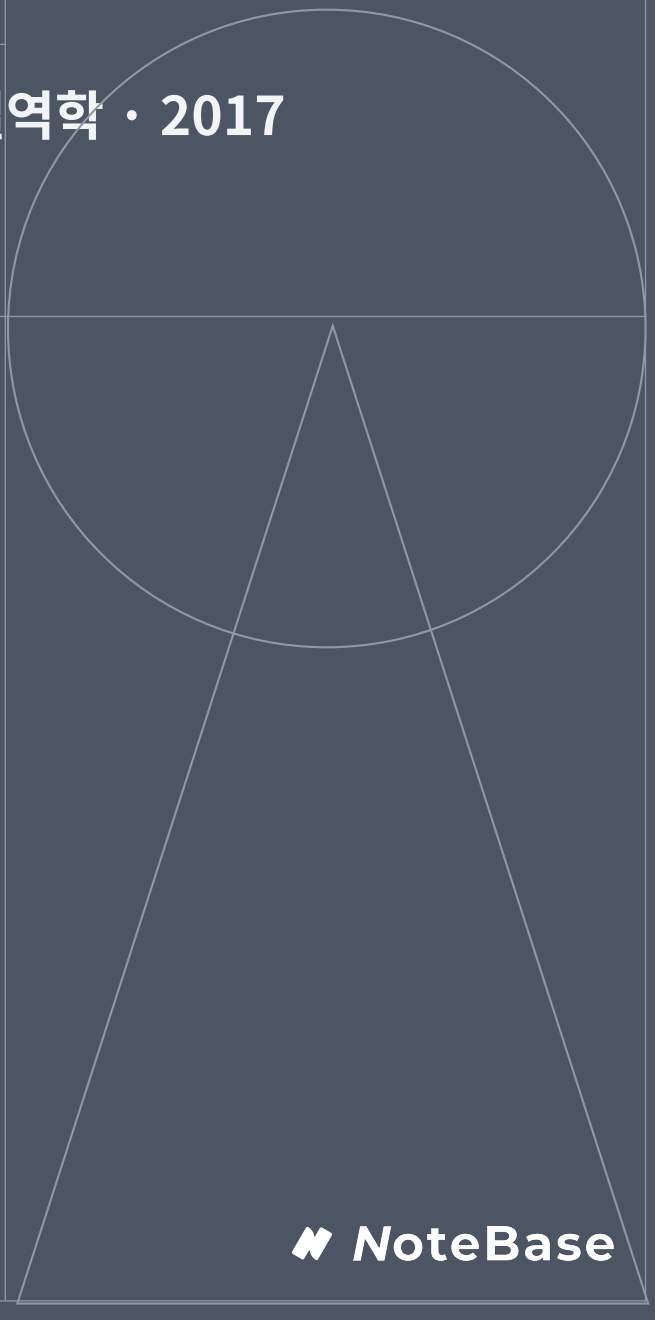
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 화공열역학 · 2017



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 화공열역학 · 2017

공무원/국가직/7급 · 화공열역학 · 2017

문 1. 열역학적 변수들에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 온도, 압력, 밀도는 세기(intensive) 성질이다.

② 부피, 질량은 크기(extensive) 성질이다.

③ 엔트로피는 경로(path) 함수이다.

④ 엔탈피는 상태(state) 함수이다.

정답 3번

출제 포인트

열역학적 변수를 세기 성질과 크기 성질로 구분하고, 엔트로피·엔탈피 같은 상태함수의 성질을 정확히 알고 있는지를 묻는다. 특히 상태함수와 경로함수의 구분이 핵심이다.

핵심 개념

세기 성질(intensive property)은 물질의 양에 무관한 성질로 온도, 압력, 밀도, 몰분율 등이 해당한다. 크기 성질(extensive property)은 물질의 양에 비례하는 성질로 부피, 질량, 몰수, 내부에너지, 엔탈피, 엔트로피 등이 해당한다. 상태함수(state function)는 계의 현재 상태에 의해서만 값이 결정되고 경로에 무관한 함수로 내부에너지, 엔탈피, 엔트로피, 깁스자유에너지 등이 모두 상태함수이다. 경로함수(path function)는 상태 변화 과정 자체에 값이 좌우되는 함수로 일과 열이 대표적이다.

선지별 해설

① 온도, 압력, 밀도는 세기(intensive) 성질이다 → O. 이 세 변수는 물질의 양에 관계없이 정의되는 세기 성질이 맞다.
② 부피, 질량은 크기(extensive) 성질이다 → O. 부피와 질량은 물질의 양에 비례하므로 크기 성질이 맞다.
③ 엔트로피는 경로(path) 함수이다 → X. 엔트로피는 온도, 압력 등 다른 상태변수와 마찬가지로 계의 상태만으로 값이 정해지는 상태함수이다. 경로함수로 분류되는 것은 일(work)과 열(heat)이며, 엔트로피를 경로함수라고 한 것은 틀린 설명이다. 틀린 표현 '엔트로피는 경로 함수이다' → 올바른 표현 '엔트로피는 상태함수이다'.
④ 엔탈피는 상태(state) 함수이다 → O. 엔탈피는 정의상 $H = U + PV$로 내부에너지, 압력, 부피라는 상태변수들의 조합이므로 상태함수이다.

NoteBase

오답 포인트

일과 열은 경로함수이고 엔트로피, 엔탈피, 내부에너지는 모두 상태함수라는 점을 혼동하면 안 된다. '경로에 따라 값이 달라지는가'라는 기준으로 구분하면, 계의 상태(온도·압력 등)가 같으면 항상 같은 값을 갖는 엔트로피는 상태함수로 분류된다.

다시 나오면 이렇게 판단

선지에 '경로함수(path function)'라는 표현이 나오면 그 대상이 일 또는 열인지 먼저 확인한다. 엔트로피, 엔탈피, 내부에너지, 깁스자유에너지, 헬름홀츠자유에너지처럼 열역학적 상태량으로 정의되는 것은 모두 상태함수이므로 경로함수라는 설명이 붙으면 틀린 선지로 판단한다.

암기 포인트

세기 성질: 온도, 압력, 밀도, 몰분율. 크기 성질: 부피, 질량, 몰수, 내부에너지, 엔탈피, 엔트로피. 상태함수: 내부에너지·엔탈피·엔트로피·자유에너지. 경로함수: 일과 열, 이 두 가지뿐이다.

NoteBase

문 2. 실제 기체의 열용량에 대한 설명으로 옳은 것만을 모두 고른 것은? (단, C_v는 정적열용량, C_p는 정압열용량이다)

ㄱ. C_v는 온도의 함수이다.
ㄴ. 단열 팽창 공정일 때 C_p는 C_v와 같은 값이다.
ㄷ. C_p는 온도에 무관한 함수이다.

① ㄱ
② ㄴ
③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ

정답 1번

출제 포인트

실제 기체에서 정적열용량 C_v와 정압열용량 C_p가 무엇의 함수인지, 그리고 두 열용량의 차이가 어떤 성질(상태량인지 과정량인지)인지를 구분할 수 있는지를 묻는다. ㄱ, ㄴ, ㄷ 세 진술 중 옳은 것만 골라야 하며, 정답은 ㄱ만 옳은 조합이다.

핵심 개념

정적열용량은 $C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$로 정의되고, 정압열용량은 $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$로 정의된다. 이상기체든 실제 기체든 내부에너지와 엔탈피는 온도가 오르면 값이 변하므로, 이 정의식 자체가 온도에 대한 미분이다. 따라서 C_v와 C_p는 항상 온도의 함수이며(실제 기체에서는 추가로 압력이나 부피에도 의존할 수 있지만, 온도에 의존한다는 사실 자체는 변하지 않는다), '온도의 함수이다'라는 진술은 그 자체로 참이다.
한편 $C_p - C_v$는 물질의 상태량(state property)으로, $C_p - C_v = \frac{TV\alpha^2}{\kappa}$($\alpha$는 열팽창계수, κ는 등온압축률)와 같이 그 물질이 놓인 온도·압력·부피 상태에만 좌우된다. 즉 $C_p - C_v$의 값은 그 기체가 어떤 과정(단열, 등온, 등압 등)을 거치고 있는지와는 무관하다. 과정은 상태가 변화해 가는 경로일 뿐, 상태량인 $C_p - C_v$의 값 자체를 정의하지 않는다.

NoteBase

선지별 해설

ㄱ. C_V는 온도의 함수이다 → O. $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$로 정의되므로 온도에 따라 값이 달라지는 온도의 함수이다. 실제 기체에서는 부피(또는 압력)에도 의존할 수 있지만, 그렇다고 온도의 함수라는 사실이 부정되지는 않는다.
ㄴ. 단열 팽창 공정일 때 C_p는 C_V와 같은 값이다 → X. $C_p - C_V$는 그 기체가 특정 온도·압력 상태에서 갖는 상태량이며, 단열 팽창이라는 '과정'의 종류에 따라 결정되는 값이 아니다. 실제 기체는 $C_p - C_V = \frac{TV\alpha^2}{\kappa} > 0$ 이므로 단열 팽창 중이라 해서 $C_p = C_V$가 되지 않는다.
ㄷ. C_p는 온도에 무관한 함수이다 → X. $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$로 정의되므로 온도가 바뀌면 값이 달라지는, 온도에 종속된 양이다. '온도에 무관하다'는 진술은 정의 자체와 모순된다.
따라서 옳은 진술은 ㄱ 하나뿐이며, ①(ㄱ)이 정답이다.

오답 포인트

②(ㄴ)와 ④(ㄴ,ㄷ)를 고르는 실수는 '단열'이라는 과정 조건이 C_p와 C_V의 관계 자체를 바꾼다고 착각하는 데서 비롯된다. $C_p - C_V$는 물질의 상태(온도·부피 등)에 의해서만 정해지는 상태량이지, 그 상태에 도달하는 경로(등온·단열·등압 등 과정)와는 무관하다. ③(ㄱ,ㄷ)을 고르는 실수는 C_p의 정의식 $(\partial H/\partial T)_P$에서 이미 온도에 대한 미분이 들어 있다는 점을 놓치고, '실제 기체라서 이상적이지 않으니 온도와 무관할 것'이라고 막연히 추측한 데서 비롯된다.

다시 나오면 이렇게 판단

C_V나 C_p가 '무엇의 함수인가'를 묻는 문제는 항상 정의식—$C_V = (\partial U/\partial T)_V$, $C_p = (\partial H/\partial T)_P$—을 먼저 떠올린다. 정의식에 온도에 대한 편미분이 들어 있으므로 두 열용량 모두 최소한 온도의 함수라는 점은 이상기체든 실제 기체든 항상 참이다. 반대로 $C_p - C_V$의 값이 과정(단열·등온·등압 등)에 따라 달라진다고 서술된 진술은 상태량과 과정량을 혼동시키려는 오답 함정이므로 틀린 진술로 판단한다.

암기 포인트

$C_V = (\partial U/\partial T)_V$, $C_p = (\partial H/\partial T)_P$ — 두 정의식 모두 온도 미분이므로 C_V, C_p는 항상 온도의 함수이다.
$C_p - C_V = \frac{TV\alpha^2}{\kappa}$는 상태량이며 과정의 종류(단열·등온 등)와 무관하게 그 물질의 현재 상태에 의해서만 결정된다.

NoteBase

문 3. Gibbs 에너지에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 일정한 온도와 압력에서 닫힌 계의 평형상태는 전체 Gibbs 에너지가 최소인 상태이다.

② 일정한 온도와 압력에서 기체의 혼합과정 중 Gibbs 에너지는 감소한다.

③ 반응평형상수 값은 Gibbs 에너지의 변화와 무관하다.

④ 단일 성분 계에서 Gibbs 에너지는 온도와 압력의 함수이다.

정답 3번

출제 포인트

Gibbs 에너지의 정의와 성질(평형조건, 혼합에 따른 변화, 상태함수로서의 성질, 반응평형상수와의 관계)을 정확히 아는지 묻는 문제이다. 특히 반응평형상수와 표준 Gibbs 에너지 변화 사이의 관계식을 알아야 옳지 않은 선지를 골라낼 수 있다.

핵심 개념

일정한 온도와 압력에서 계의 평형상태는 전체 Gibbs 에너지가 최소가 되는 상태로 정의된다($dG_{T,P} = 0$, 최소점). 기체의 혼합과정은 자발적 과정이므로 등온등압에서 혼합 Gibbs 에너지 변화 ΔG_{mix}는 항상 음수이며, 이는 곧 Gibbs 에너지가 감소함을 뜻한다. 단일 성분계에서 Gibbs 에너지는 $dG = -SdT + VdP$로부터 온도와 압력의 함수 $G = G(T, P)$로 표현된다. 반응평형상수는 표준 반응 Gibbs 에너지 변화와 $\Delta G^\circ = -RT\ln K$의 관계로 직접 연결되어 있으므로, 평형상수 값은 Gibbs 에너지의 변화와 무관한 것이 아니라 오히려 그 변화량에 의해 결정된다.

선지별 해설

① 일정한 온도와 압력에서 닫힌 계의 평형상태는 전체 Gibbs 에너지가 최소인 상태이다 → O. 등온등압 조건에서 자발적 변화는 Gibbs 에너지가 감소하는 방향으로 진행되고, 더 이상 감소할 수 없는 지점, 즉 전체 Gibbs 에너지가 최소인 상태가 평형상태이다.

