

[최고의 수험물리 전문가]

윤형철

# 변리사 탄탄물리

[개념+기출]

## — 06장 회전운동 —

“물리는 외우는 과목이 아니라 생각하는 과목입니다.”

세 가지 강의 철학

목차

— 성장기반 물리

(Grow-based Physics)

— 취사선택 물리

(Cut-off Strategy Physics)

— 생각하는 물리

(Thinking Physics)



물리

윤형철 교수

물리 윤형철 교수입니다.

## 약력

전남과학고등학교 졸업  
서울대학교 사범대학 물리교육과 졸업

전 대치 미래탐구  
전 대치 새움학원  
현 대치 링크물리  
현 변리사스쿨 물리 전문교수

개념 POINT

[역학 개관]

물리현상 (문제상황)	→ 물리량	물리법칙
물체의 운동 <표현>	① 시간 - 주기 ② 위치 - 각위치 ③ 변위 - 각변위 ④ 거리 ⑤ 속도 - 각속도 ⑥ 속력 - 각속력 ⑦ 가속도 - 각가속도	없음 (미적분+기하)  그래프 해석
물체의 운동 <원인>	① 질량 ② 힘/알짜 힘 ③ 돌림힘/알짜 돌림힘 ④ 회전관성	[뉴턴 운동법칙] - 제1법칙 (관성) - 제2법칙 (질량/가속도) - 제3법칙 (작용/반작용)
충돌/융합/분열(폭발) <순식간>	① 운동량/운동량 변화량 ② 충격량/충격력	① 운동량 보존법칙 ② 충격량-운동량 변화량 정리
물체의 운동 <스칼라적 접근>	① 일 ② 운동에너지 ③ 위치에너지-보존력 ④ 역학적 에너지	① 알짜일-운동에너지 변화량 정리 ② 보존력-위치에너지 관계 ③ 역학적 에너지 보존법칙

## I. 물체의 운동

### 1. 물체(body) - 역학적 구분

- (1) 질점 - 입자 (크기 무시)
- (2) 강체 - 고체 (크기 고려)
- (3) 유체 - 액체/기체 (크기 고려)

### 2. 운동(motion)

- (1) 정의  
운동이란 시간에 따라 물체의 위치가 변하는 물리현상이다.
- (2) 분류
  - 1) 병진운동 : 물체가 전체적으로 이동하는 운동(예. 자유낙하 하는 물체)
  - 2) 회전운동 : 물체가 전체적으로 이동하지 않고 고정된 한 점을 중심으로 돌아가는 운동 (예. 선풍기 날개의 운동)
  - 3) 진동운동 : 물체가 일정한 점을 중심으로 왕복하는 운동 (예. 시계추의 운동)

순수한 병진운동(고정된 방향)		순수한 회전운동(고정축)	
위치	$x$	각위치	$\theta$
속도	$v = dx/dt$	각속도	$\omega = d\theta/dt$
가속도	$a = dv/dt$	각가속도	$\alpha = d\omega/dt$
질량	$m$	회전관성	$I$
Newton의 제2법칙	$F_{\text{net}} = ma$	Newton의 제2법칙	$\tau_{\text{net}} = I\alpha$
일	$W = \int F dx$	일	$W = \int \tau d\theta$
운동에너지	$K = \frac{1}{2}mv^2$	운동에너지	$K = \frac{1}{2}I\omega^2$
일률(일정한 힘)	$P = Fv$	일률(일정한 토크)	$P = \tau\omega$
일-운동에너지 정리	$W = \Delta K$	일-운동에너지 정리	$W = \Delta K$

## II. 질점의 고정축 회전운동(표현)

### 1. 시간 - 주기 - 진동수

- (1) 시간
- (2) 주기
- (3) 진동수

### 2. 각위치

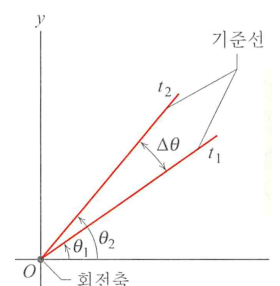
- (1) 정의 : 극좌표계에서 물체의 위치를 각으로 나타내는 물리량
- (2) 표시 :  $\theta = \frac{s}{r}$
- (3) 성격 : 벡터
  - 1) 크기 :  $|\theta|$
  - 2) 방향 : 부호 (+ : 반시계 방향 / - : 시계방향)
- (4) 단위 : rad(호도)
- (5) 적용

### 3. 각변위

- (1) 정의 : 각변위 = 나중 순간 각위치 - 처음 순간 각위치
- (2) 표시 :  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$
- (3) 성격 : 벡터 아님(주의!)
- (4) 단위 : rad(호도)
- (5) 적용

## 개념 POINT

[각위치 및 각변위]



#### 4. 각거리

#### 5. 각속도

(1) 정의 : 단위시간 당 각변위를 나타내는 물리량

(2) 종류

1) 평균 각속도 :  $\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$

2) 순간 각속도 :  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$

(3) 성격 : 벡터

1) 크기

2) 방향 : 각변위의 방향 (오른손 규칙)

(4) 단위 :  $rad/s$

(5) 적용

#### 6. 각속력

(1) 정의

(2) 종류

1) 평균 각속력 :  $|\bar{\omega}|$

2) 순간 각속력 :  $|\omega|$

(3) 성격 : 스칼라

(4) 단위 :  $rad/s$

(5) 적용

#### 7. 각가속도

(1) 정의 : 단위시간 당 각속도 변화량

(2) 종류

1) 평균 각가속도 :  $\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$

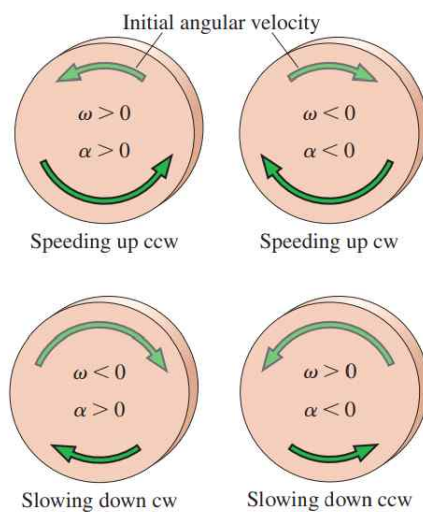
2) 순간 각가속도 :  $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$

(3) 성격 : 벡터

(4) 단위 :  $rad/s^2$

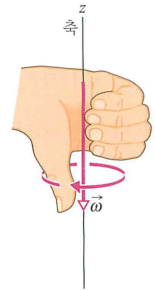
(5) 적용 :

1) 각가속도와 각속도의 관계



#### 개념 POINT

[각속도의 방향]



2) 등각가속도 운동

등가속도 직선운동 (병진운동)	등각가속도 운동 (고정축 회전운동)
$v = v_0 + at$	$\omega = \omega_0 + \alpha t$
$\Delta s = s - s_0 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$	$\Delta \theta = \theta - \theta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$
$2a\Delta s = v^2 - v_0^2$	$2\alpha\Delta \theta = \omega^2 - \omega_0^2$
$\bar{v} = \frac{v + v_0}{2} = v _{\frac{t}{2}}$	$\bar{\omega} = \frac{\omega + \omega_0}{2} = \omega _{\frac{t}{2}}$
$\Delta s = \bar{v}t = v _{\frac{t}{2}}t$	$\Delta \theta = \bar{\omega}t = \omega _{\frac{t}{2}}t$

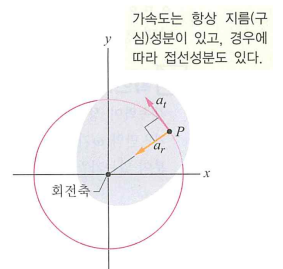
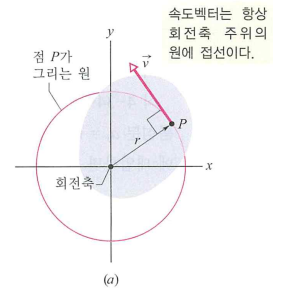
8. 선변수와 각변수의 관계

(1)  $s = r\theta$

(2) 접선속도  $v_t = r\omega$

(3) 접선방향 가속도  $a_t = r\alpha$ , 지름방향 가속도  $a_r = \frac{v_t^2}{r} = r\omega^2$

개념 POINT



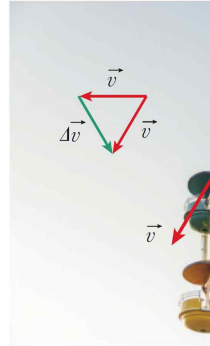
### III. 등속(력)원운동

#### 개념 POINT

#### 1. 등속 원운동

회전하는 관람차를 보면 각각의 관람차가 원을 그리면서 일정한 속력으로 회전하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 물체가 반지름이 일정한 원둘레를 따라 일정한 속력으로 회전하는 운동을 등속 원운동이라고 한다.

등속 원운동을 하는 물체의 운동 방향은 원 궤도의 접선 방향이므로, 등속 원운동은 속도의 크기는 일정하지만 방향이 계속해서 변하는 가속도 운동이다. 등속 원운동을 분석할 때는 주기, 진동수, 각속도 등을 이용하면 편리하다.



##### (1) 주기( $T$ )

물체가 원둘레를 한 바퀴 도는 데 걸리는 시간을 주기라고 한다. 물체가 반지름  $r$ 인 원둘레를 따라 속력  $v$ 로 등속 원운동을 할 때 주기  $T$ 는 다음과 같다.

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad (\text{단위: s})$$

##### (2) 진동수( $f$ )

단위 시간(1초) 동안에 물체가 회전하는 횟수를 진동수라고 하고, 단위는 Hz(헤르츠)를 사용한다. 진동수  $f$ 와 주기  $T$  사이에는 다음과 같이 역수 관계가 성립한다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r} \quad (\text{단위: Hz, } 1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1})$$

##### (3) 등속 원운동의 속력

물체가 등속 원운동을 할 때 물체의 속력은 일정하지만 물체의 운동 방향은 원의 접선 방향으로 계속 변하므로 속도  $\vec{v}$ 는 일정하지 않고 계속 변한다. 물체가 반지름이  $r$ 인 원둘레를 일정한 속력  $v$ 로 한 바퀴 도는 데 주기  $T$ 만큼 시간이 걸렸다면, 물체의 속력  $v$ 는 다음과 같다.

