

2장: 힘과 운동



1. 뉴턴의 운동 제2법칙
2. 뉴턴의 운동 제3법칙과 선운동량 보존
3. 마찰력

뉴턴의 운동 법칙

◆ 뉴턴의 운동 제 1법칙: 관성의 법칙

“외력이 없으면 물체는 일정한 속력으로 움직인다.”

◆ 뉴턴의 운동 제 2법칙: $F = ma$

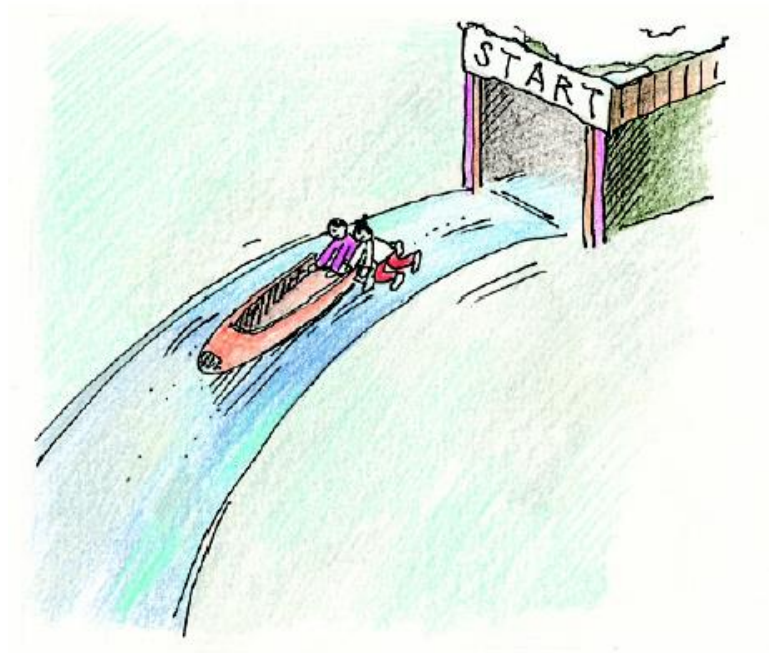
“외력이 있으면 물체는 가속된다.”

◆ 뉴턴의 운동 제 3법칙: 작용과 반작용의 법칙 ($F_{BA} = F_{AB}$)

“물체 A에 의하여 물체 B에 작용하는 힘은
물체 B에 의하여 물체 A에 작용하는 힘과 같다.”

뉴턴의 운동 제2법칙

- ◆ 뉴턴의 운동 제 2법칙: "가속도는 물체가 받는 힘에 비례한다."



$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d^2 \vec{r}(t)}{dt^2}$$

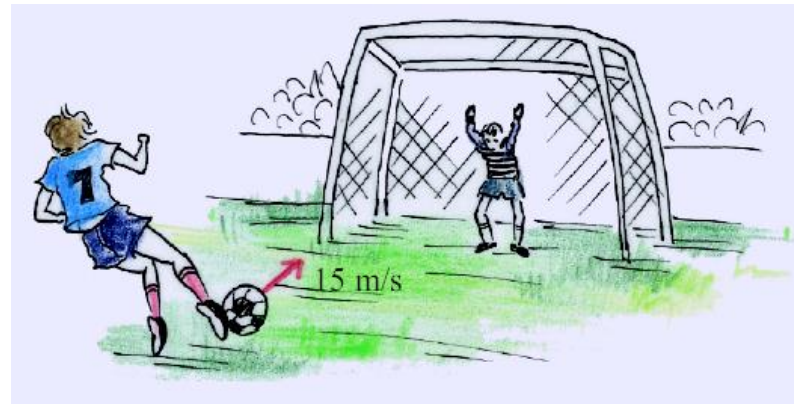
- ◆ 힘의 단위

$$1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyne}$$

$$\text{dyne} = g \cdot \text{cm} / \text{s}^2$$

날아가는 축구공이 받는 힘

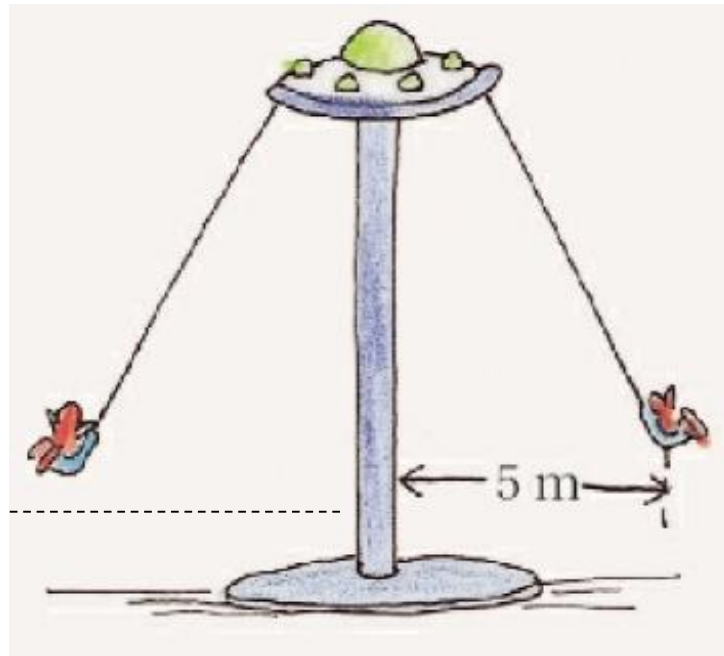
생각해 보기: 축구선수가 속력 15 m/s 로 골 문을 향해 슛을 하였다. 질량 0.43 kg 의 공을 정지 상태에서 15 m/s 로 5 ms 동안 일정하게 가속시켰다면 축구선수는 얼마의 힘으로 이 공을 찼을까?



회전그네

생각해 보기: 회전그네에 탄 어린이에게 작용하는 구심력 F 와 줄에 작용하는 장력 T 를 구하라.

(어린이의 몸무게: 30 kg, 회전반경: 5 m, 그네의 속도: 6 m/s)



로켓의 추진력

생각해 보기: 질량 2000 kg인 로켓이 80000 N의 추진력을 받아 가속되고 있다. 이 로켓이 받는 가속도는 얼마인가?



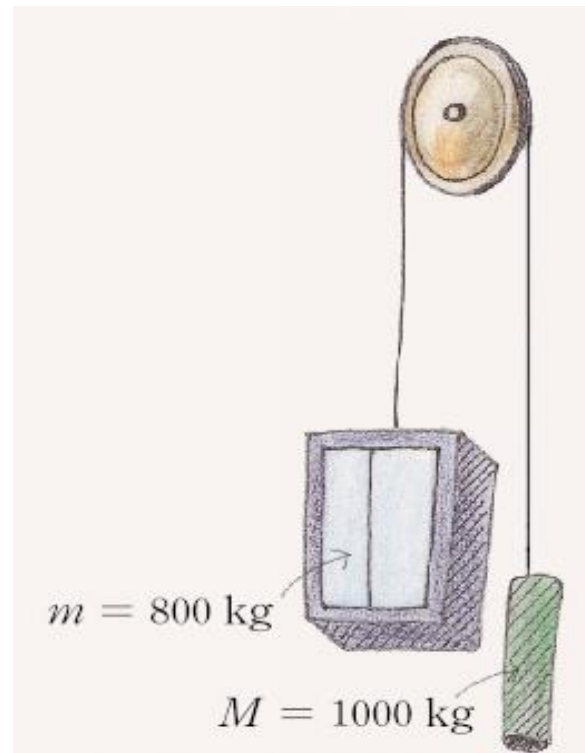
우주 비행사는 로켓이 추진되는 동안 계속하여 가속되고 이에 따라 엄청난 힘을 계속 받는다.

