



열역학

물리올림피아드 고급과정

제1장 기체분자운동론과 열역학 제1법칙

최근 5회분(90문항)에서 열역학은 16문항(17.8%)으로, **매회 3~4문항**이 빠짐없이 출제된다. 그중 이 장이 다루는 범위만 9문항이다. 출제 축은 셋으로 좁혀진다 – (i) **기체분자운동론으로 P 와 T 를 미시량으로 환산하기**, (ii) **열역학 제1법칙 $\Delta U = Q - W$ 를 과정별로 나누어 적용하기**, (iii) **P - V · P - T 그래프에서 일·열·온도를 읽어내기**. 세 축 모두 계산량은 적지만 **어느 항이 0인지**를 순간적으로 판단해야 한다. 이 장의 표 하나(과정별 W , Q , ΔU)를 외우면 절반은 끝난다.

학습 목표

- 이상기체 상태방정식과 피스톤의 힘 평형을 결합해 기체의 압력을 구할 수 있다.
- 벽과의 탄성충돌에서 $P = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m \langle v^2 \rangle$ 를 유도하고 v_{rms} 를 계산할 수 있다.
- 등온·등적·등압·단열·자유팽창 각각에 대해 W , Q , ΔU 를 즉시 적을 수 있다.
- 가역 단열과 급격한 비가역 단열을 구분하고 최종 온도·압력의 대소를 비교할 수 있다.

1.1 이상기체 상태방정식과 피스톤의 역학

분자 사이의 상호작용을 무시하고 분자 자체의 부피를 0으로 보는 기체가 이상기체다. 상태량 P, V, T , n 은 단 하나의 식으로 묶인다.

$$PV = nRT = Nk_B T, \quad R = 8.31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}, \quad k_B = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

여기서 T 는 **반드시 절대온도(K)**다. 섭씨를 그대로 넣는 순간 모든 비례관계가 깨진다.

세 상태량 중 하나를 고정하면 나머지 둘의 관계가 정해진다. T 고정이면 $P \propto 1/V$ (보일), P 고정이면 $V \propto T$ (샤를), V 고정이면 $P \propto T$. 경시 문항은 이 셋 중 어느 것이 걸린 상황인지 먼저 묻는다.

기체 문항의 절반은 **피스톤이 붙어 있다**. 이때 기체의 압력은 상태방정식이 아니라 **피스톤의 힘 평형**에서 나온다. 피스톤은 정지해 있으므로 알짜힘이 0이고, 압력 $\times$ 단면적이 곧 힘이다.

피스톤이 있는 실린더 – 압력 읽는 법

- 기체가 피스톤 **아래**(피스톤이 기체 위에 얹힘): $P = P_0 + (Mg)/A$ – 대기압보다 **크다**.
- 기체가 피스톤 **위**(피스톤이 기체에 매달림): $P = P_0 - (Mg)/A$ – 대기압보다 **작다**.
- 바깥이 진공이면 $P_0 = 0$ 이므로 $P = (Mg)/A$ (매다는 방향이면 $P = 0$ 이 되어 성립 불가).
- 피스톤이 **천천히** 움직이는 동안에도 이 평형은 계속 성립한다 → **등압 과정**.

자주 하는 실수

그림에서 기체가 피스톤의 위쪽에 있는지 아래쪽에 있는지를 보지 않고 무조건 $P = P_0 + Mg/A$ 를 쓰는 것이 이 유형 최다 오답이다. 2025년 제1회 15번이 정확히 이 함정으로, 기체가 위에 있어 $P = P_0 - Mg/A$ 인데 “기체 압력 = 대기압”이라는 보기를 참으로 골라 틀린다.

1.2 기체분자운동론 – 압력과 온도의 미시적 의미

한 변이 L 인 정육면체에 질량 m 인 분자 N 개가 들어 있다. 분자 하나가 x 방향으로 속력 v_x 로 벽과 탄성충돌하는 상황을 따라가면 압력이 통째로 유도된다.

1. **운동량 변화.** 탄성충돌이므로 $v_x \rightarrow -v_x$, 즉 $\Delta p = -2mv_x$ (벽이 받는 충격량은 $+2mv_x$).
2. **충돌 간격.** x 축을 1회 왕복하는 시간 $\Delta t = 2L/v_x$.
3. **평균 힘.**

$$F = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$$

4. **압력.** 벽 넓이가 L^2 이므로 분자 하나의 기여는 mv_x^2/L^3 . N 개를 더하면

$$P = \frac{Nm\langle v_x^2 \rangle}{L^3} = \frac{Nm\langle v_x^2 \rangle}{V}$$

5. **등방성.** $\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle = \frac{1}{3}\langle v^2 \rangle$ 이므로

$$P = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m \langle v^2 \rangle \iff PV = \frac{1}{3} Nm \langle v^2 \rangle = \frac{2}{3} N \left(\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle \right)$$

마지막 형태가 핵심이다. PV 는 **분자 병진운동에너지 총합의 2/3** 다. 이것을 $PV = Nk_B T$ 와 나란히 놓으면 온도의 미시적 정의가 즉시 나온다.

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T, \quad v_{\text{rms}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

온도는 분자 하나의 평균 병진운동에너지다. 분자의 종류·질량·개수와 무관하게, 온도가 같으면 평균 운동에너지가 같다.

v_{rms} 의 두 비례관계 – 매년 나온다

- 같은 온도에서 $v_{\text{rms}} \propto 1/\sqrt{m}$ – 질량이 2배면 속력은 $1/\sqrt{2}$ 배.
- 같은 기체에서 $v_{\text{rms}} \propto \sqrt{T}$ – 온도가 2배면 속력은 $\sqrt{2}$ 배 (2배가 아니다).
- 압력 $P = Nk_B T/V$ 는 m 을 포함하지 않는다. 같은 N, V, T 면 무거운 기체든 가벼운 기체든 압력이 같다.

자주 하는 실수

유도식에 붙는 계수 $\frac{1}{3}$ 을 $\frac{1}{2}$ 로 쓰는 오답이 실제로 보기로 출제된다(2024년 제1회 14번 ◡). $\frac{1}{2}$ 은 **운동에너지** $\frac{1}{2}mv^2$ 의 계수이고, 압력의 계수는 3차원 등방성에서 나온 $\frac{1}{3}$ 이다. 한편 $\langle v_x^2 \rangle$ 자리에 $\langle v^2 \rangle$ 을 그대로 넣으면 정확히 3배가 틀린다.

1.3 등분배 정리와 내부에너지

자유도 하나마다 평균 에너지 $\frac{1}{2}k_B T$ 가 배분된다(에너지 등분배 정리). 단원자 분자는 병진 자유도 3개 뿐이므로

$$U = N \cdot 3 \cdot \frac{1}{2}k_B T = \frac{3}{2}Nk_B T = \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2}PV$$

이상기체의 내부에너지는 **온도만의 함수**다. 부피나 압력이 아무리 변해도 온도가 같으면 U 가 같다. 이 한 줄이 등온 과정과 자유팽창 문항 전체를 지배한다.

분자	자유도 f	C_V	C_P	$\gamma = C_P/C_V$
단원자 (He, Ar)	3	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$	$5/3 \approx 1.67$
이원자 (상온 N_2)	5	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$	$7/5 = 1.40$
다원자 (강체)	6	$3R$	$4R$	$4/3 \approx 1.33$

어떤 과정이든 $\Delta U = nC_V \Delta T$ 다. **등적 과정에서만 쓰는 식이 아니다.** U 가 온도만의 함수이므로, 두 상태의 온도차만 알면 경로와 무관하게 이 식으로 계산한다. 등압 과정에서도 $\Delta U = nC_V \Delta T$ 이고, 다만 그때 흡수한 열이 $Q = nC_P \Delta T$ 일 뿐이다.

마이어 관계식 $C_P - C_V = R$ 은 등압 과정에서 기체가 추가로 하는 일 $P\Delta V = nR\Delta T$ 에서 곧바로 나온다.

1.4 열역학 제1법칙과 과정별 정리표

에너지 보존을 기체에 적용한 것이 제1법칙이다.

$$\Delta U = Q - W, \quad W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

부호 약속을 반드시 고정하라. Q 는 기체가 흡수한 열, W 는 기체가 외부에 한 일이다. 기체가 팽창하면 $W > 0$, 압축되면 $W < 0$ 이며, 외부가 기체에 해 준 일은 $W_{\text{외부}} = -W$ 다.

$W = \int P dV$ 는 곧 P - V 그래프에서 곡선 아래 넓이다. 부피가 늘면 +, 줄면 -.

과정별 정리표 – 이 장의 핵심 암기 카드

과정	조건	W (기체가 한 일)	ΔU	Q
등온	T 일정	$nRT \ln(V_2/V_1)$	0	$Q = W$
등적	V 일정	0	$nC_V \Delta T$	$Q = \Delta U$
등압	P 일정	$P \Delta V = nR \Delta T$	$nC_V \Delta T$	$nC_P \Delta T$
단열(가역)	$Q = 0$	$W = -\Delta U$	$nC_V \Delta T$	0
자유팽창	단열·비가역	0	0	0

※ 굵은 0 이 문제 풀이의 출발점이다. “무엇이 0인가”를 먼저 찾고 나머지 둘을 제1법칙으로 연결한다.

표의 맨 아래 두 줄을 혼동하면 안 된다. **둘 다 $Q = 0$ 인 단열이지만 결과가 정반대다.** 가역 단열 팽창에서는 기체가 외부에 일을 하므로 $\Delta U < 0$, 즉 온도가 내려간다. 자유팽창은 진공 속으로 퍼지는 것이라 밀어낼 상대가 없어 $W = 0$ 이고, 따라서 $\Delta U = 0$ 으로 **온도가 변하지 않는다.**

자주 하는 실수

“단열이니까 온도가 내려간다”는 반사적 판단이 자유팽창에서 정확히 뒤집힌다. W 는 “부피가 변했는가”가 아니라 “무엇을 밀어냈는가”로 결정된다. 진공으로의 팽창은 부피가 두 배가 되어도 한 일이 0이므로 온도가 그대로다(2025년 제2회 14번).

1.5 단열 과정 – 가역과 비가역

가역 단열(준정적) 과정에서는 상태방정식과 제1법칙을 결합해 다음 관계가 나온다.

$$PV^\gamma = \text{일정}, \quad TV^{\gamma-1} = \text{일정}, \quad T^\gamma P^{1-\gamma} = \text{일정}$$

한 일은 넓이를 적분해서 얻지만, 실전에서는 $Q = 0$ 이므로 곧장 $W = -\Delta U = -nC_V \Delta T$ 를 쓰는 편이 훨씬 빠르다.

같은 부피만큼 압축할 때 **등온선보다 단열선이 더 가파르다**($\gamma > 1$). 압축하면 온도가 오르고, 온도가 오르면 압력이 추가로 오르기 때문이다.

여기서 가역과 비가역이 갈린다. 피스톤을 급격히 밀어 넣는 비가역 단열 압축은 위 관계식을 만족하지 않는다. 엔트로피로 비교하면 승부가 난다. 이상기체의 엔트로피는

$$\Delta S = nC_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

가역 단열은 $\Delta S = 0$ (등엔트로피), 비가역 단열은 $\Delta S > 0$ 이다. 같은 최종 부피 V_2 에 도달했다면 $\ln(V_2/V_1)$ 항이 같으므로, $\Delta S > 0$ 이려면 T_2 가 더 커야 한다.

같은 부피까지 단열 압축했을 때 – 가역 vs 비가역

- 최종 온도: $T_{\text{비가역}} > T_{\text{가역}}$ ($\Delta S > 0$ 이 강제한다)
- 최종 압력: $P_{\text{비가역}} > P_{\text{가역}} = P_1 2^\gamma$ – 부피를 절반으로 줄인 경우
- 외부가 해 준 일: $Q = 0$ 이므로 $W_{\text{외부}} = \Delta U = nC_V \Delta T \rightarrow$ **비가역이 더 크다**
- 단열이라고 해서 엔트로피가 보존되는 것이 아니다. **등엔트로피 = 가역 + 단열.**

자주 하는 실수

$PV^\gamma = \text{일정}$ 은 **가역 단열에만** 성립한다. “단열”이라는 말만 보고 급격한 압축에 이 식을 적용하면 최종 압력을 과소평가한다. 마찬가지로 자유팽창에도 이 식을 쓸 수 없다 – 자유팽창은 단열이지만 T 가 일정하므로 오히려 $PV = \text{일정}$ 을 따른다.

1.6 P-V 그래프와 P-T 그래프 읽는 법

P-V 그래프. 읽어야 할 것은 세 가지뿐이다.

- **넓이 = 기체가 한 일 W .** 오른쪽으로 진행하면 +, 왼쪽이면 -. 순환과정이면 닫힌 넓이가 알짜 일이고, 시계방향이면 $W > 0$ (열기관).
- **PV 곱 = 온도.** $PV = nRT$ 이므로 원점에서 멀어질수록(쌍곡선 바깥쪽일수록) 온도가 높다. 두 점의 PV 값만 비교하면 ΔT 의 부호가 나온다.
- **$\Delta U = \frac{3}{2}\Delta(PV)$ (단원자).** 온도를 따로 구할 필요 없이 PV 의 변화만으로 내부에너지 변화가 나온다. 이 요령을 쓰면 n, R, T 가 식에서 아예 사라진다.

