

# 5장. 운동의 법칙

## (The Laws of Motion)

5.1 힘의 개념

5.2 뉴턴의 제1법칙과 관성틀

5.3 질량

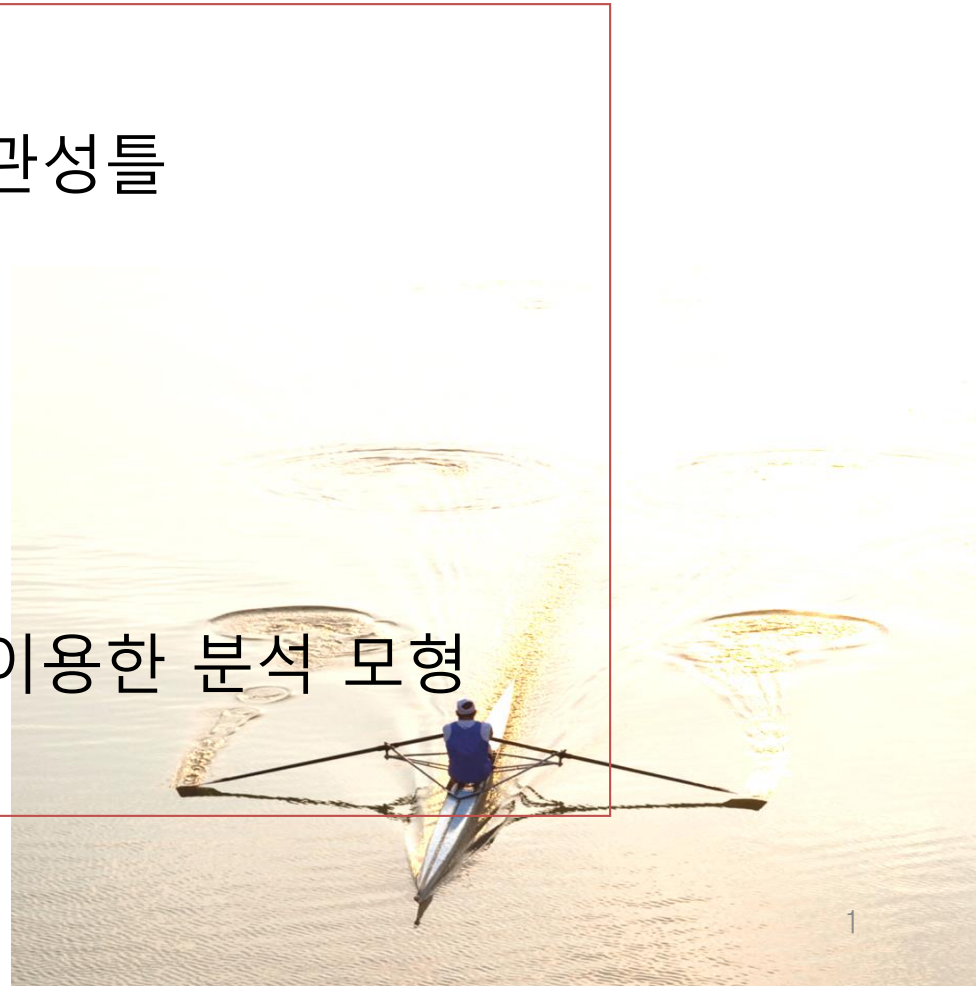
5.4 뉴턴의 제2법칙

5.5 중력과 무게

5.6 뉴턴의 제3법칙

5.7 뉴턴의 제2법칙을 이용한 분석 모형

5.8 마찰력



- 2장과 4장에서는 운동이 왜 일어나는가를 고려하지 않고 위치, 속도, 가속도로 물체의 운동을 정의 (운동학)

이제 무엇이 물체의 운동을 변화시키는가를 공부

- 고려해야 할 두 개의 중요한 요인은 물체에 가해지는 힘과 물체의 질량

이 장에서는 거의 3세기 전에 뉴턴(Isaac Newton, 1642-1727)에 의해 공식화된 힘과 질량에 관한 3개의 운동 법칙을 다룸  
(달의 운동, 사과 떨어짐 (만유인력).....

1665~1666년, 유럽의 흑사병 창궐, 1687년 저서 '프린키피아' 발표)

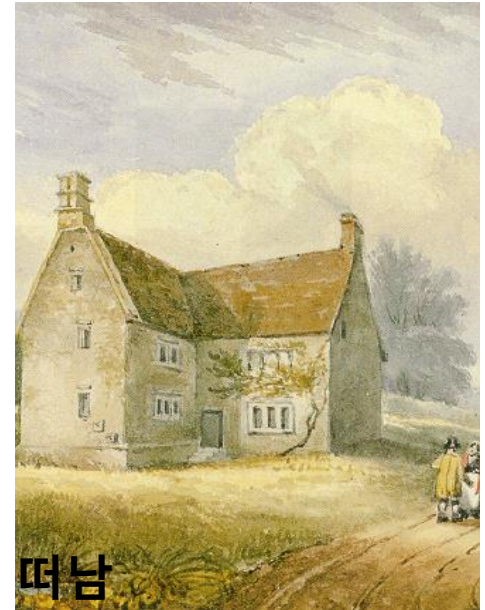
-이 법칙을 이해하고 나면

“무엇이 운동 상태를 변화시키는가?”

“왜 어떤 물체가 다른 것보다 빨리 가속되는가?”의 질문에 답을 할 수 있게 됨

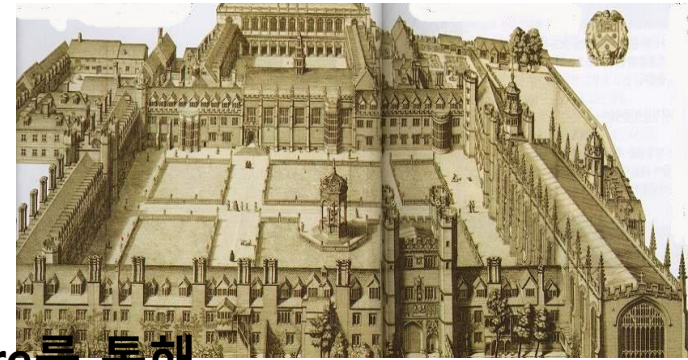
# 뉴턴의 어린 시절

- Isaac Newton
- (1642년 12월 25일(1월 4일)-1727)
  - 소지주의 유복자로 태어남
  - 모성 결핍과 심리적 영향
    - 어머니는 생후 2년 만에 재가해서 그의 곁을 떠남
      - 외할머니 손에 의해서 길러짐.
      - 의붓아버지가 죽고 어머니가 다시 돌아올 때까지 9년 동안 어머니와 떨어져 지냈음.
    - 이런 모성결핍이 그의 심리적 경향에 커다란 영향을 미침
      - 논문을 발표할 때마다 보인 심리적 불안감
      - 그를 비판하는 사람들에게 대해서 보여 주었던 지극히 비이성적이고 격렬한 반응



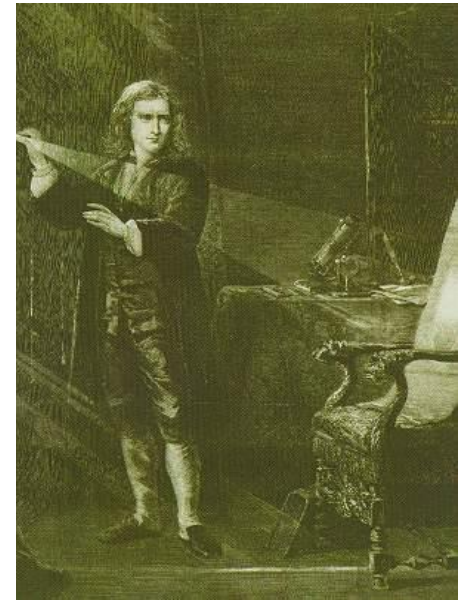
# 케임브리지 시절의 뉴턴

- 1661년 케임브리지 트리니티 칼리지에 입학.      트리니티 칼리지
- 1664년 <철학의 몇가지 문제들>
  - 과학혁명에 근간이 되는 생각을 접했음
  - 데카르트, Gassendi의 원자론, 보일의 화학 등 기계적 철학
  - Hermeticism
    - 케임브리지 플라톤주의자 Henry More를 통해
  - 데카르트 기하학 공부
  - 유율론 개발
- Annus Mirabilis(1665-1667)
  - 1665년 흑사병으로 대학이 문을 닫자 고향에서 2년간 후일 중요한 의미를 지니는 생각을 하게 됨
    - 미적분학, 색깔에 관한 생각, 역제곱법칙



# 후크와의 논쟁

- 1667년 Fellow of Trinity College
  - 2년 뒤 Lucasian Professor of Mathematics
    - 광학에 대해서 강의
- 광학에 대한 연구
  - 빛이 단색광이 아니라 혼합광임을 주장
  - 반사망원경 발명
- Robert Hooke (1635-1703)와 논쟁
  - 1672년 빛과 색깔에 관한 논문을 왕립학회에 발표한 뒤
  - 이후 외부와 관계를 끊고 격리
    - 신경쇠약, 발작
    - 이 기간 동안 헤르메티시즘과 연금술에 탐닉
  - 프린키피아 출판시 후크와의 표절 시비



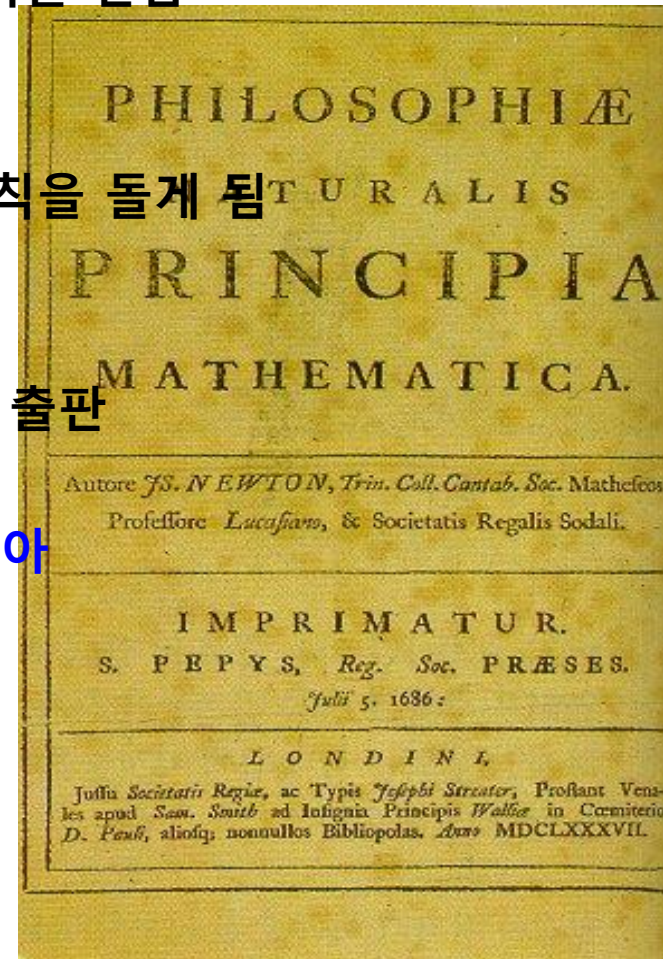
뉴턴 망원경





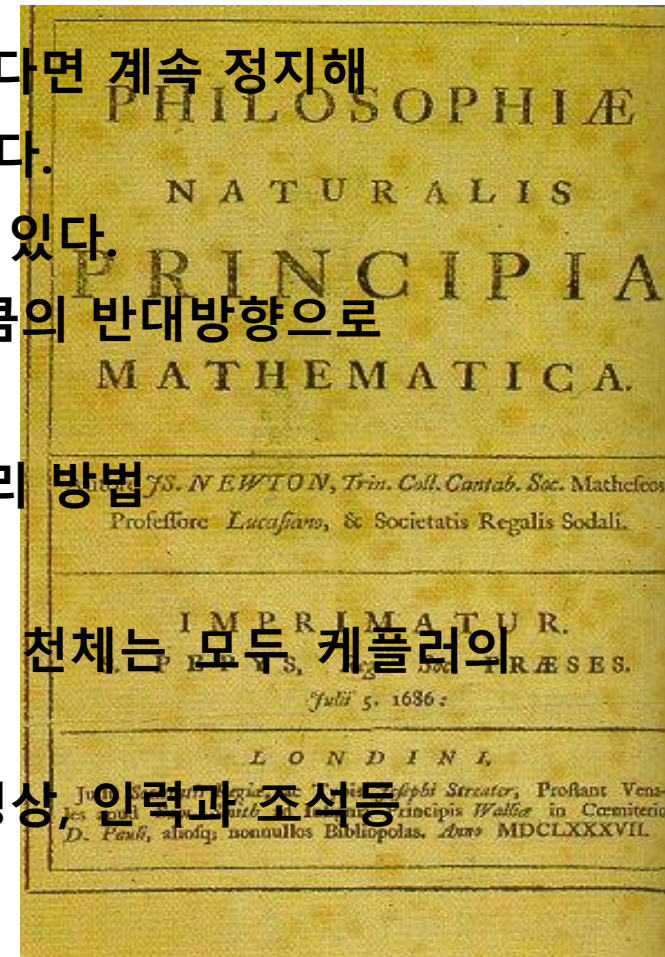
# *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*