자동차의 가속도

생각해 보기: 1 톤의 소형차가 최대 1500 N의 힘을 낼 수 있다고 하자. 60 kg의 운전자가 낼 수 있는 최대 가속도는? 500 kg의 물건을 싣고 있을 때의 최대 가속도는?

승강기의 운동

생각해 보기: 무게 $m = 800 \text{ kg}$ 의 엘리베이터에 균형을 맞추기 위해 도르래 반대편에 질량 $M = 1000 \text{ kg}$ 의 추가 달려 있다. 외력이 없을 때 이 엘리베이터는 얼마의 가속도로 운동할까?



비관성계와 원심력

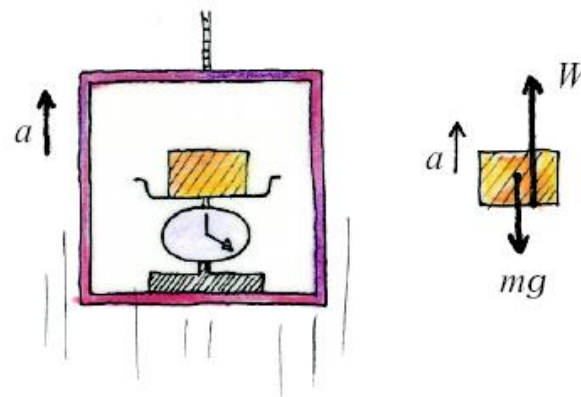
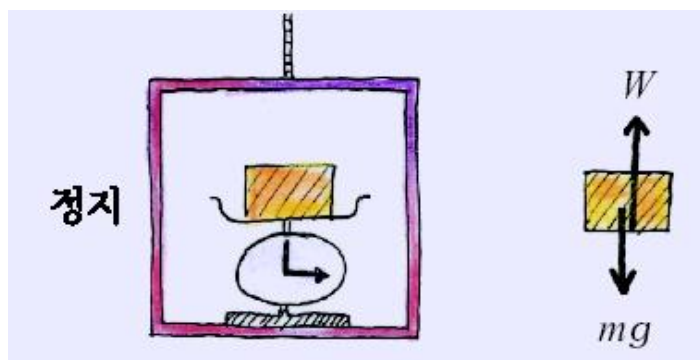
생각해 보기: 관성계에서 정지한 사람이 원운동 하는 물체를 관찰한다고 하자. 이 사람은 원운동 하는 물체에 구심력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

한편, 물체와 같은 주기로 원운동 하는 관찰자에게 물체는 정지해 있는 것으로 보인다. 이 때 원운동하는 관찰자가 볼 때에도 물체에 구심력이 작용하는가?

“관성계와 비관성계에서의
운동의 차이를 생각해 보자”

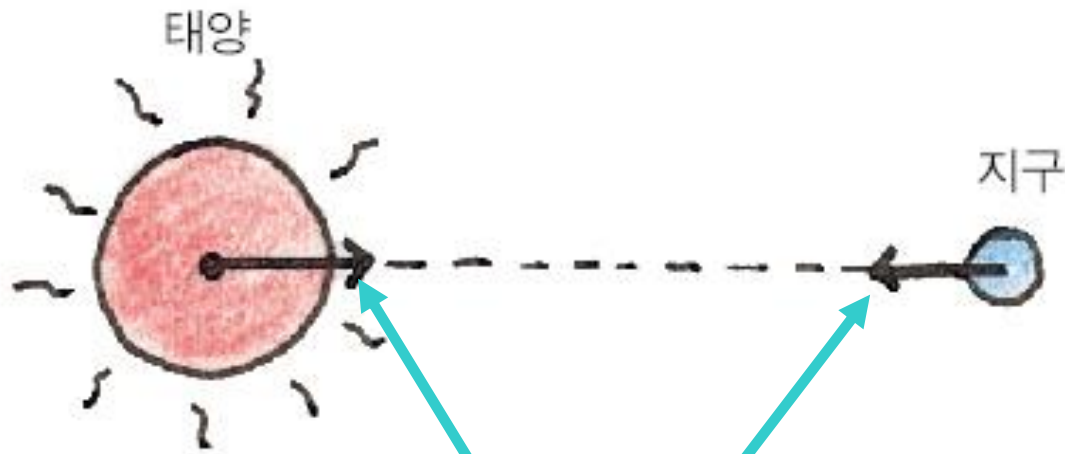
운동하는 물체의 무게의 변화

생각해 보기: 정지해 있는 엘리베이터에서의 금의 무게는 1 kg중이다. 엘리베이터가 출발할 때와 정지할 때의 금의 무게는 어떻게 변할까?



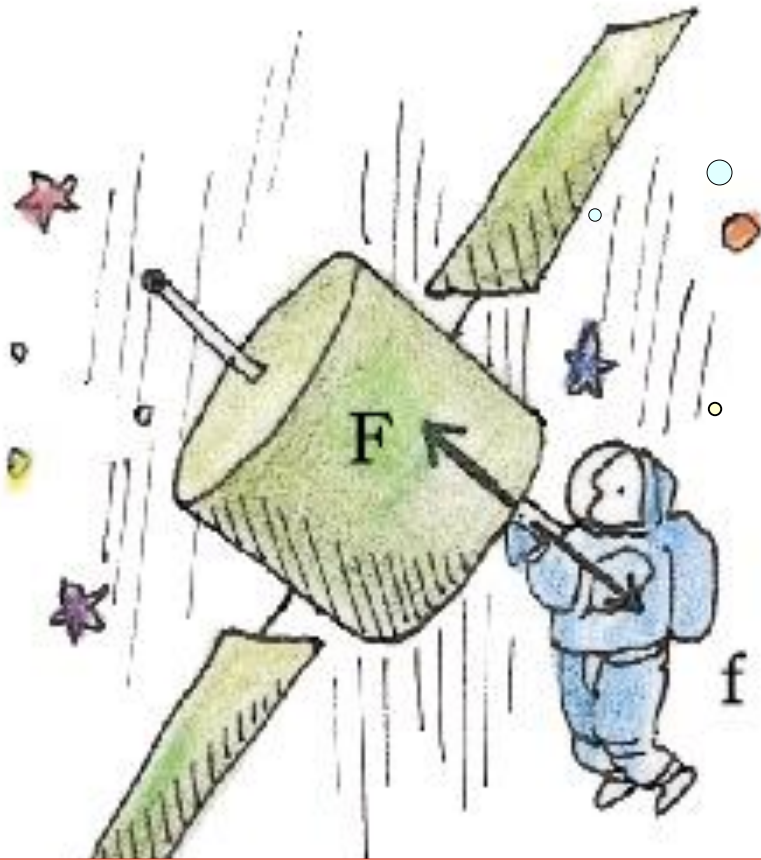
지구와 태양

지구는 태양에 비해 질량이 약 100만배 정도 작다.



