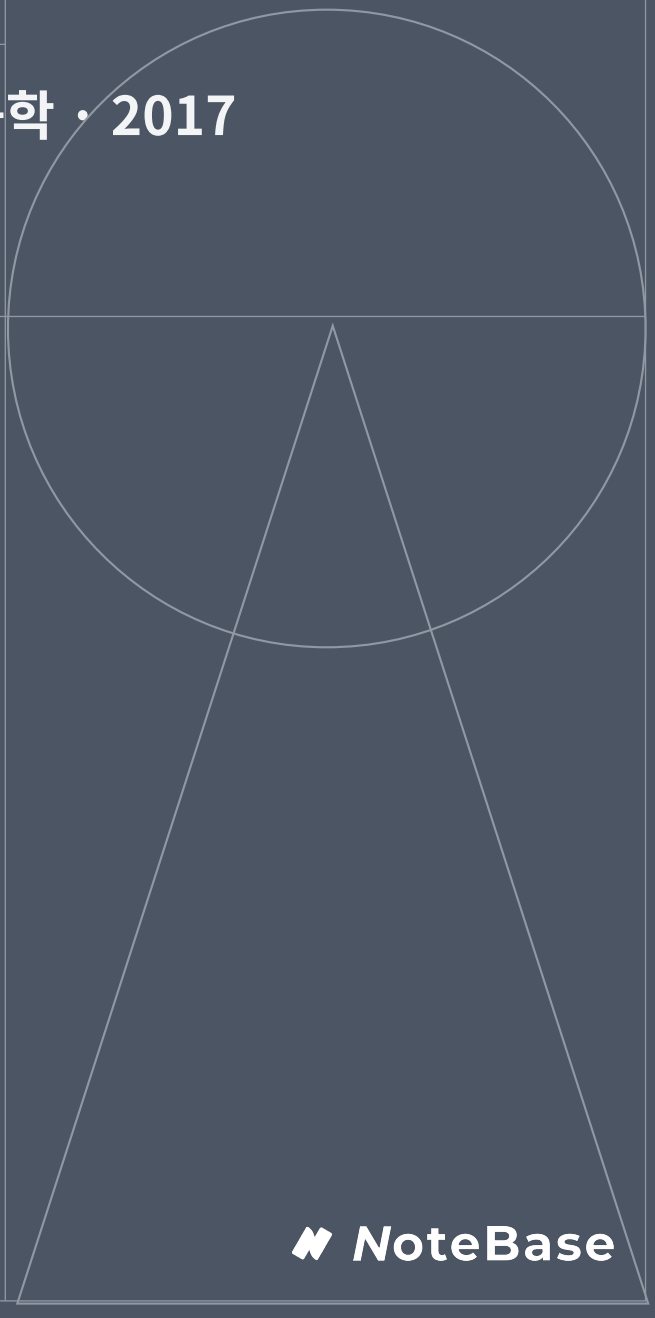
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2017



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2017

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2017

문 1. 혼합흐름 반응기에서 $A \rightarrow R$인 비가역 1차 반응이 진행된다. 전환율 80%를 얻기 위해 필요한 공간시간은? (단, k는 반응속도상수이다)

① $4k$
② $\frac{4}{k}$
③ $\frac{k}{4}$
④ $\frac{1}{4k}$

정답 2번

출제 포인트

혼합흐름반응기(MFR, 완전혼합반응기)에서 비가역 1차 반응이 진행될 때 목표 전환율을 얻기 위한 공간시간(space time) τ를 설계방정식으로부터 구할 수 있는지를 묻는다. 관건은 MFR 설계방정식에 1차 반응속도식을 대입하고 전환율 정의를 이용해 정리하는 것이다.

조건 정리

반응은 A→R, 비가역 1차 반응이며 반응속도상수는 k이다. 반응기는 혼합흐름반응기(MFR)이고 목표 전환율은 $X = 0.8$이다. 1차 반응이므로 반응속도는 $-r_A = kC_A$이며, 전환율 정의에 의해 $C_A = C_{A0}(1 - X)$이다.

사용할 공식

혼합흐름반응기(MFR)의 설계방정식은 $\tau = \frac{C_{A0}X}{-r_A}$ 이고, 1차 반응이므로 $-r_A = kC_A = kC_{A0}(1 - X)$를 대입하면 $\tau = \frac{C_{A0}X}{kC_{A0}(1-X)} = \frac{X}{k(1-X)}$ 로 정리된다. 이 식에서 초기농도 C_{A0}는 분자·분모에서 서로 약분되어 사라지므로, 1차 반응의 MFR 공간시간은 전환율과 반응속도상수만으로 결정된다.

계산 과정

$X = 0.8$을 대입하면 $\tau = \frac{0.8}{k(1-0.8)} = \frac{0.8}{0.2k} = \frac{4}{k}$ 이다. 따라서 목표 전환율 80%를 얻기 위해 필요한 공간시간은 $\frac{4}{k}$ 이다.

NoteBase

선지 판단

① 4k → X (분모·분자 위치를 반대로 두어 얻는 형태로, $\tau = X/(k(1-X))$ 관계와 맞지 않는다)
② 4/k → O ($\tau = X/(k(1-X)) = 0.8/(0.2k) = 4/k$로 정확히 일치한다)
③ k/4 → X (τ와 k의 관계를 역수로 잘못 취한 형태이다)
④ 1/(4k) → X (전환율 80%가 아니라 20%를 대입하거나 분자·분모를 혼동했을 때 나오는 값이다)

오답 포인트

MFR 설계방정식에서 $-r_A$에 1차 반응식을 대입할 때 C_{A0}가 약분되어 사라진다는 점을 놓치면 엉뚱한 형태의 답을 고르게 된다. 또한 전환율 X와 잔류율 $(1-X)$의 위치를 바꾸어 계산하면 ①이나 ③처럼 역수 관계의 오답이 나온다. $X = 0.8$이면 $(1-X) = 0.2$임을 정확히 대입해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

혼합흐름반응기(MFR)에 1차 비가역 반응이 나오면 곧바로 $\tau = X/(k(1-X))$를 떠올리고, 문제에서 주어진 전환율 값만 대입해 계산한다. 회분식(Batch)이나 플러그흐름반응기(PFR)의 1차 반응식 $kt = -\ln(1-X)$ 또는 $k\tau = -\ln(1-X)$와 혼동하지 않도록 반응기 종류를 먼저 확인한다.

암기 포인트

MFR + 1차 비가역 반응의 공간시간 공식은 $\tau = \frac{X}{k(1-X)}$이며, 초기농도 C_{A0}는 소거되어 식에 나타나지 않는다는 점을 기억해 둔다.

NoteBase

문 2. 회분식 반응기에서 $2A \rightarrow 2R$인 기초반응이 진행된다. 반응 개시 5분 후에 50%의 A가 소모되었다면, 전환율 80%가 되는 데 걸리는 시간[min]은?

① 5

② 10

③ 15

④ 20

정답 4번

출제 포인트

회분식(batch) 반응기에서 진행되는 기초반응(elementary reaction)의 반응차수를 화학양론식으로부터 바로 판단하고, 2차 반응의 적분식을 전환율(conversion) 형태로 세워 시간을 구할 수 있는지를 묻는다. 반응식 2A→2R가 기초반응이므로 속도식은 화학양론계수를 그대로 지수로 사용하여 $-r_A = kC_A^2$인 2차 반응이 된다.

조건 정리

정용(부피 일정) 회분식 반응기이고 2A→2R는 기초반응이므로 A에 대해 2차 반응이다. $t = 5$ min일 때 전환율 $X_A = 0.5$이며, 전환율 $X_A = 0.8$이 되는 데 걸리는 시간 t를 구하는 문제이다.

사용할 공식

정용 회분식 반응기에서 2차 반응의 물질수지는 $-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^2$이며, 이를 적분하면 $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt$이다.
$C_A = C_{A0}(1 - X_A)$를 대입하면 $\frac{1}{C_{A0}} \cdot \frac{X_A}{1 - X_A} = kt$로 정리되며, 이를 $k' = k/C_{A0}$로 두면 $k't = \frac{X_A}{1 - X_A}$가 된다.

계산 과정

$t = 5$ min, $X_A = 0.5$를 대입하면 $\frac{X_A}{1 - X_A} = \frac{0.5}{0.5} = 1$이므로 $k' \times 5 = 1$, 즉 $k' = 0.2$ min^{-1}이다. 전환율 $X_A = 0.8$에서는 $\frac{X_A}{1 - X_A} = \frac{0.8}{0.2} = 4$이므로 $k't = 4$가 되고, $t = \frac{4}{0.2} = 20$ min이 된다.

선지 판단

① 5 → X: 5분은 전환율 50%에 도달하는 시간이지 80%에 도달하는 시간이 아니다.
② 10 → X: $k't = \frac{X_A}{1 - X_A}$ 관계에서 X_A/(1-X_A)를 2로 잘못 계산했을 때 나오는 값으로, 실제 X_A=0.8에서의 값(4)과 다르다.
③ 15 → X: 계산 과정의 비례관계를 선형(1차 반응)으로 잘못 적용하면 나올 수 있는 값이나, 이 반응은 2차 반응이므로 맞지 않는다.
④ 20 → O: 2차 반응의 적분식에 X_A=0.8을 대입하여 얻은 값과 일치한다.

NoteBase

오답 포인트

가장 흔한 실수는 반응차수를 1차로 착각하여 $\ln\frac{1}{1-X_A}=kt$로 계산하는 것이다. 이 경우 X_A=0.5에서 $\ln 2$, X_A=0.8에서 $\ln 5$가 되어 $t=5\times\frac{\ln 5}{\ln 2}\approx 11.6$ min이라는 잘못된 값이 나온다. 이 문제는 2A→2R가 '기초반응'이라는 조건 때문에 반드시 2차 반응식 $\frac{X_A}{1-X_A}=k't$을 써야 한다. 또한 전환율을 시간에 단순 비례(5분에 50%이므로 8분에 80%일 것이라는 식)로 계산하는 것도 오답 원인이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응식에 '기초반응(elementary reaction)'이라는 표현이 있으면 반응차수는 화학양론계수와 같다고 판단한다. 2A→2R처럼 계수가 2이면 2차 반응이므로 속도식은 $-r_A=kC_A^2$이고, 적분형은 $\frac{X_A}{1-X_A}=k't$ 꼴이 된다. 두 시점의 전환율이 주어지면 비율 $\frac{X_A}{1-X_A}$의 비로 시간의 비를 구하면 빠르게 계산할 수 있다.

암기 포인트

정용 회분식 반응기, 2차 반응 적분식: $\frac{1}{C_A}-\frac{1}{C_{A0}}=kt$, 전환율 형태로는 $\frac{X_A}{1-X_A}=k't$. 기초반응은 화학양론계수가 곧 반응차수가 된다는 점을 기억해 둔다.

NoteBase

문 3. 공간시간과 공간속도에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 공간속도가 $3h^{-1}$이라는 것은 주어진 조건 하에서 1h당 반응기 부피의 3배에 해당하는 공급물이 반응기에 유입된다는 뜻이다.

② 공간시간은 주어진 조건에서 측정된 반응기 부피만큼의 공급물 처리에 필요한 시간을 의미한다.

③ 공간시간의 역수가 공간속도이다.

④ 공간시간은 반응기 부피를 반응기 출구에서의 부피유속으로 나눈 값이다.

정답 4번

출제 포인트

공간시간(space time, τ)과 공간속도(space velocity, s)의 정의를 정확히 구분하는지 묻는 문항이다. 두 개념은 서로 역수 관계이지만, 특히 공간시간을 계산할 때 사용하는 부피유속의 기준점(반응기 입구인지 출구인지)이 핵심 함정이다.

핵심 개념

공간속도 $s = v_0/V$는 반응기 부피(V)에 대해 단위시간당 몇 배 부피의 공급물이 처리되는지를 나타내는 값이다. 예를 들어 공간속도가 $3h^{-1}$이면 1시간 동안 반응기 부피의 3배에 해당하는 공급물이 반응기로 유입된다는 뜻이다. 공간시간 $\tau = V/v_0 = 1/s$는 반응기 부피만큼의 공급물을 처리하는 데 걸리는 시간을 의미한다. 여기서 v_0는 반드시 반응기로 들어가는 공급물의 부피유속, 즉 반응기 입구(공급) 조건에서 측정한 부피유속이며, 반응기 출구에서의 부피유속이 아니다. 기체상 반응처럼 몰수 변화나 온도·압력 변화로 부피유속이 반응 진행에 따라 달라지는 경우, 입구와 출구의 부피유속은 서로 다를 수 있으므로 이 기준점 구분이 중요하다.