- 1679년경 Hooke로부터 역제곱법칙에 관한 편지를 받음
  - 행성운동에 이용할 생각
- 1684년 8월 Edmond Halley 뉴턴 방문
  - 뉴턴이 역제곱법칙을 도입하여 케플러의 법칙을 도출
  - Halley의 권유로 책을 쓰게 됨
  - 왕립학회에서 출판을 약속
  - 18개월동안 집필해서 1687년 3권의 책으로 출판
- 후크의 표절 시비 뉴턴의 프린키피아
  - 프린키피아에서 후크 인용 삭제
  - 후크 생전에 왕립학회 회장직 거부
  - 광학 출판 연기



# *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*

- 제1권 : 정의와 공리를 전개, 운동법칙 설명
  - ① 어떠한 물체도 외부의 힘에 의한 작용이 없다면 계속 정지해 있거나 혹은 계속 같은 속도로 직선 운동한다.
  - ② 힘의 크기는 운동의 변화에 의해 측정할 수 있다.
  - ③ 모든 작용하는 힘에는 동시에 같은 크기만큼의 반대방향으로 향하는 반작용이 존재한다.
- 제2권 : 유체정역학과 유체 동역학의 수학적 처리 방법
- 제3권 : '세계체계'
  - 태양계 안에서 궤도운동을 하는 모든 천체는 모두 케플러의 행성운동 제3법칙을 따른다.
  - 달의 정확한 궤도, 천체섭동, 지구의 형상, 인력과 조석등



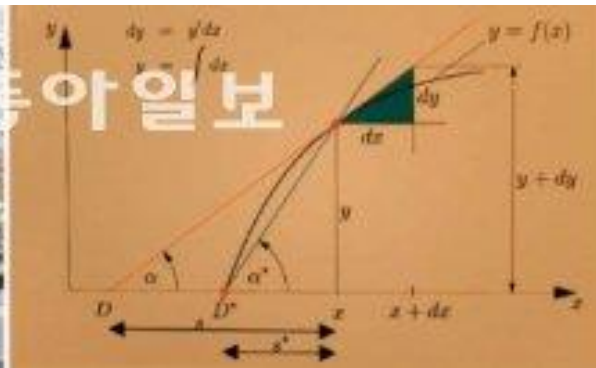
## ‘프린키피아’ 출간 이후

- 출판 직후의 반응
  - 인력의 도입 문제: 연금술사나 마술사가 쓰던 용어
    - 특히 데카르트 철학의 영향 아래 있던 곳에서는 저항 심함
  - 굉장히 큰 충격과 함께 뉴턴에게 국제적 명성을 줌
- 조폐국 시절
  - 1696년부터 조폐국에서 일함(찰스 몬티규의 도움)
  - 위조지폐 방지에 노력
  - 1699년 국장으로 승진
  - 1705년 기사 작위 받음
- 성경 해석 작업
  - 다니엘과 요한의 예언서를 해석(사후 출판)



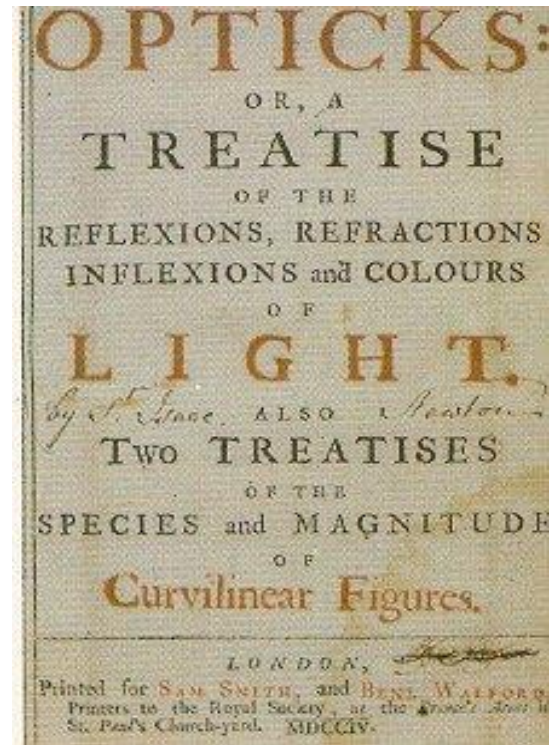


- 라이프니츠와의 미적분학 우선권 논쟁
  - 추종자들의 부축임에 못 이겨서 시작한 논쟁이 추잡한 싸움으로 변함
  - 두 사람이 죽으면서 끝남
- 뉴턴과 악연을 맺은 사람들
  - 플램스티드: 천문표를 만든 영국 왕립 천문학자



# 뉴턴의 Opticks

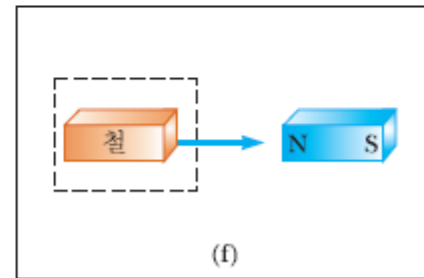
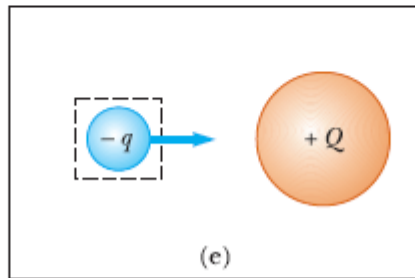
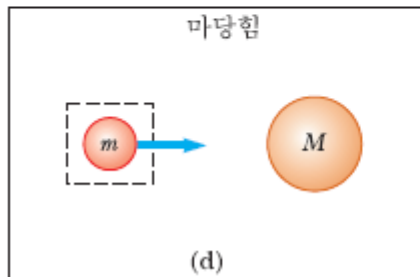
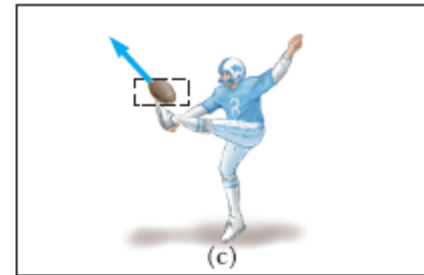
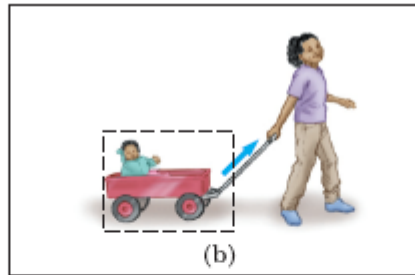
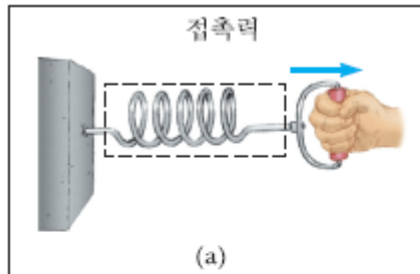
- Opticks (1704)
  - 1672년 경에 이미 거의 완성된 논문
    - 1703년 후크가 죽은 뒤 출판
- 특징
  - 프린키피아에 비해 실험적
  - 빛을 입자로 보고, 프리즘에 의한 색의 연구
  - 거시적 현상만을 언급
    - 미시적 메커니즘은 언급하지 않음
- “나는 가설을 만들지 않는다”
  - Principia에 나오는 언급
    - 중력이 실제로 존재함을 강조하기 위해서 한 말



## 5.1 힘의 개념

(The Concept of Force)

힘(force): 물체의 운동 상태를 변화시킬 수 있는 작용,  
알짜 힘(net force), 평형 상태(equilibrium state)



접촉력: 두 물체 사이에 물리적인 접촉을 수반하는 힘

마당힘(field force): 빈 공간을 통해 작용

(참고) 자연에 존재하는 기본적인 힘들은 모두 마당힘

(1) 두 물체 사이의 중력

(2) 전하와 전하 사이에 작용하는 전자기력

(3) 원자핵 내부에서 작용하는 강한 핵력

(4) 어떤 방사성 붕괴 과정에서 나타나는 약력

\* 강한핵력 > 전자기력 > 약한핵력 > 중력

고전 물리학에서는 단지 중력과 전자기력에 대해서만 고려

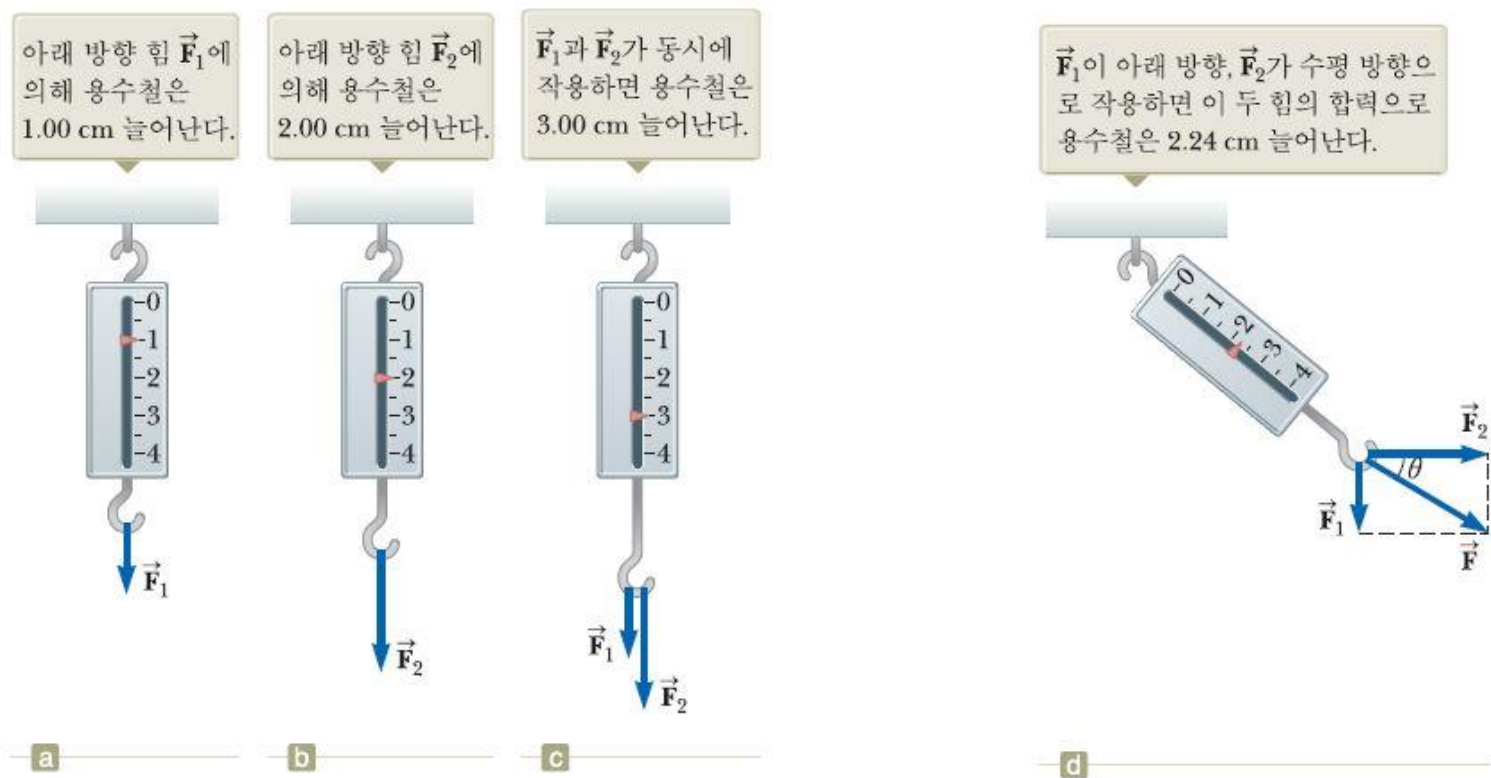
-우주는 Quark와 Lepton 등의 입자와 이들의 반입자로 구성

-우주에 존재하는 물질과 현상들은 이 4개의 상호작용과 이 입자들로  
설명 (표준이론)

## ◆ 힘의 벡터적인 성질

한 물체에 두 힘이 작용할 때, 각 힘의 방향에 따라서 대상 물체가 받는 알짜힘의 크기와 방향이 달라진다.

