

훌륭한 수학자는 정리를 증명하고,
위대한 수학자는 추측을 세우며,
가장 위대한 수학자는 정의를 만든다.

개념 체크

⑤ 열평형 상태: 두 물체의 온도가 같아져 더 이상 온도가 변하지 않는 상태이다.

⑥ 이상 기체: 분자의 부피를 무시할 수 있으며, 분자들 사이에 충돌 이외의 다른 상호 작용을 하지 않는 기체이다. 일정량의 이상 기체에 대하여 $\frac{\text{압력} \times \text{부피}}{\text{절대 온도}}$ 가 일정하게 유지된다.

1. 온도가 높은 물체와 낮은 물체를 접촉시켰을 때 열은 저절로 온도가 (높은, 낮은) 물체에서 온도가 (높은, 낮은) 물체로 이동한다.

2. () 상태는 온도가 다른 두 물체 사이에서 열이 이동하여 온도가 같아져 더 이상 온도가 변하지 않는 상태이다.

3. ()은 단위 면적에 수직으로 작용하는 힘으로, 1 Pa(파스칼)일 때 1 m²의 면적에 ()만큼의 힘이 작용한다.

4. 기체의 부피가 (증가, 감소)하면 기체는 외부에 일을 하게 되고, 기체가 외부로부터 일을 받으면 기체의 부피가 (증가, 감소)한다.

정답

1. 높은, 낮은
2. 열평형
3. 압력, 1 N
4. 증가, 감소

1 열역학 제1법칙

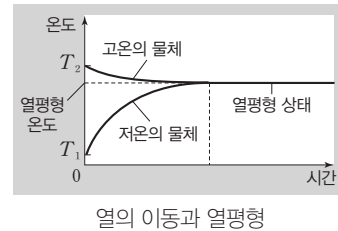
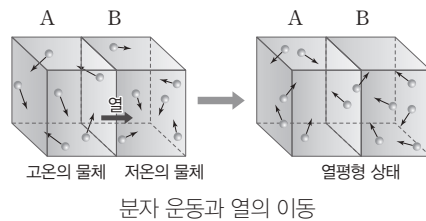
(1) 온도: 물체의 차갑고 따뜻한 정도를 수치로 나타낸 물리량이다.

- ① 섭씨온도: 1기압에서 순수한 물이 어는 온도를 0 °C, 끓는 온도를 100 °C로 정하고 그 사이를 100등분하여 1 °C 간격으로 눈금을 나타낸 온도이다.
- ② 절대 온도: 섭씨온도와 눈금 간격은 같으나 열역학적 최저 온도인 -273 °C를 0 K(켈빈)으로 정한 온도로, 절대 온도와 섭씨온도를 각각 T, t 라고 할 때 다음 관계가 성립한다.

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$$

• 이상 기체 분자들의 평균 운동 에너지는 절대 온도에 비례한다.

- ③ 열: 물체의 온도와 상태를 변화시키는 원인으로, 에너지의 일종이므로 열에너지라고도 한다.
- ④ 열의 이동: 열은 저절로 온도가 높은 물체에서 온도가 낮은 물체로 이동한다. 고온의 물체에서 저온의 물체로 이동한 열에너지의 양을 열량이라고 하며, 열량의 단위는 cal 또는 J을 사용한다.
- ⑤ 열평형 상태: 온도가 다른 두 물체 사이에서 열이 이동하여 온도가 같아져 더 이상 온도가 변하지 않는 상태이다.



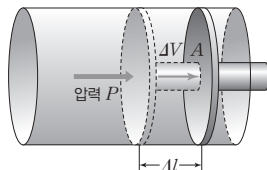
(2) 기체가 하는 일

- ① 이상 기체: 분자의 부피를 무시할 수 있고 충돌하는 동안 에너지 손실이 없는 기체로, 퍼텐셜 에너지가 없으므로 기체 분자의 역학적 에너지는 운동 에너지와 같다. 실제 기체는 압력이 낮거나, 온도가 높거나, 밀도가 작으면 이상 기체처럼 행동한다.
- ② 압력(P): 단위 면적(A)에 수직으로 작용하는 힘(F)이다.

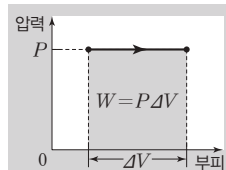
$$\text{압력} = \frac{\text{힘}}{\text{면적}}, P = \frac{F}{A} \quad [\text{단위: Pa(파스칼), } 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2]$$

- ③ 기체에 열을 가하면 온도나 부피의 변화가 일어난다.

- 기체가 팽창하면 기체가 외부에 일을 하게 되고, 기체가 외부로부터 일을 받으면 기체가 수축한다.
- 압력이 일정할 때 기체가 하는 일은 다음과 같다.



$$W = F \Delta l = P A \Delta l = P \Delta V$$

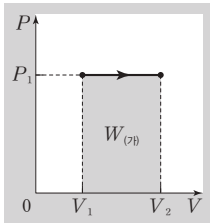


압력-부피 그래프에서 그래프 아래 면적은 기체가 외부에 한 일이다.

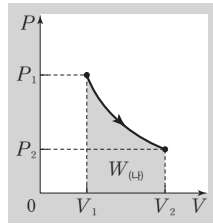
부피 변화	일의 부호와 의미
증가 ($\Delta V > 0$)	기체가 외부에 일을 한다. $\Rightarrow W > 0$
감소 ($\Delta V < 0$)	기체가 외부로부터 일을 받는다. $\Rightarrow W < 0$

- ④ 찌그러진 탁구공을 뜨거운 물에 넣으면 부피가 증가하는 것은 열에 의해 탁구공 내부의 기체의 압력이 커져 기체의 부피가 증가했기 때문이다. 이때 공 내부의 공기가 열을 흡수하여 압력이 증가하면 공 안에서 바깥쪽으로 힘을 작용하여 부피가 증가하므로 공 내부의 공기는 외부에 일을 한다.

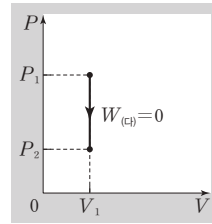
과학 돋보기

압력(P)-부피(V) 그래프에서 기체가 한 일

(가)



(나)



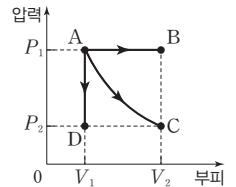
(다)

- (가) 과정: 압력이 P_1 로 일정하고 부피가 V_1 에서 V_2 로 증가한 경우, 기체가 한 일은 그래프 아래의 면적인 $W_{(가)} = P_1(V_2 - V_1)$ 이다.
- (나) 과정: 압력이 P_1 에서 P_2 로 감소하고 부피가 V_1 에서 V_2 로 증가한 경우, 기체가 한 일은 그래프 아래의 면적인 $W_{(나)}$ 이다.
- (다) 과정: 부피가 V_1 로 일정하고 압력이 P_1 에서 P_2 로 변한 경우, 기체의 부피 변화가 없으므로 기체가 한 일은 $W_{(다)} = 0$ 이다.
- 기체가 한 일을 비교하면 $W_{(가)} > W_{(나)} > W_{(다)} = 0$ 이다.

개념 체크

- ➡ **경로에 따른 일:** 기체가 한 상태에서 다른 상태로 변하는 경우는 여러 경로가 있다. 이때 기체가 한 일은 경로에 따라 다른 값을 가질 수 있다.
- ➡ **압력-부피 그래프와 일:** 압력-부피 그래프에서 그래프 아래의 면적은 기체가 외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일과 같다.

[1~3] 그림은 일정량의 이상 기체가 각각 상태 $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$, $A \rightarrow D$ 를 따라 변하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다.



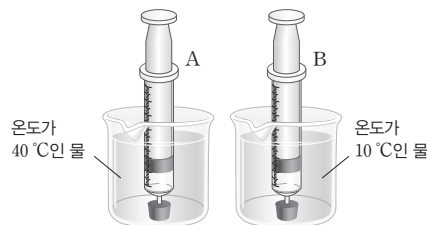
1. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 ()이다.
2. 기체가 외부에 한 일은 $A \rightarrow B$ 과정에서가 $A \rightarrow C$ 과정에서보다 (크다, 작다).
3. $A \rightarrow D$ 과정에서 기체의 온도는 (증가, 감소)한다.

탐구자료 살펴보기

열의 이동과 기체가 하는 일

과정

- (1) 주사기 A, B에 각각 온도가 같은 공기 30 mL를 넣고 고무마개로 막는다.
- (2) 그림과 같이 A, B를 각각 온도가 40°C , 10°C 인 물에 담긴 비커에 넣고 충분한 시간이 지나 피스톤이 움직이지 않을 때 공기의 부피를 측정한다.



결과

주사기	공기의 처음 부피(mL)	공기의 나중 부피(mL)
A	30	35
B	30	27

point

- A 안의 공기의 온도는 물의 온도보다 낮아 공기는 열을 흡수하여 온도가 올라간다.
- B 안의 공기의 온도는 물의 온도보다 높아 공기는 열을 방출하여 온도가 내려간다.
- 물과 주사기 안 공기의 온도가 같아 열평형을 이루면 주사기의 피스톤이 움직이지 않는다.
- A 안의 공기의 부피는 증가하므로 공기는 외부에 일을 하고, B 안의 공기의 부피는 감소하므로 공기는 외부로부터 일을 받는다.

정답

1. $P_1(V_2 - V_1)$
2. 크다
3. 감소

개념 체크

- **기체의 내부 에너지:** 기체 분자들이 가지는 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지의 총합이다.
- **이상 기체의 내부 에너지:** 분자들이 충돌 이외의 상호 작용을 하지 않으므로 퍼텐셜 에너지가 0이다. 따라서 이상 기체의 내부 에너지는 분자들의 운동 에너지의 총합과 같다.
- **이상 기체의 내부 에너지와 절대 온도:** 일정량의 이상 기체의 내부 에너지는 절대 온도에 비례한다.

1. 기체의 () 에너지는 기체 분자들이 가지는 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지의 총합이다.
2. 이상 기체의 경우 분자 사이의 인력이 없으므로 () 에너지는 0이고, 이상 기체 분자 1개의 평균 운동 에너지는 기체의 ()에 비례한다.
3. 이상 기체의 절대 온도가 ()인 경우 내부 에너지가 0이다.
4. 일정량의 이상 기체의 온도가 높아질 때, 내부 에너지는 (증가한다, 일정하다, 감소한다).

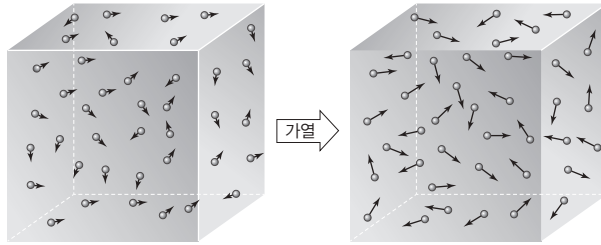
정답

1. 내부
2. 퍼텐셜, 절대 온도
3. 0 K
4. 증가한다

(3) 기체의 내부 에너지

- ① 내부 에너지(U): 기체 분자의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지의 총합을 말한다.
- ② 이상 기체는 분자 사이의 인력이 없으므로 퍼텐셜 에너지가 없다. 따라서 이상 기체의 내부 에너지는 운동 에너지만의 총합으로 나타내고, 절대 온도에 비례한다.
- ③ 이상 기체 분자 1개의 평균 운동 에너지($\overline{E_k}$)는 절대 온도(T)에 비례하므로, 이상 기체의 내부 에너지(U)는 기체 분자의 수(N)와 절대 온도(T)에 각각 비례한다.

$$U = N\overline{E_k} \propto NT$$



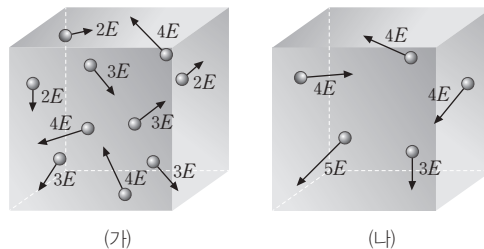
온도가 낮은 기체를 가열하여 온도가 높은 기체로 변화시키면 기체의 내부 에너지는 증가한다.

