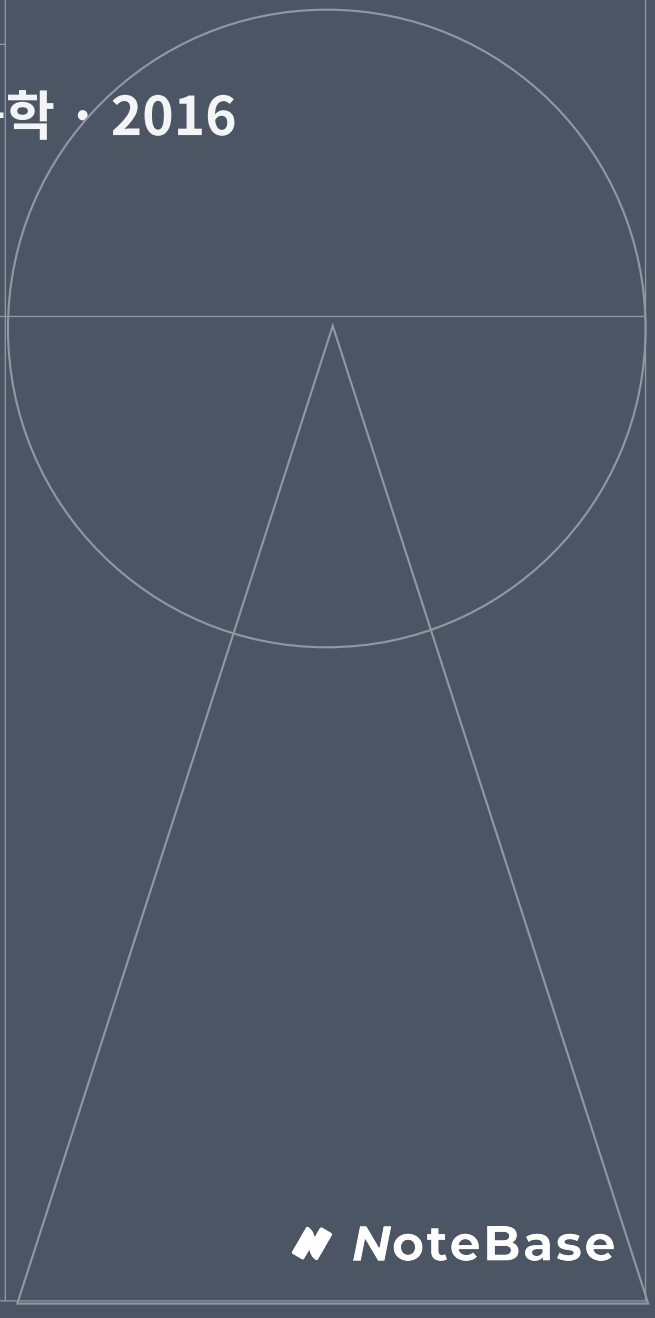
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2016



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2016

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2016

문 1. 회분식 반응기에서 액상반응 $3A + B \rightarrow 3C + D$가 진행된다. 원료물질이 $10\text{mol}\text{L}^{-1}$의 A와 $4\text{mol}\text{L}^{-1}$의 B로만 구성되어 있다면, A의 전환율이 20%일 때 B와 D의 농도$[\text{mol}\text{L}^{-1}]$는?

① B 농도 C_B: 2.67, D 농도 C_D: 2

② B 농도 C_B: 4, D 농도 C_D: 0.67

③ B 농도 C_B: 2.67, D 농도 C_D: 1.33

④ B 농도 C_B: 3.33, D 농도 C_D: 0.67

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 액상 회분식 반응기에서 전환율과 화학양론을 이용해 C_B와 C_D를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응식은 $3A + B \rightarrow 3C + D$이다.
초기 농도는 $C_{A0} = 10mol/L$, $C_{B0} = 4mol/L$이다.
A의 전환율은 20%이므로 반응한 A의 농도는 $10 \times 0.2 = 2mol/L$이다.

사용할 공식

화학양론상 $3A$가 반응할 때 B와 D는 각각 1씩 감소 또는 생성된다.
따라서 반응한 A가 $2mol/L$이면 반응 진행량은 $\frac{2}{3}mol/L$이다.
이 문제는 부피 변화가 없는 액상 반응으로 보고, 전환된 A의 양을 반응식 계수비에 맞춰 B와 D에 그대로 연결하면 된다.

계산 과정

1. A의 반응량은 $10 \times 0.2 = 2mol/L$이다.
2. 반응 진행량은 $\xi = \frac{2}{3}mol/L$이다.
3. B의 감소량은 $\xi = \frac{2}{3}mol/L$이므로 $C_B = 4 - \frac{2}{3} = \frac{10}{3} = 3.33mol/L$이다.
4. D의 생성량도 $\xi = \frac{2}{3}mol/L$이므로 $C_D = \frac{2}{3} = 0.67mol/L$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
제시값 $C_B = 2.67mol/L$, $C_D = 2mol/L$는 화학양론 계수를 잘못 적용한 값이다. D는 A와 1:1로 생성되지 않고 $3A$가 반응할 때 1만 생성되므로 $C_D = 0.67mol/L$가 맞다. B도 같은 진행량만큼만 감소하므로 $C_B = 3.33mol/L$로 고쳐야 한다.

② X
$C_D = 0.67mol/L$는 맞지만, $C_B = 4mol/L$는 B의 소모를 반영하지 않은 값이다. 반응식에서 B는 반응물이라 진행량 $\frac{2}{3}mol/L$만큼 감소하므로 $C_B = 3.33mol/L$로 고쳐야 한다.

③ X
제시값 $C_B = 2.67mol/L$, $C_D = 1.33mol/L$는 B와 D의 변화량을 실제보다 크게 잡은 값이다. A의 반응량 $2mol/L$를 그대로 B와 D에 대응시키면 안 되고, 반드시 계수비 3 : 1 : 1로 환산해야 하므로 정답 값은 $C_B = 3.33mol/L$, $C_D = 0.67mol/L$이다.

④ O
A가 $2mol/L$ 반응하면 반응 진행량은 $\frac{2}{3}mol/L$이다. 따라서 B는 $4 - \frac{2}{3} = 3.33mol/L$, D는 $\frac{2}{3} = 0.67mol/L$가 되어 옳다.

오답 포인트

전환율로 구한 A의 반응량을 곧바로 B나 D의 변화량으로 착각하면 오답이 된다. 이 문제의 함정은 $3A$를 기준으로 B와 D가 각각 1씩 변한다는 계수비를 놓치는 데 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분식 농도 계산은 먼저 전환율로 기준 성분의 반응량을 구하고, 그다음 반응식 계수비로 다른 성분의 감소량과 생성량을 환산하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

전환율은 기준 성분의 반응량까지 알려 주고, 다른 성분 농도는 반드시 화학양론 계수비로 바꿔서 계산한다.

NoteBase

문 2. 부피변화가 없는 비가역 1차 반응을 혼합흐름 반응기와 플러그흐름 반응기에서 각각 진행하고자 한다. 동일한 입구조건으로부터 두 반응기 모두 80% 전환율을 달성하고자 한다면 혼합흐름 반응기 부피는 플러그흐름 반응기 부피의 몇 배인가? (단, $\ln 0.2 = -1.6$으로 가정한다)

① 0.4

② 1.6

③ 2.0

④ 2.5

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 부피변화가 없는 비가역 1차 반응에서 같은 전환율을 만들기 위한 혼합흐름 반응기와 플러그흐름 반응기의 설계식 차이를 이용해 부피비를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건: 부피변화가 없고 비가역 1차 반응이며 두 반응기 모두 같은 입구조건에서 전환율 80%를 달성한다.
구해야 할 값: 혼합흐름 반응기 부피를 플러그흐름 반응기 부피로 나눈 값이다.
주의할 조건: 1차 반응이므로 반응속도는 농도에 비례하고, 혼합흐름 반응기는 출구농도로 속도를 계산하며 플러그흐름 반응기는 반응기 전체에서 농도변화를 적분한다.

사용할 공식

혼합흐름 반응기(CSTR): $V_{CSTR} = \frac{F_{A0}X}{-r_A}$이고, 1차 반응 $-r_A = kC_A$, 부피변화 없음에서 $C_A = C_{A0}(1-X)$이므로 $V_{CSTR} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}} \cdot \frac{X}{1-X}$
플러그흐름 반응기(PFR):
$V_{PFR} = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}}\int_0^X \frac{dX}{1-X} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}}\ln\frac{1}{1-X}$
이 공식을 쓰는 이유는 같은 1차 반응이라도 CSTR은 출구조건 하나로, PFR은 반응기 내부 농도변화를 적분해서 설계하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 전환율 $X = 0.8$을 대입하면 CSTR은
$V_{CSTR} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}} \cdot \frac{0.8}{0.2} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}} \cdot 4$
2. 같은 조건에서 PFR은
$V_{PFR} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}} \ln \frac{1}{0.2} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}} \cdot 1.6$
3. 따라서 부피비는
$\frac{V_{CSTR}}{V_{PFR}} = \frac{4}{1.6} = 2.5$
이다.

선지별 해설

① X

0.4배가 아니라 계산 결과는 2.5배이다. 0.4는 1/2.5에 해당하므로 문제에서 묻는 V_{CSTR}/V_{PFR}를 거꾸로 V_{PFR}/V_{CSTR}로 뒤집은 값이다.

② X

1.6배가 아니라 2.5배이다. 1.6은 ln(1/0.2)로서 PFR 부피식의 적분값 자체이지, 반응기 부피비가 아니다.

③ X

2.0배가 아니라 2.5배이다. 2.0은 CSTR의 $X/(1-X) = 4$와 PFR의 적분값 1.6을 정확히 나누지 않고 대략 처리했을 때 나올 수 있는 오답이다.

④ O

$V_{CSTR} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}} \cdot 4$, $V_{PFR} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}} \cdot 1.6$이므로 비는 2.5이다. 따라서 혼합흐름 반응기 부피는 플러그흐름 반응기 부피의 2.5배이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 PFR 적분값 1.6 자체를 부피비로 착각하거나, 마지막에 묻는 비를 거꾸로 뒤집는 데 있다. CSTR은 $X/(1-X)$, PFR은 $\ln(1/(1-X))$를 각각 구한 뒤 마지막에 두 값을 나누는 순서를 지켜야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

비교 설계 문제는 먼저 반응차수와 부피변화 유무를 확인한 다음 CSTR과 PFR 설계식을 각각 따로 쓴다. 같은 공통인자 $F_{A0}/(kC_{A0})$는 약분되고, 남는 $X/(1-X)$와 $\ln(1/(1-X))$만 비교하면 빠르게 판단할 수 있다.

암기 포인트

1차 반응에서 같은 전환율이면 CSTR 부피는 $X/(1-X)$, PFR 부피는 $\ln(1/(1-X))$에 비례하므로 고전환율일수록 CSTR이 더 크게 필요하다.

