

05

열역학 제2법칙

수록 구성

- 개념 기본 문제
- 개념 적용 문제
- 1등급 도전 문제
- 정답과 해설

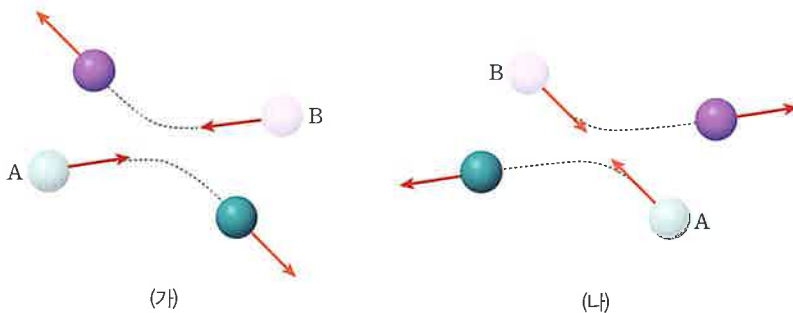
☞ 자연에서 일어나는 대부분의 현상에는 **방향성**이 있으며, 이러한 방향성은 **엔트로피**와 **열역학 제2법칙**으로 설명할 수 있다. ☞

1 자연 현상의 비가역성

물에 떨어뜨린 잉크 방울은 물 전체로 퍼져 나간다. 하지만 퍼진 잉크가 다시 한 방울로 모이는 것은 볼 수 없다. 이처럼 자연에서 일어나는 현상에는 한쪽 방향으로만 일어나는 **방향성**이 존재한다.

1. 가역 과정

- (1) **가역 과정**: 어떤 과정이 일어난 후, 그 과정이 거꾸로 일어나서 계와 주위가 모두 원래의 상태로 되돌아갈 수 있는 과정을 가역 과정이라고 한다.
- (2) 가역 과정에서는 매 순간이 열역학적 평형 상태에 근접해야 하며, 마찰이나 공기 저항, 열의 이동으로 인한 에너지 손실이 없는 이상적인 상황에서만 가능하다.
- (3) **가역 과정의 예**
 - ① 이상 기체 분자의 충돌, 마찰이나 공기 저항이 없는 이상적인 진자의 왕복 운동 등은 이론적으로 가역 과정이다.
 - ② 아래의 그림에서 (가)는 두 기체 분자 A와 B가 충돌하여 튕겨 나가는 과정을 나타낸 것이다. 충돌이 끝난 시점에서 시간을 거꾸로 돌려 (나)와 같이 속도의 방향을 반대로 바꾸어도 (가)의 처음 상태로 정확히 되돌아갈 수 있다. 즉, 과정의 정방향과 역방향 모두 어떤 물리 법칙도 위반하지 않고 가능하다.



▲ 이상 기체 분자 A와 B 사이의 충돌

열역학적 평형 상태

시간이 지나도 계의 거시적 상태(압력, 온도 등)가 변하지 않고, 외부와 물질이 나 에너지의 알짜 흐름이 없는 상태이다.

이상적인 진자의 운동

아래의 그림과 같은 진자는 공기 저항이나 마찰 등이 없다면 일정한 진폭으로 계속 진동한다. 즉, 진자의 역학적 에너지는 보존되므로 한 주기마다 동일한 에너지 상태의 운동을 반복한다.



2. 비가역 과정

집중 분석 159쪽

- (1) **비가역 과정**: 시간에 대해 한쪽 방향으로만 자발적으로 일어나며, 그 과정이 거꾸로 일어나 원래의 상태로 되돌아갈 수 없는 과정을 비가역 과정이라고 한다.
- (2) 자연계에서 일어나는 대부분의 현상은 비가역 과정이다. 이는 현실 세계에 마찰이나 공기 저항, 물질의 확산 등 에너지가 흩어지는 요인이 항상 존재하기 때문이다.

비가역 과정에서의 에너지 보존

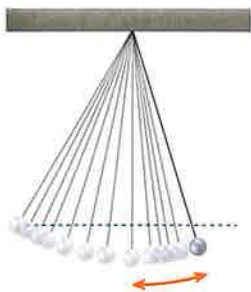
비가역 과정에서도 계 전체의 에너지는 항상 일정하게 보존된다. 따라서 거꾸로의 과정이 자발적으로 일어나지 않는 자연 현상의 방향성을 설명하려면 에너지 보존 법칙(열역학 제1법칙) 이외에 다른 법칙이 필요하다.

