

04

열역학 법칙

개념 체크

- ❶ 열평형 상태: 두 물체의 온도가 같아져 더 이상 온도가 변하지 않는 상태이다.
- ❷ 이상 기체: 분자의 부피를 무시할 수 있으며, 분자들 사이에 충돌 이외의 다른 상호 작용을 하지 않는 기체이다. 일정량의 이상 기체에 대하여 $\frac{\text{일력} \times \text{부피}}{\text{절대 온도}}$ 가 일정하게 유지된다.

1. 온도가 다른 두 물체 사이에서 열은 저절로 온도가 () 물체에서 온도가 () 물체로 이동한다.

2. 온도가 다른 두 물체 사이에서 열이 이동하여 온도가 같아져 더 이상 온도가 변하지 않는 상태를 () 상태라고 한다.

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

정답

- 높은, 낮은
- 열평형
- 증가, 감소

1 열역학 제1법칙

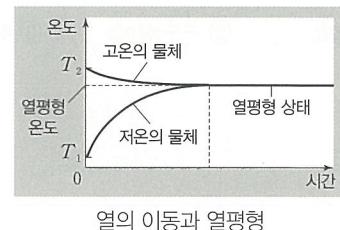
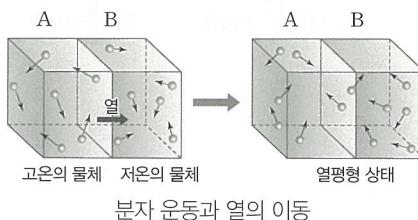
(1) 온도: 물체의 차갑고 따뜻한 정도를 수치로 나타낸 물리량이다.

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

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

- 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 kcal 또는 J을 사용한다.
- ⑤ 열평형 상태: 온도가 다른 두 물체 사이에서 열이 이동하여 온도가 같아져 더 이상 온도가 변하지 않는 상태이다.



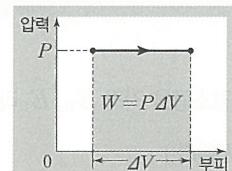
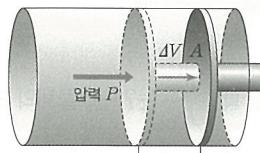
(2) 기체가 하는 일

- 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.



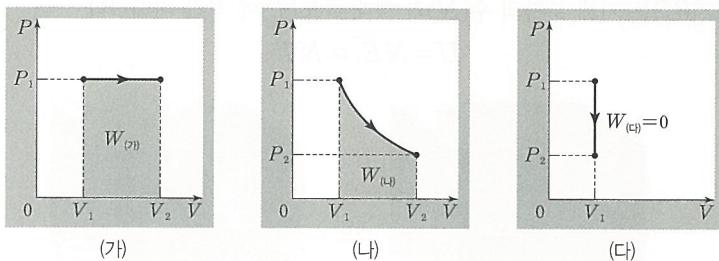
$$W = F\Delta l = PA\Delta l = P\Delta V \quad \text{압력-부피 그래프에서 그림과 아래 면적은 기체가 외부에 한 일이다.}$$

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

개념 체크

- ④ 찌그려진 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 안쪽에서 바깥쪽으로 힘을 작용하여 부피가 증가하므로 공 내부의 공기는 외부에 일을 한다.

과학 돋보기 압력(P)-부피(V) 그래프에서 기체가 한 일

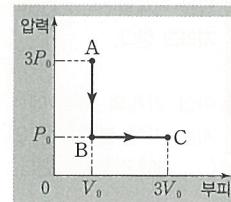


- (가) 과정: 압력이 P_1 로 일정하고 부피가 V_1 에서 V_2 로 증가한 경우, 기체가 한 일은 그림 아래의 면적인 $W_{(가)} = P_1(V_2 - V_1)$ 이다.
- (나) 과정: 압력이 P_1 에서 P_2 로 감소하고 부피가 V_1 에서 V_2 로 증가한 경우, 기체가 한 일은 그림 아래의 면적인 $W_{(나)}$ 이다.
- (다) 과정: 부피가 V_1 로 일정하고 압력이 P_1 에서 P_2 로 변하는 경우, 기체의 부피 변화가 없으므로 기체가 한 일은 $W_{(다)} = 0$ 이다.
- 기체가 한 일을 비교하면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

☞ 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 기체의 상태가 A → B → C를 따라 변하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다.



