

연세대학교 논술시험

자연계열 · 물리

문제 · 예시답안

시험 구분
전형
문항 수
핵심 개념

논술시험 (자연계열, 물리) · 오후
2020학년도 수시모집
4문항 (각 10점, 총 40점)
포물선 운동과 수평면과의 탄성 충돌,
단원자 이상 기체의 내부 에너지·열평형·분자 운동론,
균일한 자기장 속 하전 입자의 등속 원운동,
움직이는 음원과 관측자의 도플러 효과

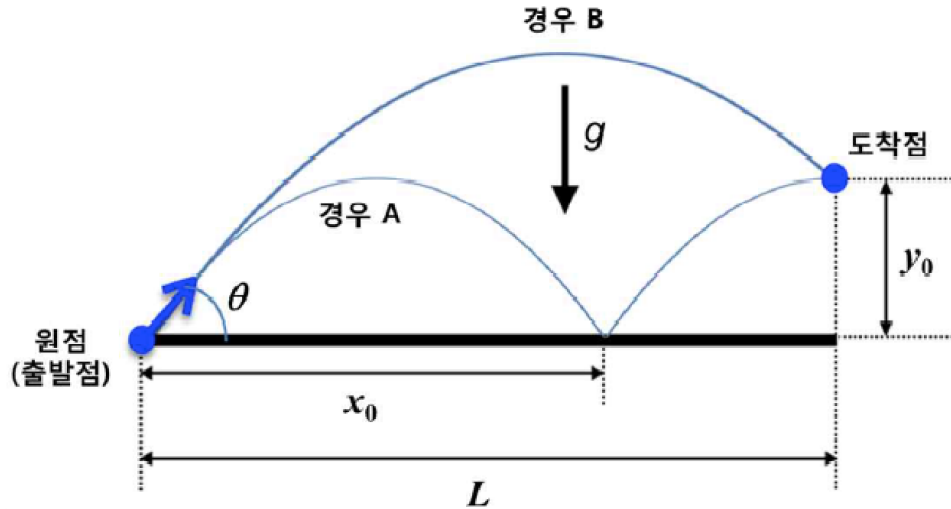
I. 문제

다음 제시문을 읽고 물음에 답하시오.

문제 1 포물선 운동과 수평면과의 탄성 충돌

배점 10점

[가] [그림 1]은 지표 근처에서 비스듬히 위로 던진 물체가 포물선 운동하는 두 경우를 보여준다. 경우 A는 수평 거리가 x_0 인 지점에서 수평면과 탄성 충돌한 후 수평 거리가 L 이고 높이가 y_0 인 지점에 도착하는 상황이고, 경우 B는 던지는 각도 θ 는 같지만 던지는 속력은 더 커서 동일한 도착점에 지면과 충돌 없이 바로 도착하는 상황이다. 중력 가속도 g 는 10 m/s^2 이고, 공기의 저항은 무시할 수 있을 정도로 매우 작다.



[그림 1] 경우 A(한 번 탄성 충돌 후 도착)와 경우 B(직접 도착)의 포물선 운동

제시문 [가]에서 수평 거리 x_0 이 $2L/3$ 이고 도착점의 높이 y_0 이 $L/4$ 일 때, 경우 A에서 물체를 던지는 각도 θ 에 대해 논하고, 경우 B에서 물체를 던지는 속력에 대해 논하시오.