선지별 해설

① 옳음: 공간속도가 $3h^{-1}$이라는 것은 주어진 조건에서 1시간당 반응기 부피의 3배에 해당하는 공급물이 반응기에 유입된다는 뜻이며, 이는 공간속도의 정의 $s = v_0/V$를 그대로 서술한 것이다.
② 옳음: 공간시간은 주어진 조건에서 측정된 반응기 부피만큼의 공급물을 처리하는 데 필요한 시간을 의미하며, 이는 공간시간의 정의 $\tau = V/v_0$를 그대로 서술한 것이다.
③ 옳음: 공간시간과 공간속도는 서로 역수 관계이므로 $\tau = 1/s$가 성립한다.
④ 옳지 않음(정답): 공간시간은 반응기 부피를 반응기 '출구'에서의 부피유속으로 나눈 값이 아니라, 반응기로 들어가는 공급물, 즉 반응기 '입구(공급 조건)'에서의 부피유속으로 나눈 값이다. 틀린 표현 → 올바른 표현: '반응기 출구에서의 부피유속' → '반응기로 유입되는 공급물의 부피유속(입구 조건)'.

NoteBase

오답 포인트

공간시간의 정의에서 분모에 들어가는 부피유속을 출구 조건으로 착각하는 경우 이 문항을 틀리기 쉽다.
공간시간과 체류시간(residence time)을 혼동해서도 안 된다. 체류시간은 실제 유체가 반응기 안에 머무는 평균 시간으로 부피유속 변화의 영향을 받지만, 공간시간은 항상 반응기로 유입되는 공급물의 부피유속을 기준으로 정의되는 값이다.

다시 나오면 이렇게 판단

공간시간·공간속도 관련 선지가 나오면 먼저 분모의 부피유속이 입구(공급) 기준인지 출구 기준인지부터 확인한다. '출구', '반응 후', '생성물' 등의 표현이 공간시간의 분모에 붙어 있으면 정의를 왜곡한 오답일 가능성이 높다.

암기 포인트

공간속도 $s = v_0/V$, 공간시간 $\tau = V/v_0 = 1/s$, 여기서 v_0는 항상 반응기 입구(공급물)에서의 부피유속임을 기억해 둔다.

NoteBase

문 4. 다음의 액상 기초반응이 회분식 반응기에서 진행된다. 반응물 A와 B의 초기농도가 $10\text{mol}\text{L}^{-1}$와 $2\text{mol}\text{L}^{-1}$이고 제한반응물(limiting reactant)의 전환율이 100 %일 때, 제한반응물과 제한반응물이 아닌 반응물의 최종농도[molL^{-1}]를 바르게 나열한 것은?

$3A + B \rightarrow 3C + D$

① 제한반응물: A, 제한반응물이 아닌 반응물의 최종농도: 1

② 제한반응물: B, 제한반응물이 아닌 반응물의 최종농도: 1

③ 제한반응물: A, 제한반응물이 아닌 반응물의 최종농도: 4

④ 제한반응물: B, 제한반응물이 아닌 반응물의 최종농도: 4

정답 4번

출제 포인트

화학양론 반응식 $3A + B \rightarrow 3C + D$에서 두 반응물의 초기농도가 반응식의 몰비와 다를 때 어느 것이 제한반응물인지 판정하고, 제한반응물이 100% 전환되었을 때 남은 반응물의 최종농도를 구하는 문제이다.

조건 정리

초기농도는 $C_{A0} = 10\ \text{mol L}^{-1}$, $C_{B0} = 2\ \text{mol L}^{-1}$이다. 반응식의 계수비는 A:B = 3:1이므로, A가 B와 완전히 반응하려면 B 1몰당 A가 3몰 필요하다. 제한반응물의 전환율은 100%로 가정한다.

사용할 공식

제한반응물 판정: 각 반응물의 초기농도를 반응식 계수로 나눈 값 $C_{A0}/3$과 $C_{B0}/1$을 비교하여 그 값이 더 작은 쪽이 제한반응물이다. 소모량 관계: A의 소모량 $\Delta C_A = 3\Delta C_B$이다.

계산 과정

$C_{A0}/3 = 10/3 \approx 3.33$, $C_{B0}/1 = 2/1 = 2$이다. $2 < 3.33$이므로 B가 제한반응물이다. B가 100% 전환되면 $\Delta C_B = 2\ \text{mol L}^{-1}$이 모두 소모되고, 이때 A의 소모량은 $\Delta C_A = 3 \times \Delta C_B = 3 \times 2 = 6\ \text{mol L}^{-1}$이다. 따라서 A의 최종농도는 $C_A = C_{A0} - \Delta C_A = 10 - 6 = 4\ \text{mol L}^{-1}$이다.

NoteBase

선지 판단

① 제한반응물 A, 최종농도 1 → X. A는 오히려 더 여유 있는 반응물이며 제한반응물이 아니다.
② 제한반응물 B, 최종농도 1 → X. 제한반응물 판정은 맞으나, 제한반응물이 아닌 반응물(A)의 최종농도는 1이 아니라 4이다.
③ 제한반응물 A, 최종농도 4 → X. 제한반응물 판정이 B가 아니라 A로 되어 있어 틀렸다(계산값 4는 우연히 일치하지만 대상 반응물 지정이 잘못됨).
④ 제한반응물 B, 최종농도 4 → O. B가 제한반응물이고, 제한반응물이 아닌 A의 최종농도가 4 mol L^-1로 계산과 일치한다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 초기농도가 큰 쪽(A, 10 mol L^-1)을 무심코 제한반응물로 착각하는 것이다. 제한반응물은 절대량이 아니라 반응식 계수로 나눈 비율로 판정해야 한다. 또한 제한반응물의 최종농도(0에 가까움)와 제한반응물이 아닌 반응물의 최종농도(4)를 헷갈리지 않아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

두 반응물의 초기농도가 주어지면 먼저 각 초기농도를 자기 반응식 계수로 나누어 비교한다. 값이 더 작은 반응물이 제한반응물이며, 그 반응물이 100% 소모될 때 다른 반응물의 소모량은 계수비를 곱해서 구하고, 초기농도에서 빼서 최종농도를 계산한다.

암기 포인트

제한반응물 판정식: C_{i0}/ν_i가 가장 작은 반응물이 제한반응물이다. 소모량 비례식: $\Delta C_A/\Delta C_B = \nu_A/\nu_B$를 이용해 다른 반응물의 소모량을 구한 뒤 초기농도에서 빼면 최종농도가 된다.

NoteBase

문 5. 다음과 같은 가역 액상 기초반응에서 농도가 각각 $3\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$인 반응물 A와 B만 초기에 존재한다. 평형상태에서 A의 전환율이 50%일 때, 이 반응의 평형상수 [$\mathrm{L\,mol^{-1}}$]는?

A + B [k_2]k_1 C

① $\frac{1}{3}$
② $\frac{2}{3}$
③ 1
④ $\frac{3}{2}$

정답 2번

출제 포인트

가역 액상 기초반응 A + B ⇌ C에서 평형 전환율이 주어졌을 때 각 성분의 평형 농도를 구하고, 이를 이용해 평형상수 $K = C_C/(C_A C_B)$를 계산할 수 있는지를 묻는다. 정반응과 역반응이 모두 기초반응(elementary reaction)이므로 평형상수는 각 반응물의 반응차수(여기서는 모두 1차)를 그대로 지수로 사용한다.

조건 정리

초기 농도는 $C_{A0} = C_{B0} = 3\ \mathrm{mol L^{-1}}$이고 C는 초기에 없다. 평형에서 A의 전환율 $X_A = 0.5$이므로 반응한 A의 농도는 $C_{A0}X_A = 3 \times 0.5 = 1.5\ \mathrm{mol L^{-1}}$이다. 반응식의 양론비가 A:B:C = 1:1:1이므로 B도 같은 양만큼 소모되고 C는 같은 양만큼 생성된다.

사용할 공식

기초반응 $A + B \underset{k_2}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} C$에서 평형 시 정반응 속도와 역반응 속도가 같으므로 $k_1 C_A C_B = k_2 C_C$가 성립하고, 평형상수는 $K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{C_C}{C_A C_B}$로 정의된다.

계산 과정

평형 농도는 다음과 같다. $C_A = C_{A0}(1 - X_A) = 3(1 - 0.5) = 1.5\ \mathrm{mol L^{-1}}$
$C_B = C_{B0} - C_{A0}X_A = 3 - 1.5 = 1.5\ \mathrm{mol L^{-1}}$ $C_C = C_{A0}X_A = 1.5\ \mathrm{mol L^{-1}}$ 따라서 평형상수는 $K = \frac{C_C}{C_A C_B} = \frac{1.5}{1.5 \times 1.5} = \frac{1.5}{2.25} = \frac{2}{3}\ \mathrm{L mol^{-1}}$ 이 된다.

NoteBase

선지 판단

① 1/3: $C_C/(C_A C_B)$ 계산에서 분모를 잘못 크게 잡거나 전환율 적용을 잘못한 경우 나오는 값으로, 실제 계산값 2/3과 다르므로 틀리다.
② 2/3: $C_A = C_B = 1.5$, $C_C = 1.5$로 계산하면 $K = 1.5/(1.5 \times 1.5) = 2/3$이 정확히 나오므로 옳다.
③ 1: A와 B의 초기 농도가 같아 전환량도 같다는 점에서 평형 농도 자체를 1로 착각하거나 C_C/C_A 만을 구한 경우 나올 수 있는 값이나, 정확한 계산식과 다르므로 틀리다.
④ 3/2: 평형 농도값(1.5)을 그대로 답으로 착각한 경우 나오는 값으로, 실제로는 이를 제곱한 분모로 나누어야 하므로 틀리다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 전환율을 A에만 적용하고 B의 평형 농도를 A와 다르게 계산하는 것이다. 하지만 반응식의 양론비가 1:1이고 초기 농도도 같으므로 평형에서도 $C_A = C_B$가 유지된다. 또 다른 실수는 평형상수 식의 분모에서 $C_A C_B$를 곱해야 하는데 더하거나 하나만 쓰는 경우이다. 반드시 $K = k_1/k_2 = C_C/(C_A C_B)$ 형태로 정반응차수 그대로 지수를 적용해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

가역 기초반응 문제는 먼저 각 성분의 초기 농도와 전환율로부터 평형 농도표(A, B, C)를 만든 뒤, 반응식의 양론계수를 그대로 지수로 사용하여 평형상수 식을 세운다. 초기 농도가 반응물끼리 같고 양론비가 1:1이면 두 반응물의 평형 농도도 항상 같다는 점을 이용하면 계산이 단순해진다.

암기 포인트

기초반응 $aA + bB \rightleftharpoons cC$의 평형상수는 $K = k_1/k_2 = C_C^c/(C_A^a C_B^b)$이며, 전환율이 주어지면 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$ 형태로 평형 농도를 먼저 구한 다음 대입한다.

NoteBase

문 6. 발열 가역반응에서 반응온도의 조작에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 반응온도를 높이면 평형전환율은 감소한다.

② 반응온도를 높이면 평형상수값은 감소한다.

③ 최적온도진행(optimum temperature progression)을 따르면 주어진 반응물의 전환율에 대하여 반응물 유입량에 대한 반응기 부피의 비를 최소화할 수 있다.

④ 최대속도궤적(locus of maximum rate)을 따르려면 반응온도는 반응 시작시점에서 낮게 유지할 필요가 있다.

정답 4번

출제 포인트

발열 가역반응에서 반응온도를 조작할 때 평형전환율·평형상수·최적온도진행(OTP)·최대속도궤적(locus of maximum rate)이 각각 어떻게 움직이는지를 구분해서 아는지를 묻는다. 특히 온도가 낮을수록 유리한 지점(평형)과 온도가 높을수록 유리한 지점(반응속도)이 반대라는 점, 그리고 그 절충 결과인 최적 온도 경로가 전환율에 따라 어떻게 변하는지가 핵심이다.

핵심 개념

발열 가역반응은 반응이 진행될수록(정반응) 열을 방출하므로, 온도를 높이면 평형이 역반응 쪽으로 밀려 평형전환율과 평형상수값이 모두 감소한다(반트호프 식에 따라 발열반응의 평형상수는 온도 상승 시 감소). 반면 반응속도 자체는 온도가 높을수록 커지므로(아레니우스 식), 전환율이 낮은 반응 초기에는 아직 평형에서 멀리 떨어져 있어 온도를 높여도 되돌아가는 역반응 영향이 작고, 오히려 속도를 최대로 키울 수 있다. 전환율이 커질수록 평형전환율에 가까워지므로 온도를 낮춰 평형이 뒤로 밀리는 것을 막아야 순반응 속도를 유지할 수 있다. 이 때문에 각 전환율에서 순간 반응속도를 최대로 만드는 온도를 이은 선인 최대속도궤적(locus of maximum rate)은 전환율이 낮은 반응 초기에는 높은 온도, 전환율이 커질수록 점차 낮아지는 온도로 이루어진다. 최적온도진행(OTP)은 이 최대속도궤적을 따라가도록 반응기 온도를 조절하는 조작으로, 주어진 전환율을 얻는 데 필요한 반응기 부피(또는 반응물 유입량 대비 부피)를 최소화하는 방법이다.