NoteBase

문 3. 다음의 기상 기초반응이 등온 정압 혼합흐름 반응기에서 진행된다. 순수한 반응물 A가 반응기에 공급될 때 전환율 X_A에서 이 반응기의 부피V는? (단, A와 R은 이상기체이고 v_{A0}는 A의 초기 부피유속, C_{A0}는 A의 초기농도이다)

$2A \rightarrow R, \quad -r_A = kC_A^2$

① $\frac{v_{A0}}{kC_{A0}} \int_0^{X_A} \left(\frac{1-0.5X_A}{1-X_A}\right)^2 dX_A$
② $\frac{v_{A0}X_A}{kC_{A0}} \left(\frac{1-0.5X_A}{1-X_A}\right)^2$
③ $\frac{v_{A0}X_A}{kC_{A0}^2} \left(\frac{1-0.5X_A}{1-X_A}\right)^2$
④ $\frac{v_{A0}}{kC_{A0}} \int_0^{X_A} X_A \left(\frac{1-0.5X_A}{1-X_A}\right)^2 dX_A$

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 기상 정압 CSTR에서 부피변화를 반영한 농도식과 설계식 $V = F_{A0}X_A/(-r_A)$를 결합해 반응기 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

- 반응식: $2A \rightarrow R$
- 속도식: $-r_A = kC_A^2$
- 반응기: 등온 정압 혼합흐름반응기(CSTR)
- 공급조건: 순수한 A가 유입되므로 $F_{A0} = v_{A0}C_{A0}$이다.
- 총 몰수 변화: $2A \rightarrow R$이므로 반응이 진행될수록 총 몰수가 감소하여 $v = v_{A0}(1 - 0.5X_A)$이다.

사용할 공식

$V = \frac{F_{A0}X_A}{-r_A}$
$C_A = C_{A0}\frac{1-X_A}{1-0.5X_A}$
CSTR은 반응기 내부 조성이 출구 조성과 같으므로 출구 전환율 X_A에서의 속도 $-r_A$를 바로 대입한다. 정압 기상반응이므로 부피유량 변화 $v = v_{A0}(1 - 0.5X_A)$를 반영해 C_A를 써야 한다.

NoteBase

계산 과정

1. 순수한 A 공급에서 $F_A = F_{A0}(1 - X_A)$, $v = v_{A0}(1 - 0.5X_A)$이므로
$C_A = \frac{F_A}{v} = C_{A0}\frac{1 - X_A}{1 - 0.5X_A}$
2. 속도식에 대입하면
$-r_A = kC_A^2 = kC_{A0}^2\left(\frac{1 - X_A}{1 - 0.5X_A}\right)^2$
3. CSTR 설계식에 대입하면
$V = \frac{F_{A0}X_A}{-r_A} = \frac{v_{A0}C_{A0}X_A}{kC_{A0}^2\left(\frac{1 - X_A}{1 - 0.5X_A}\right)^2} = \frac{v_{A0}X_A}{kC_{A0}}\left(\frac{1 - 0.5X_A}{1 - X_A}\right)^2$
따라서 2번 식이 맞다.

선지 판단

① X
- 적분형은 $V = F_{A0}\int_0^{X_A}\frac{dX_A}{-r_A}$인 PFR 설계식에 해당한다. 이 문제는 CSTR이므로 적분이 아니라 출구조건에서 $V = F_{A0}X_A/(-r_A)$를 사용한다.
- 틀린 표현은 적분 기호이다. 올바르게는 $V = \frac{v_{A0}X_A}{kC_{A0}}\left(\frac{1 - 0.5X_A}{1 - X_A}\right)^2$이다.

② O
- $C_A = C_{A0}\frac{1 - X_A}{1 - 0.5X_A}$, $V = F_{A0}X_A/(-r_A)$, $F_{A0} = v_{A0}C_{A0}$를 차례로 대입하면 정확히 $\frac{v_{A0}X_A}{kC_{A0}}\left(\frac{1 - 0.5X_A}{1 - X_A}\right)^2$가 된다.

③ X
- $F_{A0} = v_{A0}C_{A0}$이므로 설계식에 대입하면 C_{A0}가 하나 상쇄되어 분모는 kC_{A0}가 된다. kC_{A0}^2가 남지 않는다.
- 틀린 표현은 분모의 kC_{A0}^2이다. 올바르게는 분모가 kC_{A0}이다.

④ X
- 이 식도 적분형이라서 PFR 형태를 잘못 적용한 것이다. CSTR은 적분하지 않고 출구 전환율 하나로 계산한다.
- 틀린 표현은 적분 전체와 적분함수 안의 X_A 배치이다. 올바르게는 X_A가 적분 내부가 아니라 전체 인자로 밖에 있는 $V = \frac{v_{A0}X_A}{kC_{A0}}\left(\frac{1 - 0.5X_A}{1 - X_A}\right)^2$이다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 CSTR과 PFR 설계식을 뒤바꾸는 점이다. ①, ④는 적분형이라는 점에서 PFR 식이고, ③은 $F_{A0} = v_{A0}C_{A0}$ 대입 뒤 C_{A0} 하나가 약분된다는 점을 놓치게 만든 선택지이다. 또 정압 기상반응에서 총 몰수 감소에 따른 $1 - 0.5X_A$ 항을 빼먹으면 농도식 자체가 틀어진다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 부피 문제는 먼저 반응기 종류부터 구분한다. CSTR이면 $V = F_{A0}X_A/(-r_A)$, PFR이면 적분식이다. 그다음 기상 정압 반응이면 총 몰수 변화로부터 v를 구해 $C_A = F_A/v$를 만든 뒤 속도식에 넣어 정리하면 된다.

암기 포인트

CSTR은 출구속도 대입, PFR은 적분식 적용이다. 순수 A의 $2A \rightarrow R$ 정압 기상반응에서는 $v = v_{A0}(1 - 0.5X_A)$가 바로 핵심이다.

문 4. 온도 100K에서 어떤 기상반응의 반응 속도식은 다음의 (가)와 같다. 이 속도식을 (나)와 같이 반응물 A의 분압(p_A)에 대하여 나타낼 때 k의 값은? (단, A는 이상기체이고 반응진행에 따른 몰수변화는 없으며 R은 기체상수이다)

(가) $-r_A\,[\mathrm{mol L^{-1} s^{-1}}] = -\frac{dC_A}{dt} = 2C_A^2$
(나) $-\frac{dp_A}{dt} = kp_A^2$

① $50R$
② $\frac{1}{50R}$
③ $100R$
④ $\frac{1}{100R}$

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 이상기체식 $p_A = C_ART$를 이용해 농도 기준 속도식 $-dC_A/dt = 2C_A^2$를 분압 기준 속도식 $-dp_A/dt = kp_A^2$로 바꾸는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $-dC_A/dt = 2C_A^2$, $T = 100K$
구해야 할 값: $-dp_A/dt = kp_A^2$에서의 k
주의할 조건: A는 이상기체이고 반응 중 몰수변화가 없으므로 $p_A = C_ART$를 그대로 쓸 수 있다.

사용할 공식

사용할 공식은 $p_A = C_ART$와 $C_A = p_A/(RT)$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 농도 C_A로 준 속도식을 분압 p_A 기준으로 다시 써야 하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

먼저 $C_A = p_A/(RT)$이므로
$\frac{dC_A}{dt} = \frac{1}{RT}\frac{dp_A}{dt}$
이다.

주어진 식에 대입하면
$-\frac{1}{RT}\frac{dp_A}{dt} = 2\left(\frac{p_A}{RT}\right)^2$
이다.

양변에 RT를 곱하면
$-\frac{dp_A}{dt} = \frac{2}{RT}p_A^2$
이므로
$k = \frac{2}{RT}$
이다.

$T = 100K$를 대입하면
$k = \frac{2}{100R} = \frac{1}{50R}$
이다.

선지별 해설

① X: $50R$는 k가 $1/(RT)$ 꼴로 나와야 한다는 점을 놓치고 역수 관계를 뒤집은 값이다. 올바르게는 $k = 1/(50R)$이다.
② O: $C_A = p_A/(RT)$를 대입하면 $-dp_A/dt = (2/RT)p_A^2$가 되고, $T = 100K$에서 $k = 1/(50R)$가 된다.
③ X: $100R$는 역수를 뒤집은 데다 원래 식의 계수 2까지 반영하지 못한 값이다. 올바르게는 $k = 1/(50R)$이다.
④ X: $1/(100R)$는 주어진 속도식의 계수 2를 빠뜨리면 나오는 값이다. $-dC_A/dt = 2C_A^2$이므로 올바르게는 $k = 2/(100R) = 1/(50R)$이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 C_A와 p_A의 관계를 대입한 뒤 미분항에 붙는 $1/(RT)$를 놓치거나, 원래 속도식의 계수 2를 빠뜨리는 데 있다. 역수 처리와 계수 처리를 동시에 틀리면 $50R$나 $100R$ 같은 값으로 흐르기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

농도식과 분압식을 바꾸는 문제는 먼저 $p = C_RT$를 $C = p/(RT)$로 정리한 뒤, 미분항까지 함께 치환하고 마지막에 계수와 역수를 검산하면 된다.

암기 포인트

이상기체에서 $C = p/(RT)$이므로 농도 기준 2차 속도식 k_CC^2는 분압 기준으로 바꾸면 계수에 $1/(RT)$가 붙는다.

NoteBase

문 5. 다음과 같이 경쟁하는 두 반응이 있다. 이 반응이 동시에 진행될 때 반응물 A에 대한 생성물 R의 순간수율은?

$A + B \rightarrow R,\ r_R = C_A^{0.5} C_B^{0.5}$
$A + B \rightarrow S,\ r_S = 2 C_A C_B^{1.5}$

① $\frac{1}{1 + C_A^{0.5} C_B}$
② $\frac{1}{1 + C_A^{-0.5} C_B^{-1}}$
③ $\frac{1}{1 + 2C_A^{0.5} C_B}$
④ $\frac{1}{1 + 2C_A^{-0.5} C_B^{-1}}$

정답 3번

출제 포인트

경쟁반응에서 반응물 A 기준 생성물 R의 순간수율을 $r_R/(-r_A)$, 즉 $r_R/(r_R + r_S)$로 정리할 수 있는지를 묻는 문제이다.

조건 정리

주어진 속도식:
- $A + B \rightarrow R, r_R = C_A^{0.5} C_B^{0.5}$
- $A + B \rightarrow S, r_S = 2 C_A C_B^{1.5}$

구해야 할 값:
- 반응물 A에 대한 생성물 R의 순간수율

주의할 조건:
- 두 반응 모두 A를 1몰씩 소비하므로 $-r_A = r_R + r_S$이다.

사용할 공식

$Y_{R/A} = \frac{r_R}{-r_A} = \frac{r_R}{r_R + r_S}$

이 공식을 쓰는 이유는 순간수율이 원하는 생성물의 생성속도를 기준 반응물의 전체 소모속도로 나눈 값이기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 순간수율은 $Y_{R/A} = r_R/(-r_A)$이다.
2. 이 문제에서는 A가 두 반응에서 모두 1몰씩 소모되므로 $-r_A = r_R + r_S$이다.
3. 따라서 $Y_{R/A} = r_R/(r_R + r_S)$이다.
4. 속도식을 대입하면 $Y_{R/A} = \frac{C_A^{0.5}C_B^{0.5}}{C_A^{0.5}C_B^{0.5} + 2C_AC_B^{1.5}}$ 이다.
5. 분자와 분모를 $C_A^{0.5}C_B^{0.5}$로 나누면 $Y_{R/A} = \frac{1}{1 + 2C_A^{0.5}C_B}$ 이다.

선지별 해설

① X: 틀린 표현은 분모에서 2가 빠진 점이다. $r_S/r_R = 2C_A^{0.5}C_B$이므로 올바르게는 $1/(1 + 2C_A^{0.5}C_B)$이다.
② X: 틀린 표현은 $C_A^{-0.5}C_B^{-1}$처럼 지수를 뒤집은 점과 계수 2를 누락한 점이다. 올바르게는 $r_S/r_R = 2C_A^{0.5}C_B$ 이므로 $1/(1 + 2C_A^{0.5}C_B)$이다.
③ O: 순간수율을 $r_R/(r_R + r_S)$로 두고 정리하면 $1/(1 + 2C_A^{0.5}C_B)$가 되므로 옳다.
④ X: 틀린 표현은 $2C_A^{-0.5}C_B^{-1}$처럼 역수 형태를 그대로 분모에 넣은 점이다. 분자와 분모를 공통인수 $C_A^{0.5}C_B^{0.5}$로 나누어야 하므로 올바르게는 $1/(1 + 2C_A^{0.5}C_B)$이다.

