

완자 · 역학과 에너지

내신만점 · 실력UP 집중

1 시공간과 운동  
2 중력의 작용과 등가 원리

# 02

## 탈출 속도

내신만점 · 실력UP

I-2-02 탈출 속도





# 내신 만점 문제

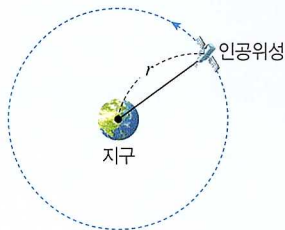
## A 역학적 에너지와 탈출 속도

**01** 그림은 인공위성이 지구를 중심으로 반지름이  $r$ 인 원 궤도를 따라 등속 원운동을 하는 모습을 나타낸 것이다. 인공위성의 중력에 의한 위치 에너지는  $-E_0$ 이다.

인공위성의 운동 에너지는?

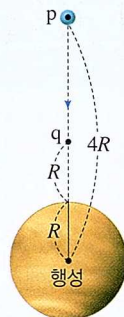
(단, 중력이 0인 지점에서 물체의 중력에 의한 위치 에너지는 0이다.)

- ①  $\frac{1}{5}E_0$       ②  $\frac{1}{4}E_0$       ③  $\frac{1}{3}E_0$   
 ④  $\frac{1}{2}E_0$       ⑤  $E_0$

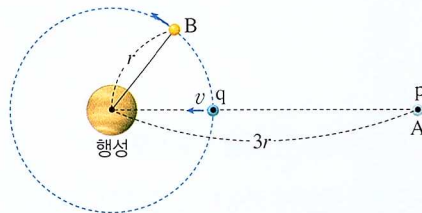


**03** 그림은 점 p에서 가만히 놓은 물체가 점 q를 지나 반지름이  $R$ 인 행성의 중심을 향해 운동하는 모습을 나타낸 것이다. 행성의 중심으로부터 p, q까지의 거리는 각각  $4R$ ,  $2R$ 이다. 물체의 질량은  $m$ 이고, p에서 물체의 중력에 의한 위치 에너지는  $-E_0$ 이다. q에서 물체의 속력은? (단, 중력이 0인 지점에서 중력에 의한 위치 에너지는 0이다.)

- ①  $\sqrt{\frac{E_0}{2m}}$       ②  $\sqrt{\frac{E_0}{m}}$       ③  $\sqrt{\frac{3E_0}{2m}}$   
 ④  $\sqrt{\frac{2E_0}{m}}$       ⑤  $\sqrt{\frac{5E_0}{2m}}$



**04** 그림은 점 p에서 가만히 놓은 물체 A가 점 q를 속력  $v$ 로 통과하고, 행성을 중심으로 물체 B가 반지름이  $r$ 인 원 궤도를 따라 등속 원운동을 하는 모습을 나타낸 것이다. 질량은 A와 B가 같고, p, q는 행성의 중심으로부터 각각  $3r$ ,  $r$ 만큼 떨어진 지점이다. p에서 A의 중력에 의한 위치 에너지는  $-E_0$ 이다.

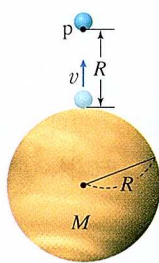


이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은? (단, A, B에는 행성에 의한 중력만 작용하며, 중력이 0인 지점에서 물체의 중력에 의한 위치 에너지는 0이다.)

- 보기**  
 ㄱ. A의 가속도 방향은 p에서와 q에서가 같다.  
 ㄴ. B의 운동 에너지는 q에서 A의 운동 에너지의  $\frac{3}{4}$ 배이다.  
 ㄷ. B의 역학적 에너지는  $-\frac{1}{2}E_0$ 이다.

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

**중요 02** 그림은 반지름이  $R$ , 질량이  $M$ 인 행성의 표면에서 속력  $v$ 로 발사된 물체가 행성의 표면으로부터 높이가  $R$ 인 점 p에서 속력이 0이 된 순간의 모습을 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은? (단, 중력 상수는  $G$ 이고, 공기 저항은 무시한다.)

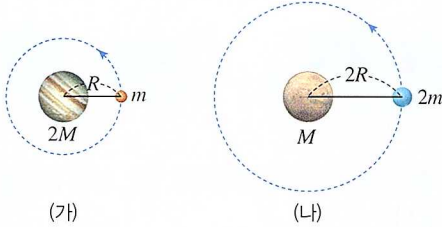


**보기**

- ㄱ. 물체가 행성의 표면에서 p에 도달하는 동안, 물체에 작용하는 중력의 방향은 물체의 운동 방향과 반대이다.  
 ㄴ.  $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$  이다.  
 ㄷ. 물체의 중력에 의한 위치 에너지는 행성의 표면에서 p에서보다 크다.

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

**05** 그림 (가)는 질량이  $m$ 인 위성이 질량이  $2M$ 인 행성을 중심으로 원 궤도 반지름이  $R$ 인 등속 원운동을 하는 모습을, (나)는 질량이  $2m$ 인 위성이 질량이  $M$ 인 행성을 중심으로 원 궤도 반지름이  $2R$ 인 등속 원운동을 하는 모습을 나타낸 것이다. 행성의 반지름은 (가)에서와 (나)에서가 같다.



