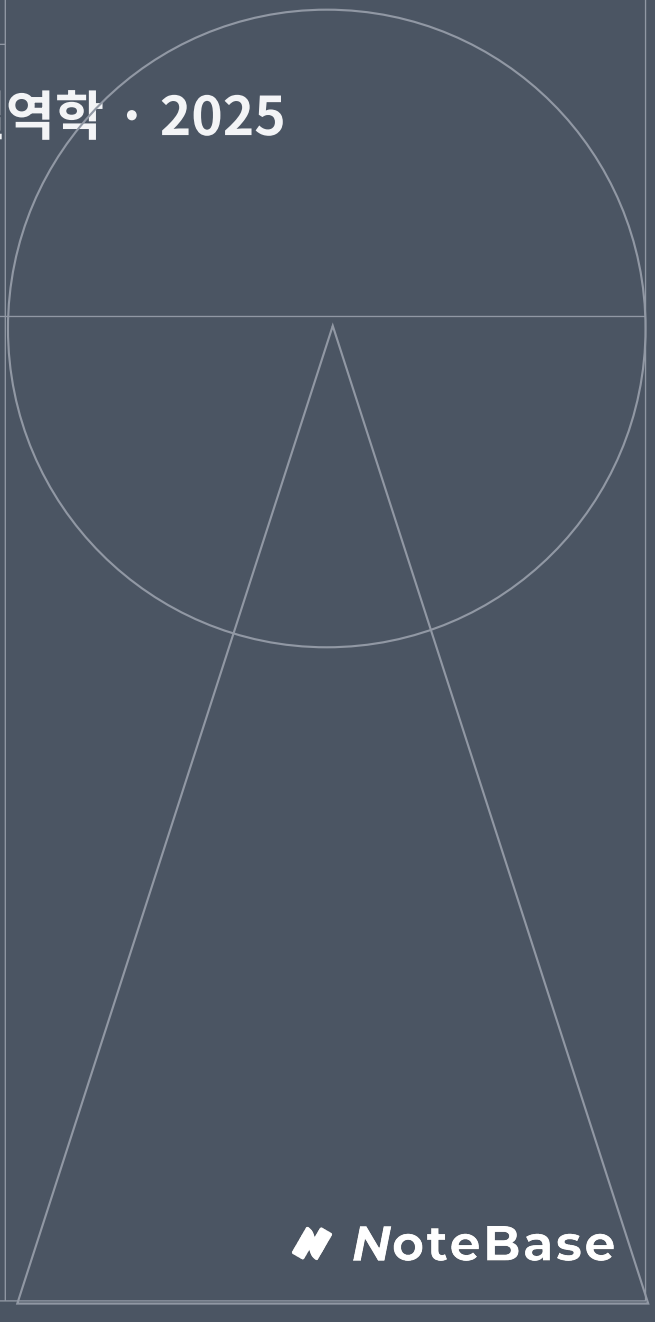
기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 화공열역학 · 2025



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 화공열역학 · 2025

공무원/서울시/7급 · 화공열역학 · 2025

문 1. 이상기체 2mol이 260K 온도의 풍선에 들어있다. 풍선의 부피가 2.2배 증가하고, 압력은 반으로 감소할 때, 기체의 최종온도[K]는? (단, 풍선은 닫힌계로 가정한다.)

① 246

② 286

③ 326

④ 366

정답 2번

출제 포인트

이상기체 상태방정식 PV = nRT를 이용해 초기 상태와 최종 상태를 비교하여 최종 온도를 구한다.

조건 정리

초기 온도 T_1 = 260K, 최종 부피 V_2 = 2.2 V_1, 최종 압력 P_2 = 0.5P_1. 몰수와 기체상수 R은 변하지 않는다(단힌계).

사용할 공식

이상기체 상태방정식: $PV = nRT$
두 상태의 비: $\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2V_2}{P_1V_1}$

계산 과정

$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2V_2}{P_1V_1} = \frac{0.5P_1 \times 2.2V_1}{P_1V_1} = 0.5 \times 2.2 = 1.1$
따라서 $T_2 = 1.1 \times 260 = 286$ K

선지 판단

① 246K — 부피·압력 비를 0.5 × 2.2 = 1.1이 아닌 다른 값으로 계산하면 나오는 오답.
② 286K — PV = nRT 비례식 정확 적용, 1.1 × 260 = 286K. 정답.
③ 326K — 부피 증가 계수를 2.5로 잘못 적용하거나 압력 변화를 무시할 때 나오는 오답.
④ 366K — 압력이 반으로 감소한 것을 간과하고 부피 2.2배만 적용할 때 나오는 오답.

NoteBase

오답 포인트

①③④ 모두 P_2V_2 / (P_1V_1) 비를 잘못 계산한 경우다. 특히 ④는 압력 변화를 빠뜨리고 2.2배만 곱해 $T_2 = 2.2 \times 260 \approx 572$K쯤을 예상하다 착각하거나, 기타 산술 오류에서 발생한다. 단위에 주의할 것 — 온도 비 계산은 반드시 절대온도(K)로 수행해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

이상기체 문제에서 온도·압력·부피가 동시에 변하면, 몰수가 일정할 때 $T_2 = T_1 \times \frac{P_2}{P_1} \times \frac{V_2}{V_1}$ 한 공식으로 풀면 된다. 각 변화 비율(압력 비 × 부피 비)을 먼저 곱한 뒤 초기 온도를 곱한다.

암기 포인트

이상기체 온도 비 공식: $\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2V_2}{P_1V_1}$. 압력이 절반(× 0.5), 부피가 2.2배(× 2.2)이면 온도 비 = 0.5 × 2.2 = 1.1 → $T_2 = 1.1 \times T_1$. 풍선처럼 압력과 부피가 동시에 바뀌는 문제에서 자주 출제된다.

NoteBase

문 2. 순수한 물질의 상평형에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

① 두 가지 상이 평형을 이루고 있는 상태에서, 압력이 일정할 때 온도를 임의로 변화시킬 수 없다.

② 삼중점에서 깁스 상률에 의한 자유도는 0이다.

③ 압력이 임계 압력보다 높을 때 기체와 액체는 공존할 수 있다.

④ PT 상평형도에서, 물의 용융 곡선은 임계 압력 이하의 영역에서 음의 기울기를 갖는다.

정답 3번

출제 포인트

깁스 상률(Gibbs Phase Rule)을 이용한 자유도 계산과, 임계점 이상 영역에서의 상거동(초임계 상태)을 이해하고 있는지 묻는 문제다. 발문이 '옳지 않은 것'이므로 틀린 선지 하나를 골라야 한다.

핵심 개념

깁스 상률: $F = C - P + 2$ (C=성분 수, P=공존 상 수, F=자유도).
순수한 물질은 C=1이므로 $F = 3 - P$.
· 두 상 공존: P=2 → F=1 (압력·온도 중 하나만 독립)
· 삼중점: P=3 → F=0 (압력·온도 모두 고정)
임계점: 기체-액체 경계선이 끝나는 점. 임계 압력·임계 온도를 동시에 초과하면 초임계 유체(supercritical fluid) 상태로, 기체와 액체의 구분이 사라진다. 기체와 액체가 별개로 '공존'하는 상태는 임계점 이하에서만 가능하다.
물의 융해 곡선(고체-액체 경계): 물은 얼음보다 밀도가 높으므로, 압력이 증가하면 녹는점이 낮아진다 → PT 상평형도에서 음(-)의 기울기.

선지별 해설

① [O] 두 상 평형(P=2)에서 자유도 F=1. 압력을 일정하게 고정하면 자유도를 하나 소비하므로 F=0이 되어 온도도 고정된다. 따라서 압력이 일정할 때 온도를 임의로 변화시킬 수 없다 — 옳다.
② [O] 삼중점에서 P=3이므로 $F = 1 - 3 + 2 = 0$. 자유도 0 — 옳다.
③ [X] 임계 압력보다 높은 조건에서는 기체와 액체의 경계가 존재하지 않아 초임계 유체 상태가 된다. 기체와 액체가 공존하는 것이 아니라, 두 상의 구분 자체가 사라진다. '공존할 수 있다'는 설명은 틀리다.
④ [O] 물의 융해 곡선은 압력이 높아질수록 녹는점이 낮아지므로 PT 도에서 음의 기울기를 갖는다. 이 곡선은 삼중점(약 611 Pa)부터 매우 높은 압력까지 이어지며, 임계 압력(약 22.1 MPa) 이하 영역에서 음의 기울기를 갖는다 — 옳다.

NoteBase

오답 포인트

③번 오답 선택의 함정: '임계 압력보다 높으면 기체와 액체가 공존한다'는 표현이 그럴듯해 보이지만, 임계점 이상에서는 상 경계선 자체가 없다. 기체·액체가 공존하는 2상 영역은 임계점 이하에서만 나타난다. 임계점을 넘으면 하나의 초임계 상(phase)만 존재한다.

다시 나오면 이렇게 판단

상평형 문제에서 '임계점 이상'이 나오면 항상 '초임계 유체 = 기체·액체 구분 없음'으로 연결한다. 깁스 상률 자유도 계산은 $F = C - P + 2$에 숫자를 바로 대입해 0·1·2 중 무엇인지 확인한다. 물의 융해 곡선 기울기는 '물이 얼음보다 무거우므로 압력 증가 → 녹음 → 음의 기울기'로 외운다.

암기 포인트

깁스 상률 $F = C - P + 2$: 순수 물질(C=1)에서 두 상=자유도 1, 삼중점=자유도 0.
임계점 이상: 초임계 유체(기체·액체 구분 소멸, 공존 불가).
물의 융해 곡선: 음의 기울기(압력↑ → 녹는점↓). 대부분의 물질은 양의 기울기이므로 물은 예외로 기억.

NoteBase

문 3. 해안가에 설치된 풍력발전기 주변에서 정상상태의 바람이 $10\mathrm{ms}^{-1}$로 불고 있다. 풍력 터빈이 $1{,}000\mathrm{kgs}^{-1}$의 바람을 이용할 때, 발전기가 발생시킬 수 있는 최대 일률의 크기[kW]는?

① 5

② 50

③ 500

④ 5,000

정답 2번

출제 포인트

정상상태 에너지 방정식(SSEE)에서 유체의 운동에너지를 일률(파워)로 변환하는 계산 문제다. 풍력발전기가 바람의 운동에너지를 전부 일로 변환할 수 있다고 가정할 때 최대 일률을 구한다.

조건 정리

바람 속도 v = 10m/s, 질량 유량 m_dot = 1, 000kg/s. 구하는 것: 최대 일률 W_dot [kW].

