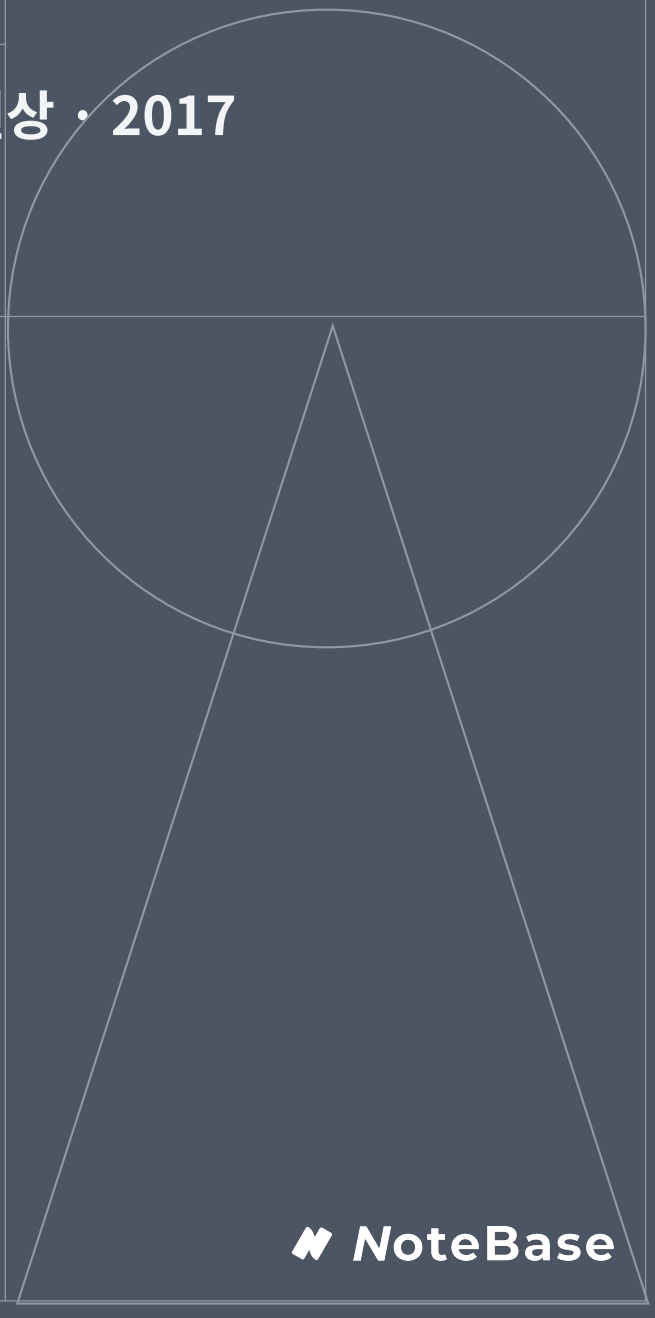
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 전달현상 · 2017



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 전달현상 · 2017

공무원/국가직/7급 · 전달현상 · 2017

문 1. 유체 흐름의 압축성 또는 비압축성 판별에 가장 적합한 무차원수는?

① Reynolds 수

② Mach 수

③ Prandtl 수

④ Euler 수

정답 2번

출제 포인트

유체역학의 주요 무차원수들이 각각 어떤 물리적 효과 사이의 비를 나타내는지 구분하고, 그중 압축성(밀도 변화) 여부를 판별하는 데 쓰이는 수가 무엇인지 고르는 문제이다. 압축성 판별은 유동 속도와 음속의 관계로 결정되므로, 속도를 음속과 비교하는 무차원수가 정답이 된다.

핵심 개념

Mach 수는 $Ma = \frac{V}{c}$로 정의되며, 유동 속도 V와 그 유체 내 음속 c의 비이다. Ma가 커질수록 유동 중 압력 변화에 따른 밀도 변화가 커지므로, 통상 $Ma < 0.3$ 정도이면 비압축성으로, 그 이상이면 압축성 유동으로 취급한다. 즉 압축성·비압축성 판별의 기준 자체가 Mach 수이다.

반면 Reynolds 수 $Re = \frac{\rho V L}{\mu}$는 관성력과 점성력의 비로 층류·난류 판별에 쓰이고, Prandtl 수 $Pr = \frac{c_p \mu}{k}$는 운동량 확산과 열 확산의 비로 속도경계층과 열경계층의 상대적 두께를 나타내며, Euler 수 $Eu = \frac{\Delta p}{\rho V^2}$는 압력차와 관성력의 비로 압력 강하 특성을 나타낸다. 이 세 수는 모두 압축성 여부와 직접 관련이 없다.

선지별 해설

① Reynolds 수 → X. 관성력과 점성력의 비로 층류와 난류를 구분하는 지표이며, 압축성 판별과는 관련이 없다.

② Mach 수 → O. 유동 속도와 음속의 비로, 이 값의 크기에 따라 유동을 압축성 또는 비압축성으로 분류하는 기준이 되는 무차원수이다.

③ Prandtl 수 → X. 유체의 운동량 확산도(동점성계수)와 열 확산도의 비로, 속도경계층과 열경계층 두께의 상대적 관계를 나타낼 뿐 압축성과는 무관하다.

④ Euler 수 → X. 압력차와 관성력(동압)의 비로, 유동에서 압력 강하 정도를 나타내는 지표이며 압축성 판별과는 관련이 없다.

NoteBase

오답 포인트

Reynolds 수를 '유동의 성질을 대표하는 수'라는 인상만으로 압축성 판별과 혼동하기 쉬운데, Reynolds 수는 층류·난류 판별용이다. Prandtl 수는 이름에 '수'가 붙어 있어 속도 관련 수로 오인하기 쉬우나 실제로는 열전달과 관련된 무차원수이다. Euler 수 역시 압력 관련 수라는 점에서 압축성과 헷갈릴 수 있지만, 이는 압력강하 특성을 나타낼 뿐 음속과의 비교는 포함하지 않는다.

다시 나오면 이렇게 판단

문제에서 '압축성/비압축성 판별'이라는 표현이 나오면 곧바로 Mach 수를 떠올린다. 반대로 '층류/난류'가 나오면 Reynolds 수, '속도경계층/열경계층'이나 '열전달'이 나오면 Prandtl 수, '압력강하'가 나오면 Euler 수와 연결 짓는다.

암기 포인트

Mach 수=속도/음속 → 압축성 판별. Reynolds 수=관성력/점성력 → 층류/난류 판별. Prandtl 수=운동량 확산/열 확산 → 경계층 두께 비교. Euler 수=압력차/관성력 → 압력강하 특성.

NoteBase

문 2. 열확산도(thermal diffusivity, α)에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, 열전도도, 밀도, 비열은 각각 k, ρ, c_p이다)

① 열확산도는 물질이 열에너지를 저장하는 능력에 대한 열에너지를 전도하는 능력의 정도를 나타낸다.

② 열확산도가 작으면 주위의 열적 환경 변화에 따라 새로운 평형에 느리게 도달한다.

③ 열확산도 $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$로 정의된다.

④ 열확산도의 단위는 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$이다.

정답 4번

출제 포인트

열확산도(thermal diffusivity) α의 정의식과 물리적 의미, 그리고 그 단위(SI 단위: 제곱미터 매초)를 정확히 알고 있는지 확인하는 문제이다. 열확산도는 열전도도 k, 밀도 ρ, 비열 c_p로 정의되는 물성치로, 정의식과 단위가 함께 출제되면 단위를 놓치기 쉽다.

조건 정리

열전도도, 밀도, 비열이 각각 k, ρ, c_p로 주어져 있고, 열확산도 α에 대한 설명 중 옳지 않은 것을 고르는 문제이다.

사용할 공식

열확산도의 정의식은 $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ 이다. 각 물리량의 SI 단위는 k가 $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$, ρ가 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, c_p가 $\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$이다.

계산 과정

단위를 대입하여 확인하면 $[\alpha] = \frac{\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}}{\mathrm{kg \cdot m^{-3} \cdot J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}} = \frac{\mathrm{W \cdot m^{-1}}}{\mathrm{J \cdot m^{-3}}}$ 이고, $\mathrm{W = J/s}$이므로 $[\alpha] = \frac{\mathrm{J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}}}{\mathrm{J \cdot m^{-3}}} = \mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$가 된다. 즉 열확산도의 단위는 제곱미터 매초($\mathrm{m^2/s}$)이며, 열전도도의 단위인 $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$와는 전혀 다르다.

선지 판단

① 열확산도는 물질이 열에너지를 저장하는 능력(ρc_p, 열용량)에 대한 열에너지를 전도하는 능력(k)의 상대적 정도를 나타낸다는 설명으로, $\alpha = k/(\rho c_p)$의 물리적 의미를 그대로 서술한 옳은 설명이다.
② 열확산도가 작다는 것은 전도되는 열에너지에 비해 저장되는 열에너지의 비중이 크다는 뜻이므로, 주위의 온도 변화가 물체 내부까지 퍼져 새로운 열평형에 도달하는 속도가 느려진다는 설명이며 옳은 설명이다.
③ 열확산도의 정의식 $\alpha = k/(\rho c_p)$를 그대로 나타낸 것으로 옳은 설명이다.
④ 열확산도의 단위는 계산 과정에서 확인한 대로 $\mathrm{m^2/s}$이다. 제시된 $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$는 열전도도 k의 단위이지 열확산도의 단위가 아니므로 틀린 표현이다. → 올바른 표현: 열확산도의 단위는 $\mathrm{m^2/s}$이다.

NoteBase

오답 포인트

열전도도 k의 단위인 $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$를 열확산도의 단위로 착각하기 쉽다. 열확산도는 k를 ρc_p로 나눈 값이므로 단위가 바뀐다는 점, 즉 열전도도와 열확산도는 이름이 비슷해도 단위와 물리적 성격이 다른 별개의 물성치라는 점을 놓치면 안 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

열확산도 관련 문제가 나오면 먼저 정의식 $\alpha = k/(\rho c_p)$를 떠올리고, 단위를 직접 대입해 $\mathrm{m^2/s}$가 나오는지 검산한다. 선지에 단위가 $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$처럼 열전도도의 단위로 제시되어 있으면 곧바로 틀린 선지로 판단한다.

암기 포인트

열확산도 $\alpha = k/(\rho c_p)$, 단위는 $\mathrm{m^2/s}$로 암기해 둔다. 열전도도 k의 단위 $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$와 혼동하지 않는다.

NoteBase

문 3. 기체 분자가 미세 기공을 통과할 때 발생하는 Knudsen 확산에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 확산하는 기체 분자의 평균자유경로보다 미세 기공의 지름이 작을 때 발생한다.

② 전체 압력이 감소하면 Knudsen 수는 증가한다.

③ 온도가 증가하면 Knudsen 수는 감소한다.

④ 확산 기체의 분자량이 증가하면 Knudsen 확산계수는 감소한다.

정답 3번

출제 포인트

Knudsen 확산이 일어나는 조건과 Knudsen 수(Kn), Knudsen 확산계수가 압력·온도·분자량에 따라 어떻게 변하는지를 공식으로 판단할 수 있는지를 묻는다. 기공 내 기체 확산은 기공 지름과 기체 분자의 평균자유경로의 상대적 크기에 따라 일반 분자확산(Fickian diffusion)과 Knudsen 확산으로 구분된다.

조건 정리

Knudsen 수는 기체 분자의 평균자유경로 λ와 미세 기공의 지름 d의 비로 정의된다: $Kn = \frac{\lambda}{d}$. Kn이 1보다 훨씬 크면(즉 $\lambda \gg d$) 분자는 다른 분자보다 기공 벽에 더 자주 충돌하게 되어 Knudsen 확산이 지배적이 된다.

사용할 공식

평균자유경로는 $\lambda \propto \frac{T}{P}$(온도에 비례, 압력에 반비례)로 나타난다. Knudsen 확산계수는 $D_K = \frac{d}{3}\sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \propto \sqrt{\frac{T}{M}}$로, 온도의 제곱근에 비례하고 분자량의 제곱근에 반비례한다.

계산 과정

① Knudsen 확산은 기공 지름이 평균자유경로보다 작아 분자-벽 충돌이 분자-분자 충돌보다 우세할 때 나타나므로, $d < \lambda$인 조건에서 발생한다는 설명은 맞다.
② $\lambda \propto 1/P$이므로 전체 압력이 감소하면 λ가 커지고, 따라서 $Kn = \lambda/d$도 함께 증가한다. 맞는 설명이다.
③ $\lambda \propto T$이므로 온도가 증가하면 λ가 커지고, 이에 따라 Kn은 증가해야 한다. 그런데 선지는 온도가 증가하면 Kn이 감소한다고 하여 실제 관계와 반대이다. 따라서 이 설명이 옳지 않다.
④ $D_K \propto 1/\sqrt{M}$이므로 분자량이 증가하면 D_K는 감소한다. 맞는 설명이다.

