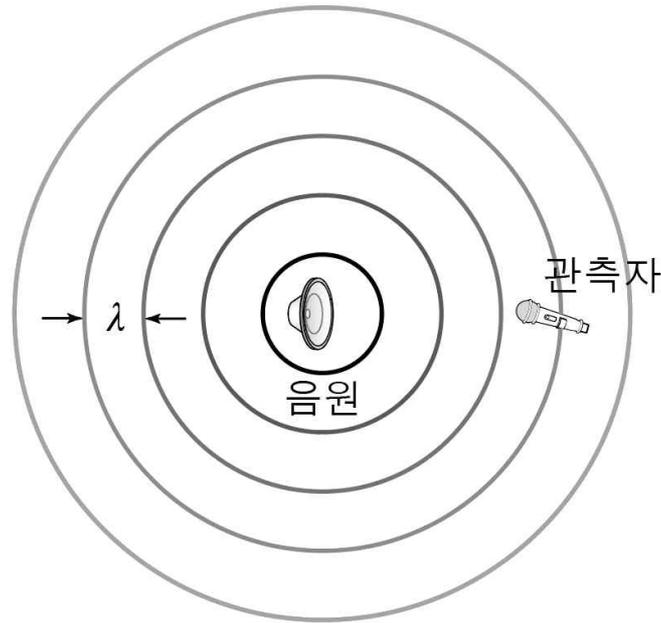


06

Theme. 도플러 효과

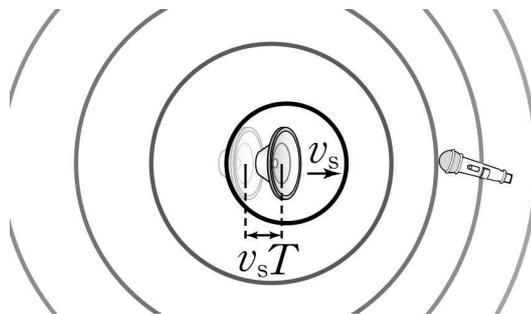
[개념편]

음파는 공기중에서 진동하는 파동의 형태로 우리 귀에 도달합니다.



즉, 음파의 매질은 공기이므로 음원의 속력이나 관찰자의 속력 모두 공기에 대한 속력을 생각해야 합니다.

위 그림과 같이 음원과 관측자 모두 정지해¹⁾ 있다면 도플러 효과는 나타나지 않습니다.



음원이 속력 v_s 로 관측자에게 다가가면

관측자가 관측하는 파장은 $\lambda' = \lambda - v_s T$ 입니다.

음원이 운동하더라도 매질²⁾에서의 속력은 달라지지 않으므로

1) 이후 음원 혹은 관측자의 속력은 모두 공기에 대한 속력을 의미합니다.

2) 공기의 밀도가 ρ , 부피 탄성율이 B 이면 공기에서 파동의 속력 $v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$



관측자가 듣는 소리의 진동수를 f' 이라 하면

$$\frac{v}{f'} = \frac{v}{f} - \frac{v_s}{f} = \frac{v - v_s}{f}$$

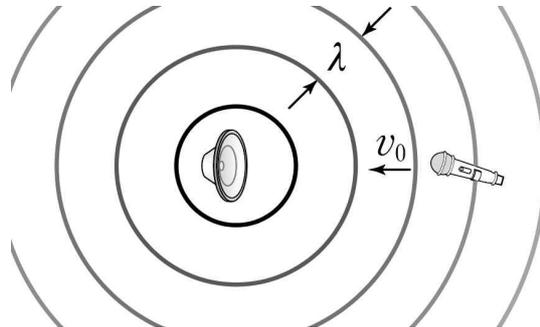
$f' = f \frac{v - v_s}{v}$ 이 성립합니다.

음원이 속력 v_s 로 관측자에게서 멀어지는 경우에도

마찬가지 방법으로

$$f' = f \frac{v + v_s}{v}$$
 이 성립합니다.

