

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
운동량 보존, 도플러 효과, 자기력과 전자기 유도,
탄성에너지와 엔트로피, 완전탄성충돌과 역학적에너지 보존

I. 문제

일반전형

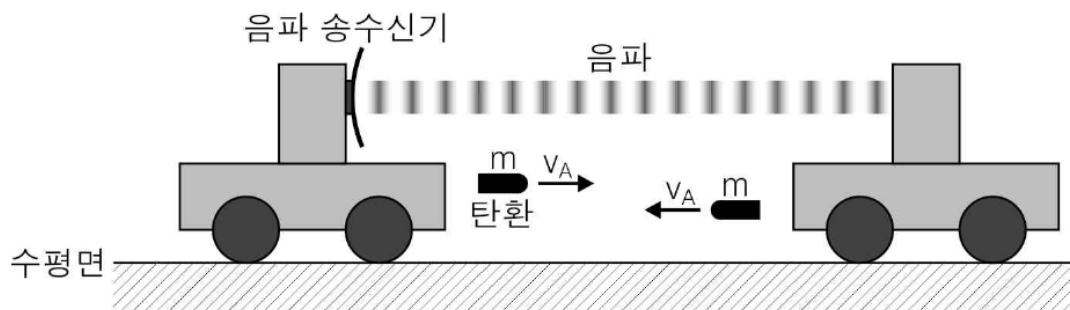
문제 1 음파의 도플러 효과와 운동량 보존

물리 II · 7분 · 4점

서로 마주 보고 있는 두 전차에 각각 질량이 m 인 탄환이 하나씩 장착되어 있고, 왼쪽 전차에는 음파 송수신기가 설치되어 있으며, 두 전차의 전체 질량은 서로 같다. 송수신기에서 진동수가 f_0 인 음파를 발생시켜 내보내면, 이 음파는 오른쪽 전차에서 반사된 후 왼쪽 전차로 되돌아오고, 송수신기는 되돌아온 음파의 진동수를 측정한다.

정지 상태의 공기에서의 음파의 속력을 v_A 라 하자. 정지해 있던 두 전차가 동시에 서로를 향해 수평 방향으로 탄환을 발사하였고, 두 탄환은 지면에 대해 정지해 있는 외부 관찰자가 보기에 수평면과 평행하게 속력 v_A 의 등속운동을 하며 날아가 각각 상대 전차에 동시에 박혔다.

탄환이 박힌 후 송수신기에서 측정되는 음파의 진동수가 $0.64f_0$ 라면, 탄환이 박히기 직전에 송수신기에서 측정된 음파의 진동수는 얼마였을까? (전차와 지면 사이의 마찰과 공기저항은 무시하자.)