NoteBase

선지 판단

① 확산하는 기체 분자의 평균자유경로보다 미세 기공의 지름이 작을 때 발생한다. → O, Knudsen 확산의 발생 조건 $d < \lambda$에 부합한다.
② 전체 압력이 감소하면 Knudsen 수는 증가한다. → O, 압력 감소는 평균자유경로 증가로 이어져 $Kn = \lambda/d$가 커진다.
③ 온도가 증가하면 Knudsen 수는 감소한다. → X, 온도가 증가하면 평균자유경로가 커져 오히려 Knudsen 수는 증가한다 → 틀린 표현 '감소한다' → 올바른 표현 '증가한다'.
④ 확산 기체의 분자량이 증가하면 Knudsen 확산계수는 감소한다. → O, $D_K \propto 1/\sqrt{M}$이므로 분자량이 클수록 확산계수는 작아진다.

오답 포인트

평균자유경로 λ가 온도에 비례하고 압력에 반비례한다는 관계를 거꾸로 외우면 ②와 ③에서 모두 실수하게 된다. 온도와 압력이 Knudsen 수에 미치는 영향의 방향이 서로 반대라는 점(온도 증가·압력 감소는 둘 다 Kn 증가 방향)을 혼동하지 않아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

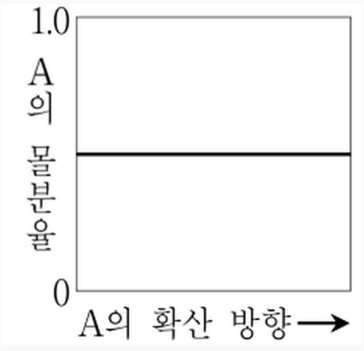
Knudsen 수나 확산계수 관련 문제는 $Kn = \lambda/d$, $\lambda \propto T/P$, $D_K \propto \sqrt{T/M}$ 세 관계식만 정리해 두면 압력·온도·분자량 중 무엇이 바뀌어도 증감 방향을 바로 판단할 수 있다.

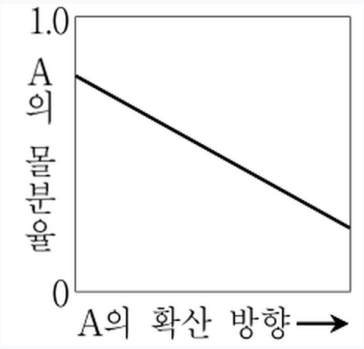
암기 포인트

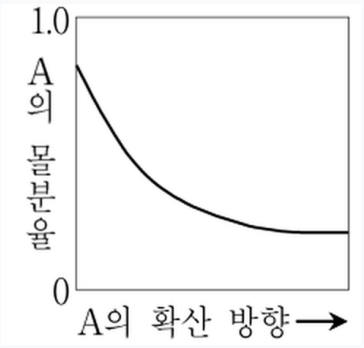
$Kn = \lambda/d$에서 압력 감소·온도 증가는 둘 다 λ를 키워 Kn을 증가시키고, Knudsen 확산계수 D_K는 분자량이 클수록 작아진다는 것을 함께 묶어 외워 둔다.

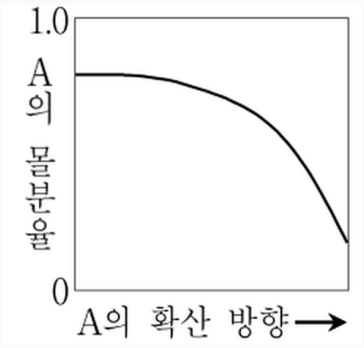
NoteBase

문 4. A와 B가 등몰 상대 확산(equimolar counter diffusion)하고 있다. 이때 A의 확산 방향에 따른 A의 몰분율 변화를 나타낸 것은?

① 

② 

③ 

④ 

정답 2번

NoteBase

출제 포인트

등몰 상대 확산(equimolar counter diffusion, EMD)에서 성분 A의 몰분율이 확산 방향(위치)에 따라 어떤 함수 형태로 변하는지를 묻는 문제이다. 정지막을 통한 단일방향 확산(A만 확산하고 B는 정지, UMD)과 비교했을 때 농도(몰분율) 프로파일의 형태가 직선인지 곡선인지를 구분하는 것이 핵심이다.

조건 정리

A와 B가 등몰 상대 확산을 하므로 A가 이동하는 몰수만큼 B가 반대 방향으로 이동한다. 즉 A의 몰 유량과 B의 몰 유량의 크기가 같고 방향이 반대이다($N_A = -N_B$). 이 경우 두 성분의 유량이 서로 상쇄되어 전체 벌크 유동(bulk flow)이 존재하지 않으며, 정상상태(steady state)이고 이상기체이면 전체 몰농도 C는 위치에 관계없이 일정하다.

사용할 공식

등몰 상대 확산에서 A의 유량은 벌크 유동 항이 없는 순수 확산(Fick의 법칙) 형태로 주어진다: $N_A = -D_{AB}\frac{dC_A}{dz}$. 정상상태에서는 N_A가 위치 z에 무관하게 일정하므로 $\frac{dC_A}{dz}$도 상수가 되고, 이를 적분하면 C_A가 z에 대해 1차식(직선)으로 나타난다. 전체 몰농도 C가 일정하므로 몰분율 $x_A = C_A/C$ 역시 위치에 대해 직선으로 변한다. 이는 정지막을 통한 단일방향 확산에서 $N_A = -\frac{cD_{AB}}{1-x_A}\frac{dx_A}{dz}$로 주어져 몰분율이 로그(곡선) 형태로 변하는 것과 대조된다.

계산 과정

정상상태 물질수지에서 $\frac{dN_A}{dz} = 0$이므로 N_A는 상수이다. N_A=-D_AB(dC_A)/(dz)=상수에서 (dC_A)/(dz)=-(N_A)/(D_AB)=상수가 되어 $C_A(z) = C_{A0} - \frac{N_A}{D_{AB}}z$와 같은 1차 함수(직선)를 얻는다. 확산 방향으로 갈수록 A의 농도는 일정한 기울기로 감소하며, 전체 몰농도 C가 상수이므로 몰분율 x_A도 같은 형태의 직선으로 감소한다. 즉 A의 확산 방향에 따라 A의 몰분율은 높은 값에서 낮은 값으로 기울기가 일정한 직선 그래프가 된다.

NoteBase

선지 판단

① 수평 직선(몰분율이 항상 일정) → A가 실제로 확산하고 있다면 위치에 따라 농도차가 존재해야 하므로 몰분율이 전혀 변하지 않는 것은 확산이 일어나지 않는다는 뜻이 되어 모순이다. 틀린 표현 → 등몰 상대 확산에서도 몰분율은 위치에 따라 변한다.
② 기울기가 일정한 직선으로 감소 → 등몰 상대 확산은 벌크 유동이 없는 순수 확산이므로 정상상태에서 몰분율이 위치에 대해 1차 함수(직선)로 감소한다. 그림과 정확히 일치한다.
③ 초반에 급격히 감소하다가 완만해지는 아래로 오목한 곡선 → 이는 정지막을 통한 단일방향 확산(벌크 유동이 존재하는 경우)에서 나타나는 로그형 곡선의 특징이다. 틀린 표현 → 벌크 유동이 있는 UMD의 프로파일이며, 벌크 유동이 없는 등몰 상대 확산의 프로파일이 아니다.
④ 초반에는 완만하다가 후반에 급격히 감소하는 곡선 → 이 역시 곡선형으로, 벌크 유동에 의한 비선형 프로파일에 해당하며 등몰 상대 확산의 결과와 다르다. 틀린 표현 → 등몰 상대 확산은 직선 프로파일을 가지므로 이러한 곡선 형태가 될 수 없다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 오답은 확산이라고 하면 무조건 곡선(지수함수적 감소)으로 떠올려 ③번이나 ④번을 고르는 경우이다. 곡선형 프로파일은 벌크 유동이 존재하는 정지막 확산(UMD)에서 나타나는 특징이며, 등몰 상대 확산(EMD)은 벌크 유동이 상쇄되어 순수 분자확산만 남기 때문에 반드시 직선형 프로파일이 된다는 점을 혼동하지 않아야 한다. 또한 ①번처럼 몰분율이 전혀 변하지 않는다고 판단하는 것도 오답인데, 확산이 일어나는 한 위치에 따른 농도(몰분율) 변화는 반드시 존재한다.

다시 나오면 이렇게 판단

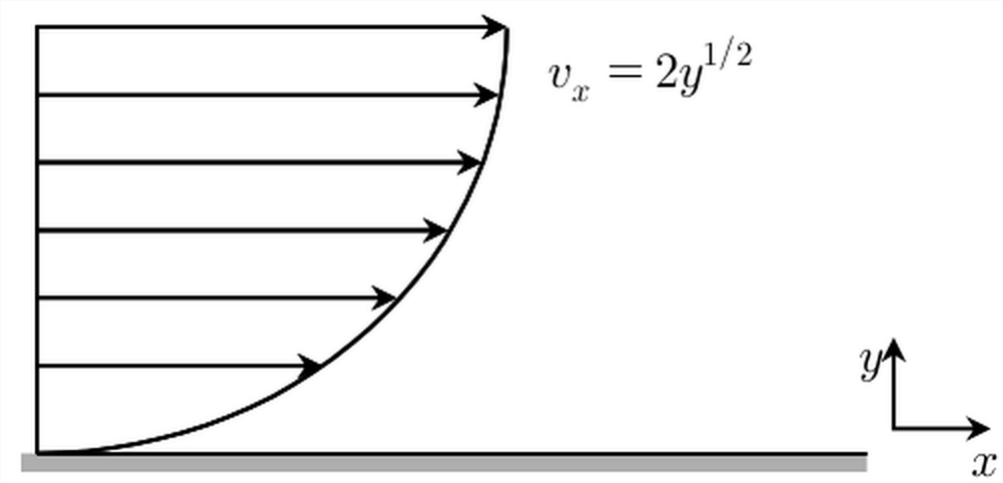
확산 유형을 먼저 등몰 상대 확산(EMD)인지 정지막을 통한 단일방향 확산(UMD)인지 구분한다. EMD는 벌크 유동이 없으므로 몰분율-위치 그래프가 직선이고, UMD는 벌크 유동 보정항 때문에 몰분율-위치 그래프가 곡선(오목하게 감소)이 된다는 대응관계를 기준으로 그래프의 형태를 고른다.

암기 포인트

등몰 상대 확산(EMD): 벌크 유동 없음 → 몰분율 vs 위치 그래프는 직선. 정지막 단일방향 확산(UMD): 벌크 유동 있음 → 몰분율 vs 위치 그래프는 곡선(오목하게 감소).

NoteBase

문 5. 평판 위를 흐르고 있는 뉴턴 유체의 x-축 방향 속도 분포(v_x)가 그림과 같다. 평판으로부터 1m 떨어진 위치와 2m 떨어진 위치에서의 전단응력 차이[Pa]는? (단, 유체의 점도는 $0.5\,\mathrm{Pa\cdot s}$이고 그림에서 속도와 거리의 단위는 각각 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$와 m이다)



① $2\sqrt{2}-1$

② $\sqrt{2}-1$

③ $\frac{2-\sqrt{2}}{2}$

④ $\frac{2-\sqrt{2}}{4}$

정답 4번

출제 포인트

뉴턴 유체의 전단응력(shear stress)을 속도 구배로부터 계산하는 문제이다. 뉴턴의 점성 법칙 $\tau = \mu\frac{dv_x}{dy}$를 주어진 속도 분포 $v_x = 2y^{1/2}$에 적용해, 평판으로부터 서로 다른 두 높이에서의 전단응력을 구하고 그 차이를 계산할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

속도 분포: $v_x = 2y^{1/2}$ (단위: v는 m·s^-1, y는 m)
점도: $\mu = 0.5$ Pa·s
구할 값: $y = 1$ m에서의 전단응력과 $y = 2$ m에서의 전단응력의 차이

사용할 공식

뉴턴의 점성 법칙: $\tau_{yx} = \mu\frac{dv_x}{dy}$
먼저 속도 분포를 y에 대해 미분하여 속도 구배를 구하고, 각 높이의 값을 대입해 전단응력을 계산한다.

NoteBase

계산 과정

속도 분포를 미분하면 $\frac{dv_x}{dy} = \frac{d}{dy}(2y^{1/2}) = y^{-1/2}$

$y = 1$ m에서: $\tau_1 = \mu \cdot y^{-1/2} = 0.5 \times 1^{-1/2} = 0.5$ Pa

$y = 2$ m에서: $\tau_2 = \mu \cdot y^{-1/2} = 0.5 \times 2^{-1/2} = \frac{0.5}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{4}$ Pa

두 위치의 전단응력 차이는 $\tau_1 - \tau_2 = 0.5 - \frac{\sqrt{2}}{4} = \frac{2}{4} - \frac{\sqrt{2}}{4} = \frac{2-\sqrt{2}}{4}$ Pa

선지 판단

① $2\sqrt{2} - 1$: X → 속도 구배를 미분하지 않고 y값을 잘못 대입하거나 지수 부호를 반대로 처리했을 때 나오는 값으로, 올바른 계산 결과가 아니다.

