

04

열기관과 열효율

수록 구성

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

04 열기관과 열효율

핵심 내용 **마라톤**

열기관은 열을 일로 바꾸는 장치로, 열기관의 열효율에는 한계가 있다. 열기관의 개발과 활용은 인류의 삶을 크게 변화시켰다.

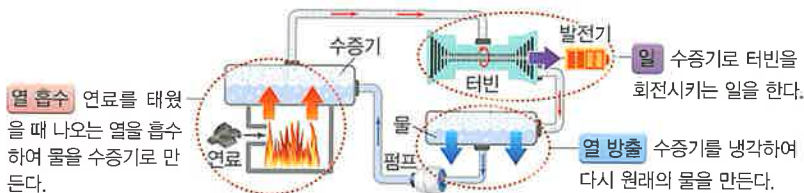
1 열기관과 열효율

뉴커먼이 최초로 실용적인 증기기관을 발명하고 제임스 와트가 이를 획기적으로 개량한 이후, 열기관은 산업 혁명의 핵심 동력이 되어 인류 문명을 폭발적으로 발전시켰다. 우리 주변의 자동차 엔진, 전기를 생산하는 발전소의 터빈 등이 모두 열기관에 해당한다.

1. *열기관의 원리와 열효율

(1) 열기관의 원리: 열기관은 열역학 제1법칙을 따르는 작동 기체의 열역학 과정으로 이루어진 순환 과정을 통해 지속해서 작동한다.

예 화력 발전소의 열기관



▲ 화력 발전소 열기관의 순환 과정

- ① 열 흡수: 열기관이 온도가 높은 고열원으로부터 열(Q_1)을 흡수한다. 이 과정에서 열기관 내부 작동 기체의 열운동이 활발해져 온도와 압력이 급격히 높아진다.
- ② 일 수행(팽창): 고온·고압의 작동 기체가 팽창하면서 피스톤을 밀어내거나 터빈의 날개를 돌리는 등 외부로 역학적인 일(W)을 한다. 이 과정이 열기관이 동력을 만들어내는 핵심 과정이다.
- ③ 열 방출: 일을 마친 작동 기체는 여전히 높은 온도를 가지고 있으므로, 다음 순환을 위해 압축되기 쉬운 상태로 만들어야 한다. 이 과정에서 남은 열에너지(Q_2)를 온도가 낮은 외부 대기나 강물과 같은 저열원으로 방출하여 기체가 냉각된다.
- ④ 상태 복귀(압축): 열을 방출하여 온도가 낮아진 기체는 외부의 힘(예 피스톤의 관성)에 의해 다시 압축되어 처음 상태로 되돌아가며, 새로운 순환 과정을 시작한다.

(2) 열기관과 열역학 제1법칙

- ① 열기관은 한 번의 순환 과정을 거치면 내부 작동 기체의 온도, 압력, 부피가 모두 처음 상태와 같아지므로, 내부 에너지의 총 변화량(ΔU)은 0이다.
- ② 열역학 제1법칙에 따라 $Q = Q_1 - Q_2 = W$ 이므로, 열기관이 한 일(W)은 흡수한 열(Q_1)에서 방출한 열(Q_2)을 뺀 값과 같다.

$$W = Q_1 - Q_2$$

통합과학 연계

「열효율」

통합과학에서는 공급한 에너지에 대하여 유용하게 사용된 에너지의 비율인 에너지 효율을 배웠다. 역학과 에너지에서는 열기관에서의 에너지 흐름을 열과 일로 구분하여 열기관의 열효율을 구하는 방법을 배운다.

작동 기체

열기관 내부에서 열역학 과정을 통해 팽창과 압축을 하면서 직접 일을 수행하는 매개체가 되는 물질을 작동 기체라고 한다. 증기 기관에서는 수증기, 자동차 엔진에서는 공기와 연료의 혼합 연소 기체가 작동 기체 역할을 한다.

열기관의 순환 과정

열기관의 순환 과정이란 기관 내부의 작동 기체가 여러 상태 변화를 거친 후 다시 처음 상태로 되돌아오는 것을 의미한다.

열원

열기관에 열을 공급하거나(고열원) 열을 흡수하는(저열원) 외부 환경으로, 열원은 열을 무한히 주고받아도 온도가 변하지 않는 이상적인 열 저장소로 가정한다.

용어 리마인드

*열기관 [물리학]

고열원에서 열을 흡수하여 외부에 일을 하고, 저열원으로 남은 열을 방출하여 원래 상태로 되돌아오는 순환 과정을 통해 외부에 일을 하는 장치를 열기관이라고 한다.