1. A → B 과정에서 기체의 온도는 (내려간다, 일정하다, 올라간다).

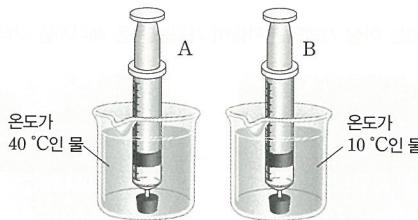
2. A → B 과정에서 기체가 외부에 한 일은 ()이다.

3. B → C 과정에서 기체가 외부에 한 일은 ()이다.

탕구자료 살펴보기 | 열의 이동과 기체가 하는 일

과정

- 주사기 A, B에 각각 온도가 같은 공기 30 mL를 넣고 고무마개로 막는다.
- 그림과 같이 A, B를 각각 온도가 40 °C, 10 °C인 물이 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 열을 흡수하여 온도가 올라간다.
- B 안의 공기의 온도는 물의 온도보다 높아 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

- 내려간다
- 0
- $2P_0V_0$

개념 체크

❶ 기체의 내부 에너지: 기체 분자들이 가지는 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지의 총합이다.

❷ 이상 기체의 내부 에너지: 분자들이 충돌 이외의 상호 작용을 하지 않으므로 퍼텐셜 에너지가 0이다. 따라서 이상 기체의 내부 에너지는 분자들의 운동 에너지의 총합과 같다.

❸ 이상 기체의 내부 에너지와 절대 온도: 일정량의 이상 기체의 내부 에너지는 절대 온도에 비례한다.

1. 기체 분자의 () 에너지와 퍼텐셜 에너지의 총합은 기체의 () 에너지라고 한다.

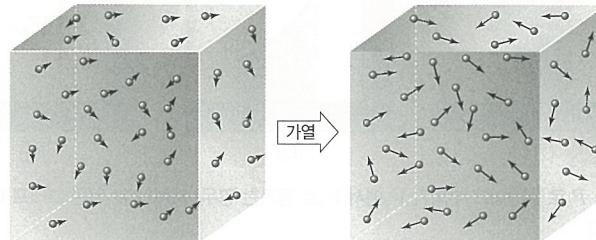
2. 이상 기체의 내부 에너지는 기체 분자의 수와 ()에 각각 비례한다.

3. 밀폐된 용기 안에 들어 있는 이상 기체에 열을 공급하면, 기체 분자 1개의 평균 운동 에너지는 (증가, 감소)하고, 기체의 온도는 (올라간다, 일정하다, 내려간다).

(3) 기체의 내부 에너지

- 내부 에너지(U): 기체 분자의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지의 총합을 말한다.
- 이상 기체는 분자 사이의 인력이 없으므로 퍼텐셜 에너지가 없다. 따라서 이상 기체의 내부 에너지는 운동 에너지만의 총합으로 나타나고, 절대 온도에 비례한다.
- 이상 기체 분자 1개의 평균 운동 에너지(\bar{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.

$$U = N \bar{E}_k \propto NT$$



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.
- 이상 기체의 절대 온도가 0 K인 경우 내부 에너지는 0이 된다. 따라서 0 K일 때 기체는 열운동을 하지 않는다.

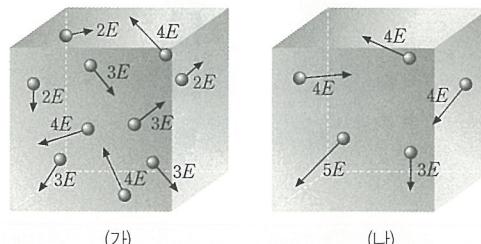


탐구자료 살펴보기

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

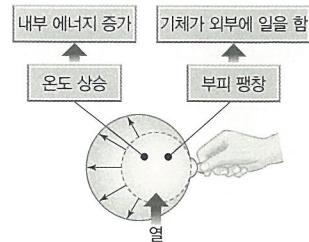
정답

- 운동, 내부
- 절대 온도
- 증가, 올라간다

개념 체크

(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 에너지는 한 형태에서 다른 형태로 전환될 수 있지만 에너지의 총량은 변하지 않는다는 것을 뜻하므로 에너지 보존 법칙을 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.



