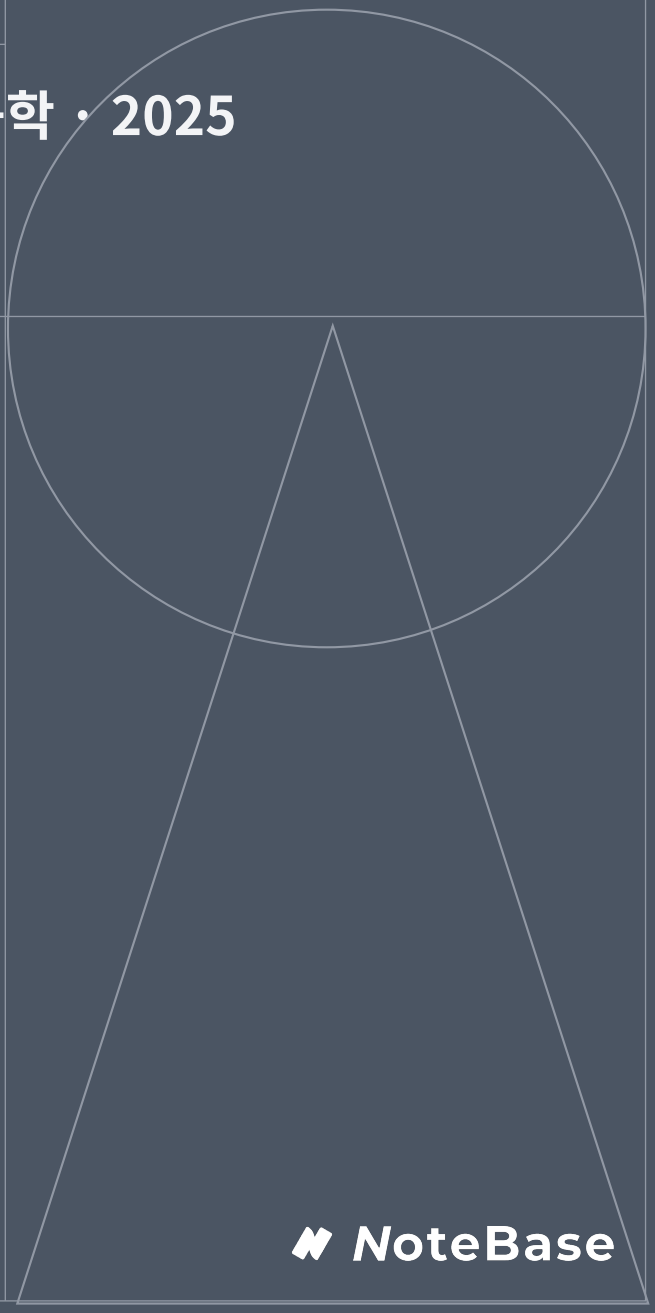
기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2025



NoteBase

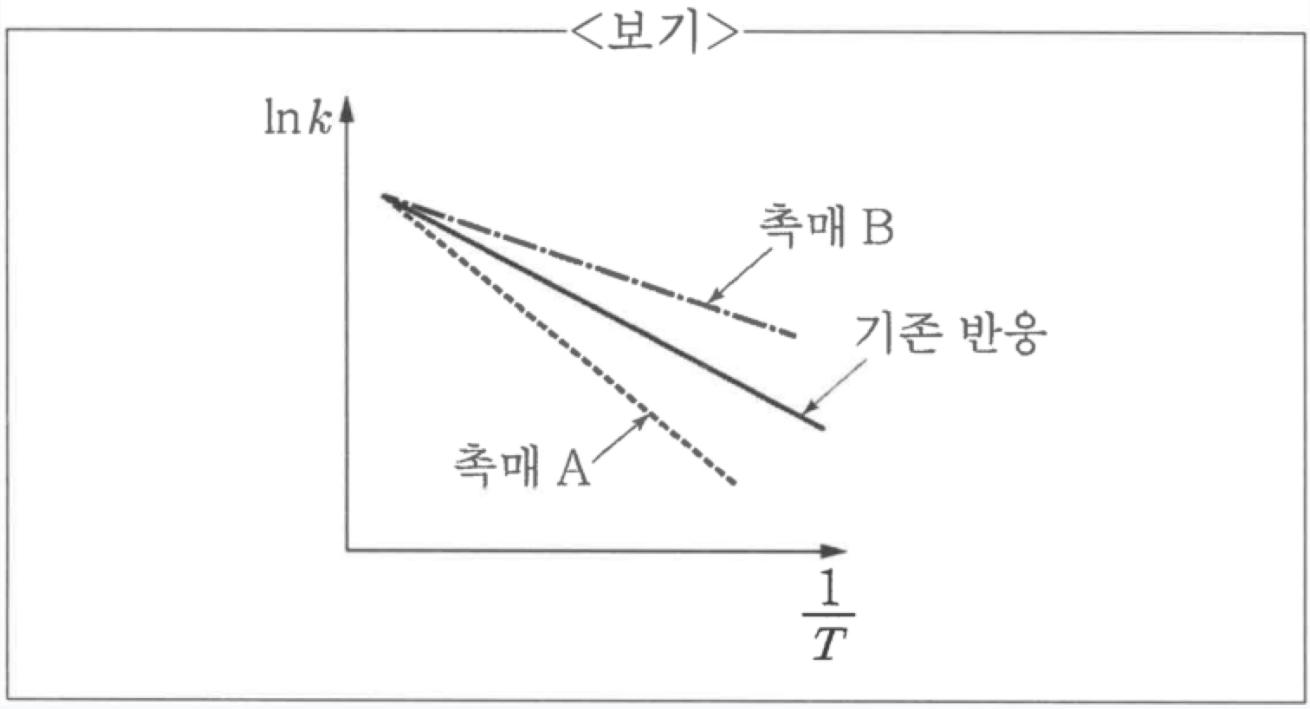
기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2025

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2025

문 1. <보기>의 그림은 반응온도(T)에 따른 반응속도상수(k)를 나타낸 도표이다. 반응에 사용된 촉매를 촉매 A와 촉매 B로 변경하니 그림과 같이 각각 직선이 이동하였다. 이에 대한 설명으로 가장 옳은 것은?

<보기>



① 촉매 A로 변경하니 반응의 활성화 에너지가 낮아졌다.

② 촉매 B로 변경하니 같은 반응 조건에서 기존 반응보다 반응속도가 증가하였다.

③ 촉매 B로 변경하니 반응이 반응온도에 더 민감해졌다.

④ 촉매 가격이 동일하다면 촉매 A로 변경하는 것이 더 경제적이다.

정답 2번

출제 포인트

이 그림은 가로축이 $1/T$, 세로축이 $\ln k$인 아레니우스 도표이다. 아레니우스 식 $\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T}$에서 직선의 기울기는 $-\frac{E_a}{R}$, 세로축 절편은 $\ln A$이다. 즉 기울기가 급할수록(아래로 더 기울수록) 활성화 에너지 E_a가 크다는 점을 읽어내는 것이 핵심이다. 세 직선이 왼쪽 한 점에서 만나도록 그려져 있어 절편($\ln A$)은 비슷하고 기울기만 다르게 비교하라는 의도이다.

NoteBase

자료 읽는 순서

1) 축을 먼저 본다: 세로축 $\ln k$, 가로축 $1/T$ → 아레니우스 직선화 그래프임을 확정한다.
2) 기울기 비교: 촉매 A가 가장 가파르고(기울기 절댓값 최대), 기존 반응이 중간, 촉매 B가 가장 완만하다 → E_a는 촉매 A > 기존 반응 > 촉매 B.
3) 높이(반응속도) 비교: 같은 $1/T$(같은 온도)에서 위에 있는 선일수록 $\ln k$가 크고, 곧 k가 크다(반응속도가 빠르다). 세 선이 왼쪽에서 만나므로 그 오른쪽(실제 온도 영역)에서는 촉매 B가 항상 가장 위, 촉매 A가 가장 아래에 있다.

선지별 해설

① X. 촉매 A는 기울기가 가장 가파르므로 E_a = -(기울기)× R 값이 가장 크다. "활성화 에너지가 낮아졌다" → "활성화 에너지가 오히려 높아졌다"가 맞다.
② O. 같은 $1/T$(같은 온도)에서 촉매 B 직선이 기존 반응 직선보다 위에 있으므로 k_B > k_기존, 즉 k_B > k_기존이다. 따라서 같은 반응 조건에서 반응속도가 증가했다는 설명이 옳다.
③ X. 온도 민감도는 기울기(곧 E_a)가 클수록 크다. 촉매 B는 기울기가 가장 완만해 E_a가 가장 작으므로 온도 변화에 k가 덜 변한다. "반응온도에 더 민감해졌다" → "덜 민감해졌다"가 맞다.
④ X. 촉매 A는 E_a가 가장 커서 같은 온도에서 k가 가장 작다(반응이 가장 느리다). 가격이 같다면 같은 조건에서 가장 빠른 촉매 B가 유리하므로 "촉매 A로 변경하는 것이 더 경제적"이라는 설명은 틀리다.

오답 포인트

③번이 가장 헷갈리는 함정이다. "속도가 빠르다(절편·높이)"와 "온도에 민감하다(기울기)"를 혼동하게 만든다. 촉매 B는 항상 가장 빠르지만(②가 옳은 이유) 기울기가 완만해 온도에는 가장 둔감하다. 또 ①·④는 촉매 A의 가파른 기울기를 "좋은 촉매"로 착각하면 걸린다 — 가파른 기울기는 E_a가 크다는 뜻이지 빠르다는 뜻이 아니다.

다시 나오면 이렇게 판단

$\ln k$ vs $1/T$ 도표가 나오면 두 가지만 본다. (가) 기울기 = E_a의 크기(가파를수록 E_a 큼·온도에 민감), (나) 같은 $1/T$에서의 높이 = k의 크기(높을수록 빠름). 좋은 촉매는 E_a를 낮춰(기울기 완만) 같은 온도에서 더 위에 오는 선이다. "민감도"는 기울기로, "빠르기"는 높이로 답하면 헷갈리지 않는다.

암기 포인트

아레니우스 직선화: $\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R}\cdot\frac{1}{T}$. 기울기 $= -\frac{E_a}{R}$(가파를수록 E_a 큼), 절편 $= \ln A$. 이 문제의 서열: E_a는 A>기존>B, 같은 온도에서 k(속도)는 B>기존>A. 촉매는 E_a를 낮춰 속도를 올린다.

문 2. 등온 비가역 액상 2차 반응이 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 발생할 때, 동일한 조건에서 전환율 0.6과 0.4를 달성하기 위한 반응기 부피의 비율($V_{0.6}/V_{0.4}$)에 가장 가까운 값은? (단, V_j는 전환율이 j일 때의 반응기 부피이다.)

① 3.0

② 3.4

③ 3.8

④ 4.2

정답 2번

출제 포인트

등온·비가역 액상 2차 반응을 CSTR(연속교반탱크반응기)에서 운전할 때, 목표 전화율이 달라지면 필요한 반응기 부피가 어떻게 변하는지를 묻는 문제다. 핵심은 CSTR 설계식에서 부피가 전화율 X에 정비례하고 (1-X)의 제곱에 반비례한다는 점이다. 같은 조건(같은 F_{A0}, k, C_{A0})이므로 두 부피의 비는 X에만 의존하는 함수의 비로 깔끔하게 정리된다.

조건 정리

반응 차수: 2차 ($-r_A = kC_A^2$).
상(相): 액상 → 밀도 일정, 부피팽창 없음($\varepsilon = 0$) → $C_A = C_{A0}(1 - X)$.
반응기: CSTR(단일).
비교 대상: 전화율 0.6일 때 부피 $V_{0.6}$ 와 전화율 0.4일 때 부피 $V_{0.4}$ 의 비 $V_{0.6}/V_{0.4}$.
F_{A0}, k, C_{A0} 는 동일 조건이므로 비를 구하면 모두 약분된다.

사용할 공식

CSTR 설계식: $V = \frac{F_{A0}X}{-r_A}$.
2차 액상 반응의 반응속도: $-r_A = kC_{A0}^2(1 - X)^2$.
두 식을 합치면 $V = \frac{F_{A0}X}{kC_{A0}^2(1-X)^2}$.
따라서 부피비는 $\frac{V_{0.6}}{V_{0.4}} = \frac{X_{0.6}/(1-X_{0.6})^2}{X_{0.4}/(1-X_{0.4})^2}$.

계산 과정

분자(전화율 0.6): $\frac{0.6}{(1-0.6)^2} = \frac{0.6}{0.16} = 3.75$.
분모(전화율 0.4): $\frac{0.4}{(1-0.4)^2} = \frac{0.4}{0.36} = 1.111$.
부피비: $\frac{V_{0.6}}{V_{0.4}} = \frac{3.75}{1.111} = 3.375$.
한 줄로 정리하면 $\frac{0.6 \times 0.36}{0.4 \times 0.16} = \frac{0.216}{0.064} = 3.375$. 가장 가까운 값은 3.4.