② $\sqrt{2} - 1$: X → 점도 0.5를 곱하지 않고 계산했을 때 나올 수 있는 값으로, 단위를 맞추지 않은 오답이다.

③ $(2 - \sqrt{2}) / 2$: X → 분모에 점도 0.5를 반영하는 과정에서 계산을 한 번만 나누어 생기는 오답으로, 최종값이 실제보다 두 배 크다.

④ $(2 - \sqrt{2}) / 4$: O → $\tau_1 - \tau_2 = 0.5 - \frac{\sqrt{2}}{4} = \frac{2-\sqrt{2}}{4}$로 정확히 일치한다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 속도 분포 $v_x = 2y^{1/2}$을 미분할 때 지수 법칙을 잘못 적용하는 것이다. $y^{1/2}$을 미분하면 $\frac{1}{2}y^{-1/2}$이 아니라, 계수 2와 곱해져 $2 \times \frac{1}{2}y^{-1/2} = y^{-1/2}$이 됨에 유의해야 한다. 또한 전단응력은 속도 구배에 점도를 곱한 값이므로, 점도 0.5를 반드시 곱해야 하며 이를 누락하면 ②나 ①과 같은 오답이 나온다. 마지막으로 두 지점의 전단응력을 각각 구한 뒤 차이(뺄셈)를 취해야지, 두 값을 더하거나 순서를 바꿔 빼면 부호나 크기가 달라진다.

다시 나오면 이렇게 판단

속도 분포가 y의 거듭제곱 형태로 주어지면 먼저 미분해 속도 구배 함수를 구한 뒤, 문제에서 요구하는 지점의 y값을 대입한다. 전단응력은 항상 $\tau = \mu\frac{dv_x}{dy}$이며, 여러 지점의 값을 비교하는 문제라면 각 지점의 전단응력을 따로 계산한 후 마지막에 뺄셈이나 비율을 취한다. 계산 중간에 점도를 곱하는 단계를 빠뜨리지 않도록 순서를 정해 두고 계산하는 것이 안전하다.

암기 포인트

뉴턴의 점성 법칙: $\tau = \mu\frac{dv_x}{dy}$. $y^{1/2}$ 형태의 속도 분포는 미분하면 $y^{-1/2}$ 형태의 속도 구배가 되고, 이는 y가 커질수록 전단응력이 작아짐을 의미한다(경계층에서 벽면에서 멀어질수록 전단응력이 감소하는 전형적 경향).

NoteBase

문 6. 반응물 A가 반지름 R인 구형 촉매입자 내부로 확산되어 생성물 B로 바뀌는 1차 반응($-r_A = kC_A$)이 일어난다. 정상상태에서 촉매입자 중심으로부터의 거리(r)에 따른 A의 농도 분포를 구하기 위해 필요한 물질수지식은? (단, C_A와 C_B는 각각 A와 B의 농도이고 r만의 함수이며, D_A와 k는 각각 확산계수와 반응속도상수이다)

① $-D_A\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A = 0$

② $-D_A\frac{1}{R}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A = 0$

③ $-D_A\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A/C_B = 0$

④ $-D_A\frac{1}{R}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A/C_B = 0$

정답 1번

출제 포인트

구형 촉매입자 내부에서 확산과 1차 반응이 동시에 일어날 때, 정상상태 물질수지식(연속방정식)을 구형좌표계에서 올바르게 세울 수 있는지를 묻는 문제이다. 핵심은 구형 좌표계에서 반지름 방향 확산 항을 어떻게 표현하는지와, 소모항(반응항)의 형태를 정확히 아는 것이다.

조건 정리

반지름 R인 구형 촉매입자 내부로 A가 확산되며 1차 반응 $-r_A = kC_A$로 소모되어 B가 생성된다. 정상상태이므로 시간에 대한 축적항은 0이다. C_A는 촉매입자 중심으로부터의 거리 r만의 함수이고, D_A는 확산계수, k는 반응속도상수이다.

사용할 공식

구형 좌표계에서 반지름 방향으로만 확산이 일어나는 정상상태 물질수지식은 얇은 구형 껍질(shell)에 대해 유입량과 유출량의 차이가 반응에 의한 소모량과 같다는 조건에서 유도된다. 미분 형태로 정리하면 $D_A\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dC_A}{dr}\right) - kC_A = 0$이며, 이는 $-D_A\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A = 0$과 같은 식이다. 구형좌표계 라플라시안의 반지름 성분이 $\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d(\cdot)}{dr}\right)$ 형태로 나타나는 것이 핵심이며, 여기서 R이 아니라 r이 미분 안팎에 그대로 쓰여야 한다는 점에 주의한다.

NoteBase

계산 과정

두께 Δr인 얇은 구형 껍질을 잡고 물질수지를 세우면, r에서 유입되는 확산 몰유량은 $4\pi r^2 N_A|_r$이고, $r+\Delta r$에서 유출되는 몰유량은 $4\pi r^2 N_A|_{r+\Delta r}$이다. 여기서 소모항은 껍질 부피 $4\pi r^2 \Delta r$에 반응속도 kC_A를 곱한 값이다. 정상상태이므로 (유입) − (유출) − (소모) = 0이 되고, $\Delta r \to 0$의 극한을 취하면 $\frac{d}{dr}(r^2 N_A) + r^2 k C_A = 0$의 형태가 된다. 여기에 Fick의 법칙 $N_A = -D_A \frac{dC_A}{dr}$을 대입하면 $-\frac{d}{dr}\left(D_A r^2 \frac{dC_A}{dr}\right) + r^2 k C_A = 0$이 되고, 양변을 r^2으로 나누면 $-D_A \frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A = 0$이 얻어진다. 이 식에서 미분과 계수 모두 반지름 좌표 r로 표현되며, 촉매입자의 전체 반지름 R은 경계조건(예: $r = R$에서 $C_A = C_{As}$)에만 등장하고 미분방정식 자체에는 들어가지 않는다.

선지 판단

① $-D_A \frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A = 0$: 구형좌표계 확산항과 1차 반응 소모항이 모두 r의 함수로 올바르게 표현되어 있다. O.

② $-D_A \frac{1}{R}\frac{d}{dr}\left(r \frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A = 0$: 확산항의 계수와 미분 안의 지수가 구형좌표계 형태(r^2, $1/r^2$)가 아니라 원통좌표계와 유사한 형태(r, 1/R)로 잘못 쓰였다. 틀린 표현 $\frac{1}{R}\frac{d}{dr}\left(r \frac{dC_A}{dr}\right)$ → 올바른 표현 $\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{dC_A}{dr}\right)$. X.

③ $-D_A \frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A/C_B = 0$: 확산항은 맞지만 반응항이 1차 반응식 $-r_A = kC_A$와 맞지 않게 C_B로 나눈 형태로 바뀌어 있다. 틀린 표현 kC_A/C_B → 올바른 표현 kC_A. X.

④ $-D_A \frac{1}{R}\frac{d}{dr}\left(r \frac{dC_A}{dr}\right) + kC_A/C_B = 0$: 확산항과 반응항이 모두 잘못되어 있다. 틀린 표현 $\frac{1}{R}\frac{d}{dr}\left(r \frac{dC_A}{dr}\right)$와 kC_A/C_B → 올바른 표현 $\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{dC_A}{dr}\right)$와 kC_A. X.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 구형좌표계의 확산항 $\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{dC_A}{dr}\right)$을 원통좌표계 형태인 $\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r \frac{dC_A}{dr}\right)$와 혼동하거나, 계수 자리에 변수 r 대신 상수인 전체 반지름 R을 잘못 넣는 것이다. 또한 1차 반응식 $-r_A = kC_A$가 이미 문제에 주어져 있으므로 반응항은 반드시 kC_A로만 표현되어야 하며, 생성물 농도 C_B로 나누는 형태가 나오면 반응차수를 잘못 적용한 것이다.

다시 나오면 이렇게 판단

구형 촉매입자·구형 액적·구형 기포처럼 대상이 '구형'으로 주어지면 확산항은 반드시 $\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{d(\cdot)}{dr}\right)$ 형태인지부터 확인한다. 그다음 반응항이 문제에서 준 반응속도식 그대로(여기서는 kC_A) 들어가 있는지, 즉 다른 성분의 농도가 끼어들어 차수가 바뀌지 않았는지를 확인한다. 미분방정식 안에 전체 반지름 R이 변수처럼 들어가 있으면 오답 신호로 본다(R은 경계조건에만 쓰인다).

암기 포인트

구형좌표계 확산(라플라시안) 항: $\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2 \frac{dC}{dr}\right)$ — 원통좌표계의 $\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r \frac{dC}{dr}\right)$와 구분해 기억해 둔다. 반응항은 주어진 반응속도식을 그대로(여기서는 kC_A) 쓰고, 전체 반지름 R은 방정식이 아니라 경계조건에만 등장한다는 점을 함께 기억해 둔다.

NoteBase

문 7. 열교환기를 이용하여 튜브(tube) 내부를 흐르는 액체 A를 가열하고자 한다. 액체 A는 10°C로 유입되어 20°C로 배출되며, 튜브 외부를 흐르는 액체 B의 열교환기 입구와 출구 온도는 각각 80°C와 40°C이다. A의 비열이 B의 비열의 2배이고 A의 질량유속이 $2\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$일 때, B의 질량유속$[\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}]$은? (단, 비열은 일정하며 열손실은 없다)

① 0.5

② 1

③ 2

④ 4

정답 2번

출제 포인트

열교환기에서 열손실이 없으면 고온 유체(B)가 잃은 열량과 저온 유체(A)가 얻은 열량이 같다는 열평형 관계 $Q_A = Q_B$를 세우고, 이를 각 유체의 질량유속 · 비열 · 온도차로 표현해 미지의 질량유속을 구하는 문제이다.

조건 정리

A(관 내부, 가열됨): 입구 10°C, 출구 20°C이므로 $\Delta T_A = 10°\text{C}$, 질량유속 $\dot{m}_A = 2\ \text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$.
B(관 외부, 냉각됨): 입구 80°C, 출구 40°C이므로 $\Delta T_B = 40°\text{C}$, 질량유속 $\dot{m}_B$는 미지수.
비열 관계: $c_A = 2c_B$.
열손실이 없으므로 A가 얻은 열량과 B가 잃은 열량은 같다.

사용할 공식

정상상태 열교환기의 열평형식은 $\dot{Q}_A = \dot{m}_A c_A \Delta T_A$, $\dot{Q}_B = \dot{m}_B c_B \Delta T_B$이며, 열손실이 없으므로 $\dot{m}_A c_A \Delta T_A = \dot{m}_B c_B \Delta T_B$이다.

계산 과정

$\dot{Q}_A = \dot{m}_A c_A \Delta T_A = 2 \times (2c_B) \times 10 = 40c_B$
$\dot{Q}_B = \dot{m}_B c_B \Delta T_B = \dot{m}_B \times c_B \times 40$
두 열량이 같으므로 $40c_B = 40\dot{m}_B c_B$이고, 양변을 $40c_B$로 나누면 $\dot{m}_B = 1$이다.
따라서 B의 질량유속은 $1\ \text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$이다.

NoteBase

선지 판단

① 0.5 → X, $\dot{m}_B c_B \Delta T_B = 0.5 \times c_B \times 40 = 20 c_B$로 A가 얻은 열량 $40 c_B$와 맞지 않는다.
② 1 → O, 계산 과정에서 구한 값과 일치하며 열평형식을 정확히 만족한다.
③ 2 → X, A와 B의 질량유속이 같다고 착각한 경우로, 비열 차이($c_A = 2c_B$)와 온도차 차이(10°C vs 40°C)를 함께 반영하지 않은 오답이다.
④ 4 → X, 비열비 2배만 반영하고 온도차 비(40:10=4:1)를 반대 방향으로 곱해 생기는 오답이다.

오답 포인트

이 문제는 두 유체의 비열이 다르다는 점과 온도차가 다르다는 점을 동시에 열평형식에 대입해야 하는데, 비열 조건($c_A = 2c_B$)만 반영하고 온도차 비($\Delta T_A : \Delta T_B = 10 : 40$)를 빠뜨리거나 반대로 곱하면 ③이나 ④ 같은 오답이 나온다. 항상 $\dot{m} c \Delta T$ 전체를 양변에 정확히 대입해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

열교환기(단열, 정상상태) 문제에서는 먼저 어느 유체가 가열되고 어느 유체가 냉각되는지, 각각의 입출구 온도차를 확인한다. 그다음 열손실이 없다는 조건에서 $\dot{m}_A c_A \Delta T_A = \dot{m}_B c_B \Delta T_B$를 세우고, 문제에서 준 비열비와 온도차를 각각 대입해 미지의 질량유속을 구한다.

암기 포인트

열손실 없는 열교환기의 열평형식은 $\dot{m}_A c_A \Delta T_A = \dot{m}_B c_B \Delta T_B$이다. 비열비와 온도차비를 모두 곱해서 반영해야 하며, 어느 한쪽만 적용하면 틀린다.

