

# 5장: 힘과 운동 I

Force and Motion — I

## 이번 장에서 배울 내용

- 뉴턴의 운동 법칙 세 가지 — 역학의 기본 원리
- 힘(**force**)이란 무엇인가?
- 질량(**mass**)과 관성(**inertia**)
- 자유물체도(**free-body diagram**)로 문제 풀기
- 중력(**gravity**), 무게와 질량의 차이
- 수직항력(**normal force**)과 장력(**tension**)
- 응용: 앳우드 기계, 빗면, 엘리베이터 걸보기 무게

# 왜 물체는 움직이는가?

4장까지 우리는 **어떻게** 움직이는지(운동학)를 배웠다.

이제는 **왜** 움직이는지를 묻는다 — 이것이 **동역학(dynamics)** 이다.

- 정지한 축구공은 차야 움직인다
- 달리던 자전거는 브레이크를 잡아야 멈춘다
- 지하철이 출발할 때 몸이 뒤로 쏠린다

이 모든 현상의 원인은 **힘(force)** 이다.

## 뉴턴 이전의 관점: 아리스토텔레스

아리스토텔레스는 "물체가 움직이려면 힘이 필요하다"고 생각했다.

- 힘이 없으면 물체는 정지한다?

이 생각은 약 2000년간 지배적이었지만, **틀렸다**.

갈릴레이와 뉴턴: 힘이 없으면 물체는 현재 운동 상태를 **유지** 한다. 마찰이 물체를 멈추게 하는 것이지, 힘이 없어서 멈추는 것이 아니다.

## 5.1 뉴턴의 제1법칙 (관성의 법칙)

물체에 작용하는 **알짜힘(net force)** 이 0이면, 물체는:

- 정지해 있으면 **계속 정지** 한다
- 운동 중이면 **등속 직선운동** 을 계속한다

$$\vec{F}_{\text{net}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{v} = \text{일정}$$

지하철이 갑자기 출발하면 몸이 뒤로 쏠리는 이유: 몸은 원래 정지 상태를 유지하려 하는데, 발은 지하철 바닥과 함께 앞으로 움직이기 때문이다.

## 관성 (Inertia)

**관성**이란 물체가 현재의 운동 상태를 유지하려는 성질이다.

- 질량이 클수록 관성이 크다
- 무거운 물체일수록 속도를 바꾸기 어렵다

일상의 예시:

- 버스가 급정거하면 서 있던 승객이 앞으로 넘어진다 (관성)
- 테이블보를 빠르게 빼면 그릇이 제자리에 남는다
- 망치 머리를 끼울 때 자루를 아래로 내리친다

## 관성 기준틀 (Inertial Reference Frame)

뉴턴의 법칙이 성립하는 기준틀을 **관성 기준틀** 이라 한다.

- 등속 운동하는 기준틀 → 관성 기준틀
- 가속하는 기준틀 → **비관성 기준틀** (뉴턴 법칙이 성립하지 않음)

예: 가속하는 차 안에서 대시보드 위의 물건이 뒤로 미끄러지는 것은, 차 안의 기준틀이 비관성 기준틀이기 때문이다. 관성 기준틀(지면)에서 보면 물건은 가만히 있고, 차가 앞으로 가는 것이다.

## 5.2 힘 (Force)

**힘** 은 물체의 운동 상태를 변화시키는 원인이다.

- 힘은 **벡터** 다 — 크기와 방향을 가진다
- SI 단위: **뉴턴(N)** =  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
- 여러 힘이 작용할 때, **알짜힘(net force)** 이 운동을 결정한다

$$\vec{F}_{\text{net}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \cdots = \sum \vec{F}_i$$

알짜힘은 각 힘의 **벡터 합** 이다.

## 5.3 뉴턴의 제2법칙

물체에 작용하는 알짜힘은 질량과 가속도의 곱이다:

$$\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a}$$

성분별로 쓰면:

$$F_{\text{net},x} = ma_x, \quad F_{\text{net},y} = ma_y, \quad F_{\text{net},z} = ma_z$$

핵심 포인트:

- 힘의 방향 = 가속도의 방향
- 같은 힘이면 질량이 클수록 가속도가 작다
- 알짜힘이 0이면 가속도도 0 → 제1법칙과 일관

## 뉴턴의 제2법칙: 단위

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

힘의 단위 뉴턴(N)은 질량 **1 kg**인 물체에 **1 m/s<sup>2</sup>**의 가속도를 만드는 힘이다.

