

[최고의 수험물리 전문가]

윤형철

# 변리사 탄탄물리

[개념+기출]

— 16장 역학적 파동 —

“물리는 외우는 과목이 아니라 생각하는 과목입니다.”

세 가지 강의 철학

목차

— 성장기반 물리

(Grow-based Physics)

— 취사선택 물리

(Cut-off Strategy Physics)

— 생각하는 물리

(Thinking Physics)



물리

윤형철 교수

물리 윤형철 교수입니다.

## 약력

전남과학고등학교 졸업  
서울대학교 사범대학 물리교육과 졸업

전 대치 미래탐구  
전 대치 새움학원  
현 대치 링크물리  
현 변리사스쿨 물리 전문교수

개념 POINT

[파동 개관]

물리현상 (문제상황)	→ 물리량	물리법칙
파동현상	① 주기 - 진동수 ② 위치 - 파장 ③ 변위 - 진폭 ④ 속도 - 속력 ⑤ 가속도 - 횡가속도 ⑥ 에너지	

## I. 파동

### 1. 개관

물리학의 중요한 주제 중의 하나는 파동이다. 현대 사회에서 파동의 중요성을 확인하려면 음향 산업만 생각해도 된다. 대학가 술집에서 연주하는 펑크음악에서부터 웹으로 감상할 수 있는 우아한 협주곡까지 모든 종류의 음악은 연주자가 생성하는 파동과 관측자가 검출하는 파동에 달려 있다. 파동의 생성과 검출 사이에서는 (웹에서의 실황공연처럼) 파동으로 전달되는 정보가 녹음되고, (CD나 DVD 또는 공학실험실에서 개발하고 있는 저장장치를 이용하여) 재생된다. 음악의 파동적 특성을 제어하는 것 자체가 시장성이 높기 때문에 새로운 기술을 개발하면 경제적으로 크게 보상 받을 수 있을 것이다.

이 장은 기타줄처럼 팽팽한 줄을 따라 이동하는 파동에 중점을 둔다. 다음 장은 기타가 만들어내는 음파들을 주로 다룰 것이다. 먼저 일상생활에서 흔히 접하게 되는 수많은 파동을 기본 유형으로 분류해 보자.

### 2. 분류

#### (1) 원인

중요한 파동으로 다음과 같은 세 종류가 있다.

1. 역학적 파동. 일상생활에서 흔히 접하는 파동으로서 수면파, 음파, 지진파 등이 여기에 속한다.

이 파동은 두 가지 중요한 특징을 갖고 있다. 역학적 파동은 Newton의 운동법칙으로 결정되며, 물, 공기, 바위 같은 물질로 이루어진 매질 안에서만 존재한다.

2. 전자기파. 이 파동은 덜 친숙하지만 일상생활에서 수없이 사용하고 있다. 가시광선, 자외선, 라디오파, TV파, 마이크로파, 엑스선, 레이더파 등이 바로 전자기파이다. 이 파동은 매질이 필요 없다. 예컨대 별에서 오는 빛은 우주의 진공을 통과하여 우리에게로 온다. 모든 전자기파는 진공에서 같은 속력  $c = 2,999,792,458 \text{ m/s}$ 로 진행한다.

3. 물질파. 이 파동은 최첨단 기술로 사용하는 데도 불구하고 여러분에게 매우 생소할 것이다. 이 파동은 전자, 양성자 및 다른 소립자는 물론 원자, 분자들과도 관련이 있다. 이러한 입자들이 물질을 구성하기 때문에 물질파라고 부른다.

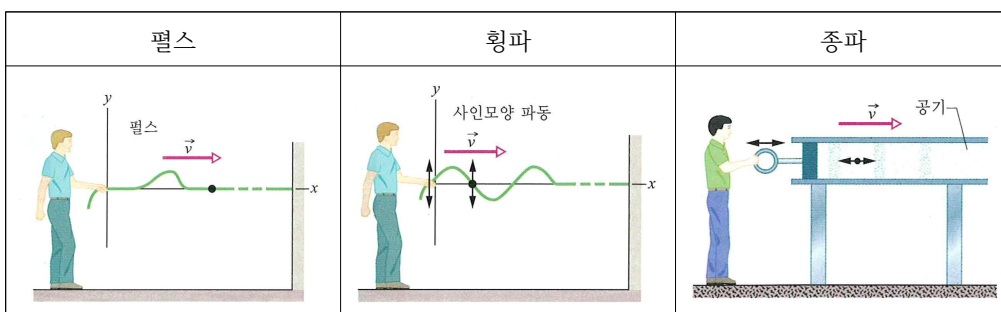
이 장에서 언급하는 많은 부분은 모든 종류의 파동에 대해서 적용할 수 있지만, 여기서는 역학적 파동만을 고려하겠다.

#### (2) 운동상태

- 1) 진행파
- 2) 정지파(정상파)

#### (3) 형태 - 파동의 진행방향과 매질의 진동방향의 관계

- 1) 펄스
- 2) 횡파 (세로파동)
- 3) 종파 (가로파동)





### 3. 진행파

#### 10 I

줄의 파동(과 길이를 따라 어떤 요소의 운동)을 완전히 기술하려면 파동의 모양을 표현하는 함수가 필요하다. 즉,

$$y = h(x, t) \quad (16-1)$$

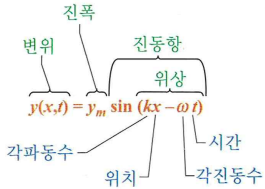
형태의 관계식이 필요하다. 여기서 줄 요소의 가로 변위  $y$ 는 줄 요소의 위치  $x$ 와 시간  $t$ 의 함수인  $h$ 이다. 일반적으로 그림 16-1b와 같은 사인모양의 파동은 사인이나 코사인 함수로 표기할 수 있다. 두 함수 모두 파동에 대해 같은 모양을 주기 때문에 이 장에서는 사인함수를 사용한다.

그림 16-1b의 파동처럼  $+x$ 축 방향으로 진행하는 사인모양의 함수를 고려해 보자. 파동이 연속적인 줄 요소들(줄의 아주 작은 부분들)을 지나가면 각 요소는  $y$ 축과 평행하게 진동한다. 시간  $t$ 에서 위치  $x$ 에 있는 줄 요소의 변위  $y$ 는 다음과 같다.

$$y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t). \quad (16-2)$$

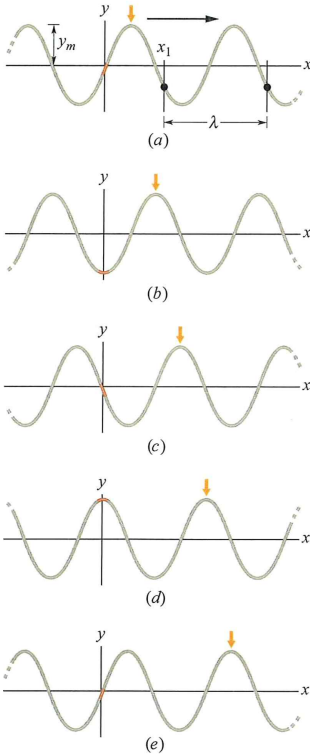
이식은 위치  $x$ 로 나타내므로 시간이 지남에 따라 모든 줄 요소들의 변위들을 구하는 데 사용할 수 있다. 따라서 이식으로 임의의 주어진 시간에 파동의 모양과 그 모양이 어떻게 변하는지를 알 수 있다.

식 16-2에 있는 각 항을 설명하는 용어가 그림 16-3에 표기되어 있고 최종



**그림 16-3** 사인모양 가로파동의 파동방정식 16-2에서 각 항을 설명하는 용어.

이 점이 다음의 순간그림들에서 어떻게 움직이는지 관찰하여라.



**그림 16-4**  $x$ 축 양의 방향으로 줄을 따라 진행하는 파동의 순간그림.  $y_m$ 은 진폭이고,  $\lambda$ 는 임의의 점  $x_1$ 에서 측정된 파장이다.

에 정의한다. 이들을 설명하기 전에  $x$ 축 양의 방향으로 진행하는 사인모양의 파동에 대한 다섯 개의 순간 그림 16-4를 먼저 살펴보자. 파동의 움직임을 파동의 최고점을 표시한 짧은 화살표가 오른쪽으로 움직인 것을 보면 알 수 있다. 매순간마다 짧은 화살표는 파형을 따라 오른쪽으로 움직이지만, 줄은  $y$ 축에 평행하게 움직인다. 이것을 알아보기 위해  $x = 0$ 에서 붉게 표시된 줄 요소의 운동을 생각해 보자. 첫 번째 순간 그림 16-4a에서 줄 요소는 변위  $y = 0$ 에 있다. 다음 순간그림에서는 파동의 골(최저점)을 지나고 있으므로 이 줄 요소는 가장 낮은 변위에 있다. 줄 요소는 다시 변위  $y = 0$ 을 지나 네 번째 순간그림에서는 파동의 마루(최고점)를 지나고 있으므로 가장 높은 변위에 있다. 다섯 번째 순간그림에서 이 줄 요소는 완전히 한 주기의 진동을 마치면서 다시  $y = 0$ 에 있다.

**진폭과 위상** 그림 16-4처럼 파동의 진폭  $y_m$ 은 파동에 의해 줄 요소들이 평형위치로부터 벗어난 최대 변위의 크기이다[아래첨자  $m$ 은 최대(maximum)를 뜻한다].  $y_m$ 은 크기이기 때문에 그림 16-4a와 반대로 아래쪽으로 측정하여도 항상 양의 값이다.

파동의 위상은 식 16-2의 사인함수 괄호 안의 값  $kx - \omega t$ 이다. 파동이 줄의 한 위치  $x$ 에서 줄 요소를 지나감에 따라 위상은 시간에 따라 선형적으로 변한다. 이때 사인값도  $+1$ 과  $-1$  사이를 진동하면서 변한다. 최대값( $+1$ )은 파동의 마루에 해당하고 이때 위치  $x$ 에서  $y$ 값은  $y_m$ 이다. 최소값( $-1$ )은 파동의 골에 해당하며 이때 위치  $x$ 에서  $y$ 값은  $-y_m$ 이다. 결국 사인함수와 시간에 의존하는 위상은 줄 요소의 진동에 대응되며,

파동의 진폭은 줄 요소들의 변위의 최대값이다.

**파장과 각파동수** 파장  $\lambda$ 는 파동의 모양(파형)이 계속 반복될 때 파동의 진행방향으로 생긴 같은 모양의 길이이다. 전형적인 파장은  $t = 0$ 에서 파동의 순간그림을 보여주는 그림 16-4a에 표시되어 있다.  $t = 0$ 에서 식 16-2에 의하면 파형은 다음과 같다.

$$y(x, 0) = y_m \sin kx. \quad (16-3)$$

정의에 따라 변위  $y$ 는 한 파장의 양 끝에서, 즉  $x = x_1$ 과  $x = x_1 + \lambda$ 에서 같은 값을 가진다. 따라서 식 16-3을 이용하면

$$\begin{aligned} y_m \sin kx_1 &= y_m \sin k(x_1 + \lambda) \\ &= y_m \sin(kx_1 + k\lambda) \end{aligned} \quad (16-4)$$

를 얻는다. 사인함수는 각도가  $2\pi$  rad만큼 증가할 때마다 주기적으로 반복하기 때문에 식 16-4

#### 개념 POINT

에서  $k\lambda = 2\pi$ , 즉 다음의 관계식을 얻는다.

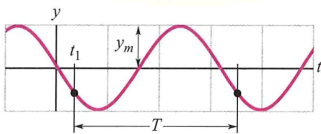
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{각파동수}). \quad (16-5)$$

여기서  $k$ 를 **파동의 각파동수**라고 하며, SI 단위는 rad/m이다(참고로, 여기서  $k$ 는 앞에 나왔던 용수철상수가 아니다).

그림 16-4에서 파동은 한 순간그림에서 다음 순간그림 사이에 오른쪽으로  $\lambda/4$ 만큼 이동하였다. 따라서 다섯 번째 순간 그림에서는 파동이 오른쪽으로  $\lambda$ 만큼 이동하였다.

**주기, 각진동수, 진동수** 그림 16-5는 여기서는  $x=0$ 로 선택한 줄의 한 위치에서 시간  $t$ 에 대한 식 16-2의 변위  $y$ 이다.  $x=0$ 에서 줄 요소만을 관찰한다면 식 16-2에 의해

이것은 그래프이지 순간그림은 아니다.



**그림 16-5** 그림 16-4의 사진모양 파동이 줄의 요소를 지나갈 때  $x=0$ 에서 줄의 변위를 나타낸 그래프. 진폭  $y_m$ 과 임의의 시간  $t_1$ 부터 측정된 주기  $T$ 가 표시되어 있다.

$$\begin{aligned} y(0, t) &= y_m \sin(-\omega t) \\ &= -y_m \sin \omega t \quad (x=0) \end{aligned} \quad (16-6)$$

으로 주어지는 위아래 방향의 단순조화운동을 한다.

여기서 임의의 각도  $\alpha$ 에 대해 성립하는 관계  $\sin(-\alpha) = -\sin \alpha$ 를 사용하였다. 그림 16-5는 시간에 대해 변위를 그린, 위 식의 그래프이지, 파동의 모양을 나타내는 것이 아니라는 점을 유의해야 한다.

진동의 **주기  $T$** 는 줄의 요소가 완전하게 한 번 진동을 하는 데 걸리는 시간이라고 정의한다. 전형적인 주기가 그림 16-5의 그래프에 표시되어

있다. 식 16-6을 한 주기의 양 끝 시간에 적용하면

$$\begin{aligned} -y_m \sin \omega t_1 &= -y_m \sin \omega(t_1 + T) \\ &= -y_m \sin(\omega t_1 + \omega T) \end{aligned} \quad (16-7)$$

를 얻는다. 이렇게 되려면  $\omega T = 2\pi$ , 즉 다음의 관계식을 얻는다.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{각진동수}). \quad (16-8)$$

여기서  $\omega$ 를 파동의 **각진동수**라 부르고 SI 단위는 rad/s이다.

다시 그림 16-4에 있는 진행파동의 다섯 개의 순간그림들을 살펴보자. 두 순간그림 사이의 시간은  $T/4$ 이다. 따라서 다섯 번째 순간그림에서 모든 줄의 요소들이 완전한 한 진동을 마치게 된다. 파동의 **진동수  $f$** 는  $1/T$ 로 정의하며 각진동수  $\omega$ 와 다음의 관계가 있다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{진동수}). \quad (16-9)$$

15장의 단순조화운동의 진동수처럼 이 진동수  $f$ 도 단위시간당 진동한 횟수이며 헤르츠(Hz)나 킬로헤르츠(kHz)로 표기한다.

**위상상수** 사인모양의 진행파동이 식 16-2의 파동함수로 주어지면  $t=0$ 일 때 이 파동은  $x=0$  근처에서 그림 16-6a처럼 보인다.  $x=0$ 에서 변위는  $y=0$ 이고 기울기는 최대값을 가진다.

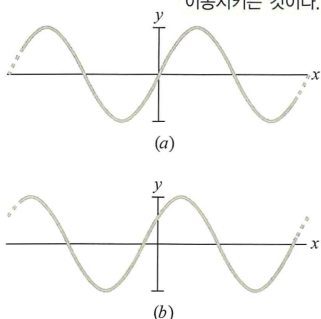
위상상수  $\phi$ 의 효과는 파동을 이동시키는 것이다.

파동방정식에 **위상상수  $\phi$** 를 추가함으로써 식 16-2를 다음과 같이 일 반화할 수 있다.

$$y = y_m \sin(kx - \omega t + \phi). \quad (16-10)$$

이 함수가  $t=0$ 일 때  $x=0$ 에서 다른 기울기와 변위를 갖도록  $\phi$  값을 선택할 수도 있다. 예를 들어,  $\phi = +\pi/5$ 를 선택하면  $t=0$ 일 때 기울기와 변위는 그림 16-6b와 같다. 이 파동은 여전히 같은  $y_m$ ,  $k$ ,  $\omega$ 를 갖는 사인모양으로 그림 16-6a의 파동( $\phi=0$ 인 경우)이 평행이동한 모양이다.

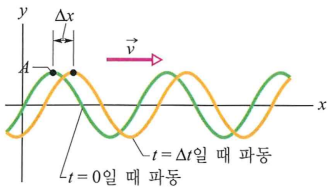
**그림 16-6** 시간  $t=0$ 일 때 위상상수 (a) 0과 (b)  $\pi/5$  rad를 갖는 사인모양의 진행파동.



#### 4. 진행파의 속력

100

그림 16-7은 식 16-2로 주어지는 파동의 시간간격  $\Delta t$ 에 대한 두 순간그림이다. 파동은  $+x$ 축 방향(그림 16-7에서 오른쪽)으로 진행하고, 전체적인 파형은 시간간격  $\Delta t$  동안  $\Delta x$ 를 움직인다. 비율  $\Delta x/\Delta t$ (또는 미분값  $dx/dt$ )는 **파동속력**  $v$ 이다. 어떻게 이 값을 알 수 있을까?



**그림 16-7**  $t=0$ 과  $t=\Delta t$ 인 순간의 그림 16-4에 있는 파동의 모습. 파동이 오른쪽으로 속도  $v$ 로 움직일 때, 전체 파동곡선은  $\Delta t$  동안  $\Delta x$ 만큼 오른쪽으로 이동한다. 점  $A$ 는 파동의 형태와 같이 “타고” 가지만, 줄의 요소는 아래위로만 움직인다.

그림 16-7의 파동이 움직여가더라도 파형의 한 점, 예컨대 마루에 표시된 점  $A$ 의 변위는 일정하게 유지된다. (줄 위의 각 점들은 변위가 일정하지 않지만 파동의 각 점은 변위가 일정하게 유지된다) 줄 위의 각 점들은 변위가 일정하지 않지만 파동의 각 점들은 변위가 일정하게 유지된다. 점  $A$ 가 움직일 때 점  $A$ 의 변위  $y$ 를 일정하게 유지하려면 식 16-2에서 위상이 다음과 같이 일정해야 한다.

$$kx - \omega t = \text{상수}. \quad (16-11)$$

비록 이 값이 일정하더라도  $x$ 와  $t$ 는 둘 다 계속해서 변한다. 사실  $t$ 가 증가함에 따라  $x$ 도 이 값을 일정하게 유지하기 위해 증가하여야 한다. 즉, 파형이  $+x$ 축 방향으로 움직인다.

파동속력  $v$ 를 구하기 위하여 식 16-11을 미분하면

$$k \frac{dx}{dt} - \omega = 0$$

즉, 다음을 얻는다.

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{\omega}{k}. \quad (16-12)$$

식 16-5,  $k=2\pi/\lambda$ 와 식 16-8,  $\omega=2\pi/T$ 를 사용하여 파동속력을

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (\text{파동의 속력}) \quad (16-13)$$

로 표기할 수 있다. 방정식  $v=\lambda/T$ 는 파동속력이 한 주기당 파장이라는 뜻이다, 즉 파동이 한 주기 동안 한 파장의 거리만큼 움직인다.

