2018학년도 2학기

물리학및실험 (US0019)

3부 진동과 파동

13장 진동과 파동

상명대학교 융합공과대학

전기공학과

조 수 환 교수

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과

Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

Image copyright Epic Stock. Used under license from Shutterstock.com

13. 진동과 파동

바다의 파도는 횡파와 종파가 결합되어 있다. 적당한 균형과 타이밍으로 서퍼는 파도의 에너지를 이용하여 서핑을 즐길 수 있다.

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.1 훅의 법칙 Hooke's Law

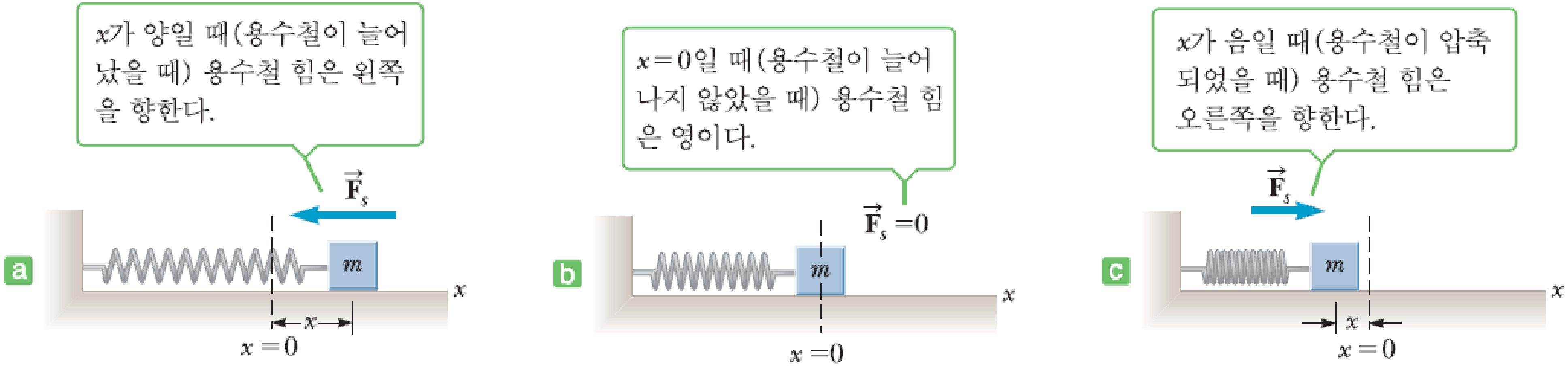
- 훅의 법칙 : 용수철이 작용하는 힘 F_s(복원력)는 변위 x에 비례함.

$$F_s = -kx$$

용수철이 물체에 가하는 힘의 방향이 항상 물체의 변위와 반대 방향 : 음의 부호(−)

k : 용수철 상수(N/m)
(강한 용수철일수록 k값이 크고, 약한 용수철일수록 k값이 작음)

- 단조화운동(Simple Harmonic Motion)
  - 운동의 방향에 따른 알짜힘이 훅의 법칙을 따를 때, 즉 알짜힘이 평형점으로부터의 변위에 비례하고 언제나 평형점을 향할 때 일어나는 운동



서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.1 훅의 법칙 Hooke's Law

- 단조화운동(Simple Harmonic Motion) : 주기운동
  - 진폭(A, amplitude) : 물체가 평형점으로부터 멀어지는 최대거리 (−A ~ +A)
  - 주기(T, period) : x = +A에서 x = −A 그리고 다시 x = −A에서 x = +A로 돌아오는 데 걸리는 시간
  - 진동수(f, frequency) : 1초 동안 일어나는 진동의 횟수 (f = 1/T)

- 단조화운동하는 물체의 가속도
  - 뉴턴의 제2법칙과 훅의 법칙으로부터 유도

$$ma = F = -kx$$

$$\boxed{a = -\frac{k}{m}x}$$

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.2 탄성 위치 에너지 Elastic Potential Energy

