

한국과학기술원 구술고사

자연계열 · 물리

문제 · 예시답안

시험 구분
전형
출제 과목
문항 수
핵심 개념

면접 및 구술고사 (자연계열, 물리)
일반전형 / 학교장추천전형·고른기회전형
물리 I, 물리 II
전형별 2문항, 총 4문항
베르누이 법칙과 이상 기체의 등적 과정, 열역학 제1법칙,
전기력·로렌츠 힘, 등가속도 포물선 운동과 등속 원운동,
만유인력과 등속 원운동, 전자기 유도와 자기력

I. 문제

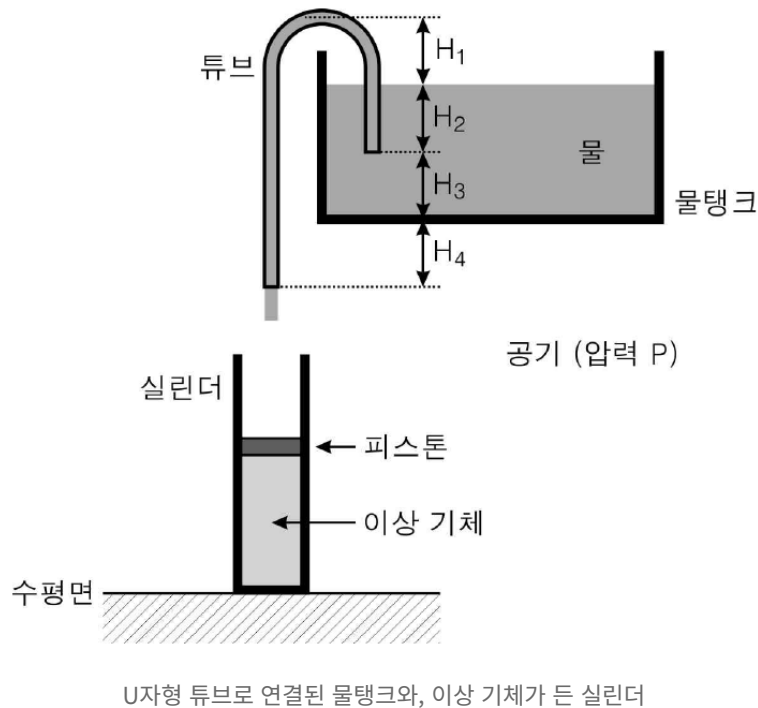
일반전형

문제 1 베르누이 법칙과 이상 기체의 등적 과정

물리 I · II · 7분 · 4점

실린더와 물탱크가 압력이 P 인 공기 중에 있다. 실린더는 수평면 위에 연직 방향으로 세워져 고정되어 있고, 그 안에 압력 $3P/2$, 부피 V 의 단위자 분자 이상 기체가 평형 상태로 들어 있다. 이제 U자형 튜브를 적절히 사용하여 물탱크 안의 물을 튜브를 통과시켜 피스톤 위로 옮기고자 한다. $H_1 = H_2 = H_3 = H_4 = h$ 가 되도록 튜브를 고정시키고 피스톤 위에 1시간에 걸쳐 물이 일정한 속도로 쌓이게 했더니 평형 상태에서 이상 기체의 압력이 $2P$ 로 증가하였다. (실린더를 통해 이상 기체와 물이 빠져나가거나 들어오지는 못한다.)

피스톤 위의 물을 모두 없애고 $H_1 = h, H_2 = 2h, H_3 = 3h, H_4 = 4h$ 가 되도록 튜브와 물탱크를 다시 설치한 후 같은 작업을 반복하자. 피스톤 위에 물이 일정한 속도로 쌓이는 1시간 동안 이상 기체의 부피가 V 로 일정하게 유지되고 있었다면, 이 과정에서 이상 기체에 공급된 열은 얼마인가? (물탱크의 면적이 매우 넓어 물탱크 수면의 높이 변화는 무시할 수 있다고 하자. 피스톤과 실린더 사이의 마찰과 물의 압축성 및 점성도 무시하자. 피스톤 위에 쌓일 수 있는 물의 양이 충분히 크기 때문에, 물이 피스톤 위에 쌓이다가 실린더 밖으로 넘치는 상황은 일어나지 않는다고 하자.) [4점]



문제 2 전기장·자기장 골프장에서 하전 입자의 궤적

물리 II · 8분 · 6점

무중력 우주 공간에 그림과 같이 두 개의 골프장을 건설하였다. 그림 (가)의 골프장에는 바닥 면에 수직인 위 방향으로 균일한 전기장이 걸려있고, 그림 (나)의 골프장에는 바닥 면에 평행하면서 종이면 밖으로 나오는 방향으로 균일한 자기장이 걸려있다.