NoteBase

선지 판단

① 3.0 → X (계산값 3.375에서 0.375나 차이가 나 가장 가깝지 않다)
② 3.4 → O (계산값 3.375에 가장 근접 — 정답)
③ 3.8 → X (3.375보다 크게 벗어남, 분모와 분자를 거꾸로 약분하거나 (1-X) 제곱을 빠뜨린 오답 유도값과도 다름)
④ 4.2 → X (제곱항을 잘못 처리하거나 2차가 아닌 다른 차수로 계산했을 때 나오는 과대값)

오답 포인트

가장 흔한 실수는 (1-X)에 제곱을 붙이지 않고 1차처럼 푸는 것이다. 1차로 풀면 $\frac{0.6/0.4}{0.4/0.6} = \frac{1.5}{0.667} = 2.25$ 가 나와 선지에 없으니 차수를 다시 확인해야 한다. 또 CSTR을 PFR로 착각하면 안 된다. PFR 2차는 $V \propto \frac{X}{1-X}$ 형태(적분식)라 비가 $\frac{0.6/0.4}{0.4/0.6} = 2.25$ 로 전혀 다른 값이 나온다. 부피가 X에 비례(분자)하고 $(1-X)^2$에 반비례(분모)한다는 CSTR 2차 특유의 형태를 정확히 써야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

같은 조건에서 부피비만 묻는 문제는 F_{A0}, k, C_{A0} 가 다 약분된다고 보고, 전화율에 따른 부피 함수 $V(X)$ 의 비만 세우면 된다. 순서는 (1) 반응기 종류 확인(CSTR이면 설계식에 미분 없이 끝 전화율 그대로 대입), (2) 차수 확인(2차면 $(1-X)$에 제곱), (3) 액상이면 $\varepsilon = 0$ 이라 $C_A = C_{A0}(1-X)$ 그대로 사용. CSTR 2차는 곧 $V \propto \frac{X}{(1-X)^2}$ 임을 바로 떠올리면 대입만 하면 된다.

암기 포인트

CSTR 1차: $V \propto \frac{X}{1-X}$ / CSTR 2차: $V \propto \frac{X}{(1-X)^2}$ / PFR 2차: $V \propto \frac{X}{1-X}$(적분 결과). 이 문제 핵심 숫자: $\frac{0.6/0.4^2}{0.4/0.6^2} = 3.375 \approx 3.4$. CSTR은 미분 없이 끝 전화율을 한 번 대입, PFR은 0부터 X까지 적분이라는 차이를 함께 기억한다.

NoteBase

문 3. 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 비가역 액상 1차 반응 A → B를 진행할 때, A의 전화율은 0.6이다. PFR 부피의 4배의 크기를 가지는 하나의 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 동일한 조건으로 같은 반응을 진행할 때, CSTR에서 A의 전화율에 가장 가까운 값[%]은? (단, $\ln 2.5 = 0.9$로 가정한다.)

① 68

② 70

③ 75

④ 78

정답 4번

출제 포인트

같은 1차 반응에서 PFR과 CSTR의 설계식이 다르다는 점을 이용해, 먼저 PFR 조건으로 $k\tau$를 구하고 부피(체류시간)가 4배인 CSTR에 그 값을 넣어 전화율을 역산하는 문제다. 핵심은 PFR과 CSTR의 1차 설계식 차이를 정확히 쓰는 것이다.

조건 정리

등온, 비가역 액상(밀도 일정) 1차 반응 A→B / PFR 전화율 $X_{PFR} = 0.6$ / CSTR 부피는 PFR의 4배, 같은 유량·같은 조건이므로 체류시간도 4배 ($\tau_{CSTR} = 4\tau_{PFR}$) / $\ln 2.5 = 0.9$ 로 가정.

사용할 공식

1차 반응 PFR 설계식: $k\tau_{PFR} = -\ln(1 - X)$ / 1차 반응 CSTR 설계식: $k\tau_{CSTR} = \frac{X}{1-X}$

계산 과정

PFR에서 $k\tau_{PFR} = -\ln(1 - 0.6) = -\ln 0.4 = \ln 2.5 = 0.9$. 같은 반응속도상수 k, 체류시간 4배이므로 $k\tau_{CSTR} = 4 \times 0.9 = 3.6$. CSTR 설계식에 대입하면 $\frac{X}{1-X} = 3.6 \rightarrow X = 3.6(1 - X) \rightarrow 4.6X = 3.6 \rightarrow X = 0.783$, 즉 약 78%.

선지 판단

① 68 → X: CSTR 설계식 대신 PFR식이나 잘못된 비율을 쓴 값으로 오답.
② 70 → X: $k\tau$를 2배 정도로만 보거나 중간 계산 실수 시 나오는 함정값으로 오답.
③ 75 → X: $\frac{X}{1-X} = 3$ (즉 $k\tau = 3$)으로 잘못 잡았을 때 나오는 값으로 오답.
④ 78 → O: $k\tau_{CSTR} = 3.6$을 정확히 대입해 얻은 $X \approx 0.783$에 가장 가까운 값으로 정답.

NoteBase

오답 포인트

PFR과 CSTR의 1차 설계식을 헷갈려 CSTR에도 $-\ln(1-X)$를 쓰면 안 된다. CSTR은 반드시 $k\tau = \frac{X}{1-X}$를 써야 한다. 또 부피가 4배면 같은 유량에서 체류시간 τ도 4배이므로 $k\tau$가 4배가 된다는 연결을 놓치면 비율을 틀린다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 주어진 반응기(여기선 PFR)에서 $k\tau$를 수치로 확정한다($\ln 2.5 = 0.9$ 힌트가 곧 $k\tau_{PFR} = 0.9$라는 신호다). 그다음 부피·체류시간 배수만큼 $k\tau$를 곱해 바꾼 뒤, 목표 반응기(CSTR)의 설계식 $\frac{X}{1-X} = k\tau$에 넣어 X를 푼다. ln 값이 깔끔히 주어지면 그 자리에 대입하라는 뜻이다.

암기 포인트

1차 반응 등온 액상에서 PFR은 $k\tau = -\ln(1-X)$, CSTR은 $k\tau = \frac{X}{1-X}$. 같은 $k\tau$라도 CSTR이 PFR보다 전화율이 낮다(혼합 때문). 부피 $\propto$ 체류시간 $\propto k\tau$(유량·k 고정 시).

NoteBase

문 4. 요소와 우레아제의 반응은 수용액 내에서 진행되며 물은 과량으로 존재한다. 이 반응을 통해 미카엘리스-멘텐 (Michaelis-Menten) 식을 얻을 수 있다. 이때, 미카엘리스 상수에 대한 설명으로 가장 옳은 것은?

① 미카엘리스 상수는 반응속도가 최대반응속도의 2배가 되는 때의 기질 농도와 같다.

② 미카엘리스 상수는 반응속도가 최대반응속도와 같을 때의 기질 농도와 같다.

③ 미카엘리스 상수는 반응속도가 최대반응속도의 1/2이 되는 때의 기질 농도와 같다.

④ 미카엘리스 상수는 반응속도가 최대반응속도의 1/4이 되는 때의 기질 농도와 같다.

정답 3번

출제 포인트

효소 반응의 미카엘리스-멘텐(Michaelis-Menten) 식에서 미카엘리스 상수 K_M이 물리적으로 무엇을 의미하는지를 묻는 문제다. K_M의 정의를 식으로부터 직접 유도할 수 있는지가 핵심이며, '최대반응속도의 절반이 되는 때의 기질 농도'라는 한 줄 정의를 알고 있으면 바로 풀린다.

조건 정리

요소(urea)와 우레아제(urease)의 효소 반응으로 단일 기질 효소 반응이며, 물이 과량이므로 기질은 요소 $[S]$ 하나로 본다. 미카엘리스-멘텐 식이 성립한다고 주어졌고, 최대반응속도 V_{max}와 미카엘리스 상수 K_M의 관계를 묻는다.

사용할 공식

미카엘리스-멘텐 속도식: $v = \frac{V_{max}[S]}{K_M + [S]}$. 여기서 v는 반응속도, $[S]$는 기질 농도, V_{max}는 최대반응속도, K_M은 미카엘리스 상수다.

계산 과정

미카엘리스 상수의 정의를 식에 대입해 확인한다. 기질 농도를 미카엘리스 상수와 같게 두면, 즉 $[S] = K_M$이면 $v = \frac{V_{max}K_M}{K_M + K_M} = \frac{V_{max}K_M}{2K_M} = \frac{V_{max}}{2}$. 따라서 $[S] = K_M$일 때 반응속도가 최대반응속도의 절반이 된다. 거꾸로 $v = \frac{V_{max}}{2}$가 되는 기질 농도가 바로 K_M이다.

NoteBase

선지 판단

① X: '최대반응속도의 2배가 되는 때' → 미카엘리스-멘텐 식에서 v는 V_{max}를 절대 넘지 못하므로 $2V_{max}$는 불가능하다. 올바른 표현은 '최대반응속도의 1/2이 되는 때'.
② X: '최대반응속도와 같을 때' → $v = V_{max}$는 기질 농도가 무한대로 갈 때 도달하는 값이라 특정 유한 기질 농도로 정의할 수 없다. 올바른 표현은 '최대반응속도의 1/2이 되는 때'.
③ O: $[S] = K_M$을 식에 넣으면 $v = V_{max}/2$이므로, 미카엘리스 상수는 반응속도가 최대반응속도의 1/2이 되는 때의 기질 농도와 같다.
④ X: '최대반응속도의 1/4이 되는 때' → $v = V_{max}/4$이려면 $[S] = K_M/3$이 되어야 하므로 미카엘리스 상수 정의와 맞지 않는다. 올바른 표현은 '최대반응속도의 1/2이 되는 때'.

오답 포인트

①처럼 '2배'에 끌리면 안 된다. 미카엘리스-멘텐 식은 포화 곡선이라 반응속도가 V_{max}를 넘는 일은 없다. ②의 '최대반응속도와 같을 때'는 그럴듯해 보이지만 $v = V_{max}$는 $[S] \to \infty$에서만 점근적으로 도달하므로 특정 기질 농도로 정의되지 않는다. ④의 1/4은 분수만 절반(1/2)에서 바꿔치기한 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

미카엘리스 상수 K_M의 정의를 묻는 문제는 '반응속도가 최대의 절반(1/2)이 되는 기질 농도'를 고르면 된다. 선지에 2배 · 1/4 · 최대와 같음 같은 분수가 섞여 있으면, $[S] = K_M$을 식에 직접 대입해 $v = V_{max}/2$가 나오는지 한 번만 확인하면 바로 답이 갈린다.

암기 포인트

핵심 한 줄: $[S] = K_M$일 때 $v = V_{max}/2$. 즉 미카엘리스 상수는 '반응속도가 최대반응속도의 절반이 되는 기질 농도'다. K_M이 작을수록 효소-기질 친화도가 높다는 점도 같이 기억한다.

NoteBase

문 5. 등온 비가역 액상 1차 반응 $A \rightarrow B$가 직렬로 연결된 n개의 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 일어난다. CSTR의 공간시간은 10분이고 반응속도상수는 0.1min^{-1}일 때, 0.9 이상의 전환율을 얻기 위해서는 최소 몇 개의 CSTR을 사용해야 하는가? (단, n개의 CSTR은 모두 동일한 부피를 가진다.)

① 2개

② 3개

③ 4개

④ 5개

정답 3번

출제 포인트

등온·비가역 1차 반응을 동일 부피 CSTR n개 직렬로 연결했을 때 목표 전화율을 만족하는 최소 반응기 개수를 구하는 문제다. 핵심은 동일 CSTR 직렬에서 농도비가 $\frac{C_n}{C_0} = \frac{1}{(1+k\tau)^n}$ 형태로 거듭제곱으로 떨어진다는 점, 그리고 n은 정수이므로 부등식을 만족하는 값 중 올림한 값을 답해야 한다는 점이다.

조건 정리

반응: 1차 비가역 $A \rightarrow B$, 액상(밀도 일정)
각 CSTR의 공간시간: $\tau = 10\text{min}$
반응속도상수: $k = 0.1\text{min}^{-1}$
목표 전화율: $X \geq 0.9$
CSTR n개는 모두 동일 부피(=동일 τ)로 직렬 연결

사용할 공식

동일 부피 CSTR n개 직렬, 1차 반응의 출구 농도비는 $\frac{C_n}{C_0} = \frac{1}{(1+k\tau)^n}$ 전화율은 $X = 1 - \frac{C_n}{C_0} = 1 - \frac{1}{(1+k\tau)^n}$ (단일 CSTR 1차 물질수지 $C_i = \frac{C_{i-1}}{1+k\tau}$를 n번 반복한 결과)

계산 과정

먼저 $k\tau = 0.1 \times 10 = 1$이다.
따라서 한 단을 지날 때마다 농도가 $\frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}$배로 줄어, n단 뒤에는 $\frac{C_n}{C_0} = \frac{1}{2^n}$이다.
전화율 조건: $X = 1 - \frac{1}{2^n} \geq 0.9 \Rightarrow \frac{1}{2^n} \leq 0.1 \Rightarrow 2^n \geq 10$
$2^3 = 8 < 10$ (이때 $X = 1 - \frac{1}{8} = 0.875$, 미달)
$2^4 = 16 \geq 10$ (이때 $X = 1 - \frac{1}{16} = 0.9375 \geq 0.9$, 만족)
그러므로 조건을 만족하는 최소 개수는 $n = 4$이다.

NoteBase

선지 판단

① 2개 → X: n=2이면 $X = 1 - \frac{1}{4} = 0.75$로 0.9에 한참 못 미친다.
② 3개 → X: n=3이면 $X = 1 - \frac{1}{8} = 0.875$로 0.9에 살짝 못 미친다(가장 흔한 함정 오답).
③ 4개 → O: n=4이면 $X = 1 - \frac{1}{16} = 0.9375 \geq 0.9$로 처음으로 조건을 만족하는 최소 개수다.
④ 5개 → X: n=5이면 $X = 1 - \frac{1}{32} = 0.96875$로 조건은 만족하지만 '최소'가 아니다. 필요 이상으로 많다.

오답 포인트

가장 잘 빠지는 함정은 ②(3개)다. $2^3 = 8$을 10과 비교하지 않고 '대략 충분하겠지'라고 넘기거나, $X = 0.875$를 반올림해 0.9로 착각하면 3개로 답하기 쉽다. 조건이 '0.9 이상'이므로 0.875는 탈락이라는 점을 명확히 해야 한다. 또 부등식 $2^n \geq 10$을 풀고 $n \geq \log_2 10 \approx 3.32$가 나왔을 때 내림(3)이 아니라 올림(4)을 취해야 한다는 것도 핵심이다.