개념 기본 문제

- 01** 그림은 어떤 열기관이 527°C 의 고열원에서 8000 J 의 열을 흡수하여 W 만큼 일을 하고, 127°C 의 저열원으로 5000 J 의 열을 방출하는 것을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 이 열기관이 한 일은 3000 J 이다.
- ㄴ. 이 열기관의 열효율은 0.4 이다.
- ㄷ. 두 온도 사이에서 작동하는 열기관의 최대 열효율은 0.5 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

- 02** 고열원과 저열원의 절대 온도 T_H, T_L 사이에서 작동하는 카르노 기관에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

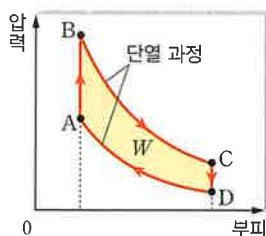
- ㄱ. 카르노 기관의 열효율은 $e_c = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ 이다.
- ㄴ. $T_L = 0\text{ K}$ 으로 만들어서 열효율을 1 이 되게 할 수 있다.
- ㄷ. 카르노 기관은 마찰이나 열 손실이 없는 이상적인 가역 과정만으로 이루어져 있다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

- 03** 흡수한 열량이 Q_H 이고 방출한 열량이 Q_L 인 열기관에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 고열원에서 열을 흡수하여 일부를 일로 바꾸고, 나머지를 저열원으로 방출한다.
- ② 한 번의 순환 과정이 끝나면 기체의 내부 에너지의 총 변화량이 0 이므로, 알짜일은 $Q_H - Q_L$ 과 같다.
- ③ 가솔린 엔진은 내연 기관, 스텔링 엔진은 외연 기관에 속한다.
- ④ 열효율은 열기관이 한 알짜일을 고열원에서 흡수한 열량으로 나눈 값이다.
- ⑤ 이론적으로 열효율이 $1(100\%)$ 인 열기관을 만들 수 있으며, 이는 지속 가능한 발전을 위한 기술 개발의 최종 목표이다.

- 04** 그림은 이상 기체를 작동 기체로 하는 열기관의 순환 과정 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 압력과 부피의 관계 그래프로 나타낸 것이다. $B \rightarrow C$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정은 단열 과정이다. 이 열기관이 한 번 순환하는 동안 외부에서 흡수한 총 열량은 그래프 내부의 넓이 W 의 4 배이다.



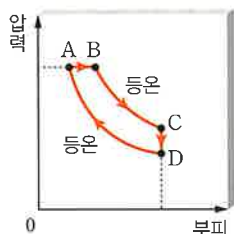
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 이 열기관의 열효율은 0.25 이다.
- ㄴ. 저열원으로 방출하는 열량은 $3W$ 이다.
- ㄷ. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체의 내부 에너지 변화량은 $3W$ 보다 작다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

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



과정	흡수 또는 방출한 열량(J)
$A \rightarrow B$	200
$B \rightarrow C$	80
$C \rightarrow D$	150
$D \rightarrow A$	50

- (1) $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 한 일을 구하시오.
 (2) 이 열기관의 열효율을 구하시오.

- 06** 그림은 고열원에서 열을 흡수하여 일을 하고 저열원으로 열을 방출하는 열기관을 모식적으로 나타낸 것이다. 이 열기관은 한 순환 과정 동안 40 J의 일을 하고, 열효율은 0.25이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

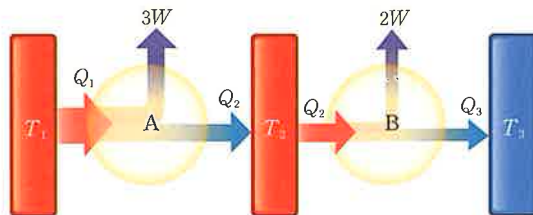


보기

- ㄱ. 고열원에서 흡수한 열량은 160 J이다.
 ㄴ. 저열원으로 방출하는 열량은 80 J이다.
 ㄷ. 이 열기관의 열효율을 0.5로 개선한다면, 동일한 열을 흡수했을 때 하는 일은 80 J이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

- 07** 두 열기관 A와 B가 아래 그림과 같이 직렬로 연결되어 있다. A는 온도가 T_1 인 열원으로부터 열 Q_1 을 흡수하여 $3W$ 의 일을 하고, 온도가 T_2 인 열원으로 열 Q_2 를 방출한다. B는 A가 방출한 열 Q_2 를 모두 흡수하여 $2W$ 의 일을 하고, 온도가 T_3 인 열원으로 Q_3 만큼 열을 방출한다.



A와 B의 열효율이 e 로 동일하다고 할 때, e 를 구하시오. (단, $T_1 > T_2 > T_3$ 이다.)

