

연세대학교 논술시험

자연계열 · 물리

문제 · 예시답안

시험 구분
전형
문항 수
핵심 개념

논술시험 (자연계열, 물리)
수시모집 논술전형
4문항 (각 10점, 총 40점)
등속 원운동과 역학적 에너지 보존, 보어 원자 모형의 쿨롱 힘과 구심력,
균일한 전기장에서 전기장이 한 일과 전위차,
드브로이 물질파와 입자·파동 이중성

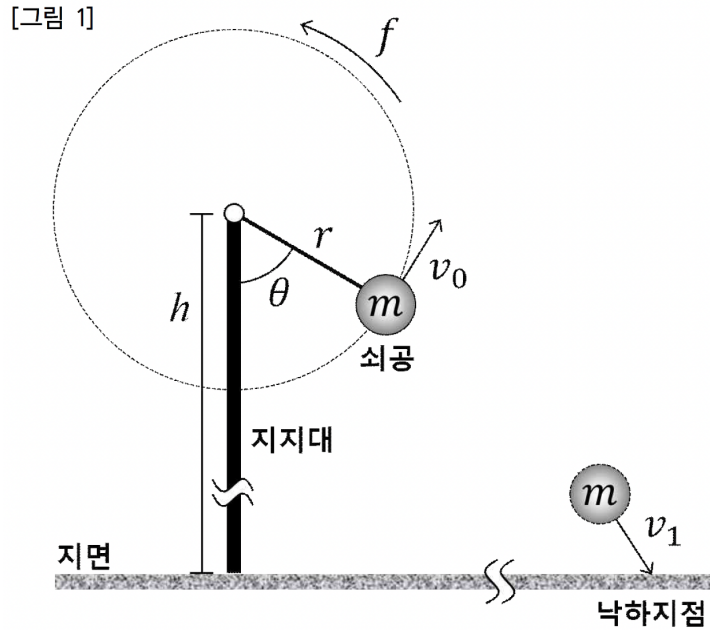
I. 문제

제시문 [가]-[라]

※ 다음 제시문을 읽고 아래 질문에 답하시오.

쇠공과 같은 거시적인 세계의 입자와 전자와 같은 미시적인 세계의 입자에 작용하는 운동 법칙은 겉보기에 달라 보이지만 자연스럽게 서로 대응된다. 이를 알아보기 위해 중력의 영향을 받는 쇠공과 전기력의 영향을 받는 전자의 운동을 비교하고 특정 위치에서 속력을 제어하는 장치를 설계해 보자.

[가] [그림 1]과 같이 질량이 m 인 쇠공이 지면으로부터의 높이가 h 인 지점을 중심으로 반지름이 r 인 원 궤도를 그리며 진동수 f 로 등속 원운동한다. 쇠공을 돌리는 줄과 지지대의 사잇각이 θ 가 되는 순간 갑자기 줄을 끊었다고 가정하자. 쇠공은 줄이 끊어지는 순간의 속력 v_0 를 초기 속력으로 운동하여 지면의 낙하지점에 최종 속력 v_1 으로 도달한다.



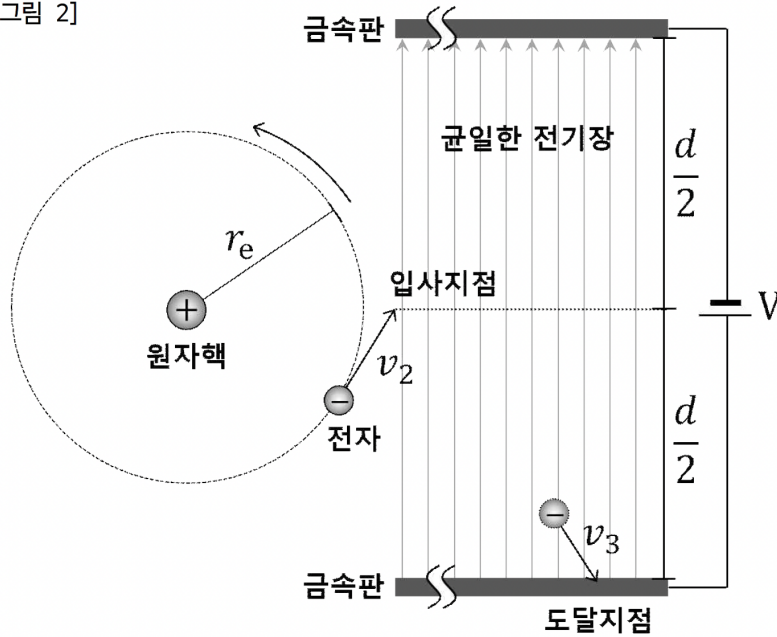
[그림 1] 높이 h 인 점을 중심으로 반지름 r , 진동수 f 로 등속 원운동하는 쇠공. 줄과 지지대의 사잇각이 θ 인 순간 줄이 끊어진다.