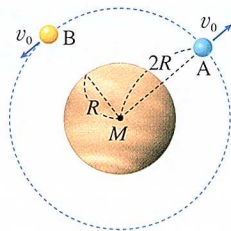
(가)에서가 (나)에서보다 큰 물리량으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

[보기]

- ㄱ. 위성의 속력
- ㄴ. 위성의 운동 에너지
- ㄷ. 행성의 탈출 속도

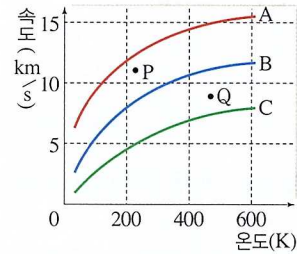
- ① ㄱ                      ② ㄷ                      ③ ㄱ, ㄴ  
④ ㄴ, ㄷ                ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

**06** 그림은 반지름이  $R$ 인 행성의 표면에서 발사된 물체 A가 행성의 중심으로부터  $2R$ 만큼 떨어진 지점을 속력  $v_0$ 으로 지나고 있고, 물체 B는 행성을 중심으로 반지름이  $2R$ 인 원 궤도를 따라 속력  $v_0$ 으로 등속 원운동을 하는 모습을 나타낸 것이다. A, B의 질량은 같다.



A가 행성의 표면에서 발사된 속력을 쓰시오. (단, A, B에는 지구에 의한 중력만 작용하며, 중력이 0인 지점에서 물체의 중력에 의한 위치 에너지는 0이다.)

**07** 그림은 질량이 같은 행성 P, Q의 탈출 속도와 표면 온도를 나타낸 것으로, 그래프의 선은 온도에 따른 기체 A, B, C의 평균 속도이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

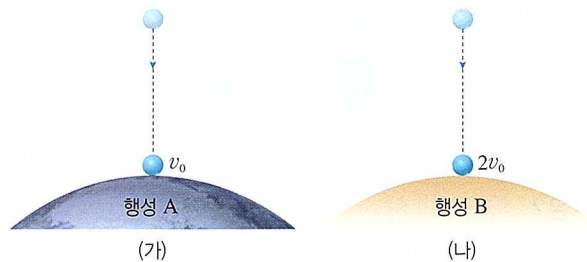
[보기]

- ㄱ. P의 표면에서 연직 위로 5 km/s의 속력으로 발사된 물체는 P로 다시 떨어진다.
- ㄴ. P, Q의 대기에 모두 존재하는 기체는 B와 C이다.
- ㄷ. 반지름은 P가 Q보다 작다.

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

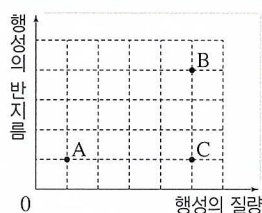
**서술형**

**08** 그림 (가), (나)는 행성 A, B의 표면으로부터 같은 높이에서 각각 동일한 물체를 가만히 놓았을 때, 물체가 행성 표면에 속력  $v_0$ ,  $2v_0$ 으로 도달하는 모습을 나타낸 것이다.



A, B의 탈출 속도를 비교하고, 그 까닭을 서술하시오. (단, 물체에는 각각 A, B에 의한 중력만 작용한다.)

**중요** 09 그림은 행성 A, B, C의 반지름과 질량을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

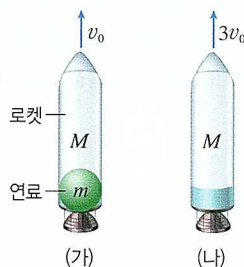
[보기]

- ㄱ. 동일한 물체가 행성의 표면에 정지해 있을 때, 물체에 작용하는 중력의 크기는 A에서 C에서보다 크다.
- ㄴ. 동일한 물체가 행성의 표면으로부터 같은 높이를 지나는 순간, 물체의 중력에 의한 위치 에너지는 B에서 C에서보다 크다.
- ㄷ. 탈출 속도는 B가 C보다 작다.

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

## B 발사체의 운동

**10** 그림 (가)는 우주 공간에서 질량이  $M$ 인 로켓이 질량이  $m$ 인 연료를 싣고  $v_0$ 의 속력으로 등속도 운동을 하는 모습을 나타낸 것이다. 그림 (나)는 (가)에서 로켓에 대해  $\frac{1}{2}v_0$ 의 속력으로 연료를 분출한 후 로켓이  $3v_0$ 의 속력으로 등속도 운동을 하는 모습을 나타낸 것이다.

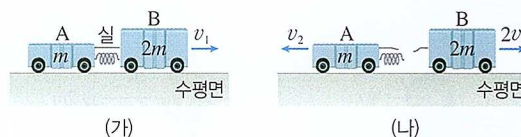


$\frac{M}{m}$ 은?

