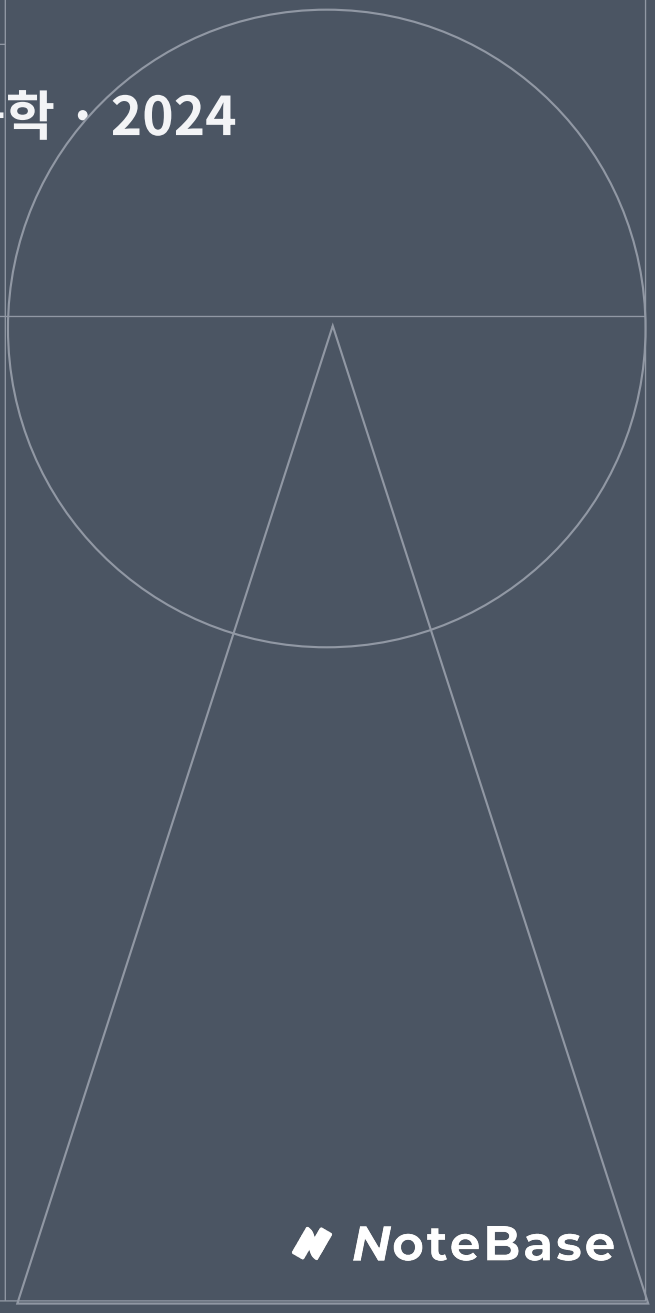
기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2024



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2024

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2024

문 1. <보기>는 중간 생성물 M^*을 포함하는 기초반응이다. 최종 생성물 P의 반응속도식으로 가장 옳은 것은? (단, 반응 중간체는 형성되는 만큼 빠르게 반응하고, k_1, k_2, k_3은 각 화살표에 해당하는 반응의 속도상수이다.)

<보기>

2A [k_2]k_1 M^*

$M^* + B \rightarrow A + P$

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

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 정상상태 가정을 이용해 반응 중간체 M^*의 농도를 제거하고 최종 생성물 P의 반응속도식을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 $2A \rightleftharpoons M^*, M^* + B \rightarrow A + P$이다.
중간체 M^*는 형성되는 만큼 빠르게 반응하므로 M^*에 정상상태 가정을 적용한다.
구해야 할 값은 최종 생성물 P의 생성속도 r_P이다.

사용할 공식

정상상태 가정은 $\frac{dC_{M^*}}{dt} = 0$이다.
따라서 M^*의 생성속도와 소멸속도를 같게 두면
$0 = \frac{k_1 C_A^2}{2} - k_2 C_{M^*} - k_3 C_{M^*} C_B$
가 된다.
이 식을 쓰는 이유는 문제에서 반응 중간체가 생성되는 만큼 바로 소비된다고 주어졌기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 정상상태 식을 C_{M^*}에 대해 정리하면
$C_{M^*} = \frac{k_1 C_A^2}{2(k_2 + k_3 C_B)}$
이다.
2. 생성물 P는 두 번째 반응에서만 생성되므로
$r_P = k_3 C_{M^*} C_B$
이다.
3. 위 식에 C_{M^*}를 대입하면
$r_P = \frac{k_1 k_3 C_A^2 C_B}{2(k_2 + k_3 C_B)}$
가 된다.

선지 판단

1번: X. $\frac{k_1 C_A^2}{2(k_2 + k_3 C_B)}$는 M^*의 농도 형태에 해당할 뿐 P의 생성속도가 아니다. 틀린 표현은 분자에 $k_3 C_B$가 빠진 점이며, 올바르게는 $\frac{k_1 k_3 C_A^2 C_B}{2(k_2 + k_3 C_B)}$이다.
2번: X. 틀린 표현은 $C_A C_B^2$와 $k_1 k_2 + k_3 C_B$이다. 정상상태 식에서 A는 첫 단계 때문에 C_A^2로 들어가고, 분모는 $k_2 + k_3 C_B$가 되어야 한다. 올바르게는 $\frac{k_1 k_3 C_A^2 C_B}{2(k_2 + k_3 C_B)}$이다.
3번: O. 정상상태 가정으로 구한 C_{M^*}를 $r_P = k_3 C_{M^*} C_B$에 대입하면 정확히 $\frac{k_1 k_3 C_A^2 C_B}{2(k_2 + k_3 C_B)}$가 된다.
4번: X. 틀린 표현은 $C_A C_B$와 $k_2 + k_3 C_A$이다. 두 번째 반응의 속도는 M^*와 B에 의존하므로 분모에는 $k_3 C_B$가 더해져야 하고, 첫 단계 때문에 분자에는 C_A^2가 남아야 한다. 올바르게는 $\frac{k_1 k_3 C_A^2 C_B}{2(k_2 + k_3 C_B)}$이다.

오답 포인트

중간체 M^*의 농도식과 최종 생성물 P의 속도식을 같은 것으로 놓으면 1번처럼 $k_3 C_B$를 빠뜨리게 된다. 또 첫 반응이 $2A$이므로 C_A^2가 나온다는 점과, M^*의 소멸항이 k_2와 $k_3 C_B$의 합으로 묶인다는 점을 함께 보아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

중간체가 있는 속도식 문제는 중간체에 먼저 정상상태 가정을 세우고, 그 농도를 푼 뒤, 최종 생성물이 만들어지는 반응단계의 속도식에 대입하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

정상상태 문제는 중간체 생성속도 = 중간체 소멸속도이고, 최종 속도는 중간체 농도를 제거한 뒤 마지막 생성단계 속도식으로 쓴다.

NoteBase

문 2. 부피가 20L인 플러그흐름반응기(PFR)에서 액상 1차 반응 $A \rightarrow P$가 일정한 온도로 일어난다. 부피유량이 $5 L min^{-1}$이고 A의 초기 농도가 $10 mol L^{-1}$일 때, A의 출구 농도$[mol L^{-1}]$는? (단, 속도상수는 $0.4 min^{-1}$이고, $\ln 5$는 1.6으로 가정한다.)

① 2

② 4

③ 6

④ 8

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 액상 1차 반응의 PFR 설계식 $C_A = C_{A0} e^{-k\tau}$로 출구 농도를 구할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

주어진 값: 반응기 부피 20 L, 부피유량 $5 L min^{-1}$, 초기 농도 10 mol L^-1, 속도상수 $k = 0.4 min^{-1}$이다.
구해야 할 값: A의 출구 농도 C_A이다.
주의할 조건: 반응기 종류가 PFR이므로 CSTR 식이 아니라 PFR 식을 써야 한다.

사용할 공식

액상 1차 반응이 일정한 밀도로 PFR에서 진행되면 $\tau = V/v_0$, $C_A = C_{A0} e^{-k\tau}$를 사용한다.
이 공식을 쓰는 이유: 문제에서 액상 1차 반응, 일정한 온도, PFR, 부피유량이 모두 주어져 있어 체류시간을 구한 뒤 PFR의 1차 반응 농도식을 바로 적용할 수 있다.

계산 과정

1. 체류시간은 $\tau = V/v_0 = 20/5 = 4 min$이다.
2. PFR 1차 반응식에 대입하면 $C_A = 10 e^{-0.4 \times 4} = 10 e^{-1.6}$이다.
3. $\ln 5 = 1.6$이므로 $e^{-1.6} = 1/5$이다.
4. 따라서 $C_A = 10 \times 1/5 = 2 mol L^{-1}$이다.

NoteBase

선지 판단

1번: O. 계산 결과가 $2 mol L^{-1}$이므로 선지의 수치 2가 맞다.
2번: X. 선지의 수치 4가 틀렸다. 이는 PFR 대신 CSTR 식 $C_A = C_{A0}/(1 + k\tau)$를 써서 $10/(1 + 1.6) \approx 3.85$를 4로 본 경우에 가깝다. 올바른 수치는 $2 mol L^{-1}$이다.
3번: X. 선지의 수치 6이 틀렸다. 이는 체류시간 4분을 반영하지 않고 1분 반응처럼 $10e^{-0.4} \approx 6.7$로 잘못 본 경우에 가깝다. 올바른 수치는 $2 mol L^{-1}$이다.
4번: X. 선지의 수치 8이 틀렸다. 이는 $e^{-1.6} = 1/5$를 놓치고 전환율을 0.2로 잘못 보아 $10(1 - 0.2) = 8$처럼 계산한 경우에 가깝다. 실제로는 전환율이 0.8이므로 올바른 수치는 $2 mol L^{-1}$이다.

오답 포인트

PFR과 CSTR 식을 바꿔 쓰거나, 부피와 유량으로 체류시간 τ를 먼저 구하지 않으면 오답이 나온다. 또 $\ln 5 = 1.6$에서 $e^{-1.6} = 1/5$라는 관계를 놓치면 8 같은 오답이 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 문제가 나오면 먼저 $\tau = V/v_0$를 계산하고, 다음에 반응기 종류가 PFR인지 CSTR인지 구분한 뒤, 1차 반응이면 PFR은 지수식 $e^{-k\tau}$, CSTR은 분수식 $1/(1 + k\tau)$로 판단한다.

