

연세대학교 논술시험

자연계열 · 물리

문제 · 예시답안

시험 구분
전형
출제 과목
문항 수
핵심 개념

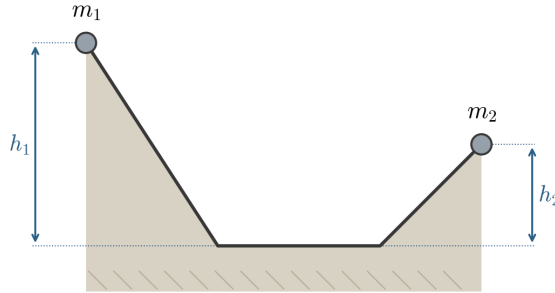
논술시험 (자연계열, 물리)
수시모집 논술전형
물리학 I, 물리학 II
4문항 (각 10점, 총 40점)
역학적 에너지 보존과 완전 비탄성 충돌,
수평 투사 운동과 상대적 위치 조건,
이중 슬릿 상쇄 간섭 무늬의 차수,
광전효과 · 드브로이 물질파와 전기장 속 감속

I. 문제

문제 1 경사면 사이의 충돌 — 이탈하지 않을 조건

물리학 I · II · 10점

[가] [그림 1]과 같이 수평면 양쪽에 정상 높이가 각각 h_1 과 h_2 로 서로 다른 두 개의 경사면이 있다. 더 높은 왼쪽 경사면의 정상에 질량이 m_1 인 물체가 있고, 더 낮은 오른쪽 경사면의 정상에 질량이 m_2 인 물체가 있다. 정지해 있던 두 물체는 동시에 운동을 시작하여 마찰이 없는 경사면을 미끄러져 내려와 수평면에서 충돌한 후 **한 덩어리가 되어** 운동한다.



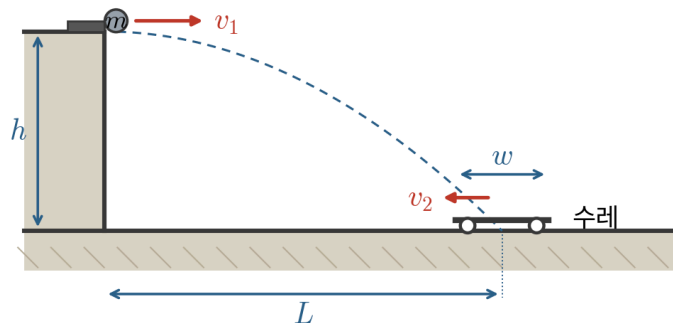
[그림 1] 정상 높이가 각각 h_1, h_2 인 두 경사면과 두 물체

문제 1. 제시문 [가]에서 높이 h_1 에서 출발하는 물체의 질량 m_1 이 높이 h_2 에서 출발하는 물체의 질량 m_2 의 2배일 때, 수평면에서 충돌 후 한 덩어리가 된 물체가 두 경사면을 이탈하지 않고 그 사이에서 운동하게 하기 위해서 h_1/h_2 가 얼마여야 하는지, 그 최댓값을 구하시오. 단, 중력가속도 g 는 연직 아래 방향으로 일정하고, 경사면 및 수평면의 마찰, 공기저항, 물체의 크기는 무시한다.

문제 2 포물선 운동과 이동하는 수레

물리학 I · II · 10점

[나] [그림 2]와 같이 지표면으로부터 높이가 h 인 절벽에 구슬을 발사하는 장치가 있고, 지표면에는 폭이 w 인 수레가 있다. 수레의 중심은 구슬 발사 장치로부터 수평거리 L 만큼 떨어진 지점에 있다. 구슬 발사 장치는 일정한 시간 간격 t 마다 질량이 m 인 구슬을 오른쪽 수평 방향으로 속도 v_1 으로 발사한다. 첫 구슬이 발사될 때 수레가 왼쪽 수평 방향으로 일정한 속도 v_2 로 운동하여 벽면에 도달한다. 그동안 발사된 구슬이 수레의 폭 w 안에 떨어지면, 수레가 구슬을 수거한 것으로 간주한다. 수레나 지표면에 닿은 구슬은 다시 튀어 오르지 않으며, 수레가 구슬을 수거하더라도 질량과 속도의 변화는 없다고 가정하자.



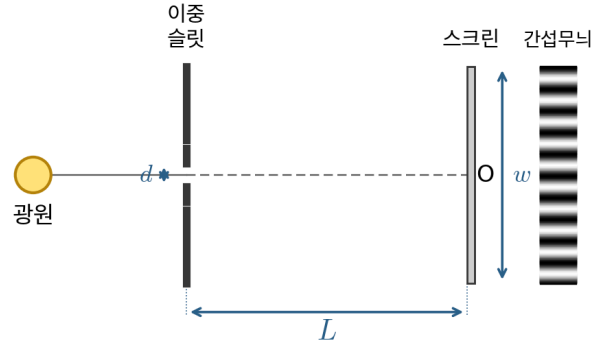
[그림 2] 구슬 발사 장치와 왼쪽으로 이동하는 수레

문제 2. 제시문 [나]에서 구슬 발사 장치의 높이 h 는 5 m, 수레의 중심까지 거리 L 은 20 m, 수레의 폭 w 는 0.8 m, 구슬 발사의 시간 간격 t 는 0.03 s, 발사된 구슬의 초기 속도 v_1 은 9.6 m/s이다. 수레의 속도 v_2 는 처음 발사된 구슬을 수거하기 위한 최솟값이라면 수레가 수거하게 될 구슬은 몇 개인가? 단, 중력가속도 g 는 10 m/s²로 계산하고, 공기저항, 수레의 높이, 구슬의 크기는 무시한다.

