

03

도플러 효과

수록 구성

- 개념 기본 문제
- 개념 적용 문제
- 1등급 도전 문제
- 정답과 해설

03

도플러 효과

핵심 내용 **마라보기**

● 파원과 관찰자의 상대적 운동에 따라 관측되는 파동의 진동수가 달라지는 도플러 효과가 나타나며, 이는 물체의 속도 측정 등 다양한 장치에 이용된다. ●●

1 도플러 효과

사이렌을 울리면서 달리는 소방차의 사이렌 소리를 들으면, 소방차가 다가올 때와 멀어질 때 사이렌 소리의 높낮이가 다르게 들린다. 이처럼 소방차의 사이렌 소리의 높낮이가 달라지는 현상은 도플러 효과로 설명된다.

1. 도플러 효과

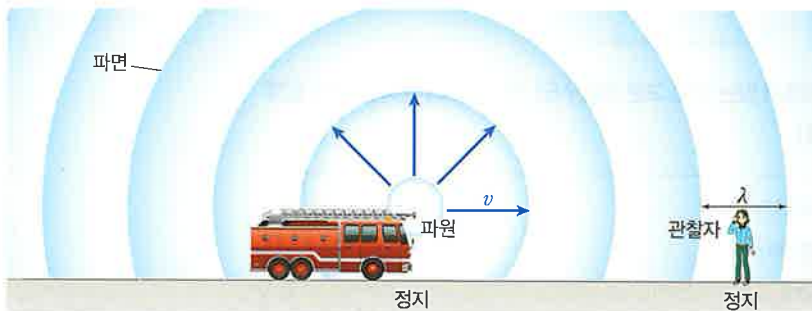
도로를 지나가는 소방차의 사이렌 소리를 들으면 소방차가 가까워질 때는 실제보다 높은 소리로 들리고, 소방차가 멀어질 때는 실제보다 낮은 소리로 들린다. 소방차의 사이렌 소리의 높낮이가 다르게 들리는 까닭은 소방차가 관찰자에 가까워질 때와 멀어질 때 관찰자가 듣는 *소리의 진동수가 달라지기 때문이다. 이처럼 파원과 관찰자의 상대적 운동에 따라 관찰자가 측정하는 파동의 진동수가 변하는 현상을 도플러 효과라고 한다.

2. 파원과 관찰자가 모두 정지해 있을 때 소리의 진동수

소방차(파원)에서 진동수가 f , 파장이 λ 인 일정한 음파(사이렌 소리)를 발생시키고 있고, 공기 중에서 진행하는 음파의 속력을 v 라고 하자. 파원과 관찰자가 모두 정지해 있을 경우, 시간 t 동안 음파의 이동 거리는 vt 이므로 이 거리만큼 관찰자의 귀를 지나가는 파면의 수는 $\frac{vt}{\lambda}$ 가 된다. 파동의 한 파면이 지날 때마다 한 번 진동하므로 관찰자가 듣는 소리의 진동수 f' 는 다음과 같이 파원의 진동수와 같다.

$$f' = \frac{vt}{\lambda} = \frac{v}{\lambda} = f$$

즉, 파원과 관찰자가 모두 정지해 있을 때는 도플러 효과가 나타나지 않는다.



▲ 파원과 관찰자가 모두 정지해 있을 때 소방차의 파원이 점파원이고 매질이 균일하다면, 음파는 모든 방향으로 동일한 속력으로 진행하므로 구면파의 형태로 퍼져 나간다.

도플러

(Doppler, J. C., 1803~1853)

오스트리아의 물리학자이며, 도플러 효과는 그의 이름을 따서 명명되었다. 도플러는 1842년에 음파와 빛 모두에 대하여 이 효과를 예측하였다.

파면

파동의 마루나 골과 같이 위상이 같은 점들을 연결한 선이나 면을 파면이라고 한다.

- 파동의 진행 방향과 파면은 서로 수직이다.
- 위상이 같은 이웃한 파면 사이의 거리는 파장이 된다.

파동의 전파 속력

파동이 한 주기(T) 동안 한 파장(λ)만큼 전파하므로, 파동의 전파 속력(v)은 다음과 같다.

$$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$

용어 리마인드

* 소리의 진동수 [중학교 과학]

소리의 진동수가 클수록 높은 소리로 들리고, 진동수가 작을수록 낮은 소리로 들린다.

개념 기본 문제

- 01** 그림은 진동수가 일정한 사이렌 소리를 내는 소방차가 일정한 속력으로 지면에 정지해 있는 관찰자 A와 B를 잇는 직선을 따라 A로부터 B를 향해 접근하는 것을 나타낸 것이다. 그림에서 곡선은 한 주기 간격으로 파면을 나타낸 것이다.



A, B가 측정한 사이렌 소리에 대하여 다음 물리량의 크기를 비교하시오. (단, 공기의 온도는 일정하다.)

- (1) 파장(λ_A, λ_B)
- (2) 전파 속력(v_A, v_B)
- (3) 진동수(f_A, f_B)

- 02** 그림은 진동수가 1020 Hz인 소리를 내는 자동차가 정지해 있고, 관찰자 A와 B가 각각 오른쪽으로 3 m/s의 속력으로 운동하는 것을 나타낸 것이다. 자동차와 A, B는 동일 직선상에서 운동하고, 소리의 속력은 340 m/s이다.



- (1) 관찰자 A, B가 듣는 소리의 진동수는 각각 몇 Hz인지 구하시오.
- (2) A, B의 속력이 각각 2배가 되었을 때, A, B가 듣는 소리의 진동수 차이는 처음의 몇 배가 되는지 구하시오.

- 03** 그림은 전동 기차가 진동수가 320 Hz인 경적 소리를 울리며 역을 20 m/s의 속력으로 통과하는 모습을 나타낸 것이다. 소리의 속력은 340 m/s이다.



- (1) 기차가 역으로 다가오는 동안, 역에 서 있는 사람이 듣는 소리의 진동수는 몇 Hz인지 구하시오.
- (2) 역을 통과한 기차가 멀어지는 동안, 역에 서 있는 사람이 듣는 소리의 진동수는 몇 Hz인지 소수점 첫째 자리에서 반올림하여 구하시오.
- (3) 기차가 역으로 다가오는 동안, 역에 서 있는 사람이 듣는 소리의 파장은 몇 m인지 구하시오.

- 04** 그림 (가)는 음파 측정기가 정지해 있는 음원을 향해 접근하는 모습을, (나)는 정지해 있는 음파 측정기를 향해 음원이 접근하는 모습을 나타낸 것이다. (가)와 (나)에서 음파 측정기 또는 음원이 접근하는 속력과 음원에서 방출하는 음파의 진동수는 각각 v 와 f 로 서로 같다. 소리의 속력은 V 로 일정하다.