오답 포인트

순간수율을 r_R/r_S와 혼동하거나, 공통인수를 묶는 대신 비율을 역수로 뒤집으면 ②와 ④ 같은 식이 나온다. 또한 부반응 속도식의 계수 2를 빠뜨리면 ①이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

경쟁반응 수율 문제는 원하는 생성물의 생성속도를 분자에 두고, 기준 반응물의 전체 소모속도를 분모에 둔 뒤 속도식을 대입해 공통인수로 정리하면 된다.

암기 포인트

경쟁반응의 A 기준 순간수율은 $Y_{R/A} = r_R/(r_R + r_S)$이며, 공통인수 $C_A^{0.5}C_B^{0.5}$를 묶으면 역수 함정을 피할 수 있다.

NoteBase

문 6. 회분식 반응기에서 진행된 액상반응 실험결과, $X_A/(1-X_A)$가 시간 $t[h]$에 대하여 기울기 1인 직선으로 표현되었다. A의 초기 농도(C_{A0})가 0.1molL^{-1}일 때 이 반응의 속도상수[$L\text{mol}^{-1}h^{-1}$]는? (단, 반응속도는 A의 농도에만 의존하며 X_A는 A의 전환율이다)

① 7

② 8

③ 9

④ 10

정답 4번

출제 포인트

회분식 액상반응에서 $\frac{X_A}{1-X_A}$ 대 t 직선식이 2차 반응의 적분형 $\frac{X_A}{1-X_A} = kC_{A0}t$임을 알아내고, 기울기에서 k를 역산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- $\frac{X_A}{1-X_A}$와 시간 t의 직선 기울기 = 1
- 초기농도 $C_{A0} = 0.1mol/L$
- 액상 회분식 반응기, 반응속도는 A 농도에만 의존

구해야 할 값:
- 속도상수 k $[Lmol^{-1}h^{-1}]$

주의할 조건:
- 액상 회분식에서는 부피가 일정하다고 본다.
- 직선의 기울기 1은 k가 아니라 kC_{A0}이다.

사용할 공식

$-r_A = kC_A^2$

$\frac{X_A}{1-X_A} = kC_{A0}t$

이 공식을 쓰는 이유:
- $\frac{X_A}{1-X_A}$가 t에 대해 직선으로 주어졌으므로 2차 반응 적분식과 일치한다.
- 따라서 직선의 기울기 1은 kC_{A0}로 해석한다.

NoteBase

계산 과정

1. 직선의 기울기에서 $kC_{A0} = 1h^{-1}$이다.
2. $C_{A0} = 0.1mol/L$를 대입하면 $k = \frac{1}{0.1} = 10$이다.
3. 단위는 $\frac{h^{-1}}{molL^{-1}} = Lmol^{-1}h^{-1}$이다.
4. 따라서 속도상수는 10이다.

선지별 해설

① X: 7은 계산값과 다르다. 틀린 표현은 속도상수가 7이라는 점이며, 올바르게는 속도상수는 10이다.
② X: 8은 계산값과 다르다. 틀린 표현은 속도상수가 8이라는 점이며, 올바르게는 속도상수는 10이다.
③ X: 9는 계산값과 다르다. 틀린 표현은 속도상수가 9라는 점이며, 올바르게는 속도상수는 10이다.
④ O: 기울기 1은 kC_{A0}이고 $C_{A0} = 0.1mol/L$이므로 $k = 10$이다. 단위도 $Lmol^{-1}h^{-1}$로 맞다.

오답 포인트

기울기 1을 그대로 k로 읽는 실수가 가장 흔하다. 이 문항의 핵심은 $\frac{X_A}{1-X_A}$ 형태가 2차 반응 적분식이라는 점과, 기울기가 k가 아니라 kC_{A0}라는 점이다. 초기농도로 한 번 더 나누는 단계와 단위 정리를 함께 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

변환율 식이 시간과 선형이면 먼저 어느 적분 반응식인지 확인한다. 그다음 직선의 기울기가 k인지 kC_{A0}인지 계수를 분리해서 본다. 마지막에 초기농도로 나누고 단위까지 검산한다.

암기 포인트

2차 액상 회분식은 $\frac{X_A}{1-X_A} = kC_{A0}t$이고, 직선의 기울기는 k가 아니라 kC_{A0}이다.

NoteBase

문 7. 불균일촉매반응에서 단위면적을 기준으로 한 반응속도가 $-r'' = kC_{As}$로 표현되었다. 반응면까지 전달되는 반응물 A의 물질전달 플럭스(flux) $J_A = k_m(C_A - C_{As})$이다. 정상상태에서 벌크상의 A 농도(C_A)로 표현된 반응속도식($-r''$)은? (단, C_{As}는 촉매입자표면에서의 A의 농도, k_m은 물질전달계수이다)

① $\frac{kC_A}{k + k_m}$
② $\frac{k_m C_A}{k + k_m}$
③ $\frac{k}{1 + \frac{k}{k_m} C_A}$
④ $\frac{kC_A}{1 + \frac{k}{k_m}}$

정답 4번

출제 포인트

표면반응속도식과 외부물질전달식을 정상상태에서 같게 놓고 촉매표면 농도 C_{As}를 소거하여 벌크 농도 C_A 기준 속도식을 만드는 문제이다.

조건 정리

주어진 식은 $-r'' = kC_{As}$, $J_A = k_m(C_A - C_{As})$이다.
정상상태에서는 반응면으로 들어오는 물질전달 플럭스와 표면반응속도가 같으므로 $J_A = -r''$이다.
구해야 할 값은 C_A만으로 나타낸 $-r''$이다.

사용할 공식

$k_m(C_A - C_{As}) = kC_{As}$
$k_m C_A = (k + k_m)C_{As}$
$C_{As} = \frac{k_m}{k + k_m} C_A$
$-r'' = kC_{As} = \frac{kk_m}{k + k_m} C_A = \frac{kC_A}{1 + k/k_m}$
이 공식을 쓰는 이유는 정상상태의 불균일촉매반응에서 외부전달과 표면반응이 직렬로 이어져 같은 몰유속을 가져야 하기 때문이다.

계산 과정

1. 정상상태 조건으로 $J_A = -r''$를 놓는다.
2. $k_m(C_A - C_{As}) = kC_{As}$에서 C_{As}를 한쪽으로 모으면 $k_m C_A = (k + k_m)C_{As}$가 된다.
3. 따라서 $C_{As} = \frac{k_m}{k + k_m} C_A$이다.
4. 이를 $-r'' = kC_{As}$에 대입하면 $-r'' = \frac{kk_m}{k + k_m} C_A = \frac{kC_A}{1 + k/k_m}$가 된다.

NoteBase

선지별 해설

① X
$\frac{kC_A}{k+k_m}$는 최종식의 분자에 있어야 할 k_m가 빠져 있다. 올바르게는 $\frac{kk_m}{k+k_m}C_A$ 또는 $\frac{kC_A}{1+k/k_m}$이다.

② X
$\frac{k_mC_A}{k+k_m}$는 C_{As}를 구한 식과 비슷한 형태일 뿐 반응속도 $-r'' = kC_{As}$에서 필요한 k가 한 번 더 곱해지지 않았다. 올바르게는 $\frac{kk_m}{k+k_m}C_A$이다.

③ X
$\frac{k}{1+\frac{k}{k_m}C_A}$는 C_A가 분모에 들어가므로 속도식이 C_A에 대해 비선형이 된다. 그러나 주어진 물질전달식과 반응속도식은 모두 C_A에 1차 형태이므로 이렇게 될 수 없다. 올바르게는 C_A가 분자에 남아 $\frac{kC_A}{1+k/k_m}$가 된다.

④ O
$\frac{kC_A}{1+k/k_m}$는 $\frac{kk_m}{k+k_m}C_A$와 같은 식이며, 정상상태에서 C_{As}를 소거해 얻은 결과와 정확히 일치한다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 정상상태 조건 $J_A = -r''$를 먼저 세우지 않고 C_{As}를 바로 없애려다가 분자에서 k 또는 k_m를 하나 빠뜨리는 것이다. 또한 C_A가 최종식의 분자에 남아야 한다는 1차 반응 구조를 놓치면 ③처럼 분모에 C_A를 넣는 오답을 고르기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

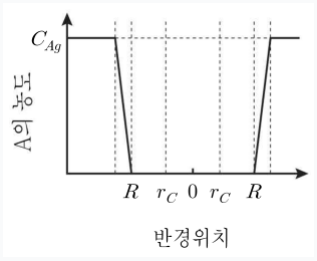
불균일촉매의 외부전달-표면반응 문제는 정상상태에서 전달속도와 반응속도를 같게 놓은 뒤, 표면농도 C_{As}를 소거하고, 마지막에 벌크농도 C_A에 대한 1차식 형태가 유지되는지 확인하면 된다.

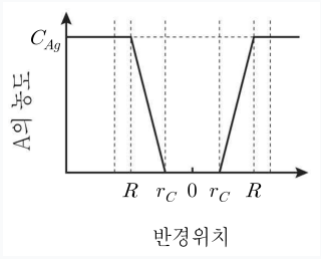
암기 포인트

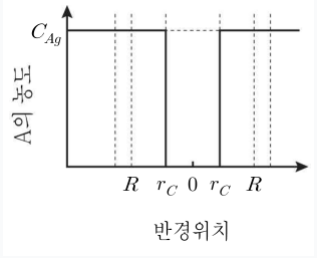
외부전달과 표면반응의 직렬저항에서는 $-r'' = \frac{kk_m}{k+k_m}C_A = \frac{kC_A}{1+k/k_m}$이다.

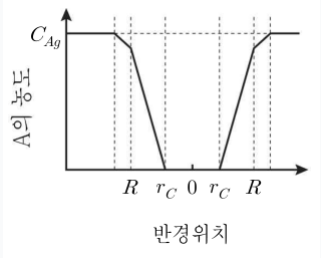
NoteBase

문 8. 구형 고체 연료의 연소 과정은 수축핵 모델(shrinking core model)로 설명될 수 있다. 이는 연소되는 과정에서 회(ash)가 생성되고 고체 입자 크기는 유지되면서 미반응 핵이 점차 줄어드는 모델이다. 고체 연료의 반경을 R, 미반응 핵의 반경을 r_c라고 할 때, 화학반응이 율속단계인 경우 반응 기체 A의 농도 그래프로 옳은 것은? (단, C_{Ag}는 기체 경막 밖에서의 농도를 나타낸다)

① 

② 

③ 

④ 

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 수축핵 모형에서 화학반응이 율속단계일 때 반응기체 A의 농도 강하가 어디에서 생기는지를 도식으로 판단하는 문제이다. 반응속도 지배이면 기체 경막과 회층에서는 농도 구배가 거의 없고, 반응계면 r_c에서만 농도가 0으로 바뀐다.

NoteBase

선지별 해설

① X
- R에서 r_c까지 농도가 계속 감소하므로 회층 내부 확산 저항이 큰 경우의 형태이다.
- 반응속도 지배라면 회층 내부 농도는 거의 일정해야 하므로 틀리다. 올바르게는 R부터 r_c 직전까지 C_{Ag}가 유지되고 r_c에서만 0으로 떨어진다.