아래의 내용은 관측자의 이동에 의한 도플러 효과로, 공식적으로는 교과서에 수록되어있지 않지만, 수능특강과 일부 교과서에 짝막하게 수록된 내용입니다.



만약 관측자가 속력 v_o 로 음원에 다가가면 시간 t 동안 관측자의 귀를 통과한 음파의 이동거리는 $(v + v_o)t$ 이고

따라서 음파의 파장의 개수는 $\frac{(v + v_o)t}{\lambda}$ 입니다.

$$\text{따라서 관측자가 듣는 소리의 진동수 } f' = \frac{(v + v_o)t}{\lambda} = \frac{(v + v_o)}{\lambda} = f \frac{(v + v_o)}{v}$$

같은 원리로 관측자가 속력 v_o 로 음원에서 멀어지면

$$f' = f \frac{(v - v_o)}{v}$$
 입니다.

일반적으로 음원과 관측자가 모두 운동하는 경우 진동수는

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

이 때 분자의 (+)부호는 관측자가 음원으로 다가가는 경우이고

분자의 (-)부호는 관측자가 음원에서 멀어지는 경우,

분모의 (+)부호는 음원이 관측자에게서 멀어지는 경우,

분모의 (-)부호는 음원이 관측자에게 다가가는 경우입니다.

06

Theme. 도플러 효과

[수능편]

도플러 효과는 어렵게 나오지 않다가

18학년도 6월 평가원 20번에서 거의 처음으로 어렵게 낼 수 있다는 것을 보여주었습니다.

도플러 효과는 음원과 관측자의 속력, 파동의 속력의 관계를 진동수, 주기, 파장의 형태로 나타내줍니다.

특히 이 단원에서는 총돌, 가속 등의 다른 상황과 겹쳐 나오는 경우 문제의 난이도가 높아질 수 있습니다.

따라서 도플러 효과를 완벽하게 이해하고 체화하는 것이 중요합니다.

개념편의 도플러 효과 공식 $f' = \frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} f$ 으로부터 도출할 수 있는 두 가지 공식이 더 있습니다.

- ① 관측자가 v_o 의 속력으로 가까워지거나 멀어지면
관측자가 관찰하는 파동의 속력은 $v' = v \pm v_o$ 가 됩니다.

- ② (파동의 속력)=(진동수) \times (파장)이므로

$$v' = f' \lambda' \text{입니다.}$$

$$\text{즉 } v \pm v_o = \frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} f \lambda' \text{에서}$$

$$\lambda' = \frac{v \mp v_s}{f}$$

여기서 당연히 원래의 파동의 속력 $v = f \lambda$ 이므로

$$\lambda' = \frac{v \mp v_s}{v} \lambda \text{입니다.}$$

정리하면

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

$$\lambda' = \frac{v \mp v_s}{v} \lambda$$

$$v' = v \pm v_o$$

위의 세 가지 공식을 전부 외워두시길 추천드립니다.



만약 음원의 속력이 음속보다 큰 경우 도플러 효과에서 측정된 진동수 $f = \frac{v}{v - v_s} < 0$ 입니다.

이 때는 더 이상 도플러 효과 공식은 성립하지 않습니다.

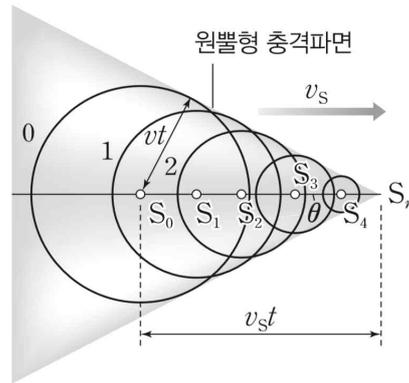
만약 음원이 소리의 속력과 비슷한 속력으로 움직이면

파동이 계속 중첩되어 압축된 공기의 장벽을 만들게 되는데,

압축된 장벽을 통과할 때 큰 소리를 듣게 됩니다.

이때 발생하는 큰 소리를 충격파라고 합니다.

충격파는 공간상에서 원뿔 형태의 파면을 형성합니다.