- 08** 열기관의 발전이 인류 공동체에 미친 영향과 지속 가능한 발전을 위한 노력에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

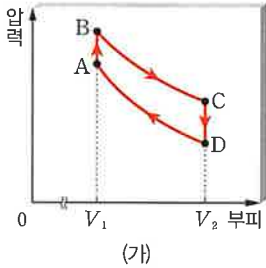
- ① 증기 기관의 발명은 산업 혁명의 원동력이 되어 공장제 대량 생산과 교통의 발달을 이끌었다.
 ② 전기 자동차는 운행 시 오염 물질을 배출하지 않으므로 기후 위기의 완벽한 해결책이다.
 ③ 대부분의 열기관이 화석 연료를 사용함에 따라 이산화 탄소 등 온실 기체 배출이 증가하여 지구 온난화 문제를 야기했다.
 ④ 터보 엔진, 폐열 회수 시스템은 열효율을 향상하여 연료 소모를 줄이기 위한 노력에 해당한다.
 ⑤ 국제 사회는 파리 협정 등 국제적 협약을 통해 온실 기체 배출량을 줄이고 탄소 중립 사회로의 전환을 추진하고 있다.

개념 적용 문제

▶ 열기관의 순환 과정과 열효율

01 그림은 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하는 동안 기체의 압력과 부피를, 표는 각 과정에서 기체가 흡수 또는 방출하는 열량과 기체의 내부 에너지 증가량 또는 감소량을 나타낸 것이다.

▶ 한 번의 순환 과정에서 기체의 내부 에너지의 총 변화량은 0이다.



과정	흡수 또는 방출하는 열량(J)	내부 에너지 증가량 또는 감소량(J)
A → B	80	⊖
B → C	120	0
C → D	⊖	150
D → A	0	⊖

(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. ⊖은 150이다.

ㄴ. ⊖+⊖=200이다.

ㄷ. 이 열기관의 열효율은 0.6이다.

① ㄱ

② ㄴ

③ ㄱ, ㄷ

④ ㄴ, ㄷ

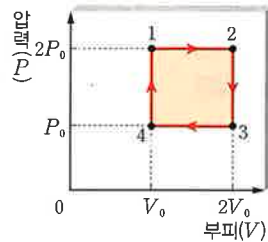
⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▶ 열기관의 순환 과정과 열효율

02 그림은 열기관에서 일정량의 이상 기체의 상태가 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ 의 경로를 따라 변하는 과정을 압력(P)·부피(V) 그래프에 나타낸 것이다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

(단, 이 기체의 내부 에너지는 $U = \frac{3}{2}PV$ 이다.)



▶ 열기관이 한 알짜일은 압력·부피 그래프에서 순환 경로로 둘러싸인 부분의 넓이와 같다.

보기

ㄱ. $1 \rightarrow 2$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 $2P_0V_0$ 이다.

ㄴ. $2 \rightarrow 3$ 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 $3P_0V_0$ 이다.

ㄷ. 이 열기관의 열효율은 $\frac{1}{5}$ 이다.

① ㄱ

② ㄴ

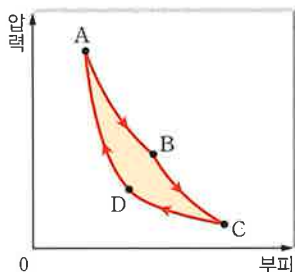
③ ㄷ

④ ㄱ, ㄴ

⑤ ㄴ, ㄷ

▶ 카르노 기관의 순환 과정과 열효율

- 03** 그림은 카르노 기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체는 300 J의 열을 흡수하고, $B \rightarrow C$ 과정에서 기체의 내부 에너지는 120 J 감소하며, $C \rightarrow D$ 과정에서 기체는 100 J의 열을 방출한다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▶ 카르노 기관의 순환 과정에서 열을 흡수하는 과정은 등온 팽창 과정이고, 열을 방출하는 과정은 등온 압축 과정이다.

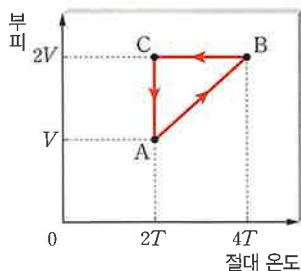
보기

- ㄱ. $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 120 J이다.
- ㄴ. $D \rightarrow A$ 과정에서 기체의 내부 에너지는 120 J 증가한다.
- ㄷ. 이 카르노 기관의 열효율은 $\frac{1}{3}$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

▶ 열기관 순환 과정과 열효율

- 04** 그림은 열기관에서 일정량의 이상 기체의 상태가 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 를 따라 변하는 동안 기체의 부피와 절대 온도를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체는 압력이 일정한 상태에서 500 J의 열을 흡수하고, $B \rightarrow C$ 과정에서는 300 J의 열을 방출한다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▶ 부피가 일정한 과정에서 기체는 외부에 일을 하지 않으므로, 열역학 제1법칙에 따라 $Q = \Delta U$ 가 성립한다.