따라서, 힘은 벡터의 성질을 갖고 있음을 알 수 있다.



$$|\mathbf{F}| = 1 + 2 = 3$$

$$|\mathbf{F}| = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = 2.24$$



## ☞ 물체에 작용하는 힘의 종류(1)

### ☞ 탄성력과 훅의 법칙(Hook's law)

- 변형은 변형력에 비례한다.

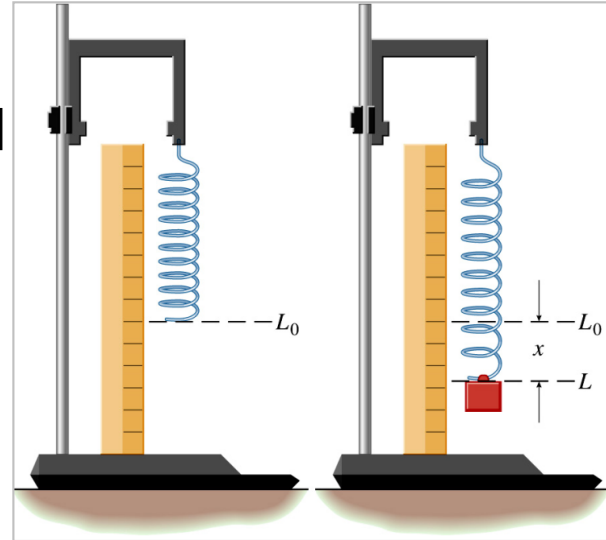
(용수철이 늘어난 길이는 용수철을 당기는 힘에  
이상적인 용수철에 대한 훅의 법칙

$$F = kx$$

$F$ : 용수철에 가한 힘

$x = L - L_0$ : 용수철의 늘어난 길이

$k$ : 용수철 상수



※ 용수철 상수  $k$  란?

: 용수철을 잡아 늘이거나 압축시키는 것이 얼마나 힘든가에 대한 척도로  
용수철 자체가 지니는 성질이다.

용수철 상수의 단위 :  $F = kx \rightarrow k = \frac{F}{x} [\text{N/m}]$

## ☞ 물체에 작용하는 힘의 종류(2)

### ☞ 만유인력

- 만유인력의 법칙: 질량이  $m_1, m_2$  인 두 물체 사이에 작용하는 힘

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$  : 만유인력 상수

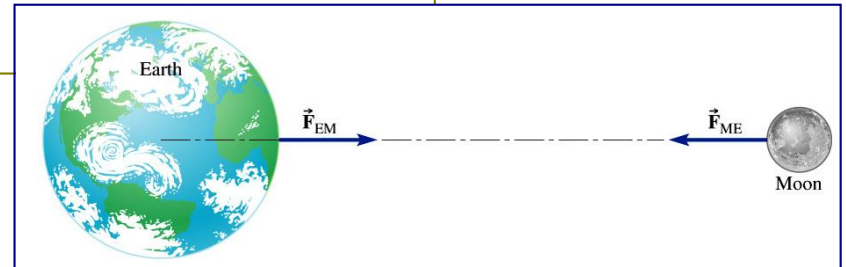
$r$  : 두 물체 사이의 거리

### ☞ 중력

- 지구와 지구상 물체간의 만유인력

$$F = mg$$

$g = 9.80 \text{ m/s}^2$  : 중력가속도



\* 지구와 물체 사이에 작용하는 만유인력으로부터 중력가속도의 크기를 구한다.

$$F = G \frac{M_E m}{R^2} = m \left( G \frac{M_E}{(R_E + h)^2} \right) = mg$$

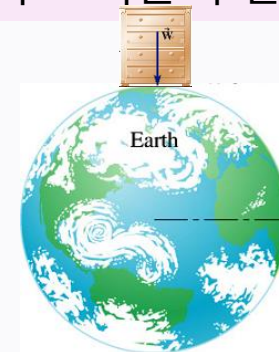
$$\rightarrow g = G \frac{M_E}{(R_E + h)^2}$$

$M_E = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$  : 지구의 질량

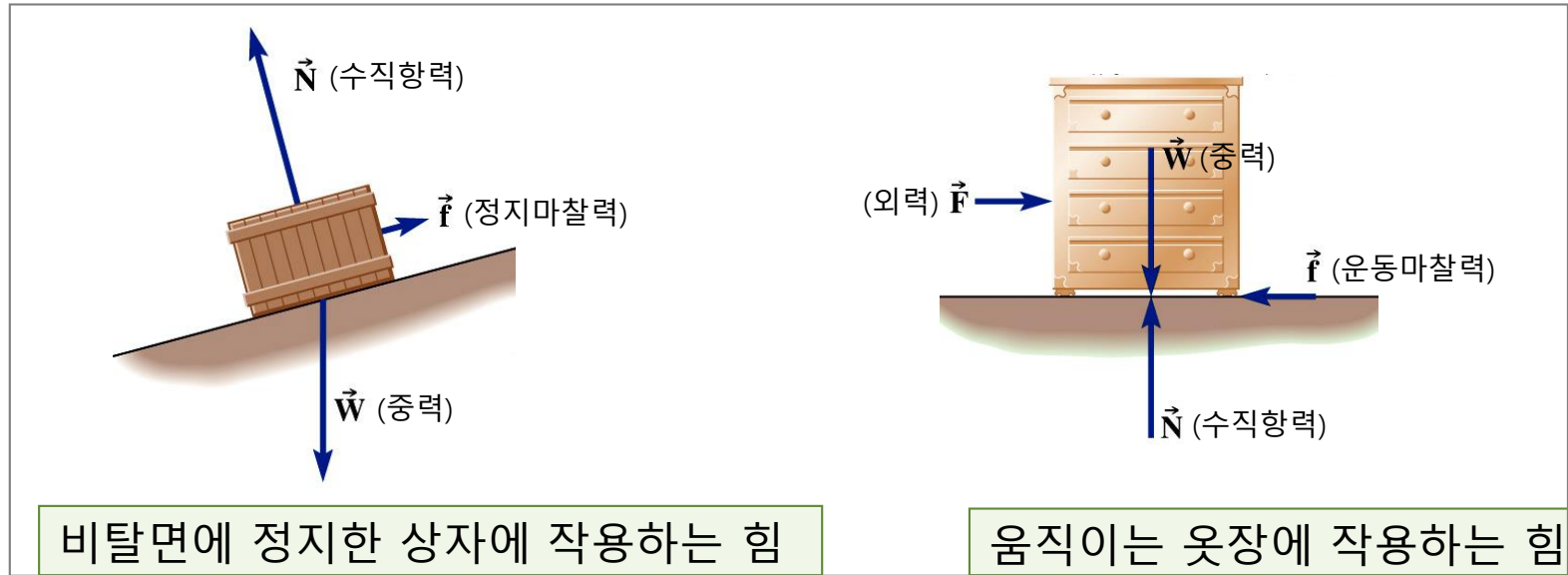
$R_E = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$  : 지구의 평균 반지름

$m$  : 서랍의 질량,  $h$  : 서랍의 높이

$$\approx \frac{(6.673 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m} / \text{kg}^2) \times (5.98 \times 10^{24} \text{ kg})}{(6.37 \times 10^6 \text{ m})^2} = 9.80 \text{ N/kg}^2 = 9.80 \text{ m/s}^2$$



## ☞ 물체에 작용하는 힘의 종류(3)



비탈면에 정지한 상자에 작용하는 힘

움직이는 옷장에 작용하는 힘

### ☞ 수직항력( $\vec{N}$ )

- 접촉면에 수직한 방향으로 작용한다. ( $\vec{f}$ )

### ☞ 마찰력

- 접촉면에 평행한 방향이면서 물체의 운동 방향과 반대방향으로 작용한다.

$$\vec{f} = \mu \vec{N} : \text{마찰력은 수직항력에 비례한다.}$$

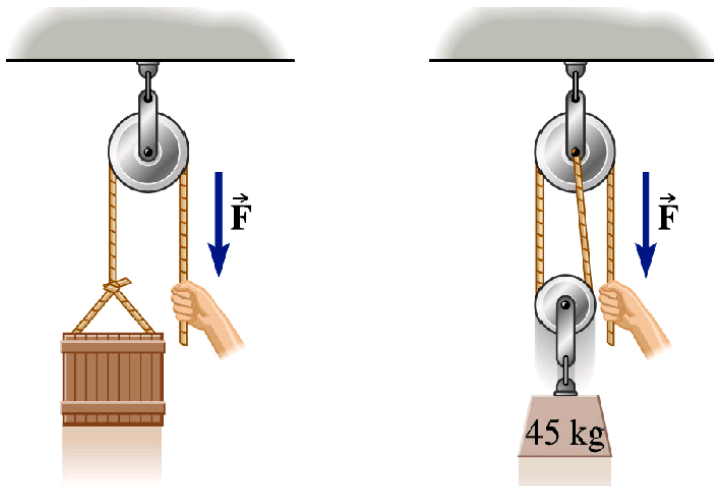
$\mu$  : 정지 혹은 운동 마찰계수

## ☞ 물체에 작용하는 힘의 종류(4)

### ☞ 장력(tension)

- 줄에 작용하는 힘으로 힘의 방향은 줄이 잡아당겨지는 방향이다.

도르래를 이용하여 물체를 들어올리는 경우



단순 도르래

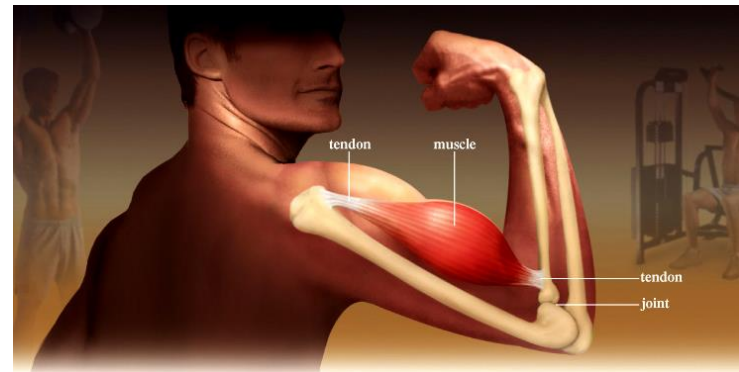
복합 도르래

단순 도르래

: 힘의 방향을 바꾸는 역할을 한다.

복합 도르래

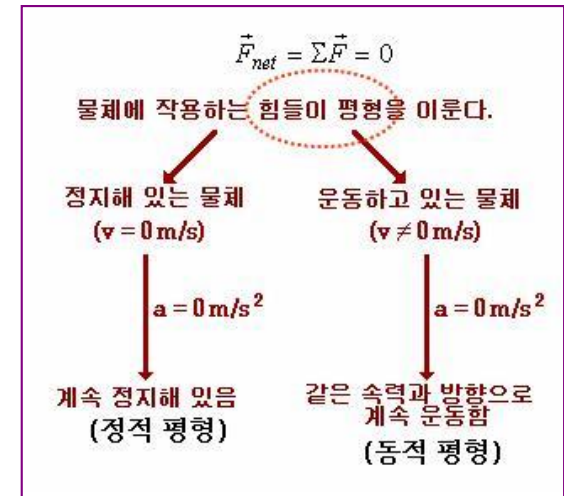
: 힘을 절반으로 줄이고, 힘의 방향을 바꾸는 역할을 한다.



☞ 사람의 근육

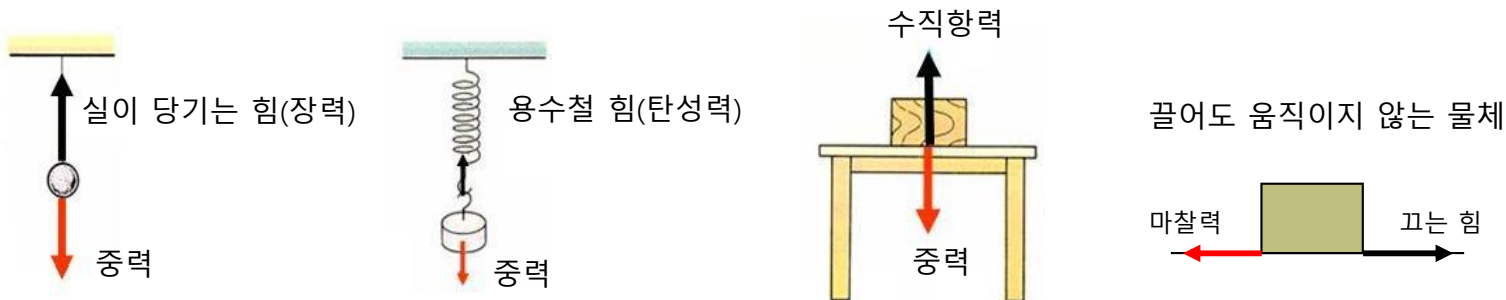
## 👉 힘의 평형(1)

- 한 물체에 작용하는 알짜 힘  $F_{\text{net}}$  이 0인 상태로, 물체의 운동이 변하지 않는다.
- 물체는 정지(정적 평형 상태) 또는 등속 직선 운동(동적 평형 상태)을 한다.



