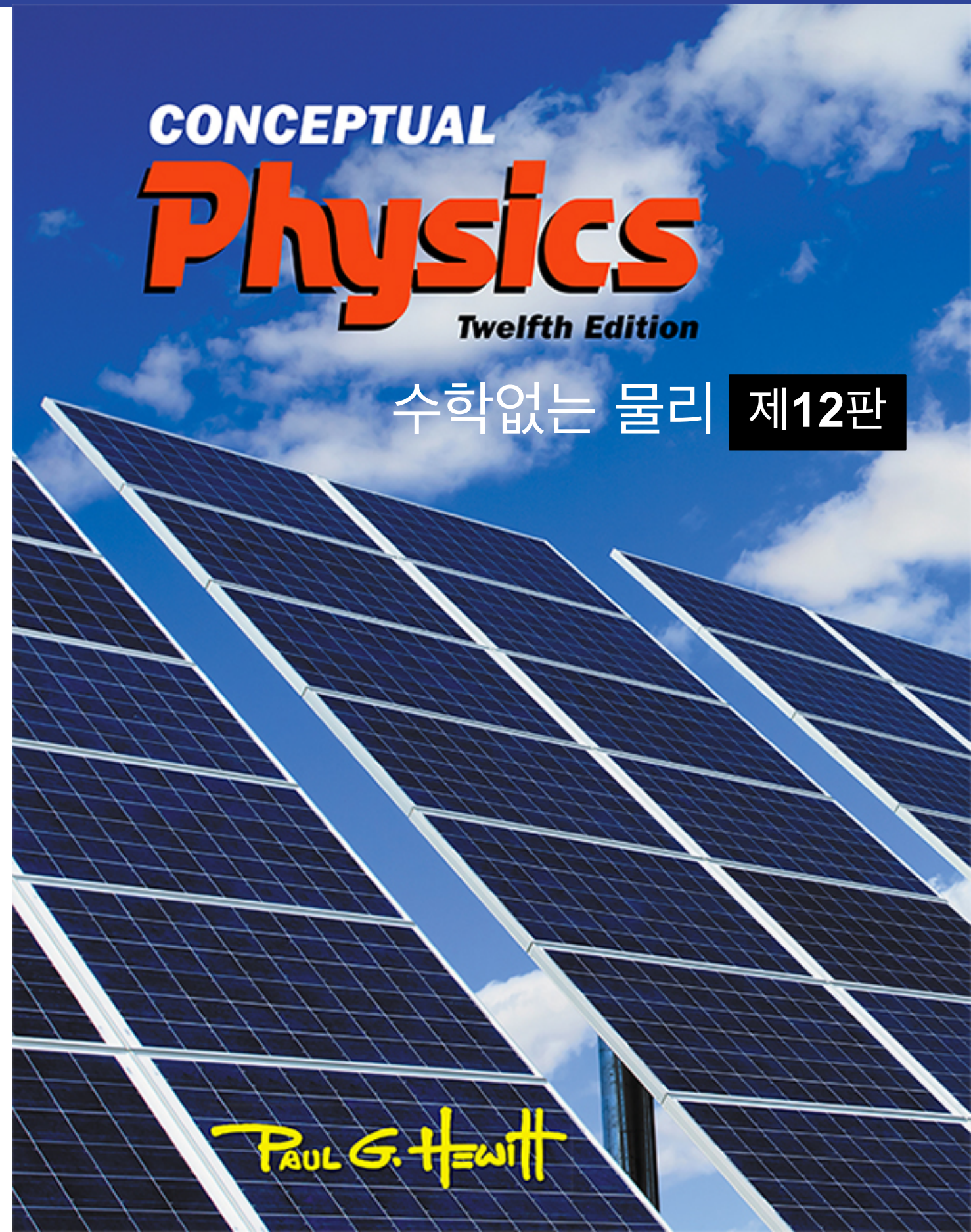


제8장

회전운동

Rotational Motion



학습내용

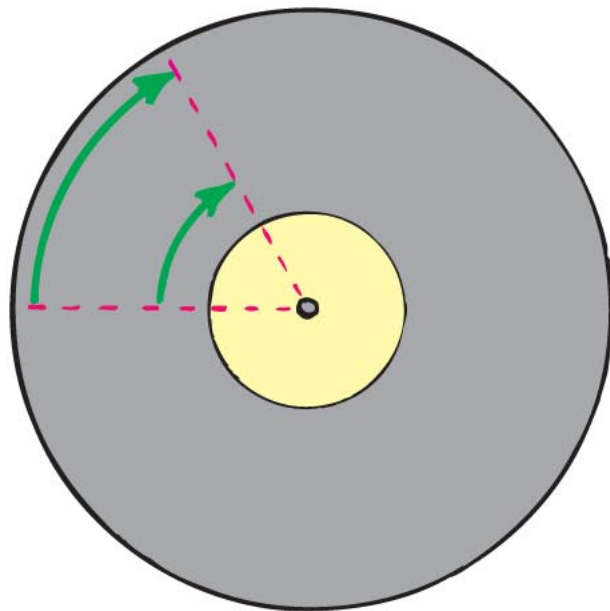
- ◆ 원운동
- ◆ 회전관성(Rotational Inertia)
- ◆ 돌림힘(토크: Torque)
- ◆ 질량중심과 무게중심
- ◆ 구심력(Centripetal Force)
- ◆ 원심력(Centrifugal Force)
- ◆ 회전하는 기준계
- ◆ 인공중력
- ◆ 각운동량
- ◆ 각운동량 보존

원운동

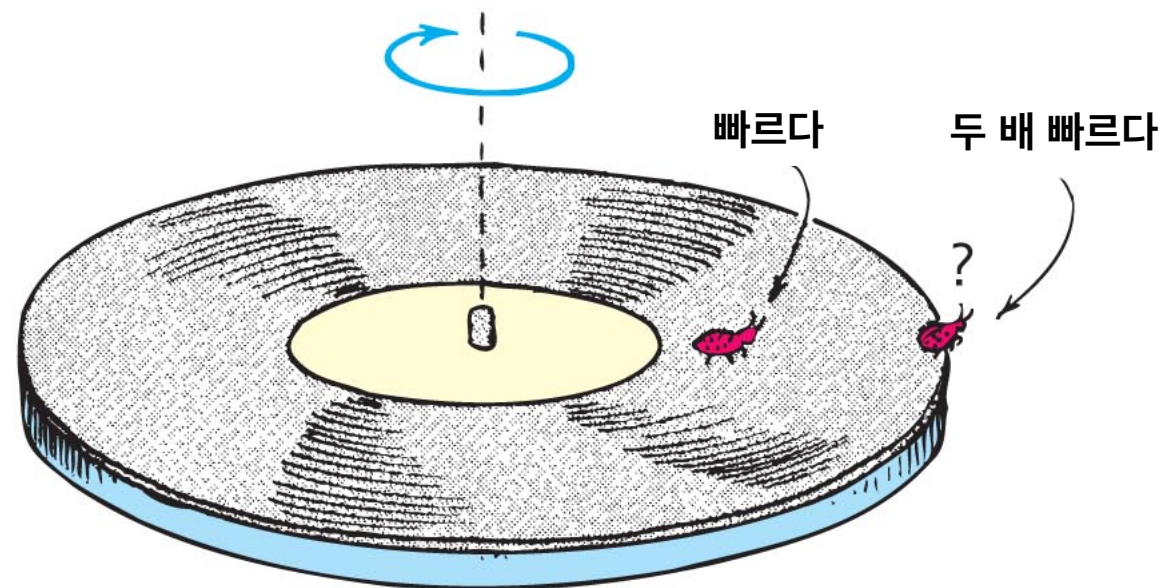
- ◆ 물체가 내부 축 주위를 돌 때 **자전** 또는 **스핀**이라고 한다.
- ◆ 물체가 외부 축 주위를 회전하는 운동은 **공전**이다.
- ◆ 원운동은 다음 두 종류의 속력으로 나타내질 수 있다.
 - 접선속력 또는 선속력 (단위: m/s)
 - 회전속력 또는 각속력 (단위: s^{-1} , rpm, ...)

원운동 — 접선속력(선속력)

- ◆ 접선속력(v) = $\frac{\text{회전하는 물체 위의 한 점이 이동한 거리}}{\text{걸린 시간}}$
- ◆ 단위: m/s
- ◆ 회전축에 가까운 부분보다 먼 바깥부분의 선속력이 더 크다.



(a)



(b)

원운동 — 회전속력(각속력)

- ◆ 회전속력 (ω): 단위 시간당 회전수, 즉 회전률
- ◆ 단위: s^{-1} (SI) 또는 rpm(분당 회전수)
- ◆ 고정된 회전목마나 레코드판의 모든 부분이 회전축 주위를 도는 시간은 모두 같으므로, 모든 부분의 회전속력은 같다.
- ◆ 접선속력과 회전속력
 - 접선속력 \sim 지름거리 \times 회전속력

$$v \sim r\omega$$

한 바퀴를 2π 라디안이라고 표기할 때, $v = r\omega$

회전속력과 접선속력 확인문제

무당벌레가 턴테이블의 회전축과 끝의 중간에 있다. 턴테이블의 회전속력이 20 RPM이고 무당벌레의 선속력은 2 cm/s일 때, 맨 끝에 있는 다른 무당벌레의 선속력은?

- A. 1 cm/s
- B. 2 cm/s
- C. 4 cm/s
- D. 8 cm/s

회전속력과 접선속력 확인문제

무당벌레가 턴테이블의 회전축과 끝의 중간에 있다. 턴테이블의 회전속력이 20 RPM이고 무당벌레의 선속력은 2 cm/s일 때, 맨 끝에 있는 다른 무당벌레의 선속력은?

- A. 1 cm/s
- B. 2 cm/s
- C. 4 cm/s
- D. 8 cm/s

설명:

선속력 $v = r\omega$

두 무당벌레의 회전속력은 같다. 회전축으로부터의 거리가 2배가 되면, 선속력도 2배가 된다.

그래서, 접선속력은 $2 \text{ cm/s} \times 2 = 4 \text{ cm/s}$.