그림과 같이 시간 t 동안 S_0 을 원점으로 하는 파면은 반지름 vt 에 도달하지만,

그 사이 음원은 $v_s t$ 를 이동하여 새로운 파면을 형성하게 됩니다.

이때 S_n 으로부터 S 를 중심으로 하는 구 형태의 파면에 그 접선은 원뿔 형태가 되고

각 θ 에 대해서 $v_s t \sin\theta = vt$ 를 만족합니다.

따라서 $\sin\theta = \frac{v}{v_s}$ 가 성립합니다.

2, 3, 6, 7번은 개정 물리학2 교육과정 내의 문제이고 나머지 문항은 풀고싶으신 분들만 풀어보시면 됩니다.

06

Theme. 도플러 효과

[문제편]

01

16학년도 6월 17번

17. 그림 (가)는 진동수 f 의 음파를 발생시키는 음원 A가 정지해 있는 음파 측정기 B를 향해 직선 도로를 따라 일정한 속력 v_0 으로 다가가고 있는 것을 나타낸 것이고, (나)는 B가 정지해 있는 A를 향해 일정한 속력 v_0 으로 다가가고 있는 것을 나타낸 것이다. 속력 v_0 은 음파 속력 v 의 $\frac{1}{10}$ 배이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, A, B는 동일 직선 상에서 운동한다.)

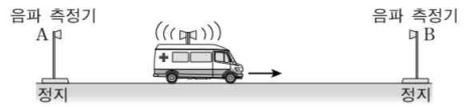
- <보기> —
- ㄱ. (가)에서 측정된 음파의 파장은 $\frac{9}{10} \frac{v}{f}$ 와 같다.
 - ㄴ. (나)에서 측정된 음파의 파장은 $\frac{v}{f}$ 와 같다.
 - ㄷ. (가), (나)에서 측정된 음파의 진동수는 서로 같다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

02

16학년도 수능 13번

13. 그림은 파장이 λ_0 인 경고음을 내는 구급차가 음파 측정기 B를 향하여 일정한 속력으로 운동하는 것을 나타낸 것이다. 정지해 있는 음파 측정기 A, B에서 측정된 경고음의 파장은 각각 λ_A, λ_B 이다.



$\lambda_0, \lambda_A, \lambda_B$ 를 옳게 비교한 것은? (단, 음속은 일정하고, 구급차는 A, B를 잇는 직선상에서 운동한다.)

- ① $\lambda_A > \lambda_0 > \lambda_B$ ② $\lambda_A > \lambda_B > \lambda_0$ ③ $\lambda_0 > \lambda_A > \lambda_B$
 ④ $\lambda_0 > \lambda_B > \lambda_A$ ⑤ $\lambda_B > \lambda_0 > \lambda_A$



01

Solution

16학년도 6월 17번

도플러 효과 공식을 떠올립니다.

$$f' = \frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} f, \lambda' = \frac{v \mp v_o}{f}, v' = v \pm v_o$$

$$v_0 = \frac{1}{10} v \text{입니다.}$$

A가 발생시키는 음파의 속력을 v , 파장을 λ , 진동수를 f 라 하면 $v = f\lambda$ 입니다.

ㄱ. 수능편에서 $\lambda' = \frac{v \mp v_o}{f}$ 이므로 $\lambda' = \frac{9}{10} \lambda = \frac{9}{10} \frac{v}{f}$

ㄴ. 음원이 정지해 있다면 파장은 변하지 않습니다. 따라서

$$\lambda = \frac{v}{f} \text{이므로 (나)에서 측정된 음파의 파장은 } \frac{v}{f} \text{입니다.}$$

ㄷ. (가)에서는 $\frac{v}{v-v_o} f$, (나)에서는 $\frac{v+v_o}{v} f$ 이므로

(가)에서 측정된 음파의 진동수가 더 큼니다.

따라서 답은 3번입니다.

여기서는 c보기를 잘 봐두시기 바랍니다.

같은 속력이라면 분모에 들어가는게, 그리고 분모에서 빼는게 영향이 더 크겠죠?