- 이상 기체의 분자 수가 일정한 경우 절대 온도가 2배로 증가하면 이상 기체의 내부 에너지도 2배가 된다.
- 절대 온도 0 K은 이상 기체 분자들이 전혀 움직이지 않는 상태의 온도로 -273.15°C 에 해당하며, 실제 자연계에서는 존재할 수 없는 이론적인 온도이다.

탐구자료 살펴보기

내부 에너지와 평균 운동 에너지 비교

자료 그림 (가), (나)는 상자 속에 들어 있는 이상 기체의 분자들이 가지는 운동 에너지를 나타낸 것이다.



분석

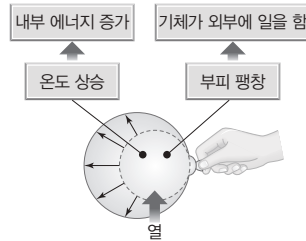
구분	이상 기체의 내부 에너지	이상 기체의 평균 운동 에너지
(가)	$30E$	$3E$
(나)	$20E$	$4E$

point

- 기체의 내부 에너지는 (가)에서가 (나)에서보다 크고, 기체 분자의 평균 운동 에너지는 (나)에서가 (가)에서보다 크다.
- 이상 기체 분자의 평균 운동 에너지는 절대 온도에 비례하므로, 절대 온도는 (나)에서가 (가)에서보다 높다.

(4) **열역학 제1법칙**: 기체가 흡수한 열량(Q)은 기체의 내부 에너지 증가량(ΔU)과 기체가 외부에 한 일(W)의 합과 같다. $\Rightarrow Q = \Delta U + W$

- ① 열역학 제1법칙은 열에너지와 역학적 에너지를 포함한 에너지 보존 법칙이며, 에너지는 다른 형태로 전환될 수 있지만 에너지의 총량은 변하지 않는다는 것을 의미한다.
- ② 풍선 내부의 기체를 가열하면 기체의 온도가 올라가고, 풍선이 팽창하며 대기를 밀어내는 일을 한다. 이때 풍선 내부의 기체가 흡수한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 기체가 외부에 한 일의 합과 같다.



③ 부호와 물리량 0의 의미

구분	(+)	(-)	0
Q	열을 흡수	열을 방출	열 흡수·방출 없음
ΔU	내부 에너지 증가	내부 에너지 감소	기체 내부 에너지 일정(온도 일정)
W	외부에 일을 함	외부로부터 일을 받음	기체 부피 일정

④ 제1종 영구 기관: 외부에서 에너지를 공급받지 않아도 계속 작동하는 열기관을 제1종 영구 기관이라고 한다. 제1종 영구 기관은 열역학 제1법칙, 즉 에너지 보존 법칙에 어긋나므로 만들 수 없다.

개념 체크

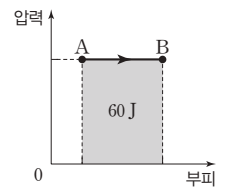
⑤ **열역학 제1법칙**: 기체의 내부 에너지 증가량은 기체가 외부로부터 흡수한 열량에서 외부에 한 일을 뺀 값과 같다.

$$\Delta U = Q - W, Q = \Delta U + W$$

⑥ **제1종 영구 기관**: 에너지를 공급하지 않아도 계속 작동하는 열기관으로, 열역학 제1법칙에 위배되므로 제작이 불가능하다.

1. 기체가 흡수한 열량은 기체의 () 증가량과 기체가 (외부에 한, 외부로부터 받은) 일의 합과 같다.

[2~3] 그림은 일정량의 이상 기체의 상태가 A → B로 변할 때 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. A → B 과정에서 기체가 흡수한 열량은 150 J이고, A와 B를 연결한 그래프 아래의 면적은 60 J이다.



2. A → B 과정에서 기체가 (외부에 한, 외부로부터 받은) 일은 ()이다.

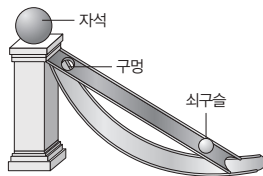
3. A → B 과정에서 기체의 내부 에너지 (증가량, 감소량)은 ()이다.

탐구자료 살펴보기

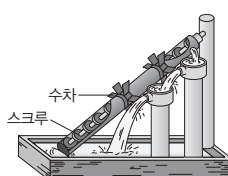
제1종 영구 기관

자료 다음은 어떤 발명가가 말한 무한 에너지 생산 장치에 대한 설명이다.

- (가) 자석에 의해 쇠구슬이 비탈면을 따라 끌려 올라가다가 구멍으로 떨어진 후, 굽은 면을 따라 원래의 위치로 되돌아간다. 쇠구슬의 운동 에너지를 사용한 후 자석이 쇠구슬을 당겨 비탈면을 따라 끌려 올라가며 계속해서 작동한다. 이 장치를 이용하면 에너지를 계속 생산할 수 있다.
- (나) 물이 떨어지며 스크루가 연결된 수차를 회전시키고, 수차의 회전 에너지를 이용하여 아래쪽 물을 위쪽으로 이동시키면 영원히 작동하는 장치를 만들 수 있다.



(가)



(나)

분석

(가) 쇠구슬이 비탈면을 따라 올라간다면, 구멍으로 떨어져도 자기력 때문에 다시 처음 위치로 갈 수 없다. 즉, 쇠구슬을 원래의 위치로 되돌리려면 별도의 에너지가 필요하다.

(나) 물의 처음 중력 퍼텐셜 에너지보다 수차를 돌리는 에너지와 스크루가 연결된 수차의 회전 에너지의 합이 더 크기 때문에 존재할 수 없는 장치이다.

point

• 에너지의 공급 없이 에너지를 계속 생산하는 장치는 존재할 수 없다.

정답

- 내부 에너지, 외부에 한
- 외부에 한, 60 J
- 증가량, 90 J

개념 체크

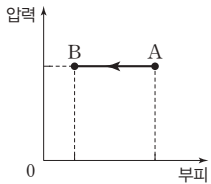
⑤ **등압 팽창**: 압력이 일정한 상태로 부피가 증가하는 열역학 과정이다. 부피가 팽창하므로 외부에 일을 하며, 기체 분자의 운동이 활발해지므로 내부 에너지가 증가한다.

⑥ **보일-샤를 법칙**: 일정량의 이상 기체에 대하여 $\frac{\text{압력} \times \text{부피}}{\text{절대 온도}}$ 가 일정하게 유지된다.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

1. 기체의 압력이 일정한 상태에서 외부로부터 열을 흡수하면 부피가 (증가, 감소)하고, 기체의 온도는 (증가, 감소)한다.

[2~4] 그림은 일정량의 이상 기체의 상태가 A → B로 변할 때 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다.



2. A → B 과정에서 기체의 온도는 (증가, 감소)한다.

3. A → B 과정에서 기체는 (외부에 일을 한다, 외부로부터 일을 받는다) .

4. A → B 과정에서 기체가 (흡수, 방출)한 열량은 기체의 내부 에너지 감소량보다 (크다, 작다) .

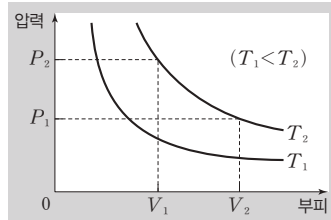
정답

1. 증가, 증가
2. 감소
3. 외부로부터 일을 받는다
4. 방출, 크다

(5) 열역학 과정

① 이상 기체의 상태 변화 그래프

- 그림과 같이 기체의 한 상태는 압력(P), 부피(V), 온도(T)의 세 가지 양으로 나타낸다.
- 온도가 같은 점을 이은 선을 등온선이라고 한다.



② 열역학 과정에서 일정하거나 0인 물리량

구분	등압(압력이 일정한) 과정	등적(부피가 일정한) 과정	등온(온도가 일정한) 과정	단열(열 출입이 없는) 과정
일정하거나 0인 물리량	압력 일정	부피 일정, 부피 변화량=0, 기체가 한 일=0	온도 일정, 내부 에너지 일정, 내부 에너지 변화량=0	열 출입=0

③ 등압 과정: 기체의 압력이 일정하게 유지되면서 기체의 부피와 온도가 변하는 과정이다 ($\Delta P = 0$).

- 기체가 흡수한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 기체가 외부에 한 일의 합과 같다.

$$Q = \Delta U + W$$

- 샤를 법칙에 따라 기체의 절대 온도가 올라가면 기체의 부피도 절대 온도에 비례하여 증가한다($\Delta T > 0 \Rightarrow \Delta V > 0$).

구분	등압 팽창	등압 수축
압력-부피 그래프		
기체가 외부에 한 일	$\Delta V > 0, W > 0$	$\Delta V < 0, W < 0$
내부 에너지 변화	$\Delta T > 0, \Delta U > 0$	$\Delta T < 0, \Delta U < 0$
특징	기체가 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일과 기체의 내부 에너지 증가량의 합과 같다. 따라서 기체의 부피, 내부 에너지, 절대 온도는 모두 증가한다.	기체가 방출한 열량은 기체가 외부로부터 받은 일과 기체의 내부 에너지 감소량의 합과 같다. 따라서 기체의 부피, 내부 에너지, 절대 온도는 모두 감소한다.

④ 등적 과정: 기체의 부피가 일정하게 유지되면서 기체의 압력과 온도가 변하는 과정이다 ($\Delta V = 0, W = 0$).

- 기체가 외부에 한 일이 0이므로 기체가 흡수한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다.

$$Q = \Delta U$$

- 기체의 절대 온도가 올라가면 기체의 압력도 비례하여 증가한다($\Delta T > 0 \Rightarrow \Delta P > 0$).
- 부피가 변하지 않는 밀폐된 용기 내부의 기체가 받은 열은 모두 내부 에너지 증가에 사용되어 기체의 압력은 증가하고 온도는 올라간다.

구분	등적 가열(압력 증가)	등적 냉각(압력 감소)
압력-부피 그래프		
기체가 외부에 한 일	$\Delta V = 0, W = 0$	$\Delta V = 0, W = 0$
내부 에너지 변화	$\Delta T > 0, \Delta U > 0$	$\Delta T < 0, \Delta U < 0$
특징	기체가 흡수한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다. 따라서 기체의 압력, 내부 에너지는 증가하고 절대 온도는 올라간다.	기체가 방출한 열량은 기체의 내부 에너지 감소량과 같다. 따라서 기체의 압력, 내부 에너지는 감소하고 절대 온도는 내려간다.

- ⑤ 등온 과정: 기체의 온도가 일정하게 유지되면서 기체의 부피와 압력이 변하는 과정이다 ($\Delta T = 0, \Delta U = 0$).

- 기체의 내부 에너지 변화량이 0이므로 기체가 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일과 같다.

$$Q = W$$

- 보일 법칙에 따라 기체의 부피가 증가하면 기체의 압력은 감소한다($\Delta V > 0 \Rightarrow \Delta P < 0$).

구분	등온 팽창	등온 압축
압력-부피 그래프		
기체가 외부에 한 일	$\Delta V > 0, W > 0$	$\Delta V < 0, W < 0$
내부 에너지 변화	$\Delta T = 0, \Delta U = 0$	$\Delta T = 0, \Delta U = 0$
특징	기체가 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일과 같다. 기체의 부피는 증가하고, 압력은 감소한다. 압력-부피 그래프 아래의 면적은 기체가 흡수한 열량 또는 기체가 외부에 한 일과 같다.	기체가 방출한 열량은 기체가 외부로부터 받은 일과 같다. 기체의 부피는 감소하고, 압력은 증가한다. 압력-부피 그래프 아래의 면적은 기체가 방출한 열량 또는 기체가 외부로부터 받은 일과 같다.