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

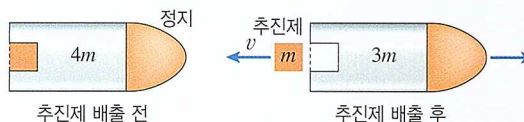
서술형

**11** 그림 (가)는 수평면에서 실로 연결되어 속력  $v_1$ 로 등속도 운동을 하는 수레 A, B를 나타낸 것으로, A와 B 사이에는 용수철이 압축되어 있다. 그림 (나)는 (가)에서 실을 끊었을 때, A, B가 반대 방향으로 각각  $v_2$ ,  $2v_2$ 의 속력으로 등속도 운동을 하는 것을 나타낸 것이다. A, B의 질량은 각각  $m$ ,  $2m$ 이다.



$v_1 : v_2$ 를 풀이 과정과 함께 구하시오. (단, 실과 용수철의 질량은 무시한다.)

**중요** **12** 그림은 질량이  $4m$ 인 우주선이 정지해 있다가 질량이  $m$ 인 추진제를  $v$ 의 속력으로 배출한 뒤 등속도 운동을 하는 모습을 나타낸 것이다.



추진제를 배출한 후 우주선의 속력은?

- ①  $\frac{1}{5}v$                       ②  $\frac{1}{4}v$                       ③  $\frac{1}{3}v$
- ④  $\frac{2}{3}v$                       ⑤  $\frac{3}{4}v$

**13** 그림은 로켓이 연료를 방출하며 운동하는 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은? (단, 공기 저항, 중력에 의한 효과는 무시한다.)

[보기]

- ㄱ. 로켓의 추진력과 로켓이 연료를 방출하는 힘은 작용 반작용 관계이다.
- ㄴ. 연료를 방출하는 동안 로켓의 운동량 크기는 일정하다.
- ㄷ. 로켓의 질량이 클수록 로켓의 지구에서의 탈출 속도는 크다.

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



# 실력 UP 문제

정답친해 30쪽

**01** 그림은 질량이 같은 물체 A, B가 동일한 행성을 중심으로 반지름이 각각  $r$ ,  $2r$ 인 궤도를 따라 등속 원운동을 하는 모습을 나타낸 것이다. A의 운동 에너지는  $E_0$ 이다.

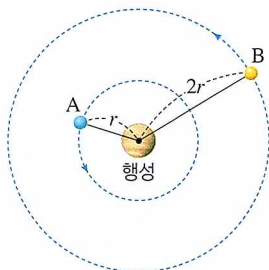
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

(단, A, B에는 행성에 의한 중력만 작용하고, 중력이 0인 지점에서 물체의 중력에 의한 위치 에너지는 0이다.)

[보기]

- ㄱ. 속력은 A가 B의 2배이다.
- ㄴ. 가속도의 크기는 A가 B의 4배이다.
- ㄷ. B의 역학적 에너지는  $-\frac{1}{2}E_0$ 이다.

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



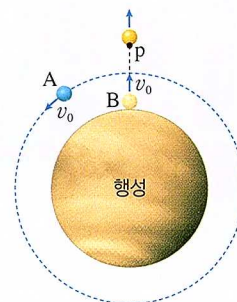
**03** 그림은 물체 A가 행성 주위를  $v_0$ 의 속력으로 등속 원운동을 하고, 행성의 표면에서  $v_0$ 의 속력으로 발사된 물체 B가 점 p를 지나는 순간의 모습을 나타낸 것이다. 질량은 A가 B보다 크고, A의 원 궤도의 반지름은 행성의 중심으로부터 p까지의 거리보다 작다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은? (단, A, B에는 행성에 의한 중력만 작용한다.)

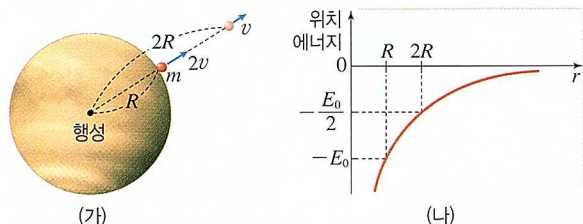
[보기]

- ㄱ. A의 가속도 크기는 일정하다.
- ㄴ. A의 운동 에너지는 p에서 B의 운동 에너지보다 크다.
- ㄷ. 행성의 탈출 속도는  $v_0$ 보다 크다.

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



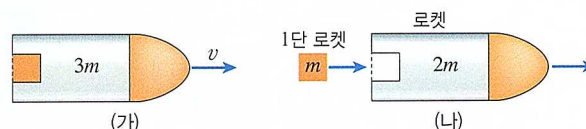
**02** 그림 (가)는 질량이  $m$ 인 물체를 반지름이  $R$ 인 행성의 표면에서 연직 위 방향으로  $2v$ 의 속력으로 발사시키는 모습을 나타낸 것이다. 물체는 행성의 중심으로부터  $2R$ 인 지점을  $v$ 의 속력으로 통과한다. 그림 (나)는 중력에 의한 위치 에너지를 행성의 중심으로부터의 거리  $r$ 에 따라 나타낸 것이다.