NoteBase

문 8. 기체 흡수공정에서 액상 경막 물질전달저항이 기상 경막 물질전달저항의 9배일 때 기상 총괄 물질전달계수는 K_{y1}이다. 기상 경막 물질전달저항을 일정하게 유지한 상태에서 액상 경막 물질전달저항을 기상 경막 물질전달저항의 4배로 하였을 때, 기상 총괄 물질전달계수를 K_{y2}라 하면 K_{y2}/K_{y1}는? (단, 기체 흡수공정은 이중 경막론을 따른다)

① 1.5

② 2.0

③ 2.5

④ 3.0

정답 2번

출제 포인트

이중 경막론(two-film theory)에서 기상 총괄 물질전달계수의 역수(총괄저항)가 기상 경막저항과 액상 경막저항의 합으로 표현됨을 이용해, 액상 경막저항의 배율이 바뀔 때 총괄 물질전달계수가 어떻게 변하는지 구하는 문제이다.

조건 정리

기상 경막 물질전달저항을 R_G라 하고, 액상 경막 물질전달저항을 기상 기준 단위로 환산한 값을 R_L이라 한다. 두 경우 모두 R_G는 일정하게 유지된다.
경우 1: $R_L = 9R_G$이고 이때의 기상 총괄 물질전달계수가 K_{y1}이다.
경우 2: $R_L = 4R_G$이고 이때의 기상 총괄 물질전달계수가 K_{y2}이다.

사용할 공식

이중 경막론의 기상 기준 총괄 물질전달저항 관계식: $\frac{1}{K_y} = R_G + R_L$ (기상 경막저항과, 평형선 기울기를 곱해 기상 단위로 환산한 액상 경막저항의 합).

계산 과정

경우 1: $\frac{1}{K_{y1}} = R_G + 9R_G = 10R_G$ 이므로 $K_{y1} = \frac{1}{10R_G}$.
경우 2: $\frac{1}{K_{y2}} = R_G + 4R_G = 5R_G$ 이므로 $K_{y2} = \frac{1}{5R_G}$.
따라서 $\frac{K_{y2}}{K_{y1}} = \frac{1/5R_G}{1/10R_G} = \frac{10R_G}{5R_G} = 2.0$이다.

NoteBase

선지 판단

① 1.5: 저항의 합을 잘못 배분하거나 배율을 단순 평균 내는 등의 계산 실수에서 나올 수 있는 값으로, 총괄저항의 올바른 합산 결과와 맞지 않는다. 오답이다.
② 2.0: 총괄저항을 경막저항의 합으로 정확히 세운 뒤 비율을 계산하면 10R_G 대 5R_G가 되어 그 역수비가 정확히 2.0이 된다. 정답이다.
③ 2.5: 액상 경막저항의 배율(9배, 4배) 차이인 9−4=5나 9/4 등을 그대로 총괄계수비로 오인했을 때 나올 수 있는 값이며, 총괄저항 합산을 거치지 않은 결과이므로 오답이다.
④ 3.0: 저항의 역수 관계를 고려하지 않고 액상저항 배율만으로 단순 비교하거나 다른 배율(예: 9와 3)을 착각해 계산했을 때 나올 수 있는 값으로, 오답이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 총괄 물질전달계수가 개별 경막 물질전달계수(또는 저항)에 비례한다고 단순하게 생각해, 액상 경막저항의 배율 변화(9배→4배)를 그대로 총괄계수의 배율 변화로 착각하는 것이다. 총괄저항은 기상 경막저항과 액상 경막저항의 '합'으로 결정되므로, 반드시 두 경우 각각 전체 저항의 합을 구한 뒤 그 역수의 비를 계산해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

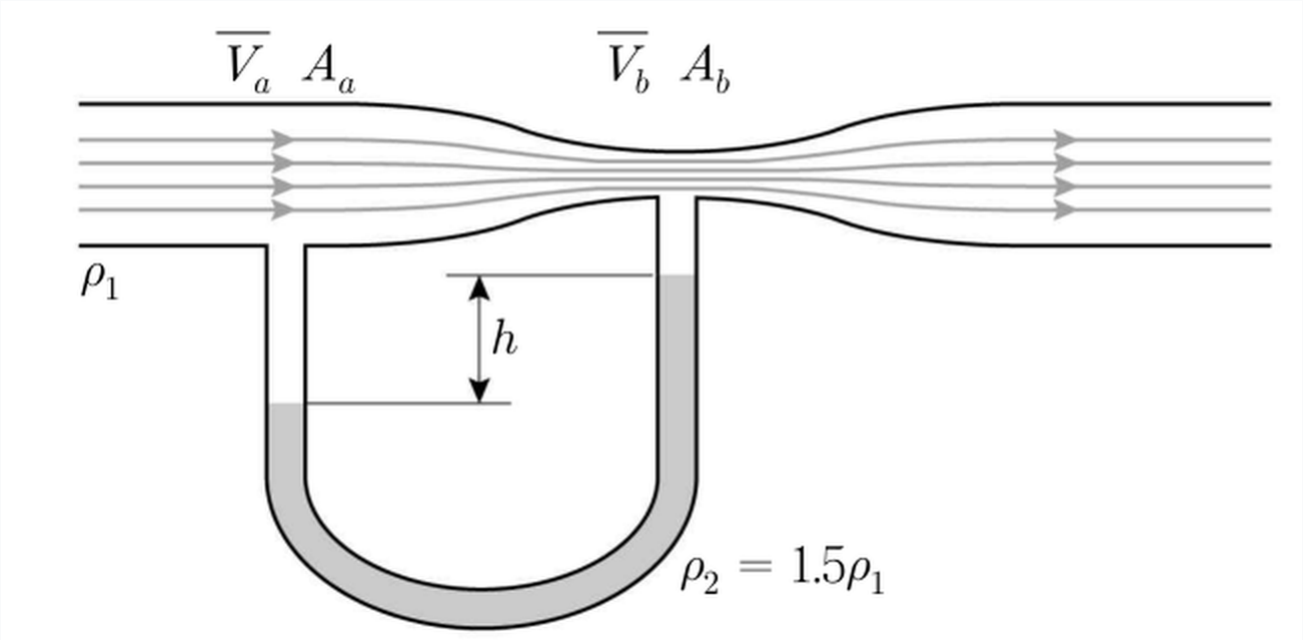
이중 경막론 문제에서 총괄 물질전달계수 관련 문항이 나오면, 먼저 기상 기준인지 액상 기준인지를 확인하고 저항의 덧셈식($\frac{1}{K_y} = R_G + R_L$ 또는 $\frac{1}{K_x} = R_L + R_G/m$)을 세운다. 그 다음 기준이 되는 저항(문제에서 고정된 쪽)을 1로 놓고 배율로 치환해 두 경우의 총괄저항 값을 각각 구한 뒤, 총괄계수의 비는 저항 값의 역수비로 계산한다.

암기 포인트

이중 경막론: 총괄저항 = 기상 경막저항 + 액상 경막저항(기상 기준으로 환산). 총괄 물질전달계수는 저항의 합에 반비례하므로, 저항 배율만 보고 총괄계수 배율을 판단하면 안 되고 반드시 저항의 합을 먼저 구한다.

NoteBase

문 9. 그림과 같이 목의 단면적이 A_b인 수평 벤투리관을 이용하여 단면적이 A_a인 파이프 안을 흐르는 유체 1의 평균 유속을 구하고자 한다. 마노미터에 채워져 있는 유체 2 밀도ρ_2가 유체 1 밀도ρ_1의 1.5배일 때, 벤투리관 목에서 유체의 평균유속$\overline{V_b}$을 옳게 표현한 것은? (단, g는 중력가속도이고, 흐름에 마찰은 없으며 베르누이 방정식의 가정을 만족한다)



① $\frac{gh}{1-(A_b/A_a)^2}$
② $\left[\frac{gh}{1-(A_b/A_a)^2}\right]^{1/2}$
③ $\frac{2gh}{1-(A_b/A_a)^2}$
④ $\left[\frac{2gh}{1-(A_b/A_a)^2}\right]^{1/2}$

정답 2번

출제 포인트

수평 벤튜리관에서 베르누이 방정식과 연속방정식을 결합해 목 부분 평균유속을 마노미터 액주차 h와 밀도비로 표현하는 문제이다. 벤튜리관은 관 단면적이 좁아지는 목 구간에서 유속이 빨라지고 압력이 낮아지는 원리를 이용해 유량이나 유속을 측정하는 장치이며, 압력차를 U자형 마노미터의 액주 높이차로 읽어낸다.

조건 정리

파이프 단면적 A_a, 목 단면적 A_b, 유체 1의 밀도 ρ_1, 마노미터 봉입 유체 2의 밀도 ρ_2 = 1.5ρ_1, 마노미터 액주차 h이다. 관은 수평이므로 위치수두 차이는 없고(고도 항 소거), 흐름은 마찰이 없어 베르누이 방정식이 그대로 성립한다. 구하는 값은 목에서의 평균유속 V_b이다.

NoteBase

사용할 공식

베르누이 방정식(수평관, a점과 b점 사이): $P_a + \frac{1}{2}\rho_1 \overline{V_a}^2 = P_b + \frac{1}{2}\rho_1 \overline{V_b}^2$
연속방정식: $\overline{V_a} A_a = \overline{V_b} A_b$
마노미터 압력차 관계식(유체 1 위, 유체 2가 U자관에 봉입된 경우): $P_a - P_b = gh(\rho_2 - \rho_1)$

계산 과정

연속방정식에서 $\overline{V_a} = \overline{V_b}\frac{A_b}{A_a}$이므로, 베르누이 방정식의 압력차는 다음과 같이 정리된다.
$P_a - P_b = \frac{1}{2}\rho_1(\overline{V_b}^2 - \overline{V_a}^2) = \frac{1}{2}\rho_1 \overline{V_b}^2\left[1 - \left(\frac{A_b}{A_a}\right)^2\right]$
한편 마노미터 액주차로부터 $P_a - P_b = gh(\rho_2 - \rho_1) = gh(1.5\rho_1 - \rho_1) = 0.5\rho_1 gh$
두 식을 같다고 두면 $0.5\rho_1 gh = \frac{1}{2}\rho_1 \overline{V_b}^2\left[1 - \left(\frac{A_b}{A_a}\right)^2\right]$
양변의 $\frac{1}{2}\rho_1$을 소거하면 $gh = \overline{V_b}^2\left[1 - \left(\frac{A_b}{A_a}\right)^2\right]$
따라서 $\overline{V_b}^2 = \frac{gh}{1-(A_b/A_a)^2}$, 즉 $\overline{V_b} = \left[\frac{gh}{1-(A_b/A_a)^2}\right]^{1/2}$

선지 판단

① gh / [1-(A_b/A_a)^2] → X, 이는 $\overline{V_b}^2$에 해당하는 식이며 제곱근을 취하지 않아 차원(속도)이 맞지 않는다.
② [gh / (1-(A_b/A_a)^2)]^(1/2) → O, 계산 과정에서 유도한 결과와 정확히 일치한다.
③ 2gh / [1-(A_b/A_a)^2] → X, 밀도비에서 나오는 계수 0.5가 이미 양변에서 소거되어야 하는데 오히려 2배로 잘못 반영된 형태이다(제곱도 취하지 않음).
④ [2gh / (1-(A_b/A_a)^2)]^(1/2) → X, 제곱근 형태는 맞으나 분자에 불필요한 2가 곱해져 있다.
$\rho_2 - \rho_1 = 0.5\rho_1$이 $\frac{1}{2}\rho_1$과 정확히 상쇄되어 계수 2가 남지 않아야 한다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 마노미터 압력차 공식 $P_a - P_b = gh(\rho_2 - \rho_1)$에서 밀도차를 구하지 않고 ρ_2나 ρ_1을 그대로 쓰는 것, 그리고 베르누이 방정식의 계수 $\frac{1}{2}$를 소거하는 과정에서 실수로 2를 살리거나 없애는 것이다. 또한 최종 결과가 유속(길이/시간 차원)이 되려면 반드시 제곱근을 취해야 하므로, 제곱근이 없는 ①·③은 차원 자체가 맞지 않는다는 점으로도 즉시 소거할 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

수평 벤튜리관·오리피스미터 문제는 항상 베르누이+연속방정식+마노미터 압력차 세 식을 순서대로 세우는 방식으로 접근한다. 밀도비가 주어지면 반드시 $\rho_2 - \rho_1$ 형태의 밀도차로 변환하고, 최종 답이 속도이면 제곱근이 붙는지부터 확인해 차원으로 오답을 먼저 걸러낸다.

암기 포인트

수평 벤튜리관 목 유속: $\overline{V_b} = \left[\frac{2gh(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1[1-(A_b/A_a)^2]}\right]^{1/2}$의 일반형에서, 이 문제처럼 $\rho_2 - \rho_1 = \frac{1}{2}\rho_1$이면 분자의 2와 절반 밀도비가 상쇄되어 $\overline{V_b} = \left[\frac{gh}{1-(A_b/A_a)^2}\right]^{1/2}$로 단순화된다는 것을 기억해 둔다.