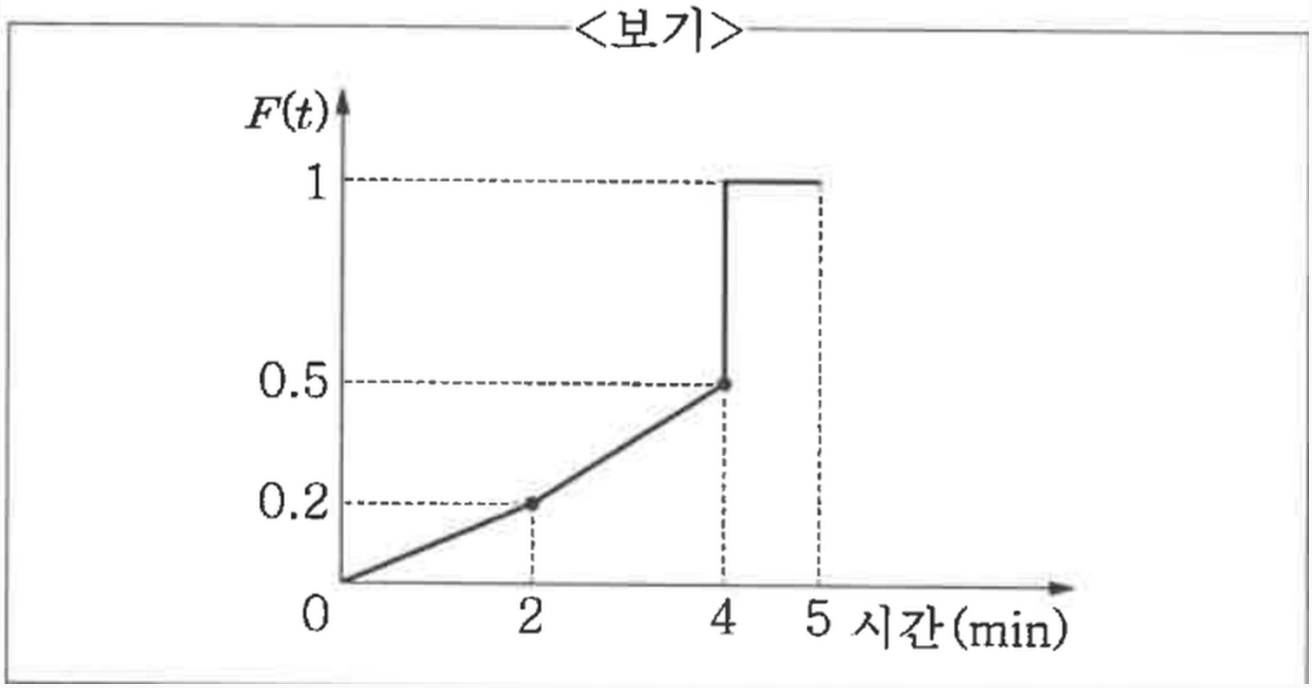
암기 포인트

액상 1차 반응에서 PFR은 $C_A = C_{A0}e^{-k\tau}$, CSTR은 $C_A = C_{A0}/(1 + k\tau)$이다.

NoteBase

문 3. 반응기 내에서 체류한 시간이 t 이하인 배출류의 분율을 뜻하는 누적분포함수 $F(t)$가 <보기>와 같을 때, 평균 체류시간[min]은?

<보기>



① 1.1

② 1.9

③ 2.9

④ 3.1

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 누적분포함수 $F(t)$로부터 평균 체류시간 $\bar{t}$를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:

- $F(2) = 0.2$, $F(4^-) = 0.5$, $F(4) = 1$이다.
- $0 \le t \le 2$와 $2 \le t < 4$ 구간에서 $F(t)$는 직선이다.

구해야 할 값:

- 평균 체류시간이다.

주의할 조건:

- $t = 4$에서 $F(t)$가 0.5만큼 점프하므로 전체의 50%가 정확히 4분에 배출된다.

NoteBase

사용할 공식

$\bar{t} = \int_0^\infty t dF(t)$

또는

$\bar{t} = \int_0^\infty (1 - F(t)) dt$

이 공식을 쓰는 이유:

문제에서 누적분포함수 $F(t)$가 직접 주어졌으므로 기울기는 연속 분포의 비율, 점프는 특정 시각에 한꺼번에 나오는 비율로 읽어 평균 체류시간을 구할 수 있다.

계산 과정

1. 0 ~ 2분 구간은 $F(t)$가 0에서 0.2까지 직선으로 증가하므로 이 구간의 배출 비율은 0.2이고, 평균 시각은 1분이다. 기여도는 $0.2 \times 1 = 0.2$이다.
2. 2 ~ 4분 구간은 $F(t)$가 0.2에서 0.5까지 직선으로 증가하므로 이 구간의 배출 비율은 0.3이고, 평균 시각은 3분이다. 기여도는 $0.3 \times 3 = 0.9$이다.
3. $t = 4$에서 0.5만큼 점프하므로 나머지 50%는 정확히 4분에 배출된다. 기여도는 $0.5 \times 4 = 2.0$이다.
4. 따라서 평균 체류시간은 $\bar{t} = 0.2 + 0.9 + 2.0 = 3.1$분이다.

선지별 해설

① X: 평균 체류시간은 3.1분이므로 1.1분은 아니다. 1.1분은 0 ~ 2분과 2 ~ 4분의 연속 구간 기여도 0.2 + 0.9만 더하고, $t = 4$에서의 0.5 점프를 누락할 때 나오는 오답이다. 올바르게는 3.1분이다.

② X: 평균 체류시간은 $\bar{t} = 0.2 \times 1 + 0.3 \times 3 + 0.5 \times 4 = 3.1$분이므로 1.9분은 아니다. 누적분포의 높이값만 보고 시간을 단순 평균하면 안 된다. 올바르게는 3.1분이다.

③ X: $t = 4$에서 전체의 50%가 한꺼번에 배출된다는 점프를 정확히 반영해야 하므로 2.9분은 아니다. 평균 체류시간은 반드시 3.1분으로 계산된다. 올바르게는 3.1분이다.

④ O: 0 ~ 2분의 20%, 2 ~ 4분의 30%, 4분에서의 50%를 시간가중 평균하면 3.1분이므로 옳다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 $F(t)$의 점프를 무시하는 데 있다. $t = 4$에서 0.5만큼 수직으로 증가한 부분은 전체의 절반이 정확히 4분에 나왔다는 뜻이므로, 이를 빼먹으면 평균 체류시간이 크게 작아진다.

다시 나오면 이렇게 판단

누적분포 $F(t)$가 나오면 먼저 연속 구간의 증가량과 점프 구간의 증가량을 각각 질량으로 나눈다. 그다음 각 구간의 대표시간 또는 $\int (1 - F) dt$를 이용해 평균 체류시간을 계산하면 된다.

NoteBase

암기 포인트

누적분포의 기울기는 분포, 수직 점프는 특정 시각의 집중 배출이며, 평균 체류시간은 $\bar{t} = \int_0^\infty (1 - F(t))dt$로 구한다.

NoteBase

문 4. U에 대한 D의 순간 선택도(instantaneous selectivity)를 D의 생성속도와 U의 생성속도의 비율로 정의한다. <보기>와 같은 액상 다중 반응이 있을 때, $U(U_1 + U_2)$에 대한 D의 순간 선택도$S_{D/U}$를 구하는 식과 이를 최대로 하는 A의 농도C_A^*를 표현한 식을 옳게 짝지은 것은? (단, k_1, k_2, k_3은 반응속도상수이다.)

<보기>

- $A + B \rightarrow D,\ r_D = k_1 C_A^2 C_B$
- $A + B \rightarrow U_1,\ r_{U_1} = k_2 C_A C_B$
- $A + B \rightarrow U_2,\ r_{U_2} = k_3 C_A^3 C_B$

① $S_{D/U}$: $\frac{k_1 C_A}{k_2 + k_3 C_A^2}$, C_A^*: $\sqrt{\frac{k_3}{k_2}}$
② $S_{D/U}$: $\frac{k_1 C_A}{k_2 + k_3 C_A^2}$, C_A^*: $\sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$
③ $S_{D/U}$: $\frac{k_1 C_A^2}{k_2 + k_3 C_A}$, C_A^*: $\sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$
④ $S_{D/U}$: $\frac{k_1 C_A^2}{k_2 + k_3 C_A}$, C_A^*: $\sqrt{\frac{k_3}{k_2}}$

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 다중반응에서 순간 선택도 $S_{D/U}$를 속도식으로 세운 뒤, 이를 최대화하는 C_A^*를 구할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

주어진 값은 $r_D = k_1 C_A^2 C_B, r_{U1} = k_2 C_A C_B, r_{U2} = k_3 C_A^3 C_B$이다.
구해야 할 값은 $S_{D/U}$의 식과 이를 최대로 하는 C_A^*이다.
여기서 $U = U_1 + U_2$이므로 분모는 $r_{U1} + r_{U2}$로 잡아야 한다.

사용할 공식

순간 선택도는 $S_{D/U} = \frac{r_D}{r_U} = \frac{r_D}{r_{U1} + r_{U2}}$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 U를 $U_1 + U_2$로 정의했기 때문이다. 최대값은 C_A에 대한 미분값을 0으로 두어 구한다.

계산 과정

1. $r_U = r_{U1} + r_{U2} = k_2 C_A C_B + k_3 C_A^3 C_B = C_A C_B (k_2 + k_3 C_A^2)$이다.
2. 따라서 $S_{D/U} = \frac{k_1 C_A^2 C_B}{C_A C_B (k_2 + k_3 C_A^2)} = \frac{k_1 C_A}{k_2 + k_3 C_A^2}$이다.
3. 이를 C_A로 미분하면 $\frac{dS_{D/U}}{dC_A} = \frac{k_1 (k_2 - k_3 C_A^2)}{(k_2 + k_3 C_A^2)^2}$이다.
4. 최대점에서는 $k_2 - k_3 C_A^2 = 0$이므로 $C_A^* = \sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$ 이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: $S_{D/U}=\frac{k_1C_A}{k_2+k_3C_A^2}$ 식은 맞지만 최대 농도가 틀렸다. 틀린 표현은 $C_A^*=\sqrt{\frac{k_3}{k_2}}$ 이고, 올바르게는 $C_A^*=\sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$ 이다.
2번 O: 순간 선택도 식이 $\frac{k_1C_A}{k_2+k_3C_A^2}$로 맞고, 미분 조건에서도 $C_A^*=\sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$ 가 되어 정답이다.
3번 X: 틀린 표현은 $S_{D/U}=\frac{k_1C_A^2}{k_2+k_3C_A}$이다. r_D를 r_U로 나눌 때 C_B와 C_A 한 개가 약분되어야 하므로 올바르게는 $S_{D/U}=\frac{k_1C_A}{k_2+k_3C_A^2}$이다. 최대 농도 $\sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$ 만 맞고 선택도 식이 틀렸다.
4번 X: 틀린 표현은 선택도 식과 최대 농도 둘 다이다. 올바르게는 $S_{D/U}=\frac{k_1C_A}{k_2+k_3C_A^2}$, $C_A^*=\sqrt{\frac{k_2}{k_3}}$ 이다.

오답 포인트

분모를 U_1만으로 잡거나, r_D/r_U에서 C_B와 C_A의 약분을 끝까지 하지 않으면 3번, 4번 형태가 나온다. 또 미분 결과 $k_2-k_3C_A^2=0$에서 비를 거꾸로 읽으면 1번처럼 $\sqrt{\frac{k_3}{k_2}}$를 고르게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

다중반응 선택도 문제는 먼저 원하는 생성물과 원하지 않는 생성물의 속도를 모두 합쳐 분모를 세운다. 그다음 공통인자부터 약분해 가장 단순한 C_A 함수로 만든 뒤, 미분하여 최대 조건을 찾으면 된다.

암기 포인트

순간 선택도는 원하는 생성속도 나누기 전체 부생성속도이다. $\frac{ax}{b+cx^2}$ 꼴의 최대점은 $x=\sqrt{\frac{b}{c}}$ 이다.