- ⑥ 단열 과정: 기체가 외부와의 열 출입이 없는 상태에서 부피가 변하는 과정이다($Q = 0$).

- 기체가 흡수 또는 방출한 열량이 0이므로 기체가 외부에 한 일은 기체의 내부 에너지 감소량과 같고, 기체가 외부로부터 받은 일은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다.

$$\Delta U = -W$$

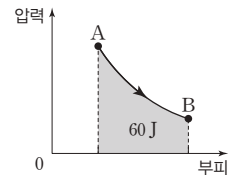
- 기체의 부피가 증가하면 기체의 온도는 내려간다($\Delta V > 0 \Rightarrow \Delta T < 0$).

개념 체크

- ⑤ 등적 과정: 기체가 외부에 한 일이 0이므로 기체에 가한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다.
- ⑤ 등온 과정: 기체의 내부 에너지 변화량이 0이므로 기체에 가한 열량은 기체가 외부에 한 일과 같다.
- ⑤ 보일 법칙: 기체의 온도가 일정할 때 기체의 부피는 압력에 반비례한다.
- ⑤ 등온 팽창: 기체의 온도가 일정하므로 내부 에너지가 일정하다. 따라서 외부로부터 흡수한 열량만큼 외부에 일을 한다.

1. 기체의 부피가 일정한 상태에서 외부로부터 열을 흡수하면 압력은 (증가, 감소)하고, 기체의 온도는 (증가, 감소)한다.

[2~4] 그림은 일정량의 이상 기체의 상태가 A → B로 변할 때 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. A → B 과정은 등온 과정이고, A와 B를 연결한 그래프 아래의 면적은 60 J이다.



2. A → B 과정에서 기체의 내부 에너지는 (증가한다, 일정하다, 감소한다).
3. A → B 과정에서 기체가 외부에 한 일은 () 이다.
4. A → B 과정에서 기체가 (흡수, 방출)한 열량은 () 이다.

정답

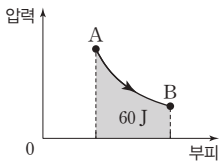
1. 증가, 증가
2. 일정하다
3. 60 J
4. 흡수, 60 J

개념 체크

- 단열 팽창: $Q = \Delta U + W = 0$ 에서 $\Delta U = -W$ 이다. 따라서 기체가 외부에 한 일만큼 내부 에너지가 감소한다.
- 단열 팽창과 단열 압축: 단열 팽창을 하면 외부에 한 일만큼 내부 에너지가 감소하고, 단열 압축을 하면 외부로부터 받은 일만큼 내부 에너지가 증가한다.
- 구름 생성과 단열 팽창: 공기 덩어리가 상승하면 압력이 낮아지므로 부피가 팽창한다. 이때 공기 덩어리의 부피가 매우 크므로 단위 부피당 표면적이 매우 작아 열 출입을 무시할 수 있다. 따라서 공기 덩어리가 상승하면서 구름이 생성되는 것은 단열 팽창으로 설명할 수 있다.

1. 기체가 외부와의 열 출입이 없는 상태에서 부피가 (증가, 감소)하면 기체의 온도는 올라간다.

[2~4] 그림은 일정량의 이상 기체의 상태가 A → B로 변할 때 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. A → B 과정은 단열 과정이고, A와 B를 연결한 그래프 아래의 면적은 60 J이다.



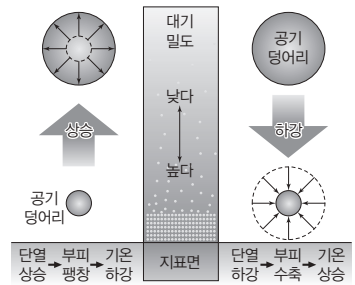
- A → B 과정에서 기체의 온도는 (증가, 감소)한다.
- A → B 과정에서 기체가 외부에 한 일은 ()이다.
- A → B 과정에서 기체의 내부 에너지 (증가량, 감소량)은 ()이다.

정답

- 감소
- 감소
- 60 J
- 감소량, 60 J

구분	단열 팽창	단열 압축
압력-부피 그래프		
기체가 외부에 한 일	$\Delta V > 0, W > 0$	$\Delta V < 0, W < 0$
내부 에너지 변화	$\Delta T < 0, \Delta U < 0$	$\Delta T > 0, \Delta U > 0$
특징	기체가 외부에 한 일은 기체의 내부 에너지 감소량과 같다. 기체의 부피는 증가하고, 압력은 감소하며 온도는 내려간다. 압력-부피 그래프의 아래 면적은 기체가 외부에 한 일 또는 기체의 내부 에너지 감소량과 같다.	기체가 외부로부터 받은 일은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다. 기체의 부피는 감소하고, 압력은 증가하며 온도는 올라간다. 압력-부피 그래프의 아래 면적은 기체가 외부로부터 받은 일 또는 기체의 내부 에너지 증가량과 같다.

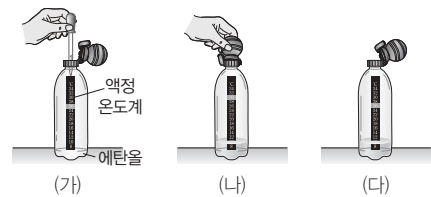
- 단열 팽창과 구름의 생성: 두터운 공기층 사이에서는 열의 이동이 느리게 일어나므로, 수증기를 포함하는 공기 덩어리가 갑자기 상승하면 기압이 낮아져 공기 덩어리가 단열 팽창을 한다. 따라서 공기 덩어리의 온도가 내려가고, 수증기가 응결하여 구름이 생성된다.
- 높새바람: 우리나라의 동해로부터 불어온 공기 덩어리가 태백산맥을 넘어 서쪽으로 불면 고온 건조한 바람이 되는데, 이것을 높새바람이라고 한다. 공기 덩어리가 산을 타고 상승할 때는 단열 팽창을 하면서 온도가 내려가고, 공기 덩어리가 산을 넘어서 하강할 때는 단열 압축을 하면서 온도가 올라간다.



탐구자료 살펴보기 단열 압축과 단열 팽창

과정

- 그림 (가)와 같이 페트병 안에 액정 온도계와 에탄올 5 mL 정도를 넣는다.
- 그림 (나)와 같이 페트병 입구를 공기 압축 마개로 닫은 후 온도를 측정하고, 공기를 빠르게 압축한 후 온도를 측정한다.
- 그림 (다)와 같이 공기가 더 이상 들어가지 않으면 공기 압축 마개의 뚜껑을 빠르게 열고 페트병 안에서 나타나는 현상과 온도 변화를 관찰한다.



결과

- (나)의 결과: 공기를 압축한 후 액정 온도계의 온도가 올라간다.
- (다)의 결과: 페트병 안에 안개와 같은 것이 나타나고, 액정 온도계의 온도가 내려간다.

point

- 기체를 빠르게 압축하면 외부와의 열 출입이 없는 단열 압축 과정이 진행되어 기체의 온도가 올라가고, 기체를 빠르게 팽창시키면 외부와의 열 출입이 없는 단열 팽창 과정이 진행되어 기체의 온도가 내려가면서 수증기가 응결하여 구름이 형성된다.

2 열역학 제2법칙

(1) 가역 현상과 비가역 현상

① 가역 현상: 물체가 외부에 어떠한 변화도 남기지 않고 처음의 상태로 되돌아가는 현상이다.

예 이상적인 용수철의 진동, 진공 중에서 운동하는 진자

② 비가역 현상: 어떤 현상이 한쪽 방향으로만 저절로(자발적으로) 일어나지만, 그 반대 방향으로 저절로 일어나지 않는 현상이다. 가역 현상은 마찰이나 공기 저항이 없는 매우 이상적인 상황에서만 가능하기 때문에 자연 현상은 대부분 한쪽 방향으로만 일어나는 비가역 현상이다.

예 공기 중에서 용수철의 진동 또는 진자에서 감쇠 진동, 열의 이동, 잉크 또는 연기의 확산



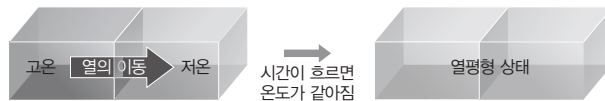
(2) 열역학 제2법칙

① 자연 현상은 대부분 비가역적으로 일어나며, 무질서도가 증가하는 방향으로 일어난다.

② 어떤 계를 고립시켜 외부와의 상호 작용이 없도록 했을 때 그 계의 원자나 분자들이 처음 상태보다 더 무질서한 배열을 이루는 방향으로 반응이 일어나며, 그 반대 현상은 자발적으로 일어나지 않는다.

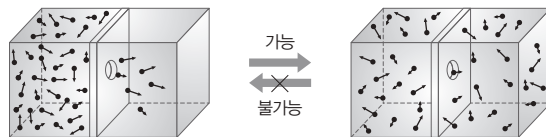
③ 역학적 에너지는 전부 열에너지로 전환될 수 있지만(마찰열), 열에너지는 전부 역학적 에너지로 전환될 수 없다.

④ 열은 저절로 고온에서 저온으로 이동한다.



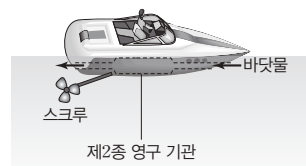
⑤ 고립계에서 자발적으로 일어나는 자연 현상은 항상 확률이 높은 방향으로 진행된다.

예 시간이 흐르면 기체들은 두 상자에 고르게 퍼지며, 저절로 한 상자에 모이지는 않는다.



⑥ 제2종 영구 기관: 열역학 제2법칙에 위배되는 열기관이다.

예 연료를 사용하지 않고 바닷물의 에너지를 이용하여 움직이는 '해수 에너지 선박'은 앞쪽의 물을 빨아들여 열을 빼앗아 엔진을 작동한 다음, 차가워진 물을 뒤로 내보내는 방식으로 작동하도록 설계되었다고 한다. 선박의 엔진을 작동시키려면 엔진의 온도가 높아야 하는데, 차가운 바닷물에서 고온의 엔진으로 열은 저절로 이동하지 않는다. 만약 저온의 바닷물에서 열을 빼앗아 고온의 엔진으로 이동시키려면 반드시 또 다른 에너지를 사용하여 일을 해 주어야 한다. 이것은 에어컨이 전기 에너지를 사용해야 작동되는 것과 마찬가지로이다. 따라서 다른 연료를 사용하지 않고 바닷물의 열로만 엔진을 작동시키는 선박은 만들 수 없다.



개념 체크

④ 비가역 현상: 한쪽 방향으로의 변화는 자발적으로 일어나지만, 반대 방향으로의 변화는 자발적으로 일어나지 않는 현상

• 열은 온도가 높은 물체에서 온도가 낮은 물체로 자발적으로 이동하지만, 온도가 낮은 물체에서 온도가 높은 물체로는 자발적으로 이동하지 않는다.

• 일은 100 % 열로 전환될 수 있지만, 열은 100 % 일로 전환될 수 없다.

⑤ 열역학 제2법칙: 고립계에서 자연 현상은 항상 확률이 높은 쪽으로 변화가 일어난다.

1. 자연 현상은 대부분 어느 한쪽 방향으로만 저절로 일어나지만, 그 반대 방향으로 저절로 일어나지 않는 () 현상이다.

2. 고립계에서 자발적으로 일어나는 현상은 확률이 (높은 , 낮은) 방향으로 진행되고, 무질서도가 (증가 , 감소) 하는 방향으로 일어난다.

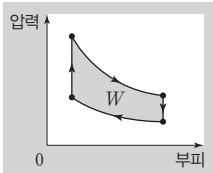
3. 연료를 사용하지 않고 물의 열로만 엔진을 작동시키는 제2종 영구 기관은 () 에 위배된다.

정답

1. 비가역
2. 높은, 증가
3. 열역학 제2법칙

개념 체크

⑤ 열기관의 순환 과정: 열역학 과정을 거친 후 다시 처음 상태로 되돌아오는 과정을 순환 과정이라고 하며, 열기관의 한 번의 순환 과정에서 기체가 한 일은 압력-부피 그래프에서 그래프로 둘러싸인 면적(W)과 같다.