NoteBase

문 10. 구형입자가 충전되어 있는 충전탑에 유체가 하단에서 상단으로 흐르고 있다. Reynolds 수 Re_p가 1,000보다 클 때, 최소유동화속도 $\overline{V}_{0M}$와 입자직경 D_p과의 관계로 옳은 것은?

① $\overline{V}_{0M}$은 $D_p^{1/2}$에 비례한다.

② $\overline{V}_{0M}$은 D_p에 비례한다.

③ $\overline{V}_{0M}$은 $D_p^{3/2}$에 비례한다.

④ $\overline{V}_{0M}$은 D_p^{2}에 비례한다.

정답 1번

출제 포인트

충전층의 최소유동화속도를 지배하는 Ergun 식에서, 입자 레이놀즈수(Re_p)의 크기에 따라 점성(층류)항과 관성(난류)항 중 어느 쪽이 압력강하를 지배하는지를 구분하고, 그 극한에서 최소유동화속도 $\overline{V}_{0M}$이 입자직경 D_p의 몇 제곱에 비례하는지를 도출하는 문제이다.

조건 정리

구형입자로 충전된 충전탑에 유체가 하부에서 상부로 흐르며 최소유동화 조건에 도달한 상태를 다룬다. 조건은 $Re_p > 1{,}000$으로, 이는 유동이 점성력보다 관성력이 지배적인 난류(고Re) 영역에 있음을 의미한다. 구하는 것은 이 조건에서 $\overline{V}_{0M}$과 D_p의 비례 관계이다.

사용할 공식

최소유동화속도는 Ergun 압력강하식으로부터 얻어지며, 그 일반형은 다음과 같다.

$$\frac{150(1-\varepsilon_{mf})\mu}{D_p^2\phi_s^2\varepsilon_{mf}^3}\overline{V}_{0M} + \frac{1.75\rho}{D_p\phi_s\varepsilon_{mf}^3}\overline{V}_{0M}^2 = (\rho_s - \rho)g$$

좌변 첫째 항은 점성(층류)항, 둘째 항은 관성(난류)항이며, Re_p가 클수록 관성항이 지배적이 된다.

계산 과정

$Re_p > 1{,}000$인 난류 영역에서는 점성항이 관성항에 비해 무시할 만큼 작아지므로, Ergun 식은 관성항만 남는 형태로 근사된다.

$$\frac{1.75\rho}{D_p\phi_s\varepsilon_{mf}^3}\overline{V}_{0M}^2 \approx (\rho_s - \rho)g$$

이를 $\overline{V}_{0M}^2$에 대해 정리하면 $\overline{V}_{0M}^2 \propto D_p$가 되고(다른 물성치는 D_p와 무관한 상수로 취급), 양변에 제곱근을 취하면 $\overline{V}_{0M} \propto D_p^{1/2}$를 얻는다. 참고로 $Re_p < 10$ 정도의 층류(저Re) 영역에서는 반대로 점성항만 남아 $\overline{V}_{0M} \propto D_p^2$의 관계(Kozeny–Carman형)가 나오며, 이 문항은 그 반대 극한을 묻고 있다.

NoteBase

선지 판단

① $\overline{V}_{0M}$은 $D_p^{1/2}$에 비례한다 → O. 고Re(관성 지배) 영역에서 Ergun 식의 관성항만 남을 때 도출되는 관계와 일치한다.
② $\overline{V}_{0M}$은 D_p에 비례한다 → X. 1차 비례 관계는 점성항과 관성항이 함께 작용하는 중간 영역에서도 정확히 성립하지 않으며, 고Re 극한의 지수(1/2)와 다르다.
③ $\overline{V}_{0M}$은 $D_p^{3/2}$에 비례한다 → X. 고Re 극한에서 나오는 지수가 아니다.
④ $\overline{V}_{0M}$은 D_p^2에 비례한다 → X. 이 관계는 Re_p가 매우 작아 점성항이 지배하는 저Re(층류) 영역에서 성립하는 관계이며, 이 문제가 묻는 $Re_p > 1{,}000$의 고Re 영역과는 반대되는 경우이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 저Re(층류) 영역에서 성립하는 $\overline{V}_{0M} \propto D_p^2$ 관계(④)를 그대로 가져와 답으로 고르는 것이다. 이 문제는 $Re_p > 1{,}000$이라는 조건으로 관성(난류)항이 지배하는 반대 극한을 지정하고 있으므로, Ergun 식에서 어느 항이 남는지부터 먼저 판단해야 한다. 또한 지수를 1(②)이나 3/2(③)로 어림짐작하지 말고, 관성항 식 $\overline{V}_{0M}^2 \propto D_p$에서 제곱근을 취하는 계산 과정을 거쳐야 1/2이라는 지수가 정확히 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

Re_p의 대소 조건이 주어지면 먼저 Ergun 식의 두 항(점성항·관성항) 중 무시되는 항을 결정한다. Re_p가 작으면(층류) 점성항만 남아 $\overline{V}_{0M} \propto D_p^2$, Re_p가 크면(난류) 관성항만 남아 $\overline{V}_{0M} \propto D_p^{1/2}$가 된다는 두 극한을 짝으로 기억해 두면 지수를 헷갈리지 않는다.

암기 포인트

Ergun 식 두 극한: 저Re(층류, 점성 지배) → $\overline{V}_{0M} \propto D_p^2$; 고Re(난류, 관성 지배, $Re_p > 1{,}000$) → $\overline{V}_{0M} \propto D_p^{1/2}$.

NoteBase

문 11. 복사(radiation) 열전달에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 흑체의 총 방사력은 절대온도의 4제곱에 비례한다.

② 복사에 의한 열전달은 매질이 없어도 가능하다.

③ 온도가 증가하면 최대 단색광 복사에너지가 나타나는 파장(λ_{max})은 커진다.

④ 복사는 전자기파에 의한 열전달이다.

정답 3번

출제 포인트

복사 열전달의 기본 성질(스테판-볼츠만 법칙, 매질 무관성, 전자기파 특성)과 흑체 복사 스펙트럼에서 온도와 최대 복사파장의 관계(빈의 변위 법칙)를 구분해서 알고 있는지를 묻는다. 이 문항은 온도가 올라갈 때 최대 단색광 복사에너지가 나타나는 파장이 어떻게 변하는지를 헷갈리게 하는 데 초점이 있다.

핵심 개념

스테판-볼츠만 법칙: 흑체의 총 방사력 E_b는 절대온도의 4제곱에 비례한다, 즉 $E_b = \sigma T^4$이다. 복사는 전자기파(빛)의 형태로 에너지가 전달되는 현상이므로 전도·대류와 달리 매질이 없는 진공에서도 일어난다. 빈의 변위 법칙(Wien's displacement law): 흑체의 복사에너지가 최대가 되는 파장 λ_{max}와 절대온도 T의 곱은 일정하다, 즉 $\lambda_{max}T = b$(상수)이다. 이 식에서 온도 T가 커지면 λ_{max}는 오히려 작아진다 — 온도가 높을수록 최대 복사에너지가 나타나는 파장이 짧은 쪽(예: 가시광선 쪽)으로 이동한다는 뜻이다.

선지별 해설

① 흑체의 총 방사력은 절대온도의 4제곱에 비례한다 → O. 스테판-볼츠만 법칙 $E_b = \sigma T^4$ 그대로이다.
② 복사에 의한 열전달은 매질이 없어도 가능하다 → O. 복사는 전자기파를 매개로 에너지가 전달되므로 진공 중에서도 전달되며, 태양 복사가 진공인 우주 공간을 통과해 지구에 도달하는 것이 대표적인 예이다.
③ 온도가 증가하면 최대 단색광 복사에너지가 나타나는 파장(λ_{max})은 커진다 → X. 빈의 변위 법칙 $\lambda_{max}T = \text{const}$에 따르면 온도가 증가하면 λ_{max}는 오히려 작아진다. '커진다'가 아니라 '작아진다'가 되어야 옳은 설명이다.
④ 복사는 전자기파에 의한 열전달이다 → O. 복사는 전도(분자 진동·자유전자)나 대류(유체 흐름)와 달리 전자기파의 형태로 에너지가 이동하는 열전달 방식이다.

오답 포인트

온도와 최대 복사파장이 '같이 커진다'거나 '비례한다'고 직관적으로 생각하기 쉬운데, 실제로는 반비례 관계(곱이 일정)이다. 온도가 오르면 흑체가 방출하는 빛의 색이 붉은색에서 흰색·파란색 쪽, 즉 파장이 짧은 쪽으로 이동한다는 사실(고온 물체일수록 파장이 짧은 빛을 많이 낸다)을 함께 기억해 두면 혼동을 막을 수 있다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

'온도와 λmax'가 함께 등장하면 곧바로 빈의 변위 법칙 $\lambda_{max}T = \text{const}$를 떠올려 두 값이 반비례 관계임을 확인한다. '온도가 증가하면 λmax가 커진다/증가한다'는 표현이 나오면 틀린 선지일 가능성이 높다.

암기 포인트

스테판-볼츠만: $E_b = \sigma T^4$(총 방사력은 온도의 4제곱에 비례). 빈의 변위 법칙: $\lambda_{max}T = \text{const}$(온도가 오르면 λmax는 작아진다). 복사는 매질이 필요 없는 전자기파 에너지 전달이다.

NoteBase

문 12. 표면적이 10m^2인 500K의 평판 위로 320K의 공기가 흐를 때, 열전달 속도[kW]는? (단, 평균 열전달계수는 $20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$이다)

① 36

② 72

③ 360

④ 720

정답 1번

출제 포인트

대류 열전달의 기본식인 뉴턴의 냉각법칙을 이용해 평판 표면에서 공기로 전달되는 열전달 속도를 구하는 문제이다. 평판 표면적, 평판과 유체의 온도차, 평균 열전달계수가 주어지므로 단위를 맞춰 곱하기만 하면 답이 나온다.

조건 정리

표면적 $A = 10\ \text{m}^2$, 평판 표면온도 $T_s = 500\ \text{K}$, 유입 공기온도 $T_\infty = 320\ \text{K}$, 평균 열전달계수 $\bar{h} = 20\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$이다. 평판이 유체보다 고온이므로 열은 평판에서 공기로 전달된다.

사용할 공식

대류에 의한 열전달 속도(뉴턴의 냉각법칙)는 $q = \bar{h}A(T_s - T_\infty)$이다.

계산 과정

온도차는 $T_s - T_\infty = 500 - 320 = 180\ \text{K}$이다. 이를 공식에 대입하면 $q = 20 \times 10 \times 180 = 36{,}000\ \text{W}$이다. 단위를 kW로 환산하면 $q = 36\ \text{kW}$가 된다.

선지 판단

① 36 → O, 계산 결과와 정확히 일치한다.
② 72 → X, 온도차 180 K 대신 360 K(=2배)를 곱하는 등의 착오로 나올 수 있는 값으로 실제 계산값의 2배이다.
③ 360 → X, 계산값 36 kW를 W 단위(36,000 W)와 혼동하거나 단위 환산을 누락하면 나올 수 있는 10배 값이다.
④ 720 → X, 온도차나 면적을 중복 적용하는 등의 착오로 나올 수 있는 값으로 실제 계산값의 20배이다.

NoteBase

오답 포인트

이 문제는 단위 환산(W를 kW로 바꾸는 과정)에서 실수하기 쉽다. $q = \bar{h}A\Delta T$를 계산하면 W 단위가 나오므로 1000으로 나누어 kW로 바꾸는 것을 빠뜨리면 360이라는 오답을 고르게 된다. 또한 온도차를 절대온도 그대로 빼지 않고 섭씨로 잘못 환산하거나 부호를 반대로 적용해 다른 값이 나오지 않도록 주의한다.

다시 나오면 이렇게 판단

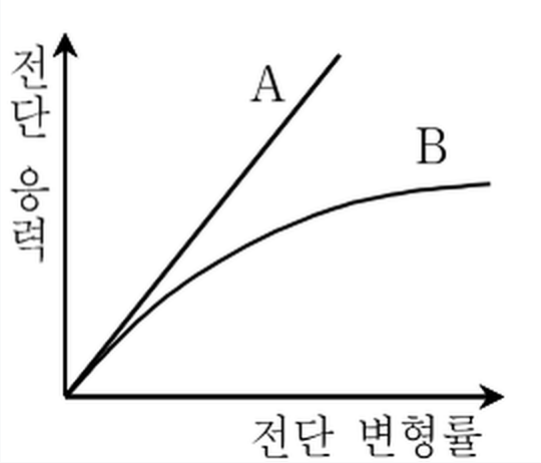
평판과 유체 사이의 대류 열전달 속도를 묻는 문제는 언제나 $q = \bar{h}A\Delta T$ 하나의 식으로 해결된다. 표면적, 온도차, 열전달계수 세 값을 그대로 곱한 뒤 문제에서 요구하는 단위(W인지 kW인지)를 마지막에 반드시 확인한다.

