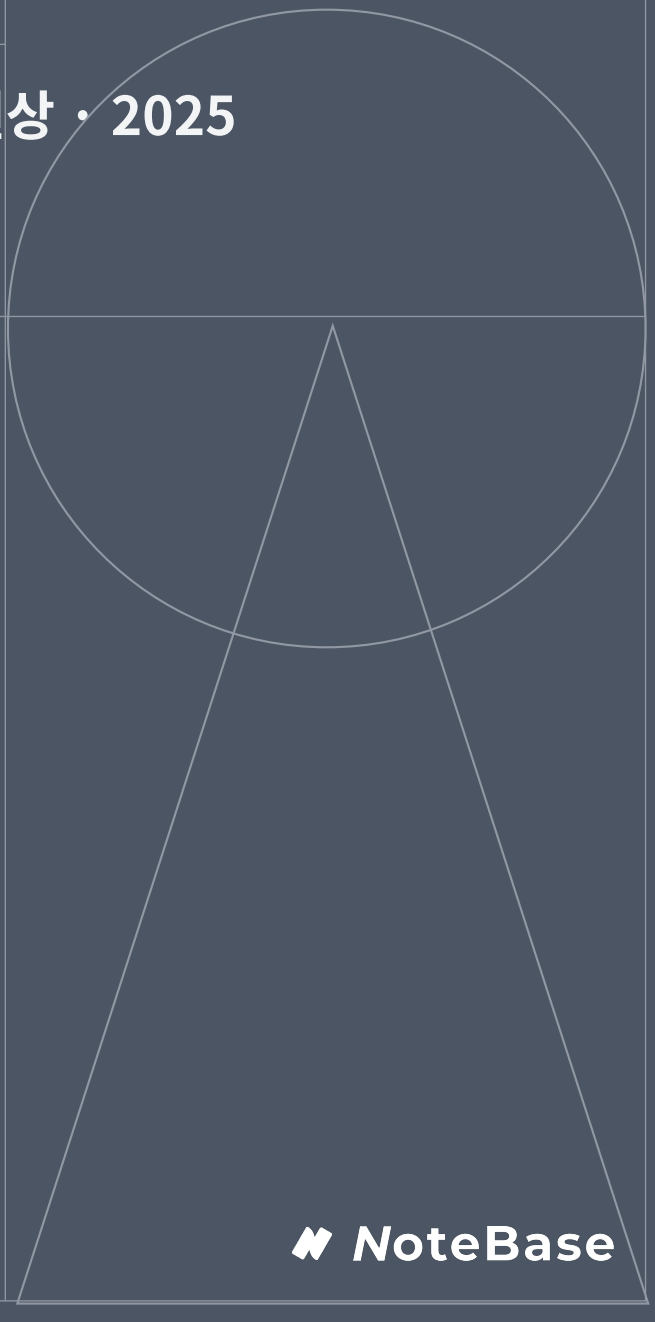
기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 전달현상 · 2025



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 전달현상 · 2025

공무원/서울시/7급 · 전달현상 · 2025

문 1. 물질의 확산에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

① 고체상 내에서의 물질 확산은 빈자리(vacancy) 확산과 틈새(interstitial) 확산 등으로 설명할 수 있다.

② 액상에서 콜로이드 입자가 확산하는 경우는 Stokes-Einstein 식으로 설명할 수 있다.

③ 매우 작은 모세관 기공 내부에서 액체 분자가 확산하는 경우는 Knudsen 확산으로 설명할 수 있다.

④ 고체상 내에서의 물질 확산이 온도에 의존하는 경향은 Arrhenius 식으로 설명할 수 있다.

정답 3번

출제 포인트

물질 확산의 메커니즘별 적용 조건을 구분할 수 있는가. 특히 Knudsen 확산이 기체에 해당하는지 액체에도 해당하는지가 핵심이다.

핵심 개념

빈자리(vacancy) 확산: 고체 격자에서 인접 빈자리로 원자가 이동하는 메커니즘.
침입형(interstitial) 확산: 격자 틈새 자리를 통해 원자가 이동하는 메커니즘.
Stokes-Einstein 식: $D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r}$. 점성 유체 속 구형 입자(콜로이드)의 확산계수를 온도·점도·입자 반지름으로 나타낸다.
Knudsen 확산: 기공 직경이 기체 분자의 평균 자유 경로보다 작을 때, 분자가 벽과의 충돌에 의해 수송되는 현상. 기체 전용 메커니즘이다.
Arrhenius 식: $D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$. 고체 내 확산계수가 온도에 지수적으로 의존함을 나타낸다.

NoteBase

선지별 해설

① (O) 고체 내 확산 메커니즘으로 vacancy 확산(빈자리 확산)과 interstitial 확산(침입형 확산)이 대표적이다. 설명이 옳다.
② (O) Stokes-Einstein 식은 콜로이드처럼 크기가 큰 구형 입자가 점성 액체에서 브라운 운동으로 확산할 때의 확산계수를 정확히 기술한다. 설명이 옳다.
③ (X) Knudsen 확산은 기체 분자의 평균 자유 경로가 기공 직경보다 클 때 기체 분자와 기공 벽 사이의 충돌이 지배적이 되는 현상이다. 액체 분자에는 평균 자유 경로 개념이 적용되지 않으므로, 액체 분자의 모세관 내 확산에 Knudsen 확산을 적용하는 것은 틀리다.
④ (O) 고체 내 확산계수의 온도 의존성은 $D = D_0 \exp(-E_a/RT)$ 형태로, 활성화 에너지를 갖는 Arrhenius 거동을 따른다. 설명이 옳다.

오답 포인트

Knudsen 확산은 '기공이 매우 좁아서 기체 분자 평균 자유 경로보다 기공이 작을 때'라는 조건이 핵심이다. '매우 작은 기공'이라는 표현이 옳은 것처럼 보이게 유도하지만, 적용 대상이 기체가 아닌 액체로 바뀌어 있어 틀린 선지가 된다. 기공 크기가 아니라 '적용 대상이 액체인가 기체인가'를 먼저 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

Knudsen 확산 문제는 (1) 대상이 기체인가 액체인가, (2) 기공 직경과 평균 자유 경로의 크기 관계가 맞는가, 두 가지를 순서대로 체크한다. 액체가 나오는 순간 Knudsen 확산 적용은 틀린 기술이다.

암기 포인트

Knudsen 확산 = 기체 전용(평균 자유 경로 > 기공 직경). Stokes-Einstein = 액체 속 콜로이드/큰 입자. Arrhenius = 고체 확산의 온도 의존성. vacancy · interstitial = 고체 내 두 가지 확산 경로.

NoteBase

문 2. 운동량, 열, 물질 전달현상에 대한 비례상수로 사용되는 각 전달계수와 전달계수의 단위를 잘못 짝지은 것은?

① 전달계수: 절대점도, 단위: $kgm^{-1}s^{-1}$

② 전달계수: 열전도도, 단위: $Wm^{-1}K^{-1}$

③ 전달계수: 대류열전달계수, 단위: $Wm^{-2}K^{-1}$

④ 전달계수: 확산계수, 단위: $kgm^{2}s^{-1}$

정답 4번

출제 포인트

운동량·열·물질 전달현상 각각의 비례상수(절대점도, 열전도도, 대류열전달계수, 확산계수)에 대해 기본 전달 법칙으로부터 단위를 유도할 수 있는지 확인하는 문제다.

핵심 개념

절대점도 μ: 뉴턴 점성 법칙 $\tau = \mu\frac{du}{dy}$. 전단응력 τ의 단위는 Pa = kg $m^{-1}s^{-2}$, 속도구배 du/dy의 단위는 s^{-1}이므로 μ의 단위는 kg $m^{-1}s^{-1}$이다.

열전도도 k: 푸리에 법칙 $q = -k dT/dx$. 열유속 q의 단위는 W m^{-2}, 온도구배의 단위는 K m^{-1}이므로 k의 단위는 W $m^{-1}K^{-1}$이다.

대류열전달계수 h: 뉴턴 냉각 법칙 $q = h\Delta T$. q는 W m^{-2}, ΔT는 K이므로 h의 단위는 W $m^{-2}K^{-1}$이다.

확산계수 D: 픽의 제1법칙 $J = -D dc/dx$. 질량 플럭스 J의 단위는 kg $m^{-2}s^{-1}$, 농도구배 dc/dx의 단위는 kg m^{-4}이므로 D의 단위는$m^{2}s^{-1}$이다.

선지별 해설

① 절대점도 — kg $m^{-1}s^{-1}$: 맞다. 뉴턴 점성 법칙에서 유도하면 kg $m^{-1}s^{-1}$이다.
② 열전도도 — W $m^{-1}K^{-1}$: 맞다. 푸리에 법칙에서 유도하면 W $m^{-1}K^{-1}$이다.
③ 대류열전달계수 — W $m^{-2}K^{-1}$: 맞다. 뉴턴 냉각 법칙에서 유도하면 W $m^{-2}K^{-1}$이다.
④ 확산계수 —$kgm^{2}s^{-1}$: 틀리다. 픽의 법칙에서 D의 단위를 유도하면$m^{2}s^{-1}$이다. kg이 붙는 것은 잘못이고, 또한m^{2}의 지수가 양수이며 s^{-1}(1승)이 맞다.$kgm^{2}s^{-1}$은 차원이 전혀 다른 양(각운동량)이다.

NoteBase

오답 포인트

확산계수를 질량 플럭스 자체의 단위(kg $m^{-2}s^{-1}$)와 혼동하거나, 농도의 차원(kg m^{-3})을 잘못 적용해 단위에 kg을 남기면 오답이 된다. 픽의 법칙 $J = -D dc/dx$에서 J와 dc/dx 단위를 정확히 나눗셈해야 kg이 모두 약분되어m^2s^{-1}만 남는다.

다시 나오면 이렇게 판단

각 전달계수의 단위는 기본 법칙(뉴턴 점성, 푸리에, 뉴턴 냉각, 픽)에 대입해 직접 유도한다. '전달량 = 계수 × 구동력'에서 계수 = 전달량 ÷ 구동력으로 단위를 계산하면 암기 없이도 정확히 맞출 수 있다. 확산계수에 kg이 붙어 있으면 즉시 의심한다.

암기 포인트

확산계수 D의 단위는m^2s^{-1}(질량 차원 없음). 나머지 세 계수: 절대점도 kg $m^{-1}s^{-1}$, 열전도도 W $m^{-1}K^{-1}$, 대류열전달계수 W $m^{-2}K^{-1}$.

NoteBase

문 3. 비정상상태 열전달을 해석하기 위해 총괄 매개변수 분석(lumped parameter analysis)을 적용할 수 있는 조건으로 가장 옳은 것은?

① 대류 저항이 전도 저항보다 훨씬 크다.

② 내부 저항이 표면 저항보다 훨씬 크다.

③ 매질 표면으로의 대류에 의한 열전달이 내부로 침투하는 전도에 의한 열전달보다 훨씬 빠르다.

④ 전체 열전달 속도를 결정하는 단계는 전도에 의한 열전달 단계이다.

정답 1번

출제 포인트

비정상상태 열전달에서 집괄 매개변수 분석(lumped parameter analysis)을 적용할 수 있는 조건을 Biot 수(Bi)의 의미를 통해 판별하는 문제다. Bi = hLc/k = (내부 전도 저항)/(표면 대류 저항)이며, Bi $\leq$ 0.1일 때(Bi << 1) 집괄 분석이 유효하다.

핵심 개념

Biot 수(Bi)의 정의: $\mathrm{Bi} = \frac{hL_c}{k}$. 분자 h는 대류 열전달 계수, 분모 k는 전도 열전달 계수, Lc는 특성 길이다.

Bi를 저항 비율로 해석하면: Bi = (1/h)/(L_c/k) = 표면 대류 저항(분모 역수)내부 전도 저항.

정확히는 Bi = 내부 전도 저항표면 대류 저항으로도 쓴다: $\mathrm{Bi} = \frac{L_c/k}{1/h}$.

Bi << 1 조건의 물리적 의미: 내부 전도 저항이 표면 대류 저항보다 훨씬 작다 → 물체 내부 온도가 거의 균일 → 집괄 분석 적용 가능.
달리 표현하면: 대류 저항이 전도 저항보다 훨씬 크다(표면 대류가 열전달의 병목).

선지별 해설

① 대류 저항이 전도 저항보다 훨씬 크다. → 옳음. Bi = (전도 저항)/(대류 저항) << 1이므로 대류 저항 >> 전도 저항. 집괄 분석의 정확한 적용 조건이다.
② 내부 저항이 표면 저항보다 훨씬 크다. → 틀림. 이는 Bi >> 1 상황으로, 내부 온도 불균일이 심해 집괄 분석을 쓸 수 없다. 올바른 표현은 '내부 저항이 표면 저항보다 훨씬 작다'여야 한다.
③ 매질 표면으로의 대류에 의한 열전달이 내부로 침투하는 전도에 의한 열전달보다 훨씬 빠르다. → 틀림. 대류가 전도보다 빠르면 전도가 병목이 되어 내부 온도 구배가 크다(Bi >> 1). 집괄 분석 적용 불가 조건이다.
④ 전체 열전달 속도를 결정하는 단계는 전도에 의한 열전달 단계이다. → 틀림. 전도가 율속 단계라는 것은 내부 전도 저항이 크다는 뜻(Bi >> 1). 집괄 분석 적용 불가. 집괄 분석이 가능하려면 전체 속도를 결정하는 단계가 대류여야 한다.