회전관성(Rotational Inertia)

- ◆ 외부 힘이 없다면, 회전하는 물체는 같은 회전축 주위를 계속해서 회전하려고 한다.
- ◆ 회전관성(I): 회전하는 물체의 운동변화에 저항하는 물체의 본성

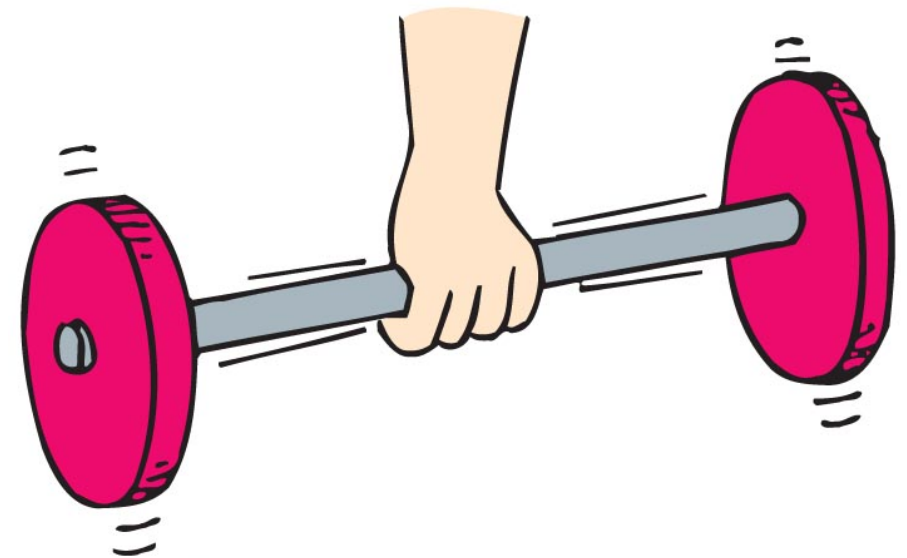
회전관성

◆ 회전관성을 결정하는 것

- 물체의 질량
- 회전축에 대한 질량분포
 - ▶ 물체의 질량분포와 회전축 사이의 거리가 멀수록 회전관성이 커진다.



회전하기 쉽다



회전하기 어렵다

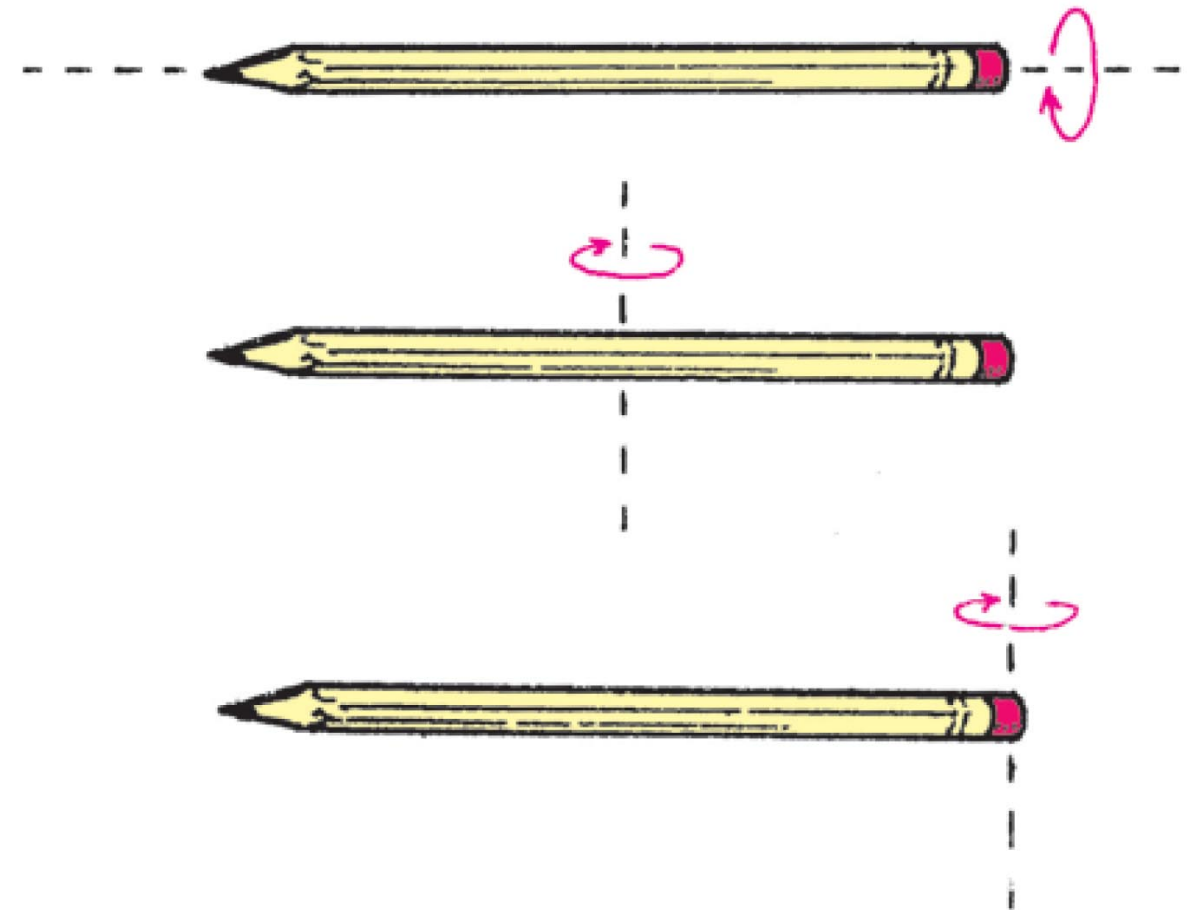
회전관성

- ◆ 회전관성이 클 수록, 물체의 회전상태를 변화시키기가 더 어려워진다.
- 외줄을 타는 곡예사는 장대를 가지고 중심을 잡는다. 장대의 회전관성이 커서 장대를 회전시키는 데 오랜 시간이 걸린다. 이 틈을 이용하여 몸의 균형을 새롭게 잡을 시간을 얻을 수 있다.



회전관성

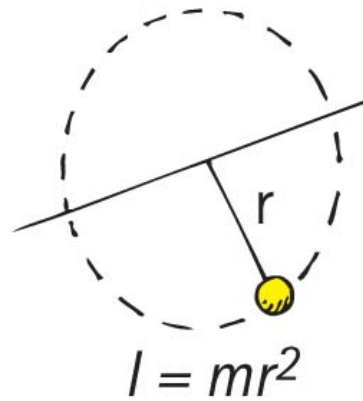
- ◆ 회전관성은 물체가 회전하는 회전축에 따라 달라진다.
- 연필 길이에 평행한 회전축의 경우 회전관성이 작아 회전시키기 쉽다.
- 연필 길이에 수직하게 중심을 통과하는 회전축의 경우 회전관성이 커서 회전시키기 어렵다.
- 연필 길이에 수직하고 연필의 한쪽 끝을 통과하는 회전축의 경우 회전시키는 것이 셋 중 가장 어렵다.



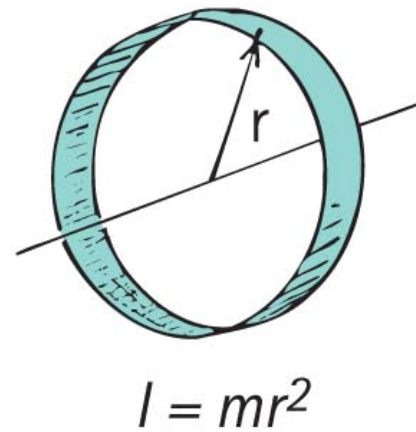
회전관성

- ◆ 회전관성은 물체의 모양과 회전축에 따라 다르다.

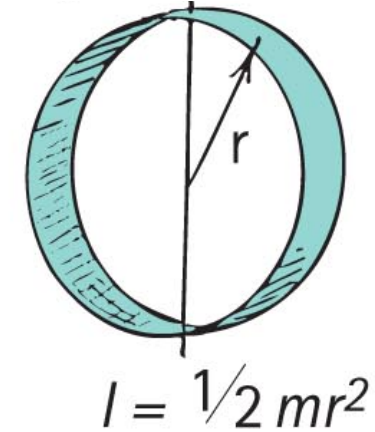
단진자



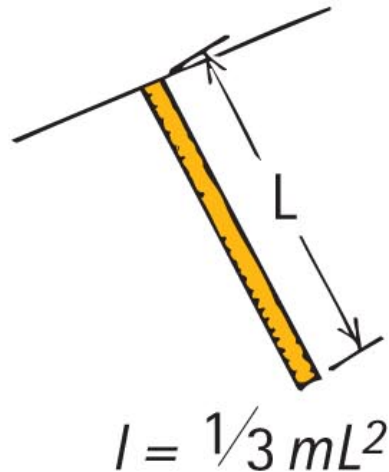
원형 고리(중심축)



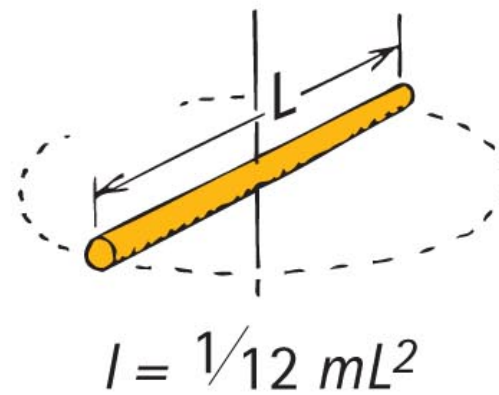
원형 고리(지름축)



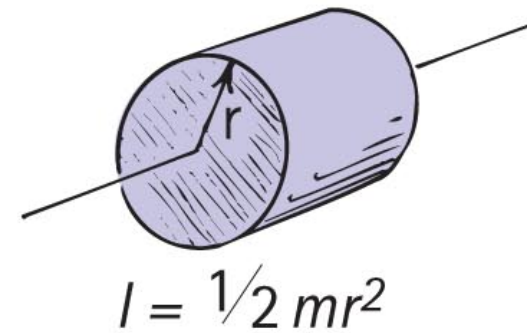
막대(끝)



