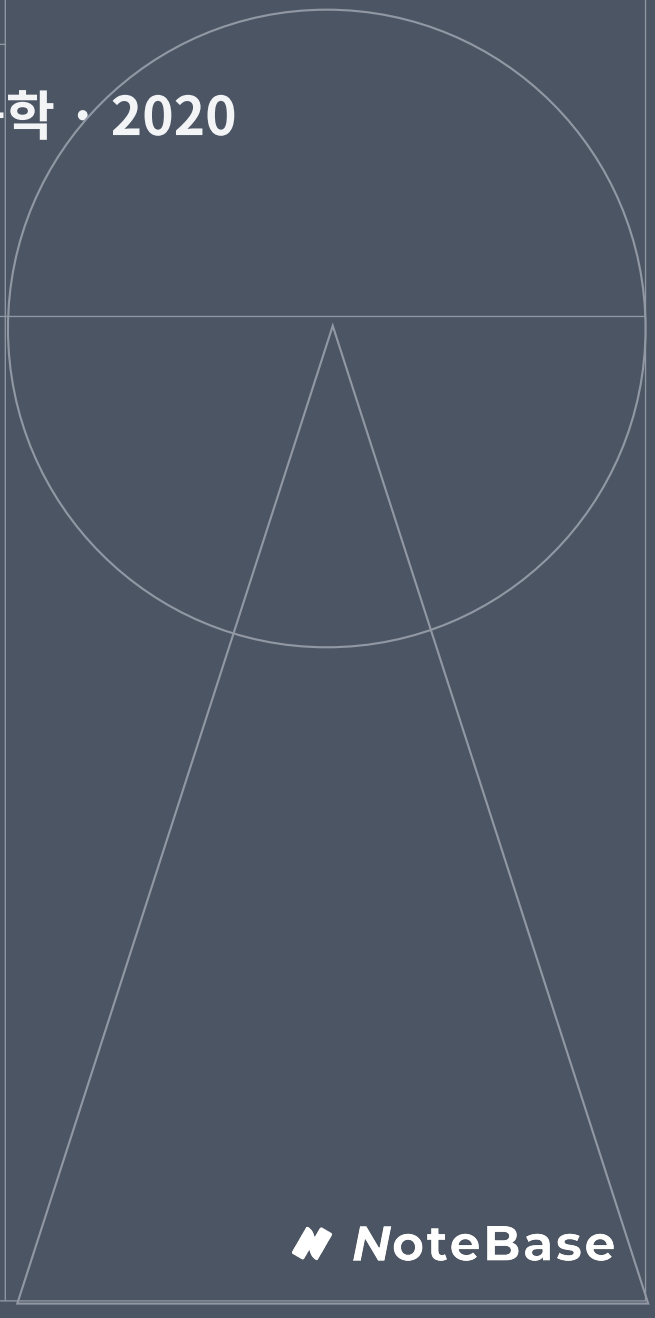
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2020



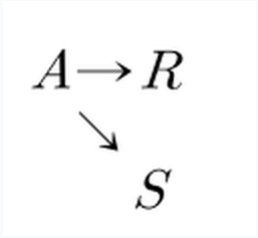
NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2020

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2020

문 1. 자동촉매반응(autocatalytic reaction)에 해당하는 반응식은?

① 

② $A \rightarrow R \rightarrow S$

③ $A + R \rightarrow R + R$

④ $A + B \rightarrow R + S$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 생성물이 자기 자신의 생성을 촉진하는 자동촉매반응과 병렬반응·연속반응·일반 반응식을 구별하는 문제이다.

핵심 개념

자동촉매반응은 생성물 중 하나가 촉매처럼 작용하여 같은 생성물의 생성을 더 빠르게 만드는 반응이다.
병렬반응은 하나의 반응물에서 둘 이상의 생성경로가 갈라지는 반응이다.
연속반응은 중간생성물이 다시 다음 단계 반응의 반응물이 되는 반응이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
A에서 R이 생성되면서 다른 경로로 S도 생기는 형태이므로 자동촉매반응이 아니라 병렬반응으로 본다.
틀린 표현은 자동촉매반응에 해당한다는 판단이다. 올바르게는 A가 둘 이상의 생성물로 나뉘어 가는 반응식이다.

② X
A→R→S는 R이 중간생성물로 생성된 뒤 다시 S로 전환되는 연속반응이다.
틀린 표현은 자동촉매로 보는 점이다. 올바르게는 중간생성물 R을 거치는 직렬 반응계이다.

③ O
A+R→R+R은 생성물 R이 반응물 쪽에도 들어 있어 A가 R로 바뀌는 과정을 R이 스스로 촉진한다. 즉 R이 자기 생성의 촉매 역할을 하므로 전형적인 자동촉매반응이다.

④ X
A+B→R+S는 두 반응물이 반응하여 두 생성물을 만드는 일반적인 반응식일 뿐, 생성물 R 또는 S가 반응 전부터 촉매로 참여하지 않는다.
틀린 표현은 자동촉매반응이라는 판단이다. 올바르게는 단순한 이분자 반응 또는 일반 반응식이다.

오답 포인트

생성물이 식의 오른쪽에 있다는 이유만으로 자동촉매라고 보면 틀린다. 자동촉매는 생성물이 오른쪽에만 있는 것이 아니라, 같은 종이 왼쪽에도 들어와 촉매처럼 작용하는지가 핵심이다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응식에서 생성물 종이 반응물 쪽에도 함께 나타나는지 먼저 본다. 생성물이 반응물에 포함되어 자기 생성을 돕으면 자동촉매반응이고, 중간체를 거치면 연속반응, 생성경로가 갈라지면 병렬반응이다.

암기 포인트

자동촉매반응은 생성물이 자기 생성을 돕는 반응이며, 반응식에서는 보통 A+R→2R 꼴로 나타난다.

NoteBase

문 2. 화학 반응속도를 몰농도로 표현할 때, 비가역 0차 반응과 비가역 2차 반응에서 속도상수 k의 단위를 바르게 연결한 것은? (단, 시간의 단위는 min이고 부피의 단위는 L이다)

① 0차 반응: $molL^{-1}min^{-1}$, 2차 반응: $Lmol^{-1}min^{-1}$

② 0차 반응: $Lmol^{-1}min^{-1}$, 2차 반응: $molL^{-1}min^{-1}$

③ 0차 반응: $molmin^{-1}$, 2차 반응: $Lmol^{-1}min^{-1}$

④ 0차 반응: $molmin^{-1}$, 2차 반응: $molL^{-1}min^{-1}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 반응속도식 $-r_A = kC_A^n$에서 반응속도의 단위와 농도차수를 이용해 속도상수 k의 단위를 구분하는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건: 반응속도는 몰농도 기준으로 표현한다.
반응속도의 단위: $molL^{-1}min^{-1}$이다.
구해야 할 값: 비가역 0차 반응과 비가역 2차 반응의 속도상수 k 단위이다.

사용할 공식

속도식은 $-r_A = kC_A^n$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 반응속도의 단위가 이미 $molL^{-1}min^{-1}$로 주어졌으므로, 농도 C_A의 차수 n만큼 나누어 주면 k의 단위를 바로 구할 수 있기 때문이다.

계산 과정

0차 반응은 $n = 0$이므로 $-r_A = k$이다. 따라서 k의 단위는 반응속도와 같은 $molL^{-1}min^{-1}$이다.
2차 반응은 $n = 2$이므로 $k = (-r_A)/C_A^2$이다.
농도 C_A의 단위는 $molL^{-1}$이므로,
$[k] = \frac{molL^{-1}min^{-1}}{(molL^{-1})^2} = \frac{molL^{-1}min^{-1}}{mol^2L^{-2}} = Lmol^{-1}min^{-1}$
따라서 0차는 $molL^{-1}min^{-1}$, 2차는 $Lmol^{-1}min^{-1}$이다.

NoteBase

선지별 해설

1번 O: 0차 반응의 k 단위를 $molL^{-1}min^{-1}$, 2차 반응의 k 단위를 $Lmol^{-1}min^{-1}$로 적었으므로 맞다.
2번 X: 0차와 2차의 단위를 서로 바꾸어 적은 것이 틀리다. 0차는 반응속도 자체가 k이므로 $Lmol^{-1}min^{-1}$가 아니라 $molL^{-1}min^{-1}$이어야 한다. 2차는 $molL^{-1}min^{-1}$가 아니라 $Lmol^{-1}min^{-1}$이어야 한다.
3번 X: 0차 반응 단위를 $molmin^{-1}$로 적은 부분이 틀리다. 이 문제는 반응속도를 몰수가 아니라 몰농도로 표현하므로 L^{-1}가 빠지면 안 된다. 올바르게는 $molL^{-1}min^{-1}$이다. 2차 반응 단위 $Lmol^{-1}min^{-1}$는 맞다.
4번 X: 0차 반응 단위를 $molmin^{-1}$로 적어 L^{-1}를 빠뜨린 점이 틀리고, 2차 반응 단위를 반응속도 단위와 같은 $molL^{-1}min^{-1}$로 적은 점도 틀리다. 올바르게는 0차가 $molL^{-1}min^{-1}$, 2차가 $Lmol^{-1}min^{-1}$이다.

오답 포인트

0차 반응에서 $-r_A = k$라는 점을 놓치면 0차 단위를 잘못 바꾸기 쉽다. 또 2차 반응에서는 반응속도 단위를 그대로 쓰는 실수가 잦은데, 실제로는 농도 ($molL^{-1}$)를 두 번 나누어야 하므로 $Lmol^{-1}min^{-1}$가 된다. 3번과 4번은 몰농도 기준이라는 조건을 무시해 L^{-1}를 누락하도록 만든 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응차수별 k 단위 문제는 먼저 반응속도 단위를 $molL^{-1}time^{-1}$ 형태로 적고, 그다음 속도식 $-r_A = kC_A^n$에서 농도항 $(molL^{-1})^n$을 나누어 판단한다. 0차는 반응속도와 동일, 1차는 $time^{-1}$, 2차는 $Lmol^{-1}time^{-1}$ 순서로 정리된다.

암기 포인트

몰농도 기준 속도식에서 0차의 k는 반응속도와 같은 단위이고, 2차의 k는 $Lmol^{-1}time^{-1}$이다.

NoteBase

문 3. 등온 혼합흐름 반응기 2개를 직렬로 연결하여 1차 액상 반응을 동일한 온도에서 진행한다. 최종 전환율이 주어질 때, 두 반응기 크기의 합이 최소가 되는 배치는?

① 작은 반응기를 먼저 배치한다.

② 두 반응기의 크기를 같게 한다.