개념 기본 문제

01 열역학 법칙과 엔트로피에 대한 설명 중 옳은 것은?

- ① 기체의 확산은 엔트로피가 감소하는 비가역 현상이다.
- ② 열역학 제1법칙은 자연 현상의 방향성을 설명하는 법칙이다.
- ③ 고립계에서는 항상 엔트로피가 감소하는 방향으로 변화가 일어난다.
- ④ 열역학 제2법칙은 자연 현상이 무질서도가 증가하는 방향으로 진행됨을 설명한다.
- ⑤ 차가운 물체에서 뜨거운 물체로 열이 자발적으로 이동하는 것은 에너지 보존 법칙에 위배된다.

02 그림은 공기 중에서 큰 진폭으로 왕복 운동을 시작한 진자의 운동 모습으로, 진자의 진폭은 시간이 지남에 따라 점차 줄어들어 결국 연직선상에 정지한다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 비가역 과정이다.
- ㄴ. 진자와 주변의 총 엔트로피는 증가한다.
- ㄷ. 진자와 주변의 총 에너지량은 감소한다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

05 열역학 제2법칙

정답과 해설 42쪽

03 그림은 가상의 열기관 A가 온도가 500 K인 고열원에서 $5Q$ 의 열을 흡수하여 $3Q$ 만큼의 일을 하고, 온도가 300 K인 저열원으로 $2Q$ 의 열을 방출하는 모습을 나타낸 것이다.



- (1) A의 열효율을 구하시오.
- (2) 동일한 두 열원 사이에서 작동하는 카르노 기관의 열효율을 구하시오.
- (3) A는 어떤 열역학 법칙을 위배하고 있는지 쓰시오.

04 그림 (가)는 한쪽에 기체가 들어 있고 다른 한쪽은 진공인 밀폐된 단열 용기의 모습을, (나)는 (가)의 중간 밸브를 열었을 때 기체가 진공으로 확산되면서 고르게 퍼지는 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

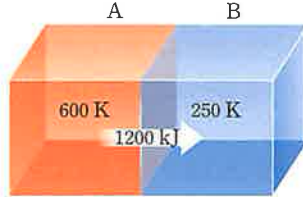
- ㄱ. 비가역 과정이다.
- ㄴ. 기체 분자가 배열될 수 있는 상태의 수는 (가)에서와 (나)에서가 같다.
- ㄷ. 기체 전체의 엔트로피 변화량은 0이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

개념 적용 문제

▶ 열역학적 엔트로피

- 01** 그림은 온도가 600 K으로 일정한 고열원 A에서 온도가 250 K으로 일정한 저열원 B로 1200 kJ의 열이 비가역적으로 이동한 것을 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, A와 B 사이의 열전달 이외에 열 출입은 없다.)



▶ 열이 이동할 때 각 물체의 엔트로피 변화량은 전달된 열량과 그 물체의 절대 온도에 따라 결정된다.

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

보기

- ㄱ. A의 엔트로피는 증가한다.
- ㄴ. B의 엔트로피 증가량은 2.0 kJ/K이다.
- ㄷ. A와 B 전체의 엔트로피는 2.8 kJ/K만큼 증가한다.

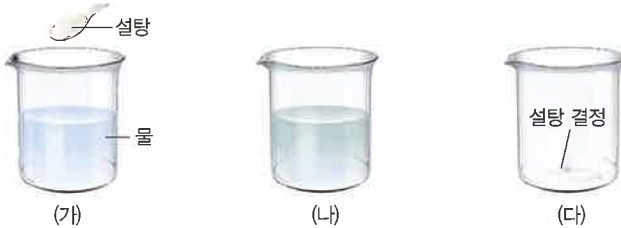
- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

▶ 비가역 과정과 열역학 제2법칙

- 02** 다음은 설탕의 용해와 석출에 대한 실험이다.