[나] 보어의 원자 모형에서는 원자핵과 전자 사이에 작용하는 전기력이 구심력의 역할을 한다. [그림 2]와 같이 질량이 m_e 인 전자가 고정된 원자핵을 중심으로 반지름이 r_e 인 원 궤도를 그리며 일정한 속력 v_2 로 등속 원운동한다. 원자핵과 전자의 전하량은 각각 $+e$ 와 $-e$ 이다.

[다] [그림 2]에서 전자가 등속 원운동을 하던 중 갑자기 원자핵이 사라졌다고 가정하자. 전자는 원자핵이 사라지는 순간의 속력 v_2 로 직선 운동하여 균일한 전기장이 형성되어 있는 두 개의 평행한 금속판의 가운데 지점에서 입사한다. 입사한 전자는 두 개의 금속판 사이 균일한 전기장 영역에서 운동하여 아래쪽 금속판에 속력 v_3 로 도달한다. (전자는 이 과정에서 위쪽 금속판에 도달하지 않는다.)

[라] 드브로이의 물질파 이론에 따르면 미시적인 세계의 입자뿐만 아니라 거시적인 세계의 입자도 파동적 성질을 갖는다. 입자들이 나타내는 파동을 물질파라 하고 물질파의 파장을 드브로이 파장이라 한다. 하지만 거시적인 세계의 입자가 지닌 파동적 성질은 보통 관찰하기 어렵다.

[그림 2]



[그림 2] 반지름 r_e 의 원 궤도를 도는 전자와, 간격 d · 전위차 V 인 두 평행 금속판. 전자는 두 판의 정확히 가운데 지점으로 입사한다.

[주의] 아래 질문에 답할 때 물리 상수와 단위 변환은 아래 표의 값을 사용한다.

중력 가속도 g	10 m/s^2	기본 전하량 e	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
플랑크 상수 h	$6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	전자의 질량 m_e	$9 \times 10^{-31} \text{ kg}$
에너지 단위 변환	$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$	쿨롱 상수 k	$9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$

문제 1 등속 원운동과 역학적 에너지 보존 — 지지대의 높이 설계

10점

제시문 [가]의 상황에서 쇠공의 질량 m 이 3 kg , 등속 원운동의 반지름 r 이 2 m , 진동수 f 가 $1/\pi \text{ s}^{-1}$, 줄을 끊는 순간의 θ 가 60° 일 때, 낙하지점의 속력 v_1 이 줄이 끊어지는 순간의 속력 v_0 의 4배가 되도록 하기 위해서는 지지대의 높이 h 를 얼마로 설계해야 하는지 논하시오. (단, 줄의 질량과 공기저항은 무시한다.)

문제 2 보어 원자 모형 — 쿨롱 힘과 구심력

10점

제시문 [나]의 상황에서 전자가 등속 원운동하는 궤도의 반지름 r_e 가 $1 \times 10^{-10} \text{ m}$ 일 때, 전자의 속력 v_2 와 운동 에너지에 관해 논하시오. (단, 중력과 공기저항은 무시한다.)

문제 3 균일한 전기장 속 전자의 가속 — 전위차의 설계

10점

제시문 [다]의 상황에서 전자가 아래쪽 금속판에 도달하는 순간의 속력 v_3 가 원자핵이 사라지는 순간의 속력 v_2 의 4배가 되도록 하기 위해서는 평행한 금속판 사이의 전위차 V 를 얼마로 설계해야 하는지 논하시오. (단, 중력과 공기저항은 무시한다.)

문제 4 드브로이 물질파와 입자·파동 이중성

10점

제시문 [라]를 읽고 질량이 3 kg 이고 속력이 10 m/s 인 쇠공과 속력이 $(1/3) \times 10^6 \text{ m/s}$ 인 전자의 드브로이 파장을 각각 구하여 비교하고, 미시적인 세계의 입자에 비해 거시적인 세계의 입자가 지닌 파동적 성질을 관찰하기 어려운 이유를 간단히 논하시오.