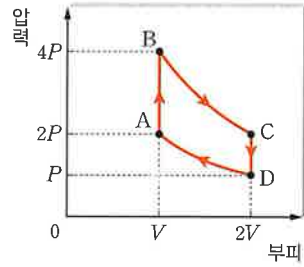
보기

- ㄱ. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 200 J이다.
- ㄴ. 기체의 내부 에너지는 C에서가 A에서보다 크다.
- ㄷ. 이 열기관의 열효율은 $\frac{2}{5}$ 보다 작다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 스텔링 기관의 순환 과정

- 05** 그림은 열효율이 0.25인 스텔링 기관에서 일정량의 이상 기체의 상태가 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량은 300 J이고, $B \rightarrow C$ 과정에서 기체는 400 J의 열을 흡수한다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



➤ 스텔링 기관의 순환 과정에서 열을 흡수하는 과정은 등적 가열 과정과 등온 팽창 과정이다.

보기

- ㄱ. $C \rightarrow D$ 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 300 J이다.
- ㄴ. $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 $A \rightarrow B$ 과정에서 증가한 내부 에너지의 2배이다.
- ㄷ. 한 순환 과정 동안 저열원으로 방출하는 총 열량은 525 J이다.

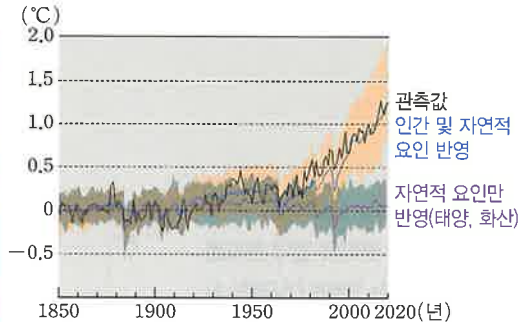
- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 열기관과 우리 삶의 변화

- 06** 그림 (가)는 농업에 사용되는 열기관의 모습을, (나)는 1850년 이후 지구의 연평균 표면 온도 변화를 나타낸 것이다.



(가)



(나)

➤ 열기관이 작동을 하려면 흡수한 열의 일부를 반드시 저열원으로 방출해야 한다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. (가)의 열기관은 고열원에서 흡수한 열에너지의 100 %를 유용한 일로 전환한다.
- ㄴ. (가)의 에너지원으로 사용되는 화석 연료의 연소는 (나)에 나타난 온도 상승의 주요 원인이다.
- ㄷ. (나)의 문제를 해결하기 위한 '탄소 중립'을 실현하려면 기존 열기관의 효율을 높이는 기술 개발과 함께 전기 자동차, 수소 연료 자동차 등 친환경 동력원으로의 전환이 필요하다.

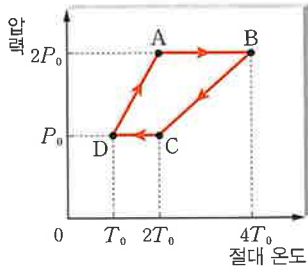
- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

1등급 도전 문제

➤ 열기관의 순환 과정과 열효율

07 그림은 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하는 동안 기체의 압력과 절대 온도를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 와 $C \rightarrow D$ 과정은 각각 압력(P)이 일정한 과정이고, $B \rightarrow C$ 와 $D \rightarrow A$ 과정은 각각 부피(V)가 일정한 과정이다. 한 순환 과정 동안 기체가 외부에 한 일은 60 J 이다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 이 기체의 내부 에너지는 $U = \frac{3}{2}PV$ 이다.)



➤ 압력이 일정한 과정에서는 샤를 법칙($\frac{V}{T} = \text{일정}$)이 성립한다.

보기

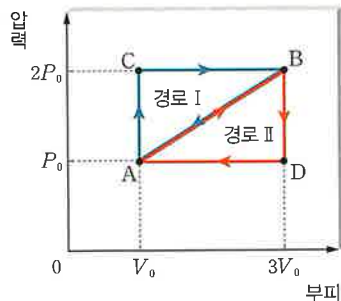
- ㄱ. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 120 J 이다.
- ㄴ. $C \rightarrow D$ 과정에서 기체가 방출하는 열량은 150 J 이다.
- ㄷ. 이 열기관의 열효율은 $\frac{2}{13}$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 열기관의 순환 과정과 열효율

08 그림은 열기관에서 일정량의 이상 기체가 각각 경로 I ($A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$)과 경로 II ($A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow A$)를 따라 순환하는 동안 기체의 압력(P)과 부피(V)를 나타낸 것이다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 이 기체의 내부 에너지는 $U = \frac{3}{2}PV$ 이다.)