문제 3 이중 슬릿 상쇄 간섭 무늬의 개수

물리학 I · II · 10점

[다] [그림 3]과 같이 빛의 파장이 λ 인 광원을 이용하여 이중 슬릿 실험 장치를 설계하였다. 광원의 오른쪽에 슬릿 사이의 간격이 d 인 이중 슬릿을 두고, 이중 슬릿으로부터 거리 L 만큼 떨어진 지점에 폭이 w 인 스크린을 설치하였다. 빛의 파장 λ 를 일정한 간격으로 점점 증가시켜가며, 스크린에 나타난 상쇄 간섭 무늬의 개수를 기록하였다.



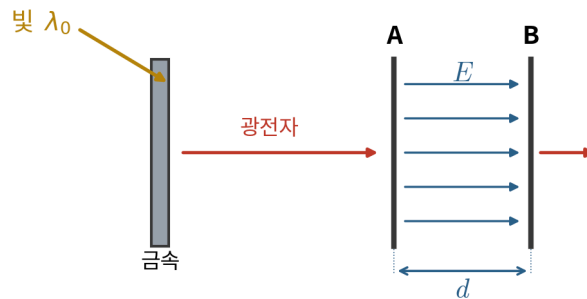
[그림 3] 슬릿 간격 d , 슬릿-스크린 거리 L , 스크린 폭 w 인 이중 슬릿 실험

문제 3. 제시문 [다]에서 슬릿 간격 d 가 0.1 mm, 거리 L 이 1 m, 처음 측정에서 빛의 파장 λ 가 150 nm일 때, [그림 3]과 같이 스크린의 가장자리에 중심(O점)으로부터 세 번째 상쇄 간섭이 나타났다. 빛의 파장 λ 를 40 nm씩 일정하게 증가시키며 스크린에 더 이상 상쇄 간섭 무늬가 나타나지 않을 때까지 측정을 반복하였다. 각 측정에서 스크린에 나타난 상쇄 간섭 무늬의 개수를 모두 합하면 몇 개인가? 단, 1 nm는 10^{-9} m로 계산한다.

문제 4 광전효과와 드브로이 파장

물리학 I · II · 10점

[라] [그림 4]와 같이 단일 원소로 구성된 금속의 성분을 알아보기 위해 광전효과 실험을 준비하였다. 금속 표면에 파장이 λ_0 인 빛을 쬌어주면 광전자가 튀어나온다. 최대 운동 에너지를 갖는 광전자는 수평 방향으로 등속 운동하여 평행판 A에 입사한다. 평행판 A와 B 사이에는 균일한 전기장 E 가 오른쪽 수평 방향으로 걸려 있고, 평행판 A와 B 사이의 거리는 d 이다. 광전자는 균일한 전기장 영역을 지나 평행판 B를 통과하였다. A와 B 지점에서 각각 광전자의 드브로이 파장을 측정한 결과, λ_A 와 λ_B 로 나타났다.



[그림 4] 금속 표면의 광전효과와 평행판 A·B 사이의 균일 전기장 E

[표 1] 주요 금속의 일함수 (eV)

원소	Li	Na	K	Cs	Mg	Ca	Ag	Au	Pt
일함수	2.5	2.3	2.2	1.9	3.7	3.2	4.7	5.1	6.4

문제 4. 제시문 [라]에서 빛의 파장 λ_0 가 150 nm, 전기장 E 가 80 V/m, 거리 d 가 7 cm이고, B에서 측정한 광전자의 드브로이 파장 λ_B 가 A에서 측정한 드브로이 파장 λ_A 의 3배로 길게 측정되었다. [표 1]을 바탕으로 금속의 성분 원소가 무엇인지 추론하시오. 단, 플랑크 상수 h 는 4.1×10^{-15} eV·s, 광속 c 는 3×10^8 m/s, 1 nm는 10^{-9} m로 계산한다.

II. 예시답안

문제 1 경사면 사이의 충돌 — 이탈하지 않을 조건

역학적 에너지 보존 · 운동량 보존 · 완전 비탄성 충돌

(답) $(h_1/h_2)_{\max} = 4$

① **충돌 직전의 속도 — 역학적 에너지 보존.** 경사면에 마찰이 없으므로 각 물체가 정상에서 수평면까지 내려오는 동안 역학적 에너지가 보존된다. 질량을 $m_1 = 2m, m_2 = m$ 으로 두고 오른쪽을 + 방향으로 잡으면

$$\frac{1}{2}m_i u_i^2 = m_i g h_i \Rightarrow u_i = \sqrt{2gh_i}$$

이므로, 충돌 직전 두 물체의 속도는 각각

$$u_1 = +\sqrt{2gh_1} \text{ (오른쪽)}, \quad u_2 = -\sqrt{2gh_2} \text{ (왼쪽)}$$

이다. 속력이 질량과 무관하게 높이만으로 정해진다는 점에 주의한다.