문제 2 이상 기체의 내부 에너지 · 분자 운동론 · 열평형

배점 10점

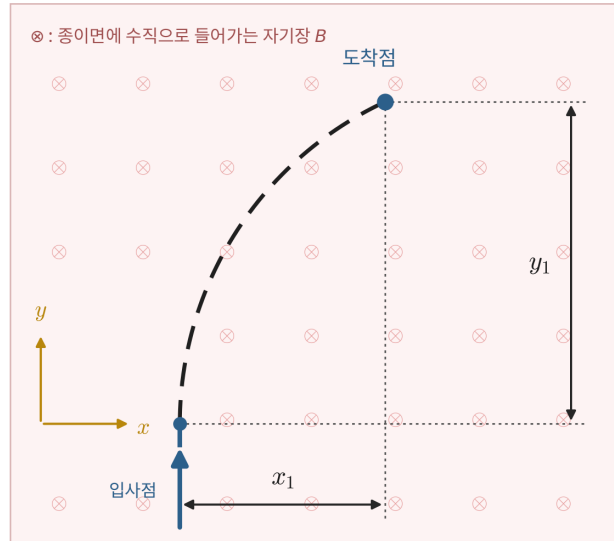
[나] 부피가 800 cm^3 로 일정한 용기가 단열 칸막이로 나뉘어 있다. 칸막이는 고정되어 있고, 칸막이로 나뉜 두 영역은 부피가 각각 300 cm^3 와 500 cm^3 이다. 부피가 300 cm^3 인 영역에는 온도가 300 K 이고 압력이 $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 인 헬륨 기체가 들어 있고, 부피가 500 cm^3 인 영역에는 온도가 500 K 이고 압력이 $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 인 네온 기체가 들어 있다.

제시문 [나]의 상황에서 칸막이가 0 초부터 열을 전도하기 시작하여 18 J 의 에너지가 천천히 전도된 후 칸막이가 다시 단열되었다. 이때 헬륨 분자의 속력의 제곱의 평균값과 네온 분자의 속력의 제곱의 평균값에 대해 논하시오. 칸막이가 다시 열을 전도하기 시작하여 용기 안쪽이 모두 열평형에 도달하였다. 이때 헬륨 기체와 네온 기체의 온도와 압력에 대해 논하시오. (단, 헬륨 기체와 네온 기체는 단원자 분자로 구성된 이상 기체로 가정한다. 용기는 단열이고 용기와 칸막이의 열용량은 무시할 수 있을 정도로 매우 작으며, 에너지 손실은 무시한다. 볼츠만 상수 k_B 는 $1.4 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 이고, 원자의 질량 단위 m_u 는 $1.6 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 이고, 헬륨 원자의 질량은 $4m_u$ 이고, 네온 원자의 질량은 $20m_u$ 이다.)

문제 3 균일한 자기장 속 하전 입자의 원운동

배점 10점

[다] [그림 2]는 균일한 자기장 B 에 수직인 평면에서 전하를 띤 입자의 운동을 보여준다. 이 입자의 전하량은 q 이고 질량은 m 이다. 이 입자는 자기장 영역에 수직한 방향으로 입사되어 입사된 지점에서 오른쪽으로 x_1 만큼, 위쪽으로 y_1 만큼 떨어진 지점에 도착한다. 자기장은 종이면에 수직으로 들어가는 방향이고, 중력은 무시할 수 있을 정도로 매우 작다.



[그림 2] 종이면에 수직으로 들어가는 자기장 속에서 휘어지는 입자의 경로 — 입사점에서 오른쪽으로 x_1 , 위쪽으로 y_1 만큼 떨어진 지점에 도착한다

제시문 [다]의 상황에서 $x_1 = L$ 이고 $y_1 = \sqrt{3}L$ 인 경우에 입자의 속도와 입자가 띤 전하의 부호에 대해 논하시오. (단, 전하를 띤 입자의 전자기파 발생은 무시한다.)

문제 4 움직이는 음원과 관측자 사이의 도플러 효과

배점 10점

[라] 진동수 1000 Hz의 소리를 발생시키는 스피커가 0 초부터 소리를 내기 시작하는데 처음 2 초간 소리를 내고, 다음 2 초간 소리를 내지 않고, 그 다음 2 초간 소리를 내고, 그 다음 2 초간 소리를 내지 않는 것을 반복한다. 이 스피커가 동쪽 방향으로 50 m/s의 일정한 속력으로 진행하고, 소리를 측정하는 마이크가 서쪽 방향으로 150 m/s의 일정한 속력으로 진행한다. 0 초일 때 마이크의 위치는 스피커로부터 동쪽 방향으로 2000 m 만큼 떨어진 지점이다.