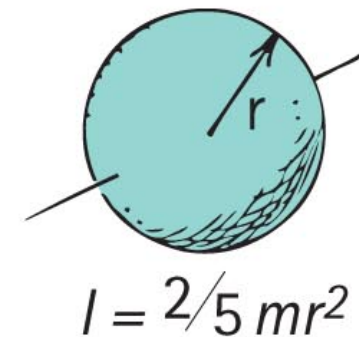
막대(질량중심)



고체원통



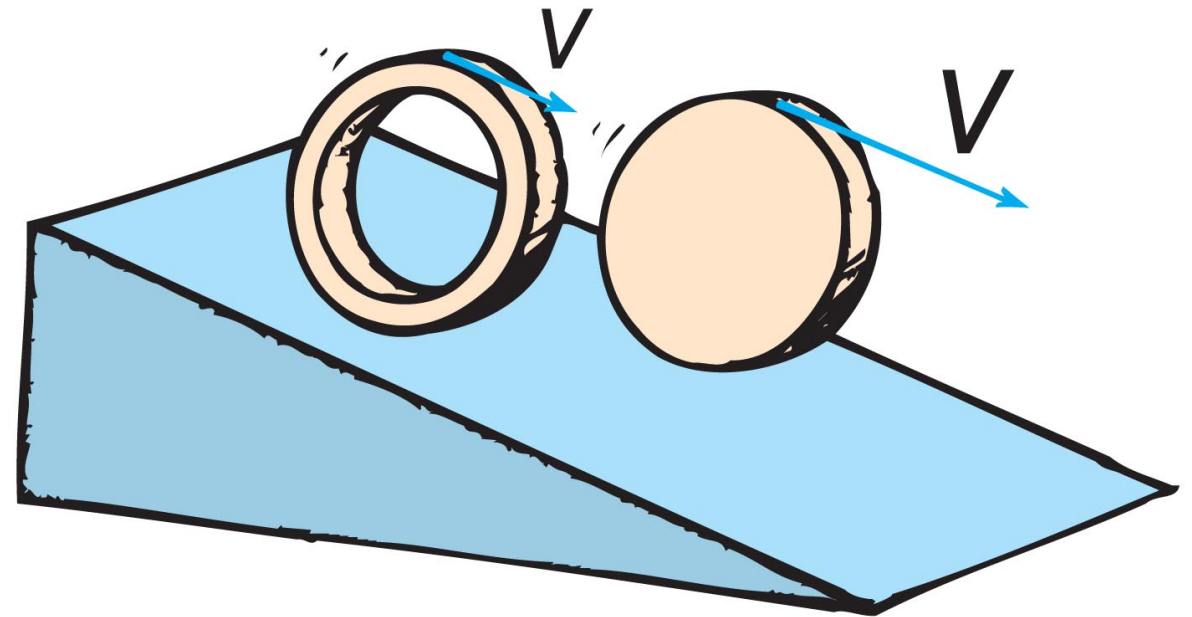
고체구
(질량중심)



회전관성 확인문제

같은 질량의 고체원통과 속이 빈 원통고리를 경사면 꼭대기에서 정지해 있다가 동시에 굴러내려온다. 경사면 아래에 먼저 도착하는 것은?

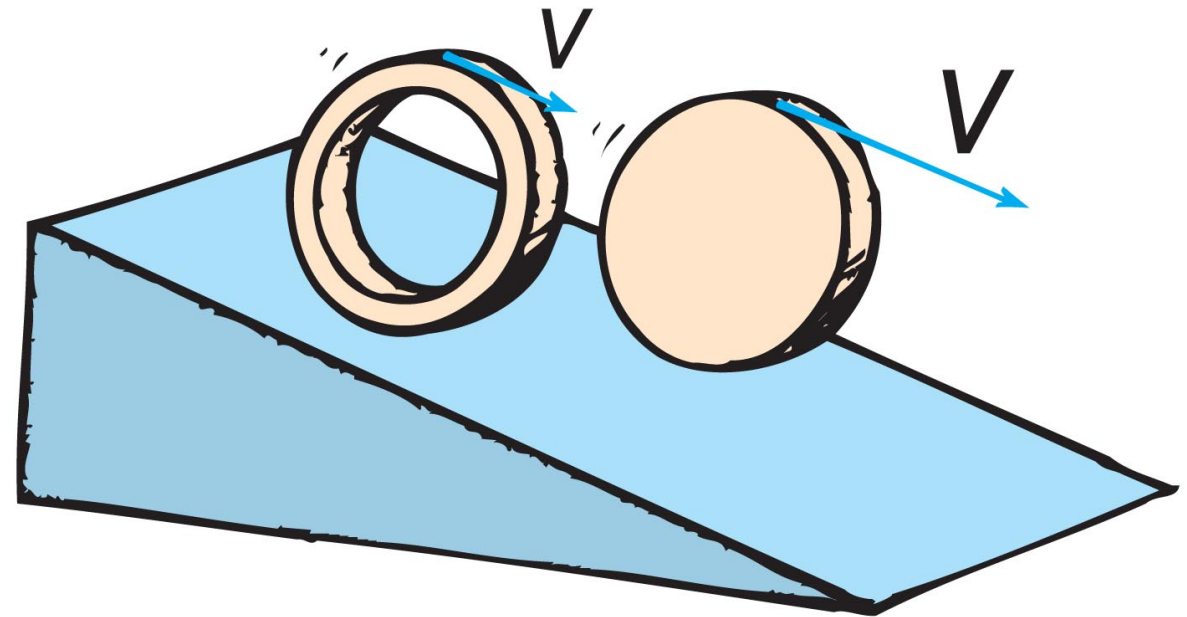
- A. 원통고리
- B. 속이 꽉 찬 원통
- C. 둘이 동시에
- D. 정보가 충분하지 않음



회전관성 확인문제

같은 질량의 고체원통과 속이 빈 원통고리를 경사면 꼭대기에서 정지해 있다가 동시에 굴러내려온다. 경사면 아래에 먼저 도착하는 것은?

- A. 원통고리
- B. 속이 꽉 찬 원통
- C. 둘이 동시에
- D. 정보가 충분하지 않음



설명:

원통고리 회전관성이 같은 질량의 고체원통보다 더 커서 회전속력이 더 느리다.

돌림힘(토크: Torque)

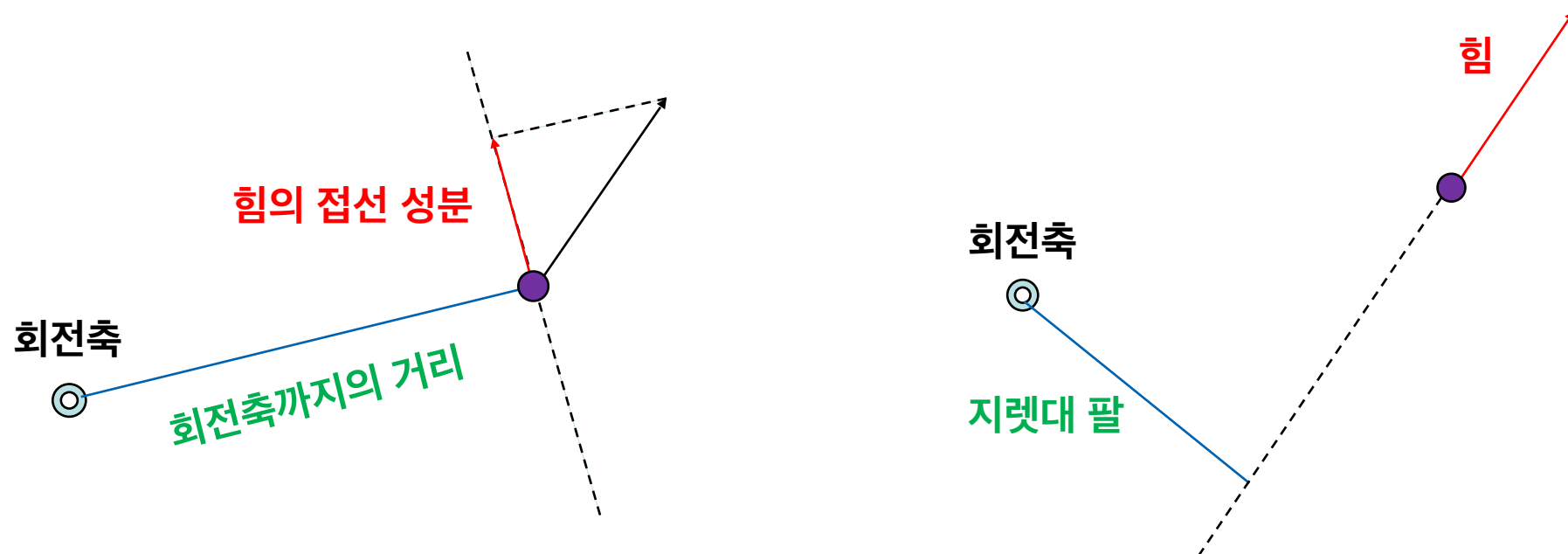
- ◆ 돌림힘: 회전운동을 변화시키는 것
- ◆ 돌림힘은 다음 세 가지 요소에 의해 결정됨
 - 힘의 크기
 - 힘이 작용한 방향
 - 회전축과 힘이 작용한 점 사이의 거리

