



모의 면접 · 구술고사

자연계열 · 단원 종합

I. 문제

제 1 회 · 역학과 열역학 — 운동량 · 일과 에너지 · 열역학 법칙

문제 1 기체의 압력은 어디에서 오는가

물리학 I · II + 제시문 · 12분 · 소문항 3개

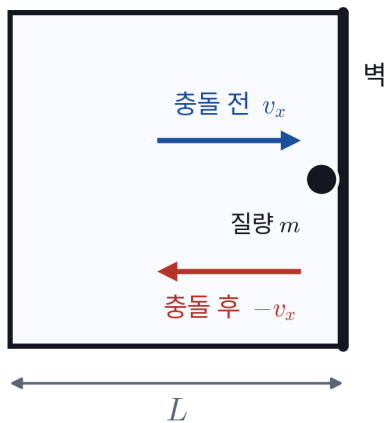
한 변의 길이가 L 인 정육면체 상자 안에 질량이 m 인 기체 분자 N 개가 들어 있다. 분자는 크기를 무시할 수 있을 만큼 작고, 서로 힘을 미치지 않으며, 벽과는 완전 탄성 충돌만 한다. 중력은 무시한다.

그림 1의 (가)와 같이 속도의 x 성분이 v_x 인 분자 하나가 오른쪽 벽에 부딪히면, 벽에 수직인 속도 성분만 뒤집혀 $-v_x$ 가 되고 나머지 성분은 그대로이다. 이 분자는 (나)와 같이 상자를 가로질러 왼쪽 벽에 부딪힌 뒤 돌아와 다시 오른쪽 벽에 부딪힌다.

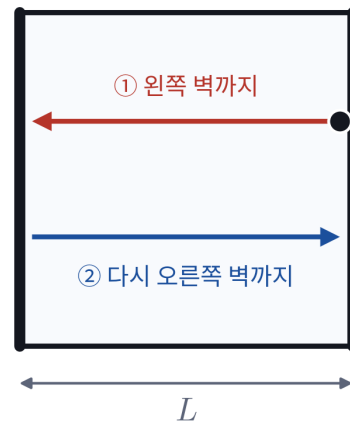
분자들이 특별히 좋아하는 방향이 없으므로 세 방향의 평균은 서로 같아 $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$ 이고, 따라서 $\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$ 이다. 여기서 윗줄(—)은 N 개 분자에 대한 평균을 뜻한다.

실제 분자의 속력은 하나로 정해져 있지 않고 평균 둘레에 넓게 분포하여, 평균보다 훨씬 빠른 분자도 언제나 일정한 비율로 존재한다.

이상 기체의 상태 방정식은 $PV = NkT$ 이며, 볼츠만 상수는 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K이다. 계산에는 원자 질량 단위 $1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}$ kg를 쓰고, 질소 분자는 28 u , 수소 분자는 2 u 로 본다. 지구 표면에서의 탈출 속도는 11.2 km/s 이다.



(가) 벽과의 완전 탄성 충돌



(나) 같은 벽에 다시 부딪힐 때까지

[그림 1] (가) 분자 하나와 벽의 충돌 (나) 같은 벽에 다시 부딪히기까지의 경로

- (1) 속도의 x 성분이 v_x 인 분자 하나가 오른쪽 벽에 한 번 부딪힐 때 벽이 받는 충격량의 크기를 구하시오. 또, 이 분자가 같은 벽에 다시 부딪히기까지 걸리는 시간을 구하고, 이 분자가 오른쪽 벽에 미치는 평균 힘을 m , v_x , L 로 나타내시오. [1점]
- (2) N 개 분자 전체에 대해 평균을 취하여 $PV = \frac{1}{3}Nm\overline{v^2}$ 이 성립함을 보이시오. 또, 이것을 이상 기체 상태 방정식과 비교하여 분자 하나의 평균 운동 에너지가 $\frac{3}{2}kT$ 임을 보이시오. [2점]
- (3) 300 K 에서 질소 분자와 수소 분자의 제곱평균제곱근 속력 v_{rms} (곧 $\overline{v^2}$ 의 제곱근)를 각각 구하시오. 또, 지구 대기에서 질소는 풍부하지만 수소는 거의 남아 있지 않은 까닭을 탈출 속도와 견주어 설명하시오. [2점]

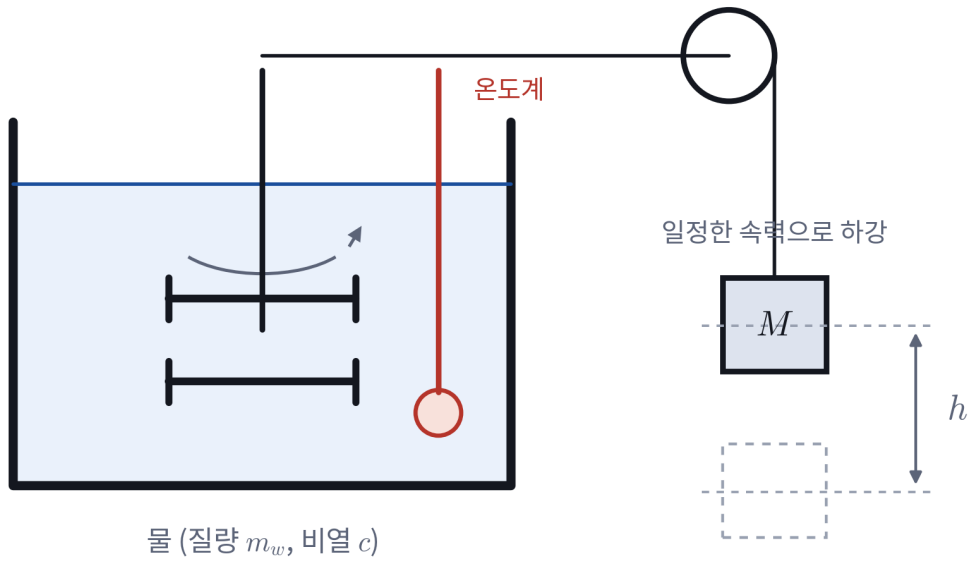
문제 2 추를 내려 물을 데운다

물리학 I·II + 제시문 · 12분 · 소문항 3개

그림 2는 줄(Joule)이 열의 일당량을 재기 위해 꾸민 장치를 간단히 나타낸 것이다. 질량이 M 인 추가 실과 도르래에 매달려 있고, 실의 반대쪽은 물통 속의 회전 날개에 연결되어 있다. 추가 내려가면 날개가 물을 저어 물의 온도가 오른다.

추는 물의 저항 때문에 **일정한 속력**으로 내려온다. 추를 높이 h 만큼 내린 뒤 실을 되감아 원래 높이로 올리는 일을 n 번 되풀이한다. 되감을 때 물에 주는 에너지는 무시하며, 물통 밖으로 빠져나가는 열과 물통·날개가 흡수하는 열도 무시한다.

$M = 20 \text{ kg}$, $h = 2.0 \text{ m}$, $n = 20$ 회이고, 물의 질량은 $m_w = 0.50 \text{ kg}$, 물의 비열은 $c = 4200 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 중력 가속도는 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 이다.