제시문 [라]에서 0 초부터 20 초 사이에 마이크에서 스피커의 소리가 측정되는 시간과 측정된 소리의 진동수에 대해 논하시오. (단, 대기 중 소리의 속력은 350 m/s로 일정하고, 스피커와 마이크는 직선상에서 운동하며 서로 부딪히지 않고 지나칠 수 있다.)

II. 예시답안

문제 1 포물선 운동과 수평면과의 탄성 충돌

탄성 충돌의 대칭성 · 포물선의 꼭짓점 조건

경우 A: $\tan \theta = 3/2$ ($\theta \approx 56.3^\circ$) 경우 B: $v_2 = \sqrt{13gL/10}$

(i) 탄성 충돌이 만드는 대칭성 — 수평면과의 탄성 충돌에서는 속력이 보존되고 수평 성분 v_x 는 그대로, 연직 성분은 크기가 같고 방향만 반대가 된다. 따라서 충돌 직후의 초기 조건은 처음 던질 때와 완전히 같으므로, 충돌 후의 궤적은 충돌 전의 궤적과 **합동인 포물선**이고 수평 도달 거리도 똑같이 $x_0 = 2L/3$ 이다.

첫 번째 포물선의 꼭짓점은 사거리의 절반인 $x = L/3$ 에 있고, 두 번째 포물선은 $x = 2L/3$ 에서 시작하므로 그 꼭짓점은

$$x = 2\frac{L}{3} + \frac{1}{2} \cdot 2\frac{L}{3} = 2\frac{L}{3} + \frac{L}{3} = L$$

에 있다. 도착점의 수평 위치가 바로 L 이므로 **도착점은 두 번째 포물선의 꼭짓점**이며, 그 높이 $y_0 = L/4$ 는 곧 이 포물선 운동의 최고 높이이다.

(ii) 두 조건식 — 던지는 속력을 v_1 , 시간을 t 라 하면 $x = (v_1 \cos \theta)t$, $y = (v_1 \sin \theta)t - \frac{1}{2}gt^2$ 이다. 최고점은 $v_y = v_1 \sin \theta - gt = 0$, 즉 $t = v_1 \sin \theta / g$ 일 때이므로 최고 높이와 사거리는

$$y_{\max} = \frac{(v_1 \sin \theta)^2}{2g} = \frac{L}{4} \Rightarrow v_1^2 \sin^2 \theta = \frac{gL}{2},$$

$$R = \frac{2v_1^2 \sin \theta \cos \theta}{g} = \frac{2L}{3} \Rightarrow v_1^2 \sin \theta \cos \theta = \frac{gL}{3}$$

가 된다. 두 식을 나누면 v_1^2 이 소거되어

$$\tan \theta = \frac{(gL)/2}{(gL)/3} = \frac{3}{2}, \quad \theta = \arctan \frac{3}{2} \approx 56.3^\circ$$

따라서 $\sin \theta = 3/\sqrt{13}$, $\cos \theta = 2/\sqrt{13}$ 이고, 이를 되돌려 넣으면 $v_1^2 = 13gL/18$ 이다.