그러나 태양이 지구를 잡아당기는 힘 (만유인력)과
지구가 태양을 잡아당기는 힘은 같다.

뉴턴의 운동 제3법칙과 선운동량 보존



어떤 물체에 힘을
가하면

그 물체도 똑같은 힘을
상대방에게 가한다.

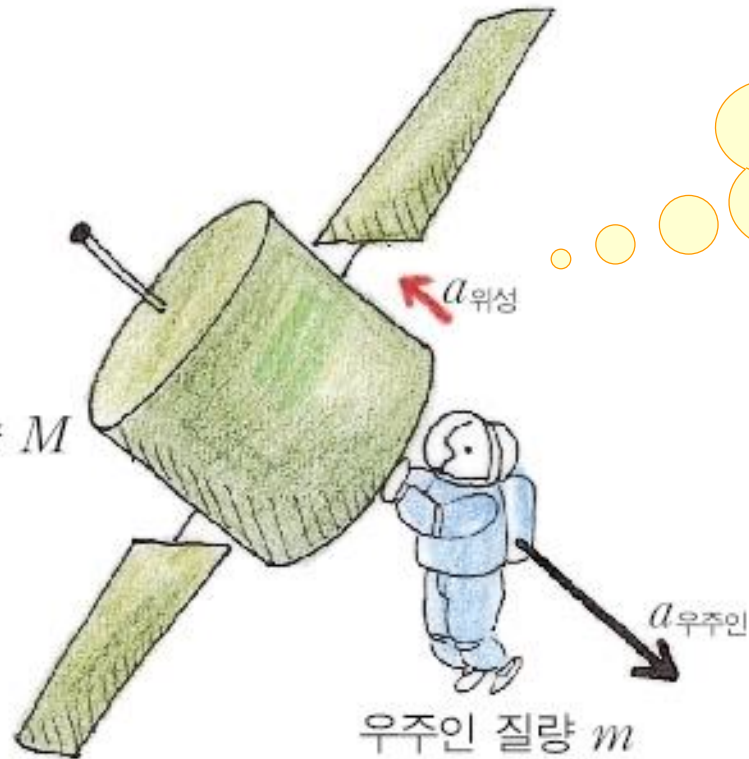
작용과 반작용은 항상 **쌍을 이루며**,
서로 상대방에게 작용한다.

작용이 없으면 반작용도 없다.

우주인과 위성은
똑같은 크기의 힘을 주고받는다.

그렇다면
가속도도 같을까 ???

뉴턴의 운동 제3법칙과 선운동량 보존



위성질량이
우주인질량보다
10배 크다면,

가속도는 질량에 반비례한다.

우주인이 위성보다
10배 더 가속된다.

$$a_{\text{우주인}}/a_{\text{위성}} = M/m$$

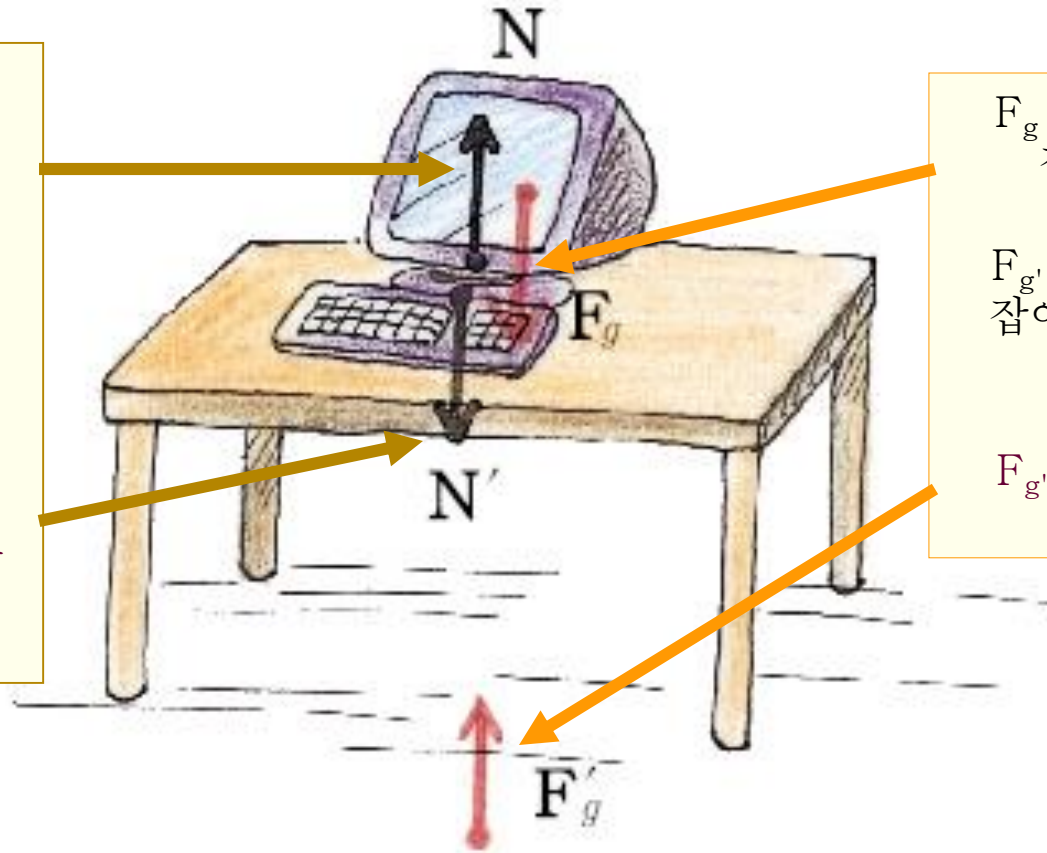
작용-반작용의 쌍

작용이 없으면 반작용도 없다.

N = 책상이 컴퓨터에
가하는 힘은

N' = 컴퓨터가 책상을
누르는 힘
과 쌍을 이룬다.

N' 이 사라지면 N 도
사라진다.