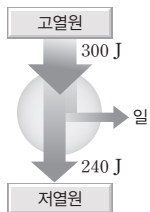
⑥ 열기관: 고열원과 저열원 사이의 온도 차를 이용해 열을 일로 전환하는 장치이다.

⑦ 열효율: 고열원에서 Q_1 의 열량을 흡수하여 W 만큼 일을 하고 저열원으로 Q_2 의 열량을 방출하는 열기관의 열효율 e 는 다음과 같다.

$$e = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

1. ()은 반복되는 순환 과정을 거쳐 열을 일로 바꾸는 장치이다.

[2~3] 그림은 고열원에서 300 J의 열을 흡수하고 외부에 일을 한 후 저열원으로 240 J의 열을 방출하는 열기관을 나타낸 것이다.



2. 열기관이 외부에 한 일은 ()이다.

3. 열기관의 열효율은 ()이다.

정답

1. 열기관
2. 60 J
3. 0.2

3 열기관과 열효율

(1) 열기관: 반복되는 순환 과정을 거쳐 열을 일로 바꾸는 장치이다.

(2) 열기관의 종류

- ① 외연 기관: 기관의 외부에서 연료를 연소시켜 이 열로 고온의 수증기를 만들어 수증기가 팽창할 때의 역학적 에너지를 이용하는 장치이다. 예) 증기 기관, 증기 터빈, 스팀링 기관
- ② 내연 기관: 기관의 내부에서 연료를 연소시켜 발생한 기체가 팽창할 때의 역학적 에너지를 이용하는 장치이다. 예) 가솔린 기관, 디젤 기관, 제트 기관

(3) 열기관의 원리

- ① 열기관의 순환 과정: 모든 열기관은 고온(T_1)의 열원으로부터 열(Q_1)을 흡수하여 일(W)을 하고, 남은 열(Q_2)을 저온(T_2)의 열원으로 방출한 후 원래의 상태로 다시 되돌아온다.
 - 한 번의 순환 과정 동안 열기관의 내부 에너지는 변화 없다 ($\Delta U = 0$).

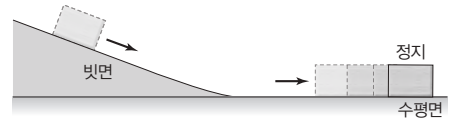
- ② 열기관의 열효율(e): 열기관의 열효율은 고온의 열원에서 흡수한 열량 Q_1 에 대하여 외부에 한 일 W 의 비로 정의한다.

➡ 열효율을 높이려면 일반적으로 고온부의 온도(T_1)는 높게, 저온부의 온도(T_2)는 낮게 해야 한다.

$$e = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

- ③ 열효율이 1(100%)인 열기관($Q_2 = 0$)은 만들 수 없다: 열역학 제2법칙에 의하면 열기관이 일을 하는 과정에서 열은 주변에 존재하는 더 낮은 온도의 계로 저절로 흘러가 버리기 때문이다.

- ④ 빗면에 놓은 물체는 빗면을 따라 내려와 수평면에 도달하여 멈춘다. 이는 물체의 에너지가 바닥이나 공기와의 마찰로 인해 모두 열로 바뀌었기 때문이다.

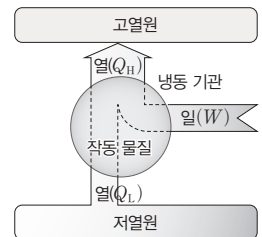


그러나 수평면에 있는 물체에 열을 가하면 물체가 빗면 위로 올라가지 못한다. 열은 원자나 분자의 무질서한 운동에 의한 에너지이다. 수평면에 멈춘 물체가 다시 빗면으로 올라가기 위해서는 무질서한 운동을 하던 공기 분자가 같은 방향으로 힘을 가해 물체를 움직여야 한다. 그러나 열역학 제2법칙에 따르면 그런 일이 일어날 확률은 없다. 따라서 일을 모두 열로 바꿀 수는 있지만, 열을 모두 일로 바꿀 수는 없다.

과학 돋보기

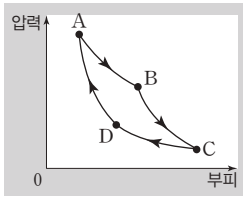
냉동 기관

- 냉동 기관: 외부로부터 일(W)을 받아 온도가 낮은 열원에서 열(Q_L)을 흡수하여 온도가 높은 열원으로 열(Q_H)을 방출하는 기관이다.
- 냉동 기관은 열기관과 같이 한 번의 순환 과정을 마치면 내부 에너지가 처음과 같으므로 내부 에너지 변화량 $\Delta U = 0$ 이다.
- 열역학 제1법칙으로부터 $\Delta U = 0 = Q_L - Q_H + W$, $Q_H = Q_L + W$ 가 성립된다.
- 냉동 기관의 효율은 외부에서 냉동 기관에 해 준 일이 저열원에서 열을 제거하는데 얼마나 효율적인지에 의해 결정되며, 이를 냉동 기관의 작동 계수 $K = \frac{Q_L}{W}$ 로 나타낸다.



(4) 카르노 기관: 열효율이 최대인 이상적인 열기관이다.

① 순환 과정: 등온 팽창(A → B) → 단열 팽창(B → C) → 등온 압축(C → D) → 단열 압축(D → A)



열역학 과정	Q	W	ΔU
등온 팽창(A → B)	+	+	0
단열 팽창(B → C)	0	+	-
등온 압축(C → D)	-	-	0
단열 압축(D → A)	0	-	+

② 열효율: 고열원에서 흡수하는 열량 Q_1 과 저열원으로 방출하는 열량 Q_2 가 각각 고온부의 절대 온도 T_1 과 저온부의 절대 온도 T_2 에 비례한다. 따라서 카르노 기관의 열효율(e_k)은 다음과 같다.

$$e_k = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (0 \leq e_k < 1)$$

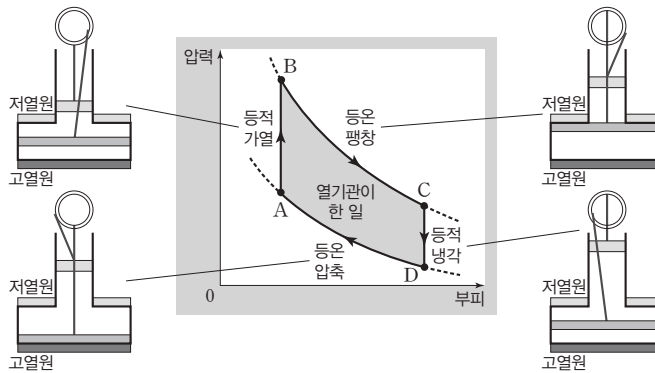
(5) 실제 열기관의 열효율

구분	가솔린 기관	디젤 기관	증기 기관
열효율	20 % ~ 30 %	25 % ~ 35 %	20 % 미만

탐구자료 살펴보기

스털링 기관

자료 그림은 스텔링 기관의 작동 과정을 나타낸 것이다.



분석

- A → B(등적 가열) 과정: 부피가 일정한 상태에서 기체는 열을 흡수하여 온도가 올라간다($W=0$, $Q=\Delta U>0$).
- B → C(등온 팽창) 과정: 온도가 일정한 상태에서 기체는 열을 흡수하면서 팽창한다($\Delta U=0$, $Q=W>0$).
- C → D(등적 냉각) 과정: 부피가 일정한 상태에서 기체는 열을 방출하여 온도가 내려간다($W=0$, $Q=\Delta U<0$).
- D → A(등온 압축) 과정: 온도가 일정한 상태에서 기체가 열을 방출하면서 수축한다($\Delta U=0$, $Q=W<0$).

point

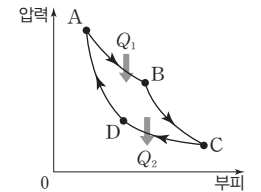
- 열을 흡수하는 과정은 A → B(등적 가열)와 B → C(등온 팽창)이고, 기체가 외부에 일을 하는 과정은 B → C(등온 팽창)이다.
- 외부에서 열을 흡수하는 과정에서는 내부 에너지가 증가하거나 부피가 팽창하여 외부에 일을 한다. 열을 방출하는 과정에서는 내부 에너지가 감소하거나 외부로부터 일을 받는다. 따라서 한 번의 순환 과정을 지난 후 내부 에너지는 동일한 상태가 된다.

개념 체크

④ 카르노 기관: 열역학 제2법칙을 적용하여 알아낸 최대의 열효율을 가질 수 있는 열기관이다. 고열원과 저열원의 온도가 각각 T_1 , T_2 일 때, 카르노 기관의 열효율 e_k 는 다음과 같다.

$$e_k = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

[1~4] 그림은 열기관에서 일정량의 이상 기체가 A → B → C → D → A를 따라 변하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. A → B, C → D 과정은 등온 과정이고, B → C, D → A 과정은 단열 과정이며, A → B 과정에서 흡수하는 열량은 Q_1 , C → D 과정에서 방출하는 열량은 Q_2 이다.



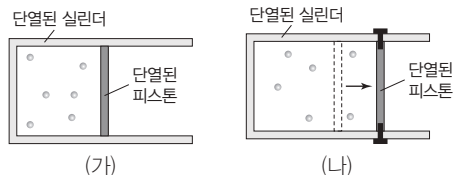
1. A → B 과정에서 기체가 외부에 한 일은 ()이다.
2. D → A 과정에서 기체의 내부 에너지는 (증가한다, 일정하다, 감소한다) .
3. 한 번의 순환 과정에서 기체가 외부에 한 일은 ()이다.
4. 열기관의 열효율은 ()이다.
5. 스텔링 기관의 순환 과정에는 두 번의 부피가 일정한 과정과 두 번의 () 과정이 있다.

정답

1. Q_1
2. 증가한다
3. $Q_1 - Q_2$
4. $1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ (또는 $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$)
5. 등온

[26023-0087]

01 그림 (가)는 이상 기체가 들어 있는 단열된 실린더에 단열된 피스톤이 정지해 있는 모습을, (나)는 (가)에서 피스톤을 당겨 기체가 단열 팽창한 상태에서 피스톤을 고정시킨 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?
(단, 실린더와 피스톤 사이의 마찰은 무시한다.)

◀ 보기 ▶

- ㄱ. 기체의 온도는 (가)에서가 (나)에서보다 높다.
- ㄴ. 기체의 압력은 (가)에서가 (나)에서보다 크다.
- ㄷ. (가) → (나) 과정에서 기체가 외부에 한 일은 기체의 내부 에너지 감소량과 같다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

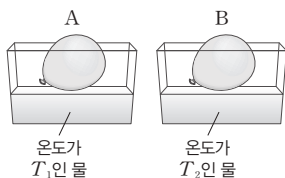
[26023-0088]

02 다음은 열의 이동에 따른 기체의 부피 변화를 알아보기 위한 실험이다.

[실험 과정]

(가) 재질이 같은 풍선 A, B에 동일한 기체를 각각 같은 부피로 채운다.

(나) 그림과 같이 A, B를 각각 온도가 T_1 , T_2 인 물이 담긴 수조에 넣고 풍선 내부 기체의 부피 변화를 관찰한다.