③ 큰 반응기를 먼저 배치한다.

④ 반응기의 크기에 무관하다.

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 1차 액상 반응을 하는 두 CSTR 직렬계에서 최종 전환율이 고정될 때 총반응기 부피가 최소가 되는 분할 조건을 묻는다.

조건 정리

두 반응기는 등온에서 작동하는 완전혼합흐름반응기이다.
반응은 1차 액상 반응이므로 속도식은 $-r_A = kC_A$ 이다.
최종 전환율 X_2 는 고정이고, 첫 번째 반응기 출구 전환율 X_1 을 어떻게 잡느냐에 따라 $V_1 + V_2$ 가 달라진다.

사용할 공식

각 CSTR의 설계식은 $V = F_{A0}(X_{out} - X_{in})/(-r_A)_{out}$ 이다.
따라서
$V_1 = \frac{v_0}{k}\frac{X_1}{1-X_1}, \quad V_2 = \frac{v_0}{k}\frac{X_2 - X_1}{1-X_2}$
이다.
이 식을 쓰는 이유는 액상 1차 반응에서는 반응속도가 출구 농도에 비례하고, CSTR는 출구 조건의 속도로 설계되기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 총부피는
$V_T = V_1 + V_2 = \frac{v_0}{k}\left(\frac{X_1}{1-X_1} + \frac{X_2 - X_1}{1-X_2}\right)$
이다.

2. X_2는 고정이므로 X_1에 대해 미분하여 최소조건을 잡으면
$\frac{dV_T}{dX_1} = \frac{v_0}{k}\left(\frac{1}{(1-X_1)^2} - \frac{1}{1-X_2}\right) = 0$
이다.

3. 따라서 $1 - X_1 = \sqrt{1-X_2}$ 이고, 이를 각 반응기 식에 대입하면
$V_1 = \frac{v_0}{k}\frac{1-\sqrt{1-X_2}}{\sqrt{1-X_2}}, \quad V_2 = \frac{v_0}{k}\frac{1-\sqrt{1-X_2}}{\sqrt{1-X_2}}$
가 되어 $V_1 = V_2$ 이다.

선지 판단

1번: X. 작은 반응기를 먼저 두는 것이 최소조건이 아니다. 최소 총부피 조건은 앞반응기와 뒷반응기의 부피가 같아지는 경우이다. 틀린 표현은 '작은 반응기를 먼저'이고, 올바르게는 '두 반응기의 크기를 같게'이다.

2번: O. 최소 총부피 조건에서 미분 결과를 대입하면 $V_1 = V_2$ 가 된다. 따라서 두 반응기의 크기를 같게 하는 배치가 정답이다.

3번: X. 큰 반응기를 먼저 두어도 최소가 되지 않는다. 부피를 비대칭으로 나누면 한쪽 CSTR에서 출구농도 손해가 커져 총부피가 증가한다. 틀린 표현은 '큰 반응기를 먼저'이고, 올바르게는 '두 반응기의 크기를 같게'이다.

4번: X. 반응기 크기에 무관하지 않다. 같은 최종 전환율이라도 X_1 분할에 따라 각 CSTR의 출구농도가 달라져 총부피가 달라진다. 틀린 표현은 '무관하다'이고, 올바르게는 '크기 분할에 따라 총부피가 달라지며 최소일 때는 두 반응기 크기가 같다'이다.

오답 포인트

직렬 CSTR는 순서만 바꾸는 문제처럼 보이지만 실제 핵심은 중간 전환율 X_1을 어떻게 나누느냐이다. '앞에 크게 두면 유리하다' 또는 '작게 두면 유리하다'처럼 감으로 판단하면 틀리고, 설계식을 세워 총부피를 최소화해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 CSTR 최적 분할 문제는 각 반응기 설계식을 먼저 쓰고, 총부피를 중간 전환율 변수 하나로 정리한 뒤 최소조건을 잡아 판단한다. 1차 반응의 동일 조건 두 CSTR 직렬에서는 최소 총부피 조건이 결국 두 반응기 부피를 같게 만든다.

암기 포인트

동일 조건의 1차 반응 CSTR 2기 직렬에서 최종 전환율이 고정되면 최소 총부피 조건은 $V_1 = V_2$ 이다.

NoteBase

문 4. 다음 n차 화학 반응속도식으로부터 얻어지는 반감기($t_{1/2}$)는? (단, $n>1$이고, C_{A0}는 A의 초기농도이다)

$A \rightarrow R, \quad -r_A = kC_A^n$

① $\frac{2^{n-1}}{(n-1)kC_{A0}^{n-1}}$
② $\frac{2^{n-1}-1}{nkC_{A0}^{n-1}}$
③ $\frac{2^{n-1}-1}{(n-1)kC_{A0}^{n}}$
④ $\frac{2^{n-1}-1}{(n-1)kC_{A0}^{n-1}}$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 $n>1$인 n차 반응의 적분속도식을 반감기 조건 $C_A = C_{A0}/2$에 대입하여 $t_{1/2}$를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응속도식은 $-r_A = kC_A^n$이다.
반응차수 조건은 $n>1$이다.
구해야 할 값은 반감기 $t_{1/2}$이다.
반감기에서는 $C_A = C_{A0}/2$를 대입한다.

사용할 공식

$n \neq 1$인 경우 적분식은 $t = \frac{C_A^{1-n} - C_{A0}^{1-n}}{(n-1)k}$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 반응속도식이 $-r_A = kC_A^n$ 형태의 n차 반응식이기 때문이다.

계산 과정

1. 적분식에 반감기 조건 $C_A = C_{A0}/2$를 대입하면 $t_{1/2} = \frac{(C_{A0}/2)^{1-n} - C_{A0}^{1-n}}{(n-1)k}$이다.
2. $(C_{A0}/2)^{1-n} = C_{A0}^{1-n}2^{n-1}$이므로 $t_{1/2} = \frac{C_{A0}^{1-n}(2^{n-1}-1)}{(n-1)k}$이다.
3. $C_{A0}^{1-n} = 1/C_{A0}^{n-1}$이므로 $t_{1/2} = \frac{2^{n-1}-1}{(n-1)kC_{A0}^{n-1}}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 분자가 2^{n-1}만 있고 -1이 빠졌다. 적분식에는 초기항 C_{A0}^{1-n}을 빼는 과정이 들어가므로 반감기 분자는 $2^{n-1}-1$이 된다. 틀린 표현 → 올바르게는 $\frac{2^{n-1}-1}{(n-1)kC_{A0}^{n-1}}$이다.
② X: 분모가 nkC_{A0}^{n-1}로 되어 있는데 적분 결과의 계수는 n이 아니라 $n-1$이다. $\int C_A^{-n}dC_A$를 적분하면 $C_A^{1-n}/(1-n)$가 나오므로 분모는 $(n-1)k$가 된다. 틀린 표현 → 올바르게는 $\frac{2^{n-1}-1}{(n-1)kC_{A0}^{n-1}}$이다.
③ X: C_{A0}의 지수가 n으로 되어 있는데, 정리하면 $C_{A0}^{1-n}=1/C_{A0}^{n-1}$가 되므로 분모의 지수는 $n-1$이어야 한다. 틀린 표현 → 올바르게는 $\frac{2^{n-1}-1}{(n-1)kC_{A0}^{n-1}}$이다.
④ O: 반감기 조건을 적분식에 대입하면 $t_{1/2}=\frac{2^{n-1}-1}{(n-1)kC_{A0}^{n-1}}$가 되어 식이 정확히 일치한다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 세 가지이다. 첫째, 반감기 대입 뒤 분자에서 $2^{n-1}-1$의 -1을 빠뜨리기 쉽다. 둘째, 적분 결과의 계수를 n으로 착각하기 쉽다. 셋째, C_{A0}^{1-n}를 $1/C_{A0}^{n-1}$로 바꾸는 과정에서 지수를 n으로 잘못 옮기기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

계산형 반응속도식 문제는 먼저 $n\neq 1$ 적분식을 쓴 뒤, 반감기이면 $C_A=C_{A0}/2$를 넣고, 마지막에 $C_{A0}^{1-n}=1/C_{A0}^{n-1}$로 정리하여 분자에 $2^{n-1}-1$, 분모에 $(n-1)kC_{A0}^{n-1}$가 남는지 확인하면 된다.

암기 포인트

$n>1$인 n차 반응의 반감기는 일정하지 않으며, $t_{1/2}=\frac{2^{n-1}-1}{(n-1)kC_{A0}^{n-1}}$ 형태로 초기농도에 의존한다.

NoteBase

문 5. 1차 액상 반응 $A \rightarrow B$의 반응속도상수 k는 $0.1s^{-1}$이다. 농도가 $0.5\text{mol}\text{L}^{-1}$인 순수한 A를 유량 $1.0\text{L}\text{s}^{-1}$로 등온 혼합흐름반응기에 공급하여 생성물 B를 1초당 0.1mol의 속도로 생성시킬 때, 필요한 반응기의 부피 $[L]$는?

① 2.5

② 5

③ 25

④ 50

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 등온 액상 혼합흐름반응기에서 1차 반응 속도식과 CSTR 설계식을 이용해 필요한 반응기 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

- 주어진 값: $k = 0.1s^{-1}$, $C_{A0} = 0.5mol/L$, $v_0 = 1.0L/s$
- 구해야 할 값: 생성물 B를 $0.1mol/s$로 만들기 위한 반응기 부피
- 주의할 조건: 액상 등온 반응이므로 유량은 일정하다고 보고, 혼합흐름반응기이므로 반응기 내부 농도는 출구농도와 같다.

사용할 공식

$V = \frac{F_{A0}X}{-r_A}, \qquad -r_A = kC_A$

이 공식을 쓰는 이유는 혼합흐름반응기에서는 출구농도 C_A가 반응기 내부 농도와 같으므로, 그 농도로 반응속도를 계산해 설계식에 넣어야 하기 때문이다.

계산 과정

1. 입구에서의 A 몰유량은 $F_{A0} = C_{A0}v_0 = 0.5 \times 1.0 = 0.5mol/s$이다.
2. B 생성속도가 $0.1mol/s$이므로 화학양론상 A도 $0.1mol/s$만큼 소비된다. 따라서 A의 전환율은 $X = 0.1/0.5 = 0.2$이다.
3. 출구 A 농도는 $C_A = C_{A0}(1 - X) = 0.5(1 - 0.2) = 0.4mol/L$이다.
4. 출구 반응속도는 $-r_A = kC_A = 0.1 \times 0.4 = 0.04mol/(L \cdot s)$이다.
5. 따라서 반응기 부피는 $V = \frac{0.5 \times 0.2}{0.04} = 2.5L$이다.