NoteBase

선지별 해설

① 반응온도를 높이면 평형전환율은 감소한다 → O. 발열 가역반응은 온도가 높아지면 평형이 역반응 쪽으로 이동하므로 평형에서 도달할 수 있는 전환율(평형전환율)이 낮아진다.
② 반응온도를 높이면 평형상수값은 감소한다 → O. 반트호프 식에 따르면 발열반응(반응열이 음수)의 평형상수는 온도가 높아질수록 작아진다. 평형상수 감소는 곧 평형이 역반응 쪽으로 치우친다는 뜻으로 ①과 같은 맥락이다.
③ 최적온도진행(OTP)을 따르면 주어진 전환율에 대하여 반응물 유입량 대비 반응기 부피의 비를 최소화할 수 있다 → O. OTP는 각 전환율에서 반응속도가 최대가 되는 온도를 따라가는 경로이므로, 반응속도가 항상 최댓값을 유지해 같은 전환율을 얻는 데 필요한 반응기 부피(공간시간)를 가장 작게 만든다.
④ 최대속도궤적을 따르려면 반응온도는 반응 시작시점에서 낮게 유지할 필요가 있다 → X. 최대속도궤적은 전환율이 낮은 반응 초기일수록 평형의 제약이 작아 온도를 높게 유지해 속도를 최대로 끌어올리고, 전환율이 커질수록(평형에 가까워질수록) 온도를 점차 낮추는 경로다. 따라서 반응 시작시점에는 온도를 낮게가 아니라 높게 유지해야 한다 → 반응 시작시점에서 낮게 유지 → 반응 시작시점에서 높게 유지.

오답 포인트

발열 가역반응이라는 조건에서 '온도를 높이면 평형 쪽 지표(평형전환율, 평형상수)는 감소한다'는 것과 '온도를 높이면 반응속도 자체는 커진다'는 것을 혼동하면 안 된다. 최대속도궤적과 최적온도진행을 같은 개념으로 오해해 온도 변화 방향을 반대로 기억하는 것이 가장 흔한 실수이며, 최대속도궤적은 전환율 0에서 온도가 가장 높고 전환율이 커질수록 온도가 낮아지는 감소 곡선이라는 점을 정확히 새겨야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

발열 가역반응 문제에서는 먼저 '평형' 관련 진술(평형전환율, 평형상수)과 '속도' 관련 진술(최대속도궤적, OTP)을 나누어 판단한다. 평형 관련 진술은 온도 상승 시 모두 감소 방향으로 맞고, 최대속도궤적은 전환율(반응 진행 정도)이 커질수록 온도가 낮아지는 경로라는 점만 기억하면 '시작점에서 온도가 낮다/높다'를 묻는 함정을 바로 걸러낼 수 있다.

암기 포인트

발열 가역반응: 온도 ↑ → 평형전환율 ↓, 평형상수 ↓. 최대속도궤적: 전환율 낮음(반응 초기) → 온도 높게, 전환율 높음(반응 후기) → 온도 낮게. 최적온도진행(OTP)=이 궤적을 따라가 주어진 전환율에서 반응기 부피를 최소화하는 조작.

NoteBase

문 7. 1,000개의 박테리아가 존재하는 생선 통조림을 150°C에서 10분간 열처리하면 100개의 박테리아만 남는다. 1차 반응의 회분식 공정으로 가정할 때, 150°C로 생선 통조림 안에 있는 1백억 개의 박테리아를 1개로 줄이기 위해 필요한 열처리시간[min]은?

① 100

② 1,000

③ 10,000

④ 100,000

정답 1번

출제 포인트

1차 반응(회분식)의 반응속도식으로부터 반응속도상수 k를 먼저 구하고, 그 k를 이용해 다른 초기·최종 농도(개체수) 조건에서 필요한 반응시간을 구하는 문제이다. 박테리아 개체수를 농도처럼 취급하여 1차 반응 감쇠식에 대입하는 것이 핵심이다.

조건 정리

조건 1: 초기 개체수 $N_0 = 1{,}000$개, 150 °C에서 10분 열처리 후 $N = 100$개.
조건 2(구해야 할 값): 초기 개체수 $N_0 = 10^{10}$개(1백억 개)를 같은 150 °C에서 $N = 1$개로 줄이는 데 필요한 시간 t.

사용할 공식

1차 반응 회분식의 적분형 속도식은 다음과 같다.
$\ln \frac{N_0}{N} = kt$
같은 온도(150 °C)에서는 반응속도상수 k가 동일하므로, 조건 1에서 k를 구한 뒤 조건 2에 그대로 적용한다.

계산 과정

조건 1로 k 계산: $\ln \frac{1{,}000}{100} = k \times 10$이므로 $\ln 10 = 10k$, 즉 $k = \frac{\ln 10}{10}$[1/min]이다.
조건 2에 대입: $\ln \frac{10^{10}}{1} = kt$이고 좌변은 $10 \ln 10$이므로,
$t = \frac{10 \ln 10}{k} = \frac{10 \ln 10}{\ln 10/10} = 100$
따라서 필요한 열처리시간은 100분이다.

NoteBase

선지 판단

① 100 → O. 위 계산 결과와 정확히 일치한다.
② 1,000 → X. k를 구할 때 지수 계산을 잘못하여 자릿수를 하나 더 곱하는 경우 나오는 오답이다.
③ 10,000 → X. N_0/N 비를 10^{10}이 아니라 $10^{10} \times 100$ 등으로 잘못 설정하거나 조건 1의 배율(10배 감소에 10분)을 단순 비례식으로 잘못 확장할 때 나오는 값이다.
④ 100,000 → X. 두 조건의 감소 배율(조건 1은 10배 감소, 조건 2는 10^{10}배 감소)의 지수 관계를 무시하고 단순 비례식(10분:10배 = x분:10^{10}배)으로 계산하면 나오는 오답이다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 농도(개체수) 감소 배율과 시간을 단순 비례식으로 연결하는 것이다. 1차 반응에서는 시간과 농도비의 로그값이 비례하는 것이지, 농도비 자체가 시간에 비례하는 것이 아니다. 즉 '10배 줄이는 데 10분'이라고 해서 '10^{10}배 줄이는 데 10^{10}분'이 되는 것이 아니라, $\ln(10^{10}) = 10\ln 10$이 $\ln 10$의 10배이므로 시간도 정확히 10배(10분→100분)가 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분식 1차 반응 문제는 항상 $\ln(N_0/N) = kt$ 형태부터 세운다. 먼저 주어진 조건으로 k를 구하고, 같은 온도 조건이면 그 k를 그대로 다른 조건에 대입한다. 농도비가 몇 배인지는 ln을 취한 값끼리 비교해야 하며, 배율 자체를 그대로 시간에 비례시키지 않도록 주의한다.

암기 포인트

1차 반응 회분식: $\ln\frac{N_0}{N} = kt$. 10배 감소마다 $\ln 10$만큼씩 누적되므로, 감소 배율이 10^n이면 필요한 시간은 기준 시간의 n배가 된다(이 문제에서는 10배 감소에 10분이므로 10^{10}배 감소에는 $10 \times 10 = 100$분).

NoteBase

문 8. 혼합흐름 반응기에서 다음과 같은 비가역 액상 1차 반응이 연속적으로 진행된다. R의 최대 수율을 얻기 위해 필요한 반응기의 부피[L]와 R의 최대 수율이 얻어질 때 A의 농도[$\mathrm{mol}L^{-1}$]를 바르게 나열한 것은? (단, A의 초기농도와 부피유속은 각각 $6\mathrm{mol}L^{-1}$와 $4L\mathrm{min}^{-1}$이다)

$A \rightarrow R \rightarrow S, \quad k_1 = 1.0\mathrm{min}^{-1}, \quad k_2 = 0.25\mathrm{min}^{-1}$

① 반응기의 부피: 8, A의 농도: 1.2

② 반응기의 부피: 16, A의 농도: 1.2

③ 반응기의 부피: 8, A의 농도: 2.0

④ 반응기의 부피: 16, A의 농도: 2.0

정답 3번

출제 포인트

혼합흐름반응기(CSTR)에서 진행되는 직렬 1차 반응 A → R → S의 중간생성물 R의 최대 수율 조건을 묻는 문제다. 회분식이나 플러그흐름반응기와 달리 혼합흐름반응기에서는 R의 최대 농도가 나오는 최적 체류시간(공간시간) 공식이 따로 있으므로, 이 공식을 정확히 적용해 최적 반응기 부피와 그때의 A 농도를 함께 구해야 한다.

조건 정리

A의 초기농도 $C_{A0} = 6\ \mathrm{mol\ L^{-1}}$, 부피유속 $v_0 = 4\ \mathrm{L\ min^{-1}}$, $k_1 = 1.0\ \mathrm{min^{-1}}$, $k_2 = 0.25\ \mathrm{min^{-1}}$이며 A → R → S는 모두 비가역 1차 반응이다. 반응기는 혼합흐름반응기(MFR, CSTR)이다.

사용할 공식

혼합흐름반응기에서 직렬 1차 반응 A → R → S가 진행될 때 R의 농도가 최대가 되는 공간시간은 $\tau_{opt} = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$이다. 이때 A의 농도는 1차 반응의 CSTR 물질수지식 $C_A = \frac{C_{A0}}{1 + k_1 \tau}$로 구하고, 반응기 부피는 $V = \tau \cdot v_0$로 구한다.

계산 과정

최적 공간시간은 $\tau_{opt} = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}} = \frac{1}{\sqrt{1.0 \times 0.25}} = \frac{1}{0.5} = 2\ \mathrm{min}$이다.
이때 필요한 반응기 부피는 $V = \tau_{opt} \cdot v_0 = 2 \times 4 = 8\ \mathrm{L}$이다.
이때 A의 농도는 $C_A = \frac{C_{A0}}{1 + k_1 \tau_{opt}} = \frac{6}{1 + 1.0 \times 2} = \frac{6}{3} = 2.0\ \mathrm{mol\ L^{-1}}$이다.
따라서 R의 최대 수율을 주는 반응기 부피는 8 L, 그때 A의 농도는 2.0 mol L^-1이다.

NoteBase

선지 판단

① 부피 8, 농도 1.2 → 부피는 맞지만 A 농도가 틀렸다. A 농도는 물질수지식으로 2.0이 되어야 하며 1.2가 아니다.
② 부피 16, 농도 1.2 → 부피와 농도 모두 틀렸다. 최적 공간시간이 2 min이므로 부피는 8 L이어야 하고 농도도 2.0이어야 한다.
③ 부피 8, 농도 2.0 → 계산 결과와 정확히 일치한다. 정답이다.
④ 부피 16, 농도 2.0 → 농도는 맞지만 부피가 틀렸다. 최적 공간시간 2 min에 부피유속 4 L min^-1을 곱하면 8 L이어야 하며 16 L이 아니다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 최적 공간시간 공식 $\tau_{opt} = 1/\sqrt{k_1 k_2}$을 쓰지 않고 산술평균이나 단순히 $1/k_1$, $1/k_2$ 같은 값을 대입하는 것이다. 또한 부피를 구할 때 공간시간 τ에 부피유속 v_0을 곱해야 하는데($V = \tau v_0$) 이를 빠뜨리거나 반대로 나누는 실수, 그리고 A의 농도를 구할 때 1차 반응 CSTR 물질수지식 $C_A = C_{A0}/(1 + k_1\tau)$ 대신 회분식 공식 $C_A = C_{A0}e^{-k_1\tau}$를 잘못 적용하는 실수가 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 1차 반응 A → R → S에서 R의 최대 수율을 묻는 문제는 반응기 종류(회분식·PFR vs CSTR)부터 확인한다. 회분식이나 PFR이면 공식이 다르므로, 혼합흐름반응기(CSTR)임을 확인한 뒤 $\tau_{opt} = 1/\sqrt{k_1 k_2}$로 최적 공간시간을 먼저 구하고, 이어서 $V = \tau_{opt} v_0$로 부피를, $C_A = C_{A0}/(1 + k_1\tau_{opt})$로 그때의 A 농도를 순서대로 구한다.

암기 포인트

CSTR에서 직렬 1차 반응의 R 최대수율 조건: $\tau_{opt} = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$, $V = \tau_{opt} v_0$, $C_A = \frac{C_{A0}}{1 + k_1\tau_{opt}}$. PFR/회분식의 최적 시간 공식 $t_{opt} = \frac{\ln(k_2/k_1)}{k_2 - k_1}$과 혼동하지 않도록 반응기 종류를 항상 먼저 확인한다.