(가), (나)의 음파 측정기에서 측정한 소리의 진동수 $f_{(가)}, f_{(나)}$ 의 크기를 비교하시오.

- 05** 그림은 진동수가 f 인 소리를 발생하는 자동차가 벽을 향해 v 의 일정한 속력으로 접근하는 모습을 나타낸 것이다. 소리의 속력은 V 로 일정하고, 자동차에 탄 관찰자는 벽에서 반사된 소리를 측정하고 있다. (단, 자동차는 벽에 수직인 직선을 따라 움직인다.)



- (1) 벽에서 감지한 소리의 진동수를 구하시오.
- (2) 자동차에 탄 관찰자가 측정한 벽에서 반사된 소리의 진동수를 구하시오.

- 06** 그림 (가), (나)는 진동수가 f 인 소리를 발생하는 음원과 음파 측정기가 동일 직선상에서 각각 v 의 속력으로 가까워지는 것과 멀어지는 것을 나타낸 것이다. 소리의 속력은 V 로 일정하다.



- (가), (나)의 음파 측정기에서 측정한 소리의 진동수가 각각 f_1, f_2 일 때, $\frac{f_1}{f_2}$ 을 구하시오.

- 07** 도플러 효과를 이용하는 예로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 야구공의 속력을 측정하는 스피드 건
- ㄴ. 구름의 움직임을 관측하는 기상 레이더
- ㄷ. 은하로부터 오는 빛의 스펙트럼을 관측하여 은하의 후퇴 속도를 계산할 때
- ㄹ. 천체 망원경의 렌즈나 거울의 표면을 코팅하여 반사되는 빛을 줄일 때

- ① ㄱ, ㄴ ② ㄱ, ㄷ ③ ㄴ, ㄹ
- ④ ㄱ, ㄴ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ, ㄹ

- 08** 그림은 레이더에서 진동수가 f_0 인 전파를 구름을 향해 발사하고, 구름에서 반사된 전파(반사 전파)가 레이더 쪽으로 전달되는 것을 나타낸 것이다.



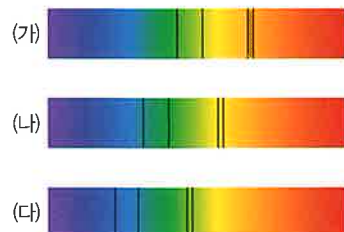
- 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 공기의 온도는 일정하다.)

보기

- ㄱ. 구름이 레이더 쪽으로 접근할 때 레이더에 도달하는 반사 전파의 진동수는 f_0 보다 크다.
- ㄴ. 구름이 레이더 쪽으로 접근할 때 레이더에 도달하는 반사 전파의 속력은 증가한다.
- ㄷ. 구름이 레이더로부터 멀어질 때 구름의 속력이 클수록 레이더에 도달하는 반사 전파의 진동수는 f_0 보다 더 작아진다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

- 09** 그림 (가), (나), (다)는 어떤 은하에서 온 빛의 흡수 스펙트럼을 나타낸 것으로, 은하가 지구로부터 멀어질 때(A), 지구 쪽으로 가까워질 때(B), 지구로부터 일정한 거리에 있을 때(C)를 순서 없이 나타낸 것이다.



- (가)~(다)에 해당하는 A~C를 옳게 짝 지으시오.

개념 적용 문제

▶ 파원만 움직일 때의 도플러 효과

01 다음은 도플러 효과에 대한 설명이다.

파장이 λ 이고 진동수가 f 인 음파를 발생하는 파원이 정지한 관찰자에게 v 의 속력으로 접근하면 관찰자가 측정한 음파의 파장 λ' 는 λ 보다 짧다. 파원에서 음파의 속력을 V 라고 할 때, $\lambda = \text{㉠}$ 이므로 $\lambda' = \text{㉡}$ 이다. 따라서 관찰자가 측정한 음파의 진동수 $f' = \text{㉢}$ 이다.



▷ 음파 주기를 T 라고 하면, 파원이 접근할 때 관찰자가 측정하는 파장은 $\lambda - vT$ 로 감소한다.

(가), (나), (다)에 들어갈 내용을 옳게 짝 지은 것은? (단, 음파의 속력 V 는 일정하다.)

- | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| (가) | (나) | (다) | (가) | (나) | (다) |
| ① $\frac{v}{f}$ | $\frac{V-v}{f}$ | $\left(\frac{V}{V-v}\right)f$ | ② $\frac{v}{f}$ | $\frac{V+v}{f}$ | $\left(\frac{V+v}{V}\right)f$ |
| ③ $\frac{V}{f}$ | $\frac{V-v}{f}$ | $\left(\frac{V}{V-v}\right)f$ | ④ $\frac{V}{f}$ | $\frac{V-v}{f}$ | $\left(\frac{V+v}{V}\right)f$ |
| ⑤ $\frac{V}{f}$ | $\frac{V+v}{f}$ | $\left(\frac{V}{V-v}\right)f$ | | | |

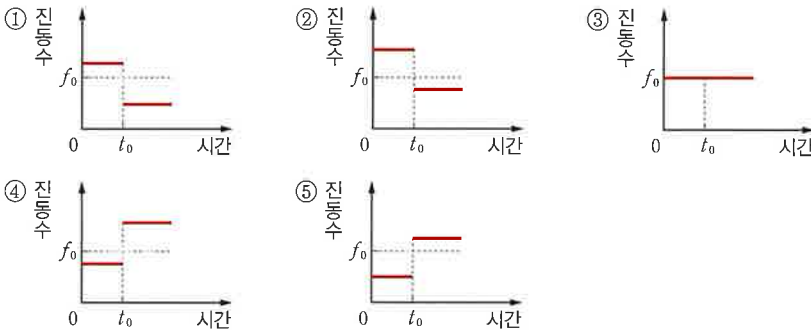
▶ 파원만 움직일 때의 도플러 효과

02 그림은 직선 도로변에 서 있는 관찰자 옆으로 진동수가 f_0 인 경고음을 울리는 구급차가 일정한 속력으로 스쳐 지나가는 모습을 나타낸 것이다. 시간이 t_0 인 순간 구급차가 관찰자 옆을 지나갔다.