02

Solution

16학년도 수능 13번

도플러 효과 공식을 떠올립니다.

떠올릴 필요가 없습니다.

λ_0 의 변화를 생각하면

B에서는 파장이 작아지고

A에서는 커집니다.

$$\lambda_A > \lambda_0 > \lambda_B \text{입니다.}$$

따라서 답은 1번입니다.

03

16학년도 9월 7번

7. 그림 (가)는 진동수 f_0 의 음파를 발생하며 운동하는 음원과 정지해 있는 음파 측정기를 나타낸 것이다. 음원과 음파 측정기는 동일 직선 상에 있다. 그림 (나)는 음원의 위치를 시간에 따라 나타낸 것이다.



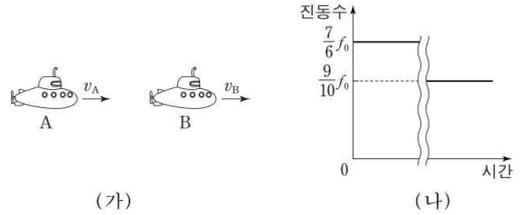
음파 측정기가 측정한 음파의 진동수를 시간에 따라 나타낸 것으로 가장 적절한 것은? (단, 음파의 속력은 일정하다.)

- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤

04

17학년도 6월 20번

20. 그림 (가)는 시간 $t=0$ 일 때 진동수 f_0 인 음파를 발생하며 진행하는 잠수함 A와 B의 모습을 나타낸 것이며, (나)는 B에서 측정한 A의 음파 진동수를 시간에 따라 나타낸 것이다. B가 A의 음파 진동수를 측정하는 동안, A와 B는 각각 v_A , v_B 의 일정한 속도로 동일 직선 경로를 따라 운동한다.



$v_A : v_B$ 는? (단, 음속은 일정하다.)

- ① 3 : 1 ② 2 : 1 ③ 3 : 2 ④ 2 : 3 ⑤ 1 : 3



03

Solution

16학년도 9월 7번

(나)에서 음원의 속력을 알 수 있습니다.
이 때 다가가는 속력과 멀어지는 속력이 같은데
분모에서 더하는 것 보단 빼는 것이 영향이 큼니다.

따라서 답은 1번입니다.

라고 하면 쪼끔 째째하죠

$$f' = \frac{v}{v - v_s} f \text{ 와 } f'' = \frac{v}{v + v_s} f \text{ 를 } f \text{ 와 비교해보면}$$

우선 $f' > f > f''$ 임을 알 수 있고

$$f' - f = \frac{v_s}{v - v_s} f$$

$$f - f'' = \frac{v_s}{v + v_s} f$$

이므로 f 와의 차이는 f' 이 더 큼니다.

앞으로는 분모에서 더하는 것 보단 빼는 것이 영향이 크다는
것을 알아두세요!

04

Solution

17학년도 6월 20번

이 문제는 대체 무슨 상황인지가 감이 잘 안잡힙니다.
 v_A 가 v_B 보다 작다면, 진동수의 변화는 없습니다.
따라서 v_A 가 v_B 보다 크고, 언젠가는 추월합니다.

그런데 동일 직선 경로 상에서 잠수함어 어떻게 추월하죠?

따라서

$$\frac{7}{6} f_0 = \frac{v - v_B}{v - v_A} f_0$$

$$\frac{9}{10} f_0 = \frac{v + v_B}{v + v_A} f_0$$

정리하면

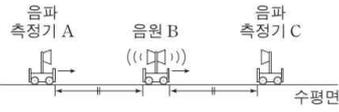
$$v_A = 2v_B \text{입니다.}$$

따라서 답은 2번입니다.

05

18학년도 수능 13번

13. 그림과 같이 음파 측정기 A와 음원 B가 정지해 있는 음파 측정기 C를 향해 동일 직선 상에서 각각 등속 직선 운동을 한다. A와 B 사이의 거리는 B와 C 사이의 거리와 매순간 같고, B는 A, C와 동시에 만난다. A, B, C가 만나기 전까지 A와 C가 측정할 음파의 진동수는 각각 f_A, f_C 이다. B는 진동수가 일정한 음파를 내고, 음속은 v 이다.