II. 예시답안

문제 1 등속 원운동과 역학적 에너지 보존 — 지지대의 높이 설계

등속 원운동 · 역학적 에너지 보존

[문제 1] $h = 13 \text{ m}$

[전제] 제시문 [가]의 설정을 그대로 받아들이며, 쇠공의 궤도는 **회전 중심(지지대 꼭대기, 높이 h)을 지나는 연직 평면 위에 놓인 반지름 r 인 원**이고 쇠공이 이 원을 진동수 f 로 등속으로 돈다고 본다. 이 전제에서만 $v_0 = 2\pi r f$ 와 $y_0 = h - r \cos \theta$ 가 동시에 성립한다(등속이 동역학적으로 어떻게 유지되는지는 문제에서 묻지 않는다). 또한 이 문항의 h 는 상수표의 플랑크 상수 h 와 무관한 **지지대(원 궤도 중심)의 높이**이다.

(a) **줄이 끊어지는 순간의 속력 v_0** — 등속 원운동에서는 반지름 r 인 원둘레 $2\pi r$ 를 주기 $T = 1/f$ 마다 한 바퀴 돌므로 속력은

$$v_0 = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r f = 2\pi \cdot 2 \cdot \frac{1}{\pi} = 4 \text{ m/s}$$

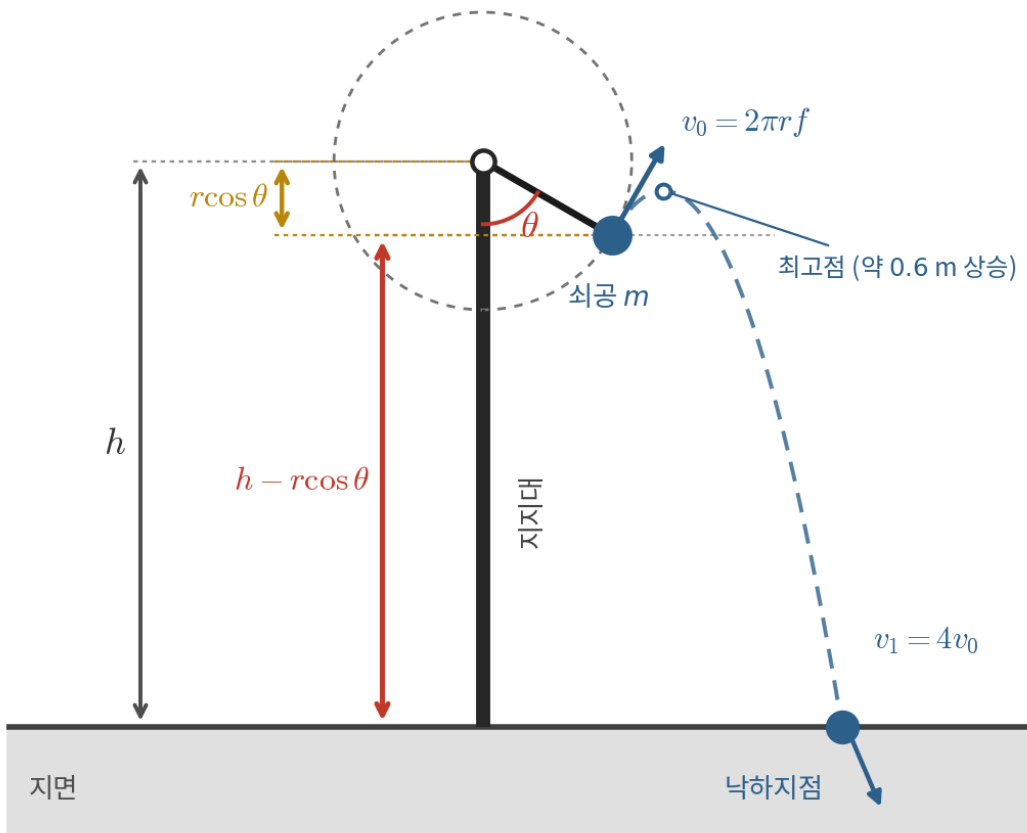
이다. 진동수에 $1/\pi$ 가 들어 있어 π 가 정확히 약분된다.