두 골프장에서 각각 전하를 띤 서로 다른 골프공을 동일한 초기 속도로 바닥 면에 대해 30° 오른쪽 위로 쳤더니, 두 골프공은 바닥 면으로부터 같은 최대 높이까지 올라간 후 출발 지점으로부터 오른쪽에 떨어졌다. 이때 그림 (가)의 골프공은 60초의 체공 시간 동안 오른쪽으로 $2\sqrt{3}$ km의 수평 도달거리를 움직였다. (골프공의 크기와 전자기파 발생은 무시하자.)

[총 6점]

- (1) 두 골프공이 각각 어떤 부호의 전하를 띠고 어떤 형태의 궤적을 따라 운동하는지 정성적으로 설명하라. [2점]
- (2) 그림 (나)의 골프장에서 자기장의 방향만 반대로 바꾸고 나머지 조건은 같게 유지한 채 실험을 반복하면 골프공은 얼마의 체공 시간 후 어느 위치에 떨어지는지 답하라. [4점]

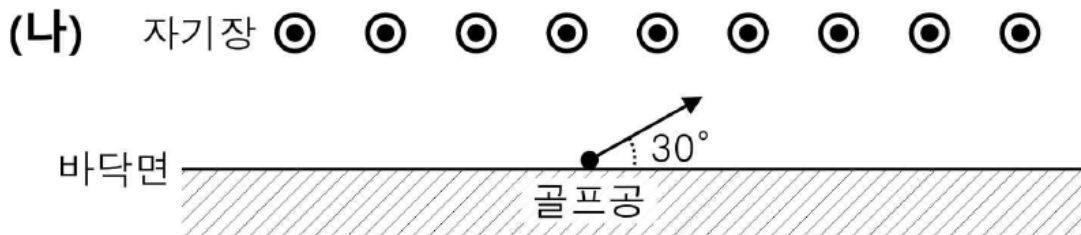
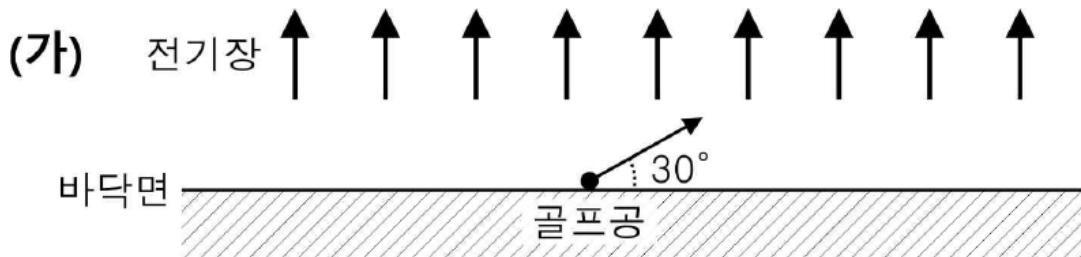
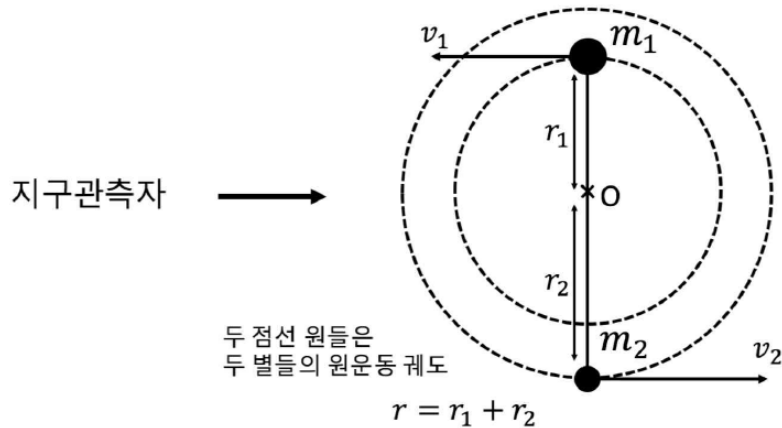