직선 과정의 일은 사다리꼴 넓이다. $(V_1, P_1) \rightarrow (V_2, P_2)$ 직선이면

$$W = \frac{1}{2}(P_1 + P_2)(V_2 - V_1)$$

P-T 그래프. 가로축이 부피가 아니라는 점만 조심하면 오히려 더 단순하다. $P = (nR/V)T$ 이므로 **P-T 평면에서 등적 과정은 원점을 지나는 직선**이고, 그 기울기 nR/V 는 부피에 반비례한다.

과정	P-V 평면	P-T 평면
등온	쌍곡선 $P \propto 1/V$	T 축에 수직인 세로선
등압	가로 직선	P 축에 수직인 가로선
등적	세로 직선	원점을 지나는 직선
단열(가역)	등온선보다 가파른 곡선	$T^\gamma P^{1-\gamma}$ 일정 곡선

P-T 그래프에서 두 상태의 부피 대소는 **원점에서 그은 직선의 기울기**로 비교한다. 기울기가 클수록 V가 작다. 세로축이 잘려 있어(축 단절 기호 $\approx$) 원점이 보이지 않는 그림이라면, 보기 항목들 사이의 **논리적 동치 관계**로 답을 확정하는 편법이 오히려 정석이다(2024년 제2회 17번 해설 참조).

기체 스프링 – 피스톤 단진동

단면적 A , 부피 V , 압력 P 인 기체 위에 질량 m 인 피스톤이 놓여 있다. 피스톤이 x 만큼 움직이면 부피가 Ax 만큼 변하고, 압력 변화가 복원력을 만든다.

$$k_{\text{eff}} = -\frac{dF}{dx} = A \cdot \left| \frac{dP}{dV} \right| \cdot A = \begin{cases} \frac{PA^2}{V} & \text{등온 (온도 변화 무시)} \\ \frac{\gamma PA^2}{V} & \text{단열 (빠른 진동)} \end{cases}$$

$$T_{\text{주기}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_{\text{eff}}}}$$

문제에 “온도 변화는 무시한다”가 있으면 등온식, “단열”이면 γ 를 붙인다.

자주 하는 실수

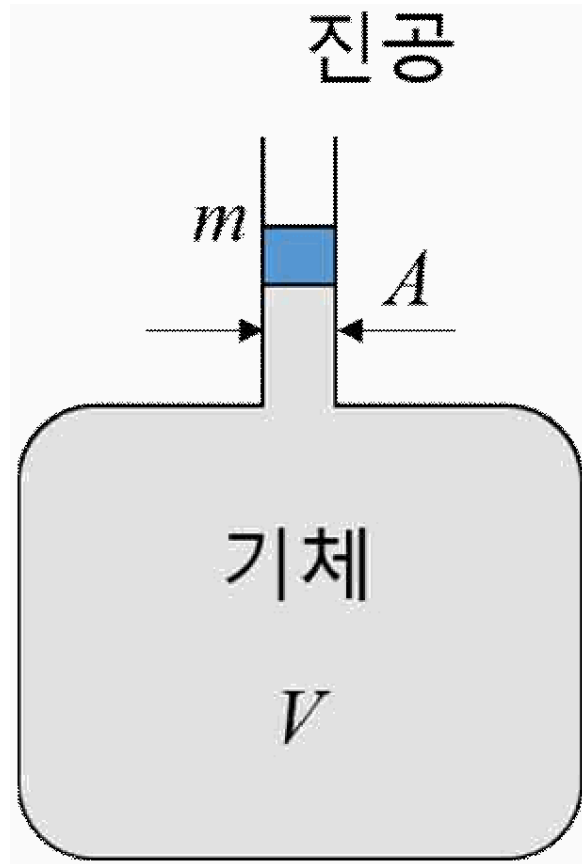
P-V 그래프 문항에서 “기체가 흡수한 열”을 넓이로 읽는 실수가 흔하다. **넓이는 언제나 W 이지 Q 가 아니다.** Q 는 반드시 $Q = \Delta U + W$ 로 한 번 더 계산해야 하고, ΔU 는 양 끝점의 PV 값에서 나온다.

기출 문항

제1장 기체분자운동론과 열역학 제1법칙 수록 문항 9개. 해설은 다음 절에 있다.

문제 1 2024년 제1회 · 5번 · 기체 스프링 피스톤 단진동 주기

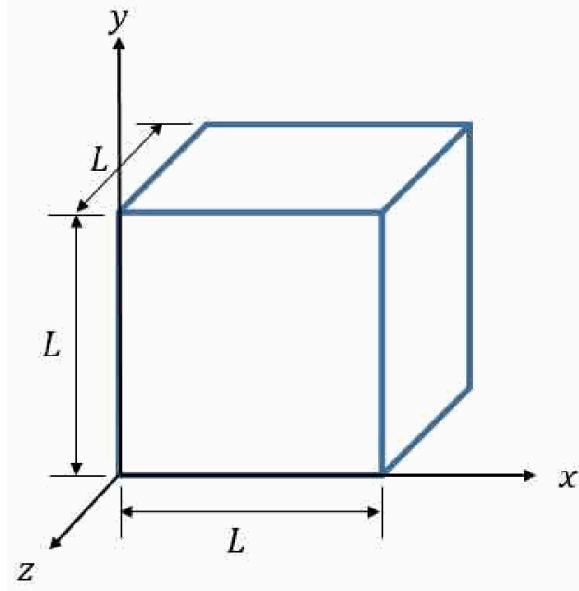
그림은 부피가 $V = 5\text{m}^3$ 인 유리병의 얇은 목에 질량 $m = 5\text{g}$ 인 피스톤이 평형 상태를 유지하고 있는 모습을 나타낸 것이다. 유리병 목의 단면적은 $A = 2 \times 10^{-4}\text{m}^2$ 이며 유리병 안은 이상기체로 채워져 있고 유리병 밖은 진공이다. 피스톤을 조금 움직였더니 피스톤이 단진동을 한다. 이때 진동 주기는? (단, 중력 가속도는 10m/s^2 이다. 피스톤과 유리병 사이의 마찰은 없고, 이상기체의 온도 변화는 무시한다. 원주율을 3으로 근사하시오.)



- ① 230 초
- ② 300 초
- ③ 510 초
- ④ 603 초
- ⑤ 702 초

문제 2 2024년 제1회 · 14번 · 기체분자운동론 압력·온도 유도

그림과 같이 한 변의 길이가 L 인 정육면체 상자 속에 N 개의 단원자 분자 이상 기체가 들어있다. 분자 1개의 질량은 m 이고 평균 운동 에너지는 $\frac{1}{2}mv^2$ 이다. 기체 분자 1개가 다른 분자와 충돌하지 않고 $+x$ 방향으로 속력 v_x 로 운동하여 벽과 탄성충돌 한다고 가정하면, 기체 분자 1개의 충돌 전, 후의 운동량의 변화는 $-2mv_x$ 이다. 기체 분자가 x 축을 따라 1회 왕복하는 데 걸리는 시간 Δt 는 $\frac{2L}{v_x}$ 이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것을 모두 고른 것은? (단, R 은 기체상수 이다.)



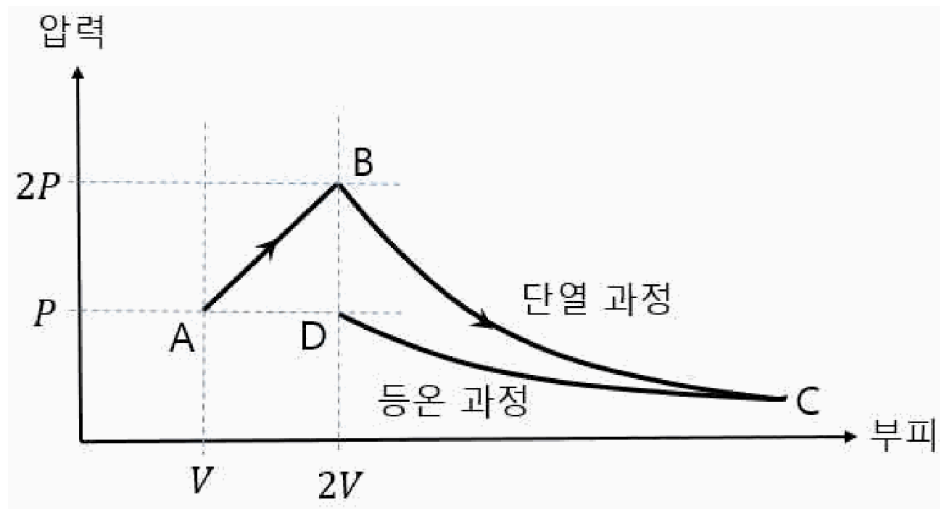
〈 보기 〉

- ㄱ. x 방향으로 운동하는 기체 분자 1개가 Δt 시간 동안에 벽에 주는 평균적인 힘은 $\frac{mv_x^2}{L}$ 이다.
- ㄴ. 벽에 주는 기체의 압력은 $\frac{1}{2} \frac{Nmv^2}{L^3}$ 이다.
- ㄷ. 기체가 n 몰일 때, 절대 온도 T 는 $\frac{Nmv^2}{3nR}$ 이다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄱ, ㄷ
- ⑤ ㄴ, ㄷ

문제 3 2024년 제1회 · 15번 · P-V 그래프 과정의 일과 열

1 몰(mol)의 단원자 분자 이상 기체가 그림과 같이 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 과정을 따라 변화한다. 이에 대한 설명으로 옳은 것을 모두 고른 것은?



〈 보기 〉

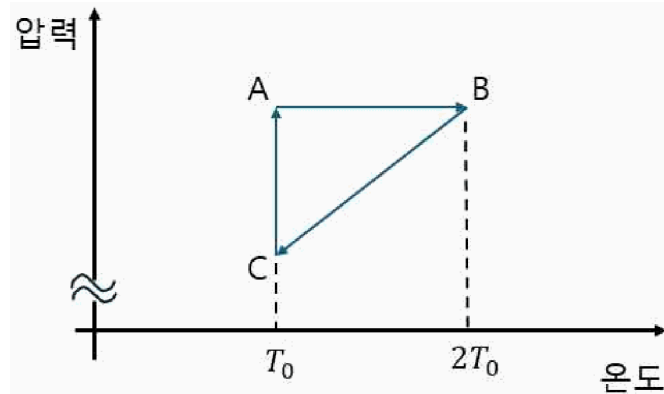
- ㄱ. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 한 일은 $\frac{3}{2}PV$ 이다.
- ㄴ. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 흡수한 열은 $6PV$ 이다.
- ㄷ. $B \rightarrow C$ 과정에서 기체의 한 일은 $3PV$ 이다.

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

문제 4

2024년 제2회 · 17번 · P-T 그래프 순환과정 해석

그림은 1몰의 단원자 이상기체가 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 를 따라 변화할 때 압력과 온도 사이의 관계를 나타낸 것이다. 이에 대해 올바르게 설명한 것을 모두 고르시오. (주의: 가로축은 부피가 아니라 온도임.)



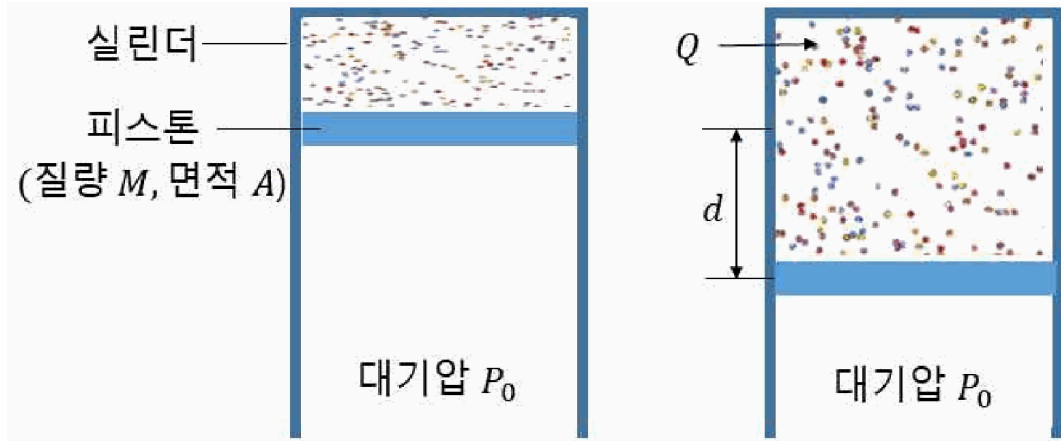
〈 보기 〉

- ㄱ. $A \rightarrow B$ 과정에서 부피는 두 배로 증가한다.
- ㄴ. $B \rightarrow C$ 과정에서 부피는 일정하다.
- ㄷ. $C \rightarrow A$ 과정에서 압력은 두 배로 증가한다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
- ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

문제 5 2025년 제1회 · 15번 · 피스톤 실린더 등압 과정의 일

그림 (가)는 이상 기체가 들어 있는 실린더 내에 피스톤이 정지한 모습을 나타낸 것이다. 피스톤의 질량은 M 이고 단면적은 A 이다. 그림 (나)는 이상 기체에 열 Q 가 흡수되어 피스톤이 아래로 d 만큼 서서히 이동하여 정지한 모습을 나타낸 것이다. 대기압은 P_0 로 일정하며 중력 가속도는 g 이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기> 에서 있는 대로 고른 것은? (단, 흡수된 열 Q 를 제외하고는 이상기체와 외부 사이에 열 출입은 없으며 실린더와 피스톤 사이에 마찰은 무시한다.)



