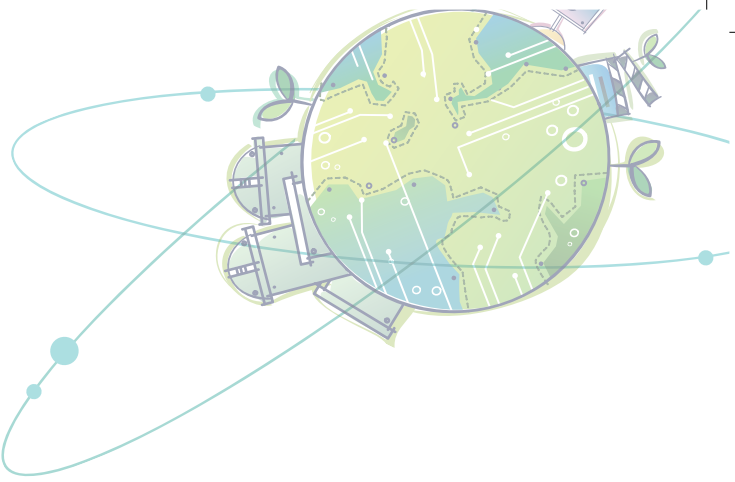
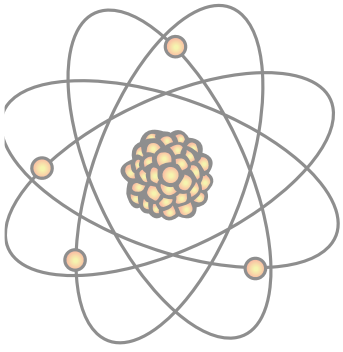
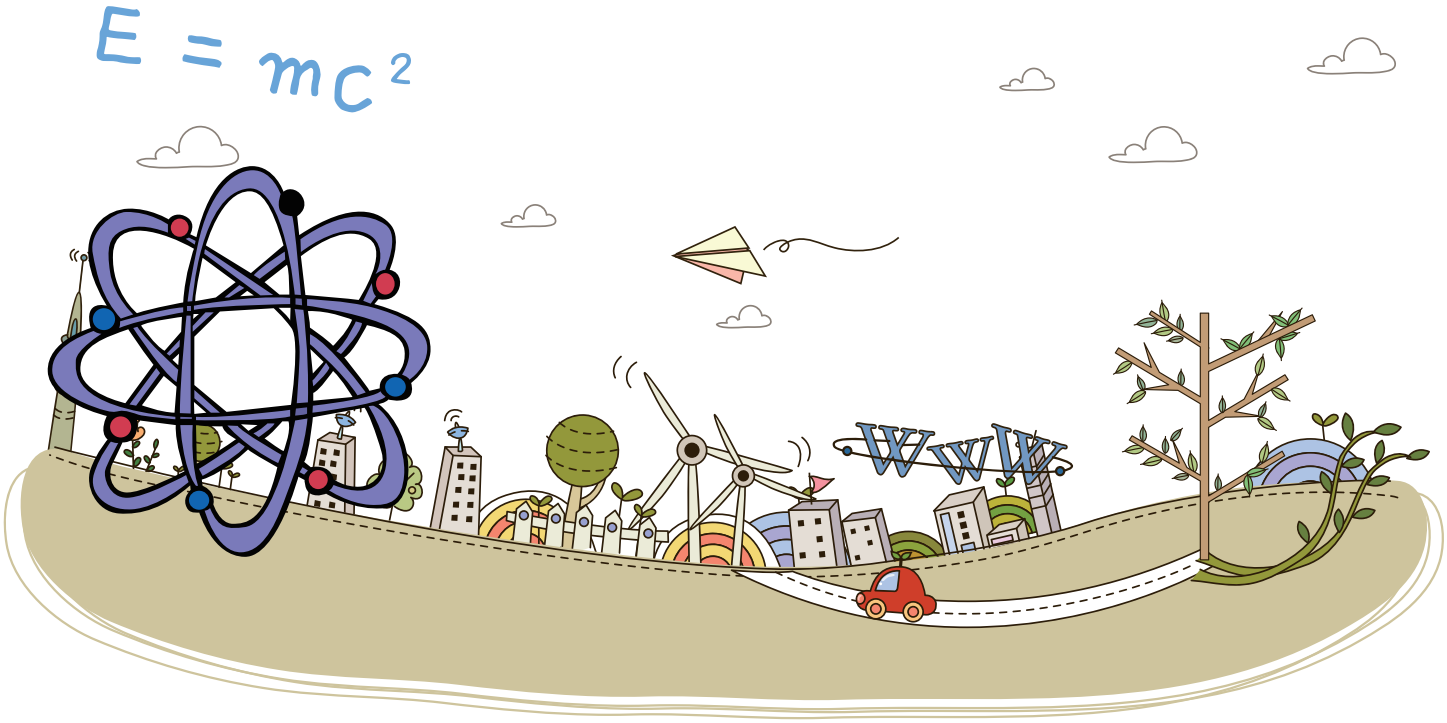
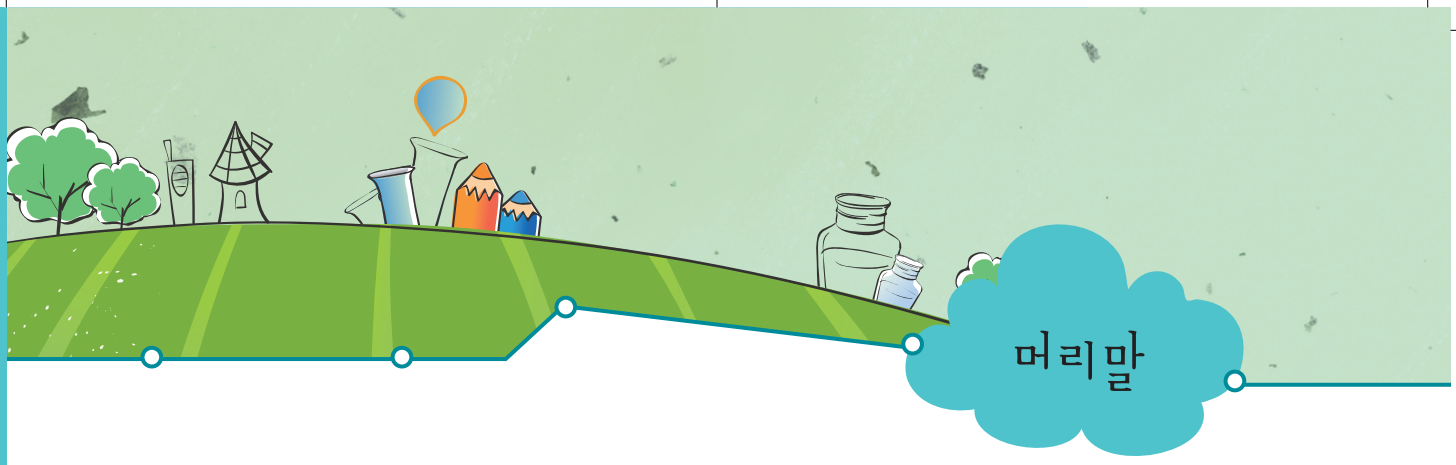




심화

물리





머리말

우리 주변의 수많은 자연 현상이 보이는 규칙성에 사람들이 눈뜨게 되면서 시작된 자연과학은 시간이 가면서 점점 더 체계적으로 깊은 이해의 틀을 제공해 왔다. 지금까지의 경험에 비추어 보면 자연은 몇 가지의 근본 법칙에 따라 행동하는 것으로 보이며, 물리학이란 이러한 자연의 궁극적인 작동 원리를 밝히고 그 성질을 이해하려는 시도라 할 수 있다. 물리학은 자연과학의 중심적인 뼈대일 뿐만 아니라 응용과학에서의 수많은 응용은 인류 문명의 중요한 한 부분이기도 하다.

따라서 과학기술 분야로 진출하게 될 과학도 누구에게나 깊은 물리학적 이해와 지식은 필수적인 부분이다. 특히 학제간 연구나 학문간 융합이 흔한 최근의 추세를 보면 기초 학문인 물리학적 이해의 깊이는 더욱 중요해 보인다. 하지만 어떻게 하면 물리학이란 거대한 봉우리의 정수를 이해할 수 있는가라는 질문에 대해서는 하나의 답이 있는 것이 아니며, 특히 이러한 물리학적 성과를 간단히 제시하는 것은 불가능해 보인다.

기존의 물리 I, 물리 II 교과서와는 다르게 기본적인 내용으로부터 출발하여 과학적인 소양과 흥미를 갖고 있는 과학고 학생들에게 효과적일 수 있다고 생각되는 고급의 내용까지 주제를 선별하여 심화물리라는 과목을 구성하게 되었다. 고급물리나 대학 물리학으로의 연계성을 고려하였으며, 이 교과서를 바탕으로 더 고급의 물리학적 탐구의 길로 나아가는데 도움이 되기를 희망한다.

아무쪼록 미래를 이끌어 갈 과학도들에게 본 교과서가 조금이라도 유익한 제시가 되기를 기대해 본다.

저자일동

이 책의 차례

Ⅰ 역학 탐구

1. 운동의 기술 ····· 8
2. 힘과 운동의 법칙 ····· 22
3. 운동량과 충돌 ····· 35
4. 중력 ····· 46
5. 일과 에너지 ····· 56
6. 진동(Oscillatory Motion) ····· 70
7. 회전(Rotational Motion) ····· 81

Ⅱ 열역학 탐구

1. 열과 열전달 ····· 96
2. 열역학 법칙 ····· 112

Ⅲ 전자기 탐구

1. 쿨롱의 법칙과 전기장 ····· 140
2. 전위와 축전기 ····· 151
3. 전류와 직류회로 ····· 164
4. 자기장과 로렌츠 힘 ····· 177
5. 전자기 유도와 자성체 ····· 188
6. 교류회로와 전자기파 ····· 205

Ⅳ 파동과 빛 탐구

1. 진동과 파동 ····· 224
2. 정상파 ····· 237
3. 기하 광학 ····· 248
4. 간섭 ····· 268
5. 회절 ····· 288
6. 편광 ····· 303

Ⅴ 현대 물리 탐구

1. 전기 방전관과 전자 및 X선의 발견 ····· 320
2. 물질과 파동의 이중성 ····· 333
3. 원자의 구조 ····· 348
4. 핵 물리 ····· 375
5. 기본 입자 ····· 391
6. 현대 물리학의 검출기들 ····· 408

부록

1. 물리학사 연표 ····· 426
2. SI단위의 정의 ····· 431
3. 접두사 ····· 432
4. 그리스 문자 ····· 432
5. 중요 물리 상수 ····· 433
6. 연습 문제 풀이 ····· 434
7. 참고문헌 ····· 465
8. 찾아보기 ····· 468

I

역학 탐구

- 1. 운동의 기술
- 2. 힘과 운동의 법칙
- 3. 운동량과 충돌
- 4. 중력
- 5. 일과 에너지
- 6. 진동(Oscillatory Motion)
- 7. 회전(Rotational Motion)

생 | 각 | 열 | 기

물체의 운동을 이해하고자 하는 것은 물리학에서 가장 기본적인 일이다. 물체의 운동을 어떻게 설명할 것인가 하는 문제는 아리스토텔레스로부터 갈릴레오 시대까지의 과학 발전의 핵심이었다고 할 수 있다. 그 이후 뉴턴에 의해 힘의 개념과 세 가지 뉴턴 운동 법칙을 통해 물체가 왜 그렇게 운동하는 지를 설명할 수 있는 이론 체계가 확립되었다.

이 단원에서는 먼저 물체의 운동을 어떻게 기술할 수 있는 지를 알아보고 뉴턴의 운동법칙과, 관련되는 힘과 에너지에 관한 내용들에 대해 공부해 보자. 또한 이러한 내용들을 바탕으로 병진 운동 뿐만 아니라 그네 타기, 시계추의 운동, 피겨 스케이팅, 및 회전 목마 등 주변에서 흔히 볼 수 있으며, 원자와 분자와 같은 미시적인 세계에서도 중요한 운동 형태인 진동과 회전 운동에 대해 살펴보자.

1 운동의 기술

버스가 일정한 속도로 달릴 때도 있지만 모든 구간에서 일정한 속도를 유지할 수는 없다. 정류장에 도착할 때와 다음 정류장으로 출발할 때는 속도가 변하기 마련이다.

예를 들어, 신호등 앞에 정지해 있던 자동차가 신호등에 초록색 불이 켜지면 출발하여 속도가 빨라지고, 빨간색 신호등 앞에서 브레이크를 밟으면 달리던 자동차의 속도가 감소하여 정지한다. 이와 같이 속도가 변하는 운동을 어떻게 기술할 수 있을까?

1. 가속도

생각해 보기

오토바이가 커브길을 도는 경우의 속도 변화는 어느 방향인가? 또 이 오토바이에는 어떤 힘이 작용하고 있으며 그 방향은 어느 쪽인가?

1) 가속도

물체의 순간 속도가 시간에 따라 변할 때 그 물체는 가속된다고 한다. 어떤 특정 시간간격 $\Delta t = t_2 - t_1$에 대한 평균가속도는 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$로 정의한다. 여기서 $\Delta v = v_2 - v_1$은 시간간격 Δt에 대한 순간속도의 변화량이다. 즉,

$$a_{\text{평균}} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad \text{(I. 1–1)}$$

이다. 가속도의 단위는 $\mathrm{m/s^2}$이다. 순간 가속도는 Δt가 0에 근접할 때의 비 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$의 극한값이다. 시간 변화에 따른 속도를 그래프로 그리면 시간 t에서의 순간 가속도는 그 시각에서의 곡선에 대한 접선의 기울기로 정의된다.

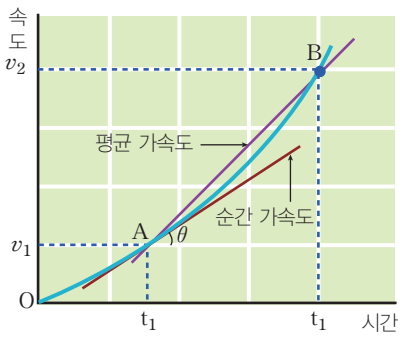
즉,

$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad \text{(I. 1-2)}$$

이다. 그러므로 가속도는 시간에 대한 속도의 도함수이다. 이 도함수에 대한 미분적분학 기호는 $\frac{dv}{dt}$이다. 속도가 시간 t에 대한 위치 x의 도함수이므로, 이 가속도는 t에 대한 x의 2차 도함수이며 통상 $\frac{d^2x}{dt^2}$로 쓰여진다. 이 표기는 가속도를 $\frac{dv}{dt}$로 쓰고 v 대신 $\frac{dx}{dt}$로 쓰면 이해할 수 있다. 즉,

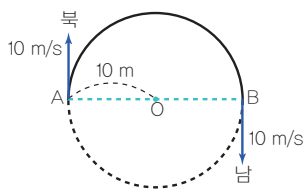
$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\right) = \frac{d^2x}{dt_2} \qquad \text{(I. 1-3)}$$

이다. 속도가 일정하면 모든 시간간격에 대해 $\Delta v = 0$이므로 가속도는 0이다. 이 경우 t에 따른 x곡선의 기울기는 변화하지 않는다. 이상을 속도-시간 그래프로 나타내면 [그림 I-1]과 같이 된다.



[그림 I-1] 평균 가속도와 순간 가속도

예제 그림과 같이 반지름이 10 m인 원형 도로를 달리는 사람이 A점을 10 m/s의 속력으로 지난 다음, 20초 후에 B점을 10 m/s의 속력으로 통과하였다. 20초 동안 이 사람의 평균 가속도는 몇 m/s^{2}인가?



풀이 남쪽 방향으로 속도를 (+)로 하면 평균 가속도는 $\frac{10-(-10)}{20} = 1\ \text{m/s}^2$ 이다.

2) 등가속도 운동

일정한 가속도를 갖는 물체의 운동은 우리 주변에 흔히 있는 운동이다. 예를 들어 지구표면 가까이에서 떨어지는 모든 물체는 공기저항이 무시되고 중력 이외의 다른 힘의 작용이 없다면 일정한 중력 가속도로 수직으로 떨어진다.

등가속도는 t에 대한 v의 기울기가 일정, 즉 속도가 시간에 비례하여 변

한다는 것을 의미한다. 시각 $t = 0$에서 속도를 $\boldsymbol{v}_0$라고 하면 나중 시각 t에서의 속도 v는

$$v = v_0 + at \qquad \text{(I. 1–4)}$$

로 주어진다. 물체가 시간 $t = 0$일 때 위치 x_0에서 출발하고 시각 t에서의 그 입자의 위치를 x라 하면, 변위 $\Delta x = x - x_0$는

$$\Delta x = v_{\text{평균}}\, t$$

로 주어진다. 가속도가 일정하면 속도는 시간에 비례하고 평균 속도는 [그림 I–1]처럼 처음 속도와 나중 속도의 평균값이다. 초기 속도가 v_0이고 나중 속도가 v이면 평균 속도는 $\frac{1}{2}(v_0 + v)$이다. 즉,

$$v_{\text{평균}} = (v_0 + v) \qquad \text{(I. 1–5)}$$

이다. 따라서 변위는

$$\Delta x = v_{\text{평균}}\, t = \frac{1}{2}(v_0 + v)t \qquad \text{(I. 1–6)}$$

이다. 식 (I. 1–4)에 v 대신 $v = v_0 + at$를 대입하여 v를 소거할 수 있다. 즉,

$$\Delta x = \frac{1}{2}(v_0 + v)t = \frac{1}{2}(v_0 + v_0 + at)t = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \qquad \text{(I. 1–7)}$$

이다. 따라서 위치 함수는

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \qquad \text{(I. 1–8)}$$

이 된다. 식 (I. 1–4)와 식 (I. 1–7)로부터 t를 소거하면 변위 Δx, 가속도 a, 그리고 처음과 나중 속도들 사이의 관계식을 얻을 수 있다. 식 (I. 1–4)에서 t에 관하여 정리하면 $t = \frac{v - v_0}{a}$가 된다. 이것을 식 (I. 1–7)에 대입하면

$$\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 = v_0\left(\frac{v - v_0}{a}\right) + \frac{1}{2}a\left(\frac{v - v_0}{a}\right)^2 \qquad \text{(I. 1–9)}$$

을 얻을 수 있다. 양변에 a를 곱하고 각 항을 전개하면

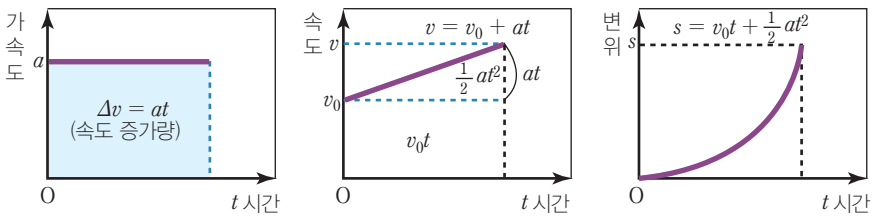
$$a\Delta x = v_0 v - v_0^2 + \frac{1}{2}v^2 - v_0 v + \frac{1}{2}v_0^2 = \frac{1}{2}v^2 - \frac{1}{2}v_0^2 \qquad \text{(I. 1–10)}$$

또는

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \qquad \text{(I. 1-11)}$$

이 된다.

이상의 등가속도 운동에 대해서 시간에 따른 가속도, 속도, 변위의 관계를 그래프로 나타내면 [그림 I-2]와 같이 된다.



[그림 I-2] **등가속도 직선 운동의 그래프**

예제 등가속도 직선 운동을 하는 물체의 운동을 매초 20타점 씩 찍는 기록 타이머를 사용하여 종이 테이프에 기록하였다. 종이 테이프에 찍힌 타점 사이의 간격이 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm, …의 순서로 증가하였다.

1. 물체의 가속도는 몇 m/s^2인가?
2. 최초의 타점이 찍히는 순간 물체의 속력은 몇 m/s인가?

풀이 1. $a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t} = \dfrac{\Delta x}{\Delta t^2} = \dfrac{0.02}{(\frac{1}{20})^2} = 8(m/s^2)$

2. $\Delta x = v_0 t + \dfrac{1}{2}at^2$에서 $0.04 = v_0 \times \dfrac{1}{20} + \dfrac{1}{2} \times 8 \times (\dfrac{1}{20})^2$이고,

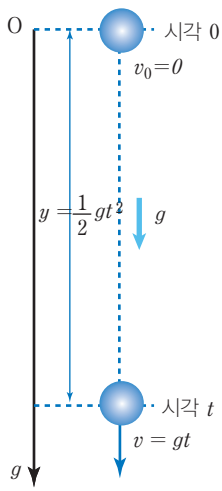
따라서 $v_0 = 0.6(m/s)$이다.

2. 중력장 내의 운동

1) 자유 낙하 운동

물체를 공중에 가만히 놓으면 중력을 받아서 연직 아래로 떨어진다. 공기의 저항이 무시될 경우에는 중력만이 물체에 작용한다. 이런 정지 상태에서의 낙하 운동을 **자유 낙하 운동**이라고 한다.

자유 낙하 운동은 속도가 처음 정지 상태에서 아랫방향으로 매초 9.8 m/s씩 점점 빨라지는 등가속도 직선 운동이다.



[그림 I-3] **자유 낙하 운동**

[그림 I-3]과 같이 출발점을 좌표의 원점 O로 하고 연직 아래쪽을 낙하 거리 또는 낙하 위치를 나타내는 y축의 양(+)의 방향으로 잡으면, 등가속도 직선 운동의 관계식으로부터 출발 후 시각 t에서의 속도 v와 위치 y사이의 관계식

$$v = gt \qquad \text{(I. 1-12)}$$

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \qquad \text{(I. 1-13)}$$

$$2gy = v^2 \qquad \text{(I. 1-14)}$$

을 얻는다.

예제 지상 19.6 m 높이에서 물체를 가만히 놓았다. 지면에 도달하는 데 걸리는 시간과 지면 도달 속도는 얼마인가? (단, 공기 저항은 무시하며 중력 가속도는 9.8 m/s^{2}이다.)

풀이 자유 낙하 운동에서 낙하 거리 $y = \frac{1}{2}gt^2$이므로,

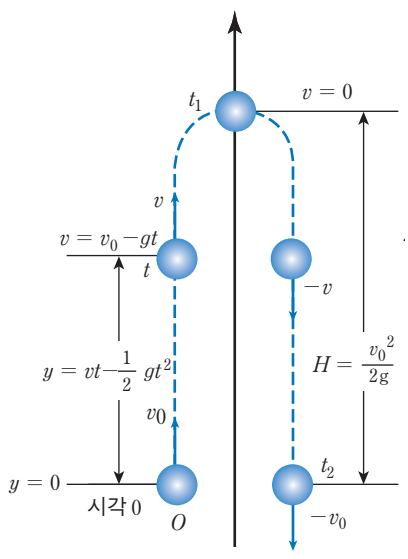
$19.6 = \frac{1}{2} \times 9.8t^2$, $\therefore t = 2(\text{s})$

$v = gt$ 이므로, $v = 9.8 \times 2 = 19.6(\text{m/s})$

2) 연직 위로 던진 물체의 운동

물체를 똑바로 위로 던져 올리면 위로 올라가고 있는 동안에도 연직 아래로 향하는 중력 때문에 속도는 매초 9.8 m/s씩 느려져 마침내 0이 되고, 그 순간부터 물체는 아래로 자유 낙하 운동을 시작하여 물체의 속도는 아래로 매초 9.8 m/s씩 빨라진다. 이 때 속도가 0이 되는 순간의 위치가 이 운동의 최고점이다.

[그림 I-4]와 같이 출발점을 좌표의 원점 O로 하고, 연직 위쪽을 y축의 양(+)의 방향으로 정하면, 이 운동은 가속도가 $-g$인 등가속도 직선 운동이다. 등가속도 직선 운동의 관계식으로부터 출발 후 시각 t에서의



[그림 I-4] 연직 위로 던진 물체의 운동

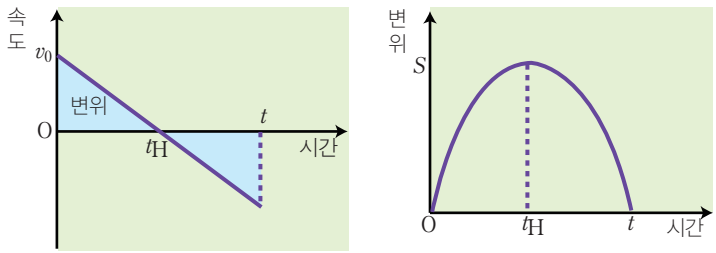
속도 v와 변위 y 사이의 관계식

$$v = v_0 - gt \qquad \text{(I. 1–12)}$$

$$y = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \qquad \text{(I. 1–13)}$$

$$-2gy = v^2 - v_0^2 \qquad \text{(I. 1–14)}$$

을 얻는다. 이것을 그래프로 나타내면 [그림 I–5]와 같다.



(가) (나)

[그림 I–5] **연직 위로 던진 물체의 운동 그래프**

이 경우 속도–시간 그래프는 그림 (가)와 같이 직선이며 이 직선과 시간축 사이의 넓이는 출발점으로부터의 변위를 나타낸다. 시간 t_H는 속도가 0인 최고점 도달 시간이므로 시간축의 위쪽에 있는 삼각형의 넓이는 물체가 위로 최고점까지 올라간 높이이고, 아래쪽에 있는 삼각형의 넓이는 최고점에서 아래로 내려온 거리이다.

물체가 최고점에 이르는 시간 t_H는 최고점에서 속도가 0이므로 식(I. 1–12)로부터

$$t_H = \frac{v_0}{g} \qquad \text{(I. 1–15)}$$

임을 알 수 있다. 또 최고점까지의 높이 H는 t_H를 식 (I. 1–13)에 대입하여 구하면

$$H = \frac{v_0^2}{2g} \qquad \text{(I. 1–16)}$$

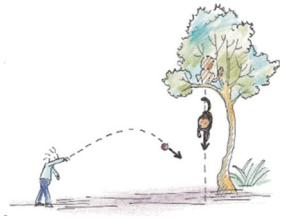
으로 주어진다.

예제 어떤 물체를 연직 위로 던져 올렸더니 2초 후에 최고점에 도달하였다. 올라간 높이는 몇 m인가 (단, 공기 저항은 무시하며 중력 가속도는 9.8 m/s^{2}이다.)

풀이 $v = v_0 - gt$이므로 $0 = v_0 - 9.8 \times 2$, $\therefore v_0 = 19.6(\text{m/s})$

$$h = vt = \left(\frac{19.6 + 0}{2}\right) \times 2 = 19.6(\text{m})$$

3) 포물선 운동



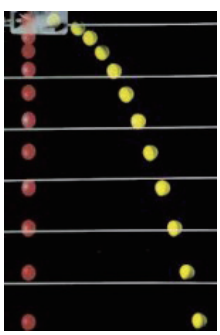
생각해 보기

그림은 나뭇가지에 매달려 있는 원숭이를 향하여 공을 던지는 순간 원숭이가 나뭇가지에서 떨어지는 모습을 그린 것이다. 공이 원숭이에게 명중될까?

(1) 수평 방향으로 던진 물체의 운동

바닷가 절벽 위에서 어른과 어린이가 힘껏 수평 방향으로 돌을 던졌다. 누가 던진 돌이 먼저 물에 떨어질지 알아보자.

실험 수평으로 던진 공의 운동



그림은 자유 낙하시킨 공과 수평으로 던진 공의 운동을 나타내는 다중 섬광 사진이다. 이 사진을 분석하여 수평으로 던진 물체의 운동이 어떠한지 알아보자. (섬광 사진의 주기는 Δt이다.)

과정

1. 다중 섬광 사진에 수평 방향의 기준선과 연직 방향의 기준선을 긋는다.
2. 각 기준선에 맞춰 투명한 모눈종이를 다중 섬광 사진 위에 겹친다.
3. 모눈종이의 눈금을 이용하여 수평 방향의 위치를 측정하여 다음 표를 완성해 보자.

시각(s)	0	Δt	$2\Delta t$	$3\Delta t$	$4\Delta t$	$5\Delta t$	$6\Delta t$	$7\Delta t$	$8\Delta t$
위치(cm)									
구간 거리(cm)									
구간 거리 차(cm)									

4. 수평으로 던진 공의 위치와 자유 낙하하는 공의 위치를 비교해 보자.

정리

1. 수평 방향의 운동은 어떤 운동인가?

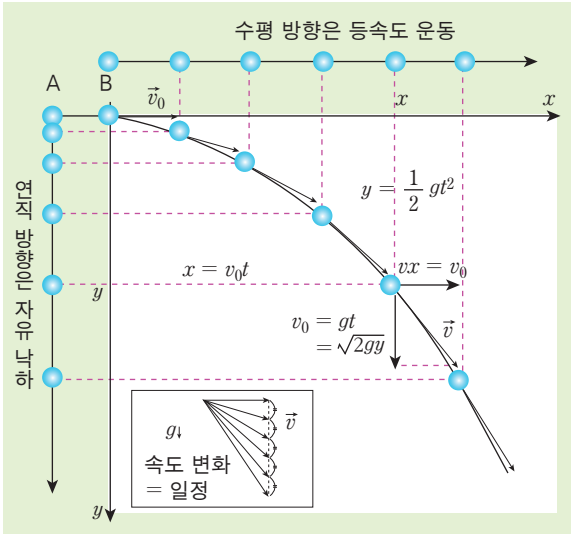
2. 연직 방향의 운동은 어떤 운동인가?

[그림 I-6]은 공 A를 자유 낙하 시킴과 동시에 다른 공 B를 수평 방향으로 던졌을 때 일정한 시간마다 두 공의 위치를 나타낸 것이다.

수평으로 던진 공 B의 위치를 보면 수평 방향에 대해서는 똑같은 간격으로 위치해 있는 사실로부터 등속 직선 운동임을 알 수 있다. 연직 방향에 대해서는 자유 낙하하는 공 A와 같은 높이에 있는 사실로부터 자유 낙하 운동인 등가속도 직선 운동을 한다는 사실을 알 수 있다.

출발 시각을 $t = 0$, 출발점을 좌표의 원점($x = 0$, $y = 0$)으로 하고, 수평 방향을 x축, 연직 아래쪽을 y축으로 각각 택하면 중력 가속도 g는 y축 방향이고, 처음 속도 v_0는 x축 방향이다.

한편, 공기의 저항을 무시할 수 있어서, 공이 받는 힘이 중력뿐이라면 수평 방향의 운동은 속도 v_0의 등속 직선 운동이고, 연직 방향은 가속도 g의 자유 낙하 운동이다.



[그림 I-6] **수평 방향으로 던진 물체의 운동**

공 A의 처음 속도 $\vec{v}_0$의 x, y성분을 각각 v_{0x}, v_{0y}라 하면

$$v_{0x} = v_0,\ v_{0y} = 0$$

이고, 시각 t에서 공의 위치 점 P(x, y)에서 속도 $\vec{v}$의 성분을 v_x, v_y변위 $\vec{r}$의 성분을 x, y라 하면 수평 방향의 운동은 등속 직선 운동으로

$$\text{가속도 } a_x = 0$$
$$\text{속 \quad 도 } v_x = v_0$$
$$\text{변 \quad 위 } x = v_0 t$$

이고, 연직 방향의 운동은 등가속도 직선 운동(자유 낙하 운동)

$$\text{가속도 } a_y = g$$
$$\text{속 \quad 도 } v_y = gt$$
$$\text{변 \quad 위 } y = \frac{1}{2}gt^2$$

이다.

점 P(x, y)에서 속도 $\vec{v}$의 크기는 속도의 x성분과 y성분을 합성한 크기로 주어지므로

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$$

이 되며, 그 방향은 궤도의 접선 방향으로 연직선과 이루는 각 θ의 크기는

$$\tan\theta = \frac{v_x}{v_y} = \frac{v_0}{gt}$$

로부터 구할 수 있다.

예제 높이 H인 건물 옥상에서 수평 방향으로 10 m/s의 속도로 물체를 던졌더니 수평 거리 20 m인 지점에 떨어졌다. 물체가 지면에 도달하기까지의 시간과 이 건물의 높이는 각각 얼마인가?(단, 공기 저항은 무시하고 중력 가속도는 9.8 m/s^{2}이다.)

풀이 수평 방향은 등속 직선 운동을 하므로 물체가 날아간 시간, 곧 지면에 도달하는데 걸린 시간을 t라 하면 $x = v_0 t$에 의해

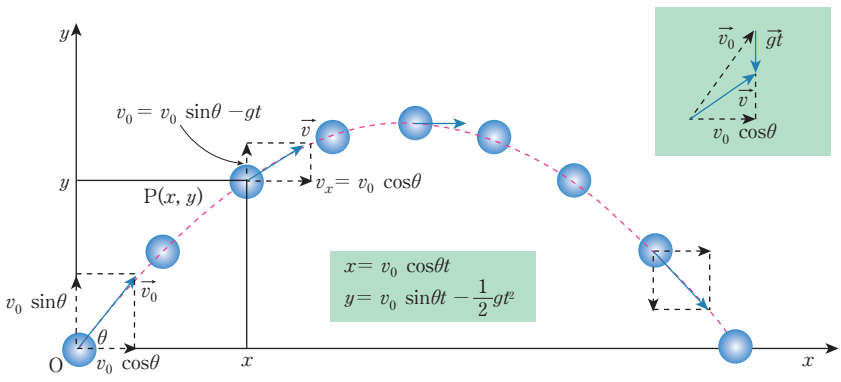
$20 = 10 \times t$, $t = 2(\text{s})$

$y = \frac{1}{2}gt^2$에 의해 $H = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times 22 = 19.6(\text{m})$

(2) 비스듬히 위로 던진 물체의 운동

수평 방향에 대하여 각 θ의 방향으로 비스듬히 위로 던져 올린 공의 운동을 생각해 보자. 이 경우는 처음 속도 $\vec{v_0}$가 수평 성분 외에 연직 성분도 있다는 것이 수평 방향으로 던진 경우와 다른 점이다. 이와 같은 물체의 운동은 연직 방향과 수평 방향으로 분해해서 생각하는 것이 편리하다. 연직 방향에 대해서는 똑바로 위로 던져 올린 공의 운동과 같은 등가속도 직선 운동이고, 수평 방향에 대해서는 등속 직선 운동이므로 이 두 운동을 합성하여 물체의 운동을 기술할 수 있다.

[그림 I-7]과 같이 출발점을 좌표의 원점으로 하고, 수평 방향을 x축, 연직 위쪽을 y축으로 정하면 중력 가속도 $\vec{g}$는 y축의 음(−)의 방향이고, 처음 속도 $\vec{v_0}$는 x, y성분으로 분해해서 생각할 수 있다.



[그림 I-7] **비스듬히 위로 던진 물체의 운동**

수평 방향 및 연직 방향의 가속도 및 처음 속도는 각각 다음과 같다.

$$a_x = 0,\ a_y = -g$$

$$v_{0x} = v_0 \cos\theta,\ v_{0y} = v_0 \sin\theta$$

출발 시각을 $t = 0$이라 하고, 임의의 시각 t에서 공의 위치를 점 P(x, y)라 할 때 점 P에서의 속도 성분을 v_x, v_y, 변위 성분을 x, y라 하면 수평 방향은 등속 직선 운동이므로

$$a_x = 0$$

$$v_x = v_{0x} = v_0 \cos\theta$$

$$x = v_{0x}t = (v_0 \cos\theta)t \qquad \text{(I. 1-17)}$$

연직 방향은 등가속도 직선 운동이므로

$$a_y = -g \qquad \text{(I. 1–18)}$$

$$v_y = v_{0y} - gt = (v_0 \sin\theta) - gt \qquad \text{(I. 1–19)}$$

$$y = v_{0y}\, t - \frac{1}{2} g t^2 = (v_0 \sin\theta) t - \frac{1}{2} g t^2 \qquad \text{(I. 1–20)}$$

이다.

또, 최고점에서는 $v_y = 0$이므로 물체가 최고점까지 올라가는 시간 t_H는 식 (I. 1–19)에서

$$t_H = \frac{v_0 \sin\theta}{g}$$

이고, 이를 식 (I. 1–20)에 대입하면 최고점 높이 H는 다음과 같다.

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2\theta}{2g}$$

❖ $\sin(\alpha + \beta) = \sin\alpha \cos\beta + \cos\alpha \sin\beta$
$\sin 2\alpha = 2 \sin\alpha \cos\alpha$

물체가 지면에 도달하기까지의 시간 t_R는 $y = 0$을 식 (I. 1–20)에 대입하면

$$t_R = \frac{2v_0 \sin\theta}{g}$$

이고, 이를 식 (I. 1–17)에 대입하면 수평 도달 거리 R은

$$R = v_0 \cos\theta \ \frac{2v_0 \sin\theta}{g} = \frac{v_0^2 \sin^2\theta}{2g}$$

가 된다. 따라서 처음 속도의 방향이 수평면에 대해서 45° 일 때 수평 도달 거리 R이 최대가 됨을 알 수 있다.

연 습 문 제

1. 길이 100 m인 열차가 등속도 운동을 하다가 철교를 등가속도 운동으로 통과하였다. 열차의 맨 앞이 20 m/s의 속력으로 철교를 건너기 시작하여 20초 후에 열차의 뒤 끝이 30 m/s의 속력으로 철교의 마지막 끝을 통과하였다면 철교의 길이는 얼마인가?

2. 자동차 A가 자동차 B의 뒤쪽에서 100 m의 거리를 일정하게 유지하면서 72 km/h의 속력으로 달리다가 A가 B를 추월하기 위해 등가속도 운동을 하였다. A가 B를 추월하는 순간 A의 속력은 108 km/h이었다.

1) A가 B를 추월할 때까지 등가속도 운동을 한 시간은 얼마인가?

2) A가 B를 추월할 때까지 등가속도 운동을 한 거리는 얼마인가?

연 습 문 제

3. 연직 위로 던져 올린 공이 한 점 P를 2초만에 올라가면서 통과하고 3초만에 내려오면서 통과하였다.(단, 공기의 저항은 무시하고 중력 가속도는 10 m/s^2이다.)

1) 이 공의 초속도는 얼마인가?

2) 공을 던진 위치에서 점 P까지의 높이는 얼마인가?

3) 점 P를 통과할 때 공의 속력은 얼마인가?

4) 점 P에서 최고점까지의 높이는 얼마인가?

4. 지면으로부터 높이 h인 곳에서 공 A를 가만히 놓아 떨어뜨리고 동시에 바닥에서는 공 B를 연직 위로 던져 올렸더니 두 공이 높이 h인 곳에서 서로 스치듯이 지나갔다. (단, 중력 가속도는 g이다.)

1) 공 B의 초속도는 얼마인가?

2) 두 공이 만나는 순간 공 B의 속력은 얼마인가?

5. 수평면과 30°의 각으로 비스듬히 올라가는 비행기가 720 km/h의 등속도로 비행하던 도중에 떨어뜨린 폭탄이 24초 만에 지면에 도달하였다.(단, 공기의 저항은 무시하고, 중력 가속도는 10 m/s^2이다.)

1) 24초 동안 폭탄이 수평 방향으로 운동한 거리는 몇 m인가?

2) 폭탄을 떨어뜨린 순간 지면으로부터 비행기의 고도는 몇 m인가?

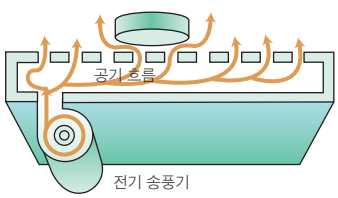
2 힘과 운동의 법칙

작은 예인선이 큰 화물선에 힘을 작용하여 이동시키고 있다. 어떻게 매우 작은 배가 큰 화물선을 움직일 수 있을까?(Steve Raymer/CORBIS) 정지한 물체에 힘이 작용하지 않으면 계속 정지해 있고 힘을 작용하면 속력이 빨라진다. 또한 스케이트를 신고 벽을 밀면 내 몸이 밀려나는 것처럼 힘을 서로 주고 받는다. 물체에 작용하는 힘과 물체의 운동 사이의 관계와 서로 주고 받는 힘에 대하여 알아보기로 하자.

1. 관성의 법칙

뉴턴의 제1법칙은 물체에 외부에서 힘(외력)이 작용하지 않는다면 정지해 있거나 일정한 속도로 운동을 하고 있는 물체는 계속해서 정지한 상태로 남아 있거나 또는 일정한 속도를 가지고 계속하여 운동을 한다는 것을 의미한다. 이러한 경향은 물체가 갖는 관성에 의하여 기술되어 질 수가 있다.

[그림 I-8]과 같이 수평으로 놓인 평평한 판의 중간에 구멍이 있고, 그 구멍으로부터 공기가 나와 그 위의 원판을 자유롭게 움직이게 할 수 있는 실험 장치가 있다고 하자. 원판을 처음 상태로 두면 처음 위치에 있을 것이다. 이 실험 장치를 부드럽게 연결된 철로 위를 일정한 속력으로 움직이는 열차에 싣고 같은 실험을 하더라도 원판은 처음 위치에 있을 것이다. 그러나 열차가 가속하기 시작하면, 마치 버스를 가속시킬 때 승객이 뒤로 밀려 나듯이 원판은 판 위에서 뒤로 움직이기 시작할 것이다.



[그림 I-8] 에어 트랙

뉴턴의 운동 제1법칙이 성립하는 기준계를 소위 관성기준계라고 한다. 관성기준계에 대해 상대적으로 일정한 속도로 움직이는 임의의 기준계는

그 자체가 관성기준계이다. 지표면에 고정된 기준계는 엄밀한 의미에서는 관성기준계가 아니다. 왜냐하면 지구의 회전으로 인하여 지표면에 작은 가속도가 있고 또 지구의 태양 주위로의 공전으로 인하여 작은 구심 가속도가 있기 때문이다. 그러나 이들 가속도는 0.01 m/s^2보다 작기 때문에 관성기준계라고 할 수 있다. 따라서 지표면에 고정된 기준계는 관성기준계가 된다.

2. 힘, 질량 및 운동 제2법칙

운동 제1법칙 그리고 제2법칙은 힘의 정의로 생각할 수 있다. 힘은 물체의 속도를 변화시키는 즉 물체를 가속시키는 효과이다. 힘의 방향은 그 힘이 물체에 작용하는 유일한 힘이라면 그것을 야기시키는 가속도의 방향과 같다. 힘의 크기는 물체의 질량과 가해준 힘에 의하여 생긴 가속도와의 곱이다. 실험적으로 둘 또는 그 이상의 힘이 똑같은 물체에 작용할 때 물체의 가속도는 마치 각 힘의 벡터 합과 같은 크기를 갖는 하나의 힘이 물체에 작용한 것과 똑같다. 즉 힘들은 벡터로 연결된다.

질량은 가속에 대한 저항으로 측정되는 물체의 고유한 양이다. 임의의 두 질량의 비는 다음과 같이 정의된다. 만약 힘 F가 질량 m_1인 물체에 작용하여 가속도 a_1을 만든다면

$$F = m_1 a_1$$

이다. 만약 똑같은 힘이 질량 m_2인 물체에 작용하여 가속도 a_2를 만든다면

$$F = m_2 a_2$$

이다. 이들 방정식을 연립하면

$$F = m_1 a_1 = m_2 a_2$$

또는

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2}$$

이다. 따라서 주어진 두 물체의 질량비는 같은 힘을 각 물체에 작용시켜 그들의 가속도를 비교함으로써 알 수 있다. 예를 들어 한 물체가 우리가

일상적으로 사용하는 말에 따라 다른 것보다 질량이 더 나간다. 주어진 힘은 보다 질량이 많이 나가는 물체에는 보다 작은 가속도를 생기게 하는 것을 발견할 것이다. 실험적으로 두 물체에 작용하는 똑같은 힘에 의해 생긴 가속도의 비 $\frac{a_1}{a_2}$이 힘의 방향에 무관하다는 것을 알 수 있다. 그것은 또한 사용된 힘의 종류에는 무관하다. 즉 힘이 스프링에 의한 것이건 중력, 전기, 자기적인 인력 또는 척력인지는 중요하지 않다. 또 질량 m_2가 질량 m_1의 두 배이고 질량 m_3가 질량 m_1의 네 배일 때, m_3와 m_2를 직접 비교하면 질량 m_3는 질량 m_2의 두 배가 되는 것을 알 수 있다. 그러므로 질량의 척도는 어떤 물체를 표준물체로 택하고 그 질량을 1단위의 질량으로 정한다. 국제적인 표준물체는 프랑스에 있는 백금합금의 원통이다. 표준물체의 질량은 질량의 SI단위로 1 kg이다. 이 표준물체를 사용하여 직접 비교함으로써 제2의 표준물체를 정할 수 있으며 다른 물체의 질량은 한 힘을 그 물체와 제2의 표준물체 중의 하나에 주어 생기는 가속도를 비교함으로써 알 수 있다. 물체의 질량은 물체의 위치에 의존하지 않는 고유한 성질이다. 즉 물체의 질량은 물체가 지구에 있건 달 위에 있건 또는 우주공간에 있건 항상 똑같다.

표준물체에 1 m/s^{2}의 가속도를 만드는데 필요한 힘은 1N으로 정의된다. 마찬가지로 표준물체에 2 m/s^{2}의 가속도를 만드는데 필요한 힘은 2N으로 정의된다. 힘과 질량의 개념을 정의함으로써 뉴턴의 운동 제2법칙인 다음의 식이 정의에서 직접 나오게 된다는 것에 유의하라.

$$F_{\text{net}} = ma$$

운동 제2법칙은 힘, 질량과 같은 역학적인 양과 가속도, 속도, 변위와 같은 운동학적인 양들을 연결시켜 준다. 비교적 간단한 몇 개의 힘을 법칙들을 사용하여 광범위한 여러 가지 물리적 현상들을 기술할 수 있기 때문에 이 정의들은 매우 중요하다.

❖ **알짜힘**

한 물체에 여러 힘이 동시에 작용할 때 이 힘들이 합쳐진 하나의 힘을 합력, 또는 알짜힘이라고 한다. 운동의 제2법칙에서 F는 그 물체에 작용하는 알짜힘을 의미한다.

예제 힘 F로 질량 m_1인 물체 A를 밀었더니 A의 가속도가 a_1이 되었고, 질량 m_2인 물체 B를 밀었더니 B의 가속도가 a_2로 되었다. 두 물체 A, B를 묶어 힘 F로 밀었을 때, 두 물체의 가속도를 구하라.

풀이 운동 제2 법칙에서 $F = m_1 a_1 = m_2 a_2$이고, $\therefore m_1 = \frac{F}{a_1}, m_2 = \frac{F}{a_2}$

두 물체의 가속도를 a라고 하면

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2} = \frac{F}{\frac{F}{a_1} + \frac{F}{a_2}} = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2}$$

이다.

3. 중력에 의한 힘 : 무게

일상생활의 경험 속에서 가장 흔한 힘은 한 물체에 대한 지구의 인력이다. 이 힘을 물체의 무게라고 한다. 물체를 지구의 표면 근처에서 떨어뜨리고 공기의 저항을 무시하고 물체에 작용하는 유일한 힘이 중력에 의한 힘이라면, 그 물체는 9.81 m/s^{2}의 가속도로 지구쪽으로 가속된다. 공간의 한 점에서 이 가속도는 모든 물체에 대하여 그들의 질량에 관계없이 똑같은 값을 가진다. 우리는 이 값을 가속도 $\vec{g}$라 부른다. 운동 제2법칙으로부터 우리는 질량 m인 물체에 작용하는 중력 $\vec{F}_g$를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{F}_g = m\vec{a}$$

$\vec{a} = \vec{g}$를 사용하면,

$$\vec{F}_g = m\vec{g} \qquad \text{(I. 2-1)}$$

과 같다. $\vec{g}$는 주어진 점에서 모든 물체에 대하여 똑같으므로 우리는 물체의 무게는 질량에 비례한다고 말할 수가 있다. 식 (I. 2-1)에서 벡터 g는 지구에 의해 임의의 물체에 미치는 단위질량 당 힘이며 지구의 중력장이라 부른다. 그것은 물체에 작용하는 유일한 힘이 지구의 중력일 때 물체가 받는 자유 낙하 가속도와 같다.

여러 장소에서 g값을 측정하면 모든 장소가 같은 값을 갖지 않는다는 것을 알 수가 있다. 물체에 작용하는 지구의 인력은 위치에 따라 변한다. 특히 지표면 바로 위에서 중력은 지구의 중심으로부터 물체까지 거리의 제곱에 반비례한다. 그러므로 물체의 무게는 해수면보다 매우 높은 고도에서 약간 적게 측정된다. 중력장은 또한 지구가 완전한 구형이 아니고 극쪽에서 약간 평평하기 때문에 위도에 따라서도 약간 다르다. 그러므로 질량과 다르게 무게는 물체의 고유한 성질이 아니다. 즉 무게는 물체 그 자체의 성질이 아니다.

무게에 관한 우리의 감각은 보통 그것과 균형을 이루는 다른 힘으로부터 온다. 예를 들어 의자 위에 앉아 있을 때 우리는 우리의 몸무게와 균형을 이루어 우리가 바닥으로 떨어지는 것을 막아주는 의자에 의해 미치는 힘을 느낀다. 우리가 저울 위에 서 있을 때 우리의 발은 그 저울에 의하여 우리가 받는 힘을 느낀다. 저울은 우리의 몸무게와 균형을 이루는 힘을 읽을 수 있도록 환산되어 있다. 우리의 몸무게와 균형을 이루는 힘을 우

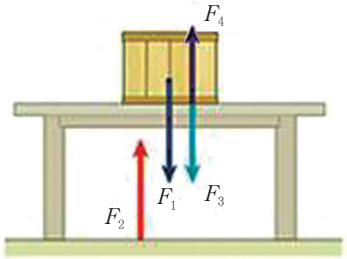
리는 겉보기 무게라고 부른다. 만약 자유 낙하와 같이 여러분의 몸무게와 균형을 이루는 힘이 없다면 여러분의 겉보기 무게는 0이 될 것이다. 무중력이라 불리는 이 상태는 궤도를 도는 위성 안의 우주비행사를 통해 경험할 수 있다.

4. 운동 제3법칙

운동 제3법칙은 상호작용의 법칙이라 할 수 있다. 이 법칙은 항상 힘이 쌍으로 나타난다는 힘의 성질을 기술한다. 힘이 물체 A에 작용하며 물체 A는 다른 물체 B에 힘을 작용해야 한다. 만약 B가 A에 힘을 작용한다면 A는 크기가 같고 방향이 반대인 힘을 B에 작용해야만 한다. 예로 지구는 포사체가 지구 쪽으로 가속되도록 중력 $\overrightarrow{F_g}$를 작용한다. 제3법칙에 따라 이번에는 포사체가 크기는 같고 방향이 반대인 힘을 지구에 작용한다. 따라서 포사체는 지구에 대하여 자기쪽으로 힘 $\overrightarrow{F_{g'}} = -\overrightarrow{F_g}$ 를 작용한다. 이것이 지구에 작용하는 유일한 힘이라면 지구는 포사체를 향하여 가속될 것이다. 지구의 질량이 매우 크기 때문에 이 힘으로 인해 지구가 받는 가속도는 무시할 수 있고 관측되지 않는다.

운동 제3법칙에 관한 논의에서 작용과 반작용이란 말이 자주 사용된다. 물체 A에 작용하는 힘을 B의 A에 대한 작용이라고 할 경우 물체 A가 다시 B에 작용하는 힘을 B에 미치는 A의 반작용이라고 한다. 이러한 두 힘 중에서 어느 힘을 작용이라고 하고 어느 힘을 반작용이라고 하는 것은 중요하지 않다. 중요한 점은 힘은 항상 작용–반작용의 쌍으로 일어나며 반작용력은 항상 작용력과 크기가 같고 방향이 반대인 점이다. 작용과 반작용의 힘은 서로 다른 물체에 작용하기 때문에 결코 서로 평형을 이룰 수 없다는 점에 유의하여라.

[그림 I–9]는 책상 위에 놓여 있는 책에 대한 작용과 반작용의 두 힘을 나타낸 것이다. 책의 아래쪽으로 작용하는 힘은 지구의 인력에 의한 무게 $\overrightarrow{F_1}$이다. 또 이와 크기가 같고 방향이 반대인 힘 $\overrightarrow{F_2} = -\overrightarrow{F_1}$을 책이 지구에 작용한다. 이것이 작용과 반작용의 힘의 쌍이다. 만약 이 힘들만 작용하고 있다면 그것이 유일하게 책에 작용하는 힘이므로 책은 아래쪽으로 가속될 것이다. 그러나 책과 닿아 있는 책상은 책에 윗방향으로 힘 $\overrightarrow{F_4}$을 작용한다. 이 힘은 책의 무게와 평형을 이룬다. 책도 역시 책상에 아래 방향으로 힘



F_1 : 지구가 물체를 잡아당기는 힘
F_2 : 물체가 지구를 잡아당기는 힘
F_3 : 물체가 책상을 누르는 힘
F_4 : 책상이 물체를 떠받치는 힘

[그림 Ⅰ-9] **작용 – 반작용**

$\overrightarrow{F_4} = -\overrightarrow{F_3}$ 을 작용한다. 힘 $\overrightarrow{F_4}$와 $\overrightarrow{F_3}$도 역시 작용–반작용의 쌍이다.

5. 마찰력과 운동

관성의 법칙에 의하면 운동하고 있는 물체에 힘이 작용하지 않으면 계속 운동을 하게 된다고 한다. 그러나 운동장에서 공을 차면 잡지 않아도 결국 정지하게 된다. 왜 그럴까?

실험 마찰력

준비물 나무 도막, 벽돌이나 추 여러 개, 도르래, 페트병, 뷰렛, 낚시줄 또는 실, 노트북(컴퓨터), Lab pro, 힘센서

과정

1. 노트북(컴퓨터)에서 Lab pro 프로그램을 실행하고 힘센서를 연결한다.
2. 그림과 같이 낚시줄과 도르래를 이용하여 나무도막과 페트병을 연결한다.

3. 힘센서와 나무 도막을 연결하고, 뷰렛을 이용하여 페트병에 물이 조금씩 흐르도록 한다.
4. 나무 도막이 움직이기 시작하여 멈출때까지 페트병에 물을 계속 흘려준다.
5. 나무 도막에 추를 1개, 2개 씩 올려놓고 앞의 과정을 반복한다.

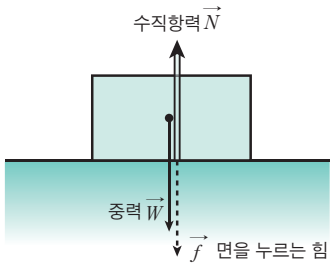
정리

1. 실험 결과로 얻어진 그래프의 형태는 어떠한가?
2. 나무 도막이 움직이지 않는 경우 마찰력의 크기는 어떻게 변하는가?
3. 나무 도막이 움직이기 시작하는 순간의 마찰력의 크기와 추의 개수는 어떤 관계인가?

두 물체 사이의 접촉면을 따라 물체에 작용하는 힘을 마찰력이라고 한다.

책을 수평으로 밀어 보면 미는 힘이 어느 정도의 크기가 되기 전에는 움직이지 않는다. 이것은 책상과 책의 접촉면을 따라 미는 힘과 크기는 같고 방향이 반대인 마찰력이 책에 작용하기 때문이다. 이와 같이 물체가 정지하고 있을 때 작용하는 마찰력을 정지 마찰력이라고 한다. 정지 마찰력은 외부에서 물체에 가해주는 힘과 크기는 같고 방향은 반대이다. 물체가 움직이기 시작하는 순간의 정지 마찰력을 최대 정지 마찰력이라고 한다.

물체가 바닥 위에 놓여 있으면 물체는 바닥을 누르게 되는데, 이 힘의 반작용으로 바닥이 물체를 바닥에 수직한 방향으로 떠받치게 된다. 이와 같이 접촉면에 수직하게 물체에 작용하는 반작용인 힘을 수직 항력이라 하며 접촉면에 작용하는 물체의 힘과 크기는 같다.



[그림 Ⅰ-10] **수직 항력**

최대 정지 마찰력 f_{max}는 수직 항력 N에 비례하며, 그 비례 상수를 정지 마찰 계수 μ_s라고 한다. 곧, 최대 정지 마찰력은

$$f_{max} = \mu_s N \qquad (\text{Ⅰ. } 2\text{-}2)$$

이고, μ_s 접촉면의 재질과 상태에 따라 결정되는 값이다.

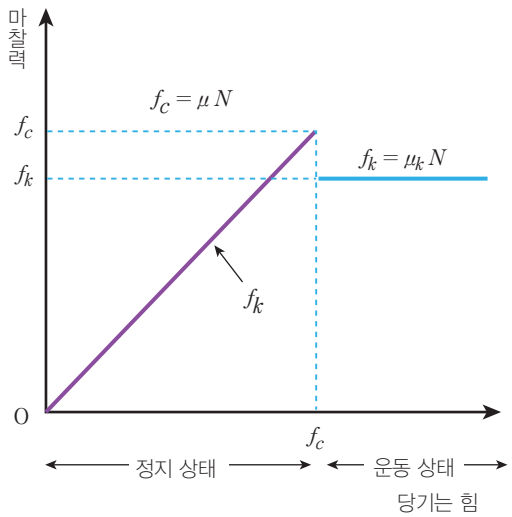
물체가 움직이는 동안 작용하는 마찰력을 운동 마찰력이라고 하고 그 크기도 수직 항력에 비례하는데, 그 비례 상수를 운동 마찰 계수라 한다. 곧, 운동 마찰 계수를 μ_k, 운동 마찰력을 f_k라 하면

$$f_k = \mu_k N \qquad \text{(I. 2-3)}$$

이다.

일반적으로 운동 마찰력의 크기는 최대 정지 마찰력보다 작고 최대 정지 마찰력과 운동 마찰력은 접촉면과 수직 항력에 따라 달라지며 접촉면의 면적과는 관계가 없다고 알려져 있다.

[그림 I-11]은 물체에 작용하는 힘과 마찰력 사이의 관계를 나타낸 것인데 정지 마찰력은 물체에 작용하는 힘과 같은 값을 가지고 운동 마찰력은 물체에 작용하는 힘과 관계없이 일정하다.



[그림 I-11] **물체에 작용하는 힘**

예제 질량이 각각 950 kg인 승용차 A, B가 수평한 직선 도로를 54 km/h의 속력으로 달리고 있다고 한다. 승용차 A에는 질량 50 kg인 운전자만 타고, 승용차 B에는 운전자를 포함하여 4명이 탔는데 4명의 전체 질량은 250 kg이다. 두 자동차가 급정거를 하여 바퀴가 회전하지 않는 상태에서 미끄러져 갔다고 한다. (단, 바퀴와 도로 사이의 마찰 계수가 같다고 한다.)

1. 두 자동차에 작용한 마찰력의 비는 얼마인가?
2. 정지할 때까지 이동한 거리의 비는 얼마인가?

풀이 1. 마찰력은 수직 항력에 비례하고 수평면에서 수직 항력은 중력과 같으므로 두 자동차 A, B의 마찰력의 비는 5 : 6이다.

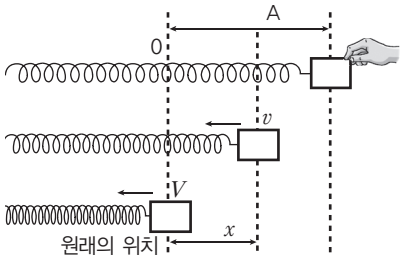
2. 가속도는 마찰 계수에만 관계되므로 이동거리는 같다. 1 : 1이다.

6. 탄성력과 운동

❖ **복원력**

물체가 평형점으로부터 멀어질 때, 평형점으로 되돌리는 힘이다.

[그림 I-12]와 같이 용수철의 한 쪽 끝에 달린 물체를 당기거나 밀었다가 가만히 놓으면 용수철이 원래의 길이(자연 길이)로 되돌아가면서 물체를 당기거나 민다. 이 현상으로부터 용수철의 길이가 변할때 접촉한 물체에 힘이 작용한다는 것을 알 수 있다. 이 힘을 탄성력이라고 한다. 탄성력은 용수철의 변형 방향과 반대 방향으로 작용하며, 그 크기는 변형된 길이에 비례한다. 그 비례 상수를 용수철 상수 또는 용수철의 힘 상수라 한다. 변형된 길이를 x라 하면 탄성력 F는

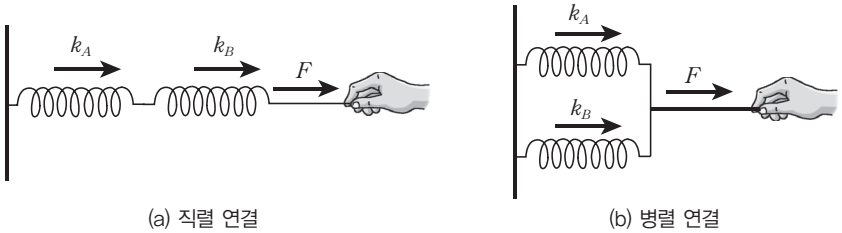


[그림 I-12] **용수철에 의한 물체의 운동**

$$F = -kx \qquad \text{(I. 2-4)}$$

이다. 이런 관계를 훅의 법칙이라고 한다. 여기서 음(−)의 부호는 늘어나거나 줄어드는 방향에 반대 방향으로 작용함을 뜻한다. 용수철 상수 k의 단위는 N/m이다.

탄성력은 용수철이 원래의 길이(자연 길이)로 되돌아가려는 방향으로 작용하므로 복원력의 일종이다. 탄성력을 받고 운동하는 물체는 용수철의 자연 길이의 위치(평형점)를 중심으로 하는 왕복 운동을 하게 된다.



(a) 직렬 연결 (b) 병렬 연결

[그림 I-13] **용수철의 연결**

여러 개의 용수철을 연결하여 사용할 때 직렬 연결과 병렬 연결법이 있다. 이때 한 용수철과 그 효과가 같을 때 합성 용수철 상수가 된다.

[그림 I-13]의 (a)와 같이 용수철 상수 k_A, k_B인 두 용수철을 직렬로 연결하고 힘 F로 잡아당길 때 각 용수철의 변형을 x_A, x_B, 합성 용수철 상수를 k라 하면, 각각의 용수철에 작용하는 힘 F는 동일하나, 전체 변형의 크

기는 각 용수철의 변형을 합한 것과 같다. 따라서,

$$x = x_A + x_B \qquad \text{(I. 2-6)}$$

이고, 식 (I. 2-4)를 이용하여 정리하면

$$\frac{F}{k} = \frac{F}{k_A} + \frac{F}{k_B} \rightarrow \frac{1}{k} = \frac{1}{k_A} + \frac{1}{k_B} \qquad \text{(I. 2-7)}$$

이 된다.

[그림 I-13]의 (b)와 같이 용수철 상수 k_A, k_B인 두 용수철을 병렬로 연결하고 힘 F로 잡아당길 때 각 용수철의 변형을 x, 탄성력을 F_A, F_B, 합성 용수철 상수를 k라 하면, 각 용수철의 변형 x는 동일하나, 전체 힘의 크기는 각 용수철의 탄성력을 합한 것과 같다. 따라서,

$$F = F_A + F_B \qquad \text{(I. 2-8)}$$

이고, 식 (I. 2-4)를 이용하여 정리하면

$$F = k_A\, x_A + k_B\, x_B \rightarrow k = k_A + k_B \qquad \text{(I. 2-9)}$$

이 된다.

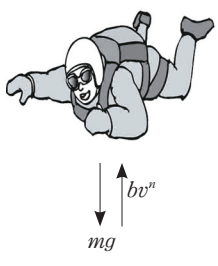
7. 저항력을 받는 물체의 운동

물체가 공기나 물과 같은 유체를 통해서 움직인다면 유체는 물체의 속력을 줄이는 경향을 갖는 저항력을 작용할 것이다. 이 저항력은 물체의 모양과 유체의 성질에 따라 다르며 유체에 대한 물체의 상대 속력에 따라서도 다르다. 마찰력과 마찬가지로 저항력도 복잡하다. 보통의 마찰과는 달리 저항력은 물체의 속력이 증가함에 따라 같이 증가한다. 작은 속력에 대해 저항력은 근사적으로 물체의 속력에 비례한다. 높은 속력에 대해서는 거의 속력의 제곱에 비례한다.

❖ **자유물체도**

물체와 거기에 작용하는 힘을 모두 표시한 그림.

[그림 I-14]와 같이 정지 상태로부터 중력을 받아 아래로 떨어지는 물체를 생각해 보자. 여기서 중력은 일정하다고 가정하고 저항력의 크기는 bv^n이며 b와 n은 상수라고 가정한다. 그런데 아래쪽으로 향하는 일정한 힘 mg와 위쪽으로 향하는 힘 bv^n을 갖는다. 만약 아래쪽을 양의



[그림 I-14] **스카이다이버의 자유 물체도**

방향으로 취하면 운동 제2법칙으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$F_{net} = mg - bv^n = ma \qquad \text{(I. 2-10)}$$

$t = 0$ 에서 물체가 떨어질 때 속력은 0이다. 따라서 지연력은 0이며 가속도는 아래로 향하며 값은 g이다. 물체의 속력이 증가함에 따라 저항력은 증가하며 가속도는 g보다 작아진다. 결국 속력은 저항력 bv^n이 중력 mg와 같아질 만큼 충분히 커지며 따라서 가속도는 0이 된다. 그러면 물체는 일정한 속력 v_f로 계속 움직이며 이때의 속력을 종단 속력이라 한다. 식 (I. 2-10)에서 가속도 a를 0으로 놓으면

$$bv_f^n = mg \qquad \text{(I. 2-11)}$$

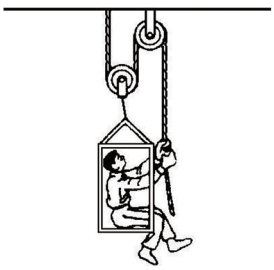
가 된다. 종단 속력에 대해서 풀면

$$v_f = \left(\frac{mg}{b}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad \text{(I. 2-12)}$$

이다. b가 클수록 종단 속력은 작다. 상수 b는 물체의 모양에 좌우된다. 낙하산은 종단 속력을 작게 하기 위해 b가 커지도록 만든다. 반면에 차는 바람의 저항에 의한 효과를 줄이기 위해 b를 작게 만든다.

연 습 문 제

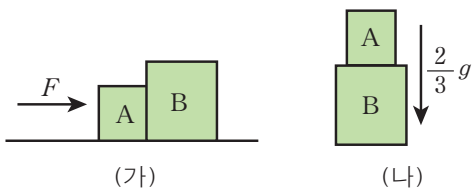
1. 어떤 사람이 그림과 같이 도르래를 통하여 밧줄을 잡아당겨 자신을 끌어올리고 있다. 사람을 포함한 총질량은 90 kg이다.(단, 도르래와 밧줄의 질량 및 마찰은 무시하고, 중력 가속도는 10 m/s^{2}이다.)



1) 자신을 끌어올리는데 드는 최소의 힘은 얼마인가?

2) 자신을 가속도 5 m/s^{2}으로 끌어올리는데 드는 힘은 얼마인가?

2. 질량이 각각 m, M인 두 물체 A ,B가 다음과 같이 붙어 있다.



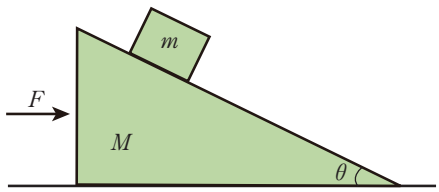
(가) (나)

1) 그림 (가)와 같이 마찰이 없는 수평면에서 두 물체를 힘 F로 밀면 A가 B로부터 받는 반작용은 얼마인가?

2) 그림 (나)와 같이 두 물체가 연직 아래로 가속도 $\frac{2}{3}g$ 로 등가속도 운동을 하고 있다면, A가 B로부터 받는 반작용은 얼마인가?(단, g는 중력 가속도이다.)

연 습 문 제

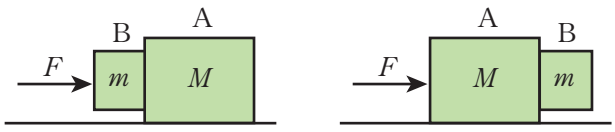
3. 그림과 같이 질량이 M이고 경사각 θ인 매끄러운 빗면 위에 질량이 m인 물체 A가 미끄러지지 않도록 빗면을 수평방향으로 밀었다.(단, 중력 가속도는 g이다.)



1) 빗면을 민 힘을 구하라.

2) 물체의 가속도를 구하라.

4. 마찰이 없는 수평면에 질량 M인 나무 도막 A가 놓여 있다. 그림과 같이 질량 m인 나무 도막 B가 A와 함께 붙어서 운동하도록 나무 도막을 힘 F로 밀었다. A, B사이의 최대 정지 마찰 계수가 μ이고, 중력 가속도가 g일 때 힘 F의 최소 크기를 각각 구하라.



(1) (2)

3 운동량과 충돌

볼링공이 핀에 충돌하면 무슨 일이 일어나는지를 생각해 보자. 충돌이 일어난 핀은 큰 속도로 다른 핀을 쓰러뜨리거나 뒷면으로 날아간다. 충돌하는 동안 핀이 받는 평균적인 힘이 크기 때문에 핀은 매우 빨리 큰 속도에 도달하며 매우 짧은 시간 동안 힘을 받는다. 운동 제3법칙에 의하여 볼링공이 핀에 작용하는 힘과 핀이 볼링공에 작용하는 힘을 서로 비교해 보면 크기는 같고 방향은 반대이다. 그러나 볼링공이 핀보다 훨씬 무겁기 때문에 핀의 가속도에 비하여 볼링공의 가속도는 상당히 작다.

1. 운동량

정지해 있는 물체는 언제나 정지해 있으려고 하며, 운동하는 물체는 일정한 속도로 직선 운동을 계속하려는 성질이 있다. 따라서 정지해 있는 물체를 운동시키거나, 운동하고 있는 물체를 정지시키려면 힘이 필요하다. 운동하는 물체의 운동 상태를 변화시키는데 드는 힘은 운동하는 물체의 어떤 요인에 의하여 결정되는지 알아보자.

운동하고 있는 물체의 질량과 속력이 클수록 정지시키기가 더 어렵다. 이것은 물체의 운동하는 효과가 크기 때문이다. 그래서 물체의 운동 효과를 질량과 속도의 곱으로 나타낼 수 있는데, 이것을 운동량이라고 한다. 질량 m인 물체가 속도 v로 운동할 때 물체의 운동량 $\vec{p}$는

$$\vec{p} = m\vec{v} \qquad \text{(I. 3-1)}$$

이다. 운동량은 스칼라량 m과 벡터량 v를 곱한 것이므로 벡터량이다. 운동량은 속도와 같은 방향을 가지며, 단위는 kg · m/s이다.

운동량의 개념은 같은 속도로 움직이는 무거운 물체와 가벼운 물체의 움

직임에 대하여 그 운동의 정량적인 차이를 나타낸다. 예를 들어, 볼링공의 운동량은 같은 속도로 움직이는 야구공의 운동량보다 훨씬 크다.

운동 제2법칙을 사용하여 물체의 운동량과 그 물체에 작용하는 합력 사이의 관계를 이끌어낼 수 있다.

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} = m\frac{dv}{dt}$$

운동 제2법칙에서 질량 m이 일정하다면,

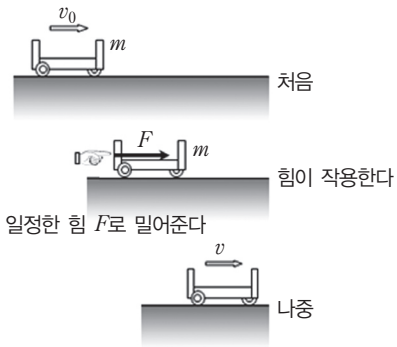
$$\Sigma \vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} \qquad \text{(I. 3-2)}$$

이다. 식 (I. 3-2)는 물체의 운동량의 시간 변화율이 그 입자에 작용하는 전체 합력 즉, 알짜힘과 같다는 것을 보여준다.

2. 충격량

방망이로 공을 치면 공의 운동 상태가 변한다. 이와 같이 충돌이 일어날 때 운동 상태를 다르게 하는 요인은 무엇일까?

[그림 I-15]와 같이 직선 상에서 속도 v_0로 운동하고 있는 질량 m인 술래를 일정한 힘 F로 시간 t 동안 밀어주어 속도 v가 되었다면, 이 때 물체의 가속도 a는



[그림 I-15] 운동량의 변화와 충격량

$$a = \frac{v - v_0}{t}$$

이다. 이것을 운동 방정식에 대입하면

$$ma = \frac{mv - mv_0}{t} = F$$

가 되어

$$mv - mv_0 = Ft \qquad \text{(I. 3-3)}$$

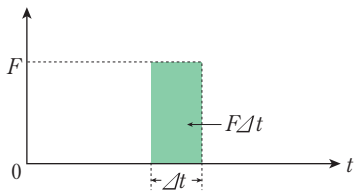
를 얻는다. 이 관계식은 운동 제2법칙의 변형으로 물체에 작용한 힘과 힘이 작용한 시간의 곱이 운동량 변화의 원인임을 보여주며, 이 물리량을 충격량이라고 한다. 따라서 운동량의 변화량은 충격량과 같다.

힘을 F, 힘이 작용한 시간을 t라 하면 충격량 I는

$$I = Ft \qquad \text{(I. 3-4)}$$

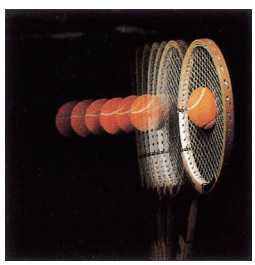
로 나타낸다. 충격량은 힘과 같은 방향을 가지며 단위는 N · s이다.

일정한 세기의 힘이 일정한 방향으로 작용하였을 때 힘은 [그림 I-16]과 같이 시간 축에 나란한 직선이 되고, 그 아래의 면적은 충격량과 같다.



[그림 I-16] 힘-시간 그래프

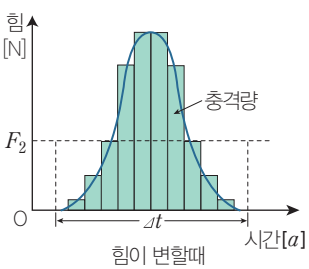
그러나 [그림 I-17]처럼 실제로 충돌하는 경우, 힘은 [그림 I-18]과 같이 변한다. 이 때 힘이 작용한 시간을 매우 짧은 구간 Δt로 나누어 보면 작은 직사각형의 넓이는 Δt 동안의 충격량을 나타낸다. 따라서 곡선 아래의 면적은 매우 폭이 좁은($\Delta t \to 0$) 직사각형 면적을 합한 것과 같으므로, 힘이 작용한 동안의 충격량과 같다.



[그림 I-17] 테니스 공과 라켓이 충돌하는 모습

예제 야구 경기에서 40 m/s의 속력으로 똑바로 날아오는 공을 타자가 똑바로 쳐서 50 m/s의 속력으로 되돌려 보냈다.(단, 야구공의 질량은 0.15 kg이다.)

1. 야구 방망이가 공에 준 충격량은 얼마인가?
2. 공과 방망이 사이의 접촉 시간이 0.05초라고 한다면, 공이 방망이로부터 받는 평균 힘은 몇 N인가?



[그림 I-18] 힘이 변하는 경우

풀이 1. 운동량의 변화량이 충격량이므로 운동량의 변화량을 구한다.
운동량의 변화량은

$0.15\ \text{kg} \times 50\ \text{m/s} - 0.15\ \text{kg} \times (-40\ \text{m/s}) = 13.5\ \text{N} \cdot \text{s}$

2. $F = \dfrac{I}{t} = \dfrac{13.5}{0.05} = 270\text{N}$

3. 운동량 보존의 법칙

직선 운동을 하는 두 물체가 충돌할 때 충돌 전후의 두 물체의 운동량이 어떻게 변하는지 알아보자.

[그림 I-19]와 같이 직선 상에서 속도 v_1로 운동하고 있는 질량 m_1의 공이 같은 직선 상에서 속도 v_2로 운동하고 있는 질량 m_2의 공에 충돌하여 두 공의 속도가 각각 v_1', v_2'이 되었다.

[그림 I-19] **운동량 보존의 법칙**

두 공은 서로 접촉하여 힘을 작용하므로 작용 반작용의 법칙에 의하여 같은 시간 동안 같은 크기의 힘을 서로 주고 받는다. 따라서 서로 주고 받는 충격량의 크기는 같고 방향은 서로 반대이다. 또한 각 공의 충격량은 운동량 변화량과 같으므로

$$m_1v_1' - m_1v_1 = -Ft$$
$$m_2v_2' - m_2v_2 = Ft$$

이고, 두 식을 더하여 정리하면

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2' \qquad \text{(I. 3-5)}$$

이다.

식 (I. 3-5)의 왼쪽은 충돌 전 두 공의 운동량의 합이고, 오른쪽은 충돌 후 운동량의 합이므로, 충돌 전후에 운동량의 총합은 변하지 않는다.

일반적으로 두 개 이상의 물체들이 서로 작용할 때 외부로부터 받는 힘이 없으면 그들의 운동량의 합은 항상 일정하게 보존된다. 이를 운동량 보존의 법칙이라고 한다.

예제 질량 300 kg의 물을 싣고 10 m/s의 일정한 속력으로 가던 질량이 100 kg인 수레에서 물 200 kg이 샜다. 수레의 속력은 얼마가 되겠는가?(단, 모든 마찰과 저항은 무시한다.)

풀이 운동량 보존 법칙에서

$(300\ \text{kg}+100\ \text{kg}) \times 10\text{m/s} = (100\ \text{kg}+100\ \text{kg}) \times v$

$\therefore\ v = 20(\text{m/s})$

4. 반발 계수

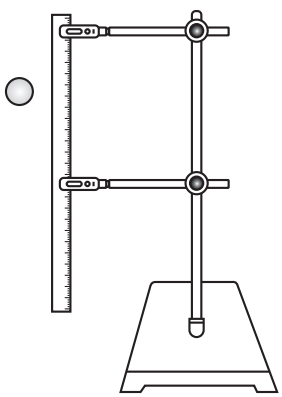
공이 마루 바닥에 충돌하여 다시 튀어오르는 높이는 처음 자유 낙하하는 높이에 따라 어떻게 변하는지, 또 그 높이에 영향을 미치는 것은 어떤 것이 있는지를 알아보자.

실험 반발 정도

준비물 탁구공, 골프공, 야구공, 1 m 자, 스탠드, 고무판, 나무 판자, C형 클램프

과정

1. 그림과 같이 콘크리트 바닥에 세워 놓은 스탠드에 1 m 자를 수직으로 세워 놓는다.
2. 한 사람이 탁구공을 1 m 높이에서 가만히 떨어뜨리고, 다른 사람은 탁구공이 튀어 오른 높이를 측정해 보자.
3. 탁구공을 떨어뜨리는 높이를 변화시키면서 튀어 오른 높이를 측정해 보자.
4. 바닥에 고무판을 놓고 위의 과정 2, 3을 반복해 보자.
5. 골프공, 야구공으로 과정 2를 반복해 보자.



정리

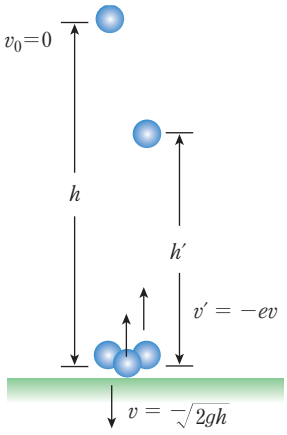
1. 튀어 오른 높이가 가장 높은 공은 어느 것인가?
2. 공을 떨어뜨린 높이와 튀어 오른 높이 사이에는 어떤 관계가 있는가?
3. 공이 튀어 오른 높이에 영향을 주는 것은 어떤 것이 있는가?

공이 마루 바닥에 충돌하는 경우, [그림 I-20]과 같이 높이 h에서 자유 낙하한 공이 마루 바닥에 충돌하여 다시 튀어오르는 높이 h'이 클수록 잘 튕겨 나오는 공이다.

낙하 운동에서 높이는 속력의 제곱에 비례하므로, 공이 잘 반발되는 정도를 보통 공이 마루 바닥에 닿는 순간의 속력 v의 충돌 직후의 속력 v'에 대한 비 값으로 나타낸다. 이 비 값은 충돌하는 두 물체에 의하여 결정되는 상수로 반발 계수라고 한다.

곧, 반발 계수 e는

$$e = \frac{|v'|}{|v|} = \frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{h'}{h}}$$



[그림 Ⅰ-20] 공과 마루 바닥의 충돌

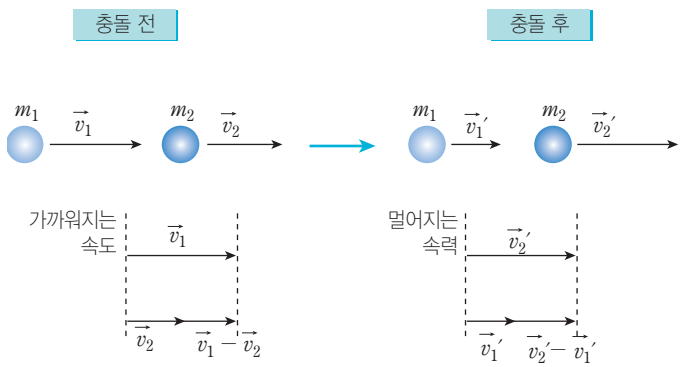
로 주어진다.

두 공이 정면 충돌하는 경우 반발 계수는 어떻게 될까? 공이 마루 바닥과 충돌하는 경우, 속도 v는 마루 바닥에 접근하는 공의 충돌 전 마루 바닥에 대한 상대 속도이고, 속도 v'은 공의 충돌 후 마루 바닥에 대한 상대 속도이다.

[그림 Ⅰ-21]과 같이 일직선 위에서 속도 v_1, v_2로 각각 운동하던 두 물체가 정면 충돌하여 각각 속도 v_1', v_2'로 운동하는 경우, 충돌 전 상대 속도는 $v = v_1 - v_2$이고, 충돌 후 상대 속도는 $v' = v_1' - v_2'$이므로 반발 계수 e는 다음과 같이 주어진다.

$$e = -\frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2} \qquad (\text{Ⅰ. } 3\text{-}6)$$

여기서 음(−)의 부호는 일반적으로 $v_1 > v_2$, $v_1' > v_2'$이기 때문이다.



[그림 Ⅰ-21] 반발 계수

5. 충돌의 종류

물체가 충돌할 때에는 속도의 변화가 일어나기도 하고 소리나 열이 발생하기도 한다. 또 물체의 변형이 일어나기도 한다.

여기서 충돌이 일어날 때 물체의 운동 에너지는 어떻게 되는지 알아보자.

충돌 형태에 따라 운동 에너지는 보존될 수도 있고 보존되지 않을 수도 있다. 그래서 운동 에너지가 보존되면 탄성 충돌, 보존되지 않으면 비탄성 충돌로 구분한다.

두 물체 사이의 탄성 충돌은 운동량뿐만 아니라 운동 에너지도 충돌 전과 후에 같다. 예로써 골프공과 같이 거시적인 세계에서 어떤 물체 사이의 충돌은 약간의 변형과 운동 에너지의 손실이 일어나므로 단지 근사적인 탄성 충돌이다. 예를 들면, 골프공이 충돌하는 소리는 운동 에너지의 일부가 소리로 변환된 것이다. 완전한 탄성 충돌은 미시적인 원자와 아원자 입자 사이에서 일어난다.

비탄성 충돌은 운동량은 보존되지만 운동 에너지가 충돌 전과 후에 같지 않은 경우이다. 비탄성 충돌에는 두 가지 형태가 있다. 두 개의 물체가 충돌하여 서로 붙어버리는 경우, 예를 들면 운석이 달과 충돌하여 달에 박히는 경우에 이를 완전 비탄성 충돌이라 한다. 두 물체가 충돌하여 합쳐지지 않고 단지 운동 에너지만 손실되는 경우, 예를 들면 고무공과 단단한 면의 충돌 경우에 이를 비탄성 충돌이라 한다. 이 경우에 고무공의 운동 에너지 일부는 공이 면과 접촉하면서 변형될 때 잃어버린다.

❖ **거시적 세계**

맨눈으로 볼 수 있는 세계 또는 감각으로 직접 알 수 있는 세계.

❖ **미시적 세계**

너무 작아서 맨눈으로는 볼 수 없고 현미경을 통해서만 볼 수 있는 세계.

1) 탄성 충돌

[그림 I-21]과 같이 두 물체가 탄성 충돌할 때 운동량과 운동 에너지 모두 보존된다. 식으로 표현하면,

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \qquad \text{(I. 3-7)}$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \qquad \text{(I. 3-8)}$$

과 같다.

식 (I. 3-8)를 정리하면

$$m_1(v_1^2 - v_1'^2) = m_2(v_2^2 - v_2'^2)$$

이 방정식의 양변을 인수분해하면

$$m_1(v_1 - v_1')(v_1 + v_1') = m_2(v_2' - v_2)(v_2' + v_2) \qquad \text{(I. 3-9)}$$

가 된다.

이번에는 식 (I. 3-7)을 정리하면

$$m_1(v_1 - v_1') = m_2(v_2' - v_1) \qquad \text{(I. 3-10)}$$

가 된다. 나중 결과를 구하기 위하여 식 (I. 3-9)를 식 (I. 3-10)으로 나누면

$$\begin{aligned} v_1 + v_1' &= v_2' + v_2 \\ v_1 - v_2 &= -(v_1' - v_2') \end{aligned} \qquad \text{(I. 3-11)}$$

를 얻는다. 식 (I. 3-7)과 (I. 3-11)를 이용하면 충돌 후 속도들을 충돌 전의 속도들로 구할 수 있다.

$$v_1' = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}\right)v_1 + \left(\frac{2m_2}{m_1 + m_2}\right)v_2 \qquad \text{(I. 3-12)}$$

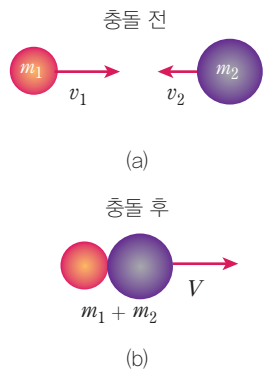
$$v_1' = \left(\frac{2m_1}{m_1 + m_2}\right)v_1 + \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}\right)v_2 \qquad \text{(I. 3-13)}$$

탄성 충돌에서 특별한 경우를 생각해 보자. 만일 $m_1 = m_2$이면, 식 (I. 3-12)와 (I. 3-13)에 의해 $v_1' = v_2$이고 $v_2' = v_1$이다. 즉, 질량이 같은 경우 물체들의 속도가 서로 바뀐다. 이 현상은 당구공이 정면 충돌할 때 관찰하는 것과 비슷하다. 움직이는 당구공은 정지하고, 정지해 있던 당구공은 움직이는 당구공과 같은 속도로 충돌 위치에서 멀어진다.

2) 완전 비탄성 충돌

[그림 I-22]와 같이 질량이 m_1, m_2인 두 물체가 각각 속도 v_1, v_2로 운동하다가 충돌하여 서로 붙은 후, 어떤 속도 V로 움직이는 경우를 생각해 보자. 어떤 충돌에서도 운동량이 보존되므로, 충돌 전의 운동량의 총합은 충돌 후에 운동량의 총합과 같다.

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)V$$



[그림 I-22] 두 물체 사이의 완전 비탄성 충돌

나중 속도에 대하여 풀면,

$$V = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

과 같다.

6. 2차원 충돌

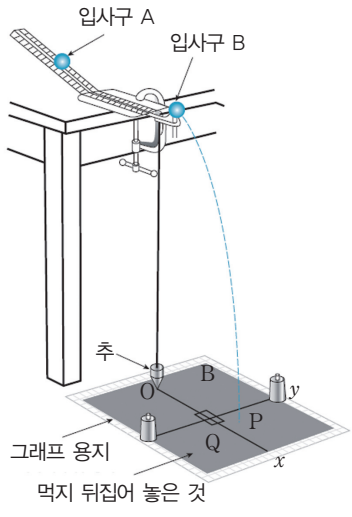
지금까지는 일직선상에서 충돌 문제를 생각하였다. 이제 2차원 즉 평면상에서 두 물체가 비스듬히 충돌하여 충돌 후 운동 방향이 처음과 다른 비낌 충돌에 대하여 알아보자.

실험 2차원 충돌

준비물 충돌 실험 장치, C형 클램프, 막대자, 금속구 2개, 저울, 추가 달린 실, 먹지, 전지 모조지, 모눈 종이, 셀로판 테이프, 그래프 용지

과정

1. 그림과 같이 실험대의 한쪽 끝에 충돌 실험 장치를 설치하고, 바닥에는 전지 모조지를 깔고 셀로판 테이프로 고정시킨다.
2. 두 금속구가 충돌하는 예상 지점에서 추를 수직으로 매달아서 모조지에 두 금속구의 충돌지점 O를 정확히 표시한다.
3. 금속구(입사구 A)를 일정한 높이에서 낙하시키면서 낙하 지점 C를 구한다.
4. 크기와 질량이 같은 두 금속구가 비스듬히 충돌할 수 있도록 표적구 B의 위치를 선택한다.
5. 입사를 일정한 높이에서 낙하시키면서 표적구와 충돌시킨다. 여러 번 연습한 후 두 금속구의 예상 낙하 지점에 먹지를 깐다.



6. 두 금속구 A, B가 각각 바닥에 충돌하는 지점 $\overline{OP}$의 x성분, y성분, $\overline{OQ}$의 x성분, y성분의 길이를 측정한다.
7. 두 금속구의 충돌 지점을 조금씩 변화시키면서 위의 값들을 측정한다.
8. 벡터 OC, OP, OQ를 그래프 용지에 적당한 축척으로 작도하여, 평행사변형이 되는지 확인해 보자.

결과

1. 과정 3의 결과

구의 질량	$mA = (\quad)g,\ mB = (\quad)g$					
측정 횟수	1회	2회	3회	4회	5회	평균값
OC의 길이(cm)						

2. 과정 7의 결과

측정값	1회	2회	3회	4회	5회	평균값
(OP)x의 길이(cm)						
(OP)y의 길이(cm)						
(OQ)x의 길이(cm)						
(OQ)y의 길이(cm)						

[그림 I-23]의 (가)와 같이 평면상에서 두 물체가 임의의 방향으로 운동하다가 충돌하는 경우에도 운동량이 보존된다.

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$$

이를 x축, y축 방향의 두 성분으로 나누어 표시하면

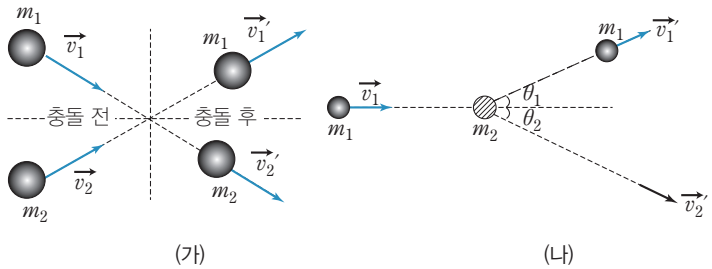
$$m_1v_{1x} + m_2v_{2x} = m_1v_{1x}' + m_2v_{2x}'$$
$$m_1v_{1y} + m_2v_{2y} = m_1v_{1y}' + m_2v_{2y}'$$

이 된다.

[그림 I-23]의 (나)와 같이 정지해 있는 질량 m_2인 물체에 질량 m_1인 물체가 v_1의 속도로 충돌하였을 때 운동량 보존 법칙을 적용하면

$$x\text{성분} : m_1v_1 = m_1v_1'\cos\theta_1 + m_2v_2'\cos\theta_2$$
$$y\text{성분} : 0 = m_1v_1'\sin\theta_1 + m_2v_2'\sin\theta_2$$

을 얻을 수 있다.



[그림 I-23] (가) 평면상의 충돌, (나) 비김 충돌

연 습 문 제

1. 총질량 M인 비행기가 속력 V로 수평 비행하던 중 질량 m인 포탄을 비행기의 진행 방향과 반대 방향으로 비행기에 대하여 속력 v로 발사하였다.

1) 비행기가 받은 충격량은 얼마인가?

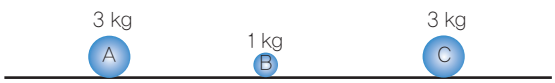
2) 포탄을 발사한 후 비행기의 속도는 얼마인가?

2. 한 지점 P에서 질량 3 kg인 물체를 수평면에 대하여 45°의 방향으로 속력 20 m/s로 쏘아 올렸더니 물체가 최고점에 도달하였을 때 폭발하여 질량이 각각 1 kg, 2 kg인 두 조각으로 분열되었다. 분열 후, 1 kg의 조각은 자유 낙하하였고, 두 조각은 모두 P와 동일한 수평면에 떨어졌다.(단, 중력 가속도는 10 m/s^{2}이다.)

1) 2 kg의 조각이 수평면에 도달하는 속력은 얼마인가?

2) 2 kg의 조각의 수평 도달 거리는 얼마인가?

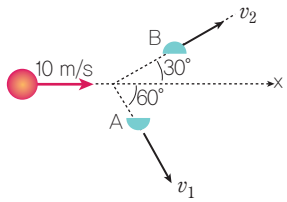
3. 그림과 같이 질량이 각각 3 kg, 1 kg, 3 kg인 세 개의 공 A, B, C가 일직선 위에 놓여 있다. A를 속도 6 m/s로 B에 정면 충돌시키면 B는 C에 정면 충돌한다.(단, 세 공은 탄성 충돌을 하고 마찰은 무시한다.)



1) B와 충돌한 후 C의 속도는 얼마인가?

2) A와 B가 두 번 충돌한 후 B의 속도는 얼마인가?

4. 그림과 같이 x축 방향으로 10 m/s의 속력으로 운동하고 있는 질량 2 kg의 물체가 갑자기 폭발하여 질량이 같은 두 개의 파편 A, B로 나누어졌다. A는 처음의 운동 방향과 60°의 방향으로, B는 왼쪽으로 30°의 방향으로 운동한다. 폭발 후의 파편 A, B의 속력을 v_1, v_2라 할 때, v_1, v_2를 구하시오.



4 중력

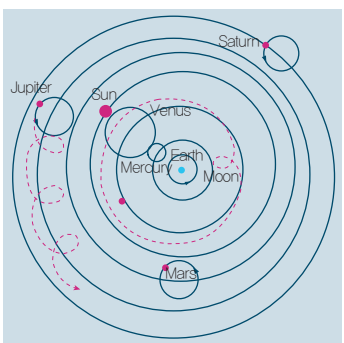
중력은 소립자들 간에 발생하는 네 가지 기본적 상호작용들 가운데서 가장 약하다. 중력은 소립자의 상호작용에서는 무시할 수 있을 만큼 작다. 또한 질량이 수천 킬로그램이나 된다할지라도 일상생활의 물체들 사이에서 중력을 관측한다는 것은 어렵다. 그러나 행성, 달, 별들과 같이 대단히 큰 물체들에 관여된 상호작용을 생각할 때는 아주 중요하다. 우리를 지구에 매여 있게 한다든지, 태양계 내에서 지구와 다른 행성들을 붙들어 매고 있는 것은 바로 중력이다. 중력은 별들의 진화 및 은하계의 움직임에 있어서 중요한 역할을 한다. 어떤 의미에 있어서, 우주를 꼭 붙잡아 매고 있는 것은 바로 중력이다.

1. 케플러 법칙

❖ Ptolemy 우주모형

행성과 별들의 1차적 운동은 시계방향으로 1일 주기로 되어있다. 별들에 대한 행성들의 운동을 설명하기 위해서, 행성들은 보다 작은 반시계방향의 각속도로 주어진다. 이 모형은, 지구가 우주의 중심에 위치하고 있기 때문에, 지구의 중심 모형이라고 불리운다.

수많은 별들과 반짝이는 행성들로 가득 찬 밤하늘은 언제나 인간을 황홀하게 한다. 지구에 대해서 별 및 행성들의 외견상 운동들이 여러 세기 동안 천문학자들에 의해서 관측되고 도표로 만들어졌다.



[그림 Ⅰ-24] Ptolemy 우주모형

약 A.D. 140년 경에 프톨레마이오스(K. Ptolemaeos)에 의해서 출간된 우주의 모형에 의하면, [그림 Ⅰ-24]와 같이 중심에 지구가 있고, 그 주위를 태양과 별들이 단순한 원 궤도를 돌고 있고, 행성들이 큰 원들 위해 겹쳐서 주전원(epicycle)이라고 불리는 작은 원들로 구성되는 보다 복잡한 경로들을 따라 돌고 있다. 이와 같은 약간 복잡한 모형은 그 당시의 육안 관측과 근본적으로 일치했으며 14세기 동안에 걸쳐 널리 인정되었다. 이것은 태양과 다른 별들은 고

정되어 있으며 지구를 포함한 행성들은 태양 주위를 원을 그리며 돌고 있다는 코페르니쿠스(N. Copernicus)의 간단하나 고도로 역설적인 모형으로 1543년에 대치되었다.

16세기 말 무렵, 천문학자 브라헤(T. Brahe)는 행성들의 운동을 연구하면서, 전에 얻었던 것보다 훨씬 더 정밀한 관측을 하였다. 브라헤가 관측한 행성의 운동에 관한 관측 자료를 정리 분석한 케플러(J. Kepler)는 태양 주위의 행성들의 실제 경로들은 타원이라는 것을 발견하였다. 또한, 행성들은 일정한 속도로 운동하는 것이 아니라 태양에 가까이 있을 때가 멀리 떨어져 있을 때보다 더 빨리 운동한다는 것을 보였다. 드디어, 케플러는 행성의 주기와 태양으로부터의 평균거리 사이에 정확한 수학적 관계식을 전개하였다. 케플러는 행성운동의 세 가지 법칙을 기술하였다. 궁극적으로, 이 법칙들은 뉴턴이 만유인력 법칙을 발견하는데 근간을 제공해 주었다.

1. 모든 행성들은 태양을 한 초점으로 하는 타원 궤도를 돌고 있다.
2. 행성과 태양을 잇는 직선은 같은 시간 간격 동안에 같은 면적을 쓸고 지나간다.
3. 모든 행성의 공전 주기의 제곱은 그 행성 궤도의 긴 반지름의 세제곱에 비례한다.

2. 뉴턴의 중력법칙

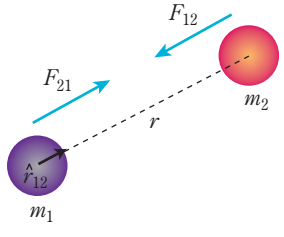
뉴턴은 궤도내에서 행성의 가속을 태양에 의해서 행성에 작용하는 힘 때문이라고 했다. 그러한 힘은 우주 내의 어떤 두 물체 사이에도 존재한다고 하는 대담한 가정을 내 놓았다.

뉴턴의 중력법칙은 모든 물체는 다른 모든 물체에 끄는 힘을 작용하는데, 그 힘은 두 물체의 질량에 비례하고 그 떨어진 거리의 제곱에 반비례한다고 가정한다.

[그림 I-25]와 같이 두 물체의 질량이 각각 m_1, m_2이고 떨어진 거리가 r일 때, 질량 m_1이 m_2에 작용하는 힘은

$$\vec{F}_{12} = -\frac{Gm_1m_2}{r^2}\hat{r}_{12} \qquad \text{(I. 4-1)}$$

이다. 여기서 $\hat{r}_{12}$는 m_1으로부터 m_2로 향하는



[그림 I-25] 두 물체 사이에 작용하는 힘

단위벡터이고, G는 만유인력 상수로

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\,\mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$$

이다. 그리고 음(−)의 부호는 물체 2가 물체 1에 끌림을 나타낸다. 그러므로 물체 2에 작용하는 힘은 물체 1을 향한다. 뉴턴의 운동 제3법칙에 의해서 물체 2에 물체 1이 받는 힘 $\overrightarrow{F_{21}}$은 $\overrightarrow{F_{12}}$와 크기는 같고 방향은 반대이다. 즉, 이 두 힘은 작용–반작용의 쌍을 이루며, $\overrightarrow{F_{21}} = -\overrightarrow{F_{12}}$이다.

예제 서로 0.5 m 떨어져 앉아 있는 질량이 각각 60 kg, 50 kg인 남학생과 여학생 사이에 작용하는 만유인력은 얼마인가?

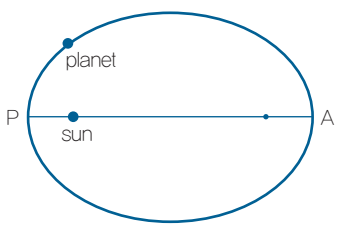
풀이 만유인력은 $F = \dfrac{Gm_1m_2}{r^2}$ 이므로,

$$6.67 \times 10^{-11}\,\mathrm{N \cdot m^2/kg^2} \times \frac{60\ \mathrm{kg} \times 50\ \mathrm{kg}}{0.5\ \mathrm{m}} = 4 \times 10^{-7}\ (\mathrm{N})$$

3. 케플러의 법칙과 행성의 운동

1) 케플러의 제1법칙

[그림 I–26]은 태양을 한 초점으로 하는 한 행성의 타원 경로를 보여준다. 행성이 태양에 가장 가까운 점 P는 근일점이라 하고, 가장 먼 점 A는 원일점이라고 한다.



[그림 I–26] 행성의 타원 경로

제1법칙은 중력의 거리 제곱에 반비례하는 성질의 결과이다. 중력의 중심에 의해 속박되어 원형 또는 타원 궤도를 그리는 물체들은 행성, 소행성, 태양 주위를 주기적으로 운행하는 혜성들이며, 행성 주위의 달도 계속해서 돈다. 또한 속박되지 않고 우주 먼 곳에서 와서 태양 근처까지 왔다가 다시 사라져 돌아오지 않는 유성체들도 있다. 이러한 물체들과 태양 사이의 중력도 거리의 제곱에 반비례하며, 포물선 또는 쌍곡선 등의 궤도 곡선을 그린다.

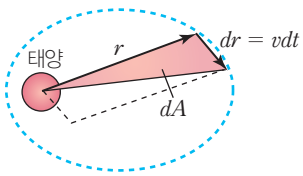
❖ **중심력**
운동하는 물체에 작용하는 힘의 작용선이 항상 한 개의 고정점을 지나고 그 힘의 크기가 고정점과 물체 사이의 거리에 의해 결정될 때의 힘.

2) 케플러의 제2법칙

제2법칙은 태양에 의해서 행성에 작용하는 힘은 태양쪽으로 향한다는 사

실로부터 나온다. 그러한 힘을 중심력이라 부른다. 행성에 작용하는 힘은 행성으로부터 태양까지를 잇는 직선을 따라 있으므로, 태양을 중심으로 회전력(토크, torque)를 갖지 않는다. 만일 한 물체에 작용한 알짜회전력이 0이라면 그 물체의 각운동량은 보존된다.

[그림 I-27]은 태양 주위의 한 타원 궤도 내에서 운동하고 있는 한 행성을 나타낸 것이다. 시간 dt동안에 행성은 거리 vdt를 운동하고 그림에서 나타낸 만큼의 면적을 쓸고 지나간다. 이것은 벡터 $\vec{r}$과 $\vec{v}dt$에 의해서 형성되는 평행사변형의 면적, 즉 $\vec{r} \times \vec{v}dt$의 절반이다. 따라서, 반지름 벡터 $\vec{r}$에 의해서 시간 dt 내에 쓸고 지나간 면적 dA는



[그림 I-27] 케플러 제2법칙

$$dA = \frac{1}{2} \left| \vec{r} \times \vec{v}dt \right| = \frac{1}{2m} \left| \vec{r} \times m\vec{v}dt \right| = \frac{1}{2m} Ldt \qquad \text{(I. 4-2)}$$

이고, $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$는 태양에 대한 행성의 각운동량이다.

그러므로 주어진 시간 간격 dt에 쓸고 지나간 면적은 각운동량 L에 비례한다. L은 행성의 운동 중 일정하므로, 주어진 시간 간격 dt에 쓸고 지나간 면적은 궤도의 전부분에 대해서 같다.

3) 케플러의 제3법칙

[그림 I-28]과 같이 태양(질량 M_S) 주위를 원운동하는 질량 m_p인 행성을 생각해 보자. 행성은 한 원형 내에서 운동하고 있으므로, 그것은 구심 가속도를 갖는다. 이 가속도는 뉴턴의 중력법칙에 의해서 주어지는 것으로 태양과 행성 사이의 인력에 의해서 제공된다. 뉴턴의 운동 제2법칙을 적용하면

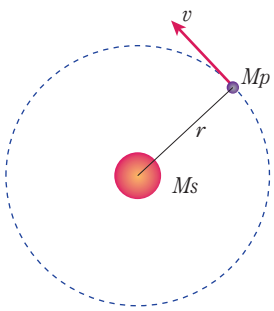
$$F = m_p a$$

$$\frac{GM_s m_p}{r^2} = m_p \frac{v^2}{r}$$

가 된다. v^2에 대해서 정리하면

$$v^2 = \frac{GM_S}{r} \qquad \text{(I. 4-3)}$$

을 얻는다. 행성의 속력 v를 주기 T에 관계지을 수 있다. 행성은 시간 T 동안에 거리 $2\pi r$만



[그림 I-28] 태양 주위를 원운동하는 행성

큼 운동하므로, 그 속력은

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

이다. 이 v를 식 4-2에 대입하면

$$v^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = \frac{GM_S}{r}$$

가 되고, T와 r에 대해서 정리하면

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_S} r^3 \qquad \text{(I. 4-4)}$$

을 얻는다. 이것은 케플러의 제3법칙이다. 원형 궤도에서는 긴 반지름이 반지름이기 때문에, 식 (I. 4-4)는 원형이든 타원 궤도이든 성립한다.

예제 토성의 공전 궤도의 긴 반지름은 지구 공전 궤도의 긴 반지름의 약 9배이다. 토성의 공전 주기는 얼마인가?

풀이 행성의 주기를 T, 긴 반지름을 r이라 하면, 케플러 제3법칙을 적용하여 $T^2 = kr^3$로 나타낼 수 있다.

$$\frac{T_{토}^2}{r_{토}^3} = \frac{T_{지}^2}{r_{지}^3} = \frac{1^2}{r_{지}^3} \rightarrow T_{토}^2 = \left(\frac{r_{토}}{r_{지}}\right)^3 = 9^3 = (3^3)^2$$

$\therefore T_{토} = 3^3 = 27$(년)

4. 중력장

지구와 달 사이에서 달에 작용하는 힘을 계산하는데 점입자들로 취급할 수 있다는 가정은 타당하다. 그 이유는 달이 지구나 혹은 달의 반경에 비해서 지구로부터 멀리 떨어져 있기 때문이다. 그러나 그러한 가정은 지구가 그 표면 근방 물체에 작용하는 힘에 적용할 때는 확실히 의문스럽다. 상당한 노력 끝에 뉴턴은 구대칭의 물체가 그 표면 상이나 혹은 표면 밖에 있는 한 점 질량에 미치는 힘은 마치 그 물체의 모든 질량이 그 중심에 집중되어 있는 것과 똑같다는 것을 증명할 수 있었다.

지구에 의해서, 지구 중심으로부터 거리 r에 있는 임의의 질량 m에 작용하는 힘은 식 (I. 4-1)에 의해서

$$F = \frac{GM_E m}{r^2}$$

이 된다. 한 질량에 작용하는 중력을 그 질량으로 나눈 것을 중력장이라고 한다. 거리 r(지구 반경보다 큰 경우)에서 지구의 중력장은 지구 쪽으로 향하고 그 크기 $g(r)$은

$$g(r) = \frac{F}{m} = \frac{GM_B}{r^2} \qquad \text{(I. 4-5)}$$

로 주어진다.

5. 중력(만유인력) 위치 에너지

지구 표면 가까이에서는 만유인력이 일정하다고 볼 때 중력 $F_g = mg$에 의한 위치 에너지는 지면으로부터의 연직 높이 h에 비례한다.

그러나 중력의 크기는 지구 표면에서 멀어짐에 따라 지구 중심으로부터의 거리의 제곱에 반비례하여 작아진다. 따라서 인공 위성이나 천체와 같이 지구로부터 멀리 있는 물체에는 중력이 일정하다고 가정했을 때의 위치 에너지 $E_p = mgh$는 적용할 수 없다.

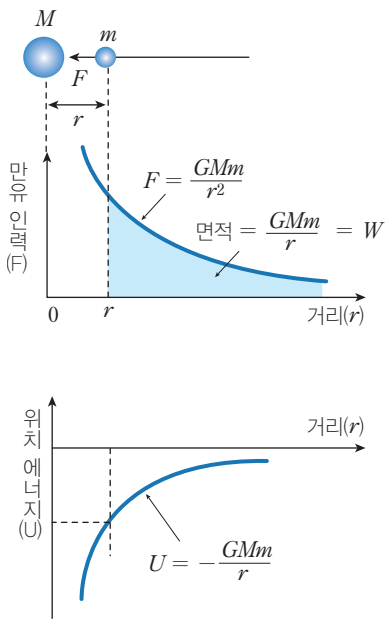
[그림 I-29]와 같이 지상 10 km 이하에서는 중력 가속도가 거의 일정하지만 실제로 중력 가속도는 높이에 따라 변하므로 만유인력 $F = \frac{GMm}{r^2}$을 써서 중력의 위치 에너지를 계산해야 한다. 물체가 보존력만을 받으면서 운동하면 역학적 에너지는

$$E = U + K = \text{일정}$$

이다. 따라서

$$dE = dU + dK = 0$$

가 된다. 그런데 힘이 한 일은 물체의 운동 에너지 변화와 같으므로



[그림 I-29] 만유인력 및 그 위치 에너지

$dW = dK$ 이다. 따라서

$$dU = -dK = -dW = -Fdx$$

이고, 거리 r에 따라 변하므로

$$dU = -Fdr$$

가 된다. 양변을 적분하면

$$\int dU = -\int_{\infty}^{r} Fdr$$

$$\Delta U = -\int_{\infty}^{r} F_r dr = -\int_{\infty}^{r} -\frac{GMm}{r^2} dr = \left[-\frac{GMm}{r}\right]_{\infty}^{r} = -\frac{GMm}{r}$$

$$\Delta U = U_r - U_{\infty} = -\frac{GMm}{r}$$

이와 같이 힘이 위치에 따라 변하는 경우에는 힘이 0이 되는 점을 위치 에너지의 기준점으로 택하는 것이 편리하다. 만유인력의 경우 그 크기가 0이 되는 무한 원점을 만유인력의 기준점으로 택하는 것이 좋다. 따라서 중력(만유인력)에 의한 위치 에너지는

$$U_{\infty} = 0,\ U(r) = E_p(r) = -\frac{GMm}{r} \qquad \text{(I. 4-6)}$$

이 된다.

물체가 지구 인력권을 벗어나게 하려면 만유인력이 지구의 중심을 향하고 있기 때문에 일이 필요하다. 따라서 만유인력에 의한 위치 에너지는 지구로부터 멀어질수록 커지고 무한 원점 P_{∞}에서 최대가 된다. 이 점을 기준점으로 택하면 이 점에서 위치 에너지의 값이 0이 되므로 만유인력에 의한 위치 에너지는 항상 음(−)의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 여기서 음(−)의 부호의 의미는 물체를 지구 쪽으로 당기는 만유인력으로 인하여 물체가 지구 중력장에 속박되어 있음을 의미한다.

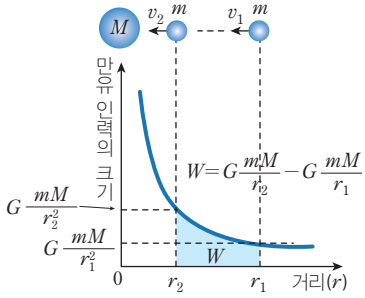
6. 중력(만유인력)에 의한 역학적 에너지 보존

[그림 I-30]과 같이 질량 m의 물체가 질량 M의 지구 중심으로부터 거

리 r_1 인 점을 지날 때 속력이 v_1이고, r_2 인 점을 지날 때 속력이 v_2이면, 그 동안에 만유인력이 물체에 한 일, 즉 물체의 위치 에너지 변화는 물체의 운동 에너지 변화와 같다. 따라서, 식으로 표현하면

$$W = \Delta K = -\Delta U$$

가 되고, 식을 정리하면



[그림 Ⅰ-30] 만유인력에 의한 역학적 에너지 보존

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = -\left[\left(-\frac{GMm}{r_2}\right) - \left(-\frac{GMm}{r_1}\right)\right]$$

$$\therefore\ -\frac{GMm}{r_2} + \frac{1}{2}mv_1^2 = -\frac{GMm}{r_2} + \frac{1}{2}mv_2^2 = E(\text{일정})$$

가 된다. 일반적으로 역학적 에너지는

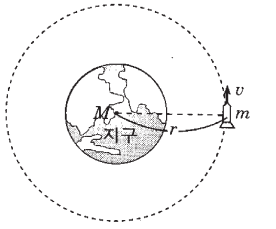
$$E = -\frac{GMm}{r} + \frac{1}{2}mv^2 = \text{일정} \qquad \text{(Ⅰ. 4-7)}$$

로 나타낸다.

역학적 에너지 $E < 0$ 이면 물체는 지구 중력장에 갇혀 있는 상태이고, $E \geq 0$ 이면 물체는 지구 중력장을 탈출한다.

7. 인공 위성의 운동

[그림 Ⅰ-31]과 같이 질량 m인 인공 위성이 질량 M의 지구 주위를 속력 v로 반지름 r의 원운동을 하고 있을 때, 역학적 에너지는 질량 m인 인공 위성의 운동 에너지와 만유 인력에 의한 위치 에너지의 합이다.



[그림 Ⅰ-31] 인공 위성의 운동

$$E = U + K$$

$$E = -\frac{GMm}{r_1} + \frac{1}{2}mv^2$$

반경 r의 한 원 내에서 운동하고 있으므로 구심 가속도의 크기는 $\frac{v^2}{r}$이

된다. 뉴턴의 운동 제2법칙을 적용하면

$$F = \frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

이고, 인공 위성의 운동 에너지는

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\frac{GMm}{r}$$

이 된다. 따라서, 운동 에너지는 위치 에너지의 절반되는 크기를 갖는다. 인공 위성의 총 운동 에너지는

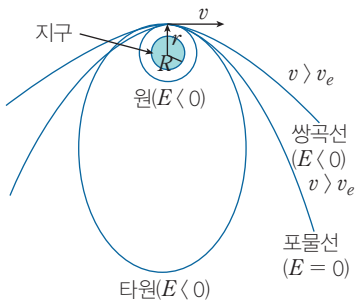
$$E = K + U = \frac{1}{2}\frac{GMm}{r} - \frac{GMm}{r} = -\frac{1}{2}\frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}U(r)$$

가 된다.

무한 원점을 기준점으로 하여 무한 원점에서 역학적 에너지 $E_\infty = 0$이면 인공 위성을 지구 중력장으로부터 벗어나게 하는 데 필요한 최소 일은

$$W = E_\infty - E = 0 - (-\frac{GMm}{2r}) = \frac{GMm}{2r}$$

이고, 이 일을 **결합 에너지**라 한다.



[그림 Ⅰ-32] **인공 위성의 궤도와 역학적 에너지**

또, 인공 위성이 지구 중력장을 탈출하는 데 필요한 최소 속도를 v_e라 하면, $E = -\frac{GMm}{r} + \frac{1}{2}mv_e^2 = 0$에서 구할 수 있다. 식을 정리하면

$$K_e = \frac{1}{2}mv_e^2 = \frac{GMm}{r}$$

이 되고, 이것을 v_e에 대해 정리하면

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

이 된다. 이것을 인공 위성의 탈출 속도라 한다.

연 습 문 제

1. 달의 질량 및 반지름이 각각 지구의 약 $\frac{1}{81}$배 및 $\frac{3}{11}$배라 한다.

1) 달의 중력 가속도는 지구 표면에서의 중력 가속도 g의 몇배인가?

2) 지구 표면에서 질량 18 kg의 물체는 달 표면에서 용수철 저울로 달면 몇 kg이 되는가?

3) 지구 표면에서 1 m 높이까지 뛰는 사람은 달 표면에서는 몇 m 높이까지 뛸 수 있는가?(단, 자전의 영향은 무시한다.)

2. 지구 표면으로부터 높이 900 km 상공에서 지구 주위를 원운동하고 있는 인공 위성이 있다. 지구를 반지름 $R = 6.4 \times 103$ km , 질량 $M = 6.0 \times 10^{24}$ kg의 공이라고 가정하고, 만유 인력 상수를 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ N · m^2/kg^{2}이라 한다.

1) 인공 위성의 가속도 및 속도는 각각 얼마인가?

2) 인공 위성의 공전 주기는 몇 초인가?

3. 지구 중심으로부터 반지름 r의 원 궤도를 등속 원운동을 하고 있는 질량 m의 인공 위성이 있다. 지구의 질량은 M, 만유 인력 상수는 G이다.

1) 인공 위성의 속도 v를 구하라.

2) 인공 위성의 역학적 에너지를 구하라.

3) 이 인공 위성이 지구의 중력권을 벗어나려면 속도는 v_0의 몇 배 이상이어야 하는가?

4. 지표면의 한 지점에서 연직 위로 물체를 쏘아 올린다. 지구의 반지름을 R, 지표면에서 중력 가속도를 g라고 하자.

1) 지구의 중심으로부터의 거리가 $2R$인 점 A에서 속도가 0이 되기 위해서는 초속도 v_0를 얼마로 해야 하는가?

2) 점 A에서 속도가 0이 된 순간 물체에서 수평으로 추진력을 가해 수평 방향의 속도가 v이고 지구의 중심을 중심으로 하는 등속 원운동을 시키고자 하려면 속도 v를 얼마로 하면 되겠는가?

5 일과 에너지

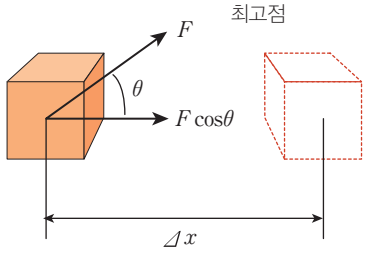
일의 개념과 밀접한 관계가 있는 것이 에너지의 개념이다. 에너지란 일할 수 있는 능력이다. 한 계가 다른 계에 일을 하면 두 계 사이는 에너지의 이동이 일어난다. 예를 들면, 썰매를 끌 때 썰매에 한 일의 일부는 썰매의 운동 에너지로 바뀌고 일부는 썰매와 눈 사이의 마찰에 의한 열 에너지로 변한다. 동시에 썰매를 끈 사람 몸의 내부 화학 에너지는 썰매를 끈 만큼 줄어든다.

1. 일정한 힘이 한 일

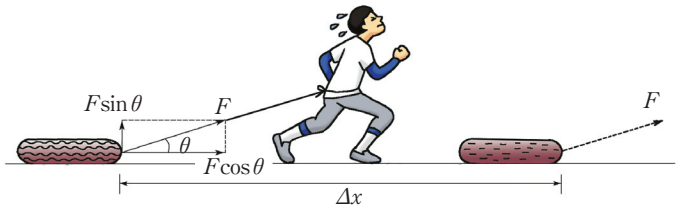
한 물체에 작용한 힘이 한 일은 힘과 힘이 작용한 점의 변위의 곱으로 정의된다. 만일 힘과 변위의 방향이 다르다면, 변위 방향의 힘의 성분만이 일을 한 것이다. 먼저 일차원상에서 일정한 힘과 운동의 특수한 경우를 생각하자. 그리고 물체를 하나의 입자로 간주할 수 있다고 가정하자. 이는 물체의 변형과 같은 복잡성을 제거하기 위한 것이며, 변형이 있는 경우에는 물체의 서로 다른 부분의 변위는 다르다. 그러나 입자인 경우는 힘의 작용점의 변위는 입자의 변위와 같다. 식 (I. 5-1)과 같이 힘 $\vec{F}$가 변위 Δx와 θ의 각을 이루고 있다면, 일은

$$W = F\cos\theta\Delta x = F_x\Delta x \qquad \text{(I. 5-1)}$$

이다. 일은 스칼라량이므로 Δx와 F_x가 같은 부호이면 양수이고 서로 반대 부호라면 음수이다. 이와 같이 일의 차원은 힘과 거리의 곱이다. SI 단위에서 일과 에너지의 단위는 줄(J)이며, N · m 이다.



[그림 I-33] 일정한 힘이 한 일



[그림 Ⅰ-34] 타이어를 끌고 있는 소년

[그림 Ⅰ-34]는 한 소년이 운동장에서 수평 방향과 θ의 각도로 힘 $\vec{F}$를 작용하여 타이어를 끌고 있는 것을 나타낸 것이다. 마찰력은 무시할 수 있다고 가정하자. 그러면 타이어에 작용하는 다른 힘들은 그의 무게 $m\vec{g}$와 수직항력 $\vec{\mathrm{N}}$이다. 중력이 한 일은 이 힘이 운동 방향과 수직이므로 0이다. 마찬가지로 항력도 운동 방향과 직각이므로 일을 한 것이 아니다. 타이어에 한 일의 유일한 힘은 수평력 $F\cos\theta$이다. 한 입자에 여러 종류의 힘이 작용하여 일을 할 때, 총 일은 각각의 힘이 한 일의 합으로써 계산할 수 있다. 이는 모든 힘을 더하여 총 알짜힘을 구하고 이 힘이 한 일을 계산함으로 같은 결과를 얻을 수 있다. 이것은 입자의 변위와 각 힘의 작용점의 변위가 같기 때문에 사실인 것이다. 이 경우에 타이어는 수직방향으로 가속되지 않았기 때문에 위로 작용하는 수직력 $F\sin\theta + \mathrm{N}$은 중력 mg와 같아야 한다. 이와 같이 타이어에 작용하는 알짜힘은 수평력 $F\cos\theta$이다.

한 입자에 한 총 일과 입자의 처음과 나중의 속력 사이에는 중요한 관계가 있다. 만일 F_x가 입자에 작용한 알짜 힘이라면 뉴턴의 제2법칙에서

$$F_x = ma_x$$

이다. 일정한 힘에 대해서는 가속도가 일정함으로, 등가속도 운동 공식을 이용하면 물체가 이동한 거리와 처음과 나중 속력 사이의 관계를 얻을 수 있다. 만일 초기 속력이 v_1이고 최종 속력이 v_2라면

$$v_2^2 = v_1^2 + 2a_x\Delta x$$

이다. 입자에 한 총 일은 알짜 힘이 한 일과 같으므로

$$W_{net} = F_x\Delta x = ma_x\Delta x$$

이다. $a_x\Delta x$ 대신에 $\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)$을 대입하면,

$$W_{net} = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \qquad \text{(I. 5-2)}$$

을 얻는다. 여기서 물리량 $\frac{1}{2}mv^2$은 입자의 운동 에너지 K라 한다. 이것은 스칼라량이며 입자의 질량과 속력에 의존한다.

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

식 (I. 5-2)의 우변 물리량은 입자의 운동 에너지의 변화, 즉 운동 구간의 최종상태의 운동 에너지 $\frac{1}{2}mv_2^2$에서 처음 상태의 운동 에너지 $\frac{1}{2}mv_1^2$을 뺀 것이다. 그러므로 입자에 한 총 일은 입자의 운동 에너지의 변화와 같다.

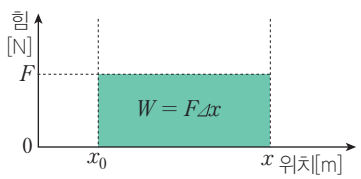
$$W_{net} = \Delta K = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \qquad \text{(I. 5-3)}$$

이 결과를 일-에너지 정리라고 한다. 이것은 알짜 힘이 일정하거나 그렇지 않거나 항상 성립한다.

물체가 외부로부터 일을 받으면($W > 0$) 운동 에너지가 증가하여 속력이 빨라지고, 외부에 일을 해 주면($W < 0$) 운동 에너지가 감소하여 속력은 느려진다. 이것은 마찰력과 같이 운동을 방해하는 힘이 작용하는 경우이다. 따라서 일은 운동 에너지 변화의 원인이 된다.

2. 변하는 힘이 한 일

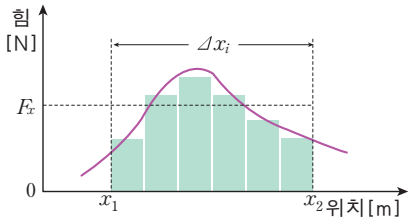
일정한 힘에 의하여 한 일은 $W = F_x \Delta x$로 정의하였다. [그림 I-35]는 일정한 힘 F_x를 위치 x의 함수로 그린 것이다. 변위가 Δx일 때, 입자에 한 일은 힘 위치 곡선 아래에서 면적으로 표시되며, 그림에서는 그늘진 음영으로 표시하였다. 그러나 많은 힘들은 본질적으로 일정하지 않으며 위치에 따라 변한다. 예를 들면, 용수철을 잡아 당기면, 용수철에 의하여 작용하는 힘은 용수철의 늘어난 길이에 비례한다. 마찬가지로 우주선에 작용하는 지구의 중력은 지구의 중심과 우주



[그림 I-35] **일정한 힘이 작용할 때의 힘과 위치 관계 그래프**

선 사이의 거리의 제곱에 반비례한다. 그러므로 위치에 따라 변하는 힘이 작용하는 경우에는 일의 정의에 따라 일은 힘–위치 곡선 아래의 면적으로 표시할 수 있다.

[그림 I–36]은 위치 x의 함수로 변하는 힘 F_x를 나타낸 것이다. 그림에서 우리는 x_1과 x_2 사이의 간격을 보다 작은 간격 Δx_i의 집합으로 나누었다. 만일 각 간격이 충분히 작으면 변하는 힘을 근사적으로 일련의 일정한 힘들로 볼 수 있다. 각 구간에서 일정한 힘이 한 일은 힘 아래의 직사각형의 면적이다. 이들 직사각형 면적의 합이 변하는 힘을 근사적으로 계산한 일연의 일정한 힘이 한 일의 합이다. 그림과 같이 이 면적은 근사적으로 곡선 아래의 면적과 같다. 무한히 작은 Δx_i의 극한에서는 직사각형의 면적들의 합은 곡선 아래의 면적과 같다. 그러므로 변하는 힘이 한 일은 그 힘에 대한 F_x–x 곡선 아래의 면적으로 정의할 수 있다.



[그림 I–36] **변하는 힘이 작용할 때 힘과 위치 관계 그래프**

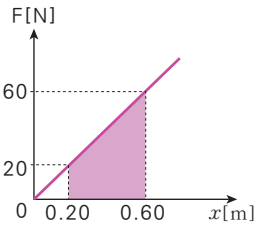
$$W = \lim_{\Delta x_i \to 0} F_x \Delta x_i \quad = F_x \text{ 대 } x \text{ 곡선 아래의 면적}$$

이것의 극한은 F_x의 x에 대한 적분이다. 그러므로 변하는 힘 F_x가 작용하여 한 입자가 x_1에서 x_2까지 이동하였을 때 한 일은

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F_x \, dx = F_x \text{ 대 } x \text{ 곡선 아래의 면적} \qquad \text{(I. 5–4)}$$

이다. 이제 우리는 위치에 따라 변하는 힘이라도 입자에 한 총 일은 입자의 운동 에너지의 변화와 같다는 것을 보이겠다. [그림 I–36]에서 각 직사각형 면적에 대하여 힘은 일정하므로 그 구간에서 일정한 힘이 한 일은 그 구간에서의 운동 에너지의 변화와 같다. 전 구간에 대하여 이것을 합하면, 운동 에너지의 변화량의 합이 되며, 이것이 전 구간 x_1에서 x_2까지의 총 또는 알짜 운동 에너지의 변화량이다. 그러므로 곡선 아래의 총 면적은 각 구간 Δx_i에 대한 운동 에너지의 변화량의 합과 같고 달리 말하면 전 구간에 대한 운동 에너지의 총 변화량, $\Delta K = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$과 같다. 이 결과는 식 (I. 5–3)과 같고 W_{net}는 식 (I. 5–4)의 적분으로 해석할 수 있다.

예제 위치에 따라 그림과 같이 변하는 힘이 직선 상에서 운동하는 물체에 작용하여 위치 x =0.20 m에서 x = 0.60 m까지 물체를 이동시켰다. 힘이 물체에 한 일은 얼마인가?



풀이 힘-위치 그래프에서 두 위치 x = 0.20 m, x = 0.60 m에서 힘은 각각 20 N, 60 N이므로, 그래프와 좌표축(x축)으로 둘러싸인 두 점 사이의 사다리꼴의 넓이는

$$\frac{1}{2} \times (20\ \text{N} + 60\ \text{N}) \times (0.40\ \text{m}) = 16\ \text{N} \cdot \text{m} = 16\ \text{J}$$

이다. 곧, 물체에 힘이 한 일은 16 J이다.

3. 위치 에너지

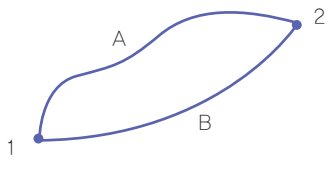
둘이나 그 이상의 입자로 구성되어 있는 계에서 계의 일부분에 작용한 힘이 한 일을 계산할 때 힘의 작용점의 변위가 계 전체의 변위와 항상 같은 것은 아니기 때문에 특별히 주의를 하여야 한다. 사실, 계의 다른 부분은 변위가 다를 수도 있다.

많은 경위 계의 한 일이 계의 운동 에너지의 변화로 나타나는 것이 아니라 위치 에너지로 저장된다. 질량 m인 스키 선수가 스키 승강기를 타고 언덕 위로 올라갔다고 생각하자. 높이 h에서 스키 선수의 속력의 증가는 무시해도 좋다. 승강기가 스키 선수에게 한 일은 mgh이며, 승강기의 경사각과는 무관하다. 스키 선수의 운동 에너지는 변화가 없다. 왜냐하면, 지구의 중력이 스키 선수에게 한 일의 양이 $-mgh$이므로 스키 선수에 작용한 총 일이 0이기 때문이다. 이제 승강기를 제외하고 지구와 스키 선수로 구성된 두 입자계를 생각하자. 중력이 스키 선수에 한 일은 이 계의 내부적인 것이다. 이 계에 한 총 일은 승강기가 한 일 mgh이며 이것이 계의 외부적인 것이라 생각할 수 있다. 이 일이 지구-스키 선수계의 위치 에너지 mgh로 저장된 것이다.

스키 선수가 마찰이 없는 경사면을 스키를 타고 내려올 때, 이 위치 에너지가 계의 운동 에너지로 전환되며, 지구의 운동은 무시할 수 있으므로 이것이 곧 스키 선수의 운동 에너지이다. 스키 선수가 승강기를 타고 언덕의 꼭대기를 올라갈 때 중력이 한 일은 음수이고 계의 위치 에너지는 증가한다. 반대로 스키 선수가 스키를 타고 언덕을 내려올 때는 중력이 한 일은 양

수이고 계의 위치 에너지는 감소한다는 것에 유의하자. 스키 선수가 언덕의 꼭대기까지 올라갔다가 다시 원래의 위치로 되돌아올 때 중력이 한 총 일은 0이다. 중력은 보존력이라고 한다. 일반적으로 입자에 힘이 작용하여 폐경로를 따라 이동하여 처음 위치로 되돌아올 때 입자에 한 총 일이 0이라면 힘은 보존력이다. 이를 다르게 표현하면, 입자에 작용한 보존력이 한 일은 입자가 한 지점에서 다른 지점으로 움직여 간 그 경로에 무관하다.

[그림 I-37]은 지점 1과 지점 2를 연결하는 두 가지 경로를 나타낸 것이다. 만일 보존력이 작용하여 입자가 어떤 경로를 따라 1지점에서 2지점까지 움직여서 한 일을 W라고 하면, 총 왕복 운동한 일이 0이 되어야 하므로, 입자가 임의의 경로를 따라 되돌아올 때의 일은 $-W$가 되어야 한다. 그러므로 보존력이 입자에 한 일은 경로에 무관하고, 오직 양 끝 1과 2지점에 의존한다고 할 수 있다. 예를 들면, 스키 선수가 높이 h인 언덕을 내려올 때 중력이 스키 선수에게 한 일은 언덕의 경사각과 무관하게 mgh이다.



[그림 I-37] **공간에서 지점 1과 2을 연결하는 경로**

브라질에 있는 금광이다. 광부가 밑바닥으로 내려올 때 지구가 광부에 한 일은 그가 어느 사다리를 이용하는지에 관계없이 같다.

보존력과 관련된 위치 에너지 함수 U를 정의하기 위하여 이러한 성질을 이용할 수 있다. 보존력이 한 일은 위치 에너지 함수의 감소로 정의한다. 즉,

$$W = \int \vec{F} \cdot \vec{ds} = -\Delta U$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -W = -\int_{s_1}^{s_2} \vec{F} \cdot \vec{ds} \qquad \text{(I. 5-5)}$$

이다. 무한소 변위에 대해서는

$$dU = -\vec{F} \cdot \vec{ds} \qquad \text{(I. 5-6)}$$

이다. 한 계의 위치 에너지 함수는 그 계의 구성원들의 배열 상태에 의존한다. 지구-스키 선수 계는 지구의 중심에서 스키 선수까지의 거리에 의존한다. 그러나 어떤 특별한 배열 상태를 가진 한 계의 함수 U의 값은 단지 위치 에너지의 변화량만 정의되기 때문에 정의에 의하여 특별히 구별되는 것이 아니다. 우리는 자유로이 편리한 지점을 U가 0이 되는 기준점으로 선택할 수 있다. 그러면 어떤 다른 지점의 위치 에너지는 그 지점의 위치 에너지와 기준점의 그것과 차이가 있다. 예를 들면, 만일 지구-스키 선

수 계의 중력 위치 에너지를 스키 선수가 언덕의 밑바닥에 있을 때 0으로 선택하였다면, 스키 선수가 그 위치에서 높이 h만큼 위에 있을 때의 값은 mgh이다. 또는 스키 선수가 바다 수면에 있을 때 위치 에너지를 0으로 선택할 수 있다. 이 경우 다른 임의의 위치에서의 값은 mgy이며 y는 바다 수면으로부터 측정한 높이이다.

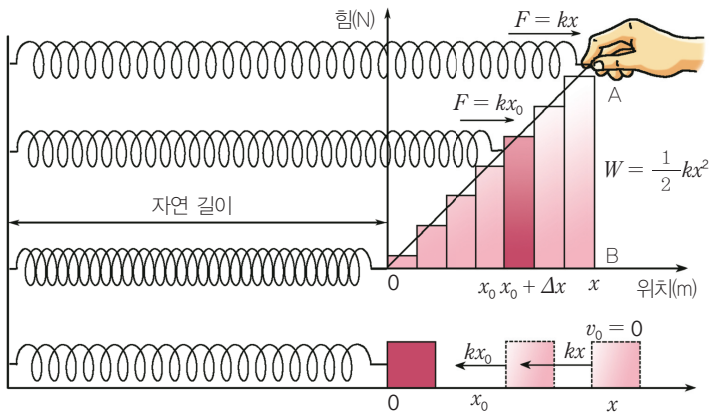
예제 질량 0.35 kg인 병이 마루에서 1.75 m 높이인 탁자로부터 정지 상태에서 떨어졌다. 마루와 관련하여 병–지구 계의 원래의 위치 에너지와 마루와 부딪치기 직전의 운동 에너지를 구하시오. (단, 중력 가속도는 9.81 m/s^{2}이다.)

풀이 병이 마루위에 있을 때 병–지구 계의 위치 에너지를 0으로 보면, 병이 y = 1.75 m에 있을 때 위치 에너지는

$U = mgy = (0.35\ \text{kg})(9.81\ \text{m/s}^2)(1.75\text{m}) = 6.01\ \text{J}$

이다. 병이 떨어지므로 지구가 병에 일을 한다. 따라서 일–에너지 정리에 의해 마루와 부딪치기 직전의 운동 에너지는 원래의 위치 에너지와 같다.

이번에는 계가 가질 수 있는 다른 형태의 위치 에너지를 생각해 보자. [그림 I-38]은 용수철과 물체로 구성된 계를 나타내고 있다.



[그림 I-38] 탄성력에 의한 위치 에너지

자연 길이 상태인 $x = 0$에 마찰이 없는 탁자 위에 물체가 정지하여 있다. 용수철이 늘어날 때 용수철이 작용하는 힘과 크기가 같고 방향이 반대인 힘을 천천히 물체에 작용하여 용수철을 늘리자. 용수철이 물체에 작용하는 힘 $F_s = -kx$이므로, 가속도 없이 물체를 밀기 위해서는 크기가 같고 방향이 반대인 힘 $F_{app} = +kx$을 작용하여야 한다. 작용력이 한 일은

$$W_{app} = \int_o^x kx\,dx = \frac{1}{2}kx^2$$

이다. 용수철이 물체에 작용하는 힘은 변위 방향과 반대이므로, 물체에 한 일은 음수이다. 즉

$$W_s = \int_o^x -kx\,dx = -\frac{1}{2}kx^2$$

이다. 물체가 한 총 일이 0이므로 운동 에너지는 변화가 없다.

물체–용수철 계에 작용하는 총 일은 W_{app}이다. 이 일이 물체–용수철 계의 위치 에너지로 저장된다. 물체를 놓으면 용수철은 물체에 양수의 일을 하게 되어 계의 위치 에너지가 운동 에너지로 전환된다. 왕복 운동할 때, 즉 물체가 원래의 위치에서 어떤 위치 x로 갔다가 다시 돌아올 때, 용수철이 물체에 한 일은 0이다. 그러므로 용수철의 힘은 보존력이다.

식 (I. 5–6)으로부터 이 힘과 연관된 위치 에너지를 구할 수 있다.

$$dU = -\vec{F}\cdot\vec{ds} = -F_x\,dx = -(-kx)dx = +kx\,dx$$

양변을 적분하면,

$$U = \frac{1}{2}kx^2 + U_0$$

이다. 여기서 U_0는 $x = 0$일 때, 즉 용수철이 자연 길이일 때의 위치 에너지이다. U_0를 0으로 하면,

$$U = \frac{1}{2}kx^2 \qquad \text{(I. 5–7)}$$

이다.

모든 힘이 보존력은 아니다. 비 보존력의 한 예로 사람에 의하여 밀리고 당겨지는 힘과 같은 것이다. 거친 수평 탁자 위에 놓여 있는 상자를 생각하자. 상자를 밀어 어떤 폐경로를 따라 상자가 최종적으로 처음 원래 위치에 돌아왔다고 가정하자. 사람이 한 일은 일반적으로 0이 아니다. 그것은 얼마나 큰 힘을 상자에 작용하느냐에 달려 있다. 상자가 한 바퀴 왕복 운동할 때 이와 같은 작용력이 한 일은 0이 아니기 때문에 이 힘에 대한 위치 에너지 함수를 정의할 수 없다. 운동 마찰력이 상자에 한 일도 역시 0이 아니다. 운동 마찰력은 항상 운동 방향과 반대이므로 마찰력에 의해 한 바퀴 한 일은 음수가 된다. 그러므로 운동 마찰력은 보존력이 아니며, 이에 대한 위치 에너지 함수를 정의할 수 없다.

예제 마찰이 없는 수평면에서 용수철 상수 k인 가벼운 용수철의 양 끝에 질량이 각각 m, M인 물체 A, B를 매단 다음, 물체 A를 일정한 힘 F로 밀었다.

1. 용수철이 압축되는 길이는 얼마인가?
2. 용수철에 저장된 탄성 위치 에너지는 얼마인가?

풀이 1. 두 물체의 가속도를 a라고 하면 $a = \dfrac{F}{m+M}$

물체 B에 작용하는 힘 f는 $f = Ma = F\dfrac{M}{m+M}$

용수철에 작용하는 힘이 물체 B에 작용하므로 용수철이 압축되는 길이 x는

$$f = kx \quad \therefore x = \frac{f}{k} = \frac{FM}{k(m+M)}$$

2. 탄성 에너지는 $\dfrac{1}{2}kx^2 = \dfrac{(FM)^2}{2k(m+M)^2}$

4. 역학적 에너지 보존

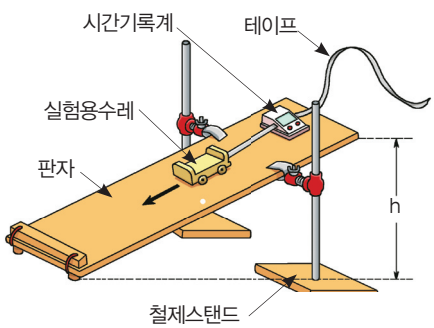
중력만을 받으면서 물체가 낙하할 때, 기준면으로부터 높이는 점점 낮아지고 물체의 속력은 점점 빨라지므로, 중력 위치 에너지는 감소하고 운동 에너지는 증가한다. 물체의 운동 에너지와 위치 에너지는 어떻게 될까?

실험 빗면을 내려오는 수레의 역학적 에너지

준비물 실험용 수레, 시간 기록계, 종이 테이프, 활주대, 스탠드, 접착용 테이프, 추, C형 클램프, 나무 도막

과정

1. 그림과 같이 실험 장치를 만들고 빗면의 길이와 높이를 구한다.
2. 실험용 수레에 종이 테이프를 붙이고 테이프를 시간 기록계에 끼운다.
3. 시간 기록계의 스위치를 넣고 실험용 수레를 빗면 위에서 가만히 놓아 내려가게 하고 운동을 기록한다.



4. 종이 테이프의 타점을 운동 시작 근처(A), 중간 근처(B), 운동의 끝 근처(C)의

세 점을 잡고, 각 점에서의 수레의 높이와 속력을 각각 구하여 표를 완성해 보자.

타점 위치	A	B	C
h(m)			
v(m/s)			
Ek(J)			
Ev(J)			
$Ek + Ev$(J)			

정리

1. 수레의 운동 에너지와 중력 위치 에너지는 각각 어떻게 변했는가?
2. 수레의 운동 에너지와 중력 위치 에너지의 합은 변하는가?

식 (I. 5-5)의 위치 에너지 함수의 정의에서 음수 부호는 보존력이 입자에 한 일이 계의 위치 에너지의 감소와 같도록 도입한 것이다. 지구-스키 선수 계에서와 같이 물체들 중 하나에만 일이 하여진 계를 생각하자. 만일 보존력이 물체에 한 유일한 힘이라면, 이 힘이 한 일은 계의 위치 에너지의 감소와 같고, 또한 그 물체의 운동 에너지 증가와 같다.

$$W = \int \vec{F} \cdot \vec{ds} = -\Delta U = +\Delta K \qquad \text{(I. 5-8)}$$

$$\Delta K + \Delta U = \Delta(K + U) = 0 \qquad \text{(I. 5-9)}$$

계의 운동 에너지와 위치 에너지의 합은 총 역학적 에너지 E라고 한다. 즉,

$$E = K + U \qquad \text{(I. 5-10)}$$

이다. 만일 보존력만이 일을 한다면 식 (I. 5-9)는 총 역학적 에너지의 변화는 0임을 말해 주고 있다. 이와 같이 물체가 운동하는 동안 총 역학적 에너지는 일정하다. 즉,

$$E = K + U = \text{일정} \qquad \text{(I. 5-11)}$$

하다. 이것을 역학적 에너지 보존의 법칙이라고 한다.

예제 용수철 상수가 100 N/m인 용수철에 질량 1 kg인 물체를 연직으로 매달아 추

를 아래로 잡아 당겼다가 놓았더니 상하 거리가 30 cm P, Q사이를 단진동하였다. (단, 중력 가속도는 10 m/s^{2}으로 한다.)

1. 이 물체의 최대 속력은 얼마인가?

2. 점 P에서 용수철의 탄성 에너지는 얼마인가?

풀이

1. 역학적 에너지보존 법칙에서 $\frac{1}{2}k(x+A)^2 = \frac{1}{2}kx^2 + mgA + \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow 100 \times 0.15^2 = v^2 \rightarrow \therefore v = 1.5(\mathrm{m/s})$

2. 진폭(A)은 15 cm, 용수철의 자연 길이로부터 평형점까지의 거리(x)가 10 cm이므로, 점 P에서 용수철은 15 − 10 = 5 cm 만큼 압축되므로(J)

$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} \times 100 \times 0.05^2 = \frac{1}{8}(\mathrm{J})$

5. 일반화 된 일–에너지 정리

보존력과 비보존력이 모두 작용하여 일을 할 때, 계의 총 역학적 에너지는 상수가 아니다. 물체들 중 하나에 일을 하는 계에 대하여 생각해 보자. 그 물체에 비 보존력 $\vec{F}_{nc}$와 보존력 $\vec{F}$가 작용한다고 하면, 알짜 힘은 $\vec{F}_{net} = \vec{F}_{nc} + \vec{F}$이다. 일–에너지 정리에 의하면 이들 힘이 한 총 일은 그 물체의 운동 에너지의 변화와 같다. 그러므로

$$W_{net} = \int \vec{F}_{nc} \cdot d\vec{s} + \int \vec{F} \cdot d\vec{s} = W_{nc} + W = \Delta K \qquad \text{(I. 5–12)}$$

이며, 여기서 W_{nc}는 비보존력이 한 일이며, W는 힘$\vec{F}$에 의하여 한 일이다. 보존력에 대하여 한 일을 식 (I. 5–5)를 이용하여 정리하면

$$W_{nc} - \Delta U = \Delta K$$
$$W_{nc} = \Delta U + \Delta K = \Delta E \qquad \text{(I. 5–13)}$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 $E = K + U$는 계의 총 역학적 에너지이다. 식 (I. 5–13)은 일반화된 일–에너지 정리이다. 즉, 한 입자에 작용하는 비보존력이 한 일은 총 역학적 에너지의 변화와 같다. 비보존력이 한 일이 없을 때에는 총 역학적 에너지는 보존되고 그러므로 그것은 상수이다.

예제 5 kg인 썰매가 초속도 4 m/s로 미끄러지고 있다. 만일 썰매와 눈 사이의 마찰계수가 0.2라면 정지할 때까지 얼마나 멀리 미끄러지겠는가?(단, 중력 가속도는 10 m/s^{2}이다.)

풀이 계의 처음 역학적 에너지는 $\frac{1}{2} \times 5\ \text{kg} \times (4\ \text{m/s})^2 = 40\ \text{J}$이고, 총 역학적 에너지 변화량은 -40 J이다. 일을 한 유일한 힘은 운동 마찰의 비보존력이다. 마찰이 한 총 일은

$$W_{nc} = f\Delta x = \mu mg\Delta x = (0.2 \times 5\ \text{kg} \times 10\ \text{m/s}^2)\Delta x$$

이다. $\therefore \Delta x = \frac{-40\ \text{J}}{-10\ \text{N}} = 4(\text{m})$이다.

6. 일률

일률은 에너지가 한 계에서 다른 계로 변환되는 비율을 뜻한다. 순간 속도가 v인 한 물체를 생각해 보자. 짧은 시간 간격 dt 후 그 물체의 변위는 $ds = vdt$이다. 이 시간 간격 동안에 그 입자에 작용한 힘이 한 일은

$$dW = \vec{F} \cdot \vec{ds} = \vec{F} \cdot \vec{v}dt$$

이다. 힘이 한 일의 비율이 그 힘의 일률이므로

$$P = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

이다. SI단위로 일률은 1 J/s, 즉 watt(W)라고 한다. 1 J/s = 1 W이다.

일률을 일이나 에너지와 혼동해서는 안된다. 우리는 가정에서 사용한 전기나 가스 값을 지불할 때, 일률이 아니라 에너지에 대한 값을 지불하는 것이다. 보통 킬로와트-시에 따라 전기 요금을 청구받는데 1 kWh의 에너지는

$$1\ \text{kWh} = 10^3\ \text{W} \times 3600\ \text{s} = 3.6 \times 10^6\ \text{J}$$

이다. 1 kWh는 일률의 단위가 아니라 에너지의 단위이다.

연습문제

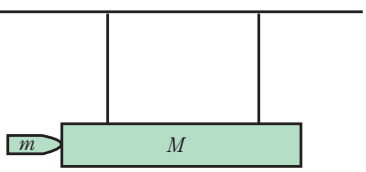
1. 고층 건물의 꼭대기에서 일을 하던 사람이 실수로 병을 떨어뜨렸다고 한다. 이 병이 건물의 꼭대기에서 최초의 한 층을 떨어지는 순간의 속력을 v라고 한다면, $2v$의 속력을 가질 때는 꼭대기에서 몇 층을 떨어질 때인가?

2. 연직으로 매달려 있는 가벼운 용수철의 아래 끝에 질량 m의 추를 달아 용수철이 자연 길이가 되도록 판자로 받치고 있다. 다음과 같은 경우 추가 내려가는 최하점을 구하라. 용수철의 힘 상수는 k이고, 중력 가속도는 g이다.

1) 판자를 천천히 내릴 때

2) 판자를 갑자기 뺄 때

3. 그림과 같이 천정에 매달아 놓은 질량 M인 나무 도막에 수평 방향에서 날아온 질량 m인 탄환이 박혀, 나무 도막이 높이 h만큼 올라갔다. (단, 중력 가속도는 g이다.)



1) 나무 도막의 최대 속력을 구하라.

2) 나무 도막에 박히기 직전 탄환의 속력을 구하라.

4. 질량 60 kg인 학생이 등교하여 1층에서부터 3층까지 계단을 올라갔다고 한다. 계단을 올라가는 동안 걸린 시간은 1분이고 한 층의 높이는 3 m라고 한다.(단, 중력 가속도는 10 m/s^2이다.)

1) 이 학생의 위치 에너지 증가량은 몇 J인가?

2) 이 학생이 계단을 올라가는 동안의 일률은 몇 W인가?

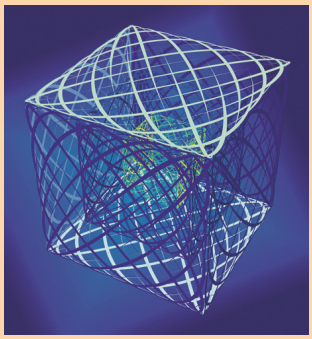
5. 수평면에서 용수철 상수가 k인

가벼운 용수철의 한쪽 끝을 고정시키고 다른 끝에 질량 m인 물체를 매단 다음, 용수철이 평형점으로부터 A만큼 압축되도록 물체를 밀었다가 놓았더니 물체는 용수철이 평형점으로부터 $\frac{2}{3}$A만큼 늘어난 위치까지 갔다가 방향을 바꾸어 운동하였다.(단, 중력 가속도는 g이다.)

1) 물체와 수평면 사이의 운동 마찰 계수를 구하라.

2) 용수철이 평형점으로부터 다시 압축되는 길이를 구하라.