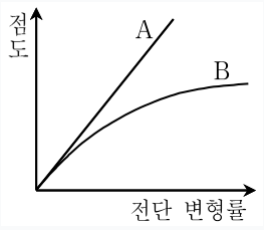
암기 포인트

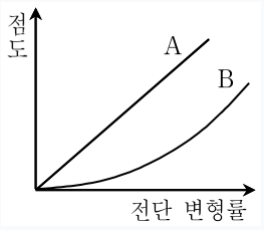
뉴턴의 냉각법칙: $q = \bar{h}A\Delta T$ (열전달 속도 = 열전달계수 × 표면적 × 온도차). 계산 후 단위를 W에서 kW로 바꿀 때는 1000으로 나눈다.

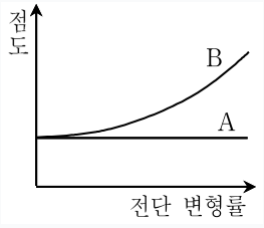
NoteBase

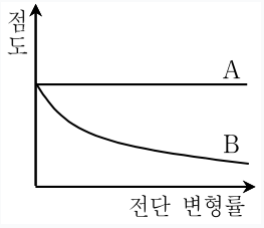
문 13. 유체 A와 B의 전단 응력(shear stress)과 전단 변형률(rate of shear strain)의 관계가 그림과 같을 때, 전단 변형률의 변화에 따른 점도를 옳게 나타낸 것은?



① 

② 

③ 

④ 

정답 4번

NoteBase

출제 포인트

전단 응력(τ)-전단 변형률($\dot{\gamma}$) 그래프의 기울기가 곧 점도라는 점을 이해하고 있는지 묻는 문항이다. 점도는 $\mu = \tau/\dot{\gamma}$로 정의되며, 원점을 지나는 직선의 기울기 또는 곡선 위 한 점에서 원점까지 이은 직선의 기울기로 나타난다. 위 그래프에서 A는 원점을 지나는 직선이므로 전단 변형률이 아무리 커져도 이 비율(기울기)이 항상 같은 값으로 일정하다. 반면 B는 원점에서 시작해 위로 오목하게 휘어지며 변형률이 커질수록 곡선의 기울기(그래프상 접선 기울기이자, 원점에서 그은 직선의 기울기)가 점점 완만해진다. 즉 변형률이 커질수록 응력의 증가폭이 상대적으로 줄어드는 모양이므로, 같은 비율인 점도는 변형률이 커질수록 작아진다. 이를 점도-전단 변형률 그래프로 옮기면 A는 일정한 수평선, B는 높은 값에서 시작해 점점 낮아지는 감소 곡선이 되어야 한다.

선지별 해설

① X. A를 점도-전단 변형률 그래프에서 기울기가 점점 커지는 직선처럼, B를 점점 완만해지는 증가 곡선처럼 그렸다. 그러나 원그래프에서 A는 기울기가 일정한 직선이므로 점도(기울기)도 일정해야 하는데, 이 선지는 A의 점도가 계속 증가하는 것으로 잘못 나타냈다. → 점도는 변형률과 무관하게 일정한 수평선이어야 한다.
② X. A는 점도가 일정(수평선)해야 하는데, 이 선지는 A의 점도를 계속 증가하는 직선으로 나타냈고 B도 증가하는 곡선으로 나타냈다. 원그래프에서 B는 변형률이 커질수록 기울기가 완만해지므로 점도는 증가가 아니라 감소해야 한다.
③ X. A(점도 일정)와 B(점도 변화)의 그래프 자체 구성 순서는 맞을 수 있으나, 이 선지는 A를 낮은 수평선, B를 변형률이 커질수록 증가하는 곡선으로 나타냈다. 원그래프에서 B의 기울기는 변형률이 커질수록 오히려 완만해지므로(점도가 감소하므로), B가 증가하는 모양은 틀렸다.
④ O. A는 원그래프에서 기울기가 일정한 직선이므로 점도가 변형률과 무관하게 일정하며, 이를 높은 수평선으로 나타낸 것이 맞다. B는 원그래프에서 변형률이 작을 때는 A와 비슷한 기울기(같은 값 근처)로 시작하지만, 변형률이 커질수록 곡선이 눕게 되어 기울기(점도)가 점점 작아진다. 따라서 A와 같은 값에서 출발해 점점 낮아지는 감소 곡선으로 나타낸 것이 옳다.

오답 포인트

이 문항에서 실수하기 쉬운 부분은 원그래프의 곡선 모양과 점도 그래프의 모양을 그대로 같다고 착각하는 것이다. 원그래프(응력-변형률)에서 위로 오목한 증가 곡선이라고 해서 점도(기울기) 그래프도 증가 곡선이 되는 것이 아니라, 오히려 기울기가 완만해지는 만큼 점도는 감소한다. 즉 응력 그래프의 기울기 변화 방향과 점도 그래프의 증감 방향이 반대로 대응된다는 점을 놓치면 ①·②·③처럼 방향을 거꾸로 그린 오답을 고르게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

전단응력-전단변형률 그래프가 주어지고 점도 그래프를 묻는 문제가 나오면, 먼저 각 곡선이 직선인지 위로 오목한지 아래로 오목한지를 확인한다. 원점을 지나는 직선이면 점도는 변형률과 무관하게 일정한 수평선이고, 위로 오목(기울기가 점점 완만)하면 점도는 감소하는 곡선(가유사소성/전단박화 유체), 아래로 오목(기울기가 점점 가팔라짐)하면 점도는 증가하는 곡선(다일런트/전단농화 유체)으로 대응시켜 판단한다.

NoteBase

암기 포인트

점도 $\mu = \tau/\dot{\gamma}$ = 응력-변형률 그래프에서 원점과 그 점을 잇는 직선의 기울기. 직선(뉴턴 유체)→점도 일정(수평선). 위로 오목(기울기 완만해짐)→점도 감소(전단박화, 예: 폴리머 용액). 아래로 오목(기울기 가팔라짐)→점도 증가(전단농화, 예: 전분물).

NoteBase

문 14. 몰분율이 각각 0.2, 0.4, 0.4인 A, B, C로 이루어진 기체 혼합물에서 고정면에 대한 각 성분의 절대속도는 각각 $10\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$, $2\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$, $-12\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$이다. A의 농도가 $12\mathrm{mol}\cdot\mathrm{m}^{-3}$일 때, A의 몰 확산 플럭스 $J_A[\mathrm{mol}\cdot\mathrm{m}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}]$는?

① 24

② -24

③ 144

④ -144

정답 3번

출제 포인트

고정 좌표계에서 관측한 각 성분의 절대속도가 주어졌을 때, 몰 평균속도를 구하고 이를 기준으로 한 상대속도로부터 성분 A의 몰 확산 플럭스 J_A를 계산할 수 있는지를 묻는다. 절대속도(고정면 기준)와 확산속도(몰 평균속도 기준)를 구분하는 것이 핵심이다.

조건 정리

몰분율: $x_A = 0.2,\ x_B = 0.4,\ x_C = 0.4$. 고정면에 대한 절대속도: $u_A = 10\ \mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1},\ u_B = 2\ \mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1},\ u_C = -12\ \mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. A의 농도 $c_A = 12\ \mathrm{mol}\cdot\mathrm{m}^{-3}$이므로 전체 몰농도는 $c = c_A/x_A = 12/0.2 = 60\ \mathrm{mol}\cdot\mathrm{m}^{-3}$이다.

사용할 공식

몰 평균속도(고정면 기준): $u_M = \sum_i x_i u_i = x_A u_A + x_B u_B + x_C u_C$ 성분 A의 몰 확산 플럭스(몰 평균속도 기준 상대속도에 의한 플럭스): $J_A = c_A(u_A - u_M)$

계산 과정

몰 평균속도를 구하면 $u_M = (0.2)(10) + (0.4)(2) + (0.4)(-12) = 2 + 0.8 - 4.8 = -2\ \mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ A의 상대속도(확산속도)는 $u_A - u_M = 10 - (-2) = 12\ \mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ 따라서 몰 확산 플럭스는 $J_A = c_A(u_A - u_M) = 12 \times 12 = 144\ \mathrm{mol}\cdot\mathrm{m}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$

NoteBase

선지 판단

① 24: 몰 평균속도를 0으로 잘못 두거나 계산 과정에서 부호·배수를 잘못 처리했을 때 나오는 값이다 → 틀린 표현.
② -24: 상대속도의 부호를 반대로 처리한 경우 나오는 값이다 → 틀린 표현.
③ 144: 몰 평균속도 $u_M = -2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$를 정확히 구하고 $J_A = c_A(u_A - u_M) = 12 \times 12 = 144$로 계산한 값과 일치한다 → 옳은 표현.
④ -144: 상대속도 $u_A - u_M$ 대신 $u_M - u_A$로 부호를 반대로 계산했을 때 나오는 값이다 → 틀린 표현.

오답 포인트

이 문제의 함정은 절대속도(고정 좌표계 기준)를 그대로 확산속도로 착각하는 것이다. 몰 확산 플럭스는 반드시 몰 평균속도를 기준으로 한 상대속도에서 정의되므로, 먼저 $u_M = \sum x_i u_i$를 구하는 단계를 빠뜨리면 안 된다. 또한 u_M이 음수(-2)로 나오는 것을 실수로 무시하고 부호를 잘못 대입하면 ①, ②, ④ 같은 오답이 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

성분의 '절대속도'가 주어지고 몰 확산 플럭스를 물으면, 항상 몰분율 가중합으로 몰 평균속도부터 구한다. 이후 구하고자 하는 성분의 절대속도에서 몰 평균속도를 뺀 값에 그 성분의 농도를 곱하면 몰 확산 플럭스가 된다.
부호를 끝까지 유지하며 계산하는 것이 정확도의 관건이다.

암기 포인트

몰 평균속도 $u_M = \sum_i x_i u_i$, 몰 확산 플럭스 $J_A = c_A(u_A - u_M)$를 한 세트로 기억해 둔다. 전체 몰농도가 필요하면 $c = c_A / x_A$로 구할 수 있다는 점도 함께 정리해 둔다.

NoteBase

문 15. 탈거탑(stripping column)을 이용하여 에탄올로부터 미량의 난용해성 물질을 제거하고자 한다. 평형선이 $y^* = 110x$일 때, 총괄효율(η_o)은? (단, 액상과 기상의 질량유속은 각각 $400\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$와 $40\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$이고, 머프리(Murphree) 효율($\eta_M$)은 0.5이다)

① $\frac{\ln 4}{\ln 9}$
② $\frac{\ln 5}{\ln 10}$
③ $\frac{\ln 6}{\ln 11}$
④ $\frac{\ln 7}{\ln 12}$

정답 3번

출제 포인트

다단 접촉 장치(탈거탑, 흡수탑 등)에서 각 단의 머프리(Murphree) 효율과 탑 전체의 총괄효율(연결선을 이용한 계단작도 효율) 사이의 관계식(Lewis식)을 적용할 수 있는지를 묻는다. 핵심은 평형선의 기울기와 액상·기상 유속으로부터 탈거계수(스트리핑 인자) $\lambda = \frac{mG}{L}$를 구하고, 이를 머프리 효율과 결합해 총괄효율로 환산하는 절차이다.

조건 정리

평형선: $y^* = 110x$이므로 기울기 $m = 110$. 액상 유속 $L = 400\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, 기상 유속 $G = 40\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$. 머프리 효율 $\eta_M = 0.5$. 구하는 값은 총괄효율 η_o이다.

사용할 공식

탈거계수(스트리핑 인자): $\lambda = \frac{mG}{L}$. 머프리 효율과 총괄효율의 관계(Lewis식): $\eta_o = \frac{\ln[1 + \eta_M(\lambda - 1)]}{\ln \lambda}$.

계산 과정

먼저 탈거계수를 구하면 $\lambda = \frac{mG}{L} = \frac{110 \times 40}{400} = 11$이다. 이를 총괄효율 식에 대입하면
$\eta_o = \frac{\ln[1 + 0.5(11 - 1)]}{\ln 11} = \frac{\ln(1 + 5)}{\ln 11} = \frac{\ln 6}{\ln 11}$이다.

선지 판단

① $\frac{\ln 4}{\ln 9}$: X — 분자·분모 모두 계산값보다 작아 λ나 괄호 안 값을 잘못 대입한 결과이다.
② $\frac{\ln 5}{\ln 10}$: X — 분모가 10이 되려면 $\lambda = 10$이어야 하는데, $\lambda = mG/L = 11$이므로 성립하지 않는다.
③ $\frac{\ln 6}{\ln 11}$: O — $\lambda = 11$, $1 + \eta_M(\lambda - 1) = 1 + 0.5 \times 10 = 6$이 정확히 반영된 값이다.
④ $\frac{\ln 7}{\ln 12}$: X — 분모가 12가 되려면 $\lambda = 12$여야 하므로 유속 대입이 틀린 경우에 나오는 값이다.