(iii) 경우 B의 속력 — 던지는 속력을 v_2 라 하면 $x = (v_2 \cos \theta)t$ 에서 도착 시각은 $t = L/(v_2 \cos \theta)$ 이다. 이를 연직 방향 식에 넣으면

$$\frac{L}{4} = (v_2 \sin \theta) \frac{L}{v_2 \cos \theta} - \frac{1}{2}g \left(\frac{L}{v_2 \cos \theta} \right)^2 = L \tan \theta - \frac{gL^2}{2(v_2 \cos \theta)^2}$$

이고, $\tan \theta = 3/2$ 이므로 $L \tan \theta = 3L/2$ 이다. 정리하면

$$\frac{gL^2}{2(v_2 \cos \theta)^2} = \frac{3L}{2} - \frac{L}{4} = \frac{5L}{4} \Rightarrow (v_2 \cos \theta)^2 = \frac{2gL}{5}$$

이고, 연직 성분은 $\tan^2 \theta = 9/4$ 를 이용하여 $(v_2 \sin \theta)^2 = (v_2 \cos \theta)^2 \tan^2 \theta = \frac{2gL}{5} \cdot \frac{9}{4} = \frac{9gL}{10}$ 이 된다. 두 성분을 더하면

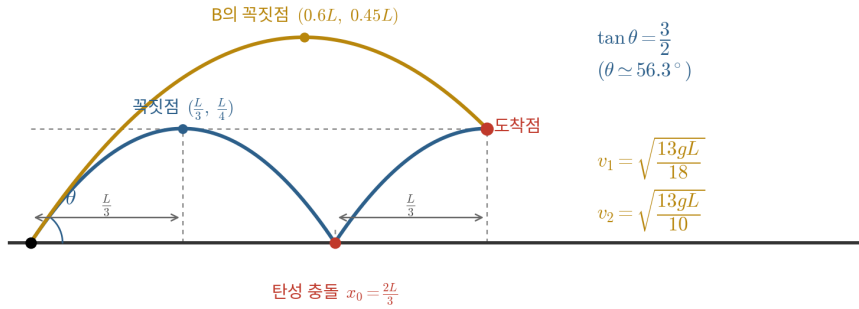
$$v_2^2 = \frac{2gL}{5} + \frac{9gL}{10} = \frac{13gL}{10}, \quad v_2 = \sqrt{\frac{13gL}{10}}$$

$g = 10 \text{ m/s}^2$ 이므로 L 을 m 단위로 재면 수치식으로 $v_2 = \sqrt{13L}$ (m/s)로 쓸 수 있다.

물리적 의미 — 두 경우의 관계와 도착 순간의 상태는 다음과 같다.

- **속력 비** — $v_2^2/v_1^2 = (13/10)/(13/18) = 9/5$ 이므로 $v_2 = (3/\sqrt{5})v_1 \approx 1.34v_1$ 이다. 같은 각도라도 속력이 약 34% 크면 중간에 지면에 닿지 않고 한 번에 도착점까지 날아간다.
- **도착 순간의 속도** — 경우 A의 도착점은 꼭짓점이므로 연직 성분이 0, 즉 속도가 **수평**이다. 반면 경우 B는 꼭짓점 $(0.6L, 0.45L)$ 을 이미 지나 내려오는 중이며, 도착 순간 $v_x = 2\sqrt{gL/10}$, $v_y = -2\sqrt{gL/10}$ 로 **수평 아래 45° 방향**이다.
- **에너지 관점** — $v_2^2 - 2gy_0 = 13gL/10 - gL/2 = 4gL/5$ 로, 앞 불릿에서 성분으로 구한 도착 속력의 제곱 $v_x^2 + v_y^2 = 4gL/5$ 와 일치한다.

경우 A(두 번의 합동 포물선)와 경우 B(직접 도달)의 궤적



예시 작도 — 경우 A는 합동인 두 포물선이 이어지고 도착점이 두 번째 포물선의 꼭짓점이 된다.