NoteBase

오답 포인트

②와 ④는 Bi >> 1 조건을 설명하는데, 이는 집괄 분석이 '불가능'한 조건이다. 조건과 결론을 반대로 혼동하기 쉽다. ③은 '대류가 빠르다 = 대류 저항이 작다 = 전도가 병목'임을 놓치기 쉽다. 빠르다는 표현을 저항 언어로 바꿔 Bi를 판정해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

집괄 분석 조건 문제가 나오면 즉시 Bi << 1을 떠올리고, 선지를 '대류 저항 vs 전도 저항' 비교로 환산한다. '대류 저항 >> 전도 저항'이면 Bi << 1 → 집괄 분석 가능. '전도 저항 >> 대류 저항'이면 Bi >> 1 → 집괄 분석 불가.

암기 포인트

Bi << 1: 전도 저항 작음 = 대류 저항 큼 = 내부 온도 균일 = 집괄 분석 OK. Bi >> 1: 전도 저항 큼 = 내부 온도 불균일 = 집괄 분석 불가. '집괄(lumped) = 물체를 하나의 덩어리로 취급 = 내부 온도 구배 무시 = Bi가 충분히 작아야 가능'으로 기억한다.

NoteBase

문 4. 라울의 법칙을 따르는 화학물질 A와 B로 이루어진 이성분계 용액에 대해서 A와 B의 증기압이 각각 300kPa과 120kPa일 때, B에 대한 A의 상대 휘발도는?

① 1.5
② 1.7
③ 2.5
④ 3.0

정답 3번

출제 포인트

라울의 법칙을 따르는 이성분계 용액에서 상대 휘발도(relative volatility)를 순수 성분 증기압의 비율로 구하는 계산 문제다.

조건 정리

순수 성분 A의 증기압 $P_A^* = 300$ kPa, 순수 성분 B의 증기압 $P_B^* = 120$ kPa. 라울의 법칙 적용 → 이상 용액.

사용할 공식

B에 대한 A의 상대 휘발도: $\alpha_{AB} = \frac{P_A^*}{P_B^*}$

계산 과정

$\alpha_{AB} = \frac{P_A^*}{P_B^*} = \frac{300}{120} = 2.5$

선지 판단

① 1.5 — 120/300 = 0.4가 아닌, 300/120이 아니라 분자·분모를 뒤집은 뒤 잘못 계산한 값. 오답.
② 1.7 — 계산 근거 없는 값. 오답.
③ 2.5 — 300÷120 = 2.5. 정답.
④ 3.0 — 300/100처럼 분모를 잘못 설정했을 때 나오는 오류 값. 오답.

오답 포인트

상대 휘발도 α_{AB}는 'B에 대한 A'이므로 A가 분자, B가 분모다. 분자·분모를 바꾸면 300/120 대신 120/300 = 0.4가 되어 완전히 다른 값이 나온다. 문제에서 '누구에 대한 누구'인지 방향을 먼저 확정하고 식을 세워야 한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

라울의 법칙 이상 용액에서 상대 휘발도는 순수 성분 증기압의 단순 비율이다. '◯에 대한 △의 상대 휘발도' → △가 분자, ◯가 분모. 추가 몰분율 정보 없이 순수 증기압만 주어지면 즉시 비율 계산으로 끝낸다.

암기 포인트

$\alpha_{AB} = P_A^* / P_B^*$ (라울 법칙 이상 용액, 몰분율 무관). 'B에 대한 A' = A/B 순서. 상대 휘발도 > 1이면 A가 더 쉽게 기화(더 휘발성 높음).

NoteBase

문 5. 두 개의 고정막 A, B가 순차적으로 배열되어 있다. A의 왼쪽면의 농도는 C_1, B의 오른쪽면의 농도는 C_2로 각각 유지되고 있으며, $C_1 > C_2$이다. 또한 A, B의 확산계수는 각각 D_1, D_2이고, 두께는 각각 L_1, L_2일 때, A와 B 사이 경계면에서의 농도로 옳은 것은? (단, 고정막 내에서 두께 방향으로의 정상상태 1차원 확산만 존재하고, 반응은 없으며, 농도구배는 선형이다.)

① $\frac{C_1L_2 + C_2L_1}{L_1 + L_2}$
② $\frac{C_1D_1L_2 + C_2D_2L_1}{D_1L_2 + D_2L_1}$
③ $C_2 + \frac{C_1 - C_2}{\frac{L_1}{D_1} + \frac{L_2}{D_2}} \cdot \frac{L_2}{D_2}$
④ $C_1 - \frac{C_1 - C_2}{\frac{L_1}{D_1} + \frac{L_2}{D_2}} \cdot \frac{L_1}{D_1}$

정답 2번

출제 포인트

두 개의 고정막이 직렬로 배열된 정상상태 1차원 확산에서 경계면(계면) 농도를 구하는 문제다. 두 막에서의 플럭스가 같다는 정상상태 조건(플럭스 연속)을 세워 계면 농도를 소거하면 식이 도출된다.

조건 정리

막 A: 확산계수 D_1, 두께 L_1, 왼쪽 경계 농도 C_1
막 B: 확산계수 D_2, 두께 L_2, 오른쪽 경계 농도 C_2
$C_1 > C_2$, 정상상태, 반응 없음, 농도구배 선형(Fick의 법칙 직접 적용 가능)

사용할 공식

Fick의 제1법칙(정상상태): $J = D\frac{\Delta C}{L}$
계면 농도를 C_m이라 하면
막 A를 통한 플럭스: $J = D_1\frac{C_1 - C_m}{L_1}$
막 B를 통한 플럭스: $J = D_2\frac{C_m - C_2}{L_2}$
정상상태이므로 두 플럭스는 같다.

NoteBase

계산 과정

플럭스 등치:
$D_1\frac{C_1 - C_m}{L_1} = D_2\frac{C_m - C_2}{L_2}$

양변에 L_1L_2를 곱하면:
$D_1L_2(C_1 - C_m) = D_2L_1(C_m - C_2)$

전개:
$D_1L_2C_1 - D_1L_2C_m = D_2L_1C_m - D_2L_1C_2$

C_m 항을 우변으로 모으면:
$D_1L_2C_1 + D_2L_1C_2 = C_m(D_1L_2 + D_2L_1)$

따라서:
$C_m = \frac{C_1D_1L_2 + C_2D_2L_1}{D_1L_2 + D_2L_1}$

선지 판단

① $\frac{C_1L_2 + C_2L_1}{L_1 + L_2}$ — 오답. 확산계수 D_1, D_2가 없다. 두 막의 확산계수가 같을 때($D_1 = D_2$)만 성립하는 특수한 경우이며 일반식이 아니다. 예를 들어 $C_1 = 5,\ C_2 = 1,\ D_1 = 2,\ D_2 = 7,\ L_1 = 3,\ L_2 = 11$을 넣으면 ①은 약 4.14가 나와 정답값(약 3.05)과 다르다.

② $\frac{C_1D_1L_2 + C_2D_2L_1}{D_1L_2 + D_2L_1}$ — 정답. 플럭스 연속 조건에서 도출된 정확한 계면 농도 식이다.

③ $C_2 + \frac{C_1 - C_2}{\frac{L_1}{D_1} + \frac{L_2}{D_2}} \cdot \frac{L_2}{D_2}$ — ②와 수학적으로 완전히 동일한 식이다. 막의 저항을 $R_1 = L_1/D_1,\ R_2 = L_2/D_2$로 두면 $C_2 + (C_1 - C_2)\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{C_2R_1 + C_1R_2}{R_1 + R_2}$이고, 분자·분모에 D_1D_2를 곱하면 $\frac{C_1D_1L_2 + C_2D_2L_1}{D_1L_2 + D_2L_1}$이 되어 ②와 일치한다. 즉 ③은 ②를 저항비 형태로 바꿔 쓴 같은 식이다.

④ $C_1 - \frac{C_1 - C_2}{\frac{L_1}{D_1} + \frac{L_2}{D_2}} \cdot \frac{L_1}{D_1}$ — 이 또한 ②와 수학적으로 완전히 동일하다. $C_1 - (C_1 - C_2)\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{C_1R_2 + C_2R_1}{R_1 + R_2}$이고, 같은 방식으로 D_1D_2를 곱하면 ②가 된다. ④는 막 A에서의 농도 강하를 C_1에서 뺀 직렬저항(전압분배) 표현으로, ③과 마찬가지로 정답식의 또 다른 형태다.

결론적으로 ②③④는 모두 같은 계면 농도를 나타내는 동치식이며, 위 수치 예시로 검산하면 셋 다 약 3.05로 정확히 일치한다. 본 문항은 표준형인 ②를 공식 정답으로 채점하지만, 엄밀히는 ③④도 같은 값이므로 선지 구성상 복수정답 소지가 있는 출제 결함으로 볼 수 있다.

NoteBase

오답 포인트

①번 함정: 두께 비율만으로 가중평균하면 되지 않을까 직관적으로 느끼기 쉽다. 그러나 확산계수가 다른 두 막에서는 두께뿐 아니라 확산계수까지 가중치에 포함되어야 한다. $D_1 = D_2$인 경우에만 ①과 ②가 같아진다.
③④에 대한 주의: ③④는 직렬 저항(전압분배) 개념으로 같은 계면 농도를 쓴 식으로, 전개하면 ②와 완전히 같은 값이다. 따라서 '②와 다른 값이 나온다'고 단정하면 안 된다. 시험장에서는 표준형인 ②를 정답으로 고르되, ③④도 동일한 식임을 알아두면 식 변형을 검산하는 데 도움이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 막 계면 농도 문제가 나오면, '두 막의 플럭스 J가 정상상태에서 같다'는 조건 하나만 세우면 된다.
$D_1(C_1 - C_m)/L_1 = D_2(C_m - C_2)/L_2$를 풀어 C_m을 소거하면 항상 ② 형태가 나온다. 선지에서 D와 L이 같은 자리에 묶여 있는지(D_1L_2와 D_2L_1 짝) 확인하면 빠르게 고를 수 있다.

암기 포인트

직렬 두 막의 계면 농도 공식:
$$C_m = \frac{C_1 D_1 L_2 + C_2 D_2 L_1}{D_1 L_2 + D_2 L_1}$$
분자: 각 농도에 '상대편 막'의 D·L 곱을 붙여 더한다(C_1에는 D_1L_2, C_2에는 D_2L_1).
분모: 두 D·L 교차 곱의 합($D_1L_2 + D_2L_1$).
저항으로 쓰면 분모 = $D_1D_2(L_1/D_1 + L_2/D_2) = D_1D_2R_{total}$로도 표현되지만, 공식 그대로 외우는 것이 빠르다.

NoteBase

문 6. 단면적이 일정한 수평 원형관 내 층류 유동의 특징으로 옳은 것을 <보기>에서 모두 고른 것은?

<보기>
ㄱ. 층류 유동에서는 유체 입자들이 서로 뒤섞이지 않고 평행하게 흐른다.
ㄴ. 층류 유동은 일반적으로 Reynolds 수가 4,000 이상일 때 발생한다.
ㄷ. 층류 유동에서는 유속 분포가 포물선형인 경우가 있다.
ㄹ. 층류 유동에서는 관성력이 점성력보다 지배적이다.

① ㄱ, ㄷ
② ㄴ, ㄹ
③ ㄱ, ㄷ, ㄹ
④ ㄴ, ㄷ, ㄹ

정답 1번

출제 포인트

원형관 내 층류 유동의 특성 4가지(입자 거동, Reynolds 수 범위, 유속 분포 형태, 지배력)를 정확히 구분하는 문제다.

핵심 개념

층류(laminar flow): 유체 입자들이 서로 뒤섞이지 않고 층을 이루어 평행하게 흐르는 유동. Reynolds 수(Re) = 관성력 / 점성력으로 정의된다. 원형관 기준으로 Re < 약 2,100이면 층류, Re > 약 4,000이면 난류, 그 사이(2,100~4,000)는 천이 구간이다. 완전 발달된 원형관 층류(Hagen-Poiseuille 유동)에서 반경 방향 유속 분포는 포물선형(parabolic)이다. 층류는 Re가 낮으므로 점성력이 관성력보다 지배적이다.

선지별 해설

ㄱ (O) — 층류의 정의 자체다. 유체 입자들은 인접 층과 섞이지 않고 평행 방향으로만 이동한다.
ㄴ (X) — Re ≥ 4,000은 난류 발생 조건이다. 층류는 원형관 기준 Re < 약 2,100일 때 발생한다. '4,000 이상일 때 층류'는 완전히 반대 서술이다.
ㄷ (O) — 원형관 내 완전 발달 층류에서 유속은 $u(r) = u_{\max}\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$ 형태로 포물선형 분포를 갖는다.
ㄹ (X) — 층류에서는 점성력이 관성력보다 지배적이다. 관성력이 점성력보다 커지면(Re 증가) 난류로 전이된다. 서술이 거꾸로다.