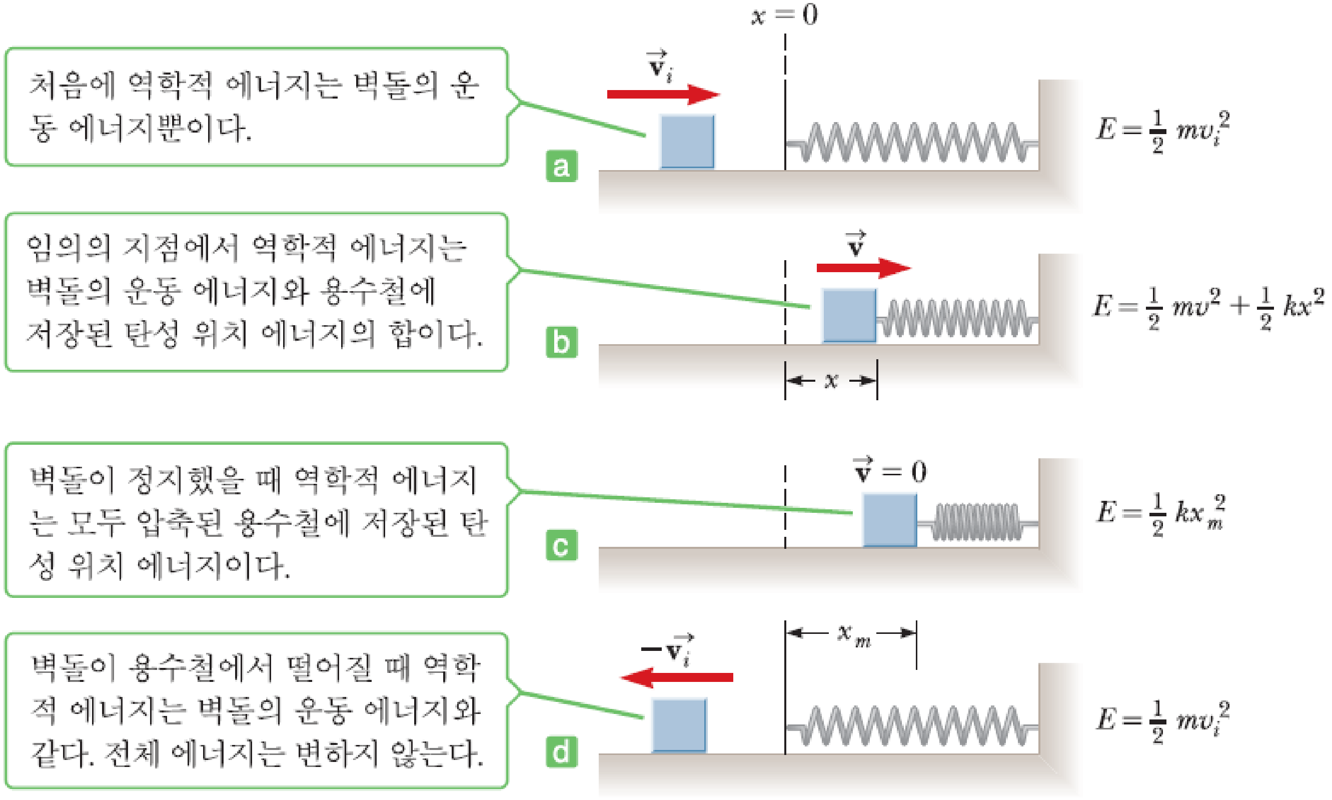
- 탄성위치에너지(PE_s)

$$PE_s = \frac{1}{2}kx^2$$

- 중력 위치 에너지와 용수철 위치 에너지를 포함한 에너지 보존의 법칙

$$(KE + PE_g + PE_s)_i = (KE + PE_g + PE_s)_f$$

$$W_{nc} = (KE + PE_g + PE_s)_f - (KE + PE_g + PE_s)_i$$



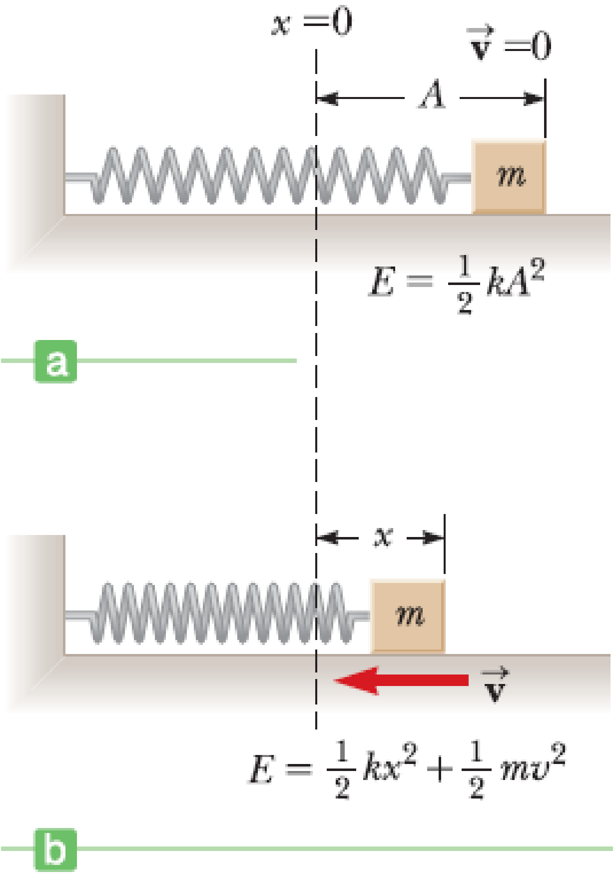
서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.2 탄성 위치 에너지 Elastic Potential Energy

- 위치의 함수로서의 속도

  (−A < x < A)

$$\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 \;\Rightarrow\; v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}\left(A^2 - x^2\right)}$$



서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.3 단조화 운동과 등속 원운동의 비교 Comparing Simple Harmonic Motion with Uniform Circular Motion

- 스프링에 달려 있는 물체의 단조화 운동
  - 물체의 속도

$$v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}\left(A^2 - x^2\right)} \qquad v = C\sqrt{A^2 - x^2}$$

