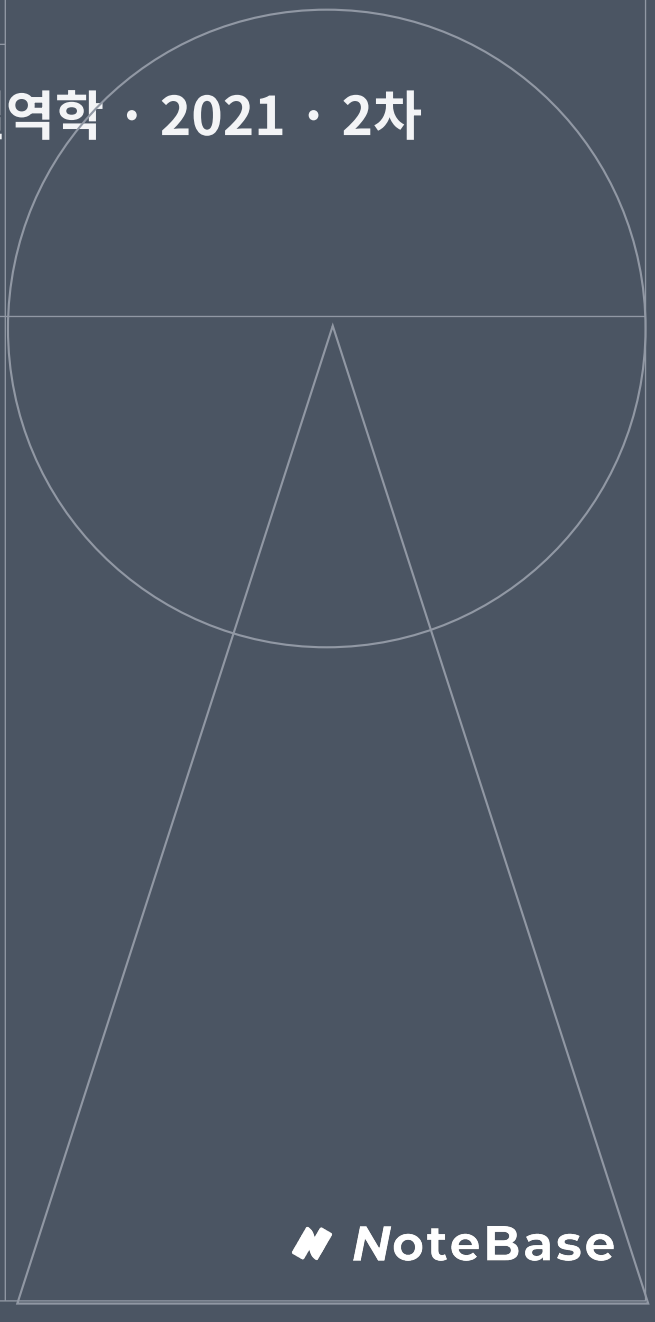
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 화공열역학 · 2021 · 2차



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 화공열역학 · 2021 · 2차

공무원/국가직/7급 · 화공열역학 · 2021 · 2차

문 1. 단열된 비커에 있는 10°C 물 300 g을 전기 열선으로 가열한다. 전압 12 V에서 2 A 전류가 500 s 동안 열선에 흐를 때, 물의 최종온도[°C]는? (단, 물의 비열은 $1\mathrm{cal g^{-1}{}^{\circ}C^{-1}}$, 1 J = 0.24 cal이며, 열선에 공급된 전기 에너지는 모두 물의 온도를 높이는 데 사용된다)

① 19.6

② 29.2

③ 40.0

④ 52.0

정답 1번

출제 포인트

전기 에너지가 전부 물의 온도 상승에 쓰인다는 단열 조건에서, 전력량(줄 단위)을 열량(칼로리 단위)으로 환산해 최종온도를 구하는 문제이다. 단위 환산 계수(1J = 0.24cal)를 빠뜨리지 않고 곱하는 것이 핵심이다.

조건 정리

초기온도 $T_1 = 10^{\circ}\mathrm{C}$, 질량 $m = 300\mathrm{g}$, 비열 c = 1 cal g^-1 ^^-1, 전압 $V = 12\mathrm{V}$, 전류 $I = 2\mathrm{A}$, 가열 시간 $t = 500\mathrm{s}$, 단위환산 1J = 0.24cal. 전기 에너지가 손실 없이 전부 물의 온도 상승(현열)에 쓰인다.

사용할 공식

전기 에너지 $Q_J = VIt$, 열량 환산 $Q_{cal} = Q_J \times 0.24$, 현열식 $Q_{cal} = mc\Delta T$에서 $\Delta T = \frac{Q_{cal}}{mc}$, 최종온도 $T_2 = T_1 + \Delta T$.

계산 과정

전기 에너지는 $Q_J = 12\mathrm{V} \times 2\mathrm{A} \times 500\mathrm{s} = 12000\mathrm{J}$이다.
이를 칼로리로 환산하면 $Q_{cal} = 12000 \times 0.24 = 2880\mathrm{cal}$이다.
온도 상승폭은 Δ T = 2880 cal300 g × 1 cal g^-1 ^^-1 = 9.6 ^C이다.
따라서 최종온도는 $T_2 = 10 + 9.6 = 19.6^{\circ}\mathrm{C}$이다.

NoteBase

선지 판단

① 19.6 — 옳다. 전기 에너지 12000J을 0.24를 곱해 2880cal로 환산하고, 300g·비열 1로 나누어 얻은 온도상승 9.6℃를 초기온도 10℃에 더한 값과 일치한다.
② 29.2 — 틀린 표현. 온도상승분 9.6℃ 대신 전기 에너지를 칼로리로 환산하지 않고 J값을 그대로 나누거나, 초기온도를 잘못 더하는 등 환산을 누락했을 때 나오는 값이다 → 올바른 값은 최종온도 19.6℃이다.
③ 40.0 — 틀린 표현. 단위 환산(0.24)을 곱하지 않고 12000J을 그대로 열량으로 써서 300으로 나눈 값(40℃)에 해당한다 → 반드시 J를 cal로 환산한 후 계산해야 한다.
④ 52.0 — 틀린 표현. 전압과 전류를 곱하는 과정에서 시간을 잘못 적용하거나 환산과 계산을 이중으로 잘못 적용했을 때 나올 수 있는 값으로, 올바른 계산 결과인 19.6℃와 다르다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 전기 에너지의 단위가 줄(J)이고 비열식은 칼로리(cal) 기준이라는 점이다. 1J = 0.24cal 환산을 빠뜨리면 40.0(③) 같은 값이 나오고, 초기온도 10℃를 더하지 않으면 온도상승분만 답으로 착각하게 된다. 전력(W)과 전력량(J)을 구분하지 못해 시간(500s)을 잘못 곱하거나 나누는 실수도 주의해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

전기 가열 문제는 항상 (1) 전력량 VIt를 J 단위로 먼저 구하고, (2) 문제에서 준 환산계수로 cal 단위로 바꾼 다음, (3) $Q = mc\Delta T$로 온도상승분을 구하고, (4) 초기온도에 더해 최종온도를 얻는 순서로 접근한다. 단위가 섞여 있으면 반드시 계산 전에 하나의 단위계로 통일한다.

암기 포인트

전기 에너지: $Q = VIt$ [J]. 단위환산: $1\text{J} = 0.24\text{cal}$. 현열식: $Q = mc\Delta T$. 최종온도 = 초기온도 + 온도상승분.

NoteBase

문 2. 압축기를 사용하여 질량유량이 $0.02kgs^{-1}$인 공기 흐름을 정상 상태에서 압축한다. 압축기 출구와 입구 사이의 공기 단위질량당 엔탈피 변화량은 $120kJkg^{-1}$이고 공기 단위질량당 $10kJkg^{-1}$의 열이 외부로 방출될 때, 공기 흐름에 가해지는 단위시간당 일의 크기[kW]는? (단, 운동에너지와 위치에너지의 변화는 무시한다)

① 2.2

② 2.4

③ 2.6

④ 2.8

정답 3번

출제 포인트

정상상태 개방계(압축기)에 대한 에너지수지식을 세우고, 열과 일의 부호(계로 들어오면 +, 계에서 나가면 −)를 올바르게 적용해 단위시간당 축일(동력)을 구하는 문제이다. 운동에너지·위치에너지 변화가 없다는 단서가 주어졌으므로 엔탈피 변화, 열, 일만으로 식이 단순화된다.

조건 정리

질량유량 $\dot{m} = 0.02$ kg s^{-1}. 단위질량당 엔탈피 변화량 Δ h = h_출구 - h_입구 = 120 kJ kg^-1 (압축기이므로 엔탈피 증가는 양수). 단위질량당 열은 계에서 외부로 방출되므로 계 기준 부호는 음수, 즉 $q = -10$ kJ kg^{-1}. 운동에너지·위치에너지 변화는 0이다.

사용할 공식

정상유동 개방계의 단위질량당 에너지수지식은 $\Delta h + \Delta \text{ke} + \Delta \text{pe} = q + w_s$ 이며, 여기서 q는 계가 받는 열, w_s는 계가 받는 축일(단위질량당)이다. 운동에너지·위치에너지 변화가 없으므로 $\Delta h = q + w_s$ 로 단순화된다. 단위시간당 일(동력)은 $\dot{W}_s = \dot{m} w_s$이다.

계산 과정

단위질량당 일은 $w_s = \Delta h - q = 120 - (-10) = 130$ kJ kg^{-1} 이다. 압축기가 공기에 일을 가하는 방향이므로 w_s는 양수로 나오는 것이 타당하며, 실제로 130 kJ kg^{-1}로 양수가 나와 압축기가 공기 흐름에 일을 가하고 있음이 확인된다. 단위시간당 일(동력)은 $\dot{W}_s = \dot{m} w_s = 0.02$ kg s^{-1} × 130 kJ kg^{-1} = 2.6 kW 이다.

NoteBase

선지 판단

① 2.2 — X. 열 방출을 엔탈피 변화에서 빼거나(120−10=110) 다른 부호 처리를 하면 나올 수 있는 값이나, 계가 받는 열의 부호를 반대로 적용한 오답이다.
② 2.4 — X. $\dot{m}$과 Δh만 곱하고 열 방출을 절반만 반영하는 등 부호를 잘못 조합했을 때 나오는 값으로, 올바른 에너지수지식을 적용하지 않은 결과이다.
③ 2.6 — O. $w_s = \Delta h - q = 120 - (-10) = 130$ kJ kg^{-1}, $\dot{W}_s = 0.02 \times 130 = 2.6$ kW로 정확히 일치한다.
④ 2.8 — X. 엔탈피 변화 120과 열 방출 10을 단순히 더한 130에 다른 유량을 곱하거나, 부호를 다르게 처리했을 때 나올 수 있는 값으로 근거가 없는 오답이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 '열이 외부로 방출된다'는 표현을 부호에 반영하는 과정이다. 계(공기 흐름) 기준으로 외부로 나가는 열은 반드시 음수($q = -10$)로 넣어야 하며, 이를 양수로 넣거나 아예 부호를 무시하고 단순히 120에서 10을 빼면(110) 오답이 나온다. 또한 문제에서 묻는 것은 '가해지는 일의 크기'이므로 부호를 뗀 절댓값(2.6)으로 답해야 하고, 단위질량당 일(130 kJ kg^{-1})과 단위시간당 일(2.6 kW)을 혼동해 질량유량을 곱하지 않은 채 답하지 않도록 주의한다.

다시 나오면 이렇게 판단

개방계 정상유동 문제에서는 항상 $\Delta h = q + w_s$ (운동·위치에너지 무시 시) 식을 기준으로 놓고, '방출'은 계에서 나가는 것이므로 음의 부호, '가해지는 일'은 계가 받는 일이므로 w_s에 해당함을 먼저 확정한다. 이후 단위질량당 값을 구하고 마지막에 질량유량을 곱해 단위시간당 값(동력, kW)으로 변환하는 순서를 지킨다.

암기 포인트

정상유동 에너지수지식(운동·위치에너지 무시): $\Delta h = q + w_s$. 열 방출(계에서 나감)은 $q < 0$, 열 흡수는 $q > 0$; 계가 일을 받으면 $w_s > 0$. 단위시간당 동력 $\dot{W}_s = \dot{m} w_s$로 단위질량당 값에 질량유량을 곱해 환산한다.

NoteBase

문 3. 열용량에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, C는 열용량, C_P는 정압 열용량, C_V는 정적 열용량, H는 몰 엔탈피, Q는 열, R은 기체상수, T는 온도이다)

① $C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$로 정의된다.

② 이상기체의 경우 모든 온도에서 $C_P - C_V = R$이다.

③ 이상기체의 C_V는 온도만의 함수이다.

④ $C = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)$로 정의되며 상태함수이다.

정답 4번

출제 포인트

열용량 C의 정의와 이상기체에서 C_P, C_V가 갖는 성질을 구분할 수 있는지를 묻는다. 특히 열 Q는 경로함수이므로 Q의 미분으로 정의되는 일반적인 열용량은 상태함수가 아니라는 점이 핵심이다.

핵심 개념

정압 열용량은 $C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$, 정적 열용량은 $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$로 정의되며, 두 값 모두 상태함수인 H와 U를 온도로 미분한 값이므로 그 자체가 상태함수이다.
이상기체의 경우 $H = U + RT$이므로 온도로 미분하면 $C_P = C_V + R$, 즉 $C_P - C_V = R$이 모든 온도에서 성립한다. 또한 이상기체의 U와 H는 온도만의 함수이므로 C_P, C_V 역시 온도만의 함수이다.
반면 일반적으로 정의하는 $C = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)$는 열 Q 자체가 경로함수이기 때문에 어떤 과정(정압 과정인지 정적 과정인지 등)을 거치느냐에 따라 값이 달라진다. 즉 이 식만으로 정의된 C는 상태함수가 아니다. 열용량이 상태함수가 되려면 반드시 정압 또는 정적처럼 경로(구속 조건)를 명시해 C_P나 C_V로 정의해야 한다.

선지별 해설

① $C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$는 정압 열용량의 표준 정의이므로 옳은 설명이다.
② 이상기체는 $H = U + RT$가 성립하고 양변을 T로 미분하면 $C_P = C_V + R$이 되며, 이 관계는 특정 온도에서만이 아니라 모든 온도에서 성립하므로 옳은 설명이다.
③ 이상기체의 내부에너지와 엔탈피는 온도만의 함수이므로, 이를 온도로 미분한 C_V(그리고 C_P) 역시 온도만의 함수이다. 옳은 설명이다.
④ $C = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)$로 정의된다는 부분까지는 일반적인 열용량의 표현이지만, 열 Q는 경로함수이므로 이 정의만으로는 값이 과정(경로)에 따라 달라져 상태함수가 될 수 없다. "상태함수이다"라는 서술이 틀렸으며, "정압 또는 정적 조건을 명시해야 상태함수인 C_P, C_V로 정의된다"로 고쳐야 옳은 설명이 된다.

NoteBase

오답 포인트

④를 옳다고 착각하기 쉬운 이유는 C_P, C_V가 상태함수라는 사실에 이끌려 열용량 일반이 항상 상태함수라고 넘겨짚기 때문이다. 하지만 경로를 지정하지 않은 $\partial Q/\partial T$는 과정에 따라 다른 값을 가지는 경로함수이지 상태함수가 아니다. Q가 경로함수라는 사실과 C_P, C_V가 각각 H, U라는 상태함수의 미분으로 정의된다는 사실을 혼동하지 않아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

선지에 $\partial Q/\partial T$ 또는 $\partial W/\partial T$ 형태로 정의된 양이 "상태함수이다"라고 서술되어 있으면 우선 의심한다. Q와 일 W는 경로함수이므로 이를 그대로 미분한 양은 경로(조건)를 명시하지 않는 한 상태함수가 될 수 없다. 반대로 $C_P = (\partial H/\partial T)_P$, $C_V = (\partial U/\partial T)_V$처럼 아래첨자로 조건(P 또는 V 고정)이 명시된 정의는 상태함수인 H, U를 미분한 것이므로 상태함수가 맞는다.

암기 포인트

$C_P = (\partial H/\partial T)_P$, $C_V = (\partial U/\partial T)_V$ — 조건이 명시되어야 상태함수이다.
이상기체: $C_P - C_V = R$(모든 온도에서 성립), C_P와 C_V는 온도만의 함수이다.
경로를 지정하지 않은 $\partial Q/\partial T$는 상태함수가 아니다 — Q는 경로함수이기 때문이다.

NoteBase

문 4. 압축인자(compressibility factor) Z를 다음과 같이 표현하는 비리얼(virial) 상태방정식에 대한 설명으로 옳은 것만을 모두 고르면? (단, B, C, D는 비리얼 계수이고 V는 몰 부피이다)

$Z = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \cdots$

ㄱ. 이상기체의 압축인자는 1이다.

ㄴ. 압력이 0에 가까워질수록 압축인자는 1에 가까워진다.

ㄷ. 비리얼 계수 값은 분자의 크기와 원자간 결합에너지에 의존한다.