실험 과정

- (가) 물이 담긴 비커에 설탕을 넣는다.
- (나) 그 상태로 설탕이 모두 녹을 때까지 기다린다. 이때 물을 휘젓거나 가열하지 않는다.
- (다) (나)에서 물이 모두 증발할 때까지 그대로 놔둔다.



실험 결과 (다)의 비커 바닥에 설탕 결정이 남았다.

▶ 열역학 제2법칙에 따르면 고립계의 엔트로피는 감소하지 않는다. 엔트로피의 변화를 논할 때에는 계의 설정이 중요하다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

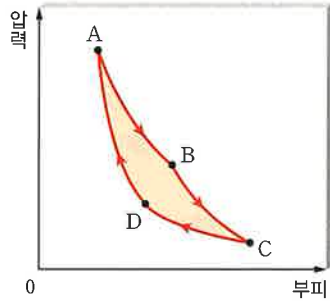
보기

- ㄱ. (나)에서 설탕이 물에 녹는 현상은 비가역 과정이다.
- ㄴ. (다)에서 설탕의 엔트로피는 감소한다.
- ㄷ. (다)에서 물이 증발하고 설탕 결정만 남는 과정은 자발적 과정이다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▶ 카르노 기관과 열역학적 엔트로피

- 03** 그림은 이상 기체를 이용한 카르노 기관의 순환 과정 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 압력과 부피의 관계 그래프로 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 와 $C \rightarrow D$ 과정은 등온 과정이고, $B \rightarrow C$ 와 $D \rightarrow A$ 과정은 단열 과정이다. 이 기관은 온도가 T_H 인 고열원에서 열 Q_H 를 흡수하고, 온도가 T_L 인 저열원으로 열 Q_L 을 방출한다.
- 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▶ 가역 과정에서 엔트로피의 변화량은 $\Delta S = \frac{Q}{T}$ 이다. 엔트로피는 물질의 상태에 의해서만 결정되는 상태 함수이다.

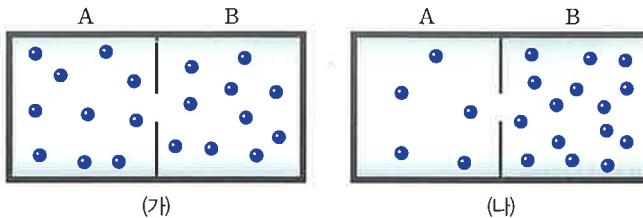
보기

- ㄱ. $Q_H T_L = Q_L T_H$ 이다.
- ㄴ. $B \rightarrow C$ 과정에서 기체의 엔트로피는 감소한다.
- ㄷ. 한 번의 순환을 마치고 나면 기체의 엔트로피는 증가한다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▶ 통계역학적 엔트로피

- 04** 그림 (가)는 크기가 같은 두 방 A, B에 기체 분자가 고르게 퍼져 있는 모습을, (나)는 (가)에 일을 가해 기체 분자가 B에 더 많이 분포하게 만든 모습을 나타낸 것이다.



▶ 가능한 미시 상태의 수 (W)가 많은 상태에서 엔트로피(S)도 크다.

$$S = k \ln W$$

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

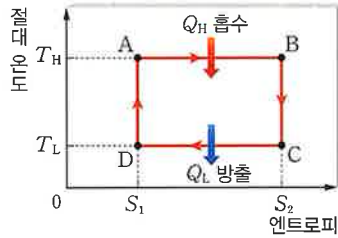
보기

- ㄱ. (가)에서 (나)로 변할 때 기체 전체의 엔트로피는 증가한다.
- ㄴ. (나) 상태가 나타날 확률이 (가) 상태가 나타날 확률보다 높다.
- ㄷ. (가)에서 (나)로 변하는 과정은 비자발적 과정이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 절대온도·엔트로피 그래프

- 05 그림은 이상 기체를 이용한 카르노 기관의 순환 과정 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 절대 온도와 엔트로피의 관계 그래프로 나타낸 것이다. 이 기관은 온도가 T_H 인 고열원과 온도가 T_L 인 저열원 사이에서 작동한다. $A \rightarrow B$ 와 $C \rightarrow D$ 는 등온 과정이며, 각각 열 Q_H , Q_L 을 흡수하거나 방출한다. $B \rightarrow C$ 와 $D \rightarrow A$ 는 단열 과정이다.