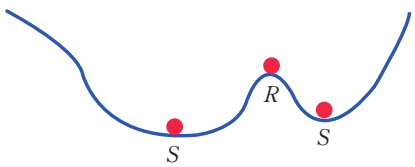
6 진동(Oscillatory Motion)



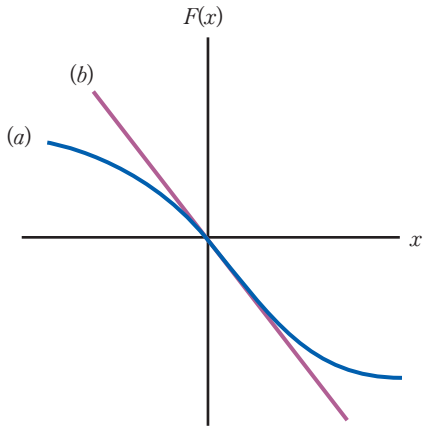
주기적으로 왕복 운동을 하는 모습은 주위에서 흔히 볼 수 있다. 옆의 그림은 2차원 조화진동에서 나타나는 Lissajous 곡선들을 형상화한 박스이다. 이러한 운동들은 평형점 근처에서의 요동에 의해 이루어진다. 특히 평형점에서 크게 벗어나지 않는 대부분의 진동 운동은 위치 함수가 조화 함수로 나타내어지는 단조화 진동으로 설명할 수 있고 모든 주기적인 운동은 여러 단조화 운동의 결합으로 나타낼 수 있다. 이 장에서는 진동 운동을 설명하는데 기본적인 단조화 운동에 대해 알아보자. 또한 평면상에서 이루어지는 진동 운동의 간단한 예의 하나인 단진자의 운동을 통해 진자의 등시성에 대해 알아보자.

1. 단조화 운동 (Simple Harmonic Motion)

운동 중 주기적으로 왕복 운동하는 것을 진동이라고 한다. 진동은 **안정된 평형점**(stable equilibrium) 근처에서 일어난다[그림 I-39]. 물체에 작용하는 힘이 물체를 평형점으로 되돌아오도록 작용할 경우 물체는 평형점 사이에서 왕복 운동을 하게 된다. 이처럼 평형점으로 돌아오도록 작용하는 힘을 **복원력**(restoring force)이라고 하고 복원력의 크기가 평형점에서 벗어난 변위에 비례할 때 **단조화 운동**(simple harmonic motion)이 일어난다. [그림 I-40]에서 보여 지는 것처럼 일반적으로 복원력의 크기가 변위에 비례할 필요는 없지만 많은 경우 평형점 근처에서 근사적으로 변위에 비례하는 복원력으로 간주할 수 있다. 즉 진폭이 크지 않은 진동 운동의 경우 단조화 운동으로 설명할 수 있다.

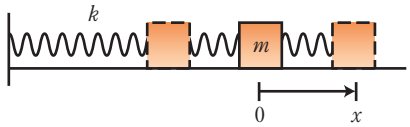


[그림 I-39] **안정한 평형점(S), 불안정한 평형점(R)**



[그림 Ⅰ-40] (a) 선형이 아닌 복원력 (b) 작은 진폭일 경우 직선인 복원력으로 근사할 수 있다.

1) 용수철에 매달린 물체의 운동



[그림 Ⅰ-41] 마찰이 없는 면 위에 놓인 용수철에 매달린 물체. 변위 x는 평형위치로부터 측정된 것이고 당겨지거나 눌려지는 것에 따라 양이나 음의 값이 될 수 있다.

단조화 운동을 하는 대표적인 예는 [그림 Ⅰ-41]과 같이 용수철에 매달린 물체의 운동이다. 물체가 평형위치로부터 x만큼 움직였을 때 용수철은 Hooke의 법칙에 의해 복원력

$$F_x = -kx \qquad \text{(Ⅰ. 6-1)}$$

를 가하게 된다. k는 용수철 상수이고, 음의 기호는 힘의 방향이 평형점으로부터의 변위 방향과 반대라는 것을 나타낸다. 뉴턴 제2법칙을 이용하여 운동 방정식을 세워보자.

$$F_x = -kx = ma = m\frac{d^2x}{dt^2} \qquad \text{(Ⅰ. 6-2)}$$

식 (Ⅰ. 6-2)를 정리하면

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \qquad \text{(Ⅰ. 6-3)}$$

로 쓸 수 있고, 여기서

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \text{(Ⅰ. 6-4)}$$

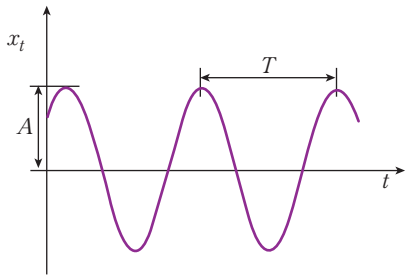
식 (Ⅰ. 6-5)를 식 (Ⅰ. 6-3)에 대입해 보면 방정식을 만족시키는 것을 쉽게 확인할 수 있다.

$\cos(\omega t+\phi)=\sin(\omega t+\phi+\frac{\pi}{2})$ 이므로 해를 사인함수로 표현해도 상관없다. 단지 $t=0$일 때의 값에 맞도록 ϕ 값이 달라진다.

이다. 식 (I. 6-3)의 해는

$$x = A\cos(\omega t + \phi) \qquad \text{(I. 6-5)}$$

이 된다. 즉 단조화 운동을 하는 물체의 위치 함수는 조화 함수로 주어진다. A는 **진폭**이라고 하고 평형점으로부터 최대 변위를 나타낸다.



[그림 Ⅰ-42] **단조화 운동의 x와 t의 그래프**

❖ **진동수의 단위**
헤르츠 (Hz) 1Hz = 1/s.

$\omega t + \phi$를 운동의 **위상**이라고 하고, **위상상수** ϕ는 $t = 0$일 때의 위치를 결정한다. 물체를 당겼다 놓으면 평형위치를 기준점으로 진동 운동을 한다.

물체가 한 번 진동하는 데 걸리는 시간을 **주기** T라고 한다. 단위시간에 진동하는 진동 개수를 **진동수** f라고 하고 주기의 역수로 주어진다.

$$f = \frac{1}{T} \qquad \text{(I. 6-6)}$$

❖ **각진동수의 단위**
rad/s, rev/s

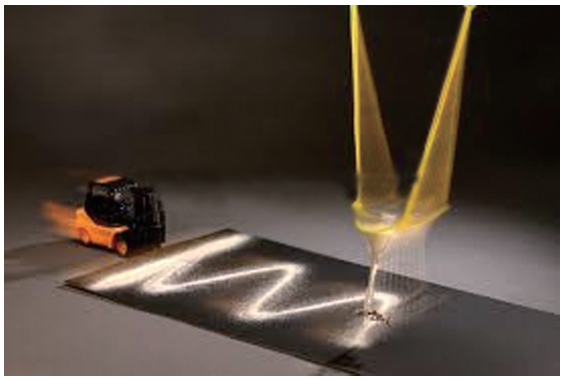
한 주기를 움직인 경우 위상이 2π만큼 증가하므로 $\omega(t + T) + \phi = \omega t + \phi + 2\pi$가 된다. 따라서

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \qquad \text{(I. 6-7)}$$

의 관계를 갖는다. 식 (I. 6-6)을 이용하면 $\omega = 2\pi f$가 되어 ω를 **각진동수**라고 한다. 즉, 용수철에 매달린 물체의 각진동수는 식 (I. 6-4)로 주어지고 주기는

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad \text{(I. 6-8)}$$

로 된다. 질량이 클수록 용수철 상수값이 작을 수록 주기가 커지는 것을 알 수 있다.



[그림 Ⅰ-43] **단조화 운동과 조화 함수**
모래를 떨어뜨리면서 진동하는 깔때기가 있다. 진동하는 면에 수직한 방향으로 판을 잡아당기면 모래가 사인 파형을 만드는 것을 볼 수 있다.

속도 함수는 식 (I. 6-5)를 한 번 미분하여 구할 수 있다. 즉,

$$v(t) = -\omega A\sin(\omega t + \phi) \qquad \text{(I. 6-8)}$$

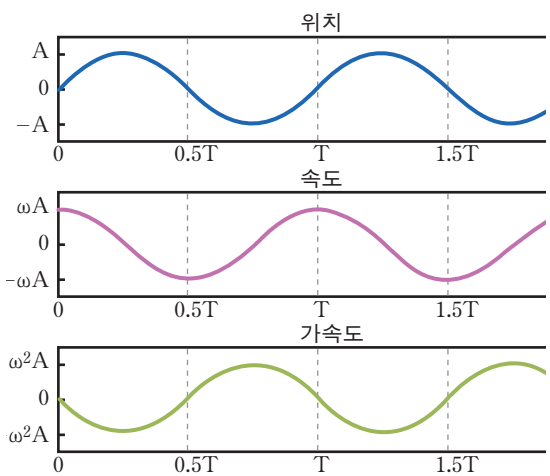
이 된다. 위치 함수와 90°의 위상차가 있음을 알 수 있고 속도 진폭은 ωA가 된다. 식 (I. 6-8)을 한 번 더 미분하면 가속도가 된다.

$$a(t) = -\omega^2 A\cos(\omega t + \phi) \qquad \text{(I. 6-9)}$$

가속도 함수는 위치 함수와는 180°위상차가 생기고 진폭이 $\omega^2 A$가 됨을 알 수 있다. 또한, 식 (I. 6-5)와 비교하면,

$$a(t) = -\omega^2 x(t) \qquad \text{(I. 6-10)}$$

가 된다. 단조화 운동에서 가속도의 방향은 평형점으로부터의 변위 방향과 항상 반대임을 알 수 있다. 식 (I. 6-2)로부터 용수철에 매달린 물체의 가속도가 $a = -\dfrac{k}{m}x = -\omega^2 x$가 됨을 쉽게 확인할 수 있다. [그림 I-44]는 시간에 대한 위치 x, 속도 v, 가속도 a의 그래프를 보여준다.



[그림 Ⅰ-44] **시간의 함수로 나타낸 위치 x, 속도 v, 가속도 a의 그래프**

2. 단조화 운동의 에너지

용수철에 매달린 물체가 진동할 때 마찰이 없다면 물체–용수철 계의 역학적 에너지는 보존되고 계의 운동 에너지와 위치 에너지는 시간에 따라 변하게 된다. 탄성 위치 에너지는

$$U = \frac{1}{2}kx^2 \qquad \text{(I. 6–11)}$$

로 주어지고, 속력 v로 움직일 때 질량 m인 물체의 운동 에너지는

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \qquad \text{(I. 6–12)}$$

이다. 역학적 에너지는 운동 에너지와 위치 에너지의 합으로 정의되므로

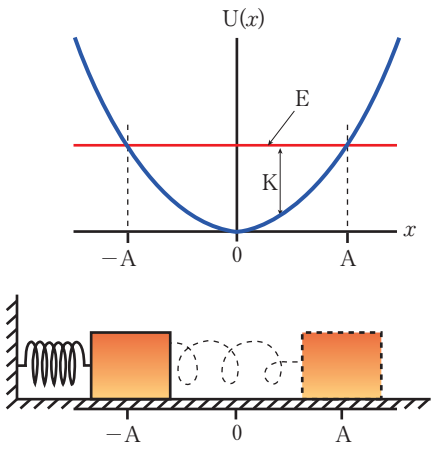
$$E = K + U = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 \qquad \text{(I. 6–13)}$$

이 된다. 위치가 $x=A$로 최대일 때 속력은 0이므로 역학적 에너지는

$$E = \frac{1}{2}kA^2 \qquad \text{(I. 6–14)}$$

이 된다. 즉,

단조화 운동에서 역학적 에너지는 진폭의 제곱에 비례한다.

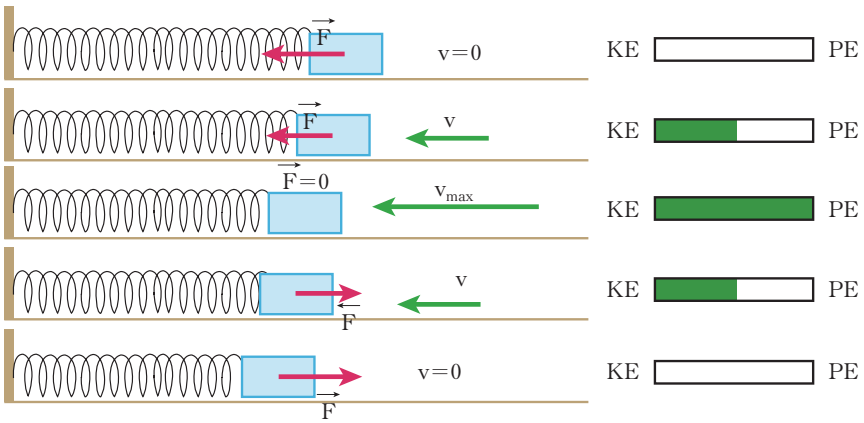


[그림 I–45] **용수철에 매달린 물체의 위치 에너지**

[그림 I–45]는 위치 에너지 U를 x의 함수로 그린 것이다. 이 곡선은 평형위치에서 최소값을 갖는 포물선이다. $x = \pm A$에서 역학적 에너지는 위치 에너지와 같고 운동에너지는 0이다. 운동 에너지의 최소값은 0이므로 위치 에너지가 역학적 에너지보다 클 수 없다. 따라서 운동은 $-A \leqq x \leqq A$ 영역에서만 가능하고 각 위치에서 운동에너지는 $K = E - U$가 된다.

[그림 I–46]은 반주기 동안의 물체의 운동과 운동 에너지와 위치 에너지 전환을 나타낸 그림이다. 최대 위치 에서 운동을 시작하였다면 역학적 에너지는 위치 에너지와 같다. 물체가 평형점을 향해 움직임에 따라 운동 에너지는 증가하고 위치 에너지는 감소한다. 평형점에서의 속

력은 최대가 되고 위치 에너지는 0이 되어 이 때 운동 에너지는 역학적 에너지가 된다. 물체가 평형점을 지나 압축되면서 운동 에너지는 감소하고 위치 에너지는 증가하여 최소 위치에서 운동 에너지는 다시 0이 되고 위치 에너지는 최대가 된다. 이 과정에서 역학적 에너지는 항상 일정하다.



[그림 Ⅰ-46] 반주기 동안의 용수철에 매달린 물체의 운동과 에너지 전환

위치와 속력에 대한 식 (I. 6-5)와 (I. 6-8)을 이용하여 운동의 모든 순간에 역학적 에너지가 일정함을 증명해보자. 식 (I. 6-11)에 식 (I. 6-5)를 대입하면 위치 에너지는

$$U(t) = \frac{1}{2}kA^2\cos^2(\omega t + \phi) \qquad \text{(I. 6-15)}$$

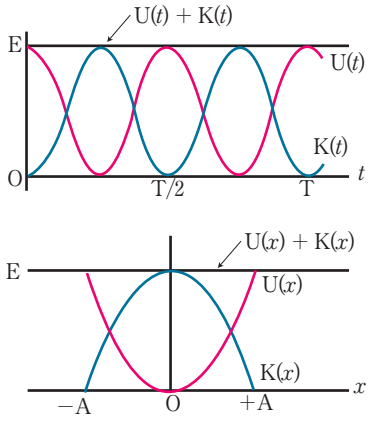
가 되고 식 (6-8)을 식 (6-12)에 대입하면 운동 에너지는

$$K(t) = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2\sin^2(\omega t + \phi) = \frac{1}{2}kA^2\sin^2(\omega t + \phi) \qquad \text{(I. 6-16)}$$

가 된다. 따라서 역학적 에너지는

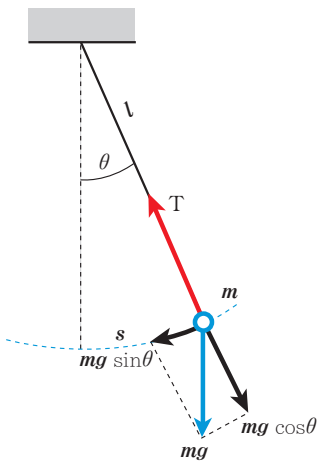
$$E(t) = \frac{1}{2}kA^2 \qquad \text{(I. 6-17)}$$

이 된다. 즉 시간에 상관없이 진폭이 결정되면 항상 일정한 역학적 에너지를 갖는 것을 알 수 있다. [그림 I-47]은 각각 시간과 위치에 대한 에너지들을 나타낸 것이다. 시간과 위치에 따라 운동 에너지와 위치 에너지의 값은 변하지만 역학적 에너지는 항상 일정한 것을 알 수 있다.



[그림 Ⅰ-47] (a) 시간에 대한 에너지 (b) 위치에 따른 에너지

3. 단진자 (simple pendulum)



[그림 Ⅰ-48] 단진자

단진자에 의한 진동운동은 단조화 진동을 설명하기 위한 간단한 예 중 하나이다. **단진자**는 질량을 무시할 수 있는 길이 l의 실에 질량 m인 물체가 매달려 평면상에서 진동 운동 할 수 있는 진자이다. [그림 Ⅰ-48]은 단진자에 미치는 힘들이 표시되어 있다. s를 호의 길이라고 하면 $s = l\theta$가 된다. 접선 방향으로 작용하는 힘은 $mg\sin\theta$

이므로 뉴턴 제2법칙에 의하면 $-mg\sin\theta = m\dfrac{d^2s}{dt^2}$ 이 된다.

l은 일정하고

$$\omega^2 = g/l \qquad \text{(Ⅰ. 6-18)}$$

이라고 하면, 운동 방정식은

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\sin\theta = 0 \qquad \text{(Ⅰ. 6-19)}$$

이 된다. 진폭이 작아 $\sin\theta \approx \theta$ 로 근사할 수 있다면 식 (Ⅰ. 6-19)는

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\theta = 0 \qquad \text{(Ⅰ. 6-20)}$$

이 된다. 이것은 식 (Ⅰ. 6-3)과 수학적으로 동일한 식으로 해는

$$\theta(t) = A\cos(\omega t + \phi) \qquad \text{(I. 6-21)}$$

로 주어지는 단조화 운동을 하는 것을 알 수 있다. 식 (I. 6-18)을 이용하면 단진자의 주기는

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad \text{(I. 6-22)}$$

이 된다. 길이가 길어짐에 따라 주기가 길어짐을 알 수 있고 질량과는 상관없는데 이것은 용수철에 매달린 물체와 달리 복원력이 질량에 비례하여 가속도가 질량과 무관하기 때문이다. 또한 진폭에 상관없이 주기가 일정한 것을 알 수 있다. 이것을 **진자의 등시성** 이라고한다.

[그림 I-49] 물체의 고속 회전 상태를 관찰하는 장치를 이용하여 본 단진자의 운동. 바닥부분에서 더 빠르게 움직이는 것을 알 수 있다.

실험 진자의 주기 측정

준비물 초시계, 스탠드, 질량이 다른 추 5개, 클램프, 자, 실 등.

과정

1. 실의 길이에 따라 추가 왕복하는데 걸리는 시간이 어떻게 달라지는지 알아보자. 실의 길이를 변화시켜 가며 주기를 측정해 보자.

❖ 실의 길이를 변화시켜 가며 주기를 측정 할 때, 변화시키지 않아야 할 것에는 어떤 것이 있는가?

실의 길이(cm)		25	50	75	100
주기(T)	1회				
	2회				
	3회				
	평균				

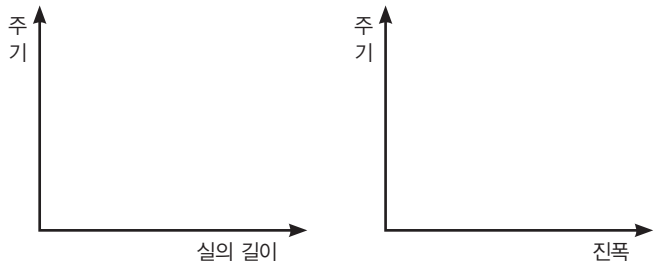
2. 진폭을 변화시켜 가며 주기를 측정해 보자.

❖ 진폭을 변화시켜 가면서 주기를 측정하자. 이때 변화시키지 않아야 할 것에는 어떤 것이 있는가?

진폭(cm)		10	20	30	40	50
주기(T)	1회					
	2회					
	3회					
	평균					

❖ 진폭에 상관없이 주기가 일정한 각도가 대략 얼마정도 되는 지 확인해 보자. 진폭이 40° 이상인 경우 단조화 운동을 할 때의 주기와 어는 정도 차이가 나는지 확인해 보자.

3. 진자의 주기와 실의 길이, 주기와 진폭의 관계를 그래프로 나타내어 보자.



정리하기

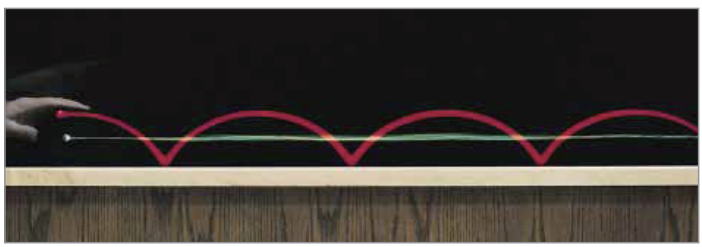
1. 추의 질량이 변화하면 왕복시간은 어떻게 달라지는가?
2. 실의 길이가 변화하면 추가 왕복하는데 걸리는 시간은 어떻게 달라지는가?
3. 진폭이 변화하면 주기는 어떻게 달라지는가?

진폭이 작지 않은 경우 주기는 진폭에 관계된다. 진폭이 커질수록 식 (I. 6-23)과 같이 주기가 늘어난다.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left[1 + \frac{k^2}{4} + \frac{9k^4}{64} + \cdots\right] \text{ (단, } k = \sin(A/2)) \quad \text{(I. 6-23)}$$

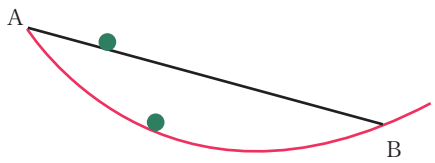
❖ 브라키스토크론 (brachistochrone)
그리스어의 가장 짧음을 의미하는 'brakistos'와 시간을 의미하는 'kronos'를 합친 말로 보통 '최속 강하선'이라고 불린다

진폭에 상관없이 등시성을 보이는 예로는 **사이클로이드** 곡선을 이용할 수 있다. 1696년 베르누이는 '브라키스토크론 문제'를 내었다. 이것은 중력장 내에서 위 아래로 떨어져 있는 두 점 사이에서 어떤 경로를 따라 내려가는 것이 가장 빨리 내려갈 수 있는지를 찾는 것이었다. 흔히 생각하면 직선 경로가 최단 거리이기 때문에 가장 빠를 것 같지만 실상은 사이클로이드 곡선을 따라 내려가는 것이 가장 빠르다.



[그림 I-50] 구르는 원통의 질량중심 (초록색)과 가장자리 (빨간색)의 한 점에 둔 광원에서 나오는 불빛이 두 점이 그리는 궤적을 보여주고 있다. 빨간색 곡선이 사이클로이드 곡선이다.

[그림 I-51]은 사이클로이드 곡선과 직선 경로를 따라 운동하는 물체들을 보여준다. 사이클로이드 곡선 위에서는 직선과는 달리 각도에 따라 가속도가 변하고 처음 출발 부근에서는 직선 경로보다 각도가 커져서 가속도가 크기 때문에 속력이 더 빨라진다. 그런 이유로 도착 지점까지의 시간이 직선이나 다른 어떤 궤적 보다 빠르다. 또한 사이클로이드를 따라 움직일 경우에 진자의 궤도가 등시곡선(tautochrone)이 된다는 것이 증명되었고, 이러한 성질을 이용하면 곡선 상의 어떤 점에서 출발하더라도 도달하는 데 걸리는 시간이 같게 되어 등시곡선을 따라 움직이는 사이클로이드 진자는 진폭에 상관없이 일정한 주기를 갖게 된다.



[그림 I-51] 최속강하선 문제

실험 사이클로이드 진자의 주기 측정

준비물 원통, 펜, 초시계, 질량이 다른 추 5개, 클램프, 자, 등.

과정

1. 사이클로이드 곡선 경로를 만들어 보자.
2. 사이클로이드 곡선 위를 왕복하는 진자를 만들어 보자.
3. 사이클로이드 곡선을 이용한 진자의 진폭에 따른 주기를 측정해 보자.

진폭		10	20	30	40	50
주기(T)	1회					
	2회					
	3회					
	평균					

정리하기

1. 사이클로이드 곡선을 이용한 진자는 단진자와 어떠한 점이 다른가?
2. 호이겐스는 1673년 진자가 사이클로이드 상을 진행할 때 등시성을 가진다는 사실을 증명하고 이 결과를 이용하여 진자시계를 만들었다. 호이겐스가 문제를 해결한 방법을 좀 더 자세히 알아보자.

연습문제

1. 용수철 상수가 k인 용수철에 매달린 질량 m인 물체가 진폭 A로 진동한다. $x = 0$에서 $x = \frac{A}{2}$까지 움직이는데 걸리는 시간을 구하시오.

2. 질량 0.005 kg의 물체가 용수철 상수 20.0 N/m의 가벼운 용수철에 연결되어 마찰이 없는 수평 트랙 위에서 진동한다.

(a) 진폭이 3.00 cm일 때 물체의 최고 속력과 계의 역학적 에너지를 구하시오.

(b) 위치가 2.00 cm일 때 물체의 속도를 구하시오.

3. 질량 m인 물체가 수직 방향으로 용수철에 매달려 있다.

(a) 평형상태에서 용수철이 늘어난 길이 y_0를 구하시오.

(b) 단조화 운동을 하는 것을 보이고 각진동수를 구하시오.

4. 질량 m인 입자가 반지름 R인 반구 형태의 그릇 내부에서 미끄러진다. 평형 위치로부터 작은 변위에 대해 입자가 길이 R의 단진자와 같은 각진동수로 단조화 운동을 하는 것을 보이시오.

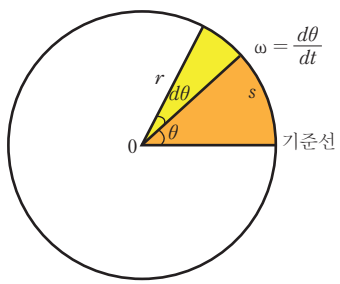
5. 질량 0.50 kg인 물체가 매달려 있는 단진자가 있다. 진폭이 1.0 cm일 때 진자의 주기는 1.5 s이다. 질량을 0.25 kg으로 줄였다면 진폭이 2.0 cm일 때 주기는 얼마인가?

7 회 전(Rotational Motion)

회전 운동은 회전 놀이기구, 피겨스케이팅 선수의 회전, 지구의 공전과 자전, 원자내 전자의 회전 등과 같이 주변에서 쉽게 많이 볼 수 있는 운동이다. 이러한 회전운동을 설명 하는 데는 병진 운동을 설명할 때와 는 다른 유용한 물리량들이 있다. 이러한 물리량들에 대해 알아보고 회전 운동에서 적용되는 운동 법칙과 보존 법칙에 대해 알아보자.

1. 각속도와 각가속도

[그림 I-52]는 중심을 통과하는 수직축을 중심으로 자유롭게 회전하는 원판을 나타낸 것이다. 원판이 회전할 때 각 부분은 서로 다른 속력으로 회전하지만 모두 같은 시간에 한 바퀴를 돈다. 즉, 같은 시간에 모두 같은 각도만큼 회전한다. 따라서 원판의 회전 각도는 원판의 회전 운동을 설명할 수 있는 좋은 변수가 되고 속력 보다는 각속도가 더 적절한 변수가 된다.



[그림 I-52] 중심을 지나는 회전축에 대해 회전하는 원판

❖ 강체

원판처럼 회전할 때 구성 입자들 사이의 거리가 변하지 않는 물체를 강체라고 한다.

강체의 회전 운동을 설명할 수 있는 물리량들을 소개하기 위해 원판 상의 한 점 P를 고려하자. 중심으로부터의 거리는 r이고 기준선으로부터의 각도를 θ라고 하자. 각 θ에 의해 펼쳐지는 호의 길이를 s라고 하면 각 θ는

$$\theta = \frac{s}{r} \qquad \text{(I. 7-1)}$$

로 정의된다. 이 값은 차원이 없는 순수한 수지만 라디안(rad)이라는 보조 단위를 쓴다. 시간 간격 dt동안 회전한 각을 $d\theta$라고 하면 식 (I. 7-1)에 의해 $d\theta = ds/r$이 된다. 거리 ds는 위치에 따라 다르지만 각 $d\theta$는 모든 점에서 동일하다. 따라서 시간에 대한 각의 변화율은 원판의 모든 점에서 동일하다. 이것을 각속도 ω라고 하고

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \qquad \text{(I. 7-2)}$$

로 정의한다. 시간에 대한 각속도의 변화율을 각가속도 α라 하고

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \qquad \text{(I. 7-3)}$$

로 정의한다.

P점의 속력이 v라면,

$$v = \frac{ds}{dt} = r\frac{d\theta}{dt} = r\omega \qquad \text{(I. 7-4)}$$

이 된다. 또한 접선 방향 가속도와 각가속도 사이의 관계는

$$a_t = \frac{dv}{dt} = r\frac{d\omega}{dt} = r\alpha \qquad \text{(I. 7-5)}$$

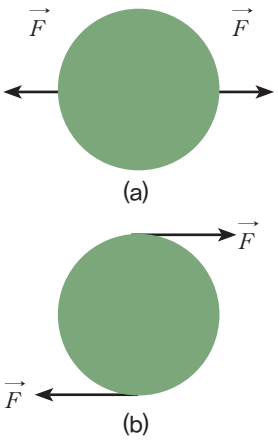
로 주어짐을 알 수 있다. 구심 방향 가속도는 $a_r = \frac{v^2}{r}$이므로

$$a_r = r\omega^2 \qquad \text{(I. 7-6)}$$

의 관계가 주어진다.

❖ θ가 증가하는 반시계 방향을 각속도의 양의 값으로 정하고 시계 방향을 음의 값으로 한다.

각속도와 각가속도의 단위는 각각 rad/s와 rad/s^{2}이다.



[그림 I-53] 동일한 힘이 작용하여도 작용선에 따라 원판이 움직이지 않기도하고 회전하기도 한다.

2. 돌림힘과 회전관성

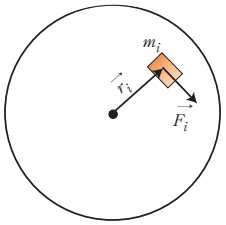
[그림 I-53]에서 (a)와 같이 동일한 힘이 같은 작용선상에서 반대 방향으로 작용하는 경우 물체에 작용하는 합력은 0이 되어 물체가 움직이지 않는다. 그러나 (b)처럼 작용선이 다른 경우 합력이 0이므로 병진 운동은 일어나지 않지만 회전 운동이 일어난다. 이처럼 회전 운동을 일으키는데는 힘

의 크기 뿐만 아니라 회전축에서부터 어는 지점에 작용하는지도 중요한 영향을 미친다. 이러한 요소들을 포함하면서 회전 운동을 일으키는 역할을 하는 것을 **돌림힘**(tourque)이라고 한다.

돌림힘 τ를 벡터 곱을 이용하여

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \qquad \text{(I. 7-7)}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $\vec{F}$는 힘을, $\vec{r}$은 회전축으로부터 힘의 작용점까지의 위치 벡터를 나타낸다. [그림 I-54]



[그림 I - 54] **돌림힘**

벡터 곱의 방향은 $\vec{r}$이 향하는 쪽으로 오른손 네 손가락을 뻗은 다음 네 손가락을 $\vec{r}$에 대해 $\vec{F}$가 있는 쪽으로 감아 쥘 때 똑바로 세운 엄지손가락의 방향이다. 돌림힘을 정의하는 벡터 곱의 $\vec{r}$과 $\vec{F}$의 순서 는 물체에 돌림힘이 작용하여 생기는 물체의 각가속도와 작용한 돌림힘의 방향이 일치하도록 맞추어져 있다.

벡터 곱의 크기는 회전축으로부터 힘의 작용점까지의 거리와 힘의 위치 벡터에 수직한 성분을 곱한 것이다. 따라서 돌림힘의 크기는

$$\tau = rF\sin\phi = rF_t \qquad \text{(I. 7-8)}$$

이 된다.

강체의 돌림힘과 각가속도 사이의 관계를 알아보자. [그림 I-54]에서 i번 째 입자에 작용하는 합력은 F_i이다. 식 (I. 7-5)를 이용하면

$$\vec{F}_{it} = m_i\vec{a}_{it} = m_i r_i\vec{\alpha}_i \qquad \text{(I. 7-9)}$$

가 된다. 양변에 r_i를 곱하고 식 (I. 6-8)을 이용하면,

$$\vec{\tau}_i = m_i r_i^2\vec{\alpha}_i \qquad \text{(I. 7-10)}$$

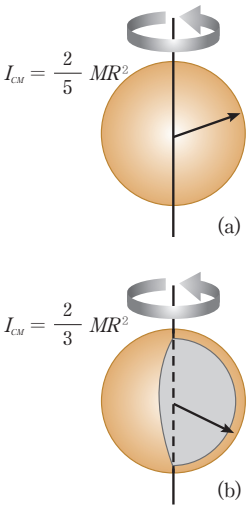
이 된다. 이 식을 모든 입자에 대해 합해 주면,

$$\sum_i \vec{\tau}_i = \sum_i m_i r_i^2\vec{\alpha} \qquad \text{(I. 7-11)}$$

이 된다. 왼쪽 항은 전체 돌림힘이 되고 오른쪽 항에서 각가속도는 모든 점에서 동일함으로 합해주는 양 만을 새로운 물리량인 **회전관성** I로 정의할 수 있다.

$$I = \sum_i m r_i^2 \qquad \text{(I. 7-12)}$$

같은 질량의 물체에 대해서도 회전관성은 회전축에 대한 질량 분포에 따



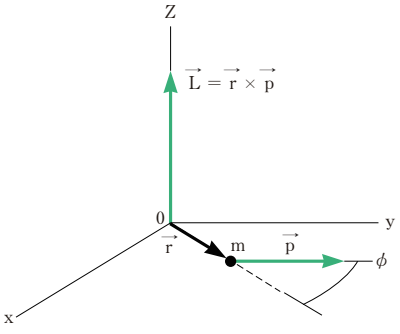
[그림 I-55]
(a) 고체구와 (b) 얇은 구 껍질의 회전관성

라 달라진다. 질량 M인 고체구의 중심을 지나는 회전축에 대한 회전관성은 $\frac{2}{5}MR^2$인 반면 속인 빈 구 껍질의 경우 $\frac{2}{3}MR^2$이다([그림 I-55]). 구 껍질의 경우 회전축으로부터 더 먼 거리에 대부분의 질량들이 분포되어 있으므로 고체구의 회전관성보다 크다. 회전관성은 병진 운동에서 질량과 같은 역할을 회전 운동에서 하게 된다. 식 (I. 7-12)를 식 (I. 7-11)에 대입하면,

$$\vec{\tau} = I\vec{\alpha} \qquad \text{(I. 7-13)}$$

가 된다. $\vec{F} = m\vec{a}$와 비교하면 돌림힘, 회전관성, 및 각가속도는 각각 힘, 질량, 가속도와 대응되는 것을 알 수 있다.

3. 각운동량

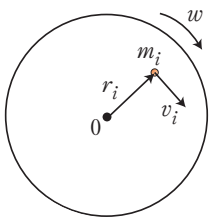


[그림 I-56] 질점의 운동량과 각운동량의 관계

일반적인 회전 운동에서 회전 운동 상태를 나타내는 물리량인 각운동량에 대해 알아보자. [그림 I-56]은 x-y 평면에서 중심 0에 대해 회전하는 질점의 운동량과 각운동량의 관계를 보인 것이다. 각운동량의 크기는 질점의 질량 m, 중심 0로부터 거리 $\vec{r}$, 속도 $\vec{v}$ 세 가지를 곱한 값이다. 각운동량 $\vec{L}$은 병진 운동의 운동량 $\vec{p} = m\vec{v}$에 대응하는 물리량으로

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \qquad \text{(I. 7-14)}$$

로 위치 r과 운동량 $\vec{p}$의 벡터 곱으로써 표현된다. 또한 벡터 곱의 성질로부터 각운동량은 위치와 운동량이 만든 평면에 언제나 수직하다.



[그림 I-57] 원판의 각운동량은 m_i질량을 가지는 요소의 각운동량을 합하여 구할 수 있다.

일반적으로 각운동량의 방향은 각속도의 방향과 나란하지 않지만 물체의 한 대칭축이 회전축이 되면 각운동량의 방향은 각속도의 방향과 나란하게 된다. [그림 I-57] 처럼 원판이 중심축에 대하여 각속도 ω로 회전하는 경우 질량이 m_i인 요소의 각운동량은

$$L_i = m_i r_i v_i = m_i r^2_i \omega \qquad \text{(I. 7-15)}$$

이 된다. 원판의 각운동량은

$$L = \Sigma_i L_i = \Sigma_i m_i r^2_i \omega$$

이므로,

$$L = I\omega \qquad \text{(I. 7-16)}$$

이 된다. 즉, 각운동량 L은 회전관성 I와 각속도ω의 곱으로 간단히 표현된다. 이것은 운동량이 물체의 질량과 속도의 곱으로 표현되는 것과 같다.

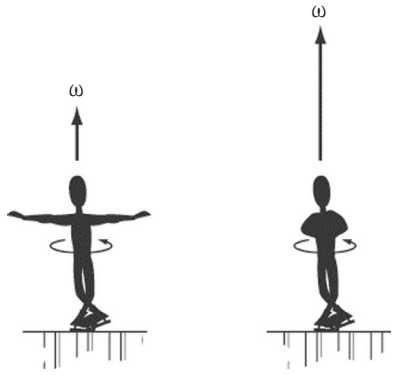
회전 운동의 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} \qquad \text{(I. 7-17)}$$

회전하는 계에 작용하는 외부 토크는 계의 각운동량의 시간 변화율과 같다. 고정된 축 주위를 회전하는 강체의 경우 회전관성은 일정하므로 회전 운동 방정식은 다음과 같이 식 (I. 7-13)으로 환원된다.

$$\tau = \frac{dL}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = I\frac{d\omega}{dt} = I\alpha \qquad \text{(I. 7-18)}$$

식 (I. 7-17)로부터 회전하는 계에 작용하는 알짜 토크 τ가 0이면 계의 각운동량 L은 변하지 않는 것을 알 수 있다. 이것을 **각운동량 보존 법칙**이라 한다. 각운동량 보존 법칙의 예는 일상 생활에서도 많이 볼 수 있다. 대표적으로, 팔을 벌리고 회전하던 피겨스케이팅 선수가 팔을 오므리면 회전은 더욱 빨라진다 [그림 I-58]. 회전하는 동안 선수의 몸은 강체로 생각할 수 있고 팔을 오므리면 몸의 회전관성이 줄어들므로 각운동량이 보존되기 위해 각속력이 그만큼 커지는 것이다. 또 다이빙 선수가 낙하하면서 무릎을 가슴에 붙이면 몸의 회전관성이 줄어들므로 회전은 빨라지게 된다.

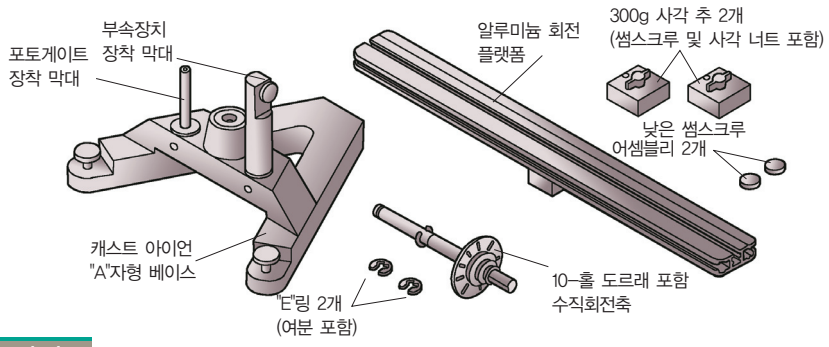


[그림 I-58] 팔을 벌리고 회전하는 경우와 오므리고 회전하는 경우의 각속도 변화

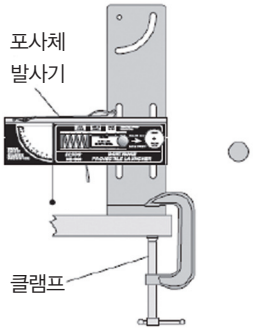
실험 각운동량 보존

준비물

1. 기본부품 포함된 회전플랫폼 : 'A'자형 베이스, 회전축 및 10-홀 도르래, 알루미늄 트랙, 썸스크루, 포토게이트 장착 막대, 부속장치 장착 막대 등
2. 추가 준비물 : 포사체 충돌 부속장치, 포사체 발사기, 구슬, 포토게이트 및 장착대 각 2개, 고무 밴드, 실, 미터자, 추, 행거셋트, 전자저울, 스톱워치, Data Studio 프로그램, Smart Pulley Timer 소프트웨어, 스마트 도르래



과정

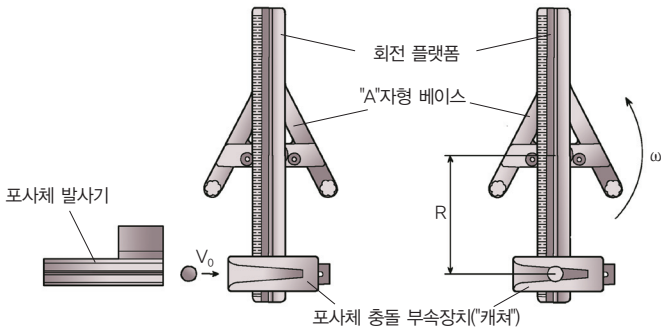


❖ DataStudio 프로그램을 실행한 후 화면에 인터페이스 그림에서 포토게이트가 연결된 채널을 설정해 주어야 한다.

❖ 실험은 5회 정도 반복하여 평균값을 사용한다.

1. 구슬의 초기속도 구하기
   1) 컴퓨터에 DataStudio 프로그램을 설치한다.
   2) 인터페이스를 컴퓨터의 USB 단자에 연결하고 전원을 켠다.
   3) 포사체 발사기에 구슬을 장착하고 테이블 위에 고정시킨 후, 구슬이 나오는 입구 바로 앞에 포토게이트 두 대를 10 cm 간격으로 설치한다.
   4) 포토게이트를 인터페이스에 연결한 다음 DataStudio 프로그램을 실행하고, 준비가 완료되면 'Start' 단추를 누른 후, 발사기에 장착된 구슬을 발사 한다.
   5) 구슬이 포토게이트 둘 다를 지나가면 'Stop' 단추를 눌러 측정을 중지하고, 각각의 포토게이트를 지나간 시간을 확인한다.
   6) 구슬이 두 개의 포토게이트를 지나는 시간과 포토게이트 사이의 거리에서 구슬의 초기 속도를 구한다.

2. 캐쳐(catcher; 포사체 충동 부속장치)가 부착된 회전 플랫폼(알루미늄 트랙)의 회전관성 구하기.
   1) 'A'자형 회전 베이스에 알루미늄 트랙을 장착한다.



❖ 과정 1과 마찬가지로 DataStudio 화면에 인터페이스 그림에서 포토게이트가 연결된 채널을 설정해 주어야 한다.

   2) 알루미늄 트랙의 바깥쪽에 고무 밴드를 이용하여 캐쳐를 부착하고 회전 중심과 캐쳐까지의 거리, 구슬 질량을 측정한다.
   3) 캐쳐 안에 구슬을 부착한 후, 캐쳐와 알루미늄 트랙 전체의 회전관성을 측정하기 위해 스마트 도르래에 포토게이트를 부착한 후 'A'자형 베이스에 고정한다.

4) 스마트 도르래에 부착된 포토게이트를 인터페이스와 연결한다.
5) 알루미늄 트랙 바로 아래 회전실린더의 직경을 측정한 후, 회전실린더에 실을 감아 스마트 도르래를 지나도록 하고 그 끝에 회전 시 마찰을 상쇄할 질량체(약 10 g)를 부착한다.
6) 마찰을 상쇄하기 위한 질량체에 추가하여 100 g 정도의 질량체를 바닥에서 1 m 위에 부착하고 낙하시켜 바닥에 닿는 시간을 측정하여 물체의 가속도를 구한다.

❖ 회전축의 마찰을 보정해 주기 위해 질량체가 미세하게 움직일 때 까지 질량을 조절한다. 이 후 계산에서 마찰질량은 무시한다.

3. 각속도 측정
1) 실험과정 2의 100 g 추를 제거하고, 실 끝에 회전 마찰을 상쇄할 질량체 만을 부착한 후, DataStudio 프로그램에서 Smart Pulley Timer를 실행한다.
2) 발사기에 구슬을 장전한 후, 정지된 회전 플랫폼의 캐쳐 입구로 구슬을 발사한다.
3) 알루미늄 트랙의 각속도를 기록한다.

❖ 총 5회 이상 발사하여 평균값을 구한다.

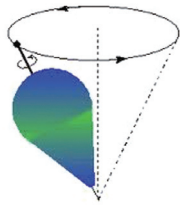
※ 각속도는 알루미늄 트랙의 마찰력 최소화를 위해 1회전 아닌 1/4회전 정도의 시간을 측정하여 구할 수도 있다.

정리하기

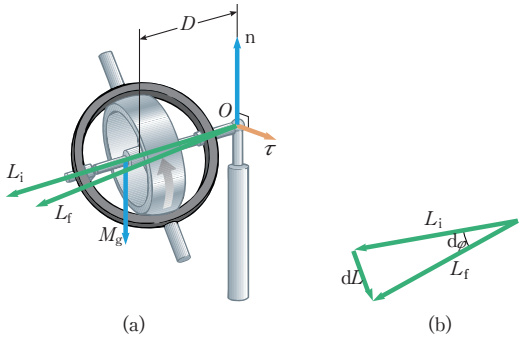
1. 측정한 값들을 이용하여 회전관성을 구해보자.
2. 충돌 전 각운동량과 충돌 후 각운동량이 같은지 확인해 보자.

4. 세차 운동 (Precession)

지금까지 고정된 축 주위를 회전하는 강체의 운동을 주로 공부하였다. 이제 회전축의 방향이 변하는 회전 운동을 살펴보자. 어떤 대칭축 주위로 강체가 회전 운동할 때 이 대칭축이 고정되어 있지 않고 축 자체가 회전 운동하는 것을 세차 운동이라 한다. [그림 I-60]에서 보면 팽이의 자전축이 대칭축 주위로 점선으로 그린 원뿔 모양의 궤적을 그리면서 도는 **세차 운동**을 하고 있음을 알수 있다.



[그림 I-60] 대칭축 주위로 회전하는 팽이의 세차 운동



[그림 I-59] 자이로스코프

[그림 I-59]의 자이로스코프에서 짧은 시간 dt 동안 생기는 바퀴의 각운동량 변화 dL을 구해 보자. 지지대로부터 바퀴까지의 거리가 D이고 질량 M인 바퀴에 작용하는 돌림힘은 $\tau = MgD$이므로 식 (I. 7-17)에서

$$dL = \tau dt = MgDdt \qquad \text{(I. 7-18)}$$

이 된다. 또한 dL은 세차 운동의 회전각 $d\phi$에 대한 호의 길이에 해당하므로 $Ld\phi = dL$이 된다. 이것을 식 (I. 6-18)에 대입하면 다음과 같다.

$$d\phi = \frac{dL}{L} = \frac{MgD\,dt}{L} \qquad \text{(I. 7-19)}$$

따라서 세차 운동의 각속도 Ω는

$$\Omega = \frac{d\phi}{dt} = \frac{MgD}{L} \qquad \text{(I. 7-20)}$$

가 된다. 세차 운동의 각속도는 토크에 비례하고 바퀴의 각운동량에 반비례한다. 바퀴의 각운동량이 아주 크다면 세차 운동은 느리게 일어난다.

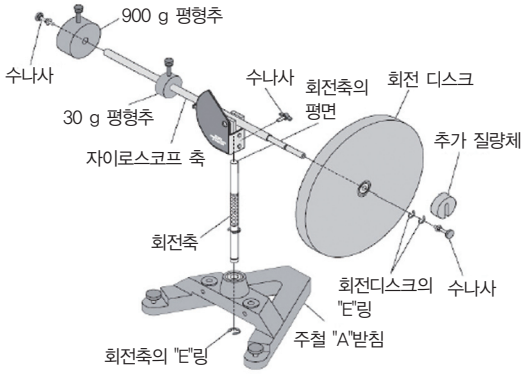
실험 세차 운동 각속도 측정

준비물

1. 자이로스코프 : 'A'자형 베이스, 자이로스코프 축, 수직 회전축, 회전 디스크, 추가 질량체, 수나사, 평형추(30 g, 900 g 각 1개), 'E'링 등
2. 추가 준비물 : 스톱워치, 수퍼 풀리, 풀리 설치봉, 질량체 및 걸이 셋트, 전자저울, 미터자, 풀리용 테이블 클램프, 실(2 m)

과정

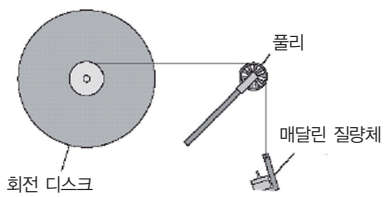
1. 자이로스코프 조립하기
   1) 회전축을 'A'자형 베이스 상단의 베어링으로 삽입한다.
   2) 'E'링을 축 밑바닥 슬롯에 삽입시켜 축을 제 위치에 고정한다.
   3) 자이로스코프 축을 수직 회전축에 부착하고 수나사를 조인다.
   4) 자이로스코프 축의 긴 쪽으로 30 g 평형추와 900 g 평형추를 순서대로 삽입하고 나사를 조인다.
   5) 회전 디스크의 풀리면이 안쪽을 향하도록 하여 자이로스코프 축의 짧은 쪽으로 삽입하고 'E'링으로 제 위치에 고정한다.
   6) 'A'자형 베이스의 평형을 맞추고, 자이로스코프 축이 평형을 이루도록 평형추의 위치를 조절한다.



2. 디스크의 회전관성 측정

1) 자이로스코프 축이 평형을 유지하도록 수직 회전축 상단을 고정한다.
2) 풀리가 장착된 풀리봉을 'A'자형 베이스에 고정한다.
3) 회전 디스크의 회전 방향을 결정한 후 디스크의 풀리 면직경을 측정한 후 실을 감고 수퍼 풀리를 지나게 한 후, 실의 끝에 질량체 걸이를 부착한다.
4) 회전 디스크와 축의 마찰을 상쇄하기 위해 질량체 걸이에 질량을 조금씩 증가시켜 가면서 회전 디스크가 미세하게 회전할 때의 질량을 측정한다.
5) 질량체 걸이에 질량을 추가한 후, 바닥에서 1 m 높이에서 낙하시켜 그 시간을 측정하여 질량체의 가속도를 구한다.

❖ 이때의 질량은 회전축의 마찰력을 보정해주기 위한 것이므로 이후의 계산에서는 이 질량을 무시한다.



디스크 회전관성 측정

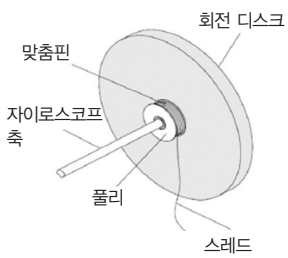
3. 각속도 측정

1) 질량체를 조절하여 자이로스코프 축의 균형을 맞추고 디스크 옆면에 회전수를 확인할 수 있는 표시를 한 다음 세차 운동을 하지 못하게 수직 회전축에 고정한다.
2) 추가 질량체의 질량을 측정한 다음 회전 디스크 쪽의 축 끝에 달고 회전축으로부터 질량체 중심까지의 거리를 측정한다.
3) 초당 약 2회전으로 디스크를 돌린다. 이 때, 디스크의 각속도를 결정하기 위해 10회전 시간을 잰다.
4) 수직 회전축의 나사를 풀어 자이로스코프 축이 세차 운동을 하게하고 세차 비율을 알기 위해 2회 회전의 시간을 잰다.
5) 세차 운동 2회 회전 후 디스크의 10회전 측정을 즉시 반복한다. 세차 운동 중에 디스크의 각속도를 얻기 위해 전후 데이터를 사용하여 평균값을 구한다.

❖ 옆면에 색깔이 있는 스티커 등을 붙여 회전수를 확인한다.

※ 디스크 회전시키기

디스크는 손으로 돌리거나 그림처럼 디스크 풀리면 핀에 실을 감아 돌린다.



❖ 2회전의 평균값으로 1회 세차 주기를 구한다.

정리하기

1. 실험과정 2의 디스크의 회전관성을 구해보자.
2. 측정한 세차 운동 각속도를 이론적인 값과 비교해보자.

창의 탐구

공기의 저항력이 작용하는 물체의 종단 속도 구하기.

학습 목표

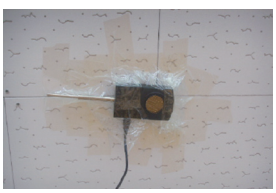
1. 커피 드리퍼를 낙하시켜 속도, 가속도-시간과의 관계 그래프를 구할 수 있다.
2. 그래프를 이용하여 커피 드리퍼의 종단 속도를 구할 수 있다.

준비물

MBL(Motion Sensor), 스탠드, 노트북, 커피 드리퍼 10개, A4 용지

실험 과정 및 방법

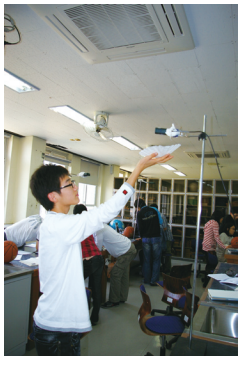
1. 노트북의 바탕 화면에 있는 'MBL과 EXCEL 사용법'을 숙지한다.
2. 컴퓨터와 인터페이스, Motion Sensor를 연결한다.



❖ **실험시 유의사항**

1. Motion Sensor는 지향성이 좋지 않으므로 센서 주위에 방해물이 없어야 한다.
2. 유효숫자를 맞추어서 소수점 둘째자리까지의 결과를 계산한다.

3. 바닥으로부터 2 m 위에 Motion Sensor를 설치한다.
4. 커피 드리퍼를 Motion Sensor로부터 밑으로 0.5 m 떨어진 지점에서 두 손으로 잡고 있는다.
5. 컴퓨터의 스프래드시트 프로그램을 열고, 4처럼 Motion Sensor에 밑에서 커피 드리퍼를 들고 있다가 놓으면서 동시에 [과학 실험]메뉴의 [실험하기]를 누른다.
6. 커피 드리퍼의 개수를 변화시켜가며 실험한다.
7. MBL과 스프래드시트를 이용하여 낙하하는 커피 드리퍼의 시간에 따른 위치 데이터를 얻은 후 속도를 계산한다.



8. 스프래드시트의 차트 기능을 이용하여 속도-시간 그래프를 그린다.
9. 속도-시간 그래프의 곡선에서 수평한 부분이 종단 속도이므로 각 경우의 종단 속도를 구한다.

읽을 거리

1. 피버노바

2002년 한·일 월드컵 축구 공인구인 피버노바는 1998년 프랑스 월드컵 때의 공인구인 트리콜로보다 튕겨나오는 속도가 1% 이상 빨라졌다. 골대 앞 35 m에서 공을 찰 경우 이전 공보다 같은 시간에 35 cm를 더 가는 셈이다.

피버노파 거죽의 구조를 보면, 10개층으로 이루어진 인조가죽이다. 가장 겉면에 투명 폴리우레탄, 마이크로 공기 방울이 들어간 신택틱 폼, 세겹 라스켈 원단, 세겹의 천연 라텍스층으로 구성되어 있다.

공이 튀어나오는 속도를 높이는 핵심 비결은 신택틱 폼에 있다. 여기에는 눈으로는 보기 어려운 높은 압력의 미세한 공기 방울이 수없이 많이 들어가 있어 전체 거죽의 반발력이 높아졌고, 어느 곳을 차더라도 그 정확성이 일정해졌다.

2. 골프공 딤플의 비밀

골프공은 원래 회양목으로 만든 나무공이었다. 골프게임이 처음으로 크게 유행된 시기는 14세기였다. 회양목 골프공을 골프채로 힘차게 치면 멋진 소리를 내지만 멀리 가지는 못했다. 그 후 17세기 들어 쇠가죽을 바느질해 만든 껍데기 속에 삶은 깃털을 채우고 돌덩이처럼 말린 후 나무 망치로 두들겨 둥그렇게 만들었다. 이렇게 만든 골프공은 분명 나무공보다는 더 멀리 날아갔다.

골프공 표면을 울퉁불퉁하게 만들면 더 멀리 날아간다는 것은 19세기 중엽에 밝혀졌는데, 이후에도 골프공의 재질 및 딤플이라고 하는 골프공 표면의 움푹 패인 자국의 크기 및 깊이가 비행거리에 어떻게 영향을 미치는지를 꾸준히 연구해 왔다.

1975년에 물리학자와 화학자의 공동 노력으로 딤플이 골프공 표면의 약 50%를 차지하고 공 윗부분과 아랫부분에 있는 딤플을 가운데 부분에 있는 딤플보다 더 깊게 만들면 역회전(타격 반대 방향으로 회전)할 뿐 아니라 좌우로 공이 튀는 것을 방지하여 정방향으로 멀리 날아가는 공을 만들 수 있다는 것을 발견했다.

골프공 겉표면에 딤플을 만들면 왜 공이 멀리 갈까? 딤플이 있는 공을 역회전하도록 타격하면 공의 윗부분의 공기압력이 아랫부분 공기압력보다 낮게 된다. 따라서 날아가는 공은 더 오랫동안 하늘에 머물게 되어 더 멀리 비행한다.

연 습 문 제

1. 반지름이 8.0 cm인 원판이 가운데 축을 중심으로 1200 rev/min의 일정한 각속력으로 회전하고 있다.

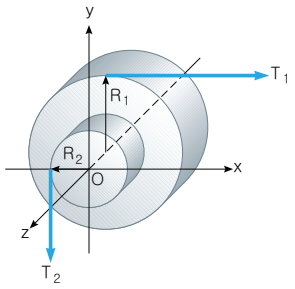
(a) 중심에서 3.0 cm떨어진 점의 접선 속력을 구하시오.

(b) 가장자리에서 지름 방향 가속도를 구하시오.

(c) 가장자리에 있는 한 점이 2s 동안 움직인 거리를 구하시오.

2. 질량이 M이고 길이가 L인 가는 막대의 길이 방향에 수직한 회전축이 막대의 끝에 있을 경우의 회전관성은 $I = \frac{1}{3} ML^2$이다. 회전축이 수직 이등분선이 되는 경우 회전관성의 값이 더 커지는지 작아지는 지 설명하고 그 값을 구하시오.

3. 그림과 같은 큰 원통의 가운데 부분이 튀어나온 실린더가 있다. 실린더는 그림처럼 중심축에 대하여 자유롭게 회전하고 있다. 반지름 R_1의 바깥 부분에 감겨 있는 밧줄은 원통의 오른쪽으로 T_1의 힘을 작용하고, 반지름 R_2의 안쪽 부분에 감겨 있는 밧줄은 원통의 아래쪽으로 힘 T_2를 작용한다.



(a) O을 지나는 z축에 대하여 실린더에 작용하는 알짜 토크를 구하시오.

(b) $T_1 = 5.0$ N, $R_1 = 10.0$ m, $T_2 = 15.0$ N, $R_2 = 0.50$ m이면 회전축에 대한 알짜 토크는 얼마인가? 정지 상태에서 시작하였다면 어느 방향으로 원통이 회전하겠는가?

4. 원반 모양의 수평면이 원반의 중심을 지나는 마찰이 없는 수직 축을 중심으로 자유롭게 회전하고 있다. 수평면의 질량은 M이고 반지름은 R이다. 질량 $M/2$인 사람이 원반의 가장자리에서 중심으로 천천히 걸어가고 있다. 사람이 원반 가장자리에 있을 때 계의 각속력이 ω라면 사람이 중심으로부터 $R/2$ 떨어진 지점에 도달했을 때 계의 각속력은 얼마인가? (단, 원반의 회전관성은 $I = \frac{1}{2}MR^2$이고, 사람은 입자로 간주할 수 있다.)

Ⅱ

열역학 탐구

- 1. 열과 열전달
- 2. 열역학 법칙

생 | 각 | 열 | 기

온도, 열, 및 에너지와 같은 용어는 물리학의 한 분야인 열역학에서 중요하게 다루어지는 것들이다. 그러나 이러한 용어들은 물리학과 상관없이 일상생활에서도 친숙한 말들로 인류가 불을 사용한 이후 항상 일상생활과 밀접한 관계가 있어왔음을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 과학적인 이해가 높아진 것은 산업혁명 이후 열을 이용해서 일을 할 수 있는 기관의 효율을 높이기 위한 노력에서 시작되었다. 18세기 중반까지도 열역학과 역학은 관련성 없는 다른 분야로 취급되었으며 열과 에너지는 별개로 인식되었다. 그러나 열이 온도 차이에 의한 자발적인 에너지의 한 전달 방식이라는 것을 이해하면서 단순히 역학적인 에너지 보존이 아닌 에너지 보존 법칙을 보편적인 자연 법칙으로 이해하게 되었다. 또한 엔트로피 개념을 도입하여 자연에서 일어나는 현상들이 특정한 방향으로만 진행되는 것을 이해할 수 있게 되었다.

이 단원에서는 열에 대한 이해와 열전달이 이루어지는 방식들에 대해 공부하고 에너지 보존 법칙을 말해주는 열역학 제1법칙과 엔트로피 개념을 이해하고 다양한 상황에서 나타나는 열역학 제2법칙에 대해 알아보자.

1 열과 열전달

열은 인류가 불을 사용한 이래로 일상생활에서 우리에게 매우 친숙한 것 이지만 열에 대한 과학적인 이해가 이루어진 것은 19세기 중반 무렵부터이다. 17세기에 갈릴레오, 뉴턴 등의 당시 과학자들은 열이 분자 운동의 형태로 나타나는 것이라고 생각했던 고대 그리스 원자론자들의 이론을 일반적으로 믿었다. 18세기에는 생성도 소멸도 되지 않는 열소(Caloric)라는 보이지 않는 유체의 이동이라는 열소설이 주장되기도 하였다. 19세기 중반 이후 열이 에너지 전달의 한 방식인 것을 알게 되면서 열역학이라는 새로운 분야가 탄생되었다. 이 장에서는 열과 에너지의 관계에 대해 알아보고 열은 어떠한 방법으로 전달될 수 있는지 알아보자.

1. 이상기체 (Ideal gas)

밀도가 낮은 기체들의 성질은 다음 **이상기체 법칙**으로 요약될 수 있다.

$$PV = nRT \qquad (\text{Ⅱ}.\ 1\text{–}1)$$

❖ 식 (Ⅱ. 1–1)은 온도 T의 단위가 켈빈(K) 온도인 경우에만 성립한다.

여기서 P는 압력, V는 부피, n은 몰수, T는 온도를 나타낸다. R은 **기체상수**로 실험적으로 측정한 값은

$$R = 8.31\ \text{J/mol} \cdot \text{K} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 1\text{–}2)$$

이 된다. 1몰은 아보가드로수(Avogadro's number) 만큼의 원자수나 혹은 분자수를 가진 물질의 양을 말한다. 아보가드로수는 $N_A = 6.02 \times 10^{23}$으로 n몰의 분자수는 $N = nN_A$가 된다. 식 (Ⅱ. 1–1)에서 몰수 대신 분자수로 나타내면 $PV = \dfrac{N}{N_A} RT$ 가 된다.

새로운 상수 k를

$$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23}\ \mathrm{J/K} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 1\text{–}3)$$

이라고 하면 이상기체 법칙은

$$PV = NkT \qquad (\text{Ⅱ}.\ 1\text{–}4)$$

로 주어진다. k는 볼츠만 상수(Boltzman's constant)로 어떤 종류의 기체에 대해서도 항상 같은 값을 갖는 것이 실험적으로 확인되었다.

❖ 계의 압력, 온도, 부피 등의 상태함수들 사이의 관계를 나타낸 식을 상태 방정식이라고 한다. 따라서 식 (Ⅱ. 1–4)를 이상기체의 상태 방정식이라고도 한다.

이상기체 법칙은 기체계의 많은 물리적 성질들을 요약하여 말해준다. 일정한 온도를 가진 기체의 압력이 두 배가 되면 부피는 반으로 줄어든다. 일정한 부피에서 온도가 두 배로 높아지면 압력이 두 배로 증가한다. 이상기체 법칙은 일상생활에서 접하게 되는 실제 기체에 꼭 맞지 않으나 기체 분자 둘 사이의 평균거리가 분자 크기에 비해 훨씬 큰, 낮은 밀도의 기체계에 대해 잘 맞는다. 실온과 대기압에서 공기 분자의 평균거리는 대략 분자 크기의 열 배쯤 되므로 이상기체 법칙이 잘 맞는다.

예제 온도는 30 ℃이고 압력이 1 atm인 한 기체의 부피는 2 L이다. 이 기체가 60 ℃로 가열되고, 부피는 1.5 L로 압축되었다. 압력은 얼마인가?

풀이 이상기체 법칙으로부터

$$\frac{P_f V_f}{T_f} = \frac{P_i V_i}{T_i}$$

이 성립한다.(여기서 f는 나중 상태를 나타내고 i는 처음 상태를 나타낸다.) 따라서 나중 압력 P_f는

$$P_f = \frac{T_f V_i}{T_i V_f} P_i = \frac{333\mathrm{K} \cdot 2\mathrm{L}}{303\mathrm{K} \cdot 1.5\mathrm{L}}\ 1\ \mathrm{atm} = 1.47\ \mathrm{atm}$$

이 된다. 온도값을 대입할 때 섭씨온도를 절대온도로 바꾸어 주어야 하는 것에 주의하자.

2. 열 (heat)

뜨겁다 또는 차갑다라고 하는 표현은 일상적으로 많이 사용되는 표현으로 열과 온도와 관련하여 인식되고 있다. 그러나 이러한 표현들은 감각에 의존하는 것으로써 동일한 상황에서 서로 다르게 느껴질 수 있다. 예를 들

어, 한 손을 뜨거운 물에 담그고 다른 한 손을 차가운 물에 담궜다가 두 손을 동시에 미지근한 물에 담근다면 뜨거운 물에 담궜던 손은 차갑게 느껴질 것이고 차가운 물에 담궜던 손은 뜨겁게 느껴질 것이다.

이와 같이 주관적인 감각은 물체의 열적 성질(thermal properties)을 정확하게 나타낼 수 없다. 뜨겁거나 차갑게 느끼는 것은 단지 열의 이동에 의한 것일 뿐이다. 어떤 물체를 손으로 잡았을 때 차갑게도 뜨겁게도 느껴지지 않는다면 그 물체와 손 사이에 열의 이동이 없는 것을 의미하고 이러한 경우 두 물체 사이에 **열평형**(thermal equilibrium)이 이루어졌다고 한다. 열평형을 이룬 두 물체는 열적으로 서로 동등한 상태에 있으며 이러한 시스템의 열적 성질을 나타내는 물리량이 **온도**이다. 즉, 두 물체의 온도가 같으면 두 물체 사이에는 알짜 열의 이동이 없고 열평형 상태에 도달했다고 한다. 거꾸로 두 물체가 열평형 상태라면 두 물체의 온도는 같다고 말할 수 있다. 만약 열 접촉하고 있는 두 물체의 온도가 다르다면 두 물체는 열평형 상태에 있지 않으며 열평형을 이룰 때까지 온도가 높은 물체에서 낮은 물체로 열이 이동하게 된다.

❖ **열 접촉**

여기서 접촉이라고 하는 것은 반드시 직접 맞닿은 접촉을 의미하지 않는다. 열이 전달될 수 있는 모든 경우는 열 접촉이 되었다고 한다.

즉, **열**은 열 접촉하는 두 물체간의 온도 차이에 의해 한 물체에서 다른 물체로 전달되는 것으로 정의할 수 있다. 이와 같이 열은 물체의 온도와 관련하여 전달되는 양이며 한 물체에 열이 전달되면 그 물체의 온도를 높여 주는 양으로 생각할 수 있다. 이러한 관점을 정량적으로 나타내기 위하여 열용량의 개념을 도입하자. 한 물체의 온도를 ΔT만큼 올리는데 필요한 열의 양을 Q라고 하면 물체에 따라 필요한 열의 양이 다르므로 물체의 특성을 반영한 양이 필요하다. 이것을 물체의 **열용량** C라하고 물체의 온도를 1 ℃ 올리는데 필요한 열의 양으로 정의한다. 그러면 다음 관계식

$$Q = C\Delta T \qquad (\text{Ⅱ. 1–5})$$

가 성립된다. 식 (Ⅱ. 1–5)에 의해 열의 단위를 결정할 수 있다. 표준이 되는 물질로 물을 선택하여 물 1 g을 1 ℃ 올리는 데 필요한 열의 양을 1 cal로 정의한다.

지금까지의 열에 관한 설명에서 보면 열은 물체의 온도와 관련된 새로운 물리량이다. 다음 두 가지 간단한 실험을 수행하면서 열이 이미 잘 알려진 물리량과 어떤 관계가 있을 지 생각해 보자.

실험 납 구슬이 들어있는 병을 흔들었을 때의 변화

준비물 액정 온도계, 플라스틱 병, 에어캡

과정

1. 액정 온도계가 들어있는 플라스틱 병을 에어캡으로 감싼다.
2. 장갑을 끼고 플라스틱 병을 50번, 100번 흔들었을 때, 액정 온도계의 변화를 관찰한다.

정리하기

흔든 횟수에 따른 액정 온도계의 변화를 적어보자.

❖ **액정 온도계**

종이로 온도에 따라 색깔 변화를 갖게 된다. 열에 대하여 매우 민감하므로 외부로 부터의 열 출입이 차단될 수 있도록 실험에 유의한다.

실험 얼음물과 뜨거운 물속에서 피스톤의 변화

준비물 실린더, 얼음, 수조, 물

과정

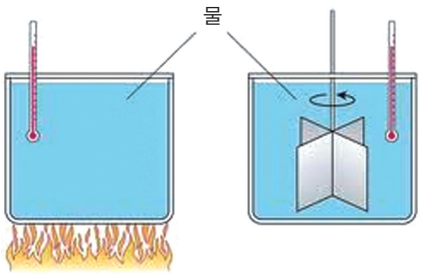
1. 실린더에 적당량의 공기를 채우고, 밀폐시킨다.
2. 공기가 들어있는 위치를 빨간색 유성펜으로 표시한다.
3. 얼음이 들어있는 수조에 실린더를 잠기게 한 후 변화를 관찰한다.
4. 끓는 물에 실린더를 잠기게 하여 변화를 관찰한다.

정리하기

온도에 따라 기체의 부피가 어떻게 변화되는지 적어보자.

첫 번째 실험 결과에서 많이 흔들수록 온도계의 눈금이 올라가는 것을 확인할 수 있다. 이것은 물체의 온도를 높이는데 열을 가하지 않아도 되는 것을 의미한다. 반면 두 번째 실험에서 얼음물에 담구었을 때는 온도가 낮은 얼음물로 열이 방출되고 기체의 부피가 줄어드는 반면, 끓는 물에서는 열을 흡수하고 기체의 부피가 커지는 것을 확인할 수 있다.

즉, 시스템에 열을 가하는 경우뿐 만 아니라 일을 해 줌으로써 시스템의 온도를 높일 수 있고, 열전달을 통해 시스템에 일을 해 줄 수도 있다. 이것



[그림 Ⅱ-1] 물의 온도를 각각 열과 일 로 올리고 있다.

은 열과 일이 서로 역할을 바꿀 수 있는 것을 의미하고, 일을 통해서 시스템에 에너지를 전달할 수 있는 것과 마찬가지로 열의 전달에 의해 시스템의 에너지를 변화시킬 수 있음을 의미한다. 이와 같이 열은 일과 같이 시스템에 에너지를 전달하는 한 방식이나 일과 달리 외부 동력이 없이 두 물체의 온도 차이에 의해 자발적으로 에너지를 전달한다. 따라서 열의 정의를 다음과 같이 할 수 있다.

열은 열접촉 하고 있는 물체 사이의 온도차에 의해 자발적으로 전달되는 에너지이다.

3. 내부 에너지와 에너지 등분배

역학에서는 한 물체의 운동에 관심이 있으며 주로 그 물체를 입자로 간주하여 운동을 다룬다. 이것은 물체를 구성하는 요소들 사이의 상호 작용이나 상태에 관심 있는 것이 아니고 물체 전체를 하나의 대표점으로 생각하여 전체 움직임에만 관심을 두는 것이다. 그러나 열역학에서는 주로 물체의 대표적인 거시적인 움직임에 관심을 두기 보다는 그 구성 물질들의 내부적인 상황에 따라 나타나는 시스템의 거시적인 열적 성질들(thermal properties)과 그 관계에 관심을 둔다. 시스템의 열적 성질은 온도, 압력, 부피, 내부 에너지, 엔트로피 등과 같은 **상태 함수**들에 의해 결정된다. 따라서 열역학에서는 입자의 운동 에너지나 퍼텐셜 에너지와는 다른 시스템의 내부 에너지를 올바로 이해하는 것이 중요하다.

1) 내부 에너지

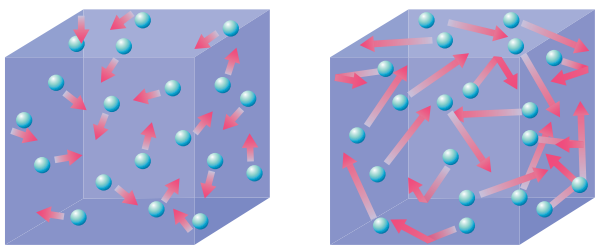
내부 에너지(internal energy)는 시스템(system: 계)의 질량중심에 대해 정지해 있는 기준계의 관점에서 볼 때 미시적 요소(원자나 분자)와 관련하여 시스템이 가지고 있는 모든 에너지를 의미한다. 시스템은 하나의 물체일 수도 있고 물체들의 집합체일 수도 있다. 시스템의 일부분이 아닌 것은 그 시스템의 주위(environment)로 본다. 열역학에서 시스템과 주위 사이의 열적 상호작용에 대한 이해가 중요한 문제가 된다.

내부 에너지에 속하는 것들을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 시스템을 구성하는 분자 각각의 병진 운동 에너지 및 회전 운동 에너지, 한 분

자 안에서 평형점을 중심으로 그 분자나 원자가 임의로 진동하는 진동 에너지, 시스템 내부의 분자나 원자 간에 존재하는 상호작용에 의한 퍼텐셜 에너지, 분자나 원자를 구성할 수 있게 하는 화학 결합 에너지, 핵 에너지, 정지 질량 에너지 등도 포함된다.

그러나 시스템 전체의 병진, 회전, 진동 운동에 의한 에너지나 시스템와 주위와의 상호작용(예를 들면 중력장)에 의한 퍼텐셜 에너지는 시스템의 내부 에너지에 해당되지 않는다.

❖ 내부 에너지 자체보다 내부 에너지 변화에 더 관심이 있고 핵 에너지, 정지 질량 에너지와 같이 온도 변화에 따라 변하지 않는 에너지들은 고려하지 않아도 된다.



[그림 Ⅱ-2] **분자들이 더 큰 속력으로 움직이고 있는 (b)의 경우 각 분자들의 운동 에너지가 커서 더 큰 내부 에너지를 갖는다.**

[그림 Ⅱ-2]는 단원자 분자 이상기체로 이루어진 시스템의 내부 에너지를 분자들의 운동 상태로 나타낸 것이다. 화살표는 각 분자들의 속도를 나타낸다. (a)와 (b)의 내부 에너지 차이는 각 분자들의 운동 에너지에 의해 결정되므로 분자들이 더 큰 속력으로 움직이고 있는 (b)의 내부 에너지가 더 크다. 한 시스템의 내부 에너지 변화는 시스템의 온도 변화로 나타나거나 시스템의 상태 변화로 나타날 수 있다.

생각해 보기

고무줄의 한 부분을 손으로 잡아서 당겼다 놓았다 여러 번 반복한 후 입술에 대고 온도를 느껴보자. 당겼다 놓았다 하지 않은 부분과 비교하여 더 따뜻하게 느껴지는가? 더 따뜻하게 느껴지는 이유가 무엇인지 생각해 보자.

2) 에너지 등분배 정리

기체 운동론에 의하면 분자 하나의 평균 운동 에너지는

$$\langle K \rangle = \frac{3}{2} kT \qquad (\text{Ⅱ. } 1\text{-}6)$$

로 주어진다. 한 축 방향으로의 평균 운동 에너지가 $\frac{1}{2}kT$이고, x, y, z축 세 방향에 대해 동일하게 적용되기 때문에 식 (Ⅱ. 1-6)이 성립된다.

만일 기체를 압축하는 동안 한 분자와 피스톤 사이의 충돌에 의하여 한 분자의 x축 방향의 운동 에너지가 순간적으로 증가하였다면, 이 분자와 다른 분자들 사이의 충돌에 의해 증가되었던 에너지는 재빨리 재분배될 것이며, 기체는 다시 평형상태가 되고 x, y, z축 방향의 운동 에너지 성분들에 균등하게 분배될 것이다.

이렇게 에너지가 운동 에너지의 세 성분으로 똑같이 나눠지는 것은 **등분배 정리**(equipartition theorem)라고 부르는 일반화된 결과의 특별한 경우에 해당된다. 이 정리는 병진 운동 에너지의 경우에만 해당되는 것이 아니라 식이 좌표 또는 속도 성분의 2차 함수형태로 주어지는 모든 에너지에 관계된다. 분자의 2차 함수 형태의 에너지를 표현하는데 나타나는 좌표, 속도 성분, 각속도 성분 등을 **자유도**(degree of freedom)라고 한다. 다음과 같은 공식을 보면 $\frac{1}{2}mv_x^2$, $\frac{1}{2}mv_y^2$, $\frac{1}{2}mv_z^2$, $\frac{1}{2}I\omega_x^2$, $\frac{1}{2}I\omega_y^2$, $\frac{1}{2}k_x x^2$, · · · 2차 함수 형태의 에너지들을 나타낸다.

I는 회전관성이고 ω는 각속도로 네 번째 다섯 번째 식은 회전 운동 에너지를 나타낸다. k_x는 용수철 상수를 나타내고 여섯 번째 식은 탄성 퍼텐셜 에너지를 나타낸다. 이러한 형태의 에너지 각각에 평균적으로 $\frac{1}{2}kT$의 에너지가 배분된다. 즉, 등분배 정리를 다음과 같이 표현할 수 있다.

어떤 물체가 평형상태에 있을 때 각 자유도에 대해 분자당 $\frac{1}{2}kT$의 평균 에너지가 배분된다.

N개의 분자들로 이루어진 시스템이 있고 각 분자들의 자유도가 f라면 시스템의 내부 에너지는

$$U = \frac{f}{2}NkT \qquad (Ⅱ.\ 1\text{-}7)$$

가 된다. 여기에서 내부 에너지는 화학 결합 에너지나 정지 질량 에너지와 같은 온도에 따라 변하지 않는 에너지는 제외한 것이다. 따라서 등분배 정리는 온도가 올라가거나 내려갈 때 내부 에너지가 변하는 경우에만 적용할 수 있고 상태 변화가 있는 경우 등에는 적용될 수 없다.

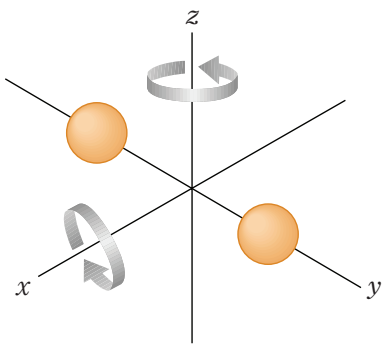
등분배 정리를 적용하면 시스템의 자유도를 구할 수 있으면 시스템의 내

부 에너지를 알 수 있다. 헬륨(He)이나 아르곤(Ar)과 같은 단원자 분자 이상기체의 경우 병진 운동 에너지만 고려하면 된다. 따라서 각 분자는 $f=3$의 자유도를 갖는다. 반면, 산소(O_2)나 질소(N_2)와 같은 이원자 분자 기체의 경우 두 개의 회전축에 대하여 회전할 수 있어 추가로 두 개의 자유도를 더 갖는다. 따라서 n몰의 이원자 분자로 이루어진 시스템의 내부 에너지는

$$U = \frac{5}{2}nRT \qquad (\text{Ⅱ. 1–8})$$

가 된다.

❖ 실온에서 원자들을 연결하는 연결축에 대한 회전은 일어날 수 없기 때문에 고려하지 않아도 된다. 또한 두 원자들의 진동에 의한 자유도도 고려하지 않아도 된다.
이처럼 실온에서 이원자 분자 기체의 내부 에너지가 식 (Ⅱ. 1–7)으로 주어지는 것은 양자역학의 중요한 실험적 근거가 되었다.



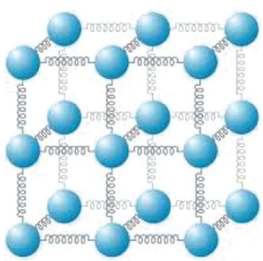
[그림 Ⅱ–3] 이원자 분자의 연결축에 수직한 두 축에 대한 회전

실온에서 대부분의 고체들의 내부 에너지는 $U=3nRT$로 주어진다. 이것은 [그림 Ⅱ–4]에서 보여 지는 것과 같은 고체 모형에 등분배 정리를 적용하여 설명할 수 있다. 이 모형에 의하면 고체는 각 분자들이 각자의 평형 위치에서 인접한 원자들과 용수철로 연결된 규칙적인 분자들의 배열로 이루어져 있다. 각 분자는 x, y, z축 세 방향으로 진동할 수 있으므로 세 방향의 운동 에너지와 세 방향의 탄성 퍼텐셜 에너지를 갖게 됨으로 여섯 개의 자유도를 갖는다. 따라서 등분배 정리에 의하면 고체의 내부 에너지는

$$U = 6 \times \frac{1}{2}nRT = 3nRT \qquad (\text{Ⅱ. 1–9})$$

가 된다.

이와 같이 등분배 정리로 실온에서 고체의 열적 특성을 잘 설명할 수 있다. 그러나 온도가 아주 낮은 경우에는 더 이상 내부 에너지가 온도에 일차 비례하는 형태로 주어지지 않는다. 따라서 식 (Ⅱ. 1–9)의 결과는 실온



[그림 Ⅱ–4] 각 분자들이 용수철로 연결되어 있는 고체 모형

을 포함한 일정 온도 영역에서만 성립한다.

4. 열전달

다음 탐구 실험을 진행하면서 열전달에 대한 탐구를 바탕으로 열에 대한 모형을 생각해보자.

탐구실험 열전달 과정을 통한 열에 관한 모형 세우기

준비물	쇠막대기, 알코올 램프, 풍선 3개, 비커 3개, 얼음물, 뜨거운 물, 고무 지우개, 거친 사포, 스티로폼판, 스프링 4개, 탁구공 4개, 줄자

❖ 쇠막대가 너무 많이 가열되면 화상을 입을 수 있으므로 주의한다.

1. 다음 활동을 하며 어떤 현상이 일어나는지 관찰하자.

활동 1. 쇠막대의 한쪽 끝을 잡고, 다른 한쪽 끝을 알코올 램프로 가열한 후, 손의 느낌 변화를 관찰한다.
활동 2. 풍선 3개를 같은 크기로 불어, 하나는 빈 비커에, 다른 하나는 뜨거운 물에, 나머지 하나는 얼음물에 넣고, 풍선의 크기 변화를 관찰한다.

1) 활동 1에서 손의 느낌 변화는 어떠한가?
2) 활동 2에서 각 비커에 넣은 풍선의 크기 변화는 어떠한가?

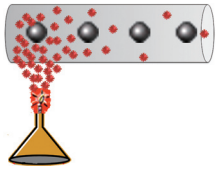
2. 관찰한 현상을 설명하는 모형을 만들어 보자.
1) 쇠막대 속에서는 어떤 일들이 일어나기에 이런 현상이 나타나는 것일까?
2) 같은 방법으로 고무풍선의 크기가 변한 현상을 어떻게 열과 관련지어 설명할 수 있을까?

3. 열소설 모형이 맞는 지 확인할 수 있는 실험을 해보자.

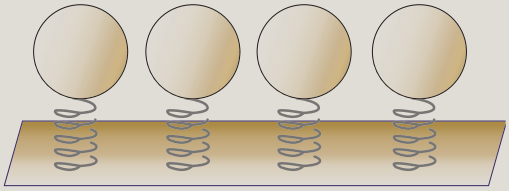
1. 고무 지우개를 거친 사포 표면에 대고 문질러보자. (20회)
2. 1과 같은 고무 지우개를 책상 면에 대고 문질러보자. (20회)
3. 문지르는 횟수를 늘려가며 어떤 변화가 생기는지 살펴보자.

1) 고무 지우개를 거친 사포 표면과 책상 면에 문지를 때, 어떤 현상이 일어날까?
2) 고무 지우개를 거친 사포 표면과 책상 면에 문지를 때, 어떤 경우에 고무 지우개가 더 뜨거울까? 열소설 모형으로 예상해보자.
3) 실제 실험에서는 두 경우 중 어느 경우의 지우개가 더 뜨거운가?
4) 실제 실험결과는 열소설 모형을 바탕으로 예상한 실험결과와 일치하는가?

❖ 열소설



열 현상을 설명하기 위해 18세기 후반에 제창된 모델인 열소(熱素;caloric)를 기초로 한 이론. 열을 에너지 전달의 한 형태로 보는 현대의 견해와는 달리, 열을 물질의 일종으로 보았다. 18세기 후반, 비열 · 숨은 열의 실험을 통해 처음으로 열과 온도를 구별한 J. 블랙은 '열은 미세하고 무게가 없는 탄성유체(彈性流體)로서 물질입자를 둘러싸며 서로 반발한다'고 생각하여 열소의 원형을 만들었다. 한편, 같은 무렵 그 입자를 칼로릭(caloric)이라고 명명하고 화학의 원소표에까지 넣은 사람은 A.L. 라부아지에인데, 화학반응에 따르는 발열 · 흡열을 설명했다.



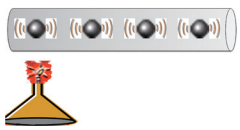
1. 그림과 같이 탁구공에 구멍을 뚫어 스프링을 연결한 후, 스프링의 나머지 다른 쪽을 스티로폼판에 연결한다.
2. 가장자리에 있는 탁구공 하나를 튕겨보고 그 움직임을 관찰하자.
3. 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm에서 튕겨보고 양옆의 거리를 재어보자.

1) 한 개의 탁구공을 튕긴 후 탁구공의 움직임은 어떠한가?
2) 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm에서 탁구공을 튕겼을 때, 양 옆의 거리를 측정하고 표로 나타내자. 변화가 있는가?

튕긴 거리	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm
양옆 거리				

5. 이 실험을 바탕으로 새로운 모형을 형성하여 보자.
   1) 이 실험을 바탕으로 1번의 첫 번째 활동을 설명할 수 있는가?
   2) 1번의 두 번째 활동도 같은 모형을 사용하여 설명할 수 있는가?

6. 세운 모형으로 설명할 수 있는 다른 현상들을 찾아보자.

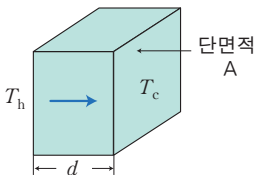


열소설 모형과는 다른 방식의 열전달을 생각해 보자.

쇠막대기의 한쪽 끝만을 가열해도 손으로 잡고 있던 반대편이 뜨거워진다. 얼음물에 넣은 풍선은 처음 것보다 크기가 줄어들며, 뜨거운 물에 넣은 풍선은 처음 것보다 크기가 커진다. 이러한 현상을 설명하기 위해 위의 탁구공 실험을 살펴보자. 탁구공 한 개를 튕기면 탁구공은 운동하게 되고 그 운동은 점차 전달되어 간다. 열을 가한다는 것은 탁구공을 튕기는 것처럼 쇠막대 분자를 운동시키는 것이라고 생각할 수 있다. 튕겨진 탁구공의 운동이 양 옆의 탁구공에게 전달되듯이 가열에 의해 쇠막대 분자들을 진동시키고, 그 진동이 양 옆으로 전달되어 결국 열을 가하지 않은 쪽도 뜨거워진다. 결국 가열을 한다는 것은 시스템의 내부 에너지를 증가시키는 것을 의미한다. 실험에서 쇠막대의 경우 시스템의 내부 에너지 증가는 분자들의 진동 에너지 증가로 나타나고 풍선의 경우 풍선 내부 기체분자들의 운동 에너지 증가로 나타난다.

이제 잘 알려진 세 가지 열전달 방식인 전도, 대류, 복사에 대해 알아보자.

1) 전도(Conduction)



[그림 Ⅱ-5] 단면적이 A이고 두께가 d인 판을 통한 열전도($T_h > T_c$)

❖ 열전도도 k의 단위는 J/m · s · K이다.

한 쪽 끝이 가열된 쇠막대에서의 열전달 방식은 열전도의 대표적인 예이다. **전도**는 시스템을 구성하는 원자 또는 분자간의 충돌에 의한 에너지 전달 방식이다. 시스템의 어느 곳에서나 온도가 같다면 알짜 열의 이동은 발생하지 않는다. 반면에 온도가 일정하지 않다면 온도가 높은 곳의 원자들의 평균 에너지가 커서 활발히 움직이며 충돌에 의해 평균 에너지가 낮은 원자들에 에너지를 전달함으로서 평균적으로 높은 온도에서 낮은 온도로 전달되는 알짜 열의 이동이 이루어진다.

[그림 Ⅱ-5]와 같이 단면적이 A이고 폭이 d인 물체의 왼쪽 면은 온도 T_h인 열저장고와 접촉하고 있고 오른쪽 면은 온도 T_c ($T_h > T_c$)인 열저장고와 접촉하고 있다고 하자. 이 때 열전달은 온도차와 단면적이 클수록 크고 폭이 넓을수록 작을 것이라는 것을 예상할 수 있다. 또한 물질의 열적 특성에 의해 달라진다. 금속의 경우 자유전자는 전기를 잘 통하게 할 뿐만 아니라 자유로운 이동에 의해 열을 잘 전달되게 한다. 반면에 비금속 고체의 경우 전자들이 원자에 속박되어 있기 때문에 금속보다 열을 잘 전달하지 못한다. 기체의 경우 액체와 고체에 비해 원자 간격이 멀어 열전도가 잘되지 않는다. 이처럼 물질에 따라 열이 전달되는 정도가 다른 것을 나타내는 양을 **열전도도**라고 한다.

[표 Ⅱ-1] 에서의 열전도도

물질	k
공기	0.023
물	0.6
얼음	2
유리	0.63
나무	0.13
구리	401
금	318
은	429

따라서 t시간 동안 Q의 열이 전달되었다면 열전달율 P는

$$P = \frac{Q}{t} = k\mathrm{A}\left(\frac{T_h - T_c}{d}\right) \qquad (\text{Ⅱ. 1-10})$$

로 주어진다. 열전도도 k는 온도에도 영향을 받는다. [표 Ⅱ-1]은 20 ℃에서의 여러 물질의 열전도도를 보여준다.

생각해 보기

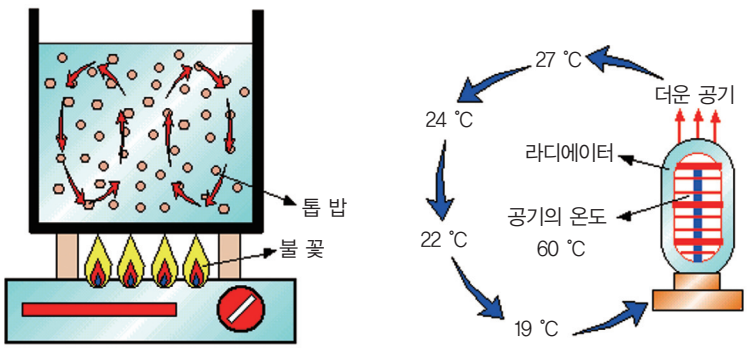
겨울철에 밖과 실내의 온도차에 의한 유리창을 통한 열 손실을 어림 계산해보자. 실제로 그만한 열 손실이 일어나는지 생각해 보자.

2) 대류(Convection)

대류는 물질의 이동에 의해 열전달이 이루어지는 방식이다. 방안 한쪽면에 있는 난방기에 의해 방안 전체가 따뜻해지는 것은 대류에 의한 열전달에 의한 것으로 난방기 근처의 공기가 가열되어 팽창되면 공기의 밀도가

감소하여 공기가 상승하고 이러한 공기의 순환운동으로 방 전체가 고루 가열되게 된다(그림 Ⅱ-6). 물질의 이동이 가능한 경우는 액체와 기체이므로 대류는 유체에서 일어나는 열전달 방식이다.

뜨거운 곳과 차가운 곳의 밀도 차로 인해 발생하는 자연스러운 물질의 이동에 의해 열전달이 되는 경우 자연 대류라고 한다. 반면 온수난방 장치와 같이 가열된 물질이 팬이나 펌프에 의하여 강제 순환되는 경우를 강제 대류라고 한다.



[액체의 대류 현상] [공기의 대류 현상]

[그림 Ⅱ-6] **대류 현상**

3) 복사

일상적으로 가장 많이 경험하는 열전달의 한 예는 태양으로부터 지구로 에너지가 전달되는 경우이다. 이 경우 우주공간은 거의 진공이므로 매질 물질이 존재해야만 열전달이 가능한 전도나 대류 방식의 열전달이 아닌 다른 방식이라는 것을 알 수 있다. 태양에서 지구로의 열전달은 전자기파 복사에 의한 것이다. 전자기파는 매질이 없어도 전파되고 에너지를 전달한다. 물체를 이루는 원자 속 전하가 진동하면서 전자기파를 방출하는 방식으로 열전달을 하는 것을 **복사**라고 한다.

모든 물체는 온도가 절대영도가 아닌 이상 복사파를 방출한다. 그러나 단지 방출만 한다면 물체의 온도는 점점 낮아져 영도에 이르게 될 것이다. 실제로 그렇지 않고 일정한 온도를 유지한다는 것은 방출한 만큼의 에너지를 주변으로부터 흡수한다는 것을 의미한다. 즉 주변과 열평형 상태에 있을 때 흡수하는 열과 방출하는 열이 같아 알짜 열전달은 없다. 반면에 물체의 온도가 주변보다 높거나 낮다면 주변과 열전달이 이루어져야 한다.

복사의 경우 물체의 온도가 높을수록 더 많은 복사열을 방출하기 때문에 주변보다 온도가 높은 물체는 방출하는 열이 흡수하는 열보다 많아 주변으로의 알짜 열전달이 일어난다.

❖ 스테판 법칙은 1879년 스테판이 실험적으로 발견하였고 5년 후애 볼츠만이 이론적으로 유도하여 스테판-볼츠만 법칙이라고도 한다.

온도에 따른 복사 에너지 방출율은 절대온도의 네 제곱에 비례한다는 사실을 실험적으로 정량화한 사람은 스테판(Stefan)으로 **스테판 법칙**은 다음과 같이 주어진다.

$$I = e\sigma T^4 \qquad (\text{Ⅱ. } 1\text{-}11)$$

I는 단위 면적당, 단위 시간당 방출되는 복사 에너지를 나타내고 e는 물체에 따라 다른 값을 주는 방출률(emissivity)로 0에서 1 사이의 값을 갖는다. σ는 물체에 상관없이 일정한 값을 갖는 양으로 **스테판 상수**라고 한다. 그 값은 다음과 같다.

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8}\,\mathrm{W/m^2 \cdot k^4} \qquad (\text{Ⅱ. } 1\text{-}12)$$

❖ 물체의 방출률과 흡수율은 같아서 이상적인 흡수체는 동시에 이상적인 방출체가 된다.

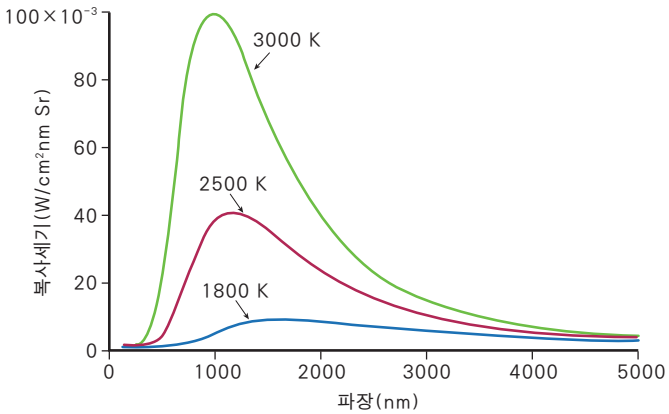
방출률 e의 값이 1인 이상적인 물체를 **흑체**(blackbody)라고 하는데 흑체는 입사하는 모든 파장의 전자기파를 흡수하는 물체를 말한다. 모든 전자기파를 흡수하는 경우 가시광선 영역대의 전자기파도 모두 흡수되므로 그 물체는 검게 보이게 된다. 따라서 일반적으로 검은색의 물체들은 흑체처럼 행동한다. 스테판 법칙은 같은 방출률을 갖는 물체들인 경우 방출되는 복사 에너지는 물체의 모양이나 크기 또는 다른 특성들에 상관없이 온도에만 관계된다는 것을 명확히 보여주고 있다. 또한 온도의 네제곱에 비례하기 때문에 온도 변화에 굉장히 민감한 것을 알 수 있다.

복사파는 전자기파이므로 한 물체가 내는 복사파에는 여러 파장(또는 진동수) 영역대의 전자기파들이 섞여있다. 어느 파장 영역대에서 많은 방출이 일어나는지 알아보자.

[그림 Ⅱ-7]은 여러 온도의 흑체로부터 방출되는 **복사 스펙트럼**으로 방출되는 에너지를 파장의 함수로 나타낸 것이다. 온도가 높아질수록 전체 복사량이 많아짐을 알 수 있고 최대값을 주는 파장은 짧아지는 것을 알 수 있다.

물체의 복사 스펙트럼은 그 물체의 온도 특성을 반영하는 것이고 실온 정도(300 K)의 물체는 주로 파장이 10 μm인 적외선이 방출된다. 태양은 훨씬 더 온도가 높기 때문에 주로 더 짧은 파장의 복사를 방출하는데, 복

사가 최대가 되는 파장은 가시광선 영역이지만 상당부분의 적외선과 자외선도 포함된다.



[그림 Ⅱ-7] 여러 온도에서의 흑체 복사 스펙트럼

최대 복사가 일어나는 파장은 온도에 반비례하는 데 이것을 **빈의 변위법칙**(Wien's displacement law)이라고 하고 다음과 같다.

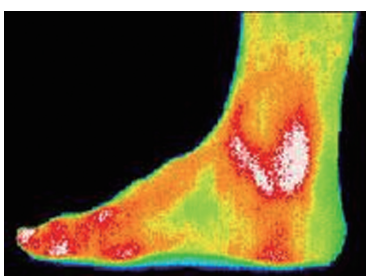
$$\lambda_{max} = \frac{2.898\ \text{mm} \cdot \text{K}}{T} \qquad (\text{Ⅱ. } 1\text{-}13)$$

빈의 변위법칙은 별의 복사선을 분석하여 별의 온도를 결정하는데 유용하게 사용되며 물체 표면에서의 온도분포를 나타내는 온도분포도(thermograph)를 그리는 데에도 이용된다.

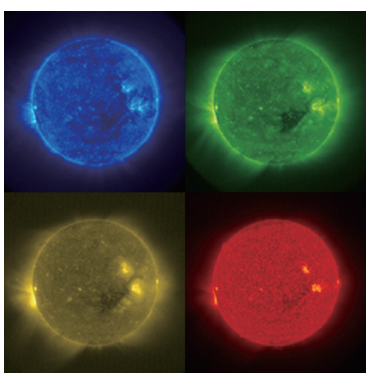
인체에서 나오는 열복사는 의학적인 진단도구로 이용되고 있다. 열화상 사진(thermography)은 신체의 어떤 부위에서 비정상적으로 많은 열이 나는지 보여준다. 예를 들어 부러진 뼈가 치유될 때 골절 부위에 손을 대보면 그 부위에서 열이 나는 것을 알 수 있는데 열화상 사진으로 더 정확한 위치를 찾을 수 있다. [그림 Ⅱ-8]은 검출기에 흡수된 복사파를 전기신호로 변환한 후 화상 표시장치로 보여준 열화상 사진이다.

생각해 보기

태양의 복사 스펙트럼이 최대가 되는 파장은 대략 0.5 ㎛이다.
대략적인 태양 표면의 온도를 계산해 보자.



[그림 Ⅱ-8] 발목이 골절된 발의 열화상 사진



[그림 Ⅱ-9] 다른 온도에서 방출되는 태양 복사 (NASA STEREO 위성에서 보내온 이미지)

연 습 문 제

1. 상자가 고정되어 있는 칸막이에 의해 같은 부피의 두 부분으로 나뉘어 있다. 한 쪽에는 1몰의 네온기체가 4기압 상태로 있고 다른 쪽에는 아르곤 기체가 1기압 상태로 있다. 계 전체의 온도는 300 K으로 외부와는 단열되어 있다.(가스들은 이상기체로 간주할 수 있다.)
칸막이가 자유롭게 움직일 수 있는 상태가 되어 새로운 평형 상태에 도달하였다.

(a) 최종 상태에서 계의 온도는 얼마인가?

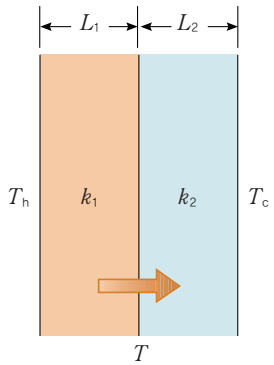
(b) 최종 상태에서 네온기체와 아르곤기체의 부피비는 얼마인가?

2. 200 g의 물이 담겨 있는 컵이 탁자 위에 놓여 있다. 물의 온도를 측정하여 20 °C임을 확인하였다. 얼마 후 물의 온도를 다시 측정하여 보니 25 °C였다. 물에 공급된 열은 얼마인가?

3. 질량 10.0 kg의 물체가 1.00 m의 높이를 낙하하면서 단열용기 속의 물을 저어준다. 이런 낙하를 20회 반복할 경우 물의 내부 에너지 증가는 얼마인가?

4. 몸의 표면적이 2.0 m^2인 사람이 탈의한 상태로 방에 있다. 방의 온도가 22 ℃이고 사람의 평균 체온은 34 ℃이다. 사람 몸으로부터의 단위 시간당 방출되는 알짜에너지는 얼마인가?(단, 사람 피부의 방출률 $e = 0.97$이다.)

5. 두께가 L_1, L_2이고 열전도가 k_1, k_2인 두 판이 그림과 같이 서로 접촉되어 있다. 바깥면의 온도는 각각 T_c와 T_h($T_h > T_c$)이다. 정상 상태에서 판을 통한 열전달률을 구하시오.



2 열역학 법칙

그림은 천장에 매달아 놓은 기계 장치를 이용하여 바닥에 쌓여 있는 낙엽 더미에서 낙엽들을 위로 끌어 올리는 설치 미술을 보여 준다.
이 과정에 어떠한 물리 법칙들이 숨어있을까?

1. 열역학 제1법칙

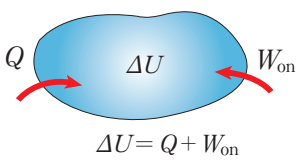
1장에서 열과 일을 통해 시스템과 주의가 에너지 교환을 할 수 있다는 것을 보았다. 이것은 시스템에 유입된 열과 가해진 일 만큼 시스템의 내부 에너지가 변화해야한다는 것을 의미한다. 즉, 시스템에 Q의 열이 유입되고 W_{on}의 일을 해 주었다면 시스템의 내부 에너지 변화 ΔU는

$$\Delta U = Q + W_{on} \qquad (\text{Ⅱ. } 2\text{-}1)$$

가 된다. 이것이 **열역학 제1법칙**으로 시스템의 내부 에너지 변화는 시스템에 유입된 열과 시스템에 해준 일의 합과 같다는 것이다. 즉 열역학 제1법칙은 에너지 보존법칙을 의미한다 [그림 Ⅱ-10].

❖ 계가 일을 행하는 경우 에너지를 주위로 전달한다. 즉 계가 양의 일 (W>0)을 하는 경우는 $W_{on} < 0$인 경우에 해당된다.

Q와 W_{on}의 부호는 양과 음 모두 될 수 있다. 시스템이 열을 흡수한 경우 $Q>0$이고 열을 방출한 경우 $Q<0$이 된다. 마찬가지로 시스템에 양의 일을 해 준 경우 시스템의 내부 에너지는 증가하는 반면 음의 일을 해주는 경우 시스템의 내부 에너지는 감소한다.



[그림 Ⅱ-10] **열역학 제 1법칙**

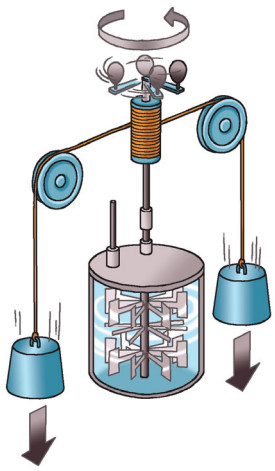
예제 6.0 kg의 물이 담긴 그릇이 불 위에 놓여있다. 어떤 사람이 주걱으로 물을 휘저어 9.2 kJ의 일을 한다. 만일 물의 내부 에너지가 45.2 kJ 증가하였다면 그동안 불이 물에 전달한 열은 얼마인가?

풀이 이 문제의 경우 시스템은 물통안의 물이 된다. 물의 내부 에너지 증가는 $\Delta U = 45.2$ kJ이고 물에 행해진 일은 9.2 kJ이다. 따라서 열역학 제1법칙에 의하면

$Q = \Delta U - W = 45.2\ \text{kJ} - 9.2\ \text{kJ} = 36.0\ \text{kJ}$이 된다.

여기서 36.0 kJ이라는 것이 불에서 방출된 전체 열의 양이라는 것을 의미하지 않는다. 불에서 방출된 전체 열의 양을 알 수는 없지만 열역학 제1법칙에 의해 물에 가해진 열의 양을 계산할 수 있다. 불에서 방출된 열은 물의 내부 에너지로 전달된 것 외에 물통을 뜨겁게 하고 주위 공기와 사람을 따뜻하게 한다.

열 뿐만 아니라 일을 통해서 시스템의 온도를 높일 수 있다는 것을 실험적으로 처음 확인한 것은 1840년대 줄(J. Joule)에 의하여 이루어졌다. 이 실험을 통하여 열이 에너지 전달의 한 방법이라는 것을 과학적으로 확인하였고 이를 통해서 열역학 제1법칙을 이끌어 낼 수 있었다. 줄의 실험은 [그림 Ⅱ-11]에 보여 지는 것처럼 용기에 담겨 있는 물속에 회전할 수 있는 갈퀴가 장치되어 있고 외부에서 일을 하여 갈퀴를 돌려주어 물의 온도를 높이는 것이다. 갈퀴를 돌리는데 해 준 일과 물의 온도 증가로부터 열과 일 사이의 관계를 정량적으로 알 수 있고 그 결과



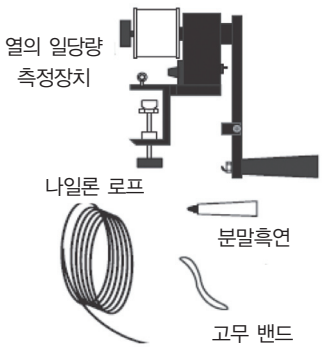
[그림 Ⅱ-11] **줄의 열의 일당량 측정 실험장치**

$$1\ \text{cal} = 4.184\ \text{J} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}2)$$

의 관계가 성립된다는 것을 알아냈다. 즉 1 cal의 열은 4.18 J의 에너지와 같다는 것이고 이것을 열의 일당량이라고 한다.

실험 열의 일당량 측정

준비물 열의 일당량 측정장치, 넓적한 나일론실, 분말흑연, 고무 밴드, 10 kg 질량체, 디지털 전기저항계, 수조, 얼음, 투명 비닐봉지, 온도계, 캘리퍼스, 전자 저울

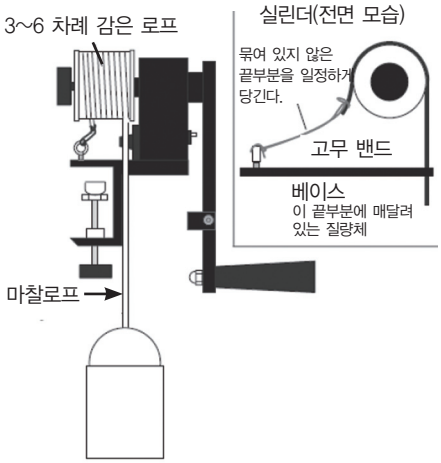


과정

1. 일당량 측정장치에서 알루미늄 실린더를 분리한 후, 표면에 분말흑연을 살짝 분사한다.
2. 수조에 얼음을 넣고 알루미늄 실린더를 비닐봉지에 넣은 다음 수조 안에 충분히 두어 최소한 실온보다 10 ℃ 이하로 낮춘다.
3. 실린더가 냉각되는 동안 실내온도를 측정한 후 실험하는 동안 실린더가 도달하게 될 처음 온도(실온보다 7~9 ℃ 이하)와 최종 온도(실온보다 7~9 ℃ 이상)를 기록한다.
4. 열의 일당량 측정장치에 붙어 있는 서미스터에 대한 저항 대 온도표를 사용하여 최초 온도, 최종 온도에 상응하는 저항값을 기록한다.
5. 수평 테이블 위에 열의 일당량 측정장치를 설치하고, 냉각된 실린더의 구리로 도금된 면이 안쪽을 향하도록 일 당량 측정장치에 장착한다.

❖ 분말흑연은 알루미늄 실린더에 일정한 토크를 가하게 할 뿐만 아니라 마모도 방지한다.

❖ 서미스터는 열에 민감한 저항체로 온도에 따라 저항값이 달라진다.



6. 전기저항계의 리드를 바나나 플러그 커넥터에 연결하고 실린더에 나일론실을 3~6회 정도 감는다.
7. 실린더에 가까운 실의 한쪽 끝에 고무 밴드를 연결하고 고무 밴드 끝을 일당량 측정장치에 있는 원형 고리에 묶어 고정한다.
8. 늘어뜨려져 있는 나일론실의 한쪽 끝에 10 kg짜리 질량체를 묶는다.
9. 일당량 측정장치에 있는 카운터를 '0'으로 초기화 한다.
10. 처음 온도에 상응하는 저항 값에 도달하면 크랭크를 시계방향으로 빠르게 회전시키기 시작하고, 최종 온도 보다 1 ℃ 낮은 온도에 도달하면 저항계를 주시하면서 천천히 회전시키다 최종 온도에 도달하면 멈춘다.
11. 카운터에 표시된 크랭크 회전수를 기록한 후 알루미늄의 질량을 측정한다.
12. 캘리퍼스를 이용하여 알루미늄 실린더의 직경을 측정한다.

❖ 나일론 실은 실린더가 처음온도에 상응하는 저항값에 도달하기 전에 감는다.

❖ 이 때, 위험하지 않도록 질량체의 높이는 가능하면 3 cm를 넘지 않도록 한다.

❖ 실린더는 회전하지만, 실린더에 감긴 로프는 고정되어 회전하지 않으므로 마찰열이 발생하게 된다.

구분	측정값
처음 온도(℃) / 온도상응 저항값	
최종 온도(℃) / 온도상응 저항값	
질량체 질량	
알루미늄 실린더 질량	
알루미늄 실린더 직경 및 반지름	
크랭크 회전 수(회)	

결과 및 분석

1. 실린더에 가해진 토크를 구해보자.
2. 한 일을 계산해 보자.
3. 나타난 온도변화를 측정하여 알루미늄 실린더에 발생한 열(Q)을 계산해 보자.
4. 열의 일당량을 구해보자.

2. 열역학적 과정

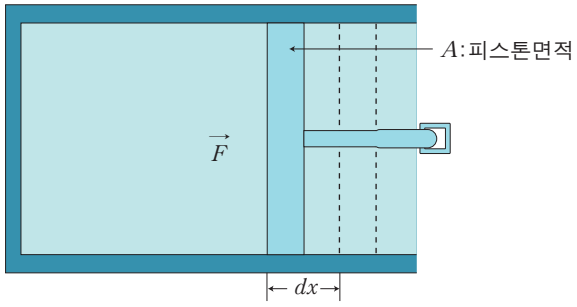
시스템이 한 상태에서 다른 상태로 변하는 과정을 열역학적 과정이라고 한다. 이 때 시스템의 상태는 압력, 부피, 온도, 내부 에너지, 엔트로피 등과 같은 상태 함수에 의해 규정된다. 한 편, 상태 함수는 어느 순간의 시스템의 상태를 설명하지만 시스템이 어떻게 그 상태로 왔는지는 설명하지는 못한다. 반면 열역학적 과정에서 출입한 열과 시스템이 한 일은 경로에 따라 달라지기 때문에 특정한 열역학적 과정동안 출입한 열과 시스템이 한 일을 구함으로써 어떤 경로를 따르는 지 알 수 있다.

1) 기체가 한 일

기체가 한 일을 이해하는 것은 열을 사용할 수 있는 일로 바꾸는 기관을 이해하는데 중요하다. 많은 기관들에서 기관이 하는 일은 기체가 움직일 수 있는 피스톤을 밀면서 팽창할 때 이루어진다. 예를 들어 증기기관은 보일러에서 물이 가열되어 수증기가 발생하고 수증기는 팽창하면서 피스톤을 움직임으로써 일을 한다. 자동차 기관에서는 가솔린과 공기의 혼합체가 점화되어 폭발하면서 발생한 고온과 고압은 기체를 급속하게 팽창시키고 피스톤을 움직여서 일을 하게 한다.

[그림 Ⅱ-12]에 주어진 실린더와 피스톤을 고려하자. 피스톤이 움직일 때 실린더 안의 기체의 부피는 달라지고 이상기체로 간주한다면 이상기체 상태 방정식 $PV = nRT$에 따라 압력 P, 온도 T가 달라지게 된다. 기체가 **준정적 과정**으로 팽창하는 경우 기체가 한 일 W를 구해보자.

❖ **준정적 과정 (quasi-static process)**
피스톤을 갑자기 압축시키면 순간적으로 피스톤 근방의 압력은 먼 곳의 압력보다 높을 것이고 기체가 자체적으로 평형 상태에 이를 때까지 상태 함수인 온도 압력 내부 에너지 등의 값을 결정할 수 없다. 그러나 피스톤을 충분히 천천히 움직여 연속적인 평형상태에 준하는 상태를 이루면서 부피 변화를 준다면 처음 상태에서 최종상태에 이르는 과정에서의 상태 변화들을 파악할 수 있다. 이와 같은 과정을 준정적 과정이라고 한다.



[그림 Ⅱ-12] **단열된 실린더와 움직일 수 있는 피스톤 내에 갇혀있는 기체**

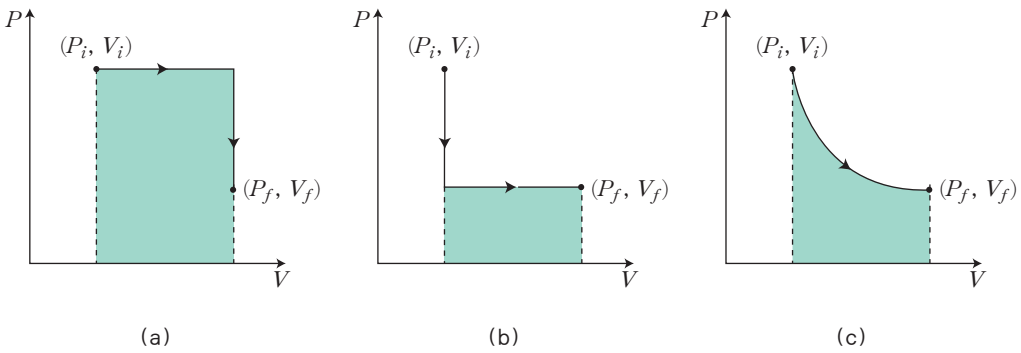
피스톤이 작은 거리 dx만큼 움직였다면 기체가 피스톤에 한 일은 $dW = Fdx$이고 기체 압력이 P이고 균일하다면 $F = PA$가 된다. 따라서,

$$dW = PAdx = PdV \qquad (\text{Ⅱ. } 2\text{-}3)$$

가 되며, $dV = Adx$이므로 팽창하면 기체가 양의 일을 한 것이 되고 압축되었다면 기체가 음의 일을 한 것이다.(이 경우 기체에 양의 일이 가해졌다는 것을 의미한다.) 기체의 처음 부피가 V_i이고 나중 부피가 V_f로 되었다면 그 과정 동안 기체가 한 일 W는

$$W = \int_{V_t}^{V_f} P(V)dV \qquad (\text{Ⅱ. } 2\text{-}4)$$

가 된다. 기체가 한 일을 계산하기 위해서는 기체의 부피가 변하는 동안 압력이 어떻게 변하는지 알아야 한다. 압력과 부피는 기체의 상태를 나타내는 상태 함수들로서 압력과 부피를 각각 축으로 하는 평면 그래프에서의 한 점은 특정한 열역학적 상태를 나타낸다. 또한 압력과 부피의 그래프는 처음 상태에서 최종 상태로 변하는 동안의 열역학적 과정을 보여준다. 압력과 부피의 그래프를 PV 그림(PV diagram)이라고 한다. [그림 Ⅱ-13]은 처음 상태 $(P_i,\ V_i)$에서 나중 상태 $(P_f,\ V_f)$로 변하는 과정에서 서로 다른 경로를 거치는 경우를 보여준다. 기체가 한 일은 PV 곡선 아래의 면적에 해당하고 각 경우에 한 일이 다르다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 동일한 처음 상태와 나중 상태를 갖는 열역학적 과정의 경우에도 다른 경로에 따라 기체가 한 일은 달라진다. 그러나 상태 함수인 내부 에너지 U는 경로에 상관없이 처음과 나중 상태에서 같은 값을 가지므로 경로에 따라 일의 값이 달라지는 것은 경로에 따라 출입한 열도 달라지는 것을 의미한다. 즉, 일과 열은 경로에 따라 달라지는 양이며 특정 상태를 나타내는 상태 함수들이 아니다.



[그림 Ⅱ-13] **처음 상태$(P_i,\ V_i)$에서 나중 상태$(P_f,\ V_f)$로 변하는 세 가지 서로 다른 열역학적 과정. 각 경로를 따라 기체가 한 일은 곡선 아래 색칠된 면적과 같다.**

2) 특별한 열역학적 과정들

(1) 등압 과정 (Constant Pressure Process)

등압 과정은 압력이 일정하게 유지되면서 시스템의 상태가 변하는 과정이다. [그림 Ⅱ-13] (a)의 첫 번째 과정과 (b)의 두 번째 과정이 해당된다. 이 과정에서 부피가 V_i에서 V_f로 변할 때 기체가 한 일은

$$W = P(V_f - V_i) \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{–}5)$$

가 된다.

(2) 등적 과정 (Constant Volume Process)

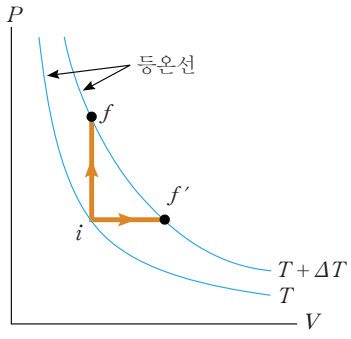
등적 과정은 상태가 변하는 동안 부피가 일정하게 유지되는 과정이다. [그림 Ⅱ-13] (a)의 두 번째 과정과 (b)의 첫 번째 과정이 해당된다. 부피 변화가 없기 때문에 이 과정 동안 기체가 한 일은 $W = 0$이 되고 열역학 제1법칙에 의해 내부 에너지 변화 ΔU는

$$\Delta U = Q \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{–}6)$$

가 된다.

(3) 등온 과정 (Isothermal Process)

등온 과정은 온도가 일정하게 유지되면서 상태가 변하는 과정이다. 이 과정은 PV 그림에서 온도가 일정한 경로를 따라 진행되는데 이상기체의 경우 이상기체 상태 방정식에 따르면 $P = nRT\frac{1}{V}$가 되므로 압력이 부피에 반비례하는 곡선을 따른다. 이 과정 동안 부피가 V_i에서 V_f로 변할 때 이상기체가 한 일은



[그림 Ⅱ-14] 온도 $T_1 < T_2$인 이상기체의 등온곡선.

$$W = nRT\int_i^f \frac{1}{V}dV = nRT\ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{–}7)$$

가 된다. 또한 이상기체의 내부 에너지 변화는 온도 변화에 의하여 결정되므로 내부 에너지 변화는 없다. 즉,

$$\Delta U = 0 \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{–}8)$$

가 되고 열역학 제1법칙에 의하면

$$Q = W \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{–}9)$$

가 되어, 등온 과정의 경우 기체가 한 일은 시스템이 흡수한 열과 같다.

열저장고는 시스템과의 열적 접촉에 의해 온도가 변하지 않는 큰 시스템을 의미하므로 시스템이 열저장고와 접촉하는 경우 시스템과 열저장고 사이에 열이 이동하여 시스템의 온도는 열저장고의 온도로 일정하게 유지 될 수 있다.

(4) 단열 과정(Adiabatic Process)

열역학 과정동안 시스템에 열출입이 없는 경우 단열 과정이라고 한다. 즉, $Q = 0$이고, 열역학 제1법칙에 의하면 시스템의 내부 에너지 변화는

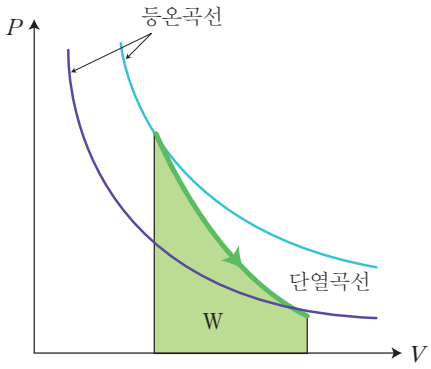
$$\Delta U = -W \qquad (\text{Ⅱ. } 2\text{-}10)$$

이 된다. 단열 과정은 시스템을 단열재나 진공으로 되어 있는 벽을 이용하여 주위로부터 열적으로 차단하거나 그 과정을 매우 빨리 진행하여 열출입이 가능하지 않도록 할 수 있다.

단열된 실린더에 갇혀 있는 기체가 팽창할 때 피스톤을 천천히 밀어 내면서 일을 하는 준정적 과정을 생각해보자. 식 (Ⅱ. 2-10)과 같이 기체가 한 일은 내부 에너지 감소와 같고 이 결과로 기체의 온도는 내려가게 된다. 따라서 [그림 Ⅱ-15]에서 보여지는 바와 같이 단열곡선은 등온곡선보다 가파른 모양을 하게 되고 같은 부피 변화에 대해서 등온팽창의 경우 보다 압력이 더 많이 감소된다.

❖ **열저장고 (heat reservoir)**

일반적으로 열저장고는 열이 유입되거나 유출되더라도 온도 변화가 거의 없는 큰 계를 의미한다. 큰 방에 따뜻한 커피를 두면 커피가 방안의 온도로 식지만 커피로부터 전달된 열에 의해 방의 온도가 변하지는 않는다고 볼 수 있다. 이 때 방은 열저장고의 역할을 한다.



[그림 Ⅱ-15] **단열팽창 과정** PV곡선은 낮은 온도 등온선에서 시작하여 높은 온도 등온선에서 끝나 등온곡선보다 가파른 곡선이 된다.

단원자 분자 이상기체의 단열곡선에 대한 방정식을 구하기 위해 등분배 정리를 이용하자. 등분배 정리에 의하면 내부 에너지는

$$U = \frac{3}{2}nRT \qquad (\text{Ⅱ. } 2\text{-}11)$$

이 된다. 내부 에너지의 미소 변화는

$$dU = \frac{3}{2}nRdT \qquad (\text{Ⅱ. } 2\text{-}12)$$

로 주어지고 준정적 단열팽창 동안 기체가 한 일은 $W = PdV$이므로 식 (Ⅱ. 2-12)는

$$\frac{3}{2}nRdT = -PdV \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}13)$$

가 된다. 이상기체 상태 방정식을 이용하면 식 (Ⅱ. 2-13)은

$$\frac{3}{2}\frac{dT}{T} = -\frac{dV}{V} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}14)$$

가 된다. 식 (Ⅱ. 2-14)의 양변을 적분하면

$$\frac{3}{2}\ln\frac{T_f}{T_i} = -\ln\frac{V_f}{V_i} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}15)$$

을 얻는다. 식 (Ⅱ. 2-15)로부터 $V_f T_f^{3/2} = V_i T_i^{3/2}$의 식을 얻을 수 있다. 즉,

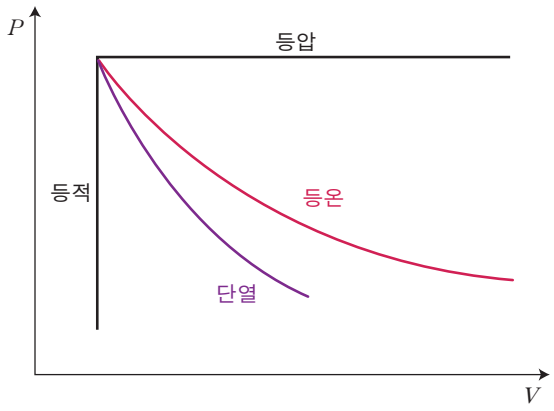
$$VT^{3/2} = \text{일정} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}16)$$

이 된다. 이상기체 상태 방정식을 이용하여 T를 소거하면 $PV^{5/3} = $ 일정이 된다. 여기서 5/3은 단원자 분자 이상기체의 단열지수의 값이다. 일반적으로 단열지수 γ로 표현하면

$$PV^{\gamma} = \text{일정} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}17)$$

❖ 단열지수 γ는 자유도와 $\gamma = \frac{f+2}{f}$의 관계를 갖는다.

이 된다. 단열지수 γ는 1 보다 큰 값을 갖는다. 따라서 이상기체 상태 방정식에 의하면 등온 과정의 경우 $PV =$ 일정이므로 단열 과정의 경우 더 가파른 곡선이 됨을 알 수 있다.



[그림 Ⅱ-16] 여러 가지 열역학적 과정에 대한 그림

3. 열기관과 열역학 제2법칙

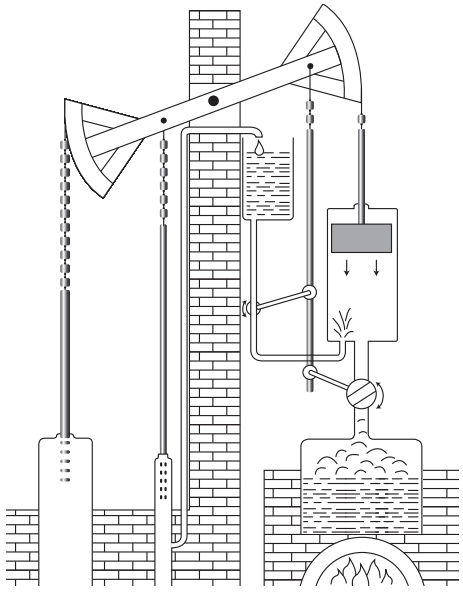
열역학에 대한 연구가 활발히 이루어진 것은 열기관의 효율을 높이기 위한 연구에서부터 시작되었다. 열기관의 이상적인 효율은 카르노에 의해 이론적으로 제시되었고 그 과정에서 클라우지우스에 의해 열과 온도와는 다른 새로운 물리량인 엔트로피가 정의되고 열역학 제2법칙이 나오게 되었다. 이 절에서는 열기관과 카르노 기관에 대해 알아보고 관련하여 열역학 제2법칙에 대해 알아보자.

[그림 Ⅱ-17] 증기기관

1) 열기관(heat engine)

열기관은 열을 흡수하여 그 일부를 일로 바꾸어 주는 장치이다. 첫 번째 실용적인 열기관은 18세기 석탄광산에서 물을 퍼내기 위해 발명된 증기기관이었다. 오늘날은 대부분의 발전소에서 전기를 생산하기 위해 사용되는 증기터빈이나 자동차의 내연기관 등의 열기관이 사용되고 있다.

열역학 제1법칙에 의하면 열을 모두 일로 바꿀 수 있을 것으로 생각되나 실제 기관은 투입된 열의 일부만을 일로 바꿀 수 있을 뿐이다. 그 이유는 열역학 제1법칙 만으로는 설명되지 않으며 열역학 제2법칙의 발견을 이끌었다.



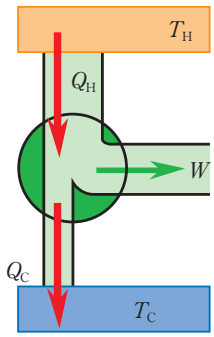
[그림 Ⅱ-18] 물을 퍼내기 위한 증기기관의 개략도

❖ 작업물질

증기기관의 경우 물이 작업물질이 되고 내연기관의 경우 공기와 기화된 가솔린의 혼합체가 된다.

모든 열기관이 가지고 있는 중요한 특징은 작업물질(working substance)이라고 부르는 시스템이 온도가 T_H인 고온 열저장고에서 열 Q_H를 흡수하여 일 W을 하고 남은 열 Q_C를 온도 T_C인 저온 열저장고로 방출하고 원래의 상태로 되돌아온다는 것이다. 이와 같이 열기관은 순환장치로 열을 투입하여 일을 할 수 있도록 하는 것이 목적이다.

[그림 Ⅱ-19]은 열기관의 에너지 유입과 유출을 보여주는 개략도이다.



[그림 Ⅱ-19] 열기관의 에너지 유입과 유출

열기관의 효율 e는 고원열저장고에서 유입된 열 대비 기관이 한 일

$$e = \frac{W}{Q_H} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}18)$$

로 정의한다.

열역학 제1법칙에 의하면 $W = Q_H - Q_C$이므로 열효율 e는

$$e = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}19)$$

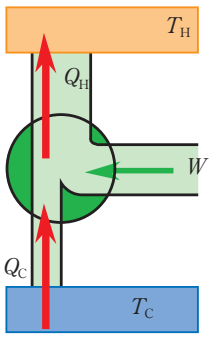
이 된다. 이 값은 1보다 클 수 없고 $Q_C = 0$인 경우, 즉 유입된 열이 모두 일로 바뀌었을 때에만 효율이 1이 될 수 있다. 이와 같이 열역학 제1법칙인 에너지 보존 법칙만을 고려한다면 효율이 1인 기관도 나올 수 있다. 그러나 실제로 효율이 1인 기관은 존재하지 않는다.

이와 같은 실험적인 사실들로부터 켈빈(Kelvin)은 다음과 같이 **열역학 제2법칙**을 진술하였다.

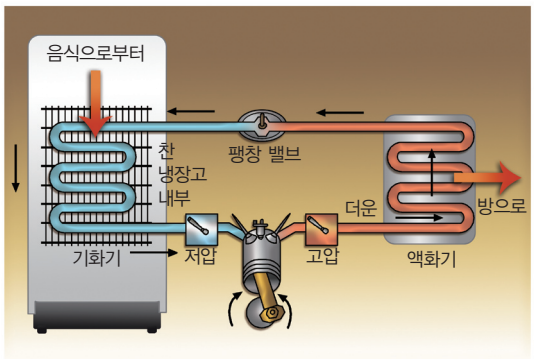
열기관의 한 순환과정 동안 열저장고에서 얻은 열을 모두 일로 바꿀 수는 없다.

2) 냉동기(refrigerator)

냉동기는 기본적으로 열기관을 거꾸로 작동하는 기관이다. 저온 열저장고에서 열을 뽑아 고온 열저장고로 전달하기 위해 냉동기에 일을 해주어야 한다. [그림 Ⅱ-20]은 [그림 Ⅱ-19]의 역방향으로 바뀐 냉동기에서의 에너지 유, 출입을 보여주는 개략도이다. 저온 열저장고에서 Q_C의 열을 뽑아내기 위해 외부에서 일 W를 해 주어야 하고 고온 열저장고로 Q_H의 열을 방출한다. 가정의 냉장고를 생각하면 저온 열저장고는 냉장고의 내부가 되고 고온 열저장고는 냉장고가 있는 방이 된다. 이 때 냉장고의 열을 바깥으로 빼내기 위해 전기적인 일을 해주게 된다.



[그림 Ⅱ-20] 냉동기의 에너지 유입과 유출



[그림 Ⅱ-21] 냉장고의 원리

냉동기의 효율은 성능계수(COP : Coefficient of Performance)로 나타내고 해 준 일 W대비 뽑아낸 열 Q_C로 정의한다. 즉,

$$\mathrm{COP} = \frac{Q_C}{W} \qquad (\text{Ⅱ. } 2\text{-}20)$$

이다.

[그림 Ⅱ-21]은 냉장고의 원리를 도식화 한 것으로 압축기에서 유체가 압축되고, 액화기를 통과하면서 찬 유체가 팽창하여 더 차가워진다. 냉장고 안 음식의 열이 찬 유체로 전달된다. 이 유체가 다시 압축기로 가며 이 과정이 반복된다.

다음과 같은 냉동기에 관한 클라우지우스(Clausius)의 표현은 **열역학 제2법칙**에 대한 또 다른 표현이다.

한 순환과정 동안 냉동기가 아무런 일을 받지 않고 저온 열저장고에서 고온 열저장고로 열을 전달하는 것은 불가능하다.

즉, 자발적으로 차가운 물체에서 뜨거운 물체로 열이 전달되지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 클라우지우스의 표현은 켈빈의 표현과 동등한 표현이다.

생각해 보기

열역학 제2법칙에 대한 클라우지우스의 표현과 켈빈의 표현이 동등함을 보이시오.

❖ 카르노는 공학자로서 가능한 열기관의 최대효율을 밝힌 1824년은 열열학 제 1 법칙이 확립되기 이전이다.

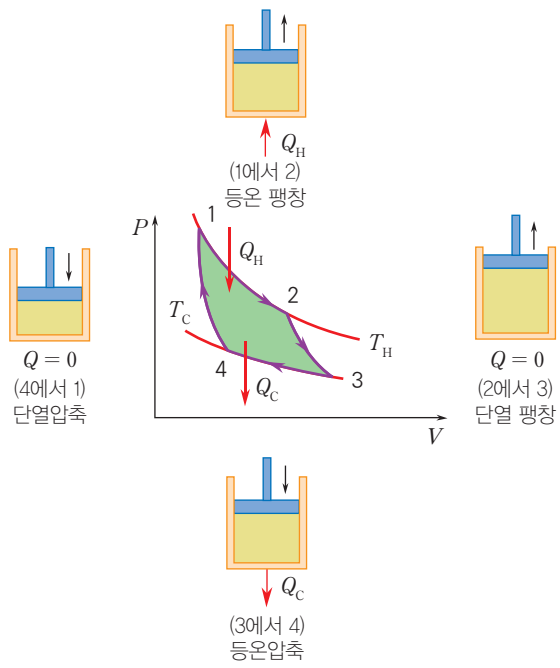
3) 카르노 기관(Carnot engine)

앞에서 언급한 열역학 제2법칙에 의하면 열효율이 1인 열기관을 만들 수는 없다. 가능한 최대 효율에 대한 연구는 카르노에 의해 1824년에 이루어졌다. 카르노 기관은 고온과 저온의 두 열저장고에 접촉하고 있는 이상기체를 이용한 가상적인 기관으로, 그 작동하는 순환과정을 카르노 순환(carnot cycle)이라고 한다.

카르노는 두 열저장고 사이에서 작동하는 모든 가역기관(reversible engine)은 같은 효율을 가지며, 이 가역기관보다 더 큰 효율을 가진 기관은 있을 수 없다는 카르노 정리를 발표하였다. [그림 Ⅱ-22]와 같은 카르노 순환과정을 이용하여 카르노 정리를 확인해 보자.

카르노 순환과정은 한 순환과정 동안 마찰이나 자유팽창, 외부와의 비가역적 열 교환 등이 없는 이상적인 상황을 가정한 가역과정이다. [그림 Ⅱ-22]는 4단계의 과정을 거쳐 원래상태로 돌아오는 카르노 한 순환과정과 PV그림을 나타낸다.

각 단계를 살펴보면 1→2인 과정은 등온팽창 과정으로 기체가 팽창하면서 고온 열저장고로부터 열 Q_H를 흡수한다. 2→3인 과정은 단열팽창 과정으로 외부와의 열 접촉이 차단된 상태로 기체의 온도가 T_C가 될 때까지



[그림 Ⅱ-22] 카르노 순환과정

팽창한다. 3→4인 과정은 등온압축 과정으로 저온 열저장고와 열 접촉하여 기체가 압축되는 동안 열 Q_C를 배출하고 이 때 기체의 온도는 T_C로 일정하게 유지된다. 마지막으로, 4→1인 과정은 단열압축 과정으로 외부와의 열 접촉이 차단된 상태로 기체의 온도가 T_H가 될 때까지 압축되어 처음 1번 상태로 되돌아간다.

한 순환과정을 마치고 원래 상태로 되돌아 왔으므로 이 과정 동안 기관의 내부 에너지의 변화 $\Delta U = 0$이 된다. 따라서 열역학 제1법칙에 의하면 한 순환과정 동안 기관이 한 일 $W = Q_H - Q_C$와 같다. n몰의 단원자 분자 이상기체를 작업물질로 고려하자. 등온팽창 과정 동안 내부 에너지 변화는 없으므로 흡수한 열 Q_H는 그 과정 동안 기체가 한 일과 같다. 식 (Ⅱ. 2-7)을 이용하면,

$$Q_H = W = nRT_H \ln\frac{V_2}{V_1} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}21)$$

이 된다. 등온압축 과정에서 방출된 열은

$$Q_C = nRT_C \ln\frac{V_3}{V_4} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}22)$$

이 된다. 그러면,

$$\frac{Q_C}{Q_H} = \frac{T_C \ln\frac{V_3}{V_4}}{T_H \ln\frac{V_2}{V_1}} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}23)$$

가 된다. 두 번의 단열 과정에서 온도와 부피사이의 관계식 식 (Ⅱ. 2-16)을 이용하면,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}24)$$

이 된다. 식 (Ⅱ. 2-24)를 식 (Ⅱ. 2-23)에 대입하면

$$\frac{Q_C}{Q_H} = \frac{T_C}{T_H} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}25)$$

이 성립하고 따라서 카르노 기관의 열효율 e_c는

$$e_c = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \qquad (Ⅱ.\ 2\text{-}26)$$

이 된다.

식 (Ⅱ. 2-26)은 단지 저온 열저장고의 온도와 고온 열저장고의 온도에만 카르노 열효율이 관계된다는 것을 보여준다. 저온 열저장고의 온도가 낮을수록 고온 열저장고의 온도가 높을수록 열효율을 높일 수 있다. 또한 저온 열저장고의 온도가 0 K이거나 고온 열저장고의 온도가 무한대인 경우 열효율 값이 1이 되지만 이러한 경우는 실제로 없으므로 열효율이 1이 되는 경우는 없다. 이 식은 두 열저장고 사이에서 작동하는 어떤 가역기관에도 적용된다. 카르노 기관은 이상적인 가역 열기관이므로 카르노 기관보다 열효율이 높은 기관은 있을 수 없으며 카르노 열효율은 어떤 열기관이 가질 수 있는 최대 효율이 된다.

❖ 회전운동 센서는 피스톤 상부에서 20~30 cm 위에 위치하도록 부착한다.

❖ 피스톤 중앙에 난 구멍에 실을 묶고 메스헹거가 35 g이 되도록 질량체를 부착한다. 이 때, 질량체는 피스톤에 대한 평형력 역할을 한다.

❖ 인터페이스에 채널번호는 구분되어 있다.

❖ 뜨거운 물 사용에 주의하고, 물의 양이 너무 적으면 실험하는 동안 일정한 온도를 유지하기 어렵다.

실험 열기관의 효율 측정

준비물

1. 열기관 실험장치 : 열기관 장치, 스탠드, 200 g 질량체, 가운데 구멍난 질량체 10 g, 20 g, 질량체 행거, 플라스틱 통 2개, 회전운동 센서 1개, 온도센서 2개, 압력센서 1개

추가 준비물 : ScienceWorkhop 750 인터페이스, DataStudio 소프트웨어, Heat Engine cycle소프트웨어, 컴퓨터, 얼음물, 100 ℃물, 실 1 m

과정

1. 컴퓨터에 Data Studio와 Heat Engine cycle 프로그램을 설치한다.
2. 인터페이스를 컴퓨터의 USB 단자에 연결하고 전원을 켠다.
3. 스탠드 받침대 위에 열기관을 부착하고 회전운동 센서를 스탠드 봉에 부착한다.
4. 피스톤 상부 중앙에 실을 묶고 실이 회전운동 센서의 풀리(pulley) 중간 홈에 맞도록 정렬하여 실을 통과시킨 다음 메스행거(mass hanger)를 실 끝에 매달고 질량체를 부착한다.
5. 피스톤의 위치를 실린더 바닥으로부터 약 2-3 cm 떨어진 곳에 두고 캔에 꽂힌 튜브를 열기관 상의 한쪽 포트에 부착하고 다른 포트에는 압력센서와 연결된 튜브를 부착한다.
6. 인터페이스 상에 압력센서는 채널 A, 2개의 온도센서는 채널 B, C, 회전운동 센서는 채널 1, 2에 연결한다.
7. 두 개의 플라스틱 통에 각각 얼음물과 뜨거운 물을 90%정도 채우고 온도센서를 각 통에 넣고 캔은 얼음물 통에 넣는다.
8. Data Studio 소프트웨어를 실행한 다음 'Open Activity'를 선택하여 임의의 장소에 저장해둔 Heat Engine cycle 소프트웨어를 불러온다.
9. 'Start' 단추를 눌러 데이터 기록을 시작한 다음 아래 10번-13번의 과정을 지

연 없이 실시한다.

10. 피스톤 위에 200 g 질량체를 놓는다.
11. 캔을 얼음물통에서 뜨거운 물통으로 옮긴다.
12. 피스톤 위에 있는 200 g 질량체를 제거한다.
13. 캔을 뜨거운 물통에서 얼음물통으로 옮긴다.
14. Heat Engine cycle 그래프가 완성되면 'Stop' 단추를 눌러 실험을 정지하고 그래프를 분석한다.

❖ 과정 10번–13번은 각 단계마다 4초를 넘지 않도록 한다.

결과 및 분석

1. 각 단계별로 내부 에너지 변화, 출입한 열, 기체가 한 일들을 구해보자.
   1) A–B과정(등온압축)
   2) B–C과정(등압팽창)
   3) C–D과정(등온팽창)
   4) D–A과정(등압압축)
2. 곡선 안의 면적을 측정해서 기체가 한 일을 구한다.
3. 고온 저수조에서 흡수한 열을 구한다.
4. 이 기관의 효율 e를 구한다.

정리하기

1. 실험에서 얻은 효율 e값과 이론적인 계산값을 비교해 보고 차이가 있다면 그 이유를 생각해 보자.
2. 실험에서 사용된 기관의 효율과 카르노 효율과 비교하여 그 차이를 설명해 보자.

생각해 보기

실제 열기관들이 어떠한 것들이 있는지 알아보고 그러한 열기관들은 어떤 순환과정을 거치는 지 알아보자.

4. 엔트로피와 열역학 제2법칙

❖ 엔트로피(entropy)라는 용어는 클라우지우스가 처음 제안한 것으로 그리스어로 진화, 변환의 의미를 갖는다.

많은 자연현상은 한 번 일어난 일은 원래대로 되돌릴 수 없다는 것을 보여준다. 유리컵이 바닥에 떨어져 깨진다든지, 담배 연기가 공기 중으로 흩어지는 등의 현상들은 그 예이다. 이와 같은 과정을 **비가역과정**(irreversible process)이라고 한다. 비가역과정은 어떠한 과정이 한 방향으로만 진행할 수 있고 그 역으로 진행되는 것이 가능하지 않는 과정을 의

미한다. 이러한 자연의 방향성에 대한 설명은 **엔트로피**(entropy)라는 양을 통하여 설명할 수 있다.

1865년 클라우지우스는 엔트로피를 온도가 T인 시스템에 열 Q가 흡수될 때마다 Q/T만큼 씩 변화하는 양으로 정의하였다. 이 정의는 엔트로피가 실제로 무엇인지에 대해서 말하지는 않지만, 시스템의 미시적 구조와는 상관없이 시스템의 온도와 출입한 열에 대한 거시적인 열역학적 정보만으로 알 수 있다. 열역학에서의 엔트로피를 정의하고 그 성질을 알아보자.

1) 열역학적 엔트로피

카르노 기관의 경우 식 (Ⅱ. 2-25)에서 고온 열저장고와 관계되는 양과 저온 열저장고와 관계되는 양으로 나눠보면

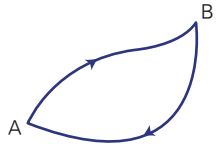
$$\frac{Q_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}}+\frac{-Q_{\mathrm{C}}}{T_{\mathrm{C}}}=0 \qquad (\text{Ⅱ. 2-27})$$

이 성립한다. 이것은 카르노 한 순환과정 동안 0이 되는 어떤 물리량이 있음을 의미한다. Q는 상태 함수가 아니기 때문에 한 순환과정을 거친 뒤 0이 되지 않고 어떠한 과정을 거치는지에 따라 다른 값을 갖는다. 반면 시스템의 열역학적 상태를 특정 짓는 상태 함수들은 시스템의 열역학적 과정에 상관없이 최종적으로 같은 상태에 도달하면 같은 값을 갖는다. 따라서 한 순환과정을 거친 후 처음 상태로 되돌아오면 상태 함수들은 같은 값을 가지며 순환과정동안 상태 함수의 변화량은 0이 된다. 가역과정의 경우 식 (Ⅱ. 2-27)을 일반화하면 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{Q_i}{T_i}=0 \qquad (\text{Ⅱ. 2-28})$$

이 성립한다. 이것은 한 순환과정을 n단계로 나누었을 때 각 단계에서의 Q_i/T_i의 합이 0이 됨을 의미한다. 단계를 더욱 미소단계로 나누면 다음과 같이 적분으로 나타낼 수 있다.

$$\oint\frac{dQ}{T}=0 \qquad (\text{Ⅱ. 2-29})$$



[그림 Ⅱ-23] A와 B 점을 통과하는 한 순환과정

[그림 Ⅱ-23] 처럼 A지점에서 B지점으로 간 후 다시 A점으로 돌아와 한 순화관정을 마치는 경우 식 (Ⅱ. 2-29)으로부터 다음 식

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} = -\int_B^A \frac{dQ}{T} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}30)$$

이 성립되는 것을 알 수 있다. 즉 가역과정을 따라서 계산한 적분은 처음 상태 A와 나중 상태 B에만 관계하고 그 중간에 어떠한 열역학적 과정을 거쳤는지는 상관없다. 그러므로 $\frac{dQ}{T}$를 미분으로하는 새로운 상태 함수를 정의할 수 있다. 이 새로운 상태 함수를 엔트로피라고 명명하면 **엔트로피** S는

$$\Delta S = S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{dQ}{T} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}31)$$

로 정의된다. 이것을 열역학적 엔트로피 또는 거시적인 엔트로피라고 한다. 이 정의에 의하면 엔트로피는 시스템에 열이 출입함에 따라 수반되는 양으로 시스템이 열을 흡수하면 증가하고 열을 방출하면 감소하는 양이다. 열 출입이 차단된 경우, 즉 단열 과정의 경우 시스템의 엔트로피 변화는 없다.

❖ dQ와 dW는 출입한 열의 양과 기체가 한 일의 미소량을 나타내기 위해 미분의 표현을 썼다. 그러나 열과 일은 상태 함수가 아니기 때문에 dQ나 dW가 함수의 미분을 나타내는 것은 아니다.

예제 200 g의 물이 든 컵을 20 ℃ 에서 100 ℃까지 가열하였다. 엔트로피는 얼마나 증가하였는가?(단, 물의 비열은 4.2 J/g · K이다.)

풀이 물의 비열이 4.2 J/g · K이므로 물 200 g의 열용량은 840 J/K이다. 식 (Ⅱ. 2-31)으로부터 엔트로피 변화는

$$\Delta S = 840\ \text{J/K} \int_{293\text{K}}^{373\text{K}} \frac{dT}{T} = 840\ \text{J/K}\ \ln\left(\frac{373}{293}\right) = 202.8\ \text{J/K}\ \text{이 된다.}$$

❖ C_V는 등적 열용량을 나타낸다. 부피가 일정한 경우 $W=0$이므로 $dU=dQ$가 된다. 따라서 열용량 정의식에 의하면 $dU = C_V dT$가 되고 이상기체의 경우 $C_V = \frac{f}{2}nR$이 된다.

• 이상기체의 엔트로피 변화

이상기체의 엔트로피 변화를 간단히 측정할 수 있는 온도나 부피와 같은 양들로 어떻게 나타낼 수 있는지 알아보자. 이상기체가 온도 T_i와 부피 V_i인 처음 상태에서 T_f와 V_f인 나중 상태로 준정적 과정을 통해 변한다고 하자. 열역학 제1법칙에 의하면 $dQ = dU + dW$가 된다. $dW = PdV$이므로

$$dQ = dU + PdV \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}32)$$

이 된다. 이상기체에 대하여 $dU = C_V dT$로 표현되고, 상태 방정식을 이용하면 $P = nRT/V$이므로 식 (Ⅱ. 2-32)는

$$dQ = C_V dT + nRT\frac{dV}{V} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}33)$$

가 된다. 식 (Ⅱ. 2-33)의 각 항을 T로 나누면

$$\frac{dQ}{T} = C_V\frac{dT}{T} + nR\frac{dV}{V} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}34)$$

이 된다. 식 (Ⅱ. 2-34)의 양 변을 적분하면 엔트로피 변화는

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T} = C_V \ln\frac{T_f}{T_i} + nR\ln\frac{V_f}{V_i} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}35)$$

이 된다. 오른쪽 항들을 보면 처음 상태와 나중 상태의 온도와 부피를 알면 이상기체의 엔트로피 변화를 구할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 두 상태들 사이의 경로에 상관없는 값으로 엔트로피가 상태 함수임을 말해 준다.

등온 가역과정의 경우 식 (Ⅱ. 2-35)에서 첫 번째 항은 0이 되므로 이상기체의 엔트로피 변화는

$$\Delta S = nR\ln\frac{V_f}{V_i} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}36)$$

이 된다. 이 과정 동안 기체가 한 일은 식 (Ⅱ. 2-7)에 의하면

$$W = nRT\ln\frac{V_f}{V_i} \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}37)$$

이다. 기체가 흡수한 열은 $Q = W$이다. 기체가 흡수한 열은 주위 열저장고로부터 온 것이므로 열저장고는 Q만큼의 열을 잃었다. 따라서 열저장고는 $\frac{Q}{T} = -nR\ln\frac{V_f}{V_i}$의 엔트로피 변화를 겪게 된다. 기체와 열저장고를 합친 시스템을 전체계라고 하면 전체계의 엔트로피 변화는 0이 된다. 즉,

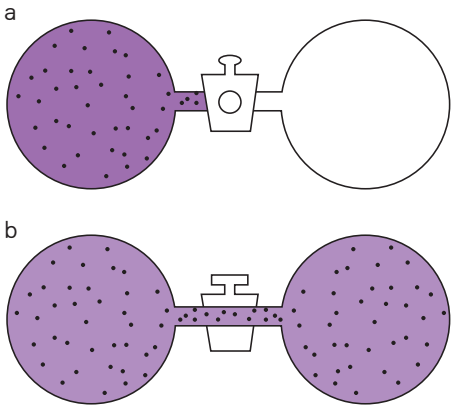
❖ 우주는 완전한 고립계를 대변하므로 기체와 열저장고를 포함한 고립된 전체계를 간단히 우주로 표현하자.