사용할 공식

정상상태에서 유체가 갖는 운동에너지의 단위시간당 양, 즉 일률은 $\dot{W} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2$이다. 여기서 $\dot{m}$은 질량 유량[kg/s], v는 유속[m/s]이다.

계산 과정

$\dot{W} = \frac{1}{2} \times 1000 \times (10)^2 = \frac{1}{2} \times 1000 \times 100 = 50{,}000\ \mathrm{W} = 50\ \mathrm{kW}$

선지 판단

① 5 kW — 오답. 속도를 제곱하지 않고 v=10을 그대로 대입하거나 계수 오류일 때 나오는 값이다.
② 50 kW — 정답. $\frac{1}{2} \times 1000 \times 100 = 50{,}000\ \mathrm{W} = 50\ \mathrm{kW}$.
③ 500 kW — 오답. $\frac{1}{2}$ 계수를 빠뜨리고 $\dot{m}v^2 = 100{,}000\ \mathrm{W}$로 계산하거나 단위 환산 오류 시 나올 수 있는 값이다.
④ 5,000 kW — 오답. $\frac{1}{2}$ 계수 누락 + 단위 미환산 등 복합 오류 시 나오는 값이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수 두 가지: (1) v를 제곱하지 않아 $\frac{1}{2} \times 1000 \times 10 = 5{,}000\ \mathrm{W}$로 계산, (2) $\frac{1}{2}$ 계수를 생략해 100,000 W → 100 kW로 오산. 단위 환산(W → kW, ÷1000)도 반드시 확인한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

풍력·수력 등 유체 기계의 '최대 일률' 문제가 나오면 $\dot{W} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2$ 공식을 즉시 적용한다. 질량 유량과 속도 두 값만 주어지면 이 공식 하나로 풀린다. W를 kW로 환산(÷1000)하는 것을 잊지 않는다.

암기 포인트

유체 운동에너지 일률: $\dot{W} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2$. 이 식은 정상상태 에너지 방정식(SSEE)에서 위치에너지·엔탈피 변화 무시, 속도 항만 남긴 결과다. 1 W = 1J/s = 1 kg·m^2/s^{3}이므로 단위가 자동으로 맞는다.

NoteBase

문 4. 마찰이 거의 없도록 단면적이 변화되는 노즐에서 유체가 가역적으로 흐르고 있을 때, 노즐 흐름의 특성으로 가장 옳은 것은?

① 흐름이 아음속일 경우, 수렴부에서는 흐름방향으로 압력이 증가한다.

② 흐름이 아음속일 경우, 발산부에서는 흐름방향으로 속도가 증가한다.

③ 흐름이 초음속일 경우, 수렴부에서는 흐름방향으로 압력이 증가한다.

④ 흐름이 초음속일 경우, 발산부에서는 흐름방향으로 속도가 감소한다.

정답 3번

출제 포인트

마찰 없는(등엔트로피) 가역 노즐에서 마하수(아음속·초음속)에 따라 수렴부·발산부의 속도와 압력이 어떻게 변하는지를 면적-속도 관계식으로 판단하는 문제다.

핵심 개념

연속방정식과 운동량 방정식을 결합하면 면적-속도 관계식 $\frac{dA}{A} = (M^2 - 1)\frac{dV}{V}$ 을 얻는다. 오일러 방정식 $dP = -\rho V dV$ 에서 속도가 증가하면 압력은 감소하고, 속도가 감소하면 압력은 증가한다.

아음속(M < 1): $M^2 - 1 < 0$
- 수렴부(dA < 0) → dV > 0(속도 증가), dP < 0(압력 감소)
- 발산부(dA > 0) → dV < 0(속도 감소), dP > 0(압력 증가)

초음속(M > 1): $M^2 - 1 > 0$
- 수렴부(dA < 0) → dV < 0(속도 감소), dP > 0(압력 증가)
- 발산부(dA > 0) → dV > 0(속도 증가), dP < 0(압력 감소)

NoteBase

기출OX 해설집 · 공무원/서울시/7급 · 화공열역학 · 2025

선지별 해설

① 아음속, 수렴부 → 압력이 증가한다 (X)
아음속 수렴부는 $M^2 - 1 < 0$, dA<0이므로 dV>0(속도 증가). 오일러 방정식에 의해 dP<0(압력 감소). '증가'는 틀린 표현 → 올바른 표현은 '압력이 감소한다'.

② 아음속, 발산부 → 속도가 증가한다 (X)
아음속 발산부는 dA>0이므로 dV<0(속도 감소). 아음속 발산부는 디퓨저로 작동해 속도가 줄고 압력이 회복된다. '증가'는 틀린 표현 → 올바른 표현은 '속도가 감소한다'.

③ 초음속, 수렴부 → 압력이 증가한다 (O)
초음속 수렴부는 $M^2 - 1 > 0$, dA<0이므로 dV<0(속도 감소). 속도가 감소하면 dP>0(압력 증가). 초음속 유동에서 수렴부는 아음속과 반대로 작동하여 속도를 줄이고 압력을 높인다. 옳은 설명.

④ 초음속, 발산부 → 속도가 감소한다 (X)
초음속 발산부는 dA>0, $M^2 - 1 > 0$이므로 dV>0(속도 증가). 초음속 발산부는 노즐로 작동해 속도가 더 빨라진다. '감소'는 틀린 표현 → 올바른 표현은 '속도가 증가한다'.

오답 포인트

아음속과 초음속에서 수렴/발산의 역할이 뒤바뀐다는 점을 혼동하기 쉽다. 아음속에서는 수렴=가속·발산=감속이지만, 초음속에서는 수렴=감속·발산=가속으로 정반대다. ①번은 아음속 수렴부를 초음속 수렴부처럼 오해한 함정이고, ②번은 아음속 발산부에서 속도 증가라는 직관적 오류(확대하면 빨라질 것 같다는 착각)를 노린 함정이다. ④번은 초음속 발산부를 아음속 발산부(디퓨저)처럼 잘못 적용한 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

1단계: 마하수 조건(아음속/초음속)을 확인한다.
2단계: 면적 변화(수렴/발산)를 확인한다.
3단계: $\frac{dA}{A} = (M^2 - 1)\frac{dV}{V}$ 에 대입해 dV의 부호를 구한다.
4단계: dP와 dV는 반대 부호임을 적용해 압력 변화를 구한다.
속도·압력 중 어느 쪽을 묻는지 발문을 다시 확인하고, 부호 오류 없이 정리하면 된다.

암기 포인트

아음속: 수렴→가속·감압 / 발산→감속·승압 (일상적인 호스 직관과 일치)
초음속: 수렴→감속·승압 / 발산→가속·감압 (아음속과 정반대)

로켓 엔진 노즐(드라발 노즐)은 수렴부로 아음속을 가속시켜 마하 1에 도달시킨 뒤, 발산부로 초음속까지 추가 가속한다는 사실을 이미지로 기억해 두면 초음속 발산부가 '가속'임을 잊지 않는다.

NoteBase

문 5. 과잉 Gibbs 에너지(G^E)가 <보기>와 같이 주어질 때, 과잉 등압 열용량(C_P^E)의 값[$\mathrm{J mol^{-1} K^{-1}}$]은? (단, $R = 8 \mathrm{J mol^{-1} K^{-1}}$이고 b와 c는 상수이다.)

<보기>

$G^E = -\frac{R}{4}(T\ln T - T) + bT + c$

① 2

② 4

③ 8

④ 10

정답 1번

출제 포인트

과잉 Gibbs 에너지 G^E의 온도 의존성으로부터 과잉 등압 열용량 C_p^E를 유도하는 열역학 관계식을 묻는다. $C_p^E = -T\left(\frac{\partial^2 G^E}{\partial T^2}\right)_P$ 공식을 정확히 적용할 수 있는지가 핵심이다.

조건 정리

$G^E = -\frac{R}{4}(T\ln T - T) + bT + c$, R = 8 J $\mathrm{mol^{-1}}$ $\mathrm{K^{-1}}$, b와 c는 상수(상수는 T 미분 시 소거됨).

사용할 공식

과잉 등압 열용량과 과잉 Gibbs 에너지의 관계: $C_p^E = -T\left(\frac{\partial^2 G^E}{\partial T^2}\right)_P$. 유도 경로: $S^E = -\left(\frac{\partial G^E}{\partial T}\right)_P \rightarrow H^E = G^E + TS^E \rightarrow C_p^E = \left(\frac{\partial H^E}{\partial T}\right)_P$. 두 경로 모두 같은 결과를 준다.

계산 과정

1단계 — G^E를 T로 1차 미분한다.
$\frac{\partial}{\partial T}(T\ln T) = \ln T + 1$이므로
$\frac{\partial G^E}{\partial T} = -\frac{R}{4}(\ln T + 1 - 1) + b = -\frac{R}{4}\ln T + b$

2단계 — 2차 미분한다.
$\frac{\partial^2 G^E}{\partial T^2} = -\frac{R}{4} \cdot \frac{1}{T}$

3단계 — C_p^E를 계산한다.
$C_p^E = -T \cdot \left(-\frac{R}{4T}\right) = \frac{R}{4} = \frac{8}{4} = 2 \mathrm{\ J\ mol^{-1} K^{-1}}$

NoteBase

선지 판단

① 2 — $\frac{R}{4} = \frac{8}{4} = 2$. 옳다. (정답)
② 4 — $\frac{R}{2}$에 해당. $-T\frac{\partial^2 G^E}{\partial T^2}$를 $\frac{R}{2T} \cdot T$로 잘못 계산한 경우에 나오는 오답.
③ 8 — R 전체 값. 분모 4를 누락하거나 미분 없이 계수만 읽은 오답.
④ 10 — 계산 과정의 산술 오류에 해당하는 오답.

오답 포인트

$\frac{\partial}{\partial T}(T\ln T) = \ln T + 1$임을 잊고 $\frac{1}{T} \cdot T = 1$만 남겨 계수 오류가 생기기 쉽다. 또한 1차 미분 후 $-T$를 곱하는 단계에서 T가 약분되어 상수 $\frac{R}{4}$만 남는 것을 놓치면 ③ 8 또는 ④ 10을 고를 수 있다. b와 c는 미분 후 소거됨을 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

G^E가 주어지고 C_p^E 또는 H^E를 구하라는 문제가 나오면 $C_p^E = -T\frac{\partial^2 G^E}{\partial T^2}$ 공식을 즉시 적용한다. $T\ln T$의 미분은 $\ln T + 1$임을 반드시 확인하고, 2차 미분 시 T가 분모에 남아 $-T\cdot$와 약분됨을 의식적으로 추적한다.