참고 — 다른 단위계:

단위계	힘	질량	가속도
SI	N (뉴턴)	kg	m/s <sup>2</sup>
CGS	dyne	g	cm/s <sup>2</sup>
영국	pound (lb)	slug	ft/s <sup>2</sup>

## 뉴턴의 제2법칙: 중첩 원리

여러 힘이 동시에 작용할 때:

$$\vec{F}_{\text{net}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$$

각 힘은 **독립적으로** 작용한다 — 한 힘이 다른 힘에 영향을 주지 않는다.

알짜힘만 구하면  $\vec{a} = \vec{F}_{\text{net}}/m$ 으로 가속도를 알 수 있다.

시뮬레이션: 뉴턴의 제2법칙 시뮬레이션

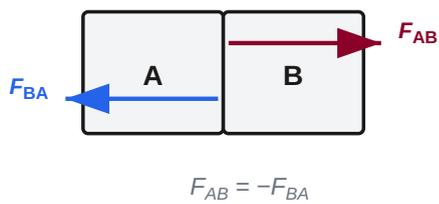
## 5.4 뉴턴의 제3법칙 (작용-반작용 법칙)

물체 A가 물체 B에 힘을 가하면, B도 A에 크기는 같고 방향은 반대인 힘을 가한다:

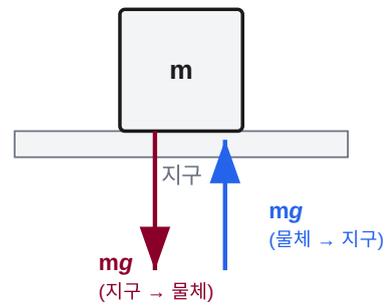
$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

뉴턴의 제3법칙: 작용-반작용 쌍

예시 1: 두 물체의 접촉



예시 2: 중력의 작용-반작용



작용-반작용 쌍은 항상 서로 다른 물체에 작용한다!

## 제3법칙의 핵심 포인트

- 작용-반작용 쌍은 항상 **서로 다른 두 물체** 에 작용한다
- **같은 물체** 에 작용하는 두 힘은 작용-반작용이 아니다!
- 크기가 같다고 상쇄되는 것이 아님 — 서로 다른 물체에 작용하므로

흔한 오해:

"말이 마차를 끌면 마차도 말을 같은 힘으로 끈다. 그러면 어떻게 움직이나?"

답: 말에 작용하는 알짜힘을 보아야 한다. 말의 발이 땅을 미는 힘 (마찰력)이 마차가 말을 당기는 힘보다 크면, 말은 가속한다.

## 5.5 중력과 무게

### 중력 (Gravitational Force)

지표면 근처에서, 질량  $m$ 인 물체에 작용하는 중력:

$$\vec{F}_g = -mg\hat{j} = m\vec{g}$$

- $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$  (지표면 근처)
- 방향: 항상 지구 중심 방향 (아래)
- 모든 물체에 작용하는 **비접촉력**