F_g = 지구가 컴퓨터를
잡아 당기는 힘과

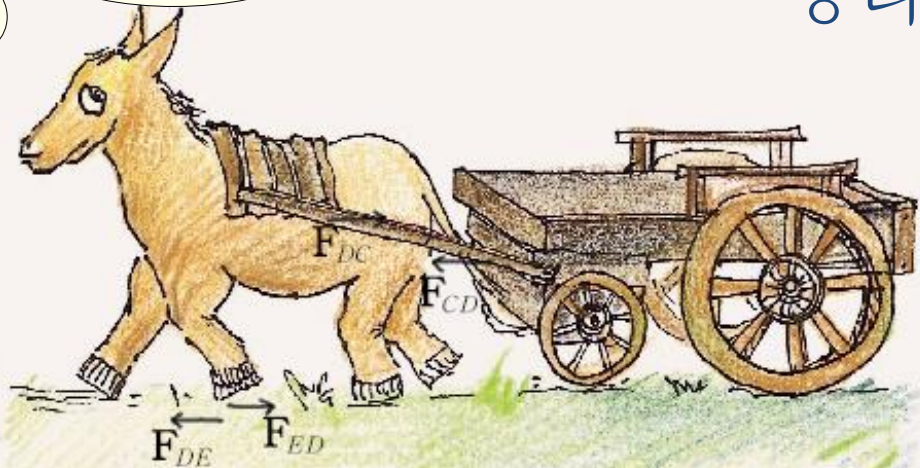
F'_g = 컴퓨터가 지구를
잡아 당기는 힘은 쌍을
이룬다.

F'_g 이 사라지면 F_g 도
사라진다.

당나귀의 항의

주인님, 작용-반작용 법칙을
아시나요?
마차를 끌려고 해도
뉴턴 제3 법칙에 의하면 마차가 똑같은
힘으로 나를 끌어당기니,
제가 마차를 끄는 것은 원리적으로
불가능합니다!

영리한 당나귀



주인: 핑계 한번 그럴 듯하다마는 네 속을 모를 줄 아느냐? 땅을 박차보아라.

참으로 감사하게도 땅이 반작용으로 너를 밀어 줄 테니 마차가 어찌 가지 않겠느냐?

운동량과 힘

운동량 $p = mv$

운동량의 변화율 $dp/dt = mdv/dt = F$

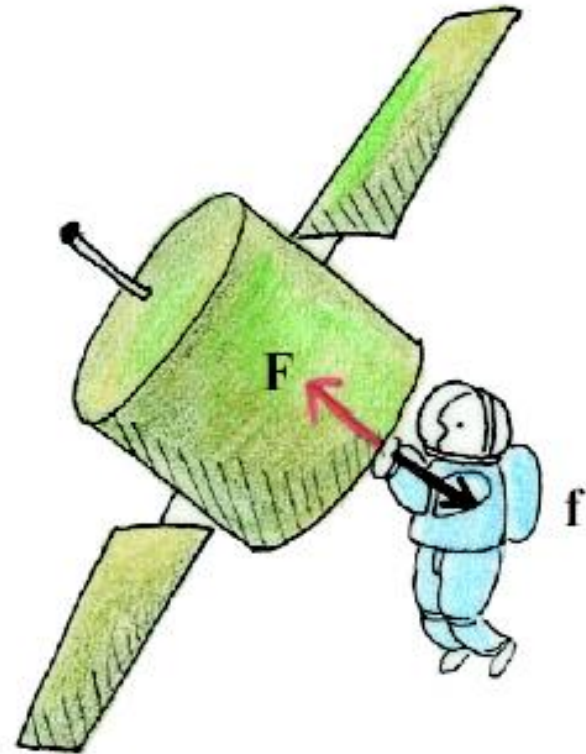
운동량의 변화 $\Delta p = F\Delta t$

위성의 운동량의 변화 $\Delta p_s = F\Delta t$

우주인의 운동량의 변화 $\Delta p_A = f\Delta t$

작용-반작용의 법칙 $f = -F$

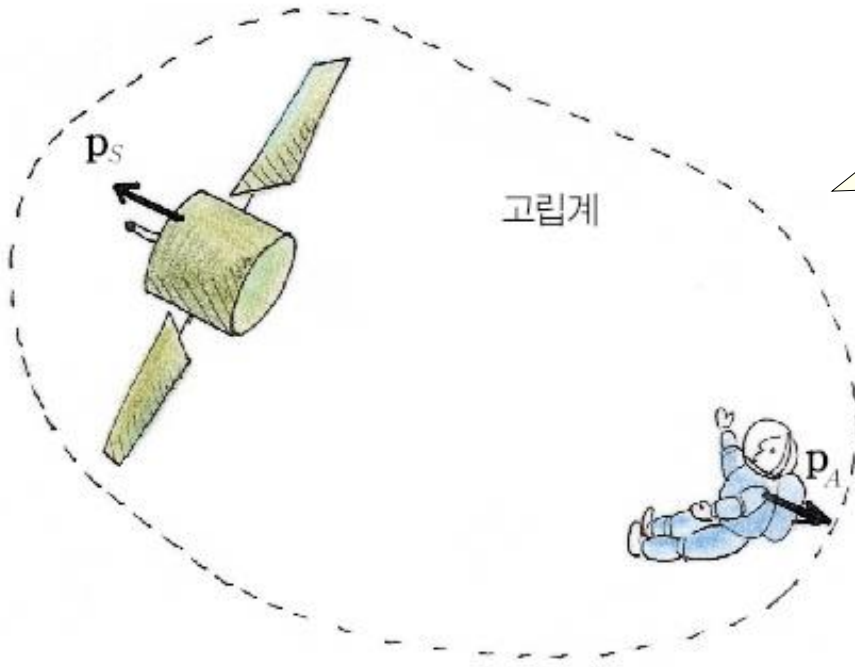
따라서 $\Delta p_s = -\Delta p_A$



우주인이 위성을 앞으로 밀면 자신은 뒤로 밀려난다.

운동량의 보존

고립계의 총운동량이 보존된다.