마주 보는 두 전차와 음파 송수신기

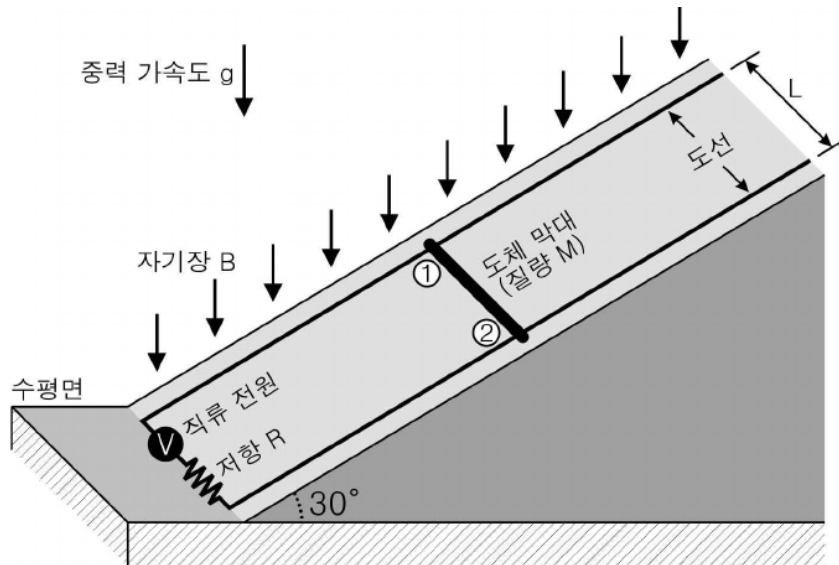
문제 2 경사면 레일 위 도체 막대의 자기력과 전자기 유도

물리 I · II · 8분 · 5점

수평면에 대해 30° 의 각도로 기울어진 경사면에 두 개의 도선을 간격 L 로 평행하게 놓아 레일을 만들고, 경사면 전체에 균일한 세기 B 의 자기장을 중력 가속도 g 와 같은 방향으로 걸었다. 레일의 아래쪽 끝에 전압 V 의 직류 전원과 저항 R 이 직렬로 연결되어 있고, 질량이 M 인 도체 막대가 레일에 수직하게 물린 채로 레일을 따라 마찰 없이 움직일 수 있다.

전원을 켜 후 막대를 정지 상태에 두고 손을 뗐더니 막대가 경사면 위로 움직이기 시작하였고 시간이 충분히 흐른 후 등속 운동을 하게 되었다. 그리고 전원의 극성만 반대로 뒤집은 후 같은 조건의 실험을 반복하였더니 막대가 경사면 아래로 움직이기 시작하였고 시간이 충분히 흐른 후 등속운동을 하게 되었다. (도선 및 도체 막대의 저항과 공기저항은 무시하자. 전류에 의해 발생하는 자기장의 세기는 B 보다 훨씬 약해서 그 효과를 무시할 수 있다고 가정하자.)

- (1) 막대가 경사면 위로 움직이기 시작한 경우에 대해 등속운동을 하게 되는 원리를 정성적으로 설명하시오. [2점]
- (2) 막대의 두 운동 방향(경사면 상향 및 하향)에 대해 각각, 막대가 움직이기 시작할 때와 등속운동을 할 때 전류의 크기 및 방향을 모두 구하시오. (전류 방향은 막대의 양 끝 ①, ②에 대해 ‘①→②’ 또는 ‘②→①’로 답하시오.) [2점]
- (3) 막대의 두 운동 방향에 대해 등속운동 속력이 각각 v_F 와 $1.4v_F$ 였다고 하자. 같은 조건의 실험을 수평면에서 했을 때 시간이 충분히 흐른 후 등속운동을 하는 막대의 속력은 v_F 의 몇 배인가? [1점]



경사면 레일과 직류 전원 · 도체 막대

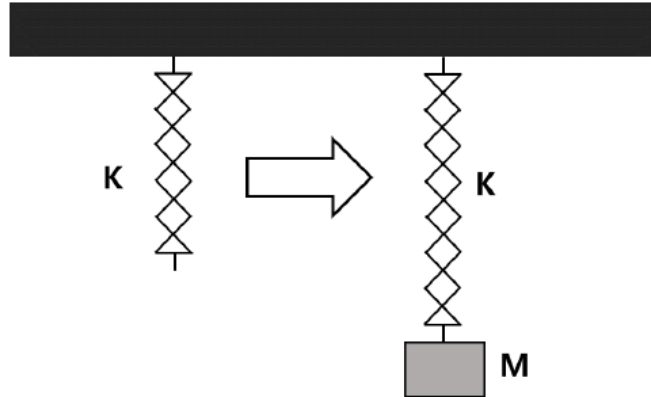
학교장추천전형 · 고른기회전형

문제 1 용수철의 탄성에너지와 엔트로피 변화

물리 II · 7분 · 4점

용수철 상수 K 인 용수철이 있다. 여기에 그림과 같이 질량 M 인 물체를 매달았더니 물체는 상하로 왕복 운동을 하다가 용수철이 처음보다 약간 늘어난 상태에서 정지하였다. 이 과정에서 온도는 T 로 일정하였으며 중력 가속도는 g 이다. 용수철의 질량은 무시하자.