② **충돌 — 운동량 보존.** 두 물체가 부딪쳐 한 덩어리가 되므로 완전 비탄성 충돌이며, 수평면에서 수평 방향으로의 외력이 작용하지 않으므로 운동량이 보존된다. 충돌 직후 공통 속도를 V 라 하면

$$(2m)\sqrt{2gh_1} + m(-\sqrt{2gh_2}) = (2m + m)V$$

$$\Rightarrow V = \frac{1}{3}(2\sqrt{2gh_1} - \sqrt{2gh_2}) = \frac{\sqrt{2g}}{3}(2\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})$$

이다. 문제 조건에서 $h_1 > h_2$ 이므로 $2\sqrt{h_1} > 2\sqrt{h_2} > \sqrt{h_2}$, 즉 $V > 0$ 이다. 따라서 한 덩어리가 된 물체는 항상 **오른쪽(낮은 경사면 쪽)**으로 움직인다.

③ **충돌 후 도달하는 최고 높이 — 다시 역학적 에너지 보존.** 충돌 후에도 마찰이 없으므로 운동에너지가 모두 중력 퍼텐셜 에너지로 바뀌는 높이 H 는

$$\frac{1}{2}(3m)V^2 = (3m)gH \Rightarrow H = \frac{V^2}{2g} = \frac{(2\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})^2}{9}$$

이다. 마찰이 없으므로 물체는 두 경사면 사이를 왕복하며 **매번 같은 높이 H 까지만 올라간다.**

④ **이탈하지 않을 조건.** 물체가 경사면을 이탈하려면 정상보다 높이 올라가야 하므로, 이탈하지 않을 조건은 $H \leq h_1$ 이면서 $H \leq h_2$ 이다. 그런데 $h_2 < h_1$ 이므로 **더 낮은 경사면 쪽 조건 $H \leq h_2$ 만 만족하면 충분하다.** $r = h_1/h_2$ ($r > 1$) 로 놓고 양변을 h_2 로 나누면

$$\begin{aligned} \frac{(2\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})^2}{9} &\leq h_2 \Rightarrow (2\sqrt{r} - 1)^2 \leq 9 \\ &\Rightarrow |2\sqrt{r} - 1| \leq 3 \Rightarrow -1 \leq \sqrt{r} \leq 2 \end{aligned}$$

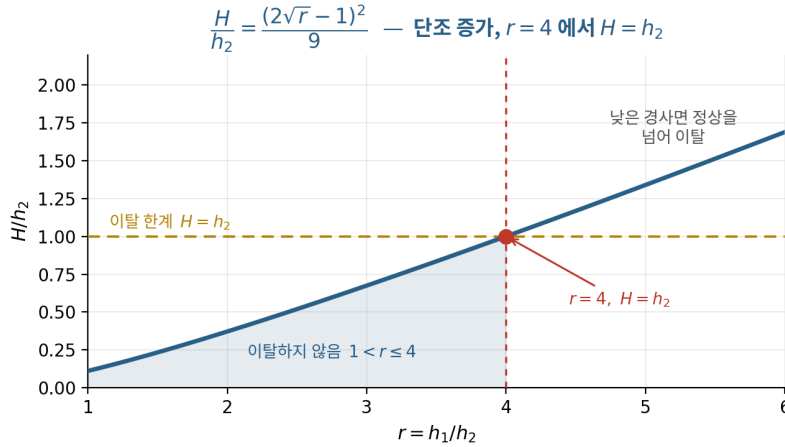
이고, $\sqrt{r} > 0$ 이므로 실질적인 조건은 $\sqrt{r} \leq 2$, 즉 $r \leq 4$ 이다.

$$\frac{H}{h_2} = \frac{(2\sqrt{r} - 1)^2}{9} \leq 1 \iff 1 < \frac{h_1}{h_2} \leq 4, \quad \therefore \left(\frac{h_1}{h_2}\right)_{\max} = 4$$

등호가 성립하는 $h_1 = 4h_2$ 일 때 $H = h_2$ 로, 물체는 낮은 경사면의 정상에 속력 0으로 정확히 도달했다가 되돌아온다.

⑤ 결과의 검토와 물리적 의미.

- H 는 r 에 대해 단조 증가 — $d(H/h_2)/dr = 2(2\sqrt{r} - 1)/(9\sqrt{r}) > 0$ 이므로, 왼쪽 경사면이 높아질수록 충돌 후 속력이 커져 더 높이 올라간다. 따라서 이탈 조건은 위쪽 한계 $r \leq 4$ 하나로 정리된다.
- **한계에서의 속도** — $r = 4$ 이면 $V = (\sqrt{2g}/3)(2\sqrt{4h_2} - \sqrt{h_2}) = \sqrt{2gh_2}$ 로, 합쳐진 물체가 마치 낮은 쪽 물체가 내려온 속력 그대로 되돌아 올라가는 셈이다. 이로부터 $H = h_2$ 임을 곧바로 확인할 수 있다.
- **충돌에서 잃는 에너지** — $r = 4$ 일 때 충돌 직전 운동에너지는 $2mgh_1 + mgh_2 = 9mgh_2$, 직후는 $\frac{1}{2}(3m)V^2 = 3mgh_2$ 이다. 즉 완전 비탄성 충돌에서 역학적 에너지의 2/3 가 소리·열 등으로 사라진다. 운동량은 보존되지만 역학적 에너지는 보존되지 않는다는 점이 이 문제의 핵심이다.