행성의 탈출 속도는? (단, 공기 저항은 무시한다.)

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

**04** 그림 (가)는 우주 공간에서 질량이  $3m$ 인 로켓이 속력  $v$ 로 등속도 운동을 하는 모습을 나타낸 것이다. 그림 (나)는 로켓에서 분리된 1단 로켓에 대해 로켓이 속력  $v$ 로 운동하는 것을 나타낸 것이다. (나)에서 로켓과 1단 로켓의 운동 방향은 같고, 1단 로켓의 질량은  $m$ 이다.



(나)에서 로켓의 속력은?

- ①  $\frac{1}{5}v$                       ②  $\frac{1}{4}v$                       ③  $\frac{1}{3}v$
- ④  $\frac{4}{3}v$                       ⑤  $\frac{3}{4}v$

# 정답 및 해설

내신만점문제 · 실력UP문제  
탈출 속도

## 02 / 탈출 속도

### 개념 확인 문제

62쪽

- ① 크다 ② 탈출 속도 ③ 질량 ④ 반지름 ⑤  $\geq$  ⑥ 온도  
⑦ 질량 ⑧ 지구 ⑨ 목성 ⑩ 큰 ⑪ 외력 ⑫ 크다

- 1 (1) ○ (2) ○ (3) × 2 ㉠  $G \frac{Mm}{R}$ , ㉡  $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$  3  $\frac{\sqrt{3}}{3}$  배  
4 ㉠ C, ㉡ A 5 C, D

1 (1), (2) 물체에 중력만 작용하면 역학적 에너지가 보존되므로, 물체의 운동 에너지와 중력에 의한 위치 에너지의 합인 역학적 에너지가 일정하다. 따라서 물체가 행성으로부터 임의의 위치에서 일정한 거리를 유지하며 운동을 하면 중력에 의한 위치 에너지가 일정하므로 물체의 운동 에너지도 일정하다.

(3) 행성의 중심으로부터 거리가 멀수록 물체의 중력에 의한 위치 에너지는 크다. 따라서 행성의 중심으로부터 떨어진 거리가 멀어질수록 중력에 의한 위치 에너지는 커진다.

2 행성의 표면에서 탈출 속도로 발사된 물체의 역학적 에너지는 0이므로  $\frac{1}{2}mv^2 - G \frac{Mm}{R} = 0$ 에서  $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이다.

3 질량  $M$ , 반지름  $R$ 인 행성에서의 탈출 속도  $v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이므로, A의 탈출 속도는  $\sqrt{\frac{2GM}{3R}}$ 이고, B의 탈출 속도는  $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이다. 따라서 A의 탈출 속도는 B의 탈출 속도의  $\frac{\sqrt{3}}{3}$  배이다.

4 행성의 반지름이 같을 때 행성의 질량이 클수록 탈출 속도가 크므로 질량이 가장 큰 행성은 C이다. 표면 온도가 높고 탈출 속도가 작은 A에서 질량이 작은 수소 기체가 가장 적게 존재한다.

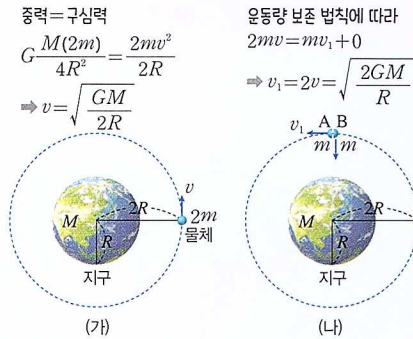
5 기체 분자의 평균 속도가 행성의 탈출 속도보다 작으면 행성의 대기에 존재할 수 있다. 따라서 평균 속도가 20 km/s인 기체 분자가 대기에 포함될 수 있는 행성은 C, D이다.

### 대표 자료 분석

63쪽

- 1  $-\frac{3}{4}E_0$  2  $E_0$  3 (1) 같다 (2) 증가 4 (1) ○ (2) ○ (3) ×

### 꼼꼼 문제 분석



1 중력 상수를  $G$ , 물체의 질량을  $2m$ 이라고 하자. 물체의 중력에 의한 위치 에너지는  $-E_0$ 이므로  $-E_0 = -G \frac{M(2m)}{2R}$ 이다. 물체의 속력을  $v$ 라고 하면, 물체에 작용하는 중력은 구심력과 같으므로  $G \frac{M(2m)}{4R^2} = \frac{2mv^2}{2R}$ 에서  $v = \sqrt{\frac{GM}{2R}}$ 이다. 따라서 (가)에서 물체의 역학적 에너지는  $-G \frac{M(2m)}{2R} + \frac{1}{2}m \left( \frac{GM}{2R} \right) = -G \frac{3Mm}{4R} = -\frac{3}{4}E_0$ 이다.