그림 (가) 균일한 전기장 골프장 · 그림 (나) 균일한 자기장 골프장

학교장추천전형 · 고른기회전형

문제 1 쌍성의 만유인력과 등속 원운동

물리 I · II · 7분 · 4점



원점 O를 중심으로 같은 주기로 등속 원운동하는 두 별

위 그림과 같이 질량이 m_1, m_2 인 두 별들이 원점 O를 중심으로 점선의 궤적을 따라 같은 주기로 등속 원운동을 하고 있다. 지구의 관측자는 원점과 두 별들 사이의 거리인 r_1, r_2 와 별들의 원운동 주기 T 를 측정할 수 있다.

$r_1 = 1, r_2 = 2, T = \pi$ 로 측정되었다고 할 때, 두 별들의 질량 m_1, m_2 를 유도하시오. (단, 만유인력 상수는 G 로 표현한다.) [4점]

문제 2 두 자기장 영역을 통과하는 직사각형 도선

물리 II · 8분 · 6점

한 수평 경계면을 기준으로, 위쪽 영역에는 균일한 자기장 $B_1 = 1 \text{ T}$ 가 종이면 안으로 들어가는 방향으로, 아래쪽 영역에는 균일한 자기장 $B_2 = 1 \text{ T}$ 가 종이면 밖으로 나오는 방향으로 걸려있다. 위쪽 영역에 질량 200 g , 저항 3Ω , 세로 $b = 40 \text{ cm}$, 가로 $a = 50 \text{ cm}$ 인 대전되어 있지 않은 균일한 직사각형 도선이 있다. 도선의 가로변은 그림 (가)처럼 경계면과 평행 하면서 자기장에 수직이고 세로변은 그림 (나)처럼 연직 방향과 각도 $\theta = 30^\circ$ 를 이루며 기울어져 있다. (그림 (나)는 그림 (가)를 오른쪽 옆에서 본 측면도임)

도선의 아래쪽 가로변과 경계면의 거리가 $h = 1 \text{ m}$ 가 되는 위치에서 도선을 연직 위로 초기 속도 v_0 로 회전이 일어나지 않도록 던졌고, 얼마 후 그림 (다)처럼 도선이 경계면에 걸쳐있는 동안에는 등속도 운동을 하는 것이 관찰되었다. (중력 가속도는 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 이고, 공기저항과 도선의 굵기는 무시할 수 있다고 하자.) [총 6점]

- (1) 도선이 경계면에 걸쳐있는 동안에 등속도 운동을 하게 되는 원리를 정성적으로 설명하고, 도선의 초기 속도 v_0 를 구하시오. [4점]
- (2) 도선을 연직 위로 던진 직후부터 도선의 모든 부분이 경계면 아래쪽 영역으로 완전히 넘어가기까지 도선에서 발생한 총 열에너지는 얼마인가? [2점]