[그림 2] 줄의 실험 장치

- (1) 추가 한 번 내려올 때 물에 전달되는 에너지를 구하시오. [1점]
- (2) 20회를 되풀이한 뒤 물의 온도가 몇 K 올랐는지 구하시오. 또, 이 실험에서 “추가 일정한 속력으로 내려온다”는 조건이 왜 필요한지 설명하시오. [2점]
- (3) 이 과정을 물을 계로 잡고 열역학 제1법칙 $\Delta U = Q - W$ 로 기술하시오. 또, 이 과정의 역과정 — 물이 저절로 식으면서 그 에너지로 추가 저절로 올라가는 일 — 이 결코 일어나지 않는 까닭을 열역학 제2법칙으로 설명하시오. [2점]

제 2 회 · 광학과 전자기 — 편광 · 진동 회로 · 전자기파

문제 1 편광판 세 장을 겹치면

물리학 I · II + 제시문 · 12분 · 소문항 3개

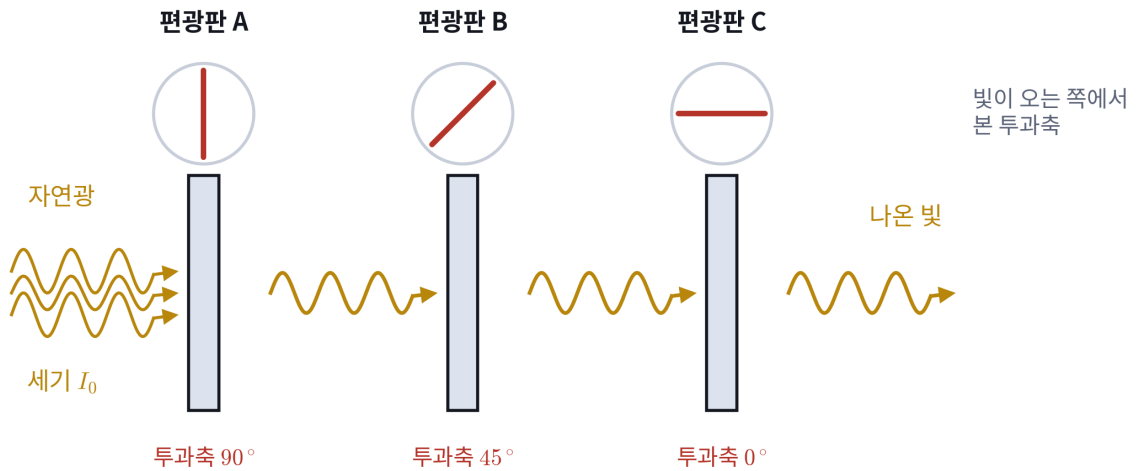
빛은 진행 방향에 수직인 방향으로 전기장이 진동하는 전자기파이다. 보통의 자연광은 진행 방향에 수직인 모든 방향으로 고르게 진동한다.

편광판은 자신의 투과축에 나란한 전기장 성분만 통과시킨다. 세기가 I_0 인 자연광이 편광판 하나를 지나면 세기가 $I_0/2$ 인 선편광이 된다. 이미 선편광이 된 빛(세기 I_1)이 투과축과 θ 의 각을 이루며 들어오면, 통과하는 전기장의 크기는 $E_1 \cos \theta$ 이고 빛의 세기는 전기장의 제곱에 비례하므로

$$I = I_1 \cos^2 \theta$$

가 된다. 이를 말루스 법칙이라 한다.

그림 3과 같이 투과축이 각각 90° , 45° , 0° 인 편광판 A, B, C를 이 순서로 세우고 세기가 I_0 인 자연광을 왼쪽에서 쬔다. 편광판의 흡수와 반사는 무시한다.



[그림 3] 투과축이 서로 다른 편광판 세 장

- (1) 자연광이 편광판 A 하나만 지났을 때 세기가 $I_0/2$ 가 되는 까닭을 설명하시오. [1점]
- (2) A와 C만 세웠을 때(B를 빼냈을 때) 나오는 빛의 세기를 구하시오. 또, 그 사이에 B를 끼워 넣었을 때 나오는 빛의 세기를 I_0 로 나타내시오. [2점]
- (3) 가운데 편광판 B의 투과축이 A와 이루는 각을 θ 로 두었을 때 최종 세기를 I_0 와 θ 로 나타내고, 그 값을 최대화 하는 θ 와 그때의 세기를 구하시오. 또, 편광 현상이 빛이 횡파임을 보이는 까닭을 소리와 견주어 설명하시오. [2점]

문제 2 진동 회로와 전파의 송신

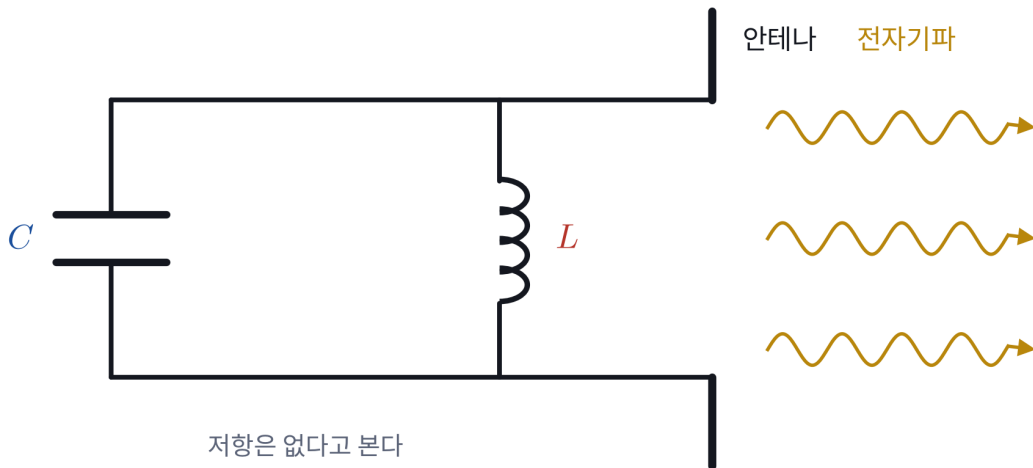
물리학 I·II + 제시문 · 12분 · 소문항 3개

그림 4와 같이 전기 용량이 C 인 축전기와 자체 유도 계수가 L 인 코일을 연결하면, 축전기에 저장된 전기 에너지 $Q^2/(2C) = \frac{1}{2}CV^2$ (전하량과 전압은 $Q = CV$)와 코일에 저장된 자기 에너지 $\frac{1}{2}LI^2$ 가 서로 오가며 전류가 진동한다. 저항이 없다고 보면 두 에너지의 합은 일정하게 유지되고, 진동수는

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

이다. 이 회로를 안테나에 연결하면 같은 진동수의 전자기파가 방출된다.

$L = 2.5 \times 10^{-6} \text{ H}$, $C = 1.0 \times 10^{-10} \text{ F}$ 이고, 축전기에는 처음에 $V_0 = 12 \text{ V}$ 의 전압이 걸려 있었다. 진공에서 빛의 속력은 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 이며, 계산에는 $\pi = 3.14$, $\sqrt{10} = 3.16$ 을 쓴다.



[그림 4] L - C 진동 회로와 안테나

- (1) 이 회로의 진동수와, 안테나에서 방출되는 전자기파의 파장을 각각 구하시오. [1점]
- (2) 코일에 흐르는 전류의 최대값을 구하시오. 또, 이 회로에서 에너지가 오가는 과정을 용수철에 매달린 물체의 단진동과 하나씩 짝지어 설명하시오. [2점]
- (3) 같은 코일을 그대로 두고 축전기만 바꾸어 100 MHz 의 전자기파를 내보내려면 전기 용량을 처음의 몇 배로 해야 하는지 구하시오. 또, 이 전파를 받는 안테나의 길이를 파장의 $1/4$ 로 만드는 까닭을 정상파로 설명하시오. [2점]

제 3 회 · 현대물리와 전자기 — 유도 방출 · 초전도

문제 1 레이저는 왜 뜨겁게 해서는 만들 수 없는가

물리학 I · II + 제시문 · 12분 · 소문항 3개

에너지 준위가 E_1 과 E_2 ($E_1 < E_2$) 둘뿐인 원자들을 생각하자. 그림 5와 같이 광자와 원자 사이에는 세 가지 과정이 일어난다.

(가) 흡수 아래 준위의 원자가 에너지 $E_2 - E_1$ 인 광자를 흡수하여 위 준위로 올라간다.

(나) 자발 방출 위 준위의 원자가 저절로 광자 하나를 내놓고 내려온다. 방출되는 방향과 위상은 제각각이다.