- 등속 원운동하는 물체의 그림자 관찰

$$\sin\theta = \frac{v}{v_0}$$

v : x축 방향의 속도 성분

$$\sin\theta = \frac{\sqrt{A^2 - x^2}}{A}$$

$$\boxed{v = \frac{v_0}{A}\sqrt{A^2 - x^2}} = C\sqrt{A^2 - x^2}$$

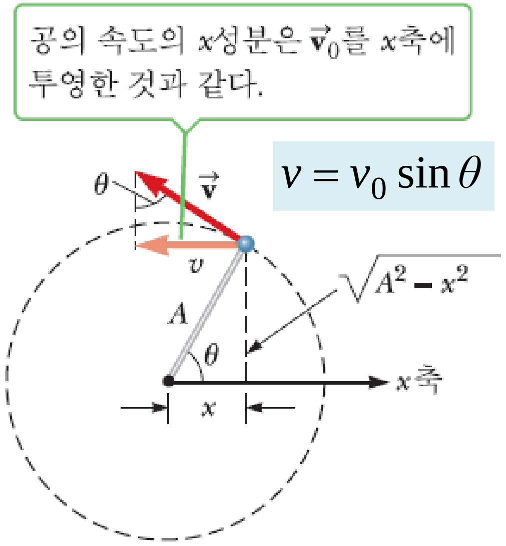


그림 13.8 공이 일정한 속력 v_0로 돈다.

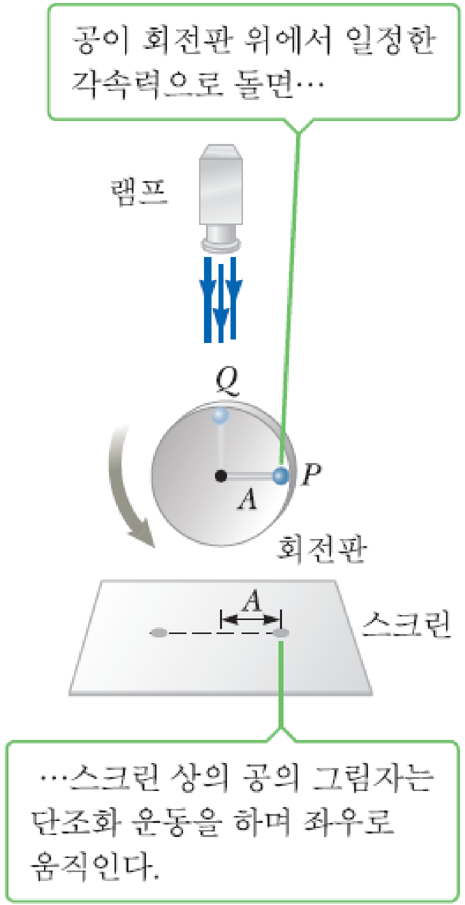


그림 13.7 단조화 운동과 등속 원운동 사이의 연관성을 볼 수 있는 실험 장치

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.3 단조화 운동과 등속 원운동의 비교 Comparing Simple Harmonic Motion with Uniform Circular Motion

- 주기와 진동수
  - 주기(T, sec) : 등속 원운동 시 한 바퀴 회전하는 데 소요되는 시간

$$v_0 = \frac{2\pi A}{T} \Rightarrow \boxed{T = \frac{2\pi A}{v_0}}$$

v_0 : 회전 운동물체의 선속도

  - 진동수(f, Hz) : 1초 동안 회전하는 바퀴 수

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

  - 용수철 진동 운동의 경우 : 평형점에서의 속도 v_0

$$\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 \Rightarrow \frac{A}{v_0} = \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad \omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

각주파수 = 각속도

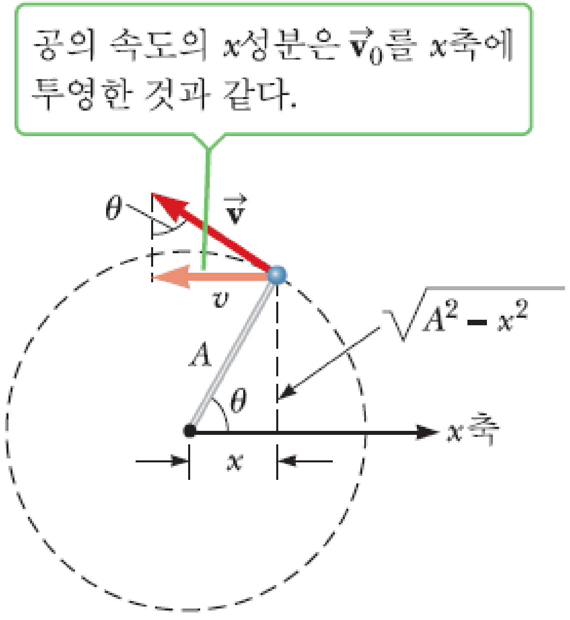


그림 13.8 공이 일정한 속력 v_0로 돈다.

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.4 시간함수로서의 위치, 속도 및 가속도

Position, Velocity and Acceleration as a Function of Time

- 회전하는 물체의 위치를 시간함수로 표현
  - 물체의 위치와 각도와의 관계

$$x = A\cos\theta$$

  - 각도와 시간의 관계 : 각속도(ω)

