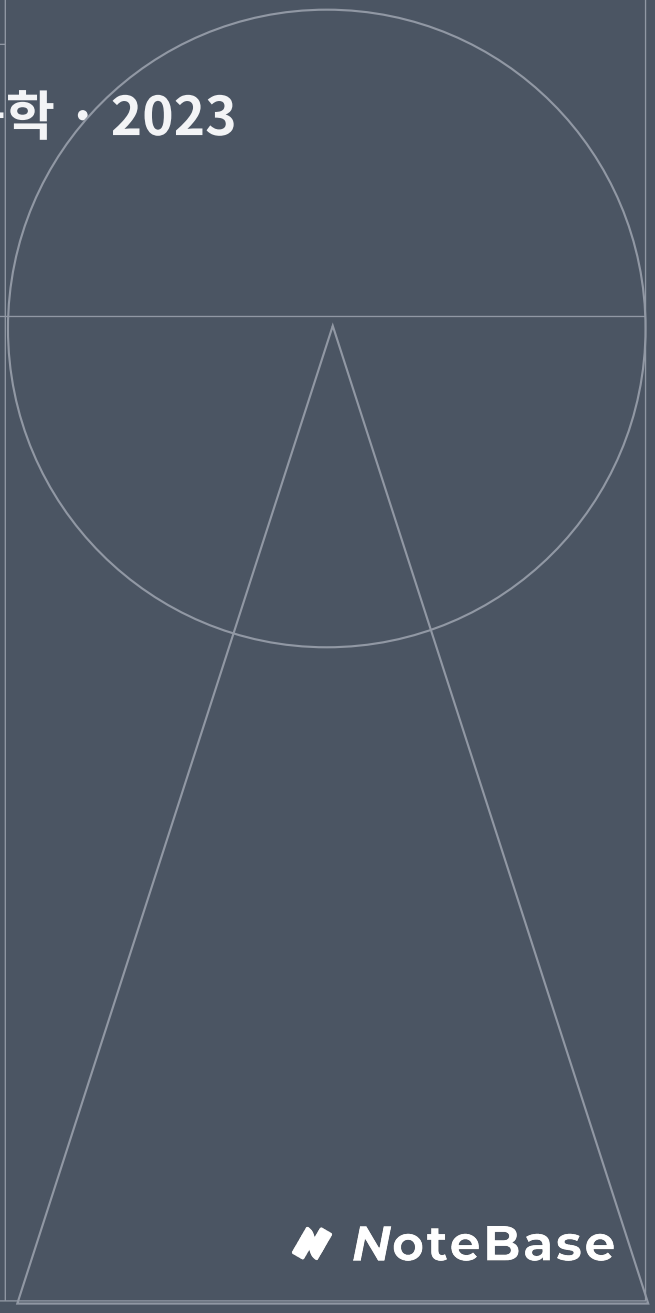
기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2023



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2023

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2023

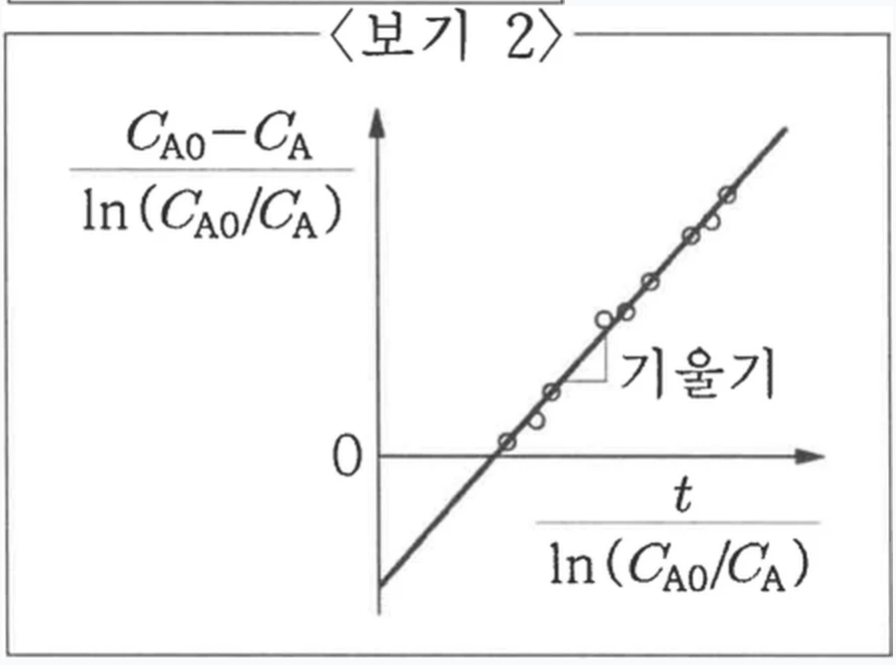
NoteBase

문 1. 등온 회분식 반응기에서 <보기 1>의 반응속도식을 가지는 액상 반응 $A \rightarrow R$을 진행한다. 반응시간(t)에 따른 반응물 A의 몰농도(C_A) 변화를 <보기 2>와 같이 그래프로 나타낼 때, 그래프의 기울기로 가장 옳은 것은? (단, C_{A0}는 반응물 A의 초기 몰농도이며, C_A는 시간 t에서 A의 농도이다.)

〈보기 1〉

$$-r_A = \frac{k_1 C_A}{1 + k_2 C_A}$$

〈보기 2〉



① k_1

② k_2

③ $\frac{k_2}{k_1}$

④ $\frac{k_1}{k_2}$

NoteBase

정답 4번

출제 포인트

회분식 반응기 물질수지와 반응속도식 적분 결과를 직선식으로 정리하여 그래프의 기울기를 구하는 문제이다.

조건 정리

- 주어진 속도식은 $-r_A = \frac{k_1 C_A}{1 + k_2 C_A}$이다.
- 액상 등온 회분식 반응기이므로 $-\frac{dC_A}{dt} = -r_A$로 둘 수 있다.
- 그래프의 세로축은 $\frac{C_{A0} - C_A}{\ln(C_{A0}/C_A)}$, 가로축은 $\frac{t}{\ln(C_{A0}/C_A)}$이다.
- 구해야 할 값은 직선의 기울기이다.

사용할 공식

$-\frac{dC_A}{dt} = \frac{k_1 C_A}{1 + k_2 C_A}$

이를 정리하면

$\left(\frac{1}{C_A} + k_2\right) dC_A = -k_1 dt$

이고, 적분하면

$\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right) + k_2(C_{A0} - C_A) = k_1 t$

이 된다.

이 공식을 쓰는 이유는 속도식이 C_A만의 함수로 주어졌고 회분식 반응기에서는 농도 변화식을 시간에 대해 직접 적분할 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 회분식 수지식에 속도식을 대입하면 $-\frac{dC_A}{dt} = \frac{k_1 C_A}{1 + k_2 C_A}$이다.
2. 초기조건 $t = 0$에서 $C_A = C_{A0}$, 시간 t에서 $C_A = C_A$로 적분하면 $\ln(C_{A0}/C_A) + k_2(C_{A0} - C_A) = k_1 t$이다.
3. 이를 그래프 축에 맞게 정리하면

$C_{A0} - C_A = \frac{k_1}{k_2} t - \frac{1}{k_2} \ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)$

4. 양변을 $\ln(C_{A0}/C_A)$로 나누면

$\frac{C_{A0} - C_A}{\ln(C_{A0}/C_A)} = \frac{k_1}{k_2} \frac{t}{\ln(C_{A0}/C_A)} - \frac{1}{k_2}$

이므로 직선의 기울기는 $\frac{k_1}{k_2}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X

기울기는 k_1이 아니다. 적분 후 직선식으로 바꾸면 기울기 앞에는 반드시 k_2가 분모로 함께 남는다. 틀린 표현은 '기울기 = k_1'이고, 올바르게는 '기울기 = k_1/k_2'이다.

② X

k_2는 기울기가 아니라 분모와 절편 정리에 영향을 주는 상수이다. 위 식에서 절편은 $-1/k_2$이며, 기울기는 k_2가 아니다. 틀린 표현은 '기울기 = k_2'이고, 올바르게는 '기울기 = k_1/k_2'이다.

③ X

k_2/k_1은 기울기를 뒤집은 값이다. 직선식의 계수는 $\frac{k_1}{k_2}$이므로 분자와 분모를 바꾸면 안 된다. 틀린 표현은 '기울기 = k_2/k_1'이고, 올바르게는 '기울기 = k_1/k_2'이다.

④ O

$\frac{C_{A0}-C_A}{\ln(C_{A0}/C_A)} = \frac{k_1}{k_2}\frac{t}{\ln(C_{A0}/C_A)} - \frac{1}{k_2}$

로 정리되므로 세로축 대 가로축의 직선 기울기는 $\frac{k_1}{k_2}$이다.

오답 포인트

적분형을 만든 뒤 바로 축과 대응시키지 않으면 k_1만 남긴다거나 k_1/k_2를 k_2/k_1로 뒤집는 실수가 나온다. 또 $\ln(C_{A0}/C_A)$ 항을 반대 부호로 쓰면 절편과 기울기를 함께 잘못 읽게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분식 반응기 그래프 문항은 먼저 $-dC_A/dt = -r_A$로 수지를 세우고, 적분식을 만든 다음, 문제에서 준 축 형태에 맞게 $y = mx + b$ 꼴로 다시 정리하여 계수와 절편을 읽으면 된다.

암기 포인트

포화형 속도식 $-r_A = \frac{k_1 C_A}{1 + k_2 C_A}$의 회분 적분형은 $\ln(C_{A0}/C_A) + k_2(C_{A0} - C_A) = k_1 t$이며, 이 문항의 축에서는 기울기가 k_1/k_2이다.

NoteBase

문 2. 이상기체 거동을 보이는 기체 A를 플러그흐름반응기(PFR)에 공급하여 반응 $A \rightarrow 3R$을 진행한다. 이때, 공급 반응물은 50 % A와 50 % 비활성 기체의 몰비율로 구성된다. 반응기 내부에서 온도 T와 압력 P이 변할 때, 반응물 A의 몰농도 C_A와 전환율 X의 관계식으로 가장 옳은 것은? (단, 반응기 입구에서 반응물 A의 몰농도는 C_{A0}, 온도는 T_0, 압력은 P_0이다.)

① $C_A = \frac{C_{A0}(1-X)}{1+X}\left(\frac{T_0}{T}\right)\left(\frac{P_0}{P}\right)$
② $C_A = \frac{C_{A0}(1-X)}{1+2X}\left(\frac{T_0}{T}\right)\left(\frac{P}{P_0}\right)$
③ $C_A = \frac{C_{A0}(1-X)}{1+X}\left(\frac{T_0}{T}\right)\left(\frac{P}{P_0}\right)$
④ $C_A = \frac{C_{A0}(1-X)}{1+2X}\left(\frac{T}{T_0}\right)\left(\frac{P_0}{P}\right)$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 기상 반응 $A \rightarrow 3R$에서 전환율에 따른 총몰수 변화와 이상기체 농도식 $C_A = y_A P/(RT)$를 결합해 C_A와 X의 관계를 구하는 문제이다.

조건 정리

- 반응식: $A \rightarrow 3R$
- 공급 조성: A 50%, 비활성 기체 50%
- 입구 조건: C_{A0}, T_0, P_0
- 구해야 할 값: 반응기 내부에서의 C_A
- 주의할 조건: 반응이 진행되면 총몰수가 증가하므로 y_A 분모가 바뀐다.

사용할 공식

$C_A = \frac{F_A}{F_T}\frac{P}{RT} = y_A\frac{P}{RT}$
$C_{A0} = y_{A0}\frac{P_0}{RT_0}$

이 공식을 쓰는 이유는 이상기체 혼합물에서 성분 A의 농도는 성분몰분율 y_A와 전체 압력 P로 표현되기 때문이다. 이 문제는 반응 때문에 F_A와 F_T가 함께 변하므로 먼저 y_A를 전환율 X로 써야 한다.