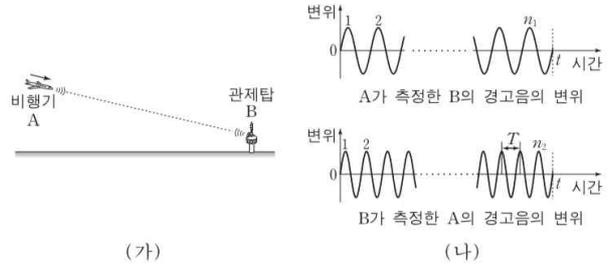
$f_A : f_C = 5 : 6$ 일 때, B의 속력은? [3점]

- ① $\frac{v}{11}$
- ② $\frac{v}{7}$
- ③ $\frac{v}{5}$
- ④ $\frac{v}{3}$
- ⑤ $\frac{v}{2}$

06

17학년도 6월 20번

20. 그림 (가)는 경고음을 내는 비행기 A가 경고음을 내는 관제탑 B를 향해 등속 직선 운동을 하고 있는 것을 나타낸 것이다. A가 정지 상태에서 내는 경고음의 파장과 B가 내는 경고음의 파장은 λ_0 으로 같다. 그림 (나)는 (가)에서 시간 t 동안 A가 측정할 B의 경고음의 변위와 B가 측정할 A의 경고음의 변위를 나타낸 것으로, A가 측정할 마루의 개수는 n_1 , B가 측정할 마루의 개수는 n_2 이다. T 는 B가 측정할 A의 경고음의 이웃한 마루 사이의 시간 간격이다.



T 동안 A의 이동 거리가 $\frac{1}{4}\lambda_0$ 일 때, $n_1 : n_2$ 는? (단, 음파의 속력은 일정하다.) [3점]

- ① 1 : 2
- ② 1 : 3
- ③ 2 : 3
- ④ 3 : 4
- ⑤ 4 : 5

05

Solution

18학년도 수능 13번

A와 B사이의 거리가 B와 C사이의 거리와 매순간 같고
 B는 A, C와 동시에 만나므로
 A의 속력을 v_A , B의 속력을 v_B 라 하면
 $v_A = 2v_B$ 입니다.

B가 내는 음파의 진동수를 f_0 라 하면

$$f_A = \frac{v + 2v_B}{v + v_B} f_0$$

$$f_C = \frac{v}{v - v_B} f_0$$

$$\frac{v + 2v_B}{v + v_B} f_0 : \frac{v}{v - v_B} f_0 = 5 : 6 \text{이므로}$$

$$v^2 + vv_B - 12v_B^2 = 0 \text{에서}$$

$$v = 3v_B$$

따라서 답은 4번입니다.

06

Solution

18학년도 6월 20번

A와 B가 내는 파장이 λ_0 로 같으므로
 음파의 속력을 v_0 라 하면

$$v_0 = f_0 \lambda_0, \quad T_0 = \frac{1}{f_0} \text{입니다.}$$

(보통 음원의 속력을 v_0 로 두는데 여기서는 λ_0 이므로 저렇게
 두었습니다. o 와 0 은 구분이 어려우니 조심하시길 바랍니다.)

B가 측정한 A의 주기는

$$T = \frac{v_0 - v_A}{v_0} T_0$$

$$T \times v_A = \frac{1}{4} \lambda_0 \text{이므로}$$

$$\frac{(v_0 - v_A)v_A}{v_0} T_0 = \frac{1}{4} \lambda_0 = \frac{1}{4} v_0 T_0$$

$$v_0^2 - 4v_0 v_A + 4v_A^2 = 0 \text{이므로}$$

$$v_0 = 2v_A \text{입니다.}$$

비행기의 속력을 알아내었으니 구하라는 것을 구하기만 하면
 됩니다.