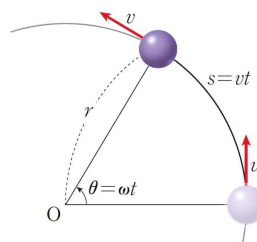
$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (\text{단위: m/s})$$

(4) 각속도( $\omega$ ): 등속 원운동을 하는 물체가 얼마나 빠르게 회전하는지는 단위 시간 동안 회전한 각도로 나타낼 수 있으며, 이 값을 각속도라고 한다. 물체가 시간  $t$  동안에 각  $\theta$ (rad)만큼 회전하였을 때 각속도  $\omega$ 는 다음과 같다.

$$\omega = \frac{\theta}{t} \quad (\text{단위: rad/s})$$

물체는 주기  $T$  동안에  $360^\circ$ , 즉  $2\pi$ (rad)만큼 회전하므로 각속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (\text{단위: rad/s})$$



▲ 각 ( $\theta$ )과 각속도( $\omega$ )의 관계

## 2. 등속 원운동의 이동 거리와 속도, 가속도

집중 분석 84쪽

(1) **이동 거리( $s$ ):** 속력  $v$ 로 등속 원운동을 하는 물체가 시간  $t$  동안 각  $\theta(\text{rad})$ 만큼 회전하면,  $\text{rad}$  단위의 정의에 의해 물체가 원둘레를 따라 이동한 거리  $s$ (호의 길이)는 다음과 같다.

$$s = vt = r\theta \quad (\text{단위: m})$$

(2) **속도( $\vec{v}$ ):** 등속 원운동을 하는 물체의 속력은 일정하고, 위 식에서  $s = r\theta$ 이므로, 등속 원운동을 하는 물체의 속도  $\vec{v}$ 의 크기는 다음과 같다.

$$v = \frac{s}{t} = \frac{r\theta}{t} = r\omega \quad (\text{단위: m/s})$$

• 속도의 방향은 그 지점에서 원의 접선 방향이다.

(3) **등속 원운동의 속도 변화량:** 오른쪽 그림 (가)와 같이 등속 원운동을 하는 물체가 시간  $\Delta t$  동안 P에서 Q로 이동하였다면, 속도 변화량은

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$$

이다. 그림 (나)와 같이 속도  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 를 평행 이동시켜 출발점(C)이 일치하도록 하여  $\triangle ABC$ 를 그리면  $\overline{AB}$ 의 길이가 속도 변화량  $\Delta \vec{v}$ 의 크기이다.

그림 (가)와 (나)에서  $\triangle PQO$ 와  $\triangle ABC$ 를 비교해보면 중심각  $\angle POQ = \angle ACB = \Delta\theta$ 이다. 등속 원운동이므로  $\vec{v}_1$ 과  $\vec{v}_2$ 의 크기를 모두  $v$ 라고 하면, 선분  $\overline{OP} = \overline{OQ} = r$ ,  $\overline{AC} = \overline{BC} = v$ 이고,  $\triangle POQ$ 와  $\triangle ACB$ 는 닮은꼴이므로 다음과 같다.

$$\frac{\Delta l}{r} = \frac{|\Delta \vec{v}|}{v}$$

이때  $\Delta t$ 를 매우 짧게 하면 현  $\overline{PQ}$ 를 호  $\widehat{PQ}$ 로 근사할 수 있고,  $\overline{PQ} = \widehat{PQ} = v\Delta t$ 가 되므로 속도 변화량의 크기  $|\Delta \vec{v}|$ 는 다음과 같다.

$$\frac{v\Delta t}{r} = \frac{|\Delta \vec{v}|}{v} \Rightarrow |\Delta \vec{v}| = \frac{v^2}{r}\Delta t$$

### (4) 구심 가속도

① **구심 가속도:** 가속도  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ 이므로 등속 원운동의 가속도 크기  $|\vec{a}| = a$ 는 다음과 같다.

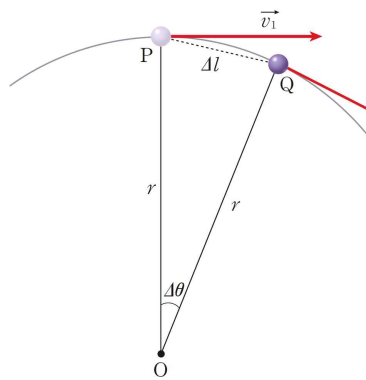
$$a = \frac{|\Delta \vec{v}|}{\Delta t} = \frac{v^2}{r} = r\omega^2 = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = v\omega$$

또, 가속도  $\vec{a}$ 의 방향은  $\Delta \vec{v}$ 의 방향과 같고,  $\Delta\theta$ 를 매우 작게 하면  $\Delta \vec{v}$ 는  $\vec{v}_1$ 이나  $\vec{v}_2$ 와 거의 직각을 이루게 되어 순간 가속도의 방향은 원의 중심을 향한다. 따라서 등속 원운동에서의 가속도는 항상 원의 중심을 향하므로, 이를 구심 가속도라고 한다.

② **구심 가속도의 방향과 크기:** 등속 원운동의 구심 가속도  $\vec{a}$ 는 방향이 항상 원의 중심을 향하고, 그 크기  $a$ 는 다음과 같다.

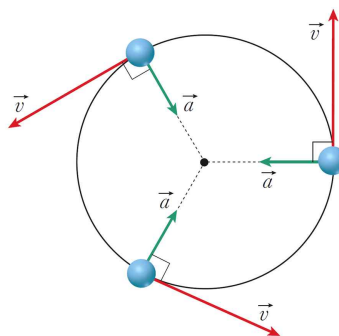
$$a = \frac{v^2}{r} = r\omega^2 = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = v\omega \quad (\text{단위: m/s}^2)$$

③ 등속 원운동에서 구심 가속도의 크기는 일정하지만 가속도의 방향이 원 궤도의 중심을 향하여 계속 변화하므로, 등속 원운동은 등가속도 운동이 아니다.



(가) 위치의 변화

▲ 등속 원운동의 위치와 속도의 변화



▲ 구심 가속도

개념 POINT



### 3. 구심력

심화 86쪽

개념 POINT

#### (1) 등속 원운동의 알짜힘

① 구심력: 물체에 작용하는 알짜힘은 질량과 가속도의 곱이므로, 등속 원운동을 하는 물체에 작용하는 알짜힘은 구심 가속도와 같이 항상 원의 중심을 향한다. 따라서 이를 구심력이라고 한다.

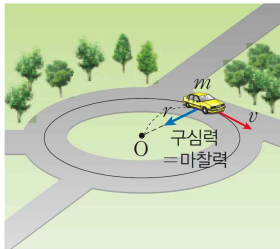
② 구심력의 크기: 뉴턴 운동 제2법칙에 의해 반지름이  $r$ 인 원 궤도를 일정한 속력  $v$ 로 회전하는 질량  $m$ 인 물체에 작용하는 구심력의 크기  $F$ 는 다음과 같다.

$$F = ma = m \frac{v^2}{r} = mr\omega^2 = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$$

③ 구심력은 크기는 일정해도 방향이 계속 변하므로, 힘이 일정한 것이 아니다.

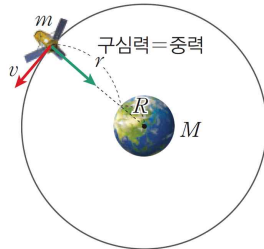
#### (2) 구심력과 운동 방향

등속 원운동을 하는 물체의 운동 방향은 원의 접선 방향이고, 구심력은 원의 중심 방향이므로, 운동 방향과 구심력의 방향은 항상 서로 수직이다. 즉, 일정한 크기의 힘이 항상 운동 방향에 수직인 방향으로 작용하면, 이 힘이 구심력이 되어 물체는 등속 원운동을 하게 된다.



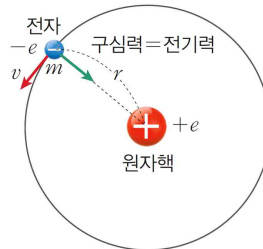
(가) 마찰력 수평면에서 자동차가 등속 원운동을 할 때 지면과 타이어 사이의 마찰력이 구심력이 된다.

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



(나) 중력 인공위성이 지구 주위를 등속 원운동을 할 때 중력이 구심력의 역할을 한다.

$$F = \frac{mv^2}{(R+r)} = G \frac{Mm}{(R+r)^2}$$



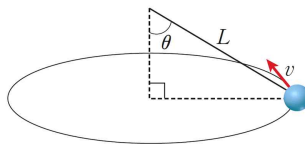
(다) 전기력 원자핵 주위를 도는 전자의 운동은 전기력이 구심력의 역할을 한다.

$$F = \frac{mv^2}{r} = -k \frac{e^2}{r^2}$$

#### ▲ 여러 가지 등속 원운동의 구심력

#### 예제

그림은 길이가  $L$ 인 줄로 회전축에 매달려 일정한 속력  $v$ 로 원운동을 하는 물체를 나타낸 것이다. 줄이 연직 방향과 이루는 각은  $\theta$ 이다. (단, 줄의 질량과 공기 저항은 무시한다.)



(1) 회전 반지름과 회전 주기를 각각 구하시오.

(2) 각속도의 크기를 구하시오.

(3) 가속도의 크기를 구하시오.

**해설** (1) 물체가 회전하는 원의 회전 반지름  $r = L \sin \theta$ 이다. 원둘레  $2\pi r = 2\pi L \sin \theta$ 를  $v$ 의 속력으로 회전하므로 주기  $T = \frac{2\pi L \sin \theta}{v}$ 이다.

(2) 각속도의 크기  $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{v}{L \sin \theta}$ 이다.

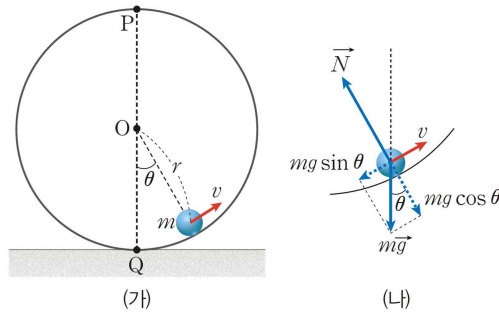
(3) 가속도의 크기  $a = \frac{v^2}{r} = \frac{v^2}{L \sin \theta}$ 이다.

**정답** (1) 회전 반지름:  $L \sin \theta$ , 회전 주기:  $\frac{2\pi L \sin \theta}{v}$  (2)  $\frac{v}{L \sin \theta}$  (3)  $\frac{v^2}{L \sin \theta}$

## IV. 연직 원운동(부등속 원운동)

### 1 연직면에서의 원운동

그림 (가)는 롤러코스터와 같이 연직면으로 놓인 반지름이  $r$ 인 원 궤도를 따라 운동하는 질량이  $m$ 인 물체를 나타낸 것이고, (나)는 물체가 최하점 Q로부터  $\theta$ 만큼 회전한 지점을 지날 때 물체에 작용하는 중력  $m\vec{g}$ 와 궤도가 물체를 떠받치는 수직 항력  $\vec{N}$ 을 나타낸 것이다.



어느 순간 물체가  $v$ 의 속력으로 원 궤도를 따라 운동하려면 원의 중심 방향으로 구심력  $\frac{mv^2}{r}$ 이 작용해야 한다. 따라서 물체가 받는 수직 항력의 크기는 다음과 같다.

$$N - mg \cos \theta = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow N = mg \cos \theta + \frac{mv^2}{r}$$

이것은 물체가 받는 수직 항력이 중력의 원 궤도에 수직인 성분보다 크다는 것을 의미한다.