NoteBase

오답 포인트

ㄴ: Re 수치 2,100(층류 상한)과 4,000(난류 하한)의 위치를 뒤바꾸는 함정. 숫자만 외우면 어느 경계가 층류·난류 쪽인지 헷갈린다.
ㄹ: '관성력 지배 = 층류'로 혼동하는 오류. Reynolds 수 공식(Re = 관성력/점성력)에서 Re가 작을수록 점성력 우세 → 층류임을 공식에서 직접 읽어야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

보기에 Re 수치가 나오면 '2,100 미만 = 층류, 4,000 초과 = 난류'로 즉시 판정한다. '관성력 vs 점성력 지배'가 나오면 Re = 관성/점성을 떠올려, 낮은 Re(층류) = 점성력 지배임을 적용한다. 유속 분포 '포물선형'은 원형관 층류의 고유 특성이므로 맞는 서술로 처리한다.

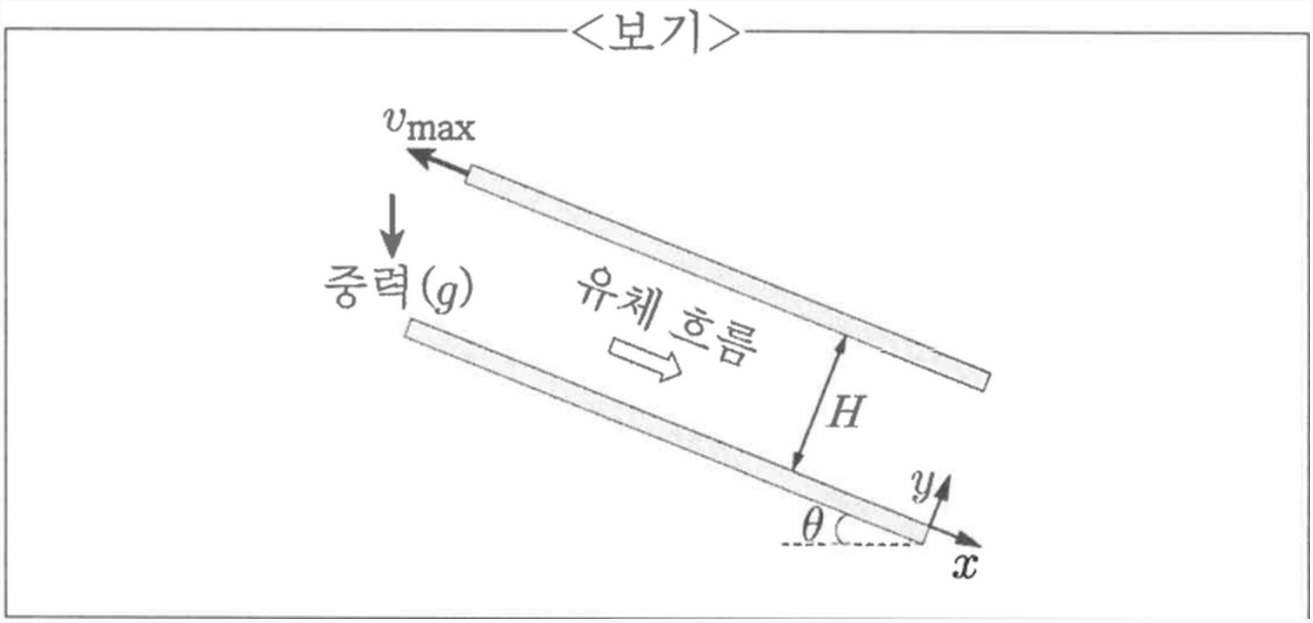
암기 포인트

층류 3종 세트: ① 입자 평행 흐름(혼합 없음) ② Re < 2,100 ③ 포물선형 유속 분포 + 점성력 지배. 이 세트에 어긋나는 서술(Re 4,000 이상, 관성력 지배)은 모두 난류의 특성이다.

NoteBase

문 7. <보기>와 같이 θ만큼 기울어진 두 평판 사이를 비압축성 뉴튼 유체가 중력에 의하여 정상상태의 완전발달층류로 흐르고 있다. 두 평판 사이의 거리는 H, 유체의 x방향 속도 분포는 $v_x = -\frac{\rho g \sin\theta}{2\mu}(y^2 - yH)$, 유체의 최대 국부 속도는 v_{max}이다. 상부판이 v_{max} 속도로 유체 흐름의 반대 방향으로 이동하는 경우, 유체의 x방향 속도 분포식으로 가장 옳은 것은? (단, 유체의 밀도는 ρ, 점도는 μ, 중력가속도는 g이다.)

<보기>



① $v_x = -\frac{H^2 \rho g \sin\theta}{2\mu}\left\{\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{3y}{4H}\right\}$

② $v_x = -\frac{H^2 \rho g \sin\theta}{2\mu}\left\{\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{5y}{4H}\right\}$

③ $v_x = -\frac{H^2 \rho g \sin\theta}{2\mu}\left\{\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{y}{H} - \frac{1}{4}\right\}$

④ $v_x = -\frac{H^2 \rho g \sin\theta}{2\mu}\left\{\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{y}{H} + \frac{1}{4}\right\}$

정답 1번

출제 포인트

경사진 두 평판 사이 중력 구동 완전발달층류(경사 Poiseuille 흐름)에 상부판이 유체 흐름 반대 방향으로 이동하는 Couette 흐름이 결합된 속도 분포를 구하는 문제다. 무차원 변수 y/H로 정리한 최종 식이 핵심이다.

조건 정리

하부판(y=0): 정지(비미끄럼) → v_x=0. 상부판(y=H): 유체 흐름 반대 방향으로 v_max 속도로 이동 → v_x=-v_max. 중력만 있을 때 최대 속도: Poiseuille 포물선의 꼭짓점(y=H/2)에서 v_max = $\frac{\rho g \sin\theta H^2}{8\mu}$.

사용할 공식

중력 Poiseuille 성분: $v_x^{(P)} = -\frac{\rho g \sin\theta}{2\mu}(y^2 - yH)$. Couette 성분(상부판 속도 -v_max를 선형 배분): $v_x^{(C)} = -v_{max}\frac{y}{H}$. 전체: $v_x = v_x^{(P)} + v_x^{(C)}$.

NoteBase

계산 과정

전체 속도 분포를 H^2로 묶어 무차원화한다.

$v_x = -\frac{\rho g \sin\theta}{2\mu}(y^2 - yH) - v_{max}\frac{y}{H}$

$= \frac{\rho g \sin\theta H^2}{2\mu}\left(\frac{y}{H} - \left(\frac{y}{H}\right)^2\right) - v_{max}\frac{y}{H}$

$v_{max} = \frac{\rho g \sin\theta H^2}{8\mu}$ 대입:

$= \frac{\rho g \sin\theta H^2}{2\mu}\left(\frac{y}{H} - \left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{1}{4}\cdot\frac{y}{H}\right)$

$= \frac{\rho g \sin\theta H^2}{2\mu}\left(\frac{3}{4}\cdot\frac{y}{H} - \left(\frac{y}{H}\right)^2\right)$

$= -\frac{H^2 \rho g \sin\theta}{2\mu}\left\{\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{3y}{4H}\right\}$

선지 판단

① $v_x = -\frac{H^2 \rho g \sin\theta}{2\mu}\left\{\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{3y}{4H}\right\}$ → O. 위 계산 과정과 정확히 일치한다. 경계 조건 y=0에서 0, y=H에서 -v_max 모두 만족한다.

② $v_x = -\frac{H^2 \rho g \sin\theta}{2\mu}\left\{\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{5y}{4H}\right\}$ → X. 1차항 계수가 3/4이어야 하는데 5/4로 틀렸다.

③ $v_x = -\frac{H^2 \rho g \sin\theta}{2\mu}\left\{\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{y}{H} - \frac{1}{4}\right\}$ → X. 상수항 -1/4이 포함되어 y=0에서 v_x≠0이 되므로 하부판 비미끄럼 조건 위반.

④ $v_x = -\frac{H^2 \rho g \sin\theta}{2\mu}\left\{\left(\frac{y}{H}\right)^2 - \frac{y}{H} + \frac{1}{4}\right\}$ → X. 상수항 +1/4이 포함되어 y=0에서 v_x≠0, 하부판 경계 조건 위반.

③④ 모두 괄호 안이 $(y/H - 1/2)^2$ 형태로 변환되어 Couette 성분이 잘못 처리된 형태다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 두 가지다. 첫째, Couette 성분을 빠뜨리거나 부호를 반대로 넣어 1차항 계수가 달라지는 것(② 선택 오류). 둘째, v_max를 Poiseuille 최대 속도로 환산하지 않고 미지수로 남겨 정리에 실패하는 것. 상수항이 붙으면(③④) 즉시 y=0 경계 조건으로 탈락시킬 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

경사 Poiseuille + Couette 혼합 문제가 나오면: ①먼저 중력만 있을 때 포물선 속도 분포식을 쓴다. ②이동하는 판의 속도를 선형 Couette 항으로 더한다(방향 부호 주의). ③H^2로 묶어 y/H 무차원수로 표현한다. ④경계 조건(y=0, y=H)에 대입해 상수항 여부로 ③④ 같은 오답을 빠르게 제거한다.

암기 포인트

경사진 두 평판 중력 Poiseuille: $v_x = -\frac{\rho g \sin\theta}{2\mu}(y^2 - yH)$, 최대 속도 위치 y=H/2, 최대 속도 $\frac{\rho g \sin\theta H^2}{8\mu}$. 상부판이 반대 방향 v_max로 움직이면 Couette 항 $-v_{max}\frac{y}{H}$ 를 더하고, v_max를 $\frac{\rho g \sin\theta H^2}{8\mu}$로 치환하면 1차항 계수가 1 - 1/4 = 3/4 이 된다.

NoteBase

문 8. 무차원수에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

① Reynolds 수는 점성력에 대한 관성력의 비이다.

② Euler 수는 관성력에 대한 압력의 비이다.

③ Froude 수는 중력에 대한 관성력의 비이다.

④ Weber 수는 표면장력에 대한 마찰항력의 비이다.

정답 4번

출제 포인트

유체역학에서 자주 쓰이는 무차원수(Reynolds, Euler, Froude, Weber) 각각이 어떤 두 힘의 비로 정의되는지를 정확히 기억하는지 확인한다.

핵심 개념

Reynolds 수(Re) = 관성력 / 점성력
Euler 수(Eu) = 압력 / 관성력 (압력이 관성력에 비해 얼마나 큰가)
Froude 수(Fr) = 관성력 / 중력
Weber 수(We) = 관성력 / 표면장력

공통 구조: 분자는 지배하고자 하는 힘, 분모는 저항하는 힘이다. 마찰항력은 어떤 대표 무차원수의 분자·분모에도 해당하지 않는다(항력 계수 Cd와는 별개 개념).

선지별 해설

① Re = 관성력 / 점성력. '점성력에 대한 관성력의 비'는 관성력 / 점성력이므로 옳다.
② Eu = 압력 / 관성력. '관성력에 대한 압력의 비'는 압력 / 관성력이므로 옳다.
③ Fr = 관성력 / 중력. '중력에 대한 관성력의 비'는 관성력 / 중력이므로 옳다.
④ We = 관성력 / 표면장력. '표면장력에 대한 관성력의 비'라면 옳지만, 선지는 '표면장력에 대한 마찰항력의 비'라고 했다. 마찰항력은 Weber 수를 구성하는 힘이 아니므로 틀리다.

오답 포인트

Weber 수를 '표면장력 vs 마찰항력'으로 혼동하는 것이 함정이다. Weber 수에서 표면장력과 쌍을 이루는 힘은 관성력이다. 마찰항력(drag force)은 무차원 항력 계수(Cd)와 관련된 개념으로, 무차원수의 비 정의에서는 나타나지 않는다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

무차원수 문제는 '어떤 힘 / 어떤 힘'의 분자·분모를 직접 떠올린다. We = 관성력 / 표면장력이므로, '마찰항력'이라는 단어가 보이면 즉시 틀린 선지로 표시한다. 또한 Euler 수는 '압력 / 관성력'이라 관성력이 분모에 온다는 점도 함께 확인한다.