2 (가)에서 물체의 질량을  $2m$ , 속력을  $v$ , (나)에서 A의 속력을  $v_1$ 이라고 하자. 물체가 A, B로 분리되는 순간 운동량 보존 법칙을 적용하면,  $2mv = mv_1 + 0$ 에서  $v_1 = 2v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이다. 따라서 A의 운동 에너지는  $\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}m \left( \frac{2GM}{R} \right) = G \frac{Mm}{R} = E_0$ 이다.

3 (1) (가)에서 물체는 등속 원운동을 하므로 물체에 작용하는 중력의 크기는 구심력의 크기와 같다.  
(2) B가 낙하하는 동안, 지구 중심으로부터의 거리는 감소하므로 B에 작용하는 중력의 크기는 증가한다.

4 (1) 물체가 지구 중심으로부터  $3R$ 인 곳에서 등속 원운동을 하면 물체에 작용하는 중력은 구심력과 같으므로  $G \frac{M(2m)}{9R^2} = \frac{2mv^2}{3R}$ 에서  $v = \sqrt{\frac{GM}{3R}}$ 이다.

(2) 지구의 탈출 속도를  $v_0$ 이라고 하면  $\frac{1}{2}mv_0^2 = G \frac{Mm}{R}$ 에서  $v_0 = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이다. (나)에서 A의 속력은  $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이므로 A는 지구로부터 매우 먼 지점까지 도달할 수 있다.

(3) B가 지표면에 도달하는 순간 B의 운동 에너지를  $E_B$ 라고 하면, B의 역학적 에너지는 보존되므로  $-G \frac{Mm}{2R} = -G \frac{Mm}{R} + E_B$ 에서  $E_B = G \frac{Mm}{2R} = \frac{1}{2} E_0$ 이다.

### 내신만점문제

64쪽~66쪽

- 01 ④    02 ③    03 ④    04 ③    05 ⑤    06  $\sqrt{3}v_0$   
 07 ④    08 해설 참조    09 ⑤    10 ②  
 11 해설 참조    12 ③    13 ①

**01** 지구의 질량을  $M$ , 인공위성의 질량을  $m$ 이라고 하면, 인공위성의 중력에 의한 위치 에너지는  $-G \frac{Mm}{r} = -E_0$ 이다. 인공위성이 원 궤도를 따라 등속 원운동을 할 때 인공위성에 작용하는 중력은 구심력과 같으므로  $G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$ 에서  $\frac{1}{2}mv^2 = G \frac{Mm}{2r} = \frac{1}{2} E_0$ 이다.

**02** ㄱ. 물체에 작용하는 중력은 행성의 중심을 향하는 방향이므로, 물체가 행성의 표면에서 p에 도달하는 동안 물체에 작용하는 중력의 방향은 물체의 운동 방향과 반대이다.

ㄴ. 물체의 질량을  $m$ 이라고 하자. 물체가 행성의 표면에서 발사된 순간부터 p에 도달할 때까지 물체의 역학적 에너지는 보존되므로  $\frac{1}{2}mv^2 - G \frac{Mm}{R} = -G \frac{Mm}{2R}$ 이다. 따라서  $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ 이다.

**바로알기** ㄷ. 행성의 중심으로부터 거리가 멀수록 물체의 중력에 의한 위치 에너지가 크다. 따라서 물체의 중력에 의한 위치 에너지는 행성의 표면에서가 p에서보다 작다.

**03** 행성의 질량을  $M$ , 중력 상수를  $G$ 라 할 때, p에서 물체의 중력에 의한 위치 에너지는  $-G \frac{Mm}{4R} = -E_0$ 에서  $\frac{GM}{R} = \frac{4E_0}{m}$ 이다. q에서 물체의 속력을  $v$ 라고 하면, 물체의 역학적 에너지는 보존되므로  $-G \frac{Mm}{4R} = -G \frac{Mm}{2R} + \frac{1}{2}mv^2$ 에서  $v = \sqrt{\frac{GM}{2R}} = \sqrt{\frac{2E_0}{m}}$ 이다.

**04** ㄱ. A의 가속도 방향은 행성의 중심을 향한다. 따라서 A의 가속도 방향은 p에서와 q에서가 같다.

ㄴ. A가 행성을 향해 운동하는 동안 A의 역학적 에너지는 보존된다. 중력 상수를  $G$ , 행성의 질량을  $M$ , A, B의 질량을  $m$ 이

라고 하자. p에서 A의 역학적 에너지는  $-G \frac{Mm}{3r}$ 이고, q에서 A의 역학적 에너지는  $-G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2}mv^2$ 이다. 이를 정리하면  $-G \frac{Mm}{3r} = -G \frac{Mm}{r} + \frac{1}{2}mv^2$ 에서  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{2GMm}{3r}$ 이다. B의 속력을  $v_B$ 라고 할 때, B에 작용하는 중력은 구심력과 같으므로  $G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv_B^2}{r}$ 에서  $v_B = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ 이다. 따라서 B의 운동 에너지는  $\frac{GMm}{2r}$ 이므로 B의 운동 에너지는 q에서 A의 운동 에너지의  $\frac{3}{4}$ 배이다.