< 보기 >

- ㄱ. (가)에서 이상기체의 압력은 대기압과 같다.
- ㄴ. (나)에서 이상기체의 온도는 (가)와 같다.
- ㄷ. (나)에서 열 Q 가 흡수되는 동안 이상기체가 한 일은 $(P_0 A - Mg)d$ 이다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄱ, ㄴ
- ⑤ ㄴ, ㄷ

문제 6

2025년 제2회 · 14번 · 네 팽창 과정의 최종 온도 비교

온도가 T_0 , 부피가 V_0 인 이상기체가 다음과 같은 방식(가역 등온팽창, 가역 단열팽창, 가역 등압팽창, 비가역 단열 자유팽창)으로 팽창하여 부피가 $2V_0$ 가 되었다. 같은 초기 상태에서 출발하여 최종 부피가 $2V_0$ 일 때, 온도에 관해 옳은 것만을 <보기> 에서 있는 대로 고른 것은?

< 보기 >

- ㄱ. 가역 등온팽창의 경우가 가역 단열팽창보다 온도가 높다.
- ㄴ. 가역 등압팽창의 경우가 가역 등온팽창보다 온도가 낮다.
- ㄷ. 가역 등온팽창의 경우가 비가역 단열 자유팽창보다 온도가 낮다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄱ, ㄴ
- ⑤ ㄱ, ㄷ

문제 7 2025년 제2회 · 15번 · 기체분자운동론 압력 계산

한 변의 길이가 0.1 m 인 정육면체 용기 안에 단원자 이상기체가 들어 있다. 분자 수는 $N = 2 \times 10^{23}$, 분자 하나의 질량은 $m = 6 \times 10^{-26}$ kg, 속도 제곱의 평균은 $\langle v^2 \rangle = 25000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 이다. 기체 분자 운동론에 따라 이 기체의 압력을 구하라 (단, 분자의 평균 운동에너지는 이상기체의 온도와 관계된다.)

〈 보기 〉

ㄱ. 10^6 N/m^2 ㄴ. $3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ㄷ. $\frac{10^6}{3} \text{ N/m}^2$ ㄹ. 10^5 N/m^2 ㅁ. $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄹ
- ⑤ ㅁ

문제 8

2026년 제1회 · 16번 · RMS 속력과 압력

질량 m 인 이상기체 분자 N 개가 부피 V 인 용기에 들어 있다. 또 다른 부피 V 인 용기에 질량 $2m$ 인 이상기체 분자 N 개가 들어 있다. 두 이상기체의 온도는 같다. 기체분자운동론의 관점에서 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, RMS 속력은 제곱 평균 제곱근 속력이다.)

< 보기 >

- ㄱ. 질량이 m 인 분자들의 RMS 속력은 질량이 $2m$ 인 분자들의 RMS 속력의 $\sqrt{2}$ 배이다.
- ㄴ. 질량이 $2m$ 인 이상기체의 압력은 질량이 m 인 이상기체의 압력의 2배이다.
- ㄷ. 기체의 온도가 두 배로 증가하면 질량 m 인 분자들의 RMS 속력은 2배가 된다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄱ, ㄴ
- ⑤ ㄴ, ㄷ

문제 9

2026년 제1회 · 17번 · 가역/비가역 단열 압축 비교

실린더에 들어 있는 이상기체 1몰을 피스톤으로 압축하여, 기체의 부피가 V_1 에서 $V_2 = \frac{1}{2}V_1$ 로 되는 두 과정 A, B를 생각하자. 기체의 초기 압력과 온도는 각각 P_1, T_1 이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 이 기체의 정적 몰열용량과 정압 몰열용량은 각각 C_V, C_P 로 일정하다.)

과정 A: 가역 단열 압축

과정 B: 빠른 비가역 단열 압축

< 보기 >

ㄱ. 두 과정 모두 단열이므로 과정 중에 이상기체의 엔트로피는 변하지 않는다.

ㄴ. 과정 B에서 최종 압력은 $P_1 2^{\frac{C_P}{C_V}}$ 이다.

ㄷ. $V_2 = \frac{1}{2}V_1$ 인 상태에 도달하기 위해 피스톤이 기체에 한 일은 과정 B가 과정 A보다 더 크다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄱ, ㄷ
- ⑤ ㄴ, ㄷ

해설

문제 1 2024년 제1회 · 5번 · 기체 스프링 피스톤 단진동 주기

정답 ②

풀이

“진공 속 유리병 목에 얹힌 피스톤이 평형”이라는 상황에서 **기체의 압력부터** 구해야 한다. 상태방정식이 아니라 피스톤의 힘 평형이 압력을 준다.

① **평형 압력**. 피스톤에 작용하는 힘은 아래로 무게 mg , 위로 기체가 미치는 P_0A 뿐이다(바깥은 진공이므로 대기압 항이 없다).

$$P_0A = mg \Rightarrow P_0 = \frac{mg}{A} = \frac{5 \times 10^{-3} \times 10}{2 \times 10^{-4}} = 250 \text{ Pa}$$

② **복원력 – 기체가 곧 스프링이다**. 피스톤이 위로 x 만큼 밀려 올라가면 부피는 $V + Ax$ 가 된다. 문제에서 “**이상기체의 온도 변화는 무시한다**” 고 했으므로 등온, 즉 $PV = \text{일정}$ 이다.

$$P = \frac{P_0V}{V + Ax} \approx P_0 \left(1 - \frac{Ax}{V} \right) \Rightarrow \Delta P = -P_0 \frac{Ax}{V}$$

알짜 복원력은 $F = A\Delta P = -\frac{P_0A^2}{V}x$ 이므로 유효 용수철 상수는

$$k = \frac{P_0A^2}{V} = \frac{250 \times (2 \times 10^{-4})^2}{5} = \frac{250 \times 4 \times 10^{-8}}{5} = 2 \times 10^{-6} \text{ N/m}$$

③ **주기**.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{5 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-6}}} = 2\pi\sqrt{2500} = 100\pi$$

$\pi \approx 3$ 으로 근사하라고 했으므로 $T \approx 300$ 초. → ②

π 를 3으로 근사하라는 단서가 정답 선택을 갈라 놓는다. 정확한 값은 $100\pi = 314$ 초여서 ①(230 초)·③(510초)과는 멀지만, 근사 지시를 무시하면 “314는 보기에 없다”며 헤매게 된다. **근사 지시는 계산 편의가 아니라 답 고르기용이다.**

이 유형의 표준 절차 – 기체 스프링

1. **압력을 힘 평형으로 구한다**. 진공이면 $P = mg/A$, 대기 중이면 $P = P_0 \pm mg/A$.
2. **어떤 과정인지 확인한다**. “온도 변화 무시” → 등온(PV 일정), “단열” → PV^γ 일정.
3. **미소 변위에서 ΔP 를 1차까지 전개한다**. 등온이면 $\Delta P = -P(Ax)/V$, 단열이면 γ 배.
4. $k = (PA^2)/V$ (또는 $\gamma PA^2/V$) → $T = 2\pi\sqrt{m/k}$.
5. 단위를 SI로 통일했는지 마지막에 확인한다. $g \rightarrow \text{kg}$, $\text{cm}^2 \rightarrow \text{m}^2$ 에서 자릿수가 무너진다.

자주 하는 실수

k 를 PA/V 나 PA^2/V^2 로 잘못 쓰는 오답이 많다. 차원으로 걸러라. $[PA^2/V] = (\text{N/m}^2)(\text{m}^4)/(\text{m}^3) = \text{N/m}$ 로 용수철 상수의 차원이 정확히 맞는다. 또 여기서 $V = 5 \text{ m}^3$ 은 병 전체의 부피이고, 목의 부피가 아니다 – 목이 “얇다”는 서술이 그 뜻이다.

풀이

1.2절의 유도를 그대로 따라가되, **어디서 $\frac{1}{3}$ 이 나오는지**만 정확히 짚으면 된다.

ㄱ. 벽이 받는 충격량은 $|\Delta p| = 2mv_x$, 왕복 시간은 $\Delta t = 2L/v_x$ 이므로 평균 힘은

$$F = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$$

발문이 이미 Δp 와 Δt 를 주었으므로 나눗셈 한 번이다. → 참

ㄴ. 분자 하나가 한쪽 벽(넓이 L^2)에 주는 압력은 $F/L^2 = mv_x^2/L^3$. N 개를 더하면 $Nm\langle v_x^2 \rangle/L^3$ 이고, 등방성 $\langle v_x^2 \rangle = \frac{1}{3}\langle v^2 \rangle$ 를 넣으면

$$P = \frac{1}{3} \frac{Nm\langle v^2 \rangle}{L^3}$$

보기는 계수를 $\frac{1}{2}$ 로 적었다. 3차원 등방성에서 나오는 계수는 $\frac{1}{3}$ 이므로 틀렸다. → 거짓

ㄷ. 위 결과를 $PV = nRT$ 에 넣는다. $V = L^3$ 이므로 $PV = \frac{1}{3}Nm\langle v^2 \rangle$ 이고

$$nRT = \frac{1}{3}Nm\langle v^2 \rangle \Rightarrow T = \frac{Nm\langle v^2 \rangle}{3nR}$$

(여기서 v^2 은 발문이 정의한 평균값 $\langle v^2 \rangle$ 이다.) → 참

따라서 ㄱ, ㄷ 이므로 ④.

ㄴ과 ㄷ은 같은 식에서 나오므로 **계수가 서로 어긋난다**는 점을 이용하면 더 빠르다. ㄷ이 $\frac{1}{3}$ 계수를 쓰고 있으니, $\frac{1}{2}$ 을 쓴 ㄴ과 동시에 참일 수 없다. 둘 중 하나는 반드시 거짓이다.

이 유형의 표준 절차 – 분자운동론 유도

- 충격량 $2mv_x \rightarrow$ 왕복시간 $2L/v_x \rightarrow$ 평균 힘 mv_x^2/L . 이 세 단계는 통째로 외운다.
- 면적 L^2 로 나눠 압력으로, N 배 해서 전체로.
- $\langle v_x^2 \rangle \rightarrow \frac{1}{3}\langle v^2 \rangle$ **치환에서만 3이 나온다**. 다른 데서 3이 나오면 틀린 것이다.
- $PV = \frac{1}{3}Nm\langle v^2 \rangle = \frac{2}{3}N \cdot \overline{K}$ 를 $PV = nRT = Nk_B T$ 와 나란히 놓는다.
- 결과: $\overline{K} = \frac{3}{2}k_B T$, $v_{\text{rms}} = \sqrt{3k_B T/m} = \sqrt{3RT/M}$.

풀이

$A(V, P)$, $B(2V, 2P)$, $B \rightarrow C$ 는 단열, C 는 $D(2V, P)$ 를 지나는 등온선 위에 있다. 단원자 1몰이므로 $\Delta U = \frac{3}{2}\Delta(PV)$ 를 쓰면 온도를 구할 필요조차 없다.

ㄱ. $A \rightarrow B$ 에서 기체가 한 일. 직선이므로 사다리꼴 넓이다.

$$W_{AB} = \frac{1}{2}(P + 2P)(2V - V) = \frac{3}{2}PV$$

→ 참

ㄴ. $A \rightarrow B$ 에서 흡수한 열. 먼저 내부에너지 변화를 PV 곱으로 구한다.

$$\Delta U_{AB} = \frac{3}{2}(P_B V_B - P_A V_A) = \frac{3}{2}(4PV - PV) = \frac{9}{2}PV$$

제1법칙 $Q = \Delta U + W$ 에 넣으면

$$Q_{AB} = \frac{9}{2}PV + \frac{3}{2}PV = 6PV$$

→ 참

ㄷ. $B \rightarrow C$ 에서 기체가 한 일. 단열이므로 $Q = 0$, 따라서 $W = -\Delta U$ 다. 곡선 아래 넓이를 적분할 필요가 없다.

$$W_{BC} = -\Delta U = \frac{3}{2}(P_B V_B - P_C V_C)$$

C 는 $D(2V, P)$ 를 지나는 등온선 위에 있으므로 $P_C V_C = P_D V_D = 2PV$ 다. 그러면

$$W_{BC} = \frac{3}{2}(4PV - 2PV) = 3PV$$

→ 참

따라서 ㄱ, ㄴ, ㄷ 모두 참이므로 ⑤.

