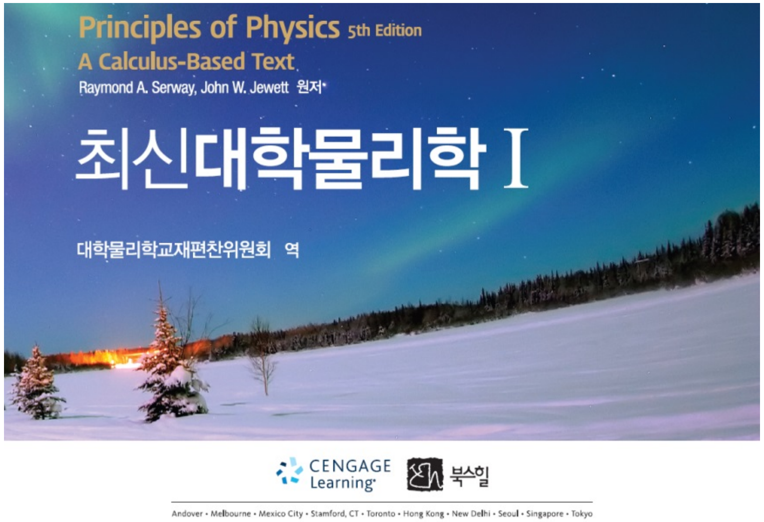

Principles of Physics 5th Edition
A Calculus-Based Text
Raymond A. Serway, John W. Jewett 원저
최신대학물리학 I
대학물리학교재편찬위원회 역
CENGAGE Learning
북스힐
Andover • Melbourne • Mexico City • Stamford, CT • Toronto • Hong Kong • New Delhi • Seoul • Singapore • Tokyo

제13장 역학적 파동

제13장 역학적 파동

파의 형태

파의 형태는 크게 두 가지로 나눔:

역학적 파동

매질을 필요로 함

매질을 통한 간섭이 퍼져 나가는 것

물결파, 음파 등

전자기적 파동

매질이 필요 없음

빛, 전파, 엑스레이 등

13.1 파동의 전파(Propagation of a Disturbance)

파동에서는 에너지가 멀리 전달된다.

그러나, 물질 자신은 멀리 옮겨가지 않는다.

물질 자신은 이동하지 않으나 파는 공간을 통해 옮겨간다.

모든 파동은 에너지를 운반한다.

모든 파동이 에너지를 운반하지만 매질을 통해 전파되는 에너지 양과 에너지 전달 방식은 경우에 따라 다르다.

역학적인 파동이 생기기 위해서는:

(1) 파원

(2) 매질

(3) 매질의 요소들이 서로 간섭할 수 있는 어떤 물리적인 관계

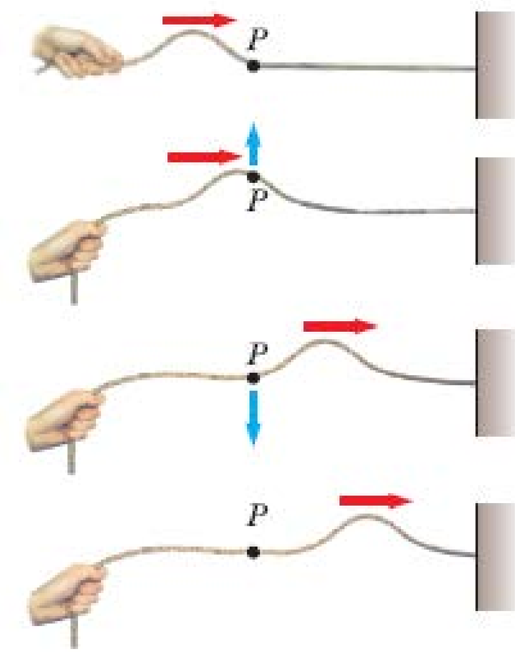
-이것은 파동이 매질을 통해 전달되어야 함을 의미한다.

줄의 한쪽 끝을 흔들면 파가 생긴다.

줄은 팽팽한 상태(장력을 받고 있음)에 있다.

단발 펄스가 생기고 줄을 따라 이동한다.

그 줄이 펄스가 이동하는 매질이 된다.



횡파(transverse wave)

파동의 진행방향과 수직한 방향으로 매질을 움직이게 하는 진행파 또는 펄스

수직한 화살표가 입자의 운동방향이다.

파동의 전파 방향은 수평방향의 화살표 방향이다.

종파(longitudinal wave)

파동의 진행방향과 평행한 방향으로 매질을 움직이게 하는 진행파 또는 펄스를 **라 한다.**

그림에서 용수철의 코일은 진행방향과 평행하게 변위한다.

t = 0 에서 줄 위의 펄스의 모양은: $y(x,0) = f(x)$

이것은 t = 0 에서 x 값에 따른 줄의 요소의 세로 위치 y를 나타낸다.

펄스의 속력: v

어떤 시각 t 에서, 그 펄스는 거리 vt 만큼 이동한다.

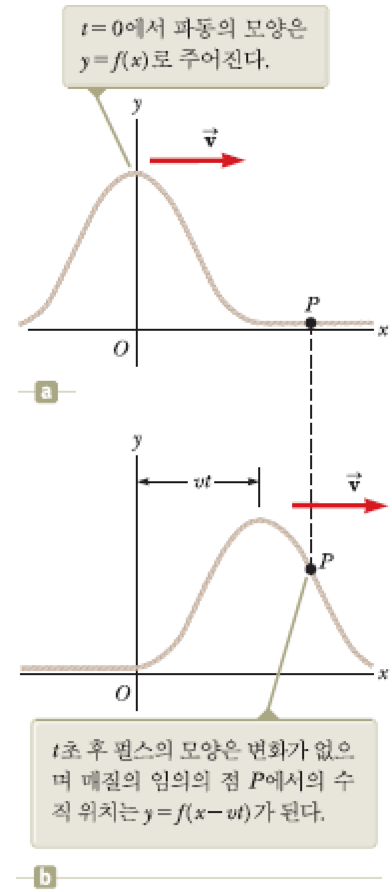
그러나 펄스의 모양은 변하지 않는다.

새로운 위치는 $$y(x,\ t) = y(x - vt,\ 0)$$

오른쪽으로 이동하는 펄스는: $y(x,\ t) = f(x - vt)$

왼쪽으로 이동하는 펄스는: $y(x,\ t) = f(x + vt)$

함수 y 를 **파동함수**(wave function)라고도 한다.



그 파동함수는 임의 시각 t에서 위치 x에 있는 요소의 y좌표를 나타낸다.

y 좌표는 세로 위치를 나타낸다.

t가 고정되었을 때의 파동함수를 **파형**(waveform)이라고 한다.

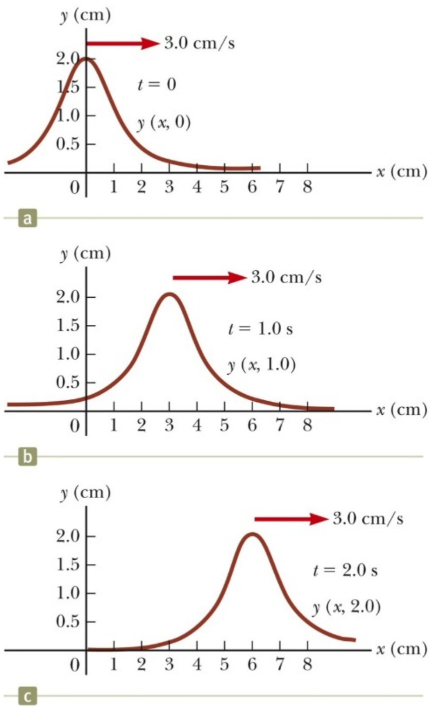
파형은 그 시각에서의 펄스의 실제 모양을 나타내는 곡선이다.