## 👉 두 힘의 평형

: 두 힘의 크기가 같고, 방향이 반대이며, 같은 작용선상에서 작용해야 한다.





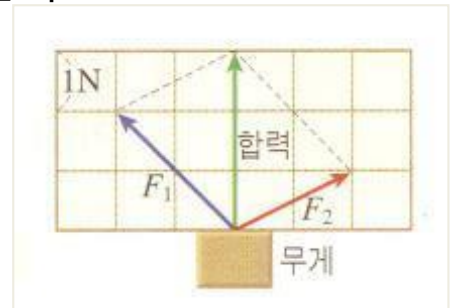
## 👉 힘의 평형(2)

### 👉 세 힘의 평형

: 두 힘의 합력이 나머지 한 힘과 크기가 같고, 방향이 반대이어야 한다.

예) 두 힘으로 물체를 들고 있다.

물체의 무게는 얼마인가? (물체가 정지상태이므로 힘의 평형상태이다.)



풀이  $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ , 물체의 무게가 평형을 이룬다.

이들 세 힘의 합력이 0이므로  
두 힘  $\vec{F}_1, \vec{F}_2$  의 합력은 물체의 무게와 크기가 같고 방향이 반대이다.  
따라서 물체의 무게는 3N이다.

## 5.2 뉴턴의 제1법칙과 관성틀

(Newton's First Law and Inertial Frames)

한 물체가 다른 어떤 물체와도 상호 작용하지 않으면, 이 물체의 가속도가 영(0)이 되는 기준틀(관성틀)이 존재한다.

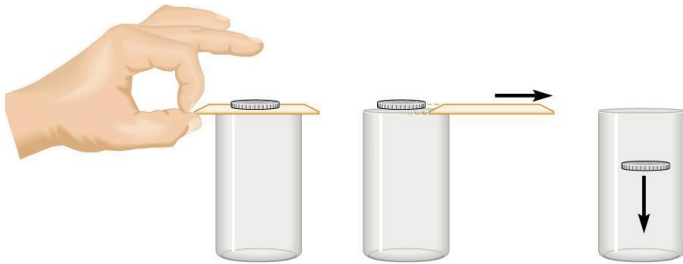
이러한 기준틀을 관성 기준틀(inertial frame of reference)이라고 한다. 관성틀에 대해 등속으로 움직이는 기준틀은 모두 관성틀이다.

지구는 태양 주위로 공전 운동을 하고 지구 축에 대해 자전 운동을 해서 두 회전 운동의 구심 가속도를 가지므로 관성틀이 아니다. 그러나 이 가속도는 중력 가속도  $g$ 에 비해 매우 작아서 무시할 수 있다. 따라서 **지구와 지구 상에 고정된 좌표계를 관성틀로 취급**한다.

관성 기준틀에서 볼 때, 외력이 없다면 정지해 있는 물체는 정지 상태를 유지하고, 등속 직선 운동하는 물체는 계속해서 등속 운동 상태를 유지한다. 운동 제1법칙

# 뉴턴의 제 1법칙과 관성틀

☞ 정지 상태를 유지하려는 관성에 의한 현상



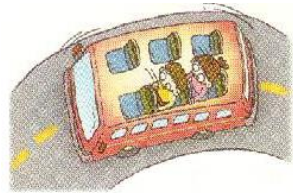
→ 종이는 튕겨나가고 동전은 컵 속으로 떨어진다.

☞ 운동 상태를 유지하려는 관성에 의한 현상



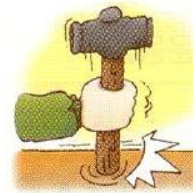
버스가 갑자기 정지하면  
승객이 앞으로 넘어진다.

→ 버스는 정지하는데 승객은  
나아가던 방향으로 계속  
움직이려 하므로



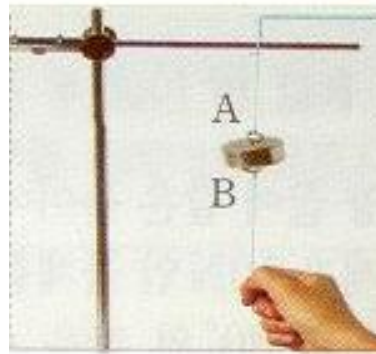
버스가 커브 길을 돌면  
몸이 바깥쪽으로 쏠린다.

→ 몸은 원래 운동 방향으로  
계속 운동하려 하므로



자루를 바닥에 치면 헐거워진  
망치 머리가 고정된다.

→ 망치를 거꾸로 내려치면  
자루는 정지하나, 망치  
머리는 계속 운동하려 하므로



실을 천천히 당기면

A에는 당기는 힘과 추의 무게가,  
B에는 당기는 힘만 작용하므로 A가 끊어진다.

갑자기 실을 당기면

추의 아래쪽 실(B)이 끊어진다.

→ 관성에 의해 추는 제자리에 정지해 있고,  
아래쪽 실에 당기는 힘이 작용하므로

## 5.3 질량

(Mass)

**질량(mass):** 물체는 속도의 변화를 거스르려는 경향(**관성, inertia**)을 가지며 그 경향의 정도를 나타내는 물체의 속성을 **질량**이라고 정의.

두 질량의 비는 작용한 힘에 의해 발생하는 가속도 크기의 역비로 정의

$$\frac{m_1}{m_2} \equiv \frac{a_2}{a_1}$$

질량은 물체가 가지고 있는 고유 속성으로 주위 환경과 그것을 측정하는 절차에 무관하다. 또한 질량은 스칼라량이며 보통의 산술 법칙을 따른다.

질량과 무게는 서로 다른 양이다. 물체의 **무게(weight)**는 그것에 작용하는 중력의 크기와 같고 물체의 위치에 따라 달라진다.

$$W = m g$$

## 5.4 뉴턴의 제2법칙

(Newton's Second Law)

관성 기준틀에서 관찰할 때 물체의 가속도는 그 물체에 작용하는 알짜힘에 비례하고 물체의 질량에 반비례한다.

$$\mathbf{a} \propto \frac{\sum \mathbf{F}}{m}$$

비례상수를 1로 하면

$$\sum \mathbf{F} = m \mathbf{a}$$

운동 제2법칙

이 벡터를 성분으로 표현하면

$$\sum F_x = m a_x \quad \sum F_y = m a_y \quad \sum F_z = m a_z$$

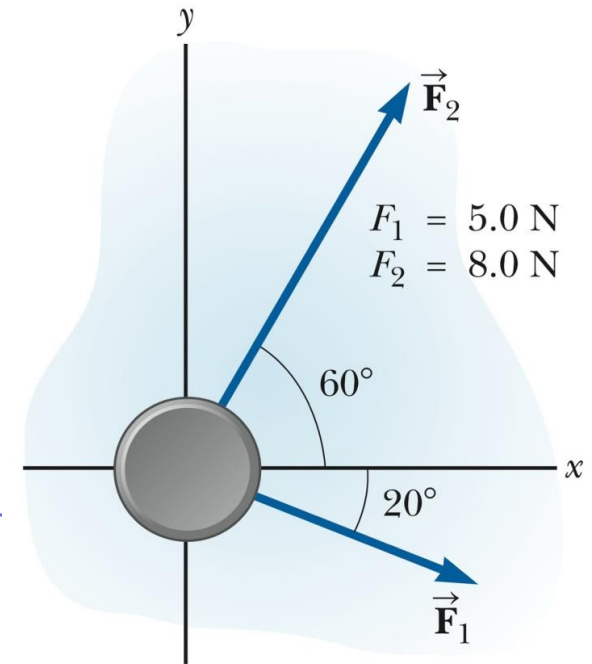
단위:  $1N \equiv 1kg \cdot m/s^2 = 10^5 \text{ dyne in CGS unit}$



## 예제 5.1

## 가속되는 하키 퍽

질량이 3.0 kg인 하키 퍽이 스케이트장의 마찰 없는 수평면에서 미끄러 지고 있다. 그림처럼 두 개의 하키 스틱이 동시에 퍽을 가격하여 힘이 작용하였다.  $\vec{F}_1$  은 크기가 5.0 N이고 x축아래로  $\theta=20^\circ$ 를 향한다.  $\vec{F}_2$  는 크기가 8.0 n이고, x축위로  $\phi=60^\circ$ 를 향한다. 퍽이 가속되는 가속도의 크기와 방향을 구하라.



풀이

$$\sum F_x = F_{1x} + F_{2x} = F_1 \cos \theta + F_2 \cos \phi$$

$$\sum F_y = F_{1y} + F_{2y} = F_1 \sin \theta + F_2 \sin \phi$$

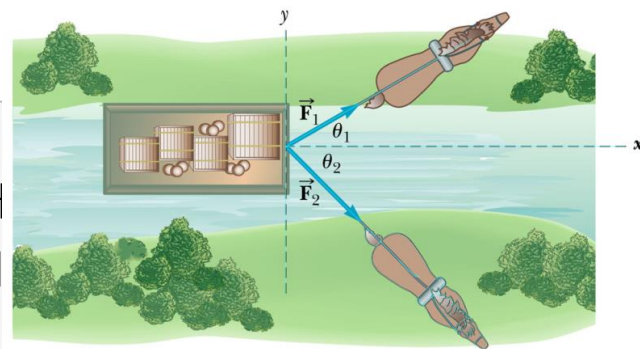
$$a_x = \frac{(5.0 \text{ N}) \cos(-20^\circ) + (8.0 \text{ N}) \cos(60^\circ)}{0.30 \text{ kg}} = 29 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = \frac{(5.0 \text{ N}) \sin(-20^\circ) + (8.0 \text{ N}) \sin(60^\circ)}{0.30 \text{ kg}} = 17 \text{ m/s}^2$$

$$a = \sqrt{(29 \text{ m/s}^2)^2 + (17 \text{ m/s}^2)^2} = 34 \text{ m/s}^2 \quad \theta = \tan^{-1} \left( \frac{a_y}{a_x} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{17}{29} \right) = 31^\circ$$

## 예제 : 배를 끄는 말

수로를 따라서 두 마리의 말이 질량이  $2.00 \times 10^3 \text{ kg}$  인 배를 끌고 있다. 첫 번째 말에는 줄이 수로와  $30.0^\circ$  의 각도로 연결되어 있고, 두 번째 말에는  $45.0^\circ$  로 연결되어 있다. 두 마리의 말이 모두  $6.00 \times 10^2 \text{ N}$  의 힘으로 끌 때, 정지 상태에서 출발하는 배의 처음 가속도를 구하라. 배의 마찰은 무시한다.



**풀이**  $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = 6.00 \times 10^2 \text{ N}$ ,  $m = 2.00 \times 10^3 \text{ kg}$

$$F_{1x} = |\vec{F}_1| \cos \theta_1 = (6.00 \times 10^2 \text{ N}) \times \cos 30.0^\circ = 520 \text{ N}$$

$$F_{1y} = |\vec{F}_1| \sin \theta_1 = (6.00 \times 10^2 \text{ N}) \times \sin 30.0^\circ = 300 \text{ N}$$

$$F_{2x} = |\vec{F}_2| \cos \theta_2 = (6.00 \times 10^2 \text{ N}) \times \cos(-45.0^\circ) = 424 \text{ N}$$

$$F_{2y} = |\vec{F}_2| \sin \theta_2 = (6.00 \times 10^2 \text{ N}) \times \sin(-45.0^\circ) = -424 \text{ N}$$

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$\rightarrow F_x = F_{1x} + F_{2x} = 520 \text{ N} + 424 \text{ N} = 944 \text{ N}$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = 300 \text{ N} + (-424 \text{ N}) = -124 \text{ N}$$

$$F_x = ma_x \rightarrow a_x = \frac{F_x}{m} = \frac{944 \text{ N}}{2.00 \times 10^3 \text{ kg}} = 0.472 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{-124 \text{ N}}{2.00 \times 10^3 \text{ kg}} = -0.0620 \text{ m/s}^2$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(0.472 \text{ m/s}^2)^2 + (-0.0620 \text{ m/s}^2)^2} = 0.476 \text{ m/s}^2$$

$$\tan \phi = \frac{a_y}{a_x} \rightarrow \phi = \tan^{-1} \left( \frac{-0.0620 \text{ m/s}^2}{0.472 \text{ m/s}^2} \right) = -7.48^\circ$$

## 5.5 중력과 무게

(The Gravitational Force and Weight)

지구가 물체에 작용하는 인력을 **중력**(gravitational force)  $F_g$ 라 한다.  
이 힘은 지구의 중심을 향하며 이 힘의 크기가 **무게**(weight)이다.

$$\mathbf{F} = m \mathbf{g}$$

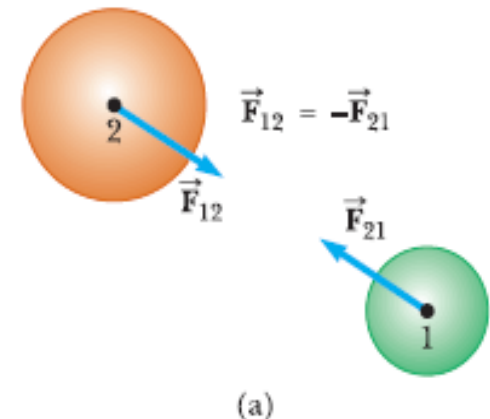
\*중력 질량( $f=mg$ )과 관성 질량( $f=ma$ )

## 5.6 뉴턴의 제3법칙

(Newton's Third Law)

두 물체가 상호 작용할 때, 물체 1이 물체 2에 작용하는 힘  $F_{12}$ 는 물체 2가 물체 1에 작용하는 힘  $F_{21}$ 과 크기는 같고 방향이 반대이다.