NoteBase

문 5. 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 기초속도법칙을 따르는 액상 반응 $A + B \rightarrow C$가 진행되고 있다. 반응물의 초기 농도는 $C_{A0} = C_{B0} = 2\text{mol}\text{L}^{-1}$이고, 유량은 $100\text{L}\text{s}^{-1}$일 때, 반응기 출구에서 A의 농도에 가장 가까운 값$[\text{mol}\text{L}^{-1}]$은? (단, 반응속도상수는 $0.2\text{L}\text{mol}^{-1}\text{s}^{-1}$이고, 반응기 길이는 5m이며, 단면적은 0.1m^2이다.)

① 0.33

② 0.67

③ 0.8

④ 1

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 등밀도 액상 PFR에서 $A + B \rightarrow C$의 기초속도식을 적분해 출구 C_A를 구할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

주어진 값: $C_{A0} = C_{B0} = 2molL^{-1}$, $Q = 100Ls^{-1}$, $k = 0.2Lmol^{-1}s^{-1}$, 반응기 길이 5m, 단면적 $0.1m^2$이다.
구해야 할 값: 출구 C_A이다.
주의할 조건: 액상 반응이므로 밀도 변화가 없고, 등몰 공급이어서 반응 내내 $C_A = C_B$이다. 반응기 부피는 $V = AL = 0.1 \times 5 = 0.5m^3 = 500L$이다.

사용할 공식

체류시간은 $\tau = V/Q$이다. 등밀도 액상 PFR에서 $C_A = C_B$이므로 속도식은 $-r_A = kC_AC_B = kC_A^2$이다. 이를 적분하면 $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = k\tau$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유: 등밀도 액상 PFR는 체류시간 기준으로 정리하면 2차 반응 농도식을 바로 적분할 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 반응기 부피는 $V = 0.1 \times 5 = 0.5m^3 = 500L$이다.
2. 체류시간은 $\tau = V/Q = 500/100 = 5s$이다.
3. $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{2} = 0.2 \times 5 = 1$ 이므로 $\frac{1}{C_A} = 1.5$ 이다.
4. 따라서 $C_A = \frac{2}{3} = 0.667molL^{-1}$ 이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: 0.33 $molL^{-1}$는 실제보다 지나치게 작은 값이다. 이 값이 나오려면 체류시간이 더 길거나 반응기 부피가 더 커야 한다. 올바르게는 0.67 $molL^{-1}$이다.
2번 O: 계산 결과 출구 $C_A = 0.667 molL^{-1}$이므로 가장 가깝다.
3번 X: 0.8 $molL^{-1}$는 반응이 덜 진행된 값으로, 이 조건의 $V = 500L$, $\tau = 5s$와 맞지 않는다. 올바르게는 0.67 $molL^{-1}$이다.
4번 X: 1.0 $molL^{-1}$는 PFR를 CSTR처럼 잘못 처리할 때 자주 나오는 값이다. 이 문항의 PFR 출구 농도는 1.0이 아니라 0.67 $molL^{-1}$이다.

오답 포인트

반응기 부피를 $V = AL$로 먼저 구해 500 L로 바꾸지 않거나, PFR를 CSTR 식으로 혼동하면 오답이 나온다. 또 등몰 공급이므로 $C_A = C_B$라는 점을 놓치면 속도식을 잘못 세우게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

액상 PFR 계산형은 먼저 $V \to \tau$를 구하고, 등밀도 여부와 화학양론으로 농도 관계를 정한 뒤, 그 농도 관계가 들어간 속도식을 적분해 출구 농도를 계산하면 된다.

암기 포인트

등밀도 액상 PFR에서 $A + B \to C$, 등몰 공급, 기초속도식이면 $C_A = C_B$가 유지되고, 2차 반응은 $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = k\tau$ 형태로 정리된다.

NoteBase

문 6. 두 개의 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)가 병렬로 연결되어 있으며, 반응속도상수가 $0.05s^{-1}$, A의 초기 농도C_{A0}가 $2molL^{-1}$인 동일한 액상 기초반응 $A \rightarrow B$가 진행되고 있다. 반응기 1의 부피V_1가 $160L$, 반응기 2의 부피V_2가 $400L$일 때, 각 반응기 출구에서의 전환율비X_1/X_2에 가장 가까운 값은? (단, 초기에는 반응물 A만 존재하며, 부피유량은 $40Ls^{-1}$로 동일하다.)

① 0.5

② 0.67

③ 1

④ 2

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 1차 액상 반응이 일어나는 CSTR에서 전환율 식 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$를 적용하여 두 반응기의 전환율비를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $k = 0.05s^{-1}, Q = 40Ls^{-1}, V_1 = 160L, V_2 = 400L, C_{A0} = 2molL^{-1}$이다.
구해야 할 값: X_1/X_2이다.
주의할 조건: 병렬 연결이므로 각 반응기의 유입은 동일한 원료이고, 각 반응기의 전환율은 각자 $\tau = V/Q$로 계산한다. 초기농도 C_{A0}는 전환율비 계산에 직접 필요하지 않다.

사용할 공식

정상상태 1차 액상반응 CSTR의 전환율은 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$, 체류시간은 $\tau = \frac{V}{Q}$이다.
이 공식을 쓰는 이유: 문제는 동일한 1차 반응이 각 CSTR에서 독립적으로 진행될 때 각 출구 전환율을 묻고 있으므로 PFR식이 아니라 CSTR식을 적용해야 한다.

계산 과정

1. 체류시간은 $\tau_1 = \frac{160}{40} = 4s$, $\tau_2 = \frac{400}{40} = 10s$이다.
2. 전환율은 $X_1 = \frac{0.05 \times 4}{1 + 0.05 \times 4} = \frac{0.2}{1.2} = \frac{1}{6} \approx 0.1667$, $X_2 = \frac{0.05 \times 10}{1 + 0.05 \times 10} = \frac{0.5}{1.5} = \frac{1}{3} \approx 0.3333$이다.
3. 따라서 $\frac{X_1}{X_2} = \frac{1/6}{1/3} = \frac{1}{2} = 0.5$이다.

NoteBase

선지 판단

① O
- 계산 결과 $X_1/X_2 = 0.5$이므로 맞는 값이다.
- 1번의 수치 표현은 그대로 타당하다.

② X
- 0.67은 계산 결과와 다르다.
- 틀린 표현은 \"$X_1/X_2 = 0.67$\"이고, 올바르게는 \"$X_1/X_2 = 0.5$\"이다.
- 이 값은 CSTR 식의 분모 $1 + k\tau$ 처리를 잘못하면 고르기 쉬운 오답이다.

③ X
- 1은 두 반응기의 전환율이 같다는 뜻인데, 실제로는 $X_1 = 0.1667$, $X_2 = 0.3333$으로 서로 다르다.
- 틀린 표현은 \"$X_1/X_2 = 1$\"이고, 올바르게는 \"$X_1/X_2 = 0.5$\"이다.

④ X
- 2는 비를 거꾸로 계산한 X_2/X_1에 해당한다.
- 틀린 표현은 \"$X_1/X_2 = 2$\"이고, 올바르게는 \"$X_1/X_2 = 0.5$\"이다.

오답 포인트

반응기 2의 부피가 더 크므로 체류시간과 전환율이 모두 더 크다. 따라서 X_1/X_2는 1보다 작아야 하는데, 이 감각을 놓치면 ③ 같은 오답을 고르기 쉽다. 또 문제는 X_1/X_2를 묻는데 이를 X_2/X_1로 뒤집으면 ④가 된다. 초기농도 C_{A0}에 신경을 빼앗겨 핵심인 CSTR 전환율식을 놓치는 경우도 흔하다.

다시 나오면 이렇게 판단

계산형 CSTR 문제는 먼저 $\tau = V/Q$를 구하고, 다음에 1차 CSTR 식 $X = \frac{k\tau}{1 + k\tau}$를 적용한 뒤, 마지막에 비의 방향이 문제에서 묻는 X_1/X_2인지 확인하면 된다.

암기 포인트

1차 CSTR 전환율은 $X = \frac{k\tau}{1 + k\tau}$이고, 부피가 커지면 τ가 커져 전환율도 커진다.

NoteBase

문 7. 액상 반응 A→P가 <보기>의 속도식을 따른다. 등온 회분식반응기에서 순수한 반응물 A가 전화율 75%에 도달하는 데 걸리는 시간이 10분일 때, 동일한 반응조건에서 전화율 100%에 도달하는 데 걸리는 최소 시간[min]은?

<보기>

$-r_A = kC_A^{0.5}$

① 12

② 15

③ 18

④ 20

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 회분식 반응기에서 반응속도식 $-r_A = kC_A^{0.5}$를 적분하여 전환율에 따른 반응시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 액상 반응 $A \to P$, 속도식 $-r_A = kC_A^{0.5}$, 전환율 75% 도달 시간 10분이다. 구해야 할 값: 같은 조건에서 전환율 100% 도달 최소 시간이다. 주의할 조건: 액상 회분식이므로 부피를 일정하게 보면 $C_A = C_{A0}(1 - X)$로 둘 수 있고, 0.5차 반응은 $C_A \to 0$일 때 적분시간이 유한하다.

사용할 공식

회분식 반응기에서 $\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^{0.5}$ 이므로 $t = \int_{C_A}^{C_{A0}} \frac{dC_A}{kC_A^{0.5}} = \frac{2}{k}\left(\sqrt{C_{A0}} - \sqrt{C_A}\right)$ 이다. 또 $C_A = C_{A0}(1 - X)$ 이므로 $t = \frac{2\sqrt{C_{A0}}}{k}\left(1 - \sqrt{1 - X}\right)$ 이다. 이 공식을 쓰는 이유는 전환율과 시간이 직접 연결되는 회분식 속도적분식이기 때문이다.

계산 과정

1. 전환율 75%이면 $X = 0.75$ 이고 $1 - X = 0.25$ 이다.
2. 따라서 $10 = \frac{2\sqrt{C_{A0}}}{k}\left(1 - \sqrt{0.25}\right) = \frac{2\sqrt{C_{A0}}}{k}(1 - 0.5) = \frac{\sqrt{C_{A0}}}{k}$ 이다. 즉 $\frac{\sqrt{C_{A0}}}{k} = 10$ 이다.
3. 전환율 100%이면 $X = 1$ 이고 $\sqrt{1 - X} = 0$ 이므로 $t = \frac{2\sqrt{C_{A0}}}{k} = 2 \times 10 = 20$ min 이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 계산 결과는 20분이므로 12분은 맞지 않는다. 12분은 75% 전환에 필요한 10분보다 조금 큰 값일 뿐 100% 도달시간이 아니다. 틀린 표현은 "100%에 도달하는 데 12분"이고, 올바르게는 "100%에 도달하는 데 20분"이다.
② X: 계산 결과는 20분이므로 15분은 틀리다. 15분은 전환율과 시간의 비례를 막연히 가정하거나 75%에서 100%까지 남은 25%만 짧게 더하는 식으로 판단할 때 나올 수 있는 값이다. 틀린 표현은 "100%에 도달하는 데 15분"이고, 올바르게는 "100%에 도달하는 데 20분"이다.
③ X: 계산 결과는 20분이므로 18분도 틀리다. 18분은 적분 없이 거의 다 되었으니 조금만 더 걸린다고 오판한 값이다. 0.5차 반응에서는 적분식으로 직접 계산해야 한다. 틀린 표현은 "100%에 도달하는 데 18분"이고, 올바르게는 "100%에 도달하는 데 20분"이다.
④ O: $t = \frac{2\sqrt{C_{A0}}}{k}(1 - \sqrt{1 - X})$ 에서 $X = 1$을 대입하면 $t = \frac{2\sqrt{C_{A0}}}{k} = 20$분이므로 옳다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 전환율과 시간이 선형 비례한다고 착각하는 점이다. 75%에서 10분이 걸렸다고 해서 남은 25%를 같은 비율로 더하면 안 된다. 또 100% 전환은 항상 무한 시간이 걸린다고 일반화하면 안 된다. 0.5차 반응은 $C_A^{0.5}$ 적분 결과가 유한하므로 100% 도달시간이 20분으로 계산된다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분식 계산형은 먼저 $C_A = C_{A0}(1 - X)$로 바꾸고, 다음에 속도식을 적분형 시간식으로 만든 뒤, 주어진 전환율-시간 자료로 상수 묶음 $\sqrt{C_{A0}}/k$를 정리해서 목표 전환율에 다시 대입하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

0.5차 회분식은 $t = \frac{2\sqrt{C_{A0}}}{k}(1 - \sqrt{1 - X})$ 이고, $X = 1$에서도 시간이 유한하게 나온다.