예제 1.1 오른쪽으로 움직이는 파동

x 축을 따라 오른쪽으로 움직이는 펄스의 파동 함수가 다음과 같다.

$$y(x, 1.0) = \frac{2}{(x - 3.0)^2 + 1}$$

여기서 x와 y 의 단위는 cm이고 t 의 단위는 s이다. t = 0, t =1.0s, t = 2.0s에서 파동 함수 식을 구하라.



풀이

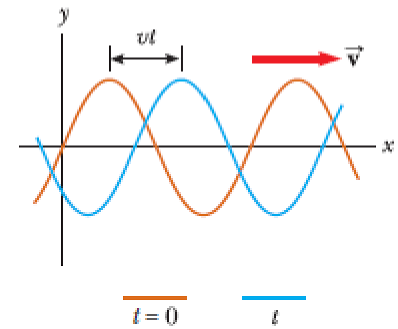
파동함수 식에 t = 0 를 대입: $y(x, 0) = \frac{2}{x^2 + 1}$

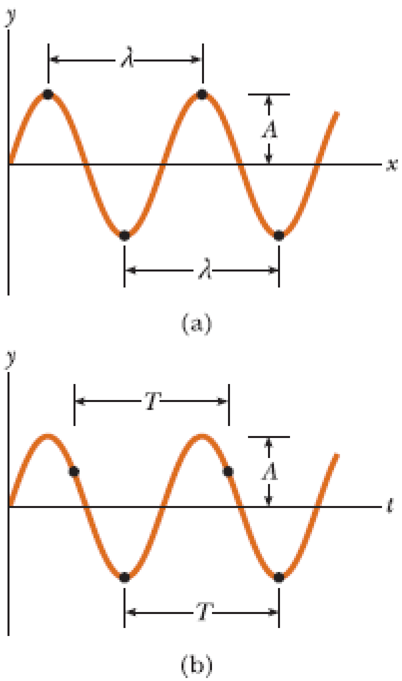
파동함수 식에 t = 1.0s 를 대입: $y(x, 1.0) = \frac{2}{(x - 3.0)^2 + 1}$

파동함수 식에 t = 2.0s 를 대입: $y(x, 2.0) = \frac{2}{(x - 6.0)^2 + 1}$

13.2 분석 모형: 진행파(The Traveling Wave Model)

사인형 파동(sinusoidal wave) : 파동의 모양이 sine 함수의 모양을 갖는 파동





마루(crest): 정상 위치에서 요소의 변위가 최고인 점

골(trough): 정상 위치에서 요소의 변위가 최저인 점

파장(wavelength) λ : 마루에서 마루까지의 거리

진폭(amplitude) A : 매질 요소의 평형으로부터의 최대 변위

주기(period) T : 한 파장을 이동하는데 걸리는 시간

진동수(frequency) f : 단위 시간당 주어진 점을 지나가는 마루의 수(단위 Hz)

$$f = \frac{1}{T}$$

파가 진행하는 속력은 정해져 있다.

그 속력은 매질의 특성에 의해 결정된다.

파동함수 $$y(x, t) = A \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]$$

이것은 오른쪽으로 진행하는 파의 식

왼쪽으로 진행하는 경우 x-vt 대신 x+vt 로 바꾼다.

속력은 거리를 시간으로 나눈 것이므로, $$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$$

파동함수는 다음과 같다. $$y = A \sin\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

임의 시각 t 에서 y 는 위치 x. x+ λ, x+2 λ, …의 위치에서 같은 값을 갖는다.

주어진 위치 x 에서의 y 값은 시각 t, t+T, t+2T...에서 같은 값을 갖는다.

각파수(또는 파수, angular wave number): $k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}$

각진동수(angular frequency): $\omega \equiv \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

파동함수: $y = A \sin(kx - \omega t)$

파의 속력: $v = \lambda f$

t=0에서 x≠0 인 일반적인 경우의 파동함수: $\boxed{y = A \sin(kx - \omega t + \phi)}$

여기서 ϕ는 위상상수이다.

예제 13.2 진행하는 사인형 파동

$+x$ 방향으로 진행하는 사인형 파동이 있다. 진폭이 15.0 cm, 파장이 40.0 cm, 진동수가 8.00Hz이며, t = 0과 x = 0에서 매질 요소의 수직 위치는 그림과 같이 15.0 cm이다.

(A) 파수 k, 주기 T, 각진동수 ω 및 파동의 속력 v를 구하라.

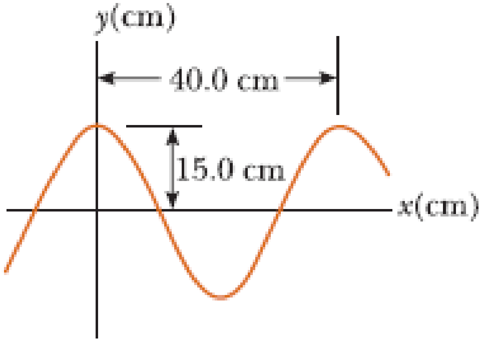
풀이

$$k=\frac{2\pi}{\lambda}=\frac{2\pi rad}{40.0cm}=0.157rad/cm$$

$$T=\frac{1}{f}=\frac{1}{8.00s^{-1}}=0.125s$$

$$\omega=2\pi f=2\pi(8.00s^{-1})=50.3rad/s$$

$$v=f\lambda=(8.00s^{-1})(40.0cm)=320cm/s$$



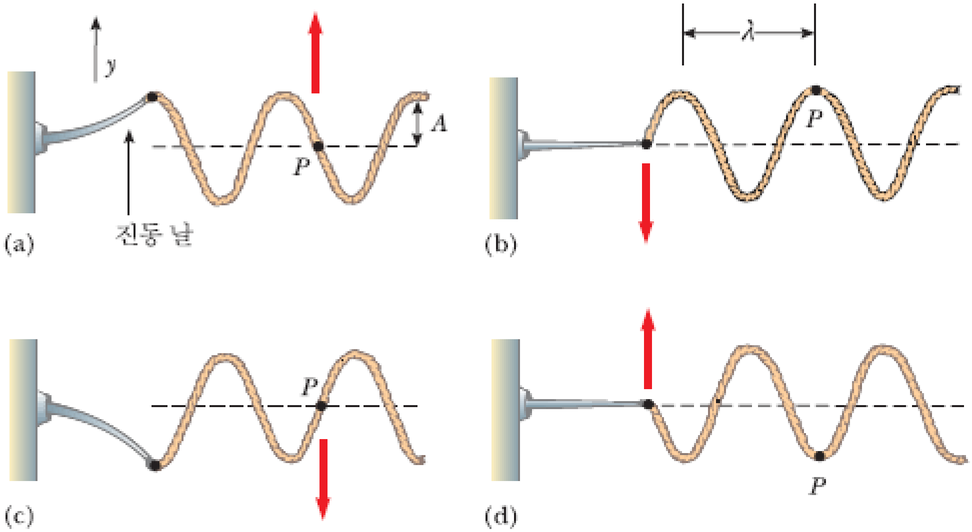
(B) 위상 상수 z와 파동 함수를 구하라.

$$15.0=(15.0)\sin\phi \quad \rightarrow \quad \sin\phi=1$$

$$y=A\sin\left(kx-\omega t+\frac{\pi}{2}\right)=A\cos(kx-\omega t)$$

$$y=(15.0cm)\cos(0.157x-50.3t)$$

선형 파동 방정식(The Linear Wave Equation)



P와 같이 줄에서의 각 요소는 y 방향으로 단조화 운동을 한다.

$$y = A\sin(kx - \omega t)$$

점 P(또는 줄에서 어떤 다른 점)는 수직 운동을 하므로 x 좌표는 항상 상수로 남는다. 그러므로 횡속력(transverse speed) v_y 와 횡가속도(transverse acceleration) a_y는 다음과 같이 주어진다 (파동 속력 v와 혼동하지 마라).

$$v_y = \frac{dy}{dt}\Big]_{x=\text{constant}} = \frac{\partial y}{\partial t} = -\omega A\cos(kx - \omega t)$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt}\Big]_{x=\text{constant}} = \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\omega^2 A\sin(kx - \omega t)$$

파동함수 $y(x, t)$는 선형파동방정식(linear wave equation) 이라고 하는 식의 해를 나타낸다.