$$x = A\cos(\omega t)$$

$$\boxed{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

$$x = A\cos(2\pi f t)$$

  - x축 방향의 속도와 시간의 관계 : dx/dt

$$v = -A\omega\sin(2\pi f t)$$

  - x축 방향의 가속도와 시간의 관계 : dv/dt

$$a = -A\omega^2\cos(2\pi f t)$$

용수철에서의 가속도

$$a = -\frac{k}{m}x$$

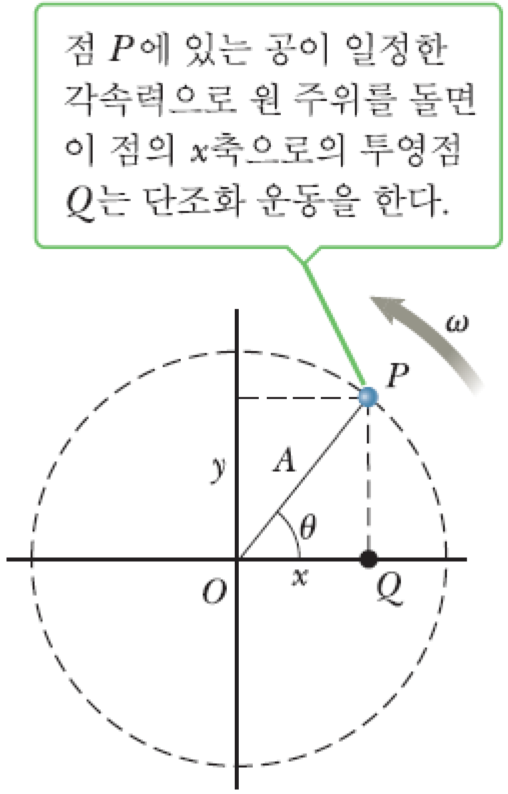


그림 13.10 기준원

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.5 진자의 운동 Motion of a Pendulum

- **단진자의 주기 운동**
  - 단진자의 중력에 의한 복원력

$$F_t = -mg\sin\theta \quad \Rightarrow \quad F_t = -mg\sin\left(\frac{s}{L}\right)$$

$$s = L\theta$$

  - 각도가 작은 경우 : $\sin\theta \approx \theta$

$$F_t = -mg\sin\theta \approx -mg\theta \quad \Rightarrow \quad F_t = -\left(\frac{mg}{L}\right)s$$

훅의 법칙의 일반적인 형태

  - 진자가 작은 각도(15도 이내)로 좌우로 왕복운동하는 경우, 단조화 운동으로 볼 수 있음.

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \Rightarrow \quad \omega = \sqrt{\frac{mg/L}{m}} = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

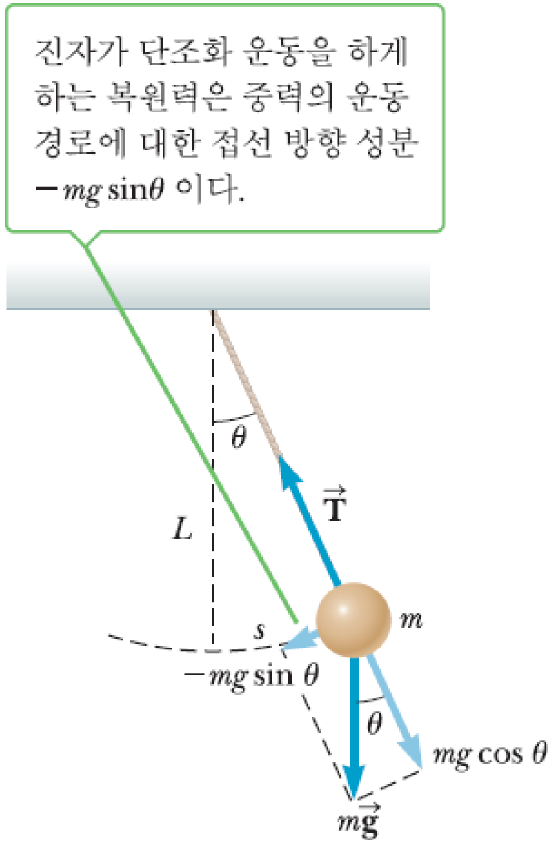


그림 13.13 길이 L(L은 축으로부터 추의 질량 중심까지의 거리)인 가벼운 줄에 달린 질량 m의 추로 이루어진 단진자

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.6 감쇠 진동 Damped Oscillations

- 감쇠의 원인 : 마찰력(계의 역학적 에너지를 감소시킴)
  - Under-damped : 과소 감쇠(부족제동), 진동을 동반함
  - Critically-damped : 임계 감쇠(임계제동)
  - Over-damped : 과대 감쇠(과제동)