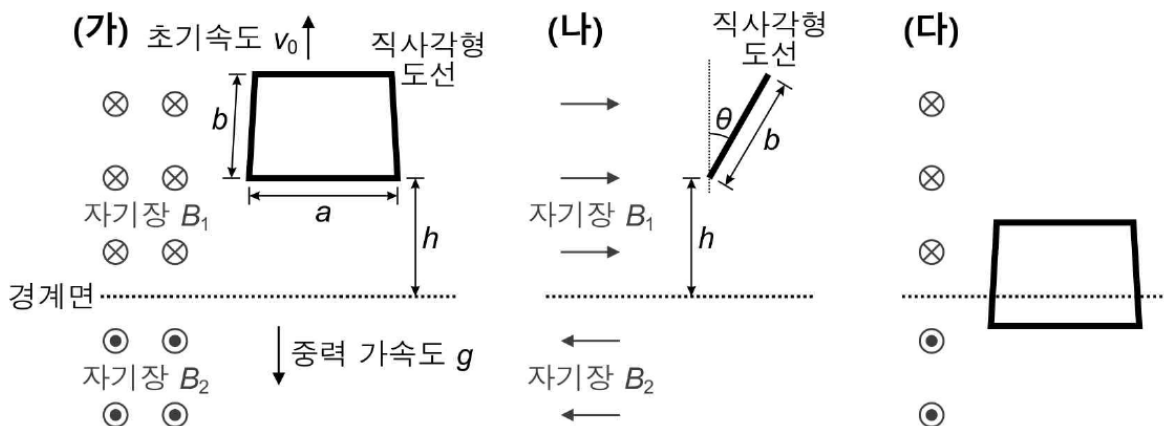


그림 (가) 정면도 · 그림 (나) 측면도 · 그림 (다) 경계면에 걸쳐 있는 도선

II. 예시답안

일반전형

문제 1 베르누이 법칙과 이상 기체의 등적 과정

베르누이 법칙 · 등적 과정 · 열역학 제1법칙

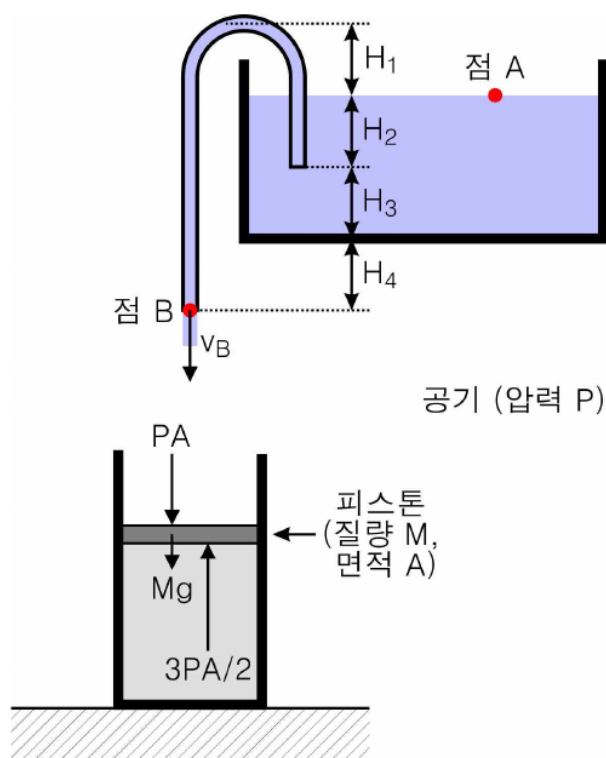
튜브에서 나오는 물의 속력 — 물탱크 수면 위의 점 A와 튜브 출구인 점 B에 베르누이 법칙을 적용하면 (ρ : 물의 밀도, g : 중력 가속도)

$$P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 + \rho gh_A = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 + \rho gh_B$$

이다. 두 점 모두 압력이 P 인 공기와 접해 있으므로 $P_A = P_B = P$ 이고, 물탱크 면적이 매우 넓어 $v_A = 0$, 그리고 $h_A - h_B = H_2 + H_3 + H_4$ 이므로

$$v_B = \sqrt{2g(H_2 + H_3 + H_4)}$$

(두 점의 압력이 같으므로 역학적 에너지 보존 $mg(H_2 + H_3 + H_4) = \frac{1}{2}mv_B^2$ 을 바로 적용해도 같은 결과를 얻는다.)



점 A·점 B의 위치와, 피스톤에 작용하는 힘의 평형

피스톤의 힘의 평형 — 피스톤의 질량을 M , 단면적을 A 라 하면 처음 평형 상태에서

$$\frac{3P}{2}A = PA + Mg$$

이다. 피스톤 위에 질량 M_w 의 물이 쌓이면 기체의 압력은 $\Delta P = M_w g / A$ 만큼 증가한다.