예시 작도 — $H/h_2 = (2\sqrt{r}-1)^2/9$ 가 $r=4$ 에서 이탈 한계 $H=h_2$ 에 닿는다

문제 2 포물선 운동과 이동하는 수레

수평 투사 · 낙하 시간의 독립성 · 상대 위치 조건

(답) 수거하는 구슬 3개 (첫 번째 · 두 번째 · 세 번째 구슬)

① 좌표 설정과 낙하 시간. 발사 지점 바로 아래의 지표면을 원점, 오른쪽을 $+x$ 로 잡는다. 수평 투사에서 연직 방향은 자유낙하이므로 지표면에 닿을 때까지 걸리는 시간 t_f 는 수평 속력과 무관하게

$$h = \frac{1}{2}gt_f^2 \Rightarrow t_f = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 5}{10}} = 1 \text{ s}$$

이다.

② 구슬의 착지점은 항상 같다. 수평 방향은 등속이므로 착지점의 x 좌표는

$$x_\ell = v_1 t_f = 9.6 \times 1 = 9.6 \text{ m}$$

이다. 모든 구슬이 같은 높이에서 같은 속력으로 발사되므로 발사 시간만 다를 뿐 궤적과 착지점은 모두 동일하다. 즉 구슬은 $x = 9.6 \text{ m}$ 한 지점에 0.03 s 간격으로 차례차례 떨어진다. 따라서 문제는 “수레가 그 지점을 덮고 있는 동안 몇 개의 구슬이 떨어지는가”로 바뀐다.

③ 수레의 위치와 첫 구슬 수거 조건. 수레의 중심은 $t=0$ 에 $x=L=20 \text{ m}$ 이고 왼쪽으로 등속 v_2 로 움직이므로

$$x_c(t) = L - v_2 t = 20 - v_2 t$$

이고, 수레는 $x_c - w/2$ 부터 $x_c + w/2$ 까지를 덮는다 ($w/2 = 0.4 \text{ m}$). 첫 구슬은 $t = t_f = 1 \text{ s}$ 에 $x = 9.6 \text{ m}$ 에 떨어지므로 수거 조건은

$$|x_\ell - x_c(1)| \leq \frac{w}{2} \Rightarrow |9.6 - (20 - v_2)| \leq 0.4$$

$$\Rightarrow 9.2 \leq 20 - v_2 \leq 10.0 \Rightarrow 10.0 \leq v_2 \leq 10.8 \text{ m/s}$$

이다. v_2 가 작을수록 수레가 덜 다가오므로, 최솟값은 구슬이 수레의 진행 방향 앞쪽 끝($x_c - w/2$)에 겨우 걸리는 경우이다.

$$v_{2, \min} = \frac{L - (x_\ell + w/2)}{t_f} = \frac{20 - 10.0}{1} = 10 \text{ m/s}$$

④ k 번째 구슬의 수거 여부. k 번째 구슬의 발사 시각을 $t_k^{(0)}$ 이라 하면 발사 간격이 $t = 0.03$ s 이므로 $t_k^{(0)} = (k-1)t = 0.03(k-1)$ 이고, 이 구슬은

$$t_k = t_k^{(0)} + t_f = 0.03(k-1) + 1$$

에 착지한다. 그때 수레 중심의 위치는 $v_2 = 10$ m/s 를 대입하여

$$x_c(t_k) = 20 - 10[0.03(k-1) + 1] = 10 - 0.3(k-1)$$

이므로, 수거 조건 $|x_\ell - x_c(t_k)| \leq 0.4$ 는

$$|9.6 - (10 - 0.3(k-1))| \leq 0.4 \Rightarrow |0.3(k-1) - 0.4| \leq 0.4$$

$$\Rightarrow 0 \leq 0.3(k-1) \leq 0.8 \Rightarrow 0 \leq k-1 \leq \frac{8}{3} \approx 2.67$$

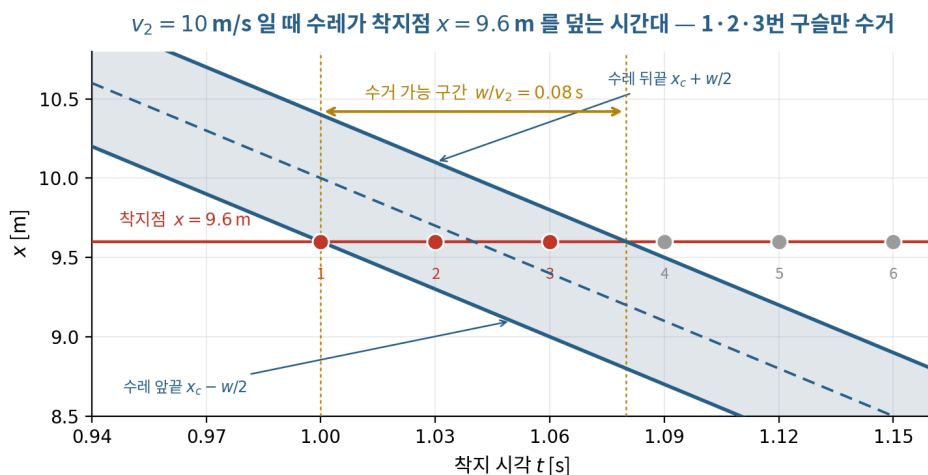
가 된다. k 는 자연수이므로 $k = 1, 2, 3$ 이다.