(b) **줄이 끊어지는 순간 쇠공의 높이** — [그림 1]에서 h 는 **원 궤도의 중심(지지대 꼭대기)의 지면으로부터의 높이**이고, θ 는 줄과 **지지대**가 이루는 각이다. 지지대는 중심에서 연직 아래로 뻗어 있으므로, θ 는 줄이 연직 아래 방향과 이루는 각과 같다. 중심에서 쇠공까지의 변위(크기 r)를 연직·수평 성분으로 분해하면 연직 성분의 크기가 $r \cos \theta$ 이고 이 성분은 중심에서 아래를 향한다. 따라서 쇠공은 중심보다 $r \cos \theta$ 만큼 낮은 곳에 있어

$$y_0 = h - r \cos \theta = h - 2 \cos 60^\circ = h - 2 \cdot \frac{1}{2} = (h - 1) \text{ m}$$

이다. ($\theta = 90^\circ$ 이면 줄이 수평이 되어 쇠공이 중심과 같은 높이 h 에 오는 것과 일치한다.)

줄이 끊어지는 순간 쇠공의 높이는 원 중심의 높이 h 보다 $r \cos \theta$ 만큼 낮다



예시 도해 — 원 궤도의 중심은 높이 h 에 있고, 줄이 연직선과 θ 를 이루므로 쇠공은 중심보다 $r \cos \theta$ 만큼 아래, 즉 높이 $h - r \cos \theta$ 에 있다. 줄이 끊어지면 v_0 는 접선 방향(수평에서 60° 위)이므로 쇠공은 약 0.6 m 더 올라갔다 떨어진다.

- (c) 줄이 끊어진 뒤 — 역학적 에너지 보존 — 줄이 끊어지면 장력이 사라지고 공기저항도 무시하므로 쇠공에 작용하는 힘은 중력뿐이다. 중력은 보존력이므로 낙하하는 동안 역학적 에너지가 보존된다. 지면을 퍼텐셜 에너지의 기준면으로 잡으면

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + mg(h - r \cos \theta) = \frac{1}{2}mv_1^2 + 0$$

이다. 여기서 v_0 의 방향(원의 접선 방향)은 식에 전혀 들어오지 않는다. 에너지는 속도의 방향과 무관한 스칼라량이므로, 줄이 어느 위치에서 끊어지든 **높이만 같으면** 낙하지점의 속력은 같다. 이것이 이 문제를 포물선 운동의 성분 분해 없이 풀 수 있는 이유이다.

- (d) h 의 결정 — 양변을 m 으로 나누고 $v_1 = 4v_0$ 를 대입하면

$$v_1^2 - v_0^2 = 2g(h - r \cos \theta) \rightarrow (16 - 1)v_0^2 = 2g(h - r \cos \theta)$$

$$h = r \cos \theta + \frac{15v_0^2}{2g} = 1 + \frac{15 \cdot 4^2}{2 \cdot 10} = 1 + 12 = 13 \text{ m}$$

이다. 수치를 그대로 대입해 확인해도 같다. 줄이 끊어지는 순간의 운동 에너지는 $\frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 4^2 = 24 \text{ J}$, 낙하지점의 운동 에너지는 $\frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 16^2 = 384 \text{ J}$ 이므로 중력이 해 준 일은 $384 - 24 = 360 \text{ J}$ 이고,

$$mg(h - r \cos \theta) = 3 \cdot 10 \cdot (h - 1) = 30(h - 1) = 360 \rightarrow h - 1 = 12.$$

$$h = r \cos \theta + \frac{v_1^2 - v_0^2}{2g} = 1 + 12 = 13 \text{ m}$$

줄이 끊어지는 순간 쇠공의 높이는 $h - r \cos \theta = 12 \text{ m}$ 이고, 이 높이만큼 낙하하면서 속력이 4 m/s 에서 16 m/s 로 4배가 된다.