② X
- 기체 경막 밖의 C_{Ag}에서 반응계면까지 연속적인 농도 구배를 그린 형태이므로 회층 확산 저항을 반영한 그림이다.
- 화학반응이 율속이면 반응 자체가 느리고 전달은 상대적으로 빨라서 이런 완만한 내부 농도 강하가 나타나지 않는다. 올바르게는 입자 내부 회층에서도 농도가 거의 일정하다.

③ O
- 기체 경막 밖에서 입자 표면 R을 지나 반응계면 r_c 직전까지 농도가 C_{Ag}로 일정하다.
- 미반응핵 내부에는 기체 A가 존재하지 않으므로 r_c에서 농도가 불연속적으로 0이 된다. 화학반응이 율속단계일 때의 전형적인 농도 분포이다.

④ X
- 입자 바깥쪽에서 먼저 농도가 조금 떨어지고, 회층 내부에서도 다시 크게 감소하므로 경막 전달 저항과 회층 확산 저항이 함께 있는 형태이다.
- 화학반응 지배에서는 이런 전달 단계의 농도 강하가 거의 없어야 한다. 올바르게는 경막 밖 농도, 입자 표면 농도, 반응계면 직전 농도가 거의 같아야 한다.

오답 포인트

수축핵 모형 문제에서는 그래프의 기울기가 생기는 위치를 저항 위치와 바로 연결해야 한다. R부터 r_c까지 기울기가 있으면 회층 확산 저항, C_{Ag}에서 R까지 먼저 떨어지면 경막 전달 저항이다. 이 문항은 화학반응 지배인데도 ①, ②, ④처럼 전달 저항이 있는 그래프를 고르게 만드는 함정이 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 율속단계가 무엇인지 확인한 뒤 그 단계에서만 농도 강하가 생긴다고 보면 된다. 화학반응 지배이면 경막과 회층은 거의 평평하고 반응계면에서만 농도가 바뀌며, 회층 확산 지배이면 $R \sim r_c$ 구간에 기울기가 생긴다.

암기 포인트

수축핵 모형에서 화학반응 지배는 전달 구간 평탄, 반응계면에서만 급변이다.

NoteBase

문 9. 액상 비가역반응의 혼합흐름 반응기에 대한 담켈러 수(Damköhler 수, Da)의 설명으로 옳은 것은?

① 1차 반응의 경우 Da는 반응물 A의 유입유량과 출구 반응속도의 비이다.

② 1차 반응의 경우 Da는 반응속도와 대류속도의 비이다.

③ Da가 0.1 이하이면 단일반응기에서 전환율이 90% 이상이다.

④ 2차 반응의 경우 Da는 반응물 A의 초기농도(C_{A0})의 제곱에 비례한다.

정답 2번

출제 포인트

혼합흐름반응기에서 담켈러 수 Da의 정의와 반응차수에 따른 농도 의존성을 구별하는 문제이다.

핵심 개념

담켈러 수는 반응이 진행되는 세기와 유체가 반응기를 통과하는 대류 효과의 상대적 크기를 나타내는 무차원수이다.
1차 반응에서는 보통 $Da = k\tau$로 정리되어 반응속도와 대류속도의 비로 해석한다.
n차 반응에서는 $Da \propto kC_{A0}^{n-1}\tau$이므로 2차 반응이면 $Da \propto C_{A0}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
1차 반응의 담켈러 수는 반응물 A의 유입유량과 출구 반응속도의 비가 아니라, 반응의 진행 정도와 대류 효과의 비로 본다.
틀린 표현은 "유입유량과 출구 반응속도의 비"이다. 올바르게는 반응속도와 대류속도의 비, 또는 $Da = k\tau$로 정리한다.

② O
1차 반응의 경우 $Da = k\tau$로 나타낼 수 있으므로 반응속도와 대류속도의 비라는 설명이 맞다.
체류시간이 길거나 반응속도상수 k가 크면 Da가 커지고, 이는 반응이 흐름보다 상대적으로 더 우세함을 뜻한다.

③ X
단일 혼합흐름반응기에서 1차 반응 전환율은 $X = \frac{Da}{1+Da}$이다.
따라서 $Da = 0.1$이면 $X = \frac{0.1}{1.1} \approx 0.09$로 약 9% 수준이므로 90% 이상이라는 설명은 틀리다.
틀린 표현은 "전환율이 90% 이상"이다. 올바르게는 Da가 매우 커져야 높은 전환율이 얻어진다.

④ X
2차 반응에서는 $Da \propto kC_{A0}^{2-1}\tau = kC_{A0}\tau$이므로 초기농도 C_{A0}의 1제곱에 비례한다.
틀린 표현은 "초기농도의 제곱에 비례"이다. 올바르게는 초기농도 C_{A0}에 1차로 비례한다.

오답 포인트

①은 비율의 방향을 뒤집어 놓은 선지이고, ③은 Da가 작을수록 전환율이 크다고 착각하게 만드는 선지이다.
④는 n차 반응에서 C_{A0}^{n-1}가 들어간다는 점을 놓치면 제곱으로 오인하기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 담켈러 수를 반응 대 대류의 무차원비로 잡고, 1차 반응이면 $Da = k\tau$, n차 반응이면 C_{A0}^{n-1}가 붙는다는 구조를 대입해 선지의 차수와 전환율 해석이 맞는지 판단한다.

암기 포인트

담켈러 수는 반응 대 대류, 1차는 $k\tau$, n차는 C_{A0}^{n-1}가 붙는다.

NoteBase

문 10. 혼합흐름 반응기에서 초기농도 C_{A0}인 순수한 반응물 A로부터 기초 연속반응 $A \rightarrow R \rightarrow S$가 진행된다. k_1과 k_2의 값이 동일할 때 R의 농도(C_R)를 공간시간(τ)의 함수로 표현한 식은?

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

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 정상상태 혼합흐름반응기(CSTR)에서 기초 연속반응 $A \rightarrow R \rightarrow S$의 중간생성물 R 농도를 성분수지로 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 순수 반응물 A 유입, 초기농도 C_{A0}, 기초 연속반응 $A \rightarrow R \rightarrow S$, $k_1 = k_2$이다.
구해야 할 값: 공간시간 τ의 함수로 나타낸 R의 농도 C_R이다.
주의할 조건: 혼합흐름반응기이므로 PFR식의 지수형 농도식이 아니라 정상상태 CSTR 성분수지를 사용한다.

사용할 공식

A에 대한 CSTR 성분수지는 $C_A = \frac{C_{A0}}{1 + k_1 \tau}$이다.
R에 대한 CSTR 성분수지는 $C_R = \tau(k_1 C_A - k_2 C_R)$이다.
이 공식을 쓰는 이유: R은 A로부터 생성되고 다시 S로 소비되는 중간생성물이므로, 생성속도 $k_1 C_A$와 소비속도 $k_2 C_R$를 동시에 넣은 정상상태 물질수지가 필요하다.

계산 과정

1. A 성분수지에서 $C_A = \frac{C_{A0}}{1 + k_1 \tau}$이다.
2. 이를 R 성분수지에 대입하면 $C_R = \tau(k_1 C_A - k_2 C_R)$이므로 $C_R(1 + k_2 \tau) = \tau k_1 C_A = \tau k_1 \frac{C_{A0}}{1 + k_1 \tau}$이다.
3. 따라서 $C_R = \frac{C_{A0} k_1 \tau}{(1 + k_1 \tau)(1 + k_2 \tau)}$이다.
4. $k_1 = k_2$이므로 $C_R = \frac{C_{A0} k_1 \tau}{(1 + k_1 \tau)^2}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X

분모가 $1 + k_1\tau$ 하나뿐인 점이 틀리다. R은 생성만 되는 성분이 아니라 반응기 내에서 소비도 되므로 R 성분수지에서 추가로 $(1 + k_2\tau)$가 붙는다. $k_1 = k_2$이면 올바른 식은 $\frac{C_{A0}k_1\tau}{(1+k_1\tau)^2}$이다.

② X

분자에서 τ가 빠진 점이 틀리다. CSTR의 생성항은 공간시간 τ와 곱해져야 하므로 $C_{A0}k_1$만 남는 식은 성분수지 형태와 맞지 않는다. 올바르게는 $\frac{C_{A0}k_1\tau}{(1+k_1\tau)^2}$이다.

③ X

지수항 $e^{-k_1\tau}$를 쓴 점이 틀리다. 이 형태는 플러그흐름반응기(PFR)나 회분반응기의 1차 반응 해와 닮았지만, 이 문제는 혼합흐름반응기이므로 지수식이 아니라 대수식이 나온다. 올바르게는 $\frac{C_{A0}k_1\tau}{(1+k_1\tau)^2}$이다.

④ O

유도한 결과 $C_R = \frac{C_{A0}k_1\tau}{(1+k_1\tau)^2}$와 일치한다. A의 감소와 R의 생성·소비를 모두 반영한 정상상태 CSTR 식이므로 맞다.

오답 포인트

기초 연속반응이라도 반응기가 CSTR이면 지수식을 바로 쓰지 않는 점이 함정이다. 특히 ①은 A 농도식만 보고 R의 추가 소비를 빠뜨리게 만들고, ③은 PFR의 1차 반응 해를 떠올리게 만들어 반응기 종류를 혼동하게 만든다.

다시 나오면 이렇게 판단

중간생성물 농도를 묻는 CSTR 문제는 먼저 A의 출구농도를 구한 뒤, 생성항과 소비항이 함께 들어간 R 성분수지를 다시 세워 판단한다. 반응기 종류가 CSTR인지 PFR인지부터 확인하면 지수식 오답을 걸러낼 수 있다.

암기 포인트

기초 연속반응 CSTR의 중간생성물은 $C_R = \frac{C_{A0}k_1\tau}{(1+k_1\tau)(1+k_2\tau)}$이고, $k_1 = k_2$이면 분모가 제곱꼴 $(1 + k_1\tau)^2$이 된다.

NoteBase

문 11. 정용 회분식 반응기에서 반응물 A의 반감기를 측정하였다. 측정된 반감기는 초기 반응물 농도에 관계없이 일정하였다. 이 반응의 반응차수는?

① 0차

② 1차

③ 2차

④ 3차

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 반감기의 초기농도 의존성과 반응차수의 대응 관계를 묻는 문제이다.

핵심 개념

0차 반응은 반응속도가 농도와 무관하여 반감기가 초기농도에 비례한다. 키워드는 $t_{1/2} = C_{A0}/(2k)$이다.
1차 반응은 반응속도가 농도에 비례하여 반감기가 초기농도와 무관하게 일정하다. 키워드는 $t_{1/2} = \ln 2/k$이다.
2차 이상 반응은 반감기가 초기농도에 의존하므로 반감기가 일정하다는 조건과 맞지 않는다.

선지별 해설

① X: 틀린 부분은 "0차"이다. 0차 반응의 반감기는 $t_{1/2} = C_{A0}/(2k)$이므로 초기농도 C_{A0}가 커지면 반감기도 커진다. 올바르게는 반감기가 초기농도와 무관할 때 1차 반응이다.
② O: 1차 반응은 $t_{1/2} = \ln 2/k$이므로 속도상수 k만 정해지면 반감기가 일정하다. 문제의 조건과 정확히 일치한다.
③ X: 틀린 부분은 "2차"이다. 2차 반응의 반감기는 $t_{1/2} = 1/(kC_{A0})$이므로 초기농도에 따라 달라진다. 올바르게는 반감기가 일정하면 2차가 아니라 1차 반응이다.
④ X: 틀린 부분은 "3차"이다. 3차 반응도 반감기가 초기농도에 의존하므로 초기농도와 무관하게 일정할 수 없다. 올바르게는 이 조건을 만족하는 차수는 1차이다.