NoteBase

계산 과정

1. 기준을 입구에서 $F_{A0}=1$, 비활성 기체를 $F_{I0}=1$로 둔다. 50:50 공급이므로 $F_{T0}=2$, $y_{A0}=1/2$이다.
2. 전환율이 X이면 $F_A=1-X$, 생성물은 $F_R=3X$, 비활성 기체는 그대로 1이다.
3. 따라서 총몰유량은 $F_T=(1-X)+3X+1=2+2X=2(1+X)$이다.
4. 성분 A의 몰분율은 $y_A=\frac{1-X}{2(1+X)}$이다.
5. 이를 농도식에 대입하면
(C_A)/(C_A0) = (y_A P/(RT))/(y_A0 P_0/(RT_0)) = ((1-X)/(2(1+X))(P)/(T))/(12(P_0)/(T_0)) = (1-X)/(1+X)(T_0)/(T)(P)/(P_0)
6. 따라서
$C_A=C_{A0}\frac{1-X}{1+X}\frac{T_0}{T}\frac{P}{P_0}$
가 된다.

선지별 해설

① X이다. 압력비가 틀렸다. 이상기체에서 C_A는 P에 비례하므로 P_0/P가 아니라 P/P_0가 들어가야 한다. 틀린 표현은 P_0/P이고, 올바르게는 P/P_0이다.

② X이다. 총몰수 변화의 분모가 틀렸다. 총몰유량은 $2+2X=2(1+X)$이므로 비율식의 분모는 $1+X$가 된다. 틀린 표현은 $1+2X$이고, 올바르게는 $1+X$이다.

③ O이다. $y_A=(1-X)/\{2(1+X)\}$, $C_A=y_AP/(RT)$, $C_{A0}=(1/2)P_0/(RT_0)$를 결합하면 $C_A=C_{A0}\frac{1-X}{1+X}\frac{T_0}{T}\frac{P}{P_0}$가 된다.

④ X이다. 온도비와 압력비가 모두 반대로 들어갔다. 이상기체 농도는 P에 비례하고 T에 반비례하므로 T/T_0가 아니라 T_0/T, P_0/P가 아니라 P/P_0가 되어야 한다. 또한 총몰수 분모도 $1+2X$가 아니라 $1+X$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 두 가지이다. 첫째, 반응식 $A\rightarrow 3R$ 때문에 A 1몰이 사라질 때 총몰수는 2몰 증가하므로 최종 분모를 직감적으로 $1+2X$로 적기 쉽다. 그러나 50:50 공급이라 전체 기준을 잡으면 $F_T=2+2X=2(1+X)$이어서 정리된 분모는 $1+X$이다. 둘째, 농도식에서 $C\propto P/T$ 관계를 뒤집어 P_0/P, T/T_0로 쓰기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

기상 반응 농도식 문제는 F_{A0}와 비활성 기체를 편한 기준몰수로 둔 뒤, F_A, F_T, y_A를 순서대로 구하고 마지막에 $C_A=y_AP/(RT)$를 C_{A0}와 비로 정리하면 된다. 총몰수 변화와 P/T 방향을 마지막에 한 번 더 검산하면 된다.

암기 포인트

이상기체 성분농도는 $C_A\propto y_AP/T$이고, 비활성 기체가 섞인 기상 반응은 먼저 총몰수 F_T를 정확히 써야 한다.

문 3. 질소와 수소가 반응하여 암모니아를 생성하는 균일계 기상 반응이 <보기>와 같이 일어나고 있다. 이때 r_{N_2}와 r_{H_2}의 관계로 가장 옳은 것은?

<보기>

$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$

① $r_{N_2} = \frac{1}{3} r_{H_2}$

② $r_{N_2} = r_{H_2}$

③ $r_{N_2} = \frac{3}{2} r_{H_2}$

④ $r_{N_2} = 3 r_{H_2}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 반응식의 화학양론 계수로부터 각 성분의 생성·소모 속도 관계를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응식은 $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$이다.
구해야 할 값은 r_{N_2}와 r_{H_2}의 관계이다.
주의할 점은 반응물의 종속도는 화학양론 계수 비를 그대로 따른다는 점이다.

사용할 공식

균일 반응에서 종속도와 반응속도의 관계는 $r_i = \nu_i r$이다.
따라서 이 반응에서는 $r_{N_2} = -r$, $r_{H_2} = -3r$이므로 $r_{N_2} = \frac{1}{3} r_{H_2}$가 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 실제 수치 계산이 아니라 반응식의 계수로 속도 비를 묻고 있기 때문이다.

계산 과정

1. 반응식 $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$에서 질소와 수소의 화학양론 계수는 각각 1, 3이다.
2. 종속도는 $r_i = \nu_i r$로 나타내므로 $r_{N_2} = -r$, $r_{H_2} = -3r$이다.
3. 두 식을 비교하면 $r_{H_2} = 3 r_{N_2}$이고, 정리하면 $r_{N_2} = \frac{1}{3} r_{H_2}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① O: $r_{H_2} = -3r$, $r_{N_2} = -r$이므로 $r_{N_2} = \frac{1}{3} r_{H_2}$가 맞다.
② X: $r_{N_2} = r_{H_2}$는 질소와 수소의 소모 속도가 같다고 본 표현이라 틀리다. 틀린 표현은 "같다"이고, 올바르게는 수소의 종속도 크기가 질소의 3배이다.
③ X: $r_{N_2} = \frac{3}{2} r_{H_2}$는 반응식 계수 1과 3을 잘못 조합한 값이라 틀리다. 틀린 표현은 "$\frac{3}{2}$배"이고, 올바르게는 $r_{N_2} = \frac{1}{3} r_{H_2}$이다.
④ X: $r_{N_2} = 3r_{H_2}$는 분자와 분모를 뒤집은 경우이다. 틀린 표현은 "3배"이고, 올바르게는 질소의 종속도가 수소의 $\frac{1}{3}$배이다.

오답 포인트

반응식 계수의 비를 읽을 때 1 : 3을 보자마자 어느 쪽이 더 큰지 뒤집어 쓰는 실수가 잦다. 특히 $r_{H_2} = 3r_{N_2}$를 $r_{N_2} = 3r_{H_2}$로 바꾸는 역수 혼동이 대표적인 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응속도 관계 문제는 먼저 반응식 계수를 확인하고, 각 성분에 대해 $r_i = \nu_i r$를 쓴 뒤, 마지막에 두 종 사이의 비로 정리하면 된다.

암기 포인트

종속도 비는 반응식 계수 비를 따른다. $N_2 : H_2 = 1 : 3$이면 $r_{N_2} : r_{H_2} = 1 : 3$이다.

NoteBase

문 4. 일산화질소의 산화 반응 $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$의 총 반응차수는? (단, 비가역 기초반응으로 가정한다.)

① 1

② 2

③ 3

④ 4

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 비가역 기초반응의 속도식에서 각 반응물 농도 지수의 합으로 총 반응차수를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$이다.
문제 조건은 비가역 기초반응이다.
구해야 할 값은 총 반응차수이다.

사용할 공식

기초반응이므로 속도식은 $r = kC_{NO}^2 C_{O_2}$이다.
총 반응차수는 속도식의 농도 지수 합이므로 $2 + 1 = 3$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 기초반응에서는 반응속도식의 지수가 반응식의 화학양론계수와 직접 대응하기 때문이다.

계산 과정

1. 비가역 기초반응 조건에서 속도식은 $r = kC_{NO}^2 C_{O_2}$로 쓴다.
2. NO의 차수는 2, O_2의 차수는 1이다.
3. 총 반응차수는 $2 + 1 = 3$이므로 3차 반응이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
1차 반응으로 본 선지이다. 기초반응 속도식의 지수 합은 3이므로 맞지 않는다. 틀린 표현은 "1차"이고 올바르게는 "3차"이다.

② X
2차 반응으로 본 선지이다. NO의 지수 2만 보고 O_2의 지수 1을 빠뜨리면 나올 수 있는 값이다. 틀린 표현은 "2차"이고 올바르게는 "3차"이다.

③ O
속도식이 $r = kC_{NO}^2 C_{O_2}$이므로 총 반응차수는 $2 + 1 = 3$이다. 따라서 3차라는 판단이 옳다.

④ X
4차 반응으로 본 선지이다. 계수를 잘못 더하거나 생성물 계수까지 섞으면 혼동할 수 있으나, 총 반응차수는 반응물 쪽 속도식 지수 합만 본다. 틀린 표현은 "4차"이고 올바르게는 "3차"이다.

오답 포인트

문제의 핵심 함정은 "비가역 기초반응" 조건을 놓치는 데 있다. 이 조건이 있을 때만 속도식 지수를 화학양론계수와 직접 연결할 수 있다. 또 ②는 NO의 계수 2만 보고 총차수로 착각할 때 고르기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응차수 문항에서 먼저 기초반응 여부를 확인한다. 기초반응이면 속도식을 바로 쓰고, 총 반응차수는 각 반응물 농도 지수의 합으로 판단한다.

암기 포인트

기초반응에서는 속도식 지수 = 반응물 계수, 총 반응차수 = 지수 합이다.

NoteBase

문 5. <보기>의 반응이 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 진행된다. $20 molmin^{-1}$ CO**와** $30 molmin^{-1}$ H_2**가 반응기로 유입되어** H_2**의 전환율이** 50%**에 도달하였을 때, 반응기 출구에서** CH_4**의 몰유량의 값** $[molmin^{-1}]$**은? (단,** CH_4**,** H_2O**는 초기 상태에서 존재하지 않는다.)**

<보기>

$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$

① 2

② 5

③ 10

④ 15

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 H_2 전환율과 반응식의 양론관계를 이용해 반응기 출구의 CH_4 몰유량을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $CO = 20 molmin^{-1}$, $H_2 = 30 molmin^{-1}$, H_2 전환율 $= 50\%$이다.
구해야 할 값: 반응기 출구 CH_4 몰유량이다.
주의할 조건: 반응식은 $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$이고, CH_4와 H_2O는 초기 유입이 없다.

사용할 공식

$F_{H_2,\,reacted} = F_{H_2,\,0} X_{H_2}, \qquad F_{CH_4} = \frac{1}{3} F_{H_2,\,reacted}$

이 공식을 쓰는 이유는 전환율이 H_2 기준으로 주어졌고, 반응식에서 H_2 3 mol이 반응할 때 CH_4 1 mol이 생성되기 때문이다.

계산 과정

1. H_2 반응량은 $30 \times 0.5 = 15 molmin^{-1}$이다.
2. 반응식에서 $3H_2 \rightarrow CH_4$이므로 CH_4 생성량은 $15/3 = 5 molmin^{-1}$이다.
3. CH_4는 초기 유입이 없으므로 출구 CH_4 몰유량도 $5 molmin^{-1}$이다.
4. CO 20mol/min을 모두 반응시키려면 H_2가 60mol/min 필요하므로, 이 조건에서는 H_2가 부족한 성분이고 CO는 과잉이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: CH_4 생성량은 $15/3 = 5 mol min^{-1}$이다. 2는 반응한 H_2를 양론계수 3으로 연결한 결과와 맞지 않는다. 틀린 값 2 → 올바르게는 5이다.
② O: H_2 전환율 50%로 반응한 H_2는 15mol/min이고, 이를 3으로 나누면 CH_4는 5mol/min이다. 따라서 출구 CH_4 몰유량은 5이다.
③ X: 10은 CO의 50%가 반응했다고 잘못 보고 20×0.5로 계산한 값이다. 문제는 CO 전환율이 아니라 H_2 전환율을 준다. 틀린 값 10 → 올바르게는 5이다.
④ X: 15는 반응한 H_2 양을 그대로 CH_4 생성량으로 착각한 값이다. 반응식에서 H_2 3 mol이 CH_4 1 mol에 해당한다. 틀린 값 15 → 올바르게는 5이다.

오답 포인트

전환율 기준 성분을 CO로 잘못 읽거나, 양론계수 3을 나누지 않으면 오답이 된다. 이 문제에서 PFR과 등온 조건은 반응속도식을 묻는 정보처럼 보이지만, 실제 계산에는 전환율과 화학양론만 필요하다.