NoteBase

문 9. 혼합흐름 반응기에서 반응물 A에 대해 다음 두 반응이 경쟁적으로 진행된다. A의 초기농도가 $2\text{mol}\text{L}^{-1}$ 일 때, 전환율 50%를 얻기 위해 필요한 공간시간[min]과 그때 R의 총괄수율(overall fractional yield)을 바르게 나열한 것은?

$A \rightarrow R$(원하는 반응), $-r_{A1}\ [\text{mol}\text{L}^{-1}\text{min}^{-1}] = 0.08C_A$
$A \rightarrow S$(원하지 않는 반응), $-r_{A2}\ [\text{mol}\text{L}^{-1}\text{min}^{-1}] = 0.12C_A^2$

① 공간시간: 5, 총괄수율: 0.2

② 공간시간: 5, 총괄수율: 0.4

③ 공간시간: 10, 총괄수율: 0.2

④ 공간시간: 10, 총괄수율: 0.4

정답 2번

출제 포인트

혼합흐름반응기(MFR, CSTR)에서 병렬반응이 진행될 때 전체 반응물 소모속도로 공간시간을 구하고, 그 조건에서 원하는 생성물 R의 총괄수율을 계산할 수 있는지를 묻는다. 두 반응이 동시에 A를 소모하므로 전체 반응속도는 두 반응속도의 합이 되고, MFR의 설계식은 반응기 출구 조건(전환율 후 농도)에서의 반응속도 하나로 계산된다는 점이 핵심이다.

조건 정리

$A \rightarrow R$(원하는 반응), $-r_{A1} = 0.08C_A$
$A \rightarrow S$(원하지 않는 반응), $-r_{A2} = 0.12C_A^2$
초기농도 $C_{A0} = 2\ \text{mol}\text{L}^{-1}$, 전환율 $X_A = 0.5$이므로 반응기 출구 농도는
$C_A = C_{A0}(1 - X_A) = 2 \times 0.5 = 1\ \text{mol}\text{L}^{-1}$이다.

사용할 공식

전체 소모속도: $-r_A = -r_{A1} - r_{A2} = 0.08C_A + 0.12C_A^2$
혼합흐름반응기(MFR) 설계식: τ = C_A0 - C_A(-r_A)_출구 (MFR은 반응기 내부 농도가 전 구간에서 출구 농도와 같으므로 출구 조건의 반응속도 하나만 사용한다)
R에 대한 총괄수율: $\Phi_R = \frac{-r_{A1}}{-r_A} = \frac{0.08C_A}{0.08C_A + 0.12C_A^2}$

NoteBase

계산 과정

출구 농도 $C_A = 1\ \text{mol}\text{L}^{-1}$에서 전체 소모속도를 구하면
$-r_A = 0.08(1) + 0.12(1)^2 = 0.08 + 0.12 = 0.2\ \text{mol}\text{L}^{-1}\text{min}^{-1}$
공간시간은
$\tau = \frac{C_{A0} - C_A}{-r_A} = \frac{2-1}{0.2} = 5\ \text{min}$
같은 출구 농도에서 R의 총괄수율은
$\Phi_R = \frac{0.08(1)}{0.2} = \frac{0.08}{0.2} = 0.4$
따라서 공간시간 5분, R의 총괄수율 0.4가 된다.

선지 판단

① 공간시간 5, 총괄수율 0.2 → X 공간시간은 맞지만 총괄수율 계산에서 분모(전체 소모속도 0.2)가 아닌 다른 값을 쓴 오답이다. 실제 총괄수율은 0.4이다.
② 공간시간 5, 총괄수율 0.4 → O 출구농도 1 mol L^-1에서 전체 소모속도 0.2로 계산한 공간시간 5분과 총괄수율 0.4가 모두 맞다.
③ 공간시간 10, 총괄수율 0.2 → X 공간시간을 구할 때 전체 소모속도(0.2) 대신 R 생성속도(0.08)만 사용해 $(2-1)/0.08 = 12.5$ 근처로 잘못 크게 계산하거나 다른 값을 나눈 오답이며, 총괄수율도 틀렸다.
④ 공간시간 10, 총괄수율 0.4 → X 총괄수율은 맞지만 공간시간이 틀렸다(전체 소모속도를 잘못 적용한 경우).

오답 포인트

이 문제의 함정은 두 가지이다. 첫째, 공간시간을 구할 때 R을 만드는 반응(k1)의 속도만 쓰거나 S를 만드는 반응(k2)의 속도만 쓰면 안 되고, 두 반응의 소모속도를 더한 전체 소모속도 $-r_A = -r_{A1} + (-r_{A2})$를 써야 한다. 둘째, MFR(혼합흐름반응기)은 관형반응기(PFR)와 달리 반응기 내부 농도가 전 구간에서 출구 농도로 균일하므로, 적분이 아니라 출구 농도 하나에서의 반응속도만으로 $\tau = (C_{A0} - C_A)/(-r_A)$를 계산한다는 점을 놓치면 안 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응이 있는 MFR 문제는 먼저 전환율로부터 출구 농도 C_A를 구하고, 그 농도에서 각 반응속도를 각각 계산한 뒤 합해서 전체 소모속도를 만든다. 공간시간은 이 전체 소모속도 하나로 $(C_{A0} - C_A)/(-r_A)$를 계산하고, 총괄수율은 원하는 반응의 속도를 전체 소모속도로 나누어 같은 출구 조건에서 함께 구한다.

암기 포인트

MFR 설계식은 출구 농도에서의 반응속도 하나로 τ=(C_A0-C_A)/(-r_A)_출구; 병렬반응이면 $-r_A$는 각 반응속도의 합; 총괄수율 $\Phi_R = (-r_{A1})/(-r_A)$는 공간시간과 같은 농도 조건에서 계산한다.

NoteBase

문 10. 이상흐름 반응기에서 체류시간분포에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, τ_s는 혼합흐름 반응기의 체류시간, τ_p는 플러그흐름 반응기의 체류시간, 시간 $t = 0$일 때 추적자 농도는 C_0이다)

① 추적자 펄스가 혼합흐름 반응기의 입구로 주입되면, 단일 혼합흐름 반응기의 출구 농도는 $C = C_0 e^{-t/\tau_s}$로 표현된다.

② 추적자 펄스가 혼합흐름 반응기의 입구로 주입되면, 단일 혼합흐름 반응기의 체류시간분포는 $\frac{e^{-t/\tau_s}}{\tau_s}$로 표현된다.

③ 단일 플러그흐름 반응기의 체류시간분포는 τ_p만큼 지연된다.

④ 혼합흐름 반응기→플러그흐름 반응기 직렬계와 플러그흐름 반응기→혼합흐름 반응기 직렬계의 체류시간분포식은 서로 다르다.

정답 4번

출제 포인트

혼합흐름 반응기(MFR)와 플러그흐름 반응기(PFR) 각각의 체류시간분포(RTD) 식을 알고 있는지, 그리고 두 반응기를 직렬로 연결할 때 연결 순서가 전체 RTD에 영향을 주는지를 묻는 문제이다. 반응이 없는 이상흐름계에서 RTD는 각 반응기의 부피(즉 체류시간)에만 의존하며, MFR과 PFR을 어떤 순서로 배치하든 전체 RTD 함수는 동일하다는 사실이 핵심이다.

조건 정리

τs는 단일 혼합흐름 반응기의 체류시간, τp는 단일 플러그흐름 반응기의 체류시간이다. t = 0에서 펄스로 주입한 추적자의 농도는 C0이다. 이 조건에서 각 이상형 반응기의 펄스 응답(C 곡선)과 체류시간분포 함수 E(t)의 관계를 확인한다.

사용할 공식

혼합흐름 반응기(완전혼합, CSTR)의 펄스 추적자 응답은 $C(t) = C_0 e^{-t/\tau_s}$이고, 이를 정규화한 체류시간분포 함수는 $E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t)dt} = \frac{1}{\tau_s} e^{-t/\tau_s}$이다. 플러그흐름 반응기(PFR)는 유체 요소가 전부 동일한 시간 τ_p 동안 머물다가 한꺼번에 유출되므로, 그 체류시간분포는 $t = \tau_p$에서만 값을 갖는 디랙델타함수 $E(t) = \delta(t - \tau_p)$로 표현되며, 이는 입구 펄스가 τ_p만큼 시간 지연되어 그대로 출구에 나타나는 것과 같다. 여러 이상형 반응기를 직렬로 연결한 계의 전체 체류시간분포는 각 반응기 RTD의 컨벌루션(convolution)으로 구해지며, 컨벌루션은 교환법칙이 성립하므로 $E_1 * E_2 = E_2 * E_1$이다.

NoteBase

계산 과정

① 혼합흐름 반응기에 t=0에서 추적자 펄스를 주입하면 물질수지로부터 출구 농도가 $C = C_0 e^{-t/\tau_s}$로 유도되므로 옳은 설명이다.
② E(t)는 C(t)를 전체 면적(=C0·τs)으로 나눈 것이므로 $E(t) = e^{-t/\tau_s}/\tau_s$가 되어 옳은 설명이다.
③ 플러그흐름 반응기는 모든 유체 요소가 동일하게 τp 동안 체류하다가 유출되므로, 입구 신호가 형태 변화 없이 τp만큼 지연되어 나타난다. 즉 단일 PFR의 RTD는 입력 신호가 τp만큼 지연된 것으로 볼 수 있으므로 옳은 설명이다.
④ MFR→PFR 직렬계와 PFR→MFR 직렬계는 배치 순서만 다를 뿐 동일한 두 반응기(체류시간 τs, τp)를 직렬 연결한 것이다. 전체 RTD는 두 반응기 RTD의 컨벌루션인데, 컨벌루션은 순서를 바꾸어도 결과가 같다(교환법칙). 따라서 두 직렬계의 체류시간분포식은 서로 같으며, '서로 다르다'는 설명은 옳지 않다. (다만 반응이 일어나는 경우 전화율은 비선형 속도식에서 배치 순서에 따라 달라질 수 있는데, 이는 RTD 자체가 아니라 전화율에 관한 별개의 논점이다.)

선지 판단

① 옳다 — 혼합흐름 반응기의 펄스 응답 C = C0 e^{-t/τs}는 표준적인 CSTR 추적자 실험 결과와 일치한다.
② 옳다 — 위 C(t)를 정규화한 E(t) = e^{-t/τs}/τs는 혼합흐름 반응기의 표준 RTD 함수이다.
③ 옳다 — 플러그흐름 반응기는 모든 유체가 동일한 시간(τp) 동안 머물다 나오므로, RTD가 τp만큼 시간 지연된 형태로 나타난다.
④ 옳지 않다 → 옳은 진술로 고치면 'MFR→PFR 직렬계와 PFR→MFR 직렬계의 체류시간분포식은 서로 같다'이다. 두 이상형 반응기를 직렬로 연결했을 때 전체 RTD는 각 RTD의 컨벌루션이며, 컨벌루션 연산은 순서를 바꾸어도 결과가 동일하기 때문이다.

오답 포인트

'직렬 연결 순서가 바뀌면 결과도 달라질 것'이라는 직관 때문에 ④를 옳은 설명으로 착각하기 쉽다. 그러나 이 직관은 반응이 일어나는 비선형 속도식에서 전화율이 순서에 따라 달라지는 사실과, 반응이 없는 순수한 RTD(추적자 실험) 결과를 혼동한 것이다. RTD 자체는 반응기 부피(체류시간)만으로 결정되는 유체역학적 특성이므로 배치 순서와 무관하게 동일하다.

다시 나오면 이렇게 판단

'MFR과 PFR을 직렬로 연결했을 때 RTD가 순서에 따라 달라지는가'라는 형태의 선지가 나오면, RTD는 컨벌루션의 교환법칙에 따라 순서와 무관하게 같다는 점을 먼저 떠올린다. 반대로 '전화율(반응 결과)'을 묻는 문제라면 순서에 따라 달라질 수 있다는 점과 구분해서 판단한다.

NoteBase

암기 포인트

혼합흐름 반응기(MFR) 펄스응답: $C = C_0 e^{-t/\tau_s}$, RTD: $E(t) = \frac{1}{\tau_s} e^{-t/\tau_s}$. 플러그흐름 반응기(PFR)의 RTD: $E(t) = \delta(t - \tau_p)$(τp만큼 지연된 스파이크). 이상형 반응기 직렬계의 전체 RTD=각 RTD의 컨벌루션이며, 컨벌루션은 교환법칙이 성립해 연결 순서와 무관하게 RTD가 동일하다.

NoteBase

문 11. 기체 상태에서 일산화이질소(N_2O)는 다음의 두 단계를 거쳐 분해된다. 전체반응의 속도식이 $-r_{N_2O} = k[N_2O]$일 때, 1단계와 2단계 반응의 상대적 속도에 대한 설명으로 옳은 것은?