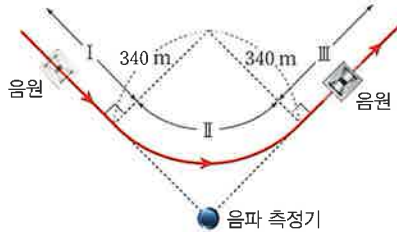
▷ 정지한 관찰자에 대하여 파원이 접근할 때 측정되는 진동수는 $f' = \frac{V}{V-v}f_0$ 이고, 파원이 멀어질 때 측정되는 진동수는 $f' = \frac{V}{V+v}f_0$ 이다.

관찰자가 듣는 경고음의 진동수를 시간에 따라 나타낸 것으로 가장 적절한 것은? (단, 소리의 속력은 일정하며, 구급차는 직선 도로를 따라 운동한다.)



▶ 파원만 움직일 때의 도플러 효과와 구심 가속도

- 03** 진동수가 399 Hz인 소리를 발생하는 음원이 그림과 같이 직선 구간 I, 원형 구간 II, 직선 구간 III을 일정한 속력으로 지나고 있다. II는 반지름이 340 m인 원의 일부이다. 음원이 I과 III에서 운동할 때, I과 III의 연장선이 만나는 지점에 고정된 음파 측정기가 측정한 소리의 진동수는 각각 f_1, f_3 이다.



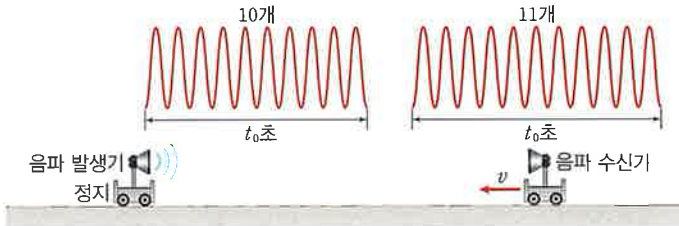
▷ 진동수가 f 인 소리를 내는 음원의 속력이 v , 소리의 속력이 V 라면, 음원이 관찰자에 접근할 때와 멀어질 때의 도플러 효과는 $f' = \frac{V}{V \mp v} f$ 이다. 속력 v 로 반지름 r 인 등속 원운동을 하는 물체의 구심 가속도 크기는 $a = \frac{v^2}{r}$ 이다.

$f_1 - f_3 = 40$ Hz일 때, II에서 음원의 구심 가속도 크기는? (단, 음원의 크기는 무시하며, 소리의 속력은 340 m/s로 일정하다.)

- ① 0.85 m/s² ② 1.7 m/s² ③ 2.55 m/s² ④ 3.4 m/s² ⑤ 5.1 m/s²

▶ 관찰자만 움직일 때의 도플러 효과

- 04** 그림과 같이 정지해 있는 음파 발생기에서는 t_0 초 동안 10개의 펄스가 연속해서 발생하고, 이때 음파 발생기를 향하여 속력 v 로 접근하는 음파 수신기에는 동일한 시간 t_0 초 동안 총 11개의 펄스가 수신된다.



▷ 소리의 속력이 V 이고 관찰자가 v 의 속력으로 정지해 있는 음원에 접근할 때, t_0 초 동안 관찰자를 지나가는 소리의 길이는 $Vt_0 + vt_0$ 이다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 소리의 속력은 V 로 일정하고, 음파 수신기는 직선상에서 운동한다.)

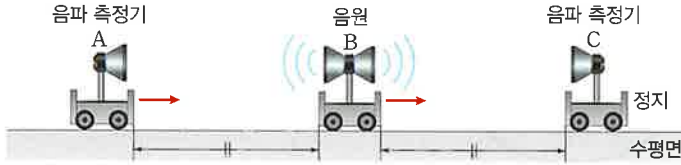
보기

- ㄱ. 음파 발생기에서 발생하는 소리의 진동수는 $\frac{10}{t_0}$ 이다.
 ㄴ. 소리의 속력은 $11v$ 이다.
 ㄷ. 음파 발생기에서 발생한 펄스 1개의 파장은 vt_0 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 도플러 효과

- 05** 그림과 같이 음파 측정기 A와 음원 B가 정지해 있는 음파 측정기 C를 향해 동일 직선상에서 각각 등속 직선 운동을 한다. A와 B 사이의 거리는 B와 C 사이의 거리와 매 순간 같고, B는 A, C와 동시에 만난다. A, B, C가 만나기 전까지 A와 C가 측정한 소리의 진동수는 각각 f_1, f_3 이다. B는 진동수가 일정한 소리를 내고, 소리의 속력은 v 로 일정하다.



$f_1 : f_3 = 44 : 45$ 일 때, B의 속력은?

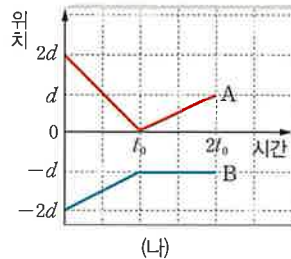
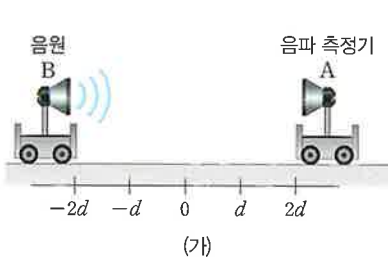
- ① $\frac{v}{9}$ ② $\frac{v}{8}$ ③ $\frac{v}{7}$ ④ $\frac{v}{6}$ ⑤ $\frac{v}{5}$

➤ 진동수가 f 인 소리의 속력 V , 음원의 속력 v_s , 관찰자의 속력 v_o 일 때, 도플러 효과로 인해 측정되는 소리의 진동수 f' 는 다음과 같다.

$$f' = \frac{V \pm v_o}{V \mp v_s} f$$

➤ 파원과 관찰자가 모두 움직일 때의 도플러 효과

- 06** 그림 (가)는 음파 측정기 A와 일정한 진동수 f_0 인 소리를 내는 음원 B의 모습을 나타낸 것이고, (나)는 동일 직선상에서 운동하고 있는 A, B의 위치를 시간에 따라 나타낸 것이다. 시간이 $\frac{t_0}{2}$ 일 때 A가 측정한 소리의 진동수는 $\frac{5}{2}f_0$ 이다.



➤ 도플러 효과로 인해 측정되는 소리의 진동수 f' 는 $f' = \frac{V \pm v_o}{V \mp v_s} f_0$ 이다. 위치·시간 그래프의 기울기로부터 음원과 관찰자의 속력을 구하여 대입한다.

$\frac{3}{2}t_0$ 일 때 A가 측정한 소리의 진동수는? (단, 소리의 속력은 일정하다.)