총운동량
=
우주인의 운동량
+
위성의 운동량

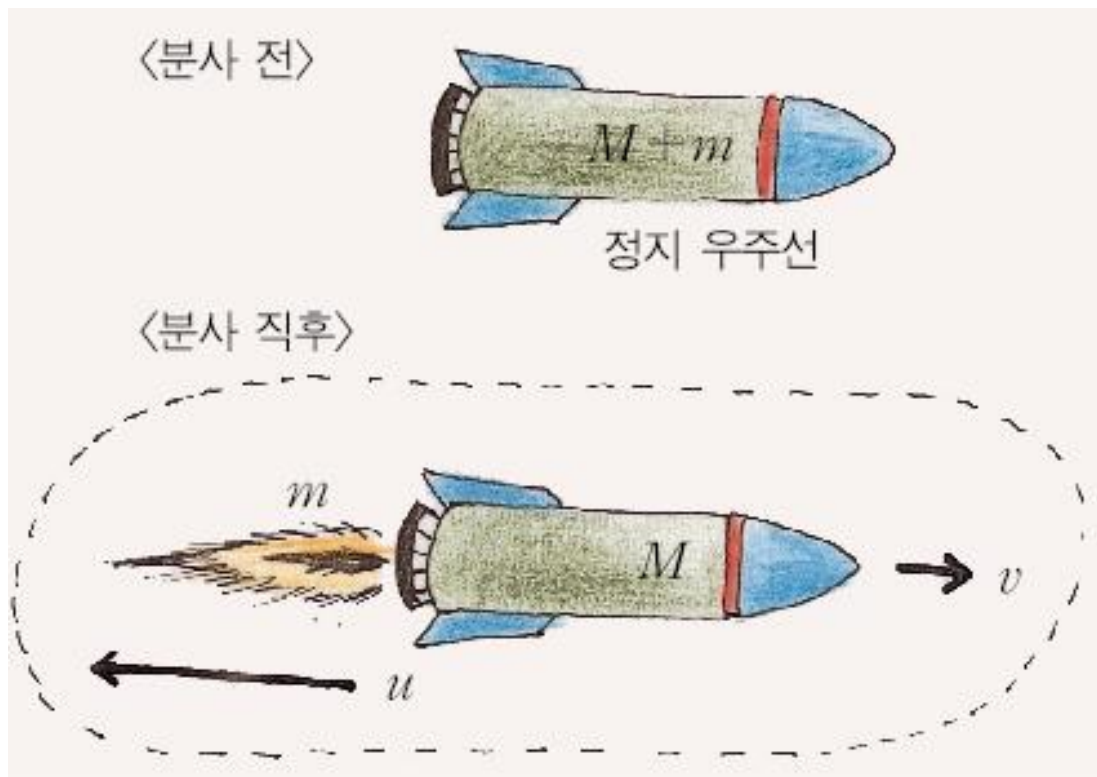
$$\Delta(p_s + p_A) = 0$$

$$p_{\text{총}} = p_s + p_A = \text{일정}$$

고립계에는 외력이 작용하지 않는다.

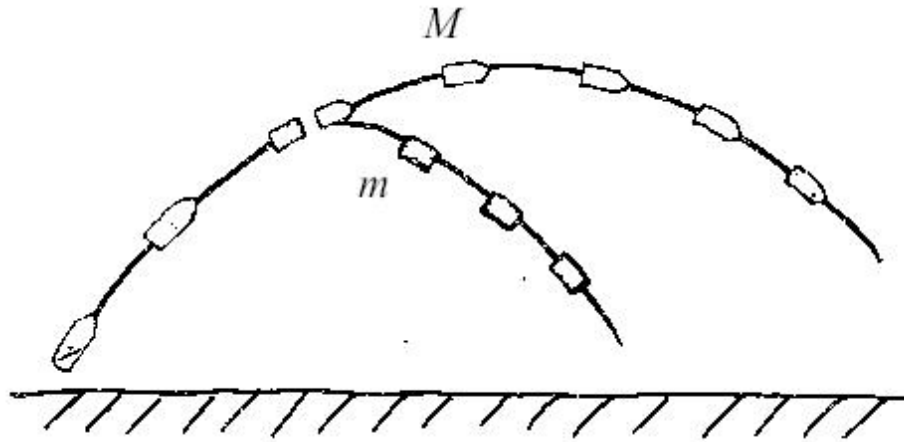
우주선이 얻는 속력

생각해 보기: 우주선이 질량 m 인 연료를 속력 u 로 내뿜는다.
이 때 얻는 속력 v 는 얼마인가?



(운동량 보존법칙)

질량중심의 운동

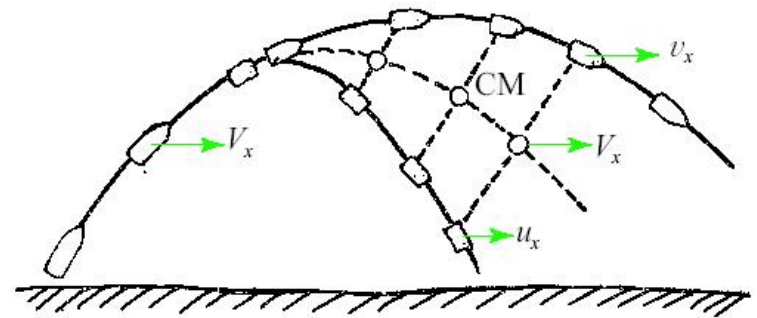
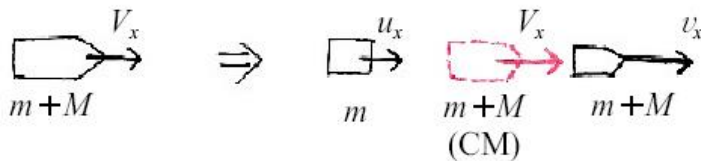


로켓이 연료통 m 을 분리시켜 떨어뜨리고 분리된 로켓 M 은 계속 날아간다. 이 운동을 어떻게 분석할 것인가?

질량중심의 운동

- ◆ 로켓이 분리될 때 수평 방향으로 외력이 작용하지 않으므로 수평 방향의 운동량은 보존된다.

분리 전 운동량 $(m + M)V_x =$ 분리 후 운동량 $mu_x + Mv_x$



가상물체의 수평 방향으로의 운동은 “질량중심”이라는 개념을 통해 이해할 수 있다.

질량중심의 운동

- ◆ 두 개의 분리된 물체 m_1 과 m_2 가 각각 원점으로부터 위치 r_1 과 r_2 에 놓여 있다고 하자. 이때 원점으로부터의 질량중심 R_{CM} 은 다음과 같이 정의된다.

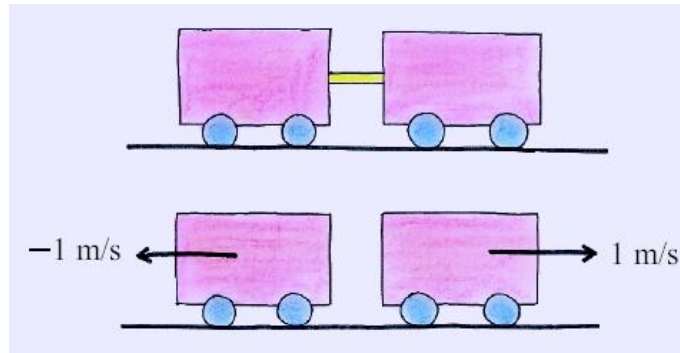
$$\vec{R}_{CM} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}$$

질량중심에 놓인 총 질량 $M_{\text{총}} = m_1 + m_2$ 의 운동은 뉴턴 방정식을 따른다.

$$\vec{F}_{\text{총}} = M_{\text{총}} \frac{d^2 \vec{R}_{CM}}{dt^2}$$

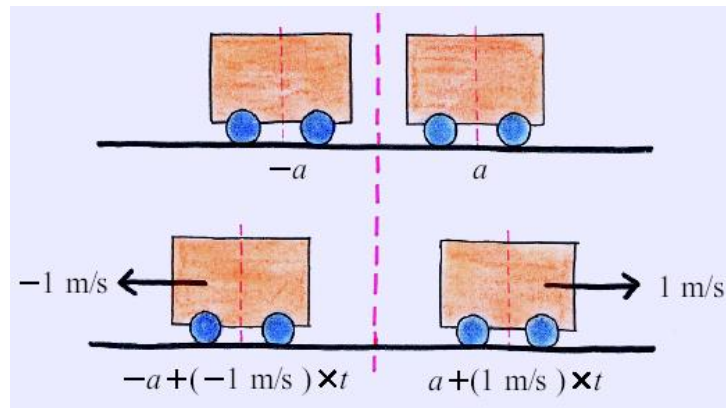
두 자동차의 운동

생각해 보기: 압축된 용수철에 묶여 있던 똑같은 질량(300 g)의 장난감 기차 두 대가 용수철이 풀리면서 1 m/s 의 속력으로 서로 밀려 나갔다고 하자. 밀려나기 전과 후의 총 운동량은?