암기 포인트

$C_p^E = -T\left(\frac{\partial^2 G^E}{\partial T^2}\right)_P$. $\frac{d}{dT}(T\ln T) = \ln T + 1$, $\frac{d^2}{dT^2}(T\ln T) = \frac{1}{T}$. $-T \cdot \frac{1}{T} = 1$(T 약분). 따라서 $T\ln T$ 항에 곱해진 계수가 곧 C_p^E가 된다.

NoteBase

문 6. 열기관이 500K의 고온 열 저장고에서 열($|Q_H|$)을 흡수하여 295K의 저온 열 저장고로 열 ($|Q_C| = 1{,}000\text{kW}$)을 방출하며 일을 생산한다. 열기관의 효율이 최댓값의 60%라고 할 때, 열기관이 생산하는 일에 가장 가까운 값[kW]은?

① 126

② 226

③ 326

④ 426

정답 3번

출제 포인트

카르노 효율 공식과 열기관 에너지 보존을 결합하여 실제 일을 구하는 문제다. 효율이 '최댓값의 60%'라는 표현이 카르노 효율 × 0.6임을 정확히 파악해야 한다.

조건 정리

고온 열저장고 온도 $T_H = 500$ K, 저온 열저장고 온도 $T_C = 295$ K, 저온으로 방출하는 열 $|Q_C| = 1{,}000$ kW, 실제 효율 = 카르노 효율의 60%.

사용할 공식

카르노(최대) 효율: $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$
실제 효율: $\eta = 0.60 \times \eta_{Carnot}$
에너지 보존: $Q_H = W + Q_C$
효율 정의: $\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$

NoteBase

계산 과정

① 카르노 효율 계산
$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{295}{500} = 1 - 0.59 = 0.41$

② 실제 효율 계산
$\eta = 0.60 \times 0.41 = 0.246$

③ 고온 열원에서 흡수하는 열 $|Q_H|$ 계산
$\eta = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$ 이므로
$|Q_H| = \frac{|Q_C|}{1-\eta} = \frac{1{,}000}{1-0.246} = \frac{1{,}000}{0.754} \approx 1{,}326$ kW

④ 생산하는 일 W 계산
$W = |Q_H| - |Q_C| = 1{,}326 - 1{,}000 = 326$ kW

선지 판단

① 126 kW → 틀림. 카르노 효율을 그대로 효율로 쓰거나 잘못된 수식을 적용했을 때 나오는 오답이다.
② 226 kW → 틀림. 중간 계산 실수(예: 온도비를 거꾸로 적용)로 나오는 오답이다.
③ 326 kW → 맞음. 카르노 효율 0.41의 60%인 0.246을 실제 효율로 적용하면 $|Q_H| \approx 1{,}326$ kW, $W = 326$ kW.
④ 426 kW → 틀림. $|Q_C|$와 $|Q_H|$의 역할을 혼동하거나 효율 식을 잘못 세울 때 나온다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 '최댓값의 60%'를 무시하고 카르노 효율 0.41을 그대로 실제 효율로 쓰는 것이다. 이 경우 $|Q_H| = 1{,}000/0.59 \approx 1{,}695$ kW, $W \approx 695$ kW 등 선지에 없는 값이 나온다. 또 다른 실수는 W = $\eta \times |Q_C|$로 잘못 계산하는 것인데, 효율은 Q_H 대비 W이지 Q_C 대비가 아니다.

다시 나오면 이렇게 판단

① 카르노 효율 먼저 구한다(절대온도 사용). ② '최댓값의 X%' 문구가 있으면 실제 효율 = 카르노 효율 × X/100. ③ 방출열 $|Q_C|$가 주어지면 $|Q_H| = |Q_C|/(1-\eta)$로 역산 후 $W = |Q_H| - |Q_C|$를 계산한다.

암기 포인트

카르노 효율 $\eta_C = 1 - T_C/T_H$ (반드시 절대온도 K). 실제 열기관의 효율이 '카르노의 몇 %'로 주어지면 곱해서 실제 η를 구한 뒤 에너지 보존 $Q_H = W + Q_C$를 세운다. 흡수열이 아닌 방출열이 주어지는 경우 $|Q_H| = |Q_C|/(1-\eta)$ 식으로 역산하는 것이 핵심.

NoteBase

문 7. 계(system)와 주변(surrounding)의 열역학 거동에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

① 열과 일은 계와 주변 사이를 이동하는 에너지의 형태이며, 열 또는 일의 형태로 저장되지 않는다.

② 닫힌계에서 동일한 상태 변화를 하는 모든 공정에 대하여 열과 일의 합은 같다.

③ 온도가 낮은 곳에서 높은 곳으로 열이 전달되기만 하는 공정은 불가능하다.

④ 계의 엔트로피 변화량은 0보다 크거나 같다.

정답 4번

출제 포인트

열역학 제1·2법칙에서 '계(system)'와 '우주(계+주변)' 중 어느 대상에 엔트로피 증가 법칙이 적용되는지를 구별하는 문제다. 열·일의 이동 성질, 닫힌계의 에너지 보존, 제2법칙의 Clausius 표현도 함께 확인한다.

핵심 개념

열(Q)과 일(W): 경로함수, 계와 주변 사이를 이동하는 에너지의 형태. 계 내부에 '열' 또는 '일'로 저장되지 않으며, 내부에너지(U)·엔탈피(H) 등 상태함수로 저장된다.

열역학 제1법칙(닫힌계): $\Delta U = Q - W$. ΔU는 상태함수이므로 동일한 초·말 상태 사이라면 경로(공정)에 무관하게 같다. 따라서 모든 공정에서 $Q - W = \Delta U$로 일정하다.

Clausius 표현(제2법칙): 저온에서 고온으로 열이 자발적으로 이동하는 것만으로 구성되는 공정은 불가능하다.

엔트로피 증가 법칙: 비가역 공정에서 $\Delta S_{우주} = \Delta S_{계} + \Delta S_{주변} \geq 0$. 이 부등식은 계+주변 전체(우주)에 적용된다. 계 단독의 $\Delta S_{계}$는 음수가 될 수 있다.

NoteBase

선지별 해설

① [O] 열과 일은 경계를 가로질러 이동하는 에너지 형태이며, 계 내부에는 내부에너지·엔탈피 등 상태량으로만 에너지가 저장된다. '열 또는 일의 형태로 저장되지 않는다'는 표현은 옳다.

② [O] 닫힌계에서 제1법칙 $\Delta U = Q - W$에서 ΔU는 상태함수이므로 경로에 무관하다. 동일한 상태 변화라면 어떤 공정을 택해도 $Q - W$의 값은 같다.

③ [O] Clausius의 제2법칙 표현 그대로다. 저온→고온으로의 자발적 열전달만 일어나는 공정은 존재하지 않는다.

④ [X] '계의 엔트로피 변화량 ≥ 0'은 틀렸다. 계 단독으로는 엔트로피가 감소할 수 있다(예: 냉동기에서 냉각되는 물체의 엔트로피는 감소한다). 엔트로피 증가 법칙은 계+주변을 합한 우주 전체에 대해 $\Delta S_{우주} \geq 0$으로 성립한다.

오답 포인트

'계의 엔트로피 ≥ 0'을 당연하게 외우는 학생이 가장 많이 틀린다. 엔트로피 증가 법칙의 적용 대상은 반드시 '우주(계+주변)'임을 기억해야 한다. 계만 보면 냉각·압축·결정화 등 다양한 공정에서 계의 엔트로피가 줄어들 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

엔트로피 관련 선지에서 주어가 '계', '주변', '우주' 중 어느 것인지 먼저 확인한다. '우주(계+주변) 전체의 엔트로피 변화 ≥ 0'만 항상 성립하고, '계 단독' 또는 '주변 단독'은 음수가 될 수 있다.

암기 포인트

열·일 = 이동 에너지, 계 내 저장 불가 / 닫힌계 Q-W = ΔU(상태함수, 경로 무관) / 제2법칙 Clausius: 저온→고온 자발적 이동 불가 / 엔트로피 증가 법칙: $\Delta S_{우주(계+주변)} \geq 0$, $\Delta S_{계 단독}$은 음수 가능

NoteBase

문 8. 실제기체가 <보기>와 같은 상태 방정식을 따를 때, 이 기체의 보일(Boyle) 온도는? (단, P는 압력, V는 몰부피, R은 기체상수, T는 절대온도, a와 b는 양의 상수이다.)

<보기>

$P\left(V-\left(b-\frac{a}{RT}\right)\right)=RT$

① $\frac{a}{Rb}$

② $\frac{a}{8Rb}$

③ $\frac{8a}{27Rb}$

④ $\frac{27a}{64Rb}$

정답 1번

출제 포인트

주어진 상태 방정식을 비리얼(virial) 급수 형태로 전개해 제2 비리얼 계수 $B'(T)$를 구한 뒤, $B'(T_B)=0$ 조건으로 보일 온도를 유도할 수 있는가를 묻는다.

조건 정리

상태 방정식: $P\left(V-\left(b-\frac{a}{RT}\right)\right)=RT$. P=압력, V=몰부피, R=기체상수, T=절대온도, a와 b는 양의 상수.

사용할 공식

보일 온도(Boyle temperature): 실제기체의 압력 비리얼 급수 $Z=1+B'(T)P+\cdots$ 에서 제2 비리얼 계수 $B'(T)$가 0이 되는 온도. 부피전개 제2 비리얼 계수 $B(T)$와는 $B'(T)=\frac{B(T)}{RT}$ 관계이며, $B'(T)=0$과 $B(T)=0$은 같은 온도를 준다. 이 온도에서 실제기체는 저압 영역에서 이상기체처럼 거동한다.

계산 과정

주어진 방정식을 전개한다.

$PV-P\left(b-\frac{a}{RT}\right)=RT$

양변을 RT로 나누면 압축인자 $Z=\frac{PV}{RT}$:

$Z=1+\frac{P}{RT}\left(b-\frac{a}{RT}\right)$

압력 비리얼 급수 $Z=1+B'(T)P$와 비교하면 압력전개 제2 비리얼 계수 $B'(T)=\frac{1}{RT}\left(b-\frac{a}{RT}\right)$이고, 괄호 안 $b-\frac{a}{RT}$가 부피전개 제2 비리얼 계수 $B(T)$다.