마루의 개수는 $\frac{t}{T}$ 의 꼴로 나타납니다.

물론 양 끝의 위상이 다르다면 그렇지 않겠지만

(나)에서 $t=0$ 과 $t=t$ 에서의 위상이 같습니다.

A가 측정한 B의 경고음의 주기를 T' , B가 측정한 A의 주기를 T 라고 하면

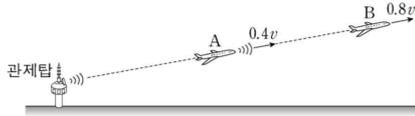
$$n_1 : n_2 = \frac{1}{T'} : \frac{1}{T} = \frac{1}{\frac{v_0}{v_0 + v_A} T_0} : \frac{1}{\frac{v_0 - v_A}{v_0} T_0} = \frac{3}{2} : 2 = 3 : 4$$

따라서 답은 4번입니다.

07

19학년도 6월 16번

16. 그림과 같이 동일한 직선상에서 비행기 A, B가 관제탑으로부터 각각 일정한 속력 $0.4v$, $0.8v$ 로 멀어지고 있다. 관제탑은 A를 향해, A는 B를 향해 진동수 f_0 인 음파를 발생시킨다. 관제탑에서 발생된 음파를 A가 측정한 진동수는 f_1 이고, A에서 발생된 음파를 B가 측정한 진동수는 f_2 이다.



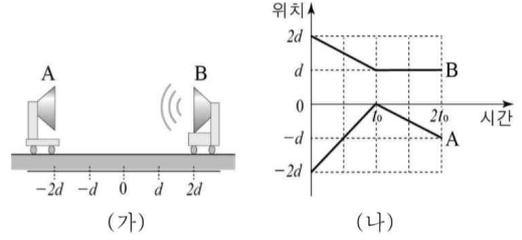
$f_1 - f_2$ 는? (단, 음속은 v 로 일정하다.)

- ① $\frac{4}{35}f_0$ ② $\frac{4}{15}f_0$ ③ $\frac{16}{35}f_0$ ④ $\frac{1}{2}f_0$ ⑤ $\frac{4}{7}f_0$

08

19학년도 7월 17번

17. 그림 (가)는 음파 측정기 A와 일정한 진동수 f_0 인 소리를 내는 음파 발생기 B의 모습을 나타낸 것이다. 그림 (나)는 동일 직선상에서 운동하고 있는 A와 B의 위치를 시간에 따라 나타낸 것이다. t_0 일 때 A가 측정한 진동수는 $\frac{5}{2}f_0$ 이다.



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

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



07

Solution

19학년도 6월 16번

f_1 부터 구해봅시다.

$$f_1 = \left(\frac{v-0.4v}{v} \right) f_0 = \frac{3}{5} f_0$$

이제 f_2 를 구하면

$$f_2 = \left(\frac{v-0.8v}{v-0.4v} \right) f_0 = \frac{1}{3} f_0$$

$$f_1 - f_2 = \frac{4}{15} f_0$$

08

Solution

19학년도 7월 17번

소리의 속력을 v_0 ,

$0 \sim t_0$ 까지 B의 속력을 v 라 하면

$$\frac{5}{2} f_0 = \left(\frac{v_0 + 2v}{v_0 - v} \right) f_0$$

따라서 $v_0 = 3v$

$\frac{3}{2} t_0$ 일 때 A의 속력은 v 이므로

$$A \text{가 측정} \text{한 진동수 } f = \left(\frac{3v}{3v+v} \right) f_0 = \frac{3}{4} f_0$$

09

19학년도 9월 13번

13. 그림은 음원 A, B가 정지해 있는 음파 측정기 C를 향해 각각 v , $2v$ 의 속력으로 등속 직선 운동하는 것을 나타낸 것이다. A, B에서 발생하는 음파의 진동수는 각각 f_0 , $\frac{8}{9}f_0$ 이다.