돌림힘

◆ 돌림힘

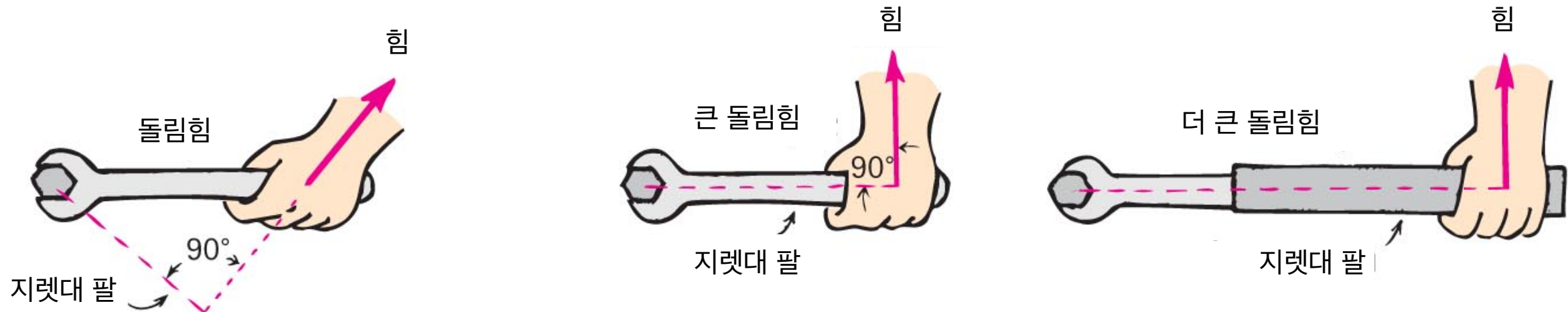
$$(\text{돌림힘}) = (\text{지렛대 팔}) \times (\text{힘})$$

- 지렛대 팔: 작용하는 힘과 회전축 사이의 최단거리



돌림힘 — 예

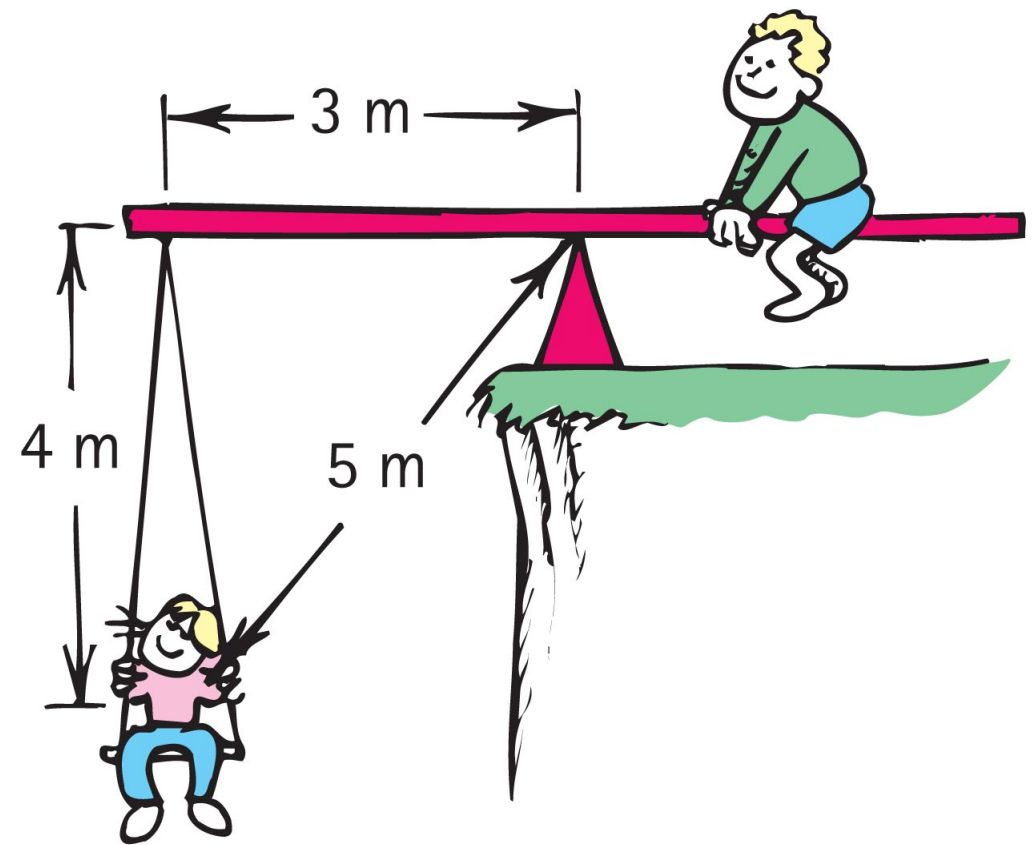
- ◆ 첫 번째 그림: 지렛대 팔이 렌치 손잡이 길이보다 짧다.
- ◆ 두 번째 그림: 지렛대 팔은 렌치 손잡이 길이와 같다.
- ◆ 세 번째 그림: 지렛대 팔이 렌치 손잡이 길이보다 더 길다.



돌림힘 확인문제

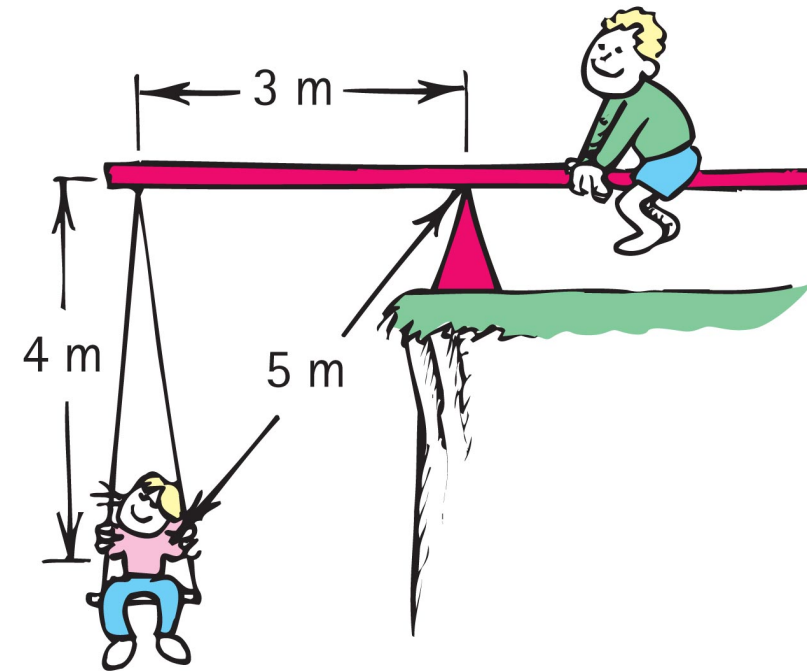
왼쪽에 있는 소녀가 50 N의 사과가 든 가방을 갑자기 받았다고 하자. 오른쪽의 소년이 움직이지 않는다고 했을 때, 소녀는 균형을 맞추기 위해 어디에 앉아야 하는가?

- A. 회전축으로부터 1 m
- B. 회전축으로부터 1.5 m
- C. 회전축으로부터 2 m
- D. 회전축으로부터 2.5 m



돌림힘 확인문제

왼쪽에 있는 소녀(250 N의 무게)가 50 N의 사과가 든 가방을 갑자기 받았다고 하자. 오른쪽의 소년이 움직이지 않는다고 했을 때, 소녀는 균형을 맞추기 위해 어디에 앉아야 하는가?



- A. 회전축으로부터 1 m
- B. 회전축으로부터 1.5 m
- C. 회전축으로부터 2 m
- D. 회전축으로부터 2.5 m

설명:

돌림힘이 사과 가방을 받기 전과 같아야 함.

$$\text{돌림힘} = \text{지렛대 팔} \times \text{힘} = 3 \text{ m} \times 250 \text{ N} = 750 \text{ Nm}$$

$$\text{돌림힘} = \text{새로운 지렛대 팔} \times \text{힘}$$

$$750 \text{ Nm} = \text{새로운 지렛대 팔} \times 300 \text{ N}$$

$$\Rightarrow \text{새로운 지렛대 팔} = 750 \text{ Nm} / 300 \text{ N} = \underline{2.5 \text{ m}}$$

질량 중심과 무게중심

- ◆ **질량중심(Center of mass)**: 물체를 구성하는 질량 입자들의 평균 위치
- ◆ **무게중심(Center of gravity: CG)**: 무게 분포의 평균 위치
 - 무게와 질량은 비례하므로, 무게중심과 질량중심은 보통은 같은 위치이다.

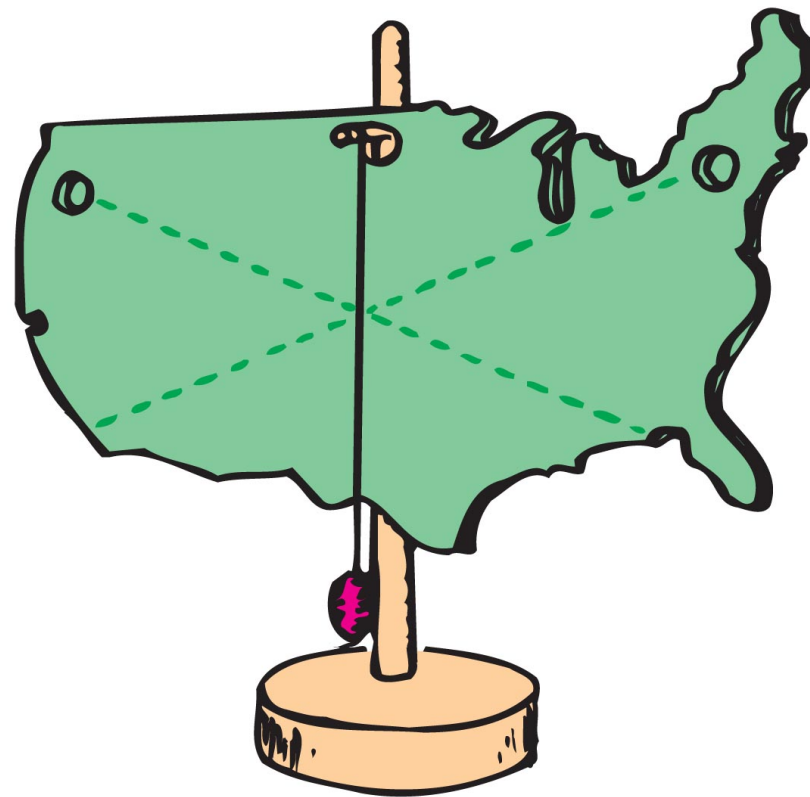
참고: 물체가 너무 커서 각 부분에 작용하는 중력이 변할 때 두 중심 사이에는 차이가 있을 수 있다.