② 일정한 온도와 압력에서 기체의 혼합과정 중 Gibbs 에너지는 감소한다 → O. 서로 다른 기체의 혼합은 등온등압에서 자발적으로 일어나는 과정이므로 혼합에 따른 Gibbs 에너지 변화는 음수이며, 이는 Gibbs 에너지가 감소함을 의미한다.

③ 반응평형상수 값은 Gibbs 에너지의 변화와 무관하다 → X. 틀린 표현 → 올바른 표현: 반응평형상수 K는 표준 반응 Gibbs 에너지 변화 ΔG°와 $\Delta G^\circ = -RT\ln K$의 관계로 직접 연결되어 있으므로, 평형상수 값은 Gibbs 에너지의 변화에 의해 결정되는 값이지 무관한 값이 아니다.

④ 단일 성분 계에서 Gibbs 에너지는 온도와 압력의 함수이다 → O. 단일 성분계에서 $dG = -SdT + VdP$가 성립하므로 Gibbs 에너지는 온도와 압력만의 함수 $G(T, P)$로 표현된다.

NoteBase

오답 포인트

③을 옳다고 착각하기 쉬운 이유는 평형상수를 온도만의 함수로 외워 두었기 때문인데, 온도가 변수인 것과 Gibbs 에너지 변화와 무관하다는 것은 별개의 문제이다. 평형상수 자체가 표준 Gibbs 에너지 변화로부터 정의되는 값이므로 두 값은 서로 무관할 수 없다.

다시 나오면 이렇게 판단

선지에 '~와 무관하다', '~에 영향을 받지 않는다'는 표현이 나오면 먼저 관련 열역학 관계식을 떠올려 실제로 두 변수가 식으로 연결되어 있는지 확인한다. 반응평형상수 문제는 $\Delta G^\circ = -RT\ln K$ 관계식 하나로 대부분 해결된다.

암기 포인트

등온등압 평형조건: 전체 Gibbs 에너지 최소. 자발적 혼합·반응: Gibbs 에너지 감소. 단일 성분계: $G = G(T, P)$. 반응평형상수: $\Delta G^\circ = -RT\ln K$로 Gibbs 에너지 변화와 직결된다.

NoteBase

문 4. 기체의 부피 팽창률(volume expansivity)은 β이고 등온 압축률(isothermal compressibility)은 κ라고 할 때, $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V$ 값은?

① $-\frac{\beta}{\kappa}$
② $-\frac{\kappa}{\beta}$
③ $\frac{\beta}{\kappa}$
④ $\frac{\kappa}{\beta}$

정답 4번

출제 포인트

부피 팽창률 β와 등온 압축률 κ의 정의로부터 편미분 삼중곱 관계(triple product rule)를 이용해 $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V$를 β, κ로 표현하는 문제이다. 두 물성치의 정의식을 정확히 기억하고 부호까지 맞게 대입할 수 있는지를 확인한다.

조건 정리

부피 팽창률은 $\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$로 정의된다. 등온 압축률은 $\kappa = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$로 정의되며, 압력이 증가하면 부피가 감소하므로 앞에 음의 부호가 붙는다. 구하려는 값은 $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V$이다.

사용할 공식

세 변수 T, P, V 사이에는 순환 관계(triple product rule)가 성립한다: $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -1$. 이를 이용하면 $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V = -\frac{1}{\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P}$로 정리된다.

계산 과정

정의식으로부터 $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \beta V$이고, $\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T = -\kappa V$이므로 $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = -\frac{1}{\kappa V}$이다. 이를 순환 관계식에 대입하면 $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V = -\frac{1}{(-\frac{1}{\kappa V})(\beta V)} = -\frac{1}{-\frac{\beta}{\kappa}} = \frac{\kappa}{\beta}$로 계산된다.

선지 판단

① $-\frac{\beta}{\kappa}$ → 계산 결과인 $\frac{\kappa}{\beta}$와 분자·분모가 뒤바뀌고 부호도 다르므로 틀린 표현이다 → 올바른 표현은 $\frac{\kappa}{\beta}$이다.
② $-\frac{\kappa}{\beta}$ → 분자·분모는 맞지만 부호가 반대이므로 틀린 표현이다 → 올바른 표현은 $\frac{\kappa}{\beta}$이다.
③ $\frac{\beta}{\kappa}$ → 부호는 맞지만 분자·분모가 뒤바뀐 표현이다 → 올바른 표현은 $\frac{\kappa}{\beta}$이다.
④ $\frac{\kappa}{\beta}$ → 순환 관계식과 두 물성치의 정의식을 정확히 대입한 결과와 일치하므로 옳은 표현이다.

NoteBase

오답 포인트

가장 흔한 실수는 κ의 정의식에 붙는 음의 부호를 빠뜨리는 것이다. 압력이 오르면 부피가 줄어드는 물리적 의미 때문에 $\kappa = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$로 정의되는데, 이 부호를 놓치면 최종 결과의 부호가 반대로 나와 ②를 고르게 된다. 또한 순환 관계식에서 분자와 분모의 위치를 바꿔 대입하면 ①이나 ③처럼 β와 κ가 뒤바뀐 결과를 얻게 되므로 대입 순서를 정확히 지켜야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

T, P, V 세 변수 중 두 변수의 편미분이 주어지고 나머지 하나를 구하라는 형태가 나오면 곧바로 순환 관계식 $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -1$을 떠올린다. 그다음 β와 κ의 정의식에서 편미분 항을 뽑아내 대입하면 부호 실수 없이 답을 구할 수 있다.

암기 포인트

$\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$(양의 부호), $\kappa = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$(음의 부호)로 기억해 둔다. 순환 관계식의 결과는 항상 -1이라는 점과, $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V = \frac{\kappa}{\beta}$라는 결론을 함께 묶어 외워 둔다.

NoteBase

문 5. 닫힌 계에서 어떤 기체가 $P = \frac{RT}{V-b}$의 상태방정식을 따른다고 할 때, 이 기체의 부피에 대한 내부에너지(U)의 변화량 $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T$의 값은? (단, V는 몰부피, R은 기체상수, b는 양의 상수이다)

① 1

② 0

③ b

④ $\frac{1}{V^2}$

정답 2번

출제 포인트

주어진 상태방정식으로부터 내부에너지의 부피 의존성 $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T$를 열역학 기본 관계식을 이용해 계산할 수 있는지를 묻는다. 이상기체와 유사한 형태의 상태방정식(반데르발스형에서 인력항이 없는 형태)이 주어졌을 때 내부에너지가 부피에 무관해지는 조건을 확인하는 문제이다.

조건 정리

상태방정식은 $P = \frac{RT}{V-b}$이며, V는 몰부피, R은 기체상수, b는 양의 상수이다. 구하는 값은 등온 조건에서 부피에 대한 내부에너지의 편미분 $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T$이다.

사용할 공식

열역학 기본식 $dU = TdS - PdV$와 맥스웰 관계식으로부터 유도되는 다음 관계식을 사용한다.
$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P$
이 식은 임의의 순수물질에 대해 성립하는 일반식으로, 상태방정식만 알면 우변을 직접 계산할 수 있다.

계산 과정

먼저 V를 일정하게 놓고 $P = \frac{RT}{V-b}$를 T에 대해 미분하면
$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{R}{V-b}$
이다. 이를 공식에 대입하면
$T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{RT}{V-b} = P$
가 되어, 우변의 두 항이 서로 같아진다. 따라서
$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = P - P = 0$
이 된다. 이는 이상기체 상태방정식 $PV = RT$에서 얻어지는 결과와 동일한 형태로, 상수 b가 부피를 평행이동시킬 뿐 P와 T의 곱셈 관계 자체는 바꾸지 않기 때문에 나타나는 결과이다.

NoteBase

선지 판단

① 1 → X, 계산 결과와 무관한 값이며 어떤 유도 과정에서도 나오지 않는다.
② 0 → O, $T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P$를 계산하면 두 항이 정확히 상쇄되어 0이 된다.
③ b → X, b는 상태방정식에 등장하는 상수일 뿐 편미분 결과에 그대로 나타나지 않는다.
④ $\frac{1}{V^2}$ → X, 반데르발스 상태방정식처럼 압력항에 V^2에 반비례하는 인력 보정항(a/V^2)이 있을 때 나타나는 형태이며, 이 문제의 상태방정식에는 그런 항이 없으므로 해당하지 않는다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 상태방정식에 상수 b가 포함되어 있어 이상기체와 다르다고 생각하고 답을 0이 아닌 다른 값으로 고르는 것이다. 그러나 b는 부피축을 $V - b$로 평행이동시키는 역할만 하고, $P(V - b) = RT$ 형태이므로 $T(\partial P/\partial T)_V$를 계산하면 항상 P 자신과 같아져 상쇄된다. 또한 반데르발스 방정식의 인력항(a/V^2)과 혼동해 ④를 고르지 않도록 주의해야 한다. 이 문제의 방정식에는 인력항이 없으므로 $1/V^2$ 형태가 나올 수 없다.

다시 나오면 이렇게 판단

상태방정식이 주어지고 $(\partial U/\partial V)_T$를 물으면, 반드시 일반식 $(\partial U/\partial V)_T = T(\partial P/\partial T)_V - P$에 대입해 계산한다. 상태방정식이 $P(V - b) = RT$ 꼴(부피만 상수만큼 이동된 이상기체형)이면 결과는 항상 0이고, 반데르발스형처럼 $P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$처럼 인력항이 추가되면 결과가 $\frac{a}{V^2}$로 0이 아니게 된다는 점을 함께 기억해 둔다.

암기 포인트

내부에너지의 부피 의존성 공식 $(\partial U/\partial V)_T = T(\partial P/\partial T)_V - P$를 기본 공식으로 암기해 둔다. 이상기체 및 $P(V - b) = RT$ 형태(공동부피만 보정된 형태)에서는 이 값이 0이며, 이는 내부에너지가 온도만의 함수임을 의미한다. 반데르발스형처럼 인력 보정항이 있는 경우에만 0이 아닌 값이 나온다는 점이 핵심 구분 기준이다.

NoteBase

문 6. 1기압, 300 K의 공기가 매우 느린 속도($u_1 \approx 0$)로 압축기에 유입된 후 3기압으로 압축되었다가 다시 노즐에서 팽창되어 1기압, 300 K이 되었다. 이때 최종속도(u_2)가 $500 ms^{-1}$이었고, 압축과정에서 공기 1 kg당 125 kJ의 열이 제거되었다면, 공기 1 kg당 가해진 일[kJ]은? (단, 위치에너지의 변화와 마찰에 의한 손실은 없다)

① 125

② 250

③ 375

④ 500

정답 2번

출제 포인트

압축기와 노즐을 거치는 정상상태 유동 과정 전체에 개방계 에너지수지식(정상유동 에너지식)을 적용해, 열 출입과 운동에너지 변화로부터 계에 가해진 일을 구하는 문제이다. 입구와 출구의 온도·압력이 같다는 조건을 이용해 엔탈피 변화가 0임을 알아채는 것이 핵심이다.

조건 정리

입구 상태: 1기압, 300 K, $u_1 \approx 0$. 출구 상태(노즐 이후): 1기압, 300 K, $u_2 = 500\ \mathrm{ms}^{-1}$. 위치에너지 변화와 마찰손실은 없다. 압축 단계에서 공기 1kg당 125 kJ의 열이 제거되었고, 계 전체(압축기+노즐)에서 열 출입은 이 압축 단계뿐이므로 전체 과정의 열량은 $q = -125$ kJ/kg이다(제거이므로 음수). 공기는 이상기체로 취급하며, 이상기체의 엔탈피는 온도만의 함수이다.

사용할 공식

정상유동 개방계 에너지수지식(단위질량당, 위치에너지 무시): $q + w_s = \Delta h + \frac{\Delta u^2}{2}$ 여기서 w_s는 계에 가해진 축일, $\Delta h = h_2 - h_1$, $\Delta u^2/2 = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2}$이다.

계산 과정

입구와 출구의 온도가 모두 300 K로 같고 공기를 이상기체로 보면 엔탈피는 온도만의 함수이므로 $\Delta h = h_2 - h_1 = 0$이다. 운동에너지 변화는 $\frac{\Delta u^2}{2} = \frac{500^2 - 0^2}{2} = 125{,}000$ J/kg $= 125$ kJ/kg 이다.
에너지수지식에 대입하면 $w_s = \Delta h + \frac{\Delta u^2}{2} - q = 0 + 125 - (-125) = 250$ kJ/kg 이므로 공기 1kg당 가해진 일은 250 kJ이다.

NoteBase

선지 판단

① 125 → 틀림. 이는 제거된 열량 또는 운동에너지 증가분 하나만을 답으로 착각한 값이다. 실제로는 열 제거분과 운동에너지 증가분을 모두 합산해야 한다.
② 250 → 옳음. $\Delta h = 0$과 $\Delta u^2/2 = 125$ kJ/kg, $q = -125$ kJ/kg을 에너지수지식에 넣으면 $w_s = 250$ kJ/kg이 정확히 나온다.
③ 375 → 틀림. 부호를 잘못 처리해 열 제거분을 빼지 않고 다른 값과 잘못 더한 경우에 나올 수 있는 값이다.
④ 500 → 틀림. 운동에너지 변화만 두 배로 계산하거나 열항을 아예 누락한 경우에 나오는 값으로, 에너지수지가 맞지 않는다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 입구와 출구의 온도·압력이 같다고 해서 계에 가해진 일이 0이라고 오판하는 것이다. 온도가 같으면 엔탈피 변화만 0이 될 뿐, 속도 변화에 따른 운동에너지 항과 열 출입 항은 별도로 남아 있으므로 반드시 함께 고려해야 한다. 또한 열이 '제거'되었다는 것은 q가 음수라는 뜻이므로 부호를 바꾸지 않고 그대로 더하면 답이 틀어진다.