오답 포인트

반감기가 일정하다는 표현을 반응속도가 일정하다는 뜻으로 잘못 읽으면 0차를 고르기 쉽다. 이 문제는 속도의 농도 의존성이 아니라 반감기의 농도 의존성을 묻는다는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

반감기 문제가 나오면 먼저 반감기가 초기농도와 무관한지, 비례하는지, 역비례하는지를 본다. 무관하면 1차, 비례하면 0차, 역비례하면 2차로 판단할 수 있다.

NoteBase

암기 포인트

반감기 일정이면 1차, 반감기 농도의 함수이면 0차 또는 2차 이상이다.

NoteBase

문 12. 회분식 반응기에서 비가역 1차 반응 $A \rightarrow B$가 진행되었다. A의 초기농도(C_{A0})가 $5.0\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$일 때 반응시간 $460\,\mathrm{s}$ 경과 후 A의 농도(C_A)가 $0.5\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$로 감소하였다. 반응속도상수($k$) 및 A의 농도가 초기농도에서 $0.05\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$로 감소할 때까지 걸리는 시간($t$)은? (단, $\ln 10 = 2.30$으로 가정한다)

① $k[\mathrm{s^{-1}}]$: 0.005, $t[\mathrm{s}]$: 1840

② $k[\mathrm{s^{-1}}]$: 0.005, $t[\mathrm{s}]$: 920

③ $k[\mathrm{s^{-1}}]$: 0.010, $t[\mathrm{s}]$: 1840

④ $k[\mathrm{s^{-1}}]$: 0.010, $t[\mathrm{s}]$: 920

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 회분식 반응기에서 비가역 1차 반응의 적분식 $\ln(C_{A0}/C_A) = kt$를 이용해 반응속도상수 k와 목표농도 도달시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 초기농도 $C_{A0} = 5.0 mol/L$, 460초 후 농도 $C_A = 0.5 mol/L$
구해야 할 값: 반응속도상수 k, $C_A = 0.05 mol/L$가 될 때까지의 시간 t
주의할 조건: 비가역 1차 반응이므로 농도비를 로그로 처리하는 적분식을 사용한다.

사용할 공식

1차 반응의 회분식 적분식은 $\ln(C_{A0}/C_A) = kt$이다.
이 공식을 쓰는 이유: 문제에서 반응이 비가역 1차 반응이라고 주어졌으므로 농도 감소는 시간에 대해 지수적으로 진행되고, 두 농도 사이의 관계를 적분식으로 바로 계산할 수 있다.

계산 과정

1. 460초 시점의 자료로 k를 구하면
$k = \frac{\ln(C_{A0}/C_A)}{t} = \frac{\ln(5.0/0.5)}{460} = \frac{\ln 10}{460} = \frac{2.30}{460} = 0.005 s^{-1}$
2. $C_A = 0.05 mol/L$가 되는 시점은
$t = \frac{\ln(5.0/0.05)}{k} = \frac{\ln 100}{0.005} = \frac{2\ln 10}{0.005} = \frac{4.60}{0.005} = 920 s$
3. 따라서 $k = 0.005 s^{-1}$, $t = 920 s$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: $k = 0.005 s^{-1}$는 맞지만 $t = 1840 s$가 틀렸다. 올바르게는 C_A가 5.0에서 $0.05 mol/L$로 줄어들 때 $\ln 100 = 4.60$을 써서 $t = 920 s$가 된다.
② O: $\ln(5.0/0.5) = \ln 10$으로부터 $k = 0.005 s^{-1}$가 나오고, $\ln(5.0/0.05) = \ln 100$으로부터 $t = 920 s$가 나온다. 두 값이 모두 맞다.
③ X: 반응속도상수 $k = 0.010 s^{-1}$로 둔 부분이 틀렸다. 올바르게는 $k = 0.005 s^{-1}$이다. 또한 $t = 1840 s$도 틀렸고, 올바른 시간은 $920 s$이다. 이 값은 10배 감소와 100배 감소를 혼동해 로그항을 두 배로 잘못 잡으면 나오기 쉽다.
④ X: $t = 920 s$는 맞는 값이지만 $k = 0.010 s^{-1}$가 틀렸다. 올바르게는 $k = 0.005 s^{-1}$이다. 1차 반응에서 같은 자료로 구한 k가 달라지면 같은 문제의 시간 계산과도 모순된다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 10배 감소와 100배 감소를 구분하지 않는 데 있다. 460초는 $5.0 \to 0.5$의 10배 감소 시간이고, $5.0 \to 0.05$는 100배 감소이므로 $\ln 100 = 2 \ln 10$을 써야 한다. 또 k를 한 번 잘못 구하면 뒤의 시간도 연쇄적으로 틀리게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

1차 반응 계산형은 먼저 $\ln(C_{A0}/C_A) = kt$를 적고, 주어진 한 시점 자료로 k를 구한 다음, 목표농도에 대해 농도비의 로그값만 다시 넣어 시간을 계산하면 된다. 농도비가 10배인지 100배인지부터 확인하면 오답을 줄일 수 있다.

암기 포인트

1차 반응 회분식은 $\ln(C_{A0}/C_A) = kt$이고, 농도가 10배 더 줄 때마다 시간은 같은 비율로 누적된다.

NoteBase

문 13. 플러그흐름 반응기에서 $2A \rightarrow R + P$ $(-r_A = kC_A^2)$ 액상 비가역 2차 반응이 일어날 때, 부피 1L 반응기를 사용하여 A의 전환율 50%를 얻었다. 4L 반응기를 사용할 때 A의 전환율[%]은?

① 65

② 70

③ 75

④ 80

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 액상 등밀도 플러그흐름반응기에서 2차 반응의 설계식을 이용해 반응기 부피가 커질 때 전환율이 어떻게 변하는지를 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 반응식은 $2A \rightarrow R + P$, 속도식은 $-r_A = kC_A^2$, $V = 1L$일 때 $X = 0.5$이다.
구해야 할 값: $V = 4L$일 때 전환율 X이다.
주의할 조건: 액상 반응이므로 체적유량이 일정하여 $C_A = C_{A0}(1 - X)$를 그대로 적용할 수 있다.

사용할 공식

플러그흐름반응기 설계식은 $V = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$이다.
이 문제에서는 $-r_A = kC_A^2 = kC_{A0}^2(1 - X)^2$이므로
$V = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2}\int_0^X \frac{dX}{(1 - X)^2} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2} \cdot \frac{X}{1 - X}$
가 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 액상 비가역 2차 반응의 PFR에서는 부피와 $\frac{X}{1-X}$가 비례하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. $V = 1L$, $X = 0.5$를 대입하면
$1 = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2} \cdot \frac{0.5}{1-0.5} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2}$
이므로 $\frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2} = 1$이다.
2. 따라서 이 문제의 관계식은
$V = \frac{X}{1-X}$
로 정리된다.
3. $V = 4L$를 대입하면
$4 = \frac{X}{1-X}$
$4 - 4X = X$
$5X = 4$
$X = 0.8$
이므로 전환율은 80%이다.

선지별 해설

① X: 65%는 $\frac{0.65}{0.35} \approx 1.857$이므로 필요한 반응기 부피가 약 $1.857L$일 때의 값이다. 4 L 조건과 맞지 않는다. 올바르게는 4 L에서 80%이다.
② X: 70%는 $\frac{0.70}{0.30} \approx 2.333$이므로 약 $2.333L$일 때의 전환율이다. 부피를 4배로 늘린 조건의 답이 아니다. 올바르게는 80%이다.
③ X: 75%는 $\frac{0.75}{0.25} = 3$이므로 3 L일 때에 해당한다. 4 L를 대입하면 더 큰 전환율이 나와야 한다. 올바르게는 80%이다.
④ O: 80%는 $\frac{0.80}{0.20} = 4$이므로 주어진 4 L 조건을 정확히 만족한다. 따라서 정답이다.

오답 포인트

부피가 1 L에서 4 L로 4배가 되었으니 전환율도 단순히 50%에서 4배라고 생각하면 틀린다. PFR의 2차 반응은 $V \propto \frac{X}{1-X}$ 관계를 따르므로 전환율을 선형 비례로 잡으면 65%, 70%, 75% 같은 오답에 걸리기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

액상 등밀도 PFR 계산형 문제는 먼저 $V = F_{A0}\int \frac{dX}{-r_A}$를 세우고, 다음으로 $C_A = C_{A0}(1-X)$를 넣어 V와 X의 관계식을 만든 뒤, 주어진 한 점으로 비례상수를 정리해서 나머지 조건을 푸는 순서로 판단한다.

암기 포인트

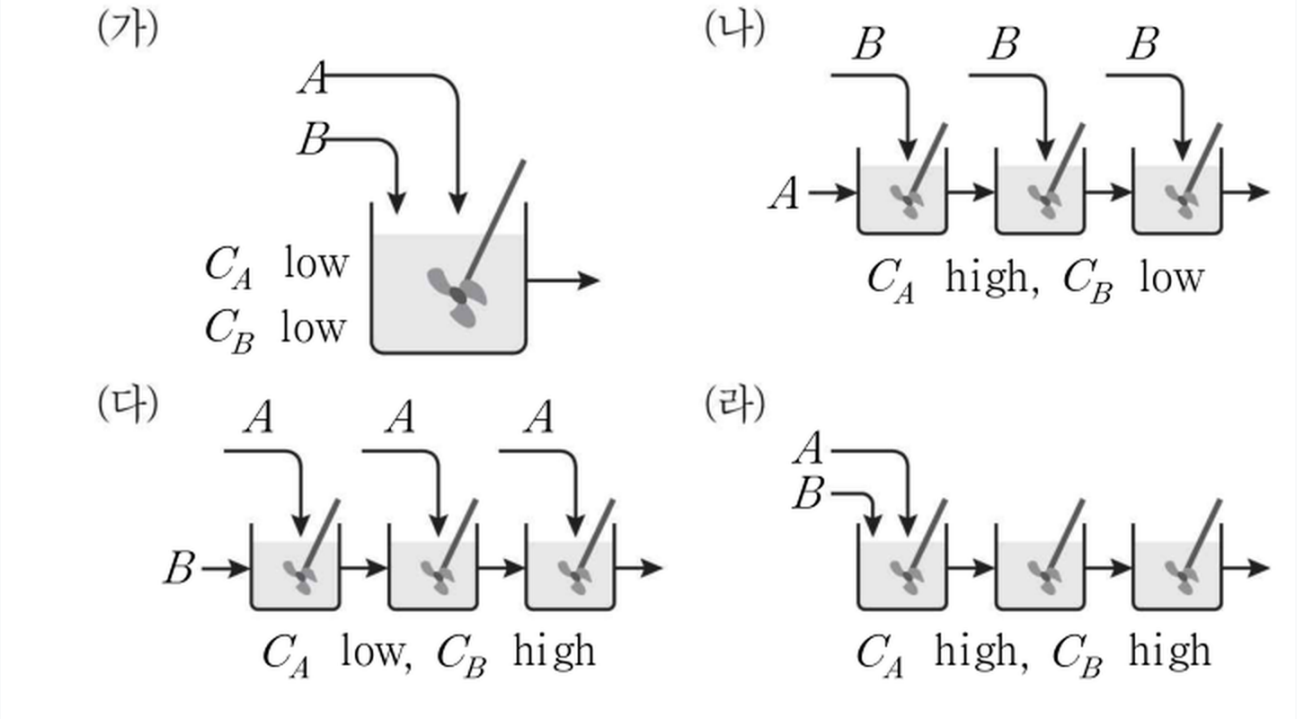
액상 2차 반응 PFR은 $V \propto \frac{X}{1-X}$이고, $X = 0.5$에서 $\frac{X}{1-X} = 1$, $X = 0.8$에서 $\frac{X}{1-X} = 4$가 된다.