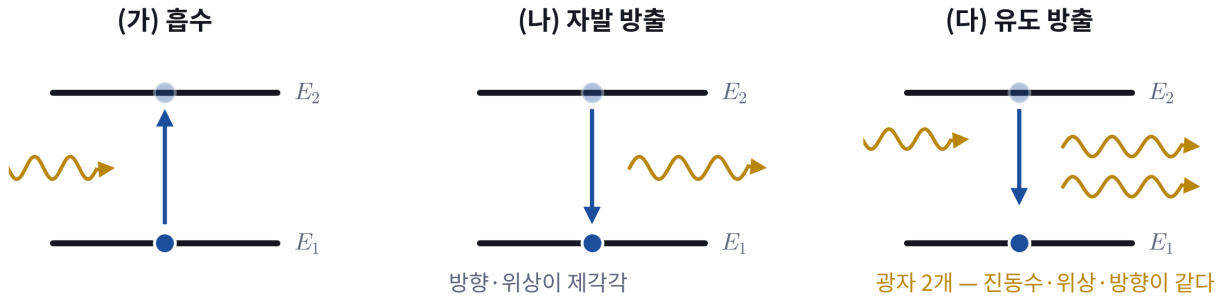
(다) 유도 방출 위 준위의 원자에 에너지 $E_2 - E_1$ 인 광자가 지나가면 원자가 광자 하나를 더 내놓고 내려온다. 새로 나온 광자는 원래 광자와 진동수·위상·진행 방향이 모두 같다.

빛이 증폭되려면 유도 방출이 흡수보다 자주 일어나야 하고, 그러려면 위 준위의 원자 수 N_2 가 아래 준위의 원자 수 N_1 보다 많아야 한다. 이를 준위 반전이라 한다. 그런데 온도 T 에서 열평형에 있는 원자들은 볼츠만 분포를 따라

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/(kT)}$$

를 만족한다.

헬륨-네온 레이저는 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 인 빛을 낸다. 계산에는 $hc = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$, $k = 8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$, $\log e = 0.434$ 를 쓴다.



[그림 5] 광자와 원자 사이의 세 가지 과정

- (1) 헬륨-네온 레이저가 내는 광자 하나의 에너지를 eV 단위로 구하시오. [1점]
- (2) $T = 300 \text{ K}$ 인 열평형 상태에서 N_2/N_1 을 자릿수까지 구하시오. 또, 그 값이 뜻하는 바를 설명하시오. [2점]
- (3) 온도를 아무리 높여도 열평형만으로는 준위 반전을 만들 수 없음을 위 식을 근거로 보이시오. 또, 레이저에서 나온 빛이 보통 전구의 빛과 달리 단색성·간섭성·직진성을 갖는 까닭을 유도 방출의 성질로 설명하시오. [2점]

문제 2 저항이 0인 도선과 떠 있는 자석

물리학 I·II + 제시문 · 12분 · 소문항 3개

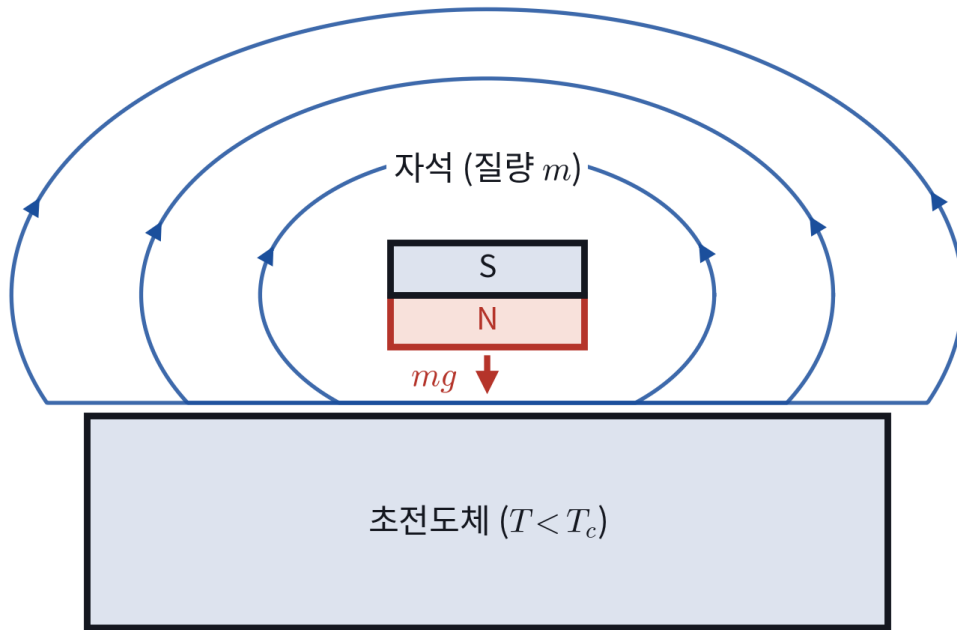
어떤 물질은 임계 온도 T_c 보다 낮은 온도에서 전기 저항이 정확히 0이 된다. 이를 초전도 현상이라 한다. 초전도 상태의 물질은 또한 내부의 자기장을 밀어내어 내부의 자기장이 0이 되는데, 이를 마이스너 효과라 한다. 그림 6과 같이 초전도체 위에 자석을 놓으면 자석이 공중에 떠서 정지한다.

한편 초전도 상태는 온도가 T_c 를 넘거나, 걸리는 자기장이 임계 자기장 B_c 를 넘으면 깨진다.

반지름이 r 인 원형 도선을 N 번 촘촘히 감은 코일에 세기가 I 인 전류가 흐를 때 코일 중심에서의 자기장의 세기는

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2r}$$

이다. 진공의 투자율은 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ 이고, 계산에는 $\pi = 3.14$ 를 쓴다. 코일은 $r = 0.50 \text{ m}$, $N = 1000$ 회이며 $I = 200 \text{ A}$ 를 흘린다. 떠 있는 자석의 질량은 20 g 이고 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 이다.



[그림 6] 초전도체 위에 떠 있는 자석

- (1) 저항이 0인 닫힌 도선 고리를 지나는 자기 선속이 변하려고 하면 어떤 일이 일어나는지 렌츠 법칙으로 설명하고, 그 결과 고리를 지나는 자기 선속이 어떻게 되는지 답하시오. [1점]
- (2) 위 초전도 코일이 중심에 만드는 자기장의 세기를 구하시오. 또, 같은 코일을 구리 도선으로 만들어 같은 전류를 흘린다면 어떤 문제가 생기는지 저항과 발열의 관점에서 설명하시오. [2점]
- (3) 그림 6에서 자석이 떠서 정지해 있을 때 자석이 초전도체로부터 받는 자기력의 크기를 구하시오. 또, 그 힘이 생기는 까닭을 마이스너 효과와 연결하여 설명하고, 초전도체의 온도를 T_c 보다 높이면 어떤 일이 일어나는지 답하시오. [2점]

II. 예시답안

제 1 회 · 역학과 열역학

문제 1 기체의 압력은 어디에서 오는가

운동량과 충격량 · 이상 기체 · 열역학

(1) 정답: 충격량 $2mv_x$, 시간 $2L/v_x$, 평균 힘 mv_x^2/L

완전 탄성 충돌에서 벽에 수직인 속도 성분만 뒤집히므로 분자의 운동량 변화는

$$\Delta p = m(-v_x) - mv_x = -2mv_x$$

이고, 작용-반작용에 의해 벽이 받는 충격량의 크기는

$$|\Delta p| = 2mv_x$$

이 분자가 같은 벽에 다시 부딪히려면 상자를 가로질러 갔다가 돌아와야 하므로 x 방향으로 $2L$ 을 이동해야 한다. x 방향 속력은 충돌해도 크기가 변하지 않으므로

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x}$$

충격량을 시간으로 나누면 이 분자가 벽에 미치는 평균 힘이 된다.

$$\bar{F} = \frac{|\Delta p|}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$$

(2) 정답: $PV = \frac{1}{3}Nm\bar{v}^2$, $\bar{K} = \frac{3}{2}kT$

N 개의 분자가 모두 오른쪽 벽을 두드리므로 벽이 받는 전체 평균 힘은 각 분자의 몫을 더한 것이다.

$$F_{\text{전체}} = \sum_{i=1}^N \frac{mv_{xi}^2}{L} = \frac{Nm}{L} \bar{v}_x^2$$

벽의 넓이는 L^2 이므로 압력은

$$P = \frac{F_{\text{전체}}}{L^2} = \frac{Nm\bar{v}_x^2}{L^3} = \frac{Nm\bar{v}_x^2}{V}$$