가역과정에서 우주의 엔트로피 변화는 0이다.

이상기체의 등온가역 과정을 통해 내린 결론이지만 가역과정의 경우 항상 성립한다.

• 비가역과정에서의 엔트로피 변화

식 (Ⅱ. 2-35)는 가역과정에 대한 적분을 통해 얻은 값이다. 그러나 엔트로피는 상태 함수이기 때문에 처음 상태와 나중 상태가 같다면 그 변화 과정이 비가역과정을 거쳐 변화된 것이라 할지라도 엔트로피 변화는 같다.



[그림 Ⅱ-24] 자유팽창하는 기체

따라서 비가역과정의 엔트로피 변화는 처음과 나중 상태가 동일한 가역과정을 이용하여 계산할 수 있다.

기체가 팽창하는 예로 앞에서 설명한 등온팽창의 경우와는 다른 자유팽창을 생각해 볼 수 있다. 먼저 [그림 Ⅱ-24]와 같이 처음에 상자의 왼쪽 반에 기체를 가두어 두었다가 중간에 있는 잠금 콕을 열면 갇혀 있던 기체는 오른쪽 상자로 확산되어 양쪽 상자 전체에 고루 퍼지게 된다. 고루 퍼진 후 자발적으로 한 쪽으로 기체들이 모두 다시 몰리는 경우는 나타나지 않으므로 이 과정은 비가역과정이다. 이러한 부피팽창을 자유팽창이라 한다. 자유팽창 과정 동안 단열되어 있다고 하면 시스템 전체의 출입한 열 $Q=0$이고 기체가 일을 하지 않았으므로 $W=0$이어서 열역학 제1법칙에 의하면 내부에너지 변화도 없다. 자유팽창은 처음 상태와 나중 상태는 알 수 있으나 그 중간에 어떠한 상태들을 거치는지 알 수는 없다. 그러나 내부 에너지 변화가 없으므로 온도 변화가 없는 경우로 같은 온도에서 부피 변화를 주는 등온팽창 과정을 이용하여 엔트로피 변화를 계산할 수 있다.

자유팽창하는 기체의 온도가 T이고 처음 부피가 V_i나중 부피가 V_f라면 기체의 엔트로피 변화는

$$\Delta S = nR\ln\frac{V_f}{V_i} \qquad (\text{Ⅱ. 2-38})$$

가 된다. 이 과정 동안 우주의 엔트로피 변화를 생각해 보자. 기체는 주위와 고립되어 있었으므로 주위 열저장고의 엔트로피 변화는 없다. 따라서 식 (Ⅱ. 2-38)이 우주의 엔트로피 변화가 된다. $V_f > V_i$이므로 $\Delta S > 0$이다.

즉 자유 팽창하는 동안 우주 전체의 엔트로피는 증가하게 된다.

이것은 비가역과정에서 일반적인 현상으로 열역학 제2법칙을 다음과 같이 표현할 수 있다.

비가역과정에서 우주의 엔트로피는 증가한다.

다시 말해서, 어떠한 비가역적 열역학 과정은 항상 엔트로피가 증가하는 방향으로 일어난다는 것을 의미한다. 가역과정을 포함해서 열역학 제2법칙을 다음과 같이 표현할 수 있다.

우주의 엔트로피는 결코 감소하지 않는다.

이것은 켈빈의 표현이나 클라우지우스의 표현과 같은 사실을 말한다. 열이 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하고 그 반대현상이 자발적으로 일어나지 못한다. 이것은 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 열이 흐를 때 전체계의 엔트로피가 증가하기 때문이다. 즉, 엔트로피가 증가하는 방향으로 열역학적 과정이 이루어진다.

예제 높이 h에서 질량 m인 찰흙 덩어리가 바닥으로 떨어졌다. 우주의 엔트로피 변화를 구하시오.(단, 이 과정이 일어나는 동안 온도는 T로 일정하다.)

풀이 처음 찰흙 덩어리는 중력 퍼텐셜 에너지 mgh를 갖는다. 이 에너지는 바닥에 충돌한 후 멈추게 되는 완전 비탄성 충돌로 모두 시스템의 내부 에너지로 전환된다.(여기서 시스템은 찰흙 덩어리, 바닥, 대기를 포함한다.) 이 과정은 비가역과정이므로 엔트로피 변화를 구하기 위해 대응되는 가역과정을 생각해 보자. 시스템의 내부 에너지가 mgh만큼 증가하였으므로 일정한 온도가 유지되는 상황에서 $Q = mgh$만큼의 열이 가해진 가역과정을 생각할 수 있다. 이 때 엔트로피 변화는

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{mgh}{T}$$

가 된다. 시스템은 고립계이므로 우주의 엔트로피 변화도 같아서 이 과정 동안 우주의 엔트로피가 증가하는 것을 알 수 있다.

2) 통계적인 엔트로피

열역학적 과정이 우주의 엔트로피가 증가하는 방향으로 일어난다는 것을 알았다. 그 이유가 무엇인지는 통계적인 엔트로피 개념을 이용하여 설명할 수 있다. 엔트로피는 관점에 따라 여러 형태로 표현할 수 있다. 통계적인

엔트로피는 많은 자연현상들이 한 방향으로만 일어나는 이유가 단지 확률에 의한 것이라는 것을 말해 준다. 열이 온도가 낮은 곳에서 높은 곳으로 전달될 수도 있다. 단지 그러한 확률이 아주 작아 거시적인 세계에서 나타나지 않는 것으로 간주할 수 있는 것이다.

처음 부피 V에서 나중 부피 $2V$로 늘어나는 자유팽창의 예를 다시 살펴보자. 이 과정에서 우주의 엔트로피 변화는 식 (Ⅱ. 2-38)으로부터 $\Delta S = Nk\ln 2$임을 알 수 있다. 역으로, 기체가 자발적으로 압축되어 원래의 부피로 돌아가는 경우에도 내부 에너지 변화는 없으므로 열역학 제1법칙에 위배되지 않는다. 그럼에도 그 과정이 일어나지 않는 이유는 무엇인가? 그 이유는 단지 이같은 압축이 확률적으로 가능하지 않기 때문이다.

이것을 이해하기 위해 열 개의 분자만을 가진 기체를 가정하고 이 분자들이 실린더 안에 골고루 퍼져 있다고 가정하자. 기체 분자들이 마구잡이로(randomly) 움직인다고 가정한다면 기체 분자들이 왼쪽에 있을 확률과 오른쪽에 있을 확률은 같다. 따라서 한 분자가 실린더 내의 왼쪽 반에 있을 확률은 $\frac{1}{2}$이다. 두 개의 특정한 분자가 왼쪽 반에 있을 확률은 $\frac{1}{2}\times\frac{1}{2} = \frac{1}{4}$이다. 세 개의 특정한 분자가 왼쪽 반에 있을 확률은 $\frac{1}{8}$이 된다. 열 개의 분자가 모두 왼쪽에 있을 확률은 $(\frac{1}{2})^{10} = \frac{1}{1024}$가 된다. 즉 열 개의 분자가 모두 방안의 한 쪽 반에 있을 확률은 1024번 중에서 한 번 뿐이다. 그러나 이것은 일어날 확률이 작기는 하지만 일어나지 않는 것은 아니다. 만약 1 초에 한 번 씩 기체 상태를 살펴본다면 1024초(17분)에 한 번은 방 반 쪽에 분자들이 모두 몰려 있는 상황을 보게 될 것이다. 골고루 퍼져 있던 상태에서 방 반쪽에 분자들이 모두 있는 상태로 변했다면 이 과정에서 엔트로피 변화는 $\Delta S = 10k\ln\frac{1}{2} = -10k\ln 2$로 감소하게 된다. 이것은 고립된 시스템의 엔트로피가 감소하지 않는 방향으로 열역학적 과정이 일어난다고 하는 열역학 제2법칙에 위배된다. 무엇이 문제 일까?

분자의 개수가 좀 더 많아져 50개인 경우를 생각해 보자. 50개 기체 분자들이 모두 방 한 쪽 절반에 있을 확률은 $(\frac{1}{2})^{50} \approx 10^{-15}$이 된다. 따라서 매 초마다 기체를 관찰한다면 50개의 기체가 모두 한 쪽 절반에 있는 것을 관측할 수 있는 기회는 10^{15}초(3600만 년)에 한 번이 된다. 이것은 거의 관측되지 않는다는 것을 의미한다. 실제로 기체 분자들의 수는 50개 보다도

❖ 미시상태는 계가 가질 수 있는 각각의 서로 다른 상태를 말한다. 반면에 거시상태는 상태 함수로 결정되는 겉보기로 드러나는 상태를 의미한다. 구별 가능한 두 개의 기체 분자가 서로 위치를 바꾼다면 계의 미시상태는 다른 상태를 나타내지만 거시적으로는 같은 부피를 갖는 동일한 거시상태를 나타낸다.

훨씬 많은 아보가드로 수 이상이다. 따라서 실제 기체계에서 기체 분자들이 방에 골고루 퍼져 있지 않고 한 쪽 절반에 자발적으로 모이는 일은 일어나지 않는 다고 할 수 있다. 이처럼 거시적인 시스템에서 우주의 엔트로피를 감소시킬 수 있는 어떤 과정의 확률도 아주 작아서 일어나는 것이 불가능한 것으로 간주해도 무방하다.

이처럼 기체 분자들이 골고루 퍼져 있는 상태가 있을 수 있는 확률이 가장 크다는 것은 기체 분자들의 분포에 의해 만들어지는 모든 미시상태 중에 골고루 퍼져 있는 상태에 대응하는 미시상태가 가장 많다는 것을 의미한다. 따라서 열역학적 평형상태라는 것은 미시상태 수7가 가장 많은 거시상태에 해당된다. 전체 미시 상태의 수를 **겹침수** Ω라고 하면 고립계의 **엔트로피** S는

❖ 온도 개념을 매개로 하여 거시적인 엔트로피 정의와 미시적인 엔트로피가 동일한 것임이 알려져 있다.

$$S = k\ln\Omega \qquad (\text{Ⅱ}.\ 2\text{-}39)$$

로 정의된다. 여기서 k는 볼츠만 상수이다. 식 (Ⅱ. 2-39)는 시스템을 구성하는 원자 또는 분자들의 배열 상태로부터 정의된 양이므로 엔트로피의 미시적인 정의 또는 통계적인 정의라고도 한다. 즉 열역학적 과정을 통해 새로운 평형 상태에 이른다는 것은 겹침수(엔트로피)가 가장 큰 상태로 열역학적 과정이 진행된다는 것을 의미한다. 이것은 앞에서 설명한 열역학 제2법칙으로 경험적 사실들로부터 알아낸 것을 이론적으로 설명할 수 있는 토대를 만들었다.

창의 탐구

주변에서 쉽게 접할 수 있는 표면이나 경계면의 성장을 관찰해보자. 그 현상을 과학적으로 설명하기 위한 실험을 설계하고 검증하는 실험을 수행함으로써, 현상으로부터 과학적인 설명을 이끌어내는 탐구 과정을 학습하여 보자.

실험 과정 및 방법

1. 휴지나 한지와 같은 종이에 잉크물을 적셔보자. 종이에 용액이 흡수될 때 나타나는 변화가 있는가? 어떤 변화가 있었는지 기록해보자.
2. 주변에서 이와 비슷한 현상들을 생각해서 적어보자.
3. 지금까지 본 현상을 과학적으로 설명하기 위한 과정에 대하여 논의해보자.
   3-1. 과학자가 되어서 지금까지의 관찰한 현상을 바라본다면, 이 현상에 대하여 무엇을 설명할 수 있을까? 무엇을 측정하여 이 현상을 설명할 수 있을까?
   3-2. 시간에 따른 경계면의 높이 차이를 하나하나 다 구하는 것이 가능할까? 어떤 방법을 사용하면 좋을까? 논의하여 적어보자.
   3-3. 구체적으로 실험을 어떻게 해야 하는지 실험방법을 적어보자.
4. 고안한 실험 방법대로 직접 실험을 수행하고 결과를 기록해보자.
   4-1. 시간에 따라 물이 올라간 높이를 기록해보자.
   4-2. 결과를 그래프로 그려보자.
5. 실험결과를 분석하고 결과에 대한 논의를 해보자. 그래프로부터 어떤 결론을 내릴 수 있는가?
6. 실험의 과정에서 떠오르는 문제점에는 어떤 것들이 있었는지 논의하여 적어보자.
7. 문제점들을 해결할 수 있는 방법을 토의해 보자.
8. 문제를 해결할 수 있는 방안 중 한 가지를 선택하여 다시 실험을 하고 결과를 기록해보자.
9. 실험결과를 분석하고 결과에 대한 논의를 해보자.
   9-1. 그래프로부터 어떤 결론을 내릴 수 있는가?
   9-2. 결과를 다른 조와 비교해보자. 결과가 어떠한가?
   9-3. 다른 조가 실험한 결과까지를 합해서 시간에 따른 평균 높이를 구해 보자.
   9-4. 평균값으로 그래프를 다시 그려보자.
   9-5. 그래프로부터 무엇을 설명할 수 있는가?
10. 지금까지의 실험을 통하여 종이에 물이 흡수될 때 경계면에서 발견되는 규칙성은 무엇이었나?
11. 지금까지의 실험과정에서 궁금한 점이나 기타 논의 사항을 적어보자.

읽을 거리

18세기에 물체에서 빼앗기거나 얻은 열량을 정량적으로 측정하는 방법이 개발되어, 두 물체가 열접촉 할 때 한 물체에서 빼앗긴 열량은 다른 물체가 얻은 열량과 같다는 사실을 알게 되었다. 이 발견으로 생성도 소멸도 되지 않는 열소(Caloric)라는 보이지 않는 불멸의 유체가 물체 간에 이동하는 것이라는 이론을 주장하게 되었다.

열전달은 열소이론으로 잘 설명할 수 있지만, 마찰의 경우에는 열소가 마찰에 의하여 끊임없이 생성되어지는 반면에 어느 곳에서도 열소가 감소되지 않는다는 사실이 발견되어 열소 이론을 적용할 수 없게 되었다. 결국 열에 관한 이론의 실험적 기초였던 열소보존의 원리는 틀린 것으로 드러났다.

열소가 보존될 수 없다는 것을 처음으로 명확하게 실험으로 보여준 사람은 톰슨이다. 그는 군수공장에서 대포에 구멍을 뚫는 일을 감독하였는데 구멍을 뚫는 연장에서 열이 발생해서 이를 식히기 위해 물을 사용했다. 구멍을 뚫는 동안에 물이 증발해서 물을 계속 부어야 했다. 열소이론에 의하면 구멍을 뚫을 때에 금속조각이 잘려 나가므로 열소를 보유할 능력은 점점 줄어들게 될 것이다. 따라서 열소는 물로 방출되어 물을 가열하며 끓게 한다. 하지만 톰슨은 드릴이 금속을 자를 수 없을 만큼 천천히 돌 때에도 드릴이 도는 한 물이 끓는다는 사실을 알았다. 분명히 마찰만으로도 끝없이 생성될 수 있었다. 이 같은 관측 사실을 토대로 톰슨은 열이란 보존되는 물질이 아니라 구멍으로부터 물로 전달되는 어떤 운동 형태라고 주장했다. 실제로 그는 생성된 열이 구멍을 뚫는 연장이 한 일에 거의 비례한다는 것을 밝혔다.

열소이론은 톰슨의 연구 후에도 약 40년간 지배적인 이론으로 남아 있었으나, 열이 보존되지 않는 예들이 속속 발견됨에 따라 서서히 약화되었다. 현대와 같은 열에 대한 이해는 1840년대 줄에 의해 행해진 여러 시험들로부터 드러났다. 줄은 생성 또는 소멸된 일정량의 내부 에너지가 항상 같은 양의 소멸 또는 생성된 역학적 에너지와 같다는 사실을 발견하였다. 줄과 여러 사람들의 실험들은 내부 에너지와 역학적 에너지는 각각 독립적으로 보존되지 못하지만, 잃어버린 역학적 에너지가 생성된 내부 에너지와 항상 같다는 것을 보여 주었다. 즉, 보존되는 것은 역학적 에너지와 내부 에너지의 합으로 에너지 보존 법칙을 확립하게 되었다.

「물리학」, Paul A. Tipler

❖ 톰슨
(B. Thomson, 1753~1814)

화약 · 총포 등의 공학적 연구에서 열현상의 물리적 연구를 수행하였다. 런던에 왕립연구소를 창립하였다.

❖ 줄
(J.Joule, 1818~1889)

전류의 발열 작용에 관한 법칙(줄의 법칙)을 발견하고 그로부터 열과 일과의 관계를 깊이 연구하였고, 열의 일당량을 측정하는 실험을 면밀하게 또 여러 가지 방법으로 실행하여(1843~1849), 에너지 보존 법칙의 확립에 큰 기여를 하였다.

연 습 문 제

1. 자전거 타이어에 바람을 넣는 과정에서 대기압 상태에 있는 1 L의 공기를 단열과정을 거쳐 7기압으로 압축하였다.(공기는 대부분 이원자 분자인 질소와 산소로 되어 있다.)

(a) 압축 후 공기의 부피를 구하시오.

(b) 공기를 압축하는데 얼마나 일을 하였는가?

(c) 공기의 온도가 처음에 300 K이라면 압축 후 온도는 얼마인가?

2. 이상기체 2.0 mol이 부피 20.0 L에서 40.0 L로 팽창하는 동안 57 ℃인 열저장고와 열적접촉을 하고 있다. 이상기체와 열저장고 사이에 전달된 열을 구하시오.

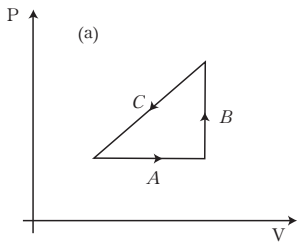
3. 이상기체가 그림과 같은 한 순환과정을 따른다고 하자. 각 단계 A, B 및 C에서 다음 양들의 값이 양의 값인지 음의 값인지 결정하시오.

(a) 기체에 해 준 일

(b) 기체의 내부 에너지 변화

(c) 기체에 공급된 열

한 순환과정이 끝났을 때 이 세 양들의 부호를 결정하고 이 과정에서 기체가 한 일을 계산하시오.



4. 0 ℃ 물 1 kg이 100 ℃ 물 1 kg과 혼합되었다. 열평형에 도달한 후 물의 온도는 50 ℃이다. 이 시스템의 엔트로피 변화를 구하시오.

5. 동전 100개로 된 시스템의 거시적 상태는 동전 앞면의 수로 나타낸다고 하자. 동전 한 개가 앞면인 상태의 엔트로피는 얼마인가?

Ⅲ

전자기 탐구

- 1. 쿨롱의 법칙과 전기장
- 2. 전위와 축전기
- 3. 전류와 직류회로
- 4. 자기장과 로렌츠 힘
- 5. 전자기 유도와 자성체
- 6. 교류회로와 전자기파

생 | 각 | 열 | 기

우리는 일상생활에서 라디오, 텔레비전, 전기 자동차, 컴퓨터, 고에너지 가속기, 그리고 다른 전자기기 등 전자기학의 원리들이 응용된 많은 장치들을 활용하며 생활하고 있다. 이 단원에서는 쿨룽의 법칙과 전기장, 전위와 축전기, 전류와 직류회로, 자기장과 로렌츠 힘, 전자기 유도와 자성체, 그리고 교류회로와 전자기파 등의 내용에 대하여 알아보자.

1 쿨롱의 법칙과 전기장

쿨롱(Charles Coulomb; 1736~1806)은 자신이 발명한 비틀림 저울을 사용하여 대전된 물체 사이의 힘을 정량적으로 측정하였다. 비틀림 저울의 동작 원리는 캐번디시가 만유인력상수를 측정하기 위해 사용했던 기구와 구조는 같은데, 질량체를 대전된 구로 대체한 점만 다르다. 그림의 두 대전된 구 A와 B 사이의 전기력에 의하여 매달린 줄이 비틀어진다. 이 비틀어진 줄의 복원 토크는 비틀림 각에 비례하기 때문에 이 각도를 측정하면 인력이나 반발력의 크기에 대한 정량적 값을 얻을 수 있다. 대전된 작은 두 구 사이의 전기력과 두 구 사이의 거리는 어떤 관계일까? 대전된 작은 두 구 사이의 전기력과 두 구의 전하량은 어떤 관계일까?

1. 쿨롱의 법칙

전기력과 전하가 존재한다는 것은 여러 가지 간단한 실험으로 입증할 수 있다. 예를 들어 건조한 날 빗으로 머리를 빗으면 [그림 Ⅲ-1]과 같이 그 빗이 작은 종이 조각들을 끌어당기는 것을 볼 수 있다. 어떤 물질이 빗과 같이 이런 특성을 보이면 '이 물질이 전기를 띠었다', 또는 '전기적으로 대전되었다'고 한다.

[그림 Ⅲ-1] 종이 조각을 끌어당기는 대전된 빗

이런 실험들에서 두 가지 종류의 전하가 있음을 알 수 있고, 이들은 양전하와 음전하이다. 전하를 띤 물체 사이의 전기력은 쿨롱의 법칙으로 두 점전하 사이의 전기력의 크기를 구할 수 있다.

$$F_e = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 1\text{–}1)$$

여기서 k_e는 쿨롱 상수라 하고 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon^2} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 1\text{–}2)$$

여기서 상수 ϵ_0는 진공에서의 유전률이라 하며 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}\,\mathrm{C^2/N \cdot m^2} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 1\text{–}3)$$

따라서 쿨롱 상수 k_e는 진공 중에서 $8.9875 \times 10^9\,\mathrm{N \cdot m^2/C^2}$의 값을 갖는다.

자연계에서 알려진 전하 중 가장 작은 전하량은 e이며, 전자는 $-e$, $+e$양성자는 $+e$이고, 크기는

$$e = 1.60219 \times 10^{-19} C \qquad (\text{Ⅲ}.\ 1\text{–}4)$$

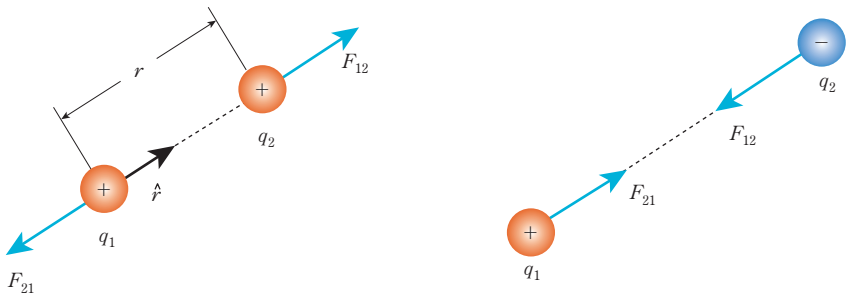
❖ e보다 작은 크기의 전하를 가진 쿼크가 존재한다는 실험적 증거가 있다.

그러므로 $1C$의 전하량은 근사적으로 6.25×10^{18}개의 전자나 양성자에 해당한다. 이 수는 구리 $1\ \mathrm{cm^3}$에 들어 있는 자유전자의 수 10^{23}과 비교된다.

쿨롱의 법칙을 적용할 때는 힘이 벡터이며 따라서 점 전하나 입자들 사이에만 정확하게 성립한다. 전하 q_1이 q_2에 작용하는 힘 F_{12}을 벡터 형태로 쓰면

$$\overrightarrow{F_{12}} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 1\text{–}5)$$

이 되는데, $\hat{r}$은 [그림 Ⅲ–2]의 (a)에서처럼 q_1에서 q_2방향으로 향하는 단위벡터이다. 쿨롱의 법칙도 뉴턴의 법칙을 따르기 때문에, q_2가 q_1에 작용하는 힘은 q_1이 q_2에 작용하는 힘과 같고 방향이 반대, 즉 $\overrightarrow{F_{21}} = -\overrightarrow{F_{12}}$이다. 또한 식 (Ⅲ. 1–5)에서 q_1과 q_2가 같은 부호이면 $q_1 q_2$곱은 [그림 Ⅲ–2](*a*)와 같이 양(+)이 된다. q_1과 q_2가 [그림 Ⅲ–2](*b*)처럼 반대 부호라면 $q_1 q_2$곱은 음(–)이 된다. 곱이 음(–)이면 인력이고, 곱이 양(+)이면 척력이다.



[그림 Ⅲ-2] **같은 부호 전하와 반대 부호 전하 사이의 힘**

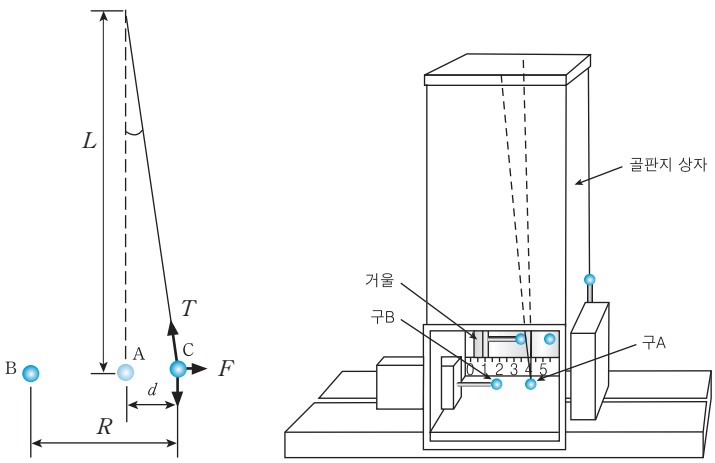
둘 이상의 전하가 있으면, 이들 중 임의의 둘 사이의 힘은 식 (Ⅲ. 1-5)로 주어지므로 이들 중 한 전하에 작용하는 전체 힘은 각각의 전하가 작용하는 힘의 벡터 합과 같다. 예를 들어 네 개의 전하가 있다면, 입자 2, 3과 4가 입자 1에 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$\vec{F_1} = \vec{F_{21}} + \vec{F_{31}} + \vec{F_{41}}$$

다음 실험을 통하여 쿨롱의 법칙을 확인해 보자.

실험 쿨롱의 법칙

준비물 쿨롱의 법칙 실험장치, 백열 전등, 플라스틱 막대 1개, 모직 헝겊, 은박지로 싼 스티로폼 구(흑연액을 칠한 스티로폼 구), 실



과정

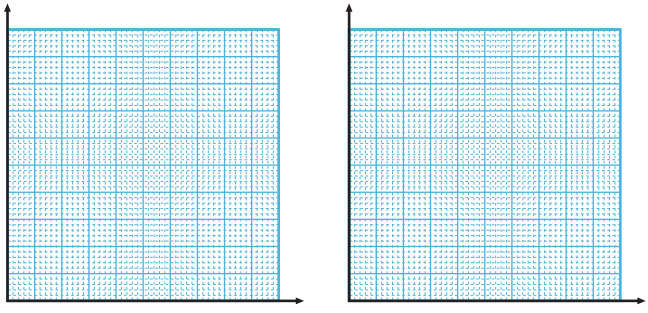
1. 스티로폼 구에 흑연액을 골고루 칠하고 잘 건조시키자. 흑연액을 칠한 스티로폼 구를 그림과 같이 실에 매달아서 쿨롱의 법칙 실험기 안에 매달아 놓자. 그리고 백열등을 2~3분 정도 켜 놓자.
2. 스티로폼 구를 흔들리지 않게 한 다음, 상자의 거울을 이용하여 위치를 측정하자. 구의 위치를 측정할 때는 거울에 비친 상과 실물이 겹쳐 보이는 방향에서 구의 한쪽 끝을 읽으면 된다.
3. 모직 헝겊에 문지른 플라스틱 막대를 A, B에 접촉하여 대전시킨다.
4. 대전구 B를 A에 일정한 거리만큼 접근시키면서 두 대전구 사이의 거리 R과 대전구 A가 C의 위치로 움직인 거리 d를 측정하여 표에 기록하자.
5. d–R사이의 관계 그래프와 $d-\frac{1}{R^2}$ 사이의 관계 그래프를 그려 보자.

결과

1. 두 대전구의 거리 R과 대전구 A가 C의 위치로 움직인 거리 d

횟수	A위치	B위치	C위치	$d(\propto F)$	R	$\frac{1}{R^2}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

2. d–R 사이의 관계 그래프와 $d-\frac{1}{R^2}$ 사이의 관계 그래프



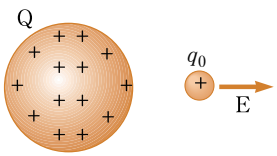
정리

1. 쿨롱의 법칙 실험기 안에 백열등을 켜 놓은 이유는 무엇일까?
2. 그래프로부터 전기력 d와 대전구 사이의 거리 R 사이에는 어떤 관계가 있는가?
3. 전기력 d와 대전구 사이의 거리 R을 측정할 때, 대전구가 접근할 때와 멀어질 때 측정값이 일치하지 않는다. 그 이유는 무엇일까?
4. 이 실험에서 두 대전구의 전하량과 전기력 사이의 관계를 조사하려면 어떻게 하면 좋을까? 변인 통제 및 전하량를 정량화 할 수 있는 방법을 고려해 보자.

생각해 보기

위의 실험에서 전하의 누설을 적게 하려면 어떻게 하면 좋을까?

2. 전기장이란?



[그림 Ⅲ-3] 전기장의 정의

전기력과 연관되어 패러데이에 의해 발전된 전기장은 대전된 물체 주위 공간에 있고, 이 전기장에 시험 전하를 넣으면 전기력이 작용한다. 예를 들어 [그림 Ⅲ-3]과 같이 작은 시험 전하 q_0가 매우 큰 양(+)전하 Q를 가진 두 번째 물체 근처에 위치할 때, 시험 전하의 위치에서 근원 전하에 의한 전기장은 단위 전하당 시험 전하에 작용하는 전기력으로 다음과 같이 표현된다.

공간 속 한 점에서의 전기장 벡터 E는 그 점에 놓인 양(+)의 시험 전하 q_0에 작용하는 전기력 F_e로써 정의할 수 있다.

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F_e}}{q_0} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 1\text{-}6)$$

전기장 E는 시험 전하가 만든 전기장이 아니라 시험 전하 이외의 어떤 외부 전하에 의하여 생성된 전기장이며, 전기장은 시험 전하의 존재 여부에 관계없이 그 점에 존재한다.

식 (Ⅲ. 1-6)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\vec{F_e} = q\vec{E} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 1\text{-}7)$$

여기서, 전하에 대한 일반적 기호로 q를 쓴다. 이 식은 전기장 내의 대전된 입자에 힘이 작용함을 의미한다. 만약 q가 양(+)이면 힘은 전기장과 같은 방향으로 작용한다. 만약 q가 음(−)이면, 힘과 전기장은 서로 반대 방향

이다. 식 (Ⅲ. 1-7)은 중력장 내에 위치한 질량 m에 작용하는 힘 $F_g = mg$와 유사하다.

전기장 E의 단위는 N/C이고, 어느 점에서의 전기장을 알면 그 점에 놓인 임의의 대전 입자에 작용하는 힘은 식 (Ⅲ. 1-7)으로 구할 수 있다. 다양한 근원에 대한 전기장의 크기는 [표 Ⅲ-1]과 같다.

[표 Ⅲ-1] 전형적인 전기장의 세기

전기장의 원천	전기장의 세기(N/C)
형광등	10
대기(맑은 날)	100
머리에 마찰시킨 풍선	1,000
대기(전개 구름 아래)	10,000
복사기	100,000
공기 중의 스파크	> 3,000,000
수소원자에서 전자 부근	5×10^{11}

전기장의 방향을 결정하기 위해 근원 전하로서 점 전하 q를 생각하자. 이 전하는 주변 공간의 모든 점에 전기장을 형성한다. [그림 Ⅲ-4] (a)처럼, 점 P에 위치한 시험 전하 q_0에서 r 떨어진 지점에 있는 점 전하 q를 고려하자. 쿨롱의 법칙에 의하면 q가 시험 전하에 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$\vec{F} = k_e \frac{qq_0}{r^2}\hat{r} \qquad (Ⅲ.\ 1\text{-}8)$$

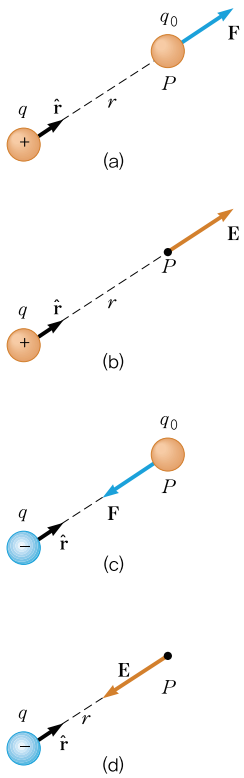
여기서 $\hat{r}$은 q로부터 q_0를 향하는 단위 벡터이다. [그림 Ⅲ-4] (a)에서 이 힘은 근원 전하 q로부터 멀어지는 방향이다. 점 p의 전기장은 $E = Fe/q_0$로 정의된다. 따라서 P위치에서 전하 q가 만드는 전기장은

$$\vec{E} = k_e \frac{q}{r^2}\hat{r} \qquad (Ⅲ.\ 1\text{-}9)$$

이고, 양(+)의 근원 전하에 의한 점 p에서의 전기장은 [그림 Ⅲ-4] (b)와 같이 q로부터 멀어지는 방향이다. 음(-)의 근원 전하에 의한 점 P에서 전기장은 q를 향한다.

여러 개의 점 전하가 한 점 P에 만드는 전기장은 모든 전하의 전기장을 벡터로 더한 것과 같다. 따라서 점 P에서 여러 개의 전하에 의한 전기장은 다음과 같이 표현할 수 있다.

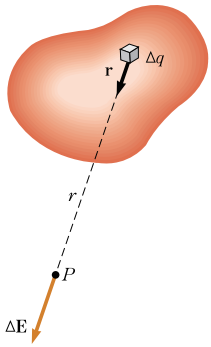
$$\vec{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2}\hat{r}_i \qquad (Ⅲ.\ 1\text{-}10)$$



[그림 Ⅲ-4] 점전하 q가 만드는 전기장의 방향

여기서 r_i는 i번째 전하 q_i로부터 점 P(시험 전하의 위치)에 이르는 거리이다.

3. 연속적인 전하 분포에 의한 전기장



[그림 Ⅲ-5] 연속적인 전하분포에 의한 전기장

연속적으로 분포되어 있는 전하에 의한 전기장을 계산하기 위해서는 다음과 같은 방법을 사용한다. [그림 Ⅲ-5]와 같이 전하가 분포된 공간을 전하량 Δq를 가지는 작은 부분으로 쪼개고, 식 (Ⅲ. 1-10)을 써서 이 부분이 점 p에 만드는 전기장을 계산한다. 다음으로 이 부분들이 만드는 전기장을 모두 합쳐서 점 P에서의 전기장을 구하게 된다.

전하 Δq로 대전된 작은 부분이 점 P에 만드는 전기장은

$$\Delta \vec{E} = k_e \frac{\Delta q}{r^2} \hat{r}$$

이고, 분포된 전하 전체에 의하여 점 p에 나타나는 전기장은 다음과 같다.

$$\vec{E} \approx k_e \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

여기서 첨자 i는 전하 분포에서 i번째 부분을 나타낸다. 이들 각 부분들 사이의 간격이 점 P까지의 거리에 비해 작으면, 이 전하 분포는 연속적인 것으로 어림할 수 있다. 그러므로 $\Delta q_i \to 0$인 극한의 경우 점 P에서의 전체 전기장은 다음과 같다.

$$\vec{E} = k_e \lim_{\Delta q_i \to 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \qquad \hat{r}_i = k_e \int \frac{dq \hat{r}}{r^2} \qquad \text{(Ⅲ. 1-11)}$$

여기서 적분은 전체 전하 분포를 대상으로 한다. 전하가 선, 면, 혹은 어떤 공간에 골고루 퍼져 있다고 가정하면, 다음과 같은 전하 밀도의 개념을 도입하면 계산이 편리하다.

- 전하 Q가 공간 V에 고르게 퍼져 있으면, 부피 전하 밀도 ρ는 다음과 같이 정의한다.

$$\rho \equiv \frac{Q}{V}$$

- 전하 Q가 면적 A에 고르게 퍼져 있으면, 면 전하 밀도 σ는 다음과 같이 정의한다.

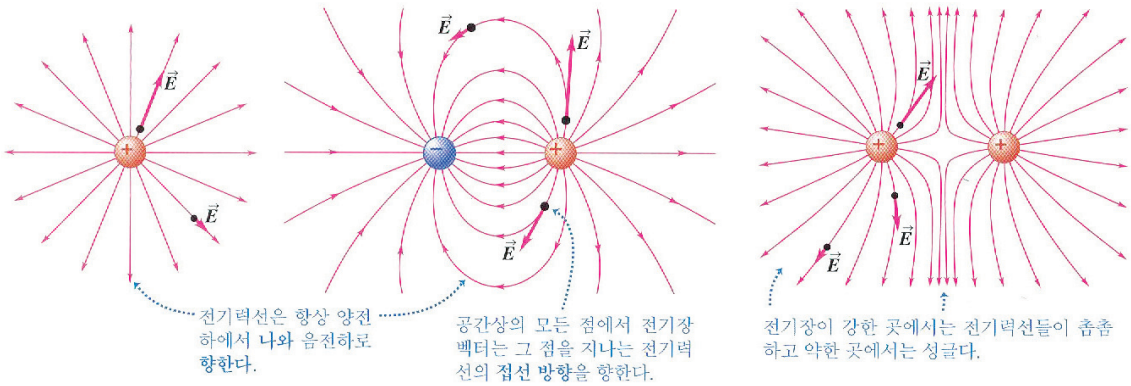
$$\sigma \equiv \frac{Q}{A}$$

• 전하 Q가 어떤 구간 l에 고르게 퍼져 있으면, 선 전하 밀도 λ는 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda \equiv \frac{Q}{l}$$

4. 전기력선

전기장은 직접 눈으로 볼 수 있는 것이 아니기 때문에 전기장의 개념을 파악하기는 쉽지 않다. 전기력선은 전기장을 시각화시키고 좀 더 실제적인 것으로 이해하는데 많은 도움을 줄 수 있다. 전기력선은 공간상의 한 영역에서 그린 가상의 선 또는 곡선으로, 임의의 점에서의 접선이 그 점에서의 전기장 벡터의 방향이 된다. 전기력선들은 각 점에서 $\vec{E}$의 방향을 나타내며, 이들의 간격은 각 점에서의 $\vec{E}$의 크기를 나타내 준다. $\vec{E}$가 강한 곳에서는 전기력선 사이의 간격을 가깝게 그리고, $\vec{E}$가 약한 곳에는 전기력선 사이의 간격을 크게 그린다. 어느 특정한 점에서 전기장은 고유의 방향을 가지므로 전기력선들은 서로 교차하지 않는다. [그림 Ⅲ-6]은 (a) 하나의 양전하, (b)같은 크기의 전하를 갖는 두 전하, 하나는 양전하이고 하나는 음전하(쌍극자), 그리고 (c) 두 개의 같은 양전하를 포함하고 있는 한 평면에서의 전기력선을 보여주고 있다.



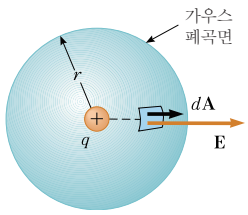
(a) 단일 양전하

(b) 같은 크기를 가지는 반대 부호의 두 전하(전기 상극자)

(c) 같은 크기를 가지는 같은 부호의 두 전하

[그림 Ⅲ-6] 서로 다른 세 전하 분포에 의한 각각의 전기력선

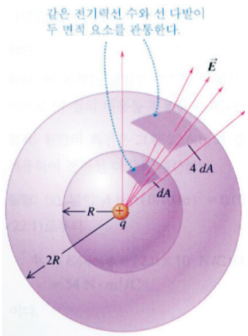
5. 가우스의 법칙



[그림 Ⅲ-7] 점전하가 중심에 있는 구를 관통하는 전기선 다발

[그림 Ⅲ-7]과 같이 반지름이 r인 구의 중심에 양(+)의 점 전하 q가 있다고 가정하자. 쿨롱의 법칙으로부터 구면 어디에서나 전기장의 세기는 $E = k_e\, q/r^2$임을 알 수 있으며, 전기력선은 구면에 수직하고 구 표면의 바깥쪽을 향한다. 그러므로 구면 위의 모든 점에서 전기장 E와 면적 벡터 ΔA_i는 평행하다. 따라서 구면위의 모든 위치에서 미소면적 ΔA_i를 통과하는 전기선 다발은 식 (Ⅲ. 1-12)와 같이 쓸수 있다.

$$\vec{E} \cdot \vec{A_i} = E_n A_i = E A_i \qquad (Ⅲ.\ 1\text{-}12)$$



[그림 Ⅲ-8] 반지름이 R인 구의 면적소 dA를 반지름이 2R인 구로 투영하면 반지름이 2배로 커짐으로 넓이는 4dA이다.

여기서 E_n은 미소면적ΔA_i에 대하여 수직한 전기장을 말한다. 구 표면을 통과하는 총 전기선 다발 Φ_E은

$$\Phi_E = \oint E_n dA = \oint E dA = E \oint dA = EA \qquad (Ⅲ.\ 1\text{-}13)$$

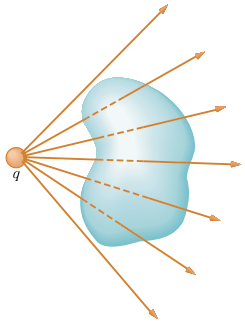
이고, 구의 표면적 $A = 4\pi r^2$과 구면에서의 전기장 $E = k_e q/r^2$을 통하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi_E = EA = \left(\frac{k_e q}{r^2}\right)(4\pi r^2) = 4\pi k_e q$$

식 (Ⅲ. 1-2)를 위의 식에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_o} \qquad (Ⅲ.\ 1\text{-}14)$$

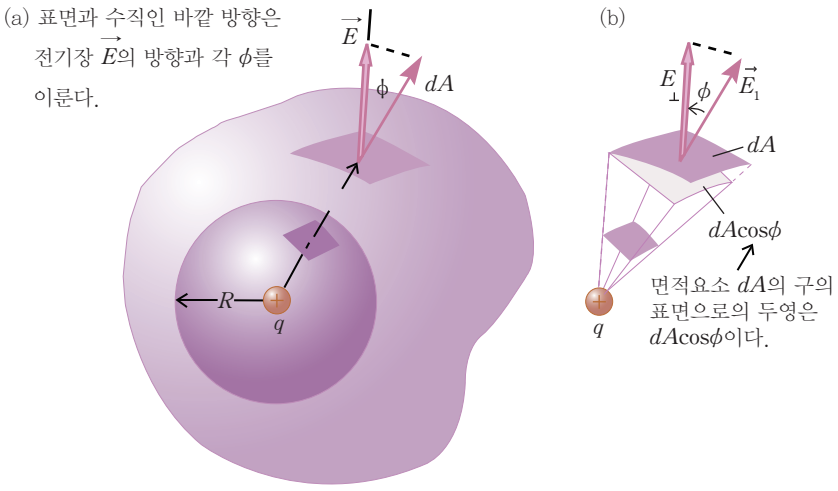
식(Ⅲ. 1-14)은 전기선 다발이 구의 반경 r에 무관하고, 구 내부의 중심에 있는 전하 q의 크기에 비례한다는 것을 말한다.



[그림 Ⅲ-9] 폐곡면 안에 전하를 포함하지 않는 경우

이번에는 점전하 주위에 오른쪽 그림과 같이 구면이 아니라 임의의 폐곡면(가우스 폐곡면)을 생각해 보자.

[그림 Ⅲ-10] (a)는 불규칙한 모양의 곡면이 반지름이 R인 구를 둘러싸고 있다. 불규칙한 면 위의 면적소 dA를 생각해보면, 이 넓이는 q로부터 같은 거리에 있는 구면 위의 면적소보다 더 넓다는 것을 알 수 있다. 불규칙한 면적소의 법선이 q로부터의 지름선과 각 ϕ를 이루면, 구면 위에 투영된 면의 두 변의 길이는 $\cos\phi$만큼 줄어들고 [그림 Ⅲ-10(b)], 나머지 두 변은 변하지 않는다. 따라서 구형 면적소를 지나는 전기선 다발은 불규칙한 면 위의 대응되는 면적소를 지나는 전기선 다발과 같으며 $E\, dA\cos\phi$이다.



[그림 Ⅲ-10] 구형이 아닌 표면을 통과하는 전기선 다발

각각의 면적소를 구면 위에 대응되는 요소로 투영시키면 불규칙한 곡면을 지나는 총 전기선 다발은

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_o} \qquad (\text{Ⅲ. 1-15})$$

구면을 지나는 총 전기선 다발과 같다는 것을 알 수 있다. 식(Ⅲ. 1-15)는 어떠한 모양 또는 어떤 크기의 곡면이든 간에 전하 q를 감싸는 닫힌 표면이기만 하면 성립된다. 적분기호에서의 원은 닫힌 표면에 대한 적분이어야 한다는 것을 나타낸다.

그러나 [그림 Ⅲ-9]와 같이 폐곡면 안에 전하를 포함하지 않은 경우에는 폐곡면을 통과해 들어온 전기선 다발과 나간 전기선 다발은 동일하므로 총 전기선 다발은 0이다.

일반적으로 폐곡면을 통과하는 전기장 다발 Φ_E는 폐곡면 안에 든 총 전하량 Q_{in}에 비례하는데 이를 가우스의 법칙이라 한다.

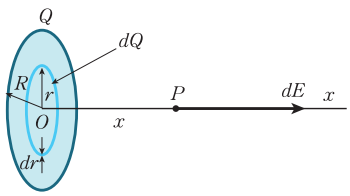
$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{in}}{\epsilon_o} \qquad (\text{Ⅲ. 1-16})$$

연 습 문 제

1. 알파(α)입자는 헬륨 원자의 원자핵이다. 그것의 질량 m은 6.64×10^{-27} kg 이고 전하 q는 $+2e = 3.2 \times 10^{-19}$C 이다. 두 알파입자 사이의 정전기적 반발력을 그들 사이에 작용하는 중력의 크기와 비교하여라.

2. 점전하 $q = -0.8$nC은 원점에 위치해 있다. $x = 1.2$ m, $y = -1.6$ m위치에서의 전기장 벡터 $\vec{E}$를 구하여라.

3. 반지름이 R이고 균일한 면전하 밀도(단위 면적당의 전하)를 가진 원판에 대해 원판의 축을 따라 중심에서 x 만큼 떨어진 P점에서의 전기장을 구하여라. x는 양이라고 가정한다. 또한, $x \gg R$인 경우와 $x \ll R$인 경우에 대하여 생각해 보자.



4. 지구(도체)는 알짜전하를 가지고 있다. 지표 근방에서의 전기장은 감도가 좋은 전자기기로 측정할 수 있는데, 평균 크기는 약 150 N/C이고 방향은 지구 중심을 향한다.

(1) 이에 대응하는 표면 전하 밀도는 얼마인가?

(2) 지구의 총 표면 전하는 얼마인가?

2 전위와 축전기

중력과 용수철의 탄성력과 같은 보존력의 경우 위치 에너지를 도입하고, 에너지 보존 법칙을 사용하면 힘을 직접 다루지 않고도 여러 가지 역학적 문제를 해결할 수 있다. 위치 에너지의 개념은 전기 문제를 다루는 데 중요한 역할을 한다. 전기력은 보존력이므로 전기적 위치 에너지라는 용어를 사용하면 전기적 현상을 편리하게 기술할 수 있다. 전기적 위치 에너지로부터 전위라는 개념을 도입하면, 전기장과 전기력의 개념보다 전기적 현상을 더 간단하게 기술 할 수 있다.

1. 전위란?

시험 전하 q_0가 전기장 $\vec{E}$ 속에 놓여 있을 때 시험 전하가 받는 전기력은 $q_0\vec{E}$이다. 쿨롱의 법칙에 따르는 전하들 사이에 작용하는 힘은 보존력이므로 전기적 위치 에너지를 생각해 보자.

전기력 $q_0\vec{E}$에 의해 시험 전하가 미소변위 $\vec{ds}$ 만큼 이동할 때, 전기장이 전하에 한 일은 $\vec{F}\cdot\vec{ds} = q_0\vec{E}\cdot\vec{ds}$ 이다. 전기장이 이만큼의 일을 하기 때문에, 전하-전기장의 위치 에너지는 $dU = -q_0\vec{E}\cdot\vec{ds}$ 만큼 변하게 된다. 시험 전하가 A에서 B로 이동할 때, 위치 에너지의 변화 $\Delta U = U_B - U_A$는

$$\Delta U = -q_0\int_A^B \vec{E}\cdot\vec{ds} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{-}1)$$

이다. 식 (Ⅲ. 2-1)에 있는 적분은 q_0가 A에서 B로 옮겨간 경로에 따라 적분을 해야 한다. 힘 q_0E가 보존력이므로 이 선 적분은 A와 B 사이의 경로에 무관하다.

단위 전하당 위치 에너지는 q_0의 값에 무관하며 전기장 내의 모든 점에서 유일한 값을 갖는다. 물리량 U/q_0를 전기적 전위, 또는 단순히 전위라 하며 V로 표기한다. 따라서 전기장 내의 어떤 점에서 전위는 다음과 같다.

$$V = \frac{U}{q_o} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{–}2)$$

위치 에너지가 스칼라량이므로 식 (Ⅲ. 2–2)로부터 전위도 스칼라량임을 알 수 있다.

식 (Ⅲ. 2–1)에서 알 수 있듯이, 시험 전하가 전기장 내의 점 A에서 B로 이동한다면, 위치 에너지가 변하게 된다. 점 A와 점 B 사이의 전위차 $\Delta V = V_B - V_A$는 위치 에너지의 변화를 시험 전하 q_0로 나눈 값이다.

$$\Delta V \equiv \frac{\Delta U}{q_o} = \int_A^B \vec{E} \cdot \vec{ds} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{–}3)$$

위치 에너지와 마찬가지로 전위에서도 단지 차이만이 의미를 가진다. 그러나 전위차를 다루는 번거로움을 피하기 위하여, 전기장 내의 어떤 편리한 지점의 전위를 0으로 취할 수 있다. 일반적으로, 무한히 먼 지점에서의 전위를 0으로 잡는다.

시험 전하가 외력에 의해 운동 에너지의 변화 없이 점 A로부터 B점 까지 움직인다면, 외력은 위치 에너지를 변화시키는 일을 한 것이다.전기장 내에 놓여 있는 전하 q를 생각해 보자. 식 (Ⅲ. 2–3)과 같이 전하 q가 전기장 내에서 일정한 속도로 움직이도록 외력이 한 일은

$$W = q\Delta V \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{–}4)$$

이다.

전위는 단위 전하당 측정된 위치 에너지 값이므로 전위의 SI 단위는 J/C이 되며 이를 볼트 (V)라고 정의한다. 즉,

$$1V \equiv 1\ \text{J/C}$$

이다. 다시 말하면 전하를 의 전위차 만큼 옮기는 데 1 J의 일이 필요하다.

1) 다양한 전하 배열에 의한 균일한 전기장 속에서의 전위차

⑴ 균일한 전기장 속에서의 전위차

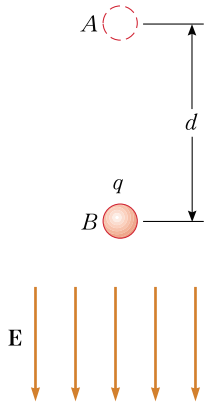
식 (Ⅲ. 2–1)과 식 (Ⅲ. 2–3)은 전기장이 균일하든지 변하든지 간에 모든 전기장 내에서 성립한다. 이 식들은 [그림 Ⅲ–11]과 같이 $-y$방향으로의 균일한 전기장에 대해서 간단해질 수 있다. 먼저 거리 $|s| = d$ 만큼 떨어져 있는 점 A와 B 사이의 전위차를 구해 보자. 여기서 s는 전기장의 방향과 평행이다. 식 (Ⅲ. 2–3)에 이러한 경우를 적용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$V_B - V_A = \Delta V = -\int_A^B E \cdot ds = -\int_A^B (E\cos 0^o) ds = -\int_A^B E ds$$

E가 상수이므로 적분 밖으로 나올 수 있고, 점 A와 B 사이의 전위차는 다음과 같다.

$$\Delta V = -E\int_A^B ds = -Ed \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{-}4)$$

음(−)의 부호는 점 B의 전위가 A보다 낮다는 것을 의미한다. 즉, $V_B < V_A$이다. [그림 Ⅲ−11]과 같이, 전기력선은 항상 전위가 감소하는 방향으로 향한다.



[그림 Ⅲ−11] 전기장이 아래방향일 때 점A보다 B의 전위가 낮다

(2) 점 전하에 의한 전위와 위치 에너지

고립된 양(+)의 점 전하 q는 전하로부터 밖으로 나가는 방향을 갖는 전기장을 만든다는 것을 배웠다. 그 전하로부터 거리 r만큼 떨어진 지점의 전위를 구하려면 전위차에 대한 일반적인 식을 사용해야 한다.

$$V_B - V_A = -\int_A^B E \cdot ds$$

여기서 점 A와 B는 [그림 Ⅲ−12]와 같이 두 개의 임의 지점이다. 점 전하에서 거리가 r되는 지점의 전기장은 $E = k_e q\hat{r}/r^2$이며, $E \cdot ds$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E \cdot ds = k_e \frac{q}{r^2}\hat{r} \cdot ds = (k_e \frac{q}{r^2})dr$$

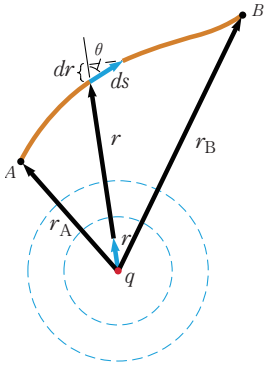
따라서 전위차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_B - V_A = -k_e q\int_A^B \frac{dr}{r^2} = \left[\frac{k_e q}{r}\right]_{r_A}^{r_B}$$

$$V_B - V_A = k_e q\left[\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right]$$

위 식의 결과에서 점 전하에 의해 생성된 전기장 내의 임의의 점 A와 B 사이의 전위차는 지름 방향의 위치 r_A와 r_B만으로 결정됨을 알 수 있다. 일반적으로 $r_A = \infty$인 점에서 전위가 0이 되도록 기준점을 잡는다. 따라서 점 전하로부터 거리 r인 지점의 전위는 다음과 같다.

$$V = k_e \frac{q}{r} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{-}5)$$

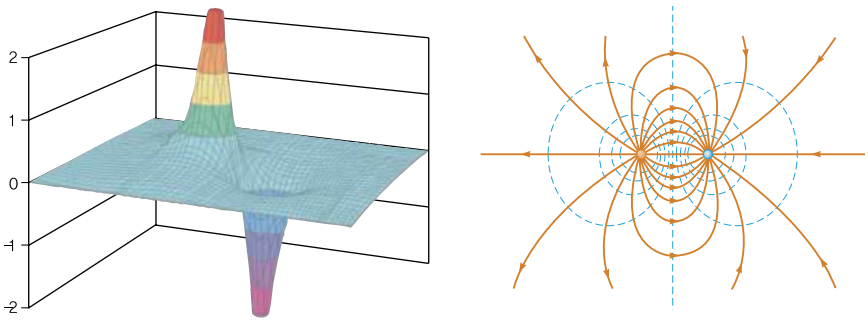


[그림 Ⅲ−12] 점전하 q에 의한 점A와 B사이의 전위차는 지름 방향의 위치와 위치만으로 결정된다.

둘 이상의 점 전하군에 의한 전위는 중첩의 원리를 적용하여, 어떤 점 P에서의 전위는 각각의 전하에 의한 전위의 합과 같다.

$$V = Vk_e \sum_i \frac{q_i}{r_i} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{–}6)$$

식 (Ⅲ. 2–6)의 합은 벡터합이 아닌 스칼라양에 대한 대수적 합이다. 벡터합 E를 구하는 것보다 대수적 합 V를 구하는 것이 훨씬 수월할 때가 많다. 다음 그림은 전기 쌍극자 주변의 전위를 나타낸 것이다. 두 전하 사이의 전위의 급경사 부분은 전기장이 매우 강한 부분이다.

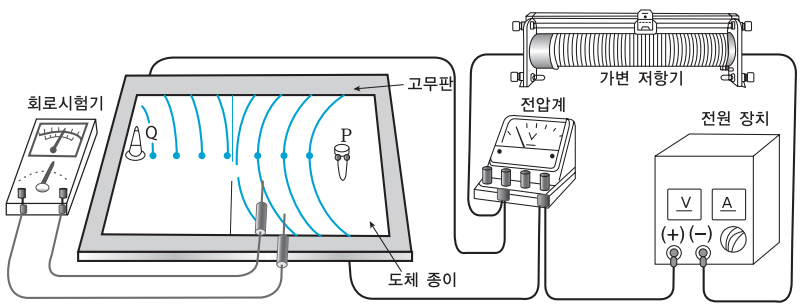


[그림 Ⅲ–13] **전기 쌍극자 주변의 전위**

다음 실험을 통하여 전기장과 전위 사이에 어떠한 관계가 있는지 확인해 보자.

실험 전기장과 등전위선

준비물 전원장치, 전압계, 가변 저항, 스위치, 회로 시험기(또는 검류계, 10~100nA) 도체 종이(알루미늄 은박지, 소금물에 적신 종이), 모눈종이, 고무판(널빤지), 전극용 직선 도체판(1.5 cm×5 cm), 먹지, 전극용 나사



등전위전 조사

과정

(1) 위 그림과 같이 고무판 위에 모눈종이를 깔고, 그 위에 먹지와 도체 종이를 올려 놓는다. 도체 종이의 크기는 20 cm×20 cm정도로 한다.
(2) 도체 종이에 점으로 된 두 전극을 고정시키고, 6~10 V의 전압을 걸어 주어서 1~2A의 전류가 도체면을 따라서 흐르게 한다.
(3) 두 전극 사이의 전위차를 측정하여, 두 전극을 잇는 일직선상에서 전위를 등간격으로 표시한다. 등간격으로 나눌 때 회로 시험기를 이용하면 된다.
(4) 표시한 점에서 회로 시험기를 이용하여 전류가 흐르지 않는 점을 여러 개 찾을 수 있다. 이 때, 회로 시험기의 눈금 선택 위치는 μA로 한다. 전위가 같으면 전류가 흐르지 않으므로, 이러한 점을 연결하면 등전위선이 된다.
(5) 등간격으로 표시한 모든 점에 대해 (4)와 같은 실험을 반복한다.
(6) 등전위선을 매끄럽게 연결하여 곡선을 만든다. 표시한 점을 매끄럽게 연결하고 곡선의 모양을 그려본다.

정리하기

(1) 실험 과정 (6)에서 곡선이 의미하는 것은 무엇인가?
(2) 극 P와 Q 사이에 전류는 어떻게 흐를 것인가? 위에서 그린 곡선의 모양 위에 전류가 흐르는 경로를 표시하여라. 양 전하가 이동하는 방향을 전기력선으로 나타낼 수 있다.
(3) 전류가 흐르는 경로와 등전위선 사이의 각은 어떻게 될 것인가?

생각해 보기

위의 실험에서 도체 종이에 흐르는 전류를 다르게 하였을 때, 실험 결과는 어떻게 될 것으로 생각하는가?

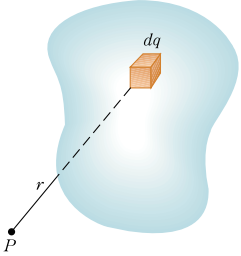
2) 연속적인 전하 분포에 의한 전위

[그림 Ⅲ-14]와 같이 연속적인 전하 분포에 의한 P점에서의 전위는 두가지 방법으로 구할 수 있다.

첫 번째 방법은 전하의 분포를 알고 있는 경우, P점으로부터 r만큼 떨어져있는 곳의 미소전하 dq에 의한 미소전위 dV는

$$dV = k_e \frac{dq}{r} \qquad (\text{Ⅲ. } 2\text{-}7)$$

이고, P점에서의 전체 전위를 구하기 위해서 식(Ⅲ. 2-7)을 연속적인 분포를 갖는 전하 전체에 대하여 적분을 한다. 일반적으로 k_e는 상수이고, 각 미소전하와 P점 사이의 거리는 다르므로 전위는 다음과 같이 표현할 수 있다.



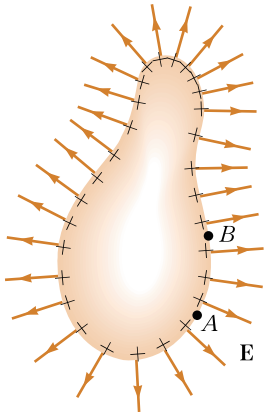
[그림 Ⅲ-14] 연속적인 전하 분포에 의한 전위

$$V = k_e \int \frac{dq}{r} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{–}8)$$

식(Ⅲ. 2–6)과 (Ⅲ. 2–8)에서 정의된 전위는 모든 전하로부터 아주 멀리 떨어진 곳에서 0이다.

두 번째 방법은 전기장 값을 이미 알고 있거나, 가우스의 법칙과 같은 방법을 통하여 전기장을 쉽게 알 수 있는 경우, 식(Ⅲ. 2–3)에 전기장을 대입하여 두 점 사이의 전위차를 계산할 수 있다.

3) 대전된 도체에 의한 전위



[그림 Ⅲ–15] 과잉 전하를 갖는 임의의 형태의 도체

[그림 Ⅲ–15]와 같이 과잉 전하를 갖는 임의의 형태의 도체를 생각해 보자. 평형을 이루고 있는 이 도체의 과잉 전하는 도체의 바깥 표면에 위치한다. 도체 내부에서의 전기장은 0이고, 도체 바로 밖에서의 전기장은 표면에 수직하다. 이 전하들은 도체의 양면과 내부의 모든 점들의 전위를 균일하게 만든다. 하지만 도체의 표면 전하밀도는 균일하지 않다.

대전된 도체의 표면 위의 두 지점 A와 B 사이의 전위 차를 생각해 보자.

도체 표면 바로 밖의 전기장은 표면과 수직이므로 표면을 따른 미소변위 $\vec{ds}$와 도체 표면에서의 전기장 $\vec{E}$는 항상 수직이므로, $\vec{E} \cdot \vec{ds} = 0$이다. 이 결과와 식(Ⅲ. 2–3)으로부터, A와 B 사이의 전위차가 필연적으로 0이라는 것을 알 수 있다.

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot \vec{ds} = 0 \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{–}9)$$

이 결과는 도체 표면의 임의의 두 점 사이에 적용된다. 그러므로, 전위 V는 평형상태의 대전된 도체 표면의 모든 곳에서 일정하고, 이러한 표면을 등전위면이라 한다.

2. 축전기

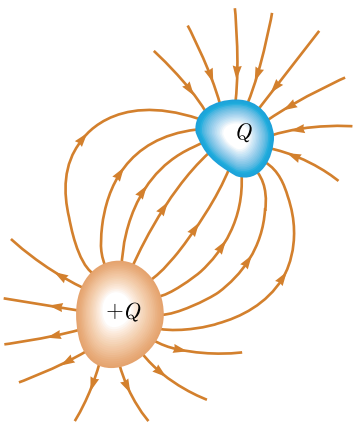
[그림 Ⅲ-16] 축전기 사진

축전기는 저항과 인덕터와 함께 전기회로를 구성하는 중요한 소자 중의 하나이다. 라디오 수신을 위한 주파수 조절 장치, 자동차의 점화 장치, 카메라의 섬광 장치 등 많은 전기회로에 축전기가 사용된다. 축전기는 기본적으로 절연체에 의해 분리된 두 개의 도체로 구성된다. 축전기의 전기 용량은 도체들의 기하학적인 모양과 도체 사이의 물질인 유전체에 의하여 정해진다.

1) 축전기와 전기 용량

[그림 Ⅲ-17]과 같이 두 도체가 크기는 같지만 부호가 서로 반대인 전하로 대전되어 있는 경우를 생각해 보자. 이와 같은 두 도체의 배열을 축전기라 한다. 전하는 공간에 전기장을 만들며 두 도체 사이에는 대전된 전하 Q의 크기에 비례하는 전위차 ΔV가 있다. 이러한 전위차에 대한 전하의 크기는 전기 용량이라는 개념으로 다음과 같이 정의된다.

$$C \equiv \frac{Q}{\Delta V} \qquad (\text{Ⅲ. } 2\text{-}10)$$



[그림 Ⅲ-17] 두 도체가 크기는 같지만 부호가 서로 반대인 전하로 대전되어 있는 경우

위 식처럼 축전기의 전기 용량 C는 두 도체 사이의 전위차의 크기에 대한 한쪽 도체의 전하량의 크기로 정의된다. 또한 전기 용량은 전하나 전기적 위치 에너지를 저장할 수 있는 능력을 나타내는 하나의 척도이다.

식 (Ⅲ. 2-10)로부터 전기 용량의 SI 단위는 패러데이의 이름을 따서 패럿이라 하며 F로 표시 한다. 즉,

$$1\,F = 1\,C/V$$

이다.

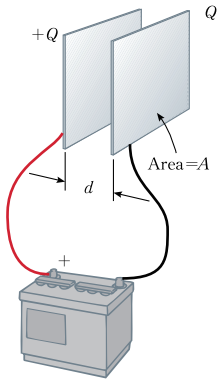
(1) 고립된 대전 구의 전기 용량

대전되어 있는 구형의 도체와 이 도체로부터 형성되는 전기선속 또는 전기력선을 생각해 보자. 이 전기장은 무한대까지 이어지는데, 무한대에 두 번째의 도체가 구각 모양으로 위치해 있다고 가정하고, 구각 도체의 전위를 영점으로 정하면, 반지름 R인 도체구의 전위차는 간단히 k_eQ/R이 되고, 전기 용량은

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{Q}{k_eQ/R} = \frac{R}{k_e} = 4\pi\epsilon_0 R \qquad (\text{Ⅲ. } 2\text{-}11)$$

이다. 이 식으로부터 고립된 도체구의 전기 용량은 도체의 모양인 반지름에만 좌우됨을 알 수 있다.

(2) 평행판 축전기의 전기 용량



[그림 Ⅲ-18] 평행판 축전기에 배터리를 연결하여 충전하는 경우

[그림 Ⅲ-18]과 같이 면적이 A인 두 개의 도체 평행판이 거리 d만큼 떨어져 있다. 한쪽 판의 전하량은 $+Q$이고, 다른 쪽 판의 전하량이 $-Q$이면, 각 판의 단위 면적당 전하량은 $\sigma = Q/A$이다. 판 사이의 전기장은 $E = \sigma/\epsilon_0 = Q/(\epsilon_0 A)$가 되고, 전위차는 $\Delta V = Ed$이므로

$$\Delta V = Ed = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$$

이다. 이 결과를 식 (Ⅲ. 2-11)에 대입하면 전기 용량을 구할 수 있다.

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{Q}{Qd/\epsilon_0 A}$$

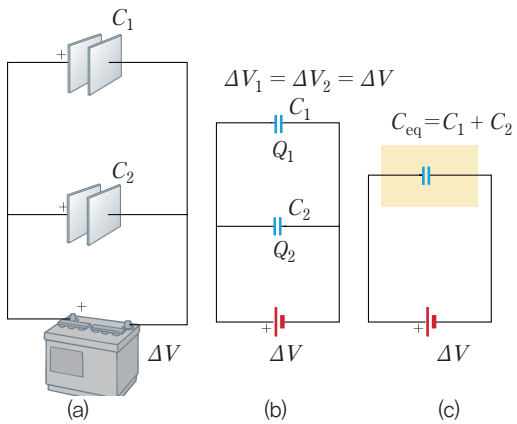
$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \qquad (Ⅲ.\ 2\text{-}12)$$

즉, 평행판 축전기의 전기 용량은 판의 면적에 비례하고 판 사이의 간격에 반비례한다.

2) 축전기의 연결

(1) 병렬 연결

[그림 Ⅲ-19] (a)와 같이 연결한 두 개의 축전기를 병렬 연결이라 한다. 각각의 축전기에 걸리는 전위차는 같으며, 이는 전지의 전압 ΔV와 같다.



[그림 Ⅲ-19] 축전기의 병렬 연결

축전기에 저장된 전하를 각각 Q_1, Q_2라고 하면, $Q_1 = C_1\Delta V$, $Q_2 = C_2\Delta V$이고, 두 축전기에 저장된 전체 전하 Q는

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1\Delta V + C_2\Delta V \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{–}13)$$

이고, 합성 축전기의 경우

$$Q = C_{eq}\Delta V$$

이다. 이를 식 (Ⅲ. 2–13)에 대입하면 다음과 같다.

$$C_{eq}\Delta V = C_1\Delta V + C_2\Delta V$$

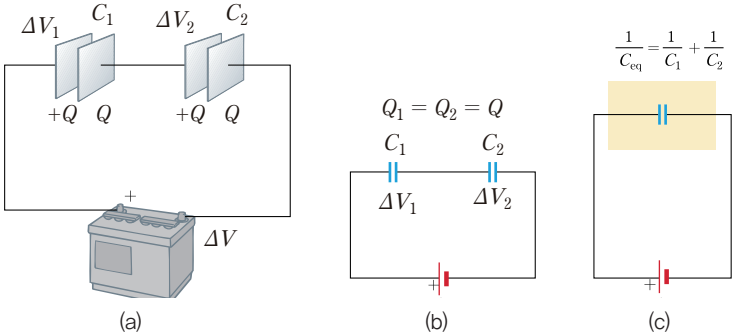
따라서 ΔV를 소거하면 합성전기 용량은

$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

이다. 축전기를 병렬로 연결하면 합성전기 용량은 각각의 전기 용량보다 더 커진다.

(2) 직렬 연결

[그림 Ⅲ–20](a)와 같이 연결한 두 개의 축전기를 직렬 연결이라 한다. 축전기를 직렬로 연결한 경우, 각 축전기에 저장되는 전하량의 크기는 모두 같다. 그 이유는 처음에 대전되어 있지 않은 축전기에 전지를 연결하면 전자가 축전기 C_1의 왼쪽 판으로부터 전지를 통하여 축전기 C_2의 오른쪽 판으로 전달된다. C_2의 오른쪽 판에 이와 같이 음 전하가 모이면, C_2의 왼쪽 판에서 같은 크기의 음 전하가 힘을 받아 떨어져 나가게 되어 여분의 양(+) 전하가 남게 된다. 마찬가지로 C_2의 왼쪽 판을 떠난 음 전하는 C_1의 오른쪽 판에 모이게 되고, 또 다시 같은 크기의 음 전하가 C_1왼쪽 판을 떠나게 된다. 따라서 모든 판의 오른쪽은 $-Q$를 얻게 되고, 모든 판의 왼쪽은 $+Q$의 전하를 가지게 된다.



[그림 Ⅲ–20] 축전기의 직렬 연결

각각의 축전기의 양단에 걸리는 전위차를 ΔV_1, ΔV_2라 하면, $\Delta V_1 = Q/C_1$, $\Delta V_2 = Q/V_2$이고, 전지 양단의 전위차 ΔV는 두 축전기에 분할되어

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{–}14)$$

이고, 합성 축전기의 경우

$$\Delta V = \frac{Q}{C_{eq}}$$

이다. 이를 식 (Ⅲ. 2–14)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{Q}{C_{eq}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

따라서 Q를 소거하면 합성전기 용량은

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

이다. 축전기를 직렬로 연결하면 합성 전기 용량은 임의의 한 축전기의 전기 용량보다 항상 작아진다.

3) 대전된 축전기에 저장된 에너지

축전기는 그것이 에너지 저장장치라는 사실을 응용하는 것이 대부분이다. 대전된 축전기에 저장된 전기 퍼텐셜 에너지는 그것을 대전시키는 과정에서 요구되는 일의 양과 같다. 곧, 반대 부호의 전하를 분리시켜서 다른 도체로 옮기는 데 필요한 일의 양과 같다. 저장된 에너지는 축전기가 방전될 때 전기력이 하는 일로 다시 사용된다.

대전된 축전기의 퍼텐셜 에너지 U는 그 축전기를 대전시키기 위해 필요한 일 W를 계산함으로써 알 수 있다. 축전기를 완전히 대전시켰을 때 축전기의 최종 전하량이 Q이고, 최종 전위차가 V라고 하면 이들 물리량은

$$V = \frac{Q}{C}$$

의 관계에 있다. 만일 q와 v를 축전기가 대전되는 어떤 순간에서의 전하와 전위차라고 하면 $v = q/C$로 쓸 수 있다. 그러므로 이 상태에서 dq만큼의 전하를 $+q$의 도체로 더 옮기는 데 필요한 일 dW는 다음과 같다.

$$dW = vdq = \frac{q\ dq}{C}$$

따라서 축전기의 전하 q를 0부터 Q까지 증가시키기 위해 외부에서 해야 하는 일 W는 다음과 같이 계산된다.

$$W = -\int_0^W dW = \frac{1}{C}\int_0^Q q\, dq = \frac{Q^2}{2C} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{-}15)$$

이 값은 또한 축전기가 방전될 때 전기장이 전하에 하는 일의 합과 같다.

대전되지 않은 축전기의 퍼텐셜 에너지를 0으로 정의하면, 식 (Ⅲ. 2-15)에 기술된 W는 대전된 축전기의 퍼텐셜 에너지 U와 같다. 최종적으로 저장된 전하가 $Q = CV$이므로 U(W와 같은 값)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{-}16)$$

여기에서 Q의 단위는 쿨롬(coulomb), C의 단위는 패럿(farad, C/V)이며, V의 단위는 볼트(volt, J/C), 그리고 U의 단위는 줄(Joule)이다.

그렇다면 저장된 에너지는 축전기의 어디에 있을까? 축전기에 저장된 에너지는 축전기의 두 도체판 사이의 공간에 전기장 형태로 저장된다고 할 수 있다. 에너지와 전기장의 관계를 살펴보기 위하여 각 도체판의 넓이가 A이고 두 도체판 사이의 거리가 d인 평행판 축전기의 두 도체 판 사이의 공간에 저장된 단위 부피당 에너지, 곧 에너지 밀도에 대해 살펴보자.

식 (Ⅲ. 2-16)에서 저장된 총 퍼텐셜 에너지 U는 $U = \frac{1}{2}CV^2$이고, 식 (Ⅲ. 2-12)에서 를 $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$대입하면

$$U = \frac{1}{2}\left(\frac{\epsilon_0 A}{d}\right)(Ed)^2 = \frac{1}{2}(\epsilon_0 Ad)E^2$$

이 된다. 두 도체판 사이의 부피는 Ad이므로, 단위 부피당 에너지($u = U/Ad$) 즉, 에너지 밀도는 다음과 같다.

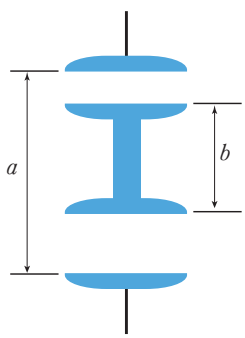
$$u = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 \qquad (\text{Ⅲ}.\ 2\text{-}18)$$

비록 위의 식은 평행판 축전기에 대해서 유도된 것이지만, 이 식은 도체판 사이가 진공인 어떤 축전기에도 유효하며, 진공에 존재하는 어떤 전기장 형태에 대해서도 유효하다. 이 결과의 의미는 흥미롭다. 진공이란 공간에 어떤 물질도 없는 것을 의미하지만 진공은 전기장을 가질 수 있으며, 그에 따라 에너지도 가질 수 있다. 결국 빈 공간이란 진실로 비어 있을 필요가 없는 것이다.

연습문제

1. 전기장의 세기가 3×10^6 N/C이면 공기 중에서 방전이 일어난다. 3000 V의 전압을 평행한 두 금속판에 걸어 주었을 때 방전이 일어나게 하려면, 판 사이의 거리를 몇 m 이하로 만들어야 하는가?

2. 오른쪽 그림은 직렬 연결된 두 축전기를 나타낸다. 길이 b의 가운데 부분은 수직으로 움직일 수 있다. 이 직렬연결의 등가 전기용량은 가운데 부분의 위치에 관계없이 $C = \frac{\epsilon_0 A}{a - b}$임을 증명하여라.

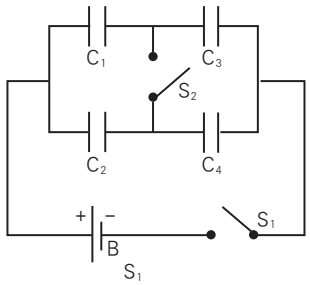


3. 평행한 축전기를 3 V의 전원에 연결하였더니 축전기에 4.5 × 10 C의 전하가 충전되었다.

(1) 이 축전기의 전기용량은 몇 μF인가?

(2) 이 축전기를 전원에서 분리시킨 후 판 사이의 거리를 2배로 하였다면 평행판 사이의 전위차는 몇 V가 되는가?

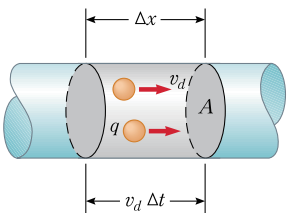
4. 오른쪽 그림의 전지 B는 12V를 공급한다. (1) 스위치 S_1이 닫은 후 각 축전기의 전하량을 구하여라. (2) (그런 다음) 스위치 S_2도 닫은 후 각 축전기의 전하량을 구하여라. 단 $C_1 = 1.0\ \mu F$, $C_2 = 2.0\ \mu F$, $C_3 = 3.0\ \mu F$, $C_4 = 4.0\ \mu F$이다.



5. 평행판 축전기의 극판들은 $F = \frac{q^2}{2\epsilon_0 A}$로 주어지는 힘으로 서로 끌어당긴다는 것을 보여라. 전하 q는 그대로 두고 극판 간격을 x에서 $x + dx$로 증가시키는데 필요한 일을 계산함으로써 위의 식을 증명하여라.

3 전류와 직류회로

지금까지 정지한 전하들 간의 상호작용에 대하여 공부하였다. 이 장에서는 움직이는 전하들에 대하여 공부하고자 한다. 한 영역에서 다른 영역으로 움직이는 전하는 전류를 이룬다. 이 장에서는 전지, 저항, 축전기를 여러 가지 형태로 결합시킨 몇 가지 간단한 회로를 분석해 보기로 한다. 복잡한 회로는 키르히호프의 법칙으로 알려진 두 가지 법칙을 사용하여 쉽게 분석되는데, 이 법칙들은 고립계의 에너지 보존 법칙과 전하량 보존 법칙에 따른다. 분석하고자 하는 대부분의 회로는 전류의 크기와 방향이 일정한 상태인 정상 상태에 있다고 가정한다. 방향이 일정한 전류를 직류(DC)라고 한다.



[그림 Ⅲ-21] 전류 I는 단면적 A를 통과해 지나가는 단위시간당 전하량과 같다.

1. 전류란?

어떤 영역을 통과하는 전하의 알짜 흐름이 있을 때 '전류가 흐른다'라고 말한다. [그림 Ⅲ-21]과 같이 단면적 A에 수직하게 전하들이 움직인다고 가정하면 전류란 전하가 이 면을 통해 흐르는 비율이다. 이 단면을 Δt시간 동안에 ΔQ만큼의 전하가 통과한다면 평균 전류 I_{av}는

$$I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 3\text{-}1)$$

이다. 그런데 전하의 흐름이 시간에 따라 변하면 전류도 시간에 따라 변한다. 순간 전류 I는 평균 전류의 미분 극한으로 정의한다. 즉,

$$I = \frac{dQ}{dt} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 3\text{-}2)$$

이다. 전류의 SI 단위는 암페어이며, 다음과 같이 표현된다.

$$1A = \frac{1C}{1s} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 3\text{-}3)$$

즉, 1A의 전류는 1초 동안에 1C의 전하량이 단면적을 통과하는 양이다.

일반적으로 전류의 방향은 양(+)전하가 흘러가는 방향으로 정한다. 구리나 알루미늄 같은 도체에서 전류는 음(−)으로 대전된 전자의 운동에 의해 생긴다. 그러므로 일반적인 도체에서 전류의 방향은 전자가 흘러가는 방향과 반대 방향이다.

[그림 Ⅲ−21]과 같이 단면적이 A인 도체를 통해 흐르는 전류를 살펴보자. 길이가 Δx인 도체의 부피는 $A\Delta x$이다. 단위 부피당 전하 운반자의 수를 n이라고 하면, 부피 속에 있는 전하 운반자의 수는 $nA\Delta x$이다. 그러므로 이 부분의 전체 전하 $\Delta Q = (nA\Delta x)q$이다. 여기서 q는 각 전하 운반자당 전하량이다. 전하 운반자가 속력 v_d로 이동한다면, 이들 전하 운반자가 시간 Δt동안 x방향으로 이동한 거리는 $\Delta x = v_d \Delta t$이다. ΔQ를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta Q = (nAv_d \Delta t)q$$

이 식의 양변을 Δt로 나누면 도체 내의 평균 전류는

$$I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqv_d A \qquad (Ⅲ.\ 3\text{−}4)$$

임을 알 수 있다. 전하 운반자의 속력 v_d는 평균 속력이며 유동 속력이라고 한다.

2. 저항

단면적이 A이고 전류 I가 흐르는 도체를 살펴보자. 도체 내에서 전류 밀도 J는 단위 면적당 전류로 정의한다. 전류는 $I = nqv_d A$이므로 전류 밀도는

$$J \equiv \frac{I}{A} = nqv_d \qquad (Ⅲ.\ 3\text{−}5)$$

이다. 일반적으로 전류 밀도는 벡터량으로 다음과 같이 표현한다.

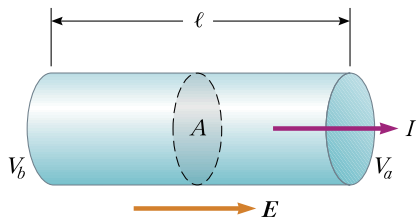
$$J = nqv_d \qquad (Ⅲ.\ 3\text{−}6)$$

도체 양단에 전위차가 유지될 때, 도체 내에 전류 밀도 J와 전기장 E가 형성된다. 몇몇 물질에서 전류 밀도는 전기장에 비례하며 다음과 같다.

$$J = \sigma E \qquad (Ⅲ.\ 3\text{−}7)$$

여기서 비례 상수 σ는 도체의 전도도이다. 식 (Ⅲ. 3−7)이 성립하는 물질을 옴의 법칙을 다룬다고 말한다. 옴의 법칙을 다르게 표현하면,

"대부분의 금속 물질을 포함한 많은 물질에 대하여 전기장과 전류 밀도



[그림 Ⅲ-22] 단면적이 A이고 길이가 l인 직선도선 양단의 전위차

의 비율은 일정한 상수값 σ를 가지며, 이 값은 전류를 흐르게 하는 전기장과 무관하다."

[그림 Ⅲ-22]에서와 같이 단면적이 A이고 길이가 l인 직선 도선을 살펴보자. 도선 양단의 전위차는 $\Delta V = V_b - V_a$이고, 이러한 전위차는 도선 내에 전기장과 전류를 일으킨다. 도선 내의 전기장이 일정하다고 가정하면 전위차는 $\Delta V = El$이 된다.

그러므로 도선 내의 전류 밀도의 크기는 $J = \sigma E = \sigma\dfrac{\Delta V}{l}$이고, 전류 밀도는 $J = I/A$이므로, 전위차를 $\Delta V = \dfrac{l}{\sigma}J = \dfrac{lI}{\sigma A} = RI$로 쓸 수 있다.

여기서 $R = l/(\sigma A)$을 도체의 저항이라고 한다. 위로부터 저항을 도체 양단의 전위차와 전류의 비로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 3\text{-}8)$$

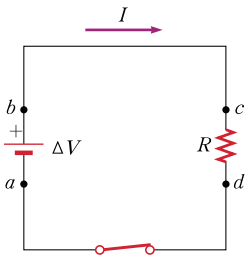
저항의 SI 단위는 1암페어(A)당 1볼트(V)를 1옴(Ω)으로 정의한다.

전도도의 역수는 비저항 ρ이다. $R = l/(\sigma A)$이므로 어떤 물질의 저항은

$$R = \rho\frac{l}{A} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 3\text{-}9)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 모든 옴성 물질은 특정한 비저항 값을 갖고, 이러한 비저항 값은 물질의 성질과 온도에만 의존한다.

3. 전력



[그림 Ⅲ-23] 시계방향으로 전류 I가 흐르는 전기회로

[그림 Ⅲ-23]의 회로에서 점 a로부터 시계 방향으로 양(+)의 전하 Q가 전지와 저항기를 통해 이동하여 점 a로 되돌아온다고 생각해 보자. 전체 회로를 하나의 계로 취급한다. 전하가 a에서 b로 전지를 통해 움직임에 따라 그 계의 전기 위치 에너지는 $Q\Delta V$만큼 증가하는 반면, 전지 내의 화학 위치 에너지는 같은 양만큼 감소한다. 전하가 c에서 d로 저항기를 통해 이동할 때에는 저항기 내의 원자들과 전자들이 충돌하는 동안 그 계의 에너지는 손실된다. 이러한 과정에서 에너지는 저항기 내의 원자의 증가된 진동 운동에 해당하는 내부 에너지로 변환되고 공기 중의 열로 전달된다. 전하 Q가 저항기를 통과할 때 계의 전기 위치 에너지를 잃는 비율을 살펴보면,

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt}(Q\Delta V) = \frac{dQ}{dt}\Delta V = I\Delta V$$

이고 에너지가 저항기에서 소모되는 비율을 나타내는 일률은,

$$P = I\Delta V \qquad (\text{Ⅲ}.\ 3\text{-}10)$$

이다. 위 식과 저항기 양단의 전위차가 $\Delta V = IR$이라는 사실로부터 저항기에서 소모되는 전력을

$$P = I^2R = \frac{(\Delta V)^2}{R} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 3\text{-}11)$$

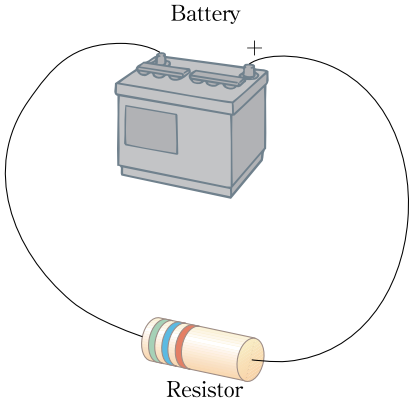
의 형태로 나타낼 수 있다. 일률의 SI 단위는 와트이다.

4. 직류회로

1) 기전력

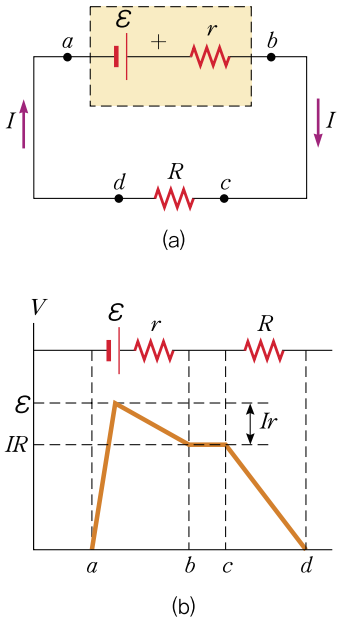
회로에서 전지는 일반적으로 에너지의 공급원으로 사용된다. 회로에서 전지의 양극 간의 전위차는 일정하므로 회로에 흐르는 전류의 방향과 크기는 일정하다. 이러한 전류를 직류라고 한다. 전지의 능력을 일반적으로 기전력이라고 한다. 전지의 기전력 E는 전지 양단에 공급할 수 있는 최대의 전위차를 말한다.

[그림 Ⅲ-24]와 같이 저항기와 전지로 구성된 간단한 회로를 생각해 보자. 실제로 전지 내부에는 전하 흐름을 방해하는 저항이 존재한다. 이 저항을 내부 저항 r이라고 한다.



[그림 Ⅲ-24] 간단한 직류회로

내부 저항이 0인 이상적인 전지의 경우, 전지 양단의 전위차(단자 전압)는 전지의 기전력과 같다. 그러나 전류가 흐르는 회로 내의 실제 전지에 있어서 단자 전압은 기전력과 같지 않다. [그림 Ⅲ-25] (a)에서 전지는 점선의 직사각형 안에 있고, 저항 0의 기전력 E와 내부 저항 r로 표현되어 있다. 이제 전지를 지나 a에서 b로 움직이면서 여러 곳의 전위를 측정한다면, 음극에서 양극 단자로 지나



[그림 Ⅲ-25] 한 회로 내에서 위는 증가한 것만큼 감소한다.

갈 때 전위는 E만큼 증가한다. 그러나 저항 r을 통해서 지나갈 때 전위는 Ir만큼 감소한다. 여기서 I는 회로에 흐르는 전류이다. 그러므로 전지의 단자 전압

$$\Delta V = V_b - V_a = E - Ir \qquad (Ⅲ.\ 3\text{-}12)$$

이다.

[그림 Ⅲ-25] (b)는 회로에서 시계 방향을 따르는 전위의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 단자 전압 ΔV는 외부 저항 R 양단의 전위차와 같아야 한다. 외부 저항 양단의 전위차는 $\Delta V = IR$이다. 이 표현을 식 (Ⅲ. 3-12)와 결합시키면

$$E = IR + Ir \qquad (Ⅲ.\ 3\text{-}13)$$

임을 알 수 있다. 전류에 대해 풀어보면

$$I = \frac{E}{R + r} \qquad (Ⅲ.\ 3\text{-}14)$$

이다. 이 식은 회로에서의 전류가 전지 외부 저항 R과 내부 저항 r 모두에 의존함을 보여준다.

식 (Ⅲ. 3-13)에 전류 I를 곱하면

$$IE = I^2R + I^2r \qquad (Ⅲ.\ 3\text{-}15)$$

을 얻는다. 이 식으로부터 기전력 장치의 전체 출력(IE)는 외부 저항의 전력 손실(I^2r)과 내부 저항의 전력 손실 I^2r로 전환됨을 알 수 있다.

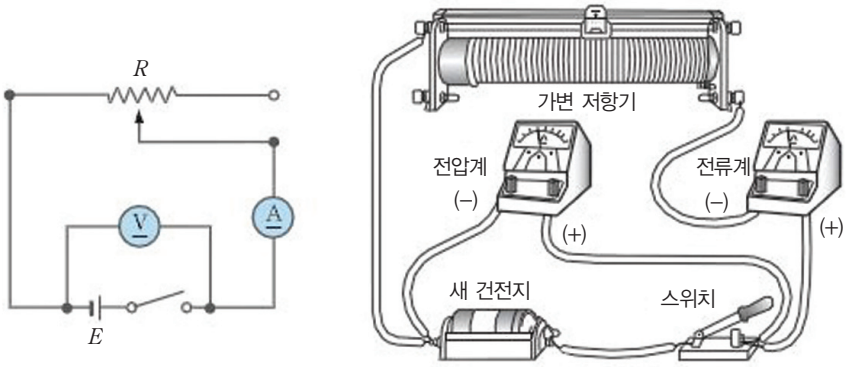
다음 실험을 통하여 전지의 기전력과 내부 저항 및 단자 전압 사이의 관계에 대하여 알아보자.

실험 전지의 단자 전압

준비물 전압계, 전류계, 연결 도선, 가변 저항, 스위치, 새 건전지와 사용한 건전지, 모눈종이

과정

(1) 그림과 같이 새 건전지, 가변 저항, 전류계, 전압계 및 스위치를 연결한다. 건전지에 가변 저항을 연결하여 전류를 변화시켰을 때 걸리는 단자 전압을 조사



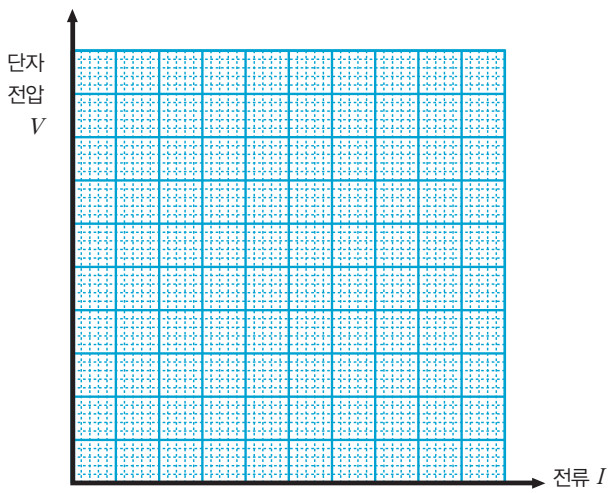
전지의 기전력과 내부 저항

(2) 가변 저항의 값을 최대로 하고, 스위치를 닫은 후 전류를 측정한다. 이 전류의 최소값에서부터 전류의 크기를 일정하게 증가시킨다.
(3) 가변 저항의 저항값을 줄여 가면서 전지 양 극의 전압과 전류를 측정한다.
(4) 전류를 가로축, 단자 전압을 세로축으로 하여 그래프를 그려본다.
(5) 그래프를 연장하여 세로축과 만나는 점을 찾고 그 값을 구한다.
(6) 사용한 건전지를 이용하여 위와 같은 실험을 해보고 새 건전지와 어떤 차이가 있는지 조사한다.

결과 및 분석

(1) 저항값을 줄임에 따라 회로에 흐르는 전류와 단자 전압

횟수	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회	9회	10회
전류 $I(V)$										
단자 전압 $V(V)$										



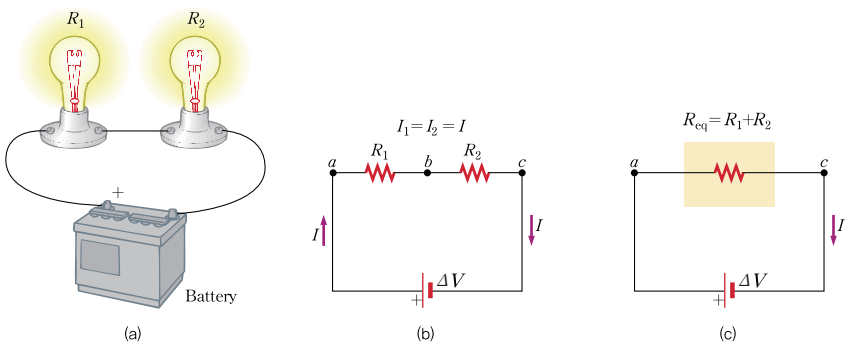
① 전류가 증가할 때 단자 전압이 낮아지는 까닭은 무엇인가?
② 그래프를 연장하여 세로축과 만나는 점의 전압은 무엇을 나타내는가? 그리고 그 값은 얼마인가?
③ 그래프에서 기울기는 어떤 차원으로 표현되며 기울기의 물리적 의미는 무엇일까? 또, 그 값은 얼마인가?
(2) 단자 전압, 내부 저항, 전류 사이의 관계를 식으로 나타내어 보자.
(3) 사용한 건전지와 새 건전지는 어떤 차이가 있는가?

과정

(1) 건전지에는 내부 저항이 있다. 이 내부 저항은 라디오와 같은 회로에서 사용하는 저항과 같은가? 다른가? 다르다면 어떻게 다른가?
(2) 건전지를 사용하면 할수록 내부 저항은 점차 증가한다. 그 이유는 무엇인가?

2) 저항의 직렬 및 병렬 연결

(1) [그림 Ⅲ-26] (a)와 같이 저항 두개가 연결되어 있을 때 이를 직렬 연결이라고 한다. 두 저항의 직렬 연결이 있어서 같은 시간 동안에 R_1을 통하여 흐르는 전하는 R_2를 통하여 흐르는 전하와 같아야 하므로 각 저항기를 통하여 흐르는 전류는 같다.



[그림 Ⅲ-26] **저항의 직렬연결**

각각의 저항의 양단에 걸리는 전위차를 ΔV_1, ΔV_2라 하면, $\Delta V_1 = IR_1$, $\Delta V_2 = IR_2$이고, 전지 양단의 전위차 ΔV는 두 저항기에 분할되어

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = IR_1 + IR_2 \qquad (\text{Ⅲ}.\ 3\text{-}16)$$

이고, 등가 저항의 경우

$$\Delta V = IR_{eq}$$

이다. 이를 식 (Ⅲ. 3-5)에 대입하며 다음과 같다.

$$IR_{eq} = IR_1 + IR_2$$

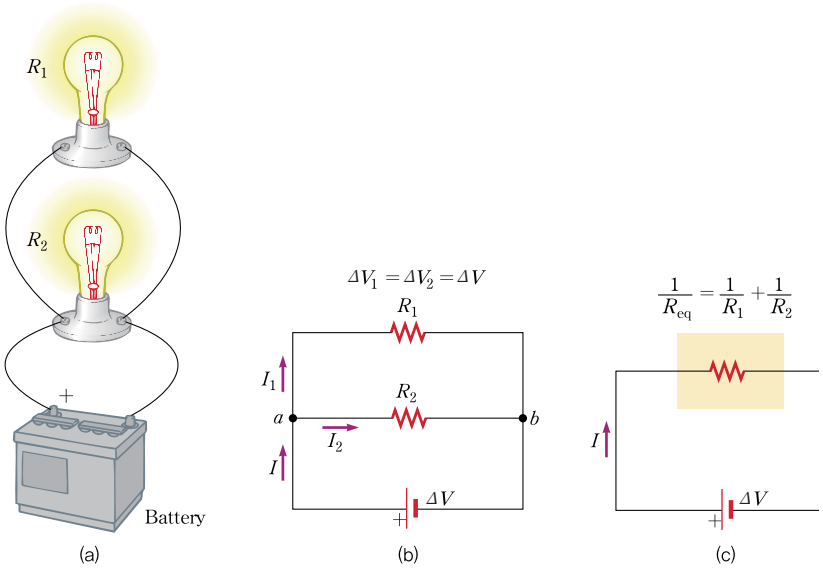
따라서 I를 소거하면 등가 저항은

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

이다. 저항을 직렬로 연결하면 등가 저항은 임의의 한 개의 저항보다 항상 커진다.

(2) 병렬 연결

[그림 Ⅲ-27] (a)와 같이 연결한 두 개의 저항을 병렬 연결이라 한다. 각각의 저항에 걸리는 전위차는 같으며, 이는 전지의 전압 ΔV와 같다.



[그림 Ⅲ-27] **저항의 병렬연결**

저항에 흐르는 전류를 각각 I_1, I_2라고 하면, $I_1 = \dfrac{\Delta V}{R_1}$, $I_2 = \dfrac{\Delta V}{R_2}$이고, 전하량은 보존되어 점 a로 들어가는 전류 I는 그 점에서 나가는 전체 전류와 같으므로

$$I = I_1 + I_2 = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} \qquad (Ⅲ.\ 3\text{-}17)$$

이고, 등가 저항의 경우

$$I = \frac{\Delta V}{R_{eq}}$$

이다. 이를 식 (Ⅲ. 3-17)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta V}{R_{eq}} = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2}$$

따라서 ΔV를 소거하면 등가 저항은

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

이다. 두 개 이상의 저항이 병렬로 연결된 경우 등가 저항 값의 역수는 각각의 저항 값의 역수의 합과 같다. 그리고 등가 저항은 병렬로 연결된 저항들 중에 가장 작은 저항 값보다도 항상 작아진다.

3) 키르히호프의 법칙

간단한 회로는 $\Delta V = IR$의 표현과 저항의 직렬 및 병렬 연결의 규칙을 이용하여 분석할 수 있다. 그러나 많은 경우 회로를 단일 고리로 단순화하는 것이 불가능하다. 이와 같은 복잡한 회로를 분석하는 과정은 키르히호프의 법칙을 이용하여 단순화시킬 수 있다.

- 분기점 법칙 : 임의의 분기점으로 들어가는 전류의 합은 그 분기점에서 나가는 전류의 합과 같아야 한다.

$$\Sigma I_{in} = \Sigma I_{out}$$

- 고리 법칙 : 임의의 닫힌 회로에서 각 소자 양단에 걸리는 전위차의 대수적인 합은 0이어야 한다.

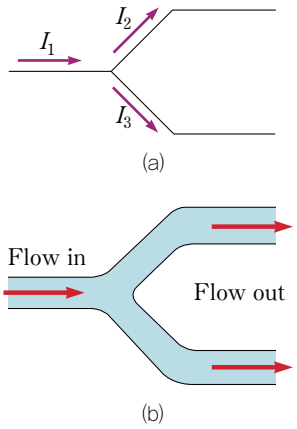
첫 번째 법칙은 전하량 보존에 대한 내용이다. 회로의 한 주어진 점에서 전하가 쌓일 수 없으므로 그 점으로 들어가는 전류는 모두 그 점을 통해 흘러 나가야 한다. 이 법칙을 [그림 Ⅲ-28] (a)의 분기점에 적용하면

$$I_1 = I_2 + I_3$$

을 얻는다. [그림 Ⅲ-28] (b)는 유사한 상황으로 여기서 물은 갈라진 파이프를 통해 새는 곳이 없이 흐른다. 파이프를 통해 단위 시간당 흘러들어오

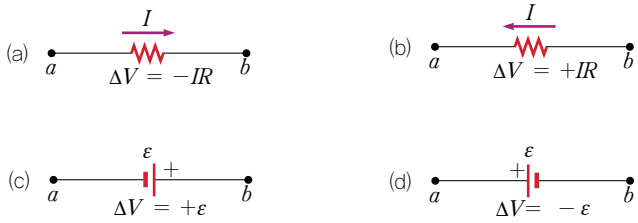
는 물의 양은 두 갈래로 흘러나가는 물의 양과 같다.

두 번째 법칙은 에너지 보존 법칙에 대한 내용이다. 닫힌 회로의 고리를 따라 한 전하를 움직인다고 가정하면 전하가 출발점에 다시 돌아오면 전하를 포함한 회로는 처음 상태의 에너지와 동일한 에너지를 가져야 한다. 전하가 회로의 어떤 소자를 지나갈 때 증가한 에너지의 전체 합은 전하가 회로의 다른 소자를 지나면서 감소한 에너지의 전체 합과 같다. 전하가 저항을 통과할 경우 전압 강하에 의한 만큼의 위치 에너지의 감소가 일어나가 전하가 기전력을 거슬러서 통과할 경우 전하의 위치 에너지는 감소한다. 전하의 위치 에너지는 전지의 음(−)극에서 양(+)극으로 통과할 때만 증가한다.



[그림 Ⅲ−28] 키르히호프의 분기점 법칙

- 전류와 같은 방향으로 저항을 통과할 경우 전하는 높은 전위로부터 낮은 전위로 이동하므로 저항에서의 전위 변화 ΔV는 $-IR$이다. [그림 Ⅲ−29(a)].
- 전류의 반대 방향으로 저항을 지날 때 저항에서의 전위 변화는 $+IR$이다[그림 Ⅲ−29(b)].
- 기전력의 방향으로 기전력 장치(내부 저항이 없다고 가정)를 지날 때의 (음극에서 양극으로) 전위 변화 ΔV는 $+E$이다[그림 Ⅲ−29(c)]. 이 방향으로 전지를 통과하면 기전력 장치는 전위를 증가시킨다.
- 기전력의 반대 방향으로 기전력 장이(내부 저항이 없다고 가정)를 지날 때의(양극에서 음극으로) 전위 변화 ΔV는 $-E$이다[그림 Ⅲ−29(d)]. 이 방향으로 전지를 통과하면 기전력 장치는 전위를 감소시킨다.



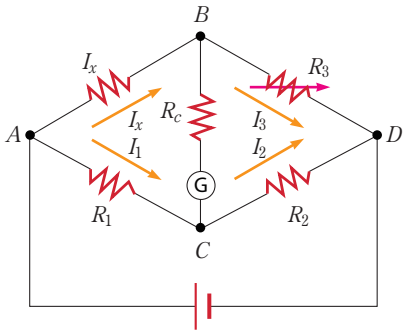
[그림 Ⅲ−29] 키르히호프의 고리법칙에 대한 부호규약

❖ 검류계에 전류가 흐르지 않으면 B점과 C점의 전위가 같다는 것을 뜻한다. 전류는 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르기 때문이다.

4) 휘트스톤 브리지

전자 제품에 많이 쓰이는 저항의 저항값은 대부분 색이나 숫자로 저항의 표면에 표시되어 있다. 그러면 저항값을 모르는 저항의 저항값은 어떻게 구할 수 있을까?

미지의 저항을 측정하기 위해서는 전류계와 전압계를 이용할 수도 있지만 보다 정밀하게 측정하기 위해서 휘트스톤 브리지를 사용한다.



[그림 Ⅲ-30] 휘트스톤 브리지 회로도

그림에서 R_1, R_2의 저항값은 이미 알고 있는 것이고, R_3는 저항 값을 변화시킬 수 있는 가변 저항이고, R_x는 측정하고자 하는 미지의 저항이다.

검류계에 전류가 흐르지 않도록 가변저항 R_3를 적당히 조절하면 점 B와 점 C의 전위는 같아진다.

그러므로 점 A와 점 B의 전위차와 점 A와 점 C의 전위차는 같다.

$$V_{AB} = V_{AC}$$

또한, 점 B와 점 D의 전위차와 점 C와 점 D의 전위차도 같다.

$$V_{BD} = V_{CD}$$

그러므로 $V_{AB} = V_{AC}$에서 $I_1R_1 = I_xR_x$이고, $V_{BD} = V_{CD}$에서 $I_2R_2 = I_3R_3$이다.

검류계에 전류가 흐르지 않으므로 $I_1 = I_2$, $I_x = I_3$이고, 따라서 $R_1R_3 = R_2R_x$이다. R_1, R_2, R_3의 저항값은 이미 알고 있으므로 R_x의 값은 다음과 같다.

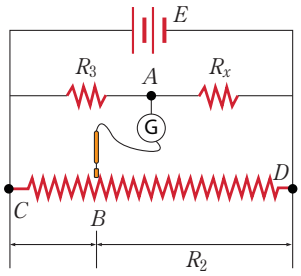
$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

실험 휘트스톤 브리지

준비물 220 V–60 W 전구 2개, 220 V–30 W 전구 4개, 전선 약간, 전구 소켓 5개

과정

(1) 그림과 같이 60 W 전구를 가운데 소켓에 꽂고, 30 W 전구 3개를 나머지 소켓에 꽂는다.
(2) 이 장치를 전원에 연결하여 어느 전구에 불이 들어오는지 관찰한다.
(3) 빈 소켓에 30 W의 전구를 꽂고, 어느 전구에 불이 들어오는지 관찰한다.
(4) 마지막으로 꽂은 30 W의 전구를 60 W의 전구로 바꾸어 꽂고 난 후 어느 전구에 불이 들어오는 지 관찰한다.



휘트스톤 브리지

정리

(1) 소비 전력이 같은 전구의 저항값은 같은지 말해 보자.
(2) 불이 들어오지 않는 전구 양 끝의 전위는 같다고 할 수 있는가?

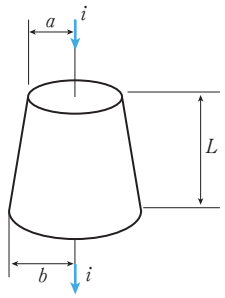
연습문제

1. 저항이 10 Ω인 저항에 전류 5.0 A가 40분 동안 흘렀다. 이 시간 동안 저항의 단면적을 통해서 지나간 (1) 전하량과 (2) 전자의 수를 구하여라.

2. 오른쪽 그림과 같은 저항이 있다. 윗면과 아랫면의 반지름은 각각 a, b이고 높이는 L이다. 반지름의 비가 작으면 단면적의 전류밀도가 균일하다고 가정할 수 있다.

(1) 이 물체의 저항을 구하여라.

(2) $a = b$일 때 저항이 $\rho(L/A)$임을 보여라.



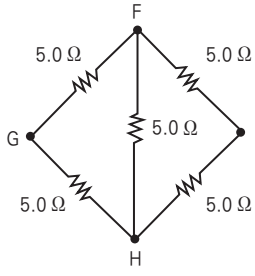
3. 120 V송전선이 15 A퓨즈에 연결되어 있다. 500 W의 전구들을 병렬로 이 선에 연결하여 퓨즈를 끊지 않고 켤 수 있는 최대의 전구수는 얼마인가?

4. 저항이 R_1, R_2이고 $R_1 > R_2$인 두 전구가 전지에 연결되어 있다. 다음의 경우 어느 전구가 더 밝은가?(즉, 열 에너지를 더 많이 방출하는가?)

(1) 직렬 연결

(2) 병렬 연결

5. 오른쪽 그림에서 (1) F와 H 2) F와 G 사이의 저항을 구하여라.

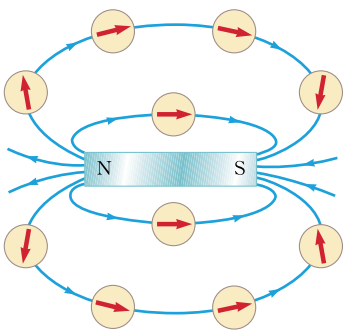


4 자기장과 로렌츠 힘

우리는 일상 생활에서 자기력을 이용한다. 자기력은 전동기, TV, 전자레인지, 컴퓨터 프린터, 지문채취에도 이용된다.
이 장에서는 자기장이 움직이는 대전 입자나 자석과 같이 자성을 띤 물체에 어떻게 자기력을 작용하는가를 알아보자. 그리고 움직이는 전하는 자기장의 원천이다. 전류에 의하여 공간의 한 점에 만들어지는 자기장을 구하는 방법을 알아보자.

1. 자기장과 자기력

[그림 Ⅲ-31]은 막대 자석 주위의 자기장이 나침반에 의해서 그려지는 방식을 나타내고 있다. 자기장의 모습은 철가루를 사용함으로써 확인할 수도 있다.



[그림 Ⅲ-31] 막대 자석 주위의 자기장과 나침반

공간의 어떤 점에서의 자기장 벡터 $\boldsymbol{B}$를 시험 물체에 작용하는 자기력의 식을 이용해 정의하기로 하자. 시험 물체는 속도 $\boldsymbol{v}$로 움직이는 대전 입자를 택하기로 한다. 전하가 존재하는 영역에 전기장이나 중력장은 없다고

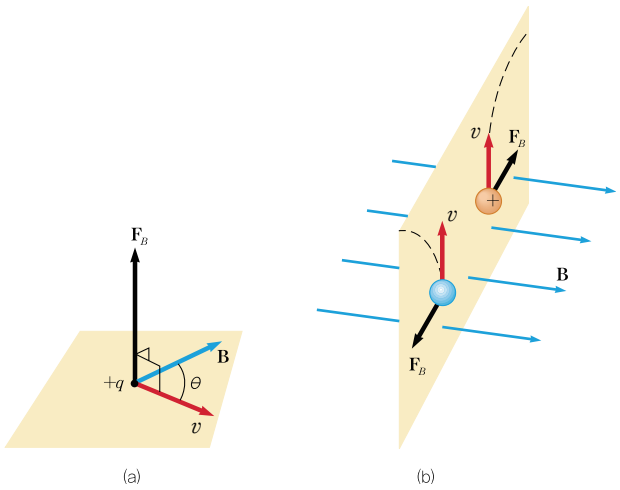
가정한다. 자기장 내에서 움직이는 여러 대전 입자의 운동에 대한 실험 결과는 다음과 같다.

- 자기력의 크기는 전하 q와 입자의 속력 v에 비례한다.
- 자기력의 크기와 방향은 입자의 속도 그리고 자기장의 크기와 방향에 의존한다.
- 대전 입자가 자기장과 평행한 방향으로 운동할 때 전하에 작용하는 자기력은 0이다.
- 속도 벡터가 자기장과 각 θ를 이룰 때, 자기력은 $\boldsymbol{v}$와 $\boldsymbol{B}$모두에 수직인 방향으로 작용한다. 즉 $\boldsymbol{F}_B$는 $\boldsymbol{v}$와 $\boldsymbol{B}$가 이루는 평면에 수직이다[그림 Ⅲ-31(a)].
- 양(+) 전하에 작용하는 자기력은 똑같은 방향으로 운동하는 음(−) 전하에 작용하는 힘과 반대 방향이다[그림 Ⅲ-31(b)].
- 속도 벡터가 자기장과 각를 이루면 자기력의 크기는 $\sin\theta$에 비례한다.

이 실험 결과로부터 자기력은 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$\boldsymbol{F}_B = q\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B} \qquad (Ⅲ.\ 4\text{-}1)$$

여기서 자기력의 방향은 벡터곱의 정의에 의하여 $\boldsymbol{v}$와 $\boldsymbol{B}$모두에 수직인 $\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$의 방향이다. 이 식을 공간의 한 점에서 자기장을 정의해 주는 식으로 사용할 수 있다. 즉, 자기장은 움직이는 대전 입자에 작용하는 힘으로부터 정의된다.



[그림 Ⅲ-32] 속도로 움직이는 전하에 작용하는 자기력

[그림 Ⅲ-32]는 벡터곱 $\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$의 방향을 결정하는 오른손 법칙을 나타낸다. 손바닥이 $\boldsymbol{B}$를 향한 상태로 오른손의 네 손가락을 벡터 $\boldsymbol{v}$에서 벡터 $\boldsymbol{B}$로 감아 돌리면 엄지손가락은 $\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$의 방향을 가리킨다. $\boldsymbol{F}_B = V q \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$이기 때문에, 가 양(+)전하이면 $\boldsymbol{F}_B$는 $\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$의 방향이며, q가 음(−)이면 $\boldsymbol{F}_B$는 $\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$의 반대 방향이다. 자기력의 크기는

$$F_B = |q| vB\sin\theta \qquad (Ⅲ.\ 4\text{-}2)$$

이며, 여기서 θ는 $\boldsymbol{v}$와 $\boldsymbol{B}$의 사이각이다. 이 표현으로부터 $\boldsymbol{F}_B$는 $\boldsymbol{v}$와 $\boldsymbol{B}$가 평행일 때($\theta = 0$ 또는 180°) 0이다. 또한 $\boldsymbol{v}$와 $\boldsymbol{B}$가 수직일 때($\theta = 90°$) 최대 값을 갖는다.

자기장의 SI 단위는 테슬라(tesla, T)이다. 이 단위는 식 (Ⅲ. 4-2)를 사용하면 기본 단위와 연관지을 수 있다. 1 C의 전하가 1 m/s의 속력으로 1T의 자기장에 수직으로 통과할 때 1 N의 힘을 받는다. 그러므로

$$[B] = T = \frac{N}{C \cdot m/s} = \frac{N}{A \cdot m}$$

이다. 실제로는 자기장의 단위로 SI 단위가 아닌 가우스(G)가 흔히 쓰인다. 1 T는 $10^4\,G$이다. [표 Ⅲ-3]은 주변의 자기장 크기를 보여준다.

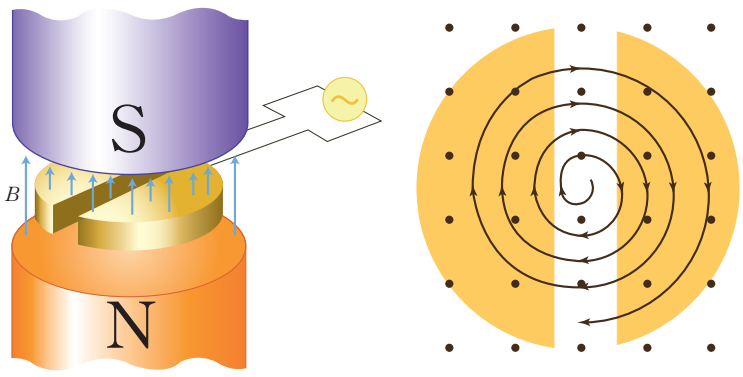
[표 Ⅲ-3] 자기장의 크기에 대한 몇 가지 예

전기장의 원천	자기장의 세기(T)
실험실의 강력한 초전도 자석	30
실험실의 강력한 일반 자석	2
의료용 MRI 장비	1.5
막대 자석	10^{-2}
태양의 표면	10^{-2}
지구의 표면	0.5×10^{-4}
인간의 두뇌(신경 신호에 의함)	10^{-13}

전기력과 자기력 사이에는 주의하여야 할 몇 가지 중요한 차이점이 있다.

- 전기력의 방향은 항상 전기장의 방향과 같은 반면에 자기력은 자기장의 방향과 수직이다.
- 대전 입자에 작용하는 전기력은 입자의 속도와 무관하지만, 자기력은 입자가 운동할 때만 작용한다.
- 전기력은 대전 입자의 변위에 대하여 일을 하는 반면에, 일정한 자기장으로부터의 자기력은 입자가 변위될 때 일을 하지 않는다.

입자 가속기 사이클로트론은 이러한 원리를 적용한 예이다. 대전 입자를 가속시키는 장치인 사이클로트론은 강한 전자석과 D자 형태의 금속 상자 2개로 이루어져 있다. 2개의 금속 상자를 마주 보게 설치한 다음, 이온 방출 장치로부터 두 금속 상자의 중심부로 이온을 방출하면, 두 금속 상자에 걸린 전압에 의하여 이온이 가속된다. 금속 상자 속으로 들어간 이온은 강한 자기장 속에서 원운동을 하는데, 반 바퀴를 돌아 금속 상자에서 나오게 되면 두 금속 상자에 걸어 준 전극이 바뀌면서 다시 가속된다.



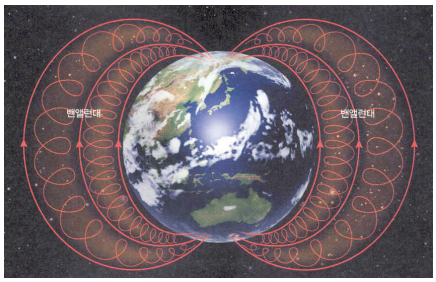
[그림 Ⅲ-33] 사이클로트론의 구조

질량이 m, 전하량이 q인 대전 입자가 v의 속도로 자기장 B에 수직으로 입사하였을 때 원궤도의 반지름을 r라고 하면 $qvB = \frac{mv^2}{r}$이고, 원운동을 하는 대전 입자의 주기는 $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$으로 궤도 반지름과 속력에 무관하다. 즉, 속력이 커지면 궤도 반지름도 같은 비율로 커져서 반 바퀴 도는 데 걸리는 시간은 같다. 따라서, 같은 시간 간격으로 반 바퀴 돌 때마다 전극을 바꿔 주면 대전 입자는 조금 더 큰 원을 그리면서 속력이 계속 증가하게 된다.

생각해 보기

사이클로트론에서 대전되지 않은 입자도 가속시킬 수 있는지 알아보자.

우주로부터 끊임없이 날아오는 전하를 띤 입자들도 지구 자기장에 의해서 힘을 받는다.



[그림 Ⅲ-34] **밴 앨런 복사대**

[그림 Ⅲ-35] **극지방의 오로라**

❖ 태양에서 온 대전 입자가 지자기장으로 들어올 때, 지구를 둘러싸고 있는 반 알렌 복사대에서 양성자는 내부에 잡히고, 전자는 외부 복사 띠에 잡힌다.

전하를 띤 알갱이들이 지구의 자기장 영역에 들어오면 지구 자기장에 의해서 자기력을 받아 곧바로 지구로 직진해 들어오지 못하고 지구 둘레에 거대한 띠를 형성하게 된다. 이를 **밴 앨런 복사대**라고 한다.

극지방에서 밤에 나타나는 오로라는 태양으로부터 온 대전 입자가 지구 자기장에 의해 극지방에 모이면서 기체 분자들과 충돌하여 나타나는 현상이다.

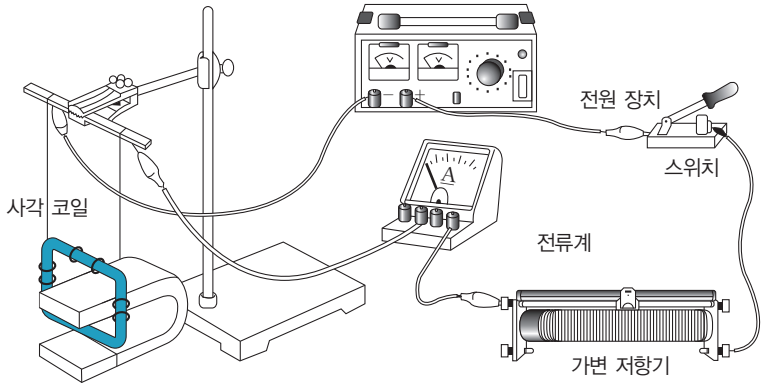
자기장이 전류에 작용하는 힘에 대하여 실험을 통하여 알아보자.

실험 자기장이 전류에 작용하는 힘

준비물 전기 그네(말굽 자석, 사각형 코일, 스탠드)1개, 직류 전류계(5A)1개, 가변 저항기 1개, 스위치 1개, 직류 전원 장치 1개, 자(30 cm), 회로 연결용 도선

과정

(1) 그림과 같이 전기 그네에 가변 저항기, 직류 전원 장치, 스위치, 직류 전류계를 연결한다.
(2) 전기 그네에 전류가 흐를 때 전기 그네의 움직임을 관찰한다.
(주의) 접촉면은 잘 닦아서 전류가 잘 흐를 수 있도록 한다.
(3) (2)에서 전류의 방향을 바꾸어 보고 전기 그네의 움직임을 관찰한다.
(4) 말굽 자석의 방향을 바꾸어 보고 전기 그네의 움직임을 관찰한다.
(5) 가변 저항기를 이용하여 전류를 증가시켜 보고 전기 그네의 움직임을 관찰한다.
(6) 자기장의 방향, 전류의 방향, 자기장에서 전류가 흐르는 도선에 작용하는 힘의 방향 사이에는 어떤 관계가 있는지 그림으로 그려 본다.



자기장에서 전류에 작용하는 힘

정리

(1) 전기 그네에 전류가 흐를 때 전기 그네의 움직임은?
(2) 전류의 방향이 바뀌었을 때 전기 그네의 움직임은?
(3) 말굽 자석의 방향이 바뀌었을 때 전기 그네의 움직임은?
(4) 전류가 증가했을 때 전기 그네의 움직임은?
(5) 자기장의 방향, 전류의 방향, 자기장에서 전류가 흐르는 도선에 작용하는 힘의 방향 사이의 관계는?

2. 전류에 의한 자기장

❖ **외르스테드(Hans Christian Oersted : 1777~1851)**

독일 물리학자 겸 화학자인 외르스테드는 전류가 흐르는 도선 근처에서 나침반 바늘이 영향을 받는다는 것을 발견한 것으로 잘 알려져 있으며, 이는 전기현상과 자기현상의 관련성에 대한 첫 번째 증거가 되는 중요한 발견이었다.

1819년 외르스테드는 나침반 바늘이 편향되는 것으로부터 전류가 흐르는 도체가 자기장을 형성한다는 것을 증명하였다.

1) 전류가 흐르는 도체에 작용하는 자기력

일정한 외부의 자기장 $\vec{B}$ 속에 전류 I가 흐르는 단면적 A, 길이 l인 도선의 한 부분을 생각해보자. 전하가 단순하게 유동속도 v_d로 이동한다고 가정하면, 전하 q에 작용하는 자기력은 $q\vec{v_d} \times \vec{B}$이다. 길이 l인 도선의 경우, 부피는 Al이고 전하의 수는 nAl이다. 이 때 단위 부피당 전하의 수를 n이라 하자. 그러면 길이가 l인 도선에 작용하는 전체 자기력은

$$\vec{F_B} = (q\vec{v_d} \times \vec{B})nAl \qquad (\text{Ⅲ. } 4\text{-}4)$$

이다. 도선에서의 전류는 $I = nqv_dA$이므로, 위의 식은 다음과 같이 표현

할 수 있다.

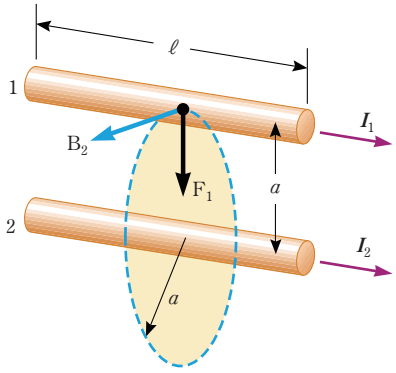
$$\overrightarrow{F_B} = I\overrightarrow{l} \times \overrightarrow{B} \qquad (\text{Ⅲ. } 4\text{–}5)$$

이 때, $\vec{l}$의 방향은 전류의 방향이며, 크기는 도선의 길이와 같다.

2) 평행한 두 직선 전류 사이에 작용하는 힘

전류가 흐르는 도선 주위에는 자기장이 형성된다. 이렇게 형성된 자기장 속에 다른 도선을 놓고 전류를 흘리면 도선에 힘이 작용한다. 이 도선이 받는 힘의 크기와 방향은 어떻게 될까?

[그림 Ⅲ-37]과 같이 같은 방향으로 전류 I_1, I_2가 흐르면서 거리 a만큼 떨어진 길고 곧은 두 도선을 생각해 보자. 전류 I_2가 흐르는 도선 2에 의하여 도선 1이 받는 자기력 F_1은 식 (Ⅲ. 4–5)와 같다. 이 때 두 도선은 서



[그림 Ⅲ-36] 도선 1에 작용하는 자기력

로 나란하므로 도선 1이 받는 자기력은 $F_1 = I_1 l B_2$ 로 쓸 수 있다.

길고 곧은 전류가 흐르는 도선 근처에서의 자기장은 다음과 같다.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

따라서, 도선 1이 받는 자기력 F_1의 크기는

$$F_1 = I_1 l B_2 = V I_1 l \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi a}\right) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} l$$

이고, 방향은 $\overrightarrow{l} \times \overrightarrow{B_2}$이므로 도선 2를 향하는 방향이다. 결론적으로 나란한 두 전류 사이의 자기력은 같은 방향으로 흐를 때 서로 잡아당기는 인력

이 작용하고, 반대 방향으로 흐를 때 서로 미는 척력이 작용한다. 두 도선에 작용하는 힘들의 크기는 같으므로 간단히 F_B로 나타내고 단위 길이당의 힘으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{F_B}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 4\text{-}6)$$

두 개의 곧고 평행한 전류가 흐르는 도체 사이에 작용하는 척력과 인력은 암페어(ampere)의 공식적인 SI(국제 단위계)단위 정의의 기초이다.

[암페어의 정의]

1암페어는 무한한 길이를 가진 두 평행 도체가 빈 공간에서 서로 1 m 떨어져 있을 때 각각 단위 길이당 정확히 2×10^{-7}N의 힘이 작용할 때의 일정한 전류이다.

식 (Ⅲ. 4-6)에서 암페어에 관한 이러한 정의가 μ_0의 값으로 $4\pi \times 10^{-7}$ T · m/a를 선택하는 이유이다. 이것은 또한 쿨롱을 SI 단위로 정의하는 바탕을 제공하는데, 1A(암페어) 전류에 의하여 1초 동안 흘러가는 전하량에 해당한다.

3) 앙페르의 법칙

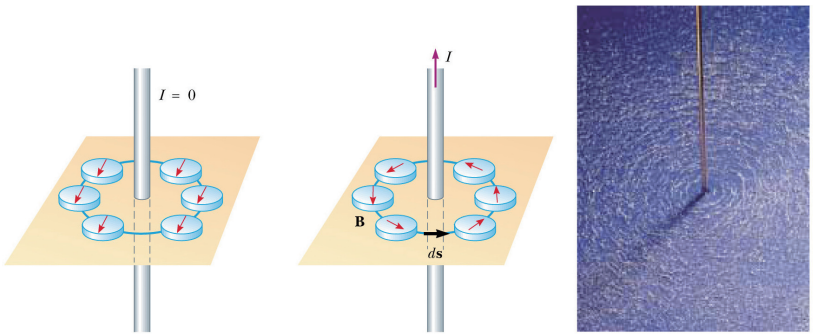
전기장 문제에서, 매우 대칭성이 높은 전하 분포의 경우에 가우스의 법칙을 써서 $\vec{E}$를 구하는 것이 더 쉽다는 것을 알았다. 이와 비슷하게 대칭성이 높은 전류 분포에 기인한 자기장 $\vec{B}$를 쉽게 구할 수 있는 방법이 있다. 이렇게 해주는 법칙을 앙페르의 법칙이라 부른다.

"닫힌 경로 주위로 $B \cdot ds$의 선적분은 $\mu_0 I$와 같다. 여기서 I는 닫힌 경로에 의해서 둘러싸인 어떤 면을 통과하는 전체 정상 전류이다.

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 I \qquad (\text{Ⅲ}.\ 4\text{-}7)$$

여기서, 상수 μ_0는 자유 공간의 투자율로 $4\pi \times 10^{-7}$ T · m/a의 값을 갖는다."

앙페르의 법칙을 이용하여 직선 도선 주위의 자기장을 구해보자. [그림 Ⅲ-37](a)와 같이 여러 개의 나침반 바늘들이 긴 수직 도선 근처의 수평면



(a) (b) (c)

[그림 Ⅲ-37] 직선도선 주위의 자기장

위에 놓여 있을 때, 도선에 전류가 흐르지 않을 때는 모든 바늘들이 같은 방향(지구 자기장의 방향)을 가리킨다. 도선에 전류가 흐르면 모든 바늘들은 [그림 Ⅲ-37](b)와 같이 지구 자기장과 전류에 의한 자기장의 합성 방향으로 정렬된다. 전류 I의 세기를 충분히 세게 하면 원의 접선방향으로 정렬된다. 이는 [그림 Ⅲ-38]의 오른손 법칙과 일치함을 보여 준다.

나침반의 바늘이 자기장 B의 방향을 가리키므로, 자기장은 도선 주위에 원을 형성하고, 그 크기는 전류에 비례하고 거리에 반비례한다. 그림의 원형 경로에서 벡터 $\vec{ds}$와 $\vec{B}$는 평행하므로 $\vec{B}\cdot\vec{ds} = Bds$이다. 따라서 직선 도선에 의한 자기장을 구하기 위하여 앙페르의 법칙을 적용하면

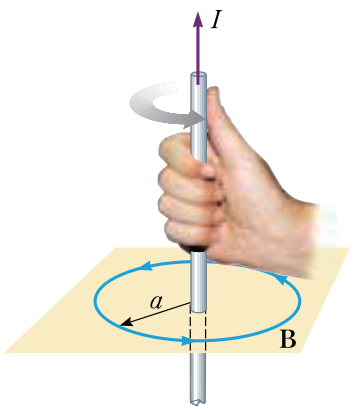
$$\oint \vec{B}\cdot\vec{ds} = B\oint ds = B(2\pi r) = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 4\text{-}8)$$

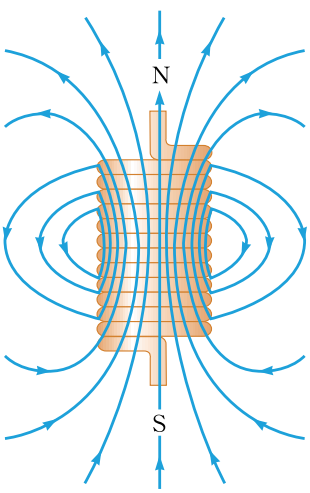
이다.

다음으로 [그림 Ⅲ-39]와 같이 나선형으로 감은 긴 도선인 솔레노이드에 의한 자기장을 구해 보자. 만일 솔레노이드가 단면의 지름에 비해서 길고, 코일이 조밀하게 감겨 있으면, 전류가 흐를 때 솔레노이드 내부 영역에 비교적 일정한 자기장을 만들 수 있다. 도선을 촘촘히 감았을 때, 각각의 한 번 감은 도선은 원형 도선 고리로 간주할 수 있고, 알짜 자기장은 모든 원형 도선 고리에 의한 자기장의 벡터합이다.

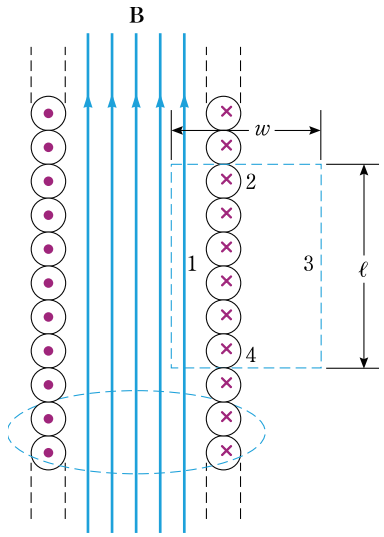
솔레노이드의 단위 길이당 감은 횟수는 n이고, 전류 I가 흐



[그림 Ⅲ-38] 전류가 흐르는 직선 도선 주위에 생성된 자기장의 방향에 관한 오른손 법칙



[그림 Ⅲ-39] 솔레노이드에 의한 자기장



[그림 Ⅲ-40] 이상적인 솔레노이드 단면

른다.

[그림 Ⅲ-40]은 이상적인 솔레노이드의 단면으로써 솔레노이드 주변의 자기장과 사각형 적분 경로 1, 2, 3, 4를 보여준다. 이상적인 솔레노이드는 내부에서 균일한 자기장을 만들고, 솔레노이드 밖에서의 자기장은 거의 0에 가깝다. 이러한 긴 솔레노이드 중심이나 근처의 자기장을 구하기 위하여 앙페르의 법칙을 쓰면 닫힌 경로 1, 2, 3, 4를 따른 자기장의 선적분은

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{ds} = \int_{side\ 1} \vec{B} \cdot \vec{ds} = B \int_{side\ 1} ds = Bl \qquad (\text{Ⅲ}.\ 4\text{-}9)$$

이 된다. 경로2와 4의 경우 자기장과 경로가 서로 수직하여 0이 되며, 경로 3의 경우 이상적인 솔레노이드 밖에서의 자기장의 세기가 0이기 때문이다.

앙페르의 법칙 오른쪽 항은 적분 경로1234로 둘러싸인 표면을 통과하는 총전류의 세기는 NI 이므로

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{ds} = Bl = \mu_0 NI$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 nI \qquad (\text{Ⅲ}.\ 4\text{-}10)$$

이상적인 솔레노이드의 내부에서의 자기장의 세기는 (식 4-7)과 같음을 확인할 수 있다.

연 습 문 제

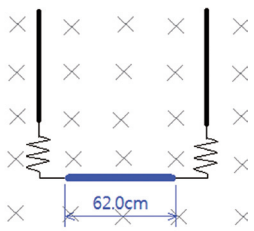
1. 마이크로파 오븐에서 마그네트론은 진동수 f = 2.450 MHz의 마이크로파를 방출한다. 전자가 이 진동수로 원형 경로에서 움직이기 위하여 필요한 자기장의 세기는 얼마인가?

2. 어떤 사이클로트론에서 양성자가 반지름 0.50 m의 원운동을 하고 있다. 자기장의 크기는 1.2 T이다.

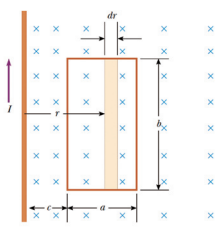
(1) 사이클로트론 진동수는 얼마인가?

(2) 양성자의 운동 에너지는 전자볼트 단위로 얼마인가?

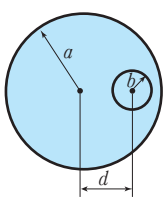
3. 길이 62.0 cm와 질량 13.0 g의 전선이 0.440 T의 자기장 내에 있는 한 쌍의 유연한 도선에 의해 떠받쳐 있다. 떠받치는 도선 내의 장력을 제거하기 위하여 어떤 크기와 방향의 전류가 필요한가?



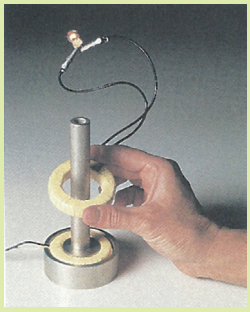
4. 오른쪽 그림과 같이 전류 I가 흐르는 매우 긴 직선 도선과 거리 c만큼 떨어진 곳에 위치한 직사각형 고리를 통과하는 자기선속은 얼마인가?



5. 오른쪽 그림은 반지름 b의 긴 원통형 구멍을 갖고 있는 반지름 a의 긴 원통형의 도체의 단면적을 보여 준다. 두 원통의 축은 서로 나란하고 거리 d의 간격을 두고 있다. 그림의 회색 부분을 전류 i가 균일하게 흐르고 있다. 암페어의 법칙을 이용하여 구멍 안에서의 자기장의 값을 구하여라.



5 전자기 유도와 자성체



19세기 초에는 전류를 흐를 수 있게 하는 장치가 오늘날 전지의 원조라 할 수 있는 전압 셀뿐 이었다. 앞에서 공부한 것처럼 그 후 전류는 주위에 자기장을 만든다는 것을 알게 되었다. 이렇게 전기와 자기가 관련되어 있다는 사실을 토대로 자기로부터 전기 즉 전류를 흐를 수 있게 하는 가능성에 대한 의문이 제기됐으며, 이에 대한 긍정적인 답은 1831년 영국의 패러데이(M. Faraday)와 미국의 헨리(J. Henry)에 의해서 얻어 졌다. 전자기 유도 현상이라 부르는 이 현상을 발견한 지 50년 후 이를 실용화한 발전기로 생산한 전기로 도시를 밝히는 것이 시작되었다.

1. 전자기 유도 현상

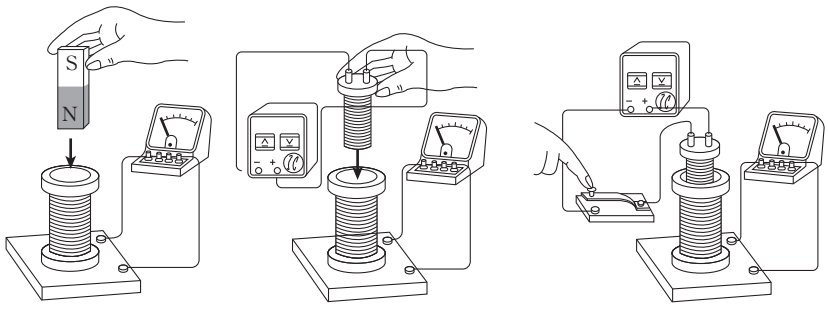
전류가 자기장을 만든다는 사실의 역의 과정이라 할 수 있는 현상으로 시간에 따라 변하는 자기장이 전류를 흐를 수 있게 한다는 것이 패러데이와 헨리가 발견한 전자기 유도 현상이다. 이 현상을 실험을 통해서 살펴보자.

실험 전자기 유도 현상

준비물 막대 자석, 반경이 다른 두 코일, 건전지와 직류 전원장치, 스위치와 도선, 검류계

과정

(1) 그림 (a)처럼 큰 코일을 검류계에 연결한다.
(2) 자석의 N극을 코일을 향하여 빨리 넣었다 빼며 검류계를 관찰한다.
(3) 자석을 천천히 넣었다 빼며 검류계를 관찰한다.



(a) (b) (c)

(4) 자석의 S극을 코일을 향하여 넣었다 빼며 (2)와 (3)을 반복한다.
(5) 자석을 움직이는 대신 코일을 움직여 위의 과정을 반복한다.
(6) 그림 (b)처럼 작은 코일을 직류 전원 장치에 연결하여 얻은 전자석을 넣었다 빼며 위의 과정을 반복한다.
(7) 그림 (c)처럼 전자석을 큰 코일에 넣은 후, 스위치를 열었다 닫았다 하면서 검류계를 관찰한다.

준비

(1) 자석과 코일이 서로 가까워 질 때와 멀어질 때 전류가 흐르는 방향은 어떻게 다른가?
(2) 막대 자석과 전자석의 극을 바꾸어 자기장의 방향을 바꾸면 전류는 어떤 차이를 보이는가?
(3) 전지나 전원 장치의 전압을 높이면 전류의 세기는 어떻게 달라지는가?

실험에서 관찰한 것처럼 자석이 정지한 코일에 접근하거나 또는 정지한 자석에 코일이 접근하여 코일에 대한 자석의 상대적인 운동이 있게 되면 코일에 전류가 흐르게 된다. 이 현상을 **전자기 유도 현상**이라 하며, 코일에 흐르는 전류를 유도 전류라 한다. 위의 실험에서 스위치를 계속 닫고 있는 상태에서는 유도 전류가 흐르지 않는다. 즉, 전자기 유도 현상은 어떤 변화가 있을 때에만 생긴다.

전자기 유도 현상에서 코일에 전류가 흐르는 것은 회로의 전지가 공급하는 기전력이 생긴 것이므로 이를 **유도 기전력**이라 부른다. 코일의 도선을 따라 전류가 흐를 수 있게 하는 기전력이 생겼다는 것은 옴의 법칙에 따라 코일의 도선을 따라 전기장이 생긴 것을 의미한다. 자석을 가까이 또는 멀리 가져가면 자석에 의한 코일의 자기장이 시간에 따라 변하는 것이므로, 전자기 유도 현상은 시간적으로 변화하는 자기장이 전기장을 유도한다고

말할 수 있다. 이는 전기장과 자기장 사이의 밀접한 관계의 하나를 표현하고 있다.

생각해 보기

위 실험의 그림 (c)에서 스위치 대신 가변 저항기를 사용하는 경우, 저항을 크게 또는 작게 함에 따라 검류계의 눈금은 어떻게 변하게 될까?

전자기 유도 현상은 많은 전기 기구에 매우 유용하게 응용되고 있다. 녹음 테이프의 소리를 재생하는 것은 녹음할 때 자화된 테이프가 즉 작은 자석들의 배열이 코일 근처를 지나게 되고, 이 때 테이프에 의한 자기장이 움직임 때문에 변하기 때문에 코일에 유도되는 전류가 생기고 이를 소리로 변환하는 것이다. 전자기 유도 현상은 이외에도 발전기, 마이크, 전기 기타 등에도 응용되고 있다.

알아보기

주변에서 전자기 유도 현상을 이용하는 기구를 조사하고 그 작동 원리를 알아보자.

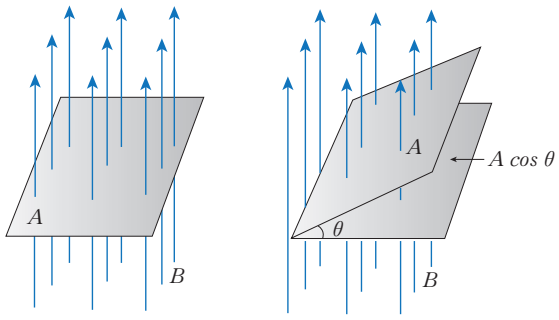
2. 패러데이의 유도법칙

전자기 유도 현상은 어떤 변화가 있을 때 생기는 것임을 보았다. 이를 정량적으로 나타내기 위해서 다음과 같이 정의되는 자속(자기력선속, 또는 자기다발)을 사용한다. [그림 Ⅲ-41]의 왼쪽처럼 면적이 A인 면이 자기장에 수직하다면 $B \cdot A$를 면을 통과하는 자속 Φ라 한다. [그림 Ⅲ-41]의 오른쪽과 같이 면에 수직한 방향과 자기장의 방향이 θ의 각도를 이루면, 이 면을 통과하는 자속 Φ는 자기장에 수직하게 투영된 면적 $A\cos\theta$와 자기장 B의 곱이다. 즉

$$\Phi = BA\cos\theta \qquad (Ⅲ.\ 5\text{-}1)$$

이다. 따라서 자기장과 나란한 면을 통과하는 자속은 0이다.

❖ 기전력은 장치가 단위 전하 당 공급하는 전기적 에너지이다.

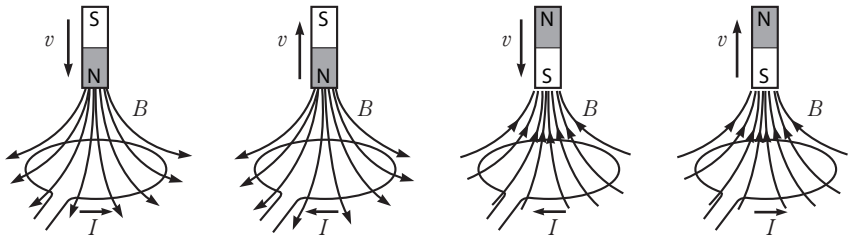


[그림 Ⅲ-41] 자속(자기력선속)

전자기 유도 현상의 실험에서 관찰된 유도된 기전력은 다음과 같이 정량적인 관계로 표현할 수 있다. 즉, 닫혀진 고리 회로에 유도되는 기전력 ε는 이 회로를 통과하는 자속 Φ의 시간적 변화와

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (\text{Ⅲ. } 5\text{-}2)$$

의 관계를 갖는다. 여기서 $\Delta\Phi$는 시간 Δt동안의 자속의 변화이며, 부호 '–'는 [그림 Ⅲ-42] 가 보여주는 것과 같이 유도 전류에 의한 자기장이 자속의 변화를 방해 또는 보상하는 방향이 되도록 유도 전류가 흐른다는 것을 말하며, 이를 **렌츠의 법칙**이라 부른다.

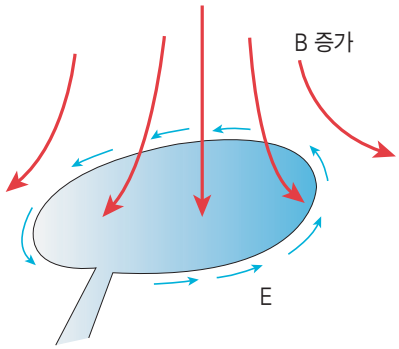


[그림 Ⅲ-42] 렌츠의 법칙

예를 들면 [그림 Ⅲ-42] (a)와 같이 N극이 코일에 접근하면 코일에는 반시계방향으로 유도 전류가 흐른다. 이 경우 유도 전류에 의한 자기장은 자기장의 증가를 방해하는 윗방향의 자기장을 만든다. 전자기 유도 현상을 정량적으로 표현한 식 (Ⅲ. 5-2)의 내용을 **패러데이의 유도 법칙**이라 한다.

❖ 패러데이(M. Faraday, 1791~1867) 영국의 물리학자로 전기장과 자기장의 장의 개념을 도입했으며, 전자기유도 법칙을 발견하였다.

또 [그림 Ⅲ-42] (a)와 같이 고리의 아랫방향 자기장이 증가하는 경우 반시계 방향의 전기장이 생기는 것을 말하고 있다. 이는 옴의 법칙에 따라 회로의 전기장의 방향은 전류 흐르는 방향과 같기 때문이다.



[그림 Ⅲ-43] B의 변화와 유도전기장 E

코일이 N번 감긴 경우, 코일 전체에 유도되는 기전력은 한 번 감긴 고리의 기전력의 N배가 된다.

예제 단면적이 3.0 cm^2 이며 감은 수가 200회인 코일이 있다. 코일에 수직하게 자기장이 가해졌으며, 세기가 0.2초 후에 그 크기가 0.8 T에서 1.2 T로 바뀌었다. (1) 코일에 유도된 기전력은? (2) 코일의 저항이 0.03 Ω이라면 유도 전류는 얼마인가?

풀이 자속의 변화는

$$\Delta\Phi = (1.2 - 0.8) \times 3 \times 10^{-4}\ \mathrm{T \cdot m^2}$$
$$= 1.2 \times 10^{-4}\ \mathrm{T \cdot m^2},$$

변화에 걸린 시간은 $\Delta t = 0.2\mathrm{s}$ 이므로, 기전력은

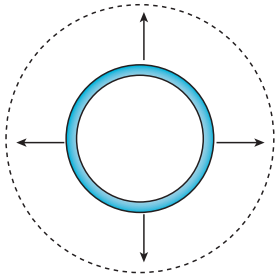
$$\varepsilon = 200 \times \frac{1.2 \times 10^{-4}}{0.2}\ \mathrm{T \cdot m^2/s} = 0.12\ \mathrm{V}$$

이다. 유도 전류는

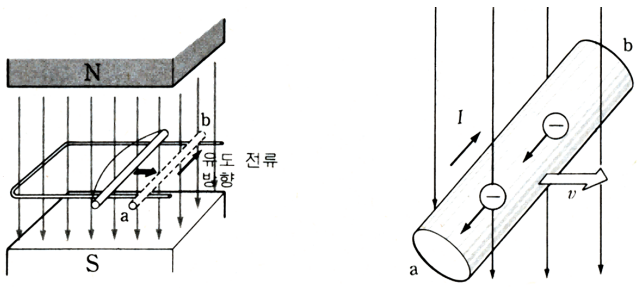
$$I = \varepsilon/R = 0.12/0.03\ \mathrm{V/\Omega} = 4A$$

이다.

탐구문제 균일한 자기장 속에서 원형 도체가 그림과 같이 열팽창 하고 원형 도체에 시계방향으로 유도 전류가 흐른다. 이 때 자기장은 지면에서 나오는 방향인가, 들어가는 방향인가?



패러데이의 유도 법칙을 적용하는 중요한 예로 자기장 내에서 움직이는 도선에 유도되는 기전력을 생각해보기로 하자. [그림 Ⅲ-44]와 같이 균일한 자기장이 있는 곳에 ㄷ자 형의 저항이 있는 레일이 놓여 있고, 이 레일에 수직으로 놓여있는 길이 l인 직선 도선을 속도 로 움직이게 하자. 이들 물체와 속도는 그림처럼 모두 자기장에 수직이다.



[그림 Ⅲ-44] **운동 기전력과 유도 전류의 전자의 운동**

레일과 도선이 하나의 고리를 이루고 있으며 이 고리를 통과하는 자속은 변하고 있으므로 고리에 기전력이 생긴다. 시간 Δt동안 이동한 거리는 $\Delta x = v\Delta t$이므로 그 동안의 자속 변화는

$$\Delta\Phi = B\Delta A = Bl\Delta x = Blv\Delta t$$

이다. 따라서 패러데이의 유도법칙(식 (Ⅲ. 5-2))에 의해 기전력의 크기는

$$\varepsilon = Blv \qquad (Ⅲ.\ 5\text{-}3)$$

이다. 렌츠의 법칙에 따라 유도 전류는 반시계 방향으로 흐른다. 이처럼 자기장 내에서 도체가 움직여서 생기는 기전력을 **운동 기전력**이라 부른다. 이러한 운동 기전력을 생기게 하는 에너지 원은 무엇인가? 고리에 흐르는 유도 전류를 I라 하면, 단위 전하당 공급되는 에너지가 기전력이므로 고리에 공급되는 일률은

$$P = \varepsilon I = BlvI \qquad (Ⅲ.5\text{-}4)$$

이다. 이것은 도선 ab를 잡아 당기는 사람이 한 일률과 같다. 실제로 도선 ab에 작용하는 로렌츠 힘은 속도의 반대 방향으로 작용하고 그 크기는

$$F = BlI \qquad (Ⅲ.5\text{-}5)$$

이다.

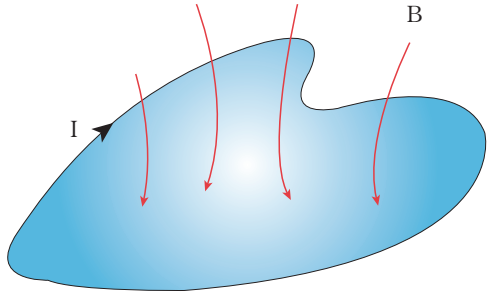
생각해 보기

도선의 유도 전류 때문에 전자에 작용하는 로렌츠 힘의 크기는 BlI이고 방향은 속도와 반대임을 보이라.