식 16-2는  $+x$ 축 방향으로 진행하는 파동을 기술한다. 반대 방향으로 진행하는 파동의 방정식은 식 16-2의  $+t$ 를  $-t$ 로 바꾸면 얻을 수 있다. 이것은

$$kx + \omega t = \text{상수} \quad (16-14)$$

의 조건에 대응하고, 식 16-11과 비교하면  $x$ 는 시간에 따라 감소한다. 따라서  $-x$ 축 방향으로 진행하는 파동을 다음의 방정식으로 표기할 수 있다.

$$y(x, t) = y_m \sin(kx + \omega t). \quad (16-15)$$

식 16-2의 파동처럼 식 16-15의 파동을 분석하면 다음의 파동속력을 얻는다.

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\omega}{k}. \quad (16-16)$$

음의 부호는 파동이  $-x$  방향으로 움직인다는 뜻이고,  $t$ 에 대한 부호가 바뀐 것이 타당하다는 것을 알 수 있다.

이제 다음과 같은 임의의 파동을 고려해 보자.

$$y(x, t) = h(kx \pm \omega t), \quad (16-17)$$

여기서  $h$ 는 임의의 함수로서, 사인함수일 수도 있다. 앞의 분석에 따르면 변수  $x$ 와  $t$ 가  $kx \pm \omega t$  형태로 결합된 파동은 모두 진행파동이라는 것을 알 수 있다. 게다가 모든 진행파동은 식 16-17의 형태를 가진다. 따라서  $y(x, t) = \sqrt{ax + bt}$ 는 가능한 진행파동(물리적으로는 약간 이상하지만)을 표현하지만, 함수  $y(x, t) = \sin(ax^2 - bt)$ 는 진행파동을 표현하지 못한다.

개념 POINT

## 5. 팽팽한 줄에 생긴 파동의 속력

U U

식 16-13에 의해 파동의 진동수와 파장에 관계가 있는 파동의 속력은 매질의 특성에 따라 정해진다. 만약 파동이 물, 공기, 강철 또는 바위 같은 매질을 지난다면 파동이 지나감에 따라 매질 안의 입자들을 진동시켜야만 한다. 이 현상이 일어나려면 매질은 질량(운동에너지)과 탄성(퍼텐셜에너지)을 가져야 한다. 따라서 매질의 질량과 탄성은 파동이 얼마나 빨리 매질 속을 전파하는지 결정한다. 이제 팽팽한 줄에 대하여 두 가지 방법으로 계산해 보자.

**차원 분석** 차원분석에서는 결정할 물리량들을 계산하기 위해서 주어진 상황에서 모든 물리량의 차원을 주의 깊게 조사하여야 한다. 이 경우에는 길이를 시간으로 나눈  $LT^{-1}$ 의 차원을 갖는 속력  $v$ 를 구하기 위해 질량과 탄성을 조사해 보자.

질량에 대해서는 줄의 질량  $m$ 을 줄의 길이  $l$ 로 나눈 줄 요소의 질량을 사용한다. 이것을 줄의 선밀도  $\mu$ 라고 부른다. 따라서  $\mu = m/l$ 이고, 차원은 질량을 길이로 나눈  $ML^{-1}$ 이다.

줄은 양 끝점의 두 힘에 의해서 팽팽하게 당겨져 장력이 작용하고 있어야 줄을 통하여 파동을 보낼 수가 있다. 줄의 장력  $\tau$ 는 크기가 같은 두 힘의 크기와 같다. 파동이 줄을 따라 진행할 때 장력으로 서로 끌어당겨지는 줄의 인접한 부분들에 추가적인 늘림이 일어나 줄 요소들의 위치를 변

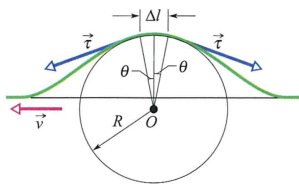
화시킨다. 따라서 줄의 장력을 줄의 탄성과 관련시킬 수 있다. 줄을 늘이는 힘과 장력은 힘의 차원  $MLT^{-2}$  ( $F = ma$ )을 가진다.

여기서의 목적은  $v(LT^{-1})$ 를 만들어낼 수 있도록  $\mu(ML^{-1})$ 와  $\tau(MLT^{-2})$ 를 결합하는 것이다. 여러 가지 결합을 시도해서 다음을 얻을 수 있다.

$$v = C\sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \quad (16-22)$$

여기서  $C$ 는 차원이 없는 상수이고 차원 분석으로는 결정할 수 없다. 파동의 속력을 구하기 위한 다음의 두 번째 접근 방법에서 식 16-22가 정말로 옳은 식이고  $C = 1$ 이라는 것을 알게 될 것이다.

### Newton의 제2법칙에서 유도하기



**그림 16-8** 줄이 오른쪽에서 왼쪽으로 속도  $v$ 로 움직이는 것처럼 보이고 펄스가 정지한 것처럼 보이는 좌표계에서 본 대칭적인 펄스. 펄스의 맨 위에 위치한 길이  $\Delta l$ 인 줄의 요소에 Newton의 제2법칙을 적용하여 속력  $v$ 를 구한다.

그림 16-1b의 사인모양 파동 대신에 그림 16-8의 파동처럼 속력  $v$ 로 줄을 따라 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이는 하나의 대칭적인 펄스를 생각해 보자. 편의상 펄스가 정지해 있는 좌표계를 선택하자. 즉, 관찰자가 일정한 파형을 보도록 펄스를 따라 움직인다. 이 좌표계에서는 그림 16-8의 줄이 오른쪽에서 왼쪽으로 속력  $v$ 로 관찰자를 지나가는 것처럼 보인다.

펄스 안에 반지름  $R$ 의 원호를 그리고 그 원의 중심에서 각도  $2\theta$ 를 이루는 길이  $\Delta l$ 의 작은 줄 요소를 고려해 보자. 줄의 장력과 같은 크기를 갖는 힘  $\tau$ 는 줄 요소의 양끝에서 접선방향으로 끌어당긴다. 이러한 힘의 수평성분은 서로 상쇄되고, 수직성분의 힘은 더해져서 반지름 방향의 복원력  $\vec{F}$ 를 이룬다. 그 크기는

$$F = 2(\tau \sin \theta) \approx \tau(2\theta) = \tau \frac{\Delta l}{R} \quad (\text{힘}) \quad (16-23)$$

이다. 여기서 그림 16-10에 있는 작은 각도  $\theta$ 에 대해 어림하여  $\sin \theta$ 를  $\theta$ 로 놓았고, 그림으로부터  $2\theta = \Delta l/R$ 을 사용하였다.

줄 요소의 질량은

$$\Delta m = \mu \Delta l \quad (\text{질량}) \quad (16-24)$$

이고, 여기서  $\mu$ 는 줄의 선밀도이다. 그림 16-10에서 나타난 순간에 줄 요소  $\Delta l$ 은 원호 위에서 움직이므로, 줄 요소는 다음과 같은 원의 중심을 향한 구심가속도를 가진다.

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (\text{가속도}). \quad (16-25)$$

식 16-23, 16-24, 16-25를 결합하여, Newton의 제2법칙

$$\text{힘} = \text{질량} \times \text{가속도}$$

의 형태로 표기하면

개념 POINT



$$\frac{\tau \Delta l}{R} = (\mu \Delta l) \frac{v^2}{R}$$

을 얻는다. 속력  $v$ 에 관해서 이 방정식을 풀면 다음을 얻는다.

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \quad (\text{속력}). \quad (16-26)$$

이식은 식 16-22에서 상수  $C$ 를 1로 놓은 결과와 같다. 식 16-26은 그림 16-8에 있는 펄스의 속력이고, 장력이 같으면 줄에 생긴 파동의 속력은 모두 같다.

식 16-26의 의미는 다음과 같다.

▶ 팽팽한 이상적인 줄을 따라 진행하는 파동의 속력은 줄의 선밀도와 줄에 작용하는 장력에만 의존하고 파동의 진동수에는 의존하지 않는다.

파동의 진동수는 파동을 만들어내는 원인에 의해서 정해지고(예를 들면, 그림 16-1b에서 사람), 파동의 파장은 식 16-13에 의해  $\lambda = v/f$ 로 정해진다.

## 6. 파동의 중첩성과 독립성

두 개 이상의 파동이 같은 영역을 동시에 지나가는 경우가 흔히 있다. 예를 들어 음악회에서 여러 악기에서 나오는 소리가 동시에 고막을 울린다. 또한 라디오나 TV 안테나에 있는 전자들은 여러 방송국에서 발사된 많은 신호에 따라서 운동한다. 부두나 호수의 물이 여러 배가 일으키는 파동들에 의해서 움직이기도 한다.

팽팽한 줄에서 동시에 진행하는 두 파동을 생각해 보자. 각각의 파동이 혼자 진행할 때 줄의 변위를 각각  $y_1(x, t)$ ,  $y_2(x, t)$ 라 한다면, 두 파동이 같이 진행할 때의 변위는

$$y'(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) \quad (16-46)$$

처럼 두 파동의 대수적인 합이고, 그 의미는 다음과 같다.

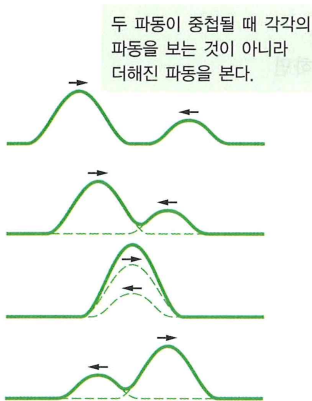


그림 16-11 줄을 따라 진행하는 두 펄스의 순간그림. 이들이 서로 지나칠 때 중첩원리가 적용된다.

▶ 중첩되는 파동의 **합성파동**은 각 파동의 대수적인 합이다.

이것은 **중첩원리**의 다른 예이다. 그 의미는 여러 가지 효과가 동시에 일어날 때 알짜 효과는 각 효과의 합이라는 것이다.

그림 16-11는 팽팽한 줄에서 반대방향으로 진행하는 두 펄스의 순간그림이다. 펄스가 중첩될 때 합성파동은 두 펄스의 합이다. 또한, 각 펄스는 마치 다른 펄스가 없는 것처럼 서로 지나쳐 간다.

▶ 중첩된 파동은 다른 파동의 진행을 방해하지 않는다.

## 7. 파동의 간섭현상

### 10 10

평평한 줄을 따라 같은 방향으로 파장과 진폭이 같은 사인모양의 두 파동을 보내면 중첩원리가 적용된다. 합성파동은 어떤 모양일까? 합성파동은 두 파동의 위상이 서로 얼마만큼 차이가 있는지(즉, 한 파동의 형태가 다른 파동에 대해서 얼마만큼 이동되어 있는지)에 의존한다. 만약 두 파동의 위상이 정확히 일치하면(두 파동의 마루와 골이 일치하게 배열되면) 파동의 변위가 두 배인 파동이 된다. 그러나 두 파동의 위상이 정반대라면(한 파동의 골과 다른 파동의 마루가 일치하게 배열되면) 파동은 모든 곳에서 상쇄되어 직선모양이 된다. 중첩된 파동의 이런 현상을 **간섭**이라고 하고, '파동이 **간섭한다**'라고 말한다(간섭현상은 오직 파동의 변위에만 영향을 주며 파동의 진행에는 아무런 영향을 주지 않는다). 평평한 줄을 따라 진행하는 한 파동의 형태가

$$y_1(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t) \quad (16-47)$$

이고, 다른 파동은 다음과 같다고 하자.

$$y_2(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t + \phi). \quad (16-48)$$

이들의 각진동수  $\omega$  (진동수  $f$ ), 각파동수  $k$  (파장  $\lambda$ ), 진폭  $y_m$ 은 모두 같다. 두 파동은 식 16-26으로 주어지는 속력으로  $x$ 축 양의 방향으로 진행한다. 두 파동은 위상상수  $\phi$ 만큼 차이가 난다. 즉, 각도  $\phi$ 만큼 위상이 어긋난다.

식 16-46에서 합성파동은 두 파동의 대수적 합으로 변위는

$$\begin{aligned} y'(x, t) &= y_1(x, t) + y_2(x, t) \\ &= y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx - \omega t + \phi) \end{aligned} \quad (16-49)$$

이다. 부록 E에서 두 각도  $\alpha, \beta$ 의 사인의 합은

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta) \quad (16-50)$$

변위  
 $y'(x, t) = [2y_m \cos \frac{1}{2}\phi] \sin(kx - \omega t + \frac{1}{2}\phi)$   
 진폭의 크기    진동하는 항

이다. 이식을 식 16-49에 적용하면 다음을 얻는다.

$$y'(x, t) = [2y_m \cos \frac{1}{2}\phi] \sin(kx - \omega t + \frac{1}{2}\phi). \quad (16-51)$$

**그림 16-12** 사인모양의 두 가로파동이 간섭하여 만든 식 (16-51)의 합성파동도 역시 진폭항과 진동항을 갖는 사인모양의 가로파동이다.

그림 16-12에서 볼 수 있듯이 합성파동은  $x$ 가 증가하는 방향으로 진행하는 사인모양 파동이다. 이것이 줄에서 실제로 볼 수 있는 파동이다(식 16-47과 16-48의 두 간섭파동을 따로따로 보는 것이 아니다).



같은 진폭과 파장을 가진 두 사인모양 파동이 줄을 따라 같은 방향으로 진행한다면, 서로 간섭하여 사인모양의 합성파동을 만든다.

두 가지 면에서 합성파동과 간섭파동은 다르다. (1) 위상상수가  $\phi/2$ 이며, (2) 진폭  $y_m'$ 이 식 16-51의 [ ]안의 양으로 다음과 같다.

$$y_m' = 2y_m \cos \frac{1}{2}\phi \quad (\text{진폭}). \quad (16-52)$$

만약  $\phi = 0(0^\circ)$ 라면, 두 간섭파동은 그림 16-13a처럼 정확히 같은 위상이 되고, 식 16-51은

$$y'(x, t) = 2y_m \sin(kx - \omega t) \quad (\phi = 0) \quad (16-53)$$

이다. 이 합성파동은 그림 16-13d이다. 그림과 식 16-53에서 알 수 있듯이 합성파동의 진폭은 간섭파동의 두 배이다. 이 크기는 식 16-51과 16-52의 코사인 항이  $\phi = 0$ 일 때 최대값(1)을 갖기 때문에 합성파동이 가질 수 있는 최대 진폭이다. 최대 진폭이 생기는 간섭을 완전 보강간섭이라 한다.

만일  $\phi = \pi \text{ rad}(180^\circ)$ 이라면 간섭하는 파동들의 위상은 그림 16-13b처럼 정반대이다. 이때  $\cos(\phi/2)$ 는  $\cos \pi/2 = 0$ 이 되고, 식 16-52로 주어진 합성파동의 진폭은 0이 된다. 즉, 모든  $x, t$ 에 대하여

$$y'(x, t) = 0 \quad (\phi = \pi \text{ rad}) \quad (16-54)$$

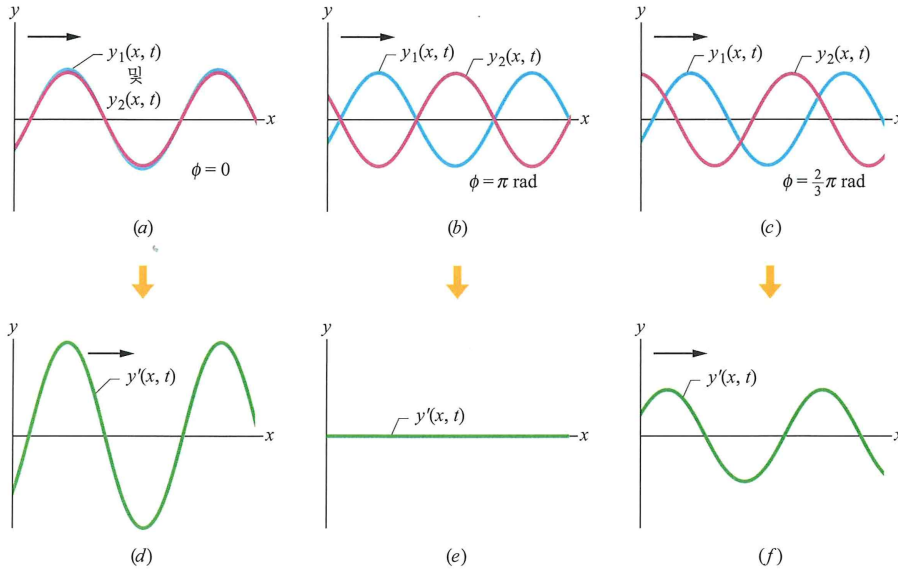
이다. 이런 합성파동은 그림 16-13e이다. 비록 줄을 따라 두 파동을 보낸다 하더라도 줄의 운동을 관찰할 수 없다. 이러한 형태의 간섭을 완전 소멸간섭이라 한다.

### 개념 POINT

정확히 같은 위상일 경우  
더 큰 파동이 된다.

정확하게 위상이 반대이면  
줄은 평평해진다.

이것은 중의 결과를  
주는 중간 상황이다.



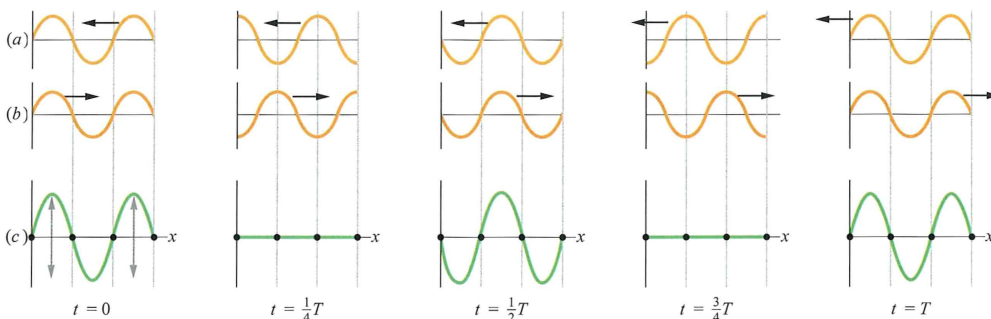
**그림 16-13** 두 동일한 사인모양 파동,  $y_1(x, t)$ 와  $y_2(x, t)$ 가  $+x$ 축 방향으로 줄을 따라 진행한다. 두 파동이 간섭하여 합성파동  $y(x, t)$ 를 만든다. 두 파동 사이의 위상차는 (a) 0, (b)  $\pi$  rad( $180^\circ$ ), (c)  $2\pi/3$  rad( $120^\circ$ )이다. 각 위상차에 대응하는 합성파동은 각각 (d), (e), (f)이다.

## 8. 정지파 (정상파)

**10 10** 16-10절에서는 파장과 진폭이 같은 사인모양의 두 파동이 같은 방향으로 진행하는 경우를 논하였다. 만일 이들이 반대 방향으로 진행한다면 어떻게 될까? 이번에도 중첩원리를 적용하여 합성파동을 구할 수 있다.