두 자동차의 운동

생각해 보기: 앞 선 문제를 질량중심의 개념을 사용해서
풀어보자.

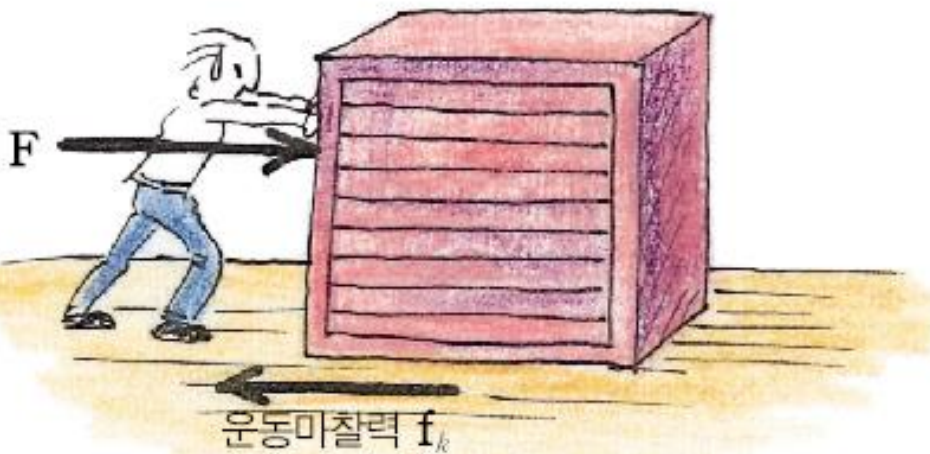


미끄럼 마찰력 (운동 마찰력)

$$f_{k(s)} = \mu_{k(s)} N$$

미끄럼(정지)
마찰계수

물체가 바닥으로부터 받는 힘
(수직력)



일정한 속도로 밀고 있다면
가속도는 0 이다.

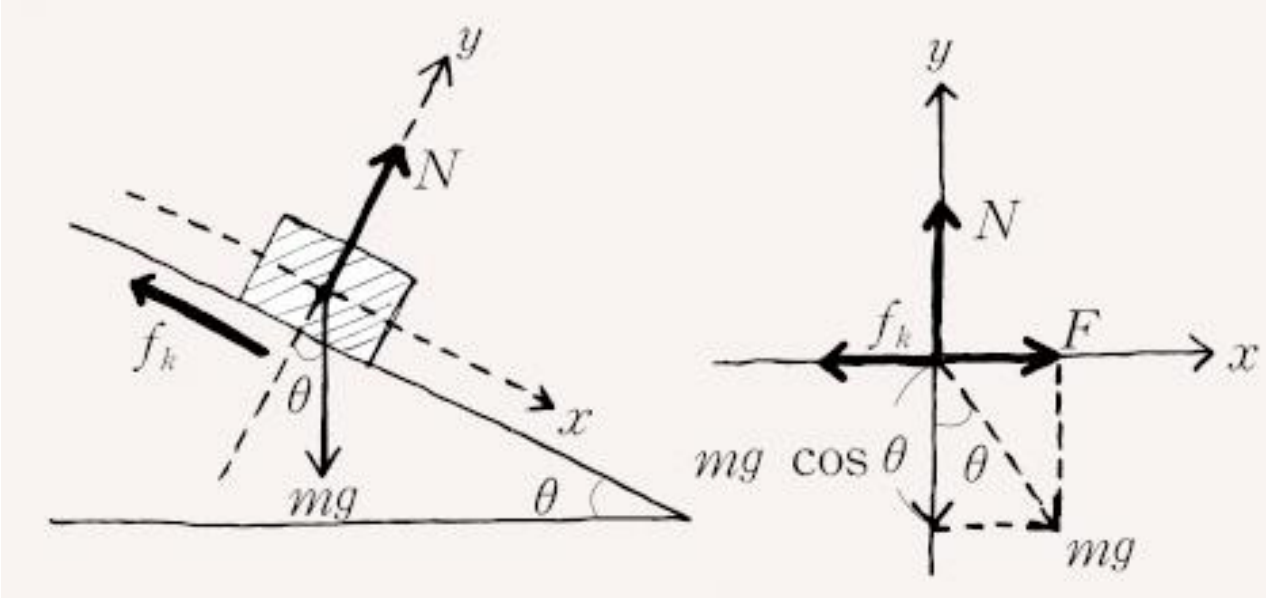
$$\vec{F} + \vec{f}_k = m\vec{a} = 0$$

마찰계수

물 질	정지, μ_s	미끄럼, μ_k
강철 - 강철	0.74	0.57
알루미늄 - 강철	0.61	0.47
구리 - 강철	0.53	0.36
놋쇠 - 강철	0.51	0.44
아연 - 주철	0.85	0.21
구리 - 주철	1.05	0.29
유리 - 유리	0.94	0.40
구리 - 유리	0.68	0.53
테플론 - 테플론	0.04	0.04
테플론 - 강철	0.04	0.04
고무 - 콘크리트(건조)	1.0	0.8
고무 - 콘크리트(습)	0.30	0.25

마찰력과 운동 1

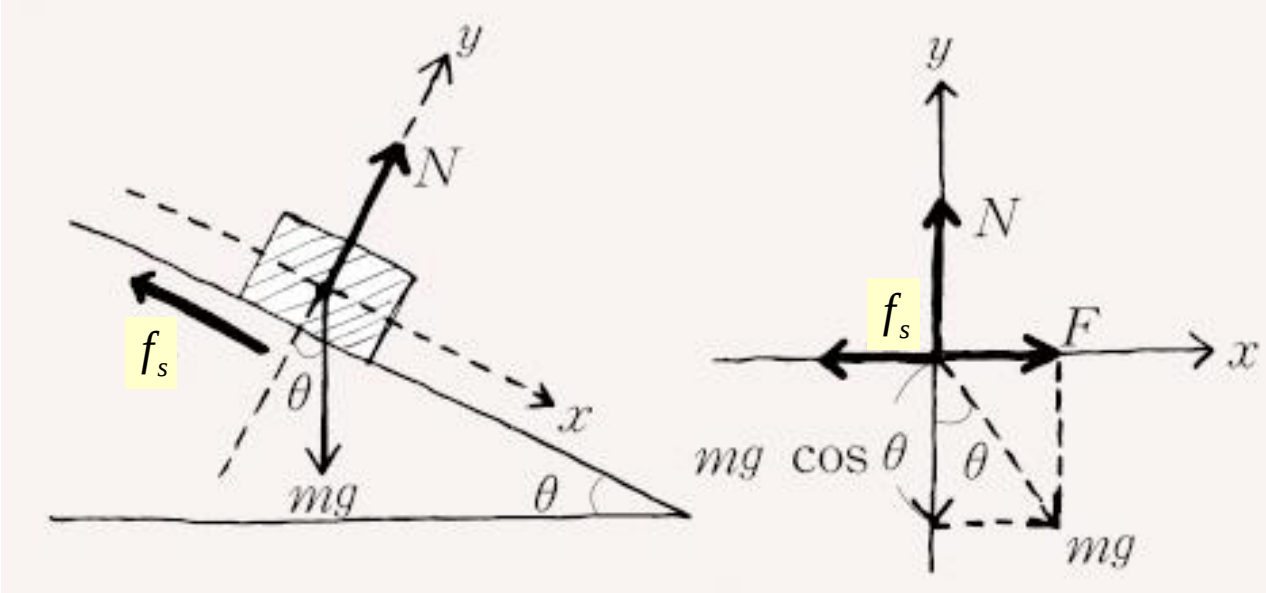
트럭 화물 칸 뒤에 철판으로 비탈면을 만들고
300Kg의 나무 상자를 이 비탈면을 따라 내리려고 한다.