- ① $\frac{1}{5}f_0$ ② $\frac{1}{4}f_0$ ③ $\frac{1}{3}f_0$ ④ $\frac{2}{5}f_0$ ⑤ $\frac{2}{3}f_0$

도전 문제

정답과 해설 58쪽

➤ 도플러 효과 식의 적용

07 그림은 진동수가 f_0 인 소리를 발생하는 자동차가 벽을 향해 v_0 의 속력으로 접근하는 것을 나타낸 것으로, 자동차에 탄 관찰자는 벽에서 반사된 소리를 듣고 있다. 벽은 자동차 쪽으로 v 의 속력으로 움직이고, 소리의 속력은 V 로 일정하다.



➤ 벽이 반사한 소리의 진동수는 벽에서 측정(감지)하는 소리의 진동수와 같다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 자동차와 벽은 벽면에 수직인 직선상에서 운동한다.)

보기

ㄱ. 정지한 자동차가 발생하는 소리의 파장은 $\frac{V-v_0}{f_0}$ 이다.

ㄴ. 벽에서 반사된 소리의 파장은 $\frac{(V-v_0)(V-v)}{(V+v)f_0}$ 이다.

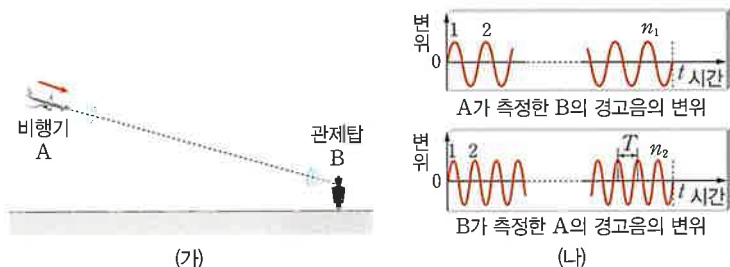
ㄷ. 관찰자가 듣는 벽에서 반사된 소리의 진동수는 $\frac{(V+v_0)(V+v)}{(V-v)(V-v_0)}f_0$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 파원만 움직일 때의 도플러 효과

08 그림 (가)와 같이 경고음을 내는 비행기 A가 경고음을 내는 관제탑 B를 향해 등속 직선 운동을 하고 있다. A, B가 정지 상태에서 내는 경고음의 파장은 λ_0 로 같다. 그림 (나)는 (가)에서 시간 t 동안 A, B가 측정한 경고음의 변위를 나타낸 것으로, A가 측정한 마루의 개수는 n_1 , B가 측정한 마루의 개수는 n_2 이다. T 는 B가 측정한 A의 경고음의 이웃한 마루 사이의 시간 간격이다.

➤ A가 측정한 B의 경고음의 진동수는 $\frac{n_1}{t}$ 이고, B가 측정한 A의 경고음의 진동수는 $\frac{n_2}{t} = \frac{1}{T}$ 이다.



T 동안 A의 이동 거리가 $\frac{1}{4}\lambda_0$ 일 때, 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 소리의 속력은 일정하다.)

보기

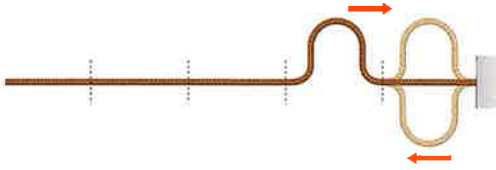
ㄱ. A가 내는 경고음의 주기는 T 이다.

ㄴ. A의 속력은 A의 경고음 속력의 $\frac{1}{3}$ 배이다.

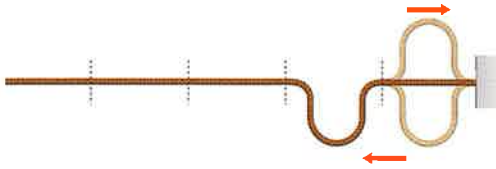
ㄷ. $n_1 : n_2 = 3 : 4$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

서로 중첩되어 상쇄되므로 ㄱ과 같은 모양이 만들어진다.



ㄷ. (나)의 파동에서 오른쪽 2개의 입사 파형이 전부 반사 되면 위상이 반대인 반사 파형 중 하나가 남아 있는 세 번째 입사 파형과 중첩되어 상쇄되므로 ㄷ과 같은 모양이 만들어진다.



[바로알기] ㄴ. 입사파가 위상이 반대인 반사파와 중첩되어도 이와 같은 모양은 나타날 수 없다.

- 07 ㄱ. 그림에서 이웃한 마루 사이의 거리가 4 m이므로 이 파동의 파장은 4 m이다.

[바로알기] ㄴ. P에서 Q로 1 m 진행하는 데 걸린 최소 시간이 0.2 s이므로 파장인 4 m를 진행하는 데 걸린 시간은 0.8 s이다. 따라서 이 파동의 진동수는 $\frac{1}{0.8 \text{ s}} = 1.25 \text{ Hz}$ 이다.

ㄷ. 만약 파동이 $-x$ 방향으로 진행한다면, P에서 Q로 바뀌는 데 걸린 최소 시간이 Q에서 P로 바뀌는 데 걸린 최소 시간보다 커야 한다. 하지만 (나)에서 P에서 Q로 바뀌는 데 걸린 최소 시간이 Q에서 P로 바뀌는 데 걸린 최소 시간보다 작으므로, 파동은 $+x$ 방향으로 진행한다.

- 08 ㄷ. 한 매질에서 진행하던 파동이 다른 매질을 만나 경계면에서 반사와 투과가 일어날 때 파동의 진동수는 변하지 않는다. 보기 ㄱ의 해설에 따라 파동의 속력이 B에서가 A에서보다 빠르므로 $v=f\lambda$ 에 의해 파장은 B에서가 A에서보다 길다.

[바로알기] ㄱ. A와 B의 경계면에서 반사 펄스와 투과 펄스가 동시에 발생하며, b 가 a 보다 크므로 같은 시간 동안 펄스가 이동한 거리는 B에서가 A에서보다 멀다. 따라서 파동의 전파 속력은 B에서가 A에서보다 빠르다.

ㄴ. 파동의 속력이 느린 A에서 빠른 B로 펄스가 진행하는 경우이므로, 두 줄의 경계면에서 자유단 반사가 일어난다. 자유단 반사에서 반사파의 위상은 입사파의 위상과 같다.

03 도플러 효과

중요 개념 체크

205쪽

- 1 도플러 2 높은, 낮은 3 커진다 4 파장

탐구 확인 문제

206쪽

1 ③

- 1 ㄱ. 소리의 속력을 V 라고 할 때 $V=f\lambda$ 이므로, A에서 발한 소리의 파장은 $\lambda = \frac{V}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{680 \text{ Hz}} = 0.5 \text{ m}$ 이다.