➤ 가역 과정에서 엔트로피의 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

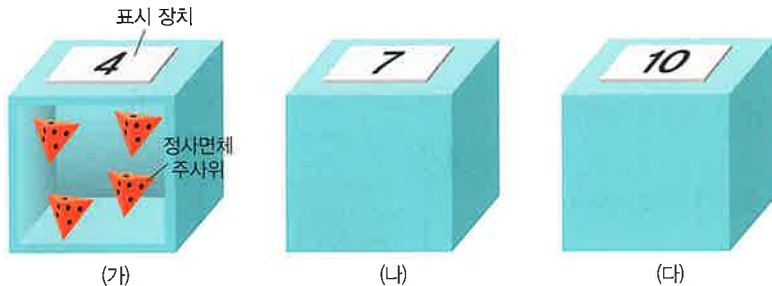
보기

- ㄱ. 한 번의 순환 과정 동안 열기관이 한 일은 그래프 내부 면적과 같다.
- ㄴ. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 흡수한 열량은 $T_L(S_2 - S_1)$ 이다.
- ㄷ. 한 번의 순환 과정 동안 계와 주변의 엔트로피 총합은 증가한다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 통계역학적 엔트로피

- 06 그림은 내부를 볼 수 없는 밀폐 상자에 정사면체 주사위 4개를 넣은 모습을 나타낸 것이다. 상자 외부의 표시 장치에는 주사위를 굴려서 나온 눈의 합이 표시된다. 예를 들어 모든 주사위의 눈이 1이 나오면 표시 장치에는 그림 (가)와 같이 숫자 4가 표시된다. 그림 (나)와 (다)는 (가)의 상자를 흔들어서 내부의 주사위를 굴린 후 표시 장치에 각각 숫자 7과 10이 나온 모습을 나타낸 것이다.



➤ 가능한 미시 상태의 수(경우의 수, W)가 많을수록 발생 확률이 높고, 엔트로피(S)가 크다.

$$S = k \ln W$$

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. (나)에 해당하는 미시 상태의 수는 4가지이다.
- ㄴ. (다)는 (나)보다 엔트로피가 더 높은 상태이다.
- ㄷ. (나)의 상자를 다시 흔들었을 때 (가)가 될 확률과 (다)가 될 확률은 서로 같다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

한 번의 순환 과정에서 알짜일은 흡수한 총 열량에서 방출한 총 열량을 뺀 값과 같으므로, $W=200\text{ J}-150\text{ J}=50\text{ J}$ 이다. 따라서 열효율은 $e=\frac{50\text{ J}}{200\text{ J}}=0.25$ 이다.

- 02 ㄱ. $1 \rightarrow 2$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 $W=P\Delta V=2P_0(2V_0-V_0)=2P_0V_0$ 이다.

ㄴ. $2 \rightarrow 3$ 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 $|\Delta U|=|U_3-U_2|$ 이다. 주어진 식 $U=\frac{3}{2}PV$ 를 이용하면 $U_2=6P_0V_0$ 이고, $U_3=3P_0V_0$ 이다. 따라서 내부 에너지 감소량은 $|3P_0V_0-6P_0V_0|=3P_0V_0$ 이다.

[바로알기] ㄷ. 한 번의 순환 과정에서 알짜일은 기체의 압력·부피 그래프에서 순환 경로로 둘러싸인 부분의 넓이와 같으므로 $W=P_0V_0$ 이다. 열을 흡수하는 과정은 $1 \rightarrow 2$ 과정과 $4 \rightarrow 1$ 과정이다. 열역학 제1법칙에 따라 $1 \rightarrow 2$ 과정과 $4 \rightarrow 1$ 과정에서 흡수한 열은 각각 다음과 같다.

$$Q_{1 \rightarrow 2}=U_{1 \rightarrow 2}+W_{1 \rightarrow 2}=(U_2-U_1)+W_{1 \rightarrow 2}=3P_0V_0+2P_0V_0=5P_0V_0$$

$$Q_{4 \rightarrow 1}=U_{4 \rightarrow 1}=U_1-U_4=3P_0V_0-\frac{3}{2}P_0V_0=\frac{3}{2}P_0V_0$$

따라서 흡수한 총 열량은 $5P_0V_0+\frac{3}{2}P_0V_0=\frac{13}{2}P_0V_0$ 이고,

이 열기관의 열효율은 $e=\frac{P_0V_0}{\frac{13}{2}P_0V_0}=\frac{2}{13}$ 이다.