로렌츠 힘이 속도와 반대 방향으로 작용하므로 도선을 일정한 속도로 움직이기 위해서는 같은 크기의 힘이 속도와 같은 방향으로 작용해야 한다. 바로 도선 ab를 잡아당기는 사람이 이 힘을 가하는 것이며, 회로에 유도 기전력이 공급하는 일률도 사람에 의한 역학적 일률인 $Fv = BlIv$와 같은 값임을 알 수 있다.

3. 유도 계수

대체적으로 고리의 자속 변화는 흐르는 전류의 변화에 의해서 생긴다. 이러한 경우의 유도 기전력을 생각해 보자. [그림 Ⅲ-45]과 같은 고리 형태의 회로에 전류가 시간이 경과함에 따라 변한다고 하자. 회로의 전류가 변하면 주위의 자기장도 변하게 되며 이에 따라 회로를 통과하는 자속도 변하게 되어 회로에 기전력이 유도된다.



[그림 Ⅲ-45] 자체 유도

이렇게 한 회로의 전류가 변하여 이 회로 자체에 기전력이 유도되는 현상을 자체 유도라고 하며, 이때의 기전력은 전류 변화를 방해하는 방향으로 기전력이 생기므로 **역기전력**이라고도 부른다. 회로를 통과하는 자속 Φ은 전류 I에 비례하므로

$$\Phi = LI \qquad (Ⅲ.\ 5\text{-}6)$$

형태로 쓸 수 있다. 여기서 상수 L은 회로의 기학학적인 내용에 의해서 결

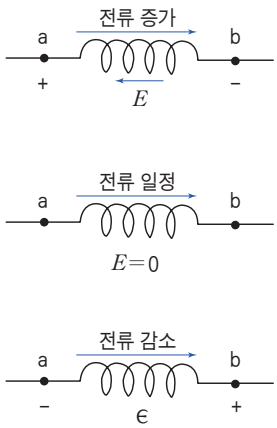
정되는 값으로 **자체 유도 계수** 또는 자체 인덕턴스(inductance)라고 부른다. 따라서 패러데이 유도 법칙으로부터 자체 유도 기전력은

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad (\text{Ⅲ. } 5\text{-}7)$$

형태로 쓸 수 있음을 알 수 있다.

코일의 경우 [그림 Ⅲ-46]과 같이 전류의 변화에 의한 자체 유도 기전력의 방향을 표시할 수 있다.

자체 유도 계수 L은 그 값이 클수록 같은 단위 시간당 전류의 변화에 대해서 많은 기전력을 수반한다. 따라서 자체 유도 계수는 역학의 질량처럼 회로에서의 관성을 표현한다고 할 수 있다. 유도 계수의 단위는 헨리(H)를 쓰며, 1초 동안 1A의 전류 변화가 1 V의 기전력이 유도되는 회로의 유도 계수를 1H라 한다. 즉, $1\text{H} = 1\ \text{V}\cdot\text{s/A} = 1\ \Omega\cdot\text{s}$ 이다.



[그림 Ⅲ-46] **전류의 방향과 유도 기전력**

예제 단위 길이당 감은 수 n, 길이 l, 단면적 A인 코일의 자체 유도 계수를 결정하라.

풀이 전류가 I일 때, 코일 내부의 자기장은 균일하며 그 크기는 $B = k''nI$이고, 코일의 한 고리를 통과하는 자속은 $BA = k''nIA$이며 전체 고리의 수는 nl이므로 코일을 통과하는 자속은

$$U = k''n^2lAI$$

이다. 따라서 자체 유도 계수는

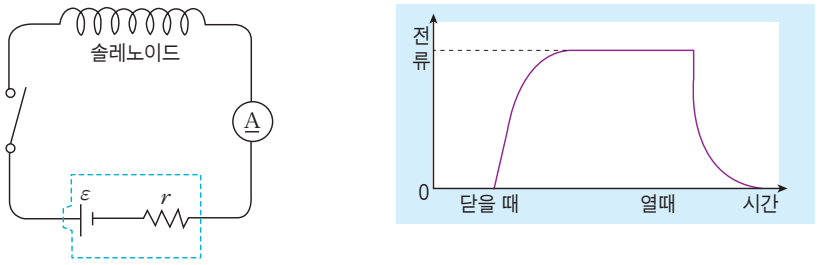
$$L = \frac{\Phi}{I}k''n^2lA$$

이다.

생각해 보기

전기 기구의 플러그를 콘센트에서 뽑을 때와 전기 스위치를 끌 때 불이 번쩍이는 것을 경험하였을 것이다. 그 이유를 생각해 보자.

[그림 Ⅲ−47] (a)와 같이 스위치를 통해 기전력 ε, 내부 저항 r인 전지를 코일에 연결한다고 하자. 스위치를 닫으면 전류가 순간적으로 일정한 값 $\frac{\varepsilon}{r}$에 도달하는 것이 아니라 얼마의 시간이 경과한 후에 이 값에 도달한다. 이것은 코일에 전류가 흐르기 시작하면서 전류의 증가를 방해하는 방향으로 자체 유도의 역기전력이 생기기 때문이다. 그리고 스위치를 닫은 후 시간이 충분히 경과하여 일정한 전류가 흐르고 있는 상황에서 스위치를 여는 경우, 전류가 순간적으로 0이 되는 것이 아니고 전류의 급격한 감소를 방해하는 방향으로의 역기전력 때문에 어느 정도의 시간이 경과한 후에 전류가 비로소 0이 된다. 이 경우 회로에 흐르는 전류를 시간에 따라 그리면 [그림 Ⅲ−48] (b)와 같다.



(a) 코일이 포함된 회로　　(b) 코일에 흐르는 전류

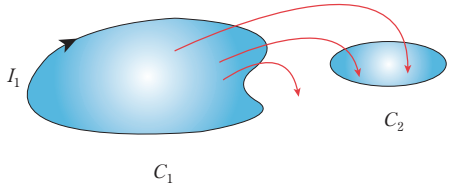
[그림 Ⅲ−47] 코일을 포함하는 회로의 자체 유도

전류가 흐르던 회로의 스위치를 갑자기 열면, 매우 큰 역기전력이 생기고 이것이 주위의 공기가 스파크를 일으키게 하는 것이다.

두 회로가 있는 경우, 회로 1의 전류 I_1이 시간에 따라 변하면 이 전류에 의한 회로 2를 통과하는 자속이 바뀌게 되어 회로 2에 유도 기전력이 생기게 된다. [그림 Ⅲ−48] 에서 전류 I_1때문에 회로 2에 생기는 자속 Φ_{12}는 전류 I_1에 비례하며

$$\Phi_{21} = M_{21} I_1 \qquad (\text{Ⅲ}.\ 5\text{–}8)$$

형태로 쓸 수 있다.



[그림 Ⅲ−48] 회로 1에 의한 회로 2의 상호 유도

따라서 회로 1의 전류 변화 때문에 회로 2에 유도 $\varepsilon_2 = -\frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta t}$ $= -M_{21}\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$이다. 마찬가지로, 회로 2의 전류 I_2의 시간적 변화 때문에 회로 1에 생기는 유도 기전력은 $\varepsilon_1 = -\frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta t} = -M_{12}\frac{\Delta I_2}{\Delta t}$이다. 두 상수 M_{21}과 M_{12}는 같은 값을 갖다는 것이 알려져 있어서 이들을 한 기호인 M으로 표시하고, 이를 두 회로 사이의 **상호 유도 계수** 또는 상호 인덕턴스라 부르는데 그 값은 두 회로 사이의 기하학적 특성에 의해서 결정된다. 따라서 각 회로의 전류의 변화 때문에 상대방 회로에 유도되는 기전력은

$$\varepsilon_1 = -M\frac{\Delta I_2}{\Delta t},\quad \varepsilon_2 = -M\frac{\Delta I_1}{\Delta t} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 5\text{–}9)$$

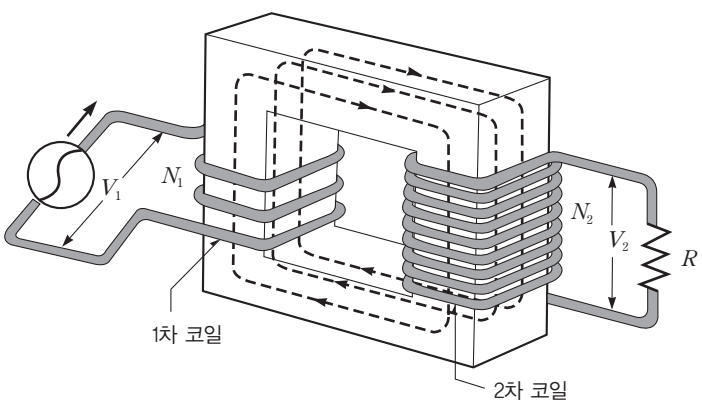
로 쓸 수 있다.

❖ 상호 유도 계수의 단위는 자체 유도 계수와 같은 헨리(H).

상호 유도는 발전소, 변전소, 가정 등에서 전압을 변화시키는 변압기에 사용한다. 변압기는 [그림 Ⅲ-49]과 같이 철심에 두 코일이 감겨져 있다. 1차 코일의 전류가 변하면 2차 코일에 유도 기전력이 생긴다. 1차 코일의 감은 수를 N_1, 2차 코일의 감은 수를 N_2라 할 때, 1차 코일에 공급되는 교류 기전력을 V_1, 2차 코일에 유도되는 기전력을 V_2라 하면, 각 고리를 통과하는 자속은 거의 일정하다고 볼 수 있으므로 V_1과 V_2의 비는 감은 수에 비례한다. 즉,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 5\text{–}10)$$

의 관계가 성립해서 감은 수의 비를 조절해서 교류 전압을 높이거나 낮출 수 있다.



[그림 Ⅲ-49] **변압기**

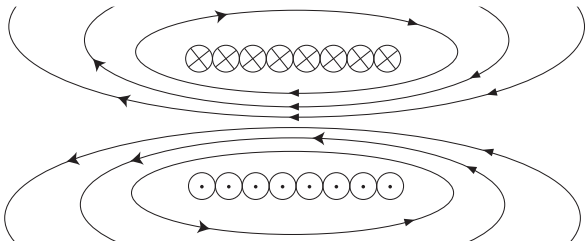
❖ **[조사]** 변압기의 용도를 조사해 보자.

4. 자석이란?

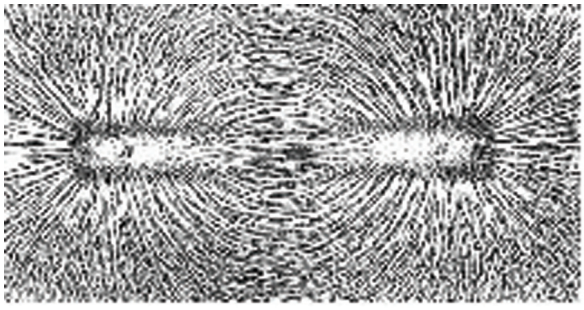
❖ 쇠못을 잡아당기는 천연 자성광물

인류가 고대 그리스, 인도 및 중국에서 자석을 발견한 것은 2000년 이상 된 것으로 알려졌다. 자석을 의미하는 영어 magnet은 그리스어의 어원인 '마그세시아(Magnesia) : 지방의 돌'에서 유래하며 이는 쇠붙이를 잡아당기는 성질이 있는 이 지방의 돌을 의미한다. 또 자석의 성질을 띠는 천연 자성광물(lodestone)은 그 어원의 뜻이 '길 돌' 또는 '안내하는 돌'이며, 이 광물의 조각을 매달아서 항해에서 나침반으로 사용하면서 자연스럽게 생긴 말이다. 사진처럼 이러한 천연 자성광물은 쇠못을 잡아당긴다. 모든 물체는 이렇게 자석에 잡아당겨지는 것인가? 이와 같은 자석의 성질은 어떻게 해서 생기는 것일까?

우리는 어떤 물질은 막대자석과 같은 좋은 자석이 되고 또 다른 많은 물질은 자석이 될 수 없다는 것을 경험에 의해 알고 있다. 물질의 어떤 성질이 이러한 차이를 만드는 것인가? 앞에서 도선에 흐르는 전류는 주위에 자기장을 만든다는 것을 보았다. 전류처럼 주위에 자기장을 만드는 물체를 자석이라 한다. 다음의 [그림 Ⅲ-50] (a)는 전류가 흐르는 솔레노이드가



(a)



(b)

[그림 Ⅲ-50] (a) 솔레노이드에 의한 자기장, (b) 막대 자석에 의한 자기장

만드는 자기장을 나타낸다. [그림 Ⅲ-50] (b)는 막대 자석 주위의 철가루가 배열된 모습이다. 이 그림이 암시하듯이 막대 자석이 솔레노이드와 같은 모양의 자기장을 주위에 만든다는 것을 추정할 수 있다.

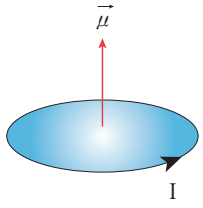
이러한 자석이 만드는 자기장의 근원은 무엇인가? 그 근본적인 이유는 원자를 이루는 각 전자가 미시적인 자석과 같아서 주위에 자기장을 만든다는 사실이다. 막대 자석의 수많은 전자들에 의해서 만들어진 전체 자기장이 바로 위의 그림에서 보는 자석이 만드는 자기장인 것이다.

원자 내의 전자는 원자핵 주위에서 운동을 하는데, 이러한 전자의 궤도운동도 전하의 운동이므로 전류라 할 수 있으며 이러한 원자적인 스케일의 전류도 자기장을 만든다는 것을 이해할 수 있다. 즉, 전자의 궤도운동이 자기장의 한 원인임을 알 수 있다. 전자가 만드는 자기장에는 이와는 다른 중요한 부분이 있다. 20세기에 전반에 밝혀진 중요한 발견 중에는 물질세계를 이루는 전자와 같은 기본 입자는 스핀 각운동량(간단히 스핀)을 갖는다는 사실이다. 스핀은 일상생활의 물체들에서는 볼 수 없고, 미시적인 세계 즉 양자역학적 세계에서 나타나는 성질로써 전자의 스핀 때문에 생기는 자기장이 존재함이 밝혀졌다. 결국 전자는 주위에 자기장을 만들며, 이 자기장은 전자의 궤도운동에 의한 부분과 스핀에 의한 부분의 합이다.

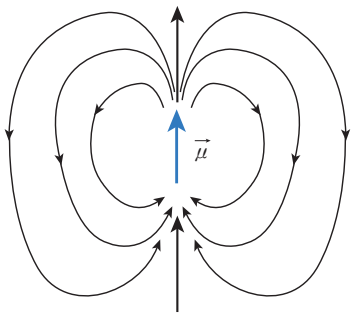
❖ 스핀은 궤도 각운동량 $\vec{L}=\vec{r}\times\vec{p}$와 같은 단위의 양으로 궤도각운동량과 더하면 그 입자의 총 각운동량이 된다.

크기가 매우 작은 것으로서 주위에 자기장을 만드는 것을 자기쌍극자라 부르는데, 이 자기쌍극자가 만드는 자기장의 크기와 방향을 나타내는 양으로 그림과 같은 자기쌍극자 모멘트 $\vec{\mu}$를 사용한다. 그림에서 보듯이 자기쌍극자 모멘트 $\vec{\mu}$의 방향은 막대자석의 경우의 S극에서 N극으로 향하는 방향에 대응한다.

❖ 면적 A인 고리 모양으로 흐르는 전류 I의 자기쌍극자 모멘트 μ는 IA이고 그 방향은 그림과 같다.

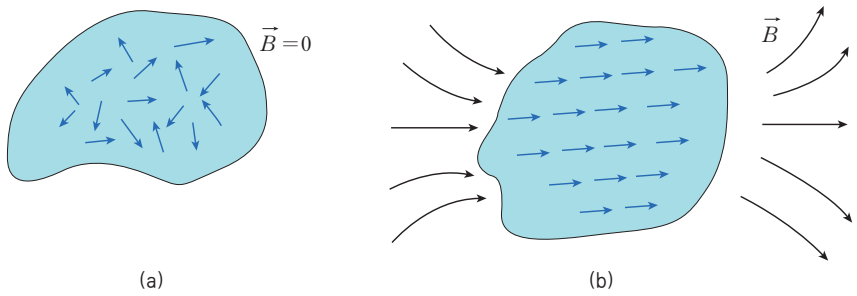


따라서 전자는 자기장을 만드는 원인임을 알고 있으므로 자기쌍극자라 할 수 있으며, 전자의 자기쌍극자 모멘트는 궤도운동에 의한 부분과 스핀에 의한 두 부분의 합이다. 결국 물체에 의한 자기장은 이 물체를 이루는 수많은 전자의 궤도운동과 스핀에 의한 자기쌍극자 모멘트들에 의한 자기장의 합이 되는 것이다.



[그림 Ⅲ-51] 자기쌍극자 모멘트 $\vec{\mu}$에 의한 자기장

어떤 물체의 경우는 이들 수많은 자기쌍극자 모멘트의 크기와 방향이 마구잡이여서 이들에 의한 자기장은 상쇄되어 전체적으로는 자기장을 만들지 못하고 즉 자성을 띠지 못하고, 다른 물체에서는 자기쌍극자 모멘트들이 비슷한 방향으로 정렬되어 주위에 알짜 자기장을 만들어 자성을 띤다. 물체가 자석이 되기 이해서는 뒤의 경우가 되어야 함은 명백하다.



[그림 Ⅲ-52] (a) 정렬 안 된 자기쌍극자, (b) 정렬된 자기쌍극자기 의한 자기장

5. 물체의 자기적 성질

위에서 보았듯이 물체에 의한 자기장은 물체를 구성하는 전자들의 궤도 운동과 스핀에 의한 자기쌍극자 모멘트들에 의한 것이므로, 물체가 어떤 종류의 원자들로 이루어졌으며 또 이들 원자가 어떻게 결합되어 있는지가 물체의 자기적 특성을 결정한다고 볼 수 있다. 물체의 자성은 크게 반자성, 상자성 그리고 강자성의 세 가지로 나누어진다.

1) 반자성

원자에 가하는 외부 자기장을 어떤 한 방향으로 0에서 어떤 세기까지 증가시키는 상황을 생각해 보자. 이는 전자의 운동궤도를 통과하는 자속을 변화시키는 것이므로, 전자기 유도 법칙에 따라 이 변화를 방해하는 방향으로 전자의 운동에 변화가 생기며 이는 원자에 유도된 자기쌍극자 모멘트가 생기게 하고 그 방향은 외부 자기장 방향과 반대 방향이다. 이와 같이 외부 자기장과 반대 방향의 자기쌍극자 모멘트가 생기는 것은 모든 원자가 공통적으로 보이는 성질이다. 하지만 이렇게 유도된 자기쌍극자 모멘트의 값은 매우 작다. 따라서 물체가 외부에서 가해진 자기장과 반대 방

향의 유도쌍극자 모멘트의 효과를 외부에 나타내게 되는 것은, 즉 **반자성**(diamagnetism)을 보이는 것은 자기장을 가하기 전의 원자들에 의한 자기쌍극자 모멘트가 상쇄되는 경우이며 유도 자기쌍극자 모멘트들에 의한 자기장도 약하다. 반자성을 보이는 물체를 반자성체라 부르며, 실온에서 그 예로는 비스무스, 구리, 수은, 질소 등이 있다.

온도가 매우 낮아지면 대부분의 물질은 전기저항이 없어져서 초전도체가 된다는 것이 알려져 있다. 초전도체는 자석을 가까이 가져가서 자기장을 가하면 초전도체는 완전한 반자성을 보여서 그 내부가 자기장이 0이 되는 중요한 성질을 보인다. 이러한 성질을 마이스너(Meissner)효과라 부른다. 초전도체의 반자성의 결과로 그림처럼 초전도체 위쪽에 영구 자석을 가져가면, 자석과 초전도체는 서로 밀어내서 자석의 무게와 이 힘이 평형을 이루어 뜨게 됨을 볼 수 있다.

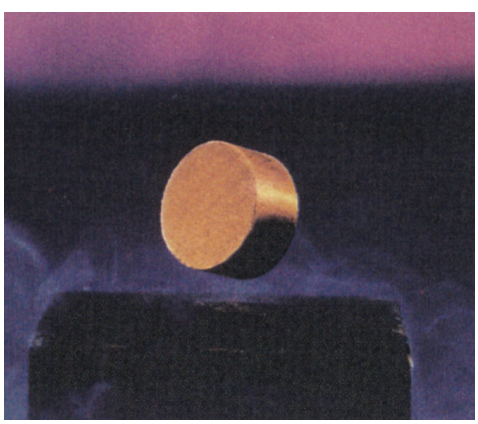
❖ 초전도체 관련 인터넷 주소
http://www.superconductors.org

조사하기

인터넷 등에서 초전도체에서 마이스너 효과에 대한 보다 자세한 내용을 조사해 보자.

2) 상자성

많은 종류의 물질의 경우 각 원자의 궤도운동과 스핀에 의한 자기쌍극자 모멘트 $\vec{\mu}$가 상쇄되지 않아 영구 자기쌍극자 모멘트를 갖으며, 높은 온도에서는 이들 모멘트의 방향이 마구잡이여서 물체 전체가 만드는 자기장은 0이다. 하지만 외부에서 자기장이 가해지면 원자적 자기쌍극자들은 외부 자기장과 같은 방향으로 정렬하려는 성질이 있다. 이는 [그림 Ⅲ-53]의 철

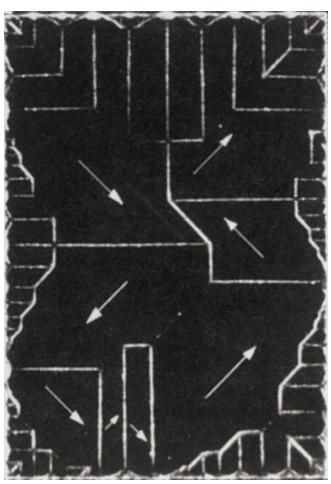


[그림 Ⅲ-53] 초전도체의 완전 반자성 때문에 초전도체 위에 뜨는 영구 자석

가루가 자석의 자기장을 따라 정렬하는 것과 같은 원리이다. 정렬된 자기장은 외부 자기장이 셀수록 센 알짜 자기장을 주위에 만들며, 외부 자기장을 없애면 원자적 쌍극자들의 방향이 다시 마구잡이가 되어 알짜 자기장이 0이 된다. 이러한 성질을 **상자성**(paramagnetism)이라 하며, 상자성을 보이는 물체를 상자성체라고 부른다.

3) 강자성

철, 코발트, 니켈과 이러한 원소를 포함하는 합금들의 경우 이들이 보이는 자기장은 반자성체나 상자성체의 경우보다 크며, 외부 자기장을 제거해도 그대로 자기쌍극자 모멘트를 유지하는 영구 자석이다. 이와 같이 외부 자기장을 제거해도 강한 영구자성을 띠는 성질을 **강자성**(ferromagnetism)이라 하며 강자성을 보이는 물체를 강자성체라고 부른다. 강자성은 물체를 구성하는 원자의 구조와 원자간의 결합이 특별하여, 한 원자의 전자 스핀과 다른 원자의 전자 스핀 사이의 상호작용이 자기쌍극자 모멘트가 서로 같은 방향을 향하도록 한다는 소위 교환결합이라는 양자물리적인 효과 때문이다. 자기쌍극자 모멘트가 한 방향으로 정렬된 부분을 자기 구역이라 부른다. 실제의 물체는 [그림 Ⅲ-54]에서 보는 것처럼 여러 개의 자기 구역으로 이루어져 있으며, 자기 구역들의 자기쌍극자 모멘트의 방향이 비슷할수록 강한 자기장을 주위에 만들게 된다.



[그림 Ⅲ-54] **자기 구역의 사진** 한 자기 구역에서는 자기쌍극자 모멘트들의 방향이 평행하며 화살표로 표시되었다.

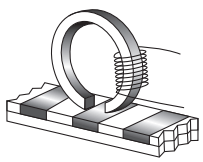
자기적인 성질에 따라 물체를 반자성체, 상자성체, 강자성체로 위와 같이 나누었다. 보다 정확하게 말하면 한 물체의 자성은 온도에 따라 달라진다. 낮은 온도에서 강자성을 보이던 물체도 온도를 높여가면, 어떤 특정한 온도를 넘어서면 이 물체는 상자성을 보이게 된다. 이 특정한 온도를 **큐리(Curie) 온도**라 부른다. 큐리 온도보다 낮은 온도의 경우 스핀간의 교환결합이 열적인 요동의 효과보다 커서 강자성체이나, 큐리 온도보다 높으면 열적인 요동의 효과가 오히려 커서 상자성체가 된다. 이렇게 임계온도에서 물질의 성질이 갑자기 변하는 현상 가운데에는 물질의 상태가 액체 또는 기체로 변하는 것이 있다. 자성의 변화와 물질의 상태 변화는 **상전이**라고 부르는 물리적 현상의 구체적인 사례라 할 수 있으며 중요한 연구의 대상이다.

❖ **상전이**

온도가 달라짐에 따라 특정한 온도(임계온도)에서 한 상(상태)에서 다른 상(상태)으로 갑자기 변하는 현상

생각해보기

소리를 테이프 녹음기에서 녹음하는 과정을 생각해 보자. 녹음기 헤드는 고리 모양의 상자성체에 전류가 흐를 수 있는 코일이 감겨있다. 헤드의 고리의 간격 부분을 자성의 필름으로 입혀진 테이프가 지나갈 수 있도록 한다. 테이프 녹음기의 작동 원리를 생각해 보자.



테이프 녹음기의 주요 구조

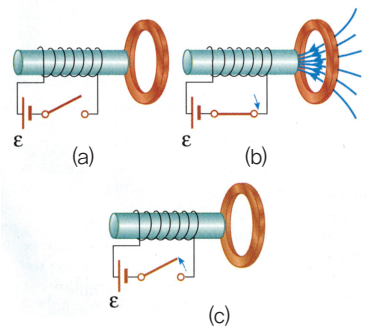
조사하기

인터넷 등을 통해 물질의 자성을 이용하는 자기 기록의 기기들에 대하여 그 주요 작동원리를 조사해 발표해 보자.

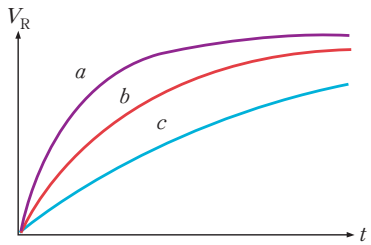
연 습 문 제

1. 그림의 (a)와 같이 전지와 코일 사이의 스위치가 열려있던 상태에서 (b)처럼 스위치를 닫는다. 그리고 (c)처럼 스위치를 여는 경우를 생각하자. 다음의 각 경우에 고리에 유도되는 전류의 방향을 화살표로 표시하라.

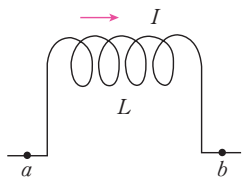
1) 그림 (b)의 상황, 2) 스위치가 오랫동안 닫혀져 있는 상황, 3) 그림 (c)의 상황.



2. 옆의 그림은 저항에 걸리는 전압 V_R의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 세 회로는 모두 같은 저항 R과 같은 직류 기전력 ε에 코일이 모두 직렬로 연결된 회로이고 자체 유도계수 L의 값만 다르다. 회로의 L값이 큰 것부터 나열하라.

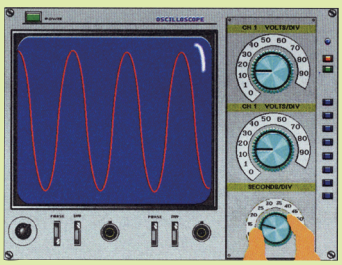
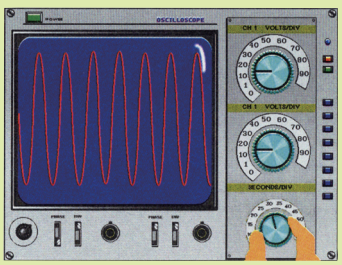


3. 자체 유도 계수가 0.6 H인 코일에 그림과 같은 방향으로 전류가 흐르고 있다. 이 전류가 $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0.6$ A/s의 비율로 증가하고 있다면 a와 b중 어느 곳의 전위가 얼마만큼 높은가?



4. 변압기의 1차 코일은 200번 감겨 있으며 100 V의 전압이 가해졌다. 2차 코일에서 400 V와 50 V의 전압을 얻으려면 2차 코일의 감긴 수는 각각 얼마인가?

6 교류회로와 전자기파

건전지에 연결된 저항에 흐르는 전류는 크기와 방향이 바뀌지 않는다. 이러한 전류를 직류(DC)라 하고 크기와 방향이 바뀌는 전류를 교류(AC)라 하는데 교류도 매우 많이 사용되고 있다. 교류의 성질에 대해서 알아보자.

1. 교류의 발생

생각해 보기

가정의 전기 기구는 대부분 교류 전류를 사용한다. 직류 대신 교류를 사용하는 이유가 무엇인지 생각해 보자.

균일한 자기장 내에서 [그림 Ⅲ-56]과 같이 자기장에 수직한 중심 축에 대해서 코일이 회전하면 전자기 유도 법칙에 따라 코일에 기전력이 유도된다. 시각 t자기장과 고리의 면에 수직한 방향이 각도 θ를 이룬다고 하면, 이 시각의 자속은

$$\Phi = BA\cos\theta \qquad (\text{Ⅲ. } 6\text{-}1)$$

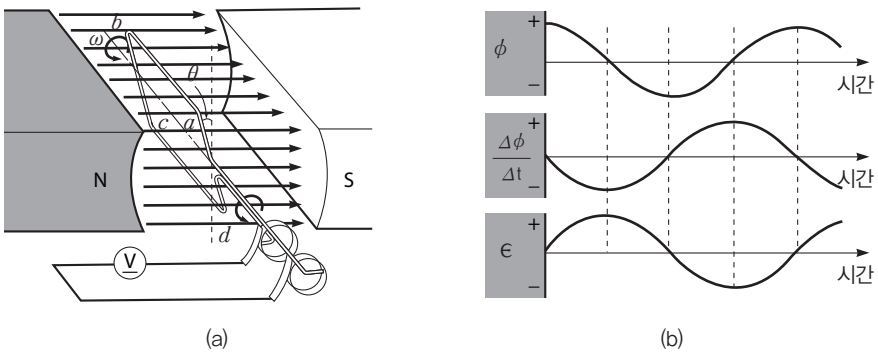
이다. 코일이 일정한 회전 각속도 ω로 회전한다면 $\theta = \omega t$이므로, 유도 기전력은 패러데이의 유도 법칙에 따라

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = BA\omega\sin\omega t$$

이다. 즉, 코일은

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin\omega t \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{-}2)$$

형태의 시간에 따라 주기적으로 변하는 교류 기전력 또는 교류 전압을 제공하는 기전력 장치의 역할을 한다. 이것이 발전기의 원리이기도 하다.



[그림 Ⅲ-55] **교류 발생의 원리**

발전소에서는 물의 위치 에너지, 물질의 화학 에너지 또는 원자력 에너지를 이용하여 자기장 내에서 코일을 회전시켜 전기적 에너지를 얻는 것이다.

식 (Ⅲ. 6-2)의 교류 기전력의 진동주기 T는 $\frac{2\pi}{w}$이므로, 이 기전력의 주파수는

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{-}3)$$

이다. 주파수의 단위는 헤르츠(Hz)로서, 우리 나라의 발전소가 공급하는 교류 전압의 주파수는 60Hz 이어서 1초에 60번 진동한다는 의미이다.

식 (Ⅲ. 6-2)의 기전력의 최댓값은 ε_0이며, 이 기전력이 저항 R에 가해지면, 전류는

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_0}{R}\sin\omega t = I_0 \sin\omega t \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{-}4)$$

의 교류로 전류의 최댓값 I_0는 $\frac{\varepsilon_0}{R}$이다. 이 경우 저항에서 소모되는 전력은

$$P = \varepsilon I = \varepsilon_0 I_0 \sin^2\omega t = I_0^2 R \sin^2\omega t \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{-}5)$$

이다.

생각해 보기

우리가 사용하는 교류는 1초에 60번의 진동을 하는데 형광등이나 전구의 불빛은 어떻게 깜박이지 않는 것인가?

이 순간 전력은 사람이 감지하기에는 빨리 변하므로 보통 시간 평균값을 사용한다. $\sin^2\omega t$의 한 주기에 걸친 시간 평균값은 $\frac{1}{2}$이다. 즉, 평균 전력은

$$\overline{P} = \frac{I_0^2}{2}R \qquad (\text{Ⅲ. } 6\text{–}6)$$

이다. 직류 기전력 ε이 저항 R에 가해졌을 때의 전력은 $\varepsilon I = I^2R$인 것과 비교하면, 같은 전력을 소모하는 직류 전류 값은 $\frac{I_0}{\sqrt{2}}$이다. 이 값을 교류 전류의 실효값 I_e이라 부른다. 즉,

$$I_e = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \qquad (\text{Ⅲ. } 6\text{–}7)$$

또, 위의 식 (Ⅲ. 6–6)은 $\overline{P} = \frac{\varepsilon_0^2}{2R}$ 으로 쓸 수 있으므로, 교류 기전력의 실효값 ε_e도

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}} \qquad (\text{Ⅲ. } 6\text{–}8)$$

이다. 평균 전력은

$$\overline{P} = \varepsilon_e I_e = \frac{\varepsilon_0 I_0}{2} \qquad (\text{Ⅲ. } 6\text{–}9)$$

이다.

보통 교류의 전압과 전류의 크기를 말할 때, 최댓값이 아니고 실효값을 사용하고, 전력의 경우도 실효값을 말한다. 교류 전압계와 전류계의 눈금도 실효값을 표시한다.

❖ 실효값의 첨자 e는 effective value에서 유래.

예제 220 V 용 880 W의 전기 기구를 220 V 교류에 연결하여 쓴다고 할 때 (1) 최대 전압의 값 (2) 전류의 최댓값 (3) 최대 순간 전력은?

풀이 실효 전류는 $P/V = 4\text{A}$이다.

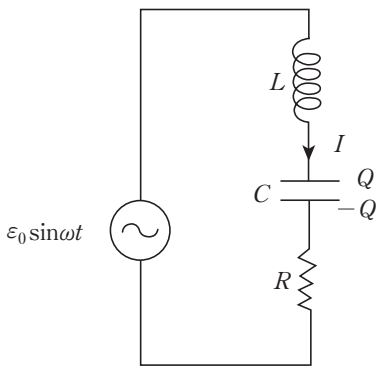
(1) $V = 311$ V

(2) $A = 5.64$ A

(3) $P = 1760$ W

2. 교류 회로의 전류와 임피던스

교류 기전력을 공급하는 장치에 코일, 축전기와 저항를 직렬로 연결하는 회로를 생각하자. 이 경우의 기전력과 흐르는 전류 사이의 관계는 위에서 살펴 본 기전력 장치에 저항만 연결되어 있는 경우와는 다르다.



[그림 Ⅲ-56] LRC 회로

[그림 Ⅲ-56] 처럼 자기 유도 계수 L의 코일, 전기 용량 C의 축전기와 전기 저항 R의 저항이 교류 기전력

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin\omega t \qquad (Ⅲ.\ 6\text{-}10)$$

의 기전력 장치에 연결되었다고 하자. 이 회로의 전류를 결정하는 관계식은 기전력 장치가 공급하는 기전력이 회로의 나머지 부분에서 전압 강하의 합과 같다는 관계이다. 이는 공급된 에너지 만큼 회로의 나머지 부분에서 쓰이거나 저장되는 에너지와 같다는 에너지 보존 법칙의 단위 전하 당 표현이다. 이 회로의 경우 외부 기전력 $\varepsilon_0 \sin\omega t$와 코일에 의한 기전력 $-L\frac{dI}{dt}$의 합이 전체 기전력이며, 축전기에서의 전압 강하 $\frac{Q}{C}$와 저항에서의 전압 강하 IR의 합이 전체 전압 강하이어서, 전류를 결정하는 관계식은

❖ 전압 강하
회로 요소를 전류가 흐르는 방향으로 진행했을 때 단위 전하당 전기적인 퍼텐셜 에너지의 감소

$$\varepsilon_0 \sin\omega t - L\frac{dI}{dt} = \frac{Q}{C} + IR \qquad (Ⅲ.\ 6\text{-}11)$$

이다. 여기서 단위 시간 당 전류의 변화 $\frac{\Delta I}{\Delta t}$를 보다 정확한 표현인 미분 $\frac{dI}{dt}$으로 대체하였다. 또, 전류 I와 축전기에 저장된 전하 Q사이의 관계인 $I = \frac{dQ}{dt}$를 사용하면 식 (Ⅲ. 6-11)은

$$L\frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{Q}{C} + R\frac{dQ}{dt} = \varepsilon_0 \sin\omega t \qquad (Ⅲ.\ 6\text{-}12)$$

이 된다. 식 (Ⅲ. 6-12)을 만족하는 함수는 $Q = A\sin\omega t + B\cos\omega t$의 형태로서, 식 (Ⅲ. 6-12)에 대입하여 그 상수 A, B를 결정할 수 있다. 이 함수를 미분하면 전류

$$I = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \sin(\omega t - \phi) \qquad (Ⅲ.\ 6\text{-}13)$$

를 얻는다. 여기서 위상각 ϕ는 $\tan\phi = \dfrac{\omega L - \dfrac{1}{\omega C}}{R}$ 의 관계를 만족하며, $\sqrt{R^2 + (\omega L - \dfrac{1}{\omega C})^2}$를 이 회로의 임피던스(impedance)라 부르며 보통 Z로 표시한다. 즉, 임피던스는

❖ 임피던스(impedance)는 저항의 의미를 갖는 영어.

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{–}14)$$

로써, 회로의 전류를 식 (6–13)에 따라

$$I = I_0 \sin(\omega t - \phi) \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{–}15)$$

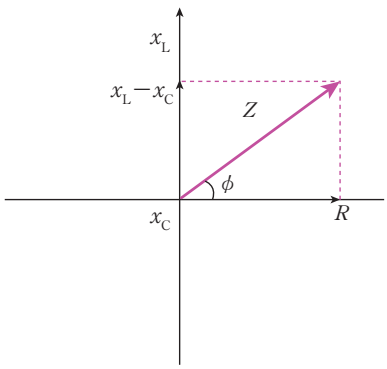
형태로 쓸 때 임피던스 Z는 외부 기전력의 최댓값 ε_0와 전류의 최댓값의 I_0 비

$$Z = \frac{\varepsilon_0}{I_0} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{–}16)$$

와 같다. 따라서 임피던스는 직류 회로에서의 저항과 같은 역할을 하며, 임피던스가 클수록 회로의 전류는 적게 흐르고 단위도 옴이다. 흔히

$$X_L = \omega L,\ X_C = \frac{1}{\omega C} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{–}17)$$

로 표시하며, X_L과 X_C를 각각 코일과 축전기의 리액턴스(reactance)라 부른다. 또 임피던스를 다음과 같이 평면의 화살표로 나타내면 편리하다. [그림 Ⅲ–57]처럼 수평 성분이 저항 R이고 연직 성분이 리액턴스의 차이 $X_L - X_C$인 화살표의 크기가 임피던스 Z이고, 이 화살표가 수평축과 이루는 각이 위상각 ϕ이다.



[그림 Ⅲ–57] 임피던스와 위상각

직류 회로와 교류 회로에는 차이가 나는 몇 가지 성질이 있다. 주파수에 따라 회로의 임피던스는 그 값이 달라서, 같은 크기의 교류 기전력이 가해졌을 때 회로에 흐르는 전류의 크기는 주파수에 따라 다르다. 또 식 (Ⅲ. 6–15)에서 알 수 있듯이 전류와 기전력 사이에 위상차가 있다. 기전력 장치가 공급하는 순간 전력은

$$\begin{aligned} P = \varepsilon I &= \frac{\varepsilon_0^2}{Z} \sin\omega t \sin(\omega t - \phi) \\ &= \frac{\varepsilon_0^2}{Z} \sin\omega t\,(\sin\omega t \cos\phi - \cos\omega t \sin\phi) \end{aligned}$$

이다. $\sin^2\omega t$의 평균은 $\frac{1}{2}$이고 $\sin\omega t\cos\omega t$의 평균은 0이므로, 평균 공급 전력은

$$\overline{P} = \frac{\varepsilon_0^2}{Z}\frac{1}{2}\cos\phi \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{-}18)$$

이다. 실효값으로 표현하면 평균 전력은

$$\overline{P} = \frac{\varepsilon_e^2}{Z}\cos\phi = \varepsilon_e I_e \cos\phi \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{-}19)$$

이다. 이 식의 $\cos\phi$를 흔히 전력인자라 부르는데, 위의 [그림 Ⅲ-58]에서 알 수 있듯이 $\cos\phi\frac{R}{Z}$이다.

생각해 보기

RLC 회로에서 기전력 장치가 공급하는 에너지를 높이기 위해서는 전력인자 $\cos\phi$를 가능한 1에 가깝게 해야 한다. 어떻게 하면 좋을지 생각해 보자.

기전력의 진동수를 변화시켜서 임피던스의 크기가 최소가 되는 경우를 살펴보자. 이 경우 전류의 크기는 최대가 된다. 이는 식 (Ⅲ. 6-14)에서 볼 수 있듯이 $X_L = X_C$인 경우로, 그 각진동수 ω_0는

$$\omega_0 = \frac{I_0}{\sqrt{LC}} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{-}20)$$

이다. 이 때 위상각 ϕ는 0이므로, 전류와 기전력은 위상차가 없어서 회로에 최대의 전력이 공급되게 된다. 이와 같이 회로에 흐르는 전류가 최대가 되고 회로에 최대의 전력이 공급될 때 회로와 외부 기전력 사이에 공명이 일어났다고 말한다. 그리고 식 (Ⅲ. 6-20)의 진동수를 공명 진동수라 한다.

생각해 보기

교류 기전력의 진동수를 낮은 값에서 높은 값으로 변화시킨다고 할 때, 전류의 크기를 결정함에 있어 낮은 진동수에서는 코일은 없는 것과 같으며 높은 진동수에서는 축전기가 없는 것과 같다. 이유를 생각해 보자.

전원 장치에 직렬로 연결된 회로 요소 중 저항이나 코일 또는 축전기가 없는 경우의 임피던스는 식 (Ⅲ. 6-14)에서 각각 $R = 0$, $X_L = 0$, 또는 $X_C = 0$로 놓으면 된다. 외부 기전력에 코일만 연결된 경우, $R = 0$, $X_C = 0$로 놓으면 식 (Ⅲ. 6-14)으로부터 임피던스는 $R = X_L$이며, 위상각은 $\phi = \frac{\pi}{2}$이다. 따라서 전류와 기전력은 위상차가 $\pi/2$인 90도 이며, 평균전력은 0 이어서 전력 소모가 없다. 마찬가지로 외부 기전력과 축전기

만 연결된 경우, $R=0$, $X_L=0$이어서 임피던스는 $Z=X_C$이고 위상각은 $\phi=-\frac{\pi}{2}$로 평균 전력 소모가 없다.

예제 기전력 $\varepsilon=\varepsilon_0\sin\omega t$이 자기 유도 계수 L인 코일과 전기저항 R에 직렬로 연결된 경우의 전류와 이 회로에 공급되는 평균 전력을 결정하라.

풀이 $X_C=0$이므로, 식 (Ⅲ. 6-14)으로부터 임피던스는 $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$이다. 따라서 전류는

$$I=\frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2+X_L^2}}\sin(\omega t-\phi)$$

이고, 위상각 ϕ는 $\tan\phi=\frac{X_L}{R}$을 만족하여 $\cos\phi=\frac{R}{\sqrt{R^2+X_L^2}}$이다. 평균 전력은

$$\overline{P}=\frac{\varepsilon_0^2}{2\sqrt{R^2+X_L^2}}\cos\phi=\frac{\varepsilon_0^2 R}{2(R^2+X_L^2)}$$

이다.

3. LC 회로의 진동

자체 유도 계수 L인 코일과 전기용 C인 축전기를 직렬로 연결한 회로를 생각해 보자. 축전기에 저장된 전하를 Q, 회로에 흐르는 전류를 I라 하면, 코일의 기전력이 축전기의 전압 강하와 같아야 하므로 $-L\frac{dI}{dt}=\frac{Q}{C}$이고 $I=\frac{dQ}{dt}$이 성립하므로,

$$L\frac{d^2Q}{dt^2}=-\frac{Q}{C} \qquad (Ⅲ.\ 6\text{-}21)$$

이다. 이 관계식은 용수철에 매달린 물체의 운동 방정식

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=-kx \qquad (Ⅲ.\ 6\text{-}22)$$

와 같은 형태로

$$L\leftrightarrow m,\ \frac{1}{C}\leftrightarrow k \qquad (Ⅲ.\ 6\text{-}23)$$

의 대응 관계가 있다. 따라서 LC 회로의 전하 Q는 용수철에 매달린 물체의 위치와 같이 조화진동하게 된다. 즉,

$$Q=Q_0\cos(\omega t+\phi) \qquad (Ⅲ.\ 6\text{-}24)$$

형태이며, 각진동수도 역학계의 $\sqrt{\frac{k}{m}}$에 대응하는 $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$이다. $I = \frac{dQ}{dt}$로부터 전류도 같은 진동수로 진동하는

$$I = I_0 \cos(\omega t + \phi) \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{–}25)$$

형태이다.

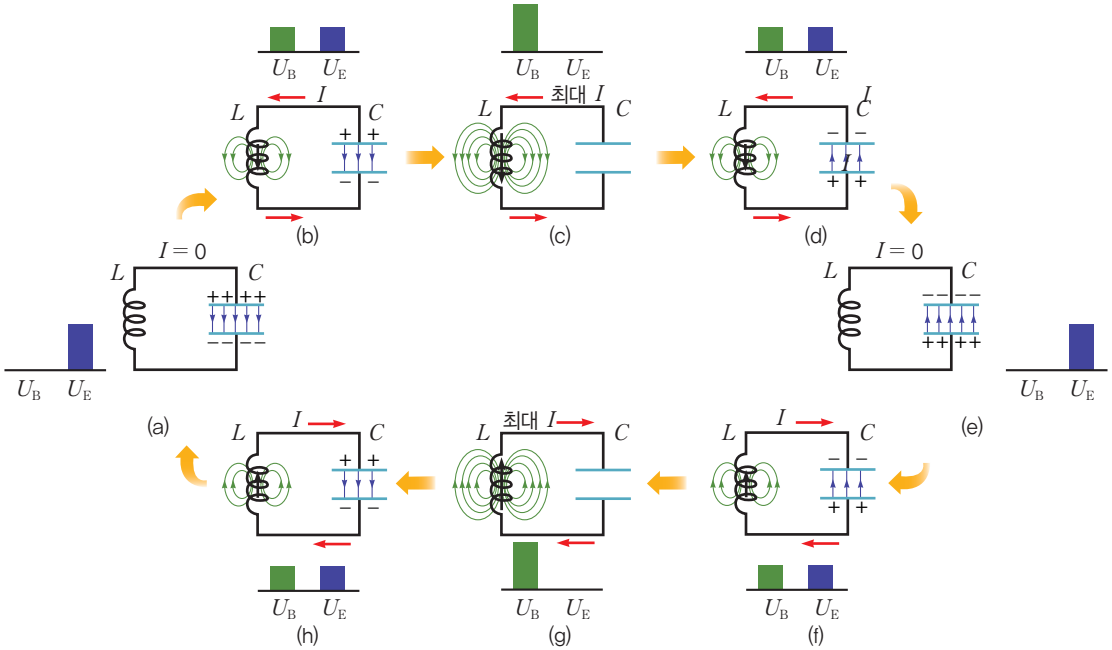
역학계의 운동 방정식 (Ⅲ. 6–22)의 경우 성립하는 역학적 에너지 보존법칙인

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \text{일정} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{–}26)$$

에 대응하여

$$\frac{1}{2}L\left(\frac{dQ}{dt}\right)^2 + \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}LI^2 + \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \text{일정} \qquad (\text{Ⅲ}.\ 6\text{–}27)$$

가 성립한다. $U_E = \frac{Q^2}{2C}$는 축전기의 전기장을 만드는데 필요한 일로서 전기장에 저장된 에너지라 할 수 있으며, $U_B = \frac{LI^2}{2}$는 코일에 전류가 흐르게 하여 자기장을 만드는데 필요한 일로서 자기장에 저장된 에너지라 할 수 있다. [그림 Ⅲ–58]가 보여주는 것처럼, 축전기의 전기장과 코일의 자기장이 진동함에 따라 전기장에 저장된 에너지 U_E와 자기장에 저장된 에너지 U_B의 순간적인 값은 커졌다 작아졌다 하며 변하지만 이들의 합은 보존된다.



[그림 Ⅲ–58] 회로에서 진동의 각 단계에서의 자기장과 전기장 에너지

예제 식 (Ⅲ. 6–24)처럼 전하가 진동하는 경우, 자기장 에너지와 전기장 에너지의 표현은? 총 에너지의 표현은?

풀이 $U_B = \frac{1}{2}L\left(\frac{dQ}{dt}\right)^2 = \frac{1}{2}L\omega^2 Q_0^2\cos^2(\omega t + \phi)$ 이며

$U_E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q_0^2}{2C}\sin^2(\omega t + \phi)$ 이다. $\omega^2 = \frac{1}{LC}$

이므로, $U_B + U_E = \frac{Q_0^2}{2C}$ 로 일정하다.

4. 맥스웰 방정식과 전자기파

영국의 물리학자 맥스웰은 1860년대에 전자기학의 근본 법칙을 4개의 방정식으로 제시하였다. 후에 맥스웰 방정식으로 알려진 이 방정식은 전기장과 자기장은 무엇에 의해서 어떻게 만들어 지는지와 전기장과 자기장은 서로 어떻게 관련되어 있는지를 가장 일반적으로 표현하고 있다.

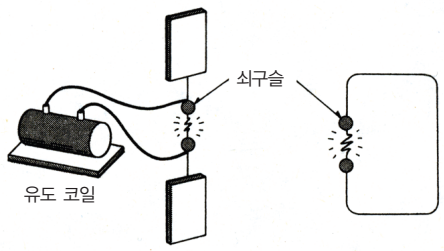
❖ 맥스웰(J. Maxwell, 1831~1879)
스코틀랜드 태생의 이론물리학자. 기체분자운동론과 전자기 이론의 수립의 중요한 기여를 하였다.

전자기학은 초기에 서로 독립적인 것으로 생각되었던 전기와 자기현상의 탐구로 시작되었다. 이 단계에서 전기장은 전하에 의해서 만들어지며, 자기장은 자석 즉 전류에 의해서 만들어 짐을 알게 되었다. 그 후 패러데이의 전자기 유도 법칙의 발견으로 자기장의 시간적인 변화도 전기장을 만들게 됨을 알게 되었다. 이는 전기장과 자기장이 독립적이지 않고 매우 밀접하게 관련되어 있음을 말하는 것이다. 그 후 맥스웰이 그 이전에 알려진 전자기 원리를 이론적으로 분석하는 과정에서, 패러데이 법칙과 유사하게 전기장의 시간적인 변화도 자기장의 원인이 된다는 것을 소위 변위 전류에 의한 자기장이 존재함을 이론적으로 제시하였다. 맥스웰 방정식은 기존에 알려진 전자기학의 원리와 변위 전류에 의한 자기장의 존재를 표현하고 있다고 말 할 수 있다.

맥스웰은 맥스웰 방정식으로부터 진공에서

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3\times10^8 \text{ m/s} \qquad (\text{Ⅲ. } 6\text{–}28)$$

의 속도로 전파되는 파동 즉 전자기파가 존재함을 보일 수 있었다. 맥스웰 전자기 이론에 의하면 진동하는 전하와 전류가 있게 되면 이는 주위에 진동하는 전기장과 자기장을 만들고, 이러한 전기장과 자기장은 파동의 형태로 위에서 말한 속도로 주위로 전파된다. 여기서 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$



[그림 Ⅲ－59] **헤르츠의 실험 장치**

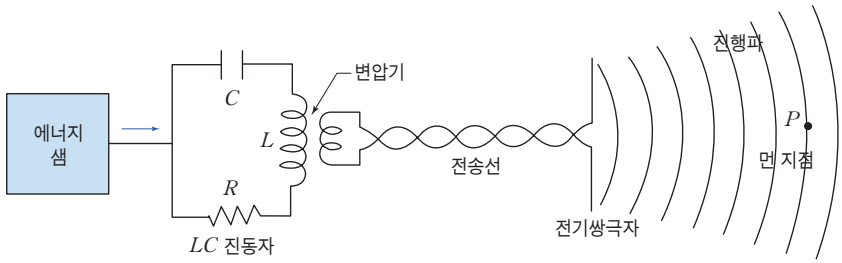
$C^2/N \cdot m^2$는 진공의 유전상수이며, $\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6}$ $T \cdot m/A$ 는 진공의 투과상수라고 불리는 것으로 실험적으로 그 값이 결정되었다.

이렇게 예측된 전자기파는 1888년 [그림 Ⅲ－59]과 같은 장치를 사용한 실험을 통해 헤르츠(H. Hertz)에 의해서 그 존재와 전파 속도가 확인되었다. 유도 코일에 의한 고전압이 두 구슬 사이에 가해져 방전이 일어나면 약간 떨어져 있는 곳에 있는 검출기의 구슬 사이에서도 방전이 일어난다. 이는 유도 코일과 쇠구슬로 이루어진 진동회로에서 발생한 전자기파가 검출기가 있는 곳으로 전파되어 이곳의 쇠구슬 사이에서 방전이 일어나게 한 것이다. 이렇게 하여 전자기학의 근본 원리로서의 맥스웰 방정식에 대한 타당성은 인정받게 되었다.

❖ **헤르츠(H. Hertz, 1857~1894)**

독일의 물리학자로 맥스웰 이론이 예측한 전자기파의 존재를 실험적으로 확인하였다. 주파수의 단위 헤르츠는 그의 이름에서 온 것이다.

아래의 [그림 Ⅲ－60]은 특정한 진동수의 전자기파의 발생에 흔히 사용되는 방법을 보여준다.



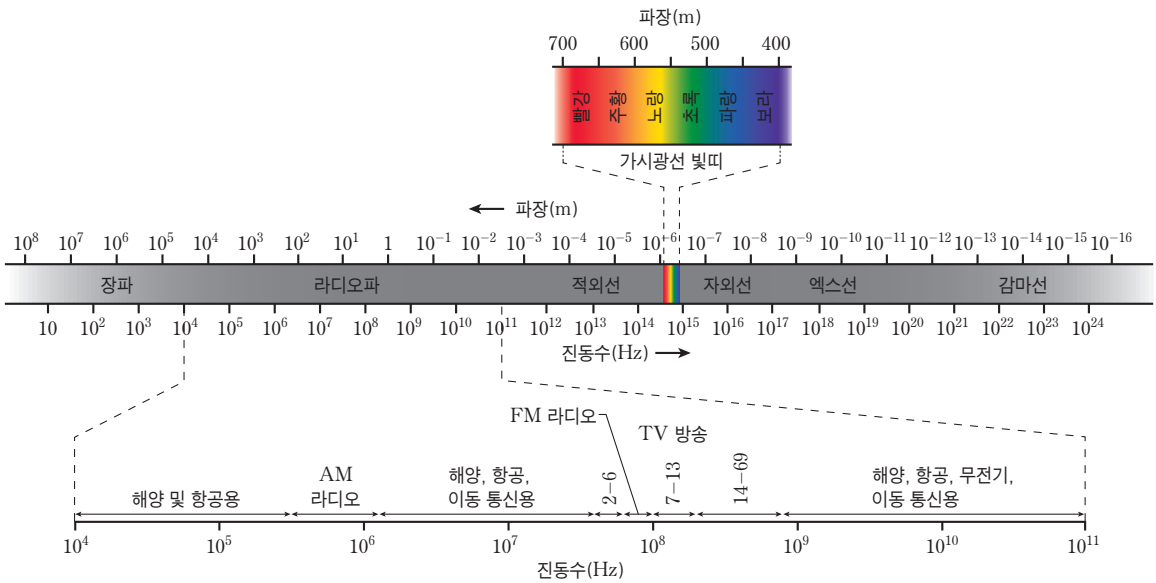
[그림 Ⅲ－60] **전자기파 발생 장치**

앞에서 공부한 것처럼 에너지가 공급된 LC 회로는 각진동수 $\omega = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$로 진동하며, 이 진동자는 필요하면 변압기와 전송선을 통해 안테나에 연결된다. 안테나는 두 개의 얇은 도체 막대로 되어 있으며, 진동하는 전류로 막대 속 전하도 각진동수 ω로 진동하게 된다. 이렇게 하여 안테나는 진동하는 전기쌍극자의 효과를 낸다. 진동하는 전기쌍극자는 맥스웰 전자기 이론에 따라 같은 각진동수의 전자기파를 주위에 방출하게 된다. 파동 현상의 핵심은 어떤 양이 고정된 점에서는 시간에 따라 진동하며, 시간이 경과하면서 이 양이 공간을 따라 전파된다는 것이다. 전자기파에서는 이 양은 전기장과 자기장이다. 따라서 전자기파라는 것은 공간의 각 점에서는 시간에 따라 진동하는 전기장과 자기장이 주위로 전파되는 것이다.

맥스웰 전자기 이론에 따른 전자기파의 속도 3×10^{-8} m/s 는 피조(M. Fizeau)에 의해서 이미 측정되어서 잘 알려진 빛의 속도와 같은 값이다. 이 이유로 맥스웰은 우리가 친숙한 빛이 다름 아닌 전자기파임을 추정하게 되었다. 빛이 맥스웰 이론이 예측하는 전자기파의 여러 성질을 갖는다는 것을 확인함으로써 빛이 전자기파의 일종임이 밝혀졌다. 우리가 볼 수 있는 빛인 가시광선은 그 파장의 범위가 400 nm(보라)에서 700 nm(빨강) 정도이며, 파장이 이 범위를 벗어나서 사람이 감지하기 어려운 전자기파에는 파장이 긴 것부터 라디오파, 적외선, 자외선, 엑스선, 감마선 등이 있다. 전자기파의 파장 λ 와 진동수 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 는 속도 c와

$$\lambda f = c \qquad (\text{Ⅲ. } 6\text{-}29)$$

의 관계를 만족한다. [그림 Ⅲ-61]은 파장과 진동수에 따른 전자기파의 명칭과 그 활용 내용을 보여주고 있다.

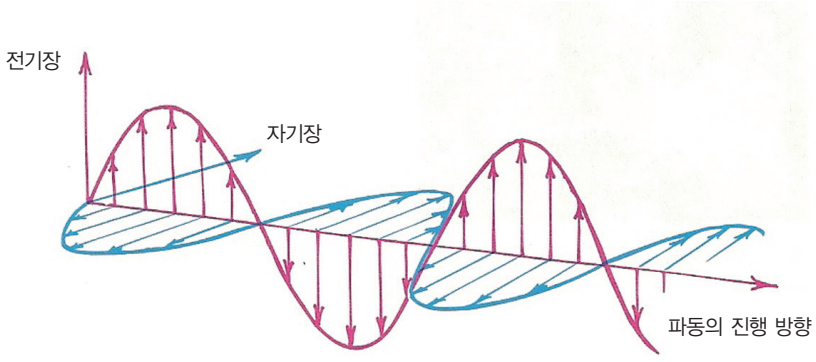


[그림 Ⅲ-61] **전자기파의 띠**

전자기파의 몇 가지 중요한 특징을 살펴보면 다음과 같다.

1. 전자기파는 줄의 파동, 수면파나 음파 등과는 다르게 진공에서도 전파될 수 있어서 매질을 필요로 하지 않는다. 진공에서 전자기파의 속도는 $c = 3 \times 10^{-8}$ m/s 이다.

2. 파면이 평면인 평면 전자기파의 경우, 전기장과 자기장은 진행 방향에 수직이다. 즉, 전자기파는 진동의 방향이 진행 방향에 수직인 가로파동이다.
3. 평면 전자기파의 경우, 전기장 $\vec{E}$와 자기장 $\vec{B}$은 수직이다. 또 $\vec{E} \times \vec{B}$의 방향은 진행방향과 같은 방향이며 세기는 $E = Bc$의 관계를 갖는다.
4. 전기장과 자기장은 같은 위상이어서 전기장의 골과 자기장의 골끼리 또 마루끼리 그 위치가 일치한다.
5. 진행하던 전자기파가 다른 매질을 만나게 되면 이 경계면에 반사와 굴절하게 되며, 다른 파동들과 같이 간섭 및 회절 현상을 보인다.



[그림 Ⅲ-62] 전자기파의 전기장과 자기장의 방향

조사

1. 전자기파는 음파나 흐들리는 줄의 파동과 유사한 점과 다른 점을 조사해 보자.
2. 전자기파는 파장에 따라 그 활용 내용이 다르다. 라디오파, 마이크로파, 적외선, 자외선, 엑스선, 감마선 등의 용도가 어떻게 다른지 조사해 보자.

창의 탐구 LRC 회로의 공명

많은 경우 각 물리계에는 그 물리계에 고유한 자연 각진동수 ω_0가 있다. 각진동수가 ω인 외부의 어떤 영향을 이 물리계에 가하면, $\omega \approx \omega_0$일 때 물리계는 이 영향으로부터 많은 에너지를 흡수하게 되는 현상이 나타난다. 이러한 현상을 **공명**이라고 한다. [그림 Ⅲ-57]과 같이 주어진 LRC 회로에 외부 기전력을 가할 때의 공명 각진동수를 결정하려고 한다.

[주요 관계]

외부 기전력이 $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin\omega t$ 일 때, 회로에 흐르는 전류는 $I = \frac{\varepsilon_0}{Z}\sin(\omega t - \phi)$ 형태이고 저항, 코일과 축전기의 전압은

$$V_R = IR = \frac{\varepsilon_0}{Z} R\sin(\omega t - \phi)$$

$$V_L = L\frac{dI}{dt} = \frac{\varepsilon_0}{Z} X_L \cos(\omega t - \phi)$$

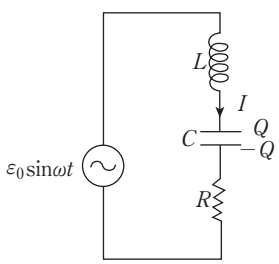
$$V_C = L\frac{Q}{C} = \frac{\varepsilon_0}{Z} X_C \cos(\omega t - \phi)$$

이다.

[준비물] 오실로스코프, 파형발생기, 저항, 코일, 축전기 및 도선

[주요 과정]

1. 싸인파 형태의 교류 전원에 연결하였을 경우, 오실로스코프를 사용해서 저항, 코일, 축전기 그리고 이들 세 소자에 걸리는 진동하는 전압의 진폭을 측정한다. 이들로부터 임피던스 Z, 저항 R, 리액턴스 X_L, X_C 그리고 위상차 ϕ를 결정한다.
2. 파형발생기의 진동수를 변화시키면서 위의 양들을 결정한다. 그리고 이들이 진동수에 따라 어떻게 변하는지 그래프를 그려 보고 예상되는 결과와 비교해보자.
3. 회로에 흡수되는 전력 $\overline{P}$은 식 (Ⅲ. 6-19)로 주어지며, 이 전력은 각진동수에 따라 오른쪽 그림과 같이 달라진다. 이 공명곡선을 실험적으로 얻고 최대가 되는 공명 각진동수를 결정하라.



[논의]

1. 역학적인 물리계에서 이러한 공명현상을 보이는 상황을 고안해 보자.
2. 교류전압계의 측정값은 실효값을 나타낸다. 교류전압계를 사용하여 측정한 LRC 전체, L, R, C의 전압 v, v_L, v_R, v_C은 $v = v_L + v_R + v_C$의 성질이 있는가? 아니라면 그 이유는 무엇인가?

읽을 거리

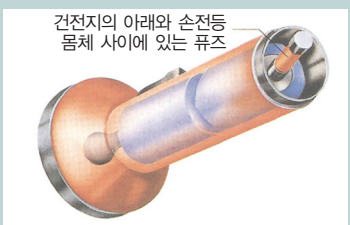
회로의 문제점 파악

1. 연속 점검기

전선이나 전기 부품은 종종 끊어져, 회로 내에서 어디가 잘못 되었는지 검사를 해야 할 경우가 생긴다. 이 때는 전기 전하의 전도 경로에서 저항값이 0인 곳을 찾는데, 이 과정을 연속에 대한 점검이라 하고, 이 때 사용하는 점검 기구를 연속 점검기(continuity tester)라고 한다. 우리는 검사하고자 하는 회로에 배터리와 꼬마 전구 또는 전류계를 직렬로 연결하여 간단한 연속 점검기를 만들 수도 있다.

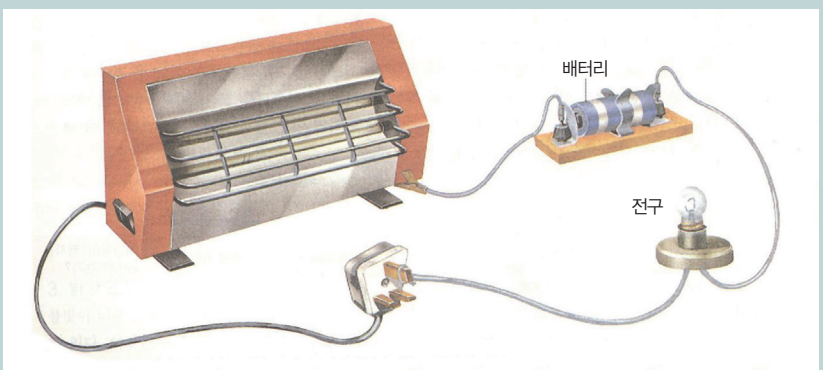
전선이나 전기 부속 또는 가전제품의 양쪽 끝에 연결된 연속 점검기. 전구에 불이 들어오면 그 회로는 이어져 있고, 불이 들어오지 않으면 그 회로는 어디서인가 끊어진 것이다.

물론, 연속 여부만이 우리가 점검하려는 것은 아니다. 그 외 어떤 것을 점검해야 하느냐는 것도 문제가 된다. 끊어지지 않은 퓨즈나 전선은 연속이어야 하고, 제대로 접지된 접지선도 플러그의 지면 부분과 전기제품 사이에서 이어져 있어야 한다. 그러나 다리미 같은 경우 회로가 잘못되면 합선(short circuit)이 될 수도 있다.



연속 점검기로서의 손전등.
퓨즈가 끊어지지 않았으면, 이 전기 회로는 이어져 있어 불이 켜질 것이다.

다이오드가 들어 있는 회로는 점검하기가 더욱 복잡하다. 그 이유는 회로 내에 다른 문제가 없더라도 회로가 배터리와 한 쪽 방향으로 연결되면 이어진 것으로



전열기의 접지를 점검하는 연속 점검기로서의 역할을 하는 배터리와 전구.

나타나지만, 다른 쪽 방향으로 연결되면 끊어진 것으로 나타나기 때문이다. 따라서, 이러한 회로를 점검할 때는 다이오드의 각 방향에 대해 한번씩 점검을 거쳐야 할 것이다.

2. 회로 저항값의 파악

연속 점검기는 어떤 회로의 저항값이 아주 낮은지를 알아내도록 되어 있으므로, 저항값이 높은 부품이 들어 있는 회로에 사용하기에는 적합하지가 않다. 이런 경우에는 그 저항값 범위로 맞추어진 멀티미터(multimeter)를 사용하는 것이 훨씬 좋다.

회로의 저항값을 측정하면 다음과 같은 여러 가지 유용한 정보를 얻을 수 있다.

① 변압기가 포함된 전화 회로의 저항값

② 동력 회로의 저항값

③ 가정용 접지 회로와 토양 사이의 저항값

각 경우에서 문제점이 파악되면 이러한 측정으로 그 문제점을 쉽게 해결할 수 있다.

연 습 문 제

1. [그림 Ⅲ-56]의 상황에서 발생하는 기전력의 실효값을 2배로 증가시키려면 어떻게 하면 되겠는가?

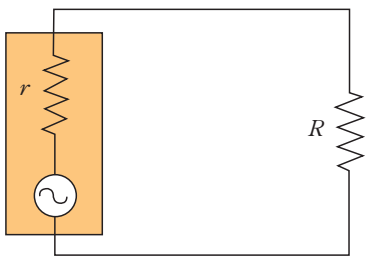
2. [그림 Ⅲ-57]과 같은 LRC 회로에서 기전력 장치가 공급하는 전력은 저항에서 소모되는 전력과 같다는 것을 보이라.

3. [그림 Ⅲ-57]과 같은 LRC 회로에서 외부 기전력이 $\varepsilon = \varepsilon_0 \cos\omega t$ 인 경우에 회로의 전류, 순간 전력, 평균 전력의 표현식을 써라.

4. [그림 Ⅲ-57]과 같은 회로에서 저항이 없는 경우를 생각해보자. 이 경우 회로의 전류, 기전력 장치가 공급하는 평균전력, 평균 전기장 에너지, 평균 자기장 에너지를 결정하라.

5. $L = 1.1$ mH 이고 $C = 4.0\ \mu$F 인 LC 진동회로에서 축전기의 최대 전하는 3.0 μC 이라고 한다. 최대 전류는 얼마인가? 실효 전류는?

6. 내부 저항이 r 이고 기전력이 ε 인 발전기를 저항 R 인 전열기에 그림처럼 연결하였다. 이 전열기에서 사용하는 평균 전력은 $R = r$ 일 때 최대가 됨을, 즉 전열기의 저항이 발전기의 내부 저항과 같을 때 전열기에서 최대의 전력을 사용할 수 있음을 보여라.



7. $L = 0.25\ \mu\text{H}$, $C = 25\ \text{pF}$인 진동회로에서 발생하는 전자기파의 파장은 얼마인가?

8. $\sqrt{LC}$의 물리적 차원이 시간임을 보이라.

9. FM 방송의 주파수는 100 MHz 정도이다. 라디오의 수신기가 LC 회로라고 가정하고 이 방송을 청취하려면 어떤 코일과 축전기를 사용해야 하는가?

Ⅳ

파동과 빛 탐구

- 1. 진동과 파동
- 2. 정상파
- 3. 기하 광학
- 4. 간섭
- 5. 회절
- 6. 편광

생 | 각 | 열 | 기

인간은 태초부터 빛과 소리를 통하여 자연을 인식하여 왔으며, 우주는 빛과 물질로 구성되어 있다고 생각하고, 이들의 근본을 이해하려고 노력해 왔다. 오랫동안 빛은 파동으로 이해되어 왔으며, 물질은 더 이상 나눌 수 없는 작은 입자가 모여서 만들어진 것으로 생각하여 왔다.

20세기 초부터 빛은 파동의 성질과 함께 입자의 성질이 있다는 것을 알게 되었으며, 입자라고 생각되던 물질도 파동의 성질이 있다는 사실을 확인하게 되었다. 이러한 실험 결과와 이론을 바탕으로 이전에 설명할 수 없었던 간단한 원자 구조를 설명할 수 있게 되었다.

이 단원에서는 진동과 파동의 특성과 중첩의 원리를 이해한 후, 파동에서만 나타나는 간섭, 회절 및 편광 현상을 알아보자.

1 진동과 파동

잔잔한 호수에 돌멩이를 떨어뜨리면 동심원의 물결이 일어나서 점차 퍼져 나간다. 또한, 호숫가에 부딪힌 물결은 반사되어 복잡한 물결무늬를 만드는 것을 볼 수 있다. 이들은 물결파라는 파동 운동에 의하여 생기는 현상이다.
물결파 이외에도 목소리나 음악 소리와 같은 음파, 지진이 일어날 때 땅이 흔들리는 지진파 등 일상생활에서 쉽게 볼 수 있는 많은 현상들이 파동 운동으로 나타난다. 파동 운동은 돌멩이나 공과 같은 입자들이 운동하는 것과는 매우 다른 모양으로 나타난다.

1. 진동과 파동에 대한 기초 이해

1) 진동과 파동의 차이는 무엇인가?

❖ 전기회로에서 전하가 진동하는 경우도 있는데, 이러한 경우에는 한글로는 진동이라고 하지만 영어로는 oscillation이라고 구별한다.

진동(vibration)은 제한된 공간 내에서 진동자가 반복운동하는 것을 말한다. 대표적인 예들로 용수철에 달려 있는 물체, 단진자와 산소분자 내의 2개의 산소원자가 서로 왕복 운동하는 경우 등이 있다. 파동(wave)은 진동자들이 연속적으로 연결되어 배열된 상태에서 한 지점에 있는 진동자를 진동시키면 진동이 옆의 진동자들에게 차례로 전달되어 에너지가 공간적으로 퍼져 가는 것을 말한다. 수면파, 소리, 전자기파 등이 대표적인 예이다.

일반적으로 대부분의 파동들은 전파를 하기 위하여 진동자들이 연속적으로 연결되어 있는 매질이 필요하나, 빛을 포함한 전자기파는 진공에서도 전파할 수 있는 매우 독특한 파동이다.

[그림 Ⅳ-1] 줄이 진동하는 모습

[그림 Ⅳ-1]은 줄에 만들어진 파동의 어떤 순간을 나타낸 것이다. 물론 시간이 변하면 줄의 모습은 달라질 것이다. 그러면 시간과 위치에 따라 변하는 파동 현상을 수학적으로 어떻게 표현할 수 있는가?

줄에 형성된 파동뿐만 아니라 모든 파동은 함수로 나타낼 수 있다. 파동 함수는 어떤 지점 x에 있는 진동자가 평형상태로부터 벗어난 정도를 함수 값으로 나타낸 것이다. 따라서 줄파동의 경우에 파동 함수를 나타내는 공간 좌표는 x 하나면 충분하다. 줄 입자의 위치를 나타내기 위해서는 두 개 또는 세 개의 공간좌표가 필요하지만, x지점에 있는 줄 입자가 평형 위치로부터 벗어난 정도를 함수 값으로 나타내기 위해서는 두세 개의 공간좌표가 필요 없게 된다. 즉 $f(x)$로 충분히 표현할 수 있다.

파동이 몇 차원 파동인지를 결정할 때는 평형상태 또는 진동하지 않을 때 진동자의 위치를 나타내기 위하여 필요한 좌표 수를 고려하면 된다. 줄파동은 평형상태에서 1차원으로 진동자가 배열되어 있기 때문에 1차원 파동이며, 수면파는 2차원 파동이다. 음파와 전자기파의 경우는 공간상의 임의의 지점에서 압력이나 전기장 값이 함수 값이 되기 때문에 3개의 좌표가 필요하므로 3차원 파동이다.

2) 파동에서 시간과 공간에 따라 무엇이 진동하는가?

진동이나 파동에서 가장 중요한 개념 중 하나가 어떠한 물리량이 진동하는가를 아는 것이다. [표 Ⅳ-1]에 여러 파동에서 진동하는 물리량을 나타냈다. 진동하는 물리량이 바로 함수 값이다.

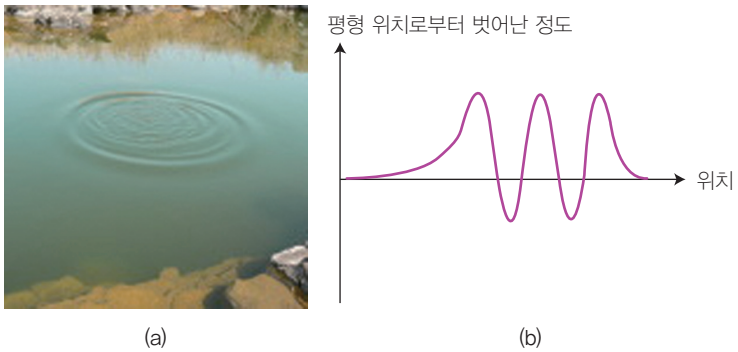
[표 Ⅳ-1] 파동에서 진동하는 물리량

파동의 종류	진동하는 물리량(함수 값)
수면 파동	평형 위치로부터 높이
음파	대기압으로부터 압력 차이
빛(전자기파)	전기장과 자기장
물질파	발견 확률 분포

(1) 줄 파동과 수면파

줄 파동과 수면파는 평형 위치로부터 벗어난 정도를 파동 함수로 나타낸다. [그림 Ⅳ-2] (a)와 같이 어떤 순간에 수면의 모양이 주어졌을 때, 각 지점에서 함수 값은 [그림 Ⅳ-2] (b)와 같이 그릴 수 있다. 수평축은 수면상의 지점을 의미하며 수직축은 평형 위치로부터 벗어난 정도를 나타낸 것이다. 각 지점에서 파동 함수 값은 그 평형 위치에 있을 때를 기준으로 위쪽으로 벗어난 정도를 (+)값으로 하고, 아래쪽으로 벗어난 정도를 (−)값

으로 하여 나타낸다. 물론 평형 위치에 있게 되면 함수 값은 0이다.



[그림 Ⅳ-2] (a)수면이 진동하는 모습 (b)수면을 파동으로 표현

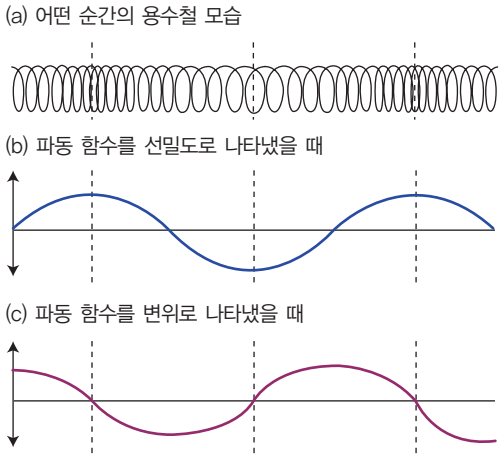
(2) 용수철에서의 종파

[그림 Ⅳ-3]은 용수철을 앞뒤로 흔들었을 때 어떤 순간의 모습이다. 이 파동은 종파로 파동의 진행방향과 진동자의 진동방향이 나란한 경우이다. 용수철 파동 역시 1차원 파동이다.

어떤 순간에 용수철에 형성된 종파를 파동 함수로 나타내려면 어떤 물리량을 함수 값으로 할 것인가? 두 가지 방법으로 생각해 보자.

첫 번째 방법으로 선밀도를 함수 값으로 나타내 보자. 선밀도는 단위 길이 당 용수철의 감긴 수이다. 각 위치에서 단위 길이 당 용수철의 감긴 수를 함수 값으로 하여 그래프를 그리면 [그림 Ⅳ-3] (b)와 같이 될 것이다. 여기서 함수 값을 나타내는 수직축 값은 선밀도이다.

두 번째 방법은 줄 파동에서처럼 평형 위치에서 벗어난 정도를 함수 값으로 나타낼 수 있다. 이 때 벗어난 정도는 좌우로 벗어난 정도이지 위아래로 벗어난 정도가 아니다. [그림 Ⅳ-3] (c)에서 함수 값이 0인 지점은 그 순간에 용수철이 평형 위치에 있음을 의미한다. 즉, 선밀도가 가장 큰 부분과 가장 작은 부분에 있는 용수철이 움직이지 않았음을 알 수 있다. 선밀도가 가장 큰 부분을 살펴보자. 변위 그래프를 보면 왼쪽 부분의 함수 값은 (+)이고 오른쪽 부분에서는 (−)이다. 즉, 왼쪽 부분의 용수철은 평형 위치에서 오른쪽으로 이동하였음을 나타내고 오른쪽 부분의 용수철은 평형 위치에서 왼쪽으로 이동하였음을 나타낸다. 한편 선밀도가 가장 작은 부분을 보면, 이 지점을 중심으로 왼쪽 부분의 용수철이 왼쪽으로 이동하였음을 함수 값이 (−)인 것을 보고 알 수 있다. 오른쪽 부분은 오른쪽으로 이동한 것을 함수 값이 (+)인 것을 통하여 확인할 수 있다.



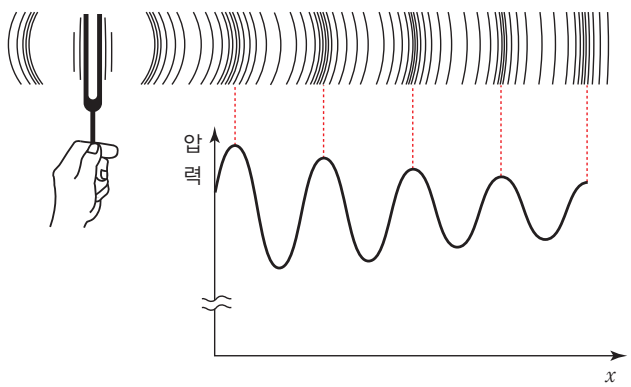
[그림 Ⅳ-3] **용수철에서의 종파**

❖ 두 그래프의 진폭이 같은 것으로 보이지만 함수 값을 직접 비교할 수 없다. 즉, 선밀도와 변위는 비교할 수 없는 대상이다.

동일한 용수철 파동을 나타내는 데도 불구하고 함수 값을 선밀도를 이용하여 표현했을 때와 변위를 이용하여 표현했을 때 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

(3) 음파

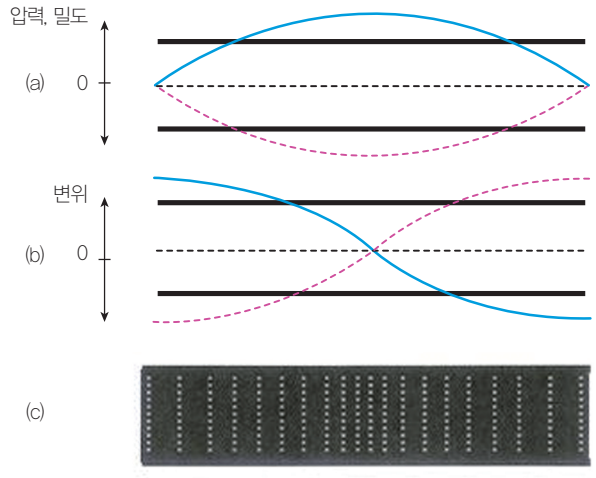
음파는 용수철에 나타난 종파와 거의 같은 방법으로 기술된다. [그림 Ⅳ-4]는 소리굽쇠를 진동시켰을 때 음파가 발생되어 대기를 통하여 전파되어 가는 과정이다. 그림에서 선밀도는 압력 혹은 공기밀도에 비례하는 양을 고려하여 나타낸 것이다. 에너지가 사방으로 퍼져 나가기 때문에 한 방향으로는 에너지가 점점 줄어들면서 진폭이 줄어들게 된다. 대기압은 평형 상태 즉, 소리가 없을 때일 것이기 때문에 이때의 함수 값을 0으로 하여 나타내면 우리가 흔히 보는 사인파형이 된다.



[그림 Ⅳ-4] **소리굽쇠를 이용하여 발생시킨 음파**

소리가 발생되었을 때 소리에 의한 압력 변화는 아주 작은 값이지만 우리의 귀는 이와 같은 작은 압력 변화를 감지할 만큼 민감하다.

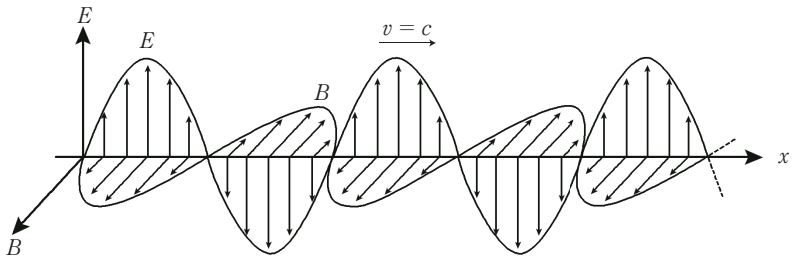
[그림 Ⅳ-5]는 양쪽이 열린 개관에서 만들어지는 음파의 모습을 나타낸 것이다. 음파는 종파이므로 공기 입자의 밀도 또는 압력이나 평형 위치에서 벗어난 정도를 파동 함수로 나타내야 한다. [그림 Ⅳ-5] (a)와 (b)에서 보듯이 압력과 변위 사이에는 90°의 위상차가 있다. 관의 끝부분은 항상 대기압이므로 압력에 대한 함수 값은 0이 된다. 즉, 마디가 된다. 반면에 변위로 파동 함수를 나타내면 끝단에 있는 공기 입자들이 좌우로 많이 진동하기 때문에 배가 된다.



[그림 Ⅳ-5] **양쪽 끝이 열린 개관에서의 음파**

(4) 전자기파

전자기파는 우리 일상에서 응용되고 있는 대표적인 파동 중의 하나이다. 전자기파는 진동하는 물리량이 전기장 또는 자기장이지만 자기장은 항상 전기장과 함께 진동하기 때문에 일반적으로 전기장의 진동만으로 전자기파를 나타낸다. 전기장은 단위 전하가 받는 힘이므로 전자기파의 전기장 화살표는 단위 전하를 x축 위에 놓았을 때 화살표의 방향으로 길이에 비례하는 힘을 받는다는 것을 의미한다. [그림 Ⅳ-6]은 전기장과 자기장이 진동해 가면서 x축으로 전파해 가는 모습이다.

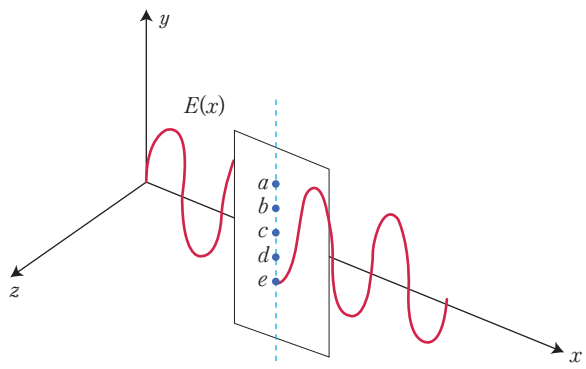


[그림 Ⅳ-6] 전자기파의 전기장과 자기장

❖ $\vec{E}$가 $+y$ 방향인 평면에서 $\vec{B}$는 $+z$ 방향이다. 반면에 $\vec{E}$가 $-y$ 방향이면 $\vec{B}$는 $-z$ 방향이다. 모든 평면에서 벡터곱 $\vec{E}\times\vec{B}$는 파가 진행하는 방향($+x$ 방향)이 된다.

이제 특정 지점에서 특정 시각에 x축에 수직한 평면을 고려해 보자. 전기장과 자기장이 그 평면의 모든 지점에서 같은 값을 갖는다면 이 전자기파는 평면파이다. 즉, 평면상의 여러 지점에서 사인파가 동일 위상을 가지고 나오는 것을 의미한다.

예제 아래 그림은 x축 방향으로 전파하는 평면파이다. 어떤 순간에 각각의 위치에서 전기장 값을 크기 순서대로 나타내시오.



3) 파동은 어떻게 발생되고 전파되는가?

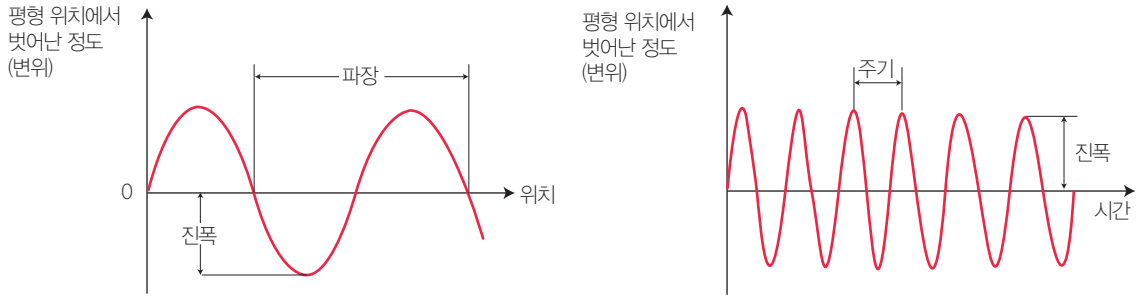
(1) 역학적 파동의 발생

파동이 발생된 지점을 파원이라 한다. 수면파는 잔잔한 수면의 한 부분을 돌을 떨어뜨리거나 막대기로 쳐서 진동시키면, 파원에서 발생된 진동이 사방으로 퍼져 나가는 파동을 말한다. 일단 한 부분이 진동하기 시작하면 매질을 따라서 사방으로 에너지가 전달된다. 파동이 공간적으로 퍼져나가는 이유는 인접한 진동자(매질)를 강제 진동시킬 수 있는 에너지가 파원에 제공되기 때문이다. 진동자들 사이에 서로 연결시켜 주는 힘이 작용하

기 때문에 진동이 옆으로 퍼져 나갈 수 있는 것이다. 줄 파동의 경우에는 장력이며, 수면파동의 경우에는 표면장력, 음파의 경우에는 압력차에 의한 힘에 의해 인접한 곳으로 진동 에너지가 전파된다.

❖ 진동은 시간만의 함수이다.

파원을 일정한 주기로 진동시키면서 어느 순간에 위치에 따라 파동 함수는 [그림 Ⅳ-7] (a)와 같이 표현된다. 한편 파동이 지나가는 한 지점을 관찰하면 시간이 흐름에 따라 [그림 Ⅳ-7] (b)와 같이 함수 값이 진동한다. 따라서 파동은 시간과 공간에 따라 함수 값이 달라지기 때문에 시간과 공간 2개의 독립변수가 있다.



(a) 위치에 따른 파동 함수　　(b) 시간에 따른 파동 함수

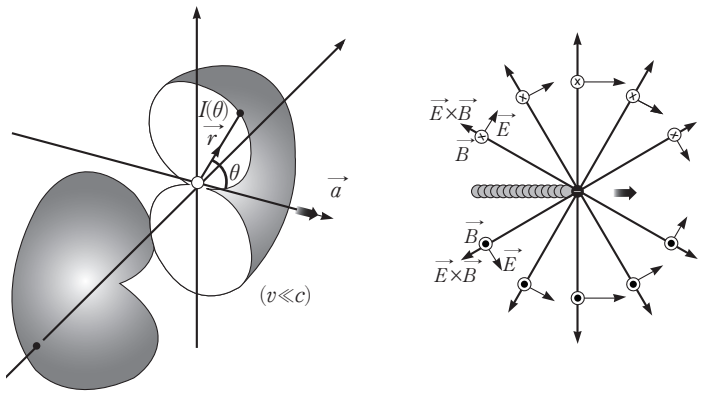
[그림 Ⅳ-7] **파동의 표현**

(2) 전자기파의 발생

대부분의 경우에 전자기파의 발생은 전자에 의해 이루어진다. 전자가 원자핵을 중심으로 진동하게 되면 이 전자는 가속 운동을 하게 되는 것이고 따라서 전자기파가 발생된다. 전자기파와 역학적 파동의 큰 차이점은 역학적 파동들은 매질이 없으면 파동이 전파할 수 없는데 반해 전자기파는 매질이 없는 진공 중에서도 전파하는 특성을 가진다. 이는 진공 중에서도 전기장과 자기장이 존재할 수 있기 때문이다. 파원에서 전자의 진동에 의해 시간에 따라 변하는 전기장은 자기장을 발생(Faraday 유도법칙)시키고 또한 시간에 따라 변하는, 즉 진동하는 자기장은 전기장을 발생(Maxwell이 수정한 Ampere 법칙)시키기 때문에 전자기파는 진공 중에서도 전파할 수 있다.

하전입자가 선형 가속기에서 가속되거나, 싱크로트론에서 원운동을 하는 경우, 또는 안테나 내에 있는 전자가 단순히 진동하여도 전자기파가 방출된다. [그림 Ⅳ-8]은 하전입자가 일정한 가속도를 가지고 운동할 때 발생

되는 전자기파의 세기를 나타낸 것이다. [그림 Ⅳ-8] (a)에서 전하의 위치로부터 사과 껍질과 같은 면까지의 거리는 그 방향으로 발생되는 전자기파의 세기에 비례한다. 즉, 가속도의 직각방향으로 전자기파가 가장 세게 방출되는 것을 알 수 있다. 그리고 가속도의 방향으로는 전자기파가 전혀 방출되지 않음을 알 수 있다. 또한 서로 수직인 전기장과 자기장은 [그림 Ⅳ-8] (b)에 나타나 있다.



(a) (b)

[그림 Ⅳ-8] **하전입자가 가속 운동할 때 발생되는 전자기파**

❖ **전자기파의 발생**

고전 전자기 이론에 의하면 대전된 입자가 가속 운동하면 전자기파가 방출된다.

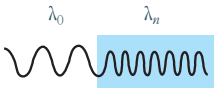
❖ $\vec{E}$가 $+y$ 방향인 평면에서 $\vec{B}$는 $+z$ 방향이다. 반면에 $\vec{E}$가 $-y$ 방향이면 $\vec{B}$는 $-z$ 방향이다. 모든 평면에서 벡터곱 $\vec{E}\times\vec{B}$는 파가 진행하는 방향($+x$ 방향)이 된다.

예제 전자기파의 세기는 전기장 진폭의 제곱에 비례한다고 한다. [그림 Ⅳ-8]의 (a)의 $I(\theta)$와 (b)의 $\vec{E}, \vec{B}$ 화살표 길이 사이의 관계에 대하여 설명하여라.

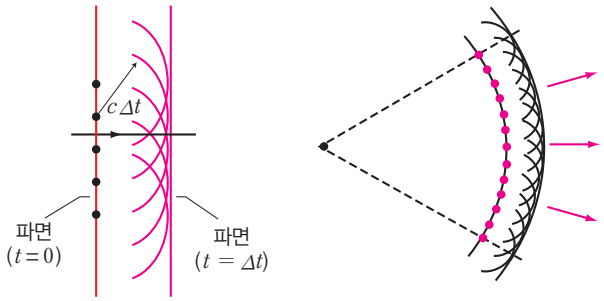
(3) 호이겐스 원리

2, 3차원 공간에서 파동은 호이겐스 원리에 따라 전파한다. 호이겐스 원리는 다음과 같다. 어떤 순간에 주어진 파면이 [그림 Ⅳ-9]와 같다면 파면상의 모든 점은 새로운 점파원이 되어 전파하여 가는데 시간이 Δt 만큼 경과한 후에 새롭게 형성된 파면은 점파원들에서 발생된 파동들의 접선에 의해 결정된다.

파동이 한 종류의 균일한 매질을 전파하다가 다른 매질을 만나게 되면 반사, 투과, 흡수, 굴절 등 다양한 현상이 일어난다. 다른 매질에 들어갈 때 전파 방향, 파장, 전파 속도 등 많은 양이 변하지만 진동수는 변하지 않는다. 진동수가 변하지 않는 이유는 진동자들이 강제진동을 하기 때문이다.



매질 안에서의 빛의 파장은 진공에서보다 작다. $\lambda_0 = n\,\lambda_n$. 경계면을 지나면서 빛의 진동수는 변하지 않는다.



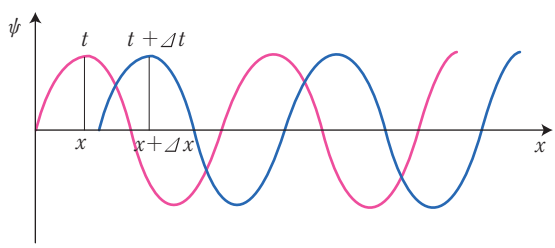
[그림 Ⅳ-9] 호이겐스 원리

2. 진행파

파동 방정식의 해 중 하나인 조화파동은

$$\psi = A\sin(kx - \omega t + \phi)$$

이다. 식에서 $(kx - \omega t + \phi)$를 위상이라 하며, 이 위상은 시간과 공간의 함수로 주어진다. 어떤 주어진 위치에서 시간이 흘러가면 위상이 계속 증가하는데 함수 값은 일정한 주기로 진동한다. 또한 어떤 시간에 파동을 고정시켜 놓고 x축을 따라가면서 위상을 보면 역시 일정한 비율로 증가하거나 감소한다. sin 함수의 성격 때문에 일정한 거리, 즉 파장만큼 가면 함수 값이 반복되는 현상이 발생한다. 수식으로부터 $t = 0$으로 놓고 인접한 두 지점에서 같은 함수 값을 갖기 위한 거리를 구해보면, 위상이 2π 만큼 변해도 sin 값은 변하지 않기 때문에 파장은 $2\pi/k$ 임을 알 수 있다. 또한 파동함수로부터 줄 위의 모든 점, 즉 진동자들은 같은 진동수와 같은 진폭으로 진동한다는 사실을 알 수 있다.



[그림 Ⅳ-10] 진행파에서의 속도

시간이 t 에서 $t + \Delta t$ 만큼 변할 때 [그림 Ⅳ-10]과 같이 어떤 점을 관찰하면 평행 위치로부터의 변위는 $\psi(x, t)$로부터 $\psi(x, t + \Delta t)$로 변할 것이다. 옆의 지점도 동일한 방식으로 변할 것이기 때문에 $x + \Delta x$ 지점에서 $t + \Delta t$

시간에 변위가 $\psi(x+\Delta x, t+\Delta t)$인 지점에 있을 것이다. 변위 값이 같은 것은 위상 값이 같음을 의미한다.

따라서

$$kx-\omega t = k(x+\Delta x)-\omega(t+\Delta t)$$

인 관계를 얻고, 이로부터

$$v_\phi \equiv \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k}$$

를 얻을 수 있다. 이를 위상 속도라고 하는데 이는 위상이 같은 값이 전파하여 가는 속도이기 때문이다.

진행파의 해를 파동 방정식에 대입하면

$$\omega^2 = v^2k^2 \rightarrow \omega = \pm vk$$

를 얻을 수 있다. 따라서 파동방정식을 만족하는 줄 파동의 위상 속도는

$$v_\phi = \pm v$$

이다. v의 값이 줄 파동의 경우 장력(T)과 단위 길이당 질량(μ)에 의존하기 때문에 파동의 전파속도는 매질에 의해서만 결정된다. 또 파장이 $\lambda = 2\pi/k$ 이므로, 파장과 진동수 사이에는

$$v = f\lambda$$

의 관계가 성립한다.

❖ 파동 방정식

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}\right)$$

예제 파동의 전파 속도에 영향을 주는 요인을 제시하고, 전파 속도를 크게 하기 위한 방법을 설명하시오.

실험 소리의 전파 속도 측정

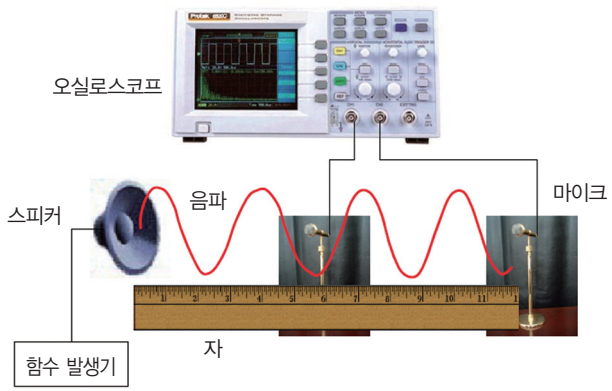
준비물 오실로스코프, 함수 발생기, 스피커, 마이크 2개, 자

과정

1. [그림 Ⅳ-11]과 같이 실험 장치를 구성한다.
2. 스피커로부터 마이크 1, 2를 같은 거리만큼 떨어뜨려 놓고 오실로스코프에 나

타난 신호를 확인한다. 두 신호는 위상이 같게 측정될 것이다. 위상이 같다는 의미는 두 마이크가 스피커로부터 같은 거리에 떨어져 있기 때문에 공기 입자들의 운동 상태가 정확하게 같다는 것을 의미한다.

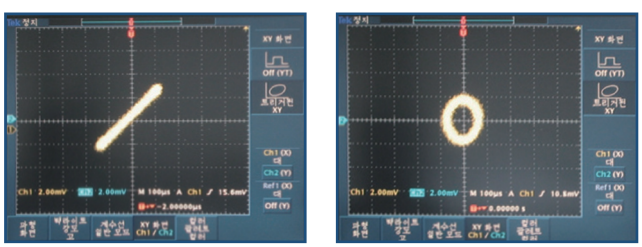
3. 마이크 1을 고정시켜 놓고 마이크 2를 움직이면서 두 신호를 비교해 본다. 두 신호는 마이크의 위치 차이만큼 위상차가 나게 된다.
4. 마이크 2를 움직여 마이크 1로부터 한 파장만큼 이동하면 다시 공기 입자들의 운동 상태가 같아지게 된다. 두 마이크에서 측정된 시간에 따른 진동 신호는 정확하게 같다.
5. 두 스피커 사이의 거리를 측정하여 소리의 전파 속도를 구한다.



[그림 Ⅳ-11] **소리의 전파 속도 측정을 위한 개념도**

정리

1. 마이크 1과 마이크 2에서 발생된 신호를 결합하여 만든 리사쥬 곡선의 모양으로 두 신호의 위상차를 살펴보자.

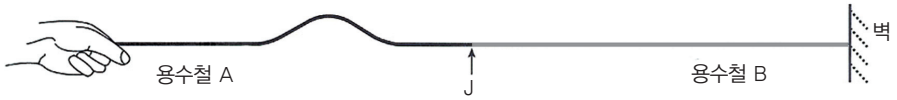


2. 소리의 전파 속도에 영향을 미치는 요인에 대해 알아보자.

예제 스피커로부터 더 멀리 떨어진 마이크의 신호의 진폭은 조금 더 작을 것이다. 그 이유는 무엇인가?

연 습 문 제

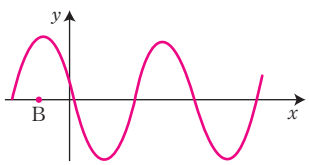
1. 그림처럼 두 개의 용수철 A, B가 점 J에서 서로 붙어 있다. 한 실험자가 용수철 A를 빠르게 움직여 펄스를 만들었다. 파동은 용수철 B보다 용수철 A에서 더 빨리 이동한다.



(1) 용수철 A에서의 장력(T_A)이 용수철 B에서의 장력(T_B)보다 더 큰가, 작은가, 같은가? 설명하여라. 만약 비교하는 것이 불가능하다면 왜 그런가를 설명하여라.

(2) 용수철 A의 단위 길이 당 질량(μ_A)이 용수철 B의 단위 길이당 질량(μ_B)보다 더 큰가. 작은가, 같은가? 설명하여라. 만약 비교하는 것이 불가능하다면 왜 그런가를 설명하여라.

2. $+x$ 방향으로 진행하는 진폭 A, 주기 T, 파장 λ인 파동의 시각 $t = 0$에서의 매질의 변위 y가 오른쪽 그림과 같은 sine 곡선으로 주어진다.



(1) 원점 $x = 0$에서의 매질은 $y = A\sin\omega t$의 단진동을 한다. $t = 0$일 때 원점으로부터 거리 x와 변위 y사이의 관계식을 구하여라.

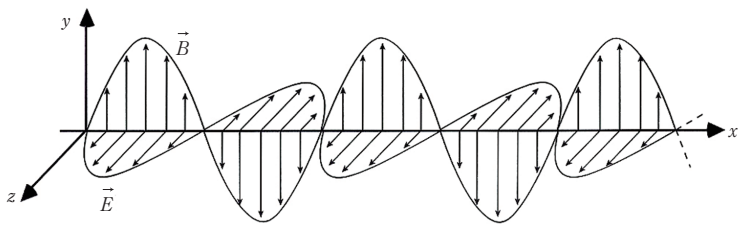
(2) 그림에서 점 B에 대한 변위 y의 식을 구하여라.

(3) 그림에 나타낸 파동과 파장 및 주기가 같고 진폭이 $\frac{1}{2}$이고 위상이 90°만큼 진행한 파동의 그래프를 그림에 나타낸 그래프 위에 그려보자. 그리고 그 파동 함수를 구하여라.

연 습 문 제

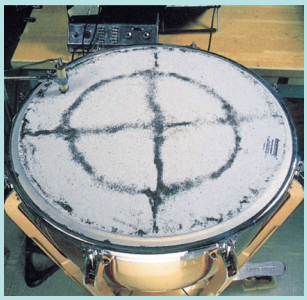
3. 다음은 빈 공간을 진행하는 전자기 평면파(라디오파)를 나타낸 것이다.

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_0 \sin(kx + \omega t)\hat{z} \qquad \vec{B}(x, y, z, t) = B_0 \sin(kx + \omega t)\hat{y}$$



휴대용 라디오의 수신 상태가 가장 좋도록 하기 위하여 안테나는 라디오에 대하여 어떤 방향으로 향하도록 하는 것이 좋을까?

2 정상파



정상파(standing wave)는 용어에서도 알 수 있는 바와 같이 일정한 공간 내에서 진동하는 파동이다. 지금까지의 진행파(travelling wave)는 에너지를 공간적으로 이동시킬 수 있는 파동인데 반하여 정상파는 어떤 공간 내에 에너지가 갇혀 있다.

정상파는 일상생활뿐만 아니라 물리적으로 매우 중요한 개념으로 많은 물리 현상들이 정상파와 관련되어 있다.

1. 정상파의 발생

정상파는 어떻게 발생될까? 진행파가 진행하다가 반사체를 만나면 반사파가 발생되므로 서로 반대 방향으로 진행하는 입사 파동과 반사 파동의 중첩이 일어난다. 이와 같이 반대방향으로 진행하는 두 개의 파동이 중첩되면 정상파가 발생할 수 있는데, 가장 효율적으로 일어나기 위해서는 두 파동의 세기가 같아야 한다. 이와 같은 상황은 어떤 닫힌 계에서 파동이 발생되면 자연스럽게 일어난다. 예를 들어 양쪽 끝이 고정된 줄에서 중간을 튕기면 정상파가 만들어진다. 그 이유는 양쪽 끝으로 진행하던 파동들이 고정된 곳에서 전반사되어 진행방향이 반대로 바뀌는 파동이 만들어지기 때문이다.

같은 진폭과 같은 진동수를 가진 두 파동이 서로 반대방향으로 매질을 통해 진행할 때 어떤 일이 일어나는지 고려해 보자. 오른쪽으로 진행하는 파동(ψ_1)과 왼쪽으로 진행하는 파동(ψ_2)은 다음과 같다.

$$\psi_1(x,\ t) = A\sin(kx - \omega t)$$
$$\psi_2(x,\ t) = A\sin(kx + \omega t)$$

이 두 파동이 중첩되면 수학적으로는 두 식을 합하는 것이다.

$$\psi(x,\ t) = \psi_1(x,\ t) + \psi_2(x,\ t)$$
$$= 2A\sin(kx)\cos(\omega t) \qquad (\text{Ⅳ}.\ 2\text{-}1)$$

중첩된 후에 파동의 특징은 위상에 영향을 주었던 항이 두 개로 분리된 것이다. 즉 진행파는 시간(t)과 공간(x)을 나타내는 변수들이 독립적으로 변하지 못했는데, 정상파의 경우에는 시간과 공간이 독립적인 변수가 된다. 공간의 어떤 장소에서도 진동수 ω로 진동하는 것은 진행파와 같지만 진폭이 공간에 따라 결정된다는 점이 매우 다르다. 진행파에서는 진폭이 A로 모든 지점에서 같다. 그러나 정상파에서는

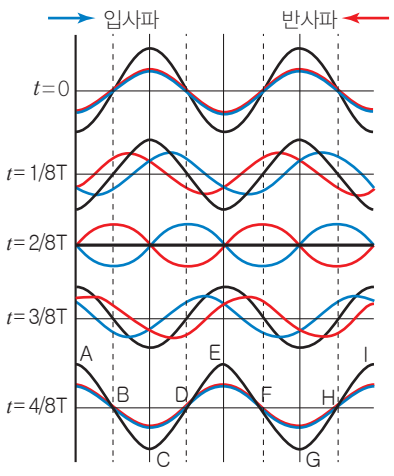
$$kx = n\pi\ (n = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \cdots)$$

가 되는 지점들에서는 진폭이 0이 됨을 알 수 있는데, 이러한 지점들을 마디(node)라고 한다. 그리고

$$kx = (2n+1)\frac{\pi}{2}(n = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \cdots)$$

를 만족하는 지점들에서는 진폭이 최대가 되는데, 이러한 조건을 만족하는 지점들을 배(loop)라고 한다.

예제 정상파의 배와 배 또는 마디와 마디 사이의 간격이 반파장이 됨을 증명하시오.



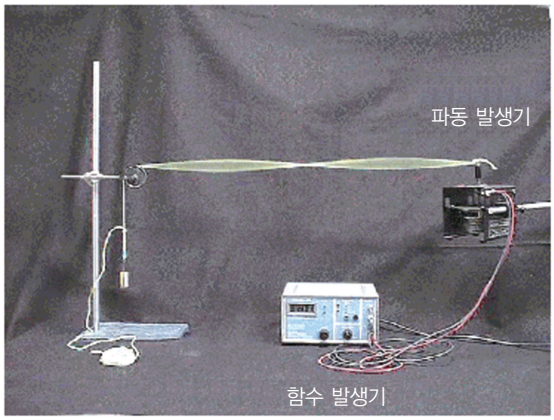
[그림 Ⅳ-12] **정상파**

[그림 Ⅳ-12]는 반대방향으로 진행하는 두 개의 파동을 1/8주기 시간 간격으로 중첩시켰을 때 정상파가 형성되는 과정을 나타낸 것이다. 굵은 검정색 모양이 중첩 후의 파의 모양이다. 마디인 점 B, D, F, H들에서 진행파는 진동하지만 정상파는 시간이 흘러도 진동하지 않는 것을 확인할 수 있다. 반면에 배인 지점들 A, C, E, G, I에서는 큰 진폭으로 진동하는 것을 확인할 수 있다.

예제 정상파 조건에서 진폭이 차이가 나면 어떤 현상이 일어날지 예상하여 보시오.

1) 현악기에서의 정상파

[그림 Ⅳ-13]은 줄을 이용하여 정상파를 발생시키는 장치이다.



[그림 Ⅳ-13] **줄에서의 정상파 실험장치**

탄성이 좋은 줄의 한쪽 끝은 고정시키고 다른 쪽 끝에는 진동자(스피커)를 연결시킨다. 진동자에 일정한 진동수를 갖는 전기 신호를 가해주면 진동자가 진동함에 따라 줄이 함께 진동한다. 진동자에 부착된 줄이 진동을 하면 줄 파동이 발생되고 왼쪽으로 진행하는 파가 발생한다. 왼쪽으로 진행하던 파가 왼쪽 끝에서 반사되어 오른쪽으로 진행하는 파가 발생되어 정상파를 이루기 위한 조건인 서로 반대 방향으로 진행하는 파들의 중첩이 발생한다.

진동자의 진동수에 무관하게 정상파가 발생되겠는가?

[그림 Ⅳ-13]에서는 양쪽에서 진행하는 파를 독립적으로 있다고 가정하고 중첩시켰다. 이 경우에는 어떤 파장이든지 정상파가 형성되어 마디와 배가 나타난다. 그러나 양쪽이 고정된 경우에는 임의의 파장이 정상파를 형성할 수가 없고 단지 양쪽 끝에서 함수 값이 0이 되는 조건을 만족하는 파동만 살아남는다. 즉

$$\psi(0,\ t) = \psi(L,\ t) = 0 \qquad (\text{Ⅳ}.\ 2\text{-}2)$$

으로부터

$$kL = n\pi$$

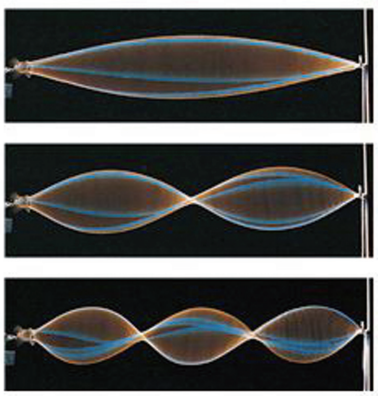
이다. $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$를 이용하면 이 식은

$$2L = n\lambda \qquad (\text{Ⅳ. } 2\text{-}3)$$

를 만족시키는 파장의 파동들만이 정상파를 형성할 수 있다. 만약에 위 식의 조건을 만족시키지 않으면 파동들이 반사하면서 조금씩 위상이 맞지 않게 되고 이들의 중첩 결과는 모든 지점에서 0이 된다. 정상파에서 특별한 파장들만이 가능한 이유는 양쪽 끝이 고정되어 있어 양쪽 끝의 함수 값이 0이 되기 때문인데, 이와 같이 경계에서 함수 값이 주어지는 것을 경계조건이라 한다.

예제 경계조건을 만족시키지 못하는 파장을 갖는 파동들이 수없이 반사되어 중첩되는 상황을 이용하여 왜 경계조건을 만족시키는 파동만이 진동을 유지하는지 설명하시오.

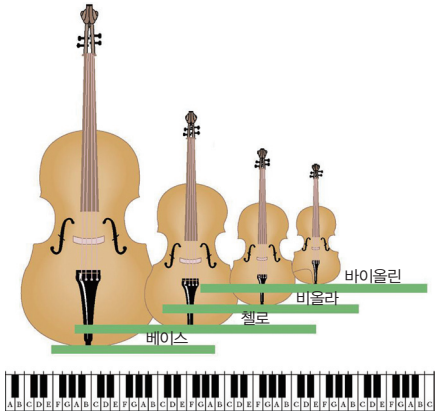
[그림 Ⅳ-14]와 같이 줄에 나타난 정상파가 $n = 1$인 경우를 기본진동, $n = 2$인 경우를 2배 진동, $n = 3$인 경우를 3배 진동이라고 한다.



[그림 Ⅳ-14] **줄에 나타나는 정상파**

[그림 Ⅳ-15]는 길이가 다른 다양한 현악기이다. 현악기는 정상파를 이용하여 고유의 진동수를 발생시키는 악기이다. 식 (Ⅳ. 2-3)으로부터 알 수 있듯이 길이가 짧을수록 기본 진동의 파장이 짧아지고, 따라서 소리는 진동수가 커져 고음을 낸다. 줄의 길이를 일정하게 하고 튕기는 위치를 달리 하는 경우에는 재미있는 현상이 발생한다. 중앙을 약하게 튕기면 기본 진동 하나만 진동하여 소리가 나고, 튕기는 힘을 조금 더 세게 하여 중앙을 튕기면 기본 진동만 하지만, 울림통 근처를 튕기면 기본 진동과 2배 진동, 두 개의 진동이 함께 일어난다. [그림 Ⅳ-14] (b)에서 알 수 있듯이 중앙을 튕기면 2배 진동은 일어날 수 없다. 반면에 울림통 근처를 튕기면 기

본 진동과 2배 진동 둘 다 진폭이 0이 아니기 때문에 진동을 하게 된다.



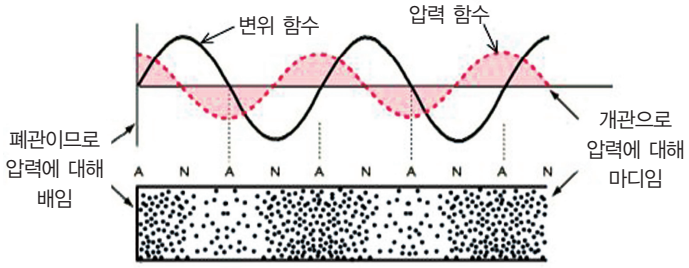
[그림 Ⅳ-15] 길이가 다른 현악기들

예제 길이가 같은 줄을 더 팽팽하게 하여 장력을 키우게 되면 발생되는 소리의 진동수는 어떻게 되겠는가? 그 이유를 설명하시오.

2) 관악기에서의 정상파

관악기는 관에서 만들어진 정상파에 의해서 아름다운 소리가 발생한다. 관의 길이가 짧을수록 높은 음이 발생되는 것은 현악기와 동일하다. 변위에 대한 경계조건은 개관과 폐관의 경우가 다르다. 폐관의 경우에는 공기 입자의 변위로 나타냈을 때는 마디, 즉 함수 값이 항상 0이고 함수 값을 압력으로 나타내면 배가 된다. 개관 부분은 함수 값을 변위로 나타냈을 때는 배가 되고 압력으로 나타내면 마디가 된다.

관에서의 정상파는 음파인 종파에 의해 만들어진 것이다. 따라서 공기 입자의 진동 방향은 지름 방향이 아닌 길이 방향이다. [그림 Ⅳ-16]에 길이 방향으로 진동하는 공기입자들의 분포가 나타나 있다. 변위 함수 값이 0인 지점은 입자들이 이동 없이, 평형 상태에 있다는 것을 나타낸다.



[그림 Ⅳ-16] 관악기에서의 정상파

예제 관이 열린 쪽에서 파동이 반사하겠는가? 우리가 소리를 들으려면 개관 부분에서 어떠한 상황이 일어나야 하겠는가?

3) 북에서의 정상파

1차원 매질에서 경계가 있으면 정상파가 발생된다는 사실을 확인하였다. 북과 같이 2차원, 3차원 구조물에서도 경계가 주어지면 정상파가 발생된다. [그림 Ⅳ-17]은 북 가죽에 나타난 정상파이다. 북 가죽위에 모래가루를 놓고 진동시키면 배 부분에 있던 모래들은 마디 부분으로 이동하게 된다. 그 이유는 마디 부분은 진동하지 않기 때문이다.

[그림 Ⅳ-17] 북 가죽의 진동에 대한 정상모드

3차원 구조물에서의 정상파 중 대표적인 것은 마이크로 오븐 내에서 형성된 정상파이다. 음식을 고루 익히려면 마디 부분의 음식을 배 부분으로 옮겨 주어야 한다. 이렇게 하기 위해 음식을 회전판 위에 올려놓고 돌리는 것이다.

4) 물질파의 정상파

물질파에서 정상파는 원자의 에너지 준위의 양자화와 밀접한 관계가 있다. 물질파는 확률파이지만 앞서 살펴본 모든 파동적인 성질이 동일하게 적용된다. [그림 Ⅳ-18]은 원자핵에 잡혀서 왼쪽과 오른쪽으로 돌고 있는 전자를 물질파로 생각하였을 때 형성된 정상파를 나타낸 것이다. 파동의 함수 값이 의미하는 것은 발견 확률이다.

허용된 물질파의 파장은 경계 조건에 의해 원둘레가 파장의 정수배가 되어야 하기 때문에 다음과 같다.

$$2\pi r = n\lambda \qquad (\text{Ⅳ. } 2\text{-}4)$$

위의 조건을 만족하지 않는 경우에 한 방향으로 돌고 있는 진행파들의 중첩 결과는 모든 곳에서 0이 된다. 즉, 정상파가 되지 않고는 파동이 존재할 수 없게 된다.

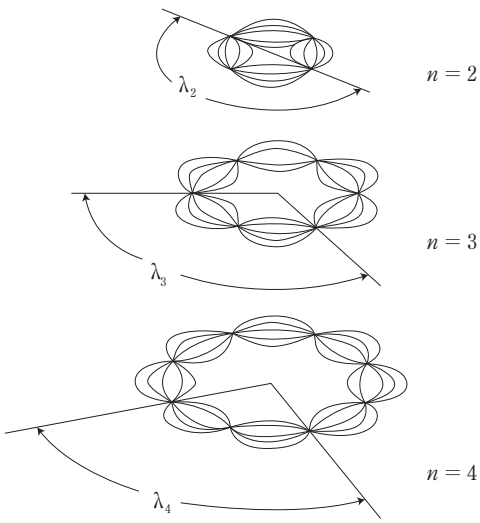
식 (Ⅳ. 2-4)로부터 보어의 원자 모형에 대한 첫 번째 가정, 즉 각운동량

의 양자화 조건을 이끌어낼 수 있다. 각운동량은 $L = mvr = pr$이고, 드브로이의 물질파 파장은 $\lambda = \frac{h}{p}$이므로

$$L = pr = \frac{hr}{\lambda} = \frac{nh}{2\pi} \qquad (\text{Ⅳ. } 2\text{–}5)$$

가 되어 보어 원자 모형의 각운동량 양자화 조건과 동일함을 알 수 있다. 그러므로 각운동량의 양자화 조건은 전자를 물질파로 보았을 때 파동이 정상파를 이루는 궤도만 허용된다는 것을 의미한다.

❖ 원자핵 주위의 전자에게 특정 궤도만 허용된다는 것을 '궤도의 양자화'라고 한다.



[그림 Ⅳ-18] **물질파의 정상파**

예제 물질파의 경우에 파동 함수 값이 0인 곳에서는 입자를 발견할 확률이 0이라고 한다. 그렇다면 [그림 Ⅳ-18]의 각 경우에 확률이 음수인 상황을 어떻게 설명할 수 있을지 생각해 보자.

2. 맥놀이

[그림 Ⅳ-19] (a), (b)와 같이 약간의 진동수 차이가 나는 두 개의 파동이 중첩되면 [그림 Ⅳ-19] (c)와 같이 주기적으로 진폭이 변하는 파동이 된다. 이러한 현상을 **맥놀이**라고 한다. 소리의 경우에는 두 파동의 진동수 차이에 해당하는 진동수로 소리가 커졌다 작아졌다를 반복한다.

어느 특정한 위치를 기준점 $x = 0$으로 택하고, 수학적으로 문제를 간단

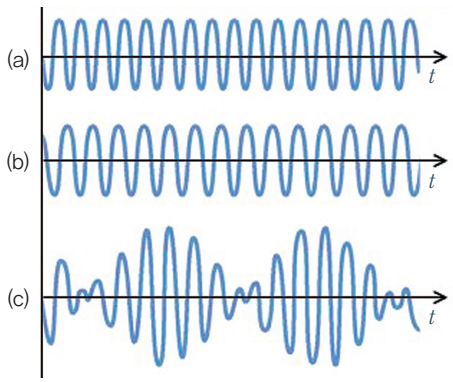
히 하기 위해 두 파의 진폭은 같으며 위상상수는 0이라고 하면 중첩파의 파동함수는 다음과 같다.

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = A\sin(\omega_1 t) + A\sin(\omega_2 t)$$

$$= 2A\cos\left[2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t\right]\sin\left[2\pi\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right)t\right] \qquad (\text{Ⅳ}.\ 2\text{-}6)$$

❖ 귀로 듣는 음의 세기에 비례하는 진폭의 제곱은 사이클 당 두 번의 최댓값과 두 번의 최솟값을 지나므로 들리는 맥놀이 진동수는 $(f_1-f_2)/2$의 2배 즉 (f_1-f_2)가 된다.

이는 진동수 $f_{\text{평균}} = \frac{f_1 + f_2}{2}$이며, 진폭은 $\frac{f_1 - f_2}{2}$의 진동수로 변조된 파동 함수를 나타낸다. 따라서 거의 같은 진동수 f_1, f_2의 소리가 동시에 방출되면 우리는 평균 진동수 $f_{\text{평균}}$를 듣게 되지만, 소리의 크기는 맥놀이 진동수 $|f_1 - f_2|$로 변환한다.



[그림 Ⅳ-19] **맥놀이**

실험 정상파를 이용한 소리의 속도 측정

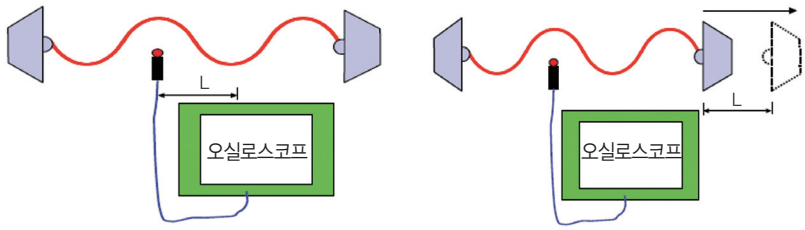
준비물 오실로스코프, 함수 발생기, 스피커 2개, 마이크, 자

과정

1. [그림 Ⅳ-20]과 같이 실험 장치를 구성한다.
2. 스피커 두개를 마주보게 하여 30 cm 쯤 떨어뜨려 놓고 같은 함수 발생기에서 나온 신호를 병렬로 나누어 두개의 스피커를 작동시킨다. 이렇게 하면 두 스피커에서 발생된 음파가 같은 진동수를 가지고 서로 반대 방향으로 진행하면서 겹치게 된다.
3. [그림 Ⅳ-20] (a)의 방법을 이용하여 정상파의 파장을 측정한다. 신호가 가장 크게 나온 지점을 표시한다. 이곳이 배(압력이 가장 크다.)에 해당한다. 마이크

를 이동시켜 가면서 다시 첫 번째로 신호가 크게 나오는 지점을 표시하고 두 지점 사이의 간격을 측정한다. 다시 배가 되는 지점이다. 측정된 길이는 반파장에 해당하므로 파장은 이 값의 2배를 하여야 한다.

4. [그림 Ⅳ-20] (b)의 방법을 이용하여 정상파의 파장을 측정한다. 이 경우는 스피커를 이동시켜가며 배의 위치를 찾는 것으로 다시 배가 되려면 한 파장만큼 이동시켜야 한다. 즉, 측정된 간격 L이 파장이 된다.



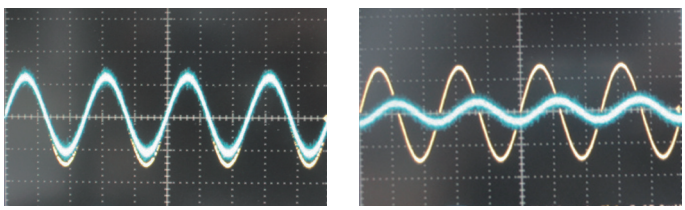
(a) 마이크를 이동시키는 방법　　(b) 스피커를 이동시키는 방법

[그림 Ⅳ-20] **정상파를 이용한 소리의 속도 측정 개념도**

논의

1. 정상파의 파장을 측정하는 위 두 실험 방법에서 파장을 결정하는 방법이 다른 이유에 대해 논의해 보자.

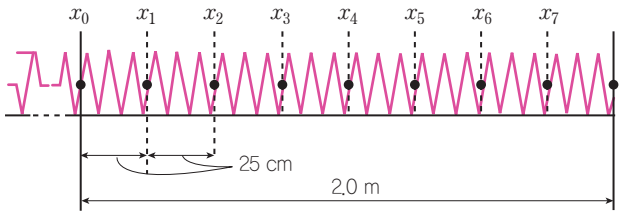
2. 배와 마디 부분에서 오실로스코프에 나타나는 신호의 차이에 대해 설명해 보자.



예제 스피커를 이동하는 경우에 한 파장만큼 이동시켜야 되는 이유는 무엇인가?

연습문제

1. 그림과 같이 마찰이 없는 수평한 평면 위에 용수철을 놓고 그 오른쪽 끝을 벽면에 고정한 다음 왼쪽 끝을 당겨서 전체 길이가 2 m가 되게 하였다.



이 용수철에는 25 cm씩 등간격으로 x_0, x_1, x_2, …, x_8의 표시가 되어 있으며, x_8은 벽면에 고정되어 있다. 이 상태에서 용수철의 왼쪽 끝을 그림의 좌우 방향으로 주기 0.25s, 진폭 5 cm의 작은 진동을 시켰더니 이 진동은 진폭이 일정한 파장 $\lambda = 1$ m의 종파가 되어 용수철을 전파하기 시작하였다.

(1) 이 파동이 x_0에서 x_4까지 진행하는데 걸리는 시간은 얼마이며, 이 파동의 속력은 얼마인가?

(2) 점 x_4의 변위가 처음으로 최대가 되었다가 감소하여 0이 되었을 때 변위의 크기가 최대가 되는 점은 어느 점과 어느 점인가?

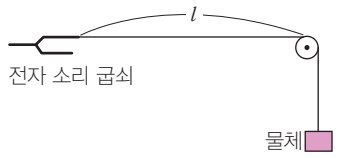
(3) 시간이 충분히 경과되어 오른쪽으로 진행하는 파동과 고정점 x_8에서 반사하여 되돌아오는 파동이 중첩되어 정상파가 만들어졌을 때 정상파의 배가 되는 점은 어느 점과 어느 점인가?

(4) 점 x_5에 대한 진행파와 반사파의 위상차는 얼마인가?

2. 균일한 굵기의 가벼운 실을 그림과 같이 한 쪽 끝을 전자소리 굽쇠에 연결하고 다른 쪽 끝을 도르래를 통하여 물체에 연결하였다.

이 소리굽쇠의 진동수는 100 Hz이다. 소리굽쇠를 진동시키면서 도르래까지의 현의 길이 l을 1.5 m가 되게 한 다음 물체의 질량을 조절하여 현에 5개의 배를 가진 정상파를 만들었다.

(1) 이 파동의 파장은 얼마인가?



(2) 파동의 속력은 얼마인가?

(3) 또 물체의 질량 m을 2배로 하였을 때, 3개의 배를 가진 정상파를 만들기 위해서는 현의 길이 l을 얼마로 하여야 하는가?

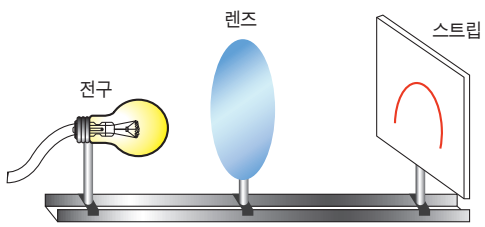
3 기하 광학

지금 여러분 중에는 안경을 쓰고 있는 사람이 상당수 될 것이다. 안경은 선명하게 글씨를 읽도록 도와주는 매우 중요한 광학 기기이다. 어떻게 안경이 그와 같은 역할을 할까? 안경 이외에도 디지털 카메라, 빔 프로젝터, 복사기, 스캐너, 현미경, 망원경 등 이루 헤아릴 수 없을 만큼 많은 광학 기기들이 우리 주변에서 사용되고 있다.

전자기파의 파장이 상호작용하는 물체의 크기보다 매우 작을 때, 우리는 전자기파를 광선으로 취급할 수 있다. 이와 같이 빛을 광선으로 취급하는 영역을 기하 광학이라고 한다. 이 장에서는 빛의 반사와 굴절에 대하여 알아보고 이들을 응응한 광학 기기의 동작 원리에 대하여 알아보자.

1. 물체와 상

기하 광학에서 알아두어야 할 가장 중요한 개념 중의 하나가 '물체와 상'일 것이다. [그림 Ⅳ-21]은 광학 기기로 렌즈를 사용한 경우에 물체와 상 사이의 관계를 나타낸 것이다.



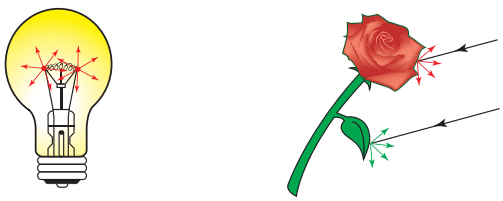
[그림 Ⅳ-21] 물체인 전구의 필라멘트 모양이 렌즈에 의해 스크린에 상이 만들어진 모습

전구의 필라멘트에서 나온 빛들이 렌즈를 거쳐 스크린에 상을 형성하는 과정이다. [그림 Ⅳ-21]의 렌즈와 같은 광학 기기는 물체에서 나온 빛들을 이용하여 상이 형성되도록 역할을 하는 것을 말하는데, 현미경처럼 아

주 작은 물체를 확대하거나 망원경처럼 아주 멀리 있어 작게 보이는 물체를 확대하여 보여주는 역할을 한다.

1) 물체

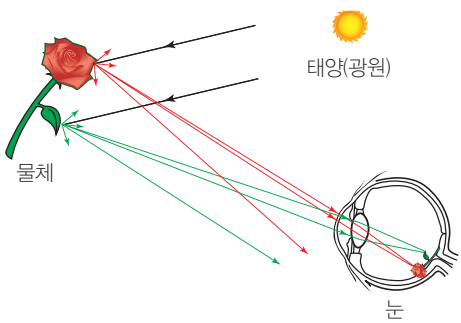
광학에서 말하는 물체는 [그림 Ⅳ-22] (a)와 같이 스스로 빛을 발생하거나 [그림 Ⅳ-22] (b)와 같이 광원에서 나온 빛을 반사시켜 사방으로 산란시키는 것을 말한다. 스스로 빛을 방출하든지 혹은 빛을 산란시키든지 물체는 점파원들이 모여 이루어진 것이고, 각 점파원에서는 무수히 많은 광선들이 사방으로 퍼져 나오는 것으로 고려하여야 한다.



[그림 Ⅳ-22] **광학에서의 물체**

2) 물체를 보기 위해서는?

[그림 Ⅳ-23]은 장미꽃이라는 물체를 보는 과정을 광선 추적을 통하여 보여주고 있다. [그림 Ⅳ-23]에서 알 수 있는 것과 같이 물체를 인식하기 위해서는 물체, 빛, 눈이 있어야 한다. 3개의 요소 중 어느 하나라도 없으면 사람은 물체를 볼 수 없다.



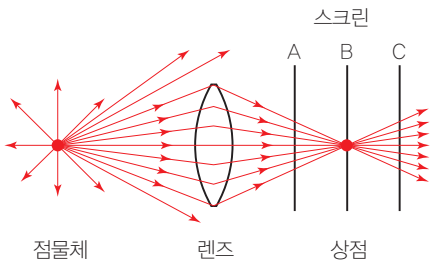
[그림 Ⅳ-23] **물체를 보는 원리**

태양이나 전등과 같은 광원에서 발생된 빛은 물체에서 부딪치고 물체의 각 지점은 이 빛들을 사방으로 산란시킨다. 사방으로 산란되는 이유는 물체의 표면이 거울 면과 다르게 거칠기 때문이다. 여기서 중요한 점은 물체

는 빛을 산란시키기 때문에 점파원들의 집합체와 같은 역할을 한다는 것이다. 물체에서 산란된 빛은 사방으로 퍼져 나가다가 물체를 바라보고 있는 사람 눈에 일부의 빛이 들어가게 된다. 물체의 한 점에서 산란되어 사람 눈으로 들어온 광선들은 각막과 수정체를 거치면서 망막의 한 점(이를 상점이라고 하자.)에 모이게 된다. 따라서 물체를 이루는 각 점들에 대응되는 상점들이 있게 되고 망막에는 장미꽃의 형상이 뚜렷하게 만들어지게 된다. 망막에 있는 시세포는 상의 모양과 색을 측정하여 전기 신호로 만들고 이 전기 신호를 뇌가 인식하여 물체의 형상을 인식하게 되는 것이다.

3) 실상, 허상 그리고 스크린의 역할

물체 위의 한 점에서 출발된 광선들 중에 광학 기기 안으로 들어간 모든 광선들은 하나의 상점에 대응시킬 수 있다. 점물체(광원)에서 나간 광선들이 렌즈에 입사되어 어떻게 가는지 [그림 Ⅳ-24]를 통하여 살펴보자. 스크린을 A, B, C의 위치에 놓았을 때 점으로 보이는 곳은 오로지 한 지점 B이다. 즉, 한 곳에서만 상이 만들어진다. 스크린을 옮기면 형상이 흐릿하게 보이지만, B지점을 제외하고는 상면이라고 하지 않는다.



[그림 Ⅳ-24] **점물체(점광원)에서 빛이 나가는 광선들이 렌즈에 의해 굴절되었을 때 진행하는 모습**

[그림 Ⅳ-24]처럼 물체에서 나온 광선들이 실제로 상점을 지나는 경우를 **실상**(real image)이 형성된다고 말하고, 상점을 포함한 **상면**(image plane)에 스크린을 놓으면 물체의 형상을 볼 수 있다. 그 이유는 스크린에 도달한 빛이 스크린 앞쪽으로 산란되기 때문이다. 이 경우에 스크린에 만들어진 상은 관찰자의 입장에서 보면 다시 물체와 같은 역할을 한다. 평면거울과 같은 경우에는 물체에서 나온 광선들이 상점을 통과하지 않고 광학계를 통과한 광선들을 연장시켰을 때 만나는 경우가 있는데 이를 **허상**(virtual image)이라고 한다. 허상의 위치에 스크린을 놓으면 어떠한 형상도 관찰할

수 없다. 왜냐하면 허상의 위치에 실제 빛이 지나지 않기 때문이다.

광학 기기에 의해 허상이 만들어진 경우에도 우리는 눈을 사용하여 볼 수 있다. 광학 기기에 의해 형성된 허상이나 실상을 우리가 보게 되면, 이 광학기기에 의해 만들어진 허상이나 실상 자체가 우리 눈이라는 광학 기기 입장에서 보면 또 다른 물체가 된다.

예제 거울 앞에서 자신을 보는 것과 카메라로 거울 앞에서 자신을 촬영하는 것은 기하 광학적으로 동일한 과정이라 해석 할 수 있다. 거울에 의한 상은 눈이나 카메라 입장에서 물체 사이에 어떠한 역할을 하는가?

4) 그림자의 상

물체의 형태만 보이면 상이라 표현하는데, 상과 그림자는 구별되어 설명되어야 한다. 물체의 한 점에서 여러 방향으로 나온 빛들이 렌즈를 거치면서 한 점에 도달하면 이를 상점이라 한다. 물체는 점파원들의 집합이며 대응되는 상점들의 집합이 물체의 상이 된다. 반면에 그림자는 광선이 도달하지 못하는 영역을 말한다. 광원의 한 점에서 나온 광선들이 물체에 의해 차단되면 스크린에 빛이 도달하지 못하는 부분도 있고, 차단되지 않아 스크린에 빛이 도달하는 부분도 있다. 이 경우도 물체의 형태는 어느 정도 나타나기 때문에 모양이 보인다는 측면에서 상과 그림자를 혼용하여 사용하고 있다. 그러나 그림자의 경우는 한 점에서 나온 수많은 빛들 중에 물체에 의해 차단되지 않은 광선들이 스크린의 여러 곳에 도달한다는 점에서 상과 큰 차이가 있다.

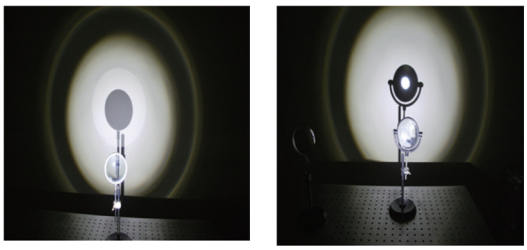
[그림 Ⅳ-25]와 같은 사진을 흔히 역광사진이라고 한다. 이유는 보통의 사진은 광원을 등지고 찍는데 반하여 사진은 물체 뒤에 광원이 있기 때문이다. 이와 같이 역광으로 사진을 촬영할 때 생긴 상을 그림자 상이라고 한다. 그렇다면 보통의 그림자와 그림자 상은 어떻게 다를까?

[그림 Ⅳ-25] 역광사진

(1) 점광원과 유한크기의 광원

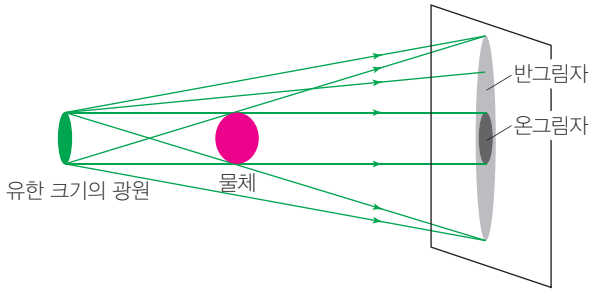
점광원은 크기가 매우 작아 점으로 근사할 수 있는 광원을 말한다. 점광원에서 빛이 발생되면 사방으로 직진하며 전파한다. 꼬마전구나 하나의 발광다이오드(LED)와 같이 발광 영역이 작은 경우에 점광원으로 생각할 수 있다. 반면에 형광등이나 백열전구와 같이 어느 정도의 크기를 가져 여러

곳에서 빛이 발생되는 경우를 유한 크기의 광원이라고 한다. 유한 크기의 광원은 점광원들이 모여서 된 것으로 생각할 수 있기 때문에 광원의 각 지점에서는 사방으로 빛이 퍼져나간다.



예제 그림은 점광원에서 발생된 빛을 렌즈를 통과하여 스크린에 나타난 모습이다. 어떤 렌즈를 사용하였는지를 생각하여 보고, 스크린에서 보이는 빛의 세기가 위치마다 달라지는 이유를 설명하여 보자. 광원으로부터 스크린까지 광선들을 그려서 설명해 보자.

[그림 Ⅳ-26]은 구모양의 물체 앞에 유한 크기의 광원이 있을 때 스크린에 도달하는 빛들을 광선을 이용하여 나타낸 것이다. 유한 크기의 광원은 점파원들의 집합이므로 스크린에는 반그림자와 온그림자가 나타난다. 반그림자는 광원의 모든 점에서 출발한 빛들이 물체에 의해 일부 차단되고 일부가 도달하기 때문에 나타난다. 온그림자는 광원의 모든 점에서 출발한 빛들이 하나도 스크린에 도달하지 않는 부분을 말한다. 따라서 상과 그림자의 큰 차이점은 상은 물체점과 상점이 1:1로 대응이 되는데 반해, 그림자는 광원의 한 점에서 나온 빛이 스크린의 여러 곳에 도달한다는 점에서 큰 차이가 있다.



[그림 Ⅳ-26] **반그림자와 온그림자**

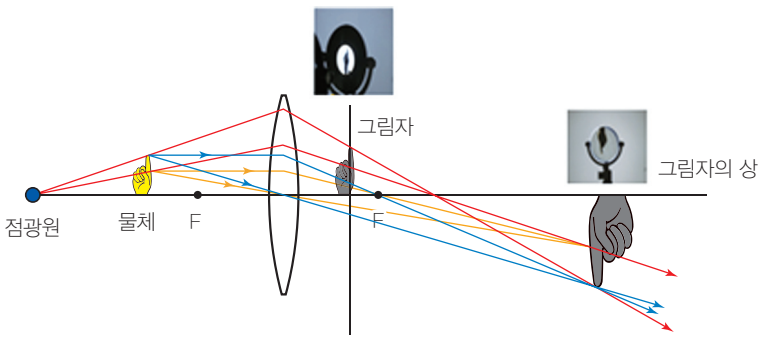
예제 바늘구멍 사진기의 의해 스크린에 나타난 모습은 상인가? 그림자인가? 그 이유를 설명하여라.

예제 [그림 Ⅳ-26]에서 유한크기의 광원 대신에 점광원을 설치하면 반그림자가 나타나겠는가? 이유를 설명하여라.

(2) 그림자와 그림자의 상

[그림 Ⅳ-27]은 손가락 한 개를 펼친 물체를 점광원 앞에 놓고 볼록 렌즈를 통하여 스크린에 나타난 모습을 촬영한 것이다. 스크린에 나타난 모습은 그림자이다. 스크린에 나타난 모습을 추적하기 위하여 광선 추적을 실시하여 보면 [그림 Ⅳ-28]과 같다.

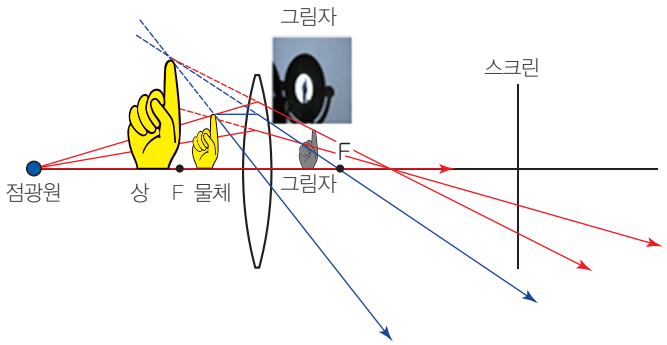
[그림 Ⅳ-27] 물체의 그림자



[그림 Ⅳ-28] 그림자 및 그림자의 상을 보기 위한 광선 추적

점광원에서는 사방으로 빛이 퍼져 나가는데 물체에 의해 차단된 빛은 더 이상 진행하지 못하고 차단되지 않은 빛만 진행하게 된다. 손가락 끝 지점을 향하여 나가는 빛의 광선 추적을 하려면 우리가 앞서 수행한 방법으로 상의 위치를 결정하여야 한다. 즉 손가락에서 실제로 빛이 나간다고 생각하고 광축에 나란하게 간 광선, 렌즈의 중심을 향하여 나가는 광선을 선택하여 두 개의 광선이 만나는 지점을 상점이라고 하자. 이제 실제로 손가락 끝 지점을 향하여 나간 빛 또한 렌즈에 의해 굴절되기 때문에 상점을 향하여 진행한다. 그런데 [그림 Ⅳ-28]에서는 렌즈 가까이에 스크린을 놓았기 때문에 상을 향하여 가던 빛이 스크린에 도달하여 산란된다. 손가락 다른 지점을 가까스로 벗어나 렌즈를 향하는 빛들을 이용하여 나머지 부분에 대해서도 광선 추적을 해보면 [그림 Ⅳ-28]의 스크린 위치에는 선명하게 바로 선 그림자가 나타난다. 렌즈가 없었을 때 보여야 할 그림자보다 더 작게 나타난다. 손가락의 상의 위치에 스크린을 놓으면 거꾸로 된 그림자 상을 얻을 수 있다. 이 방법으로는 스크린을 주위에서 앞뒤로 왔다 갔다 해도 거꾸로 된 손가락 모습을 선명하게 볼 수 있기 때문에 정확하게 상의 위치를 확인할 수는 없다.

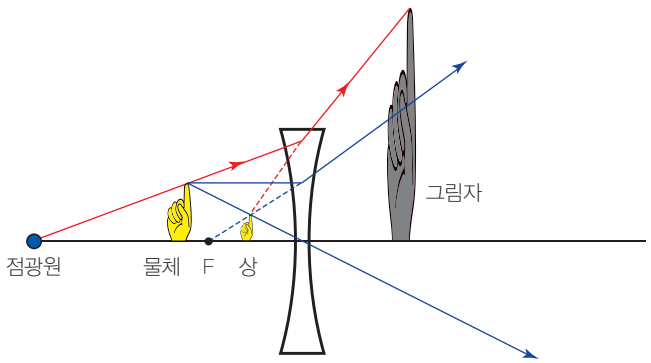
볼록렌즈의 경우에 물체가 초점 안쪽에 위치해 있는 경우에 광선 추적은 [그림 Ⅳ-29]와 같다. 실제 상은 허상인데 스크린을 설치하면 마치 정립 그림자가 상처럼 보인다. 이유는 점광원을 사용했기 때문에 상이 선명하게 보이기 때문이다. 이것은 그림자이다.



[그림 Ⅳ-29] **볼록렌즈에 의한 상과 그림자**

예제 [그림 Ⅳ-29]에서 스크린을 오른쪽 선이 위치한 곳에 놓으면 어떠한 모양이 관찰될까?

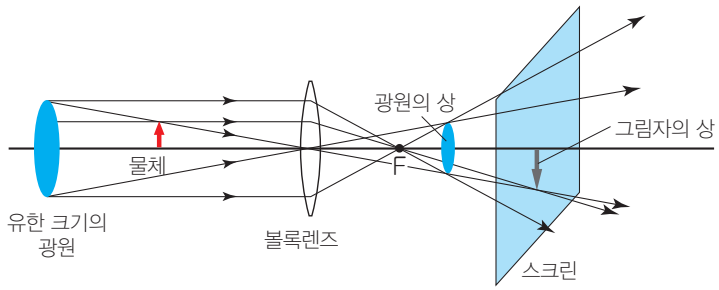
오목렌즈의 경우에 점광원에 의한 광선 추적은 [그림 Ⅳ-30]과 같다.



[그림 Ⅳ-30] **오목렌즈에 의한 상과 그림자**

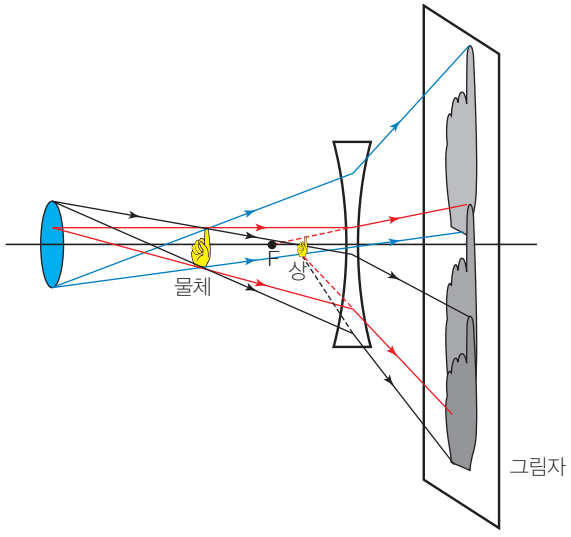
유한 크기의 광원을 놓게 되면 상황은 매우 복잡하게 된다. 렌즈가 없으면 앞서 살펴 본 바와 같이 온그림자와 반그림자가 스크린에 나타나지만 렌즈에 의해 물체의 상이 형성되는 곳에 스크린을 놓으면 선명한 그림자 상이 나타나는 것을 알 수 있다. 그림자 상의 광선 추적은 빛을 발생하는 물체의 경우와 동일한 방법으로 할 수 있다. 그 이유는 [그림 Ⅳ-31]에서

보는 것처럼 광원의 다른 지점들에서 화살표 물체 끝 점을 향하여 온 빛들이 다양하기 때문에 마치 화살표 물체 끝 점에서 사방으로 빛이 나가는 경우와 동일하게 생각할 수 있기 때문이다. 따라서 물체에 의해 빛이 차단되기 때문에 스크린에는 그림자 상이 나타나게 된다.



[그림 Ⅳ-31] **볼록렌즈의 경우, 유한 크기의 광원에 의한 그림자의 상**

유한 크기의 광원이 물체 뒤에서 비추어졌을 때 오목렌즈에 의한 광선 추적 그림은 좀 더 복잡하다.



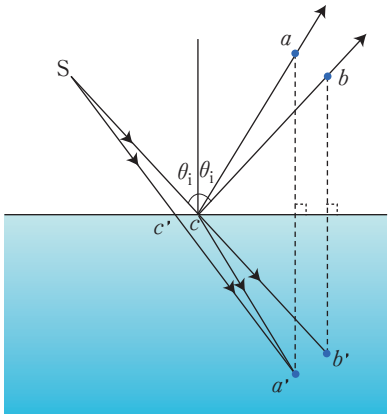
[그림 Ⅳ-32] **오목렌즈의 경우, 유한 크기의 광원에 의한 그림자의 상**

2. 반사

모든 물체가 빛을 반사시키지 않고 완전히 흡수한다면 물체를 볼 수 있을까? 우리가 물체를 볼 수 있는 것은 물체에서 반사(또는 산란)된 빛이 우리 눈으로 들어오기 때문이다. 우리 일상생활에서 빛의 반사를 의도적으로 이용한 가장 대표적인 광학기기로 거울을 꼽을 수 있다.

1) 반사 법칙

빛이 거울 표면에서 반사된다고 할 때, 어떤 경로로 반사가 일어날까? 이 의문에 대한 해답은 빛의 진행에 대한 페르마(Fermat)의 **최소 시간의 원리**(least time principle)나 호이겐스의 원리, 또는 맥스웰 방정식으로부터 유도되는 매질의 경계 조건 등을 이용해 여러 가지 방법으로 구할 수 있다. 여기서 우리는 '빛은 가장 시간이 적게 드는 경로로 진행한다'라는 페르마의 최소 시간의 원리를 이용해서 반사광의 진행경로를 알아보자.