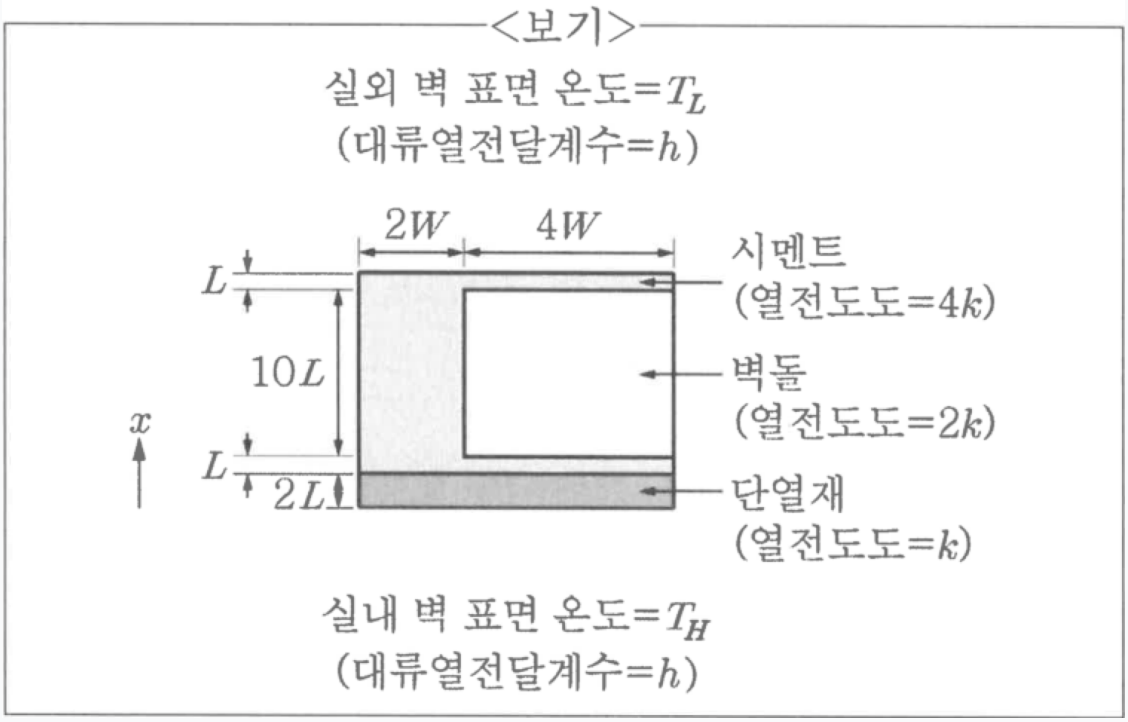
암기 포인트

Re = 관성 / 점성, Eu = 압력 / 관성, Fr = 관성 / 중력, We = 관성 / 표면장력. 네 수 모두 관성력이 관여하며, We의 분모는 표면장력(마찰항력 X).

NoteBase

문 9. <보기>와 같이 단열재, 벽돌, 시멘트로 구성된 복합벽을 통하여 정상상태의 열전달이 발생한다. 복합벽 내에는 폭 $4W$, 두께 $10L$의 벽돌이 시멘트 내부에 위치해 있다. 단열재의 열전도도는 k, 벽돌의 열전도도는 $2k$, 시멘트의 열전도도는 $4k$, 실내와 실외의 대류열전달계수는 h이며, 벽 표면 온도는 각각 T_H와 T_L로 일정하다. 복합벽을 통한 단위길이당 열 손실량으로 가장 옳은 것은? (단, 벽면을 구성하는 소재 사이의 접촉 열저항은 없고, 실내와 실외의 온도는 각각의 벽 표면 온도와 동일하며, x 방향 열전달만 고려한다.)

<보기>



① $(T_H - T_L)\left(\frac{35L}{12kW} + \frac{1}{3hW}\right)^{-1}$

② $(T_H - T_L)\left(\frac{25L}{24kW} + \frac{1}{3hW}\right)^{-1}$

③ $(T_H - T_L)\frac{12kW}{35L}$

④ $(T_H - T_L)\frac{24kW}{25L}$

정답 4번

출제 포인트

복합벽(단열재·벽돌·시멘트 혼합 구조)을 통한 정상상태 1차원 열전달에서 단위길이당 열 손실량을 열저항 등가회로(직렬·병렬 조합)로 계산하는 문제이다. 핵심은 ①실내외 온도가 벽 표면 온도와 동일하여 대류저항이 0임을 인식하는 것, ②x방향 각 두께 슬랩에서 y방향 면적 비례 병렬 컨덕턴스를 구한 뒤 직렬로 합산하는 것이다.

NoteBase

조건 정리

열전달 방향: x방향(실외→실내, 수직)
각 재료 x방향 두께: 시멘트 L, 벽돌 10 L, 단열재 2 L
y방향 폭: 벽돌 4 W, 벽돌 옆 시멘트 2 W, 전체 폭 6 W
열전도도: 단열재 k, 벽돌 2k, 시멘트 4k, 대류열전달계수 h
실내외 온도 = 각각의 벽 표면 온도(T_H, T_L) → 대류저항 없음
x방향 열전달만 고려, 접촉 열저항 없음

사용할 공식

열저항 R = 두께 / (열전도도 × 단면적)
단위길이당(z방향 단위) 면적 = y방향 폭 × 1
직렬 합성: R_총 = R_1 + R_2 + R_3
슬랩 내 병렬 컨덕턴스: $G = \sum \frac{k_i A_i}{L_i}$, 저항 $R = 1/G$
단위길이당 열 손실: q = (T_H - T_L)/(R_총)

NoteBase

계산 과정

실내외 온도 = 벽 표면 온도 → 대류저항 = 0 → 선지 ①②는 대류저항 항 1/(3hW)를 포함하므로 제거.

전도저항을 슬랩(x방향 각 구간)별로 계산한다.

[슬랩 1] x두께 = L, 전체 폭 6 W, 재료 = 시멘트(4k)
$G_1 = \frac{4k \cdot 6W}{L} = \frac{24kW}{L}, R_1 = \frac{L}{24kW}$

[슬랩 2] x두께 = 10 L, y방향으로 벽돌(4 W, 2k)와 시멘트(2 W, 4k) 병렬
$G_2 = \frac{2k \cdot 4W}{10L} + \frac{4k \cdot 2W}{10L} = \frac{8kW}{10L} + \frac{8kW}{10L} = \frac{8kW}{5L}, R_2 = \frac{5L}{8kW}$

[슬랩 3] x두께 = 2 L, 전체 폭 6 W, 재료 = 단열재(k)
$G_3 = \frac{k \cdot 6W}{2L} = \frac{3kW}{L}, R_3 = \frac{L}{3kW}$

전도 총 저항(직렬 합산):
R_전도 = (L)/(24kW) + (5L)/(8kW) + (L)/(3kW)

공통분모 24:
$= \frac{L}{24kW} + \frac{15L}{24kW} + \frac{8L}{24kW} = \frac{24L}{24kW}$

대류저항 없으므로 R_총 = (25L)/(24kW)(선지 ④의 분모 구조).

단위길이당 열 손실:
q = (T_H - T_L)/(R_총) = (T_H - T_L) · (24kW)/(25L)

선지 판단

① $(T_H - T_L)\left(\frac{35L}{12kW} + \frac{1}{3hW}\right)^{-1}$: 대류저항 항 1/(3hW)가 포함되어 있다. 실내외 온도가 벽 표면 온도와 동일하므로 대류저항은 0이다. 이 선지는 대류저항을 잘못 포함하여 틀림.
② $(T_H - T_L)\left(\frac{25L}{24kW} + \frac{1}{3hW}\right)^{-1}$: 전도저항은 옳으나 대류저항 항이 포함되어 있다. 위와 동일 이유로 틀림.
③ $(T_H - T_L)\frac{12kW}{35L}$: 전도저항을 잘못 계산한 값이다. 경로별 합산 오류 또는 재료 배치를 잘못 가정한 경우에 해당한다. 틀림.
④ $(T_H - T_L)\frac{24kW}{25L}$: 대류저항이 없고, 슬랩별 등온면 가정 병렬+직렬 합산으로 구한 전도 총 저항 25 L/(24 kW)의 역수를 정확히 표현한다. 옳음.

NoteBase

오답 포인트

가장 빈번한 실수는 '실내외 온도가 벽 표면 온도와 동일하다'는 조건을 놓치고 대류저항을 추가하는 것이다. 이 조건이 있으면 대류저항 1/(hA)는 반드시 0으로 처리한다. 또한 시멘트 슬랩의 폭이 2 W(전체 6 W에서 벽돌 4 W를 뺀 나머지)임을 주의해야 하며, 슬랩 2에서 시멘트와 벽돌 양쪽 모두 같은 G값(8 kW/10 L)이 나오는 이유는 4k×2 W = 2k×4 W = 8 kW이기 때문이다.

다시 나오면 이렇게 판단

복합벽 문제에서 '실내외 온도 = 벽 표면 온도' 조건이 있으면 대류항을 포함한 선지를 먼저 탈락시킨다. 남은 선지들 중 등온면 가정(슬랩별 병렬 컨덕턴스 후 직렬 합산)을 적용해 풀되, 각 슬랩에서 폭(면적)이 다른 재료가 공존하면 k×폭을 각각 더하여 G를 구한다.

암기 포인트

이 문제에서 슬랩 2의 두 재료 컨덕턴스가 같아지는 이유: 시멘트 4k×2 W = 벽돌 2k×4 W = 8 kW. 폭과 열전도도가 반비례하면 컨덕턴스가 같고 병렬 저항은 각각의 절반이 된다. 이 숫자 관계를 기억해 두면 슬랩 2 계산이 즉시 가능하다.

NoteBase

문 10. 뜨거운 구 주변의 공기가 데워지는 자연대류 현상이 일어날 때, 벌크(Bulk) 유체의 영향 없이 오직 전도에 의해 열이 전달되는 경우, Nusselt 수로 가장 옳은 것은?

① 0

② 1

③ 2

④ 3

정답 3번

출제 포인트

구(sphere) 주위 정지 유체에서 순수 전도 극한일 때 Nusselt 수의 이론값을 구하는 문제이다. Nusselt 수의 정의와 구 형상에서의 정상 전도 해를 연결할 수 있어야 한다.

조건 정리

형상: 뜨거운 구(직경 D, 반지름 r = D/2). 주변 유체: 정지 공기(벌크 유체 흐름 없음). 전열 메커니즘: 오직 전도(대류 효과 무시). 경계조건: 구 표면 온도 Ts, 무한 원방 유체 온도 T∞.

사용할 공식

Nusselt 수 정의: $Nu = \frac{hD}{k}$ (여기서 h=대류 열전달계수, D=직경, k=유체 열전도도). 구 주위 정상 전도 열전달량: $Q = 4\pi kr(T_s - T_\infty)$. 대류 열전달로 표현: $Q = h \cdot 4\pi r^2(T_s - T_\infty)$.

계산 과정

두 식을 같다고 놓으면 $4\pi kr(T_s - T_\infty) = h \cdot 4\pi r^2(T_s - T_\infty)$이므로 $h = \frac{k}{r}$.
특성길이를 직경 D = 2r로 쓰면 $Nu = \frac{hD}{k} = \frac{(k/r)(2r)}{k} = 2$.
따라서 구에서 순수 전도 극한의 Nusselt 수는 2이다.

선지 판단

① 0 — 오답. Nu=0이면 h=0, 즉 열전달이 전혀 없음을 의미하는 비물리적 값이다.
② 1 — 오답. 구의 전도 극한 Nu 유도값(2)과 다르다. 평판 등 다른 형상에서 나올 수 있는 혼동 값이다.
③ 2 — 정답. 구 주위 무한 정지 매질에서 정상 전도 해로부터 Nu=2가 정확히 유도된다.
④ 3 — 오답. Nu가 3이 되려면 h가 전도 극한보다 더 큰 값이어야 하므로 대류 기여가 있어야 한다.

오답 포인트

Nu=1로 헷갈리는 이유: 특성길이를 반지름 r로 잡으면 Nu=hD/k 대신 Nu=hr/k=1이 나온다. 이 문제처럼 직경 D를 특성길이로 쓰는 표준 정의에서는 Nu=2이다. 특성길이 선택에 유의해야 한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

구 형상 + 순수 전도(또는 Re→0, Gr→0) 극한이 조건이면 Nu=2를 즉시 떠올린다. 반지름을 특성길이로 쓰면 Nu=1이 나오므로, 직경 기준 정의인지 반지름 기준 정의인지 문제에서 명시된 정의를 먼저 확인한다.

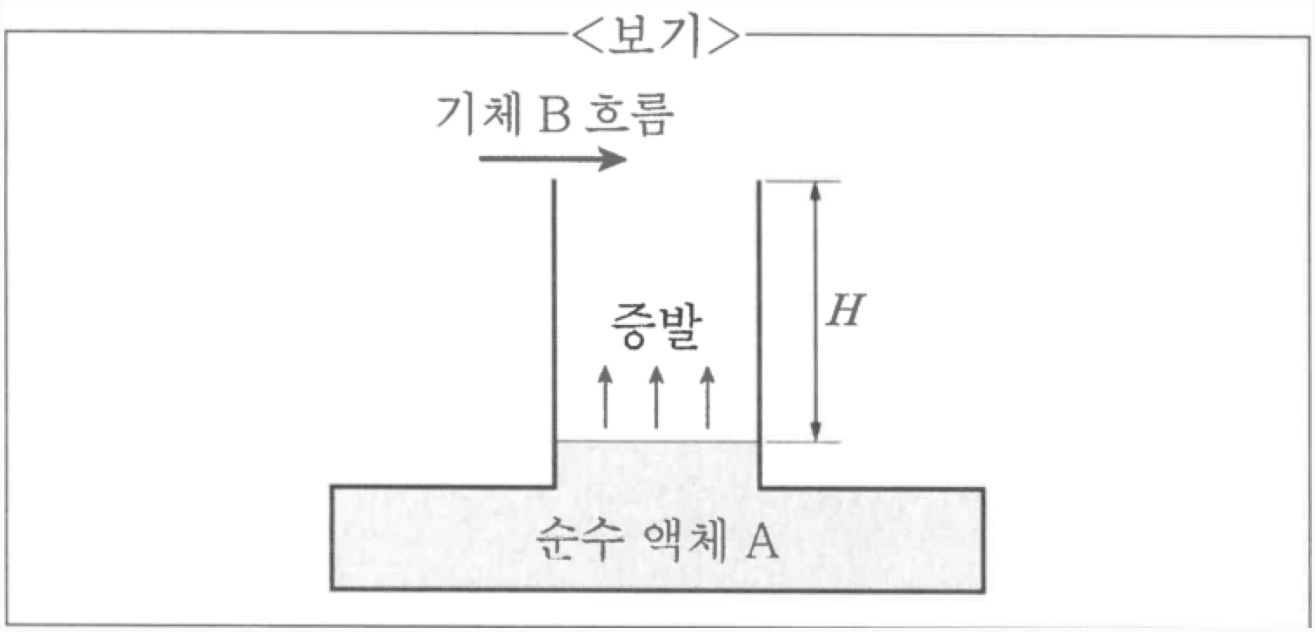
암기 포인트

구(sphere) 순수 전도 극한: $Nu_D = 2$ (직경 D 기준). 이는 Whitaker 상관식이나 Churchill-Bernstein 구 열전달 식에서 Re=0, Gr=0일 때의 하한값이기도 하다.