**바로알기** ㄷ. p에서 A의 중력에 의한 위치 에너지는  $-E_0 = -G \frac{Mm}{3r}$ 이므로, B의 역학적 에너지는  $\frac{1}{2}mv_B^2 - G \frac{Mm}{r} = -G \frac{Mm}{2r} = -\frac{3}{2} E_0$ 이다.

**05** ㄱ. 위성에 작용하는 중력은 구심력과 같다. 중력 상수를  $G$ , (가), (나)에서 위성의 속력을 각각  $v_{(가)}$ ,  $v_{(나)}$ 라고 하자. (가)에서  $G \frac{(2M)m}{R^2} = \frac{mv_{(가)}^2}{R}$ 이므로  $v_{(가)} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이고, (나)에서  $G \frac{M(2m)}{4R^2} = \frac{2mv_{(나)}^2}{2R}$ 이므로  $v_{(나)} = \sqrt{\frac{GM}{2R}}$ 이다. 따라서 위성의 속력은 (가)에서가 (나)에서보다 크다.

ㄴ. (가)에서 위성의 운동 에너지는  $\frac{1}{2}m \left( \frac{2GM}{R} \right) = G \frac{Mm}{R}$ 이

고, (나)에서 위성의 운동 에너지는  $\frac{1}{2}(2m) \left( \frac{GM}{2R} \right) = G \frac{Mm}{2R}$ 이다. 따라서 운동 에너지는 (가)에서가 (나)에서보다 크다.

ㄷ. (가), (나)에서 행성의 탈출 속도를 각각  $v_1$ ,  $v_2$ , 행성의 반지름을  $r$ 이라고 하자. (가)에서  $-G \frac{(2M)m}{r} + \frac{1}{2}mv_1^2 = 0$ 에서  $v_1 = \sqrt{\frac{4GM}{r}}$ 이고, (나)에서  $-G \frac{M(2m)}{r} + \frac{1}{2}(2m)v_2^2 = 0$ 에서  $v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$ 이다. 따라서 행성의 탈출 속도는 (가)에서가 (나)에서보다 크다.

**06** 중력 상수를  $G$ , 행성의 질량을  $M$ , A, B의 질량을  $m$ , A가 행성의 표면에서 발사된 속력을  $v$ 라고 하면, A의 역학적 에너지는 보존되므로  $\frac{1}{2}mv^2 - G \frac{Mm}{R} = \frac{1}{2}mv_0^2 - G \frac{Mm}{2R} \dots$  ①이다. B는 등속 원운동을 하므로 B에 작용하는 중력은 구심력과 같다.  $G \frac{Mm}{4R^2} = \frac{mv_0^2}{2R}$ 에서  $v_0 = \sqrt{\frac{GM}{2R}} \dots$  ②이다. 식 ②를

①에 대입하여 정리하면  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{GM}{2R}\right) + G\frac{Mm}{R} - G\frac{Mm}{2R} = \frac{3GMm}{4R}$ 이므로  $v = \sqrt{\frac{3GM}{2R}} = \sqrt{3}v_0$ 이다.

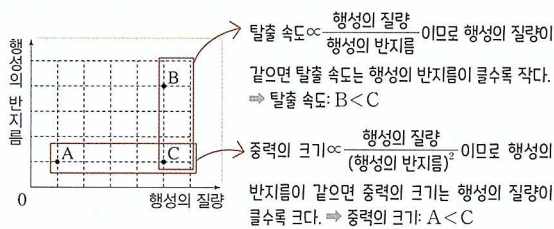
**07** ㄱ. P의 탈출 속도는 10 km/s보다 크다. P의 표면에서 연직 위로 5 km/s의 속력으로 발사된 물체는 P로 다시 떨어진다.  
ㄷ. 질량은 P와 Q가 같고, 탈출 속도는 P가 Q보다 크다. 따라서 행성의 반지름은 P가 Q보다 작다.

**바로알기** ㄴ. 어떤 기체의 평균 속도가 행성의 탈출 속도보다 작으면, 그 기체는 행성의 대기 성분에 존재한다. 따라서 P의 대기에 존재하는 기체는 B와 C이고, Q의 대기에 존재하는 기체는 C이다.

**08** **모범 답안** 탈출 속도는 A가 B보다 작다. 같은 높이에서 동일한 물체를 떨어뜨렸을 때 행성 표면에서의 속력은 A에서가 B에서보다 작으므로 행성의 표면에서 물체의 운동 에너지는 A에서가 B에서보다 작고, 물체를 가만히 놓은 지점에서 물체의 중력에 의한 위치 에너지도 (가)에서가 (나)에서보다 작다. 행성의 표면으로부터 물체를 가만히 놓은 지점의 높이는 (가)에서와 (나)에서가 같으므로  $\sqrt{\frac{\text{행성의 질량}}{\text{행성의 반지름}}}$ 은 (가)에서가 (나)에서보다 작다. 행성의 탈출 속도는  $\sqrt{\frac{\text{행성의 질량}}{\text{행성의 반지름}}}$ 에 비례하므로 탈출 속도는 A가 B보다 작다.

| 채점 기준                              | 배점    |
|------------------------------------|-------|
| 행성의 질량과 반지름을 이용하여 탈출 속도를 옳게 비교한 경우 | 100 % |
| 탈출 속도의 비교만 옳은 경우                   | 30 %  |

## 09 — 푼답 문제 분석



ㄴ. 행성의 중심으로부터 물체까지의 거리가 클수록 물체의 중력에 의한 위치 에너지가 크다. 동일한 물체가 행성의 표면으로부터 같은 높이를 지나는 순간, 행성의 중심으로부터 물체까지의 거리는 B에서가 C에서보다 크다. 따라서 물체의 중력에 의한 위치 에너지는 B에서가 C에서보다 크다.