[그림 Ⅳ-33] 페르마의 최소 시간의 원리를 이용한 반사 법칙 유도

[그림 Ⅳ-33]은 거울표면 c에서 반사된 빛이 입사각과 다른 반사각을 갖고 a를 통과하는 경우와 입사각과 같은 반사각을 갖고 b를 통과하는 경우를 나타낸 것이다. 먼저 거울 아래쪽으로 거울면에서 a까지의 거리와 같은 거리만큼 떨어진 곳에 가상적인 점 a'을 설정하고, b에 대해서도 마찬가지 방법으로 b'을 설정한다. 즉, c점에서 반사되어 a를 통과하는 광은 sca'의 경로로 진행하는 것과 똑같은 거리를 이동하게 되고, b를 통과하는 광은 scb'의 경로로 진행하는 것과 똑같은 거리를 이동하게 된다. [그림 Ⅳ-33]으로부터 a를 통과하는데 가장 시간이 적게 드는 경로는 c를 통과하면서 꺾여 진행하는 것이 아니라, c'을 통과하면서 직선으로 진행하는 경로임을 알 수 있다. 즉, a를 통과하는데 가장 시간이 적게 드는 경로는 c에서 반사되는 것이 아니라 c'에서 반사되는 것이다. 또한 c를 통과해서는 b'을 지나는 것이 가장 시간이 적게 드는 경로임을 알 수 있다. 즉, 거울 면에서 반사되는 빛은 입사각과 같은 각도로 반사된다는 것을 알 수 있다.

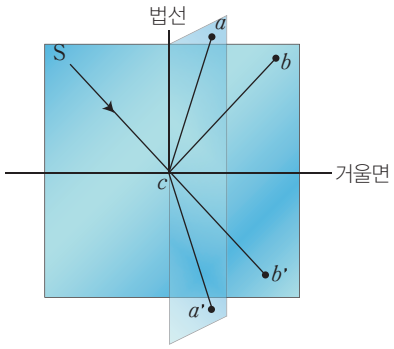
이제 반사광이 어떤 면상에 존재하는가를 생각해 보자. 거울 표면에서 반사되는 빛이 입사각과 같은 각도로 반사된다는 것은 알게 되었지만, 이 조건을 만족시킬 수 있는 면은 무수히 많이 존재한다.

[그림 Ⅳ-34]에서 b는 입사광과 법선으로 이루어진 평면상에 존재하는 지점이고, a는 다른 평면상에 존재하는 지점이다. 물론 반사각은 두 경우 모두 입사각과 같다. [그림 Ⅳ-33]에서와 마찬가지로 거울로부터 같은 거리 떨어진 곳에 가상적인 a', b'을 설정하게 되면, 일직선 경로인 scb'가 가장 시간이 작게 드는 경로임을 알 수 있다. 즉, c에서 반사된 빛은 입사광과 법선으로 이루어진 평면상에 존재함을 알 수 있다.

❖ 입사광선과 법선으로 이루어진 평면을 입사면이라 한다.

따라서 반사 법칙은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 입사각과 반사각은 같다.
- 반사광은 입사광선과 법선으로 이루어진 평면상에 있다.

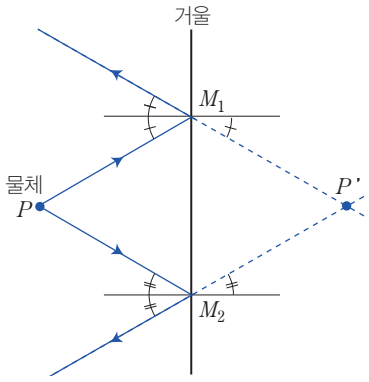


[그림 Ⅳ-34] **반사 법칙**

2) 평면거울

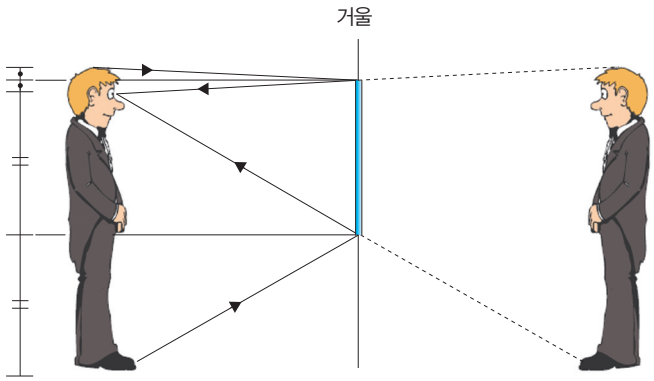
실생활에서 빛의 반사를 이용한 가장 흔한 예는 평면거울이다. 지금 평면거울 앞에 한번 서 보라. 거울로부터 똑같은 거리 만큼 떨어진 곳에 또 다른 자신이 서 있을 것이다. 이와 같은 상은 어떻게 생기는 것일까?

[그림 Ⅳ-35] 물체 P가 평면거울 앞에 놓여 있는 것을 나타낸다. 물체의 P지점에서 출발하여 거울을 향해 진행하는 무수한 광선 중 두 개의 광선에 대해 그 경로를 살펴보자. 두 개의 광선은 빛의 반사 법칙에 의해 입사각과 같은 각도로 반사되므로, 간단한 기하학을 이용하면 ΔPM_1M_2과 $\Delta P'M_1M_2$이 합동임을 알 수 있다. 따라서 물체의 P지점에서 출발한 빛은 거울로부터 똑같은 거리만큼 떨어져 있는 P'에서 출발해 진행하는 것처럼 보인다. 이와 같은 과정을 통해 물체와 같은 크기의 상이 거울로부터 똑같은 거리만큼 떨어져 있는 위치에 형성된다. 이때의 상은 실제로 빛이 모여서 생긴 상이 아니므로 허상이다.



[그림 Ⅳ-35] **평면거울에 의한 상**

평면거울에 대한 다음과 같은 문제를 생각해 보자. 평면거울을 통해 자신의 전체 모습을 보고자 할 때, 어느 정도 크기의 거울이 필요할까? [그림Ⅳ-36]과 같이 머리끝에서 거울로 입사하는 광선과 발끝에서 거울로 입사하는 광선만 반사 법칙에 따라 작도해 보면, 자신 키의 반 만큼의 거울 크기로 자신의 상하 전신을 볼 수 있음을 알 수 있다. 단, 이때 거울은 머리끝과 눈 사이의 중간 지점에서부터 놓여 있어야 한다.



[그림 Ⅳ-36] **자신의 전체 모습을 보기 위한 거울의 최소 크기**

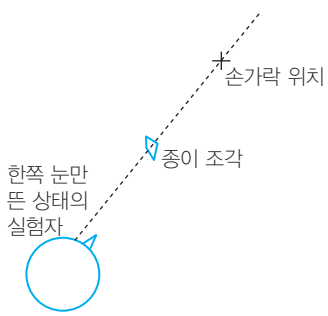
예제 자신의 좌우 전체 모습을 보자면 거울의 폭이 얼마나 되어야 할까?(눈과 눈 사이의 거리가 6 cm이고, 자신의 좌우 폭이 54 cm인 경우) 만약, 눈과 눈 사이의 거리가 좀 더 멀다면 거울의 폭은 어떻게 되겠는가?

실험 시차법(Method of parallax)

과정

1. 한쪽 눈을 감고 나머지 뜬 눈이 탁자 높이에 있도록 몸을 낮춘다. 다른 실험자가 탁자 위로 한 변이 2 mm인 정사각형의 종이 조각을 떨어뜨린다. 손가락 하나를 탁자의 표면보다 위에 있도록 하고, 손가락이 탁자와 떨어진 상태에서 종이 조각 바로 위에 있다고 생각될 때까지 손가락을 움직인다. 탁자 표면까지 손가락을 똑바로 내려서 그 손가락이 실제로 종이 바로 위에 있는지 확인하여라.

2. 손가락으로 종이 조각의 위치를 찾으려고 시도했지만 오른쪽 그림처럼 손가락을 종이 뒤에 놓았다고 가정하자. 다음의 두 경우에 손가락은 종이 조각의 왼쪽에 보일까, 오른쪽에 보일까, 같은 줄에 보일까를 예상하고 확인하여라.



위에서 바라본 실험

(1) 머리를 왼쪽으로 옮기는 경우

(2) 머리를 오른쪽으로 옮기는 경우

3. 손가락을 종이 조각의 앞에 놓았다고 가정하자.
머리를 왼쪽으로 옮길 때, 왼쪽에 보이는 것이 종이일지, 손가락일지 예상하여라. 실험으로 확인하여 보자.

논의

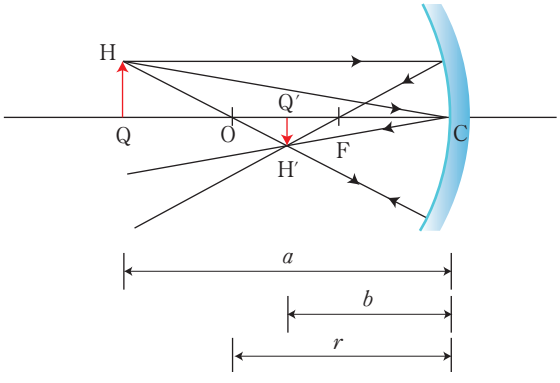
1. 손가락이 종이 조각을 놓칠 때, 손가락은 항상 종이의 앞이나 뒤에 있고, 결코 종이의 왼편이나 오른편에는 있지 않다는 사실을 어떻게 설명할 수 있을까?

2. 문제 2와 3에서 얻은 결과를 바탕으로 종이 조각의 정확한 위치에 손가락을 놓을 수 있는 방법을 고안하여라. 그 방법은 손가락이 종이 조각 바로 위에 있는지, 그렇지 않다면 손가락이 종이 조각의 앞 혹은 뒤에 있는지를 말해줄 수 있는 방법을 포함하고 있어야 한다.

3) 구면거울

평면거울과 함께 볼록거울, 오목거울과 같은 구면거울도 일상생활에 많이 사용되고 있다. 굽어진 길모퉁이나 자동차의 백미러(rear mirror) 혹은 사이드 미러(side mirror)에 평면거울 대신 볼록거울이 많이 부착되어 있는 것을 보게 된다. 이와 같은 곳에 볼록 거울을 사용하면 어떤 점이 유리할까? 일반적으로 평면거울은 거울에 대해 대칭인 지점에 물체와 같은 크기의 허상이 생긴다. 볼록거울의 경우는 평면거울에 비해 상의 크기가 작지만 평면거울보다 더 넓은 범위의 풍경을 담을 수 있다.

거울에 의한 상의 위치나 크기는 물체와 거울 사이의 거리와 거울의 곡률 반경에 따라 달라지는데, 간단한 기하학을 이용해 이들 사이의 관계를 구해 보도록 하자.



[그림 Ⅳ-37] 오목 거울에서 상의 위치를 찾기 위한 광선 추적

[그림 Ⅳ-37]에서 ΔQOH와 ΔQ′OH′이 닮은 삼각형이므로

$$\frac{\mathrm{QH}}{\mathrm{Q'H'}} = \frac{\mathrm{OQ}}{\mathrm{OQ'}} = \frac{a-r}{r-b}$$

이고, ΔQCH와 ΔQ′CH′이 닮은 삼각형이므로

$$\frac{\mathrm{QH}}{\mathrm{Q'H'}} = \frac{\mathrm{CQ}}{\mathrm{CQ'}} = \frac{a}{b}$$

❖ a, b, f 의 ±는 빛이 실제로 진행하는 공간에서는 (+)값을, 빛이 진행할 수 없는 공간에서는 (−)값을 가진다.

이다. 위 두 식으로부터 오목 거울의 곡률 반경과 물체의 위치, 상의 위치 사이에는

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{r} = \frac{1}{f} \qquad (\mathrm{Ⅳ}.\ 3\text{-}1)$$

의 관계가 성립함을 알 수 있다. 이 식을 거울 공식이라 한다. 또한, 물체의 크기와 상의 크기의 비, 즉 배율(m)이

$$m = \frac{\mathrm{Q'H'}}{\mathrm{QH}} = \frac{b}{a} \qquad (\mathrm{Ⅳ}.\ 3\text{-}2)$$

가 됨을 알 수 있다.

3. 굴절

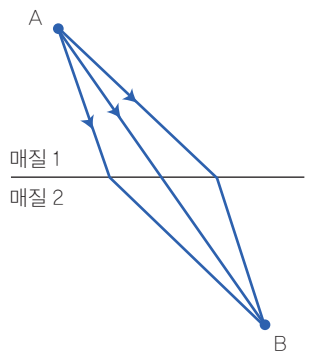
우리는 물에 넣은 젓가락이 꺾여 보이거나 물속의 물고기가 실제의 위치보다 떠올라 보이는 현상을 쉽게 접하게 된다. 이러한 현상들은 빛이 한 매질에서 다른 매질로 진행할 때 매질의 경계면에서 진행 방향이 바뀌는 빛의 굴절에 의해 나타나는 현상이다. 위의 두 가지 예 이외에도 실제로 빛의 굴절로 인해 우리 주변에는 수많은 현상이 나타나고 있고, 우리는 또한 실생활에 빛의 굴절을 이용하고 있다.

빛의 굴절은 매질에 따라 빛의 진행 속도가 다르기 때문에 일어난다. 물질 내에서의 빛의 속력(v)과 진공 중에서의 빛의 속력(c)의 비를 그 물질의 굴절률($n = c/v$)로 정의한다.

1) 굴절법칙

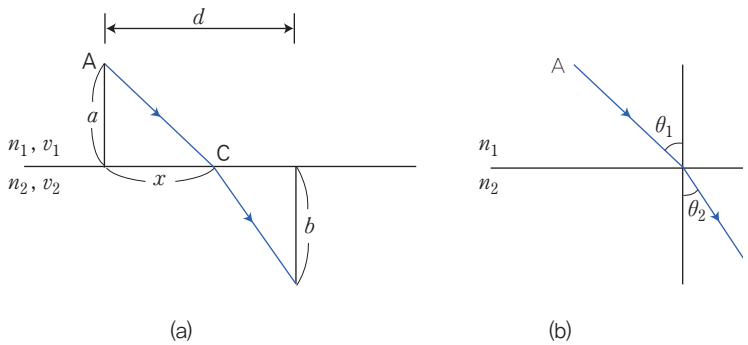
빛이 [그림 Ⅳ-38]과 같이 매질 1의 A지점에서 매질 2의 B지점으로 진

행할 때, 어떤 경로를 취하겠는가? 페르마의 최소 시간의 원리에 의하면 빛은 가장 시간이 작게 드는 경로를 택하여 진행한다. 따라서 매질 1과 매질 2가 같은 매질이라면 최단 거리 즉 직선 경로를 택하여 진행할 때 가장 작은 시간이 걸릴 것이다. 하지만 매질이 달라질 경우 매질 내에서 빛의 진행 속도가 달라지므로 최단 거리가 최소 시간을 의미하지는 않는다. 예를 들어 매질 1에서의 빛의 진행 속도가 매질 2보다 빠르다면 진행 속도가 빠른 매질 1에서 좀 더 진행한 후 매질 2를 진행하는 것이 즉, 경계면에서 굴절되어 진행하는 것이 시간을 단축할 것이라는 것을 예상할 수 있다.



[그림 Ⅳ-38] 굴절에서의 페르마의 원리 적용

[그림 Ⅳ-39] (a)와 같이 굴절률이 n_1인 매질 1에서 굴절률이 n_2인 매질 2로 빛이 진행한다고 하자. 매질 1에서의 빛의 진행 속도는 $v_1(=c/n_1)$이고 매질 2에서의 진행 속도는 $v_2(=c/n_2)$이다. A지점에서 출발한 빛이 매질 경계의 C지점에서 굴절되어 B지점에 도달한다고 할 때, 매질 1에서의 빛의 진행한 시간 t_1은



[그림 Ⅳ-39] 굴절 법칙의 유도

$$t_1 = \frac{\sqrt{x^2 + a^2}}{v_1}$$

이고, 매질 2에서의 빛의 진행한 시간 t_2는

$$t_2 = \frac{\sqrt{(d-x)^2 + b^2}}{v_2}$$

이다. 따라서 A지점에서 출발한 빛이 B지점에 도달되는데 총 걸린 시간은

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + a^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(d-x)^2 + {}^2}}{v_2} \qquad (\text{Ⅳ. } 3\text{-}3)$$

이다. 시간 t는 굴절되는 위치 즉 C지점의 위치에 따라 달라지므로 x의 함수이다. 이 식에서 시간 t가 최소가 되는 x는

$$\frac{dt}{dx} = 0$$

로부터 구할 수 있다. 식 (Ⅳ. 3-3)을 x에 대해 미분하여 정리하면

$$\frac{x}{v_1\sqrt{x^2+a^2}} = \frac{(d-x)}{v_2\sqrt{(d-x)^2+b^2}}$$

와 같은 식을 만족시키고, [그림 Ⅳ-39] (b)의 입사각(θ_1)과 굴절각(θ_2)으로 표현하면

$$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2} \qquad (Ⅳ.\ 3\text{-}4)$$

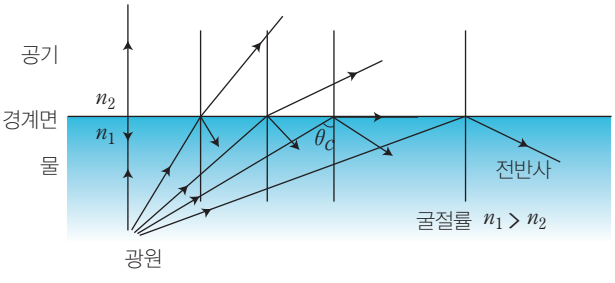
와 같다. 여기에 빛의 속도와 굴절률 사이의 관계식 $v = c/n$을 대입하면

$$n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2 \qquad (Ⅳ.\ 3\text{-}5)$$

을 얻는다. 이 식은 매질의 경계에서 빛의 진행 경로를 나타내는 것으로 굴절 법칙 또는 스넬(Snell)의 법칙이라고 한다.

2) 전반사

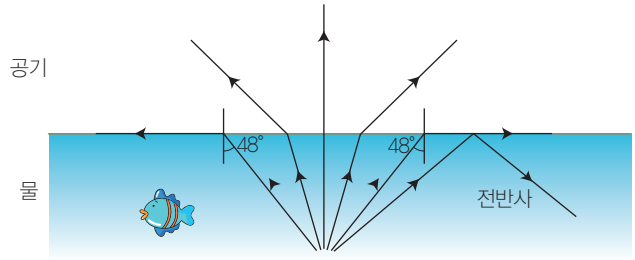
전반사는 굴절률이 큰 매질에서 작은 매질로 빛이 진행할 때 나타나는 현상이다. [그림 Ⅳ-40]과 같이 여러 개의 입사각으로 물에서 공기로 빛이 진행한다고 하자. 물의 굴절률이 공기의 굴절률 보다 크므로 빛은 입사각보다는 항상 더 큰 각으로 굴절되고, 입사각이 θ_c가 되었을 때 굴절각은 90°가 됨을 볼 수 있다. 굴절각이 90°가 되는 입사각 θ_c를 임계각이라고 한다. 물($n_1 = 1.33$)에서 공기($n_2 = 1$)로 빛이 진행하는 경우 임계각은 스넬의 법칙으로부터 약 48°이다. 입사각이 임계각보다 더 커지게 되면 스넬의 법칙을 만족하는 굴절각이 존재하지 않게 되고, 공기 중으로 입사하는 모든 빛은 물속으로 전반사하게 된다.



[그림 Ⅳ-40] 물속에서 공기 중으로 빛이 굴절할 때의 모습(전반사)

위와 같은 경우 공기 중에서 물을 내려다보면 물속이 어떻게 보일까? [그림 Ⅳ

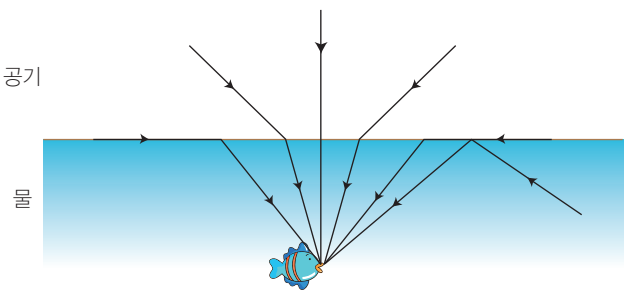
–41]과 같이 광원을 꼭지점으로 하여 원뿔 내부만이 밝아 보이고 나머지 부분은 어둡게 보인다.



[그림 Ⅳ–41] 물 위에서 광원을 보았을 때의 모습

예제 [그림 Ⅳ–41]에서 원판 모양의 불투명 물체를 물 위에 띄워 물 밖으로 나오는 빛을 완전히 차단시키려 한다. 광원이 수면으로부터 1 m 아래에 있다고 하면, 얼마만한 크기의 원판이 필요할까?

이제 역으로 수면 위를 쳐다보는 물고기의 입장이 되어 보자. [그림 Ⅳ–42]와 같이 물고기는 96°의 각도만 가지고도 물 위의 180° 풍경을 모두 볼 수 있다. 기상학 분야에서 180°의 전체 시야를 사진으로 찍기 위해 어안 렌즈(fish eye lens)라는 특수 렌즈를 사용하는데, 바로 이러한 점에서 렌즈의 이름이 유래되었다고 한다.



[그림 Ⅳ–42] 물고기가 밖의 세상을 보는 과정(어안 렌즈)

예제 굴절에 의한 자연현상의 예를 들고 그 이유를 설명하여 보자.

예제 공기 중에서는 물체가 선명하게 보이는 반면 물속에서는 물체가 희미하게 보인다. 이때 물안경을 쓰고 물체를 보게 되면 물체가 비교적 선명하게 보인다. 그 이유를 생각해 보자.

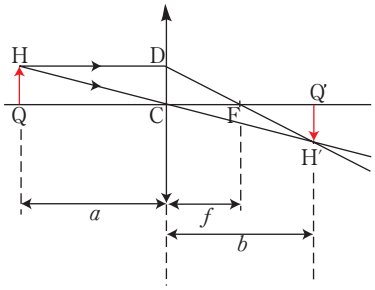
3) 렌즈에 의한 상

자연을 탐구하는 도구로써 널리 사용되고 있는 돋보기, 현미경, 망원경과 같은 광학 기기들은 렌즈와 거울의 조합으로 구성되어 있다. 따라서 이들

의 작동 원리를 이해하기 위해 렌즈에 의해 물체의 상이 형성되는 원리를 파악해 보자.

[그림 Ⅳ-43]은 초점이 F인 볼록렌즈 앞에 물체가 놓여 있는 경우이다. 물체의 한 점 H로부터 렌즈를 향해 진행하는 무수히 많은 광선 중 렌즈의 중심을 향해 입사하는 광선은 굴절 없이 그대로 직진하고, 렌즈 축에 평행하게 입사하는 광선은 초점을 통과하여 두 빛은 H′에서 교차하게 된다. 물체의 다른 점에서 나오는 광선들도 이와 마찬가지 과정을 통해 진행하게 되므로 결국 렌즈에 의해 Q′H′의 도립 실상이 형성되게 된다.

❖ 기호 ↕는 볼록렌즈를 나타내는 기호이다.



[그림 Ⅳ-43] **볼록렌즈에서 상의 위치를 찾기 위한 광선 추적**

렌즈에 의한 상의 위치나 크기는 물체와 렌즈 사이의 거리와 렌즈의 초점 거리 사이의 관계에 의해 결정된다. 물체와 렌즈의 위치 그리고 여기에 따른 상의 위치나 크기는 간단한 기하학을 이용해 구할 수 있다. [그림 Ⅳ-43]에서 ΔQCH와 ΔQ′CH′는 닮음 삼각형이므로

$$\frac{\mathrm{QH}}{\mathrm{Q'H'}} = \frac{\mathrm{CQ}}{\mathrm{CQ'}} = \frac{a}{b}$$

이고, ΔCFD와 ΔQ′FH′이 닮음 삼각형이므로

$$\frac{\mathrm{CD}}{\mathrm{Q'H'}} = \frac{\mathrm{FC}}{\mathrm{FQ'}} = \frac{f}{b-f}$$

이다. 이 식으로부터 물체와 상의 위치, 렌즈의 초점 거리 사이에 다음과 같은 렌즈 공식

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \qquad (\text{Ⅳ. } 3\text{-}6)$$

의 관계가 성립하고, 물체의 크기와 상의 크기 사이에는 배율(m)

$$m = \frac{\mathrm{Q'H'}}{\mathrm{QH}} = \frac{b}{a} \qquad (\text{Ⅳ. } 3\text{-}7)$$

가 성립함을 알 수 있다.

실험 직육면체 유리판의 굴절률 측정

준비물 흰 종이(A4), 유리판, 자

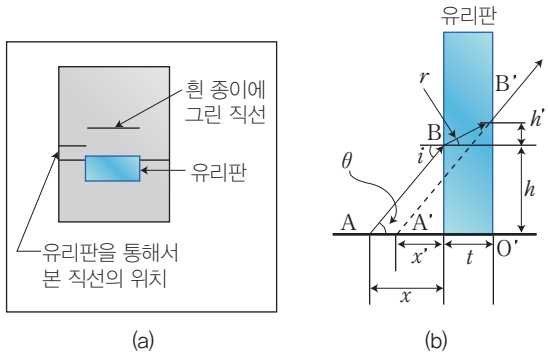
과정

1. [그림 Ⅳ-44]와 같이 종이에 직선을 그린 다음 유리판을 통해 보이는 직선이 얼마나 가깝게 보이는지 구한다.
2. 각이 매우 작은 경우에 $\sin i$와 $\tan i$의 값이 근사적으로 같다는 것을 이용하면 다음의 관계가 성립한다.

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \approx \frac{\tan i}{\tan r}$$

$$= \frac{h/x}{h'/t} = \frac{t}{x}\frac{h}{h'} = \frac{t}{t-(x-x')}$$

3. 유리판의 두께와 직선의 위치가 줄어든 거리를 측정하면 유리의 굴절률을 측정할 수 있다.



[그림 Ⅳ-44] **유리판의 굴절률 측정**

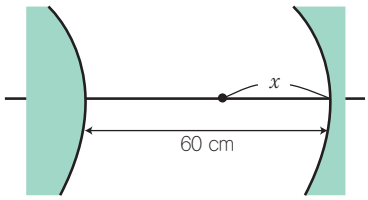
논의

1. 직육면체의 유리 기둥의 굴절률을 측정할 수 있는 새로운 실험 방법에 대해 생각해 보자.

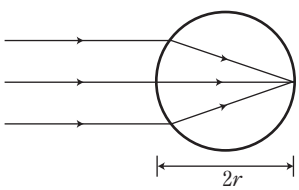
2. 위 실험에서 가장 큰 오차는 어느 부분에서 발생하겠는가?

연 습 문 제

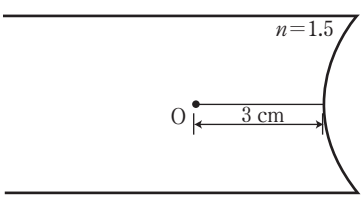
1. 볼록 거울과 오목 거울이 오른쪽 그림과 같이 놓여있다. 두 거울의 곡률 반지름이 40 cm이고 광원은 오목 거울로부터 x 만큼 떨어져 있다. 광원에서 나온 광선이 볼록 거울에서 반사한 다음 다시 오목 거울에서 반사하여 광원이 있는 곳으로 되돌아왔다. 거리 x는 얼마인가?



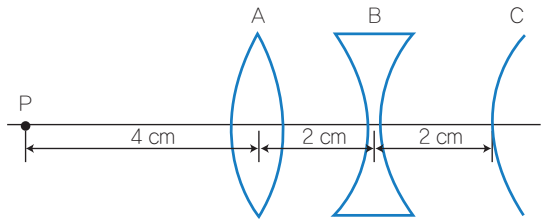
2. 평행광선이 그림과 같이 굴절률 n인 투명하고 속이 찬 공에 입사한다. 이 광선의 상이 공의 뒷면에 모아졌다면 공의 굴절률은 얼마인가?



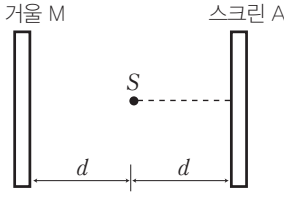
3. 그림과 같이 점광원 O가 굴절률 1.5인 유리 속에 있다. 오목 면의 곡률반지름이 1 cm일 때 상의 위치 i를 구하여라.



4. 다음 그림에서 A, B는 렌즈이고 C는 구면거울일 때 물체 P의 상의 위치를 구하여라. (단, $f_A = 2$ cm, $f_B = 3$ cm, $R_C = 6$ cm이다.)



5. 점광원 S가 스크린 A로부터 거리 d인 곳에 있다. 이 때 그림처럼 점광원의 뒤에 거리 d인 곳에 완전 반사하는 거울 M을 놓으면 스크린 중심 근처에서의 빛의 세기는 거울이 없을 때 점 S에서 빛의 세기는 몇 배가 되는가?



4 간섭

왼쪽 그림은 비눗방울 표면에 나타난 다양한 색깔의 간섭무늬이다. 이러한 간섭무늬는 매우 얇은 비눗방울의 위쪽 면과 아래쪽 면에서 반사된 파동들이 중첩되어 위치에 따라 다른 파장의 빛들이 보강간섭하기 때문에 나타난다. 이 밖에도 파동의 중첩 현상으로 설명되어지는 현상들 중에 회절, 편광, 정상파 등이 있다. 이 단원에서는 파동의 중첩 원리에 대하여 살펴보고, 관련된 자연 현상을 이들을 이용하여 설명하는 방법에 대해 알아보자.

1. 파동의 중첩

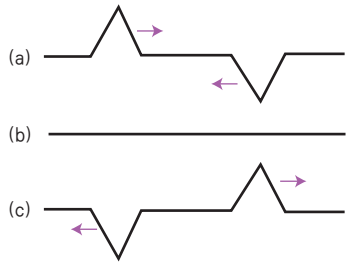
1) 파동의 중첩의 원리

둘 또는 그 이상의 파동들이 공간상의 한 지점에서 만나게 될 때 어떠한 일이 일어나는가에 대한 이해로부터 간섭, 회절, 편광 등의 현상을 잘 설명할 수 있다.

한 지점에서 두 개의 전자기파가 중첩하게 되면, 그 지점에서 합성파의 전기장의 크기는

$$E(x, t) = E_1(x, t) + E_2(x, t) \qquad (\text{Ⅳ}.\ 4\text{-}1)$$

이다. 이것을 중첩의 원리라고 한다. 즉, 어떤 지점에서 파동들이 중첩하면 그 지점에서 함수 값은 개개의 파동들의 함수 값들의 대수적 합과 같다는 의미이다.



[그림 Ⅳ-45] 변위와 진행방향이 반대인 두 개의 펄스가 진행하는 모습

[그림 Ⅳ-45]와 같이 두 개의 줄 파동들이 만나면, 어느 시간에 [그림 Ⅳ

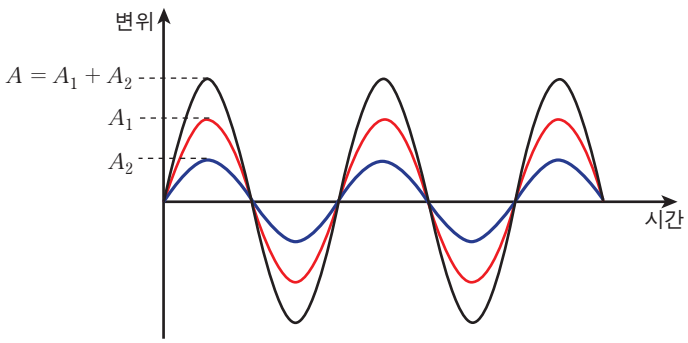
−45] (b)와 같이 줄이 평평해져 파동이 사라졌다가 시간이 경과하면, (c)와 같이 원래의 모습이 다시 나타나며 가던 방향으로 전파한다.

예제 [그림 Ⅳ−45] (b)에서 파동이 사라져 버린 것 같은데 시간이 경과 후 (c)와 같이 되는 이유는 무엇이라고 생각하는가?

두 개의 파동 함수를 수학적으로 더하는 방법에는 대수적 방법, 복소수 방법, 위상자 덧셈법 등이 있다.

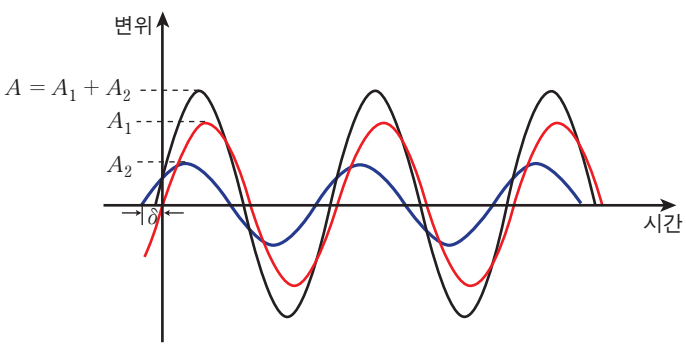
2) 대수적 덧셈법

진행하는 두 파동이 서로 중첩될 때, 진동수와 위상이 같은 두 파동이 만나면 두 파의 합성 진폭은 [그림 Ⅳ−46]과 같이 $A = A_1 + A_2$가 된다.



[그림 Ⅳ−46] 진동수와 위상이 같은 두 파동의 중첩

진동수는 같지만 위상이 δ 만큼 다른 두 파동의 중첩이 [그림 Ⅳ−47]에 나타나 있다. 이 때 두 파동 사이의 위상차가 δ라고 하면, 한 파동이 $\psi_1 = A_1\sin(kx - \omega t)$이면, 다른 한 파동은 $\psi_2 = A_2\sin(kx - \omega t + \delta)$가 된다.



[그림 Ⅳ−47] 진동수는 같고 위상이 다른 두 파동의 중첩

❖ 빛의 경우에는 진동수가 너무 커서 보강간섭의 경우에 밝게 보이나, 수면파의 경우는 보강간섭할 때 진동수가 낮아 우리 눈으로 물결이 심하게 요동치는 것을 볼 수 있다.

[그림 Ⅳ-46]와 [그림 Ⅳ-47]에서 알 수 있는 것은 같은 진동수를 갖는 파동들이 중첩되면 합성파 역시 같은 진동수로 진동한다는 것이다.

가시광선에 대한 전자기파의 진동수는 10^{14}Hz 정도로 매우 크기 때문에 우리 눈은 시간에 따라 변하는 양을 측정하지 못하고 시간에 대한 평균값을 측정하게 된다. 따라서 우리 눈은 합성파의 세기 (또는 강도) 즉, 진폭의 제곱에 비례하는 양을 측정하게 된다. 따라서 두 파동의 합성파의 세기 I는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I \propto < (\psi_1 + \psi_2)^2 > \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{-}2)$$

여기서, <>는 시간에 대한 평균을 의미한다.

실제로 파동 $\psi_1 = A_1\sin(kx - \omega t)$과 파동 $\psi_2 = A_2\sin(kx - \omega t + \delta)$를 식 (Ⅳ. 4-2)에 대입하면

$$\begin{aligned} I \propto & < [A_1\sin(kx - \omega t) + A_2\sin(kx - \omega t + \delta)]^2 > \\ & = < [A_1\sin(kx - \omega t)]^2 + [A_2\sin(kx - \omega t+\delta)]^2 \\ & \quad + 2A_1A_2\sin(kx - \omega t)\sin(kx - \omega t + \delta) > \\ & = I_1 + I_2 + I_{12} \end{aligned} \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{-}3)$$

이다. I_1과 I_2는 각각의 파동의 세기이고 I_{12}는 간섭항이라고 한다. 위의 결과로부터 두 파동을 중첩시키면 단순히 두 파동의 강도 합 $I_1 + I_2$에 비해 I_{12}의 부호에 따라 더 어두워질 수도 있고, 더 밝아질 수도 있다. 즉, 중첩이 되면 어떤 조건하에서 파동들이 서로를 강하게 또는 약하게 만들 수 있음을 의미한다.

간섭항을 정리하여 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{12\,1} &= < 2A_1A_2\sin(kx - \omega t)[\sin(kx - \omega t)\cos\delta + \cos(kx - \omega t)\sin\delta\ ] > \\ &= 2\sqrt{I_1 I_2}\ \cos\delta \end{aligned} \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{-}4)$$

여기서 $< \sin^2(kx - \omega t) > = \frac{1}{2}$와 $< \sin(kx - \omega t)\cos(kx - \omega t) > = 0$을 이용하였다. 따라서 간섭 결과 우리 눈에 감지되는 빛의 세기는

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\ \cos\delta \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{-}5)$$

이다. 두 파동의 위상차가 $\delta = 0$일 경우, 빛의 강도가 최대가 되어

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{-}6)$$

가 되는데, 특히 간섭하는 두 광의 세기가 같은 $I_1 = I_2$ 일 때, [그림 Ⅳ-48]과 같이 $I_{max} = 4I_1$이 된다.

반면에 두 파동의 위상차가 $\delta = 180^\circ$일 경우에는, 빛의 강도는 최소가 되어

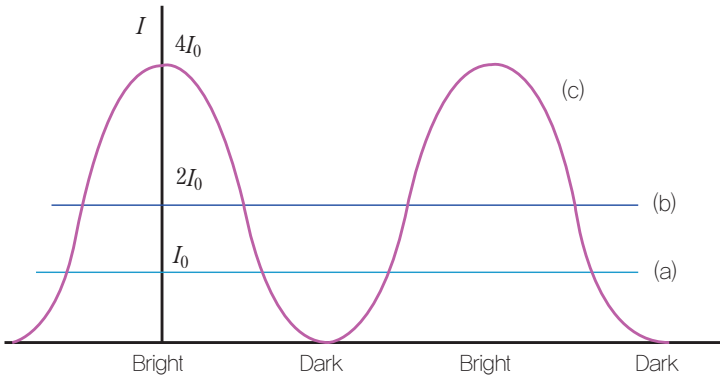
$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \qquad (Ⅳ.\ 4-7)$$

와 같이 되고, $I_1 = I_2$ 일 때, $I_{min} = 0$이 된다.

결국 $I_1 = I_2 = I_0$라면, 두 지점 사이의 점에서 빛의 강도는

$$I = I_0 + I_0 + 2I_0\cos\delta = 2I_0(1+\cos\delta) = 4I_0\cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \qquad (Ⅳ.\ 4-8)$$

가 된다.



[그림 Ⅳ-48] **(a) 한 광원의 세기 (b) 두 광원이 간섭을 일으키지 않을 때의 세기 (c) 두 광원이 간섭을 일으킬 때의 세기**

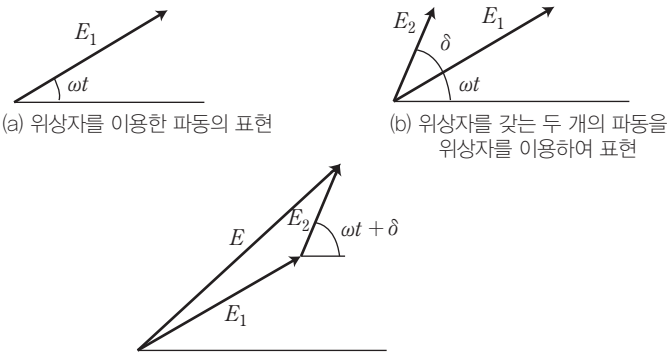
즉, 진동수와 진폭이 같은 두 파동이 중첩될 때 위상차(δ)가 0, 2π, 4π, … 가 되면 그 밝기는 각각의 파동의 밝기의 4배가 되어 **보강간섭**(constructive interference)이 일어나고, 위상차(δ)가 π, 3π, 5π, … 가 되면 그 밝기는 0이 되면서 **소멸간섭**(destructive interference)이 일어나게 된다. [그림 Ⅳ-48] (b)로부터 비결맞음 빛인 경우에는 두 개의 빛이 합쳐져 $2I_0$이 되는데, 간섭이 일어나는 경우에는 최대 4배의 세기가 얻어진다. 물론 두 개가 간섭하여 어두운 지점도 나타나기 때문에 전체적으로 평균 에너지 값은 비결맞음 빛을 두 개 합치는 경우와 같음을 알 수 있다. 따라서 보강간섭이나 소멸간섭이란 빛이 더 많이 생성되거나 파괴되는 것이 아니라 단지 빛이 재분배되는 것이다.

3) 위상자 덧셈법

공간상의 한 지점에서 진행파의 함수 값 변화는 [그림 Ⅳ-49]와 같은 위상자 공간을 이용하여 표현하면 이해하기가 용이하다. 즉, 진폭을 화살표의 크기로 위상을 x축과 이루는 각도로 나타내면, 위상이 시간에 따라 증가하기 때문에 화살표가 ω의 각속도로 회전한다고 생각할 수 있다. 어느 순간에 파동의 함수 값은 그 순간에 지시하는 화살표의 x축이나 y축 성분에 해당하는데, 여기서는 y축 성분을 택하기로 하자.

두 개의 파동이 중첩되는 경우에는 [그림 Ⅳ-49] (b)와 같이 그릴 수가 있으며, 두 파동은 같은 진동수를 가지기 때문에 두 화살표는 일정한 각도의 차이를 두고 같은 각속도로 회전한다. 어느 순간에 두 화살표의 합은 [그림 Ⅳ-49] (c)와 같이 나타낼 수 있기 때문에 마치 두 벡터의 합과 같다. 따라서 합 벡터가 같은 각속도로 회전하는 것으로 두 파동의 합을 나타낼 수 있게 된다. 다시 말하면, 진동수가 같은 조화파를 중첩시키면 합성파도 역시 같은 진동수를 갖는 조화파가 된다.

❖ 합 벡터의 크기가 합성파의 진폭을 의미한다.



(a) 위상자를 이용한 파동의 표현

(b) 위상자를 갖는 두 개의 파동을 위상자를 이용하여 표현

(c) 두 파동의 중첩은 벡터의 합과 같음

[그림 Ⅳ-49] 위상자 덧셈법

두 파동이 다음과 같이 주어진 경우에

$$E_1 = E_{01}\sin(\omega t) \qquad (Ⅳ.\ 4\text{-}9)$$

$$E_2 = E_{02}\sin(\omega t + \delta) \qquad (Ⅳ.\ 4\text{-}10)$$

합성파의 진폭 E_0는

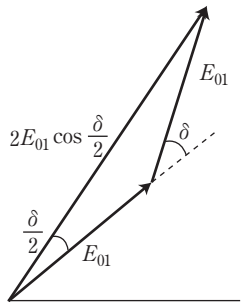
$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos(\delta) \qquad (Ⅳ.\ 4\text{-}11)$$

이 되어 앞서 구한 식 (Ⅳ. 4-5)와 동일함을 볼 수 있다.

$E_{01} = E_{02}$라면 [그림 Ⅳ-50]의 합성파의 진폭은 $E_0 = 2E_{01}\cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$이다. 따라서

$$I = 4I_1\cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \qquad (Ⅳ.\ 4\text{-}12)$$

로 주어지므로 여러 개의 파동들이 중첩하는 경우에도 같은 원리를 적용하여 벡터들을 연결한 후에 최종적인 중첩의 결과의 결과는 원점에서 마지막 벡터의 끝 지점을 연결하는 화살표의 길이와 같다.



[그림 Ⅳ-50] **진폭이 같은 두 파동의 중첩에 대한 위상자 덧셈**

예제 어떠한 빛을 이용하여도 간섭무늬가 잘 보일까? 비눗방울이나 기름 막에서는 간섭무늬가 잘 보이나 유리창에서는 간섭무늬가 잘 보이지 않는 이유는 무엇일까? 왜 레이저를 이용하면 유리창에서도 간섭무늬를 볼 수 있을까?

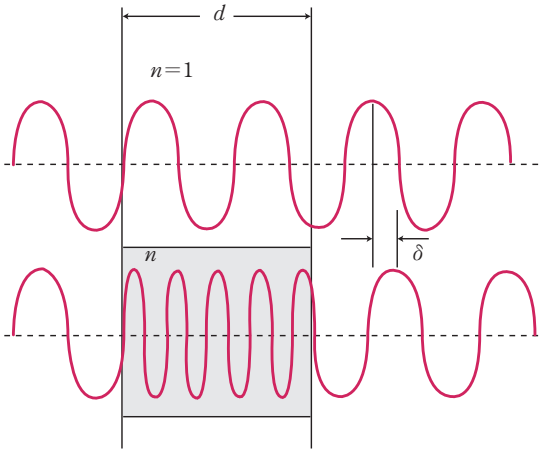
4) 광경로차와 위상차

두 개의 진동수가 같은 단색광이 초기 동일 위상으로 전파하다가 임의의 공간에서 만났을 때, 경로차 Δ와 위상차 사이에는

$$\frac{n\Delta}{\lambda_0} = \frac{\delta}{2\pi} \qquad (Ⅳ.\ 4\text{-}13)$$

의 관계가 있다. 여기서 λ_0는 진공 중에서 빛의 파장을 나타내고, n은 굴절률을 나타낸다. 대부분의 간섭무늬는 같은 매질에서 경로차에 의해 결정되는 위상차에 의하여 결정되지만 때로는 굴절률 차이에 의한 위상차로 인하여 결정될 때도 있다. [그림 Ⅳ-51]은 경로차와 굴절률 차이에 의한 위상차를 나타낸다. 경로차이에 굴절률이 곱하여진 항, 즉 $n\Delta$를 광경로차라고 한다. 결과적으로 위상차는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n-1)d \qquad (\text{Ⅳ}.\ 4\text{-}14)$$



[그림 Ⅳ-51] 경로차와 굴절률 차이에 의한 위상차

5) 파동의 중첩으로 설명되는 현상들

간섭이라는 용어는 매우 폭넓게 사용하는 용어이며 두 개 이상의 파동이 중첩되는 현상을 말한다. 따라서 파동의 중첩 현상과 관련한 모든 현상에 간섭이라는 용어를 사용할 수 있다.

간섭무늬는 시간 또는 공간적으로 분리된 두 개의 파동이 같은 방향으로 진행하면서 중첩되어 시간 또는 공간적으로 보강과 상쇄가 교대로 나타나 생긴 무늬를 말한다. 따라서 정상파나 맥놀이 등은 파동이 중첩되어 나타나는 현상이지만 간섭이라는 용어를 사용하지 않는다. 한편 회절은 파동이 진행하다가 장애물을 만나 진행 방향이 바뀌는 현상을 말한다. 그러므로 진행 방향이 꺾이는 현상에 국한하여 회절을 말하면 간섭과 상당한 차이가 있는 것처럼 보인다. 그러나 많은 수의 파동들이 진행 방향이 꺾이게 되면 어느 곳에는 많은 수의 파동들이 도달하게 되고 중첩되는 현상이 나타나게 된다. 따라서 회절에 의하여 꺾인 파동들도 중첩되어 위치에 따라 강한 보강과 상쇄가 일어나 회절무늬가 나타난다. 파동들의 중첩에 의하여 회절무늬가 만들어지기 때문에 간섭무늬와 회절무늬를 구분하는 물리적인 개념은 중첩이라는 관점에서 보면 아무런 차이가 없게 되는 것이다.

두 개 또는 그 이상의 파동들이 중첩된 결과 나타나는 자연 현상들을 설명하기 위한 조건들을 요약하면 [표 Ⅳ-2]와 같다. [표 Ⅳ-2]에서 알 수

있는 것과 같이 두 개의 편광이 다른 두 파동이 중첩하여 또 다른 편광을 만드는 것을 제외하고 파동의 중첩은 같은 편광 성분을 갖는, 즉 하나의 진동 성분만 갖는 파동들의 중첩으로 다루는 것으로 충분하다.

[표 Ⅳ-2] 파동의 중첩으로 설명되는 현상들

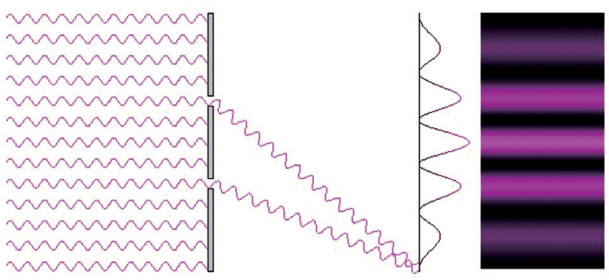
	진동수	진행방향	편광	중첩하는 파동
간섭	같음	같음	같음	(보통) 2개
회절	같음	같음	같음	무수히 많음
편광	같음	(보통)같음	다름	2개
정상파	같음	반대	같음	2개
맥놀이	약간 다름	무관함	같음	2개

2. 간섭

1800년경 영국의 물리학자 토마스 영(T. Young)은 빛은 파동이라는 것을 증명하기 위한 실험에서 빛의 간섭현상을 이용하였다. 빛의 파장, 굴절률 또는 미소거리 등을 측정하기 위하여 빛의 간섭을 이용한 방법이 일상적으로 사용된다.

1) 이중 슬릿에 의한 간섭

서로 가깝게 있는 두 개의 좁은 슬릿을 광파가 통과할 때, 두 슬릿으로부터 빠져 나온 두 광파는 회절되어 스크린에서 중첩하게 된다. 스크린에는 [그림 Ⅳ-52]와 같이 밝은 부분과 어두운 부분이 교대로 보이게 된다. 밝은 부분은 이중 슬릿으로부터 나온 두 광파의 위상이 같아서($\delta = 0$) 보강간섭을 일으킨 지점이고, 어두운 부분은 두 광파의 위상이 서로 반대여서 ($\delta = 180°$)소멸간섭을 일으킨 지점이다.



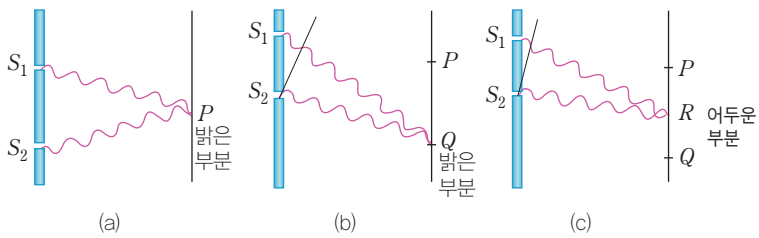
[그림 Ⅳ-52] 영의 이중 슬릿에 의한 간섭무늬

❖ 중앙으로부터 멀어질수록 보강간섭하는 부분의 밝기가 어두워지는 것을 볼 수 있는데 이는 회절에 의해 빛의 세기가 약해진 것이 주요한 원인이 되지만, 경로차이가 결맞음 거리에 가까워지기 때문에 간섭항의 기여가 작아지는 요인도 작용한다.

스크린에 나타난 간섭무늬의 중앙부분에는 밝은 영역이 있는데(밝은 무늬들 중에서 중앙에 있는 밝은 무늬) 이는 광파가 [그림 Ⅳ-53] (a) 처럼 정확하게 같은 거리를 나아가서 같은 위상으로 스크린에 도달하기 때문이다. 가운데서부터 아래쪽으로 첫 번째 밝은 영역을 보면, [그림 Ⅳ-53] (b)에서 보듯이 위쪽 슬릿(S_1)에서 나온 광파는 아래쪽 슬릿(S_2)에서 나온 것보다 정확히 한 파장 만큼 더 먼 거리를 진행한다. 경로차가 한 파장 만큼 차이가 나도 두 광파의 위상은 여전히 같게 된다. 이와 유사하게 스크린에 아래쪽으로 연속적으로 밝은 부분들이 나오는 곳을 보면, 위쪽 슬릿(S_1)으로 나온 광파가 아래쪽 슬릿(S_2)으로 나온 것보다 파장의 2, 3, 4,… 배 만큼 더 먼 거리를 진행하므로 경로차가

$$\Delta = m\lambda \quad (m = 0,\ 1,\ 2,\ 3\cdots) \qquad (\text{Ⅳ}.\ 4\text{-}15)$$

나서 보강간섭하기 때문이다.



[그림 Ⅳ-53] **스크린의 위치에 따라 경로차에 의한 위상차로 인해 간섭무늬가 결정됨**

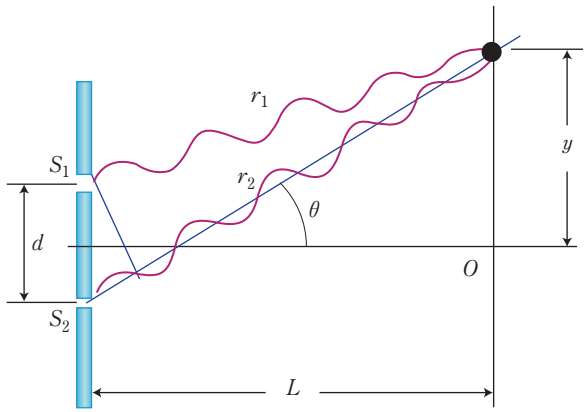
간섭무늬의 중앙에서 아래쪽으로 첫 번째 어두운 부분은 [그림 Ⅳ-53] (c)에서 알 수 있듯이 위쪽 슬릿(S_1)에서 나온 광파가 아래쪽 슬릿(S_2)에서 나온 광파보다 반파장($\lambda/2$) 더 진행한다. 결국 두 광파의 위상은 180° 차이가 나게 되어 소멸간섭을 하게 된다. 아래쪽으로 두 번째 어두운 부분에서는 $3\lambda/2$ 만큼 더 길게 된다. 따라서 연속적으로 아래쪽의 어두운 부분에서는 위쪽 슬릿(S_1)에서 나온 광파가 아래쪽 슬릿(S_2)에서 나온 광파보다 파장의 1/2, 3/2, 5/2, …배 만큼 더 진행하므로 경로차가

$$\Delta = \frac{\lambda}{2}(m+1) \quad (m = 0,\ 1,\ 2,\ 3\cdots) \qquad (\text{Ⅳ}.\ 4\text{-}16)$$

나서 소멸간섭하기 때문이다.

[그림 Ⅳ-54]와 같이 슬릿 사이의 간격을 d, 스크린 위의 임의의 한 점과 두 슬릿 사이의 거리를 각각 r_1, r_2라 하면, 경로차 Δ는 $\Delta = r_2 - r_1 \approx d\sin\theta$로 표현된다.

❖ 경로차 $\Delta \approx d\sin\theta$의 근사는 $L \gg d$인 경우로 슬릿에서 나와 스크린 상의 임의의 지점에서 만난 두 광파는 서로 평행하다고 말할 수 있다.



[그림 Ⅳ-54] 이중 슬릿에서 스크린의 위치에 따른 경로차

스크린 상의 한 점은 θ에 의하여 결정되므로 관측점이 달라졌다는 말은 θ 값이 다르다는 의미이다. 따라서 관측점이 달라지면 경로차가 바뀌게 된다.

두 슬릿을 통과한 빛들은 같은 위상의 점광원으로 작용하기 때문에 스크린 상의 임의의 점에서 두 빛의 최대 보강간섭이 일어나려면,

$$\Delta = d\sin\theta = m\lambda \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{-}17)$$

이어야 하고, 최대 소멸간섭이 일어나려면

$$\Delta = d\sin\theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{-}18)$$

를 만족하여야 한다. 여기서 $m = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \cdots$이다. 전형적인 이중 슬릿 실험에서는 각($\theta$)이 작으며, θ와 d를 측정하기 쉬우므로 파장을 결정하는데 영의 실험을 이용할 수 있다. 스크린에서 m번째 밝은 무늬까지의 거리를 y_m이라고 하면

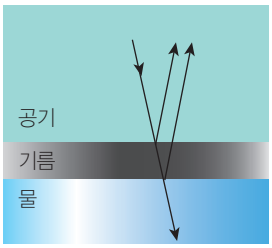
$$y_m = L\tan\theta_m \approx L\theta_m \approx L\sin\theta_m = L\frac{m\lambda}{d} \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{-}19)$$

가 되어, L, d, y_m을 측정하면 빛의 파장을 구할 수 있다. 또한 두 슬릿 중 한쪽 뒤에 굴절률이 다른 투명한 유리조각을 놓으면, 유리의 굴절률을 측정할 수 있다. 한편 파장이 다른 두 빛이 이중 슬릿에 입사된다면 장파장

쪽 빛의 보강간섭 위치가 단파장 쪽보다 더 바깥쪽에 있게 된다.

예제 밝은 무늬의 폭은 θ가 커짐에 따라 어떤 변화가 있겠는가?

2) 얇은 박막에 의한 간섭



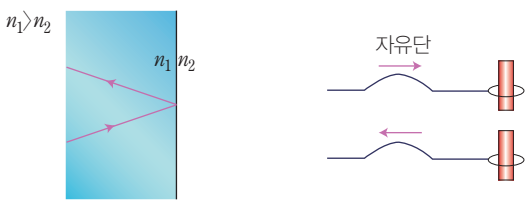
[그림 Ⅳ-55] 얇은 기름 막에서 간섭

젖은 도로 위에 떨어진 기름이나 휘발유 위에 나타난 여러 가지 색깔은 얇은 막 간섭에 의한 것이다. 비춰진 빛의 일부분은 기름의 얇은 박막 윗면에서 반사되고, 다른 일부분은 아랫면에서 반사된다.

[그림 Ⅳ-55]와 같이 기름방울이 물 위에 떨어져 기름막이 형성되면 아랫면에서 반사된 광파는 기름의 윗면에서 반사된 광파보다 더 먼 거리를 진행하여 중첩된다. 결과적으로 기름막 표면에서 반사된 광파와 더 진행하여 아랫면에서 반사된 광파 사이의 위상이 서로 같으면 보강간섭이 일어나고, 위상이 180°의 차이가 나면 소멸간섭이 일어난다.

광파가 진행하면서 다른 매질을 만났을 때 그 경계면에서 일부는 반사하고 일부는 굴절하게 된다. 투과할 때에는 매질의 굴절률에 관계없이 위상의 변화가 없지만, 반사할 때에는 두 매질의 굴절률에 따라서 위상이 달라진다.

(a) 고정단에서 반사에 의한 180°의 위상 변화

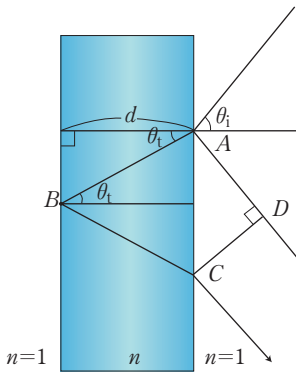


(b) 자유단에서 반사에 의한 0°의 위상 변화

[그림 Ⅳ-56] 고정단과 자유단에서 반사에 따른 위상 변화

[그림 Ⅳ−56] (a)의 경우처럼, 소한 매질에서 밀한 매질로 광파가 진행할 때 그 경계면에서 위상은 180° 바뀌게 된다. 이것은 고정단에서의 반사현상으로 이해할 수 있다. 반면에 [그림 Ⅳ−56] (b)의 경우처럼 밀한 매질에서 소한 매질로 광파가 진행할 때 그 경계면에서의 반사는 위상 변화가 없다. 이것은 자유단에서의 반사현상으로 이해할 수 있다.

수식적으로 접근하면 [그림 Ⅳ−57]에서 보듯이 경계 윗면에서의 반사와 경계 아랫면에서의 반사 사이의 경로 차이는 $2d\cos\theta_t$가 된다. 그런데 여기서 고려되어야 할 파장은 공기 중의 빛의 파장이 아니라 얇은 막 내의 빛의 파장이다. 따라서 윗면과 아랫면 사이에 있는 매질의 굴절률을 고려하여 두께 d는 광학적 두께 nd로 대치된다.



[그림 Ⅳ−57] 비누막에 의한 간섭

얇은 막에 의한 간섭현상에 대한 광경로차 Δ에 대한 기본식은

❖ $\Delta = n(\overline{AB}+\overline{BC})-\overline{AD}$

$$\Delta = 2nd\cos\theta_t = \frac{\lambda}{2}\,2m \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{−}20)$$

일 때 보강간섭이 일어나고

$$\Delta = 2nd\cos\theta_t = \frac{\lambda}{2}\,(2m-1) \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{−}21)$$

일 때 소멸간섭이 일어난다.

파동의 반사에서 설명했듯이 광파가 진행하면서 다른 매질을 만났을 때 그 매질의 굴절률에 따라 경계면에서 반사에 의한 위상변화가 180° 일어날 수도 있고, 일어나지 않을 수도 있다. 만약에 빛이 공기 중에 있는 얇은 막의 두 면에서 반사한다면, 윗면에서의 반사한 빛은 외부반사에 의한 위상변화가 180° 생길 것이다. 그러나 아랫면에서의 반사한 빛은 내부반사로서 위상변화가 생기지 않는다. 이처럼 한 번의 위상변화가 있을 경우에는 반사에 따른 위상 변화 180°를 거리차로 환산한 $\frac{\lambda}{2}$를 더해 주어야 한다. 따라서

$$\Delta = 2nd\cos\theta_t + \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}\,2m$$

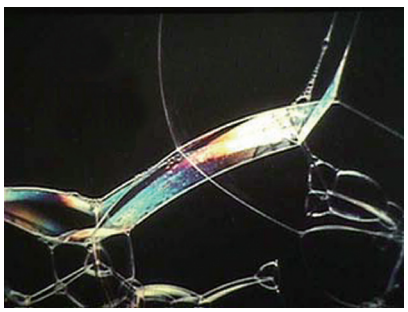
$$2nd\cos\theta_t = \frac{\lambda}{2}(2m-1) \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{−}22)$$

에서 보강간섭이 일어나며

$$\Delta = 2nd\cos\theta_t + \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}(2m-1)$$

$$2nd\cos\theta_t = \frac{\lambda}{2}(2m) \qquad (\text{Ⅳ. } 4\text{-}23)$$

에서 소멸간섭이 일어나게 된다.



[그림 Ⅳ-58] 비눗막에 의한 간섭 현상

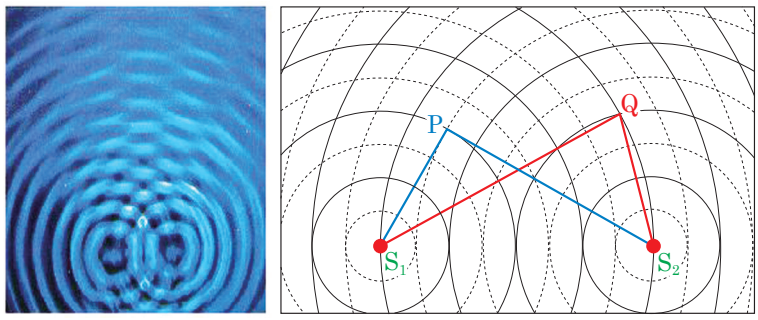
빛의 파장, 얇은 막의 두께, 그리고 얇은 막에 입사되는 빛의 각도에 의해서 보강간섭인지, 소멸간섭인지 결정된다. 단색광의 빛을 얇은 막에 비추면 막 위의 여러 곳에서 밝은 영역과 어두운 영역을 보게 될 것이다. 반면에 백색광이라면 막 위에서 위치마다 서로 다른 색깔을 보게 될 것이다. 즉, 얇은 막의 어떤 위치에서는 막의 두께와 빛의 입사각도로 인해 빨간색 파장의 보강간섭이 일어날 것이고, 다른 위치에서는 녹색 파장의 보강간섭이 일어날 것이며, 이런 식으로 [그림 Ⅳ-58]처럼 위치마다 다른 색의 보강간섭이 일어날 것이다.

대부분의 안경에는 무반사 코팅이 되어 있는데 이는 역시 상쇄간섭을 이용한 것이다. 안경 유리 위에 두께가 $\frac{\lambda}{4}$인 얇은 막을 코팅하는데, 코팅 재료는 공기보다 굴절률이 크고 유리보다 작은 것을 사용한다. 이와 같이 하면 반사에 따른 위상차는 없고 경로차에 따른 위상차가 180°나게 된다.

3) 수면파의 간섭

호수에 돌을 던지면 돌이 떨어진 지점을 중심으로 동심원의 파선이 퍼져 나가는 것을 경험해 보았을 것이다. 이러한 물의 파동 즉, 수면파는 적당한 크기의 파장과 진동수를 가지고 있어 공간적으로 펼쳐진 파동의 모습이나 시시각각 변하는 한 지점에서의 수면의 진동을 눈으로 쉽게 볼 수 있어서 파동의 여러 현상을 설명하는 좋은 예가 된다.

수면파의 간섭을 보여주는 장치로 물결통 실험장치(ripple tank)가 있다. [그림 Ⅳ-59] (a)의 사진처럼 동시에 같은 진동수로 두 지점에 파동을 발생시키면 이 지점으로부터 수면파가 동심원으로 퍼져 나간다. 이때 파가



(a) (b)

[그림 Ⅳ-59] **두 구면 수면파에 의한 간섭**

만들어지는 두 지점의 거리가 적당하면 지역에 따라 진동이 크게 일어나는 보강간섭의 영역과, 진동이 적게 일어나는 소멸간섭의 영역이 생겨난다.

빛의 경우에 보강간섭 지점은 우리 눈이 전기장의 진동을 관찰하지 못하고 시간 평균을 하여 밝게 보이지만 수면파의 경우에 보강간섭 지점은 큰 진폭을 가지고 위아래로 진동하는 것을 눈으로 확인할 수 있다. 그 이유는 시간에 따른 물의 높이 변화가 눈이 충분히 따라갈 만큼 느리기 때문이다.

두 구면파의 진동수를 동일하게 하면서 물을 진동시키는 시간차(위상차)를 일정하게 유지한다면 보강간섭이나 소멸간섭의 영역이 변하지 않고 일정하다.

[그림 Ⅳ-59] (b)에서 두 파원 S_1, S_2로부터 경로차가 λ의 정수배인 Q지점에서는 $\Delta = |S_1Q - S_2Q| = \frac{\lambda}{2}(2m)$이 되고, 보강간섭이 일어난다. 파면이 실선과 실선이 만났다는 의미는 위상차가 없다는 것을 의미한다. 반면에 두 파원 S_1, S_2로부터 점 P까지의 경로차는 반파장의 홀수배이다. 즉, 경로차 $\Delta = |S_2P - S_1P| = \frac{\lambda}{2}(2m+1)$이 된다. 이때는 파면이 실선과 점선이 만나게 되는데, 이는 위상이 180° 차이가 나는 것을 의미한다. 상쇄간섭하는 지점의 수면은 잔잔하기 때문에 실험 장치에서 선이 잘 보인다. 이 선은 흥미롭게 S_1과 S_2를 초점으로 하는 쌍곡선 식을 만족한다. 물론 보강간섭하는 지점들을 연결해도 쌍곡선 식을 만족한다.

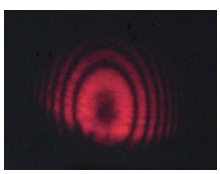
❖ 쌍곡선은 두 점으로부터 거리차가 일정한 점들로 이루어진 곡선이다.

4) 마이켈슨 간섭계

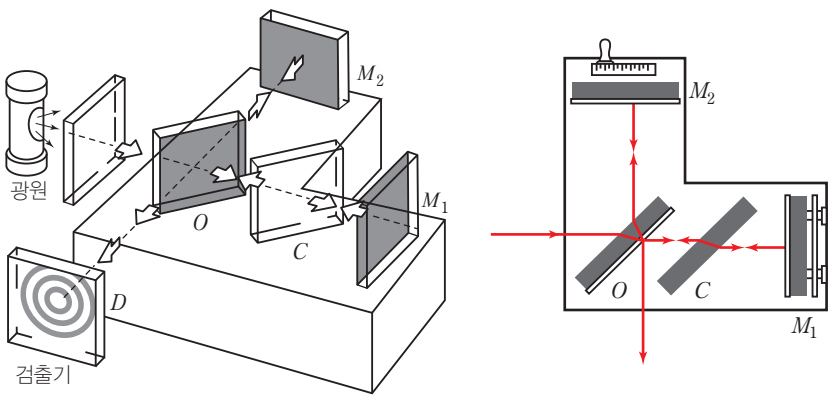
마이켈슨 간섭계는 [그림 Ⅳ-60]과 같이 광원에서 나온 빛은 오른쪽으

로 진행하여 O에 있는 광속분리기에 의해서 두 부분으로 갈라지고, 그 중 하나는 오른쪽으로 다른 하나는 왼쪽으로 진행한다. 이들은 다시 거울 M_1, M_2에 의해 반사되어 광속분리기로 되돌아온다. M_2에 의해 반사된 파의 일부는 광속분리기를 통과하여 아래에 있는 검출기 쪽으로 가고, M_1에 의해서 반사된 파의 일부도 광속분리기에 의해서 검출기 쪽으로 편향된다. 이들이 서로 합쳐질 때 간섭무늬가 관찰된다.

상하방향으로 진행한 광파는 O점을 세 번 통과하는 반면 좌우방향으로 진행한 광파는 오직 한번만 통과하게 된다. 두 광파의 광경로를 같게 하기 위해서는 광속분리기와 같은 두께의 유리판 C를 OM_1 사이에 삽입해야 하는데, 이 유리판을 보상판이라고 한다. 이 보상판은 45°의 각도로 놓여 있으므로 O와 C는 서로 평행하다. 보상판이 사용될 경우 두 광파 사이의 광경로차는 실질적인 빛의 진행 경로차에 의해서 발생된다.



마이켈슨 간섭계의 간섭무늬

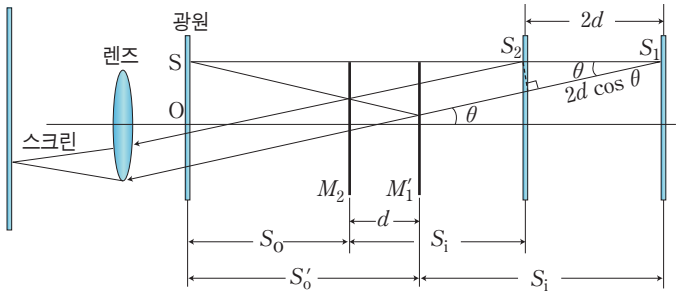


(a) 마이켈슨 간섭계　　(b) 빛의 진행경로

[그림 Ⅳ-60] **마이켈슨 간섭계**

간섭무늬가 어떻게 형성되는가를 알아보기 위해 장치를 구성하고 있는 광학소자들을 수학적 평면으로 표현한 [그림 Ⅳ-61]을 살펴보자. 검출기의 위치에 있는 관찰자는 광속분리기 속에서 광원과 더불어 거울 M_1과 M_2를 동시에 보게 된다. 따라서 간섭계를 구성하는 요소들을 일직선 상에 있는 것으로 나타낼 수 있다.

빛이 한 점 S에서 나와서 거울 M_1'과 거울 M_2에서 반사된다고 가정한다. 거울 M_1'은 광속분리기를 통해서 본 거울 M_1의 상이다. 관측자는 거울 M_1'에서의 반사에 의한 S_1과 거울 M_2에서의 반사에 의한 S_2인 두 개의 실상을 볼 수 있다. 관측자가 θ의 각으로 관찰하면, 두 빛의 광경로차 $\Delta = 2d\cos\theta$와 같다.



[그림 Ⅳ-61] **마이켈슨 간섭계의 배치도**

광속분리기에서 거울 사이의 길이 차이가 d라면 왕복하기 때문에 광경로차는 $2d$이다. $d=0$이라면 중심부는 어둡게 되는데, 이것은 광속분리기의 경계면에서 빛이 공기에서 유리로 진행하다가 반사되었기 때문에 결국 고굴절률 매질에서 저굴절률의 매질로의 반사로 인해 π 만큼의 위상변화가 생기게 되어 서로 소멸간섭이 일어나기 때문이다. 따라서 보강간섭 조건은 $2d\cos\theta+\frac{\lambda}{2}=\frac{\lambda}{2}(2m)$이 되며 간섭무늬는 θ에 대해 대칭이기 때문에 동심원이 된다.

$d=0$인 상태에서 거울 M_1을 $\frac{\lambda}{4}$ 만큼 움직이면 광경로는 $\frac{\lambda}{2}$ 만큼 변하여 두 광파 사이의 위상이 π 만큼 차이 나게 된다. 이것은 $d=0$일 때 생겼던 위상 차이를 상쇄시켜 결국은 보강간섭이 일어나게 되고, 스크린 중앙 부분은 밝은 무늬로 바뀌게 된다. 따라서 d를 $\frac{\lambda}{2}$씩 이동시킬 때마다 스크린의 중심에 새로운 고리가 나타난다. d가 증가함에 따라 중앙에 새로운 원형 고리들이 나타나게 되고, d가 감소하게 되면 반대로 고리들이 수축되어 중앙에서 사라지게 된다.

마이크로미터로 거울 M_1을 움직인 거리를 d라 하고 무늬의 소멸(발생) 개수를 N이라 하자. 그러면 광경로차는 거울의 이동거리의 2배가 되어서 $2d$이다. $2d=N\lambda$가 되고 이로부터 빛의 파장을 정확하게 측정할 수 있다.

실제 두 광파의 경로차의 변화는 한 경로에 대한 직접적인 거리 변화 방법 외에도 광로에 대한 매질의 변화를 통해 이루어질 수도 있다. 한 광로 상에 유리판과 같은 고체 매질 또는 유체, 기체 등을 놓음으로써 위상차에 변화를 줄 수 있다. 우리는 이를 이용하여 고체 매질의 굴절률과, 굴절률과 관계되

는 유체 매질의 점성 및 기체 매질의 압력 관계를 정확히 측정할 수 있다.

유리와 같은 물질의 굴절률과 간섭무늬 사이의 관계를 알아보자. 유리판의 두께가 L일 때 유리판에 의한 광경로차 $\Delta = 2L(n_g - n_a)$이 되고, 간섭무늬의 개수가 m개 변하였다면

$$m\lambda = 2L(n_g - n_a) \qquad (\text{Ⅳ}.\ 4\text{-}24)$$

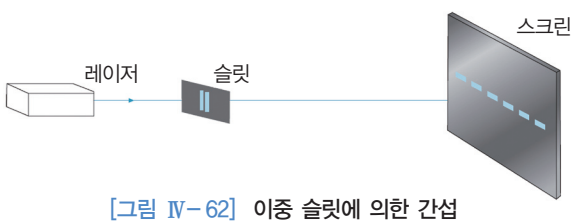
와 같이 된다. 여기서 n_a는 공기의 굴절률이고, n_g는 유리의 굴절률이다.

실험 빛의 간섭

준비물 레이저, 선형 전등, 간격과 폭이 다른 슬릿, 30 cm 자, 줄자, 셀로판지

과정 1

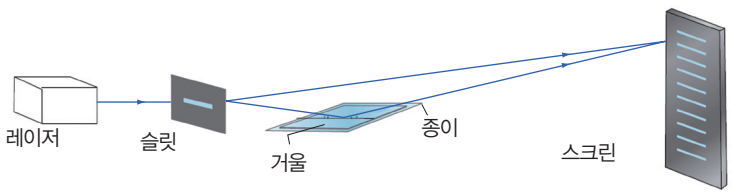
1. [그림 Ⅳ-62]와 같이 이중 슬릿을 레이저 앞에 놓고 스크린에 생긴 무늬를 관찰한다. (이중 슬릿은 슬라이드글라스 위에 검정페인트를 뿌려서 건조시킨 후 면도날 두 장을 겹쳐서 약간 힘을 가하여 그으면 만들 수 있다.)
2. 슬릿과 스크린까지의 거리를 변화시키면서 간섭무늬가 어떻게 변하는지 관찰한다. 중앙에서 첫 번째 어두운 무늬의 m값은 얼마인가?
3. 스크린을 슬릿으로부터 약 50 cm 뒤에 설치한 다음 간섭무늬의 간격을 측정하고 m번째 어두운 무늬까지의 거리를 측정한다.
4. 스크린을 고정시키고 폭과 간격이 다른 슬릿으로 바꾸어 3의 과정을 반복한다. 간섭무늬에서 밝은 무늬의 폭이 어떻게 변화되는가?
5. 슬릿의 간격, 슬릿과 스크린까지의 거리 등을 측정하여 레이저의 파장을 측정한다.
6. 슬릿을 90° 회전시키고 간섭무늬의 변화를 살펴보자.
7. 직선 필라멘트 전구에서 나온 빛을 셀로판지에 통과시킨 후 렌즈로 광을 슬릿에 집속하여 1의 과정을 반복해 보자.
   - 셀로판지의 색에 따라 간섭무늬의 변화는 어떠한가?
   - 셀로판지가 없을 때 스크린 가장자리에서 관찰된 무늬는 왜 그렇게 되는가?
8. 편광판을 슬릿 뒤쪽에 설치한 후 편광판을 돌려가면서 7의 과정을 반복하여 보자.



[그림 Ⅳ-62] 이중 슬릿에 의한 간섭

과정 2

1. [그림 Ⅳ-63]과 같이 단일 슬릿과 평면거울을 장치한다. 이때 슬릿과 거울 사이는 약 15 cm, 거울과 스크린까지의 거리는 약 30 cm가 되도록 한다.
2. 거울 한 쪽 끝 밑에 얇은 종이를 몇 장 설치하여 거울이 경사지도록 한다.
3. 레이저를 단일 슬릿에 비추어 스크린에 나타나는 간섭무늬를 관찰한다. 어떻게 간섭무늬가 만들어지는지 광선 추적을 하여 보아라. 여기서 거울이 하는 역할은 무엇인가?
4. 거울 밑의 종이의 매수를 변화시키면서 간섭무늬의 변화를 관찰한다. 종이의 매수 변화는 간섭무늬에 어떠한 변화를 초래하는가? 이것은 이중 슬릿에서 무엇을 변하시키는 것에 해당하는가?



[그림 Ⅳ-63] **단일 슬릿과 평면거울을 이용한 간섭**

논의

1. 수면파의 간섭에서는 보강간섭하는 곳에서 수면의 높이 변화가 심하고 상쇄간섭하는 곳에서는 잠잠한데 빛의 경우에 보강간섭하는 지점의 밝기는 일정하다. 왜 그러한지 생각해 보자.

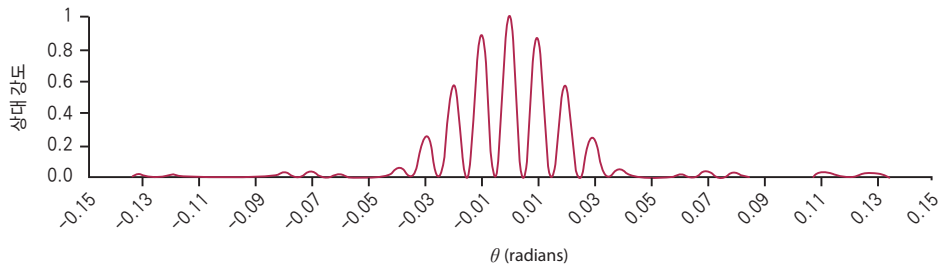
2. 이중 슬릿 실험에서 중심으로부터 멀리 떨어진 곳에서는 간섭무늬의 간격이 일정하지 않은 이유는 무엇인지 논의해 보자.

3. 간섭무늬와 함께 나타나는 회절무늬에 대해서도 논의해 보자.

4. 프리즘을 이용한 또 다른 방법의 영(Young)의 이중 슬릿 실험을 구상하여 보자.

연습문제

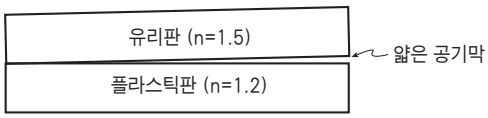
1. 이중 슬릿에 의한 간섭무늬의 상대적인 세기에 대한 그래프를 생각해 보자. 사용된 빛의 파장은 $\lambda = 633$ nm이다.



(1) 슬릿의 폭과 슬릿 사이의 거리를 결정하여라. 답을 결정하기 위해 사용한 그래프의 특징을 제시하여라.

(2) $\theta = 0.05$(rad)이나 $\theta = 0.10$(rad)을 제외한 지점에서 최대 점들이 0.01(rad) 간격으로 나타난다. 이와 같이 '있어야 할 곳에 없는' 최대 점들을 어떻게 설명할 수 있을까?

2. 유리판 ($n = 1.5$)이 평평한 플라스틱 판 ($n = 1.2$) 위에 놓여 있다. 오른쪽 그림처럼 두 판 사이에는 얇은 공기막이 있다.



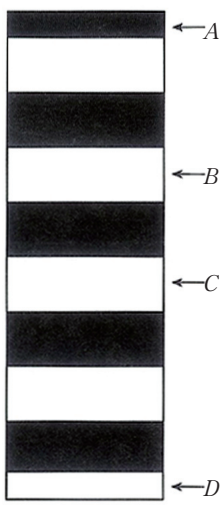
파장 $\lambda = 600$ nm인 빛이 위에서 수직으로 입사되면 그림과 같이 위쪽부터 어둡고 밝은 무늬가 나타난다.

(1) 두 판이 접촉하는 곳은 A지점인가, D지점인가? 이유를 설명하여라.

(2) 유리 위에서 본 그림에서 B와 C지점은 인접한 밝은 무늬의 위치를 나타낸다. B와 C지점에서 공기막의 두께 차이는 얼마인가?

(3) 두 판 사이의 공기막을 수막($n = 1.33$)으로 대체했다고 가정하자.

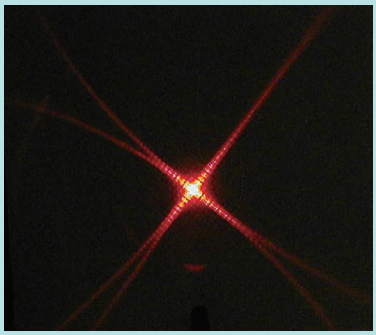
- 두 판이 접촉하는 지점에서 밝은 무늬가 보일까 어두운 무늬가 보일까? 설명하여라.



위에서 내려다 본 판의 모습

- 인접한 두 밝은 무늬는 서로 더 가까워지는가, 멀어지는가 아니면 전과 똑같은 위치인가? 설명하여라.

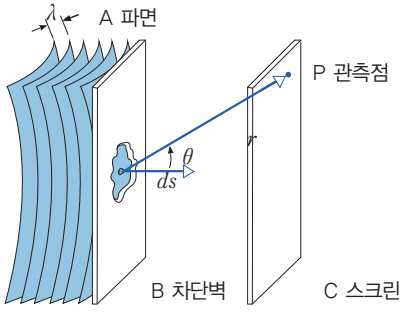
5 회절



모기장을 통하여 가로등을 보면 그림과 같은 십자 형태의 무늬를 볼 수 있고, 컴팩 디스크의 정보가 기록된 면을 보면 아름다운 무지개색이 보인다. 이것은 모기장의 조그만 구멍들이나 CD의 가는 선들이 슬릿의 역할을 하여 회절을 일으키기 때문이다. 이와 같이 많은 수의 슬릿이나 구멍으로 이루어진 집합체를 회절격자라고 하는데, 회절격자에 빛이 입사되면 파장에 따라 회절 각도의 차이가 발생한다. 따라서 색깔별로 공간적으로 나누어지게 된다. 또한 회절은 망원경이나 현미경의 분해능을 떨어뜨리는 결정적인 역할을 한다.

1. 회절

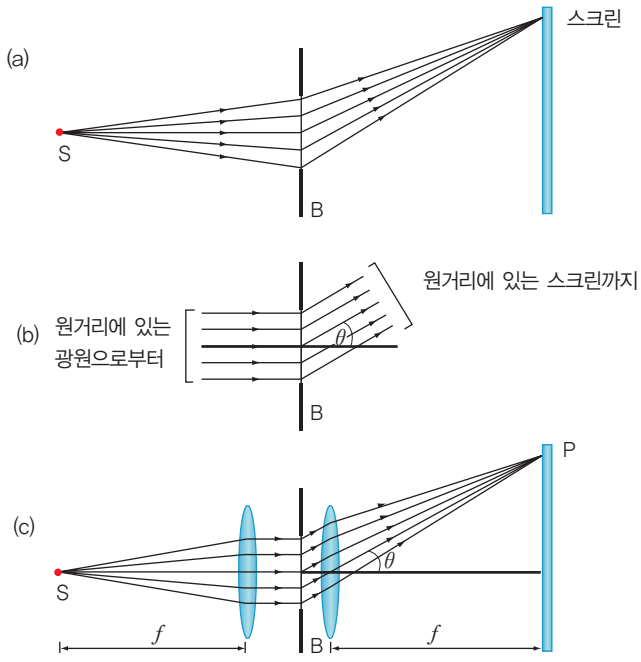
회절은 음파, 수면파 및 빛을 포함한 전자기파 등의 파동이 진행하다가 장애물에 의해 파면의 일부가 차단 또는 방해를 받았을 때 장애물 뒤쪽으로 돌아가는 파동 현상이다. 빛이 직진하면 그림자 부분에는 빛이 도달하지 않지만 회절에 의해 빛이 도달한다. 이는 방해를 받지 않는 파면상의 각 부분이 새로운 파원 역할을 하기 때문이다. 새로운 파원들에서 발생된 파동들은 서로 간섭하여 회절무늬라 불리는 독특한 무늬를 형성하게 된다. 따라서 중첩이라는 관점에서 간섭무늬와 회절무늬는 물리학적으로 구분되지 않는다. 다만, 관례적으로 몇 개의 파, 특히 공간적으로 분리된 후에 다시 만나는 파들이 중첩하는 경우에는 간섭으로, 유한한 크기의 연속 파원에서 방출된 파들이 중첩하는 경우처럼 대단히 많은 수의 파가 중첩되어 나타나는 현상을 회절로 구분한다.



[그림 Ⅳ-64] 회절 이론을 위한 모형

[그림 Ⅳ-64]는 회절의 일반적인 상황을 나타낸 것이다. 파면 A는 B에 입사하는 파면이고 B는 임의의 형태를 가진 구경을 포함하는 차단벽이다. C는 구경을 통과한 빛이 도달하게 되는 스크린이나 사진 필름이다. 구멍이 있는 곳에서 파면을 면적 요소로 세분하여 C에 공헌하는 빛의 세기를 계산할 수 있다. 이 경우에 각각의 면적 요소는 호이겐스 원리에 따라서 제2의 점 파원 역할을 한다. 임의의 관측점 P에서 빛의 세기는 구경 내의 모든 면적 요소들에 의한 전기장의 기여를 중첩해서 구할 수 있다. 구멍이 뚫려 있는 장애물이나 철사나 동전과 같이 일부가 막혀있는 장애물에서도 회절 현상을 볼 수 있다.

[그림 Ⅳ-64]의 P점에 도달하는 파동의 교란은 (1) 면적 요소로부터 P점까지의 거리가 다양하고 (2) 파면의 법선에 대하여 여러 가지 각도로 빛이 방출되며 (3) 장애물이 막혀 있는 부분도 있고 막혀 있지 않은 부분도 있어 기여하는 진폭과 위상이 상이하게 된다. 스크린 상의 관측지점에서 파동의 세기는 모든 제2점파원 면적 요소들의 기여를 계산하여야 한다. 회절무늬를 구하기 위해서는 스크린 상의 알고자 하는 모든 점에 대하여 이와 같은 계산이 반복되어야 한다. 따라서 회절에 대한 세기 분포의 계산은 원리적으로 간단하나 실제적으로는 복잡하다.



[그림 Ⅳ-65] **회절의 종류 (a) 프레넬 회절, (b) 프라운호퍼 회절, (c) 실제적인 프라운호퍼 회절 실험 장치**

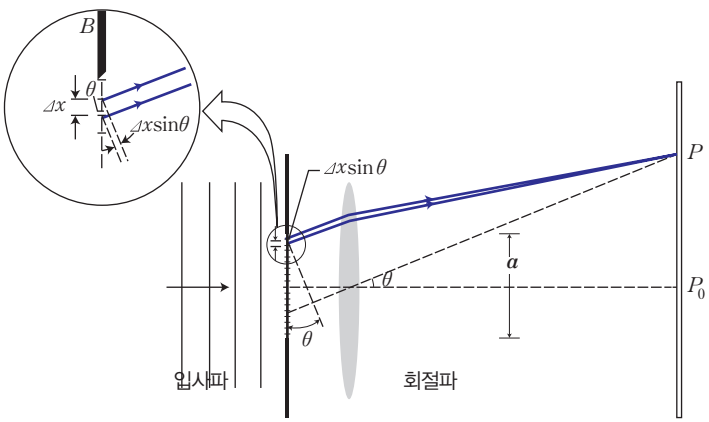
[그림 Ⅳ-65] (a)는 회절의 일반적인 경우를 나타낸 것이다. 광원 S와 스크린까지의 거리가 가까워 구멍에 입사하는 파면이 구면파이고, 구멍으로부터 발생된 파의 스크린에서의 파면 또한 평면파가 아닌 경우이다. 또한 대응되는 광선들도 평행하지 않다. 이와 같이 파원과 구멍, 그리고 구멍과 스크린 사이의 거리가 짧아서 구면파의 형태로 파면을 취급하여야 하는 경우를 **프레넬 회절**이라 한다.

[그림 Ⅳ-65] (b)와 같이 파원과 구멍 사이의 거리 그리고 구멍과 스크린 사이의 거리가 먼 경우에는 파면을 평면파로 취급할 수 있으며 이 경우를 **프라운호퍼 회절**이라 한다.

[그림 Ⅳ-65] (c)와 같이 두 개의 볼록렌즈를 사용하면 실험실에서 쉽게 프라운호퍼 회절 조건을 얻을 수 있다. 첫 번째 렌즈는 광원으로부터 발산하는 파를 평면파로 변환하고 두 번째 렌즈는 구멍으로부터 떠나가는 평면파를 관측점 P에 수렴하도록 하는 역할을 한다.

예제 [그림 Ⅳ-65] (c)에서 두 개의 렌즈는 차단벽으로부터 광원과 스크린이 어디에 위치하는 것과 같은 효과를 주는가?

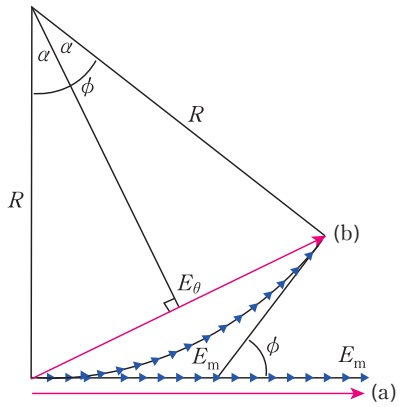
2. 단일 슬릿에 의한 회절



[그림 Ⅳ-66] **단일 슬릿에 의한 회절**

[그림 Ⅳ-66]은 폭이 a인 슬릿을 폭이 Δx인 N개의 평행한 선광원으로 분할한 것이다. 각각의 선광원은 호이겐스 원리에 따라 제2의 파원이 되어 구면파를 발생시킨다. 각 선광원이 관찰점 P에 기여한 것은 각각의 선광원과 P점을 잇는 각도에 의해 기술할 수 있다. 프라운호퍼 회절의 경우, P점에 대한 선광원들의 진폭의 기여는 ΔE_0로 같다고 할 수 있다. 그리고 이웃한 선광원들 사이의 경로차가 $\Delta x \sin\theta$이므로 위상차는 $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta x \sin\theta)$로 주어진다.

이제 N 개의 선광원의 기여를 모두 고려하려면, 인접한 광원 사이에는 위상이 $\Delta\phi$ 만큼씩 차이가 나며 같은 진폭을 갖는 N 개의 성분을 더해야 한다. 길이는 합성파의 진폭, 방향은 위상에 해당하는 벡터인 위상자를 이용하여 이웃한 벡터와 각도 $\Delta\phi$를 이루는 길이가 모두 ΔE_0로 모두 같은 N개의 벡터를 더하면 된다.



[그림 Ⅳ-67] 회절에 의한 세기를 구하기 위한 위상자 덧셈법

만약 P점이 슬릿의 가운데를 수직으로 있는 P_0에 있으면 θ가 0인 경우이다. 이때는 모든 선광원들의 위상차가 없으므로 N개의 위상자를 더하면 길이가 같은 벡터들이 [그림 Ⅳ-67] (a)와 같이 일직선상으로 더해진다. 따라서 모든 기여의 합은 처음 벡터에서 마지막 벡터까지의 길이를 모두 합하여 구하면 된다. 이 길이는 최대 진폭 E_m에 해당한다. 따라서 스크린 중앙점 P_0에서 가장 밝다.

이제 P점이 스크린 중앙선으로부터 각도 θ를 이루는 곳이라고 하자. 이웃한 선 광원들이 $\Delta\phi$의 위상차를 갖도록 [그림 Ⅳ-67] (b)와 같이 위상자 벡터를 연이어 그린다. 최종적인 중첩의 결과는 첫 벡터의 시작점부터 마지막 벡터의 끝나는 지점까지의 거리이다. [그림 Ⅳ-67]로부터 $E_\theta = 2R\sin\dfrac{\phi}{2}$이고 ϕ를 라디안으로 표시하면 $\phi = \dfrac{E_m}{R}$이다. 위 두 식을 결합하면,

$$E_\theta = E_m\frac{\sin\alpha}{\alpha} \qquad (\text{Ⅳ. } 5\text{-}1)$$

가 된다. 여기서

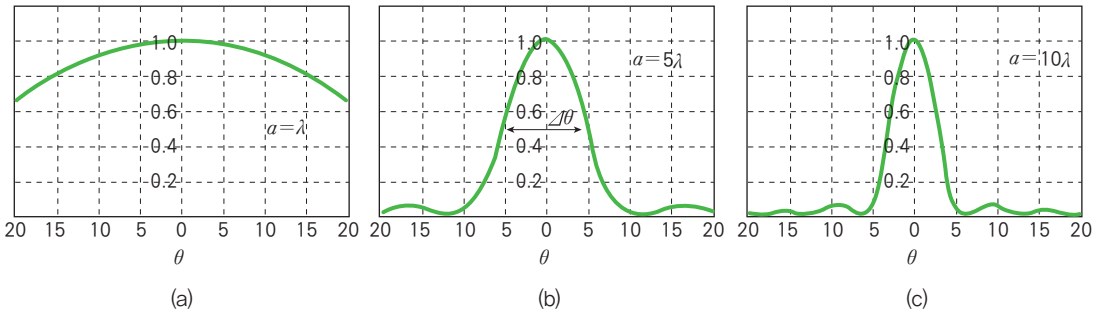
$$\alpha = \frac{\phi}{2} = \frac{\pi a}{\lambda}\sin\theta \qquad (\text{Ⅳ. } 5\text{-}2)$$

이다. ϕ는 첫 번째 벡터와 마지막 벡터 사이의 위상차이다. 즉, 슬릿의 제일 아래쪽과 위쪽 선광원 성분 사이의 위상차이다. 식 (Ⅳ. 5-2)로부터 α는 ϕ의 반에 해당하므로 α는 슬릿의 중앙과 끝지점 사이의 위상차이다.

따라서 회절무늬의 각도에 따른 빛의 세기 분포는 진폭의 제곱에 비례하므로

$$I_\theta = I_m\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2 \qquad (\text{Ⅳ. } 5\text{-}3)$$

이 된다.



[그림 Ⅳ-68] 슬릿의 폭에 따른 회절무늬

[그림 Ⅳ-68]은 a/λ의 비가 다른 몇 가지 경우의 I_θ 그래프이다. a/λ를 증가시키면 회절무늬의 폭이 좁아진다. 극소의 위치는 $\alpha = m\pi (m = 1, 2, 3, \cdots)$일 때이며 이 식을 $\alpha = \dfrac{\pi a}{\lambda}\sin\theta$과 결합시켜 정리하면 $a\sin\theta = m\lambda$이 된다.

특히, [그림 Ⅳ-68] (a)와 같이 $a = \lambda$이면 첫 번째 0이 되는 조건, 즉 $m = 1$일 때 $\theta = 90°$가 된다. 90°의 의미는 스크린 위에서 무한대로 높은 지점과 낮은 지점까지 빛이 도달함을 의미한다. a가 λ에 비해 어느 정도 크면 최초 0이 되는 $m = 1$인 지점에 대한 θ가 작다고 가정할 수 있으므로 $\sin\theta \approx \theta$로 근사할 수 있어

$$\theta \approx \frac{\lambda}{a} \qquad (Ⅳ.\ 5\text{-}4)$$

가 된다.

예제 구멍의 크기를 매우 크게 하면 회절무늬 폭이 넓어지는 것처럼 보인다. 무엇이 문제인지 생각해 보자.

3. 원형 구멍에 의한 회절

대부분의 광학계가 원형의 렌즈를 사용하므로 단일 슬릿보다 원형 구멍에서의 회절을 이해할 필요가 있다. [그림 Ⅳ-69]는 볼록렌즈의 초점 평면에 필름을 놓고 원거리에 있는 점광원의 상을 촬영한 것이다. 이 상은 기하광학에서 기대했던 '점'이 아니다. 중앙에 원형 디스크를 중심으로 바깥으로 밝고 어두운 원형 고리들이 나타난다. 중앙선을 따라가면서 빛의 세기를 그려 보면 단일 슬릿의 경우 [그림 Ⅳ-68] (c)와 거의 같은 것을 볼 수 있다.

따라서 유한한 크기의 렌즈를 사용하면 회절 효과를 피할 수 없다.

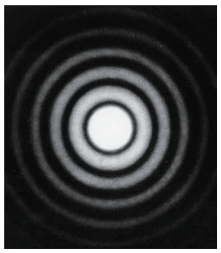
관측점 P에서의 진폭의 계산은 선광원들의 집합인 단일 슬릿에서와 같이 간단한 벡터합으로 할 수 없으며 원형형태의 광원들의 기여를 고려해야 한다. 그러나 원리는 두 경우 모두 같다. 렌즈의 직경을 D라고 할 때 단일 슬릿에서와 같이 D/λ의 비가 회절무늬를 결정한다. 프라운호퍼 회절 조건을 이용하게 되면 회절무늬의 1차 극소가 일어나는 조건은

$$\sin\theta = 1.22\frac{\lambda}{D} \qquad (\text{Ⅳ}.\ 5\text{–}5)$$

이다. 식 (Ⅳ. 5–4)와 비교하여 볼 때 1이 아니라 1.22가 나타난 것은 구멍이 원형이기 때문이다. 중앙의 밝은 원판의 크기가 작을수록 이상적인 기하광학에 가깝다. 초점거리가 f인 렌즈인 경우에 중앙 원판의 반지름(r)은

$$r = 1.22\frac{\lambda}{D}f \qquad (\text{Ⅳ}.\ 5\text{–}6)$$

이다.



[그림 Ⅳ–69] 원형 구멍에 의한 회절무늬

예제 식 (Ⅳ. 5–5)에서 $\sin\theta \approx \theta$를 이용하여 (Ⅳ. 5–6)식을 유도하시오.

4. 분해능

렌즈에 의한 상의 회절은 원거리에 아주 근접해 있는 두 개의 물체를 분별하려고 할 때 매우 결정적인 역할을 한다. 두 개의 점광원이 공간적으로 멀리 떨어져 있으면 스크린에는 뚜렷하게 2개의 상이 만들어진다. 그러나 두 개의 점광원이 가까워지면 상황은 달라진다.

[그림 Ⅳ–70] (c)는 두 개의 점광원이 있다고 할 수 있으나 [그림 Ⅳ–70] (a)는 하나인지 두 개인지 구별하기 힘들다. 이때 분해능이 매우 큰 렌즈를 사용하면 2개의 상을 볼 수 있을 것이다. 두 물체 사이의 거리에 따라 (a)는 두 물체가 구별되지 않고, (b)는 가까스로 분해된 경우이고, (c)는 완전히 분해된 경우이다. 렌즈의 분해능은 (b)처럼 가까스로 분해가 되는 경우를 기준으로 하는데, 이 기준을 레일리(Rayleigh) 기준이라 하며 한 점광원에 대한 회절무늬의 중앙 극대점이 다른 점광원에 대한 회절무늬의 1차 극소점과 일치하는 경우이다. [그림 Ⅳ–70] (b)의 점선이 레일

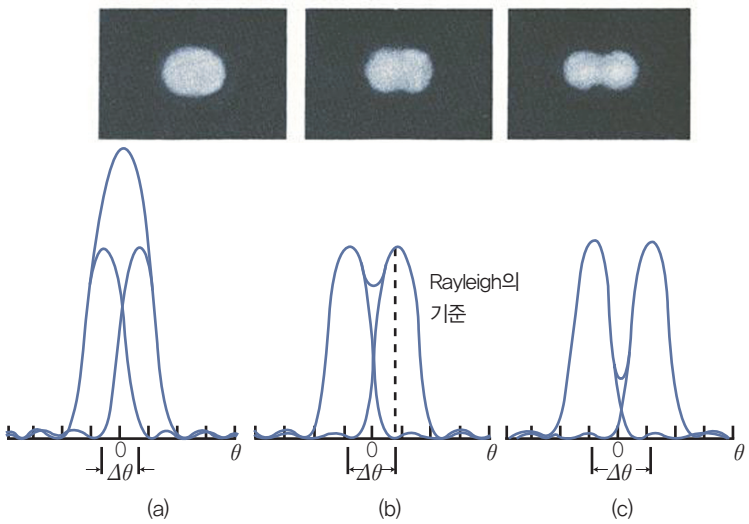
리 기준이다.

식 (Ⅳ. 5-5)로부터 가까스로 분해할 수 있는 두 물체를 렌즈에서 바라보는 각도는

$$\theta_D = \sin^{-1}\left(\frac{1.22\lambda}{D}\right) \qquad (Ⅳ.\ 5\text{-}7)$$

이고, 원거리의 점물체에 대해서는 θ가 매우 작으므로

$$\theta_D = \frac{1.22\lambda}{D} \qquad (Ⅳ.\ 5\text{-}8)$$



[그림 Ⅳ-70] **분해능**

이다. 물체 사이의 각도가 θ_D보다 크면 두 물체는 분해가 되고, θ_D보다 작으면 분해되지 않는다. 무한히 큰 렌즈를 쓰면 상이 점이 되기 때문에 아무리 가까운 물체도 구별하여 볼 수 있을 것이다.

매우 작은 각도차를 가진 두 물체를 분해하기 위해서는 θ_D이 작아야 하므로 렌즈의 직경을 증가시키거나 짧은 파장의 광원을 사용한다. 이것이 거대한 망원경을 만드는 이유가 되며, 전자 현미경처럼 파장이 가시광선이 비하여 매우 짧은 파동을 사용하게 되는 이유가 된다.

예제 현미경에서 대물렌즈와 커버글라스 사이에 오일을 추가하는 이유는 무엇인지 생각해 보자.

5. 이중 슬릿에 의한 회절

이중 슬릿에 의한 회절은 단일 슬릿의 회절무늬 두 개가 중첩하여 간섭무늬와 함께 나타나게 된다. 각각의 슬릿 폭이 파장과 같은 이중 슬릿의 경우에 간섭무늬는 다음과 같은 식을 만족시키면서 나타난다.

$$I_{\theta,\text{간섭}} = I_{m,\text{간섭}}\cos^2\beta \qquad (\text{Ⅳ. 5-9})$$

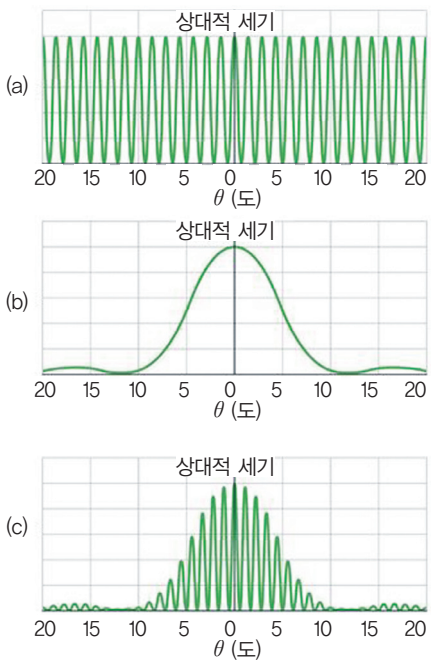
여기서 $\beta = \dfrac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta$이며, d는 슬릿 중심 사이의 거리이다. θ는 단일 슬릿의 경우와 같이 이중 슬릿의 중앙을 가로지르는 축과 이중 슬릿 중앙에서 스크린 상의 점을 잇는 선 사이의 각도이다. 슬릿의 폭이 파장에 비하여 매우 좁지 않으면 회절무늬 효과가 간섭무늬와 함께 나타난다. 즉,

$$I_{\theta,\text{회절}} = I_{m,\text{회절}}\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2 \qquad (\text{Ⅳ. 5-10})$$

의 형태로 주어진다. 따라서 회절과 간섭이 동시에 고려된 세기 분포는

$$I_\theta = I_m(\cos\beta)^2\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2 \qquad (\text{Ⅳ. 5-11})$$

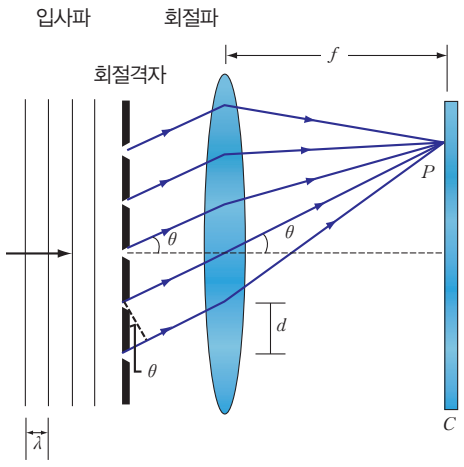
가 되는데 이는 [그림 Ⅳ-71]에 나타나 있다. [그림 Ⅳ-71] (a)는 폭이 매우 좁은 이중 슬릿에 의한 간섭무늬를 나타내고, (b)는 단일 슬릿에 의한 회절무늬의 모습이며, (c)는 이들 결과를 곱하여 얻은 것으로 간섭과 회절이 동시에 고려된 것이다.



[그림 Ⅳ-71] 이중 슬릿에 의한 회절과 간섭무늬

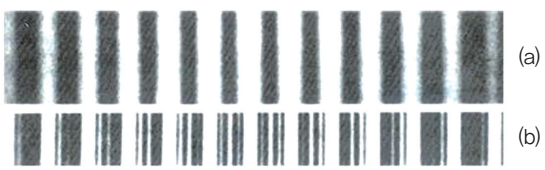
6. 다중 슬릿 또는 회절격자에 의한 회절

슬릿의 개수가 N개로 증가된 경우를 다중 슬릿 또는 회절격자라 한다. [그림 Ⅳ-72]는 슬릿의 개수가 5인 이상적인 다중 슬릿이다. 파장 λ의 단색광을 회절격자에 비추면 일련의 무늬가 나타나는데 이 무늬들 사이의 간격은 $\frac{\lambda}{d}$에 의해 결정되며, 여기서 d는 슬릿 사이의 간격이다.



[그림 Ⅳ-72] 다중 슬릿에 의한 회절

회절무늬들이 가지는 상대적인 세기 분포는 단일 슬릿에 의한 회절무늬에 의해 결정된다. [그림 Ⅳ-73]에서 (a)는 $N=2$인 경우, (b)는 $N=5$인 경우에 세기 분포를 나타낸 것으로서 회절무늬의 중앙 극대 부분만을 나타내었다. 두 경우에 양쪽 끝에서 세기가 약해지는 것을 볼 수 있는데 이것은 회절에 의한 세기 분포 때문이다. $N=5$인 경우에 1차 극대 사이에 3개의 2차 극대들이 나타난다. N을 증가시킬수록 주요 극대가 아주 예리해지며, 2차 극대는 그 수가 $(N-2)$개로 증가하지만 세기가 아주 줄어들어 거의 무시할 만하다. 이는 슬릿 수가 많아질수록 여러 개의 슬릿에서 온 파동들이 보강간섭 조건을 만족시키는 지점이 좁아지기 때문이다.



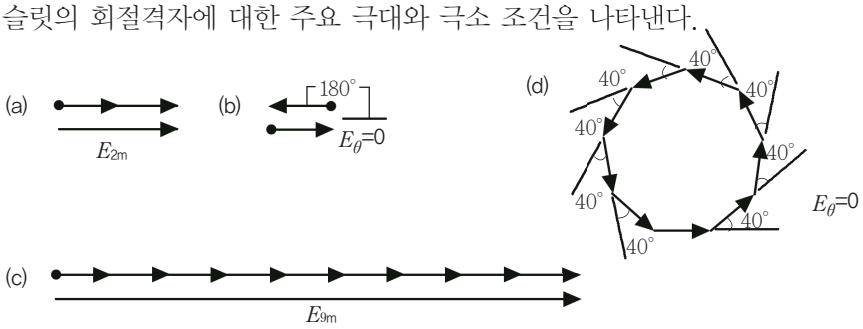
[그림 Ⅳ-73] 다중 슬릿(N=5)과 이중 슬릿 회절무늬 비교

주요 극대 위치는 이웃한 슬릿으로부터 광경로차가

$$d\sin\theta = m\lambda \qquad m = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \cdots \qquad (\text{Ⅳ}.\ 5\text{-}12)$$

인 곳이다. 여기서 m을 차수라고 한다. 이 식 (Ⅳ. 5-12)는 이중 슬릿에서 보강간섭하는 지점을 찾기 위한 식과 일치하며 슬릿의 개수 N에 무관하다.

N이 증가해 갈 때 주요 극대의 폭이 좁아지는 것을 위상자 덧셈법을 이용하여 알아보자. [그림 Ⅳ-74]의 (a)와 (b)는 이중 슬릿, (c)와 (d)는 9중 슬릿의 회절격자에 대한 주요 극대와 극소 조건을 나타낸다.

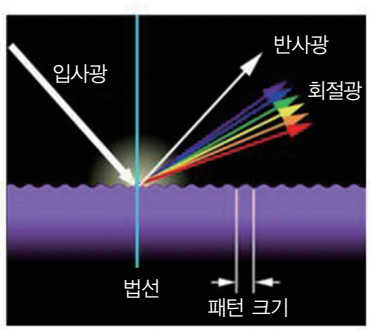


[그림 Ⅳ-74] 다중 슬릿(N=9)과 이중 슬릿의 회절무늬 비교

각각의 슬릿에서 기여하는 정도는 작은 화살표로 나타낸 위상자의 벡터 길이와 같다. $\theta = 0$인 중앙의 주요 극대 양쪽에 있는 세기가 0인 곳(이중 슬릿의 경우 소멸간섭 지점)의 각 위치 $\Delta\theta_0$를 생각해 보자. 이들 점에서 벡터 합에 대한 것은 [그림 Ⅳ-74] (b)와 (d)이다. $N = 2$에서는 두 슬릿에서 나온 광파의 위상차가 180°이며, $N = 9$에 대해서는 이웃한 두 슬릿에서 나온 광파의 위상차가 $\Delta\phi = \dfrac{2\pi}{9}(= 40°)$가 된다. 일반적인 경우에는

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{N} \qquad (\text{Ⅳ}.\ 5\text{-}13)$$

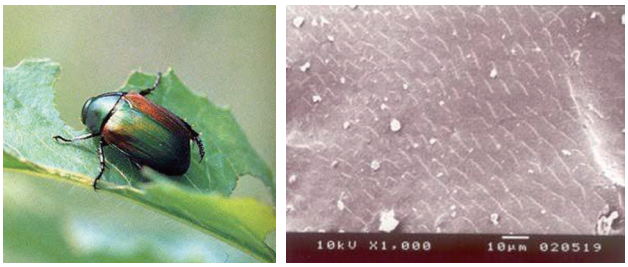
로 주어진다. 슬릿의 개수가 늘어날수록 이 각도가 줄어든다는 의미는 주요 극대의 폭이 줄어든다는 것을 의미한다. 파장이 약간 다른 2개의 빛이 이중 슬릿에 들어가면 색분해가 안 되지만 다중 슬릿에 의해서는 분해가 된다. 다중 슬릿은 빛이 도달할 수 있는 위치가 파장에 따라 예리하게 결정되어 있기 때문이다.



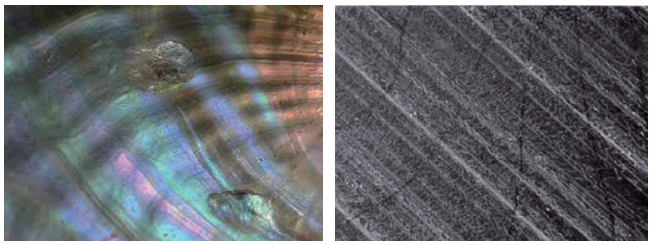
[그림 Ⅳ-75] 회절격자에 의한 색분해

예제 파장이 약간 차이가 나는 빛을 이중 슬릿으로 색분해를 하지 못하는 이유를 생각해 보자. 또한, 다중 슬릿의 경우 색 분해가 가능한 이유에 대해 생각해 보자.

예제 다음 사진들은 동물들에서 관찰할 수 있는 아름다운 색이다. 또한 보는 각도에 따라 화려한 무늬의 색깔이 달라진다. 그 이유를 설명해 보자.



[그림 Ⅳ-76] 풍뎅이와 풍뎅이 껍질 구조(×100)

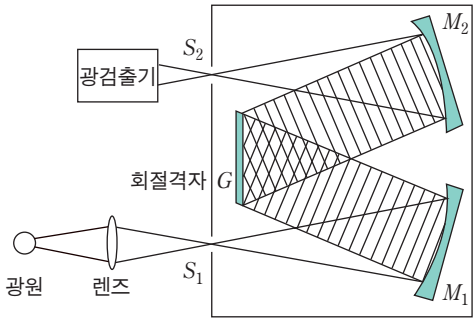


[그림 Ⅳ-77] 조개 껍질과 그 구조(×200)

7. 회절격자 분광기

광원에서 나오는 빛의 파장에 따른 빛의 세기, 즉 스펙트럼을 관찰하는 기구를 분광기라고 한다. 분해능이 높은 분광기는 물질의 미시적 에너지 구조를 이해하는데 유용한 수단으로 사용되기도 한다. 스펙트럼을 얻는 방법으로 프리즘을 사용하는 프리즘 분광기, 회절격자를 사용하는 격자분광기, 빛의 간섭을 이용하는 간섭분광기 등이 있다.

1인치의 너비에 많은 직선 슬릿(이를 때로 선, groove라 하며 약 10^5개 정도이다.)이 분포되어 있는 회절격자는 광학적으로 부드러운 유리 층에 선을 긋거나 홀로그래픽 방법을 이용해 만들 수 있으며, 반사형 회절격자를 만들기 위해 일반적으로 회절격자 면을 고반사 층으로 코팅한다.



[그림 Ⅳ-78] 회절격자 분광기의 구조

[그림 Ⅳ-78]은 회절격자를 이용한 분광기의 구조이다. 광원 앞에 렌즈를 설치하여 가능한 많은 빛이 분광기 안으로 입사되도록 하고 렌즈의 초점 위치에 단일 슬릿을 설치한다. 식 (Ⅳ. 5-13)에 의하면 가능한 많은 슬릿 선들을 사용하여야 높은 분해능이 얻어질 수 있기 때문에, [그림 Ⅳ-78]과 같이 회절격자에 입사되기 전에 광의 크기를 평행하게 확대하는 과정이 필요하다. 여기에서는 프리즘 분광에서 사용한 평행광용 렌즈 대신에 구면 거울 M_1을 사용하여 평행광을 만든다. 평행광은 회절격자에 입사되고 회절격자에 의해서 반사되면 파장에 따라 다양한 반사각으로 구면 거울 M_2을 향한다. 반사된 빛들은 파장에 따라 다른 각도를 가지게 되며 같은 파장의 광들은 평행광이 되어 나간다. 반사된 빛은 거울 M_2의 초점 평면에 있는 출사 슬릿 S_2 또는 검광판에 모아지며 파장에 따라 공간적으로 분리된 빛을 얻을 수 있다.

원리적으로 프리즘 분광기와 회절격자 분광기는 같은 구조를 가지고 있다. 먼저 선광원을 만든 후에 평행광을 만들어 분산 소자에 입사시키고 파장에 따라 다른 각으로 분리시킨 후에는 다시 집속시키는 과정을 거치게 된다.

[그림 Ⅳ-79] 회절격자 분광기

실험 빛의 회절

준비물 레이저, 직선 필라멘트로 된 전구, 단일 슬릿(폭이 다른 것 2개), 자, 스크린, 구역판(zone plate), 원형 구경, 투명 테이프, 빨간색 셀로판지, 파란색 셀로판지

과정

1. [그림 Ⅳ-80]과 같이 레이저와 단일 슬릿을 장치하고 스크린에 나타난 회절무늬를 관찰한다.
2. 폭이 다른 슬릿으로 관찰하고 1의 결과와 정성적으로 비교하여라.
3. 중앙의 밝은 영역의 폭을 측정하여 슬릿의 폭을 결정하여라.
4. 나트륨등에서 나온 빛을 렌즈로 집속시킨 후에 회절무늬의 변화에 대하여 설명하여라. 슬릿 앞쪽 또는 뒤쪽에 편광판을 설치하고 편광판의 각도에 따른 회절무늬 변화를 살펴 보아라. 그 이유에 대해 설명하여라.
5. 1의 과정에서 슬릿 대신에 원형 구경을 설치하고 회절무늬를 관찰하여 보자. 회절무늬로부터 원형 구경의 직경을 측정해 보자
6. 구역판(zone plate)을 설치하고 스크린의 위치를 바꾸면서 통과된 모양을 관찰한다. 특히 중앙이 가려진 구역판의 경우, 그림자에 해당하는 지점의 중앙에 빛이 모아지는 것을 자세히 관찰해 보자.

[그림 Ⅳ-80] **단일 슬릿에서의 회절 실험 장치 개념도**

논의

1. 호이겐스의 원리를 이용하여 회절 현상을 설명해 보자.

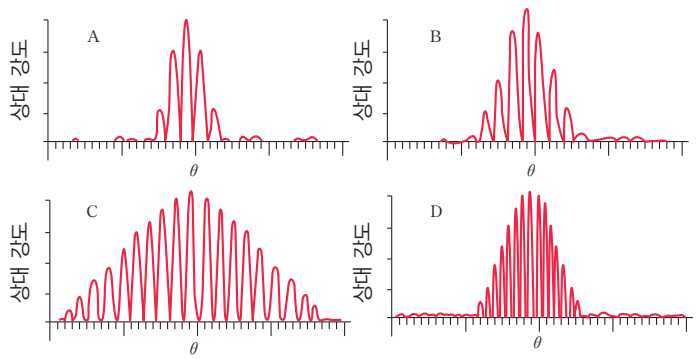
2. 구역판을 자세히 살펴보고 각각의 원형의 띠가 하는 역할에 대해 말해보자.

3. 모기장과 같은 정사각형 그물망을 통하여 나트륨등을 보자. 어떤 회절무늬가 관찰되는가?

4. CD 표면이 반사형 회절격자와 비슷하다는 점에 착안하여 CD를 이용한 반사형 회절격자 실험을 정량적으로 하여 보자. 회절격자 사이의 간격을 측정해 보자. CD는 회절격자로 쓸 수 있겠는가? 쓸 수 있다면 어느 파장 영역에서 사용이 가능하겠는가?

연 습 문 제

1. 아래 각각의 그래프는 이중 슬릿 실험에서 θ에 따른 상대적인 세기를 보여준다. 상대적 세기는 빛의 세기를 $\theta = 0$일 때의 세기로 나눈 것이다. 가로축 눈금의 척도는 모든 그래프에서 같다. 아래의 네 경우에서 달라질 수 있는 것은 오직 슬릿의 폭과 슬릿의 중앙 사이의 거리이다.

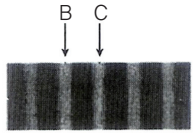


(1) 위 네 경우를 슬릿의 폭이 큰 것부터 순서대로 나열하여라. 만약 슬릿의 폭이 같은 경우가 있다면 정확히 나타내어라. 이유를 설명하고, 순서를 정하는데 사용한 그래프의 특징들을 명확하게 제시하여라.

(2) 위 네 경우를 슬릿의 중앙 사이의 거리가 큰 것부터 순서대로 나열하여라. 만약 슬릿의 중앙 사이의 거리가 같은 경우가 있다면 정확히 나타내어라. 이유를 설명하고, 순서를 정하는데 사용한 그래프의 특징들을 명확하게 제시하여라.

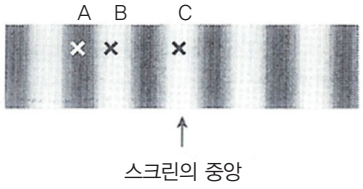
연 습 문 제

2. 스크린 중앙에서 왼쪽 첫 번째 최대 지점인 점 B를 생각해 보자. 두 슬릿의 간격은 0.2 mm이고, 스크린은 슬릿으로부터 1.2 m 거리에 있고, 무늬의 중앙(점 C)으로부터 점 B까지의 거리는 3.6 mm라고 가정하자.



위의 정보를 사용하여 빛의 파장을 구하여라. 사용한 근사를 기술하여라.

3. 작은 빨간색 전구가 이중 슬릿이 설치된 마스크로부터 매우 멀리 떨어져 놓여 있다. 두 슬릿 사이의 간격은 d이다. 오른쪽 사진은 멀리 있는 스크린에 나타난 무늬를 보여준다.

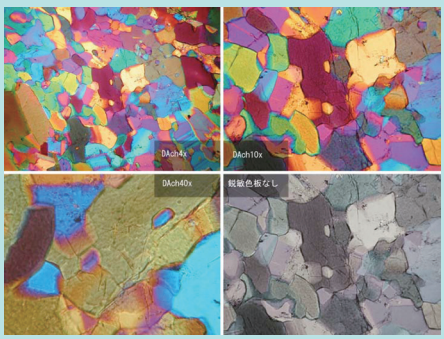


이제 이중 슬릿을 슬릿 사이의 거리와 폭이 같은 3중 슬릿으로 바꾸자.

(1) 3중 슬릿으로 바꾸었을 때, 점 A는 여전히 빛의 세기가 0일까? 이유를 설명하여라.

(2) 3중 슬릿으로 바꾸었을 때, 점 B는 여전히 최대보강간섭이 일어나는 지점일까? 이유를 설명하여라.

6 편광



평면파에서 전기장 벡터는 공간의 고정된 방향으로 항상 진동한다. 이러한 빛의 특성을 선편광되었다고 말한다. 이 때 자기장 벡터도 마찬가지로 전기장과 직각 방향을 유지하면서 진행한다. 일반적인 광선은 제멋대로 배열된 수많은 원자복사체들로 되어 있어 편광되지 않았다.

편광된 빛은 근본적으로 횡파와 관련되어 있다. 광의 편광은 횡파의 특성을 나타내며 편광상태는 빛과 광학 매질과의 상호작용으로 변화시킬 수 있다.

1. 편광의 종류

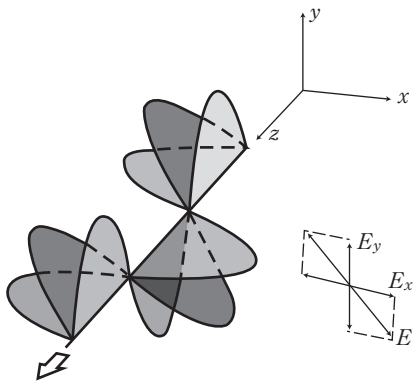
횡파인 전자기파는 진행 방향에 대하여 수직인 평면에서 전기장이 진동한다. 따라서 어느 한 방향으로 진행하는 빛에 대해 전기장이 진동하는 방향(편광방향)은 진행방향에 대해 수직인 평면 위에서 두 가지 성분으로 분리할 수 있다. z방향으로 진행하는 빛에 대하여 전기장은 x, y 두 성분으로 나누어 쓸 수 있다. 각진동수 ω인 빛의 두 성분은 다음과 같다.

$$E_x = E_{0x}\sin(kz - \omega t + \phi_1) \qquad (\text{Ⅳ}.\ 6\text{-}1)$$

$$E_y = E_{0y}\sin(kz - \omega t + \phi_2) \qquad (\text{Ⅳ}.\ 6\text{-}2)$$

식 (Ⅳ.6-1)은 진폭이 E_{0x}, 초기 위상이 ϕ_1인 x방향의 진동을 나타내고, 식 (Ⅳ. 6-2)는 y방향의 진동을 나타내는 것으로 진폭 E_{0y}, 초기 위상이 ϕ_2이다.

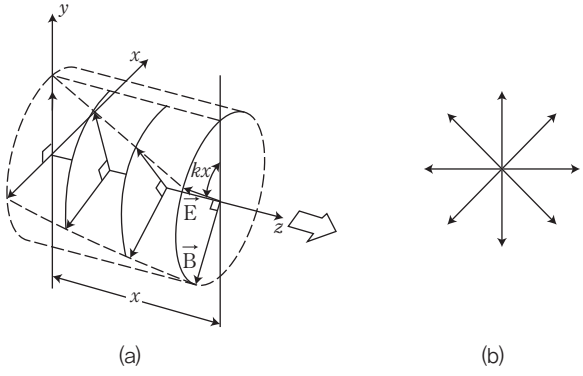
두 파의 초기 위상 ϕ_1과 ϕ_2가 같은 경우에는 [그림 Ⅳ-81]과 같이 합성파의 진동방향은 y축과 기울기가 E_{0y}/E_{0x}을 유지한 채 파가 진행을 하여도 변하지 않을 것이다. 이와 같이 진동 방향이 변하지 않고 하나의 방향을 유지하면서 진행하는 편광을 **선편광**이라 한다.



[그림 Ⅳ-81] 2사분면과 4사분면에서 진동하는 선편광된 빛

예제 $E_{0y}/E_{0x}=1/\sqrt{3}$ 일 때 편광 상태에 대하여 설명하시오.

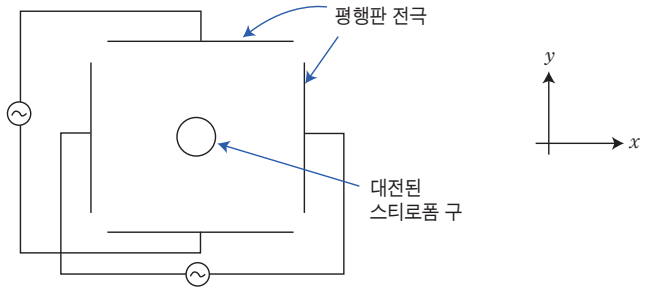
또한 x축 성분의 진폭 E_{0x}와 y축 성분의 진폭 E_{0y}가 서로 같고 위상차가 90°라면 전기장은 z방향으로 나선형을 그리면서 [그림 Ⅳ-82] (a)와 같이 전파하게 된다. 이러한 편광을 **원편광**이라 한다. 한편 보통의 광원에서 나오는 빛들은 [그림 Ⅳ-82] (b)와 같이 전기장의 진동 방향이 무질서하게 변하기 때문에 **비편광**이라 한다. 이때는 전기장을 성분별로 나누었을 때 x축 성분과 y축 성분이 순간적으로 위상이 일치하겠지만 계속 변하기 때문에 두 성분 사이에 정확한 위상차를 말할 수 없게 된다.



[그림 Ⅳ-82] (a) 원편광된 빛, (b) 비편광된 자연광

예제 빛이 오는 방향을 볼 때, 전기장 벡터가 왼쪽으로 돌아가는 경우와 오른쪽으로 돌아가는 경우에 어떤 차이가 있는지 생각해 보자.

물질 내의 전자가 편광된 빛과 어떻게 상호작용하는지 [그림 Ⅳ-83]의 모델을 이용하여 살펴보자. 서로 수직하게 평행판 전극을 설치하고 내부에 대전된 스티로폼 구를 놓았다고 하자. 이때 물질 내의 전자는 구에 해당하고 외부에서 가하는 전기장은 전자기파의 전기장에 해당한다. y축 방향으로만 진동하는 빛, 즉 y축 방향으로 선편광된 빛이 매질에 입사된 경우에 구는 y축 방향에서 진동할 것이다. 이제 y축 방향의 전기장은 0으로 하고 x축 방향에 sine 형태로 진동하는 전기장을 가하면 구는 x축 방향으로 진동할 것이다. 이는 x축 방향으로 선편광된 경우를 의미한다.



[그림 Ⅳ-83] **편광된 빛과 원자의 상호작용 모델**

이제 x축과 y축에 같은 진폭과 위상을 가지고 sine 형태의 전기장을 가하면 구는 45° 방향의 선을 따라 진동할 것이다. 이 경우 역시 선편광이다.

하지만 x축과 y축 사이에 90° 위상차를 두고 sine 형태의 전기장을 가하면 구는 원운동을 할 것이다. 이와 같이 x성분과 y성분에 90°의 위상차가 유지되면서 진동하는 전자기파를 원편광되었다고 한다.

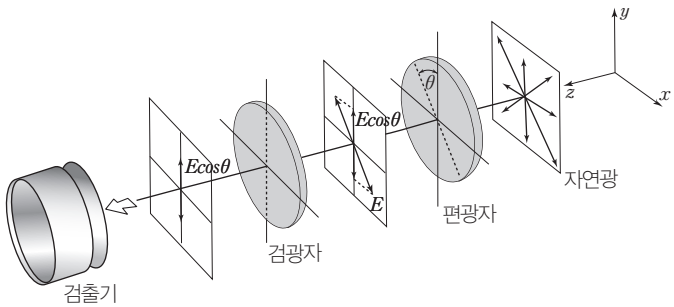
2. 편광자

어떤 특정한 방향으로 진동하는 빛을 흡수하거나 반사하여, 한쪽 방향으로만 전기장 성분이 진동하도록 하는 광학기구를 선형편광자(polarizer)라고 한다. 선형편광기를 거친 후에 결정된 편광 방향을 편광자의 편광축(또는 투과축)이라 한다. 무편광된 빛을 편광축이 x방향으로 놓인 편광자를 통과시키면 x축 방향으로 진동하는 성분만 통과하게 된다. 이와 같이 통과된 빛은 수학적으로 식 (Ⅳ. 6-1)로 기술된다. 그러나 자연광 즉 비편광된 빛을 통과시켰다면 초기 위상이 시간에 따라 무질서하게 변한다. [그림 Ⅳ-84]와 같이 어떤 방향으로 선편광된 진폭 E_0인 빛을 그것과 편광축이 θ

기울어진 편광자를 통과시키면 진폭이 $E_0\cos\theta$가 되고, 편광자의 투과축과 나란한 선편광된 빛이 투과될 것이다. 이때 입사하는 빛의 세기를 I_0라 하면 투과광의 세기는

$$I = I_0\cos^2\theta \qquad (\text{Ⅳ. } 6\text{-}3)$$

이 된다. 이 식을 Malus 법칙이라 하며, 어떤 빛이 선편광 되었는지를 알아보기 위해서 사용되는 중요한 식이다. $\theta = 90^\circ$이면 통과하는 빛이 하나도 없음을 의미한다.



[그림 Ⅳ-84] Malus 법칙

원편광된 빛의 경우에 선형편광기를 통과시키면 임의의 방향으로 선편광된 빛을 얻을 수 있다. 따라서 원편광된 빛은 선형편광기의 각도와 무관하게 통과하는 빛의 세기가 일정함을 알 수 있다. 무편광된 빛도 선형편광기의 각도와 무관하게 같은 세기의 빛이 나오는데, 원편광된 빛과는 크게 다르다. 즉, x축 성분과 y축 성분에 90°의 일정한 위상차가 유지되는 경우가 원편광이고, 두 성분 사이에 위상차를 말할 수 없을 때가 비편광이다.

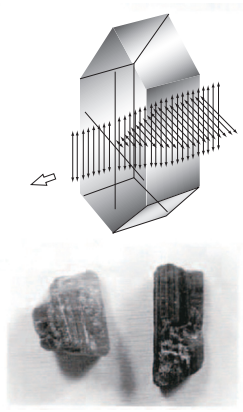
예제 투과축이 서로 수직이 되게 설치한 선형편광기 안에 투과축이 45°방향이 되도록 선형편광기를 내부에 설치하고 빛을 입사시키게 되면 어떻게 되겠는가? 단, 첫 번째 편광판을 거친 후의 빛의 세기는 I_0이다.

3. 편광을 만드는 방법

1) 이색성

가장 일반적으로 사용되는 편광판의 원리이다. [그림 Ⅳ-85]와 같이 두 개의 편광 성분 중 투과축과 일치하는 성분은 투과시키고 투과축에 수직

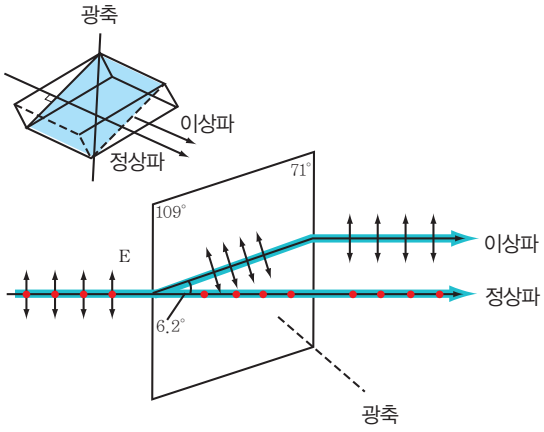
인 성분은 흡수해서 통과하지 못하고 열에너지로 바뀌게 된다. 이와 같이 두 개의 수직 성분에 대한 흡수 계수의 차이가 나는 성질을 이색성(dichroism)이라고 한다. 물질이 비등방적으로 되어 있어 흡수축에 나란한 방향에 대해서는 공명을 일으켜 에너지를 모두 흡수하고, 투과축에 나란한 성분에 대해서는 공명 진동수에서 멀어 투과되는 성질을 이용한 것이다.



[그림 Ⅳ-85] 이색성

2) 복굴절

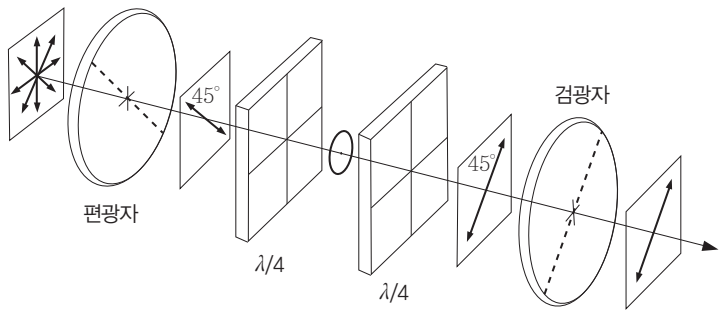
빛의 진행속도 $\frac{c}{n}$가 물질의 비등방성으로 인해 편광상태에 따라 달라지는 복굴절을 나타내는 물질이 있다. 방해석, 운모 등 복굴절 결정 속에서 대칭축인 광축 방향으로 나아가는 빛은 편광방향에 관계없이 그 진행속도 v_0가 같지만 그 외의 방향으로 나아가는 빛은 두 가지 속도를 가지고 있다. 이때에는 광축에 수직인 편광 성분과 그것에 수직인 두 개의 편광 성분이 진행하는 속도가 다르게 된다. 즉, 광축방향에 수직방향으로 편광된 빛은 역시 속도가 v_0이지만, 광축방향의 빛은 속도 v_e로 v_0와 같지 않다. 따라서 [그림 Ⅳ-86]과 같이 편광이 안된 빛을 입사시키면 광축에 수직인 성분은 스넬 법칙을 만족시키면서 통과하나, 그것에 수직인 성분은 스넬 법칙을 만족시키지 않으면서 굴절된다. 방해석을 통과한 후에 분리된 빛은 서로 수직하게 편광되어 있다.



[그림 Ⅳ-86] 복굴절에 의한 편광

[그림 Ⅳ-87]과 같이 비편광된 빛을 y축에 대하여 45°기울어진 편광판을 통과시킨 후, 광축이 y축 방향이고 두께가 d인 복굴절체를 통과시키는 상

황을 고려해 보자. 편광판을 통과한 후에 빛은 y축과 45°의 각도로 기울어진 선편광된 빛이 된다. 복굴절체를 입사할 때 두 개의 선편광 성분 즉, 광축에 수직인 성분(정상파)와 광축에 수평한 성분(이상파)는 초기 위상이 같지만 두께가 d인 물체를 통과한 후에는 진행속도가 달라 위상차를 두고 다시 중첩이 된다. 원형편광이 되도록 하기 위해서는 위상차가 90°가 되어야 하는데 이와 같이 제품화된 판을 λ/4판이라 한다. 한편 위상차가 180°가 되도록 하는 판을 λ/2판이라 하며, 선편광된 빛의 편광각도를 임의로 바꾸고자 할 때 사용한다. λ/4판 뒤에 또 하나의 선편광자(이를 흔히 검광자라 한다)를 놓고 투과축을 회전시키면서 투과되는 빛의 세기를 측정하면 투과축의 방향에 무관하게 일정하다는 것을 알 수 있다. 이는 λ/4판을 통과한 빛이 원형 편광되었음을 의미한다.



[그림 Ⅳ-87] **위상 지연판을 이용하여 원형 편광을 만드는 방법**

3) 반사에 의한 편광

빛이 반사면에 부딪히면 부분적으로 편광이 되거나 특별한 각도(이를 편광각이라 한다.)에서는 완전히 선편광된 빛만이 반사하는 경우가 있다. 그 대표적인 예로 해가 앞쪽에서 비출 때 낚시꾼이 편광안경을 쓰는데, 그 이유는 빛이 물 표면에서 반사될 때 편광되기 때문이다. 호수 면을 바라볼 때 반짝거리는 현상이 이에 해당한다.

[그림 Ⅳ-88]과 같이 표면에 입사된 전자기파의 성분은 표면에 평행한 성분과 그것에 수직한 성분으로 나누어 볼 수 있다. 평행한 성분은 전자가 물질 표면을 따라 잘 진동할 수 있기 때문에 전자기파를 재방출하지만, 물질 표면에 수직인 성분은 전자가 표면 밖으로 진동해야 하는 상황이 벌어진다. 하지만 전자가 경계면 밖으로 튀오나오는 것은 거의 불가능하다. 따라서 이 성분에 의한 반사파는 없게 된다.

반사광이 완전 편광이 되는 편광각에서는 반사광선과 굴절광선이 90°가 된다. 이 경우에는 굴절광선에 수직한 성분이 바로 반사광선 방향이 되므로 반사광선 방향으로 진동하는 쌍극자는 진동 방향으로 재방출하는 빛이 없으므로 완전 편광됨을 알 수 있다.

반사광선과 굴절광선이 90°라는 사실로부터

$$n_1 \sin\theta_B = n_2 \sin\theta_r \qquad (\text{Ⅳ. } 6\text{-}4)$$

에서

$$\theta_B + \theta_r = 90^\circ \qquad (\text{Ⅳ. } 6\text{-}5)$$

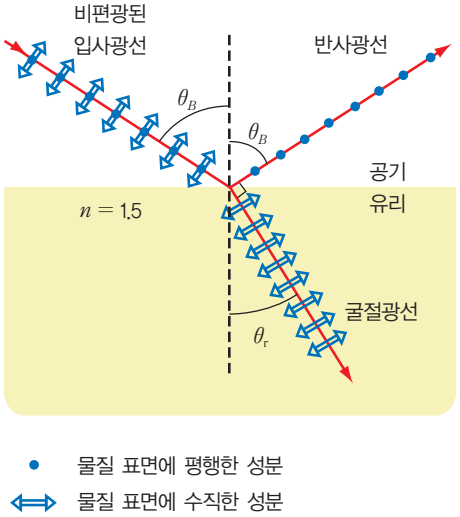
이므로

$$n_1 \sin\theta_B = n_2 \sin(90 - \theta_B) = n_2 \cos\theta_B$$

를 이용하면

$$\tan\theta_B = \frac{n_2}{n_1} \qquad (\text{Ⅳ. } 6\text{-}6)$$

이 된다.



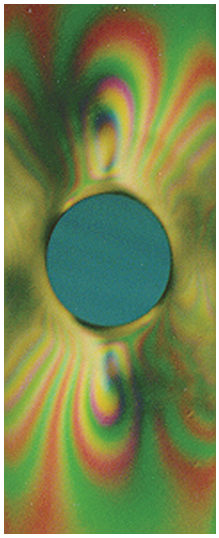
[그림 Ⅳ-88] **반사에 의한 편광**

이때 θ_B를 편광각 또는 브루스터(Brewster) 각이라 한다. 편광각을 측정하여 굴절률을 측정할 수도 있다.

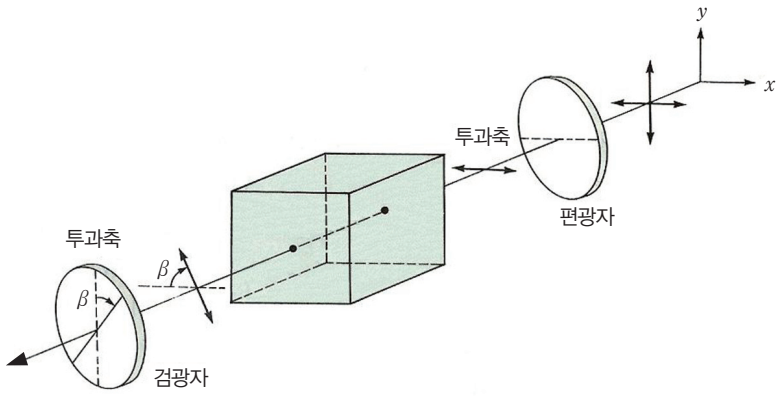
4. 광활성

수정 결정에 선편광된 빛이 입사하면 결정 속으로 빛이 진행함에 따라 편광 방향이 연속적으로 회전하게 만들 수 있다. 이러한 현상은 1811년 프랑스의 물리학자 아라고(Arago)에 의해서 최초로 관측되었다. 이와 같이 편광이 돌아가는 현상을 광활성이라 한다. 거의 비슷한 시기에 액체에 의한 광활성이 비오(Biot)에 의하여 발견되었다. 회전 방향은 결정의 방향에 따라 오른편이거나 왼편일 수 있는데 실험실에서 합성된 유기분자의 경우에는 오른편의 활성을 갖는 분자와 왼편의 활성을 갖는 분자가 거의 같은 수만큼 만들어지기 때문에 활성은 관측되지 않는다. 대표적으로 설탕물에 의하여 광활성을 관측할 수 있다. [그림 Ⅳ-90]은 광활성을 측정하기 위한 실험 장치이다. 편광된 빛을 설탕물에 통과시키고 검광자를 돌리면서 편광이 돌아간 정도를 측정할 수 있다.

한편, 어떤 등방성인 물체라도 압력을 받아 변형이 일어나면 복굴절 성질을 가지게 되어 편광된 빛이 통과하면 편광방향이 바뀌는 현상이 발생한다. 이와 같이 변형에 의한 편광 변화를 광탄성이라 한다. [그림 Ⅳ-89]는 광탄성을 측정한 실례이다. 선편광된 백색광이 광탄성이 있는 매질을 통과하면 위치마다 편광이 돌아간 정도가 파장별로 다르기 때문에 검광기를 통해 보면 아름다운 색을 관찰할 수 있다. 비닐 같은 것을 구겨서 두 편광판 사이에 넣고 보면 이 현상을 쉽게 관찰할 수 있다. 그러나 생물체에 의해서 합성된 유기분자는 한쪽 방향으로의 활성을 가진다.



[그림 Ⅳ-89] 광탄성



[그림 Ⅳ-90] 광활성 측정 실험 장치

실험 설탕물의 광활성 측정

준비물 광원, 필터, 볼록렌즈, 조리개, 편광자, 설탕물 통, 검광자, 광도계

과정

1. 설탕물 통에 농도를 맞춘 설탕용액을 넣는다.
2. [그림 Ⅳ-90]과 같이 실험 장치를 구성하고 편광자와 검광자 사이에 설탕물 통을 놓는다. 즉 광원, 필터, 볼록렌즈, 조리개, 편광자, 설탕물 통, 검광자, 광도계 순으로 설치한다.
3. 검광자를 돌려서 광도계의 눈금이 최대로 될 때 편광자와 검광자가 이루는 각을 기록한다. 이것이 설탕물에 의한 회전각이다.
4. 물통의 길이를 다르게 하여 회전각을 측정하여 보자.
5. 설탕물의 농도를 바꾸어 가며 회전각을 측정하고 농도에 대한 회전각을 그래프로 그려보자.

결론 및 논의

1. 설탕물의 농도 변화에 따라 회전각은 어떻게 변화하는지 논의해 보자. 그래프의 기울기는 무엇을 의미하는가?

2. 설탕물 통의 길이 변화에 따라 회전각은 어떻게 변화하는지 논의해 보자.

창의 탐구

다음 주어진 주제들에 대한 연구 계획을 세워 해결하고, 조별로 발표 · 토론해 보자.
※아래 주제들은 IYPT문제에서 발췌하였음(http://ww.kypt.or.kr/05iypt/iypt13.php).

1. Brilliant pattern (23회 IYPT)
Suspend a water drop at the lower end of a vertical pipe. Illuminate the drop using a laser pointer and observe the pattern created on a screen. Study and explain the structure of the pattern.

2. Liquid light guide (23회 IYPT)
A transparent vessel is filled with a liquid (e.g. water). A jet flows out of the vessel. A light source is placed so that a horizontal beam enters the liquid jet. Under what conditions does the jet operate like a light guide?

3. Shrieking rod (23회 IYPT)
A metal rod is held between two fingers and hit. Investigate how the sound produced depends on the position of holding and hitting the rod?

4. Optical tube (22회 IYPT)
Look down a cylindrical metal tube which is shiny on the inside. You will notice dark and light bands. Investigate the phenomenon.

5. Pin hole Camera (21회 IYPT)
Study the characteristics of a pin-hole camera and find the conditions that the camera gets the clearest image

6. Flute (21회 IYPT)
Drill a hole into the side of a tube that is open at one end and produce a sound by blowing the open end. Investigate the pitch and timbre of the sound of your flute and how they depend on the position and the diameter of the hole.

7. Singing tube (19회 IYPT)
A tube open at both ends is mounted vertically. Use a flame to generate sound from the tube. Investigate the phenomenon.

8. Balloon (20회 IYPT)
Measure the change of the optical properties of the skin of a balloon during its inflation.

※ 한 주제를 2조 이상이 연구하고, 그 결과를 발표하고 토론하는 과정을 거쳐보자.

읽을 거리

빛에 대한 두 가지 이론

빛의 본질은 17세기에 많은 논쟁의 원인이 되었다. 데카르트는 빛을 역학의 원리가 적용될 수 있는 입자 또는 '미립자'의 흐름으로 취급하였다. 그는 빛의 간섭이 편평한 표면에서 테니스공이 완전탄성 충돌을 하는 것과 비슷하다고 생각했다. 빛이 공기로부터 유리로 들어가는 굴절을 설명하기 위해 그는 표면에 수직한 입자의 속도 성분이 유리 속에서 더 크다고 가정했다. 뉴턴도 미립자 가설을 지지했지만 그럼에도 불구하고 굴절을 기술하는 것이 어설프다고 생각했다. 그는 유리 속에서의 광선의 일부가 진공을 만났을 때 반사된다는 것을 지적했다. 이 경우 어떤 것과 미립자가 충돌할 수 있겠는가?

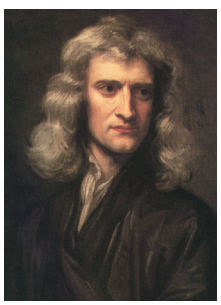
크리스티안 호이겐스는 미립자 가설을 거부하였다. 그 대신 그는 에테르라고 부르는 매질에서 나타나는 횡방향의 펄스거나 교란일 것이라고 제안하였다. 이것은 현대적인 파동의 이론은 아니었다.

빛의 반사와 굴절현상은 파동이론과 입자이론 모두로 설명할 수 있다. 빛의 간섭과 회절현상은 논쟁을 더 심화시켰다. 1665년 로버트 훅은 운모의 가는 조각과 유리판 사이의 얇은 막에서 볼 수 있는 색을 기술하였다. 그는 유리판을 손으로 눌러 압력을 가하면 막의 두께에 따라 색이 다르게 되는 것을 발견하였다. 그는 일종의 '파동' 이론을 전개하여 막의 윗면과 아랫면에서 반사된 빛의 간섭으로 색을 정성적으로 설명하였다. 호이겐스와 마찬가지로 그도 역시 빛의 주기성(파장과 진동수)은 고려하지 않았다. 그는 이 현상을 더 이상은 분석할 수가 없었는데 그 이유는 막의 두께를 잴 수 없었기 때문이다.

뉴턴은 1666년부터 1672년에 거쳐 얇은 막에 생기는 색을 연구하였다. 훅이 최초로 사용했던 실험 장치에서 쐐기모양의 공기막을 만들기 위하여 큰 곡률반지름을 갖는 렌즈를 편평한 유리판 위에 놓았다. 그 막에 빛을 쪼였을 때 밝고 어두운 동심원이 연속적으로 번갈아 나타났으며, 프리즘을 통하여 다른 색의 빛을 쪼였을 때에 그 고리가 커지기도 하고 줄어들기도 하는 것을 보았다. 그는 첫 번째 밝은 고리가 나타나는 곳의 두께가 t였다면 다음 밝은 무늬가 나타나는 곳의 두께가 3t, 5t 등인 것을 알아냈다. 어두운 무늬는 2t, 4t에서 나타난다. 빨간 빛의 고리가 파란 빛보다 크다는 사실로부터 그는 빨간 빛의 미립자가 파란 빛보다 크다고 유추하였다. 그 고리는 명백히 주기적인 성질을 갖는 것이었다. 하지만 훅과 뉴턴 모두 미립자의 크기와 파장을 연결시키지 못했다.

이탈리아의 제수이트 교도인 그리말디는 빛의 또 다른 재미있는 현상을 발견하였다. 1665년에 발표한 논문에서 빛이 직선으로 나아가지 않는 것을 보여주

데카르트(Rene Descartes, 1596~1650)
프랑스의 철학자 · 수학자 · 물리학자. 근대철학의 아버지로 불리는 데카르트의 형이상학적 사색은 방법적 회의에서 출발한다.



뉴턴(Isaac Newton, 1642~1727)
영국의 물리학자 · 천문학자 · 수학자 · 근대이론과학의 선구자. 수학에서는 미적분법을 창시하고, 물리학에서는 뉴턴 역학의 체계를 확립했다.

호이겐스(Christian Huygens, 1629~1695)
네덜란드의 수학자, 물리학자이자 천문학자이다. '호이겐스의 원리'로, 빛의 여러 가지 현상을 설명하고 빛의 파동설을 확립하였다.

훅(Robert Hooke, 1635~1703)
영국의 화학자 · 물리학자 · 천문학자로서 박막의 색에 관한 연구로 파동설의 선구자가 되었다.

그리말디(Francesco Maria Grimaldi, 1616~1663)
회절격자에 의한 빛의 분산에서 색의 문제를 고찰하여 색을 물체의 구조에 귀착시킴과 동시에 빛의 파동설과 다른 유체현상과의 유사성을 밝혔다.

영(Thomas Young, 1773~1829)
영국의 의사 · 물리학자 · 고고학자.'에너지'라는 술어에 과학적 의미를 부여하고, 빛의 간섭 원리를 발견하였으며, 탄성률의 하나인 영률을 도입하였다.

는 몇 가지의 실험을 기술하였다. 그는 불투명한 가는 끈을 점광원으로부터 어떤 거리만큼 떨어지게 놓았을 때 그림자의 경계가 색을 띤 모양이 된다는 것을 발견하였다. 끈을 구멍으로 바꾸었을 때에도 마찬가지로 기하학적인 그림자의 영역에 색띠들을 볼 수 있었다. 이렇게 광선이 기하학적인 그림자의 영역에서 그림자의 영역으로 휘어지는 것을 회절이라 불렀다.

뉴턴은 자신의 실험과 빛의 파동성을 보여주는 그리말디의 실험에도 불구하고 입자이론을 옹호하였다. 파동이론에 대한 그의 반대 주장은 파동이 공기 중에서나 물속에서 장애물의 뒤에까지 눈에 띠게 퍼지는 데에 반하여 빛은 직선으로 나아간다는 것이었다. 그는 빛의 회절은 파동이론으로 받아들이기에는 너무 작다고 생각하였다.