- 03 ㄱ. 카르노 기관에서 $B \rightarrow C$ 과정은 단열 과정이므로 외부와의 열 출입이 없다($Q=0$, $0=\Delta U+W$). 문제의 조건에서 $B \rightarrow C$ 과정에서 기체의 내부 에너지 변화량은 $\Delta U=-120\text{ J}$ 이므로, 기체가 외부에 한 일은 $W=120\text{ J}$ 이다.
- ㄴ. 한 번의 순환 과정에서 내부 에너지의 총 변화량은 0이다. $A \rightarrow B$ 과정과 $C \rightarrow D$ 과정은 등온 과정이므로 내부 에너지의 변화가 없고, $B \rightarrow C$ 과정에서 기체의 내부 에너지 변화량은 $\Delta U=-120\text{ J}$ 이므로 $D \rightarrow A$ 과정에서 기체의 내부 에너지는 120 J 증가한다.

[바로알기] ㄷ. 열을 흡수하는 과정은 $A \rightarrow B$ 과정뿐이므로 $Q_H=300\text{ J}$ 이다. 열을 방출하는 과정은 $C \rightarrow D$ 과정뿐이므로 $Q_L=100\text{ J}$ 이다. 한 번의 순환 과정에서 알짜일은 흡수한 총 열량에서 방출한 총 열량을 뺀 값과 같으므로 $W=300\text{ J}-100\text{ J}=200\text{ J}$ 이다. 따라서 이 카르노 기관의 열효율은 $e_c=\frac{200\text{ J}}{300\text{ J}}=\frac{2}{3}$ 이다.

- 04 ㄱ. $B \rightarrow C$ 과정에서 기체의 부피가 일정하므로 기체가 하는 일은 0이고, 방출한 열량이 300 J 이므로 열역학 제1

법칙($Q=\Delta U+W$)에 따라 내부 에너지 감소량은 300 J 이다. $C \rightarrow A$ 과정은 온도가 일정한 등온 과정이므로 내부 에너지 변화량이 0이다. 한 번의 순환 과정에서 내부 에너지의 총 변화량은 0이므로, $A \rightarrow B$ 과정에서 내부 에너지 증가량은 300 J 이다. 즉, $A \rightarrow B$ 과정에서 500 J 의 열을 흡수하여 내부 에너지가 300 J 증가하였으므로 기체가 외부에 한 일은 200 J 이다.

ㄷ. 순환 과정에서 열을 흡수하는 과정은 $A \rightarrow B$ 과정뿐이므로 흡수한 총 열량 $Q_H=500\text{ J}$ 이다. 기체는 $A \rightarrow B$ 과정에서 200 J 의 일을 하고, $C \rightarrow A$ 과정에서 외부로부터 일을 받으므로 알짜일은 200 J 보다 작다. 따라서 이 열기관의 열효율은 $e=\frac{200\text{ J}-W_{B \rightarrow C}}{500\text{ J}}<\frac{2}{5}$ 이다.

[바로알기] ㄴ. 이상 기체의 내부 에너지는 절대 온도에 비례한다. 그래프에서 기체의 절대 온도는 A와 C에서 $2T$ 로 같으므로, 내부 에너지도 A와 C에서 같다.

- 05 ㄱ. 스텔링 기관의 순환 과정에서 $B \rightarrow C$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정은 온도가 일정한 등온 과정이므로, 내부 에너지 변화량은 0이다. 한 번의 순환 과정에서 내부 에너지의 총 변화량은 0이고, $A \rightarrow B$ 과정에서 내부 에너지 증가량이 300 J 이므로, $C \rightarrow D$ 과정에서 내부 에너지는 300 J 감소해야 한다.