NoteBase

문 8. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)와 등온 플러그흐름반응기(PFR)가 직렬로 연결되어 있고, 액상 기초반응 $A \rightarrow B$가 진행되고 있다. 반응속도상수가 $0.1s^{-1}$, CSTR의 체류시간(τ_{CSTR})이 $10s$, PFR에서의 체류시간(τ_{PFR})이 $20s$일 때, 출구에서 A의 총 전화율[%]은? (단, 초기에는 반응물 A만 존재하며, e^{-2}는 0.14로 가정한다.)

① 50

② 86

③ 91

④ 93

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 1차 액상반응에서 CSTR 출구 농도를 먼저 구한 뒤, 그 농도가 PFR로 들어간다고 보고 전체 전환율을 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 반응속도상수 $k = 0.1s^{-1}$, CSTR 체류시간 $\tau_{CSTR} = 10s$, PFR 체류시간 $\tau_{PFR} = 20s$이다.
구해야 할 값: 출구에서 A의 총 전환율이다.
주의할 조건: CSTR과 PFR가 직렬이므로 CSTR 출구 농도가 그대로 PFR 입구 농도가 된다.

사용할 공식

CSTR에서는 $C_{A,1} = \frac{C_{A0}}{1 + k\tau_{CSTR}}$, 따라서 $X_{CSTR} = \frac{k\tau_{CSTR}}{1 + k\tau_{CSTR}}$이다. PFR에서는 $C_{A,2} = C_{A,1}e^{-k\tau_{PFR}}$이다.
이 공식을 쓰는 이유: 액상 1차반응이고 밀도 변화가 없으므로 CSTR은 정상상태 물질수지식, PFR은 1차반응 적분식으로 바로 계산할 수 있다.

계산 과정

1. CSTR에서 $k\tau_{CSTR} = 0.1 \times 10 = 1$이므로 $X_{CSTR} = \frac{1}{1+1} = 0.5$이다. 따라서 $C_{A,1} = 0.5C_{A0}$이다.
2. PFR에서 $k\tau_{PFR} = 0.1 \times 20 = 2$이므로 $C_{A,2} = C_{A,1}e^{-2} = 0.5C_{A0} \times 0.14 = 0.07C_{A0}$이다.
3. 전체 출구에서 남은 A는 초기의 7%이므로 총 전환율은 $X = 1 - 0.07 = 0.93$이다. 따라서 총 전환율은 93%이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 50%는 CSTR 하나만 지난 직후의 전환율이다. 뒤에 연결된 PFR에서 A가 더 반응하므로 최종 총 전환율 50%는 틀리다. 올바르게는 총 전환율이 93%이다.
② X: 86%는 PFR 단독으로 처음 농도 C_{A0}가 바로 들어간다고 보고 $1-e^{-2}=0.86$만 계산한 값이다. 이 문제는 먼저 CSTR을 지난 뒤 PFR로 들어가므로 최종 총 전환율은 86%가 아니라 93%이다.
③ X: 91%는 최종 잔존농도를 $0.09C_{A0}$처럼 잘못 잡았을 때의 값이다. 문제에서 $e^{-2}=0.14$를 사용하면 $C_{A,2}=0.07C_{A0}$이므로 총 전환율은 91%가 아니라 93%이다.
④ O: CSTR 출구 농도는 $0.5C_{A0}$이고, 이어서 PFR를 지나면 $0.5\times0.14=0.07$만 남는다. 따라서 전체 전환율은 $1-0.07=0.93$, 즉 93%이므로 옳다.

오답 포인트

직렬 반응기 문제에서 각 반응기를 따로 계산하고 끝내는 실수가 잦다. 특히 ①처럼 CSTR 결과만 답으로 고르거나, ②처럼 PFR 식을 초기농도에 바로 적용해 앞단 CSTR의 영향을 빼먹는 함정이 자주 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 반응기 계산형 문제는 반응기별 출구 농도를 순서대로 연결해서 판단한다. 먼저 앞 반응기 출구 농도를 구하고, 그 값을 다음 반응기 입구 농도로 넣은 뒤 마지막에 초기농도 대비 전환율로 환산하면 된다.

암기 포인트

직렬 반응기는 전환율을 바로 더하지 않고 출구 농도를 이어서 계산한다. CSTR은 $C_A=C_{A0}/(1+k\tau)$, PFR은 $C_A=C_{A,\text{in}}e^{-k\tau}$ 형태로 기억해 둔다.

NoteBase

문 9. 이상적인 연속교반탱크반응기(CSTR)의 출구 나이분포 함수(exit age distribution curve, $E(t)$)를 평균체류시간($\bar{\tau}$)을 활용하여 바르게 표현한 식은?

① $1-\exp(-t/\bar{\tau})$

② $1-\exp(-t/\bar{\tau})/\bar{\tau}$

③ $\exp(-t/\bar{\tau})$

④ $\exp(-t/\bar{\tau})/\bar{\tau}$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 이상적 CSTR의 체류시간분포함수 $E(t)$가 완전혼합계의 지수분포 형태라는 점을 묻는 문제이다.

조건 정리

주어진 개념은 이상적 연속교반탱크반응기(CSTR)의 출구 나이분포함수이다.
구해야 할 값은 평균체류시간 $\bar{\tau}$로 나타낸 $E(t)$의 식이다.
주의할 조건은 $E(t)$가 확률밀도함수이므로 적분값이 1이어야 하고 단위는 1/time이어야 한다는 점이다.

사용할 공식

이상적 CSTR의 출구 나이분포함수는 $E(t)=\frac{1}{\bar{\tau}}\exp\left(-\frac{t}{\bar{\tau}}\right)$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 이상적 CSTR이 완전혼합이므로 체류시간분포가 지수분포를 따르기 때문이다.

계산 과정

완전혼합 CSTR에서는 시간 t까지 반응기 내부에 남아 있을 확률이 $\exp(-t/\bar{\tau})$ 형태로 감소한다.
따라서 누적분포는 $F(t)=1-\exp(-t/\bar{\tau})$가 된다.
출구 나이분포함수는 누적분포의 미분이므로 $E(t)=\frac{dF(t)}{dt}=\frac{1}{\bar{\tau}}\exp\left(-\frac{t}{\bar{\tau}}\right)$가 된다.

선지 판단

1번 X: $1-\exp(-t/\bar{\tau})$는 이상적 CSTR의 누적분포 $F(t)$ 형태이다. 틀린 표현은 이것을 바로 $E(t)$로 둔 점이며, 올바르게는 $E(t)=\frac{1}{\bar{\tau}}\exp(-t/\bar{\tau})$이다.
2번 X: $1-\exp(-t/\bar{\tau})/\bar{\tau}$는 1에서 1/time 차원의 항을 빼는 꼴이라 분포함수로도 밀도함수로도 맞지 않는다. 틀린 표현은 앞의 1이 남아 있는 점이며, 올바르게는 $\frac{1}{\bar{\tau}}\exp(-t/\bar{\tau})$만 남아야 한다.
3번 X: $\exp(-t/\bar{\tau})$는 지수감소 형태만 있고 정규화 인자 $1/\bar{\tau}$가 빠져 있다. 틀린 표현은 분모 $\bar{\tau}$가 없는 점이며, 올바르게는 $\exp(-t/\bar{\tau})/\bar{\tau}$이다.
4번 O: $\exp(-t/\bar{\tau})/\bar{\tau}$는 $\frac{1}{\bar{\tau}}\exp(-t/\bar{\tau})$와 같은 식이다. 이상적 CSTR의 출구 나이분포함수를 정확히 나타내므로 옳다.

NoteBase

오답 포인트

이 문항의 함정은 누적분포 $F(t)$와 밀도함수 $E(t)$를 혼동하는 점, 그리고 지수항은 기억하지만 앞의 정규화 인자 $1/\bar{\tau}$를 빠뜨리는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

RTD 문제에서 식이 나오면 먼저 그것이 누적분포인지 밀도함수인지 구분하고, 밀도함수라면 적분값이 1이 되도록 앞의 정규화 인자 $1/\bar{\tau}$가 있는지 확인한다.

암기 포인트

이상적 CSTR의 RTD는 지수분포이며 $E(t)=\frac{1}{\bar{\tau}}e^{-t/\bar{\tau}}$, $F(t)=1-e^{-t/\bar{\tau}}$로 구분된다.

NoteBase

문 10. 순수한 A로 구성된 회분식반응기에서 반응물의 부피가 반응 시작 후 9분 동안 50% 증가한다. 기체 반응 $A \rightarrow 1.6B$에서 A의 소멸에 대한 1차 반응속도상수$[min^{-1}]$는? (단, 모든 기체는 이상기체이며 계 내의 전압과 온도는 일정하고, $\ln 6$은 1.8로 가정한다.)

① 0.1

② 0.2

③ 0.3

④ 0.5

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 등온등압 기체 회분식반응기에서 부피 변화로 전환율을 구한 뒤 1차 반응 적분식으로 속도상수 k를 계산할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

주어진 값: 반응식은 $A \rightarrow 1.6B$, 모든 기체는 이상기체, 계 내의 전압과 온도는 일정, 9분 후 부피는 초기보다 50% 증가한다.
구해야 할 값: A의 소멸에 대한 1차 반응속도상수 k이다.
주의할 조건: 등온등압 이상기체이므로 부피비는 총 몰수비와 같고, 부피 증가율 50%를 전환율 50%로 바로 두면 안 된다.

사용할 공식

$A \rightarrow 1.6B$이므로 총 몰수는 $N_T = N_{A0}(1 + 0.6X)$이다.
등온등압 이상기체이므로 $V/V_0 = N_T/N_{T0} = 1 + 0.6X$이다.
또한 1차 소멸반응의 회분식 적분식은 $N_A = N_{A0}e^{-kt}$이므로 $1 - X = e^{-kt}$이다.
이 공식을 쓰는 이유: 부피 증가로 먼저 전환율 X를 구하고, 그 전환율을 1차 반응 적분식에 넣으면 속도상수 k를 계산할 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 9분 후 부피가 50% 증가했으므로 $V/V_0 = 1.5$이다.
2. $1 + 0.6X = 1.5$이므로 $0.6X = 0.5$, 따라서 $X = 5/6$이다.
3. 남아 있는 A의 비율은 $1 - X = 1/6$이므로 $e^{-kt} = 1/6$이다.
4. $t = 9\text{min}$, $\ln 6 = 1.8$을 대입하면 $k = (\ln 6)/9 = 1.8/9 = 0.2\text{min}^{-1}$이다.