ㄴ. 관찰자만 음원에서 멀어질 때 도플러 효과에 의해 측정되는 진동수 $f' = \frac{V-v}{V}f$ 이다. B에서 측정한 소리의

진동수는 $678 \text{ Hz} = \frac{V-v}{V} \times 680 \text{ Hz}$ 이므로 $\frac{680-2}{680} = \frac{340-1}{340} = \frac{V-v}{V}$ 이다. 따라서 $v=1 \text{ m/s}$ 이다.

[바로알기] ㄷ. 음원만 관찰자에서 멀어지면 도플러 효과에 의해 측정되는 진동수가 음원의 진동수보다 작다. 따라서 B가 정지해 있고 A가 B에서 멀어지면, B에서 측정한 소리의 진동수는 A(음원)의 진동수인 680 Hz보다 작다.

개념 기본 문제

208쪽~209쪽

- 01 (1) $\lambda_A > \lambda_B$ (2) $v_A = v_B$ (3) $f_A < f_B$

- 02 A: 1029 Hz, B: 1011 Hz (2) 2배

- 03 (1) 340 Hz (2) 302 Hz (3) 1 m 04 $f_{(v)} < f_{(u)}$

- 05 (1) $\frac{V}{V-v}f$ (2) $\frac{V+v}{V-v}f$ 06 $\frac{(V+v)^2}{(V-v)^2}$

- 07 ④ 08 ③ 09 (가) - A, (나) - C, (다) - B

- 01 (1) 파면 사이의 간격이 A에서가 B에서보다 크므로 측정 한 사이렌 소리의 파장은 A에서가 B에서보다 길다.

(2) 동일한 공기(매질)에서 소리가 진행하므로 A에서와 B에서 측정한 사이렌 소리의 전파 속력은 서로 같다.

(3) 파동의 전파 속력 $v=f\lambda$ 식에서 $f=\frac{v}{\lambda}$ 이다. 소리의 전파 속력은 A에서와 B에서가 서로 같고, 파장은 A에서가 B에서보다 길므로 진동수는 A에서가 B에서보다 작다.

- 02 (1) 음원이 정지해 있고 관찰자 A, B가 운동한다. 도플러 효과에 의해 3 m/s의 속력으로 음원에 접근하는 A가 듣는 소리의 진동수는 다음과 같다.

$$\frac{340 \text{ m/s} + 3 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \times 1020 \text{ Hz} = 1029 \text{ Hz}$$

또한 3 m/s의 속력으로 음원으로부터 멀어지는 B가 듣는 소리의 진동수는 다음과 같다.

$$\frac{340 \text{ m/s} - 3 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \times 1020 \text{ Hz} = 1011 \text{ Hz}$$

(2) 소리의 속력을 V , 관찰자의 속력을 v 라고 할 때 관찰자만 움직일 때의 진동수는 도플러 효과에 의해

$$f_A = \frac{V+v}{V} f_0, f_B = \frac{V-v}{V} f_0 \text{이다. 따라서 A, B가 듣는}$$

소리의 진동수 차이는 $f_A - f_B = \frac{2v}{V} f_0$ 으로, 이는 관찰자의 속력 v 에 비례한다. 따라서 A, B의 속력이 각각 2배가 되면 A, B가 듣는 소리의 진동수 차이도 2배가 된다.

- 03 (1) 음원인 기차가 관찰자인 사람에게 접근하므로, 도플러 효과의 관계식 $f' = \frac{v}{v - v_s} f$ 에 따라 사람이 듣는 소리의

$$\text{진동수 } f' = \frac{340 \text{ m/s}}{(340 - 20) \text{ m/s}} \times 320 \text{ Hz} = 340 \text{ Hz} \text{이다.}$$

(2) 음원인 기차가 관찰자인 사람으로부터 멀어지므로, 도플러 효과의 관계식 $f' = \frac{v}{v + v_s} f$ 에 따라 사람이 듣는 소리의

$$\text{진동수 } f' = \frac{340 \text{ m/s}}{(340 + 20) \text{ m/s}} \times 320 \text{ Hz} \approx 302 \text{ Hz} \text{이다.}$$

(3) 소리의 속력은 340 m/s이고, 기차가 역으로 다가오는 동안 사람이 듣는 소리의 진동수는 340 Hz이므로 소리의 파장은 $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ Hz}} = 1 \text{ m}$ 이다.

- 04 소리의 속력을 V 라고 할 때 (가)에서 관찰자(음파 측정기)가 음원에 가까워지므로 음파 측정기가 측정하는 진동수는 $f_{(가)} = \frac{V+v}{V} f$ 이다. (나)에서는 반대로 음원이 관찰자(음파 측정기)에 가까워지므로 음파 측정기가 측정한 진동수는 $f_{(나)} = \frac{V}{V-v} f$ 이다. 이에 따라 $\frac{f_{(가)}}{f_{(나)}} = \frac{V^2 - v^2}{V^2} < 1$ 이 성립하므로 $f_{(가)} < f_{(나)}$, 즉 음파 측정기에서 측정한 진동수의 크기는 (나)에서가 (가)에서보다 크다.

- 05 (1) 자동차에서 발생한 소리를 벽에서 관찰하는 것은 음원만 이동하는 상황이므로, 이때 벽에서 감지한 소리의 진동수를 f_1 이라고 하면 $f_1 = \frac{V}{V-v} f$ 이다.

(2) 벽에서 반사된 소리의 진동수는 f_1 과 같고, 자동차에 탄 관찰자는 벽에서 반사된 소리를 v 의 속력으로 접근하면서 듣는다. 이것은 관찰자만 이동하는 상황이므로, 관찰자가 측정하는 벽에서 반사된 소리의 진동수를 f_2 라고 하면 $f_2 = \frac{V+v}{V} f_1 = \frac{V+v}{V} \times \left(\frac{V}{V-v} f \right) = \frac{V+v}{V-v} f$ 이다.

- 06 (가)에서는 음원과 음파 측정기가 서로 가까워지므로 진동수 $f_1 = \frac{V+v}{V-v} f$, (나)에서는 음원과 음파 측정기가 서로 멀어지므로 $f_2 = \frac{V-v}{V+v} f$ 이다. 따라서 $\frac{f_1}{f_2} = \frac{(V+v)^2}{(V-v)^2}$ 이다.

- 07 ㄱ. 스피드 건은 물체를 향해 마이크로파를 발사하고 반사된 마이크로파의 진동수를 측정해 물체의 속력을 알아내는 장비로, 도플러 효과를 이용한다.