다시 나오면 이렇게 판단

전환율이 주어진 성분의 반응량을 먼저 구하고, 그다음 반응식의 양론계수로 생성물량을 연결하면 된다. 반응기 종류가 제시되어도 속도식이 없으면 우선 전환율-양론 문제인지부터 판단한다.

암기 포인트

H_2 기준 전환율 문제는 '반응한 H_2 = 유입 H_2 × 전환율, 생성 CH_4 = 반응한 H_2 ÷ 3'으로 정리된다.

NoteBase

문 6. 순수한 반응물 A가 있는 등온 회분식 반응기(반응용액 부피 $20L$)에서 비가역 액상 1차 기초반응 $A \rightarrow B$를 2시간 진행하였을 때, 반응물 A가 30% 소모되었다. 이 반응을 회분식 반응기와 같은 온도와 압력의 플러그흐름반응기(PFR)에서 진행하고자 한다. 순수한 반응물 A를 부피유량 $4L/h$로 공급할 때, 회분식 반응기와 동일한 A의 전환율을 얻기 위해 필요한 플러그흐름반응기 부피의 값$[L]$은?

① 2.5

② 5

③ 8

④ 20

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 액상 1차 반응의 회분식 시간식과 PFR 설계식을 연결하여 같은 전환율을 만드는 반응기 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 회분식 반응기 부피 20 L, 반응 시간 2 h, A의 소모율 30%이다.
구해야 할 값: 같은 전환율 $X = 0.30$을 얻는 PFR의 부피이다.
주의할 조건: 비가역 액상 1차 반응이고 액상 부피 변화가 없으므로 $-r_A = kC_A = kC_{A0}(1 - X)$로 놓을 수 있다.

사용할 공식

회분식 반응기: $kt = \ln \frac{1}{1-X}$
PFR 설계식: $V = \frac{v_0}{k} \ln \frac{1}{1-X}$
이 공식을 쓰는 이유: 액상 1차 반응에서 농도는 $C_A = C_{A0}(1 - X)$로 정리되며, 회분식과 PFR 모두 같은 속도식 kC_A를 사용하기 때문이다.

계산 과정

1. 회분식 반응기 자료로 속도상수 k를 구하면 $k = -\frac{1}{t}\ln(1 - X) = -\frac{1}{2}\ln(0.7) = 0.1783h^{-1}$이다.
2. 같은 전환율 $X = 0.30$을 PFR에서 얻으려면 $V = \frac{4}{0.1783} \ln \frac{1}{0.7} \approx 8.0L$이다.
3. 회분식 식의 $\ln \frac{1}{1-X}$와 PFR 식의 $\ln \frac{1}{1-X}$가 같은 값이므로, 같은 전환율에서는 $V = v_0 t = 4 \times 2 = 8L$로 바로 확인된다.

NoteBase

선지 판단

① X: $V = 2.5L$이면 체류시간은 $\tau = V/v_0 = 0.625h$이고, 전환율은 $X = 1 - e^{-k\tau} \approx 0.105$이다. 30% 전환율에 못 미치므로 틀리다. 틀린 값 2.5 L → 올바르게는 8 L이다.
② X: $V = 5L$이면 $\tau = 1.25h$이고, $X \approx 0.200$이다. 여전히 30%에 부족하므로 틀리다. 틀린 값 5 L → 올바르게는 8 L이다.
③ O: $V = 8L$이면 $\tau = 2h$이고, $X = 1 - e^{-0.1783 \times 2} = 0.30$이 된다. 회분식 반응기와 같은 전환율을 주므로 옳다.
④ X: $V = 20L$이면 $\tau = 5h$이고, $X \approx 0.590$이다. 30%보다 훨씬 큰 전환율이므로 틀리다. 틀린 값 20 L → 올바르게는 8 L이다.

오답 포인트

회분식에서 2시간이 주어졌을 때 이를 단순한 반응시간 정보로만 보고 PFR 설계식과 따로 계산하려다 실수하기 쉽다. 이 문항의 핵심은 액상 1차 반응에서 같은 전환율이면 회분식의 반응시간과 PFR의 체류시간이 같아진다는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

액상 1차 반응에서 회분식과 PFR의 같은 전환율을 비교하면 먼저 회분식 식 $kt = \ln\frac{1}{1-X}$와 PFR 식 $V = \frac{v_0}{k}\ln\frac{1}{1-X}$를 나란히 둔다. 같은 X에서는 로그항이 같으므로 $V = v_0 t$인지 바로 확인하면 된다.

암기 포인트

액상 1차 반응에서 같은 전환율이면 회분식 시간 t와 PFR 체류시간 $\tau = V/v_0$가 같아진다.

NoteBase

문 7. 1차 반응을 1,000K에서 진행하면 반응속도상수(k)는 $100h^{-1}$이고, 2,000K에서 진행하면 $200h^{-1}$이다. 반응속도상수(k)가 $25h^{-1}$일 때의 반응온도의 값[K]은? (단, 반응속도상수는 Arrhenius 관계식을 따른다.)

① 100

② 250

③ 500

④ 750

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 Arrhenius 식에서 $\ln k$와 $1/T$의 선형관계를 이용해 반응속도상수가 $25h^{-1}$가 되는 온도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- $T_1 = 1000K$, $k_1 = 100h^{-1}$
- $T_2 = 2000K$, $k_2 = 200h^{-1}$

구해야 할 값:
- $k = 25h^{-1}$일 때의 T

주의할 조건:
- 속도상수는 Arrhenius 관계식 $k = Ae^{-E/RT}$를 따른다.

사용할 공식

Arrhenius 식은 $\ln k = \ln A - \frac{E}{R}\frac{1}{T}$로 바꿀 수 있다.
이 식은 $\ln k$를 세로축, $1/T$를 가로축으로 보면 직선식이 되므로 두 점 $(1000K, 100h^{-1})$, $(2000K, 200h^{-1})$으로 직선관계를 정한 뒤 $k = 25h^{-1}$일 때의 T를 구할 수 있다.

NoteBase

계산 과정

1. $\ln k = \ln A - \frac{E}{R}\frac{1}{T}$라 두고 $b = E/R$라 놓으면

$\ln 100 = \ln A - \frac{b}{1000}$

$\ln 200 = \ln A - \frac{b}{2000}$

2. 두 식을 빼면

$\ln 200 - \ln 100 = \frac{b}{2000}$

$\ln 2 = \frac{b}{2000} \Rightarrow b = 2000\ln 2$

3. 첫 식에 대입하면

$\ln A = \ln 100 + 2\ln 2 = \ln 400$

따라서

$\ln k = \ln 400 - \frac{2000\ln 2}{T}$

4. $k = 25h^{-1}$를 대입하면

$\ln 25 = \ln 400 - \frac{2000\ln 2}{T}$

$\ln\left(\frac{400}{25}\right) = \frac{2000\ln 2}{T}$

$\ln 16 = \frac{2000\ln 2}{T} = \frac{4\ln 2 \cdot 500}{T}$

$4\ln 2 = \frac{2000\ln 2}{T} \Rightarrow T = 500K$

계산 결과는 $500K$이다.

선지별 해설

① X

- 계산 결과는 $500K$이므로 100 K는 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 온도값 자체이다. 올바르게는 $500K$이다.

② X

- 계산 결과는 $500K$이므로 250 K는 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 온도값 자체이다. 올바르게는 $500K$이다.

③ O

- Arrhenius 식을 직선형으로 바꾸어 계산하면 $k = 25h^{-1}$일 때의 온도는 $500K$가 된다.

④ X

- 계산 결과는 $500K$이므로 750 K는 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 온도값 자체이다. 올바르게는 $500K$이다.

NoteBase

오답 포인트

이 문제의 함정은 Arrhenius 식을 그대로 대입하려다 A와 E/R를 따로 구하지 못해 막히는 지점에 있다. 핵심은 $\ln k$와 $1/T$가 직선관계라는 점을 이용하는 것이다. 또한 온도가 1000 K에서 2000 K로 올라갈 때 k가 2배가 되었으므로, 그 반대 방향에서 k가 4분의 1이 되는 온도를 비례감각으로 잘못 추정하면 250 K나 750 K 같은 오답을 고르기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

Arrhenius 식에서 두 온도와 두 속도상수가 주어지면 먼저 $\ln k = \ln A - (E/R)(1/T)$의 직선형으로 바꾼다. 그다음 두 점으로 직선식을 만든 뒤, 구하려는 k를 넣어 $1/T$를 구하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

Arrhenius 문제는 $k = Ae^{-E/RT}$보다 $\ln k$ 대 $1/T$ 직선형으로 바꾸는 것이 계산의 출발점이다.

NoteBase

문 8. 비가역 액상 2차 반응 $2A \rightarrow 2B$를 등온 플러그흐름 반응기(PFR)에서 진행한다. 반응기 출구에서 반응물 A의 전환율이 0.8이면, 반응기 입구를 기준으로 할 때 부피의 75%에 해당하는 지점에서의 전환율은?

① 0.4

② 0.5

③ 0.6

④ 0.75

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 액상 2차 반응의 PFR 설계식 $V \propto \int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2}$를 이용해 반응기 길이 방향의 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 비가역 액상 2차 반응 $2A \rightarrow 2B$
- 반응기 출구 전환율 $X_e = 0.8$
- 찾을 지점의 반응기 부피 $V = 0.75V_e$

구해야 할 값:
- $V = 0.75V_e$에서의 전환율 X

주의할 조건:
- 액상 PFR이므로 부피에 따라 전환율이 선형으로 증가하지 않는다.
- 액상 반응이므로 $C_A = C_{A0}(1-X)$로 둘 수 있다.

사용할 공식

액상 2차 반응의 PFR 설계식은 다음과 같다.
$V = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$
반응속도가 $-r_A = kC_A^2 = kC_{A0}^2(1-X)^2$ 이므로
$V \propto \int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2} = \frac{X}{1-X}$
이 공식을 쓰는 이유는 이 문항이 등온 액상 2차 반응의 PFR 내부 위치별 전환율을 묻고 있기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 출구 조건을 설계식에 대입하면
$V_e \propto \frac{0.8}{1-0.8} = 4$
2. 반응기 입구 기준 75% 지점에서는
$V = 0.75V_e \propto 0.75 \times 4 = 3$
3. 따라서 내부 지점의 전환율 X는
$\frac{X}{1-X} = 3$
$X = 3(1-X) \Rightarrow 4X = 3 \Rightarrow X = 0.75$
계산 결과 해당 지점의 전환율은 0.75이다.

선지별 해설

① X
- $X = 0.4$를 넣으면 $\frac{X}{1-X} = \frac{0.4}{0.6} = \frac{2}{3}$이므로 전체 반응기 부피의 $\frac{2/3}{4} = \frac{1}{6}$ 지점에 해당한다. 틀린 판단은 75% 부피 지점의 전환율을 0.4로 본 점이며, 올바르게는 0.75이다.

② X
- $X = 0.5$를 넣으면 $\frac{X}{1-X} = 1$이므로 전체 반응기 부피의 $\frac{1}{4}$ 지점에 해당한다. 틀린 판단은 75% 부피 지점의 전환율을 0.5로 본 점이며, 올바르게는 0.75이다.

③ X
- $X = 0.6$를 넣으면 $\frac{X}{1-X} = \frac{0.6}{0.4} = 1.5$이므로 전체 반응기 부피의 $\frac{1.5}{4} = 0.375$ 지점에 해당한다. 이 값은 $0.8 \times 0.75 = 0.6$처럼 전환율을 부피와 단순 비례시킬 때 나오기 쉬운 오답이며, 올바르게는 0.75이다.

④ O
- $X = 0.75$를 넣으면 $\frac{X}{1-X} = \frac{0.75}{0.25} = 3$이므로 전체 반응기 부피의 $\frac{3}{4} = 0.75$ 지점과 정확히 일치한다. 따라서 ④가 옳다.