다시 나오면 이렇게 판단

동일 부피 CSTR 직렬·1차 반응 문제는 (1) 먼저 $k\tau$를 계산해 한 단당 감쇠비 $\frac{1}{1+k\tau}$를 구하고, (2) ≤ft((1)/(1+kτ))^n≤ 1-X_목표 부등식을 세운 뒤, (3) n에 1,2,3,...을 대입해 처음으로 만족하는 정수를 찾으면 된다. 단위 통일(분/초)과 '이상/이하' 부등호 방향, 그리고 정수 올림을 반드시 확인한다.

암기 포인트

동일 CSTR n개 직렬·1차: $\frac{C_n}{C_0} = \frac{1}{(1+k\tau)^n}$. $k\tau = 1$이면 한 단마다 농도가 반씩 줄어 n단 뒤 $\frac{1}{2^n}$. 0.9 전화율 = 잔류 0.1 이하 = $2^n \geq 10$ → n=4. 반면 단일 PFR이면 같은 1차에서 $\frac{C}{C_0} = e^{-k\tau}$로 떨어진다(혼동 주의).

NoteBase

문 6. 공간시간이 10h로 동일한 연속교반탱크반응기(CSTR)와 플러그흐름반응기(PFR)를 차례로 직렬 연결하여 전체 반응기를 구성한다. 구성된 반응기에서 등온 비가역 액상 2차 반응 A → B를 진행한다. PFR의 출구에서 A의 전환율이 75%일 때, CSTR의 출구에서 A의 전환율[%]은? (단, 초기에는 반응물 A만 존재한다.)

① 37.5

② 50

③ 60

④ 65

정답 2번

출제 포인트

공간시간(τ)과 반응속도상수(k), 초기 농도(C_{A0})가 두 반응기에서 모두 같다는 점이 핵심이다. 이때 두 반응기는 같은 무차원 군 $kC_{A0}\tau$ 값을 가지므로, CSTR 식과 PFR 식을 같은 값으로 놓고 미지의 CSTR 전화율을 구하는 문제다. 액상이므로 부피 변화가 없어 농도를 전화율로 바로 바꿀 수 있다는 점도 출제 의도다.

조건 정리

두 반응기 모두 공간시간 $\tau = 10\text{h}$로 동일하다. 등온, 비가역, 액상(부피 일정), 2차 반응 $A \to B$이고 초기에는 A만 존재한다. 직렬 연결 순서는 CSTR이 먼저, PFR이 나중이다. PFR 출구 전화율 $X_2 = 0.75$, 구할 값은 CSTR 출구 전화율 X_1이다. 2차 반응이므로 $-r_A = kC_A^2 = kC_{A0}^2(1-X)^2$이다.

사용할 공식

두 반응기에 공통인 무차원 군을 $M = kC_{A0}\tau$로 두면, CSTR(입구 전화율 0, 출구 X_1)은 $M = \frac{X_1}{(1-X_1)^2}$ PFR(입구 X_1, 출구 X_2)은 적분으로 $M = \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{(1-X)^2} = \frac{1}{1-X_2} - \frac{1}{1-X_1}$ 두 식의 M이 같다는 조건을 쓴다.

계산 과정

PFR 쪽에 $X_2 = 0.75$를 넣으면 $\frac{1}{1-0.75} = 4$이므로 $M = 4 - \frac{1}{1-X_1}$ CSTR 식과 같게 놓으면 $\frac{X_1}{(1-X_1)^2} = 4 - \frac{1}{1-X_1}$ 양변에 $(1-X_1)^2$을 곱하면 $X_1 = 4(1-X_1)^2 - (1-X_1)$ 전개하면 $X_1 = 4 - 8X_1 + 4X_1^2 - 1 + X_1$, 정리하면 $4X_1^2 - 8X_1 + 3 = 0$ 근의 공식으로 $X_1 = \frac{8 \pm \sqrt{64-48}}{8} = \frac{8 \pm 4}{8}$, 즉 $X_1 = 1.5$ 또는 $X_1 = 0.5$. 전화율은 $0 < X_1 < 0.75$여야 하므로 $X_1 = 0.5$, 곧 50%다. 검산하면 $M_{CSTR} = \frac{0.5}{0.5^2} = 2$, $M_{PFR} = 4 - \frac{1}{0.5} = 2$로 두 값이 일치한다.

NoteBase

선지 판단

① 37.5% → X (PFR 출구 75%의 절반을 기계적으로 취한 값이며, CSTR-PFR 식을 풀면 나오지 않는다)
② 50% → O (CSTR과 PFR의 $kC_{A0}\tau$가 같다는 조건을 풀면 $X_1 = 0.5$로 정확히 일치한다)
③ 60% → X (이차방정식의 근 0.5와 다른 값으로 검산 시 두 반응기의 무차원 군이 일치하지 않는다)
④ 65% → X (PFR 출구 75%에 가깝게 잡은 함정 값으로 식을 만족하지 않는다)

오답 포인트

직렬 순서를 PFR 먼저로 착각하면 식이 뒤바뀐다(이 문제는 CSTR이 먼저). 또 2차 반응을 1차 공식 $\tau = \frac{X}{k(1-X)}$로 풀면 $(1-X)^2$을 놓쳐 답이 어긋난다. τ와 k, C_{A0}가 모두 같으므로 두 식을 k나 τ 값 없이도 같은 M으로 놓을 수 있다는 점을 보지 못하면 미지수가 많아 막힌다.

다시 나오면 이렇게 판단

공간시간이 같고 같은 반응이면 두 반응기의 $kC_{A0}\tau$가 동일하다는 점부터 잡는다. 그 다음 먼저 오는 반응기(여기선 CSTR)의 출구 전화율을 미지수로 두고, 나중 반응기(PFR) 식의 입구에 그 값을 넣어 두 M을 같게 놓으면 미지수 하나짜리 방정식이 된다. 2차 반응이면 분모는 항상 $(1-X)^2$, CSTR은 출구값 대입, PFR은 적분 $\frac{1}{1-X}$ 차이로 정리한다.

암기 포인트

2차 액상 반응 무차원 군: CSTR은 $kC_{A0}\tau = \frac{X}{(1-X)^2}$, PFR은 $kC_{A0}\tau = \frac{1}{1-X_{out}} - \frac{1}{1-X_{in}}$. 같은 τ·같은 반응 직렬이면 두 M을 같게 놓는다. 이 문제 정답 조합: CSTR 출구 50% → PFR 출구 75%, 두 반응기 $M = 2$.

NoteBase

문 7. <보기>는 세 개의 기초반응으로 구성된 연속 반응 메커니즘이다. 반응 중간체 M^*에 유사 정상상태 가정(pseudo steady-state hypothesis)을 적용하여 유도한 Q의 생성속도식으로 가장 옳은 것은? (단, C_j는 j의 농도이고, k_1, k_2, k_3는 각 화살표에 해당하는 반응속도 상수이다.)

<보기>

$A + B \rightarrow M^*$

$M^* + A \rightarrow N$

$M^* + C \rightarrow Q$

① $\frac{k_1 C_A C_B}{k_2 + k_3 C_C}$

② $\frac{k_1 k_3 C_A C_B C_C}{k_2 + k_3 C_C}$

③ $\frac{k_1 k_3 C_A C_B C_C}{k_2 C_A + k_3 C_C}$

④ $\frac{k_1 k_3 C_A^2 C_B C_C}{k_2 + k_3 C_C}$

정답 3번

출제 포인트

반응 중간체 M^*에 유사 정상상태 가정(PSSH)을 적용하는 문제다. 핵심은 두 단계다. 첫째, 구하려는 생성물 Q의 속도식을 Q가 만들어지는 단일 단계($M^* + C \rightarrow Q$)로 먼저 쓴다. 둘째, 그 식에 들어간 중간체 농도 C_{M^*}를 PSSH로 소거한다. 이때 M^*를 소비하는 반응이 두 개(k_2단계와 k_3단계)이고, 두 단계 모두 M^*와 또 다른 물질의 곱으로 표현된다는 점을 놓치면 분모가 틀린다.

조건 정리

주어진 세 기초반응: (1) $A + B \rightarrow M^*$, (2) $M^* + A \rightarrow N$, (3) $M^* + C \rightarrow Q$. 모두 기초반응이므로 화학량론 차수가 곧 반응차수다. C_j는 물질 j의 농도, k_1, k_2, k_3는 각 화살표의 반응속도상수. M^*는 중간체이므로 PSSH 대상이다.

사용할 공식

Q의 생성속도: $r_Q = k_3 C_{M^*} C_C$ 중간체 PSSH(생성=소비, 순생성속도 0): $k_1 C_A C_B = k_2 C_{M^*} C_A + k_3 C_{M^*} C_C$ 좌변은 M^* 생성(1단계), 우변은 M^* 소비(2단계와 3단계)다.

계산 과정

PSSH 식에서 C_{M^*}를 푼다. 우변을 C_{M^*}로 묶으면 $k_1 C_A C_B = C_{M^*}(k_2 C_A + k_3 C_C)$ 따라서 $C_{M^*} = \frac{k_1 C_A C_B}{k_2 C_A + k_3 C_C}$ 이를 $r_Q = k_3 C_{M^*} C_C$에 대입하면 $r_Q = \frac{k_1 k_3 C_A C_B C_C}{k_2 C_A + k_3 C_C}$ 이 식이 곧 3번이다.

NoteBase

선지 판단

① $\frac{k_1 C_A C_B}{k_2 + k_3 C_C}$ → X. 분모의 k_2 뒤에 C_A가 빠졌고, 분자에 $k_3 C_C$가 없어 Q의 속도식이 아니라 잘못 유도한 형태다. 올바른 식은 $\frac{k_1 k_3 C_A C_B C_C}{k_2 C_A + k_3 C_C}$이다.
② $\frac{k_1 k_3 C_A C_B C_C}{k_2 + k_3 C_C}$ → X. 분자는 맞지만 분모의 k_2 소비항에 C_A를 빠뜨렸다. 2단계 $M^* + A$는 M^* 소비 속도가 $k_2 C_{M^*} C_A$이므로 분모는 $k_2 C_A + k_3 C_C$여야 한다.
③ $\frac{k_1 k_3 C_A C_B C_C}{k_2 C_A + k_3 C_C}$ → O. PSSH로 구한 C_{M^*}를 $r_Q = k_3 C_{M^*} C_C$에 대입한 결과와 정확히 일치한다.
④ $\frac{k_1 k_3 C_A^2 C_B C_C}{k_2 + k_3 C_C}$ → X. 분자에 C_A가 하나 더 붙어 C_A^2이 되었고 분모에도 C_A가 빠졌다. 어느 경로로도 나오지 않는 형태다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 분모를 $k_2 + k_3 C_C$로 쓰는 것이다(②와 ④의 함정). M^*를 소비하는 두 단계가 모두 두 물질의 이분자 반응이라 소비속도가 각각 $k_2 C_{M^*} C_A$, $k_3 C_{M^*} C_C$이므로, C_{M^*}로 묶고 나면 분모는 $k_2 C_A + k_3 C_C$가 된다. k_2 뒤에 C_A가 반드시 따라붙는 점이 핵심이다. ①처럼 Q 생성단계($k_3 C_C$)를 분자에 곱하는 것을 잊는 실수, ④처럼 대입 과정에서 C_A를 중복으로 곱하는 실수도 주의한다.

다시 나오면 이렇게 판단

PSSH 문제는 항상 같은 두 단계로 푼다. 첫째, 목표 생성물이 만들어지는 단계 하나로 속도식을 쓴다(여기서는 $r_Q = k_3 C_{M^*} C_C$). 둘째, 중간체의 생성속도 합 = 소비속도 합으로 놓고 C_{M^*}를 푼다. 이때 중간체를 소비하는 단계가 몇 개인지, 각 단계가 어떤 농도와 곱해지는지 화살표를 보고 빠짐없이 더하는 것이 분모를 맞히는 열쇠다. 선지에서 분모의 각 항에 알맞은 농도가 붙어 있는지(k_2 뒤 C_A, k_3 뒤 C_C)부터 확인하면 빠르게 거를 수 있다.

암기 포인트

PSSH 결과의 형태: 분자는 (중간체 생성단계 속도)×(목표물 생성단계의 속도상수와 농도), 분모는 (중간체를 소비하는 모든 단계 속도상수×해당 농도의 합)이다. 이 문제 정답 $r_Q = \frac{k_1 k_3 C_A C_B C_C}{k_2 C_A + k_3 C_C}$에서 분모 $k_2 C_A + k_3 C_C$를 통째로 외워 두면, 소비단계가 둘인 PSSH 문제의 분모 구조를 바로 떠올릴 수 있다.

NoteBase

문 8. 등온 비가역 액상 1차 반응 $A \rightarrow B$가 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 일어나고 있다. 반응물의 초기 농도가 $5\text{mol}\text{L}^{-1}$이고, 반응속도상수가 0.01min^{-1}이다. 반응기의 체류시간이 100분일 때, A의 전환율[%]은?

① 50

② 60

③ 70

④ 80

정답 1번

출제 포인트

연속교반탱크반응기(CSTR)에서 일어나는 1차 반응의 전화율을 구하는 문제다. CSTR 설계식에 $k\tau$ 값을 대입해 전화율 X를 풀어내면 된다. 핵심은 PFR이 아니라 CSTR이라는 점, 그리고 1차 반응이라는 점을 먼저 확인하는 것이다.