NoteBase

선지 판단

① O: 계산 결과가 정확히 $2.5L$이므로 옳다.
② X: 틀린 표현은 제시값 $5L$이다. 올바르게는 $2.5L$이다. 이 값은 출구농도나 반응속도를 잘못 잡아 실제보다 부피를 두 배로 크게 본 경우에 해당한다.
③ X: 틀린 표현은 제시값 $25L$이다. 올바르게는 $2.5L$이다. 이 값은 생성속도와 전환율의 관계를 반영하지 않거나 설계식의 분자와 분모를 잘못 다룬 오답이다.
④ X: 틀린 표현은 제시값 $50L$이다. 올바르게는 $2.5L$이다. 이 값은 $1/k$ 같은 시간척도만 크게 적용하고 실제 전환율 0.2와 출구 반응속도를 반영하지 않은 오답이다.

오답 포인트

생성물 생성속도 $0.1mol/s$를 그대로 농도로 오해하거나, 혼합흐름반응기인데도 입구농도 C_{A0}로 반응속도를 계산하는 실수가 잦다. 이 문제의 핵심 함정은 CSTR에서는 출구농도로 속도를 계산해야 한다는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

액상 CSTR 계산형은 먼저 $F_{A0} = C_{A0}v_0$로 입구 몰유량을 구하고, 생성속도에서 전환율을 구한 뒤, 출구농도 C_A와 반응속도 $-r_A$를 계산하여 마지막에 $V = F_{A0}X/(-r_A)$를 적용하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

CSTR의 부피는 반응된 몰수율을 출구 반응속도로 나눈 값이며, 1차 액상반응에서는 $-r_A = kC_A$에 들어가는 C_A가 출구농도라는 점이 핵심이다.

NoteBase

문 6. $A \rightarrow R \rightarrow S$ **형태의 연속 단분자형 1차 반응이 순수한** A**로부터 정용 회분식 반응기에서 진행한다.** R**의 농도가 최대일 때,** A**의 전환율(**X_A**)은? (단,** $k_1 = 2\text{min}^{-1}$**이고** $k_2 = 4\text{min}^{-1}$**이다)**

① 0.2

② 0.3

③ 0.4

④ 0.5

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 정용 회분식 반응기에서 연속 단분자형 1차 반응 $A \rightarrow R \rightarrow S$의 중간생성물 R가 최대가 되는 시점의 A 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $k_1 = 2min^{-1}, k_2 = 4min^{-1}$
구해야 할 값: R의 농도가 최대일 때 A의 전환율 X_A
주의할 조건: 반응기는 정용 회분식이므로 시간에 따라 농도가 변하며, 최대 중간생성물 조건 $\frac{dC_R}{dt} = 0$를 사용한다.

사용할 공식

연속반응 $A \rightarrow R \rightarrow S$의 정용 회분식 반응기에서
$t_{R,\max} = \frac{\ln(k_2/k_1)}{k_2 - k_1}$
또는 최대 조건 $k_1 C_A = k_2 C_R$를 사용한다.
또한 1차 반응의 A 농도는 $C_A = C_{A0} e^{-k_1 t}$이므로 전환율은 $X_A = 1 - \frac{C_A}{C_{A0}} = 1 - e^{-k_1 t}$이다.
이 공식을 쓰는 이유: 문제는 회분식 반응기에서 중간생성물 R가 최대가 되는 시점의 A 소모 정도를 묻기 때문이다.

계산 과정

1. R 최대 시점은
$t_{R,\max} = \frac{\ln(k_2/k_1)}{k_2 - k_1} = \frac{\ln(4/2)}{4-2} = \frac{\ln 2}{2} min$
2. 이때 A의 농도는
$\frac{C_A}{C_{A0}} = e^{-k_1 t} = e^{-2 \cdot (\ln 2/2)} = e^{-\ln 2} = \frac{1}{2}$
3. 따라서 A의 전환율은
$X_A = 1 - \frac{C_A}{C_{A0}} = 1 - \frac{1}{2} = 0.5$

NoteBase

선지별 해설

① X
- 계산 결과 $X_A = 0.5$이므로 0.2는 아니다.
- 틀린 표현은 전환율 값이다. 올바르게는 0.5이다.
- 0.2는 최대 중간생성물 조건을 쓰지 않거나 시간식을 잘못 적용했을 때 나오는 오답이다.

② X
- 계산 결과 $X_A = 0.5$이므로 0.3은 아니다.
- 틀린 표현은 전환율 값이다. 올바르게는 0.5이다.
- 0.3은 $k_2 - k_1$ 또는 로그 계산을 부정확하게 처리했을 때 나오는 오답이다.

③ X
- 계산 결과 $X_A = 0.5$이므로 0.4는 아니다.
- 틀린 표현은 전환율 값이다. 올바르게는 0.5이다.
- 0.4는 $t_{R,\max}$를 구한 뒤 $X_A = 1 - e^{-k_1 t}$ 대신 다른 반응기 식을 섞어 썼을 때 나오는 오답이다.

④ O
- 계산 결과 $X_A = 0.5$이므로 옳다.
- 회분식 1차 반응에서 R 최대 시점의 A 잔존분율이 1/2가 되어 전환율은 0.5가 된다.

오답 포인트

문제의 핵심 함정은 반응기 종류이다. 연속반응이라는 말만 보고 CSTR이나 PFR 식을 적용하면 틀린다. 이 문항은 반응경로가 연속반응일 뿐, 반응기는 정용 회분식이므로 시간 기준 식과 R 최대 조건을 사용해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

연속반응에서 중간생성물 최대를 묻고 반응기가 회분식이면 먼저 $t_{R,\max}$ 또는 $\frac{dC_R}{dt} = 0$ 조건을 세운다. 그 다음 해당 시점의 A 잔존분율 $e^{-k_1 t}$을 구해 전환율 $1 - e^{-k_1 t}$로 바꾸면 된다.

암기 포인트

정용 회분식 $A \to R \to S$에서 R 최대 시점은 $t_{R,\max} = \frac{\ln(k_2/k_1)}{k_2 - k_1}$이고, 전환율은 항상 $X_A = 1 - e^{-k_1 t}$로 연결된다.

문 7. 다음과 같이 복합 반응을 중간체 B에 대해 유사 정상상태 근사법을 적용하여 근사화된 단일 반응으로 나타낼 때, 유효 속도계수(k_{eff})는? (단, C_I는 I의 농도이다)

복합 반응:

$A \underset{k_{b1}}{\overset{k_{f1}}{\rightleftarrows}} B,\ r_1 = k_{f1}C_A - k_{b1}C_B$

$B \xrightarrow{k_2} C,\ r_2 = k_2 C_B$

근사화된 단일 반응:

$A \rightarrow C,\ r = k_{eff}C_A$

① $\frac{k_{f1}k_2}{k_{b1} - k_2}$

② $\frac{k_{f1}k_2}{k_{b1} + k_2}$

③ $\frac{k_{b1}k_2}{k_{f1} - k_2}$

④ $\frac{k_{b1}k_2}{k_{f1} + k_2}$

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 중간체 B에 유사 정상상태 근사법을 적용하여 유효 속도계수 k_{eff}를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 $A \rightleftarrows B, B \rightarrow C$이다.

중간체 B에 유사 정상상태를 적용하면 B의 생성속도와 소모속도가 같아져 $r_1 = r_2$가 된다.

따라서 $k_{f1}C_A - k_{b1}C_B = k_2 C_B$이고, 이를 C_B에 대해 정리하면 $C_B = \frac{k_{f1}}{k_{b1} + k_2}C_A$이다.

사용할 공식

유사 정상상태 조건은 $\frac{dC_B}{dt} \approx 0$이며, 이 문제에서는 $r_1 - r_2 = 0$으로 쓴다.

이 공식을 쓰는 이유는 B가 반응 중간체이므로 축적되지 않고 생성되자마자 다시 소모된다고 보는 상황이기 때문이다.

계산 과정

1. 유사 정상상태에서 $r_1 = r_2$이므로 $k_{f1}C_A - k_{b1}C_B = k_2 C_B$이다.
2. 이를 정리하면 $k_{f1}C_A = (k_{b1} + k_2)C_B$이고, 따라서 $C_B = \frac{k_{f1}}{k_{b1} + k_2}C_A$이다.
3. 전체 반응속도는 $r = r_2 = k_2 C_B$이므로 $r = k_2 \cdot \frac{k_{f1}}{k_{b1} + k_2}C_A = \frac{k_{f1}k_2}{k_{b1} + k_2}C_A$이다.
4. 따라서 $r = k_{eff}C_A$와 비교하면 $k_{eff} = \frac{k_{f1}k_2}{k_{b1} + k_2}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 분모가 $k_{b1} - k_2$인 식이다. 유사 정상상태식 $k_{f1}C_A - k_{b1}C_B = k_2C_B$를 정리하면 $(k_{b1} + k_2)C_B$가 되어야 하므로 분모는 차가 아니라 합이다. 틀린 표현은 분모의 $-$ 부호이고, 올바르게는 $\frac{k_{f1}k_2}{k_{b1} + k_2}$이다.
② O: $C_B = \frac{k_{f1}}{k_{b1} + k_2}C_A$를 $r = k_2C_B$에 대입하면 $k_{eff} = \frac{k_{f1}k_2}{k_{b1} + k_2}$가 된다. 중간체 생성항은 k_{f1}, 소모항은 $k_{b1} + k_2$로 들어가므로 이 식이 맞다.
③ X: 분자에 k_{b1}가 들어가 있고 분모도 $k_{f1} - k_2$로 잘못되어 있다. B의 생성은 정반응 속도상수 k_{f1}가 결정하므로 분자는 $k_{b1}k_2$가 아니라 $k_{f1}k_2$이어야 한다. 또한 분모도 차가 아니라 합이므로 올바르게는 $\frac{k_{f1}k_2}{k_{b1} + k_2}$이다.
④ X: ③과 같이 분자에 k_{b1}를 넣은 것이 잘못이다. 역반응 상수 k_{b1}는 B의 소모 쪽에 들어가 분모를 구성할 뿐, 전체 유효 속도계수의 분자를 만들지 않는다. 틀린 표현은 분자의 k_{b1}이고, 올바르게는 $\frac{k_{f1}k_2}{k_{b1} + k_2}$이다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 유사 정상상태식을 세운 뒤 $k_{b1}C_B$와 k_2C_B를 서로 반대편으로 넘기면서 분모를 $k_{b1} - k_2$로 잘못 만드는 경우이다.
또 다른 함정은 중간체 B의 생성항을 보지 않고 분자에 k_{b1}를 넣는 것이다. 분자는 항상 $A \rightarrow B$의 생성항인 k_{f1}에서 출발한다.