- (e) 의미 — 속력이 4배가 되려면 운동 에너지가 $4^2 = 16$ 배가 되어야 한다. 즉 중력이 해 주어야 할 일은 처음 운동 에너지의 15배($24 \rightarrow 360 \text{ J}$)이고, 필요한 낙하 높이는 $15v_0^2/(2g)$ 로 초기 속력의 제곱에 비례한다. 만약 속력을 n 배로 만들고 싶다면 $h = r \cos \theta + (n^2 - 1)v_0^2/(2g)$ 이므로, **낙하 높이 $h - r \cos \theta$ 가 $n^2 - 1$ 에 비례해 커진다.**

문제 2 보어 원자 모형 — 쿨롱 힘과 구심력

쿨롱 법칙 · 등속 원운동 · 운동 에너지

[문제 2] $v_2 = 1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$, 운동 에너지 $E_k = 1.152 \times 10^{-18} \text{ J} = 7.2 \text{ eV}$

- (a) 운동 방정식 — 쿨롱 힘이 구심력이다 — 전하량 $+e$ 인 원자핵과 $-e$ 인 전자 사이에는 크기

$$F = k \frac{|+e| |-e|}{r_e^2} = \frac{ke^2}{r_e^2}$$

인 인력이 작용하고, 이 힘의 방향은 항상 원자핵(원의 중심)을 향한다. 속력이 일정한 원운동을 하려면 중심 방향의 알짜힘이 구심력 $m_e v_2^2 / r_e$ 와 같아야 하므로

$$\frac{ke^2}{r_e^2} = \frac{m_e v_2^2}{r_e}$$

이다. 양변에 r_e 를 곱하면 $m_e v_2^2 = ke^2 / r_e$ 라는 유용한 관계식을 얻는다.

- (b) 속력 v_2 — 위 식을 v_2 에 대해 풀면

$$v_2 = \sqrt{\frac{ke^2}{m_e r_e}} = \sqrt{\frac{(9 \times 10^9)(1.6 \times 10^{-19})^2}{(9 \times 10^{-31})(1 \times 10^{-10})}}$$

이다. 분자는 $9 \times 10^9 \cdot 2.56 \times 10^{-38} = 2.304 \times 10^{-28}$, 분모는 $9 \times 10^{-31} \cdot 1 \times 10^{-10} = 9 \times 10^{-41}$ 이므로

$$v_2 = \sqrt{\frac{2.304 \times 10^{-28}}{9 \times 10^{-41}}} = \sqrt{2.56 \times 10^{12}} = 1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$$

이다.

- (c) 운동 에너지 — J 단위 — (a)에서 얻은 $m_e v_2^2 = ke^2 / r_e$ 를 쓰면 속력을 다시 대입하지 않고도 곧바로

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v_2^2 = \frac{ke^2}{2r_e} = \frac{(9 \times 10^9)(1.6 \times 10^{-19})^2}{2 \times 10^{-10}} = \frac{2.304 \times 10^{-28}}{2 \times 10^{-10}}$$

$$E_k = 1.152 \times 10^{-18} \text{ J}$$

를 얻는다. 속력을 직접 대입해도 $\frac{1}{2}(9 \times 10^{-31})(2.56 \times 10^{12}) = 1.152 \times 10^{-18} \text{ J}$ 로 같다.

- (d) 운동 에너지 — eV 단위로 환산 — 1 eV 는 전하량 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 인 입자가 1 V 의 전위차를 지날 때 얻는 에너지, 즉 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 이다. 따라서 J로 나타낸 값을 1.6×10^{-19} 로 나누면 eV 값이 된다.

$$E_k = \frac{1.152 \times 10^{-18} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 7.2 \text{ eV}$$

$$v_2 = 1.6 \times 10^6 \text{ m/s}, \quad E_k = \frac{ke^2}{2r_e} = 1.152 \times 10^{-18} \text{ J} = 7.2 \text{ eV}$$

- (e) **의미** — 전자의 속력은 빛의 속력의 약 0.5% 로, 고전역학으로 다루어도 무방한 크기이다. 한편 이 궤도에서 전기적 퍼텐셜 에너지는 $U = -ke^2/r_e = -2.304 \times 10^{-18} \text{ J} = -14.4 \text{ eV}$ 이므로 총 역학적 에너지는 $E_k + U = 7.2 - 14.4 = -7.2 \text{ eV}$ 로 음수이다. 총 에너지가 음수라는 것은 전자가 원자핵에 **속박되어** 있다는 뜻이고, 이 전자를 떼어 내려면 최소 7.2 eV 를 공급해야 한다. 쿨롱 힘이 구심력인 **원 궤도에서는** $E_k = -U/2$ 인 관계가 성립하며(일반적인 타원 궤도에서는 한 주기 동안의 시간 평균에 대해서만 성립한다), 이 관계도 위의 구심력 조건에서 곧바로 따라 나온다.