NoteBase

문 14. 반응물 A, B에 대해 다음 두 액상반응이 경쟁하여 진행된다. 보기에 제시된 반응기들을 목적생성물 R의 수율이 높은 순으로 나열한 것은?

$A + B \rightarrow R + T, \quad r_R = k_1 C_A^3 C_B$

$A + B \rightarrow S + U, \quad r_S = k_2 C_A C_B^2$



① (나) - (가) - (라) - (다)

② (나) - (라) - (가) - (다)

③ (다) - (라) - (가) - (나)

④ (라) - (나) - (다) - (가)

정답 2번

출제 포인트

경쟁 병렬반응에서 목적생성물 선택성은 $r_R/r_S = (k_1/k_2)(C_A^2/C_B)$가 되므로, C_A는 높고 C_B는 낮게 유지하는 반응기 배열을 고르는 문제이다.

핵심 개념

반응 $A + B \rightarrow R + T$의 속도는 $r_R = k_1 C_A^3 C_B$, 반응 $A + B \rightarrow S + U$의 속도는 $r_S = k_2 C_A C_B^2$이다. 따라서 선택성은 $r_R/r_S = (k_1/k_2)(C_A^2/C_B)$이고, A 농도는 클수록 유리하고 B 농도는 작을수록 유리하다. 그래서 A를 먼저 많이 두고 B를 분할 주입하는 배열이 가장 좋고, B를 먼저 많이 두고 A를 분할 주입하는 배열이 가장 불리하다.

NoteBase

선지별 해설

1번 X
- (나)는 가장 앞에 오는 것이 맞지만, '(가)-(라)'의 순서가 틀리다. (라)는 직렬 CSTR 배열이라 단일 CSTR인 (가)보다 역혼합이 작고, 전체적으로 R 선택성이 더 크다. 올바르게는 '(나)-(가)-(라)-(다)'가 아니라 '(나)-(라)-(가)-(다)'이다.

2번 O
- (나)는 A를 처음에 넣고 B를 각 반응기에 나누어 넣어 C_A high, C_B low 조건을 가장 잘 만든다. (라)는 두 반응물을 함께 넣지만 직렬 CSTR이라 (가)보다 유리하다. (가)는 완전혼합 단일 CSTR이라 C_A, C_B가 모두 낮아지고, (다)는 A를 분할 주입하여 C_A low, C_B high가 되어 가장 불리하다. 따라서 순서는 '(나)-(라)-(가)-(다)'이다.

3번 X
- (다)를 1위로 둔 것이 틀리다. (다)는 선택성 식에서 가장 불리한 C_A low, C_B high 조건이므로 최하위가 되어야 한다. 올바르게는 '(다)-(라)-(가)-(나)'가 아니라 '(나)-(라)-(가)-(다)'이다.

4번 X
- (라)를 1위로 둔 것이 틀리다. (라)도 직렬 반응기라 (가)보다 유리하지만, B를 분할 주입하여 C_B를 낮춘 (나)보다 선택성이 낮다. 또한 뒤 순서도 맞지 않으며, 올바르게는 '(라)-(나)-(다)-(가)'가 아니라 '(나)-(라)-(가)-(다)'이다.

오답 포인트

두 반응물 농도가 모두 높으면 무조건 목적생성물 수율이 크다고 오해하기 쉽다. 이 문항의 핵심은 절대적인 고농도보다 C_A^2/C_B 비가 더 중요하다는 점이다. 그래서 B를 분할 주입해 C_B를 낮추는 (나)가, 두 반응물을 함께 넣는 (라)보다 더 유리하다.

다시 나오면 이렇게 판단

경쟁 병렬반응은 먼저 r_{target}/r_{side}를 만든 뒤 각 농도의 지수를 본다. 목적반응에 유리한 성분은 높게, 불리한 성분은 낮게 유지하는 공급 방식이 유리하다고 판단한다. 반응기 형식만 비교하면 직렬 CSTR 배열이 단일 CSTR보다 역혼합이 작아 보통 선택성에 더 유리하다.

암기 포인트

선택성은 C_A^2/C_B에 비례하므로 A는 한꺼번에 두고 B는 나누어 넣는 배열이 가장 유리하다.

NoteBase

문 15. 다음은 중간체 A_2^*를 거치는 2단계 반응으로 구성된 비기초반응이다. 중간체 생성속도를 0으로 가정하여 구한 생성물 P의 반응속도식은?

(가) 1단계: 2A [k_2]k_1 A_2^*
(나) 2단계: $A_2^* + B \rightarrow A + P$

① $r_P = \frac{k_1 k_3 C_A^2 C_B}{2(k_2 + k_3 C_B)}$
② $r_P = \frac{2k_1 k_3 C_A^2 C_B}{k_2 + k_3 C_B}$
③ $r_P = \frac{k_1 k_3 C_A^2 C_B}{k_2 + k_3 C_B}$
④ $r_P = \frac{k_2 + k_3 C_A}{k_1 k_3 C_A C_B^2}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 중간체 A_2^*에 정상상태 가정을 적용하고, 동일한 분자 A 두 개가 결합하는 1단계의 쌍 개수 보정을 반영하여 생성물 P의 속도식을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 1단계 $2A \rightleftharpoons A_2^*$, 2단계 $A_2^* + B \rightarrow A + P$이다.
구해야 할 값은 생성물 P의 생성속도 r_P이다.
주의할 조건은 중간체 생성속도를 0으로 두는 정상상태 가정과, $2A$처럼 동일 분자 두 개가 결합할 때 생성항에 $\frac{1}{2}$ 보정이 들어간다는 점이다.

사용할 공식

정상상태식은 $\frac{dC_{A_2^*}}{dt} = 0$이다.
따라서
$\frac{k_1}{2} C_A^2 - k_2 C_{A_2^*} - k_3 C_{A_2^*} C_B = 0$
이고, 생성물 속도는
$r_P = k_3 C_{A_2^*} C_B$
이다.
이 공식을 쓰는 이유는 A_2^*가 반응 도중 잠깐 생성되었다가 바로 소모되는 중간체이므로 생성속도와 소멸속도를 같게 둘 수 있기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 1단계에서 동일한 A 두 분자가 만나 A_2^*를 만들므로 A_2^*의 생성속도는 $\frac{k_1}{2}C_A^2$이다.
2. 정상상태를 적용하면 $\frac{k_1}{2}C_A^2 = (k_2 + k_3C_B)C_{A_2^*}$이다.
3. 따라서 $C_{A_2^*} = \frac{k_1C_A^2}{2(k_2 + k_3C_B)}$이다.
4. 이를 $r_P = k_3C_{A_2^*}C_B$에 대입하면

$r_P = \frac{k_1k_3C_A^2C_B}{2(k_2 + k_3C_B)}$
이므로 ①이 맞다.

선지별 해설

① O
제시식 $r_P = \frac{k_1k_3C_A^2C_B}{2(k_2 + k_3C_B)}$는 정상상태식으로 유도한 결과와 일치한다.

② X
분자에 2가 붙은 식 $r_P = \frac{2k_1k_3C_A^2C_B}{k_2 + k_3C_B}$는 1단계의 동일 분자 결합을 과대평가한 값이다. 틀린 식의 핵심은 "2k_1" 부분이며, 올바르게는 $\frac{k_1k_3C_A^2C_B}{2(k_2 + k_3C_B)}$이다.

③ X
식의 형태는 거의 맞지만 $2A$ 결합에 대한 $\frac{1}{2}$ 보정을 빠뜨렸다. 틀린 식의 핵심은 분모 앞의 2가 없다는 점이며, 올바르게는 $r_P = \frac{k_1k_3C_A^2C_B}{2(k_2 + k_3C_B)}$이다.

④ X
이 식은 k_1, k_3, C_A, C_B가 분모로 들어가 있어 속도상수와 농도가 커질수록 속도가 작아지는 비정상적인 형태이다. 또 B는 2단계에서 1차로 작용하므로 C_B^2가 될 수 없다. 틀린 식의 핵심은 분자·분모가 뒤바뀌고 C_B 차수가 잘못된 점이며, 올바르게는 $r_P = \frac{k_1k_3C_A^2C_B}{2(k_2 + k_3C_B)}$이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 정상상태식 자체는 맞게 세우면서도 $2A$가 만드는 쌍의 수를 고려하지 않아 ③처럼 $\frac{1}{2}$를 빠뜨리는 점이다. ②는 그 반대로 계수를 과도하게 키운 경우이고, 분모 $(k_2 + k_3C_B)$는 중간체의 역반응 소멸과 2단계 소모가 함께 들어간다는 뜻이다.

다시 나오면 이렇게 판단

중간체 속도식 문제는 먼저 $\frac{dC_I}{dt} = 0$인 정상상태식을 세우고, 그다음 생성항과 소멸항을 분리해 본다. 출발 단계가 $2A$처럼 동일 분자 두 개의 결합이면 쌍 개수 보정이 필요한지 확인한 뒤, 마지막에 생성물 속도식 r_P로 연결하면 된다.

NoteBase

암기 포인트

정상상태는 생성속도 = 소멸속도이고, 동일 분자 결합 $2A$는 쌍의 수 때문에 $\frac{1}{2}kC_A^2$ 형태가 될 수 있다.

NoteBase

문 16. 다음 반응을 위해 동일한 입구 조건에서 플러그흐름 반응기 또는 혼합흐름 반응기 중 하나를 선택하여 사용하고자 한다. 이 반응과 관련된 설명으로 옳지 않은 것은? (단, 반응기로 유입되는 반응물 중 A와 R의 초기농도는 각각 $9\text{mol}\text{L}^{-1}$ 및 $1\text{mol}\text{L}^{-1}$이다)

$A + R \rightarrow R + R, \quad -r_A = kC_AC_R$

① 반응속도가 최대일 때 A의 전환율은 약 44.4%이다.

② A의 출구 전환율이 30%일 때 혼합흐름 반응기 부피가 플러그흐름 반응기 부피에 비해 작다.

③ 최대 반응속도를 보이는 A의 출구 전환율에서 플러그흐름 반응기와 혼합흐름 반응기의 부피는 같다.

④ A의 출구 전환율이 90%일 때 플러그흐름 반응기의 부피가 혼합흐름 반응기의 부피에 비해 작다.

정답 3번

출제 포인트

자기촉매 반응 $A + R \rightarrow 2R$에서 전환율 X에 따른 농도식을 세운 뒤, 반응속도 최대점과 PFR·CSTR 설계식의 크기를 비교하는 문제이다.

조건 정리

- 주어진 값: $C_{A0} = 9mol/L, C_{R0} = 1mol/L$
- 반응식: $A + R \rightarrow 2R$ 이므로 A가 1만큼 반응하면 R은 순증가량이 1이다.
- 등밀도 조건에서 A의 전환율을 X라 두면 $C_A = 9(1 - X), C_R = 1 + 9X$ 이다.