오답 포인트

PFR에서는 반응기 길이 또는 부피와 전환율이 선형 관계가 아니다. 특히 2차 반응은 $(1-X)^2$가 분모에 들어가므로 뒤로 갈수록 같은 부피 증가에 필요한 전환율 변화가 더 작아진다. ③처럼 출구 전환율 0.8에 75%를 그대로 곱하면 CSTR식이나 선형 보간처럼 잘못 처리한 값이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

PFR 계산형 문항은 먼저 $-r_A$를 X의 식으로 바꾼 뒤, $V \propto \int \frac{dX}{-r_A}$ 형태로 적분식을 세운다. 그다음 출구값으로 전체 부피를 기준화하고, 묻는 지점의 부피비를 다시 적분값 비로 연결하면 된다.

암기 포인트

액상 2차 반응 PFR은 $V \propto \frac{X}{1-X}$이고, 전환율은 부피와 단순 비례하지 않는다.

NoteBase

문 9. 효소(E)는 <보기>의 경로를 통해 기질(A)을 생성물(P)로 전환하며, 반응속도는 미카엘리스-멘텐(Michaelis-Menten) 식을 따른다. 최대 반응속도의 절반에 해당하는 반응속도를 보일 때의 기질 농도 C_A로 가장 옳은 것은? (단, <보기>의 모든 반응은 기초반응이며 k_1, k_2, k_3는 각 화살표에 해당하는 반응의 속도상수이다.)

<보기>

E + A [k_2]k_1 E·A k_3 E + P

① $k_1 + k_3$

② $(k_2 + k_3)/k_1$

③ $(k_1 + k_3)/k_2$

④ $k_2 + k_3$

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 미카엘리스-멘텐 식에서 $v = V_{max}/2$일 때 $C_A = K_M$가 되고, 단순 효소반응 기구에서 $K_M = (k_2 + k_3)/k_1$임을 연결하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 $E + A \rightleftharpoons E \cdot A \rightarrow E + P$이며 결합 속도상수는 k_1, 해리 속도상수는 k_2, 생성 속도상수는 k_3이다.
구해야 할 값은 최대 반응속도의 절반을 보일 때의 기질 농도 C_A이다.
이 기구에서는 미카엘리스 상수 K_M가 $(k_2 + k_3)/k_1$로 정해진다.

사용할 공식

$v = \frac{V_{max} C_A}{K_M + C_A}$
$K_M = \frac{k_2 + k_3}{k_1}$
문제의 반응경로가 전형적인 미카엘리스-멘텐 기구이므로 반속도 조건은 $C_A = K_M$로 바로 연결된다.

계산 과정

1. 미카엘리스-멘텐 식에 $v = V_{max}/2$를 대입하면 $\frac{V_{max}}{2} = \frac{V_{max} C_A}{K_M + C_A}$이다.
2. V_{max}를 약분하면 $\frac{1}{2} = \frac{C_A}{K_M + C_A}$이다.
3. 정리하면 $K_M + C_A = 2C_A$이므로 $K_M = C_A$이다.
4. 따라서 $C_A = K_M = \frac{k_2 + k_3}{k_1}$이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: $k_1 + k_3$는 미카엘리스 상수 식이 아니고, 결합 속도상수 k_1를 분모에 두는 구조가 빠져 있어 기질 농도 C_A가 될 수 없다. 틀린 표현은 $k_1 + k_3$이고, 올바르게는 $C_A = (k_2 + k_3)/k_1$이다.
2번 O: $v = V_{max}/2$이면 $C_A = K_M$이고, 이 반응의 K_M는 $(k_2 + k_3)/k_1$이므로 맞다.
3번 X: 분자와 분모를 잘못 대응한 식이다. 틀린 표현은 $(k_1 + k_3)/k_2$이고, 올바르게는 해리와 생성의 합을 결합 속도상수로 나눈 $(k_2 + k_3)/k_1$이다.
4번 X: $k_2 + k_3$까지만 쓰고 k_1로 나누는 단계가 빠졌다. 틀린 표현은 $k_2 + k_3$이고, 올바르게는 $(k_2 + k_3)/k_1$이다.

오답 포인트

반속도 조건을 보고도 $C_A = K_M$를 바로 연결하지 못하거나, K_M를 단순히 $k_2 + k_3$로 외워 k_1 분모를 빠뜨리면 ④로 흔들리기 쉽다. ③처럼 분자와 분모를 거꾸로 쓰는 실수도 자주 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

단순 효소반응 $E + A \rightleftharpoons EA \rightarrow E + P$가 보이면 먼저 K_M=(역반응+생성반응)/결합반응 꼴을 대응시키고, $v = V_{max}/2$ 조건이면 곧바로 $C_A = K_M$를 대입해 선지를 비교한다.

암기 포인트

반속도에서는 $C_A = K_M$이고, 단순 효소반응의 K_M는 (해리+생성)/결합이다.

NoteBase

문 10. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 <보기>와 같은 액상 직렬 반응이 일어난다. B의 농도가 최댓값을 가지는 공간시간(τ_{max})이 10h이다. k_1이 $100h^{-1}$일 때, k_2의 값[h^{-1}]은? (단, 공급원료 내 B, C의 농도는 $0molL^{-1}$이다.)

〈보기〉

$$A \xrightarrow{k_1} B \qquad -r_A = k_1 C_A$$

$$B \xrightarrow{k_2} C \qquad r_C = k_2 C_B$$

① 0.1

② 0.01

③ 0.001

④ 0.0001

정답 4번

출제 포인트

직렬 1차 반응 $A \rightarrow B \rightarrow C$가 일어나는 CSTR에서 중간생성물 B의 농도가 최대가 되는 공간시간 조건 $\tau_{max} = 1/\sqrt{k_1 k_2}$를 적용하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $k_1 = 100h^{-1}$, $\tau_{max} = 10h$

구해야 할 값: k_2

주의할 조건: 등온 CSTR의 액상 직렬 반응이며 공급원료에서 $C_{B0} = 0$, $C_{C0} = 0$이다.

사용할 공식

중간생성물 B의 농도는

$C_B = \frac{k_1 \tau C_{A0}}{(1 + k_1\tau)(1 + k_2\tau)}$

이고, 이를 τ에 대해 최대화하면

$\tau_{max} = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$

가 된다.

이 공식을 쓰는 이유: CSTR에서 B는 A로부터 생성되면서 동시에 C로 소모되므로, 생성과 소모가 균형을 이루는 최대 농도 조건을 써야 하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 최대 조건에서 $k_2 = 1/(k_1\tau_{max}^2)$이다.
2. 수치를 대입하면
$k_2 = \frac{1}{100 \times 10^2}$
이다.
3. 따라서
$k_2 = \frac{1}{10000} = 0.0001h^{-1}$
이다.

선지 판단

① X
- $k_2 = 0.1h^{-1}$이면 $k_1k_2 = 10$이므로 $\tau_{max} = 1/\sqrt{10} \approx 0.316h$가 된다. 문제의 $10h$와 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 값 자체이다. 올바르게는 $k_2 = 0.0001h^{-1}$이다.
- 이 값은 τ의 제곱 관계를 놓치고 단순 역수처럼 판단할 때 나오는 오답이다.

② X
- $k_2 = 0.01h^{-1}$이면 $k_1k_2 = 1$이므로 $\tau_{max} = 1h$가 된다. 문제 조건과 다르다.
- 틀린 표현은 $k_2 = 0.01h^{-1}$이다. 올바르게는 $k_2 = 0.0001h^{-1}$이다.
- 이 값은 $k_2 = 1/\tau_{max}^2$로 두고 k_1을 빠뜨리면 나오는 오답이다.

③ X
- $k_2 = 0.001h^{-1}$이면 $k_1k_2 = 0.1$이므로 $\tau_{max} = 1/\sqrt{0.1} \approx 3.16h$가 된다. 역시 조건과 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 $k_2 = 0.001h^{-1}$이다. 올바르게는 $k_2 = 0.0001h^{-1}$이다.
- 이 값은 $k_2 = 1/(k_1\tau_{max})$처럼 τ를 한 번만 나누는 실수에서 나온다.

④ O
- $k_2 = 0.0001h^{-1}$이면 $k_1k_2 = 0.01$이고 $\tau_{max} = 1/\sqrt{0.01} = 10h$가 되어 문제 조건과 정확히 일치한다.
- 계산 결과 $k_2 = 0.0001h^{-1}$이므로 정답은 4번이다.

오답 포인트

중간생성물 최대 조건을 $\tau_{max} = 1/\sqrt{k_1k_2}$가 아니라 단순히 $1/k$ 꼴로 외우면 k_1을 빠뜨리거나 τ의 제곱을 놓치기 쉽다. 이 문항의 오답은 대부분 그 두 실수에서 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 1차 반응 CSTR에서 중간생성물 농도 최대를 묻는 문제는 먼저 $\tau_{max} = 1/\sqrt{k_1k_2}$를 적고, 이어서 $k_2 = 1/(k_1\tau_{max}^2)$로 정리한 뒤 제곱과 단위를 검산하는 순서로 판단한다.

NoteBase

암기 포인트

직렬 1차 반응 CSTR의 중간생성물 최대 조건은 $\tau_{max} = 1/\sqrt{k_1 k_2}$이며, 역으로는 $k_2 = 1/(k_1 \tau_{max}^2)$이다.

NoteBase

문 11. <보기>의 내용에 해당하는 것은?

<보기>
• 반응물의 농도가 촉매의 농도보다 높은 초기 상태에서는 반응이 진행될수록 촉매의 농도가 증가하여 반응이 촉진된다.
• 미생물 증식 반응(배양 반응)이 일례이다.
기질 + 미생물 → 제품 + 더 많은 미생물

① 자동촉매반응(autocatalytic reaction)
② 단일반응(single reaction)
③ 기초반응(elementary reaction)
④ 불균일 촉매반응(heterogeneous catalytic reaction)

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 생성물 또는 촉매 역할을 하는 성분이 반응 중 증가하여 반응속도를 더 높이는 자동촉매반응의 개념을 묻는 문제이다.

핵심 개념

자동촉매반응은 생성물이나 반응계 내의 촉매 성분이 반응이 진행될수록 늘어나 스스로 반응을 더 촉진하는 반응이다. 단일반응은 하나의 반응식으로 표현되는 반응 분류이다. 기초반응은 분자 수준에서 한 단계로 일어나는 최소 반응단계이다. 불균일 촉매반응은 촉매와 반응물이 서로 다른 상에 존재하는 촉매반응이다.

NoteBase

선지별 해설

① O
제시문은 반응이 진행될수록 촉매의 농도가 증가하여 반응이 촉진된다고 설명한다. 미생물 증식 반응에서 미생물 자체가 늘어나 다음 반응을 더 촉진하므로 자동촉매반응에 해당한다.

② X
틀린 부분은 이 현상을 단일반응으로 보는 점이다. 단일반응은 반응식의 수나 반응 분류를 말할 뿐, 생성된 촉매가 늘어나 반응이 가속되는 특징을 뜻하지 않는다. 올바르게는 생성물이 촉매 역할을 강화하는 자동촉매반응이다.

③ X
틀린 부분은 이 현상을 기초반응으로 보는 점이다. 기초반응은 반응 메커니즘이 한 단계로 진행되는지를 나타내는 개념이다. 제시문은 단계 수가 아니라 촉매 농도 증가에 따른 자기촉진을 설명하므로 올바르게는 자동촉매반응이다.

④ X
틀린 부분은 이 현상을 불균일 촉매반응으로 보는 점이다. 불균일 촉매반응은 촉매와 반응물이 서로 다른 상에 있는 경우를 뜻한다. 제시문의 핵심은 상의 차이가 아니라 반응이 진행될수록 촉매 역할을 하는 미생물이 늘어나는 점이므로 올바르게는 자동촉매반응이다.

오답 포인트

촉매라는 단어만 보고 불균일 촉매반응으로 넘어가기 쉽다. 이 문항의 판단 기준은 촉매의 존재 자체가 아니라 촉매 역할을 하는 성분이 반응 중 스스로 증가하는지 여부이다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응이 진행될수록 생성물이나 미생물처럼 촉매 역할을 하는 성분이 더 많이 생겨 반응속도가 커지면 자동촉매반응으로 판단한다. 상이 다른 촉매인지, 반응식이 하나인지, 메커니즘이 한 단계인지는 별개의 분류이다.