## 무게 (Weight) vs 질량 (Mass)

### 질량(mass) $m$ :

- 물체가 가진 물질의 양
- 장소에 관계없이 일정
- 단위: kg

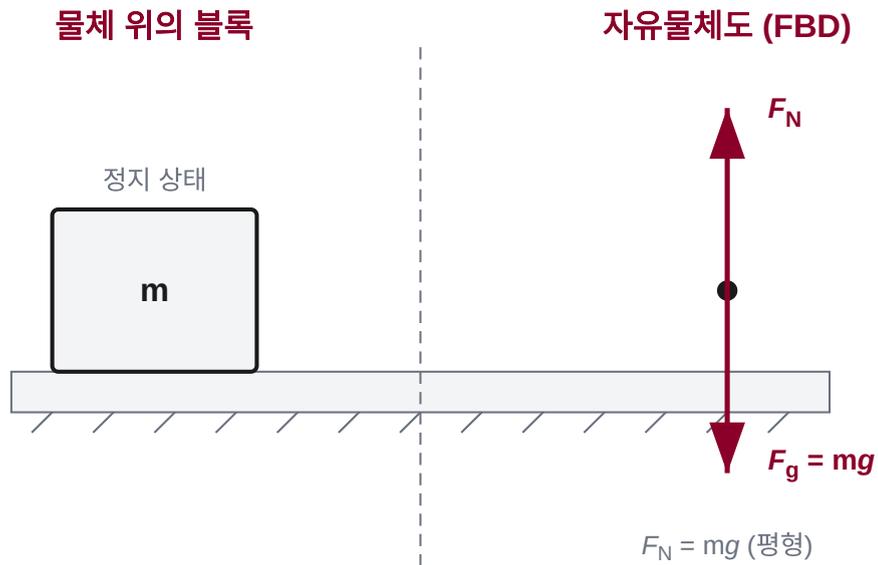
### 무게(weight) $W$ :

- 물체에 작용하는 중력의 크기
- $W = mg$
- 장소에 따라 변한다 (달에서는 지구의 1/6)
- 단위: N

체중계는 실제로 질량이 아니라 **무게** (엄밀히는 수직항력)를 측정한다.

## 5.6 수직항력 (Normal Force)

물체가 표면과 접촉할 때, 표면이 물체를 수직으로 밀어내는 힘이 수직항력이다.



## 수직항력의 크기

수직항력은 항상  $mg$ 인가? **아니다!**

수직항력은 접촉 상황에 따라 달라진다. 뉴턴 제2법칙으로 구해야 한다.

수평면 위 정지한 블록:

$$F_N - mg = ma_y = 0 \quad \Rightarrow \quad F_N = mg$$

누군가 블록을 아래로  $F$ 만큼 누르면:

$$F_N - mg - F = 0 \quad \Rightarrow \quad F_N = mg + F > mg$$

누군가 블록을 위로  $F$ 만큼 당기면:

$$F_N - mg + F = 0 \quad \Rightarrow \quad F_N = mg - F < mg$$

## 5.7 장력 (Tension)

줄(실, 밧줄, 케이블 등)이 물체를 당기는 힘이 **장력(tension)** 이다.

이상적인 줄의 가정:

- **질량이 없다** (massless)
- **늘어나지 않는다** (inextensible)
- 줄의 장력은 줄 전체에서 **동일** 하다

$$T_{\text{양끝}} = T \quad (\text{질량 없는 줄})$$

도르래를 지나더라도 (마찰 없는 이상적인 도르래):

$$T_{\text{한쪽}} = T_{\text{다른 쪽}}$$

## 5.8 자유물체도 (Free-Body Diagram)

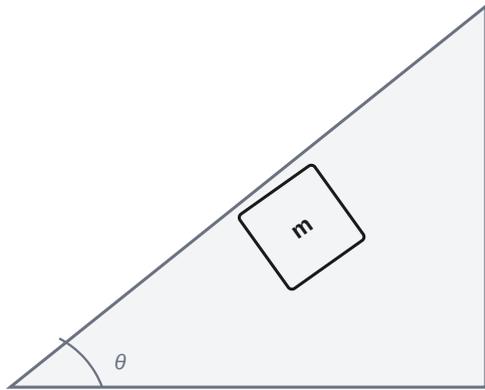
자유물체도(FBD)는 역학 문제를 푸는 가장 중요한 도구이다.

FBD 작성법:

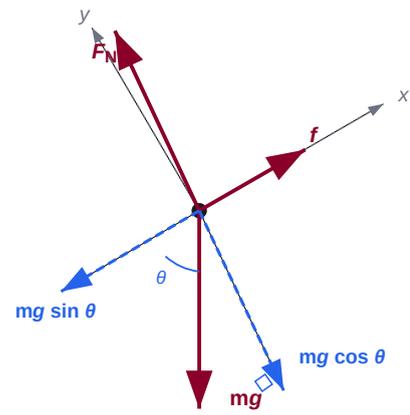
1. 분석할 물체를 하나 **고른다**
2. 그 물체에 작용하는 **모든 힘** 을 파악한다
3. 물체를 점으로 그리고, 각 힘을 **화살표** 로 표시한다
4. 적절한 **좌표축** 을 설정한다
5. 뉴턴 제2법칙을 **성분별로** 적용한다

FBD에는 그 물체에 작용하는 힘**만** 그린다. 그 물체가 다른 물체에 가하는 힘은 그리지 않는다!