검산: 단열 조건 $PV^{5/3} = \text{일정}$ 과 $P_C V_C = 2PV$ 를 함께 풀면 $V_C = 2^{3/5}V \approx 1.58V$, $P_C \approx 0.354P$ 로 그림의 C 위치와 정확히 맞는다.

자주 하는 실수

ㄷ에서 단열 곡선 아래 넓이를 적분하려 들면 시험 시간이 사라진다. 단열이면 넓이를 구하지 말고 $W = -\Delta U$ 로 우회하라. 반대로 등온이면 $\Delta U = 0$ 이라 $W = Q$ 다. 또 하나 - 이 그림에서 D 는 지나가는 상태가 아니다. D 는 C 의 위치를 확정해 주기 위한 보조점일 뿐, 기체는 B 에서 곧장 C 로 간다. $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow C$ 로 착각해 D 구간의 일을 더하면 안 된다.

풀이

가로축이 온도라는 단서가 문제의 전부다. 1몰이므로 $PV = RT$, 즉 $V = RT/P$ 다.

그래프에서 $A(T_0, P_A), B(2T_0, P_A)$ — 두 점의 압력이 같다(수평선). $C(T_0, P_C)$ 이고 $P_C < P_A$ 다.

ㄱ. $A \rightarrow B$. 압력이 같으므로 등압 과정이고, $V = RT/P$ 에서 $V \propto T$ 다. 온도가 $T_0 \rightarrow 2T_0$ 로 두 배가 되었으므로 부피도 두 배가 된다. → 참

ㄴ. $B \rightarrow C$ 에서 부피가 일정한가?

$$V_B = \frac{R \cdot 2T_0}{P_A}, \quad V_C = \frac{RT_0}{P_C}$$

$$V_B = V_C \iff \frac{2T_0}{P_A} = \frac{T_0}{P_C} \iff P_A = 2P_C$$

ㄷ. $C \rightarrow A$ 에서 압력이 두 배가 되는가? $C \rightarrow A$ 는 $T = T_0$ 로 고정된 수직선이고, 이 서술은 그대로 $P_A = 2P_C$ 다.

여기서 결정적인 관찰이 나온다. ㄴ과 ㄷ은 완전히 같은 조건 $P_A = 2P_C$ 를 다르게 표현한 것이다. 따라서 둘은 반드시 함께 참이거나 함께 거짓이다.

한편 ㄱ은 그래프만 봐도(수평선 = 등압, 온도 2배) 확실히 참이다. 이제 선택지를 걸러 보자.

- ①(ㄴ), ②(ㄷ), ③(ㄱ, ㄴ), ④(ㄱ, ㄷ) — 모두 ㄴ과 ㄷ 중 하나만 담고 있어 동치 관계를 깬다. 불가능.
- ⑤(ㄱ, ㄴ, ㄷ) — 셋 다 참. 유일하게 모순이 없다.

→ ⑤

즉 P-T 평면에서 선분 BC 를 연장하면 원점을 지나며(원점을 지나는 직선 = 등적), $P_C = P_A/2$ 다. 세로축이 잘려 있어($\approx$ 기호) 그림에서 눈으로는 확인할 수 없지만, 보기 사이의 논리로 확정된다.

자주 하는 실수

P-T 그래프를 P-V 그래프로 착각해 “ $A \rightarrow B$ 는 오른쪽으로 갔으니 부피가 늘었다”고 넓이 계산을 시작하는 것이 최다 실수다. P-T 평면에서는 넓이가 일과 아무 관계가 없다. 부피는 오직 $V = nRT/P$ 로만 읽고, 등적 과정은 원점을 지나는 직선이라는 것 하나만 기억하면 된다.

풀이

그림을 정확히 읽는 것이 전부다. 실린더는 **위가 막혀 있고 기체가 위쪽에** 있으며, 피스톤은 그 아래에 매달린 형태다. 피스톤 아래는 대기다. 열을 흡수하자 피스톤이 **아래로** d 만큼 내려갔으므로 기체는 팽창했다.

압력. 피스톤에 작용하는 힘을 위·아래로 나눈다.

- 위에서 기체가 누르는 힘 PA (아래 방향)
- 무게 Mg (아래 방향)
- 아래에서 대기가 받치는 힘 P_0A (위 방향)

$$P_0A = PA + Mg \implies P = P_0 - \frac{Mg}{A}$$

ㄱ. $P = P_0 - Mg/A < P_0$ 이므로 기체의 압력은 대기압보다 **작다**. → **거짓**

ㄴ. 피스톤이 서서히 움직이는 동안 위 힘 평형이 계속 성립하므로 압력은 일정하다 – **등압 과정**이다. 등압이면 $V \propto T$ 인데 부피가 Ad 만큼 늘었으므로 온도도 올라간다. (제1법칙으로 봐도 $Q > 0, W > 0$ 이지만 $Q = nC_P\Delta T > 0$ 이므로 $\Delta T > 0$.) → **거짓**

ㄷ. 등압 과정의 일은 $W = P\Delta V$ 이고 $\Delta V = Ad$ 이므로

$$W = \left(P_0 - \frac{Mg}{A}\right)(Ad) = (P_0A - Mg)d$$

→ **참**

따라서 ㄷ만 참이므로 ③.

자주 하는 실수

“피스톤 = 기체 위에 얹힌 뚜껑”이라는 고정관념 때문에 반사적으로 $P = P_0 + Mg/A$ 를 쓰면 ㄱ과 ㄷ이 동시에 틀려 ①이나 ②로 빠진다. **그림에서 기체가 피스톤의 어느 쪽에 있는지부터 확인하라.** 기체가 피스톤을 **떠받치면** $+Mg/A$, 기체가 피스톤에 **매달리면** $-Mg/A$ 다. 또 ㄴ은 “열을 흡수했는데 온도가 그대로”라는 말인데, 등온이라면 열이 전부 일로 나가야 한다. 등압 팽창에서는 흡수한 열의 C_V/C_P 만큼이 내부에너지로 남으므로 온도는 반드시 오른다.

풀이

같은 초기 상태 (T_0, V_0) 에서 출발해 모두 $2V_0$ 로 팽창한다. 네 과정의 최종 온도를 각각 적어 놓고 대소만 비교하면 끝이다. 1.4절의 표가 그대로 답이 된다.

과정	Q	W	최종 온도
가역 등온팽창	> 0	> 0	T_0 (정의상 일정)
가역 단열팽창	0	> 0	$T_0 2^{1-\gamma} < T_0$
가역 등압팽창	> 0	> 0	$2T_0$ ($V \propto T$)
비가역 단열 자유팽창	0	0	T_0 ($\Delta U = 0$)

정리하면 $T_{\text{단열}} < T_{\text{등온}} = T_{\text{자유팽창}} < T_{\text{등압}} = 2T_0$.

ㄱ. 등온(T_0) vs 가역 단열($T_0 2^{1-\gamma} < T_0$). 단열팽창에서는 $Q = 0$ 인데 기체가 일을 했으므로 $\Delta U = -W < 0$, 온도가 내려간다. 등온이 더 높다. → 참

ㄴ. 등압($2T_0$) vs 등온(T_0). 등압 팽창은 부피가 두 배면 온도도 두 배다. 등압이 등온보다 높다. 보기는 “낮다”고 했다. → 거짓

ㄷ. 등온(T_0) vs 자유팽창. 자유팽창은 진공으로 퍼지므로 밀어낼 상대가 없어 $W = 0$, 게다가 단열이라 $Q = 0$ 이다. 제1법칙에서 $\Delta U = 0$, 이상기체의 U 는 온도만의 함수이므로 $T = T_0$ - 등온과 같다. “낮다”는 서술은 틀렸다. → 거짓

따라서 ㄱ만 참이므로 ①.

자주 하는 실수

ㄷ이 이 문항의 핵심 함정이다. “단열 → 온도 하강”이라는 반사가 자유팽창에서 정확히 깨진다. 온도를 바꾸는 것은 Q 와 W 이지 부피 자체가 아니다. 자유팽창은 단열이면서 결과적으로 등온이므로, 오히려 $PV = \text{일정}$ (PV^γ 가 아니다)을 따른다. 한편 ㄷ이 “같다”가 아니라 “낮다”라고 서술되어 있으므로 거짓임에 주의 - 등호 여부까지 읽어야 한다.

풀이

공식 하나에 수를 넣는 문항이다. 자릿수만 조심하면 된다.

$$P = \frac{1}{3} \frac{Nm\langle v^2 \rangle}{V}$$

$V = (0.1)^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$ 이고, 분자는

$$Nm\langle v^2 \rangle = (2 \times 10^{23})(6 \times 10^{-26})(2.5 \times 10^4) = 12 \times 10^{-3} \times 2.5 \times 10^4 = 3 \times 10^2$$

단위는 $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = \text{J}$ 다. 따라서

$$P = \frac{1}{3} \cdot \frac{3 \times 10^2}{10^{-3}} = \frac{1}{3} \cdot 3 \times 10^5 = 10^5 \text{ N/m}^2$$

보기 중 10^5 N/m^2 은 ㄹ이므로 → ④

참고로 이 값은 대략 1기압($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$)이다. 상온 기체가 한 변 10 cm 상자에 2×10^{23} 개 들어 있다면 거의 1기압이 맞으므로, 물리적으로도 자연스럽다. 발문의 “평균 운동에너지는 온도와 관계된다”는 단서는 $\bar{K} = \frac{3}{2}k_B T$ 를 쓰라는 뜻이지만, 압력만 물었으므로 온도를 경유할 필요는 없다.

자주 하는 실수

오답 보기가 정확히 세 가지 실수를 노린다. ㄱ(10^6)은 V 를 10^{-4} 로 잘못 본 경우, 즉 $(0.1)^3$ 을 $(0.1)^4$ 이나 $0.1^2 \times 0.01$ 로 계산한 것이다. ㄴ(3×10^6)과 ㄷ($10^6/3$)은 $\frac{1}{3}$ 계수를 곱하는 대신 나누거나 아예 빼먹은 경우다. ㄹ(3×10^5)은 $\frac{1}{3}$ 을 빠뜨린 값이다. 계수 $\frac{1}{3}$ 과 $V = L^3$ 두 가지만 정확하면 오답 넷이 한꺼번에 걸러진다.

풀이

두 용기는 부피 V , 분자 수 N , 온도 T 가 모두 같고 분자 질량만 m 과 $2m$ 으로 다르다. 어떤 양이 m 에 의존하고 어떤 양이 의존하지 않는지가 전부다.

ㄱ. 온도가 같으면 평균 병진운동에너지가 같다.

$$\frac{1}{2}m\langle v^2 \rangle = \frac{3}{2}k_B T \implies v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$$

$$\frac{(v_{\text{rms}})_m}{(v_{\text{rms}})_{2m}} = \sqrt{\frac{2m}{m}} = \sqrt{2}$$

질량이 가벼운 쪽이 $\sqrt{2}$ 배 빠르다. → 참

ㄴ. 압력을 미시식으로 쓰면

$$P = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m \langle v^2 \rangle = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left(\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle \right) = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \cdot \frac{3}{2} k_B T = \frac{N k_B T}{V}$$

m 이 완전히 사라진다. 무거운 분자는 느리게 움직이고, 그 두 효과가 $m\langle v^2 \rangle$ 에서 정확히 상쇄되기 때문이다. N, V, T 가 같으므로 두 기체의 압력은 같다. 2배가 아니다. → 거짓

ㄷ. $v_{\text{rms}} \propto \sqrt{T}$ 이므로 온도가 2배가 되면 속력은 $\sqrt{2} \approx 1.41$ 배다. 2배가 되려면 온도가 4배여야 한다. → 거짓

따라서 ㄱ만 참이므로 ①.

자주 하는 실수

ㄴ은 “무거운 분자가 더 세게 때리니 압력이 크다”는 직관을 노린 함정이다. 충돌 한 번의 충격량은 $2mv_x$ 로 크지만, 느려서 충돌 빈도가 그만큼 줄어든다. 곱해 보면 mv_x^2 인데 이것이 곧 운동에너지의 2배이고, 온도가 같으면 같은 값이다. $P = Nk_B T/V$ – 이상기체의 압력에는 분자 질량이 들어가지 않는다. ㄷ은 제곱근을 빠뜨리는 실수로, $v_{\text{rms}} \propto \sqrt{T}$ 이지 T 에 비례하지 않는다.

풀이

같은 초기 상태 (P_1, T_1, V_1) 에서 같은 최종 부피 $V_2 = \frac{1}{2}V_1$ 까지 압축하되, A는 **가역** 단열, B는 **빠른 비가역** 단열이다. 둘 다 $Q = 0$ 이지만 나머지는 전부 다르다.