다시 나오면 이렇게 판단

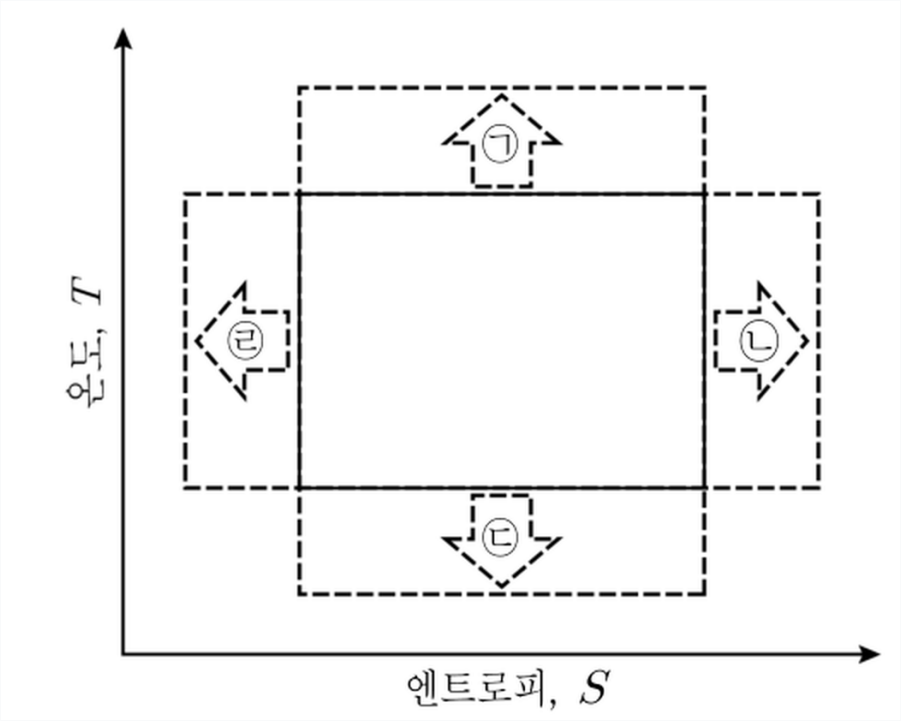
압축기·노즐·터빈 등 정상유동 장치가 여러 개 직렬로 연결된 과정을 하나의 계로 묶어 물어보면, 우선 입구·출구의 온도가 같은지부터 확인해 엔탈피 변화 유무를 판단한다. 그다음 운동에너지 변화와 열량의 부호(제거는 음수, 가해짐은 양수)를 정확히 표시하고 에너지수지식에 대입한다.

암기 포인트

정상유동 에너지수지식은 $q + w_s = \Delta h + \Delta u^2/2$(위치에너지 무시 시)이며, 이상기체는 온도가 같으면 엔탈피 변화가 0이라는 점과 열이 제거될 때는 q를 음수로 넣는다는 점을 기억해 둔다.

NoteBase

문 7. Carnot 엔진에 대한 정규 $T-S$ 선도(실선)에서 어느 하나의 과정에 점선으로 표시된 변화를 준 경우에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?



① ㄱ의 변화를 주면, 엔진의 효율이 증가한다.

② ㄴ의 변화를 주면, 엔진이 하는 일의 양이 증가한다.

③ ㄷ의 변화를 주면, 엔진의 효율이 감소한다.

④ ㄹ의 변화를 주면, 엔진이 하는 일의 양이 증가한다.

정답 3번

출제 포인트

정규(직사각형) Carnot 사이클의 T-S 선도에서 위쪽 변은 고온 등온 흡열 과정(온도 T_H), 아래쪽 변은 저온 등온 방열 과정(온도 T_C), 좌우 양 변은 단열(등엔트로피) 과정을 나타낸다. 네 변 중 하나를 바깥으로 밀어내는 변화가 Carnot 효율 $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$과 한 사이클당 일의 양(사각형 넓이 $W = (T_H - T_C)(S_2 - S_1)$)에 각각 어떤 영향을 주는지 구분해서 판단하는 문제이다.

조건 정리

직사각형의 위쪽 변=T_H선(등온 흡열), 아래쪽 변=T_C선(등온 방열), 좌측 변=낮은 엔트로피 S_1에서의 단열 과정, 우측 변=높은 엔트로피 S_2에서의 단열 과정이다. ㄱ은 위쪽 변이 위로 이동(=T_H 증가), ㄴ은 우측 변이 오른쪽으로 이동(=S_2 증가, 즉 폭 확대), ㄷ은 아래쪽 변이 아래로 이동(=T_C 감소), ㄹ은 좌측 변이 왼쪽으로 이동(=S_1 감소, 즉 폭 확대)한 상황을 점선으로 나타낸 것이다.

NoteBase

사용할 공식

Carnot 효율 $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$, 한 사이클이 하는 일 $W = Q_H - Q_C = (T_H - T_C)(S_2 - S_1)$ (T-S 선도에서 사각형의 넓이).

계산 과정

ㄱ: T_H만 증가하고 T_C, 폭 $(S_2 - S_1)$은 불변 → $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$에서 분모 T_H가 커지므로 $\frac{T_C}{T_H}$가 작아져 효율은 증가한다. 넓이도 커지므로 일의 양도 증가하지만, ①은 효율 증가만 언급하므로 옳은 설명이다.
ㄴ: 우측 변이 오른쪽으로 이동해 폭 $(S_2 - S_1)$만 커지고 T_H, T_C는 불변 → 효율 $\eta = 1 - T_C/T_H$는 변화가 없으나, 넓이 $W = (T_H - T_C)(S_2 - S_1)$는 폭이 커진 만큼 증가한다. 따라서 일의 양이 증가한다는 ②는 옳은 설명이다.
ㄷ: T_C만 감소하고 T_H, 폭은 불변 → $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$에서 분자 T_C가 작아지므로 $\frac{T_C}{T_H}$가 작아져 효율은 오히려 증가한다. 그런데 ③은 '효율이 감소한다'고 하였으므로 실제(효율 증가)와 반대이며, 이 설명이 옳지 않다.
ㄹ: 좌측 변이 왼쪽으로 이동해 폭 $(S_2 - S_1)$만 커지고 T_H, T_C는 불변 → ㄴ과 같은 원리로 넓이가 커져 일의 양이 증가한다. 따라서 ④는 옳은 설명이다.

선지 판단

① ㄱ의 변화(T_H 상승)를 주면 $\eta = 1 - T_C/T_H$의 분모가 커져 효율이 증가한다 → 옳은 설명(O).
② ㄴ의 변화(폭 확대, S_2 증가)를 주면 T_H, T_C는 그대로이고 사각형 넓이만 커지므로 일의 양이 증가한다 → 옳은 설명(O).
③ ㄷ의 변화(T_C 하강)를 주면 $\eta = 1 - T_C/T_H$의 분자가 작아져 효율이 오히려 증가한다. 따라서 '효율이 감소한다'는 서술은 틀린 표현 → 올바른 표현은 '효율이 증가한다'이다(X, 정답).
④ ㄹ의 변화(폭 확대, S_1 감소)를 주면 ㄴ과 마찬가지로 사각형 넓이가 커져 일의 양이 증가한다 → 옳은 설명(O).

오답 포인트

이 문제의 함정은 '온도가 낮아지면 성능이 나빠질 것'이라는 직관과 실제 열역학 공식의 부호가 반대라는 점이다. Carnot 효율 $\eta = 1 - T_C/T_H$은 저온부 온도 T_C가 낮을수록, 고온부 온도 T_H가 높을수록 커진다. 즉 냉각원 온도를 낮추는 것도 열원 온도를 높이는 것과 마찬가지로 효율을 높이는 방향이다. 또한 좌우 변(등엔트로피 과정)의 이동은 온도를 바꾸지 않고 엔트로피 폭만 넓히므로 효율에는 영향이 없고 일의 양(사각형 넓이)만 증가시킨다는 점도 함께 구분해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

T-S 선도에서 직사각형 어느 변이 움직였는지 먼저 확인한 뒤, 위/아래 변(등온선)의 이동은 T_H 또는 T_C를 바꿔 효율 $\eta = 1 - T_C/T_H$에 영향을 주고, 좌/우 변(등엔트로피선)의 이동은 엔트로피 폭만 바꿔 일의 양(넓이)에만 영향을 준다고 정리해서 판단한다. T_C가 낮아지는 변화는 항상 효율을 증가시키는 방향임을 기억한다.

NoteBase

암기 포인트

Carnot 효율 $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$: $T_H \uparrow$ 또는 $T_C \downarrow$ 이면 효율 증가. 일의 양 $W = (T_H - T_C)(S_2 - S_1)$: 폭(엔트로피 구간)이 넓어지면 효율과 무관하게 일의 양만 증가.

NoteBase

문 8. 닫힌 계에서 어떤 기체의 상태방정식이 $V = \frac{RT}{P} + b$로 표시된다. 기체가 가역적으로 등온 압축되는 과정의 부피감소($V_1 \rightarrow V_2$)에 필요한 일(W)의 양($|W|$)은? (단, V는 몰부피, R은 기체상수, b는 양의 상수이다)

① 0
② $RT\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$
③ $RT\ln\left(\frac{V_1+b}{V_2+b}\right)$
④ $RT\ln\left(\frac{V_1-b}{V_2-b}\right)$

정답 4번

출제 포인트

이상기체 상태방정식이 아니라 부피 보정항 b가 더해진 상태방정식 $V = \frac{RT}{P} + b$를 갖는 기체에서, 가역 등온 압축에 필요한 일의 크기를 구하는 문제이다. 상태방정식을 압력에 대해 정리한 뒤 일의 정의식에 대입하는 절차를 정확히 수행할 수 있는지를 확인한다.

조건 정리

닫힌 계(질량 일정), 가역 과정, 등온 과정(T=일정)이다. 상태방정식은 $V = \frac{RT}{P} + b$이며, 부피는 V_1에서 V_2로 감소한다($V_1 > V_2$, 압축). 구해야 할 값은 계에 가해진 일의 크기 $|W|$이다.

사용할 공식

가역 과정에서 계가 받는 일은 $W = -\int_{V_1}^{V_2} P dV$이다. 주어진 상태방정식을 압력에 대해 정리하면 $V - b = \frac{RT}{P}$이므로 $P = \frac{RT}{V-b}$가 된다.

계산 과정

$P = \frac{RT}{V-b}$를 일의 정의식에 대입하면 $W = -\int_{V_1}^{V_2} \frac{RT}{V-b} dV$이다. 등온이므로 RT는 적분 밖으로 나오고, $\int \frac{dV}{V-b} = \ln(V-b)$이므로 $W = -RT[\ln(V-b)]_{V_1}^{V_2} = -RT\ln\left(\frac{V_2-b}{V_1-b}\right) = RT\ln\left(\frac{V_1-b}{V_2-b}\right)$이다. 압축 과정($V_1 > V_2$)이므로 $\frac{V_1-b}{V_2-b} > 1$이 되어 이 값은 양수이며, 이것이 곧 계에 가해진 일의 크기 $|W|$가 된다.

선지 판단

① 0: 부피가 실제로 변화하며 압력도 유한하므로 일이 0이 될 수 없다. X
② $RT\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$: 이는 이상기체($b = 0$)일 때의 일의 크기이다. 이 문제의 상태방정식에는 보정항 b가 존재하므로 그대로 적용할 수 없다. X
③ $RT\ln\left(\frac{V_1+b}{V_2+b}\right)$: $P = \frac{RT}{V-b}$에서 부호가 $-b$인데 $+b$로 잘못 적용한 결과이다. X
④ $RT\ln\left(\frac{V_1-b}{V_2-b}\right)$: 계산 과정에서 유도한 결과와 정확히 일치한다. O

NoteBase

오답 포인트

가장 흔한 실수는 상태방정식의 b를 무시하고 이상기체 공식 $RT\ln(V_1/V_2)$를 그대로 쓰는 것이다(②). 또한 $V = \frac{RT}{P} + b$를 P에 대해 정리할 때 부호를 잘못 옮겨 $V + b$ 형태로 만드는 실수도 나온다(③). 상태방정식을 압력 중심으로 재정리하는 대수 과정을 침착하게 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

상태방정식이 이상기체식과 다르게 주어지면, 가장 먼저 그 식을 $P = f(V)$ 형태로 정리한 뒤 $W = -\int P dV$에 대입하는 순서를 따른다. b와 같은 보정 상수가 있으면 적분 결과의 로그 안 항이 V 대신 $V - b$(또는 식의 부호에 따라 $V + b$)로 바뀐다는 점을 반드시 반영한다.

암기 포인트

가역 등온 과정의 일은 $W = -\int_{V_1}^{V_2} P dV$이며, 상태방정식이 $V - b = \frac{RT}{P}$ 꼴이면 결과는 $RT\ln\left(\frac{V_1 - b}{V_2 - b}\right)$로, 이상기체식의 V를 $V - b$로 치환한 형태가 된다.

NoteBase

문 9. A, B, C의 삼성분계에서 과잉 Gibbs 에너지G^E가 $G^E = x_A x_B x_C RT$로 표시될 때, 성분 A의 활동도 계수 γ_A는? (단, x_A, x_B, x_C는 각각 성분 A, B, C의 몰분율이며, R은 기체상수이다.)