NoteBase

오답 포인트

가장 흔한 실수는 탈거계수 $\lambda = mG/L$을 구할 때 액상·기상 유속을 반대로 넣어 $L/(mG)$로 계산하거나, m, G, L 중 하나를 빠뜨리는 것이다. 또한 총괄효율 공식의 분자에서 $1 + \eta_M(\lambda - 1)$을 $\eta_M\lambda$로 단순화해 계산하면 분자값이 틀어져 ①·②·④ 같은 오답이 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

평형선 기울기 m, 기상 유속 G, 액상 유속 L이 주어지면 가장 먼저 $\lambda = mG/L$부터 계산해 숫자로 확정한다. 그 다음 머프리 효율 η_M을 대입해 $1 + \eta_M(\lambda - 1)$을 구하고, 마지막으로 $\ln[\cdot]/\ln\lambda$ 형태로 정리하면 선지의 분모(=λ)와 분자(=$1 + \eta_M(\lambda - 1)$)가 바로 대응되므로 검산이 쉽다.

암기 포인트

탈거계수(스트리핑 인자) $\lambda = mG/L$, 흡수계수(흡수 인자)는 그 역수 $A = L/(mG)$로 정의됨을 함께 기억해 둔다. 머프리 효율과 총괄효율의 관계식 $\eta_o = \frac{\ln[1 + \eta_M(\lambda - 1)]}{\ln\lambda}$은 다단 탑의 효율 환산 문제에서 그대로 재사용되므로 공식 형태 자체를 외워 둔다.

NoteBase

문 16. 포화액체의 풀비등(pool boiling)에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 포화액체의 풀비등은 일반적으로 자연대류, 핵비등, 전이비등, 막비등의 네 구간으로 나눌 수 있다.

② 전이비등 구간에서 열플럭스는 Leidenfrost점에서 최소점에 도달한다.

③ 막비등 구간에서는 열전달의 주요 저항이 가열표면을 덮고 있는 증기막에 의해 나타난다.

④ 핵비등 구간에서는 복사 열전달이 중요한 역할을 한다.

정답 4번

출제 포인트

포화액체의 풀비등 곡선(boiling curve)을 자연대류·핵비등·전이비등·막비등의 네 구간으로 나누고, 각 구간의 열전달 메커니즘과 특징을 정확히 구분하는지를 묻는다. 특히 각 구간에서 어떤 열전달 방식(대류/복사)이 지배적인지가 핵심이다.

핵심 개념

풀비등 곡선은 표면 과열도(벽면온도-포화온도)를 가로축으로 하여 자연대류 구간, 핵비등 구간, 전이비등 구간, 막비등 구간의 순서로 진행된다. 핵비등 구간은 표면에서 기포가 생성·이탈하며 액체를 강하게 교반시키는 대류 열전달이 지배적인 구간으로, 열플럭스가 과열도 증가에 따라 크게 증가해 최대열유속(임계열유속)에 이른다. 전이비등 구간은 핵비등과 막비등이 불안정하게 혼재하는 구간으로, 과열도가 증가할수록 오히려 열플럭스가 감소해 Leidenfrost점(막비등 시작점)에서 최솟값에 도달한다. 막비등 구간에서는 가열면 전체가 증기막으로 덮여 이 증기막이 주된 열저항으로 작용하며, 온도가 매우 높아지므로 복사 열전달의 비중이 커진다.

선지별 해설

① O — 포화액체의 풀비등은 과열도 증가 순서에 따라 자연대류, 핵비등, 전이비등, 막비등의 네 구간으로 구분되는 것이 표준적인 분류이다.
② O — 전이비등 구간은 과열도가 증가함에도 열플럭스가 감소하는 구간이며, 이 구간의 끝인 Leidenfrost점에서 열플럭스가 최솟값(극소점)에 도달한다.
③ O — 막비등 구간에서는 가열표면 전체를 얇은 증기막이 덮고 있고, 이 증기막의 낮은 열전도도가 열전달의 주요 저항으로 작용한다.
④ X — 핵비등 구간은 기포 생성과 액체 교반에 의한 대류 열전달이 지배적인 구간이며 복사 열전달의 기여는 무시할 만큼 작다. 복사 열전달이 중요해지는 구간은 표면온도가 매우 높은 막비등 구간이다. → 올바른 표현: '핵비등 구간에서는 대류(교반) 열전달이 지배적이며, 복사 열전달이 중요한 역할을 하는 구간은 막비등 구간이다.'

NoteBase

오답 포인트

핵비등과 막비등의 열전달 메커니즘을 뒤바꿔 기억하기 쉽다. 핵비등=기포에 의한 대류가 핵심, 막비등=증기막 저항과 고온에서의 복사 기여가 핵심이라는 대응을 혼동하면 ④를 옳은 설명으로 잘못 판단하게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

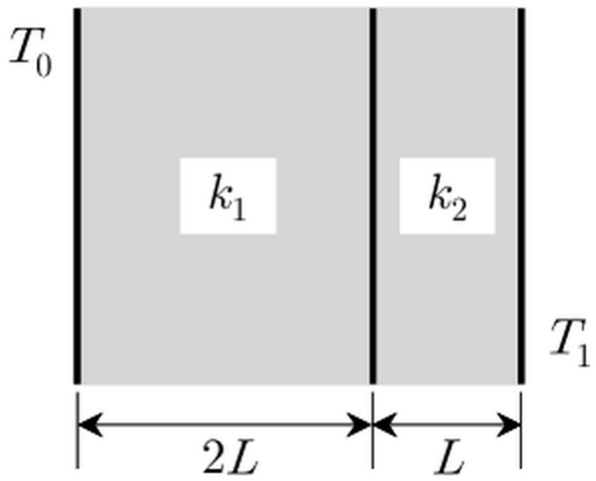
선지에 '핵비등 구간에서 복사가 중요하다'는 식의 서술이 나오면 우선 의심한다. 복사 열전달은 표면온도가 매우 높아지는 막비등 구간에서만 유의미하게 커진다는 점을 기준으로 참/거짓을 가른다.

암기 포인트

풀비등 4구간 순서: 자연대류 → 핵비등(대류·기포 지배) → 전이비등(불안정, Leidenfrost점=열플럭스 최솟값) → 막비등(증기막 저항+복사 중요).

NoteBase

문 17. 열전도도가 각각 k_1과 k_2이고 두께가 $2L$ 및 L인 두 평판이 그림과 같이 접해 있을 때, 정상상태에서 유효열전도도(effective thermal conductivity) k_{eff}를 이용하여 전도 열전달식을 $q = k_{\text{eff}} \frac{T_0 - T_1}{3L}$로 표현하였다. 이때 k_{eff}를 k_1과 k_2로 나타낸 것은? (단, 평판의 면적은 두께에 비하여 매우 넓고 평판 사이에 공극은 없으며, $T_0 > T_1$이다)



① $\frac{3k_1k_2}{k_1 + 2k_2}$
② $\frac{k_1k_2}{k_1 + 2k_2}$
③ $\frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2}$
④ $\frac{k_1 + 2k_2}{3}$

정답 1번

출제 포인트

두께가 다른 두 평판이 직렬로 접해 있을 때 정상상태 1차원 전도를 등가 열저항으로 바꾸고, 전체 두께 3L에 대해 정의된 유효열전도도 k_{eff}를 두 평판의 열전도도 k_1, k_2로 표현하는 문제이다. 두 평판이 열유동 방향으로 직렬 연결되어 있다는 점을 인식하는 것이 핵심이다.

조건 정리

왼쪽 평판: 두께 $2L$, 열전도도 k_1. 오른쪽 평판: 두께 L, 열전도도 k_2. 두 평판의 단면적은 동일하고 두께에 비해 매우 넓어 1차원 정상상태 전도로 볼 수 있으며, 접촉면에 공극(접촉저항)이 없다. 전체 두께는 $2L + L = 3L$이고 양 끝단 온도는 T_0(왼쪽, 고온), T_1(오른쪽, 저온)이다. 문제에서 주어진 전체 열전달식은 $q = k_{eff} \frac{T_0 - T_1}{3L}$이다.

NoteBase

사용할 공식

정상상태에서는 평판을 통과하는 열유속 q가 어느 위치에서나 동일하므로, 각 평판에 대해 각각 $q = k_1\frac{T_0 - T_m}{2L}$, $q = k_2\frac{T_m - T_1}{L}$이 성립한다($T_m$은 두 평판 접촉면의 온도). 두 식을 온도차에 대해 정리하면 $T_0 - T_m = \frac{2L}{k_1}q$, $T_m - T_1 = \frac{L}{k_2}q$이고, 이를 더하면 $T_0 - T_1 = q\left(\frac{2L}{k_1} + \frac{L}{k_2}\right)$이다. 이는 직렬 열저항의 합과 같은 형태이다.

계산 과정

위 식을 q에 대해 정리하면 $q = \frac{T_0 - T_1}{\frac{2L}{k_1} + \frac{L}{k_2}}$ 이다. 이를 문제에서 주어진 $q = k_{eff}\frac{T_0 - T_1}{3L}$과 비교하면 $k_{eff} = \frac{3L}{\frac{2L}{k_1} + \frac{L}{k_2}} = \frac{3}{\frac{2}{k_1} + \frac{1}{k_2}}$ 이다. 분모를 통분하면 $\frac{2}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{2k_2 + k_1}{k_1k_2}$이므로 $k_{eff} = \frac{3k_1k_2}{k_1 + 2k_2}$ 로 정리된다.

선지 판단

① $k_{eff} = \frac{3k_1k_2}{k_1 + 2k_2}$: O. 계산 과정에서 얻은 식과 정확히 일치한다.
② $k_{eff} = \frac{k_1k_2}{k_1 + 2k_2}$: X. 분자의 계수 3이 빠진 값으로, 전체 두께 3L을 반영하지 않은 오답이다.
③ $k_{eff} = \frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2}$: X. 두 평판의 두께가 같다고(2L, L이 아니라 동일 두께로) 가정했을 때 나오는 병렬형 조화평균 형태로, 이 문제의 두께 조건과 맞지 않는다.
④ $k_{eff} = \frac{k_1 + 2k_2}{3}$: X. 이는 두 열전도도를 두께로 가중한 산술평균(병렬 연결에서 쓰는 형태)으로, 직렬 연결에서 성립하는 조화평균 관계를 반영하지 못한 오답이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 직렬(같은 열유속, 온도차가 더해짐)과 병렬(같은 온도차, 열유속이 더해짐)을 혼동하여 산술평균 형태인 ④를 고르는 것이다. 또한 두께 2L과 L을 계수에 반영하지 않고 단순히 k_1, k_2만 넣어 ②나 ③처럼 두께 가중치를 누락하는 오류도 자주 나온다. k_{eff}의 정의식이 전체 두께 3L 기준이라는 점을 놓치면 분자의 3이 빠지게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

여러 층이 열유동 방향으로 직렬로 쌓인 평판 문제는 각 층의 열저항 $R_i = \frac{L_i}{k_iA}$을 모두 더한 뒤 전체 두께와 전체 온도차로 k_{eff}를 역산한다는 원칙으로 접근한다. 두께가 다르면 반드시 각 층의 두께를 열저항식에 그대로 넣어야 하며, 병렬(같은 온도차를 공유하는 구조)과 직렬(같은 열유속을 공유하는 구조)을 그림에서 먼저 구분하는 것이 우선이다.

암기 포인트

직렬 전도: 열유속 q가 모든 층에서 같고, 온도차는 각 층의 $\frac{L_i}{k_i}$에 비례해 나뉘어 전체 저항이 합으로 더해진다(전기 저항의 직렬합과 동일한 구조). 전체 두께 L_{tot}에 대한 유효열전도도는 $k_{eff} = \frac{L_{tot}}{\sum L_i/k_i}$로 정의된다는 관계를 기억해 둔다.

NoteBase

문 18. 지름이 4 cm이고 Reynolds 수(Re)가 20,000인 젖은 벽탑(wetted-wall tower)에서 액체를 공기 중으로 증발시키고 있다. Sherwood 수(Sh)에 대한 Reynolds 수와 Schmidt 수(Sc)의 상관식이 $Sh = 0.01 \times Re \times Sc^{0.5}$일 때, 기체 경막(gas film)의 유효 두께[cm]는? (단, 공기의 밀도와 점도는 각각 $1 \times 10^{-3}[g \cdot cm^{-3}]$와 $2 \times 10^{-4}[g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}]$이고, 공기에 대한 액체의 확산계수는 $0.2[cm^2 \cdot s^{-1}]$이다)

① 0.01

② 0.02

③ 0.03

④ 0.04

정답 2번

출제 포인트

Sherwood 수의 정의로부터 물질전달계수를 구하고, 이를 다시 유효 경막 두께로 환산하는 문제이다. Sherwood 수 상관식에 대입할 Schmidt 수를 먼저 계산해야 하고, 마지막에 물질전달계수를 경막 두께로 바꾸는 관계식까지 이어서 적용해야 한다.