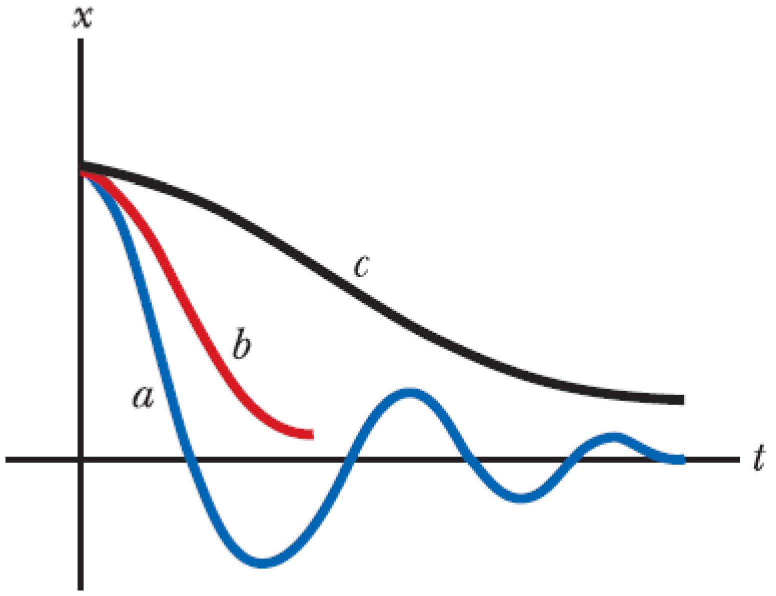


그림 13.18 (a) 과소 감쇠 진동자, (b) 임계 감쇠 진동자 및 (c) 과도 감쇠 진동자 각각에 대한 변위 대 시간 그래프

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.7 파동 Waves

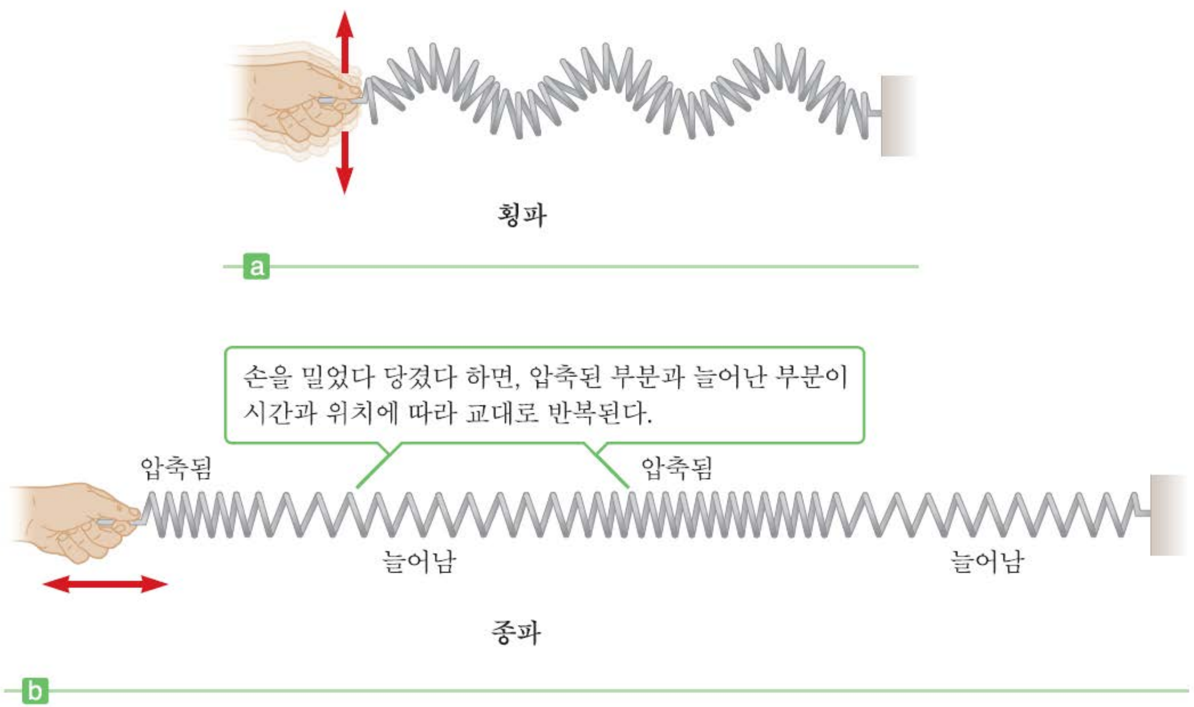
- 역학적 파동 : 교란
  - 교란의 원천인 파원
  - 교란을 일으킬 수 있는 매질
  - 매질의 각 부분들이 서로 영향을 주고받을 수 있는 물리적 매커니즘

- 모든 파동은 에너지와 운동량을 전달함

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.7 파동 Waves

- **파동의 종류**
  - 진행파 (Traveling Wave) : 횡파(Transverse wave)와 종파(Longitudinal wave)
    - 횡파 : 교란된 매질의 각 입자들의 파동의 속도와 수직인 방향으로 진행하는 파동
    - 종파 : 매질의 입자들이 파동의 진행 방향과 동일한 방향으로 움직이는 경우



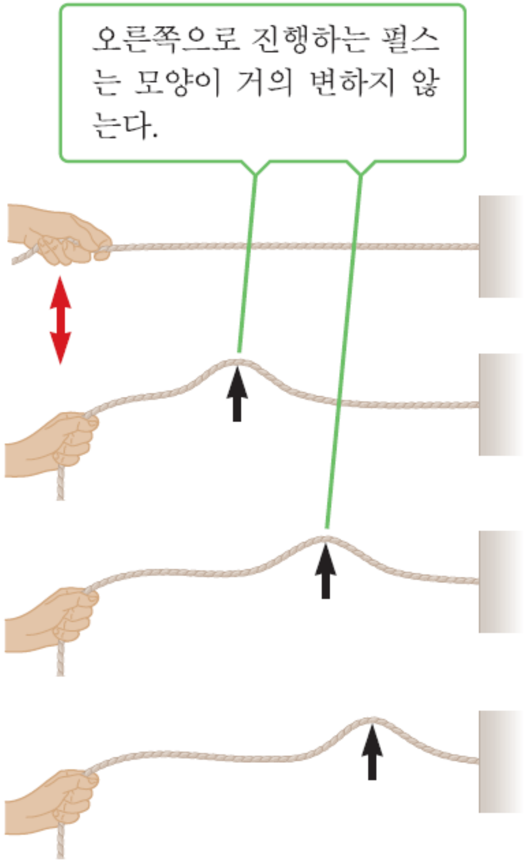


그림 13.19 팽팽한 줄 끝을 손으로 살짝 흔들면(빨간색 화살표) 줄을 따라서 펄스가 진행한다.