NoteBase

선지 판단

1번: X. 계산 결과는 0.2min^{-1}이므로 0.1은 맞지 않는다. 올바르게는 속도상수는 0.2min^{-1}이다.
2번: O. 부피 증가에서 $X = 5/6$을 구하고 $1 - X = 1/6$을 1차 반응식에 대입하면 $k = 0.2\text{min}^{-1}$가 된다.
3번: X. 계산값과 일치하지 않는 값이다. 올바르게는 속도상수는 0.2min^{-1}이다.
4번: X. 50%는 부피 증가율이지 속도상수가 아니다. 올바르게는 부피 증가율로 전환율을 먼저 구한 뒤 $k = 0.2\text{min}^{-1}$를 얻는다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 부피가 50% 증가했다는 말을 전환율 50%로 바로 해석하는 실수이다. 이 반응은 $A \rightarrow 1.6B$이므로 1몰 반응할 때 총 몰수가 0.6몰 증가하여 $V/V_0 = 1 + 0.6X$로 연결해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

등온등압 기체 회분식에서 부피 변화가 주어지면 먼저 화학양론으로 V/V_0와 X의 관계를 세우고, 그다음 $1 - X$를 적분식에 넣어 k를 구하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

등온등압 기체 회분식 1차 반응은 V/V_0로 전환율을 구하고, 마지막에는 $1 - X = e^{-kt}$를 적용한다.

NoteBase

문 11. 미분형반응기(differential reactor)에 대한 설명으로 옳은 것을 <보기>에서 모두 고른 것은?

<보기>
ㄱ. 미분형반응기는 농도의 함수로 반응속도를 구하는 데 사용된다.
ㄴ. 미분형반응기를 사용할 때, 우회(by-pass)나 편류(channeling)가 발생하도록 운전 조건을 조절해야 한다.
ㄷ. 미분형반응기에서 반응속도는 촉매층 내에서 변화한다고 볼 수 있다.
ㄹ. 미분형반응기에서는 농도구배가 없다고 가정할 수 있다.

① ㄱ, ㄴ
② ㄱ, ㄷ
③ ㄱ, ㄹ
④ ㄴ, ㄹ

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 미분형반응기의 핵심 가정인 매우 낮은 전환율, 반응기 내부 조성의 거의 일정함, 그리고 속도측정 용도를 묻는 문제이다.

핵심 개념

미분형반응기는 반응기 내 전환율을 매우 작게 유지하여 반응물 농도와 온도가 거의 변하지 않는다고 보고 순간 반응속도를 측정하는 장치이다. 따라서 촉매층을 따라 속도와 농도가 크게 달라지지 않는다고 본다.

NoteBase

선지별 해설

① O: ㄱ은 옳다. 미분형반응기는 전환율을 아주 작게 만들어 특정 농도 조건에서의 반응속도를 직접 구하는 데 사용된다.
② X: ㄴ은 틀리다. 틀린 표현은 "우회(by-pass)나 편류(channeling)가 발생하도록"이다. 실제로는 유동 이상이 생기지 않도록 우회와 편류를 방지해야 정확한 속도 측정이 가능하다.
③ O: ㄷ은 옳지 않으므로 이 조합은 틀리다. 미분형반응기에서는 촉매층 내 조성 변화가 매우 작다고 보므로 반응속도가 촉매층 내에서 유의미하게 변한다고 보지 않는다. 틀린 표현은 "반응속도는 촉매층 내에서 변화한다"이고, 올바르게는 "반응속도는 촉매층 내에서 거의 일정하다고 본다"이다.
④ X: ㄹ은 옳다. 미분형반응기는 전환율이 매우 낮아 반응기 내부의 농도구배를 무시할 수 있다고 가정한다. 따라서 ㄴ, ㄹ 조합은 틀리다.
ㄱ: O. 농도의 함수로 반응속도를 구하는 용도라는 설명이 맞다.
ㄴ: X. 우회나 편류는 의도적으로 만들 대상이 아니라 제거해야 할 유동 이상이다. 올바르게는 "우회와 편류가 생기지 않도록 운전한다"이다.
ㄷ: X. 미분형반응기에서는 층내 조성 변화가 작아 속도도 거의 일정하다고 본다. 올바르게는 "반응속도는 촉매층 내에서 거의 변화하지 않는다고 본다"이다.
ㄹ: O. 전환율이 매우 작으므로 반응기 내부 농도구배를 무시할 수 있다.

오답 포인트

ㄴ의 "발생하도록"과 ㄷ의 "변화한다"가 함정이다. 미분형반응기는 오차 요인을 일부러 만드는 장치가 아니라, 유동 이상과 농도 변화를 최대한 줄여 순간 속도를 재는 장치라는 점을 놓치면 헷갈리기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

미분형반응기가 나오면 먼저 "전환율이 매우 작은가"를 떠올리면 된다. 전환율이 매우 작으면 농도와 온도는 거의 일정하고, 속도는 특정 조성에서의 순간값으로 다루며, 우회·편류 같은 유동 이상은 배제 대상이다.

암기 포인트

미분형반응기 = 낮은 전환율 = 농도구배 무시 = 순간 반응속도 측정이다.

NoteBase

문 12. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 액상 기초반응 $\mathrm{A} + \mathrm{B} \rightarrow \mathrm{C}$가 진행되고 있다. 반응기 출구에서 A의 농도가 $0.1\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$, B의 농도가 $0.5\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$일 때, A의 초기 농도 C_{A0}와 B의 초기 농도 C_{B0}의 비율 C_{A0}/C_{B0}은? (단, 반응속도상수는 $0.05\,\mathrm{L\,mol^{-1}\,s^{-1}}$이고, 반응체류시간은 $20\,\mathrm{s}$이다.)

① $\frac{3}{11}$
② $\frac{1}{3}$
③ 3
④ $\frac{11}{3}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 정상상태 CSTR의 물질수지와 액상 기초반응 속도식 $-r_A = kC_AC_B$를 이용해 C_{A0}/C_{B0}를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 출구 $C_A = 0.1\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$, $C_B = 0.5\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$, $k = 0.05\,\mathrm{L\,mol^{-1}\,s^{-1}}$, $\tau = 20\,\mathrm{s}$이다.
구해야 할 값: 초기 농도 비 C_{A0}/C_{B0}이다.
주의할 조건: 정상상태 CSTR에서는 출구 농도가 반응기 내부 농도와 같고, 반응식 $A + B \rightarrow C$는 1:1로 소모된다.

사용할 공식

정상상태 CSTR의 A 성분 수지는 $C_{A0} - C_A = \tau(-r_A) = \tau k C_A C_B$ 이고, B 성분도 $C_{B0} - C_B = \tau k C_A C_B$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유: 문제에서 체류시간과 출구 농도가 주어졌으므로, 출구 조성에서의 반응속도를 구한 뒤 CSTR 설계식으로 소모량을 바로 계산할 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 출구 조성에서 반응속도를 계산하면 $-r_A = kC_AC_B = 0.05 \times 0.1 \times 0.5 = 0.0025\,\mathrm{mol\,L^{-1}\,s^{-1}}$이다.
2. CSTR에서 성분 A의 소모량은 $\tau(-r_A) = 20 \times 0.0025 = 0.05\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$이다. 반응식이 1:1이므로 B도 같은 양만큼 소모된다.
3. 따라서 $C_{A0} = 0.1 + 0.05 = 0.15\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$, $C_{B0} = 0.5 + 0.05 = 0.55\,\mathrm{mol\,L^{-1}}$이다.
4. 비율은 $\frac{C_{A0}}{C_{B0}} = \frac{0.15}{0.55} = \frac{15}{55} = \frac{3}{11}$ 이다.

NoteBase

선지 판단

1번: O. 계산 결과가 3/11이므로 맞다.
2번: X. 1/3은 계산 결과와 다르다. 틀린 표현은 $C_{A0}/C_{B0} = 1/3$이고, 올바르게는 $C_{A0}/C_{B0} = 3/11$이다.
3번: X. 3은 계산 결과와 다르다. 이 값은 B의 초기 농도에 출구 농도 0.5를 더하지 않고 소모량만 반영할 때 나올 수 있다. 틀린 표현은 $C_{A0}/C_{B0} = 3$이고, 올바르게는 $C_{A0}/C_{B0} = 3/11$이다.
4번: X. 11/3은 정답의 역수이므로 분모와 분자를 뒤바꾼 값이다. 틀린 표현은 $C_{A0}/C_{B0} = 11/3$이고, 올바르게는 $C_{A0}/C_{B0} = 3/11$이다.

오답 포인트

출구 농도와 초기 농도를 혼동하거나, 1:1 반응이므로 A와 B의 소모량이 같다는 점을 놓치면 오답이 된다. 또한 C_{A0}/C_{B0}를 C_{B0}/C_{A0}로 뒤집으면 4번이 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

CSTR 계산형 문제는 출구 농도로 속도식을 계산한 뒤 $\tau(-r)$로 소모량을 구하고, 그 값을 출구 농도에 다시 더해 초기 농도를 복원하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

정상상태 CSTR에서는 $C_{\text{in}} - C_{\text{out}} = \tau(-r)$이고, 1:1 반응이면 두 반응물의 소모 농도 변화량이 같다.

NoteBase

문 13. 반응속도상수의 온도의존성이 Arrhenius 관계식을 따르는 어떤 반응의 온도를 500K에서 1,000K으로 증가시켰을 때, 반응속도상수가 10배 증가하였다. 이 반응의 활성화에너지의 값[$\mathrm{Jmol^{-1}}$]은? (단, $\ln 10$은 2.3으로, 기체상수는 $8\mathrm{Jmol^{-1}K^{-1}}$로 가정한다.)

① 9,200

② 18,400

③ 22,400

④ 36,800

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 Arrhenius 식을 이용해 두 온도에서의 반응속도상수 비로부터 활성화에너지 E_a를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $T_1 = 500K$, $T_2 = 1000K$, $k_2/k_1 = 10$, $\ln 10 = 2.3$, $R = 8Jmol^{-1}K^{-1}$이다.
구해야 할 값: 활성화에너지 E_a이다.
주의할 조건: Arrhenius 식은 온도의 역수 차이 $1/T_1 - 1/T_2$를 써야 하며, 절대온도 K를 그대로 사용한다.

사용할 공식

사용 공식은 $\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유: 문제에서 같은 반응의 두 온도 $500K$, $1000K$에서 반응속도상수의 비 $k_2/k_1 = 10$를 주었으므로, Arrhenius 식을 두 상태에 대해 정리한 비율식이 바로 적용된다.