[실험 결과]

- A의 부피는 감소하고, B의 부피는 증가한다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

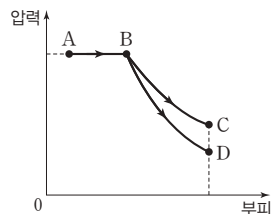
◀ 보기 ▶

- ㄱ. $T_1 < T_2$ 이다.
- ㄴ. A 내부의 기체가 방출한 열량은 기체의 내부 에너지 감소량보다 크다.
- ㄷ. B 내부의 기체가 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일보다 작다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

[26023-0089]

03 그림은 일정량의 동일한 이상 기체가 상태 A → B → C 또는 A → B → D를 따라 변하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. A → B 과정은 압력이 일정한 과정이고, B → C, B → D 과정은 단열 과정과 등온 과정을 순서 없이 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

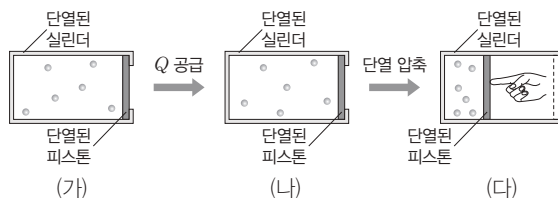
◀ 보기 ▶

- ㄱ. A → B 과정에서 기체가 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일보다 크다.
- ㄴ. B → C 과정은 단열 과정이다.
- ㄷ. B → D 과정에서 기체의 내부 에너지는 감소한다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

[26023-0090]

04 그림 (가)는 이상 기체가 들어 있는 단열된 실린더에서 단열된 피스톤이 정지해 있는 것을, (나)는 (가)에서 기체에 열량 Q 를 공급한 것을, (다)는 (나)에서 피스톤을 손으로 서서히 밀어 기체가 단열 압축한 모습을 나타낸 것이다. (가)에서 기체의 부피는 (나)에서와 같고, (다)에서보다 크다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?
(단, 실린더와 피스톤 사이의 마찰은 무시한다.)

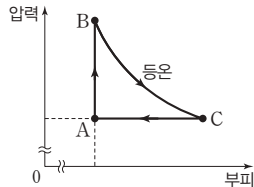
◀ 보기 ▶

- ㄱ. (가) → (나) 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량은 Q 보다 작다.
- ㄴ. (나) → (다) 과정에서 기체는 외부에 일을 한다.
- ㄷ. 기체의 온도는 (가)에서가 (다)에서보다 낮다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

[26023-0091]

05 그림은 열기관에서 일정량의 이상 기체의 상태가 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 를 따라 순환하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정은 부피가 일정한 과정, $B \rightarrow C$ 과정은 등온 과정, $C \rightarrow A$ 과정은 압력이 일정한 과정이다. 표는 각 과정에서 기체가 흡수 또는 방출한 열량을 나타낸 것이다.



과정	흡수 또는 방출한 열량(J)
$A \rightarrow B$	60
$B \rightarrow C$	90
$C \rightarrow A$	100

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

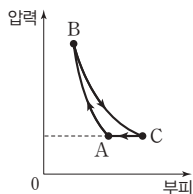
< 보기 >

- ㄱ. 기체의 온도는 B에서가 A에서보다 높다.
- ㄴ. $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 $C \rightarrow A$ 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일보다 30 J만큼 크다.
- ㄷ. 열기관의 열효율은 $\frac{3}{10}$ 이다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

[26023-0092]

06 그림은 열효율이 $\frac{3}{8}$ 인 열기관에서 일정량의 이상 기체의 상태가 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 를 따라 순환하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정은 단열 과정, $C \rightarrow A$ 과정은 압력이 일정한 과정이고, $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 $C \rightarrow A$ 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일의 4배이다. 표는 각 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량 또는 감소량을 나타낸 것이다.



과정	내부 에너지 증가량 또는 감소량(J)
$A \rightarrow B$	60
$B \rightarrow C$	0
$C \rightarrow A$	㉠

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

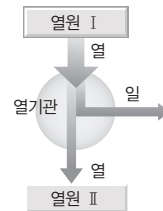
< 보기 >

- ㄱ. ㉠은 60보다 작다.
- ㄴ. $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 흡수한 열량은 160 J이다.
- ㄷ. 기체가 외부로부터 받은 일은 $A \rightarrow B$ 과정에서가 $C \rightarrow A$ 과정에서보다 크다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

[26023-0093]

07 그림은 열원 I에서 열을 흡수하여 외부에 일을 하고 열원 II로 열을 방출하는 열기관을 나타낸 것이다. 표는 열기관 A, B에서 I로부터 흡수한 열량 Q_1 과 II로 방출하는 열량 Q_2 를 나타낸 것으로 열효율은 A가 B의 2배이다.



열기관	Q_1	Q_2
A	30 kJ	18 kJ
B	40 kJ	㉠

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

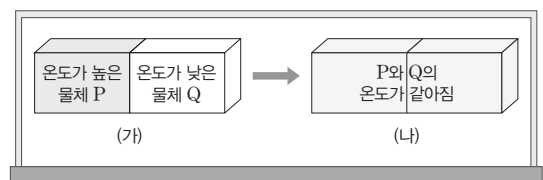
< 보기 >

- ㄱ. 온도는 I이 II보다 높다.
- ㄴ. A의 열효율은 0.4이다.
- ㄷ. ㉠은 32 kJ이다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

[26023-0094]

08 그림은 온도가 높은 물체 P와 온도가 낮은 물체 Q를 접촉시킬 때 P, Q의 온도가 같아지는 현상에 대해 학생 A, B, C가 대화하는 모습을 나타낸 것이다.



(가)에서 열은 P에서 Q로 이동해.

학생 A

P와 Q의 온도는 자연적으로 (나)에서 (가)로 될 수 있어.

학생 B

P와 Q로 이루어진 계의 무질서도는 (가)에서 (나)에서보다 높아.

학생 C

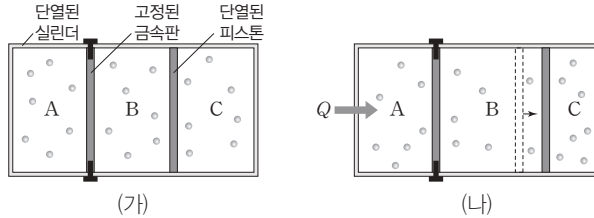
제시한 내용이 옳은 학생만을 있는 대로 고른 것은?

① A ② B ③ A, C ④ B, C ⑤ A, B, C

[26023-0095]

열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$
(Q : 기체가 흡수한 열량, ΔU :
기체의 내부 에너지 증가량,
 W : 기체가 외부에 한 일)에
의해 (나)에서 A에 가한 열량
 Q 는 A와 B의 내부 에너지 증
가량과 B가 C에 한 일의 합과
같다.

01 그림 (가)는 단열된 실린더 안에 같은 양의 동일한 이상 기체 A, B, C가 열전달이 잘 되는 고정된 금속판과 단열된 피스톤에 의해 같은 부피로 분리되어 있는 모습을 나타낸 것으로, 피스톤은 정지해 있다. 그림 (나)는 (가)에서 A에 열량 Q 를 서서히 가했더니 B의 부피가 증가하여 피스톤이 정지한 모습을 나타낸 것이다.



(가) → (나) 과정에서, 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 실린더와 피스톤 사이의 마찰, 금속판이 흡수한 열량은 무시한다.)

< 보기 >

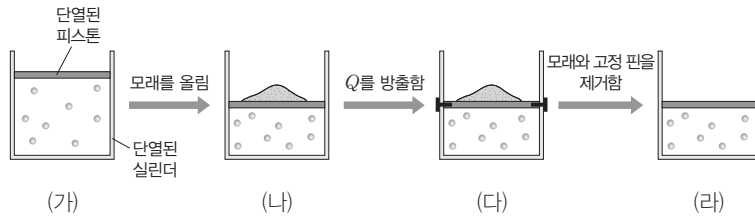
- ㄱ. 기체의 내부 에너지 증가량은 A가 B보다 작다.
- ㄴ. 기체의 압력 증가량은 A가 C보다 크다.
- ㄷ. B가 C에 한 일은 $\frac{1}{3}Q$ 보다 작다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

(가) → (나) 과정은 단열 압축
과정, (나) → (다) 과정은 부피
변화 없이 열이 방출되는 과정
이다.

[26023-0096]

02 그림 (가)는 이상 기체가 들어 있는 단열된 실린더에 단열된 피스톤이 정지해 있는 모습을, (나)는 (가)에서 모래를 서서히 올려 피스톤이 내려가 정지한 모습을, (다)는 (나)에서 피스톤을 고정시킨 다음 기체에서 열량 Q 를 방출시킨 후의 모습을, (라)는 (다)에서 모래와 고정 핀을 제거하였더니 피스톤이 정지한 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 대기압은 일정하고, 피스톤의 질량 및 실린더와 피스톤 사이의 마찰은 무시한다.)

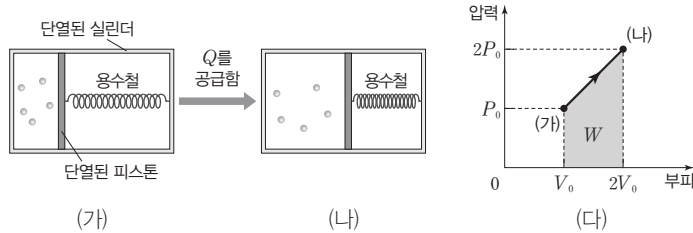
< 보기 >

- ㄱ. 기체의 압력은 (나)에서가 (다)에서보다 크다.
- ㄴ. 기체의 온도는 (나)에서가 (라)에서보다 높다.
- ㄷ. (가) → (나) 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일은 Q 보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

[26023-0097]

03 그림 (가)는 용수철에 매달린 단열된 피스톤에 의해 두 부분으로 나누어진 단열된 실린더의 한쪽에는 이상 기체가 들어 있고, 다른 쪽은 진공 상태일 때 피스톤이 정지한 모습을, (나)는 (가)에서 기체에 열량 Q 를 서서히 공급하였더니 기체의 부피가 증가하여 피스톤이 정지한 모습을 나타낸 것이다. (가)에서 기체의 내부 에너지는 용수철에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지의 3배이다. 그림 (다)는 (가) → (나) 과정에서 기체의 압력과 부피를 나타낸 것으로 (가)와 (나)의 기체의 상태를 연결한 직선이 부피 축과 이루는 넓이는 W 이다.

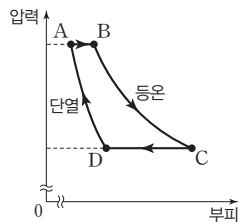


Q 는? (단, 실린더와 피스톤 사이의 마찰, 피스톤과 용수철의 질량은 무시한다.)

- ① $3W$ ② $4W$ ③ $5W$ ④ $6W$ ⑤ $7W$

[26023-0098]

04 그림은 열효율이 0.4인 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정과 $C \rightarrow D$ 과정은 압력이 일정한 과정, $B \rightarrow C$ 과정은 등온 과정, $D \rightarrow A$ 과정은 단열 과정이다. 기체가 한 번 순환하는 동안 외부에 한 일은 $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 흡수한 열량과 같다. 표는 각 과정에서 기체가 외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일을 나타낸 것이다.



과정	외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일(J)
$A \rightarrow B$	200
$B \rightarrow C$	750
$C \rightarrow D$	300
$D \rightarrow A$	㉠

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

< 보기 >

- ㄱ. 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 500 J이다.
 ㄴ. ㉠은 150이다.
 ㄷ. $C \rightarrow D$ 과정에서 기체가 방출한 열량은 750 J이다.

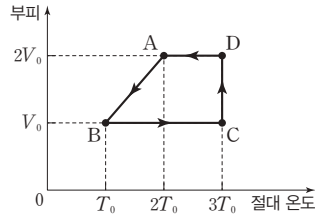
- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

압력-부피 그래프에서 (가)와 (나)의 기체의 상태를 연결한 직선이 부피 축과 이루는 넓이 W 는 기체가 외부에 한 일이다.

기체가 열을 흡수하는 과정은 $A \rightarrow B$ 과정과 $B \rightarrow C$ 과정이고, 열을 방출하는 과정은 $C \rightarrow D$ 과정이다.

기체의 온도는 압력과 부피의 곱에 비례하므로 C, D에서 기체의 압력은 각각 $3P_0$, $\frac{3}{2}P_0$ 이다.

05 그림은 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하는 동안 기체의 부피와 절대 온도를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정은 압력이 P_0 으로 일정한 과정, $B \rightarrow C$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정은 부피가 일정한 과정, $C \rightarrow D$ 과정은 등온 과정이다. 표는 각 과정에서 흡수 또는 방출한 열량을 나타낸 것이다.