무게중심

◆ 무게중심 찾기

- 한 점이 물체를 지탱한다면 그 점으로부터 수직선을 긋는다.
- 물체를 지탱하는 다른 점을 찾아 반복한다.

◆ 무게중심은 두 직선이 만나는 점이다.



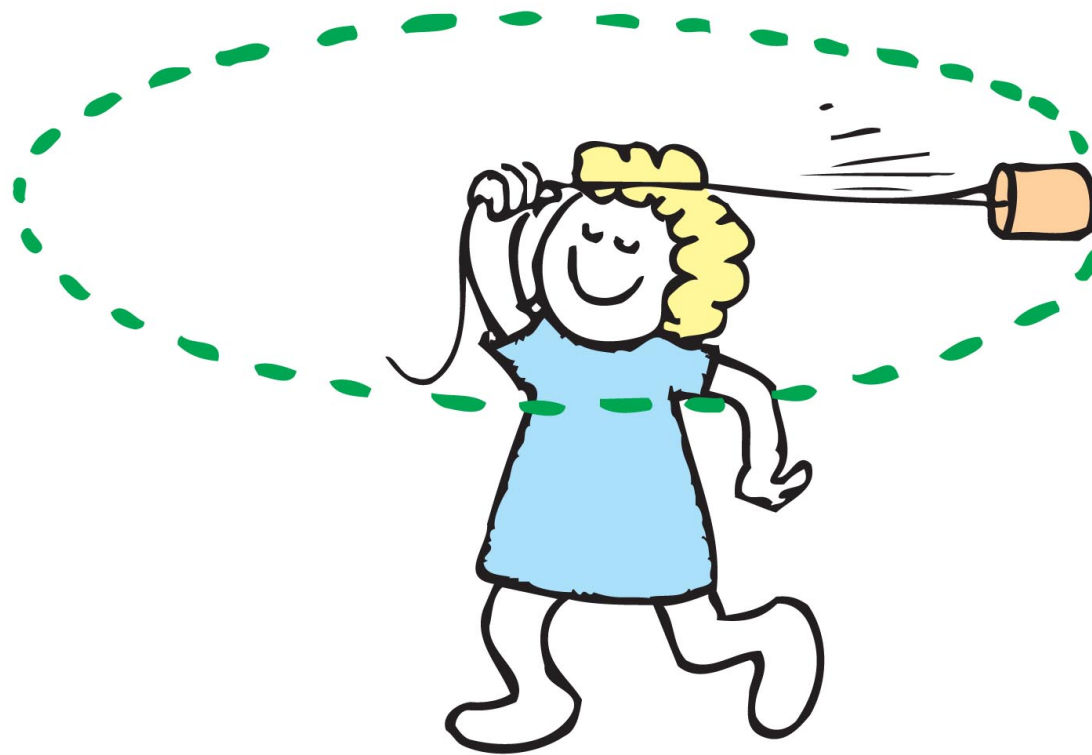
무게중심 - 안정성

- ◆ 질량중심의 위치는 안정성에 있어서 매우 중요하다.
- 질량중심에서 연직선을 그었을 때 연직선이 물체의 내부 바닥 위에 있으면 물체는 안정한 **평형상태**에 있다. 즉, 물체는 균형을 이루고 있다.
- 연직선이 물체의 바닥을 벗어나면 불안정하다.



구심력(Centripetal Force)

- ◆ 고정된 중심으로 향하는 모든 힘을 **구심력**이라고 한다.
- ◆ 구심은 “중심을 찾는” 혹은 “중심을 향한”이란 뜻임.
 - 예: 줄의 한쪽 끝에 매단 강통을 회전시키려면 구심력이 작용하도록 줄을 끌어 당겨야만 한다.



구심력

◆ 구심력과 관계 있는 것

- 물체의 질량
- 물체의 접선속도
- 원의 반지름

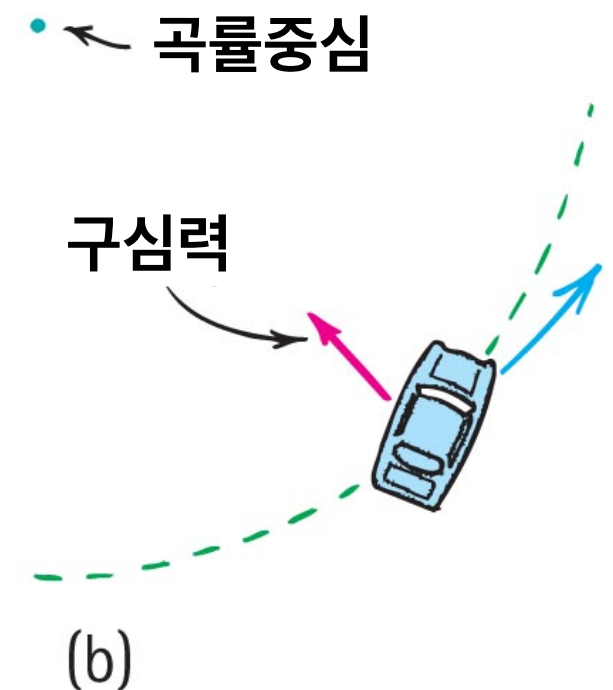
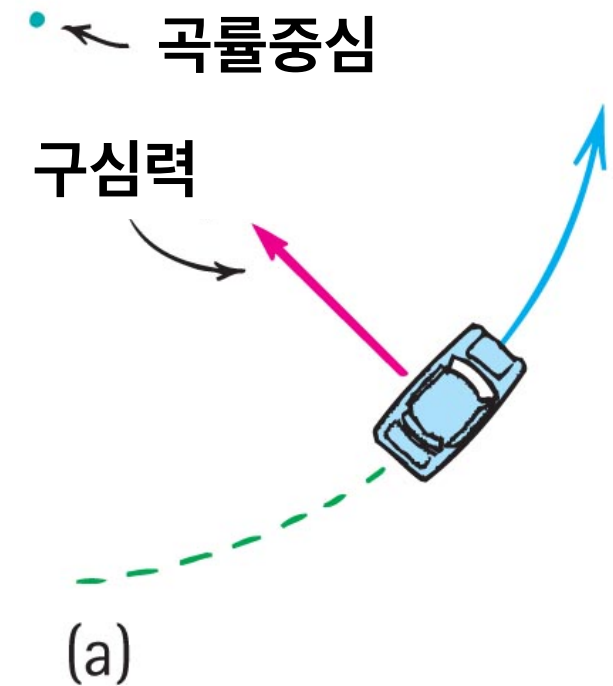
◆ 수식:

$$(\text{구심력}) = \frac{(\text{질량}) \times (\text{접선속력})^2}{(\text{반지름})}$$

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

구심력 - 예

- ◆ 자동차가 모퉁이를 돌 때, 바퀴와 도로 사이의 마찰력은 자동차가 도로를 벗어나지 않도록 하는 구심력이다.
- ◆ 도로가 젖어 있거나 자동차가 너무 빠르면, 구심력이 충분히 크지 않아서 자동차는 도로 밖으로 미끄러진다.



구심력 확인문제

자동차로 곡선도로를 돌 때 속력을 두 배로 하면, 미끄러지지 않기 위해 구심력은 전보다 얼마나 변화해야 하는가?

- A. 두 배
- B. 네 배
- C. 절반
- D. $\frac{1}{4}$

구심력 확인문제

자동차로 곡선도로를 돌 때 속력을 두 배로 하면, 미끄러지지 않기 위해 구심력은 전보다 얼마나 변화해야 하는가?

A. 두 배

B. 네 배

C. 절반

D. $\frac{1}{4}$

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

구심력 확인문제

자동차로 곡선도로를 돌 때 반지름을 절반으로 하면, 미끄러지지 않기 위해 구심력은 전보다 얼마나 변화해야 하는가?

- A. 두 배
- B. 네 배
- C. 절반
- D. $\frac{1}{4}$

구심력 확인문제

자동차로 곡선도로를 돌 때 반지름을 절반으로 하면, 미끄러지지 않기 위해 구심력은 전보다 얼마나 변화해야 하는가?

A. 두 배

B. 네 배

C. 절반

D. $\frac{1}{4}$

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

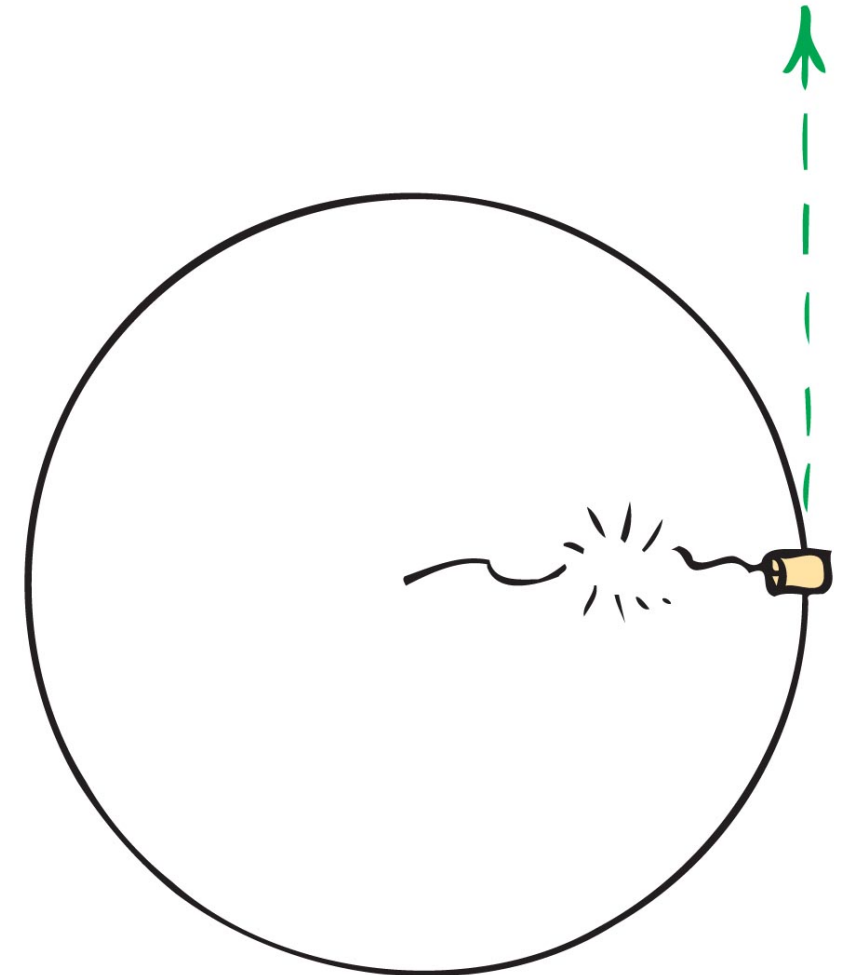
원심력(Centrifugal Force)

- ◆ 구심력이 중심을 향한 힘이라고 할 지라도 회전하고 있는 계의 내부에 있는 사람은 밖으로 향하는 힘을 경험하는 것처럼 느낀다. 이처럼 명백하게 밖을 향한 힘을 **원심력**이라고 한다.
- ◆ 원심은 “중심을 벗어나는” 혹은 “중심으로부터 멀어지는”이라는 뜻이다.