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21} \quad \text{운동 제3법칙}$$



## ◆ 뉴턴의 제3법칙 예: 수직항력(normal force) $n$

작용력: 모니터에 작용하는 지구의 인력( $F_{Em}=F_g$ )  
 반작용력: 지구에 작용하는 모니터의 인력 ( $F_{mE}$ )

$$\vec{F}_{mE} = -\vec{F}_{Em}$$

미시적으로 보면 모니터와 책상 표면 분자들 간에 전기력이 작용한다.  
 $n$ : 한 물체가 바닥을 누르는 힘에 대한 반작용으로 주어지는 힘.

작용력: 모니터가 책상을 누르는 힘 ( $F_{mt}$ )  
 반작용력: 책상이 모니터를 밀어 올리는 힘 ( $F_{tm}=n$ )

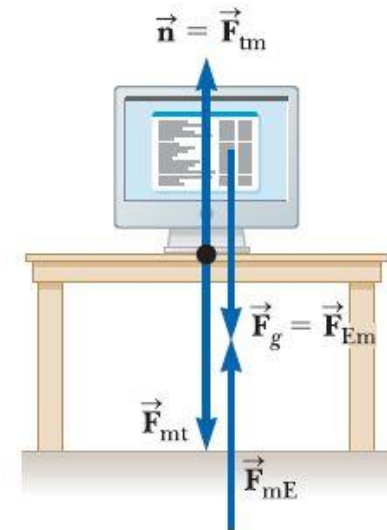
$$\vec{F}_{mt} = -\vec{F}_{tm}$$

모니터가 받는 힘만을 고려하면

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{tm} + \vec{F}_{Em} = \vec{n} + m\vec{g}$$

$$\vec{n} + m\vec{g} = 0$$

$$\therefore \vec{n} = -m\vec{g}$$



## 5.7 뉴턴의 제2법칙을 이용한 분석 모형

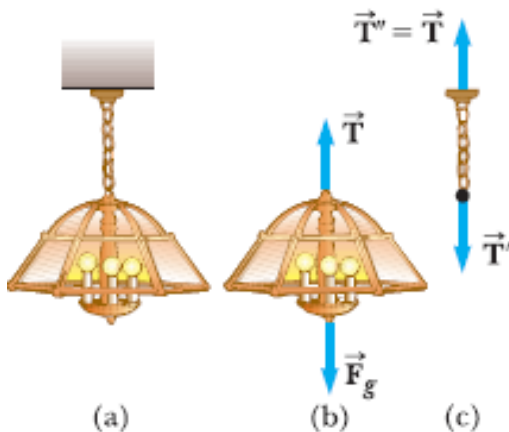
(Analysis Models Using Newton's Second Law)

뉴턴의 법칙을 적용할 때 오직 물체에 작용하는 외력에만 관심을 갖는다. 물체를 입자로 가정하여 회전 운동은 고려하지 않는다.

별도의 언급이 없는 한 줄이나 끈의 질량도 무시한다. 이와 같은 가정에 의해 줄의 한 점에 작용하는 힘은 줄을 따라 어디에서나 일정하게 작용한다

### ◆ 평형 상태의 입자(The Particle in Equilibrium)

평형 상태는 가속도가 0인 상태를 말한다.  $\sum \mathbf{F} = 0$



$$\sum F_x = 0$$
$$\sum F_y = T - F_g = 0$$

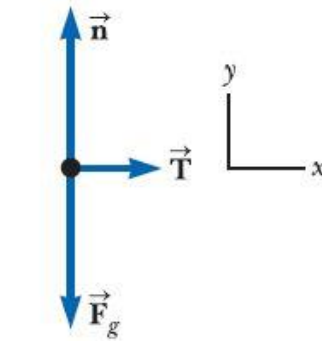
$$\therefore T = F_g$$



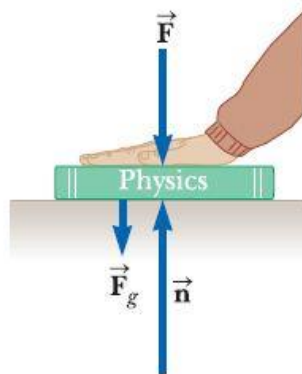
# ◆ 알짜힘을 받는 입자(The Particle Under a Net Force)



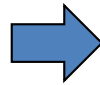
a



b



$$\sum \mathbf{F} = m \mathbf{a}$$



$$\begin{aligned} \sum F_x &= T = ma_x & \therefore a_x &= \frac{T}{m} \\ \sum F_y &= n - F_g = 0 & \therefore n &= F_g \end{aligned}$$

수직항력이 항상 중력과 같은 것은 아니다.

$$\sum F_y = n - F_g - F$$

$$n = F_g + F$$

## 예제 5.2 매달려있는 신호등

무게가 122 N인 신호등이 세 줄에 매달려 있다. 위의 두 줄은 수직 줄에 비해 그렇게 강하지 못하여 장력이 100 N을 초과하면 끊어진다. 이 상태에서 신호등은 잘 매달려 있을 수 있을까? 아니면 둘 중 하나의 줄이 끊어질까?

신호등에서 보면(그림 (b))

$$\sum F_y = T_3 - F_g = 0$$

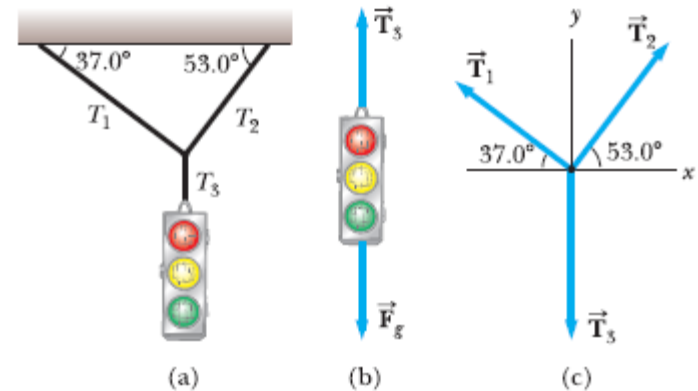
$$T_3 = F_g = 122\text{N}$$

매듭에서 보면(그림 (c))

$$\sum F_x = -T_1 \cos 37.0^\circ + T_2 \cos 53.0^\circ = 0$$

$$\sum F_y = T_1 \sin 37.0^\circ + T_2 \sin 53.0^\circ + (-122) = 0$$

$$\therefore T_1 = 73.4\text{N} \quad T_2 = 97.4\text{N}$$



### 예제 5.3

### 미끄러 지는 자동차

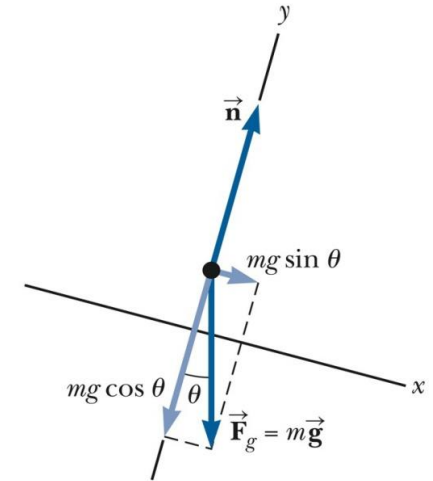
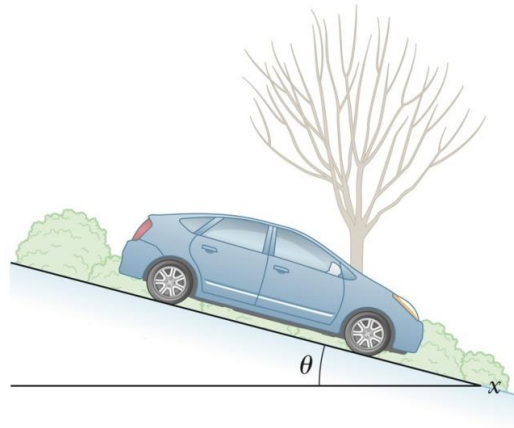
그림처럼 경사각이  $\theta$ 이고 비탈진 빙판길에 질량  $m$ 인 자동차가 있다.  
(A) 비탈길이 마찰이 없다고 가정하고, 자동차의 가속도를 구하라

풀이

$$\sum F_x = mg \sin \theta = ma_x$$

$$\sum F_y = n - mg \cos \theta = 0$$

$$a_x = g \sin \theta$$



(B) 자동차가 정지 상태에서 비탈길 꼭대기로 부터 운동을 시작하고 자동차의 앞 범퍼에서 비탈 맨 아래까지의 거리가  $d$ 라고 가정하자. 앞 범퍼가 비탈 맨 아래에 도달하는데 걸리는 시간과 그곳에서 자동차의 속력을 구하라.

$$d = \frac{1}{2} a_x t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a_x}} = \sqrt{\frac{2d}{g \sin \theta}}$$

$$v_{xf} = \sqrt{2a_x d} = \sqrt{2gd \sin \theta}$$

## 예제 상자 옮기기

짐상자와 바퀴가 달린 작은 수레의 무게의 합이  $3.00 \times 10^2 \text{ N}$  이다. 한 사람이  $20.0 \text{ N}$  의 힘으로 끈을 당긴다면, 이 계(짐상자와 수레)의 가속도는 얼마인가?

또  $2.00 \text{ s}$  동안 움직인 거리는 얼마인가?

계는 정지 상태에서부터 출발하고, 계의 운동에 반하는 어떠한 마찰력도 작용하지 않는다고 가정하라.

풀이 무게  $w = mg$

$$m = \frac{w}{g} = \frac{3.00 \times 10^2 \text{ N}}{9.80 \text{ m/s}^2} = 30.6 \text{ kg}$$

Newton 제2법칙에서

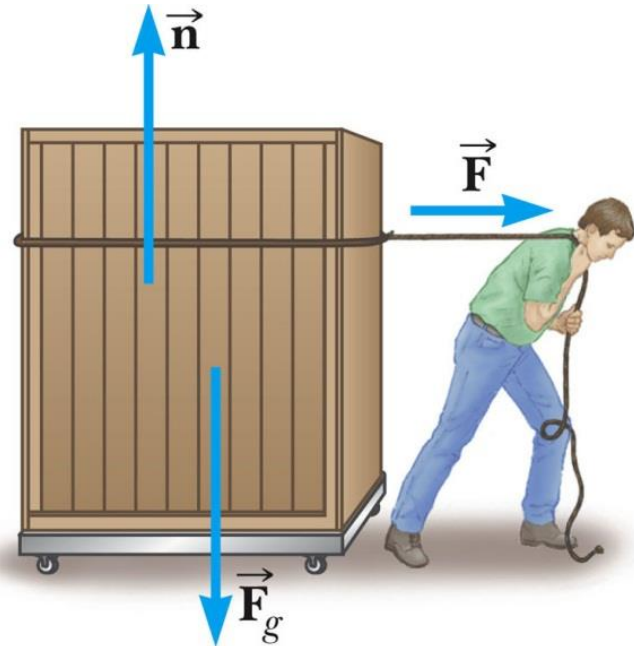
$$F_x = ma_x$$

$$a_x = \frac{F_x}{m} = \frac{20.0 \text{ N}}{30.6 \text{ kg}} = 0.654 \text{ m/s}^2$$

정지상태에서 출발하므로,

$$v_0 = 0$$

$$\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2} a_x t^2 = \frac{1}{2} (0.654 \text{ m/s}^2) (2.00 \text{ s})^2 = 1.31 \text{ m}$$



## 예제 5.4

## 승강기 안에서 물고기의 무게 측정

엘리베이터의 천장에 붙어있는 스프링 저울로 질량이  $m$ 인 물고기의 무게를 잰다.  
엘리베이터가 정지하고 있을 때 물고기의 무게는  $40.0\text{ N}$  이다.