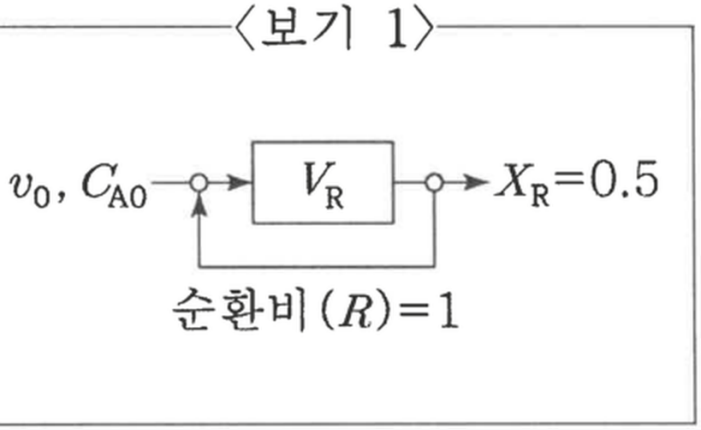
암기 포인트

생성물이 촉매가 되어 스스로 속도가 붙으면 자동촉매반응이다.

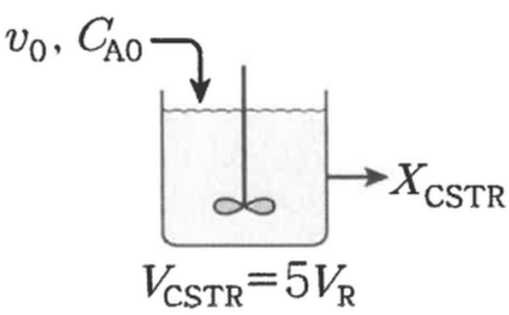
NoteBase

문 12. 비가역 액상 1차 반응 $A \rightarrow B$를 <보기 1>의 순환비가 1인 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 진행하여 반응물 A의 전화율(X_R) 0.5를 얻었다. <보기 2>와 같이 순환 플러그흐름반응기보다 5배 큰 연속교반탱크반응기(CSTR)에 반응물 A를 동일한 부피유속(v_0)과 농도(C_{A0})로 공급하였다. 반응온도가 동일할 때, 연속교반탱크반응기에서 반응물 A의 전화율(X_{CSTR})의 값은? (단, ln 2는 0.7, ln 3은 1.1이다.)

<보기 1>



<보기 2>



① 0.5

② 0.6

③ 0.7

④ 0.8

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 재순환 PFR에서 먼저 $k\tau$를 구한 뒤, 같은 반응을 5배 부피의 CSTR에 적용하여 전환율을 계산하는 문제이다.

조건 정리

- 신선 공급은 $F_{A0} = v_0 C_{A0}$이다.
- 순환비 $R = 1$이므로 재순환 유량은 v_0이고, PFR 실제 유입 유량은 $2v_0$이다.
- PFR 계의 최종 출구 전환율이 0.5이므로 반응기 출구 농도는 $C_{A,e} = 0.5C_{A0}$이다.
- 혼합 후 PFR 입구 농도는 $C_{A,i} = \frac{C_{A0} + 0.5C_{A0}}{2} = 0.75C_{A0}$이다.
- CSTR 부피는 $V_{CSTR} = 5V_R$이고, 유입 유량은 v_0이다.

NoteBase

사용할 공식

$k\tau_{PFR} = \ln\left(\frac{C_{A,i}}{C_{A,e}}\right)$
$X_{CSTR} = \frac{k\tau_{CSTR}}{1 + k\tau_{CSTR}}$
이 공식을 쓰는 이유는 비가역 액상 1차 반응이며, 밀도 변화가 없는 등온 조건이므로 PFR과 CSTR의 1차 반응 설계식이 그대로 적용되기 때문이다.

계산 과정

1. 재순환 PFR 출구 농도는 전체 전환율 $X_R = 0.5$로부터 $C_{A,e} = C_{A0}(1 - 0.5) = 0.5C_{A0}$이다.
2. PFR 입구는 신선 공급과 재순환 유출이 섞이므로 $C_{A,i} = \frac{C_{A0} + 0.5C_{A0}}{2} = 0.75C_{A0}$이다.
3. 따라서 PFR의 1회 통과 기준 전환율은 $X_{sp} = \frac{0.75 - 0.5}{0.75} = \frac{1}{3}$이고,
$k\frac{V_R}{2v_0} = \ln\left(\frac{0.75C_{A0}}{0.5C_{A0}}\right) = \ln\left(\frac{3}{2}\right) = \ln 3 - \ln 2 = 1.1 - 0.7 = 0.4$
이다.
4. CSTR에서는 $\tau_{CSTR} = \frac{5V_R}{v_0} = 10\frac{V_R}{2v_0}$이므로 $k\tau_{CSTR} = 10 \times 0.4 = 4$이다.
5. 따라서
$X_{CSTR} = \frac{4}{1+4} = 0.8$
이다.

선지별 해설

① X
- 틀린 표현은 전환율을 0.5로 둔 값이다. 0.5는 재순환 PFR 계의 전체 출구 전환율일 뿐이며, 부피가 더 큰 CSTR의 값이 아니다. 올바르게는 $X_{CSTR} = 0.8$이다.

② X
- 틀린 표현은 전환율을 0.6으로 둔 값이다. CSTR에서 $X = 0.6$이면 필요한 $k\tau$는 $\frac{0.6}{0.4} = 1.5$인데, 실제 $k\tau$는 4이다. 올바르게는 $X_{CSTR} = 0.8$이다.

③ X
- 틀린 표현은 전환율을 0.7로 둔 값이다. CSTR에서 $X = 0.7$이면 필요한 $k\tau$는 $\frac{0.7}{0.3} \approx 2.33$인데, 실제 $k\tau$는 4이다. 올바르게는 $X_{CSTR} = 0.8$이다.

④ O
- $k\tau_{CSTR} = 4$를 대입하면 $X_{CSTR} = \frac{4}{5} = 0.8$이므로 옳다.

오답 포인트

순환비가 1이면 PFR 부피를 단순히 V_R/v_0로 잡지 않고 실제 반응기 유입 유량 $2v_0$로 나누어야 한다. 또한 재순환 계의 전체 전환율 0.5와 PFR 1회 통과 전환율 1/3을 혼동하면 오답이 된다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

재순환 반응기 문제는 전체 출구 농도부터 구한 뒤 혼합점의 입구 농도와 실제 반응기 유입 유량을 정리하여 $k\tau$를 계산하고, 그 값을 다른 반응기 설계식에 옮겨 판단한다.

암기 포인트

재순환이 있으면 체류시간은 신선 공급 유량이 아니라 실제 반응기 유입 유량 기준으로 잡으며, 1차 CSTR는 $X = \frac{k\tau}{1 + k\tau}$를 사용한다.

NoteBase

문 13. <보기 1>의 병렬 반응에서 원하는 생성물(D)과 원하지 않는 생성물(U)에 대한 순간 선택도$S_{D/U}$가 주어졌다. 순간 선택도를 크게 하기 위한 방법으로 옳은 것을 <보기 2>에서 모두 고른 것은? (단, k_1, k_2는 반응속도 상수이며, $a = \alpha_2 - \alpha_1, b = \beta_2 - \beta_1$로서 양의 상수이다.)

<보기 1>

- $A + B \rightarrow D, \quad r_D = k_1 C_A^{\alpha_1} C_B^{\beta_1}$
- $A + B \rightarrow U, \quad r_U = k_2 C_A^{\alpha_2} C_B^{\beta_2}$
- $S_{D/U} = \frac{r_D}{r_U} = \frac{k_1}{k_2 C_A^a C_B^b}$

<보기 2>

ㄱ. A와 B의 농도를 낮은 상태로 반응시켜야 한다.

ㄴ. 순환비가 큰 플러그흐름반응기(PFR)를 이용한다.

ㄷ. 비활성 물질로 희석된 원료를 사용한다.

ㄹ. 기상인 경우, 고압에서 반응시킨다.

① ㄱ, ㄴ

② ㄴ, ㄷ

③ ㄱ, ㄴ, ㄷ

④ ㄱ, ㄷ, ㄹ

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 병렬반응의 순간 선택도 식에서 반응물 농도 변화가 원하는 생성물의 선택성에 어떻게 작용하는지를 판단하는 문제이다.

조건 정리

주어진 식은 $S_{D/U} = \frac{r_D}{r_U} = \frac{k_1}{k_2 C_A^a C_B^b}$이다.
여기서 $a = \alpha_2 - \alpha_1, b = \beta_2 - \beta_1$이고 둘 다 양수이다.
따라서 C_A나 C_B가 커질수록 분모가 커져 순간 선택도는 작아지고, 두 농도가 낮아질수록 순간 선택도는 커진다.

사용할 공식

$S_{D/U} = \frac{k_1}{k_2 C_A^a C_B^b}$
이 식을 쓰는 이유는 원하는 생성물과 원하지 않는 생성물이 같은 반응물 A, B에서 병렬로 생성될 때, 반응물 농도 조건이 두 반응의 상대 속도비를 어떻게 바꾸는지 직접 보여 주기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. $a, b > 0$이므로 순간 선택도는 C_A와 C_B에 반비례한다.
2. 따라서 반응기 내부의 A, B 농도를 낮추는 조작은 모두 $S_{D/U}$를 크게 한다.
3. ㄱ의 저농도 반응, ㄴ의 큰 순환비에 의한 저농도 유지, ㄷ의 비활성물질 희석은 모두 선택도를 높인다.
4. ㄹ의 기상 고압 반응은 반응물의 분압과 농도를 높여 $S_{D/U}$를 낮추므로 옳지 않다.

선지별 해설

① X: ㄱ과 ㄴ은 옳지만 ㄷ도 옳다. 틀린 표현은 'ㄱ, ㄴ만 해당한다'는 점이며, 올바르게는 'ㄱ, ㄴ, ㄷ이 해당한다'이다.
② X: ㄴ과 ㄷ은 옳지만 ㄱ도 옳다. 틀린 표현은 'ㄱ이 제외된다'는 점이며, 올바르게는 '저농도 반응인 ㄱ도 포함된다'이다.
③ O: ㄱ, ㄴ, ㄷ이 모두 선택도를 크게 하는 방법이다. 저농도 유지와 희석은 C_A, C_B를 낮추고, 큰 순환비 PFR도 반응기 내 반응물 농도를 낮게 유지하는 방향으로 작용한다.
④ X: ㄱ과 ㄷ은 옳지만 ㄹ이 틀리다. 틀린 표현은 '기상인 경우 고압에서 반응시킨다'는 부분이며, 올바르게는 '기상 반응에서는 압력을 높이면 반응물 농도가 증가하여 선택도가 감소하므로 저압 또는 희석 조건이 유리하다'이다.

오답 포인트

큰 순환비 PFR을 단순히 반응을 빠르게 만드는 장치로만 보면 ㄴ을 놓치기 쉽다. 이 문항의 핵심은 반응속도의 절대값이 아니라 원하는 반응과 원하지 않는 반응의 속도비이며, $a, b > 0$일 때는 반응물 농도를 낮게 유지하는 조작이 모두 유리하다는 점이다. 또 기상 반응에서 고압이 항상 좋다고 일반화하면 ㄹ에 속기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응 선택도 식이 주어지면 먼저 원하는 선택도가 반응물 농도에 비례하는지 반비례하는지 확인한다. 그다음 각 조작이 반응물 농도 C_A, C_B를 올리는지 내리는지로만 정리하면 정답을 빠르게 고를 수 있다.

암기 포인트

$S \propto 1/(C_A^a C_B^b)$이고 $a, b > 0$이면 저농도, 희석, 큰 순환비가 유리하고 고압은 불리하다.

NoteBase

문 14. <보기>는 고체 촉매를 이용한 노말부테인(n-butane)의 단열 액상 이성질화 반응이다. 이 반응에서 평형전화율X_e를 온도에 대한 식으로 표현한 것으로 가장 옳은 것은? (단, <보기>의 반응은 가역 기초반응이며, $K_e(T)$는 농도 평형상수이고, i-C_4H_{10}의 초기 농도는 $0 mol L^{-1}$이다.)