이 식은 파의 운동을 완전하게 묘사한다.

그 식으로부터 파의 속력을 구할 수 있다:

선형파동방정식은 모든 파동의 기본이 되는 식이다.

선형파동방정식 $$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

이 식은 여러 가지 형태의 진행파에 적용된다.

y가 나타내는 위치의 예는 다음과 같다.

줄의 경우, 줄의 한 부분의 수직 변위이다.

음파의 경우, 어떤 부분의 평형위치로부터의 종 변위이다.

전자기파의 경우, 전기장 또는 자기장의 성분이다.

선형파동방정식은 $y(x, t) = f(x \pm vt)$ 과 같은 형태의 모든 파동함수를 만족한다.

비선형파는 해석하기가 매우 어렵다.

비선형파의 예로 진폭이 파장에 비해 작지 않은 것이 있다.

예제 13.3 선형파동방정식의 해

예제 13.1에 나타낸 파동 함수가 선형 파동 방정식의 해임을 증명하라.

풀이

파동함수의 식을 쓴다: $$y(x,t) = \frac{2}{(x-3.0t)^2+1}$$

이 함수의 x 와 t에 대한 편도함수를 구한다:

$$(1) \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{12(x-3.0t)^2 - 4.0}{[(x-3.0t)^2+1]^3}$$

$$(2) \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{108(x-3.0t)^2 - 36}{[(x-3.0t)^2+1]^3} = 9.0\,\frac{[12(x-3.0t)^2 - 4.0]}{[(x-3.0t)^2+1]^3}$$

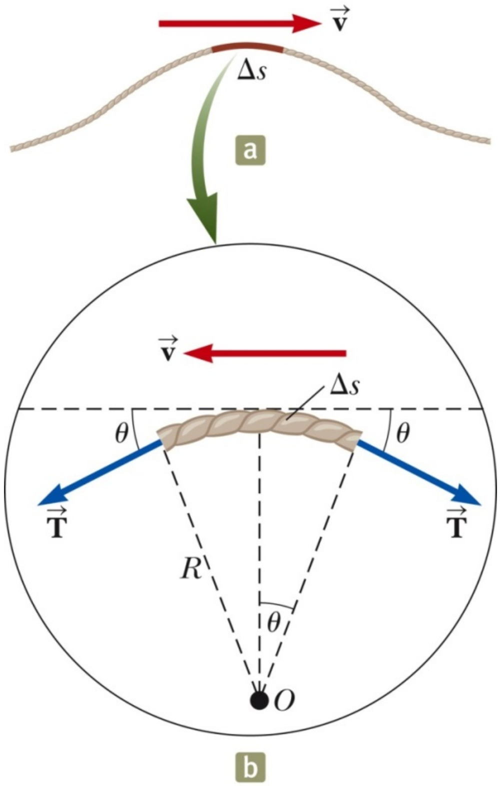
이 두 식의 우변 끼리 관계 지으면:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{9.0}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

13.3 줄에서의 횡파의 속력(The Speed of Transverse Wave on String)

줄의 장력은 T

줄의 요소 Δs 를 확대하여 보면



y 방향으로의 알짜 힘

$$F_r = 2T\sin\theta \approx 2T\theta$$

여기서 미소각 근사를 사용함

$\mu\Delta s$ 는 줄의 요소의 질량

$m=\mu\Delta s=2\mu R\theta$ 이고

$$F_r = \frac{mv^2}{R} \rightarrow 2T\theta = \frac{2\mu R\theta v^2}{R} \rightarrow T = \mu v^2$$

이므로

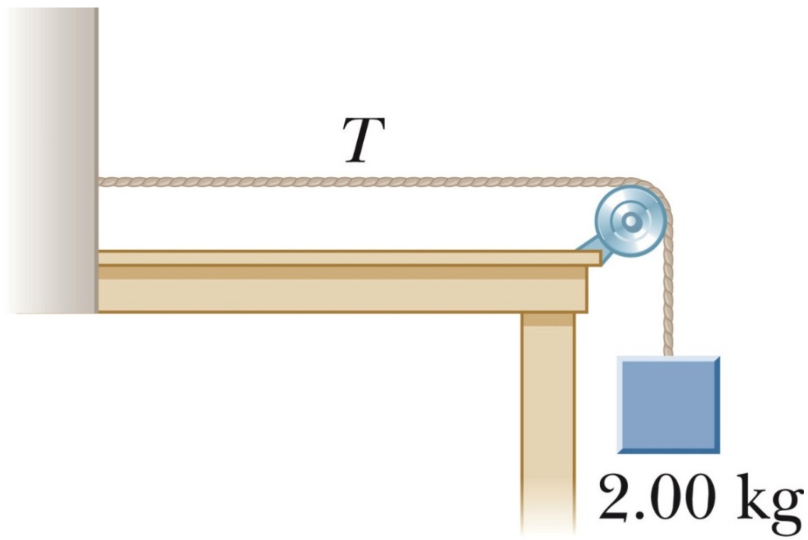
$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

이것은 줄위에서 진행하는 파의 속력

어떤 모양의 펄스에 대해서도 적용

예제 13.4 줄에서 펄스의 속력

그림에서 균일한 줄의 질량은 0.300 kg이고 길이는 6.00 m이다. 줄은 도르래를 통해 2.00 kg의 물체를 매달고 있다. 이 줄을 따라 진행하는 펄스의 속력을 구하라.



풀이

물체에 평형 상태의 입자모형을 적용

$$\sum F_y = T - m_{\text{block}}g = 0$$

이것을 줄의 장력에 대해 푼다:

$$T = m_{\text{block}}g$$

파의 속력을 구하면:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{m_{\text{block}}g\,\ell}{m_{\text{string}}}}$$

속력의 값을 구한다:

$$v = \sqrt{\frac{(2.00\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2)(6.00\text{ m})}{0.300\text{ kg}}} = \boxed{19.8\text{ m/s}}$$

예제 13.5 등산객 구조

조난 당한 등산객의 질량: 80.0 kg
밧줄의 질량: 8.00 kg 길이: 15.0 m이다.
삼각 멜빵의 질량 70.0 kg, 펄스가 밧줄 전체를 지나가는데 걸리는 시간: 0.250S

풀이

조난객으로부터 헬리콥터까지 펄스가 이동하는 데 걸리는 시간을 이용해서 밧줄에서의 펄스 속력을 구한다.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{15.0\ \text{m}}{0.250\ \text{s}} = 60.0\ \text{m/s}$$