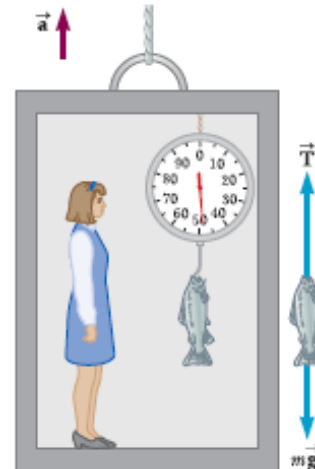
(a) 엘리베이터가 위로  $2.0\text{ m/s}^2$ 의 가속도로 올라갈 경우, 용수철 저울로 잰 무게는 얼마인가?

풀이  $\sum \vec{F} = \vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a} \rightarrow T - mg = ma$

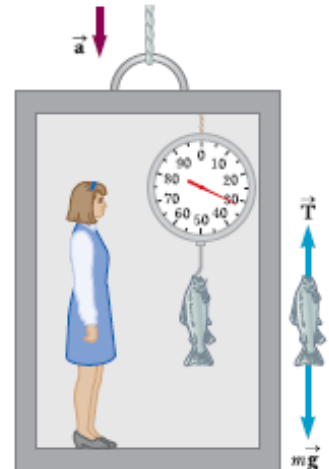
$$w = mg \rightarrow m = \frac{w}{g} = \frac{40.0\text{ N}}{9.80\text{ m/s}^2} = 4.08\text{ kg}$$

$$T = m(a + g) = 4.08\text{ kg} \times (2.00\text{ m/s}^2 + 9.80\text{ m/s}^2) = 48.1\text{ N}$$

승강기가 위로 가속될 때, 용수철 저울의 눈금은 물고기의 무게보다 더 큰 값을 가리킨다.



승강기가 아래로 가속될 때, 용수철 저울의 눈금은 물고기의 무게보다 더 작은 값을 가리킨다.



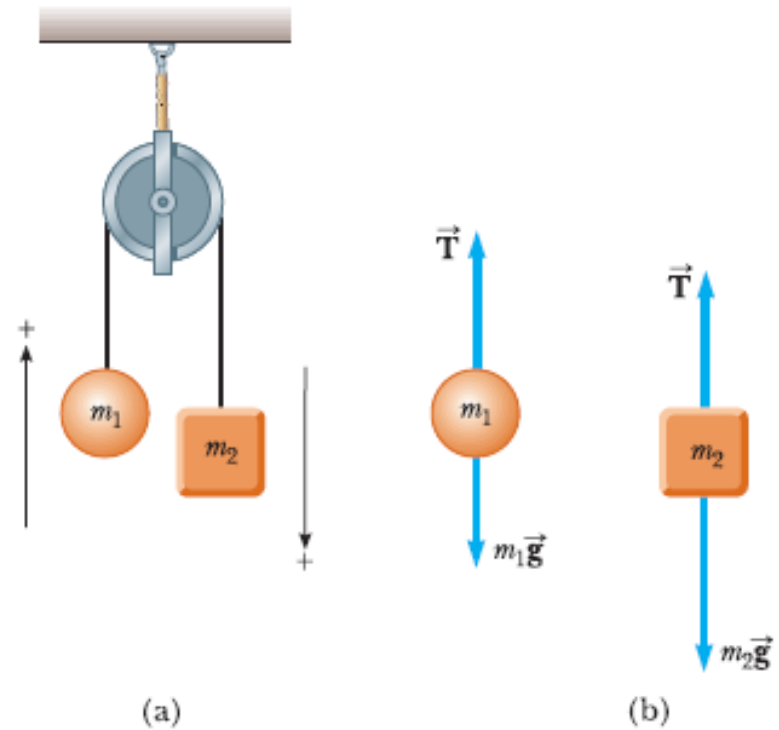
(b) 엘리베이터의 가속도가 아래쪽 방향으로  $2.0\text{ m/s}^2$  일 때 저울로 잰 무게는 얼마인가?

풀이  $\sum \vec{F} = \vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a} \rightarrow T - mg = -ma$

$$T = m(-a + g) = 4.08\text{ kg} \times (-2.00\text{ m/s}^2 + 9.80\text{ m/s}^2) = 31.8\text{ N}$$

### 예제 5.5 도르래 (Atwood machine)

서로 다른 질량을 가진 두 물체가 그림과 같이 질량을 무시할 수 있고 마찰이 없는 도르래에 수직으로 매달려 있다. 두 물체의 가속도와 줄에 걸리는 장력을 구하라.



도르래의 질량과 마찰을 모두 무시하면 두 물체에 작용하는 장력은 같다.

$$\text{물체 1: } \sum F_y = T - m_1 g = m_1 a_y$$

$$\text{물체 2: } \sum F_y = m_2 g - T = m_2 a_y$$

$$\therefore a_y = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \right) g$$

$$\therefore T = m_1 (g + a_y) = \left( \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) g$$

## 예제 5.6 줄로 연결된 두 물체의 가속도

가벼운 줄에 의해 질량을 무시할 수 있고 마찰이 없는 도르래에 질량  $m_1$ 과  $m_2$  인 두 물체가 연결되어 있다. 질량이  $m_2$  인 블록은 경사각  $\theta$  의 비탈면에 놓여 있다. 두 물체의 가속도와 줄의 장력을 구하라.

구( $m_1$ )에 대해 뉴턴 운동법칙을 적용하면

$$(1) \quad \sum F_x = 0$$

$$(2) \quad \sum F_y = T - m_1 g = m_1 a_y = ma$$

블록( $m_2$ )에 대해 뉴턴 운동법칙을 적용하면

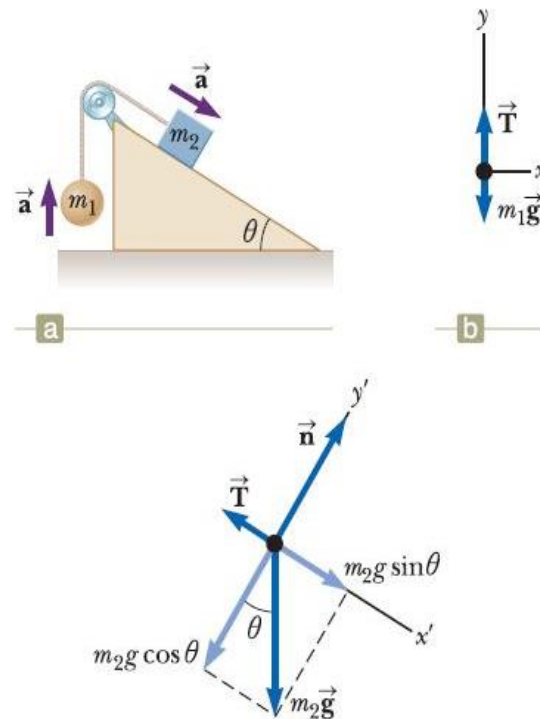
$$(3) \quad \sum F_{x'} = m_2 g \sin \theta - T = m_2 a_{x'} = m_2 a$$

$$(4) \quad \sum F_{y'} = n - m_2 g \cos \theta = 0$$

(2)식과 (3)식에서

$$\therefore a = \frac{m_2 g \sin \theta - m_1 g}{m_2 + m_1}$$

$$\therefore T = \frac{m_1 m_2 g (\sin \theta + 1)}{m_1 + m_2}$$





## 5.8 마찰력

(Forces of Friction)

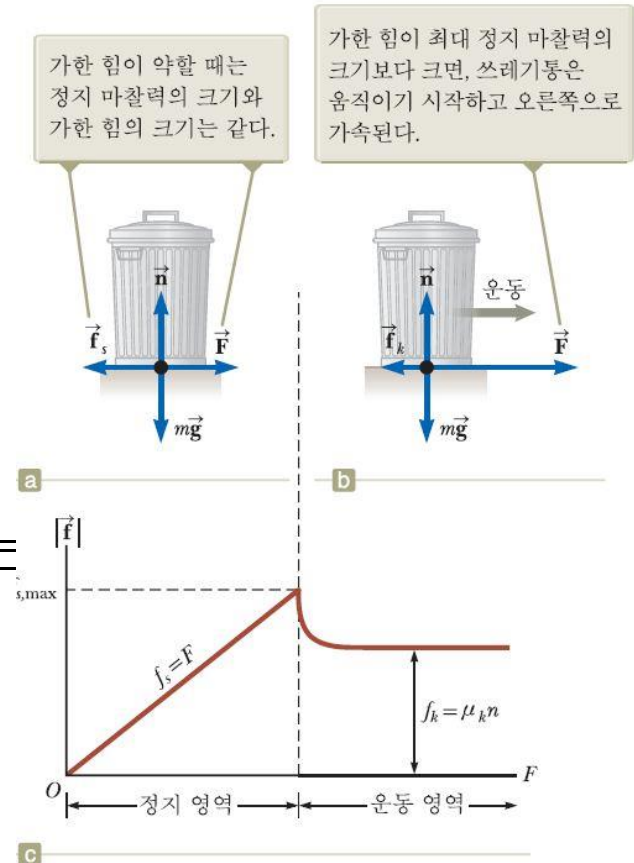
**마찰력(force of friction)** : 물체가 주위와의 상호 작용으로 받는 저항

**정지 마찰력** : 물체가 움직이지 않는 상태에서 작용하는 마찰력.

**운동 마찰력** : 물체가 움직이는 상태에서 작용하는 마찰력.

운동 속도가 크지 않은 경우, 접촉하고 있는 두 물체 사이의 마찰력은 수직항력에 비례한다.

8.3 절을 참조할 것



접촉하고 있는 두 물체 사이의 **정지 마찰력**

$$f_s \leq \mu_s n \quad \mu_s : \text{정지 마찰계수}$$

접촉하고 있는 두 물체 사이의 **운동 마찰력**

$$f_k = \mu_k n \quad \mu_k : \text{운동 마찰계수}$$

**마찰력의 방향**은 접촉하고 있는 물체의 표면에 평행하고 **움직이는 방향과 반대**이며, 정지 마찰력도 움직이려는 방향의 반대 방향으로 작용한다.

• 마찰계수는 접촉면의 **면적과 거의 무관**하다.

*이것은 면적당 수직항력을 생각해보면, 싯 식들로부터 증명할 수 있다.*

표 5.1 마찰계수

	$\mu_s$	$\mu_k$
콘크리트 위의 고무	1.0	0.8
강철 위의 강철	0.74	0.57
강철 위의 알루미늄	0.61	0.47
유리 위의 유리	0.94	0.4
강철 위의 구리	0.53	0.36
나무 위의 나무	0.25-0.5	0.2
젖은 눈 위의 왁스칠한 나무	0.14	0.1
마른 눈 위의 왁스칠한 나무	—	0.04
금속 위의 금속(윤활유를 칠한 경우)	0.15	0.06
테플론 위의 테플론	0.04	0.04
얼음 위의 얼음	0.1	0.03
인체의 관절	0.01	0.003

주의: 모든 값은 근사값이다. 어떤 경우에는 마찰계수가 1.0을 넘기도 한다.

## 예제 5.7

## 실험으로 $\mu_s$ 와 $\mu_k$ 결정하기

다음에서 물체와 거친 표면 사이의 마찰 계수를 측정하는 간단한 방법을 알아보자.

그림과 같이 수평면에 대하여 기울어진 비탈면에 물체를 둔다. 이때 비탈면의 경사를 수평에서 물체가 막 미끄러질 때까지 서서히 증가시키자. 물체가 미끄러지기 시작할 때의 임계각  $\theta_c$ 를 측정하여  $\mu_s$ 를 얻을 수 있음을 보이라.