여기에 제시문의 등방성 조건 $\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3}\bar{v}^2$ 을 넣으면

$$PV = \frac{1}{3}Nm\bar{v}^2$$

이제 오른변을 운동 에너지로 바꾸어 쓴다. 분자 하나의 평균 운동 에너지는 $\bar{K} = \frac{1}{2}m\bar{v}^2$ 이므로 $m\bar{v}^2 = 2\bar{K}$ 이고

$$PV = \frac{2}{3}N\bar{K}$$

이다. 이것을 이상 기체 상태 방정식 $PV = NkT$ 와 견주면 $\frac{2}{3}N\bar{K} = NkT$ 이므로

$$\bar{K} = \frac{3}{2}kT$$

온도의 의미: 온도는 “뜨거운 정도”라는 감각적인 양이 아니라 분자 하나의 평균 운동 에너지에 정비례하는 양이다. 이 식에는 분자의 질량이 없으므로, 같은 온도라면 어떤 기체이든 분자 하나의 평균 운동 에너지가 같다.

(3) 정답: 질소 약 5.2×10^2 m/s, 수소 약 1.9×10^3 m/s

$\bar{K} = \frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{3}{2}kT$ 에서

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad \left(v_{\text{rms}} \propto \frac{1}{\sqrt{m}} \right)$$

질소 분자의 질량은 $m = 28 \times 1.66 \times 10^{-27} = 4.65 \times 10^{-26}$ kg이므로

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23})(300)}{4.65 \times 10^{-26}}} = \sqrt{\frac{1.24 \times 10^{-20}}{4.65 \times 10^{-26}}} = \sqrt{2.67 \times 10^5}$$

$$v_{\text{rms}}(\text{N}_2) \approx 5.2 \times 10^2 \text{ m/s} = 0.52 \text{ km/s}$$

수소 분자는 $m = 2 \times 1.66 \times 10^{-27} = 3.32 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 으로 질소의 1/14이므로, $v_{\text{rms}} \propto 1/\sqrt{m}$ 에서 $\sqrt{14} = 3.74$ 배가 된다.

$$v_{\text{rms}}(\text{H}_2) \approx 3.74 \times 0.52 = 1.9 \text{ km/s}$$

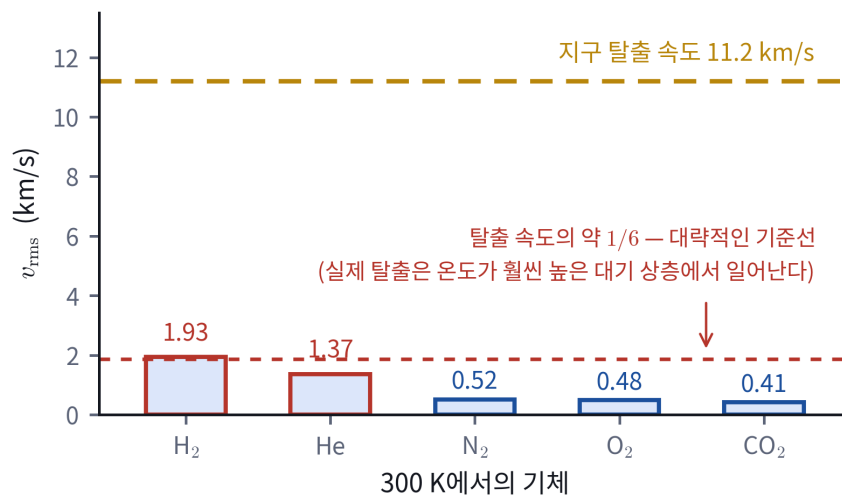
수소가 남아 있지 않은 까닭: 탈출 속도 11.2 km/s와 견주면 질소는 약 1/22, 수소는 약 1/6이다. 여기서 중요한 것은 v_{rms} 가 탈출 속도보다 작다는 사실 자체가 아니다. 분자의 속력은 하나로 정해져 있지 않고 넓게 분포하므로, 평균보다 훨씬 빠른 분자가 언제나 일정 비율 존재한다. 대기 상층에서 위쪽을 향해 움직이던 이런 분자는 그대로 우주로 빠져나간다.

대략 v_{rms} 가 탈출 속도의 1/6 정도만 되어도 분포의 꼬리에 있는 분자들이 수십억 년에 걸쳐 꾸준히 빠져나가 기체가 고갈된다고 알려져 있다. 수소는 바로 이 경계에 있고 질소는 훨씬 안전한 쪽에 있다.

덧붙이면 실제 탈출은 지표가 아니라 1000 K에 이르는 대기 상층에서 일어나므로, 300 K 기준으로 보면 헬륨(1.4 km/s)도 실제로는 꾸준히 빠져나간다. 그 결과 지구 대기에는 질소·산소가 남고 수소·헬륨은 거의 남지 않았다. 반대로 질량이 크고 온도가 낮은 목성은 수소를 그대로 붙잡고 있다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	$\Delta p = 2mv_x$ 와 왕복 거리 $2L$ 에서 $\Delta t = 2L/v_x$ 를 구하고, 충격량을 시간으로 나누어 mv_x^2/L 을 얻은 경우	1
(2)	N 개의 합을 평균으로 바꾸고 $P = F/L^2$ 과 등방성 조건을 써서 $PV = \frac{1}{3}Nm\overline{v^2}$ 을 유도한 뒤, $PV = NkT$ 와 비교하여 $\frac{3}{2}kT$ 를 얻은 경우	2
(3)	$v_{\text{rms}} = \sqrt{3kT/m}$ 으로 두 값을 자릿수까지 구하고, 속력 분포의 꼬리에 있는 빠른 분자들이 오랜 시간에 걸쳐 탈출한다는 점을 근거로 설명한 경우	2



[해설 그림 1] 300 K에서 기체별 v_{rms} 와 탈출 속도

문제 2 추를 내려 물을 데운다

일과 에너지 · 열량 · 열역학 제1·2법칙

(1) 정답: 400 J

추가 일정한 속력으로 내려오므로 운동 에너지는 변하지 않는다. 따라서 줄어든 중력 퍼텐셜 에너지가 모두 실을 통해 날개에 전달되고, 날개가 물을 저어 물의 내부 에너지가 된다.

$$E = Mgh = 20 \times 10 \times 2.0 = 400 \text{ J}$$

(2) 정답: $\Delta T \approx 3.8 \text{ K}$

20회 되풀이하면 물이 받은 에너지는

$$Q = nMgh = 20 \times 400 = 8000 \text{ J}$$

물의 온도 상승은 $Q = m_w c \Delta T$ 에서

$$\Delta T = \frac{Q}{m_w c} = \frac{8000}{0.50 \times 4200} = \frac{8000}{2100} \approx 3.8 \text{ K}$$

“일정한 속력”이 필요한 까닭: 이 조건이 있어야 추의 운동 에너지 변화가 0이 되어, 줄어든 퍼텐셜 에너지 Mgh 전부를 물에 전달된 에너지로 볼 수 있다. 만약 추가 점점 빨라지며 내려온다면 Mgh 의 일부가 추의 운동 에너지로 남으므로

$$Mgh = \Delta K + Q \Rightarrow Q < Mgh$$

가 되어 물에 전달된 에너지를 알 수 없다. 실제 장치에서는 날개가 받는 물의 저항이 커서 곧 일정한 속력에 이른다. 줄은 추가 바닥에 닿을 때의 속력을 재어 남아 있는 운동 에너지 $\frac{1}{2}Mv^2$ 만큼을 빼 주는 보정을 하였다.