문제 3 균일한 전기장 속 전자의 가속 — 전위차의 설계

전기장이 한 일 · 전위차 · 에너지 보존

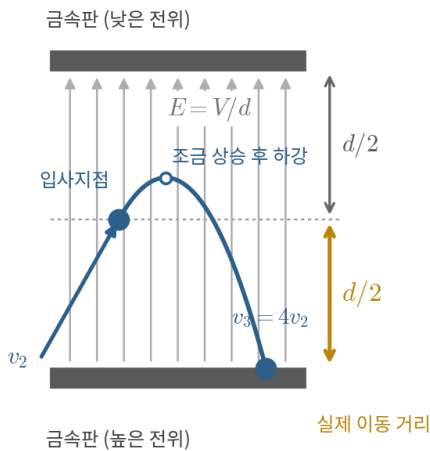
[문제 3] $V = 216 \text{ V}$

- (a) **균일한 전기장과 전자에 작용하는 힘** — 간격 d 인 두 평행 금속판에 전위차 V 를 걸면 판 사이에는 크기가 일정한 전기장

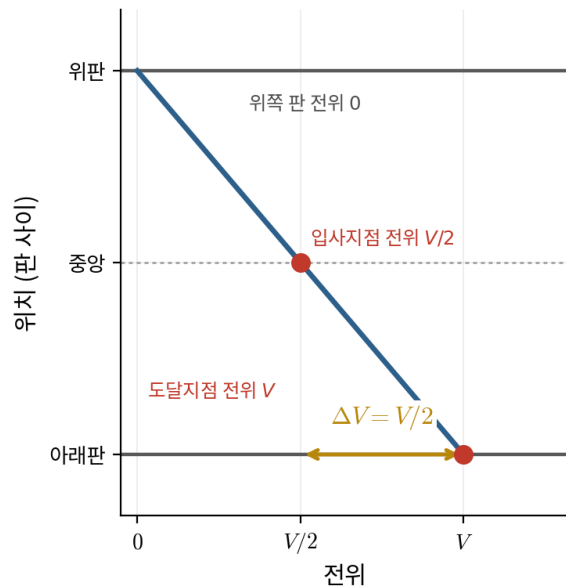
$$E = \frac{V}{d}$$

이 생긴다. 전하량의 크기가 e 인 전자에 작용하는 전기력의 크기는 $F = eE = eV/d$ 로 위치에 관계없이 **일정**하다. [그림 2]에서 전기장은 아래쪽 판에서 위쪽 판을 향하므로, 음전하인 전자는 그 반대인 **아래쪽 판** 방향으로 힘을 받아 가속된다.

전자는 중앙에서 입사 → 아래로 $d/2$ 만 이동



전기장이 한 일 = $e\Delta V = eV/2$



예시 도해 — 전자는 두 판의 중앙에서 입사하므로 힘 방향(아래쪽)의 알짜 변위는 $d/2$ 이다. 전위가 선형으로 변하므로 중앙의 전위는 $V/2$ 이고, 전기장이 한 일은 $e\Delta V = eV/2$ 이다. (왼쪽 궤적은 개형이며 축척은 실제와 다르다.)

- (b) **핵심 — 전기장이 한 일이 eV 가 아니라 $eV/2$ 인 이유**

제시문 [다]에 따르면 전자는 두 금속판의 **정확히 가운데 지점**으로 입사한다. 판 사이의 간격이 d 이므로 입사지점에서 아래쪽 판까지의 거리는 d 가 아니라 $d/2$ 이다. 균일한 전기장에서는 전기력의 크기와 방향이 일정하므로 전기력이 한 일은 **경로에 무관하고 힘 방향의 알짜 변위**만으로 결정된다. 힘의 방향(아래쪽)으로의 알짜 변위는 입사 방향과 관계없이 $d/2$ 이므로

$$W = F \times \frac{d}{2} = \frac{eV}{d} \times \frac{d}{2} = \frac{eV}{2}$$

이다. 실제로 [그림 2]에서 전자는 수평에서 비스듬히 **위쪽**으로 입사하여 잠시 상승했다가 내려온다. 상승 구간에서는 힘의 방향과 이동 방향이 반대여서 전기력이 한 일이 **음**이지만, 되돌아 내려오면서 같은 크기의 양의 일이 더해져 정확히 상쇄되므로 결과는 입사 방향과 무관하게 $eV/2$ 이다.