## FBD 예시: 빗면 위의 블록



자유물체도 (FBD)



좌표축: 빗면을 따라 x, 수직으로 y

$$F_N = mg \cos \theta$$

## 빗면 문제 풀이

질량  $m$ 인 블록이 경사각  $\theta$ 인 마찰 없는 빗면 위에 놓여 있다. 가속도는?

좌표축을 빗면을 따라 ( $x$ ) 와 수직 ( $y$ ) 으로 설정:

$y$ 축 방향:

$$F_N - mg \cos \theta = 0 \quad \Rightarrow \quad F_N = mg \cos \theta$$

$x$ 축 방향 (빗면 아래 방향을 양으로):

$$mg \sin \theta = ma$$

$$a = g \sin \theta$$

가속도는 **질량에 무관** 하다! (갈릴레이의 발견과 일맥상통)

## 빗면의 극한 경우 확인

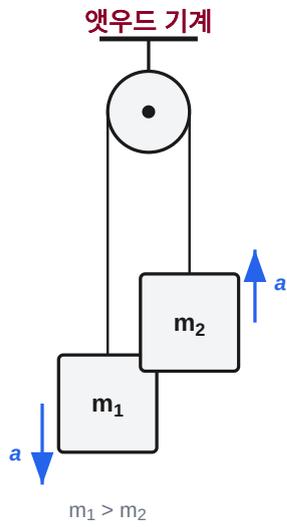
$$a = g \sin \theta$$

- $\theta = 0^\circ$ : 수평면,  $a = 0$  (당연!)
- $\theta = 90^\circ$ : 수직,  $a = g$  (자유낙하!)

극한 경우가 물리적으로 맞으므로, 답이 합리적이다.

문제를 풀고 나서 **극한 경우(limiting case)** 를 확인하는 습관을 들이자.

# 애틀우드 기계 (Atwood Machine)



자유물체도

$m_1$  의 FBD



$$m_1g - T = m_1a$$

$m_2$  의 FBD



$$T - m_2g = m_2a$$

$$a = (m_1 - m_2)g / (m_1 + m_2)$$

$$T = 2m_1m_2g / (m_1 + m_2)$$

## 앳우드 기계 풀이

질량  $m_1 > m_2$ 인 두 물체가 질량 없는 줄과 마찰 없는 도르래로 연결되어 있다.

$m_1$ 에 대한 뉴턴 제2법칙 (아래 방향을 양으로):

$$m_1g - T = m_1a$$

$m_2$ 에 대한 뉴턴 제2법칙 (위 방향을 양으로):

$$T - m_2g = m_2a$$

두 식을 더하면:

$$(m_1 - m_2)g = (m_1 + m_2)a$$

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

## 앳우드 기계: 장력

가속도를  $m_1$ 의 운동 방정식에 대입:

$$T = m_1g - m_1a = m_1g \left( 1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right)$$