① $\exp(2x_B^2 x_C + 2x_B x_C^2 - x_B x_C)$

② $\exp(x_B^2 x_C + x_B x_C^2 - x_B x_C)$

③ $\exp(2x_B^2 x_C + 2x_B x_C^2 + x_B x_C)$

④ $\exp(x_B^2 x_C + x_B x_C^2 + x_B x_C)$

정답 1번

출제 포인트

삼성분계 과잉 Gibbs 에너지 모델 $G^E = x_A x_B x_C RT$가 주어졌을 때, 부분몰 성질 관계식을 이용해 성분 A의 활동도 계수 γ_A를 유도할 수 있는지를 묻는다. 몰분율 $x_i = n_i/n$로 정의된 조성함수를 몰수 n_i에 대해 편미분하는 표준 절차를 정확히 적용하는 것이 핵심이다.

조건 정리

전체 몰수를 $n = n_A + n_B + n_C$라 하면 $x_i = n_i/n$이므로 $nG^E/RT = n_A n_B n_C/n^2$로 쓸 수 있다. 활동도 계수는 $\ln \gamma_A = \left(\frac{\partial(nG^E/RT)}{\partial n_A}\right)_{n_B,\, n_C}$로 정의되며, 이 편미분을 수행한 뒤 다시 몰분율로 되돌리면 된다.

사용할 공식

부분몰 과잉 Gibbs 에너지(=활동도 계수의 로그) 정의식 $\ln \gamma_i = \left(\frac{\partial(nG^E/RT)}{\partial n_i}\right)_{n_{j\neq i}}$를 사용하고, 몫의 미분 $\frac{\partial}{\partial n_A}\left(\frac{1}{n^2}\right) = -\frac{2}{n^3}$을 이용한다.

계산 과정

$nG^E/RT = \frac{n_A n_B n_C}{n^2}$를 n_A로 편미분하면 n_B, n_C는 상수이고 n도 n_A의 함수이므로 곱의 미분을 적용한다.

$\ln \gamma_A = \frac{n_B n_C}{n^2} + n_A n_B n_C\left(-\frac{2}{n^3}\right) = \frac{n_B n_C}{n^2} - \frac{2n_A n_B n_C}{n^3}$

여기서 $n_B n_C/n^2 = x_B x_C$, $n_A n_B n_C/n^3 = x_A x_B x_C$이므로

$\ln \gamma_A = x_B x_C - 2x_A x_B x_C = x_B x_C(1 - 2x_A)$

삼성분계에서 $x_A = 1 - x_B - x_C$이므로 이를 대입하면

$\ln \gamma_A = x_B x_C\{1 - 2(1 - x_B - x_C)\} = x_B x_C(2x_B + 2x_C - 1)$

$= 2x_B^2 x_C + 2x_B x_C^2 - x_B x_C$

따라서 $\gamma_A = \exp(2x_B^2 x_C + 2x_B x_C^2 - x_B x_C)$이다.

NoteBase

선지 판단

① exp(2x_B^{2}x_C + 2x_Bx_C^2 - x_Bx_C): O — 편미분 결과와 정확히 일치한다.
② exp(x_B^{2}x_C + x_Bx_C^2 - x_Bx_C): X — 앞의 두 항에서 계수 2를 빠뜨린 값이다. 곱의 미분에서 n이 n_A의 함수임을 반영하지 않고 $-1/n^3$만 사용하면 나오는 오답이다.
③ exp(2x_B^{2}x_C + 2x_Bx_C^2 + x_Bx_C): X — 마지막 항의 부호가 반대다. $-2x_Ax_Bx_C$ 항의 부호를 잘못 처리하면 나온다.
④ exp(x_B^{2}x_C + x_Bx_C^2 + x_Bx_C): X — ②의 계수 오류와 ③의 부호 오류가 동시에 발생한 값이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 $nG^E/RT = n_An_Bn_C/n^2$를 n_A로 미분할 때 분모의 n도 n_A의 함수라는 점을 놓치고 분자 $n_An_Bn_C$만 미분하는 것이다. 이 경우 2배가 되어야 할 항의 계수가 절반으로 줄어 ②, ④ 같은 오답이 나온다. 또한 $-2x_Ax_Bx_C$를 $x_A = 1 - x_B - x_C$로 치환하는 부호 계산을 서두르면 마지막 항 $-x_Bx_C$의 부호가 뒤집혀 ③, ④가 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

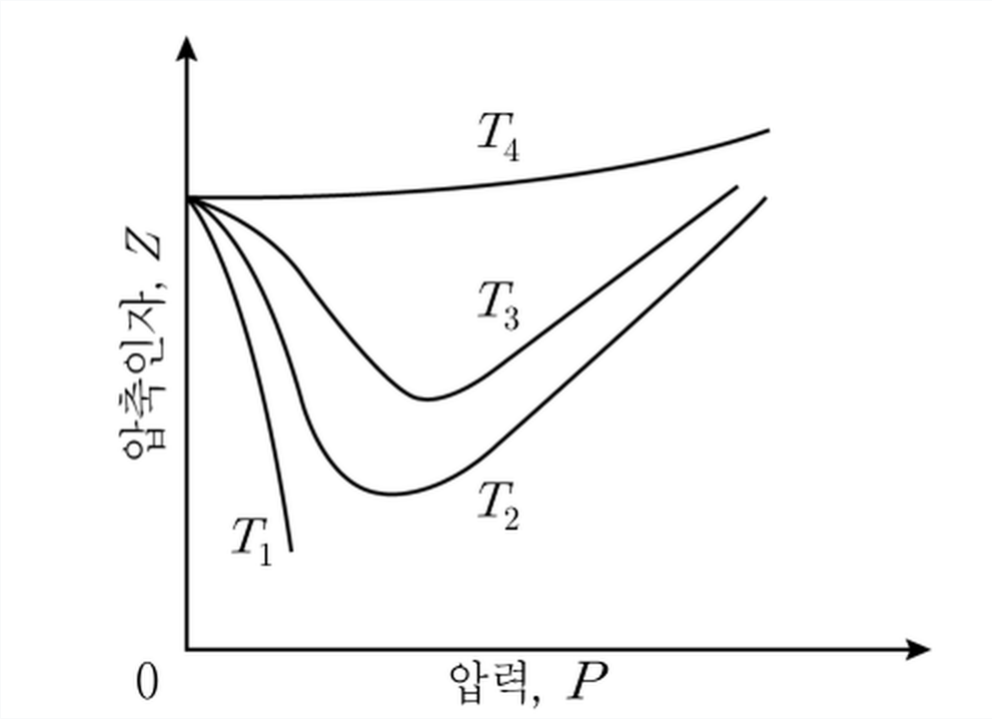
삼성분계(또는 이성분계) 과잉 Gibbs 에너지 모델이 주어지고 특정 성분의 활동도 계수를 구하라는 문제는 항상 nG^E/RT를 몰수로 표현한 뒤 구하려는 성분의 몰수로 편미분하는 절차로 접근한다. 분모에 전체 몰수 n이 들어 있으면 반드시 곱의 미분(또는 몫의 미분)을 적용해 n에 대한 의존성까지 빠짐없이 미분한 다음, 마지막에 몰분율로 되돌리고 필요하면 $x_A + x_B + x_C = 1$ 관계로 정리한다.

암기 포인트

활동도 계수 정의: $\ln \gamma_i = \partial(nG^E/RT)/\partial n_i$(다른 성분 몰수 고정). 삼성분 대칭모델 $G^E = x_Ax_Bx_CRT$의 결과는 $\ln \gamma_A = x_Bx_C(1 - 2x_A) = 2x_B^2x_C + 2x_Bx_C^2 - x_Bx_C$로, 나머지 성분의 활동도 계수도 첨자를 순환시켜 같은 형태로 얻는다.

NoteBase

문 10. 어떤 기체의 압력(P)에 대한 압축인자(Z)의 관계가 다음과 같은 온도별 그래프로 표시된다. 그래프에서 $P-Z$ 관계가 $Z=1+B'P+C'P^2+\cdots$의 비리얼(virial) 식으로 표현될 때, 가장 작은 제2 비리얼 계수(B') 값을 갖는 온도는?



① T_1

② T_2

③ T_3

④ T_4

정답 1번

출제 포인트

비리얼 상태방정식 $Z=1+B'P+C'P^2+\cdots$에서 압력 P가 0으로 갈 때의 기울기가 곧 제2 비리얼 계수 B'라는 사실을 알고, 온도별 P-Z 그래프에서 원점($P=0,\ Z=1$) 부근의 접선 기울기를 비교해 B'가 가장 작은(가장 음수인) 온도를 찾아내는 문제이다.

NoteBase

자료 읽는 순서

먼저 식 $Z = 1 + B'P + C'P^2 + \cdots$을 압력에 대해 미분하면 $\frac{dZ}{dP} = B' + 2C'P + \cdots$이고, $P \to 0$에서는 $\frac{dZ}{dP}|_{P=0} = B'$이 성립한다. 즉 그래프에서 각 곡선이 $P = 0,\ Z = 1$ 지점을 지나갈 때의 초기 기울기(접선의 기울기)가 바로 그 온도의 B' 값이다.

다음으로 네 곡선의 원점 부근 기울기를 서로 비교한다. T4 곡선은 원점에서부터 계속 완만하게 위로 올라가므로 초기 기울기가 양수이다($B' > 0$). T3 곡선은 원점에서 살짝 아래로 내려갔다가 다시 올라오므로 초기 기울기가 작은 음수이다. T2 곡선은 T3보다 더 가파르게 내려갔다가 다시 올라오므로 초기 기울기가 T3보다 더 큰 음수이다. T1 곡선은 네 곡선 중 원점에서 가장 급격하게(가장 짧은 구간에서 가장 크게) 아래로 떨어지므로 초기 기울기가 가장 큰 음수, 즉 B'가 가장 작다.

따라서 기울기(=B') 크기를 비교하면 $B'(T_1) < B'(T_2) < B'(T_3) < B'(T_4)$의 순서가 되고, 가장 작은 B' 값을 갖는 온도는 T1이다.

선지별 해설

① T1 — 옳다. 그래프에서 P=0 부근의 접선 기울기가 네 곡선 중 가장 급하게 음(-)의 방향으로 꺾여 있으므로 B'가 가장 작은(가장 음수인) 온도이다.

② T2 — 틀리다. T2도 초기에 Z가 감소하지만 T1보다 완만하게 감소하므로 B'의 절댓값이 T1보다 작다. → T1보다 B'가 크다.

③ T3 — 틀리다. T3의 초기 기울기는 T2보다도 완만한 음(-)의 값이므로 B'가 T1, T2보다 크다.

④ T4 — 틀리다. T4는 P=0에서부터 Z가 거의 단조 증가하므로 초기 기울기가 양(+)의 값, 즉 $B' > 0$으로 네 곡선 중 가장 크다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 곡선의 '골(최소점)이 얼마나 깊은가'로 B'를 판단하는 것이다. 최소점의 깊이는 B'와 C'가 함께 만드는 결과이며, B'만을 결정하는 것은 오직 $P = 0$에서의 초기 접선 기울기이다. 그래프 전체 모양이 아니라 원점 부근의 국소적인 기울기만 비교해야 한다는 점에 유의해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

비리얼 식 $Z = 1 + B'P + C'P^2 + \cdots$이 주어지고 P-Z 그래프가 제시되면, 곧바로 $P = 0$ 지점에서의 접선 기울기가 B'라는 점을 떠올린다. 여러 온도 곡선 중 원점에서 가장 가파르게 내려가는 곡선이 B'가 가장 작고(가장 음수), 원점에서부터 계속 올라가는 곡선이 B'가 가장 크다(양수)고 판단한다.

암기 포인트

$\frac{dZ}{dP}|_{P\to 0} = B'$: P-Z 그래프의 원점 접선 기울기 = 제2 비리얼 계수. 온도가 낮을수록 분자 간 인력의 영향이 커져 저압에서 Z가 1보다 크게 떨어지므로 B'는 더 음수가 되고, 온도가 충분히 높아지면(보일 온도 이상) $B' > 0$이 되어 Z가 P=0부터 증가한다.

NoteBase

문 11. 부피와 온도가 같은 두 단열 상자가 있다. 한 상자에는 Ar 이 다른 상자에는 Ne 이 각각 1 몰씩 들어있다. 두 상자를 맞대고 그 사이의 벽을 제거하여 두 기체를 혼합할 때, 변하지 않는 열역학적 양으로만 묶은 것은? (단, 두 기체는 서로 반응하지 않는 이상기체이며, 벽을 제거할 때 마찰손실은 없다)

ㄱ. 엔트로피
ㄴ. 엔탈피
ㄷ. Gibbs 에너지
ㄹ. 내부에너지

① ㄱ, ㄷ
② ㄱ, ㄹ
③ ㄴ, ㄷ
④ ㄴ, ㄹ

정답 4번

출제 포인트

부피와 온도가 같은 두 단열(斷熱) 상자에 이상기체 Ar과 Ne이 각각 1몰씩 들어 있다가 벽을 제거해 혼합되는 과정에서, 계 전체를 기준으로 어떤 열역학적 양이 보존되고 어떤 양이 변하는지를 구분하는 문제이다.
단열이면서 외부와 부피 교환이 없는 고립계라는 조건에서 에너지수지 $\Delta U = Q - W$를 세우는 것이 핵심이다.