ㄷ. 행성의 반지름은 B가 C보다 크고 질량은 B와 C가 같으므로 탈출 속도는 B가 C보다 작다.

**바로알기** ㄱ. 행성의 표면에 정지해 있는 동일한 물체에 작용하는 중력의 크기는  $\frac{\text{행성의 질량}}{(\text{행성의 반지름})^2}$ 에 비례한다. 행성의 반지름은

A와 C가 같고 질량은 A가 C보다 작으므로, 물체에 작용하는 중력의 크기는 A에서가 C에서보다 작다.

**10** 로켓에 대해  $\frac{1}{2}v_0$ 의 속력으로 연료가 분출되므로 운동량 보존 법칙을 적용하면  $(m+M)v_0 = 3Mv_0 + m\left(v_0 - \frac{1}{2}v_0\right)$ 이다. 이를 정리하면  $M = \frac{1}{4}m$ 이므로  $\frac{M}{m} = \frac{1}{4}$ 이다.

**11** **모범 답안** A와 B의 운동량의 총합은 (가)에서와 (나)에서가 같다.  $(m+2m)v_1 = -mv_2 + 2m(2v_2)$ 에서  $v_1 = v_2$ 이다. 따라서  $v_1 : v_2 = 1 : 1$ 이다.

| 채점 기준                     | 배점    |
|---------------------------|-------|
| 속력의 비를 풀이 과정과 함께 옳게 구한 경우 | 100 % |
| 속력의 비만 옳게 쓴 경우            | 30 %  |

**12** 추진제를 배출한 후 우주선의 속력을  $v_1$ 이라고 하면, 우주선의 운동량은 보존되므로  $0 = -mv + 3mv_1$ 이다. 따라서  $v_1 = \frac{1}{3}v$ 이다.

**13** ㄱ. 로켓의 추진력은 로켓에서 방출된 연료가 로켓을 미는 힘이다. 따라서 로켓의 추진력과 로켓이 연료를 방출하는 힘은 작용 반작용 관계이다.

**바로알기** ㄴ. 연료를 방출하기 전 로켓의 운동량은 연료의 운동량과 방출된 연료만큼 질량이 감소한 로켓의 운동량의 합과 같다. 따라서 로켓의 운동량 크기는 연료를 방출한 후가 방출하기 전보다 크므로, 연료를 방출하는 동안 로켓의 운동량 크기는 증가한다.  
ㄷ. 지구의 탈출 속도는 로켓의 질량과 관계없다. 행성의 질량이 크고 행성의 반지름이 작을수록 행성의 탈출 속도는 크다.

## 실력UP문제

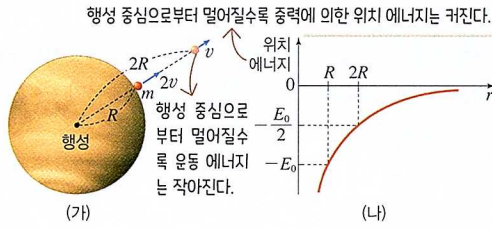
67쪽

01 ⑤    02 ③    03 ⑤    04 ④

**01** ㄴ. 중력 가속도  $g = \frac{GM}{R^2}$ 이다. 따라서 행성으로부터의 거리는 B가 A의 2배이므로, 가속도의 크기는 A가 B의 4배이다.  
ㄷ. A의 운동 에너지는  $E_0 = \frac{1}{2}m\left(\frac{GM}{r}\right)$ 이다. B의 역학적 에너지는  $-G\frac{Mm}{2r} + \frac{1}{2}m\left(\frac{GM}{2r}\right) = -G\frac{Mm}{4r} = -\frac{1}{2}E_0$ 이다.

**바로알기** ㄱ. 중력 상수를  $G$ , 행성의 질량을  $M$ , A, B의 질량을  $m$ , A, B의 속력을 각각  $v_A, v_B$ 라고 하면, 물체에 작용하는 중력과 구심력은 같으므로  $G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv_A^2}{r}$ 에서  $v_A = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ 이고,  $G \frac{Mm}{4r^2} = \frac{mv_B^2}{2r}$ 에서  $v_B = \sqrt{\frac{GM}{2r}}$ 이다. 따라서 속력은 A가 B의  $\sqrt{2}$ 배이다.