문제 2 이상 기체의 내부 에너지 · 분자 운동론 · 열평형

단원자 이상 기체 $U = 3PV/2$ · 등적 과정

$$\overline{v_{\text{He}}^2} \approx 2.23 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2, \overline{v_{\text{Ne}}^2} \approx 5.78 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}^2 \text{ (비} = 85 : 22)$$

열평형 온도 380 K, $P_{\text{He}} = 3.8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $P_{\text{Ne}} = 1.52 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

(i) 처음 내부 에너지 — 단원자 이상 기체의 내부 에너지는 병진 운동 에너지뿐이므로 $U = \frac{3}{2}Nk_B T$ 이고, 이상 기체 상태 방정식 $PV = Nk_B T$ 를 쓰면 $U = \frac{3}{2}PV$ 이다. 부피를 $\text{cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$ 로 고쳐 넣으면

$$U_{\text{He}} = \frac{3}{2}(3 \times 10^5)(300 \times 10^{-6}) = 135 \text{ J}, \quad U_{\text{Ne}} = \frac{3}{2}(2 \times 10^5)(500 \times 10^{-6}) = 150 \text{ J}$$

이다. 또한 두 기체의 (몰수에 해당하는) 양은 $Nk_B = PV/T$ 로부터 $(Nk_B)_{\text{He}} = 90/300 = 0.3 \text{ J/K}$, $(Nk_B)_{\text{Ne}} = 100/500 = 0.2 \text{ J/K}$ 이고, 부피가 고정되어 있으므로 등적 열용량은 각각 $C_{\text{He}} = \frac{3}{2}(0.3) = 0.45 \text{ J/K}$, $C_{\text{Ne}} = \frac{3}{2}(0.2) = 0.30 \text{ J/K}$ 이다.

(ii) 18 J 전도 후의 온도 — 열은 온도가 높은 네온(500 K)에서 낮은 헬륨(300 K)으로 흐른다. 칸막이가 고정되어 부피 변화가 없으므로 기체가 하는 일이 0 이고, 열역학 제1법칙에서 $\Delta U = Q$ 이다. 따라서 $U'_{\text{He}} = 135 + 18 = 153 \text{ J}$, $U'_{\text{Ne}} = 150 - 18 = 132 \text{ J}$ 이고, $U \propto T$ (부피·입자 수 일정)이므로

$$T'_{\text{He}} = 300 \times \frac{153}{135} = 340 \text{ K}, \quad T'_{\text{Ne}} = 500 \times \frac{132}{150} = 440 \text{ K}$$

이다. (열용량으로 확인하면 $\Delta T_{\text{He}} = 18/0.45 = +40 \text{ K}$, $\Delta T_{\text{Ne}} = -18/0.30 = -60 \text{ K}$ 로 같은 결과이다.)

(iii) 속력의 제곱의 평균값 — 분자 운동론에서 분자 하나의 평균 병진 운동 에너지는 $\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}k_B T$ 이므로 $\overline{v^2} = 3k_B T/m$ 이다. $m_{\text{He}} = 4m_u = 6.4 \times 10^{-27} \text{ kg}$, $m_{\text{Ne}} = 20m_u = 3.2 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 이므로

$$\overline{v_{\text{He}}^2} = \frac{3(1.4 \times 10^{-23})(340)}{6.4 \times 10^{-27}} \approx 2.23 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2, \quad \overline{v_{\text{Ne}}^2} = \frac{3(1.4 \times 10^{-23})(440)}{3.2 \times 10^{-26}} \approx 5.78 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

이다. 두 값의 비는 상수가 모두 약분되어 온도와 질량만으로 결정된다.

$$\frac{\overline{v_{\text{He}}^2}}{\overline{v_{\text{Ne}}^2}} = \frac{T'_{\text{He}}}{T'_{\text{Ne}}} \cdot \frac{m_{\text{Ne}}}{m_{\text{He}}} = \frac{340}{440} \cdot \frac{20}{4} = \frac{85}{22} \approx 3.86$$

제곱근을 취하면 제곱평균제곱근 속력은 $v_{\text{rms,He}} \approx 1.49 \times 10^3 \text{ m/s}$, $v_{\text{rms,Ne}} \approx 7.6 \times 10^2 \text{ m/s}$ 로 헬륨이 약 1.97 배 빠르다.

