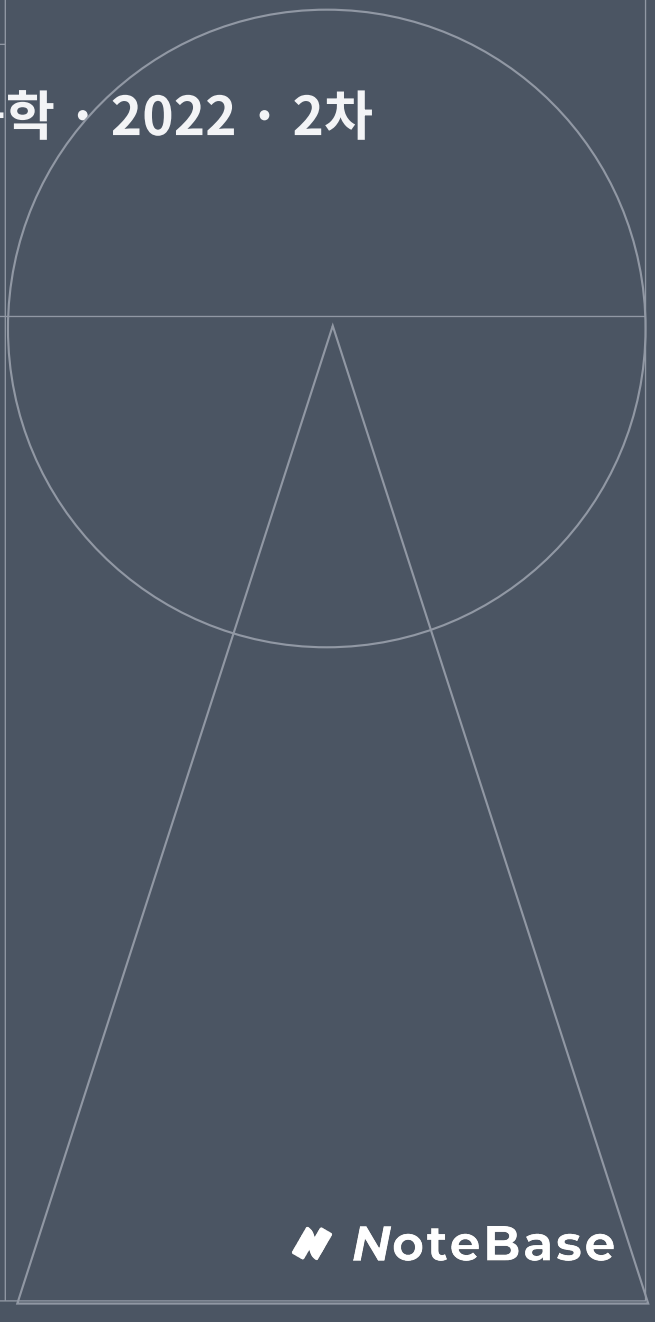
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2022 · 2차



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2022 · 2차

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2022 · 2차

문 1. $A \rightarrow 2B$ **기초반응에서 반응속도식이** $-r_A = kC_A^n$ $[\mathrm{mol L^{-1} s^{-1}}]$**일 때, 이에 대한 설명으로 옳은 것은? (단,** n**은 반응차수,** k**는 반응속도상수,** t**는 반응시간,** C_A**는** A**의 농도,** C_{A0}**는** A**의 초기농도이다)**

① $n = 1$이다.

② $C_A = C_{A0} - kt$이다.

③ k의 단위는 $\mathrm{L^2 mol^{-2} s^{-1}}$이다.

④ A의 소멸속도는 B의 생성속도의 2배이다.

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 기초반응에서 반응차수와 적분형 속도식, 속도상수의 단위, 화학양론적 속도관계를 함께 연결할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

반응은 $A \rightarrow 2B$이다.
문제에서 기초반응이라고 했으므로 속도식의 지수는 반응물의 화학양론계수와 일치한다.
따라서 $-r_A = kC_A$인 1차 반응으로 본다.

사용할 공식

기초반응 $A \rightarrow 2B$에서는 $-r_A = kC_A^1$이므로 $n = 1$이다.
1차 반응의 적분형은 $C_A = C_{A0}e^{-kt}$이다.
속도 단위가 $molL^{-1}s^{-1}$이고 C_A 단위가 $molL^{-1}$이므로 1차 반응의 k 단위는 s^{-1}이다.
화학양론적으로는 $r_B = 2(-r_A)$, 즉 $-r_A = \frac{1}{2}r_B$이다.