(3) 정답: $\Delta U = +8000 \text{ J}$. 역과정은 열역학 제2법칙에 어긋난다

제1법칙: 계의 경계를 어디에 긋느냐에 따라 같은 8000 J이 Q 로도 W 로도 셈해지지만 결론은 같다. 물만 계로 잡으면 날개가 물에 일을 해 주는 것이므로 $Q = 0$, 계가 한 일 $W = -8000 \text{ J}$ 이다. 물과 날개를 함께 계로 잡으면 마찰로 흩어진 에너지가 계 안에서 열이 되므로 $Q = 8000 \text{ J}$ 이고, 물의 부피가 거의 변하지 않아 $W = 0$ 이다. 어느 쪽이든

$$\Delta U = Q - W = +8000 \text{ J}$$

이고, 받은 에너지가 모두 내부 에너지 증가로 나타나 온도가 3.8 K 오른다. 줄의 실험이 뜻깊은 것은 **역학적 일과 열이 내부 에너지를 올리는 데 완전히 같은 자격을 가진다**는 점을 보였기 때문이다.

역과정이 일어나지 않는 까닭: 역과정은 에너지 보존(제1법칙)에는 어긋나지 않는다. 물이 3.8 K 식으면서 내놓은 8000 J로 추를 들어 올리면 에너지의 총량은 그대로이다. 그런데도 이런 일은 결코 일어나지 않는다.

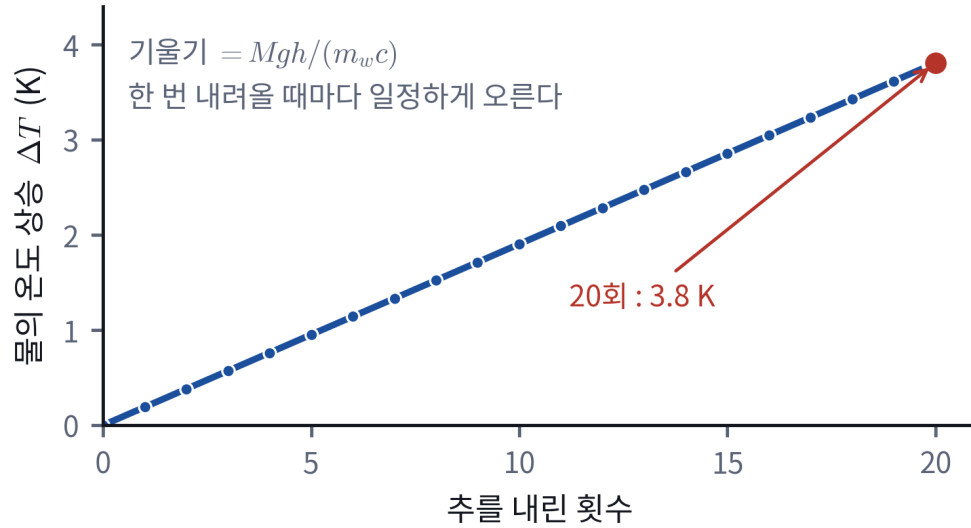
열역학 제2법칙(켈빈의 서술)은 “한 열원에서 열을 받아 그것을 모두 일로 바꾸고 다른 변화를 남기지 않는 순환 과정은 불가능하다”고 말한다. 역과정만 보면 순환이 아니지만, 이어서 정방향을 한 번 더 돌리면 물과 추가 처음 상태로 돌아와 순환이 완성되고 그 알짜 효과는 “한 열원에서 받은 열을 전부 일로 바꾼 것”뿐이므로 이 서술에 어긋난다.

미시적으로 보면 까닭이 분명하다. 정방향에서는 추의 **한 방향으로 정렬된** 운동 에너지가 물 분자들의 **제각각인** 열운동으로 흩어진다. 역방향은 무수히 많은 물 분자의 무질서한 운동이 우연히 한 방향으로 맞추어져 날개를 밀어야 하는데, 그 확률은 사실상 0이다.

역학적 일은 100% 열로 바꿀 수 있지만, 열을 100% 일로 바꾸는 순환 과정은 불가능하다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	일정한 속력이므로 운동 에너지 변화가 0임을 근거로 $Mgh = 400 \text{ J}$ 를 구한 경우	1
(2)	$Q = nMgh$ 와 $Q = m_w c \Delta T$ 로 3.8 K를 구하고, 운동 에너지 변화가 0이어야 전달 에너지를 확정할 수 있음을 설명한 경우	2
(3)	계를 어디까지로 잡는지 밝히고 $\Delta U = +8000 \text{ J}$ 을 바르게 얻었으며, 역과정이 제1법칙에는 어긋나지 않으나 제2법칙(또는 무질서도 증가)에 어긋남을 근거를 들어 설명한 경우	2



[해설 그림 2] 되풀이 횟수에 따른 물의 온도 상승

제 2 회 · 광학과 전자기

문제 1 편광판 세 장을 겹치면

전자기파 · 말루스 법칙 · 횡파

(1) 정답: 모든 방향에 대해 $\cos^2 \theta$ 의 평균이 $1/2$ 이기 때문

자연광의 전기장은 진행 방향에 수직인 모든 방향으로 고르게 진동한다. 각 방향의 성분에 말루스 법칙을 적용하면 투과되는 몫은 $\cos^2 \theta$ 이다. 방향이 고르게 분포하므로 $\overline{\cos^2 \theta} = \overline{\sin^2 \theta}$ 이고, 두 값의 합은 $\overline{\cos^2 \theta} + \overline{\sin^2 \theta} = 1$ 이다. 따라서 각각이 $1/2$ 이다.

$$\overline{\cos^2 \theta} = \frac{1}{2} \Rightarrow I_1 = \frac{I_0}{2}$$

이다. 어느 방향으로 놓든 결과가 같다는 점도 함께 알 수 있다. 자연광을 편광판 하나로 통과시켰을 때 편광판을 돌려도 밝기가 변하지 않는 것이 그 증거이다.

(2) 정답: B가 없으면 0, B를 끼우면 $I_0/8$

A와 C만 있을 때: A를 지난 빛은 90° 방향의 선편광이고 세기는 $I_0/2$ 이다. C의 투과축은 0° 이므로 두 축이 이루는 각은 90° 이고

$$I = \frac{I_0}{2} \cdot \cos^2 90^\circ = 0$$

빛이 전혀 나오지 않는다.

B를 끼웠을 때: 한 장씩 차례로 적용한다.

$$I_1 = \frac{I_0}{2} \quad (\text{편광판 A를 지난 뒤})$$

A와 B의 투과축이 이루는 각은 $90^\circ - 45^\circ = 45^\circ$ 이므로

$$I_2 = I_1 \cos^2 45^\circ = \frac{I_0}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{I_0}{4}$$

B와 C의 투과축이 이루는 각도 $45^\circ - 0^\circ = 45^\circ$ 이므로

$$I_3 = I_2 \cos^2 45^\circ = \frac{I_0}{4} \cdot \frac{1}{2} = \frac{I_0}{8}$$

아무것도 통과하지 못하던 곳에 편광판을 하나 더 끼웠더니 빛이 나온다. 편광판은 들어온 빛을 회전시키는 것이 아니라 투과축 방향 성분만 골라내는(사영하는) 장치이다. 그 결과 통과한 빛은 세기가 줄어든 채 투과축 방향으로 편광된다. B를 지난 빛은 45° 편광이 되므로 C의 0° 축과 90° 가 아니라 45° 를 이루게 되고, 그래서 통과할 수 있다. 회전이 아니라 사영이므로 세기는 $I_0/2$ 가 아니라 $I_0/8$ 까지 줄어든다.