### 2 최고점과 최하점에서의 속력

물체가 최고점 P를 지날 때 속력이 느려서 구심력이 중력보다 작으면 물체는 원운동을 계속하지 못하고 포물선을 그리며 떨어지게 된다. 물체가 원운동을 계속하려면,  $F = \frac{mv^2}{r} \geq mg$ 가 되어야 하므로, P에서의 최소 속력  $v_0$ 은 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{mv_0^2}{r} = mg \dots\dots ①$$

물체가 P에서 Q로 높이  $2r$ 만큼 내려가는 동안 역학적 에너지는 보존되므로 물체의 운동 에너지는  $2mgr$ 만큼 증가한다. 식 ①에서  $mgr = mv_0^2$ 이므로, Q에서의 속력  $v_1$ 은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 + 2mgr \Rightarrow \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{5}{2}mv_0^2 \Rightarrow v_1 = \sqrt{5}v_0$$

- 최하점 Q에서 물체에 작용하는 구심력:  $F_1 = \frac{mv_1^2}{r} = \frac{5mv_0^2}{r} = 5mg$
- 최하점 Q에서 궤도가 물체에 작용하는 수직 항력:  $N_1 = \frac{5mv_0^2}{r} + mg = 6mg$

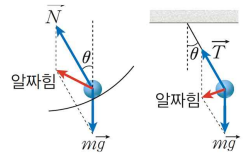
한편, 최하점 Q에서  $\theta$ 만큼 회전한 지점은 최고점과의 높이차가  $r(1 + \cos \theta)$ 이므로 이때의 속력  $v$ 는 다음과 같다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 + mgr(1 + \cos \theta) \Rightarrow v = \sqrt{3 + 2\cos \theta} v_0$$

### 개념 POINT

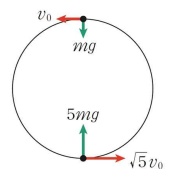
#### 알짜힘의 방향

연직면으로 놓인 원 궤도를 따라 중력에 의해 운동하는 물체에 작용하는 알짜힘의 방향은 중력과 수직 항력의 합력 방향이고, 줄에 매달린 물체에 작용하는 알짜힘의 방향은 중력과 장력의 합력 방향이다.



#### 롤러코스터의 최하점에서 느끼는 중력

최고점에서 최소한의 속력으로 회전할 때 최하점에서는 느끼는 중력의 크기는 정지했을 때의 6배이다.



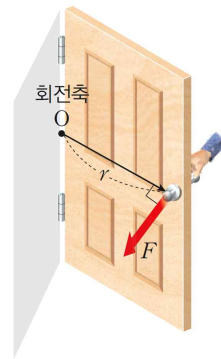
## V. 돌림힘(Torque, 토크)

개념 POINT

여닫이문의 손잡이가 경첩에서 멀리 떨어진 곳에 있는 것은 까닭이 있다. 무거운 문을 회전 시켜 열기 위해서는 문에 작용하는 힘뿐만 아니라 힘을 작용하는 위치도 중요하기 때문이다. 이처럼 물체의 회전 운동을 나타낼 때는 힘 대신 힘과 거리를 포함하는 다른 물리량으로 기술하는 것이 편리하다.

### 1. 돌림힘

여닫이문을 여닫을 때와 같이 회전축에서 일정한 거리만큼 떨어진 지점에 힘을 작용하면 물체가 회전축을 중심으로 회전한다. 이처럼 물체의 회전 운동을 변화시키는 원인이 되는 물리량을 돌림힘 또는 토크(torque)라고 하며, 돌림힘은 크기와 방향을 가지는 벡터량이다.



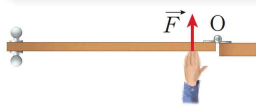
▲ 여닫이문의 회전 원리

#### (1) 돌림힘의 크기

##### ① 힘의 크기, 팔의 길이와 돌림힘의 크기 관계

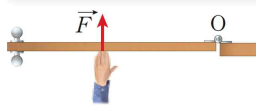
여닫이문의 손잡이를 잡고 문을 열 때처럼 힘을 작용하는 지점이 같다면 큰 힘을 가할수록 문이 더 잘 돌아간다. 한편, 문을 동일한 크기의 힘으로 수직으로 밀더라도 회전축 O에서 멀리 떨어진 지점을 밀수록 문이 더 잘 돌아간다. 이처럼 돌림힘의 크기는 작용하는 힘이 클수록 크고, 힘을 작용한 지점이 회전축에서 멀수록 크다.

회전축에 가까운 지점을 밀 때



돌림힘이 가장 작다.

가운데 지점을 밀 때



돌림힘이 커진다.

회전축에서 가장 먼 지점을 밀 때



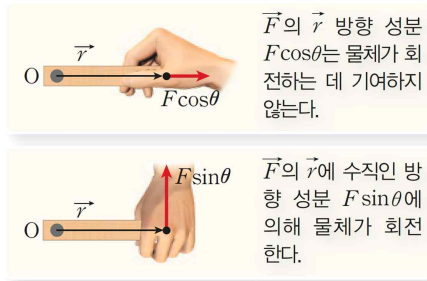
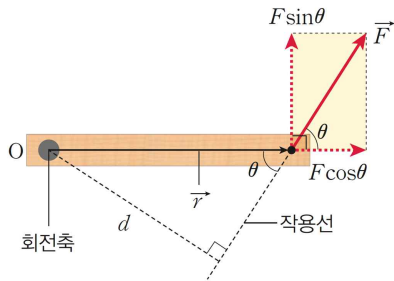
돌림힘이 가장 크다.

#### ▲ 회전축에서의 거리와 돌림힘의 크기

즉, 회전축에서 팔의 길이  $r$ 만큼 떨어진 지점에 크기가  $F$ 인 힘이 수직으로 작용할 때, 돌림힘의 크기  $\tau$ 는 다음과 같이 팔의 길이  $r$ 와 회전 팔에 수직으로 작용한 힘의 크기  $F$ 의 곱으로 나타낸다.

$$\tau = rF \text{ (단위: N} \cdot \text{m)}$$

② 힘의 방향과 돌림힘의 크기 관계: 다음 그림과 같이 어떤 물체에 회전축 O에서  $\vec{r}$ 만큼 떨어진 지점에  $\vec{F}$ 와  $\theta$ 의 각으로 힘  $\vec{F}$ 가 작용하는 경우를 생각해 보자. 이때  $\vec{F}$ 를  $\vec{r}$  방향과  $\vec{r}$ 에 수직인 방향으로 분해하면,  $\vec{r}$  방향의 힘의 성분  $F\cos\theta$ 는 물체의 회전에 기여하지 않는다. 즉, 물체의 회전에 기여하는 것은  $\vec{r}$  방향에 수직인 힘의 성분  $F\sin\theta$ 임을 알 수 있다.



#### ▲ $\vec{r}$ 와 $\vec{F}$ 가 수직이 아닐 때 돌림힘의 크기

따라서 어떤 물체에 회전축 O에서  $r$ 만큼 떨어진 지점에  $\vec{r}$ 와  $\theta$ 의 각으로 크기가  $F$ 인 힘이 작용할 때 돌림힘의 크기  $\tau$ 는 다음과 같다.

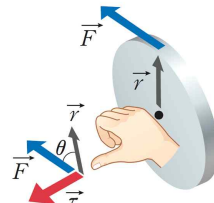
$$\tau = rF\sin\theta \quad (\text{단위: N} \cdot \text{m})$$

여기서  $r\sin\theta = d$ 는  $\vec{F}$ 의 작용선과 물체의 회전축 사이의 수직 거리로, 이를 돌림힘의 팔 길이라고 한다.

#### (2) 돌림힘의 방향

돌림힘은 벡터량으로 크기와 함께 방향을 가진다. 그림과 같이 오른손의 네 손가락을  $\vec{r}$ 에서 작은 각도로  $\vec{F}$ 의 방향을 향하도록 감아줄 때 엄지손가락이 향하는 방향을 돌림힘의 방향으로 정의한다.

- ① 힘의 방향이 반대가 되면, 돌림힘의 방향도 반대가 된다.
- ② 하나의 회전축에 의한 회전만을 생각할 때는 회전 방향이 두 가지이므로, 하나의 돌림힘의 방향을 (+)로 나타내면, 반대 방향의 돌림힘은 (-)로 나타낼 수 있다.

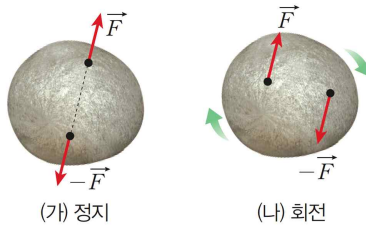


▲ 돌림힘의 방향

#### 개념 POINT

## 2. 돌림힘의 평형

정지해 있는 물체에 크기가 같은 두 힘이 서로 반대 방향으로 작용하면, 두 힘은 평형을 이루어 물체의 위치는 변하지 않는다. 그러나 크기가 있는 물체의 경우 힘의 작용점의 위치에 따라 그림 (가)와 같이 물체가 정지해 있을 때도 있고, (나)와 같이 물체가 회전할 때도 있다. 이때 (나)의 물체가 회전한 까닭은 두 힘에 의해 알짜 돌림힘이 생겼기 때문이다.



▲ 돌림힘의 평형과 회전 운동

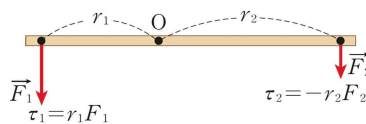
### (1) 돌림힘의 평형

물체에 힘이 작용하는데 물체가 회전하지 않거나 일정한 각속도로 회전한다면, 돌림힘이 평형을 이룬다고 한다. 이처럼 물체가 회전 운동에 대해 평형을 이루기 위해서는 임의의 어느 점을 회전축으로 하여도 돌림힘의 합이 0이 되어야 한다. 돌림힘의 합을 구할 때는 돌림힘의 방향에 따라 (+), (-)를 붙여 계산한다.

$$\sum \vec{\tau}_i = \vec{\tau}_1 + \vec{\tau}_2 + \vec{\tau}_3 + \dots = 0$$

### (2) 두 돌림힘의 평형

오른쪽 그림과 같이 O점을 축으로 회전할 수 있는 막대에 두 힘  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$ 가 수직으로 작용하여 막대가 정지해 있다면, 두 힘에 의한 돌림힘이 평형을 이루므로 다음 관계가 성립한다.

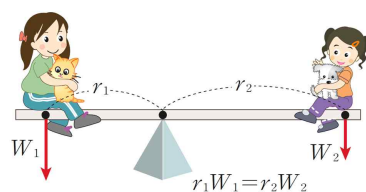


▲ 두 돌림힘의 평형

$$\vec{\tau} = \vec{\tau}_1 + \vec{\tau}_2 = r_1 F_1 + (-r_2 F_2) = 0 \Rightarrow r_1 F_1 = r_2 F_2$$

### (3) 시소에서 돌림힘의 평형

오른쪽 그림과 같이 시소를 타는 두 사람의 몸무게가 다를 때 시소 중심에서 두 사람이 앉는 자리까지의 거리가 몸무게에 반비례하도록 앉아야 돌림힘이 평형을 이루어 시소를 제대로 탈 수 있다. 즉, 몸무게가 무거운 사람이 회전축에 가깝게 앉아야 한다.