밧줄의 장력을 구한다

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \rightarrow T = \mu v^2$$

조난객과 멜빵을 알짜 힘을 받는 하나의 입자로 간주

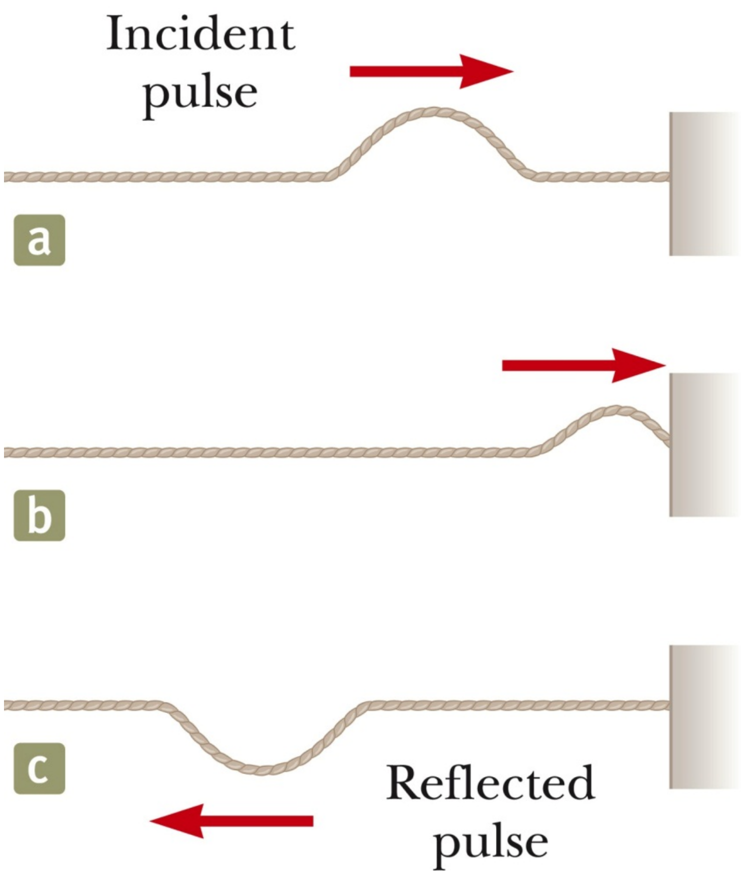
$$\sum F = ma \rightarrow T - mg = ma$$

13.4 반사와 투과

줄 위를 진행하는 펄스에서

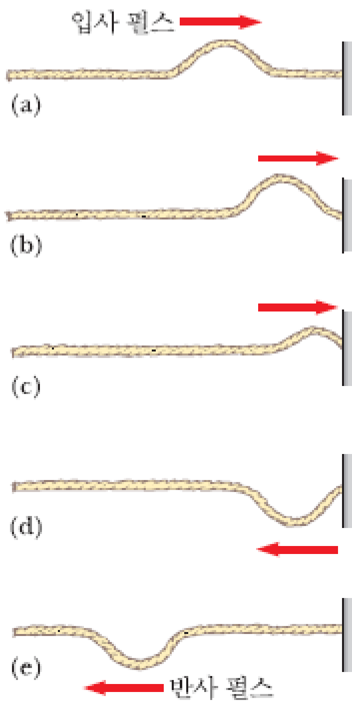
펄스가 벽에 도달하면, 반사된다.

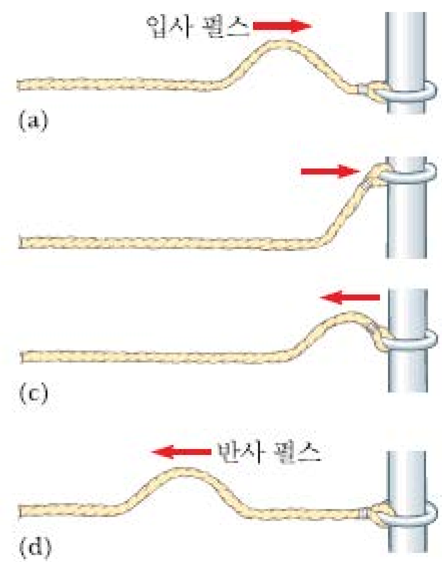
고정된 경계에서 반사될 때
펄스는 뒤집힌다.



13.4 반사와 투과(Reflection and Transmission)

진행파가 경계면에 도달하면, 파동의 일부 또는 전부가 반사된다. 줄의 경우 끝의 형태에 따라 다르다.





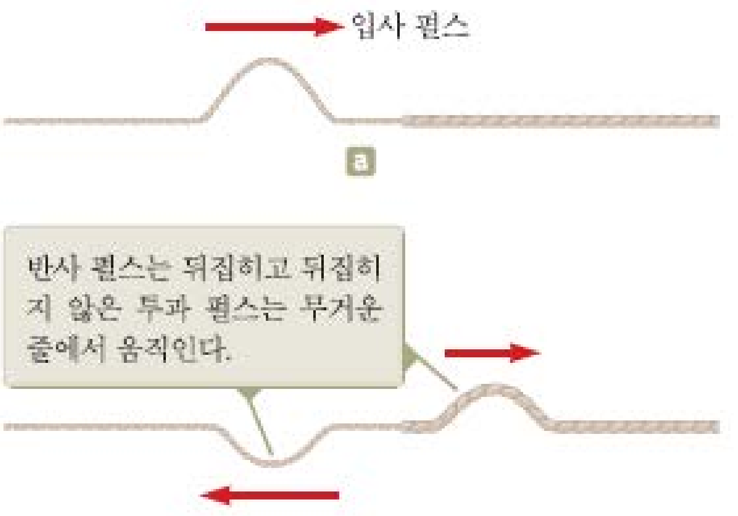
한 끝이 고정된 줄의 경우 한 끝이 자유롭게 움직이는 경우

그러나, 경계가 고정되지도 않고 자유롭지도 않은 중간 정도인 경우,

입사 펄스 에너지의 일부는 투과(transmission)되고 일부는 반사된다.

이제 가벼운 줄이 무거운 줄에 연결되어 있다고 하자.

가벼운 줄을 진행하던 펄스가 무거운 줄의 경계에 다다르면,



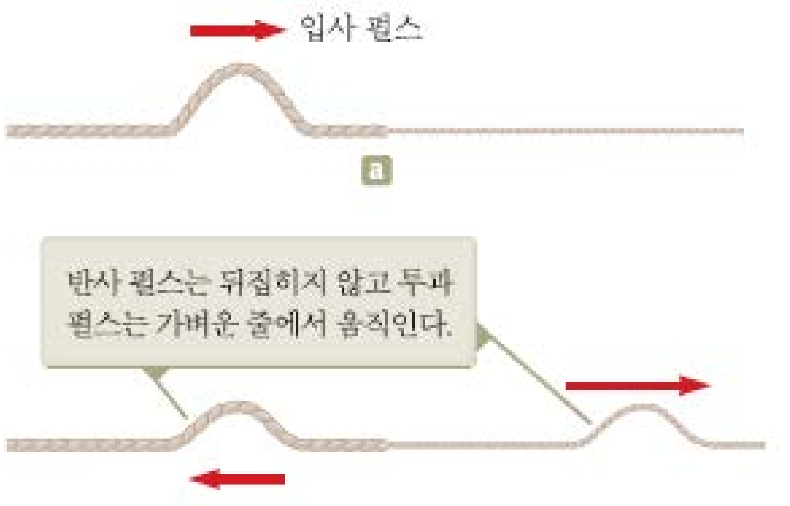
반사된 펄스의 일부는 뒤집어 지며,

진폭이 작아진다.

이제 무거운 줄이 가벼운 줄에 연결되어 있다고 하자.