이러한 경우를 그림 16-16에 그림으로 나타내었다. 그림 16-16a는 왼쪽으로, 그림 16-16b는 오른쪽으로 진행하는 파동이고, 그림 16-16c는 중첩원리로 얻은 합성파동이다. 이러한 합성파동의 특징은 항상 정지상태로 고정된 **마디**라고 부르는 점들이 있다는 것이다. 인접한 마디들의 중간점을 **배리**라고 부르는데, 이곳에서 합성파동의 진폭이 최대이다. 그림 16-16c의 파동은 파형이 좌우로 진행하지 않고 변위의 최대점과 최소점이 변하지 않기 때문에 **정지파**라고

파동이 서로 통과할 때  
어떤 점들은 전혀 움직이지 않고,  
어떤 점들은 많이 움직인다.



**그림 16-16** (a) 아래에 표시한 시간에 왼쪽으로 이동하는 파동의 순간그림( $T$ 는 진동의 주기이다), (b) 같은 시간에 오른쪽으로 이동하는 동일한 파동의 순간그림, (c) 같은 줄에서 두 파동의 중첩에 대한 순간그림. 시간  $t = 0, T/2, T$ 에서 마루와 마루, 골과 골이 같게 배열되어 완전 보강간섭이 일어난다.  $t = T/4, 3T/4$ 에서는 골과 마루가 같게 배열되어 완전 소멸간섭이 일어난다. 어떤 점(마디)은 전혀 진동하지 않고 어떤 점(배리)은 최대로 진동한다.

개념 POINT

부른다.



당겨진 줄에서 진폭과 파장이 같은 사인모양의 두 파동이 반대 방향으로 진행하면 서로 간섭하여 정지파를 만든다.

정지파를 분석하기 위해 다음의 두 파동을 고려해 보자.

$$y_1(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t) \quad (16-58)$$

$$y_2(x, t) = y_m \sin(kx + \omega t). \quad (16-59)$$

두 파동에 중첩원리를 적용하면 합성파동은

$$y'(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx + \omega t)$$

이다. 여기서 식 16-50의 삼각함수 관계식을 이용하면

$$y'(x, t) = [2y_m \sin kx] \cos \omega t \quad (16-60)$$

변위

$$y'(x, t) = [2y_m \sin kx] \cos \omega t$$

x에서 진동하는 항  
진폭의 크기

**그림 16-17** 식 16-60의 합성 파동은 정지파이고, 반대 방향으로 진행하는 진폭과 파장이 같은 사인모양의 두 파동이 간섭하여 만든다.

를 얻고, 이 결과가 그림 16-17에 나타나 있다. 이식은 식 16-17의 형태가 아니기 때문에 진행파동이 아니다.

식 16-60의 [ ]안에 있는  $2y_m \sin(kx)$ 는 위치  $x$ 에 있는 줄의 요소가 진동하는 진폭이라고 할 수 있다. 그러나 진폭은 항상 양수이고,  $\sin(kx)$ 는 음수가 될 수 있으므로,  $2y_m \sin(kx)$ 의 절대값을  $x$ 에서의 진폭이라고 한다.

진행하는 사인모양 파동에서 진폭은 모든 줄의 요소에서 똑같다. 그러나 정지파에서는 위치에 따라서 진폭이 변한다. 예를 들어 식 16-60의 정지파에서  $\sin(kx) = 0$ 이 되는 모든  $kx$  값, 즉 다음 값에서 진폭은 0이다.

$$kx = n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (16-61)$$

이 식에  $k = 2\pi/\lambda$ 를 대입하고 다시 정리하면 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$x = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{마디}). \quad (16-62)$$

이것은 식 16-60의 정지파에서 진폭이 0인 마디의 위치이다. 인접한 마디는 반파장( $\lambda/2$ )만큼 떨어져 있다.

식 16-60의 정지파는  $|\sin(kx)| = 1$ 이 되는 다음의  $kx$ 값에서 최대 진폭  $2y_m$ 을 가진다.

$$kx = \frac{1}{2}\pi, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi, \dots$$

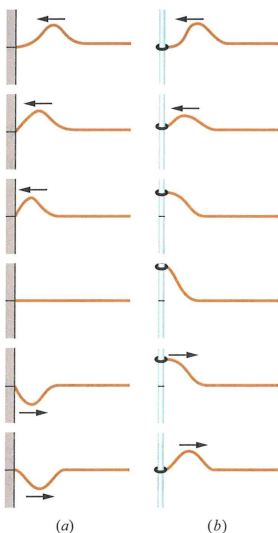
$$= (n + \frac{1}{2})\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (16-63)$$

식 16-63에  $k = 2\pi/\lambda$ 를 대입하면 다음과 같다.

$$x = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{배}). \quad (16-64)$$

이것은 식 16-60의 정지파에서 진폭이 최대가 되는 배의 위치이다. 배는 반 파장씩 떨어져 있

펄스가 줄 끝에서 반사될 수 있는 두 가지 방법.



**그림 16-18** (a) 오른쪽에서 입사한 펄스가 벽에 고정되어 있는 왼쪽 끝에서 반사된다. 반사펄스는 입사펄스와 위상이 반대가 된다. (b) 줄의 왼쪽 끝이 마찰 없이 막대의 아래위로 움직일 수 있는 고리에 묶여 있다. 이때 반사펄스는 뒤집히지 않고 위상은 변하지 않는다.

므로 마디들의 중간점에 위치한다.

**경계면에서의 반사** 팽팽한 줄의 진행파동이 줄의 먼 끝에서 반사하게 만들면 정지파를 얻을 수 있다. 입사파와 반사파는 식 16-58, 16-59로 표기할 수 있고 정지파의 형태로 합성할 수 있다.

그림 16-18은 단일펄스가 경계면에서 반사하는 모습이다. 그림 16-18a처럼 줄의 왼쪽을 고정하면 펄스가 끝에 도착할 때 지지대(벽)를 위로 끌어올리려 한다. Newton의 제3법칙에 의하여 지지대는 반대 방향으로 같은 크기의 힘을 작용한다. 이 반작용은 지지대에 펄스를 만들고 줄을 따라서 입사한 펄스와 반대 방향으로 진행한다. 이러한 종류의 “강한” 반사에는 줄의 끝이 고정되어 있으므로 지지대의 위치가 마디가 되어야 한다. 즉, 입사펄스와 반사펄스는 부호가 달라야 이 점에서 서로 상쇄될 수 있다.

그림 16-18b에는 줄의 왼쪽 끝이 막대를 따라 마찰 없이 움직일 수 있는 가벼운 고리에 걸려 있다. 입사펄스가 도달할 때 고리는 막대를 따라 위로 올라간다. 고리가 움직일 때 줄을 위로 끌어올리며 입사펄스와 부호와 진폭이 같은 반사펄스를 만든다. 이러한 “약한” 반사에서는 입사펄스와 반사펄스가 서로 보강되어 줄의 끝은 두 배가 된다. 즉, 고리의 최대 진폭은 각 펄스의 두 배이다.

## 개념 POINT

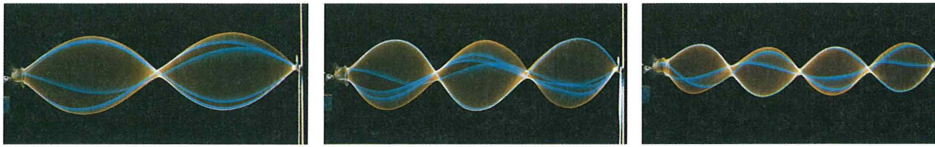


## 9. 정지파의 공명

10 10

두 끝이 고정된 팽팽한 줄을 생각해 보자. 줄을 따라 오른쪽으로 사인모양의 파동을 연속적으로 보낸다고 하자. 줄을 따라 오른쪽으로 진행하는 사인파동이 오른쪽 끝에 도달하면 왼쪽으로 되돌아가는 반사가 일어난다. 이때 되돌아가는 파동은 오른쪽으로 진행하는 파동과 중첩된다. 한편 왼쪽으로 진행하는 파동도 왼쪽 끝에서 반사되어 오른쪽으로 진행하여 결국 양쪽으로 진행하는 두 파동이 중첩된다. 다시 말하면 서로 간섭하는 진행파들이 많이 생긴다.

어떤 진동수에서 그림 16-19처럼 두 진행파동의 간섭은 배와 마디를 가진 정지파(또는 진동모



**그림 16-19** 줄의 왼쪽 끝을 진동시킬 때 생기는 (불완전한) 정지파의 파형을 찍은 선풍사진. 이런 정지파의 파형은 특정한 진동수에서 일어난다.

드를 만들어낸다. 이런 정지파는 **공명상태**에서 만들어지고, 줄이 공명한다고 한다. 이때의 진동수를 **공명진동수**라 한다. 줄이 공명진동수와 다른 진동수로 진동하고 있다면 정지파는 생기지 않고, 오른쪽과 왼쪽으로 진행하는 파동들이 서로 소멸간섭하여 작은 진동만 남는다.

거리  $L$ 만큼 떨어진 두 고정단 사이의 팽팽한 줄에 생기는 공명진동수를 구해 보자. 양 끝이 고정되어 진동하지 않기 때문에 양 끝에 마디가 생긴다. 이렇게 될 수 있는 가장 간단한 형태가 그림 16-20a이다. 줄의 중심에 배가 한 개 있다.  $L$ 은 정지파 파장의 절반인  $\lambda/2$ 와 같다. 따라서  $\lambda/2 = L$ 이다. 이 조건은 좌우로 진행하는 두 파동이 간섭하여 이런 형태의 정지파를 만들려면 파장이  $\lambda = 2L$ 이어야 한다는 뜻이다.

두 번째로 간단한 파동 모양이 그림 16-20b이다. 여기서는 세 개의 마디와 두 개의 배가 있다. 이런 정지파를 얻으려면 좌우로 진행하는 파동의 파장이  $\lambda = L$ 이어야 한다. 세 번째 파형은 그림 16-20c로서, 마디가 네 개, 배가 세 개이므로  $L = 3\lambda/2$ 이다. 이런 식으로 더 복잡한 파형을 계속해서 만들 수 있다. 각각을 만드는 과정에서 파동의 모양은 이전의 파동보다 한 개의 마디와 한 개의 배가 더 생기고, 길이  $L$  안에  $\lambda/2$ 씩 더 들어가게 된다.

따라서 줄의 길이  $L$ 과 파장  $\lambda$ 와의 관계를

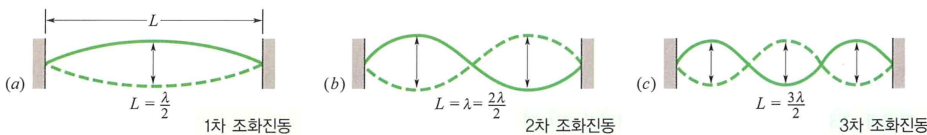
$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (16-65)$$

로 표기할 수 있다. 식 16-13에서 이러한 파장에 해당하는 공명진동수는 다음과 같다.

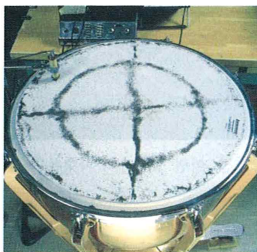
$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (16-66)$$

여기서  $v$ 는 진행파동의 속력이다.

식 16-66에서 공명진동수는  $n = 1$ 에 해당하는 가장 낮은 공명진동수  $f = v/2L$ 의 정수배임을 알 수 있다. 가장 낮은 공명진동수를 갖는 진동모드를 **기본모드** 또는 **제1조화모드**라고 부른다.  $n$



**그림 16-20** 양 끝을 고정시켜 당긴 줄에서 정지파가 발생하도록 줄이 진동한다. (a) 가장 간단한 파형은 하나의 고리를 가진다. (b) 두 번째로 간단한 파형은 두 개의 고리를 가진다. (c) 세 번째로 간단한 파형은 세 개의 고리를 가진다.



**그림 16-21** 케틀드럼의 진동판에 검은 분말가루를 뿌려서 눈으로 볼 수 있게 만든 여러 정지파형 중의 하나. 사진의 왼쪽 위에 위치한 진동자에 의해서 진동판에 단일 진동수의 진동이 일어나도록 하면 분말들은 2차원의 경우에 직선과 원으로 이루어진 마디에 모여든다.

$= 2, 3$  등에 해당하는 진동모드들은 제2조화모드, 제3조화모드 등으로 부른다. 이러한 진동모드에 대한 진동수를  $f_1, f_2, f_3$ 으로 표기한다. 진동모드 전체를 **조화계열**이라고 하고  $n$ 을  $n$ 번째 조화모드의 **조화차수**라고 한다.

일정한 장력의 현들은 각각 특정한 진동모습에 해당하는 공명진동수를 갖고 있다. 따라서 공명진동수가 가청범위이면 줄의 모양에 따라 다른 소리를 들을 수 있다. 공명은 2차원(그림 16-21의 케틀드럼의 표면)과 3차원(고층건물의 흔들림과 비틀림)에서도 일어난다.

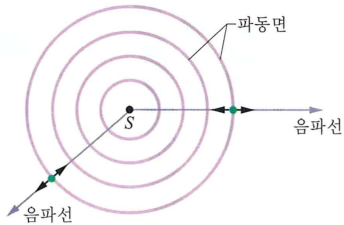
개념 POINT

## 10. 음파

### (1) 개관

#### 11 6

16장에서 배운 바와 같이 역학적 파동은 매질이 필요한 파동이다. 역학적 파동에는 두 가지 형태, 즉 가로파동과 세로파동이 있다. 가로파동은 파동의 진행



**그림 17-2** 점원  $S$ 에서 나온 음파가 3차원 매질로 퍼져나간다. 파동면은  $S$ 가 중심인 구형을 이루며 음파선은 지름방향이다. 양 방향 화살표는 매질 요소가 음파선과 나란하게 진동한다는 뜻이다.

방향과 수직하게 매질이 진동하고, 세로파동은 파동의 진행방향과 나란하게 매질이 진동하는 파동이다.

이 장에서는 세로파동인 **음파**를 다룬다. 지질탐사단은 석유를 찾기 위해, 선박은 해저의 장애물을 탐지하기 위해, 잠수함은 추진기에서 발생하는 특정 소음을 감지해서 다른 잠수함을 몰래 추적하기 위해 음파를 이용한다. 그림 17-1은 초음파가 인체나 동물의 조직과 어떻게 반응하는지 보여준다. 이 장에서는 가청영역의 진동수로 공기 중에서 전파되는 음파를 주로 다루기로 한다.

그림 17-2에는 음파를 논의하기 위한 여러 개념들이 있다. 점  $S$ 는 모든 방향으로 음파를 방출하는 **점원**이다. 파동면과 음파선은 음파의 **진행방향**과 **퍼짐**을 나타낸다. **파동면**은 음파로 인한 공기의 진동이 같

은 값을 가지는 면이다. 파동면들은 점원의 2차원적 표현에서 원으로 표시한다. **음파선**은 파동면의 진행방향을 가리키며 파동면과 수직인 직선이다. 음파선에 중첩된 양 방향 화살표는 세로파동의 진동이 음파선과 나란하다는 뜻이다.

3차원에서는 그림 17-2처럼 점원 근처에서 파동면이 구형으로 퍼져 나간다. 이를 **구면파**라 한다. 파동이 진행함에 따라 파동면의 반지름은 점점 커지고 곡률은 감소한다. 점원으로부터 아주 먼 곳에서 파동면은 평면(2차원에서는 직선)같이 되며, 이를 **평면파**라 한다.

#### 개념 POINT

(2) 음파의 속력(음속)

17-1 U

역학적 파동인 가로파동 또는 세로파동의 속력은 운동에너지를 저장하는 매질의 관성적 특성과 퍼텐셜에너지를 저장하는 매질의 탄성적 특성에 의존하며, 속력의 일반적인 표현은 식 16-26이다. 즉, 팽팽한 줄에 생긴 가로파동의 속력은 다음과 같다.

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \sqrt{\frac{\text{탄성적 특성}}{\text{관성적 특성}}} \quad (17-1)$$

여기서 (가로파동이면)  $\tau$ 는 줄의 장력이고  $\mu$ 는 줄의 선밀도이다. 만약 매질이 공기이고 파동이 세로파동이면  $\mu$ 에 대응되는 관성에 관한 특성은 공기의 부피밀도  $\rho$ 라는 것을 짐작할 수 있다. 그러면 탄성적인 특성에 대해서는 어떤 양을 사용해야 할까?

퍼텐셜에너지는 파동이 생긴 팽팽한 줄이 주기적으로 늘어나는 것과 관련이 있다. 음파는 공기를 통하여 전달되므로 퍼텐셜에너지는 공기의 작은 부피가 주기적으로 압축되고 팽창되는 것과 관계있다. 즉, 매질에 가한 압력이 변화할 때 매질의 부피가 변화하는 정도이다. 이러한 특성을 **부피탄성률**  $B$ 라고 하며 식 12-25에서 다음과 같이 정의한다.

$$B = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V} \quad (\text{부피탄성률}). \quad (17-2)$$

여기서  $\Delta V/V$ 는  $\Delta P$ 의 압력변화에 의한 부피의 미소변화량의 비율을 의미한다. 14-3절에서 설

표 17-1 음속 (0°C, 1기압)

매 질	속력 (m/s)
기체	
공기 (0°C)	331
공기 (20°C)	343
헬륨	965
수소	1284
액체	
물 (0°C)	1402
물 (20°C)	1482
바닷물(20°C, 염도 3.5%)	1522
고체	
알루미늄	6420
강철	5941
화강암	6000

명한 바와 같이 압력의 SI 단위는  $\text{N/m}^2$ 인 파스칼(Pa)로 나타낸다. 식 17-2에서  $B$ 의 단위가 파스칼임을 알 수 있다.  $\Delta P$ 와  $\Delta V$ 의 부호는 항상 반대이다. 즉, 매질에 가한 압력이 증가하면( $\Delta P$ 가 양수) 부피요소는 감소한다( $\Delta V$ 는 음수). 식 17-2에서 마이너스 부호를 앞에 붙여서  $B$ 의 값이 항상 양이 되도록 한다. 식 17-1에서  $\tau$ 를  $B$ 로,  $\mu$ 를  $\rho$ 로 바꾸면 밀도가  $\rho$ 이고 부피탄성률이  $B$ 인 매질에서 음속을 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (\text{음속}). \quad (17-3)$$

표 17-1은 여러 가지 매질 내에서 음속들이다.

물의 밀도는 공기의 밀도보다 거의 1000배 정도 더 크다. 만약 식 17-3에서 이 부분만 고려하면 공기보다 물속에서 음속이 상당히 작아야 한다. 그러나 표 17-1을 보면 반대이다. 따라서 식 17-3에 의하면

물의 부피탄성률이 공기의 부피탄성률보다 1000배 이상으로 크다고 결론지을 수 있는데, 실제로 그렇다. 물은 공기에 비해서 훨씬 압축하기 어려워서 부피탄성률이 매우 크기 때문이다.

개념 POINT

### (3) 진행음파

진동을 거리  $x$ 와 시간  $t$ 의 사인모양 함수로 표기하기 위하여 코사인함수 또는 사인함수를 사용할 수 있다. 이 장에서는 코사인함수를 사용하여 다음과 같이 표기한다.