C가 측정하는 두 음파의 진동수가 같을 때, v 는? (단, 음속은 V 이다.) [3점]

- ① $\frac{1}{10}V$ ② $\frac{1}{9}V$ ③ $\frac{1}{8}V$ ④ $\frac{1}{7}V$ ⑤ $\frac{1}{6}V$

10

19학년도 10월 10번

10. 그림과 같이 x 축상에서 음원 A는 $-x$ 방향으로, 음원 B와 음파 측정기 C는 $+x$ 방향으로 각각 등속도 운동하고 있다. A, B, C의 속력은 각각 $0.2v$, $0.2v$, $0.1v$ 이다. A, B는 진동수가 각각 f_A , f_B 인 음파를 발생시킨다. v 는 음파의 속력이다.



A, B에서 발생한 음파가 C에서 동일한 진동수로 측정될 때, $f_A : f_B$ 는? [3점]

- ① 9 : 11 ② 2 : 3 ③ 11 : 10 ④ 11 : 9 ⑤ 3 : 2

**09**

Solution

19학년도 9월 13번

C가 측정하는 A의 진동수는 $\left(\frac{V}{V-v}\right)f_0$

C가 측정하는 B의 진동수는 $\left(\frac{V}{V-2v}\right) \cdot \frac{8}{9}f_0$

$$\left(\frac{V}{V-v}\right)f_0 = \left(\frac{V}{V-2v}\right) \cdot \frac{8}{9}f_0$$

따라서 $V=10v$

$$v = \frac{1}{10}V$$

10

Solution

19학년도 10월 10번

$$\frac{v-0.1v}{v+0.2v}f_A = \frac{v-0.1v}{v-0.2v}f_B$$

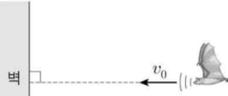
$$\frac{9}{12}f_A = \frac{9}{8}f_B$$

따라서 답은 5번입니다.

11

19학년도 수능 6번

6. 그림과 같이 진동수 f_0 인 음파를 발생시키는 박쥐가 고정된 벽을 향해 속력 v_0 으로 등속도 운동을 하고 있다. 박쥐가 발생시킨 음파는 벽에서 반사된 후 동일 직선상으로 되돌아온다. 박쥐가 측정할 반사된 음파의 진동수는 f 이다.



$\frac{f}{f_0}$ 는? (단, 음속은 v 이다.) [3점]

- ① $\frac{v}{v-v_0}$ ② $\frac{v+v_0}{v-v_0}$ ③ $\left(\frac{v}{v-v_0}\right)^2$
- ④ $\frac{v(v+v_0)}{(v-v_0)^2}$ ⑤ $\left(\frac{v+v_0}{v-v_0}\right)^2$

12

20학년도 9월 11번

11. 그림과 같이 정지해 있는 음파 송수신기 A로부터 자동차 B가 일정한 속력 v_0 으로 멀어지고 있다. A에서 발생된 진동수 f_0 인 음파는 B에서 반사된 후 동일 직선상으로 되돌아와 A에서 진동수 f 로 측정되었다.



$\frac{f}{f_0}$ 는? (단, 음속은 v 이다.) [3점]

- ① $\frac{v-v_0}{v+v_0}$ ② $\frac{v+v_0}{v-v_0}$ ③ $\frac{v}{v-v_0}$
- ④ $\frac{v+v_0}{v}$ ⑤ $\frac{v-v_0}{v}$



11

Solution

19학년도 수능 6번

벽에 반사되는 음파의 진동수는 $\frac{v}{v-v_0}f_0$, 벽에 반사된 음파를
박쥐가 측정하면 $\frac{v}{v-v_0} \cdot \frac{v+v_0}{v} f_0$ 입니다.

따라서 답은 2번입니다.

12

Solution

20학년도 9월 11번

B가 듣는 A의 음파의 진동수는 $\frac{v-v_0}{v}f_0$ 이고 B는 이 음파를
 v_0 의 속력으로 이동하며 반사시키므로 A가 측정한 반사된 음
파의 진동수는 $\frac{v-v_0}{v} \cdot \frac{v}{v+v_0} f_0$ 입니다.

따라서 답은 1번입니다.