- (1) 물체가 정지했을 때, 용수철의 늘어난 길이는 얼마인가? [1점]
- (2) 이때, 용수철에 축적된 탄성에너지는 얼마인가? [1점]
- (3) 용수철에 축적된 탄성에너지와 물체의 위치에너지 변화를 비교하시오. [1점]
- (4) 처음 물체를 용수철에 매단 순간에서 최종적으로 물체가 정지한 상태 사이의 과정에 의한 우주 전체 엔트로피의 변화량과 변화방향(증가 혹은 감소)을 구하시오. [1점]



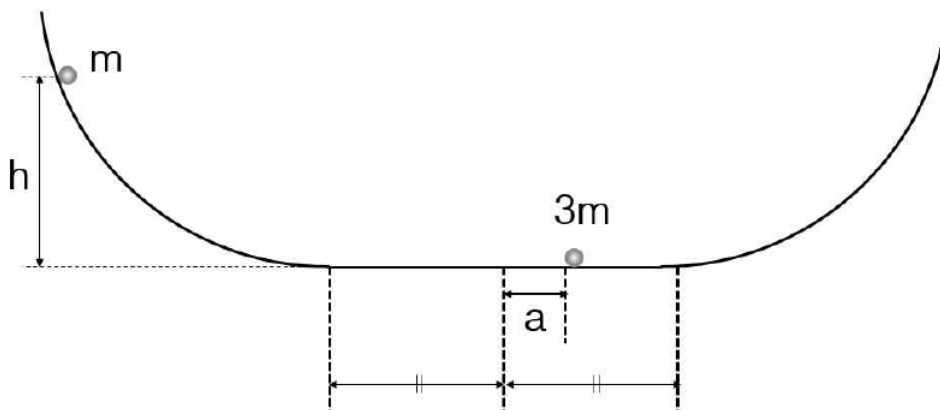
용수철에 물체를 매달기 전과 후

문제 2 곡면 위 두 물체의 반복적인 완전탄성충돌

물리 I · II · 8분 · 6점

그림과 같이 지면에서 높이 h 에 정지해 있던 질량 m 인 물체가 마찰이 없는 완만한 곡면을 따라 미끄러져 내려온 후 편평한 평면에서 정지해 있던 질량 $3m$ 인 물체와 충돌한다. (두 물체는 질량은 있지만 크기는 없는 질점으로 가정하며, $3m$ 인 물체는 아래 그림과 같이 가운데에서 a 만큼 오른쪽으로 떨어져 있다). 충돌 후 각 물체는 양쪽 곡면으로 이동할 수 있으며, 양쪽 곡면의 높이는 충분히 높아서 물체는 다시 돌아오고, 계속해서 충돌이 일어난다. 모든 충돌은 완전탄성충돌이라고 가정하며, 공기의 저항은 무시하고, 중력가속도는 g 이다.

- (1) 첫 번째 충돌 직후, 두 물체의 속도를 각각 구하시오. [2점]
- (2) 두 번째 충돌이 일어날 때, $3m$ 인 물체의 위치를 구하시오. [1점]
- (3) 두 번째 충돌 직후, 두 물체의 속도를 각각 구하시오. [1점]
- (4) 이후 충돌 양상을 설명하시오. 충돌 위치는 어떻게 변하는가? [1점]
- (5) 질량 m 과 $3m$ 인 물체가 곡면에서 도달할 수 있는 최대 높이를 구하시오. [1점]