보일 온도 조건 $B'(T_B)=0$, 즉 $B(T_B)=0$:

$b-\frac{a}{RT_B}=0$

$T_B=\frac{a}{Rb}$

NoteBase

선지 판단

① $\frac{a}{Rb}$ — $B'(T_B)=0$에서 직접 유도되는 값. 정답(O)
② $\frac{a}{8Rb}$ — T_B의 $\frac{1}{8}$배. 틀림(X)
③ $\frac{8a}{27Rb}$ — 반데르발스 기체의 임계 온도 $T_c=\frac{8a}{27Rb}$와 같은 값으로, 보일 온도 자리에 임계 온도를 잘못 넣은 혼동값. 틀림(X)
④ $\frac{27a}{64Rb}$ — 근거 없는 수치. 틀림(X)

오답 포인트

③은 반데르발스 기체의 임계 온도 $T_c=\frac{8a}{27Rb}$를 보일 온도로 착각하게 만든 함정이다. 참고로 반데르발스 기체의 보일 온도는 $T_B=\frac{a}{Rb}$로 임계 온도와 다르다. 게다가 이 문제의 상태 방정식은 반데르발스가 아니므로 그 수치를 가져오면 오답이 된다. 주어진 방정식에서 비리얼 계수를 직접 읽어내는 것이 핵심이다.

다시 나오면 이렇게 판단

상태 방정식이 $PV=RT+f(T)\cdot P+\cdots$ 형태로 정리되면 $f(T)$가 제2 비리얼 계수 $B'(T)$다. $B'(T_B)=0$으로 놓고 T_B를 구한다. 방정식 형태마다 $B'(T)$가 달라지므로 매번 직접 전개할 것.

암기 포인트

보일 온도 정의: $B'(T_B)=0$이 되는 온도. 이 문제의 방정식에서 $B'(T)=b-\frac{a}{RT}$이므로 $T_B=\frac{a}{Rb}$. 반데르발스 방정식의 보일 온도도 $T_B=\frac{a}{Rb}$로 같은 형태지만, 반데르발스 임계 온도 $T_c=\frac{8a}{27Rb}$와는 다르므로 보일 온도와 임계 온도를 혼동하지 말 것.

NoteBase

문 9. 일정한 온도와 압력에서 성분 1과 성분 2로 구성된 이성분계 용액의 과잉 깁스 에너지(G^E)는 <보기>의 식으로 표현된다. 해당 용액에서 성분 1과 성분 2의 활동도 계수가 동일할 때, 성분 1의 몰분율(x_1)은? (단, R은 기체상수, T는 절대온도이다.)

<보기>

$G^E = RT(-0.5x_1^3 + 1.3x_1^2 - 0.8x_1)$

① 0.2

② 0.3

③ 0.4

④ 0.5

정답 3번

출제 포인트

과잉 깁스 에너지(G^E) 표현식으로부터 활동도 계수 식을 유도하고, 두 성분의 활동도 계수가 같아지는 조건으로 x_1을 구하는 문제다.

조건 정리

2성분계 이성 분계 용액. $G^E = RT(-0.5x_1^3 + 1.3x_1^2 - 0.8x_1)$. 활동도 계수 동일 조건: $\gamma_1 = \gamma_2$, 즉 $\ln\gamma_1 = \ln\gamma_2$.

사용할 공식

2성분계에서 $g \equiv G^E/RT$로 놓으면,

$\ln\gamma_1 = g + (1 - x_1)g'$

$\ln\gamma_2 = g - x_1 g'$

여기서 $g' = dg/dx_1$. (Gibbs-Duhem 관계로부터 유도되는 편미분 공식)

NoteBase

계산 과정

$\ln\gamma_1 = \ln\gamma_2$ 조건 대입:
$g + (1 - x_1)g' = g - x_1 g'$
양변에서 g 상쇄 후 정리:
(1 - x_1)g' + x_1 g' = 0 g' = 0

$g' = \frac{d}{dx_1}(-0.5x_1^3 + 1.3x_1^2 - 0.8x_1) = -1.5x_1^2 + 2.6x_1 - 0.8 = 0$

양변에 -1 곱해 정리:
$1.5x_1^2 - 2.6x_1 + 0.8 = 0$

근의 공식 적용:
$x_1 = \frac{2.6 \pm \sqrt{(2.6)^2 - 4 \times 1.5 \times 0.8}}{2 \times 1.5} = \frac{2.6 \pm \sqrt{6.76 - 4.80}}{3} = \frac{2.6 \pm \sqrt{1.96}}{3} = \frac{2.6 \pm 1.4}{3}$

두 근: $x_1 = \frac{2.6 - 1.4}{3} = \frac{1.2}{3} = 0.4$ 또는 $x_1 = \frac{4.0}{3} \approx 1.33$

몰분율은 $0 \le$ x_1 ≤ 1 이어야 하므로 $x_1 = 1.33$은 물리적으로 불가. 따라서 $x_1 = 0.4$.

선지 판단

① 0.2 — g' 계산 결과 $x_1 = 0.2$는 해가 아니다. 오답.
② 0.3 — 마찬가지로 $g' \neq 0$. 오답.
③ 0.4 — $1.5(0.4)^2 - 2.6(0.4) + 0.8 = 0.24 - 1.04 + 0.8 = 0$. 성립. 정답.
④ 0.5 — $1.5(0.5)^2 - 2.6(0.5) + 0.8 = 0.375 - 1.3 + 0.8 = -0.125 \neq 0$. 오답.

오답 포인트

활동도 계수 동일 조건 $\ln\gamma_1 = \ln\gamma_2$를 g에 대한 조건으로 잘못 세우면(예: $g = 0$으로 놓음) x_1을 전혀 다른 값으로 계산한다. 핵심은 g가 아니라 g의 도함수 g'가 0이 되어야 한다는 점이다. $\gamma_1 = \gamma_2$와 $\ln\gamma_1 = \ln\gamma_2$는 동치이므로 조건이 달라지지 않는다.

다시 나오면 이렇게 판단

G^E 식이 주어지고 '두 활동도 계수가 같다'는 조건이 오면, $\ln\gamma_1 = \ln\gamma_2$를 바로 전개해 g'=0으로 환원한 뒤 도함수를 0으로 놓고 방정식을 풀면 된다. 근이 2개 나오면 0 < x_1 < 1 범위 안에 있는 것을 취한다.

암기 포인트

2성분계 G^E 미분 공식: $\ln\gamma_1 = g + (1 - x_1)g'$, $\ln\gamma_2 = g - x_1 g'$ (단, $g = G^E/RT$, $g' = dg/dx_1$). 이 두 식을 같다고 놓으면 항상 g'=0으로 귀결된다.

NoteBase

문 10. 350K**에서 성분 1과 성분 2로 구성된 이성분계 용액이 증기와 평형을 이루고 있으며, 용액을 구성하는 각 성분의 활동도 계수**γ_i**는 <보기>의 식으로 표현된다. 성분 1의 액상 몰분율**x_1**이 0.5일 때, 기포점(bubble point) 압력**[kPa]**은? (단,** γ_i**는 성분** i**의 활동도 계수,** 350K**에서 성분 1, 2의 포화 증기압은 각각** 100kPa**,** 20kPa**이고,** $e^{0.175} = 1.2$**이다.)**

<보기>

- $\ln \gamma_1 = 0.7x_2^2$
- $\ln \gamma_2 = 0.7x_1^2$

① 36

② 72

③ 108

④ 144

정답 2번

출제 포인트

비이상 용액의 기포점(bubble point) 압력 계산. 활동도 계수 모델(Margules 식)을 이용해 각 성분의 γ⊠를 구한 뒤, 수정 라울의 법칙 $P = \sum x_i \gamma_i P_i^{sat}$ 에 대입한다.

조건 정리

T = 350K, x_1 = 0.5, x_2 = 0.5
포화 증기압: P_1sat = 100 kPa, P_2sat = 20 kPa
활동도 계수 모델: $\ln \gamma_1 = 0.7x_2^2$, $\ln \gamma_2 = 0.7x_1^2$
주어진 수치: $e^{0.175} = 1.2$

사용할 공식

수정 라울의 법칙(비이상 기-액 평형):
$P = x_1\gamma_1 P_1^{sat} + x_2\gamma_2 P_2^{sat}$
활동도 계수는 주어진 ln γ⊠ 식에 몰분율을 대입해 구한다.

NoteBase

계산 과정

① 활동도 계수 계산

$\ln \gamma_1 = 0.7 \times (0.5)^2 = 0.7 \times 0.25 = 0.175 \rightarrow \gamma_1 = e^{0.175} = 1.2$

$\ln \gamma_2 = 0.7 \times (0.5)^2 = 0.7 \times 0.25 = 0.175 \rightarrow \gamma_2 = e^{0.175} = 1.2$

② 기포점 압력

$P = x_1\gamma_1 P_1^{sat} + x_2\gamma_2 P_2^{sat}$

$= 0.5 \times 1.2 \times 100 + 0.5 \times 1.2 \times 20$

$= 60 + 12 = 72$ kPa

선지 판단

① 36 kPa — 오답. γ□ = 1(이상 용액)로 잘못 가정하면 P = 0.5×100 + 0.5×20 = 60 kPa. 여기서 절반을 취한 오류이거나 계산 실수.

② 72 kPa — 정답. 위 계산 과정과 일치.

③ 108 kPa — 오답. γ□ 적용 오류 또는 x_2 몰분율을 잘못 설정한 경우.

④ 144 kPa — 오답. P_1sat + P_2sat 합산 오류 등 계산 실수.

오답 포인트

$x_1 = x_2 = 0.5$이므로 두 성분의 ln γ□ 식에 같은 값(0.25)이 대입되어 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1.2$로 동일하게 나온다. 이 대칭성을 인지하지 못하고 γ□를 다르게 계산하거나, 활동도 계수를 빠뜨리고 이상 용액 라울의 법칙(P = Σx□ P□sat = 60 kPa)을 그대로 쓰면 오답이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

비이상 용액 기포점 문제는 반드시 3단계: (1) 주어진 ln γ□ 식에 몰분율 대입 → γ□ 계산, (2) 수정 라울의 법칙 P = Σx□γ□ P□sat 적용, (3) 제시된 지수값(e^... = ...)으로 최종 계산. Margules 1-상수 모델에서 $\ln \gamma_1 = Ax_2^2$, $\ln \gamma_2 = Ax_1^2$ 형태이면 $x_1 = x_2$일 때 두 γ가 항상 같다.

암기 포인트

수정 라울의 법칙: $P = \sum_i x_i \gamma_i P_i^{sat}$ (비이상 기-액 평형, 기포점 계산)

1-상수 Margules: $\ln \gamma_1 = Ax_2^2$, $\ln \gamma_2 = Ax_1^2$ — 동일 A값, 첨자 교차 주의

$e^{0.175} = 1.2$ 는 시험에서 주어지는 값이므로 지수 계산 없이 바로 대입한다.