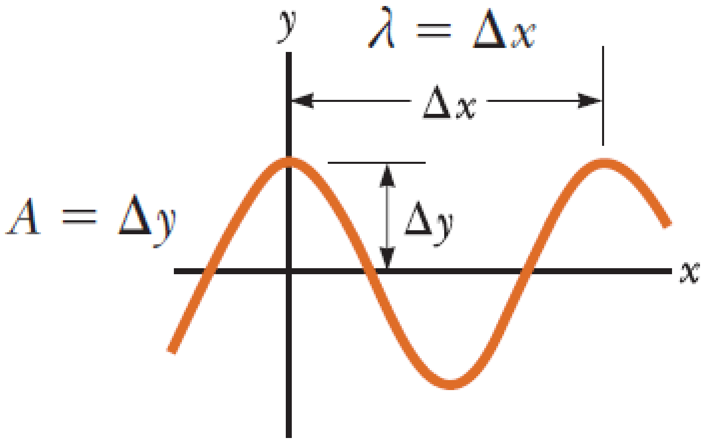
서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.8 진동수, 진폭 및 파장 Frequency, Amplitude and Wavelength

- 진폭(Amplitude, A)
- 진동수(Frequency, f) : 주기(T)의 역수
- 파장(Wavelength, λ) : 한 주기동안 이동 거리(m)
- 파동의 속력(Wavespeed, v)

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

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



서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.9 줄에서의 파동의 속력 Speed of Waves on Strings

- 진동하는 줄
  - 줄에 수직 방향인 y축 방향을 따라 위, 아래로 진동하는 줄의 속력
  - 줄의 길이 방향인 x축 방향으로 전파해가는 교란의 속력(파동의 속력)

- 팽팽한 줄에서의 파동의 진행
  - 파동의 속력

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

  - 또 다른 표현 : 줄의 장력(F)와 줄의 선밀도(μ)

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

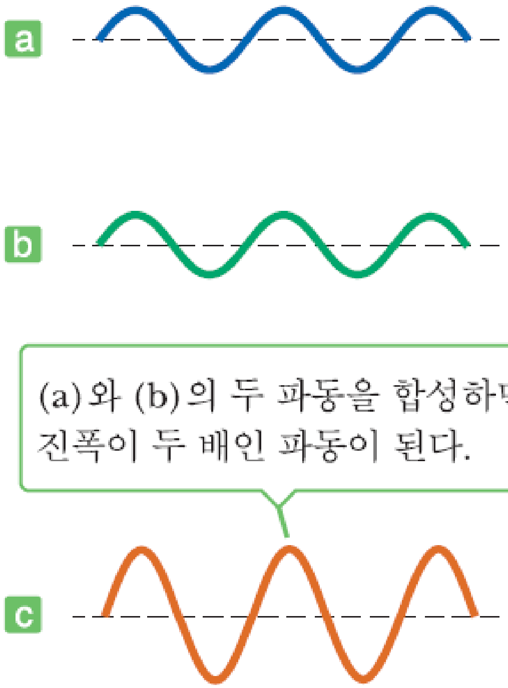
줄의 장력이 증가하면 파동의 속력이 증가하여 진동수가 증가하여 높은 톤의 소리를 내게 됨

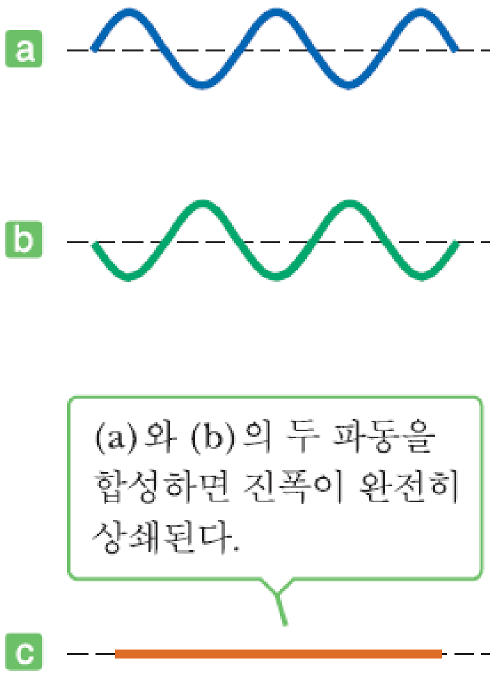
13.10 파동의 간섭 Interference of Waves

- 두 개 이상의 파동이 동시에 같은 공간 상의 지점을 통과할 경우

두 개 이상의 진행파가 매질을 통해 이동하다가 만났을 때 생기는 합성파는 각 파동의 변위를 각 위치별로 모두 더한 것과 같다.