경우 ① — $H_1 = H_2 = H_3 = H_4 = h$ 이므로 $H_2 + H_3 + H_4 = 3h$ 이고 $v_{B1} = \sqrt{6gh}$ 이다. 1시간 동안 총 질량 M_1 의 물이 쌓여 압력이 $3P/2$ 에서 $2P$ 로 증가하였으므로

$$\Delta P_1 = \frac{M_1 g}{A} = \frac{P}{2}$$

경우 ② — $H_1 = h, H_2 = 2h, H_3 = 3h, H_4 = 4h$ 이므로 $H_2 + H_3 + H_4 = 9h$ 이고

$$v_{B2} = \sqrt{18gh} = \sqrt{3} v_{B1}$$

이다. 튜브의 단면적이 같으므로 같은 시간 동안 흘러나오는 물의 질량은 유출 속력에 비례한다. 따라서 $M_2 = \sqrt{3}M_1$ 이고

$$\Delta P_2 = \frac{M_2 g}{A} = \sqrt{3} \Delta P_1 = \frac{\sqrt{3}P}{2}$$

공급된 열 — 경우 ②에서 기체의 부피가 V 로 일정하게 유지되었으므로 이상 기체가 한 일은 $W = 0$ 이다. 단위자 분자 이상 기체의 내부 에너지 변화량은 (n : 몰 수, R : 기체 상수)

$$\Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T = \frac{3}{2} \Delta(PV) = \frac{3}{2} V \Delta P_2 = \frac{3}{2} V \cdot \frac{\sqrt{3}P}{2}$$

이고, 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에 의하여

$$Q = \Delta U = \frac{3\sqrt{3}}{4} PV \approx 1.30 PV$$

문제 2 전기장·자기장 골프장에서 하전 입자의 궤적

전기력 · 로렌츠 힘 · 포물선 운동과 원운동

(1) 전하의 부호와 궤적

그림 (가)의 골프공은 바닥 면으로 되돌아오려면 아래 방향의 전기력을 받아야 한다. 전기장이 위 방향이므로 골프공은 **음전하**를 띠어야 하고, 크기와 방향이 일정한 힘을 받으므로 **아래 방향의 가속도를 갖는 등가속도 포물선 운동**을 한다.

그림 (나)의 골프공은 운동 방향에 수직이면서 아래쪽(원의 중심 쪽)을 향하는 자기력(로렌츠 힘)을 받아야 한다. 자기장이 종이면 밖으로 나오는 방향이므로 골프공은 **양전하**를 띠어야 하고, 크기가 일정하고 항상 운동 방향에 수직인 힘을 받으므로 **원호를 따라 등속 원운동**을 한다. 이때 골프공이 그리는 원호의 중심각은 60° 이다.