ㄴ. 기상 레이더는 방출한 전자기파가 구름 속의 입자에 반사될 때 발생하는 진동수의 변화, 즉 도플러 효과를 분석하여 구름의 움직임을 관측하는 장치이다.

ㄷ. 은하 내 별들이 방출하는 스펙트럼의 파장 변화를 측정하고, 이를 도플러 효과로 해석하면 은하의 후퇴 속도를 계산할 수 있다.

[바로알기] ㄹ. 천체 망원경의 렌즈나 거울의 표면을 코팅하여 반사파를 줄이는 것은 빛의 간섭을 이용한 것이다.

- 08 ㄱ. 전파의 속력을 V , 구름의 속력을 v 라고 하자. 구름이 레이더에 가까워질 때 구름 위치에서 감지하는 전파의 진동수를 f_1 이라고 하면 $f_1 = \frac{V+v}{V} f_0$ 이고, 이는 구름에서 반사된 전파의 진동수와 같다. 레이더에 도달하는 반사 전파의 진동수를 f_2 라고 하면 $f_2 = \frac{V}{V-v} f_1$ 이다. 따라서 $f_2 = \frac{V+v}{V-v} f_0$ 이고, $\frac{V+v}{V-v} > 1$ 이므로 f_2 는 f_0 보다 크다.
- ㄷ. 구름이 레이더로부터 멀어질 때 구름 위치에서 감지하는 전파의 진동수 $f_1 = \frac{V-v}{V} f_0$ 이고, 레이더에 도달하는 구름에서 반사된 전파의 진동수 $f_2 = \frac{V}{V+v} f_1$ 이다. 따라서 레이더에 도달하는 반사 전파의 진동수는 $f_2 = \frac{V-v}{V+v} f_0$ 이고, $\frac{V-v}{V+v} < 1$ 이므로 f_2 는 f_0 보다 작다. 이때 v 가 클수록 $\frac{V-v}{V+v}$ 값의 분모는 커지고 분자는 작아지므로 f_2 의 값은 더 작아진다.

[바로알기] ㄴ. 전파가 레이더와 구름 사이를 왕복하는 동안 매질인 공기의 상태가 변하지 않으므로 전파의 속력은 변하지 않는다.

- 09 (다)–(나)–(가) 순으로 흡수 스펙트럼이 적색 쪽에 위치한다. 따라서 (가)는 적색 이동으로 은하가 지구로부터 멀어질 때(A), (나)는 은하와 지구 사이의 거리가 일정할 때(C), (다)는 청색 이동으로 은하가 지구에 가까워질 때(B)의 흡수 스펙트럼이다.

개념 적용 문제

210쪽~213쪽

- 01 ③ 02 ② 03 ① 04 ③ 05 ① 06 ⑤
07 ④ 08 ②

- 01 (가) 파동이 한 주기 T 동안 진행한 거리가 한 파장이므로, 음파의 파장 $\lambda = VT = \frac{V}{f}$ 이다.

(나) 파동의 파면이 한 파장 진행하는 동안 파원이 관찰자 쪽으로 vT 만큼 이동하여 다음 파면을 만들므로, 관찰자가 측정한 음파의 파장 $\lambda' = \lambda - vT = \frac{V}{f} - \frac{v}{f}$ 이다.

(다) 파원이 운동하더라도 매질인 공기가 달라지는 것은 아니므로 관찰자가 측정한 음파의 속력은 V 로 같다. 따라서 $\lambda' = \frac{V}{f'} = \frac{V}{f} - \frac{v}{f}$ 에서 $f' = \left(\frac{V}{V-v}\right)f$ 이다.

- 02 소리의 속력을 V , 구급차의 속력을 v 라고 하자. $0 \sim t_0$ 동안, 구급차가 정지한 관찰자에 접근하므로 관찰자가 듣는 경고음의 진동수는 $f_1 = \frac{V}{V-v}f_0$ 이다. t_0 이후, 구급차가 관찰자로부터 멀어지므로 관찰자가 듣는 경고음의 진동수는 $f_2 = \frac{V}{V+v}f_0$ 이다. 따라서 $f_1 > f_0$, $f_2 < f_0$ 이다. 또한 관찰자가 듣는 소리의 진동수와 원래 진동수를 비교하면 $(f_1 - f_0) = \frac{v}{V-v}f_0 > (f_0 - f_2) = \frac{v}{V+v}f_0$ 이므로, 이를 나타낸 그래프로는 ②가 적절하다.

- 03 음원이 구간 I에서는 음파 측정기에 접근하고, 구간 II에서는 음파 측정기로부터 멀어진다. 음원의 속력을 v 라고 하면 두 진동수 $f_1 = \frac{340}{340-v} \times 399$, $f_3 = \frac{340}{340+v} \times 399$ 이다. 따라서 제시된 조건 $f_1 - f_3 = 40 = \frac{340 \times 2v}{340^2 - v^2} \times 399$

에서 $340^2 - v^2 = 17 \times 399v$ 이다. 이 식을 정리하면 $(v-17) \times (v+17 \times 400) = 0$ 에서 $v = 17 \text{ m/s}$ 이다. 구간 II에서는 17 m/s 의 속력으로 반지름이 340 m 인 등속 원운동을 하므로, 음원의 구심 가속도 크기 a 는 다음과 같다.

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{(17 \text{ m/s})^2}{340 \text{ m}} = 0.85 \text{ m/s}^2$$

- 04 ㄱ. 진동수는 1초 동안 파동이 진동하는 횟수이므로, 음파 발생기에서 t_0 초 동안 10개의 펄스가 연속적으로 발생할 때 소리의 진동수는 $f_0 = \frac{10}{t_0}$ 이다.

ㄴ. 소리의 속력이 V 이고, 음파 수신기가 속력 v 로 정지해 있는 음파 발생기에 접근할 때, t_0 초 동안 음파 수신기에 도달하는 전체 펄스의 길이는 $Vt_0 + vt_0$ 이다. 펄스의 파장을 λ 라고 하면, 총 11개의 펄스가 음파 수신기에 수신되므로 $Vt_0 + vt_0 = 11\lambda$ 이고, $Vt_0 = 10\lambda$ 이다. 따라서 펄스 1개의 파장 $\lambda = vt_0$ 이다.