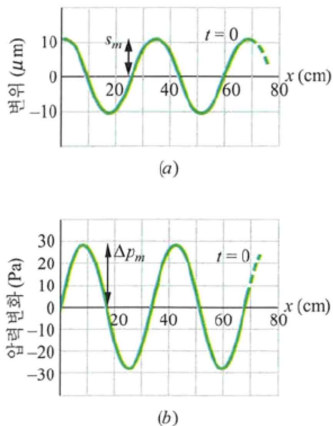
$$s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t). \quad (17-12)$$

그림 17-5a에 이식의 각 항에 대한 설명이 있다. 여기서  $s_m$ 은 변위진폭으로 평형위치에 대한 공기요소의 최대변위이다(그림 17-4b 참조). 음파(세로파동)의 각파동수  $k$ , 각진동수  $\omega$ , 진동수  $f$ , 파장  $\lambda$ , 속력  $v$ , 그리고 주기  $T$ 는  $\lambda$ 가 공기의 압축과 팽창이 반복되는 거리(그림 17-4a 참조)라는 것 이외에는 가로파동의 경우와 똑같이 정의한다(여기서는  $s_m$ 의 값이  $\lambda$ 보다 아주 작다고 가정한다).

(a)  $s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t)$   
 변위진폭  $s_m$       진동항  $\cos(kx - \omega t)$

(b)  $\Delta p(x, t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t)$   
 압력진폭  $\Delta p_m$       압력변화항  $\sin(kx - \omega t)$

**그림 17-5** 진행 음파의 (a) 변위함수 및 (b) 압력변화 함수는 진폭과 진동항으로 표현한다.

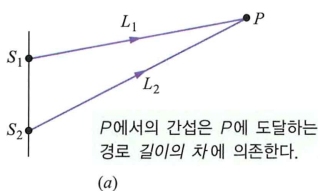


**그림 17-6** (a)  $t = 0$ 일 때 변위함수(식 17-12)의 그래프, (b) 식 17-13의 압력변화 그래프. 두 그래프는 1000 Hz의 음파이며, 이 정도의 압력진폭은 통증을 주기 시작한다.

### (4) 음파의 간섭현상

**II U** 가로파동처럼 음파도 간섭을 일으킬 수 있다. 같은 방향으로 진행하는 동일한 두 음파의 간섭을 생각해 보자. 그림 17-7a에 이와 같은 상황을 어떻게 만들어내는지 나타내었다. 두 점원  $S_1$ 과  $S_2$ 는 파장  $\lambda$ 와 위상이 같은 음파를 발생한다. 두 파동의 위상이 같으므로 점원에서 나올 때의 변위는 항상 똑같다. 그림 17-7a에서 점  $P$ 를 통과하는 파동을 고려하자. 이때  $P$ 점까지의 거리가 점원들 사이의 거리보다 매우 크다고 가정하면, 어렵잡아 두 파동은 나란히 진행한다고 볼 수 있다.

만일 두 파동이  $P$ 점까지 동일한 거리를 진행하면, 두 파동은  $P$ 점에서 같은 위상을 가지므로



차이가 예를 들어  $2.0\lambda$ 라면 파동은 정확히 같은 위상으로 도달한다. 이것이 가로파동일 때의 모양이다.

**그림 17-7** (a) 두 점원  $S_1$ 과  $S_2$ 가 위상이 같은 구면파를 발생한다. 음파선을 따라 파동은 동일한 점  $P$ 를 지나간다. (가로파동으로 나타낸) 파동이 (b) 정확히 같은 위상으로 (c) 정확히 반대 위상으로  $P$ 에 도달한다.

가로파동처럼 세로파동도  $P$ 점에서 완전 보강간섭을 일으킨다. 하지만 그림 17-7a에서  $S_2$ 가 진행한 길이  $L_2$ 는  $S_1$ 이 진행한 길이  $L_1$ 보다 길다. 진행거리가 다르다면 파동은  $P$ 점에서 위상이 같지 않을 수 있다. 즉,  $P$ 점에서의 위상차  $\phi$ 는 경로차  $\Delta L = |L_1 - L_2|$ 에 의존한다.

위상차  $\phi$ 와 경로차  $\Delta L$  간의 관계는  $2\pi$ 의 위상차가 하나의 파장에 해당하므로(16-4절), 그 비율은

### 개념 POINT



(b)



차이가 예를 들어  $2.5\lambda$ 라면 파동은 정확히 반대 위상으로 도달한다. 이것이 가로파동일 때의 모양이다.

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{\Delta L}{\lambda}, \quad (17-20)$$

로 쓸 수 있으며, 이로부터 다음을 얻는다.

$$\phi = \frac{\Delta L}{\lambda} 2\pi. \quad (17-21)$$

완전 보강간섭은  $\phi$ 가  $0, 2\pi$  또는  $2\pi$ 의 정수배일 때 일어나므로

(c)

$$\phi = m(2\pi) \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{완전 보강간섭}) \quad (17-22)$$

로 표기할 수 있다. 따라서 식 17-21로부터  $\Delta L/\lambda$ 의 비율이

$$\frac{\Delta L}{\lambda} = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{완전 보강간섭}) \quad (17-23)$$

일 때 보강간섭을 한다. 예컨대 그림 17-7a에서 경로차  $\Delta L = |L_1 - L_2|$ 가  $2\lambda$ 라면,  $\Delta L/\lambda = 2$ 이므로, P에서 완전 보강간섭을 한다. 왜냐하면 P점에서  $S_1$ 으로부터  $2\lambda$ 만큼 위상이 이동된  $S_2$ 는 정확히 같은 위상을 갖기 때문이다.

완전 소멸간섭은  $\phi$ 가  $\pi$ 의 반정수배일 때 일어나므로

$$\phi = (2m + 1)\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{완전 소멸간섭}) \quad (17-24)$$

로 표기할 수 있다. 즉,  $\Delta L/\lambda$ 의 비율이

$$\frac{\Delta L}{\lambda} = 0.5, 1.5, 2.5, \dots \quad (\text{완전 소멸간섭}) \quad (17-25)$$

일 때 소멸간섭을 한다. 그림 17-7a에서 경로차  $\Delta L = |L_1 - L_2|$ 가  $2.5\lambda$ 라면  $\Delta L/\lambda = 2.5$ 이므로, P에서 완전 소멸간섭을 한다(그림 17-7c). 왜냐하면 P점에서  $S_1$ 으로부터  $2.5\lambda$ 만큼 위상이 이동된  $S_2$ 는 정확히 반대 위상을 갖기 때문이다.

## (5) 악기



음악적인 소리는 진동하는 줄(기타, 피아노, 바이올린)이나 막(북 종류), 공기관(플루트, 오보에, 파이프 오르간, 디제리두(그림 17-12 참조)], 나무판이나 쇠파이프(목금, 실로폰), 또는 다른 진동체들을 써서 만들 수 있다. 대부분의 악기는 하나 이상의 진동하는 부분이 있다.

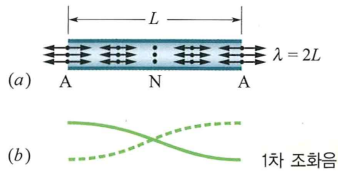


그림 17-12 악기를 연주하면 디제리두(관) 속의 공기기둥이 진동한다.

16장에서 보았듯이 양 끝이 고정된 팽팽한 줄에 정지파가 생길 수 있다. 정지파는 줄을 따라 진행하는 파동들이 양 끝에서 반사되기 때문에 생긴다. 파동의 파장이 줄의 길이와 잘 맞으면 반대 방향으로 진행하는 파동들이 중첩되어 정지파(또는 진동모드)를 형성한다. 그러한 조건이 만족되는 음파의 파장은 줄의 공명진동수에 대응된다. 정지파의 이점은 줄이 지속적으로 큰 진폭으로 진동하여 주위의 공기를 주기적으로 밀어내고 끌어당김으로써 줄과 같은 진동수의 음파를 발생시킬 수 있다는 것이다. 이러한 음파의 발생은 기타 연주가에게 매우 중요하다.

공기관에서도 비슷한 방식으로 정지파를 발생시킬 수 있다. 음파는 관 속의 공기를 통해 진행하다가 양 끝에서 반사된다(반사는 한 끝이 열려 있어도 일어나지만 양 끝이 닫혀 있을 때보다 완전하지는 못하다). 음파의 파장이 관의 길이와 잘 맞으면 관 속에서 반대 방향으로 진행하는 파동들이 중첩되어 정지파를 형성한다. 그러한 조건을 만족시키는 음파의 파장은 관의 공명진동수에 대응된다. 정지파의 이점은 관 속의 공기가 안정적이고 큰 진폭으로 진동하여

배(최대진동)는 열린 끝에서 생긴다.



**그림 17-13** (a) 양 끝이 변위(A)가, 중간에 마디(N)가 있는 관 속의 음파(세로파동)에서 생기는 가장 간단한 정지파 모양. (이중 화살로 나타낸 세로변위는 매우 과장하여 그렸다) (b) 이에 대응하는 줄의 파동(가로파동)모양.

관 속의 진동과 같은 음파를 열린 끝으로 내보낼 수 있다는 것이다. 이러한 음파의 발생은 예를 들어 오르간 연주자에게는 매우 중요하다.

정지파의 다른 특성들은 줄의 파동과 비슷하다. 관의 막힌 끝에는 줄의 고정단과 같은 마디가 있어야 한다. 그리고 관의 열린 끝에는 그림 16-18b처럼 자유자재로 움직이는 고리에 연결된 줄의 끝과 같이 배가 있어야 한다(실제로는 관의 열린 끝에 대한 배는 끝으로부터 약간 밖에 있지만 여기서는 더 이상 자세히 다루지 않겠다).

그림 17-13a는 양 끝이 열린 관 속에 형성될 수 있는 가장 간단한 정지파이다. 열린 양 끝에는 배가 생기고 관의 중간에는 마디가 생긴다. 정지 세로음파를 그림 17-13b처럼 가로파동인 줄의 정지파로 표시하면 이해하기가 쉽다.

그림 17-13a의 정지파 모양을 기본모드 또는 제1조화모드라고 한다.

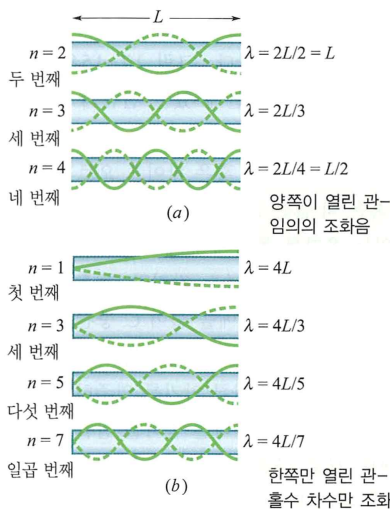
이러한 모드가 형성되려면 길이가  $L$ 인 관 속의 음파는  $L = \lambda/2$ , 즉  $\lambda = 2L$ 의 파장을 가져야 한다. 줄의 파동처럼 표시해서 양 끝이 열린 관에 대한 정지파 모양을 그림 17-14a에 나타내었다. 제2조화모드에서는 파장  $\lambda = L$ 이다. 제3조화모드에서는  $\lambda = 2L/3$ 이다.

일반적으로 양 끝이 열린 길이가  $L$ 인 관의 공명진동수는

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (17-38)$$

의 파장에 대응하며  $n$ 은 조화차수라고 한다. 따라서 양 끝이 열린 관의 공명진동수는 다음과 같다.

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{양 끝이 열린 관}). \quad (17-39)$$



여기서  $v$ 는 음속이다.

그림 17-14b는 한쪽 끝만 열린 관 속에 형성되는 몇 개의 정지파 모양이다. 열린 끝에는 배가 생기고 닫힌 끝에는 마디가 생긴다. 가장 간단한 모양은  $L = \lambda/4$ , 즉  $\lambda = 4L$ 의 파장이고, 다음으로 간단한 모양의 파장은  $L = 3\lambda/4$ , 즉  $\lambda = 4L/3$ 이다.

일반적으로 한끝만 열린 길이  $L$ 의 관에 대한 공명진동수는

$$\lambda = \frac{4L}{n} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (17-40)$$

의 파장에 대응하며, 조화차수  $n$ 은 홀수이어야 한다. 이때의 공명진동수는 다음과 같다.

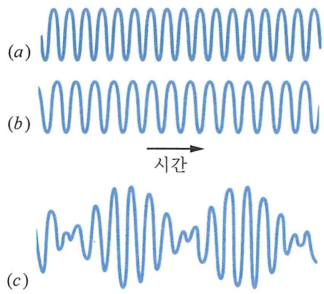
**그림 17-14** 관 속의 정지파를 표시하기 위해 관 위에 그린 정지파 모양 (a) 관의 양 끝이 열려 있으므로 어떤 조화모드도 존재할 수 있다. (b) 한끝만 열려 있으면 홀수 차수의 조화모드만이 생긴다.

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{4L} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (\text{한끝이 열린 관}). \quad (17-41)$$

한끝이 열린 관 속에는 홀수 차수의 조화모드만이 존재한다. 즉  $n = 2$ 인 제2조화모드는 형성될 수 없다. 주목해야 할 점은 이와 같은 관에서 “3차 조화진동”이라고 하면 조화차수  $n$ 을 나타낸다는 것이다(세 번째 가능한 조화음을 뜻하는 것이 아니다). 마지막으로 양쪽이 열린 관에 대한 식 17-38과 17-39에는 숫자 2와 임의의 정수값  $n$ 이 있지만, 한쪽이 열린 관에 대한 식 17-40과 17-41에는 숫자 4와 홀수값인  $n$ 만 있다는 것을 주의하여야.

(6) 맥놀이 현상

I / U



수 분 간격으로 552 Hz와 564 Hz의 두 소리를 듣는다면 이들을 구별하기 어려울 것이다. 그러나 동시에 귀에 도달하면 두 진동수의 평균인 558 Hz의 소리를 듣게 된다. 또한 소리의 세기가 뚜렷하게 변화한다. 즉, 느리게 너울너울 밀려오듯이 증가하거나 감소하면서 두 진동수의 차이인 12 Hz로 맥놀이를 형성한다. 그림 17-17은 이러한 맥놀이 현상을 나타낸다.

어떤 곳에서 두 음파에 의한 시간에 따른 변위의 변화를

$$s_1 = s_m \cos \omega_1 t \quad \text{및} \quad s_2 = s_m \cos \omega_2 t \quad (17-42)$$

그림 17-17 (a, b) 따로 검출된 두 음파의 압력변화  $\Delta p$ . 두 음파의 진동수는 거의 같다. (c) 두 파동이 동시에 검출되었을 때 합성압력의 변화.

라고 하자. 여기서  $\omega_1 > \omega_2$ 이다. 단순화시켜서 두 음파는 같은 진폭을 가진다고 가정하였다. 중첩원리에 따라 합성변위는

$$s = s_1 + s_2 = s_m (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)$$

이다. 삼각함수 관계식(부록 E 참조)

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left[ \frac{1}{2}(\alpha - \beta) \right] \cos \left[ \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \right]$$

를 사용하면 합성변위는

$$s = 2s_m \cos \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t \right] \cos \left[ \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t \right] \quad (17-43)$$

이다. 여기서

$$\omega' = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2) \quad \text{및} \quad \omega = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \quad (17-44)$$

로 나타내면, 식 17-43을 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$s(t) = [2s_m \cos \omega' t] \cos \omega t. \quad (17-45)$$

여기서 두 파동의 각진동수  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 가 거의 같다고 가정하자. 즉, 식 17-44에서  $\omega \gg \omega'$ 이다. 그러면 식 17-45는 각 진동수가  $\omega$ 이고 진폭은 괄호 안(일정하지 않고 각진동수  $\omega'$ 으로 변하는)의 양과 같은 코사인함수로 생각할 수 있다.

최대 진폭은 식 17-45에서  $\cos \omega' t$ 가 +1 또는 -1의 값을 가질 때마다 일어나므로, 코사인함수가 한번 반복될 때마다 두 번 일어난다.  $\cos \omega' t$ 의 각진동수는  $\omega'$ 이므로 맥놀이가 일어나는 각진동수  $\omega_{\text{beat}}$ 는  $\omega_{\text{beat}} = 2\omega'$ 이다. 그러면 식 17-44에 따라

$$\omega_{\text{beat}} = 2\omega' = (2)\left(\frac{1}{2}\right)(\omega_1 - \omega_2) = \omega_1 - \omega_2$$

로 표기할 수 있다. 한편  $\omega = 2\pi f$ 이므로 맥놀이 진동수는 다음과 같다.

$$f_{\text{beat}} = f_1 - f_2 \quad (\text{맥놀이 진동수}). \quad (17-46)$$

개념 POINT

(7) 도플러 효과



경찰차가 1000 Hz의 사이렌을 울리면서 고속도로 변에 주차해 있다. 고속도로 변에 주차해 있는 사람들은 같은 진동수를 들을 것이다. 그러나 관찰자와 경찰차가 다가가거나 멀어지면서 서로 상대운동을 한다면 다른 진동수를 들을 것이다. 예를 들어 경찰차 쪽으로 120 km/h의 속력으로 달린다면 더 높은 진동수(96 Hz 증가한 1096 Hz)로 들릴 것이고, 같은 속력으로 경찰차에서 멀어지는 방향으로 달린다면 더 낮은 진동수(96 Hz 감소한 904 Hz)로 들릴 것이다.

이와 같은 상대운동과 관련된 진동수의 변화가 바로 **Doppler 효과**이다. Doppler 효과는 1842년 오스트리아의 물리학자 Johann Christian Doppler가 제안하였고, 1845년 네덜란드의 Buys Ballot이 “몇 개의 트럼펫을 무개차에 설치하고 기관차로 움직이는” 실험으로 검증하였다.

Doppler 효과는 음파뿐만 아니라 초단파, 단파, 가시광선 등 모든 전자기파에서 나타난다. 여기서는 음파에 대해서만 고려할 것이며 파동이 진행하는 공기를 기준으로 삼는다. 즉, 음원  $S$ 와 검출기  $D$ 의 속력은 공기에 대한 상대적인 속력이다. 또한  $S$ 와  $D$ 는 음속보다는 느리게 서로 접근하거나 멀어진다고 가정한다.