이 상자가 일정한 속도로 내려오게 하기 위해서 비탈면은 어느 정도 기울어져야 하는가? 미끄럼 마찰 계수는 0.3 이다.

마찰력과 운동 2

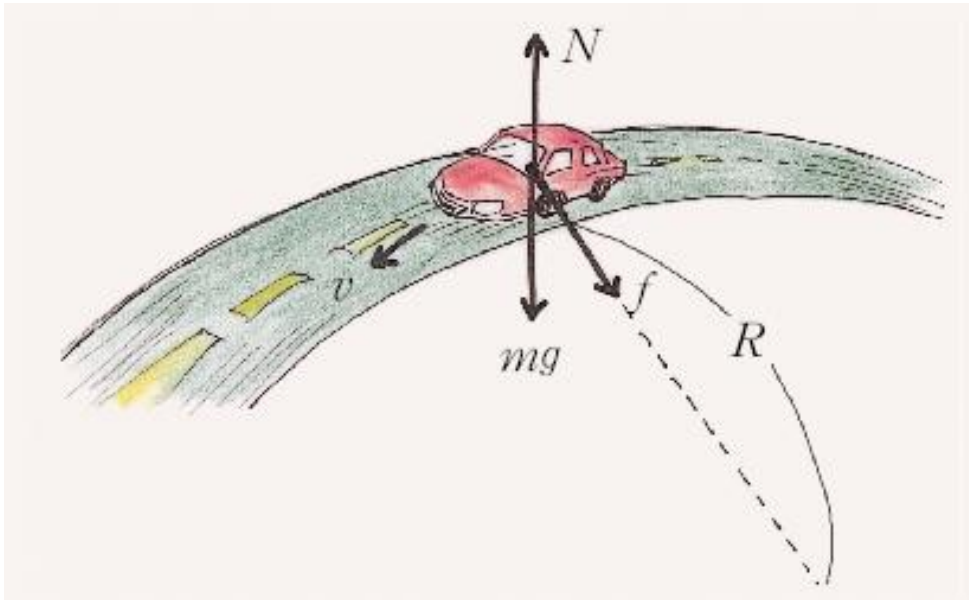
트럭 화물 칸 뒤에 철판으로 비탈면을 만들고
300Kg의 나무 상자를 이 비탈면을 따라 내리려고 한다.



정지해 있는 상자를 움직이기 위한 비탈면의 최소 경사각은?
정지 마찰 계수는 0.4 이다.

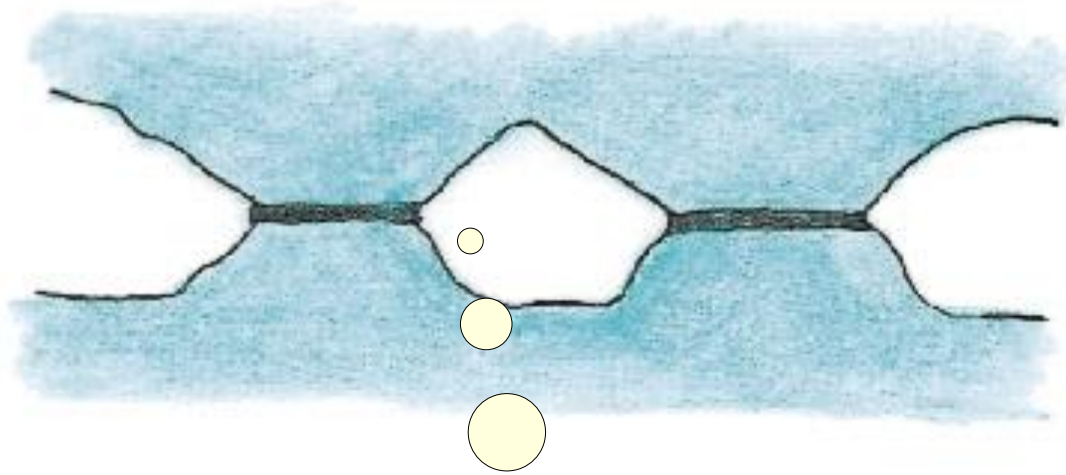
고속도로 곡률반경

고속도로를 150 km/hr로 달릴 수 있도록 설계해보자.



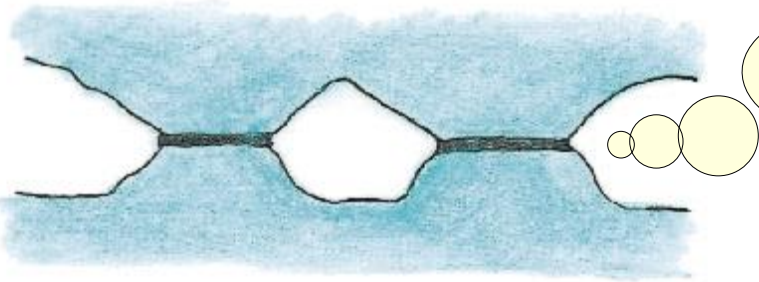
생각해 보기: 커브 길의 곡률 반경 R 은 최소 얼마가 되어야 할까?
 (정지 마찰계수 $\mu_s = 0.8$)
 비가 오면 속도를 얼마나 줄여야 하나? ($\mu_k = 0.3$)

마찰력과 마찰면

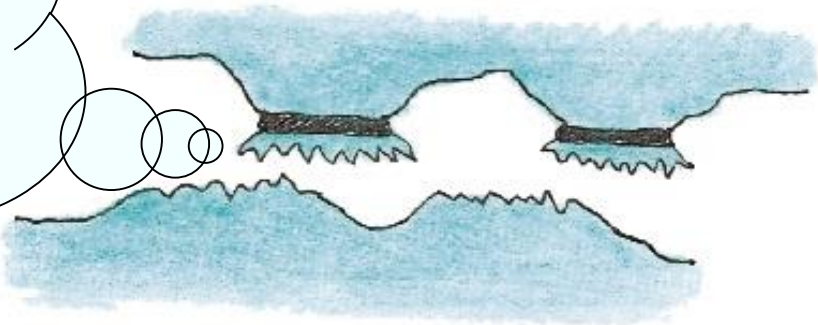


마찰면은 원자적인 수준에서 보면 매우 거칠다.
마찰력은 이 거친 면 사이에 작용하는 힘이다.
마찰력은 마찰면에 놓인 원자나 분자들 사이에
작용하는 전자기 힘이 원인이다.