조건 정리

지름 $d = 4$ cm, Reynolds 수 $Re = 20{,}000$, 상관식 $Sh = 0.01 \times Re \times Sc^{0.5}$, 공기 밀도 $\rho = 1 \times 10^{-3}$ g $\cdot$ cm^{-3}, 공기 점도 $\mu = 2 \times 10^{-4}$ g $\cdot$ cm^{-1} $\cdot$ s^{-1}, 확산계수 $D_{AB} = 0.2$ cm^2 $\cdot$ s^{-1}이다.

사용할 공식

Schmidt 수는 $Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$이다. Sherwood 수는 물질전달계수 k_c와 지름 d, 확산계수 D_{AB}로 $Sh = \frac{k_c d}{D_{AB}}$로 정의된다. 기체 경막의 유효 두께 δ는 $k_c = \frac{D_{AB}}{\delta}$, 즉 $\delta = \frac{D_{AB}}{k_c}$로 구한다.

계산 과정

먼저 Schmidt 수를 구하면 $Sc = \frac{2 \times 10^{-4}}{(1 \times 10^{-3})(0.2)} = \frac{2 \times 10^{-4}}{2 \times 10^{-4}} = 1$이다.
다음으로 Sherwood 수는 $Sh = 0.01 \times 20{,}000 \times 1^{0.5} = 200$이다.
$Sh = \frac{k_c d}{D_{AB}}$에서 물질전달계수를 구하면 $k_c = \frac{Sh \times D_{AB}}{d} = \frac{200 \times 0.2}{4} = 10$ cm $\cdot$ s^{-1}이다.
마지막으로 유효 두께는 $\delta = \frac{D_{AB}}{k_c} = \frac{0.2}{10} = 0.02$ cm이다.

NoteBase

선지 판단

① 0.01 → 계산된 $\delta = 0.02$ cm와 다르다. 지름 4 cm를 확산계수 대신 잘못 대입하는 등 계산 과정에서 값을 절반으로 줄여 얻을 수 있는 오답이다.
② 0.02 → 계산 과정과 일치하는 값으로 정답이다.
③ 0.03 → 확산계수 대신 다른 값을 대입하거나 Reynolds 수를 잘못 반영했을 때 나올 수 있는 오답이다.
④ 0.04 → 물질전달계수를 절반으로 잘못 구했을 때 나올 수 있는 오답이다.

오답 포인트

Schmidt 수를 구할 때 분모의 ρD_{AB}를 곱이 아닌 합이나 나눗셈으로 잘못 계산하면 1이 아닌 값이 나와 이후 계산이 전부 어긋난다. 또한 $Sh = \frac{k_c d}{D_{AB}}$에서 물질전달계수를 구할 때 지름과 확산계수의 위치를 바꿔 곱하거나 나누는 순서를 헷갈리기 쉽다. 마지막으로 유효 경막 두께가 물질전달계수의 역수 관계($\delta = D_{AB}/k_c$)라는 점을 놓치고 k_c 값 자체를 답으로 고르지 않도록 주의한다.

다시 나오면 이렇게 판단

Sherwood 수 문제가 나오면 항상 (1) Schmidt 수 계산 (2) 상관식으로 Sherwood 수 계산 (3) $Sh = k_c d/D_{AB}$로 물질전달계수 계산의 순서로 접근한다. 문제에서 '유효 두께'를 물으면 마지막에 $\delta = D_{AB}/k_c$ 한 단계를 반드시 추가한다는 점을 기억한다.

암기 포인트

Schmidt 수 $Sc = \mu/(\rho D_{AB})$, Sherwood 수 $Sh = k_c d/D_{AB}$, 유효 경막 두께 $\delta = D_{AB}/k_c$의 세 관계식을 순서대로 연결해 외워 둔다.

NoteBase

문 19. 공기 밀도가 $1.2kg \cdot m^{-3}$이고 헬륨 밀도가 $0.2kg \cdot m^{-3}$일 때, 직경 $2m$인 구형 헬륨 열기구가 들어 올릴 수 있는 최대 무게 $[N]$는? (단, 열기구 자체의 무게는 무시하고, 원주율은 3, 중력가속도는 $10m \cdot s^{-2}$으로 한다)

① 40

② 50

③ 60

④ 70

정답 1번

출제 포인트

구형 열기구가 들어 올릴 수 있는 최대 무게를 구하는 문제로, 부력(공기가 밀어내는 힘)에서 기구 내부 헬륨의 무게를 뺀 값이 순수하게 짐을 들어 올리는 데 쓸 수 있는 힘이라는 점을 이해하는지 확인한다.

조건 정리

공기 밀도 $\rho_{air} = 1.2\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, 헬륨 밀도 $\rho_{He} = 0.2\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, 구의 직경 $d = 2\ \mathrm{m}$(반지름 $r = 1\ \mathrm{m}$), 원주율 $\pi = 3$, 중력가속도 $g = 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$, 열기구 자체 무게는 무시한다.

사용할 공식

구의 부피 $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, 부력 $F_{buoyancy} = \rho_{air} V g$, 기구 안 헬륨의 무게 $W_{He} = \rho_{He} V g$, 최대로 들어 올릴 수 있는 무게 $W_{lift} = F_{buoyancy} - W_{He} = (\rho_{air} - \rho_{He}) V g$.

계산 과정

구의 부피는 $V = \frac{4}{3} \times 3 \times 1^3 = 4\ \mathrm{m^3}$이다. 부력은 $F_{buoyancy} = 1.2 \times 4 \times 10 = 48\ \mathrm{N}$이고, 기구 안 헬륨의 무게는 $W_{He} = 0.2 \times 4 \times 10 = 8\ \mathrm{N}$이다. 열기구 자체의 무게는 무시하므로, 들어 올릴 수 있는 최대 무게는 $W_{lift} = 48 - 8 = 40\ \mathrm{N}$이다.

선지 판단

① 40: 부력 48N에서 헬륨 자체 무게 8N을 뺀 값과 정확히 일치하므로 옳다.
② 50: 부력 48N보다 큰 값이므로 부력에서 헬륨 무게를 빼는 과정을 거치지 않고 잘못 계산한 값이다.
③ 60: 부피를 잘못 계산했거나(예를 들어 반지름 대신 직경을 그대로 세제곱) 밀도 차를 잘못 적용한 경우에 나올 수 있는 값으로 틀렸다.
④ 70: 부력 48N보다 훨씬 큰 값으로, 밀도 차 대신 공기 밀도와 헬륨 밀도를 더하는 등 잘못된 식을 쓴 경우에 나오는 값이므로 틀렸다.

NoteBase

오답 포인트

부력만 계산하고 헬륨 자체의 무게를 빼지 않으면 48N이 나와 선지에 없는 값이 되어 다시 계산 과정을 점검하게 되는데, 이때 밀도 차 대신 밀도 합을 쓰거나 반지름과 직경을 혼동해 부피를 잘못 구하면 60이나 70과 같은 오답이 나온다. 반드시 '공기가 밀어내는 힘(부력)에서 기구 안 헬륨 자체의 무게를 뺀다'는 순서를 지켜야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

기체를 채운 기구나 풍선이 들어 올릴 수 있는 무게를 묻는 문제는 항상 '부력 − 채운 기체의 무게'로 접근한다. 즉 (외부 유체 밀도 − 내부 기체 밀도) × 부피 × 중력가속도의 형태로 한 번에 계산하면 실수를 줄일 수 있다. 부피 계산 시 반지름과 직경을 헷갈리지 않도록 직경이 주어지면 먼저 반으로 나눠 반지름을 구한다.

암기 포인트

구의 부피 공식 $V = \frac{4}{3}\pi r^3$과, 기구가 들어 올릴 수 있는 최대 무게는 (외부 유체 밀도 − 내부 기체 밀도) × 부피 × 중력가속도라는 관계를 함께 외워 둔다.

NoteBase

문 20. 중력장 내 액체 속에서 자유낙하 하는 구형 고체에 작용하는 힘은 다음과 같다. 이 구형 고체의 종말속도는? (단, ρ는 액체의 밀도, ρ_p는 고체의 밀도, m은 고체의 질량이다. C_D는 항력계수, g는 중력가속도, u는 액체에 대한 고체의 상대속도, A_p는 고체의 투영면적이다)

중력: $F_g = mg$
부력: $F_b = \frac{m\rho g}{\rho_p}$
항력: $F_d = \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2}$

① $\frac{A_p \rho_p C_D \rho}{2g(\rho_p - \rho)m}$
② $\left[\frac{A_p \rho_p C_D \rho}{2g(\rho_p - \rho)m}\right]^{1/2}$
③ $\frac{2g(\rho_p - \rho)m}{A_p \rho_p C_D \rho}$
④ $\left[\frac{2g(\rho_p - \rho)m}{A_p \rho_p C_D \rho}\right]^{1/2}$

정답 4번

출제 포인트

액체 속에서 자유낙하하는 구형 고체가 종말속도(terminal velocity)에 도달했을 때, 중력·부력·항력이 이루는 힘의 균형식을 세우고 이를 상대속도 u에 대해 정리하는 문제이다. 종말속도에서는 가속도가 0이므로 알짜힘이 0이 되어야 한다는 점이 핵심이다.

조건 정리

중력: $F_g = mg$
부력: $F_b = \frac{m\rho g}{\rho_p}$
항력: $F_d = \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2}$
종말속도에서는 낙하 방향(중력)과 반대 방향(부력+항력)의 힘이 평형을 이루므로 $F_g = F_b + F_d$가 성립한다.

사용할 공식

힘의 평형식 $mg = \frac{m\rho g}{\rho_p} + \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2}$을 세운 뒤 u에 대해 정리한다.

계산 과정

힘의 평형식을 쓰면 $mg = \frac{m\rho g}{\rho_p} + \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2}$이다.
좌변의 mg를 우변의 부력항과 묶어 정리하면 $mg\left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) = \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2}$가 된다.
괄호 안을 통분하면 $mg \cdot \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} = \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2}$이다.
양변에 $\frac{2}{C_D \rho A_p}$를 곱하면 $u^2 = \frac{2mg(\rho_p - \rho)}{\rho_p C_D \rho A_p}$를 얻는다.
마지막으로 양변에 제곱근을 취하면 $u = \left[\frac{2g(\rho_p - \rho)m}{A_p \rho_p C_D \rho}\right]^{1/2}$이 되어 종말속도의 식이 완성된다.

NoteBase

선지 판단

① $A_p\rho_p C_D\rho/(2g(\rho_p-\rho)m) \rightarrow$ X, 계산 결과인 u^2의 역수 형태이며 제곱근도 취하지 않아 차원과 형태가 모두 맞지 않는다.
② $[A_p\rho_p C_D\rho/(2g(\rho_p-\rho)m)]^{1/2} \rightarrow$ X, 제곱근은 올바르게 취했으나 분자와 분모가 뒤바뀐 형태이다. 올바른 식은 $2g(\rho_p-\rho)m$이 분자, $A_p\rho_p C_D\rho$가 분모여야 한다.
③ $2g(\rho_p-\rho)m/(A_p\rho_p C_D\rho) \rightarrow$ X, 분자·분모의 배치는 올바르지만 제곱근을 취하지 않아 u^2에 해당하는 값이며 u 자체가 아니다.
④ $[2g(\rho_p-\rho)m/(A_p\rho_p C_D\rho)]^{1/2} \rightarrow$ O, 힘의 평형식을 정리해 얻은 $u^2=\frac{2mg(\rho_p-\rho)}{\rho_p C_D\rho A_p}$에 제곱근을 취한 것과 정확히 일치한다.

오답 포인트

이 문항은 계산 자체보다 마지막 두 단계, 즉 '분자·분모를 바르게 배치했는가'와 '제곱근을 취했는가'에서 오답이 갈린다. ①은 두 실수(역수+제곱근 누락)가 겹친 선지, ②는 제곱근은 취했지만 분자·분모가 뒤바뀐 선지, ③은 배치는 맞지만 제곱근을 빠뜨린 선지로, 계산 과정의 마지막 두 조작을 각각 하나씩 빠뜨리도록 설계되어 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

종말속도 문제는 항상 '중력 = 부력 + 항력'의 힘의 평형식에서 출발한다고 정리해 둔다. 평형식을 세운 뒤에는 좌변의 중력항과 부력항을 먼저 묶어 $(\rho_p-\rho)/\rho_p$ 형태로 정리하고, 항력식의 u^2을 분리해 정리한 다음 마지막에 제곱근을 취하는 순서를 지킨다. 답을 고를 때는 분자·분모 배치와 제곱근 유무 두 가지를 반드시 함께 확인한다.

암기 포인트

구형 입자의 종말속도 공식은 $u_t=\left[\frac{2g(\rho_p-\rho)m}{A_p\rho_p C_D\rho}\right]^{1/2}$이다. 분자에는 밀도차 $(\rho_p-\rho)$와 질량 m, 분모에는 투영면적 A_p와 고체 밀도 ρ_p, 항력계수 C_D, 액체 밀도 ρ가 들어가며 전체에 제곱근이 씌워진다는 형태를 기억해 둔다.

NoteBase