ㄹ. 우변에서 분모의 차수가 높은 항일수록 분자들 사이에 더 높은 빈도의 상호작용을 반영한다.

① ㄱ, ㄴ

② ㄱ, ㄷ

③ ㄱ, ㄴ, ㄹ

④ ㄴ, ㄷ, ㄹ

정답 1번

출제 포인트

비리얼 상태방정식 $Z = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \cdots$의 각 항이 물리적으로 무엇을 의미하는지 정확히 이해하는지를 묻는다. 단순히 식의 형태를 외우는 것이 아니라, 이상기체 극한에서 압축인자가 어떻게 되는지, 그리고 각 비리얼 계수가 실제로 어떤 상호작용을 반영하는지를 구분할 수 있어야 한다.

핵심 개념

압축인자 $Z = \frac{PV}{RT}$는 실제기체가 이상기체 거동에서 벗어나는 정도를 나타낸다. 이상기체는 분자 사이의 상호작용이 없다고 가정하므로 $Z = 1$이며, 비리얼 전개에서 B, C, D 항이 모두 0이 되는 경우에 해당한다.
압력이 0에 가까워지면(또는 몰 부피 V가 무한히 커지면) $\frac{B}{V}, \frac{C}{V^2}, \frac{D}{V^3}$ 항이 모두 0으로 수렴하므로 Z는 1에 가까워진다. 즉 저압 극한에서 실제기체는 이상기체처럼 행동한다.
한편 비리얼 계수 B, C, D는 통계역학적으로 분자 간 상호작용 퍼텐셜(분자간 인력·척력)로부터 유도되는 값으로, B는 두 분자가 동시에 상호작용하는 효과(2체 상호작용), C는 세 분자가 동시에 상호작용하는 효과(3체 상호작용), D는 네 분자가 동시에 상호작용하는 효과(4체 상호작용)를 반영한다. 이는 분자 내부의 원자와 원자를 묶는 화학 결합에너지와는 무관하며, 분자와 분자 사이의 상호작용 에너지(분자간 퍼텐셜)에 의해 결정된다. 또한 분모의 차수가 높아질수록 반영하는 것은 상호작용이 일어나는 '빈도'가 아니라 동시에 상호작용에 참여하는 분자의 '개수'(다체 상호작용의 체수)이다.

NoteBase

선지별 해설

ㄱ. 이상기체의 압축인자는 1이다. → 옳다. 이상기체는 분자 간 상호작용이 없다고 가정하므로 $B = C = D = 0$이 되어 $Z = 1$이 된다.
ㄴ. 압력이 0에 가까워질수록 압축인자는 1에 가까워진다. → 옳다. 압력이 0으로 갈수록 몰 부피 V는 무한대로 커지고, 그 결과 $\frac{B}{V}$, $\frac{C}{V^2}$, $\frac{D}{V^3}$의 값이 모두 0으로 수렴하여 $Z \to 1$이 된다.
ㄷ. 비리얼 계수 값은 분자의 크기와 원자간 결합에너지에 의존한다. → 틀렸다. 비리얼 계수는 분자와 분자 '사이'의 상호작용 퍼텐셜(분자간 인력·척력, 분자 크기에 따른 배제부피 효과 등)에 의해 결정되는 값이지, 한 분자 내부의 원자와 원자를 연결하는 화학 결합에너지와는 무관하다. '원자간 결합에너지' → '분자간 상호작용에너지(분자간 퍼텐셜)'로 바꾸어야 옳은 설명이 된다.
ㄹ. 우변에서 분모의 차수가 높은 항일수록 분자들 사이에 더 높은 빈도의 상호작용을 반영한다. → 틀렸다. 분모의 차수가 높은 항(C/V^2, D/V^3 등)은 상호작용이 일어나는 '빈도'가 높다는 뜻이 아니라, 동시에 상호작용에 참여하는 분자의 수가 더 많다는 것을 뜻한다. 즉 B항은 2개 분자 사이의 동시 상호작용(2체 상호작용), C항은 3개 분자 사이의 동시 상호작용(3체 상호작용), D항은 4개 분자 사이의 동시 상호작용(4체 상호작용)을 나타낸다. '더 높은 빈도의 상호작용' → '더 많은 분자가 동시에 참여하는 다체 상호작용'으로 바꾸어야 옳은 설명이 된다.
따라서 옳은 설명은 ㄱ, ㄴ이며 정답은 ①번이다.

오답 포인트

ㄷ과 ㄹ은 언뜻 보면 그럴듯하게 느껴지지만, 둘 다 '분자와 분자 사이의 상호작용'을 '분자 내부의 결합'이나 '상호작용의 빈도'라는 다른 개념으로 바꿔치기한 오답이다. 비리얼 계수는 화학결합에너지가 아니라 분자간 상호작용 퍼텐셜에서 유도되며, 항의 차수는 상호작용의 빈도가 아니라 동시에 관여하는 분자의 개수(2체·3체·4체)를 의미한다는 점을 헷갈리면 ③이나 ④를 고르게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

비리얼 상태방정식 문제에서는 먼저 저압(또는 저밀도) 극한에서 $Z \to 1$이 성립한다는 사실을 기본으로 확인한다. 이후 각 비리얼 계수($B, C, D, \ldots$)가 각각 2체, 3체, 4체 분자 간 동시 상호작용을 반영한다는 점, 그리고 이 상호작용이 분자 내부의 화학 결합에너지가 아니라 분자와 분자 사이의 상호작용 퍼텐셜에서 비롯된다는 점을 기준으로 선지의 표현을 하나하나 대조해서 판단한다.

암기 포인트

이상기체·저압 극한: $Z \to 1$. 비리얼 계수 B, C, D는 각각 2체·3체·4체 분자간 상호작용(분자간 퍼텐셜)을 반영하며, 분자 내부의 결합에너지와는 무관하다. 차수가 높을수록 '빈도'가 아니라 '동시에 관여하는 분자 수'가 늘어난다고 기억해 둔다.

NoteBase

문 5. 작동 기체가 이상기체인 Carnot 기관에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 완전히 가역적인 방식으로 작동한다.

② 두 개의 단열과정과 두 개의 일정부피 과정으로 이루어진다.

③ 하나의 사이클에 걸친 기관의 엔트로피 변화는 0이다.

④ 고온의 열 저장고, 저온의 열 저장고 및 기관의 엔트로피 변화의 총합 ΔS_{tot}는 0이다.

정답 2번

출제 포인트

Carnot 기관(카르노 사이클)을 구성하는 네 과정의 종류와, 가역 사이클에서 성립하는 엔트로피 관계(기관 자체의 순환적분과 전체 계의 총 엔트로피 변화)를 구분해서 아는지를 묻는 문항이다.

핵심 개념

이상기체를 작동유체로 하는 Carnot 사이클은 등온팽창 → 단열팽창 → 등온압축 → 단열압축의 두 개의 등온과정과 두 개의 단열과정으로 구성된다. 일정부피(등적) 과정은 Carnot 사이클에 포함되지 않는다. 사이클을 이루는 모든 과정이 가역이므로, 기관(작동유체)은 한 사이클을 마치면 원래 상태로 돌아오고 엔트로피는 상태함수이므로 사이클 1회에 걸친 기관의 엔트로피 변화는 $\oint dS = 0$이다. 또한 각 과정이 모두 가역이면 열저장고(고온·저온)와 기관을 합한 전체 계(우주)의 총 엔트로피 변화도 $\Delta S_{tot} = 0$이 된다. 반면 비가역 기관이라면 기관 자체의 사이클 엔트로피 변화는 여전히 0이지만 저장고를 포함한 총 엔트로피 변화 ΔS_{tot}는 0보다 크다.

NoteBase

선지별 해설

① 완전히 가역적인 방식으로 작동한다.
O. Carnot 기관은 정의상 모든 과정(등온 2개, 단열 2개)이 가역적으로 진행되는 이상적인 기관이다.

② 두 개의 단열과정과 두 개의 일정부피 과정으로 이루어진다.
X. Carnot 사이클은 두 개의 단열과정과 두 개의 등온과정으로 이루어진다. '일정부피 과정'이 아니라 '등온과정'이 되어야 하므로 옳지 않은 설명이다.

③ 하나의 사이클에 걸친 기관의 엔트로피 변화는 0이다.
O. 엔트로피는 상태함수이므로 기관이 한 사이클을 거쳐 처음 상태로 되돌아오면 기관 자체의 엔트로피 변화는 항상 0이다(가역·비가역 기관 모두 성립).

④ 고온의 열 저장고, 저온의 열 저장고 및 기관의 엔트로피 변화의 총합 ΔS_{tot}는 0이다.
O. Carnot 기관은 완전 가역이므로 기관과 두 저장고를 합한 전체 계의 총 엔트로피 변화가 0이 된다. 이는 가역 기관에서만 성립하는 특징이다.

오답 포인트

'두 개의 단열과정'이라는 앞부분이 맞기 때문에 뒷부분의 '일정부피 과정'까지 무심코 옳다고 넘기기 쉽다. Carnot 사이클의 나머지 두 과정은 부피가 일정한 과정이 아니라 온도가 일정한 등온과정이라는 점을 정확히 구분해야 한다. 또한 ③(기관만의 엔트로피 변화=0)과 ④(저장고 포함 전체 엔트로피 변화=0)를 같은 말로 착각하지 않아야 하는데, ③은 모든 사이클 기관에 공통으로 성립하고 ④는 가역(Carnot) 기관에서만 성립한다는 차이가 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

'Carnot 사이클' 또는 'Carnot 기관'을 구성하는 과정을 묻는 선지가 나오면 먼저 '등온 2개 + 단열 2개'인지부터 확인한다. 일정부피, 일정압력 같은 단어가 하나라도 섞여 있으면 그 선지는 틀린 설명일 가능성이 높다. 엔트로피 관련 선지는 '기관만의 변화'인지 '저장고까지 포함한 총 변화'인지를 구분해서 판단한다.

암기 포인트

Carnot 사이클 = 등온팽창 + 단열팽창 + 등온압축 + 단열압축(등온 2, 단열 2). 사이클 1회당 기관 자체의 엔트로피 변화는 항상 0. 가역(Carnot) 기관에서는 저장고까지 포함한 총 엔트로피 변화 ΔS_{tot}도 0.

NoteBase

문 6. 힘(force)의 크기를 큰 것부터 순서대로 바르게 나열한 것은?

① $1\text{lb}_f > 1\text{kg}_f > 1\text{N} > 1\text{dyne}$

② $1\text{lb}_f > 1\text{kg}_f > 1\text{dyne} > 1\text{N}$

③ $1\text{kg}_f > 1\text{lb}_f > 1\text{N} > 1\text{dyne}$

④ $1\text{kg}_f > 1\text{lb}_f > 1\text{dyne} > 1\text{N}$

정답 3번

출제 포인트

여러 힘의 단위(lbf, kgf, N, dyne)를 SI 단위인 뉴턴(N) 기준으로 환산해 크기 순서를 비교하는 문제다. 각 단위가 뉴턴의 몇 배인지 정확히 알고 있어야 순서를 가릴 수 있다.

조건 정리

비교 대상은 1 lbf, 1 kgf, 1 N, 1 dyne 네 가지다. 뉴턴은 $1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$로 정의되는 SI 힘의 단위이고, kgf(중량킬로그램)와 lbf(파운드포스)는 각각 질량 1 kg, 1 lb에 표준중력가속도를 곱한 중력단위이며, dyne은 CGS 단위계의 힘의 단위다.

사용할 공식

$1\ \text{kgf} = 1\ \text{kg} \times g = 9.80665\ \text{N}$

$1\ \text{lbf} = 0.45359\ \text{kg} \times g \approx 4.4482\ \text{N}$

$1\ \text{dyne} = 1\ \text{g} \cdot \text{cm/s}^2 = 10^{-5}\ \text{N}$

계산 과정

네 단위를 모두 뉴턴으로 환산하면 다음과 같다.

$1\ \text{kgf} \approx 9.807\ \text{N}$

$1\ \text{lbf} \approx 4.448\ \text{N}$

$1\ \text{N} = 1\ \text{N}$

$1\ \text{dyne} = 10^{-5}\ \text{N} = 0.00001\ \text{N}$

이 값을 큰 순서대로 나열하면 $9.807 > 4.448 > 1 > 0.00001$이므로, 힘의 크기 순서는 1 kgf > 1 lbf > 1 N > 1 dyne이 된다.

NoteBase

선지 판단

① 1 lbf > 1 kgf > 1 N > 1 dyne — X. lbf(약 4.448 N)가 kgf(약 9.807 N)보다 크다고 했으므로 첫 두 항의 대소가 뒤바뀌어 있다.
② 1 lbf > 1 kgf > 1 dyne > 1 N — X. 첫 두 항의 대소가 틀렸을 뿐 아니라, dyne(0.00001 N)이 N(1 N)보다 크다고 되어 있어 마지막 두 항의 순서도 틀렸다.
③ 1 kgf > 1 lbf > 1 N > 1 dyne — O. 뉴턴으로 환산한 값 9.807 N > 4.448 N > 1 N > 0.00001 N과 정확히 일치한다.
④ 1 kgf > 1 lbf > 1 dyne > 1 N — X. 앞의 kgf, lbf 순서는 맞지만, dyne과 N의 대소가 뒤바뀌어 있다(dyne이 N보다 훨씬 작다).

오답 포인트

kgf와 lbf 중 어느 쪽이 더 큰지 헷갈리기 쉬운데, 두 단위 모두 표준중력가속도를 곱해 만든 중력단위이므로 결국 질량의 크기(1 kg vs 1 lb ≈ 0.4536 kg)로 비교하면 되고, 1 kg이 1 lb보다 크므로 kgf가 lbf보다 크다. 또한 dyne은 CGS 단위이고 N은 SI 단위인데, 단위계가 작을수록(cm, g 기준) 같은 물리량의 수치는 커진다고 착각하기 쉽지만, dyne은 N보다 10^{-5}배로 훨씬 작은 단위이므로 크기 비교 시 유의해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

단위 환산 비교 문제는 선지를 눈으로만 보고 감으로 판단하지 말고, 모든 단위를 하나의 기준 단위(보통 SI 단위인 N)로 직접 환산한 뒤 수치로 비교한다. kgf ≈ 9.8 N, lbf ≈ 4.45 N, dyne = 10^{-5} N이라는 환산값을 기억해 두면 어떤 조합의 선지가 나와도 바로 대소를 가릴 수 있다.

암기 포인트

1 kgf ≈ 9.807 N, 1 lbf ≈ 4.448 N, 1 N = 1 N, 1 dyne = 10^{-5} N = 0.00001 N. 크기 순서는 kgf > lbf > N > dyne이며, 이는 질량 기준으로 보면 kg > lb이고 단위계 기준으로 보면 SI(N) > CGS(dyne)라는 두 가지 비교축이 겹쳐 있는 것으로 이해하면 외우기 쉽다.

NoteBase

문 7. 내부에너지에 대한 관계식으로 옳지 않은 것은? (단, U는 몰 내부에너지, C_V는 정적 열용량, P는 압력, S는 몰 엔트로피, T는 온도, V는 몰 부피이다)

① 이상기체일 때 $\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P$

② $\left[\frac{\partial}{\partial S}\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S\right]_V = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S$

③ $\left[\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V\right]_S = \left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$

④ $dU = C_V dT + \left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P\right]dV$

정답 3번

출제 포인트

몰 내부에너지 $U(S, V)$의 전미분 $dU = TdS - PdV$로부터 나오는 편도함수 관계와 맥스웰 관계식을 정확히 적용할 수 있는지를 묻는다. 특히 이차 편미분(교차미분)의 순서를 바꿀 때 부호가 그대로 유지되는지, 부호가 바뀌는지를 구분하는 것이 핵심이다.

조건 정리

U는 몰 내부에너지, S는 몰 엔트로피, V는 몰 부피, T는 온도, P는 압력, C_V는 정적 열용량이다. 기본 관계식은 $dU = TdS - PdV$이며, 여기서 $\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = T$, $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S = -P$가 성립한다.

사용할 공식

내부에너지의 전미분 $dU = TdS - PdV$에서 유도되는 맥스웰 관계식 $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$와, 온도-부피 형태의 내부에너지 미분식 $dU = C_V dT + \left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P\right]dV$를 사용한다.

계산 과정

①: 이상기체는 U가 T만의 함수이므로 V를 고정하든 P를 고정하든 $\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P$가 성립한다. 옳은 식이다.
②: $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S = -P$이므로 이를 S로 다시 미분하면 $\left[\frac{\partial}{\partial S}\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S\right]_V = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$이다. 한편 맥스웰 관계식에 의해 $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$이므로 양변이 서로 같다. 옳은 식이다.
③: $\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = T$이므로 이를 V로 다시 미분하면 $\left[\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V\right]_S = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S$이다. 그런데 맥스웰 관계식은 $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$이지 $+\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$가 아니다. 즉 좌변은 $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S$와 같아야 하는데, ③은 이를 부호가 반대인 $\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$와 같다고 적어 놓아 부호가 틀렸다.
④: 온도와 부피를 독립변수로 잡은 표준 내부에너지 전미분식으로, $dU = C_V dT + \left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P\right]dV$는 잘 알려진 옳은 관계식이다.