계산 과정

1. 기초반응 $A \rightarrow 2B$에서 반응물 A의 계수는 1이므로 속도식 지수는 $n = 1$이다.
2. 따라서 속도식은 $-r_A = kC_A$인 1차 반응식이다.
3. 1차 반응의 적분형, k의 단위, 생성속도와 소멸속도의 비를 순서대로 대조하면 정답이 1번으로 확정된다.

NoteBase

선지 판단

1번 O: 기초반응에서는 반응차수가 반응물의 화학양론계수와 같으므로 $A \rightarrow 2B$에서 $n = 1$이 맞다.
2번 X: $C_A = C_{A0} - kt$는 0차 반응의 적분형이다. 이 문항은 1차 반응이므로 틀린 표현은 "C_A = C_A0 - kt"이고, 올바르게는 $C_A = C_{A0}e^{-kt}$이다.
3번 X: $L^2mol^{-2}s^{-1}$는 3차 반응일 때의 k 단위이다. 이 문항은 1차 반응이므로 틀린 표현은 "k의 단위는 L^2mol^-2s^-1이다"이고, 올바르게는 k의 단위가 s^{-1}이다.
4번 X: $A \rightarrow 2B$에서는 B가 A 1몰 소멸마다 2몰 생성되므로 B의 생성속도가 A의 소멸속도의 2배이다. 틀린 표현은 "A의 소멸속도는 B의 생성속도의 2배이다"이고, 올바르게는 "A의 소멸속도는 B의 생성속도의 1/2이고, B의 생성속도는 A의 소멸속도의 2배이다"이다.

오답 포인트

기초반응이라는 조건을 놓치면 1번을 확정하지 못하고, 2번의 0차 적분형이나 3번의 3차 반응 단위를 섞어서 헷갈리기 쉽다. 또 화학양론계수 2를 보고 4번처럼 소멸속도와 생성속도의 크기를 거꾸로 판단하기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

기초반응 문제는 먼저 화학양론계수로 반응차수를 정하고, 그다음 적분형 속도식과 k 단위를 맞춘 뒤, 마지막에 화학양론으로 생성속도와 소멸속도의 비를 확인하면 된다.

암기 포인트

기초반응은 계수=차수, 1차 반응은 $C_A = C_{A0}e^{-kt}$, k 단위는 s^{-1}, $A \rightarrow 2B$이면 $r_B = 2(-r_A)$이다.

NoteBase

문 2. 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 $A \rightarrow B$ 액상 1차 반응을 진행한다. A를 99 % 전환하기 위해 필요한 공간시간$[s]$은? (단, 반응속도상수 $k = 0.02 s^{-1}$이고, $\ln 10 = 2.3$이다)

① 57.5

② 115

③ 230

④ 460

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 등온 액상 1차 반응이 일어나는 PFR에서 전환율과 공간시간의 관계식으로 필요한 τ를 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 전환율 $X = 0.99$, 반응속도상수 $k = 0.02 s^{-1}$, $\ln 10 = 2.3$이다.
구해야 할 값: A를 99% 전환하는 데 필요한 공간시간 τ이다.
주의할 조건: PFR의 액상 1차 반응식은 CSTR 식과 다르며, 99% 전환은 $1 - X = 0.01$이다.

사용할 공식

사용 공식은 $\tau = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-X}$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 액상 1차 반응이 등밀도로 PFR에서 진행되면 설계식 적분 결과가 $\tau = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-X}$로 정리되기 때문이다.