## 02 - 꼼꼼 문제 분석



역학적 에너지가 보존되므로

$$\begin{aligned} \text{행성 중심으로부터 } R \text{인 곳에서의 역학적 에너지} & \left( \frac{1}{2} m (2v)^2 - E_0 \right) \\ = \text{행성 중심으로부터 } 2R \text{인 곳에서의 역학적 에너지} & \left( \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} E_0 \right) \end{aligned}$$

㉓ 물체의 역학적 에너지는 보존되므로  $\frac{1}{2} m (2v)^2 - E_0 = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} E_0$ 에서  $v = \sqrt{\frac{E_0}{3m}}$ 이다. 행성의 탈출 속도를  $v_0$ 이라고 하면,  $\frac{1}{2} m v_0^2 - E_0 = 0$ 에서  $v_0 = \sqrt{\frac{2E_0}{m}} = \sqrt{6}v$ 이다.

**03** ㄱ. A는 등속 원운동을 하므로 행성의 중심으로부터 A까지의 거리는 일정하다. 따라서 A의 가속도 크기는 일정하다.  
 ㄴ. A의 속력은  $v_0$ 이고, p에서 B의 속력은  $v_0$ 보다 작다. 질량은 A가 B보다 크므로 운동 에너지는 A가 B보다 크다.  
 ㄷ. A는  $v_0$ 의 속력으로 등속 원운동을 하므로 A는 행성에서 탈출할 수 없다. 행성의 표면에서  $v_0$ 의 속력으로 발사된 물체가 A의 원 궤도를 통과할 때의 속력은  $v_0$ 보다 작으므로 B 또한 탈출할 수 없다. 따라서 행성의 탈출 속도는  $v_0$ 보다 크다.

**04** (가)에서 로켓의 운동량 크기는  $3mv$ 이다. (나)에서 로켓과 1단 로켓의 속력을 각각  $v_A, v_B$ 라고 하면, 1단 로켓에 대해 로켓이  $v$ 의 속력으로 운동하므로  $v_A - v_B = v$ 에서  $v_B = v_A - v$ 이다. (나)에서 로켓과 1단 로켓의 운동 방향은 같으므로 운동량 보존 법칙을 적용하면,  $3mv = mv_B + 2mv_A$ 에서  $3mv = mv_A - mv + 2mv_A$ 이다. 따라서  $v_A = \frac{4}{3}v$ 이다.

## 03 / 일반 상대성 이론

### 개념 확인문제

70쪽

- ① 가속 좌표계 ② 관성력 ③ 관성 ④ 원심력 ⑤ 반대 ⑥ 등가 원리 ⑦ 중력

- 1 (1) ○ (2) × (3) ○ (4) ○ 2 (1) B (2) A (3) A (4) B  
 3 (1) ㄱ, ㄴ (2) ㄷ, ㄹ (3) ㄴ, ㄹ 4 (1) ○ (2) ○ (3) ○

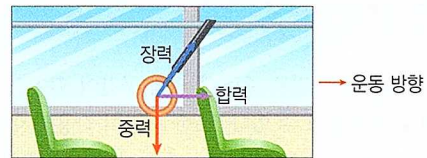
1 (1) 관성력은 가속 좌표계의 가속도 방향과 반대 방향으로 나타난다.

(2) 가속도가  $\vec{a}$ 인 가속 좌표계에 있는 질량이  $m$ 인 물체에 나타나는 관성력의 크기는 가속도의 크기와 질량에 비례하고, 방향은 가속도의 방향과 반대 방향이므로 관성력은  $-m\vec{a}$ 이다.

(3) 구심력은 관성 좌표계 안에서 등속 원운동을 하는 물체에 작용하는 힘이다.

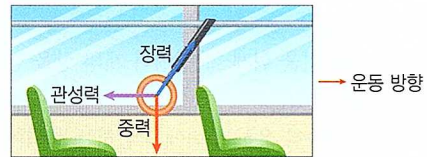
(4) 원심력은 가속 좌표계 안에서 등속 원운동을 하는 관찰자가 느끼는 관성력이다.

2 (1), (4) 지면에 정지해 있는 관찰자가 가속도 운동하는 버스를 관찰하면, 버스 안의 손잡이에는 중력과 줄의 장력이 작용하여 오른쪽 방향으로 가속도 운동을 하는 것으로 보인다.



⦿ 지면에 정지한 관찰자가 볼 때

(2), (3) 버스 안의 관찰자가 볼 때, 버스 안의 손잡이에는 중력과 줄의 장력, 가속 방향과 반대 방향으로 관성력이 작용하여 손잡이가 정지해 있는 것으로 보인다.



⦿ 버스 안의 관찰자가 볼 때

3 관성력은 가속 좌표계에서 작용하며, 가속 좌표계의 가속도 방향과 반대 방향으로 나타난다.

(1) 엘리베이터를 탄 사람에게 중력과 같은 방향으로 관성력이 작용할 때 몸무게가 증가하여 측정된다. 따라서 가속도의 방향은 연직 위 방향이므로 엘리베이터가 위로 출발할 때와 아래로 내려가다 멈출 때가 해당한다.