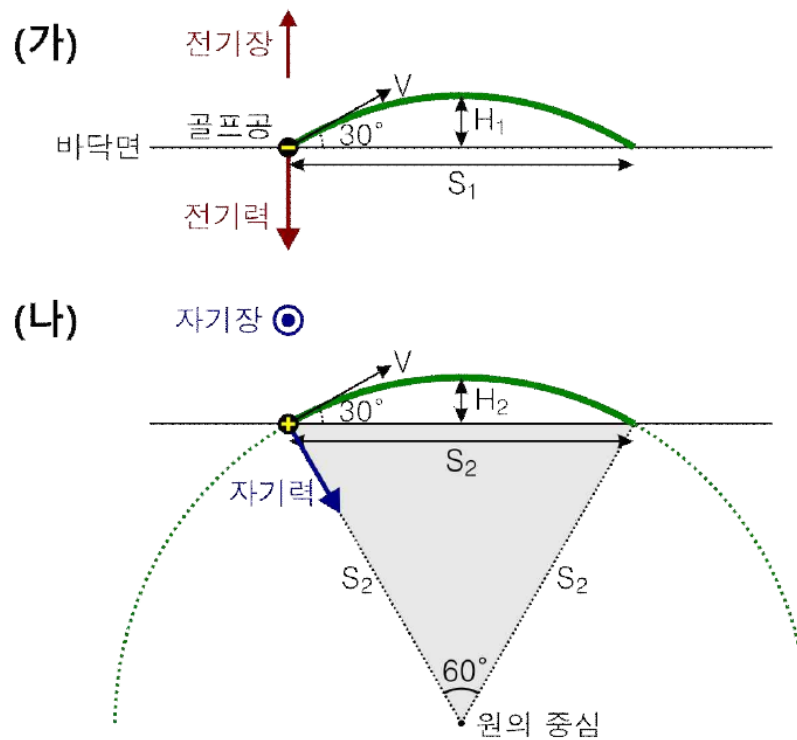


그림 (가) 등가속도 포물선 궤적 · 그림 (나) 중심각 60° 의 원호 궤적

(2) 자기장을 뒤집었을 때의 체공 시간과 낙하 위치

그림 (가)의 골프공의 체공 시간과 가속도를 각각 T_1, a 라 하면, 초기 속력 V 에 대하여

$$H_1 = \frac{(V \sin 30^\circ)^2}{2a}, \quad T_1 = \frac{2V \sin 30^\circ}{a} = \frac{4H_1}{V \sin 30^\circ}, \quad S_1 = (V \cos 30^\circ)T_1 = \frac{4H_1}{\tan 30^\circ}$$

그림 (나)의 골프공의 수평 도달거리 S_2 는 원운동의 반지름과 같다 (회색 삼각형이 정삼각형이므로). 따라서 최고점의 높이는

$$H_2 = (1 - \cos 30^\circ)S_2$$

두 골프공이 서로 같은 최대 높이까지 올라갔으므로 $H_1 = H_2$ 이고,

$$S_2 = \frac{\tan 30^\circ}{4(1 - \cos 30^\circ)}S_1 = \frac{2 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}}S_1$$

$S_1 = 2\sqrt{3}$ km이므로 $S_2 = (2 + \sqrt{3})$ km ≈ 3.73 km이다.

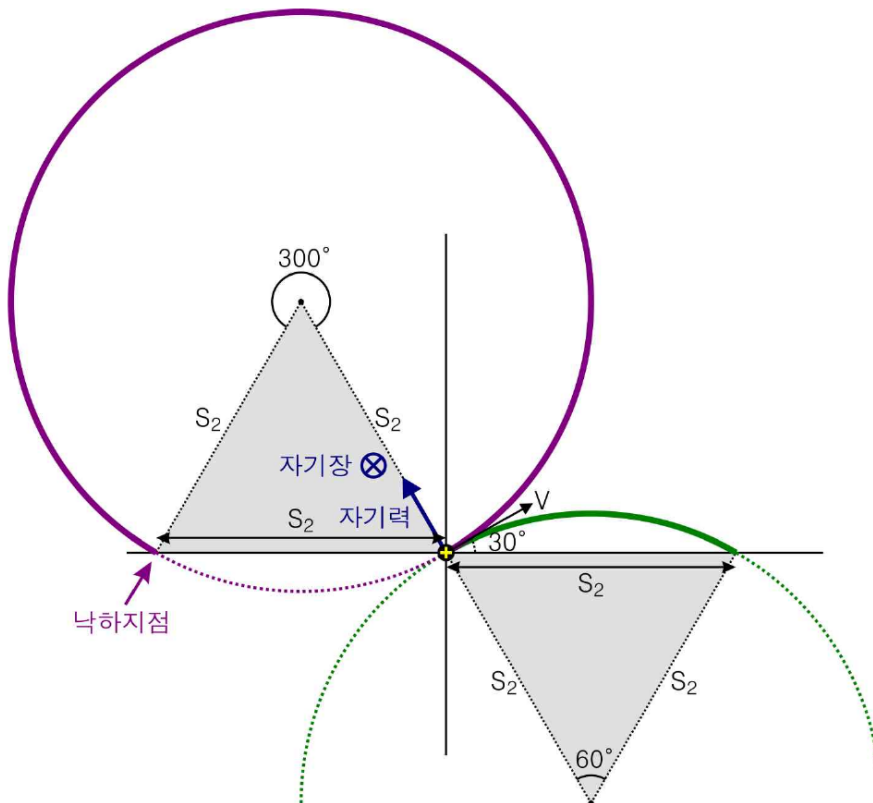
또한 원호 궤적의 길이가 $(\pi/3)S_2$ 이므로, 그림 (나)의 체공 시간은

$$T_2 = \frac{\pi S_2}{3V} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{2 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \cdot (T_1 \cos 30^\circ) = \frac{(2 + \sqrt{3})\pi}{12}T_1 = 5(2 + \sqrt{3})\pi \text{ (초)}$$

$T_1 = 60$ 초이므로 $T_2 \approx 58.6$ 초이다.