원심력

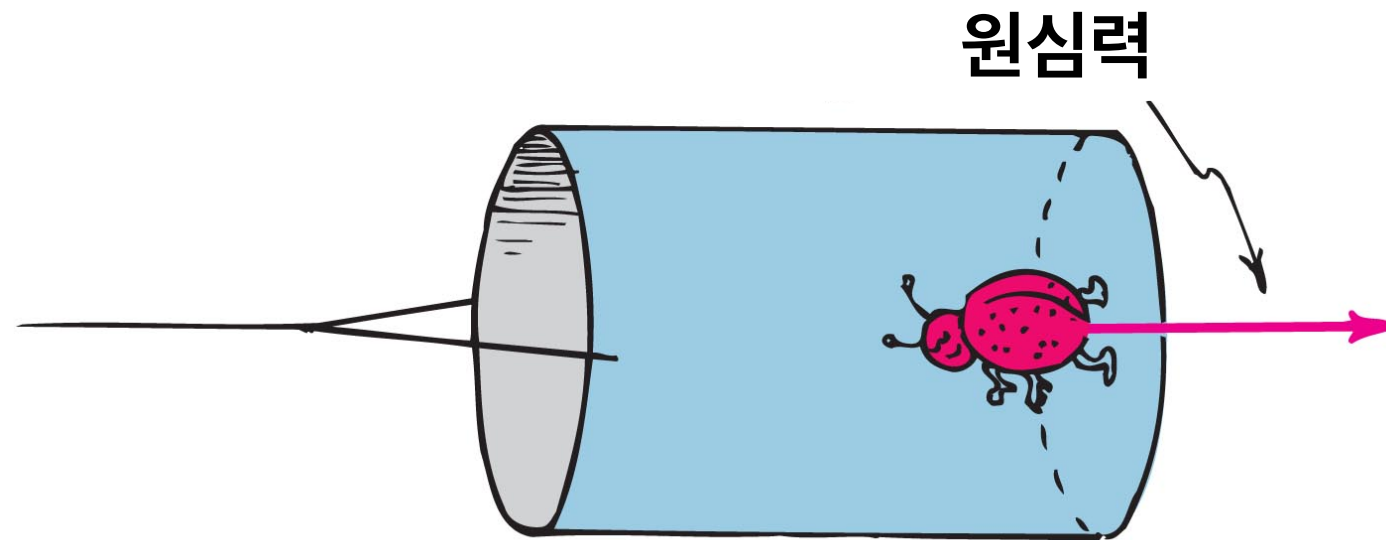
- 일반적인 오해

- ◆ 원심력이 물체를 밖으로 밀어낸다는 생각은 흔히 갖기 쉬운 잘못된 개념
- ◆ 예:
 - 그림에서 끈이 끊어지면, 물체는 지름방향 밖으로 움직이지 않는다.
 - 깡통에 작용하는 힘이 없기 때문에 원궤도의 접선 방향으로 직선운동을 한다. (뉴턴의 제1법칙)



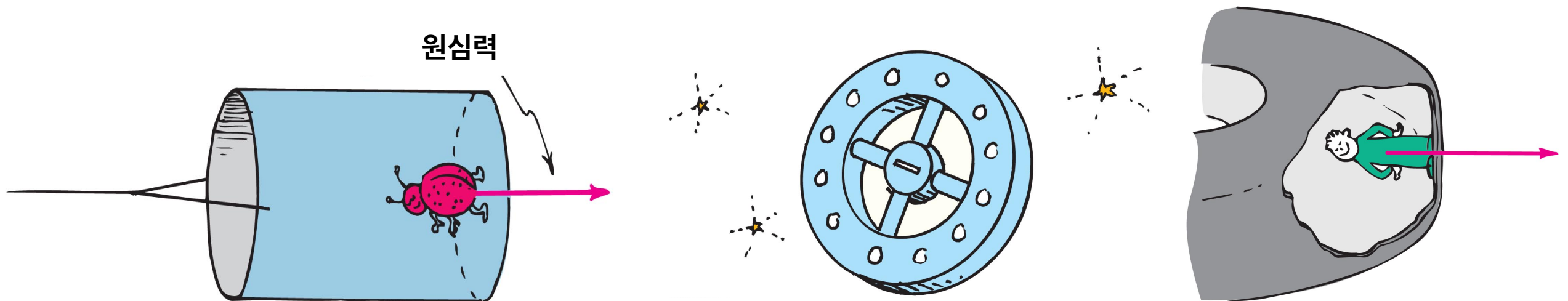
회전기준계

- ◆ 회전기준계에서 원심력은, 중력과 같이 다른 어떤 힘처럼 자신에게 작용하는 힘이다.
- ◆ 예:
 - 강통의 바닥에 있는 벌레는 강통의 바닥을 향하여 끌어당김을 겪는다.



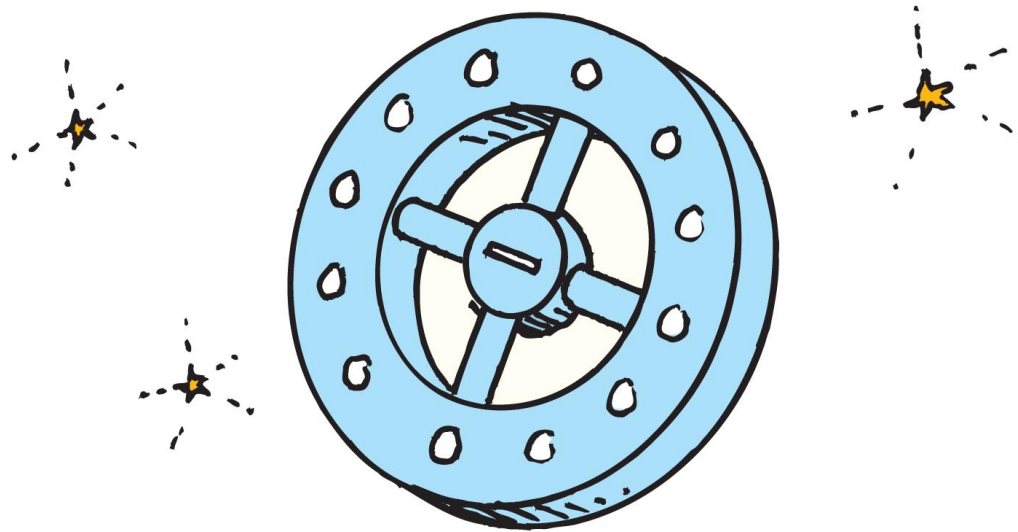
인공중력

- ◆ 미래의 우주공간에서 인공중력을 만들기 위해 원심력을 이용할 수 있다.
- ◆ 우주 정거장을 회전시킴으로써, 강통에 있는 벌레와 같이 승무원들은 원심력(인공중력)을 느끼게 된다.



인공중력

- ◆ 가속을 통해 인공중력의 크기가 중력가속도 g , 즉 10 m/s^2 가 되려면,
- ◆ 우주정거장의 반지름이 약 1 km (즉, 2 km 의 직경)일 때
- ◆ 대략 1분에 한 번 도는 속력으로 회전해야 한다.



각운동량

- ◆ 회전하는 물체가 갖는 “회전의 관성”을 **각운동량**이라고 한다.
 - 이것은 “운동의 관성”을 선운동량인 것과 같다.
- ◆ 각운동량
 - = 회전관성 \times 각속도
 - 운동량의 경우
 - 선운동량 = 질량 \times 속도