▲ 시소에서 돌림힘의 평형

## 3. 역학적 평형의 조건

물체에 여러 힘이 작용하지만 물체의 병진 운동 상태와 회전 운동 상태가 모두 변하지 않을 때 역학적 평형을 이룬다고 한다. 물체가 역학적 평형을 이루려면 다음의 두 조건을 동시에 만족해야 한다.

- 물체에 작용하는 모든 힘의 합력이 0이 되어야 한다.

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = \sum \vec{F}_i = 0 \text{ (병진 운동에 대한 평형)}$$

- 물체에 작용한 힘의 임의의 점에 대한 돌림힘의 합이 0이 되어야 한다.

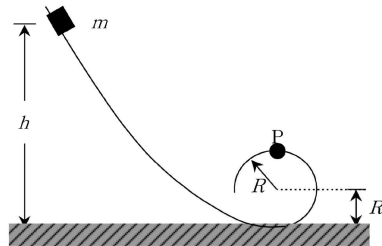
$$\vec{\tau}_1 + \vec{\tau}_2 + \vec{\tau}_3 + \dots = \sum \vec{\tau}_i = 0 \text{ (회전 운동에 대한 평형)}$$

■ 변리사 기출문제

개념 POINT

1. [2005년 변리사] (중)

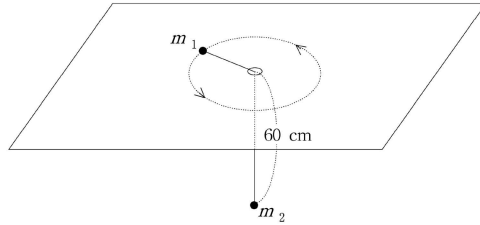
질량이  $m$ 인 작은 물체를 그림과 같이 높이  $h$ 에 정지시켰다가 살며시 놓았더니 궤도를 따라 미끄러져 갔다. 물체가 반지름  $R$ 인 원형 궤도의 꼭대기(점P)에서 궤도를 떠나지 않고 회전하게 하려면 높이는 최소한 얼마이어야 하는가? (단, 물체와 궤도 사이에는 마찰이 없다고 가정한다.)<sup>1)</sup>



- ①  $2R$       ②  $\frac{5}{2}R$       ③  $3R$       ④  $\frac{7}{2}R$       ⑤  $4R$

2. [2007년 변리사] 등속원운동

마찰이 없고 두께를 무시할 수 있는 수평테이블에 작은 구멍을 뚫고 길이가  $100\text{cm}$ 인 늘어나지 않는 실을 통과시킨 후, 그림과 같이 양 끝에 질량이 각각  $m_1$ 과  $m_2$ 인 두 질점을 연결하였다. 질점  $m_1$ 은 테이블 위에서 원운동하고, 질점  $m_2$ 는 테이블 아래 지점에 정지한 채로 있다. 원운동하는 질점의 속력은 얼마인가? (단,  $m_2 = 4m_1$ 이고, 실의 질량과 구멍의 지름은 무시하며, 중력가속도는  $10\text{m/s}^2$ 로 한다.)<sup>2)</sup>

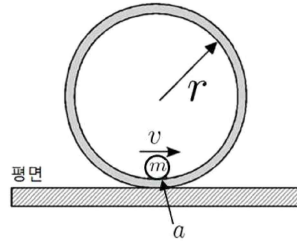


- ①  $2\text{m/s}$       ②  $4\text{m/s}$       ③  $6\text{m/s}$       ④  $8\text{m/s}$       ⑤  $10\text{m/s}$

개념 POINT

3. [2012년 변리사] (하)

평면 위에 수직으로 고정된 반지름이  $r$ 인 원형 궤도를 따라 움직이는 질량  $m$ 인 물체가 있다. 이 물체가 원형궤도를 따라 돌기 위해 필요한 제일 낮은 위치  $a$ 지점에서의 최소 속력  $v$ 는 얼마인가? (단,  $g$ 는 중력가속도이고, 물체와 원형 궤도 간의 마찰은 무시한다. 물체는 질점으로 가정한다.)<sup>3)</sup>



- ①  $\sqrt{gr}$       ②  $\sqrt{\frac{3}{2}gr}$       ③  $\sqrt{\frac{5}{2}gr}$       ④  $\sqrt{3gr}$       ⑤  $\sqrt{5gr}$

개념 POINT



4. [2013년 변리사] (중)

질량  $20kg$ 인 물체가 길이  $3.0m$ 인 늘어나지 않는 강체 줄에 연결되어 단진자 운동을 하고 있다. 이 물체가 가장 낮은 위치를 통과할 때, 줄의 장력이  $260N$ 이다. 이 물체가 운동하는 최고 점과 최저점의 높이( $m$ ) 차이는? (단, 공기의 마찰력과 줄의 질량은 무시하고, 중력가속도 크기는  $10m/s^2$ 이다.)<sup>4)</sup>

① 0.20

② 0.31

③ 0.45

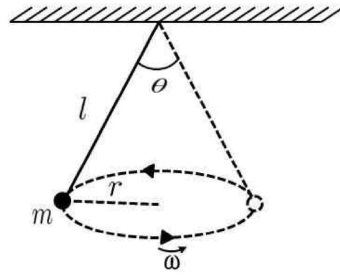
④ 0.62

⑤ 0.80

개념 POINT

5. [2014년 변리사] (상) 원뿔진자

그림과 같이 질량이  $m$ 인 입자가 일정한 길이  $l$ 인 줄에 매달려 회전하고 있다. 회전 반지름은  $r$ 이고 각속도는  $\omega$ 이다.



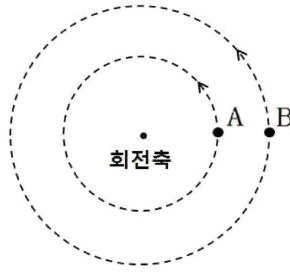
이때 줄에 가해지는 장력은? (단,  $g$ 는 중력가속도이다.)<sup>5)</sup>

- ①  $mg\left(\frac{l}{r}\right)$       ②  $mg\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$       ③  $\frac{m\omega r^2}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$
- ④  $\frac{m\omega^4 r^2}{\sqrt{\omega^4 r^2 + g^2}}$       ⑤  $m\sqrt{\omega^4 r^2 + g^2}$

개념 POINT

6. [2016년 변리사] 등속원운동

그림과 같이 질량이 같은 물체 A와 B가 수평면상에서 회전축을 중심으로 동일한 속도로 원운동을 하고 있다. B가 A보다 큰 물리량만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? <sup>6)</sup>



<보기>

ㄱ. 선속도의 크기    ㄴ. 구심력의 크기    ㄷ. 각운동량의 크기

① ㄱ

② ㄷ

③ ㄱ, ㄴ

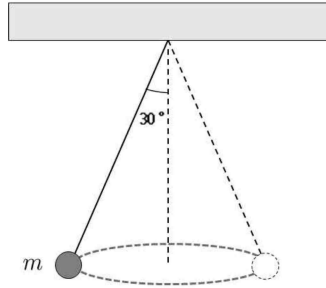
④ ㄴ, ㄷ

⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

7. [2021년 변리사] (하) 원뿔진자

그림은 줄에 매달린 물체가 수평면에서 등속원운동을 하는 모습을 나타낸 것이다. 물체의 질량은  $m$  이고, 줄과 수직축 사이의 각도는  $30^\circ$  이다.



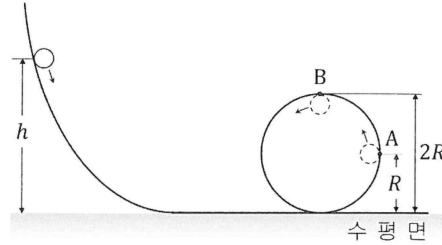
물체의 구심가속도의 크기는? (단, 중력가속도는  $g$ 이고, 모든 마찰은 무시한다.)<sup>7)</sup>

- ①  $\frac{1}{2}g$       ②  $\frac{1}{\sqrt{3}}g$       ③  $\frac{\sqrt{3}}{2}g$       ④  $\sqrt{3}g$       ⑤  $2g$

개념 POINT

8. [2022년 변리사] (상)

그림과 같이 곡선과 반지름  $R$ 인 원으로 구성되어 있는 궤도의 높이  $h$ 인 곳에서 구슬을 가만히 놓으면 구슬은 궤도를 따라 미끄러지며 운동하여 원궤도의 두 지점 A와 B를 지난다. A, B에서 원궤도가 구슬에 작용하는 수직항력은 각각  $n_A$ ,  $n_B$ 이다.



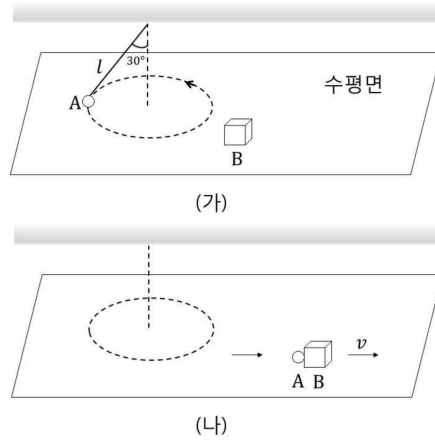
$\frac{n_A}{n_B} = 2$ 일 때,  $h$ 는? (단, 중력가속도는 일정하고, 구슬의 크기, 공기 저항과 모든 마찰은 무시한다.)<sup>8)</sup>

- ①  $\frac{5}{2}R$       ②  $3R$       ③  $\frac{7}{2}R$       ④  $4R$       ⑤  $\frac{9}{2}R$

개념 POINT

9. [2023년 변리사] (상)

그림 (가)와 같이 실에 매달린 물체 A는 수평면에서 반지름  $\frac{l}{2}$ 인 등속원운동을 하고, 물체B는 수평면에서 정지해 있다. (가)의 실이 끊어져 그림 (나)와 같이 A가 B와 충돌한 후 한 덩어리가 되어 속력  $v$ 로 운동한다. A와 B의 질량은 각각  $m$ 과  $3m$ 이고, (가)에서 실과 수직축 사이의 각도는  $30^\circ$ 이다. (가)에서 A에 작용하는 수직항력의 크기는? (단, 중력가속도는  $g$ 이고, 실의 질량과 모든 마찰은 무시한다.)<sup>9)</sup>

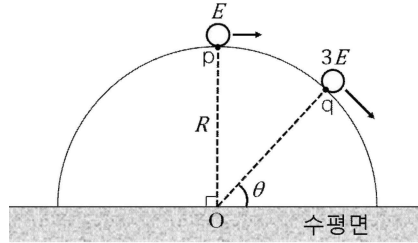


- ①  $mg - 2\sqrt{3} \frac{mv^2}{l}$       ②  $mg - 4\sqrt{3} \frac{mv^2}{l}$       ③  $mg - 8\sqrt{3} \frac{mv^2}{l}$   
 ④  $mg - 16\sqrt{3} \frac{mv^2}{l}$       ⑤  $mg - 32\sqrt{3} \frac{mv^2}{l}$