구슬 k	착지 시각 t_k (s)	수레 중심 x_c (m)	중심에서의 어긋남 (m)	수거
1	1.00	10.0	-0.4 (앞쪽 끝)	○
2	1.03	9.7	-0.1	○
3	1.06	9.4	+0.2	○
4	1.09	9.1	+0.5 > 0.4	×

∴ 수레가 수거하는 구슬의 개수 = 3 개

⑤ 다른 방법과 물리적 의미.

- “수거 창”으로 보는 방법 — 착지점이 고정되어 있으므로, 수레가 그 점을 덮고 있는 시간은 수레가 자기 몸 길이만큼 지나가는 데 걸리는 시간 $w/v_2 = 0.8/10 = 0.08$ s 이다. 첫 구슬이 창이 열리는 순간($t = 1.00$ s)에 정확히 떨어지므로, 창이 닫히는 $t = 1.08$ s 까지 0.03 s 간격으로 떨어지는 구슬 수는 $[0.08/0.03] + 1 = 2 + 1 = 3$ 개이다.
- v_2 가 최솟값이라는 조건의 뜻 — $v_2 = 10$ m/s 는 첫 구슬을 “겨우” 받는 값이므로 첫 구슬이 수레의 앞쪽 끝에 걸린다. 덕분에 이후 구슬들이 수레 폭 전체를 훑고 지나가 수거 개수가 최대가 된다. 만약 v_2 가 조금 더 컸다면 첫 구슬이 수레 안쪽에 떨어지고 창이 그만큼 일찍 닫혀 수거 개수가 줄어든다.
- 수레가 벽에 닿기 전에 수거가 끝난다 — 수레의 앞쪽 끝이 절벽 벽면($x = 0$)에 닿는 시각은 $(20 - 0.4)/10 = 1.96$ s 로, 마지막 수거 시각 1.06 s 보다 훨씬 뒤이다. 따라서 수거가 진행되는 동안 수레는 계속 등속으로 접근한다.



예시 작도 — 수레가 덮는 구간(띠)과 착지점 $x = 9.6$ m 가 겹치는 시간대는 1.00 ~ 1.08 s 이며, 그 안에 떨어지는 구슬은 1·2·3번뿐이다

문제 3 이중 슬릿 상쇄 간섭 무늬의 개수

경로차와 상쇄 조건 · 무늬 차수의 정수 조건

(답) 모든 측정의 상쇄 간섭 무늬 개수의 합 = 40 개

① **상쇄 간섭 조건.** 슬릿 간격이 d 이고 스크린이 충분히 멀면($L \gg d$), 두 슬릿에서 나온 빛이 스크린의 한 점에 도달할 때 생기는 경로차는 $d \sin \theta$ 이다. 상쇄 간섭(어두운 무늬)은 경로차가 반파장의 홀수 배일 때 일어나므로

$$d \sin \theta = \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

이다. 중심 O 에서 켜 떨어진 거리를 y 라 하면 $L \gg y$ 에서 $\sin \theta \approx \tan \theta = y/L$ 이므로, m 번째 상쇄 무늬의 위치는

$$y_m = \left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda L}{d}$$

이고 O 를 기준으로 위·아래 대칭으로 나타난다. 이웃한 무늬 사이의 간격은 $\Delta y = \lambda L/d$ 로, **파장이 길수록 무늬가 성기게** 퍼진다.

② **스크린의 반폭 Y 를 결정한다.** 첫 측정 $\lambda = 150 \text{ nm}$ 에서 O 로부터 **세 번째** 상쇄 무늬가 스크린의 가장자리에 나타났으므로 $Y = y_3$ 이다.

$$Y = \left(3 - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda L}{d} = 2.5 \times \frac{150 \times 10^{-9} \times 1}{1.0 \times 10^{-4}} = 3.75 \times 10^{-3} \text{ m}$$

즉 $Y = 3.75 \text{ mm}$ 이고 스크린의 폭은 $w = 2Y = 7.5 \text{ mm}$ 이다. 이후 측정에서 장치는 그대로이므로 Y 는 고정된 상수로 쓸 수 있다.