ㄱ. 단열이면 $Q = 0$ 이므로 엔트로피 유입 $\int dQ/T$ 는 0이다. 그러나 비가역 과정에서는 내부에서 엔트로피가 **생성**된다.

$$\Delta S = \underbrace{\int \frac{dQ}{T}}_{=0 \text{ (단열)}} + \underbrace{S_{\text{gen}}}_{\geq 0} \Rightarrow \Delta S_A = 0, \quad \Delta S_B > 0$$

등엔트로피는 “단열”이 아니라 “가역 + 단열”의 결과다. 과정 B에서는 엔트로피가 증가한다. → **거짓**

ㄴ. $P_1 2^{C_P/C_V} = P_1 2^\gamma$ 는 $PV^\gamma = \text{일정}$ 에서 V 를 절반으로 줄인 결과, 즉 **가역** 단열(과정 A)의 최종 압력이다. 과정 B는 $PV^\gamma = \text{일정}$ 을 따르지 않는다. 아래 ㄷ에서 보듯 B의 최종 온도가 더 높으므로 $P_2 = RT_2/V_2$ 도 더 크다. → **거짓**

ㄷ. 두 과정 모두 $Q = 0$ 이므로 제1법칙에서 피스톤이 기체에 한 일은

$$W_{\text{외부}} = \Delta U = C_V(T_2 - T_1)$$

즉 **최종 온도가 높은 쪽이 더 많은 일을 받은 것이다.** 최종 온도를 엔트로피로 비교한다. 이상기체 1몰의 엔트로피 변화는

$$\Delta S = C_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = C_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln 2$$

- 과정 A: $\Delta S = 0 \Rightarrow C_V \ln(T_A/T_1) = R \ln 2 \Rightarrow T_A = T_1 2^{R/C_V} = T_1 2^{\gamma-1}$
- 과정 B: $\Delta S > 0 \Rightarrow C_V \ln(T_B/T_1) > R \ln 2 \Rightarrow T_B > T_A$

따라서 $\Delta U_B > \Delta U_A$ 이고, 피스톤이 한 일도 B가 더 크다. → **참**

따라서 ㄷ만 참이므로 ③.

직관적으로도 같은 결론이 나온다. 피스톤을 급격히 밀면 피스톤 바로 앞의 기체가 압축되어 국소적으로 압력이 높아지고, 피스톤은 그 **더 높은** 압력을 상대로 밀어야 한다. 그 여분의 일이 난류·충격파로 흩어졌다가 결국 열로 남으므로 최종 온도가 더 높다. 가역 압축은 매 순간 평형 압력만큼만 밀면 되므로 일이 최소다 – **가역 과정은 언제나 일의 최소(압축)·최대(팽창) 극한이다.**

자주 하는 실수

“단열 → $PV^\gamma = \text{일정}$ ”을 조건 반사로 쓰는 것이 이 문항의 함정 전부다. $PV^\gamma = \text{일정}$, $TV^{\gamma-1} = \text{일정}$ 은 모두 **준정적(가역)** 단열에서만 성립한다. 급격한 압축, 자유팽창, 교반 등 비가역 단열에서는 $Q = 0$ 과 $\Delta U = -W$ 만 살아남는다. “단열이면 엔트로피 불변”이라는 ㄱ의 서술도 같은 뿌리의 오해다.

이 장의 요약

1. **과정별 정리표가 절반이다.** 등온 $\Delta U = 0$, 등적 $W = 0$, 단열 $Q = 0$, 자유팽창 $W = Q = \Delta U = 0$. 문제를 읽자마자 무엇이 0인가부터 찾고 나머지는 $\Delta U = Q - W$ 로 연결한다.

2. 분자운동론의 계수는 $\frac{1}{3}$. $P = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m \langle v^2 \rangle = \frac{Nk_B T}{V}$ 이며 분자 질량 m 은 최종식에서 사라진다. $v_{\text{rms}} = \sqrt{3k_B T/m} \propto \sqrt{T}/\sqrt{m}$ - 제곱근을 빠뜨리지 않는다.
3. **피스톤은 힘 평형으로 압력을 준다.** 기체가 피스톤을 떠받치면 $P_0 + Mg/A$, 매달면 $P_0 - Mg/A$. 미소 진동이 면 $k = PA^2/V$ (등온) 또는 $\gamma PA^2/V$ (단열), $T = 2\pi\sqrt{m/k}$.
4. **그래프 읽기.** P - V 에서 넓이 = W (열이 아니다), PV 곱 = 온도, $\Delta U = \frac{3}{2}\Delta(PV)$. P - T 에서는 넓이가 무의미하고, 등적 과정이 원점을 지나는 직선이다.
5. **가역과 비가역.** $PV^\gamma = \text{일정}$ 은 가역 단열 전용이다. 같은 부피까지 압축하면 비가역 쪽이 최종 온도·압력·받은 일 모두 더 크고, 단열이어도 $\Delta S > 0$ 이다.

제2장 엔트로피·열기관·열역학 제2법칙

최근 5회분(90문항)에서 열역학은 16문항(17.8%)이 출제되었고, 그중 이 장이 다루는 엔트로피·제2법칙 영역이 7문항으로 절반에 육박한다. 더 중요한 사실은 **엔트로피가 다섯 회차에 단 한 번도 빠지지 않고 출제되었다**는 점이다. 출제 측은 셋으로 좁혀진다 – (i) 같은 두 상태를 잇는 여러 경로의 ΔS 를 비교하게 만드는 문제(엔트로피가 상태함수임을 아는지 묻는다), (ii) 열원 사이의 열전달에서 Q/T 를 부호까지 정확히 더하는 계산, (iii) 열기관·냉동기의 효율과 성능계수를 카르노 한계와 비교하는 판정. 계산량은 대부분 두세 줄이며, 답을 가르는 것은 언제나 **가역인가 비가역인가**라는 판단 하나다.

학습 목표

- 가역과 비가역을 구분하고, 비가역 과정의 ΔS 를 가역 경로로 바꿔 계산할 수 있다.
- 이상기체의 $\Delta S = nC_V \ln(T_2/T_1) + nR \ln(V_2/V_1)$ 로 등온·등압·등적·단열·자유팽창의 엔트로피 변화를 모두 구할 수 있다.
- 열접촉·열평형처럼 열원이 둘인 상황에서 계와 주위의 ΔS 를 각각 구해 우주 전체의 증가를 확인할 수 있다.
- 열기관 효율 $\eta = 1 - Q_L/Q_H$ 와 카르노 효율 $1 - T_L/T_H$ 를 구분하고, 주어진 기관이 가역인지 판정할 수 있다.
- 냉동기·열펌프의 성능계수를 $Q_H = Q_L + W$ 와 함께 다루고 이상적 한계값과 비교할 수 있다.

2.1 가역과 비가역 – 무엇이 되돌릴 수 없는가

가역 과정이란 계와 주위를 함께 원래 상태로 되돌릴 수 있는 과정이다. 현실의 모든 과정은 비가역이지만, 무한히 느리게(준정적으로) 진행하고 불균형이 없다면 가역에 임의로 가깝게 만들 수 있다. 경사에서 비가역의 원인은 사실상 넷뿐이다 – **유한한 온도차를 사이에 둔 열전달**(뜨거운 물과 찬 물 섞기, 두 물체 맞대기), **진공으로의 자유팽창**, **마찰·점성에 의한 역학적 에너지의 소산**, 서로 다른 기체의 **혼합**.

여기서 학생들이 놓치는 지점이 있다. “천천히 하면 가역”이 아니라 **불균형이 없으면 가역**이다. 진공으로의 팽창은 아무리 밸브를 천천히 열어도 기체와 진공 사이의 압력차가 유한하므로 언제나 비가역이다.

에너지 보존(제1법칙)만으로는 이 방향성을 설명할 수 없다. 찬 물이 저절로 더 차가워지고 더운 물이 더 뜨거워지는 과정도 에너지는 완벽히 보존한다. **일어나는 일과 일어나지 않는 일을 가르는 새로운 상태량이 필요하고, 그것이 엔트로피다.**

2.2 엔트로피의 정의 – 그리고 상태함수라는 성질

엔트로피는 **가역** 경로를 따라 주고받은 열을 절대온도로 나눈 것으로 정의한다.

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}, \quad \Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

정의에 붙은 아래첨자 “rev”가 이 장 전체의 핵심이다. 실제 과정이 비가역이어도 ΔS 는 **처음 상태와 나중 상태만으로 정해진다**. 즉 엔트로피는 압력·부피·온도·내부에너지와 같은 **상태함수**이고, 일이나 열 처럼 경로에 따라 달라지는 양이 아니다. 여기서 경시 문항이 반복해서 요구하는 계산 전략이 나온다.

비가역 과정의 ΔS 를 구하는 법

1. 실제 과정은 잊고 **처음 상태와 나중 상태만** 적는다 ($T_1, V_1 \rightarrow T_2, V_2$).
2. 그 두 상태를 잇는 **아무 가역 경로**나 하나 상상한다 (보통 등온 + 등적 두 토막).
3. 그 경로에서 $\int \delta Q_{\text{rev}}/T$ 를 계산한다. 이 값이 곧 실제 과정의 ΔS 다.
4. 실제로 흐른 열 Q 를 T 로 나누면 **안 된다**.

제2법칙은 이 언어로 다음과 같이 쓰인다. 고립계(또는 우주 전체)에서

$$\Delta S_{\text{우주}} = \Delta S_{\text{계}} + \Delta S_{\text{주위}} \geq 0, \quad \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

둘 다 등호는 오직 가역일 때만 성립한다(오른쪽이 **클라우지우스 부등식**). 따라서 $\Delta S_{\text{우주}} > 0$ 인지를 계산하는 것이 곧 그 과정이 비가역인지를 판정하는 것과 같고, 이 부등식을 위반하는 순환기관은 존재할 수 없다.

자주 하는 실수

“엔트로피는 언제나 증가한다”는 서술은 **틀렸다**. 증가가 보장되는 것은 **고립계 또는 우주 전체**의 엔트로피다. 부분계의 엔트로피는 얼마든지 줄어든다 – 냉장고 안의 음식, 열을 내주는 고온 물체가 그렇다. 문항이 계·물체·전체·우주 중 무엇을 묻는지 먼저 확인하라.

2.3 이상기체의 엔트로피 변화와 과정별 정리

이상기체 n 몰에 대해 제1법칙 $\delta Q_{\text{rev}} = dU + P dV = nC_V dT + (nRT/V) dV$ 를 T 로 나누어 적분하면 이 장에서 가장 많이 쓰는 공식이 나온다.

$$\Delta S = nC_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

T 와 V 대신 T 와 P 로 쓰면 $\Delta S = nC_P \ln(T_2/T_1) - nR \ln(P_2/P_1)$ 이다. 두 식 모두 **처음·나중 상태의 상태량만** 담고 있다는 점을 눈으로 확인해 두자 – 경로가 어디에도 없다. 이것이 2.2에서 말한 상태함수라는 성질의 구체적 모습이다.

특히 부피가 두 배가 되는 팽창($V \rightarrow 2V$)은 매회 나오는 표준 상황이다.

과정 ($V \rightarrow 2V$)	계의 ΔS	우주의 ΔS	메모
등온 가역 팽창	$+nR \ln 2$	0	열원에서 $Q = nRT \ln 2$ 흡수, 주위는 $-nR \ln 2$
자유팽창(진공)	$+nR \ln 2$	$+nR \ln 2$	$Q = 0, W = 0, T$ 불변. 단열인데 $\Delta S > 0$
등압 팽창	$+nC_P \ln 2$	≥ 0	T 도 2배가 되므로 등온보다 크다
등적 가열 ($T \rightarrow 2T$)	$+nC_V \ln 2$	≥ 0	부피항이 없다
가역 단열(등엔트로피)	0	0	$\delta Q_{\text{rev}} = 0, TV^{\gamma-1}$ 이 일정
비가역 단열	> 0	> 0	자유팽창·마찰·급팽창. 주위와는 열을 안 주고받는다
열접촉 ($T_H \rightarrow T_L$, 열 Q)	$-\frac{Q}{T_H} + \frac{Q}{T_L}$	$Q\left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H}\right) > 0$	고온은 감소, 저온은 증가, 합은 반드시 증가

표에서 반드시 읽어야 할 두 줄이 있다. 첫째, **등온 팽창과 자유팽창의 ΔS 는 완전히 같다**. 처음과 나중의 (T, V) 가 같기 때문이다. 다만 등온 팽창은 주위의 엔트로피가 같은 크기만큼 줄어들어 우주 전체로는 0이고, 자유팽창은 주위가 아무 변화도 겪지 않으므로 우주 전체가 $nR \ln 2$ 만큼 늘어난다. 둘째, **같은 $V \rightarrow 2V$ 라도 등압 팽창의 ΔS 가 등온보다 크다**. 부피가 두 배 되면서 온도까지 두 배가 되므로 온도항 $nC_V \ln 2$ 가 추가로 붙기 때문이다 ($nC_V \ln 2 + nR \ln 2 = nC_P \ln 2$).