개념 POINT

10. [2024년 변리사] (상)

그림과 같이 반지름이  $R$ 인 반구 모양의 면을 따라 움직이던 물체가 점  $q$ 에서 반구면으로부터 이탈된다. 점  $p, q$ 에서 물체의 운동에너지는 각각  $E, 3E$  이고, 반구의 중심  $O$ 와  $q$ 를 잇는 선분이 수평면과 이루는 각은  $\theta$ 이다.  $\sin\theta$ 는? (단,  $p, q$ 는 반구면 상의 점이며, 물체의 크기와 모든 마찰은 무시한다.)<sup>10)</sup>



①  $\frac{3}{5}$

②  $\frac{13}{20}$

③  $\frac{7}{10}$

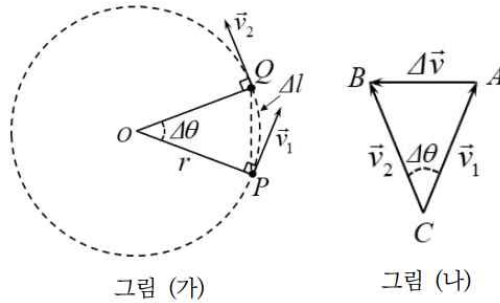
④  $\frac{3}{4}$

⑤  $\frac{4}{5}$

개념 POINT

■ 개념확인문제

11. 다음은 등속 원운동하는 물체의 구심가속도의 크기와 방향을 구하는 과정이다. 빈칸에 들어갈 말을 쓰시오.<sup>11)</sup>



반지름  $r$ , 속력  $v$ 로 등속원운동을 하는 물체가 그림 (가)와 같이 시간  $\Delta t$ 동안 점  $P$ 에서 점  $Q$ 로 이동할 때 원운동의 중심과 이루는 각은  $\Delta\theta$ 만큼 변하고 속도는  $\vec{v}_1$ 에서  $\vec{v}_2$ 로 변한다.  $\Delta t$ 가 매우 짧을 때  $\Delta\theta$ 가 매우 작아지므로  $P$ 와  $Q$ 를 잇는 호의 길이  $\Delta l$ 은 선분  $PQ$ 의 길이와 같아진다. 따라서  $\triangle POQ$ 와  $\triangle ACB$ 는 삼각형이 닮음 조건으로 다음 식을 만족한다.

$$\frac{\Delta v}{(a)} = \frac{\Delta l}{(b)} \quad \dots \textcircled{1}$$

물체가 이동한 거리  $\Delta l$ 은  $v\Delta t$ 와 같으므로 식 ①에 넣고 정리하면 구심가속도의 크기는 다음과 같다.

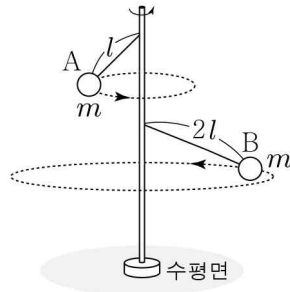
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(c)}{(d)} \quad \dots \textcircled{2}$$

$P$ 에서  $Q$ 로 이동하는 동안 물체의 가속도 방향은 속도 변화량  $\Delta\vec{v}$ 의 방향과 같다. 그림 (나)에서  $\Delta\vec{v}$ 의 방향은  $A$ 에서  $B$ 를 향하는 방향이므로 선분  $PQ$ 에 수직인 원운동의 (㉔)인  $O$  방향이다. 이렇게 구심가속도는 크기가 일정하고 방향이 운동 방향에 수직인 원운동의 (㉔) 방향임을 알 수 있다.

개념 POINT



12. 그림과 같이 질량이  $m$ 으로 같은 물체 A, B가 길이가 각각  $l$ ,  $2l$ 인 실로 막대와 연결되어 수평면과 나란하게 각각 등속원운동을 한다. A와 B의 각속도는 같고, A에 작용하는 구심력의 크기는  $mg$ 이다.



B에 작용하는 구심력의 크기는? (단, 중력가속도는  $g$ 이고, A, B의 크기, 막대의 두께, 실의 질량, 모든 마찰과 공기 저항은 무시한다.)<sup>12)</sup>

- ①  $\sqrt{3}mg$       ②  $2mg$       ③  $\sqrt{5}mg$       ④  $\sqrt{6}mg$       ⑤  $\sqrt{7}mg$

개념 POINT

13. 분침의 길이가 1.0cm, 시침의 길이가 0.6cm인 시계가 있다.<sup>13)</sup>

(1) 분침의 각속도는 시침의 몇 배인가?

(2) 분침 끝의 선속도는 시침의 몇 배인가?

개념 POINT

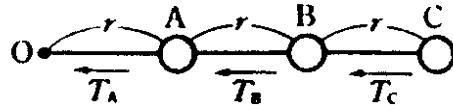
14. 어떤 물체가 일정한 속도  $v$  로 원운동하고 있다.<sup>14)</sup>

(1) 물체가  $60^\circ$  회전하였을 때의 속도 변화량의 크기는 얼마인가?

(2) 물체의 주기가  $T$  일 때의 구심 가속도는 얼마인가?

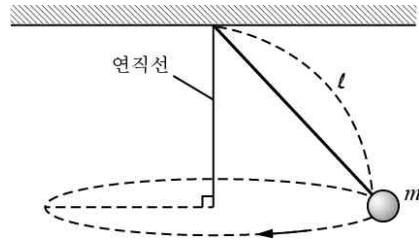
개념 POINT

15. 그림과 같이 가벼운 막대에 같은 간격으로 질량이 같은 세 물체 A, B, C를 고정시키고 한쪽 끝 O를 회전축으로 하여 막대를 수평면에서 등속원운동시켰다. OA, AB, BC 사이의 막대에 작용하는 장력의 비  $T_A : T_B : T_C$  는 얼마인가?<sup>15)</sup>



개념 POINT

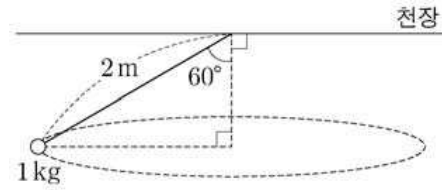
16. 그림은 질량이  $m$ 인 물체가 길이  $\ell$ 인 줄에 연결되어 수평면과 나란하게 일정한 주기  $T$ 로 회전하고 있는 모습을 나타낸 것이다. 다음 물음에 답하시오.(단, 중력가속도의 크기는  $g$ 이고, 물체의 크기, 줄의 질량, 공기 저항은 무시한다.)<sup>16)</sup>



- (1) 줄이 물체에 작용하는 장력의 크기를 구하시오.
- (2) 줄과 연직선 사이의 각도를  $\theta$ 라 할 때,  $\cos \theta$ 를 구하시오.

개념 POINT

17. 그림은 질량이  $1\text{kg}$ 인 물체가 천장에 줄로 연결되어 등속원운동을 하는 모습을 나타낸 것이다. 줄의 길이는  $2\text{m}$ 이고, 줄과 연직방향이 이루는 각은  $60^\circ$ 이다.



물체의 운동에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 중력 가속도는  $10\text{m/s}^2$ 이고, 물체의 크기와 줄의 질량은 무시한다.)<sup>17)</sup>

<보 기>

ㄱ. 구심력의 크기는  $10\sqrt{3}\text{N}$ 이다.

ㄴ. 속력은  $\sqrt{30}\text{m/s}$ 이다.

ㄷ. 주기는  $\frac{2\sqrt{10}}{5}\pi$  초이다.

① ㄱ

② ㄷ

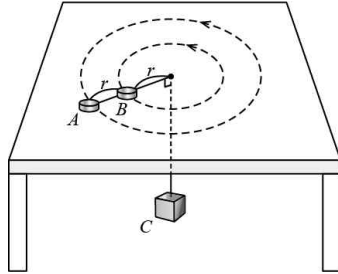
③ ㄱ, ㄴ

④ ㄴ, ㄷ

⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

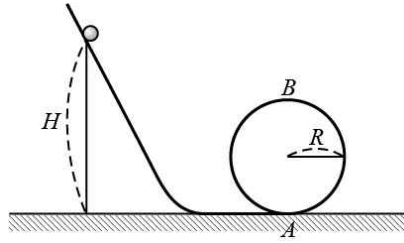
18. 그림은 실로 연결된 물체  $A$ 와  $B$ 가 수평한 책상 위에서 각각 반지름이  $2r$ ,  $r$ 로 등속원운동하고 있는 모습을 나타낸 것이다. 물체  $C$ 는 책상 중심의 구멍을 통하여  $B$ 와 연결되어 정지해 있다.  $A$ ,  $B$ 의 질량은  $m$ 이고, 등속원운동의 주기는  $T_0$ 이다. 다음 물음에 답하시오. (단, 중력가속도의 크기는  $g$ 이고, 실의 질량, 물체의 크기, 모든 마찰은 무시한다.)<sup>18)</sup>



- (1)  $A$ 에 작용하는 장력의 크기를 구하시오.
- (2)  $C$ 의 질량을 구하시오.

개념 POINT

19. 그림은 질량  $m$ 인 롤러코스터가 반지름이  $R$ 인 원형 트랙을 운동하는 모습을 나타낸 것이다. 롤러코스터가 원운동하기 위한 최소 높이가  $H$ 이고, 물체가  $A$ 에서  $B$ 로 이동할 때까지 수직항력이 한 일은  $W$ 이다. '일-운동에너지 정리'를 쓰고,  $H$ ,  $W$ 를 구하시오. (단, 롤러코스터의 크기, 공기저항, 모든 마찰은 무시하고 중력가속도는  $g$ 이다.)<sup>19)</sup>

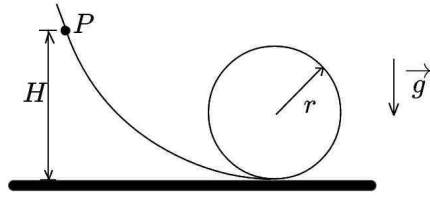


개념 POINT



20. 그림과 같이 질량  $m$ 인 물체가 높이  $H$ 인  $P$ 에서 출발하여 트랙을 따라 운동한다. 중력가속도는  $g$ 로 일정하고 모든 마찰 및 공기 저항은 무시한다. 다음 물음에 답하시오.<sup>20)</sup>

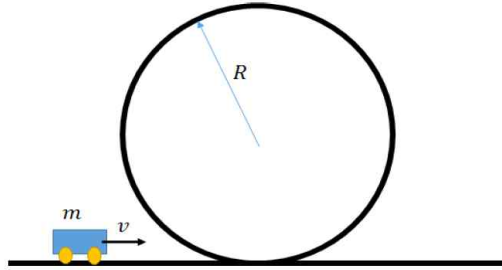
개념 POINT



- (1) 물체가 반지름  $r$  원형 트랙을 완전히 한 바퀴 돌기 위한 높이  $H$ 의 최솟값을 구하시오.
- (2) 물체를 높이  $2H$ 인 지점의 트랙에서 놓았을 때 원형 트랙의 꼭대기 지점에서 트랙이 질량  $m$ 에 작용하는 수직항력을 구하시오.(단,  $H$ 는 (1)의 최솟값이다.)