③ **임의의 파장에서 무늬 개수.** 무늬가 스크린 안에 들어올 조건 $y_m \leq Y$ 로부터

$$\left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda L}{d} \leq Y \Rightarrow m \leq \frac{Yd}{\lambda L} + \frac{1}{2}$$

이다. 여기서 $Yd/L = 3.75 \times 10^{-3} \times 10^{-4}/1 = 3.75 \times 10^{-7} \text{ m} = 375 \text{ nm}$ 이므로, 한쪽(위 또는 아래)에 보이는 무늬의 최대 차수 M 과 총 개수 N 은

$$M(\lambda) = \left\lfloor \frac{375 \text{ nm}}{\lambda} + \frac{1}{2} \right\rfloor, \quad N(\lambda) = 2M(\lambda)$$

④ **차수별 파장 구간으로 세기.** $M(\lambda) = M$ 이 되는 조건은 $M \leq 375/\lambda + 1/2 < M + 1$, 즉

$$\frac{375}{M + 1/2} < \lambda \leq \frac{375}{M - 1/2} \quad (\text{단위: nm})$$

이다. 측정 파장은 $\lambda = 150, 190, 230, \dots$ 로 40 nm 씩 커지는 등차수열이므로, 각 구간에 몇 개의 측정값이 들어가는지 세면 된다.

M	파장 구간 (nm)	해당 측정 파장 (nm)	측정 횟수	$N = 2M$ 의 소계
3	$107.1 < \lambda \leq 150$	150	1회	$3 \times 2 \times 1 = 6$
2	$150 < \lambda \leq 250$	190, 230	2회	$2 \times 2 \times 2 = 8$
1	$250 < \lambda \leq 750$	270, 310, ..., 750	13회	$1 \times 2 \times 13 = 26$
0	$\lambda > 750$	790 이상	—	무늬 없음 → 측정 종료

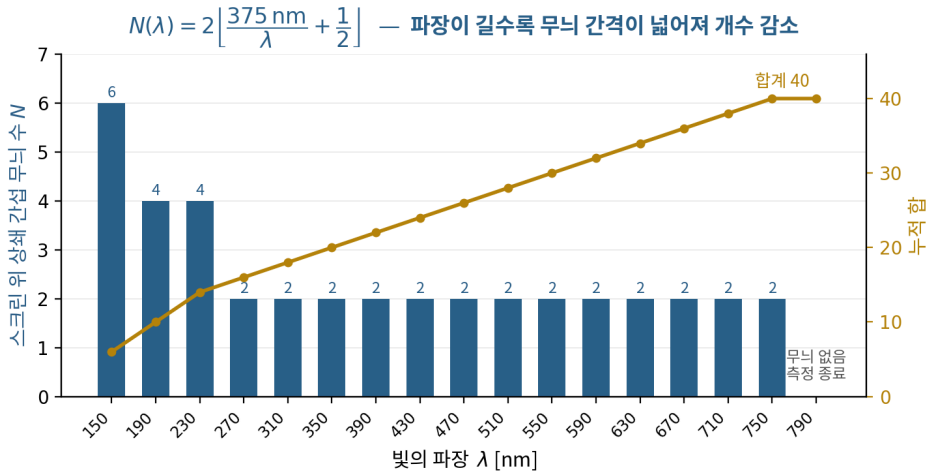
$M = 1$ 구간의 측정 횟수는 270, 310, ..., 750 이 첫째항 270, 공차 40 인 등차수열이므로 $(750 - 270)/40 + 1 = 13$ 회이다. 경계값을 확인하면

• $\lambda = 750 \text{ nm}$: $y_1 = 0.5 \times (750 \times 10^{-9} \times 1)/(1.0 \times 10^{-4}) = 3.75 \times 10^{-3} \text{ m} = 3.75 \text{ mm} = Y$ 로 첫 번째 무늬가 스크린 가장자리에 정확히 걸린다. 처음 측정에서 세 번째 무늬가 가장자리에 나타난 것을 “무늬가 나타났다”고 본 것과 같은 기준이므로 $N = 2$ 로 센다.

• $\lambda = 790 \text{ nm}$: $y_1 = 0.5 \times (790 \times 10^{-9} \times 1)/(1.0 \times 10^{-4}) = 3.95 \times 10^{-3} \text{ m} = 3.95 \text{ mm} > Y$ 로 첫 번째 무늬조차 스크린을 벗어난다. 따라서 이 측정에서 무늬는 0개이고, 여기서 측정을 종료한다.

$$\sum N = \underbrace{6}_{\lambda=150} + \underbrace{4+4}_{\lambda=190,230} + \underbrace{2 \times 13}_{\lambda=270 \sim 750} = 6 + 8 + 26 = 40 \text{ 개}$$

⑤ **물리적 의미.** 무늬 간격 $\Delta y = \lambda L/d$ 는 파장에 비례하므로, 파장을 늘리면 무늬가 바깥으로 밀려나며 스크린 밖으로 하나씩 사라진다. 그래서 $N(\lambda)$ 는 매끄럽게 줄지 않고 $6 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 0$ 처럼 **계단 모양**으로 감소한다. 특히 $\lambda = 250 \text{ nm}$ 와 750 nm 부근에서 차수가 하나씩 떨어지는데, 이는 $Yd/L = 375 \text{ nm}$ 라는 장치의 고유한 척도가 파장과 견주어지는 지점이다.



예시 작도 — 측정 파장별 상쇄 간섭 무늬 개수 N (막대)과 그 누적 합(선). 마지막 $\lambda = 790 \text{ nm}$ 에서 무늬가 0이 되어 측정이 끝나며 누적 합은 40이다

문제 4 광전효과와 드브로이 파장

광전 방정식 · 물질파 · 전기장이 하는 일

(답) 금속의 성분 원소는 세슘(Cs), 일함수 $W = 1.9 \text{ eV}$

① **입사 광자 1개의 에너지.** 파장 λ_0 인 빛의 광자 1개가 갖는 에너지는

$$E_{\text{광자}} = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{(4.1 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{150 \times 10^{-9} \text{ m}} = \frac{1.23 \times 10^{-6}}{1.5 \times 10^{-7}} = 8.2 \text{ eV}$$

이다.