계산 과정

먼저 $1 - X = 1 - 0.99 = 0.01$이다.
따라서 $\ln \frac{1}{1-X} = \ln 100 = 2 \ln 10 = 2 \times 2.3 = 4.6$이다.
그러므로 $\tau = \frac{4.6}{0.02} = 230 s$이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: $57.5s$는 정답 $230s$의 4분의 1이다. 이는 99% 전환을 90% 전환처럼 보거나 $\ln 100$ 대신 더 작은 로그값을 넣은 오답이다. 올바르게는 $\tau = 230s$이다.
2번 X: $115s$는 $\ln 100 = 2\ln 10$에서 앞의 2를 빠뜨려 $\tau = \frac{2.3}{0.02}$로 계산할 때 나오는 값이다. 틀린 표현은 99% 전환에 $\ln 10$만 쓴 점이고, 올바르게는 $\ln 100 = 4.6$을 써서 $230s$가 된다.
3번 O: $\tau = \frac{1}{0.02}\ln\frac{1}{0.01} = \frac{4.6}{0.02} = 230s$이므로 맞는 선지이다.
4번 X: $460s$는 주어진 $k = 0.02s^{-1}$를 잘못 읽어 $0.01s^{-1}$처럼 계산할 때 나오는 값이다. 틀린 표현은 반응속도상수를 잘못 적용한 점이고, 올바르게는 주어진 $k = 0.02s^{-1}$를 써서 $230s$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 PFR 1차 반응식과 로그값 처리이다. 특히 99% 전환에서 $\ln 100 = 2\ln 10$이라는 점을 놓치면 115초를 고르기 쉽고, PFR 식 대신 다른 반응기 식을 떠올리면 전체 계산이 어긋난다.

다시 나오면 이렇게 판단

계산형 반응기 문제는 반응기 종류를 먼저 확인하고, 전환율을 $1 - X$로 바꾼 뒤, 해당 설계식에 대입해 로그값과 단위를 순서대로 검산하면 된다.

암기 포인트

액상 1차 PFR은 $\tau = \frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-X}$이며, 99% 전환은 $1 - X = 0.01$, $\ln 100 = 4.6$이다.

NoteBase

문 3. 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 이용하여 $A \rightarrow B$ 액상 0차 반응을 1시간 동안 진행하면 A의 전환율은 40%이다. 반응을 2시간 진행할 경우, A의 전환율[%]은? (단, 다른 조건은 변함없다)

① 40

② 60

③ 80

④ 100

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 회분식반응기에서 액상 0차 반응의 전환율이 시간에 비례해 증가한다는 관계를 이용해 2시간 후 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 1시간 후 전환율 40%
구해야 할 값: 2시간 후 전환율
주의할 조건: 등온, 회분식, 액상 0차 반응이며 다른 조건은 변하지 않는다.

사용할 공식

액상 0차 회분반응에서는 농도가 시간에 따라 일정한 속도로 감소하므로 $C_A = C_{A0} - kt$ 이고, 전환율은 $X_A = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} = \frac{kt}{C_{A0}}$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유: 0차 반응은 반응속도가 농도와 무관하여 같은 조건이면 전환율이 시간에 선형적으로 비례하기 때문이다.

계산 과정

1시간 후 $X_A = 0.40$ 이므로 $\frac{k}{C_{A0}} \times 1 = 0.40$ 이다.
따라서 $\frac{k}{C_{A0}} = 0.40 h^{-1}$ 이다.
2시간 후에는 $X_A = \frac{k}{C_{A0}} \times 2 = 0.40 \times 2 = 0.80$ 이다.
따라서 전환율은 80%이다.

NoteBase

선지별 해설

1번 X: 40%는 1시간 후 전환율을 그대로 옮긴 값일 뿐 2시간 후 값이 아니다. 0차 회분반응에서는 전환율이 시간에 비례하므로 2시간 후에는 80%가 된다. 틀린 표현은 "2시간 후에도 40%"이고, 올바르게는 "2시간 후 전환율은 80%"이다.
2번 X: 60%는 1시간에 40% 전환된다는 조건에서 나오지 않는 값이다. 시간 비례 관계를 적용하면 2시간 후 전환율은 80%가 되어야 한다. 틀린 표현은 "2시간 후 60%"이고, 올바르게는 "2시간 후 전환율은 80%"이다.
3번 O: 0차 회분반응에서는 $X_A \propto t$ 이므로 1시간에 40%이면 2시간에는 80%가 된다. 계산 결과와 일치하므로 옳다.
4번 X: 100% 전환은 반응이 완전히 끝났을 때의 값인데, 이 문제에서는 1시간에 40%이므로 100%에 도달하려면 $\frac{1.00}{0.40} = 2.5$시간이 필요하다. 틀린 표현은 "2시간 후 100%"이고, 올바르게는 "2시간 후 전환율은 80%"이다.