NoteBase

문 11. 1,000kPa, 1,000K의 기체가 가스 터빈을 통해 단열 팽창되어, 125kPa의 압력으로 배출된다. 가스 터빈의 효율이 80%일 때, 기체 1mol당 가스 터빈에서 얻을 수 있는 최대 일의 크기[$\mathrm{J mol^{-1}}$]는? (단, 기체는 이상기체이고, 기체상수 $R = 8\,\mathrm{J mol^{-1} K^{-1}}$, 정압 열용량 $C_P = 24\,\mathrm{J mol^{-1} K^{-1}}$이다.)

① 3,840

② 5,760

③ 7,680

④ 9,600

정답 4번

출제 포인트

이상기체가 가스 터빈에서 단열 팽창할 때 등엔트로피 과정으로 이상적인 일을 구한 뒤, 터빈 효율을 곱해 실제 일을 계산하는 문제다. Cp와 R로 γ를 구하고, 단열 과정의 온도-압력 관계식을 적용하는 것이 핵심이다.

조건 정리

초기 압력 P_1 = 1,000 kPa, 초기 온도 T_1 = 1,000 K, 최종 압력 P_2 = 125 kPa, 터빈 효율 η = 0.8, 기체상수 R = 8 J $\mathrm{mol^{-1}}$ $\mathrm{K^{-1}}$, 정압 열용량 Cp = 24 J $\mathrm{mol^{-1}}$ $\mathrm{K^{-1}}$

사용할 공식

① 정적 열용량: $C_V = C_P - R$

② 비열비: $\gamma = C_P/C_V$

③ 단열(등엔트로피) 온도-압력 관계: $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$

④ 등엔트로피 일(이상적): $W_s = C_P(T_1 - T_2)$

⑤ 실제 일: $W = \eta \cdot W_s$

NoteBase

계산 과정

Step 1. 정적 열용량과 비열비 계산
$C_V = C_P - R = 24 - 8 = 16\ \text{J mol}^{-1}\ \text{K}^{-1}$
$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{24}{16} = \frac{3}{2} = 1.5$

Step 2. 지수 계산
$\frac{\gamma - 1}{\gamma} = \frac{0.5}{1.5} = \frac{1}{3}$

Step 3. 등엔트로피 출구 온도 계산
$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/3} = \left(\frac{125}{1000}\right)^{1/3} = \left(\frac{1}{8}\right)^{1/3} = \frac{1}{2}$
$T_2 = 1000 \times \frac{1}{2} = 500\ \text{K}$

Step 4. 이상적인 일(등엔트로피)
$W_s = C_P(T_1 - T_2) = 24 \times (1000 - 500) = 24 \times 500 = 12{,}000\ \text{J mol}^{-1}$

Step 5. 터빈 효율 적용
$W = \eta \cdot W_s = 0.8 \times 12{,}000 = 9{,}600\ \text{J mol}^{-1}$

선지 판단

① 3,840 J mol^{-1} — 오답. 0.8 × 4,800처럼 온도차나 비열비를 잘못 적용한 결과로 나타나는 값이다.
② 5,760 J mol^{-1} — 오답. 효율 80%를 적용했으나 이상적인 일 자체를 작게 계산(예: γ=5/3 가정 등)했을 때 나오는 값이다.
③ 7,680 J mol^{-1} — 오답. 효율을 잘못 반영하거나 온도차를 다르게 잡은 경우이다.
④ 9,600 J mol^{-1} — 정답. $(1/8)^{1/3} = 1/2$이므로 T_2=500 K, 이상적 일=12,000 J mol^{-1}, 여기에 효율 0.8을 곱하면 9,600 J mol^{-1}이다.

오답 포인트

① $(1/8)^{1/3} = 1/2$임을 확실히 계산해야 한다. $8 = 2^3$이므로 세제곱근은 2, 역수는 1/2이다. 이 값을 0.25(=1/4)로 혼동하면 T_2=250 K이 되어 오답이 나온다.
② 효율 80%는 이상적인 일(등엔트로피 일)에 곱한다. 출구 온도를 먼저 효율로 보정하려 하면 계산 경로가 달라진다.
③ Cp를 쓸지 Cv를 쓸지 헷갈리는 경우가 있다. 정상 유동 장치(터빈)에서의 엔탈피 변화는 $\Delta H = C_P \Delta T$이므로 반드시 Cp를 사용한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

이상기체 단열 터빈 문제가 나오면: ① R과 Cp로 γ를 먼저 구한다. ② $(\gamma-1)/\gamma$ 지수를 계산한다. ③ $(P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}$으로 T_2를 구한다. ④ $W_s = C_P(T_1 - T_2)$로 이상적 일을 구한다. ⑤ 마지막에 터빈 효율을 곱한다. γ=1.5이면 지수가 1/3이 되어 압력비의 세제곱근이 온도비가 된다.

암기 포인트

이상기체 단열 팽창: $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}$, 여기서 $\gamma = C_P/C_V = C_P/(C_P - R)$. Cp=24, R=8 → Cv=16, γ=3/2=1.5, 지수=1/3. 압력비 1/8의 1/3승 = 1/2. 터빈 효율은 이상적 일(엔탈피 변화)에 곱한다.

NoteBase

문 12. 300K의 아르곤 기체 1mol이 닫힌계에서 가역 정적 과정을 거쳐 압력이 2배로 증가하였을 때, 계에 가해진 열의 값[J]은? (단, 기체는 이상기체로 가정하며, 기체 상수 $R = 8\text{J}\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$이다.)

① 3,600

② 4,800

③ 6,000

④ 7,200

정답 1번

출제 포인트

단원자 이상기체의 등적(정적) 과정에서 압력 변화로부터 온도 변화를 구하고, 열역학 제1법칙(Q = ΔU)을 이용해 계에 가해진 열을 계산하는 문제이다.

조건 정리

기체: 아르곤(Ar, 단원자 이상기체) / 물질량: n = 1 mol / 초기 온도: T_1 = 300 K / 과정: 가역 정적(등적) 과정, 즉 부피 일정 / 압력 변화: $P_2 = 2P_1$ / 기체상수: R = 8 J $mol^{-1}K^{-1}$

사용할 공식

등적 과정이므로 부피 변화 없음 → 일(W) = 0. 열역학 제1법칙: $Q = \Delta U + W = \Delta U$. 단원자 이상기체의 정적 열용량: $C_v = \frac{3}{2}R$. 내부에너지 변화: $\Delta U = nC_v\Delta T$. 이상기체 법칙(등적 조건): $PV = nRT$에서 V 일정이면 $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$, 즉 $T \propto P$.

계산 과정

1단계 — 온도 변화 계산: 등적 조건에서 $P_2 = 2P_1$이므로 $T_2 = 2T_1 = 2 \times 300 = 600$ K, $\Delta T = 600 - 300 = 300$ K.
2단계 — 열(Q) 계산: $Q = \Delta U = nC_v\Delta T = 1 \times \frac{3}{2} \times 8 \times 300 = 12 \times 300 = 3{,}600$ J.

선지 판단

① 3,600 J → ΔU = n(3/2)R ΔT = 1 × 12 × 300 = 3,600 J. 정답(O).
② 4,800 J → ΔT = 400 K로 잘못 설정했거나 Cv를 (2/2)R 등으로 잘못 쓴 경우. 오답(X).
③ 6,000 J → Cp = (5/2)R을 등적 과정에 잘못 적용한 결과: 1 × (5/2) × 8 × 300 = 6,000. Cp는 등압 과정에 쓰이며 등적 과정에는 Cv를 써야 한다. 오답(X).
④ 7,200 J → Cv = (3/2)R 대신 더 큰 값을 쓰거나 ΔT를 잘못 계산한 경우. 오답(X).

NoteBase

오답 포인트

가장 흔한 실수는 ③번처럼 등적 과정에 Cp(정압 열용량)를 쓰는 것이다. 단원자 이상기체의 Cv = (3/2)R, Cp = (5/2)R이며, 과정 유형(등적/등압)에 따라 사용하는 열용량이 다르다. 또한 등적 조건에서는 W = 0이므로 Q = ΔU가 성립함을 반드시 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

문제에서 '정적 과정'이 나오면 즉시 W = 0, Q = ΔU로 시작한다. 이상기체 법칙에서 등적이면 $T \propto P$임을 이용해 ΔT를 구하고, 기체 종류(단원자→Cv = 3R/2, 이원자→Cv = 5R/2)를 확인해 ΔU = nCvΔT를 계산하면 끝이다.

암기 포인트

단원자 이상기체(He, Ar, Ne 등): Cv = (3/2)R, Cp = (5/2)R, γ = Cp/Cv = 5/3. 이원자 이상기체(N_2, O_2 등): Cv = (5/2)R, Cp = (7/2)R, γ = 7/5. 등적(정적) 과정: W = 0, Q = ΔU = nCvΔT. 등압 과정: Q = ΔH = nCpΔT.

NoteBase

문 13. 메탄 수증기 개질(methane steam reforming) 공정에서 <보기>의 두 가지 반응이 발생하고 있다. 초기에 2몰의 메탄과 3몰의 물이 공급되었다. 반응식 1, 2의 반응좌표(reaction coordinate)가 차례로 ε_1, ε_2이고, 각각 0.4, 0.6일 때, H_2를 제외한 반응계의 각 성분 중 몰분율 값이 가장 큰 성분은?

<보기>

- 반응식 1: $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$
- 반응식 2: $CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$

① CH_4

② CO

③ CO_2

④ H_2O

정답 4번

출제 포인트

복수 반응이 동시에 진행될 때 반응좌표(extent of reaction, ε)를 이용해 각 성분의 최종 몰수를 구하고, 전체 몰수 대비 몰분율을 비교하는 문제이다. H_2를 제외한 나머지 성분만을 비교 대상으로 삼는 조건에 주의해야 한다.