곡면과 평면 위에 놓인 두 물체

II. 예시답안

일반전형

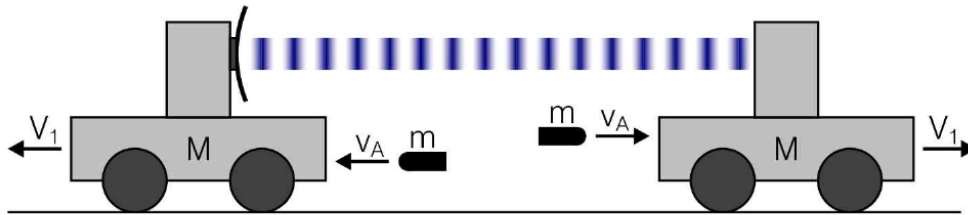
문제 1 음파의 도플러 효과와 운동량 보존

운동량 보존 · 진동수 · 도플러 효과

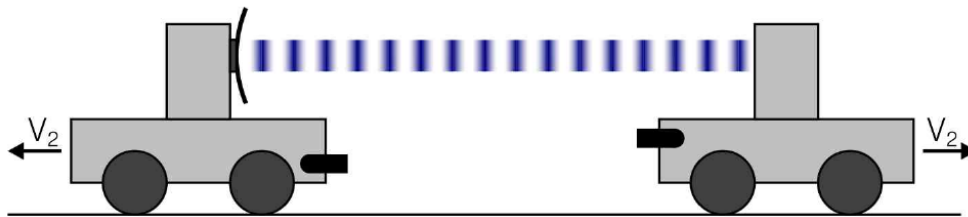
탄환을 제외한 전차의 질량을 M 이라 하면, 운동량 보존 법칙으로부터 탄환이 박히기 전후의 전차의 속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{탄환이 박히기 전: } 0 = MV_1 - mv_A \rightarrow V_1 = \left(\frac{m}{M}\right)v_A$$

$$\text{탄환이 박힌 후: } mv_A + MV_1 = (M+m)V_2 \rightarrow V_2 = \left(\frac{2m}{M+m}\right)v_A$$



탄환이 전차에 박히기 전



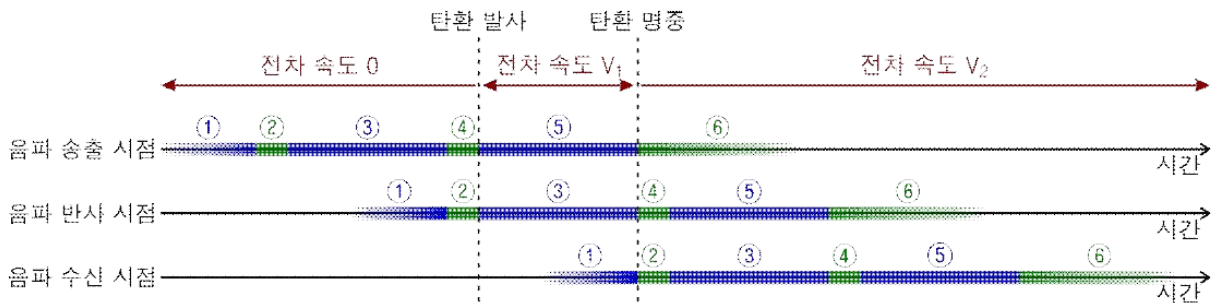
탄환이 전차에 박힌 후

탄환이 박히기 전(위)과 박힌 후(아래)의 전차의 운동

탄환이 박히기 직전에 측정된 진동수 — 이때 수신되는 음파는 ㉠ 정지 상태의 왼쪽 전차에서 송출되었고, ㉡ 정지 상태의 오른쪽 전차에서 반사되었으며, ㉢ V_1 의 속력으로 멀어지는 왼쪽 전차에서 수신된다. 따라서

$$f_1 = \left(\frac{v_A - V_1}{v_A}\right)f_0 = \left(\frac{M - m}{M}\right)f_0$$

여기서 M 과 m 의 관계를 아직 모르므로, 탄환이 박힌 후의 진동수가 $0.64f_0$ 라는 조건으로부터 구해야 한다.



송출·반사·수신 시점의 시간대 구분 — ①-⑥

탄환이 박힌 후에 측정된 진동수 — “탄환이 박힌 후”가 언제를 의미하는지에 대한 해석에 따라 위 그림의 ②-⑥ 다섯 가지 시간대로 풀 수 있다. 이 중 ②번(박힌 직후)으로 해석하는 것이 가장 보편적이다.