사용할 공식

반응속도식은 $-r_A = kC_AC_R = 9k(1 - X)(1 + 9X)$ 이다.
PFR 설계식은 $\frac{V}{F_{A0}} = \int_0^X \frac{dX}{-r_A}$, CSTR 설계식은 $\frac{V}{F_{A0}} = \frac{X}{(-r_A)_{exit}}$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유는 같은 입구 조건에서 목표 전환율까지 도달하는 데 필요한 반응기 체적을 직접 비교해야 하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. $-r_A = 9k(1-X)(1+9X) = 9k(1+8X-9X^2)$ 이다.
2. 반응속도 최대 조건은 $\frac{d(-r_A)}{dX} = 9k(8-18X) = 0$ 이므로 $X = \frac{4}{9} = 0.444$ 이다.
3. PFR 체적은 $\frac{V_{PFR}}{F_{A0}} = \frac{1}{90k}\ln\left(\frac{1+9X}{1-X}\right)$ 이다.
4. CSTR 체적은 $\frac{V_{CSTR}}{F_{A0}} = \frac{X}{9k(1-X)(1+9X)}$ 이다.
5. $X = 0.30$에서 $V_{CSTR}/F_{A0} = 0.01287/k$, $V_{PFR}/F_{A0} = 0.01849/k$ 이므로 $V_{CSTR} < V_{PFR}$ 이다.
6. $X = 4/9$에서 $V_{CSTR}/F_{A0} = 0.01778/k$, $V_{PFR}/F_{A0} = 0.02441/k$ 이므로 두 부피는 같지 않고 여전히 $V_{CSTR} < V_{PFR}$ 이다.
7. $X = 0.90$에서 $V_{PFR}/F_{A0} = 0.05012/k$, $V_{CSTR}/F_{A0} = 0.10989/k$ 이므로 $V_{PFR} < V_{CSTR}$ 이다.

선지별 해설

① O: 반응속도는 $-r_A = 9k(1-X)(1+9X)$ 이고, 최대점은 $X = 4/9 = 44.4\%$ 이다. 반응속도 최대일 때 A의 전환율이 약 44.4%라는 설명은 맞다.

② O: $X = 0.30$은 반응속도 최대점 이전이라 반응속도가 입구에서 출구로 갈수록 커진다. 이 구간에서는 출구 속도를 쓰는 CSTR가 더 유리하여 $V_{CSTR} < V_{PFR}$ 이다.

③ X: 틀린 표현은 '부피는 같다'이다. $X = 4/9$에서 계산하면 $V_{CSTR}/F_{A0} = 0.01778/k$, $V_{PFR}/F_{A0} = 0.02441/k$ 이므로 같지 않다. 올바르게는 '최대 반응속도를 보이는 전환율에서도 혼합흐름 반응기 부피가 플러그흐름 반응기 부피보다 작다'이다.

④ O: $X = 0.90$은 최대점 이후라 출구로 갈수록 반응속도가 크게 떨어진다. 이때는 높은 출구 전환율 전체를 CSTR 출구 속도로 처리해야 하므로 CSTR 체적이 더 커지고, 계산 결과도 $V_{PFR} < V_{CSTR}$ 이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 '반응속도가 최대가 되는 지점'과 '두 반응기 부피가 같아지는 지점'을 같은 의미로 착각하는 데 있다. 자기촉매 반응은 초반에는 R 생성 때문에 속도가 증가하지만, 이후에는 A 고갈 때문에 다시 감소하므로 전환율 구간별로 PFR·CSTR의 유불리가 달라진다.

다시 나오면 이렇게 판단

자기촉매 반응기 비교 문제는 먼저 화학양론으로 C_A, C_R를 X의 식으로 바꾸고, 다음으로 $-r_A(X)$가 목표 전환율까지 증가하는지 감소하는지 본다. 목표 지점까지 속도가 증가하는 구간이면 $V_{CSTR} < V_{PFR}$, 높은 전환율에서 속도가 떨어지는 구간이면 $V_{PFR} < V_{CSTR}$가 될 수 있다.

암기 포인트

자기촉매 반응은 $r(X)$가 중간 전환율에서 최대가 되며, 최대점 이전은 CSTR가 작고 최대점 이후의 높은 전환율에서는 PFR가 작아질 수 있다.

NoteBase

문 17. 다공성 촉매입자 표면 속도론에서 정의된 유효인자(effectiveness factor)에 대한 설명으로 옳은 것은?

① 유효인자가 1이면 기공확산에 의한 저항은 무시할 수 있다.

② 유효인자가 1보다 크면 반응의 율속단계는 물질전달 단계이다.

③ C_A를 기공 내 반응물의 농도, C_{As}를 기공 입구에서 반응물의 농도라 하면 0차 반응에서 유효인자는 $\frac{C_A}{C_{As}}$와 같다.

④ 유효인자는 경막확산이 개입할 때 반응속도와 경막확산이 없을 때 반응속도의 비로 정의된다.

정답 1번

출제 포인트

다공성 촉매입자의 유효인자 η가 무엇을 뜻하는지와, 이것이 내부 기공확산 저항만을 반영하는 개념인지 묻는 문제이다.

핵심 개념

유효인자 η는 실제 입자 전체 반응속도를, 입자 내부 전체가 입구 표면농도 C_{As}에 놓여 있다고 가정할 때의 고유반응속도로 나눈 값이다.
즉 $\eta = 1$이면 내부 농도구배가 거의 없어 기공확산 저항을 무시할 수 있고, $\eta < 1$이면 내부 확산 때문에 실제 반응속도가 감소한 상태이다.
이 문항의 핵심 구분은 경막확산과 기공 내부확산을 분리하는 것이다. 유효인자는 표면 속도론 기준에서는 경막확산이 아니라 기공 내부확산의 영향을 나타낸다.

NoteBase

선지별 해설

① O
유효인자가 1이라는 것은 실제 반응속도와 내부확산이 전혀 없다고 가정한 반응속도가 같다는 뜻이다. 따라서 입자 내부 농도저하가 사실상 없고, 기공확산 저항은 무시할 수 있다.

② X
틀린 부분은 "유효인자가 1보다 크면 반응의 율속단계는 물질전달 단계이다"라는 표현이다. 표면 속도론에서 정의한 유효인자는 내부 기공확산의 영향을 나타내는 값이며, 물질전달 율속 여부를 직접 판정하는 기준이 아니다. 일반적인 등온 반응계에서는 내부확산이 있으면 $\eta \le 1$로 본다.

③ X
틀린 부분은 "0차 반응에서 유효인자는 C_A/C_{As}와 같다"라는 표현이다. 0차 반응은 속도가 농도에 무관하므로 유효인자를 이런 농도비로 두지 않는다. 올바르게는 0차 반응에서는 반응이 입자 전역에서 유지되면 η가 1이고, 확산이 매우 심하면 반응영역이 줄어드는 방식으로 해석한다.

④ X
틀린 부분은 "경막확산이 개입할 때 반응속도와 경막확산이 없을 때 반응속도의 비"라는 정의이다. 이는 표면속도론에서의 유효인자 정의가 아니다. 올바르게는 실제 입자 반응속도를, 입자 내부 전체가 표면농도에서 반응한다고 가정한 속도로 나눈 값이 유효인자이다.

오답 포인트

③과 ④가 대표적인 함정이다. ③은 1차 반응에서의 농도 의존성을 0차 반응에 잘못 가져온 것이고, ④는 내부확산을 나타내는 유효인자와 외부 경막확산 효과를 섞어 놓은 선택지이다.

다시 나오면 이렇게 판단

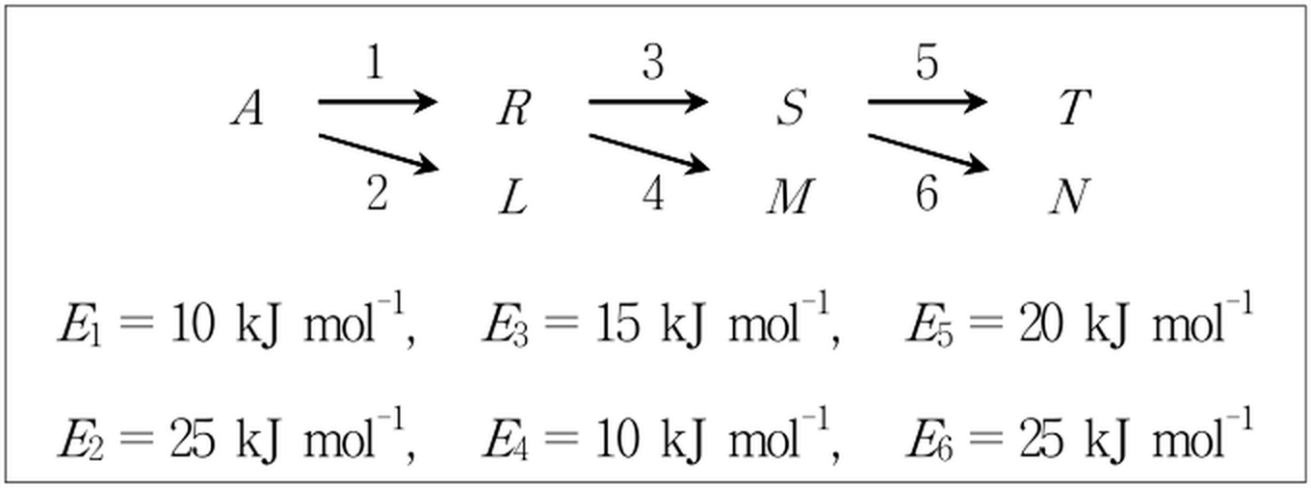
유효인자가 나오면 먼저 기준 반응속도가 무엇인지 본다. 기준이 입자 표면농도에서의 고유반응속도라면 내부 기공확산을 보는 개념이고, $\eta = 1$이면 내부확산 저항이 없다고 판단할 수 있다.

암기 포인트

유효인자 η는 내부확산의 지표이고, $\eta = 1$이면 기공확산 저항이 없다.

NoteBase

문 18. 다음 복합반응에서 S의 농도를 최대로 하기 위한 온도 진행 순서는? (단, E_n은 n번 반응의 활성화에너지를 나타낸다)



① 고온 → 고온 → 저온

② 저온 → 저온 → 저온

③ 저온 → 고온 → 저온

④ 고온 → 저온 → 저온

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 연속·병렬 반응망에서 원하는 중간생성물 S의 생성 단계는 촉진하고 경쟁 반응과 후속 소모 반응은 억제하도록 각 구간의 온도를 정하는지를 묻는다.

올바른 순서

1단계 $A \to R/L$: 저온이다. 원하는 $A \to R$의 $E_1 = 10$이 경쟁 $A \to L$의 $E_2 = 25$보다 작으므로 저온에서 1번 반응이 상대적으로 유리하다.
2단계 $R \to S/M$: 고온이다. 원하는 $R \to S$의 $E_3 = 15$가 경쟁 $R \to M$의 $E_4 = 10$보다 크므로 고온에서 3번 반응이 상대적으로 더 크게 촉진된다.
3단계 $S \to T/N$: 저온이다. 5번과 6번은 모두 S를 소모하므로 S 농도를 최대화하려면 후속 반응 전체를 늦춰야 한다.
왜 이 순서인가: 원하는 경로의 활성화에너지가 경쟁 경로보다 작으면 저온, 크면 고온을 택하고, 목표물질이 만들어진 뒤에는 소모 반응을 막기 위해 저온을 둔다.

NoteBase

선지별 해설

① X
- 틀린 부분: 1단계를 고온으로 본 점이다.
- 이유: 1단계에서는 $E_1 < E_2$이므로 고온으로 올리면 오히려 고활성화에너지 경로인 2번 반응이 상대적으로 더 유리해져 R 수율이 떨어진다.
- 올바르게는: 1단계는 저온이어야 한다. 3단계 저온 판단은 맞지만 전체 순서는 아니다.

② X
- 틀린 부분: 2단계를 저온으로 본 점이다.
- 이유: 2단계에서는 $E_3 > E_4$이므로 저온에서는 4번 반응이 상대적으로 유리해져 S 대신 M으로 더 빠지기 쉽다.
- 올바르게는: 2단계는 고온이어야 한다.

③ O
- 이유: 1단계는 저온으로 $A \rightarrow R$를 상대적으로 유리하게 만들고, 2단계는 고온으로 $R \rightarrow S$를 상대적으로 유리하게 만든 뒤, 3단계는 저온으로 S의 후속 소모 반응을 억제한다.
- 따라서 S 농도를 최대화하는 순서는 저온 → 고온 → 저온이다.