조건 정리

초기 공급: CH_4 2몰, H_2O 3몰, $CO \cdot CO_2 \cdot H_2$ 각 0몰.
반응식 1: $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$, 반응좌표 $\varepsilon_1 = 0.4$
반응식 2: $CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$, 반응좌표 $\varepsilon_2 = 0.6$

사용할 공식

성분 i의 몰수 $n_i = n_{i,0} + \sum_j \nu_{ij}\varepsilon_j$
여기서 ν_{ij}는 반응 j에서 성분 i의 양론 계수(생성이면 양수, 소비이면 음수)이다.
몰분율 $y_i = n_i / n_{\text{total}}$

NoteBase

계산 과정

각 성분 몰수 계산:

$n_{CH_4} = 2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 2 - 0.4 - 0.6 = 1.0\text{mol}$

$n_{H_2O} = 3 - \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 = 3 - 0.4 - 1.2 = 1.4\text{mol}$

$n_{CO} = \varepsilon_1 = 0.4\text{mol}$

$n_{CO_2} = \varepsilon_2 = 0.6\text{mol}$

$n_{H_2} = 3\varepsilon_1 + 4\varepsilon_2 = 1.2 + 2.4 = 3.6\text{mol}$

전체 합: $n_{total} = 1.0 + 1.4 + 0.4 + 0.6 + 3.6 = 7.0\text{mol}$

몰분율(H_2 제외, 분모는 전체 7.0몰 기준):

$y_{CH_4} = 1.0/7.0 \approx 0.143$

$y_{H_2O} = 1.4/7.0 = 0.200$

$y_{CO} = 0.4/7.0 \approx 0.057$

$y_{CO_2} = 0.6/7.0 \approx 0.086$

H_2를 제외한 성분 중 몰분율이 가장 큰 것은 H_2O(0.200)이다.

선지 판단

① CH_4: 몰분율 ≈ 0.143 — H_2O보다 작으므로 오답.
② CO: 몰분율 ≈ 0.057 — 가장 작은 편이므로 오답.
③ CO_2: 몰분율 ≈ 0.086 — H_2O보다 작으므로 오답.
④ H_2O: 몰분율 = 0.200 — H_2를 제외한 성분 중 가장 크므로 정답.

오답 포인트

H_2O는 두 반응 모두에서 소비되므로 초기 3몰에서 1.4몰로 줄어든다. 그럼에도 불구하고 H_2 생성으로 전체 몰수가 크게 늘어났기 때문에 몰분율은 더욱 낮아진다. 착각하기 쉬운 포인트는 H_2O의 소비를 '많다'고 느껴 작은 쪽으로 오판하는 것인데, 나머지 성분(CO, CO_2)의 생성량이 더 적으므로 H_2O가 여전히 가장 큰 몰분율을 갖는다.
또한 문제는 몰분율의 분모를 '전체 혼합물(H_2포함)'로 두고 분자에서 H_2만 제외하는 방식으로 비교하는 것이므로, H_2를 분모에서도 빼는 실수를 하지 않도록 주의한다.

다시 나오면 이렇게 판단

복수 반응 계에서 몰분율을 묻는 문제는 항상 세 단계로 처리한다: ① 각 성분의 양론 계수와 반응좌표로 최종 몰수 계산 → ② 전체 몰수 합산 → ③ 비교 대상 성분의 몰분율(n_i/n_total) 비교. H_2를 '제외'하라는 조건은 순위 비교 대상에서만 제외하고 전체 몰수 합산에는 그대로 포함시킨다.

NoteBase

암기 포인트

반응좌표 ε: 반응 1몰 진행당 소비·생성 몰수 변화를 일괄 추적하는 변수. 여러 반응이 공존하면 각 반응마다 독립적인 ε를 쓰고 성분별로 합산한다.

CH_4 steam reforming 양론: 반응 1(SMR)은 $CH_4+H_2O\rightarrow CO+3H_2$, 반응 2(WGS 확장형)는 $CH_4+2H_2O\rightarrow CO_2+4H_2$. H_2는 두 반응 모두에서 다량 생성되어 최종 몰분율이 압도적으로 크고, 남은 성분 중에서는 초기 공급량이 많은 H_2O가 상대적으로 큰 몰분율을 유지한다.

NoteBase

문 14. 등압조건에서 엔트로피 변화에 따른 부피 변화량을 구하고자 한다. 엔트로피 변화를 직접 측정하기가 쉽지 않을 때의 대체 시험법으로 가장 적절한 것은?

① 단열 가역 조건에서 압력변화에 따른 온도변화 측정

② 단열 가역 조건에서 부피변화에 따른 온도변화 측정

③ 정적조건에서 온도변화에 따른 압력변화 측정

④ 등압조건에서 온도변화에 따른 부피변화 측정

정답 1번

출제 포인트

엔탈피의 Maxwell 관계식을 이용해 $\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$를 측정 가능한 변수로 치환하는 능력을 묻는다. S(엔트로피)는 직접 측정이 어려우므로, Maxwell 관계를 통해 측정 가능한 T·P·V 변수로 변환하는 것이 핵심이다.

조건 정리

구하려는 양: 등압조건에서 엔트로피 변화에 따른 부피 변화량, 즉 $\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$. S는 직접 측정 불가 → 대체 측정량으로 변환 필요.

사용할 공식

엔탈피 H의 전미분: $dH = TdS + VdP$. 이로부터 Maxwell 관계식: $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$. 단열 가역 과정은 등엔트로피 과정(S = 일정)이므로, 이 조건이 첨자 S와 일치한다.

계산 과정

엔탈피의 Maxwell 관계에서: $\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S$. 우변은 S를 일정하게 유지한 상태(단열 가역)에서 압력을 변화시킬 때 온도가 얼마나 바뀌는지를 뜻한다. T와 P는 모두 직접 측정 가능하므로 대체 시험이 성립한다.

선지 판단

① 단열 가역 조건에서 압력변화에 따른 온도변화 측정 → $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$. Maxwell 관계와 정확히 일치. ✓
② 단열 가역 조건에서 부피변화에 따른 온도변화 측정 → $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S$. 내부에너지 Maxwell 관계 $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$에 대응되며, 구하려는 양과 다르다. ☒
③ 정적조건에서 온도변화에 따른 압력변화 측정 → $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$. Helmholtz 에너지 Maxwell 관계 $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T$에 대응. 구하려는 양과 다르다. ☒
④ 등압조건에서 온도변화에 따른 부피변화 측정 → $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$. Gibbs 에너지 Maxwell 관계 $-\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$에 대응. $\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$와 다르다. ☒

NoteBase

오답 포인트

④번이 매력적인 오답이다. 등압 조건이라는 점은 문제 설정과 같지만, 치환 결과가 $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$(Gibbs Maxwell)이지 $\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$(엔탈피 Maxwell)가 아니다. 조건(첨자)이 같아 보여도 측정 변수 쌍이 다르면 다른 편미분이다. Maxwell 관계를 출발 열역학 퍼텐셜별로 구분해서 외워야 헷갈리지 않는다.

다시 나오면 이렇게 판단

측정하기 어려운 S를 포함하는 편미분이 나오면, 해당 편미분이 어느 열역학 퍼텐셜(U·H·A·G)의 Maxwell 관계에 속하는지 확인한다. $\left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$는 H의 Maxwell 관계 → 등엔트로피(단열 가역) 조건에서 $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S$로 치환. 첨자(고정 변수)와 측정 변수 쌍을 동시에 맞춰야 한다.

암기 포인트

네 가지 Maxwell 관계식(TVSP 패턴): $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$ (U 기반), $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$ (H 기반), $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T$ (A 기반), $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T$ (G 기반). H 기반 관계가 이 문항의 핵심이며, 단열 가역 과정 = 등엔트로피 과정임을 연결하면 된다.

NoteBase

문 15. 1개의 입구와 1개의 출구가 있는 정상상태의 계를 흐르고 있는 이상기체 1mol로부터 얻을 수 있는 최대 일의 크기[kJmol^{-1}]는? (단, 흐름과정에서 외부의 온도는 300K이고, 이상기체의 운동에너지와 위치에너지 변화는 무시하며, 엔탈피 변화량과 엔트로피 변화량은 각각 −10kJmol^{-1}, 2Jmol^{-1}K^{-1}이다.)

① 10.6

② 10.8

③ 11.0

④ 11.2

정답 1번

출제 포인트

정상상태 개방계(steady-state open system)에서 이상기체 1 mol이 외부에 줄 수 있는 최대 일(maximum shaft work)을 계산하는 문제다. 가역 과정 조건을 적용하면 엔탈피 변화와 주위 온도·엔트로피 변화량만으로 답을 구할 수 있다.

조건 정리

외부(주위) 온도 T_surr = 300 K, 엔탈피 변화 ΔH = −10 kJ mol^{-1}, 계의 엔트로피 변화 ΔS_sys = 2 J mol^{-1} K^{-1} = 0.002 kJ mol^{-1} K^{-1}, 운동에너지·위치에너지 변화 무시.

사용할 공식

정상상태 개방계의 에너지 균형과 엔트로피 균형을 결합하면, 가역 조건(엔트로피 생성 = 0)에서 계가 외부에 줄 수 있는 최대 축일(shaft work)은 다음과 같다.

$W_{s,max} = -\Delta H + T_{surr} \cdot \Delta S_{sys}$

이 식은 계의 엔트로피 증가분을 주위 온도로 곱한 항(T_surr ΔS_sys)이 가역 열 방출에 해당하므로, 엔탈피 감소에서 그 열을 주위로 버린 만큼을 일로 회수할 수 있음을 나타낸다.

계산 과정

T_surr · ΔS_sys = 300 K × 2 J mol^{-1} K^{-1} = 600 J mol^{-1} = 0.6 kJ mol^{-1}

W_s,max = −ΔH + T_surr · ΔS_sys
= −(−10 kJ mol^{-1}) + 0.6 kJ mol^{-1}
= 10 + 0.6
= 10.6 kJ mol^{-1}

NoteBase

선지 판단

① 10.6 kJ mol^{-1} → 계산 결과와 일치. O (정답)
② 10.8 kJ mol^{-1} → 해당 값이 나오려면 T_surr · ΔS = 0.8 kJ가 되어야 하나, 300 × 2 J = 0.6 kJ이므로 틀림. X
③ 11.0 kJ mol^{-1} → T_surr · ΔS = 1.0 kJ, 즉 ΔS = 1/300 kJ K^{-1} = 3.33 J K^{-1}에 해당하며 주어진 조건과 다름. X
④ 11.2 kJ mol^{-1} → 마찬가지로 T_surr · ΔS = 1.2 kJ에 해당, 조건 불일치. X

오답 포인트

가장 흔한 실수는 ΔS의 단위(J)를 kJ로 변환하지 않고 300 × 2 = 600을 그대로 kJ로 착각하는 것이다. 그렇게 하면 610 kJ이 나와 선지에 없다. 반드시 단위를 통일(J → kJ, 즉 ÷ 1000)한 뒤 계산해야 한다.
또 ΔH가 음수(−10)임에 주의한다. W_s,max = −ΔH이므로 음수의 부호를 바꿔 +10이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

정상상태 개방계 + 최대 일 → 가역 조건 적용 → $W_{s,max} = -\Delta H + T_{surr} \cdot \Delta S_{sys}$ 공식 바로 적용. ΔS 단위(J vs kJ) 맞추는 것이 핵심 계산 포인트다.