(3) 정답: $I = \frac{I_0}{8} \sin^2 2\theta$, $\theta = 45^\circ$ 에서 최대 $I_0/8$

A와 B의 각이 θ 이면 B와 C의 각은 $90^\circ - \theta$ 이므로

$$I = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta \cdot \cos^2 (90^\circ - \theta) = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta \sin^2 \theta$$

$\sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} \sin 2\theta$ 를 쓰면

$$I = \frac{I_0}{2} \left(\frac{1}{2} \sin 2\theta \right)^2 = \frac{I_0}{8} \sin^2 2\theta$$

$\sin^2 2\theta$ 가 최대 1이 되는 것은 $2\theta = 90^\circ$, 곧

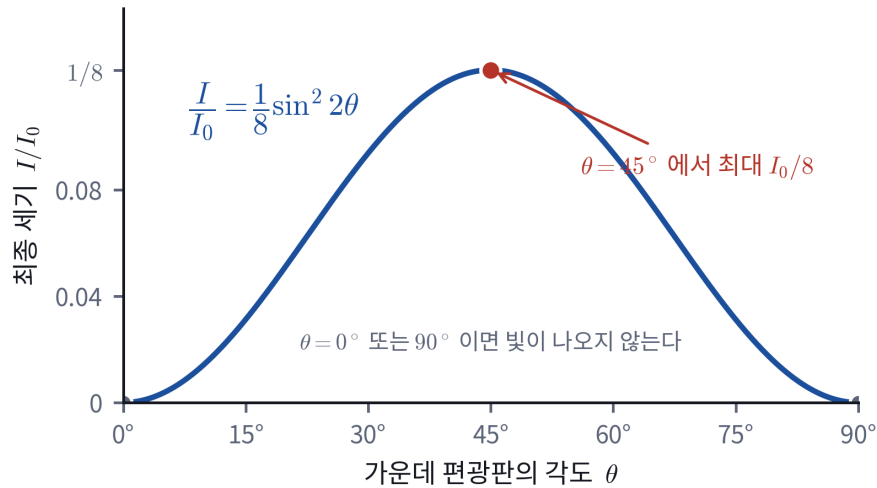
$$\theta = 45^\circ \Rightarrow I_{\max} = \frac{I_0}{8}$$

$\theta = 0^\circ$ 나 90° 이면 세 장 중 어느 한 쌍이 직교하게 되어 빛이 나오지 않는다는 것도 이 식에서 바로 확인된다.

편광이 횡파의 증거인 까닭: 편광은 “진행 방향에 수직인 여러 진동 방향 가운데 특정한 하나를 골라낼 수 있다”는 현상이다. 이런 선택이 가능하려면 애초에 진행 방향에 수직인 진동 방향이 여러 개 있어야 하고, 그것은 횡파에서만 가능하다.

공기 중을 지나는 소리는 매질이 진행 방향과 나란히 진동하는 종파이다. 진동 방향이 진행 방향 하나뿐이므로 “골라낼” 다른 방향이 없고, 따라서 편광시킬 수 없다. 편광은 파동이 횡파인지 종파인지를 가리는 가장 결정적인 실험적 증거이다.
채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	자연광의 진동 방향이 고르게 분포함과 $\overline{\cos^2 \theta} = 1/2$ 을 근거로 $I_0/2$ 를 설명한 경우	1
(2)	B가 없으면 0임을 밝히고, 말루스 법칙을 두 번 적용하여 $I_0/8$ 을 구한 경우 (편광 방향이 투과축 방향으로 사영 된다는 해석을 덧붙이면 우수)	2
(3)	$I = \frac{I_0}{8} \sin^2 2\theta$ 를 유도하여 $\theta = 45^\circ$, $I_0/8$ 을 구하고, 횡파에만 수직 진동 방향이 여러 개 있음을 소리와 대비하여 설명한 경우	2



[해설 그림 3] 가운데 편광판의 각도에 따른 최종 세기

문제 2 진동 회로와 전파의 송신

전자기 진동 · 에너지 보존 · 전자기파

(1) 정답: $f \approx 1.0 \times 10^7 \text{ Hz} = 10 \text{ MHz}$, $\lambda = 30 \text{ m}$

$$\sqrt{LC} = \sqrt{(2.5 \times 10^{-6})(1.0 \times 10^{-10})} = \sqrt{2.5 \times 10^{-16}} = 1.58 \times 10^{-8} \text{ s}$$

이므로

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 1.58 \times 10^{-8}} \approx 1.0 \times 10^7 \text{ Hz} = 10 \text{ MHz}$$

전자기파의 파장은 $\lambda = c/f$ 이므로

$$\lambda = \frac{3.0 \times 10^8}{1.0 \times 10^7} = 30 \text{ m}$$

단파 방송에 쓰이는 대역이다.

(2) 정답: $I_{\max} \approx 7.6 \times 10^{-2} \text{ A} = 76 \text{ mA}$

저항이 없으므로 에너지가 보존된다. 처음에는 전류가 0이고 축전기에만 에너지가 있으며, 전류가 최대일 때는 축전기 전압이 0이 되어 에너지가 모두 코일에 있다.

$$\frac{1}{2}CV_0^2 = \frac{1}{2}LI_{\max}^2 \Rightarrow I_{\max} = V_0\sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$I_{\max} = 12\sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-10}}{2.5 \times 10^{-6}}} = 12\sqrt{4.0 \times 10^{-5}} = 12 \times 6.32 \times 10^{-3} \approx 7.6 \times 10^{-2} \text{ A}$$

단진동과의 대응: 두 계는 같은 형태의 운동 방정식을 따르며, 다음과 같이 하나씩 짝지어진다.

L-C 진동 회로	용수철 진자	역할
축전기의 전하량 Q	변위 x	상태를 나타내는 양
전류 $I = \Delta Q / \Delta t$	속도 $v = \Delta x / \Delta t$	그 변화율
전기 용량의 역수 $1/C$	용수철 상수 k	되돌리려는 정도
자체 유도 계수 L	질량 m	변화를 거스르는 관성
$Q^2/2C$	$\frac{1}{2}kx^2$	퍼텐셜 에너지
$\frac{1}{2}LI^2$	$\frac{1}{2}mv^2$	운동 에너지

축전기가 완전히 충전된 순간은 용수철이 가장 늘어나 물체가 멈춘 순간에, 전류가 최대인 순간은 물체가 평형점을 최대 속력으로 지나는 순간에 대응한다. 진동수도 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 와 $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$ 로 같은 꼴이다.

(3) 정답: 전기 용량을 1/100배로

$f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 에서 L 이 일정하면

$$f \propto \frac{1}{\sqrt{C}} \Rightarrow C \propto \frac{1}{f^2}$$

진동수를 10 MHz에서 100 MHz로 10배 높여야 하므로

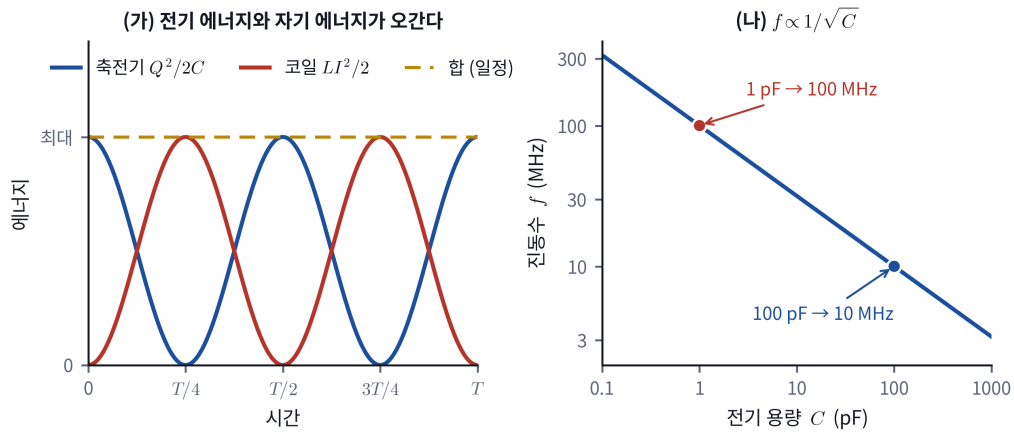
$$C' = \frac{C}{10^2} = \frac{C}{100} = 1.0 \times 10^{-12} \text{ F} = 1 \text{ pF}$$

안테나 도선 한쪽의 길이가 $\lambda/4$ 인 까닭: 안테나는 끝이 열려 있는 도선이므로 전류가 더 흐를 곳이 없는 끝점이 전류의 마디가 되고, 급전점(회로와 연결된 쪽)은 전류가 가장 크게 흐르는 배가 된다. 마디와 이웃한 배 사이의 거리는 파장의 1/4이므로, 한쪽 도선의 길이가 $\lambda/4$ 일 때 전류가 정상파를 이루며 공진한다. 그림 4처럼 위아래로 뺀 두 도선을 쓰면 전체 길이는 $\lambda/2$ 가 된다.