과정	흡수 또는 방출한 열량(J)
$A \rightarrow B$	㉠
$B \rightarrow C$	Q_1
$C \rightarrow D$	Q_2
$D \rightarrow A$	?

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

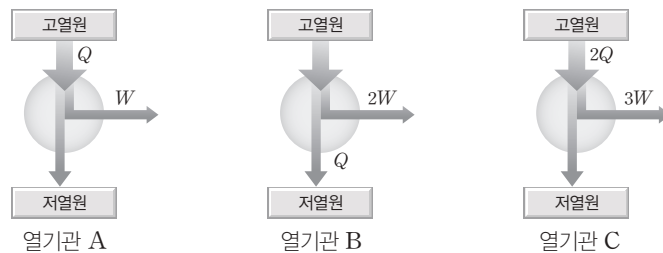
< 보기 >

- ㄱ. ㉠은 $\frac{1}{2}Q_1$ 보다 크다.
- ㄴ. 열기관의 열효율은 $\frac{Q_2}{Q_1+Q_2}$ 보다 크다.
- ㄷ. 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 $\frac{5}{4}P_0V_0$ 보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

열기관에서 기체가 한 번 순환하는 동안 흡수한 열량을 $Q_{\text{흡수}}$, 방출한 열량을 $Q_{\text{방출}}$, 한 일을 W 라 할 때, 열기관의 열효율은 $e = \frac{W}{Q_{\text{흡수}}} = 1 - \frac{Q_{\text{방출}}}{Q_{\text{흡수}}}$ 이다.

06 그림은 열기관 A, B, C가 각각 고열원에서 열을 흡수하여 일을 하고, 저열원으로 열을 방출하는 것을 나타낸 것이다. A는 고열원에서 열량 Q 를 흡수하고 외부에 W 의 일을 하며, B는 외부에 $2W$ 의 일을 한 후 저열원으로 열량 Q 를 방출하고, C는 고열원에서 열량 $2Q$ 를 흡수하고 외부에 $3W$ 의 일을 한다. 열효율은 B가 A의 $\frac{4}{3}$ 배이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

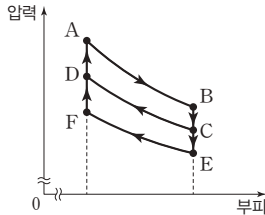
< 보기 >

- ㄱ. $Q=5W$ 이다.
- ㄴ. 저열원으로 방출하는 열량은 A가 C의 $\frac{3}{5}$ 배이다.
- ㄷ. 열효율은 C가 B의 $\frac{9}{8}$ 배이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

[26023-0101]

07 그림은 열기관 I, II에 들어 있는 일정량의 이상 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. A → B 과정, C → D 과정, E → F 과정은 등온 과정이고, B → C 과정, B → E 과정, D → A 과정, F → A 과정은 부피가 일정한 과정이다. A → B 과정에서 기체가 흡수한 열량은 $5Q_0$, C → D 과정, E → F 과정에서 기체가 방출한 열량은 각각 $4Q_0$, $3Q_0$ 이고, A와 D, D와 F에서의 온도 차는 서로 같다. 표는 I, II의 순환 과정과 열효율을 나타낸 것이다.



열기관	순환 과정	열효율
I	A → B → C → D → A	$\frac{1}{6}$
II	A → B → E → F → A	㉠

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

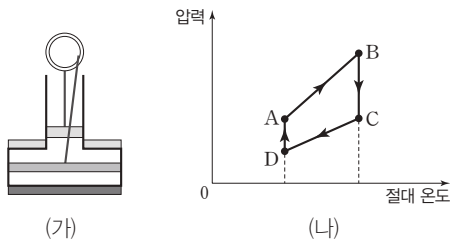
< 보기 >

- ㄱ. 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 I 이 II의 $\frac{1}{2}$ 배이다.
- ㄴ. F → D 과정에서 기체가 흡수한 열량은 Q_0 이다.
- ㄷ. ㉠은 $\frac{1}{5}$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

[26023-0102]

08 그림 (가)는 온도가 다른 두 열원 사이에서 열을 흡수, 방출하며 작동하는 스텔링 기관을 나타낸 것이다. 그림 (나)는 (가)에서 기관 내부의 일정량의 이상 기체가 상태 A → B → C → D → A를 따라 순환하는 동안 기체의 압력과 절대 온도를 나타낸 것이다. A → B 과정, C → D 과정은 부피가 일정한 과정이고, B → C 과정, D → A 과정은 등온 과정이다. A → B 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량은 B → C 과정에서 기체가 외부에 한 일과 같고, D → A 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일의 2배이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

< 보기 >

- ㄱ. 기체의 부피는 A에서가 C에서보다 작다.
- ㄴ. C → D 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일의 2배이다.
- ㄷ. 스텔링 기관의 열효율은 $\frac{1}{4}$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

B → C 과정, B → E 과정, D → A 과정, F → A 과정은 부피가 일정한 과정이므로 기체가 흡수 또는 방출한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량 또는 감소량과 같다.

A, D에서의 온도가 같고 압력은 A에서가 D에서보다 크므로 부피는 A에서가 D에서보다 작다.

04 열역학 법칙

수능 2점 테스트

본문 68~69쪽

01 ⑤ 02 ③ 03 ③ 04 ② 05 ① 06 ④
07 ⑤ 08 ①

01 단열 팽창 과정

열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ (Q : 기체가 흡수한 열량, ΔU : 기체의 내부 에너지 변화량, W : 기체가 외부에 한 일)에서 단열 과정은 $Q=0$ 이므로 $W = -\Delta U$ 이다.

㉠. (가) → (나) 과정에서 기체는 단열 팽창하여 외부에 일을 하였으므로 $W > 0$ 이고 $\Delta U < 0$ 이 되어 기체의 온도는 낮아진다. 따라서 기체의 온도는 (가)에서가 (나)에서보다 높다.

㉡. 기체가 단열 팽창하는 과정에서 온도는 낮아지고 부피는 증가하였으므로 압력은 감소한다. 따라서 기체의 압력은 (가)에서가 (나)에서보다 크다.

㉢. 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에서 $Q=0$ 이므로 $W = -\Delta U$ 가 되어 (가) → (나) 과정에서 기체가 외부에 한 일($W > 0$)은 기체의 내부 에너지 감소량($-\Delta U$)과 같다.

02 열의 이동

A 내부의 기체는 물로 열을 방출하고 부피가 감소하며 외부로부터 일을 받고, B 내부의 기체는 물로부터 열을 흡수하여 부피가 증가하며 외부에 일을 한다.

㉠. 열은 온도가 높은 물질에서 온도가 낮은 물질로 이동한다. 따라서 A가 놓인 물의 온도는 A 내부 기체의 온도보다 낮고, B가 놓인 물의 온도는 B 내부 기체의 온도보다 높으므로 $T_1 < T_2$ 이다.

㉡. 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에 의해 A 내부의 기체가 방출한 열량은 기체의 내부 에너지 감소량과 기체가 외부로부터 받은 일의 합과 같다. 따라서 A 내부의 기체가 방출한 열량은 기체의 내부 에너지 감소량보다 크다.

㉢. 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에 의해 B 내부의 기체가 흡수한 열량은 B 내부 기체의 내부 에너지 증가량과 B 내부의 기체가 외부에 한 일의 합과 같다. 따라서 B 내부의 기체가 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일보다 크다.

03 단열 과정과 등온 과정

열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에 의해 기체가 단열 팽창($Q=0$, $W > 0$, $\Delta U < 0$)하면 기체가 외부에 한 일만큼 기체의 내부 에너지는 감소하여 기체의 온도는 낮아진다. 기체의 절대 온도는 기체의 압력과 부피의 곱에 비례한다($T \propto PV$).

㉠. A → B 과정은 압력이 일정한 과정으로 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에 의해 기체가 흡수한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 기체가 외부에 한 일의 합과 같다. 따라서 A → B 과정에서 기체가 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일보다 크다.

㉡. C와 D에서 부피가 서로 같고 압력은 C에서가 D에서보다 크므로 온도는 C에서가 D에서보다 높다. 기체가 단열 팽창 과정을 거치면 온도가 낮아지므로 B → C 과정은 등온 과정, B → D 과정은 단열 과정이다.

㉢. B → D 과정은 단열 팽창 과정으로 기체의 온도가 낮아지고, 기체의 내부 에너지는 기체의 절대 온도에 비례하므로 B → D 과정에서 기체의 내부 에너지는 감소한다.

04 등적 과정과 단열 과정

(가) → (나) 과정은 부피가 일정한 과정이다. 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에서 $W=0$ 이므로 기체가 흡수한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다($Q = \Delta U$). (나) → (다) 과정은 단열 압축 과정이므로 $Q = \Delta U + W$ 에서 $Q=0$ 이므로 기체가 외부로부터 받은 일($W < 0$)은 기체의 내부 에너지 증가량($\Delta U > 0$)과 같다.

㉠. (가) → (나) 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량은 기체에 공급된 열량 Q 와 같다.

㉡. (나) → (다) 과정에서 기체의 부피가 감소하였으므로 기체는 외부로부터 일을 받는다.

㉢. (가) → (나) 과정, (나) → (다) 과정에서 모두 기체의 온도가 높아지므로 기체의 온도는 (가)에서가 (다)에서보다 낮다.

05 열역학 과정

A → B 과정은 일정한 부피에서 압력이 증가하므로 기체의 내부 에너지 증가량만큼 열을 흡수하고, B → C 과정은 등온 팽창 과정으로 기체가 외부에 한 일만큼 열을 흡수한다. C → A 과정은 일정한 압력에서 부피가 감소하므로 기체가 외부로부터 받은 일과 기체의 내부 에너지 감소량의 합만큼 열을 방출한다.

㉠. A, B에서 부피가 같고, 압력은 B에서가 A에서보다 크므로 기체의 온도는 B에서가 A에서보다 높다.

㉡. B → C 과정은 등온 과정으로 기체의 내부 에너지 변화가 없으므로 이 과정에서 기체가 외부에 한 일은 기체가 흡수한 열량 90 J과 같다. 또한 A → B 과정에서 기체의 온도 증가량과 C → A 과정에서 기체의 온도 감소량이 같고, A → B 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량은 기체가 흡수한 열량 60 J과 같으므로 C → A 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 60 J이다. 따라서 C → A 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일은 방출한 열량과 내부 에너지 감소량의 차와 같은 40 J이므로 B → C 과정에서 기체가 외부에 한 일(90 J)은 C → A 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일(40 J)보다 50 J만큼 크다.

✕. 열기관의 열효율 $e = 1 - \frac{Q_{\text{방출}}}{Q_{\text{흡수}}}$ ($Q_{\text{방출}}$: 기체가 방출한 열량, $Q_{\text{흡수}}$: 기체가 흡수한 열량)이다. 열기관의 기체가 한 번 순환하는 동안 기체가 흡수한 열량 $Q_{\text{흡수}} = Q_{A \rightarrow B} + Q_{B \rightarrow C} = 60 \text{ J} + 90 \text{ J} = 150 \text{ J}$ 이고, 기체가 방출한 열량 $Q_{\text{방출}} = Q_{C \rightarrow A} = 100 \text{ J}$ 이므로 열기관의 열효율 $e = 1 - \frac{100 \text{ J}}{150 \text{ J}} = \frac{1}{3}$ 이다.

06 열역학 과정

A $\rightarrow$ B 과정은 단열 압축 과정으로, 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에서 $Q = 0$ 이므로 기체가 외부로부터 받은 일($W < 0$)과 기체의 내부 에너지 증가량($\Delta U > 0$)이 같다($W = -\Delta U$). B $\rightarrow$ C 과정에서 기체의 내부 에너지 변화가 없으므로 B $\rightarrow$ C 과정은 등온 팽창 과정이고, 이 과정에서 $\Delta U = 0$ 이므로 기체가 흡수한 열량과 기체가 외부에 한 일은 같다($Q = W$).