계산 과정

1. 반응속도상수 비를 식에 대입하면 $\ln 10 = \frac{E_a}{8}\left(\frac{1}{500} - \frac{1}{1000}\right)$ 이다.
2. 온도 항을 계산하면 $\frac{1}{500} - \frac{1}{1000} = \frac{2-1}{1000} = 0.001$ 이다.
3. 따라서 $2.3 = \frac{E_a}{8} \times 0.001$ 이고, 정리하면 $E_a = \frac{2.3 \times 8}{0.001} = 18{,}400Jmol^{-1}$ 이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: 9,200은 계산 결과의 절반이다. $1/500 - 1/1000$을 잘못 처리하거나 마지막 곱셈에서 2를 빠뜨리면 나올 수 있는 값이다. 올바른 값은 18,400 $Jmol^{-1}$이다.
2번 O: Arrhenius 식에 주어진 값을 그대로 대입하면 $E_a = 18{,}400 Jmol^{-1}$이므로 맞는 선지이다.
3번 X: 22,400은 $2.3 \times 8 = 18.4$ 계산을 잘못하거나 온도 역수 차이를 틀리게 넣었을 때 나오는 오답이다. 올바른 값은 18,400 $Jmol^{-1}$이다.
4번 X: 36,800은 정답 18,400의 두 배이다. $\ln(k_2/k_1)$ 식을 정리한 뒤 같은 항을 한 번 더 곱하는 식의 중복 계산에서 생기기 쉽다. 올바른 값은 18,400 $Jmol^{-1}$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 Arrhenius 식 자체보다 $1/T$ 차이를 정확히 계산하는지에 있다. $1/500 - 1/1000 = 0.001$을 0.002로 보거나, 마지막에 10의 자연로그 2.3과 기체상수 8을 곱한 뒤 소수점을 잘못 옮기면 1번, 3번, 4번 같은 값이 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

온도에 따른 속도상수 변화가 나오면 먼저 $\ln(k_2/k_1) = \frac{E_a}{R}(1/T_1 - 1/T_2)$ 형태를 적고, 다음에 역수 차이 계산, 마지막에 단위가 $Jmol^{-1}$인지까지 확인하면 된다.

암기 포인트

Arrhenius 비율식은 속도상수 비를 자연로그로 바꾸고 $1/T$의 차이로 연결하면 활성화에너지를 바로 구할 수 있다.

NoteBase

문 14. 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 액상 기초반응으로 구성된 <보기>의 직렬반응이 일어난다. 중간생성물 B의 농도 C_B를 공간시간 τ의 함수로 표현한 것으로 가장 옳은 것은? (단, k_1과 k_2는 값이 서로 다른 반응속도상수이며, 초기에는 반응물 A만 존재한다.)

<보기>

$A \rightarrow B \rightarrow C$

① $C_B = \frac{k_2 C_{A0}}{-k_1 + k_2}[e^{-k_1\tau} + e^{-k_2\tau}]$
② $C_B = \frac{k_1 C_{A0}}{k_1 - k_2}[e^{-k_1\tau} - e^{-k_2\tau}]$
③ $C_B = \frac{k_1 C_{A0}}{k_1 + k_2}[e^{k_1\tau} - e^{k_2\tau}]$
④ $C_B = \frac{k_1 C_{A0}}{-k_1 + k_2}[e^{-k_1\tau} - e^{-k_2\tau}]$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 액상 PFR에서 직렬 1차반응 $A \rightarrow B \rightarrow C$의 중간생성물 농도 C_B를 공간시간 τ의 함수로 유도할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

주어진 반응은 $A \rightarrow B \rightarrow C$이다.
액상 기초반응이므로 밀도 변화가 없고 PFR의 공간시간 τ를 배치반응 시간처럼 둘 수 있다.
초기조건은 $C_A(0) = C_{A0}$, $C_B(0) = 0$이다.

사용할 공식

중간생성물에 대한 물질수지는 $\frac{dC_A}{d\tau} = -k_1 C_A$, $\frac{dC_B}{d\tau} = k_1 C_A - k_2 C_B$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 B가 A로부터 생성되고 동시에 C로 소멸되는 직렬반응이기 때문이다.

계산 과정

1. 먼저 A의 농도는 $C_A = C_{A0} e^{-k_1\tau}$이다.
2. 이를 B 식에 대입하면 $\frac{dC_B}{d\tau} + k_2 C_B = k_1 C_{A0} e^{-k_1\tau}$이다.
3. 적분인자 $e^{k_2\tau}$를 곱하면 $\frac{d}{d\tau}(C_B e^{k_2\tau}) = k_1 C_{A0} e^{(k_2 - k_1)\tau}$이다.
4. $C_B(0) = 0$을 적용해 적분하면 $C_B = \frac{k_1 C_{A0}}{k_2 - k_1}(e^{-k_1\tau} - e^{-k_2\tau})$이다.
5. 따라서 $C_B = \frac{k_1 C_{A0}}{-k_1 + k_2}(e^{-k_1\tau} - e^{-k_2\tau})$가 된다.

NoteBase

선지 판단

1번: X. 앞 계수는 B의 생성반응 속도상수이므로 k_2가 아니라 k_1이어야 한다. 또한 괄호 안이 $e^{-k_1\tau}+e^{-k_2\tau}$이면 $\tau=0$에서 $C_B(0)\neq 0$가 되어 초기조건을 만족하지 못한다. 틀린 표현은 앞 계수 k_2와 더하기 부호이며, 올바르게는 $\frac{k_1C_{A0}}{k_2-k_1}(e^{-k_1\tau}-e^{-k_2\tau})$이다.
2번: X. 분자 k_1와 지수항의 순서는 맞지만 분모가 k_1-k_2라서 전체 부호가 반대로 된다. 이 식은 정답식의 음수배이므로 C_B가 음수로 나올 수 있어 물리적으로 맞지 않는다. 틀린 표현은 분모의 부호이며, 올바르게는 k_2-k_1 또는 $-k_1+k_2$이다.
3번: X. 직렬 1차 소멸반응에서 농도항은 $e^{-k\tau}$ 형태로 감소해야 하는데, 이 식은 $e^{k_1\tau}$, $e^{k_2\tau}$로 되어 있어 반응이 진행될수록 지수적으로 커지는 형태가 된다. 또한 분모도 k_1+k_2가 아니라 두 속도상수의 차이로 나타나야 한다. 틀린 표현은 양의 지수와 분모 k_1+k_2이며, 올바르게는 $\frac{k_1C_{A0}}{k_2-k_1}(e^{-k_1\tau}-e^{-k_2\tau})$이다.
4번: O. $C_B=\frac{k_1C_{A0}}{-k_1+k_2}(e^{-k_1\tau}-e^{-k_2\tau})$는 직렬 1차반응의 중간생성물 농도식과 일치한다. $\tau=0$에서 $C_B=0$이 되고, 생성항은 k_1, 소멸항은 k_2로 반영되어 있어 타당하다.

오답 포인트

중간생성물 식에서는 생성항의 계수가 k_1인지, 분모가 k_2-k_1인지, 두 지수항이 모두 음수인지가 핵심이다. 특히 2번과 4번은 모양이 거의 같아서 분모 부호를 놓치면 쉽게 바뀐다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬반응 계산형은 먼저 C_A를 구한 뒤 (dC_B)/(dτ)=생성-소멸을 세운다. 그다음 $\tau=0$에서 0이 되는지, 생성속도상수 k_1가 앞에 오는지, 지수항 부호가 모두 음수인지 순서대로 검산하면 된다.

암기 포인트

직렬 1차반응의 중간체는 $C_B=\frac{k_1C_{A0}}{k_2-k_1}(e^{-k_1\tau}-e^{-k_2\tau})$이다. 앞 계수는 생성상수 k_1, 분모는 속도상수의 차이, 지수항은 둘 다 음수이다.

NoteBase

문 15. 효소 우레아제를 이용하여 요소를 암모니아와 이산화탄소로 전환하는 반응의 반응속도를 요소농도의 함수로서 측정한 자료를 이용하여 라인위버-버크 식을 도출하였다. 절편과 기울기가 각각 $0.5 m^3 skmol^{-1}$과 $0.01 s$일 때, 최대 반응속도 $V_{\max}$의 값$[kmolm^{-3}s^{-1}]$과 마이켈리스(Michaelis) 상수 K_M의 값 $[kmolm^{-3}]$을 옳게 짝지은 것은?

① $V_{\max}$: 1, K_M: 0.01

② $V_{\max}$: 1, K_M: 0.02

③ $V_{\max}$: 2, K_M: 0.01

④ $V_{\max}$: 2, K_M: 0.02

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 라인위버-버크 식의 절편과 기울기에서 각각 $1/V_{max}$, K_M/V_{max}를 읽어 V_{max}와 K_M를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 절편은 $0.5\ m^3 skmol^{-1}$, 기울기는 $0.01\ s$이다.
구해야 할 값: V_{max}와 K_M이다.
주의할 조건: 라인위버-버크 식에서 절편은 $1/V_{max}$, 기울기는 K_M/V_{max}이다.

사용할 공식

라인위버-버크 식은 $\frac{1}{v} = \frac{K_M}{V_{max}}\frac{1}{[S]} + \frac{1}{V_{max}}$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 절편과 기울기를 직접 주었으므로 각각을 $1/V_{max}$, K_M/V_{max}에 바로 대응시킬 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 절편이 $1/V_{max} = 0.5$이므로 $V_{max} = 1/0.5 = 2\ kmolm^{-3}s^{-1}$이다.
2. 기울기가 $K_M/V_{max} = 0.01$이므로 $K_M = 0.01 \times V_{max} = 0.01 \times 2 = 0.02\ kmolm^{-3}$이다.
3. 따라서 $V_{max} = 2, K_M = 0.02$이다.

NoteBase

선지 판단

1번: X. $V_{max} = 1$이 틀렸다. 절편이 $1/V_{max} = 0.5$이므로 올바르게는 $V_{max} = 2$이다. 또한 $K_M = 0.01$도 틀렸다. 0.01은 K_M/V_{max} 값일 뿐이고, 올바르게는 $K_M = 0.02$이다.
2번: X. $K_M = 0.02$는 맞지만 $V_{max} = 1$이 틀렸다. 절편의 역수를 취해야 하므로 올바르게는 $V_{max} = 2$이다.
3번: X. $V_{max} = 2$는 맞지만 $K_M = 0.01$이 틀렸다. 기울기 0.01에 $V_{max} = 2$를 곱해야 하므로 올바르게는 $K_M = 0.02$이다.
4번: O. 절편에서 $V_{max} = 2$, 기울기에서 $K_M = 0.02$가 계산되므로 맞는 선지이다.

오답 포인트

기울기 0.01을 그대로 K_M로 읽거나 절편 0.5를 그대로 V_{max}로 읽으면 틀린다. 이 문제의 함정은 절편과 기울기가 각각 역수와 비율이라는 점을 놓치게 만드는 데 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

라인위버-버크 문제가 나오면 먼저 절편이 $1/V_{max}$, 기울기가 K_M/V_{max}인지 확인한 뒤 절편의 역수로 V_{max}를 구하고, 그 값을 기울기에 곱해 K_M를 계산하면 된다.

암기 포인트

라인위버-버크 직선에서 절편은 $1/V_{max}$, 기울기는 K_M/V_{max}이다.

NoteBase

문 16. 표면반응이 속도제한인 반응에서 반응속도식이 <보기>와 같이 주어졌을 때, 이 반응속도식에 해당하는 반응메커니즘으로 가장 옳은 것은? (단, k_1, k_2는 표면반응속도상수, K_i는 i의 흡착평형상수, P_i는 i의 부분압력을 나타낸다.)