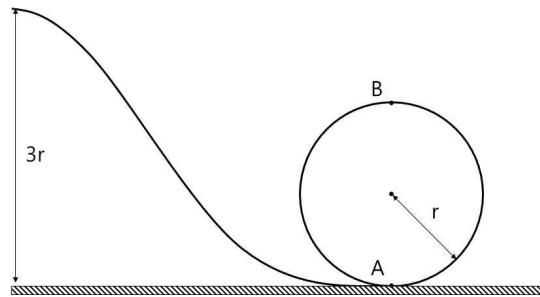
21. 그림과 같이 질량이  $m$ 인 자동차가 수직으로 세워진 원형 트랙을 향해  $v$ 의 속력으로 올라간다. 원형 트랙의 반지름을  $R$ 이라고 하면, 원형 트랙의 꼭대기에서 차가 떨어지지 않으려면  $v$ 는 어떤 조건을 만족해야 하는가?<sup>21)</sup> (단, 중력가속도는  $g$ 이다.)

개념 POINT



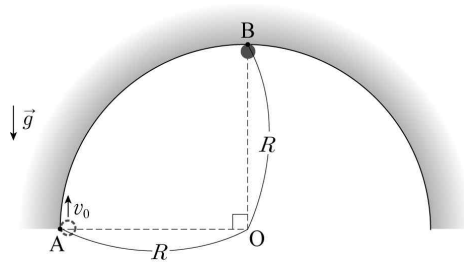
22. 반지름이  $r$ 인 원형 트랙을 가진 롤러코스터가 있다. 마찰을 무시할 때  $3r$ 의 높이에 질량이  $m$ 인 물체를 놓아 물체가 트랙을 따라 운동하도록 하였다. (단, 중력가속도는  $g$ 이다.)<sup>22)</sup>

개념 POINT



- (1) 관성좌표계의 관점에서 볼 때, 롤러코스터가 원형 트랙의 바닥 A 지점을 지나는 시점에 롤러코스터에 작용하는 수직항력을 구하시오.
- (2) 관성좌표계의 관점에서 볼 때, 롤러코스터가 원형 트랙의 바닥 A 지점을 지나는 시점에 롤러코스터에 작용하는 힘을 화살표로 그리고 물체의 운동을 힘과 관련지어 글로 설명하시오.
- (3) 롤러코스터가 원형 트랙의 맨 꼭대기 B지점을 지날 때, 롤러코스터의 좌표계의 관점에서 관측한 물체에 작용하는 힘을 화살표로 나타내고 각각의 힘을 주어진 문자로 표시하시오.

23. 그림과 같이 마찰이 없고 반지름  $R$ 인 반원형 구조물의 내부 면상에 있는  $A$  지점에서 초기속력  $v_0$ 으로 질량  $m$ 인 물체를 연직 상방으로 쏘아 올렸다. 이 물체는 반원형 궤도를 따라 원운동 하였다.



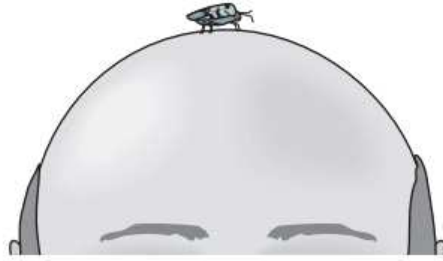
이 물체가 최고점  $B$ 를 지나는 순간, 물체가 구조물로부터 받는 수직항력의 크기는? (단,  $g$ 는 중력가속도이고, 공기저항과 물체의 크기는 무시한다.)<sup>23)</sup>

- ①  $\frac{mv_0^2}{R} - 3mg$       ②  $\frac{mv_0^2}{R} - 2mg$       ③  $\frac{mv_0^2}{R} - mg$   
 ④  $\frac{mv_0^2}{R} + mg$       ⑤  $\frac{mv_0^2}{R} + 3mg$

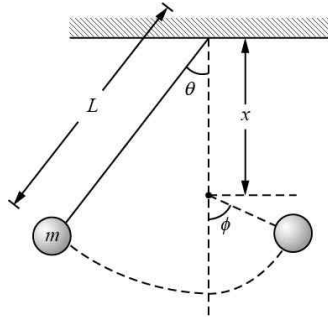
개념 POINT

24. 그림처럼 마찰 없는 구형 대머리 꼭대기에 앉은 바퀴벌레가 반지름의  $1/3$ 인 수직 위치에서 아래로 떨어짐을 보여라.<sup>24)</sup>

개념 POINT



25. 그림과 같이 길이  $L$ 의 실에 질량  $m$ 인 추를 매달아  $\theta$ 만큼 들었다가 놓으면 추가 진동하게 된다. 고정점의 수직 아래로 거리  $x$ 인 지점에 나무뿔을 설치하면 진동하던 실이 나무뿔에 걸려 진자의 길이가 짧아지는 진동을 하게 된다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 추의 크기, 나무뿔의 크기, 실의 크기와 질량은 무시한다.)<sup>25)</sup>

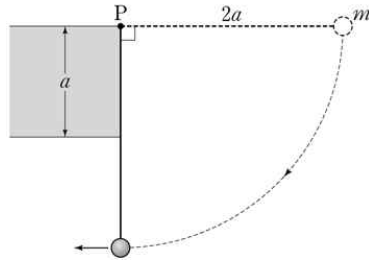
<보 기>

- ㄱ. 추의 처음 출발점의 높이가 나무뿔 보다 낮은 경우,  $\phi = \theta$ 이다.  
 ㄴ. 진동을 시작한 추가 나무뿔에 걸리기 전까지, 추에 작용하는 실의 장력이 하는 일의 크기는  $mgL(1 - \cos \theta)$ 이다.  
 ㄷ. 처음 출발점의 각도  $\theta$ 가  $90^\circ$  일 때, 실이 나무뿔에 걸려 나무뿔을 중심으로 완전한 원궤도를 그리는  $x$ 의 최솟값은  $0.6L$ 이다.

- ① ㄱ                      ② ㄴ                      ③ ㄷ                      ④ ㄱ, ㄷ                      ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

26. 그림은 점  $P$ 에 한쪽 끝이 고정된, 길이  $2a$ 인 실의 다른 쪽 끝에 질량  $m$ 인 물체가 매달려 연직면상에서 운동하는 것을 나타낸 것이다. 물체는  $P$ 와 같은 높이에서 가만히 놓아졌다. 실이  $P$ 로부터 길이  $a$ 인 연직 모서리에 걸리기 직전의 장력 크기는  $T_1$ 이고, 걸린 직후의 장력 크기는  $T_2$ 이다.



장력 크기의 차( $T_2 - T_1$ )는? (단, 중력가속도는  $g$ 이고, 물체의 크기와 실의 질량 및 공기 저항은 무시한다.)<sup>26)</sup>

- ① 0                      ②  $mg$                       ③  $2mg$                       ④  $3mg$                       ⑤  $4mg$

개념 POINT

1)

[정답] ②

[해설]

Step 1: 꼭대기(점P)에서의 최소 속력 구하기

물체가 원형궤도의 꼭대기에서 떨어지지 않고 지나가려면, 그 지점에서의 구심력이 최소한 중력보다는 크거나 같아야 합니다. 궤도를 떠나지 않는 최소조건은 수직항력이 0이 될 때이므로

$$mg = \frac{v^2}{r} \text{ 에서 } v = \sqrt{gr} \text{ 이다.}$$

Step 2: 역학적 에너지 보존 법칙적용

처음 높이에서의 위치에너지가 점P에서의 위치에너지와 운동에너지의 합과 같아야 한다. (지면을 퍼텐셜에너지의 기준면으로 설정)

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + 2mgR \text{ 에서 } v = \sqrt{gr} \text{ 이므로 } mgh = \frac{1}{2}mgR + 2mgR = \frac{5}{2}mgR \text{ 이다.}$$

$$\text{따라서 } h = \frac{5}{2}R \text{ 이다.}$$

2)

[정답] ②

[해설]

이 문제를 풀기 위해서는 테이블 아래 매달린 물체  $m_2$ 의 평형조건과 테이블 위 물체  $m_1$ 의 구심력 조건을 연결하는 실의 장력  $T$ 를 구해야 한다.

Step 1: 실의 장력 구하기

테이블 아래 매달린 질량  $m_2$ 는 정지해 있으므로, 실이 당기는 힘(장력)과 중력이 평형을 이룬다. 따라서  $T = m_2g = 4m_1g$  이다.

Step 2: 원운동의 반지름 구하기

실의 전체 길이는  $100\text{cm} = 1.0\text{m}$  이고 물체가 테이블 아래  $60\text{cm} = 0.6\text{m}$  지점에 있으므로, 테이블 위에서 원운동하는 부분의 길이  $r = 0.4\text{m}$  이다.

Step 3: 구심력 공식을 이용한 속력 계산

테이블 위에서 이 원운동을 유지하게 하는 구심력은 실의 장력이므로

$$m_1 \frac{v^2}{r} = 4m_1g \text{ 이고 } v = 2\sqrt{gr} = 2 \times \sqrt{10 \times 0.4} = 4\text{m/s} \text{ 이다}$$

3)

[정답] ⑤

[해설]

물체가 원형 궤도를 완전히 한 바퀴 돌기 위해서는 가장 높은 지점(최고점)을 통과할 때의 속력이 특정 값 이상이어야 한다.

Step 1: 최고점에서의 최소 속력  $v_T$  구하기

최고점에서 물체가 궤도에서 떨어지지 않으려면, 중력이 구심력 역할을 해야 하며 수직항력은 0 이상이어야 한다. 최소 속력을 구하는 것이므로 수직항력을 0이라고 가정하면



$$mg = \frac{v_{\top}^2}{r} \text{ 에서 } v_{\top} = \sqrt{gr} \text{ 이다.}$$

Step 2: 역학적 에너지 보존법칙 적용

최저점 a에서의 속력을  $v$ , 최고점에서의 속력을  $v_{\top}$ 이라 하고, 최저점을 중력 퍼텐셜에너지의 기준면으로 잡으면

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_{\top}^2 + 2mgr \text{ 이므로 } \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mgr + 2mgr = \frac{5}{2}mgr \text{ 이다.}$$

$$\text{따라서 } \frac{1}{2}mv^2 = \frac{5}{2}mgr \text{ 이므로 } v = \sqrt{5gr} \text{ 이다.}$$

4)

[정답] ④

[해설]

이 문제를 풀기 위해서는 최저점에서의 힘의 평형(구심력)을 통해 속력을 구한 뒤, 역학적에너지 보존법칙을 적용해야 한다.