조건 정리

두 상자는 부피 V, 온도 T가 서로 같고 각각 1몰의 이상기체(Ar, Ne)를 담고 있다. 전체 계는 단열되어 있으므로 $Q = 0$이고, 벽을 제거하는 과정에서 계 전체의 부피는 $V + V = 2V$로 고정되어 외부에 대해 일을 하지 않으므로 $W = 0$이다. 두 기체는 서로 반응하지 않는 이상기체이고 마찰손실도 없다.

사용할 공식

고립계의 에너지수지 $\Delta U = Q - W$, 이상기체 내부에너지 $U = nC_vT$(온도만의 함수), 엔탈피 정의 $H = U + PV$, 이상기체 상태방정식 $PV = nRT$, 혼합 엔트로피 $\Delta S_{mix} = -R\sum n_i \ln x_i > 0$.

NoteBase

계산 과정

전체 계가 단열($Q=0$)이고 전체 부피가 일정해 외부일도 없으므로($W=0$) $\Delta U_{total}=0$이다. 이상기체의 내부에너지는 온도만의 함수이므로 혼합 전 $U=n_{Ar}C_{v,Ar}T+n_{Ne}C_{v,Ne}T$와 혼합 후 온도 T'에서의 U가 같아야 하고, 몰수와 열용량이 변하지 않으므로 $T'=T$, 즉 혼합 후에도 온도는 그대로 유지된다. 혼합 전 각 상자의 압력은 $P=\frac{RT}{V}$로 서로 같고, 혼합 후 압력은 $P'=\frac{(n_{Ar}+n_{Ne})RT}{2V}=\frac{2RT}{2V}=\frac{RT}{V}=P$로 역시 변하지 않는다. 따라서 전체 PV곱, 즉 nRT의 총합도 혼합 전후 같으므로 $H=U+PV$ 역시 변하지 않는다. 반면 서로 다른 두 기체가 섞이므로 혼합 엔트로피 $\Delta S_{mix}=-R(n_{Ar}\ln x_{Ar}+n_{Ne}\ln x_{Ne})>0$만큼 엔트로피는 반드시 증가한다. 온도는 변하지 않지만 엔트로피가 증가하므로 Gibbs 에너지 $G=H-TS$는 감소하여 변한다.

선지 판단

ㄱ. 엔트로피 — 서로 다른 두 기체가 섞이는 혼합 과정이므로 혼합 엔트로피만큼 반드시 증가한다. 변하지 않는 양이 아니다.
ㄴ. 엔탈피 — 계 전체의 온도와 압력이 혼합 전후 그대로 유지되므로 $H=U+PV$도 변하지 않는다.
ㄷ. Gibbs 에너지 — 온도는 일정하지만 엔트로피가 증가하므로 $G=H-TS$는 감소하여 변한다.
ㄹ. 내부에너지 — 계 전체가 단열되어 있고($Q=0$) 부피 변화에 따른 외부일도 없으므로($W=0$) $\Delta U=0$, 즉 변하지 않는다.
따라서 변하지 않는 열역학적 양은 ㄴ(엔탈피)과 ㄹ(내부에너지)이며, 정답은 ④ 'ㄴ, ㄹ'이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 '단열'이라는 말을 '엔트로피도 변하지 않는다'는 뜻으로 착각하는 것이다. 단열은 열 출입(Q)이 없다는 것이지 비가역 과정에서 엔트로피가 만들어지지 않는다는 뜻이 아니다. 서로 다른 두 기체를 섞는 과정은 자발적 비가역 과정이므로 계가 고립되어 있어도 혼합 엔트로피만큼 엔트로피는 항상 증가한다. 또한 온도가 변하지 않는다고 해서 Gibbs 에너지까지 불변이라고 오해하기 쉬운데, $G=H-TS$에서 T가 일정해도 S가 증가하면 G는 감소한다.

다시 나오면 이렇게 판단

고립(단열+부피 일정)계에서 서로 다른 이상기체를 섞는 문제가 나오면 먼저 $\Delta U=Q-W=0$을 세워 내부에너지가 보존됨을 확인하고, 이상기체 내부에너지가 온도만의 함수라는 사실로부터 온도가 변하지 않음을 이끌어낸다. 온도가 불변이면 이상기체 상태방정식으로 압력도 불변임을 확인해 엔탈피($H=U+PV$)도 보존됨을 판단한다. 반면 서로 다른 기체의 혼합은 항상 엔트로피를 증가시키므로 엔트로피와, 온도 일정·엔트로피 증가로부터 Gibbs 에너지도 변하는 양으로 분류한다.

암기 포인트

단열·고립계에서 서로 다른 이상기체를 섞으면: 내부에너지 U 불변, 온도 T 불변(이상기체 U는 T만의 함수), 압력 P 불변(같은 T, 몰수 대 부피 비 유지), 엔탈피 H 불변. 반면 혼합 엔트로피는 항상 증가하고, 이에 따라 Gibbs 에너지 $G=H-TS$는 감소한다.

NoteBase

문 12. 수평관 내에서 이상기체의 흐름공정에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 터빈은 내부에너지를 운동에너지로 변환시킨다.

② 비가역 단열 흐름에서 온도는 흐름방향으로 감소한다.

③ 조름공정은 등엔탈피($\Delta H = 0$) 과정이다.

④ 가역 단열압축 공정은 등엔트로피($\Delta S = 0$) 과정이다.

정답 2번

출제 포인트

수평관 내 이상기체 흐름공정에서 일어나는 대표적인 네 가지 상황(터빈에 의한 팽창일, 마찰이 있는 단열 흐름, 조름공정, 가역 단열압축)을 에너지수지와 엔트로피 개념으로 정확히 구분할 수 있는지를 묻는다. 특히 '비가역'과 '단열'이라는 조건만으로 온도 변화 방향을 단정할 수 있는지가 핵심 쟁점이다.

핵심 개념

수평관(위치에너지 변화 없음)에서 정상상태 에너지수지는 $\Delta H + \frac{\Delta u^2}{2} = Q - W_s$로 쓴다. 단열($Q = 0$)이고 축일이 없는($W_s = 0$) 흐름이면 $\Delta H = -\frac{\Delta u^2}{2}$가 되어, 온도(엔탈피) 변화는 오직 유속(운동에너지) 변화에 좌우된다. 관 지름이 일정해 유속 변화가 거의 없다면 마찰로 비가역이더라도 엔탈피, 즉 온도는 거의 변하지 않는다(엔트로피만 증가). 터빈은 유체의 엔탈피(내부에너지+유동일)를 먼저 고속 흐름의 운동에너지로 바꾼 뒤, 그 운동에너지가 블레이드에 부딪히며 축일로 전환되는 2단계 과정으로 설명된다. 조름공정(팽창밸브, 오리피스 등 축일과 열교환이 없고 운동에너지 변화도 무시하는 공정)은 $\Delta H = 0$인 등엔탈피 과정이다. 가역이면서 단열인 과정은 $dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T} = 0$이므로 등엔트로피 과정이다.

선지별 해설

① O: 터빈에서는 고압 유체가 노즐 등을 통해 팽창하며 내부에너지(엔탈피)가 감소하는 대신 유속이 빨라져 운동에너지로 바뀌고, 이 운동에너지가 블레이드에 작용해 축일을 만들어낸다. 즉 내부에너지가 운동에너지로 변환되는 과정을 거치므로 옳은 설명이다.

② X: 흐름이 비가역(마찰 동반)이라는 조건만으로 온도가 흐름방향으로 반드시 감소한다고 말할 수 없다 → '온도가 감소한다'를 '엔트로피가 증가한다(비가역성 때문에 엔트로피가 생성된다)'로 바꿔야 옳다. 수평관에서 단열·무일 조건이면 에너지수지상 엔탈피 변화는 운동에너지 변화분과 같고, 관 단면이 일정해 유속 변화가 작으면 온도는 거의 일정하게 유지되며, 비가역성은 온도 하강이 아니라 엔트로피 증가로 나타난다.

③ O: 조름공정은 축일과 열출입이 없고 운동에너지·위치에너지 변화도 무시하는 정상상태 유동이므로 에너지수지에서 $\Delta H = 0$이 되는 등엔탈피 과정이다.

④ O: 가역이면서 단열인 과정은 열전달에 의한 엔트로피 변화가 0이고 비가역성에 의한 엔트로피 생성도 없으므로 $\Delta S = 0$인 등엔트로피 과정이다.

NoteBase

오답 포인트

'비가역'이라는 단어를 보면 반사적으로 어떤 물리량이 감소한다고 연결짓기 쉬운데, 비가역 과정에서 항상 증가하는 것은 온도가 아니라 엔트로피(계와 주위를 합한 총엔트로피)이다. 온도의 증감은 에너지수지(엔탈피와 운동에너지의 관계)로 판단해야 하고, 엔트로피의 증감은 가역성 여부로 판단해야 한다는 점을 혼동하면 이 문제에서 틀리기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

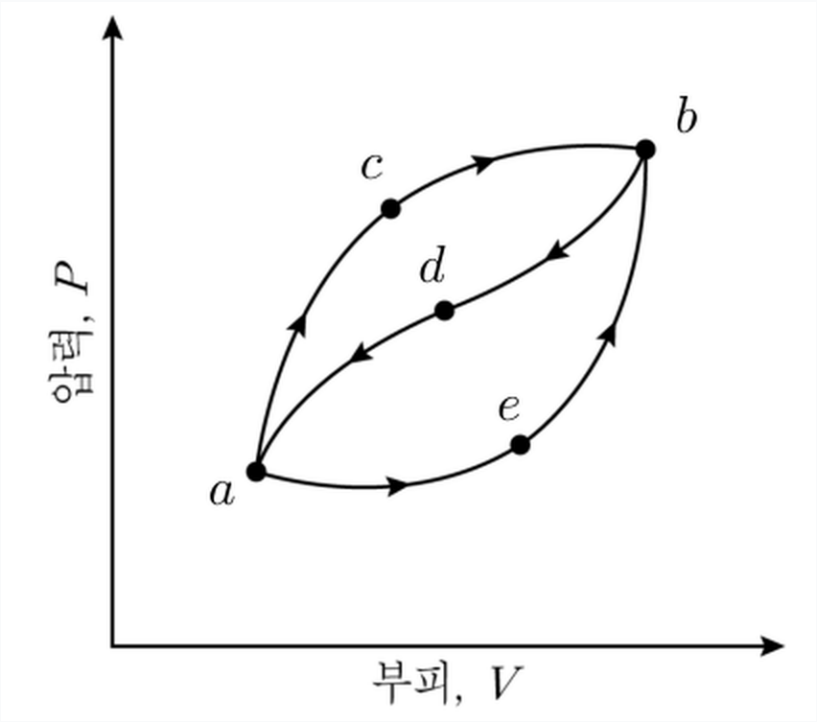
수평관·단열·무일 조건이 주어지면 먼저 에너지수지 $\Delta H = -\Delta(u^2/2)$를 떠올려 온도(엔탈피) 변화가 유속 변화에 달려 있음을 확인한다. 그다음 '비가역'이라는 표현이 나오면 이는 온도 변화가 아니라 엔트로피 생성(총엔트로피 증가)과 연결된다는 점을 짚어 선지를 판단한다.

암기 포인트

단열+무일 수평관: $\Delta H = -\Delta(u^2/2) \rightarrow$ 온도 변화는 유속 변화가 결정. 비가역 과정의 표식은 '온도 하강'이 아니라 '엔트로피 증가'. 조름공정=등엔탈피, 가역단열=등엔트로피, 터빈=내부에너지→운동에너지→축일의 2단계 변환.

NoteBase

문 13. 다음 P-V 선도에서 a와 b 사이의 가역 과정에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?



① a→c→b→d→a 순환 경로의 내부에너지 변화량은 0이다.

② a→e→b 경로와 b→d→a 경로에 대한 엔탈피 변화량의 절댓값은 같다.

③ a→c→b 경로와 a→e→b 경로에서 한 일의 양은 서로 다르다.

④ a→c→b→d→a 순환 경로에서 한 일은 0이다.

정답 4번

출제 포인트

상태함수(내부에너지, 엔탈피)와 경로함수(일)의 차이를 P-V 선도 위의 순환 경로 및 개별 경로에 적용해 구별할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

a와 b 사이에는 세 가지 서로 다른 가역 경로가 존재한다. 위쪽 곡선은 c를 지나며 a→c→b 방향으로 진행하고, 아래쪽 곡선은 e를 지나며 a→e→b 방향으로 진행하며, 중간 곡선은 d를 지나되 b→d→a 방향으로 진행한다. 순환 경로 a→c→b→d→a는 위쪽 곡선을 따라 a에서 b까지 간 뒤, 중간 곡선을 따라 b에서 다시 a로 되돌아오는 하나의 폐곡선이다.

NoteBase

사용할 공식

내부에너지와 엔탈피는 상태함수이므로 한 바퀴 돌아 처음 상태로 되돌아오면 변화량은 0이다: $\oint dU = 0$, $\oint dH = 0$. 반면 일은 경로함수로 $W = \int PdV$이며 곡선의 모양(경로)에 따라 값이 달라지고, 서로 다른 두 경로가 이루는 순환 과정의 정미일은 그 폐곡선이 감싸는 면적과 같다.