다시 나오면 이렇게 판단

중간체가 있는 반응에서 유사 정상상태가 보이면 먼저 중간체의 축적식 $\frac{dC_{intermediate}}{dt} \approx 0$을 세운다.
그다음 중간체 농도를 원물질 농도로 정리하고, 마지막에 전체 속도식 $r = k_{eff}C_A$와 계수를 비교하면 된다.
분자는 중간체 생성항, 분모는 중간체를 없애는 모든 항의 합이라는 구조로 판단하면 부호 실수를 줄일 수 있다.

암기 포인트

유사 정상상태에서는 중간체에 대해 생성속도 = 소모속도이며, k_{eff}의 분자는 생성항, 분모는 소모항의 합이다.

NoteBase

문 8. 등온 정압하의 변용 회분식 반응기에서 균일계 기상반응 $A + 3B \rightarrow 2C$을 진행한다. 반응초기에 1몰의 A와 3몰의 B만을 반응기에 넣을 때, 전환율(X_A)로 나타낸 A의 농도(C_A)는? (단, 기체는 모두 이상기체이고 C_{A0}는 A의 초기농도이다)

① $C_{A0}\frac{1-X_A}{1-0.5X_A}$
② $C_{A0}\frac{1-X_A}{1+0.5X_A}$
③ $C_{A0}\frac{1-0.5X_A}{1-X_A}$
④ $C_{A0}\frac{1+0.5X_A}{1-X_A}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 등온 정압 기상반응에서 총 몰수 변화가 있을 때 X_A로 C_A를 표현하는 관계를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 반응식은 $A + 3B \rightarrow 2C$이고 초기 투입량은 A 1몰, B 3몰이다.
구해야 할 값: 전환율 X_A로 나타낸 A의 농도 C_A이다.
주의할 조건: 등온 정압 이상기체이므로 전체 농도 $C_T = P/RT$는 일정하지만, 총 몰수는 반응에 따라 변한다.

사용할 공식

사용식은 $C_A = y_A C_T$, $y_A = N_A/N_T$이다.

이 공식을 쓰는 이유: 등온 정압 이상기체에서는 $C_T = P/RT$가 일정하므로, C_A는 A의 몰분율 y_A가 어떻게 바뀌는지로 구할 수 있다.

계산 과정

1. 전환율이 X_A일 때 몰수는 $N_A = 1 - X_A$, $N_B = 3 - 3X_A$, $N_C = 2X_A$이다.
2. 전체 몰수는 $N_T = (1 - X_A) + (3 - 3X_A) + 2X_A = 4 - 2X_A = 4(1 - 0.5X_A)$이다.
3. 따라서 A의 몰분율은 $y_A = \frac{1-X_A}{4-2X_A}$이다.
4. 초기에는 $y_{A0} = 1/4$이므로 $C_{A0} = y_{A0}C_T = \frac{1}{4}C_T$, 즉 $C_T = 4C_{A0}$이다.
5. 그러면 $C_A = y_A C_T = \frac{1-X_A}{4-2X_A} \cdot 4C_{A0} = C_{A0}\frac{1-X_A}{1-0.5X_A}$이다.

NoteBase

선지 판단

1번: O. $C_A = C_{A0}\frac{1-X_A}{1-0.5X_A}$로 유도되므로 정답이다.
2번: X. 분모가 $1+0.5X_A$가 되려면 반응이 진행될수록 총 몰수가 증가해야 하는데, 이 반응은 $4 \rightarrow 2$로 총 몰수가 감소한다. 틀린 표현은 $1+0.5X_A$이고, 올바르게는 $1-0.5X_A$이다.
3번: X. 총 몰수 감소는 반영했지만 분자와 분모의 위치가 뒤바뀌었다. 틀린 표현은 $\frac{1-0.5X_A}{1-X_A}$이고, 올바르게는 $\frac{1-X_A}{1-0.5X_A}$이다.
4번: X. 총 몰수 변화 방향도 반대로 잡았고 분자와 분모도 뒤집혔다. 틀린 표현은 $\frac{1+0.5X_A}{1-X_A}$이고, 올바르게는 $\frac{1-X_A}{1-0.5X_A}$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 등온 정압이면 농도가 무조건 일정하다고 단순화하는 데 있다. 일정한 것은 전체 농도 C_T이고, 성분 농도 C_A는 총 몰수 변화 때문에 몰분율이 바뀌므로 함께 변한다.

다시 나오면 이렇게 판단

기상반응 농도식은 먼저 반응 전후의 총 몰수 증가·감소를 확인하고, 그다음 N_A, N_T, y_A, $C_A = y_A C_T$ 순서로 정리하면 된다.

암기 포인트

등온 정압 이상기체에서는 C_T는 일정하고, 성분 농도는 몰분율 변화로 결정된다.

NoteBase

문 9. 등온 플러그흐름 반응기에서 균일계 2차 비가역 액상 반응 $A \rightarrow B$를 진행하여 전환율 50%를 얻었다. 이 반응의 전환율을 75%로 높이기 위한 방법으로 옳은 것만을 모두 고르면? (단, 제시된 조건 이외의 다른 조건은 변화시키지 않는다)

ㄱ. 반응기 부피를 1/3로 줄인다.
ㄴ. 부피 유량을 3배로 늘린다.
ㄷ. 온도를 올려서 속도상수 값을 3배로 늘린다.
ㄹ. A의 초기농도를 3배로 늘린다.

① ㄱ, ㄴ
② ㄱ, ㄷ
③ ㄴ, ㄹ
④ ㄷ, ㄹ

정답 4번

출제 포인트

등온 플러그흐름반응기에서 균일계 2차 액상반응의 설계식 $X/(1-X) = kC_{A0}\tau$를 이용해 전환율을 높이려면 어떤 변수를 몇 배 조정해야 하는지를 묻는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건은 등온, 플러그흐름, 균일계 2차 비가역 액상반응, 초기 전환율 50%이다.
공간시간은 $\tau = V/v_0$이다.
초기 상태에서는 $X = 0.5$이므로 $X/(1-X) = 1$이고, 따라서 $kC_{A0}\tau = 1$이다.
목표 상태는 $X = 0.75$이므로 $X/(1-X) = 3$이고, 따라서 $kC_{A0}\tau = 3$이 되어야 한다.

사용할 공식

균일계 2차 액상반응의 플러그흐름반응기 설계식은 $V = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2}\int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2} = \frac{v_0}{kC_{A0}} \cdot \frac{X}{1-X}$이다.
정리하면 $\frac{X}{1-X} = kC_{A0}\tau \qquad (\tau = V/v_0)$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 반응차수, 반응기 형식, 액상조건이 모두 주어져 있어 전환율이 k, C_{A0}, τ의 곱으로 결정되기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 초기 전환율 50%를 대입하면 $0.5/(1-0.5)=1$이므로 초기에는 $kC_{A0}\tau=1$이다.
2. 목표 전환율 75%를 대입하면 $0.75/(1-0.75)=3$이므로 목표에는 $kC_{A0}\tau=3$이다.
3. 따라서 다른 조건이 그대로이면 $kC_{A0}\tau$를 현재의 3배로 만들어야 한다.
4. ㄱ은 V를 1/3로 줄여 τ를 1/3로 만들므로 오히려 전환율이 낮아진다.
5. ㄴ은 v_0를 3배로 늘려 τ를 1/3로 만들므로 역시 전환율이 낮아진다.
6. ㄷ은 k를 3배로 만들어 목표 조건을 만족한다.
7. ㄹ은 C_{A0}를 3배로 만들어 목표 조건을 만족한다.

선지별 해설

① X
①의 조합은 ㄱ, ㄴ이다. ㄱ은 반응기 부피를 1/3로 줄이면 τ도 1/3로 줄어들어 틀리다. ㄴ도 부피유량을 3배로 늘리면 τ가 1/3로 줄어 틀리다. 올바르게는 ㄷ, ㄹ 조합이어야 한다.

② X
②의 조합은 ㄱ, ㄷ이다. ㄷ은 속도상수 k를 3배로 늘려 맞지만, ㄱ은 V를 줄이는 방향이라 틀리다. 올바르게는 ㄱ 대신 ㄹ이 들어가야 하므로 ㄷ, ㄹ 조합이 맞다.

③ X
③의 조합은 ㄴ, ㄹ이다. ㄹ은 초기농도 C_{A0}를 3배로 늘려 맞지만, ㄴ은 유량 증가로 τ를 감소시켜 틀리다. 올바르게는 ㄴ 대신 ㄷ이 들어가야 하므로 ㄷ, ㄹ 조합이 맞다.

④ O
④의 조합은 ㄷ, ㄹ이다. ㄷ은 k를 3배로, ㄹ은 C_{A0}를 3배로 만들어 각각 $kC_{A0}\tau$를 3배로 키우므로 전환율 75% 달성 조건에 맞다.

오답 포인트

전환율을 높인다는 말만 보고 반응기 부피나 유량의 변화 방향을 직관으로 찍으면 틀리기 쉽다. 이 문제의 함정은 2차 반응 PFR에서 전환율이 단순히 체류시간 τ와 비례하는 것이 아니라 $kC_{A0}\tau$가 1에서 3으로 커져야 한다는 점이다. 특히 ㄱ의 '부피를 1/3로 줄인다'와 ㄴ의 '유량을 3배로 늘린다'는 둘 다 τ를 줄이는 같은 방향이라는 점을 놓치기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 설계 문제는 먼저 설계식을 X에 대한 무차원식으로 정리한 뒤 현재 조건과 목표 조건에서 필요한 배수 변화를 비교하는 방식으로 판단한다. 그 다음 k, C_{A0}, V, v_0 중 어떤 항이 곱을 키우고 줄이는지를 확인하면 보기의 진위를 바로 가를 수 있다.

NoteBase

암기 포인트

2차 액상 PFR은 $X/(1-X) = kC_{A0}\tau$이며, 전환율 상승에는 k, C_{A0}, τ 증가가 유리하고 v_0 증가는 불리하다.

NoteBase

문 10. 다음과 같이 일산화이질소 N_2O 분해반응의 속도법칙이 주어질 때, 이에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

$2N_2O \rightarrow 2N_2 + O_2,\ -r_{N_2O} = \frac{k_{N_2O}C_{N_2O}}{1 + k'C_{O_2}}$

① 산소의 농도가 매우 낮아 $1 \gg k'C_{O_2}$이면, 이 반응의 일산화이질소에 대한 겉보기 반응차수는 -1차이다.