NoteBase

문 11. <보기>는 물질의 확산계수를 측정하기 위하여 사용되는 Arnold 확산 셀이다. 셀 상단부의 출구 주위에는 액체 A에 대해 용해성이 없고 화학적으로도 불활성인 기체 B가 흐르고 있으며, 셀 하단부에는 순수한 액체 A가 액체의 자유표면을 통하여 기화되고 있다. Arnold 확산 셀에서 일어나는 정상상태의 물질전달에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

<보기>



① Arnold 확산 셀에서 기화되는 A 물질의 몰 플럭스는 액체 자유표면에서 셀 출구까지의 길이(H)에 비례한다.

② Arnold 확산 셀에서 기체 B는 정체기체(stagnant)이다.

③ Arnold 확산 셀에서 기화되는 A 물질의 몰 플럭스는 확산 셀에서의 기체의 전체 몰농도에 비례한다.

④ Arnold 확산 셀에서는 단일성분 물질전달이 발생한다.

정답 1번

출제 포인트

Arnold 확산 셀(Arnold diffusion cell)에서 정상상태 단일성분 물질전달(unimolecular diffusion)의 몰 플럭스 공식을 이해하고, 각 변수와의 비례·반비례 관계를 구별할 수 있는지 묻는다.

조건 정리

셀 하단: 순수 액체 A가 자유표면을 통해 기화. 셀 상단: 기체 B(화학적 비활성, 액체 A에 불용)가 흐름. 기체 B는 정체(stagnant) 상태로 취급. H = 액체 자유표면에서 셀 출구(상단)까지의 거리. 정상상태, 1차원 확산.

사용할 공식

Arnold 확산 셀의 A 몰 플럭스: $N_A = \frac{cD_{AB}}{H} \ln \frac{1-y_{A,H}}{1-y_{A,0}}^{-1}$ 또는 압력 표현으로 $N_A = \frac{cD_{AB}}{H} \cdot \frac{P}{P_{B,lm}}(y_{A,0} - y_{A,H})$. 핵심 비례 관계: $N_A \propto \frac{c}{H}$. 즉, 전체 몰농도 c에 비례하고, 거리 H에 반비례한다.

NoteBase

계산 과정

공식에서 $N_A \propto \frac{1}{H}$이므로, H가 클수록 몰 플럭스는 작아진다(반비례). 반면 $N_A \propto c$이므로 전체 몰농도에는 비례한다. 기체 B는 이동하지 않는 정체기체이며, A 한 성분만 확산하므로 단일성분 물질전달이 성립한다.

선지 판단

① [X] '몰 플럭스가 H에 비례한다'고 했으나, 공식상 $N_A \propto 1/H$이므로 H에 반비례한다. 비례와 반비례를 뒤바꾼 틀린 설명이다. → 이것이 정답(옳지 않은 것).
② [O] Arnold 확산 셀에서 기체 B는 이동 속도가 0인 정체기체(stagnant gas)로 취급한다. 옳다.
③ [O] 공식에서 $N_A \propto c$(전체 몰농도)이므로 옳다.
④ [O] A만 확산하고 B는 정체하므로 단일성분 물질전달(unimolecular diffusion)이 발생한다. 옳다.

오답 포인트

①번은 'H에 비례'라고 쓰여 있어 얼핏 자연스럽게 읽힌다. 그러나 확산 거리가 길수록 물질이 이동하기 어려워지므로 플럭스는 감소한다. 분모에 H가 있어 반비례임을 공식에서 직접 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

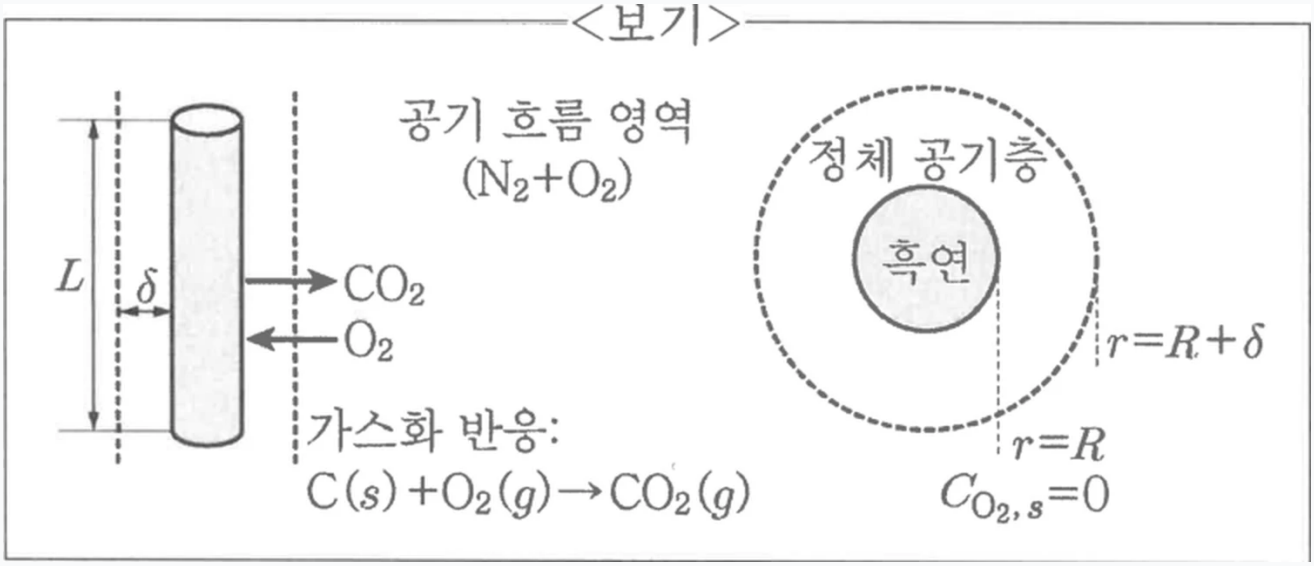
Arnold 확산 셀 문제는 항상 $N_A \propto c/H$ 한 줄을 먼저 쓰고 선지와 대조한다. '비례·반비례' 또는 '거리·농도·확산계수' 중 하나를 바꿔 틀린 선지를 만든다. H가 분모임을 잊지 않으면 ①번 유형의 함정은 즉시 판별된다.

암기 포인트

Arnold 확산 셀 몰 플럭스: $N_A \propto \frac{cD_{AB}}{H}$. 전체 몰농도(c)·확산계수(D)에 비례, 확산 거리(H)에 반비례. 기체 B = stagnant(정체). A만 이동 = 단일성분(unimolecular) 확산.

문 12. <보기>는 1atm, 1,100K의 고온 공기 흐름에 의한 원통형 흑연의 표면 산화를 나타낸 것이다. 흑연 표면에 형성되는 정체 공기층에 함유된 O_2가 흑연 표면의 C와 반응하여 CO_2 가스를 생성한다. 흑연 가스화 반응으로 인하여 흑연 표면에서 O_2의 농도는 0이 된다. 유입 공기의 압력을 2atm으로 증가시키는 경우, 흑연 표면의 CO_2 생성 속도 변화에 대한 설명으로 가장 옳은 것은? (단, 정체 공기층에서 기체들의 확산계수와 전체 몰농도는 일정하고, 가스화 반응에 의한 흑연의 부피 변화는 없으며, 물질 전달은 흑연의 반지름 방향으로만 발생한다. 공급되는 공기는 N_2와 O_2로 구성되어 있다.)

<보기>



① 2배 감소한다.

② 2배 증가한다.

③ 4배 감소한다.

④ 4배 증가한다.

정답 2번

출제 포인트

원통형 흑연의 표면 가스화 반응에서 정체 필름(stagnant film) 내 확산에 의한 물질전달 속도를 이해하고, 압력 변화가 O_2 공급 속도(= CO_2 생성 속도)에 미치는 영향을 계산하는 문제이다.

NoteBase

조건 정리

반응: C(s) + O_2(g) → CO_2(g) (1:1 등몰 반응)
흑연 표면(r = R)에서 O_2 농도 = 0 (반응으로 소진)
확산계수 D = 일정 (온도 일정, 압력 의존성 무시 조건)
정체층 내 기체들의 확산계수와 전체 몰농도는 공간적으로 균일하다고 가정
흑연 부피 변화 없음 → R과 정체층 두께 δ 일정
유속 변화 없음 → 유동 조건과 경계층 구조 불변

사용할 공식

원통형 좌표에서 정상상태 등몰 역확산(O_2 유입, CO_2 유출, N_2 정체)의 물질전달 플럭스:
$N_{O_2}|_{r=R} = \frac{D \cdot c_{O_2,\infty}}{R \cdot \ln\left(\frac{R+\delta}{R}\right)}$
여기서 $c_{O_2,\infty} = c_{total} \times y_{O_2,\infty}$이다.
CO_2 생성 몰 속도 = $N_{O_2}|_{r=R}$ (반응비 1:1이므로 동일).

계산 과정

① 압력 1 atm → 2 atm 변화 시 각 변수의 변화 검토:

D = 일정 (문제 조건)
δ = 일정 (흑연 반지름 R 불변, 유동 조건 불변)
R = 일정 (가스화 반응에 의한 부피 변화 없음)
y_{O_2,∞} = 일정 (공기 조성 N_2 + O_2 고정, 몰분율 불변)

② c_total의 변화:
이상기체 법칙에서 $c_{total} = \frac{P}{RT}$이므로 T 일정, P → 2P이면 c_{total}이 2배가 된다.
(문제의 "전체 몰농도 일정" 조건은 필름 내 공간적 균일성을 가정한 것으로, 압력 변화 후 새로운 c_{total}에 대해 다시 적용됨.)

③ O_2 농도 변화:
$c_{O_2,\infty} = c_{total} \times y_{O_2,\infty}$
c_total이 2배, y_{O_2,∞}는 불변 → $c_{O_2,\infty}$가 2배 증가

④ 플럭스 변화:
$N_{O_2} \propto D \times c_{O_2,\infty}$
D = 불변, $c_{O_2,\infty}$ = 2배 → N_{O_2}가 2배 증가

CO_2 생성 속도도 2배 증가.

NoteBase

선지 판단

① 2배 감소한다. → 틀림. 압력 증가 시 O_2 몰농도가 증가하므로 확산 구동력이 증가하고, D가 일정이면 플럭스는 증가한다.
② 2배 증가한다. → 옳음. 압력 2배 → c_total 2배 → c_{O_2,∞} 2배 → N_{O_2} 2배 → CO_2 생성 속도 2배.
③ 4배 감소한다. → 틀림. 생성 속도가 감소할 물리적 근거가 없다.
④ 4배 증가한다. → 틀림. D가 일정 조건에서 압력 2배는 구동력(농도)만 2배 증가시키므로 4배가 아닌 2배 증가다.

오답 포인트

가장 흔한 오류는 D와 c_total이 "모두 일정"이라는 조건을 글자 그대로 받아들여 "아무것도 안 변한다"고 결론 내리는 것이다. 이 조건은 필름 내 공간적 균일성 가정이며, 압력 변화에 따른 c_total의 실질적 증가(이상기체 법칙)는 별도로 반영해야 한다.
④번 오류(4배 증가)는 D도 압력 의존성 없이 일정이면서 c_total도 2배 변한다는 가정에 추가로 잘못된 인자를 하나 더 넣은 계산 오류이다.

다시 나오면 이렇게 판단

"확산계수 일정" + "압력 증가" 조건이 동시에 주어지면: D 일정이지만 이상기체 법칙에 의해 c_total ∝ P → 농도 구동력이 압력에 비례해 증가 → 플럭스는 압력에 비례 증가. 원통형 기하학의 ln 항은 R과 δ가 모두 불변이므로 이 경우 변화 없이 분모에 상수로 존재한다. 결론: CO_2 생성 속도는 압력에 정비례한다.

암기 포인트

기체 이진 확산에서 D × c_total(= D × P/RT)은 압력에 무관하게 일정하다(D ∝ 1/P, c_total ∝ P). 그러나 D를 강제로 일정하게 두는 조건에서는 c_total ∝ P가 그대로 남아 확산 플럭스가 압력에 비례한다. 표면 반응으로 표면 농도 = 0이면, 구동력 = c_{A,∞} - 0 = c_{A,∞}이며 이것만 압력 의존성을 갖는다.