자주 하는 실수

이 장에서 학생들이 가장 많이 틀리는 한 줄. **“단열이면 $\Delta S = 0$ ”은 가역 단열일 때만 참이다**. 정의가 $dS = \delta Q_{\text{rev}}/T$ 이므로 $\Delta S = 0$ 을 보장하려면 $\delta Q = 0$ 과 **가역**이 동시에 필요하다. 진공으로의 자유팽창은 완벽히 단열($Q = 0$)이면서도 $\Delta S = nR \ln(V_2/V_1) > 0$ 이다. 실제로 흐른 열이 0이라고 해서 $\Delta S = Q/T = 0$ 으로 계산하는 순간 그 문항은 틀린다. “단열 = 등엔트로피”가 아니라 **“가역 단열 = 등엔트로피”**로 외워라.

2.4 자유팽창과 열접촉 – 비가역의 두 표준 상황

(가) 진공으로의 자유팽창(줄 팽창). 단열 용기가 칸막이로 나뉘어 한쪽에 기체, 한쪽은 진공이다. 칸막이를 열면 기체가 퍼진다. 이때

$$Q = 0 \quad (\text{단열}), \quad W = 0 \quad (\text{진공에 대해 밀 것이 없다}) \implies \Delta U = 0$$

이상기체는 U 가 온도만의 함수이므로 $\Delta U = 0$ 은 곧 T 불변을 뜻한다. 따라서

$$P_2 = \frac{nRT}{V_2} < \frac{nRT}{V_1} = P_1, \quad \Delta S = nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) > 0$$

온도는 그대로, 압력은 감소, 엔트로피는 증가가 이 상황의 세 줄 결론이다. 단원자 기체라면 분자들의 평균 운동에너지 $3k_B T/2$ 도 그대로이므로 총 운동에너지도 변하지 않는다.

(나) 열접촉. 온도 T_H 인 물체에서 T_L 인 물체로 열 Q 가 흘렀다면 (두 물체의 열용량이 아주 커서 온도 변화를 무시할 수 있을 때)

$$\Delta S_H = -\frac{Q}{T_H}, \quad \Delta S_L = +\frac{Q}{T_L}, \quad \Delta S_{\text{전체}} = Q\left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H}\right) > 0$$

부호가 전부다. 열을 내준 쪽은 음, 받은 쪽은 양, 그리고 나누는 온도가 작은 쪽이 저온이므로 합은 반드시 양수다. 이 세 줄을 그대로 묻는 문항이 매회 나온다.

온도 변화를 무시할 수 없다면(물 섞기 같은 경우) 적분을 해야 한다. 열용량 C 인 물체가 $T_i \rightarrow T_f$ 로 변하면 $\Delta S = C \ln(T_f/T_i)$ 이고, 최종 온도는 열량 보존 $\sum m_i c (T_f - T_i) = 0$ 으로 먼저 구한다.

2.5 열기관과 카르노 효율

열기관은 고온 열원에서 Q_H 를 받아 일 W 를 하고 저온 열원으로 Q_L 을 버리는 순환장치다. 한 순환에서 계의 상태가 원래대로 돌아오므로 $\Delta U = 0$, 따라서

$$W = Q_H - Q_L, \quad \eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

여기까지는 제1법칙이다. 제2법칙은 여기에 상한을 얹는다. 순환이므로 기관 자신의 $\Delta S = 0$ 이고 열원들의 엔트로피 변화만 남으므로

$$\Delta S_{\text{우주}} = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} \geq 0 \implies \frac{Q_L}{Q_H} \geq \frac{T_L}{T_H} \implies \eta \leq 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

등호가 성립하는 기관이 **카르노 기관**이다. 여기서 두 가지가 따라 나온다(카르노 정리). 두 열원 사이에서 작동하는 **모든 가역 기관의 효율은 같고, 비가역 기관의 효율은 그보다 반드시 작다**. 그리고 카르노 효율은 작업물질의 종류와 무관하게 두 온도만으로 정해진다.

카르노 기관에서는 등호가 성립하므로 다음 비례식을 그대로 쓸 수 있고, 이것이 계산 문항의 지름길이다.

열기관 계산 카드

- 제1법칙: $W = Q_H - Q_L$ - 모든 기관에 성립.
- 효율의 정의: $\eta = W/Q_H = 1 - Q_L/Q_H$ - 모든 기관에 성립.
- **카르노(가역)일 때만**: $Q_L/Q_H = T_L/T_H$, $\eta_C = 1 - T_L/T_H$.
- 온도는 반드시 **절대온도(K)**. $^{\circ}\text{C}$ 를 그대로 넣는 것이 이 유형 최대 실수다.
- 일률을 묻으면 마지막에 $P = W/t$. 한 순환의 일을 한 순환의 시간으로 나눈다.

자주 하는 실수

$\eta = 1 - T_L/T_H$ 는 **가역(카르노) 기관에만** 쓸 수 있는 식이다. 문항이 “카르노”라고 명시하지 않았다면 이 식으로 Q_L 을 구해서는 안 되고, $\eta = 1 - Q_L/Q_H$ 만 써야 한다. 반대로 “카르노”라고 적혀 있으면 $Q_L/Q_H = T_L/T_H$ 라는 **비례식**이 곧바로 주어진 것이므로, 열량 하나만 알아도 나머지가 전부 결정된다.

2.6 냉동기·열펌프와 제2법칙의 여러 진술

열기관을 거꾸로 돌리면 냉동기다. 외부에서 일 W 를 받아 저온부에서 Q_L 을 뽑아내고 고온부로 Q_H 를 버린다. 순환이므로 여기서도

$$Q_H = Q_L + W$$

이 한 줄이 냉동기 문항의 절반이다. 성능은 “얻은 것 / 지불한 것”으로 정의하는데, **무엇을 얻으려는 장치인가에 따라 두 가지로 갈린다.**

$$\text{COP}_{\text{냉동기}} = \frac{Q_L}{W}, \quad \text{COP}_{\text{열펌프}} = \frac{Q_H}{W} = \text{COP}_{\text{냉동기}} + 1$$

효율과 달리 성능계수는 **1보다 클 수 있다** – 이것은 제1법칙 위반이 아니다. W 는 열을 만드는 것이 아니라 열을 낮은 온도에서 높은 온도로 **퍼 올리는** 대가이기 때문이다.

카르노 순환을 거꾸로 돌린 이상적 냉동기에서는 $Q_L/Q_H = T_L/T_H$ 가 성립하므로

$$\text{COP}_{\text{냉동기, 최대}} = \frac{T_L}{T_H - T_L}, \quad \text{COP}_{\text{열펌프, 최대}} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

두 온도가 가까울수록 성능계수가 커진다는 것이 물리적 의미다.

제2법칙의 세 진술. 표현은 달라도 서로 완전히 동등하다.

1. **클라우지우스** – 다른 효과 없이 저온에서 고온으로 열이 스스로 이동하는 과정은 불가능하다. (완벽한 냉동기는 없다)
2. **켈빈-플랑크** – 한 열원에서 열을 받아 전부 일로 바꾸는 순환기관은 불가능하다. (제2종 영구기관은 없다)
3. **엔트로피 진술** – 고립계의 엔트로피는 감소하지 않는다. $\Delta S_{\text{우주}} \geq 0$.

자주 하는 실수

“평형에 도달한 계가 저절로 처음 상태로 돌아가지 않는 이유”를 **에너지 보존** 때문이라고 답하면 틀린다. 되돌아가는 과정도 에너지는 완벽하게 보존한다. 되돌아가지 못하는 이유는 오직 **그 역과정이 우주의 엔트로피를 감소시키기 때문이다.** 즉 제1법칙이 아니라 제2법칙이 방향을 정한다.

자주 하는 실수

성능계수를 효율과 혼동해 $\text{COP} \leq 1$ 이라고 판단하는 실수가 잦다. COP의 분모는 Q_H 가 아니라 W 이며, 값이 3, 5, 10이어도 아무 문제가 없다. 또 $Q_H = Q_L + W$ 에서 Q_H 는 항상 Q_L 과 W 를 **더한** 값이다 – 빼는 순간 부호가 뒤집힌다.

기출 문항

제2장 엔트로피·열기관·열역학 제2법칙 수록 문항 7개. 해설은 다음 절에 있다.

문제 1 2024년 제1회 · 16번 · 팽창 경로별 엔트로피 변화 비교

1 몰(mol)의 단원자 분자 이상 기체가 부피 V 에서 $2V$ 로 팽창할 때 엔트로피 변화에 대해서 옳은 것을 모두 고른 것은? (단, R 은 기체 상수이다.)

〈 보기 〉

- ㄱ. 등온 과정을 통해 팽창하면 엔트로피는 $2R$ 만큼 증가한다.
- ㄴ. 단열 과정을 통해 팽창하면 엔트로피는 $R \ln 2$ 만큼 증가한다.
- ㄷ. 등압 과정을 통해 팽창할 때가 등온 과정을 통해 팽창할 때보다 엔트로피의 증가가 크다.
- ㄹ. 자유 팽창할 때와 등온 과정을 통해 팽창할 때의 엔트로피 변화는 같다.

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

문제 2

2024년 제2회 · 16번 · 카르노 기관 효율과 일률

온도 127°C 의 고열원과 27°C 의 저열원 사이에서 작동하는 카르노 기관이 한 순환과정 당 150 J 의 열을 저열원으로 배출한다. 이 기관이 한 번 순환하는 데 0.5 s 의 시간이 걸린다면 이 기관의 일률은 얼마인가?

- ① 50 W ② 80 W ③ 100 W
④ 120 W ⑤ 150 W

문제 3 2024년 제2회 · 18번 · 단열 용기 물 열평형과 엔트로피

단열된 통에 20°C 물 50 g과 80°C 물 100 g을 넣어 섞는다. 이에 대해 올바르게 설명한 것을 모두 고르시오.

〈 보기 〉

- ㄱ. 시간이 흘러 평형상태가 되면 물의 온도는 60°C 이다.
- ㄴ. 이 과정에서 엔트로피는 증가한다.
- ㄷ. 평형 상태에 도달한 물이 다시 처음 상태로 돌아가지 않는 이유는 에너지가 보존되지 않기 때문이다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
- ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

문제 4 2025년 제1회 · 13번 · P-V 순환과정 비교

그림은 이상 기체의 상태가 변할 수 있는 과정을 나타낸 것이다.

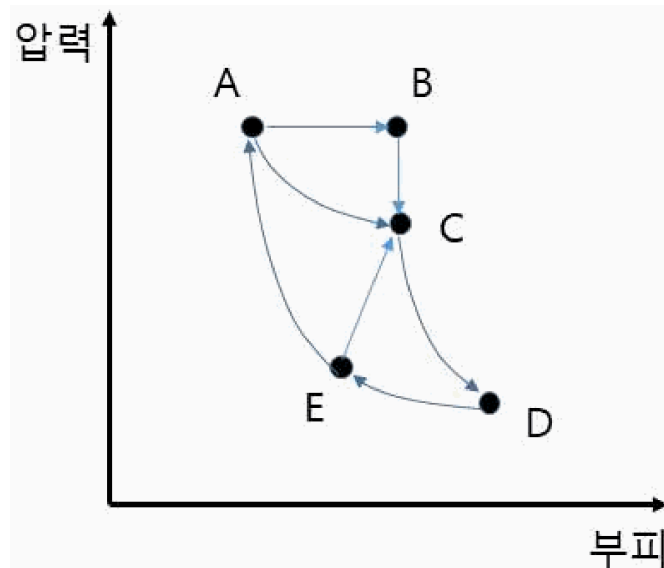
A→B: 등압 과정

B→C: 등적 과정

A→C, D→E: 등온 과정

C→D, E→A: 단열 과정

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기> 에서 있는 대로 고른 것은?



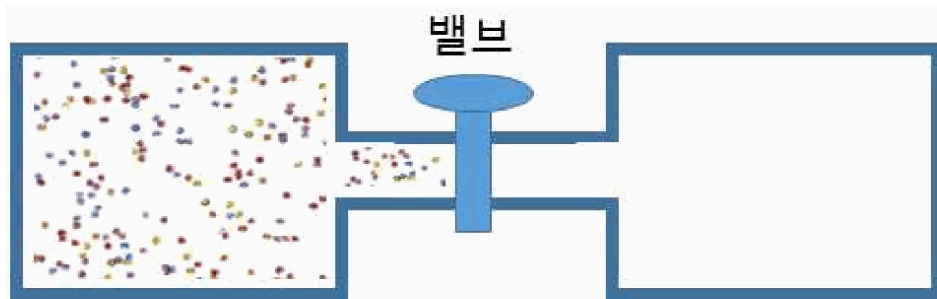
< 보기 >

- ㄱ. A→B→C 과정에서 기체에 흡수된 열은 A→C 과정에서 흡수된 열보다 많다
- ㄴ. B→C→D 과정에서 기체가 한 일은 E→A 과정에서 받은 일보다 크다.
- ㄷ. C→D→E→C 과정의 열기관의 효율은 A→C→D→E→A 과정의 효율보다 크다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄱ, ㄴ
- ⑤ ㄴ, ㄷ

문제 5 2025년 제1회 · 14번 · 진공으로의 자유팽창(줄 팽창)

그림과 같이 중간에 밸브가 있는 단열 용기의 한쪽에만 단원자 이상 기체가 들어 있고, 다른 한쪽은 진공이다. 밸브를 열면 기체가 진공인 용기 쪽으로 이동하여 평형 상태에 이르게 된다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?