ㄷ. 열을 흡수하는 과정은 $A \rightarrow B$ 과정(등적 가열 과정)과 $B \rightarrow C$ 과정(등온 팽창 과정)이다. $A \rightarrow B$ 과정은 부피가 일정하므로($W=0$) 흡수한 열량은 내부 에너지 증가량과 같은 300 J 이고, $B \rightarrow C$ 과정에서 흡수한 열량은 400 J 이다. 따라서 흡수한 총 열량 $Q_H=700\text{ J}$ 이다. 제시된 문제의 조건에서 열효율이 $0.25=\frac{1}{4}$ 이므로, $\frac{1}{4}=1-\frac{Q_L}{700\text{ J}}$ 에서 방출한 총 열량 $Q_L=525\text{ J}$ 이다.

[바로알기] ㄴ. $B \rightarrow C$ 과정은 등온 과정이므로 내부 에너지 변화량이 0이다. 따라서 열역학 제1법칙에 따라 기체가 외부에 한 일은 흡수한 열량과 같다. 문제의 조건에서 $B \rightarrow C$ 과정에서 흡수한 열량이 400 J 이므로, 이 과정에서 기체가 외부에 한 일은 400 J 이다. $A \rightarrow B$ 과정에서 증가한 내부 에너지는 300 J 이므로, 이것의 2배는 600 J 이다. 따라서 보기 ㄴ의 내용은 옳지 않다.

- 06 ㄴ. (가)의 열기관은 석유와 같은 화석 연료를 연소시켜 동력을 얻는다. 이 연소 과정에서 발생하는 이산화 탄소 등의 온실 기체는 (나)의 자연적 요인만으로는 설명되지 않는 1950년 이후의 급격한 온도 상승의 주요 원인이다.

ㄷ. (나)의 기후 위기 문제를 해결하기 위한 '탄소 중립'을 실현하기 위해서는 기존 화석 연료를 사용하는 열기관의 효율을 높여 연료 소모를 줄이려는 노력과 더불어, 운행 과정에서 탄소를 배출하지 않는 친환경 동력원으로서의 근본적인 전환이 필수적으로 요구된다.

[바로알기] ㄱ. 열기관은 고열원에서 흡수한 열에너지 전부를 유용한 일로 전환할 수 없으며, 반드시 일부의 열을 저열원으로 방출해야 한다. 따라서 열효율이 1(100%)인 열기관은 이론적으로도 만들 수 없다.

- 07** ㄱ. A → B 과정과 C → D 과정은 등압 과정이므로, 샤를 법칙($\frac{V}{T}$ = 일정)에 따라 $\frac{V_A}{2T_0} = \frac{V_B}{4T_0}$ 에서 $V_B = 2V_A$ 이다. 제시된 문제 조건에서 기체의 부피는 A와 D에서 같고 (V_A), B와 C에서 같으므로(V_B), D → A 과정과 B → C 과정에서 기체가 한 일은 0이며, 한 번의 순환 과정 동안 열기관이 한 일의 양은 다음과 같다.

$$W = 2P_0(V_B - V_A) + P_0(V_A - V_B) \\ = P_0(V_B - V_A)$$

여기에 $V_B = 2V_A$ 를 대입하면 $W = P_0V_A = 60 \text{ J}$ 이다. 따라서 A → B 과정에서 기체가 한 일은 $2P_0(V_B - V_A) = 2P_0V_A = 120 \text{ J}$ 이다.

ㄴ. 기체의 부피는 A와 D에서 같고 B와 C에서 같으므로, C → D 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일의 양은

$$W = P_0V_A = 60 \text{ J} \text{이다. 내부 에너지 } U = \frac{3}{2}PV \text{이므로,}$$

내부 에너지 감소량은 $\frac{3}{2}P\Delta V = \frac{3}{2}P_0V_A = \frac{3}{2} \times 60 \text{ J} = 90 \text{ J}$ 이다. 열역학 제1법칙에 따라 C → D 과정에서 기체가 방출하는 열량은 $90 \text{ J} + 60 \text{ J} = 150 \text{ J}$ 이다.