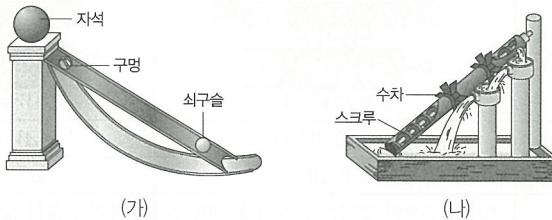
탐구자료 살펴보기

제1종 영구 기관

자료

다음은 어떤 연설가가 말한 무한 에너지 생산 장치에 대한 설명이다.

- (가) 자석에 의해 쇠구슬이 비탈면을 따라 끌려 올라가다가 구멍으로 떨어진 후, 굽은 면을 따라 원래의 위치로 돌아간다. 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.



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 피텐셜 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.

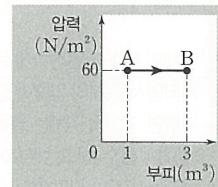
- ❷ 열역학 제1법칙: 기체의 내부 에너지 증가량은 기체가 외부로부터 흡수한 열량에서 외부에 한 일을 뺀 값과 같다.

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

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

1. 기체가 흡수한 열량은 100 J이고, 기체가 외부에 한 일이 70 J이면, 기체의 내부 에너지는 () J만큼 (증가, 감소) 한다.

2. 그림은 일정량의 이상 기체의 상태가 A \rightarrow B로 변할 때, 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. A \rightarrow B 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량은 180 J이다.



- A \rightarrow B 과정에서 기체가 흡수한 열량은 () J이다.

정답

1. 30, 증가
2. 300

개념 체크

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

❷ 보일-샤를 법칙: 일정량의 이상 기체에 대하여 $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$ 가 일정하게 유지된다.

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

❸ 기체의 압력이 일정하게 유지되면서 기체의 부피가 증가하면, 기체의 온도는 (내려, 올라)가고, 기체는 (외부에 일을 한다, 외부로부터 일을 받는다).

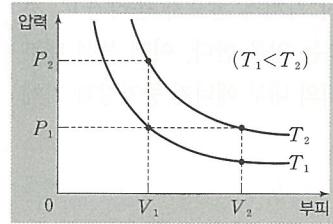
❹ 기체의 압력이 일정하게 유지되면서 기체의 부피가 감소하면, 기체의 내부 에너지는 (감소, 증가)하고, 기체는 열을 (방출, 흡수)한다.

❺ 기체의 부피가 일정하게 유지되면서 기체의 압력이 증가하면, 기체의 기체는 열을 (방출, 흡수)하고, 내부 에너지는 (감소, 증가)한다.

(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

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

- 기체가 흡수한 열은 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	 $Q = P(V_2 - V_1)$	 $Q = P(V_1 - V_2)$
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.

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

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

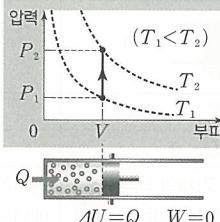
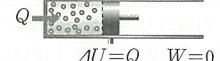
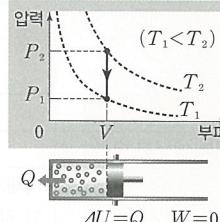
$$Q = \Delta U$$

정답

- 올라, 외부에 일을 한다
- 감소, 방출
- 흡수, 증가

- 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.

개념 체크

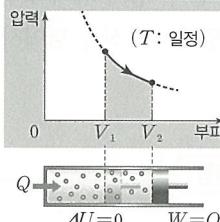
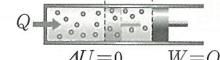
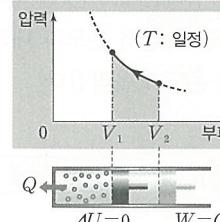
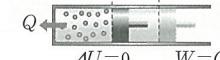
구분	등적 가열(압력 증가)	등적 냉각(압력 감소)
압력-부피 그래프	  $\Delta U = Q$, $W = 0$	  $\Delta U = Q$, $W = 0$
기체가 외부에 한 일	$\Delta V = 0$, $W = 0$	$\Delta V = 0$, $W = 0$
내부 에너지 변화	$\Delta T > 0$, $\Delta U > 0$	$\Delta T < 0$, $\Delta U < 0$
특징	기체가 흡수한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다. 따라서 기체의 압력, 내부 에너지는 증가하고 절대 온도는 올라간다.	기체가 방출한 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 열은 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	  $\Delta U = 0$, $W = Q$	  $\Delta U = 0$, $W = Q$
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 그래프의 아래 면적은 기체가 흡수한 열 또는 기체가 외부에 한 일과 같다.	기체가 방출한 열량은 기체가 외부로부터 받은 일과 같다. 기체의 부피는 감소하고, 압력은 증가한다. 압력-부피 그래프의 아래 면적은 기체가 방출한 열 또는 기체가 외부로부터 받은 일과 같다.