➤ 한 번의 순환 과정 동안 열기관이 한 알짜일은 압력·부피 그래프에서 순환 경로로 둘러싸인 부분의 넓이와 같다.

보기

- ㄱ. 한 번의 순환 과정 동안 열기관이 한 일은 경로 I과 경로 II가 같다.
- ㄴ. A에서 B로 상태가 변하는 동안 내부 에너지 변화량은 $6P_0V_0$ 이다.
- ㄷ. 열기관의 열효율은 경로 II가 경로 I보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

보기 ㄱ의 해설에서 $Q_I = 0$, 표에서 $Q_{II} = -E_0$, 등적 과정에서 기체가 흡수한 열량은 내부 에너지 증가량과 같으므로 $Q_{III} = 2E_0$ 이다. 따라서 한 번 순환하는 동안 기체가 한 일 $W_{\text{전체}} = 0 - E_0 + 2E_0 = E_0$ 이다.

과정	Q	ΔU	W
I	$\ominus 0$	$-2E_0$	$2E_0$
II	$-E_0$	0	$-E_0$
III	$2E_0$	$\ominus 2E_0$	0

[바로알기] ㄱ. I은 단열 과정이므로 기체가 흡수한 열량 $\ominus$ 은 0이다.

ㄴ. 순환 과정에서는 기체가 처음의 압력과 부피로 되돌아오므로 온도 변화가 0이고, 내부 에너지 변화량도 0이다. 따라서 $\ominus$ 은 $2E_0$ 이다.

- 04 ㄱ. 기체의 내부 에너지는 절대 온도에 비례하므로, 문제 조건 $U_B = \frac{4}{3}U_D$ 로부터 $4T_1 = 3T_2$ 이다.

ㄴ. $D \rightarrow A$ 과정은 단열 압축 과정이므로 외부와의 열 출입이 없다($Q=0$). 열역학 제1법칙에 따라, 기체가 외부로부터 받은 일의 양은 기체의 내부 에너지 변화량과 같다. 즉, $W = -\Delta U = U_D - U_A$ 이다. $U_D = kT_1$, $U_A = kT_2$ 라고 할 때, $T_2 = \frac{4}{3}T_1$ 을 위 식에 대입하면 기체가 외부로부터 받은 일 $W = k(T_1 - T_2) = -\frac{1}{3}kT_1$ 이다. 따라서 $D \rightarrow A$ 과정에서 기체가 외부로부터 받은 일의 양은 D에서 기체의 내부 에너지의 $\frac{1}{3}$ 배이다.

[바로알기] ㄴ. $A \rightarrow B$ 과정은 온도가 T_2 로 일정한 등온 팽창 과정이다. 보일 법칙($PV = \text{일정}$)에 따라 기체의 압력이 A에서 B에서의 2배이면, 기체의 부피는 B에서 A에서의 2배이다.

- 05 ㄴ. A, B에서 가열 전 기체의 부피가 같고, 가열 후 피스톤이 같은 거리 d 만큼 올라갔으므로 최종 부피도 A와 B에서가 같다. 이때 피스톤에 놓은 추의 질량이 클수록 압력도 크므로 $P_A > P_B$ 이다. 따라서 가열 후 PV 값은 A에서 B에서보다 크고, 이상 기체 법칙 $PV = nRT$ 에 따라 가열 후 기체의 온도는 A에서 B에서보다 높다.
- ㄴ. 압력이 일정할 때 기체가 외부에 한 일 $W = P\Delta V$ 인데, 피스톤이 올라간 거리 d 가 같고 피스톤의 면적이 동일하므로 A와 B의 부피 변화량 ΔV 는 같다. 따라서 기체가 외부에 한 일은 압력이 더 큰 A에서 B에서보다 크다.

[바로알기] ㄱ. 같은 양의 이상 기체가 압력이 다른 채로 부피가 같으려면 온도가 달라야 한다. 가열 전 A, B에서 기체의 부피가 같고 기체의 압력은 $P_A > P_B$ 이므로, 이상 기체 법칙에 따라 온도는 A에서 B에서보다 높다.

- 06 ㄱ. (가)에서 공기가 지형을 따라 올라갈 때, 고도가 높아져 외부 압력이 낮아지면 공기 덩어리는 팽창하면서 외부에 일을 한다. 이 과정은 외부와의 열 교환 없이 빠르게 일어나므로 단열 팽창에 해당하며, 공기는 일을 한 만큼 내부 에너지가 감소하고 온도가 내려간다.

ㄴ. (나)의 공기 압축 점화 장치는 단열 압축의 원리를 이용한다. 피스톤을 빠르게 눌러 외부에서 공기에 일을 해 주면, 외부와의 열 교환이 거의 없어 공기에 해 준 일은 공기의 내부 에너지를 증가시키는 데 사용된다. 따라서 공기의 온도가 숨의 발화점 이상으로 올라가 숨에 불이 붙는다.