조건 정리

반응: A → B (등온, 비가역, 액상, 1차)
초기 농도 $C_{A0} = 5\text{mol/L}$
반응속도상수 $k = 0.01\text{min}^{-1}$
체류시간(공간시간) $\tau = 100\text{min}$
구하는 값: A의 전화율 X[%]
참고로 1차 반응에서는 초기 농도 C_{A0}가 전화율 계산에 직접 들어가지 않는다(미끼 값).

사용할 공식

액상(밀도 일정) 1차 반응의 CSTR 설계식: $\tau = \frac{C_{A0}X}{-r_A} = \frac{C_{A0}X}{kC_{A0}(1-X)} = \frac{X}{k(1-X)}$ 정리하면 $k\tau = \frac{X}{1-X}$

계산 과정

먼저 $k\tau$를 계산한다.
$k\tau = 0.01\text{min}^{-1} \times 100\text{min} = 1$
설계식에 대입하면
$1 = \frac{X}{1-X}$
양변에 $(1-X)$를 곱하면 $1 - X = X$, 즉 $2X = 1$이므로
$X = 0.5 = 50\%$

NoteBase

선지 판단

① 50 → O. $k\tau = 1$일 때 $X = k\tau/(1 + k\tau) = 1/2 = 50\%$로 정확히 일치한다.
② 60 → X. $X = 0.6$이 되려면 $k\tau = X/(1 - X) = 0.6/0.4 = 1.5$가 필요한데, 실제 $k\tau = 1$이므로 틀리다.
③ 70 → X. $X = 0.7$이려면 $k\tau = 0.7/0.3 \approx 2.33$이어야 한다.
④ 80 → X. $X = 0.8$이려면 $k\tau = 0.8/0.2 = 4$가 필요하다. 같은 $k\tau = 1$을 PFR 설계식 $k\tau = -\ln(1 - X)$에 넣으면 $X = 1 - e^{-1} \approx 0.632$로 약 63%인데, 이는 CSTR이 아니라 PFR일 때의 값이라 이 문제 답이 아니다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 CSTR 식 대신 PFR(또는 회분식) 식 $k\tau = -\ln(1 - X)$를 써서 $X \approx 63\%$로 잘못 푸는 것이다. 같은 $k\tau$라도 CSTR은 완전혼합이라 출구 농도가 낮은 상태로 반응하므로 PFR보다 전화율이 작다. 또 $C_{A0} = 5\text{mol/L}$를 식에 넣으려다 헷갈리는 경우가 있는데, 1차 반응에서는 C_{A0}가 약분되어 사라지는 미끼 값이다.

다시 나오면 이렇게 판단

1) 반응기가 CSTR인지 PFR인지부터 확인한다(이 문제는 CSTR). 2) 반응 차수가 1차이면 액상 CSTR은 $k\tau = \frac{X}{1-X}$, PFR은 $k\tau = -\ln(1 - X)$를 바로 쓴다. 3) $k\tau$를 먼저 숫자로 계산하고(여기선 1), 그다음 전화율을 푼다. 4) 초기 농도가 주어져도 1차에서는 무시한다.

암기 포인트

1차 반응 CSTR: $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$. $k\tau = 1$이면 $X = 50\%$. 1차 반응 PFR: $X = 1 - e^{-k\tau}$, $k\tau = 1$이면 약 63%. 같은 조건에서 PFR 전화율 > CSTR 전화율.

NoteBase

문 9. <보기>의 아세톤의 브롬화 반응은 자동촉매반응 (Autocatalytic reaction)이다. 등온으로 진행될 때, 자동촉매반응의 반응속도식으로 가장 옳은 것은? (단, A가 소모되어도 A와 R의 농도를 합한 총 농도 C_{total}는 변하지 않으며, C_j는 j의 농도이고, k는 반응속도상수이다.)

<보기>

CH_3COCH_3 + Br_2 H^+ CH_3COCH_2Br + HBr

$A + R \rightarrow R + R$ (A : 반응물, R : 촉매 또는 생성물)

① $kC_A(C_A - C_R)$

② $kC_A(C_A - 2C_R)$

③ $kC_A(C_{\text{total}} - C_R)$

④ $kC_A(C_{\text{total}} - C_A)$

정답 4번

출제 포인트

자동촉매반응(autocatalytic reaction)의 속도식을 세우는 문제다. 자동촉매반응은 생성물(R)이 곧 촉매로 작용해서, 반응물 A뿐 아니라 생성물 R의 농도에도 비례한다는 점이 핵심이다. 여기에 "총 농도가 일정"이라는 보존 조건을 대입해 식을 한 변수로 정리하는 것이 출제 의도다.

조건 정리

반응식: A + R → R + R (A는 반응물, R은 촉매이자 생성물). 등온 진행. 총 농도 보존: $C_{total} = C_A + C_R$로 일정하다(A가 소모된 만큼 R이 생성되므로 합이 변하지 않음). C_j는 j의 농도, k는 속도상수.

사용할 공식

기본 속도식은 반응에 참여하는 두 화학종의 농도 곱에 비례한다: $-r_A = kC_AC_R$. 보존 조건에서 $C_R = C_{total} - C_A$이므로 이를 대입한다.

계산 과정

1) 자동촉매반응이므로 속도는 반응물과 촉매(=생성물 R) 두 농도 모두에 비례: $-r_A = kC_AC_R$.
2) 총 농도 보존식 $C_{total} = C_A + C_R$에서 $C_R = C_{total} - C_A$.
3) 대입하면 $-r_A = kC_A(C_{total} - C_A)$.
이 식은 반응 초기에는 R이 적어 느리다가, 중간에서 $C_A = C_R = \frac{C_{total}}{2}$일 때 속도가 최대가 되고, 후반에 다시 느려지는 자동촉매반응 특유의 S자 거동을 그대로 보여준다.

NoteBase

선지 판단

① $kC_A(C_A - C_R)$ → X: 촉매 농도가 C_R이어야 하는데 $(C_A - C_R)$로 잘못 묶었다. 올바른 표현은 $kC_AC_R = kC_A(C_{total} - C_A)$.
② $kC_A(C_A - 2C_R)$ → X: 계수와 부호가 임의로 들어간 식으로 보존 조건과 맞지 않는다.
③ $kC_A(C_{total} - C_R)$ → X: $C_{total} - C_R = C_A$이므로 이 식은 $kC_A \cdot C_A = kC_A^2$가 되어 촉매 R이 사라진 단순 2차식이다. 자동촉매 거동을 못 만든다.
④ $kC_A(C_{total} - C_A)$ → O: $C_{total} - C_A = C_R$이므로 정확히 $-r_A = kC_AC_R$이다. 자동촉매반응 속도식으로 옳다.

오답 포인트

③번이 가장 헷갈리는 함정이다. 모양이 ④번과 거의 같지만 괄호 안이 $C_{total} - C_R$이라 결국 C_A가 되어 R이 빠진 식이 된다. "괄호 안에 무엇을 빼는가"를 반드시 보존식으로 환산해서 확인해야 한다($C_{total} - C_A = C_R$, $C_{total} - C_R = C_A$). 또 ①처럼 $(C_A - C_R)$로 두면 R 농도가 높을 때 속도가 음수가 되는 비물리적 식이 되므로 즉시 배제할 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

자동촉매반응 속도식은 무조건 $-r_A = kC_AC_R$(반응물 × 촉매)에서 출발한다. 그다음 보존 조건이 주어지면 한 변수로 치환한다: R로 표현하려면 $C_R = C_{total} - C_A$, A로 표현하려면 $C_A = C_{total} - C_R$. 선지가 C_{total}을 포함하면 괄호 안을 반드시 보존식으로 되돌려 C_A인지 C_R인지 확인하면 함정 선지를 거른다.

암기 포인트

자동촉매: 생성물이 촉매다 → 속도식에 생성물 농도가 곱해진다 → $-r_A = kC_AC_R$. 보존조건 $C_{total} = C_A + C_R$로 치환하면 $-r_A = kC_A(C_{total} - C_A)$. 속도 최대 지점은 $C_A = C_R = \frac{C_{total}}{2}$.

NoteBase

문 10. 반응기들에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

① 플러그흐름반응기(PFR)는 반응물의 농도가 흐름 경로를 따라 점차 감소한다.

② 연속교반탱크반응기(CSTR)는 반응기 내의 모든 곳에서 반응물의 농도가 동일하다.

③ 회분식반응기는 반응 시간이 길수록 전환율이 감소한다.

④ 회분식반응기는 소량의 제품을 생산할 때 자주 사용된다.

정답 3번

출제 포인트

대표적인 세 반응기(PFR, CSTR, 회분식)의 농도 분포와 운전 특성을 묻는 개념 비교 문제다. 발문이 '가장 옳지 않은 것'을 고르는 형태이므로, 네 선지 중 설명이 잘못된 하나를 찾아야 한다. 핵심은 '회분식반응기에서 반응 시간과 전화율의 관계'다.

핵심 개념

PFR(플러그흐름반응기): 반응물이 한 방향으로 흐르며 입구에서 출구로 갈수록 농도가 점차 감소한다(축방향으로 농도 구배 존재). CSTR(연속교반탱크반응기): 완전 혼합 가정으로 반응기 내부 어디서나 농도가 같고, 그 농도는 출구 농도와 동일하다. 회분식반응기(Batch): 원료를 한 번에 넣고 시간이 지남에 따라 반응이 진행되므로, 시간이 길수록 반응물이 더 많이 소모되어 전화율이 증가한다. 소량·다품종 생산에 적합하다.

선지별 해설

① O — PFR은 반응물이 흐름 경로(축방향)를 따라 흐르면서 계속 소비되므로 입구에서 출구로 갈수록 농도가 점차 감소한다. 맞는 설명이다.

② O — CSTR은 완전 혼합을 가정하므로 반응기 내 모든 위치에서 반응물 농도가 동일하며, 그 값이 출구 농도와 같다. 맞는 설명이다.

③ X — 회분식반응기는 시간이 지날수록 반응이 더 진행되어 반응물이 더 많이 소모되므로 전화율은 증가한다. '반응 시간이 길수록 전화율이 감소한다' → '반응 시간이 길수록 전화율이 증가한다'가 옳다. 이 선지가 틀렸으므로 정답이다.

④ O — 회분식반응기는 한 배치씩 운전하므로 소량 생산, 다품종 생산, 의약품·정밀화학 등에 자주 사용된다. 맞는 설명이다.

NoteBase

오답 포인트

③에서 '시간↑ → 전화율↓'라는 방향을 무심코 맞다고 넘기면 틀린다. 회분식에서는 시간이 곧 반응이 진행될 기회이므로 전화율은 시간의 증가함수다(평형에 도달하면 더 이상 증가하지 않고 일정해질 뿐, 감소하지는 않는다). 또 ②의 '모든 곳에서 농도 동일'을 PFR과 헷갈려 틀렸다고 오판하지 않도록 주의한다 — 농도가 위치마다 변하는 것은 PFR이고, CSTR이 균일하다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 종류별로 '농도가 어디서 변하는가'와 '시간/위치에 따른 전화율 방향'을 기준으로 끊는다. 위치에 따라 농도 변함=PFR, 어디서나 균일=CSTR, 시간에 따라 변함=Batch. 전화율은 PFR에서 길이(부피)가 길수록, Batch에서 시간이 길수록 증가한다. '감소'라는 단어가 보이면 이 방향이 맞는지 먼저 의심한다.

암기 포인트

회분식: 시간↑ → 전화율↑ (소량·다품종 생산). PFR: 흐름 경로 따라 농도↓ (위치별 구배). CSTR: 내부 농도 균일 = 출구 농도. 세 반응기 모두 '반응이 진행되면 반응물은 줄고 전화율은 늘어난다'가 대원칙이며, '시간/위치가 길수록 전화율 감소'라는 표현은 틀린 함정이다.

NoteBase

문 11. 정상상태 단열 플러그흐름반응기(PFR)에서 상변화 없는 비가역 발열 1차 반응 $A \rightarrow R$을 진행한다. 480K의 순수한 기체 반응물 A를 반응기에 공급할 때, 반응기 출구에서 생성물의 온도는 680K이며, 반응물 A의 전환율은 80%이다. 반응기 내부의 온도가 600K인 지점에서 A의 전환율[%]은? (단, 반응물 A와 생성물 R의 열용량은 $10\,\mathrm{J\,mol^{-1}K^{-1}}$로 동일하고, 열용량과 반응물은 온도에 상관없이 일정하다.)

① 40

② 48

③ 50

④ 58

정답 2번

출제 포인트

단열(adiabatic) 반응기에서는 에너지수지가 온도와 전화율 사이의 1차(직선) 관계로 정리된다. 이 '단열 조작선'을 알면 반응 속도식이나 부피, 반응열의 구체적 수치를 몰라도 온도만으로 전화율을 바로 구할 수 있다. 핵심은 '단열에서는 온도 상승이 전화율에 비례한다'는 점이다.

조건 정리

단열 정상상태 PFR, 발열·비가역 1차 반응 $A \rightarrow R$. 공급: 순수 A, 입구온도 $T_0 = 480\,\mathrm{K}$. 출구: $T = 680\,\mathrm{K}$에서 전화율 $X = 0.80$. 열용량 $C_{p,A} = C_{p,R} = 10\,\mathrm{J\cdot mol^{-1}K^{-1}}$로 동일(즉 $\Delta C_p = 0$), 열용량·반응열은 온도에 무관하게 일정. 구할 값: 반응기 내부 온도가 600K인 지점에서의 전화율.

사용할 공식

단열 에너지수지(상변화 없음, 입구 전화율 0): $T - T_0 = \frac{(-\Delta H_{rxn})}{C_p} X$ 여기서 $\Delta C_p = 0$이라 비열항이 전화율에 따라 변하지 않으므로 T는 X의 1차 함수가 된다. 따라서 $\frac{T - T_0}{X}$는 반응기 어디서나 일정(직선의 기울기)하다.