부호 — 같은 결과를 전위로도 쓸 수 있다. 전하 q 가 전위차를 지날 때 전기력이 한 일은 $W = -q\Delta V$ 이고, 전자는 $q = -e$ 이다. 균일한 전기장에서는 전위가 위치에 따라 **선형**으로 변하므로, 위쪽 판의 전위를 0, 아래쪽 판의 전위를 V 라 하면 정확히 가운데 지점의 전위는 그 평균인 $V/2$ 이다. 전자가 가운데($V/2$)에서 아래쪽 판(V)까지 갈 때의 전위 변화는 $\Delta V = V/2$ 이므로

$$W = -q\Delta V = (+e)\left(\frac{V}{2}\right) = \frac{eV}{2} > 0$$

이다. 즉 전자는 음전하라서 **전위가 높은 쪽으로 갈 때** 에너지를 얻는다. 만약 전자가 위쪽 판에서 출발했다면 전위차 V 전체를 지나 eV 를 얻었을 것이다. **중앙 입사이므로 그 절반만 얻는다**는 점이 이 문항의 핵심이다.

또한 위 계산에서 $E = V/d$ 의 d 와 이동 거리 $d/2$ 의 d 가 서로 **상쇄**된다. 결과 $eV/2$ 에는 d 가 전혀 남지 않으므로, 제시문이 판 사이 간격 d 의 구체적인 값을 주지 않아도 답이 결정된다.

(c) **에너지 보존과 V 의 결정** — 전기력이 한 일만큼 운동 에너지가 증가하므로

$$\frac{1}{2}m_e v_2^2 + \frac{eV}{2} = \frac{1}{2}m_e v_3^2, \quad v_3 = 4v_2$$

이다. $v_3 = 4v_2$ 를 넣으면 $\frac{1}{2}m_e(16v_2^2) - \frac{1}{2}m_e v_2^2 = \frac{15}{2}m_e v_2^2$ 이므로

$$\frac{eV}{2} = \frac{15}{2}m_e v_2^2 \Rightarrow V = \frac{15m_e v_2^2}{e}$$

이다. 속력의 비로 정리하면 $v_3/v_2 = \sqrt{1 + eV/(m_e v_2^2)} = 4$ 로부터 같은 식을 얻는다.

(d) **수치 대입** — 문제 2에서 $v_2 = 1.6 \times 10^6$ m/s 이므로 $v_2^2 = 2.56 \times 10^{12}$ m²/s² 이고

$$V = \frac{15 \cdot (9 \times 10^{-31}) \cdot (2.56 \times 10^{12})}{1.6 \times 10^{-19}} = \frac{3.456 \times 10^{-17}}{1.6 \times 10^{-19}} = 216 \text{ V}$$

이다. eV 단위로 풀면 계산이 훨씬 간단하다. 문제 2에서 $\frac{1}{2}m_e v_2^2 = 7.2$ eV 이므로 도달지점의 운동 에너지는

$$\frac{1}{2}m_e v_3^2 = 16 \times 7.2 = 115.2 \text{ eV} \quad (= 1.8432 \times 10^{-17} \text{ J})$$

이고, 전기장이 준 에너지는 $115.2 - 7.2 = 108$ eV 이다. 이것이 $eV/2$ 에 해당하므로 전위차는 그 두 배인

$$V = 2 \times 108 \text{ V} = 216 \text{ V}$$

전위차는 216 V 이지만 전자가 실제로 얻는 에너지는 그 절반인 108 eV 이다. 전자가 판 사이 간격의 절반만 지나기 때문이다.

(e) **의미** — 문제 1과 구조가 똑같다. 문제 1에서 중력이 한 일 $mg(h - r \cos \theta)$ 가 운동 에너지를 15배로 키웠듯이, 여기서 전기력이 한 일 $eV/2$ 가 같은 역할을 한다. 즉 **균일한 중력장 ↔ 균일한 전기장, 중력장 세기 $g \times$ 높이차 ↔ 전위차 V , 질량 ↔ 전하량**의 대응 관계로 거시 세계와 미시 세계의 운동이 같은 형태의 에너지 보존식으로 기술된다.