[바로알기] ㄴ. (가)에서의 공기는 부피가 팽창하므로 외부에 일을 하고, (나)에서의 공기는 부피가 압축되므로 외부로부터 일을 받는다.

- 07 ㄱ. 처음 A, B, C, D의 온도와 압력이 서로 같으므로, 이상 기체 법칙에 따라 처음 A, B, C, D의 부피도 서로 같다. (가)에서 A에 열량을 공급하면 A가 팽창하면서 B를 압축시키므로, B의 최종 부피는 처음 부피보다 작아진다. (나)에서 C에 열량을 공급하면 금속 피스톤을 통해 열평형이 이루어지면서 C와 D의 온도와 압력이 같아지므로, 최종 부피는 처음 부피와 같다. 따라서 최종 열평형 상태에서 기체의 부피는 B가 C보다 작다.

ㄴ. (가)에서 A에 가해진 열량(Q)은 A의 내부 에너지를 증가시키고($\Delta U_A > 0$), 피스톤을 밀어 B에 일을 해 주는데($W_A > 0$) 사용된다. 단열 압축된 B는 W_A 만큼 내부 에너지가 증가한다($\Delta U_B > 0$). 즉, 열역학 제1법칙에 따라 $Q = \Delta U_A + W_A$, $W_A = -W_B$, $0 = \Delta U_B + W_B$ 이므로, 전체 내부 에너지 증가량은 $\Delta U_A + \Delta U_B = Q$ 이다. 또한 피스톤이 단열되어 있어 최종 열평형 상태에서 A의 온도가 B보다 높으므로 $\Delta U_A > \Delta U_B$ 이고, $\Delta U_A > \frac{Q}{2}$ 이다. 반면, (나)에서는 금속 피스톤을 통해 열이 전달되어 최종적으로 C와 D의 온도가 같아지므로, C에 가해진 열량 Q 는 두 기체에 균등하게 분배되어 $\Delta U_C = \frac{Q}{2}$ 이다. 따라서 처음 A와 C의 내부 에너지가 같으므로, 최종 기체의 내부 에너지는 내부 에너지 변화량이 더 큰 A가 C보다 크다.

[바로알기] ㄷ. (가) 과정에서 B가 A로부터 받은 일은 B의 내부 에너지 증가량(ΔU_B)과 같다. 보기 ㄴ의 해설에서 $\Delta U_B < \frac{Q}{2}$, $\Delta U_C = \frac{Q}{2}$ 이므로, (가) 과정에서 B가 받은 일의 양은 (나) 과정에서 C의 내부 에너지 증가량보다 작다.

- 08** ㄱ. X는 고정된 금속판에 의해 부피가 일정하게 유지된다. 이 상태에서 X를 서서히 가열하면 X는 온도와 압력이 증가하므로, (나)의 그래프에서 부피가 일정하고 압력이 증가하는 A → B 과정을 따라 상태가 변한다.

[바로알기] ㄴ. 금속판은 열을 잘 전달하므로 X를 서서히 가열하여 열평형 상태에 도달했을 때 X와 Y의 최종 온도는 같다. 즉, B 상태의 온도와 C 상태의 온도는 같다. 일정량의 이상 기체의 내부 에너지는 절대 온도에만 비례하므로, B와 C에서 기체의 내부 에너지는 같다.

ㄷ. 열역학 제1법칙($Q = \Delta U + W$)을 각 기체에 적용한다. X는 부피가 일정하여 한 일이 0이므로 흡수한 열량이 내부 에너지 증가량과 같다($Q_X = \Delta U_X$). Y가 흡수한 열량은 내부 에너지를 증가시키고 외부에 일을 하는 데 사용된다($Q_Y = \Delta U_Y + W_Y$). X와 Y의 최종 온도가 같으므로 내부 에너지 증가량은 같다($\Delta U_X = \Delta U_Y$). 따라서 $Q_X < Q_Y$ 이므로, Y가 흡수한 열량이 X가 흡수한 열량보다 크다.

04 열기관과 열효율

중요 개념 체크

145쪽

- 1 0.3 2 (1) ○ (2) × 3 내연 4 (1) × (2) ○

질문 분석 유제

147쪽

- 1 ③ 2 ②

- 1** 열기관이 한 일은 압력·부피 그래프에서 순환 경로로 둘러싸인 직사각형의 넓이와 같다. 따라서 $W = 2PV$ 이다. A → B 과정에 열역학 제1법칙($Q = \Delta U + W$)을 적용하면 내부 에너지 증가량은 $\frac{7}{6}PV$ 이고 기체가 한 일은 $4PV$ 이므로, 흡수한 열량은 $\frac{31}{6}PV$ 이다. D → A 과정에서 흡수한 열량은 $\frac{3}{2}PV$ 이므로, 순환 과정에서 흡수한 총 열량

은 $\frac{20}{3}PV$ 이다. 따라서 열효율은 $\frac{2PV}{\frac{20}{3}PV} = 0.3$ 이다.