계산 과정

1) 출구 데이터로 기울기를 구한다. 온도 상승 $\Delta T = 680 - 480 = 200\,\mathrm{K}$가 전화율 $X = 0.80$에 대응하므로 $\frac{(-\Delta H_{rxn})}{C_p} = \frac{T - T_0}{X} = \frac{200}{0.80} = 250\,\mathrm{K}$. 즉 전화율 1당 250 K가 오른다(전화율 1%당 2.5 K). 2) 내부 온도가 600K인 지점의 전화율: $X = \frac{T - T_0}{250} = \frac{600 - 480}{250} = \frac{120}{250} = 0.48$. 따라서 전화율은 48%이다.

NoteBase

선지 판단

① 40 → X (오답): 단열 직선관계를 무시하고 임의로 잡은 값. 600 K는 입구·출구 온도 구간(480~680 K)의 정확히 중간보다 약간 아래이므로 40%보다 큰 값이 나와야 한다.
② 48 → O (정답): $\frac{600-480}{680-480} \times 0.80 = \frac{120}{200} \times 0.80 = 0.48$. 단열에서 온도 상승이 전화율에 비례하므로 정확히 48%.
③ 50 → X (오답): 온도 구간의 절반 지점(580 K)을 600 K로 착각하거나 $\frac{120}{200} = 0.60$을 그대로 전화율로 쓰는 실수의 결과(0.60×0.80을 빠뜨림). 기울기 250 K를 쓰면 50%가 아니다.
④ 58 → X (오답): 온도비 $\frac{600}{680}$ 같은 잘못된 비례나 출구 기준이 아닌 절대온도 비율을 적용한 값으로, 단열 조작선과 맞지 않는다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 '600 K가 480 K와 680 K의 중간쯤이니 전화율도 80%의 절반인 40%'라고 어림하는 것이다. 중간점은 580 K이지 600 K가 아니므로 절반보다 커야 한다. 또 $\frac{120}{200} = 0.6$을 곧장 전화율로 적어 60%나 그 변형(50%)을 고르는 실수도 잦다. 반드시 출구 전화율 0.80을 곱해 $0.6 \times 0.80 = 0.48$로 환산해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

'단열' + '열용량이 같다(또는 $\Delta C_p = 0$)'가 보이면 곧바로 온도와 전화율을 비례식으로 묶는다. 반응열·열용량 숫자가 주어져도 두 상태(여기선 출구)가 하나 주어지면 그 숫자들은 약분되어 필요 없다. 공식은 (T-T_0)/(X)=일정 하나면 충분하다. $\frac{600-480}{680-480} \times 0.80$ 형태로 바로 비례 계산하는 것이 가장 빠르다.

암기 포인트

단열 반응기 핵심: 온도 상승 $\propto$ 전화율, 즉 $T - T_0 = \frac{-\Delta H}{C_p} X$. $\Delta C_p = 0$이면 완전한 직선. 이 문제 수치로는 '전화율 0.80에 200 K 상승 → 전화율당 250 K → 120 K 상승이면 0.48'. 두 점이 같은 직선 위에 있다는 점을 기억하면 비례식 한 줄로 끝난다.

NoteBase

문 12. <보기>는 반응물 A가 세 가지의 동시 반응으로 분해되는 트람보제(Trambouze) 반응이다. 생성물 X와 생성물 Y에 대한 생성물 B의 순간 선택도가 최대가 되는 A의 농도[$\mathrm{mol dm^{-3}}$]는? (단, r_j는 j의 생성속도이며, k_1, k_2, k_3는 반응속도상수이고, $k_1 = 0.001 \mathrm{mol dm^{-3} s^{-1}}$, $k_2 = 0.002 \mathrm{s^{-1}}$, $k_3 = 0.004 \mathrm{dm^3 mol^{-1} s^{-1}}$이다.)

<보기>

$A \rightarrow X \quad (r_X = k_1)$

$A \rightarrow B \quad (r_B = k_2 C_A)$

$A \rightarrow Y \quad (r_Y = k_3 C_A^2)$

① 0.5

② 0.7

③ 1.4

④ 2

정답 1번

출제 포인트

트람보제(Trambouze) 반응은 반응물 A가 0차·1차·2차의 서로 다른 차수로 동시에 세 갈래로 분해되는 병렬반응의 대표 예제다. 차수가 모두 다르기 때문에 농도 C_A에 따라 어느 생성물이 유리한지가 달라지고, 목표 생성물 B의 순간 선택도가 극대가 되는 최적 농도가 존재한다. C_A에 대해 선택도를 미분해 0이 되는 지점을 찾는 것이 핵심이다.

조건 정리

A → X : $r_X = k_1$ (0차), $k_1 = 0.001 \mathrm{mol dm^{-3} s^{-1}}$

A → B : $r_B = k_2 C_A$ (1차), $k_2 = 0.002 \mathrm{s^{-1}}$

A → Y : $r_Y = k_3 C_A^2$ (2차), $k_3 = 0.004 \mathrm{dm^3 mol^{-1} s^{-1}}$

구하는 것: X와 Y에 대한 B의 순간 선택도가 최대가 되는 A의 농도

사용할 공식

B의 순간 선택도(원하지 않는 생성물 X, Y 대비)는

$S_B = \frac{r_B}{r_X + r_Y} = \frac{k_2 C_A}{k_1 + k_3 C_A^2}$

이 값을 최대로 만들려면 C_A로 미분해서 0으로 둔다:

$\frac{dS_B}{dC_A} = 0$

NoteBase

계산 과정

분자·분모를 정리하면 $S_B = \frac{k_2 C_A}{k_1 + k_3 C_A^2}$이다.
몫의 미분법으로 $\frac{dS_B}{dC_A} = \frac{k_2(k_1 + k_3 C_A^2) - k_2 C_A (2k_3 C_A)}{(k_1 + k_3 C_A^2)^2}$를 구하면 분자는 $k_2(k_1 - k_3 C_A^2)$이다.
이를 0으로 두면 $k_1 - k_3 C_A^2 = 0$, 즉
$C_A^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{k_1}{k_3}} = \sqrt{\frac{0.001}{0.004}} = \sqrt{0.25} = 0.5\,\text{mol dm}^{-3}$
여기서 k_2는 분자 전체에 곱해진 상수라 최적 농도 위치에는 영향을 주지 않는다(B 자신의 속도상수는 선택도의 크기만 키울 뿐 위치는 X·Y 상수만으로 결정).

선지 판단

① 0.5 → O. $\sqrt{k_1/k_3} = \sqrt{0.001/0.004} = 0.5$로 선택도 최댓값을 주는 농도.
② 0.7 → X. $\sqrt{k_2/k_3} = \sqrt{0.002/0.004} \approx 0.707$을 답으로 착각한 값. 선택도 극대 조건에 k_2는 들어가지 않는다 → 옳은 식은 $\sqrt{k_1/k_3}$.
③ 1.4 → X. $\sqrt{k_3/k_1}$ 처럼 비를 거꾸로 잡거나 단위를 잘못 쓴 값.
④ 2 → X. $k_3/k_2 = 0.004/0.002 = 2$ 같은 단순 비를 답으로 본 오류. 미분 조건과 무관하다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 목표 생성물 B의 상수 k_2를 최적 농도 공식에 끼워 넣는 것이다(② 0.7이 그 미끼). 선택도 $S_B = k_2 C_A/(k_1 + k_3 C_A^2)$에서 k_2는 분자에 곱해진 상수이므로 미분해 0으로 두면 사라지고, 결과는 분모를 이루는 k_1(0차)과 k_3(2차)만으로 $C_A = \sqrt{k_1/k_3}$로 결정된다. 또 k_1/k_3를 거꾸로 잡아 $\sqrt{k_3/k_1}$로 쓰면 1.4가 나오므로 비의 방향에 주의한다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응에서 '특정 생성물 선택도 최대 농도'를 물으면 (원하는 생성물 속도)/(나머지 속도 합)을 세우고 C_A로 미분해 0으로 둔다. 분자가 1차 항($k_2 C_A$)이고 분모가 0차+2차($k_1 + k_3 C_A^2$) 꼴이면 극값은 항상 1차 상수가 약분되어 사라지고 C_A=(0차 상수)/(2차 상수)로 떨어진다. 숫자보다 '어떤 두 상수의 비의 제곱근인가'를 먼저 판별하는 것이 빠르다.

암기 포인트

트람보제 반응 B 선택도 최대 농도: $C_A^{\text{opt}} = \sqrt{k_1/k_3}$ (0차 상수/2차 상수의 제곱근). 목표 생성물의 1차 상수 k_2는 위치에 영향 없음. 여기선 $\sqrt{0.001/0.004} = 0.5\,\text{mol dm}^{-3}$.

NoteBase

문 13. 반응 시간에 따라 부피가 변하고, 반응기 압력은 변하지 않는 등온 회분식반응기에서 비가역 기상 1차 반응 $A \rightarrow 2R$을 진행한다. 반응기에 순수한 반응물 A만 가득 채워서 반응을 진행한 결과, 초기 반응기 부피 10L에서 반응기 부피가 15L로 증가하는 데 1시간이 소요됐다. 동일한 조건에서 초기 부피의 반응기에 반응물 A 80%와 비활성기체 20%를 채우고 반응을 1시간 동안 진행할 때, 반응기의 부피[L]는? (단, 반응물 A와 비활성기체는 모두 이상기체 거동을 따르며, 비활성기체는 반응에 참여하지 않는다.)

① 12

② 12.5

③ 14

④ 15

정답 3번

출제 포인트

기체 몰수가 변하는 비가역 1차 반응을 등온·정압(부피 가변) 회분식 반응기에서 다루는 문제다. 핵심은 부피 팽창 인자 ε_A가 초기 반응물 몰분율 y_{A0}에 비례한다는 점, 그리고 1차 반응의 전환율 식은 ε_A와 무관하게 동일 시간이면 동일 전환율을 준다는 점이다.

조건 정리

반응: $A \rightarrow 2R$ (기상, 비가역, 1차). 등온·등압이므로 부피가 변하는 가변부피 회분식. 1차 반응이므로 속도상수 k는 두 실험에서 동일.
실험1: 순수 A, 초기부피 10 L → 1시간 후 15 L.
실험2: A 80% + 비활성기체 20%, 초기부피 10 L, 1시간 진행 후 부피를 구함.

사용할 공식

팽창인자: $\varepsilon_A = y_{A0}\delta$, 여기서 $\delta = \frac{2-1}{1} = 1$ (A 1몰당 R 2몰 생성, 순변화 +1).
부피-전환율: $V = V_0(1 + \varepsilon_A X_A)$.
1차 가변부피 적분식: $-\ln(1 - X_A) = kt$ (이 식에는 ε_A가 나타나지 않는다).

계산 과정

실험1: 순수 A이므로 $y_{A0} = 1$, $\varepsilon_A = 1 \times 1 = 1$.
부피로 전환율: $15 = 10(1 + 1 \cdot X_A) \rightarrow X_A = 0.5$.
속도상수: $-\ln(1 - 0.5) = k \cdot 1 \rightarrow k = \ln 2 \approx 0.693\text{hr}^{-1}$.
실험2: $y_{A0} = 0.8$이므로 $\varepsilon_A = 0.8 \times 1 = 0.8$.
같은 k, 같은 $t = 1$시간이므로 $-\ln(1 - X_A) = \ln 2 \rightarrow X_A = 0.5$ (전환율은 그대로).
부피: $V = 10(1 + 0.8 \cdot 0.5) = 10 \times 1.4 = 14\text{L}$.

NoteBase

선지 판단

① 12 → X: 잘못된 풀이. ε_A를 0.4 등으로 잘못 잡거나 부피식을 오용한 값.
② 12.5 → X: ε_A나 전환율을 임의로 줄여 잡은 함정값.
③ 14 → O: $\varepsilon_A = 0.8$, $X_A = 0.5$로 $V = 10(1 + 0.8 \times 0.5) = 14$L.
④ 15 → X: 비활성기체 효과를 무시하고 순수 A일 때 결과(15 L)를 그대로 옮긴 오답. 비활성기체가 ε_A를 1에서 0.8로 줄이므로 부피 증가폭이 더 작아야 한다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 두 가지다. 첫째, 1차 반응의 전환율 적분식 $-\ln(1 - X_A) = kt$에 ε_A가 들어간다고 착각해 실험2의 전환율을 다시 계산하려는 것. 1차에서는 부피 변화 항이 상쇄되어 전환율은 ε_A와 무관하므로 두 실험 모두 $X_A = 0.5$다. 둘째, 비활성기체가 있으면 부피가 안 변한다고 오해해 15 L(④)를 고르는 것. 비활성기체는 반응엔 안 끼지만 y_{A0}를 낮춰 ε_A를 줄이고, 그 결과 부피 팽창은 줄어든다.

다시 나오면 이렇게 판단

순서를 고정하라: (1) δ로 순몰변화 계산 → (2) $\varepsilon_A = y_{A0}\delta$로 팽창인자 → (3) 첫 실험에서 부피비로 전환율, 거기서 k 추출 → (4) 둘째 실험은 같은 k·같은 시간 → 1차면 전환율 그대로 → (5) $V = V_0(1 + \varepsilon_A X_A)$에 새 ε_A 대입. '비활성기체 추가' 문구가 보이면 곧바로 ε_A가 작아진다고 떠올린다.

암기 포인트

팽창인자 $\varepsilon_A = y_{A0}\delta$ — 비활성기체가 섞이면 y_{A0}가 작아져 ε_A도 작아진다. 1차 가변부피 회분식은 $-\ln(1 - X_A) = kt$로 ε_A에 무관하게 같은 시간이면 같은 전환율. 부피는 $V = V_0(1 + \varepsilon_A X_A)$. 이 문항은 A→2R, $\delta = 1$, $X_A = 0.5$ 고정, ε_A만 $1 \to 0.8$로 바뀌어 15 → 14L.