②번 시간대: 정지 상태에서 송출 → 탄환 발사 직전 정지 상태의 오른쪽 전차에서 반사 → 명중 직후 V_2 로 멀어지는 왼쪽 전차에서 수신.

$$f_2 = \left(\frac{v_A - V_2}{v_A} \right) f_0 = \left(\frac{M - m}{M + m} \right) f_0 = 0.64 f_0 \rightarrow M = \left(\frac{41}{9} \right) m$$

$$f_1 = \left(\frac{M - m}{M} \right) f_0 = \left(\frac{32}{41} \right) f_0 \approx 0.780 f_0$$

다른 해석에 따른 결과 — 송출·반사·수신 시점을 각각 어느 시간대로 잡느냐에 따라 아래와 같이 달라진다.

시간 대	송출 / 반사 / 수신	명중 후 진동수 f_2	질량비	명중 직전 f_1
②	정지 / 정지 / V_2	$\left(\frac{M-m}{M+m} \right) f_0$	$M = \frac{41}{9} m$	$\frac{32}{41} f_0$
③	정지 / V_1 / V_2	$\left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 f_0$	$M = 9m$	$\frac{8}{9} f_0$
④	정지 / V_2 / V_2	$\left(\frac{M-m}{M+m} \right) \left(\frac{M-m}{M+3m} \right) f_0$	$M = \frac{19+8\sqrt{6}}{3} m$	$\frac{16+8\sqrt{6}}{19+8\sqrt{6}} f_0$
⑤	V_1 / V_2 / V_2	$\left(\frac{M-m}{M+m} \right) \left(\frac{M-m}{M+3m} \right) \left(\frac{M}{M+m} \right) f_0$	3차방정식	$\approx 0.9338 f_0$
⑥	V_2 / V_2 / V_2	$\left(\frac{M-m}{M+3m} \right)^2 f_0$	$M = 17m$	$\frac{16}{17} f_0$