NoteBase

선지 판단

① 이상기체에서는 U가 온도만의 함수이므로 압력을 고정하든 부피를 고정하든 T에 대한 U의 편미분값이 같다 → 옳음(정답 아님).
② $(\partial U/\partial V)_S = -P$를 S로 한 번 더 미분한 값과 맥스웰 관계식 $(\partial T/\partial V)_S = -(\partial P/\partial S)_V$의 우변이 정확히 일치한다 → 옳음(정답 아님).
③ $(\partial U/\partial S)_V = T$를 V로 미분하면 $(\partial T/\partial V)_S$가 되는데, 이는 맥스웰 관계식에 의해 $-(\partial P/\partial S)_V$와 같아야 한다. 그런데 선지는 부호를 빼고 $(\partial P/\partial S)_V$와 같다고 서술하여 부호가 반대로 틀렸다 → 틀림(정답).
④ $dU = C_V dT + [T(\partial P/\partial T)_V - P]dV$는 U(T,V)의 표준 전미분식으로 옳게 서술되었다 → 옳음(정답 아님).

오답 포인트

①, ②, ④를 정답으로 고르는 실수는 이들 식이 익숙하지 않은 형태라 낯설게 느껴져 틀렸다고 오판하는 데서 비롯된다. 반대로 ③을 넘기는 실수는 이차 편미분에서 어느 변수를 먼저 미분하든 결과가 같다는 점만 보고, 맥스웰 관계식 특유의 부호(마이너스)를 놓치는 데서 비롯된다. $U(S, V)$ 계열의 맥스웰 관계식은 $(\partial T/\partial V)_S = -(\partial P/\partial S)_V$처럼 반드시 음의 부호가 붙는다는 점을 기억해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

내부에너지 U(S,V)의 전미분 $dU = TdS - PdV$를 기준으로 $(\partial U/\partial S)_V = T$, $(\partial U/\partial V)_S = -P$를 먼저 적어 둔 뒤, 이차 교차미분 $\partial^2 U/\partial V \partial S$를 두 방향에서 각각 계산해 부호까지 맞춰 비교한다. 부호가 하나라도 어긋나면 그 선지가 오답이다.

암기 포인트

$dU = TdS - PdV$에서 나오는 맥스웰 관계식은 $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$로 반드시 음의 부호가 붙는다는 것을 외워 둔다. 또한 U(T,V) 형태의 전미분 $dU = C_V dT + \left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P\right]dV$도 함께 기억해 둔다.

NoteBase

문 8. 환산압력(reduced pressure)이 1.25일 때, 퓨개시티(fugacity) 계수가 0.5인 순수한 기체의 퓨개시티[bar]는? (단, 이 기체의 임계압력 P_c는 40 bar이다)

① 20

② 25

③ 30

④ 35

정답 2번

출제 포인트

환산압력(reduced pressure)의 정의를 이용해 실제 압력을 구하고, 퓨개시티 계수(fugacity coefficient)의 정의를 이용해 퓨개시티를 계산하는 문제이다. 환산압력·임계압력·압력 세 값의 관계와 퓨개시티 계수·압력·퓨개시티 세 값의 관계를 순서대로 적용할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

환산압력 $P_r = 1.25$, 퓨개시티 계수 $\phi = 0.5$, 임계압력 $P_c = 40$ bar이다. 구하는 값은 이 기체의 퓨개시티 f [bar]이다.

사용할 공식

환산압력의 정의: $P_r = \frac{P}{P_c}$. 퓨개시티 계수의 정의: $\phi = \frac{f}{P}$.

계산 과정

먼저 환산압력의 정의로부터 실제 압력 P를 구한다. $P = P_r \times P_c = 1.25 \times 40 = 50$ bar이다. 다음으로 퓨개시티 계수의 정의로부터 퓨개시티 f를 구한다. $f = \phi \times P = 0.5 \times 50 = 25$ bar이다.

선지 판단

① 20 → X. 임계압력 40에 환산압력 1.25를 곱하지 않고 다른 값을 곱하거나 계수 적용을 잘못한 경우에 나오는 값으로, $P = 50$, $f = 25$라는 계산 결과와 맞지 않는다.
② 25 → O. $P = 1.25 \times 40 = 50$ bar이고 $f = 0.5 \times 50 = 25$ bar이므로 계산 결과와 일치한다.
③ 30 → X. 압력 $P = 50$ bar에 퓨개시티 계수 0.5를 반영하지 않고 임의로 어림한 값이라 계산 결과와 맞지 않는다.
④ 35 → X. 임계압력 40 bar에 가까운 값으로 환산압력이나 퓨개시티 계수를 반영하지 않은 값이라 계산 결과와 맞지 않는다.

NoteBase

오답 포인트

이 문제에서 자주 하는 실수는 환산압력을 바로 퓨개시티 계수와 곱해버리는 것이다. 환산압력은 실제 압력과 임계압력의 비이고, 퓨개시티 계수는 퓨개시티와 실제 압력의 비이므로 두 정의를 혼동하면 안 된다. 반드시 P_r과 P_c로 실제 압력 P를 먼저 구한 다음, 그 P에 ϕ를 곱해 퓨개시티 f를 구하는 두 단계를 거쳐야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

환산압력·환산온도가 주어지고 퓨개시티나 퓨개시티 계수를 구하라고 하면, 먼저 환산 변수의 정의식으로 실제 압력(또는 온도)을 복원한 뒤, 퓨개시티 계수의 정의식으로 최종 값을 계산하는 두 단계 절차를 순서대로 적용한다.

암기 포인트

환산압력 $P_r = P/P_c$, 퓨개시티 계수 $\phi = f/P$라는 두 정의식을 각각 정확히 기억해 둔다. $P = P_r P_c$, $f = \phi P$ 순서로 계산한다.

NoteBase

문 9. 대응상태 이론에 대한 설명으로 옳은 것만을 모두 고르면?

ㄱ. Ar, Kr, Xe은 같은 환산온도와 환산압력에서 거의 같은 압축인자를 가진다.
ㄴ. 이심인자(acentric factor)를 제3의 대응상태 파라미터로 사용할 수 있다.
ㄷ. 이심인자는 임의의 유체에 대하여 임계온도와 임계압력 그리고 특정한 환산온도에서 측정된 단 하나의 증기압에 의해 결정될 수 있다.
ㄹ. Ar, Kr, Xe의 이심인자 값은 0.7이다.

① ㄱ, ㄴ
② ㄴ, ㄷ
③ ㄷ, ㄹ
④ ㄱ, ㄴ, ㄷ

정답 4번

출제 포인트

대응상태 원리(corresponding states principle)와 이심인자(acentric factor)의 정의·역할을 정확히 아는지 묻는 문제다. 단순유체(simple fluid)의 압축인자 거동, 이심인자를 세 번째 파라미터로 쓰는 이유, 이심인자의 계산 방법, 그리고 Ar·Kr·Xe 같은 단순유체의 이심인자 값이 실제로 얼마인지를 구분해서 판단해야 한다.

핵심 개념

2-파라미터 대응상태 원리는 환산온도 $T_r = T/T_c$와 환산압력 $P_r = P/P_c$가 같으면 압축인자 Z도 거의 같다는 원리이며, Ar·Kr·Xe처럼 구형에 가까운 단순유체(simple fluid)에서 잘 성립한다. 그러나 극성이 크거나 분자 형태가 복잡한 유체는 2-파라미터만으로는 잘 맞지 않아 이심인자 ω를 세 번째 파라미터로 추가한 3-파라미터 대응상태 원리(Pitzer 상관관계)를 사용한다. 이심인자는 $\omega = -\log_{10}\left(P_r^{sat}\right)_{T_r=0.7} - 1$로 정의되며, 임계온도·임계압력과 환산온도 0.7에서 측정한 증기압 단 하나만 있으면 계산할 수 있다. 정의상 단순유체(Ar, Kr, Xe)는 $\omega \approx 0$에 가깝고, 0.7은 이심인자를 정의할 때 사용하는 기준 환산온도 값이지 이심인자 자체의 값이 아니다.

NoteBase

선지별 해설

ㄱ. O — Ar, Kr, Xe과 같은 단순유체는 같은 환산온도·환산압력에서 압축인자가 거의 같다는 것이 2-파라미터 대응상태 원리의 근거 자체이다.
ㄴ. O — 이심인자는 극성·비구형 분자의 거동을 보정하기 위해 도입된 제3의 대응상태 파라미터이며, 3-파라미터 대응상태 원리(Pitzer 상관관계)에서 사용된다.
ㄷ. O — 이심인자는 임계온도, 임계압력과 함께 환산온도 $T_r = 0.7$에서 측정한 단 하나의 증기압 값만으로 $\omega = -\log_{10}\left(P_r^{sat}\right)_{T_r=0.7} - 1$에 따라 결정될 수 있다.
ㄹ. X — 0.7은 이심인자를 정의할 때 기준으로 삼는 환산온도 값일 뿐이다. Ar, Kr, Xe처럼 구형에 가까운 단순유체는 정의상 이심인자가 0에 가깝다(0.7이 아니다) → 틀린 표현 "이심인자 값은 0.7이다" → 올바른 표현 "이심인자 값은 0에 가깝다(0.7은 정의에 쓰이는 기준 환산온도일 뿐이다)".

오답 포인트

이심인자 정의식에 등장하는 기준 환산온도 0.7과 이심인자 값 자체를 혼동하면 ㄹ을 옳은 것으로 잘못 판단해 ③번을 고르게 된다. 0.7은 어디까지나 증기압을 측정하는 조건(환산온도)이고, 그 조건에서 계산되어 나오는 결과값이 이심인자이며 단순유체에서는 이 값이 0 부근이라는 점을 구분해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

대응상태 이론 문제에서는 먼저 2-파라미터(환산온도·환산압력)로 설명되는 대상이 단순유체인지 확인하고, 이심인자가 언제 왜 추가되는지(비구형·극성 보정용 제3 파라미터), 어떻게 계산되는지(임계상수+환산온도 0.7에서의 증기압 하나)를 순서대로 따져본다. 마지막으로 숫자가 나오면 그것이 정의식의 조건값(0.7)인지 실제 이심인자 결과값인지를 반드시 구분해서 판단한다.

암기 포인트

이심인자 정의: $\omega = -\log_{10}\left(P_r^{sat}\right)_{T_r=0.7} - 1$. 단순유체(Ar, Kr, Xe)는 $\omega \approx 0$, 0.7은 정의에 쓰이는 기준 환산온도일 뿐 이심인자 값이 아니다.

NoteBase

문 10. 부피 3L인 용기에 373K의 기체 30mol이 있을 때, van der Waals 상태방정식으로 계산한 기체의 압력[atm]은? (단, 이 기체의 van der Waals 상태방정식 상수 a, b는 각각 $1.370\text{atmL}^2\text{mol}^{-2}$과 0.018Lmol^{-1}이고, 기체상수 R은 $0.082\text{Latmmol}^{-1}\text{K}^{-1}$이다)

① 206

② 236

③ 266

④ 296

정답 2번

출제 포인트

이상기체 상태방정식이 아니라 van der Waals 상태방정식을 사용해 실제 기체의 압력을 계산할 수 있는지 확인하는 문제이다. 분자 간 인력 보정항 an^2/V^2과 분자 부피 보정항 nb를 정확히 대입하는 것이 핵심이다.

조건 정리

부피 $V = 3$ L, 온도 $T = 373$ K, 몰수 $n = 30$ mol이다. van der Waals 상수는 $a = 1.370$ $\text{atmL}^2\text{mol}^{-2}$, $b = 0.018$ Lmol^{-1}이고, 기체상수는 $R = 0.082$ $\text{Latmmol}^{-1}\text{K}^{-1}$이다.

사용할 공식

van der Waals 상태방정식은 $\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$이다. 압력에 대해 정리하면 $P = \frac{nRT}{V-nb} - \frac{an^2}{V^2}$이다.

계산 과정

먼저 부피 보정항을 구하면 $nb = 30 \times 0.018 = 0.54$ L이므로 $V - nb = 3 - 0.54 = 2.46$ L이다.
이상기체 항의 분자는 $nRT = 30 \times 0.082 \times 373 = 917.58$이다.
따라서 $\frac{nRT}{V-nb} = \frac{917.58}{2.46} = 373$ atm이다.
다음으로 인력 보정항은 $\frac{an^2}{V^2} = \frac{1.370 \times 30^2}{3^2} = \frac{1.370 \times 900}{9} = 1.370 \times 100 = 137$ atm이다.
두 값을 대입하면 $P = 373 - 137 = 236$ atm이다.

선지 판단

① 206: 보정항 계산에서 오차가 있을 때 나올 수 있는 값으로, 정확한 계산 결과인 236과 다르므로 틀린 값이다.
② 236: $P = \frac{nRT}{V-nb} - \frac{an^2}{V^2} = 373 - 137 = 236$ atm으로 계산 결과와 일치하므로 옳다.
③ 266: 부피 보정항 nb를 빼지 않고 V를 그대로 사용하거나 인력 보정항을 잘못 나눈 경우 나올 수 있는 값으로, 옳지 않다.
④ 296: 인력 보정항 $\frac{an^2}{V^2}$을 빼지 않고 오히려 더하거나 이상기체 근사값(약 373)에서 잘못된 보정을 한 경우 나올 수 있는 값으로, 옳지 않다.

NoteBase

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 두 가지이다. 첫째, 부피 보정항 nb를 빼지 않고 V를 그대로 이상기체 항의 분모에 사용하는 경우이다. 둘째, 인력 보정항 $\frac{an^2}{V^2}$에서 n^2을 n으로 잘못 계산하거나 부호를 반대로(더하기) 적용하는 경우이다. 두 보정항을 각각 정확히 계산한 뒤 빼는 순서를 지켜야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

van der Waals 압력 계산 문제는 항상 두 단계로 나누어 접근한다. 먼저 부피 보정항 nb를 구해 $V-nb$를 계산하고 이상기체 항 $\frac{nRT}{V-nb}$를 구한다. 그다음 인력 보정항 $\frac{an^2}{V^2}$을 별도로 계산해 앞의 값에서 빼준다. 두 항을 섞어서 한 번에 계산하려 하지 않는다.

암기 포인트

van der Waals 상태방정식은 $\left(P+\frac{an^2}{V^2}\right)(V-nb)=nRT$이며, 압력식으로 바꾸면 $P=\frac{nRT}{V-nb}-\frac{an^2}{V^2}$이다. a는 분자 간 인력 보정, b는 분자 자체 부피 보정이라는 물리적 의미를 함께 기억해 둔다.

NoteBase

문 11. 온도 500K의 열 저장고가 600K의 또 다른 열 저장고로부터 6×10^6kJ의 열을 받았다. 열 전달과정에서 각 열 저장고의 온도 변화가 없을 때, 이 과정에서 전체 엔트로피의 변화 ΔS_{tot}[kJK^{-1}]는?

① 2,000

② 4,000

③ 6,000

④ 8,000

정답 1번

출제 포인트

두 개의 열 저장고(고온 저장고와 저온 저장고) 사이에서 열이 이동할 때 전체(우주) 엔트로피 변화를 계산하는 문제이다. 각 저장고는 온도가 일정하게 유지되는 열원이므로, 등온 과정에서의 엔트로피 변화식 $\Delta S = \frac{Q}{T}$를 저온 저장고와 고온 저장고 각각에 적용한 뒤 더하면 된다.

조건 정리

고온 저장고의 온도는 600 K이고, 저온 저장고의 온도는 500 K이다. 저온 저장고(500 K)가 고온 저장고(600 K)로부터 $Q = 6 \times 10^6$ kJ의 열을 받았으며, 열 전달 과정 동안 두 저장고의 온도는 각각 일정하게 유지된다. 고온 저장고는 열을 잃으므로 $-Q$가 나가고, 저온 저장고는 열을 얻으므로 $+Q$가 들어온다.

사용할 공식

저장고처럼 온도가 일정하게 유지되는 열원의 엔트로피 변화는 $\Delta S = \frac{Q}{T}$로 계산한다. 전체 엔트로피 변화는 두 저장고의 엔트로피 변화를 합한 값이다. $\Delta S_{tot} = \Delta S_{hot} + \Delta S_{cold} = -\frac{Q}{T_{hot}} + \frac{Q}{T_{cold}}$

계산 과정

고온 저장고(600 K)는 열을 내보내므로 $\Delta S_{hot} = -\frac{6 \times 10^6}{600} = -10{,}000$ kJK^{-1} 저온 저장고(500 K)는 열을 받으므로 $\Delta S_{cold} = +\frac{6 \times 10^6}{500} = +12{,}000$ kJK^{-1} 따라서 전체 엔트로피 변화는
$\Delta S_{tot} = -10{,}000 + 12{,}000 = 2{,}000$ kJK^{-1} 이 값은 양수이며, 열이 고온에서 저온으로 흐르는 자발적인 과정이므로 전체 엔트로피가 증가한다는 열역학 제2법칙과도 일치한다.