$$T = \frac{2m_1m_2g}{m_1 + m_2}$$

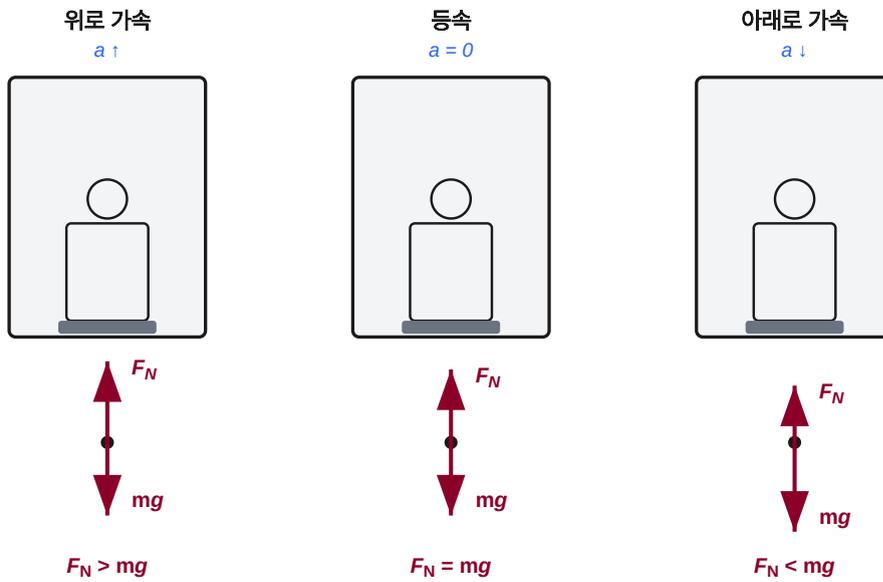
극한 경우 확인:

- $m_1 = m_2$ :  $a = 0$ ,  $T = mg$  (평형 — 맞다!)
- $m_2 = 0$ :  $a = g$ ,  $T = 0$  (자유낙하 — 맞다!)
- $m_1 \gg m_2$ :  $a \approx g$ ,  $T \approx 2m_2g$

시뮬레이션: 옛우드 기계 시뮬레이션

# 엘리베이터와 걸보기 무게

## 엘리베이터 안의 걸보기 무게



## 걸보기 무게 계산

엘리베이터 안에서 체중계 위에 서 있는 사람 (질량  $m$ ):

$$F_N - mg = ma$$

$$F_N = m(g + a)$$

체중계가 측정하는 것은  $F_N$  (수직항력)이다.

상황	가속도	걸보기 무게
위로 가속	$a > 0$	$F_N > mg$ (무거워진다!)
등속	$a = 0$	$F_N = mg$ (평소 무게)
아래로 가속	$a < 0$	$F_N < mg$ (가벼워진다!)
자유낙하	$a = -g$	$F_N = 0$ (무중력!)

## 무중력이란?

자유낙하 상태 ( $a = -g$ )에서:

$$F_N = m(g + a) = m(g - g) = 0$$

체중계가 표시하는 무게가 0 — **무중력(weightlessness)** 상태!

국제우주정거장(ISS)의 우주인이 "무중력" 상태인 이유:

- ISS에도 중력은 작용한다 (지표면의 약 90%)
- ISS와 우주인이 **함께 자유낙하** (궤도 운동)하고 있기 때문에, 수직항력 = 0

진정한 무중력이 아니라, 정확한 표현은 **미소중력 (microgravity)** 이다.

# 문제 풀이 전략 정리

역학 문제를 풀 때 항상 따라야 할 단계:

1. **상황 파악**: 어떤 물체가 관련되는가? 가속하는가?
2. **자유물체도(FBD)** 를 그린다
3. **좌표축** 을 설정한다 (가속도 방향이 한 축과 나란하도록)
4. 뉴턴 제2법칙을 **성분별로** 적용:
  - $\sum F_x = ma_x$
  - $\sum F_y = ma_y$
5. 연립방정식을 풀어 미지수를 구한다
6. **극한 경우** 를 확인한다

# Review & Summary

## 핵심 법칙

법칙	내용
제1법칙 (관성)	$\vec{F}_{\text{net}} = 0 \rightarrow \vec{v} = \text{일정}$
제2법칙	$\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a}$
제3법칙 (작용-반작용)	$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

## 주요 힘과 공식

개념	공식
무게 (중력)	$W = mg$
수직항력	뉴턴 제2법칙으로 구한다
장력	뉴턴 제2법칙으로 구한다
빗면 가속도	$a = g \sin \theta$ (마찰 없을 때)
엠투드 기계 가속도	$a = \frac{(m_1 - m_2)g}{m_1 + m_2}$
겉보기 무게	$F_N = m(g + a)$

### 기억할 것:

- FBD는 역학 문제의 **필수** 도구
- 좌표축 선택이 풀이의 난이도를 결정한다
- 극한 경우 확인으로 답의 합리성을 검증한다