각운동량

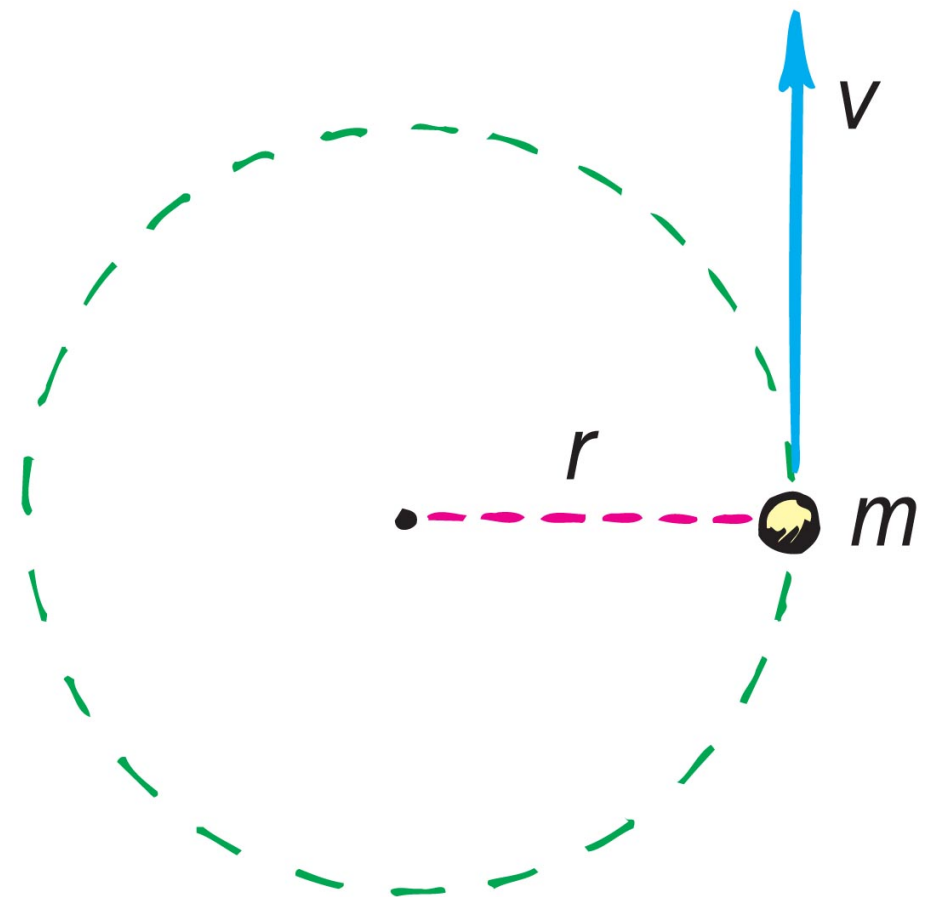
- ◆ 회전축으로부터의 거리에 비해 크기가 작은 물체인 경우,
각운동량의 크기 = 질량 x 선속력 x 반지름 ($l = mvr$)

- 선운동량과의 유사성

$$p = mv$$

- ◆ 예:

- 긴 줄에 매달려 회전하는 공
- 태양 주위를 공전하는 행성



각운동량

- ◆ 외부 알짜 돌림힘은 물체의 각운동량을 변화시킨다.
- ◆ 회전계에 대한 뉴턴의 제1법칙:
 - 외부 돌림힘이 작용하지 않으면 한 물체나 여러 물체로 이루어진 계에서 각운동량은 변하지 않는다.

각운동량 확인문제

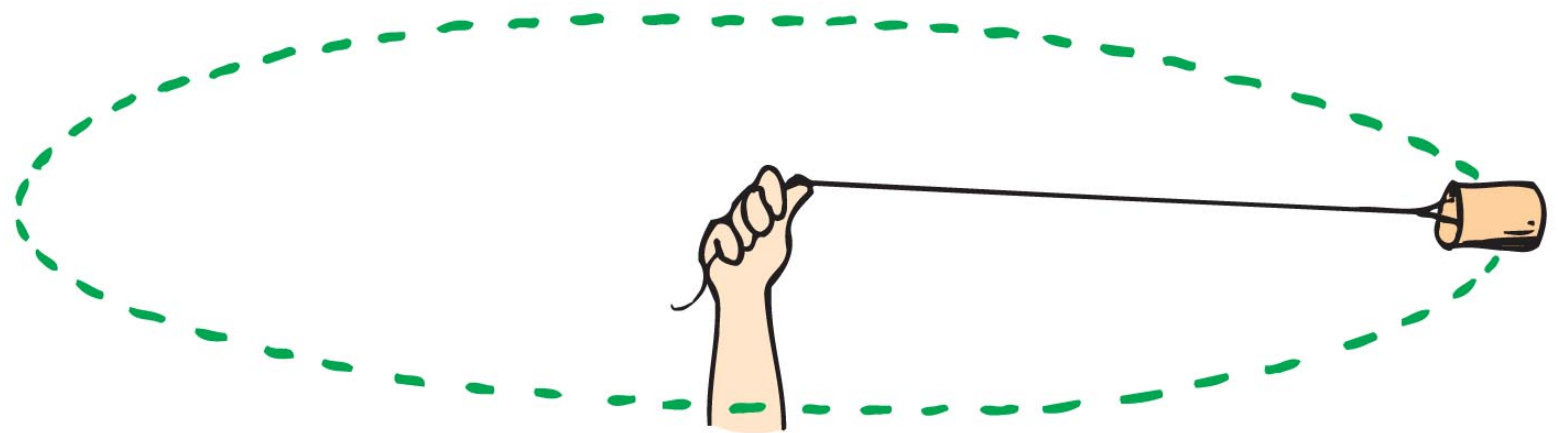
강통을 회전시키다가 갑자기 줄을 반으로 잡아당긴다. 강통의 속도는 어떻게 변하는가?

A. 2 배

B. 4 배

C. $\frac{1}{2}$

D. $\frac{1}{4}$



각운동량 확인문제

강통을 회전시키다가 갑자기 줄을 반으로 잡아당긴다. 강통의 속도는 어떻게 변하는가?

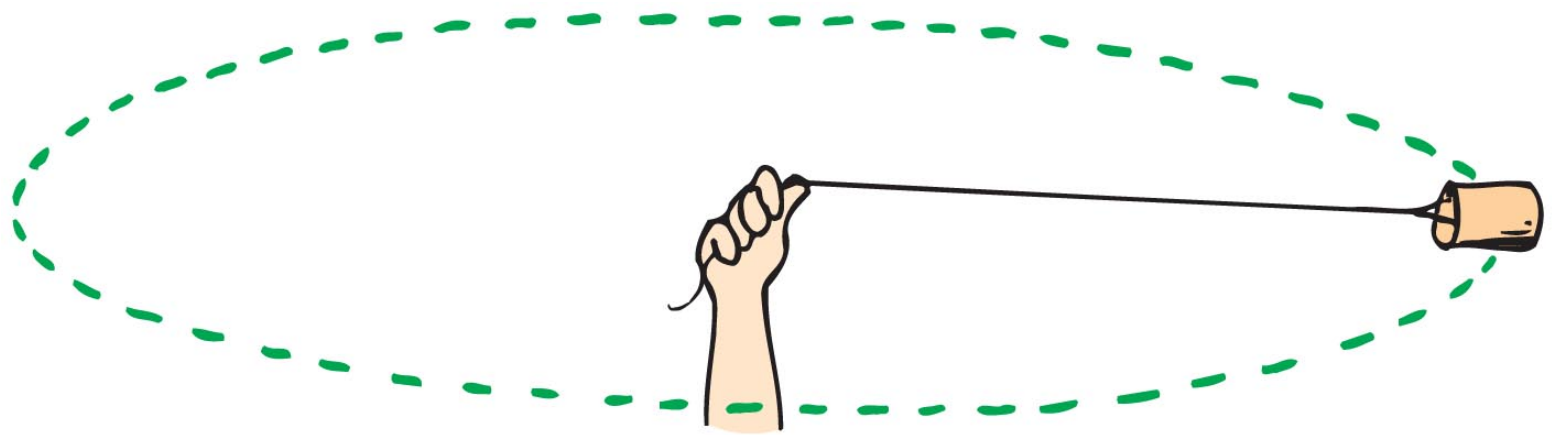
A. 2 배

B. 4 배

C. $\frac{1}{2}$

D. $\frac{1}{4}$

$$l = mvr$$



각운동량 보존

◆ 각운동량 보존 법칙:

- 회전하고 있는 계에 작용하는 외부 알짜 돌림힘이 0이면, 계의 각운동량은 일정하게 유지된다.

◆ 선운동량 보존 법칙:

- 계에 외부 힘이 작용하지 않는다면, 계의 전체 선운동량은 일정하게 유지된다.

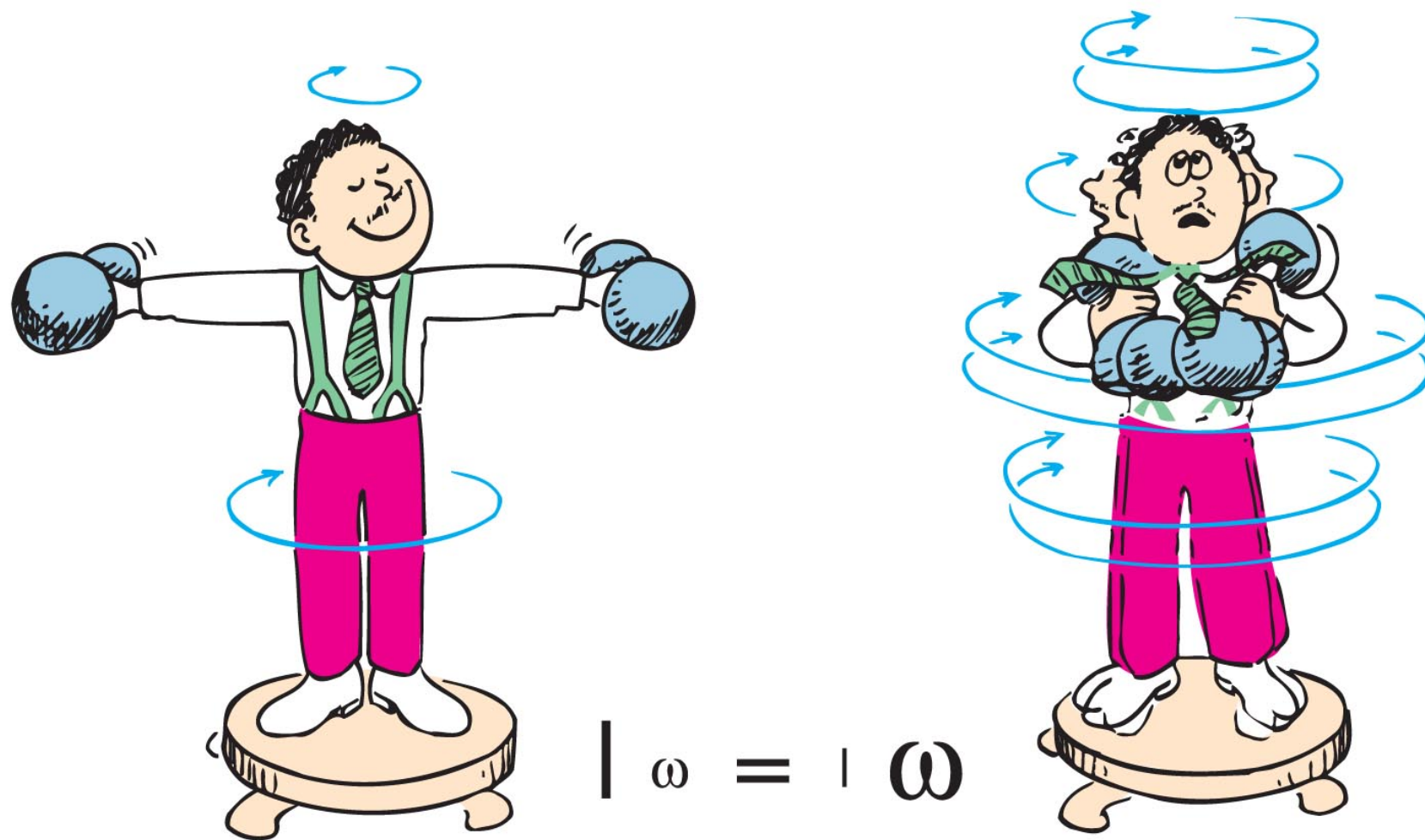
◆ 강체의 각운동량

$$L = I\omega$$

각운동량 보존

◆ 예:

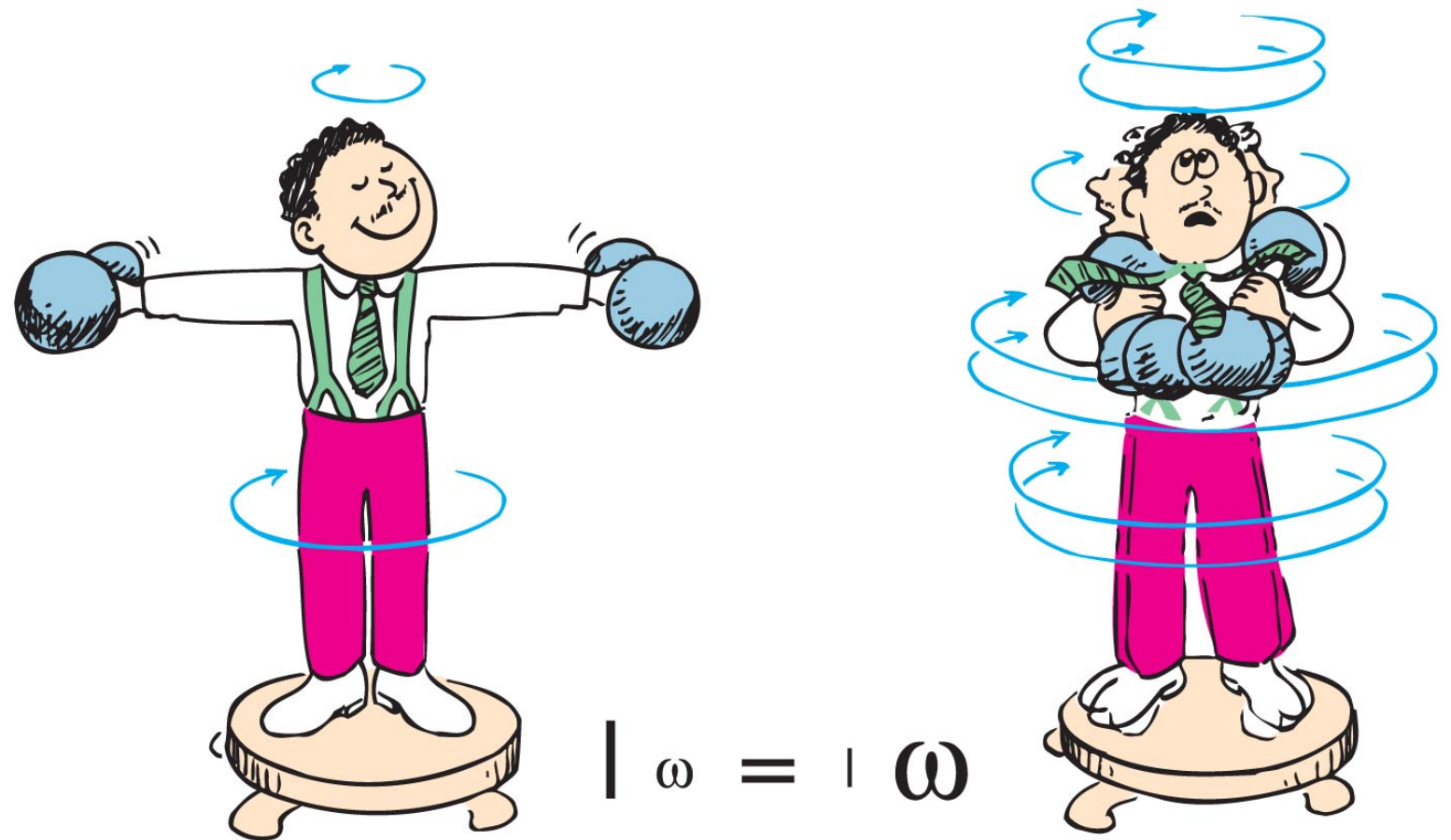
- 팔을 안으로 오므리면 회전관성(I)이 줄어들어서 회전속력(ω)은 증가한다!



각운동량 보존 확인문제

팔을 안으로 오므려서 회전관성이 절반으로 줄어든다고 하자. 각속도는 얼마나 변하는가?

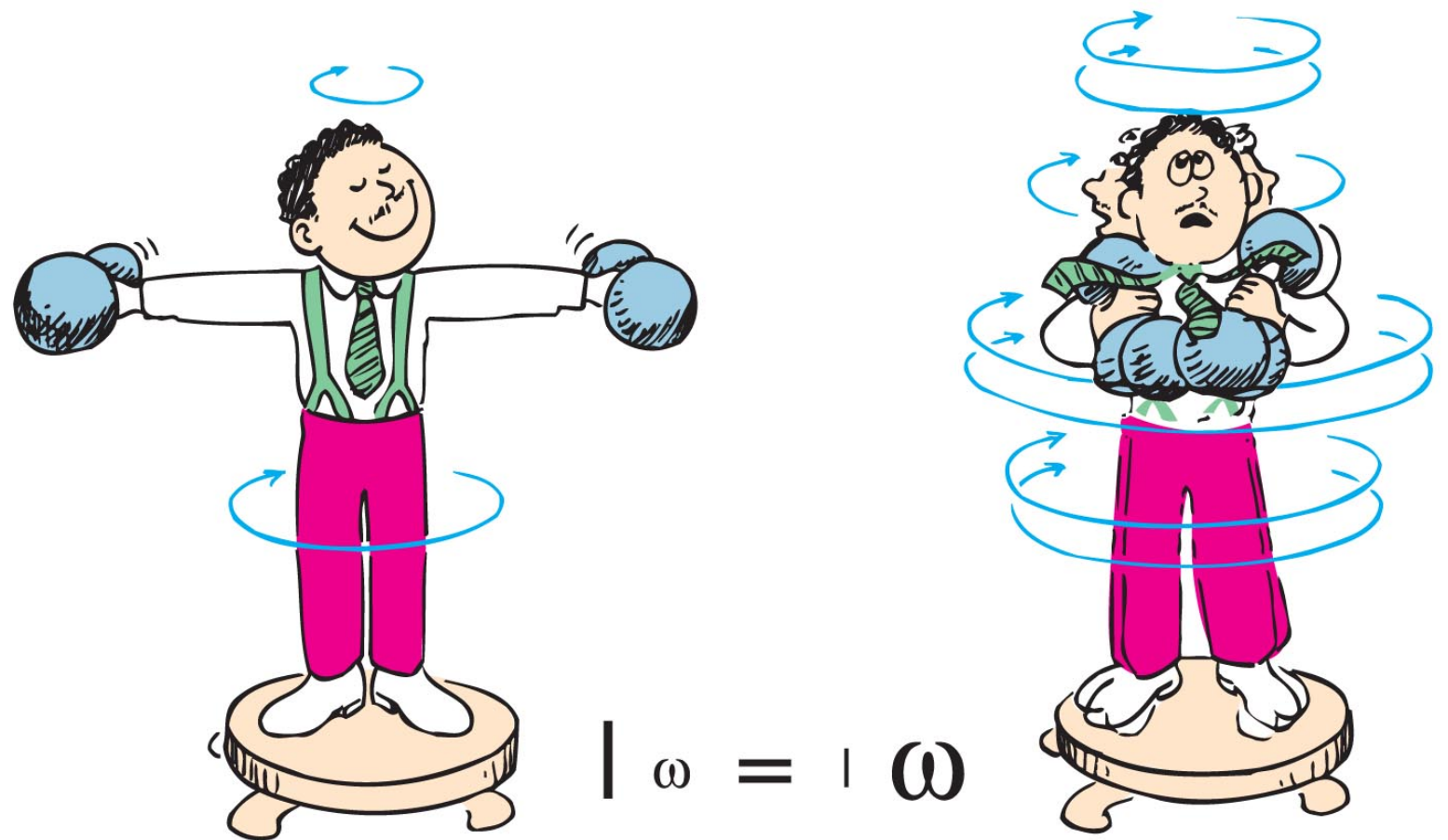
- A. 2 배
- B. 3 배
- C. $\frac{1}{2}$ 배
- D. $\frac{1}{4}$ 배



각운동량 보존 확인문제

팔을 안으로 오므려서 회전관성이 절반으로 줄어든다고 하자. 각속도는 얼마나 변하는가?

- A. 2 배
- B. 3 배
- C. $\frac{1}{2}$ 배
- D. $\frac{1}{4}$ 배



“본 강의 동영상 및 자료는 대한민국 저작권법을 준수합니다. 본 강의 동영상 및 자료는 상명대학교 재학생들의 수업목적으로 제작·배포되는 것이므로, 수업목적으로 내려받은 강의 동영상 및 자료는 수업목적 이외에 다른 용도로 사용할 수 없으며, 다른 장소 및 타인에게 복제, 전송하여 공유할 수 없습니다. 이를 위반해서 발생하는 모든 법적 책임은 행위 주체인 본인에게 있습니다.”