② **광전효과 — A 지점에서의 운동 에너지.** 광전자는 광자 1개의 에너지를 받아 일함수 W 만큼을 금속을 탈출하는 데 쓴다. 최대 운동 에너지를 갖는 광전자가 A 에 입사하므로, 아인슈타인의 광전 방정식에서

$$K_A = E_{\text{광자}} - W = 8.2 - W \text{ (eV)}$$

이다. 아직 W 를 모르므로 이 식은 나중에 쓰고, 드브로이 파장 조건에서 K_A 를 먼저 결정한다.

③ 드브로이 파장에서 운동 에너지의 비를 얻는다. 물질파의 파장은 $\lambda = h/p$ 이고 운동 에너지는 $K = p^2/(2m_e)$ 이므로

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e K}} \Rightarrow K \propto \frac{1}{\lambda^2} \Rightarrow \frac{K_B}{K_A} = \left(\frac{\lambda_A}{\lambda_B}\right)^2$$

이다. $\lambda_B = 3\lambda_A$ 이므로

$$\frac{K_B}{K_A} = \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{1}{9} \Rightarrow K_B = \frac{K_A}{9}$$

이다. $K_B < K_A$ 이므로 광전자는 A 에서 B 로 가는 동안 **느려졌다**. 실제로 전기장 E 는 $+x$ 방향인데 전자의 전하는 $-e$ 이므로 전기력 $\vec{F} = (-e)\vec{E}$ 는 $-x$ 방향, 즉 운동 방향과 반대여서 광전자를 감속시킨다.

④ 전기장이 한 일 — 에너지 보존. 균일한 전기장 속에서 전하 $-e$ 가 거리 d 만큼 이동할 때 전기장이 하는 일은 $-eEd$ 이므로

$$K_B - K_A = -eEd \Rightarrow K_A - K_B = eEd$$

이다. 여기서 $E d = 80 \times 0.07 = 5.6 \text{ V}$ 는 두 평행판 사이의 전위차이고, 전자 1개가 5.6 V 의 전위차를 거스를 때 잃는 에너지는 정의상 5.6 eV 이다.

$$K_A - \frac{K_A}{9} = 5.6 \Rightarrow \frac{8}{9}K_A = 5.6 \Rightarrow K_A = 5.6 \times \frac{9}{8} = 6.3 \text{ eV}$$

$$K_B = \frac{K_A}{9} = 0.7 \text{ eV} (> 0)$$

$K_B > 0$ 이므로 광전자가 실제로 평행판 B 를 통과했다는 제시문의 서술과 모순이 없다.

⑤ 일함수와 원소의 결정. ②의 식에 $K_A = 6.3 \text{ eV}$ 를 넣으면

$$W = E_{\text{광자}} - K_A = 8.2 - 6.3 = 1.9 \text{ eV} \Rightarrow \therefore \text{세슘 (Cs)}$$

[표 1]에서 일함수가 1.9 eV 인 원소는 세슘(Cs) 하나뿐이다.

⑥ 답의 유일성 검토와 물리적 의미. [표 1]의 다른 원소를 넣어 보면 조건을 만족하지 못한다. 원소마다 $K_A = 8.2 - W$ 가 정해지고, B 를 통과하려면 $K_B = K_A - 5.6 > 0$ 이어야 하며, 그때 파장 비는 $\lambda_B/\lambda_A = \sqrt{K_A/K_B}$ 이다.