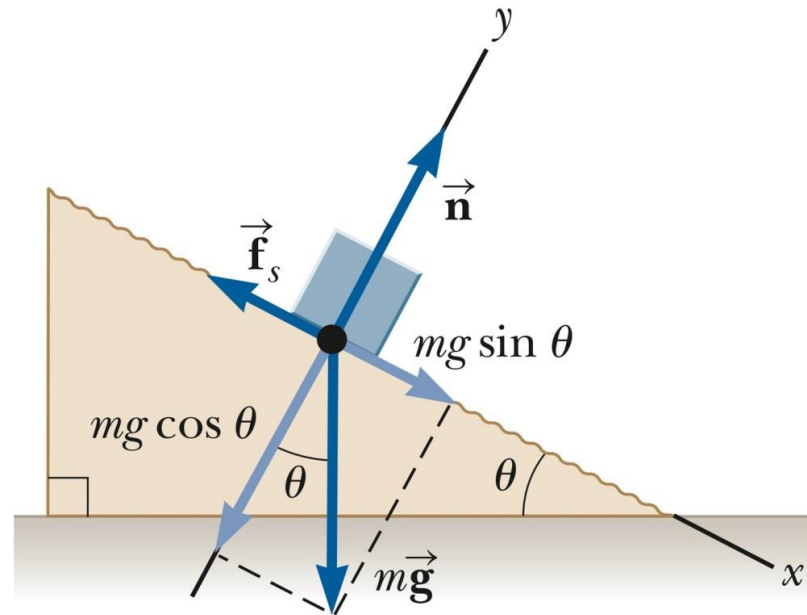
풀이  $\sum F_x = mg \sin \theta - f_s = 0$

$$\sum F_y = n - mg \cos \theta = 0$$

$$f_s = mg \sin \theta = \left( \frac{n}{\cos \theta} \right) \sin \theta =$$

$$\mu_s n = n \tan \theta_c$$

$$\mu_s = \tan \theta_c$$



## 예제 경사면에 놓인 벽돌

질량이 2.50 kg인 벽돌이 경사면 위에 놓여 있다. 벽돌과 경사면 사이의 정지 마찰계수가 0.350이라면, 벽돌이 아래쪽으로 미끄러지지 않을 경사면의 수평 방향에 대한 최대 각은 얼마인가?

풀이

$$\sum F_x = m\vec{g} \sin \theta + \vec{f}_k = 0$$

$$\rightarrow mg \sin \theta - \mu_k n = 0 \quad -$$

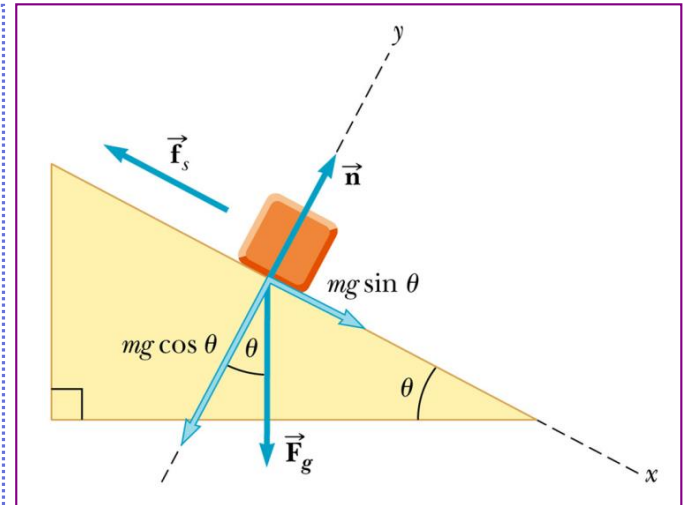
$$\sum F_y = \vec{n} + m\vec{g} \cos \theta = 0 \quad \xrightarrow{(1)} n - mg \cos \theta = 0$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면

$$mg \sin \theta - \mu_k (mg \cos \theta) = 0$$

$$\rightarrow \mu_k = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \tan \theta = 0.350$$

$$\therefore \theta = \tan^{-1}(0.350) = 19.3^\circ$$



## 예제 미끄러지는 하키 퍽

하키 스틱에 맞은 하키 퍽이 얼어있는 연못 위에서 처음 속도  $20.0\text{ m/s}$  로 움직이고 있다. 이 퍽은 얼음 위에서 정지할 때까지 일정하게 속도를 낮추며  $1.20 \times 10^2\text{ m}$  미끄러졌다. 퍽과 얼음 사이의 운동 마찰계수를 결정하라.

**풀이**  $v_0 = 20.0\text{ m/s}$ ,  $v = 0$ ,  $\Delta x = 1.20 \times 10^2\text{ m}$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \rightarrow a = \frac{v^2 - v_0^2}{2\Delta x} = \frac{-(20.0\text{ m/s})^2}{2 \times (1.20 \times 10^2\text{ m})} = -1.67\text{ m/s}^2$$

$$\sum F_y = \vec{n} + m\vec{g} = 0 \rightarrow n - mg = 0$$

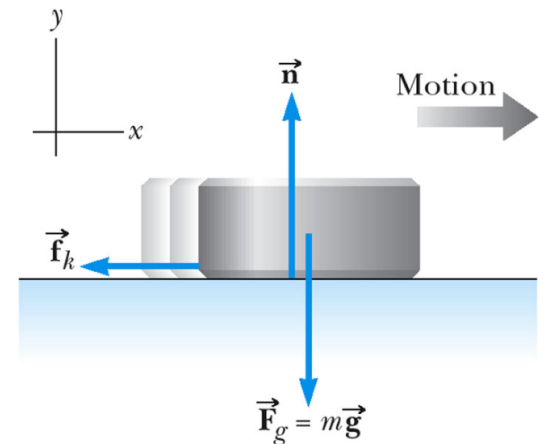
$$n = mg \quad - (1)$$

$$\sum F_x = \vec{f}_k = m\vec{a} \rightarrow -f_k = ma \quad - (2)$$

$$f_k = \mu_k n = \mu_k mg \quad - (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로 부터

$$-f_k = -\mu_k mg = ma \rightarrow \mu_k = -\frac{a}{g} = \frac{1.67\text{ m/s}^2}{9.80\text{ m/s}^2} = 0.170$$



## 예제 5.8 마찰이 있는 경우 연결된 두 물체의 가속도

거친 수평면 위에 질량  $m_1$ 인 블록이 가볍고 마찰없는 도르래에 걸쳐진 가벼운 줄에 의해 질량  $m_2$ 인 구와 연결되어 있다. 수평과 이루는 각이  $\theta$ 인 방향으로 블록에 힘  $F$ 가 작용해서 오른쪽으로 미끄러지고 있다. 블록과 표면 사이의 운동마찰계수는  $\mu_k$ 이다. 두 물체의 가속도의 크기를 구하라.

블록에 대해 뉴턴 운동법칙을 적용하면

$$(1) \quad \sum F_x = F \cos \theta - f_k - T = m_1 a_x = m_1 a$$

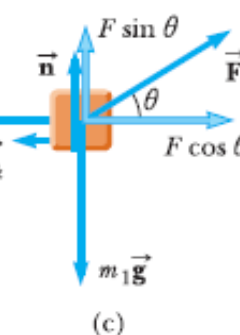
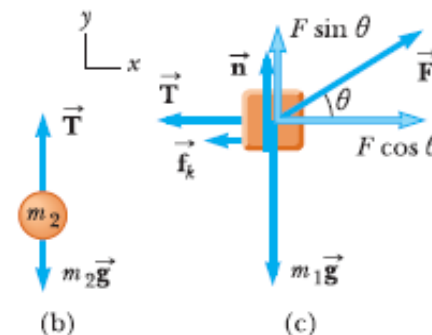
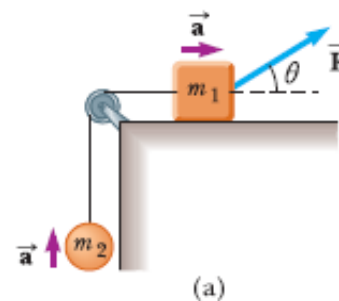
$$(2) \quad \sum F_y = n + F \sin \theta - m_1 g = 0$$

구에 대해 뉴턴 운동법칙을 적용하면

$$(3) \quad \sum F_y = T - m_2 g = m_2 a_y = m_2 a$$

$$n = m_1 g - F \sin \theta$$

$$\therefore f_k = \mu_k n = \mu_k (m_1 g - F \sin \theta) \therefore a = \frac{F(\cos \theta + \mu_k \sin \theta) - (m_2 + \mu_k m_1)g}{m_1 + m_2}$$



## 예제 : 연결된 물체

질량  $m_1 = 4.00\text{kg}$  인 벽돌과 질량  $m_2 = 7.00\text{kg}$  인 공이 마찰이 없는 도르래에 걸쳐 가벼운 줄로 연결되어 있다. 벽돌과 바닥 사이의 운동 마찰 계수는  $0.300$  이다.

(a) 두 물체의 가속도를 구하라.

풀이  $\sum F_{1x} = \vec{T} + \vec{f}_k = m_1 \vec{a} \rightarrow T - f_k = m_1 a \quad - (1)$

$$\sum F_{1y} = \vec{n} + m_1 \vec{g} = 0 \rightarrow n - m_1 g = 0 \quad - (2)$$

$$\sum F_{2y} = \vec{T} + m_2 \vec{g} = m_2 \vec{a} \rightarrow T - m_2 g = -m_2 a \quad - (3)$$

$f_k = \mu_k n = \mu_k m_1 g$  이며 식 (1)과 (3)으로 부터

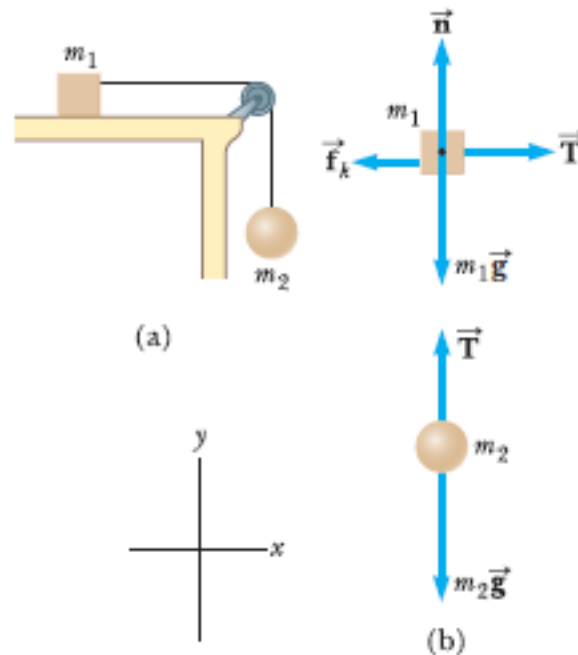
$$(-\mu_k m_1 + m_2)g = (m_1 + m_2)a \rightarrow a = \frac{(-\mu_k m_1 + m_2)}{(m_1 + m_2)} g$$

$$\therefore a = \frac{(-0.300 \times 4.00\text{kg} + 7.00\text{kg})}{(4.00\text{kg} + 7.00\text{kg})} \times 9.80\text{m/s}^2 = 5.17\text{m/s}^2$$

(b) 줄의 장력을 구하라.

풀이 식 (3)으로 부터

$$T = -m_2 a + m_2 g = 7.00\text{kg} \times (9.80\text{m/s}^2 - 5.17\text{m/s}^2) = 32.4\text{N}$$



## 예제 : 줄에 매여있는 나무토막 위에 올려놓은 나무토막

10.0kg 인 나무토막 위에 질량 5.00kg 나무토막이 놓여져 있다. 어떤 사람이 밑에 있는 나무토막에 줄을 연결하여 마찰이 없는 평면에서 그림과 같이 수평으로 당기고 있다. 두 토막 사이의 마찰로 5.00kg 짜리 나무토막이 미끄러지지 않고 있다. 정지 마찰계수가 0.350 이라면 5.00kg 짜리 토막이 미끄러지지 않게 하면서 10.0kg 짜리 나무 토막에 연결된 줄에 가할 수 있는 최대 힘은 얼마인가?

풀이 위쪽 벽돌을 살펴보면

$$\sum F_x = \mu_s n_1 = ma$$

$$\sum F_y = n_1 - mg = 0$$

$$\therefore ma = \mu_s n_1 = \mu_s (mg)$$

$$\rightarrow a = \mu_s g$$

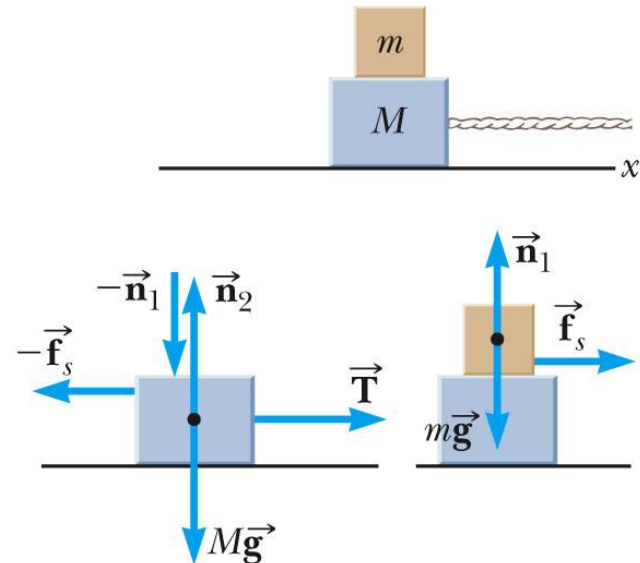
아래 벽돌에 대해 살펴보면

$$\sum F_{Mx} = T - \mu_s mg = Ma$$

$$M(\mu_s g) = T - \mu_s mg$$

$$\therefore T = (m + M)\mu_s g = (5.00\text{kg} + 10.0\text{kg})(0.350)(9.80\text{ m/s}^2) \quad (a)$$

$$= 51.5\text{N}$$





### 연습문제

1. 6.0 kg의 물체가  $2.0 \text{ m/s}^2$  으로 가속된다.