문제 2 경사면 레일 위 도체 막대의 자기력과 전자기 유도

자기력 · 유도 기전력 · 알짜힘

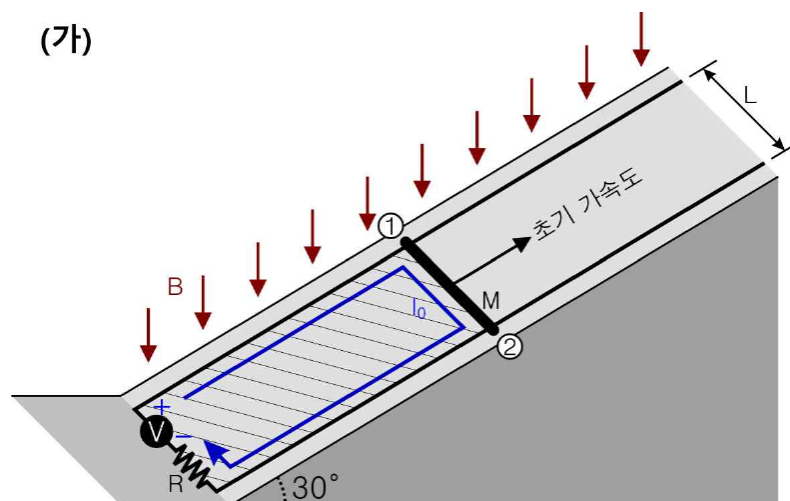


그림 (가) — 경사면 레일 회로와 자기선속이 지나는 영역

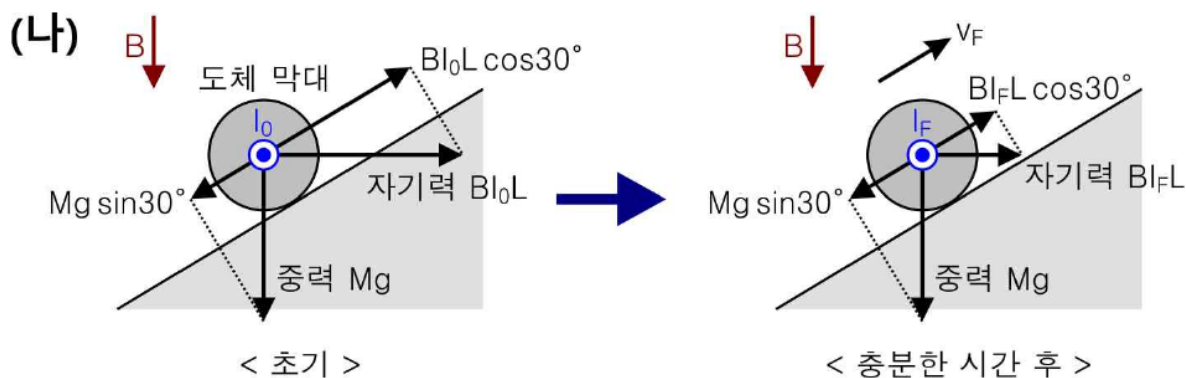


그림 (나) — 경사면 상향 운동에서 막대에 작용하는 힘

(1) 등속운동에 이르기까지의 과정

자기력 발생 $[BI_0 L] \rightarrow$ 속도 증가 $[v]$

- 그림 (가)의 빗금친 영역 증가
- 이 영역을 통과하는 자기 선속 증가
- 유도 기전력 증가 $[BLv \cos 30^\circ]$ (렌츠 법칙 및 패러데이 법칙)
- 전류 감소 $[I = (V - BLv \cos 30^\circ)/R]$
- 자기력 감소 $[BIL]$
- 알짜 힘 및 가속도 감소 $[(BIL \cos 30^\circ - Mg \sin 30^\circ)/M]$

의 과정이 반복되고, 시간이 충분히 흘러 알짜 힘 및 가속도가 0이 되면 도체 막대가 등속운동을 하게 된다.

(2) 전류의 크기와 방향

막대가 움직이기 시작할 때 — 속도가 0이므로 유도 기전력도 0이다.

전류의 크기: 두 경우 모두 $I_0 = V/R$

전류의 방향: 상향운동 ①→②, 하향운동 ②→①

막대가 등속운동을 할 때 — 중력과 자기력이 힘의 평형을 이룬다.

$$BI_F L \cos 30^\circ - Mg \sin 30^\circ = 0 \rightarrow I_F = \frac{Mg}{BL} \tan 30^\circ = \frac{Mg}{\sqrt{3}BL}$$

전류의 방향: 두 경우 모두 ①→②

하향 운동의 경우 막대가 가속되면서 유도 기전력이 점점 커져 V 를 초과하고, 그 순간 전류의 방향이 뒤집힌다. 즉 전류는 0까지 줄어들었다가 반대 방향으로 다시 늘어나 결국 상향 운동과 같은 크기·방향이 된다.