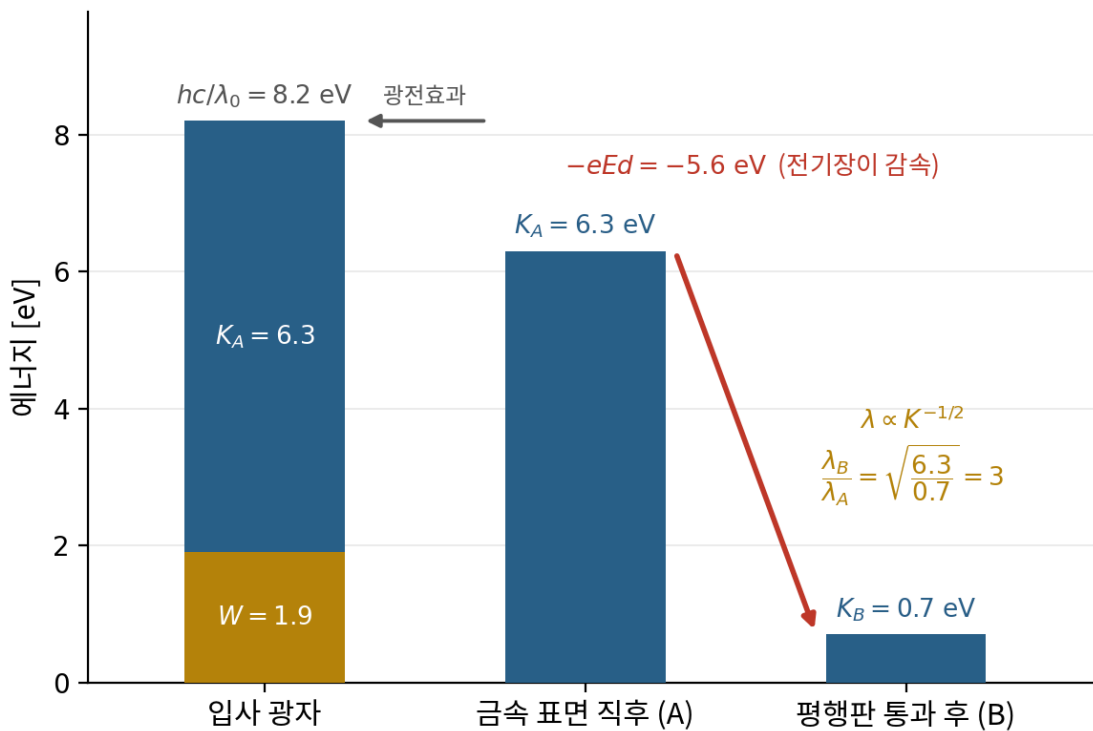
원소	$W \text{ (eV)}$	$K_A = 8.2 - W$	$K_B = K_A - 5.6$	$\lambda_B/\lambda_A = \sqrt{K_A/K_B}$
Cs	1.9	6.3	0.7	3.00 ← 조건 일치
K	2.2	6.0	0.4	3.87
Na	2.3	5.9	0.3	4.43
Li	2.5	5.7	0.1	7.55
Mg, Ca, Ag, Au, Pt	≥ 3.2	≤ 5.0	≤ -0.6	B 에 도달하지 못함

- 일함수가 3.2 eV 이상인 원소는 $K_A \leq 5.0 \text{ eV}$ 로 감속 에너지 5.6 eV 보다 작아 광전자가 평행판 B 에 도달하기 전에 멈춰 되돌아온다. 제시문의 “B 를 통과하였다”는 서술과 어긋나므로 후보에서 제외된다.
- 남은 Li·Na·K·Cs 중에서는 일함수가 작을수록 K_A 가 커지고 K_B 도 커져 λ_B/λ_A 가 작아진다. 이 비가 정확히 3 이 되는 것은 $W = 1.9 \text{ eV}$ 인 세슘뿐이므로 답은 유일하다.
- 이 실험의 원리는 **두 번 재기**에 있다. 파장(물질파)을 재면 운동 에너지를 알 수 있고, 전기장 구간을 지나기 전후의 운동 에너지 차이는 이미 알고 있는 eEd 이다. 이 두 정보를 결합하면 광전자가 처음 갖고 나온 에너지 K_A 가 정해지고, 광전 방정식이 곧바로 일함수 W 를 준다. 즉 **빛의 파장과 전기장만으로 금속의 종류를 알아내는** 셈이다.

⑦ 조건을 다시 읽기 — 놓치기 쉬운 세 가지.

- 왜 “최대 운동 에너지”인가 — 금속 표면 바로 아래에서 튀어나온 전자만이 일함수 W 만큼만 쓰고 나머지를 모두 운동 에너지로 갖는다. 더 깊은 곳에서 나온 전자는 그보다 적은 에너지를 가지므로 드브로이 파장이 더 길고, 감속 구간을 통과하지 못하고 되돌아올 수도 있다. 제시문이 “최대 운동 에너지를 갖는 광전자”를 지정한 것은 $K_A = hc/\lambda_0 - W$ 라는 하나의 값을 쓰기 위함이다.
- 빛의 세기는 답에 영향을 주지 않는다 — 광전효과는 광자 1개와 전자 1개의 일대일 상호작용이므로, K_A 는 빛의 세기가 아니라 진동수(파장)만으로 결정된다. 세기를 키우면 광전자의 개수만 늘어날 뿐 λ_A 는 그대로이고, 따라서 $\lambda_B/\lambda_A = 3$ 이라는 측정 결과도 변하지 않는다.
- Ed 는 사실상 감속 전압이다 — $Ed = 80 \times 0.07 = 5.6 \text{ V}$ 는 A 와 B 사이의 전위차이므로, 이 실험은 전자를 5.6 V 만큼 거슬러 올려보내는 것과 같다. 광전자가 B 에 도달하려면 $eEd < K_A$, 즉 $Ed < 6.3 \text{ V}$ 여야 한다. 여기서 $V_0 = K_A/e = 6.3 \text{ V}$ 가 바로 이 금속의 파장에서의 정지 전압이며, 주어진 5.6 V 는 그보다 작으므로 광전자가 실제로 B 를 통과한다.

에너지 수지 — 일함수 $W = 1.9 \text{ eV}$ 는 표에서 세슘(Cs)



예시 작도 — 광자 $8.2 \text{ eV} = \text{일함수 } 1.9 \text{ eV} + K_A = 6.3 \text{ eV}$, 이어서 전기장이 5.6 eV 를 빼앗아 $K_B = 0.7 \text{ eV}$, 따라서 $\lambda_B/\lambda_A = 3$