(a) 물체에 작용하는 힘의 크기는 얼마인가?

(b) 만약 같은 힘이 4.0 kg의 물체에 작용하면 가속도의 크기는 얼마인가?

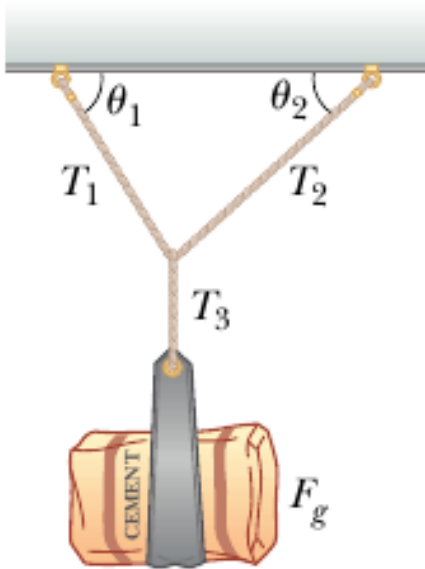
### 연습문제

2. 물위에 있는 보트가 움직일 때 두 힘이 작용한다. 첫 번째 힘은 전방으로 작용하는 모터에 의한 추진력으로 크기는  $2,000\text{ N}$  이고, 두번째 힘은 배의 선수에 작용하는 물의 저항력으로 크기는  $1,800\text{ N}$  이다.

- (a) 보트의 질량이  $1,000\text{ kg}$  일 경우 가속도는 얼마인가?
- (b) 정지한 상태에서 출발할 경우  $10.0\text{ s}$  동안 움직인 거리는 얼마인가?
- (c)  $10.0\text{ s}$  후의 속도는 얼마인가?

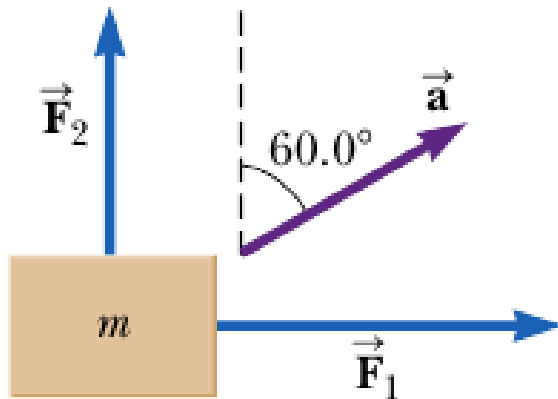
### 연습문제

3. 무게가 325 N인 시멘트 포대가 그림 P5.19와 같이 세 줄에 평형 상태로 매달려 있다. 위의 두 줄은 수평면과 각각  $\theta_1 = 60.0^\circ$ ,  $\theta_2 = 40.0^\circ$  를 이루고 있다. 이 상태를 평형 상태라고 가정할 때, 각 줄에 걸리는 장력  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  을 구하라.(P111.19번)



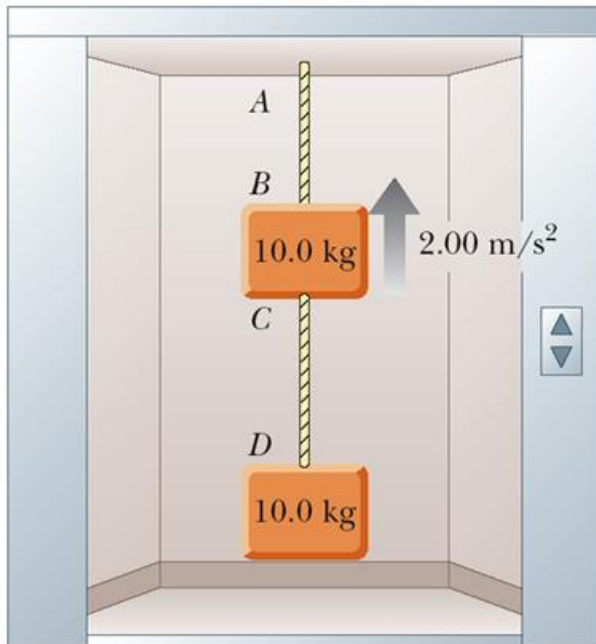
### 연습문제

4. 질량  $m = 1.00 \text{ kg}$ 인 물체의 가속도는  $\vec{a}$  인데, 그 크기는  $10.0 \text{ m/s}^2$ 이고 방향은 북동  $60.0^\circ$  방향으로 기울어져 있다. 그림은 물체를 위에서 본 모습이다. 물체에 작용하는 힘  $\vec{F}_2$  크기는  $5.00 \text{ N}$ 이고 방향은 북쪽이라고 할 때, 물체에 작용하는 다른 힘  $\vec{F}_1$ 의 크기와 방향을 구하라(P111.21번)



### 연습문제

5. 두 개의 상자가 그림과 같이 엘리베이터의 천정에 매달려 있다. 엘리베이터는 위쪽 방향으로 가속된다. 각 줄에 작용하는 장력을 구하라.



### 연습문제

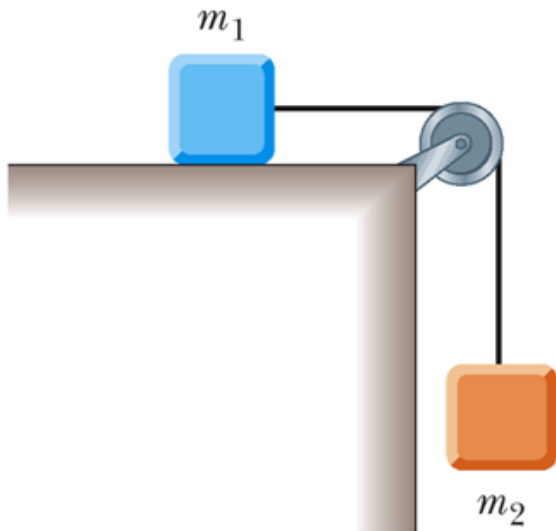
6. 질량 2000 kg인 자동차가 4초 동안에 속력이 20 m/s에서 5.0 m/s 로 일정하게 감소했다. 이 시간 동안에 작용한 평균력의 크기와 감속되는 동안 자동차가 진행한 거리는 얼마인가?

### 연습문제

7. 그림과 같이  $m_1=5.0\text{ kg}$ 과  $m_2=9.0\text{ kg}$  인 물체가 줄로 연결되어 있다.  $m_1$ 은 마찰이 없는 바닥 위에서 움직이고 줄과 도르래의 영향은 무시한다. (P111.22번)

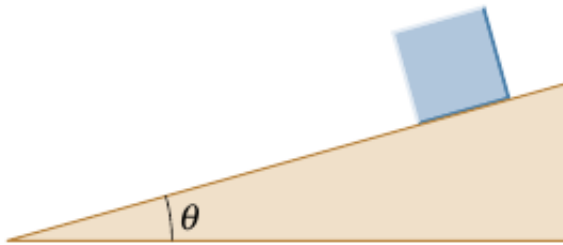
(a) 각 물체의 가속도의 크기는 얼마인가?

(b)  $5.00\text{ kg}$  과  $9.0\text{ kg}$  의 블록을 연결하는 줄의 장력은 얼마인가?



### 연습문제

8. 그림과 같이 블록이 마찰이 없는  $\theta = 20.0^\circ$ 인 경사면에 놓여 있다. 경사면 위 방향으로 처음 속도  $5.00 \text{ m/s}$ 가 주어졌다면 블록이 정지할 때까지 올라간 거리는 얼마인가?(P112.26번)



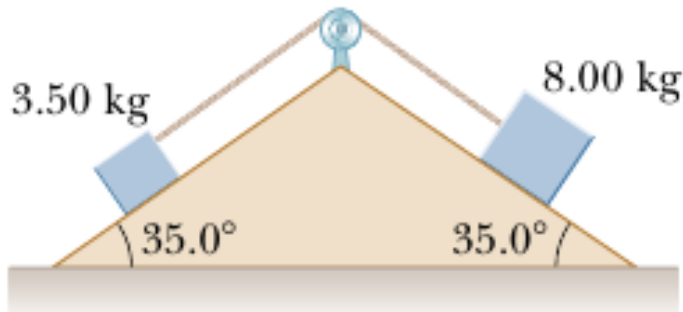


### 연습문제

9. 그림과 같이 두 블록이 가벼운 줄로 연결되어 마찰이 없는 도르래에 걸려 있다.  $M_1=3.50\text{ kg}$ ,  $m_2=8.0\text{ kg}$  이고 경사면에 마찰은 없다(P112.28번)

(a) 두 물체의 가속도를 구하라.

(b) 줄의 장력을 구하라.



### 연습문제

10. 질량이 12.0 g인 라이플총의 탄환이 오른쪽 방향으로 260 m/s의 속력으로 날아가 큰 모래 주머니에 23.0 cm 깊이로 박힌다. 모래 주머니가 탄환에 작용한 마찰력의 방향과 크기를 구하라. 마찰력은 일정하다고 가정한다.(P113.29번)

### 연습문제

11. 수평 고속도로에서 자동차가 시속 50.0마일로 달리고 있다.

(a) 비가 오는 날 도로와 바퀴 사이의 정지 마찰 계수가 0.100일 때 자동차가 멈추기 위한 최소 거리를 구하라.

(b) 도로면이 말라 있고  $\mu_s=0.600$ 일 때 정지거리를 구하라(P113.30번)

### 연습문제

12. 25.0 kg인 물체가 수평면에 정지해 있다. 물체를 정지 상태에서 움직이게 하기 위해서는 75.0 N의 힘이 필요하다. 물체가 움직이기 시작한 후 물체가 일정한 속력으로 움직이게 하기 위해서는 60.0 N의 힘이 필요하다. 이때 물체와 수평면 사이의

- (a) 정지 마찰 계수와
- (b) 운동 마찰 계수를 구하라.

(P113.31번)

### 연습문제

13. 공항에서 한 여자가 20.0 kg의 여행용 가방을 일정한 속력으로 끌고 있는데, 여행용 가방의 가죽끈과 수평면 사이의 각도는  $\theta$ 로 유지된다(그림). 여자는 가죽끈을 35.0 N의 힘으로 당기고 있고 여행용 가방에 작용하는 마찰력은 20.0 N이다. 이때

- (a) 여행용 가방의 자유 물체 도형을 그리라.
- (b) 수평면과 가죽끈이 이루는 각도  $\theta$ 는 얼마인가?
- (c) 바닥이 여행용 가방에 작용하는 수직항력의 크기는 얼마인가?



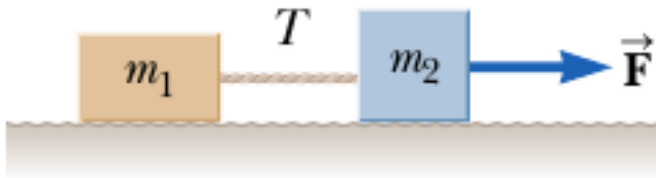
### 연습문제

14.  $30.0^\circ$ 로 기울어져 있는 경사면 위쪽 끝에 멈춰 있던  $3.00\text{kg}$ 인 물체가 미끄러지기 시작하여  $1.50\text{ s}$  동안  $2.00\text{ m}$ 의 거리를 미끄러져 내려온다. 이때
- (a) 물체의 가속도,
  - (b) 물체와 경사면 사이의 운동 마찰 계수,
  - (c) 물체에 작용한 마찰력,
  - (d)  $2.00\text{ m}$ 를 미끄러진 후 물체의 속력을 구하라.
- (P113.33번)

### 연습문제

15. 두 물체가 질량을 무시할 수 있는 줄로 연결되어 수평력에 의하여 수평으로 끌려가고 있다(그림 P5.36).  $F = 68.0 \text{ N}$  이고,  $m_1 = 12.0 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 18.0 \text{ kg}$  그리고 물체와 바닥 사이의 운동 마찰 계수는 0.100이라고 하자.(P113.36번)

- (a) 각 물체의 자유 물체 도형을 그리라.
- (b) 계의 가속도와
- (c) 줄에 걸리는 장력  $T$  를 구하라.



### 연습문제

16. 그림과 같이 3.0 kg의 짐 상자와 경사각이  $35.0^\circ$  인 경사면 사이의 마찰계수는 0.300이다. 짐 상자가 경사면을 따라 미끄러져 내려가지 않게 하기 위해서 경사면에 수직인 방향으로 최소한 얼마의 힘을 작용해야 하는가?