Step 1: 최저점에서의 속력 구하기

최저점에서 물체에 작용하는 힘은 위쪽 방향의 장력과 아래쪽 방향의 중력이다. 이 두 힘의 합력이 원운동의 구심력이 된다.

$$T - mg = m \frac{v^2}{r} \text{ 에서 주어진 값을 대입하면 } 260 - (20 \times 10) = \frac{20 \times v^2}{3.0} \text{ 에서 } v = 3m/s \text{ 이다.}$$

Step 2: 최고점과 최저점의 높이 차이 구하기

최고점에서는 속력이 0이므로 모든 에너지는 위치에너지 형태이다. 최저점에서는 이 위치에너지가 모두 운동에너지로 전환되므로

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \text{ 에서 } h = \frac{v^2}{2g} = \frac{3^2}{2 \times 10} = 0.45m \text{ 이다.}$$

5)

[정답] ⑤

[해설]

이 문제를 해결하기 위해 물체에 작용하는 힘을 성분별로 나누어 분석해야 한다. 물체에는 중력과 줄의 장력이 작용한다.

Step 1: 힘의 성분 분해

줄이 연직선과 이루는 각을  $\alpha = \frac{\theta}{2}$  라고 할 때, 장력을 수평성분과 연직성분으로 나누면

$$T \sin \alpha = mr\omega^2, \quad T \cos \alpha = mg \text{ 이다.}$$

Step 2: 장력 유도

장력을 구하기 위해 위 두 식을 각각 제곱하여 더하면

$$T^2(\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) = (mg)^2 + (mr\omega^2)^2 \text{ 이므로 } T^2 = (mg)^2 + (mr\omega^2)^2 \text{ 이다.}$$

$$\text{따라서 } T = m \sqrt{\omega^4 r^2 + g^2} \text{ 이다.}$$

6)

[정답] ⑤

[해설]

문제의 핵심 조건은 질량이 같고, 각속도가 동일하다는 점이다. 그림을 보면 회전 반지름은 B가 A보다 크다.

ㄱ. 선속도의 크기  $v = r\omega$ 에서  $\omega$ 가 동일하므로  $v \propto r$ 이다. 따라서  $v_B > v_A$  이다.

ㄴ. 구심력의 크기  $F = mr\omega^2$ 에서  $m$ 과 동일하므로  $F \propto r$ 이다. 따라서  $F_B > F_A$  이다.

개념 POINT

ㄷ. 각운동량의 크기  $L = rmv = mr\omega^2$ 에서  $L \propto r$ 이다. 따라서  $L_B > L_A$  이다.

7)

[정답] ②

[해설]

이 문제를 풀기 위해서는 물체에 작용하는 두 가지 힘인 중력과 장력을 분석해야 한다.

Step 1: 힘의 성분 분해

줄이 수직축과 이루는 각도를  $\theta = 30^\circ$  라고 할 때, 장력을 수평성분과 연직성분으로 나누면  $T \sin 30^\circ = ma_c$ 이고  $T \cos 30^\circ = mg$ 이다. 이 때  $a_c$ 는 구심가속도이다.

Step 2: 구심가속도 유도

위 식의 양변을 나누면  $\frac{T \sin 30^\circ}{T \cos 30^\circ} = \frac{ma_c}{mg}$ 에서  $a_c = g \tan 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}}g$  이다.

8)

[정답] ④

[해설]

Step 1 : 각 지점에서의 속력 구하기(에너지 보존)

높이  $h$ 에서 정지상태로 출발했으므로, 지면으로부터 높이가  $y$ 인 지점에서의 속력  $v$  다음과 같다.

$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + mgy$  에서  $v^2 = 2g(h-y)$ 이므로 지점A에서  $v_A^2 = 2g(h-R)$ 이고 지점B에서  $v_B^2 = 2g(h-2R)$ 이다.

Step 2 : 수직항력 유도(구심력분석)

지점 A : 구슬이 원의 옆면을 지날때, 수평방향으로 작용하는 수직항력이 구심력이므로

$n_A = \frac{mv_A^2}{R} = \frac{m \times 2g(h-R)}{R}$  이다.

지점 B : 원의 꼭대기에서 수직항력과 중력의 합이 구심력이므로

$n_B + mg = \frac{mv_B^2}{R}$ 에서  $n_B = \frac{mv_B^2}{R} - mg = \frac{m \times 2g(h-2R)}{R} - mg$  이다.

Step 3: 조건 대입 및 계산

$\frac{n_A}{n_B} = 2$ 에서  $n_A = 2n_B$ 이므로  $\frac{m \times 2g(h-R)}{R} = 2 \left[ \frac{2mg(h-2R)}{R} - mg \right]$ 이고 정리하면  $h = 4R$ 이다.

9)

[정답] ⑤

[해설]

이 문제는 (나)의 충돌 상황을 통해 (가) 원운동 당시 A의 속력을 먼저 구한 뒤, (가)에서의 힘의 평형을 분석해야 한다.

Step 1: 충돌 전 A의 속력  $v_A$  구하기(운동량 보존)

(나)에서 A와 B가 충돌하여 한 덩어리가 될 때, 수평방향의 운동량이 보존된다.

$mv_A + 3m \times 0 = (m + 3m)v$  에서  $v_A = 4v$  이다.

Step 2: (가)에서 실의 장력 구하기(구심력 분석)

개념 POINT

(가)에서 물체 A는 반지름  $r = \frac{l}{2}$ 인 원운동을 하고, 장력의 수평성분이 구심력 역할을 한다.

$$T \sin 30^\circ = m \frac{v_A^2}{r} \text{에서 } T = \frac{64mv^2}{l} \text{이다.}$$

Step 3: (가)에서 수직항력 구하기(연직방향 평형)

물체 A는 수평면 위에 놓여 있으므로, 연직방향으로 작용하는 힘(장력의 연직성분, 수직항력, 중력)들의 합은 0이 되어야 한다.

$$N + T \cos 30^\circ = mg \text{에서 } N = mg - 32\sqrt{3} \frac{mv^2}{l} \text{이다.}$$

10)

[정답] ④

[해설]

Step 1 : 역학적 에너지 보존법칙 적용

마찰이 없으므로 점 p와 점 q에서의 역학적 에너지는 보존된다. 수평면을 퍼텐셜 에너지의 기준면으로 잡으면

$$E + mgR = 3E + mgR \sin \theta \text{이므로 } E = \frac{1}{2} mgR(1 - \sin \theta) \cdots \textcircled{1} \text{이다.}$$

Step 2: 점 q에서의 이탈 조건 분석(원운동)

물체가 점 q에서 면을 떠난다는 것은 수직항력이 0이 된다는 뜻이다. 이 때 중력의 중심방향 성분이 구심력 역할을 한다. 점 q에서의 속력을  $v_q$ 라고 하면

$$3E = \frac{1}{2} mv_q^2 \text{에서 } v_q^2 = \frac{6E}{m} \text{이고, } mg \sin \theta = \frac{mv_q^2}{R} \text{에서 } mg \sin \theta = \frac{6E}{R} \text{이다.}$$

$$\text{따라서 } E = \frac{1}{6} mgR \sin \theta \cdots \textcircled{2} \text{이다.}$$

Step 3: 두 식을 연립하여 계산

$$\text{식 } \textcircled{1} \text{과 식 } \textcircled{2} \text{는 같으므로 } \frac{1}{2} mgR(1 - \sin \theta) = \frac{1}{6} mgR \sin \theta \text{이다. 정리하면 } \sin \theta = \frac{3}{4} \text{이다.}$$

11)

[정답]

㉠ :  $v$

㉡ :  $r$

㉢ :  $v^2$

㉣ : 중심

[해설]

$$\text{구심 가속도는 } a = \frac{|\Delta \vec{v}|}{\Delta t} = \frac{\frac{\Delta l}{r} v}{\frac{\Delta l}{v}} = \frac{v^2}{r} \text{이다.}$$

12)

[정답] ⑤

[해설]

[출제의도] 구심력 분석하기

A에 연결된 실이 연직선과 이루는 각을  $\theta$ , 실이 A를 당기는 힘의 크기를  $T_A$ 라 하면, A에 작용하는 구심력의 크기는  $m\omega^2 l \sin \theta = T_A \sin \theta$ 에서  $T_A = m\omega^2 l$ 이다. 각속도( $\omega$ )는 A와 B가 같고, 실

의 길이는 B가 A의 2배이므로 실이 B를 당기는 힘의 크기( $T_B$ )는  $T_A$ 의 2배이다.  $T_A = \sqrt{(mg)^2 + (mg)^2} = \sqrt{2}mg$ 이므로  $T_B = 2\sqrt{2}mg$ 이다. 따라서 B에 작용하는 구심력의 크기는  $\sqrt{(2\sqrt{2}mg)^2 - (mg)^2} = \sqrt{7}mg$ 이다.

13)

[정답] (1) 12배 (2) 20배

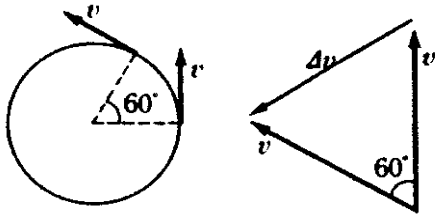
[해설] (1) 각속도  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  에서 분침  $\omega_1 = \frac{2\pi}{3600}$ , 시침  $\omega_2 = \frac{2\pi}{12 \times 3600}$   $\therefore \frac{\omega_1}{\omega_2} = 12(\text{배})$

(2)  $v = r\omega$  에서 분침  $v_1 = 1 \times \frac{2\pi}{3600}$  시침  $v_2 = 0.6 \times \frac{2\pi}{12 \times 3600}$   $\therefore \frac{v_1}{v_2} = 20(\text{배})$

14)

[정답] (1)  $v$  (2)  $\frac{2\pi v}{T}$

[해설] (1) 다음 그림에서  $\Delta v = \sqrt{v^2 + v^2 - 2v^2 \cos 60^\circ} = v$



(2)  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  와  $a = v\omega$  에서  $a = \frac{2\pi v}{T}$

15)

[정답] 6 : 5 : 3

[해설]  $T_A = mr\omega^2 + m \times 2r\omega^2 + m \times 3r\omega^2 = 6mr\omega^2$

$T_B = m \times 2r\omega^2 + m \times 3r\omega^2 = 5mr\omega^2$

$T_C = m \times 3r\omega^2 = 3mr\omega^2 \quad \therefore T_A : T_B : T_C = 6 : 5 : 3$

16)

[정답] (1)  $F = \frac{4\pi^2 m l}{T^2}$  (2)  $\cos \theta = \frac{g T^2}{4\pi^2 l}$

[해설] (1) (2) 연직선과 이루는 각을  $\theta$ 라고 하고, 장력을  $F$ 라고 하자.  
연직방향의 힘의 평형에 의해

$$F \cos \theta = mg. \quad \text{①}$$

수평방향의 알짜힘은 구심력 역할을 하므로

$$F \sin \theta = m l \sin \theta \omega^2. \quad \text{②}$$

②에 의해  $F = m l \omega^2 = m l \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 = \frac{4\pi^2 m l}{T^2}. \quad \text{③}$

③을 ①에 대입하면

$$\cos \theta = \frac{mg}{F} = \frac{mg}{4\pi^2 m l / T^2} = \frac{g T^2}{4\pi^2 l}$$

17)

[정답] ③ ㄱ, ㄴ

[해설]