오답 포인트

0차 반응과 1차 반응을 혼동하면 전환율이 시간에 선형 비례한다는 점을 놓치기 쉽다. 특히 4번처럼 시간을 두 배로 늘리면 곧바로 완전전환이라고 생각하는 것이 대표적인 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분식 반응기에서 반응차수를 먼저 확인한 뒤, 0차 반응이면 $X_A = \frac{kt}{C_{A0}}$ 로 시간 비례 여부를 바로 본다. 이미 한 시점의 전환율이 주어졌다면 같은 조건에서 시간을 비례식으로 연결해 답을 판단할 수 있다.

암기 포인트

액상 0차 회분반응의 전환율은 시간에 정비례하므로 시간이 2배이면 전환율도 2배이다.

NoteBase

문 4. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 순수한 A를 반응물로 이용하여 다음의 액상 반응을 동시에 진행한다. 반응물의 부피 유량이 $5Lmin^{-1}$이고, 반응기 부피가 $100L$일 때, A의 전환율은?

$A \rightarrow B, r_B = k_1 C_A\ [molL^{-1}min^{-1}], k_1 = 0.1min^{-1}$
$A \rightarrow C, r_C = k_2 C_A\ [molL^{-1}min^{-1}], k_2 = 0.4min^{-1}$

① $\frac{1}{101}$
② $\frac{1}{11}$
③ $\frac{10}{11}$
④ $\frac{100}{101}$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 병렬 1차 반응이 동시에 일어나는 CSTR에서 정상상태 물질수지로 A의 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 반응은 $A \rightarrow B, A \rightarrow C$이고 $k_1 = 0.1min^{-1}, k_2 = 0.4min^{-1}$이다.
주어진 값: 부피유량은 $q = 5Lmin^{-1}$, 반응기 부피는 $V = 100L$이다.
구해야 할 값: A의 전환율 X이다.
주의할 조건: 두 반응이 모두 A를 소모하므로 A의 전체 소모 속도상수는 $k_1 + k_2$이다.

사용할 공식

병렬 1차 반응에서 A의 소모속도는 $-r_A = (k_1 + k_2)C_A$이다.
정상상태 CSTR 물질수지는 $qC_{A0} - qC_A + Vr_A = 0$이므로
$q(C_{A0} - C_A) = V(k_1 + k_2)C_A$
이다.
따라서
$\frac{C_A}{C_{A0}} = \frac{1}{1 + (k_1 + k_2)V/q}, \qquad X = 1 - \frac{C_A}{C_{A0}} = \frac{(k_1 + k_2)V/q}{1 + (k_1 + k_2)V/q}$
이다.
이 공식을 쓰는 이유: 등온 CSTR의 출구 농도는 반응기 내부 농도와 같고, 문제의 두 반응이 모두 1차이므로 전체 반응속도를 합산한 정상상태 물질수지로 바로 전환율을 구할 수 있다.

NoteBase

계산 과정

1. 전체 속도상수는 $k = k_1 + k_2 = 0.1 + 0.4 = 0.5 min^{-1}$이다.
2. 체류시간은 $\tau = V/q = 100/5 = 20 min$이므로 $k\tau = 0.5 \times 20 = 10$이다.
3. 따라서 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau} = \frac{10}{11}$이다. 같은 결과로 $C_A/C_{A0} = 1/11$이고, 전환율은 $1 - 1/11 = 10/11$이다.

선지별 해설

① X: 1/101은 실제 계산 결과와 맞지 않는다. 이 문제의 $k\tau$는 10이므로 전환율은 1% 수준이 아니라 10/11이어야 한다. 올바르게는 전환율이 10/11이다.
② X: 1/11은 전환율이 아니라 미반응 A의 농도비 C_A/C_{A0}이다. 전환율은 $X = 1 - C_A/C_{A0}$이므로 올바르게는 $1 - 1/11 = 10/11$이다.
③ O: 정상상태 CSTR 물질수지에서 $k_1 + k_2 = 0.5 min^{-1}$, $V/q = 20 min$을 대입하면 $X = 10/11$이 된다. 따라서 ③이 옳다.
④ X: 100/101이 되려면 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$에서 $k\tau = 100$ 수준이어야 한다. 실제로는 $k\tau = 10$이므로 이렇게 거의 완전전환에 가까운 값은 나오지 않는다. 올바르게는 10/11이다.