<보기>

n-$C_4H_{10} \rightleftharpoons i$-$C_4H_{10}$

① $X_e = \frac{K_e(T)}{1 + K_e(T)}$

② $X_e = \frac{K_e(T)}{1 - K_e(T)}$

③ $X_e = \frac{K_e(T)}{(1 + K_e(T))^2}$

④ $X_e = \frac{K_e(T)}{(1 - K_e(T))^2}$

정답 1번

출제 포인트

가역 액상 이성질화 반응에서 농도평형상수 $K_e(T)$와 평형전환율 X_e의 관계를 식으로 정리하는 문제이다.

조건 정리

반응은 n-$C_4H_{10} \rightleftharpoons i$-$C_4H_{10}$이다.
액상 반응이므로 부피를 일정하게 본다.
초기 i-C_4H_{10} 농도는 0이므로 평형에서 $C_n = C_{n0}(1 - X_e)$, $C_i = C_{n0}X_e$이다.

사용할 공식

$K_e(T) = \frac{C_i}{C_n}$
이 문제는 가역 기초반응의 농도평형상수를 평형 농도비로 놓고, 평형전환율로 각 성분 농도를 치환하면 바로 정리할 수 있는 형태이다.

NoteBase

계산 과정

1. 평형에서 n-C_4H_{10}의 농도는 $C_n = C_{n0}(1 - X_e)$이다.
2. 초기 i-C_4H_{10}가 없으므로 생성된 i-C_4H_{10}의 농도는 $C_i = C_{n0}X_e$이다.
3. 이를 평형상수식에 대입하면
$K_e(T) = \frac{C_i}{C_n} = \frac{C_{n0}X_e}{C_{n0}(1 - X_e)} = \frac{X_e}{1 - X_e}$
4. 정리하면
$K_e(T)(1 - X_e) = X_e$
$K_e(T) = X_e(1 + K_e(T))$
$X_e = \frac{K_e(T)}{1 + K_e(T)}$
따라서 계산 결과와 일치하는 식은 ①이다.

선지별 해설

① O
$K_e(T) = X_e/(1 - X_e)$를 X_e에 대해 정리하면 $X_e = K_e(T)/(1 + K_e(T))$가 되므로 옳다.

② X
틀린 표현은 분모의 $1 - K_e(T)$이다. 올바르게는 $1 + K_e(T)$이다. 이 식은 $K_e(T)(1 - X_e) = X_e$를 정리할 때 이항 부호를 잘못 처리한 경우에 나온다.

③ X
틀린 표현은 분모의 $(1 + K_e(T))^2$이다. 올바르게는 $1 + K_e(T)$이다. 평형상수식은 농도비의 1차식이므로 분모가 제곱될 이유가 없다.

④ X
틀린 표현은 분모의 $(1 - K_e(T))^2$이다. 올바르게는 $1 + K_e(T)$이다. 이 식은 ②의 부호 오류에 ③의 불필요한 제곱까지 겹친 형태이다.

오답 포인트

평형상수식을 세운 뒤 X_e 항을 이항하는 과정에서 부호를 잘못 두거나, 농도비 1차식을 임의로 제곱식으로 바꾸는 실수가 자주 나온다. 특히 ②와 ④는 부호 함정, ③과 ④는 제곱 함정을 노린 선지이다.

다시 나오면 이렇게 판단

가역 액상 반응에서 평형전환율을 묻는 문제는 먼저 각 성분의 평형 농도를 X_e로 표현하고, 다음에 K_e=생성물 농도/반응물 농도를 세운 뒤 마지막에 부호와 차수를 검산하면 된다.

NoteBase

암기 포인트

1대1 액상 가역 이성질화에서 초기 생성물이 0이면 $K_e = X_e/(1 - X_e)$, 따라서 $X_e = K_e/(1 + K_e)$이다.

NoteBase

문 15. 흐름반응기에서 진행되는 가역 반응의 단열 평형 전환율 (adiabatic equilibrium conversion)에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

① 흡열 반응일 때, 단열 평형 전환율은 반응물 유입온도가 증가함에 따라 최대 1까지 증가한다.

② 발열 반응일 때, 단열 평형 전환율은 반응물 유입온도가 증가함에 따라 증가한다.

③ 단열 평형 전환율은 반응물 유입온도 T_0에 대하여 단열 조건에서 반응이 진행될 때 도달할 수 있는 최대전환율이다.

④ 에너지수지선(energy balance line) $X(T)$와 열역학적 평형곡선(thermodynamic equilibrium curve) $X_e(T)$의 교차점으로부터 반응물 유입온도 T_0에 대한 단열 평형 전환율을 구할 수 있다.

정답 2번

출제 포인트

이 문항은 가역 반응에서 단열 평형 전환율의 의미와, 흡열 반응·발열 반응에서 유입온도 T_0가 단열 평형 전환율에 미치는 방향을 구별하는 문제이다.

핵심 개념

단열 평형 전환율은 주어진 반응물 유입온도 T_0에서 단열 조건으로 반응이 진행될 때 도달 가능한 최대 평형 전환율이다.
흡열 가역반응은 온도가 높을수록 평형이 생성물 쪽에 유리해져 T_0가 올라가면 단열 평형 전환율이 커지는 방향으로 간다.
발열 가역반응은 온도가 높을수록 평형이 반응물 쪽에 불리하게 이동하므로 T_0가 올라가면 단열 평형 전환율은 작아지는 방향으로 본다.
이 값은 에너지수지선 $X(T)$와 평형곡선 $X_e(T)$의 교점에서 읽는다.

선지별 해설

① O: 흡열 반응은 온도 상승이 평형 전환율을 높이는 방향으로 작용하므로, 유입온도 T_0가 커질수록 단열 평형 전환율이 증가하고 조건에 따라 1에 가까워질 수 있다.
② X: 틀린 부분은 "유입온도가 증가함에 따라 증가한다"이다. 발열 가역반응은 온도가 높아질수록 평형이 생성물보다 반응물 쪽에 불리해지므로 단열 평형 전환율은 증가가 아니라 감소하는 방향으로 본다. 올바르게는 "발열 반응일 때 단열 평형 전환율은 반응물 유입온도가 증가할수록 감소한다"이다.
③ O: 단열 평형 전환율은 주어진 T_0에서 단열적으로 반응시켰을 때 도달 가능한 최대 전환율을 뜻하므로 서술이 맞다.
④ O: 단열 조건의 에너지수지선과 열역학적 평형곡선의 교차점이 바로 그 T_0에서의 단열 평형 전환율이므로 맞는 설명이다.

NoteBase

오답 포인트

②는 "온도를 올리면 반응이 빨라진다"는 속도론 직관을 평형 문제에 잘못 가져오면 틀리기 쉽다. 이 문항은 반응속도가 아니라 가역반응의 평형 전환율을 묻고 있으므로, 발열인지 흡열인지에 따라 온도 상승이 평형을 어느 쪽으로 이동시키는지를 먼저 봐야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

가역반응의 단열 평형 전환율 문제는 먼저 발열 반응인지 흡열 반응인지 구분한 뒤, 온도 상승이 평형 전환율을 키우는지 줄이는지 판단한다. 그다음 단열선 $X(T)$와 평형곡선 $X_e(T)$의 교점이 의미하는 값이 무엇인지 연결하면 선지를 정리할 수 있다.

암기 포인트

단열 평형 전환율은 "단열선-평형곡선 교점"이며, 흡열은 $T_0 \uparrow \Rightarrow X_{ae} \uparrow$, 발열은 $T_0 \uparrow \Rightarrow X_{ae} \downarrow$로 정리된다.

NoteBase

문 16. $A \rightarrow B$ **액상 기초반응이 열교환기가 설치된 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 진행된다.** $500K$**의 순수한** A**가** 4molmin^{-1}**으로 유입되고, 반응기의 온도는** $500K$**, 냉각 매체의 온도는** $400K$**으로 일정하게 유지될 때 반응기 출구에서** A**의 전화율은? (단, 반응열 (**ΔH_R**)은 온도와 무관하게** -200kJmol^{-1}**, 반응기와 냉각 매체 사이의 총괄열전달계수 (**U**)와 열교환 면적은 각각** $1\text{kJm}^{-2}\text{min}^{-1}\text{K}^{-1}$**,** 2m^2**이며,** A**와** B**의 열용량은 동일하다.)**

① 0.25

② 0.4

③ 0.5

④ 0.6

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 등온 CSTR의 정상상태 열수지에서 반응발열과 열교환기로 제거되는 열을 같게 두고 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 A의 유입몰유량 4molmin^{-1}, 반응기 온도 500 K, 냉각 매체 온도 400 K, 반응열 $\Delta H_R = -200\text{kJmol}^{-1}$, $U = 1\text{kJm}^{-2}\text{min}^{-1}\text{K}^{-1}$, 열교환 면적 $A = 2\text{m}^2$이다.
구해야 할 값은 A의 전환율 X이다.
유입 온도와 반응기 온도가 모두 500 K이고 A와 B의 열용량이 같으므로 현열 변화항은 사라진다.

사용할 공식

정상상태 에너지수지는 $F_{A0}X(-\Delta H_R) = UA(T - T_c)$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유는 반응기가 500 K로 일정하게 유지되는 등온 CSTR이고, 유입물과 반응기 온도가 같아 반응열과 열교환기 제거열만 맞추면 되기 때문이다.

계산 과정

1. 열교환기로 제거되는 열량은 $Q = UA(T - T_c) = 1 \times 2 \times (500 - 400) = 200\text{kJmin}^{-1}$ 이다.
2. 반응으로 생성되는 열량은 반응한 A의 몰수에 비례하므로 반응한 A의 몰유량은 $\frac{200\text{kJmin}^{-1}}{200\text{kJmol}^{-1}} = 1\text{molmin}^{-1}$ 이다.
3. 따라서 전환율은 $X = \frac{1}{4} = 0.25$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① O

열제거율이 200kJmin^{-1}이므로 반응 가능한 A는 1molmin^{-1}이고, 이를 유입량 4molmin^{-1}로 나누면 전환율은 0.25가 된다.

② X

0.4는 A가 1.6molmin^{-1} 반응했다는 뜻인데, 이때 필요한 반응열 제거량은 $1.6 \times 200 = 320\text{kJmin}^{-1}$이다. 실제 열교환기가 제거하는 열은 200kJmin^{-1}뿐이므로 맞지 않는다. 올바르게는 전환율이 0.25이다.

③ X

0.5는 A가 2molmin^{-1} 반응했다는 뜻인데, 이 경우 필요한 열제거량은 400kJmin^{-1}이다. 문제의 $UA\Delta T$로는 그만큼의 열을 뺄 수 없으므로 틀리다. 올바르게는 전환율이 0.25이다.

④ X

0.6은 A가 2.4molmin^{-1} 반응했다는 뜻인데, 이때 필요한 열제거량은 480kJmin^{-1}이다. 실제 열교환 성능과 전혀 맞지 않으므로 틀리다. 올바르게는 전환율이 0.25이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 속도식을 찾으려 하거나 현열 항을 추가하는 데 있다. 유입 온도와 반응기 온도가 같으므로 현열 변화는 없고, 등온 유지 조건에서는 반응열과 열교환기 제거열만 비교하면 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

등온 반응기 열수지 문제는 먼저 유입 온도와 반응기 온도가 같은지 확인하고, 같으면 $F_{A0}X(-\Delta H_R) = UA\Delta T$를 바로 세운다. 그다음 열량을 반응 몰수로 바꾸고 마지막에 유입 몰유량으로 나누면 전환율이 정리된다.

암기 포인트

등온 CSTR에서는 반응발열량 = 열교환기 제거열량이고, $T_{in} = T$이면 현열 항은 사라진다.