만일 검출기나 음원 또는 둘 다 움직인다면 방출되는 진동수  $f$ 와 검출되는 진동수  $f'$ 은

$$f' = f \frac{v \pm v_D}{v \pm v_S} \quad (\text{Doppler 효과의 일반화}) \quad (17-47)$$

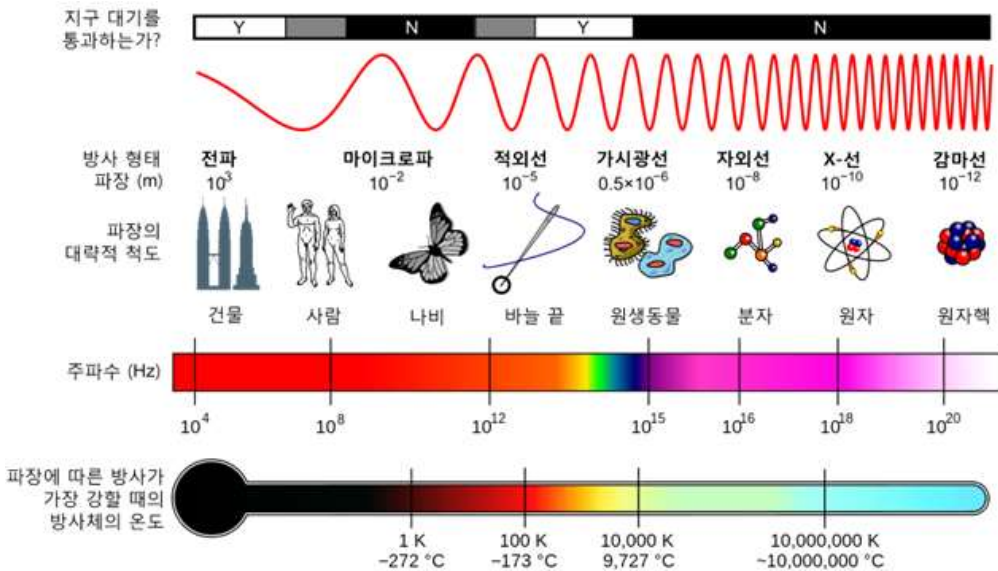
의 관계를 가진다. 여기서  $v$ 는 공기에서 음속이고  $v_D$ 는 공기에 대한 검출기의 상대속력,  $v_S$ 는 공기에 대한 음원의 상대속력이다.  $\pm$ 부호는 다음의 규칙을 따른다.



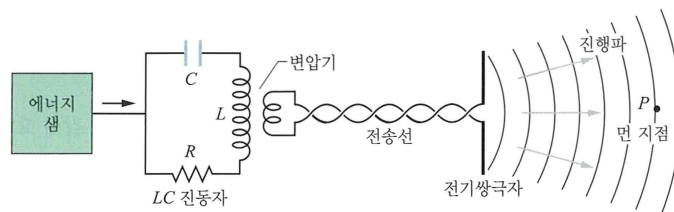
검출기나 음원이 상대방 쪽으로 움직이면 속력의 부호는 진동수가 증가되도록 정한다. 검출기나 음원이 상대방으로부터 멀어지도록 움직이면 속력의 부호는 진동수가 감소되도록 정한다.

간단히 말해서 서로 가까워지면 진동수가 증가하고, 멀어지면 진동수가 감소한다.

11. 전자기파



**그림 33-3** 단파영역의 전자기파 발생장치. LC 진동자가 전자기파를 발생시키는 안테나에 사인모양의 전류를 만든다. 샘에서 멀리 떨어진 점  $P$ 를 지나가는 파동을 감지할 수 있는 검출기가 있다.





$$E = E_m \sin(kx - \omega t) \quad (33-1)$$


$$B = B_m \sin(kx - \omega t). \quad (33-2)$$

여기서  $E_m$ 과  $B_m$ 은 각각 전기장과 자기장의 진폭이고  $\omega$ 와  $k$ 는 각각 파동의 각진동수와 각파동수이다. 이 식으로부터 전기장과 자기장이 전자기파를 형성할 뿐 아니라 이들이 별도로 파동을 이룬다는 것을 알 수 있다. 식 33-1은 전자기파의 전기장 성분이고 식 33-2는 자기장 성분이다. 앞으로 논의하겠지만 이들 두 파동의 성분은 서로 독립적으로 존재할 수 없다.

식 16-13에 의하면 파동의 속력은  $\omega/k$ 이다. 그러나 전자기파인 경우 (진공에서의) 파동의 속력을 나타내는 기호로  $v$ 보다  $c$ 를 사용한다. 다음 절에서 다음과 같은  $c$ 의 값을 구할 것이다.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (\text{전자기파의 속력}). \quad (33-3)$$

여기서  $c$ 의 크기는  $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 이다. 따라서 다음과 같이 요약할 수 있다.

 가시광선을 포함한 모든 전자기파는 진공에서 똑같은 속력  $c$ 로 진행한다.

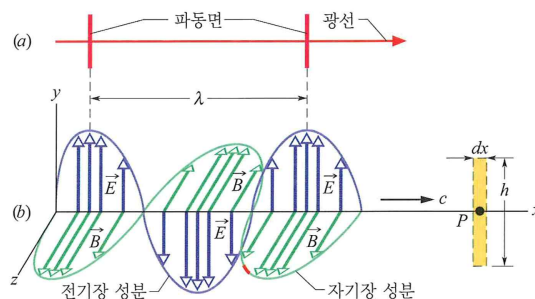
그리고 전자기파의 속력  $c$ 가 다음과 같이 전기장의 진폭과 자기장 진폭의 비와 같다는 것도 설명할 것이다.

$$\frac{E_m}{B_m} = c \quad (\text{진폭의 비}). \quad (33-4)$$

식 33-1을 식 33-2로 나누고 식 33-4를 대입하면 임의의 한 점에서 전기장의 크기와 자기장 크기의 비도 다음과 같이 언제나 광속  $c$ 와 같다.

$$\frac{E}{B} = c \quad (\text{크기의 비}). \quad (33-5)$$

**그림 33-5** (a) 광선과 두 개의 파동면으로 나타낸 전자기파. 파동면들은 한 파장  $\lambda$ 만큼씩 떨어져 있다. (b)  $x$ 축 위치에 따라 전자기파의 전기장  $\vec{E}$ 와 자기장  $\vec{B}$ 를 “순간사진”으로 나타낸 그림. 파동이 점  $P$ 를 지나가는 동안 전기장과 자기장은 그림 33-4와 같이 변한다. 파동의 전기장 성분은 오직 전기장으로만, 자기장 성분은 오로지 자기장으로만 이루어져 있다. 점  $P$ 에서 파선으로 된 직사각형은 그림 33-6에서 사용할 것이다.



■ 변리사 기출문제

개념 POINT

1. [2002년 변리사] (하)

길이가  $L$ 인 줄의 양쪽 끝을 고정시키고 현을 진동시킬 때 나타나는 파동 현상에 대한 설명 중 틀린 것은?<sup>1)</sup>

- ① 기본진동의 파장은  $2L$ 이다.
- ② 현의 길이를 반으로 하면 현의 진동수는 2배가 된다.
- ③ 현의 굵기를 굵게 하여 선밀도를 증가시키면 진동수는 증가한다.
- ④ 현에서 반대로 진행하는 두 개 이상의 파동에 의해서 정상파가 생긴다.
- ⑤ 현의 장력을 크게 하면 진동수는 증가한다.

2. [2003년 변리사] (중) - 전자기파

다음 중 전자기파가 발생하지 않는 경우는?<sup>2)</sup>

- ① 도선에 교류 전류가 흐르고 있을 때
- ② TV 브라운관에 전자가 충돌할 때
- ③ 전하가 원 운동할 때
- ④ 일정한 자기장이 만들어져 있을 때
- ⑤ 원자에서 전자가 들뜬 상태에서 바닥 상태로 전이할 때

개념 POINT

3. [2004년 변리사] (하) - 전자기파

다음의 여러 전자기파를 파장이 긴 것부터 순서대로 올바르게 나열한 것은?<sup>3)</sup>

- ㄱ. X-ray
- ㄴ. 공중파 TV를 송신하는 데 사용되는 전자기파
- ㄷ. 태양에서 제일 많이 나오는 전자기파
- ㄹ. 음식물 요리를 하는 전자레인지에 사용되는 전자기파
- ㅁ. 열적 평형에 의해 사람의 몸에서 가장 많이 나오는 전자기파

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

개념 POINT

4. [2005년 변리사] (하) - 전자기파

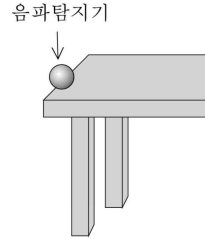
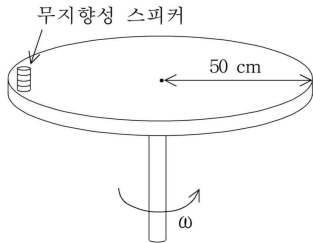
어떤 레이저로부터 방출된 단색광의 전기장의 진폭이  $3 \times 10^6 \text{ V/m}$  이라면 자기장의 진폭은 얼마인가? (단, 이 전자기파는 진공에서 전파되는 평면파라고 가정한다.)<sup>4)</sup>

- ①  $10^{-4} T$       ②  $10^{-2} T$       ③  $10^2 T$       ④  $3 \times 10^2 T$       ⑤  $3 \times 10^6 T$

개념 POINT

5. [2007년 변리사] (중) - 도플러 효과

반지름이  $50\text{cm}$ 인 원판 끝에 진동수가  $1\text{kHz}$ 인 소리를 내는 무지향성 스피커가 고정되어 있고, 원판은  $200\text{rad/s}$ 의 각속도( $\omega$ )로 회전하고 있다. 원판과 높이가 같은 책상 위에 고정된 음파탐지기가 측정하는 스피커 소리 중 가장 높은 진동수는 가장 낮은 진동수의 몇 배인가? 스피커의 크기는 원판의 반지름에 비해 무시될 수 있다. 또한 음파탐지기의 크기도 무시될 수 있으며 모든 방향에 대해서 왜곡 없이 탐지할 수 있다. (단, 공기 중에서 소리의 전파속력은  $340\text{m/s}$ 로 한다.)<sup>5)</sup>



- ①  $\frac{35}{33}$       ②  $\frac{39}{29}$       ③  $\frac{9}{8}$       ④  $\frac{27}{7}$       ⑤  $\frac{11}{6}$

개념 POINT

6. [2009년 변리사] (하) - 맥놀이

진동수가  $200\text{Hz}$ 인 소리굽쇠를 다른 소리굽쇠 A와 나란히 놓아 진동시켰더니 맥놀이 현상이 관찰되었다. 맥놀이 진동수가  $3\text{Hz}$ 일 때 소리굽쇠 A의 진동수에 해당하는 것은? (단, 맥놀이 진동수는 1초당 소리의 강약이 반복되는 회수이다.)<sup>6)</sup>

- ①  $195.5\text{Hz}$       ②  $197\text{Hz}$       ③  $201.5\text{Hz}$       ④  $204\text{Hz}$       ⑤  $206\text{Hz}$

개념 POINT

7. [2010년 변리사] (하) 전자기파

다음 중 가시광선 영역에 있는 빛의 진동수에 해당하는 것은? (단, 진공에서 빛의 속력은  $3 \times 10^8 m/s$ 이다.)<sup>7)</sup>

- ①  $1.5 \times 10^{15} Hz$     ②  $6.0 \times 10^{14} Hz$     ③  $1.5 \times 10^{13} Hz$     ④  $3.0 \times 10^{12} Hz$     ⑤  $1.0 \times 10^{11} Hz$

개념 POINT



8. [2011년 변리사] (중)

그림과 같이 한쪽 끝이 열린 실린더 위에서 소리굽쇠를 쳤다. 실린더에 담긴 물의 수위를 낮추며 실린더의 울림소리와 소리굽쇠가 공명할 때마다 실린더 공기 부분의 길이를 측정하였다.



첫 번째, 두 번째 공명에서 그 길이가 각각  $14.2\text{cm}$ 와  $44.2\text{cm}$ 일 때, 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 공기 중에서 음속은  $340\text{m/s}$ 이다.)<sup>8)</sup>

<보기>

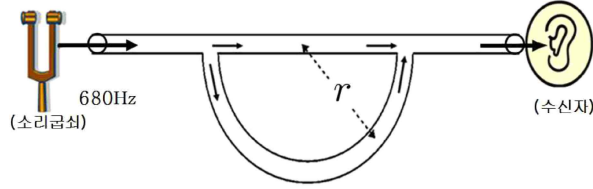
- ㄱ. 소리굽쇠의 진동수는  $600\text{Hz}$ 보다 작다.
- ㄴ. 물의 수위를 더 낮추어 세 번째 공명이 일어난다면 공기 부분의 길이가  $70\text{cm}$ 보다 작다.
- ㄷ. 소리의 크기를 두 배로 할 때, 첫 번째 공명이 일어나는 공기 부분의 길이가  $7.1\text{cm}$ 로 작아진다.

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

개념 POINT

9. [2012년 변리사] (하) - 파동의 간섭

직선과 반원 모양이 연결된 관을 통해 진동수가  $680\text{Hz}$ 인 소리굽쇠의 음파가 진행해 나가고 있다. 이 관의 반대편에서 수신자가 듣는 소리의 세기를 최대한 크게 하기 위한 반원 모양관의 반지름의 최솟값은? (단,  $\pi$ 값은 3으로 하며, 관내의 모든 지점에서 음파의 속도는  $340\text{m/s}$ 로 균일하다. 수신자는 관을 통해서 전파된 소리만 들을 수 있고, 음파의 감쇄는 무시한다.)<sup>9)</sup>



- ①  $30\text{cm}$       ②  $50\text{cm}$       ③  $60\text{cm}$       ④  $75\text{cm}$       ⑤  $80\text{cm}$

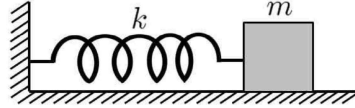
개념 POINT

10. [2014년 변리사] (중)

다음 식은 공기 중에서 속력  $v$ 로 진행하는 음파의 파동식이다.

$$A(x,t) = A_0 \cos(bx - \omega t)$$

그림은 마찰이 없는 수평면에서 질량  $m$ 인 물체가 용수철상수  $k$ 인 용수철에 연결되어 단조화 진동하는 모습을 나타낸 것이다.



이 음파의 진동수와 단조화 진동의 진동수가 같다면, 이 때 위 식에 있는  $\omega$ 와  $b$ 를  $v$ ,  $m$ ,  $k$ 의 함수로 표현한 것으로 옳은 것은? <sup>10)</sup>

- ①  $\omega = \left(\frac{m}{k}\right)^{\frac{1}{2}}, b = \left(\frac{m}{k}\right)^{\frac{1}{2}}/v$       ②  $\omega = \left(\frac{m}{k}\right)^{\frac{1}{2}}, b = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}}/v$
- ③  $\omega = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}}, b = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}}/v$       ④  $\omega = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}}, b = \left(\frac{m}{k}\right)^{\frac{1}{2}}/v$
- ⑤  $\omega = \left(\frac{2k}{m}\right)^{\frac{1}{2}}, b = \left(\frac{m}{2k}\right)^{\frac{1}{2}} \times v$

개념 POINT

11. [2015년 변리사] (하)

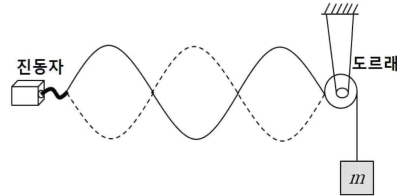
늘어나지 않는 길이가  $L$ 인 줄의 양 끝이 고정되어 있다. 줄의 장력이  $T_1$ 일 때의 제2조화진동수는 장력을  $T_2$ 로 하였을 때 제1조화진동수와 같다면, 장력  $T_1$ 과  $T_2$ 관계식은?<sup>(11)</sup>

개념 POINT

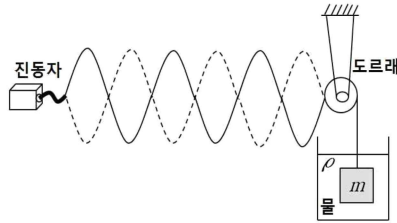
- ①  $T_2 = \frac{T_1}{4}$       ②  $T_2 = \frac{T_1}{2}$       ③  $T_2 = T_1$       ④  $T_2 = 2T_1$       ⑤  $T_2 = 4T_1$

12. [2017년 변리사] (중)

그림 (가)는 수평방향으로 놓인 균일한 줄이 진동자와 도르래 사이에서 진동하는 모습을 나타낸 것이다. 줄의 한쪽 끝에는 도르래를 통해 질량  $m$ 인 추가 매달려 있고, 줄은  $n_1$ 개의 배를 가지는 정상파를 만든다. 그림 (나)와 같이 (가)의 장치를 이용하여 추가 물에 완전히 잠기도록 하면, 줄은  $n_2$ 개의 배를 가지는 정상파를 만든다.



(가)



(나)

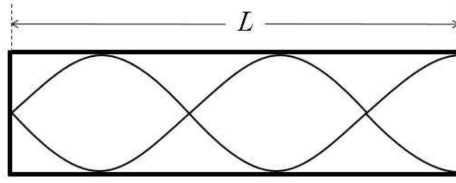
줄에 연결되어 있는 추의 부피는? (단, 줄의 부력과 무게는 무시하고, 물의 밀도는  $\rho$ 이며, 중력가속도는 일정하다.)<sup>12)</sup>

- ①  $\frac{m}{\rho} \left[ 1 + \frac{n_2}{n_1} \right]$       ②  $\frac{m}{\rho} \left[ 1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \right]$       ③  $\frac{m}{\rho} \left[ 1 + \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \right]$
- ④  $\frac{2m}{\rho} \left[ 1 + \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]$       ⑤  $\frac{2m}{\rho} \left[ 1 + \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \right]$

개념 POINT

13. [2018년 변리사] (상) - 폐관

그림은 공기 중에 있는 한 쪽이 닫힌 관에 형성되는 정상파의 한 예를 나타낸 것이다. 관의 길이는  $L$ 이다.



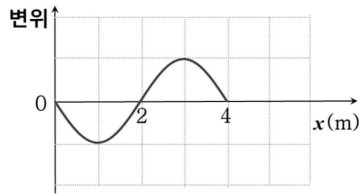
이 관에 형성되는 정상파의 진동수를 갖는 두 음파가 중첩되어 맥놀이 현상이 나타날 때, 맥놀이 진동수의 최솟값은? (단, 공기 중에서 음파의 속력은  $v$ 이다.)<sup>13)</sup>

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

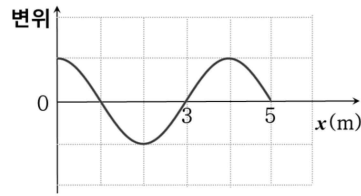
개념 POINT

14. [2019년 변리사] (하)

그림 (가)는  $+x$ 방향으로 일정한 속력으로 진행하는 사인파 A의  $t=0$ 일 때의 모습을 나타낸 것이고, (나)는  $t=\frac{1}{8}$ 초일 때 (가)에서 A가  $+x$ 방향으로 진행한 모습을 나타낸 것이다.