NoteBase

선지 판단

① 2,000 → O. 저온 저장고의 엔트로피 증가분(12,000)에서 고온 저장고의 엔트로피 감소분(10,000)을 뺀 값과 정확히 일치한다.
② 4,000 → X. Q/T_{cold}와 Q/T_{hot}의 차를 잘못 계산하거나 두 값을 더하는 등 부호 처리를 잘못했을 때 나올 수 있는 값이다.
③ 6,000 → X. Q를 두 온도의 평균이나 다른 방식으로 나누어 생긴 값으로, 두 저장고를 각각 등온 과정으로 나누어 계산하지 않으면 나올 수 있는 오답이다.
④ 8,000 → X. Q/T_{hot}만 계산하거나 부호를 반대로 적용하는 등 한쪽 저장고의 엔트로피 변화만 반영했을 때 나올 수 있는 값으로, 전체 엔트로피 변화가 아니다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 고온 저장고와 저온 저장고의 열 부호를 반대로 적용하거나, 두 저장고의 엔트로피 변화를 더하지 않고 하나만 계산하는 것이다. 열을 내보내는 저장고는 $-Q$, 열을 받는 저장고는 $+Q$를 대입해야 하며, 전체 엔트로피 변화는 반드시 두 값을 합산해야 한다는 점을 놓치지 않아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

온도가 일정한 두 열 저장고 사이의 열 전달 문제가 나오면, 먼저 어느 저장고가 열을 잃고 어느 저장고가 열을 받는지 부호를 확정한다. 그다음 각 저장고에 $\Delta S = Q/T$를 적용하고, 열을 잃는 쪽은 음수, 받는 쪽은 양수로 하여 두 값을 더해 전체 엔트로피 변화를 구한다.

암기 포인트

일정 온도 열원의 엔트로피 변화는 $\Delta S = Q/T$이며, 열을 내보내면 음수 열을 받으면 양수로 대입한다. 열이 고온에서 저온으로 흐르는 비가역 과정에서는 전체 엔트로피 변화가 항상 양수(증가)가 된다는 사실을 함께 기억해 둔다.

NoteBase

문 12. Clapeyron 식을 적용하여 순수한 물질의 상변화에 수반되는 잠열을 계산할 때 필요한 자료로 옳지 않은 것은?

① 상변화에 수반되는 부피 변화

② 상변화가 일어나는 온도

③ 상변화 온도에서 온도에 대한 포화증기압의 기울기

④ 상변화에 수반되는 Gibbs 에너지 변화

정답 4번

출제 포인트

Clapeyron 식을 이용해 상변화 잠열(엔탈피 변화)을 계산할 때 실제로 어떤 물리량들이 입력 자료로 쓰이는지 구분하는 문제이다. 식에 등장하는 항을 정확히 알고 있는지, 그리고 상변화 과정에서 항상 0이 되어 별도로 구할 필요가 없는 양이 무엇인지를 함께 묻는다.

사용할 공식

Clapeyron 식은 $\frac{dP^{sat}}{dT} = \frac{\Delta H}{T\Delta V}$ 로 주어진다. 이를 잠열(엔탈피 변화) ΔH에 대해 정리하면 $\Delta H = T\Delta V\frac{dP^{sat}}{dT}$ 이다.

조건 정리

위 식에서 ΔH를 구하려면 우변에 나타나는 세 가지 값, 즉 상변화가 일어나는 온도 T, 상변화에 따른 부피 변화 ΔV, 그리고 그 온도에서 포화증기압-온도 곡선의 기울기 dP^{sat}/dT가 필요하다. 반면 순수한 물질이 일정 온도·압력에서 상변화를 겪을 때는 두 상의 Gibbs 에너지가 같아지는 평형 조건 때문에 Gibbs 에너지 변화 ΔG는 항상 0이 되며, 이는 Clapeyron 식 자체에 들어가지 않는 별도의 결과값이다.

선지 판단

① 상변화에 수반되는 부피 변화: Clapeyron 식의 ΔV 항에 해당하는 필수 자료이므로 O.
② 상변화가 일어나는 온도: 식의 T 항에 해당하는 필수 자료이므로 O.
③ 상변화 온도에서 온도에 대한 포화증기압의 기울기: 식의 dP^{sat}/dT 항에 해당하는 필수 자료이므로 O.
④ 상변화에 수반되는 Gibbs 에너지 변화: 상변화는 정의상 등온·등압 평형 과정이므로 $\Delta G = 0$이 항상 성립하며, Clapeyron 식 어디에도 ΔG 항이 나타나지 않는다. 따라서 잠열 계산에 필요한 자료가 아니므로 옳지 않은 것에 해당한다.

오답 포인트

①②③을 고르는 오답은 Clapeyron 식에 실제로 들어가는 항(부피 변화, 온도, 증기압 기울기)을 정확히 기억하지 못해 발생한다. Gibbs 에너지 변화를 필요 자료로 착각하는 경우도 있는데, 이는 상변화가 등온·등압 평형 과정이라 $\Delta G = 0$이 자동으로 성립한다는 사실과 Clapeyron 식의 구성 항을 혼동한 결과이다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

"잠열 계산에 필요한 자료"를 묻는 문제는 먼저 Clapeyron 식 $dP^{sat}/dT = \Delta H/(T\Delta V)$을 적어 놓고, 그 식에 실제로 등장하는 변수(온도, 부피 변화, 증기압 기울기)만 골라낸다. 식에 나타나지 않는 열역학량(Gibbs 에너지 변화 등)이 선지로 제시되면 그것이 옳지 않은 것일 가능성이 높다고 판단한다.

암기 포인트

Clapeyron 식: $\Delta H = T\Delta V(dP^{sat}/dT)$ — 필요한 자료는 온도, 부피 변화, 포화증기압의 기울기 세 가지뿐이다. 상변화 시 $\Delta G = 0$은 평형 조건에서 나오는 결과이지 식의 입력 자료가 아니다.

NoteBase

문 13. 이상기체 혼합물의 단위 몰당 열역학 성질에 대한 표현으로 옳지 않은 것은? (단, G는 몰 Gibbs 에너지, H는 몰 엔탈피, S는 몰 엔트로피, P는 압력, R은 기체상수, y_i와 $\Gamma_i(T)$는 각각 성분 i의 몰분율과 일정 온도 T에서의 적분 상수, 상첨자 ig는 이상기체를 의미하며, M_i^{ig} ($M = G$, H 또는 S)는 순수한 이상기체 성분 i의 열역학 성질이다)

① $H^{ig} = \sum_i y_i H_i^{ig}$

② $S^{ig} = \sum_i y_i S_i^{ig} + R\sum_i y_i \ln y_i$

③ $G^{ig} = \sum_i y_i G_i^{ig} + RT\sum_i y_i \ln y_i$

④ $G^{ig} = \sum_i y_i \Gamma_i(T) + RT\sum_i y_i \ln(y_i P)$

정답 2번

출제 포인트

이상기체 혼합물의 몰당 열역학 성질(H, S, G)을 순성분 이상기체 성질과 혼합에 따른 부가항으로 어떻게 표현하는지를 묻는 문제이다. 엔탈피는 혼합에 따른 부가항이 없지만, 엔트로피와 Gibbs 에너지는 혼합 엔트로피(entropy of mixing) 항이 반드시 추가되며, 이때 부호를 정확히 아는 것이 핵심이다.

조건 정리

G는 몰 Gibbs 에너지, H는 몰 엔탈피, S는 몰 엔트로피, P는 압력, R은 기체상수이다. y_i는 성분 i의 몰분율, Γ_i(T)는 일정 온도 T에서의 적분 상수이다. 상첨자 ig는 이상기체를 의미하고, M_i^{ig}(M=G, H, S)는 순수한 이상기체 성분 i의 열역학 성질이다. 몰분율은 0 < y_i < 1이므로 $\ln y_i < 0$이다.

사용할 공식

이상기체 혼합물의 몰당 성질은 다음과 같다. 엔탈피: $H^{ig} = \sum_i y_i H_i^{ig}$ (혼합에 따른 부가항 없음). 엔트로피: $S^{ig} = \sum_i y_i S_i^{ig} - R\sum_i y_i \ln y_i$ (혼합 엔트로피 항은 항상 양수이므로 음의 로그 앞에 +R을 곱해 양수를 만든다). Gibbs 에너지: $G^{ig} = H^{ig} - TS^{ig} = \sum_i y_i G_i^{ig} + RT\sum_i y_i \ln y_i$. 순성분 이상기체의 몰 Gibbs 에너지는 $G_i^{ig} = \Gamma_i(T) + RT\ln P$로도 쓸 수 있다.

NoteBase

계산 과정

혼합 엔트로피가 항상 양수($\Delta S_{mix} > 0$)임을 이용해 각 선지의 부호를 점검한다. 엔트로피: $-R\sum_i y_i \ln y_i$에서 $\ln y_i < 0$이므로 이 항 전체는 양수가 되어 혼합에 의해 엔트로피가 증가한다는 물리적 사실과 일치한다. 그런데 ②는 이 항의 부호를 $+R\sum_i y_i \ln y_i$로 표기했으며, 이는 $\ln y_i < 0$이므로 전체가 음수가 되어 혼합 시 엔트로피가 오히려 감소한다는 뜻이 되어 물리적으로 모순이다. Gibbs 에너지는 $G^{ig} = H^{ig} - TS^{ig}$에서 $H^{ig} = \sum_i y_i H_i^{ig}$, $S^{ig} = \sum_i y_i S_i^{ig} - R\sum_i y_i \ln y_i$를 대입하면 $G^{ig} = \sum_i y_i (H_i^{ig} - TS_i^{ig}) + RT\sum_i y_i \ln y_i = \sum_i y_i G_i^{ig} + RT\sum_i y_i \ln y_i$가 되어 ③과 정확히 일치한다. 또한 $G_i^{ig} = \Gamma_i(T) + RT\ln P$를 대입하고 $\sum_i y_i = 1$을 쓰면 $\sum_i y_i G_i^{ig} = \sum_i y_i \Gamma_i(T) + RT\ln P$이므로 ③의 결과에 이를 대입하면 $G^{ig} = \sum_i y_i \Gamma_i(T) + RT\ln P + RT\sum_i y_i \ln y_i = \sum_i y_i \Gamma_i(T) + RT\sum_i y_i \ln(y_i P)$가 되어 ④와도 일치한다.

선지 판단

① H^{ig} = Σy_i H_i^{ig} → O. 이상기체는 분자 간 상호작용이 없으므로 엔탈피에는 혼합에 따른 부가항이 없고, 순성분 몰 엔탈피를 몰분율로 가중평균한 값과 같다.

② S^{ig} = Σy_i S_i^{ig} + RΣy_i ln y_i → X. 틀린 표현 → 올바른 표현: $S^{ig} = \sum_i y_i S_i^{ig} - R\sum_i y_i \ln y_i$. 혼합 엔트로피 항의 부호가 반대로 표기되어 있다. $\ln y_i < 0$이므로 +R을 곱하면 전체 부가항이 음수가 되어, 혼합에 의해 엔트로피가 증가해야 한다는 열역학적 사실과 어긋난다.

③ G^{ig} = Σy_i G_i^{ig} + RTΣy_i ln y_i → O. $G^{ig} = H^{ig} - TS^{ig}$에 올바른 엔탈피식과 엔트로피식을 대입하면 정확히 이 식이 유도된다.

④ G^{ig} = Σy_i Γ_i(T) + RTΣy_i ln(y_iP) → O. ③의 식에 순성분 이상기체의 $G_i^{ig} = \Gamma_i(T) + RT\ln P$ 관계와 $\sum_i y_i = 1$을 대입하면 그대로 유도되는 동치 표현이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 혼합 엔트로피 항의 부호이다. y_i가 1보다 작은 몰분율이므로 $\ln y_i$는 항상 음수라는 점을 놓치면, R을 곱한 항의 부호를 헷갈려 ②를 맞는 식으로 착각하기 쉽다. 또한 ③과 ④는 서로 다른 식처럼 보이지만 $G_i^{ig} = \Gamma_i(T) + RT\ln P$ 관계로 서로 치환 가능한 동치 표현이므로, 둘 다 옳은 식임을 놓치지 않아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

이상기체 혼합물의 성질식이 나오면 먼저 엔탈피에는 혼합 부가항이 없다는 것을 확인하고, 엔트로피와 Gibbs 에너지에만 $y_i \ln y_i$ 형태의 혼합항이 붙는다는 점을 떠올린다. 그다음 엔트로피 부가항의 부호가 $-R\sum y_i \ln y_i$(즉 전체가 양수)인지부터 점검하면 이런 유형의 부호 함정을 빠르게 걸러낼 수 있다.

암기 포인트

이상기체 혼합 시: 엔탈피는 그대로 가중평균, 엔트로피는 $-R\sum_i y_i \ln y_i$(항상 양수)가 더해지고, Gibbs 에너지는 $+RT\sum_i y_i \ln y_i$(항상 음수)가 더해진다는 부호 규칙을 짝지어 기억해 둔다.

NoteBase

문 14. 조름공정에 의해 425°C, 200 kPa의 기체 압력이 50 kPa로 감소할 때 온도[°C]는? (단, Joule-Thomson 계수는 $0.6^\circ\mathrm{C kPa}^{-1}$로 일정하다)

① 335

② 340

③ 345

④ 350

정답 1번

출제 포인트

조름공정(throttling process, Joule-Thomson 팽창)에서 압력 변화에 따른 온도 변화를 Joule-Thomson 계수를 이용해 계산하는 문제이다. 조름공정은 엔탈피가 일정하게 유지되는 등엔탈피 과정이며, Joule-Thomson 계수 $\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H$가 일정하다고 주어졌으므로 온도 변화와 압력 변화가 선형 관계에 있다는 점을 이용한다.

조건 정리

초기 온도 $T_1 = 425\,^\circ\mathrm{C}$, 초기 압력 $P_1 = 200\mathrm{kPa}$, 나중 압력 $P_2 = 50\mathrm{kPa}$, Joule-Thomson 계수 $\mu_{JT} = 0.6\,^\circ\mathrm{C}\cdot\mathrm{kPa}^{-1}$(일정)이 주어졌다. 압력이 200kPa에서 50kPa로 감소하므로 압력 변화량은 $\Delta P = P_2 - P_1 = 50 - 200 = -150\mathrm{kPa}$이다.

사용할 공식

Joule-Thomson 계수가 일정한 구간에서는 다음과 같이 온도 변화량을 직접 구할 수 있다.
$\Delta T = \mu_{JT}\cdot\Delta P$
여기서 $\mu_{JT} > 0$이면 압력이 감소할 때 온도도 감소한다(조름공정에서 흔히 나타나는 냉각 효과).

계산 과정

압력 변화량을 대입하면
$\Delta T = 0.6\times(-150) = -90\,^\circ\mathrm{C}$
따라서 나중 온도는
$T_2 = T_1 + \Delta T = 425 + (-90) = 335\,^\circ\mathrm{C}$
이다.

NoteBase

선지 판단

① 335 → O, 계산 결과와 일치한다.
② 340 → X, 계산값 335와 다르다.
③ 345 → X, 계산값 335와 다르다.
④ 350 → X, 계산값 335와 다르다(압력 변화량을 잘못 계산하거나 부호를 빠뜨렸을 때 나오는 값과 유사하다).

오답 포인트

압력이 감소하는 방향이므로 ΔP는 반드시 음수(50-200=-150)로 놓아야 한다. ΔP를 150으로 양수 처리하면 온도가 오히려 상승한 값(425+90=515)이 나와 오답 선지와 전혀 다른 값이 되므로, 이런 실수를 하면 바로 걸러진다. 또한 Joule-Thomson 계수의 단위가 $^\circ\mathrm{C}\cdot\mathrm{kPa}^{-1}$임을 확인해 압력 변화량(kPa)에 그대로 곱하면 온도 변화량(°C)이 나온다는 점을 놓치지 않아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

Joule-Thomson 계수가 상수로 주어지는 문제는 적분 없이 $\Delta T = \mu_{JT}\Delta P$로 바로 계산한다. 압력이 줄어드는 방향(팽창)인지 늘어나는 방향(압축)인지를 먼저 확인해 ΔP의 부호를 정하고, 최종 온도는 초기 온도에 ΔT를 더해 구한다.

암기 포인트

조름공정(Joule-Thomson 팽창)은 등엔탈피 과정이며, Joule-Thomson 계수 $\mu_{JT} = (\partial T/\partial P)_H$가 일정할 때는 $\Delta T = \mu_{JT}\Delta P$로 온도 변화를 바로 계산할 수 있다.

NoteBase

문 15. 성능계수가 3.5인 Carnot 냉동기가 분당 2,520kJ의 열을 흡수할 때, 이 냉동기를 작동시키기 위한 전력량[kW]은? (단, 냉동기에 공급된 전력은 모두 냉동기의 알짜 일로 전환된다)

① 8

② 10

③ 12

④ 14

정답 3번

출제 포인트

Carnot 냉동기의 성능계수(COP) 정의를 이용해 흡수열량으로부터 소요 동력(일)을 구하는 문제이다. 냉동기의 성능계수는 얻고자 하는 효과인 저온부 흡수열량 Q_C를 투입한 일 W로 나눈 값으로 정의된다는 점이 핵심이다.