펄스의 일부는 반사되고 일부는 투과한다.

반사된 펄스는 뒤집어지지 않는다.



13.5 줄에서 사인형 파동의 에너지 전달률

(Rate of Energy Transfer by Sinusoidal Waves on Strings)

파가 매질을 따라 전파될 때 에너지를 운반한다.

줄의 각 부분을 단조화운동으로 모형화할 수 있다.

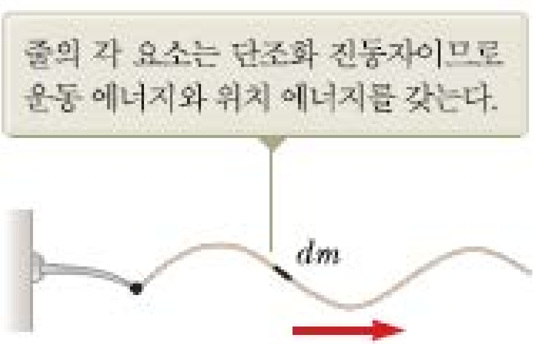
진동은 y방향이다.

모든 요소 각각의 총에너지 같다.

각 요소의 질량은 dm이고 길이는 dx이다.

모든 요소는 상하로 단조화운동한다.

모든 요소의 각진동수와 진폭은 같다.



운동에너지: $dK = \frac{1}{2}(dm)v_y{}^2$

질량 dm은 μdx 와 같으므로: $dK = \frac{1}{2}(\mu\ dx)v_y{}^2$

횡파의 속력을 대입하면,

$$dK = \tfrac{1}{2}\mu[-\omega A \cos(kx - \omega t)]^2\, dx = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \cos^2(kx - \omega t)\, dx$$

t=0에서: $$dK = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2\, A^2 \cos^2 kx\, dx$$

이것을 적분하면:

$$K_\lambda = \int dK = \int_0^\lambda \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \cos^2 kx\, dx = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \int_0^\lambda \cos^2 kx\, dx$$

$$= \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \left[\tfrac{1}{2}x + \frac{1}{4k}\sin 2kx\right]_0^\lambda = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \left[\tfrac{1}{2}\lambda\right] = \tfrac{1}{4}\mu\omega^2 A^2 \lambda$$

위치에너지를 제공하는 것에는,

평형위치로부터의 변위와

이웃하는 요소들에 의한 복원력이 있다.

총 위치에너지는: $U_\lambda = \frac{1}{4}\mu\omega^2 A^2 \lambda$

총에너지: $E_\lambda = U_\lambda + K_\lambda = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \lambda$

일률, 즉 역학적 파동이 전달하는 에너지 T_{MW} 의 전달률 P 는,

$$P = \frac{T_{\mathrm{MW}}}{\Delta t} = \frac{E_\lambda}{T} = \frac{\frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \lambda}{T} = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \left(\frac{\lambda}{T}\right)$$

$$P = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v$$

줄에서의 사인형 파동에 의해 전달되는 에너지율은

진동수의 제곱,

진폭의 제곱,

파의 속력에 비례한다.

예제 13.6 진동하는 줄에 공급되는 일률

단위 길이당 질량 $\mu = 5.00 \times 10^2$ kg/m인 팽팽한 줄에 80.0N의 장력이 작용하고 있다. 진동수가 60.0Hz이고 진폭이 6.00cm인 사인형 파동을 만들기 위해서, 줄에 공급해야 할 일률은 얼마인가?

풀이

일률을 계산한다: $P = \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v$

ω 와 v를 대입: $P = \frac{1}{2}\mu(2\pi f)^2 A^2\left(\sqrt{\frac{T}{\mu}}\right) = 2\pi^2 f^2 A^2\sqrt{\mu T}$

수치를 대입:

$$P = 2\pi^2(60.0\ \mathrm{Hz})^2(0.060\,0\ \mathrm{m})^2\sqrt{(0.050\,0\ \mathrm{kg/m})(80.0\ \mathrm{N})} = \boxed{512\ \mathrm{W}}$$

13.6 음파(Sound Wave)

- 음파는 **종파**(longitudinal wave)이다.
- 모든 물질을 매질로 한다.
- 파의 속력은 매질의 특성에 따라 다르다.
  - 사인형 음파의 수학적인 표현은 줄 위의 사인형 파동과 매우 비슷하다.

- 피스톤 속에 압축 가능한 기체의 경우
  - 피스톤이 움직이기 전 기체의 밀도는 균일했다.
  - 피스톤이 갑자기 오른쪽으로 움직이면,
    그 기체는 앞부분이 급히 압축된다.
  - 압축된 부분을 밀(compression)한 부분이라 한다.

피스톤이 정지하면, 밀한 부분은 관 속을 속력 v로 종펄스의 형태로 움직여 간다.

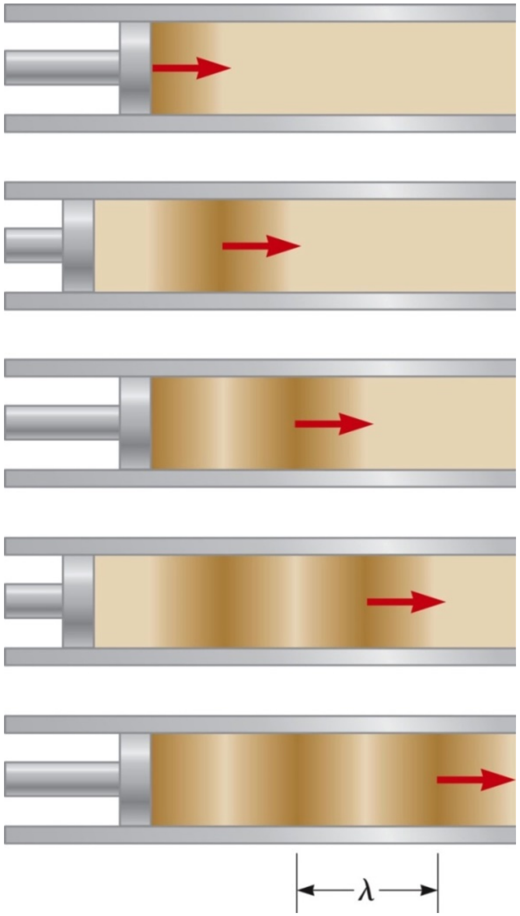
파의 속력은 피스톤의 속력과 같지 않다.

압력이 낮은 영역을 소(rarefaction)한 부분이라 한다.

처음 밀한 부분과 다음 밀한 부분(또는 소와 소 사이) 사이의 거리가 파장 λ 이다.

밀 또는 소한 영역이 관 속을 따라 진행함으로서 각 영역은 앞 뒤로 단조화 운동을 한다.

그 진동은 파의 진행 방향과 평행하다.



요소의 변위는 $s(x, t) = s_{max} \cos(kx - \omega t)$

여기서 s_{max} 는 평형위치로부터의 최대 위치(변위 진폭)이다.

위 식을 변위 파동의 식이라 한다.

k : 파수(wave number)

ω : 피스톤의 각진동수

평형값으로부터 측정한 기체 압력의 변화 ΔP도 사인형이다:

$$\Delta P = \Delta P_{max} \sin(kx - \omega t)$$

ΔP_{max} : 압력의 최대변화(압력진폭).

이 식을 압력파의 식이라 한다.

$$\Delta P_{max} = \rho v \omega s_{max}$$

압력진폭은 변위진폭에 비례:

ρ : 매질의 밀도

v : 파의 속력

ωs_{max} : 매질 요소의 최대 종속력

평형값으로부터 측정한 기체 압력의 변화 ΔP도 사인형이다:

$$\Delta P = \Delta P_{\max} \sin(kx - \omega t)$$

$\Delta P_{\max}$: 압력의 최대변화(압력진폭).