NoteBase

문 17. <보기>의 기상 반응이 등온 등압 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 진행된다. 60mol% **A,** 20mol% **B,** 20mol% **비활성 물질로 구성된 반응물이** $10\mathrm{Lmin}^{-1}$ **부피 유량으로 반응기에 공급될 때, 반응기 출구에서 반응물 B의 전환율** 50%**를 얻기 위해 필요한 반응기의 부피의 값**[L]**은?**

<보기>

- $2A + B \overset{k_1}{\underset{k_{-1}}{\rightleftharpoons}} C + D$
- $-r_B = k_1 C_B - k_{-1} C_C$
- $k_1 = 1.8\mathrm{min}^{-1},\ k_{-1} = 0.9\mathrm{min}^{-1}$

① 2

② 4

③ 5

④ 10

정답 4번

출제 포인트

기상 등온 등압 CSTR에서 화학양론으로 출구 조성을 구한 뒤, CSTR 설계식과 주어진 속도식을 결합해 필요한 반응기 부피를 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 $2A + B \rightleftharpoons C + D$이다.
유입 조성은 A 60 mol%, B 20 mol%, 비활성 물질 20 mol%이다.
유입 체적유량은 $v_0 = 10 L min^{-1}$이다.
구해야 할 값은 반응물 B의 전환율이 50%일 때의 반응기 부피이다.
등온 등압 기상 반응이므로 총농도 C_T는 일정하고, 출구에서는 총 몰유량 변화만 반영하면 된다.

사용할 공식

$V = \frac{F_{B0} X_B}{-r_B}$
$-r_B = k_1 C_B - k_{-1} C_C$
이 공식을 쓰는 이유는 정상상태 CSTR에서는 반응기 전체가 출구 조성과 같으므로 출구 농도로 속도를 계산하고, 그 속도를 설계식에 대입해 부피를 구하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 전체 유입 몰유량을 F_{T0}로 두면 $F_{B0} = 0.2F_{T0}$이다. B 전환율이 50%이므로 반응한 B는 $0.5F_{B0} = 0.1F_{T0}$이다.
2. 화학양론에 따라 출구 몰유량은 $F_A = 0.6F_{T0} - 2(0.1F_{T0}) = 0.4F_{T0}$, $F_B = 0.2F_{T0} - 0.1F_{T0} = 0.1F_{T0}$, $F_C = 0.1F_{T0}$, $F_D = 0.1F_{T0}$, 비활성 물질은 $0.2F_{T0}$이다.
3. 따라서 출구 총 몰유량은 $0.9F_{T0}$이고, 출구 몰분율은 $y_B = y_C = \frac{0.1}{0.9} = \frac{1}{9}$이다. 등온 등압이므로 $C_B = C_C = \frac{1}{9}C_T$, 또 유입에서는 $C_{B0} = 0.2C_T$이다.
4. 속도식에 대입하면 $-r_B = 1.8 \times \frac{1}{9}C_T - 0.9 \times \frac{1}{9}C_T = 0.1C_T$이다.
5. CSTR 설계식에 대입하면 $F_{B0} = v_0 C_{B0} = 10 \times 0.2C_T$이므로 $V = \frac{F_{B0}X_B}{-r_B} = \frac{(10)(0.2C_T)(0.5)}{0.1C_T} = 10L$
따라서 필요한 반응기 부피는 10 L이다.

선지별 해설

① X
선지의 '2 L'은 틀렸고 올바른 값은 '10 L'이다. 화학양론으로 출구 조성을 구하고 $-r_B = k_1 C_B - k_{-1} C_C$를 적용하면 필요한 부피는 10 L이므로 2 L는 성립하지 않는다.

② X
선지의 '4 L'은 틀렸고 올바른 값은 '10 L'이다. 출구에서 C_B와 C_C를 모두 반영한 반응속도를 써야 하므로 4 L처럼 더 작은 값은 실제 필요 부피를 과소평가한 결과이다.

③ X
선지의 '5 L'은 틀렸고 올바른 값은 '10 L'이다. 이 값은 역반응항 $k_{-1}C_C$를 누락해 $-r_B = 1.8 \times \frac{1}{9}C_T = 0.2C_T$로 계산할 때 나오는 대표적 오답이다.

④ O
선지의 '10 L'이 옳다. 출구에서 $C_B = C_C = \frac{1}{9}C_T$, $-r_B = 0.1C_T$가 되고, $V = \frac{(10)(0.2C_T)(0.5)}{0.1C_T} = 10L$이므로 정답과 일치한다.

오답 포인트

기상 등온 등압 반응이라도 반응 전후 총 몰수 변화가 있으면 출구 몰분율이 바뀐다는 점을 놓치기 쉽다. 또한 속도식에 역반응항 $k_{-1}C_C$가 포함되어 있는데 이를 빼먹으면 5 L가 나와 오답에 빠진다.

다시 나오면 이렇게 판단

기상 CSTR 계산형은 먼저 기준 몰유량을 잡고 화학양론으로 출구 조성을 구한 다음, 출구 농도로 속도식을 계산하고 마지막에 $V = \frac{F_{B0}X_B}{-r_B}$ 같은 해당 성분 설계식을 적용하는 순서로 판단하면 된다.

NoteBase

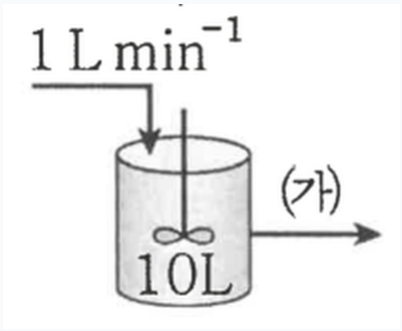
암기 포인트

등온 등압 기상 CSTR은 조성 계산이 먼저이고, 속도식의 정반응항과 역반응항을 모두 넣은 뒤 설계식에 대입해야 한다.

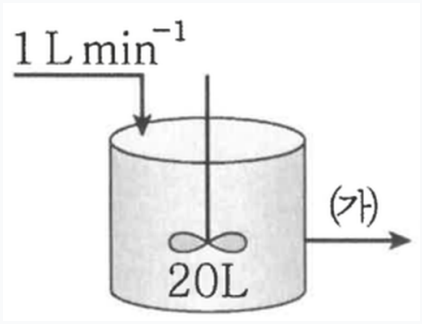
NoteBase

문 18. A→B 액상 기초반응을 $1Lmin^{-1}$의 순수한 A를 반응물로 이용하여 다양한 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 진행하였다. 반응기 출구 (가)에서 A의 전환율이 가장 큰 것은? (단, 반응속도상수는 $0.4min^{-1}$이다.)

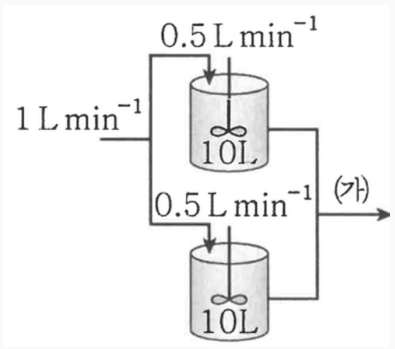
①



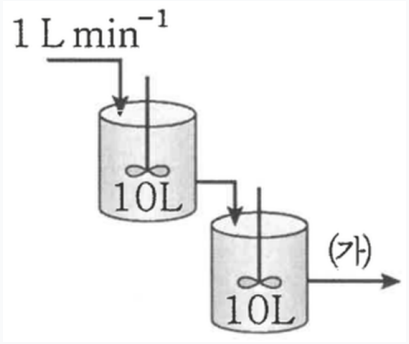
②



③



④



정답 4번

출제 포인트

이 문제는 1차 액상 반응의 CSTR 전환율 식을 이용해 단일 CSTR, 병렬 CSTR, 직렬 CSTR의 출구 전환율을 비교하는 문제이다.

NoteBase

조건 정리

주어진 값: 유입은 순수한 A이고 총 유량은 1L/min, 반응속도상수는 0.4min^{-1}이다.
구해야 할 값: 각 배치의 출구 (가)에서 A의 전환율이다.
주의할 조건: 액상 1차 반응의 CSTR이므로 각 반응기에서 $C_{A,\,out} = \frac{C_{A,\,in}}{1+k\tau}$, $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$를 쓴다. 직렬은 각 단을 순서대로 계산하고, 병렬은 분기 유량으로 각 반응기의 체류시간을 구한다.

사용할 공식

$X = \frac{k\tau}{1+k\tau}, \quad \tau = \frac{V}{u}$
직렬 CSTR은 각 단마다 $C_{A,\,out} = \frac{C_{A,\,in}}{1+k\tau}$를 반복 적용한다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제의 모든 반응기가 정상상태 액상 1차 반응의 CSTR이기 때문이다.

계산 과정

1. ①은 $V = 10L, u = 1L/min$이므로 $\tau = 10min$이고, $X_1 = \frac{0.4\times 10}{1+0.4\times 10} = \frac{4}{5} = 0.80$이다.
2. ②는 $V = 20L, u = 1L/min$이므로 $\tau = 20min$이고, $X_2 = \frac{0.4\times 20}{1+0.4\times 20} = \frac{8}{9} \approx 0.889$이다.
3. ③은 총 유량 1L/min이 두 갈래로 0.5L/min씩 나뉘어 각 10 L CSTR로 들어가므로 각 반응기의 $\tau = \frac{10}{0.5} = 20min$이다. 따라서 각 출구 전환율은 $\frac{8}{9} \approx 0.889$이고, 두 유출을 합친 최종 전환율도 같다.
4. ④는 10 L CSTR 두 기가 직렬이므로 각 단의 $\tau = 10min$이다. 1단 출구는 $C_{A1} = \frac{C_{A0}}{1+0.4\times 10} = \frac{C_{A0}}{5}$, 2단 출구는 $C_{A2} = \frac{C_{A1}}{5} = \frac{C_{A0}}{25}$이다. 따라서 $X_4 = 1 - \frac{C_{A2}}{C_{A0}} = 1 - \frac{1}{25} = 0.96$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
- 단일 10 L CSTR에 1L/min이 들어가므로 체류시간은 10 min이다. 계산하면 전환율은 0.80이다.
- 틀린 판단은 이 배치의 전환율이 가장 크다고 보는 점이다. 올바르게는 ①의 출구 전환율은 0.80으로 ④의 0.96보다 작다.

② X
- 단일 20 L CSTR에 1L/min이 들어가므로 체류시간은 20 min이다. 계산하면 전환율은 $\frac{8}{9} \approx 0.889$이다.
- 틀린 판단은 총부피 20 L의 단일 CSTR이 직렬 10 L + 10 L보다 더 큰 전환율을 준다고 보는 점이다. 올바르게는 1차 반응에서 같은 총부피라면 CSTR 직렬 연결이 단일 CSTR보다 전환율이 크다.

③ X
- 유량이 0.5L/min씩 병렬 분기되어 각각 10 L CSTR을 지나므로 각 반응기의 체류시간은 20 min이다. 따라서 각 출구 전환율은 $\frac{8}{9} \approx 0.889$이다.
- 두 유출을 합친 뒤에도 두 흐름의 전환율이 같으므로 최종 전환율도 $\frac{8}{9} \approx 0.889$이다.
- 틀린 판단은 병렬 분할이 직렬 연결보다 전환율을 더 키운다고 보는 점이다. 올바르게는 ③의 최종 전환율은 ②와 같고 ④보다 작다.

④ O
- 10 L CSTR 두 기가 직렬이고 유량은 계속 1L/min이므로 각 단의 체류시간은 10 min이다.
- 1단에서 C_A가 $\frac{1}{5}$로 줄고, 2단에서 다시 $\frac{1}{5}$가 되어 최종적으로 $C_{A2} = \frac{C_{A0}}{25}$이다. 따라서 전체 전환율은 0.96이다.
- 네 선택지 중 전환율이 가장 크므로 옳다.

오답 포인트

총부피가 같으면 배치 방식이 달라도 전환율이 같다고 착각하기 쉽다. 그러나 1차 반응의 CSTR은 같은 총부피라도 직렬 배치가 단일 배치보다 유리하고, 병렬 배치는 유량만 나누는 것이어서 직렬처럼 농도를 단계적으로 더 낮추지 못한다.