② 산소의 농도가 충분히 커 $1 \ll k'C_{O_2}$이면, 이 반응의 산소에 대한 겉보기 반응차수는 -1차이다.

③ 이러한 형태의 속도식은 고체 촉매에 의해 촉진되는 액체반응 및 기체반응에서 흔하게 나타난다.

④ 반응성 중간체를 수반하는 균일반응에서도 이러한 형태의 속도식이 얻어진다.

정답 1번

출제 포인트

산소 생성물이 분모에 들어간 저해형 속도식에서 $k'C_{O_2}$의 크기에 따라 일산화이질소와 산소의 겉보기 반응차수가 어떻게 바뀌는지를 묻는 문제이다.

핵심 개념

겉보기 반응차수는 다른 성분 농도를 고정했을 때 속도식이 특정 성분 농도의 몇 제곱에 비례하는지로 정한다.
주어진 속도식은 $-r_{N_2O} = \frac{k_{N_2O}C_{N_2O}}{1 + k'C_{O_2}}$이다.
$1 \gg k'C_{O_2}$이면 분모가 거의 1이므로 $-r_{N_2O} \approx k_{N_2O}C_{N_2O}$가 되어 N_2O에 대해 1차, O_2에 대해 0차이다.
$1 \ll k'C_{O_2}$이면 $-r_{N_2O} \approx \frac{k_{N_2O}}{k'}\frac{C_{N_2O}}{C_{O_2}}$가 되어 N_2O에 대해 1차, O_2에 대해 -1차이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
산소 농도가 매우 낮으면 분모 $1 + k'C_{O_2}$는 거의 1이므로 속도는 C_{N_2O}에 비례한다.
틀린 표현은 '-1차'이다. 올바르게는 일산화이질소에 대한 겉보기 반응차수는 1차이다.

② O
산소 농도가 충분히 크면 분모가 $k'C_{O_2}$에 지배되어 속도는 $\frac{C_{N_2O}}{C_{O_2}}$에 비례한다.
따라서 산소에 대한 겉보기 반응차수는 -1차이다.

③ O
분모에 흡착항이나 저해항이 들어가는 형태의 속도식은 고체 촉매 표면반응의 Langmuir-Hinshelwood형 해석에서 흔히 나타난다.
액체반응과 기체반응 모두에서 관찰될 수 있다는 설명은 타당하다.

④ O
반응성 중간체를 포함하는 균일반응에서도 정상상태 가정 등을 적용하면 중간체 농도가 분모에 들어간 유리식 형태의 속도식이 유도될 수 있다.
따라서 이러한 형태가 촉매반응에만 한정된다고 볼 수 없다.

오답 포인트

①은 생성물 산소가 분모에 있으므로 무조건 음의 차수라고 성급히 연결하면 틀리기 쉽다. 음의 차수는 $1 \ll k'C_{O_2}$처럼 산소가 충분히 커서 분모에 실제로 지배적으로 작용할 때 나타나며, $1 \gg k'C_{O_2}$에서는 분모가 1로 수렴하므로 N_2O에 대한 차수는 그대로 1차이다.

다시 나오면 이렇게 판단

분모에 성분 농도가 들어간 속도식은 먼저 문제에서 준 극한조건으로 분모를 단순화한 뒤 속도를 각 농도의 거듭제곱 꼴로 다시 쓴다. 그다음 분자와 분모에 남는 해당 성분의 지수를 읽으면 겉보기 반응차수를 바로 판단할 수 있다.

암기 포인트

저농도에서는 분모를 1로 보고, 고농도에서는 분모의 지배항만 남겨 겉보기 차수를 읽는다.

NoteBase

문 11. 직렬로 연결된 동일한 크기와 온도의 혼합흐름 반응기에서 1차 액상 반응이 진행될 때 전환율은 담켈러(Damköhler) 수로 표시할 수 있다. 담켈러 수가 1일 때, 전환율이 80 %를 넘기 위해 필요한 반응기의 최소 개수는?

① 1개

② 2개

③ 3개

④ 4개

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 직렬로 연결된 동일한 혼합흐름반응기에서 1차 반응의 전체 전환율을 담켈러 수로 계산하는 문제이다.

조건 정리

- 반응기 형태: 동일한 크기의 혼합흐름반응기(CSTR) 직렬 연결
- 반응 차수: 1차 액상 반응
- 각 반응기의 담켈러 수: 1
- 구해야 할 값: 전체 전환율이 80%를 넘기기 위한 최소 반응기 개수

사용할 공식

1차 반응 CSTR 1기에서 출구 농도비는 $\frac{C_{A,out}}{C_{A,in}} = \frac{1}{1+Da}$이다.
동일한 CSTR n기를 직렬 연결하면 전체 농도비는 $\left(\frac{1}{1+Da}\right)^n$이므로 전체 전환율은 $X = 1 - \left(\frac{1}{1+Da}\right)^n$이다.
이 식을 쓰는 이유는 각 반응기가 완전혼합 CSTR이고, 1차 반응에서는 각 반응기마다 같은 농도비 감소율이 연속적으로 곱해지기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

각 반응기에서 $Da = 1$이므로
$\frac{C_{A,out}}{C_{A,in}} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}$
따라서 n기 직렬 연결 시
$X = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n$
전환율이 80%를 넘으려면
$1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n > 0.8$
$\left(\frac{1}{2}\right)^n < 0.2$
값을 대입하면
- $n = 1$: $X = 1 - \frac{1}{2} = 0.5 = 50\%$
- $n = 2$: $X = 1 - \frac{1}{4} = 0.75 = 75\%$
- $n = 3$: $X = 1 - \frac{1}{8} = 0.875 = 87.5\%$

따라서 처음으로 80%를 넘는 최소 개수는 3기이다.

선지별 해설

① X
1개일 때 전환율은 50%이므로 80%를 넘지 못한다. 틀린 표현은 최소 개수를 1개로 본 점이며, 올바르게는 1개로는 부족하다.

② X
2개일 때 전환율은 75%이므로 여전히 80%를 넘지 못한다. 틀린 표현은 2개면 조건을 만족한다고 본 점이며, 올바르게는 2개로도 부족하다.

③ O
3개일 때 전환율은 87.5%이므로 80%를 넘는다. 1개와 2개는 부족하고 3개에서 처음 조건을 만족하므로 최소 개수는 3개가 맞다.

④ X
4개일 때 전환율은 93.75%로 80%를 넘기는 하지만 최소 개수를 묻는 문제의 정답은 아니다. 틀린 표현은 최소를 4개로 본 점이며, 올바르게는 4개도 가능하지만 최소는 3개이다.

오답 포인트

전환율이 80%를 넘는지만 보고 4개도 가능하다고 판단하면 최소 개수 조건을 놓치게 된다. 또 PFR 식처럼 전환율을 더하거나, CSTR 1기 전환율 50%를 그대로 직렬 개수에 단순 배수로 적용하면 오답이 된다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 CSTR 계산형 문제는 먼저 1기당 농도비 $\frac{1}{1+Da}$를 구한 뒤, 직렬 개수만큼 거듭제곱하여 전체 전환율 $X = 1 - \left(\frac{1}{1+Da}\right)^n$로 판단한다. 마지막에는 조건 만족 여부뿐 아니라 최소 개수인지까지 함께 확인한다.

암기 포인트

1차 반응 직렬 CSTR은 농도비가 곱해지고, $Da = 1$이면 기수마다 절반씩 남는다.

NoteBase

문 12. 액상 이성질화 평형반응 $A \rightleftharpoons B$의 250 K에서 반응평형상수가 3.0이고, 반응열ΔH_{Rx}은 $-8{,}314\,\mathrm{J\,mol^{-1}}$이다. 400 K에서 이 반응의 반응평형상수를 K_{400}이라 할 때, $\ln K_{400}$ 값은? (단, A와 B의 열용량은 동일하고, 기체상수 $R = 8.314\,\mathrm{J\,mol^{-1}K^{-1}}$, $\ln 3 = 1.1$이다)

① -1.4

② -0.4

③ 2.6

④ 3.6

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 반트호프 식을 이용해 온도 변화에 따른 평형상수의 로그값 $\ln K$ 변화를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $K_{250} = 3.0$, $\ln 3 = 1.1$, $\Delta H_{Rx} = -8314 J mol^{-1}$, $R = 8.314 J mol^{-1} K^{-1}$
구해야 할 값: $\ln K_{400}$
주의할 조건: 발열반응이므로 온도가 올라가면 평형상수가 감소하며, 먼저 K가 아니라 $\ln K$를 구해야 한다.

사용할 공식

$\ln\left(\frac{K_2}{K_1}\right) = -\frac{\Delta H_{Rx}}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$
이 공식을 쓰는 이유: 반응열이 일정하고 두 온도에서의 평형상수 관계를 바로 연결하는 식이기 때문이다.

계산 과정

1. $-\Delta H_{Rx}/R = -(-8314)/8.314 = 1000$이다.
2. $(1/T_2 - 1/T_1) = (1/400 - 1/250) = 0.0025 - 0.0040 = -0.0015$이다.
3. 따라서 $\ln(K_{400}/K_{250}) = 1000 \times (-0.0015) = -1.5$이다.
4. $\ln K_{400} = \ln K_{250} - 1.5 = 1.1 - 1.5 = -0.4$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 계산 결과는 -0.4이므로 -1.4는 맞지 않는다. 틀린 표현은 $\ln K_{400} = -1.4$이고, 올바르게는 $\ln K_{400} = -0.4$이다.
② O: 반트호프 식에 값을 대입하면 $\ln K_{400} = -0.4$가 되어 정답과 일치한다.
③ X: 2.6은 온도항의 부호를 반대로 두어 $1.1 + 1.5$로 계산할 때 나오는 값이다. 틀린 표현은 $\ln K_{400} = 2.6$이고, 올바르게는 발열반응에서 온도 상승 시 K가 감소하므로 $\ln K_{400} = -0.4$이다.
④ X: 3.6은 $\ln K_{400}$와 K_{400}를 혼동하거나 부호를 잘못 처리한 값으로 볼 수 있다. 틀린 표현은 $\ln K_{400} = 3.6$이고, 올바르게는 $\ln K_{400} = -0.4$이다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 발열반응의 $\Delta H < 0$ 부호와 $(1/T_2 - 1/T_1)$의 부호를 동시에 놓치는 점이다. 또 K를 묻는지 $\ln K$를 묻는지 구분하지 않으면 ④ 같은 값으로 흔들릴 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

평형상수 온도변화 문제는 먼저 발열·흡열을 확인하고, 다음에 반트호프 식에 $(1/T_2 - 1/T_1)$를 그대로 넣어 부호를 검산한 뒤, 마지막에 K인지 $\ln K$인지 물은 대상을 확인한다.