- 2** 한 번의 순환 과정에서 내부 에너지 변화량은 0이다. C → A 과정은 등온 과정이므로 내부 에너지는 일정하고, 문제 조건에서 B → C 과정에서 기체의 내부 에너지가 200 J 감소하므로, A → B 과정에서 내부 에너지는 200 J 증가한다. A → B 과정에서 기체는 일을 하지 않으므로 흡수한 열량이 200 J이다. 열기관은 A → B 과정에서 200 J의 열을 흡수하고 C → A 과정에서 160 J의 열을 방출하므로, 이 열기관의 열효율은 $\frac{200 \text{ J} - 160 \text{ J}}{200 \text{ J}} = 0.2$ 이다.

개념 기본 문제

148쪽~149쪽

- 01 ④ 02 ④ 03 ⑤ 04 ③
05 (1) 80 J (2) $\frac{2}{7}$ 06 ④ 07 $\frac{1}{3}$
08 ②

- 01** ㄱ. 열역학 제1법칙에 따라 한 번의 순환 과정에서 열기관이 한 일은 $W = Q_H - Q_L$ 이므로, 이 열기관이 한 일은 $W = 8000 \text{ J} - 5000 \text{ J} = 3000 \text{ J}$ 이다.

ㄷ. 열기관이 가질 수 있는 최대 열효율(카르노 효율)은 고열원의 절대 온도 T_H 와 저열원의 절대 온도 T_L 에 의해서 $e_{\max} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ 로 결정된다. 고열원과 저열원의 온도를 절대 온도로 환산하면 각각 800 K, 400 K이므로, 열기관의 최대 열효율은 $e_{\max} = 1 - \frac{400 \text{ K}}{800 \text{ K}} = 0.5$ 이다.

[바로알기] ㄴ. 열기관이 흡수한 열량은 8000 J이고, 한 일은 $W = 3000 \text{ J}$ 이므로, 열효율은 $e = \frac{3000 \text{ J}}{8000 \text{ J}} = 0.375$ 이다.

- 02** ㄱ. 카르노 기관의 열효율은 고열원과 저열원의 절대 온도 T_H 와 T_L 에 의해서 $e_c = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ 로 결정된다.

ㄷ. 카르노 기관은 마찰이나 열 손실 등 비가역적인 요인이 전혀 없는, 가장 이상적인 열기관 모델이다. 이 기관은 2개의 등온 과정과 2개의 단열 과정으로 이루어진 가역 순환 과정으로 이루어져 있다.

[바로알기] ㄴ. 절대 온도가 0 K인 저열원은 존재할 수 없으므로, 카르노 기관의 열효율도 1이 될 수 없다.

03 ① 열기관은 고열원에서 열을 흡수하여 일부는 유용한 일로 바꾸고, 나머지는 저열원으로 방출하는 장치이다.

② 열기관의 작동 기체는 순환 과정을 거쳐 처음 상태로 되돌아오므로, 한 번의 순환 과정이 끝나면 내부 에너지의 총 변화량(ΔU)은 0이다. 열역학 제1법칙에 따라 $Q=W$ 이므로, 알짜일은 $W=Q=Q_H-Q_L$ 이다.

③ 가솔린 엔진은 실린더 내부에서 연료를 연소시켜 열을 얻으므로 내연 기관에 속하고, 스팀 엔진은 외부의 열원을 이용하여 작동하므로 외연 기관에 속한다.

④ 열기관의 열효율은 한 번의 순환 과정 동안 기체가 한 알짜일을 고열원에서 흡수한 총 열량으로 나눈 값으로 정의된다.

[바로알기] ⑤ 흡수한 열을 100 % 일로 전환하는 열기관, 즉 열효율이 1인 열기관은 만들 수 없다. 이는 저열원으로 열을 방출하지 않는 제2종 영구 기관에 해당하며, 자연계에서 불가능하다.

04 ㄱ. 그래프 내부의 넓이 W 는 순환 과정에서 열기관이 한 알짜일과 같으며, 흡수한 총 열량은 $4W$ 이므로 이 열기관의 열효율은 $e=\frac{W}{4W}=0.25$ 이다.

ㄴ. 열역학 제1법칙에 따라 $Q_L=Q_H-W$ 이므로 저열원으로 방출하는 열량 Q_L 은 $4W-W=3W$ 이다.