조건 정리

성능계수 COP = 3.5, 분당 흡수열량 $Q_C = 2{,}520$ kJ/min이다. 냉동기에 공급된 전력은 모두 알짜 일로 전환되므로, 전력량은 곧 순환당 필요한 일 W와 같다.

사용할 공식

냉동기의 성능계수는 $\mathrm{COP} = \frac{Q_C}{W}$ 로 정의되며, 여기서 Q_C는 저온부에서 흡수하는 열량, W는 냉동기를 작동시키기 위해 공급해야 하는 일(동력)이다.

계산 과정

위 식을 일에 대해 정리하면 $W = \frac{Q_C}{\mathrm{COP}} = \frac{2{,}520\ \mathrm{kJ/min}}{3.5} = 720\ \mathrm{kJ/min}$ 이다. 이를 kW 단위로 환산하면 1분은 60초이므로 $W = \frac{720\ \mathrm{kJ/min}}{60\ \mathrm{s/min}} = 12\ \mathrm{kJ/s} = 12\ \mathrm{kW}$ 가 된다.

선지 판단

① 8 → 틀린 값. 2,520/3.5를 60이 아닌 다른 값으로 잘못 나누거나 계산 과정에서 오차가 생긴 경우에 나올 수 있는 값이며, 정확한 계산 결과인 12와 다르다.
② 10 → 틀린 값. 단위 환산이나 나눗셈 과정에서 반올림 오차 등으로 나올 수 있는 근사값이나, 정확한 계산 결과인 12와 일치하지 않는다.
③ 12 → 옳음. $Q_C/\mathrm{COP} = 2{,}520/3.5 = 720$ kJ/min이고, 이를 60으로 나누어 kW로 환산하면 정확히 12kW가 되어 계산 결과와 일치한다.
④ 14 → 틀린 값. 2,520을 3.5가 아닌 다른 수(예: 3.0 등)로 나눈 경우 나올 수 있는 값으로, 주어진 성능계수 3.5를 정확히 적용하지 않은 결과이다.

NoteBase

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 단위 환산을 빠뜨리는 것이다. Q_C/COP = 720을 그대로 답으로 착각하면 단위가 kJ/min이지 kW가 아니므로 틀린다. 반드시 분당 열량을 초당(kJ/s = kW)으로 바꾸기 위해 60으로 나누는 과정을 거쳐야 한다. 또한 성능계수의 정의를 냉동기 대신 열기관(열효율)처럼 착각해 $W = Q_C \times$ COP로 잘못 계산하지 않도록 주의해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

냉동기·열펌프 문제에서는 먼저 무엇이 성능계수의 정의인지(냉동기는 Q_C/W, 열펌프는 Q_H/W) 확인한 뒤, 주어진 열량의 시간 단위(분당·시간당)와 구하려는 동력의 단위(kW, 즉 초당 에너지)가 다르면 반드시 단위를 통일하는 환산을 거친다. 계산 순서는 항상 '정의식 세우기 → 대입 → 단위 환산' 순으로 진행한다.

암기 포인트

Carnot 냉동기 성능계수: COP = $\frac{Q_C}{W}$ (저온부 흡수열량 ÷ 투입한 일). 1kW = 1kJ/s이므로 분당(kJ/min) 값을 kW로 바꾸려면 60으로 나눈다는 점을 기억해 둔다.

NoteBase

문 16. 표는 화학반응 $2A + B + 3C \rightarrow D$의 반응물과 생성물의 정압 열용량을 나타내며 $298K$에서 D의 표준생성열은 $-65{,}000 J mol^{-1}$이다. $298K$에서 $3mol$의 A, $2mol$의 B와 $4mol$의 C가 반응하여 $1mol$의 D가 생성되었을 때, 일정 압력 단열 반응에서 도달할 수 있는 최고 온도[K]는? (단, 정압 열용량 C_P는 일정하며 A, B, C는 원소이다)

물질	A	B	C	D
C_P [J mol^{-1} K^{-1}]	35	15	10	40

① 363

② 573

③ 758

④ 948

정답 4번

출제 포인트

정압·단열 반응에서 생성열로부터 방출되는 반응열이 남은 물질들의 온도를 얼마나 올리는지를 에너지 수지로 계산하는 문제이다. A, B, C는 원소이므로 2A + B + 3C → D 반응의 반응열은 곧 D의 표준생성열과 같다는 점, 그리고 반응물이 화학양론비보다 과량 투입되어 미반응분이 남는다는 점을 함께 처리해야 한다.

조건 정리

반응식은 2A + B + 3C → D이고 298 K에서 D의 표준생성열은 $-65{,}000$ J mol^{-1}이다. 투입량은 A 3 mol, B 2 mol, C 4 mol이며 반응 결과 D가 1 mol 생성되었다. 화학양론비(2:1:3)에 따라 D 1 mol을 만드는 데 A 2 mol, B 1 mol, C 3 mol이 소모되므로, 반응 후 남는 양은 A $3-2=1$ mol, B $2-1=1$ mol, C $4-3=1$ mol이고 D는 1 mol 생성된다. 반응은 일정 압력·단열(계와 주위 사이 열 출입 없음) 조건이다.

사용할 공식

일정 압력 단열 과정에서는 전체 엔탈피 변화가 0이므로, 반응에 의한 엔탈피 변화(반응열 방출)와 생성물+미반응물의 온도 상승에 필요한 엔탈피 변화가 서로 상쇄된다.

$\Delta H_{rxn} + \sum n_i C_{P,i}(T_f - T_0) = 0$

여기서 ΔH_{rxn}은 실제로 반응이 진행된 만큼(D 1 mol 생성 기준)의 반응 엔탈피이고, $\sum n_i C_{P,i}$는 최종적으로 계에 남아 있는 모든 물질(미반응 A, B, C와 생성된 D)의 정압열용량의 합이다.

NoteBase

계산 과정

D가 1 mol 생성되었으므로 방출된 반응열은 표준생성열 그대로 65,000 J이다(발열이므로 이 에너지가 그대로 온도 상승에 쓰인다).
최종 상태에 남아 있는 물질의 열용량 합을 구하면
$\sum n_i C_{P,i} = 1 \times 35 + 1 \times 15 + 1 \times 10 + 1 \times 40 = 35 + 15 + 10 + 40 = 100\ \mathrm{J\ K^{-1}}$이다.
에너지 수지에서 온도 상승분은 $\Delta T = \frac{65{,}000}{100} = 650\ \mathrm{K}$이므로, 최고 온도는 $T_f = 298 + 650 = 948\ \mathrm{K}$이다.

선지 판단

① 363 → 틀린 표현. 온도 상승분 650 K를 반영하지 않고 훨씬 작은 값만 더한 계산으로, 초기 열용량 합이나 반응열 배분을 잘못 적용한 결과이다.
② 573 → 틀린 표현. 반응열을 D의 생성열 그대로 쓰지 않거나 열용량 합을 다르게(예: 반응물 전량 기준) 계산했을 때 나올 수 있는 값으로, 화학양론적으로 남은 물질만 합산해야 한다는 점을 놓친 결과이다.
③ 758 → 틀린 표현. 열용량 합을 100 J K^{-1}보다 작게(예: D를 빼거나 일부 물질을 누락) 계산하면 나오는 값으로, 최종 상태에 존재하는 모든 물질(미반응 A·B·C + 생성 D)을 빠짐없이 합산해야 한다는 점을 놓친 결과이다.
④ 948 → 옳은 표현. 반응열 65,000 J을 남은 물질들의 열용량 합 100 J K^{-1}로 나눈 온도 상승분 650 K를 초기 온도 298 K에 더한 값과 정확히 일치한다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 열용량 합을 구할 때 반응 전 투입량(A 3, B 2, C 4 mol) 그대로 쓰거나, 반대로 생성물 D를 빠뜨리는 것이다. 단열 반응이 끝난 뒤 실제로 계에 존재하는 물질은 미반응으로 남은 A 1 mol, B 1 mol, C 1 mol과 새로 생긴 D 1 mol이므로, 이 네 가지를 모두 포함해 열용량을 합산해야 한다. 또한 반응열은 화학양론비대로 완결된 반응(D 1 mol 생성) 기준으로 한 번만 적용하며, 과량 투입된 반응물의 몰수를 반응열 계산에 끌어들이지 않는다.

다시 나오면 이렇게 판단

정압 단열 반응 문제는 항상 두 단계로 나눈다. 첫째, 화학양론비로 실제 반응이 얼마나 진행되었는지(한계반응물이 없다면 반응식대로 완결된 몰수 기준)를 정하고 그에 따른 반응열을 구한다. 둘째, 반응이 끝난 뒤 계에 남아 있는 모든 물질(미반응물+생성물)의 열용량 합을 구해 $\Delta T = |\Delta H_{rxn}| / \sum n_i C_{P,i}$로 온도 상승분을 계산하고 초기 온도에 더한다. 반응물이 과량으로 주어질 때는 반드시 반응 후 남는 몰수를 먼저 정리하고 시작한다.

암기 포인트

정압 단열 반응의 최고 온도는 $T_f = T_0 + \frac{|\Delta H_{rxn}|}{\sum n_i C_{P,i}}$로 구하며, 여기서 $\sum n_i C_{P,i}$는 반응이 끝난 후 실제로 남아 있는 물질(미반응물+생성물) 전체의 열용량 합임을 기억해 둔다.

NoteBase

문 17. 다음은 섭취된 에탄올(C_2H_5OH)이 NAD와 반응하여 아세트알데하이드(C_2H_4O)와 NADH로 분해되는 반응식과 298 K에서 물질들의 표준 생성 엔탈피($\Delta H_{f,298}^{\circ}$)를 나타낸 표이다. 섭취한 모든 에탄올을 298 K 일정 온도에서 분해하기 위해 1,105 J의 열량이 소비되었다면 섭취한 에탄올의 양[g]은? (단, 에탄올의 분자량은 46 g mol^{-1}이며 생성된 아세트알데하이드와 NADH는 더 이상 반응하지 않는다)

$C_2H_5OH + NAD \rightarrow C_2H_4O + NADH$

물질	C_2H_5OH	NAD	C_2H_4O	NADH
$\Delta H_{f,298}^{\circ}$ [J mol^{-1}]	−288.3	0	−212.2	−31.9

① 450

② 750

③ 1,150

④ 1,550

정답 3번

출제 포인트

반응 엔탈피 ΔH_{rxn}°를 표준생성엔탈피로부터 계산하고, 이를 이용해 일정한 열량이 소비될 때 반응한 몰수와 질량을 구하는 문제이다. 반응이 흡열인지 발열인지를 먼저 판단하는 것이 핵심이다.

조건 정리

반응식은 $C_2H_5OH + NAD \rightarrow C_2H_4O + NADH$이다. 298 K에서 각 물질의 표준생성엔탈피는 C_2H_5OH = −288.3 $Jmol^{-1}$, NAD = 0 $Jmol^{-1}$, C_2H_4O = −212.2 $Jmol^{-1}$, NADH = −31.9 $Jmol^{-1}$이다. 에탄올을 분해하는 데 1,105 J의 열량이 소비되었고, 에탄올의 분자량은 46 g mol^{-1}이다.

사용할 공식

반응 엔탈피는 Δ H_rxn^ = Σ Δ H_f, 생성물^ - Σ Δ H_f, 반응물^로 구한다. 반응한 몰수는 $n = \frac{Q}{\Delta H_{rxn}^{\circ}}$이고, 질량은 $m = n \times M$이다(여기서 M은 몰질량).

NoteBase

계산 과정

생성물의 엔탈피 합은 $-212.2 + (-31.9) = -244.1$ J mol^{-1}이고, 반응물의 엔탈피 합은 $-288.3 + 0 = -288.3$ J mol^{-1}이다. 따라서 $\Delta H^\circ_{rxn} = -244.1 - (-288.3) = 44.2$ J mol^{-1}로 양수이므로 이 반응은 흡열반응이다. 즉 에탄올 1 mol이 분해될 때마다 44.2 J의 열이 외부로부터 소비된다. 소비된 열량이 1,105 J이므로 분해된 에탄올의 몰수는 $n = \frac{1105}{44.2} = 25$ mol이다. 에탄올의 분자량이 46 g mol^{-1}이므로 섭취한 에탄올의 질량은 $25 \times 46 = 1150$ g이다.

선지 판단

① 450 → 틀림. 몰수를 잘못 구하거나 분자량을 곱하지 않고 단순 비례로 계산한 경우에 나올 수 있는 값으로, 반응 엔탈피 44.2 J/mol과 1,105 J을 정확히 나누면 나올 수 없는 값이다.
② 750 → 틀림. 반응 엔탈피 부호나 값을 다르게 취급했을 때 나오는 값으로, 실제 계산 결과인 1,150 g과 일치하지 않는다.
③ 1,150 → 옳음. 반응 엔탈피 44.2 J/mol로 1,105 J을 나누면 25 mol이 되고, 여기에 분자량 46 g/mol을 곱하면 1,150 g이 된다.
④ 1,550 → 틀림. 몰수 계산이나 곱셈 과정에서 오차가 생긴 값으로, 정확한 계산 결과인 1,150 g보다 크다.

오답 포인트

반응 엔탈피를 구할 때 생성물에서 반응물을 빼는 순서를 반대로 하면 부호가 바뀌어 흡열과 발열을 혼동하게 된다. 또한 몰수를 구한 뒤 분자량 46을 곱하는 단계를 빠뜨리면 답이 25로 남아 선지와 맞지 않게 되므로, 마지막 단위 환산(mol → g)을 반드시 확인한다.

다시 나오면 이렇게 판단

표준생성엔탈피 표가 주어지면 항상 (생성물의 합) − (반응물의 합) 순서로 반응 엔탈피를 구한다. 구한 반응 엔탈피의 부호로 흡열·발열을 먼저 판정하고, 열량을 반응 엔탈피로 나누어 몰수를 얻은 뒤 분자량을 곱해 질량으로 바꾸는 순서를 지킨다.

암기 포인트

Δ H_rxn^ = Σ Δ H_f, 생성물^ - Σ Δ H_f, 반응물^, $n = Q/\Delta H^\circ_{rxn}$, $m = n \times M$ 세 식을 순서대로 적용하는 흐름을 기억해 둔다.

NoteBase

문 18. 일정한 온도에서 내부에너지의 부피 의존성을 나타내는 열역학적 성질을 내부적 압력(π_T)이라 한다. 내부에너지가 부피와 엔트로피에 대한 함수로 표현될 때, 다음 비리얼(virial) 상태방정식으로 구한 π_T는? (단, $\pi_T = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T$이며, 2차 비리얼 계수 B는 온도의 함수이고, R은 기체상수, P는 압력, T는 온도, U는 몰 내부에너지, V는 몰 부피이다)

$$P = \frac{RT}{V}\left(1 + \frac{B}{V}\right)$$

① $\frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$
② $-\frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$
③ $\frac{RT}{V} + \frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$
④ $\frac{RT}{V} - \frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$

정답 1번

출제 포인트

내부적 압력 $\pi_T = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T$를 열역학 기본 관계식으로부터 상태방정식 $P = P(T, V)$의 편미분으로 바꾸어 계산할 수 있는지를 묻는다. 즉 $U(T, V)$에 대한 맥스웰 관계식 유도 공식을 비리얼 상태방정식에 직접 대입해 정리하는 문제이다.

조건 정리

주어진 비리얼 상태방정식은 $P = \frac{RT}{V}\left(1 + \frac{B}{V}\right) = \frac{RT}{V} + \frac{RTB}{V^2}$이다. 여기서 2차 비리얼 계수 B는 온도만의 함수 $B = B(T)$이므로, T에 대해 편미분할 때 B도 함께 미분되어야 한다(곱의 미분).

사용할 공식

내부에너지의 부피 의존성에 대한 열역학 기본 관계식은 $\pi_T = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P$ 이다. 이는 $dU = TdS - PdV$와 맥스웰 관계식 $\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$로부터 얻어지는 표준 결과이다.

계산 과정

먼저 P를 T로 편미분한다(V 일정). $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{R}{V} + \frac{RB}{V^2} + \frac{RT}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$ (마지막 항은 $B(T)$를 곱의 미분으로 처리한 것이다.) 이제 양변에 T를 곱한다. $T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{RT}{V} + \frac{RTB}{V^2} + \frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$ 여기서 P를 빼면 $\pi_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P = \left[\frac{RT}{V} + \frac{RTB}{V^2} + \frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V\right] - \left[\frac{RT}{V} + \frac{RTB}{V^2}\right]$ 앞의 두 항 $\frac{RT}{V}$와 $\frac{RTB}{V^2}$는 서로 정확히 상쇄되어 남는 것은 $\pi_T = \frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$ 뿐이다.