암기 포인트

정상상태 개방계 최대 일: $W_{s,max} = -\Delta H + T_{surr}\Delta S_{sys}$
닫힌계 최대 일: $W_{max} = -\Delta U + T_{surr}\Delta S_{sys}$
두 식의 차이는 H(엔탈피)냐 U(내부에너지)냐이며, 개방계(흐름 공정)에서는 H를 쓴다.

NoteBase

문 16. 기체의 휘산도(fugacity)에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

① 휘산도와 실제 압력을 변환하는 인자가 휘산도 계수이다.

② 이상기체의 경우 휘산도 계수는 모든 온도와 압력에서 1이다.

③ 휘산도는 이상기체와 실제 기체의 거동 차이를 유도하기 위한 유효 압력의 개념으로, 압력과 동일한 단위를 사용한다.

④ 압축인자 Z가 1보다 클 경우, 휘산도 계수는 1보다 커지게 되고, 따라서 휘산도가 압력보다 작은 값을 갖는다.

정답 4번

출제 포인트

기체의 휘산도(fugacity)와 휘산도 계수(fugacity coefficient)의 정의, 그리고 압축인자 Z와 휘산도 계수의 관계를 묻는 문항이다.

핵심 개념

휘산도 f는 실제기체의 유효 압력에 해당하는 열역학적 양으로 압력과 같은 단위를 가진다. 휘산도 계수는 $\phi = f/P$로 정의되며, 실제기체가 이상기체에서 얼마나 벗어나는지를 나타낸다. 이상기체는 모든 온도·압력 조건에서 압축인자 Z = 1이므로 휘산도 계수도 1이 되어 f = P가 성립한다. 압축인자 Z와 휘산도 계수의 관계는 $\ln\phi = \int_0^P \frac{Z-1}{P} dP$이다. Z > 1이면 피적분함수가 양수이므로 $\ln\phi > 0$, 즉 $\phi > 1$이 되어 $f = \phi P > P$가 된다. 반대로 Z < 1이면 $\phi < 1$이 되어 f < P가 된다.

선지별 해설

① [O] 휘산도 계수 $\phi = f/P$는 휘산도 f와 실제 압력 P를 변환하는 인자다. 올바른 설명이다.
② [O] 이상기체는 모든 온도와 압력에서 Z = 1이므로 $\ln\phi = 0$, 즉 $\phi = 1$이다. 올바른 설명이다.
③ [O] 휘산도는 이상기체와 실제기체의 거동 차이를 반영하기 위해 도입된 유효 압력 개념으로, 압력과 동일한 단위(Pa, bar, atm 등)를 사용한다. 올바른 설명이다.
④ [X] 압축인자 Z > 1이면 $\ln\phi = \int_0^P \frac{Z-1}{P} dP > 0$이므로 $\phi > 1$이고, $f = \phi P > P$가 된다. 즉 휘산도는 압력보다 큰 값을 가진다. 선지는 '압력보다 작은 값을 갖는다'고 했으므로 틀린 설명이다.

오답 포인트

Z와 ϕ의 관계에서 $Z > 1 \rightarrow \phi > 1 \rightarrow f > P$, $Z < 1 \rightarrow \phi < 1 \rightarrow f < P$ 방향을 반대로 기억하기 쉽다. Z > 1은 실제기체 분자 간 척력이 우세한 상황이고, 이때 기체가 이상기체보다 더 높은 유효 압력(휘산도)을 가진다고 연결하면 혼동을 방지할 수 있다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

Z > 1 조건이 주어지면 $\ln\phi = \int_0^P \frac{Z-1}{P} dP$ 적분이 양수임을 떠올려 $\phi > 1$, f > P 순서로 빠르게 판정한다.
'휘산도가 압력보다 작다'는 서술이 나오면 Z < 1 조건과 짝지어야 한다.

암기 포인트

Z > 1 → $\phi > 1$ → f > P (척력 우세, 휘산도가 압력 초과) / Z < 1 → $\phi < 1$ → f < P (인력 우세, 휘산도가 압력 미만) / Z = 1 (이상기체) → $\phi = 1$ → f = P

NoteBase

문 17. Peng-Robinson 상태방정식에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

① 방정식의 매개변수 중 하나로 등온 압축률 값이 사용된다.

② 방정식의 매개변수로 등압 열팽창 계수는 사용되지 않는다.

③ 방정식에는 이심인자에 대한 인력 매개변수의 의존성이 도입되었다.

④ 상태방정식의 세부 사항들이 추가된 방법은 이론적이기 보다 경험적인 것이었다.

정답 1번

출제 포인트

Peng-Robinson(PR) 상태방정식의 매개변수 구성과 이심인자 도입의 의의를 묻는 문항이다. PR EOS가 기존 van der Waals 계열 방정식과 어떻게 다른지, 어떤 물성이 매개변수로 쓰이고 어떤 물성은 쓰이지 않는지를 구분해야 한다.

핵심 개념

PR EOS(1976) 형태: $P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)}$. 매개변수 a(T)와 b는 임계온도 T_c, 임계압력 P_c, 이심인자 ω 세 가지로부터 결정된다. 구체적으로 $a(T) = a_c \cdot \alpha(T_r)$이고, $\alpha = [1 + \kappa(1 - \sqrt{T_r})]^2$, $\kappa = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$이다. 등온 압축률이나 등압 열팽창 계수는 PR EOS의 입력 매개변수가 아니라 방정식으로부터 계산되는 유도 물성이다.

선지별 해설

① (X) 방정식의 매개변수 중 하나로 등온 압축률(isothermal compressibility) 값이 사용된다 → 틀림. PR EOS의 매개변수는 임계온도 T_c, 임계압력 P_c, 이심인자 ω이다. 등온 압축률 $\kappa_T = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$은 상태방정식으로부터 계산되는 유도 물성이며 매개변수로 입력되지 않는다.

② (O) 매개변수로 등압 열팽창 계수는 사용되지 않는다 → 맞음. 등압 열팽창 계수 $\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$도 역시 유도 물성이고 입력 매개변수가 아니다.

③ (O) 방정식에는 이심인자에 대한 인력 매개변수의 의존성이 도입되었다 → 맞음. PR EOS의 핵심 기여는 $a(T)$가 이심인자 ω를 포함한 κ를 통해 온도 의존성을 갖도록 설계한 점이다. 이를 통해 증기압 곡선을 더 잘 재현한다.

④ (O) 상태방정식의 세부 사항들이 추가된 방법은 이론적이기보다 경험적인 것이었다 → 맞음. PR EOS는 증기압 데이터와 액체 밀도 데이터에 맞추어 경험적으로 계수를 결정한 방정식이며, 순수한 이론 유도물이 아니다.

오답 포인트

①번의 함정은 '등온 압축률'이라는 열역학 용어가 익숙해서 PR 매개변수 중 하나로 착각하기 쉽다는 점이다. 압축률은 상태방정식의 출력(유도 물성)이지 입력(매개변수)이 아니다. ②번은 맞는 진술이므로 오답으로 고르기 쉬운 함정이 될 수 있다. 발문이 '옳지 않은 것'임을 반드시 확인해야 한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

PR EOS 매개변수 관련 문제가 나오면 입력 3가지(T_c, P_c, ω)와 유도 물성(압축률, 열팽창 계수, 잠열 등)을 즉시 분리한다. '매개변수로 X를 사용한다'는 선지가 나오면 X가 T_c, P_c, ω 중 하나인지 확인한다. 이심인자가 인력항 $a(T)$에만 반영되고 척력항 b에는 반영되지 않는다는 점도 출제 포인트이다.

암기 포인트

PR EOS 입력 매개변수 = T_c, P_c, ω 세 가지가 전부. 이심인자 ω는 인력 매개변수 $a(T)$의 온도 의존성 함수 κ에 들어간다. 등온 압축률·등압 열팽창 계수는 매개변수가 아니라 방정식으로 계산하는 결과값이다.

NoteBase

문 18. A 냉동기는 분당 1,800kJ의 열을 흡수한다. A 냉동기가 10kW의 동력으로 작동되고 있다면, A 냉동기의 성능 계수(coefficient of performance) 값은?

① 1

② 3

③ 9

④ 18

정답 2번

출제 포인트

냉동기의 성능계수(COP) 정의를 단위 변환과 함께 적용하는 계산 문제다. 분당(kJ/min) 단위를 kW(kJ/s)로 변환하지 않으면 틀린다.

조건 정리

흡수 열량: $Q_L = 1{,}800\text{kJ/min}$, 소비 동력: $W = 10\text{ kW} = 10\text{kJ/s}$

사용할 공식

냉동기 COP(성능계수) = $\frac{Q_L}{W}$ (저온에서 흡수한 열량 ÷ 소비한 일)

계산 과정

단위 통일: $Q_L = \frac{1{,}800\text{ kJ/min}}{60\text{ s/min}} = 30\text{ kW}$

$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{30\text{ kW}}{10\text{ kW}} = 3$

선지 판단

① 1 — 오답. COP = 1이 되려면 $Q_L = W$, 즉 흡수 열량과 소비 일이 같아야 하나 계산값은 3이다.
② 3 — 정답. 단위 변환 후 $Q_L = 30$ kW, $W = 10$ kW이므로 COP = 3이다.
③ 9 — 오답. 1, 800kJ/min ÷ 10 kW = 180을 다시 잘못 연산하거나 혼동한 값으로 성립하지 않는다.
④ 18 — 오답. 단위를 변환하지 않고 1,800 ÷ 100 = 18로 계산하거나 다른 혼동에서 비롯된 오류다.

오답 포인트

가장 빈번한 실수는 단위 변환 생략이다. 1, 800kJ/min을 그대로 10 kW에 나누면 180이 되어 보기에 없는 값이 나온다. 이때 분 단위를 초 단위로 바꾸지 않은 것을 놓친다. 또한 COP를 W/Q_L로 뒤집어 적용하면 ①번 1/3 또는 엉뚱한 값이 나오므로 분자가 '원하는 효과(냉동기는 Q_L)'임을 반드시 확인한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

① 열량·동력의 단위가 다르면 반드시 초(s) 기준 kW로 통일한다. ② COP 분자는 '목적'이 되는 열량: 냉동기는 저온 흡수열 Q_L, 열펌프는 고온 방출열 Q_H로 구분한다. ③ 계산 결과가 보기에 없으면 단위 변환 누락을 가장 먼저 의심한다.