[바로알기] ㄴ. 음파 수신기에서 t_0 초 동안 11개의 펄스가 연속적으로 수신되었으므로, 음파 수신기에서 측정하는 소리의 진동수는 $\frac{11}{t_0}$ 이다. 즉, 정지해 있는 음원을 향해 속력 v 로 접근하는 음파 수신기에서 측정하는 소리의 진동수는 $f = \frac{V+v}{V}f_0 = \frac{V+v}{V} \frac{10}{t_0} = \frac{11}{t_0}$ 이다. 이를 정리하면 소리의 속력 $V = 10v$ 이다.

- 05 A와 B 사이의 거리는 B와 C 사이의 거리와 매 순간 같으므로 A와 B, B와 C 사이의 상대 속도의 크기는 같다. 따라서 B의 속력을 x 라고 하면 A의 속력은 $2x$ 이고, 도플러 효과 관계식에 따라 $f_1 = \frac{v+2x}{v+x}f$, $f_3 = \frac{v}{v-x}f$ 이다. 문제에 제시된 조건에서 $f_1 : f_3 = 44 : 45$ 이므로 $\frac{f_1}{f_3} = \frac{44}{45} = \frac{(v+2x)(v-x)}{(v+x)v}$ 이고, 정리하면 $(v-9x)(v+10x) = 0$ 에서 B의 속력 $x = \frac{v}{9}$ 이다.

- 06 $\frac{t_0}{2}$ 일 때 B의 속력을 v 라고 하면, (나)의 그래프 기울기를 통해 A의 속력은 $\frac{t_0}{2}$ 일 때는 $2v$, $\frac{3}{2}t_0$ 일 때는 v 이다. $\frac{t_0}{2}$ 일 때 A와 B가 서로 접근하므로, 이때 A가 측정한 소리의 진동수는 $\frac{5}{2}f_0 = \frac{V+2v}{V-v}f_0$ 이고, 이를 정리하면 B의 속력 $v = \frac{V}{3}$ 이다.

$\frac{3}{2}t_0$ 일 때 A는 정지해 있는 B로부터 v 의 속력으로 멀어지

므로 A가 측정한 소리의 진동수는 $\frac{V-v}{V}f_0 = \frac{2}{3}f_0$ 이다.

- 07 나. 자동차(음원)는 v_0 의 속력으로, 벽(관찰자)은 v 의 속력으로 서로를 향해 접근하므로 벽에서 감지하는 소리의 진동수는 $f_1 = \frac{V+v}{V-v_0}f_0$ 이다. 벽에서 반사된 소리는 진동수가 벽에서 감지한 소리의 진동수와 같으며, 파장은 벽이 v 로 접근하므로 $\lambda_1 = \frac{V-v}{f_1} = \frac{(V-v_0)(V-v)}{(V+v)f_0}$ 이다.

다. 자동차에 탄 관찰자가 v_0 의 속력으로, 벽(음원)이 v 의 속력으로 서로를 향해 접근하므로 관찰자가 듣는 벽에서 반사된 소리의 진동수 f 는 다음과 같다.

$$f = \frac{V+v_0}{V-v}f_1 = \left(\frac{V+v_0}{V-v}\right)\left(\frac{V+v}{V-v_0}\right)f_0$$

[바로알기] ㄱ. 자동차가 발생하는 소리의 고유 진동수가 f_0 , 소리의 속력이 V 이므로 소리의 파장은 $\lambda_0 = \frac{V}{f_0}$ 이다.

- 08 경고음의 속력을 V , 비행기 A의 속력을 v , A와 B가 내는 경고음의 진동수를 $f = \frac{V}{\lambda_0}$ 라고 하자. (나)에서 t 동안 A가 측정한 B의 경고음의 마루 개수는 n_1 이므로, A가 측정한 진동수는 $f_1 = \frac{n_1}{t} = \frac{V+v}{V}f$ 이다. B가 측정한 A의 경고음의 마루 개수는 n_2 이므로, B가 측정한 진동수는 $f_2 = \frac{n_2}{t} = \frac{V}{V-v}f$ 이다. 한편 T 는 B가 측정한 주기이므로 $f_2 = \frac{1}{T}$ 이다. 또한 T 동안 $\frac{1}{4}\lambda_0$ 만큼 이동하는 A의 속

$$력 v = \frac{\frac{1}{4}\lambda_0}{T} = \frac{\lambda_0}{4}f_2 \text{에서 } v = \frac{V}{4f}\left(\frac{V}{V-v}\right)f = \frac{V^2}{4(V-v)}$$

이고, 이를 정리하면 $(V-2v)^2=0$ 에서 $v = \frac{V}{2}$ 이다.

다. $v = \frac{V}{2}$ 이므로 $f_1 = \frac{n_1}{t} = \frac{V+v}{V}f = \frac{3}{2}f$, $f_2 = \frac{n_2}{t} = \frac{V}{V-v}f = 2f$ 이다. 따라서 $n_1 : n_2 = 3 : 4$ 이다.

[바로알기] ㄱ. B가 측정한 A가 내는 경고음의 진동수가 $\frac{1}{T}$ 이고, 이것은 A가 내는 경고음의 진동수보다 크다. 따라서 A가 내는 경고음의 진동수는 $\frac{1}{T}$ 보다 작으므로 A가 내는 경고음의 주기는 T 보다 크다.

나. $v = \frac{V}{2}$ 에서 A의 속력은 A의 경고음 속력의 $\frac{1}{2}$ 배이다.

04 소리의 간섭

중요 개념 체크

218쪽

1 (1) ○ (2) ×

2 반대, 상쇄

개념 기본 문제

220쪽~221쪽

- 01 ② 02 (1) 파장: 0.5 m, 진동수: 680 Hz (2) 0.5 m
03 나, 다 04 (1) A: 보강 간섭, B: 상쇄 간섭 (2) B
05 ③ 06 ② 07 ③ 08 ①
09 ② 10 ②

- 01 다. 소리의 속력 $v=f\lambda$ 이므로, 소리의 속력이 일정할 때 진동수가 증가하면 파장이 감소한다. 따라서 진동수가 증가하면 파장인 A는 감소한다.

[바로알기] ㄱ. 소리와 같은 종파에서 파장은 이웃한 밀한 곳 사이의 거리이다. A는 이웃한 밀한 곳 사이의 거리이므로 파장을 나타낸다.

나. 파동이 진행할 때 매질은 제자리에서 진동만 하고 이동하지는 않는다. 따라서 공기 분자들은 제자리에서 진동만 할 뿐 소리의 진행 방향으로 이동하지 않는다.

- 02 (1) 파장은 위상이 같은 이웃한 두 지점 사이의 거리이므로 이 소리의 파장은 0.5 m이다. 또한 소리의 속력 $v=f\lambda$ 에서 이 소리의 진동수 $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0.5 \text{ m}} = 680 \text{ Hz}$ 이다.