ㄷ. A → B 과정에서 흡수하는 열 Q_1 과 D → A 과정에서 흡수하는 열 Q_2 는 다음과 같다.

$$Q_1 = \Delta U_1 + W_1 = \frac{3}{2}(2P_0)V_A + 120 \text{ J} = 300 \text{ J}$$

$$Q_2 = \Delta U_2 = \frac{3}{2}V_A\Delta P = \frac{3}{2}(P_0)V_A = 90 \text{ J}$$

따라서 이 열기관의 열효율 $e = \frac{60 \text{ J}}{390 \text{ J}} = \frac{2}{13}$ 이다.

- 08** ㄱ. 한 번의 순환 과정 동안 열기관이 한 일의 양은 기체의 압력·부피 그래프에서 순환 경로로 둘러싸인 부분의 넓이와 같다. 경로 I과 경로 II에서 경로로 둘러싸인 부분의 넓이가 같으므로 열기관이 한 일도 서로 같다.

ㄷ. 경로 I과 경로 II에서 과정별로 열기관이 흡수하는 열량을 구하면 다음의 표와 같다.

과정	ΔU	W	Q_H
A → C	$3P_0V_0 - \frac{3}{2}P_0V_0$ $= \frac{3}{2}P_0V_0$	0	$\frac{3}{2}P_0V_0$
C → B	$9P_0V_0 - 3P_0V_0$ $= 6P_0V_0$	$4P_0V_0$	$10P_0V_0$
경로 I 전체			$\frac{23}{2}P_0V_0$
A → B	$9P_0V_0 - \frac{3}{2}P_0V_0$ $= \frac{15}{2}P_0V_0$	$3P_0V_0$	$\frac{21}{2}P_0V_0$
경로 II 전체			$\frac{21}{2}P_0V_0$

열기관이 한 일은 두 경로에서 같으므로, 흡수한 열량이 더 작은 경로 II의 열효율이 더 크다.

[바로알기] ㄴ. A에서 B로 상태가 변하는 동안 내부 에너지 변화량은 제시된 식 $U = \frac{3}{2}PV$ 에 의해 다음과 같다.

$$\Delta U = U_B - U_A = \frac{3}{2}(2P_0)(3V_0) - \frac{3}{2}P_0V_0 = \frac{15}{2}P_0V_0$$

05 열역학 제2법칙

중요 개념 체크

158쪽

1 비가역 2 (1) ○ (2) × 3 4 4 (1) ○ (2) ×

개념 기본 문제

160쪽

01 ④

02 ③

03 (1) 0.6 (2) 0.4 (3) 열역학 제2법칙 04 ①

- 01** ④ 열역학 제2법칙은 자연 현상이 자발적으로 일어날 때 계와 주변의 총 엔트로피, 즉 무질서도가 증가하는 방향으로 진행됨을 설명한다.

[바로알기] ① 기체의 확산은 분자가 더 넓은 공간으로 퍼져 나가는 현상으로, 엔트로피가 증가하는 비가역 현상이다.

② 자연 현상의 방향성을 설명하는 법칙은 열역학 제2법칙이다. 열역학 제1법칙은 에너지 보존 법칙이다.

③ 고립계에서 일어나는 자발적인 변화는 항상 엔트로피가 증가하는 방향(가역 과정은 엔트로피가 일정)으로 일어난다.

⑤ 차가운 물체에서 뜨거운 물체로 열이 자발적으로 이동하는 것은 에너지 보존 법칙(열역학 제1법칙)에는 위배되지 않으나, 엔트로피가 감소하는 현상이므로 열역학 제2법칙에 위배되어 불가능하다.

02 ㄱ. 진자의 역학적 에너지는 공기 저항과 마찰에 의해 점차 열에너지로 전환되고, 전환된 열에너지는 주변 공기로 흩어진다. 흩어진 열에너지가 자발적으로 다시 모여 진자를 움직이게 할 수는 없으므로, 이 과정은 비가역 과정이다.

ㄴ. 자발적으로 일어나는 실제 현상(비가역 과정)에서는 열역학 제2법칙에 따라 계와 주변을 포함한 전체의 총 엔트로피가 항상 증가한다.

[바로알기] ㄷ. 진자의 역학적 에너지는 감소하지만, 감소한 만큼 주변 공기의 내부 에너지가 증가한다. 에너지 보존 법칙(열역학 제1법칙)에 따라, 진자와 주변의 에너지는 한 형태에서 다른 형태로 전환될 뿐 그 총량은 항상 보존된다.