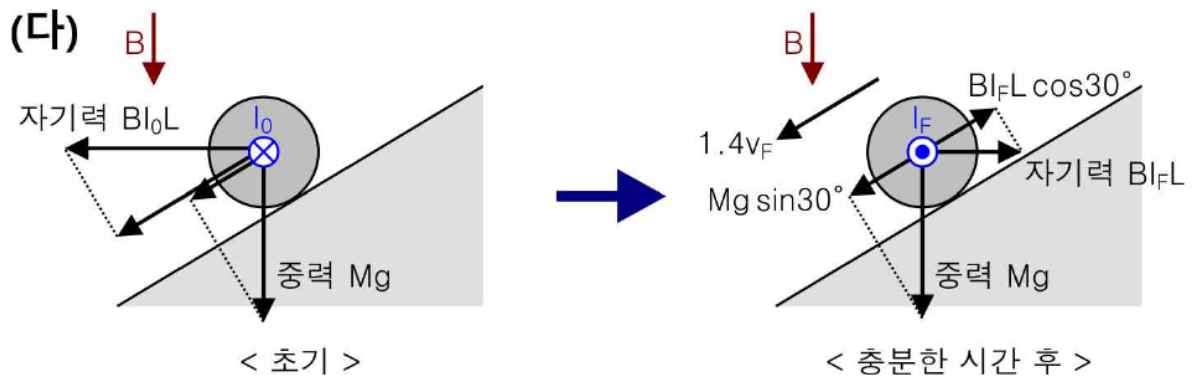


그림 (다) — 경사면 하향 운동에서 막대에 작용하는 힘

(3) 수평면에서의 등속운동 속력

등속운동 속력은 하향 운동의 경우가 상향 운동의 경우보다 크므로, v_F 와 $1.4v_F$ 는 각각 상향 운동과 하향 운동의 등속 운동 속력이다. 두 경우의 I_F 가 서로 같으므로

$$I_F = \frac{V - BLv_F \cos 30^\circ}{R} = \frac{BL(1.4v_F) \cos 30^\circ - V}{R}$$

$$\rightarrow 2V = 2.4BLv_F \cos 30^\circ \rightarrow V = 1.2BLv_F \cos 30^\circ = 0.6\sqrt{3}BLv_F$$

같은 실험을 수평면에서 하면 중력이 알짜 힘에 기여하지 않으므로, 시간이 충분히 지난 후 속력 $v_{F'}$ 로 등속운동을 할 때 자기력도 0이고 따라서 전류도 0이다. 즉

$$\frac{V - BLv_{F'}}{R} = 0 \rightarrow v_{F'} = \frac{V}{BL}$$

$$v_{F'} = 0.6\sqrt{3}v_F \approx 1.04v_F$$

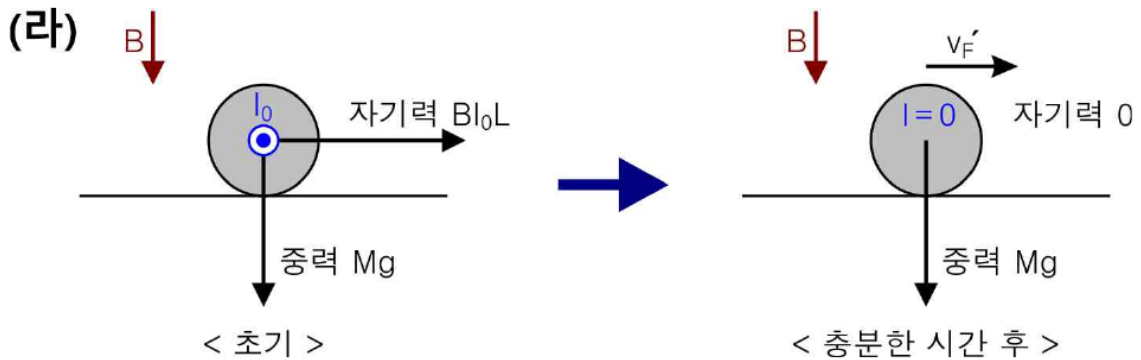


그림 (라) — 수평면에서 막대에 작용하는 힘

학교장추천전형 · 고른기회전형

문제 1 용수철의 탄성에너지와 엔트로피 변화

힘의 평형 · 에너지 보존 · 엔트로피

물체를 매달기 전 용수철 끝의 위치를 0이라 하고, 늘어난 용수철의 길이를 x 라 하자.

(1) 늘어난 길이 — 멈춘 위치에서 힘의 평형으로부터

$$Mg = Kx \rightarrow x = \frac{Mg}{K}$$

(다른 풀이) $0 \sim x$ 의 퍼텐셜 에너지 차이는 $V(x) = \frac{Kx^2}{2} - Mgx$ 이고, 용수철의 움직임이 멈춘 지점은 이 퍼텐셜 에너지의 최소점이므로 $x = Mg/K$ 이다.