NoteBase

문 13. 유체의 흐름에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

① 평판이 유체의 흐름에 직각으로 있을 경우에는 판의 뒷부분에 와류(vortex)가 형성되며, 유체의 압력 손실이 커지게 된다.

② 열전달이나 혼합을 촉진하고자 하는 경우에는 경계층의 분리가 바람직한 경우도 있다.

③ 평판에 평행하게 흐르는 유체의 경우에는 Reynolds 수 $10^5 \sim 10^6$ 정도에서 난류의 발생이 시작한다.

④ 난류가 관 안에서 임계유속 이상일 때, 완전발달흐름에 도달하는 전이길이는 Reynolds 수에 선형적으로 비례한다.

정답 4번

출제 포인트

유체의 흐름 유형(외부 평판 유동 vs. 관 내부 유동)에 따른 난류 천이 Reynolds 수, 전이길이(entry length) 공식, 경계층 분리의 역할을 구분할 수 있는지를 묻는다.

핵심 개념

① 블러프 바디(bluff body): 흐름에 직각으로 놓인 물체 뒤에는 박리와 와류(vortex)가 형성되어 압력항력과 압력손실이 크게 증가한다.
② 경계층 분리(boundary layer separation): 일반적으로는 비효율적이지만, 열교환기의 촉진 목적(corrugated 핀, 핀 후방 와류)처럼 열전달·혼합을 촉진하기 위해 의도적으로 유발하는 경우도 있다.
③ 평판 외부 유동 난류 천이 Reynolds 수: Re_cr $\approx 5\times10^5$ (통상 5×10^5 ~ 10^6 범위를 임계 구간으로 본다).
④ 관 내부 유동 전이길이(hydrodynamic entry length): 층류에서는 $L_h \approx 0.05 \cdot Re \cdot D$로 Re에 선형 비례하지만, 난류에서는 $L_h \approx 4.4 \cdot Re^{1/6} \cdot D$로 Re의 1/6승에 의존하며, 실용적으로는 10D ~ 60D 수준의 상수로 취급한다. 난류 전이길이는 Re에 선형적으로 비례하지 않는다.

선지별 해설

① (O) 평판이 유체 흐름에 직각으로 놓이면 판 뒤편에 유동 박리와 와류(vortex)가 형성되고, 압력항력이 크게 발생하므로 압력손실이 커진다. 옳은 설명이다.
② (O) 경계층 분리는 일반적으로 손실을 유발하지만, 열전달 촉진이나 혼합 강화가 목적인 장치(촉진형 열교환기, 핀 주변 와류 등)에서는 오히려 바람직하다. 옳은 설명이다.
③ (O) 평판 위 외부 유동에서 난류 천이는 Re $\approx 5\times10^5$ 부근에서 시작되며, 표면 거칠기와 입구 교란에 따라 10^5~10^6 범위에서 발생할 수 있다고 본다. 교과서 기준 내의 설명이다.
④ (X) 난류가 관 내에서 임계유속(임계 Reynolds 수) 이상일 때 완전발달 흐름에 도달하는 전이길이는 Re에 선형적으로 비례하지 않는다. 층류 전이길이 $L_h \approx 0.05 \cdot Re \cdot D$는 Re에 선형 비례하지만, 난류 전이길이는 $L_h \approx 4.4 \cdot Re^{1/6} \cdot D$로 Re의 1/6승에 비례하며 실용적으로는 지름의 10~60배 상수로 취급한다. '선형적으로 비례한다'는 표현이 틀렸다.

NoteBase

오답 포인트

층류와 난류의 전이길이 공식을 혼동하는 것이 핵심 함정이다. 층류: $L_h \approx 0.05 \cdot Re \cdot D$ (Re에 선형 비례) → 난류: $L_h \approx 4.4 \cdot Re^{1/6} \cdot D$ (선형 비례 아님). ④번은 난류에 층류 공식의 성질을 잘못 적용했다.

다시 나오면 이렇게 판단

'전이길이가 Re에 선형 비례'라는 문장이 보이면, 층류 유동 공식의 특성이므로 난류 유동에는 성립하지 않는다고 즉시 판정한다. 반대로 층류 관 유동 전이길이를 묻는다면 선형 비례가 옳다.

암기 포인트

층류 전이길이: $L_{h,\,lam} \approx 0.05 \cdot Re \cdot D$ → Re 선형 비례. 난류 전이길이: $L_{h,\,turb} \approx 4.4 \cdot Re^{1/6} \cdot D \approx$ 10D~60D → Re와 거의 무관(상수 취급). 평판 외부 유동 난류 천이 Re: 약 5×10^5.

NoteBase

문 14. 구형의 고체 A가 교반 탱크에서 물에 용해된다. 용해 과정에서 Sherwood 수는 4로 일정하다고 할 때, 직경이 2mm인 A의 완전 용해까지 걸리는 시간이 20초라면, 직경이 4mm인 A의 완전 용해까지 걸리는 최소 시간[초]은? (단, 용해 과정 중 반응은 없으며, 고체 A의 표면에서의 농도, 확산계수, 밀도가 항상 일정하고, 고체 A의 표면에서부터 충분히 멀리 떨어진 위치에서 A의 농도는 0으로 가정한다.)

① 40

② 60

③ 80

④ 160

정답 3번

출제 포인트

Sherwood 수가 일정하게 주어진 조건에서 구형 고체가 완전 용해될 때까지 걸리는 시간이 초기 직경의 제곱에 비례함을 유도하는 문제다.

조건 정리

- 구형 고체 A가 교반 탱크에서 용해됨
- Sherwood 수 Sh = 4 (일정)
- 표면 농도, 확산계수, 밀도 일정
- 고체 표면에서 충분히 먼 위치의 농도 = 0 (최대 농도 차 유지)
- 직경 2mm → 완전 용해 시간 = 20초
- 직경 4mm → 완전 용해 최소 시간 = ?

사용할 공식

Sherwood 수 정의: $\mathrm{Sh} = \frac{k_c \cdot d}{D} = 4$ 이므로 $k_c = \frac{4D}{d} = \frac{2D}{r}$

구형 고체의 질량 균형(단위 면적 기준):
$\rho \frac{dr}{dt} = -k_c \cdot C_s = -\frac{2D \cdot C_s}{r}$

정리하면: $\rho \cdot r dr = -2DC_s dt$

NoteBase

계산 과정

양변을 r_0에서 0까지, t에 대해 0에서 t_f까지 적분한다.

$$\rho \int_{r_0}^{0} r dr = -2DC_s \int_0^{t_f} dt$$

$$-\frac{\rho r_0^2}{2} = -2DC_s t_f$$

$$t_f = \frac{\rho r_0^2}{4DC_s} \propto r_0^2 \propto d_0^2$$

완전 용해 시간은 초기 직경의 제곱에 비례한다.

직경 2mm일 때 20초이므로, 직경 4mm일 때:

t_f = 20 × ≤ft((4)/(2))^2 = 20 × 4 = 80 초

선지 판단

① 40초 — 직경이 2배이면 시간이 2배(40초)라고 잘못 생각한 경우. k_c 자체가 직경에 반비례하므로 단순 비례가 아니라 제곱 비례임. 오답.
② 60초 — 중간값으로 오인한 경우. 계산 근거 없음. 오답.
③ 80초 — $t \propto d^2$에 따라 20 × 4 = 80초. 정답.
④ 160초 — 직경이 2배이면 시간이 8배(160초)라고 오산한 경우. 체적 비례(세제곱)와 혼동한 오류. 오답.

오답 포인트

Sh = 4(일정)이라도 k_c = Sh · D/d 이므로 직경이 커지면 k_c는 작아진다. 단위 면적당 플럭스는 k_c · ΔC인데 k_c가 r에 반비례하기 때문에, 최종적으로 $t \propto d^2$가 된다. 체적(d^3)이나 직경(d^1)에 비례한다고 착각하면 틀린다.

다시 나오면 이렇게 판단

Sh가 상수로 주어진 구형 용해 문제 → k_c = Sh · D/d (직경 반비례) → 질량 균형 세우면 r dr = const · dt → 적분하면 t ∝ r_0^2 ∝ d_0^2. 조건만 확인하고 비례 관계를 빠르게 도출한다.

암기 포인트

Sh 일정 · 구형 고체 용해 → 완전 용해 시간 $t \propto d_0^2$. 직경 2배 → 시간 4배. (Sh가 상수가 아닌 경우에는 별도 계산 필요.)

NoteBase

문 15. 공기는 이상기체이고 평균 분자량은 $30\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$이다. 해수면에서의 기압은 $1\,\mathrm{atm}$이고 기온은 고도와 상관없이 $300\,\mathrm{K}$으로 일정하다. 중력가속도(g)는 $10\,\mathrm{m\,s^{-2}}$, 기체 상수(R)는 $8\,\mathrm{J\,K^{-1}\,mol^{-1}}$, 자연로그의 밑($e$)은 2.5로 가정할 때, 해발 $8{,}000\,\mathrm{m}$인 산 정상에서의 기압[atm]은?

① 0.2

② 0.4

③ 0.6

④ 0.8

정답 2번

출제 포인트

등온 대기 모델에서 기압이 고도에 따라 지수적으로 감소함을 이해하고, 주어진 수치(M, g, h, R, T, e 근사값)를 공식에 대입해 산 정상 기압을 계산하는 문제다.

조건 정리

평균 분자량 M = 30 g mol^{-1} = 0.030 kg mol^{-1}, 해수면 기압 P_0 = 1 atm, 기온 T = 300 K (고도 무관),
중력가속도 g = 10m s^{-2}, 기체 상수 R = 8 J K^{-1} mol^{-1}, 자연로그의 밑 e = 2.5 (문제 가정), 고도 h = 8,000m.

사용할 공식

등온 대기 압력-고도 관계식: $P = P_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right)$

계산 과정

지수 계산: $\frac{Mgh}{RT} = \frac{0.030 \times 10 \times 8000}{8 \times 300} = \frac{2400}{2400} = 1$
따라서 $P = 1 \times e^{-1} = \frac{1}{e}$.
문제 조건에서 e = 2.5이므로 $P = \frac{1}{2.5} = 0.4$ atm.

선지 판단

① 0.2 — 오답. e = 5로 두어야 나오는 값. 문제에서 e = 2.5로 가정했으므로 틀렸다.
② 0.4 — 정답. 1/2.5 = 0.4, 계산과 정확히 일치한다.
③ 0.6 — 오답. 어떤 수치 조합으로도 도출되지 않는다.
④ 0.8 — 오답. e ≈ 1.25 수준에서 나오는 값으로 근거 없다.

NoteBase

오답 포인트

M 단위를 g mol^{-1} 그대로 쓰면 지수가 100배 커져 P ≈ 0이 된다. 반드시 kg mol^{-1}(= 0.030)으로 환산한 뒤 대입해야 한다. 또한 문제가 'e = 2.5'를 명시했으므로 자연상수 e ≈ 2.718 대신 2.5를 써야 한다. e를 2.718로 쓰면 0.368이 나와 선지에 없는 값이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

고도-기압 계산 문제에서 ①M은 kg mol^{-1}으로 환산, ②지수 Mgh/RT를 먼저 계산해 값을 확인(정수·반정수가 나오면 출제 의도), ③문제가 e 값을 별도 제시하면 그 값을 그대로 사용한다. 지수=1이면 P = P_0/e 한 번 나눗셈으로 끝난다.

암기 포인트

등온 대기 압력 공식 $P = P_0 e^{-Mgh/RT}$. 지수 인자 Mgh/RT의 분자 단위를 통일(M은 kg mol^{-1}, g는 m s^{-2}, h는 m → J mol^{-1}; R 단위 J K^{-1} mol^{-1}, T는 K)하면 무차원수가 된다.

NoteBase

문 16. 지름이 15.6cm인 실린더 안에 지름이 15cm인 수직 실린더를 중심이 같게 설치한다. 이 두 실린더 사이에 점도가 $0.2\text{Pa}\cdot\text{s}$인 기름을 채운다. 바깥쪽 실린더를 고정한 상태에서 안쪽 실린더를 120rpm으로 회전시킬 경우, 바깥쪽 실린더에서의 전단응력$[\text{N m}^{-2}]$은? (단, 기름은 비압축성 뉴튼 유체이고, 흐름은 등온, 정상상태, 완전 발달층류이다. 원주율(π)은 3으로 가정한다.)

① 20

② 40

③ 60

④ 80

정답 3번

출제 포인트

동심 실린더(Couette 흐름)에서 좁은 간격 근사를 이용해 전단응력을 계산하는 문제이다. 안쪽 실린더만 회전하고 바깥쪽 실린더는 고정된 경우, 간격이 충분히 좁으면 속도 분포를 선형으로 근사하여 전단속도를 구할 수 있다.