계산 과정

①: a→c→b→d→a는 출발점 a로 되돌아오는 순환 경로이므로 내부에너지는 상태함수 성질에 따라 변화량이 0이다. 옳은 설명.
②: a→e→b 경로의 엔탈피 변화량은 H(b)-H(a)이고, b→d→a 경로의 엔탈피 변화량은 H(a)-H(b)이다. 엔탈피는 상태함수이므로 두 값은 부호만 반대이고 절댓값은 똑같이 |H(b)-H(a)|이다. 옳은 설명.
③: 일은 경로함수이며 P-V 선도에서 곡선을 따른 면적으로 결정된다. a→c→b(위쪽 곡선)와 a→e→b(아래쪽 곡선)는 서로 다른 곡선이므로 한 일의 양도 서로 다르다. 옳은 설명.
④: a→c→b→d→a는 위쪽 곡선(c 경유)으로 a에서 b까지, 중간 곡선(d 경유)으로 b에서 a까지 되돌아오는 폐곡선을 이룬다. 두 곡선이 서로 겹치지 않는 경로이므로 이 폐곡선은 0이 아닌 면적을 감싸고, 가역 순환 과정의 정미일은 그 감싼 면적과 같다. 따라서 이 순환 경로에서 한 일은 0이 아니다. 옳지 않은 설명.

선지 판단

① a→c→b→d→a 순환 경로의 내부에너지 변화량은 0이다 → O. 순환 과정이므로 상태함수인 내부에너지는 원래 값으로 복귀한다.
② a→e→b 경로와 b→d→a 경로에 대한 엔탈피 변화량의 절댓값은 같다 → O. 엔탈피는 상태함수라 경로(e 또는 d)와 무관하게 시작·끝 상태에 의해서만 결정되므로 절댓값이 같다.
③ a→c→b 경로와 a→e→b 경로에서 한 일의 양은 서로 다르다 → O. 일은 경로함수이므로 서로 다른 곡선을 지나면 한 일의 양도 다르다.
④ a→c→b→d→a 순환 경로에서 한 일은 0이다 → X. 위쪽 곡선과 중간 곡선이 서로 다른 경로로 폐곡선을 이루므로 감싸는 면적만큼 정미일이 발생하며, 한 일은 0이 아니다. 틀린 표현 → 올바른 표현: '한 일은 폐곡선이 감싸는 면적과 같으며 0이 아니다.'

오답 포인트

순환 과정이라고 해서 모든 물리량의 변화량이 0이 되는 것은 아니다. 내부에너지, 엔탈피처럼 상태함수는 순환 시 변화량이 0이지만, 일과 열처럼 경로함수는 순환 과정에서도 0이 아닐 수 있으며 오히려 그 폐곡선이 감싸는 면적만큼 정미일이 생기는 것이 열기관이 일을 만들어내는 원리이다.

다시 나오면 이렇게 판단

P-V 선도에서 '순환 경로'라는 말이 나오면 먼저 상태함수(내부에너지, 엔탈피, 엔트로피)는 자동으로 변화량이 0임을 확인한다. 그다음 일이나 열처럼 경로함수에 해당하는 항목은 별도로 폐곡선이 감싸는 면적을 확인해서 판단한다. 서로 다른 두 곡선이 왕복하며 폐곡선을 이루면 그 면적만큼 정미일이 발생하므로 일은 0이 아니다.

NoteBase

암기 포인트

상태함수(내부에너지, 엔탈피, 엔트로피)는 순환 과정에서 변화량이 0이다. 경로함수(일, 열)는 순환 과정에서도 0이 아닐 수 있고, P-V 선도에서 순환 과정의 정미일은 폐곡선이 감싸는 면적과 같다.

NoteBase

문 14. 1몰의 이상기체를 1기압에서 10기압으로 등온 압축할 경우, 계의 엔트로피 변화(ΔS)는? (단, R은 기체상수이다)

① $R\ln\left(\frac{1}{10}\right)$
② $-R\ln\left(\frac{1}{10}\right)$
③ $\frac{R}{10}$
④ $-\frac{R}{10}$

정답 1번

출제 포인트

이상기체의 등온 과정에서 압력 변화에 따른 엔트로피 변화량을 압력비를 이용한 식으로 계산할 수 있는지를 묻는다. 등온 과정이므로 온도 항은 사라지고 압력(또는 부피) 항만 남는다는 점이 핵심이다.

조건 정리

이상기체 1몰, 등온 과정, 초기 압력 $P_1 = 1$ 기압, 최종 압력 $P_2 = 10$ 기압으로 압축(압력 증가)한다. R은 기체상수이다.

사용할 공식

이상기체의 등온 과정에서 엔트로피 변화는 $\Delta S = -nR\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = nR\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$로 나타낸다. 등온이므로 온도에 의한 항 $nC_p\ln(T_2/T_1)$은 0이 되어 압력비 항만 남는다.

계산 과정

1몰이므로 $n = 1$을 대입하면 $\Delta S = R\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = R\ln\left(\frac{1}{10}\right)$이 된다. 압력이 1기압에서 10기압으로 증가(압축)했으므로 $P_1/P_2 = 1/10 < 1$이 되어 $\ln(1/10)$은 음수이며, 압축 시 기체의 무질서도가 감소하므로 엔트로피 변화가 음수인 것과 부호가 일치한다.

선지 판단

① $R\ln(1/10)$: 옳다. 등온 압축 시 엔트로피 변화 $\Delta S = nR\ln(P_1/P_2) = R\ln(1/10)$과 정확히 일치한다.
② $-R\ln(1/10)$: 틀리다. 이는 $R\ln(10)$과 같아 양수가 되므로, 압축 시 엔트로피가 감소해야 한다는 사실과 부호가 반대이다. → $R\ln(1/10)$로 고쳐야 한다.
③ $R/10$: 틀리다. 압력비의 로그를 취하지 않고 단순히 압력비(1/10)를 R에 곱한 형태로, 등온 과정의 엔트로피 변화 공식과 무관한 식이다. → $R\ln(1/10)$로 고쳐야 한다.
④ $-R/10$: 틀리다. ③과 같은 오류에 부호까지 임의로 바꾼 것으로 근거가 없다. → $R\ln(1/10)$로 고쳐야 한다.

NoteBase

오답 포인트

등온 과정에서는 온도 항이 사라지고 압력비(또는 부피비)의 로그 항만 남는다는 점을 놓치면 ③, ④처럼 로그를 취하지 않은 단순 비율식을 고르게 된다. 또한 압력비를 P_2/P_1로 둘지 P_1/P_2로 둘지 부호를 혼동하면 ②처럼 부호가 반대인 식을 고르게 되므로, 압축(압력 증가)은 엔트로피 감소(음수)라는 물리적 방향성을 먼저 확인하는 것이 중요하다.

다시 나오면 이렇게 판단

등온 과정의 엔트로피 변화 문제는 우선 온도 항이 소거된다는 것을 확인한 뒤, 압력비 또는 부피비의 로그 항만 남긴다. 그다음 압력이 증가(압축)하면 엔트로피는 감소(음수), 압력이 감소(팽창)하면 엔트로피는 증가(양수)라는 부호를 대입해 식의 부호가 맞는지 검산한다.

암기 포인트

이상기체 등온 과정: $\Delta S = nR\ln(V_2/V_1) = nR\ln(P_1/P_2) = -nR\ln(P_2/P_1)$. 등온 압축(압력 $\uparrow$, 부피 $\downarrow$)이면 $\Delta S < 0$, 등온 팽창(압력 $\downarrow$, 부피 $\uparrow$)이면 $\Delta S > 0$.

NoteBase

문 15. 다음 경로 중 1 기압, 300 K의 이상기체를 3 기압, 300 K으로 압축할 때, 필요한 일(W)의 양($|W|$)이 가장 큰 것은?

① 300 K을 유지하며 가역적으로 압축

② 가역적으로 단열 압축한 후, 3 기압을 유지하며 냉각

③ 일정 부피에서 가압한 후, 3 기압을 유지하며 냉각

④ 1 기압을 유지하며 수축한 후, 일정 부피를 유지하며 가열

정답 3번

출제 포인트

일 W은 경로함수이므로 시작상태(1기압, 300 K)와 최종상태(3기압, 300 K)가 모두 같아도 어떤 경로를 거치느냐에 따라 필요한 압축일의 크기가 달라진다는 점을 확인하는 문제이다. 등적 구간에서는 일이 발생하지 않고, 등압 구간에서는 온도 변화폭에 비례해 일이 발생한다는 사실을 이용해, 각 경로가 중간에 어느 온도까지 우회하는지를 파악하면 일의 크기를 비교할 수 있다.

조건 정리

이상기체 1몰을 기준으로 한다. 초기상태는 1기압, 300 K이고 최종상태는 3기압, 300 K이므로 시작과 끝의 온도가 같아 전체 과정의 내부에너지 변화 $\Delta U = 0$이다. 각 선지의 중간상태는 이상기체 상태방정식 $PV = nRT$를 이용해 구할 수 있고, 비열은 이원자 분자 기준 $C_v = \frac{5}{2}R$, $C_p = \frac{7}{2}R$로 둔다.

사용할 공식

등온 가역 과정: $W = nRT\ln\frac{P_2}{P_1}$
등적 과정(부피 일정): $W = 0$
등압 과정(압력 일정): $W = nR\Delta T$ (크기 기준)
가역 단열 과정: $\frac{T'}{T_1} = \left(\frac{P'}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$, $W = C_v\Delta T$

NoteBase

계산 과정

① 300 K을 유지하며 가역적으로 압축(등온 가역):
$W_1 = RT\ln 3 = 8.314 \times 300 \times 1.0986 \approx 2740$ J

② 가역 단열 압축 후 3기압 유지 냉각: 단열 압축으로 압력이 1→3기압이 될 때 도달하는 온도는 $T' = 300 \times 3^{0.2857} \approx 410.6$ K이다. 이후 3기압을 유지하며 410.6 K에서 300 K까지 냉각하므로, 단열 구간과 등압 구간의 일을 합하면 $W_2 = C_p(T' - 300) = \frac{7}{2}R \times 110.6 \approx 3218$ J

③ 일정 부피에서 가압한 후 3기압 유지 냉각: 등적 상태에서 압력이 1기압에서 3기압으로 3배가 되려면 온도도 3배가 되어야 하므로 $T = 3 \times 300 = 900$ K까지 상승한다. 이 등적 구간은 일이 0이다. 이후 3기압을 유지하며 900 K에서 300 K까지 냉각하므로 $\Delta T = 600$ K이고, $W_3 = R\Delta T = 8.314 \times 600 \approx 4988$ J로 네 경로 중 가장 크다.

④ 1기압을 유지하며 수축한 후 일정 부피 유지 가열: 등압 상태에서 최종적으로 등적 가열만으로 압력이 1기압에서 3기압까지 오르려면, 냉각 후 도달한 온도 T''에서 $\frac{1}{T''} = \frac{3}{300}$의 관계가 성립해야 하므로 $T'' = 100$ K이다. 즉 1기압을 유지하며 300 K에서 100 K까지 냉각($\Delta T = 200$ K)한 뒤, 그 부피를 유지한 채 온도만 100 K에서 300 K으로 올려 압력을 3기압까지 맞춘다. 등압 구간의 일은 $W_4 = R \times 200 = 8.314 \times 200 \approx 1663$ J이고, 뒤의 등적 구간은 일이 0이므로 총 일은 1663 J로 네 경로 중 가장 작다.

선지 판단

① 등온 가역 압축으로 필요한 일은 약 2740 J이다. 네 경로 중 두 번째로 작다.
② 단열 압축으로 약 410.6 K까지 오른 뒤 등압 냉각하는 경로로, 필요한 일은 약 3218 J이다. ①보다 크고 ③보다는 작다.
③ 등적 구간에서 900 K까지 온도를 크게 밀어올린 뒤 등압 냉각으로 되돌리는 경로로, 필요한 일은 약 4988 J이다. 네 경로 중 가장 크므로 정답이다.
④ 등압 냉각으로 100 K까지 내려간 뒤 등적 가열만으로 마무리하는 경로로, 필요한 일은 약 1663 J이다. 네 경로 중 가장 작다.

오답 포인트

등적 구간은 일이 0이라는 이유만으로 그 구간을 포함한 경로(③)가 전체 일도 가장 작을 것이라고 착각하기 쉽다. 그러나 ③은 등적 구간에서 압력을 900 K이라는 매우 높은 온도까지 밀어올린 뒤, 이어지는 등압 냉각 구간에서 그만큼 큰 온도차(600 K)를 압축일로 되돌려야 하므로 오히려 총 일이 가장 커진다. 반대로 ④는 등압 구간에서 먼저 온도를 100 K까지 낮춰 등압 구간의 온도차를 작게(200 K) 만든 뒤, 일이 0인 등적 가열로 마무리하므로 총 일이 가장 작아진다. 시작·끝 온도가 같다고 해서 모든 경로의 일이 같다고 판단하는 것도 잘못이다. 일은 경로함수이므로 중간에 거치는 상태에 따라 값이 달라진다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

동일한 시작·끝 상태를 잇는 여러 경로의 압축일(또는 팽창일)을 비교하는 문제는, 먼저 각 경로의 중간상태 온도나 압력을 이상기체 상태방정식으로 구한다. 그다음 등적 구간은 일이 0, 등압 구간은 $W = nR\Delta T$, 등온 가역 구간은 $W = nRT\ln(P_2/P_1)$, 단열 가역 구간은 $W = C_v\Delta T$ 공식을 각 구간에 대입해 합산한다. 중간에 거치는 온도가 최종온도에서 많이 벗어나 있는(우회 폭이 큰) 경로일수록 등압 구간의 온도차가 커져 필요한 일도 커진다는 경향을 기억해 두면 계산 없이도 대소 관계를 가늠하는 데 도움이 된다.