암기 포인트

발열반응은 온도 상승 시 평형상수가 감소하므로 $\ln K$도 작아진다.

NoteBase

문 13. Thiele 계수는 촉매반응에서 속도결정단계를 판단할 수 있는 중요한 파라미터이다. Thiele 계수가 1보다 매우 작을 때, 속도결정단계는?

① 표면반응

② 외부확산

③ 내부확산

④ 반응물의 흡착

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 Thiele 계수의 크기로 촉매 입자 내부에서 반응 지배인지 내부확산 지배인지 구분하는 개념을 묻는 문제이다.

핵심 개념

Thiele 계수 ϕ는 촉매 입자 내부에서 반응속도와 확산속도의 상대적 크기를 나타내는 무차원수이다.
$\phi \ll 1$이면 확산이 반응보다 충분히 빨라 입자 내부 농도구배가 거의 없으므로 표면반응, 즉 본질 반응속도가 속도결정단계가 된다.
$\phi \gg 1$이면 반응이 매우 빨라 내부로 물질이 따라 들어가지 못하므로 내부확산 저항의 영향이 커진다.
외부확산은 입자 바깥 경계막에서의 물질전달이고, 반응물의 흡착은 촉매 반응 메커니즘의 한 단계일 수 있으나 Thiele 계수로 직접 판별하는 대상은 아니다.

NoteBase

선지별 해설

① O
Thiele 계수가 1보다 매우 작으면 내부확산 저항이 거의 없고 유효계수도 1에 가까워진다. 따라서 전체 속도는 촉매 표면에서의 본질 반응속도에 의해 결정된다.

② X
틀린 부분은 "외부확산"이다. Thiele 계수는 촉매 입자 내부 확산과 반응의 상대속도를 나타내는 값이므로 외부 경계막 확산 지배 여부를 직접 판단하는 지표가 아니다. 외부확산이 아니라 올바르게는 ϕ가 매우 작을 때 반응 지배로 본다.

③ X
틀린 부분은 "내부확산"이다. 내부확산 지배는 ϕ가 큰 경우에 해당한다. ϕ가 1보다 매우 작을 때는 내부 농도구배가 거의 없어 내부확산이 속도결정단계가 아니다.

④ X
틀린 부분은 "반응물의 흡착"이다. 흡착은 촉매 반응 메커니즘 중 하나의 단계일 수 있지만, Thiele 계수는 흡착 지배 여부를 구분하는 계수가 아니다. 이 경우 올바르게는 표면반응 지배로 해석한다.

오답 포인트

③의 "내부확산"과 ①의 "표면반응"을 뒤집어 외우기 쉽다는 점이 대표 함정이다. Thiele 계수는 확산 저항의 크기를 보는 값이므로 값이 작을수록 확산은 문제가 없고 반응이 느리다는 뜻이라는 연결이 필요하다. ② 외부확산도 확산이라는 단어 때문에 헷갈리기 쉽지만, Thiele 계수는 입자 내부 현상을 다루는 지표이다.

다시 나오면 이렇게 판단

Thiele 계수의 크기를 먼저 본다. $\phi \ll 1$이면 확산은 빠르고 반응은 느려 반응 지배이다. $\phi \gg 1$이면 반응은 빠르고 내부로의 이동이 따라가지 못해 내부확산 지배로 판단한다.

암기 포인트

Thiele 소값은 반응 지배, Thiele 대값은 내부확산 지배이다.

NoteBase

문 14. 구형 고체 연료의 연소 과정은 수축핵 모델(shrinking core model)로 설명할 수 있다. 이 모델의 반응 5단계를 순서대로 바르게 나열한 것은? (단, 고체 연료의 크기는 변하지 않는다)

ㄱ. 기체 반응물이 입자를 둘러싸고 있는 기체경막을 통하여 고체 표면으로 확산하는 단계
ㄴ. 미반응 핵 표면에서 기체 반응물과 고체가 반응하는 단계
ㄷ. 기체 생성물이 기체경막을 통하여 유체 본체로 확산하는 단계
ㄹ. 기체 반응물이 회층(ash layer)을 통과하여 미반응 핵 표면으로 침투 및 확산하는 단계
ㅁ. 기체 생성물이 회층(ash layer)을 통과하여 고체 바깥 표면으로 확산하는 단계

① ㄱ → ㄹ → ㄴ → ㄷ → ㅁ

② ㄱ → ㄹ → ㄴ → ㅁ → ㄷ

③ ㄹ → ㄱ → ㄴ → ㄷ → ㅁ

④ ㄹ → ㄱ → ㄴ → ㅁ → ㄷ

정답 2번

출제 포인트

수축핵 모형에서 기체 반응물의 유입, 미반응핵 표면 반응, 기체 생성물의 유출이 어떤 순서로 이어지는지를 묻는 문제이다.

올바른 순서

1. ㄱ - 기체 반응물이 입자 바깥의 기체경막을 통과해 고체 외표면에 도달하는 단계이다.
2. ㄹ - 반응물이 회층을 통과해 미반응핵 표면까지 확산하는 단계이다.
3. ㄴ - 미반응핵 표면에서 기체 반응물과 고체가 실제로 반응하는 단계이다.
4. ㅁ - 생성된 기체가 회층을 통과해 고체 바깥 표면으로 확산하는 단계이다.
5. ㄷ - 생성된 기체가 마지막으로 기체경막을 지나 유체 본체로 빠져나가는 단계이다.

왜 이 순서인가: 반응은 반응물이 미반응핵 표면에 도달한 뒤에만 일어나고, 생성물의 확산은 반응이 끝난 뒤에만 시작될 수 있기 때문이다.

NoteBase

선지별 해설

1번 X: ㄱ→ㄹ→ㄴ까지는 맞지만, 생성물은 먼저 회층을 지나 외표면으로 나온 뒤 기체경막을 통과해야 한다. 틀린 부분은 ㄷ와 ㅁ의 순서이다. 올바르게는 ㄱ→ㄹ→ㄴ→ㅁ→ㄷ이다.
2번 O: 반응물의 외부 기체경막 확산, 회층 내 확산, 미반응핵 표면 반응, 생성물의 회층 내 확산, 생성물의 외부 기체경막 확산 순서이므로 옳다.
3번 X: 회층 확산은 반응물이 먼저 입자 외표면에 도달한 다음에 가능하다. 틀린 부분은 ㄹ이 ㄱ보다 앞선 점이다. 올바르게는 ㄱ→ㄹ→ㄴ→ㅁ→ㄷ이다.
4번 X: 3번처럼 초반에 ㄹ과 ㄱ의 선후가 바뀌어 있고, 후반에도 생성물은 ㅁ 다음에 ㄷ이 와야 한다. 올바르게는 ㄱ→ㄹ→ㄴ→ㅁ→ㄷ이다.

오답 포인트

회층과 기체경막을 모두 확산층으로 보아 반응물 유입 단계와 생성물 유출 단계의 안팎 순서를 뒤집기 쉽다. 특히 생성물은 회층 내부에서 먼저 이동한 뒤 외부 기체경막을 지나간다는 점을 놓치면 1번처럼 판단하기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

수축핵 모형의 순서 문제는 반응물의 이동 경로를 바깥에서 안쪽으로 먼저 따라가고, 표면 반응 뒤에는 생성물의 이동 경로를 안쪽에서 바깥쪽으로 역순으로 따라가면 된다.

암기 포인트

반응물은 바깥→안쪽, 생성물은 안쪽→바깥쪽으로 이동하므로 경막-회층-반응-회층-경막 순서이다.

NoteBase

문 15. Arrhenius 법칙에 대한 설명으로 옳은 것은?

① $\ln k$대 $1/T$의 플롯은 양의 기울기를 가진 직선이다.

② 높은 활성화 에너지를 갖는 반응은 낮은 활성화 에너지를 갖는 반응보다 온도에 덜 민감하다.

③ 모든 반응은 고온일 때가 저온일 때보다 온도에 더욱 민감하다.

④ 빈도인자의 단위는 반응차수에 따라 달라진다.

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 Arrhenius 식에서 활성화에너지 E_a, 온도 T, 빈도인자 A가 반응속도상수 k에 어떻게 반영되는지를 묻는 문제이다.

핵심 개념

Arrhenius 식은 $k = A\exp(-E_a/RT)$로 나타내며, 온도가 올라가면 보통 k가 커진다.
활성화에너지는 온도 변화에 대한 민감도를 좌우하는 장벽 크기이며, E_a가 클수록 같은 온도 변화에 대한 k의 변화가 더 커진다.
빈도인자 A는 분자 충돌의 빈도와 유효성을 반영하는 상수이고, 단위는 k와 같으므로 반응차수에 따라 달라진다.

NoteBase

선지별 해설

① X
$\ln k = \ln A - (E_a/R)(1/T)$이므로 $\ln k$ 대 $1/T$ 플롯의 기울기는 $-E_a/R$이다.
틀린 부분은 "양의 기울기"이다.
올바르게는 "음의 기울기를 가진 직선"이다.

② X
활성화에너지가 큰 반응일수록 온도 변화에 따라 지수항이 더 크게 변하므로 온도 민감도가 더 크다.
틀린 부분은 "온도에 덜 민감하다"이다.
올바르게는 "낮은 활성화에너지를 갖는 반응보다 온도에 더 민감하다"이다.

③ X
같은 반응에서 상대 민감도는 대체로 $d(\ln k)/dT = E_a/(RT^2)$에 비례하므로 T가 낮을수록 더 크다.
틀린 부분은 "고온일 때가 저온일 때보다 온도에 더욱 민감하다"이다.
올바르게는 "저온일 때가 고온일 때보다 온도에 더 민감하다"이다.

④ O
빈도인자 A의 단위는 반응속도상수 k의 단위와 같으므로 반응차수에 따라 달라진다.
예를 들어 1차 반응이면 s^{-1}, 2차 반응이면 $L mol^{-1} s^{-1}$와 같은 형태가 된다.

오답 포인트

①은 Arrhenius 식을 로그화했을 때 부호가 바뀌는 지점을 놓리기 쉽다. ②와 ③은 "온도가 높을수록 반응이 빨라진다"는 사실과 "온도 민감도가 더 크다"는 사실을 혼동하면 틀리기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

Arrhenius 문제는 먼저 $k = A\exp(-E_a/RT)$를 $\ln k = \ln A - (E_a/R)(1/T)$로 바꿔 기울기 부호를 확인한다. 그다음 E_a가 크면 온도 민감도가 커지고, 같은 반응은 저온 구간에서 더 민감하다고 판단하면 된다. 마지막으로 A의 단위는 k와 같으므로 반응차수에 따라 달라진다고 정리하면 된다.