1단계: $N_2O \rightarrow N_2 + O$
2단계: $N_2O + O \rightarrow N_2 + O_2$

① 1단계 반응이 2단계 반응보다 매우 느리며 1단계가 속도결정단계이다.

② 1단계 반응이 2단계 반응보다 매우 빠르며 2단계가 속도결정단계이다.

③ 1단계 반응과 2단계 반응의 속도는 유사하다.

④ 알 수 없다.

정답 1번

출제 포인트

두 단계로 이루어진 연속 반응에서 전체 반응의 속도식이 주어졌을 때, 이 속도식으로부터 어느 단계가 속도결정단계인지, 그리고 두 단계의 상대적 속도는 어떤 관계인지를 역으로 추론하는 문제이다. N2O 분해는 1단계 $N_2O \rightarrow N_2 + O$와 2단계 $N_2O + O \rightarrow N_2 + O_2$로 이루어져 있고, 실험적으로 전체 속도식은 $-r_{N_2O} = k[N_2O]$로 1차 반응임이 주어져 있다.

핵심 개념

직렬(연속)로 진행되는 다단계 반응에서 속도결정단계(rate-determining step)는 가장 느린 단계이며, 전체 반응의 속도식은 이 가장 느린 단계의 속도식과 형태가 같아진다. 반대로 빠른 단계는 생성된 중간체(여기서는 산소 원자 O)를 즉시 소모해 버리므로 전체 속도식에 그 단계의 흔적이 남지 않는다. 만약 두 단계의 속도가 비슷하거나 2단계가 더 느렸다면, O의 농도가 반응 중 축적되거나 반응물 농도에 대한 의존성이 달라져 전체 속도식이 $k[N_2O]$의 단순한 1차 형태로 나오지 않았을 것이다. 즉 전체 속도식이 1단계의 속도식과 정확히 같은 형태([N2O]에 대해 1차, k1만 포함)로 나타난다는 사실 자체가 1단계가 느려서 전체 속도를 지배하고, 2단계는 그보다 훨씬 빨라 생성된 O를 곧바로 소모해 버린다는 것을 보여 준다.

NoteBase

선지별 해설

① 1단계가 2단계보다 매우 느리며 1단계가 속도결정단계이다: O. 1단계에서 N2O가 N2와 O로 분해되는 반응이 느리게 진행되어 전체 반응 속도를 지배하고, 2단계에서는 생성된 O가 매우 빠르게 N2O와 반응해 소모되므로 전체 속도식이 1단계의 속도식과 같은 $k[N_2O]$ 형태로 나타난다.
② 1단계가 2단계보다 매우 빠르며 2단계가 속도결정단계이다: X → 반대로 서술되어 있다. 이 경우라면 1단계에서 생성된 O가 빠르게 축적되고 2단계(N2O와 O의 반응)가 느려 전체 속도를 지배하므로, 속도식에 O의 농도(또는 그와 연동된 항)가 남아 단순한 $k[N_2O]$ 형태로 정리되기 어렵다.
③ 1단계와 2단계의 속도가 유사하다: X → 두 단계의 속도가 비슷하면 어느 한쪽 단계만으로 전체 속도를 근사할 수 없고 중간체 O의 농도 변화도 무시할 수 없어, 단순한 1차 속도식이 깔끔하게 성립하기 어렵다.
④ 알 수 없다: X → 주어진 전체 속도식이 1단계의 속도식과 형태가 일치한다는 것 자체가 1단계가 속도결정단계임을 알려 주는 확실한 근거이다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 착각은 '먼저 일어나는 단계이니 그것이 전체 속도를 정한다'거나, 반응식 순서만 보고 direct하게 판단하는 것이다. 하지만 속도결정단계는 순서가 아니라 상대적인 느림 정도로 정해진다. 또한 전체 속도식에 중간체(O)의 농도가 등장하지 않고 반응물(N2O)의 농도만 남아 있다는 사실을 속도결정단계 판별의 단서로 쓰지 못하고 ④(알 수 없다)를 고르는 오답도 나오기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

다단계 반응 문제에서 전체 속도식이 주어지면, 먼저 그 속도식이 어느 단계의 속도식과 형태가 일치하는지를 확인한다. 형태가 일치하는 단계가 느린(속도결정) 단계이고, 나머지 단계는 그보다 빠르며 중간체를 신속히 소모해 전체 속도식에 흔적을 남기지 않는다고 판단한다.

암기 포인트

속도결정단계=가장 느린 단계이고, 전체 속도식은 속도결정단계의 속도식과 같은 형태로 나타난다. 빠른 단계는 중간체를 즉시 소모해 전체 속도식에 나타나지 않는다는 점을 기억해 둔다.

NoteBase

문 12. 반응물 A와 B로부터 다음 기초반응을 통하여 원하는 생성물 R과 부생성물 S가 생성된다. S에 대한 R의 상대적인 수율을 높이기 위한 반응물의 농도 조건은? (단, C_A와 C_B는 각각 반응물 A와 B의 농도이다)

$A + B \rightarrow R$
$A \rightarrow S$

① C_A를 높인다.

② C_B를 높인다.

③ C_A와 C_B를 모두 낮춘다.

④ 농도에 상관없다.

정답 2번

출제 포인트

병렬반응(다중반응)에서 원하는 생성물 R과 원하지 않는 부생성물 S의 상대적 수율을 반응물 농도로 어떻게 조절하는지를 묻는 문제이다. 두 반응의 반응차수가 반응물마다 다를 때, 어느 반응물의 농도를 높이거나 낮추어야 목적 생성물의 선택도가 커지는지를 판단하는 것이 핵심이다.

조건 정리

원하는 반응은 $A + B \rightarrow R$이고 부반응은 $A \rightarrow S$이다. 두 반응 모두 기초반응(elementary reaction)이므로 각 반응의 속도식은 반응식의 양론계수를 차수로 그대로 쓴다. R 생성반응은 A에 대해 1차, B에 대해 1차이며, S 생성반응은 A에 대해서만 1차이고 B와는 무관하다.

사용할 공식

순간 선택도(점 선택도)는 두 반응의 속도비로 정의한다. $\frac{r_R}{r_S} = \frac{k_1 C_A C_B}{k_2 C_A}$ 여기서 r_R은 R 생성속도, r_S는 S 생성속도이다.

계산 과정

위 식에서 분자와 분모에 공통으로 들어 있는 C_A를 약분하면 $\frac{r_R}{r_S} = \frac{k_1}{k_2} C_B$ 가 된다. 즉 R에 대한 S의 상대적 수율(선택도)은 C_A와는 무관하고 오직 C_B에 비례한다. 따라서 C_B를 높일수록 선택도 r_R/r_S가 커져서 S에 대한 R의 상대적 수율이 높아진다. 반면 C_A는 분자·분모에서 서로 상쇄되므로 이를 높이거나 낮추어도 선택도에는 영향을 주지 못한다.

NoteBase

선지 판단

① C_A를 높인다. → X. 선택도 식 $k_1 C_B / k_2$에 C_A는 나타나지 않으므로 C_A를 높여도 R과 S의 상대적 수율은 변하지 않는다.
② C_B를 높인다. → O. 선택도가 C_B에 비례하므로 C_B를 높이면 S 대비 R의 수율이 증가한다.
③ C_A와 C_B를 모두 낮춘다. → X. C_B를 낮추면 오히려 선택도가 감소하여 R의 상대적 수율이 낮아지므로 목적과 반대이다.
④ 농도에 상관없다. → X. 선택도 식에 C_B가 남아 있어 농도(정확히는 C_B)에 따라 값이 달라지므로 상관없다는 설명은 옳지 않다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 A가 두 반응 모두에 공통으로 들어간다는 점 때문에 A의 농도를 조절해야 한다고 착각하는 것이다. 그러나 선택도 식을 세워 약분해 보면 A의 농도는 분자와 분모에서 정확히 상쇄되어 사라진다. 선택도에 실제로 영향을 주는 것은 R 생성반응에만 관여하고 S 생성반응에는 관여하지 않는 반응물, 즉 B의 농도이다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응에서 원하는 반응과 원치 않는 반응이 특정 반응물을 공유할 때는, 먼저 두 반응의 속도식을 각각 써서 선택도(r_R / r_S) 식을 만든다. 그 식을 정리했을 때 약분되어 사라지는 반응물은 농도를 조절해도 선택도에 영향을 주지 못하고, 식에 남아 있는 반응물의 농도를 높이는 방향이 항상 유리한 조건이 된다.

암기 포인트

공통 반응물이 분자·분모에서 약분되면 그 농도는 선택도와 무관하다는 점, 그리고 원하는 반응에만 참여하고 부반응에는 참여하지 않는 반응물의 농도를 높이는 것이 선택도를 높이는 기본 전략이라는 점을 기억해 둔다.

NoteBase

문 13. 플러그흐름 반응기에서 비가역 액상 반응이 $-r_A = kC_A^2$의 속도로 진행되고 있다. 반응기로 유입되는 반응물 A의 초기농도가 C_{A0}이고 A의 전환율이 X_A일 때, 반응기에서의 공간시간은? (단, k는 반응속도상수, C_A는 A의 농도이다)

① $\frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-X_A}$
② $\frac{X_A}{kC_{A0}(1-X_A)^2}$
③ $\frac{X_A}{kC_{A0}(1-X_A)}$
④ $\frac{X_A}{k(1-X_A)}$

정답 3번

출제 포인트

밀도 변화가 없는 액상 반응에서 2차 반응 속도식을 플러그흐름 반응기(PFR) 설계방정식에 대입해 공간시간 τ를 전환율 X_A의 함수로 유도할 수 있는지를 묻는다. 액상 반응이므로 부피 변화가 없다는 점($\varepsilon_A = 0$)을 반영해야 한다.

조건 정리

반응은 비가역 2차 반응이며 속도식은 $-r_A = kC_A^2$이다. 액상 반응이므로 반응기 내 부피유량이 일정하고, 농도는 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$로 표현된다. 초기농도는 C_{A0}, 전환율은 X_A이다.

사용할 공식

플러그흐름 반응기의 설계방정식은 $\tau = C_{A0}\int_0^{X_A}\frac{dX_A}{-r_A}$이다. 여기에 $-r_A = kC_A^2 = kC_{A0}^2(1 - X_A)^2$를 대입한다.

계산 과정

$\tau = C_{A0}\int_0^{X_A}\frac{dX_A}{kC_{A0}^2(1-X_A)^2} = \frac{1}{kC_{A0}}\int_0^{X_A}\frac{dX_A}{(1-X_A)^2}$이다.
$\int_0^{X_A}\frac{dX_A}{(1-X_A)^2} = \left[\frac{1}{1-X_A}\right]_0^{X_A} = \frac{1}{1-X_A} - 1 = \frac{X_A}{1-X_A}$이다.
따라서 $\tau = \frac{1}{kC_{A0}}\cdot\frac{X_A}{1-X_A} = \frac{X_A}{kC_{A0}(1-X_A)}$이다.

선지 판단

① $\frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-X_A}$ → X, 이는 1차 반응($-r_A = kC_A$)의 공간시간 식이다. 2차 반응식과 혼동한 오답이다.
② $\frac{X_A}{kC_{A0}(1-X_A)^2}$ → X, 적분 결과에서 $(1 - X_A)$의 지수를 잘못 처리한 오답이다. 올바른 지수는 1승이다.
③ $\frac{X_A}{kC_{A0}(1-X_A)}$ → O, 2차 반응·액상(부피 불변) 조건에서 PFR 설계방정식을 정확히 적분한 결과와 일치한다.
④ $\frac{X_A}{k(1-X_A)}$ → X, 분모에 C_{A0}가 빠져 있다. 반응속도식이 2차이므로 C_{A0}가 반드시 분모에 포함되어야 한다.

NoteBase

오답 포인트

1차 반응 공식(①)과 2차 반응 공식을 혼동하기 쉬우므로 속도식의 차수를 먼저 확인해야 한다. 또한 적분 과정에서 $\int dX_A/(1-X_A)^2$의 결과가 $X_A/(1-X_A)$임을 정확히 계산해야 하며, $(1-X_A)^2$으로 남겨두는 실수(②)나 C_{A0}를 누락하는 실수(④)를 하지 않도록 주의한다.

다시 나오면 이렇게 판단

액상(부피 불변) 반응의 PFR 공간시간 문제는 $\tau = C_{A0}\int_0^{X_A} dX_A/(-r_A)$에 주어진 속도식을 그대로 대입하고 적분하면 풀린다. 차수가 n인 반응이면 $-r_A = kC_{A0}^n(1-X_A)^n$이 되므로, n=1이면 로그함수, n=2이면 $X_A/(1-X_A)$ 형태가 나온다는 패턴을 기억해 둔다.