자기장의 방향을 반대로 바꾸면 골프공이 받는 자기력의 방향이 반대가 되어 원의 중심이 반대쪽에 놓인다. 자기장의 세기와 초기 속력이 같으므로 반지름은 S_2 로 그대로이고, 골프공은 중심각이 300° 인 원호 궤적을 따라 등속 원운동을 한다.

체공 시간은 $5T_2 = 25(2 + \sqrt{3})\pi \approx 293$ 초로 5배 늘어나고,
출발 지점으로부터 **왼쪽으로** $S_2 = (2 + \sqrt{3})$ km 떨어진 지점에 낙하한다.



자기장을 뒤집었을 때의 중심각 300° 원호 궤적과 낙하 지점

학교장추천전형 · 고른기회전형

문제 1 쌍성의 만유인력과 등속 원운동

만유인력 · 구심력 · 등속 원운동

두 별이 같은 각속도 $\omega = 2\pi/T$ 로 원운동을 하고, 두 별 사이의 만유인력이 각각의 구심력이 되므로 다음 두 방정식을 얻는다. (단 $r = r_1 + r_2$)

$$\frac{Gm_1m_2}{r^2} = m_2r_2\omega^2, \quad \frac{Gm_1m_2}{r^2} = m_1r_1\omega^2 \quad \dots \quad (1)$$

두 방정식의 좌변이 동일하므로 다음 관계식을 얻는다.

$$m_1r_1 = m_2r_2 \quad \dots \quad (2)$$

수식 (2)와 $r = r_1 + r_2$ 를 이용하면 각각의 r_1, r_2 는 다음과 같이 주어진다.

$$r_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}r, \quad r_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}r \quad \dots \quad (3)$$

수식 (3)의 r_1 또는 r_2 를 수식 (1)에 대입하면 총 질량을 얻는다.

$$G(m_1 + m_2) = r^3\omega^2 = \frac{4\pi^2r^3}{T^2}$$

$r_1 = 1, r_2 = 2$ 이므로 $r = 3$ 이고, $T = \pi$ 이므로

$$m = m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2r^3}{GT^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 27}{G\pi^2} = \frac{108}{G}$$

다시 수식 (2)를 이용하면 각각의 질량을 얻는다.

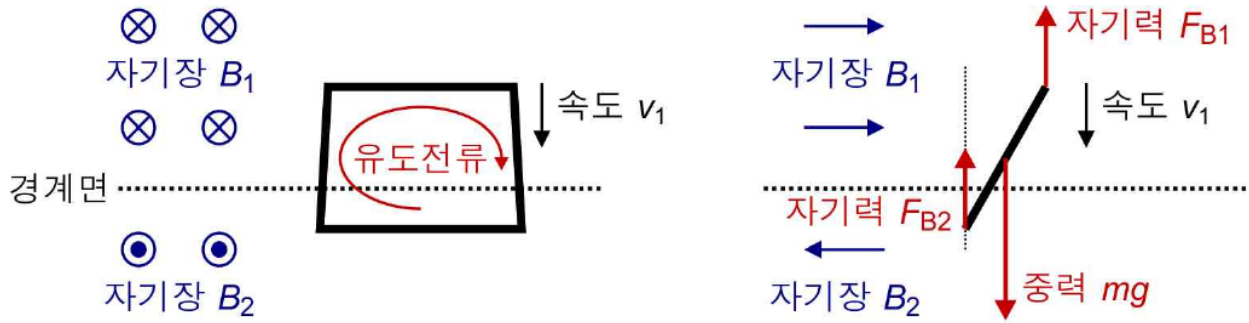
$$m_1 = \frac{4\pi^2r^3}{GT^2(1 + r_1/r_2)} = \frac{108}{G} \cdot \frac{1}{1 + 1/2}, \quad m_2 = \frac{4\pi^2r^3}{GT^2(1 + r_2/r_1)} = \frac{108}{G} \cdot \frac{1}{1 + 2}$$

$$m_1 = \frac{72}{G}, \quad m_2 = \frac{36}{G}$$

원점에 더 가까운 별($r_1 = 1$)이 더 무겁고, 실제로 $m_1r_1 = m_2r_2 = 72/G$ 를 만족한다.