암기 포인트

Arrhenius 식은 $\ln k$ 대 $1/T$ 기울기가 음수이고, E_a가 클수록 더 민감하며, A의 단위는 차수 따라 변한다.

NoteBase

문 16. 비등온반응기를 설계할 때 온도와 전환율의 관계식을 얻기 위해 필요한 것이 아닌 것은?

① 생성엔탈피

② 열용량

③ 열확산계수

④ 에너지수지식

정답 3번

출제 포인트

비등온반응기에서 온도와 전환율의 관계는 에너지수지와 반응열 계산 자료로 구하므로, 그때 필요한 열역학 자료와 불필요한 전달물성을 구별하는 문제이다.

핵심 개념

생성엔탈피는 반응엔탈피를 계산하는 기준 데이터이다.
열용량은 반응 혼합물의 온도 변화에 따른 현열 변화를 계산하는 자료이다.
에너지수지식은 전환율 변화가 온도 변화와 어떻게 연결되는지 직접 나타내는 기본 식이다.
열확산계수는 물질 내부에서 열이 퍼지는 속도를 나타내는 전달물성이며, 일반적인 비등온반응기 설계의 온도-전환율 관계식을 세우는 필수 입력값은 아니다.

NoteBase

선지별 해설

① X
생성엔탈피는 성분별 반응열을 계산하는 데 필요하다. 반응열이 있어야 전환율 변화에 따라 온도가 어떻게 달라지는지 에너지수지에 반영할 수 있다. 틀린 표현은 '필요한 것이 아니다'이며, 올바르게는 '생성엔탈피는 필요하다'이다.

② X
열용량은 반응기 내 혼합물의 온도 상승 또는 하강에 필요한 에너지량을 계산하는 데 필요하다. 비등온 관계식에서 현열항을 세울 수 있어야 하므로 빠질 수 없다. 틀린 표현은 '필요한 것이 아니다'이며, 올바르게는 '열용량은 필요하다'이다.

③ O
열확산계수는 열전도에 따른 온도 퍼짐 특성을 나타내는 물성이다. 그러나 비등온반응기의 온도-전환율 관계식은 보통 전체 에너지수지, 반응열, 열용량으로 정리하므로 열확산계수는 직접 요구되지 않는다.

④ X
에너지수지식은 비등온반응기에서 온도와 전환율을 연결하는 출발식이다. 이 식이 없으면 전환율 변화에 따른 온도 변화를 유도할 수 없다. 틀린 표현은 '필요한 것이 아니다'이며, 올바르게는 '에너지수지식은 반드시 필요하다'이다.

오답 포인트

열확산계수와 열전달 관련 개념을 넓게 묶어 모두 필요하다고 생각하면 ③을 고르지 못한다. 이 문항은 열이 실제로 어떻게 퍼지는 미시적 물성이 아니라, 온도-전환율 관계식을 세우는 거시적 에너지수지 자료를 묻는 문제이다.

다시 나오면 이렇게 판단

비등온반응기 설계 문제에서 온도-전환율 관계를 묻는다면 먼저 에너지수지식, 반응열 자료, 열용량이 들어가는지 확인하면 된다. 그다음 전도·확산 같은 전달물성이 식의 기본 형태를 만드는 데 직접 쓰이는지 구분하면 정답을 빠르게 고를 수 있다.

암기 포인트

비등온 온도-전환율 관계는 에너지수지식 + 반응열 + 열용량으로 잡고, 열확산계수는 별개 물성으로 본다.

NoteBase

문 17. 등온 회분식 반응기에서 반응물 A와 촉매 C에 의하여 정밀도 균일계 촉매반응이 다음의 두 경로로 일어나고 있다. 이에 대한 속도식은? (단, C_I는 I의 농도이고, 두 반응은 모두 기초반응법칙을 따른다)

$A \rightarrow R,\ A + C \rightarrow R + C$

① $-\frac{dC_A}{dt} = k_2 C_A C_C$
② $-\frac{dC_C}{dt} = k_2 C_A C_C$
③ $-\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A + k_2 C_A C_C$
④ $-\frac{dC_C}{dt} = k_1 C_A + k_2 C_A C_C$

정답 3번

출제 포인트

기초반응 두 경로가 병렬로 일어날 때 반응물 A의 총 소모속도는 각 경로 속도의 합으로 쓰고, 촉매 C는 참여해도 순소모되지 않는다는 점을 묻는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응경로는 $A \rightarrow R$ 와 $A + C \rightarrow R + C$ 이다.
두 반응 모두 기초반응이므로 각 경로의 속도식은 반응물 농도의 곱으로 바로 쓴다.
첫째 경로 속도는 $r_1 = k_1 C_A$ 이고, 둘째 경로 속도는 $r_2 = k_2 C_A C_C$ 이다.

사용할 공식

반응물 A의 총 소모속도는 A를 소비하는 모든 경로의 속도를 더한 값이다.
$-\frac{dC_A}{dt} = r_1 + r_2 = k_1 C_A + k_2 C_A C_C$
촉매 C는 둘째 경로의 반응물 쪽과 생성물 쪽에 함께 있으므로 순변화가 0이다.
$\frac{dC_C}{dt} = 0$

계산 과정

1. 첫째 경로 $A \rightarrow R$ 에서 A의 소모속도는 $k_1 C_A$ 이다.
2. 둘째 경로 $A + C \rightarrow R + C$ 에서 A의 소모속도는 $k_2 C_A C_C$ 이다.
3. A는 두 경로에서 모두 소모되므로 총 소모속도는 $k_1 C_A + k_2 C_A C_C$ 이다.
4. C는 둘째 경로에서 소비되었다가 같은 양만큼 다시 생성되므로 순소모속도는 0이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: $k_2C_AC_C$ 만 적어 둘째 경로만 반영한 식이다. 첫째 경로 $A \rightarrow R$ 의 소모항 k_1C_A 가 빠졌다. 올바르게는 $-\frac{dC_A}{dt} = k_1C_A + k_2C_AC_C$ 이다.
② X: C는 촉매이므로 둘째 경로에서 반응물로 들어가도 생성물로 다시 나온다. 따라서 순감소속도는 $k_2C_AC_C$ 가 아니라 0이다. 올바르게는 $\frac{dC_C}{dt} = 0$ 이다.
③ O: A는 첫째 경로와 둘째 경로에서 모두 소모되므로 총 소모속도는 각 경로 속도의 합인 $-\frac{dC_A}{dt} = k_1C_A + k_2C_AC_C$ 이다.
④ X: $k_1C_A + k_2C_AC_C$ 는 A의 총 소모속도식이지 촉매 C의 소모속도식이 아니다. C는 첫째 경로에 참여하지도 않고 둘째 경로에서도 순소모되지 않는다. 올바르게는 $\frac{dC_C}{dt} = 0$ 이다.

오답 포인트

반응속도식과 종수지식을 섞어 쓰면 ①처럼 한 경로만 적거나 ②, ④처럼 촉매가 실제로 소모된다고 착각하기 쉽다. 이 문항의 함정은 촉매가 반응에 참여한다는 사실과 촉매가 순소모된다는 사실을 혼동하게 만드는 데 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

기초반응 병렬계는 먼저 각 경로의 속도식을 반응물 기준으로 따로 쓴 뒤, 묻는 종이 어느 경로에서 소비되거나 생성되는지를 합산해서 전체 속도식을 만든다. 어떤 종이 반응식 양변에 함께 있으면 그 종의 순변화는 0으로 판단한다.

암기 포인트

기초반응은 반응물 농도의 곱으로 쓰고, 전체 종수지는 경로별 속도를 합산하며, 촉매는 참여해도 순소모는 0이다.

NoteBase

문 18. 플러그흐름 반응기에서 반응물 A에 대해 다음 비가역 1차 액상반응이 경쟁적으로 진행된다. 두 반응의 속도상수 값이 동일할 때, 생성물 C의 농도(C_C)를 공간시간(τ)의 함수로 옳게 나타낸 것은? (단, C_{A0}는 A의 초기농도이며, 생성물 B와 C의 초기농도는 0이다)

$A \rightarrow B,\ r_1 = k_1 C_A$
$A \rightarrow C,\ r_2 = k_2 C_A$

① $C_{A0} e^{-2k_1\tau}$
② $C_{A0}(1 - e^{-2k_1\tau})$
③ $\frac{C_{A0}}{2}(1 - e^{-2k_1\tau})$
④ $\frac{C_{A0}}{2}(1 - e^{-k_1\tau})$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 플러그흐름반응기에서 경쟁 병렬 1차 반응 $A \rightarrow B, A \rightarrow C$가 동시에 일어날 때 C의 생성 농도 $C_C(\tau)$를 구하는 문제이다.

조건 정리

- 주어진 반응: $A \rightarrow B, r_1 = k_1 C_A, A \rightarrow C, r_2 = k_2 C_A$이다.
- 조건: $k_1 = k_2$ 이므로 $k_1 + k_2 = 2k_1$ 이다.
- 초기조건: $C_A(0) = C_{A0}, C_B(0) = 0, C_C(0) = 0$ 이다.
- 구해야 할 값: 공간시간 τ에서의 C 농도 $C_C(\tau)$ 이다.

사용할 공식

반응물 A는 두 경로로 동시에 소모되므로
$\frac{dC_A}{d\tau} = -(r_1 + r_2) = -(k_1 + k_2)C_A = -2k_1 C_A$
이고, 생성물 C는 $A \rightarrow C$ 경로로만 생성되므로
$\frac{dC_C}{d\tau} = r_2 = k_2 C_A = k_1 C_A$
이다.
이 공식을 쓰는 이유는 플러그흐름반응기에서 액상 밀도가 일정하면 공간시간 기준 물질수지가 배치반응기 미분식과 같은 형태가 되기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. A의 농도를 먼저 구하면
$C_A = C_{A0}e^{-2k_1\tau}$
이다.
2. 이를 C 생성식에 대입하면
$\frac{dC_C}{d\tau} = k_1 C_{A0}e^{-2k_1\tau}$
이다.
3. $C_C(0) = 0$을 이용해 적분하면
$C_C = \int_0^\tau k_1 C_{A0}e^{-2k_1 t}dt = \frac{C_{A0}}{2}(1 - e^{-2k_1\tau})$
이다.