NoteBase

선지 판단

① $\frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$ — O, 계산 결과와 정확히 일치한다.
② $-\frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$ — X, 부호가 반대이다. $T(\partial P/\partial T)_V - P$에서 P를 빼는 부호를 반대로 처리하면 나오는 오답이다.
③ $\frac{RT}{V} + \frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$ — X, $T(\partial P/\partial T)_V$까지만 계산하고 P를 빼는 마지막 단계를 빠뜨리면 나오는 오답이다.
④ $\frac{RT}{V} - \frac{RT^2}{V^2}\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_V$ — X, P를 빼는 과정에서 RT/V 항은 상쇄시키지 않고 RTB/V^2 항만 잘못 상쇄한 뒤 부호까지 반대로 처리하면 나오는 오답이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 B가 상수가 아니라 온도의 함수라는 점을 놓치는 것이다. B를 상수로 취급해 $(\partial P/\partial T)_V = R/V + RB/V^2$로만 계산하면 $\partial B/\partial T$ 항 자체가 사라져 정답 형태에 도달할 수 없다. 또한 $T(\partial P/\partial T)_V$를 구한 뒤 P를 빼는 마지막 상쇄 단계를 빠뜨리면 ③처럼 RT/V 항이 남는 오답이 된다.

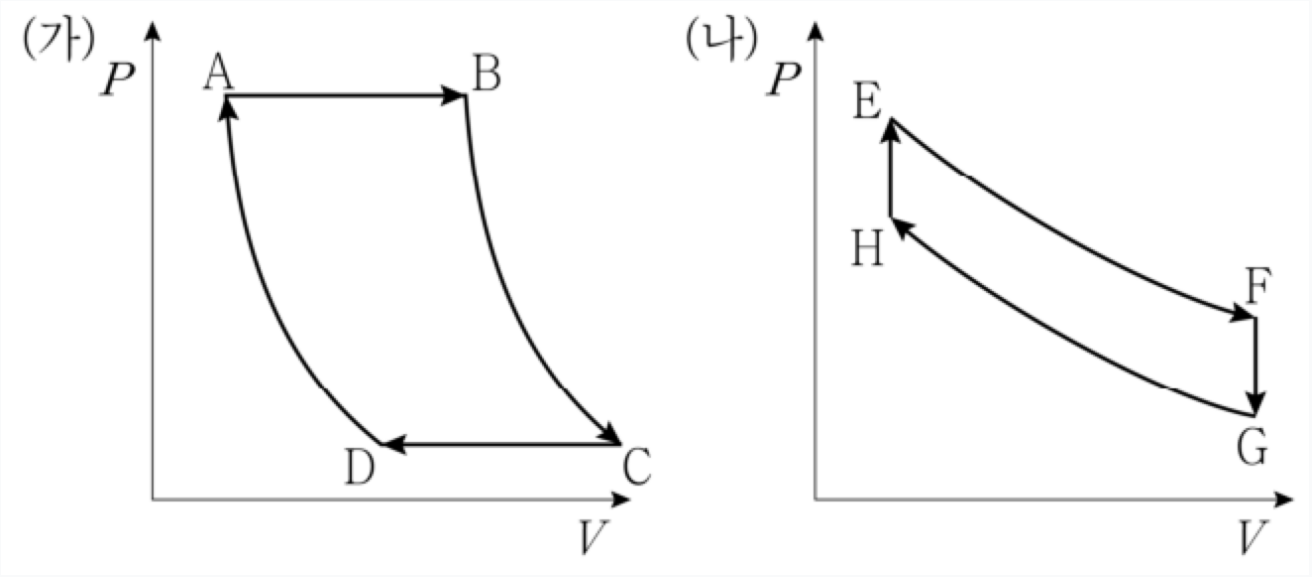
다시 나오면 이렇게 판단

$\pi_T = (\partial U/\partial V)_T$ 형태가 나오면 곧바로 $\pi_T = T(\partial P/\partial T)_V - P$ 공식을 떠올리고, 상태방정식을 T로 편미분한 뒤 원래의 P를 빼서 상쇄되는 항을 확인하는 순서로 푼다. 비리얼 계수처럼 온도의 함수로 주어진 계수는 편미분 시 반드시 곱의 미분으로 처리한다.

암기 포인트

내부적 압력 공식 $\pi_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P$를 암기해 둔다. 이상기체($P = RT/V$)에서는 이 값이 정확히 0이 되며, 비리얼 계수처럼 압력식에 온도 의존 보정항이 붙을 때만 π_T가 그 보정항의 온도 미분 형태로 남는다는 점을 기억해 둔다.

문 19. 그림은 이상적인 내연기관 사이클의 압력P-부피V 선도로, (가)와 (나)는 각각 Brayton 사이클과 공기표준 Otto 사이클이다. 일정한 열용량을 갖는 이상기체 상태 공기 1 mol을 기준으로 할 때, 두 내연기관의 열효율을 바르게 연결한 것은? (단, T_i는 i지점의 온도이다)



① (가): $1-\frac{T_C-T_D}{T_B-T_A}$, (나): $1-\frac{T_G-T_H}{T_F-T_E}$
② (가): $1-\frac{T_C-T_D}{T_B-T_A}$, (나): $1-\frac{T_F-T_G}{T_E-T_H}$
③ (가): $1-\frac{T_B-T_C}{T_A-T_D}$, (나): $1-\frac{T_G-T_H}{T_F-T_E}$
④ (가): $1-\frac{T_B-T_C}{T_A-T_D}$, (나): $1-\frac{T_F-T_G}{T_E-T_H}$

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 Brayton 사이클과 공기표준 Otto 사이클 각각의 P-V 선도에서 어느 과정이 열을 흡수하고(등압 또는 정적 가열) 어느 과정이 열을 방출하는지(등압 또는 정적 방열)를 구분한 뒤, 열효율 $\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$ 식에 각 온도차를 올바른 순서와 올바른 분자·분모 위치로 대입할 수 있는지를 묻는다.

NoteBase

조건 정리

(가) Brayton 사이클: A→B는 압력이 일정하게 유지되며 부피가 늘어나는 등압 과정(가열, 화살표가 A에서 B로 향함)이다. B→C는 곡선을 따라 압력이 급격히 낮아지는 단열 팽창이다. C→D는 압력이 일정하게 유지되며 부피가 줄어드는 등압 과정(방열, 화살표가 C에서 D로 향함)이다. D→A는 곡선을 따라 압력이 급격히 높아지는 단열 압축이다. (나) 공기표준 Otto 사이클: E→F는 곡선을 따라 압력이 낮아지는 단열 팽창이다. F→G는 부피가 일정하게 유지되며 압력이 낮아지는 정적 과정(방열, 화살표가 F에서 G로 향함)이다. G→H는 곡선을 따라 압력이 높아지는 단열 압축이다. H→E는 부피가 일정하게 유지되며 압력이 높아지는 정적 과정(가열, 화살표가 H에서 E로 향함)이다. 두 사이클 모두 일정한 열용량(Brayton은 C_p, Otto는 C_v)을 갖는 이상기체 1 mol을 기준으로 한다.

사용할 공식

열효율의 정의는 $\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$이다. 등압 과정에서 흡수·방출되는 열량은 $Q = C_p \Delta T$이고, 정적 과정에서 흡수·방출되는 열량은 $Q = C_V \Delta T$이다. 단열 과정(B→C, D→A, E→F, G→H)은 열 출입이 없으므로 효율식에 포함되지 않는다.

계산 과정

(가) Brayton 사이클: 가열은 A→B(등압)에서 일어나므로 $Q_{in} = C_p(T_B - T_A)$이고, 방열은 C→D(등압)에서 일어나므로 $Q_{out} = C_p(T_C - T_D)$이다. 따라서 _가 = 1-(T_C-T_D)/(T_B-T_A)이다. (나) 공기표준 Otto 사이클: 가열은 H→E(정적)에서 일어나므로 $Q_{in} = C_V(T_E - T_H)$이고, 방열은 F→G(정적)에서 일어나므로 $Q_{out} = C_V(T_F - T_G)$이다. 따라서 _나 = 1-(T_F-T_G)/(T_E-T_H)이다.

선지 판단

① (가) 1-(T_C-T_D)/(T_B-T_A)는 옳으나, (나) 1-(T_G-T_H)/(T_F-T_E)는 방열 구간을 G→H(단열 압축 구간)로, 가열 구간을 F→E로 잘못 짝지은 것이어서 틀렸다.
② (가) 1-(T_C-T_D)/(T_B-T_A)는 A→B 등압 가열과 C→D 등압 방열을 올바르게 반영해 옳고, (나) 1-(T_F-T_G)/(T_E-T_H)는 F→G 정적 방열과 H→E 정적 가열을 올바르게 반영해 옳다. 두 식 모두 맞으므로 정답이다.
③ (가) 1-(T_B-T_C)/(T_A-T_D)는 등압 구간이 아닌 단열 팽창(B→C)과 단열 압축(D→A) 구간의 온도차를 가져다 쓴 것이어서 틀렸다.
④ (가)는 ③과 동일한 이유로 틀렸고, (나) 1-(T_F-T_G)/(T_E-T_H) 자체는 옳지만 (가)가 틀렸으므로 전체 선지는 틀렸다.

NoteBase

오답 포인트

가장 흔한 실수는 단열 과정(곡선 구간)의 온도차를 열효율 식에 넣는 것이다. 단열 과정은 열 출입이 없으므로 반드시 등압 또는 정적 과정(직선 구간)의 온도차만 분자·분모에 들어가야 한다. 또한 분자(방열)와 분모(가열)의 위치를 바꾸거나, 가열·방열이 일어나는 두 점의 순서(예: T_F-T_G를 T_G-T_H로 착각)를 뒤바꾸는 실수도 잦다.

다시 나오면 이렇게 판단

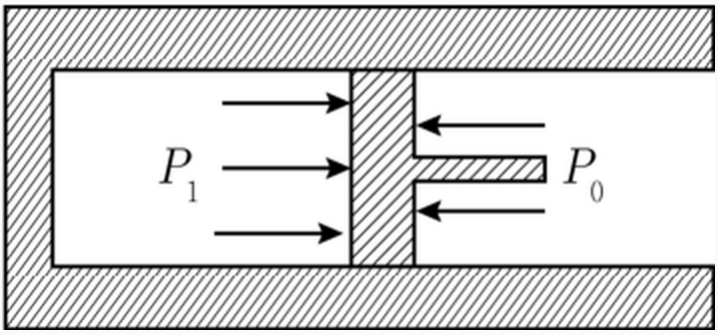
P-V 선도에서 직선(등압 또는 정적) 구간만 열 출입이 있는 구간이라는 점을 먼저 표시한다. 그중 온도가 올라가는 직선 구간이 가열(분모), 온도가 내려가는 직선 구간이 방열(분자)이다. 곡선(단열) 구간은 효율식에서 완전히 배제한 뒤, $\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$에 순서를 맞춰 대입하면 실수를 줄일 수 있다.

암기 포인트

Brayton 사이클은 등압 가열-단열 팽창-등압 방열-단열 압축 순서이며 효율은 C_p 기반 온도차 비로 표현된다. Otto 사이클은 단열 압축-정적 가열-단열 팽창-정적 방열 순서이며 효율은 C_v 기반 온도차 비로 표현된다. 두 경우 모두 곡선(단열) 구간은 열효율 식에 들어가지 않는다.

NoteBase

문 20. 그림은 초기압력이 P_1인 이상기체 1 mol이 일정한 외부압력 $P_0(P_0 < P_1)$에 대해 피스톤-실린더 장치에서 최종압력 P_0까지 등온 팽창하는 과정을 나타낸 것이다. 이 장치의 외부 온도는 T로 유지되며 장치 및 기체와 열적 평형을 이루고 있다. 팽창 과정 동안에는 피스톤과 실린더 사이 마찰력에 의해 피스톤은 매우 천천히 가속 없이 움직인다. 팽창 과정에 대한 설명으로 옳은 것은? (단, R은 기체상수이다)



① 기체가 외부로 한 일의 크기는 $\frac{RT}{P_1}(P_1 - P_0)$이다.

② 기체가 외부로부터 흡수한 열의 크기는 $\frac{RT}{P_0}(P_1 - P_0)$이다.

③ 장치 외부의 엔트로피 변화량은 $\frac{R}{P_0}(P_1 - P_0)$이다.

④ 기체의 엔트로피 변화량은 $\frac{R}{P_1}(P_1 - P_0)$이다.

정답 1번

출제 포인트

실린더-피스톤 사이의 마찰 때문에 피스톤이 가속 없이 매우 느리게 움직이는 비가역 등온 팽창 과정에서, 기체가 일정한 외부압력 P_0에 실제로 전달하는 일의 크기와 흡수하는 열의 크기, 그리고 외부(저열원)와 기체 각각의 엔트로피 변화량 공식을 서로 혼동하지 않고 구분해 계산할 수 있는지를 확인하는 문제이다.

조건 정리

이상기체 1 mol이 초기압력 P_1에서 출발하여, 크기가 일정한 외부압력 $P_0(P_0 < P_1)$에 대해 최종압력 P_0까지 등온(온도 T 일정) 팽창한다. 피스톤과 실린더 사이의 마찰로 인해 피스톤은 가속 없이 매우 천천히 움직이므로, 기체가 외부에 실제로 전달하는 일은 마찰로 소실되는 부분을 제외한, 저항 압력 P_0에 대응하는 부피일로 결정된다.

사용할 공식

이상기체 상태방정식 $V = \frac{RT}{P}$

일정한 외부압력에 대해 기체가 외부로 실제로 전달하는 일 $W = P_0\Delta V$

등온 과정의 이상기체는 내부에너지 변화가 없으므로 $\Delta U = 0$, 따라서 흡수한 열 $Q = W$

기체는 상태함수이므로 등온 팽창에서의 엔트로피 변화 $\Delta S_{gas} = R\ln\frac{V_2}{V_1} = R\ln\frac{P_1}{P_0}$

외부(온도 T의 저열원)의 엔트로피 변화 $\Delta S_{surr} = -\frac{Q}{T}$

NoteBase

계산 과정

초기 부피와 최종 부피는 각각 $V_1 = \frac{RT}{P_1}$, $V_2 = \frac{RT}{P_0}$이므로
$\Delta V = V_2 - V_1 = RT\left(\frac{1}{P_0} - \frac{1}{P_1}\right) = \frac{RT(P_1 - P_0)}{P_0 P_1}$
기체가 외부(압력 P_0)에 실제로 전달하는 일은
$W = P_0 \Delta V = P_0 \cdot \frac{RT(P_1 - P_0)}{P_0 P_1} = \frac{RT}{P_1}(P_1 - P_0)$
이 결과가 ①의 식과 정확히 일치한다.
등온 과정이므로 $\Delta U = 0$이고 $Q = W = \frac{RT}{P_1}(P_1 - P_0)$이며, 분모는 P_0가 아니라 P_1이 되어야 하므로 ②의 $\frac{RT}{P_0}(P_1 - P_0)$와는 값이 다르다.
장치 외부는 기체가 흡수한 열 Q만큼을 잃으므로 $\Delta S_{surr} = -\frac{Q}{T} = -\frac{R}{P_1}(P_1 - P_0)$이며, 이 역시 분모가 P_1이어야 하므로 ③의 $\frac{R}{P_0}(P_1 - P_0)$와 다르다.
기체 자체의 엔트로피 변화는 상태함수이므로 실제 팽창 경로(가역·비가역, 마찰 유무)와 무관하게 $\Delta S_{gas} = R\ln\frac{P_1}{P_0}$로 로그 형태가 되어야 하며, ④처럼 압력의 차 $(P_1 - P_0)$에 비례하는 선형식이 될 수 없다.

선지 판단

① 기체가 외부로 한 일의 크기는 $\frac{RT}{P_1}(P_1 - P_0)$이다 — O. 위 계산 과정에서 구한 값과 정확히 일치한다.
② 기체가 외부로부터 흡수한 열의 크기는 $\frac{RT}{P_0}(P_1 - P_0)$이다 — X. 등온 과정에서 $\Delta U = 0$이므로 $Q = W = \frac{RT}{P_1}(P_1 - P_0)$이어야 한다. 틀린 표현 → 올바른 표현: $\frac{RT}{P_0}(P_1 - P_0) \rightarrow \frac{RT}{P_1}(P_1 - P_0)$.
③ 장치 외부의 엔트로피 변화량은 $\frac{R}{P_0}(P_1 - P_0)$이다 — X. $\Delta S_{surr} = -Q/T = -\frac{R}{P_1}(P_1 - P_0)$이므로 분모가 P_1이어야 하고 부호도 음수이다. 틀린 표현 → 올바른 표현: $\frac{R}{P_0}(P_1 - P_0) \rightarrow -\frac{R}{P_1}(P_1 - P_0)$.
④ 기체의 엔트로피 변화량은 $\frac{R}{P_1}(P_1 - P_0)$이다 — X. 기체의 엔트로피 변화는 상태함수이므로 마찰 유무와 무관하게 $\Delta S_{gas} = R\ln\frac{P_1}{P_0}$로 계산해야 한다. 틀린 표현 → 올바른 표현: $\frac{R}{P_1}(P_1 - P_0) \rightarrow R\ln\frac{P_1}{P_0}$.