문제 4 드브로이 물질파와 입자·파동 이중성

물질파 · 회절 조건 · 이중성

[문제 4] $\lambda_{\text{최공}} = 2.2 \times 10^{-35}$ m, $\lambda_{\text{전자}} = 2.2 \times 10^{-9}$ m ($\lambda_{\text{전자}}/\lambda_{\text{최공}} = 10^{26}$)

(a) **드브로이 관계식** — 운동량의 크기가 $p = mv$ 인 입자에 대응하는 물질파의 파장은

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

이다. 파장은 운동량에 **반비례**하므로, 질량이 크거나 속력이 빠른 입자일수록 파장이 짧다.

(b) **최공의 드브로이 파장** — $m = 3$ kg, $v = 10$ m/s 이므로 $p = 3 \times 10 = 30$ kg·m/s 이고

$$\lambda_{\text{최공}} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{3 \times 10} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{3 \times 10^1} = 2.2 \times 10^{-35} \text{ m}$$

이다.

(c) **전자의 드브로이 파장** — $m_e = 9 \times 10^{-31}$ kg, $v = \frac{1}{3} \times 10^6$ m/s 이므로 운동량은 $p = 9 \times 10^{-31} \times \frac{1}{3} \times 10^6 = 3 \times 10^{-25}$ kg·m/s 이고

$$\lambda_{\text{전자}} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{3 \times 10^{-25}} = 2.2 \times 10^{-9} \text{ m} = 2.2 \text{ nm}$$

이다.

(d) **두 파장의 비교** — 두 값의 비를 취하면

$$\frac{\lambda_{\text{전자}}}{\lambda_{\text{최공}}} = \frac{2.2 \times 10^{-9}}{2.2 \times 10^{-35}} = 10^{26}$$

전자의 드브로이 파장이 최공의 드브로이 파장보다 약 10^{26} 배, 즉 1조 배의 1조 배의 100배만큼 길다.

두 물체 중 오히려 최공이 훨씬 느린데도 이런 차이가 나는 것은 질량이 3 kg 대 9×10^{-31} kg 으로 10^{30} 배 넘게 차이가 나기 때문이다.

- (e) **거시 입자의 파동성을 관찰하기 어려운 이유** — 파동성은 **회절과 간섭**으로 드러나는데, 파동이 틈이나 장애물을 지나며 뚜렷하게 퍼지려면 그 틈·장애물의 크기 D 가 파장 λ 와 비슷한 정도여야 한다. 회절로 퍼지는 각 θ_d 는 대략 $\sin \theta_d \sim \lambda/D$ 이므로 $\lambda \ll D$ 이면 퍼짐이 사실상 0이 되어 파동은 직진하는 입자처럼만 보인다.

• **전자** — $\lambda_{\text{전자}} = 2.2 \text{ nm}$ 는 원자의 크기($\sim 10^{-10} \text{ m}$)나 결정 격자의 간격($\sim 10^{-10} \sim 10^{-9} \text{ m}$)과 한두 자릿수 이내로 가까워(원자 크기의 약 22 배) 회절 무늬를 만들 수 있다. 실제로 결정에 전자선을 쏘면 뚜렷한 회절 무늬가 생기고(전자 회절), 이중 슬릿 실험에서도 간섭무늬가 관측된다. 즉 **비교 가능한 크기의 장애물이 실제로 존재한다**.

• **최공** — $\lambda_{\text{최공}} = 2.2 \times 10^{-35} \text{ m}$ 는 원자핵의 크기($\sim 10^{-15} \text{ m}$)보다도 약 5×10^{19} 배나 작다. 이 파장과 비슷한 크기의 틈은 자연에 존재하지 않으므로 회절·간섭을 일으킬 방법이 없고, λ/D 가 0 에 한없이 가까워 최공은 언제나 직선 궤도를 따르는 입자로만 보인다.

정리하면, 거시적인 입자도 물질파를 갖지만 플랑크 상수 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 가 극단적으로 작은 데 비해 거시 물체의 운동량은 매우 크므로 $\lambda = h/p$ 가 측정 가능한 어떤 길이보다도 작아진다. 파동성이 **사라진 것이 아니라 너무 작아서 관측할 수단이 없는 것**이며, 이 때문에 거시 세계에서는 고전역학이 잘 들어맞는다.