다시 나오면 이렇게 판단

CSTR 배치 비교 문제는 먼저 각 반응기의 체류시간 $\tau = V/u$를 구한 뒤, 단일은 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$, 직렬은 C_A를 단마다 연속 갱신하는 방식으로 계산하면 된다. 병렬은 분기 유량으로 각 가지의 체류시간을 다시 계산한 뒤 최종 혼합 전환율을 판단한다.

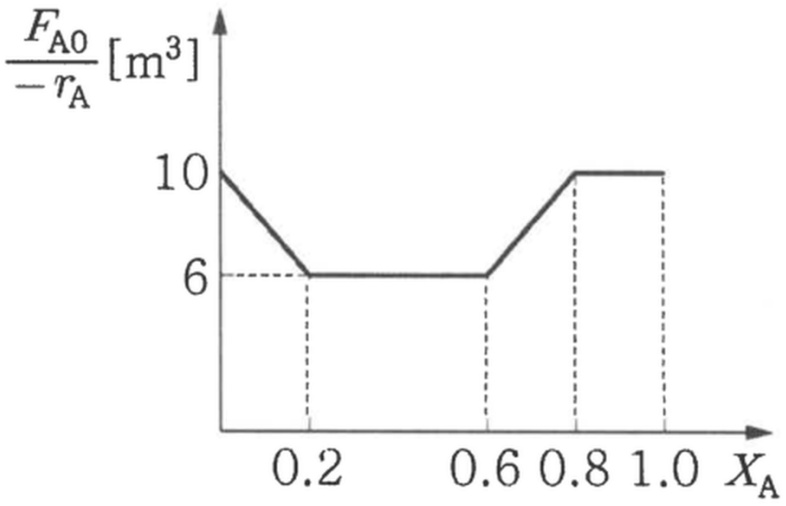
암기 포인트

1차 반응에서 같은 총부피의 CSTR은 병렬보다 직렬이 유리하고, 직렬 단수가 늘수록 PFR 거동에 가까워져 전환율이 커진다.

NoteBase

문 19. $A \rightarrow B$ 등온 액상반응을 흐름반응기에서 진행하여 <보기>와 같은 레벤스필 플롯(Levenspiel plot)을 얻었다. 동일한 A의 전환율 X_A을 얻기 위하여 필요한 연속교반탱크반응기(CSTR)와 플러그흐름반응기(PFR)의 반응기 부피가 같아지는 전환율이 존재하는 구간은? (단, F_{A0}는 반응기로 유입되는 A의 몰유량, $-r_A$는 A에 대한 반응속도이다.)

〈보기〉



① $0 < X_A < 0.2$

② $0.2 < X_A < 0.6$

③ $0.6 < X_A < 0.8$

④ $0.8 < X_A < 1.0$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 레벤스필 플롯에서 PFR의 누적면적과 CSTR의 직사각형 면적을 비교하여 두 반응기 부피가 같아지는 전환율 구간을 찾는 문제이다.

NoteBase

조건 정리

주어진 값:
- 세로축은 $\frac{F_{A0}}{-r_A}$ 이다.
- $0 < X_A < 0.2$에서는 값이 10에서 6으로 직선 감소한다.
- $0.2 < X_A < 0.6$에서는 6으로 일정하다.
- $0.6 < X_A < 0.8$에서는 6에서 10으로 직선 증가한다.
- $0.8 < X_A < 1.0$에서는 10으로 일정하다.

구해야 할 값:
- 같은 X_A를 얻을 때 CSTR과 PFR의 부피가 같아지는 구간이다.

주의할 조건:
- PFR 부피는 원점부터 해당 X_A까지의 곡선 아래 면적이고, CSTR 부피는 해당 X_A에서의 높이로 만든 직사각형 면적이다.

사용할 공식

$V_{PFR} = \int_0^{X_A} \frac{F_{A0}}{-r_A} dX_A$, $V_{CSTR} = \left(\frac{F_{A0}}{-r_A}\right)_{X_A} X_A$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유:
레벤스필 플롯에서는 PFR이 누적면적, CSTR이 직사각형 면적으로 표현되므로 두 부피의 같음을 면적 방정식으로 바로 비교할 수 있다.

계산 과정

1. $0 < X_A < 0.2$에서는 $y = 10 - 20X_A$ 이다. 따라서 $V_{PFR} = \int_0^{X_A} (10 - 20X_A) dX_A = 10X_A - 10X_A^2$, $V_{CSTR} = X_A(10 - 20X_A) = 10X_A - 20X_A^2$ 이므로 같아지는 해는 $X_A = 0$뿐이다.
2. $0.2 < X_A < 0.6$에서는 0에서 0.2까지의 면적이 $\frac{10+6}{2} \times 0.2 = 1.6$ 이고, $V_{PFR} = 1.6 + 6(X_A - 0.2) = 6X_A + 0.4$, $V_{CSTR} = 6X_A$ 이므로 해가 없다.
3. $0.6 < X_A < 0.8$에서는 0에서 0.6까지의 누적면적이 $1.6 + 6 \times 0.4 = 4.0$ 이고, 이 구간의 직선은 $y = 20X_A - 6$ 이다. 따라서 $V_{PFR} = 4.0 + \int_{0.6}^{X_A} (20X_A - 6) dX_A = 4.0 + 10X_A^2 - 6X_A$, $V_{CSTR} = X_A(20X_A - 6) = 20X_A^2 - 6X_A$ 이다. 두 식을 같게 두면 $4.0 = 10X_A^2$, 즉 $X_A^2 = 0.4$, $X_A \approx 0.632$ 이므로 이 해는 $0.6 < X_A < 0.8$에 들어간다.
4. $0.8 < X_A < 1.0$에서는 0에서 0.8까지의 면적이 5.6 이고, $V_{PFR} = 5.6 + 10(X_A - 0.8) = 10X_A - 2.4$, $V_{CSTR} = 10X_A$ 이므로 해가 없다.

계산 결과 부피가 같아지는 구간은 $0.6 < X_A < 0.8$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
- $0 < X_A < 0.2$에서는 등식이 $10X_A - 10X_A^2 = 10X_A - 20X_A^2$가 되어 $X_A = 0$만 가능하므로 개구간 안에는 해가 없다.
- 틀린 표현은 "$0 < X_A < 0.2$에서 존재한다"이며, 올바르게는 "이 구간에는 존재하지 않는다"이다.

② X
- $0.2 < X_A < 0.6$에서는 $V_{PFR} = 6X_A + 0.4$, $V_{CSTR} = 6X_A$ 이므로 PFR이 항상 0.4만큼 더 크다. 따라서 같은 부피가 되는 점이 없다.
- 틀린 표현은 "$0.2 < X_A < 0.6$에서 존재한다"이며, 올바르게는 "이 구간에는 존재하지 않는다"이다.

③ O
- $0.6 < X_A < 0.8$에서는 $V_{PFR} = 4.0 + 10X_A^2 - 6X_A$, $V_{CSTR} = 20X_A^2 - 6X_A$ 이고, 두 부피를 같게 두면 $X_A = \sqrt{0.4} \approx 0.632$가 나온다.
- 0.632는 0.6과 0.8 사이이므로 이 선택지가 옳다.

④ X
- $0.8 < X_A < 1.0$에서는 $V_{PFR} = 10X_A - 2.4$, $V_{CSTR} = 10X_A$ 이므로 두 값이 같아질 수 없다.
- 틀린 표현은 "$0.8 < X_A < 1.0$에서 존재한다"이며, 올바르게는 "이 구간에는 존재하지 않는다"이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 PFR 면적을 해당 구간의 부분면적만으로 계산하고, 원점부터의 누적면적을 빠뜨리는 경우이다. 또 CSTR을 곡선 아래 면적으로 착각하면 ②나 ④처럼 평평한 구간에서 오답을 고르기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

레벤스필 플롯에서 PFR은 원점부터 목표 전환율까지의 누적면적이고, CSTR은 목표 전환율에서의 높이로 만든 직사각형이다. 두 부피 비교 문제는 구간별 식을 나누어 누적면적과 직사각형 면적을 같게 두고 해가 실제 그 구간 안에 들어가는지 확인하면 된다.

암기 포인트

레벤스필 플롯에서 PFR은 곡선 아래 면적, CSTR은 출구점 높이의 직사각형이다.

NoteBase

문 20. 어떤 반응으로부터 화합물 A의 전화율과 반응속도를 측정하여 <보기>와 같은 결과를 얻었다. 직렬로 2개의 연속교반탱크반응기(CSTR)를 연결하여 첫 번째 반응기 출구에서 전화율 60%를 달성하고, 총괄전화율 80%를 달성하는 데 필요한 각각의 반응기 부피의 값[m^3]은?

〈보기〉

X	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
$(F_{A0}/-r_A)[m^3]$	1.0	5.0	17.0	37.0	65.0

① 첫 번째 반응기의 부피: 13.0, 두 번째 반응기의 부피: 22.2

② 첫 번째 반응기의 부피: 22.2, 두 번째 반응기의 부피: 13.0

③ 첫 번째 반응기의 부피: 22.2, 두 번째 반응기의 부피: 35.1

④ 첫 번째 반응기의 부피: 35.1, 두 번째 반응기의 부피: 22.2

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 직렬 CSTR의 설계식으로 각 반응기 부피를 따로 계산할 수 있는지를 묻는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 첫 번째 반응기 출구 전환율은 0.6, 총괄전환율은 0.8이다.
표 값: $X = 0.6$에서 $(F_{A0}/-r_A) = 37.0m^3$, $X = 0.8$에서 $(F_{A0}/-r_A) = 65.0m^3$이다.
구해야 할 값: 첫 번째와 두 번째 CSTR의 부피이다.

사용할 공식

CSTR의 설계식은 V=≤ft((F_A0)/(-r_A))_출구(X_out-X_in) 이다.
이 공식을 쓰는 이유: CSTR는 반응기 내부 상태가 출구 조건과 같으므로 각 반응기에서 $(F_{A0}/-r_A)$는 그 반응기의 출구 전환율 값으로 읽는다.

계산 과정

1. 첫 번째 반응기는 $X = 0$에서 $X = 0.6$까지 담당하므로 $V_1 = 37.0 \times (0.6 - 0) = 22.2m^3$이다.
2. 두 번째 반응기는 $X = 0.6$에서 $X = 0.8$까지 추가 전환만 담당하므로 $V_2 = 65.0 \times (0.8 - 0.6) = 13.0m^3$이다.
3. 따라서 첫 번째 반응기 부피는 22.2, 두 번째 반응기 부피는 13.0이다.

NoteBase

선지 판단

① X. 13.0은 두 번째 반응기 부피이고 22.2는 첫 번째 반응기 부피이다. 올바르게는 첫 번째 22.2, 두 번째 13.0이다.
② O. $V_1 = 22.2m^3$, $V_2 = 13.0m^3$로 계산되므로 맞다.
③ X. 첫 번째 반응기 22.2는 맞지만 두 번째 반응기 35.1은 틀리다. 두 번째 반응기는 $X = 0.6$에서 $X = 0.8$까지의 추가 전환만 담당하므로 13.0이 되어야 한다. 올바르게는 두 번째 13.0이다.
④ X. 첫 번째 반응기 35.1은 틀리다. 첫 번째 반응기는 출구 전환율 0.6에서 읽은 37.0에 $\Delta X = 0.6$을 곱해 22.2가 되어야 한다. 올바르게는 첫 번째 22.2, 두 번째 13.0이다.

오답 포인트

직렬 CSTR에서는 각 반응기를 따로 본다. 두 번째 반응기 계산에서 출구값 $(F_{A0}/-r_A)$는 $X = 0.8$에서 읽되, 곱하는 전환율은 전체 0.8이 아니라 그 반응기에서 늘어난 $\Delta X = 0.2$만 써야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 CSTR 문제는 반응기마다 출구 전환율에서 $(F_{A0}/-r_A)$를 읽고, 그 반응기가 담당하는 전환율 증가분 ΔX를 곱해 부피를 계산한다고 판단한다.

암기 포인트

CSTR 한 칸의 부피는 출구에서 읽은 값 × 그 칸의 ΔX이다.

NoteBase