NoteBase

문 14. 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 비가역 액상 2차 반응 $A \rightarrow B$가 진행되고 있다. 반응속도상수는 $0.02 \mathrm{L mol^{-1} s^{-1}}$이고, A의 초기 농도는 $2 \mathrm{mol L^{-1}}$이다. 반응기의 체류시간이 $50 \mathrm{s}$일 때, 반응의 반감기[s]와 반응기 출구에서의 전환율에 가장 가까운 값[%]은?

① 반감기[s]: 25, 전환율[%]: 50

② 반감기[s]: 25, 전환율[%]: 67

③ 반감기[s]: 40, 전환율[%]: 67

④ 반감기[s]: 40, 전환율[%]: 80

정답 2번

출제 포인트

PFR(플러그흐름반응기)에서 일어나는 2차 비가역 액상 반응에 대해 두 가지를 따로 구하는 문제다. (1) 반응 자체의 반감기(반응물 농도가 절반이 되는 시간)와 (2) 체류시간 τ가 주어졌을 때 반응기 출구의 전화율 X이다. 반감기는 PFR이라는 점과 무관하게 2차 반응의 속도식만으로 결정되고, 전화율은 PFR 설계방정식으로 구한다. 두 값을 헷갈려 같은 식으로 풀면 안 된다.

조건 정리

반응차수: 2차(액상 비가역, A→B). 속도상수 $k = 0.02\ \mathrm{L mol^{-1} s^{-1}}$. 초기 농도 $C_{A0} = 2\ \mathrm{mol L^{-1}}$. 체류시간 $\tau = 50\ \mathrm{s}$. 액상이므로 부피변화 없음($\varepsilon = 0$, 농도 기준 계산 가능).

사용할 공식

2차 반응 반감기: $t_{1/2} = \frac{1}{kC_{A0}}$. PFR 2차 반응 설계방정식: $\tau = C_{A0} \int_0^X \frac{dX}{-r_A}$, 여기서 $-r_A = kC_A^2 = kC_{A0}^2(1-X)^2$. 적분하면 $\tau = \frac{1}{kC_{A0}} \cdot \frac{X}{1-X}$.

계산 과정

반감기: $t_{1/2} = \frac{1}{kC_{A0}} = \frac{1}{0.02 \times 2} = \frac{1}{0.04} = 25\ \mathrm{s}$.

전화율: 먼저 $kC_{A0}\tau = 0.02 \times 2 \times 50 = 2$. 설계방정식 $\tau = \frac{1}{kC_{A0}} \cdot \frac{X}{1-X}$를 정리하면 $\frac{X}{1-X} = kC_{A0}\tau = 2$. 따라서 $X = 2(1-X) \Rightarrow 3X = 2 \Rightarrow X = \frac{2}{3} \approx 0.667$, 즉 약 67%.

NoteBase

선지 판단

① 25, 50 → X 틀림(O.5는 $\frac{X}{1-X}=1$일 때, 즉 $kC_{A0}\tau=1$일 때 값이라 본 문제와 다름).
② 25, 67 → 반감기 25 s, 전화율 67% 모두 일치. 정답.
③ 40, 67 → 전화율은 맞지만 반감기 25 s를 40 s로 잘못 둠.
④ 40, 80 → 반감기·전화율 모두 틀림(80%는 $\frac{X}{1-X}=4$일 때).
O/X: ① X, ② O, ③ X, ④ X.

오답 포인트

반감기를 1차 반응 공식 $t_{1/2}=\frac{\ln 2}{k}$나 PFR 체류시간과 혼동하면 40 s 같은 값이 나와 ③·④로 빠진다. 2차 반응의 반감기는 $t_{1/2}=\frac{1}{kC_{A0}}$로 초기 농도에 반비례한다는 점이 핵심. 또 PFR 전화율을 구할 때 CSTR 식 $\tau=\frac{X}{kC_{A0}(1-X)^2}$을 잘못 쓰면 X가 달라지므로(같은 조건에서 CSTR은 전화율이 더 낮다) 반응기 종류에 맞는 식을 써야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

(1) 반감기와 전화율은 별개로 계산한다 — 반감기는 반응차수 공식, 전화율은 반응기 설계방정식. (2) 2차 반응 반감기는 $\frac{1}{kC_{A0}}$부터 떠올린다. (3) PFR 2차 전화율은 $\frac{X}{1-X}=kC_{A0}\tau$ 한 줄로 끝난다. 무차원수 $kC_{A0}\tau$를 먼저 계산하면(여기선 2) $\frac{X}{1-X}$ =그 값이라 X가 바로 나온다.

암기 포인트

2차 비가역 반감기: $t_{1/2}=\frac{1}{kC_{A0}}$ (초기농도 클수록 짧다). PFR 2차: $\frac{X}{1-X}=kC_{A0}\tau$. CSTR 2차: $\frac{X}{(1-X)^2}=kC_{A0}\tau$. 같은 τ에서 PFR이 CSTR보다 전화율이 높다.

NoteBase

문 15. 등온 회분식반응기에서 비가역 액상 1차 반응 $A \rightarrow P$가 동일한 반응 시간 동안 진행된다. 이때, 반응물의 소모 몰수가 가장 큰 조건은? (단, 반응기의 부피는 일정하다.)

① 초기 농도가 높고 온도가 높다.

② 초기 농도가 높고 온도가 낮다.

③ 초기 농도가 낮고 온도가 높다.

④ 초기 농도가 낮고 온도가 낮다.

정답 1번

출제 포인트

등온·정용(부피 일정) 회분식반응기에서 비가역 1차 반응 A→P가 동일한 반응 시간 동안 진행될 때, 반응물 A의 소모 몰수를 무엇이 키우는지를 묻는 문제다. 소모 몰수는 '초기 농도(또는 초기 몰수)'와 '전화율(소모된 비율)' 두 요소의 곱으로 결정되므로, 두 요소를 각각 최대로 만드는 조건을 찾아야 한다.

조건 정리

반응: 비가역 액상 1차 A→P. 반응기: 회분식, 등온, 부피 V 일정. 비교 조건: 동일한 반응 시간 t. 변수: 초기 농도 C_{A0}의 높고 낮음, 온도 T의 높고 낮음.

사용할 공식

정용 회분식 1차 반응의 농도식: $C_A = C_{A0}e^{-kt}$. 소모 몰수: $N_{A0} - N_A = V(C_{A0} - C_A) = VC_{A0}(1 - e^{-kt})$.
속도상수의 온도 의존성(아레니우스식): $k = k_0 e^{-E_a/RT}$, 즉 온도가 높을수록 k가 커진다.

계산 과정

소모 몰수 $N_{A0} - N_A = VC_{A0}(1 - e^{-kt})$를 보면 두 부분으로 나뉜다.
첫째 인자 VC_{A0}: 초기 농도 C_{A0}가 높을수록 커진다(같은 비율이 소모돼도 출발 몰수가 많으니 절대 소모량이 크다).
둘째 인자 $(1 - e^{-kt})$=전화율: 시간 t가 같을 때 k가 클수록 1에 가까워진다. 그리고 $k = k_0 e^{-E_a/RT}$이므로 온도 T가 높을수록 k가 커져 전화율이 커진다.
따라서 두 인자를 모두 키우려면 초기 농도도 높고 온도도 높아야 한다.

NoteBase

선지 판단

① 초기 농도가 높고 온도가 높다. → O. C_{A0}가 커서 출발 몰수가 많고, T가 높아 k가 커지므로 같은 시간에 전화율도 가장 크다. 두 인자가 모두 최대라 소모 몰수가 가장 크다.
② 초기 농도가 높고 온도가 낮다. → X. 출발 몰수는 많지만 온도가 낮아 k가 작아 전화율(소모 비율)이 작다 → 전화율 최대 조건을 놓침.
③ 초기 농도가 낮고 온도가 높다. → X. 전화율은 크지만 출발 몰수 C_{A0} 자체가 작아 곱한 절대 소모 몰수가 작다 → 초기 몰수 최대 조건을 놓침.
④ 초기 농도가 낮고 온도가 낮다. → X. 출발 몰수도 적고 전화율도 작아 두 인자가 모두 최소 → 소모 몰수가 가장 작다.

오답 포인트

'온도가 높으면 반응이 빨라진다'까지는 알지만, 소모 몰수가 농도와 전화율의 곱이라는 점을 놓치고 ③처럼 '전화율만' 보거나 ②처럼 '초기 농도만' 보면 틀린다. 또 1차 반응의 전화율 $1-e^{-kt}$는 초기 농도와 무관하게 $k\cdot t$에만 의존하므로, '초기 농도가 높으면 비율이 더 많이 줄어든다'는 식으로 농도와 전화율을 혼동하면 안 된다(농도는 절대 몰수에, 온도는 전화율에 작용).

다시 나오면 이렇게 판단

'소모 몰수(절대량)'를 묻는지 '전화율(비율)'을 묻는지부터 구분한다. 절대 소모 몰수 $=VC_{A0}(1-e^{-kt})$는 '초기 농도(많을수록 ↑) × 전화율(온도 높을수록 ↑)'의 곱이므로 둘 다 높은 조건이 답이다. 만약 '전화율이 가장 큰 조건'을 물었다면 1차 반응의 전화율은 초기 농도와 무관하므로 '온도가 높은' 조건(①과 ③ 모두)이 답이 되어 문제 의도가 달라진다는 점을 같이 기억한다.

암기 포인트

정용 회분식 1차 반응: 소모 몰수 $=VC_{A0}(1-e^{-kt})$. 초기 농도 ↑ → 절대 소모 몰수 ↑, 온도 ↑ → k↑ → 전화율 ↑. 둘 다 높을 때 소모 몰수 최대. 핵심 구분: 농도=출발 몰수(절대량) / 온도=전화율(비율).

NoteBase

문 16. 부피가 20L인 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 순수한 A를 반응물로 비가역 액상 1차 반응 $A \rightarrow B$를 진행하고, 350K에서 등온으로 운전한다. 반응물의 초기 농도는 $2\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$이며, 반응속도상수는 $0.1\,\mathrm{min^{-1}}$이다. 전환율 0.8을 달성하기 위한 열 제거 속도의 크기[$\mathrm{kcal\,min^{-1}}$]는? (단, 350K에서 반응열 ΔH_R은 $-30\,\mathrm{kcal\,mol^{-1}}$이며, 축일은 무시한다.)

① 12

② 18

③ 24

④ 30

정답 3번

출제 포인트

등온 정상상태 CSTR에서 발열반응이 실제로 내놓는 열을 그대로 빼내야 온도가 유지된다는 에너지수지를 묻는 문제다. 핵심은 두 단계뿐이다. (1) CSTR 출구 농도에서 정해지는 반응속도로 단위시간당 반응하는 A의 몰수를 구하고, (2) 거기에 반응열 크기를 곱한다. CSTR에서는 C_A가 입구가 아니라 출구(=탱크 내부) 농도라는 점, 그리고 등온 정상상태에서 제거열=발생열이라는 점을 잡으면 끝난다.

조건 정리

반응기 부피 $V = 20\,\mathrm{L}$ / 초기 농도 $C_{A0} = 2\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$ / 속도상수 $k = 0.1\,\mathrm{min^{-1}}$ (1차) / 전화율 $X = 0.8$ / 반응열 $\Delta H_R = -30\,\mathrm{kcal\,mol^{-1}}$ (음수이므로 발열) / 축일(교반일) 무시, 등온 정상상태.

사용할 공식

CSTR 내부(=출구) 농도: $C_A = C_{A0}(1 - X)$
1차 반응속도: $-r_A = kC_A$
단위시간당 반응한 A의 몰수: $F_{A0}X = (-r_A)V$
등온 정상상태 에너지수지: 제거열 $\dot{Q}_{remove} = (-r_A)V|\Delta H_R|$

계산 과정

출구 농도: $C_A = 2 \times (1 - 0.8) = 0.4\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$
반응속도: $-r_A = 0.1 \times 0.4 = 0.04\,\mathrm{mol\,L^{-1}\,min^{-1}}$
반응 몰유량: $(-r_A)V = 0.04 \times 20 = 0.8\,\mathrm{mol\,min^{-1}}$
발생열(=제거열) 크기: $0.8 \times 30 = 24\,\mathrm{kcal\,min^{-1}}$
따라서 제거해야 할 열의 크기는 24 kcal/min이다.

NoteBase

선지 판단

① 12 → X 입구 농도 $C_{A0}=2$에 절반을 잘못 쓰거나 부피를 빠뜨려 $0.4\times30=12$로 계산한 값. 부피 $V=20\text{L}$을 곱하지 않은 오류다.
② 18 → X 출구 농도를 $C_{A0}(1-X)$ 대신 다른 값으로 잡거나 단위를 혼동해 나오는 함정값으로, 정상 계산 경로에서 나오지 않는다.
③ 24 → O $C_A=C_{A0}(1-X)=0.4$, $-r_A=kC_A=0.04$, 반응 몰수 $(-r_A)V=0.8\text{molmin}^{-1}$, 제거열 $=0.8\times30=24\text{kcalmin}^{-1}$. 등온 정상상태이므로 발생열을 그대로 빼낸 값이다.
④ 30 → X 반응열 크기 30을 그대로 답으로 쓴 값. 반응열은 1 mol당 값이므로 실제 반응한 몰수(0.8mol/min)를 곱해야 하는데 그 과정을 빠뜨린 오류다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 C_A에 입구 농도 2molL^{-1}를 그대로 넣는 것이다. CSTR은 완전혼합이라 탱크 안과 출구 농도가 같고, 반응속도는 출구 농도 0.4molL^{-1}로 계산해야 한다. 또 부피 $V=20\text{L}$을 곱해 '단위시간당 몰수'로 바꾸는 단계를 빼면 12나 다른 값이 나온다. 반응열 30을 그냥 답으로 옮겨 적으면 30이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

'등온 CSTR + 발열반응 + 제거열' 조합이 보이면 곧장 제거열 크기 $=(-r_A)V|\Delta H_R|$ 한 줄로 정리한다. 순서는 항상 (1) 출구 농도 $C_{A0}(1-X)$ → (2) 속도 kC_A → (3) $\times V$로 몰유량 → (4) $\times|\Delta H_R|$. 유량(Q)이 따로 주어져도 정상상태에서는 $(-r_A)V=F_{A0}X$로 같아지므로 결과는 동일하다. 등온이라는 단어가 곧 '제거열=발생열'임을 기억한다.