(2) 매질의 진폭을 증가시켜도 소리의 진동수와 파장은 변하지 않으므로, 진동판의 진폭을 2배로 증가시켜도 파장은 원래의 소리에서와 같은 0.5 m이다.

- 03 나. 진동수와 위상이 동일한 두 소리가 보강 간섭을 하는 지점에서는 두 소리의 진폭이 더해지므로 합성된 소리의 진폭은 커진다.

다. 두 파동(소리)이 반대 위상으로 중첩될 때 합성파의 진폭이 작아지는 간섭을 상쇄 간섭이라고 한다. 따라서 상쇄 간섭이 일어나는 지점에서 두 소리는 반대 위상으로 중첩된다.

[바로알기] ㄱ. 파동의 중첩과 간섭 현상은 물결파나 소리와 같은 탄성파뿐만 아니라 전자기파를 포함한 모든 파동에서 발생한다. 따라서 중첩과 간섭 현상은 입자와 구분되는 파동만의 고유한 성질이다.

04 (1) A 지점에서는 소리가 크게 들리므로 보강 간섭, B 지점에서는 소리가 작게 들리므로 상쇄 간섭이 일어난다.
 (2) 소음을 제거하려면 소음이 작게 들리게 해야 하므로, 반대 위상의 파동과 중첩되어 진폭이 작아지는 상쇄 간섭의 원리를 이용한다. 따라서 소음 제거에 이용되는 상쇄 간섭이 일어나는 지점은 B이다.

05 두 파원에서 동일한 위상으로 진동수와 진폭이 같은 소리를 발생시켰을 때, 두 파원로부터의 경로차가 반파장의 홀수 배가 되는 지점에서는 두 소리가 서로 반대 위상으로 만나 진폭이 작아지는 상쇄 간섭이 일어난다.

06 A, B에서 발생하는 소리의 진동수가 500 Hz이므로 소리의 파장은 $\frac{340 \text{ m/s}}{500 \text{ Hz}} = 0.68 \text{ m}$ 이다. 두 파원 A와 B를 연결하는 직선상에서 보강 간섭을 하는 이웃한 두 지점 사이의 거리는 반파장이다. 따라서 소리의 세기가 최대인 이웃한 두 지점 사이의 거리는 반파장인 0.34 m이다.

07 ㄱ. 스피커에 가까울수록 소리의 세기가 크므로 소리 세기의 최댓값은 스피커에 더 가까운 A가 B보다 크다.
 ㄴ. A, B가 이동하는 동안 두 스피커로부터의 경로차가 변하므로 두 스피커의 소리가 보강 간섭, 상쇄 간섭하여 소리의 세기가 큰 곳과 작은 곳이 반복된다.

[바로알기] ㄷ. 두 파동이 반대 위상으로 중첩될 때 상쇄 간섭이 일어난다. 소리의 세기가 작은 곳은 상쇄 간섭이 일어나는 곳이므로 두 스피커에서 발생한 소리가 반대 위상으로 중첩된다.

08 ㄱ. 소음을 제거하는 원리는 소음과 진폭이 같고 위상이 반대인 소리를 만들어 상쇄 간섭이 일어나게 하는 것이다. 따라서 ㉠과 ㉡의 위상은 서로 반대이다.

[바로알기] ㄴ. 같은 진폭의 두 소리가 반대 위상으로 중첩되어 상쇄될 때 합성파의 진폭이 0이 된다. 따라서 ㉠과 ㉡의 진폭은 서로 같아야 한다.

ㄷ. 소음 제거 원리는 상쇄 간섭 현상을 이용한다.

09 ㄷ. 동일한 소리가 나오는 두 스피커 주위에서 소리가 잘 들리는 않는 지점이 있다는 것은 상쇄 간섭 현상으로 설명할 수 있다.

[바로알기] ㄱ. 공사장 소음이 밤에 더 멀리 전달되는 것은 파동의 굴절로 설명할 수 있다.

ㄴ. 수영장 물의 깊이가 실제보다 얇게 보이는 현상은 빛의 굴절로 설명할 수 있다.

10 ㄷ. 소리가 작게 들리는 좌석은 두 스피커에서 발생한 소리가 상쇄 간섭하는 곳이다. 두 스피커에서 발생한 소리의 진동수, 진폭, 위상이 같으므로, 상쇄 간섭이 일어나기 위해서는 두 스피커로부터의 경로차가 반파장의 홀수 배가 되어야 한다.

[바로알기] ㄱ. 직선 A 위의 모든 점은 두 스피커로부터의 경로차가 0이므로 보강 간섭이 일어난다. 따라서 소리가 작게 들리는 좌석이 없다.

ㄴ. 소리가 보강 간섭할 때 크게 들리고, 보강 간섭은 위상이 같은 두 소리가 중첩할 때 나타난다. 따라서 소리가 크게 들리는 좌석에서는 두 스피커에서 발생한 소리가 같은 위상으로 중첩한다.

개념 적용 문제

222쪽~225쪽

01 ③ 02 ③ 03 ⑤ 04 ① 05 ② 06 ④
 07 ⑤ 08 ②

01 ㄱ. P에서는 위상이 같은 두 밀한 곳의 파면이 중첩되므로 보강 간섭이 일어나 진폭이 커져 소리가 크게 들린다.

ㄷ. R에서는 밀한 곳과 소한 곳의 파면이 중첩되므로 위상이 서로 반대인 소리가 중첩되어 상쇄 간섭이 일어난다.

[바로알기] ㄴ. P와 Q를 잇는 직선 PQ 상에서는 A, B까지의 경로차가 0이므로 보강 간섭만 일어나 소리가 작게 들리는 곳이 없다.

02 ㄱ. Q, S에서는 소리의 세기가 최대이므로 두 스피커 A, B에서 발생한 소리가 보강 간섭을 한다.

ㄷ. 경로차가 0인 지점 R에서 소리의 세기가 최솟이므로 상쇄 간섭을 하고 있다. 따라서 A, B에서 발생한 소리의 위상은 서로 반대이다.

[바로알기] ㄴ. R에서는 두 스피커 A, B까지의 거리가 같으므로 경로차가 0이다.

03 ㄱ. A와 B로부터의 경로차가 0인 지점 O에서 보강 간섭을 하므로 A, B에서 같은 위상으로 소리가 발생하고 있다.

ㄴ. A, B에서 세기와 진동수가 같은 소리가 발생하고 있고, Q는 P와 대칭인 지점이므로 Q에서 소리의 세기는 P에서와 같다.