(iv) 열평형 상태 — 용기 전체가 단열이고 칸막이·용기의 열용량이 0 이므로 두 기체의 내부 에너지 합은 보존된다. 열평형 온도를 T_f 라 하면

$$(C_{\text{He}} + C_{\text{Ne}})T_f = U'_{\text{He}} + U'_{\text{Ne}} \Rightarrow (0.45 + 0.30)T_f = 285 \text{ J} \Rightarrow T_f = \frac{285}{0.75} = 380 \text{ K}$$

이다. 더 간단히는, 옮긴 열량을 Q 라 할 때 온도 차가 $\Delta T = 200 - 5.56Q$ (K, Q 는 J 단위)로 옮긴 열량에 비례해 줄어들므로, 18 J마다 100 K씩 줄어 두 번째 18 J에서 0 이 되어 두 온도가 380 K에서 만난다. 각 기체의 부피는 변하지 않으므로 압력은 절대 온도에 비례한다(P/T 일정).

$$P_{\text{He}} = (3 \times 10^5) \times \frac{380}{300} = 3.8 \times 10^5 \text{ N/m}^2, \quad P_{\text{Ne}} = (2 \times 10^5) \times \frac{380}{500} = 1.52 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

- 온도는 같아지지만 압력은 같아지지 않는다. 칸막이가 고정되어 있어 부피가 변할 수 없으므로 열평형(온도 평형)만 이루어질 뿐 역학적 평형은 요구되지 않는다.
- 압력비 $P_{\text{He}} : P_{\text{Ne}} = 2.5 : 1$ 은 같은 온도에서의 수밀도 비 $(0.3/300) : (0.2/500) = 2.5 : 1$ 과 일치한다.
- 열평형에서는 온도가 같으므로 $\bar{v}^2$ 의 비가 질량의 역비 $m_{\text{Ne}}/m_{\text{He}} = 5$ 로 바뀐다. 가벼운 분자일수록 같은 온도에서 더 빠르게 움직인다.

문제 3 균일한 자기장 속 하전 입자의 원운동

로런츠 힘 · 구심력 · 현과 반지름의 기하

전하의 부호: 음전하 ($q < 0$) 속력: $v = 2|q| BL/m$ (입사 방향 $+y$, 도착 시 $+x$ 축과 30°)

(i) 등속 원운동 — 자기력 $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ 는 항상 속도에 수직이므로 일을 하지 않는다. 따라서 속력은 변하지 않고 자기력이 구심력 역할을 하는 등속 원운동을 한다. 반지름을 r 이라 하면

$$|q| vB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv}{|q| B}, \quad \text{주기 } T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{|q| B}$$

(ii) 반지름을 기하로 결정 — 입사 지점을 원점 O 로 잡고 입사 속도를 $+y$ 방향이라 하자. 원의 중심은 속도에 수직인 방향, 즉 x 축 위에 있다. [그림 2]에서 입자가 $+x$ 쪽으로 휘므로 중심은 $(r, 0)$ 이다. 도착점 $(x_1, y_1) = (L, \sqrt{3}L)$ 이 이 원 위에 있어야 하므로

$$(L-r)^2 + (\sqrt{3}L)^2 = r^2 \Rightarrow L^2 - 2Lr + 3L^2 = 0 \Rightarrow r = 2L$$

이다. 같은 결과를 현의 길이로도 얻는다. 현 $\overline{OP}$ 의 길이는 $\sqrt{L^2 + 3L^2} = 2L$ 이고 중심에서 두 점까지 거리가 각각 r 이므로, $r = 2L$ 이면 세 변이 모두 $2L$ 인 정삼각형이 되어 중심각이 60° 임을 알 수 있다.