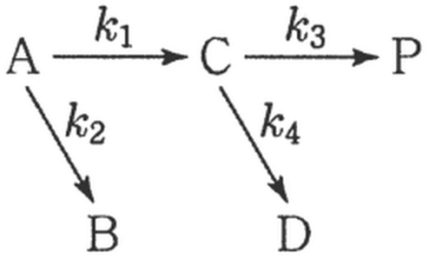
암기 포인트

등온 정상상태 CSTR 제거열 크기 $=(-r_A)V|\Delta H_R|=F_{A0}X|\Delta H_R|$. CSTR의 C_A는 언제나 출구(탱크) 농도 $C_{A0}(1-X)$. 발열이면 $\Delta H_R<0$이고 그만큼을 냉각으로 빼낸다. 이 문제 숫자: $0.4\to0.04\to0.8\to24\text{kcalmin}^{-1}$.

NoteBase

문 17. <보기>와 같은 비가역 연쇄 1차 반응이 직렬로 연결된 두 개의 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 일어나며 반응 온도는 300K와 500K 사이로 조절된다. 두 반응기의 온도를 다르게 유지시킬 때 얻을 수 있는 P의 최대 수율과, P의 수율이 최대일 때 첫 번째 반응기의 온도[K]는? (단, 첫 번째 반응기에서는 $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$가, 두 번째 반응기에서는 $C \rightarrow D$, $C \rightarrow P$가 일어나며, $k_1 \sim k_4$는 각 화살표에 해당하는 반응속도상수이고, $\frac{k_2}{k_1+k_2} = 0.6$, $\frac{k_3}{k_3+k_4} = 0.8$로 계산한다.)

<보기>



$$k_1 = 10^7\, e^{-3{,}000/T}$$
$$k_2 = 10^8\, e^{-5{,}000/T}$$
$$k_3 = 10^{13}\, e^{-15{,}000/T}$$
$$k_4 = 10^{10}\, e^{-10{,}000/T}$$

① 최대 수율: 0.32, 첫 번째 반응기 온도: 300

② 최대 수율: 0.32, 첫 번째 반응기 온도: 500

③ 최대 수율: 0.48, 첫 번째 반응기 온도: 300

④ 최대 수율: 0.48, 첫 번째 반응기 온도: 500

정답 1번

출제 포인트

직렬 연결된 두 CSTR에서 일어나는 병렬-직렬 1차 반응이다. 첫 번째 반응기는 중간체 C를, 두 번째 반응기는 최종 생성물 P를 만든다. P의 전체 수율은 각 반응기에서 원하는 경로로 가는 선택도(selectivity)의 곱으로 계산되며, 각 반응기 온도를 따로 조절해 두 선택도를 동시에 최대로 만드는 것이 핵심이다.

조건 정리

첫 번째 반응기: A→C(속도상수 k_1), A→B(속도상수 k_2). 두 번째 반응기: C→P(속도상수 k_3), C→D(속도상수 k_4). 온도 범위 300K~500K. 주어진 계산값: $\frac{k_2}{k_1+k_2} = 0.6$, $\frac{k_3}{k_3+k_4} = 0.8$. 속도상수: $k_1 = 10^7 e^{-3000/T}$, $k_2 = 10^8 e^{-5000/T}$, $k_3 = 10^{13} e^{-15000/T}$, $k_4 = 10^{10} e^{-10000/T}$.

사용할 공식

P 수율 = (1반응기에서 A가 C로 가는 선택도) × (2반응기에서 C가 P로 가는 선택도) = $\frac{k_1}{k_1+k_2} \times \frac{k_3}{k_3+k_4}$. 온도 의존성 판단은 두 속도상수의 비로 본다: $\frac{k_2}{k_1} = 10 e^{-2000/T}$ (T가 커지면 증가 → C 선택도 감소), $\frac{k_4}{k_3} = 10^{-3} e^{5000/T}$ (T가 커지면 감소 → P 선택도 증가).

NoteBase

계산 과정

1단계: 첫 번째 반응기에서 원하는 것은 중간체 C이므로 C로 가는 선택도가 분자다. $\frac{k_1}{k_1+k_2} = 1 - \frac{k_2}{k_1+k_2} = 1 - 0.6 = 0.4$. 2단계: 두 번째 반응기에서 원하는 것은 P이므로 $\frac{k_3}{k_3+k_4} = 0.8$. 3단계: 최대 수율 = $0.4 \times 0.8 = 0.32$. 4단계: 첫 번째 반응기 온도 선택. C 선택도 $\frac{k_1}{k_1+k_2}$는 $\frac{k_2}{k_1} = 10e^{-2000/T}$가 작을수록 커지고, 이 값은 T가 낮을수록 작아진다. 따라서 1반응기는 허용 범위의 최저 온도인 300K에서 C 선택도가 가장 높다(300K에서 0.99, 500K에서 0.85). 그러므로 P 수율이 최대일 때 첫 번째 반응기 온도는 300K다.

선지 판단

① 최대 수율 0.32, 첫 반응기 300K → O. C 선택도 0.4 × P 선택도 0.8 = 0.32이고, 1반응기는 저온(300K)에서 C 선택도가 최대이므로 옳다.
② 0.32, 500K → X. 수율 0.32는 맞지만 첫 반응기 온도가 틀림 → 500K가 아니라 300K. 500K에서는 $\frac{k_2}{k_1}$가 커져 C 선택도가 떨어진다.
③ 0.48, 300K → X. 최대 수율이 틀림 → 0.48이 아니라 0.32. 0.48은 $\frac{k_2}{k_1+k_2} = 0.6$을 C 선택도로 잘못 쓴 값이다(실제 C 선택도는 0.4).
④ 0.48, 500K → X. 최대 수율과 온도 둘 다 틀림 → 수율은 0.32, 첫 반응기는 300K다.

오답 포인트

주어진 $\frac{k_2}{k_1+k_2} = 0.6$을 그대로 C의 선택도로 착각하면 0.48(=0.6×0.8)이 나와 ③·④로 빠진다. 그림을 보면 A→C는 k_1, A→B는 k_2이므로 원하는 C로 가는 선택도는 $k_1/(k_1+k_2) = 1 - 0.6 = 0.4$임을 반드시 뒤집어 읽어야 한다. 또 두 번째 반응기는 고온(500K)에서 P 선택도가 최대지만, 묻는 것은 '첫 번째' 반응기 온도이므로 500K로 답하면 안 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 그림에서 '원하는 생성물로 가는 화살표의 속도상수'가 무엇인지 확정한다. 주어진 비가 원하는 경로의 분자인지 아닌지부터 확인하고, 아니면 1에서 빼서 진짜 선택도를 만든다. 그다음 각 반응기 온도는 그 반응기의 원하는 선택도를 최대로 만드는 방향으로 따로 정한다: 비 k_낭비/k_원하는가 e^-(E_원-E_낭) /T 꼴이면 부호를 보고 고온·저온을 고른다. 전체 수율은 각 반응기 선택도의 곱이다.

암기 포인트

직렬 다단 반응의 전체 수율 = 단계별 선택도의 곱. 주어진 $\frac{k_2}{k_1+k_2} = 0.6$ → 원하는 C의 선택도는 0.4. 1반응기 C 선택도는 저온(300K)에서 최대, 2반응기 P 선택도는 고온(500K)에서 최대. 따라서 최대 P 수율 $0.4 \times 0.8 = 0.32$, 첫 번째 반응기 온도 300K.

NoteBase

문 18. 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 비가역 등온 액상 기초 병렬반응 $2A \rightarrow B$와 $A \rightarrow C$가 동시에 일어나고 있다. A의 초기농도는 $2\text{mol}\text{L}^{-1}$이고, 반응기의 체류시간은 10s이다. A의 전환율이 75%일 때, 생성물 B와 C의 농도비C_B/C_C는? (단, 초기에는 반응물 A만 존재하며, k_1과 k_2는 각각 B와 C의 생성반응에 대한 반응속도상수이고, $k_1 = 0.2\text{L}\text{mol}^{-1}\text{s}^{-1}$, $k_2 = 0.1\text{s}^{-1}$이다.)

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

정답 4번

출제 포인트

CSTR에서 병렬반응(2A→B와 A→C)이 동시에 일어날 때 두 생성물의 농도비를 구하는 문제다. 핵심은 CSTR 정상상태에서 생성물 농도는 $C_i = r_i \cdot \tau$ (생성속도 × 체류시간)로 결정되며, 각 반응의 차수(B 생성은 A에 2차, C 생성은 A에 1차)가 서로 다르다는 점을 정확히 반영하는 것이다. 두 생성물 모두 같은 반응기·같은 체류시간을 공유하므로 농도비는 결국 생성속도비로 환원된다.

조건 정리

반응: 2A→B (속도상수 $k_1 = 0.2\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\text{s}^{-1}$, A에 2차), A→C (속도상수 $k_2 = 0.1\text{s}^{-1}$, A에 1차)
A 초기농도 $C_{A0} = 2\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 체류시간 $\tau = 10\text{s}$, A 전화율 $X = 75\%$
초기에는 반응물 A만 존재(B, C 유입 없음).
반응기 내 A 농도: $C_A = C_{A0}(1 - X) = 2 \times (1 - 0.75) = 0.5\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

사용할 공식

각 반응의 생성속도(반응기 내 A 농도 C_A로 평가):
B 생성속도 $r_B = k_1 C_A^2$ (2A→B, A에 2차)
C 생성속도 $r_C = k_2 C_A$ (A→C, A에 1차)
CSTR 정상상태 생성물 농도: $C_B = r_B \tau, \quad C_C = r_C \tau$
따라서 농도비 $\frac{C_B}{C_C} = \frac{r_B \tau}{r_C \tau} = \frac{k_1 C_A^2}{k_2 C_A} = \frac{k_1 C_A}{k_2}$

계산 과정

1단계 — 반응기 내 A 농도:
$C_A = C_{A0}(1 - X) = 2 \times 0.25 = 0.5\text{mol·L}^{-1}$
2단계 — 두 생성속도 계산:
$r_B = k_1 C_A^2 = 0.2 \times (0.5)^2 = 0.2 \times 0.25 = 0.05\text{mol·L}^{-1}\text{s}^{-1}$
$r_C = k_2 C_A = 0.1 \times 0.5 = 0.05\text{mol·L}^{-1}\text{s}^{-1}$
3단계 — 농도비(체류시간 τ는 약분):
$\frac{C_B}{C_C} = \frac{r_B \tau}{r_C \tau} = \frac{0.05}{0.05} = 1$
간단히 정리하면 $\frac{C_B}{C_C} = \frac{k_1 C_A}{k_2} = \frac{0.2 \times 0.5}{0.1} = 1$이다.

선지 판단

① $\frac{1}{4}$: X. 농도비는 1이다. $r_B = r_C = 0.05$로 같으므로 $\frac{1}{4}$이 될 수 없다.
② $\frac{1}{3}$: X. 마찬가지로 두 생성속도가 같아 1이다.
③ $\frac{1}{2}$: X. 만약 B 생성반응을 A에 1차로 잘못 보거나 C_A^2 대신 C_A를 쓰면 $\frac{k_1}{k_2} = \frac{0.2}{0.1} = 2$ 또는 그 역수 등 다른 값이 나오지만, 올바른 차수 적용 시 1이다.
④ 1: O. $\frac{C_B}{C_C} = \frac{k_1 C_A^2}{k_2 C_A} = \frac{k_1 C_A}{k_2} = \frac{0.2 \times 0.5}{0.1} = 1$로 정확히 일치한다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 B 생성반응 2A→B를 A에 1차로 처리하는 것이다. 속도상수 단위가 k_1은 $\text{L·mol}^{-1}\text{s}^{-1}$(2차), k_2는 s^{-1}(1차)로 다르게 주어진 것이 차수의 결정적 단서다. 또 다른 함정은 전화율 75%를 그대로 농도에 넣으려 하거나 $C_A = C_{A0}$로 두는 것인데, 속도는 반드시 출구(반응기 내부) 농도 $C_A = 0.5$로 평가해야 한다. 체류시간 10초는 두 생성물에 똑같이 곱해져 약분되므로 농도비에는 영향을 주지 않는다 — 숫자에 현혹되지 말 것.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응의 생성물 농도비 문제는 'CSTR 농도 = 생성속도 × 체류시간'에서 체류시간이 공통이면 농도비 = 생성속도비로 즉시 환원된다. 속도상수 단위로 각 반응의 차수를 먼저 확정하고(2차면 C_A^2, 1차면 C_A), 반응기 내부 농도 $C_A = C_{A0}(1 - X)$를 대입한 뒤 비를 잡으면 된다. 차수가 같으면 농도비는 속도상수비 k_1/k_2가 되고, 이 문제처럼 차수가 다르면 C_A가 한 번 더 곱해져 $k_1 C_A/k_2$가 핵심 식이 된다.