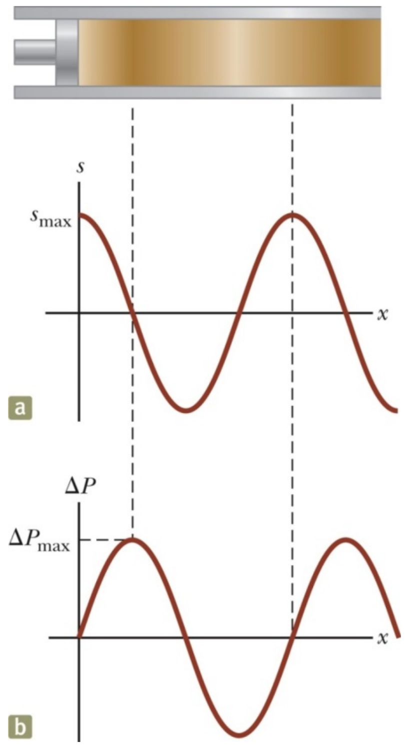
이 식을 압력파의 식이라 한다.

압력진폭은 변위진폭에 비례: $\Delta P_{\max} = \rho v \omega s_{\max}$

ρ : 매질의 밀도

v : 파의 속력

$\omega s_{\max}$: 매질 요소의 최대 종속력



음파는 변위파동 또는 압력파동이라고 할 수 있다.

압력파는 변위파와 90° 위상차가 있다.

음속은 온도에 따라 다르다.

$$v = 331\sqrt{1 + \frac{T_C}{273}}$$

T_C :섭씨온도

20°C 공기 중의 음속은 343 m/s

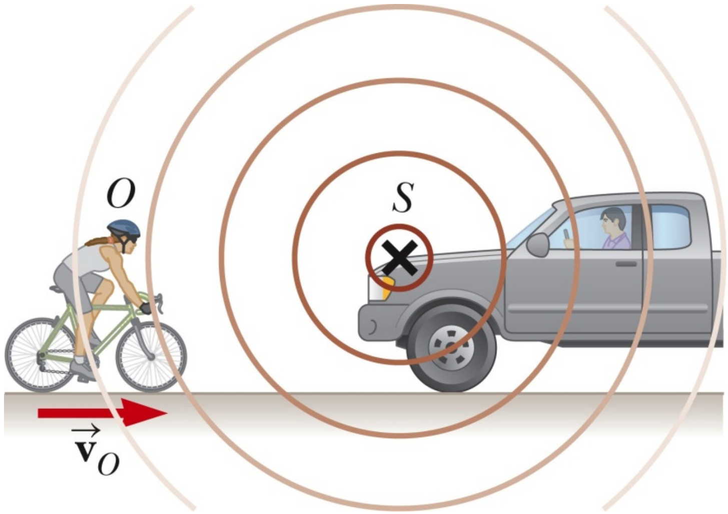
13.7 도플러 효과(The Doppler Effect)

- **도플러 효과**: 파원이나 관측자의 운동 때문에 생기는 관측 진동수(또는 파장)의 변화

  - 음원과 관측자가 서로 가까워질 때는 관측(수신)되는진동수가 커진다.
  - 음원과 관측자가 서로 멀어질 때는 관측(수신)되는 진동수가 커진다.
  - 예를 들어, 멀어져가는 자동차의 경적 소리는 가까워지는 자동차의 경적 소리보다 낮게 들린다.

•음파에 대한 도플러효과는 음원과 관측자 간의 상대운동이 있는 경우 언제나 관측된다.

소리가 나는 곳을 향하여 속력 v_o로 움직이는 관측자가 있다.



음원은 공기에 대해 정지해 있다.

파의 모양 동심원으로 나타냄

각 원의 표면이 파면(wavefront)임.

이웃하는 파면 간의 거리가 파장

음속 v, 진동수 f, 파장 λ

관측자가 음원을 향해 움직이면, 관측자에 대한 파의 속력은: $v' = v + v_O$

파장은 변치 않음

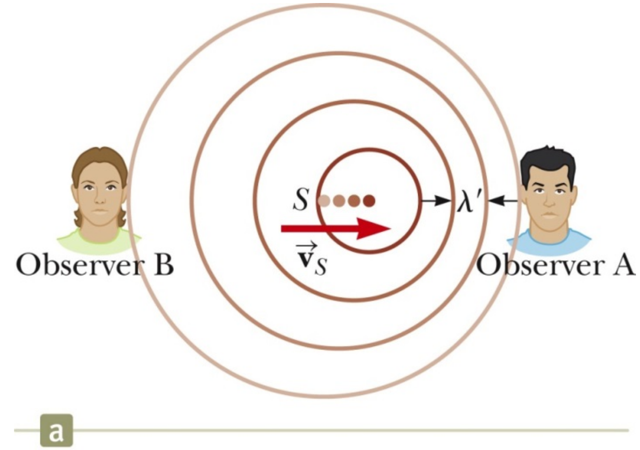
따라서 음원을 향해 움직이는 관측자가 수신하는 진동수 f' 은

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \left(\frac{v}{v - v_S}\right) f$$

- 관측자가 정지해 있고 음원이 움직이는 경우

음원이 관측자를 향해 움직임에 따라, 파장은 짧아지고,

음원이 관측자로부터 멀어지면 파장은 길어진다.



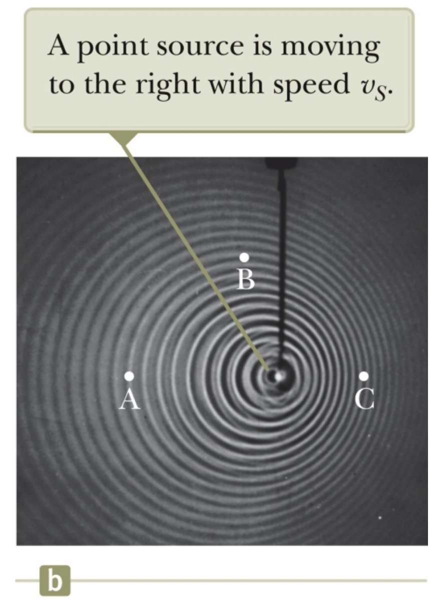
음원이 관측자를 향하면, 음원이 정지해 있는 경우보다 관측자가 수신하는 파마루 간의 간격은 좁아진다.

관측자가 측정하는 파장 λ' 은 짧아진다.

매 진동마다, 음원은 거리 $v_s T = v_s / f$ 만큼 움직이고 파장은 짧아진다.

따라서 수신되는 진동수는 높아진다.

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \left(\frac{v}{v - v_S}\right) f$$



음원과 관측자가 모두 움직이는 경우:

$$f' = \left(\frac{v + v_O}{v - v_S}\right) f$$

여기서 부호는 속도의 방향에 따라 달라진다.

음원이나 관측자가 서로를 향해 움직일 때의 속도는 양(+)이다.

음원이나 관측자가 서로 멀어질 때의 속도는 음(-)이다.

부호에 관한 규약

서로를 향한다는 것은 수신 진동수가 높아진다는 의미

서로 멀어진다는 것은 수신 진동수가 낮아진다는 의미

도플러 효과는 음파뿐 아니라 다른 모든 파동에서도 나타난다.