④ X
- 틀린 부분: 1단계를 고온, 2단계를 저온으로 뒤집은 점이다.
- 이유: 이렇게 두면 1단계에서 L 생성이, 2단계에서 M 생성이 상대적으로 증가하여 S 축적에 가장 불리하다.
- 올바르게는: 1단계는 저온, 2단계는 고온, 3단계는 저온이다.

오답 포인트

학생이 활성화에너지가 큰 반응은 무조건 고온이라고만 외워 1단계와 2단계를 같은 방향으로 잡기 쉽다. 그러나 분기마다 비교 대상은 원하는 반응과 경쟁 반응이다. 또 3단계에서 E_5와 E_6의 크기만 비교해 고온을 고르기 쉽지만, 여기서는 T와 N의 선택이 아니라 S 자체의 보존이 목표이다.

다시 나오면 이렇게 판단

각 분기에서 먼저 원하는 반응과 경쟁 반응의 활성화에너지를 비교한다. 원하는 반응의 E가 더 작으면 저온, 더 크면 고온으로 선택성을 맞춘다. 목표 중간생성물이 만들어진 뒤에는 그 물질을 소모하는 후속 반응을 전체적으로 늦추도록 저온으로 판단한다.

암기 포인트

분기 선택성은 원하는 경로와 경쟁 경로의 E 비교로 정하고, 중간생성물 최대화는 만든 뒤 저온으로 지키는 구조이다.

NoteBase

문 19. 순수한 A가 반응하는 경우 반응기의 단열조작선(adiabatic operating line)에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, X_A는 A의 전환율, C_p는 비열, ΔH_R은 반응엔탈피, ΔT는 온도변화를 의미한다)

① 반응물과 생성물의 비열 차이가 없는 경우, 단열조작선은 $X_A = \frac{C_p \Delta T}{-\Delta H_R}$로 표현된다.

② 단열조작에서 $\frac{C_p}{-\Delta H_R}$ 값이 큰 반응에서는 혼합흐름 반응기가 적절하고, 이 값이 작은 반응에서는 플러그흐름 반응기가 적절하다.

③ 흡열반응의 경우 온도 T에 대한 전환율 X_A 그래프에서 단열조작선의 기울기가 음의 값으로 나타난다.

④ 등온조건의 경우 온도 T에 대한 전환율 X_A 그래프에서 단열조작선의 기울기는 무한대이다.

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 단열조작선의 에너지수지식과 X_A-T 그래프에서의 기울기 해석, 그리고 그에 따른 반응기 선택 방향을 묻는 문제이다.

핵심 개념

단열조작선은 외부와 열교환이 없을 때 전환율 X_A와 온도 T가 에너지수지로 연결되는 선이다.
반응물과 생성물의 비열 차이가 없으면 $X_A = \frac{C_p \Delta T}{-\Delta H_R}$가 되고, X_A-T 그래프의 기울기는 $\frac{dX_A}{dT} = \frac{C_p}{-\Delta H_R}$로 본다.
발열반응은 $-\Delta H_R > 0$이므로 기울기가 양수이고, 흡열반응은 $-\Delta H_R < 0$이므로 기울기가 음수이다.
또한 $\frac{C_p}{-\Delta H_R}$가 크면 전환율 증가에 비해 온도상승이 작고, 이 값이 작으면 온도상승이 크다.

NoteBase

선지별 해설

① O
비열 차이가 없으면 단열 에너지수지가 단순화되어 $X_A = \frac{C_p \Delta T}{-\Delta H_R}$ 형태로 정리된다. 제시식은 단열조작선의 기본식으로 맞다.

② X
틀린 부분은 "값이 큰 반응에서는 혼합흐름 반응기가 적절하고, 이 값이 작은 반응에서는 플러그흐름 반응기가 적절하다"는 대응이다.
실제로는 $\frac{C_p}{-\Delta H_R}$가 크면 온도상승이 작아 단열효과가 약하므로 농도 이점을 살리는 플러그흐름 반응기가 더 적절하다. 반대로 이 값이 작으면 온도상승이 커서 반응기 전체를 높은 온도로 유지하기 쉬운 혼합흐름 반응기가 더 적절하다.

③ O
흡열반응은 $\Delta H_R > 0$이므로 $-\Delta H_R < 0$이다. 따라서 $\frac{dX_A}{dT} = \frac{C_p}{-\Delta H_R} < 0$가 되어 X_A-T 그래프에서 단열조작선의 기울기는 음수가 된다.

④ O
등온조건에서는 반응이 진행되어도 온도 T가 일정하다. 따라서 X_A-T 그래프에서는 T가 고정된 수직선이 되므로 기울기는 무한대인 것으로 본다.

오답 포인트

②는 기울기 $\frac{C_p}{-\Delta H_R}$ 자체와 실제 온도상승 크기 $\frac{-\Delta H_R}{C_p}$를 뒤집어 생각하면 쉽게 틀린다. 값이 크다는 것은 기울기가 크다는 뜻이지만, 동시에 전환율당 온도상승은 작다는 뜻이라는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 $X_A = \frac{C_p \Delta T}{-\Delta H_R}$ 또는 $\frac{dX_A}{dT} = \frac{C_p}{-\Delta H_R}$를 잡는다. 그다음 발열이면 양의 기울기, 흡열이면 음의 기울기인지 확인하고, $\frac{C_p}{-\Delta H_R}$가 클수록 온도상승은 작고 작을수록 온도상승은 크다는 방향으로 반응기 선택을 판단한다.

암기 포인트

단열조작선은 X_A-T 에너지수지선이며, 발열은 양의 기울기, 흡열은 음의 기울기, $\frac{C_p}{-\Delta H_R}$가 작을수록 온도상승이 크다.

NoteBase

문 20. 다음 액상 기초반응들이 혼합흐름 반응기에서 일어난다. 반응물로 순수한 A가 $100\text{mol}\text{min}^{-1}$의 속도로 공급되며, 반응기의 공간 시간은 20min이다. 반응기 출구에서 A, R, S, P의 몰분율은 각각 0.2, 0.5, 0.2, 0.1이다. 이 때, k_1, k_2, k_3의 값$[\text{min}^{-1}]$은?

$A \rightarrow R \rightarrow S$
$A \rightarrow P$

① k_1: 0.175, k_2: 0.02, k_3: 0.025
② k_1: 0.02, k_2: 0.175, k_3: 0.025
③ k_1: 0.025, k_2: 0.02, k_3: 0.175
④ k_1: 0.02, k_2: 0.025, k_3: 0.175

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 정상상태 혼합흐름반응기에서 1차 병렬·연속 반응의 물질수지와 공간시간 τ를 이용해 k_1, k_2, k_3를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 순수한 A의 공급속도는 $100mol/min$이다.
- 공간시간은 $\tau = 20min$이다.
- 출구 몰분율은 A, R, S, P가 각각 0.2, 0.5, 0.2, 0.1이다.
- 반응은 $A \rightarrow R \rightarrow S$, $A \rightarrow P$의 1차 반응이다.

구해야 할 값:
- k_1, k_2, k_3이다.

주의할 조건:
- 액상 기초반응이므로 총 몰유량을 $100mol/min$로 두면 출구 몰유량은 $F_A = 20, F_R = 50, F_S = 20, F_P = 10mol/min$이 된다.
- 혼합흐름반응기이므로 정상상태 성분수지 $F_{i0} - F_i + Vr_i = 0$를 그대로 적용한다.

NoteBase

사용할 공식

정상상태 CSTR의 성분수지는 다음과 같다.

$F_{i0} - F_i + Vr_i = 0$

이 문제에서는 $F_i = vC_i$, $\tau = V/v$를 이용해

$F_{A0} - F_A = \tau(k_1 + k_3)F_A$

$F_P = \tau k_3 F_A$

$F_R = \tau k_1 F_A - \tau k_2 F_R$

를 쓴다.

이 공식을 쓰는 이유:

- 혼합흐름반응기에서는 반응기 내부 농도와 출구 농도가 같아 유량식으로 바로 바꿀 수 있다.
- 모든 반응이 1차 반응이므로 각 생성·소모항이 kC 형태로 정리된다.

계산 과정

1. A의 수지에서

$100 - 20 = 20 \times (k_1 + k_3) \times 20$

이므로

$k_1 + k_3 = 0.2 min^{-1}$

이다.

2. P의 수지에서

$10 = 20 \times k_3 \times 20 = 400 k_3$

이므로

$k_3 = 0.025 min^{-1}$

이다.

3. 따라서

$k_1 = 0.2 - 0.025 = 0.175 min^{-1}$

이다.

4. R의 수지에서

$50 = 20 \times 0.175 \times 20 - 20 \times k_2 \times 50$

즉

$50 = 70 - 1000 k_2$

이므로

$k_2 = 0.02 min^{-1}$

이다.

5. 검산하면 $F_S = \tau k_2 F_R = 20 \times 0.02 \times 50 = 20 mol/min$이므로 주어진 출구 몰분율과 일치한다.

NoteBase

선지별 해설

① O
- 계산 결과는 $k_1 = 0.175 min^{-1}$, $k_2 = 0.02 min^{-1}$, $k_3 = 0.025 min^{-1}$이다. A 수지로 $k_1 + k_3$를 먼저 구하고, P 생성량으로 k_3를 정한 뒤, R 수지로 k_2를 구하면 ①과 정확히 일치한다.

② X
- ②는 k_1과 k_2를 뒤바꾼 값이다. R 생성항은 k_1, R 소모항은 k_2에 해당하므로 $k_2 = 0.175 min^{-1}$가 될 수 없다.
- 틀린 표현은 `k_1=0.02`, `k_2=0.175`이다. 올바르게는 `k_1=0.175`, `k_2=0.02`이다.

③ X
- P는 A에서 직접 생성되므로 P의 출구 유량 $10 mol/min$이 바로 k_3를 결정한다. 따라서 $k_3 = 0.175 min^{-1}$는 될 수 없고 $k_3 = 0.025 min^{-1}$이어야 한다.
- 틀린 표현은 `k_3=0.175`, `k_1=0.025`이다. 올바르게는 `k_3=0.025`, `k_1=0.175`이다.

④ X
- ④는 P 수지에서 정해지는 k_3를 가장 크게 잡은 값이라서 처음부터 A와 P의 수지를 동시에 만족하지 못한다. $k_3 = 0.175 min^{-1}$이면 $F_P = 20 \times 0.175 \times 20 = 70 mol/min$가 되어 주어진 $10 mol/min$과 모순된다.
- 틀린 표현은 `k_3=0.175`, `k_1=0.02`, `k_2=0.025`이다. 올바르게는 `k_3=0.025`, `k_1=0.175`, `k_2=0.02`이다.

오답 포인트

병렬 반응 $A \rightarrow P$의 생성량으로 정해지는 k_3와, 중간생성물 R의 수지에서 정해지는 k_2를 섞어 버리기 쉽다. 이 문항은 먼저 A 수지로 $k_1 + k_3$를 잡고, 다음에 P 수지로 k_3를 단독 확정하는 순서를 놓치면 오답이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

연속반응과 병렬반응이 함께 있는 CSTR 계산형은 출구 몰분율을 몰유량으로 바꾼 뒤, 원료 성분 수지로 전체 소모 상수를 구하고, 특정 생성물 수지로 개별 속도상수를 분리한 다음, 중간생성물 수지로 남은 상수를 정리하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

CSTR 연속·병렬 반응은 A 수지로 $k_1 + k_3$, 직접 생성물 P 수지로 k_3, 중간생성물 R 수지로 k_2를 구하는 구조이다.

NoteBase