공진 상태에서는 같은 전압으로 훨씬 큰 전류가 흐르고, 그만큼 전자기파를 세게 내보내거나 잘 받을 수 있다. 100 MHz 라면 $\lambda = 3 \text{ m}$ 이므로 $\lambda/4 = 75 \text{ cm}$ 이며, 실제 FM 라디오 안테나의 길이와 잘 맞는다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	$f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 로 10 MHz를 구하고 $\lambda = c/f = 30 \text{ m}$ 를 구한 경우	1
(2)	에너지 보존 $\frac{1}{2}CV_0^2 = \frac{1}{2}LI_{\text{max}}^2$ 로 76 mA를 구하고, $Q \leftrightarrow x, I \leftrightarrow v, L \leftrightarrow m, 1/C \leftrightarrow k$ 의 대응을 두 개 이상 바르게 짝지어 설명한 경우	2
(3)	$C \propto 1/f^2$ 에서 1/100배를 구하고, 끝점이 전류의 마디가 됨을 근거로 한쪽 도선이 $\lambda/4$ 인 정상파를 설명한 경우	2



[해설 그림 4] (가) 두 에너지의 교환 (나) 전기 용량과 진동수

제 3 회 · 현대물리와 전자기

문제 1 레이저는 왜 뜨겁게 해서는 만들 수 없는가

광양자설 · 볼츠만 분포 · 유도 방출

(1) 정답: $E = 1.96 \text{ eV}$

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{632.8} \approx 1.96 \text{ eV}$$

붉은색 빛에 해당하는 에너지이다.

(2) 정답: $N_2/N_1 \approx 10^{-33}$

300 K에서 $kT = (8.6 \times 10^{-5})(300) = 2.58 \times 10^{-2} \text{ eV}$ 이므로

$$\frac{E_2 - E_1}{kT} = \frac{1.96}{2.58 \times 10^{-2}} \approx 76$$

따라서 $N_2/N_1 = e^{-76}$ 이다. 상용로그를 취하면

$$\log\left(\frac{N_2}{N_1}\right) = -76 \log e = -76 \times 0.434 \approx -33$$

$$\frac{N_2}{N_1} \approx 10^{-33}$$

뜻: 위 준위에 있는 원자가 사실상 하나도 없다는 뜻이다. 원자 10^{33} 개마다 겨우 하나 있다는 것인데, 1 mol 이 6×10^{23} 개이므로 이는 기체를 약 17억 mol 모아야 겨우 한 개를 볼 수 있다는 이야기이다. 열평형 상태의 기체는 이 파장의 빛을 증폭하기는커녕 거의 전부 흡수만 한다.

(3) 정답: $T > 0$ 인 어떤 온도에서도 $e^{-\Delta E/kT} < 1$ 이므로 언제나 $N_2 < N_1$

온도로는 준위 반전을 만들 수 없다: $\Delta E = E_2 - E_1 > 0$ 이고 $T > 0$ 이므로 지수 $-\Delta E/(kT)$ 는 언제나 음수이고, 따라서

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\Delta E/(kT)} < 1 \Rightarrow N_2 < N_1 \quad (\text{유한한 모든 } T \text{ 에 대하여})$$

온도를 아무리 높여도 $T \rightarrow \infty$ 일 때 $N_2/N_1 \rightarrow 1$ 로 다가갈 뿐 결코 1을 넘지 못한다. 두 준위의 원자 수가 같아지는 것이 열평형이 도달할 수 있는 한계이며, 그때는 유도 방출과 흡수가 정확히 같은 비율로 일어나 증폭도 흡수도 일어나지 않는다.

따라서 준위 반전은 열평형 밖의 상태이며, 열을 가하는 방법이 아니라 강한 빛이나 방전으로 원자를 위 준위에 강제로 밀어 올리는 방법(펌핑)으로만 만들 수 있다. 실제 레이저가 준위 두 개짜리 구조가 아니라 세 개 또는 네 개짜리 구조를 쓰는 것도 이 때문이다. 준위가 둘뿐이면 펌핑하는 빛이 흡수와 유도 방출을 똑같이 일으켜 $N_2 = N_1$ 을 넘어설 수 없다.

레이저 빛의 세 가지 성질: 모두 유도 방출로 생긴 광자가 원래 광자와 진동수·위상·진행 방향이 같다는 한 가지 사실에서 나온다.

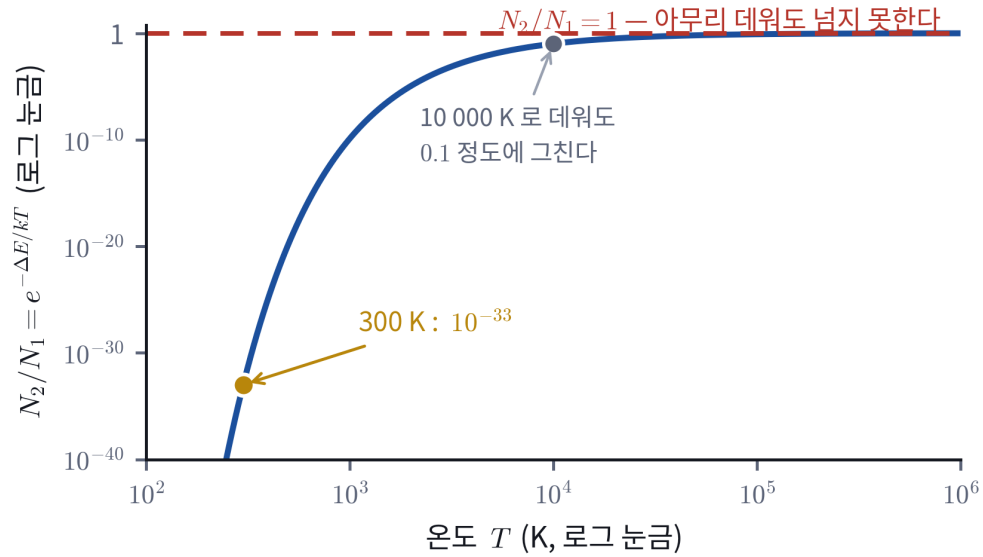
단색성 새 광자의 진동수가 원래 광자와 같으므로, 증폭이 거듭되어도 파장이 흐트러지지 않고 아주 좁은 범위에 모인다. 전구는 온도에 따른 넓은 파장 분포를 낸다.

간섭성 새 광자의 위상이 원래 광자와 같으므로 빛의 마루와 골이 가지런히 맞는다. 그래서 멀리 떨어진 두 지점의 빛끼리도 간섭무늬를 만들 수 있다. 전구의 빛은 자발 방출이라 위상이 제각각이어서 이것이 되지 않는다.

직진성 새 광자의 진행 방향이 원래 광자와 같으므로, 두 거울 사이를 왕복하는 방향의 광자만 되풀이하여 증폭된다. 그 결과 아주 좁은 각으로 퍼지는 빔이 된다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	$E = hc/\lambda$ 로 1.96 eV를 구한 경우	1
(2)	$\Delta E/kT \approx 76$ 을 구하고 상용로그로 10^{-33} 을 얻었으며, 위 준위가 사실상 비어 있다는 뜻을 밝힌 경우	2
(3)	$T > 0$ 에서 지수가 음수이므로 비가 언제나 1보다 작고 $T \rightarrow \infty$ 에서 1에 접근할 뿐임을 보이고, 유도 방출 광자의 진동수·위상·방향이 같다는 성질로 세 가지 특성을 각각 설명한 경우	2



[해설 그림 5] 온도에 따른 $N_2/N_1 \rightarrow 1$ 을 넘지 못한다

문제 2 저항이 0인 도선과 떠 있는 자석

전자기 유도 · 자기장 · 초전도

(1) 정답: 유도 전류가 변화를 완전히 상쇄하여 자기 선속이 일정하게 유지된다

고리를 지나는 자기 선속이 변하려 하면 렌츠 법칙에 따라 그 변화를 방해하는 방향으로 유도 기전력과 유도 전류가 생긴다. 보통의 도선이라면 저항 때문에 전류가 곧 줄어들어 변화를 늦출 뿐이지만, 저항이 0이면 사정이 다르다.