[바로알기] ㄷ. 이 열기관은 부피가 일정한 $A \rightarrow B$ 과정에서만 열을 흡수한다. 따라서 흡수한 총 열량 $4W$ 는 $A \rightarrow B$ 과정에서 흡수한 열량과 같고, $A \rightarrow B$ 과정은 부피가 일정한 과정이므로 기체가 하는 일이 0이다($W=0$). 열역학 제1법칙 $Q=\Delta U+W$ 에 따라 $Q=\Delta U$ 이므로, $A \rightarrow B$ 과정에서 기체의 내부 에너지 변화량은 흡수한 총 열량인 $4W$ 와 같다.

05 (1) $B \rightarrow C$ 과정은 온도가 일정한 등온 과정이므로 내부 에너지 변화량(ΔU)은 0이다. 열역학 제1법칙 $Q=\Delta U+W$ 에 따라 $\Delta U=0$ 이므로 $Q=W$ 이다. 표에서 $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 흡수한 열량은 80 J이므로 기체가 한 일도 80 J이다.

(2) 기체는 $A \rightarrow B$ 과정과 $B \rightarrow C$ 과정에서 열을 흡수하므로, 흡수한 총 열량 $Q_H=200 \text{ J}+80 \text{ J}=280 \text{ J}$ 이다. 열을 방출하는 과정은 $C \rightarrow D$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정이므로, 방출한 총 열량 $Q_L=150 \text{ J}+50 \text{ J}=200 \text{ J}$ 이다. 따라서 알짜일은 $W=280 \text{ J}-200 \text{ J}=80 \text{ J}$ 이고, 이 열기관의 열효율은 $\frac{W}{Q_H}=\frac{80 \text{ J}}{280 \text{ J}}=\frac{2}{7}$ 이다.

06 ㄱ. 열기관의 열효율 $0.25=\frac{1}{4}=\frac{W}{Q_H}=\frac{40 \text{ J}}{Q_H}$ 이므로 고열원에서 흡수한 열량 $Q_H=160 \text{ J}$ 이다.

ㄷ. 이 열기관의 열효율은 0.25이므로 열효율을 0.5로 개선한다면, 동일한 열을 흡수했을 때 기존의 2배의 일을 한다. 따라서 개선된 열기관은 80 J의 일을 한다.

[바로알기] ㄴ. 열역학 제1법칙에 따라 $Q_L=Q_H-W$ 이므로 저열원으로 방출하는 열량 $Q_L=160 \text{ J}-40 \text{ J}=120 \text{ J}$ 이다.

07 A의 열효율은 $\frac{3W}{Q_1}$ 이고, B의 열효율은 $\frac{2W}{Q_2}$ 이다. 두 열기관의 열효율이 동일하므로 $\frac{3W}{Q_1}=\frac{2W}{Q_2}$ 이고, 이를 정리하면 $Q_2=\frac{2}{3}Q_1$ 이다. 또한 A에서 $Q_1-Q_2=3W$ 이므로

$Q_2=\frac{2}{3}Q_1$ 을 대입하면 $Q_1=9W$ 를 얻는다. 따라서 열효율 $e=\frac{3W}{9W}=\frac{1}{3}$ 이다.

08 **[바로알기]** ② 전기 자동차는 운행 과정에서 배기가스를 직접 배출하지 않는다는 큰 장점이 있지만, 전기를 생산하는 과정에서 화석 연료가 사용될 수 있으며, 배터리를 생산하고 폐기하는 과정에서도 환경 문제가 발생할 수 있다. 따라서 전기 자동차는 중요한 해결 과정의 일부일 뿐, 완벽한 해결책이라는 설명은 옳지 않다.

개념 적용 문제

150쪽~153쪽

01 ① 02 ④ 03 ③ 04 ④ 05 ③ 06 ④

07 ⑤ 08 ③

01 ㄱ. $C \rightarrow D$ 과정은 부피가 일정한 등적 과정이다. 등적 과정에서는 기체가 하는 일이 0이므로, 열역학 제1법칙에 따라 기체가 방출하는 열량(㉠)은 내부 에너지 감소량과 같다($Q=\Delta U$). 표에서 $C \rightarrow D$ 과정에서 내부 에너지 감소량이 150 J이므로, 방출하는 열량 ㉠은 150 J이다.

[바로알기] ㄴ. 한 번의 순환 과정에서 내부 에너지의 총 변화량은 0이다. 따라서 표에 제시된 각 과정의 값을 더하면, $\text{㉠}+0+(-150)+\text{㉡}=0$ 이므로 $\text{㉠}+\text{㉡}=150(\text{J})$ 이다.

ㄷ. 열을 흡수하는 과정은 $A \rightarrow B$ 과정과 $B \rightarrow C$ 과정이므로, 흡수한 총 열량 $Q_H=80 \text{ J}+120 \text{ J}=200 \text{ J}$ 이다.

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.