<보기>

$$-r_A = \frac{k_1 K_A K_B P_A P_B - k_2 K_C K_D P_C P_D}{[1 + K_A P_A + K_C P_C][1 + K_B P_B + K_D P_D]}$$

① A + B ⇌ C + D (가역, A와 B가 다른 활성지점에 흡착)

② A + B ⇌ C + D (가역, A와 B가 같은 활성지점에 흡착)

③ A + B → C + D (비가역, A와 B가 다른 활성지점에 흡착)

④ A + B → C + D (비가역, A와 B가 같은 활성지점에 흡착)

정답 1번

출제 포인트

분자에 정반응항과 역반응항이 함께 있는지, 분모가 활성지점별 흡착항의 곱으로 분리되는지를 보고 가역성 여부와 활성지점 수를 판별하는 문제이다.

핵심 개념

가역 표면반응은 속도식 분자에 정반응항과 역반응항이 함께 나타난다. 다른 활성지점 흡착은 분모가 $[1 + K_A P_A + K_C P_C][1 + K_B P_B + K_D P_D]$처럼 두 괄호의 곱으로 나뉘어 각 자리의 점유를 따로 나타낸다. 같은 활성지점 흡착이면 보통 하나의 괄호 안에 A, B, C, D의 흡착항이 함께 들어간다.

선지별 해설

① O: 분자에 $k_1 K_A K_B P_A P_B - k_2 K_C K_D P_C P_D$가 있어 정반응과 역반응이 함께 존재하므로 가역 반응이다. 분모가 두 괄호의 곱으로 분리되어 있어 A, C가 한 종류의 활성지점에, B, D가 다른 종류의 활성지점에 경쟁 흡착하는 형태이므로 다른 활성지점 흡착이 맞다.

② X: 틀린 부분은 'A와 B가 같은 활성지점에 흡착'이다. 같은 활성지점 메커니즘이면 분모가 하나의 흡착괄호로 합쳐지는 형태가 일반적이다. 올바르게는 'A와 B가 다른 활성지점에 흡착'이다.

③ X: 틀린 부분은 '비가역'이다. 비가역 반응이면 역반응항인 $k_2 K_C K_D P_C P_D$가 분자에 나타나지 않는다. 올바르게는 '가역 반응'이다.

④ X: 틀린 부분은 '비가역'과 'A와 B가 같은 활성지점에 흡착'이다. 이 속도식은 역반응항이 있으므로 가역이고, 분모가 두 흡착괄호의 곱이므로 다른 활성지점 흡착이다. 올바르게는 '가역, A와 B가 다른 활성지점에 흡착'이다.

NoteBase

오답 포인트

분자에 $-k_2K_CK_DP_CP_D$가 있는데도 반응식 자체만 보고 비가역으로 오해하기 쉽다. 또 분모에 괄호가 두 개라는 점을 놓치면 같은 활성지점 흡착형과 다른 활성지점 흡착형을 뒤바꾸기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 분자에서 역반응항 유무를 본다. 역반응항이 있으면 가역이다. 다음으로 분모를 본다. 흡착항이 하나의 괄호에 모이면 같은 활성지점, 두 괄호의 곱으로 분리되면 다른 활성지점 메커니즘으로 판단할 수 있다.

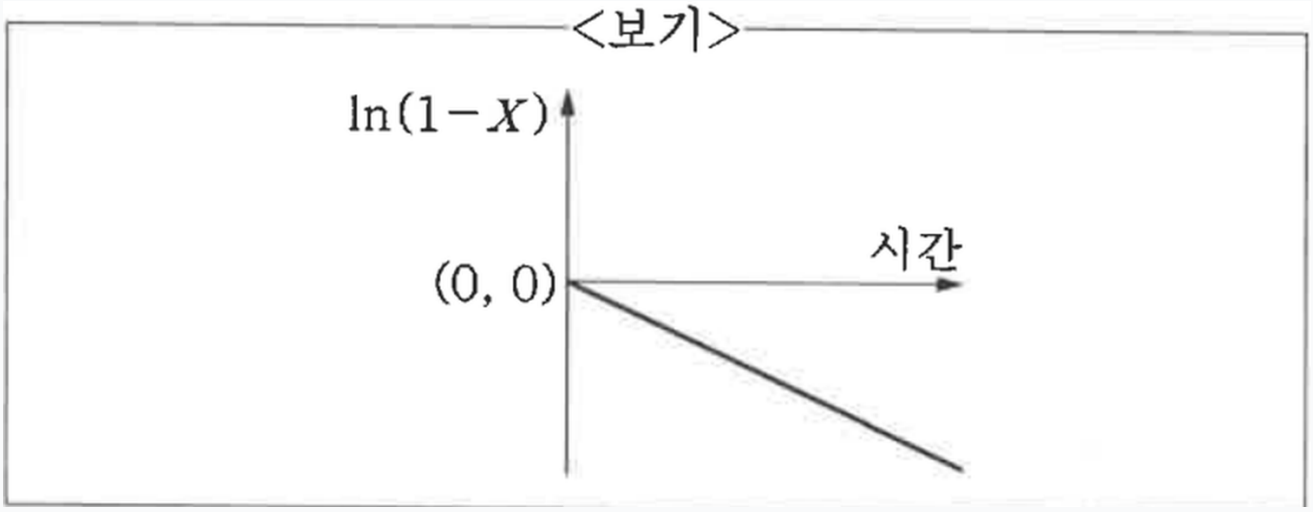
암기 포인트

역반응항이 보이면 가역, 분모 괄호가 둘이면 이중활성점이다.

NoteBase

문 17. 회분식반응기에서 비가역 등온반응 $A \rightarrow B$가 일어난다. X의 함수($\ln(1-X)$)와 시간과의 관계가 <보기>와 같이 주어졌을 때, 해당 반응의 차수는? (단, 해당 반응은 지수 법칙을 따르며, X는 A의 전환율을 의미한다.)

<보기>



① 0차 반응

② 1차 반응

③ 2차 반응

④ 주어진 그래프를 토대로 반응 차수를 정할 수 없다.

정답 2번

출제 포인트

회분식반응기에서 전환율 X와 시간의 적분형 속도식 관계를 그래프 모양으로 연결하는 문제이다.

선지별 해설

① X: 0차 반응이면 $X = kt$이고 $\ln(1-X)$가 시간에 대해 직선이 되는 형태가 아니다. 틀린 표현은 "0차 반응"이며, 올바르게는 "1차 반응"이다.

② O: 1차 반응에서는 $\ln(1-X) = -kt$이므로 주어진 그래프처럼 원점을 지나는 음의 기울기 직선이 나온다.

③ X: 2차 반응이면 적분형이 보통 $\frac{X}{1-X} = kC_{A0}t$ 또는 $\frac{1}{1-X}$ 형태의 선형식으로 정리된다. 틀린 표현은 "2차 반응"이며, 올바르게는 "1차 반응"이다.

④ X: 주어진 그래프만으로도 반응 차수를 판단할 수 있다. 틀린 표현은 "반응 차수를 정할 수 없다"이며, 올바르게는 "주어진 그래프를 통해 1차 반응임을 정할 수 있다"이다.

NoteBase

오답 포인트

전환율 X 자체의 시간 그래프와 $\ln(1-X)$의 시간 그래프를 혼동하면 0차나 2차로 오판하기 쉽다. 이 문항은 어떤 함수를 직선화했는지를 묻는 문제이다.

다시 나오면 이렇게 판단

축에 적힌 변수를 먼저 확인한 뒤, 직선이 되도록 만든 적분형 속도식을 떠올리면 된다. $\ln(1-X)$ 대 시간 직선이면 1차 반응으로 판단할 수 있다.

암기 포인트

$\ln(1-X)$-시간 직선은 1차, X-시간 직선은 0차, $\frac{1}{1-X}$ 또는 $\frac{X}{1-X}$-시간 직선은 2차로 연결된다.

NoteBase

문 18. A의 농도(C_A)에 관한 반응식과 반응속도식이 <보기>와 같은 고체촉매를 이용하는 액상 반응에 대하여 등온 플러그흐름반응기(PFR)를 설계하려고 한다. 유입 반응물 A의 농도(C_{A0})는 $1.0 mol L^{-1}$이며 A의 전환율은 0.5일 때, PFR에서의 공간시간에 가장 가까운 값[h]은? (단, ln 10은 2.3으로, ln 5는 1.6으로 가정한다.)

<보기>

$A \xrightarrow{k_1} B$

$A \xrightarrow{k_2} C$

$A \xrightarrow{k_3} D$

- $-r_A = \dfrac{k_1 C_A^2}{k_2 C_A + k_3 C_A^2}$
- k_1은 $0.2 h^{-1}$, k_2는 0.1, k_3은 $0.0001 L\,mol^{-1}$이다.

① 0.35

② 1.05

③ 1.6

④ 1.95

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 액상 등온 PFR 설계식에 주어진 반응속도식을 대입하여 공간시간 τ를 적분으로 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $C_{A0} = 1.0 mol L^{-1}$, $X = 0.5$, $k_1 = 0.2 h^{-1}$, $k_2 = 0.1$, $k_3 = 0.0001 L mol^{-1}$이다.
구해야 할 값: PFR의 공간시간 τ이다.
주의할 조건: 액상 반응이므로 $C_A = C_{A0}(1 - X)$이고, 등밀도라서 부피유량이 일정하다고 본다.

사용할 공식

공식: $\tau = C_{A0} \int_0^X \frac{dX}{-r_A}$
또는 $\tau = \int_{C_A}^{C_{A0}} \frac{dC_A}{-r_A}$
이 공식을 쓰는 이유: 액상 등온 PFR의 설계식은 공간시간을 반응속도의 역수 적분으로 구하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. $C_A = C_{A0}(1-X) = 1(1-X) = 1-X$이므로 $X = 0.5$에서 $C_A = 0.5 mol L^{-1}$이다.
2. 속도식은 $-r_A = \frac{k_1 C_A^2}{k_2 C_A + k_3 C_A^2} = \frac{k_1 C_A}{k_2 + k_3 C_A}$ 이므로 $\tau = \int_{0.5}^{1} \frac{dC_A}{-r_A} = \frac{1}{k_1}\int_{0.5}^{1} \left(\frac{k_2}{C_A} + k_3\right) dC_A$ 이다.
3. 수치를 대입하면 $\tau = 5[0.1 \ln C_A + 0.0001 C_A]_{0.5}^{1} = 5\left(0.1 \ln \frac{1}{0.5} + 0.0001(1-0.5)\right)$ 이다.
4. $\ln 2 = \ln 10 - \ln 5 = 2.3 - 1.6 = 0.7$이므로
$\tau = 5(0.1 \times 0.7 + 0.00005) = 5(0.07005) = 0.35025 h \approx 0.35 h$ 이다.

선지 판단

1번 O: 계산 결과가 $0.35 h$이므로 맞다.
2번 X: 공간시간을 $1.05 h$로 본 부분이 틀렸다. 적분 결과는 $0.35 h$이며, 로그항의 계수 0.1과 적분 한계를 정확히 반영해야 한다.
3번 X: 공간시간을 $1.6 h$로 본 부분이 틀렸다. 1.6은 문제에서 준 $\ln 5$ 값일 뿐이며, 최종 공간시간은 $0.35 h$이다.
4번 X: 공간시간을 $1.95 h$로 본 부분이 틀렸다. 올바른 적분값은 $0.35 h$이고, $1.95 h$는 속도식 적분을 과대평가한 값이다.