(가)



(나)

파동 A의 진동수(Hz)는?<sup>14)</sup>

- ① 1                      ② 2                      ③ 3                      ④ 4                      ⑤ 5

개념 POINT

15. [2020년 변리사] (하)

잔잔한 수면 위에서 퍼져 나가는 어떤 물결파의 경우, 높이 변화  $y$ 는 위치  $x$ 와 시간  $t$ 의 함수로 다음과 같이 표시된다.

$$y(x, t) = 0.10 \sin(3x - 4t) [m]$$

이 식에서  $x$ 의 단위는 미터[m]이고,  $t$ 의 단위는 초[s]이다. 이 물결파의 파장( $\lambda$ )과 속도( $v$ )는?<sup>15)</sup>

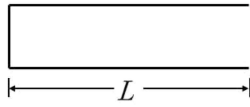
- ①  $\frac{2\pi}{3}[m], \frac{4}{3}[m/s]$       ②  $\frac{1}{3}[m], \frac{4}{3}[m/s]$       ③  $3[m], 12[m/s]$   
 ④  $\frac{3}{2\pi}[m], \frac{3}{4}[m/s]$       ⑤  $3[m], \frac{3\pi}{2}[m/s]$

개념 POINT

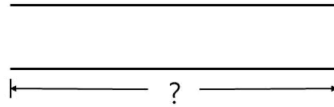


16. [2021년 변리사] (중)

그림 (가)는 길이가  $L$ 인 한 쪽이 막힌 관이고, (나)는 양쪽이 열린 관이다. (가)의 관에서 가장 낮은 음의 정상음파가 (나)의 관에서 정상음파가 되기 위한 관의 최소길이는? (단, 관의 가장자리 효과는 무시한다.)<sup>16)</sup>



(가)



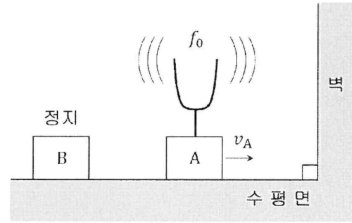
(나)

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

개념 POINT

17. [2022년 변리사] (상) - 이중 도플러효과 및 맥놀이

그림과 같이 학생 A가 진동수  $f_0$ 으로 진동하는 소리굽쇠를 가지고  $v_A$ 의 속력으로 벽을 향해 움직이고 있다. A의 뒤쪽에 정지해 있는 학생 B는 소리굽쇠로부터 나는 소리와 벽에서 반사되어 오는 메아리의 맥놀이를 측정한다.



$v_A = \frac{1}{5}v_0$ 일 때, B가 측정한 맥놀이의 진동수는? (단,  $v_0$ 은 공기 중에서 소리의 속력이다.)<sup>17)</sup>

- ①  $\frac{1}{3}f_0$       ②  $\frac{5}{12}f_0$       ③  $\frac{1}{2}f_0$       ④  $\frac{7}{12}f_0$       ⑤  $\frac{2}{3}f_0$

개념 POINT

18. [2024년 변리사] (하)

다음은 평행한 두 줄에 생긴 가로 파동 P, Q의 높이 변화  $y_P, y_Q$ 를 위치와 시간의 함수로 각각 나타낸 것이다.

$$y_P(x, t) = a \sin(bx - ct), \quad y_Q(x, t) = 2a \sin(3bx - 2ct)$$

이에 관한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단,  $a, b, c$ 는 모두 양의 상수이다.)<sup>18)</sup>

<보기>

ㄱ. 진폭은 Q가 P의 2배이다.

ㄴ. 파장은 Q가 P의  $\frac{1}{3}$ 배이다.

ㄷ. 속력은 Q가 P의  $\frac{3}{2}$ 배이다.

① ㄱ

② ㄷ

③ ㄱ, ㄴ

④ ㄴ, ㄷ

⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

19. [2026년 변리사] (하)

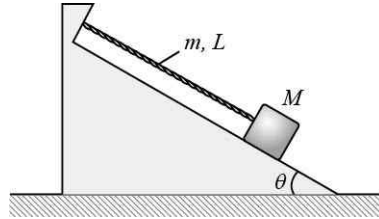
평평하게 당겨진 가느다란 줄에서 발생한 펄스의 속력이  $v = CF^x\mu^y$ 으로 주어진다.  $v$ 는 펄스의 속력,  $F$ 는 줄의 장력,  $\mu$ 는 줄의 선밀도(단위 길이당 질량)이고,  $C$ 는 차원 없는 상수이며,  $x$ 와  $y$ 는 유리수이다. 이 줄의 장력을 2배로 증가시켰을 때 발생하는 속력  $v'$ 은?<sup>19)</sup>

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

개념 POINT

■ 개념확인문제

20. 질량  $M$ 인 물체가 질량  $m$ , 길이  $L$ 인 줄 끝에 매달려서 경사각  $\theta$ 인 빗면 위에 놓여 있다. 단,  $m \ll M$ 을 만족한다. 횡파가 줄의 한 끝에서 반대쪽 끝까지 진행하는 데 걸리는 시간을 구하라.<sup>20)</sup>



개념 POINT

21. 어느 횡파의 파동 함수가 다음과 같다.

$$y(x,t) = (5\text{mm})\sin\pi\left(\frac{x}{12\text{cm}} - \frac{t}{0.03\text{s}}\right)$$

이 파동의 진행 속력은?21)

- ① 0.03 m/s
- ② 4 m/s
- ③ 8 m/s
- ④ 12 m/s
- ⑤ 24 m/s

개념 POINT

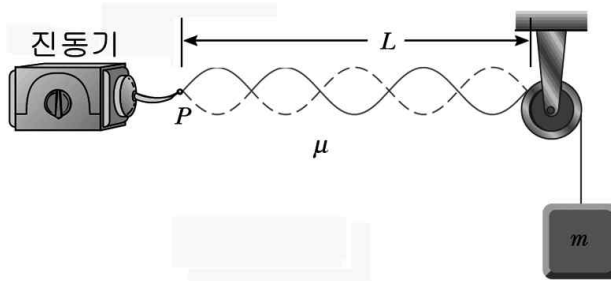
22. 파장과 진폭이 같은 파동  $y_1(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$ ,  $y_2(x, t) = y_m \sin(kx + \omega t)$ 가 있다. 각각의 파장은  $\lambda$ 이다.<sup>22)</sup>

개념 POINT

- (1) 파동  $y_1(x, t)$ 과 파동  $y_2(x, t)$ 의 물리적 차이점은 무엇인지 설명하시오.
- (2) 파동  $y_1(x, t)$ 과 파동  $y_2(x, t)$ 의 중첩에 의한 합성파가 진행파인지 정지파인지를 판단하고 이 합성파의 진폭을 구하시오.
- (3) 합성파에서 항상 정지한 상태로 고정된 마디의 위치  $x$ 를  $\lambda$ 를 이용하여 나타내시오. (조건 : 정수는  $n$ 으로 표시한다.)

23. 그림의 장치에서 진동기는 일정한 진동수  $f$ 로 진동하고 있고 진동기에서 도르래까지의 거리는  $L=2.00\text{m}$ 이다. 추의 질량이  $16\text{kg}$ 일 때와  $25.0\text{kg}$ 일 때 정상파가 생기는 것이 관측되었고 그 사이의 질량에서는 정상파가 생기지 않았다.  
줄의 선밀도는  $\mu = 0.00200\text{kg/m}$ 이다.<sup>23)</sup>

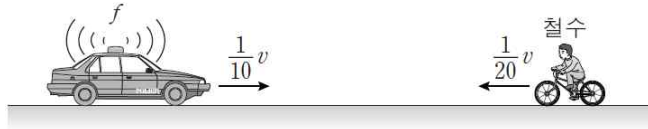
개념 POINT



- (1) 진동기의 진동수는 얼마인가?
- (2) 정상파가 관측되는 추의 질량의 최대값은 얼마인가?



24. 그림과 같이 경찰차가 일정한 진동수  $f$ 의 사이렌 소리를 내며  $\frac{1}{10}v$ 의 속력으로 철수를 향해, 철수는  $\frac{1}{20}v$ 의 속력으로 경찰차를 향해 서로 다가가고 있다.  $v$ 는 공기 중에서 음속이다.



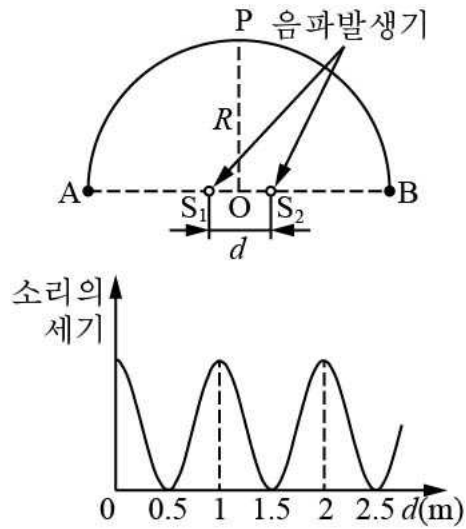
철수가 듣는 사이렌 소리의 파장과 진동수는? (단, 경찰차와 철수는 동일 직선상에서 운동한다.)<sup>24)</sup>

- |   | 파장                          | 진동수               |   | 파장                          | 진동수             |
|---|-----------------------------|-------------------|---|-----------------------------|-----------------|
| ① | $\frac{17}{20} \frac{v}{f}$ | $\frac{22}{19} f$ | ② | $\frac{17}{20} \frac{v}{f}$ | $\frac{7}{6} f$ |
| ③ | $\frac{9}{10} \frac{v}{f}$  | $\frac{22}{19} f$ | ④ | $\frac{9}{10} \frac{v}{f}$  | $\frac{7}{6} f$ |
| ⑤ | $\frac{19}{20} \frac{v}{f}$ | $\frac{22}{19} f$ |   |                             |                 |

개념 POINT

개념 POINT

25. 그림은 직선 AB의 중점 O를 기준으로 같은 거리에 두 음파 발생기  $S_1$ ,  $S_2$ 를 설치하고  $S_1$ 과  $S_2$  사이의 거리  $d$ 를 변화시키면서 반지름  $R$ 인 반원 위의 점들에서 소리의 세기를 측정하는 실험을 나타낸 것이다.  $S_1$ 과  $S_2$ 에서는 세기와 진동수가 일정한 음파가 같은 위상으로 발생하고 있고, P는  $S_1$ 과  $S_2$ 로부터 떨어진 거리가 같은 반원위의 점이다. 그래프는 점 A에서의 소리의 세기를  $d$ 의 변화에 따라 나타낸 결과이다. 다음 물음에 답하시오.<sup>25)</sup>



- (1) 음파 발생기에서 발생하는 소리의 파장을 구하시오.
- (2)  $d$ 가 2m일 때, 반원 위에서 소리가 거의 들리지 않는 지점을 표현하시오.

26. 그림은 진동수가 다른 두 음파 A, B를 발생시키고 있는 구급차를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?<sup>26)</sup>

—<보 기>—

- ㄱ. A와 B는 공기 중에서 진행할 때 공기의 진동에 의해 전달된다.
- ㄴ. 진동수는 A가 B보다 크다.
- ㄷ. B는 공기 중에서보다 물속에서 더 빨리 진행한다.

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

개념 POINT

27. 다음은 어느 횡파를 함수로 표현한 것이다.

$$y(x, t) = (3\text{cm}) \sin 2\pi \left( \frac{x}{2\text{cm}} - \frac{t}{0.01\text{s}} \right)$$

이에 대해 설명으로 옳은 것을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?<sup>27)</sup>

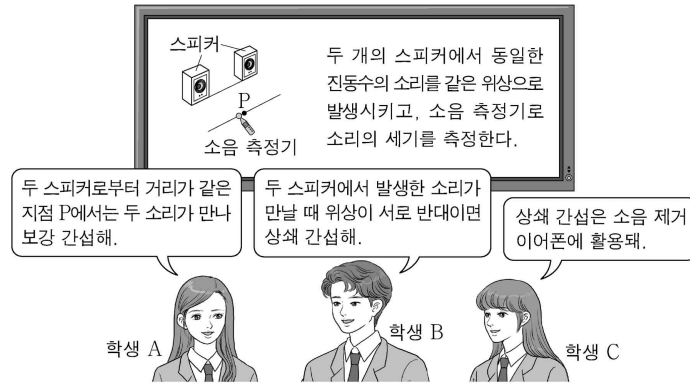
<보 기>

- ㄱ. 이 파동은 왼쪽( $-x$ 방향)으로 진행한다.
- ㄴ. 이 파동은 1초에 100회 진동한다.
- ㄷ. 이 파동의 진행 속력은 2m/s이다.

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

개념 POINT

28. 그림은 소리의 간섭 실험에 대해 학생 A, B, C가 대화하는 모습을 나타낸 것이다.



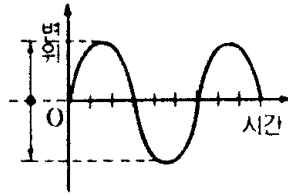
제시한 내용이 옳은 학생만을 있는 대로 고른 것은?28)

- ① A                      ② B                      ③ A, C                      ④ B, C                      ⑤ A, B, C

개념 POINT

29. 그림은 파동이 진행할 때 매질 속에 있는 한 점의 변위를 시간에 따라 나타낸 것이다. 이 그래프로부터 파동에 대하여 알 수 있는 것을 모두 고르라.<sup>29)</sup>

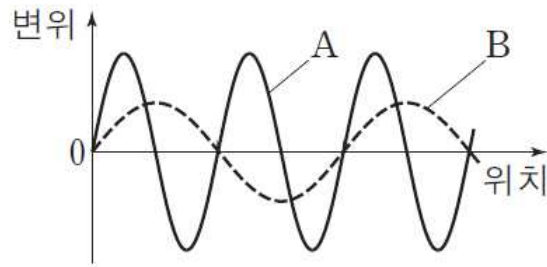
개념 POINT



- ① 파장      ② 진동수      ③ 진폭      ④ 주기      ⑤ 속력

30. 그림은 같은 속력으로 진행하는 파동 A, B의 어느 순간의 변위를 위치에 따라 나타낸 것이다.

개념 POINT



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?<sup>30)</sup>

<보 기>

- ㄱ. 파장은 A가 B보다 작다.
- ㄴ. 진폭은 A와 B가 같다.
- ㄷ. 주기는 A와 B가 같다.

① ㄱ

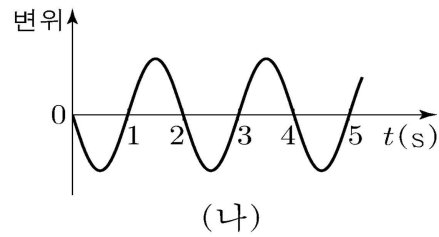
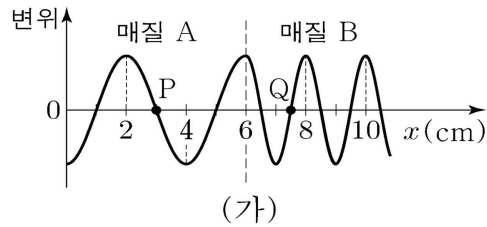
② ㄴ

③ ㄱ, ㄷ

④ ㄴ, ㄷ

⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

31. 그림 (가)는 시간  $t=0$ 일 때,  $x$ 축과 나란하게 매질 A에서 매질 B로 진행하는 파동의 변위를 위치  $x$ 에 따라 나타낸 것이다. 점 P, Q는  $x$ 축상의 지점이다. 그림 (나)는 P, Q 중 한 지점에서 파동의 변위를  $t$ 에 따라 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?<sup>31)</sup>

<보 기>

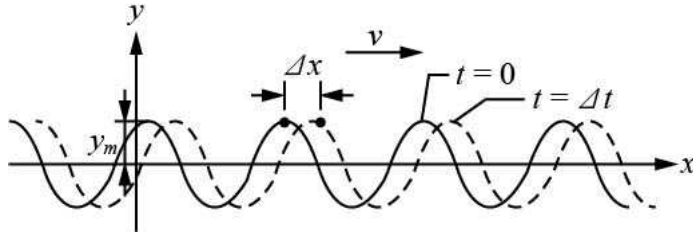
- ㄱ. 파동의 진동수는 2Hz이다.
- ㄴ. (나)는 Q에서 파동의 변위이다.
- ㄷ. 파동의 진행 속력은 A에서가 B에서의 2배이다.

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

개념 POINT



32. 그림과 같이 움직이고 있는 파동을 수식으로 표현하면  $y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$  이다.  
 $y_m = 0.1\text{ m}$ ,  $k = 10\text{ rad/m}$ ,  $\omega = 5\text{ rad/s}$  일 때, 이 파동이 이동하는 속도  $v$  는? <sup>32)</sup>

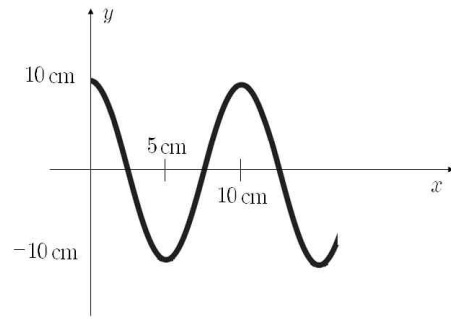


- ① 0.2 m/s
- ② 0.5 m/s
- ③ 1.0 m/s
- ④ 2.0 m/s
- ⑤ 5.0 m/s

개념 POINT

33. 다음 그림은  $+x$  방향으로 진행하는 진동수가  $10\text{ Hz}$  인 파동을 보여준다. 다음 중 옳은 것을 모두 고른 것은 무엇인가?<sup>33)</sup>

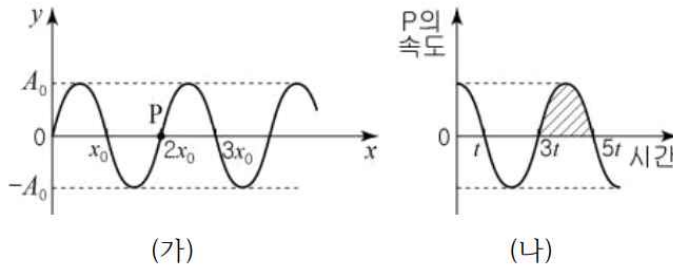
개념 POINT



- a. 파동의 진폭은  $0.1\text{ m}$  이다.
- b. 파동의 파장은  $0.1\text{ m}$  이다.
- c. 파동의 속력은  $1.0\text{ m/s}$  이다.
- d. 파동의 주기는  $0.1\text{ s}$  이다.

- ① a, b
- ② a, b, c
- ③ a, b, d
- ④ a, b, c, d
- ⑤ b, d

34. 그림 (가)는  $y$ 축과 나란하게 진동하는 횡파의 어느 순간의 매질의 변위  $y$ 를 위치  $x$ 에 따라 나타낸 것이고, (나)는 이 순간부터 매질의 한 점 P의 속도를 시간에 따라 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고르시오.<sup>34)</sup>

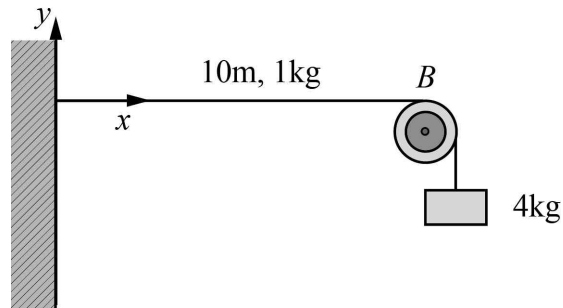
<보 기>

- ㄱ. 파동의 진행 방향은  $-x$  방향이다.
- ㄴ. 파동의 전파 속력은  $\frac{x_0}{2t}$ 이다.
- ㄷ. (나)에서 빗금 친 부분의 면적은  $2A_0$ 이다.