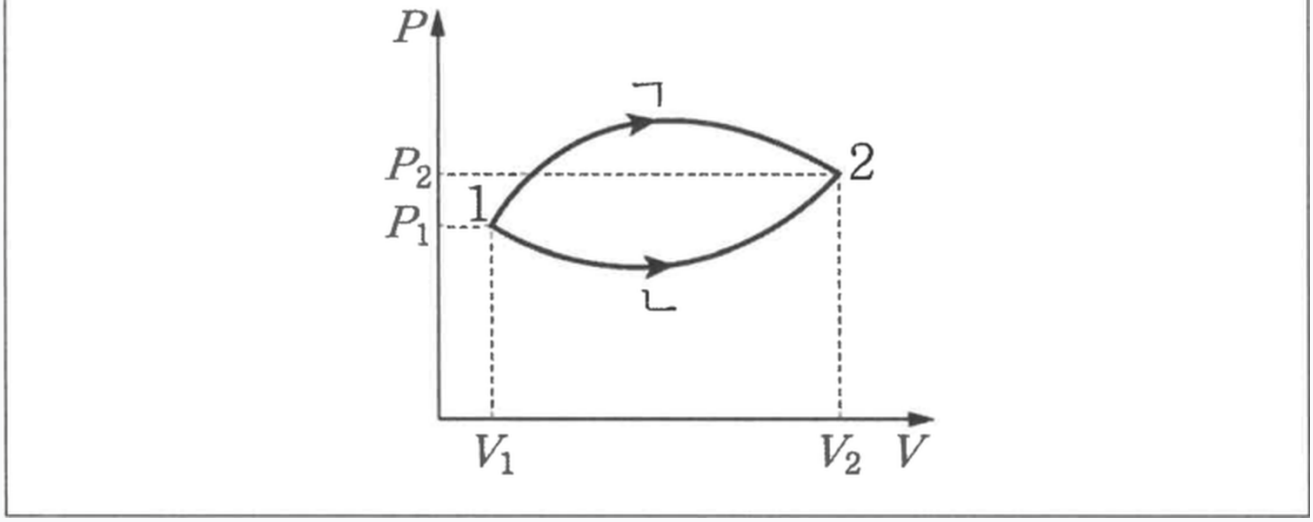
암기 포인트

냉동기 COP $= \frac{Q_L}{W}$, 열펌프 COP $= \frac{Q_H}{W}$ = 냉동기 COP $+1$. 두 값의 차이는 항상 1이다. 단위: 1 kW = 1kJ/s → 분(min) 단위 열량은 60으로 나누어 kW로 변환.

NoteBase

문 19. <보기>는 어떤 계의 상태가 1에서 2로 변화하는 두 가지 경로 ㄱ과 ㄴ을 나타낸 것이다. 열역학적 함수들 중 ㄱ과 ㄴ의 경로에 따라 변화량이 달라지는 것은?

<보기>



① 헬름홀츠(Helmholtz) 에너지(A)

② 내부 에너지(U)

③ 엔탈피(H)

④ 계에 가해진 열(Q)

정답 4번

출제 포인트

열역학 함수를 상태함수(state function)와 경로함수(path function)로 구분할 수 있는지 묻는 문제다. 상태 1→2 변화가 경로 ㄱ(위쪽 곡선)과 경로 ㄴ(아래쪽 곡선)으로 달라도 상태함수는 변화량이 같고, 경로함수는 경로마다 달라진다.

핵심 개념

상태함수: 계의 초기 상태와 최종 상태만으로 변화량이 결정된다. 경로가 달라도 변화량(Δ값)은 동일하다. 대표 상태함수: 내부 에너지 U, 엔탈피 $H = U + PV$, 헬름홀츠 에너지 $A = U - TS$, 깁스 에너지 $G = H - TS$, 엔트로피 S, 온도 T, 압력 P, 부피 V.

경로함수: 초기·최종 상태가 같아도 경로에 따라 값이 달라진다. 대표 경로함수: 열 Q, 일 W. Q와 W는 변화량의 개념이 없어 ΔQ, ΔW로 표기하지 않고 Q, W 자체로 쓴다.

NoteBase

선지별 해설

① 헬름홀츠 에너지 A = U − TS → 상태함수. 초기 상태 1과 최종 상태 2의 온도·엔트로피·내부 에너지 값만으로 ΔA가 결정되므로 경로 ㄱ과 ㄴ에서 변화량이 같다. 오답.
② 내부 에너지 U → 상태함수. 열역학 제1법칙 ΔU = Q − W 에서 Q와 W는 경로에 따라 달라지지만 그 차 ΔU는 항상 동일하다. 경로 ㄱ과 ㄴ에서 ΔU는 같다. 오답.
③ 엔탈피 H = U + PV → 상태함수. 상태 1과 2의 P, V, U 값이 고정되면 ΔH = ΔU + Δ(PV)가 결정된다. 경로에 무관하게 변화량이 같다. 오답.
④ 계에 가해진 열 Q → 경로함수. P-V 선도에서 열 Q = ΔU + W이고, 일 $W = \int PdV$는 P-V 선도의 곡선 아래 면적이다. 경로 ㄱ(위 곡선)과 경로 ㄴ(아래 곡선)은 서로 면적이 다르므로 W가 다르고, ΔU는 같으므로 Q = ΔU + W 역시 경로마다 달라진다. 정답.

오답 포인트

U, H, A, G, S는 모두 상태함수라는 사실을 확실히 외워야 한다. '계에 가해진 열'이라는 표현 때문에 직관적으로 상태함수처럼 느껴질 수 있으나, Q는 경로에 의존하는 값이다. P-V 선도에서 두 경로가 그리는 닫힌 고리 안의 면적이 바로 $\oint Q$와 $\oint W$의 차이를 시각적으로 보여준다.

다시 나오면 이렇게 판단

선지에 U, H, A, G, S가 있으면 무조건 상태함수 → 경로 무관. Q(열)나 W(일)가 있으면 경로함수 → 경로에 따라 달라진다. '경로에 따라 변화량이 달라지는 것'을 고르면 Q 또는 W를 선택한다. P-V 선도에서 두 경로가 그려지면 각 경로 아래 면적이 일 W이고, W가 달라지므로 Q도 달라진다.

암기 포인트

상태함수 암기 묶음: U, H, A, G, S, T, P, V (두문자 'U-HAGS-TPV' 등으로 묶기). 경로함수: Q(열), W(일) — 이 둘만 경로함수. 열역학 제1법칙 ΔU = Q − W 에서 좌변(ΔU)은 상태함수, 우변 Q와 W는 각각 경로함수이지만 차(Q − W)는 상태함수가 된다는 점도 함께 기억할 것.

NoteBase

문 20. $0^\circ C$에서 순수한 얼음이 물로 녹을 때 부피 변화량과 엔트로피 변화량은 각각 $-1.6 cm^3 mol^{-1}$과 $22 J K^{-1} mol^{-1}$이다. **Clapeyron 식을 사용하여 계산할 경우, 압력이** $100 bar$ **증가하게 될 때, 물의 어는점 변화에 대한 설명으로 가장 옳은 것은?**

① 약 7.3K만큼 내려간다.

② 약 7.3K만큼 올라간다.

③ 약 0.73K만큼 내려간다.

④ 약 0.73K만큼 올라간다.

정답 3번

출제 포인트

Clapeyron 식을 이용해 압력 변화에 따른 상평형 온도(어는점) 변화를 계산하는 문제이다. 부피 변화 부호가 음수인 경우 압력이 증가하면 어는점이 내려간다는 물리적 직관과 계산 결과를 일치시킬 수 있어야 한다.

조건 정리

부피 변화량 $\Delta V = -1.6 cm^3 mol^{-1} = -1.6 \times 10^{-6} m^3 mol^{-1}$
엔트로피 변화량 $\Delta S = 22 J\ K^{-1} mol^{-1}$
압력 변화 $\Delta P = 100 bar = 1.0 \times 10^7 Pa$

사용할 공식

Clapeyron 식: $\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$
역수를 취하면: $\frac{dT}{dP} = \frac{\Delta V}{\Delta S}$
어는점 변화: $\Delta T = \frac{\Delta V}{\Delta S} \cdot \Delta P$

계산 과정

$\frac{dT}{dP} = \frac{-1.6 \times 10^{-6}}{22} = -7.27 \times 10^{-8} K\ Pa^{-1}$

$\Delta T = -7.27 \times 10^{-8} \times 1.0 \times 10^7 = -0.727 K \approx -0.73 K$

결과가 음수이므로 어는점은 약 0.73K 내려간다.

NoteBase

선지 판단

① 약 7.3K만큼 내려간다. — X. 크기가 10배 과대. 단위 환산 오류(cm^3을m^3으로 바꾸지 않거나 bar→Pa 환산 누락)에서 생기는 값이다.
② 약 7.3K만큼 올라간다. — X. 크기도 틀리고 방향도 반대. $\Delta V < 0$이므로 압력 증가 시 어는점은 내려간다.
③ 약 0.73K만큼 내려간다. — O. Clapeyron 식 정확 계산 결과와 일치하며, 방향도 올바르다.
④ 약 0.73K만큼 올라간다. — X. 크기는 맞으나 방향이 반대. 물은 얼 때 부피가 팽창하므로 $\Delta V < 0$(얼음→물로 녹을 때 수축)이며 압력 증가는 어는점을 낮춘다.

오답 포인트

가장 흔한 실수 두 가지: (1) 방향 오판 — ΔV가 음수임을 간과하고 어는점이 올라간다고 보는 것. 물이 얼면 부피가 늘어나므로 녹을 때 $\Delta V < 0$이고, 이 경우 압력↑ → 어는점↓이다. (2) 크기 오류 —cm^3을m^3으로 환산하지 않으면 ΔT가 정확히 1000배 커져 약 7.3K가 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

$\Delta T = \frac{\Delta V}{\Delta S} \cdot \Delta P$ 공식을 쓸 때, (1)cm^3→m^3 환산($\times 10^{-6}$), (2) bar→Pa 환산($\times 10^{5}$)을 반드시 모두 적용한다. ΔV 부호가 음이면 압력 증가 시 어는점이 내려가고, 양이면 올라간다.

암기 포인트

물(H_2O)은 예외적으로 고체(얼음)→액체(물) 전환 시 부피 감소($\Delta V < 0$)하므로 압력이 높을수록 어는점이 낮아진다(고압 빙판이 녹는 이유). 이와 달리 대부분의 물질은 $\Delta V > 0$이어서 압력↑ → 녹는점↑이다.
Clapeyron 기울기 dP/dT의 부호로 기억하라: 물은 음(−)의 기울기를 가진다.

NoteBase