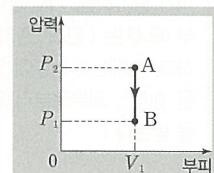
- ⑥ 단열 과정: 기체가 외부와의 열 출입이 없는 상태에서 부피가 변하는 과정이다($Q=0$).

- 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($\Delta V > 0 \Rightarrow \Delta T < 0$).

1. 그림은 일정량의 이상 기체의 상태가 A \rightarrow B로 변할 때, 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다.
 $A \rightarrow B$ 과정에서 기체의 내부 에너지 변화량은 200 J이다.



$A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 ()이고, 기체는 () 만큼의 열을 (방출, 흡수)한다.

2. 기체의 온도가 일정하게 유지되면서 기체의 압력이 감소하면, 기체의 내부 에너지는 (감소, 일정, 증가)하고, 기체는 열을 (방출, 흡수)한다.

3. 기체의 온도가 일정하게 유지되면서 기체가 외부로부터 300 J 만큼의 일을 받으면, 기체의 압력은 (감소, 증가)하고, 기체가 (방출, 흡수)한 열량은 () J이다.

정답

1. 0, 200, 방출 2. 일정, 흡수
3. 증가, 방출, 300

개념 체크

❶ 단열 팽창: $Q = \Delta U + W = 0$ 에서 $\Delta U = -W$ 이다. 따라서 기체가 외부에 한 일만큼 내부 에너지가 감소한다.

❷ 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.

❸ 단열 팽창과 단열 압축: 단열 팽창을 하면 외부에 한 일만큼 내부 에너지가 감소하고, 단열 압축을 하면 외부로부터 받은 일만큼 내부 에너지가 증가한다.

1. 기체가 외부와의 열 출입이 없는 상태에서 기체의 부피가 증가하면, 기체의 내부 에너지는 (감소, 증가)하고, 기체는 (외부에 일을 한다, 외부로부터 일을 받는다).

2. 외부와의 열 출입이 없는 상태에서 기체가 외부로부터 150 J 만큼의 일을 받으면, 기체의 온도는 (내려, 올라) 가고, 기체의 내부 에너지는 () J 만큼 (감소, 증가) 한다.

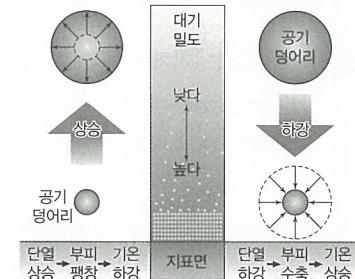
3. 공기 덩어리가 산을 타고 상승할 때는 단열 팽창하면서 온도가 (내려, 올라) 가고, 산을 넘어서 내려올 때는 단열 압축하면서 온도가 (내려, 올라) 간다.

정답

- 감소, 외부에 일을 한다
- 올라, 150, 증가
- 내려, 올라

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

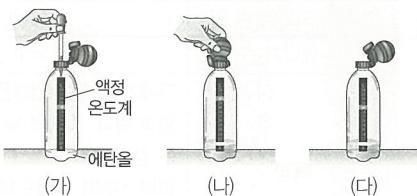
- 단열 팽창과 구름의 생성: 두터운 공기층 사이에서는 열의 이동이 느리게 일어나므로, 수증기를 포함하는 공기 덩어리가 갑자기 상승하면 기압이 낮아져 공기 덩어리가 단열 팽창을 한다. 따라서 공기 덩어리의 온도가 내려가고, 수증기가 응결하여 구름이 생성된다.
- 높새바람: 우리나라의 동해로부터 불어온 공기 덩어리가 태백산맥을 넘어 서쪽으로 불면 고온 건조한 바람이 되는데, 이것을 높새바람이라고 한다. 공기 덩어리가 산을 타고 상승할 때는 단열 팽창을 하면서 온도가 내려가고, 공기 덩어리가 산을 넘어서 내려올 때는 단열 압축을 하면서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