개념 POINT

35. 길이 10m, 질량 1kg인 줄을 그림과 같이 설치해 놓고 질량 4kg인 물체를 한쪽에 매달아 두었다.  $t=0$ 인 순간에 이 줄을 고정된 벽 A에 1초에 10회 상하로 진동하는 모터를 설치하여 사인파 형태의 파동을 만들어주었다. 다음 물음에 답하시오.<sup>35)</sup>

개념 POINT



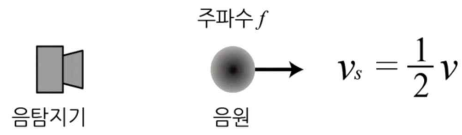
- (1) 이 파동이 전파 속도를 구하시오. (단, 중력가속도는  $g = 10\text{m/s}^2$ 이다).
- (2) 파동이 B에 도달하는 순간 AB사이에는 파동이 몇 파장이나 존재하는가?

36. 길이 2 m, 질량 1 g 인 줄의 양 끝이 장력 500 N 을 받으며 고정되어 있다. 줄을 진동시켜 배가 3개인 정상파가 발생하였다면 정상파의 진동수는?<sup>36)</sup>

- ① 250 Hz
- ② 500 Hz
- ③ 750 Hz
- ④ 1000 Hz
- ⑤ 1300 Hz

개념 POINT

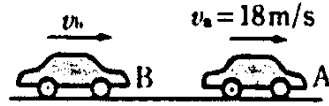
37. 그림은 일정한 주파수  $f$ 로 음파를 발생하는 음원이 음속( $v$ )의 절반 속력인  $v_s = \frac{1}{2}v$ 로 음파 탐지기로 부터 멀어지는 것을 나타낸 것이다. 음파 탐지기에서 측정되는 진동수는? (단, 음파 탐지기는 정지해 있다.)<sup>37)</sup>



- ①  $\frac{1}{2}f$       ②  $\sqrt{\frac{2}{3}}f$       ③  $\frac{2}{3}f$       ④  $\frac{3}{2}f$       ⑤  $\sqrt{\frac{3}{2}}f$

개념 POINT

38. 진동수가  $182\text{Hz}$ 인 2개의 똑같은 음원 A, B가 각각 차에 실려서 오른쪽 그림과 같이 등속도  $v_A$ ,  $v_B$ 로 운동하고 있다. 관측자는  $18\text{m/s}$ 의 속도로 움직이는 음원 A와 함께 있으며, 1초 동안에 2번의 맥놀이를 듣는다(단,  $v_A > v_B$ 이고, 소리의 속력은  $360\text{m/s}$ 이다).<sup>38)</sup>

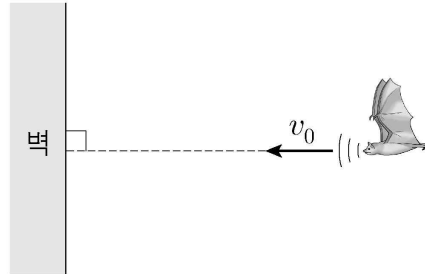


- (1) 관측자가 음원 A로부터 듣는 진동수와 음원 B로부터 듣는 진동수는 각각 얼마인가?
- (2) 음원 B의 속도  $v_B$ 를 구하라.

개념 POINT

39. 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 측정한 반사된 음파의 진동수는  $f$ 이다.  $\frac{f}{f_0}$ 는? (단, 음속은  $v$ 이다.)

개념 POINT

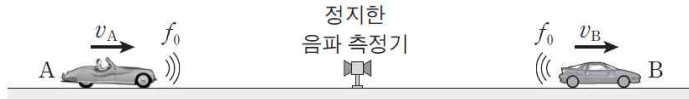


- ①  $\frac{v}{v-v_0}$       ②  $\frac{v+v_0}{v-v_0}$       ③  $\left(\frac{v}{v-v_0}\right)^2$       ④  $\frac{v(v+v_0)}{(v-v_0)^2}$       ⑤  $\left(\frac{v+v_0}{v-v_0}\right)^2$



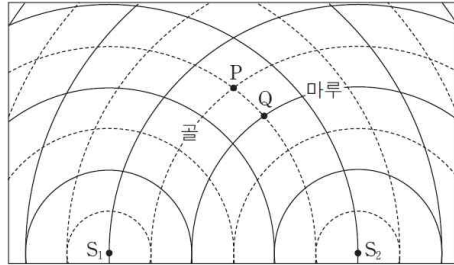
40. 그림과 같이 자동차 A, B가 각각 진동수  $f_0$ 의 소리를 발생하며 일정한 속도  $v_A$ ,  $v_B$ 로 동일 직선상에서 운동하고 있다. 같은 직선 상에 있는 음파 측정기에서 측정한 A, B의 소리의 진동수는 각각  $1.2f_0$ ,  $0.9f_0$ 이다.  $v_A : v_B$ 는?

개념 POINT



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

41. 그림은 두 점  $S_1$ ,  $S_2$ 에서 같은 진폭과 위상으로 발생시킨 두 수면파의  $t=0$ 일 때의 모습을 평면상에 모식적으로 나타낸 것이다. 두 수면파의 파장과 주기는 각각  $\lambda$ 와  $T$ 로 같고 속력은 일정하다. 실선과 점선은 각각 수면파의 마루와 골의 위치를, 점 P와 Q는 평면상에 고정된 두 지점을 나타낸 것이다.<sup>39)</sup>



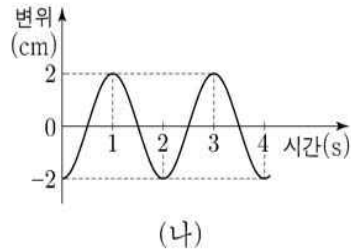
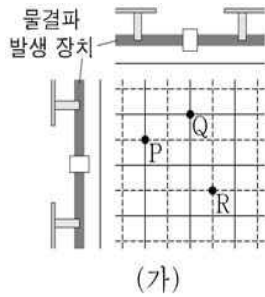
<보 기>

- ㄱ.  $S_1$ ,  $S_2$ 에서 P까지의 두 수면파의 경로차는 0이다.  
 ㄴ.  $t=0$  일 때 수면의 높이는 P에서가 Q에서보다 높다.  
 ㄷ. P에서 수면의 높이는  $t = \frac{T}{2}$  초일 때가  $t=0$ 일 때보다 높다.

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

개념 POINT

42. 그림 (가)는 진폭이 1cm, 속력이 5cm/s로 같은 두 물결파를 나타낸 것이다. 실선과 점선은 각각 물결파의 마루와 골이고, 점 P, Q, R는 평면상의 고정된 지점이다. 그림 (나)는 R에서 중첩된 물결파의 변위를 시간에 따라 나타낸 것이다.



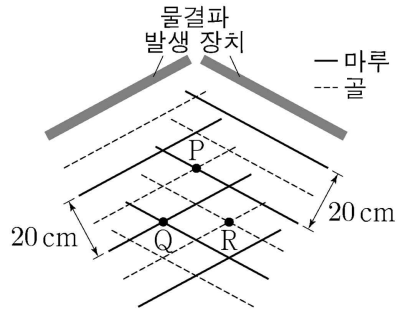
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?<sup>40)</sup>

<보 기>

- ㄱ. 두 물결파의 파장은 10cm로 같다.
- ㄴ. 1초일때, P에서 중첩된 물결파의 변위는 2cm이다.
- ㄷ. 2초일때, Q에서 중첩된 물결파의 변위는 0이다.

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

43. 그림은 진동수와 진폭이 같고 위상이 반대인 두 물결파를 발생시키고 있을 때, 시간  $t=0$  인 순간의 모습을 나타낸 것이다. 두 물결파는 진행 속력이  $20\text{m/s}$ 로 같고, 서로 이웃한 마루와 마루 사이의 거리는  $20\text{cm}$ 이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 점 P, Q, R는 평면상에 고정된 지점이다.)<sup>41)</sup>

<보 기>

- ㄱ. P에서는 상쇄 간섭이 일어난다.
- ㄴ. Q에서 중첩된 물결파의 변위는 시간에 따라 일정하다.
- ㄷ. R에서 중첩된 물결파의 변위는  $t=1$ 초일 때와  $t=2$ 초일 때가 같다.

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

44. 빛의 자기장이  $y$ 축에 평행하게 진동하고  $y$ 축 성분이  $B_y = B_m \sin(kz - \omega t)$ 로 변하면,

(1) 빛은 어느 방향으로 진행하는가?

(2) 동반하는 전기장은 어느 축 방향으로 진동하는가?<sup>42)</sup>

개념 POINT

45. 진공중을 지나가는 전자기파의 전기장 진폭이  $220\text{V/m}$ 이다. 자기장 진폭은 얼마인가?<sup>43)</sup>

개념 POINT

46. 자외선, 적외선, 가시광선, 라디오파, X선은 모두 전자기파에 속한다. 앞에서 언급한 전자기파 5가지를 진동수가 높은 값에서 낮은 값 순서로 나열하시오.<sup>44)</sup>

개념 POINT

47. 다음 설명 중 옳은 것을 모두 고르시오. 45)

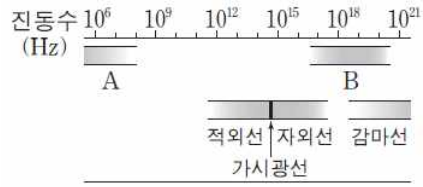
- ① 감마선은 전파할 때 매질이 필요하다.
- ② 전형적인 AM 라디오의 파장은 1cm보다 길다.
- ③ 무지개는 보통 태양 쪽에 나타난다.
- ④ 호이겐스 원리로 파동의 굴절을 설명할 수 있다.
- ⑤ 프리즘에서 가시광선의 굴절률은 파장이 짧을수록 크다.

개념 POINT



48. 그림 (가)는 전자기파를 진동수에 따라 분류한 것을, (나)는 어떤 전자기파를 이용해 공항에서 수하물을 검색하는 모습을 나타낸 것이다.

개념 POINT



(가)



공항 수하물 검색

(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?<sup>46)</sup>

<보 기>

- ㄱ. (나)에서 이용되는 전자기파는 A에 속한다.
- ㄴ. 감마선은 TV 리모컨에 이용된다.
- ㄷ. 진공에서 파장은 B가 적외선보다 짧다.

① ㄱ

② ㄷ

③ ㄱ, ㄴ

④ ㄱ, ㄷ

⑤ ㄴ, ㄷ

■ 정답과 해설

개념 POINT

1) [정답] ③

[해설]

- ① 정상파에서  $\lambda = \frac{2L}{n}$  ( $n$ 은 자연수)이고 기본진동은  $n=1$ 이므로  $\lambda=2L$ 이다. (참)
- ② 진동수는  $f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  이므로 현의 길이를 반으로 하면 현의 진동수는 2배가 된다. (참)
- ③ 진동수는  $f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  이므로 선밀도를 증가시키면 진동수는 감소한다. (거짓)
- ④ 현에서 반대로 진행하는 두 개 이상의 파동에 의해서 정상파가 생긴다. (참)
- ⑤ 진동수는  $f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  이므로 현의 장력을 크게 하면 진동수는 증가한다.

2) [정답] ④

[해설]

전자기파가 발생하기 위한 가장 핵심적인 조건은 전하의 가속운동이다. 전하가 속도나 방향이 변하는 운동(가속도  $a \neq 0$ )을 할 때, 변하는 전기장이 변하는 자기장을 유도하며 공간을 전파해 나가는 전자기파가 생성된다.

- ① 교류 전류 : 교류는 전류의 방향과 세기가 주기적으로 변하므로 전하가 가속운동을 한다. 따라서 전자기파가 발생한다. (참)
- ② 전자 충돌 : 고속의 전자가 브라운관(금속판)에 충돌하여 급격히 감속(가속운동)하면 에너지가 방출되는데, 이때 X선과 같은 전자기파가 발생한다.
- ③ 원운동 : 원운동은 속력이 일정하더라도 방향이 계속 변하는 가속운동(구심가속도)이므로 전자기파를 방출한다.
- ④ 일정한 자기장 : 자기장의 세기와 방향이 변하지 않는 정적인 상태에서는 에너지가 전파되는 파동이 발생하지 않는다. 전하가 등속 직선운동을 하거나 정지해 있는 경우와 유사하다.
- ⑤ 전자 전이 : 높은 에너지 준위에서 낮은 준위로 전자가 이동할 때, 두 준위의 에너지 차이만큼의 광자(전자기파)를 방출한다.

3) [정답] ①

[해설]

각 보기의 전자기파의 종류를 살펴보면 다음과 같다.

- ㄱ. X-ray - X선
- ㄴ. 공중파 TV를 송신하는 데 사용되는 전자기파 - 라디오파
- ㄷ. 태양에서 제일 많이 나오는 전자기파 - 가시광선
- ㄹ. 음식물 요리를 하는 전자레인지에 사용되는 전자기파 - 마이크로파
- ㅁ. 열적 평형에 의해 사람의 몸에서 가장 많이 나오는 전자기파 - 적외선

전자기파를 파장이 긴 순서대로 정리하면 라디오파>마이크로파>적외선>가시광선>자외선>X선>감마선이다. 따라서 ㄴ, ㄹ, ㅁ, ㄷ, ㄱ이다.

4) [정답] ②

[해설]

$$c = \frac{E}{B} \text{에서 } B = \frac{E}{c} = \frac{3 \times 10^6}{3 \times 10^8} = 10^{-2} T \text{이다.}$$

5) [정답] ⑤

[해설]

1. 스피커의 선속도는  $v = r\omega = 0.5 \times 200 = 100m/s$ 이다.

2. 도플러 공식은  $f' = f \frac{v \pm v_D}{v \pm v_S}$ 에서  $v_D = 0$ 이므로  $f' = f \frac{v}{v \pm v_S}$ 이다.

3. 가장 높은 진동수는 스피커가 음파 탐지기 방향으로 직선으로 다가올 때 발생하므로

$$f_{\max} = f \frac{340}{340 - 100} = f \frac{340}{240} \text{이다.}$$

4. 가장 낮은 진동수는 스피커가 음파 탐지기 방향으로 직선으로 멀어질 때 발생하므로

$$f_{\min} = f \frac{340}{340 + 100} = f \frac{340}{440} \text{이다.}$$

5. 따라서  $\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{f \frac{340}{240}}{f \frac{340}{440}} = \frac{440}{240} = \frac{11}{6}$ 이다.

6) [정답] ②

[해설]

맥놀이 진동수는  $f_{\text{beat}} = |f_1 - f_2|$ 이므로  $3 = |200 - f_2|$ 이므로  $f_2 = 197Hz, 203Hz$ 이므로 정답은  $197Hz$ 이다.

7) [정답] ②

[해설]

가시광선의 파장은  $380nm$ 에서  $750nm$ 사이이다. 따라서 가능한 진동수는  $f = \frac{c}{\lambda}$ 이므로 가시광

선의 진동수의 범위는  $\frac{3 \times 10^8}{750 \times 10^{-9}} < f < \frac{3 \times 10^8}{380 \times 10^{-9}}$ 이므로  $4.0 \times 10^{14} < f < 7.9 \times 10^{14}$ 이다. 따라서  $6.0 \times 10^{14}Hz$ 이 가시광선에 해당한다.

8) [정답] ①

[해설]

ㄱ. 폐관에서 인접한 공명 지점사이의 거리 차이는  $\frac{\lambda}{2} = 44.2 - 14.2 = 30cm = 0.3m$ 이므로

$\lambda = 0.6m$ 이다.  $v = 340m/s$ 이므로 소리굽쇠의 진동수는  $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{0.6} \simeq 567Hz$ 이므로

$600Hz$ 보다 작다. (참)

ㄴ. 세 번째 공명 지점은  $44.2 + 30 = 74.2cm$ 인 지점이므로  $70cm$ 보다 크다. (거짓)

ㄷ.  $v = \lambda f$ 에서 소리의 크기(진폭)는 소리의 속력이나 진동수 및 파장과 무관하므로 소리의 크기를 두 배로 해도, 첫 번째 공명이 일어나는 공기 부분의 길이는 변화가 없다. (거짓)

9) [정답] ②

[해설]

파장은  $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340m/s}{680Hz} = \frac{1}{2}m$ 이다.

경로차는  $\Delta L = \pi r - 2r = (\pi - 2)r$ 이고 보강간섭 조건은  $\Delta L = \pi r - 2r = (\pi - 2)r = n\lambda$ 이고  $n$ 은 정수이므로 이 관의 반대편에서 수신자가 듣는 소리의 세기를 최대한 크게 하기 위한 반원 모

양관의 반지름의 최솟값은  $n = 1$ 일 때이다. 따라서  $(\pi - 2)r = 1 \times \frac{1}{2}m$ 에서  $\pi = 3$ 이므로

$r = \frac{1}{2}m = 50cm$ 이다.

10) [정답] ③

[해설]

이 음파의 진동수와 단조화 진동의 진동수가 같으므로 진동수  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$  이다. 따라서

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \text{ 이다.}$$

$$\text{이때 } b = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ 이고 파동의 진행속력은 } v = \lambda f \text{ 이므로 } b = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{v} = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}} / v \text{ 이다.}$$

11) [정답] ⑤

[해설]

$n$ 차 조화진동수는  $f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  이므로

줄의 장력이  $T_1$ 일 때의 제2조화진동수는  $f_2 = \frac{2}{2L} \sqrt{\frac{T_1}{\mu}}$  이고

줄의 장력이  $T_2$ 일 때의 제1조화진동수는  $f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T_2}{\mu}}$  이므로

$f_1 = f_2$ 에서  $\frac{2}{2L} \sqrt{\frac{T_1}{\mu}} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T_2}{\mu}}$  이고  $T_2 = 4T_1$ 이다.

12) [정답] ②

[해설]

$n$ 차 조화진동수는  $f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  이고 문제의 경우 진동자의 진동수는 일정하므로 배의 개수는  $n = 2Lf_n \sqrt{\frac{\mu}{T}}$  이다.

그림 (가)의 경우  $T = mg$ 이므로  $n_1 = 2Lf_n \sqrt{\frac{\mu}{mg}}$  이고, 그림 (나)의 경우  $T = mg - \rho Vg$ 이므로

$n_2 = 2Lf_n \sqrt{\frac{\mu}{mg - \rho Vg}}$  이다. 따라서  $\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{mg - \rho Vg}{mg}} = \sqrt{\frac{m - \rho V}{m}}$  에서 정리하면

$$V = \frac{m}{\rho} \left[ 1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \right] \text{ 이다.}$$

13) [정답] ②

[해설]

페판의 조화진동수는  $f_n = (2n-1) \frac{v}{4L}$  ( $n=1,2,3, \dots$ )이고 맥놀이 진동수가 최소가 될 때는 인접한 조화진동수 사이에서 일어난다.

따라서  $f_{beat} = |f_{n+1} - f_n| = \left| (2n+1) \frac{v}{4L} - (2n-1) \frac{v}{4L} \right| = 2 \times \frac{v}{4L} = \frac{v}{2L}$  이다.

14) [정답] ②

[해설]

$v = \lambda f$ 이고 그림 (가)에서 파장은  $\lambda = 4m$ 이다. 그림 (나)는 그림 (가)의  $\frac{1}{8}$ 초 후  $+x$ 방향으로

진행한 모습이므로 파동의 진행속력  $v = \frac{1m}{\frac{1}{8}s} = 8m/s$ 이다. 따라서  $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{8}{4} = 2Hz$ 이다.