정지 마찰력과 운동 마찰력



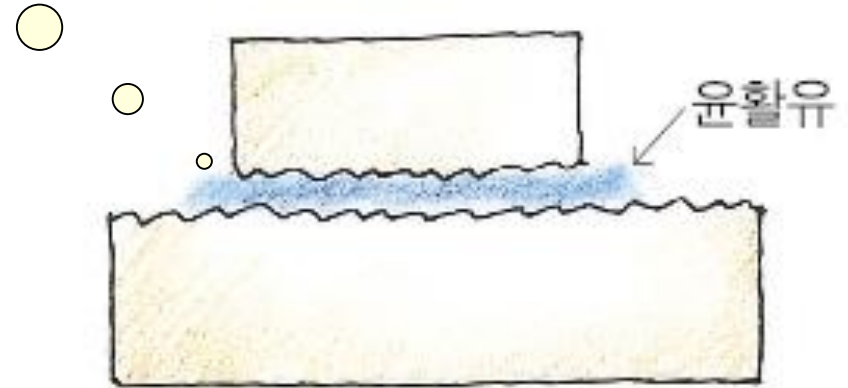
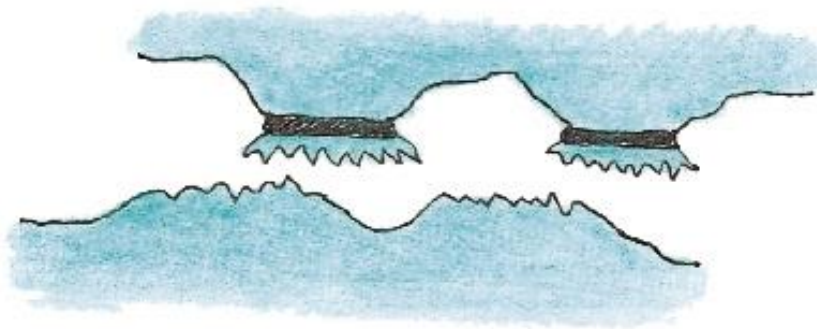
마찰면이 접촉되면
미시적으로 볼 때 튀어나온
점들이 전기적으로 결합하여
냉용접상태 (뜨겁지 않아도
달라붙는 상태)에 이른다.



최대 정지마찰력 이상이
가해지면 냉용접된 부분이
잘려 나가면서 두 면이 서로
움직인다.
일단 움직이기 시작하면
마찰력의 크기가 줄어든다.

윤활유

연한 물질의 층이
두 마찰면 사이를 채운다.

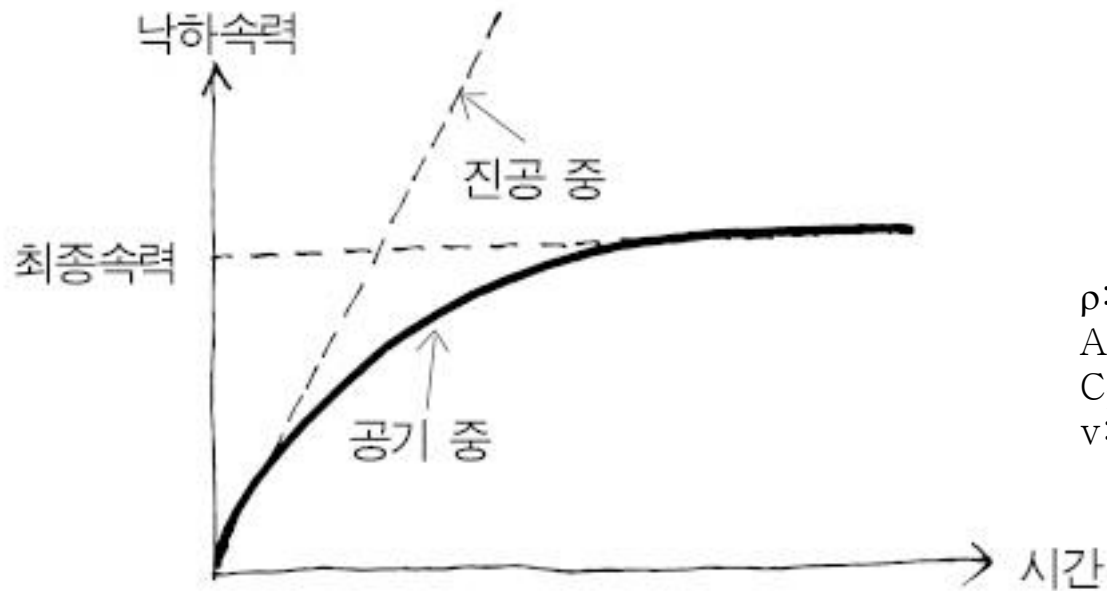


윤활유가 채워지면
두 표면끼리 직접 마찰을 일으키는 대신
윤활유와 면이 마찰을 일으킨다.

미끄럼 마찰력과 운동

생각해 보기: 시속 100km/h 로 달리던 자동차가 갑자기 브레이크를 밟아 미끄러지면서 정지하였다. 이 때 미끄럼 마찰계수가 0.8이고, 자동차에 작용하는 마찰력이 일정하다면 이 자동차는 얼마나 미끄러진 후 정지할까? 만일 비가 와서 마찰계수가 0.25로 줄어들면 어떻게 변하나?

종단속력



$$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D v^2$$

ρ : 매체의 질량 밀도
 A : 움직이는 물체의 단면적
 C_D : 지연 (drag) 계수 (물체의 모양에 의존)
 v : 속도

빗방울은 하늘로부터 자유낙하 한다.
 그런데 빗방울이 지상에 도달할 때 속도는 왜 그리 크지 않는가!

갈릴레이의 낙하실험

갈릴레이의 낙하실험에서는 공기저항을 무시할 수는 없다.
실제로 공의 공기 저항력은 크기에 따라 달라진다.

만일 크기가 같지만 질량이 다른 두 공으로
낙하실험을 했다면 어느 공이 먼저 떨어졌을까?

주의: 크기가 같으면 공기 저항력은 같다. 따라서 총 힘은 같다. 하지만 총 힘이 같아도 가속도는 다를 수 있다.



단원요약

- ◆ 뉴턴의 운동 제2법칙:
 - 가속도로부터 힘을 알아낸다: $ma \rightarrow F$
 - 힘으로부터 가속도를 알아낸다: $F \rightarrow ma$
- ◆ 뉴턴의 운동 제3법칙: 작용과 반작용이 쌍을 이룬다.
- ◆ 운동량 $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$.
 - 외력이 없으면 계의 총운동량은 보존된다.
- ◆ 마찰력은 운동을 방해하는 힘이다.
 - 미끄럼마찰력 $= \mu_k N$ (μ_k :미끄럼마찰계수, N : 수직력)
 - 정지마찰력 $= \mu_s N$ (μ_s :정지마찰계수)