조건 정리

바깥쪽 실린더 반지름 $R_2 = 15.6/2 = 7.8\,\text{cm} = 0.078\text{m}$
안쪽 실린더 반지름 $R_1 = 15/2 = 7.5\,\text{cm} = 0.075\text{m}$
간격 $\delta = R_2 - R_1 = 0.003\,\text{m}$
점도 $\mu = 0.2\,\text{Pa}\cdot\text{s}$
안쪽 실린더 회전속도 $N = 120\,\text{rpm}$
$\pi = 3$ (문제 조건)

사용할 공식

각속도: $\omega = \frac{2\pi N}{60}$
안쪽 실린더 선속도(벽면): $v_1 = \omega R_1$
좁은 간격 근사 전단속도: $\dot{\gamma} = \frac{v_1}{\delta} = \frac{v_1}{R_2 - R_1}$
뉴턴 유체 전단응력: $\tau = \mu\dot{\gamma}$

NoteBase

계산 과정

① 각속도 계산

$\omega = \frac{2 \times 3 \times 120}{60} = \frac{720}{60} = 12$ rad/s

② 안쪽 실린더 표면 선속도

$v_1 = \omega R_1 = 12 \times 0.075 = 0.9$ m/s

③ 전단속도 (바깥쪽 벽면 속도 = 0이므로 속도차 = 0.9m/s)

$\dot{\gamma} = \frac{0.9}{0.003} = 300$ s^{-1}

④ 전단응력

$\tau = 0.2 \times 300 = 60$ N m^{-2}

선지 판단

① 20 N m^{-2} → 오답. 전단응력 60의 1/3 수준으로, 간격이나 각속도를 잘못 대입하면 나올 수 있는 값이다.
② 40 N m^{-2} → 오답.
③ 60 N m^{-2} → 정답. 위 계산 결과와 일치한다.
④ 80 N m^{-2} → 오답.

오답 포인트

① rpm을 rad/s로 변환할 때 π = 3을 반드시 쓴다. π ≈ 3.14를 쓰면 값이 달라진다.
② 지름을 반지름으로 변환하지 않고 지름 15.6, 15를 그대로 대입하면 전단속도가 두 배가 되어 틀린다.
③ 간격 δ는 두 반지름의 차 0.003m이다. 지름 차(0.006m)를 쓰면 절반값이 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

동심 실린더 문제에서 간격 δ가 내경 대비 작으면(여기서는 0.003/0.075 = 4%) 선형 근사를 쓴다. rpm → rad/s → 선속도 → 전단속도 → 전단응력 순서로 계산하면 된다. π 값은 반드시 문제 조건값을 쓴다.

암기 포인트

Couette 좁은 간격 근사: $\tau = \mu \frac{\omega R_1}{R_2 - R_1}$
각속도 변환: $\omega[\text{rad/s}] = \frac{2\pi N[\text{rpm}]}{60}$

NoteBase

문 17. 상온의 유체가 고온으로 유지되고 있는 길이가 1m이고 폭이 0.2m인 평판 위를 판의 길이 방향으로 평행하게 흐르고 있다. 평판의 선단(leading edge)으로부터 임의의 길이 x에서의 국부 Nusselt 수(Nu_x)는 <보기>와 같이 Prandtl 수(Pr)와 국부 Reynolds 수(Re_x)로 표현될 때, 평판 전체에 대한 평균 대류열전달계수(h)[$Wm^{-2}\circ C^{-1}$]는? (단, 유체의 자유 흐름속도는 $0.1ms^{-1}$, 열전도도(k)는 $0.1Wm^{-1}\circ C^{-1}$, 동점도(ν)는 $0.1\times10^{-4}m^2s^{-1}$, Pr는 1.0으로 가정한다.)

<보기>

$Nu_x = 0.3Pr^{1/3}Re_x^{1/2}$

① 3

② 6

③ 15

④ 30

정답 2번

출제 포인트

국부 Nusselt 수 상관식이 주어졌을 때, 평판 전체에 대한 평균 대류열전달계수를 적분으로 구하는 문제이다. 핵심은 로컬 h_x를 x에 대해 적분한 뒤 평판 길이로 나누어 평균값을 얻는 과정이다.

조건 정리

평판 길이 L=1m, 자유흐름속도 U∞=0.1m/s, 열전도도 k=0.1 $Wm^{-1}\circ C^{-1}$, 동점도 v=$0.1\times10^{-4}m^2/s=1\times10^{-5}m^2/s$, Pr=1.0, 국부 Nusselt 수: $Nu_x = 0.3Pr^{1/3}Re_x^{1/2}$

사용할 공식

평균 열전달계수: $\bar{h} = \frac{1}{L}\int_0^L h_x dx$

로컬 열전달계수: $h_x = \frac{kNu_x}{x}$

Reynolds 수: $Re_x = \frac{U_\infty x}{\nu}$, $Re_L = \frac{U_\infty L}{\nu}$

NoteBase

계산 과정

① Re_L 계산: $\mathrm{Re}_L = \frac{0.1 \times 1}{1 \times 10^{-5}} = 10^4$, $\mathrm{Re}_L^{1/2} = 100$

② 로컬 열전달계수 표현: $\mathrm{Re}_x^{1/2} = \left(\frac{U_\infty}{\nu}\right)^{1/2} x^{1/2}$이므로
$h_x = \frac{k}{x} \cdot 0.3\mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \left(\frac{U_\infty}{\nu}\right)^{1/2} x^{1/2} = k \cdot 0.3\mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \left(\frac{U_\infty}{\nu}\right)^{1/2} x^{-1/2}$

③ 평균 열전달계수 적분:
$\bar{h} = \frac{k \cdot 0.3\mathrm{Pr}^{1/3}}{L} \cdot \left(\frac{U_\infty}{\nu}\right)^{1/2} \int_0^L x^{-1/2} dx = \frac{k \cdot 0.3\mathrm{Pr}^{1/3}}{L} \cdot \left(\frac{U_\infty}{\nu}\right)^{1/2} \cdot 2L^{1/2}$
$= 2k \cdot 0.3\mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \left(\frac{U_\infty}{\nu L}\right)^{1/2} = 0.6k\mathrm{Pr}^{1/3} \frac{\mathrm{Re}_L^{1/2}}{L}$

④ 수치 대입(Pr=1.0이므로 Pr^(1/3)=1):
$\bar{h} = 0.6 \times 0.1 \times 1 \times \frac{100}{1} = 6\mathrm{W\ m^{-2}{}^\circ C^{-1}}$

선지 판단

① 3 — 오답. 0.3×k×Re_L^(1/2)/L = 0.3×0.1×100 = 3으로, 적분 없이 국부 상관식 계수 0.3을 그대로 쓴 값이다.
② 6 — 정답. 위 계산 결과 $\bar{h} = 6\mathrm{W\ m^{-2}{}^\circ C^{-1}}$.
③ 15 — 오답. 평판 끝의 국부 Nusselt 수 Nu_L=0.3×Re_L^(1/2)=30을 구한 뒤, 적분 인수를 2배(∫_0^L x^-1/2dx = 2 L)가 아니라 1/2배로 거꾸로 적용해 30×0.5=15가 나온 값이다.
④ 30 — 오답. 평판 끝의 국부 Nusselt 수 Nu_L = 0.3×Re_L^(1/2) = 0.3×100 = 30 자체를 답으로 쓴 값이다. $\bar{h} = k\mathrm{Nu}/L$ 변환(여기서 k/L=0.1배)과 적분 모두 누락했다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 평균 Nu를 구할 때 국부 상관식의 계수(0.3)를 그대로 쓰는 것이다(①번 선택 유도). 로컬 h_x를 적분하면 계수가 두 배(0.6)가 된다는 점을 반드시 확인해야 한다. 적분 $\int_0^L x^{-1/2} dx = 2\sqrt{L}$ 결과가 계수를 두 배로 만든다.

다시 나오면 이렇게 판단

Nu_x = C · Pr^a · Re_x^n 형태의 국부 상관식이 주어지면, 평균 h는 항상 로컬 h_x를 적분해서 구한다.
x^(n-1)을 적분하면 x^n/n이 되므로 평균 계수 = C/(n)이 아니라 C · n/(n)=C로 착각하기 쉬우나,
$\int_0^L x^{n-1} dx = L^n/n$임을 이용하면 평균 계수 = C/n×(1/n) 형태가 아니라 n이 지수에 붙은 채로 계산해야 한다.
Re_x^(1/2)의 경우 n=1/2이므로 적분 후 계수 = 0.3/(1/2) = 0.6이 된다는 공식을 기억한다.

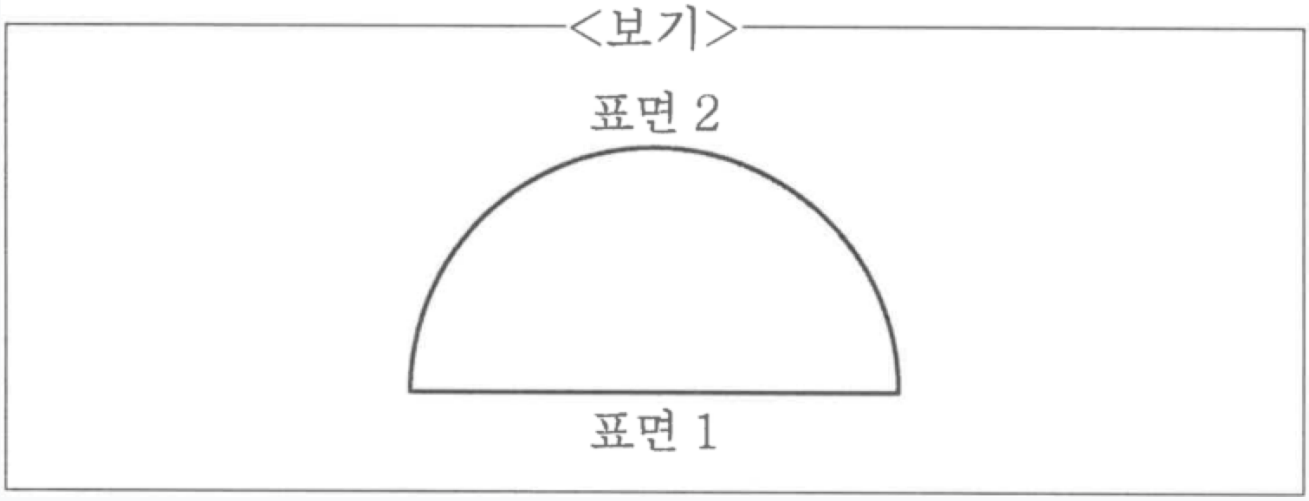
암기 포인트

국부 상관식이 $\mathrm{Nu}_x = C\mathrm{Re}_x^{1/2}$ 꼴이면 평판 평균은 $\overline{\mathrm{Nu}_L} = 2C\mathrm{Re}_L^{1/2}$로, 계수가 정확히 2배가 된다. 이 2배는 $\int_0^L x^{-1/2}dx = 2\sqrt{L}$에서 나온다. 이 문제에서 C=0.3(Pr=1.0), Re_L^(1/2)=100이므로 $\overline{\mathrm{Nu}_L} = 0.6 \times 100 = 60$, $\bar{h} = k\overline{\mathrm{Nu}_L}/L = 0.1 \times 60/1 = 6$. 마지막에 반드시 $\bar{h} = k\overline{\mathrm{Nu}_L}/L$로 h로 환산해야 하며(Nu를 그대로 답하면 ④ 30), 계수 2배를 빼먹으면 ①, 거꾸로 1/2배 하면 ③이 나온다.

NoteBase

문 18. <보기>와 같은 내경이 10cm인 반원의 단면을 가진 도관에 대한 무차원 보기인자(view factor) F_{22}는? (단, 도관이 매우 길기 때문에 양끝의 효과는 무시하고, 원주율(π)은 3으로 가정한다. F_{ij} =표면 i를 출발하여 표면 j에 도달하는 에너지 비율)

<보기>



① 0

② 1/3

③ 2/3

④ 1

정답 2번

출제 포인트

반원 단면 도관에서 평면(표면 1)과 반원 곡면(표면 2) 사이의 형태계수(view factor)를 상호성 법칙과 합산 법칙으로 구하는 문제다. 핵심은 평면의 자기 형태계수가 0이라는 점과 $\pi = 3$이라는 조건을 이용해 면적비를 정확히 계산하는 것이다.

조건 정리

내경 D=10cm인 반원 단면 도관. 도관이 매우 길므로 양끝 효과 무시(2차원 문제로 취급). 원주율 $\pi = 3$. 표면 1 = 지름 방향 평면(폭 = D = 10cm). 표면 2 = 반원 곡면(호 길이 = $\pi D/2$).

사용할 공식

합산 법칙: $\sum_j F_{ij} = 1$ (각 표면에서 출발하는 모든 형태계수의 합은 1). 상호성 법칙: $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$. 평면의 자기 형태계수: $F_{11} = 0$ (평면은 자기 자신을 볼 수 없다).

NoteBase

계산 과정

단위 길이당 면적을 구한다.
$A_1 = D = 10\ \text{cm}, A_2 = \frac{\pi D}{2} = \frac{3 \times 10}{2} = 15\ \text{cm}.$

표면 1에 합산 법칙 적용: $F_{11} + F_{12} = 1$. 표면 1은 평면이므로 $F_{11} = 0$, 따라서 $F_{12} = 1$.

상호성 법칙으로 F_{21} 계산: $A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \rightarrow F_{21} = \frac{A_1 F_{12}}{A_2} = \frac{10 \times 1}{15} = \frac{2}{3}$.

표면 2에 합산 법칙 적용: $F_{21} + F_{22} = 1 \rightarrow F_{22} = 1 - \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$.