03 (1) A의 열효율 $e_A = \frac{W}{Q_H} = \frac{3Q}{5Q} = 0.6$ 이다.

(2) 카르노 기관의 열효율은 고열원과 저열원의 절대 온도로 결정된다. 따라서 제시된 열기관 A와 동일한 두 열원 사이에서 작동하는 카르노 기관의 열효율은 $e_c = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300\text{ K}}{500\text{ K}} = 0.4$ 이다.

(3) A에서는 (흡수한 열 = 한 일 + 방출한 열)을 만족하므로 열역학 제1법칙은 성립한다. (2)에서 구한 카르노 기관의 열효율 $e_c = 0.4$ 는 해당 온도의 열원에서 가능한 이론적 최대 효율인데, A의 열효율 0.6은 그보다 크므로 이는 열역학 제2법칙에 위배된다.

04 ㄱ. 기체가 진공으로 확산되며 퍼지는 현상은 자발적으로 일어나지만, 퍼진 기체가 자발적으로 다시 용기의 한쪽으로 모이지는 않는다. 이러한 기체의 확산은 한쪽 방향으로만 일어나는 비가역 과정이다.

[바로알기] ㄴ. 밀폐된 용기 안에서 같은 양의 기체 분자가 들어 있을 때, 기체 분자가 한쪽에 모여 있는 상태의 수 (경우의 수)보다 양쪽에 각각 고르게 들어 있는 상태의 수 (경우의 수)가 훨씬 크다. 따라서 기체 분자가 배열될 수 있는 상태의 수는 (나)가 (가)보다 크다.

ㄷ. 열역학 제2법칙에 따라 고립계(단열 용기의 내부)에서 일어나는 자발적인 현상(비가역 과정)은 엔트로피가 증가하는 방향으로 일어난다. 기체가 더 넓은 공간으로 확산하였으므로 무질서한 정도가 증가하여 기체 전체의 엔트로피는 증가한다. 즉, 엔트로피 변화량은 0이 아니다.

개념 적용 문제

161쪽~163쪽

01 ③ 02 ⑤ 03 ① 04 ② 05 ① 06 ②

01 ㄷ. A와 B 전체의 엔트로피 변화량은 각 부분의 엔트로피 변화량의 합($\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B$)이다. 각 부분의 엔트로피 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta S_A = \frac{-1200\text{ kJ}}{600\text{ K}} = -2.0\text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_B = \frac{+1200\text{ kJ}}{250\text{ K}} = +4.8\text{ kJ/K}$$

따라서 A와 B 전체의 엔트로피 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta S = (-2.0 + 4.8)\text{ kJ/K} = +2.8\text{ kJ/K}$$

즉, A와 B 전체 엔트로피는 2.8 kJ/K만큼 증가한다.

[바로알기] ㄱ. A는 열을 잃었으므로 엔트로피가 감소하고, B는 열을 얻었으므로 엔트로피가 증가한다.

ㄴ. 보기 ㄷ의 해설에서 B의 엔트로피 증가량은 4.8 kJ/K이다.

02 ㄱ. (나)에서 설탕이 물에 자발적으로 녹는 현상은 한쪽 방향으로만 일어나며, 용해된 설탕이 저절로 다시 설탕 결정으로 모이지 않으므로 비가역 과정이다.

ㄴ. (다)에서 설탕은 용해된 상태(무질서한 상태)에서 고체 결정 상태(규칙적인 배열, 질서 있는 상태)로 변하는데, 이처럼 설탕 분자들의 무질서도가 감소하므로 설탕의 엔트로피는 감소한다.

ㄷ. 실험에서 설탕은 외부(물 또는 외부 공기 등)와 에너지를 주고받는 열린계이다. (다)에서 설탕의 엔트로피는 감소하지만 외부의 엔트로피는 설탕의 엔트로피 감소량보다 더 크게 증가하므로, 전체 계의 엔트로피는 증가한다. 따라서 (다)에서도 열역학 제2법칙이 성립하므로, 물이 증발하고 설탕 결정만 남는 과정은 자발적 과정이다.