ㄱ. 실이 질량 1kg인 물체에 작용하는 힘의 크기를  $T$ 라고 하면, 등속 원운동을 하는 물체에 연직 방향으로 작용하는 힘은 0이므로  $T\cos 60^\circ = 10\text{N}$ 이다. 따라서  $T = 20\text{N}$ 이다. 즉, 이 물체에 작용하는 구심력의 크기  $T\sin 60^\circ = 10\sqrt{3}\text{N}$ 이다. (O)

ㄴ. 질량  $m$ 인 물체가 속력  $v$ 로 반지름  $r$ 인 궤도를 따라 등속 원운동을 할 때 구심력의 크기는  $\frac{mv^2}{r}$ 이다.  $r = 2\sin 60^\circ = \sqrt{3}(\text{m})$  이므로  $10\sqrt{3} = \frac{1 \times v^2}{\sqrt{3}}$ 에서  $v = \sqrt{30}\text{m/s}$ 이다. (O)

ㄷ. 주기  $T = \frac{2\pi r}{v}$ 이므로  $T = \frac{2\pi \times \sqrt{3}}{\sqrt{30}} = \frac{\sqrt{10}}{5}\pi(\text{초})$ 이다. (X)

18)

[정답] (1)  $F_A = \frac{8\pi^2 m r}{T_0^2}$  (2)  $m_C = \frac{12\pi^2 m r}{g T_0^2}$

[해설]

(1) A에 작용하는 장력을  $F_A$ 라 하면  $F_A$ 가 A의 구심력 역할을 한다.

$$F_A = m(2r)\left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 = \frac{8\pi^2 m r}{T_0^2}$$

(2) B가 받는 장력을  $F_B$ 라 하면

$$F_B - F_A = m r \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 = \frac{4\pi^2 m r}{T_0^2}$$

(1)에서 구한  $F_A$ 를 대입해서  $F_B$ 를 구하면

$$F_B = \frac{12\pi^2 m r}{T_0^2}$$

B가 받는 장력은 B와 C에 연결된 줄의 장력이며, 이 힘에 의해 C가 힘의 평형상태에 있다.

$$F_B = m_C g = \frac{12\pi^2 m r}{T_0^2}$$

따라서  $m_C = \frac{12\pi^2 m r}{g T_0^2}$ 이다.

19)

[정답] 일 - 운동에너지 정리 : 물체가 받는 알짜힘을  $\vec{F}$ 라 할 때  $\vec{F}$ 가 한 일은 물체의 운동에너지 변화와 같다.

$$H_{\min} = \frac{5}{2}R, \quad W = 0$$

[해설]

일 - 운동에너지 정리 : 물체가 받는 알짜힘을  $\vec{F}$ 라 할 때  $\vec{F}$ 가 한 일은 물체의 운동에너지 변화와 같다.

B에서의 속력을  $v_B$ 라 하면 역학에너지 보존에 의해

$$\Delta K = -\Delta U \text{에서}$$

$$\frac{1}{2}mv_B^2 = mg(H - 2R) \dots \textcircled{1}$$

B에서 궤도를 벗어나지 않기 위해서는

$$N = \frac{mv_B^2}{R} - mg \geq 0$$

에서

$$mg \leq \frac{mv_B^2}{R} \dots \textcircled{2}$$

①을 ②에 대입하면

$$mg \leq \frac{2mg(H-2R)}{R} \text{에서 } H \geq \frac{5}{2}R \text{이다.}$$

수직항력은 항상 운동방향에 수직이므로 일을 하지 않는다.  $W=0$

20)

$$[\text{정답}] (1) H = \frac{5}{2}r \quad (2) N = 5mg$$

[해설] (1) 원의 꼭대기에서 중력과 수직항력의 합력이 구심력이므로

$$mg + N = m \frac{v^2}{r} \text{에서}$$

원운동하기 위해서는  $\frac{mv^2}{r} \geq mg$ 이어야  $N \geq 0$ 이다.

역학에너지 보존법칙에서  $\Delta K = -\Delta U$ 을 사용하면

$$\frac{1}{2}mv^2 - 0 = mgH - mg(2r)$$

에서  $v^2 = 2g(H-2r)$ 이며  $N \geq 0$ 조건을 사용하면

$$v^2 = 2g(H-2r) \geq rg$$

이므로  $H = \frac{5}{2}r$ 이다.

(2) 트랙의 꼭대기에서는 중력과 수직항력의 연직 아래방향이 되어 그 합력이 구심력이므로

$$mg + N = m \frac{v^2}{r}$$

이므로  $N = m \frac{v^2}{r} - mg$ 이다.

역학에너지 보존에 의해

$$\frac{1}{2}mv^2 - 0 = mg(2H) - mg(2r) = mg(5r-2r) = 3mgr$$

이다.

$$N = m \frac{v^2}{r} - mg = \frac{2mg(3r)}{r} - mg = 5mg$$

21)

$$[\text{정답}] v \geq \sqrt{5gR}$$

[해설]

꼭대기에서 필요한 최소 속력을  $v_A$ 라고 하면  $mg = m \frac{v_A^2}{R}$ 에서  $v_A = \sqrt{gR}$ 이다.

역학에너지 보존에 의해

$$v = \sqrt{v_A^2 + 2g(2R)} = \sqrt{5gR}$$

따라서  $v \geq \sqrt{5gR}$ 이면 꼭대기에서 차가 떨어지지 않는다.

22)

$$[\text{정답}] (1) 7mg \quad (2) \text{ 풀이 참조} \quad (3) \text{ 풀이 참조}$$

[해설]

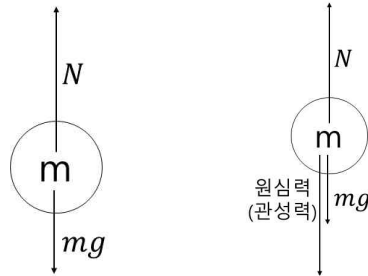
(1) 역학적 에너지 보존 법칙에 의해

$$mg(3r) = \frac{1}{2}mv_A^2 \rightarrow v_A = \sqrt{6gr}$$

롤러코스터에 작용하는 힘은 중력과 수직항력이며, 두 힘의 알짜힘이 구심력 역할을 한다.

$$N_A - mg = \frac{mv^2}{r} \rightarrow N_A = mg + \frac{mv^2}{r} = mg + 6mg = 7mg$$

(2) 앞서 설명했듯이, 관성좌표계에서 롤러코스터에는 중력과 수직항력만 작용한다. 두 힘의 합력은 구심력 역할을 하며 롤러코스터가 원운동을 하게 한다.



(3) 롤러코스터의 좌표계에서 롤러코스터는 정지해 있다. 중력과 수직항력의 차이는 원심력이라고 부르는 관성력이 채워 주며, 원심력과 중력, 수직항력의 합력은 0이다.

$$N = 7mg, \text{ 원심력} = N - mg = 6mg$$

23)

[정답] ①  $\frac{mv_0^2}{R} - 3mg$

[해설] 최고점을 지나는 순간의 속력을  $v$ 라고 하면  
에너지 보존에 의해

$$v^2 = v_0^2 - 2gR$$

최고점에서 운동방정식은

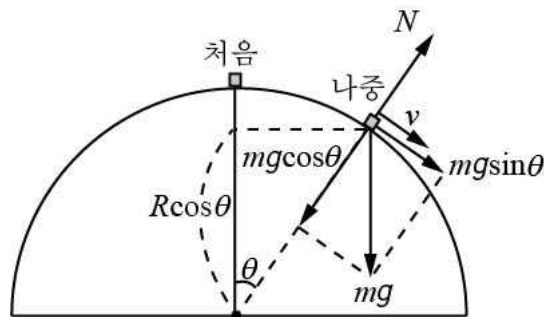
$$N + mg = m \frac{v^2}{R} = m \frac{v_0^2}{R} - 2mg$$

따라서  $N = \frac{mv_0^2}{R} - 3mg$ 이다.

24)

[정답] 떨어지는 순간의 높이는  $R \cos \theta = \frac{2R}{3}$ 이며 꼭대기로부터 1/3만큼 내려온 곳에서 분리된다.

[해설]



각  $\theta$ 만큼 미끄러진 상태를 나중 상태라 하자.

(i) 먼저 나중 상태에서 속력  $v$ 를 구한다.

$$E_{\text{처음}} = E_{\text{나중}} \Rightarrow mgR = \frac{1}{2}mv^2 + mgR \cos \theta$$

$$v = \sqrt{2gR(1 - \cos \theta)} \quad \dots\dots ①$$

(ii) 이제 물체에 작용하는 힘을 고려하자. 물체에는 중력과 구면이 밀어내는 수직항력이 작용한다. 중력을 분해하면 구면에 평행한 방향으로  $mg\sin\theta$ , 구면에 수직한 방향으로  $mg\cos\theta$ 가 작용한다. 따라서, 구면에 수직한 방향(=지름 방향)의 알짜 힘은  $mg\cos\theta - N$ 이고 이 힘이 구심력이어야 하므로,

$$mg\cos\theta - N = m\frac{v^2}{R} = 2mg(1 - \cos\theta) \quad (\because \textcircled{1})$$

물체가 구면에서 떨어지는 순간에는 수직 항력이 0이 되어야 하므로

$$mg\cos\theta = 2mg(1 - \cos\theta)$$

$$\therefore \cos\theta = \frac{2}{3}$$

즉, 떨어지는 순간의 높이는  $R\cos\theta = \frac{2R}{3}$ 이며 꼭대기로부터 1/3만큼 내려온 곳에서 분리된다.

25)

[정답] ③ ㄷ

[해설]

ㄱ.  $\phi > \theta$ 이다. (X)

ㄴ. 장력이 하는 일은 0이다. (X)

ㄷ. 완전한 원궤도를 돌기 위해서는 원운동의 꼭대기에서의 속력  $v$ 가

$$\frac{mv^2}{R} \geq mg. \quad \therefore \textcircled{1}$$

이어야 한다.

그림에서 원운동의 반지름은

$$R = L - x. \quad \therefore \textcircled{2}$$

이다.

에너지 보존을 적용해서  $v^2$ 을 구해보자.

$$\frac{1}{2}mv^2 = mg\{L - 2(L - x)\} = mg(2x - L). \quad \therefore \textcircled{3}$$

이다.

③과 ②를 ①에 대입하면 다음과 같다.

$$m\frac{2g(2x - L)}{L - x} \geq mg$$

정리하면  $2x - 4L \geq L - x$ 이 되어서  $x \geq \frac{3}{5}L$ 이다. (O)

26)

[정답] ③  $2mg$

[해설]

에너지 보존에 의해

$$v^2 = 2g(2a) = 4ga$$

따라서

$$m\frac{v^2}{a} = 4mg \text{이다.}$$

걸리기 전의 운동방정식은

$$T_1 - mg = m\frac{v^2}{2a} = 2mg$$

걸린 이후의 운동방정식은

$$T_2 - mg = m\frac{v^2}{a} = 4mg \text{ 따라서 } T_2 - T_1 = 2mg \text{ 이다.}$$