선지 판단

① 0 → 틀림. 반원 곡면은 오목면이므로 자기 자신을 볼 수 있어 $F_{22} > 0$이다.
② 1/3 → 맞음. 위 계산 결과 $F_{22} = \frac{1}{3}$.
③ 2/3 → 틀림. 이 값은 F_{21}(곡면→평면)이지 F_{22}가 아니다. F_{22}와 F_{21}을 혼동한 오답이다.
④ 1 → 틀림. 표면 2가 완전히 닫힌 오목면일 때만 $F_{22} = 1$이 될 수 있고, 반원처럼 평면과 공유 면적이 있으면 성립하지 않는다.

오답 포인트

③ 2/3을 고르는 실수가 가장 흔하다. $F_{21} = 2/3$은 맞는 값이지만, 문제가 묻는 것은 F_{22}다. 상호성으로 구한 값을 그대로 답으로 쓰면 안 되고, 반드시 합산 법칙을 한 번 더 적용해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

폐합된 n개 표면 문제에서 어떤 표면의 자기 형태계수가 필요하면 순서를 따른다: (1) 알기 쉬운 표면부터 합산 법칙과 평면·볼록면 자기계수=0 조건으로 F_{12} 확정 → (2) 상호성으로 F_{21} 계산 → (3) 합산 법칙으로 F_{22} 도출. π값을 명시한 경우 반드시 그 수치를 대입해 면적비를 계산한다.

암기 포인트

반원 단면 도관 형태계수 공식: $F_{22} = 1 - \frac{D}{\pi D/2} = 1 - \frac{2}{\pi}$. $\pi = 3$이면 $F_{22} = 1 - \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$. 평면(볼록면)은 항상 $F_{11} = 0$이어서 $F_{12} = 1$부터 출발할 수 있음을 기억한다.

NoteBase

문 19. 향류(counter flow) 이중관 열교환기에서 기름이 $20^\circ C$로 들어가는 냉각수에 의해 $90^\circ C$에서 $40^\circ C$까지 냉각된다. 기름과 냉각수의 질량 유량은 같다. 총괄 열전달계수 (U)는 $500 W m^{-2} {}^\circ C^{-1}$이고, 관의 열저항은 무시할 때, 열교환기의 단위 면적당 열전달 속도[$W m^{-2}$]는? (단, 열교환기는 열손실이 없는 정상상태로 운전되고, 기름의 비열은 $0.8 J g^{-1} {}^\circ C^{-1}$, 냉각수의 비열은 $4 J g^{-1} {}^\circ C^{-1}$이며, $\ln 2 = 0.7$, $\ln 3 = 1$, $\ln 7 = 2$로 계산한다.)

① 10,000

② 15,000

③ 20,000

④ 22,500

정답 3번

출제 포인트

향류(counter flow) 이중관 열교환기에서 에너지 균형으로 냉각수 출구 온도를 구한 뒤,
대수평균온도차(LMTD)를 계산하고 단위 면적당 열전달 속도 $q/A = U \cdot \Delta T_{lm}$를 구하는 문항이다.

조건 정리

향류 배치. 기름: 90°C 유입 → 40°C 유출. 냉각수: 20°C 유입(출구 온도 미지). 기름과 냉각수의 질량 유량(☒) 동일. 총괄 열전달계수 U = 500 W m^{-2} $°C^{-1}$. 관 열저항 무시. 비열: 기름 0.8 J g^{-1} $°C^{-1}$, 냉각수 4 J g^{-1} $°C^{-1}$. ln2 = 0.7, ln3 = 1, ln7 = 2.

사용할 공식

에너지 균형: $\dot{m} c_{oil} \Delta T_{oil} = \dot{m} c_{water} \Delta T_{water}$
대수평균온도차(LMTD): $\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$
단위 면적당 열전달 속도: $q/A = U \cdot \Delta T_{lm}$

NoteBase

계산 과정

[1단계] 냉각수 출구 온도 구하기
질량 유량이 같으므로 ☒이 약분된다.
0.8 × (90 − 40) = 4 × (T_w,out − 20)
0.8 × 50 = 40 = 4 × (T_w,out − 20)
T_w,out − 20 = 10 → T_w,out = 30°C

[2단계] 향류 양단 온도차
향류이므로 기름 유입 측에서 냉각수가 유출된다.
$\Delta T_1 = 90 - 30 = 60°C$ (기름 입구 ↔ 냉각수 출구)
$\Delta T_2 = 40 - 20 = 20°C$ (기름 출구 ↔ 냉각수 입구)

[3단계] LMTD
$\Delta T_{lm} = \frac{60-20}{\ln(60/20)} = \frac{40}{\ln 3} = \frac{40}{1} = 40°C$

[4단계] 단위 면적당 열전달 속도
$q/A = U \cdot \Delta T_{lm} = 500 \times 40 = 20{,}000\ W\ m^{-2}$

선지 판단

① 10,000 W m^{-2} — 오답. LMTD를 20°C로만 잡거나 U를 500이 아닌 값으로 계산했을 때 나오는 값.
② 15,000 W m^{-2} — 오답. 계산 과정 중 온도차를 잘못 설정할 때 나오는 값.
③ 20,000 W m^{-2} — 정답. LMTD = 40°C, U × LMTD = 500 × 40 = 20,000 W m^{-2}.
④ 22,500 W m^{-2} — 오답. 냉각수 출구 온도를 잘못 계산하거나 병류(parallel flow)로 착각할 때 나오는 값.

오답 포인트

가장 흔한 실수 두 가지: (1) 향류 배치에서 양단 온도차를 잘못 짝지어 ΔT_1=70°C, ΔT_2=20°C 등으로 계산하는 것 — 향류는 '기름 입구 ↔ 냉각수 출구', '기름 출구 ↔ 냉각수 입구'로 짝짓는다. (2) 에너지 균형에서 비열 차이(0.8 vs 4)를 무시하고 냉각수 온도 상승을 50°C로 잡아 T_w,out = 70°C로 계산하는 것 — 비열이 5배 크므로 온도 상승은 1/5인 10°C뿐이다.

다시 나오면 이렇게 판단

향류 열교환기 문제는 ① 에너지 균형으로 출구 온도 확정 → ② 향류 양단 온도차 짝짓기(핫 입구↔콜드 출구, 핫 출구↔콜드 입구) → ③ LMTD = ($\Delta T_1 - \Delta T_2$) / ln($\Delta T_1/\Delta T_2$) → ④ q/A = U × LMTD 순서로 풀면 된다. ln 값이 주어진 문항은 의도적으로 깔끔한 비율(여기서는 60/20 = 3)이 나오도록 설계되어 있으므로 그 비율이 나오도록 온도 짝짓기가 맞는지 먼저 확인한다.

NoteBase

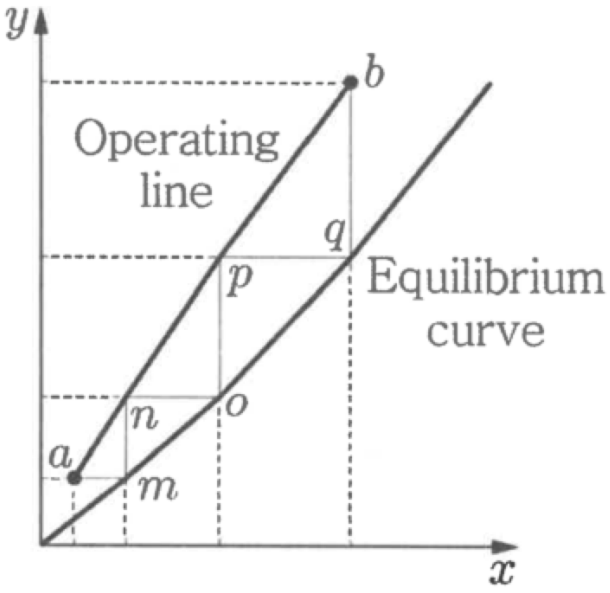
암기 포인트

향류(counter flow): 두 유체가 반대 방향 흐름. 양단 온도차 짝짓기 — ΔT_1(뜨거운 유체 입구 쪽) = T_h,in − T_c,out, ΔT_2(뜨거운 유체 출구 쪽) = T_h,out − T_c,in.
LMTD = $(\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1/\Delta T_2)$. 두 온도차가 같으면 LMTD = ΔT(산술평균과 일치).
q/A = U × LMTD (관 열저항 무시 시).

NoteBase

문 20. <보기>는 전형적인 기체 흡수탑에 대한 조작선(operating line)과 평형 곡선(equilibrium curve)이다. McCabe-Thiele 법을 이용해 조작선과 평형 곡선으로부터 흡수탑의 이상단 수를 도식적으로 구할 수 있을 때, 맨 윗단, 즉 첫 번째 이상단을 나가는 액상 및 기상 몰분율(x_1, y_1)의 위치는? (단, x, y는 액상 및 기상 몰분율이고, 기체는 탑 하부에서, 액체는 탑 상부에서 공급된다.)

<보기>



① p

② o

③ n

④ m

정답 4번

출제 포인트

McCabe-Thiele 법을 이용한 흡수탑 이상단 수 도식법에서 각 계단의 꼭짓점(이상단 출구 조건)이 그래프 위 어느 점에 해당하는지를 묻는 문제다. 단 번호를 탑 하부 기체 입구 쪽부터 1단으로 매기는 관례를 사용하면, 첫 번째 이상단의 출구 조건은 탑 하부에서 작도한 첫 번째 계단의 평형 곡선 교점(m)이다.

NoteBase

조건 정리

기체: 탑 하부 공급(조성 낮은 쪽 y). 액체: 탑 상부 공급(조성 낮은 쪽 x). 조작선(Operating line)은 직선이고 점 a(탑 하부 초기 조건)와 점 b(탑 상부 조건)를 잇는다. 평형 곡선(Equilibrium curve)은 조작선의 오른쪽(흡수 가능 구동력 방향)에 위치한다. 그래프 위 점 배치는 탑 하부에서 가까운 순으로 a — m(평형) — n(조작선) — o(평형) — p(조작선) — q(평형) — b 순이다.

사용할 공식

이상단(theoretical stage) 조건: 단을 나가는 액상 조성 x_N과 기상 조성 y_N은 평형 관계를 만족하므로, 해당 점은 평형 곡선(Equilibrium curve) 위에 위치한다. 물질수지(조작선)는 단과 단 사이 스트림 조건을 연결한다.

계산 과정

McCabe-Thiele 계단 작도를 탑 하부 초기 조건 점 a에서 시작한다.

1단계(첫 번째 이상단): a에서 수평으로 이동 → 평형 곡선과 만나는 점 m. 이 점이 첫 번째 이상단(탑 하부 1단)을 나가는 액상·기상 조성 (x_1, y_1)이다.
다음: m에서 수직으로 조작선 → n. n이 1단과 2단 사이 스트림 조건.

2단계(두 번째 이상단): n에서 수평 → 평형 곡선 교점 o = (x_2, y_2).
수직 → p.

3단계(세 번째 이상단): p에서 수평 → 평형 곡선 교점 q = (x_3, y_3).
이후 b에 도달하면 계단 작도 종료.

따라서 첫 번째 이상단을 나가는 (x_1, y_1)의 위치 = m.

선지 판단

① p — 조작선 위의 점. 이상단 출구가 아니라 단과 단 사이 스트림 조건(물질수지 점)이므로 오답.
② o — 두 번째 이상단 평형 곡선 교점 (x_2, y_2). 첫 번째 이상단이 아니므로 오답.
③ n — 조작선 위의 점. 1단과 2단 사이 스트림 조건이므로 오답.
④ m — 탑 하부 초기 조건 a에서 수평으로 이동하여 평형 곡선과 처음 만나는 점. 첫 번째 이상단을 나가는 (x_1, y_1). 정답.

오답 포인트

조작선 위의 점(n, p)을 이상단 출구로 혼동하지 않는다. 이상단 출구 조건은 반드시 평형 곡선(Equilibrium curve) 위에 있다. 또한 단 번호를 탑 상부에서 매기면 첫 번째 이상단이 q가 되므로 혼동할 수 있다. 이 문제는 탑 하부 기체 입구 쪽을 첫 번째 단으로 삼아 작도를 시작하므로, 탑 하부 쪽 평형 곡선 첫 교점 m이 (x_1, y_1)이다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

McCabe-Thiele 흡수탑 계단 작도 문제가 나오면: ①이상단 출구 = 평형 곡선 위 점, 단 사이 물질수지 = 조작선 위 점임을 먼저 확인한다. ②계단 작도 시작점(탑 하부 a 또는 탑 상부 b)과 단 번호 방향을 문제에서 명시한 대로 확인한다. ③찾는 단 번호에 해당하는 계단이 평형 곡선과 만나는 점의 x·y 좌표가 그 단의 출구 조성 (x_N, y_N)이다.

암기 포인트

이상단 출구 → 평형 곡선(Equilibrium curve) 위. 단 사이 스트림 → 조작선(Operating line) 위. 흡수탑 McCabe-Thiele 계단: 탑 하부 a에서 수평(→평형곡선)·수직(→조작선)을 반복하며 b 방향으로 올라간다. 첫 번째 평형 곡선 교점 = 탑 하부 첫 이상단 출구 조성.

NoteBase