예제 13.7 도풀러 잠수함

잠수함 A가 물속에서 8.00m/s의 속력으로 움직이면서 진동수 1400 Hz인 수중음파를 방출하고 있다. 물속에서 음파의 속력은 1533m/s이다. 잠수함 B는 잠수함 A를 향해 속력 9.00m/s로 움직이고 있다.

(A) 잠수함이 서로 접근하는 동안 잠수함 B에 타고 있는 관측자가 감지하는 진동수를 구하라.

풀이

잠수함 B에 있는 관측자가 듣는 도플러 이동 진동수를 구한다.

$$f' = \left(\frac{v + v_O}{v - v_S}\right) f$$

$$f' = \left[\frac{1\,533\ \mathrm{m/s} + (+9.00\ \mathrm{m/s})}{1\,533\ \mathrm{m/s} - (+8.00\ \mathrm{m/s})}\right](1\,400\ \mathrm{Hz}) = \boxed{1\,416\ \mathrm{Hz}}$$

(B) 두 잠수함은 서로 부딪히지 않고 간신히 지나간다. 잠수함이 서로 멀어질 때 잠수함 B에 타고 있는 관측자가 감지하는 진동수를 구하라.

풀이

잠수함 B에 있는 관측자가 듣는 도플러 이동 진동수를 구한다.

$$f' = \left(\frac{v + v_O}{v - v_S}\right) f$$

$$f' = \left[\frac{1\ 533\ \mathrm{m/s} + (-9.00\ \mathrm{m/s})}{1\ 533\ \mathrm{m/s} - (-8.00\ \mathrm{m/s})}\right](1\ 400\ \mathrm{Hz}) = \boxed{1\ 385\ \mathrm{Hz}}$$

(C) 잠수함이 서로 접근하는 동안 잠수함 A에서 나온 음파 중 일부는 잠수함 B에서 반사되어 잠수함 A로 되돌아간다. 이 반사음을 잠수함 A의 관측자가 탐지한다면 진동수는 얼마인가?

풀이

잠수함 A에서 탐지하는 도플러 이동 진동수를 구한다.

$$f'' = \left(\frac{v + v_O}{v - v_S}\right) f'$$

$$= \left[\frac{1\,533\text{ m/s} + (+8.00\text{ m/s})}{1\,533\text{ m/s} - (+9.00\text{ m/s})}\right](1\,416\text{ Hz}) = 1\,432\text{ Hz}$$

13.8 연결 주제: 지진파(Context Connection: Seismic Wave)

- 지진이 일어날 때, 지진의 초점(focus) 또는 진원(hypocenter)에서 에너지가 갑작스럽게 방출된다
- 이 진원으로부터 지름 방향 위쪽의 지표면의 한 점을 진앙(epicenter)이라 한다.
- 방출된 에너지는 지진파(seismic wave)의 형태로 진원으로부터 퍼져 나간다.

- 두 가지 형태의 지진파가 있다.

- P 파

  P 는 primary(1차)라는 의미이다.
  종파이다.
  지진계에 먼저 도달한다.

- S 파

  S 는 secondary(2차)라는 의미이다.
  횡파이다.
  지진계에 P파보다 나중에 도달한다.

- 매질 내에서의 음속은 압축률과 매질의 밀도에 의존한다.
    - 압축률은 물질의 탄성률로 나타낼 수 있다.

- 역학적인 파동의 속력은 일반적으로 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$v = \sqrt{\frac{\text{탄성적인 특성}}{\text{관성적인 특성}}}$$

- 고체 덩어리 속을 진행하는 횡파의 경우, 탄성항은 층밀리기 탄성율 S 이다.
  - S 는 옆으로 미는 힘인 층밀리기 힘에 의한 고체의 찌끄러짐의 정도를 나타내는 변수이다.

- 매질 내에서의 음속은

$$v_S = \sqrt{\frac{S}{\rho}}$$

ρ : 매질의 밀도

- 기체나 액체 속의 종파의 경우, 탄성적인 특성은 부피탄성율 B 이다.
    - B 는 외부 압력에 의한 부피의 변화율이다.

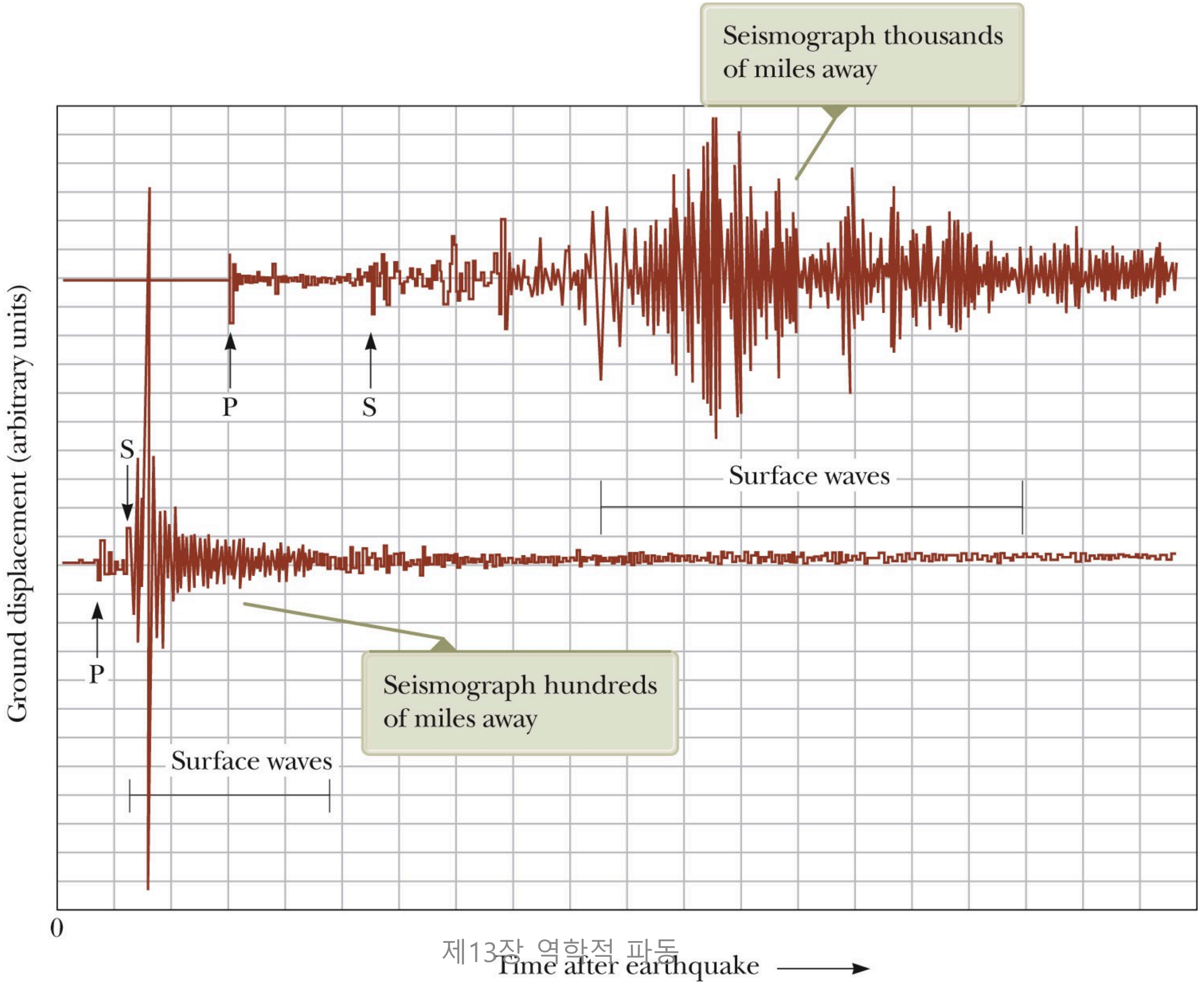
- 액체나 기체 매질 내에서의 음속은

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

ρ : 매질의 밀도

- 고체 덩어리 속을 진행하는 종파의 경우,
    - 재료가 압축되면, 파속은 B 에 의해 정해진다.
    - 재료가 옆으로 찌그러지면, 파속은 S 에 의해 정해진다.
- P파의 속력은

$$v_P = \sqrt{\frac{B + \frac{4}{3}S}{\rho}}$$


Seismograph thousands of miles away
P
S
S
Surface waves
P
Seismograph hundreds of miles away
Surface waves
Ground displacement (arbitrary units)
0
Time after earthquake