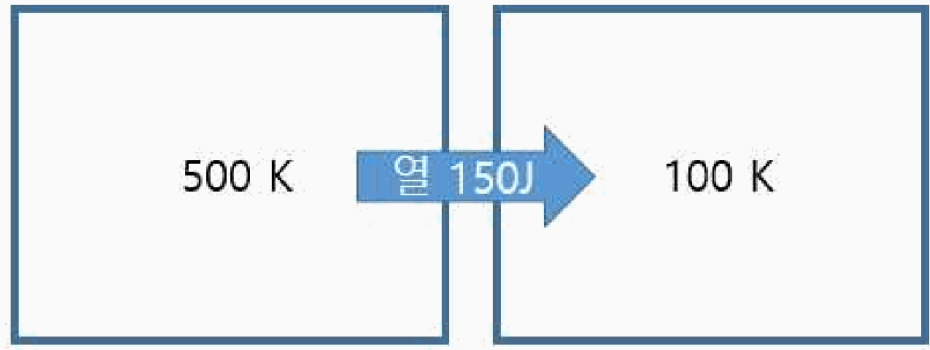
< 보기 >

- ㄱ. 밸브를 열어 평형상태가 되면 기체의 압력은 감소한다.
- ㄴ. 밸브를 열어 평형상태가 되면 기체의 운동에너지는 감소한다.
- ㄷ. 밸브를 여는 속도에 따라 최종 평형 상태의 엔트로피가 다르다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄱ, ㄴ
- ⑤ ㄴ, ㄷ

문제 6 2025년 제2회 · 13번 · 열접촉 열전달의 엔트로피 변화

외부와 단열된 두 물체(각각 500 K, 100 K)가 열접촉만 허용된 상태에서 서로 접촉하였다. 이때 고온 물체에서 저온 물체로 150 J의 열이 전달되었다. 두 물체의 열용량은 매우 커서, 과정 중 온도 변화는 무시한다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?



< 보기 >

- ㄱ. 뜨거운 물체의 엔트로피는 0.3 J/K 만큼 감소한다.
- ㄴ. 두 물체의 엔트로피의 합은 1.5 J/K 만큼 증가한다.
- ㄷ. 이 과정은 비가역 과정이다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄱ, ㄴ
- ⑤ ㄱ, ㄷ

문제 7

2026년 제1회 · 18번 · 냉동기 성능계수와 엔트로피

냉동기는 외부에서 일(W)을 공급받아 저열원에서 열(Q_L)을 흡수하고 고열원으로 열(Q_H)을 방출하는 장치이다. 냉동기의 성능은 성능계수 ($\frac{Q_L}{W}$)로 표현된다. 가역 순환 과정인 카르노 기관의 순환 과정을 거꾸로 작동시키면, 주어진 두 열원 사이에서 가능한 최대 성능계수를 갖는 이상적인 냉동기가 된다.

하나의 예로, 온도가 250 K인 저열원과 온도가 300 K인 고열원 사이에서 작동하는 냉동기가 한 주기 동안 외부에서 400 J의 일을 공급받아 저열원에서 500 J의 열을 흡수하고 고열원으로 $\tilde{Q}_H$ 의 열을 방출하는 경우를 고려하자. 이 냉동기의 성능계수는 1.25로 이상적인 냉동기가 아니다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

< 보기 >

- ㄱ. 고열원으로 방출되는 열 $\tilde{Q}_H$ 는 100 J이다.
- ㄴ. 한 주기 동안 전체 계의 엔트로피 변화는 1 J/K이다.
- ㄷ. 온도가 300 K인 고열원과 온도가 250 K인 저열원 사이에 작동하는 이상적인 냉동기의 성능계수는 5이다.

- ① ㄱ
- ② ㄴ
- ③ ㄷ
- ④ ㄱ, ㄴ
- ⑤ ㄴ, ㄷ

해설

문제 1 2024년 제1회 · 16번 · ㄷ, ㄹ - 같은 $V \rightarrow 2V$, 다른 경로

정답 ③

풀이

1몰 단원자 이상기체이므로 $n = 1$, $C_V = 3R/2$, $C_P = 5R/2$ 이고, 부피는 $V \rightarrow 2V$ 로 고정되어 있다. 네 보기 전부 다음 한 식에 대입하면 끝난다.

$$\Delta S = nC_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = C_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln 2$$

즉 **부피항 $R \ln 2$ 는 네 과정 모두 공통**이고, 오직 온도항만 과정마다 달라진다. 이 구조를 먼저 보면 계산이 거의 필요 없다.

ㄱ. 등온이면 $T_2 = T_1$ 이라 온도항이 0이다.

$$\Delta S = R \ln 2 \approx 0.69R$$

2R 이 아니다. (2R 이 되려면 $\ln(V_2/V_1) = 2$, 즉 부피가 $e^2 \approx 7.4$ 배 되어야 한다.) → 거짓

ㄴ. 여기서 말하는 단열 과정은 준정적인 **가역** 단열이므로 $\delta Q_{\text{rev}} = 0$, 따라서 $\Delta S = 0$ 이다. (검산: 가역 단열이면 $TV^{\gamma-1}$ 이 일정이라 $T_2/T_1 = 2^{-2/3}$ 이고, $C_V \ln 2^{-2/3} + R \ln 2 = -R \ln 2 + R \ln 2 = 0$ 으로 정확히 상쇄된다.) $R \ln 2$ 는 단열 팽창이 아니라 **자유팽창**의 값이며, 이 보기는 그 둘을 바꿔치기한 미끼다. → 거짓

ㄷ. 등압에서 V 가 두 배면 $PV = nRT$ 에 의해 T 도 두 배다. 온도항이 살아난다.

$$\Delta S_{\text{등압}} = C_V \ln 2 + R \ln 2 = C_P \ln 2 = \frac{5}{2} R \ln 2 \approx 1.73R$$

등온의 $R \ln 2 \approx 0.69R$ 보다 크다. → 참

ㄹ. 자유팽창은 $Q = 0$, $W = 0$ 이므로 $\Delta U = 0$, 즉 온도가 변하지 않는다. 처음 상태 (T, V) 와 나중 상태 $(T, 2V)$ 가 등온 팽창과 **완전히 동일**하고, 엔트로피는 상태함수이므로 두 과정의 ΔS 는 같다.

$$\Delta S_{\text{자유팽창}} = \Delta S_{\text{등온}} = R \ln 2$$

(우주 전체로 보면 둘은 전혀 다르다. 등온 팽창은 열원이 $-R \ln 2$ 만큼 줄어 합이 0, 자유팽창은 주위가 변하지 않아 합이 $+R \ln 2$ 다. 그러나 문항이 묻은 것은 **기체의 엔트로피 변화**다.) → 참

따라서 ㄷ, ㄹ 이므로 ③.

이 유형의 표준 절차

1. $\Delta S = nC_V \ln(T_2/T_1) + nR \ln(V_2/V_1)$ 한 줄만 적어 놓고 시작한다.
2. **부피 비가 같으면 부피항은 공통**이다. 과정을 가르는 것은 오직 온도항 T_2/T_1 이다.
3. 각 과정의 T_2/T_1 을 적는다 - 등온 1, 등압 2, 자유팽창 1, 가역 단열 $2^{-(\gamma-1)}$.
4. 자유팽창이 보이면 **등온과 같은 상태를 잇는다**는 것부터 확인한다. 두 ΔS 는 언제나 같다.
5. 크기 비교만 묻는다면 수치를 넣지 말고 $\ln 2$ 의 계수만 비교한다: $2.5 > 1 > 0$.

자주 하는 실수

ΔS 은 이 단원 최대의 함정이다. “단열이니까 $\Delta S = 0$ ”이 참인 것은 가역 단열뿐이고, “단열인데 $\Delta S = R \ln 2$ ”가 참인 것은 자유팽창이다. 문항은 이 두 값을 서로 바꿔 ΔS 에 붙여 놓았다. 보기에 “단열”이라는 단어가 보이면 반드시 가역인가 아닌가를 먼저 묻고, 진공·칸막이·자유팽창이 언급되면 $\Delta S > 0$ 을 의심하라.

풀이

가장 먼저 할 일은 섭씨를 절대온도로 바꾸는 것이다.

$$T_H = 127 + 273 = 400 \text{ K}, \quad T_L = 27 + 273 = 300 \text{ K}$$

카르노 기관이라고 명시되어 있으므로 가역이고, 따라서 두 열원과 주고받는 열은 온도에 비례한다.

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H} = \frac{300}{400} = \frac{3}{4} \Rightarrow Q_H = \frac{4}{3}Q_L = \frac{4}{3} \times 150 = 200 \text{ J}$$

한 순환에서 $\Delta U = 0$ 이므로 제1법칙이 곧 일을 준다.

$$W = Q_H - Q_L = 200 - 150 = 50 \text{ J}$$

(효율로 확인하면 $\eta = 1 - T_L/T_H = 1 - 0.75 = 0.25$ 이고 $W = \eta Q_H = 0.25 \times 200 = 50 \text{ J}$ 로 일치한다.)

마지막으로 일률은 한 순환의 일을 한 순환의 시간으로 나눈 것이다.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{50 \text{ J}}{0.5 \text{ s}} = 100 \text{ W}$$

→ ③

이 유형의 표준 절차

1. 온도를 반드시 K로 바꾼다. 127°C 를 그대로 쓰면 $\eta = 1 - 27/127$ 이라는 엉뚱한 값이 나온다.
2. “카르노 / 가역”이라는 단어를 확인한다. 있으면 $Q_L/Q_H = T_L/T_H$ 를 즉시 쓸 수 있다.
3. 주어진 열이 Q_L 인지 Q_H 인지 확인한다 – 이 문항은 **배출한 열** Q_L 을 준다.
4. $W = Q_H - Q_L$ 로 일을 구한 뒤, 일률을 물으면 마지막에 시간으로 나눈다.
5. 마지막에 무엇이든 일률인지 확인한다. $Q_L/t = 300 \text{ W}$ 나 $Q_H/t = 400 \text{ W}$ 는 **열의** 일률이지 답이 아니다. 묻는 것은 언제나 일 W 의 일률이다.

풀이

ㄱ. 단열된 통이므로 밖으로 나가는 열이 없고, 잃은 열 = 얻은 열이다. 물의 비열이 같으므로 질량으로 가중평균하면 된다.

$$T_f = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2} = \frac{50 \times 20 + 100 \times 80}{150} = \frac{9000}{150} = 60^\circ \text{C}$$

찬 물이 50 g, 더운 물이 100 g 으로 2배이므로 최종 온도는 중간값 50°C 가 아니라 더운 쪽으로 치우친 60°C 다. → 참

ㄴ. 유한한 온도차를 사이에 둔 열전달이므로 전형적인 비가역 과정이고, 엔트로피는 증가해야 한다. 실제로 계산해 보자. 물의 비열 $c = 4.19 \text{ J/(g·K)}$, 절대온도로 293 K, 353 K, 333 K 이므로

$$\Delta S = m_1 c \ln\left(\frac{333}{293}\right) + m_2 c \ln\left(\frac{333}{353}\right) = 50c(0.1279) + 100c(-0.0583) \approx +2.4 \text{ J/K} > 0$$

찬 물이 얻는 엔트로피가 더운 물이 잃는 엔트로피보다 크다. 같은 열량이라도 낮은 온도에서 주고받을 때 Q/T 가 더 크기 때문이다. → 참

ㄷ. 되돌아가지 않는 이유를 “에너지가 보존되지 않기 때문”이라고 했다. 60°C 물 150 g 이 저절로 20°C 50 g 과 80°C 100 g 으로 갈라지는 역과정도 **에너지는 완벽하게 보존한다**. 단열 용기 안이므로 제1법칙은 어느 방향으로도 위반되지 않는다. 역과정이 일어나지 않는 진짜 이유는 그것이 우주의 엔트로피를 2.4 J/K 만큼 **감소**시켜 제2법칙을 위반하기 때문이다. 방향을 정하는 것은 제1법칙이 아니라 제2법칙이다. → 거짓

따라서 ㄱ, ㄴ 이므로 ③.

자주 하는 실수

ㄷ처럼 “비가역성의 원인”을 묻는 보기는 매회 형태를 바꿔 나오며, 오답 선택지는 거의 항상 **에너지 보존**을 근거로 든다. 열역학에서 **제1법칙은 “얼마나”**를, **제2법칙은 “어느 쪽으로”**를 정한다. “저절로 일어나지 않는다 / 되돌릴 수 없다 / 한 방향으로만 진행한다”는 서술을 만나면 근거는 무조건 엔트로피지 에너지가 아니다.

풀이

먼저 상태들의 온도 관계를 정리한다. A와 C는 등온 과정으로 이어지므로 같은 온도 T_H , D와 E도 등온으로 이어지므로 같은 온도 T_L 이다. $C \rightarrow D$ 는 단열 팽창이므로 $T_L < T_H$ 다. 그리고 B는 A와 등압, C와 등적이다. 여기서 결정적인 관찰이 나온다 - $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow A$ 는 등온 2 + 단열 2로 이루어진 카르노 순환이다.