- – 보강 간섭
- – 상쇄 간섭





서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

13.11 파동의 반사 Reflection of Waves

- 진행하는 파동이 경계를 만나면 파동의 일부분 또는 전부가 반사되게 됨

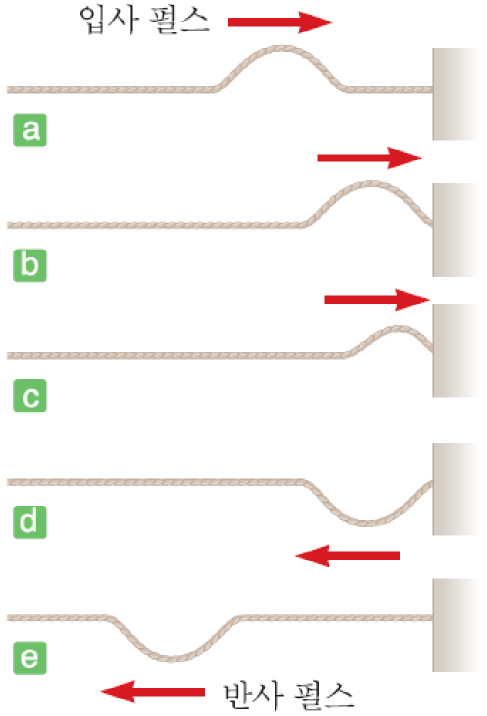


그림 13.32 팽팽한 줄의 고정된 끝에서 반사되는 진행파. 반사된 펄스는 모양은 그대로이나 뒤집어져 있다.

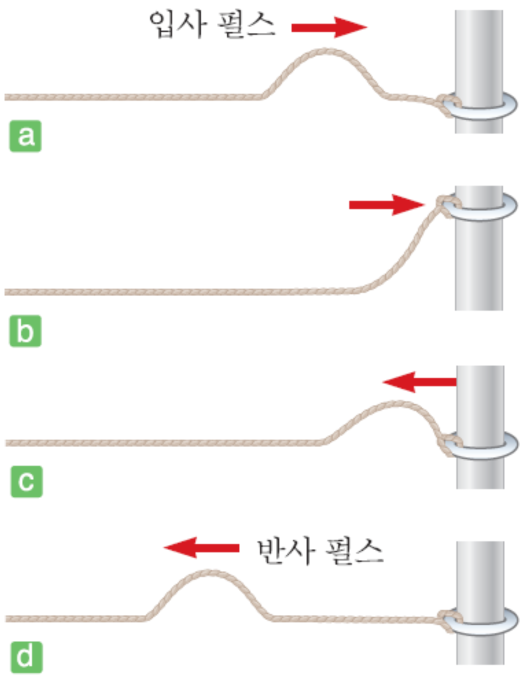


그림 13.33 팽팽한 줄의 자유로운 끝에서 반사되는 진행파. 이 경우 반사된 펄스는 뒤집어져 있지 않다.

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

(추가) 도플러 효과 Doppler Effect

- 음원과 관측자의 상대적인 움직임이 있을 경우
- 경우 1: 정지 음원(v_s = 0)에 대해 관측자가 다가가는 경우
  - 관측자의 이동속력 : v_o
  - 음원의 진동수 : f_s
  - 음원의 파장 : λ_s
  - 음파의 진행 속력 : v

$$v = \frac{\lambda_s}{T_s} = \lambda_s f_s$$

  - 음파의 상대적인 진행 속력 : $v + v_o$
  - 이 때의 관측자가 느끼는 상대적인 음원의 진동수 : f_o

$$v + v_o = \lambda_s f_o = \lambda_s f_s + v_o$$

정지 음원이므로 파장 λ_s 은 일정

$$f_o = f_s + \frac{v_o}{\lambda_s} = f_s + v_o \frac{1}{\lambda_s} = f_s + v_o \frac{f_s}{v} = f_s\left(\frac{v + v_o}{v}\right)$$

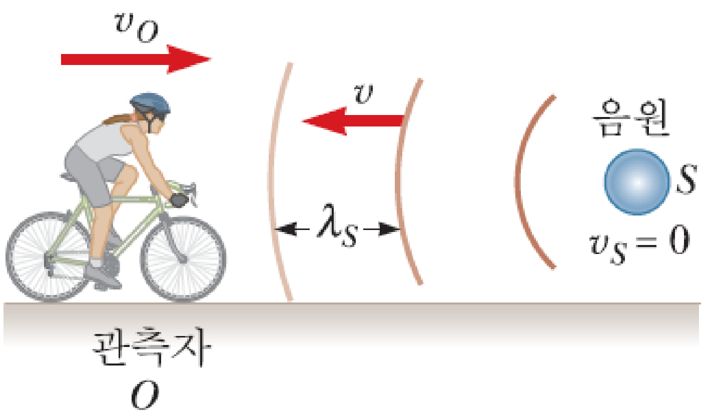


그림 14.8 정지한 점 파원(S)을 향해 v_O의 속력으로 움직이는 관측자는 음원의 진동수 f_S 보다 더 높은 진동수 f_O를 듣는다.

$$f_o > f_s$$

$$f_o = f_s\left(\frac{v + v_o}{v}\right)$$

음파의 상대 속력이 증가하여 음원의 진동수(주파수)가 증가한 것으로 관측됨
⇨ 음파: 파장 짧아짐, 고음화
빛 : Blue Shift (청색편이, 단파)