(iii) 전하의 부호 — 자기장은 종이면으로 들어가는 방향이므로 $\vec{B} = -B\hat{z}$ 이고, 입사 속도는 $\vec{v}_0 = v\hat{y}$ 이다. 이때

$$\vec{F} = q\vec{v}_0 \times \vec{B} = q(v\hat{y}) \times (-B\hat{z}) = -qvB(\hat{y} \times \hat{z}) = -qvB\hat{x}$$

이다. 원운동을 하려면 이 힘이 원의 중심 $(2L, 0)$ 쪽, 즉 $+x$ 방향이어야 하므로 $-qvB > 0$, 곧 $q < 0$ 이다.

입자는 음전하를 띤다.

같은 자기장에서 $+y$ 로 움직이는 양전하는 $-x$ 쪽으로 휘어 왼쪽으로 돌지만, [그림 2]의 입자는 오른쪽(시계 방향)으로 휘고 있다.

(iv) 속도 — $r = 2L$ 을 $r = mv/(|q| B)$ 에 넣으면 속력이 정해진다.

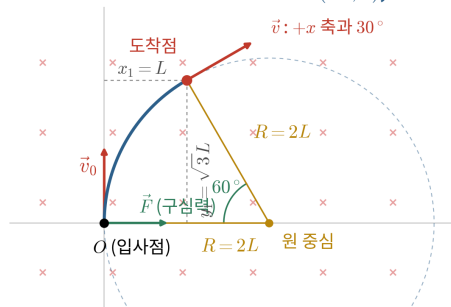
$$v = \frac{|q| Br}{m} = \frac{2|q| BL}{m}$$

방향은 입사 순간 $+y$, 도착 순간에는 시계 방향으로 60° 돌아간 방향, 즉 $+x$ 축과 30° 를 이루는 $\left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)$ 방향이다. 크기는 처음과 같다.

• 걸린 시간 — 각속도 $\omega = v/r = |q| B/m$ 은 속력과 무관하므로 중심각 $60^\circ = \pi/3$ 를 도는 데 $t = \pi m/(3|q| B) = T/6$ 이 걸린다.

• 속력과 자기장의 관계 — $r \propto v/B$ 이므로 도착점을 지나려면 $v/B = 2|q| L/m$ 을 만족해야 한다. 호의 길이 $r \cdot \pi/3 = 2\pi L/3$ 을 속력으로 나누어도 같은 시간이 나온다.

반지름 $2L$ 의 시계 방향 원운동 — 중심 $(2L, 0)$, 회전각 60°



예시 작도 — 중심 $(2L, 0)$, 반지름 $2L$ 의 시계 방향 원호. 현의 길이도 $2L$ 이어서 중심각이 60° 가 된다.

문제 4 움직이는 음원과 관측자 사이의 도플러 효과

도플러 효과 · 음파의 전파 시간

4 ~ 5.2 초, 6.4 ~ 7.6 초, 8.8 ~ 10 초에 5000/3 Hz (≈ 1667 Hz) 14 ~ 18 초에 500 Hz

(i) 두 물체의 위치와 만나는 시각 — 동쪽을 $+x$, 처음 스피커의 위치를 원점으로 잡으면 $x_{\text{스피커}} = 50t$, $x_{\text{마이크}} = 2000 - 150t$ (단위 m, s)이다. 두 위치가 같아지는 시각은 $200t = 2000$ 에서 $t = 10$ 초(위치 500 m)이다. 이 순간을 경계로 두 물체는 **가까워지다가 멀어지므로** $t < 10$ 과 $t > 10$ 을 나누어 따져야 한다.

(ii) **가까워지는 동안** ($t < 10$) — 관측자가 음원 쪽으로, 음원이 관측자 쪽으로 움직이므로

$$f_1 = f \frac{v + v_o}{v - v_s} = 1000 \cdot \frac{350 + 150}{350 - 50} = 1000 \cdot \frac{500}{300} = \frac{5000}{3} \text{ Hz} \approx 1667 \text{ Hz}$$

이다. 시각 t 에 위치 $50t$ 에서 나온 소리는 동쪽으로 350 m/s 로 퍼지므로, 마이크에 닿는 시각 τ 는

$$50t + 350(\tau - t) = 2000 - 150\tau \Rightarrow 500\tau = 2000 + 300t \Rightarrow \tau = 0.6t + 4$$

를 만족한다. 발신 구간 $[0, 2]$, $[4, 6]$, $[8, 10]$ 을 넣으면 수신 구간은 차례로 $[4, 5.2]$, $[6.4, 7.6]$, $[8.8, 10]$ 이며 모두 5000/3 Hz 로 측정된다.