문제 2 두 자기장 영역을 통과하는 직사각형 도선

패러데이 법칙 · 자기력 · 에너지 보존



경계면에 걸쳐 있는 도선에 흐르는 유도 전류(왼쪽)와 도선에 작용하는 힘(오른쪽)

(1) 등속도 운동의 원리와 초기 속도

도선이 경계면 위쪽 영역에만 있을 때에는 도선을 지나는 자기 선속이 변하지 않으므로 유도 전류가 발생하지 않는다. 도선이 경계면 아래쪽 영역에 진입하는 순간의 속도를 v_1 이라 하면, 다음과 같은 과정에 의해 도선이 등속도 운동을 하게 된다.

- 유도 기전력 $(B_1 + B_2)av_1$ 발생 (렌츠 법칙 및 패러데이 법칙). 여기서 도선이 각도 θ 만큼 기울어진 효과는 $(B_1 + B_2) \cos \theta$ 와 $v_1 / \cos \theta$ 로 나타나고, 이 둘의 곱에서 $\cos \theta$ 가 상쇄되어 유도 기전력은 θ 에 무관하게 된다.
- 유도 전류 $I = (B_1 + B_2)av_1 / R$ 이 시계 방향으로 흐름 (R : 도선의 저항)
- 중력 Mg , 위쪽 가로변에 작용하는 자기력 $F_{B1} = IaB_1$, 아래쪽 가로변에 작용하는 자기력 $F_{B2} = IaB_2$ 가 서로 상쇄되어 알짜힘이 0이 되면 등속도 운동을 하게 됨 (두 세로변에 작용하는 수평 방향의 자기력은 서로 상쇄됨)

따라서 힘의 평형 조건 $Mg = IaB_1 + IaB_2$ 로부터

$$v_1 = \frac{MgR}{(B_1 + B_2)^2 a^2} = \frac{0.2 \cdot 10 \cdot 3}{2^2 \cdot 0.5^2} = 6 \text{ m/s}$$

도선이 경계면에 닿기 전까지는 등가속도 직선운동을 하므로 (또는 역학적 에너지 보존으로부터)

$$v_0 = \sqrt{v_1^2 - 2gh} = \sqrt{36 - 20} = 4 \text{ m/s}$$

(2) 발생한 총 열에너지

도선이 경계면 위쪽 영역에서 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 의 등가속도 직선운동을 할 때에는 유도 전류가 발생하지 않으므로 열에너지도 발생하지 않는다. 반면 도선이 경계면을 통과하며 등속도 운동을 하는 동안에는 유도 전류에 의한 열에너지가 발생한다. 도선의 세로변이 연직 방향과 θ 를 이루므로 도선의 연직 방향 길이는 $b \cos \theta$ 이고, 통과에 걸리는 시간은

$$\Delta t = \frac{b \cos \theta}{v_1} = \frac{0.4 \cdot \cos 30^\circ}{6} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ s} \approx 0.0577 \text{ s}$$

(방법 1) 소비 전력을 이용 — 유도 기전력은 $(B_1 + B_2)av_1 = 2 \cdot 0.5 \cdot 6 = 6 \text{ V}$, 유도 전류는 $6/3 = 2 \text{ A}$ 이므로 저항 3Ω 에서 소비되는 전력은 $I^2 R = 12 \text{ W}$ 이다. 따라서

$$Q = 12 \text{ W} \times \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ s} = \frac{1.2}{\sqrt{3}} = 0.4\sqrt{3} \text{ J}$$

(방법 2) 에너지 보존을 이용 — 등속도 운동 과정에서 운동 에너지는 변하지 않고 위치에너지만 $Mgb \cos \theta$ 만큼 감소하였으므로, 에너지 보존 법칙에 의하여 이만큼이 그대로 열에너지로 전환되었다.

$$Q = Mgb \cos \theta = 0.2 \cdot 10 \cdot 0.4 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.4\sqrt{3} \text{ J}$$

$$Q = 0.4\sqrt{3} \text{ J} \approx 0.69 \text{ J}$$