그가 보기에 빛은 장애물의 끝에서 에테르의 밀도가 약간 낮아 굴절하게 된다. 뉴턴은 빛이 꺾이는 것을 설명할 수 있었지만 색띠를 설명하는 데는 실패했다. 회절을 가장 잘 설명하는 파동이론의 제안자라고 알려진 호이겐스조차도 1690년 논문에서 회절에 대한 언급이 없었다는 것은 흥미롭다. 그의 주된 관심은 어떻게 그의 파동이론이 빛의 직진성을 설명하느냐였다. 그도 얇은 막의 색에 대해서는 논의하지도 않았다.

뉴턴이나 호이겐스 둘 다 그들을 불편하게 만드는 실험적 사실들을 무시하기로 했기 때문에 빛의 파동이론은 가망성이 없었다. 뉴턴은 빛의 파동성이 완전히 비합리적인 것이 아니라고 인정하였지만 그는 아쉽게도 빛의 파장이 얼마나 작은지를 깨닫지 못했다. 불행하게도 그의 입자이론에 대한 옹호는 빛의 본질에 대한 연구를 거의 한 세기 동안 지연시켰다.

입자이론에 대한 첫 번째의 중대한 도전은 파의 중첩원리를 처음으로 발표한 토마스 영에 의한 것이다. 영은 뉴턴 실험에서 나타난 어두운 고리는 맥놀이와 비슷한 원리로 만들어진다고 생각하였다. 호이겐스와 마찬가지로 그는 입자들이 어떻게 그런 행동을 하는지 상상할 수가 없었다. 영은 뉴턴 실험으로부터 가시광선의 파장을 계산하였다. 그는 빛의 파동성을 보여준 그의 1802년 이중 슬릿 실험으로 잘 알려지게 되었다.

19세기의 물리학자들은 전자기장을 모든 곳에 퍼져있는 에테르의 교란이라고 상상하였다. 만일 두 전하가 상호작용한다면, 그들이 포함되어 있는 에테르가 전하의 존재에 의하여 일그러지기 때문에 그 결과로 생긴 변형이 한쪽에서 다른 쪽으로 전달되었다. 맥스웰의 장 방정식은 에테르 그 자체를 명확하게 논의하지 않고도 이 측정 가능한 매질의 교란을 기술했었다. 따라서 빛은 단순히 에테르 안에서 진동자의 역학적 변형력으로 구성된 파열이었으며, 전자기파가 존재하기 위해서는 전달 매질이 있어야만 했다. 심지어 마이켈슨-모올리 실험과 아인슈타인의 특수상대성이론이 에테르 가정을 부정한 후에도 맥스웰의 방정식은 남아있었다. 심지어 전체적인 형상이 바뀌었을지라도 이들 방정식의 타당성

은 지속되었다. 약간의 개념적 변동이 있었지만 장 그 자체가 물리적인 본질이며, 어떤 매질이나 다른 빈 공간을 이동하는 능력과는 무관하였다. 전자기파는 전자기장에서 전파되는 교란으로 이해되었다.

19세기의 전환점에서 맥스웰에 의해 만들어지고 헤르츠에 의해 자세하게 입증된 빛의 전자기 이론은 과학의 주춧돌의 하나로 확실하게 확립되었다. 그러나 그 이론이 물리학에서 만족스러웠던 기간은 대체로 짧았으며 1900년에 플랑크가 물리 세계의 관점을 극적으로 바꾸어 놓은 개념, 즉 에너지가 양자로써 방출되고 흡수된다는 가정이 물질 본연의 기본적인 성질이라고 제안하여 선풍을 일으켰다.

1887년 헤르츠가 빛이 전자기파라는 것을 증명한 바로 그 실험은 동시에 빛의 입자성을 처음 보여주는 실험이 되었다. 1888년 헐윅스는 아연판에 자외선을 비추면 판이 양전하로 대전되는 것을 발견하였고, 1899년 톰슨은 판으로부터 전자가 튀어나오는 것을 보였다. 그 이후에 1902년 레나드는 이 입자의 전하량 대 질량의 비를 측정하여 헤르츠에 의해 관측된 불꽃의 증가가 현재 광전자라 일컫는 전자의 방출이라는 결과를 확고히 했다.

고전 전자기학 이론으로 광전효과에 대한 해석이 불가능하다는 실증은 1905년 아인슈타인의 플랑크 양자가설에 대한 과감한 확대로부터 시작된 뛰어난 논문에서 최종적으로 해결되었다.

한 계의 에너지가 양자화되었다는 개념은 고전물리학으로부터의 일대 전환을 필요로 하게 되었다. 일부 과학자들에게는 흑체복사와 광전효과의 놀라운 성공도 양자 개념의 정당성을 확신시키기에는 충분치 않았다. 1910년까지 플랑크는 진동자의 에너지 준위의 양자화를 받아들였으면서도 복사 그 자체가 양자화되어 있다는 견해에는 강력히 반발하였다.

1923년 컴프턴은 흑연으로부터 반사되는 X선을 연구하면서 광자 개념의 또 다른 증거를 발견하였다. 고전적으로 전하는 입사하는 복사선의 진동수와 같은 진동수로 진동하고 같은 진동수에서 재방출해야만 한다. 컴프턴은 반사된 복사선이 두 개의 성분을 갖고 있음을 발견하고 이를 광자와 전자 사이의 충돌로 분석하였다.

이후 수소의 가시광선 스펙트럼 분석과 보어의 원자 모형에 대한 해석, 드브로이의 물질파에 대한 해석 등은 파동과 입자에 대한 해석을 모호하게 만들었다.

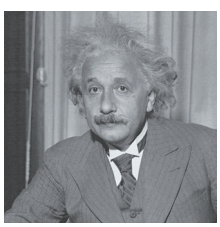
빛은 파동-입자 이중성을 갖는다. 어떤 실험이냐에 따라, 빛은 입자처럼 또는 파동처럼 행동한다. 이 말은 빛이 실제로 입자이거나 파동이라는 뜻은 아니다. 그것들은 이해를 돕는 간단한 모형들이다. 낮은 진동수-예를 들어, 라디오파-에서는 단지 수십억 개의 광자를 검출할 수 있고 따라서 연속적인 파동으로서의 빛의 모형이 적합하다. 가시광 영역에서는, 여러 다른 실험 -예를 들어 간섭 또는 광전효과-에 따라 파동 또는 입자모형을 필요로 한다. X선 같은 높

마이켈슨(Albert Abraham Michelson, 1852~1931)

미국의 물리학자. 운동하는 매질 속에서의 광속 문제를 연구하였다.

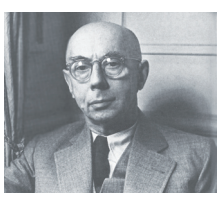
모올리(Edward Williams Morley 1838~1923)

마이켈슨 모올리의 실험으로 아인슈타인의 상대성이론 건설에 밑거름이 되었다.



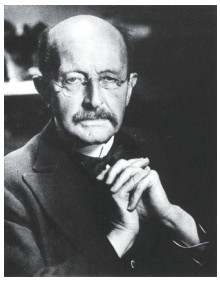
아인슈타인(Albert Einstein, 1879~1955)

광양자설, 브라운 운동의 이론, 특수상대성이론, 일반상대성이론을 발표하였다.



헤르츠(Heinrich Rudolf Hertz, 1857~1894)

독일의 물리학자. 헤르츠의 공명자를 이용하여 전자기파의 존재를 확인하였다.



플랑크(Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858~1947)
독일의 물리학자. 엔트로피 · 열전현상 · 전해질용해 등을 연구하였다.

보어(Niels Henrik David Bohr, 1885~1962)
덴마크의 물리학자. 보어의 원자이론은 후에 양자역학으로 발전하였다.

드브로이(Louis de Broglie, 1892~1987)
프랑스의 이론물리학자. 물질파에 관한 견해를 제시했다.

은 진동수에서는 결정회절을 통해 여전히 X선의 파동성이 나타나지만, 주로 입자 모형을 적용하여야 하는 결과들이 관측된다.

빛의 파동-입자 이중성의 개념은 아인슈타인이 도입했다. 광자를 소개한 그의 1905년 논문에서 빈의 복사법칙만을 써서 짧은 파장의 빛이 기체입자의 성질과 비슷한 성질을 갖는다는 것을 보였다. 물론, 긴 파장에서 성립하는 레일리-진스 법칙은 복사의 파동성에 바탕을 둔 것이다. 1909년 공동 복사에 대한 또 다른 분석 논문에서 아인슈타인은 플랑크 법칙에 의해 주어지는 전체 공동 복사 스펙트럼은 사실상 입자모형과 파동모형 모두를 필요로 한다는 것을 증명하였다.

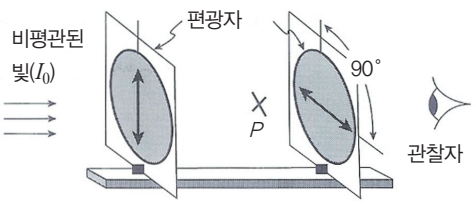
빛의 성질을 꼭 집어서 말할 수 없다는 사실과 빛 속력 일정의 원리의 사이에는 어떤 관계가 있다고 할 수 있다. 만일 빛이 파동이라면 그것의 속력을 매질에 대한 속력으로 측정할 수 있을 것이나, 에테르는 존재하지 않는다. 만일 빛이 입자로 구성되어 있다면, 속력은 광원에 대해 측정할 수 있을 것이나 실제로는 그렇지 않다. 특수 상대성이론에 따르면, 광자는 정지질량이 0이기 때문에 c의 속력으로 움직인다. 빛은 파동도 입자도 둘 다 아니라고 결론을 내릴 수도 있다! 이 단순한 모형들이 매우 성공적이었다는 것은 실로 놀랍다.

네이버 백과사전 http://100.naver.com/ 인물검색
위키피디아 http://www.wikipedia.org/ 인물검색

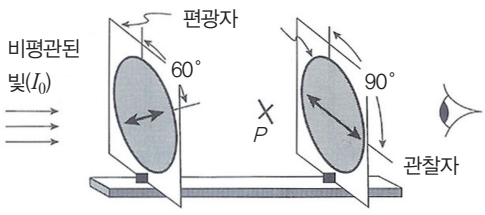
연 습 문 제

1. 세기가 I_0이고 편광되지 않은 빛이 두 개의 편광필터(편광자)에 입사한다. 관찰자는 아래 그림의 위치에서 편광자 쪽을 바라보고 있다. 각각의 편광자에 편광방향을 나타내는 양쪽 화살표가 그려져 있다.

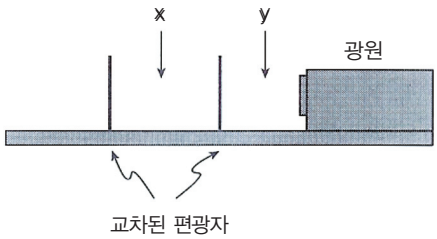
(1) 두 편광자 사이의 점 P에 도달하는 빛의 세기를 I_0로 나타내어라. 그 이유는?
이 경우 어떠한 빛이 관찰자에게 도달하는가? 이유를 설명하여라.



(2) 그림과 같이 첫 번째 편광자가 회전하여 편광방향이 수직선에서 60° 방향이 되었다고 가정하자. 점 P에 도달하는 빛의 세기는 (1)보다 커질까, 작아질까, 같을까? 이유를 설명하여라.
이 경우 어떠한 빛이 관찰자에게 도달하는가? 이유를 설명하여라.



2. 그림처럼 관찰자가 두 개의 편광자를 통하여 광원을 보고 있다. 편광자들은 투과된 빛이 최소가 되도록 교차하고 있다.



(1) 그림의 X로 표시된 위치에 세 번째 편광자가 삽입된다고 가정하자. 세 번째 편광자의 삽입이 관찰자에게 도달하는 빛의 세기에 어떤 영향을 줄 것인지 예상하여 보자.

(2) 이번에는 Y로 표시된 위치에 세 번째 편광자가 삽입된다고 가정하자. 세 번째 편광자의 삽입이 관찰자에게 도달하는 빛의 세기에 어떤 영향을 줄 것인지 예상하여 보자. 빛의 세기가 세 번째 편광자의 방향에 의존하는가?

V

현대 물리 탐구

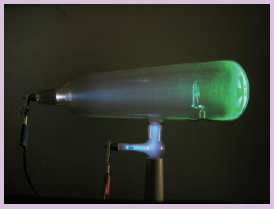
- 1. 전기 방전관과 전자 및 X선의 발견
- 2. 물질과 파동의 이중성
- 3. 원자의 구조
- 4. 핵 물리
- 5. 기본 입자
- 6. 현대 물리학의 검출기들

생 | 각 | 열 | 기

오늘날의 세계를 지배하는 컴퓨터 기술, 전자공학 기술, 반도체 기술 등은 현대물리학의 양자론에 근본을 두고 있다. 20세기로 진입하면서 발달된 현대 물리학은 생명과학의 여러 분야의 해명에도 응용되고 있고, Heisenberg의 불확정성 원리, Bohr의 상보성 원리 및 Einstein의 상대성 원리는 철학에도 커다란 영향을 미치고 있다

이 단원은 20세기 초부터 발달된 이와 같은 새로운 물리학을 이해하는데 목적이 있다. 새로운 내용을 이해하는데 중요한 것은 단순한 사실의 나열이라든가, 난해한 계산 결과의 단순한 이해가 아니라 새로운 아이디어들이 어떻게 형성되어 갔는가를 종합적으로 이해하는 과정이 중요하다.

1 전기 방전관과 전자 및 X선의 발견

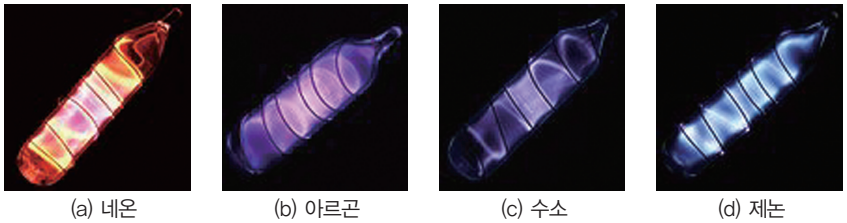


1880년경 에디슨(T. Edison)은 탄소 필라멘트의 전구를 발명했으나 이 전구가 어떻게 빛을 내는지 근본 원인을 알지는 못했다. 19세기 후반의 과학자들은 전기 방전관 내의 큰 전위차가 걸린 두 금속 전극의 한쪽 판에서 음극선이 생성된다는 사실을 알고 있었다. 그러나 음극선의 본성에 대해서는 알려져 있지 않았다. 이 당시에 물질 원소의 구성은 화학적 원자설 개념이 있었기 때문에 음극선이 원자 혹은 분자의 존재를 검증할 수 있는 존재일 것으로 믿었다. 음극선은 그 당시의 과학자들에게 흥미로운 주제였다. 1897년에 톰슨은 음극선의 정체에 대한 해답을 얻어냈다. 전기 방전관은 톰슨(J. J. Thomson)의 전자와 뢴트겐(W. K. Roentgen)의 X선 발견의 핵심적인 도구였다.

1. 전기 방전관

전기 방전관은 흔히 음극선관으로 불린다. 전기 방전관 내부 기체의 압력을 낮추고 두 개의 금속 전극판 사이의 전위차를 높여가면 기체의 종류에 따라서 [그림 Ⅴ-1] 같이 여러 가지 색의 발광 현상인 미광방전(glow discharge)이 관측되기 시작한다. 극히 낮은 내부 기체 압력에서는 유리 음극관의 양극 부근의 유리벽에서 형광이 발생된다. [그림 Ⅴ-2]은 유리벽에서 형광점이 생기는 현상의 그림이다.

❖ 기체의 압력단위 파스칼(Pa). 1 Pa = 1 N/m², 1 atm = 760 mmHg = 1 × 10^5 Pa



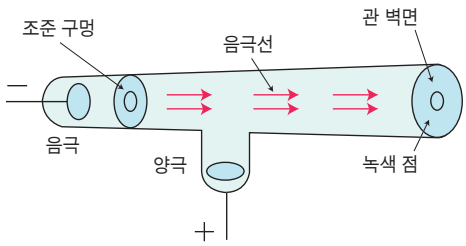
(a) 네온 (b) 아르곤 (c) 수소 (d) 제논

[그림 Ⅴ-1] 낮은 압력에서 여러 기체의 방전

가이슬러관(Geissler tube)은 미광방전을 보여 주는 대표적인 방전관이다. 기체 압력이 10 ~ 100 Pa, 두 금속 전극 사이의 전압은 100 V ~ 수 kV 정도의 가이슬러관에서 내부 기체 고유의 미광방전을 관찰할 수 있다. 가이슬러관에서 발생하는 미광방전을 가이슬러 방전이라고 부르며 대부분의 경우 시각을 자극하며 도시의 밤거리를 밝히는 전시물로 이용된다.

크룩스관(Crookes tube)은 기체 압력을 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ Pa 이하, 두 전극 사이 전압은 수 kV ~ 100 kV 로 만들어준 방전관이다. 크룩스관에서는 미광방전이 일어나지 않는다.

[그림 Ⅴ-3]에 크룩스관과 고전압 발생 유도코일이 있다. 크룩스관은 가이슬러관에서 내부의 기체를 거의 빼낸 고진공의 전기 방전관이다. 크룩스관에서 볼 수 있는 크룩스 방전은 양극 부근의 유리관 전체가 형광을 띠는 모양이다. 어떤 이유로 미광방전이나 형광이 발생되는 것일까?



[그림 Ⅴ-2] 크룩스관과 밝은 녹색 점의

[그림 Ⅴ-3] 크룩스 관과 고전압 발생 유도코일

2. 음극선과 톰슨 전자의 입자성

1) 시대적 전기 방전 연구 상황

미광방전과 형광의 발견은 여러 해 동안 여러 명의 물리학자들에 의해서 이루어졌다. 패러데이(M. Faraday)는 1833년 기체 방전 불꽃을 관찰했다. 헤르츠(H. Hertz)는 기체 방전 현상을 파동현상이라고 생각했다. 또 다른 과학자들은 방전관의 음극판으로부터 튀어나오는 음극선으로 불리는 알 수 없는 존재의 증거들을 검출했다.

크룩스는 크룩스 관을 통해 음극선들이 직선으로 운동량을 운반한다는 사실을 발견했다. 회전 날개로 음극선을 향해 쏘았을 때 날개를 회전시킨다는 사실을 알아내었다. 또한 그는 자기장에 의해 음극선들이 구부러질 수 있으며, 구부러지는 방향은 음의 전하에서 기대할 수 있는 방향이라는 것을 실험적으로 보여 준다. 이러한 모든 사실은 음극선이 실제적으로 음전하를 운반하는 물질 입자라는 것을 암시하였다.

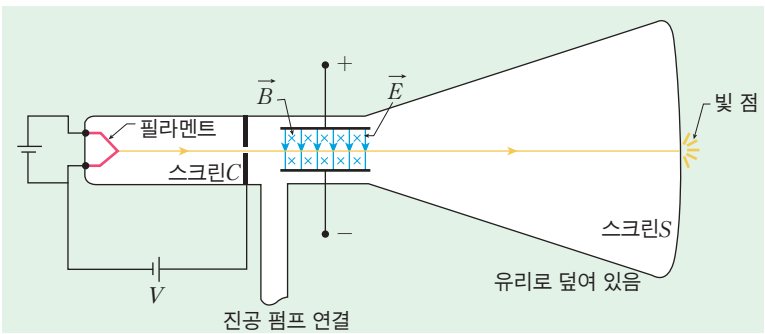
❖ 조세프 존 톰슨(Joseph John Thomson, 1856~1940)

35년동안 케임브리지에 있는 카벤디시연구소의 책임자로서 현대물리학을 개발하는데 가장 영향력이 큰 사람 중의 하나이다. 그의 학생과 조수들 중 일곱명이 노벨상을 수상하였다. 그 자신도 1906년에 전자의 발견 공로로 노벨상을 수상하였다.

톰슨(J. J. Thomson)은 X-선이 발견되기 몇 년 전부터 기체 내에서의 전기 방전의 성질에 관하여 전기 방전관을 이용하여 연구를 하였다. 뢴트겐도 같은 시기에 비슷한 전기 방전관을 이용하여 전기 방전의 성질을 연구하였다.

2) 톰슨의 음극선 실험 – 음 전하 속도와 비 전하 e/m 측정

[그림 Ⅴ-4]는 톰슨의 실험 장치의 개략도다. 필라멘트로 가열된 음극에서 나온 음 전하를 일정 방향 속도를 갖도록 스크린 C의 구멍으로 통과시킨 후에 전기장과 자기장을 적용하여 음 전하의 속도 및 전하 대 질량비를 측정했다. 먼저 자기장을 끄고 음 전하를 전기장이 있는 극판 사이로 진행시키면 음 전하는 전기장에 의해서 위쪽 방향으로 가속된다.



[그림 Ⅴ-4] 톰슨 실험의 개략도

$$F_y = ma_y = qE \qquad (\text{Ⅴ. } 1\text{-}1)$$

여기서 m과 q는 아직까지 확인되지 않은 음 전하의 질량과 전하량이다. 음극선이 편향판 길이 l을 통과하는 데 걸리는 시간은 $t \approx l/v_0$이다. 음 전하가 편향판을 벗어나는 각도 θ는 다음과 같다.

$$\tan\theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{a_y t}{v_0} = \frac{qE}{m}\,\frac{l}{v_0^2} \qquad (\text{Ⅴ. } 1\text{-}2)$$

따라서 속도를 알면 q/m를 결정할 수 있다.

자기장을 걸고 음 전하가 편향되지 않게 자기장 세기 $\boldsymbol{B}$를 조절하면 속도를 결정할 수 있다. 음 전하가 휘지 않을 조건은 음 전하에 작용하는 모든 힘이 0이 되는 경우이다. 장 $\boldsymbol{E}$와 $\boldsymbol{B}$ 안에서 전하량 q의 움직이는 전하가

받는 힘은 잘 알려진 로렌츠 힘이다.

$$\boldsymbol{F} = -q(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) \qquad (\text{Ⅴ. 1-3})$$

여기서 $\boldsymbol{v}$는 음 전하의 속도이다.

우선 전기장 $\boldsymbol{E}$만을 사용하여 음 전하의 편향을 측정했다. 다음으로 전기장 $\boldsymbol{E}$를 제거하고 자기장 $\boldsymbol{B}$를 가해 자기장으로 인한 편향이 이전의 전기장으로 인한 편향과 동등할 때까지 자기장 $\boldsymbol{B}$를 조정하였다. 이러한 조건에서 $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$가 되며, $\boldsymbol{v}$와 $\boldsymbol{B}$가 수직이므로

$$v = \frac{E}{B} \qquad (\text{Ⅴ. 1-4})$$

가 된다.

여기서 $E = -v \times B$인데 v와 B는 서로 수직하고, 전기장과 자기장의 세기는 $E = v_x B$의 관계가 있으므로

$$v_z = \frac{E}{B} = v_0 \qquad (\text{Ⅴ. 1-5})$$

이다. 식 (Ⅴ. 1-2)에 v_0의 값을 대입하면 정확한 q/m의 비를 구할 수 있다.

$$\frac{q}{m} = \frac{v_0^2 \tan\theta}{El} = \frac{E \tan\theta}{B^2 l} \qquad (\text{Ⅴ. 1-6})$$

예제 톰슨의 실험과 유사한 실험에서, 편향판 사이의 길이를 5 cm로 하고 전기장을 1.0×10^4 V/m로 걸어준다. 자기장이 없을 때 휘어진 각도는 30°이고, 8×10^{-4} T의 자기장을 걸어주면 음 전하가 휘지 않게 된다. 음 전하의 초기 속도와 q/m를 구하라.

풀이 먼저 식 (Ⅴ. Ⅰ-5) 로부터 음 전하의 속도 v_0를 구한다.

$$v_0 = \frac{E}{B} = \frac{1.0 \times 10^4 \text{ V/m}}{8.0 \times 10^{-4} \text{ T}} = 1.25 \times 10^7 \text{ m/s}$$

다음으로 식 (Ⅴ. 1-6) 을 사용해서 q/m를 결정할 수 있다.

$$\frac{q}{m} = \frac{E \tan\theta}{B^2 l} = \frac{1.0 \times 10^4 \text{ V/m}(\tan 30°)}{(8.0 \times 10^{-4} \text{ T})^2 (0.05\text{m})}$$

$$= 1.8 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

3) 톰슨 실험의 음 전하와 전자

톰슨이 실험에서 얻은 음 전하의 q/m의 값은 현재 정밀하게 알려져 있는 있는 **음극선의 비전하** 값인 1.76×10^{11} C/kg보다 상당히 낮다. 그러나 이 값은 이전에 측정했던 어떠한 q/m의 값들보다도 훨씬 더 크며, 심지어 전기 분해에서 얻은 수소이온에 대한 값보다 수 천배 만큼이나 더 큰 것을 알게 되었다. 톰슨이 음극선 관 내에서 몇 가지의 다른 기체를 넣고 또 음극의 금속을 다른 것으로 사용했을 때에도 q/m가 항상 같은 값을 갖는다는 것을 관찰했다. 이러한 관찰로부터 톰슨은 모든 음극선들은 같은 음 전하라는 것을 알았다.

당시에는 **전자**라는 음의 전하를 띤 물질은 원소들의 화학적 성질을 설명하기 위하여 화학 분야에서 처음으로 도입하였던 가설적인 물질이었다. 톰슨은 이 화학적 가설의 음의 전하를 갖는 전자가 바로 음극선이라고 믿었으며, 실험을 통하여 전자의 물리적 존재를 입증해 내었다.

이상 일련의 실험을 통하여 톰슨은 1897년 음극선이 음으로 대전된 전자라는 것을 확실히 입증하였으며 그 공로로 1906년에 노벨상을 받았다.

당시 톰슨의 원래 실험 방법에서 발생된 오차를 줄이고 더욱 정밀하게 **전자의 비전하**를 측정하기 위하여 현재는 톰슨이 사용한 방전관을 약간 개량하여 사용한다. 전자를 편향시키지 않고 헬름홀쯔(Helmholtz) 코일을 사용하여 전자를 원운동시키는 방법을 사용한다. 이 방법이 훨씬 정확하게 전자의 비전하를 측정한다.

3. 전기 방전관과 톰슨의 전자

톰슨은 음극선이 전자임을 보였다. 이제는 전기 방전관 내의 정체를 알 수 없는 음극선을 물질 입자인 전자로 대치하여 전기 방전관에서 기체의 전기 방전과 음극 물질의 음극선 방출을 설명할 수 있는 단계가 되었다. 전기 방전관 내부의 압력이 낮아짐에 따라 전기 방전이 어떻게 변화되는가를 관찰할 수 있다. 공기 속에서의 방전은 1기압 하에서는 극판 사이에 대단히 큰 전위차가 필요하기 때문에 발생되기 어렵지만 기체의 압력을 낮추면 방전이 일어나기 쉬워진다.

전기 방전관의 두 전극에 전압을 걸고, 관 안에 전기장을 만들면 관 안에 있는 기체가 전리된 전자나 양이온이 반대 전하의 전극을 향해서 달려간다.

내부 기체의 최초의 전리는 내부 기체들 사이의 무작위적인 충돌이나 우주선 뮤온 또는, 실험실 내의 환경 방사능 라돈 동위 원소에 의하여 생긴다.

방전관 속의 압력이 높을 경우에는 전자나 양이온은 전기장에 의해 충분히 가속되지 않은 상태에서 중성의 기체 분자 · 원자와 충돌한다. 관 속의 압력을 내려서 관 속의 기체가 희박해지면 전자나 양이온은 충돌하기 전까지 강한 전기장에 의하여 긴 거리에서 가속된다. 따라서 큰 운동 에너지를 얻어 중성 기체 분자 · 원자와 충돌하여 기체 방전에 의한 미광방전이 시작된다.

생각해 보기 1

미광 방전이 발생할 때 방전관 내부에서는 미시적으로 어떤 일이 벌어지고 있을까? 여기서는 서술하기 힘들 정도로 대단히 복잡하며 원자물리의 지식이 더 필요하다. 방전관 내부에 현상적으로 관측되는 발광 부분의 크기와 띠의 모습 그리고, 발광이 없는 암흑 부분들의 모습이 방전관 내부에서 벌어지고 있는 일과 관련되어 있다.

생각해 보기 2

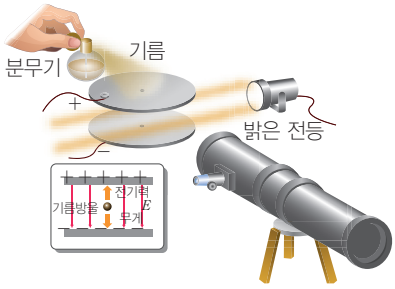
공기 중에서 전기 제품을 콘센트에 꽂을 때처럼 두 금속 조각이 전위차를 가지고 서로 접촉하게 되면 이 둘 사이에는 아크(arc)가 발생할 가능성이 있다. 대부분의 사람들이 관찰하는 아크는 금속 표면 사이의 기체가 방전된 것 즉, 파괴된 것이다. 이러한 아크 방전 현상은 낮은 전위차에서 높은 전류에 의한 방전으로 전자가 음극 표면에서 방출된다. 이 경우 방전 공간 내에 높은 온도가 발생되므로 이 현상이 일어나면 콘센트가 까맣게 타 버릴 수 있다. 이 현상은 대기압에서 높은 온도가 필요한 여러 가지 공정에 널리 활용된다.

두 금속 조각 사이에 전위차가 있는 경우 기체가 전혀 없는 고도의 진공 속에서도 아크가 발생할 가능성이 있을까? 만약 일어날 수 있다면 진공 아크 방전은 이론적으로 어떻게 설명할 수 있을까?

4. 밀리컨 유적실험

19세기 말에 톰슨은 전자를 발견하였다. 전자를 발견하였지만 전자의 질량이나 전자의 전하량을 각각 정확하게 측정하지 못하고, 전자의 질량과 전하량의 비 e/m만을 측정하였다.

1909년 밀리컨은 [그림 Ⅴ-5]과 같은 방법으로 기본 전하량을 측정하였다. 전압을 걸어 준 평행판 사이



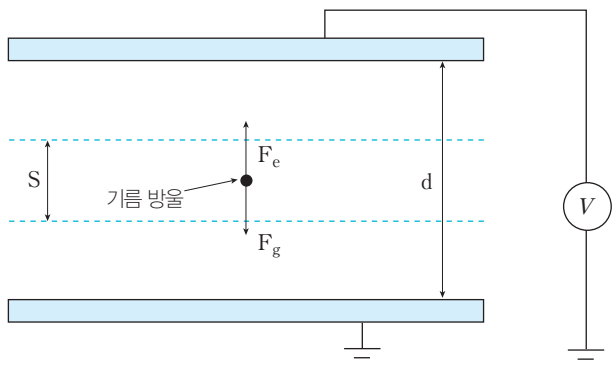
[그림 Ⅴ-5] **밀리컨 유적실험**

에 분무기로 기름 방울을 뿜어 준다. 이 기름 방울들은 분무기에서 방출될 때 분무기 노즐과의 마찰에 의해서 전하를 띠게 된다. 이 중 몇 방울이 상판에 있는 구멍을 통해 떨어지고, 이는 현미경을 통해 관찰한다. 이 때 위로 향하는 전기력과 아래로 향하는 중력이 비기게 되면 이 기름 방울들은 정지하거나 또는 등속운동을 할 것이다. 이것을 이용하여 밀리컨은 전하량을 구했는데 이에 대하여 알아보자.

❖ 밀리컨(R.A. Millikan, 1868~1953)

미국의 실험 물리학자. 1909년 기름 방울을 이용하여 전자의 전하 크기를 정밀하게 측정하는데 성공하였다. 그 공로로 1923년 노벨 물리학상을 받았다.

1) 전하량의 측정



[그림 Ⅴ-6] 평행극판 사이의 전기장과 기름 방울

[그림 Ⅴ-6]과 같이 두 평행한 판 사이에 전위차 V를 걸어 주면 두 판 사이에 전기장이 형성된다. 두 판 사이의 거리를 d라 하면 판 사이의 전기장의 세기 $E = V/d$가 된다. 위쪽 평행판 사이에 구멍을 통하여 들어온 전하 q를 띤 기름 방울이 들어 온다. 이때 기름 방울은

$$F_e = qE = q\frac{V}{d} \qquad (\text{Ⅴ. 1-7})$$

의 전기력을 받게 된다. 이 전기력이 중력과 균형을 이루면 기름 방울은 정지해 있다. 기름 방울의 질량이 m이면 중력 F_g는 mg이므로

$$q\frac{V}{d} = mg \qquad (\text{Ⅴ. 1-8})$$

의 식이 성립하여

$$q = \frac{mgd}{V} \qquad (\text{Ⅴ. 1-9})$$

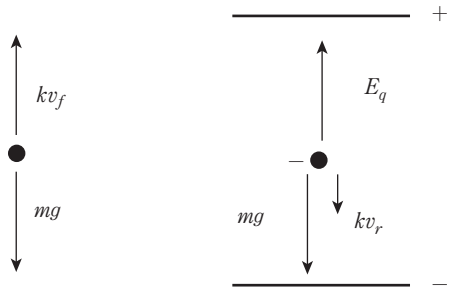
가 되어 기름 방울의 질량과 판 사이의 거리, 판에 걸어 준 전위차만 알면 기름 방울의 전하량을 구할 수 있다.

기름 방울의 무게는 기름의 밀도와 반지름 r에 의해 결정된다. 하지만, 기름 방울이 매우 작으므로 지름 측정은 간접적으로 이루어진다. 두 평행판 사이의 전기장을 없애면 기름 방울은 중력에 의해서 점점 속력이 빨라지다가 공기의 저항에 의해서 일정한 속도에 도달하게 된다. 이를 종단속도라 한다. 종단 속도에 이르렀을 때 중력 mg는 공기와 기름 방울 사이의 저항력 kv와 비긴 상태이다. 여기서 v는 기름 방울의 속력이고, k는 공기의 점성과 기름 방울의 반지름의 함수로 주어지는 양이다. 기름 방울의 종단속력을 측정해 r와 m을 결정할 수 있다. 마지막으로 전하는 (식 Ⅴ-7)에 의해 구해진다.

이 과정을 통해 밀리컨은 기름 방울에 있는 전하가 1.602×10^{-19} C의 정수배임을 알아냈다. 이 값을 기본 전하량이라 한다. 이 기본 전하량은 전하량의 최소 단위로서 이보다 작은 전하량은 존재하지 않는다. 전자의 전하량은 바로 기본 전하량과 같다. 이 값을 e/m값에 대입하여 전자의 질량 m을 구하면 9.11×10^{-31} kg이 된다.

실험 밀리컨의 기름 방울 실험

원리



[그림 Ⅴ-7] 기름 방울에 작용하는 힘

평행 극판 사이에 전기장을 걸어주지 않을 때 [그림 Ⅴ-7]의 좌측그림은 공기 중에서 낙하하여 종단 속도에 이른 기름 방울에 작용하는 힘을 보여준다. 기름 방울에 작용하는 중력과 공기 저항력이 평형을 이룬다.

$$mg = kv_f \qquad (\text{Ⅴ. } 1\text{-}10)$$

여기서 k는 공기와 기름 방울 사이에 작용하는 마찰에의 한 저항 계수를 나타낸다. [그림 Ⅴ-7]의 우측 그림에서 평행 극판 사이에 전기장을 걸어주면 전하를 띤 기름 방울은 전기장 내에서 힘을 받아 위 쪽 방향으로 등속 운동을 하게 된다. 이 때 기름 방울이 받는 힘은 전기력, 중력, 공기 저항력으로 평형을 이룬다.

$$qE = mg + kv_r \qquad (\text{Ⅴ. 1-11})$$

두 경우 모두 기름 방울에 공기에 의한 부력이 작용하지만 기름 방울의 밀도가 공기의 밀도에 비해 약 1000배로 크기 때문에 무시하기로 한다.
식 (Ⅴ. 1-10)과 식 (Ⅴ. 1-11)에서 mg를 없애고 q를 구하면 다음과 같다.

$$q = \frac{k(v_f + v_r)}{E} \qquad (\text{Ⅴ. 1-12})$$

스톡스 법칙(Stokes' law)에 의해 기름 방울이 받는 저항력은 $kv_f = 6\pi r\eta v_f$이므로, 식 (Ⅴ. 1-12)는 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$q = \frac{6\pi r\eta}{E}(v_f + v_r) \qquad (\text{Ⅴ. 1-13})$$

평행 극판 사이의 거리가 d, 전위차가 V일 때 전기장 E는 V/d 이므로, 전하량에 대한 표현식은

$$q = \frac{6\pi r\eta d}{V}(v_f + v_r) \qquad (\text{Ⅴ. 1-14})$$

이 된다.
스위치를 열었을 때 기름 방울이 등속도로 떨어지면 [그림 Ⅴ-7]에서 거리 s를 이동하는 데 걸리는 시간을 측정하여 v_f를 구하고, 스위치를 닫아서 전압 V를 걸어주었을 때 위로 상승하는 기름 방울이 등속도로 움직였을 때 역시 거리 s를 이동하는 데 걸리는 시간을 측정하여 v_r을 측정한다.

준비물

기구 : 밀리컨 기름 방울 실험장치 1조(전원장치, 전압계), 초시계
재료 : 반지름과 점도를 아는 라텍스 입자 혼합액

[그림 Ⅴ-8] 밀리컨 기름 방울 실험장치

실험 과정 및 결과

1. 밀리컨 기름 방울 실험 장치를 장치한 후 현미경에 초점이 잘맞게 광원과 위치를 조절한다.
2. 평행 금속판 사이의 거리 d를 측정한 뒤, 단자를 연결하고 스위치를 연 상태에서 기름 방울을 금속판 사이에 들어가도록 뿌린다.
3. 현미경으로 기름 방울을 관찰하여 종단 속도로 움직일 때 일정거리 s만큼 이동할 때까지 걸린 시간을 측정하여 종단 속도 v_f를 구한다.
4. 스위치를 닫아 전기장을 걸어주었을 때 '3'에서 관찰한 입자가 상승하는 동안 종단 속도로 움직일 때 같은 방법으로 종단 속도 v_r을 구한다.
4. '2' ~ '4'의 과정을 10회 정도 반복하여 아래의 표에 기록한다.

횟수	v_f	v_r	V	q	$n(=q/e)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

결론 및 논의

결론 :

논의 :

• 전기장을 걸어줄 때 종단 속도가 v_+라고 하고, 반대로 전기장을 걸어줄 때 종단 속도가 v_-라고 할 때 전하량 q에 대한 공식이 어떻게 바뀌는가?

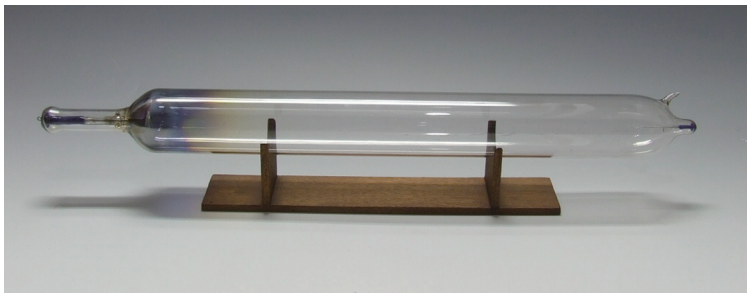
5. 전기 방전관과 뢴트겐의 X선

톰슨의 전자 발견 두 해 전인 1895년 11월에 뢴트겐(W. K. Röntgen)이

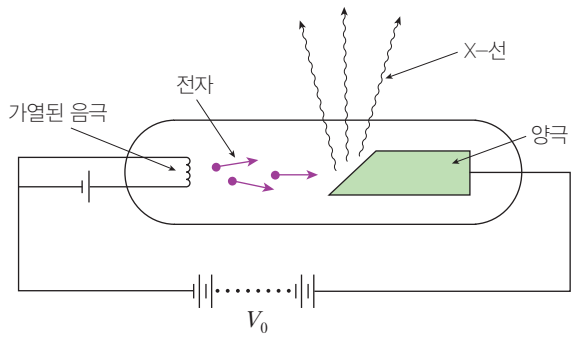
❖ **빌헬름 렌트겐**
(Wilhelm Konrad Röntgen, 1845~1923)

음극선관을 이용하여 백금시안화바륨의 종이가 감광되는 현상으로부터 X선을 발견하였다. 1902년에 최초의 노벨 물리학상을 받았다.

[그림 Ⅴ-9] 형태의 **냉음극** 형태의 전기방전관을 이용하여 X-선을 발견하였다. 뢴트겐은 여러 가지 물질이 음극선을 통과할 때 나타나는 효과를 연구하고 있었다. 암실에서 음극선 실험을 하는 도중에 인광 스크린에서 선명한 빛이 나오는 것을 보았다. 뢴트겐은 인광 스크린에 도달한 그 무엇의 존재가 크룩스의 음극선과는 다르게 자기장에 전혀 영향을 받지 않았으며, 음극선보다 투과력이 강한 새로운 종류의 그 무엇이라고 인식했었다.



[그림 Ⅴ-9] X선이 발견될 당시의 초기 X선관 모습



[그림 Ⅴ-10] 개량된 쿠울리지 X선관 구조

[그림 Ⅴ-11] 최초의 의학용 X-ray 사진인 뢴트겐의 부인의 손 (1895년 12월 22일)

뢴트겐은 X-선이 많은 물질을 투과하는 것에 대한 연구를 했으며 [그림 Ⅴ-11]처럼 X-선을 손에 통과시키면 뼈의 영상을 얻을 수 있다는 것을 증명해 보였다. 이 실험은 굉장한 반응을 일으켰으며 X-선 의학으로의 응용이 매우 빨리 발전되었다. 뢴트겐은 1901년에 첫 번째 노벨상을 물리학으로 받았다. X선관은 나중에 [그림 Ⅴ-10]과 같이 **열음극**을 이용한 형태로 개량되어 현재에도 사용되고 있다. 현대 물리학에서 X-선 응용은 고체의 결정 구조를 연구하는 X-선 결정 분광학으로 발전되었다. 이후 물질의 결정 구조와 표면 구조를 연구하는 분야에서 전자 현미경에 많은 역할을 넘겨주지만, 아직도 과학의 여러 영역에서 폭 넓게 응용되고 있다.

읽을 거리

방전관과 진공관의 전자 방출 방법

현대 물리학 분야에서 새로운 현상의 발견에는 전기 방전관이 핵심적인 역할을 하였다. 전기 방전관의 기본 기능은 방전관 내부에서 실험적으로 전자를 발생시키고 가속시키는 일이다. 전기 방전관의 기본 구조는 다음과 같다. 두 개의 금속 전극 사이에 걸리는 전압의 크기는 실험 목적에 따라 수백 V로부터 수백 kV의 고전압까지 적절하게 선택된다. 19세기 말에 수십 ~ 수백 kV의 고전압을 어떠한 방법으로 만들었을까? 전기 방전관은 전자를 효과적으로 가속시키기 위하여 유리관으로 밀봉하며, 내부를 고진공을 만들어 주는 진공 방전관과, 특정 기체의 발광을 유도하기 위하여 특정한 기체를 아주 약하게 넣어 주는 기체 방전관으로 구분된다.

전기 방전관에서 전자를 발생시킬 수 있는 방법은 여러 가지가 있다. 첫째로 방전관 내부 기체의 최초 전리에 의하여 만들어진 양이온이 두 전극 사이의 전기장에서 가속되어 음극을 때려서 음극을 이루는 물질에서 전자를 떼어 내는 방법이 있다. 이 과정에서 생겨난 전자를 이차 전자라고 부르며 이 음극을 냉음극이라고 한다. 이 경우 일차 입자는 음극을 때리는 양이온이다. 한편 기체의 전리에서 생긴 전자는 양극으로 가속되며 양극에 도달되기 전에 기체 분자를 전리시킬 수 있는 일차 전자의 역할을 한다. 두 번째로 주로 자외선 계열의 빛을 음극 물질에 입사시켜 전자를 떼어내는 방법이 있다. 이 과정을 광전 효과라 부르며 방출된 전자가 광전자이다. 세 번째로 음극을 가열하여 음극으로부터 전자를 떼어 낼 수 있는데 이때에 방출된 전자를 열전자라고 부르며 이 음극은 열음극이다.

전기 방전관 기본 구조의 공통성

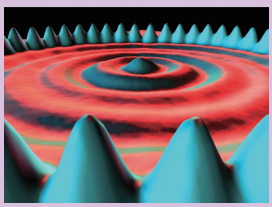
현대 물리학의 초창기에 등장하는 많은 종류의 전기 방전관은 서로 다른 외형적인 형태를 가지고 있으나 기본적인 구조는 공통점을 많이 가지고 있다. 음극의 종류는 이차 전자를 발생시키는 냉음극과 열전자를 발생시키는 열음극으로 구분된다. 초기의 방전관은 냉음극을 사용하였으나 시간이 지나면서 열음극의 방전관이 많이 사용되게 되었다. 현재 톰슨의 비전하 측정이나 X선 발생 장치의 대부분은 열음극을 사용한다.

방전관의 역사는 진공관과 같이 한다. 방전관은 수백 kV까지의 고전압 펄스로 작동하며 기체 방전을 연구하는데 주로 이용되었다. 진공관은 저전압 전기회로 내의 전류를 조절하는데 이용되었다. 진공관은 방전관보다 저전압에서 동작하며 열전자를 이용하여 동작하였다. 초기 진공관은 2극 진공관이었으며 전

기 회로의 전류 흐름을 효과적으로 제어하기 위하여 그리드를 추가한 3극 또는 5극 진공관도 만들어졌다. 비록 대부분의 진공관이 현재는 값싸고 사용이 편리한 반도체 소자로 대치되었으나 특수한 용도의 진공관은 현재에도 다수 사용되고 있다.

한편으로는 금속 음극을 일함수가 낮은 금속을 사용하여 진공관 외부에서 음극에 빛을 입사시키는 경우에 음극에서 광전자를 방출시킬 수 있는 진공관을 만들 수 있다. 이러한 진공관을 특별히 광전관이라고 부른다. 광전관은 빛의 에너지를 광전자로 바꾸어 주므로 빛 검출하는 도구로 이용된다. 특별히 극히 미약한 세기의 빛, 예를 들어 광자 몇 개 정도의 빛을 검출하기 위하여 캐소우드인 음극과 애노우드인 양극 사이에 다수의 또 다른 양극인 다이노드들을 여러 개 삽입한 광전증배관도 있다. 광전증배관에서는 캐소우드에서는 광전자, 다이노드에서는 이차전자가 방출된다.

2 물질과 파동의 이중성



파동의 성질들이 입자인 물질에서 발견된다는 또 다른 새로운 사실이 있다. 광전 효과와 컴프턴 산란과 같은 현상을 설명하기 위해 빛이 입자같이 되어야 한다는 것이 명백하다. 자연에서 똑같은 존재에 대해 왜 파동과 입자의 성질들이 발생하는가? 보어의 상보성 원리에 의하면 물질인 전자, 양성자 등과 복사인 광자들을 완전히 묘사하기 위해서는 파동과 입자의 성질 양쪽 모두가 필요하다. 하이젠베르크의 불확정성 원리는 입자 또는 파동 행동을 이해하는 데 중요한 역할을 한다.

1. 빛과 아인슈타인의 광량자 가설

1) 19세기 말 헤르츠의 광전 효과의 발견

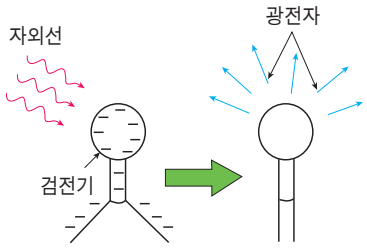
1887년에 헤르츠(H. Hertz)는 이미 10여 년 전에 맥스웰(J. C. Maxwell)이 예측했던 전자기파를 발생시키고 검출하는 데 성공하였다. 광전 효과는 1887년에 헤르츠가 맥스웰의 빛의 전자파 이론을 증명하는 불꽃 방전 실험을 하는 중에 발견하였다. 최초의 불꽃 방전에서 나온 빛을 자외선을 검출하는 유도코일의 불꽃 간격으로 비쳐지게 하는 경우가, 비쳐지게 하지 않은 경우 보다, 검출하는 불꽃이 더 잘 튀는 현상을 알아내었다.

❖ Heinrich Hertz (1857~1894)

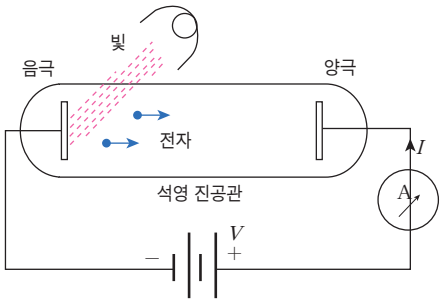
최초로 전파를 송 · 수신했다. 1880년 베를린대학교에서 우등으로 박사학위를 받았으며 그곳에서 H. 폰 헬름홀츠 밑에서 공부했다. 1883년 J. C. 맥스웰의 전자기 이론에 관한 연구를 시작했다. 1885~89년 카를스루에공과대학의 물리학 교수였던 그는 실험실에서 전자기파를 만들어내고 그 길이와 속도를 측정했다.

2) 레나드에 의한 광전 효과의 관측 사실들

헤르츠의 제자들 중 한 사람인 레나드(P. Lenard)는 방전 현상을 더 깊이 연구하였다. 그는 크룩스 관을 이용하여 자외선이 깨끗한 음극 금속 표면에 입사할 때 음극선과 비슷한 성질을 갖는 어떤 물질이 방출되는 사실을 알아내었다. 방출되는 세기는 입사하는 빛의 세기에 무관하고, 입사하는 빛의 파장이 짧아질수록 방출되는 빛의 세기가 세어진다는 것도 알아내었다. 당시에는 음극선의 성질에 대한 연구가 쉬운 연구가 아니었는데 그 이유는 음극



[그림 Ⅴ-12] 검전기의 광전 효과



[그림 Ⅴ-13] 광전 효과 측정 장치도

선을 방전관에서 꺼내어 다룰 수가 없었기 때문이었다. 1905년 레나드는 음극선에 관한 연구로 노벨상을 받았다. 검전기를 이용하여 [그림 Ⅴ-12]에서와 같이 광전 효과를 확인할 수 있다.

[그림 Ⅴ-13]에 광전 효과 측정 장치가 대략적으로 그려져 있다. 음극에 입사하는 빛이 전자를 튀어나오게 한다. 이때 튀어 나오는 전자가 광전자이다. 광전자는 양극 방향으로 흐른다. 양극에는 광전자를 가속시키거나 혹은 감속시킬 수 있도록 V 혹은 $-V$로 전원으로부터 공급된 전압을 바꾸어 걸릴 수 있도록 하였다. 전류계로 측정되는 전류 I는 음극에서 양극으로 흐르는 광전자에 의한 전류이다.

광전 효과에서 관측된 실험 사실들은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째로 빛이 입사하는 음극 표면에서 광전자가 방출되기 위한 잘라 버리기 진동수 f_c가 있는데 이 값은 광음극 물질에 의존한다. 만약 입사되는 빛의 진동수가 f_c 보다 작으면 빛의 세기가 아무리 강해도 광전자는 방출되지 않는다.

둘째로 입사하는 빛의 진동수가 f_c 보다 크다면 방출되는 광전자의 최대 운동 에너지는 입사되는 빛의 진동수와 비례하는 관계가 있으며, 방출되는 광전자의 개수는 입사되는 빛의 세기에 비례한다.

3) 광전 효과 해석의 고전적 난점들

고전 전자기학 이론에 의하면 빛의 총 에너지는 빛의 세기에 따라 증가한다. 입사하는 빛의 세기가 증가하면 방출되는 광전자는 더 큰 운동 에너지를 가져야만 한다. 그러나 빛의 진동수 f가 처음에 주어지면 어떤 특정 크기의 저지퍼텐셜 $-V_0$로 그 빛의 세기에 관계 없이 모든 전자를 감속하는 방법으로 정지시켜 광전자가 양극으로 도달하지 못하게 하여 회로에 전류가 흐르지 않도록 만들 수 있다. 고전 전자기 이론으로는 이러한 현상을 설명할 수 없다.

방출되는 광전자의 최대 운동 에너지가 입사하는 빛의 세기에 관계없다는 사실과 문턱 진동수의 존재는 고전 이론으로 설명이 불가능하다. 그러나 방출되는 광전자의 수가 입사하는 빛의 세기에 비례하여 증가한다는 것은 고전 이론으로도 예측 가능하다.

4) 광전 효과의 양자적 해석

아인슈타인(A. Einstein)은 빛의 에너지는 **양자화**되어 있으며 한 단위의 개체로만 생성되거나 흡수된다고 제안했다. 예를 들면 진동수가 다른 두 광자는 전혀 다른 개체이다. 한 단위의 개체 에너지의 양자를 광자라고 부른다. 아인슈타인에 의하면 각각의 광자는 에너지 양자

$$E = hf \qquad (\text{Ⅴ. 2-1})$$

를 갖고 있다. 여기서 f는 빛의 진동수이고, h는 플랑크상수이다.

아인슈타인의 광전 효과 해석은 입사하는 빛이 전자를 방출하는 물질에 의해 흡수되는 것으로 이해할 수 있다. 빛의 광자는 전체가 하나의 단위로만 물질에 흡수된다. 이 과정에서 흡수된 광자의 에너지가 음극을 이루는 금속 물질 내에 약하게 속박되어 있는 하나의 전자에게 탈출할 수 있을 만큼 충분한 에너지를 주는 경우를 기대할 수 있다. 하나의 전자가 물질을 탈출할 수 있도록 하는 최소 여분의 운동 에너지를 **일함수** ϕ라고 부른다. 알칼리 금속은 다른 금속보다 일함수가 작다. 일함수 ϕ를 뺀 나머지 에너지는 음극을 떠나는 순간 전자의 최대 운동 에너지로 나타날 것이다. 이 경우에 에너지 보존법칙에서

$$hf = \phi + \frac{1}{2}mv_{\max}^2 \qquad (\text{Ⅴ. 2-2})$$

가 된다. 광전 효과에서 저지퍼텐셜 V_0는 운동 에너지가 가장 큰 전자를 멈추게 하는 데 필요한 퍼텐셜에 해당하므로

$$eV_0 = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 \qquad (\text{Ⅴ. 2-3})$$

이다.

결과적으로 다음과 같은 아인슈타인 식을 얻는다.

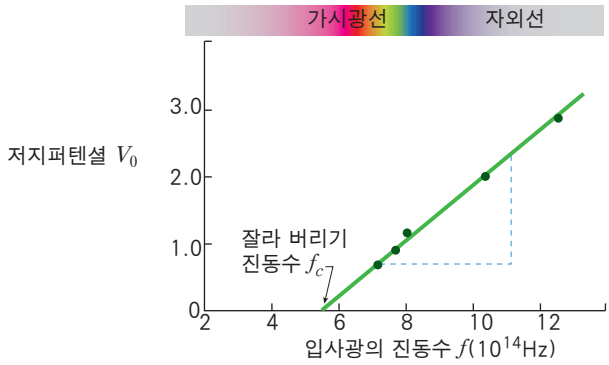
$$eV_0 = hf - \phi \qquad (\text{Ⅴ. 2-4})$$

식 (Ⅴ. 2-4)에 따르면 f에 대한 V_0의 그래프는 기울기가 h/e이고 $\frac{\phi}{e}$ [eV]에서 세로축과 만나는 직선이다. 아인슈타인의 식을 확증하기 위해 고안된 실험은 약 10년 후에 밀리칸(R. Millikan)에 의해 수행되었다. 이 실험을 통하여 물리학의 기본상수인 플랑크의 상수 h를 결정할 수 있다.

❖ 앨버트 아인슈타인(Albert Einstein, 1879~1955, 독일계 미국인)

1905년 3가지의 유명한 논문을 발표하였다. 광전효과, 브라운 운동 및 특수상대성 이론이다. 1915년에는 일반상대성 이론을 발표하였다. 1933년 독일을 떠나 뉴저지에 있는 프린스턴 고등과학연구소에서 여생을 보냈다.

[그림 Ⅴ-14]에 식 (Ⅴ. 2-4)에 대한 실험 결과가 있다.



[그림 Ⅴ-14] 입사광의 진동수 f에 대한 저지퍼텐셜 V_0

예제 파장 400 nm인 빛이 일함수 $\phi = 2.9$ eV인 리튬(Li)에 입사된다. 이 경우에 대하여 (a) 광자 에너지와 (b) 저지퍼텐셜 V_0를 계산하시오.

풀이 (a) 빛의 파장은 보통 nm로 표시되므로 에너지를 λ로 표시하는 식을 구할 필요가 있다.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(2.998 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{\lambda(1.602 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})(10^{-9}\,\text{m/nm})}$$

파장이 λ = 400 nm의 경우 광자의 에너지는

$$E = \frac{1.240 \times 10^{3}\,\text{eV}\cdot\text{nm}}{400\ \text{nm}} = 3.1\ \text{eV}$$

따라서 이 경우의 광자 에너지는 3.1 eV이다.

(b) 식 (Ⅴ. 2-4)로부터

$$eV_0 = hf - \phi = E - \phi$$
$$= 3.1\ \text{eV} - 2.9\ \text{eV} = 0.2\ \text{eV}$$
$$V_0 = 0.2\ \text{V}$$

저지 퍼텐셜 0.2 V는 방출되는 모든 광전자를 정지시킨다.

생각해 보기

광전 효과를 실험하는 장치의 음극 금속으로 어떤 금속이 적당할까? 음극 금속으로 일함수가 작은 금속을 사용할수록 빛에 의한 광전자를 효율적으로 발생시킨다. 그러나 일함수가 가장 낮은 금속은 1가의 알카리 금속이지만 실용상의 이유로 채택되지 못하고 주로 2가의 금속 재료를 사용한다. 3가 이상은 일함수가 높아서 사용되지 않는다. 실제로 1가 금속을 사용하지 못하는 이유를 각자 알카리 금속의 성질을 검토하면서 생각해 보자.

2. 전자와 드브로이의 물질파 가설

드브로이(de Broglie)는 아인슈타인이 제기한 빛이 파동성과 입자성 모두를 가지고 있다는 이중성에 주목하였다. 파동의 개념은 간섭과 회절을 이해하는데 필요하며 에너지 양자 개념은 광전 효과를 설명하기 위해서 필요하다.

만일 빛이 파동성과 입자성 양쪽을 가져야 한다면 자연의 **대칭성**은 톰슨의 전자와 같은 물질 입자들도 마찬가지로 파동성과 입자성 모두를 가질 수 있다고 생각했으며, 이 생각이 불가능하다는 어떠한 물리법칙도 없다는 것이다.

1924년 제안된 드브로이의 기본 가정은

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (\text{Ⅴ. 2-5})$$

이다. 즉 물질 입자에 관련되는 물질파 파장은 플랑크 상수를 그 입자의 운동량을 나눈 것이다. 식 (Ⅴ. 2-5)의 파장을 입자의 드브로이 파장이라고 부르며, 입자의 파동을 물질파라고 부른다. 다만, 빛의 속도에 대한 특수 상대성 이론과 모순되지 않도록 드브로이 물질파를 해석하기 위해서는 일반적인 파동의 위상속도과 군속도 개념이 추가로 필요하다.

빛의 경우는 위상속도와 군속도가 같아서 간단하게 광자의 드브로이 파장을 얻을 수 있다. 광자의 에너지 운동량 관계는 $E = pc$인데, 광양자 이론에 의하여 $E = hf$이므로 광자의 드브로이 파장은 식 (Ⅴ. 2-5)와 같다. 드브로이는 빛의 광자에 대하여 계산된 이 결과를 모든 물질 입자에도 동일하게 적용하였다.

❖ **루이스 드 브로이 (Louis de Broglie, 1892~1987, 프랑스)**

박사 학위 논문에서 모든 물질들이 파동과 관계가 있다고 밝혔다. 1929년 노벨 물리학상을 수상하였으며 이 생각은 보어 모델과 현대 양자역학의 연결고리가 되었다.

예제 다음 물체의 드브로이 파장을 각각 구하시오. (a) 25 m/s 의 속도로 움직이는 70 g의 고무공과 (b) 에너지 50 eV인 전자.

풀이 (a) 고무공의 경우 $m = 0.07$ kg이다. 그러므로

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{(0.07\ \text{kg})(25\ \text{m/s})} = 3.8 \times 10^{-34}\ \text{m}$$

(b) 전자의 경우 eV의 단위로 계산하는 것이 편리하다. 그러므로 전자의 물질파 파장 λ는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2\,mK}} = \frac{hc}{\sqrt{2\,(mc^2)K}}$$

$$\lambda = \frac{1240\ \text{eV}\cdot\text{nm}}{\sqrt{2(0.511\times10^6\ \text{eV})(50\ \text{eV})}} = 0.17\ \text{nm}$$

드브로이 물질파를 사용하여 보어의 양자화 가설을 다시 해석할 수 있다. 수소 원자 모형에 관한 보어의 양자화 가설은 특정 궤도 반경으로 궤도 운동을 하는 전자는 정상 상태를 이루며 이때 전자의 각운동량이 $h/2\pi$의 정수배가 된다는 것이다.

전자를 입자로 생각하지 않고 양성자 주위의 궤도상의 드브로이 **정상파**라고 생각하자. [그림 Ⅴ-15]에 하나의 예를 그려 놓았다. 이 정상파의 파장의 정수배가 궤도 길이가 될 것이다. 즉, 정상파가 되기 위해서는

$$n\lambda = 2\pi r \qquad (\text{Ⅴ. } 2\text{-}6)$$

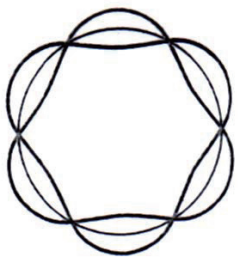
이 되어야 하며 여기서 r은 전자가 입자로서 궤도 운동을 하는 보어(A. Bohr) 모델 경우의 궤도의 반지름이다. 드브로이의 관계식을 사용하면

$$2\pi r = n\lambda = n\frac{h}{p} \qquad (\text{Ⅴ. } 2\text{-}7)$$

를 얻는다. 이 궤도에서의 전자의 각운동량은

$$\text{L} = rp = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar \qquad (\text{Ⅴ. } 2\text{-}8)$$

을 얻는다. 여기서 $\hbar$는 $h/2\pi$이다. 정상파 드브로이 파장을 적용함으로써 보어의 양자화 가설에 도달할 수 있다. 물질 정상파의 진동에는 궤도가 전혀 필요하지 않다.



[그림 Ⅴ-15] 보어 궤도 정상 파동 상태 그림

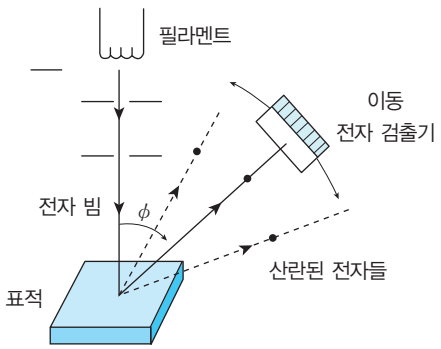
당시 원자의 구조를 설명하는데 드브로이 물질파 가설과 같은 혁신적인 가설이 필요했던 이유는 보어 모델이 많은 원자들의 스펙트럼을 설명하는데 너무나 많은 제약이 있었기 때문이다. 안타깝게도 이 부분에는 곧바로 실험적인 검증이 나오지 않았다.

3. 전자와 이중성

전자가 파동성을 갖는다는 중요한 실험적 증거가 1927년 데이비슨(C. Davisson)과 저머(L. Germer)의 전자 회절 실험에 의해 밝혀졌다. 또한 같

은 시기에 독립적으로 영국의 톰슨(G. P. Thomson)의 작업으로 얻어졌다. 아버지 톰슨(J. J. Thomson)은 전자의 입자적 성질을 발견하였고 아들 톰슨(G. P. Thomson)은 전자의 파동적 성질을 발견하였다.

데이비슨(Davisson)과 저머(Germer)의 실험은 느린 속도의 전자들을 니켈 표면에 입사시킨 후 충돌을 겪고 튀어 나온 전자의 각도 분포를 측정하여 니켈 표면의 원자 배열을 이해하고자 하는 의도에서 시작되었다. 이 실험 장치의 대략적 구도는 [그림 Ⅴ-16]과 같다. 전자는 실험 장치의 뜨거운 필라멘트에서 발생하여 가속되고 니켈의 결정 표적으로 입사된다. 충돌 후에 전자는 산란각 ϕ로 표면에서 튀어나오며 검출기로 튀어 나온 방향을 측정된다. 전자의 튀어 나온 분포는 산란각 ϕ의 함수로 측정된다. 이 장치의 세 가지 실험적 매개 변수는 전자의 에너지, 니켈 표적의 방향 a, 그리고 산란각 ϕ이다.



[그림 Ⅴ-16] 데이비슨 저머의 전자 산란

데이비슨과 저머는 전자의 파장을 두 가지 방법으로 계산하고 서로 비교하여 전자의 파동성을 확인하였다. 첫 번째 방법으로, 드브로이의 공식을 이용하여 입사하는 전자의 파장을 이론적으로 계산하였다. 다음과 같은 에너지 보존 식에서 전위차 V에서 가속되는 전자의 속도를 구한다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \qquad (\text{Ⅴ. 2-9})$$

드브로이 식에 $v = \sqrt{2eVm}$을 대입하면

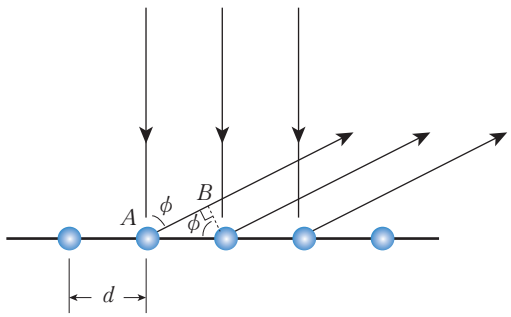
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2eVm}} \qquad (\text{Ⅴ. 2-10})$$

이 된다. 전자가 전위차 $54\,V$에서 가속된 경우를 고려하면 전자의 파장은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}}{\sqrt{2(54\ \mathrm{eV})(1.60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C})(9.11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg})}}$$

$$= 1.67 \times 10^{-10}\ \mathrm{m} = 1.67\ \mathring{\mathrm{A}}$$

두 번째 방법으로, 전자가 튀어나온 실험 결과를 전자의 반사 회절 현상으로 해석하고 전자의 실험적 파장을 결정하였다. [그림 Ⅴ-17]과 같은 니켈 원자 표면층의 반사 회절 격자로 고려해 보자. 저 에너지 전자의 경우는 X-선과 달리 결정 속으로 깊게 침투할 수 없어서 원자의 표면층에서만 반사 회절된다. 이 경우 보강 간섭은 두 인접 광선의 경로 차가 파장의 정수배이거나 다음과 같은 식을 만족할 때 일어난다.

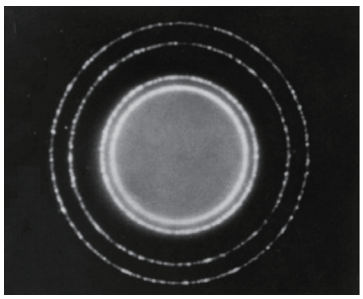


[그림 Ⅴ-17] **반사 격자와 ϕ로 산란된 전자**

$$d\sin\phi = n\lambda \qquad (\text{Ⅴ. } 2\text{-}11)$$

최대 점의 방향과 이미 알고 있는 니켈 면의 간격으로부터 54 eV의 전자의 파장을 계산할 수 있다. 여기서 $n = 1$인 극대에 대응하는 산란각이 $\phi = 50°$인 경우만 고려한다. 니켈 결정의 원자 간 거리 d는 $2.15\mathring{\mathrm{A}}$이다. 따라서 보강 간섭한 전자의 파장은 실험적으로 다음과 같이 결정된다.

$$\lambda = (2.15\mathring{\mathrm{A}})(\sin 50°) = 1.65\mathring{\mathrm{A}} \qquad (\text{Ⅴ. } 2\text{-}12)$$



[그림 Ⅴ-18] **전자 회절**

이 값은 첫 번째 방법으로 구한 입사 전자의 파장과 실험 오차의 범위 내에서 일치된다.

데이비슨과 저머의 전자의 파동성 발견 이후 많은 실험에 의하여 여러 종류에 대한 입자의 회절 현상을 성공적으로 관측함으로서 드브로이 가설의 보편적 성격이 검증되었다.

4. X-선과 이중성

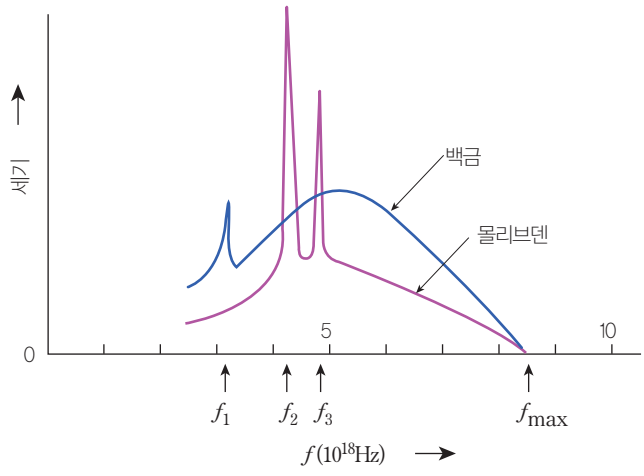
1) X-선의 발견과 X-선 스펙트럼의 특징

X-선은 1895년 말 뢴트겐(Röntgen)에 의해 발견되었다. 뢴트겐은 톰슨이 전자를 발견한 크룩스 음극선 방전관과 비슷한 방전관을 사용하였다. 뢴트겐의 X-선 방전관은 압력이 낮은 가스를 넣어주고, 유리관 내의 두 금속 전극 사이에 톰슨의 방전관보다 더 높은 수 kV 정도의 고전압을 공급하였다. 뢴트겐은 X-선 방전관을 검정색 종이로 밀폐한 경우에 바륨 시안화백금으로 도금한 종이 스크린이 빛나는 현상을 발견하였다. 그리고 뢴트겐은 미지의 X-선이 사진 필름을 감광시키며 전기장이나 자기장에 의해서 편향되지 않음도 알아내었다.

2) X-선 발생 이론과 이중성

(1) 연속 X-선의 발생과 전자기 파동론

X-선 방전관에서 발생된 X-선의 스펙트럼에는 두 가지의 특징이 있음을 알 수 있다. 연속적인 스펙트럼 속에 짧은 파장 쪽으로 매우 잘 정의된 최소 파장이 있고, 몇 개의 뾰족한 선들이 있다. 연속적인 스펙트럼 분포는 [그림 Ⅴ-19]와 같이 음극과 양극 사이에 걸어준 전압에는 의존하지만 양극 표적의 종류에는 의존하지 않는다. 그러나 뾰족한 선은 양극 표적으로 사용된 물질에 의존하며 걸어준 전압에는 무관하다.



[그림 Ⅴ-19] X-선 스펙트럼 그림

연속적인 X-선은 제동 복사 X-선이라고 부른다. 제동 복사는 전자가 양극을 두드린 후 양극 물질 속으로 들어가면서 전자가 빨리 감속되기 때문에 발생된다. 고전 전자기 파동 이론에서 가속 운동하는 전자가 에너지를 잃어버리는 일률을 라머(J. Larmor) 의 공식이라고 부른다.

가속 운동하는 전자가 잃어버리는 에너지는 무엇으로 다시 나타날까? 양자론의 입장에서 보면 전자가 여러 에너지의 광자들을 생성하는 것으로 생각할 수 있다. 이 경우는 광전 효과의 역 과정에 해당된다. 에너지가 E_i인 하나의 전자가 표적 물질 핵의 전기장을 통과하면서 감속되고 에너지 $E = hf$인 하나의 X-선 광자를 생성하는 과정을 고려해 보자. 전자의 최종 에너지 E_f는 에너지 보존법칙에 의해 다음과 같다.

$$E_f = E_i - hf \qquad (\text{Ⅴ}.\ 2\text{-}13)$$

핵은 선 운동량을 보존시키기 위해 매우 적은 에너지만을 흡수한다. 전자가 물질을 통과할 때는 이러한 제동 복사로 인하여 광자가 생성된다. 제동 복사 과정만이 X-선 광자를 생성하는 것은 물론 아니다. 연속적인 X-선이 발생되는 또 다른 중요한 과정은 높은 에너지로 입사하는 전자가 통과하는 주변 원자의 들뜸, 이온화와 관계가 있다.

(2) X-선의 최소 파장과 빛의 양자론

X-선 방전관에 걸어준 전압에 의존하는 짧은 파장 쪽의 최소 파장값은 고전적인 전자기 이론으로는 설명이 불가하다. 아인슈타인의 양자화 가설은 연속적인 X-선 스펙트럼의 분포뿐만 아니라 최소 파장이 생기는 이유도 설명할 수 있다.

전자가 정지 상태에서 전위차 V에 도달하면 전자는 eV의 운동 에너지를 얻는다. 이어서 곧바로 전자가 과녁에서 다시 정지하게 되면 eV의 에너지를 방출한다. 만약 이 에너지가 모두 X-선으로 변환된다면 그 파장은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{hc}{eV} \qquad (\text{Ⅴ}.\ 2\text{-}14)$$

이 과정은 광전 효과의 역 과정으로 설명된다. 생성된 광자의 최대 에너지는 입사하는 전자의 에너지와 같다. 이 과정에서 전자는 오직 한 번에 자신의 모든 에너지를 잃고 광자로 전환된다.

5. 전자 방출과 현대물리학

지금까지 현대물리학의 영역에서 여러 가지 현상들을 다루었다. 톰슨의 전자 발견, 뢴트겐의 X-선 발견, 광전 효과 발견 그리고 전자 회절 현상 발견 등이다. 이 현상들에서 공통되는 점은 무엇일까? 진공관 내에 있는 음극 물질 속에서 전자를 방출시켜 이용한다는 점이 공통점이다. 방출되는 전자가 에너지를 얻을 수 있는 과정은 몇 가지 종류가 있다. 이차 전자 방출, 광전자 방출, 열전자 방출 및 장전자 방출이 있다. 전자를 음극 물질 밖으로 끌어내는 방법이 여러 가지가 있다는 의미가 된다. 어떤 방법으로든 상관 없이 일함수 이상의 에너지를 얻은 전자는 음극 물질 표면을 뛰쳐나온다. 톰슨이 사용한 크룩스 진공관 음극에서 방출되는 전자는 이차 전자이다. 이 방법은 어떤 일차적인 입자 이온으로 음극 물질을 때려서 전자를 발생시킨다. 쿠울리지 X-선관 및 전자 회절을 측정한 진공관은 열전자를 이용한다. 이 방법은 음극을 전류로 가열한다. 광전 효과를 측정하는 광전관은 광전자를 이용한다. 이 방법은 음극에 자외선을 비춘다. 이 방법들은 모두 고전적인 대응이 가능하다. 그러나 고전적인 대응이 전혀 없는 전자 방출 과정이 있다. **장전자 방출** 과정이 그것이다. 음극 물질을 주변 진공이나 공기에 비하여 큰 전위차를 두면 음극 물질 표면 근처에 있는 전자가 진공이나 공기 중으로 투과되어 나온다. 이 과정은 순전히 양자적인 해석만이 가능하다.

현대의 과학 기술은 전자를 방출시키고 제어하는, 말하자면 전자를 잘 다스리는 기술 개발에서 비롯되었다. 이차전자 발생, 광전자 발생 및 열전자 발생의 활용 측면은 이루 헤아릴 수 없이 많다. 여기서는 이들 전자를 다시 물질 구조를 연구하는 도구로 삼는 예를 설명해 보자.

전자를 이용하여 물질의 미세 구조를 연구하는 전자 현미경 분야가 있다. 빛을 이용하는 현미경은 광학 현미경과 X-선 결정학이 있다. 장전자 방출은 어떤 면에 이용되고 있을까? 장전자 현미경을 만드는데 이용된다. 1.000 V/μs의 전기장에 있는 물질 표면에서 방출된 장전자는 표면의 구조에 대한 정보를 가지고 있다. 장전자 현미경(FEM)은 물질의 표면 구조 분석 현미경이다. 가속된 일차 전자로 표본을 때려서 이차 전자를 얻어서 이 정보를 영상화하는 전자 현미경으로 잘 알려 있는 주사전자 현미경(SEM)이나 투과전자 현미경(TEM)과는 동작 원리가 다르다. 장전자 현미경의 배율은 대략 10만 배 정도이다.

6. 전자 현미경

물질에서 방출시킨 전자를 인공적으로 가속시켜서 에너지를 증가시킨 후에 다시 물질로 쏘아서 거꾸로 물질의 구조를 연구할 수 있다. 전자를 제어하는 기술 중에서 지금까지 학습한 내용으로 충분히 이해할 수 있는 전자 현미경을 생각해 보자.

1) 전자 현미경의 공통적인 작동원리

전자 현미경은 전자의 파동성을 이용한 현미경이다. 가시광선 대신에 초점을 맞춘 전자빔을 사용하는 것을 제외하고 광학 현미경과 작동원리가 비슷한 면이 있다. 텅스텐으로 만든 필라멘트의 전자총에 고전압이 걸리면 필라멘트가 2,700 K까지 온도가 올라가서 열전자를 방출하게 된다. 방출된 전자선은 대략적으로 60 ~ 100 keV의 가속전압으로 가속될 수 있다. 전자선은 필라멘트에서 나와 표본에 이를 때까지 공기 중의 분자들과 충돌하여 진로를 잃는 것을 방지하기 위해서 고진공에 가깝게 유지되는 현미경 통속에 있다. 전자선이 금속 개구와 자기장을 이용한 렌즈에 의해서 한 초점으로 모아지고 파장이 일정한 전자빔을 형성한다. 이 전자선은 다시 자기장을 이용한 또 다른 렌즈에 의해서 표본에 초점을 형성한다. 배율은 대략 100만 배 정도이다.

표본에 입사되는 전자선은 표본 내의 원자 및 전자들과 상호 작용한다. 상호 작용에 의하여 여러 형태의 복사선이 방출된다. 이 상호 작용의 결과로 생기는 이차전자들은 빛으로 에너지가 변환되는 섬광검출기에 모아지고 이 빛의 신호들이 광전증배관에 의해 증폭되어 확대된 영상이 얻어진다.

2) 투과 전자 현미경과 주사전자 현미경

전자 현미경은 크게 나누어 투과전자 현미경과 주사전자 현미경으로 구분할 수 있다. 이 두 종류의 전자 현미경은 각기 다른 목적으로 발전되고 사용되어 왔다. 투과형 전자 현미경이 주사형 전자 현미경에 비해 구조상 복잡하고 취급이 쉽지 않은 점 및 고가인 점 등 때문에 주사전자 현미경의 보급이 증가하고 있다.

- 투과전자 현미경(TEM)에서는 고 에너지를 갖는 전자선이 전자렌즈계를 거쳐 표본을 통과하여 영상을 얻으므로 표본이 수십 nm 정도로 얇

아야 한다는 조건이 있다. 시료의 밀도, 두께 등의 차이에 따른 이차원적인 또는 단면적인 구조의 영상을 얻을 수 있다. 또한 시료에 도달하는 전자선을 회절시켜 회절상을 얻을 수 있으므로 표본 내부의 정보도 얻을 수 있다. 투과 전자 현미경은 금속, 세라믹, 반도체, 고분자 합성체 등의 재료 분야에서 표면의 구조, 의학 등의 생체 시료 조직관찰에 주로 사용되고 있다.

- 주사전자 현미경(SEM)은 보다 최근에 개발되었으며 전자선이 표본을 통과하는 것이 아니라 초점이 잘 맞추어진 전자선을 표본의 표면에 주사한다. 주사된 전자선이 표본의 한 점에 집중되면 일차 전자만 굴절되고 표본에서는 이차 전자들이 방출된다. 이차 전자들은 빛으로 바꾸어 주는 섬광검출기에 모아지고 이 빛의 신호들이 광전증배관에 의해 증폭되어 확대된 영상이 만들어진다. SEM은 시료 위를 주사된 상을 관찰하므로 3차원적인 입체 상을 관찰할 수 있다.

읽을 거리

광자의 일생 관측

광전 효과에서는 하나의 입사 광자가 하나의 전자를 만나서 에너지를 모두 주고 소멸된다. 한편 제동 복사에서는 하나의 입사 전자가 에너지를 잃어 여러 광자가 탄생된다. 어떤 특정한 광자의 탄생과 소멸을 생각해 보자. 속도가 빠른 전자가 금속에 부딪쳐 제동 복사에 의하여 탄생된 하나의 광자에 주목하자. 이 광자가 어떤 시간 후에 다시 금속을 만나 광전 효과로 소멸된다고 생각하자. 이 광자의 일생을 관측할 수 있을까? 과연 광자는 어디에서 생겨나고 어디로 소멸되는 것인가? 탄생과 소멸이 혹시 측정과 무슨 연관이 있는 것은 아닐까? 우리가 배운 톰슨의 전자도 탄생과 소멸을 반복할 수 있을까? 물질 속에 이미 존재하고 있는 낮은 에너지 전자는 물질 속에서 단지 꺼내어지고, 물질 밖에서 가속되고 단지 다시 물질 속으로 들어간다.

광자를 관찰하려면 우선 광자를 오래 포획하는 것이 필요하며, 광자를 파괴하지 않는 투명한 검출기도 필요하다. 일반적인 광 검출기는 광자의 에너지를 전기신호로 변환함으로써 검출하는데, 이러한 과정에서 광자는 파괴된다. 양자 측정에서 발생하는 또 하나의 문제는 만일 하나의 변수(예를 들면 위치)가 정확하게 측정된다면, 양립할 수 없는 또 다른 변수(예를 들면 운동량)에서 발생하는 필연적인 불확정성으로 인해, 그 변수를 다시 측정할 때에는 다른 결과가 생길 것이라는 점이다. 불확정성 원리이다. 이 문제를 피하기 위해 1970년대부터 소개되기 시작한 양자비파괴 측정(QND : quantum non-demolition)이라는 개념의 주된 내용은 측정에 수반되는 교란, 즉 반작용은 원치 않는 관측 대상에만 완전히 유지되도록 하고 원하는 측정 물리량은 오염되지 않도록 함으로써 높은 정밀도의 반복 측정이 가능하도록 한다. 말하자면, 광자에 대한 이상적인 양자비파괴 측정에서는 광자와 측정자 간에 에너지 교환이 없어야 한다.

아주 최근에 네이쳐(Nature)에 발표된 연구에 의하면 평균 수명 0.13초 동안 광자를 추적하는데 성공했다는 보고가 있다. 이 정도의 시간은 광자가 달까지 거리의 10분의 1을 갈 정도로 긴 시간이다. 이러한 종류의 실험은 단일 광자에 대한 양자비파괴(QND : quantum non-demolition) 개념을 확인할 수 있는 기본적인 기술이 된다. 이 기술은 양자역학에 대한 세련된 증명이 될 뿐 아니라, 양자정보 시스템에도 이용될 수 있을 것으로 예상된다. 이 성과는 양자계산 분야에서 중요한 의미를 지닌다. 양자 계산에서는 서로 다른 에너지 상태들 간에 정보의 양자 비트, 즉 큐비트를 옮김으로써 계산 속도를 높인다. 이 실험 결과는 포획된 광자의 큐비트 상태로 원자 큐비트의 흐름을 완전히 제어할 수 있음을 보여주는 것으로 양자 컴퓨터 분야에서 하나의 진전이 될 수 있다.

연 습 문 제

1. 10,000 eV의 전자가 X-선 튜브의 과녁을 두드려서 발생된 X-선의 최소 파장은 얼마인가?

2. 전자의 드브로이 파장이 10 keV의 광자의 파장과 같게 되려면 그 전자의 운동 에너지는 얼마이어야 하는가?

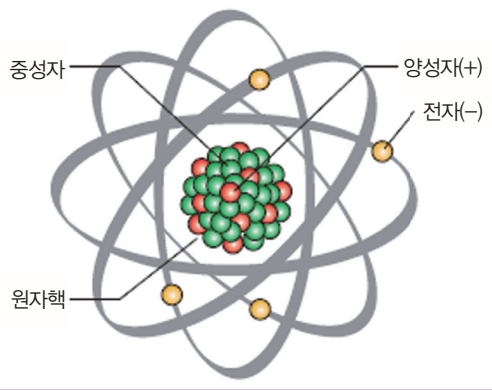
3. 질량이 0.1 μg인 먼지 조각이 0.001 mm/s의 속력으로 공기 중에서 떨어지고 있다. 이 입자의 드브로이 파장은 얼마인가?

4. (a) 대표적인 AM 라디오의 주파수는 1,000 kHz이다. 이 주파수를 갖는 광자의 에너지는 eV 단위로 얼마인가? (b) 주파수 100 MHz를 갖는 FM 신호에서 광자의 에너지는 얼마인가?

5. 세슘의 일함수는 1.9 eV이다. 이 값은 금속의 일함수 중에서 가장 낮은 값이다. 따라서 세슘은 한 개의 광자도 검출할 수 있는 매우 민감한 가시광선 검출기의 일종인 광증배관에 사용된다. (a) 세슘으로부터 광전자를 방출시킬 수 있는 빛의 최대 파장은 얼마인가? (b) $\lambda = 500$ nm인 빛을 세슘에 쪼인다면 방출되는 전자의 운동 에너지는 얼마인가?

6. 푸른빛 ($\lambda \approx 450$ nm)의 파장을 갖는 중성자의 운동 에너지를 구하라.

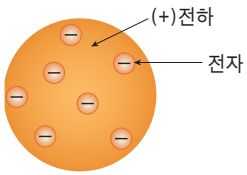
3 원자의 구조



그리스 시대에서부터 물질은 어떤 작은 입자로 되어 있을 것이라고 생각하였다. 물질이 연속적인 것처럼 보이지만 미시적인 세계에서 보면 어떤 구조를 가지고 있을 것이라는 의문 역시 가지고 있었다. 19세기 중반까지도 이러한 의문에 확신을 갖지 못했지만, 원자의 존재에 대한 화학 및 물리적 증거들은 꾸준히 연구되었으며, 물질의 일반적인 형태인 원자와 분자의 존재가 다양한 방법으로 확인되었다. 100여 년 전에 전자가 발견된 이래 양성자, 중성자들이 밝혀졌고, 다양한 연구가 진행되었다. 우리 주변 세계를 만드는 물질의 거의 모든 성질은 원자의 구조에 원인이 있다. 이 장에서는 원자의 구조를 살펴보고자 한다.

모든 원자는 양성자와 중성자로 구성된 핵과 핵으로부터 거리를 두고 있는 전자들로 구성된다. 전자가 핵 주위를 돌고 있다고 생각하기 쉬운데 고전 전자기 이론에 의하면 이렇게 도는 전자는 안정된 궤도를 가질 수 없다. 1913년 보어(Niels Bohr)는 양자의 개념을 원자 구조에 적용하여 보어 모형을 만들었다. 이 모형이 성공적이지 못하고 더 정확한 양자역학적인 방법으로 대체되었지만 원자에 대한 직관적인 이해를 준다. 수소원자에 대한 보어의 이론을 살펴보고, 양자역학이 적용되는 원자 세계의 방정식인 슈뢰딩거 방정식과 원자세계에서 에너지가 양자화되어 있는 것을 보여주는 프랑크–헤르츠의 실험을 알아보고자 한다.

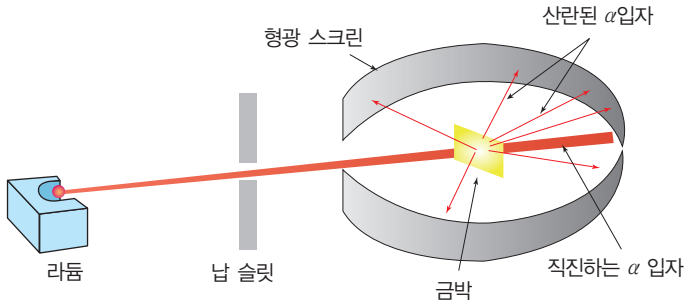
1. 핵의 발견



[그림 Ⅴ-20] 톰슨의 푸딩모형

과학자들은 19세기 말에 화학 원소들이 원자로 구성되어 있다는 것을 알고 있었지만, 원자 자체에 대해서는 모르고 있었다. 모든 원자가 전자를 가지고 있다는 발견이 원자의 모습을 풀어 주는 단서가 되었다. 톰슨(Thomson, Joseph John)은 19세기 말에 전자의 e/m를 음극선 실험으로 측정하였다. 이때, 수소 이온으로 e/m를 측정한 경우, 전자 질량의 약 2000배나 되는 값을 얻게 되었다. 전자는 음 전하를 띤 반면 원자는 중성

이므로, 원자는 양전하를 띤 어떤 물질이 있어야 했다. 톰슨은 (+)로 대전된 큰 질량체와 작은 질량체인 전자가 박힌 모형을 만들었다.



[그림 Ⅴ-21] **알파 입자 산란 실험**

1909년 러더퍼드(Rutherford, Ernest; 1871~1937)는 얇은 금박막을 지나는 α 입자의 산란을 관찰하였다. α 입자는 라돈이라는 방사성 원소에서 자연적으로 나오는 것을 사용하였다. α 입자는 $+2e$의 전하를 가졌으며, 그 질량은 헬륨(He)의 질량과 같은 값이었다. 오늘날에는 α 입자가 헬륨 원자의 핵이라는 것을 알고 있다. 이 실험에서 많은 α 입자들은 박막을 통과하여 직진하거나 매우 적은 각도로 방향이 바뀌었다. 그러나, 입자들 중 작은 숫자는 강한 반발력에 의해 뒤쪽으로 되돌아오는 것이 관찰되었다. 이러한 관찰은 톰슨의 모형으로 설명할 수 없었다. 톰슨 모형에서는 양전하가 원자 전체에 퍼져 있기 때문에 대부분의 산란 입자는 약 3° 범위 내에 들어오고 약간만이 20°까지 산란될 것으로 예상되었다. 러더퍼드의 학생이었던 가이거와 마스덴은 산란 입자 중 1/8000 가량이 90° 보다 큰 각도로 산란되는 것을 발견했다. 이 실험을 러더퍼드는 다음과 같이 회상했다.

"내 생애 가장 믿기 어려운 일이 일어난 것이다. 그것은 15인치 포탄을 종이 조각을 향해 발사했더니 되돌아와 당신을 맞히는 것과 같을 만큼 믿기 어려운 것이었다."

1911년에 러더퍼드는 이 실험의 결과로 양전하가 원자의 중심에 빽빽이 모여서 핵을 형성하고 있으며 원자 질량의 대부분은 핵이 가지고 있다고 제안하였다. 얇은 금박을 이루는 원자 내부는 주로 빈 공간이며, α 입자가 강한 반발력에 의해 큰 각으로 산란되는 것을 설명하기 위해서는 (+)전하가 중심에 뭉쳐 있다고 가정하였다. 러더퍼드는 이를 원자핵이라 하였고, α 입자와 원자핵 간의 전기적 반발력에 의해 큰 산란각을 가지게 되었다고 설명하였다.

2. 핵의 크기

원자의 지름은 약 10^{-10} m로 알려져 있다. 러더퍼드의 산란 실험을 통해서 핵의 지름을 대략 알아보자.

양전하 e를 Z개 포함하고 있는 핵과 α 입자가 정면 충돌한다고 가정하자. 충돌 전 α 입자의 운동 에너지는

$$E_\alpha = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 \qquad (\text{V. } 3\text{–}1)$$

이었는데 양전하를 띠고 있는 핵에 가까워 짐에 따라 척력에 의해 속도가 줄어든다. 핵으로부터 거리 r인 지점에서 전위는

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \qquad (\text{V. } 3\text{–}2)$$

이고, 여기서 Q는 핵의 전하량으로서 $Q = Ze$이다. 거리 r인 지점에서 α 입자가 가지는 전기적 위치 에너지는

$$\mathrm{E}_{\alpha_\mathrm{p}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Ze)(2e)}{r} \qquad (\text{V. } 3\text{–}3)$$

이다. 여기서 핵을 둘러싸고 있는 궤도전자를 고려하지 않았다. α 입자가 핵에 가장 가까이 접근하는 지점을 $r = R$이라고 두면, 이 지점에서 α 입자는 순간적으로 정지한다. 이때 α 입자가 가지고 있던 운동 에너지는 전부 위치 에너지로 전환되므로,

$$\frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Ze)(2e)}{r} \qquad (\text{V. } 3\text{–}4)$$

와 같은 관계식이 얻어진다. 따라서, 핵의 최대 반지름은

$$R = \frac{1}{\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{m_\alpha v_\alpha^2} \qquad (\text{V. } 3\text{–}5)$$

이 된다.

자연 상태에서 발견되는 α 입자의 운동 에너지는 최대값이 7.7 MeV인데, 이는 1.2×10^{-12} J이다. $1/4\pi\epsilon_0 = 9.0 \times 0^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$ 이므로

$$\mathrm{R} = (9.0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}) \frac{4Z(1.6 \times 10^{-19}\mathrm{C})^2}{0.5 \times (1.2 \times 10^{-12}\ \mathrm{J})}$$

$$= 3.8 \times 10^{-16} Z\ \mathrm{m}$$

가 된다. 금을 박막 물질로 사용했으므로 원자 번호 $Z = 79$를 대입하면

$$R_{Au} = 3.0 \times 0^{-14}\,\mathrm{m}$$

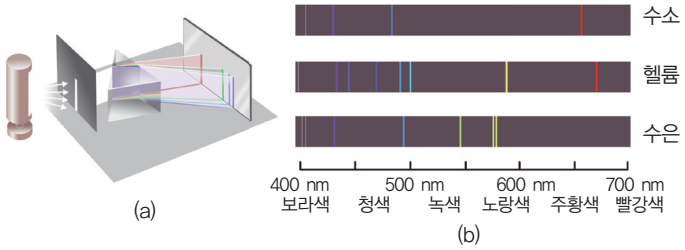
이다. 따라서 금 핵의 반지름은 $3.0 \times 0^{-14}\,\mathrm{m}$ 보다 작을 것이며, 원자 반지름의 $10^{-10}\,\mathrm{m}$ 보다 훨씬 작다.

3. 원자 스펙트럼

19세기 후반 분광학이라고 부르는 연구 분야가 발전하게 되었다. 분광학을 이용하면 원자의 종류를 정확히 구별할 수 있었다. 그렇지만 이 현상을 설명해 줄 수 있는 이론이나 공식을 찾아내는데는 어려움이 많았다. 분광학적 현상은 원자의 숨겨진 구조를 정확하게 반영하고 있었기 때문에 분광학에 관련된 공식들이 원자 이론을 검증하는 데 강력한 도구 중의 하나로 사용되었다.

뉴턴이 프리즘을 통해 백색광을 이용하여 스펙트럼을 관찰한 것이 처음 시작이었지만, 19세기 중반에서야 여러 가지 가스를 채운 방전관을 사용하여 분광스펙트럼을 연구하였다. 이때 각 색깔로 분리된 선을 분광선이라고 한다.

원자나 증기에 전류를 흘려주는 적당한 방법으로 대기압보다 약간 낮은 기압에서 원자나 분자들을 들뜬 상태로 만들면, 이 기체에서 어떤 특정한 파장만을 갖는 복사선이 방출된다. 이것을 슬릿에 통과시킨 다음에 프리즘이나 격자를 이용하여 색깔별로 분리시킨다. 이때 방출되는 복사선을 관측하여 나타낸 선들을 방출 스펙트럼이라고 한다. 반대로 같은 가스에 백색광을 통과시키면 원자들은 방출 스펙트럼과 같은 파장의 빛을 흡수하는 데 이것을 흡수 스펙트럼이라고 한다. 밝은 바탕에 검은색의 선으로 관찰된다.



[그림 Ⅴ-22] (a) 프리즘 분광기 (b) 방출 스펙트럼

가장 단순하고 가벼운 원자가 수소이기 때문에 19세기 중반부터 1913년까지 수소의 스펙트럼 연구가 집중적으로 이루어졌다. 전기 방전관에서 수소 원자는 그림과 같은 선스펙트럼을 방출한다. 가장 긴 파장에 해당하는 빨간색 선을 H_α라고 부르고, 그 다음의 청록색 선을 H_β, 그리고 이어서 나타나는 선들을 H_γ 등등으로 붙였다. 파장이 짧아짐에 따라 선들의 간격이 좁아지며, 그 세기는 약해진다. 이것을 연구해 오던 스위스 교사인 발머(Johann Balmer)는 이 선들을 나타내는 공식을 시행착오를 거쳐 1885년에 발견하였는데, 이것들을 발머 계열이라고 한다. 발머 계열에 관한 공식은

$$\frac{1}{\lambda} = R\left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right] \qquad n = 3,\ 4,\ 5\ \cdots \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}6)$$

이다. 이때 R값은 리드베리(Rydberg) 상수라고 부르고, R값은

$$R = 1.09737315 \times 10^7 \text{m}^{-1}$$

이다. H_α선은 이 식에서 $n = 3$에 해당하며, H_β는 $n = 4$에 해당한다. 이 계열의 한계는 $n = \infty$일 때이며, 그 때의 파장은 $4/R$인데 실험값과 잘 일치한다.

발머 계열은 수소 스펙트럼의 가시광 영역의 파장을 포함한다. 자외선과 적외선 영역에서 속하는 수소의 선스펙트럼은 다른 계열들에 속한다. 자외선 영역에 있는 라이만(Lyman) 계열은

$$\frac{1}{\lambda} = R\left[\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right] \qquad n = 2,\ 3,\ 4\ \cdots \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}7)$$

흡수스펙트럼

방출스펙트럼

[그림 V-23] **흡수스펙트럼과 방출스펙트럼**

이고, 적외선 계열의 파센(Paschen) 계열은

$$\frac{1}{\lambda} = R\left[\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right] \qquad n = 4,\ 5,\ 6\ \cdots \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}8)$$

이며, 푼트(Pfund) 계열은

$$\frac{1}{\lambda} = R\left[\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right] \qquad n = 6,\ 7,\ 8\ \cdots \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}9)$$

로 스펙트럼을 설명하는 공식들이 있다. 각 공식의 R값은 같다.

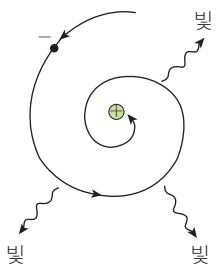
이렇게 나온 공식들은 실험을 통한 시행 착오의 방식으로 만들어진 것으로 원리를 설명할 수 없었는데 1913년에 보어가 에너지 준위 사이에 원자 전이로 분광선을 설명할 수 있었다.

4. 수소 원자에 관한 보어 모형

1913년 원자에 관한 러더퍼드의 모형이 나온 후 2년만에 보어가 수소원자에 대한 모형을 제안하였다. 이 모형은 수소 원자에서 관찰된 선스펙트럼이 가지는 파장을 약 0.02%의 정밀도로 예언하였다.

러더퍼드가 원자핵을 발견하면서 많은 문제들이 제기되었는데, 음(−)으로 대전된 전자가 크기가 작고($\sim 10^{-14}$ m), 양(+)으로 대전된 핵과의 정전기적인 인력에도 불구하고 어떻게 상대적으로 먼($\sim 10^{-10}$ m) 거리를 유지하고 있었다는 것이었다. 러더퍼드는 행성들이 태양 주위를 공전하는 것과 같이, 아마도 전자도 핵을 중심으로 하는 궤도를 공전할 것이라고 제안하였다.

러더퍼드의 원자 모형은 작고 무거우며 양의 전하를 띤 핵과, 핵에서 상대적으로 먼 거리에 떨어져서 원자 전체를 중성으로 만들기에 충분한 수의 전자가 핵을 감싸고 있는 '행성모형'이다. 이 모형에서 핵이 전자를 끌어당기는 전기력에 대항하여 전자를 정해진 위치에 가만히 둘 수 있는 다른 힘이 없기 때문에 전자는 정지해 있을 수 없다. 그러나, 전자들이 움직인다고 가정하면 태양 주위를 도는 행성처럼 안정된 궤도를 생각할 수 있다. 이 모형은 원자가 안정하다는 실험 결과와는 일치하지만 전자기 이론과는 맞지 않는다. 전자기 이론에 의하면 가속되는 전하는 전자기파의 형태로 에너지를 방출해야 한다. 곡선 궤도를 운동하는 전자는 가속 운동에 해당하므로 연속적으로 에너지를 잃어야 한다. 따라서 순식간에 전자기파를 방출하면서 핵 속으로 빨려 들어가야만 한다. 그러나, 이런 현상은 나타나지 않는다. 방출되는 전자기파는 연속적이지 않고 원자가 붕괴하지도 않는다.



[그림 Ⅴ−24] 전자기 이론에 의한 러더퍼드 모형의 실패

이 문제를 해결하기 위하여 보어는 획기적인 제안을 하였다. 원자의 전자는 고전 전자기 이론에서 설명하는 것과는 대조적으로 복사선을 방출하지 않으면서 특정한 원형의 안정한 궤도를 따라 핵 주위를 회전할 수 있다고 가정하였다.

보어가 가정하길 수소 원자는 총 에너지 E를 갖는 정상 상태로 된 집합 중에서 임의의 한 상태에서만 존재할 수 있으며 또 이들 상태 중의 어느 한 상태에 있을 동안 원자가 복사선을 내지 않을 것이라고 가정하였다. 총 에너지가 E_i인 첫 번째 상태로부터 더 낮은 총 에너지 E_f를 갖는 상태까지 원자가 전이할 때만 복사선이 생기게 된다. 이때 방출되는 복사선의 진동수와 에너지는 다음과 같은 관계식을 따른다.

$$h\nu = E_i - E_f \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}10)$$

여기서 ν는 방출되는 복사선의 진동수이다. 그리고 $h\nu$는 원자로부터 복사되는 단일 광자가 운반해 가는 에너지 양자이다. 이와 같은 보어의 가설을 진동수 조건이라고 한다.

수소원자 내의 전자가 그 원자의 원자핵을 중심으로 반지름 r인 원형궤도상에서 운동한다고 가정하자. 한 개의 양성자인 원자핵의 질량은 매우 커서 원자핵–전자 사이의 질량 중심은 실질적으로 원자핵에 있다는 가정을 하자. 전자의 운동에 대하여 뉴턴의 제2법칙과 쿨롱의 법칙을 적용하면

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{(Ze)(e)}{r^2} = m\frac{v^2}{r} \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}11)$$

이 되므로 전자가 가지는 운동 에너지는

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r} \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}12)$$

이 된다. 또한 원자핵과 전자 사이에 가지는 퍼텐셜 에너지는

$$U = (-e)V = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}13)$$

으로 주어진다. 여기서 V는 원자핵에 의한 전자의 전위이다.

원자핵과 전자가 가지는 총 에너지 E는

$$E = E_K + U = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r} \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}14)$$

이 된다. 궤도 반지름이 어떤 값을 택하여도 되므로 총 에너지 E도 어떤 값이든 취하게 된다. 따라서 E를 양자화시킨다는 문제는 r을 양자화시킨다는 의미가 된다. 전자의 반지름이 주어진다면 궤도에 대한 모든 성질이 정해진다.

식 (V. 3–12)로부터 전자에 대한 선속력은

$$v = \sqrt{\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mr}} \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}15)$$

으로 주어지고 이 궤도에서 회전 진동수는

$$f_0 = \frac{v}{2\pi r} = \sqrt{\frac{Ze^2}{16\pi^3\epsilon_0 mr^3}} \qquad (\text{V}.\ 3\text{–}16)$$

으로 표시된다. 선운동량은

$$p = mv = \sqrt{\frac{Zme^2}{4\pi\epsilon_0 r}} \qquad (\text{Ⅴ. 3-17})$$

이 되고 각운동량 L은

$$L = pr = \sqrt{\frac{Zme^2 r}{4\pi\epsilon_0}} \qquad (\text{Ⅴ. 3-18})$$

이라고 주어진다. 이와 같이 r이 알려지면 운동 에너지(E_k), 퍼텐셜 에너지(U), 총 에너지(E), 선속력(v), 회전진동수(f_0), 운동량(p), 각운동량(L) 또한 알게 되고 이 양들 중의 임의의 하나가 양자화되었다면 그 양들은 모두 양자화되어야 한다.

보어는 이 단계에서 대담한 가설을 세웠다. 각운동량에 대해 양자화를 적용할 때, 궤도의 필요한 양자화의 모습이 가장 간단하게 나타난다는 가설을 세운 것이다. 따라서 보어의 대담한 가설은 각운동량이

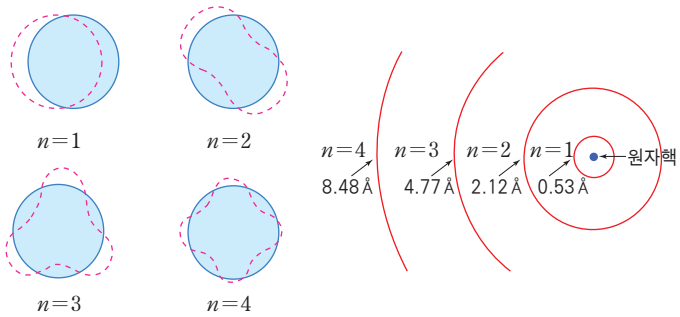
$$L = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3\cdots \qquad (\text{Ⅴ. 3-19})$$

으로 주어지는 값만을 취할 수 있다는 것이다. 플랑크 상수가 기본적으로 나오게 된다. 정수 n은 양자수(quantum number)라고 한다.

(Ⅴ. 3-18)과 (Ⅴ. 3-19)를 연결해서 계산하면

$$r_n = \frac{h^2\epsilon_0}{Z\pi me^2} \cdot n^2 = r_1 \cdot n^2, \quad n = 1, 2, 3\cdots \qquad (\text{Ⅴ. 3-20})$$

으로 된다. 이 식에서 r이 어떻게 양자화되었나를 보여준다. $Z = 1$인 수소의 경우 위 식에 각 상수값을 집어넣으면 $r_1 = 0.0529177$ nm가 된다. 이 반지름은 수소 원자가 바닥 상태일 때 반지름이며, 이것을 보어 반지름이라 부른다.



[그림 Ⅴ-25] **보어 모형의 정상파 조건**

식 (Ⅴ. 3-20)을 식 (Ⅴ. 3-14)에 대입하면

$$E_n = -\frac{Z^2me^4}{8\epsilon_0^2h^2} \cdot \frac{1}{n^2}\ ,\ n = 1,\ 2,\ 3\cdots \qquad (\text{Ⅴ}.\ 3\text{-}21)$$

이 된다. 이것이 허용된 정상 상태가 가지는 에너지값을 직접 구할 수 있게 한다.

양자수 n에 따라 각각의 궤도 반지름과 에너지들을 나타낼 수 있다. n이 커지면 반지름은 n^2에 비례하며 궤도는 더 멀리 떨어지게 된다. 다시 말하면 에너지 준위의 음의 값은 점차 감소되어 $n = \infty$로 되면 결국 에너지 준위는 0의 값이 된다. 그 이상에서는 에너지가 +가 되면, 전자는 핵의 구속에서 풀려나게 된다.

식 (Ⅴ. 3-21)은 각 궤도에 있는 전자의 에너지를 나타내며, 원자 번호가 1인 수소의 바닥 상태 에너지($n = 1$)를 구해 보면 −13.6 eV가 됨을 알 수 있다. 따라서 수소 원자의 에너지 준위는

$$E_n = -\frac{13.6\ \text{eV}}{n^2} \qquad (\text{Ⅴ}.\ 3\text{-}22)$$

가 된다. 수소의 첫 번째 들뜬 상태는 $n = 2$일 때 인데 이때 에너지는 −3.40 eV이다. 음의 부호는 외부에서 에너지를 가해야 전자를 0 준위로 떼어낼 수 있음을 말한다. 이것을 전자들의 에너지 우물이라고 생각할 수 있다. 수소원자에서 전자 하나를 떼어내기 위한 최소 에너지 13.6 eV를 이온화 에너지라고 한다.

큰 에너지를 갖는 들뜬 상태에서 낮은 에너지의 상태로 전이될 때, 광자들이 방출되면 식 (Ⅴ. 3-10)를 이용하여 방출된 광자의 에너지를 파장으로 다시 정리할 수 있다. $h\nu = hc/\lambda$이므로 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{hc}(E_i - E_f) \qquad (\text{Ⅴ}.\ 3\text{-}23)$$

식 (Ⅴ. 3-21)을 이용하면

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{Z^2me^4}{8\epsilon_0^2h^3c} \cdot \left[\frac{1}{\mathrm{n}_f^2} - \frac{1}{\mathrm{n}_i^2}\right] \qquad (\text{Ⅴ}.\ 3\text{-}24)$$

가 된다. $n_f < n_i$일 때 처음에 에너지가 높은 상태에 있던 전자는 에너지가 낮은 상태로 떨어지게 된다. 발머 계열(Z = 1)과 이 식을 비교하면 $n_i = n$이고 $n_f = 2$이므로

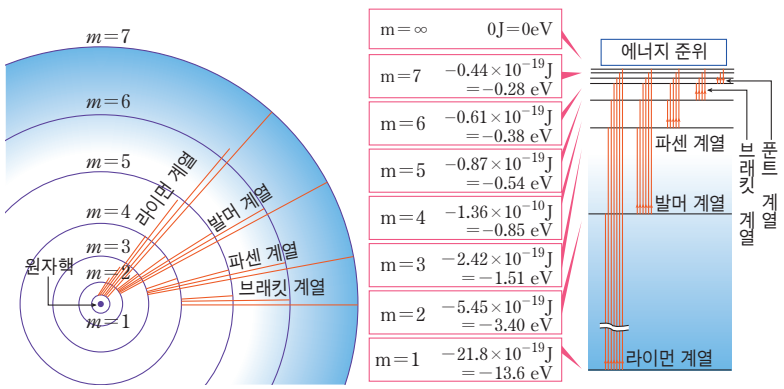
$$\frac{1}{\lambda} = R\left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{\mathrm{n}^2}\right],\ n = 3,\ 4,\ 5\cdots \qquad (\text{Ⅴ}.\ 3\text{-}25)$$

이다. 이때 R은 리드베리 상수로 1913년에 보어가 계산한 R의 값은 실험에 의해 1% 이내의 오차로 측정되었다.

라이만 계열은 $n_f = 1$, 파센 계열은 $n = 3$, 브라켓 계열은 $n_f = 4$, 푼트 계열은 $n_f = 5$를 대입하여 공식을 구하면 똑같게 된다.

보어의 원자 모형은 러더퍼드의 원자 모형으로 설명할 수 없었던 스펙트럼의 규칙성이나 광량자의 흡수, 방출에 대한 설명을 할 수 있었다. 그러나 이러한 보어의 원자 모형도 다음과 같은 문제점이 있었다.

궤도 전자가 한 개뿐인 수소 원자의 경우에는 충분히 설명할 수 있으나, 전자가 많은 원자의 경우에는 전자 하나 하나의 궤도를 정할 수 없다. 그리고 원자 내의 전자가 원자핵 주의를 회전하면서 어느 시각에 어떤 위치를 갖는지를 정할 수 없다. 다만, 전자가 원자핵 주위의 특정한 궤도를 돌고 있다기 보다는 그 궤도에 해당하는 부분에 전자가 존재하는 확률이 높다고 설명해야 한다.



[그림 Ⅴ-26] **수소 원자의 에너지 준위와 스펙트럼**

5. 슈뢰딩거 방정식과 에너지 준위

고전 역학에서 가장 중요한 것은 뉴턴의 운동 법칙이고, 이 법칙은 $F = ma$라는 간단한 식으로 표현된다. $F = ma$라는 식으로 고전 역학의 모든 것을 유도해 낼 수 있다. 운동량 보존, 역학적 에너지 보존 등 모두 이 간단한 방정식에서 유도해 낼 수 있다. 원자 세계에서는 이 뉴턴의 운동 방정식이 성립하지 않는다. 뉴턴의 역학을 대체하는 양자역학을 가지고 설명하는데 여기에도 이런 간단한 방정식이 있을까? 양자역학에서 사용하는 가장 기본적인 식 중의 하나가 슈뢰딩거 방정식이다. 드브로이가 물질파의 개념을 발표한지 얼마되지 않아서 오스트리아의 물리학자 슈뢰딩거

에르빈 슈뢰딩거
(E. Schrödinger, 1887~1961)

슈뢰딩거 방정식을 비롯한 양자역학에 대한 기여로 유명한 오스트리아의 물리학자이다. 슈뢰딩거 방정식으로 1933년 노벨 물리학상을 수상했다.

(E. Schrödinger)가 1926년에 일반적인 파동 이론과 드브로이의 생각을 접목하여 이 방정식을 만들었다. 슈뢰딩거 방정식과 이 방정식을 만족시키는 파동함수에 대하여 알아보자.

1) 슈뢰딩거의 파동방정식

파동역학의 기본적인 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} \qquad (\text{Ⅴ. 3-26})$$

파동함수를 1차원 정상파의 식으로 나타내면

$$\psi(x, t) = \psi(x)\sin(\omega t) \qquad (\text{Ⅴ. 3-27})$$

이다. 이 식을 (Ⅴ. 3-26)에 대입하면

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\omega^2}{v^2}\psi \qquad (\text{Ⅴ. 3-28})$$

가 된다. $\omega/v = k = 2\pi/\lambda$이고, $p = h/\lambda$이므로

$$\frac{\omega^2}{v^2} = \frac{p^2}{\hbar^2} \qquad (\text{Ⅴ. 3-29})$$

이 된다. 총 에너지는 $E = p^2/2m + U$이므로, $p^2 = 2m(E - U)$가 된다. 여기서 U는 위치 x의 함수로 나타낼 수 있는 퍼텐셜 에너지이다. 따라서 식(Ⅴ. 3-27)은

$$\frac{\omega^2}{v^2} = \frac{2m(E-U)}{\hbar^2} \qquad (\text{Ⅴ. 3-30})$$

이 된다. 식 (Ⅴ. 3-30)과 식 (Ⅴ. 3-28)을 묶으면

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E-U)\psi = 0 \qquad (\text{Ⅴ. 3-31})$$

이 된다. 이것을 좀더 정리하면

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x) \qquad (\text{Ⅴ. 3-32})$$

로 나타낼 수 있다. 이 식이 1차원-시간에 무관한 **슈뢰딩거 파동방정식**이다. 이때 파동함수 ψ는 E가 시간에 따라 변하지 않은 정상 상태를 나타낸다.

고전역학에서 $F = ma$라는 방정식을 풀듯이 양자역학에서는 식 (Ⅴ. 3-32)와 같은 슈뢰딩거 방정식을 풀게 된다. 파동함수의 형태로 표현하는데 이런 체계를 파동역학이라고 부른다.

2) 파동함수

슈뢰딩거 파동방정식을 풀어서 파동함수를 구하게 된다. 입자에 관한 파동함수 $\psi(x, y, z, t)$는 그 입자에 관한 모든 정보를 갖고 있다. 보른(M. Born)은 파동함수에 대한 해석을 "파동함수의 제곱이 그 입자를 발견할 단위부피당 확률일 것이다"라고 제안했다.

$$\psi^2 dV = \text{부피 } dV \text{ 안에서 그 입자를 발견할 확률}$$

이때 물리량 ψ^2은 **확률밀도**라 불린다. 1차원에서 $\psi^2(x)dx$는 x와 dx 사이에서 그 입자를 발견할 확률에 비례한다. 즉, $\psi^2(x)$가 작은 곳보다 큰 곳이 그 입자를 발견하기 쉽다. x축을 따라 모든 확률들을 합치면 1이 되어야 한다.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1 \qquad (\text{Ⅴ. 3-33})$$

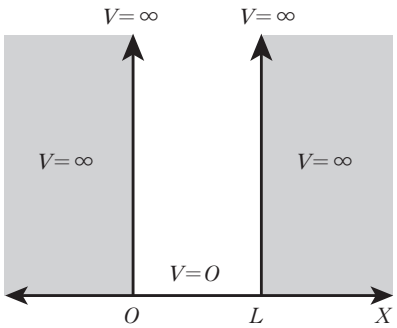
이 조건을 만족하는 파동함수 $\psi(x)$는 **규격화 되었다**라고 한다.

파동함수의 통계적 해석은 고전물리학과 전혀 다르다. 고전물리학에서는 입자에 작용하는 모든 힘들과 그 입자의 초기 위치와 초기 속도가 주어지면 입자의 미래를 정확히 예측할 수 있었다. 그러나, 파동함수는 입자를 주어진 위치에서 관측될 확률만을 예측할 수 있다. 즉 하나의 입자를 정확히 예측하는 하는 것은 불가능하다는 것이다. 양자역학은 각각의 측정 결과를 예측하는 것이 아니라, 물리량들의 평균값을 정확하게 예측할 뿐이다.

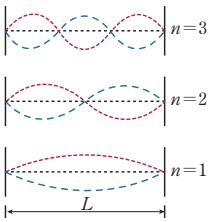
3) 상자 속의 입자

[그림 Ⅴ-27]과 같이 질량이 m인 입자가 폭이 L인 1차원 상자 속에서 왕복 운동하는 문제에 슈뢰딩거 방정식을 적용해 보자. 상자안에서 퍼텐셜 에너지는 0이고, 양벽은 무한하여 입자가 상자의 벽을 뚫지 못한다고 가정하자.

고전역학적으로는 입자가 $x = 0$에서 $x = L$ 사이 어느 곳에서나 같은 확률로 발견될 것이다. 파동역학적으로는 입자에 파동함수를 부여해



[그림 Ⅴ-27] **무한 퍼텐셜 우물**



❖ 양 끝에 묶인 길이 L인 진동하는 현의 기준방식 $L = n\lambda/2$

야 한다. 입자가 벽을 뚫지 못하므로 $x < 0$이거나 $x > L$인 영역에서는 $\psi = 0$이 된다. 그리고 파동함수가 연속이어야 하기 때문에 다음과 같은 경계조건을 갖는다.

$$x = 0\text{과 } x = L\text{에서 } \psi(x) = 0$$

$U = 0$이므로, 식 (Ⅴ. 3-31)의 슈뢰딩거 방정식은

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + k^2\psi = 0,\ \mathrm{k} \equiv \sqrt{2mE}\,/\,\hbar \qquad (Ⅴ.\ 3\text{-}34)$$

가 된다. 이 방정식의 해는 $\psi(x) = A\sin(kx + \phi)$이다. $x = 0$에서 $\psi = 0$이라는 조건으로부터, $\sin(kL) = 0$를 얻는다. 이것은 $kL = n\pi$를 말한다(n은 정수). 따라서 경계조건을 만족하는 파동함수는 정상파의 형태를 가진다.

$$\psi(x) = A\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right),\ n = 1,\ 2,\ 3 \qquad (Ⅴ.\ 3\text{-}35)$$

여기서 $k = 2\pi/\lambda = n\pi/L$이므로, n번째 정상파의 파장은 $\lambda = 2L/n$이다. 드브로이의 물질파 $\lambda = h/mv$에 적용하면,

$$v = \frac{nh}{2mL} \qquad (Ⅴ.\ 3\text{-}36)$$

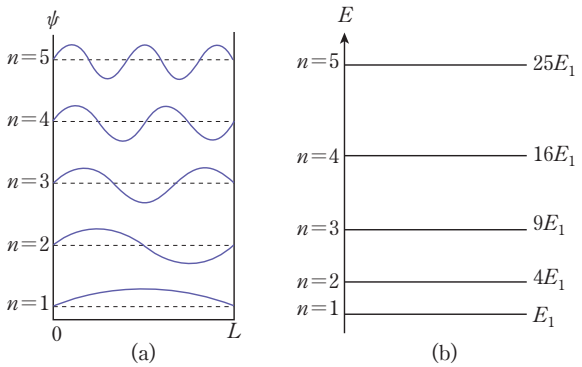
을 얻는다. n이 정수값이므로 속력은 양자화되었다. 따라서 운동량도 양자화되어

$$p_n = mv = \frac{nh}{2L},\ n = 1,\ 2,\ 3\cdots \qquad (Ⅴ.\ 3\text{-}37)$$

가 된다. 상자 안에서는 운동 에너지만이 입자의 에너지이기 때문에 이 에너지도 양자화된다.

$$E_n = \frac{n^2h^2}{8mL^2},\ n = 1,\ 2,\ 3\cdots \qquad (\text{Ⅴ}.\ 3\text{-}38)$$

경계조건에 의해서 에너지 준위들이 양자화된다. 특히 입자가 0이 되는 에너지를 가질 수 없다. 가장 낮은 에너지값은 $n = 1$일 때로 이때 에너지를 **영점 에너지**라고 부른다.



[그림 Ⅴ-28] **파동함수와 에너지 준위**

식 (Ⅴ. 3-35)을 규격화 조건식인 식 (Ⅴ. 3-33)에 적용시키면

$$\int_0^L A^2\sin^2\left(\frac{n\pi x}{L}\right)dx = 1 \qquad (\text{Ⅴ}.\ 3\text{-}39)$$

이 된다. 삼각함수의 공식 $\sin^2\theta = (1 - \cos 2\theta)/2$를 이용하여 이 적분을 계산할 수 있다. 이 결과는 $A^2L/2 = 1$이므로 $A = \sqrt{2/L}$이어야 한다. 따라서 상자속의 입자에 관한 규격화된 정상 상태의 파동함수는

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}}\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right),\ n = 1,\ 2,\ 3\cdots \qquad (\text{Ⅴ}.\ 3\text{-}40)$$

가 된다.

이 상자의 중심 $x = L/2$에서 확률밀도를 살펴보자. $n = 1$일 때는 이곳에서 가장 발견될 확률이 높지만, $n = 2$일 때는 0이 된다. 고전역학적으로는 에너지와 상관 없이 항상 상자 안의 모든 곳에서 발견될 확률이 똑같지만 양자역학적으로 보면 같은 지점이라도 에너지 준위에 따라 발견될 확률이 달라지게 된다.

예제 한 변이 수소 원자 크기인 약 1×10^{-10} 인 일차원 상자가 있다. 이 속에 한 개의 전자가 들어 있을 때, 이 전자에 관한 가장 낮은 에너지 준위를 구하라.

풀이 식 (Ⅴ. 3-38)으로부터

$$E_1 = \frac{h^2}{8mL^2} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s})^2}{8(9.11 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg})(1.0 \times 10^{-10}\,\mathrm{m})^2} = 0.603 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$$

따라서, $E_1 = 37.7$ eV가 된다.

예제 길이가 L인 일차원 상자에 입자의 에너지가 바닥 상태에 있다. (1) 확률밀도 $|\psi|^2$를 구하라. (2) 입자가 발견될 확률이 가장 큰 곳은 어디인가? (3) 이때 입자의 위치를 여러 번 측정한다면 그 평균값은 어디인가?

풀이 (1) 식 (Ⅴ. 3-35)에서 바닥 상태가 $n = 1$일 때 이므로,

$\psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{L}}\sin(\frac{\pi x}{L})$이 된다. 따라서 $|\psi_1|^2 = \frac{2}{L}\sin^2(\frac{\pi x}{L})$이다.

(2) 입자가 발견될 확률이 가장 큰 곳은 $|\psi|^2$이 최대인 곳이다. 따라서 sin 값이 최대인 곳은 $\frac{\pi x}{L} = \frac{\pi}{2}$일 때이므로, $x_{\max} = \frac{L}{2}$ 인 지점이다.

(3) 여러 번 위치를 측정한 결과의 평균값은 모든 가능한 위치에 대해 x곱하기 x에서 그 입자를 발견할 확률을 적분한 것이다(입자는 언제나 동일한 에너지 상태). 따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle x \rangle = \int_0^L x|\psi(x)|^2 dx \qquad (\text{Ⅴ. 3-41})$$

이때 평균값 $\langle x \rangle$는 보통 x의 기댓값이라고 한다. 따라서

$$\langle x \rangle = \frac{2}{L}\int_0^L x\sin^2\left(\frac{\pi x}{L}\right)dx$$

이다. 이 적분의 결과는 $\langle x \rangle = \frac{L}{2}$이 나온다.

$|\psi|^2$은 중간점 $x = L/2$인 곳을 중심으로 대칭이므로 평균값이 $L/2$가 되어야 한다. 그러나 가장 있을 확률이 높은 지점과 평균 지점의 값이 항상 같지는 않다.

탐구문제 위의 예제와 같은 1차원 상자에서 첫 번째 들뜬 상태의 에너지를 가질 때 확률밀도와 가장 발견될 확률이 높은 지점, 평균 지점의 값을 구해 보아라.

위의 예제에서 x의 기댓값 <x>를 구하였다. 이것은 어떤 한 번의 측정

에서 기대되는 x의 값이 아니라 여러 번 반복 측정할 때 예상되는 평균값이다.

한정된 확률로 다양한 값을 가질 수 있는 양인 x에 관심을 갖자. x는 입자의 위치와 같은 연속적인 변수일 수도 있고, 이산적인 변수일 수도 있다. 이산적인 변수일 경우를 보면 측정 결과 가능한 값은 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_i, \cdots$이고 이러한 결과들이 일어날 확률은 각각 $P_1, P_2, \cdots, P_i, \cdots$이다. 통계적으로 독립적인 측정이 N회 실시되었다면, x_i값을 나타내는 측정 횟수는 $n_i = P_i \cdot N$이다. 따라서 $P_i = n_i/N$은 x_i값에 해당되는 확률이다. x의 평균값은 모든 측정값들을 합하여 총 측정 횟수 N으로 나눈다. n_i번에 측정되는 값은 x_i이므로, 모든 측정값을 합한 결과는 $\sum_i n_i x_i$이 되고, 평균값은

$$<x> = \frac{1}{N}\sum_i n_i x_i$$

가 된다. 이것을 확률 P_i항으로 표시하면

$$<x> = \frac{1}{N}\sum_i n_i x_i = \sum_i \frac{n_i}{N} x_i = \sum_i P_i x_i \qquad (\text{Ⅴ. 3-42})$$

이다. x가 연속적인 양이라면 확률 P_i는 $P(x)dx$로 대치된다. 이때 $P(x)$는 확률밀도이다. 슈뢰딩거 방정식에서 나오는 파동함수의 곱이 확률밀도이기 때문에 $P(x) = |\psi(x)|^2$이 된다. 따라서 식 (Ⅴ. 3-42)식은

$$<x> = \int xP(x)dx \qquad (\text{Ⅴ. 3-43})$$

이 된다.

일반적으로 측정 값이 x뿐만 아니라 x^2, x^3 또는 함수 $f(x)$로 주어질 수 있으므로 x대신 일반적인 함수 $f(x)$를 사용하면

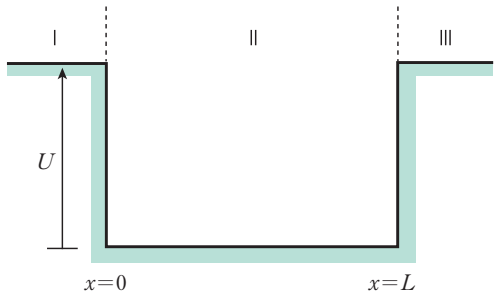
$$<f(x)> = \int f(x)P(x)dx \qquad (\text{Ⅴ. 3-44})$$

가 된다.

탐구문제 길이가 L인 일차원 상자에 입자의 에너지가 바닥 상태에 있을 때 운동량의 기댓값은 어떻게 구할 수 있을까?

4) 유한한 퍼텐셜 우물

그림과 같이 $x=0$에서 $x=L$에 걸쳐서, 유한한 높이 U를 가진 퍼텐셜 우물을 생각해 보자.



[그림 Ⅴ-29] **유한 퍼텐셜 우물**

이와 같은 상황은 두께가 L인 얇은 금속판 안에서 금속판의 표면에 수직 방향으로 움직이는 전자의 운동에 관한 단순한 모형으로 쓰일 수 있다. 여기에서 퍼텐셜 에너지 장벽의 높이 U는 광전 효과의 일함수와 연관이 있다. 그리고 퍼텐셜 우물의 3차원적인 구의 모형은 핵 속의 양성자와 중성자의 운동을 근사적으로 기술하는데 사용될 수 있다.

그림에서처럼 우물의 바닥을 $U(x)=0$으로 잡는다. 고전역학에서 보면 입자의 에너지 E가 U보다 작으면, 입자는 $x<0$인 영역과 $x>L$인 영역에는 있을 수 없다. 그러나 양자역학의 입장에서 보면 파동함수가 벽속에서도 사라지지 않는다.

$E<U$에 해당하는 구속 상태에 관한 슈뢰딩거 방정식을 풀어보자. $U(x)=0$인 영역과 $U(x)=U$인 영역을 분리하여 고려하자. $U(x)=0$인 곳에서 슈뢰딩거 방정식은 식 (Ⅴ. 3-31)를 이용하면

$$\frac{d^2\psi}{dx^2}+k^2\psi=0,\ \mathrm{k}\equiv\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \qquad (Ⅴ.\ 3\text{-}45)$$

가 된다. 따라서 우물 안에서 파동함수는 사인함수의 형태를 가진다.

$$\psi(x)=A\sin kx+B\cos kx \qquad (Ⅴ.\ 3\text{-}46)$$

여기에서 A와 B는 상수이다.

$x<0$인 영역과 $x>L$인 영역에서는 $U(x)=U$로 놓고 정리하면

$$\frac{d^2\psi}{dx^2}+K^2\psi=0,\ K^2\equiv\frac{2m(E-U)}{\hbar^2} \qquad (Ⅴ.\ 3\text{-}47)$$

를 얻는다. $E-U$가 음수이므로 이 방정식의 해는 지수함수가 된다.

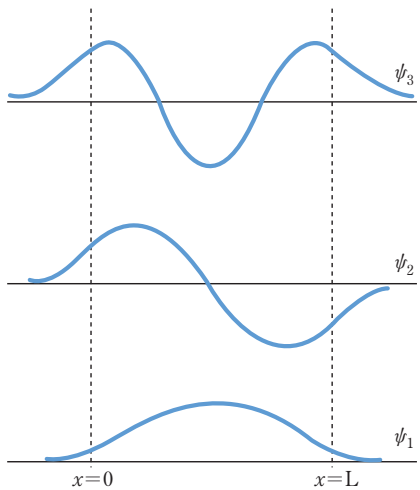
이것의 일반적인 풀이는

$$\psi(x) = Ce^{Kx} + De^{-Kx} \qquad (\text{Ⅴ. 3-48})$$

이다.

$x<0$인 영역에서는 $x \to -\infty$로 갈 때 ψ가 0에 접근해야 하므로 파동함수는 $\psi = Ce^{Kx}$가 된다. $x>L$인 영역에서는 $x \to +\infty$로 갈 때 ψ가 0에 접근해야 하므로 파동함수는 $\psi = De^{-Kx}$가 된다. 그리고 이 풀이들을 완성시키기 위해서는 $x=0$인 지점과 $x=L$인 지점에서 경계조건을 만족해야 한다. 그래서 이 지점들에서 양쪽의 파동함수 ψ가 같아야 한다. 뿐만 아니라 연속이 되어야 하기 때문에 $d\psi/dx$의 값도 같아야 한다. 이러한 조건에 의해 가능한 에너지 준위가 결정된다.

이 파동함수의 중요할 만한 것은 뉴턴역학에서 금지된 영역인 우물의 바깥 부분에 입자가 있을 확률이 조금은 있다는 것이다. 이것이 양자역학적인 효과이다.



[그림 Ⅴ-30] **유한 퍼텐셜 우물에서의 파동함수**

6. 불확정성 원리

양자역학이 가지고 있는 매우 중요한 개념 중의 하나가 불확정성 원리이다. 불확정성의 원리는 하이젠베르크(W. Heisenberg)에 의해 1927년 발표되었으며, 그 후 양자역학의 발전에 기여하게 되었다.

불확정성 원리를 간단히 말하면, 입자의 운동량과 위치를 측정함에 있어서 동시에 매우 정밀하게 측정하는 것이 불가능하다는 것이다. 운동량 한 가지만 정밀하게 측정한다든지, 입자의 위치만을 정밀하게 측정한다든지, 둘 중의 한 가지만 측정한다면 그 한 가지만 정밀하게 측정할 수 있다. 그러나, 운동량과 위치를 동시에 정밀하게 측정하는 것은 불가능하다는 것이다.

이 불확정성 원리는 양자역학의 핵심 개념으로서 고전 물리학의 기본 가정과는 대립되는 혁신적인 개념이다. 불확정성 원리가 왜 성립하는지 단일 슬릿에 의한 회절 현상을 예로 알아보자.

❖ **하이젠베르크(W. K. Heisenberg, 1901~1976)**

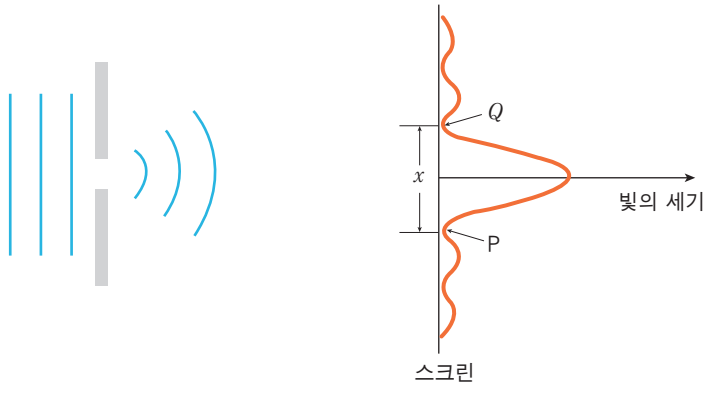
독일의 물리학자. 불확정성 원리로 유명하며, 행렬역학과 불확정성 원리를 발견하여 20세기 초 양자역학의 발전에 절대적인 공헌을 했다.

1) 단일 슬릿 회절

파장이 λ인 빛이 단일 슬릿에서 발생하는 회절 무늬를 살펴보자. 파장이 슬릿의 간격보다 훨씬 작다고 가정하자. 이때 생기는 회절 무늬에서 빛의 대부분은 양쪽으로 첫 번째 극소점에서 중앙으로 집중되어 있다. 중앙으로부터 이웃한 첫 번째 극소 사이의 각을 θ_1이라고 하면 회절무늬에서 어두운 첫 번째 어두운 조건의 식인 $\sin\theta_1 = \lambda/a$를 만족한다. $\lambda \ll a$로 가정하였으므로 θ_1은 아주 작고 $\sin\theta_1$은 거의 θ_1과 같아서

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{a} \qquad (\text{Ⅴ. } 3\text{-}49)$$

가 된다. 회절 현상에서 회절된 빛이 얼마나 퍼지느냐 하는 것은 빛의 파장과 슬릿의 간격에 의해서 결정된다. 파장이 길수록, 그리고 슬릿의 간격이 좁을수록 빛이 더 많이 퍼진다.



[그림 Ⅴ-31] **빛의 회절**

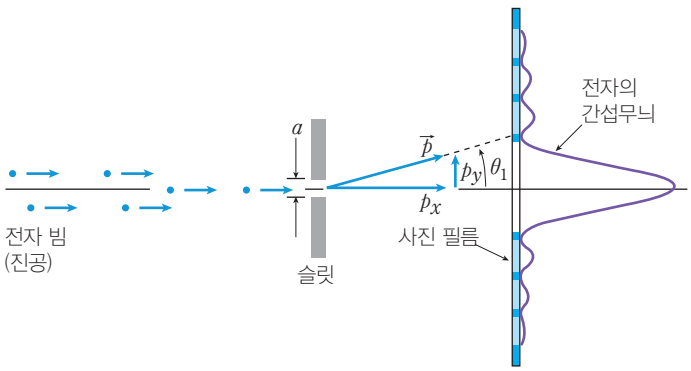
드브로이의 물질파에 대해 공부할 때 입자도 파동적인 성질이 있다는 것을 배웠다. 그렇다면 빛 대신에 입자인 전자를 가지고 회절실험을 하면 어떨까? 이 실험은 전자가 공기 분자와 충돌하지 않도록 진공에서 이루어져야 한다. 음극선관을 가열시키고 외부에서 전기장을 걸어주면 열전자들이 방출하는 원리를 이용하여 전자빔을 만든다. 이 장치에서 모든 전자들이 거의 같은 방향과 속력을 가지게 만들어, 같은 드브로이 파장을 갖게 만든다. 슬릿의 간격을 a, 파장을 λ, 입사하는 전자의 운동량을 p라 하자. 수평 방향으로 전자빔이 진행하고, 슬릿을 통과한 후 스크린에 도착한다.

사진용 필름이나 검출기에 기록된 이 실험의 결과는 회절 무늬로 나타난

다. 이 무늬는 전자의 파동성의 또 다른 직접적인 증거가 된다. 약 85%의 전자는 중앙 극대 안에 있는 필름에 부딪히고, 나머지는 양쪽으로 나눠져서 나오는 극대들이 있는 필름에 부딪힌다.

드브로이의 물질파를 배웠기 때문에 이 실험에서 나타나는 파동적인 행동을 이해할 수 있다. 그러나 이것을 입자의 행동으로 해석하려고 한다면 설명 할 수가 없다.

우리는 슬릿을 통과하는 전자가 슬릿의 어느 부분을 통과했는지 알 수 없다. 우리가 알 수 있는 것은 단지 슬릿의 어디인가를 통과했다는 것만 알 뿐이다. 따라서 이 전자의 슬릿을 통과한 위치는 불확실하다. 그 불확실의 크기는 대략 슬릿의 간격인 a와 같다. 위치의 불확실 정도를 Δy라 하면, 이 Δy의 크기가 바로 a이다.



[그림 Ⅴ-32] **전자회절 실험**

전자의 운동량은 슬릿을 통과하기 전에는 수평방향성분(p_x)만 가지고 있다고 말할 수 있다. 그러나 통과한 전자의 운동량도 수평방향성분만 가지고 있다고 말할 수는 없다. 슬릿을 통과한 전자는 스크린의 한 곳에 집중되는 것이 아니라 물질파라 파동적인 특성으로 인하여 회절 현상을 나타낸다. 이것은 전자가 수직 방향으로 이동했다는 것을 의미한다. 수직 방향의 이동은 입자가 수직 방향의 운동량(p_y)를 가지고 있다는 것을 의미한다. 여기에는 모순이 있어 보인다.

전자가 슬릿을 통과하기 전에는 수평 성분 운동량(p_x)만 있었다. 전자의 운동량에 대한 불확실성은 없었다. 이때 전자의 수직 위치(y)는 알 수 없었다. 왜냐하면, 모든 전자가 수평으로 날아오지만 어느 전자가 얼마만한 높이에 있는지 측정을 하지 않았다. 그런데 전자가 슬릿을 통과하면서 위

치가 어느 정도 정해졌다. 슬릿을 통과한 전자만 스크린에 도착하기 때문에 전자의 위치에 대한 불확실성의 정도(Δy)가 기껏해야 슬릿의 간격 a를 넘지 못한다. 슬릿을 통과하면서 전자의 위치는 어느 정도 정해졌는데, 전자의 운동량에 있어서 불확실성이 나타나게 되었다. 운동량의 불확실성은 스크린에 도착한 전자들의 분포로부터 알 수 있다. 전자들의 수직 분포로 보아서 전자의 운동량이 수직 성분(p_y)도 있어야 한다. 그것은 전자가 슬릿을 통과하면서 통과하기 전에 전자가 가지고 있던 운동량 정보를 잃어버린 것이다. 운동량의 수직 성분이 불확실하게 된 것이다. 운동량의 수직 성분(p_y)의 불확실 정도는 스크린에 도착한 전자가 퍼진 정도로부터 알 수 있다. 첫 번째 최소가 되는 점까지의 거리를 반지름으로 하는 원을 회절의 퍼진 정도로 본다면, 이 반지름을 측정하여 운동량의 불확실 정도를 알 수 있다. 슬릿의 중심에서 이 첫 번째 최소점을 연결하는 수평각이 θ_1이기 때문에 식 (Ⅴ. 3-49)를 그대로 이용한다.

[그림 Ⅴ-32]에서 보듯이 상황의 기하학적 배열로 볼 때, 두 운동량의 성분들은 $p_y/p_x = \tan\theta_1$의 관계가 있다. θ_1이 작기 때문에 근사적으로 $\tan\theta_1 = \theta_1$으로 쓸 수가 있으므로

$$p_y = p_x\theta_1 \qquad (Ⅴ. 3-50)$$

이다. 식(Ⅴ. 3-49)에 $\theta_1 = \lambda/a$를 대입하면

$$p_y = p_x\frac{\lambda}{a} \qquad (Ⅴ. 3-51)$$

를 얻는다. 운동량의 y성분에서 불확정성 Δp_y는 적어도 $p_x\lambda/a$정도는 될 것이다. 따라서

$$\Delta p_y \geq p_x\frac{\lambda}{a} \qquad (Ⅴ. 3-52)$$

이다. 슬릿의 간격 a를 작게 하면 할수록 회절무늬는 더 넓어지고 운동량의 y성분 p_y의 불확정성은 더 커진다. 처음에 운동량 성분이 수평방향만 있었으므로 $p_x = p$이고, 드브로이 관계식에 의해 $p_x = h/\lambda$이므로

$$\Delta p_y \geq \frac{h}{\lambda}\frac{\lambda}{a} = \frac{h}{a}$$

이다. 따라서

$$\Delta p_y a \geq h \qquad (Ⅴ. 3-53)$$

를 얻는다. 슬릿의 간격 a는 슬릿을 통과해 지나갈 때, 전자의 y방향 위치의 불확정성을 나타낸다. 각각의 입자들이 슬릿의 어디를 지나갈지를 정확히 알 수는 없다. 따라서 y방향의 위치와 운동량의 y성분은 모두 불확정성을 가지고 있고, 두 불확정성은 식 (Ⅴ. 3-53)으로 나타내어진다. 운동량의 불확정성 Δp_y는 회절 무늬의 폭을 줄일 때만 감소된다. 이렇게 하기 위해서는 슬릿의 간격 a를 크게 하여야 하는데 이렇게 되면 위치 불확정성이 증가하게 된다. 반대로 슬릿을 가늘게 하여 위치의 불확정성을 줄이면, 회절 무늬가 넓어져서 운동량의 불확정성이 증가하게 된다. 따라서, 어떤 입자의 위치와 운동량을 동시에 확실하게 측정하는 방법은 없다.

2) 불확정성 원리

어떤 양의 불확정성은 대개 평균값 주위에 퍼져 있는 값들을 측정한 통계학적 개념인 표준편차로써 설명한다. 위에서 보았듯이 만일 좌표 x가 Δx의 불확정성을 갖고 이에 대응하는 운동량 성분 p_x가 Δp_x의 불확정성을 갖는다면, 이 표준 편차 불확정성은 일반적으로 부등식

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s} \qquad (\text{Ⅴ. 3-54})$$

의 관계가 있다. 이 식이 하이젠베르크의 불확정성 원리이다. 이 원리는 일반적으로 입자의 위치와 운동량 어느 것도 고전 물리학에서 예측할 수 있었던 것과 같이 임의로 정확히 결정될 수 없다는 것을 말하고 있다. 대신 두 양에서의 불확정성은 상호보완적인 역할을 한다.

좀 더 정교한 검출기를 이용하여 위치와 운동량을 측정하면, 더 정밀도를 높여서 얻을 수 있을 것이라고 생각할 것이다. 그러나 이것은 불가능하다. 입자를 검출하기 위하여 검출기는 입자와 상호 작용하여야 하고 이 상호 작용은 어쩔 수 없이 입자의 운동 상태를 변화시켜서 원래의 상태에 관한 불확정성을 만든다. 예들 들어, 짧은 파장의 광자를 입자에게 쏘아서 튕겨 나오는 것을 측정하여 위치를 더 정밀하게 알려고 한다면, 광자의 운동량 h/λ에 의해 입자와 충돌을 하여 더 튀게 만들어 운동량의 불확정성이 더 커지게 된다. 이런 사고 실험을 통하여 좀 더 상세히 분석해 보면, 불확정성이 근본적이고 본질적이라는 것을 알게 된다. 실험이 아무리 정교하게 만들어 실행하여도 원칙적으로 어떤 측정으로도 불확실성은 피할 수 없다.

x축에 대해서만 특별히 그런 것이 아니다. (x, y, z)의 좌표를 갖는 3차

원 상황에서 각 좌표와 그것에 대응하는 운동량 성분에 관하여 불확정성의 관계가 있다. 곧 $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$이고 $\Delta y \Delta p_y \geq \hbar$이며, $\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$이다. 그러나 한 좌표의 불확정성은 다른 운동량 성분의 불확정성과는 관계가 없다. 예를 들어 Δx는 Δp_y와 직접적인 관련이 없다.

3) 에너지에서의 불확정성

에너지에 관해서도 불확정성이 있다. 계의 에너지 또한 고유의 불확정성을 가지고 있는데 그 불확 정도의 양 ΔE는 계가 주어진 상태에 머무는 동안의 시간 간격 Δt와 관계가 있다. 그 관계식은

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \qquad (\text{Ⅴ. 3-55})$$

이다. 매우 긴 시간 동안 준안정 상태를 유지하는 계는 에너지를 매우 정확히 측정할 수 있으나, 짧은 시간 동안만 유지된다면 에너지의 불확정성은 이것에 대응하여 더 커져서 측정의 폭이 넓어지게 된다. 보통 스펙트럼으로 측정하게 되는데 스펙트럼의 선폭이 넓어지게 된다.

예제 나트륨 원자가 파장이 589.0 nm이고 에너지가 2.105 eV인 광자를 방출하면서 바닥 준위로 전이하기 전에 1.6×10^{-8} s 동안 이 상태에 있다. 들뜬 상태의 에너지의 불확정 양은 얼마인가? 이것에 해당하는 스펙트럼 선의 파장은 얼마나 퍼지는가?

풀이 식 (Ⅴ. 3-55)로부터

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t} = \frac{1.055 \times 10^{-34}\,\text{J} \cdot \text{s}}{1.6 \times 10^{-8}\,\text{s}} = 6.6 \times 10^{-27}\,\text{J} = 4.1 \times 10^{-8}\,\text{eV}$$

이다. 광자 에너지에 대한 불확정 양의 비는

$$\frac{4.1 \times 10^{-8}\,\text{eV}}{2.205\ \text{eV}} = 1.95 \times 10^{-8}$$

이다. 이에 해당하는 스펙트럼 선의 퍼짐은

$$\Delta\lambda = (1.95 \times 10^{-8})(589\ \text{nm}) = 0.000011\ \text{nm}$$

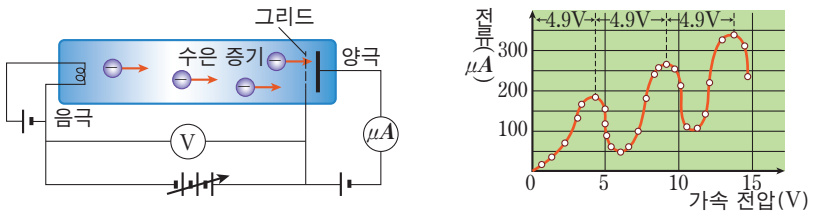
이다.

7. 프랑크-헤르츠의 실험

원자의 스펙트럼만이 원자 내의 에너지 준위를 조사하는 유일한 방법

이 아니다. 1914년부터 프랑크와 헤르츠는 충돌에 의한 들뜬 상태를 만드는 실험들을 수행하기 시작하였다. 이 실험들을 통해 원자의 에너지 준위가 존재할 뿐만 아니라, 이 준위들이 선스펙트럼에서 나타나는 것과 같다는 것을 보여 주었다.

프랑크와 헤르츠는 [그림 Ⅴ-33]과 같은 장치를 이용하였는데, 여러 원소의 증기들에 에너지가 알려진 전자를 충돌시켰다. 그리드와 집속판 사이의 약간의 전위차 V_0는 어떤 최소값보다 더 큰 에너지를 갖는 전자들만이 통과하여 전류계를 통해서 전류 I를 흐르게 한다. 너무 느린 전자는 양극에 도달하지 못한다. 가속전압 V를 크게 함에 따라 점점 더 많은 전자들이 판에 도달하게 되고 I는 증가한다.



(가) 실험 장치도 (나) 실험 결과

[그림 Ⅴ-33] **프랑크-헤르츠 실험**

전자가 증기에 있는 한 원자와 충돌할 때 운동 에너지가 보존된다면, 전자는 단지 원래의 방향에 대해 다른 방향으로 튕겨 나갈 것이다. 이 과정에서 원자는 전자에 비해 무척 무겁기 때문에 전자는 거의 운동 에너지를 잃지 않는다. 그러나 전자가 어떤 특정한 임계 에너지에 도달하고 난 후는 전류가 갑자기 줄어든다. 이 현상은 한 원자가 바닥 상태보다 높은 에너지 준위로 들뜬 상태가 되게 만드는 것으로 해석할 수 있다. 이때 충돌은 운동 에너지가 보존되는 탄성 충돌과 비교해서 비탄성 충돌이라고 한다. 전자의 임계 에너지는 원자를 가장 낮은 들뜬 상태로 올리는데 필요한 에너지와 같다.

그리고 나서 가속전압 V를 더욱 증가시키면 전류는 다시 증가한다. 전자들이 도중에서 비탄성 충돌하고 난 후에도 판에 도달할 수 있는 큰 여분의 에너지를 가지게 만들기 위해서이다. 그러면 또다시 전류가 급격히 떨어지는 현상이 나타나는데, 이는 전자들에 의해 다른 원자들이 똑같은 에너지 준위로 들뜬 상태가 되기 때문이다. 이때 두 번 혹은 세 번 이상의 비탄성 충돌로 인해 생긴 전위차는 가장 낮은 전위차의 정수배이다. 수은의

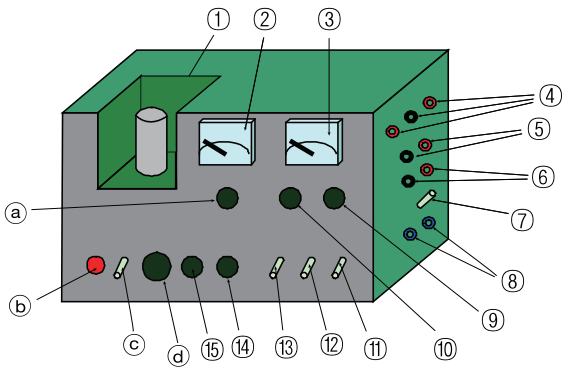
경우 가속 전압이 4.9 V의 정수배로 증가할 때마다, 양극 전류가 감소하는 현상이 나타나는 데 이것은 수은 원자가 4.9 eV라는 특정한 값의 에너지만을 흡수한다는 것을 의미한다. 즉, 수은 원자 내부에는 불연속적인 에너지 준위가 존재한다.

실험 프랑크-헤르츠 실험

실험장치 프랑크-헤르츠 실험장치 1개, 오실로스코프 또는 X-Y 기록계

실험과정

(1) 장치는 다음과 같이 초기 설정을 한다. 전원 스위치는 OFF, 각각의 조절 손잡이는 최소, 모드 선택 스위치는 아래로 하여 각각 MANUAL, INT, OSC를 선택한다. 좌측 면에 있는 HEATER 전류 측정 선택 스위치는 SHORT로 선택한다.(OPEN으로 선택할 때에는 교류 전류계를 반드시 연결하여야 한다.)