오답 포인트

이 문제의 함정은 두 가지이다. 첫째, 등온 과정이라 열과 일의 크기가 같다는 사실은 맞지만 그 크기를 나타내는 식의 분모 압력을 P_0와 P_1으로 헷갈리기 쉽다. 외부에 실제로 전달되는 일은 저항압력인 P_0를 부피차 $\Delta V = RT(1/P_0 - 1/P_1)$에 곱해서 구하므로, 계산을 끝까지 정리하면 분모에는 P_1만 남는다는 점을 놓치기 쉽다. 둘째, 상태함수인 기체 자신의 엔트로피 변화까지 부피일 공식처럼 압력의 차에 비례하는 선형식으로 착각하는 것이다. 기체의 엔트로피는 마찰이 있든 없든 초기·최종 상태만으로 결정되므로 반드시 로그 형태여야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

① 이상기체 상태방정식 $V = RT/P$로 초기·최종 부피를 먼저 구한다. ② 마찰이 있는 비가역 팽창이라도 외부에 대한 일은 저항압력(외부압력) P_0를 부피차에 곱해서 구하고, 이때 최종 식의 분모 압력이 무엇으로 정리되는지 끝까지 계산해 확인한다. ③ 등온 이상기체는 항상 $\Delta U = 0$이므로 $Q = W$임을 이용하되, 열과 일의 식이 같은 분모를 가져야 함을 검산한다. ④ 외부(저열원)의 엔트로피 변화는 $-Q/T$로 구하고, 기체 자신의 엔트로피 변화는 상태함수 공식 $R\ln(P_1/P_0)$로 구하여 두 식을 절대 같은 형태로 쓰지 않는다.

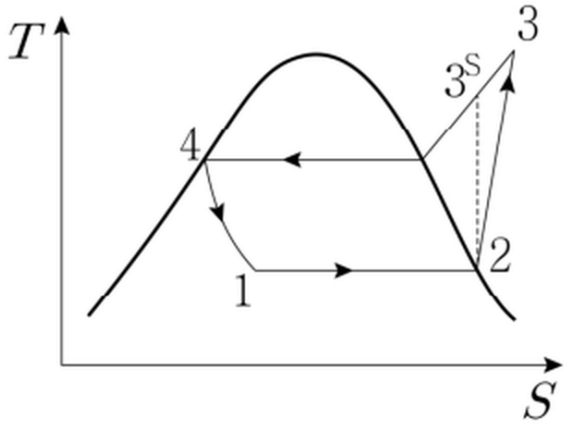
NoteBase

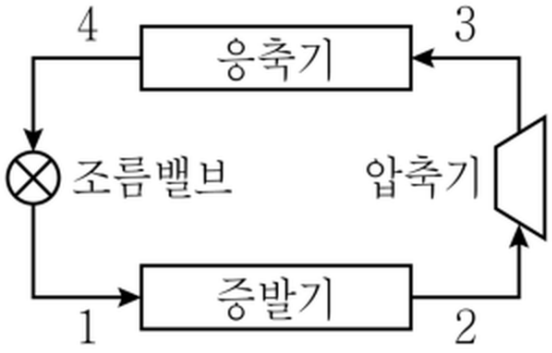
암기 포인트

일정한 외부압력에 대한 비가역 팽창일은 $W = P_{ext}\Delta V$로 계산한다. 이상기체의 등온 과정은 항상 $\Delta U = 0$이므로 $Q = W$이다. 상태함수인 기체의 엔트로피 변화는 경로(가역·비가역)와 무관하게 항상 $\Delta S = R\ln(V_2/V_1) = R\ln(P_1/P_2)$로 로그 형태이며, 부피일 공식처럼 선형식으로 쓸 수 없다. 외부(저열원)의 엔트로피 변화는 $-Q/T$이다.

NoteBase

문 21. 그림은 증기-압축 냉동 사이클의 온도(T)-엔트로피(S) 선도와 공정 개략도이고, 표는 T-S 선도 일부 지점에서 냉매의 엔탈피를 나타낸다. T-S 선도에서 점선 ($2 \rightarrow 3^S$)은 등엔트로피 공정이고, 냉동용량은 $45 kJs^{-1}$, 압축기의 효율은 0.8일 때, 이 증기-압축 사이클의 성능계수(ω)와 냉매의 순환유량($\dot{m}$)[kgs^{-1}]을 바르게 연결한 것은? (단, 위치에너지와 운동에너지 변화는 무시한다)





T-S 선도 지점	2	3^S	4
냉매의 엔탈피 [kJ kg^{-1}]	240	270	90

① ω: 4, $\dot{m}$: 0.3

② ω: 4, $\dot{m}$: 0.5

③ ω: 6, $\dot{m}$: 0.3

④ ω: 4, $\dot{m}$: 0.5

정답 1번

출제 포인트

증기-압축 냉동 사이클의 T-S 선도를 공정 개략도와 연결해 각 지점의 엔탈피 의미를 파악하고, 조름밸브에서의 등엔탈피 관계, 압축기 효율의 정의(등엔트로피 일/실제 일), 냉동용량과 순환유량의 관계, 성능계수(COP)의 정의를 종합해 계산하는 문제이다. 냉매의 순환유량과 압축기 실제 소요일을 먼저 구하고 이를 바탕으로 성능계수를 구하는 순서가 핵심이다.

NoteBase

조건 정리

공정 개략도에서 순환 순서는 조름밸브(4→1)-증발기(1→2)-압축기(2→3)-응축기(3→4)이다. 조름밸브를 통과하는 4→1 과정은 등엔탈피 과정이므로 $h_1 = h_4 = 90\ \text{kJkg}^{-1}$이다. 표에서 $h_2 = 240\ \text{kJkg}^{-1}$, 등엔트로피 압축 결과인 $h_{3^s} = 270\ \text{kJkg}^{-1}$이다. 냉동용량(증발기에서 냉매가 흡수하는 열량)은 $\dot{Q}_{evap} = 45\ \text{kJs}^{-1}$이고, 압축기의 효율(등엔트로피 효율)은 0.8이다.

사용할 공식

증발기 냉동용량: $\dot{Q}_{evap} = \dot{m}(h_2 - h_1)$. 압축기 등엔트로피 효율: $\eta_c = \frac{h_{3^s} - h_2}{h_3 - h_2}$ (등엔트로피 압축일 대비 실제 압축일의 비). 성능계수: $\omega = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_2}$.

계산 과정

먼저 냉매의 순환유량을 구한다. $h_2 - h_1 = 240 - 90 = 150\ \text{kJkg}^{-1}$이므로 $\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{h_2 - h_1} = \frac{45}{150} = 0.3\ \text{kgs}^{-1}$이다.
다음으로 압축기 효율 정의를 이용해 실제 압축일에 해당하는 엔탈피 차를 구한다.
$h_{3^s} - h_2 = 270 - 240 = 30\ \text{kJkg}^{-1}$이므로 $h_3 - h_2 = \frac{h_{3^s} - h_2}{\eta_c} = \frac{30}{0.8} = 37.5\ \text{kJkg}^{-1}$이다.
마지막으로 성능계수를 구한다. $\omega = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_2} = \frac{150}{37.5} = 4$이다.

선지 판단

① ω=4, ☒=0.3 → 계산 결과와 정확히 일치한다(O).
② ω=4, ☒=0.5 → 성능계수는 맞지만 순환유량 계산에서 냉동용량을 엔탈피차로 나누는 대신 다른 값으로 나눈 오류에 해당한다. 올바른 값은 0.3이다(X).
③ ω=6, ☒=0.3 → 순환유량은 맞지만 성능계수 계산에서 압축기 효율을 반영하지 않고 $150/(270 - 240) = 150/30 = 5$로 잘못 계산하거나 다른 식을 적용한 경우에 해당한다. 올바른 값은 4이다(X).
④ ω=6, ☒=0.5 → 두 값 모두 계산 오류에 해당한다(X).

오답 포인트

압축기 효율 $\eta_c = (h_{3^s} - h_2)/(h_3 - h_2)$의 분모와 분자를 혼동하면 실제 압축일을 등엔트로피 압축일보다 작게 계산해 성능계수가 커지는 오류(예: 6)가 나온다. 실제 과정은 등엔트로피 과정보다 더 많은 일을 필요로 하므로 $h_3 - h_2 > h_{3^s} - h_2$가 되어야 하며, 효율로 나누어 실제 값을 키우는 방향이 맞다. 또한 순환유량은 냉동용량을 증발기 구간의 엔탈피차($h_2 - h_1$)로 나누는 것이지 압축기 구간의 엔탈피차로 나누는 것이 아니다.

다시 나오면 이렇게 판단

냉동 사이클 문제는 먼저 조름밸브 구간이 등엔탈피($h_4 = h_1$)임을 이용해 누락된 지점의 엔탈피를 채운 뒤, 순환유량은 증발기 구간의 엔탈피차로, 실제 압축일은 등엔트로피 압축일을 효율로 나누어 구하고, 성능계수는 냉동효과를 실제 압축일로 나누는 순서로 접근한다.

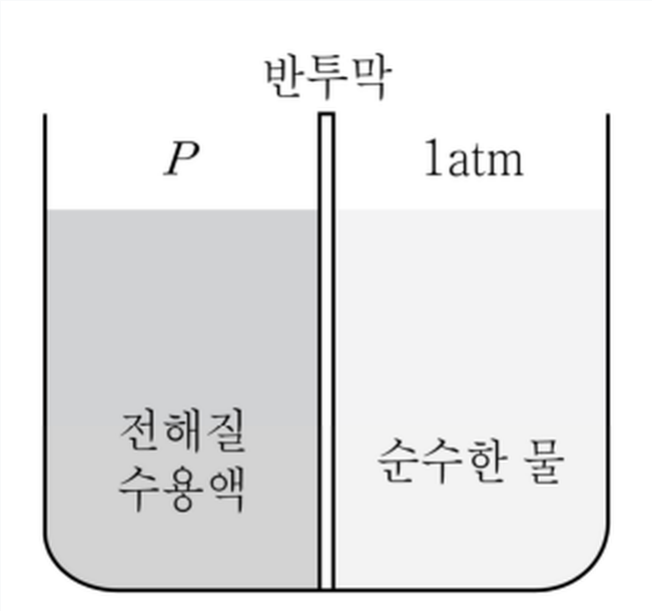
NoteBase

암기 포인트

조름밸브: 등엔탈피($h_{in} = h_{out}$). 순환유량: $\dot{m} = \dot{Q}_{evap}/(h_2 - h_1)$. 압축기 효율: $\eta_c = (h_{3^s} - h_2)/(h_3 - h_2)$, 즉 실제 압축일 =등엔트로피 압축일/$\eta_c$. 냉동사이클 성능계수: $\omega = (h_2 - h_1)/(h_3 - h_2)$.

NoteBase

문 22. 그림은 반투막을 통해 전해질 수용액으로부터 순수한 물을 얻는 역삼투압 분리장치이다. 순수한 물은 1 atm에 노출되어 있고 300 K에서 전해질 수용액 내 용질의 몰분율이 0.009일 때, 삼투 평형이 이루어지는 용액의 압력 P[atm]은? (단, 순수한 물의 몰 부피는 $18\text{cm}^3\text{mol}^{-1}$이고 기체상수 R은 $82\text{cm}^3\text{atmmol}^{-1}\text{K}^{-1}$이며, 용질 분자는 수용액에서 두 개의 이온으로 완전 해리된다)



① 12.3

② 13.3

③ 24.6

④ 25.6

정답 4번

출제 포인트

삼투 평형 상태에서 두 상의 압력차가 삼투압과 같아진다는 사실을 이용해, 묽은 용액의 삼투압을 반트호프 형태의 식으로 계산하는 문제이다. 전해질이 이온으로 해리되면 반트호프 인자 i만큼 유효 용질 몰분율이 커진다는 점이 핵심이다.

조건 정리

순수한 물 쪽 압력은 1 atm, 온도는 $T = 300$ K이다. 전해질 수용액 내 용질의 몰분율은 $x_2 = 0.009$이고, 용질 분자 1개가 이온 2개로 완전 해리되므로 반트호프 인자는 $i = 2$이다. 순수한 물의 몰 부피는 $V_1 = 18\ \text{cm}^3\text{mol}^{-1}$, 기체상수는 $R = 82\ \text{cm}^3\text{atmmol}^{-1}\text{K}^{-1}$이다. 구하는 것은 삼투 평형이 이루어지는 전해질 수용액 쪽 압력 P이다.

NoteBase

사용할 공식

묽은 용액에서 용매의 화학퍼텐셜이 같아지는 조건으로부터 삼투압 π는 다음과 같이 근사된다. $\pi = \frac{ix_2RT}{V_1}$ 여기서 ix_2는 전해질 해리로 인해 늘어난 유효 용질 몰분율이다. 삼투 평형에서는 용액 쪽 압력이 순수한 물 쪽 압력보다 삼투압만큼 높아야 하므로 P = P_물 + π = 1 + π 가 성립한다.

계산 과정

유효 용질 몰분율은 $ix_2 = 2 \times 0.009 = 0.018$이다. 이를 공식에 대입하면
$\pi = \frac{0.018 \times 82 \times 300}{18} = \frac{0.018 \times 24600}{18} = \frac{442.8}{18} = 24.6$ atm 따라서 삼투 평형이 이루어지는 용액의 압력은
$P = 1 + 24.6 = 25.6$ atm 이다.

선지 판단

① 12.3 → i를 반영하지 않고 $x_2 = 0.009$만으로 삼투압 12.3 atm을 구한 뒤, 여기에 1 atm을 더하지 않고 그친 값이다. 해리와 1 atm 가산을 모두 빠뜨린 오답이다.
② 13.3 → 반트호프 인자를 반영하지 않은 삼투압 12.3 atm에 순수한 물의 압력 1 atm만 더한 값으로, 전해질 해리를 놓친 오답이다.
③ 24.6 → 반트호프 인자 $i = 2$까지 반영해 삼투압 자체는 정확히 24.6 atm으로 구했지만, 삼투 평형 조건 $P = 1 + \pi$에서 순수한 물 쪽의 1 atm을 더하지 않은 값이다. 삼투압과 최종 압력 P를 혼동한 오답이다.
④ 25.6 → 해리로 인한 반트호프 인자 $i = 2$를 반영해 삼투압 $\pi = 24.6$ atm을 구하고, 순수한 물 쪽 압력 1 atm을 더해 삼투 평형 압력 $P = 25.6$ atm을 얻은 것으로 옳다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 두 가지이다. 첫째, 전해질이 이온 2개로 완전 해리된다는 조건을 놓치고 몰분율 0.009를 그대로 써서 삼투압을 절반으로 작게 계산하는 것이다. 둘째, 삼투압 π 자체와 최종적으로 물어보는 용액 쪽 압력 P를 혼동해, 순수한 물 쪽의 1 atm을 더하지 않고 삼투압 값만 답으로 고르는 것이다.

다시 나오면 이렇게 판단

전해질 삼투압 문제를 보면 먼저 용질이 몇 개의 입자로 해리되는지(반트호프 인자 i)를 확인하고, 유효 몰분율을 ix_2로 잡아 $\pi = ix_2RT/V_1$로 삼투압을 구한다. 그다음 그림에서 어느 쪽 압력을 묻는지 확인해, 삼투 평형 조건 P_용액 = P_순수한 물 + π을 적용해 최종 답을 낸다.

암기 포인트

묽은 용액의 삼투압은 $\pi = ix_2RT/V_1$이며, 전해질 해리 시 반트호프 인자 i를 몰분율에 곱해 유효 몰분율을 키운다. 삼투 평형에서는 용액 쪽 압력이 순수 용매 쪽 압력보다 삼투압만큼 더 크다는 것을 기억해 둔다.

NoteBase

문 23. 혼합물의 기액 상평형에서 성분 i의 평형비 K_i는 $\frac{y_i}{x_i}$로 정의된다. K_i에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, x_i와 y_i는 각각 성분 i의 액상 몰분율과 기상 몰분율이고, P_i^{sat}은 성분 i의 포화증기압, f_i는 순수한 성분 i의 퓨개시티(fugacity), γ_i는 성분 i의 활동도 계수, H_i는 성분 i의 Henry 상수이며, 상첨자 V와 L은 각각 기상과 액상을 의미한다)

① Raoult의 법칙을 따를 때, $K_i = \frac{P_i^{sat}}{P}$이다.
② 기상은 이상기체이고 액상은 Henry의 법칙을 따를 때, $K_i = \frac{H_i}{P}$이다.
③ 기상, 액상 모두 Lewis/Randall 규칙을 따를 때, $K_i = \frac{f_i^V}{f_i^L}$이다.
④ 수정된 Raoult의 법칙을 따를 때, $K_i = \frac{\gamma_i P_i^{sat}}{P}$이다.

정답 3번

출제 포인트

기액 평형비 $K_i = y_i/x_i$를 다양한 근사(Raoult의 법칙, Henry의 법칙, Lewis/Randall 규칙, 수정된 Raoult의 법칙) 하에서 어떻게 표현하는지를 각각 유도할 수 있는지 묻는 문제이다. 네 개의 선지 중 유도 과정에서 분자·분모가 뒤바뀐 것을 찾아내는 것이 핵심이다.