ㄱ. A와 C는 온도가 같으므로 어느 경로로 가든 $\Delta U = 0$ 이고, 제1법칙에 의해 $Q = W$ 다. 따라서 흡수한 열의 비교는 곧 $P-V$ 곡선 아래 넓이의 비교가 된다.

$$Q_{A \rightarrow B \rightarrow C} = W_{AB} + W_{BC} = P_A(V_C - V_A) + 0$$

$$Q_{A \rightarrow C} = \int_{V_A}^{V_C} P dV = nRT_H \ln\left(\frac{V_C}{V_A}\right)$$

$A \rightarrow B$ 는 압력을 P_A 로 유지한 채 V_A 에서 V_C 까지 가는 직사각형 넓이이고, $A \rightarrow C$ 등온선은 A를 지난 뒤 곧바로 P_A 아래로 내려간다. 같은 구간에서 위쪽 경로의 넓이가 더 크다. (수치 예: $T_H = 400$, $V_A = 1$, $V_C = 3$ 으로 잡으면 $Q_{ABC} = 800$, $Q_{AC} = 400 \ln 3 \approx 439$.) → 참

ㄴ. $B \rightarrow C$ 는 등적이라 일이 0이고, $C \rightarrow D$ 는 단열이므로 기체가 한 일은 내부에너지 감소분과 같다.

$$W_{B \rightarrow C \rightarrow D} = 0 + (-\Delta U_{CD}) = nC_V(T_H - T_L)$$

$E \rightarrow A$ 도 단열이므로 기체가 받은 일은 내부에너지 증가분과 같다.

$$W_{\text{받은}, E \rightarrow A} = \Delta U_{EA} = nC_V(T_H - T_L)$$

두 값이 정확히 같다. 카르노 순환에서 두 단열 과정의 일이 크기가 같아 상쇄된다는 것은 카르노 효율 유도의 핵심 단계이기도 하다. “크다”는 서술은 틀렸다. → 거짓

ㄷ. 비교 대상은 (i) $C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow C$ 와 (ii) $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow A$ 이다. (ii)는 위에서 확인했듯 T_H 와 T_L 사이의 카르노 순환이므로 $\eta_2 = 1 - T_L/T_H$ 이고, 이것은 두 온도 사이에서 가능한 최대 효율이다. (i)의 최고 온도는 $T_C = T_H$, 최저 온도는 T_L 로 같으므로 (i)의 효율은 결코 (ii)를 넘을 수 없다.

조금 더 정밀하게 보자. (i)에서 열을 흡수하는 구간은 $E \rightarrow C$ 하나뿐인데, 그 구간의 온도는 T_L 에서 T_H 까지 올라가는 중이라 줄곧 T_H 보다 낮다. 순환이므로 $\oint \delta Q/T = 0$ 이고

$$\frac{Q_{\text{방출}}}{T_L} = \int_{E \rightarrow C} \frac{\delta Q}{T} > \frac{Q_{\text{흡수}}}{T_H} \implies \frac{Q_{\text{방출}}}{Q_{\text{흡수}}} > \frac{T_L}{T_H} \implies \eta_1 < 1 - \frac{T_L}{T_H} = \eta_2$$

(수치 예로 $E \rightarrow C$ 를 직선으로 두고 계산하면 $\eta_1 \approx 0.31$, $\eta_2 = 0.50$.) → 거짓

따라서 ㄱ 뿐이므로 ①.

자주 하는 실수

ㄷ을 “작은 순환이니가 효율이 낮겠지” 같은 크기 직관으로 찍으면 다음 문항에서 반드시 틀린다. 효율은 순환의 넓이가 아니라 열을 흡수한 평균 온도와 방출한 평균 온도의 비로 정해진다. 같은 두 온도 사이라면 등온에서 흡수하고 등온에서 방출하는 카르노가 항상 최대이고, 흡수 구간의 온도가 조금이라도 T_H 보다 낮아지면 효율은 그만큼 떨어진다.

풀이

단열 용기 + 진공 + 밸브 = **자유팽창(줄 팽창)**이다. 시작은 언제나 이 두 줄이다.

$$Q = 0 \text{ (단열)}, W = 0 \text{ (진공을 밀 필요가 없다)} \Rightarrow \Delta U = Q - W = 0$$

이상기체는 U 가 온도만의 함수이므로 $\Delta U = 0$ 은 곧 **온도 불변**이다.

ㄱ. 온도가 그대로인데 부피는 커졌으므로

$$P_2 = \frac{nRT}{V_2} < \frac{nRT}{V_1} = P_1$$

압력은 감소한다. → 참

ㄴ. 단원자 이상기체의 내부에너지는 분자들의 병진 운동에너지 총합 그 자체다.

$$U = \frac{3}{2}nRT = N\left(\frac{3}{2}k_B T\right)$$

T 가 변하지 않았으므로 운동에너지도 변하지 않는다. “팽창했으니 식었겠지”는 **외부에 일을 해 주며** 팽창하는 단열 팽창의 이야기이고, 자유팽창은 밀어낼 상대가 없어 일을 하지 않는다. → 거짓

ㄷ. 엔트로피는 **상태함수**다. 밸브를 빨리 열든 천천히 열든 최종 평형 상태는 같은 온도 T , 같은 전체 부피 V_2 이므로

$$\Delta S = \underbrace{nC_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}_{=0 \text{ (} T_2=T_1 \text{)}} + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

로 항상 같은 값이다. 밸브를 여는 속도는 **도중의** 비평형 상태를 바꿀 뿐, 처음과 나중 상태를 바꾸지 않는다. → 거짓

따라서 ㄱ 뿐이므로 ①.

자주 하는 실수

자유팽창은 이 장에서 유일하게 $Q = 0$ **이면서** $\Delta S > 0$ 인 표준 상황이다. $\Delta S = Q/T = 0$ 으로 계산하면 즉시 틀린다. 정의가 δQ_{rev} 이므로 실제로 흐른 열이 아니라 **같은 두 상태를 잇는 가역 경로**의 열을 써야 하고, 그 가역 경로(등온 팽창)에서는 $Q_{\text{rev}} = nRT \ln(V_2/V_1) \neq 0$ 이다. 같은 이유로 ㄷ처럼 “과정을 어떻게 하느냐에 따라 ΔS 가 달라진다”는 서술은 언제나 거짓이다.

풀이

열용량이 매우 커서 온도가 변하지 않으므로, 두 물체 각각에 대해 $\Delta S = Q/T$ 를 그대로 쓸 수 있다.

$$Q = 150 \text{ J}, T_H = 500 \text{ K}, T_L = 100 \text{ K}.$$

ㄱ. 뜨거운 물체는 열을 **내주므로** 부호가 음이다.

$$\Delta S_H = -\frac{Q}{T_H} = -\frac{150}{500} = -0.3 \text{ J/K}$$

0.3 J/K 만큼 감소한다. → 참

ㄴ. 차가운 물체는 같은 열을 받으므로

$$\Delta S_L = +\frac{Q}{T_L} = +\frac{150}{100} = +1.5 \text{ J/K}$$

여기까지만 보고 ㄴ을 참으로 고르기 쉽다. 그러나 ㄴ이 말하는 것은 **두 물체의 엔트로피의 합**이다.

$$\Delta S_{\text{전체}} = -0.3 + 1.5 = +1.2 \text{ J/K}$$

1.5 는 차가운 물체 **하나만**의 값이다. → 거짓

ㄷ. 우주 전체의 엔트로피가 1.2 J/K 만큼 증가했으므로 이 과정은 비가역이다. 물리적으로도 500 K 와 100 K 라는 유한한 온도차를 사이에 둔 열전달이라 명백한 비가역 과정이며, 역과정(100 K 에서 500 K 로 저절로 열이 흐르는 것)은 클라우지우스 진술에 정면으로 위배된다. → 참

따라서 ㄱ, ㄷ 이므로 ⑤.

자주 하는 실수

이 문항의 오답 ④(ㄱ, ㄴ)는 $\Delta S_L = 1.5 \text{ J/K}$ 를 계산해 놓고 그것을 “합”이라고 읽어 버린 학생을 정확히 겨냥한 것이다. 문항이 **한 물체의 변화**를 묻는지 **합(전체·우주)**을 묻는지 매번 밑줄을 긋고 확인하라. 그리고 합은 언제 나 **작은 온도로 나눈 값이 이겨서** 양수가 된다 $-Q(1/T_L - 1/T_H) > 0$ 이 그 구조다.

풀이

냉동기의 골격은 두 줄이다. 저열원에서 Q_L 을 뽑고 일 W 를 받아 고열원으로 Q_H 를 버린다.

$$\tilde{Q}_H = Q_L + W, \quad \text{COP} = \frac{Q_L}{W}$$

주어진 값은 $T_L = 250 \text{ K}$, $T_H = 300 \text{ K}$, $W = 400 \text{ J}$, $Q_L = 500 \text{ J}$ 이다.

ㄱ. 순환이므로 냉동기 자신의 내부에너지 변화는 0이고, 들어온 에너지는 전부 나가야 한다.

$$\tilde{Q}_H = Q_L + W = 500 + 400 = 900 \text{ J}$$

100 J 은 Q_L 과 W 를 뺀 값이다. 냉동기에서 고열원으로 나가는 열은 언제나 저열원에서 뽑은 열보다 **많다**(그래야 일이 열로 바뀐 몫까지 버려진다). → **거짓**

ㄴ. 전체 계 = 저열원 + 고열원 + 냉동기다. 냉동기는 순환하므로 $\Delta S = 0$ 이고, 두 열원만 계산하면 된다.

$$\Delta S_L = -\frac{Q_L}{T_L} = -\frac{500}{250} = -2 \text{ J/K}, \quad \Delta S_H = +\frac{\tilde{Q}_H}{T_H} = +\frac{900}{300} = +3 \text{ J/K}$$

$$\Delta S_{\text{전체}} = -2 + 3 = +1 \text{ J/K}$$

문항이 “이상적인 냉동기가 아니다”라고 밀줄까지 그어 준 것이 바로 이 뜻이다 – 가역이었다면 $\Delta S_{\text{전체}} = 0$ 이어야 한다. → **참**

ㄷ. 두 열원 사이 이상적(카르노) 냉동기의 성능계수는 $Q_L/Q_H = T_L/T_H$ 를 넣어 얻는다.

$$\text{COP}_{\text{max}} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{250}{300 - 250} = 5$$

실제 냉동기의 $\text{COP} = 500/400 = 1.25$ 이므로 한계값 5보다 한참 작고, 따라서 이 기관이 이상적이지 않다는 문항의 서술과도 일치한다. → **참**

따라서 ㄴ, ㄷ 이므로 ⑤.

냉동기 문항 점검표

1. $Q_H = Q_L + W$ 를 먼저 적는다. 부호를 틀리면 이후 엔트로피가 전부 어긋난다.
2. $\text{COP} = Q_L/W$ (냉동기), Q_H/W (열펌프). 두 값의 차이는 정확히 1이다.
3. $\Delta S_{\text{전체}} = -Q_L/T_L + Q_H/T_H$. 기관 자신은 순환이라 0.
4. 계산한 $\Delta S_{\text{전체}}$ 가 0 이면 이상적(가역), > 0 이면 실제 기관, < 0 이면 **불가능한 기관**이다.
5. 한계값은 $\text{COP}_{\text{max}} = T_L/(T_H - T_L)$. 실제 COP 가 이 값을 넘는 보기는 무조건 거짓이다.

이 장의 요약

1. **상태함수** – ΔS 는 처음·나중 상태만으로 정해진다. 비가역 과정이면 실제 경로를 버리고 같은 두 상태를 잇는 가역 경로로 계산한다. 자유팽창과 등온팽창의 ΔS 가 같은 이유가 이것이다.
2. **단열 ≠ 등엔트로피** – $\Delta S = 0$ 은 **가역** 단열에서만 참이다. 자유팽창은 $Q = 0$ 인데도 $\Delta S = nR \ln(V_2/V_1) > 0$. 이 장 최대의 함정이다.

3. **한 줄 공식** – $\Delta S = nC_V \ln(T_2/T_1) + nR \ln(V_2/V_1)$. 같은 $V \rightarrow 2V$ 라도 등압 $2.5R \ln 2 >$ 등온·자유팽창 $R \ln 2 >$ 가역 단열 0.
4. **열전달** – 부호를 붙여 더하는 것이 전부다. 내준 쪽 $-Q/T_H$, 받은 쪽 $+Q/T_L$, 합은 $Q(1/T_L - 1/T_H) > 0$. “한 물체”인지 “합”인지 문항의 단어를 확인하라.
5. **기관과 냉동기** – 제1법칙은 $W = Q_H - Q_L$, $Q_H = Q_L + W$. 제2법칙은 상한 $\eta \leq 1 - T_L/T_H$, $\text{COP} \leq T_L/(T_H - T_L)$. 등호는 카르노(가역)뿐이고, 온도는 반드시 절대온도로 넣는다.