오답 포인트

속도식을 먼저 $-r_A = k_1 C_A/(k_2 + k_3 C_A)$로 정리하지 않으면 적분 형태를 놓치기 쉽다. 또 $\ln 2$를 $\ln 10 - \ln 5$로 바꾸는 과정에서 로그항 앞의 0.1 계수를 빠뜨리면 과대값을 고르기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

액상 PFR 계산형은 먼저 $C_A = C_{A0}(1-X)$로 농도를 바꾸고, 설계식 $\tau = C_{A0}\int dX/(-r_A)$ 또는 $\tau = \int dC_A/(-r_A)$에 넣은 뒤, 속도식을 적분하기 쉬운 형태로 정리해 계산한다.

암기 포인트

PFR 공간시간은 반응속도의 역수 적분이고, 전환율이 주어지면 먼저 $C_A = C_{A0}(1-X)$로 바꾼다.

NoteBase

문 19. 불균일 촉매에서의 1차 반응 $A \rightarrow B$가 <보기>의 조건에서 일어날 때, Thiele 계수(ϕ)와 $100^\circ C$에서의 겉보기 반응속도(apparent rate of reaction, $-r_{A(obs)}$)에 가장 가까운 값$[mol L^{-1} s^{-1}]$을 옳게 짝지은 것은?

<보기>

- 고유속도상수(k): $1 s^{-1}$
- 특성차원(W): $0.25 cm$
- 유효확산계수(D_{eff}): $0.01 cm^2 s^{-1}$
- 유효인자(effectiveness factor, η): 0.7
- 반응물 농도(C_A): $0.03 mol L^{-1}$

① ϕ: 0.25, 겉보기 반응속도: 0.02

② ϕ: 0.25, 겉보기 반응속도: 0.03

③ ϕ: 2.5, 겉보기 반응속도: 0.02

④ ϕ: 2.5, 겉보기 반응속도: 0.03

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 1차 반응의 Thiele 계수와 유효인자를 이용한 겉보기 반응속도를 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 $k = 1 s^{-1}$, $W = 0.25 cm$, $D_{eff} = 0.01 cm^2 s^{-1}$, $\eta = 0.7$, $C_A = 0.03 mol L^{-1}$이다. 구해야 할 값은 ϕ와 $-r_{A(obs)}$이다.

사용할 공식

Thiele 계수는 $\phi = W\sqrt{k/D_{eff}}$이다. 겉보기 반응속도는 내부 확산 저항을 유효인자로 반영하여 $-r_{A(obs)} = \eta k C_A$로 계산한다. 문제에서 1차 반응, 특성차원, 유효확산계수, 유효인자가 함께 주어졌으므로 이 두 식을 바로 적용하는 상황이다.

계산 과정

1. $\phi = 0.25 \times \sqrt{1/0.01} = 0.25 \times 10 = 2.5$이다.
2. 고유 반응속도는 $kC_A = 1 \times 0.03 = 0.03 mol L^{-1} s^{-1}$이다.
3. 겉보기 반응속도는 $-r_{A(obs)} = \eta k C_A = 0.7 \times 0.03 = 0.021 mol L^{-1} s^{-1}$이다.
4. 선택지 값으로는 0.02가 가장 가깝다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 틀린 표현은 $\phi = 0.25$이다. 올바르게는 $\phi = 2.5$이다. 반응속도 0.02는 $-r_{A(obs)} = 0.021$을 반올림하면 맞출 수 있지만, Thiele 계수가 틀렸으므로 오답이다.
② X: 틀린 표현은 $\phi = 0.25$, 겉보기 반응속도 0.03이다. 올바르게는 $\phi = 2.5$, 겉보기 반응속도는 0.02에 가장 가깝다. 0.03은 유효인자 $\eta = 0.7$을 반영하지 않고 kC_A만 쓴 값이다.
③ O: $\phi = 2.5$, $-r_{A(obs)} = 0.021 mol L^{-1} s^{-1}$이므로 보기값 0.02와 가장 가깝다. 두 값을 모두 맞게 짝지은 선택지이다.
④ X: 틀린 표현은 겉보기 반응속도 0.03이다. 올바르게는 0.02에 가장 가깝다. $\phi = 2.5$는 맞지만, 0.03은 유효인자를 곱하지 않은 고유 반응속도이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 두 단계 계산을 섞어 놓은 점이다. ϕ는 확산과 반응의 상대 크기를 보는 값이라 $\sqrt{k/D_{eff}}$를 끝까지 계산해야 하고, 겉보기 반응속도는 반드시 η를 곱해야 한다. ②와 ④는 유효인자를 빠뜨리면 쉽게 고르게 되는 오답이다.

다시 나오면 이렇게 판단

불균일 촉매 계산형은 먼저 $\phi = W\sqrt{k/D_{eff}}$로 내부확산 크기를 구하고, 그다음 실제 관측 반응속도는 $\eta k C_A$로 다시 계산하는 순서로 판단한다. 선택지에 고유 반응속도와 겉보기 반응속도가 함께 있으면 η 반영 여부를 바로 확인하면 된다.

암기 포인트

Thiele 계수는 $W\sqrt{k/D_{eff}}$, 겉보기 반응속도는 $\eta k C_A$이다. η를 빼면 고유 반응속도, η를 곱하면 겉보기 반응속도이다.

NoteBase

문 20. 일산화탄소 분자가 <보기>와 같이 해리 흡착될 때, 산소원자로 점유된 활성점의 농도$C_{O\cdot S}$를 바르게 나타낸 것은? (단, S는 비어있는 활성점, $C\cdot S$와 $O\cdot S$는 각각 탄소원자와 산소원자로 점유된 활성점이며, C_t는 전체 활성점의 농도, K_A는 흡착평형상수, P_{CO}는 일산화탄소의 분압이다.)

<보기>

$$CO + 2S \rightleftharpoons C\cdot S + O\cdot S$$

① $C_{O\cdot S} = \frac{K_A P_{CO} C_t}{1 + K_A P_{CO}}$

② $C_{O\cdot S} = \frac{(K_A P_{CO})^{0.5} C_t}{1 + (K_A P_{CO})^{0.5}}$

③ $C_{O\cdot S} = \frac{(K_A P_{CO})^{0.5} C_t}{1 + 2(K_A P_{CO})^{0.5}}$

④ $C_{O\cdot S} = \frac{2(K_A P_{CO})^{0.5} C_t}{1 + 2(K_A P_{CO})^{0.5}}$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 해리 흡착에서 평형식과 활성점 수지를 이용해 산소원자로 점유된 활성점 농도 $C_{O\cdot S}$를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 $CO + 2S \rightleftharpoons C\cdot S + O\cdot S$이다.
구해야 할 값은 산소원자로 점유된 활성점 농도 $C_{O\cdot S}$이다.
해리 흡착이므로 CO 1분자가 빈 활성점 2개를 사용한다. 또한 생성되는 $C\cdot S$와 $O\cdot S$의 농도는 1:1이므로 $C_{C\cdot S} = C_{O\cdot S} = x$이다.

사용할 공식

흡착평형식은 $K_A = \frac{C_{C\cdot S} C_{O\cdot S}}{P_{CO} C_S^2}$이다.
전체 활성점 수지는 $C_t = C_S + C_{C\cdot S} + C_{O\cdot S} = C_S + 2x$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 이 반응이 해리 흡착이라서 생성물 두 종이 각각 활성점 하나씩을 점유하고, 평형상수식에도 빈 활성점이 두 번 들어가기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. $C_{C\cdot S} = C_{O\cdot S} = x$로 둔다.
2. 평형식에 대입하면 $K_A = \frac{x^2}{P_{CO}C_S^2}$이고, 따라서 $\sqrt{K_A P_{CO}} = \frac{x}{C_S}$이다.
3. 활성점 수지에서 $C_S = C_t - 2x$이다.
4. 이를 대입하면 $\sqrt{K_A P_{CO}} = \frac{x}{C_t - 2x}$이다.
5. 정리하면 $x = \sqrt{K_A P_{CO}}(C_t - 2x)$이고, $x\{1 + 2(K_A P_{CO})^{0.5}\} = (K_A P_{CO})^{0.5} C_t$이다.
6. 따라서 $C_{O\cdot S} = x = \frac{(K_A P_{CO})^{0.5} C_t}{1 + 2(K_A P_{CO})^{0.5}}$이다.

선지 판단

1번: X. $\frac{K_A P_{CO} C_t}{1 + K_A P_{CO}}$는 제곱근이 없어서 해리 흡착의 평형식 $K_A = \frac{x^2}{P_{CO}C_S^2}$를 반영하지 못한 식이다. 한 개 활성점에 분자상으로 흡착되는 경우처럼 처리한 오답이다. 틀린 표현 → 올바르게는 $C_{O\cdot S} = \frac{(K_A P_{CO})^{0.5} C_t}{1 + 2(K_A P_{CO})^{0.5}}$이다.

2번: X. 분자에 $(K_A P_{CO})^{0.5}$가 있는 점은 맞지만, 분모가 $1 + (K_A P_{CO})^{0.5}$로 되어 있어 전체 활성점 수지를 $C_t = C_S + x$처럼 잘못 쓴 식이다. 실제로는 $C\cdot S$와 $O\cdot S$가 모두 자리를 차지하므로 $C_t = C_S + 2x$가 된다. 틀린 표현 → 올바르게는 분모가 $1 + 2(K_A P_{CO})^{0.5}$가 되어야 한다.

3번: O. 해리 흡착이므로 $C_{C\cdot S} = C_{O\cdot S} = x$, $C_t = C_S + 2x$, $K_A = \frac{x^2}{P_{CO}C_S^2}$를 함께 쓰면 $x = \frac{(K_A P_{CO})^{0.5} C_t}{1 + 2(K_A P_{CO})^{0.5}}$가 나온다. 따라서 3번이 정답이다.

4번: X. 분모는 맞지만 분자에 2가 붙어 있어 $2x$를 구한 식이다. 이것은 산소원자로 점유된 활성점 농도 하나가 아니라 $C\cdot S$와 $O\cdot S$를 합한 전체 점유 활성점 농도이다. 틀린 표현 → 올바르게는 $C_{O\cdot S}$만 묻고 있으므로 $\frac{(K_A P_{CO})^{0.5} C_t}{1 + 2(K_A P_{CO})^{0.5}}$가 되어야 한다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 해리 흡착이라는 말 때문에 평형식에 제곱근이 생긴다는 점과, 전체 활성점 수지에서 점유종이 두 개라는 점을 동시에 놓치기 쉽다는 데 있다. 2번은 점유종 두 개를 하나로 본 실수이고, 4번은 구해야 할 $C_{O\cdot S}$와 총 점유량 $C_{C\cdot S} + C_{O\cdot S}$를 혼동한 실수이다.

다시 나오면 이렇게 판단

해리 흡착 문제는 먼저 생성되는 흡착종의 수와 빈 활성점 사용 개수를 확인하고, 다음으로 평형식에 제곱이나 제곱근이 생기는지 본다. 그다음 전체 활성점 수지를 빈 자리+모든 점유종으로 세우면 분모의 계수를 안정적으로 판별할 수 있다.

암기 포인트

해리 흡착은 평형식에 제곱근이 나타나고, 활성점 수지에는 생성된 점유종 수만큼 항이 더해진다.

NoteBase