조건 정리

평형비의 정의는 $K_i = y_i/x_i$이다. P_i^{sat}은 성분 i의 포화증기압, f_i^V와 f_i^L은 각각 순수한 성분 i를 기상·액상 상태(해당 온도·압력)에 있다고 가정했을 때의 퓨개시티, γ_i는 액상에서 성분 i의 활동도계수, H_i는 Henry 상수이다.

사용할 공식

① Raoult의 법칙: $y_i P = x_i P_i^{sat}$
② 이상기체+Henry의 법칙: $y_i P = H_i x_i$
③ Lewis/Randall 규칙(양쪽 상 모두 이상용액 가정): 혼합물 내 성분의 퓨개시티는 $\hat{f}_i^V = y_i f_i^V$, $\hat{f}_i^L = x_i f_i^L$이고, 상평형 조건은 $\hat{f}_i^V = \hat{f}_i^L$이다.
④ 수정된 Raoult의 법칙: $y_i P = x_i \gamma_i P_i^{sat}$

계산 과정

① $y_i P = x_i P_i^{sat}$의 양변을 $x_i P$로 나누면 $K_i = y_i/x_i = P_i^{sat}/P$이므로 옳다.
② $y_i P = H_i x_i$의 양변을 $x_i P$로 나누면 $K_i = y_i/x_i = H_i/P$이므로 옳다.
③ Lewis/Randall 규칙에서 상평형 조건 $y_i f_i^V = x_i f_i^L$을 $x_i f_i^V$로 나누어 정리하면 $K_i = y_i/x_i = f_i^L/f_i^V$가 되어야 한다. 즉 분자에 액상 퓨개시티 f_i^L, 분모에 기상 퓨개시티 f_i^V가 와야 하는데, 선지에는 $K_i = f_i^V/f_i^L$로 분자·분모가 뒤바뀌어 있으므로 옳지 않다.
④ $y_i P = x_i \gamma_i P_i^{sat}$의 양변을 $x_i P$로 나누면 $K_i = y_i/x_i = \gamma_i P_i^{sat}/P$이므로 옳다.

NoteBase

선지 판단

① O: Raoult의 법칙 $y_iP = x_iP_i^{sat}$에서 그대로 $K_i = P_i^{sat}/P$가 도출된다.
② O: 기상 이상기체·액상 Henry의 법칙 $y_iP = H_ix_i$에서 $K_i = H_i/P$가 도출된다.
③ X: 틀린 표현 $K_i = f_i^V/f_i^L$ → 올바른 표현 $K_i = f_i^L/f_i^V$. Lewis/Randall 규칙의 상평형 조건 $y_if_i^V = x_if_i^L$을 정리하면 분자는 액상 퓨개시티, 분모는 기상 퓨개시티가 되어야 하므로 선지의 분자·분모가 서로 바뀌어 있다.
④ O: 수정된 Raoult의 법칙 $y_iP = x_i\gamma_iP_i^{sat}$에서 $K_i = \gamma_iP_i^{sat}/P$가 도출된다.

오답 포인트

①②④는 모두 상평형 조건식($y_iP = \cdots$ 형태)의 양변을 x_iP로 나누기만 하면 바로 나오는 결과라 실수하기 어렵지만, ③은 퓨개시티끼리 등식($y_if_i^V = x_if_i^L$)을 정리하는 과정에서 분자·분모 자리를 헷갈리기 쉽다. 상평형 조건은 '혼합물 내 성분의 퓨개시티가 같다'는 것이지 '순수 성분 퓨개시티가 같다'는 것이 아님을 분명히 해야 하며, 정리 후에는 반드시 어느 상의 몰분율과 어느 상의 퓨개시티가 같은 쪽(분자 또는 분모)에 남는지 부호와 위치를 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

K값을 묻는 문제는 항상 원래의 상평형 등식(예: $y_iP = x_iP_i^{sat}$, $y_if_i^V = x_if_i^L$ 등)을 먼저 적어 두고, 그 식을 $K_i = y_i/x_i$ 꼴로 직접 정리해 선지와 대조하는 방식으로 접근한다. 선지에 나온 분수식을 암기된 형태와 겉모습만으로 비교하지 말고, 분자·분모의 위치가 정의식 y_i/x_i의 정리 결과와 정확히 일치하는지 매번 재확인한다.

암기 포인트

$K_i = P_i^{sat}/P$(Raoult), $K_i = H_i/P$(Henry), $K_i = \gamma_iP_i^{sat}/P$(수정된 Raoult), $K_i = f_i^L/f_i^V$(Lewis/Randall, 액상 퓨개시티가 분자)로 네 가지 형태를 짝지어 기억해 둔다.

NoteBase

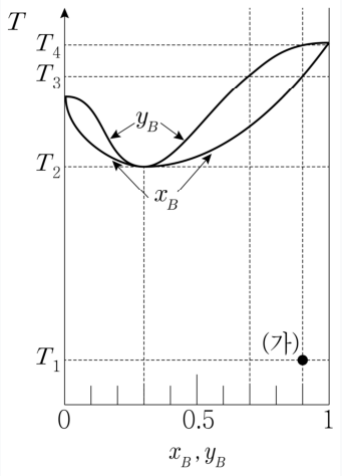
문 24. 그림은 두 물질 A와 B 혼합물에 대해 B의 몰분율과 온도(T)에 대한 정압 기-액 상도이다. 그림에 점 (가)로 표시된 상태 ($x_B = 0.9,\ T = T_1$)의 혼합물을 일정 압력하에 가열하여 온도를 상승시키는 과정에 대한 설명으로 옳은 것만을 모두 고르면? (단, x_B, y_B는 각각 B의 액상과 기상 몰분율이다)

ㄱ. 처음으로 끓기 시작하는 온도는 T_2이다.

ㄴ. 온도 T_3와 T_4 사이에서는 기상이 액상보다 더 안정하다.

ㄷ. 끓기 시작할 때 발생한 기체 혼합물 내 A의 몰분율은 0.3이다.

ㄹ. 끓기 시작한 후부터 모두 끓을 때까지 x_B는 증가한다.



① ㄱ, ㄴ

② ㄱ, ㄷ

③ ㄴ, ㄹ

④ ㄷ, ㄹ

정답 4번

출제 포인트

이 문항은 최소비등 공비 혼합물의 정압 기-액 상평형도(T-xB-yB 선도)를 읽고, 일정 조성의 액체를 가열할 때 기포점(bubble point)과 이슬점(dew point), 그리고 그 사이 2상 영역에서 액상·기상 조성이 어떻게 변하는지를 tie line 개념으로 추적하는 능력을 묻는다. 그림에서 xB=0.3, T2가 최저비등 공비점이고, 순수 A(xB=0)는 T3에서, 순수 B(xB=1)는 T4에서 끓으므로 T4>T3>T2>T1의 순서이다.

NoteBase

자료 읽는 순서

먼저 점 (가)의 조성 xB=0.9인 액체를 일정 압력에서 가열할 때, 온도가 올라가며 처음 기포가 생기는 온도는 xB=0.9에서의 기포점 곡선(아래쪽 곡선) 값이다. 그림의 보조선을 따라가면 xB=0.9의 기포점은 T2(공비점의 최저온도)가 아니라 T3임을 확인할 수 있다. 다음으로 그 온도 T3에서 수평으로 tie line을 그어 이슬점 곡선(위쪽 곡선)과 만나는 지점을 읽으면 yB=0.7이 되며, 이것이 최초로 생성되는 기포(증기)의 조성이다. 이후 온도가 T3에서 T4로 올라가는 동안에는 액상과 기상이 함께 존재하는 2상 영역이며, tie line이 위로 이동함에 따라 액상 조성 xB는 기포점 곡선을 따라 0.9에서 1(순수 B)까지 증가하고, 기상 조성 yB도 이슬점 곡선을 따라 0.7에서 1까지 증가한다. 모든 액체가 다 끓어 사라지는 온도(xB=0.9 혼합물의 이슬점)는 액상 조성이 순수 B(xB=1)에 도달하는 온도, 즉 T4이다.

선지별 해설

ㄱ. X 처음으로 끓기 시작하는 온도가 T2라는 것은 옳지 않다. T2는 공비 조성인 xB=0.3에서의 최저 끓는점일 뿐이며, xB=0.9인 혼합물의 기포점은 기포점 곡선을 따라 읽으면 T3이다.
ㄴ. X 온도 T3와 T4 사이는 xB=0.9 조성 혼합물이 끓는 도중에 해당하는 구간으로, 이 구간에서는 액상과 기상이 tie line으로 연결되어 서로 평형을 이루며 공존한다. 어느 한쪽이 더 안정하다고 말할 수 있는 상황이 아니라 두 상이 함께 존재하는 2상 영역이므로 옳지 않다.
ㄷ. O 끓기 시작하는 온도 T3에서 생성된 최초 증기의 조성은 이슬점 곡선을 tie line으로 읽은 yB=0.7이다. 따라서 이 증기 내 A의 몰분율은 1-0.7=0.3이 되어 옳다.
ㄹ. O 끓기 시작한 후 액상은 기포점 곡선을 따라 이동하는데, 온도가 T3에서 T4로 올라갈수록 액상 조성 xB는 0.9에서 시작해 모든 액체가 사라지는 순간인 순수 B(xB=1)까지 계속 증가한다. 따라서 옳다.

오답 포인트

그림에 표시된 최저점 T2를 보고 이 혼합물의 조성과 무관하게 항상 T2에서 끓기 시작한다고 오인하기 쉬운데, T2는 오직 공비 조성(xB=0.3)에서만 적용되는 온도이고 xB=0.9에서는 기포점 곡선 위의 다른 값(T3)을 읽어야 한다. 또한 2상 영역에서 '기상이 더 안정하다'는 표현은 한 상만 존재한다는 뜻인데, tie line으로 연결된 구간은 두 상이 평형 공존하는 영역이므로 이런 식의 우열 비교 자체가 성립하지 않는다는 점에 유의한다.

다시 나오면 이렇게 판단

정압 T-xy 상평형도 문제가 나오면, 우선 그림에서 최저(또는 최고)점이 공비점인지 확인하고 그 온도가 오직 그 특정 조성에서만 성립한다는 점을 기억한다. 특정 조성의 액체를 가열하는 문제라면, 그 조성에서의 기포점 곡선 값으로 끓기 시작하는 온도를 읽고, 그 온도에서 수평 tie line을 그어 이슬점 곡선과 만나는 점으로 최초 증기 조성을 구한다. 온도가 더 올라가는 동안에는 tie line이 이동하면서 액상·기상 조성이 어떻게 변하는지(액상은 항상 원래 조성에서 순수성분 쪽으로, 기상도 같은 방향으로 이동)를 따라가면 대부분의 참/거짓 판단이 가능하다.

NoteBase

암기 포인트

공비점의 온도(최저 또는 최고)는 그 공비 조성에서만 유효하며 다른 조성의 기포점과 다르다. 기포점에서 처음 생기는 증기의 조성은 같은 온도에서 이슬점 곡선을 읽어야 하며(tie line), 2상 영역은 액상·기상이 함께 평형 공존하는 구간이지 한쪽이 더 안정한 구간이 아니다. 가열이 진행되어 액체가 모두 사라지는 온도는 원래 조성이 순수 성분 쪽 끝에 도달하는 온도(여기서는 T4)와 같다.

NoteBase

문 25. 온도 500 K에서 기상 가역반응인 $A + B \rightleftharpoons C + D$의 표준반응열은 $-4{,}600R[Jmol^{-1}]$이고 평형상수는 1이다. 온도 1,000 K에서 초기 1 mol의 A와 1 mol의 B가 반응하여 평형에 도달했을 때, D의 몰분율은? (단, 혼합물은 이상기체이며, R은 기체상수 $[Jmol^{-1}K^{-1}]$이고, 표준반응열은 온도에 무관하며, $\ln(0.1) = -2.3$이다)

① $\frac{1}{7}$
② $\frac{1}{9}$
③ $\frac{1}{11}$
④ $\frac{1}{22}$

정답 4번

출제 포인트

온도가 바뀔 때 평형상수가 어떻게 변하는지를 반트호프식으로 구하고, 이렇게 구한 새 평형상수로부터 몰수변화가 없는 기상반응의 평형 조성(몰분율)을 계산하는 문제이다. 표준반응열이 온도에 무관하다는 조건이 주어져 있으므로 반트호프식을 적분형 그대로 적용하면 된다.

조건 정리

반응은 A + B ⇌ C + D이며 반응 전후 몰수 변화 $\Delta n = 0$이다. 500 K에서 표준반응열 $\Delta H^\circ = -4{,}600R$ [J mol^{-1}], 이때 평형상수 $K_1 = 1$. 1,000 K에서 초기에 A 1 mol, B 1 mol만 있고 C, D는 0이며, 이 상태에서 반응이 진행되어 평형에 도달한다. $\ln(0.1) = -2.3$이 계산에 쓰인다.

사용할 공식

온도에 따른 평형상수 변화는 반트호프식으로 구한다. $\ln\frac{K_2}{K_1} = -\frac{\Delta H^\circ}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$ 이상기체 기상반응의 평형상수는 몰분율로 $K = \frac{y_C y_D}{y_A y_B}\left(\frac{P}{P^\circ}\right)^{\Delta n}$ 로 쓰는데, $\Delta n = 0$이므로 압력항은 사라지고 $K = \frac{y_C y_D}{y_A y_B}$만 남는다.

계산 과정

먼저 1,000 K에서의 평형상수 K_2를 구한다. $\ln\frac{K_2}{1} = -\frac{(-4{,}600R)}{R}\left(\frac{1}{1{,}000} - \frac{1}{500}\right) = 4{,}600 \times (-0.001) = -4.6$
여기서 $-4.6 = 2 \times (-2.3) = 2\ln(0.1) = \ln(0.01)$이므로 $K_2 = 0.01$이다.

다음으로 평형 조성을 구한다. 반응 진행도를 x라 하면 A와 B는 각각 $1 - x$, C와 D는 각각 x가 되고, $\Delta n = 0$이므로 전체 몰수는 반응 전후 항상 2 mol로 일정하다. 몰분율은 $y_A = y_B = \frac{1-x}{2}$, $y_C = y_D = \frac{x}{2}$이므로 $K_2 = \frac{y_C y_D}{y_A y_B} = \frac{(x/2)^2}{((1-x)/2)^2} = \left(\frac{x}{1-x}\right)^2 = 0.01$ 양변에 제곱근을 취하면 $\frac{x}{1-x} = 0.1$이고, 이를 풀면 $x = 0.1(1 - x)$, $1.1x = 0.1$, $x = \frac{1}{11}$ mol이다.

마지막으로 D의 몰분율은 전체 몰수 2로 나눈 값이다. $y_D = \frac{x}{2} = \frac{1/11}{2} = \frac{1}{22}$

NoteBase

선지 판단

① 1/7 — X. 반응 진행도 x를 그대로 전체 몰수로 나누지 않고 초기 몰수 1로 나누거나 계산 과정에서 제곱근을 빠뜨리면 나오는 값으로, D의 몰분율이 아니다.
② 1/9 — X. K_2를 잘못 구하거나(부호를 반대로 적용) 몰분율 계산 중 전체 몰수를 잘못 잡았을 때 나올 수 있는 값이며 옳지 않다.
③ 1/11 — X. 이는 D의 몰분율이 아니라 반응 진행도 x 자체의 값이다. 전체 몰수 2로 다시 나누는 마지막 단계를 빠뜨리면 이 값을 답으로 고르게 된다.
④ 1/22 — O. 반트호프식으로 $K_2 = 0.01$을 구하고, 이로부터 $x = 1/11$을 얻은 뒤 전체 몰수 2로 나눈 값이 D의 몰분율 1/22이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 반응 진행도 $x = 1/11$을 그대로 D의 몰분율로 착각하는 것이다(선지 ③). 이 반응은 몰수 변화가 없는 반응($\Delta n = 0$)이라도 전체 몰수는 초기 A, B의 합인 2 mol로 고정되어 있으므로, 몰분율을 구할 때는 반드시 x를 2로 나누어야 한다. 또한 반트호프식에 ΔH°의 부호를 잘못 넣거나 $1/T_2 - 1/T_1$의 순서를 바꾸면 K_2가 100이 되어버려 완전히 다른 답이 나오므로 온도 대입 순서와 부호를 주의한다.

다시 나오면 이렇게 판단

표준반응열과 한 온도에서의 평형상수가 주어지고 다른 온도에서의 평형 조성을 물으면, 먼저 반트호프식으로 새 온도의 평형상수부터 구하고, 그다음 반응식의 몰수 변화(Δn)를 확인해 압력항의 유무를 정한 뒤, 반응 진행도로 평형 조성식을 세워 푼다. 마지막에 묻는 것이 몰분율인지 몰수인지 진행도인지를 다시 한 번 확인하고 전체 몰수로 나누는 것을 빠뜨리지 않는다.

암기 포인트

반트호프식 $\ln(K_2/K_1) = -\frac{\Delta H^\circ}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$과, $\Delta n = 0$인 기상반응에서는 평형상수가 압력에 무관하게 몰분율비만으로 표현된다는 점을 기억해 둔다. 초기 반응물의 총 몰수가 반응 진행 중에도 그대로 유지된다는 점도 함께 새겨 둔다.

NoteBase