암기 포인트

액상 2차 반응 PFR 공간시간: $\tau = \frac{X_A}{kC_{A0}(1-X_A)}$. 액상 1차 반응 PFR 공간시간: $\tau = \frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-X_A}$와 짝지어 함께 외워 둔다.

NoteBase

문 14. 다음의 반응 속도식을 갖는 비가역 액상 반응을 직렬로 연결된 두 개의 반응기에서 수행하고자 한다. 혼합흐름 반응기와 플러그흐름 반응기의 다양한 조합으로 이 반응을 진행시킬 때, 동일한 조건 하에서 부피가 최소로 되는 최적의 반응기 배열은? (단, 반응물 A의 초기농도는 2molL^{-1}, 반응 후 A의 최종농도는 0.5molL^{-1}이다)

$-r_A[\text{molL}^{-1}\text{min}^{-1}] = \frac{1}{C_A^2 - 2C_A + 2}$

① 첫 번째 반응기: 혼합흐름 반응기, 두 번째 반응기: 혼합흐름 반응기

② 첫 번째 반응기: 플러그흐름 반응기, 두 번째 반응기: 플러그흐름 반응기

③ 첫 번째 반응기: 혼합흐름 반응기, 두 번째 반응기: 플러그흐름 반응기

④ 첫 번째 반응기: 플러그흐름 반응기, 두 번째 반응기: 혼합흐름 반응기

정답 3번

출제 포인트

혼합흐름 반응기(MFR)와 플러그흐름 반응기(PFR)를 직렬로 연결할 때, 주어진 반응 속도식의 형태로부터 전체 반응기 부피가 최소가 되는 배열 순서를 판단하는 문제이다. 단순히 'PFR이 항상 유리하다'는 일반 원칙이 아니라, $1/(-r_A)$ 대 C_A 그래프의 모양(단조 감소인지, 골짜기가 있는지)에 따라 최적 순서가 달라진다는 것을 이해해야 한다.

조건 정리

반응 속도식: $-r_A = \frac{1}{C_A^2 - 2C_A + 2}$
입구농도: $C_{A0} = 2\ \text{molL}^{-1}$
출구농도: $C_{Af} = 0.5\ \text{molL}^{-1}$
두 반응기(하나는 MFR, 하나는 PFR)를 직렬로 연결하며, 배열 순서만 다르게 하여 전체 부피가 최소가 되는 경우를 찾는다.

사용할 공식

역수 속도식을 완전제곱 형태로 정리한다.
$\frac{1}{-r_A} = C_A^2 - 2C_A + 2 = (C_A - 1)^2 + 1$
반응기 배열 최적화의 그래프적 판단 기준(Levenspiel의 방법): $1/(-r_A)$를 C_A에 대해 그렸을 때 그래프가 반응 구간 내에서 골짜기(즉 반응 속도 $-r_A$가 극댓값을 갖는 지점)를 가지면, MFR을 그 골짜기 지점까지 사용하고 이후 단조 구간을 PFR로 처리하는 배열이 전체 부피를 최소로 만든다.

NoteBase

계산 과정

$1/(-r_A) = (C_A - 1)^2 + 1$이므로 $C_A = 1$에서 $1/(-r_A)$가 최솟값 1을 갖는다. 이는 반응 속도 $-r_A$가 $C_A = 1$에서 극댓값(최댓값)을 갖는다는 뜻이다.
반응은 $C_A = 2$(입구)에서 $C_A = 0.5$(출구)로 진행되며, 이 구간 안에 $C_A = 1$이 포함되어 있다.
C_A가 2에서 1로 줄어드는 동안에는 속도 $-r_A$가 점점 빨라지고($1/(-r_A)$ 감소), C_A가 1에서 0.5로 더 줄어드는 동안에는 속도가 다시 느려진다($1/(-r_A)$ 증가). 즉 $1/(-r_A)$ 곡선이 반응 구간 안에서 골짜기 모양을 이루며, 이는 자기촉매 반응에서 나타나는 전형적인 거동과 같다.
이런 골짜기 형태에서는 MFR을 첫 번째 반응기로 두어 입구농도 $C_A = 2$에서 골짜기의 최저점인 $C_A = 1$까지 한 번에 낮추는 것이 유리하다. MFR의 필요 부피는 출구농도 한 지점에서의 $1/(-r_A)$ 값으로 결정되는 직사각형 면적과 같으므로, 속도가 가장 빠른($1/(-r_A)$가 가장 낮은) 지점인 $C_A = 1$을 MFR의 출구로 잡으면 그 사각형의 면적, 즉 필요 부피가 최소가 된다.
이후 남은 $C_A = 1 \rightarrow 0.5$ 구간은 $1/(-r_A)$가 단조 증가하는 정상적인 구간이므로, 이 구간은 PFR로 처리하여 곡선 아래 면적을 그대로 적분하는 것이 최소 부피를 준다.
따라서 첫 번째 반응기는 혼합흐름 반응기, 두 번째 반응기는 플러그흐름 반응기로 배열할 때 두 반응기 부피의 합이 최소가 된다.

선지 판단

① 첫 번째-혼합흐름, 두 번째-혼합흐름: X → 두 반응기를 모두 MFR로 하면 골짜기 이후의 단조 구간($C_A = 1 \rightarrow 0.5$)에서도 곡선 아래 면적을 적분하는 대신 직사각형으로 근사하게 되어, PFR을 쓸 때보다 부피가 커진다.
② 첫 번째-플러그흐름, 두 번째-플러그흐름: X → 두 PFR을 이어붙인 것은 하나의 긴 PFR과 동일한 효과이므로, 골짜기 구간($C_A = 2 \rightarrow 1$, 속도가 느린 구간)까지 그대로 적분하게 되어 MFR로 그 구간을 건너뛰는 경우보다 부피가 커진다.
③ 첫 번째-혼합흐름, 두 번째-플러그흐름: O → 앞서 계산한 대로 MFR로 골짜기의 최저점($C_A = 1$)까지 낮추고, 이어서 PFR로 단조 구간($C_A = 1 \rightarrow 0.5$)을 처리하는 배열이 전체 부피를 최소로 만든다.
④ 첫 번째-플러그흐름, 두 번째-혼합흐름: X → 순서가 반대가 되면 PFR이 골짜기의 저속 구간($C_A = 2 \rightarrow 1$)을 그대로 적분하여 비효율적이고, 이후 MFR이 단조 감소 구간($C_A = 1 \rightarrow 0.5$)을 직사각형으로 근사하게 되어 오히려 전체 부피가 커진다.

오답 포인트

이 문제는 'PFR이 항상 MFR보다 부피가 작다'는 일반 원칙만 기억하고 있으면 틀리기 쉽다. 그 원칙은 $1/(-r_A)$가 C_A에 대해 단조로 변하는(중간에 극값이 없는) 정상적인 반응에서만 성립한다. 이 문제처럼 반응 구간 안에 $1/(-r_A)$의 극솟값(즉 반응 속도의 극댓값)이 존재하는 경우에는, 오히려 MFR을 그 골짜기 구간에 배치하는 것이 유리하다. 반응기 순서를 묻는 문제에서는 항상 속도식을 완전제곱 등의 형태로 정리해 극값의 위치를 구하고, 그 값이 입구농도와 출구농도 사이에 포함되는지부터 확인해야 한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 배열(직렬 MFR-PFR 조합) 문제가 나오면 먼저 주어진 속도식을 $1/(-r_A)$ 형태로 바꾸고 완전제곱식 등으로 정리하여 C_A에 대한 극값이 존재하는지 확인한다. 그 극값이 입구농도와 출구농도 사이에 포함되어 있고 그 지점에서 반응 속도가 극댓값(즉 $1/(-r_A)$가 극솟값)을 가지면, MFR로 입구농도에서 그 극값 지점까지 낮추고 이어서 PFR로 나머지 단조 구간을 처리하는 배열이 최소 부피를 준다고 판단한다.

암기 포인트

$1/(-r_A)$ 대 C_A 그래프에서 골짜기(반응 속도의 극댓값)가 반응 구간 안에 있으면, 'MFR이 골짜기 구간을 처리하고 PFR이 나머지 단조 구간을 처리'하는 배열이 최소 부피를 준다. 속도식을 완전제곱식 $(C_A-1)^2+1$ 형태로 정리하면 극값의 위치(여기서는 $C_A=1$)를 빠르게 찾을 수 있다.

NoteBase

문 15. 등온 혼합흐름 반응기에서 1차 기초반응이 진행된다. 반응물의 전환율이 60%일 때, Damköhler 수는?

① 1.0

② 1.5

③ 2.0

④ 2.5

정답 2번

출제 포인트

혼합흐름 반응기(CSTR)에서 1차 기초반응이 진행될 때 전환율과 Damköhler 수(Da) 사이의 관계식을 세울 수 있는지를 묻는다. Da는 반응 속도와 대류(유입) 속도의 상대적 크기를 나타내는 무차원수로, $Da = k\tau$로 정의된다.

조건 정리

등온 혼합흐름 반응기(완전혼합, CSTR), 1차 기초반응, 전환율 $X = 0.6$이 주어졌다. 구하는 값은 Damköhler 수 Da이다.

사용할 공식

혼합흐름 반응기의 설계식은 $\tau = \frac{C_{A0}X}{-r_A}$이고, 1차 반응이므로 $-r_A = kC_A = kC_{A0}(1-X)$이다. 이를 대입하면 $\tau = \frac{X}{k(1-X)}$가 되고, 양변에 k를 곱하면 $Da = k\tau = \frac{X}{1-X}$를 얻는다.

계산 과정

$Da = \frac{X}{1-X} = \frac{0.6}{1-0.6} = \frac{0.6}{0.4} = 1.5$이다. 따라서 이 반응기의 Damköhler 수는 1.5이다.

선지 판단

① 1.0: X → $Da = 1.0$이면 $X = Da/(1+Da) = 0.5$가 되어 조건인 전환율 60%와 맞지 않으므로 오답이다.
② 1.5: $Da = X/(1-X) = 0.6/0.4 = 1.5$로 계산 결과와 정확히 일치하므로 정답이다.
③ 2.0: $Da = 2.0$이면 $X = 2.0/3.0 \approx 0.667$이 되어 60%보다 큰 전환율에 해당하므로 오답이다.
④ 2.5: $Da = 2.5$이면 $X = 2.5/3.5 \approx 0.714$로 역시 60%보다 큰 전환율에 해당하므로 오답이다.

오답 포인트

회분식이나 플러그흐름 반응기의 설계식 $kt = -\ln(1-X)$ 또는 $Da = -\ln(1-X)$를 그대로 적용하면 $Da \approx 0.916$이 되어 오답으로 이어진다. 이 문제는 혼합흐름(완전혼합) 반응기이므로 반드시 $Da = X/(1-X)$ 관계식을 사용해야 한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 종류(혼합흐름 vs 플러그흐름)를 먼저 확인한 뒤, 혼합흐름이면 $Da = X/(1-X)$, 플러그흐름 1차 반응이면 $Da = -\ln(1-X)$ 공식을 구분해서 적용한다. 전환율을 소수로 바꾸어 대입하는 계산 실수도 주의한다.

암기 포인트

혼합흐름 반응기 1차 반응: $X = \frac{Da}{1+Da}$, $Da = \frac{X}{1-X}$. 플러그흐름 반응기 1차 반응: $Da = -\ln(1-X)$로 서로 다른 형태임을 구분해서 암기해 둔다.

NoteBase

문 16. 효소반응에 관한 다음의 Michaelis-Menten 속도식에 대한 설명으로 옳은 것은? (단, $-r_S$는 반응속도, v_{max}는 최대반응속도, K_m은 Michaelis-Menten 상수, $[S]$는 기질의 농도이다)

$$-r_S = \frac{v_{max}[S]}{K_m + [S]}$$

① v_{max}는 전체효소농도의 함수이다.

② K_m이 클수록 기질과 효소 사이의 친화도는 증가한다.

③ $[S] \gg K_m$인 경우, 반응속도는 1차반응에 가깝다.

④ 모든 효소 촉매반응은 Michaelis-Menten 식을 따른다.

정답 1번

출제 포인트

Michaelis-Menten 속도식 $-r_S = \frac{v_{max}[S]}{K_m + [S]}$의 각 항이 갖는 물리적 의미와, 기질 농도 [S]가 매우 크거나 작을 때 이 식이 어떤 반응차수로 근사되는지를 정확히 아는지를 묻는다. 또한 이 속도식이 모든 효소반응에 보편적으로 적용되는 것은 아니라는 점도 함께 확인한다.