(iii) **멀어지는 동안** ($t > 10$) — 스피커가 마이크의 동쪽으로 지나갔으므로 이제 관측자와 음원은 서로 멀어진다.

$$f_2 = f \frac{v - v_o}{v + v_s} = 1000 \cdot \frac{350 - 150}{350 + 50} = 1000 \cdot \frac{200}{400} = 500 \text{ Hz}$$

이때 소리는 서쪽으로 진행해야 마이크에 닿으므로

$$50t - 350(\tau - t) = 2000 - 150\tau \Rightarrow 400t - 200\tau = 2000 \Rightarrow \tau = 2t - 10$$

이다. ($t = 10$ 을 넣으면 $\tau = 10$ 으로 (ii)의 결과와 매끄럽게 이어진다.) 발신 구간을 넣으면

- $[12, 14] \rightarrow [14, 18]$: 500 Hz 로 측정된다.
- $[16, 18] \rightarrow [22, 26]$: 20 초를 넘으므로 주어진 시간 안에는 측정되지 않는다.

0 초부터 20 초 사이에 마이크가 소리를 듣는 구간은

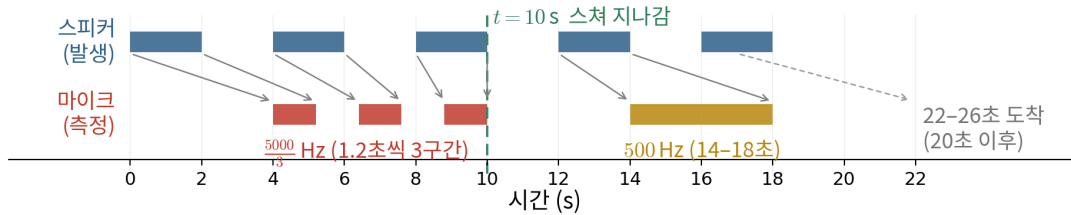
$$5000/3 \text{ Hz} \rightarrow 4 \sim 5.2 \text{ s}, 6.4 \sim 7.6 \text{ s}, 8.8 \sim 10 \text{ s}$$

$$500 \text{ Hz} \rightarrow 14 \sim 18 \text{ s}$$

총 $1.2 \times 3 + 4 = 7.6$ 초 동안 소리가 측정된다.

물리적 의미 — 진동수 변화와 시간 구간의 변화는 서로 맞물려 있다.

- **가까워질 때** — 2 초 동안 낸 소리가 1.2 초로 압축되어 들리고, 압축 비율 0.6 은 진동수 비의 역수 $f/f_1 = 0.6$ 과 같다. 파동의 개수가 보존되므로 짧은 시간에 같은 수의 마루가 도달하여 진동수가 높아진다.
- **멀어질 때** — 2 초 동안 낸 소리가 4 초로 늘어나 들리고, 늘어난 비율 2 는 $f/f_2 = 1000/500 = 2$ 와 같다.
- **무음 구간** — 스피커가 소리를 내지 않는 2 초는 가까워질 때 1.2 초, 멀어질 때 4 초의 무음으로 들린다. 10 ~ 14 초 사이가 들리지 않는 것은 스피커가 10 ~ 12 초에 소리를 내지 않았기 때문이다.



예시 작도 — 발신 구간(위)과 수신 구간(아래)의 대응. $t = 10$ 초를 경계로 시간 구간이 압축에서 신장으로 바뀐다.