❖ **명칭**

ⓐ G1-K 조절 손잡이
ⓑ 전원램프
ⓒ 전원 스위치
ⓓ Heater 전류조절 손잡이
① 프랑크-헤르츠관
② 전압계
③ 전류계
④ 오실로스코프단자
⑤ G1(2)-P 전류외부측정 단자
⑥ G2-K 전압외부측정 단자
⑦ Heater 전류측정 모드 (측정시 open 모드, 미측정시 short 모드)
⑧ Heater 전류측정단자
⑨ Gain 조절 손잡이
⑩ 영점 조절 손잡이
⑪ OSC-Meter 모드 선택 스위치
⑫ EXT-INT 모드 선택 스위치
⑬ AUTO-MANU 모드 선택 스위치
⑭ G2-D 조절 손잡이
⑮ G2-K 조절 손잡이

(2) 판넬면의 뚜껑을 열어 프랑크-헤르츠 관을 삽입한다.(유리관을 삽입할 때는 유리관에 지문이 생기지 않도록 주의한다.)

(3) 전원 코드를 연결하고, 전원 스위치를 켠다.

(4) 영점 조절 손잡이(ZERO. ADJ)를 조절하여 전류계의 영점을 조절한다.

(5) GAIN 조절 손잡이를 적당히 조절한다.(표시된 부분이 위쪽을 향할 때가 대체로 적합하다.). 이 조절 손잡이는 G2-P 전류의 증폭을 조절하는 손잡이다.

(6) G2-K 조절 손잡이를 조절하여 전압계가 약 30 V가 되도록 한다

(7) HEATER전류 조절 손잡이를 중간으로 조절하고, G1-K 조절 손잡이를 조금씩 증가시켰을 때 전류계의 눈금이 가장 잘 움직이는 위치에서 HEATER와 G1-K의 손잡이를 고정한다.(G1-K 손잡이를 조절하여도 전류계의 변화가 적으면, G1-K 조절 손잡이를 최소로 한 후, HEATER 전류를 조금 증가시키고, G1-K 조절 손잡이를 조절하여 보아라. 전류계의 눈금이 영역을 벗어나면 HEATER 전류를 감소 시킨 후, G1-K 조절 손잡이를 조절하여 보아라. 단, HEATER 전류는 될 수 있는 한 적게 하는 것이 좋다.)

(8) 다시 G2-K 조절 손잡이를 최소로 하고, 영점 조절 손잡이를 조절하여 전압계의 영점을 조정하여라.

(9) G2-K 조절 손잡이를 돌려 전압계의 눈금이 30V가 되게 조작하여라.

(10) G2-P 조절 손잡이를 돌려 전류계의 눈금이 30 μA가 되게 조정한다.(현재 G1-K의 전압 조절에 의해 전류계의 눈금은 30 μA 이상에 있을 것이다. 이때 G2-P를 이용해 전류계의 눈금을 30 μA가 되게 조정한다.)

(11) G2-K 조절 손잡이를 최소로 하고, 다시 영점 조정을 하여라.
(12) 이제 G2-K조절 손잡이를 돌려 전압을 증가시키면서 전압에 따른 전류계의 눈금의 변화를 측정 기록하여라. 그 결과를 이용하여 전압과 전류에 따른 그래프를 그려 보도록 한다.(X-Y 기록계를 이용한 측정 시 : Mode 선택 스위치를 Auto로 조정하고 G2-K스위치를 최대로 하고, 전압과 전류의 변화를 관찰한다.)
(13) 전압의 증가에 따른 전류의 증가 감소의 변화가 일어나지 않을 때에는 G2-P 조절 손잡이와 Heater 전류 조절 손잡이를 조절하도록 한다.

실험결과

전압(V)	전류( )		전압(V)	전류( )		전압	전류( )	
	1회	2회		1회	2회		1회	2회

결론 및 논의

결론 :

논의 :

- 실험결과 그래프가 계단처럼 점차 올라가는 모양이 되는 이유를 설명해 보자.
- 실험에서 전자와 원자가 완전비탄성충돌할 때 관속을 관찰하면 빛이 나올 것이다. 그 이유를 설명하고 그 빛의 파장은 얼마인지 추정해 보자.

연 습 문 제

1. 처음에 바닥 상태에 있는 수소 원자가 12.09 eV의 광자를 흡수하였다.

(1) 들뜬 준위의 에너지와 양자수는 얼마인가?

(2) 들뜬 원자가 바닥 상태로 되돌아갈 수 있는 모든 가능한 전이에서 방출될 수 있는 모든 광자의 에너지와 파장을 구하시오.

2. 수소 원자가 첫 번째 들뜬 상태에 있을 때 전자의 에너지와 각운동량, 궤도 반지름, 궤도 속력을 구하라.

3. 한 양성자가 폭 6×10^{-15} m(대략 원자핵의 평균 크기)인 무한히 깊은 퍼텐셜 우물에 갇혀 있다.

(1) $n = 1, 2, 3, 4$에 해당하는 4개의 정상파의 파장을 구하라.

(2) 각 정상파에 대응되는 에너지를 구하라.

4. 폭이 L인 무한 퍼텐셜 우물에서 어떤 한 입자가 n = 2인 상태에 있다.

(1) 이 입자의 파동함수를 찾아라.

(2) $0 \le x \le L/2$에서 입자를 발견할 확률은 얼마인가?

5. 1 keV의 에너지를 갖는 전자가 있다.

(1) 전자가 자유로울 경우 운동량의 불확정도의 비 $\Delta p/p$를 구하라.

(2) 10^{-2} m 길이의 영역에 제한될 때 운동량의 불확정도의 비 $\Delta p/p$를 구하라.

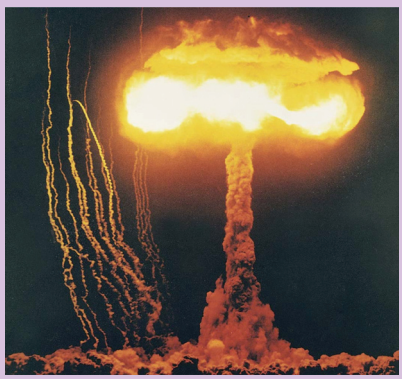
(3) 10^{-10} m 길이의 영역(원자의 크기)에 제한될 때 운동량의 불확정도의 비 $\Delta p/p$를 구하라.

(4) 6×10^{-15} m 길이의 영역(핵의 크기)에 제한될 때 운동량의 불확정도의 비 $\Delta p/p$를 구하라.

(5) 1%의 정확도로 이 전자의 에너지를 측정하는 데 요구되는 시간은 얼마인가?

(6) 만약, 다른 입자로 붕괴하기 전에 10^{-6}s 동안 존재하는 불안정한 입자가 있다면, 그 에너지 측정의 불확정도는 얼마인가?

4 핵 물리



핵 물리가 탄생한 1896년 베크렐(A. H. Becquerel)은 우라늄 합성물에서 방사능을 발견하였다. 러더퍼드(E. Rutherford)의 연구에 의해 방사선은 알파, 베타, 감마선의 세 종류가 있다는 것이 밝혀졌다. 이 발견에 이어 방사능 핵에서 방출된 방사선의 성질을 이해하고 기술하는 많은 활동들이 이어졌다. 1932년 채드윅(J. Chadwick)이 중성자를 발견하기 전까지는 원자핵은 양성자와 전자로 이루어져 있다고 생각되었다. 현재는 핵자라고 알려진 양성자와 중성자로 이루어져 있다고 본다. 핵의 특성과 핵력에 대한 연구는 자연의 기초 법칙 형성에 많은 공헌을 해왔다. 현재 우리가 알고 있는 핵 물리의 지식은 과거 수십 년 동안의 실험들을 통하여 얻어졌다. 이번 장에서는 원자핵 물리의 주요 특징을 알아보고 핵 물리의 이용에 대하여 기술한다.

1. 핵의 구조와 중성자

핵의 전하량, 질량 및 반경과 같은 몇 가지 성질을 기술하는데 필요한 3가지 양이 있다. 하나는 핵 속의 양성자 수로서 원자 번호 Z이다. 또 하나는 핵 속의 **중성자** 수 N이다. 그리고 핵 속의 양성자와 중성자의 합인 핵자 수로서 질량수 A이다.

중성자는 1932년 채드윅(J. Chadwick)이 알파 입자가 베릴륨에 충돌할 때 중성의 방사능이 방출되며, 이 방사능은 파라핀과 같이 수소를 함유하고 있는 물질에서 양성자 방출을 유도하는 능력이 있음을 확인함으로서 발견되었다. 채드윅은 이 방사능이 양성자와 질량이 비슷한 중성의 입자들일 것이라고 제안하고, 이 중성 입자를 중성자로 명명하였다. 그 전기적 성질이 중성이라는 것은 이온화 효과를 거의 만들지 않는 것으로 알 수 있다.

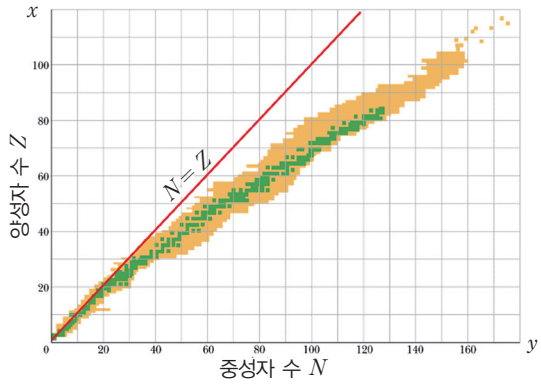
제임스 채드윅 (James Chadwick, 1891~1974, 영국)

러더퍼드와 함께 맨체스터에서 일을 해다. 1932년 졸리오 퀴리의 연구를 바탕으로 알파 입자가 베릴륨에 충돌할 때 나오는 입자가 중성자임을 발견하였다. 이 공로로 1935년 노벨 물리학상을 받았다.

1) 핵의 표시 방법 – 핵종 기호

수소 원자핵을 제외하면 핵은 양성자와 중성자 두 종류의 핵자로 구성되어 있다. 핵 속에 들어 있는 양성자와 중성자의 수를 표시하는 기호를 핵종 기호라고 부른다. 중성인 원소들을 나타내는 멘델레프의 주기율표는 양성자 수 또는 전자 수로 표시된 일차원적인 기호이다. 반면에 핵을 표시하는 기호는 양성자 수와 중성자 수로 이루어진 이차원적 기호이며 이차원적인 핵종도표로 표시된다. 핵종 기호에서 X는 원소의 화학기호이며 ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$로 표기한다. 예를 들어 ${}^{56}_{28}\mathrm{Fe}$는 질량 수가 56이고 원자 번호가 26인 핵을 의미한다. 따라서 이 핵은 26개의 양성자와 30개의 중성자를 가지고 있다.

핵종 기호 ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$를 살펴보자. 특정한 원소 X에서 Z나 A가 어떠한 임의의 값을 갖는 핵종이 있을 수 있을까? 원소 X가 결정되어 있다면 곧 Z가 결정된 것이다. 그러나 A는 사정이 다르다. 이러한 방식으로 생겨난 핵들은 **동위 원소**(isotope)라 한다. 한 원소의 동위 원소들은 같은 Z값을 갖지만 다른 N과 A값을 갖는다. 핵종 도표 [그림 Ⅴ-34]를 살펴보면 자연에 존재하는 안정한 핵종의 특징을 알아낼 수 있다. [그림 Ⅴ-34]에서 녹색 부분의 핵종은 안정한 핵종이며 불안정한 핵종인 노란 부분은 안정한 핵종의 위나 아래에 있다. 자연에 존재하는 핵종의 특징은 질량수가 증가할수록 양성자보다 중성자를 많이 가지고 있다.



[그림 Ⅴ-34] **알려진 핵종의 도표**

자연 상태에서 존재하는 특정 원소 X의 동위 원소들의 개수는 다양하다. 예를 들면 ${}^{11}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{13}_{8}\mathrm{C}$, ${}^{14}_{8}\mathrm{C}$ 는 탄소의 네 가지 동위 원소들이다. 자연 상태에서 ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ 동위 원소는 전체 탄소 원소 량의 약 98.9%를 차지하며 ${}^{13}_{8}\mathrm{C}$ 동위 원소는 단지 약 1.1% 정도이다. 한편, 어떤 핵의 동위 원소 핵종은 자

연 상태에 존재하지 않고 인공적으로 실험실에서 핵 반응을 통해서만 만들어지는 경우도 있다. 가장 단순한 원소인 수소도 동위 원소가 있는데, 안정한 수명을 갖는 보통의 수소 ${}_1^1\mathrm{H}$와 중수소(deuterium) ${}_1^2\mathrm{H}$ 그리고, 극히 평균 수명이 짧아 자연 상태로는 지상에서 극히 발견하기 어려운 삼중수소(tritium) ${}_1^3\mathrm{H}$ 3가지로 존재한다.

2) 핵의 전하와 질량

양성자는 전자 전하량과 크기가 같은 1.6×10^{-19} C 의 양전하 값을 갖는다. 중성자는 전기적으로 중성이다. 핵의 질량은 원자의 질량이 결정되면 자동적으로 결정할 수 있다. 따라서 원자 질량을 기준으로 삼는다. 원자 질량은 질량 분석기 또는 여러 가지 핵 반응을 분석함으로서 정확하게 측정할 수 있다. 원자의 질량은 ${}^{12}\mathrm{C}$ 동위 원소의 질량을 12 u로 정의한 통합 질량 단위를 사용하여 정의하는 것이 편리하다. 여기서 1 u는 원자 질량 단위이며 $1\ \mathrm{u} = 1.660559 \times 10^{-27}$ kg이다. 양성자의 질량은 전자보다 약 1,836 배 크며, 중성자의 질량은 양성자와 거의 비슷하다. 즉, 양성자와 중성자는 각각 약 1 u의 질량을 갖는다. 전자의 질량은 원자 질량 단위에 비해 매우 작다.

핵 물리학에서는 핵의 질량을 SI 단위계의 kg으로 표현하지 않고 에너지 단위로 표현한다. 통합 질량 단위도 기본적으로는 SI 단위에 속한다. 역학의 에너지 단위인 J 경우, 1 J 의 크기는 핵 물리학에서는 너무 큰 에너지이므로 불편하다. 원자 단위계에서는 에너지 단위로 eV를 사용한다. 핵의 정지 질량은 $E = mc^2$으로 주어지므로, 양성자의 질량은 에너지 단위로서

$$\begin{aligned} E = mc^2 &= (1.67 \times 10^{-27}\mathrm{kg})(3 \times 10^8\ \mathrm{m/s})^2 \\ &= 1.50 \times 10^{-10}\ \mathrm{J} = 9.38 \times 10^8\ \mathrm{eV} = 938\ \mathrm{MeV} \end{aligned}$$

로 표시된다. 마찬가지로 전자의 정지 질량은 0.511 MeV로 사용한다. 에너지 단위로 **통합 질량 단위**를 표현하고 싶은 경우에는 MeV/c^2의 단위가 사용된다.

$$1\mathrm{u} = 1.660559 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg} = 931.50\ \mathrm{MeV}/c^2$$

[표 Ⅴ-1] 여러 단위계에서 양성자, 중성자, 전자의 정지 질량

입 자	질 량		
	kg	u	MeV/c^2
양성자	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28
중성자	1.6750×10^{-27}	1.008665	939.57
전 자	9.109×10^{-31}	5.486×10^{-4}	0.511

양성자, 중성자, 전자의 여러 단위계에서의 질량이 [표 Ⅴ-1]에 있다.

예제 아보가드로수를 사용하여 원자의 통합 질량 단위가 $1\,u = 1.66\times10^{-27}$ kg이라는 것을 보여라.

풀이 12 kg의 ^{12}C에는 아보가드로수의 ^{12}C 원자들이 있다. 아보가드로수 N_A는 6.02×10^{23} atoms/g mole $= 6.02\times10^{26}$ atoms/kg mole이다. 따라서 ^{12}C 탄소 원자의 질량은,

$$^{12}C\text{원자의 질량} = \frac{12\text{ kg}}{6.02\times10^{-26}\text{ atoms}}$$

$$= 1.99\times10^{-26}\text{ kg}$$

이다. ^{12}C의 하나의 질량은 12 u로 정의되므로

$$1\text{ u} = \frac{1.99\times10^{-29}\text{ kg}}{12} = 1.66\times10^{-27}\text{ kg}$$

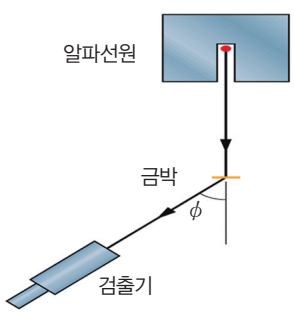
이다.

❖ **어니스트 러더퍼드 (Ernest Rutherford, 1871~1937, 영국)**

1919년 케임브리지 카벤디시 교수로서 톰슨의 후임이 되었다. 원자가 알파선에 의해 쪼개질 수 있음을 밝혔으며 방사능에 관한 연구로 1908년 노벨상을 수상했다. 1908년 방사능이 한 원소를 다른 원소로 변환시켜 준다는 것을 밝혀 냄으로서 노벨 화학상을 수상하였다. 이후 4년동안 원자핵의 존재를 확립하였다.

3) 핵의 크기

러더퍼드는 방사능 붕괴에서 나오는 알파입자를 금박 표적에 충돌시키는 [그림 Ⅴ-35]에 그려진 산란 실험을 통해 핵의 크기와 구조를 처음으로 조사하였다. 금 원자의 경우 알파 입자가 표적 핵에 가장 근접한 거리는 2×10^{-14} m이다. 이 결과로부터 러더퍼드는 원자의 양전하는 그가 핵이라 부른 약 10^{-14} m보다 작은 구 안에 집중되어 있다는 결론을 내렸다. 핵물리에서는 이 정도의 작은 길이의 단위를 페르미(fermi)라고 불리는 단위로 사용한다.



[그림 Ⅴ-35] 러더퍼드 산란의 개략도

$$1\ \text{fm} = 10^{-15}\,\text{m}$$

수많은 핵물리 산란 실험들에서 대부분의 핵들은 대략적으로 구형으로 생겼으며 평균 반경은 질량 수와

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}} \qquad (\text{Ⅴ. } 4\text{-}1)$$

의 관계로 표현할 수 있음을 알아내었다. 여기서 A는 질량수, 비례상수 r_0는 $1.2 \times 10^{-15}\,\text{m}$이다.

예제 질량 수가 3인 핵에 대하여 다음의 양을 구하시오. (a) 질량 수를 이용하여 이 핵의 부피를 표현하시오. (b) 이 핵의 밀도를 계산하시오.

풀이 (a) 핵이 구형이라고 가정하고 식 (Ⅴ. 4-1)을 쓰면 부피는 다음과 같다.

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 A$$

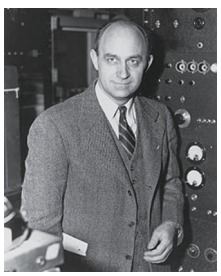
(b) 핵의 밀도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho = \frac{\text{질량}}{\text{부피}} = \frac{AM}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{3m}{4\pi r_0^3}$$

여기서 $r_0 = 1.2 \times 10^{-15}\,\text{m}$이고, $m = 1.67 \times 10^{-27}\,\text{kg}$을 사용하면

$$\rho = \frac{3(1.67 \times 10^{-27}\,\text{kg})}{4\pi(1.2 \times 10^{-15}\,\text{m})^3} = 2.3 \times 10^{17}\,\text{kg/m}^3$$

가 된다. 이 핵의 밀도는 물의 밀도보다 대략적으로 1014배 크다.



❖ 엔리코 페르미(Enrico Fermi, 1901~1954, 이탈리아계 미국)

이론가이며 실험가로서 베타 붕괴의 이론에서 중요한 공헌을 남겼고 1938년 노벨상을 받았으며 중성자 유도 핵 분열을 연구하였으며 이 연구는 핵무기 개발의 가능성을 낳았다.

2. 핵 방사능의 발견과 통계적 붕괴 법칙

1896년 베크렐(A. H. Becquerel)은 빛이 차단된 종이로 싸여진 사진 필름을 감광시킬 수 있는 정체가 알려지지 않은 방사선이 우라늄염에서 방출된다는 사실을 발견하였다. 보통의 빛도 사진 필름을 감광시킬 수 있지만, 이 방사선은 특별히 검은 종이를 통과할 수 있는 능력이 있었다. 또한 퀴리 부부에 의해서 토륨과 폴로늄, 라듐이라는 세 가지 방사능 물질이 추가로 발견되었다.

방사능 물질에서 방출된 방사선의 종류에는 세 가지가 있다는 것이 확인

❖ 마리퀴리 (Marie Curie, 1867~1934)

폴란드의 과학자, 1903년 남편 퀴리(Pierre), 베크렐(Becquerel)과 함께 자발적 방사능과 방사능 물질에서 나온 방사선에 관한 연구로 함께 노벨상을 수상했다.

되었으며 러더퍼드에 의하여 알파, 베타, 감마선으로 명명하였다. 또한 톰슨의 전자 확인과 비슷한 실험을 통하여 감마선은 전하가 없으며 알파선은 양전하이며 베타선은 음 전하를 가진 입자라는 결론을 내릴 수 있었다.

세 종류의 방사선은 매우 다른 투과력을 가지고 있다. 알파 입자는 공기를 가장 잘 이온화시키며, 물질 안에서 가장 쉽게 멈춘다. 종이 한 장도 잘 투과하지 못하고, 베타 입자는 수 mm 정도까지 금속을 투과하며, 감마 입자는 수 cm의 납을 투과할 수 있다.

방사능 물질의 어떤 일정량의 핵에서 어떤 특정한 붕괴 과정이 일어나는 비율은 아직 붕괴하지 않은 핵의 수에 비례한다. 만일 N이 어떤 순간에 존재하는 방사성능 핵의 수라면 N이 변하는 비율은

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad (\text{V}.\ 4\text{-}2)$$

으로 여기서 λ는 **붕괴 상수**이다. 음수 부호는 dN/dt가 음수, 즉 시간에 따라 감소한다는 것을 나타낸다. 식 (Ⅴ. 4-2)를 적분하면,

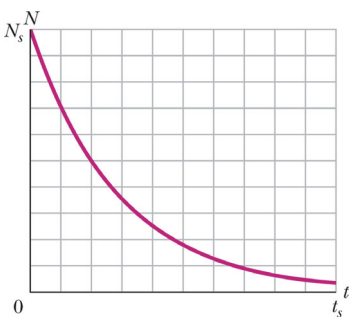
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (\text{V}.\ 4\text{-}3)$$

이 된다. 상수 N_0는 $t = 0$일 때 방사성 핵의 수를 나타낸다.

붕괴율 R은 식 (Ⅴ. 4-3) 을 시간에 대해 미분하여

$$R = \left|\frac{dN}{dt}\right| \frown N = N_0 e - \lambda t = R_0 e^{-\lambda t} \qquad (\text{V}.\ 4\text{-}4)$$

과 같이 얻는다. $R_0 = N_0\lambda$ 은 $t = 0$일 때 붕괴율이며, 시간 t의 붕괴율은 $R = \lambda N$이다. N과 R은 모두 시간에 대해 지수 함수적으로 감소한다. [그림 Ⅴ-36]의 N대 t의 그래프는 이 지수함수의 붕괴 법칙을 보여준다.



[그림 Ⅴ-36] **지수함수적 붕괴**

특정한 핵의 붕괴 특성을 나타내는 또 하나의 유용한 변수는 **반감기** $T_{1/2}$이다. 방사능 물질의 반감기는 주어진 핵의 수가 반으로 줄어드는데 걸리는 시간이다. 식 (Ⅴ. 4-3)에서 $N = N_0/2$, $t = T_{1/2}$로 놓으면,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \qquad (\text{V}.\ 4\text{-}5)$$

가 된다. 따라서 $e^{\lambda T_{1/2}} = 2$가 된다. 이 식을 양변에 자연 로그를 취하여

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (\text{Ⅴ. 4-6})$$

을 얻게 된다.

붕괴율의 전통적 단위는 큐리(Curie : Ci)이며

$$1\ \text{Ci} \equiv 3.7 \times 10^{10}\ \text{붕괴/s}$$

로 정의된다. 붕괴율의 SI 단위는 베끄렐(Becquerel : Bq)이며

$$1\ \text{Bq} \equiv 1\ \text{붕괴/s}$$

이다. 따라서 $1\ \text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\ \text{Bq}$이다. 1 Ci는 상당히 큰 붕괴율에 해당되며, 흔히 사용되는 붕괴율의 단위는 mCi와 μCi이다.

3. 방사능 붕괴의 과정

방사능 핵들은 알파, 베타, 감마의 세 과정을 통해 자발적으로 붕괴하여 안정한 핵으로 변한다. 러더퍼드의 유명한 알파입자 산란 실험을 포함한 여러 실험의 결과 방사능은 불안정한 핵들이 안정한 핵으로 스스로 붕괴하는 과정으로 알려졌다. M_x를 모핵의 질량, M_y를 딸핵의 질량, M_z를 방출 입자의 질량이라 하면 **붕괴 에너지** Q는

$$Q = (M_x - M_y - M_z)c^2 \qquad (\text{Ⅴ. 4-7})$$

와 같이 정의된다. $Q > 0$이면 발열 과정이고 $Q < 0$이면 흡열 과정이다. 후자의 경우는 반응이 진행되기 위하여 어떤 외부의 근원으로부터 에너지를 공급받아야 한다. 모든 자발적인 방사능 붕괴는 발열과정이며 $Q > 0$이다.

1) 알파 붕괴와 장벽 투과

어떤 방법으로 알파선이 헬륨의 원자핵임을 알 수 있었을까? 첫째로 톰슨이 전자의 비전하를 측정한 방법과 같이 전기장과 자기장에서의 편향을 이용하면 알파선의 질량과 전하량의 비 m/q를 측정할 수 있다. 알파선의 비전하가 $m/q = 4m_H/e$임이 알려졌다. 여기서 m_H는 수소 원자 질량이다. 두 번째로 러더퍼드는 한쪽의 유리벽이 알파 입자가 투과할 수 있을 만큼 얇은 이극 유리 진공 방전관을 이용하여 알파선의 정체를 확인하는 실험을 하였다. 알파선을 발생시키는 물질을 한쪽 유리벽 근처에 갖다 놓으면, 진

공이었던 유리관 안에 헬륨이 쌓이는 것을 진공 방전에서 나오는 빛의 스펙트럼으로 확인할 수 있다. 두 가지 방법의 실험을 통하여 알파 입자는 He^{2+}이온, 즉 헬륨의 원자핵임이 밝혀졌다.

러더퍼드에게 1908년 노벨 화학상을 안겨 준 것은 방사능 붕괴가 원소의 변환을 가져온다는 사실을 입증한 업적 때문이었다. 만일 어미핵이 알파입자($^4_2$He)를 방출하면, 이것은 두 개의 양성자와 두 개의 중성자를 잃게 된다. 그러므로 N이 2줄고, Z도 2가 줄고 A는 4가 줄게 된다. 이 붕괴는 기호로

$$(Z, N) \rightarrow (Z-2,\ N-2) + \alpha \qquad (\text{Ⅴ. 4-8})$$

과 같이 쓸 수 있다. 예를 들어 ^{238}U은 알파 입자를 방출하며

$$^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^{4}_{2}\text{He} \qquad (\text{Ⅴ. 4-9})$$

와 같은 방식으로 붕괴한다. ^{238}U의 반감기는 4.47×10^9년이다.

알파 붕괴가 일어나는 원리는 양자역학을 이용해야 설명이 가능하다. 핵 속에 갇혀 있는 알파 입자가 핵 외부로 꺼내지기 위해서는, 마치 광전 효과에서 음극 물질에 갇혀 있는 전자가 광전자가 되기 위해서는 일 함수가 필요하듯이, 에너지가 더 필요하게 된다. 이러한 경우에도 양자역학에서는 알파 입자가 핵 밖으로 투과되어 나올 확률이 존재하게 되는데 이러한 현상을 양자역학에서 **장벽 투과**라고 부른다.

2) 베타 붕괴와 뉴트리노

베타선의 경우 비전하 측정에서 $m/q = -m_e/e$가 됨을 알았다. 이는 베타선이 전자, 즉 음극선이라는 것을 의미한다. 베타선의 에너지는 보통 수 MeV가 음극선의 에너지인 상한인 100 keV 정도보다 훨씬 크다.

베타선을 방출하는 방사능 핵은 중성자를 지나치게 많이 갖고 있기 때문에 베타 붕괴를 한다. 초과된 중성자 중 하나가 전자를 내어놓으면서 양성자로 변환될 수 있다. 결과적인 β^- 붕괴는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(Z, N) \rightarrow (Z+1,\ N-1) + e^- \qquad (\text{Ⅴ. 4-10})$$

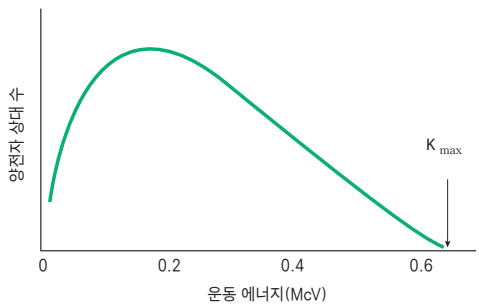
알파 붕괴처럼 베타 붕괴도 원소의 변환을 초래한다.

베타 붕괴에는 이해하기 힘든 면이 있었다. 만약 어미핵 (Z, N)이 정지해 있고, 붕괴의 결과로 식 (Ⅴ. 4-10)처럼 두 개의 입자만이 만들어진다

면, 이 두 입자의 에너지는 에너지-운동량 보존 법칙에 의하여 정확하게 결정된다. 전자는 핵에 비해서 매우 가볍기 때문에 붕괴 후 핵이 뒤로 밀리는 운동 에너지는 매우 작다. 따라서 거의 모든 에너지가 전자에 전달되어야만 한다. 만약 β^- 붕괴의 결과로 식 (Ⅴ. 4-10)처럼 전자만이 방출되는 것이라면, 같은 종류의 β^- 방사성 물질로부터 방출되는 전자는 모두 똑같은 에너지를 가져야만 한다.

실험치는 모든 전자가 같은 에너지를 가질 것이라는 예측과 달리 연속적인 에너지를 갖는다. 이렇게 에너지 보존이 명백히 성립하지 않는다는 사실이 처음 확인된 것은 1920년대였다. 관측 결과는 [그림 Ⅴ-37]과 같이 0부터 K_{max}로 표기된 최대값까지 넓게 분포해 있다. K_{max}는 전자가 유일한 입자라고 가정할 때 얻을 수 있는 에너지이다. 관측된 베타 입자의 최대 운동 에너지는 반응의 Q 값에 해당된다.

이후, 사라진 에너지에 대한 연구에 많은 노력이 투자되었다. 1930년 파울리(W. Pauli)가 잃어버린 에너지와 운동량을 갖는 새로운 입자가 필요하다고 제안했다. 페르미(A. Fermi)는 이 입자를 중성미자(neutrino)라고 불렀는데, 1956년 마침내 레인스(F. Reines)와 코웬(C. Cowan)에 의해 실험적으로 검출되었다.



[그림 Ⅴ-37] **베타입자의 에너지 곡선**

결국 두 개의 중성미자 ν와 반중성미자 $\bar{\nu}$의 존재가 확인되었고, β^- 붕괴 과정에서는 반중성미자가 방출되는 것이 밝혀졌다.

$$(Z, N) \rightarrow (Z+1,\ N-1) + e^- + \bar{\nu} \qquad (\text{Ⅴ. 4-11})$$

β^+ 붕괴에서는 중성미자가 나온다.

$$(Z, N) \rightarrow (Z-1,\ N+1) + e^- + \bar{\nu} \qquad (\text{Ⅴ. 4-12})$$

베타 붕괴에 관련되는 상호 작용을 특별히 약한 상호 작용이라고 한다. 뉴트리노는 단지 약한 상호 작용만 할 수 있다.

생각해 보기

알파 붕괴에서 나오는 알파선은 원자핵 내부에서 방출된다. 베타 붕괴에서 생겨난 전자와 양전자도 원자핵 내부에서 생긴 후에 외부로 방출될까? 분명히 베타 붕괴를 겪는 양성자와 중성자는 원자핵 속에 있다. 드브로이 파동 이론으로 각자 생각해 보자. 베타선은 핵 내부에서 생성된 후에 원자핵을 빠져 나오는 것이 아니다. 생성 즉시 원자핵 밖에 있게 된다. 전자가 원자핵 속에 있으려면 베타 붕괴에서 관측되는 전자 에너지가 적어도 20 MeV 이상이 되어야 한다.

3) 감마 붕괴와 핵의 안정 상태

알파나 베타 붕괴 후에 핵은 들뜬 상태로 남는다. 이어서 핵은 광자를 방출함으로써 더 안정한 상태로 두 번째 붕괴를 할 수 있다. 안정된 상태로 가는 과정에서 방출된 광자를 감마선이라 부른다. 감마선의 근원은 원자에서 광자가 방출되는 원리와 정확히 같다. 들뜬 상태에 있는 핵은 감마선을 방출하면서 안정 상태로 떨어진다. 감마선 광자는 두 핵의 에너지 상태의 에너지 차이인 ΔE와 같은 hf의 에너지를 갖는다. 감마 붕괴는

$$ {}^{A}_{z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{z}X + \gamma \qquad (\text{Ⅴ}.\ 4\text{-}13) $$

과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 X^{*}는 들뜬 상태의 핵을 나타낸다.

방사성 핵으로부터 방출되는 감마선은 여러 가지 면에서 X-선과 유사한 성질을 갖고 있으며, 결국 X-선과 같은 전자기적 방사선 즉, 빛임이 증명되었다. X-선 진공관에서 만들어지는 X-선 광자의 에너지는 고전압 한계 때문에 거의 100 keV를 넘지 못하지만, 감마선 광자는 방사능 핵에 따라 약 10 MeV까지의 에너지를 갖는다.

4. 핵 물리 응용

핵 반응은 대체로 많은 양의 운동 에너지를 방출한다. 핵 물리의 응용에서 중요한 부분은 인류가 핵 반응으로부터 에너지를 구하는 것이다. 전형적인 하나의 알파 붕괴 핵 반응에서는 4~9 MeV의 에너지가 방출된다. 핵 분열과 핵 융합에서는 어떤 방법으로 거대한 양의 에너지를 내어놓을 수 있는가?

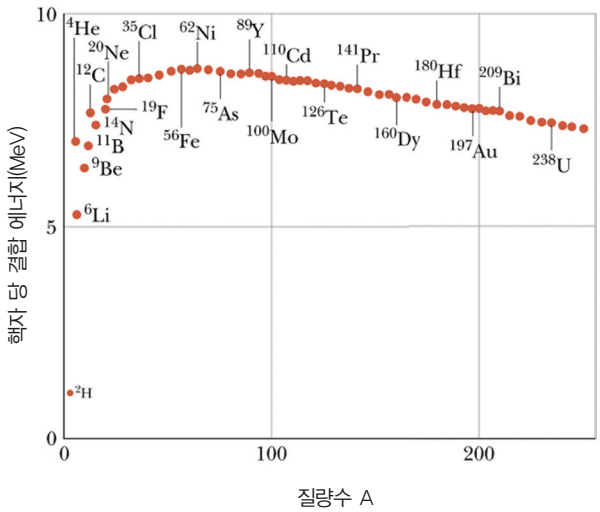
질량수 A에 따른 핵자당 결합 에너지의 그래프를 생각해 보자. [그림 Ⅴ-38]은 핵자당 결합 에너지가 질량수 A에 따라서 증가하여 A가 58에서 최대값을 가지고 이후 가장 무거운 핵에 이르기까지 지속적으로 감소하는 경향을 보여 준다. 이는 만약 가벼운 두 핵이 결합되면 결과적인 핵은 원래보다 큰 총 결합 에너지를 가지게 됨을 의미한다. 예를 들어 가벼운 핵 두 개의 융합

$$^{2}\mathrm{H} + {}^{2}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + \text{energy} \qquad (\text{Ⅴ. } 4\text{-}13)$$

은 에너지를 내어 놓는다. 한편,

$$^{236}\mathrm{U} \rightarrow {}^{92}\mathrm{Kr} + {}^{144}\mathrm{Ba} + \text{enegy} \qquad (\text{Ⅴ. } 4\text{-}14)$$

처럼 무거운 핵이 두 조각으로 갈라져도 조각난 두 핵의 총 결합 에너지가 본래 단일 핵의 결합 에너지보다 크기 때문에 운동 에너지를 방출하게 된다.

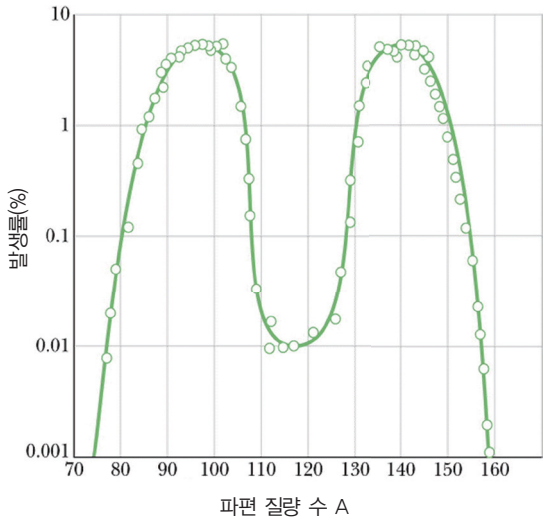


[그림 Ⅴ-38] **핵자당 결합 에너지 곡선**

1) 핵 분열

핵 분열에서 방출되는 에너지는 얼마나 될까? [그림 Ⅴ-38]로부터 쉽게 예측할 수 있다. [그림 Ⅴ-39]와 같이 비슷한 질량으로 파편 조각난 두 핵($A \approx 100$)의 핵자당 결합 에너지는 모핵($A \approx 200$)의 그것보다 거의 1 MeV 정도 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 핵자당 결합 에너지는 대략 1 MeV 정도 증가한다. 이는 모핵으로부터 방출되는 운동 에너지가 대략 200 MeV임을 의미한다. 대개의 화학 반응(예를 들어 석탄이 탈 때)에

서 방출되는 에너지가 반응당 수 eV 정도임을 상기한다면 이만한 방출 에너지가 얼마나 큰 것인가를 쉽게 짐작할 수 있다.



[그림 V-39] **핵 붕괴 생성물**

어떤 경우에 핵 분열이 가능한가? 방사능 핵 붕괴는 자발적으로 이루어진다. 반면에 자연의 모든 핵 특히 무거운 핵이 자발적으로 핵 분열을 하지 않는 이유는 무엇일까? 자연의 모든 핵이 즉각적인 핵 분열을 하지 않는 이유는 무거운 핵이 핵 분열 장벽에 가로막혀 있기 때문이다. 핵 분열 장벽을 극복하는 방법으로 무거운 핵은 저 에너지의 중성자를 흡수하여 중성자가 하나가 많은 핵의 들뜬 상태로 변하는 것이다. 이 들뜬 상태 에너지는 핵 분열 장벽의 에너지보다 크므로 핵 분열이 가능하게 된다.

연속적인 핵 분열이 가능한 데는 두 가지 요소가 담겨 있다. 그 하나는 분열이 중성자에 의해서 유도될 수 있다는 것이고, 다른 하나는 핵 분열 반응 자체가 추가의 중성자를 생산해 낸다는 것이다. 이에 따라 일단 반응이 시작되면 연쇄 반응이라고 할 수 있는 자체적인 반응의 유지가 가능하게 된다. 즉 각각의 분열에서 만들어진 중성자가 다음의 분열을 유도하는 것이다. 이러한 가능성은 핵 분열이 발견된 즉시 인식되었고, 1942년까지 페르미가 이끄는 그룹은 약 50톤의 우라늄과 산화 우라늄을 이용하여 최초의 핵 분열 원자로를 건설할 수 있었다.

2) 핵 융합

가벼운 핵이 무거운 핵으로 융합할 때에도 에너지가 방출된다. 융합의 한 예로

$$^{1}H + ^{2}H \rightarrow ^{3}He + \gamma + 5.5\ MeV \qquad (Ⅴ.\ 4-15)$$

와 같이 하나 보통의 수소 ^{1}H와 중수소 ^{2}H가 융합하는 반응을 들 수 있다. 1938년 베테(H. Bethe)에 의해 밝혀진 **양성자 – 양성자 순환 과정**은 다음과 같다.

실제로 어떤 경우에 핵 융합이 가능할까? 태양을 포함하는 대부분의 별에서 핵 융합은 핵 융합을 일으키는데 필요한 온도는 별의 내부에서 자연스럽게 얻는다. 태양과 같은 별은 주로 수소로 구성되어 있다. 별의 내부 온도가 고온이 될수록 별 내부에 있는 수소들은 서로 충돌할 기회가 잦아진다. 수소들 사이의 쿨롱 힘을 극복하고 충돌하면 양성자–양성자 충돌이 촉발된다. 첫 번째 반응은 중수소(^{2}H핵)를 만든다.

$$^{1}H + ^{1}H \rightarrow ^{2}He + e^{+} + \nu + 0.4\ MeV \qquad (Ⅴ.\ 4-16)$$

이 반응은 두 양성자의 충돌 과정에 그 중 하나가 β^{+}붕괴를 통해 중성자로 변화되는 과정을 포함하고 있기 때문에 반응이 일어날 확률은 극히 작다. 그러나 별 내부에는 양성자가 극히 많아서 양성자–양성자 충돌이 매우 자주 일어나기 때문에 이 반응이 충분한 의미를 갖는다.

$$^{2}H + ^{1}H \rightarrow ^{3}He + \gamma + 5.5\ MeV \qquad (Ⅴ.\ 4-17)$$

마지막으로 이렇게 만들어진 ^{3}He두 개가 서로 충돌하여 아주 안정된 ^{4}He를 만든다.

$$^{3}He + ^{3}He \rightarrow ^{4}He + 2(^{1}H) + 12.9\ MeV \qquad (Ⅴ.\ 4-18)$$

이상의 세 가지 반응을 묶어서 양성자–양성자 순환이라고 부른다. 이 순환 과정은 결과적으로 네 개의 양성자를 ^{4}He핵으로 묶는 역할을 하며 하나의 순환에서 방출되는 에너지는 24.7 MeV 이다.

$$4^{1}(H) \rightarrow ^{4}He + 2\ e^{+} + 2\ \nu + 2\ \gamma + 24.7\ MeV \qquad (Ⅴ.\ 4-19)$$

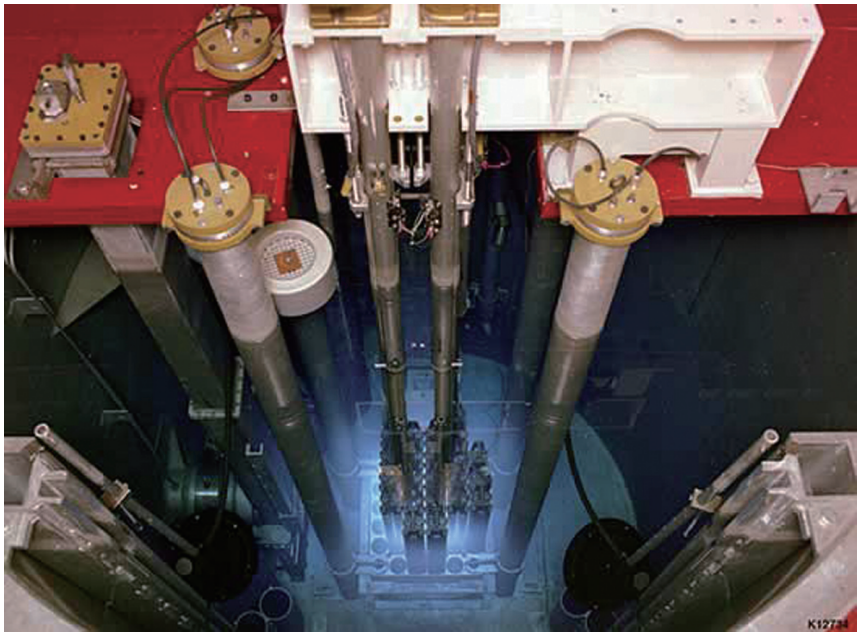
별에서 핵 융합은 별 내부의 온도가 자연스럽게 핵 융합을 유도한다. 지구상의 인공 핵 융합 역시 태양 내부 온도와 같은 고온이 필요하다. 에너지원으로서의 핵 융합의 가장 큰 장점은 수소와 같은 연료가 무궁무진하며

값싸다는 점과 핵 분열 원자로에 비해서 훨씬 적은 방사능을 내어 놓는다는 점이다. 그러나 아직도 상업적인 핵융합로를 건설하지 못하고 있다.

3) 핵 의학 진단 및 치료용 동위 원소

핵 의학은 방사능 동위 원소에서 방출되는 베타선이나 감마선을 이용하여 질병을 진단하고 치료하는 기술로서 1920년대부터 시작되었다. 1936년 사이클로트론이 발명된 후에 이용하여 다양한 동위 원소를 만들 수 있게 됨으로서 동위 원소의 이용이 활발하게 되었다. 의학적 이용을 위한 방사능 동위 원소의 국내 생산은 1962년 100 kW급 연구용 원자로 TRIGA Mark Ⅱ의 가동을 시작으로, TRIGA Mark Ⅲ 및 1995년 30 MW급 다목적 중형 원자로 하나로를 이용하여 생산하고 있다. 방사능 동위 원소는 원자력발전소, 연구용 원자로 및 사이클로트론과 같은 가속기 등에서 생산되고 있다.

대부분의 동위 원소를 생산하는 원자로는 연구용원자로이다. 그러나 ^{60}Co 등 일부 방사성 동위 원소들은 원자력발전소에서 생산된다. 또한 싸이클로트론(cyclotron)과 같은 가속기를 이용한 동위 원소 생산의 경우 의료용 방사선동위 원소 전용 사이클로트론에서 짧은 반감기의 양전자 방출



[그림 Ⅴ-40] TRIGA Mark Ⅲ 원자로 내부

단층 촬영 장치 PET용 주 동위 원소는 ^{201}Tl이며 ^{123}I, ^{67}Ga, ^{111}In, ^{57}Co와 ^{103}Pd 등도 있다.

의학에서 동위 원소의 사용은 진단과 치료의 두 개의 주요 부분으로 분류된다. 진단의 주요 목적은 조직의 이상을 가능한 확인하기 위하여 또는 종양과 같은 장애나 이상들을 알아내기 위해서이다. 방사능 치료는 악성 부위를 파괴하기 위한 방사능 충격에 의존한다.

진단에서 방사능 의약품은 대체로 입 또는 정맥 주사로 인체에 주입된다. 선택되는 화합물은 조직에 의해 결정된다. 예를 들면 갑상선의 역할을 조사하기 위하여 방사능 요오드를 투약하는데 그 이유는 인체가 이 원소를 갑상선에 모으기 때문이다. 갑상선은 신진대사를 조절하는 호르몬을 만드는데 요오드를 사용한다. 갑상선 기능 부전 상태의 개체에서는 갑상선은 보통 사람보다 적은 양의 요오드가 모일 것이고 갑상선 기능 항진 상태의 개체에서는 반대가 될 것이다. 개체에 입으로 소량의 요오드를 투입하며 위에서 즉시 흡수된다. 갑상선에서 요오드의 농도는 24시간 후에 섬광 검출기를 통하여 결정된다. 진단 목적으로 흔히 이용되는 동위 원소는 ^{99m}Tc이다. ^{99m}Tc는 반감기가 6시간이며, 140 keV의 감마선을 방출하면서 바닥 상태로 붕괴한다. 이 동위 원소는 하전 입자가 방출되지 않아서 신체에 위험이 적다. 그리고 반감기에 비해 매우 짧은 시간에 신체의 모든 부분으로 전달된다.

방사능 진단과는 다르게 방사능 치료의 목적은 방사능 충격으로 세포를 파괴하는 것이다. 우리나라에서 방사성 핵종을 이용한 치료법은 1959년 갑상선암 및 갑상선 기능 항진증 치료에 ^{131}I을 사용한 것을 효시로 ^{131}I의 사용이 꾸준히 증가하고 있다. 치료용 방사성동위 원소의 30%는 ^{131}I이 차지하고 있으며, 현재 ^{90}Y, ^{188}Re 등을 이용한 치료제 개발이 진행되고 있다. 치료에 사용하는 방사성동위 원소는 기본적으로 투과력은 약하나 조직 파괴력이 강한 베타선을 방출하는 동위 원소를 많이 사용한다.

연 습 문 제

1. 금에 α 입자를 탄성 산란시키는 실험에서, 가이거와 마스덴은 ^{218}Po을 α 입자의 방출 핵종으로 사용하였다. 방출된 입자의 에너지는 6 MeV이다. 실험 결과가 모든 산란 각도에서 러더퍼드 공식과 일치하는 것으로부터 금 핵의 가능성 있는 가장 큰 반지름을 구하라.

2. ^{227}Th 핵의 반지름을 계산하라. 1 mm^3 핵 물질의 질량은 어느 정도일까?

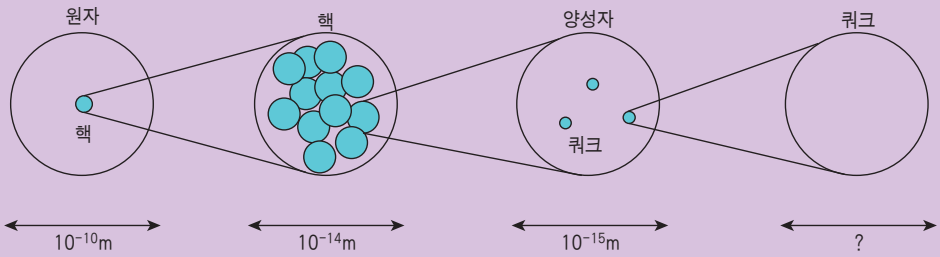
3. ^{226}Ra의 반감기는 1,600년이다. 순수한 ^{226}Ra 1 g 시료의 처음의 붕괴율은 얼마인가?

4. 어떤 핵의 붕괴 상수는 $\lambda = 0.010\ \text{min}^{-1}$이다. 시간 $t = 0$에서 어떤 시료 내에 10^6 개의 핵이 있었다면 (a) 한 시간 후 몇 개의 핵이 남아 있는가? (b) $t = 0$일 때 붕괴율 $R(t)$는 얼마인가? (c) 한 시간 후 붕괴율 $R(t)$는 얼마인가?

5. 동위 원소 ^{60}Co의 붕괴 상수는 $\lambda = 4.2 \times 10^{-1}\ \text{s}^{-1}$이다. 순수한 ^{60}Co 시료 1 μg을 생각하자. (a) 시료 내에 몇 개의 원자가 있는가? (b) 1년 후에는 몇 개의 ^{60}Co 원자가 남아 있겠는가? (c) ^{60}Co의 반감기는 얼마인가?

5 기본 입자

물질을 구성하는 궁극적인 입자를 기본 입자 또는 소립자라고 한다. 19세기 말에 이르러서야 모든 물질이 원자들로 이루어져 있다는 것을 알게 되었다. 많은 원소들이 발견되었고, 이 원소들이 주기적으로 반복되는 성질을 가지고 있다는 사실로부터 원자의 내부 구조를 이해하게 되었으며, 원자들이 더 이상 쪼갤 수 없는 입자가 아니라는 것을 알게 되었다. 20세기 초에 러더퍼드가 원자핵을 발견한 이래 양성자와 중성자를 발견하였고, 베타 붕괴에서 보존 법칙을 설명하기 위해 파울리는 중성 미자를 가정하였다. 전자와 더불어 이 네 가지 입자들이 원자 및 핵 물리의 모든 현상들을 설명할 수 있었다. 그러나, 이 단순한 입자 네 가지만으로는 설명하기 부족한 여러 현상들이 나타났다. 1950년대 이후로 이루어진 가속기를 이용한 실험들은 양성자와 중성자가 강입자(Hadron)라는 그룹의 일원이라는 것을 알아냈다. 강입자들은 100개 이상 관측되었고 이것이 물질의 기본 입자로 보기에는 힘들었다.



1960년 후반에 쿼크 모형이 출현하여 강입자를 두 개 혹은 세 개의 쿼크로 이루어져 있다는 것을 설명할 수 있었다. 기본 입자들의 종류와 특성에 대하여 살펴보자.

1. 기본 입자

1) 중성자

기본 입자의 발견 과정을 보면, 1932년에 채드윅(J. Chadwick)이 **중성자**(neutron)를 발견한 것은 매우 중요한 일이었다. 당시에 보테 등이 폴로늄 같은 방사성 원소에서 나오는 α 입자가 베릴륨이나 붕소에 충돌할 때 매우

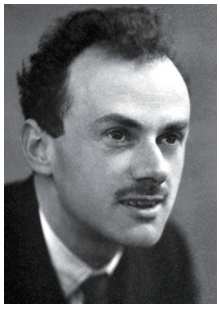
❖ 채드윅(J. Chadwick, 1891~1974)

영국의 물리학자로 1932년에 중성자를 발견하였다. 이 공로로 인해 1935년에는 노벨 물리학상을 받게 된다.

강한 복사선이 방출된다는 것을 발견하였다. 처음에는 이것이 γ선으로 생각했으나, 채드윅은 이 복사선이 매우 큰 에너지를 갖는 양성자를 떼어내는 것을 관측하여 γ선이 아니라고 결론을 내렸다. 그리고, 전기적으로 중성을 띠고 있고 질량이 양성자와 같은 입자임을 밝혔다. 전기적으로 중성을 띠었기 때문에 **중성자**라고 이름을 붙였다.

중성자의 발견은 전자와 양성자로만 구성된 원자 모형의 문제점을 한꺼번에 해결하였다. 원자핵의 구성이 양성자와 중성자로 이루어져 있다는 것을 알게 된 것이다. 물질을 구성하는 기본 입자인 원자의 모형에 대한 완성이었으나 1930년대가 끝나기도 전에 새로운 입자들이 발견되기 시작하여 현재에는 수백까지에 이르렀다. 이런 입자들을 분류하는 것 중의 하나가 입자와 반입자(antiparticle)이다.

2) 양전자



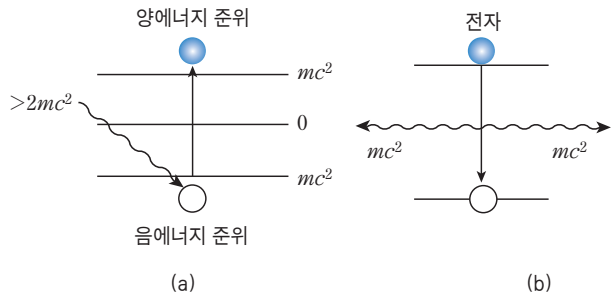
❖ 디랙(P.A.M Dirac, 1902~1984)

영국의 물리학자로 양자역학을 탄생시켰다. 상대론과 양자역학을 접목시켜 디랙 방정식을 만들었다. 슈뢰딩거와 같이 1933년에 노벨상을 수상하였다.

디랙(P.A.M Dirac)은 1928년에 상대론을 양자역학에 도입하였다. 이때 전자와 함께 질량이 전자와 똑같고 전기적인 부호만 반대인 **양전자**(positron)가 존재해야 한다고 예언하였다. 이 예언은 1932년에 앤더슨이 안개 상자를 가지고 우주선을 측정하여 전자와 똑같은 성질을 가지고 있으나 양의 전하를 가지고 있는 입자를 발견하여 확인하였다. 양의 전하를 가지고 있음은 자기장을 걸어 전기를 띤 입자들이 휘는 방향을 보고 알아 내었다. 이와 같이 질량이나 고유 각운동량 등이 모두 같고, 입자가 전기를 띠었을 때 전하의 부호만 반대인 입자를 **반입자**(antiparticle)라고 한다. 모든 입자가 이와 같이 반입자를 갖는 것이 알려졌다. 광자(photon)와 같은 경우는 입자와 반입자가 같은 경우이다.

디랙의 방정식에 의하면 자유 전자의 에너지가 mc^2보다 큰 준위들뿐만 아니라 $-mc^2$보다 작은 준위들도 존재할 수 있다는 것이다. 전자들이 낮은 음의 에너지 준위들로 떨어져 사라져 버릴까라는 문제와 음의 에너지 준위를 어떻게 해석할 것인가라는 문제를 디랙은 다음과 같이 해석했다. 음의 에너지 상태가 전자로 채워져 있고 양의 상태로 전이될 때까지는 관측되지 않는다는 것이다.

음의 에너지의 전자가 관측되기 위해서는 $2mc^2$만큼의 에너지가 공급되어 양의 에너지로 올라가야 하는데 이때 반도체 양의 전하를 띠는 정공처럼 구멍(hole)이 남게 된다. 그러나 앤더슨이 양전자를 발견함으로써 이



[그림 Ⅴ-41] (a) 디랙 방정식에 의한 자유 전자의 에너지 스펙트럼
(b) 전자-양전자 쌍소멸 과정

때 남겨진 구멍이 양전자라는 것이 밝혀졌다. 그러므로 [그림 Ⅴ-41]에서와 같이 음의 에너지 상태에 있는 전자가 $2mc^2$의 에너지를 갖는 광자를 흡수하여 양의 에너지 상태로 되는데 이때 음의 에너지에 남겨진 구멍은 양전자로 관측되어 결과적으로 전자-양전자 쌍이 생성된다. 이 과정을 **쌍생성**(pair creation)이라고 한다. 그리고 전자와 양전자가 만나 둘이 함께 소멸하면서 두 개의 광자가 발생하는 과정이 있는데 이것을 **쌍소멸**(pair annihilation)이라고 한다.

3) 중성미자(neutrino)

1930년에 파울리(W.E Pauli)가 β붕괴에서 관측되는 입자들의 에너지만으로는 에너지가 보존되지 않는 문제점을 해결하기 위해 도입한 입자이다. 중성미자의 상호 작용에 의한 현상을 실험적으로 직접 관측한 것은 1953년이었다. 이처럼 실험으로 관측하는데 어려웠던 것은 중성미자가 전기적으로 중성이라 전자기 상호 작용을 하지 않으며, 또한 강한 상호 작용도 하지 않고 약한 상호 작용만을 하기 때문이다. 중성미자가 전하를 띠지 않고 있다면 중성미자의 반입자도 중성이어야 한다. 중성미자와 반중성미자는 서로 다른 입자라는 것을 다음 실험을 통해서 보여준다.

β붕괴를 보면

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

에서 생성되는 반중성미자 $\bar{\nu}_e$가 다음과 같은 반응을 통해 양전자만을 만든다.

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

즉 반중성미자는 전자와 함께 생성되거나 반응을 통하여 양전자만을 생성하는 것이다. 만약에 다음과 같이

$$\overline{\nu}_e + n \not\rightarrow p + e^-$$

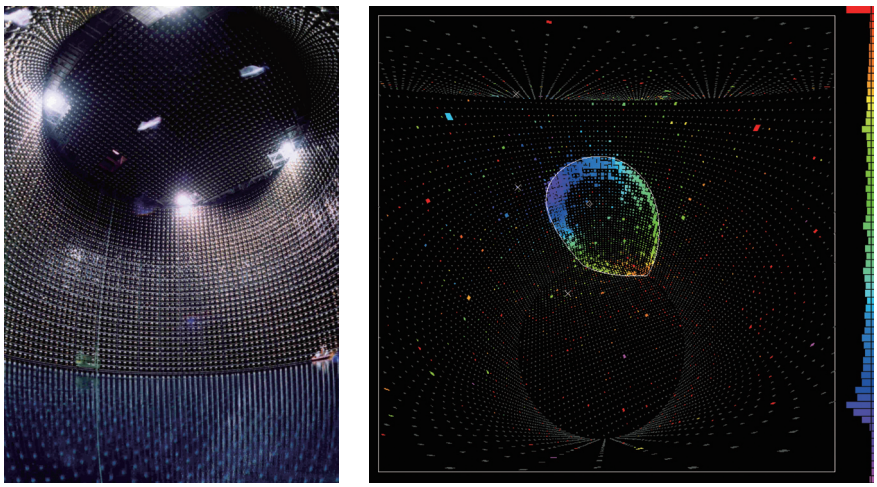
전자를 생성시키는 일은 없다. 이것으로 보아 반중성미자와 중성미자는 별개의 입자이다.

또 파이온의 붕괴에서 생성되는 중성미자와 반중성미자도 다른 성질을 보여준다.

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu$$
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

이것들의 반응은 뮤온을 생성하지만 전자는 생성하지 않는다. 이것은 적어도 두 종류의 중성미자가 존재해야 한다는 것이다. 즉 전자들의 생성에 관련하는 전자중성미자와 마찬가지로 뮤온의 생성에 관여하는 뮤온중성미자이다. 타우 생성에 관여하는 타우중성미자와 함께 세 가지 종류의 중성미자가 존재한다.

1990년대 말까지 중성미자의 질량이 없다고 생각했으나, 1999년 슈퍼 카미오칸데(Super Kamiokande)의 실험 이후 여러 실험을 통해 미세하지만 질량이 있다고 밝혀졌다. 그러나 질량이 너무 작아 아직 직접적으로 질량을 측정하지 못하고 있다.



[그림 Ⅴ-42] **슈퍼 카미오칸데 실험**

2. 입자의 분류

많은 강입자들이 발견되면서 입자들의 특성에 따라 그룹으로 분류해야 했다. 입자들은 모두 반입자가 있어서 입자와 반입자로 분류된다. 그리고 입자들이 가진 스핀과 어떤 상호 작용을 하느냐에 따라 분류한다.

1) 스핀(spin)에 의한 분류

모든 입자들은 고유의 내부 각운동량 양자수(스핀 양자수)를 갖는다. 스핀 양자수는 반정수(1/2, 3/2, …)나 정수(0, 1, …)값을 갖는데, 반정수 스핀을 갖는 입자들을 **페르미온**(fermion)이라 부른다. 그리고 정수 스핀을 갖는 입자들은 **보존**(boson)이라 부른다. 페르미온의 경우 파울리의 배타원리가 적용되서 한 계에 같은 두 페르미온이 동일한 양자수 상태를 가질 수 없다. 대표적인 페르미온은 전자, 양성자, 중성자 등이 있으며 경입자(lepton), 중입자(baryon)들도 페르미온이다. 보존의 경우 동일한 양자수 상태를 가질 수 있으면 같은 양자수 상태에 모이는 성질을 가지고 있다. 대표적인 보존은 중간자(meson)와 광자, W, Z 등이 있다. 이런 입자들은 상호 작용을 매개하는 입자들이다.

2) 상호 작용에 의한 분류

전자기적 상호 작용과 약한 상호 작용에는 관여하지만 강한 상호 작용에 관여하지 않는 입자들을 **경입자**(lepton)이라고 부른다. 이 경입자에는 전자, 뮤온, 중성미자 등이 있다. 강한 상호 작용에 관여하는 입자들을 **강입자**(hadron)라고 부른다. 강입자에는 양성자, 중성자, 파이온, 케이온 등이 있다. 강입자는 페르미온인가 보존인가에 따라서 다시 **중입자**(baryon)과 **중간자**(meson)로 나뉜다. 양성자와 중성자 등은 대표적인 중입자이다. 그리고 파이온과 케이온은 중간자이다.

3. 상호 작용

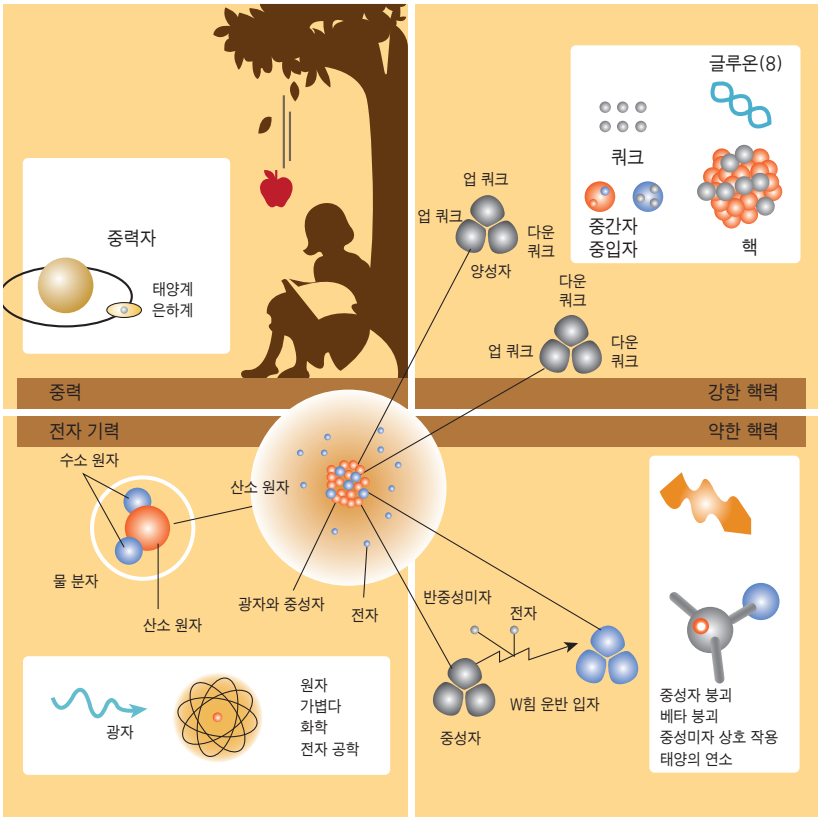
물리학자들은 네 가지의 상호 작용이 있다는 것을 발견했다. 만유인력에 의한 상호 작용(중력), 전자기적인 상호 작용, 강한 상호 작용, 약한 상호 작용이 이 네 가지 상호 작용이다.

뉴턴은 지구가 달을 궤도에 잡아두는 힘과 사과를 떨어뜨리는 힘이 같은 힘이라는 것을 보여 물리학의 역사에 커다란 공헌을 하였다. 맥스웰은 서로 다르게 보이는 힘인 전기력과 자기력을 통일하는 이론체계를 확립하였다. 이렇게 중력과 전자기력은 20세기 이전에 알려졌다.

핵력 또는 강력으로 알려진 힘은 강한 상호 작용으로 핵을 구속하는 작용과 양성자나 중성자를 구속하는 작용을 한다. 원자핵에는 양성자와 중성자가 있다. 중성자는 전기적으로 중성이기 때문에 다른 입자에게 아무런 전기적인 작용을 하지 않을 것이다. 그런데 양성자는 양전기를 띠고 있기 때문에 서로 반발력이 작용할 것이다. 특히 원자핵은 매우 작기 때문에 그 작용하는 힘이 매우 클 것이다. 이런 강한 반발력이 있음에도 어떻게 양성자가 서로 가까운 거리에서 안정한 상태로 있을 수 있는지를 설명할 수 있다. 양성자나 중성자와 같은 핵자들이 전자기적인 상호 작용 외에 특별한 상호 작용이 있어야 한다는 것을 일본의 물리학자 유카와(Yukawa, 1907~1981)는 주장하였다. 이때 상호 작용을 매개하는 중간자라는 새로운 입자를 가정하였다. 이 중간자는 그 후 실험적으로 확인되었으며, 이 상호 작용은 전자기적인 상호 작용보다 매우 강하기 때문에 강한 상호 작용이라고 부르게 되었다. 강한 상호 작용은 작용의 크기가 클 뿐만 아니라 작용하는 범위도 매우 짧다. 원자핵과 같이 매우 작은 공간에만 영향을 주고 멀어지면 급격히 줄어드는 특성이 있다. 중력이나 전자기력이 장거리 상호 작용이지만 강한 상호 작용은 단거리 상호 작용을 한다.

약력이라고 알려진 약한 상호 작용은 주로 원자핵이 β붕괴 시에 나타난다. 원자핵이 붕괴될 때 나오는 방사선에는 α, β, γ의 세 종류가 있다. α선은 헬륨의 원자핵이고, γ선은 X선보다 파장이 짧은 전자기파이다. β선은 전자라는 것을 알게 되었다. 전자가 어떻게 핵 속에서 나올 수 있는지에 대해 많은 논란이 있었고, 불확정성 원리에 의해서도 전자와 같은 가벼운 입자가 원자핵이라는 작은 공간에 존재한다는 것이 불가능하다. 따라서 전자는 핵 속에 있었던 것이 아니라 핵이 붕괴되면서 생성되었다고 결론 내릴 수 있다. 이 β붕괴의 과정을 보면 에너지 보존법칙이나 운동량의 보존법칙이 성립하지 않기 때문에 상당히 어려운 문제에 직면하게 된다. 파울리는 이런 보존법칙이 성립하게 하기 위해서 중성미자(neutrino)라는 새로운 입자의 존재를 가정하였다. 중성미자는 다른 물질들과 매우 약하게 상호 작용하기 때문에 검출이 어렵다. 중성미자가 상호 작용하는 것은 전자기적인 상호 작용보다 매우 약

하다. 따라서 이러한 상호 작용을 약한 상호 작용이라고 한다.



[그림 Ⅴ-43] **여러 가지 힘들의 상호 작용**

다음 [표 Ⅴ-2]는 이 네 가지 힘을 비교하고, 그 힘의 작용범위, 그리고 그 힘들을 매개하는 입자를 나타낸 것이다.

여러 힘들이 상호 작용할 때 서로 입자를 주고 받는 것을 상호 작용으로 설명한다. 양자전기역학(quantum electrodynamics)에 의하면 하전 입자들은 광자를 서로 교환하면서 상호 작용을 한다. 한 하전입자는 광자를 방출하고 다른 하전입자가 흡수하게 되면서 서로 매개 입자를 교환하면서 상호 작용을 하게 된다. 이때 광자가 가상광자(virtual photon)라는 매개입자가 된다. [표 Ⅴ-2]에서 보듯이 약한 상호 작용의 매개 입자는 W^+, W^-, Z^0 보존에 의해서 매개된다. 이들은 광자와는 달리 약 90 GeV에 달하는 매우 큰 질량을 갖고 있다. 이 매개입자의 질량이 상호 작용의 범위를 결정한다. 상호 작용하는 매개입자의 질량이 커질수록 상호 작용의 법위는 짧아지게 된다. 강력은 글루온이라고 불리는 입자에 의해서 매개된다고 믿고 있으나 광자와 W, Z와는 달리 간접적인 증거만 있지 직접적으로 관측된 바는 없

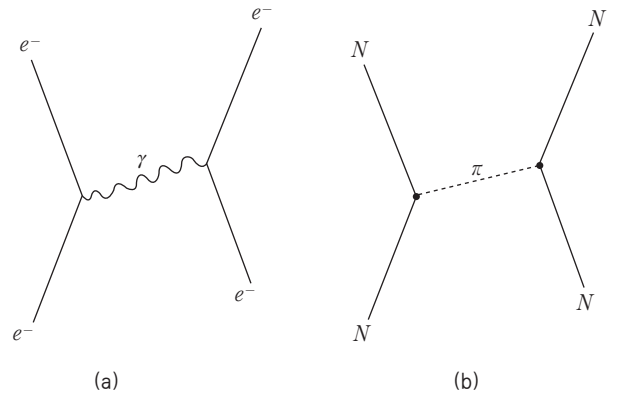
다. 그리고, 중력을 매개하는 중력자는 아직 실험적인 증거를 찾아내지 못하고 있다.

[표 V-2] 네 가지 상호 작용의 비교

상호 작용	상대적인 세기	범위	매개 입자			
			이름	정지 질량	전하량	스핀
강한 상호 작용	1	짧다(~1fm)	글루온 (gluon)	0으로 가정	0	1
전자기적 상호 작용	$\frac{1}{137}$	길다($1/r^2$)	광자 (photon)	0	0	1
약한 상호 작용	10^{-9}	짧다 (~0.001fm)	W^+, W^-, Z^0	81, 91 GeV/c^2	+e, −e, 0	1
중력에 의한 상호 작용	10^{-38}	길다($\frac{1}{r^2}$)	중력자 (graviton)	0	0	2

4. 유카와의 중간자

1935년에 유카와는 **중간자(meson)**라고 이름을 붙인 가상의 입자가 핵력을 매개한다고 제안하였다. 전자기력이 광자를 교환하면서 전자들이 상호 작용하듯이 핵자들도 중간자를 교환하면서 상호 작용한다고 생각하였다.



[그림 V-44] (a) 두 전자가 광자를 교환하면서 상호 작용하는 과정
(b) 두 핵자가 π 중간자를 교환하면서 상호 작용하는 과정

핵력은 매우 강하지만 작용하는 범위는 1.5 fm 정도의 매우 짧은 거리라는 것이 알려졌다. 유카와는 이 핵력의 범위로부터 가상입자의 질량이 약 130 MeV 정도라는 것을 불확정성 원리로부터 간단히 보였다. 1.5 fm 정도

의 거리까지 핵력을 매개하기 위해서는 이 입자가 불확정성 원리에 의해 주어지는 관측 한계 시간 정도로 존재할 수 있다. 이 입자의 수명은 불확정성 원리를 이용하면 $\Delta t \approx \hbar/\Delta E$가 한계이다. 이 중간자가 핵력을 매개하기 위해서는 이 시간 동안 핵력의 범위에서 전파될 수 있어야 한다. 이 입자의 속력을 c라고 가정할 때 걸리는 시간은

$$\Delta t = R/c = (1.5 \times 10^{-15}\ \mathrm{m})/(3 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s}) = 0.5 \times 10^{-23}\ \mathrm{s}$$

이다. 따라서

$$\Delta E \approx \hbar/\Delta t = (1.05 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s})/(0.5 \times 10^{-23}\ \mathrm{s}) = 2.1 \times 10^{-11}\mathrm{J}$$
$$= 1.3 \times 10^{8}\ \mathrm{eV}$$

가 된다. 그러므로 이 에너지를 등가질량 에너지 mc^2으로 환산하면 130 MeV 정도가 되는 매개 입자가 존재할 것이라는 가설을 제안한 것이다. 유카와가 존재할 것이라고 예측한 입자의 질량 크기는 전자와 양성자의 질량의 중간이었기 때문에 중간자라고 불렀다. 이 가설은 1947년에 포웰(C.F. Powell)이 우주선(cosmic ray)을 연구하는 원자핵건판에서 발견된 궤적을 분석하여 밝혀졌다.

5. 표준모형

입자물리의 모든 현상은 네 가지의 기본힘과 렙톤, 쿼크 그리고 매개입자로 구성된 기본입자 세 가지 가족으로 설명하는데 이렇게 기술하는 모형을 입자물리의 표준모형(standard model)이라고 한다.

전자는 매우 간단한 구조의 기본입자이다. 현재까지 연구에 의하면 크기도 없고 구조도 갖지 않는 점입자로 보고 있다. 전자는 크기와 구조와 없는 경입자(lepton)라고 불리는 여섯 가지 입자 가족의 일원이다.

양성자와 중성자는 전자와는 달라서 쿼크라는 점입자의 집합으로 구성되어 있다. 쿼크도 경입자와 같이 여섯 개의 식구로 구성된 가족이 있다.

1) 경입자(lepton)

경입자라는 말은 가볍다는 의미를 가지고 있다. 그러나 경입자를 규정하는 것이 가벼운 특성이라기보다는 강한 상호 작용에 관련되지 않은 입자라고 보는 것이 더 타당하다. 중력, 전자기력 그리고 약력에 의해 작용되고

입자–반입자 쌍으로 생성되거나 소멸하며 전체 렙톤 수는 항상 보존된다라는 성질에 의해서 정의된다.

경입자에는 여섯 가지 입자가 있다. 하전 경입자인 전자(e), 뮤온(μ), 타우(τ)와 전기중성 경입자인 세 종류의 중성미자 (ν_e, ν_μ, ν_τ)가 있고 각각 반입자 여섯으로 구성된다. 이 입자들의 특성을 [표 Ⅴ-3]과 같이 타낸다.

[표 Ⅴ-3] 렙톤의 종류와 성질

경입자	기호	전하(e)	스핀	경입자수			질량 (MeV)
				L_e	L_μ	L_τ	
전자	$e-$	−1	1/2	1	0	0	0.511
중성미자	ν_e	0	1/2	1	0	0	0
뮤온	$\mu-$	−1	1/2	0	1	0	105.7
중성미자	ν_μ	0	1/2	0	1	0	0
타우	$\tau-$	−1	1/2	0	0	1	1777
중성미자	ν_τ	0	1/2	0	0	1	0

2) 강입자(hadron)

강입자는 강한 상호 작용을 하는 입자라는 뜻이다. 강입자는 경입자와는 달리 매우 복잡한 가족 구조를 가지고 있다. 강입자는 크게 두 가지 유형으로 나뉘는데, 하나는 중간자(meson)군이고 다른 유형은 중입자(baryon)군이다. [표 Ⅴ-4]은 현재 알려진 많은 강입자 중 몇 개를 보여준다.

중간자는 파이온, 케이온, η 중간자 등 여러 다른 입자들을 포함한다. 중간자의 스핀은 0 또는 1로써 모두 보존에 속한다. 안정한 중간자는 없고 모두 보다 가벼운 입자로 붕괴 가능하며 붕괴의 보존 법칙을 만족하는 범위 내에서 붕괴한다.

중입자는 핵자와 하이퍼론(hyperon)이라 불리는 Λ, Σ, ε, Ω 등의 입자를 포함한다. 하이퍼론은 핵자와 닮았으나 좀 더 무겁다. 중입자의 스핀은 반정수이므로 모두 페르미온(fermion)에 속한다. 자유 중성자는 양성자로 붕괴하고, 하이퍼론은 여러 붕괴 과정을 통해 다른 하이퍼론이나 핵자로 붕괴한다. 이때 중입자 수 보존의 원리를 만족해야 한다.

[표 Ⅴ-4] 강입자 가족

입자		질량 (MeV/c^2)	전하량 비 Q/C	스핀	중입자수 B	기묘도 S	평균 수명(s)	쿼크 구성
중간자	π^0	135.0	0	0	0	0	0.87×10^{-10}	$u\bar{u}$, $d\bar{d}$
	π^+	139.6	+1	0	0	0	2.6×10^{-8}	$u\bar{d}$
	π^-	139.6	−1	0	0	0	$2.6 \times \times 10^{-8}$	$\bar{u}d$
	K^+	493.7	+1	0	0	+1	1.24×10^{-8}	$u\bar{s}$
	K^-	493.7	−1	0	0	−1	1.24×10^{-8}	$\bar{u}s$
중입자	p	938.3	+1	1/2	1	0	안정	uud
	n	939.6	0	1/2	1	0	898	udd
	Σ^+	1189	+1	1/2	1	−1	0.797×10^{-10}	uus
	Σ^0	1193	0	1/2	1	−1	7.4×10^{-20}	uds
	Σ^-	1197	−1	1/2	1	−1	1.48×10^{-10}	dds
	ε^0	1315	0	1/2	1	−2	2.90×10^{-10}	uss
	ε^-	1321	−1	1/2	1	−2	1.64×10^{-10}	dss
	Δ^{++}	1232	+2	3/2	1	0	10^{-23}	uuu
	Ω^-	1672	−1	3/2	1	−3	0.822×10^{-10}	sss

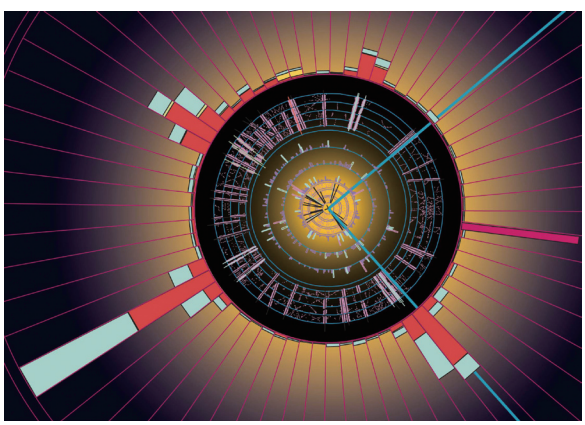
3) 쿼크(quark)

물질의 구조가 단순할 것이라고 생각하지만 수많은 입자들의 발견으로 혼란이 많았다. 과학자들은 보다 더 단순한 구조를 찾으려고 노력했다. 1963년 겔만(M. Gell-Mann)과 츠바이히(G. Zweig)는 각각 강입자가 보다 더 기본적인 입자들로 구성되었다고 주장했다. 겔만은 이를 쿼크라 불렀고, 츠바이히는 에이스라고 불렀다. 오늘날에는 쿼크라는 용어가 쓰인다. 겔만은 세 종류의 쿼크를 제안하였다. 그것은 업쿼크(up quark ; u), 다운쿼크(down quark ; d), 스트레인지쿼크(strange quark ; s)이다. 그런데 좀 더 많은 강입자들이 발견됨에 따라 더 많은 쿼크가 필요하게 되었고 오늘날에는 모두 6개가 존재한다는 확실한 증거들이 있다. [표 Ⅴ-5]는 쿼크의 종류와 그 성질들을 나타낸다. 쿼크 이론에 의하면 중간자는 두 개의 쿼크, 즉 쿼크와 반쿼크로 이루어져 있고, 중입자는 세 개의 쿼크로 이루어져 있다. 양성자를 예를 들면 구성쿼크가 uud이다. 이것의 전하는 $2/3 + 2/3 + (-1/3) = 1e$가 된다. π^-는 $\bar{u}d$로 되어 있어서 $-2/3 + (-1/3) = -1e$의 전하를 가진다.

이와 같은 방법으로 많은 종류의 강입자들에 대한 전하와 스핀들을 설명한다. 이러한 성공과 쿼크를 실험적으로 확인하지만 독립적으로 존재하는 실험적인 증거는 아직 없다. 쿼크는 항상 속박되어 있는 상태로 나타나기 때문에 분수전하가 아직 실험적으로 관측되지 않았다.

[표 V-5] 쿼크의 종류와 그 성질

쿼크	전하(e)	중입자 수	스핀	질량 (MeV/c^2)
u	2/3	1/3	1/2	2~8
d	−1/3	1/3	1/2	5~15
c	2/3	1/3	1/2	1000~1600
s	−1/3	1/3	1/2	100~300
t	2/3	1/3	1/2	180±12 GeV
b	−1/3	1/3	1/2	4100~4500



[그림 V-45] 페르미연구소의 D0 검출기에서 측정된 신호로 t-쿼크를 재구성한 사진

6. 보존법칙

불변원리와 보존법칙은 매우 중요한 역할을 한다. 예를 들면 에너지, 운동량, 각운동량 같은 물리량은 보존법칙이 있다. 현대물리에서는 대칭성과 보존법칙이 있는데, 대표적인 것이 중입자 수, 경입자 수, 색소(color), 패리티(parity), 기묘도(strangeness) 등이 있다. 중입자 수, 경입자 수, 색소의 보존법칙은 모든 상호 작용에 대해 성립하지만 패리티와 기묘도 보존법

칙은 강한상호 작용과 전자기 상호 작용에서만 보존되고 약한상호 작용에 대해서는 보존되지 않는다.

1) 에너지 보존법칙

총 에너지 $E = K + mc^2$은 항상 보존된다. 즉,

$$(\Sigma E)_{전} = (\Sigma E)_{후}$$

이다. 예를 들어 전자–양전자의 쌍소멸을 살펴보자.

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

이 상호 작용에서 전자–양전자쌍은 사라지고 두 개의 광자가 생긴다. 에너지 보존법칙으로 표현하면 다음과 같다.

$$E_{e^-} + E_{e^+} = E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}$$
$$m_{e^-}c^2 + m_{e^+}c^2 = E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}$$

전자나 양전자의 정지 에너지는 $m_e c^2 = 0.511$ MeV이다. 따라서

$$E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2} = 1.02 \text{ MeV}$$

이므로 두 개의 광자는 1.02 MeV를 나누어 갖는다.

2) 선운동량 보존법칙

반응 전의 운동량은 반응 후에도 그대로 나타난다. 전자–양전자 쌍소멸 과정에 운동량 보존을 적용하자. 반응 전에 운동량의 총합이 0이므로 반응 후에는 운동량 $\boldsymbol{p}_{\gamma_1} + \boldsymbol{p}_{\gamma_2}$도 0이어야 한다. 따라서

$$\boldsymbol{p}_{\gamma_1} = -\boldsymbol{p}_{\gamma_2}$$

이다. 그러므로 광자는 서로 반대 방향으로 운동한다. 따라서

$$(p_1 c)^2 = (p_2 c)^2$$

이고, 광자의 질량이 없으므로

$$E_{\gamma_1}^2 = E_{\gamma_2}^2$$

가 된다. $E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2} = 0.511$ MeV가 되므로 반대 방향으로 움직이고, 각각의 에너지가 0.511 MeV인 두 개의 광자는 전자–양전자의 쌍소멸의 결과가 된다.

3) 각운동량 보존법칙

상호 작용하는 입자들로 이루어진 계의 총 각운동량은 각각의 궤도 각운동량과 스핀 각운동량의 벡터 합이다. 총 각운동량의 보존은 항상 성립하지만 상당히 복잡한 과정을 가진다. 따라서 고유스핀 각운동량만 생각해 보자.

궤도 각운동량의 제곱은 양자역학적으로 $l(l+1)\hbar$로 표시된다. 이때 l은 정수이다. 스핀 각운동량의 제곱은 S^2로 $S(S+1)$로 표시되는데 이때 S는 정수이거나 반정수의 홀수배이다. 단일 페르미온의 경우 반정수의 홀수배의 스핀값을 갖는다. 즉, 양성자나 중성자는 스핀값이 1/2이다. 페르미온이 한 쌍이면 총 스핀은 정수가 된다. 세 개의 페르미온으로 이루어진 계는 반정수의 홀수배의 값을 가진다. 이 총 스핀값이 정수이거나 반정수의 홀수배인 것은 상호 작용의 처음 상태나 마지막 상태에서 같다. 처음 상태의 계가 홀수의 페르미온을 가지면 나중의 상태에도 홀수의 페르미온을 가져야 한다는 것이다.

2S의 값을 보면 페르미온에 대해서는 홀수, 보존에 대해서는 짝수가 되어야 한다. 따라서, $\sum 2S$를 처음상태와 나중상태를 보면 홀수성과 짝수성이 보존된다.

4) 전하량 보존법칙

반응 전후의 전하는 보존된다. 개별적으로 전하들은 생성되거나 소멸될 수 있지만 변화는 항상 쌍으로 일어나므로 전체 전하량의 변화는 없다. 예를 들면

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

에서 반응전의 전하량은 $-1+1=0$이다. 반응 후의 광자의 전하는 0이므로 전하량은 0으로 보존된다.

5) 중입자 수 보존법칙

모든 중입자는 중입자 수 $\mathrm{B}=1$을 가지며 모든 반중입자는 $\mathrm{B}=-1$을 갖는다. 그리고 중간자와 경입자는 $\mathrm{B}=0$을 갖는다. 이 중입자 수가 보존되지 않는 반응은 일어나지 않는다. 예를 들면

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0,\ \pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

에서 반응 전의 질량이 반응 후의 질량보다 크므로 양의 Q 값을 가지게 되며 항상 에너지 보존의 법칙을 만족한다. 그러나 이 과정은 일어나지 않는다. 에너지, 전하, 운동량, 각운동량 보존 법칙들을 다 만족시키지만 중입자 수 보존 법칙을 만족시키지 못해 일어나지 않는 반응이다. 중입자 수는 $+1 \rightarrow 0 + 0$으로 보존되지 않기 때문에 일어나지 않는 반응이다.

6) 경입자 수 보존법칙

모든 경입자는 경입자 수를 가지며 중간자와 중입자의 경입자 수는 0이다. 모든 상호 작용에서 각각의 경입자 수는 보존된다.

예를 들면

$$\begin{array}{rccccc} & \pi^+ & \rightarrow & \mu^+ & + & \nu_\mu \\ L_\mu: & 0 & & -1 & & 1 \end{array}$$

으로 붕괴 전후 경입자 수는 변화없이 보존된다.

그리고 이 뮤온은

$$\begin{array}{rccccccc} & \mu^+ & \rightarrow & e^+ & + & \nu_e & + & \overline{\nu}_\mu \\ L_\mu: & -1 & & 0 & & 0 & & -1 \\ L_e: & -1 & & 0 & & 0 & & -1 \end{array}$$

으로 거의 100% 붕괴한다. 이때 경입자 수 L_e와 L_μ가 각각 보존된다.

뮤온이 다음과 같이 붕괴하지 않는 이유는 경입자 수가 보존되지 않기 때문이다.

$$\begin{array}{rccccc} & \mu^+ & \rightarrow & e^+ & + & \gamma \\ L_\mu: & -1 & & 0 & & 0 \\ L_e: & 0 & & -1 & & 0 \end{array}$$

L_e와 L_μ가 모두 보존되지 않기 때문에 이 과정은 일어나지 않는다.

7) 기묘도 보존법칙

다음과 같은 과정을 살펴보자.

$$\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + \Sigma^+$$

이 과정은 중입자 수 보존법칙과 다른 법칙들을 다 만족하지만 일어나지 않는 과정이다. 그러나 다음 과정은

$$\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$$

흔히 일어나는 현상이다. 이 문제를 해결하기 위해 겔만과 니시지마(K. Nishjima)는 중입자들의 새로운 성질인 기묘도(strangeness)를 갖는다고 제안하였다. 기묘도 양자수는 S로 나타내며 보존법칙을 만족하게 된다. 스핀이 1/2인 중입자는 기묘도 양자수가 −1과 −2를 가진다. 여기서 핵자는 예외인데, 핵자는 기묘입자가 아니다. 즉, $S = 0$이다. 중간자는 $S = 0$이거나 +1이다. 기묘도는 강한 상호 작용에서 보존된다.

위의 첫 번째 예를 보면

$$0 + 0 \rightarrow 0 + (-1)$$

기묘도 법칙을 만족시키지 못한다. 그러나 두 번째 예는

$$0 + 0 \rightarrow 1 + (-1)$$

으로 기묘도가 보존되어 일어날 수 있는 반응이다.

연 습 문 제

1. 다음과 같은 강한 상호 작용이 있다.

$$K^- + p \rightarrow \pi^0 + x$$

이 때 x는 어떤 입자가 되겠는가?(K^-는 중간자이며 기묘도 $S = -1$이다.)

2. 다음과 같은 과정이 있다.

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$

(1) 전하와 스핀의 보존이 만족됨을 보여라.

(2) Λ^0가 정지 상태라고 가정하자. 이 때 p와 π^-의 에너지와 운동량을 계산하라. (Λ^0의 정지 상태 질량은 1115.6 MeV/c^2이고, p의 정지 상태 질량은 938.3 MeV/c^2, π^-의 정지 상태 질량은 139.6 MeV/c^2이다.)

3. 정지한 양성자가 다음과 같이 붕괴할 수 있는지 판단하여라.

$$p \rightarrow \pi^0 + \pi^+$$

양성자와 파이온의 특성은 [표 Ⅴ-3]과 같다. π^0는 전하가 0이고, 스핀이 0, 그리고 정지질량 에너지는 135.0 MeV이다.

4. 양성자와 중성자의 쿼크 구성은 각각 uud와 udd이다. 반양성자와 반중성자의 쿼크 구성은 어떻게 되는가?

5. 다음은 강한 상호 작용의 반응이다.

$$\pi^+ + p \rightarrow p + p + \overline{n}$$

보존법칙을 이용하여 반중성자에 대하여 다음을 답하여라.

(1) 전하의 양자수

(2) 중입자수

(3) 기묘도

6 현대 물리학의 검출기들

음극선, 광전 효과, X선, 원자핵 충돌, 방사능 붕괴 및 기본 입자 등에 대한 실험적 연구는 각각의 물리 현상에 해당되는 상호 작용에서 입사한 빛이나 입자가 남긴 흔적을 측정하는 검출기에 의존한다. 원자 수준보다 작은 입자들은 눈으로 보기에는 너무나 작다. 이들 입자들은 물질과 상호 작용에서 에너지라는 흔적을 남긴다. 여기서는 아주 간단한 수준의 검출기만을 다루겠지만 기본 원리는 아주 복잡한 검출기들의 원리와 무척이나 비슷하다. 역사적으로 의미있었던 검출기는 현재 교육적인 목적으로 사용되는 경우도 있다. 이들 검출기와 관련한 기술은 공학, 의학 등 다른 여러 분야에서도 핵심적인 역할을 하고 있다. 이 절에서는 현대 물리학의 검출기들이 어떻게 작동하며 어떤 입자의 검출에 활용되는지 다룬다.

1. 전기 방전관과 전자의 비전하 측정

톰슨은 전자 비전하 측정 값은 현재 인정되고 있는 값보다 훨씬 작은 값을 얻었다. 현대에 이르러서는 더욱 개량된 방전관으로 전자의 비전하를 측정하는데 어느 정도 정확한 측정이 가능하다. 이 방법의 실험 장치는 톰슨의 원래 실험 장치와 달리 열음극과 전자총이 달려 있고 영구 자석 대신에 헬름홀쯔 코일을 이용한 방전관을 사용한다. 열음극은 발생시키는 전자의 양을 조절할 수 있고, 헬름홀쯔 코일은 발생시키는 자기장의 크기를 조절할 수 있다. 이 자기장은 움직이는 전자를 원운동하게 만든다.

전하량이 q인 입자가 속도 $\boldsymbol{v}$로 자기장의 크기 $\boldsymbol{B}$ 속을 운동하면 입자에 작용하는 자기력 $\boldsymbol{F}_m$은 $\boldsymbol{F}_m = q\,\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$로 주어진다. 여기서 $\boldsymbol{F}_m$, $\boldsymbol{v}$, $\boldsymbol{B}$ 는 벡터이고 $\times$는 벡터 곱이다. 전자가 자기장에 수직으로 운동하면, 다음과 같은 스칼라 형태로 쓸 수 있다.

$$F_m = evB \qquad (\text{V. } 6\text{-}1)$$

여기서 e는 전자의 전하량이다.

전자가 원을 그리면서 움직이면, 다음과 같은 크기의 구심력을 느끼게 된다.

$$F_c = mv^2/r \qquad (\text{Ⅴ. 6-2})$$

여기서 m은 전자의 질량, v는 속도 그리고 r은 원운동의 반경이다. 전자에 자기장에 의한 힘만이 작용할 때, $F_m = F_c$이고, 식 (Ⅴ. 6-1)과 식 (Ⅴ. 6-2)를 결합하여 식 $evB = mv^2/r$ 또는 다음을 얻는다.

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br} \qquad (\text{Ⅴ. 6-3})$$

따라서 e/m을 결정하기 위해서는, 전자의 속도, 헬름홀츠 코일에 의한 자기장 그리고 회전하는 전자의 반경만 알면 된다.

전자들은 가속 전압 V속에서 가속되어, 전하량과 가속 전압의 곱에 해당하는 운동 에너지를 얻는다. 즉 $eV = \frac{1}{2}mv^2$이다. 따라서 전자들의 속도는 다음과 같다.

$$v = \left(\frac{2eV}{\mathrm{m}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (\text{Ⅴ. 6-4})$$

헬름홀츠 코일 쌍의 축 근처에 형성되는 자기장은 다음과 같이 주어진다.

$$B = \frac{[N\mu_0]I}{(5/4)^{3/2}a} \qquad (\text{Ⅴ. 6-5})$$

식 (Ⅴ. 6-4)와 식 (Ⅴ. 6-5)를 식 (Ⅴ. 6-3)에 대입하여 전자의 비전하 e/m를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br} = \frac{2V(5/4)^3a^2}{(N\mu_0 Ir)^2} \qquad (\text{Ⅴ. 6-6})$$

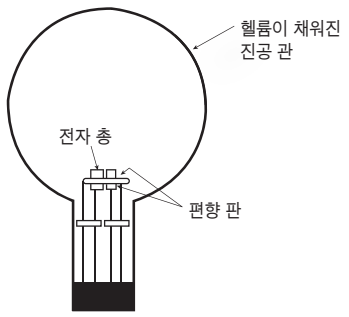
여기서 V는 가속전압, a는 헬름홀츠 코일의 반경, N은 헬름홀츠 코일의 감은 수, μ_0는 투자율 상수 $4\pi \times 10^{-7}$, I는 헬름홀츠 코일의 전류이며 r은 전자빔 경로의 반경이다.

실험 헬름홀츠 코일을 이용한 전자의 비전하 측정

준비물 일체형 전자 비전하 측정 장치

실험 장치

1. 1897년 톰슨이 사용한 방법과 비슷한 일체형 전자 비전하 측정 장치가 [그림 Ⅴ-47]에 그려져 있다. 전자빔이 알려진 전압 속에서 가속되면, 전자들의 속도를 알 수 있다. 헬름홀츠 코일 한 쌍이 균일하고 측정 가능한 자기장을 전자빔과 수직으로 만든다. 이 자기장은 전자빔이 원을 그리도록 편향시킨다. 가속 전압 V, 헬름홀츠 코일의 전류 I, 전자빔이 그리는 원형 경로의 반경 r을 측정함으로써, 비전하를 쉽게 계산할 수 있다.



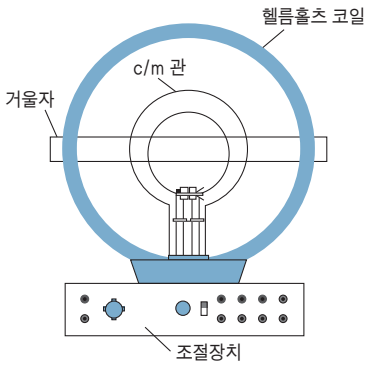
[그림 Ⅴ-46] 방전관 내부도

2. [그림 Ⅴ-46]에 10^{-2} mmHg 압력으로 헬륨이 채워져 있고, 전자총과 편향판이 있는 방전관이 있다. 전자빔은 관 속에 눈에 보이는 꼬리를 남기는데, 이유는 전자들이 헬륨 원자와 충돌하여 원자가 들뜬 상태에 있다가 가시광을 내기 때문이다.
3. [그림 Ⅴ-46]은 전자총의 구조다. 가열장치가 음극을 가열하면 전자들이 방출된다. 전자들은 음극과 양극 사이에 걸린 전압에 의해 가속된다. 그리드는 음극에 대해 +로, 양극에 대해 −로 유지된다. 이는 전자빔을 모으는 역할을 한다.
4. 헬름홀츠 코일은 매우 균일한 자기장을 제공하는데 이 코일이 만드는 자기장의 값은 식 (Ⅴ. 6-5)와 같이 코일에 흐르는 전류와 코일의 기하학적인 모양에 의존되는 값이다. 조종장치 패널은 간단하다. 모든 연결들이 표시되어 있다. 천 덮개는 밝은 방에서 실험을 수행할 수 있도록 장치의 윗부분을 덮을 수 있다. 거울 자는 헬름홀츠 코일 후면에 붙어 있다. 전자총에 전원이 들어오면 자동적으로 불이 켜져 빛이 비쳐진다. 전자빔을 거울 자 속의 상에 나란하게 정렬시킴으로써, 빔 경로의 반경을 시각적 오차 없이 측정할 수 있다.

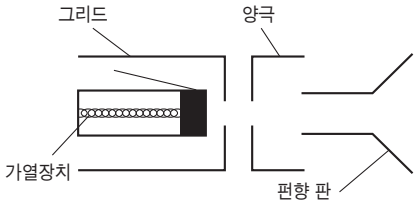
과정

1. 밝은 곳에서 실험하는 경우 장치 위에 덮개를 덮고 토글 스위치를 측정 위치에 놓는다.
2. 헬름홀츠 코일의 전류 조절 단자를 OFF 위치로 돌리고 전원 공급 장치와 전압

계, 전류계 단자를 측정 장치의 단자에 바르게 연결한다.



[그림 Ⅴ-47] **일체형 전자의 비전하 측정 장치**



[그림 Ⅴ-48] **전자 총**

3. 전원 공급 장치의 전압 크기를 조절한다. 가열장치의 전압은 관에 적혀 있는 전압 6.3 VAC 또는 VDC로 한다. 전극 전압은 150~300 VDC로 하며 헬름홀츠 코일에는 6~9 VDC를 걸어 준다.
4. 헬름홀츠 코일에 전류가 흐르도록 천천히 전류 조절 단자를 돌린다. 전류계를 주시하여 전류가 2A를 초과하지 않도록 주의한다.
5. 음극이 가열되도록 10분간 기다린다. 가열되면, 전자총에서 전자빔이 나와 헬름홀츠 코일의 자기장에 의해 휘어지는 것을 볼 수 있다. 전자빔이 헬름홀츠 코일과 나란한 것을 확인한다. 나란하지 않다면, 그렇게 될 때까지 관을 돌린다. 이때 관을 소켓 밖으로 빼내지 않도록 유의한다.

정리

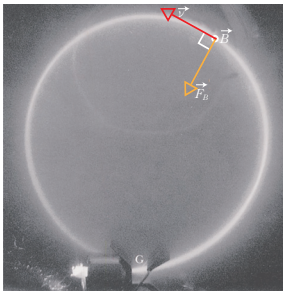
1. 전류계에 나타난 헬름홀츠 코일의 전류와 전압계에 나타난 가속 전압을 신중하게 읽는다. 아래에 값을 기록한다.

   헬름홀츠 코일의 전류 $= I =$
   가속 전압 $= V =$

2. 전자빔의 반경을 신중하게 측정한다. 관 속의 전자빔을 관찰한다. 시각적인 오차를 피하기 위해 전자빔과 거울 자 속에 보이는 전자빔의 상이 정렬되도록 머리를 움직인다. 자 양쪽에 보이는 빔의 반경을 측정한 후, 평균값을 구한다. 결과를 아래에 기록한다.

   전자 빔 반경 $= r =$

3. 위의 자료를 토대로 전자의 비전하를 계산한다. 참고로 시각적으로 관찰되는 전자 궤도의 사진이 [그림 Ⅴ-49]에 있다.

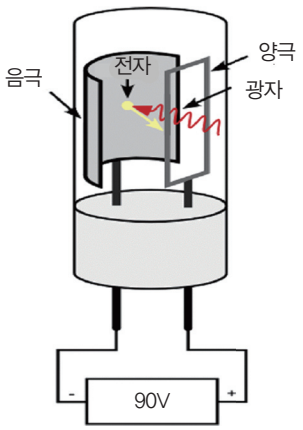


[그림 Ⅴ-49] **전자 궤도의 예시**

결론 및 논의

1. 각자 구한 값과 톰슨의 원래 실험값 1.0×10^{11} C/kg과 비교해 보자. 수소 이온의 전기 분해로 얻은 값은 수소에 대한 값은 대략적으로 $\sim 10^{8}$ C/kg이었다. 현재 전자의 비전하 값으로 인정되는 값은 1.758803×10^{11} C/kg이다. 현재 인정되는 값과 비교하여 이 실험에서 측정한 값의 오차가 주로 어디서 왔다고 생각하는가?
2. 더욱 정확한 측정을 위하여 개선할 점은 무엇인가?
3. 헬륨 기체와 전자의 어떤 상호 작용으로 기체가 발광하는 원리가 무엇인가?
4. 이 실험을 통하여 전자의 원 운동 속력을 어떻게 구할 수 있겠는가? 여기서 구한 전자의 속력을 빠르다고 생각되는 물체들의 속력과 비교해 보자.

2. 광전관과 플랑크 상수의 측정



[그림 Ⅴ-50] 광전관의 개략도

광전관은 빛의 광전 효과를 이용하여 빛을 전자의 흐름 즉 전기적인 신호로 만드는 진공관이다. [그림 Ⅴ-50]의 광전관 내부는 진공으로 만들거나 혹은 낮은 압력의 기체를 채울 수 있으며 자외선부터 근적외선까지의 빛에 광전 효과를 일으킬 수 있도록 제작될 수 있다. 광전관으로 입사한 빛은 광전 음극 면에서 광전자를 방출하며 이 광전자는 양극과 음극에 사이 전기장에 의하여 가속되어 양극으로 도달하여 전류 신호를 발생시킨다

실험 광전관을 이용한 플랑크 상수의 측정

준비물 광전 효과 측정 장치, 광학 필터, 수은 램프

실험 장치

1. 광학필터 박스에서 수은램프 뚜껑으로 수은광원의 창을 닫는다. 광학필터 박스에서 포토다이오드 뚜껑으로 포토다이오드의 창도 닫는다.
2. 전원 공급 장치의 전원과 수은등을 켠다. 광전 효과 검출기의 전원버튼을 눌러

작동이 되게 한다.

3. 광원과 광전관이 잘 작동되도록 20분 동안 예열한다. 이때 주의할 점은 어떤 측정을 하든지 광원과 광전관을 20분 동안 예열하는 것이 아주 중요하다.
4. 검출기에서 전압 스위치는 −2~0 V가 되도록 놓고, 전류 스위치는 최소가 되게 한다.
5. 전류 증폭기가 0이 되게 하기 위해 먼저 광전관의 양극 단자 A 및 음극 단자 K를 측정 장치와 연결을 끊는다.
6. 전류 보정을 하기 위해 광전관 신호 버튼을 누른다. 그리고 전류량이 0이 될 때까지 전류 보정 스위치를 조정한다.
7. 광전관 신호 버튼을 눌러 측정을 시작한다.
8. 단자 A 및 K를 측정 장치와 다시 연결한다.

과정

1. 광전관 봉입창을 열고, 직경 4 mm 구경과 365 nm 필터를 창 위쪽으로 배치한다. 이때 주의할 점은 광전관 창 위에 항상 필터를 놓아야 한다. 그리고 필터나 구경을 바꿀 때 수은 광원의 뚜껑을 덮는다. 광전관에 수은 광원의 빛이 직접 닿아서는 안 된다.
2. 수은 광원 소스의 창을 연다. 365 nm 파장의 스펙트럼 선이 광전관의 음극에 비쳐질 것이다.
3. 전원 조절 스위치를 전류가 0이 될 때까지 조절하고 365 nm 파장의 저지전압의 크기를 [표 Ⅴ-6]에 적는다.
4. 수은 광원의 창을 닫고 365 nm 필터 대신 405 nm필터를 놓는다.
5. 수은 광원의 창을 연다. 405 nm 파장의 스펙트럼 선이 광전관의 음극에 비쳐질 것이다. 전원 조절 스위치를 전류가 0이 될 때까지 조절하고 405 nm 파장의 저지전압의 크기를 [표 Ⅴ-6]에 적는다.
6. 수은 광원의 창을 닫고 다른 필터들을 이용해서 측정을 반복한다. 각 파장별 저지전압의 크기를 [표 Ⅴ-6]에 적는다.

[표 Ⅴ-6] 4 mm직경 구경의 저지전압 스펙트럼 선

	1	2	3	4	5
파장 λ[nm]	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
진동수 $f=\frac{c}{\lambda}$ [×10¹⁴ Hz]	8.214	7.408	6.879	5.490	5.196
저지전압 V [V]					

정리

위에서 얻은 측정 자료를 다음과 같은 요령으로 분석한다.

1. 진동수[$\times 10^{14}$Hz]에 따른 저지전압 V의 그래프를 그린다.
2. 진동수[$\times 10^{14}$Hz]에 따른 저지전압 V의 그래프의 데이터를 통해 최적의 기울기 값을 찾는다.
3. 계산된 기울기를 기록하고, 이것을 플랑크 상수 h를 계산하는데 사용한다. 플랑크 상수는 $h = e \cdot$ 기울기로 얻는다.
4. 기울기의 오차와 결과의 고유값의 정수를 평가해 보아라. 계산값 h를 인정하고 있는 일반적인 상수값 h_0(6.626 × 10 − 34 J · s)와 비교해 보아라.
5. % 오차를 계산한다.

결론 및 논의

1. 일반적인 상수 h_0와 이 실험에서 구한 상수 h는 얼마나 차이가 나는가?
2. 위의 두 값이 차이나는 이유가 무엇이라고 생각하는가?
3. 진동수에 따른 저지전압 그래프로부터 일함수 값을 어떻게 찾을 수 있나?

현재 인정되고 상수값 h_0와 각각의 다른 구경에서 계산된 h의 차이는 얼마가 되는가? 이러한 차이의 주요 원인은 무엇이라고 생각하는가? 신뢰할 만한 실험값을 얻기 위한 한 가지 가능성은 기울기를 계산하는데 있을 수 있다. 통계적으로 엄밀한 기울기를 계산 할 필요가 있다.

광전관에는 진공 광전관과 비활성 기체를 약간 넣어 밀봉한 기체 광전관이 있다. 진공 광전관은 출력 전류가 입사하는 빛의 양에 정비례하며, 주파수 특성이 좋으므로 측정 장치에 주로 사용한다. 기체 광전관은 광전 음극면에서 나온 전자가 관 속의 기체 분자와 충돌하여 전리를 일으키고 이때 생긴 전자가 양극에 이르게 되므로 진공 광전관보다 10~100배의 높은 출력 전류를 얻을 수 있다. 그러나 양극 전압이 너무 높아지면 양극에 이르는 전류가 급증하여 방전이 일어나게 되어 사용할 때 주의해야 한다. 한편, 광전관의 전류 출력을 높이기 위한 또 다른 방법으로 광전 음극 면과 양극 사이에 다이노드로 불리는 전극을 여러 개 넣어 광전류를 증폭하는 광전자 증배관도 널리 사용된다.

3. 안개상자 제작과 양전자의 발견

❖ 우주선(cosmic ray)
우주에서 지구로 쏟아지는 입자들로 대기로 직접 입사하는 1차 우주선과 대기와 상호 작용하여 생긴 2차 우주선으로 구분할 수 있다.

안개상자는 알파선이나 베타선 또는 우주선 뮤온과 같은 방사선을 시각적으로 관측하는 장치이다. 최초의 안개상자는 1910년경 스코틀랜드의 윌슨(C. Wilson)이 발명한 단열 팽창형 안개상자였다. 단열 팽창형 안개상자는 용기를 순간적으로 팽창시켜 짧은 시간 동안 과포화 상태가 되는 것을

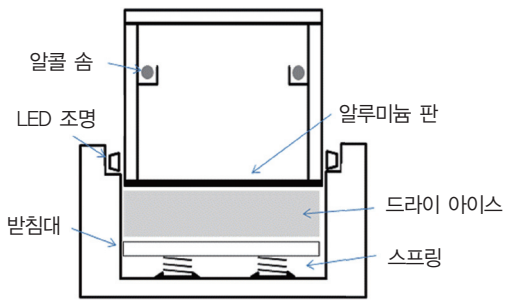
이용하였다. 이후에 1939년경에 확산형 안개상자가 개발되어, 용기의 하부를 냉각하는 방법으로 방사선을 연속적으로 관찰할 수 있게 되었다.

과포화 상태의 이소프로필 알콜 기체 사이로 방사선이 통과할 때 생기는 액체 방울로 방사선의 궤적을 관찰할 수 있는 검출기이다. 과포화 된 알코올 기체가 있는 곳을 빠른 속도의 방사선이 지나가면 질소와 산소, 알콜 등의 분자의 최외각의 전자가 떨어져 나가 이온이 된다. 이 이온들이 응결핵이 되어 과포화 상태의 알코올 분자들이 모이게 되고 결국 커다란 액체 방울이 되어 눈에 보일 수 있는 안개가 만들어진다. 이 알코올 안개에 빛을 비춰주면 빛의 산란에 의해서 액체 방울이 더욱 잘 관찰된다. 기본적인 안개상자는 비교적 간단하게 만들 수 있다.

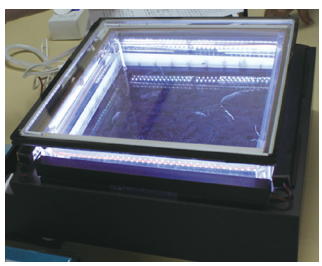
❖ **뮤온(muon)**

기본 입자의 하나로써 렙톤의 두 번째 세대에 속한다. 전하를 띠며 전자보다 약 207배 정도 무겁다. 2차 우주선에서 많이 발견된다.

실험 안개 상자의 제작



[그림 Ⅴ-51] 안개 상자의 구조도



[그림 Ⅴ-52] 안개 상자

준비물

1. 투명 육면체 상자 제작용 두께 10 mm 아크릴 판과 아크릴 접착제
2. 두께 5 ~ 10 mm 알루미늄 판과 무광택 흑색 도료
3. 길이 15 cm의 드라이 아이스 지지용 스프링 4개
4. LED 막대 3개와 LED 전원 공급기
5. 드라이 아이스 보관통
6. 솜과 이소프로필 알콜 1병

과정

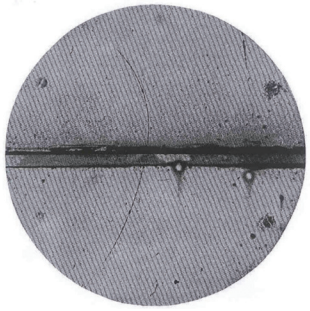
먼저 [그림 Ⅴ-51]을 숙지한다. 안개 상자를 만드는데 필요한 재료와 제작 순서는 다음과 같다. 재료의 크기는 임의로 조정이 가능하다. 먼저 투명한 폴리카보네이트 아크릴을 구하여 밑면이 없는 상자를 만든다. 만들어진 상자를 알루미늄판 위에 올려 놓는다. 다음으로 목재 드라이 아이스 보관용 목재함을 만든다. 드라이 아이스

를 떠 받칠 수 있는 적당한 목재 받침대 판과 스프링을 목재함에 장착한다. 드라이 아이스가 목재함에 장치되면 스프링에 의해 드라이 아이스는 알루미늄 판의 아래에 밀착되게 된다. 만들어진 목재함 위에 알루미늄 판을 깔고 그 위에 아크릴 상자를 놓는다. 마지막으로 LED를 아크릴 상자의 하부 네 변에 설치하고 전원을 공급하여 점등한다. 아크릴 내부 상단에는 탈지면 거치대를 설치하고 탈지면을 넣어 둔다. 탈지면은 이소프로필 알콜을 흠뻑 적셔 놓는다. 그리고 상자 내부의 알루미늄 판은 무광택 흑색도료로 칠한다. 아크릴 상자 내의 흑색 알루미늄 판에도 이소프로필 알콜을 흠뻑 뿌려 둔다. [그림 Ⅴ-52]에 완성된 안개 상자가 있다.

결론 및 논의

1. 안개 상자에서 궤적이 보이는 이유를 설명할 수 있는가?
2. 이소프로필 알콜을 사용하는 이유는 무엇인가? 왜 에틸알콜이나 메틸알콜은 사용할 수 없는가?
3. 알파선의 궤적과 베타선의 궤적의 차이를 설명할 수 있는가?

안개 상자에서 관찰되는 것은 하전 입자가 지나간 흔적이다. 따라서 알파선 베타선 또는 우주선 뮤온 등의 하전된 방사선은 안개상자로 관찰 가능하다. 감마선은 직접 전리를 일으키지 않으나 감마선과 상호 작용한 알콜 원자와 분자에서 튀어나온 2차 전자로 인하여 궤적의 관측이 가능하다.



[그림 Ⅴ-53] **안개 상자에서 최초로 발견된 양전자**

역사적으로 안개 상자를 통해서 여러 가지 훌륭한 물리학적 성과를 얻을 수 있었다. 1924년, 러더포드는 질소에 알파 입자를 쏘아서 산소와 중성자로 변환시키는 핵반응을 안개상자로 보였다. 1932년에는 앤더슨(C. Anderson)이 [그림 Ⅴ-53]과 같이 안개 상자에서 양전자를 촬영하여 디랙(P. Dirac)의 **양전자**의 존재를 입증하였다.

4. 불꽃 상자와 뮤온 뉴트리노의 발견

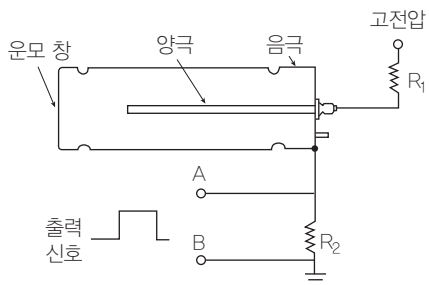
불꽃 상자는 우주선 뮤온 등을 시각적으로 관측할 수 있는 장치이다. 상자의 내부는 불활성 기체에 여러 개의 도체 판들이 간격을 두고 쌓여져 있다. 높은 에너지의 방사선이 입사함과 동시에 고전압 펄스가 도체 판에 가해진다. 고전압이 가해지면 방사선이 지나간 위치에 기체가 이온화가 되었

기 때문에 그 지점의 틈 사이에 방전불꽃이 발생된다. 이때 고전압은 이온화된 기체가 사라지기 전에 가해져야 한다. 입자가 여러 개의 도체 판 사이를 통과했다면 방전불꽃들이 긴 선으로 이어져 입자의 궤적을 확인할 수 있다. 만약 도체 판이 전선 망으로 되어 있다면 망은 좌표계를 정의하므로 각각의 불꽃이 방전되는 위치가 미리 결정되고 그 데이터는 컴퓨터에 의해 저장되어 방사선이 지나간 위치를 분석할 수 있다.

[그림 Ⅴ-54] **불꽃 상자와 우주선 뮤온 궤적**

불꽃 상자는 1948년 독일의 케펠(Keuffel)에 의해 그 원형이 개발되었고 1950년대 이후 다양하게 발전되었다. 1960~70년대에는 입자물리학 연구에서 가장 널리 사용되는 검출기의 하나가 되었다. 1962년에는 레더만(Lederman) 등이 불꽃 상자에서 **뮤온 뉴트리노**를 최초로 발견하여 노벨상을 수상하였다. [그림 Ⅴ-54]에 현대적인 불꽃 상자가 있다.

5. 가이거 계수기와 알파, 베타 및 감마선의 측정



[그림 Ⅴ-55] **가이거 계수기**

가이거(Geiger) 계수기는 방사선에 대한 일반적인 측정에 매우 유용한 검출기로서 알파, 베타 그리고 감마선의 종류를 분별하지 않고 검출하는 장치이다. 불활성 기체로 채워진 음극인 원통형 도체와 원통의 축을 따라 놓인 양극 도선 및 방사선이 입사되는 얇은 운모 창으로 이루어진 [그림 Ⅴ-55]와 같은 간단한 구조로 되어 있다. 접지된 원통과 도선 사이는 고전압이 있어서 강한 전기장이 형성된다.

가이거 계수기에 입사한 방사선이 알파나 베타선과 같은 하전 입자인 경우, 이들 방사선이 검출되는 원리는 다음과 같다. 운모 창을 통해서 원통 내부로 입사한 하전된 방사선은 내부 기체를 직접 전리시켜 전자-이온 쌍을 만든다. 입사한 방사선은 에너지를 모두 손실할 때까지 계속 새로운 전자-이온 쌍을 만든다. 한편, 새로운 전자나 이온도 전기장에 의해 매우 빠른 속도로 가속되어 연속적으로 기체를 전리시킨다. 입사한 방사선이 에너지를 모두 손실할 때까지 계속되는 이러한 연속적인 반응에서 결과적으로 양극으로 끌리는 전자의 개수가 매우 크게 증폭된다.

가이거 계수기 내부에서 크게 전자가 크게 증폭되므로 나중에 회로적인 증폭기가 별도로 없어도 양극 도선에서 검출 가능한 전류 신호를 만든다. 보통 가이거 계수기에서 만들어지는 전자–이온의 쌍은 대략적으로 일정하고 $\sim 10^{10}$ 개 정도이다. 가이거 계수기는 입사되는 방사선의 종류나 에너지에 따라서 출력 전압 신호 크기가 일정하다는 특성이 있지만 크기가 작고 가장 널리 쓰이는 간편한 방사능 검출기이다. 이 신호는 소리나 빛의 형태로 쉽게 전환할 수 있다.

예제 내부 기체를 평균 이온화 에너지가 42 eV 인 헬륨으로 채운 가이거 계수기가 있다. 이 계수기의 전자 증폭도는 1×10^6, 전기 용량은 1 nF 이다. 운동 에너지가 0.5 MeV 인 베타선이 입사하여 계수기 내부에 모든 에너지를 순간적으로 손실하는 경우 양극의 전압 변동치는 얼마가 되겠는가?

풀이 이 경우에 입사하는 베타선이 에너지를 모두 손실할 때까지 만드는 전자의 개수 n 은 대략적으로

$$n = \frac{0.5 \times 10^6\,\mathrm{eV}}{42\,\mathrm{eV}} \approx 12{,}000$$

이 된다. 만일 이 전자들만 모두 양극으로 붙는 경우의 출력 전압 신호는

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{ne}{C} = \frac{(12 \times 10^3)(1.6 \times 10^{-16}\mathrm{C})}{10^{-9}\mathrm{F}} \approx 2 \times 10^{-6}\mathrm{V}$$

이 된다. 한편 전자 증폭을 고려하면 가이거 계수기에서는 입사하는 베타선의 에너지와 관계 없이 예측되는 이온쌍의 숫자는 대략적으로 1×10^{10} 개 정도이다. 따라서 이 경우 순간적인 출력 전압 신호는

$$V = \frac{(2 \times 10^{-6}V)(1 \times 10^{10})}{12 \times 10^3} \approx 1.6\mathrm{V}$$

가 된다. 이 정도의 출력 전압 신호는 오실로스코프로 쉽게 관찰된다.

한편, 가이거 계수기에 입사하는 방사선이 감마선과 같이 전하를 갖지 않는 광자인 경우, 가이거 계수기 내부 기체의 전리는 광자에 의하여 직접 이루어지지 않는다. 감마선이 물질과 일으키는 전자기 상호 작용은 현상적으로 광전 효과, 컴프튼(Compton) 산란 및 쌍생성의 과정으로 구분할 수 있다. 이들 세 가지 현상에서 공통적으로 전자가 생기는데 이들을 각각 광전자, 컴프튼 전자 및 쌍생성 전자–양전자라고 부른다. 이 과정으로 생긴

전자들이 가이거 계수기의 전기장에서 가속되어 기체 분자를 직접 전리시킨다. 광자와 같은 감마선은 기체 물질을 직접 전리하지 않고 간접 전리시킨다. 이후의 과정은 하전 입자를 검출하는 경우와 원리가 같다.

실험 가이거 계수기를 이용한 감마선의 측정

준비물

1. 일반적인 단창형 가이거 관과 가이거 관 거치대
2. 감마선원으로서 밀봉된 1 μCi의 Cs-137 동위 원소와 거치대에 선원을 장치하는 사각형 플라스틱
3. 고전압공급기와 시계가 내장된 계수율 측정 장치

과정

1. 계수 장비의 동작 방법을 익힌다. 주의할 점은 가이거 계수기에 고전압을 인가한 상태로는 이동하지 않아야 한다. 우선 단창형 가이거관을 거치대에 설치한 후에 자연 방사능의 계수율을 측정한다.
2. 계수기에서 1 cm 되는 곳에 감마선 선원을 놓고 4,000~5,000 개를 계수하도록 충분한 시간 동안 계수한다. 거리를 1 cm씩 증가시키면서 계수 통계의 조건을 만족시키도록 충분한 시간 동안 계수한다. 이 결과를 [표 Ⅴ-6]에 기록한다. 한 위치에서 최소 2번 이상 측정한다.
3. 계수율을 환산하고 자연계수율을 뺀다. 계수율과 거리 R, 계수율과 $1/R^2$의 그래프를 작성한다.
4. 선원의 위치를 변화시키며 계수율을 측정한다. 거리에 따른 역자승 법칙의 성립을 확인한다.

정리

[표 Ⅴ-7]에 실험 자료를 기입한다. 순 방사능은 총 방사능에서 배경 방사능을 뺀 값이다. 거리를 변화시키면서 측정하여 역자승 법칙을 확인해 본다.

[표 Ⅴ-7] 역자승 법칙의 확인을 위한 표

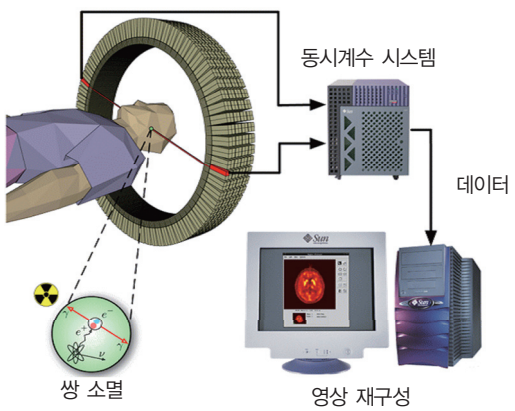
거리(R), cm	총 방사능	순 방사능	$1/R^2$
1			
2			
3			

결론 및 논의

1. 감마선의 계수가 거리에 따라 역자승 법칙이 성립하는 이유는 무엇인가? 보통의 빛에서 역자승 법칙이 성립하는 방식과 같다는 것은 무엇을 의미하는가?
2. 가이거 계수기에서 적당한 작동 전압이 필요한 이유는 무엇이라고 생각하는가?
3. 가이거 계수기로 알파 입자를 측정하는 경우에 선원과 계수기 사이의 거리는 어떻게 두어야 할지 토론해 보자.

6. 핵의학 영상물리 검출기

양전자방출 단층촬영장치 PET(positron emission tomography)는 양전자와 섬광검출기를 이용한 대표적인 영상물리 검출기이며 의학에서 진단 기술의 표준이 되고 있다. 1936년 사이크로트론(cyclotron)이 발명된 이후 이를 이용하여 다양한 종류의 방사선 동위 원소를 만들 수 있게 됨으로써 핵의학은 본격적으로 발전하기 시작하였다. 핵의학 영상측정은 1951년 카슨(B. Carson)이 최초로 핵의학 영상 주사기(scanner)를 개발한 것이 효시이지만, 1958년 앵거가 감마 사진기를 개발한 이후 임상적으로 본격적으로 활용되기 시작하였으며, 1970년대 이후 컴퓨터의 발달에 힘입어 PET가 개발되어 널리 활용되어 왔다. [그림 Ⅴ-56]에 PET의 개략도가 있다. 핵의학 영상기기의 가장 주요한 부분은 양전자와 일차적으로 반응하는 섬광검출기이다.

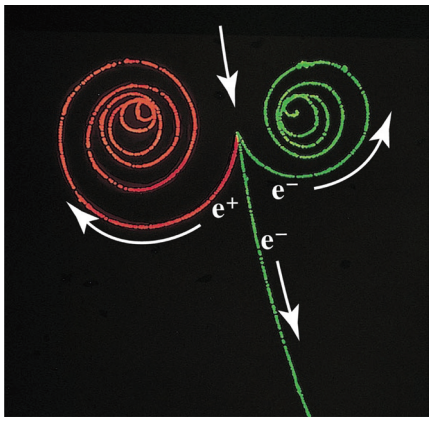


[그림 Ⅴ-56] 양전자 방출 단층촬영장치

양전자를 방출하는 ^{15}O, ^{11}C, ^{13}N 이나 ^{18}N 등의 방사능 동위 원소를 신체

속에 투입시키면 생리학적으로 방사능 물질들이 많이 누적되는 곳에서 이 양전자가 소멸되면서 두 개의 특유한 광자 신호를 동시에 내보내게 된다. 동시에 같은 에너지를 가지고 반대 방향으로 나오는 광자를 섬광검출기로 측정하면 광자가 출발한 신체 부위를 알아 낼 수 있다. 이 방법을 뇌에서의 혈액 흐름의 측정에 적용하면 뇌졸중이나 뇌종양 등을 진단할 수 있다.

양전자가 소멸하면서 특유한 광자 신호를 내보내는 원리는 다음과 같다. 양전자는 자연에서 우주선이나 몇몇 방사능 동위 원소의 붕괴 부산물로 발견된다. 그러나 양전자는 전자와의 상호 작용 때문에 수명이 아주 짧다. 양전자가 물질 속을 지나가면 원자와 충돌하여 빠르게 운동 에너지를 잃어버리고 정전기 인력에 의하여 전자를 끌어당겨 서로 주위를 도는 원자와 같은 포지트로니움(positronium)으로 된다. 결국에는 둘은 서로 부딪혀 광자를 방출하면서 소멸된다. 이 과정 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$를 쌍소멸이라 부른다.



[그림 Ⅴ-57] 쌍생성 과정

창의 탐구

미세구조 상수와 자연의 비밀

물리학에는 여러 가지의 상수가 등장한다. 빛의 속도, 전자의 질량과 전하량 그리고 진공의 유전 상수들과 같은 물리량은 언제 어디서 측정하든 같은 값을 갖는 것으로 여겨지고 있다. 따라서 이들 값은 자연 상수로 알려져 있다. 이들 상수는 매우 기본적인 값들로, 실제로 이 값들의 변화를 측정하기는 거의 불가능하다. 왜냐하면 이 변화량을 측정하는데 사용하는 장비들 역시 변하기 때문이다. 예를 들면 현재 존재하는 모든 원자의 크기도 이 값들에 의존한다. 만약 이 상수 값이 커지거나 작아진다면 원자들의 크기 역시 이에 따라 변화할 것이며, 이를 측정하는 장비들의 크기 역시 같은 비율로 변하여 모든 것이 정상인 것처럼 보이게 될 것이다. 따라서 그 변화를 측정하는 것은 극히 어려울 것이다. 현재 측정되는 이 상수 값들은 과연 빅뱅 이후 변하지 않았다고 확신할 수 있을까?

물리학의 상수는 단위가 있는 상수도 있고, 단위가 없는 상수도 있다. 빛의 속도, 전자의 전하량, 플랑크 상수, 볼츠만 상수, 진공의 유전율, 중력 상수 등은 단위가 있는 상수이다. 단위가 없는 상수로는 미세 구조 상수가 있다. 전자 질량과 양성자 질량의 비율도 역시 또 하나의 차원이 없는 상수이다. 미세 구조 상수는 원자를 결합시키는 전자기적인 힘의 크기를 정해 주는 상수로서 특별히 중요하다. 예를 들면 이 상수는 수소 원자의 보어 이론에서 찾아 볼 수 있다. 크기는 SI 단위로 $e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c = 1/137$이다. 상수의 크기는 원자들이 얼마나 강하게 결합되어 있는가를 결정한다. 다른 표현으로는 전자기장과 전하를 띠는 입자 사이의 상호 작용하는 힘의 크기를 결정하며 현재 관측되는 원자의 에너지 준위를 결정한다. 결과적으로 원자가 들뜨게 되었을 때 방출하는 복사광의 진동 수를 결정한다. 원자핵의 구조에도 커다란 영향을 주는데 핵의 양성자 사이의 척력의 크기와 핵자의 핵력 인력의 크기의 균형에도 큰 영향을 주며, 현재 우주에 존재하는 핵의 다양성을 설명하는 중대한 요인이 된다.

어떤 이유로 자연은 현재의 미세 구조 상수 값을 선택하였는지에 대한 설명은 아직 없다. 모든 것의 이론(Theory of Everything)에 기대할 수 있을까? 미세구조 상수가 1/150, 1/100이라면 안 되는가? 현재의 이 상수 값은 언제까지나 불변한 것일까? 한 가지 분명한 사실은 만약 미세 구조 상수값이 우연하게 1/150이나 1/100이었다면 지금 우리가 관측하는 세상은 존재하지 않았다는 점이다. 그 이유에 대하여는 각자가 생각해 보기로 하자.

아주 최근에 피지칼 리뷰 레터(Physical Review Letters)에 차원이 없는 물리 상수들의 시간에 따른 변화를 연구한 실험 결과가 보고되었다. 이 보고에 따르면 차

원이 없는 상수인 전자 질량과 양성자 질량의 비율이 시간에 따라 변하며, 미세 구조 상수 역시 시간에 따라 변한다는 것이다. 미세구조 상수는 특정 에너지 준위를 차지하고 있는 원자의 에너지 준위의 편이에서 관찰될 수 있기 때문에 미세 구조 상수 값이 시간에 따라 변한다면 원자의 천이 과정에서 발생하는 복사광 또는 흡수광의 스펙트럼에 변화 즉 편이가 나타나게 된다. 아주 먼 과거 시간 전에 원자에서 방출된 아주 오래된 복사광과 현존하는 원자들로부터 방출되는 아주 새로운 복사광을 비교하는 천문학적인 방법을 사용하여 60억년 동안 변화량이 백만분의 몇 정도의 극히 미세한 변화를 실험적으로 검출할 수 있었다.

부 록

- 1. 물리학사 연표
- 2. SI단위의 정의
- 3. 접두사
- 4. 그리스 문자
- 5. 중요 물리 상수
- 6. 연습 문제 풀이
- 7. 참고문헌 및 자료출처
- 8. 찾아보기

1. 물리학사 연표

연대	인명	국적	주요 업적
600경 B.C.	탈레스(Thales; 640?~546 B.C.)	그리스	마찰 전기 및 자기 현상 관찰
400경 B.C.	데모크리토스(Democritos; 460?~370? B.C.)	그리스	고대 원자론 제창
350경 B.C.	아리스토텔레스(Aristoteles; 384~322 B.C.)	그리스	형식 논리학 수립
250경 B.C.	아르키메데스(Archimedes; 287?~212 B.C.)	그리스	아르키메데스의 원리, 지레의 원리 및 원주율 발견
150경	프톨레마이오스(Ptolemaeos, Klaudius; 85?~165?)	그리스	천동설 및 지구가 구형임을 주장
1234		한국	(금속 활자 인쇄본 발간)
1441		한국	(측우기 제작)
14~16세기			(문예 부흥)
1500경	레오나르도 다 빈치(Leonardo da Vinci; 1452~1519)	이탈리아	광학, 역학, 조류의 비행 등의 과학적 연구
1543	코페르니쿠스(Copernicus, Nicolaus; 1473~1543)	폴란드	지동설 제창
1583	갈릴레이(Galilei, Galileo; 1564~1642)	이탈리아	진자의 등시성 발견
1586	스테빈(Stevin, Simon; 1548~1620)	네덜란드	비탈면에서의 힘의 평형, 힘의 평행사변형법 발견
1600	길버트(Gilbert, William; 1544~1603)	영 국	자석의 여러 성질 연구
1604	갈릴레이(Galilei, Galileo; 1564~1642)	이탈리아	물체의 낙하 법칙 발견
1609	케플러(Kepler, Johannes; 1571~1630)	독 일	케플러 제 1, 2 법칙 발표(새천문학)
1609	갈릴레이(Galilei, Galileo; 1564~1642)	이탈리아	망원경을 제작하여 천체 관측
1616	케플러(Kepler, Johannes; 1571~1630)	독 일	케플러 제 3법칙 발표(우주의 조화)
1620	베이컨(Bacon, Francis; 1561~1626)	영 국	과학 방법론 제시(신기관)
1620경	스넬(리우스)(Snellius, van Roijen Willebrord; 1591~1626)	네덜란드	빛의 굴절 법칙 발견
1632	갈릴레이(Galilei, Galileo; 1564~1642)	이탈리아	지동설지지(천문 대화)
1638	갈릴레이(Galilei, Galileo; 1564~1642)	이탈리아	가속도 운동, 관성의 법칙, 동역학의 기초 확립(신과학 대화)
1643	토리첼리(Torricelli, Evangelista; 1608~1647)	이탈리아	대기압 측정 토리첼리의 진공 발견
1644	데카르트(Descartes, René; 1596~1650)	프랑스	운동량 및 운동량 보존 개념의 도입
1656	호이겐스(Huygens, Christiaan; 1629~1695)	네덜란드	진자 시계 발명
1660	훅(Hooke, Robert; 1635~1703)	영 국	훅의 법칙 발견
1661	페르마(Fermat, Pierre de; 1601~1665)	프랑스	페르마의 원리 발견
1662	보일(Boyle, Robert; 1627~1691)	영 국	보일의 법칙 발견
1665경	그리말디(Grimaldi, Francesco Mario; 1618~1663)	이탈리아	빛의 회절 현상 발견
1666	뉴턴(Newton, Issac; 1642~1727)	영 국	빛의 분산, 미적분법 발견
1668	뉴턴(Newton, Issac; 1642~1727)	영 국	반사 망원경 발명
1676	뢰머(Römer, Ole Christensen; 1644~1710)	덴마크	목성의 위성 관측으로 광속 측정

1678	호이겐스(Huygens, Christiaan; 1629~1695)	네덜란드	빛의 파동설 주장, 호이겐스의 원리 발견
1686	라이프니츠(Leibniz, Gottfried Wilhelm Freiherr von; 1646~1716)	독 일	활력의 보존 제창
1687	뉴턴(Newton, Issac; 1642~1727)	영 국	만유 인력의 법칙 및 운동의 법칙을 확립 (자연 철학의 수학적 원리)
1724	파렌하이트(Fahrenheit, Gabriel Daniel; 1686~1736)	독 일	온도계의 눈금(화씨) 결정
1733	뒤페(Du Fay, Charles Francçois de Cisternay; 1698~1739)	프랑스	전기의 종류(+ , −)확인
1738	베르누이(Bernoulli, Daniel; 1700~1782)	스위스	베르누이 정리 발견
1742	셀시우스(Celsius, Anders; 1701~1744)	스웨덴	온도계의 눈금(섭씨)결정
1752	프랭클린	미 국	번개의 본성 확인
1765	와트(Watt, James; 1736~1819)	영 국	복수기를 사용한 증기 기관 발명
18세기 후반			(산업혁명의 시작)
1772	캐번디시(Cavendish, Henry; 1731~1810)	영 국	자기 , 전기의 정전기력에 관한 기초연구
1785	쿨롱(Coulomb, Charles Augustin de; 1736~1806)	프랑스	쿨롱의 법칙 발견
1787	샤를(Charles, Jacques Alexandre César; 1746~1823)	프랑스	샤를의 법칙 발견
1789	라부아지에(Lavoisier, Antoine Laurent de; 1743~1794)	프랑스	질량 불변의 법칙, 근대 화학의 기초 확립 (화학 요론)
1798	캐번디시(Cavendish, Henry; 1731~1810)	영국	만유인력의 상수 측정
1798	럼퍼드(Rumford, Benjamin Thompson von; 1753~1814)	영국	열의 에너지설 제창, 마찰에 의한 열의 발생 연구
1800	볼타(Volta, Alessandro; 1745~1827)	이탈리아	전지 발명
1801	영(Young, Thomas; 1773~1829)	영국	빛의 간섭을 파동설로 설명
1801	돌턴(Dalton, John; 1766~1844)	영국	부분 압력의 법칙 발견
1802	게이 뤼삭(Gay–Lussac, Joseph Louis; 1778~1850)	프랑스	게이 뤼삭의 법칙(기체의 열팽창의 법칙) 발견
1803	돌턴(Dalton, John; 1766~1844)	영국	근대 원자론의 기초 확립
1807	영(Young, Thomas; 1773~1829)	영국	에너지 개념과 영률 도입
1811	아보가드로(Avogadro, Amedeo; 1776~1856)	이탈리아	기체 분자수의 가설 수립
1814	스티븐슨(Stephenson, George; 1781~1848)	영국	증기 기관차 시운전
1814	프라운호퍼(Fraunhofer, Joseph von; 1787~1826)	독일	회절발로 빛의 파장 측정
1814	프라운호퍼(Fraunhofer, Joseph von; 1787~1826)	독일	태양빛의 흡수 스펙트럼 발견
1820	외르스테드(Oersted, Hans Christian; 1777~1851)	덴마크	전류의 자기 작용 발견
1820	아라고(Arago, Dominique Francois Jean; 1786~1853)	프랑스	전자석 발명
1820	앙페르(Ampére, AndréMarie; 1775~1836)	프랑스	앙페르의 법칙 발견, 전자기학의 기초 확립
1820	비오(Biot, Jean Baptiste; 1774~1862) 사바르(Savart, Félix; 1791 ~1841)	프랑스 프랑스	비오–사바르의 법칙 발견

1822	프레넬(Fresnel, Augustin Jean; 1788~1827)	프랑스	빛의 회절 이론, 빛의 파동설 완성
1824	카르노(Carnot, Nicolas Léonard Sadi; 1796~1832)	프랑스	카르노 기관의 원리 수립
1826	옴(Ohm,Georg Simon; 1787~1854)	독일	옴의 법칙 발견
1827	브라운(Brown, Robert; 1773~1858)	영국	브라운 운동 발견
1831	페러데이(Faraday, Michael; 1791~1867)	영국	전자기 유도 법칙 발견
1832	헨리(Henry, Joseph; 1797~1878)	미국	자체 유도 현상 발견
1833	페러데이(Faraday, Michael; 1791~1867)	영구	전기 분해 법칙 발견
1834	렌츠(Lenz, Heinrich Friedrich Emil; 1804~1865)	독일	렌츠의 법칙 발견
1837	페러데이(Faraday, Michael; 1791~1867)	영국	전자기장의 개념 도입
1840	줄(Joule, James Prescott; 1818~1889)	영국	전류의 열장용에 관한 줄의 법칙 발견
1842	마이어(Mayer, julius Robert von; 1814~1878)	독일	열의 일당량을 도입하고 에너지 보존 법칙을 제창
1842	도플러(Doppler, Christian Johann; 1803~1853)	오스트리아	도플러의 법칙 발견
1843	줄(Joule, James Prescott; 1818~1889)	영국	열의 일당량 측정
1847	헬름홀츠(Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdinand von; 1821~1894)	독일	에너지 보전 법칙 확립
1848	켈빈(Kelvin, William Thomson; 1824~1907)	영국	절대 온도의 개념 수립
1849	피조(Fizeau, A그뭉 Hippolyte Louis; 1819~1896)	프랑스	지상에서 광속 측정
1850	클라우지스 (Clausius, Rudolf Julius Emanuel; 1822~1888)	독일	열역학의 제 2법칙 확립
1855	푸코(Foucault, Jean Bernard Léon; 1819~1868)	프랑스	맴돌이 전류 발견
1858	플뤼커(Plücker, Julius; 1801~1868)	독일	음극선의 발견
1859	키르히호프 (Kirchhoff, Gustav Robert; 1824~1887)	독일	스펙트럼 분석의 기초 확립
1859	맥스웰(Maxwell, James Clerk; 1831~1879)	영국	기체 분자 운동론 기초 확립
1864	맥스웰(Maxwell, James Clerk; 1831~1879)	영국	전자기장의 기초 방정식 수립, 빛의 전자기파설 제창
1865	클라우지우스 (Clausius, Rudolf Julius Emanuel; 1822~1888)	독일	엔트로피 증가의 원리 확립
1870			(발전기의 실용화의 성공)
1874	크룩스(Crookes, William; 1832~1919)	영국	음극선의 진행 방향과 자기장의 영향 발견
1877	볼츠만(Boltzmann, Ludwig; 1844~1906)	오스트리아	열역학 제 2법칙의 통계적 기초 확립
1879	슈테판(Stefan, Josef; 1835~1893)	오스트리아	슈테판의 법칙 발견
1884	에디슨(Edison, Thomas Alva; 1847~1931)	미국	에디슨 효과(열전자 방출 현상) 발견
1885	발머(Balmer, Johann Jakob; 1825~1898)	스위스	수소원자 스펙트럼의 발머 계역의 공식 수립
1885			(최초의 자동차 제작)
1887	헤르츠(Hertz,Heinrich rudolph; 1857~1894)	독일	광전 효과 발견
1887	마이컬슨(Michelson, Albert Abraham; 1852~1931) 몰리(Morley, Edward Williams; 1838~1923)	미국 미국	마이컬슨–몰리의 실험 실시

1888	헤르츠(Hertz,Heinrich rudolph; 1857~1894)	독일	전자기파의 존재를 실증(전자기파의 속도 측정)
1890	리드베리 (Rydberg, Johannes Robert; 1854~1919)	스웨덴	스펙트럼 공식 수립
1893	빈(Wien, Wilhelm; 1864~1928)	독일	흑체 복사에 대한 빈의 법칙 발견
1895	뢴트겐(Röntgen, Wilhelm Konrad; 1845~1923)	독일	X선 발견
1895	마르코니(Marconi, Guglielmo; 1874~1937)	이탈리아	무선 통신 실험 성공
1896	베크럴(Becquerel, Antoine Henri; 1852~1908)	프랑스	우라늄(U)광의 방사능 발견
1897	톰슨(Thomson, Joseph john; 1856~1940)	영국	음극선의 음전기의 입자임을 확인, 전자의 기초 개념 수립
1897	톰슨(Thomson, Joseph john; 1856~1940)	영국	전자의 e/m측정
1898	퀴리부부(Curie, Marie; 1867~1934), (Curie, Pierre; 1859~1906)	프랑스	Ra과 Po 발견
1900	플랑크(Planck, Max Karl Ernst Ludwig; 1858~1947)	독일	복사론, 양자론의 기초 확립
1901	리처드슨 (Richardson, Owen Willans; 1879~1959)	영국	열전자 방출 이론 수립
1903	러더퍼드(Rutherford, Ernest; 1871~1937) 소디(Soddy, Frederick; 1877~1956)	영국 영국	α,β,γ선을 구별, 방사성 원자 핵의 붕괴설을 주장
1903		미국	(비행기 발명)
1905	아인슈타인(Einstein, Albert; 1879~1955)	미국	특수 상대론 발표, 광양자 가설 수립 빛 광전 효과 설명
1906	드 포리스트(de Forest, Lee; 1873~1961)	미국	3극 진공관 발명
1908	페렝(Perrin, Jean Baptiste; 1870~1942)	영국 독일	방사능 계수관 제작
1908	러더퍼드(Rutherford, Ernest; 1871~1937) 가이거(Geiger, Hans; 1882~1945)	프랑스	분자의 실재성 증명
1909	밀리컨(Millikan, Robert Andrews; 1868~1953)	미국	전자의 전하량 측정
1911	윌슨 (Wilson, Charler Thomson Rees; 1869~1959)	영국	안개 상자 발명
1911	러더퍼드(Rutherford, Ernest; 1871~1937)	영국	원자핵의 존재 확인
1911	오네스(Onnes, Heike Kámerlin호; 1853~1926)	네덜란드	수은의 초전도 현상 발견
1912	헤스(Hess, Victor Franz;1883~1964)	오스트리아	우주선(宇宙線)발견
1912	라우에(Laue, Max von; 1879~1960)	독일	결정에 의한 X선의 회절을 제안
1912	브래그 부자 (Bragg, Willian Henry; 1862~1942), (Bragg, Willian Lawrence; 1890~1971)	영국	X선 회절 이론 (브래그 식) 및 기술 개발
1913	보어(Bohr, Niels Henrik David; 1895~1962)	덴마크	원자 모형, 원자 구조의 양자론 발표
1914	프랑크(Franck, James; 1882~1964) 헤르츠(Hertz,Heinrich rudolph; 1857~1894)	독일 독일	원자의 에너지 준위 실증
1914~1918			(제 1차 세계대전)
1916	아인슈타인(Einstein, Albert; 1879~1955)	미국	일반 상대성 이론 발표
1919	애스턴(Aston, FrancisWilliam; 1877~1945)	영국	질량 분석기 제작 및 동위원소 조사

1919	러더퍼드(Rutherford, Ernest; 1871~1937)	영국	α 입자에 의한 원자핵의 인공 변환 실현
1920			(최초의 라디오 방송)
1923	콤프턴(Compton, Arthur Holly;1892~1962)	미국	콤프턴 효과 발견
1923	드 브로이(de Broglie, Louis Victor; 1892~1982)	프랑스	물질파의 개념 도입
1925	파울리(Pauli, Wolfgang; 1900~1958)	스위스	파울리의 배타 원리 발견
1925	하이젠베르크(Heisenberg, Werner; 1901~1976)	독일	양자 역학(행렬역학)의 기초 확립
1926	슈뢰딩거(Schrödinger, Erwin; 1887~1961)	오스트리아	양자 역학(파동 역학)의 이론 확립
1927	데이비슨(Davisson, Clinton Joseph; 1881~1958) 거머(Germer, Lester Halbert; 1896~1971)	미국 미국	전자의 파동성 실증
1927	톰슨(Thomson, George Paget; 1892~1975)	영국	전자의 파동성 실증
1927	하이젠베르그(Heisenberg, Werner; 1901~1976)	독일	불확정성 원리 제창
1928	디랙(Dirac, Paul Adrien Maurice; 1902~1984)	영국	상대론적 양자 역학 개척, 양전자 예언
1928			(텔레비전 시험 방영)
1931	로렌스(Lawrence, Ernest Orlando; 1901~1958)	미국	사이클로트론 발명
1932	채드윅(Chadwick,James; 1891~1974)	영국	중성자 발견
1932	앤더슨(Anderson, Carl David; 1905~)	미국	양전자 발견
1932	코크로프트 (Cockcroft, John Douglas; 1897~1967) 월턴(Walton, Ernest Thomas Sinton; 1903~)	영국 영국	고전압 가속 장치를 만들어서 원자핵의 인공 변환 실현
1934	페르미(Fermi, Enrico; 1901~1954)	미국	β붕괴 이론 수립
1935	유카와 히데키(湯川秀樹; 1907~1981)	일본	중간자 이론 수립
1937	앤더슨(Anderson, Carl David; 1905~)	미국	μ중간자 발견
1938	한(Hahn, Otto; 1879~1968)	독일 독일	우라늄 핵분열 발견
1939~1945			(제 2차 세계 대전)
1942	페르미(Fermi, Enrico; 1901~1954)	미국	핵분열의 연쇄 반응을 지속시킴
1945			(전자계산기 실용화)
1948	쇼클리(Shockly, William; 1910~) 브랜튼(Brattain, Walter houser; 1902~) 바딘(Bardeen, John;1908~)	미국 미국 미국	크랜지스터 제작
1955	세그레(Segré, Emilio Gino; 1905~) 체임벌린(Chamberlain, Owen; 1920~)	미국 미국	반양성자 발견
1957		(소련)	(최초 인공 위성 발사 성공)
1957	바딘(Bardeen, John; 1908~) 쿠퍼(Cooper, Leon N.; 1930~) 슈리퍼(Schrieffer, John Robert; 1931~)	미국 미국 미국	초전도 이론 발표
1960	메이먼(Maiman, Theodore Harold; 1927~)	미국	루비 레이저 제작

2. SI단위의 정의

단위명	설명	단위명	설명
m(미터)	1 m는 빛이 진공 중에서 299.792.458분의 1초동안 진행한 경로의 길이이다.	mol(몰)	1 mol은 질량수 12인 탄소 0.012 kg에 있는 탄소 원자의 수와 같은 실체들을 포함하고 있는 계에 있는 물질의 양이다. 그 최소 단위가 되는 실체들은 원자, 분자, 전자, 다른 입자들로 기술되거나 그러한 입자들의 무리로 기술되어야 한다.
kg (킬로그램)	1 kg은 질량의 단위이며, 국제 킬로그램 원기의 질량이다.킬로그램 원기는 프랑스의 무게와 측정에 관한 국제 사무국의 Serveres 지하실에 보관되어 있는 백금과 이리듐의 합금으로 특수제작된 원기둥이다.	J(줄)	1 J은 1 N의 힘이 작용한 질점이 힘의 방향으로 1 m의 변위를 일으켰을 때 한 일이다.
s(초)	1초는 세슘–133원자의 바닥 상태에 있는 두 개의 초미세 준위 사이의 전이에 해당하는 복사선의 주기의 9,192,631,770배에 해당하는 시간이다.	W(와트)	1 W는 매 초당 1 J의 비율로 에너지를 발생시켜 주는 전력이다.
a(암페어)	1 A는 진공 중에서 1 m 떨어져 있고, 단면적을 무시할 수 있는 무한히 긴 평행 도체 사이에 미터당 2×10^{-7}N의 힘이 작용하도록 하는 정상 전류이다.	V(볼트)	1 V는 도선에서 두 점 사이에 소모되는 전력이 1 W일 때, 1 A의 일정한 전류를 운반하는 두 점사이의 전위차이다.
K(켈빈)	1K은 물의 삼중점의 열역학적 온도의 273.16분의 1을 단위로 한 열역학적 온도의 단위이다.	Wb(웨버)	1 Wb는 1초 동안에 1 V의 기전력이 일정한 비율로 0가지 줄어들때 만등
Ω(옴)	1 Ω은 도체의 두 점 사이에 가해진 1 V의 일정한 전위차에서 그 도체에 1 A의 전류가 흐르게 하는 도체의 두 점 사이의 전기저항이다. 이 도체는 어떠한 기전력원이 되지 않는다.	lm(루메)	1lm은 세기가 1cd인 균일한 점광원에 의해 1sr의 입체각으로 방출되는 광선속이다.
C(쿨롬)	1 C은 1 A의 전류가 매 초당 운반하는 전하량이다.	F(패럿)	1 F은 축전기의 두 판이 각각 1 C의 동일한 전하량으로 대전되었을 때 그 판들 사이의 전뤼차가 1 V인 축전기의 전기용량이다.
cd(칸델라)	1 cd는 임의의 방향으로 진동수 540×10^{12}Hz인 단색 복사선을 방출하고 그 방향으로 스테라디안당 683분의 1 W의 복사 세기를 가지는 광원의 발광 강도이다. 1 cd는 임의의 방향으로 진동수 540×10^{12}Hz인 단색 복사선을 방출하고 그 방향으로 스테라디안당 683분의 1 W의 복사 세기를 가지는 광원의 발광 강도이다.	H(헨리)	1 H는 닫힌 회로에서 전류가 매 초당 1 A의 비율로 균일하게 변할 때 회로에 1 V의 기전력이 생기는 폐회로의 인덕턴스이다.
		rad(라디안)	1 rad은 원둘레에서 반지름의 길이와 같은 호를 자르는 두 반지름 사이의 평면각이다.
N(뉴턴)	1 N은 1 kg의 질량에 제곱초당 1 m의 가속도가 생기게 하는 힘이다.	sr (스테라디안)	1 sr은 구의 반지름의 제곱과 넓이가 같은 구면 위의 넓이에 대하여 구의 중심으로부터 잘리는 입체각이다.