핵심 개념

v_{max}는 주어진 전체 효소농도 $[E]_0$에서 모든 효소가 기질로 포화되었을 때의 최대반응속도이며, $v_{max} = k_2[E]_0$로 나타난다. 즉 v_{max}는 전체효소농도에 비례하는 값이다.
K_m은 반응속도가 v_{max}의 절반이 되는 기질농도로, 효소와 기질 사이의 친화도를 나타내는 지표이다. K_m이 작을수록 낮은 기질농도에서도 절반속도에 도달하므로 친화도가 높은 것이고, K_m이 클수록 절반속도에 도달하기 위해 더 많은 기질이 필요하므로 친화도는 낮아진다. 즉 K_m과 친화도는 반비례 관계이다.
반응차수는 극한값으로 판단한다. $[S] \ll K_m$이면 분모가 K_m에 지배되어 $-r_S \approx \frac{v_{max}}{K_m}[S]$로 [S]에 비례하는 1차반응이 되고, 반대로 $[S] \gg K_m$이면 분모가 [S]에 지배되어 $-r_S \approx v_{max}$로 [S]와 무관한 0차반응(포화상태)이 된다.
Michaelis-Menten 식은 하나의 기질이 하나의 효소-기질 복합체를 거쳐 반응하는 단순 모델에서 유도된 것으로, 저해제가 존재하거나 다중기질·협동성(알로스테릭) 효소가 관여하는 반응 등 모든 효소 촉매반응에 그대로 적용되지는 않는다.

NoteBase

선지별 해설

① v_{max}는 전체효소농도의 함수이다 → O. $v_{max} = k_2[E]_0$로 정의되므로 전체 효소농도 $[E]_0$에 비례하는 함수이다.
② K_m이 클수록 기질과 효소 사이의 친화도는 증가한다 → X. K_m이 클수록 절반속도에 도달하는 데 더 많은 기질농도가 필요하다는 뜻이므로 친화도는 오히려 감소한다. 친화도가 높을수록 K_m은 작아진다.
③ $[S] \gg K_m$인 경우, 반응속도는 1차반응에 가깝다 → X. $[S] \gg K_m$이면 $K_m + [S] \approx [S]$가 되어 $-r_S \approx v_{max}$로 일정해지므로 [S]에 무관한 0차반응에 가깝다. 1차반응에 가까워지는 경우는 반대로 $[S] \ll K_m$일 때이다.
④ 모든 효소 촉매반응은 Michaelis-Menten 식을 따른다 → X. Michaelis-Menten 식은 단순한 단일기질-단일효소 반응을 가정한 모델이며, 저해작용이나 다중기질 반응, 협동성을 보이는 효소반응 등은 이 식으로 설명되지 않는다.

오답 포인트

②는 K_m의 크기와 친화도의 방향을 반대로 기억하는 실수에서 나온다. K_m은 작을수록 친화도가 높다는 반비례 관계를 뒤집지 않도록 주의한다. ③은 $[S] \gg K_m$과 $[S] \ll K_m$의 극한 조건을 서로 바꿔 생각하는 실수이다. 기질이 많아 효소가 포화되면 속도가 더 이상 오르지 않는 0차반응이 되고, 기질이 적어 효소가 남아돌면 기질농도에 비례하는 1차반응이 된다는 점을 그림으로 떠올리며 구분한다. ④는 Michaelis-Menten 식이 특정 가정 위에서 유도된 모델이라는 사실을 놓치고 '효소반응 = MM식'으로 과잉 일반화한 경우이다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 식의 분모와 분자에서 [S]와 K_m의 상대적 크기를 비교해 극한을 취해 본다. [S]가 K_m보다 훨씬 크면 분모가 [S]로 근사되어 속도가 v_{max}로 수렴하는 0차반응, [S]가 K_m보다 훨씬 작으면 분모가 K_m으로 근사되어 속도가 [S]에 비례하는 1차반응임을 바로 적용한다. K_m과 친화도는 반비례, v_{max}와 효소농도는 비례라는 두 관계를 짝지어 외워 두면 헷갈리지 않는다.

암기 포인트

$v_{max} \propto [E]_0$(전체효소농도에 비례), K_m 작음=친화도 높음 · K_m 큼=친화도 낮음(반비례), $[S] \ll K_m$→1차반응 · $[S] \gg K_m$→0차반응(포화), Michaelis-Menten 식은 모든 효소반응이 아닌 단순 단일기질 모델에 한정된다.

NoteBase

문 17. A→R의 비가역 액상 반응이 $-r_A[\text{mol L}^{-1}\text{min}^{-1}] = 3C_A$의 속도로 진행된다. 반응기를 나가는 흐름의 $\frac{1}{2}$을 반응기로 재순환시킬 때, 전환율 40%를 얻기 위해 필요한 공간시간[min]은? (단, 반응물 A의 초기농도는 5mol L^{-1}이다)

① $\frac{1}{2}\ln\frac{4}{3}$
② $\frac{1}{2}\ln\frac{13}{9}$
③ $\frac{2}{3}\ln\frac{4}{3}$
④ $\frac{2}{3}\ln\frac{13}{9}$

정답 3번

출제 포인트

재순환 반응기(recycle reactor)에서 1차 비가역 반응의 공간시간을 구하는 문제이다. 재순환비 R을 문제 조건으로부터 올바르게 정의하는 것이 핵심이며, 재순환 흐름이 '반응기로 들어가는 신선한 공급물' 기준인지 '반응기를 나가는 전체 흐름' 기준인지를 정확히 구분해야 한다.

조건 정리

A→R, 1차 비가역 액상 반응, $-r_A = kC_A$, $k = 3\ \text{min}^{-1}$. 초기농도 $C_{A0} = 5\ \text{mol L}^{-1}$. 반응기를 나가는 흐름의 절반을 반응기 입구로 재순환시킨다. 목표 전환율 $X_f = 0.4$. 액상 반응이므로 밀도 변화가 없어 부피유량이 일정하다($\varepsilon_A = 0$).

사용할 공식

재순환비 R은 '(재순환되는 유량)/(계 밖으로 나가는 순생산물 유량)'으로 정의된다. 정상상태에서 순생산물 유량은 신선한 공급물 유량 v_0와 같으므로, 반응기 입구로 들어가는 총 유량은 $v_0(1+R)$이고 재순환 유량은 Rv_0이다. 재순환 흐름의 전환율은 반응기 출구 전환율 X_f와 같으므로, A에 대한 물질수지로부터 혼합점(반응기 입구) 전환율은 $X_i = \frac{R}{1+R}X_f$ 이다. 재순환 반응기의 설계식은 $\tau = \frac{(1+R)C_{A0}}{k}\int_{X_i}^{X_f}\frac{dX}{C_{A0}(1-X)} = \frac{1+R}{k}\ln\frac{1-X_i}{1-X_f}$

계산 과정

먼저 R을 구한다. 반응기를 '나가는' 전체 흐름을 F라 하면, 그 절반이 재순환되므로 재순환 유량은 $F/2$, 계 밖으로 나가는 순생산물 유량도 $F/2$이다(정상상태에서 신선한 공급물 유량 $v_0 = F/2$). 재순환비 정의에 따라 R=재순환 유량순생산물 유량=(F/2)/(F/2)=1 따라서 $R = 1$이다. 다음으로 혼합점 전환율 $X_i = \frac{R}{1+R}X_f = \frac{1}{2}\times 0.4 = 0.2$ 이다. 이제 설계식에 대입한다. $1 - X_i = 0.8 = \frac{4}{5}$, $\quad 1 - X_f = 0.6 = \frac{3}{5}$ $\frac{1-X_i}{1-X_f} = \frac{4/5}{3/5} = \frac{4}{3}$ $\tau = \frac{1+R}{k}\ln\frac{4}{3} = \frac{2}{3}\ln\frac{4}{3}$ 초기농도 $C_{A0} = 5\ \text{mol L}^{-1}$는 반응차수가 1차이므로 최종 결과에 영향을 주지 않는다(약분되어 사라진다).

NoteBase

선지 판단

① $\frac{1}{2}\ln\frac{4}{3}$ — X: 계수 $(1+R)/k$를 1/2로 잘못 계산한 경우(재순환비 R을 0으로 두거나 계수 산정을 잘못한 경우)에 나오는 값으로, 실제로는 2/3이어야 한다.
② $\frac{1}{2}\ln\frac{13}{9}$ — X: 재순환비를 $R=1/2$로 잘못 해석(반응기를 나가는 흐름의 절반이 곧 신선한 공급물 유량과 같다고 오인)하면 $X_i=(1/3)(0.4)=2/15$, $(1-X_i)/(1-X_f)=13/9$가 나오는데, 이는 R의 정의를 잘못 적용한 결과이다.
③ $\frac{2}{3}\ln\frac{4}{3}$ — O: $R=1$, $X_i=0.2$를 올바르게 적용한 계산 결과와 일치한다.
④ $\frac{2}{3}\ln\frac{13}{9}$ — X: 계수 2/3은 맞지만 X_i를 2/15로 잘못 구해 로그 안의 값이 틀렸다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 재순환비 R의 정의이다. '반응기를 나가는 흐름의 절반을 재순환한다'는 조건을 '재순환 유량이 신선한 공급물 유량의 절반'이라고 오해하면 $R=1/2$로 잘못 설정하게 되어 ②나 ①과 같은 오답이 나온다. 재순환비는 어디까지나 '재순환 유량 대 계 밖으로 나가는 순생산물(신선한 공급물과 같음) 유량'의 비이며, 이번 문제처럼 '반응기 출구 흐름의 절반이 재순환'되는 경우에는 재순환 유량과 순생산물 유량이 같아지므로 $R=1$이 된다는 점을 유량 수지로 직접 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

재순환 반응기 문제는 항상 유량 수지부터 그린다. 신선한 공급물 v_0, 재순환 유량 Rv_0, 반응기 입구 총 유량 $v_0(1+R)$, 반응기 출구(=재순환 분기점) 유량도 $v_0(1+R)$이며 이 중 Rv_0이 재순환되고 v_0이 계 밖으로 나간다는 그림을 먼저 확정한 뒤, 문제에서 준 재순환 비율 조건을 이 유량들 사이의 비로 바꾸어 R을 구한다. R을 구한 다음에는 $X_i=\frac{R}{1+R}X_f$로 혼합점 전환율을 구하고, 1차 반응이면 $\tau=\frac{1+R}{k}\ln\frac{1-X_i}{1-X_f}$에 대입한다.

암기 포인트

재순환비 R=재순환 유량순생산물(신선 공급물) 유량, 혼합점 전환율 $X_i=\frac{R}{1+R}X_f$, 1차 반응의 재순환 반응기 설계식 $\tau=\frac{1+R}{k}\ln\frac{1-X_i}{1-X_f}$를 세트로 기억해 둔다. '반응기 출구 흐름의 절반을 재순환'이라는 표현이 나오면 재순환 유량과 순생산물 유량이 같아져 R=1이 된다는 것도 함께 암기 포인트로 정리해 둔다.

NoteBase

문 18. 정상상태의 단열 혼합흐름 반응기에서 $A \rightarrow B$인 액상 반응이 상변이 없이 진행된다. 온도 $20^\circ\mathrm{C}$의 순수 반응물 A가 $10\mathrm{mol L^{-1}}$로 공급된다면, 반응기 온도가 $60^\circ\mathrm{C}$로 유지될 때의 전환율[%]은? (단, 반응열은 $-\Delta H_R = 20\mathrm{kcal mol^{-1}}$, 반응기 부피당 열용량은 $\rho C_p = 1\mathrm{kcal L^{-1} K^{-1}}$이다)

① 20

② 25

③ 30

④ 35

정답 1번

출제 포인트

단열 혼합흐름반응기(단열 CSTR)의 에너지수지를 이용해 전환율을 구하는 문제이다. 반응으로 발생한 열이 전부 반응물의 온도를 높이는 데 쓰인다는 단열 조건의 에너지 균형식 $\rho C_p(T - T_0) = X(-\Delta H_R)C_{A0}$를 세울 수 있는지가 핵심이다.

조건 정리

공급 온도 $T_0 = 20^\circ\mathrm{C}$, 반응기(유지) 온도 $T = 60^\circ\mathrm{C}$이므로 온도 상승분은 $\Delta T = T - T_0 = 40\mathrm{K}$이다. 공급 농도 $C_{A0} = 10\ \mathrm{mol L^{-1}}$, 반응열 크기 $-\Delta H_R = 20\ \mathrm{kcal mol^{-1}}$(발열), 반응기 부피당 열용량 $\rho C_p = 1\ \mathrm{kcal L^{-1} K^{-1}}$이다. 단열이므로 반응기와 외부 사이의 열 출입이 없고, 순수 반응물 A만 공급되어 상변화 없이 액상 반응이 진행된다.

사용할 공식

단열 반응기의 에너지수지(정상상태, 열 손실 없음)는 다음과 같다.