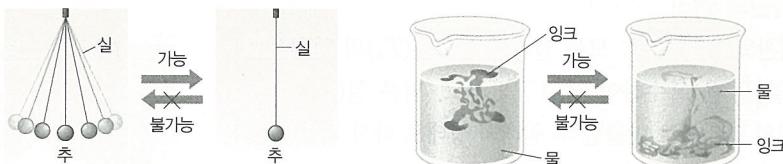
- 기체를 빠르게 압축하면 외부와의 열 출입이 없는 단열 압축 과정이 진행되어 기체의 온도가 올라가고, 기체를 빠르게 팽창시키면 외부와의 열 출입이 없는 단열 팽창 과정이 진행되어 기체의 온도가 내려가면서 수증기가 응결하여 구름이 형성된다.

개념 체크

2 열역학 제2법칙

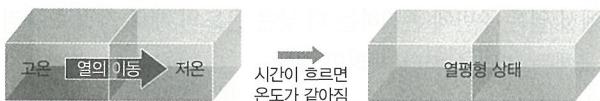
(1) 가역 현상과 비가역 현상

- 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 방향으로는 저절로(자발적으로) 일어나지만, 그 반대 방향으로는 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

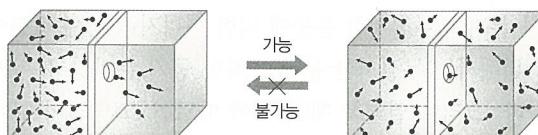


(2) 열역학 제2법칙

- 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), 열에너지에는 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 마찬가지이다. 따라서 다른 연료를 사용하지 않고 바닷물의 열로만 엔진을 작동시키는 선박은 만들 수 없다.



❶ **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.

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

❸ 1. 열은 자발적으로 온도가 (낮은, 높은) 물체에서 온도가 (낮은, 높은) 물체로 이동하지만, 온도가 (낮은, 높은) 물체에서 온도가 (낮은, 높은) 물체로는 이동하지 않는다.

❹ 2. 공기 중에서 용수철의 진동, 열의 이동, 잉크 또는 연기의 확산 현상은 모두 (가역, 비가역) 현상이다.

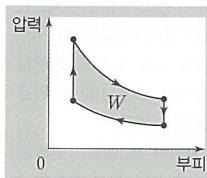
❺ 3. 고립계에서 자발적으로 일어나는 자연 현상은 항상 확률이 (낮은, 높은) 쪽으로 변화가 일어난다.

정답

1. 높은, 낮은, 낮은, 높은
2. 비가역
3. 높은

개념 체크

❶ 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 그라프로 둘러싸인 면적(W)과 같다.



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

❸ 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. 열기관은 반복되는 순환 과정을 거쳐 열을 ()로 바꾸는 장치이다.

2. 열기관이 한 번의 순환 과정 동안 고열원으로부터 흡수한 열량이 200 J이고, 저열원으로 방출한 열량은 120 J이다.

- 이 열기관이 외부에 한 일은 () J이다.
- 이 열기관의 열효율은 ()이다.

3. 고열원으로부터 흡수한 열을 모두 일로 바꿀 수 있는 열기관을 만들 수 (있다, 없다).

정답

- 일
- (1) 80 (2) 0.4
- 없다

3 열기관과 열효율

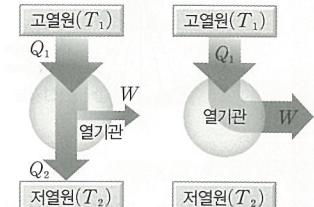
(1) 열기관: 반복되는 순환 과정을 거쳐 열을 일로 바꾸는 장치이다.

(2) 열기관의 종류

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

(3) 열기관의 원리

- 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 ($\Delta U=0$).



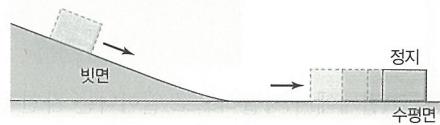
- 열기관의 열효율(e): 열기관의 열효율은 고온에서 흡수한 열량 Q_1 에 대하여 외부에 한 일 W 의 비로 정의한다.

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

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

- 열효율이 1(100 %)인 열기관($Q_1=W$)은 만들 수 없다: 열역학 제2법칙에 의하면 열기관이 일을 하는 과정에서 열은 주변에 존재하는 더 낮은 온도의 계로 저절로 흘러가 버리기 때문이다.

- 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 못 한다. 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.