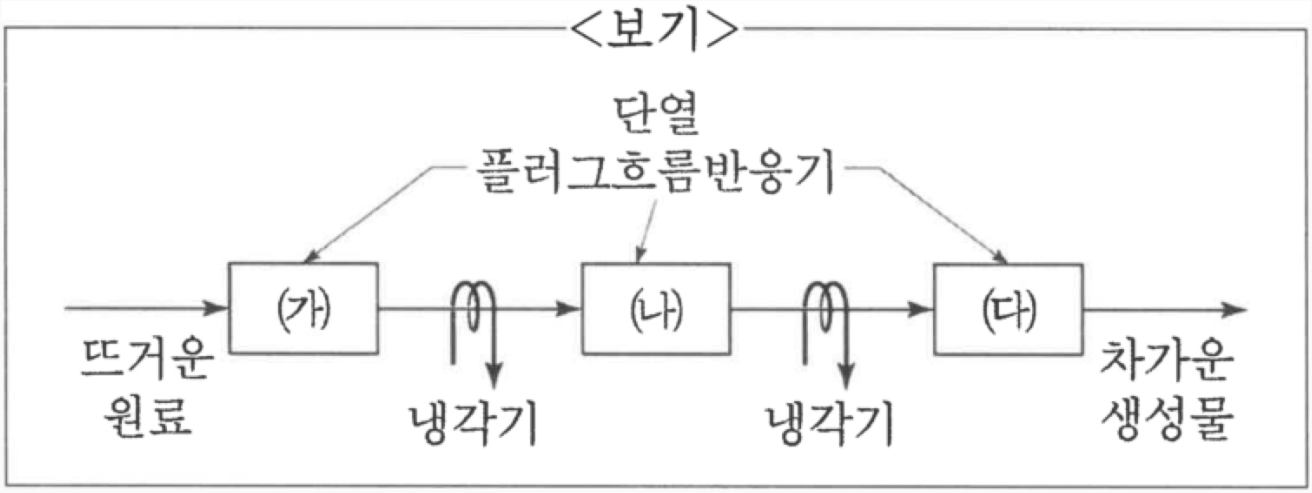
암기 포인트

CSTR 생성물 농도: $C_i = r_i \tau$ / 체류시간 공통이면 농도비 = 생성속도비 / 속도상수 단위가 차수를 말해준다 — $\text{L·mol}^{-1}\text{s}^{-1}$는 2차, s^{-1}는 1차 / 속도는 출구 농도 $C_A = C_{A0}(1 - X)$로 평가 / 이 문제 핵심식 $\frac{C_B}{C_C} = \frac{k_1 C_A}{k_2}$.

NoteBase

문 19. <보기>의 반응 시스템에서 발열 액상 1차 가역반응 $A \rightleftharpoons R$을 진행한다. 단열 플러그흐름반응기(PFR) (가), (나), (다)의 출구 온도의 크기를 가장 옳게 비교한 것은? (단, 각 반응기의 출구에서 전환율은 평형 전환율에 도달한다.)

<보기>



① (가) = (나) = (다)

② (가) < (나) < (다)

③ (가) < (나) > (다)

④ (가) > (나) > (다)

정답 4번

출제 포인트

발열 가역반응을 단열 PFR 여러 개에 중간냉각(interstage cooling)으로 연결한 시스템에서 각 반응기 출구 온도를 비교하는 문제다. 핵심은 두 가지다. (1) 발열반응이므로 평형 전화율은 온도가 높을수록 낮아진다. (2) 단열 반응기 안에서는 전화율이 올라갈수록 온도도 함께 올라간다(에너지수지). 각 반응기 출구가 평형에 도달하고, 냉각기를 거치며 누적 전화율은 점점 커지므로, 더 큰 전화율에서 평형을 만나는 뒤쪽 반응기일수록 평형 온도가 낮아진다는 점을 잡아야 한다.

핵심 개념

발열반응 평형선: 발열반응에서 평형 전화율 X_{eq}는 온도 T가 올라갈수록 감소한다(전화율-온도 그래프에서 우하향 곡선). / 단열 조작선: 단열 반응기 안에서는 에너지수지에 의해 $T = T_0 + \frac{(-\Delta H_R)}{\sum \Theta_i C_{p,i}} X$ 로, 전화율이 커질수록 온도가 선형으로 상승한다(우상향 직선). / 중간냉각의 의미: 반응기를 나온 스트림을 냉각기에서 식히면 전화율은 그대로 둔 채 온도만 내려가, 다음 단열 반응기에서 다시 평형까지 반응이 진행될 여지를 만든다. 그래서 (가)→(나)→(다)로 갈수록 누적 전화율이 커진다.

NoteBase

선지별 해설

① (가)=(나)=(다) → X: 세 반응기 출구 온도가 같다는 뜻인데, 각 출구의 평형 전화율이 서로 다르므로(누적되어 점점 커짐) 평형 온도도 달라야 한다. 같을 수 없다.
② (가)<(나)<(다) → X: 뒤로 갈수록 출구 온도가 높아진다는 주장. 발열반응에서 전화율이 더 커지면 평형 온도는 오히려 낮아져야 하므로 부등호 방향이 반대다.
③ (가)<(나)>(다) → X: (나)가 가장 높다는 주장. 단조롭게 변해야 할 출구 온도를 비단조로 본 오답으로, 평형선의 단조 감소 성질에 어긋난다.
④ (가)>(나)>(다) → O: 누적 전화율이 (가)<(나)<(다)로 커지고, 발열반응 평형선은 우하향이므로 더 큰 전화율에서 평형을 만나는 반응기일수록 출구(평형) 온도가 낮다. 따라서 T_(가) > T_(나) > T_(다) 가 성립한다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 ②번이다. '뒤쪽 반응기에서 반응이 더 많이 일어났으니 발열로 온도가 더 높아졌겠지'라고 생각하면 ②를 고른다. 하지만 각 반응기 사이에 냉각기가 있어 온도를 떨어뜨린 뒤 평형까지만 반응하므로, 출구 온도를 결정하는 것은 '단열 발열로 얼마나 데워졌나'가 아니라 '그 누적 전화율에서의 평형 온도가 얼마인가'다. 발열반응 평형선이 우하향이라는 사실을 놓치면 부등호 방향을 정반대로 뒤집게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

발열 가역반응 + 단열 반응기 + 중간냉각이 보이면 곧바로 전화율-온도 그래프를 떠올린다. 평형선이 우하향(발열)인지 우상향(흡열)인지 먼저 확인하고, 각 반응기 출구가 평형선 위에 있다고 본다. 단(stage)을 거칠수록 누적 전화율이 커지므로, 발열이면 출구 온도는 점점 내려가(앞 반응기가 가장 뜨거움), 흡열이면 반대로 점점 올라간다고 판단하면 된다.

암기 포인트

발열 가역반응 중간냉각 PFR 직렬: 누적 전화율은 단을 지날수록 증가, 발열 평형선은 우하향 → 출구 온도는 앞 반응기가 가장 높고 뒤로 갈수록 낮아진다. 즉 T_(가) > T_(나) > T_(다). 한 줄 요약: '발열은 식히며 더 짠다, 더 짤수록 평형 온도는 더 낮다.'

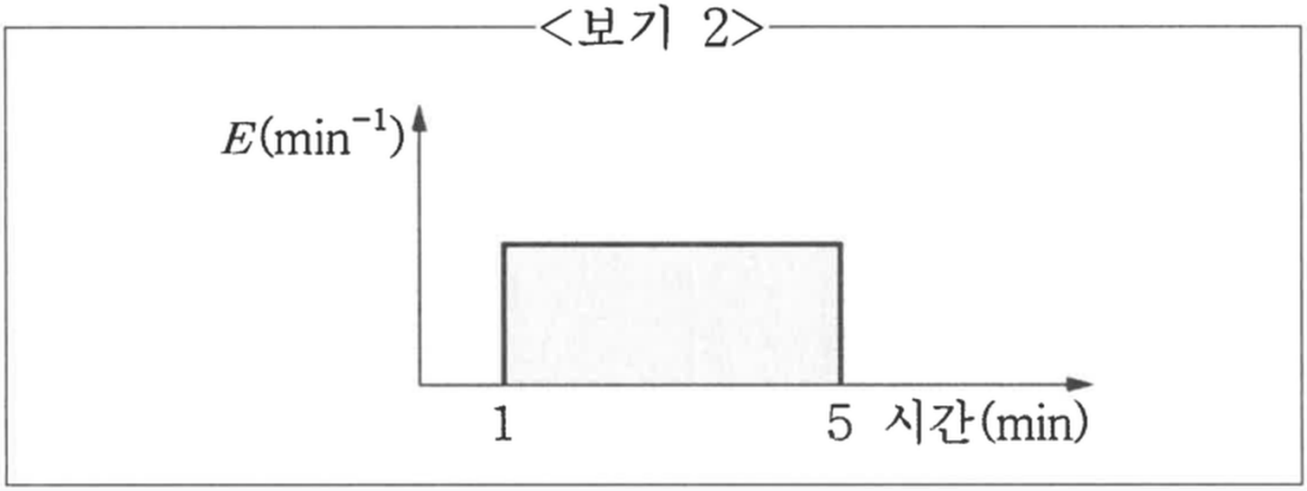
NoteBase

문 20. 비이상(nonideal) 흐름 반응기에서 <보기 1>의 속도식을 가지는 비가역 액상 2차 반응 A → R을 진행한다. 반응기 출구에서 측정한 반응물 A의 체류시간분포(E) 곡선이 <보기 2>와 같을 때, 반응물 A의 평균전환율은? (단, 반응물 A의 초기 농도는 $2\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$이고, $\ln 3 = 1.1$로 가정한다.)

<보기 1>

$-r_A = 0.5C_A^2$

<보기 2>



① 0.25

② 0.5

③ 0.65

④ 0.725

정답 4번

출제 포인트

비이상(nonideal) 흐름 반응기의 전화율을 체류시간분포(RTD)와 분리흐름(segregated flow) 모델로 계산하는 문제다. 핵심은 $\bar{X} = \int_0^\infty X(t)E(t)dt$ 로, 각 유체 덩어리를 '나이 t짜리 회분식(batch) 반응기'로 보고 거기서 얻은 전화율 $X(t)$를 E곡선으로 가중평균하는 것이다.

조건 정리

반응: 비가역 액상 2차 반응 A→R, 속도식 $-r_A = 0.5C_A^2$ (즉 $k = 0.5$).

초기 농도: $C_{A0} = 2$ mol/L.

E곡선: 1분부터 5분까지 높이가 일정한 사각형(직사각형) 분포.

가정: $\ln 3 = 1.1$.

NoteBase

기출OX 해설집 · 공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2025

사용할 공식

2차 회분식 적분식: $\frac{1}{C_A} = \frac{1}{C_{A0}} + kt$ 이므로 나이 t인 덩어리의 전화율은 $X(t) = \frac{kC_{A0}t}{1 + kC_{A0}t}$.
사각형 E곡선의 높이: 면적이 1이어야 하므로 $E = \frac{1}{5-1} = 0.25 \ (1 \le t \le 5)$.
분리흐름 평균: $\bar{X} = \int_1^5 X(t)E(t)dt$.

계산 과정

먼저 $kC_{A0} = 0.5 \times 2 = 1$ 이므로 $X(t) = \frac{t}{1+t}$.
평균전화율: $\bar{X} = \frac{1}{4}\int_1^5 \frac{t}{1+t}dt$.
피적분함수를 $\frac{t}{1+t} = 1 - \frac{1}{1+t}$ 로 나누면 적분은 $[t - \ln(1+t)]_1^5$.
대입: $(5 - \ln 6) - (1 - \ln 2) = 4 - \ln\frac{6}{2} = 4 - \ln 3$.
따라서 $\bar{X} = \frac{4 - \ln 3}{4} = \frac{4 - 1.1}{4} = \frac{2.9}{4} = 0.725$.

선지 판단

① 0.25 → X: E곡선의 높이(0.25) 자체를 답으로 착각한 값 → 올바른 답은 가중평균 0.725.
② 0.5 → X: 평균 체류시간 t=3을 한 점에만 넣어 $X = 3/4$도 아니고 그냥 절반으로 어림한 오류값 → 올바른 답은 0.725.
③ 0.65 → X: 적분을 빼먹거나 ln값을 잘못 처리한 근사 오답 → 올바른 답은 0.725.
④ 0.725 → O: $\bar{X} = \frac{4 - \ln 3}{4} = 0.725$ 로 정확히 일치한다.

오답 포인트

이 문제에서 가장 흔한 실수는 평균 체류시간 $\bar{t} = 3$분 하나만 공식에 넣어 $X(3) = \frac{3}{1+3} = 0.75$ 로 답하는 것이다. 2차 반응은 X가 t에 대해 비선형(오목)이라서 한 점 대입과 분리흐름 적분 결과가 다르며, 반드시 E곡선 전체에 걸쳐 적분해야 한다. 또 사각형 E곡선의 높이를 1로 두지 말고 면적=1 조건으로 0.25를 먼저 구해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

'비이상 흐름 + E(체류시간분포) 곡선 + 전화율' 조합이 나오면 분리흐름 모델 $\bar{X} = \int X(t)E(t)dt$ 를 떠올린다. 순서는 (1) 반응차수에 맞는 회분식 X(t) 세우기, (2) E곡선 면적=1로 높이 정하기, (3) 곱해서 적분. 사각형 E곡선이면 X(t)를 그 구간에서 평균내는 것과 같다.

암기 포인트

분리흐름(macrofluid) 전화율 = $\bar{X} = \int_0^\infty X(t)E(t)dt$.
2차 회분식 전화율 = $X(t) = \frac{kC_{A0}t}{1 + kC_{A0}t}$.
사각형 E곡선 높이 = 1(폭), 면적은 항상 1.
이 문제 핵심값: $kC_{A0} = 1$, $\bar{X} = \frac{4 - \ln 3}{4} = 0.725$.

NoteBase