✕. A $\rightarrow$ B 과정에서 기체의 온도 증가량과 C $\rightarrow$ A 과정에서 기체의 온도 감소량이 같으므로 A $\rightarrow$ B 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량과 C $\rightarrow$ A 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 같다. 따라서 ㉠은 60이다.

㉡. B $\rightarrow$ C 과정에서 기체가 외부에 한 일과 C $\rightarrow$ A 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일을 각각 $4W$, W 라 할 때, 기체가 한 번 순환하는 동안 기체가 한 일은 $3W - 60(\text{J})$ 이다. 또한 B $\rightarrow$ C 과정에서 기체가 외부에 한 일과 기체가 흡수한 열량이 같으므로 기체가 한 번 순환하는 동안 외부로부터 흡수한 열량은 $4W$ 이다.

열기관의 열효율 $e = \frac{W_{\text{외부}}}{Q_{\text{흡수}}} = \frac{3W - 60}{4W} = \frac{3}{8}$ 이므로 $W = 40 \text{ J}$ 이고, B $\rightarrow$ C 과정에서 기체가 흡수한 열량은 $4W = 160 \text{ J}$ 이다.

㉢. A $\rightarrow$ B 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일은 기체의 내부 에너지 증가량과 같은 60 J 이고, C $\rightarrow$ A 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일은 $W = 40 \text{ J}$ 이므로 기체가 외부로부터 받은 일은 A $\rightarrow$ B 과정에서 C $\rightarrow$ A 과정에서보다 크다.

07 열기관의 열효율

열기관의 열효율 $e = 1 - \frac{Q_{\text{방출}}}{Q_{\text{흡수}}}$ ($Q_{\text{방출}}$: 기체가 방출한 열량, $Q_{\text{흡수}}$: 기체가 흡수한 열량)이다.

㉠. 열기관은 고열원에서 열을 흡수하여 외부에 일을 하고, 저열원으로 열을 방출한다. 따라서 온도는 열기관으로 열을 공급하는 I 이 열기관으로부터 열을 공급받는 II 보다 높다.

㉡. A는 I 에서 30 kJ 의 열을 흡수하고, II 로 18 kJ 의 열을 방출하므로 A의 열효율 $e_A = 1 - \frac{18 \text{ kJ}}{30 \text{ kJ}} = 0.4$ 이다.

㉢. 열효율은 A가 B의 2배이므로 B의 열효율은 0.2 이다. 따라서 $e_B = 1 - \frac{\text{㉠}}{40 \text{ kJ}} = 0.2$ 에서 ㉠ = 32 kJ 이다.

08 열역학 제2법칙

어떤 현상이 한쪽 방향으로서는 자발적으로 일어나지만, 반대 방향으로 저절로 일어나지 않는 현상을 비가역 현상이라고 한다. 대표적인 예로 열은 저절로 고온에서 저온으로 이동하지만 그 반대 방향으로의 현상은 저절로 일어나지 않는다.

㉠. 열은 저절로 고온에서 저온으로 이동하므로 (가)에서 P와 Q를 접촉시킬 때 열은 온도가 높은 P에서 온도가 낮은 Q로 이동한다.

✕. 열이 고온에서 저온으로 이동하는 것은 비가역 현상으로 P와 Q의 온도는 자연적으로 열평형이 이루어진 (나)에서 (가)로 될 수 없다.

✕. 자연적으로 일어나는 비가역 현상은 무질서도가 증가하는 방향으로 일어난다. 따라서 P와 Q로 이루어진 계의 무질서도는 (나)에서 (가)에서보다 높다.

수능 3점 테스트

본문 70~73쪽

01 ㉠ 02 ㉢ 03 ㉡ 04 ㉤ 05 ㉠ 06 ㉠
07 ㉢ 08 ㉤

01 열역학 제1법칙

(가), (나)에서 각각 피스톤이 정지해 있으므로 (가), (나)에서 B와 C의 압력은 서로 같고, (가) $\rightarrow$ (나) 과정에서 C는 단열 압축을 하므로 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에서 $Q = 0$ 이 되어 C가 B로부터 받은 일은 C의 내부 에너지 증가량과 같다.

✕. (나)에서 A가 흡수한 열량 Q 에 의해 A의 온도는 높아지고, 열전달이 잘 되는 금속판에 의해 A와 B 사이에 열이 이동하여 A와 B의 온도는 서로 같다. 따라서 (가) $\rightarrow$ (나) 과정에서 A와 B의 온도 증가량이 같고, 기체의 내부 에너지 증가량은 온도 증가량에 비례하므로 (가) $\rightarrow$ (나) 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량은 A와 B가 같다.

㉡. (가)에서 A와 B의 온도와 부피가 같으므로 A와 B의 압력은 서로 같고, B와 C 사이의 피스톤이 정지해 있으므로 B와 C의 압력이 서로 같다. 따라서 (가)에서 A, B, C의 압력은 서로 같다. (나)에서 A와 B의 온도는 서로 같고, 부피는 A가 B보다 작으므로 압력은 A가 B보다 크다. 또한 B와 C 사이의 피스톤은 정지해 있으므로 압력은 B와 C가 서로 같다. 따라서 (나)에서 압력은 A가 C보다 크므로 (가) $\rightarrow$ (나) 과정에서 기체의 압력 증가량은 A가 C보다 크다.

㉢. (가) $\rightarrow$ (나) 과정에서 B가 C에 한 일(또는 C가 B로부터 받은 일)을 W 라 하고, A, B, C의 내부 에너지 증가량을 각각 ΔU_A , ΔU_B , ΔU_C 라 할 때 C는 단열 압축을 하므로 $W = \Delta U_C$ 가 되어

$Q = \Delta U_A + \Delta U_B + W = \Delta U_A + \Delta U_B + \Delta U_C$ 이다. 또한 (나)에서 압력은 B와 C가 같고 부피는 B가 C보다 크므로 온도는 B가 C보다 높다. 따라서 (가) → (나) 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량의 관계는 $\Delta U_A = \Delta U_B > \Delta U_C$ 이므로 A, B의 내부 에너지 증가량 $\Delta U_A, \Delta U_B$ 는 각각 $\frac{1}{3}Q$ 보다 크고, B가 C에 한 일 $W = \Delta U_C < \frac{1}{3}Q$ 이다.

02 열역학 과정

(가) → (나) 과정은 단열 압축 과정으로 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에서 $Q = 0$ 이므로 기체가 외부로부터 받은 일($W < 0$)과 기체의 내부 에너지 증가량($\Delta U > 0$)이 같다. (나) → (다) 과정은 부피가 일정한 과정이므로 열역학 제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에서 $W = 0$ 이므로 기체가 방출한 열량($Q < 0$)과 기체의 내부 에너지 감소량($\Delta U < 0$)이 같다.

㉠. (나) → (다) 과정에서 기체의 온도가 낮아지고 부피는 (나)와 (다)에서 서로 같으므로 압력은 (나)에서가 (다)에서보다 크다.

㉡. (가) → (나) 과정은 단열 압축 과정이므로 기체의 압력이 증가하고 기체의 온도는 높아진다. 또한 (가)와 (라)에서 기체의 압력은 같고, 부피는 (가)에서가 (라)에서보다 크므로 기체의 온도는 (가)에서가 (라)에서보다 높다. 따라서 기체의 온도는 (나) > (가) > (라)이므로 (나)에서가 (라)에서보다 높다.

✕. (가) → (나) 과정은 단열 압축 과정이므로 이 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다. 또한, (나) → (다) 과정은 부피가 일정한 과정으로 이 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 기체에서 방출한 열량 Q 와 같다. 기체의 온도가 (나) > (가) > (다)이므로 (가) → (나) 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량이 (나) → (다) 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량보다 작다. 따라서 (가) → (나) 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일은 Q 보다 작다.

03 열역학 과정

(가) → (나) 과정에서 기체가 용수철이 연결된 피스톤에 작용하는 힘의 크기가 2배로 증가하므로 용수철이 압축된 길이는 (나)에서가 (가)에서의 2배이고, 용수철에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지 $U_s = \frac{1}{2}kx^2$ (k : 용수철 상수, x : 용수철이 압축된 길이)는 (나)에서가 (가)에서의 4배이다.

㉡. (가) → (나) 과정에서 기체가 외부에 한 일 W 는 용수철에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지의 증가량과 같고, 이 과정에서 용수철이 압축된 길이가 2배가 되므로 용수철에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지는 4배가 된다. 따라서 (가), (나)에서 용수철에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지를 각각 $E, 4E$ 라 할 때, $W = 4E - E = 3E$ 이다. 또한 (가) → (나) 과정에서 기체의 압력과 부피의 곱이 P_0V_0 에서 $4P_0V_0$ 으로 4배가 되므로 기체의 내부 에너지는 (나)에서가 (가)에서의 4배이고, (가)에서 기체의 내부 에너지는 용수철에 저

장된 탄성 퍼텐셜 에너지의 3배이므로 (가), (나)에서 기체의 내부 에너지는 각각 $U_{(가)} = 3E = W, U_{(나)} = 4U_{(가)} = 4W$ 가 되어 (가) → (나) 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량은 $\Delta U = U_{(나)} - U_{(가)} = 3W$ 이다. 열역학 제1법칙에 의해 (가) → (나) 과정에서 기체에 공급된 열량 $Q = \Delta U + W = 4W$ 이다.

04 열역학 과정과 열효율

열기관에서 기체가 한 번 순환하는 동안 흡수한 열량을 $Q_{\text{흡수}}$, 방출한 열량을 $Q_{\text{방출}}$, 한 일을 W 라 할 때, 열기관의 열효율 $e = \frac{W}{Q_{\text{흡수}}} = 1 - \frac{Q_{\text{방출}}}{Q_{\text{흡수}}}$ 이다.

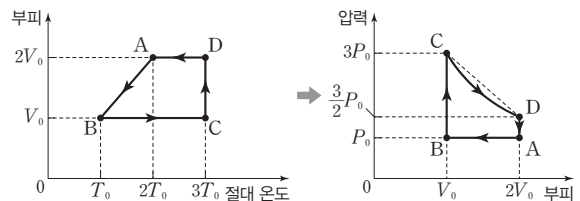
㉠. 기체가 A → B 과정에서 흡수한 열량과 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일을 각각 W 라 할 때, 기체가 흡수한 열량 $Q_{\text{흡수}} = Q_{A \rightarrow B} + Q_{B \rightarrow C} = W + 750(\text{J})$ 이다. 따라서 열기관의 열효율 $e = \frac{W}{W + 750} = 0.4$ 이므로 $W = 500 \text{ J}$ 이다.

㉡. 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 A → B 과정과 B → C 과정에서 기체가 외부에 한 일과 C → D 과정과 D → A 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일의 차와 같다. 따라서 $W = 500 \text{ J} = W_{A \rightarrow B} + W_{B \rightarrow C} - W_{C \rightarrow D} - W_{D \rightarrow A} = 200 \text{ J} + 750 \text{ J} - 300 \text{ J} - \text{㉠}$ 이므로 $\text{㉠} = 150(\text{J})$ 이다.

㉢. 기체가 한 번 순환하는 동안 열을 흡수하는 과정은 A → B 과정과 B → C 과정이고, 열을 방출하는 과정은 C → D 과정이다. C → D 과정에서 방출한 열량을 $Q_{C \rightarrow D}$ 라 할 때, A → B 과정과 B → C 과정에서 각각 500 J, 750 J의 열을 흡수하였으므로 $Q_{C \rightarrow D} = 500 \text{ J} + 750 \text{ J} - W$ 이고 $W = 500 \text{ J}$ 이므로 $Q_{C \rightarrow D} = 750 \text{ J}$ 이다.

05 열역학 과정과 열효율

부피-절대 온도 그래프를 압력-부피 그래프로 변환하면 그림과 같다.