(2) 축적된 탄성에너지

$$E_{\text{탄성}} = \frac{1}{2}Kx^2 = \frac{(Mg)^2}{2K} = \frac{1}{2}Mgx$$

(3) 위치에너지 변화와의 비교 — 물체의 위치에너지 감소량은 $Mgx = (Mg)^2/K$ 이고, 용수철에 축적된 탄성에너지는 그 절반인 $\frac{1}{2}Mgx$ 이다. 즉 두 에너지의 차이

$$D = \frac{1}{2}Mgx = \frac{(Mg)^2}{2K}$$

만큼이 진동 과정 중에 공기 마찰 등으로 소산(소실)된 것으로 볼 수 있다.

(4) 엔트로피 변화 — 온도는 T 로 변하지 않았으므로

$$\Delta S = \frac{D}{T} = \frac{M^2 g^2}{2KT} \quad \text{만큼 증가}$$

문제 2 곡면 위 두 물체의 반복적인 완전탄성충돌

완전탄성충돌 · 역학적에너지 보존

일반적인 완전탄성충돌 전후의 속도 — 운동량과 운동에너지가 모두 보존되므로, 질량 m_1, m_2 이고 초기 속도가 각각 v_1, v_2 인 물체의 충돌 후 속도 V_1, V_2 는

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 V_1 + m_2 V_2, \quad \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 V_2^2$$

$$\rightarrow V_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2}, \quad V_2 = \frac{2m_1 v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}$$

$m_1 = m, m_2 = 3m$ 을 대입하면

$$V_1 = \frac{-v_1 + 3v_2}{2}, \quad V_2 = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

(1) 첫 번째 충돌 직후의 속도 — 질량 m 인 물체가 바닥에 도달했을 때의 속력을 v_0 라 하면 역학적에너지 보존에 의해 $v_0 = \sqrt{2gh}$ 이다. 충돌 직전 조건 $v_1 = v_0, v_2 = 0$ 을 대입하면

$$V_1 = -\frac{1}{2}v_0 = -\sqrt{\frac{gh}{2}}, \quad V_2 = \frac{1}{2}v_0 = \sqrt{\frac{gh}{2}}$$

두 물체는 같은 속력으로 서로 반대 방향으로 향한다.

(2) 두 번째 충돌 위치 — 첫 번째 충돌 후 두 물체의 속력이 같으므로, 곡면이 대칭인 경우 곡선 구간에서의 시간이 동일하고 따라서 직선 구간에서의 이동거리도 같아야 한다. 그러므로 두 번째 충돌은 $3m$ 인 물체가 **가운데에서 왼쪽으로 a 만큼** 이동하였을 때 일어난다. (곡면이 대칭이 아닌 경우를 가정하면 곡선 구간의 이동시간이 달라져 충돌 위치가 바뀔 수 있다.)

(3) 두 번째 충돌 직후의 속도 — 충돌 직전 조건 $v_1 = \frac{1}{2}v_0, v_2 = -\frac{1}{2}v_0$ 를 대입하면

$$V_1' = -v_0 = -\sqrt{2gh}, \quad V_2' = 0$$

질량 m 인 물체는 v_0 의 속력으로 왼쪽으로 이동하고, 질량 $3m$ 인 물체는 멈춘다.

(4) 이후 충돌의 양상 — 두 번째 충돌 직후의 상태는 첫 번째 충돌 직전의 상태와 좌우가 뒤바뀐 형태이므로, 두 물체는 계속해서 같은 충돌을 반복하게 된다.

홀수 번째 충돌은 평평한 면의 중심으로부터 **오른쪽으로 a 위치에서**,
짝수 번째 충돌은 **왼쪽으로 a 위치에서** 일어난다.

(5) 도달할 수 있는 최대 높이 — 역학적에너지 보존에 의한 속력과 높이의 관계

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \rightarrow v \propto \sqrt{h}$$

를 이용한다. 질량 m 과 $3m$ 이 가질 수 있는 최대 속력은 각각 $v_0, \frac{1}{2}v_0$ 이므로

$$h_m = h, \quad h_{3m} = \frac{1}{4}h$$