3. 접두사

Factor	접두사	기호	Factor	접두사	기호
10^{24}	yotta	Y	10^{-1}	deci	d
10^{21}	zetta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E	10^{-3}	milli	m
10^{15}	peta	P	10^{-8}	micro	μ
10^{12}	tera	T	10^{-9}	nano	n
10^{9}	giga	G	10^{-12}	pico	p
10^{6}	mega	M	10^{-15}	femto	f
10^{3}	kilo	k	10^{-18}	atto	a
10^{2}	hecto	h	10^{-21}	zepto	z
10^{1}	deca	da	10^{-24}	yocto	y

4. 그리스 문자

영문 이름	대문자	소문자	영문 이름	대문자	소문자
Alpha	A	α	Nu	N	ν
Beta	B	β	Xi	Ξ	ξ
Gamma	Γ	γ	Omicron	O	o
Delta	Δ	δ	Pi	Π	π
Epsilon	E	ϵ	Rho	P	ρ
Zeta	Z	ζ	Sigma	Σ	σ
Eta	H	η	Tau	T	τ
Theta	Θ	θ	Upsilon	Y	υ
Iota	I	ι	Phi	Φ	ϕ
Kappa	K	κ	Chi	X	χ
Lambda	Λ	λ	Psi	Ψ	ψ
Mu	M	μ	Omega	Ω	ω

5. 중요 물리 상수

물리량	기호	상수값
중력 상수(gravitational constant)	G	$6.67259 \times 10^{-11} N \cdot m^2$
중력 가속도(acceleration of gravity)	g	$9.80665 m \cdot s^{-2}$
열의 일당량(mechanical equivalence of heat)	J	$4.1855 \times 10^{3} J \cdot kcal^{-1}$
기체 상수(gas constant)	R	$8.314510 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
아보가드로수(Avogadro's number)	N_A	$6.0221367 \times \times 10^{23} mol^{-1}$
볼츠만 상수(Boltzmann constant)	k	$1.380658 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$
광속(speed of light in vacuum)	c	$2.99792458 \times 10^{8} m \cdot s^{-1}$
진공 유전율(permittivity of a vacuum)	ε_0	$8.854187817 \times 10^{-12} C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$
진공 투자율(permeability of a vacuum)	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} N \cdot A^{-2}$
기본 전하량(elementary electric charge)	e	$1.60217733 \times 10^{-19} C$
전자의 정지 질량(mass of electron)	m_e	$9.1093897 \times 10^{-31} kg$
전자의 비전하(charge-to-mass ratio of electron)	e/m	$1.75881962 \times 10^{11} C \cdot kg^{-1}$
양성자의 정지 질량(mass of proton)	m_p	$1.6726231 \times 10^{-27} kg$
중성자의 정지 질량(mass of neutron)	m_n	$1.6749286 \times 10^{-27} kg$
패러데이 상수(Faraday constant)	F	$9.6485309 \times 10^{4} C \cdot mol^{-1}$
플랑크 상수(Planck constant)	h	$6.6260755 \times 10^{-34} J \cdot s$
슈테판-볼츠만 상수(Stefan-Boltzmann constant)	σ	$5.67051 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
리드베리 상수(Rydberg constant)	R	$1.9073731534 \times 10^{7} m^{-1}$
보어 반지름(Bohr radius)	α_0	$5.29177249 \times 10^{-11} m$
보어 마그네톤(Bohr magneton)	μ_B	$9.27400899 \times 10^{-24} A \cdot m^2$

연습 문제 풀이

I 역학 탐구

1. 운동의 기술

1.

열차의 맨 앞 또는 뒤의 등가속도 운동 거리는 $(x+10)$이므로 $s=\frac{v_1+v_2}{2}t$에서 $x+10=\frac{20+30}{2}\times 20$, $\therefore x=400$ (m)

2.

1) 72 km/h = 20 m/s, 108 km/h = 30 m/s

A의 운동 거리 = B의 운동 거리 + 100

$\frac{v_1+v_2}{2}t=vt+100$

$\frac{20+30}{2}t=20t+100$

$\therefore t=20$ (s)

2) $s=\frac{20+30}{2}\times 20=500$ (m)

3.

1) 시간 t 후의 속도를 v라고 하면 $v=v_0-gt$

$t=2(s)$일 때 $v=v_0-10\times 2$

$t=3(s)$일 때 $v=v_0-10\times 3$

$\therefore v_0=25$ (m/s)

2) 점 P의 높이 :

$h_P=v_0t-\frac{1}{2}gt^2=25\times 2-\frac{1}{2}\times 10\times 2^2=30$ (m)

3) $v_P=v_0-gt=25-10\times 2=5$ (m/s)

4) 점 P에서 최고점까지의 높이를 h, 점 P를 통과할 때의 속력을 v_P, 최고점에서의 속력을 v라고 하면 $-2gh = v^2 - v_P^2$ 에서 $v = 0$, $v_P = 5$이므로 $2 \times 10 \times h = 5^2$, $\therefore h = 1.25$ (m)

또는 점 P로부터 최고점에 도달하는데 걸리는 시간이 $\frac{1}{2}$ 초이므로 $h = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$에서

$h = 5 \times \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \times 10 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 1.25$ (m)

4.

1) 공 A의 위치는 $y_A = -\frac{1}{2} g t^2 + h$

공 B의 위치는 $y_B = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 t$

두 공이 높이 $\frac{2}{3} h$ 에서 스치고 지날 때

$y_A = -\frac{1}{2} g t^2 + h = \frac{2}{3} h \cdots$ ①, $y_B = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 t \ \frac{2}{3} h \cdots$ ②

식 ①, ②에서 $h = v_0 t$ 또는 $t = \frac{h}{v_0}$ 이다.

$t = \frac{h}{v_0}$ 를 식 ①에 대입하면 $\frac{1}{3} h = \frac{1}{2} g \left(\frac{h}{v_0}\right)^2$

$\therefore v_0 = \sqrt{\frac{3}{2} g h}$

2) 등가속도 운동이므로 $-2gh = v^2 - v_0^2$에

$y = \frac{2}{3} h$, $v_0 = \sqrt{\frac{3}{2} g h}$ 를 대입하면

$-2g\left(\frac{2}{3} h\right) = v^2 - \frac{3}{2} g h$

$\therefore v_0 = \sqrt{\frac{1}{6} g h}$

5.

1) 720 km/h = 200 m/s

$x = v_0\cos\theta t = 200 \times \cos30^\circ \times 24 = 2400\sqrt{3}$ (m)

2) $y = v_0\sin\theta t - \frac{1}{2}gt^2 + y_0 = 0$

$y_0 = -200 \times \sin30^\circ \times 24 + \frac{1}{2} \times 10 \times 24^2 = 480$ (m)

2. 힘과 운동의 법칙

1.

1) 끌어올리는데 필요한 힘 F는 줄의 장력과 같으며, 무게 Mg는 세 줄에 나누어져 걸린다.

$3F = Mg \therefore F = \frac{Mg}{3} = \frac{90 \times 10}{3} = 300$(N)

2) 무게 Mg를 가속도 a로 끌어올리는데 드는 힘을 F라고 하면

$3F - Mg = Ma$

$\therefore F = \frac{1}{3}M(g + a) = \frac{1}{3} \times 90 \times (10 + 5) = 450$(N)

2.

1) A가 받는 반작용은 B가 받는 힘과 크기가 같다.

$a = \frac{F}{m + M} = \frac{F_B}{M} \therefore F_B = \frac{M}{m + M}F$

2) $F_B = m(g - \frac{2}{3}g) = \frac{1}{3}mg$

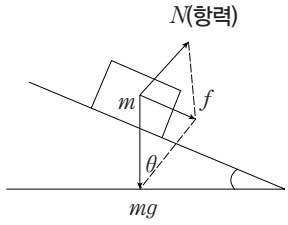
3.

1) 빗면을 민 힘을 F, A에 작용한 힘을 f, 가속도를 a라고 하면

$F = (M + m)a$, $f = ma$에서 $f = m\frac{F}{(M + m)}$ … ①

그림에서 $\tan\theta = \frac{f}{mg}$ … ②

위의 식 ①, ②에서



$mg\tan\theta = m\dfrac{F}{(M+m)} \quad \therefore\ F = (M+m)g\tan\theta$

2) $F = (M+m)a = (M+m)g\tan\theta$에서 $a = g\tan\theta$

4.

두 물체의 운동 가속도를 a, A와 B에 작용하는 힘을 각각 F_A, F_B라고 하자.

1) B에 작용하는 항력은 B가 A에 작용하는 힘 F_A의 반작용이므로

$\mu F_A = mg$ … ①

또 $F = (m+M)a$, $F_A = Ma$에서 $a = \dfrac{F}{M+m} = \dfrac{F_A}{M}$ … ②

위의 두 식 ①, ②에서 $F = \dfrac{m(M+m)g}{\mu M}$

2) B에 작용하는 힘은 F_B이므로 $\mu F_B = mg$… ①

또 $F = (m+M)a$, $F_B = ma$에서 $a = \dfrac{F}{M+m} = \dfrac{F_B}{m}$ … ②

위의 두 식 ①, ②에서 $F = \dfrac{(M+m)g}{\mu}$

3. 운동량과 충돌

1.

포탄을 발사한 후 지면에 대한 포탄의 속력을 v', 비행기의 속력을 V'이라 하면

1) 비행기가 받은 충격량 = 포탄의 운동량의 변화량

$m\Delta v = m(v' - V) = -mv$

2) 포탄 발사 전 운동량 = 발사 후 운동량에서

$MV = mv' + (M-m)V'$

이고, 또 $v' = V - v$이다. 따라서

$MV = m(V-v) + (M-m)V'$

$\therefore\ V' = V\dfrac{m}{M-m}\ v$

2.

1) $MV = m_1v_1 + m_2v_2$

수평(x축) 방향 : $3 \times 20\cos 45^\circ = 2v_2$

$\therefore\ v_2 = \dfrac{30}{\sqrt{2}} = 15\sqrt{2}$

수직(y축) 방향 : $2gh = (v_0\sin\theta)^2$

$2 \times 10h = (20\sin 45^\circ)^2 \quad \therefore\ h = 10\ (\mathrm{m})$

$v = \sqrt{v_2^2 + 2gh} = \sqrt{(15\sqrt{2})^2 + 2 \times 10 \times 10} = 5\sqrt{26}\ (\mathrm{m/s})$

2) $y = v_0\sin\theta - gt$에서 $v = 0$이므로 $t = \dfrac{v_0\sin\theta}{g}$ 최고점까지의 수평 거리 x_1은

$x_1 = v_0\cos\theta t = v_0\cos\theta \dfrac{v_0\sin\theta}{g} = \dfrac{20^2\cos 45^\circ \sin 45^\circ}{10} = 20\ (\mathrm{m})$

$h = \dfrac{1}{2}gt^2$이므로 최고점부터의 수평 거리 x_2는

$x_2 = v_2 t = v_2\sqrt{\dfrac{2h}{g}} = 15\sqrt{2}\sqrt{\dfrac{2 \times 10}{10}} = 30\ (\mathrm{m})$

$\therefore\ x = x_1 + x_2 = 20 + 30 = 50\ (\mathrm{m})$

3.

1) 충돌 전후에 운동량이 보존되므로 A, B의 충돌에서

$3 \times 6 = 3v_\mathrm{A} + v_\mathrm{B} \cdots$ ① 반발 계수가 1이므로

$1 = \dfrac{v_\mathrm{B} - v_\mathrm{A}}{6} \cdots$ ②

식 ①, ②를 연립하여 풀면

$v_\mathrm{A} = 3\ (\mathrm{m/s}),\ v_\mathrm{B} = 9\ (\mathrm{m/s})$

B, C의 충돌에서

$1 \times 9 = v_\mathrm{B}' + 3v_\mathrm{C} \cdots$ ③

반발 계수는 $1 = \dfrac{v_\mathrm{C} - v_\mathrm{B}'}{6} \cdots$ ④

식 ③, ④를 연립하여 풀면

$v_\mathrm{B}' = 4.5\ (\mathrm{m/s}),\ v_\mathrm{C} = 4.5\ (\mathrm{m/s})$

2) A와 B의 두 번째 충돌은 $v_\mathrm{A} = 3\ (\mathrm{m/s}),\ v_\mathrm{B}' = -4.5\ (\mathrm{m/s})$

운동량은 보존되므로 $3 \times 3 - 4.5 = 3v_\mathrm{A}'' + v_\mathrm{B}'' \cdots$⑤

반발 계수는 $1 = \dfrac{v_\mathrm{B}'' - v_\mathrm{A}''}{3 - (-4.5)} \cdots$⑥

식 ⑤, ⑥을 연립하여 풀면 $v_B'' = 6.75$ (m/s)

4.

운동량 보존 법칙에서 각 성분끼리 운동량은 보존되므로

수평 방향

$10 \times 2 = 1 \times v_1\cos60^\circ + 1 \times v_2\cos30^\circ$ … ①

수직 방향

$0 = -v_1\sin60^\circ + v_2\sin30^\circ$ … ②

식 ①, ②를 연립하여 풀면

$v_1 = 10$ (m/s), $v_2 = 10\sqrt{3}$ (m/s)

4. 중력

1.

1) 만유 인력은 질량에 비례하고, 거리의 제곱에 반비례하므로, 달의 중력은 지구의

$\left(\frac{1}{81}\right) \times \left(\frac{11}{3}\right)^2 = \frac{121}{729} = 0.17$ 배

2) $18\text{ kg} \times \frac{121}{729} = 3\text{ kg}$

3) 뛰어오르는 높이는 $h = \frac{v_0^2}{2g}$으로 주어지므로, 중력 가속도는 반비례한다. 따라서 $h_{달} = 1\text{m} \times \frac{729}{121} = 6\text{(m)}$이다.

2.

1) 중력 가속도는 $g_{인} = \frac{GM}{(R+h)^2}$으로 주어지므로, 값을 대입하면 $g_{인} = 7.5\text{ m/s}^2$이다.

인공 위성의 운동 방정식은 $\frac{mv^2}{R+h} = mg_{인}$이므로 $v = \sqrt{g_{인}(R+h)}$로 주어진다. 여기에 값을 대입하면 $v = 7.5$ km/s를 얻는다.

2) 주기는 $T = 2\pi\frac{R+h}{v}$에 값을 대입하면 $T = 6.2 \times 10^3$ s를 얻는다.

3.

1) 등속 원운동하는 인공 위성의 운동 방정식

$\frac{mv_0^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$, $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

2) 만유 인력의 위치 에너지는

$E_P = -\frac{GMm}{r}$(기준점 $r = \infty$)이므로

인공 위성의 역학적 에너지는

$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = -\frac{GMm}{2r}$ 이다.

3) 인공 위성이 지구의 중력권을 벗어나려면 그 역학적 에너지가

$E = \frac{1}{2}m(xv_0)^2 - \frac{GMm}{R} > 0$이어야 하므로 v_0의 $x = \sqrt{2}$배 이상이어야 한다.

4.

1) 역학적 에너지 보존으로부터, $\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{GMm}{R} = -\frac{GMm}{2R}$ 이므로

$v_0 = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ 인데, 지표면에 있는 물체에 작용하는 (만유 인력) = (중력)으로부터

$\frac{GMm}{R} = mg$ 따라서 $g = \frac{GM}{R^2}$ 의 관계식을 이용하면 $v_0 = \frac{gR^2}{R} = \sqrt{gR}$ 을 얻는다.

2) A점에서 (만유 인력) = (구심력)으로부터

$\frac{GMm}{(2R)^2} = \frac{mv^2}{2R}$ $\therefore v = \sqrt{\frac{GM}{2R}} = \sqrt{\frac{gR^2}{2R}} = \sqrt{\frac{gR}{2}}$ 이다.

5. 일과 에너지

1.

역학적 에너지가 보존되므로 $mgh = \frac{1}{2}mv^2$이고 $h \propto v^2$이므로 4층을 떨어질 때이다.

2.

1) $kx = mg$, $\therefore x = \frac{mg}{k}$

2) 역학적 에너지 보존 법칙에 의해 $\frac{1}{2}kx^2 = mgx,\ x = \frac{2mg}{k}$

3.

1) 나무 도막이 움직이기 시작할 때의 속력을 V라고 하면, 역학적 에너지 보존에서

$\frac{1}{2}(m+M)V^2 = (m+M)gh \quad \therefore V = \sqrt{2gh}$ 이다.

2) 충돌 직전 탄환의 속도를 v라고 하면, 운동량 보존의 법칙에서

$mv = (m+M)V$

$v = \frac{m+M}{m}\ V = \frac{(m+M)}{m}\sqrt{2gh}$ 이다.

4.

1) $E_P = mgh = 60\ \text{kg} \times 10\ \text{m/s}^2 \times 6\ \text{m} = 3600\ \text{J}$

2) $P = \frac{W}{t} = \frac{3600\text{J}}{60\text{s}} = 60\ W$

5.

1) 물체와 수평면 사이의 마찰 계수를 μ라고 할 때, 수평면 위에 놓인 질량의 물체에 작용하는 마찰력은 μmg이다. 또 마찰력에 대하여 해 준 일이 탄성 위치 에너지의 감소량과 같다.

$\mu mg\left(A + \frac{2}{3}A\right) = \frac{1}{2}\ kA^2 - \frac{1}{2}k\left(\frac{2}{3}A\right)^2,\ \therefore \mu = \frac{kA}{6mg}$

2) x만큼 압축되었을 때, 역학적 에너지 보존의 법칙에 따라

$\frac{1}{2}k\left(\frac{2}{3}A\right)^2 = \frac{1}{2}kx^2 + \mu mg\left(\frac{2}{3}A + x\right)$

여기에 $\mu = \frac{kA}{6mg}$ 를 대입하면

$\frac{1}{2}kx^2 + \frac{kA}{6}x - \frac{kA^2}{9} = 0$

$\left(x - \frac{1}{3}A\right)\left(\frac{k}{2}x + \frac{kA}{3}\right) = 0$

$\therefore\ x = \frac{1}{3}\ A$

6. 진동(Oscillatory Motion)

1.

물체는 단조화 운동을 한다. 이 때 주기 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$이다. $x = 0$에서 $x = \frac{A}{2}$까지 움직이는데 걸리는 시간 $t = \frac{1}{8}T$이므로 $t = \frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{m}{k}}$가 된다.

2.

(a) 역학적 에너지 E는 진폭 A의 제곱에 비례하여 $E = \frac{1}{2}kA^2$로 주어지므로

$$E = \frac{1}{2} \cdot 2.00\ \text{N/m} \cdot (3.00 \times 10^{-2}\text{m})^2 = 9.00 \times 10^{-3}\ \text{J}$$

이 된다.

최고 속력 v_{max}는 계의 역학적 에너지가 모두 운동에너지에 대응될 때 해당되므로

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9.00 \times 10^{-3}\ \text{J}}{0.500\ \text{kg}}} = 0.190\ \text{m/s}$$

이 된다.

(b) 역학적 에너지 보존 법칙에 의해 $E = \frac{1}{2}kx^2 \times \frac{1}{2}mv^2$에서

$$v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} = \pm 0.141\ \text{m/s}$$

가 된다. 양과 음의 부호는 그 지점에서 오른쪽으로 또는 왼쪽으로 움직이는지를 나타낸다.

3.

(a) 용수철의 원래 길이에서 늘어난 길이가 y라면 용수철 힘 $F_S = -ky$가 위 방향으로 작용하고 아래 방향으로 중력 $F_g = mg$가 작용한다. 평형상태에서 합력은 0이므로 $-ky_0 + mg = 0$이 된다. 따라서

$$y_0 = \frac{mg}{k}$$

가 된다.

(b) 뉴턴 제 2 법칙에 의하면

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = -ky + mg \quad (1)$$

이고, $y' = y - y_0$로 치환하면 (1)식은

$$m\frac{d^2y'}{dt^2} + ky' = 0$$

이 된다. 따라서 $y' = A\sin(\omega t + \phi)$로 y_0만큼 늘어난 길이를 평형점으로 한 단조화 운동을 한다. 이 때 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$으로 수평으로 매달린 물체의 각진동수와 같다.

4.

단진자의 장력이 하는 역할을 반구면의 수직힘이 대신하는 것 외에는 단진자의 물체와 반구면에 작용하는 힘은 같다. 반구면에서 움직인 호의 길이 $s = R\theta$로 주어지므로 길이가 인 단진자의 운동과 같아 진폭이 작은 경우 각진동수가 $\omega = \sqrt{\frac{g}{R}}$인 단조화 운동을 한다.

5.

길이 l인 단진자는 진폭이 작은 경우 주기가 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$인 단조화 운동을 한다. 따라서 진자에 달린 물체의 질량이나 진폭에 의해 주기가 변하지 않는다. 주기가 1.5s인 경우 줄의 길이 $l = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 g = \left(\frac{1.5\text{s}}{2\pi}\right)^2 \cdot 9.8\ \text{m/s}^2 = 0.56\ \text{m}$이다. 진폭이 2.0 cm인 경우도 단조화 운동으로 간주할 수 있을 정도로 작은 진폭이므로 질량과 진폭이 변한 후의 주기는 그대로 1.5 s이다.

7. 회전(Rotational Motion)

1.

(a) $v = r\omega$의 관계를 이용하자.

$\omega = 1200\ \text{rev/min} = 126\ \text{rad/s}$이므로

$v = 0.03\ \text{m} \cdot 126\ \text{rad/s} = 3.78\ \text{m/s}$

가 된다.

(b) $a_r = r\omega^2$이므로

$a_r = 0.08\ \text{m} \cdot (126\ \text{rad/s})^2 = 1270\ \text{m/s}^2$

이 된다.

(c) $\Delta s = r\Delta\theta$이고 $\Delta\theta = \omega\Delta t$이므로

$\Delta s = 0.08\ \text{m} \cdot 126\ \text{rad/s} \cdot 2\ \text{s} = 20.16\ \text{m}$

가 된다.

2.

회전축이 끝점에서 중간점으로 바뀌면 질량 분포가 회전축에 더 가깝게 이루어진다. 따라서 회전관성의 정의식 $\sum_i mr_i^2$에 의하면 그 값은 더 작아진다.

정확한 값을 구하기 위해 $I = \frac{1}{3} ML^2$을 이용하자. 막대를 반으로 나누어 생각하면 질량 $2/M$이고 길이 $2/L$인 막대의 회전축이 끝점에 있을 때의 회전관성을 구하여 두 배를 하면 된다. 따라서,

$$I = 2\left(\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2}M \cdot \left(\frac{1}{2}L\right)^2\right) = \frac{1}{12} ML^2$$

이 된다.

3.

(a) $\tau = r \times F$이므로 T_1에 의한 토크의 크기 $\tau_1 = R_1 T_1$이고 방향은 $-z$방향이다. T_2에 의한 토크의 크기 $\tau_2 = R_2 T_2$이고 방향은 $+z$ 방향이다. 따라서 알짜 토크 τ는

$\tau = \tau_1 + \tau_2 = R_2 T_2 - R_1 T_1$

이다. $\tau > 0$이면 $+z$ 방향으로 물체가 정지 상태에 있었다면 반시계 방향으로 움직이도록 작용하고 $\tau < 0$이면 $-z$ 방향으로 정지해 있던 물체가 시계 방향으로 움직이도록 작용한다.

(b) 주어진 값들을 이용하여 알짜 토크를 계산하면

$\tau = 15\ \mathrm{N} \cdot 0.50\ \mathrm{m} - 5.0\ \mathrm{N} \cdot 1.0\ \mathrm{m} = 2.5\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}$

가 된다. 토크가 양의 값이므로 실린더는 시계 반대 방향으로 돌기 시작한다.

4.

원반과 사람을 포함하여 한 시스템으로 생각한다. 시스템에 작용한 알짜 토크는 없었으므로 시스템의 각 운동량은 보존된다. 즉,

$L_i = I_i\omega_i = I_f\omega_f = L_f$

이다. 여기서 i는 처음 값을 나타내고 f는 나중 값을 나타낸다. 따라서 $R/2$지점에서의 각 속력 ω_f는

$$\omega_f = \frac{I_i}{I_f}\ \omega_i = \frac{\left(\frac{1}{2}MR^2 + \frac{M}{2}R^2\right)}{\left(\frac{1}{2}MR^2 + \frac{M}{2}\left(\frac{R}{2}\right)^2\right)}\ \omega = \frac{8}{5}\ \omega$$

가 된다. 사람이 중심으로 가까이 옴에 따라 전체 회전관성이 줄어들므로 시스템의 각 속력은 증가함을 알 수 있다.

Ⅱ 열역학 탐구

1. 열과 열전달

1.

(a) 시스템 전체는 외부와 단열되어 있으므로 시스템의 온도 변화는 없다. 따라서 최종온도는 300 K이다.

(b) 시스템 전체의 온도는 같으므로 이상기체 법칙에 의해

$\frac{P_{네온}V_{네온}}{n_{네온}} = \frac{P_{아르곤}V_{아르곤}}{n_{아르곤}}$의 관계가 성립한다. 따라서

$\frac{V_{네온}}{V_{아르곤}} = \frac{1}{4}$가 된다.

2.

$Q = C\Delta T$에서 열용량 $C = 200\ \text{g} \cdot 1\ \text{cal/g} \cdot ℃ = 200\ \text{cal/℃}$이고 $\Delta T = 5℃$이므로 물에 공급된 열은 $Q = 1\ \text{kcal}$이다.

3.

물체가 낙하할 때마다 위치에너지는 물을 저어주는 바퀴의 운동에너지로 전환되고 이는 물의 내부에너지의 증가로 이어진다. 물체가 한 번 낙하할 때 위치에너지 변화 ΔU_g는

$\Delta U_g = mg\Delta h = 10.0\ \text{kg} \cdot 9.80\ \text{N/kg} \cdot 1.00\ \text{m} = 98.0\ \text{J}$

이다. 따라서 내부에너지 변화 ΔU는

$\Delta U = 20 \cdot \Delta U_g = 20 \cdot 9.80\ \text{J} = 1960\ \text{J}$이 된다.

4.

방출률과 흡수율은 같으므로 알짜 에너지 방출율 P_{net}은 스테판 법칙을 이용하면

$P_{net} = P_{em} - P_{ab} = e\sigma A(T_4 - T_4^0)$

가 된다. 여기서 P_{em}은 단위시간당 방출 에너지이고 P_{ab}은 단위 시간당 흡수에너지이고, T와 T_0는 각각 몸의 온도와 방의 온도이다. 따라서

$P_{net} = 0.997 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8}(\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4) \cdot 2.0\ \text{m}^2 \cdot (307^4 - 295^4)\text{K}^4 = 140\ \text{W}$

이 된다.

5.

T를 접촉면에서의 온도라고 하면, 판 1을 통한 열전달률은

$$P_1 = k_1 A\left(\frac{T - T_c}{L}\right)$$

이고 판 2를 통한 열전달률은

$$P_2 = k_2 A\left(\frac{T_h - T}{L_2}\right)$$

이다. 정상 상태에 도달했을 때 두 값은 같아야 한다. 따라서,

$$T = \frac{k_1 L_2 T_c + k_2 L_1 T_h}{k_1 L_2 + k_2 L_1}$$

이 된다. 이 값을 P_1, P_2에 대입하면 열전달률 P는

$$P = \frac{A(T_h - T_c)}{(L_1/k_1) + (L_2/k_2)}$$

가 된다.

2. 열역학 법칙

1.

(a) 단열과정에서 부피와 압력사이의 관계는 $P_i V_i^{\gamma} = P_f V_f^{\gamma}$로 주어진다. 이원자 분자의 단열지수 값은 $\gamma = 7/5$이므로

$$V_f = \left(\frac{P_i}{P_f}\right)^{5/7} V_i = \left(\frac{1\ \text{atm}}{7\ \text{atm}}\right)^{5/7} 1\ l = 0.25\ l$$

가 된다.

(b) 단열과정이므로 계의 내부 에너지 변화는 시스템에 해준 일 W와 같다. 이상기체로 간주하면 시스템의 내부 에너지 변화 $\Delta U = \frac{5}{2}\Delta(PV)$가 된다. 따라서

$$W = \frac{5}{2}(7\ \text{atm} \cdot 0.25\ \text{L} - 1\ \text{atm} \cdot 1\ \text{L}) = 1.88\ \text{atm} \cdot \text{L} = 189\ \text{J}$$

가 된다.

(c) 이상기체 법칙을 이용하면 $\frac{P_f V_f}{T_f} = \frac{P_i V_i}{T_i}$이므로 나중온도 T_f는

$$T_f = \frac{P_f V_f}{P_i V_i} T_i = \frac{7\ \text{atm} \cdot 0.25\ \text{L}}{1\ \text{atm} \cdot 1\ \text{L}} 300\ \text{K} = 525\ \text{K}$$

이 된다.

2.

57 ℃인 열원과 열적 접촉하고 있으므로 시스템의 온도는 일정하게 유지되어 내부 에너지 변화가 없다. 따라서 열역학 제1법칙에 의하면 $Q = W$가 성립한다. 등온 과정 동안 기체가 한 일은

$$W = nRT\ln\frac{V_f}{V_i} = 2\ \text{mol} \cdot 8.31\ \text{J/mol} \cdot \text{K} \cdot 290\ \text{K} \cdot \ln\frac{40.0}{20.0} = 3341\ \text{J}$$

이므로 이상기체는 열원으로부터 3341 J의 열을 흡수한다.

3.

(a) A과정 : 일정 압력하에서 부피가 팽창하였으므로 기체에 음의 일을 해 주었다.
B과정 : 부피변화가 없으므로 해 준 일은 0이다.
C과정 : 부피가 압축되었으므로 기체에 양의 일을 해 주었다.

(b) A과정 : 온도가 증가하였으므로 내부 에너지 변화는 양의 값이다.
B과정 : 온도가 증가하였으므로 내부 에너지 변화는 양의 값이다.
C과정 : 온도가 감소하였으므로 내부 에너지 변화는 음의 값이다.

(c) A과정 : 내부 에너지 변화는 양의 값이고 해 준 일은 음의 값이므로 기체에 가해진 열은 양의 값이다.
B과정 : 내부 에너지 변화는 양의 값이고 해 준 일은 0이므로 기체에 가해진 열은 양의 값이다.
C과정 : 내부 에너지 변화는 음의 값이고 해 준 일은 양의 값이므로 기체에 가해진 열은 음의 값이다. 한 순환과정이 끝난 뒤 기체의 내부 에너지 변화는 0이다. 기체에 해 준 일은 삼각형 면적과 같은 양의 값이다. 따라서 기체에 가해진 열은 음의 값이다.

4.

시스템의 엔트로피 변화 ΔS는 처음 0℃ 물의 엔트로피 변화 ΔS_1와 100℃ 물의 엔트로피 변화 ΔS_2를 합한 것과 같다. 이 과정은 비가역 과정이지만 대응되는 가역과정으로 대체해서 생각하면

$$\Delta S_1 = \int_{273}^{323}\frac{C_{\text{물}}}{T}dT = 1\ \text{kg} \cdot 4186\ \text{J/kg} \cdot \text{K}\ \ln\frac{323}{273} = 704\ \text{J/K}$$

마찬가지로,

$$\Delta S_2 = \int_{273}^{323}\frac{C_{\text{물}}}{T}dT = 1\ \text{kg} \cdot 4186\ \text{J/kg} \cdot \text{K}\ \ln\frac{323}{373} = -602\ \text{J/K}$$

이다. 따라서

$\Delta S = 704\ \text{J/K} - 602\ \text{J/K} = 102\ \text{J/K}$

으로 전체 엔트로피는 증가된다.

5.

100개의 동전 중에 한 개가 앞면이 나오는 경우의 수는 100이므로 엔트로피는

$S = k\ln W = 1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K} \cdot \ln 100 = 6.36 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$가 된다.

Ⅲ 자기 탐구

1. 쿨롱의 법칙과 전기장

1.

전기력 $F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q^2}{r^2}$, 중력 $F_g = G\frac{m^2}{r^2}$이다.

이때 두 힘의 크기 비는

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 G}\frac{q^2}{m^2} = \frac{9.0 \times 10^9\ \text{N} \cdot m^2/\text{C}^2}{6.67 \times 10^{-11}\ \text{N} \cdot m^2/\text{kg}^2}\frac{(3.2 \times 10^{-19}\ \text{C})^2}{(6.64 \times 10^{-27}\ \text{kg})^2} = 3.1 \times 10^{35}$$이다.

2.

점전하에 의한 전기장 벡터를 구하는 것이다. 원점에 위치한 점전하로부터 전기장 벡터의 값을 구하는 지점까지의 거리 r은

$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(1.2\ \text{m})^2 + (-1.6\ \text{m})^2} = 2.0\ \text{m}$이다.

단위 벡터 $\hat{r}\frac{\vec{r}}{r} = \frac{x\hat{i} + y\hat{j}}{r} = 0.60\ \hat{i} - 0.80\ \hat{j}$이다. 따라서 전기장 벡터는

$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{r^2}\hat{r} = (-11\ \text{N/C})\hat{i} + (14\ \text{N/C})\hat{j}$이다.

3.

전하분포를 전하 dQ의 동심고리들의 집합체로써 나타낼 수 있다. $dQ = \sigma dA = \sigma(2\pi r dr)$이다. 점 P에서 전하 dQ에 의한 전기장의 성분 dE_x는 $dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{(2\pi\sigma r dr)x}{(x^2 + y^2)^{3/2}}$이다.

모든 고리에 의한 총 전기장을 구하기 위하여 r에 대해 $r = 0$부터 $r = R$까지 적분해야 한다.

$$E_x = \int_0^R \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{(2\pi\sigma r dr)x}{(x^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\sigma x}{2\epsilon_0}\int_0^R \frac{r dr}{(x^2 + r^2)^{3/2}}$$

적분은 분모를 치환하여 계산할 수 있다. 결과는

$$E_x = \frac{\sigma x}{2\epsilon_0}\left[1 - \frac{1}{\sqrt{(R^2 + x^2)} + 1}\right]$$

$x \gg R$인 경우 : 원판에 의한 전기장은 점전하에 의한 전기장과 같은 결과이다.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{x^2}$$

$x \ll R$인 경우 : 무한 평면 전하판에 의한 전기장이 되며, 전기장은 평면판으로부터의 거리에 무관하다.

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

4.

(1) 반지름이 R이고, 총 전하 q를 갖는 도체 구에서 전기장 E는 $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

이고, 전기장의 방향으로부터 표면 전하 밀도 σ가 음(−)의 값임을 알 수 있다. 따라서

$\sigma = \epsilon_0 E_\perp = (8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/N \cdot m^2})(-150\ \mathrm{N/C})$

$= -1.33\ \mathrm{nC/m^2}$

(2) 반지름이 $R_E = 6.38 \times 10^6$ m인 지구의 표면 면적은 $4\pi R_E^2 \sigma = -680$ kC이다.

2. 전위와 축전기

1.

10^{-2} m

$V = Ed$에서 $30000 = (3 \times 10^6)d$, 여기서 $d = 10^{-2}$ m

3.

(1) 1.5 μF

$Q = CV$를 이용하여 구한다.

(2) 6 V

충전된 상태에서 축전기 판 사이 거리를 2배로 하면 전하량은 변하지 않고 전기 용량이 반으로 줄어들므로 두 판 사이의 전위차는 2배가 된다.

4.

(1) 축전기 1과 3은 9 μC이고, 축전기 2와 4는 16 μC이다.

(2) 축전기 1 : $\frac{42}{5}\ \mu$C, 축전기 2 : $\frac{84}{5}\ \mu$C, 축전기 3 : $\frac{54}{5}\ \mu$C, 축전기 4 : $\frac{72}{5}\ \mu$C

3. 전류와 직류회로

1.

(1) $I = \frac{dQ}{dt}$이므로, $Q = It = 5.0\ (\mathrm{C/s}) \times 40\ (\mathrm{min}) \times \frac{60\ \mathrm{sec}}{1\ \mathrm{min}}\ 1.2 \times 10^4\ \mathrm{C}$

(2) $Q = ne$이므로, 이때 전자의 수 n은 $n = \frac{Q}{e} = \frac{1.2 \times 10^4}{1.6 \times 10^{-19}} = 7.5 \times 10^{22}$ 개

2.

(1) $R = \int dR = \int \rho \frac{dl}{A} = \int \frac{\rho L}{\pi ab}$

(2) $a = b$ 일때, $R = \frac{\rho L}{\pi a^2} = \rho\ \frac{L}{A}$

3.

3개

$I_{\text{허용}} = 15\ \mathrm{A},\ V = 120\ V,\ P = 500\ \mathrm{W},\ \frac{V^2}{R},\ R = \frac{144}{5}$

전구 n개를 병렬연결했을 때의 합성저항 $R_n = \frac{R}{n}$이므로, 실제 송전선에

흐르는 전류는 허용전류보다 작아야 한다.

$I_{\text{실제}} < I_{\text{허용}} \Rightarrow \frac{120}{R_n} < 15 \Rightarrow n < \frac{15}{120}\ \frac{144}{5} \Rightarrow n < 3.6$

4.

(1) 직렬연결시 회로에 흐르는 전류의 세기는 같으므로 소비전력은 저항의 크기에 비례한다 ($P = I^2R$). 따라서 저항이 큰 R_1이 더 밝다.

(2) 병렬연결시 회로의 양단에 걸리는 전압의 세기는 같으므로 소비전력은 저항의 크기에 반비례한다$\left(P = \frac{V^2}{R}\right)$. 따라서 저항이 작은 R_2가 더 밝다.

5.

(1) $\frac{10}{4}\Omega$, (2) $\frac{40}{3}\Omega$

4. 자기장과 로렌츠힘

1.

$$B = \frac{2\pi mf}{|q|} = 0.0877\ \text{T}$$

2.

(1) 사이클로트론 진동수

$$f = \frac{q_e B}{2\pi m_p} = \frac{(1.60 \times 10^{-19}\,\text{C})(1.2\ \text{T})}{2\pi(1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})} = 18.3\ \text{MHz}$$

(2) $v = \dfrac{qBr}{m_p} = \dfrac{(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})(1.2\ \text{T})(0.50\ \text{m})}{1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}} = 5.75 \times 10^{7}\ \text{m/s}$이므로

$$K = \frac{1}{2} mv^2 = 2.76 \times 10^{-12}\,\text{J} \times (1\ \text{Me V}/1.60 \times 10^{-13}\,\text{J})$$

$$= 17.2\ \text{Me V}$$

3.

도선에 작용하는 자기력이 도선에 작용하는 중력과 크기가 같고 반대방향이 되도록 전류가 흐르면 된다.

반시계 방향으로 전류 $I = \dfrac{mg}{Bl} = \dfrac{(13.0 \times 10^{-3}\,\text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)}{(0.440\ \text{T})(0.62\ \text{m})} = 0.47\ \text{A}$가 흐르면 떠받치는 도선 내의 장력을 제거할 수 있다.

4.

매우 긴 직선도선 주위의 자기장 B는 $B(r) = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}$이다. 직사각형 고리를 통과하는 자기선속 Φ_B는 $\Phi_B = \int d\Phi_B = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi} b\ln = \left(\dfrac{a+c}{c}\right)$이다.

5.

원통형의 구멍을 서로 반대방향으로 흐르는 같은 양의 전류가 채워져 있어서 서로 상쇄되는 것으로 간주할 수 있다. 실제 도체의 경우와 같이 각각의 전류는 동일한 전류밀도를 갖는다고 가정할 때, 앙페르의 법칙을 이용하면 구멍안에서의 자기장의 값이 0임을 확인할 수 있다.

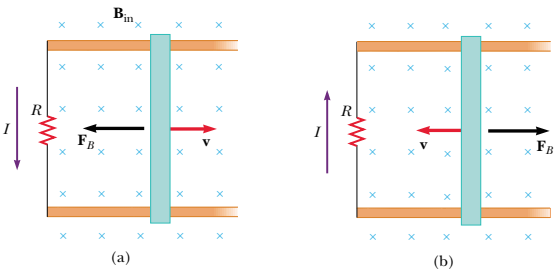
5. 전자기 유도와 자성체

1.

1) 옆의 그림 (b) 의 화살표.

2) 전류가 흐르지 않는다.

3) 그림 (c) 의 화살표.



2.

$L_a > L_b > L_c$.

3.

a가 0.36 V 높다.

4.

각각 800번, 100번

6. 교류회로와 전자기파

1.

자기장을 2배, 또는 면적을 2배, 또는 각진동수를 2배로 한다.

2.

기전력 장치가 공급하는 전력은 식 (6–18)에 따라 $\frac{\varepsilon_0^2}{2Z}\cos\phi = \frac{\varepsilon_0^2}{2Z^2}$R이다. 저항에서 소모되는 전력은 I^2R의 평균값이며 $I = \frac{\varepsilon_0}{Z}\sin(\omega t - \phi)$이므로, I^2의 평균값이 $\frac{\varepsilon_0^2}{2Z^2}$이어서 두 양은 같다.

3.

회로의 전류는 $I = \frac{\varepsilon_0}{Z}\cos(\omega t - \phi)$이며, 위상각은 본문에 경우와 같다. 순간 전력은 $\varepsilon I = \frac{\varepsilon_0^2}{Z}\cos^2(\omega t - \phi)$이며, 평균전력은 $\frac{\varepsilon_0^2}{2Z^2}$이다.

4.

$X_L > X_C$라 가정하자. 임피던스는 $Z = X_L - X_C$이며, 위상각은 $\phi = \frac{\pi}{2}$이므로, 전류는 $I = -\frac{\varepsilon_0}{X_L - X_C}\cos\omega t$이다. 평균전력은 0이고 평균 전기장 에너지는 $\frac{\varepsilon_0^2}{4C\omega^2(X_L - X_C)^2}$이며 평균 자기장 에너지는

$\frac{L\varepsilon_0^2}{4(X_L-X_C)^2}$이다.

5.

$I_0=\omega Q_0=\frac{Q_0}{\sqrt{LC}}\frac{3\times10^{-6}}{6.6\times10^{-5}}$ A $=0.045$ A이다. 실효전류는 0.032 A이다.

6.

저항 R에서 소모되는 순간전력은 $\frac{\varepsilon^2}{(R+r)^2}R$이므로 평균전력은 $\frac{\varepsilon_0^2}{2(R+r)^2}R$

이다. 이 양은 $R=r$일 때 최대이다.

7.

$\lambda=\frac{c}{f}=2\pi\frac{c}{\omega}=2\pi c\sqrt{LC}=4.71$ m

8.

$\varepsilon I=-L\frac{dI}{dt}$, $Q=CV$에서, $LC=\frac{\varepsilon}{\frac{dI}{dt}}\frac{Q}{V}$이며 ε과 V는 차원이 같고 전류

E는 전하/시간의 차원이므로 LC의 차원은 (시간)^{2}이다.

9.

$f=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}10^8$ Hz가 되도록 L과 C의 값을 선택한다.

Ⅳ 파동과 빛 탐구

1. 진동과 파동

1.

(1) 파동의 전파 속도는 $\sqrt{\frac{T}{\mu}}$이므로 장력의 크기를 비교하려면 선밀도의 조건이 주어져야 한다.

따라서 장력의 크기를 비교할 수 없다.

(2) (1)과 같은 이유로 장력에 대한 조건이 주어지지 않았기 때문에 선밀도의 크기를 비교할 수 없다.

2.

(1) 원점에서 진동이 $y = A\sin\omega t$일 때 원점에서 거리 x인 점의 진동은 원점보다 x/v시간 늦어진 진동을 하게 되므로 $t = x/v$를 주어진 식에 대입하면 이 점의 변위 y는

$$y = A\sin\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) = A\sin(\omega t - kx)$$

가 된다. 여기서 $t = 0$으로 하면 x와 y사이의 관계식으로

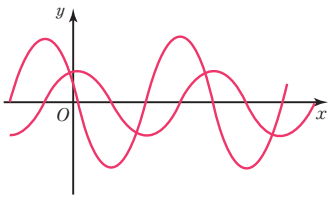
$y = -A\sin kx$

가 얻어진다.

(2) 점 B의 위치는 원점에서 왼쪽으로 $\lambda/4$ 만큼 떨어진 곳이다. 따라서 $x = -\lambda/4$를 윗식에 대입하면

$$y = A\sin(\omega t - kx) = A\sin\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}\left(-\frac{\lambda}{4}\right)\right] = A\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

이 된다.



(3) 위상 90°는 $\lambda/4$에 해당한다. 그러므로 주어진 곡선을 $\lambda/4$만큼 오른쪽으로 이동시키고 진폭이 1/2인 sine 함수를 그린다.

3.

전자기파의 전기장 진동방향과 일치하도록 놓아야 안테나 안에 있는 자유전자들이 용이하게 진동을 할 수 있다. 전자들이 진동을 하게 되며 안테나에는 전류가 흐르게 되어 이것을 증폭하여 소리로 전환시켜 들을 수 있다.

2. 정상파

1.

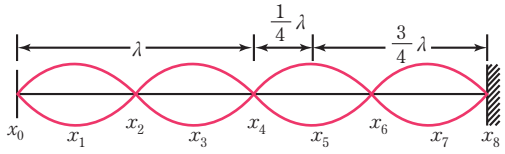
(1) 점 x_0와 x_4 사이의 거리는 1 m이다. 이것은 한 파장이므로 파동이 x_4까지 진행하는데 걸리는 시간은 주기 $T = 0.25$ s이다. 또한 속력은

$$v = \frac{\lambda}{T} = 4 \text{ m/s}$$

(2) 점 x_4의 변위가 0에서 최대가 되었다가 다시 0이 되는 시간은 $T/2$이므로 이 시간 사이에 파동은 $\lambda/2$ 만큼 앞으로 진행한다. 즉 파동은 점 x_6까지 진행한다. 용수철에 생긴 종파를 횡파로 고쳐서 생각하면 쉽게 알 수 있다. 이 때 변위가 최대인 곳은 x_1, x_3, x_5이다.

(3) 고정점 x_8이 마디가 되고, 점 x_7은 배가 되며, 이 점에서 왼쪽으로 반 파장 즉 0.5 m씩 떨어진 점은 모두 배가 된다. 그러므로 배가 되는 지점은 x_1, x_3, x_5, x_7이다.

(4) 점 x_5에 대한 진행파와 반사파의 진행 거리차 Δx는 그림에서와 같이 $\frac{1}{2}\lambda$가 되며, 이 거리차에 의한 위상차는 π이다. 또 고정단에서 반사할 때 반사파와 입사파의 위상차가 π 만큼 생기므로 결국 두 파동의 위상차는 2π가 된다.



2.

(1) 정상파의 배와 다음 배 사이의 길이는 $\frac{\lambda}{2}$이고 전체 길이 1.5 m내에 5개의 배가 만들어졌으므로

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{1.5}{5} = 0.3\ (\mathrm{m}) \quad \therefore \lambda = 0.6\ \mathrm{m}$$

(2) $v = f\lambda$에서 $f = 100$ Hz이므로 $v = 100 \times 0.6 = 60$ (m/s)

(3) 질량을 2배로 하면 질량 m은 2 m이 되고, 3개의 배를 가진 정상파를 만들었을 때의 현의 길이를 l', 파장을 λ'이라 하면

$$\frac{\lambda'}{2} = \frac{l'}{3} \quad \therefore l' = \frac{3}{2}\lambda'$$

이고, 파동의 속력 v'은

$$v' = \sqrt{\frac{T'}{\mu}} = \sqrt{\frac{2mg}{\mu}} = \sqrt{2}v$$

가 된다. 진동수는 변하지 않으므로 λ'은

$$\lambda' = \frac{v'}{f} = \sqrt{2}\ \frac{v}{f}$$

가 되고 따라서

$$l' = \frac{3}{2} \times \frac{\sqrt{2}v}{f} = \frac{3}{\sqrt{2}}\lambda = 0.9\sqrt{2}\ (\mathrm{m})$$

3. 기하 광학

1.

$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$에서

볼록거울에서 반사된 상의 위치 b는

$$b = \frac{af}{a-f} = -0.2\,\frac{0.6-x}{0.8-x} < 0$$

볼록거울에 의한 상이 오목거울의 물체 역할을 하므로 오목거울에 대해 물체의 거리 a'은

$$a' = 0.6 + 0.2\frac{0.6 - x}{0.8 - x} = \frac{0.6 - 0.8x}{0.8 - x}$$

오목거울에 의한 상의 위치는 x이므로

$$\frac{0.8 - x}{0.6 - 0.8x} + \frac{1}{x} = \frac{1}{0.2} \quad \therefore x = \frac{1 - \sqrt{0.2}}{2}$$

2.

구면에서 굴절은 $\frac{n_1}{a} + \frac{n_2}{b} = \frac{n_2 - n_1}{r}$이 성립하고, $a = \infty$, $n_1 = 1$, $n_2 = n$이라 놓으면 $b = 2r$이므로

$$\frac{n}{2r} = \frac{n - 1}{r} \quad \therefore n = 2$$

3.

$n_1 = n = 1.5$, $n_2 = 1$이고, $a = 3$, $r = 1$이므로 $\frac{n_1}{a} + \frac{n_2}{b} = \frac{n_2 - n_1}{r}$에서

$$\frac{1.5}{3} + \frac{1}{b} = \frac{1.5 - 1}{1} \quad \therefore b = -1$$

따라서 O에서 오른쪽으로 2 cm인 곳에 상이 생긴다.

4.

렌즈 A에 대해 상의 위치를 b_A라 하면 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b_A} = \frac{1}{f_A}$에서 $a = 4$, $f_A = 2$이므로

$$\frac{1}{4} + \frac{1}{b_A} = \frac{1}{2} \quad \therefore b_A = 4$$

따라서 A에 의한 상은 렌즈 B의 오른쪽 2 cm인 지점에 생긴다. 이 상이 렌즈 B에 대해 물체처럼 작용하며 렌즈 B의 오른쪽에 있으므로 $a_B = -2$, $f_B = -3$이다.

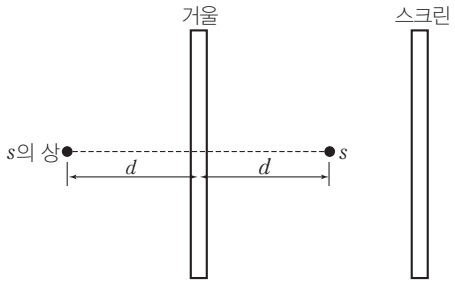
$$\frac{1}{-2} + \frac{1}{b_B} = -\frac{1}{3} \quad \therefore b_B = 6$$

즉 렌즈 B에 대한 상은 렌즈 B의 오른쪽 6 cm 지점에 있다. 이것은 거울 C의 오른쪽 4 cm 지점에 있고 이 상이 거울에 대해 물체처럼 작용하므로 $a_C = -4$, $f_C = -3$이므로

$$\frac{1}{-4} + \frac{1}{b_C} = -\frac{1}{3} \quad \therefore b_C = -12$$

즉 상은 거울에서 오른쪽으로 12 cm 지점이며 허상이다.

5.



S의 상을 그리면 오른쪽 그림과 같다.

따라서 스크린 중심에 생기는 빛의 세기는 S에 의한 빛의 세기와 S의 상에 의한 빛의 세기의 합이 된다. 빛의 세기는 스크린으로부터 거리의 제곱에 반비례하므로 S에 의한 빛의 세기 $I_0 \propto \frac{1}{d^2}$이고 상에 의한 빛의 세기 $I' \propto \frac{1}{(3d)^2}$이다.

$I = I_0 + I' \propto \frac{10}{9}\frac{1}{d^2}$

따라서 빛의 세기의 $\frac{10}{9}$배가 된다.

4. 간섭

1.

(1) 스크린 상에 보강간섭이 나타나는 θ가 0, 0.01, 0.02, 0.03, …으로 나타나고 있다. 그러나 보강간섭이 일어나야 할 $\theta = 0.05$(rad)인 곳에서는 회절의 효과(중앙으로부터 첫 번째 소멸간섭 지점)로 인해 간섭무늬의 세기가 0이다.

(2) 슬릿의 폭을 a라 하고 슬릿 사이의 간격을 d라 하면,
$d\sin\theta = n\lambda$인 조건을 만족하는 각도들, 즉 0, 0.01, 0.02, 0.03, …에서는 보강간섭에 의해 빛이 강하게 도달하는데 0.05(rad)과 0.10(rad)인 곳들은 보강간섭 조건을 만족하여 빛이 세게 도달하여야 할 것 같지만, 회절에 관한 식 $a\sin\theta = m\lambda$인 조건을 만족하여 빛이 도달하지 못한다.

2.

(1) A 지점이다. 이유는 두 판이 접촉하는 지점은 경로차에 의한 위상차는 0이지만 반사에 따른 위상차가 180°이기 때문에 상쇄간섭하여야 한다. 따라서 접촉 지점은 어둡게 보여야 한다.

(2) 반파장이다. 이유는 경로차는 2배를 해주어야 하기 때문이다.

(3) 수막으로 바뀌면 반사에 따른 위상차가 없어지기 때문에 접촉지점에서는 경로에 따른 위상차도 없어 밝은 무늬가 된다.
경로차를 굴절률의 배 만큼 키워주는 역할을 하기 때문에 더 자주 간섭무늬가 바뀌게 되어 간섭무늬 사이의 간격이 좁아진다. 즉 간섭무늬의 개수가 증가하게 된다.

5. 회절

1.

(1) 슬릿의 폭은 A > D > B > C 이다. 중앙의 큰 무늬를 기준으로 회절 무늬의 첫 번째 0이 되는 각을 보면 A는 5, B는 8, C는 19, D는 6이다. 그림이 확실하지 않아 A와 D를 같게 보면 A와 D는 슬릿 폭이 같다.

(2) 간섭무늬의 간격을 보면, 슬릿 사이의 간격은 D > A = C > B이다.

2.

간섭무늬 조건은 $d\sin\theta = n\lambda$이므로 $d = 0.2$ mm, $\sin\theta \approx \frac{y}{L}$에서 $y = 3.6$ mm, $L = 1.2$ m 이므로 $\lambda = 600$ nm이다.

3.

(1) A 지점은 두 슬릿일 때에는 경로차가 $\frac{3}{2}\lambda$이므로 위상차가 180° 나는데, 세 번째 슬릿을 통과한 빛이 상쇄 간섭할 수 있는 파가 없어서 이 빛의 세기에 해당하는 만큼의 빛이 도달하여 완전히 상쇄 간섭하지는 않는다.

(2) B 지점은 2개가 있을 때 위상차가 0이고, 세 번째 슬릿을 통과한 빛도 위상차가 없기 때문에 3광 모두 보강간섭을 하게 되어 더 밝게 된다.

6. 편광

1.

(1) $\frac{I_0}{2}$이며 전기장이 위아래로 진동하는 성분이 측정된다. 관찰자에게 빛이 도달하지 않는 이유는 두 번째 편광판에서 모두 차단하기 때문이다.

(2) (1)에서와 같다. 편광되지 않은 빛은 모든 방향으로 진동하는 전기장의 성분 크기가 같기 때문이다. 관찰자에게는 빛이 도달한다. P 지점에서 관찰된 빛 중에 수평방향으로 진동하는 성분이 두 번째 편광판을 통과한다. 세기는 $\frac{8}{3}I_0$이다.

2.

(1) 편광의 투과축의 각도에 따라 통과하는 빛의 세기가 달라진다.

(2) Y 위치에는 편광자를 어떤 방향으로 바꾸어도 결국 차단된다.

2. 물질과 파동의 이중성

1.

식 (V. 2−14)로부터

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV_A} = \frac{1240\ \text{eV} \cdot \text{nm}}{10^4\ \text{eV}} = 0.124\ \text{nm}$$

여기서 다음과 같은 편리한 결과를 사용하였다.

$$\frac{hc}{e} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s})(3 \times 10^8\ \text{m/s})}{1.6 \times 10^{-19}\ \text{J/eV}} = 1.24 \times 10^{-6}\ \text{eV} \cdot \text{m}$$

$$= 1240\ \text{eV} \cdot \text{nm}$$

2.

광자와 전자의 파장이 같으므로 운동량도 같아야 한다. 전자의 운동 에너지는 다음과 같다.

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{p^2c^2}{2mc^2} = \frac{E_{ph}^2}{2mc^2} = \frac{(10^4)^2}{2(0.511 \times 10^6)} = 98\ \text{eV}$$

98 eV의 운동 에너지가 mc^2보다 훨씬 작다는 것을 주목하라. 그러므로 운동 에너지의 고전적인 표현인 $p^2/2m$이 유효하다.

3.

이 먼지 조각의 운동량은

$$p = mv = (10^{-10}\ \text{kg})(10^{-6}\ \text{m/s}) = 10^{-16}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

이 입자의 드브로이 파장은

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{10^{-16}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}} = 6.63 \times 10^{-18}\ \text{m} = 6.63 \times 10^{-3}\ \text{fm}$$

원자 핵의 반지름은 수 femto 미터 단위의 값이다. 따라서 거시적인 물체의 파동적 성질을 관측하는 것은 불가능하다.

4.

(a) $E_\gamma = hf = (4.14 \times 10^{-15}\ \text{eV} \cdot \text{s}) \times (10^6\ \text{Hz}) = 4.14 \times 10^{-9}\ \text{eV}$

(b) f가 100배 크다면 E_γ도 마찬가지다. 따라서 $4.14 \times 10^{-7}\ \text{eV}$

5.

(a) 최대 파장은 $E_\gamma = (hc)/\lambda_0 = \phi$ 의조건에 의해 결정된다. 따라서

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\phi} = \frac{1240\text{eV} \cdot \text{nm}}{1.9\ \text{eV}} = 650\ \text{nm}$$

(b) $K_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - \phi = \frac{1240\ \text{eV} \cdot \text{nm}}{500\ \text{nm}} - 1.9\ \text{eV} = 0.6\ \text{eV}$

6.

$p = h/\lambda$이므로, 운동 에너지는 다음과 같다.

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda^2} = \frac{(hc)^2}{2mc^2\lambda^2}$$

여기서 $mc^2 = 940$ MeV이므로, 따라서

$K = 4.0 \times 10^{-9}$ eV

3. 원자의 구조

1.

바닥상태의 수소원자가 12.09 eV의 광자를 흡수 했으므로 $\Delta E = 12.09$ eV이다.

(1) $\Delta E = E_n - E_1$

$12.09\ \text{eV} = E_n - (-13.6\ \text{eV})$

$E_n = (12.09 - 13.6)\ \text{eV} = -1.51\ \text{eV}$

따라서, $E_n = -\frac{13.6}{n^2} = -1.51\ \text{eV}$

$\therefore n^2 = \frac{-13.6}{-1.51} = 9$ 또는 $n = 3$

(2) 모든 가능한 전이는 n = 3 → n = 1 , n = 3 → n = 2 , n = 2 → n = 1 세 가지이다.

첫 번째 n = 3 → n = 1 경우

$\Delta E_{31} = E_3 - E_1 =$ 방출된 광자의 에너지

$= -1.51 - (-13.6) = 12.09\ \text{eV} = 1.93 \times 10^{-18}\ \text{J}$

$\Delta E_{31} = \frac{hc}{\lambda_{31}}$에서

$\lambda_{31} = \frac{hc}{\Delta E_{31}} = \frac{2 \times 10^{-25}\ \text{J} \cdot \text{m}}{1.93 \times 10^{-18}\ \text{J}} = 1.04 \times 10^{-7}\ \text{m}$

두 번째 $n = 3 \rightarrow n = 2$ 경우

$\Delta E_{32} = E_3 - E_2$ = 방출된 광자의 에너지

$= -1.51 - (-3.4) = 1.89\ \text{eV} = 3.04 \times 10^{-19}\ \text{J}$

$\Delta E_{32} = \dfrac{hc}{\lambda_{32}}$에서

$$\lambda_{32} = \frac{hc}{\Delta E_{32}} = \frac{2 \times 10^{-25}\ \text{J} \cdot \text{m}}{3.04 \times 10^{-19}\ \text{J}} = 6.58 \times 10^{-7}\ \text{m}$$

세 번째 $n = 2 \rightarrow n = 1$ 경우

$\Delta E_{21} = E_2 - E_1$ = 방출된 광자의 에너지

$= -3.4 - (-13.6) = 10.2\ \text{eV} = 1.63 \times 10^{-18}\ \text{J}$

$\Delta E_{21} = \dfrac{hc}{\lambda_{21}}$에서

$$\lambda_{32} = \frac{hc}{\Delta E_{32}} = \frac{2 \times 10^{-25}\ \text{J} \cdot \text{m}}{1.63 \times 10^{-13}\ \text{J}} = 1.23 \times 10^{-7}\ \text{m}$$

2.

전자의 에너지는 $E_n = -\dfrac{13.6}{n^2}\ \text{eV}$이므로, 첫 번째 들뜬 상태는 $n = 2$ 대입하면

$$E_2 = -\frac{13.6\ \text{eV}}{2^2} = -3.4\ \text{eV} = 5.44 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

각운동량은 $L = n\dfrac{h}{2\pi} = 2\ \times \dfrac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{2 \times 3.14} = 2.11 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$

궤도반지름은 $r = 0.52n^2\ \text{Å} = 0.52 \times 10^{-10} \times 2^2\ \text{m} = 2.08 \times 10^{-10}\ \text{m}$

궤도속력은 각운동량 $L = mvr$에서

$$v = \frac{L}{mr} = \frac{2.11 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{(9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg})(2.08 \times 10^{-10}\ \text{m})} = 1.1 \times 10^{6}\ \text{m/s}$$

3.

(1) 정상파의 파장은 $\lambda_n = \dfrac{2L}{n}$이므로

$$\lambda_1 = \frac{2 \times (6 \times 10^{-15})}{1} = 12 \times 10^{-15}\ \text{m},$$

$$\lambda_2 = \frac{2 \times (6 \times 10^{-15})}{2} = 6 \times 10^{-15}\ \text{m},$$

$$\lambda_3 = \frac{2 \times (6 \times 10^{-15})}{3} = 4 \times 10^{-15}\ \text{m},$$

$$\lambda_4 = \frac{2 \times (6 \times 10^{-15})}{4} = 3 \times 10^{-15}\ \text{m}$$

(2) 정상파의 에너지는 $E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda_n^2} = n^2 E_1$

$$E_1 = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s})^2}{2(1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})(12 \times 10^{-15}\ \text{m})} = 9.14 \times 10^{-13}\ \text{J} = 5.7\ \text{MeV}$$

$E_2 = 2^2 E_1 = 22.8\ \text{MeV}$
$E_3 = 3^2 E_1 = 51.3\ \text{MeV}$
$E_4 = 4^2 E_1 = 91.2\ \text{MeV}$

4.

(1) 식 (V. 3-38)을 이용하면 $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{2\pi x}{L}$

(2) 확률 $\int_{x_1}^{x^2} |\psi(x)|^2 dx = \frac{2}{L}\int_0^{\frac{2}{L}} \sin^2 \frac{2\pi x}{L} dx = \frac{2}{L}\left(\frac{L}{4}\right) = 0.5$

5.

이 전자의 운동량은

$p = \sqrt{2mE} = \sqrt{2(9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg})(1.6 \times 10^{-16}\ \text{J})} = 1.7 \times 10^{-23}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

(1) 자유입자인 경우 $\Delta x = \infty$이므로 $\Delta p = \frac{h}{\Delta x} = 0$이므로 $\Delta p/p = 0$이다.

(2) $\Delta x = 10^{-2}\text{m}$ 이므로, $\Delta p = \frac{h}{\Delta x} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{10^{-2}\ \text{m}} = 6.63 \times 0^{-32}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

따라서 $\frac{\Delta p}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-32}}{1.7 \times 10^{-23}} = 3.9 \times 0^{-9}$

(3) $\Delta x = 10^{-10}\ \text{m}$이므로, $\Delta p = \frac{h}{\Delta x} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{10^{-10}\ \text{m}} = 6.63 \times 0^{-24}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

따라서 $\frac{\Delta p}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-24}}{1.7 \times 10^{-23}} = 0.39$

(4) $\Delta x = 10^{-15}\ \text{m}$이므로, $\Delta p = \frac{h}{\Delta x} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{6 \times 10^{-15}} = 1.1 \times 0^{-19}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

따라서 $\frac{\Delta p}{p} = \frac{1.1 \times 10^{-19}}{1.7 \times 10^{-23}} = 6500$

(5) 전자의 에너지 $E = 1.6 \times 10^{-16}\,\mathrm{J}$, $\Delta E/E = 0.01$이므로 $\Delta E = 1.6 \times 10^{-4}\,\mathrm{J}$

따라서 $\Delta t = \frac{h}{\Delta E} = \frac{6.63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}}{1.6 \times 10^{-14}\,\mathrm{J}} = 4.14 \times 10^{-20}\,\mathrm{s}$

(6) $\Delta t = 10^{-16}\,\mathrm{s}$이므로

$$\Delta E = \frac{h}{\Delta t} = 6.63 \times 10^{-28}\,\mathrm{J} = 4.1 \times 10^{-9}\,\mathrm{eV}$$

4. 핵 물리

1.

금 핵의 질량은 α 입자보다 약 50배 정도 무겁다. 정확한 결과보다는 근접한 값을 얻고자하므로 금 핵의 되튐은 무시하겠다. 정면 충돌에서 입사 입자의 초기 운동 에너지는 가장 근접한 거리에서 모두 정전 포텐셜 에너지로 변환된다. 금의 원자번호는 79이고, α 입자의 원자 번호는 2이다. 따라서

$$\frac{(79)(2)e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} = (6 \times 10^6\,\mathrm{eV})(1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{J/eV})$$

또는

$$r = \frac{(79)(2)(1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{J/eV})}{6 \times 10^6} = 3.8 \times 10^{-14}\ \mathrm{m}$$이다.

2.

식 (V. 4−1)로부터

$$R = (1.2 \times 10^{-15})(227^{1/3})\,\mathrm{m} = 7.32 \times 10^{-15}\,\mathrm{m}$$

이므로, 핵 밀도는

$$\rho = \frac{1u}{4\pi R_0^3/3} = \frac{1.66 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}}{7.24 \times 10^{-45}\,\mathrm{m^3}} = 2.3 \times 10^{17}\,\mathrm{kg/m^3}$$

이다. 1 $\mathrm{mm^3}$ 핵 물질의 질량은

$$m = (2.3 \times 10^{17}\,\mathrm{kg/m^3})(10^{-9}\,\mathrm{mm^3/m^3}) = 2.3 \times 10^8\ \mathrm{kg}$$

이다.

3.

시료 1 g에 들어있는 핵의 수는

$$N = \frac{6.02 \times 10^{23}\ \text{핵/mol}}{226\ \mathrm{g/mol}} = 2.66 \times 10^{21}\ \text{핵}$$

붕괴 상수는 식 (V. 4–6)에서 주어진다.

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{(1600\text{년})(3.156 \times 10^7\ \text{s/년})} = 1.37 \times 10^{-11}\,\text{s}^{-1}$$

그러므로, 시료의 붕괴율은

$$R = (2.66 \times 10^{21}\ \text{핵})(1.37 \times 10^{-11}\,\text{s}^{-1}) = 3.65 \times 10^{10}\,\text{s}^{-1}$$

즉, 예상한 대로 약 1 Ci이다.

4.

(a) $N = N_0 e^{-\gamma t}$이고, $N_0 = 10^6$, $\gamma = 0.01$분$^{-1}$이다. 따라서 60분 후에는,

$$N = 10^{60} e^{-0.01 \times 60} = 5.49 \times 10^5$$

(b) $R(t) = \gamma N(t)$이다. 따라서,

$$R_0 = \gamma N_0 = (0.01\ \text{분}^{-1}) \times 10^6 = 10^4\ \text{분}^{-1}$$

(c) 한 시간 후에는

$$R = \gamma N \approx 5.5 \times 10^3\ \text{분}^{-1}$$

5.

(a) ^{60}Co 시료의 원자 수는

$$N_0 = \frac{10^{-6}\ \text{g}}{10\ \text{g/mol}} \times (6.02 \times 10^{23}\ \text{원자/mol}) = 1.00 \times 10^{16}\ \text{원자}$$

(b) 1 년($t = 3.15 \times 10^7$ s) 후,

$$N = N_0 e^{-\gamma t} = 8.76 \times 10^{15}\ \text{원자}$$

(c) $t_{1/2} = (\ln 2)/\gamma = 1.1655 \times 10^8\ \text{s} = 5.2$ 년

5. 기본 입자

1.

첫 번째 중입자 수 보존을 고려 :

K^-는 중간자, p는 중입자이므로 $(\sum B)_{\text{처음상태}} = 0 + 1 = 1$이므로 나중상태에도 $(\sum B)_{\text{나중상태}} = 1$이다. π^0는 $B = 0$인 중간자이므로 x는 $B = 1$이어야 한다. 따라서 x는 중입자이다.

두 번째 기묘도를 고려 :

$(\sum S)_{\text{처음상태}} = -1 + 0 = -1$이다. $S_{\pi^+} = 0$이므로 $S_x = -1$이다. 따라서 x는 기묘도가 -1인 중입자이다. K^-와 π^+는 정수 스핀을 갖는 중간자이고 p는 반정수 스핀을 갖는 페르미온이므로 x는 페르미온이어야 한다.

마지막으로 전하를 고려해보면 $(\sum Q)_{\text{처음상태}} = -1 + 1 = 0$이다. $Q_{\pi^0} = 0$이므로 Q_x는 0이 되어야 한다.

따라서 [표 Ⅴ-3]에서 찾아보면 $\sum^0$가 이에 해당한다.

2.

(1) $(\sum Q)_{\text{처음상태}} = 0$이고 $(\sum Q)_{\text{나중상태}} = +1 + (-1) = 0$이므로 전하는 보존된다.
스핀의 보존은 하나의 홀수 페르미온이 처음 상태에 있고, 나중상태에 하나의 홀수 페르미온이 있다.
즉, $(\sum 2S)_{\text{처음상태}} = 1$(홀수), $(\sum 2S)_{\text{나중상태}} = 1 + 0 = 1$(홀수)이다.

(2) 처음에 $E_{\Lambda^0} = m_{\Lambda^0}c^2 = 1115.6$ MeV이다. 에너지 보존을 고려하면 $m_{\Lambda^0}c^2 = E_p + E_{\pi^-}$를 얻는다.
시스템의 초기 선운동량은 $(\sum P)_{\text{처음상태}} = 0$이다.
선운동량 보존을 고려하면 $(\sum P)_{\text{나중상태}} = p_p + p_{\pi^-} = 0$이므로 $p_p = -p_{\pi^-}$이므로 반대방향으로 생성된다.
양변을 제곱하고 c^2를 곱하면 $(p_pc)^2 = (p_{\pi^-}c)^2$이고, $(pc)^2 = E^2-(mc^2)^2$을 이용하면
$E_p^2 - (m_pc^2)^2 = E_{\pi^-}^2 - (m_{\pi^-}c^2)^2$이 된다. 이것을 정리하면
$E_p^2 - E_{\pi^-}^2 = (m_pc^2)^2 - (m_{\pi^-}c^2)^2$이 된다.
이 식의 좌변은 $\dfrac{E_p^2 - E_{\pi^-}^2}{E_p + E_{\pi^-}} = \dfrac{(E_p - E_{\pi^-})(E_p + E_{\pi^-})}{(E_p + E_{\pi^-})} = (E_p - E_{\pi^-})$

우변은 $\dfrac{(m_pc^2)^2 - (m_{\pi^-}c^2)^2}{m_{\Lambda^0}c^2}$

이다. 따라서

$$E_p - E_{\pi^-} = \frac{(m_pc^2)^2 - (m_{\pi^-}c^2)^2}{m_{\Lambda^0}c^2}$$

이다.
처음에 $m_{\Lambda^0}c^2 = E_p + E_{\pi^-}$과 같이 연립으로 풀면

$$E_p = \frac{1}{2}\left[m_{\Lambda^0}c^2 + \frac{(m_pc^2)^2 - (m_{\pi^-}c^2)^2}{m_{\Lambda^0}c^2}\right],$$

$$E_{\pi^-} = \frac{1}{2}\left[m_{\Lambda^0}c^2 - \frac{(m_pc^2)^2 - (m_{\pi^-}c^2)^2}{m_{\Lambda^0}c^2}\right]$$ 숫자를 대입하면

$$E_p = \frac{1}{2}\left[1156\text{ MeV} + \frac{(938.3\text{ MeV})^2 - (139.6\text{ MeV})^2}{1115.6\text{ MeV}}\right] = 943.7\text{ MeV}$$

$$E_{\pi^-} = \frac{1}{2}\left[1156\ \text{MeV} - \frac{(938.3\ \text{MeV})^2 - (139.6\ \text{MeV})^2}{1115.6\ \text{MeV}}\right] = 171.9\ \text{MeV}$$

양성자의 운동량은 $p_p = \dfrac{\sqrt{E_p^2 - (m_p c^2)^2}}{c} = 101\ \text{MeV/c}$

파이온의 운동량은 $p_{\pi^-} = \dfrac{\sqrt{E_\pi^{\,2} - (m_{\pi^-} c^2)^2}}{c} = 101\ \text{MeV/c}$

3.

전하량 보존 : 처음 +1이고 나중이 +1로 보존된다.
경입자수 보존 : 전부 경입자가 아니므로 보존된다.
선운동량 보존 : 정지해 있다가 움직이므로 크기가 같고 방향이 반대로 움직일 수 있으므로 보존된다고 가정하자.
처음 질량에너지와 나중질량에너지의 차이값 Q :

$$Q = (m_p c^2) - m_{\pi^0} c^2 + (m_{\pi^+} c^2)$$
$$= 938.3\ \text{MeV} - (135.0\ \text{MeV} + 139.6\ \text{MeV}) = 663.7\ \text{MeV}$$

이므로 Q가 양수이므로 양성자는 두 파이온을 만들어 내기에 충분한 질량 에너지를 갖고 있다.

스핀각운동량 : 양성자의 $S_Z = \pm\dfrac{1}{2}\hbar$ 이고 파이온은 $0\hbar$ 이므로 스핀각운동량이 보존이 안되기 때문에 이 붕괴는 일어날 수 없다.

중입자수 보존 : 양성자의 중입자수 B = 1, 두 파이온의 중입자수 B = 0 이므로 역시 보존되지 않아 일어날 수 없다.

4.

반양성자 : $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$, 반중성자 : $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$

5.

(1) $(\sum Q)_{\text{처음상태}} = 1 + 1 = 2,\ (\sum Q)_{\text{나중상태}} = 1 + 1 + q_{\bar{n}}$,
따라서 $q_{\bar{n}} = 0$

(2) $(\sum B)_{\text{처음상태}} = 0 + 1 = 1,\ (\sum B)_{\text{나중상태}} = 1 + 1 + B_{\bar{n}}$,
따라서 $B_{\bar{n}} = -1$

(3) $(\sum S)_{\text{처음상태}} = 0 + 0 = 0,\ (\sum S)_{\text{나중상태}} = 0 + 0 + S_{\bar{n}}$,
따라서 $S_{\bar{n}} = 0$

참고문헌 및 자료출처

Ⅰ. 역학 탐구

• p.8, 오토바이, http://riders.ne.kr
• p.14, 생각해 보기 그림, http://phys.chonbuk.ac.kr/Culphy/mech1/image/img1332.gif
• p.14, 다중섬광 사진, http://sungsook.com.ne.kr/images/fall&projectile.jpg
• p.22, 2장 도입 사진, 예인선 http://www.paradise.caltech.edu/riedel/personal04-08-07-gallery/04-08-07-image-027.jpg
• 그림 Ⅰ-8, Physics (Serway 7th) p82, 그림 5.3
• 그림 Ⅰ-9, http://www.sciencegood.com/pic/phy29.jpg
• p.35, 3장 도입 사진, 볼링공 http://www.asgbowl.com/Portals/26292/images/bowling-spin-game-play.jpg
• 그림 Ⅰ-17, : http://psience.com.ne.kr/grafix/motion-force/tennis_ball.jpg
• p.43, 실험 그림, 물리실험 p83 그림 26 2차원 충돌
• 그림 Ⅰ-23, 물리실험 p82 그림 24~25
• p.46 4장 도입 사진, Physics (Serway 7th) p285, 도입 사진
• 그림 Ⅰ-24, http://edu.glogster.com/media/5/23/49/79/23497994.gif
• p.56, 5장 도입 사진
• p.61, 브라질 금광 사진, http://kookbang.dema.mil.kr/newspaper/news/20091120/1468.bmp
• p.70, 6장 도입 사진, http://gallery.wolfram.com
• 그림 Ⅰ-43, http://fphoto.photoshelter.com/image/I0000u8l9D7mWHGw
• 그림 Ⅰ-49, http://fphoto.photoshelter.com/image/I000006oBOATl1QI
• 그림 Ⅰ-50, Physics (Serway 6th) p316, 그림 10.26
• p.81, 7장 도입 사진, http://astro.virginia.edu
• 그림 Ⅰ-55, Physics (Serway 6th) p304, Table 10.2
• 그림 Ⅰ-58, http://www.sparknotes.com/testprep/books/sat2/physics/chapter10section6.rhtml
• 그림 Ⅰ-59, Physics (Serway 6th) p350, Figure 11.15
• p86, 보조단 그림, Pasco manual
• p89, 회전 디스크 그림, Pasco manual
• p.91, 읽을거리, http://www.ak1525.com/upload/editor/2010/05/17/3a27d2db4c.jpg

Ⅱ. 열역학 탐구

• p.96, 1장 도입 그림, httpen.wikipedia.orgwikiFileWiki_ostrich.jpg
• 그림 Ⅱ-6, cse.ssl.berkeley.edu
• 그림 Ⅱ-7, http://alfven.princeton.edu/projects/ThermalRad.htm
• 그림 Ⅱ-8, http://www.thermographyarizona.com

• 그림 Ⅱ-9, http://discovermagazine.com/2007/may/coming-through-in-stereo
• p.112, 2장 도입 그림, http://www.rchoetzlein.com/art/sculpture/energy.htm
• 그림 Ⅱ-11, http://www.physlab.snu.ac.kr
• p.114, 열의 일당량 측정장치 그림, Pasco manual
• 그림 Ⅱ-17, http://www.coolest-gadgets.com
• 그림 Ⅱ-18, cs.brown.edu
• 그림 Ⅱ-21, 물리학 I (Giambattista, Richardson, Richardson) p496, 그림 15.12
• p.126, 보조단 사진, Pasco manual
• p.136, 읽을거리 인물 사진, 위키백과(영문)

Ⅲ. 전자기

• p.142, 실험그림, 물리실험 p.112-113
• p.143, 실험그림, 물리실험 p.113
• 그림 Ⅲ-3, Physics(Serway 6th) p.716, 23.11
• 그림 Ⅲ-4, Physics(Serway 6th) p.717, 23.13
• 그림 Ⅲ-5, Physics(Serway 6th) p.719, 23.16
• 그림 Ⅲ-6, 대학물리학(대표역자 김용은 12th) p.724, 21.29
• 그림 Ⅲ-7, Physics(Serway 6th) p.746, 24.10
• 그림 Ⅲ-8, 대학물리학(대표역자 김용은 12th) p.756 22.10
• 그림 Ⅲ-9, Physics(Serway 6th) p.744, 24.8
• 그림 Ⅲ-10, 대학물리학(대표역자 김용은 12th) p.757, 22.11
• 그림 Ⅲ-11, Physics(Serway 6th) p.765, 25.2(a)
• 그림 Ⅲ-12, Physics(Serway 6th) p.768, 25.7
• 그림 Ⅲ-13, Physics(Serway 6th) p.769, 25.9; p.772, 25.13(c)
• p.154, 실험그림, 물리실험 p.119 상단그림
• 그림 Ⅲ-14, Physics(Serway 6th) p.774, 25.15
• 그림 Ⅲ-15, Physics(Serway 6th) p.778, 25.21
• 그림 Ⅲ-16, Physics(Serway 6th) p.795 사진
• 그림 Ⅲ-17, Physics(Serway 6th) p.796, 26.1
• 그림 Ⅲ-18, Physics(Serway 6th) p.797, 26.2
• 그림 Ⅲ-19, Physics(Serway 6th) p.803, 26.9
• 그림 Ⅲ-20, Physics(Serway 6th) p.804 26.10
• 그림 Ⅲ-21, Physics(Serway 6th) p.833, 27.2
• 그림 Ⅲ-22, Physics(Serway 6th) p.836, 27.5
• 그림 Ⅲ-23, Physics(Serway 6th) p.845, 27.13

• 그림 Ⅲ-24, Physics(Serway 6th) p.859, 28.1
• 그림 Ⅲ-25, Physics(Serway 6th) p.860, 28.2
• 그림 Ⅲ-26, Physics(Serway 6th) p.862, 28.4
• 그림 Ⅲ-27, Physics(Serway 6th) p.864, 28.6
• 그림 Ⅲ-28, Physics(Serway 6th) p.870, 28.14
• 그림 Ⅲ-29, Physics(Serway 6th) p.870, 28.15
• 그림 Ⅲ-30, 물리Ⅱ(대한교과서) p.178
• p.175, 휘트스톤 브리지, 물리Ⅱ(대한교과서) p.179
• 그림 Ⅲ-31, Physics(Serway 6th) p.896, 29.1
• 그림 Ⅲ-32, Physics(Serway 6th) p.897, 29.3
• 그림 Ⅲ-33, 물리Ⅱ(대한교과서) p.186
• 그림 Ⅲ-34 : http://blog.joinsmsn.com/usr/e/sp/espark97/0910/4ad69f5fc1a92.jpg (2011. 7. 8 20시 30분)
• 그림 Ⅲ-33, http://blog.chosun.com/maple/1335336 (2011. 7. 8 20시 30분)
• 그림 Ⅲ-36, Physics(Serway 6th) p.932, 30.8
• 그림 Ⅲ-37, Physics(Serway 6th) p.929, 30.3
• 그림 Ⅲ-38, Physics(Serway 6th) p.930, 30.4
• 그림 Ⅲ-39, Physics(Serway 6th) p.938, 30.18
• 그림 Ⅲ-40, Physics(Serway 6th) p.939, 30.19
• 그림 Ⅲ-54_Physics for Scientists and Engineers, R. Serway, 4th ed., p888, Saunders College Publ.
• 그림 Ⅲ-56_Fundamentals of Physics, Halliday/Resnick/Walker, 7th ed., p878, Wiley.
• 그림 Ⅲ-59_Fundamentals of Physics, Halliday/Resnick/Walker, 7th ed., p828, Wiley.
• 그림 Ⅲ-61_Fundamentals of Physics, Halliday/Resnick/Walker, 7th ed., p891, Wiley.
• 그림 Ⅲ-62_Fundamentals of Physics, Halliday/Resnick/Walker, 7th ed., p890, Wiley.

Ⅳ. 진동과 파동

• http://blog.naver.com/ilovetap?Redirect=Log&logNo=70554322
• 그림 Ⅳ-1, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.123.
• 그림 Ⅳ-3, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.126.
• 그림 Ⅳ-5, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.129.
• 그림 Ⅳ-8, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.137.
• 그림 Ⅳ-9, 대학물리학, 물리교재편찬위원회(Harris Benson), 청문각, p.815.
• 그림 Ⅳ-11, 현장과학교육2(2) pp.105~110 (2008년 8월).
• 그림 Ⅳ-13, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.221.
• 그림 Ⅳ-16, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.224.
• 그림 Ⅳ-20, 현장과학교육2(2) pp.105~110 (2008년 8월).

• 그림 Ⅳ-58, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.195.
• 그림 Ⅳ-61, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.198.
• 그림 Ⅳ-64, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.201.
• 그림 Ⅳ-66, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.204.
• 그림 Ⅳ-68, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.206.
• 그림 Ⅳ-70, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.208.
• 그림 Ⅳ-72, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.211.
• 그림 Ⅳ-73, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.211.
• 그림 Ⅳ-74, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.212.
• 그림 Ⅳ-76, 그림Ⅳ-77 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.217.
• 그림 Ⅳ-78, 과학교사를 위한 빛과 파동, 김중복 외 2인 홍릉과학출판사, p.215.
• 그림 Ⅳ-81, 광학(Hecht 2nd Ed.), 장수 · 조재홍 외 공역, 대웅, p.397.
• 그림 Ⅳ-82, 광학(Hecht 2nd Ed.), 장수 · 조재홍 외 공역, 대웅, p.399.
• 그림 Ⅳ-85, 광학(Hecht 2nd Ed.), 장수 · 조재홍 외 공역, 대웅, p.410.
• 그림 Ⅳ-86, 광학(Hecht 2nd Ed.), 장수 · 조재홍 외 공역, 대웅, p.419.
• 그림 Ⅳ-87, 광학(Hecht 2nd Ed.), 장수 · 조재홍 외 공역, 대웅, p.448.
• 인물사진 네이버 백과사전 http://100.naver.com/인물검색
• 위키피디아 http://www.wikipedia.org/인물검색

Ⅴ. 현대 물리 탐구

• http://en.wikipedia.org/wiki/electron
• 그림 Ⅴ-1, http://en.wikipedia.org/Gas_discharge
• 그림 Ⅴ-3, http://en.wikipedia.org/wiki/crookes_tube
• 그림 Ⅴ-4, Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.740
• 그림 Ⅴ-9, http://www.cristie.com/big/x-ray
• 그림 Ⅴ-11, http://en.wikipedia.org/wiki/X_ray tube
• Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.1083
• 그림 Ⅴ-14, Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.1166
• 그림 Ⅴ-18, Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.1070
• Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.1195
• 그림 Ⅴ-22_물리학 제2판, Hecht, 청문각, pp.808
• 그림 Ⅴ-23_물리학 제2판, Hecht, 청문각, pp.810
• 슈뢰딩거_http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/99/Erwin_Schrodinger2.jpg
• 하이젠베르크_http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f8/Bundesarchiv_Bild183-R57262%2C_Werner_Heisenberg.jpg

• 그림 V-32_현대물리학, Young and Freedman, 김용은역 , 청문각, pp.101
• 프랑크-헤르츠 실험장치_물리실험, 박종찬외 3인, 서울시교육청, pp.238
• 채드윅_http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Chadwick.jpg
• 디랙_http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cf/Dirac_4.jpg
• 그림 V-34, Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.1169
• 그림 V-38, Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.1172
• 그림 V-39, Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.1197
• 그림 V-40, http://www.kaeri.re.kr
• 그림 V-42_http://images.iop.org/objects/ccr/cern/42/1/5/cernnews6_1-02.jpg
• 그림 V-42_http://lbne.fnal.gov/images2/photos/neutrino-det-02-lg.jpg
• 그림 V-43_물리학, Barry Parker 저, 손영우 역, 이치사이언스, pp.182
• 그림 V-45_http://www.sciencephoto.com/image/1599/large/A1420423-Top_quark_event_in_D-Zero_detector-SPL.jpg • http://chinacancerhopes.com/petct%2002.gif
• 그림 V-49, Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.744
• 그림 V-43, http://en.wikipedia.org/wiki/cloud_chamber
• 그림 V-54, http://lpsc.in2p3.fr/plandusite/index.html
• 그림 V-56, http://en.wikipedia.org/wiki/positron_emisson_ tomography
• 그림 V-57, Fundamentals of Physics 8판, Halliday외 2인(Wiley), pp.1070

찾아보기

ㄱ

가속도 8
가역과정 124
가우스의 법칙 148
가이거 계수기 417
각가속도 82
각속도 84
각운동량 49
각진동수 72
강입자 395
강자성 202
결합 에너지 54
경입자 395, 399
경입자 수 보존법칙 405
관성의 법칙 22
광량자 가설 333
광전효과 315
광활성 310
구면거울 259
굴절법칙 260
그림자의 상 251
기묘도 보존법칙 405
기전력 167

ㄴ

내부 에너지 100
냉동기 122
뉴턴의 중력법칙 47
뉴트리노 382

ㄷ

단열 과정 119
단일 슬릿에 의한 회절 290
단조화 운동 70
단진자 76
대류 106
데이비슨 저머의 전자 산란 339
돌림힘 82
동위 원소 376, 388
드브로이 파장 337
등가속도 9
등압 과정 117
등온 과정 118
등적 과정 118

ㄹ

러더퍼드 349
렌츠의 법칙 191

ㅁ

마찰력 27
맥놀이 243
맥스웰 방정식 213
무편광 305
뮤온 뉴트리노 417

ㅂ

반감기 380
반사 법칙 256
반사에 의한 편광 308
반입자 392
반자성 200
보어 모형 353
보존력 61
복굴절 307
복사 107
복사 스펙트럼 108
볼트 152
불꽃 상자 416
붕괴 법칙 379
붕괴 상수 380
붕괴 에너지 381
비가역과정 127
비전하 측정 408
빈의 변위법칙 109
빛 215, 225

ㅅ

사이클로이드 곡선 78
사이클로트론 180
상자성 201
상전이 203
선편광 303
세차 운동 87
수면파 224
슈뢰딩거 방정식 357
스테판 법칙 108
실상 78, 250
쌍생성 393
쌍소멸 393

ㅇ

안개 상자 415
앙페르의 법칙 184
양자론 342
에너지 등분배 101
LRC 회로 208
X-선과 이중성 341
LC 회로 210
운동기전력 193
역학적 에너지 보존 64
열 97
열기관 121
열역학 제1법칙 112
열역학 제2법칙 121
열역학적 과정 115
열역학적 엔트로피 128
열전달 104
열전도도 106
열평형 98
완전 비탄성 충돌 41
운동량 35
운동량 보존의 법칙 38
운동 제2법칙 23
운동 제3법칙 26
원자 스펙트럼 351
원편광 304
위상 72
위상상수 72

음극선 321
음극선의 비전하 324
음파 227
이상기체 96
이색성 306
이중 슬릿에 의한 회절 295
인공 위성의 운동 53
임피던스 209

ㅈ

자기력 178
자기장 177
자유 낙하 운동 11
자이로스코프 87
자체 유도 계수 195
장벽 투과 381
장전자 방출 343
저항 165
전기 방전관 320
전기력선 147
전기 용량 157
전기장 144
전도 106
전력 166
전류 164
전위 151
전자기 유도 현상 188
전자기 파동론 341
전자기파 107
전자의 비전하 324
전자의 입자성 321
정상파 237
종파 226
주기 72
주사전자 현미경 344
준정적 과정 116
줄파동 225
중간자 396
중력 위치 에너지 62
중력 가속도 9
중력장 내의 운동 11
중성미자 383, 394
중성자 391
중입자 395
중입자 수 보존법칙 404
진동 70
진동수 72

ㅊ

최소 시간의 원리 256
축전기 157
충격량 36

ㅋ

카르노 기관 124
케플러의 제1법칙 48
케플러의 제2법칙 48
케플러의 제3법칙 49
쿨롱 140
쿨롱의 법칙 140
쿼크 399, 401
큐리 온도 203
키르히호프의 법칙 172

ㅌ

탄성력 30
탄성 충돌 41
톰슨 136
톰슨 전자의 입자성 321
통합 질량 단위 377
투과 전자 현미경 344

ㅍ

파동 224
패러데이의 유도법칙 190
페르미온 395
편광 303
편광자 305
프라운호퍼 회절 290
프랑크–헤르츠의 실험 370
프레넬 회절 290

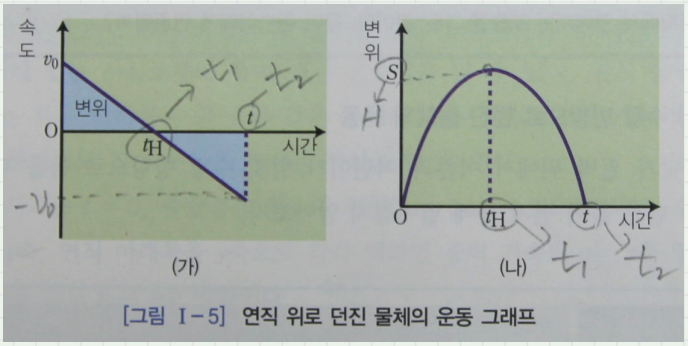
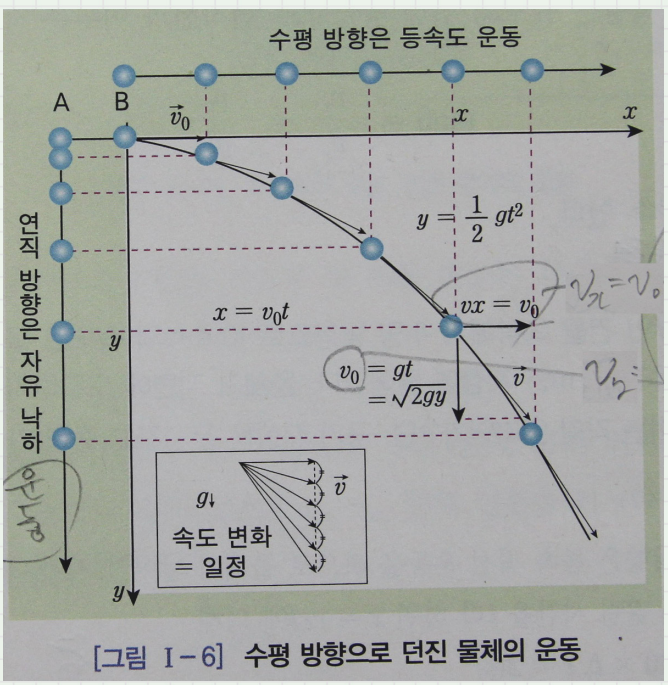
ㅎ

핵 분열 386
핵 융합 387
핵종 기호 376
허상 250
호이겐스 원리 231
확률밀도 359
회전관성 82
회절 288
회절격자 분광기 298
회절격자에 의한 회절 296
휘트스톤 브리지 174
흑체 108
힘이 한 일 56

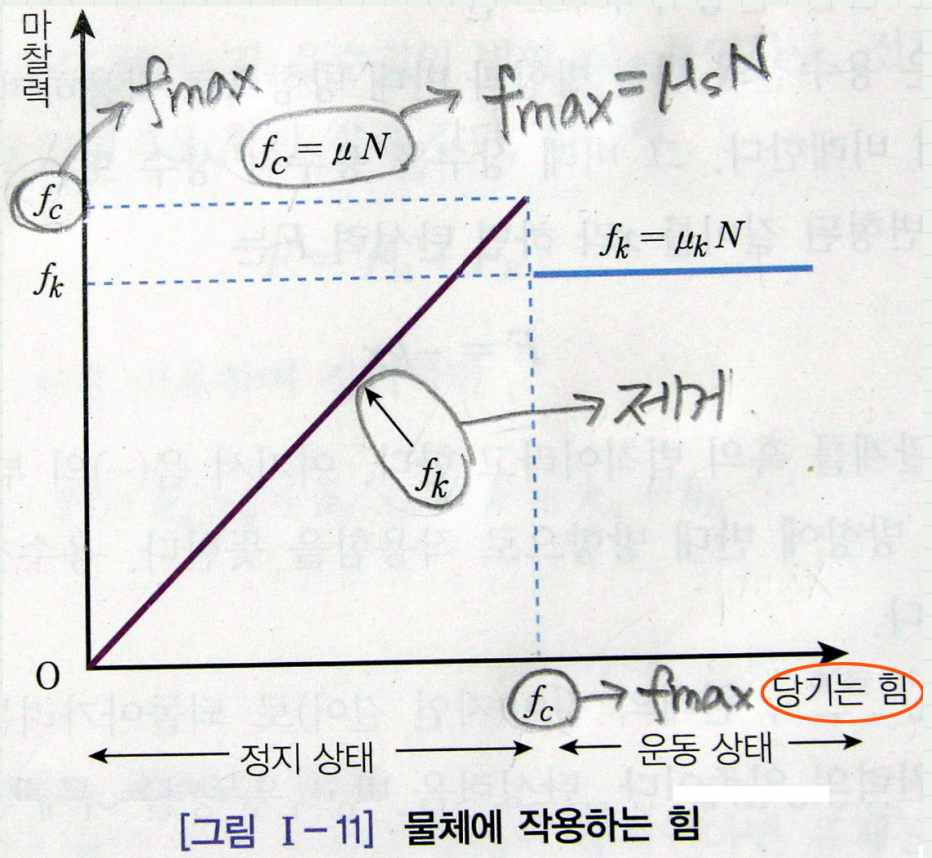
심화물리 교과서 오류 수정 · 보완 결과보고서

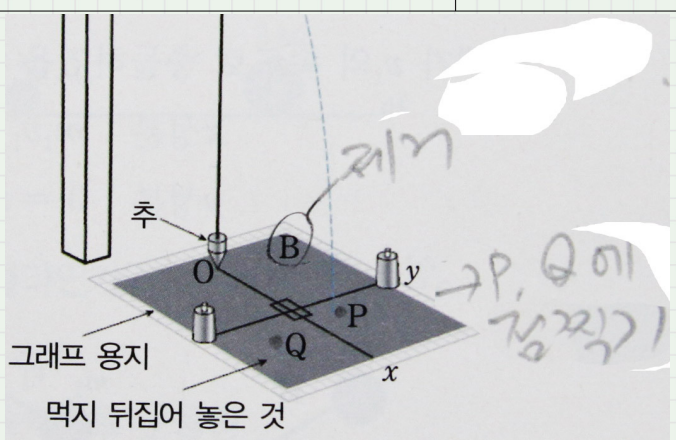
▌심화물리 교과서 오류 수정 · 보완 결과보고서_(역학/열역학)

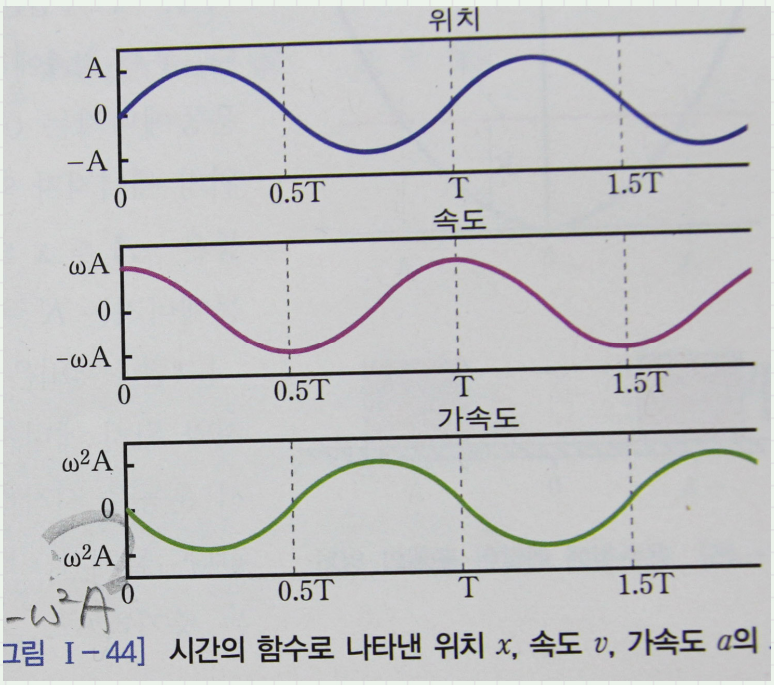
쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
8	15-16	여기서 (*높낮이가 들쭉날쭉함)	여기서 (*수평 높낮이 맞추기)
8	20	곡선에 대한 (*단어교체)	속도 그래프에 대한
9	6	...로 쓰고 v대신 (*쉼표 누락)	...로 쓰고, v대신
9	7	$\frac{dv}{dt}(\frac{dx}{dt}) = \frac{d^2x}{dt_2}$ (*미분 표기오류)	$\frac{dv}{dt}(\frac{dx}{dt}) = \frac{d^2x}{dt^2}$
9	10	t에 따른 x 곡선의	시간 t에 대한 위치 x 그래프의
9	18	1 m/s^2 (*예제 풀이의 단위 괄호묶기)	1 (m/s^2)
9	24	t에 대한 v의 기울기가 일정,	시간 t에 대한 속도 v의 그래프에서 기울기가 일정한 값(v)을 가지는,
10	4-5	출발하고 시각 t에서의 그 입자의	출발하여 시각 t의 물체
10	8	초기 속도가 v_0이고	처음 속도가 v_0이고
10	10	$v_{평균}=(v_0+v)$	$v_{평균}=\frac{1}{2}(v_0+v)$
10	13	이다. 식(I, 1-4)에 v대신	이다. 이때 식 (I, 1-4)의
11	3	이 된다.	가 된다.
11	[그림 I-2]	* x축 아래의 't시간' 위치 조정하기 -> 't'는 점선 아래, '시간'은 그대로	
11	18	물체를 공중에 가만히 놓으면 중력을 받아서 연직 아래로 떨어진다.	물체를 공중에서 가만히 놓으면, 중력을 받아서 연직 방향으로 떨어진다.
11	21	자유 낙하 운동은 속도가 처음 정지 상태에서 아랫방향으로 매초 9.8 m/s씩 점점 빨라지는 등가속도 직선 운동이다.	자유 낙하 운동은, 속도가 처음 정지 상태에서 아래 방향으로 매초 9.8 m/s씩 점점 빨라지는, 등가속도 직선 운동이다.
12	3-4	위치 y사이의 (*띄어쓰기)	위치 y 사이의
12	16-18	물체를 똑바로 위로 던져 올리면 위로 올라가고 있는 동안에도 연직 아래로 향하는 중력 때문에 속도는 매초 9.8 m/s씩 느려져	물체를 똑바로 위로 던져 올리면, 위로 올라가고 있는 동안에도 연직 하방의 중력 때문에, 속도는 매초 9.8 m/s씩 느려져서

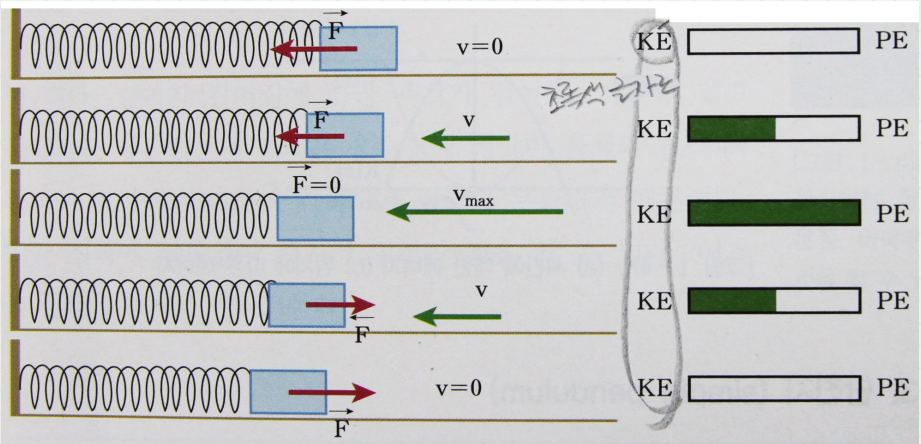
쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
13	[그림 I-5]	 [그림 I-5] 연직 위로 던진 물체의 운동 그래프	* 12쪽의 그림I-4와 기호들을 일치 시키면 표시한 것처럼 바꿔야 함.
13	7, 11	시간 t_H는	시간 t_1은
13	13	$t_H = \frac{v_0}{g}$ (*식 I. 1-15에서)	$t_1 = \frac{v_0}{g}$
13	14	t_H를	t_1을
14	2	$h = vt = (\frac{19.6+0}{2}) \times 2$	$h = v_{평균}t = (\frac{19.6+0}{2}) \times 2$
15	13	한편, 공기의 저항을 무시할 수 있어서, 공이 받는 힘이 중력뿐이라면 수평	한편, 공기의 저항을 무시할 수 있어서 공B가 받는 힘이 중력뿐이라면, 수평
15	16	공 A의 처음 속도	공 B의 처음 속도
15	17	$v_{0x} = v_0,\ v_{0y} = 0$	$v_{0x} = v_0\ ,\quad v_{0y} = 0$
15	그림 I -6	 [그림 I-6] 수평 방향으로 던진 물체의 운동	* 그림에서 3곳을 변경함. · 왼쪽의 '자유낙하'를 '자유낙하운동' · 그래프 안에서 $vx = v_0$ -> $v_x = v_0$, $v_0 = gt$ -> $v_y = gt$ 로 바꾸기

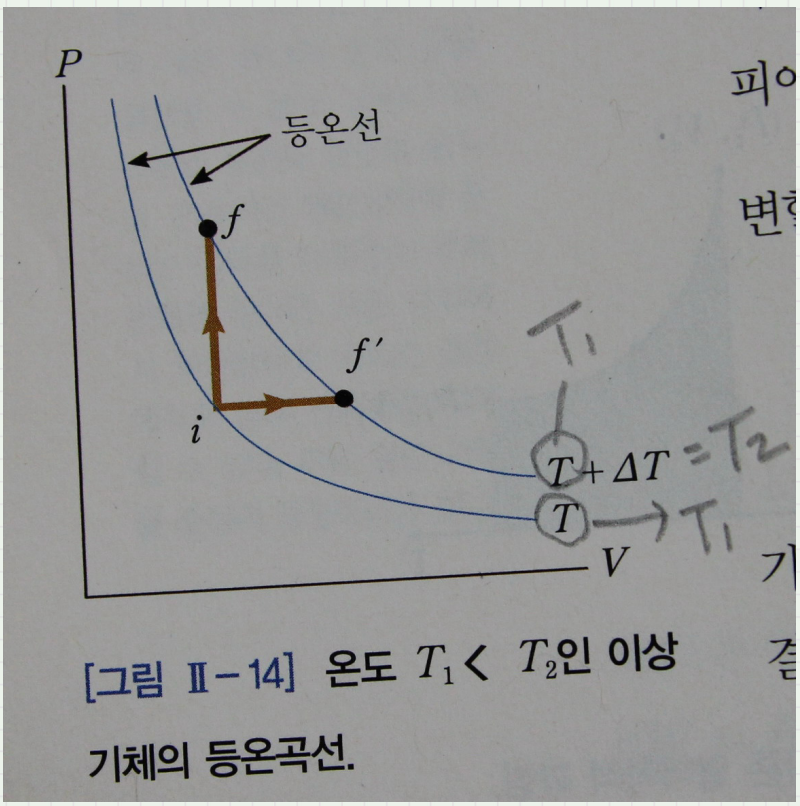
쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
16	1-2	속도 $\vec{v}$의 성분을 v_x, v_y변위 $\vec{r}$의 성분을 x, y라 하면 (*수식간격, 쉼표 2개)	속도 $\vec{v}$의 성분을 v_x, v_y, 변위 $\vec{r}$의 성분을 x, y라 하면,
16	6	직선 운동(자유 낙하 운동)	직선 운동(자유 낙하 운동)으로
16	17 <예제>	높이 H인 건물 옥상에서	지면으로부터 높이 H인 건물 옥상에서
16	24 (풀이)	$\frac{1}{2}\times 9.8\times 22 = 19.6$	$\frac{1}{2}\times 9.8\times 2^2 = 19.6$
17	13-14	$a_x = 0, a_y = -g$ (* 수식 간격) $v_{0x} = v_0\cos\theta,\ v_{0y} = v_0\ \sin\theta$	$a_x = 0,\quad a_y = -g$ $v_{0x} = v_0\cos\theta,\quad v_{0y} = v_0\sin\theta$
18	10	시간 t_R는 y=0을 (* 쉼표 추가)	시간 t_R는, y=0을
18	13	$R = v_0\cos\theta\frac{2v_0\sin\theta}{g} = \frac{v_0^2\sin^2\theta}{2g}$	$R = v_0\cos\theta\frac{2v_0\sin\theta}{g} = \frac{v_0^2\sin 2\theta}{g}$
20	1	한 점 P를 2초만에 올라가면서 통과하고 3초만에	어떤 점 P를 2초 만에 올라가면서 통과한 다음, 3초 후에 다시
20	8	두 공이 높이 h인 곳에서	두 공이 높이 $\frac{2}{3}h$인 곳에서 (*풀이참고)
22	9-11	뉴턴의 제1법칙은 물체에 외부에서 힘(외력)이 작용하지 않는다면 정지해있거나 일정한 속도로 운동을 하고 있는물체는 계속해서 정지한 상태로 남아 있거나 또는 일정한 속도를 가지고 계속하여 운동을 한다는 것을	뉴턴의 제1법칙은 물체에 외부에서 힘(외력)이 작용하지 않는다면, 정지해 있던 물체는 계속 정지해 있으려 하고, 일정한 속도로 운동하던 물체는 계속 그 상태로 운동을 한다는 것을
22	15-16	그 위의 원판을 자유롭게 움직이게	그 위의 원판이 마찰 없이 자유롭게 움직일 수 있는
22	21	승객이 뒤로 밀려 나듯이 원판은	승객이 뒤로 밀려나듯이, 원판은
23	8	운동 제1법칙 그리고 (*쉼표)	운동 제1법칙, 그리고
23	10	그것을 야기시키는 (*변경)	그것이 일으키는
23	12	똑같은 물체에 작용할 때 물체의 (*쉼표)	똑같은 물체에 작용할 때, 물체의
24	1-2	사용하는 말에 따라 다른 것보다 질량이 더 나간다. 주어진 힘은	사용하는 말대로 다른 것보다 질량이 더 나간다면, 같은 힘이 주어질 때
24	5-6	사용된 힘의 종류에는 무관하다. 즉 힘이 스프링에 의한 것이건 중력, 전기, 자기적인 인력 또는 척력인지는 중요하지 않다.	사용된 힘의 종류와 무관하다. 즉 힘이 스프링에 의한 것인지 중력, 전기, 자기적인 인력 또는 척력에 의한 것인지는 중요하지 않다.
25	3-4	표면 근처에서 떨어뜨리고 공기의 (*변경)	표면 근처에서 떨어뜨릴 때 공기의

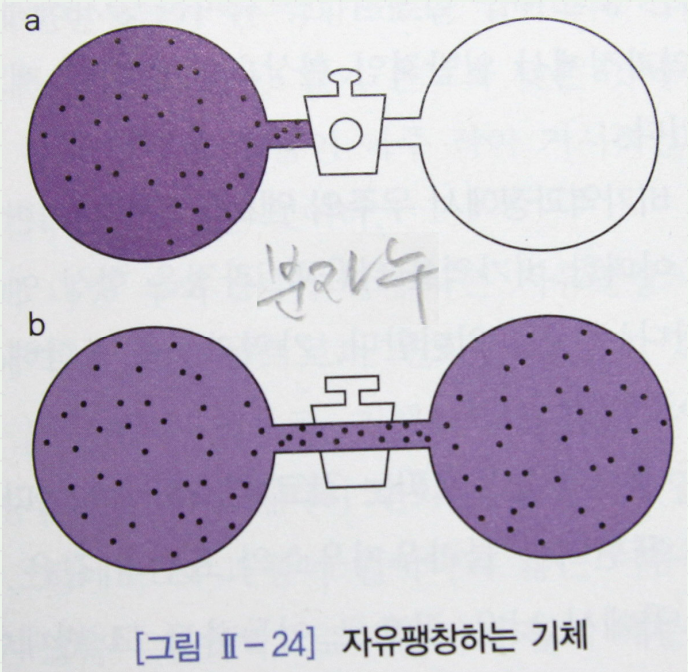
쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
25	5	그 물체는 9.81 m/s^2의 가속도로	그 물체는 일정한 가속도로
25	14	단위질량 당 힘이며 지구의	단위질량 당 힘이며, 지구의
25	17	여러 장소에서 g값을 (*띄어쓰기)	여러 장소에서 g 값을
25	18-19	인력은 위치에 따라 변한다. 특히	인력은 위치에 따라 변하는데,
25	27	의자에 의해 미치는 (*변경)	의자에 의한
26	7	힘이 물체 A에 작용하며 (*변경)	힘이 물체 A에 작용하면
29	3	최대 정지 마찰력보다 작고 (*쉼표)	최대 정지 마찰력보다 작고,
29	7	...데 정지 마찰력은 물체에 작용하는 힘과 같은 값을 가지고 운동 마찰력은	...데, 정지 마찰력은 물체에 작용하는 힘과 같은 값을 가지며 운동 마찰력은
29	그림 I-11	 [그림 I-11] 물체에 작용하는 힘 (* 5군데 고칠 것 - 오자 4개, x축 끝에 '당기는 힘')	

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
30	21	이때 한 용수철과 그 효과 같을 때 합성 용수철 상수가 된다.	이때 두 용수철을 합한 것과 같은 효과의 하나의 용수철을 가정할 때, 이 용수철 상수를 합성 용수철 상수라 한다.
31	17	유체의 성질에 따라 다르며 (*쉼표)	유체의 성질에 따라 다르며,
34	2 <문제3>	매끄러운 빗면 위에 질량이 m인 물체 A가	매끄러운 빗면을 가진 물체 위에 질량 m인 물체 A를 올린 다음,
34	4-5 <문제3>	1) 빗면을 민 힘을 구하라. 2) 물체의 가속도를 구하라.	1) 빗면을 미는 힘 F를 구하라. 2) 물체의 가속도 a를 구하라.
36	5	$\sum\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{dv}{dt}$ (*수식오류/간격)	$\sum\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{\vec{dv}}{dt}$
38	22-24 (예제)	* 예제 문제가 전체적 오류 있으므로 문제 전체를 삭제할 것.	
39	1-3 (풀이)	* 예제 문제 풀이 전체 오류로 인해 삭제할 것	
39	26	튀어오르는 높이 h'이 클수록	튀어 오르는 높이 h'가 클수록
41	18-19	고무공과 단단한 면의 충돌 경우에	고무공이 단단한 면에 충돌하는 경우,
41	28	$m_1(v_1^2 - v_1'^2) = m_2(v_2^2 - v_2'^2)$ (*수식오류)	$m_1(v_1^2 - v_1'^2) = m_2(v_2'^2 - v_2^2)$
42	5	$m_1(v_1 - v_1') = m_2(v_2' - v_1)$ (*수식오류)	$m_1(v_1 - v_1') = m_2(v_2' - v_2)$
42	12	$v_1' = (\frac{2m}{m_1+m_2})v_1 + \ ...$ (*수식오류)	$v_2' = (\frac{2m}{m_1+m_2})v_1 + \ ...$
43	23	5. 입사를 일정한 높이에서	5. 입사구 A를 일정한 높이에서
43	29-30	(* 과정8. 제거할 것)	(* 이유 : $m_A = m_B$ 일 때에만 가능)
43	실험 그림		· B 지우기 · P, Q 옆에 점 찍어주기
44	3 (표 안)	$mA = (\quad)g, \quad mB = (\quad)g$	$m_A = (\quad)g, \quad m_{B=(\quad})g$

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
46	4	수천 킬로그램이나 된다할지라도	수천 킬로그램이나 된다 할지라도
48	10 <예제>	... $\frac{60\ \text{kg}\times 50\ \text{kg}}{0.5\ \text{m}} = 4\times 10^{-7}\ (\text{N})$	... $\frac{60\ \text{kg}\times 50\ \text{kg}}{(0.5\text{m})^2} = 8\times 10^{-7}\ (\text{N})$
51	5	$g(r)=\frac{F}{m}=\frac{GM_B}{r^2}$ (*수식오류)	$g(r)=\frac{F}{m}=\frac{GM_E}{r^2}$
53	22	$E=-\frac{GMm}{r_1}+\frac{1}{2}mv^2$ (*수식오류)	$E=-\frac{GMm}{r}+\frac{1}{2}mv^2$
55	8	$R=6.4\times 103$ km (*수식오류)	$R=6.4\times 10^3$ km
59	20	위치에 따라 변하는 힘이라도 (*변경)	위치에 따라 힘이 변할지라도
60	15	많은 경위 계의 한 일이 (*오자)	많은 경우, 계가 한 일이
61	4-5	...일이 0이라면 힘은 보존력이다.	...일이 0이라면, 이 힘은 보존력이다.
61	29-30	그 지점의 위치 에너지와 기준점의 그것과 차이가 있다.	기준점의 위치에너지와 차이가 있다.
65	3, 표	4-6행의 Ek(J)/ Ev(J)/ $Ek+Ev$(J) 를	E_p(J)/ E_k(J)/ E_p+E_k(J) 로 변경
73	그림 [I-44]	 그림 I−44] 시간의 함수로 나타낸 위치 x, 속도 v, 가속도 a의	. 3번째 파동 그림에서 y축 아래의 $\omega^2 A$ 를 $-\omega^2 A$로 변경
74	9	... = $\frac{1}{2}kx^2+\frac{1}{2}mv^2$ (*순서바꾸기)	... = $\frac{1}{2}mv^2+\frac{1}{2}kx^2$

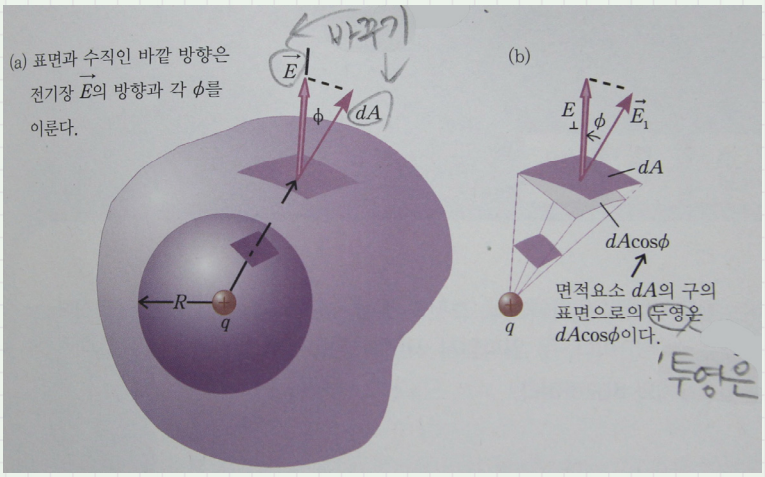
쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
75	[그림 I-46]	 [그림 I-46] 반주기 동안의 용수철에 매달린 물체의 운동과 에너지 전환	
81	4-5	회전운동을 설명 하는 데는 병진운동을 설명할 때와 는 다른 (*띄어쓰기)	회전운동을 설명하는 데는 병진운동을 설명할 때와 다른
81	17	속력 보다는 각속도가 (*띄어쓰기)	속력보다는 각속도가
83	1	어는 지점에 (*오자)	어느 지점에
83	3	**돌림힘**(tourque) (*오자)	**돌림힘**(torque)
83	10	$\vec{r}$과 $\vec{F}$의 순서 는 (*띄어쓰기)	$\vec{r}$과 $\vec{F}$의 순서는
83	25	물리량인 **회전관성*I***로 (*띄어쓰기)	물리량인 **회전관성 *I***로
84	1	질량 M인 고체구의 (*띄어쓰기)	질량 M인 고체 구의
100	그림II -1	(* 그림의 설명에서 오류) ...각각 열과 일 로 올리고 있다.	... 각각 열과 일로 올리고 있다.
101	5	...의한 에너지나 시스템와 (*오자)	...의한 에너지나 시스템과
102	11	...2차 함수형태로 (*띄어쓰기)	...2차 함수 형태로
106	29	...의한 것으로 난방기 근처의 (*쉼표)	...의한 것으로, 난방기 근처의
108	12	$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \mathrm{W/m^2 \cdot k^4}$ (단위 오기)	$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \mathrm{W/m^2 \cdot K^4}$ (* k->K)
109	5	$\lambda_{max} = \frac{2.898\,\mathrm{mm \cdot K}}{T}$ (*λ 를 이탤릭)	$\lambda_{max} = \frac{2.898\,\mathrm{mm \cdot K}}{T}$
112	8	에너지가 변화해야한다는 (*띄어쓰기)	에너지가 변화해야 한다는
113	25	...알 수 있고 그 결과 (*쉼표)	...알 수 있고, 그 결과
115	27	...한 편, 상태 함수는 (*띄어쓰기)	...한편, 상태 함수는
115	28	...설명하지는 (*변경)	...설명하지
115	29	반면 열역학적 (*띄어쓰기)	반면 열역학적

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
115	30	...열역학적 과정동안 (*띄어쓰기)	...열역학적 과정 동안
116	7	...발생한 고온과 고압은 기체를 급속하게 팽창시키고	...발생한 고온, 고압의 기체가 급속하게 팽창하면서
116	16	...양의 일을 한 것이 되고 (*쉼표추가)	...양의 일을 한 것이 되고,
116	19	...기체가 한 일 W는 (*W를 이탤릭)	...기체가 한 일 W는
116	20	$W=\int_{V_i}^{V_f} P(V)dV$ (* V_t를 V_i로)	$W=\int_{V_i}^{V_f} P(V)dV$
117	10	...경우에도 다른 경로에 따라	...경우에도 경로가 달라지면
118	16	... $=nRT\ln(\frac{V_f}{V_i})$ (* 간격넣기)	... $=nRT\ln(\frac{V_f}{V_i})$
118	그림 II-14	 · $T+\triangle T$ 를 $T_1+\triangle T=T_2$ · T를 T_1 으로
120	14	단열지수 γ 는 (*γ 를 이탤릭)	단열지수 γ 는
122	25	...외부에서 일 W를 (*W를 이탤릭)	...외부에서 일 W를
123	2	해 준 일 W 대비 (*W를 이탤릭)	해 준 일 W 대비
123	3	COP = $\frac{Q_C}{\mathrm{W}}$ (*W를 이탤릭)	COP = $\frac{Q_C}{W}$

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
124	참고글 (좌상)	카르노는 공학자로서 가능한 열기관의	공학자 카르노가 열기관의 가능한
131	[그림 II-24]	 [그림 Ⅱ-24] 자유팽창하는 기체	· 그림 a), b)에 나타난 분자 수를 같게 그릴 것
133	23	$\triangle S = 10k\ln\frac{1}{2} = -10k\ln 2$ (*수식간격)	$\triangle S = 10k\ln\frac{1}{2} = -10k\ln 2$
133	25	무엇이 문제 일까? (*띄어쓰기)	무엇이 문제일까?
134	3	...않는 다고 할 수 있다. (*띄어쓰기)	...않는다고 할 수 있다.
134	9	미시상태 수7가 (*오자)	미시상태 수가
134	10	천체 미시 상태의 수를 (*띄어쓰기)	천체 미시상태의 수를

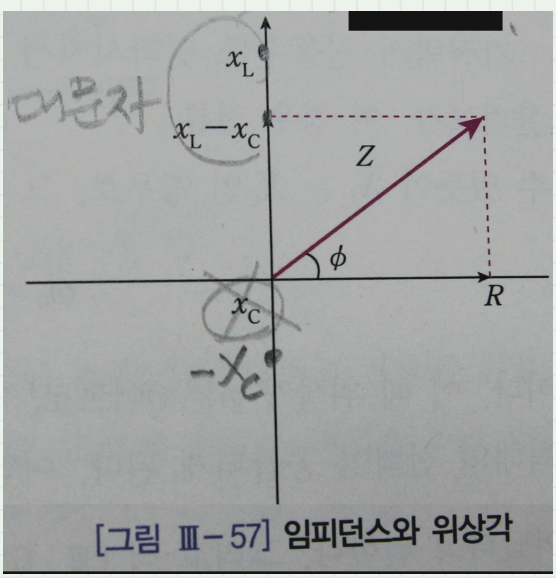
▌심화물리 교과서 오류 수정 · 보완 결과보고서 (전자기학)

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
141	6	$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon^2}$ (*수식오류)	$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$
141	10-11	전자는-*e*, +*e*양성자는 +*e*이고, (*오자)	전자는 -*e*, 양성자는 +*e*이고,
141	12	$e = 1.60219 \times 10^{-19} C$ (*고딕)	$e = 1.60219 \times 10^{-19}$ C
141	13	그러므로 1*C*의 전하량은 (*추가/고딕)	이다. 그러므로 1C의 전하량은
141	22	...같은 부호이면 $q_1 q_2$곱은 (*쉼표추가)	...같은 부호이면, $q_1 q_2$ 곱은
144	13	...같이 작은 시험 전하q_0가 (*띄어쓰기)	...같이 작은 시험 전하 q_0가
145	3	전기장 *E*의 단위는 *N/C*이고, (*고딕)	전기장 *E*의 단위는 N/C이고,
145	12	점 *p*의 전기장은 $E = Fe/q_0$ (*오자 2개)	점 P의 전기장은 $E = F/q_0$
145	15	...점 *p*에서의 전기장은 (*오자)	...점 P에서의 전기장은
145	6 [표 Ⅲ-1]	(*표의 5번째 행에서) 대기(전개 구름 아래)	(*표의 5번째 행에서) 대기(전계 구름 아래)
146	16	$\vec{E} = k_e \lim_{\Delta q_i \to 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \quad \hat{r_i} = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$ (* 수식간격 붙이기)	$\vec{E} = k_e \lim_{\Delta q_i \to 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r_i} = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$
147	14	(b)같은 크기의 전하를 (*띄어쓰기)	(b) 같은 크기의 전하를
147	17 [그림Ⅲ-6]	(* 두 번째 그림 (b)에서 오자) 반대 부호의 두 전하(전기상극자)	(* 두 번째 그림 (b)에서 오자) 반대 부호의 두 전하 (전기쌍극자)
148	6	따라서 구면위의 모든 (*띄어쓰기)	따라서 구면 위의 모든
148	8	$\vec{E} \cdot \overrightarrow{A_i} = E_n A_i = E A_i$ (*수식오류)	$\vec{E} \cdot \triangle \overrightarrow{A_i} = E_n \triangle A_i = E \triangle A_i$
148	9	미소면적$\triangle A_i$에 대해서 (*띄어쓰기)	미소면적 $\triangle A_i$에 대해서
148	12	전기장 E=$k_e q/r^2$을 (*이탤릭)	전기장 $E = k_e q/r^2$을

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
149	[그림 Ⅲ-10]		· 그림 (a)의 $\vec{E}$와 dA를 바꾸기 · 그림 (b)의 설명에서 '두영은'을 '투영은'으로
151	7	더 간단하게 기술 할 수 있다. (*붙이기)	더 간단하게 기술할 수 있다.
152	21	다시 말하면 전하를 의 전위차 만큼 (* 오탈자 고치기)	다시 말하면 1C의 전하를 1V의 전위차 만큼
154	3	$V = Vk_e\sum_i \frac{q_i}{r_i}$ (*수식오류/간격조정)	$V = k_e\sum_i \frac{q_i}{r_i}$
155	25-26	P점에서의 전위는 두가지 (*띄우기)	P점에서의 전위는 두 가지
157	20	F로 표시 한다. 즉, (*고딕체, 붙이기)	F로 표시한다. 즉,
157	21	$1F = 1C/V$ (*고딕체)	$1\mathrm{F} = 1\mathrm{C}/\mathrm{V}$
161	3	$W = -\int_0^W dW = \frac{1}{C}\int_0^Q q dq = \frac{Q^2}{2C}$ (* 이처럼 적분기호 상하첨자 높낮이)	
161	8	$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV$ (* $\frac{1}{2}QV$의 높낮이 맞추기)	
161	9	(farad, C/V)이 (*고딕체)	(farad, C/V)이
162	2 문제1	3000 V의 전압을 (*문제오류)	30,000 V의 전압을
162	9 문제3	축전기에 4.5×10 C의 (*문제오류)	축전기에 4.5×10^{-6} C의
163	문제4 그림	(* 그림에서 전지B 아래 S_1을 지우고 12V로 바꾸어 적기)	
164	22	$1A = \frac{1C}{1s}$ (*고딕체)	$1\mathrm{A} = \frac{1\mathrm{C}}{1\mathrm{s}}$

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
166	7	$\triangle V = El$이 된다. (*수식간격, 문장을 우측으로 이동)	$\triangle V = El$이 된다.
166	9	$\triangle V = \frac{l}{\sigma}J = \frac{lI}{\sigma A} = RI$ (*lI 간격조정)	$\triangle V = \frac{l}{\sigma}J = \frac{lI}{\sigma A} = RI$
168	18	손실(I^2r)과 (*오자)	손실(I^2R)과
173	13	일어나가 전하가 (*오자 및 쉼표 추가)	일어나고, 전하가
173	24	기전력 장이(내부... (*오자)	기전력 장치(내부...
179	3	$F_B = Vqv \times B$ (*수식오류)	$F_B = qv \times B$
179	4	이기 때문에, 가 (*누락)	이기 때문에, q가
179	8	($\theta = 0$ 또는 180°) (*누락)	($\theta = 0^\circ$ 또는 180°)
179	9	테슬라(tesla, T)이다. (*오자)	테슬라(Tesla, T)이다.
179	13	$T = \frac{N}{C \cdot m/s} = \frac{N}{A \cdot m}$ (*고딕체)	$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C \cdot m/s}} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}}$
179	15	1 T는 $10^4 G$이다. (*고딕체)	1 T는 10^4 G이다.
179	22	자기력은 입자가 변위될 (*추가)	자기력은 대전 입자가 변위될
179	[표Ⅲ-3]	자기장의 세기(T) (*고딕체)	자기장의 세기(T)
184	12	$\mathrm{T \cdot m/a}$ (*단위오자)	$\mathrm{T \cdot m/A}$
184	23	$4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T \cdot m/a}$ (*단위오자)	$4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T \cdot m/A}$
186	14	(식 4-7)과 같음을 (*오자)	(식 4-10)과 같음을
188	3	전압 셀뿐 이었다. (*띄어쓰기)	전압 셀 뿐이었다.
188	7	에 의해서 얻어 졌다. (*띄어쓰기)	에 의해서 얻어졌다.
190	7	자화된 테이프가 즉 (*쉼표)	자화된 테이프가 즉,
190	8	이 때 테이프에 의한 (*추가)	이 때 움직이는 테이프에 의한
190	9	움직임 때문에 변하기 때문에 (*제거)	변하기 때문에
191	4	$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ (부호와 분모/분자 구분선의 수직 정렬이 어긋남)	$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ (수직정렬 맞추기)
193	4	속도 로 움직이게 (*추가)	속도 v로 움직이게

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
193	9	$\Delta\Phi = B\Delta A = Bl\Delta x = Blv\Delta t$ (*문자 간격 재조정-넓게)	$\Delta\Phi = B\Delta A = Bl\,\Delta x = Bl\,v\,\Delta t$
193	11	$\varepsilon = Blv$ (*문자 간격 벌리기)	$\varepsilon = Bl\,v$
193	14	에너지 원은 무엇인가? (*붙이기)	에너지원은 무엇인가?
193	16	$P = \varepsilon I = BlvI$ (*문자 간격 벌리기)	$P = \varepsilon I = B\,l\,v\,I$
193	19	$F = BlI$ (문자 간격 벌리기)	$F = Bl\,I$
195	3	$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ (*부호와 분모/분자 구분선의 수직정렬이 어긋남)	$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$
195	13	1A의 전류 변화가 (*오자)	1A의 전류 변화로
195	17 <예제>	하라. (*추가)	하라. (단, 코일 안의 자기장 $B = k''nI$로 일정함)
195	18	$B = k''nI$ (*문자 간격 벌리기)	$B = k''\,n\,I$
195	19	$BA = k''nIA,\quad nl$ (*문자 간격 벌리기)	$BA = k''\,n\,IA,\quad n\,l$
195	21	$U = k''n^2lAI$ (*오자/ 간격 벌리기)	$\Phi = k''\,n^2\,l\,A\,I$
195	23	$L = \frac{\Phi}{I}k''n^2lA$ (*오자/ 간격 벌리기)	$L = \frac{\Phi}{I} = k''\,n^2\,l\,A$
196	13-14	회로 1의, 회로 2를, 회로 2에 (*붙이기)	회로1의, 회로2를, 회로2에
196	15	전류 I_1때문에 회로 2에 생기는 자속 Φ_{12}는 (*오자-Φ_{12}/ 띄어쓰기)	전류 I_1 때문에 회로2에 생기는 자속 Φ_{21}은 (* Φ_{21}로 바꿀것)
196	그림 Ⅲ-48	(*그림 캡션에서 '회로 1', '회로 2'를 '회로1', '회로2'로 고치기)	
197	1-3	'회로 1', '회로 2' (*붙이기)	(* '회로1', '회로2'로 변경하기)
197	4	M_{21}과 M_{12}는 같은 값을 (*제거)	M_{21}과 M_{12}는
198	4	'마그세시아(Magnesia) : 지방의 돌' (* 오자 및 삭제)	'마그네시아(Magnesia) 지방의 돌'
199	21	막대자석의 경우의 S극에서 (*변경)	막대자석의 경우, S극에서
200	3	즉 자성을 띠지 못하고, (*변경)	즉, 자성을 띠지 못하나,
200	5	자석이 되기 이해서는 (*오자)	자석이 되기 위해서는

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
200	13	자기장을 어떤 한 방향으로 0에서 (*쉼표)	자기장을, 어떤 한 방향으로, 0에서
200	16-17	변화가 생기며 이는 원자에 유도된 자기쌍극자 모멘트가 생기게 하고 (*변경)	변화가 생기며, 이는 원자에 자기쌍극자 모멘트를 유도하며
201	2-3	보이는 것은 자기장을 가하기 전의 원자들에 의한 자기 쌍극자 (*변경)	보이는 것은, 자기장을 가하기 전, 원자들 내부의 자기 쌍극자
201	8	가하면 초전도체는 완전한 반자성을 보여서 그 내부가 자기장이 0이 (*변경)	가하면, 초전도체는 완전한 반자성을 보이면서 그 내부 자기장이 0이
201	17	자기쌍극자 모멘트를 갖으며, (*오자)	자기쌍극자 모멘트를 가지며,
202	12	원자의 구조와 원자간의 (*띄우기)	원자의 구조와 원자 간의
203	5	낮은 온도의 경우 스핀간의 (*띄우기)	낮은 온도의 경우 스핀 간의
205	6	(AC)라 하는데 교류도 (*쉼표)	(AC)라 하는데, 교류도
205	14	시각 t자기장과 (*변경)	시각 t일 때, 자기장과
206	17	형광등이나 전구의 (*'생각해보기'에서)	전구의 (*형광등은 120회/s로 깜빡임)
207	16, 17	실효값을 (*2회 변경)	실횻값을 (*표준어 규정 변경되었음)
209	그림 Ⅲ-57	 [그림 Ⅲ-57] 임피던스와 위상각	- y축 상의 값들 x_L, $x_L - x_C$, x_C 을 X_L, $X_L - X_C$, $-X_C$ 로 변경
210	3	$\overline{P} = \frac{\epsilon_0^2}{Z}\frac{1}{2}\cos\phi$ (*수식 간격조절)	$\overline{P} = \frac{\epsilon_0^2}{Z}\frac{1}{2}\cos\phi$
210	8	$\cos\phi\frac{R}{Z}$ (*수식 오류)	$\cos\phi = \frac{R}{Z}$

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
210	15	$\omega_0 = \frac{I_0}{\sqrt{LC}}$ (*수식 오류)	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
210	27	임피던스는 $R = X_L$이며, (*수식 오류)	임피던스는 $Z = X_L$이며,
210	29	평균전력은 0 이어서 (*붙이기)	평균전력은 0이어서
211	12	3. LC 회로의 (*이탤릭)	3. LC 회로의
211	13	전기용 C인 축전기를 (*오자,)	전기용량 C인 축전기를
211	17	$L\frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{Q}{C}$ (L의 수직정렬이 어긋남 → L을 중앙에)	$L\frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{Q}{C}$
211	19	$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx$ (m의 수직정렬이 어긋남 → m을 중앙에)	$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx$
212	3	$I = I_0\cos(\omega t + \phi)$ (*수식 오류)	$I = I_0\sin(\omega t + \phi)$
213	9	어떻게 만들어 지는지와 (*변경)	어떻게 만들어지는지, 그리고
213	13	만들어 짐을 알게 되었다. (*변경)	만들어짐을 알게 되었다.
213	24	전파되는 파동 즉 (*쉼표)	전파되는 파동, 즉
214	8	약간 떨어져 있는 (*변경)	약간 떨어진
214	22	전자기파에서는 (*변경)	전자기파에서
214	23	공간의 각 점에서는 (*변경)	공간의 각 점에서
215	1, 16	$3\times10^{-8}\,\mathrm{m/s}$ (*오류값)	$3\times10^{8}\,\mathrm{m/s}$
215	7	벋어나서 (*오자)	벗어나서
215	8	에는 파장이 긴 것부터 (*쉼표)	에는, 파장이 긴 것부터
216	8	경계면에 반사와 (*오자)	경계면에서 반사와
216	11	1. 전자기파는 음파나 흐들리는 줄의 파동과 유사한 (*변경)	1. 전자기파를 음파나 흔들리는 줄의 파동과 비교하여 유사한
217	1,5,31	(*LRC 를 모두 이탤릭체로 변경)	*LRC* *L, R, C*
217	12	$V_C = L\frac{Q}{C}$ = (*수식오류)	$V_C = \frac{Q}{C}$ =
217	18	X_L, X_C (*이탤릭)	X_L, X_C
217	25-26	오른쪽 그림과 같이 달라진다. (*변경)	달라진다. (* 우측 그림은 제거할 것)

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)		수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
220	2 문제1	[그림 Ⅲ-56]의	(*오자)	[그림 Ⅲ-55]의
220	4 문제2	[그림 Ⅲ-57]과	(*오자)	[그림 Ⅲ-56]과
220	6 문제3	[그림 Ⅲ-57]과	(*오자)	[그림 Ⅲ-56]과
220	8 문제4	[그림 Ⅲ-57]과	(*오자)	[그림 Ⅲ-56]과
221	3	LC 회로라고	(*이탤릭)	*LC* 회로라고

▌심화물리 교과서 오류 수정 · 보완 결과보고서 (파동과 빛)

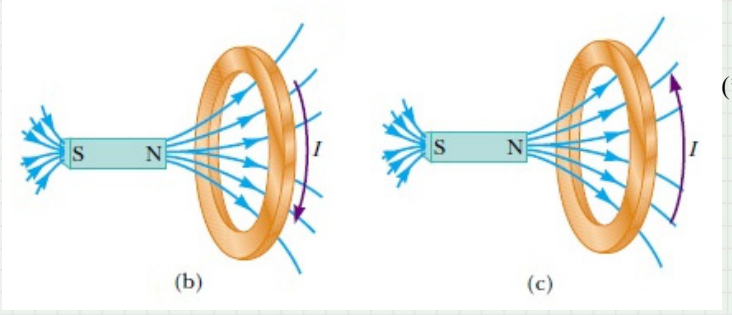
쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
227	10	없을 때일 것이기 때문에 (*변경)	없을 때의 값이므로
230	4	진동시키면서 어느 순간에 위치에 따라 (*변경)	진동시키면 어느 순간의 위치에 따른
252	17 <예제>	바늘구멍 사진기의 의해 (*오자)	바늘구멍 사진기에 의해
257	9	[그림 Ⅳ-35] 물체 P가 (*변경)	[그림 Ⅳ-35]는 물체 P가
266	4-6 문제1	나온 광선이 볼록 거울에서 반사한 다음 다시 오목 거울에서 반사하여 광원이 있는 곳으로 되돌아왔다. (*변경)	나온 광선들이 볼록 거울에서 반사한 다음 다시 오목 거울에서 반사하여 광원이 있는 곳으로 다시 모였다.
268	8-9	개개의 파동들의 함수 값들의 (*변경)	개개의 파동 함수 값들의
276	20	$\Delta = \frac{\lambda}{2}(m+1)$ (*수식오류/간격)	$\triangle = (m+\frac{1}{2})\lambda$
289	14	모든 제2점파원 (*띄어쓰기)	모든 제2 점파원
294	10	θ_D이 작아야 (*오자)	θ_D가 작아야

▌심화물리 교과서 오류 수정 · 보완 결과보고서 (현대물리탐구)

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
340	11	$dsin\phi = n\lambda$ (문자 간격 벌리기)	$d\sin\phi = n\lambda$
342	29	모든 에너지를 잃고 광자로 전환된다.	모든 에너지를 잃는데, 이들 에너지는 광자로 전환된다.
362	16	$\langle x\rangle = \int_0^L x\sin^2(\frac{\pi x}{L})dx$ (*수식간격)	$\langle x\rangle = \int_0^L x\sin^2(\frac{\pi x}{L})dx$
364	18	$\psi(x) = A\sin kx + B\cos kx$ (*수식간격)	$\psi(x) = A\sin kx + B\cos kx$
366	7	$\theta_0 = \frac{\lambda}{a}$ (*수식오류)	$\theta_1 = \frac{\lambda}{a}$
370	7	그 불확 정도의 양 (*붙여쓰기)	그 불확정도의 양
370	21 <예제>	$\frac{4.1\times10^{-8}\,\mathrm{eV}}{2.205\,\mathrm{eV}} = 1.95\times10^{-8}$ (*오류)	$\frac{4.1\times10^{-8}\,\mathrm{eV}}{2.105\,\mathrm{eV}} = 1.91\times10^{-8}$
409	14	$v = \left(\frac{2eV}{\mathrm{m}}\right)^{\frac{1}{2}}$ (*이탤릭)	$v = \left(\frac{2eV}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$
422	19	$e^2/4\pi\ \varepsilon\ _0\hbar c$ (*이탤릭)	$e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c$

▌심화물리 교과서 오류 수정 · 보완 결과보고서 (문제풀이)

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
435	16	$\therefore\ v_0 = \sqrt{\frac{1}{6}gh}$ (*수식오류)	$\therefore\ v = \sqrt{\frac{1}{6}gh}$
436	3	$x = v_0\cos\theta t = ...$ (*표기오류)	$x = (v_0\cos\theta)\,t = ...$
439	14	2) $18\ \mathrm{kg} \times \frac{121}{729} = 3\ \mathrm{kg}$ (*오류)	2) 질량은 불변이므로 18 kg
439	20	$v = 7.5\ \mathrm{km/s}$를 얻는다. (*오류)	$v = 7.4\times10^3\ \mathrm{km/s}$를 얻는다.
442	3	물체는 단조화 운동을 한다. (*변경)	물체는 $x = A\sin\omega t$의 단조화 운동을 한다.
442	4	시간 $t = \frac{1}{8}T$이므로 $t = \frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{m}{k}}$ 가 된다. (*오답)	시간 $t = \frac{1}{12}T$이므로 $t = \frac{\pi}{6}\sqrt{\frac{m}{k}}$ 가 된다.
442	10	$= \sqrt{\frac{2\cdot9.00\times10^{-3}\mathrm{J}}{0.500\ \mathrm{kg}}} = 0.190\ \mathrm{m/s}$	$= \sqrt{\frac{2\cdot9.00\times10^{-3}\mathrm{J}}{0.005\ \mathrm{kg}}} = 1.9\ \mathrm{m/s}$
444	12	$\tau = 15\mathrm{N}\cdot0.5\mathrm{m} - 5.0\mathrm{N}\cdot1.0\mathrm{m} = 2.5\ \mathrm{N\cdot m}$	$\tau = 15\mathrm{N}\cdot0.5\mathrm{m} - 5.0\mathrm{N}\cdot10\mathrm{m} = -42.5\ \mathrm{N\cdot m}$
444	13	시계 반대 방향으로	시계 방향으로
445	17	= 20 · 9.80 J =	= 20 · 98.0 J =
445	23	$P_{net} = 0.997\cdot5.67\cdot10^{-8}(\mathrm{W/m^2\cdot K^4})\cdot 2.0m^2\cdot(307^4-295^4)K^4 = 140\,W$	$P_{net} = 0.97\cdot5.67\cdot10^{-8}(\mathrm{W/m^2\cdot K^4})\cdot 2.0m^2\cdot(307^4-295^4)K^4 = 144\,W$
446	1	$P_1 = k_1A\left(\frac{T-T_c}{L}\right)$ (*오자)	$P_1 = k_1A\left(\frac{T-T_c}{L_1}\right)$
447	4	$...290\ \mathrm{K}\cdot\ln\frac{40.0}{20.0} = 3341\ \mathrm{J}$ (*오류)	$...330\ \mathrm{K}\cdot\ln\frac{40.0}{20.0} = 3802\ \mathrm{J}$
447	24	$\triangle S_2 = \int_{273}^{323}\frac{C_{물}}{T}dT = ...$ (*첨자오류)	$\triangle S_2 = \int_{373}^{323}\frac{C_{물}}{T}dT = ...$
448	13	$\sqrt{(1.2m)^2+(-1.6m)^2} = 2.0\ m$ (*오기)	$\sqrt{(1.2\mathrm{m})^2+(-1.6\mathrm{m})^2} = 2.0\ \mathrm{m}$
448	14	단위 벡터 $\hat{r}\frac{\vec{r}}{r} =$ (*오기)	단위 벡터 $\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r} =$
448	15	(-11 N/C)$\hat{i}$ + (14 N/C)$\hat{j}$	(-1.1 N/C)$\hat{i}$ + (1.4 N/C)$\hat{j}$
448	22	$E_x = \frac{\sigma x}{2\epsilon_0}\left[1-\frac{1}{\sqrt{(R^2+x^{2)}}+1}\right]$	$E_x = \frac{\sigma x}{2\epsilon_0}\left[\frac{1}{x}-\frac{1}{\sqrt{(x^2+R^2)}}\right]$

쪽	행	원본(수정이 필요한 부분)	수정 · 보완 결과(수정 후 내용)
450	3	... $\times \frac{60\ \mathrm{sec}}{1\ \mathrm{min}}\ 1.2\times10^{4}\ \mathrm{C}$ (*오기)	... $\times \frac{60\ \mathrm{sec}}{1\ \mathrm{min}} = 1.2\times10^{4}\ \mathrm{C}$
450	6	...= $\int \frac{\rho L}{\pi ab}$ (*오기)	...= $\frac{\rho L}{\pi ab}$
450	10	... $P=500\,W,\ \frac{V^2}{R}, R=\frac{144}{5}$ (*오기)	... $P=500\,W=\frac{V^2}{R},\ R=\frac{144}{5}$
450	20	(2) $\frac{40}{3}\Omega$ (*오답)	(2) $\frac{25}{8}\Omega$
451	3	= 0.0877 T (*오기)	= 8.76 × 10^{-5} T
451	17	... = $\frac{\mu_0 I}{2\pi} b \ln = \left(\frac{a+c}{c}\right)$ (*오기)	... = $\frac{\mu_0 I}{2\pi} b \ln\left(\frac{a+c}{c}\right)$
452	3-5		(* 문제1번의 그림을 삭제하고 왼편으로 대체할 것)
452	7	$L_a > L_b > L_c$ (*오기)	$L_c > L_b > L_a$
452	19-20	$\varepsilon I = \frac{\varepsilon_0^2}{Z} cos^2(\omega t-\phi)$ 이며, 평균전력은 $\frac{\varepsilon_0^2}{2Z^2}$ 이다. (*오기)	$\varepsilon I = \frac{\epsilon_0^2}{Z}\cos\omega t\cdot\cos(\omega t-\phi)$ 이며, 평균전력은 $\frac{\varepsilon_0^2}{2Z^2}\cos\phi$ 이다.
453	3	= $\frac{Q_0}{\sqrt{LC}}\ \frac{3\times10^{-6}}{6.6\times10^{-6}}\mathrm{A}$ (*오기)	= $\frac{Q_0}{\sqrt{LC}} = \frac{3\times10^{-6}}{6.6\times10^{-6}}\mathrm{A}$
453	10	$\varepsilon I = -L\frac{dI}{dt}$, (*오기)	$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}$,
453	11	E는 전하/시간의	I는 전하/시간의
456	10	$\frac{1.5}{4}+\frac{1}{b}=\frac{1.5-1}{1}$	$\frac{1.5}{4}+\frac{1}{b}=\frac{1-1.5}{1}$
461	15	$r=0.52n^2\text{Å}=0.52\times10^{-10}\times2^2\mathrm{m}=2.08\times10^{-10}m$	$r=0.53n^2\text{Å}=0.53\times10^{-10}\times2^2\mathrm{m}=2.12\times10^{-10}m$
462	4	$E_1=\frac{(6.63\times10^{-34})^2}{2(1.67\times10^{-27}\mathrm{kg})(12\times10^{-15}\mathrm{m})}$	$E_1=\frac{(6.63\times10^{-34})^2}{2(1.67\times10^{-27}\mathrm{kg})(12\times10^{-15}\mathrm{m})^2}$

지은이 소개

연구
책임 | **윤성현**(한국교원대학교)

집필
Ⅰ. 역학 탐구
김현주(한국교원대학교) **이정수**(대구과학고등학교)
Ⅱ. 열역학 탐구
김현주(한국교원대학교)
Ⅲ. 전자기 탐구
윤성현(한국교원대학교) **오형진**(한성과학고등학교)
Ⅳ. 파동과 빛 탐구
김중복(한국교원대학교) **김경수**(인천과학고등학교)
Ⅴ. 현대 물리 탐구
김상년(한국교원대학교) **노재준**(대전과학고등학교)

검토
강동우(김녕중학교) **박종육**(충북과학고등학교) **신석균**(선린인터넷고등학교)
양승희(울산과학고등학교) **오석근**(충북대학교) **이경호**(서울대학교)
장기완(창원대학교) **장영록**(인천대학교)

연구원
서미경(한국교원대학교 대학원) **신인철**(한국교원대학교 대학원)

고등학교 **심화 물리**

2011. 8. 22. 초판 1쇄 발행
2013. 3. 10. 초판 2쇄 발행
2015. 1. 30. 초판 3쇄 발행
2016. 2. 29. 초판 4쇄 발행
2017. 2. 28. 초판 5쇄 발행

발행인 | 한국과학창의재단 / 서울시 강남구 선릉로 602, 전화 02-555-0701

지은이 | 윤성현 외 17인

인쇄인 | (주)지엔피링크 / 서울 마포구 월드컵북로 6길 12-9, 전화 02-6203-1532

* 이 도서에 게재된 저작물에 대한 보상금은 문화관광부장관이 정하는 기준에 의거 한국복사전송권협회(02-2608-2036)에서 저작재산권자에게 지급합니다.