15) [정답] ①

[해설]

$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$ 에서  $k = 3 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 이고  $\omega = 4 = \frac{2\pi}{T}$ 이므로  $\lambda = \frac{2\pi}{3}$ ,  $T = \frac{\pi}{2}$ 이다. 따라서

파동의 진행속력은  $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\frac{2\pi}{3}}{\frac{\pi}{2}} = \frac{4}{3} m/s$ 이다.

16) [정답] ④

[해설]

그림 (가)의 관은 폐관이므로 가장 낮은 음인 기본진동수는  $L = \frac{1}{4}\lambda$  일 때 발생한다. 따라서 음파의 파장은  $\lambda = 4L$ 이다.

그림 (나)의 관은 개관이므로 정상음파가 되기 위한 관의 최소길이는

$L' = \frac{n}{2}\lambda = \frac{1}{2}\lambda = \frac{1}{2} \times 4L = 2L$ 이다.

17) [정답] ②

[해설]

1. 학생 B에게 직접 오는 소리의 진동수는  $f_1 = f_0 \frac{v_0}{v_0 + v_A} = f_0 \frac{v_0}{v_0 + \frac{1}{5}v_0} = \frac{5}{6}f_0$ 이다.

2. 벽에 도달하는 소리의 진동수는  $f_{wall} = f_0 \frac{v_0}{v_0 - v_A} = f_0 \frac{v_0}{v_0 - \frac{1}{5}v_0} = \frac{5}{4}f_0$ 이다.

3. 학생 B에게 반사되어 오는 소리의 진동수는  $f_2 = f_{wall} \frac{v_0}{v_0} = f_{wall} = \frac{5}{4}f_0$ 이다.

4. 따라서 맥놀이 진동수는  $f_{beat} = |f_1 - f_2| = \left| \frac{5}{6}f_0 - \frac{5}{4}f_0 \right| = \frac{5}{12}f_0$ 이다.

18) [정답] ③

[해설]

파동 P에서 진폭은  $A = a$ , 파장은  $\lambda = \frac{2\pi}{b}$ , 주기는  $T = \frac{2\pi}{c}$ 이므로 속력은  $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\frac{2\pi}{b}}{\frac{2\pi}{c}} = \frac{c}{b}$ 이다.

파동 Q에서 진폭은  $A = 2a$ , 파장은  $\lambda = \frac{2\pi}{3b}$ , 주기는  $T = \frac{2\pi}{2c}$ 이므로 속력은

$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\frac{2\pi}{3b}}{\frac{2\pi}{2c}} = \frac{2c}{3b}$ 이다. 따라서 ㄱ, ㄴ 이 참이다.

19) [정답] ②

[해설]

줄 위의 파동 속력 공식은  $v = C\sqrt{\frac{F}{\mu}}$ 이므로 장력  $F$ 를 2배로 증가시키면 새로운 속력은

$$v' = C\sqrt{\frac{2F}{\mu}} = \sqrt{2}\left(C\sqrt{\frac{F}{\mu}}\right) = \sqrt{2}v \text{ 이다.}$$

20) [정답]  $\sqrt{\frac{mL}{Mg\sin\theta}}$

[해설]  $m \ll M$ 이므로 줄의 장력은 모든 점에서 근사적으로  $\tau = Mg\sin\theta$ 라 할 수 있다. 줄의 선밀도는

$$\mu = \frac{m}{L} \text{ 이므로, 횡파 속도는}$$

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \sqrt{\frac{Mg\sin\theta}{\frac{m}{L}}} = \sqrt{\frac{MgL\sin\theta}{m}}$$

$$\text{걸린 시간은 } t = \frac{L}{v} = \sqrt{\frac{mL}{MgL\sin\theta}}$$

21) [정답] ② 4 m/s

[해설]  $v = \frac{\omega}{k} = \frac{12\text{cm}}{0.03\text{s}} = 4\text{m/s}$

22) [정답] (1) 서로 반대로 진행 (2) 정지파,  $2A|\sin kx|$

(3)  $x = \frac{n\pi}{k}$  ( $n$ 은 정수)

[해설] (1)  $y_1(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$ 는 양의  $x$ 방향으로  $v_1 = \frac{\omega}{k}$ 로 진행하며,

$y_2(x, t) = y_m \sin(kx + \omega t)$ 는 음의  $x$ 방향으로  $v_2 = -\frac{\omega}{k}$ 로 진행한다.

(2)  $y = y_1 + y_2 = 2A \sin kx \cos \omega t$ 가 되어서 정지파 이다.

최대 진폭은  $2A$ 이며  $x$ 인 곳에서의 진폭은  $2A|\sin kx|$ 이다.

(3)  $\sin kx = 0$ 인 곳은  $kx = n\pi$ 인 곳이다.

따라서  $x = \frac{n\pi}{k}$  ( $n$ 은 정수)

23) [정답] (1) 350Hz (2) 400kg

[해설] (1) 줄의 장력은  $\tau = mg$ , 줄에서 정상파가 생기면  $\frac{\lambda_n}{2} \times n = L \Rightarrow \lambda_n = \frac{2L}{n}$

따라서,  $n$ 차 조화 모드의 진동수는

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{mg}{\mu}}$$

이 문제에서는  $f_n = f$ 로 고정되어 있고, 줄의 장력  $\tau$ 가 변하므로

$$\frac{n}{2L} \sqrt{\frac{mg}{\mu}} = \frac{(n+1)}{2L} \sqrt{\frac{m'g}{\mu}}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{n}{n+1}\right)^2 = \frac{m'}{m} = \frac{16}{25} \quad (\text{단, } m = 25\text{kg}, m' = 16\text{kg})$$

따라서,  $n = 4$ 이고,

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{mg}{\mu}} = \frac{2}{2.00\text{m}} \sqrt{\frac{25\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2}{0.00200\text{kg/m}}} = 350\text{Hz}$$

(2)  $n = 1$ 일 때, 최대 질량을 가지므로

$$f = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{mg}{\mu}} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{m_{\max}g}{\mu}} \Rightarrow m_{\max} = 16m = 400\text{kg}$$

24) [정답] ④  $\frac{9}{10} \frac{v}{f}$   $\frac{7}{6} f$

[해설] 음원이  $\frac{1}{10}v$ 로 다가오며 관측자가  $\frac{1}{20}v$ 로 다가오므로 철수가 듣는 진동수는

$$f' = \frac{v + \frac{1}{20}v}{v - \frac{1}{10}v} f = \frac{21}{18} f = \frac{7}{6} f \text{이다.}$$

파장은 음원이  $\frac{1}{10}v$ 로 다가오므로, 한 주기동안 음원이 다가온 만큼 줄어든다.

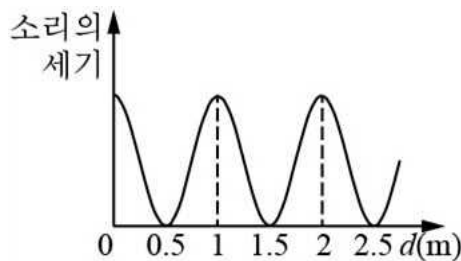
$$\lambda' = \lambda - \left(\frac{1}{10}v\right)T = \frac{v}{f} - \frac{v}{10f} = \frac{9}{10} \frac{v}{f} \text{이다.}$$

25) [정답] (1)  $\lambda = 1\text{m}$  (2) 그림 생략(풀이참조)

[해설] (1)  $S_2$ 와  $S_1$ 에서 A까지의 경로차는

$\delta = r_2 - r_1 = d$ 이므로, 보강간섭일 조건은

$$d = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$



그래프에서  $d = 0, 1\text{m}, 2\text{m}, \dots$ 에서 보강간섭이므로  $\lambda = 1\text{m}$ 임을 알 수 있다.

(2) P에서 A또는 B까지 이동할 때 두 소리의 경로차는 0에서  $2\text{m} = 2\lambda$ 까지 연속으로 증가한다.

경로차가  $0.5\lambda, 1.5\lambda$ 인 4곳에서 소리가 거의 들리지 않는다. (P에서 A사이에 2개, P에서 B사이에 2개가 있다.)

26) [정답] ④ ㄱ, ㄷ

[해설] ㄱ.음파와 초음파 모두 진동이 공기의 탄성에 의해 전파되는 파동이다. (O)

ㄴ.초음파의 진동수가 소리의 진동수 보다 크다. (X)

ㄷ.초음파와 소리 모두 물 속에서 더 빠르게 진행한다. (O)

27) [정답] ⑤ ㄴ, ㄷ

[해설] ㄱ.  $y(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$ 에서  $kx - \omega t$ 가 양수이므로 이 파동은 오른쪽(+x방향)으로 진행한다. (X)

ㄴ.  $\omega = \frac{2\pi}{0.01\text{s}}$ 이고  $f = \frac{\omega}{2\pi} = 100\text{s}^{-1}$ 이므로 이 파동은 1초에 100회 진동한다. (O)

ㄷ.  $k = \frac{2\pi}{2\text{cm}} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 이므로 파장  $\lambda = 2\text{cm}$ 이다. 또, ㄴ에서 주파수  $f = 100\text{Hz}$ 이므로 파동의 진행 속력

$$v = \lambda f = (0.02\text{m})(100/\text{s}) = 2\text{m/s} \text{이다. (O)}$$

28) [정답] ⑤

[해설] A. P에서는 두 개의 스피커에서 발생한 소리의 경로차가 0이므로 보강 간섭이 일어난다.

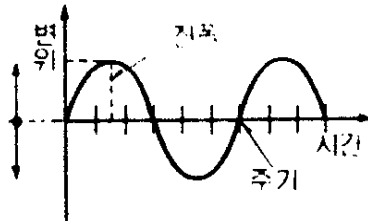
B. 두 스피커에서 발생한 소리가 만날 때 위상이 서로 같으면 보강 간섭하고, 위상이 서로 반

대이면 상쇄 간섭한다.

C. 소음 제거 이어폰에서는 외부 소음과 위상이 반대인 소리가 발생하여 상쇄 간섭을 일으켜 소음을 제거한다.

29) [정답] ②, ③, ④

[해설] 최대 변위가 진폭을 나타낸다. 같은 모양의 파형이 되풀이 될 때까지의 시간이 주기이므로 다음 그림과 같이 진폭과 주기를 알 수 있고, 주기를 알면 진동수를 알 수 있다.



30) [정답] ① ㄱ

[해설]

ㄱ. 파장은 B가 A의 2배이다. (O)

ㄴ. 진폭은 A가 B보다 크다. (X)

ㄷ. 같은 속력이므로 주기는 B가 A의 두 배이다. (X)

31) [정답] ④ ㄴ, ㄷ

[해설]

ㄱ. 파동이 서로 다른 매질에서 진행할 때, 파동의 속력은 변하지만 파동의 진동수(주기)는 변하지 않는다. (나)에서 파동의 주기  $T$ 는 2초이므로 파동의 진동수는  $f = \frac{1}{T} = 0.5\text{Hz}$  이다. (X)

ㄴ. 파동이 A에서 B로 이동하므로 0초부터 1초까지 P의 변위는 (+)이고, Q의 변위는 (-)이다. 따라서 (나)는 Q에서 파동의 변위이다. (O)

ㄷ. A, B에서 파동의 파장은 각각 4 cm, 2 cm이다. 파동의 진행 속력은  $v = \frac{\lambda}{T}$  이므로 A, B에서 파동의 진행 속력은 각각 2cm/s, 1cm/s이다. 따라서 파동의 진행 속력은 A에서 B에서의 2배이다. (O)

32) [정답] ② 0.5 m/s

[해설] 1주기 동안 1파장을 이동하므로 파동의 이동속력은 다음과 같다.

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{2\pi}{T} \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\omega}{k}$$

$k = 10\text{rad/m}$ ,  $\omega = 5\text{rad/s}$ 를 대입하면

$$v = \frac{5\text{ rad/s}}{10\text{ rad/m}} = 0.5\text{ m/s}$$

33) [정답] ④ a, b, c, d

[해설] a. 진폭은 최대변위이므로  $10\text{ cm} = 0.1\text{ m}$ 이다. (O)

b. 파장은 마루와 마루사이의 거리이므로  $10\text{ cm} = 0.1\text{ m}$ 이다. (O)

c. 파동의 속력은  $v = \lambda f = (0.1\text{ m})(10\text{ Hz}) = 1\text{ m/s}$ 이다. (O)

d. 파동의 주기는  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10\text{ Hz}} = 0.1\text{ s}$ 이다. (O)

34) [정답] ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT



[해설]

ㄱ. (가)에서 P점의 기울기는 +이다. 이 순간부터 매질의 속도가 (나)의 그래프이며, 이 순간은  $t=0$ 이다. 매질의 속도가 +이므로 파동의 진행방향은  $-x$ 방향이다. (O)

ㄴ. 파동의 파장은  $\lambda=2x_0$ , 주기는  $T=4t_0$ 이다.

전파 속력은  $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{2x_0}{4t_0} = \frac{x_0}{2t}$ 이다. (O)

ㄷ. (나)에서 속도가 +인 반주기동안 이동거리는 진폭의 2배이다. 다시 말해  $3t$ 인 순간  $x=-A_0$ 이며,  $5t$ 인 순간  $x=A_0$ 이다. 따라서 빛금 친 부분의 면적은  $2A_0$ 이다.

35) [정답] 풀이참조

[해설]

(1)  $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{mgL}{m_s}} = 20\text{m/s}$  이다.

(2) 파장은  $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{20\text{ m/s}}{10\text{Hz}} = 2\text{m}$ 이므로 B에 도달하는 순간 파장은 5파장 존재하게 된다.

36) [정답] ③ 750 Hz

[해설]

양 끝이 고정된 줄의 정상파에 대해 배가 3개이므로 줄의 길이를  $L$ 이라고 하면

$$L = 3 \times \frac{\lambda}{2}$$

이다.

줄에서의 파동의 속력은

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} = \sqrt{\frac{\tau}{m/L}} = \lambda f = \frac{2}{3}Lf$$

이다.

$$\begin{aligned} f &= \frac{3}{2L} \times \sqrt{\frac{\tau L}{m}} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\tau}{mL}} \\ &= \frac{3}{2} \times \sqrt{\frac{(500\text{N})}{(0.001\text{kg})(2\text{m})}} = 750\text{Hz} \end{aligned}$$

37) [정답] ③  $\frac{2}{3}f$

[해설]

바람이 불지 않고, 음파 탐지기가 정지해 있다. 음원이 멀어지므로 파장이 증가하게 되어 진동수가 바뀌게 된다.

탐지기에서의 진동수는

$$f_R = \frac{v}{v+v_s}f = \frac{1}{1+1/2}f = \frac{2}{3}f$$

이다.

38) [정답] (1) 182Hz, 180Hz (2) 14.2m/s

[해설] (1) 관측자는 음원 A에 대하여 정지해 있으므로, 관측자가 음원 A로부터 듣는 진동수는 음원의 진동수와 같다. 즉, 182Hz이다.

$v_A > v_B$ 이므로, 관측자는 음원 B로부터 멀어지게 된다. 따라서 관측자가 음원 B로부터 듣는 진동수  $f'$ 은  $f' < f$  이고, 2회의 맥놀이가 생기므로  $f - f' = 2$  에서

$$f' = f - 2 = 182 - 2 = 180(\text{Hz})$$

(2) 음원 B가  $v_B$ 의 속력으로 접근하고, 관측자는  $v_A (=18\text{m/s})$ 의 속력으로 멀어지므로, 도플

러 효과에 의한 관측 진동수  $f'$  은  $f' = f \frac{v - v_A}{v - v_B}$

$$182 \times \frac{360 - 18}{360 - v_B} = 180(\text{Hz}) \quad \therefore v_B = 14.2(\text{m/s})$$

39) [정답] ④ ㄱ, ㄷ

[해설] ㄱ. 두 파원으로부터 P점까지의 거리는 둘 다  $2.5\lambda$ 로 같다. (O)

ㄴ. 각 파의 진폭을 P에서는 두 파의 골이 만나므로 -로 매우 낮은 곳에 있다. Q는 상쇄간섭이므로 변위가 0에 가깝다. (X)

ㄷ. 반 주기가 지나면 P에서 두 개의 마루가 만나서 많이 올라가게 된다. (O)

40) [정답] ① ㄱ

[해설] ㄱ. 물결파의 속력( $v$ ) =  $\frac{\text{파장}(\lambda)}{\text{주기}(T)}$ 이다. 물결파의 속력이 5cm/s, (나)의 R에서 중첩된

물결파가 한 번 진동하는 데 걸리는 시간(주기,  $T$ )이 2초이므로  $5\text{cm/s} = \frac{\lambda}{2s}$ 에서

에서  $\lambda = 10\text{cm}$ 이다. (O)

ㄴ. 1초일 때 P에서는 마루와 골이 중첩되므로 중첩된 물결파의 변위는 0이다. (X)

ㄷ. 2초일 때 R에서 골과 골이 중첩되므로 Q에서는 마루와 마루가 중첩된다. 따라서 2초일 때, Q에서 중첩된 물결파의 변위는 2cm이다. (X)

41) [정답] ④ ㄱ, ㄷ

[해설] ㄱ. P에서는 마루와 골이 중첩되므로 상쇄 간섭이 일어난다. (O)

ㄴ. Q에서는 마루와 마루가 만나므로 보강 간섭이 일어나는 지점이다. Q에서는 시간에 따라 마루와 마루, 골과 골이 중첩되므로 물결파의 변위는 시간에 따라 변한다. (X)

ㄷ. 물결파의 주기는  $T = \frac{20\text{cm}}{20\text{cm/s}} = 1s$ 이다. 따라서 R에서 중첩된 물결파의 변위는  $t = 1$ 초일 때와  $t = 2$ 초일 때가 같다. (O)

42) [정답] (1) +z축 방향 (2) x축 방향

[해설]

(1)  $B_y = B_m \sin(kz - \omega t)$ 로 위상이  $kz - \omega t$ 의 형태이므로 양의 z방향으로 진행하게 된다.

(2) 전기장의 진동방향은 진행방향과 자기장에 수직이다.

$$\vec{E} = \vec{B} \times \vec{c}$$

$$= \{B_m \sin(kz - \omega t)\hat{y}\} \times (c\hat{z})$$

$$= B_m \sin(kz - \omega t)\hat{x}$$

43) [정답]  $7.33 \times 10^{-7}\text{T}$

$$[\text{해설}] B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{220\text{V/m}}{3.00 \times 10^8\text{m/s}} = 7.33 \times 10^{-7}\text{T}$$

44) [정답] X선, 자외선, 가시광선, 적외선, 라디오파

45) [정답] ②, ④

$$[\text{해설}] ② \text{ AM라디오 } f \approx 1\text{KHz} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10^3} \sim 10^5(\text{m})$$

③ 1차 무지개는 태양 반대쪽

개념 POINT

46) [정답] ② ㄷ

[해설] 전자기파의 종류

ㄱ. A는 전파 영역이고, 공항 수하물 검색은 강한 투과력이 필요하므로 X선을 사용한다. (X)

ㄴ. TV 리모컨에 사용되는 전자기파는 적외선이다. (X)

ㄷ. 진공에서 전자기파는 종류에 관계없이 속력이 같고, 진동수는 B가 적외선보다 크므로 파장은 B가 적외선보다 짧다. (O)