암기 포인트

등적 과정의 일은 항상 0이다. 등압 과정의 일은 $W = nR\Delta T$로 온도차에 비례한다. 등온 가역 과정의 일은 $W = nRT\ln(P_2/P_1)$이다. 일은 경로함수이므로 시작·끝 상태가 같아도 경로에 따라 그 크기가 달라지며, 중간상태가 최종온도에서 많이 벗어날수록(우회가 클수록) 필요한 일도 커지는 경향이 있다.

NoteBase

문 16. 닫힌 계에서 이원자분자 이상기체가 일정 압력을 유지하며 외부로부터 공급된 열에 의해 팽창하여 일을 할 때, 기체에 공급된 열이 일로 전환된 비율은? (단, 이원자분자 이상기체의 정적 열용량 $C_v = \frac{5}{2}R$이며 R은 기체상수이다)

① $\frac{2}{3}$
② $\frac{2}{5}$
③ $\frac{2}{7}$
④ $\frac{2}{9}$

정답 3번

출제 포인트

정압 과정에서 이상기체에 공급된 열 중 몇 비율이 일로 전환되는지를 묻는 문제이다. 정압 몰비열 C_p와 정적 몰비열 C_v의 관계, 그리고 이상기체의 정압 팽창일이 $W = R\Delta T$로 표현된다는 점을 함께 사용해야 한다.

조건 정리

닫힌 계, 일정 압력 유지, 이원자분자 이상기체이므로 $C_v = \frac{5}{2}R$이다. 외부로부터 열을 받아 팽창하며 일을 하므로 정압 가열 과정이고, 구하는 값은 공급된 열 Q에 대한 일 W의 비율, 즉 $\frac{W}{Q}$이다.

사용할 공식

정압 과정의 열: $Q = nC_p\Delta T$. 이상기체의 정압-정적 열용량 관계: $C_p = C_v + R$. 정압 과정에서 이상기체가 외부에 한 일: $W = P\Delta V = nR\Delta T$ (이상기체 상태방정식 $PV = nRT$에서 압력이 일정하므로 $P\Delta V = nR\Delta T$).

계산 과정

정적 열용량이 $C_v = \frac{5}{2}R$이므로 정압 열용량은 $C_p = C_v + R = \frac{5}{2}R + R = \frac{7}{2}R$이다. 같은 온도 변화 ΔT에 대해 공급된 열은 $Q = nC_p\Delta T = \frac{7}{2}nR\Delta T$이고, 기체가 외부에 한 일은 $W = nR\Delta T$이다. 따라서 일로 전환된 비율은 $\frac{W}{Q} = \frac{nR\Delta T}{\frac{7}{2}nR\Delta T} = \frac{1}{7/2} = \frac{2}{7}$이다.

선지 판단

① 2/3 → 틀린 값이다. C_p를 구하지 않고 C_v의 역수 등 다른 값으로 잘못 계산한 경우 나올 수 있는 오답이다.
② 2/5 → 틀린 값이다. $C_v = \frac{5}{2}R$의 분모·분자를 그대로 비율로 착각하면 나오는 오답이다.
③ 2/7 → 옳다. $C_p = \frac{7}{2}R$을 정확히 구한 뒤 $W/Q = R/C_p = 2/7$로 계산한 결과와 일치한다.
④ 2/9 → 틀린 값이다. C_p를 $\frac{9}{2}R$로 잘못 구했을 때 나오는 오답으로, 이원자분자의 정적 열용량에 실수로 다른 자유도를 더한 경우에 해당한다.

NoteBase

오답 포인트

이 문제의 함정은 C_v만 보고 바로 비율을 답하거나, C_p를 구하는 단계에서 $C_p = C_v + R$ 관계를 빠뜨리는 것이다. 정압 과정에서 열은 C_p 기준으로, 일은 R 기준으로 계산되므로 두 값을 혼동하지 않아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

정압 가열 문제에서 열-일 전환 비율을 물으면 항상 먼저 $C_p = C_v + R$을 계산하고, $W/Q = R/C_p$ 형태로 정리해서 대입한다. 이원자분자는 $C_v = \frac{5}{2}R$, $C_p = \frac{7}{2}R$이라는 값을 바로 떠올릴 수 있으면 계산이 빨라진다.

암기 포인트

이원자분자 이상기체: $C_v = \frac{5}{2}R$, $C_p = \frac{7}{2}R$, $\gamma = C_p/C_v = 7/5$. 정압 과정에서 $W/Q = R/C_p$이므로 이원자분자의 경우 2/7이 된다.

NoteBase

문 17. 수소 연료전지에서 $2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(l)$의 반응이 일어난다. 각 성분의 표준생성엔탈피와 표준생성엔트로피가 표와 같을 때, 300K에서의 기전력[V]은? (단, Faraday 상수는 $96500 C mol^{-1}$이다)

화합물	표준생성엔탈피 $[kJ\,mol^{-1}]$	표준생성엔트로피 $[J\,mol^{-1}\,K^{-1}]$
$H_2O(l)$	-290	70
$H_2(g)$	0	130
$O_2(g)$	0	205

① 1.0

② 1.25

③ 1.5

④ 2.5

정답 2번

출제 포인트

반응의 표준생성엔탈피와 표준생성엔트로피로부터 표준반응엔탈피 ΔH°와 표준반응엔트로피 ΔS°를 구하고, 이를 이용해 깁스자유에너지 변화 $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$를 계산한 뒤, 연료전지의 기전력 $\Delta G^\circ = -nFE$ 관계식으로 기전력을 구하는 문제이다.

조건 정리

반응식은 $2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(l)$이다. 표준생성엔탈피는 $H_2O(l)$=-290 kJ/mol, $H_2(g)$=0, $O_2(g)$=0이다. 표준생성엔트로피는 $H_2O(l)$=70 J/(mol·K), $H_2(g)$=130 J/(mol·K), $O_2(g)$=205 J/(mol·K)이다. 온도는 $T = 300K$, Faraday 상수는 $F = 96500 C/mol$이다. 이 반응에서 수소가 전자를 잃고 산소가 전자를 얻는 전체 반응이 진행될 때 이동하는 전자의 몰수는 $n = 4$이다(각 H_2가 전자 2개씩 내놓으므로 $2 \times 2 = 4$).

사용할 공식

Δ H^_rxn = Σ Δ H^_f,생성물 - Σ Δ H^_f,반응물, Δ S^_rxn = Σ S^_생성물 - Σ S^_반응물, $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$, $\Delta G^\circ = -nFE$.

NoteBase

계산 과정

$\Delta H^\circ_{rxn} = 2(-290) - [2(0) + 0] = -580 kJ = -580000 J$이다.
$\Delta S^\circ_{rxn} = 2(70) - [2(130) + 205] = 140 - 465 = -325 J/K$이다.
$\Delta G^\circ = -580000 - 300 \times (-325) = -580000 + 97500 = -482500 J$이다.
$E = \frac{-\Delta G^\circ}{nF} = \frac{482500}{4 \times 96500} = \frac{482500}{386000} = 1.25 V$이다.

선지 판단

① 1.0 → 틀림. n을 잘못 잡거나(예: $n = 5$) 부호를 다르게 처리하면 나올 수 있는 값이나, 올바른 계산에서는 나오지 않는다.
② 1.25 → 옳음. $\Delta G^\circ = -482500 J$, $n = 4$로 계산하면 $E = 1.25 V$로 정확히 일치한다.
③ 1.5 → 틀림. $T\Delta S^\circ$ 항의 부호를 반대로 더해 ΔG°를 과대(또는 과소) 추정하면 나올 수 있는 오답이다.
④ 2.5 → 틀림. $n = 4$ 대신 $n = 2$로 잘못 대입하면 $482500/(2 \times 96500) = 2.5$가 되어 나오는 전형적 오답이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 이동 전자수 n을 잘못 세는 것이다. 균형화된 반응식은 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$이므로 H_2 1몰당 전자 2개가 이동하고, 반응식 전체로는 H_2가 2몰이므로 $n = 4$가 된다. 이를 $n = 2$로 잘못 잡으면 기전력이 2배(2.5 V)로 계산되어 오답 ④가 나온다. 또한 $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$에서 ΔS°가 음수(-325 J/K)임을 놓치고 부호를 반대로 넣으면 ΔG°가 달라져 다른 오답이 나올 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

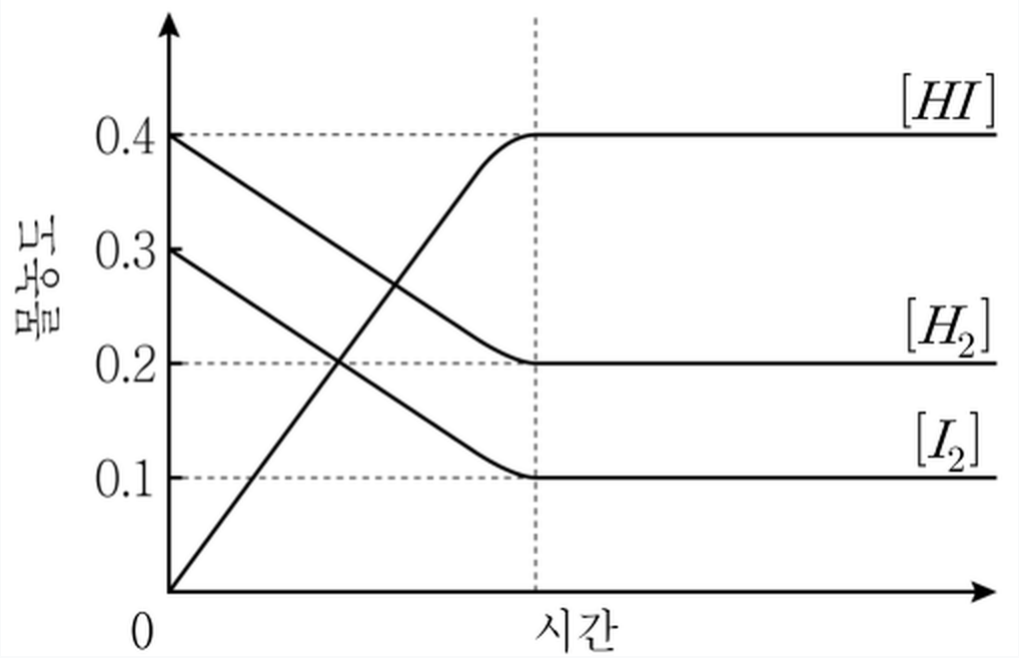
연료전지 기전력 문제는 항상 (1) 균형 반응식에서 이동 전자수 n을 정확히 세고, (2) 생성물의 합에서 반응물의 합을 빼는 방식으로 ΔH°와 ΔS°를 구하고, (3) $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$로 깁스자유에너지를 계산한 뒤, (4) $E = -\Delta G^\circ/(nF)$로 마무리하는 순서로 접근한다.

암기 포인트

$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ = -nFE$라는 두 관계식을 하나로 연결해 기억해 둔다. 수소 연료전지 반응 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$에서는 이동 전자수가 $n = 4$임을 항상 함께 기억해 둔다.

NoteBase

문 18. 일정 온도에서 $H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$와 같은 반응이 일어난다. 각 성분의 몰농도가 시간에 따라 다음 그래프와 같이 변한다면, 이 반응의 반응평형상수 값은?



① 2

② 4

③ 8

④ 16

정답 3번

출제 포인트

그래프에서 평형 상태의 각 성분 몰농도를 읽어내고, 이를 반응평형상수식에 대입해 값을 계산할 수 있는지를 묻는다. 반응식은 $H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$이며, 그래프의 점선으로 표시된 평형 시점 이후 농도가 일정해지는 구간의 값을 정확히 읽는 것이 핵심이다.

조건 정리

그래프의 평형 이후 일정 구간에서 각 성분의 몰농도는 다음과 같다. $[HI] = 0.4$, $[H_2] = 0.2$, $[I_2] = 0.1$ (단위는 몰/부피, 모두 동일 단위이므로 비율 계산에는 영향이 없다).

사용할 공식

반응 $H_2(g) + I_2(g) \rightleftharpoons 2HI(g)$에서 반응평형상수는 다음과 같이 정의된다. $K = \frac{[HI]^2}{[H_2][I_2]}$ 생성물 HI의 계수가 2이므로 농도에 제곱을 취하고, 반응물 H2와 I2의 농도는 각각 1차로 곱해 분모에 넣는다.

NoteBase

계산 과정

그래프에서 읽은 평형 농도값을 공식에 대입한다. $K = \frac{(0.4)^2}{(0.2)(0.1)} = \frac{0.16}{0.02} = 8$ 따라서 이 반응의 반응평형상수 값은 8이다.