㉠. B → C 과정에서 기체가 흡수한 열량 Q_1 은 B → C 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량과 같다. A → B 과정에서 온도 감소량이 B → C 과정에서 온도 증가량의 $\frac{1}{2}$ 배이므로 A → B 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 B → C 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량의 $\frac{1}{2}$ 배인 $\frac{1}{2}Q_1$ 이고, A → B 과정에서 기체가 방출한 열량 ㉠은 기체의 내부 에너지 감소량 $\frac{1}{2}Q_1$ 과 기체가 외부로부터 받은 일의 합과 같으므로 $\text{㉠} > \frac{1}{2}Q_1$ 이다.

✕. 기체가 $D \rightarrow A$ 과정에서 방출한 열량은 기체의 내부 에너지 감소량과 같고, $B \rightarrow C$ 과정에서 온도 증가량이 $D \rightarrow A$ 과정에서 온도 감소량의 2배이므로 기체가 $D \rightarrow A$ 과정에서 방출한 열량은 $\frac{1}{2}Q_1$ 이다. 또한 기체가 한 번 순환하는 동안 흡수한 열량은 $B \rightarrow C$ 과정에서 흡수한 열량 Q_1 과 $C \rightarrow D$ 과정에서 흡수한 열량 Q_2 의 합과 같고, 방출한 열량은 $A \rightarrow B$ 과정에서 방출한 열량 ①과 $D \rightarrow A$ 과정에서 방출한 열량 $\frac{1}{2}Q_1$ 의 합과 같다. 따라서 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 $W = Q_1 + Q_2 - \frac{1}{2}Q_1 - ① = \frac{1}{2}Q_1 + Q_2 - ① < Q_2$ 이므로 열기관의 열효율 $e = \frac{W}{Q_1 + Q_2} < \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}$ 이다.

✕. 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 압력-부피 그래프에서 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 연결한 선으로 둘러싸인 면적과 같다. 압력-부피 그래프에서 $C \rightarrow D$ 를 직선으로 연결하였을 때, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 연결한 직선으로 둘러싸인 면적이 $\frac{5}{4}P_0V_0$ 이므로 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 $\frac{5}{4}P_0V_0$ 보다 작다.

06 열기관의 열효율

B가 고열원에서 흡수한 열량은 외부에 한 일 $2W$ 와 저열원으로 방출한 열량 Q 의 합인 $Q + 2W$ 이다. 따라서 A, B, C의 열효율은 각각 $e_A = \frac{W}{Q}$, $e_B = \frac{2W}{Q + 2W}$, $e_C = \frac{3W}{2Q}$ 이다.

✕. $\frac{4}{3}e_A = e_B$ 이므로 $Q = 4W$ 이다.

○. A는 고열원에서 $Q = 4W$ 의 열을 흡수하고 외부에 W 의 일을 하므로 저열원으로 $3W$ 의 열을 방출하고, C는 고열원에서 $2Q = 8W$ 의 열을 흡수하고 외부에 $3W$ 의 일을 하므로 저열원으로 $5W$ 의 열을 방출한다. 따라서 저열원으로 방출하는 열량은 A가 C의 $\frac{3}{5}$ 배이다.

○. $e_B = \frac{2W}{Q + 2W} = \frac{2W}{6W} = \frac{1}{3}$, $e_C = \frac{3W}{2Q} = \frac{3W}{8W} = \frac{3}{8}$ 이므로 열효율은 C가 B의 $\frac{9}{8}$ 배이다.

07 열기관의 열효율

A와 D, D와 F에서의 온도 차는 서로 같으므로 기체가 $D \rightarrow A$ 과정에서 흡수한 열량과 $F \rightarrow D$ 과정에서 흡수한 열량은 서로 같고, 기체가 $B \rightarrow C$ 과정에서 방출한 열량과 $C \rightarrow E$ 과정에서 방출한 열량은 서로 같다.

○. I의 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 흡수한 열량 $5Q_0$ 과 $C \rightarrow D$ 과정에서 기체가 방출한 열량 $4Q_0$ 의 차와 같으므로 I의 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일 $W_I = Q_0$ 이다. II의 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 흡수한 열량 $5Q_0$ 과 $E \rightarrow F$ 과정에서 기체가 방

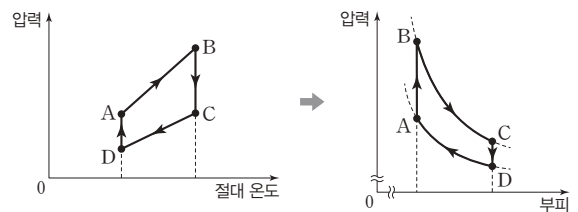
출한 열량 $3Q_0$ 의 차와 같으므로 II의 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일 $W_{II} = 2Q_0$ 이다. 따라서 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 I이 II의 $\frac{1}{2}$ 배이다.

○. 기체가 $D \rightarrow A$ 과정, $F \rightarrow D$ 과정에서 흡수한 열량과 $B \rightarrow C$ 과정, $C \rightarrow E$ 과정에서 방출한 열량을 모두 Q 라 할 때, I의 열효율 $e_I = \frac{Q_0}{Q + 5Q_0} = \frac{1}{6}$ 이므로 $Q = Q_0$ 이다.

✕. II의 열효율 $e_{II} = \frac{2Q_0}{2Q + 5Q_0} = \frac{2Q_0}{7Q_0} = \frac{2}{7}$ 이다.

08 열기관의 열효율

스털링 기관의 압력-절대 온도 그래프를 압력-부피 그래프로 변환하면 그림과 같다.



○. A, D에서의 온도가 같고 압력은 A에서보다 크므로 부피는 A에서보다 작다. C와 D에서 기체의 부피가 같으므로 기체의 부피는 A에서보다 작다.

○. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량과 $C \rightarrow D$ 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 서로 같다. 또한 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 외부에 한 일과 $D \rightarrow A$ 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일의 차와 같다. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량과 $C \rightarrow D$ 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량을 각각 ΔU , $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 외부에 한 일을 $2W_0$, $D \rightarrow A$ 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일을 W_0 이라 할 때 $\Delta U = 2W_0$ 이고, 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일 $W = 2W_0 - W_0 = W_0$ 이다.

○. $A \rightarrow B$ 과정은 부피가 일정한 과정이므로 이 과정에서 흡수한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 같은 $2W_0$ 이고, $B \rightarrow C$ 과정은 등온 과정이므로 이 과정에서 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일과 같은 $2W_0$ 이다. 따라서 기체가 한 번 순환하는 동안 흡수한 열량은 $4W_0$ 이다. 또한 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 W_0 이므로 스텔링 기관의 열효율 $e = \frac{W_0}{4W_0} = \frac{1}{4}$ 이다.

05 시간과 공간

수능 2점 테스트

본문 82~84쪽

01 ②	02 ①	03 ④	04 ③	05 ⑤	06 ②
07 ③	08 ④	09 ④	10 ⑤	11 ②	12 ③

01 특수 상대성 이론의 가정

특수 상대성 이론의 두 가지 가정은 상대성 원리와 광속 불변 원리이다.

✕. 관성계 I에서, I에 대해 상대적인 운동을 하는 관성계 II의 시간은 느리게 흐른다. 이것을 시간 팽창(시간 지연)이라고 한다.

ⓐ. 광속 불변 원리에 따라 모든 관성계에서 진공 속을 진행하는 빛의 속력은 광원이나 관찰자의 속력에 관계없이 광속 c 로 일정하다.

✕. 상대성 원리에 따라 모든 관성계에서는 물리 법칙이 동일하게 성립한다.

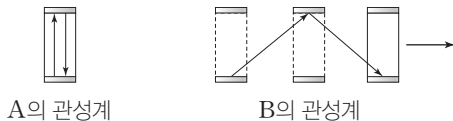
02 특수 상대성 이론

특수 상대성 이론에 의해 시간 팽창(시간 지연), 길이 수축이 나타난다. 따라서 관찰자에 대해 운동하는 관성계의 시간은 느리게 가고, 운동 방향으로의 길이는 감소한다.

ⓐ. A의 관성계에서 우주선의 길이는 고유 길이이고, B의 관성계에서 우주선의 길이는 길이 수축에 의해 고유 길이보다 작다. 따라서 우주선의 길이는 A의 관성계에서 B의 관성계에서보다 크다.

✕. 광속 불변 원리에 의해 레이저 빛의 속력은 A의 관성계와 B의 관성계에서 모두 광속 c 로 같다.

✕. A의 관성계에서와 B의 관성계에서 빛 시계의 빛이 한 번 왕복 운동하는 동안 진행한 경로는 그림과 같다.



따라서 빛 시계에서 빛이 한 번 왕복 운동하는 동안 진행한 경로의 길이는 B의 관성계에서 A의 관성계에서보다 크다.

03 시간 팽창과 길이 수축

뮤온의 관성계에서, 뮤온이 생성될 때부터 붕괴될 때까지의 시간은 짧지만 길이 수축에 의해 생성된 지점부터 지표면까지의 길이가 짧다. 반면 A의 관성계에서, 시간 팽창(시간 지연)에 의해 뮤온이 생성될 때부터 붕괴될 때까지 걸리는 시간이 길다.

✕. 뮤온의 관성계에서, A는 광속에 가까운 속력으로 운동한다.

ⓐ. 시간 팽창(시간 지연)에 의해 뮤온이 생성될 때부터 붕괴될 때까지 걸리는 시간은 A의 관성계에서 뮤온의 관성계에서보다 길다.

ⓐ. 뮤온의 관성계에서, 뮤온이 생성된 지점에서 지표면까지의 거리는 길이 수축에 의해 고유 길이 h 보다 작다.

04 시간 팽창과 길이 수축

B의 관성계에서 A가 탄 우주선의 길이는 길이 수축에 의해 고유 길이보다 작고, 길이 수축은 우주선의 속력이 클수록 더 크게 나타난다.

ⓐ. $L_1 < L_2$ 이므로 길이 수축은 I에서가 II에서보다 크게 나타난다. 따라서 $v_1 > v_2$ 이고, 등가속도 직선 운동 구간에서 우주선의 속력이 작아졌으므로 이 구간에서 우주선의 가속도 방향은 운동 방향과 반대이다.

ⓐ. 시간 팽창(시간 지연)에 의해 한 관성계에 대해 상대적으로 운동하는 다른 관성계의 시간은 느리게 간다. 따라서 A의 관성계에서, B의 시간은 A의 시간보다 느리게 간다.

✕. A의 관성계에서, 우주선의 길이 L_0 은 고유 길이이므로 길이 수축에 의한 L_1 보다 크다.

05 동시성의 상대성

A의 관성계에서 B, C가 탄 우주선의 길이는 길이 수축에 의해 고유 길이보다 작고, 길이 수축은 우주선의 속력이 클수록 더 크게 나타난다.

ⓐ. A의 관성계에서, 우주선의 길이는 B가 탄 우주선이 C가 탄 우주선보다 크므로 길이 수축은 C가 탄 우주선에서 더 크게 나타난다. 따라서 B의 속력이 C의 속력보다 작으므로 $v_B < v_C$ 이다.

ⓐ. A의 관성계에서, 시간 팽창(시간 지연)은 속력이 큰 C에서가 더 크게 나타난다. 따라서 A의 관성계에서, B의 시간은 C의 시간보다 빠르게 간다.

ⓐ. B의 관성계에서, 광원에서 방출된 빛이 검출기에 도달하는 동안 p, q는 B의 운동 방향과 반대 방향으로 운동한다. 따라서 B의 관성계에서, 광원에서 방출된 빛이 p까지 진행되는 동안 빛이 진행되는 경로의 길이는 빛이 q까지 진행되는 동안 빛이 진행되는 경로의 길이보다 크므로 광원에서 동시에 방출된 빛은 p보다 q에 먼저 도달한다.

06 시간 팽창과 길이 수축

A의 관성계에서, A의 운동 방향과 수직인 방향으로 길이는 수축이 일어나지 않으므로 광원과 거울 사이의 거리는 고유 길이와 같다. 또한 빛이 빛 시계에서 진행되는 동안 광원, 거울은 A의 운동 방향과 반대 방향으로 운동한다.