선지별 해설

① X: $C_{A0}e^{-2k_1\tau}$는 생성물 C의 농도가 아니라 두 반응이 동시에 진행된 뒤 남아 있는 반응물 A의 농도 $C_A(\tau)$이다. 옳게는 $C_C = \frac{C_{A0}}{2}(1 - e^{-2k_1\tau})$ 이다.
② X: $C_{A0}(1 - e^{-2k_1\tau})$는 총괄적으로 소모된 A의 양이다. 소모된 A가 모두 C로 가는 것이 아니라 절반은 B, 절반은 C로 가므로 C 생성량에는 $\frac{1}{2}$가 붙어야 한다. 옳게는 $C_C = \frac{C_{A0}}{2}(1 - e^{-2k_1\tau})$ 이다.
③ O: A의 총 소모 속도상수는 $k_1 + k_2 = 2k_1$ 이고, 그중 C로 가는 경로 비율은 $\frac{k_2}{k_1 + k_2} = \frac{1}{2}$ 이다. 따라서 $C_C = \frac{C_{A0}}{2}(1 - e^{-2k_1\tau})$ 가 되어 정답이다.
④ X: $\frac{C_{A0}}{2}(1 - e^{-k_1\tau})$는 A가 k_1만으로 소모된다고 본 식이라서 병렬반응의 총 소모속도 $2k_1$를 반영하지 못한다. 옳게는 지수항에 $e^{-2k_1\tau}$가 들어가야 한다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 $A \to C$의 생성속도만 보고 A의 감소도 $k_1 C_A$로 쓰는 데 있다. A는 B와 C 두 경로로 동시에 소모되므로 C_A는 $2k_1$로 감소하고, C 생성량은 총 소모량의 전부가 아니라 그중 절반이라는 점을 함께 잡아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

경쟁 병렬반응이 나오면 먼저 반응물의 총 소모식 $\frac{dC_A}{d\tau} = -(k_1 + k_2)C_A$를 세우고, 그다음 원하는 생성물의 분율 $\frac{k_i}{\sum k}$ 또는 생성 미분식 $\frac{dC_i}{d\tau} = k_i C_A$로 연결해 판단한다.

암기 포인트

병렬 1차 반응에서는 반응물 감소는 속도상수의 합으로, 생성물 분배는 각 경로의 속도상수 비로 결정된다.

문 19. 회분식 반응기에서 균일계 액상 반응 $A \rightarrow B$를 진행하여 목표 전환율을 달성하는 데 걸린 반응시간이 15min이다. 이 반응을 동일한 온도에서 운전되는 플러그흐름 반응기에서 진행한다. 반응물 A의 유입 몰유속은 50molmin^{-1}, 유입 농도는 5molL^{-1}일 때, 목표 전환율을 달성하는 데 필요한 플러그흐름 반응기의 부피[L]는?

① 50

② 75

③ 100

④ 150

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 회분식 반응기와 플러그흐름 반응기의 설계식 관계를 이용해 같은 전환율을 만들 때 필요한 플러그흐름 반응기 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 목표 전환율까지의 회분식 반응시간 $t = 15min$
- 반응물 A의 유입 몰유속 $F_{A0} = 50mol/min$
- 반응물 A의 유입 농도 $C_{A0} = 5mol/L$

구해야 할 값:
- 같은 전환율을 달성하는 플러그흐름 반응기 부피 V

주의할 조건:
- 균일계 액상 반응이므로 밀도 변화가 작아 체적유량을 일정하게 본다.
- 같은 온도, 같은 반응, 같은 목표 전환율이므로 회분식과 플러그흐름의 적분항이 같다.

NoteBase

사용할 공식

회분식 반응기와 플러그흐름 반응기의 설계식은 다음과 같다.

$t = C_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$

$V = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$

또한 $F_{A0} = v_0 C_{A0}$ 이므로

$V = v_0 t$

이다.

이 공식을 쓰는 이유:

- 같은 반응을 같은 전환율까지 진행하므로 두 식의 적분항 $\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$ 이 같다.
- 따라서 유입 체적유량 v_0 만 구하면 회분식 반응시간으로 바로 플러그흐름 반응기 부피를 구할 수 있다.

계산 과정

1. 유입 체적유량을 구한다.

$v_0 = \frac{F_{A0}}{C_{A0}} = \frac{50mol/min}{5mol/L} = 10L/min$

2. 같은 전환율 조건에서 $V = v_0 t$ 를 적용한다.

$V = 10L/min \times 15min = 150L$

3. 필요한 플러그흐름 반응기 부피는 $150L$ 이다.

NoteBase

선지 판단

① X
- 계산 결과는 $150L$ 이므로 $50L$ 는 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 부피를 $50L$ 로 본 부분이다. 올바르게는 유입 체적유량 $10L/min$ 에 반응시간 $15min$ 을 곱한 $150L$ 이다.

② X
- 계산 결과는 $150L$ 이므로 $75L$ 는 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 부피를 $75L$ 로 본 부분이다. 올바르게는 회분식 시간 전체를 그대로 사용해야 하므로 $V = 10 \times 15 = 150L$ 이다.

③ X
- 계산 결과는 $150L$ 이므로 $100L$ 는 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 부피를 $100L$ 로 본 부분이다. 올바르게는 몰유속과 농도로부터 체적유량을 먼저 구한 뒤 $V = v_0 t$ 를 적용해야 하므로 $150L$ 이다.

④ O
- $v_0 = 50/5 = 10L/min$, $V = v_0 t = 10 \times 15 = 150L$ 이므로 옳다.
- 같은 전환율의 회분식 반응시간을 플러그흐름 반응기의 공간시간으로 연결한 값이므로 정답과 일치한다.

계산 결과 $150L$ 이므로 정답은 4번이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 몰유속 F_{A0} 와 체적유량 v_0 를 바로 구분하지 못하는 데 있다. $50mol/min$ 을 그대로 부피처럼 다루거나, $F_{A0} = v_0 C_{A0}$ 관계를 빼먹으면 오답이 된다. 또 회분식 반응시간과 플러그흐름의 공간시간이 같은 적분항으로 연결된다는 점을 놓치면 선지 판단이 흔들린다.

다시 나오면 이렇게 판단

액상 반응에서 회분식 시간과 플러그흐름 부피를 연결하는 문제는 먼저 F_{A0}/C_{A0} 로 체적유량을 구한 뒤, 같은 전환율이면 $V = v_0 t$ 관계가 성립하는지 확인하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

균일 액상 반응에서 같은 전환율이면 회분식 t 와 플러그흐름 V 는 $V = v_0 t$ 로 바로 연결된다.

NoteBase

문 20. 등온 플러그흐름 반응기에서 $2A \rightarrow B + C$인 비가역 기초반응을 액상에서 수행하여 반응물 A의 전환율을 25%로 얻었다. 동일한 반응기 2개를 첫 번째 반응기에 추가하여 직렬로 연결했을 때, 얻을 수 있는 반응물 A의 최종 전환율[%]은?

① 25

② 30

③ 50

④ 75

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 액상 등온 플러그흐름반응기에서 2차 반응의 설계식으로 직렬 연결 시 최종 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

- 주어진 값: 동일한 PFR 1기에서 반응물 A의 전환율이 25%이다.
- 구해야 할 값: 동일한 반응기 2기를 더 붙여 총 3기를 직렬로 연결했을 때의 최종 전환율이다.
- 주의할 조건: 액상, 등온, 기초반응이므로 반응속도는 C_A^2에 비례하고, 동일한 PFR 3기 직렬은 총부피가 $3V$인 하나의 PFR와 동등하다.

사용할 공식

$\frac{V}{F_{A0}} = \int_0^X \frac{dX}{-r_A}, \qquad -r_A \propto C_A^2 = C_{A0}^2(1-X)^2$

따라서 같은 공급조건에서는

$V \propto \int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2} = \frac{X}{1-X}$

이 공식을 쓰는 이유는 액상 PFR의 2차 반응에서는 전환율 X 자체가 아니라 $\frac{X}{1-X}$가 반응기 부피에 비례하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 반응기 1기에서 전환율이 25%이므로
$\frac{X_1}{1-X_1} = \frac{0.25}{0.75} = \frac{1}{3}$
이다.

2. 동일한 반응기 2기를 추가하면 총 반응기 부피는 $3V$가 되므로
$\frac{X}{1-X} = 3 \times \frac{1}{3} = 1$
이다.

3. 이를 풀면
$X = 1 - X \Rightarrow 2X = 1 \Rightarrow X = 0.5$
이므로 최종 전환율은 50%이다.

선지별 해설

① X
- 25%는 반응기 1기만 사용할 때의 전환율이다. 동일한 PFR 3기를 직렬로 연결하면 총부피가 커지므로 최종 전환율이 그대로 25%일 수 없다.
- 틀린 표현은 "최종 전환율이 25%"라는 판단이다. 올바르게는 $\frac{X}{1-X}$가 3배가 되어 $X = 50\%$가 된다.

② X
- 30%는 2차 반응 PFR 설계식을 적용한 값이 아니다. 1기에서 얻은 $\frac{X}{1-X} = \frac{1}{3}$를 총부피 3배에 맞춰 반영하면 $\frac{X}{1-X} = 1$이 되어야 한다.
- 틀린 표현은 "부피를 늘리면 전환율이 조금만 증가한다"는 식의 판단이다. 올바르게는 적분식으로 계산한 최종 전환율이 50%이다.

③ O
- 1기에서 $\frac{X}{1-X} = \frac{0.25}{0.75} = \frac{1}{3}$이고, 3기 직렬이면 이 값이 3배가 되어 1이 된다.
- 따라서 $\frac{X}{1-X} = 1$에서 $X = 0.50$이므로 50%가 맞다.

④ X
- 75%는 전환율을 반응기 수만큼 단순 가산한 값에 가깝다. 그러나 2차 반응 PFR에서는 X가 아니라 $\frac{X}{1-X}$가 부피에 비례한다.
- 틀린 표현은 "25%씩 세 번 더하면 75%"라는 판단이다. 올바르게는 총부피 3배를 설계식에 대입해 50%를 구해야 한다.

오답 포인트

전환율 X 자체가 반응기 부피에 선형 비례한다고 착각하면 ④를 고르기 쉽다. 이 문항의 핵심은 액상 PFR의 2차 반응에서 비례하는 양이 X가 아니라 $\frac{X}{1-X}$라는 점이다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

액상 등온 PFR 계산형은 먼저 반응차수를 확인하고, 그다음 설계식 적분 결과가 0차의 X, 1차의 $-\ln(1-X)$, 2차의 $\frac{X}{1-X}$ 중 무엇인지 구분하면 된다. 동일한 PFR 직렬 연결은 총부피를 합친 하나의 PFR로 판단한다.

암기 포인트

액상 PFR에서 부피와의 비례식은 0차 X, 1차 $-\ln(1-X)$, 2차 $\frac{X}{1-X}$이다.

NoteBase