선지 판단

① 2: 분자와 분모를 잘못 나누거나 [HI]를 제곱하지 않고 계산한 경우에 나올 수 있는 오답이다. 실제 계산값 8과 다르므로 틀렸다.
② 4: 0.4/0.1처럼 제곱을 빠뜨리고 단순 비율만 계산하면 나오는 값으로, 틀렸다.
③ 8: $(0.4)^2 \div (0.2 \times 0.1) = 0.16/0.02 = 8$로 정확히 계산된 값이다. 옳다.
④ 16: 분모의 [H2]와 [I2] 중 하나를 빠뜨리고 한 항으로만 나누거나, 분자·분모 값을 뒤바꿔 계산하면 나올 수 있는 오답이다. 틀렸다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 반응식의 계수를 무시하고 [HI]를 제곱하지 않은 채 단순히 $[HI]/([H_2][I_2])$로 계산하는 것이다(그 경우 0.4/0.02=20이 되어 선지에도 없는 값이 나온다는 점에서 반드시 계수를 확인해야 함을 알 수 있다). 또한 그래프에서 평형 이전의 값(예: 초기 [I2]=0.4)을 잘못 읽어 대입하지 않도록 반드시 점선으로 표시된 평형 이후 구간의 값을 사용해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

농도-시간 그래프형 평형상수 문제는 먼저 그래프가 일정해지는 평형 구간을 찾아 각 성분의 농도값을 정확히 읽고, 반응식의 화학양론계수를 평형상수식의 지수로 그대로 옮겨 계산한다. 생성물은 분자에, 반응물은 분모에 놓고 각 계수만큼 거듭제곱한다는 원칙을 지키면 실수를 줄일 수 있다.

암기 포인트

반응평형상수 K = [생성물]^계수[반응물]^계수 형태로, 계수는 반드시 지수로 반영한다. $H_2 + I_2 \rightleftharpoons 2HI$ 반응의 경우 $K = [HI]^2/([H_2][I_2])$임을 기억해 둔다.

NoteBase

문 19. 어떤 온도 T[K]에서 에탄올의 증기압 P^{sat}[kPa]을 $P^{sat} = \exp\left(13 - \frac{2500}{T}\right)$로 표현할 수 있다고 할 때, 300 K에서 에탄올의 증발잠열 [kJ mol^{-1}]은? (단, 에탄올 증기는 이상기체로 가정하고 액체의 몰부피는 증기의 몰부피에 비해 매우 작아서 무시하며, 기체상수 $R = 8.3$ J mol^{-1} K^{-1}이다)

① 12.25

② 15.75

③ 18.25

④ 20.75

정답 4번

출제 포인트

증기압의 온도 의존식 $P^{sat} = \exp\left(13 - \frac{2500}{T}\right)$이 주어졌을 때 클라우지우스-클라페이롱 식을 이용해 증발잠열을 구하는 문제이다. 증기압식의 형태 자체가 클라우지우스-클라페이롱 적분식과 동일한 구조임을 알아보는 것이 핵심이다.

조건 정리

에탄올 증기는 이상기체로 거동한다. 액체의 몰부피는 증기의 몰부피에 비해 무시할 만큼 작다. 기체상수 $R = 8.3$ Jmol^{-1}K^{-1}이다. 온도에 따른 증기압식은 $P^{sat} = \exp\left(13 - \frac{2500}{T}\right)$로 주어져 있다.

사용할 공식

클라우지우스-클라페이롱 식은 다음과 같다. $\frac{d\ln P^{sat}}{dT} = \frac{\Delta H_{vap}}{RT^2}$ 이 식은 증기가 이상기체이고 액체 몰부피를 무시할 수 있을 때 클라페이롱 식 $\frac{dP^{sat}}{dT} = \frac{\Delta H_{vap}}{T\Delta V}$에서 $\Delta V \approx V^{vap} = RT/P^{sat}$를 대입하여 얻어진다.

계산 과정

주어진 증기압식의 자연로그를 취하면 $\ln P^{sat} = 13 - \frac{2500}{T}$이다. 이를 T에 대해 미분하면 $\frac{d\ln P^{sat}}{dT} = \frac{2500}{T^2}$ 이 결과를 클라우지우스-클라페이롱 식과 비교하면 $\frac{\Delta H_{vap}}{RT^2} = \frac{2500}{T^2}$ 양변에서 T^2이 소거되므로 $\Delta H_{vap} = 2500R$ 이 식은 온도 T에 무관하게 성립하므로 300 K에서도 그대로 적용된다. $R = 8.3$ Jmol^{-1}K^{-1}을 대입하면 $\Delta H_{vap} = 2500 \times 8.3 = 20750$ Jmol^{-1} $= 20.75$ kJmol^{-1}

선지 판단

① 12.25 kJ/mol: X, 2500R 계산과 일치하지 않는 값이다.
② 15.75 kJ/mol: X, 2500R 계산과 일치하지 않는 값이다.
③ 18.25 kJ/mol: X, 2500R 계산과 일치하지 않는 값이다.
④ 20.75 kJ/mol: O, $\Delta H_{vap} = 2500 \times R = 2500 \times 8.3 = 20750$ J/mol $= 20.75$ kJ/mol로 계산 결과와 정확히 일치한다.

NoteBase

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 증기압식의 지수함수 형태를 클라우지우스-클라페이롱 식과 곧바로 연결하지 못하고 T=300을 식에 대입해 압력 값부터 구하려 드는 것이다. 실제로는 압력의 절대값이 아니라 $\ln P^{sat}$을 T로 미분한 계수만 있으면 되므로 300 K이라는 특정 온도값은 계산에 등장하지 않는다. 또한 R의 단위가 J 단위이므로 계산 결과도 J/mol로 나온 뒤 kJ/mol로 환산해야 하는데, 단위 환산을 빠뜨리면 20750을 그대로 답으로 착각할 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

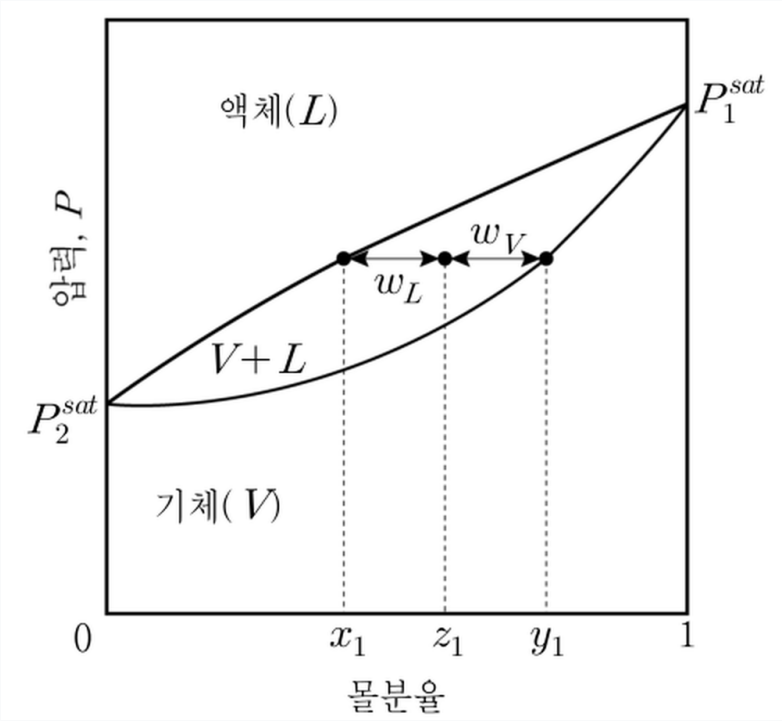
증기압이 $P^{sat} = \exp\left(A - \frac{B}{T}\right)$ 꼴로 주어지면 곧바로 $\Delta H_{vap} = BR$임을 떠올린다. $\ln P^{sat} = A - B/T$를 미분하면 $d\ln P^{sat}/dT = B/T^2$이 되고, 이를 클라우지우스-클라페이롱 식 $\Delta H_{vap}/(RT^2)$과 비교하면 T^2이 소거되어 온도에 무관한 상수 관계 $\Delta H_{vap} = BR$이 얻어지기 때문이다.

암기 포인트

안투안식이나 이와 유사한 $\ln P^{sat} = A - B/T$ 형태의 증기압 상관식에서 B에 기체상수 R을 곱하면 바로 증발잠열이 된다. 이는 클라우지우스-클라페이롱 식에서 이상기체 증기·액체 몰부피 무시 가정을 적용했을 때 나오는 결과이며, 온도항이 소거되어 특정 온도값을 대입할 필요가 없다는 점이 시험에서 자주 활용된다.

NoteBase

문 20. 어떤 일정 온도에서 성분 1과 성분 2로 구성된 기-액 혼합물의 $P-x_1-y_1$ 상평형 선도에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, N_V는 기상의 몰수, N_L은 액상의 몰수, x_1은 성분 1의 액상 몰분율, y_1은 성분 1의 기상 몰분율, z_1은 혼합물 내 성분 1의 총 몰분율, P는 계의 전체압력, P_1^{sat}은 성분 1의 포화증기압, P_2^{sat}은 성분 2의 포화증기압이며, w_V와 w_L은 표시한 부분의 길이이다)



① 성분 1이 성분 2보다 휘발성이 높다.

② $N_L w_V = N_V w_L$의 관계를 만족한다.

③ 용액이 Raoult의 법칙을 따를 경우, $P-x_1$ 선도는 직선이다.

④ 성분 2는 성분 1보다 끓는점이 높다.

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 이성분계 등온 P-x1-y1 상평형 선도를 읽고, 각 곡선의 의미와 지렛대 규칙(lever rule)을 정확히 적용할 수 있는지를 묻는다. 그림에서 위쪽 곡선(액체선)과 아래쪽 곡선(기체선) 사이의 V+L 영역에서 특정 압력의 수평선을 그으면 왼쪽부터 x1(액상 조성), z1(전체 조성), y1(기상 조성) 순으로 점이 나타나고, x1과 z1 사이 거리가 w_L, z1과 y1 사이 거리가 w_V이다. 옳지 않은 설명을 고르는 문제이므로, 지렛대 규칙의 식이 올바르게 세워졌는지를 가장 먼저 확인해야 한다.

NoteBase

자료 읽는 순서

먼저 그래프의 세로축 절편을 본다. 몰분율 1(성분 1 순수 상태) 지점의 압력이 P1^sat이고 몰분율 0(성분 2 순수 상태) 지점의 압력이 P2^sat인데, 그림에서 P1^sat이 P2^sat보다 높은 위치에 있다. 다음으로 두 선의 모양을 구분해서 본다. 위쪽 선(액체선, P-x1)은 Raoult의 법칙을 따르는 이상용액이면 직선으로 그려지고, 아래쪽 선(기체선, P-y1)은 바깥으로 볼록하게 휜 곡선으로 그려진다. 따라서 액체선이 직선인지 확인해 Raoult 법칙 준수 여부를 판단한다. 마지막으로 수평 tie line 위의 x1, z1, y1과 w_L, w_V의 위치 관계를 보고 전체 몰수 N_L, N_V와의 물질수지 관계식을 세운다.

선지별 해설

① O. 그림에서 몰분율 1인 지점(순수 성분 1)의 압력이 P1^sat이고, 이 값이 몰분율 0인 지점의 P2^sat보다 높게 그려져 있다. 같은 온도에서 포화증기압이 더 큰 성분이 더 잘 증발하는, 즉 휘발성이 더 높은 성분이므로 성분 1이 성분 2보다 휘발성이 높다는 설명은 그림과 일치한다.
② X. 전체 몰수를 N = N_L + N_V, 전체 조성을 z1이라 하면 성분 1에 대한 몰수지는 z1(N_L+N_V) = x1 N_L + y1 N_V이다. 이를 정리하면 N_L(z1-x1) = N_V(y1-z1)이 되고, w_L = z1-x1, w_V = y1-z1이므로 N_L w_L = N_V w_V가 성립한다. 그런데 선지는 N_L w_V = N_V w_L로 w_L과 w_V의 자리가 서로 바뀌어 있어 옳지 않은 관계식이다.
③ O. 용액이 Raoult의 법칙을 따르면 전압은 P = x1 P1^sat + x2 P2^sat = x1 P1^sat + (1-x1) P2^sat = P2^sat + x1(P1^sat - P2^sat)로 표현되며, 이는 x1에 대한 1차식이므로 P-x1 선도는 직선이 된다.
④ O. 성분 2의 포화증기압 P2^sat이 성분 1의 P1^sat보다 낮으므로, 성분 2는 성분 1보다 증발하기 어려운, 즉 끓는점이 더 높은 성분이다.

오답 포인트

지렛대 규칙을 세울 때 어느 쪽 몰수에 어느 쪽 거리를 곱하는지 헷갈리기 쉽다. 물질수지식을 직접 유도하지 않고 식의 형태만 외워서 N_L과 w_V, N_V와 w_L을 짝짓는 실수를 하면 ②를 옳은 관계로 착각하게 된다. 항상 '조성이 가까운 쪽의 거리에 상대측 몰수를 곱한다'는 지렛대 규칙의 원리(N_L w_L = N_V w_V)를 물질수지식으로부터 다시 확인하는 습관이 필요하다.

다시 나오면 이렇게 판단

P-x1-y1 선도 문제에서는 먼저 P1^sat과 P2^sat의 위치로 어느 성분이 더 휘발성이 높은지(끓는점이 낮은지)를 판단하고, 이어서 곡선의 직선 여부로 Raoult의 법칙 준수 여부를 판단한다. 지렛대 규칙 관계식이 나오면 반드시 z1(N_L+N_V) = x1 N_L + y1 N_V부터 직접 세워 N_L(z1-x1) = N_V(y1-z1), 즉 N_L w_L = N_V w_V를 확인한 뒤 선지와 대조한다.

NoteBase

암기 포인트

지렛대 규칙: N_L w_L = N_V w_V (조성이 가까운 상의 몰수는 먼 쪽 거리에, w_L은 x1과 z1 사이 거리, w_V는 z1과 y1 사이 거리). P1^sat이 크면 그 성분이 더 휘발성이 높고 끓는점은 더 낮다. Raoult의 법칙을 따르는 이상용액은 P-x1 선도가 직선이다.

NoteBase