옴 법칙 $I = V/R$ 에서 $R = 0$ 이므로, 아주 작은 기전력만 생겨도 전류가 무한히 커지려 한다. 실제로는 전류가 커지자마자 그 전류가 만드는 자기장이 원래의 변화를 정확히 상쇄하므로, 결국 **기전력이 0이 되는 지점**에서 멈춘다. 기전력이 0이라는 것은 곧 선속의 변화율이 0이라는 뜻이다.

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = IR = 0 \Rightarrow \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0 \Rightarrow \Phi = \text{일정}$$

이것을 **선속 고정**이라 한다. 초전도 고리는 처음에 지나던 자기 선속을 영원히 그대로 붙잡아 둔다.

(2) 정답: $B \approx 0.25 \text{ T}$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(1000)(200)}{2 \times 0.50}$$

분자를 먼저 계산하면 $4 \times 3.14 \times 10^{-7} \times 2.0 \times 10^5 = 2.51 \times 10^{-1}$ 이고 분모는 1.0이므로

$$B \approx 0.25 \text{ T}$$

지구 자기장($5 \times 10^{-5} \text{ T}$ 정도)의 약 5000배이다.

구리로 만든다면: 구리에는 저항이 있으므로 200 A를 흘리면 단위 시간당 $P = I^2 R$ 의 열이 난다. 코일의 총 길이는 $2\pi r N \approx 3.1 \times 10^3 \text{ m}$ 로 3 km가 넘고, 이만한 길이면 굵게 만들어도 저항이 수 Ω 에 이른다. $R = 1\Omega$ 만 되어도

$$P = I^2 R = 200^2 \times 1 = 4 \times 10^4 \text{ W} = 40 \text{ kW}$$

의 열이 끊임없이 나온다. 빼내지 못하면 도선이 녹고, 빼내려면 그만한 냉각 설비와 전력이 계속 든다. 그래서 보통의 전자석으로는 전류를 크게 올릴 수 없고 자기장에도 한계가 있다.

초전도 코일은 $R = 0$ 이므로 발열이 없다. 한번 전류를 흘려 놓으면 전원을 떼어도 줄지 않고 계속 흐르며((1)의 선속 고정), 훨씬 큰 전류로 훨씬 센 자기장을 유지할 수 있다. MRI 장치가 1~3 T를 몇 년씩 유지하는 것이 이 때문이다.

다만 코일 자신이 만드는 자기장이 그 물질의 임계 자기장 B_c 를 넘으면 초전도성이 깨진다. 그래서 실제 초전도 자석에는 B_c 가 낮은 순수 금속(납·주석 등)이 아니라 임계 자기장이 훨씬 높은 니오브-타이타늄 합금 같은 재료를 쓴다.

(3) 정답: $F = mg = 0.20 \text{ N}$ (연직 위 방향)

자석이 떠서 정지해 있으므로 알짜힘이 0이다. 자석에 작용하는 힘은 아래로 향하는 중력과 위로 향하는 자기력뿐이므로

$$F = mg = (20 \times 10^{-3})(10) = 0.20 \text{ N}$$

힘이 생기는 까닭: 자석이 다가가면 초전도체를 지나는 자기 선속이 늘어나려 한다. (1)에서 본 대로 저항이 0인 물체의 표면에는 이 변화를 정확히 상쇄하는 방향으로 감쇠하지 않는 전류가 흐르고, 그 결과 내부의 자기장은 0으로 유지된다.

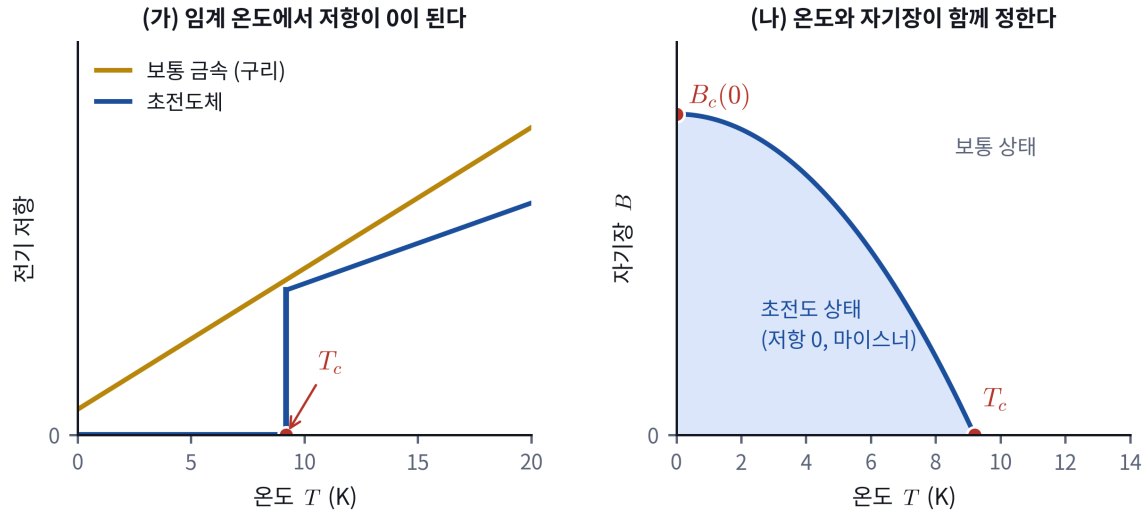
다만 여기까지는 **저항이 0이기만 해도** 성립하는 이야기이다. 마이스너 효과는 그보다 강한 성질이다. 자기장을 걸어 둔 채 온도를 T_c 아래로 내리면, 저항만 0인 물체는 그때 지나던 자기장을 그대로 가두어 두지만 초전도체는 그것을 밖으로 밀어내어 내부를 0으로 만든다. 곧 초전도체는 “선속을 붙잡는” 것이 아니라 “선속을 밀어내는” 것이며, 이 점이 완전 도체와 초전도체를 가르는 결정적인 차이이다.

이 표면 전류가 만드는 자기장은, 초전도체 아래에 자석과 극이 마주 보도록 놓인 또 하나의 자석이 있는 것과 같은 효과를 낸다. 같은 극끼리는 밀어내므로 자석은 위로 밀린다. 자석이 처지면 반발력이 커지고 뜨면 작아지므로 **연직 방향으로**는 균형을 이루는 높이가 저절로 정해진다. (옆으로도 붙박이는 것은 제2종 초전도체의 자속 고정 때문이며, 순수한 반자성만으로는 옆 방향 안정성이 생기지 않는다.)

온도를 T_c 위로 올리면: 초전도 상태가 깨져 저항이 되살아난다. 표면 전류는 저항 때문에 곧 사라지고 마이스너 효과도 없어져 자기장이 물질 안으로 들어간다. 반발력이 사라지므로 자석은 그대로 떨어진다.

채점 기준

하위 문항	채점 기준	배점
(1)	렌츠 법칙과 $R = 0$ 을 함께 써서 기전력이 0이 되어야 함을 밝히고, 그로부터 자기 선속이 일정하게 유지됨(선속 고정)을 이끌어 낸 경우	1
(2)	$B \approx 0.25 \text{ T}$ 를 구하고, 구리에서는 $P = I^2 R$ 의 발열이 커서 냉각과 전력이 계속 든다는 점을 도선의 총 길이($\approx 3.1 \text{ km}$)를 들어 설명한 경우	2
(3)	힘의 평형에서 $F = mg = 0.20 \text{ N}$ 을 구하고, 표면 전류가 만드는 자기장에 의한 반발로 힘의 근원을 설명하였으며, $T > T_c$ 에서 초전도성이 깨져 자석이 떨어짐을 답한 경우 (선속 고정과 마이스너 효과를 구별하면 우수)	2



[해설 그림 6] (가) 임계 온도에서의 저항 (나) 초전도 상태의 온도-자기장 영역