$\rho C_p(T - T_0) = X \cdot (-\Delta H_R) \cdot C_{A0}$

여기서 좌변은 반응물이 온도 T_0에서 T까지 데워지는 데 필요한 단위 부피당 열량이고, 우변은 전환율 X만큼 반응이 진행되면서 발생하는 단위 부피당 반응열이다. 단열 상태에서는 이 둘이 같아야 한다.

계산 과정

좌변: $\rho C_p(T - T_0) = 1 \times 40 = 40\ \mathrm{kcal L^{-1}}$

우변의 계수: $(-\Delta H_R) \cdot C_{A0} = 20 \times 10 = 200\ \mathrm{kcal L^{-1}}$

따라서 $40 = X \times 200$이므로 $X = \frac{40}{200} = 0.2$이다.

전환율은 $X \times 100 = 20\%$이다.

NoteBase

선지 판단

① 20 → O, 에너지수지식으로 계산한 전환율과 정확히 일치한다.
② 25 → X, 온도 상승분을 40 K가 아닌 다른 값으로 잘못 계산했거나 반응열·열용량 값을 서로 바꿔 넣었을 때 나올 수 있는 값으로, 올바른 계산과는 맞지 않는다.
③ 30 → X, 20과 200의 비율 계산을 정확히 하지 않았을 때 나오는 오답이다.
④ 35 → X, 온도차 40 K를 다른 온도차(예: 초기온도 기준 오적용)로 착각했을 때 나올 수 있는 값으로, 실제 계산 결과와 다르다.

오답 포인트

이 문제는 섭씨 온도차를 그대로 켈빈 온도차로 써도 되는지 헷갈리기 쉬운데, 온도 '차이'는 섭씨든 켈빈이든 같은 값이므로 $60-20=40$을 그대로 $\Delta T = 40$ K로 사용해도 된다. 또한 반응열 $-\Delta H_R$이 이미 발열 반응의 '크기'로 양수로 주어져 있으므로, 부호를 다시 붙이거나 뒤집어서 계산하면 안 된다. 마지막으로 단위를 맞추는 과정에서 몰 농도 C_{A0}와 열용량 ρC_p의 부피 기준(L)이 같다는 점을 확인하고 계산해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

단열 반응기에서 전환율을 묻는 문제는 항상 $\rho C_p \Delta T = X(-\Delta H_R)C_{A0}$ 형태의 에너지수지식부터 세운다. 온도차(공급온도와 반응기온도의 차)를 먼저 구하고, 우변의 계수인 $(-\Delta H_R)C_{A0}$를 계산한 뒤, 양변을 같다고 놓고 X에 대해 정리하면 빠르게 풀린다.

암기 포인트

단열 CSTR 에너지수지: $\rho C_p(T-T_0) = X(-\Delta H_R)C_{A0}$. 열용량 항(좌변)이 단위 부피당 필요한 감열, 반응열 항(우변)이 단위 부피당 발생한 화학반응 열이며, 단열 상태에서는 두 값이 같다는 점을 기억해 둔다.

NoteBase

문 19. 촉매반응 시스템에서 반응물이 촉매 내부로의 확산 제한을 받으면서 1차 반응으로 일어나는 경우, Thiele 계수에 영향을 주는 요소가 아닌 것은?

① 촉매 표면에서의 반응속도 상수

② 촉매의 입자크기

③ 반응물의 유효 확산계수

④ 촉매 표면에서의 반응물 농도

정답 4번

출제 포인트

1차 반응이 촉매 내부 확산 제한을 받을 때 Thiele 계수(Thiele modulus)를 결정짓는 물리량이 무엇인지 정확히 구분하는 문제이다. Thiele 계수는 촉매 입자 내에서 반응속도와 확산속도의 상대적 크기를 나타내는 무차원수이며, 반응물의 농도와는 무관하게 정의된다는 점이 핵심이다.

사용할 공식

구형 또는 평판형 촉매 입자에서 1차 반응에 대한 Thiele 계수는 $\phi = L\sqrt{\frac{k}{D_{eff}}}$로 정의된다. 여기서 L은 촉매 입자의 특성 길이(입자크기와 관련된 값), k는 촉매 표면(또는 내부)에서의 반응속도 상수, D_{eff}는 반응물의 유효 확산계수이다.

조건 정리

1차 반응이므로 반응속도식은 $r = kC$로 농도에 대해 선형이다. 이 경우 물질수지 미분방정식을 무차원화하면 농도항 C는 식의 양변에서 소거되어 Thiele 계수의 정의식에는 나타나지 않는다. 즉 Thiele 계수는 k, L, D_{eff}만의 함수이고 반응물의 표면 농도 값 자체와는 독립적이다.

계산 과정

$\phi = L\sqrt{k/D_{eff}}$의 구성 요소를 선지와 대응시키면 다음과 같다. 반응속도 상수 k는 식에 직접 포함되어 영향을 준다. 촉매의 입자크기는 특성 길이 L을 결정하므로 영향을 준다. 반응물의 유효 확산계수 D_{eff}는 식에 직접 포함되어 영향을 준다. 반면 촉매 표면에서의 반응물 농도는 1차 반응의 선형성 때문에 무차원화 과정에서 소거되어 ϕ 식에 남지 않으므로 영향을 주지 않는다.

NoteBase

선지 판단

① 촉매 표면에서의 반응속도 상수 - O, ϕ 식에 k로 직접 포함되어 값을 결정한다.
② 촉매의 입자크기 - O, 특성 길이 L로서 ϕ 식에 직접 포함된다.
③ 반응물의 유효 확산계수 - O, D_{eff}로서 ϕ 식에 직접 포함된다.
④ 촉매 표면에서의 반응물 농도 - X, 1차 반응은 반응속도가 농도에 선형 비례하므로 무차원화 시 농도항이 소거되어 Thiele 계수 값에 영향을 주지 않는다. 따라서 이것이 '영향을 주지 않는 요소'에 해당한다.

오답 포인트

①·②·③을 답으로 고르는 경우는 Thiele 계수의 정의식 $\phi = L\sqrt{k/D_{eff}}$에 실제로 포함되는 변수들을 오히려 '영향을 주지 않는 요소'로 착각한 것이다. 반대로 반응물 농도가 반응차수에 따라 Thiele 계수에 영향을 줄 수 있다고 생각하기 쉬운데, 이는 0차나 다른 차수 반응에서는 성립할 수 있어도 1차 반응에서는 선형성 때문에 농도항이 소거된다는 점을 놓친 것이다.

다시 나오면 이렇게 판단

문제에서 '1차 반응'이라는 조건을 먼저 확인하고, Thiele 계수 정의식 $\phi = L\sqrt{k/D_{eff}}$에 실제로 들어가는 변수(반응속도 상수, 입자 특성 길이, 유효 확산계수) 세 가지만 골라낸다. 이 세 가지에 해당하지 않는 선지, 특히 '농도'와 관련된 선지가 정답(영향을 주지 않는 요소)일 가능성이 높다는 점을 우선적으로 검토한다.

암기 포인트

1차 반응의 Thiele 계수 $\phi = L\sqrt{k/D_{eff}}$는 반응속도 상수 k, 특성 길이(입자크기) L, 유효 확산계수 D_{eff}의 함수이며 농도와는 무관하다는 점을 기억해 둔다.

NoteBase

문 20. 다음의 액상 반응이 플러그흐름 반응기에서 진행된다. 초기농도가 $5\text{mol}\text{L}^{-1}$인 반응물 A를 $10\text{mol}\text{min}^{-1}$의 속도로 반응기에 공급할 경우, 전환율 80%를 얻기 위해 필요한 반응기 부피 $[L]$는? (단, $\ln 5 = 1.6$으로 가정한다)

$A \rightarrow P, \quad -r_A[\text{mol}\text{L}^{-1}\text{min}^{-1}] = \frac{2C_A}{(1+C_A)^2}$

① 10.8

② 11.6

③ 21.6

④ 23.2

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 액상 반응(밀도 불변)에서 속도식이 반응물 농도에 대한 유리함수 형태로 주어졌을 때, 플러그흐름 반응기(PFR)의 설계식을 적분하여 필요한 반응기 부피를 구하는 계산 문제이다. 속도식을 전환율의 함수로 바꾸거나 농도를 적분변수로 치환해 정적분을 정확히 계산하는 능력을 묻는다.

조건 정리

반응물 A의 공급 몰유량은 $F_{A0} = 10\ \text{mol}\ \text{min}^{-1}$이고 초기농도는 $C_{A0} = 5\ \text{mol}\ \text{L}^{-1}$이다. 반응은 액상이므로 부피유량(밀도)이 일정하다고 볼 수 있다. 속도식은 $-r_A = \frac{2C_A}{(1+C_A)^2}$이며, 목표 전환율은 $X = 0.8$이다. 전환율 0.8에서의 농도는 $C_A = C_{A0}(1-X) = 5 \times (1-0.8) = 1\ \text{mol}\ \text{L}^{-1}$이다.

사용할 공식

플러그흐름 반응기의 설계식은 $V = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$이다. 농도를 적분변수로 바꾸기 위해 $C_A = C_{A0}(1-X)$, 즉 $dX = -\frac{dC_A}{C_{A0}}$를 이용하면, $F_{A0} = C_{A0}v_0$ 관계와 결합하여 다음과 같이 정리된다. $V = \int_{C_{Af}}^{C_{A0}} \frac{(1+C_A)^2}{C_A} dC_A$ 이는 피적분함수를 전개하여 $\frac{(1+C_A)^2}{C_A} = \frac{1}{C_A} + 2 + C_A$로 바꾸면 각 항을 쉽게 적분할 수 있다.

계산 과정

농도 범위는 $C_A = 1$(전환율 0.8)에서 $C_{A0} = 5$(전환율 0)까지이다.
$V = \int_1^5 \left(\frac{1}{C_A} + 2 + C_A\right) dC_A = [\ln C_A + 2C_A + \frac{C_A^2}{2}]_1^5$ $C_A = 5$를 대입하면 $\ln 5 + 10 + 12.5 = \ln 5 + 22.5$이고, $C_A = 1$을 대입하면 $\ln 1 + 2 + 0.5 = 2.5$이다. 두 값의 차는 $\ln 5 + 22.5 - 2.5 = \ln 5 + 20$이며, 주어진 조건 $\ln 5 = 1.6$을 대입하면 $1.6 + 20 = 21.6$이 된다. 따라서 반응기 부피는 $V = 21.6$ L이다.

NoteBase

선지 판단

① 10.8: 계산 과정에서 적분식을 절반으로 축소하거나 유량과 농도를 혼동해 값을 반으로 줄였을 때 나오는 결과로, 정적분 범위나 계수 설정이 잘못된 오답이다.
② 11.6: ln5 항의 배수를 잘못 적용하거나 상수항 계산에서 오차가 생긴 경우 나오는 값으로, 적분 결과의 산술 처리가 틀린 오답이다.
③ 21.6: $V = \ln 5 + 20 = 1.6 + 20 = 21.6$ L로 계산 과정과 정확히 일치하는 정답이다.
④ 23.2: 적분 하한이나 상한을 반대로 넣거나 전환율 80%를 20%로 착각해 농도 범위를 잘못 설정했을 때 나올 수 있는 값으로, 조건 정리 단계의 오류에 해당하는 오답이다.

오답 포인트

이 문제의 핵심 함정은 두 가지이다. 첫째, 전환율 80%에서의 농도가 $C_A = 1$이라는 점을 정확히 계산하지 않으면 적분 구간을 잘못 잡게 된다. 둘째, $F_{A0} = 10$ mol min^{-1}와 $C_{A0} = 5$ mol L^{-1}의 관계에서 부피유량 $v_0 = F_{A0}/C_{A0} = 2$ L min^{-1}이 자연스럽게 상쇄되어 최종 적분식에는 별도로 곱해지지 않는다는 점을 놓치면 결과에 불필요한 배수(2배 또는 1/2배)가 끼어들어 ①번이나 다른 오답으로 이어질 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

속도식이 농도에 대한 유리함수(분수함수)로 주어진 PFR 부피 계산 문제는, 전환율을 농도로 바꾼 뒤 $V = F_{A0}\int dX/(-r_A)$를 그대로 적분하기보다, 치환을 통해 농도를 적분변수로 삼아 $\int (1 + C_A)^2/C_A dC_A$ 꼴로 정리하면 계산이 훨씬 단순해진다. 이때 피적분함수를 다항식과 $1/C_A$ 항의 합으로 전개하는 것이 핵심 요령이다.

암기 포인트

PFR 설계식 $V = F_{A0}\int_0^X dX/(-r_A)$과, 액상(밀도 불변) 반응에서 $C_A = C_{A0}(1 - X)$ 관계를 기억해 둔다. $(1 + C_A)^2/C_A$ 같은 유리식은 $1/C_A + 2 + C_A$로 전개해 항별로 적분하면 실수를 줄일 수 있다는 점도 함께 기억해 둔다.

NoteBase