- P 파 와 S 파는 지구 내부를 통해 진행

이 파동들이 지표에 도달하면,

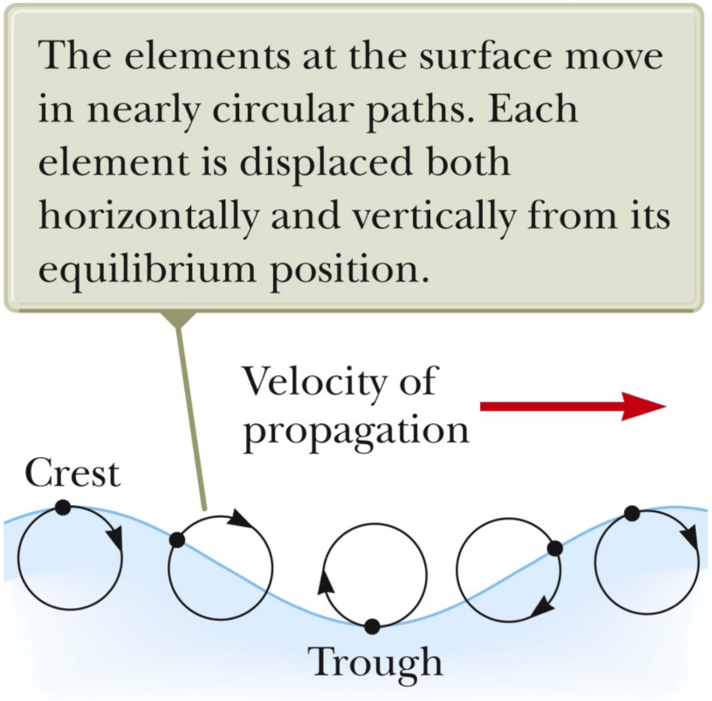
다른 종류의 파동으로 지표를 따라 에너지를 전달

- 러브파(Love waves): 표면횡파

면에 평행하게 횡적으로 진동

• **레일리파**(Rayleigh waves):

표면에서 매질 요소들의 운동은 횡적 변위와 종적 변위가 결합되어 있음 때문에 표면의 한 점에서 알짜 운동은 원이나 타원을 그리며 움직인다. 바다 표면의 파도에서의 물 요소의 경로와 같다



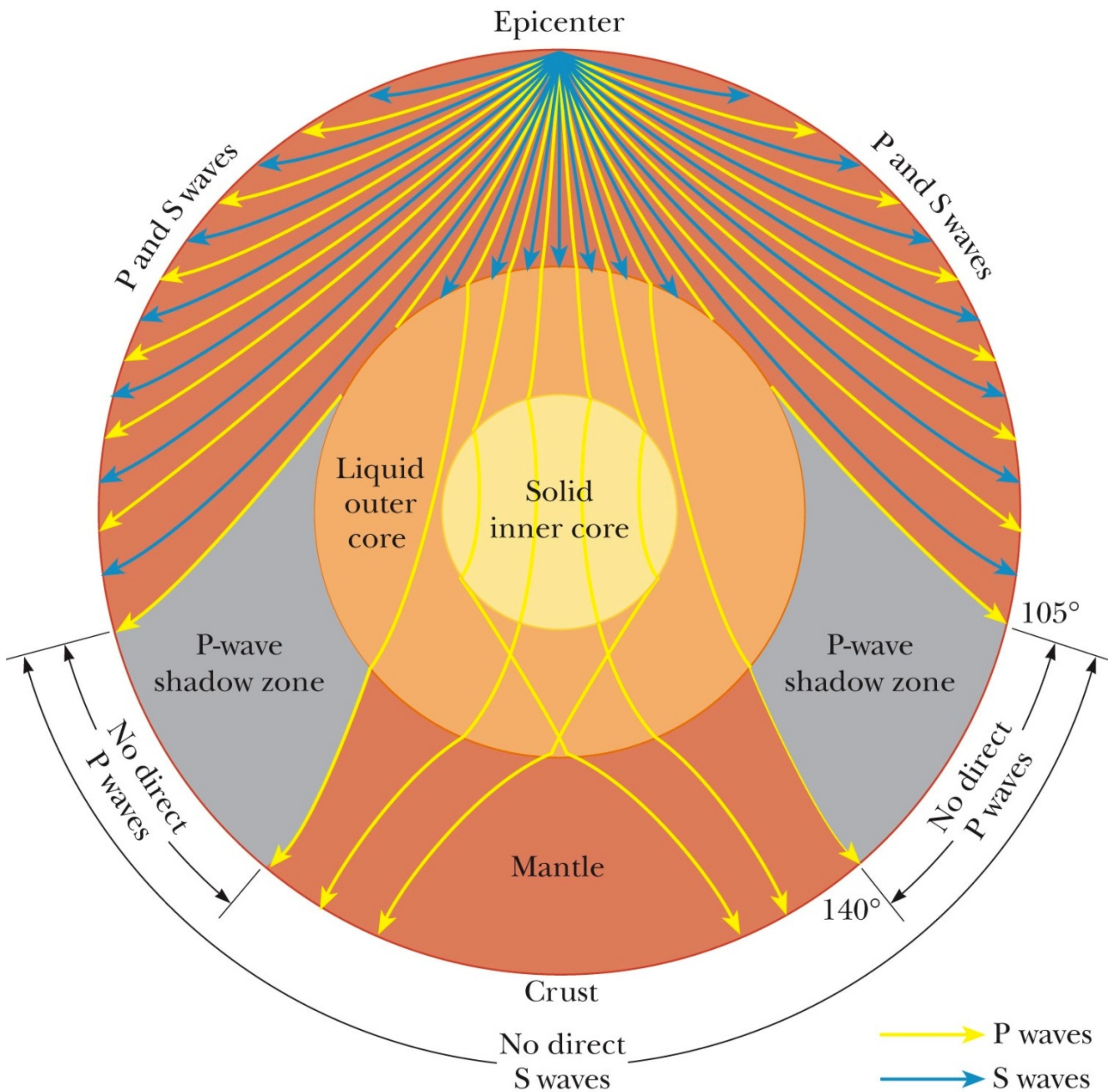
P파와 S파를 관측하여 지구 내부의 구조를 알아낼 수 있다.

측정에 의하면 지구 내부의 어떤 영역에서

P 파는 통과하고 *S* 파는 통과하지 못한다.

횡파인 S파는 액체를 통과하지 못하므로

지구 내부에는 액체 덩어리(liquid core)가 있다.


Epicenter
P and S waves
P and S waves
Liquid
outer
core
Solid
inner core
105°
P-wave
shadow zone
P-wave
shadow zone
No direct
P waves
No direct
P waves
Mantle
140°
Crust
No direct
S waves
P waves
S waves