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

(추가) 도플러 효과 Doppler Effect

- 음원과 관측자의 상대적인 움직임이 있을 경우
- 경우 2: 정지 음원(v_s = 0)에 대해 관측자가 멀어지는 경우
  - 관측자의 이동속력 : v_o
  - 음원의 진동수 : f_s
  - 음원의 파장 : λ_s
  - 음파의 진행 속력 : v

$$v = \frac{\lambda_s}{T_s} = \lambda_s f_s$$

  - 음파의 상대적인 진행 속력 : $v - v_o$
  - 이 때의 관측자가 느끼는 상대적인 음원의 진동수 : f_o

$$v - v_o = \lambda_s f_o = \lambda_s f_s - v_o$$

정지 음원이므로 파장 λ_s 은 일정

$$f_o = f_s - \frac{v_o}{\lambda_s} = f_s - v_o \frac{1}{\lambda_s} = f_s - v_o \frac{f_s}{v} = f_s \left(\frac{v - v_o}{v} \right)$$

$$f_o = f_s \left(\frac{v - v_o}{v} \right)$$

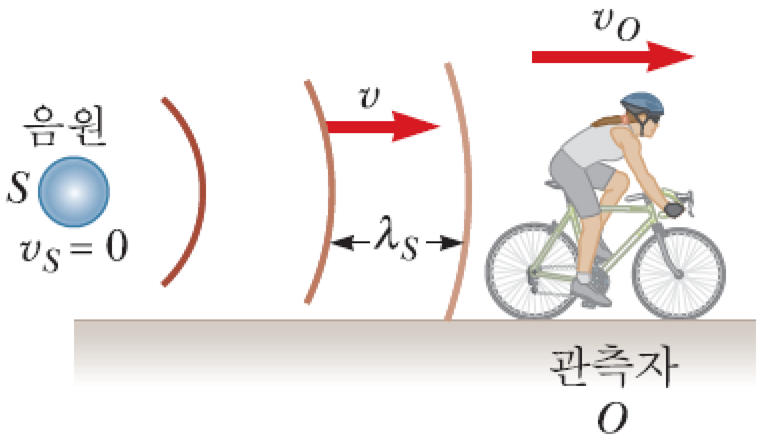


그림 14.9 정지한 음원(S)에서 v_O의 속력으로 멀어지고 있는 관측자는 음원의 진동수 f_S보다 더 낮은 진동수 f_O를 듣는다.

$$f_o < f_s$$

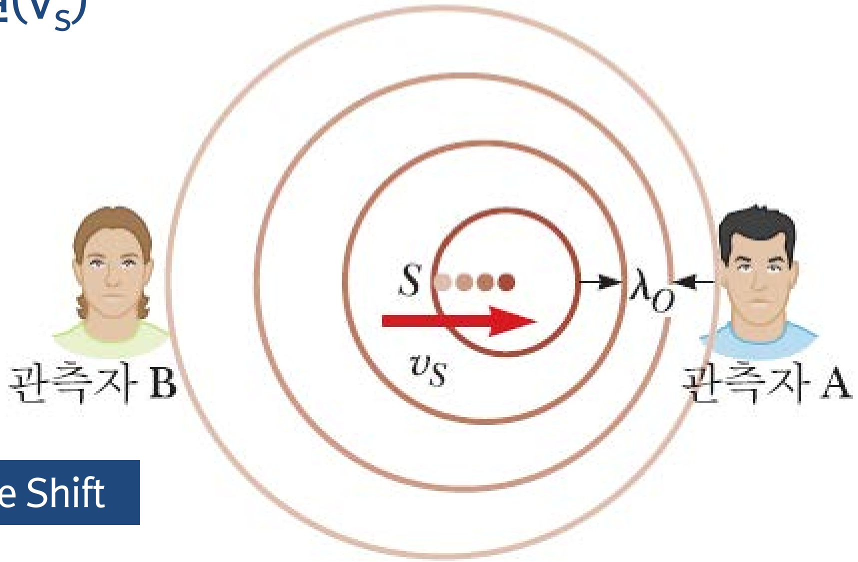
음파의 상대 속력이 감소하여 음원의 진동수(주파수)가 감소한 것으로 관측됨
⇨ 음파: 파장 길어짐, 저음화
빛 : Red Shift (적색편이, 장파)

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr

(추가) 도플러 효과 Doppler Effect

- 경우 3: 정지한 관측자(v_o = 0)에 대해 상대적으로 움직이는 음원(v_s)
  - 음원의 이동속력 : v_s
  - 음원의 진동수 : f_s
  - 음원의 파장 : λ_s
  - 음파의 진행 속력 : v
  - 관측자 A

$$v = \frac{\lambda_s}{T_s} = \lambda_s f_s$$



$$v = \lambda_A f_A = (\lambda_s - v_s T_s) f_A$$

가까워지는 음원이므로 파장이 음원의 이동거리만큼 짧아짐

$$f_A = \frac{v}{\lambda_s - \frac{v_s}{f_s}} = \frac{v}{\frac{v}{f_s} - \frac{v_s}{f_s}} = \boxed{f_s\left(\frac{v}{v - v_s}\right)}$$

$$f_A > f_s$$

Blue Shift

  - 관측자 B

$$v = \lambda_B f_B = (\lambda_s + v_s T_s) f_B$$

멀어지는 음원이므로 파장이 음원의 이동거리만큼 길어짐

$$f_B = \frac{v}{\lambda_s + \frac{v_s}{f_s}} = \frac{v}{\frac{v}{f_s} + \frac{v_s}{f_s}} = \boxed{f_s\left(\frac{v}{v + v_s}\right)}$$

$$f_B < f_s$$

Red Shift

서울시 종로구 홍지문 2길 20 상명대학교 (03016)
융합공과대학 전기공학과
Tel : 02-781-7503
E-mail : shcho@smu.ac.kr