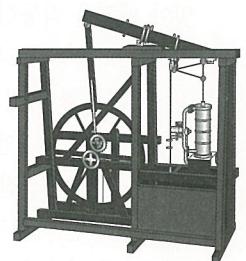


과학 동보기



제임스 와트의 증기 기관

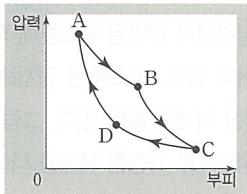
18세기 초 토마스 뉴커먼(Newcomen Thomas, 1663~1729)이 최초로 피스톤을 이용한 증기 기관을 발명하였다. 이 증기 기관은 탄광 안의 물을 퍼내는 데 쓰여 광산에서 큰 성과를 나타냈다. 제임스 와트(James Watt, 1736~1819)는 아버지를 따라 런던에서 1년간 기계공으로 일하면서 기술자의 자질을 다지게 되었고, 대학에서 일하며 화학자 블랙을 통해 잠열이라는 것을 이해하고 증기 기관의 개량을 생각하였다. 증기 기관이 발명된 이후 약 70년이 지난 1781년에 증기 기관의 수리를 맡게 된 와트는 뉴커먼의 증기 기관에서 열효율과 실용성을 크게 향상시킨 증기 기관을 탄생시키게 되었다.



개념 체크

(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($e_{\text{카}}$)은 다음과 같다.

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

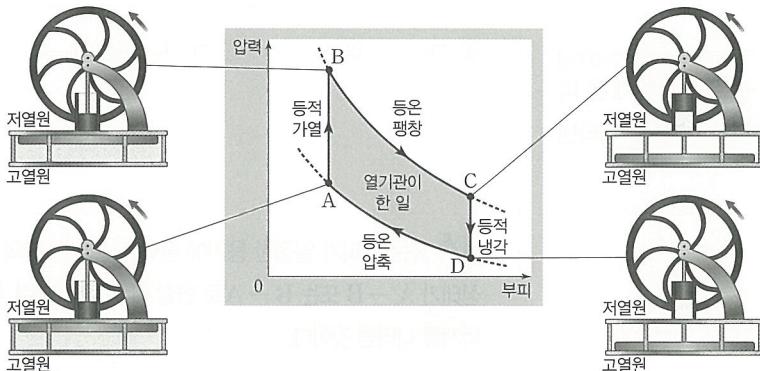
(5) 실제 열기관의 열효율

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

탐구자료 살펴보기 스텔링 엔진

자료

그림은 스텔링 엔진의 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

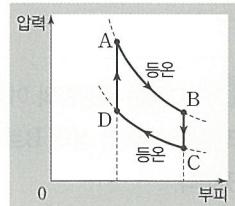
- 열을 흡수하는 과정은 A → B(등적 가열)와 B → C(등온 팽창)이고, 기체가 외부에 일을 하는 과정은 B → C(등온 팽창)이다.
- 외부에서 열을 흡수하는 과정에서는 내부 에너지가 증가하거나 부피가 팽창하여 외부에 일을 한다. 열을 방출하는 과정에서는 내부 에너지가 감소하거나 외부로부터 일을 받는다. 따라서 한 번의 순환 과정을 지난 후 내부 에너지는 동일한 상태를 반복한다.

☞ 카르노 기관: 열역학 제2법칙을 적용하여 알아낸 최대의 열효율을 가질 수 있는 열기관이다. 고열원과 저열원의 온도가 각각 T_1 , T_2 일 때, 카르노 기관의 열효율을 $e_{\text{카}}$ 는 다음과 같다.

$$e_{\text{카}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

1. 카르노 기관의 고열원의 온도가 T_1 이고, 저열원의 온도가 T_2 일 때, 카르노 기관의 열효율은 $\frac{T_2}{T_1}$ 가 작을수록 (작다, 크다).

[2~3] 그림은 스텔링 엔진의 기체의 상태가 A → B → C → D → A를 따라 순환하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. A → B 과정과 C → D 과정은 등온 과정이며, B → C 과정과 D → A 과정은 부피가 일정한 과정이다.



2. A → B 과정에서 기체의 내부 에너지는 (감소, 일정, 증가)하고, 기체는 열을 (방출, 흡수)한다.

3. D → A 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량은 () 과정에서 기체가 방출한 열량과 같다.

정답

1. 크다
2. 일정, 흡수
3. B → C