오답 포인트

②처럼 미반응 분율 C_A/C_{A0}와 전환율 X를 뒤바꾸는 실수가 가장 흔하다. 또 병렬 반응이라고 해서 한 반응만 쓰면 안 되고, A를 소모하는 속도상수 k_1과 k_2를 합해 전체 k로 계산해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬 반응 CSTR 문제는 먼저 A 기준 전체 속도식 $-r_A$를 만든 뒤 $k_{tot} = \sum k_i$를 구한다. 그다음 $\tau = V/q$를 계산하고, 1차 CSTR이면 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$ 또는 $C_A/C_{A0} = \frac{1}{1+k\tau}$를 적용해 전환율과 미반응 분율을 구분해 판단한다.

암기 포인트

병렬 1차 반응의 CSTR 전환율은 전체 속도상수 $k_1 + k_2$를 써서 $X = \frac{(k_1+k_2)\tau}{1+(k_1+k_2)\tau}$로 계산한다.

NoteBase

문 5. 등온 회분식반응기에서 $A \rightarrow B$ 액상 2차 반응을 진행한다. 이에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, k는 반응속도상수, C_A는 A의 농도, C_{A0}는 A의 초기농도, X_A는 A의 전환율이다)

① 반응의 반감기 $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$이다.

② A의 소멸속도 $-r_A = kC_A^2$이다.

③ 반응시간 $t = \frac{X_A}{kC_{A0}(1 - X_A)}$이다.

④ $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$이다.

정답 1번

출제 포인트

등온 회분식반응기에서 액상 2차 반응의 속도식, 적분식, 반감기 식을 구분하는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건: 등온 회분식반응기, 액상, $A \rightarrow B$, 2차 반응이다.
주의할 조건: 액상 회분식은 부피가 일정하므로 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$를 적용할 수 있다.
핵심 구분: 2차 반응의 반감기는 초기농도 C_{A0}에 의존한다.

사용할 공식

속도식은 $-r_A = kC_A^2$이다.
적분식은 $\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^2$에서 출발하여 $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt$가 된다.
전환율 관계식은 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$이다.
이를 대입하면 반응시간은 $t = \frac{X_A}{kC_{A0}(1 - X_A)}$가 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제 조건이 등온 액상 회분식 2차 반응이기 때문이다.

계산 과정

1. 2차 반응이므로 속도식은 $-r_A = kC_A^2$이다.
2. 회분식 적분식 $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt$에 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$를 대입하면 $t = \frac{X_A}{kC_{A0}(1 - X_A)}$가 된다.
3. 반감기에서는 $C_A = C_{A0}/2$ 또는 $X_A = 0.5$이므로 $t_{1/2} = \frac{1}{kC_{A0}}$가 된다. 따라서 $\ln 2/k$는 1차 반응 식이고 이 문항에는 맞지 않는다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 2차 반응의 반감기는 $t_{1/2} = 1/(kC_{A0})$이다. 제시식 $t_{1/2} = \ln 2/k$는 1차 반응의 반감기 식이다. 틀린 표현은 $t_{1/2} = \ln 2/k$이고, 올바르게는 $t_{1/2} = 1/(kC_{A0})$이다.
② O: 액상 2차 반응의 소멸속도식은 정의대로 $-r_A = kC_A^2$이다. 반응차수가 2이므로 농도에 대한 제곱항이 붙는다.
③ O: 회분식 2차 반응 적분식에 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$를 대입하면 $t = \frac{X_A}{kC_{A0}(1 - X_A)}$가 된다. 제시식은 적분 결과와 일치한다.
④ O: 액상에서 밀도와 부피가 일정하면 전환율 정의에 따라 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$가 된다. 회분식 액상 반응의 기본 농도-전환율 관계식이다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 1차 반응 반감기 식 $\ln 2/k$를 2차 반응에 그대로 대입하는 것이다. 이 문항은 ②, ③, ④가 모두 맞아서 ①의 반감기 식만 정확히 구분하면 바로 풀린다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응차수를 먼저 확인한 뒤 속도식과 반감기 식을 연결해 판단한다. 2차 반응이면 반감기가 초기농도에 의존하는지부터 확인하면 1차 반응 식과 바로 구별된다.

암기 포인트

1차 반감기는 $\ln 2/k$, 2차 반감기는 $1/(kC_{A0})$이다. 액상 회분식에서는 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$를 함께 묶어 기억한다.

NoteBase

문 6. 다공성 구형 촉매를 이용한 불균일계 촉매반응에서 내부유효인자와 Thiele 계수에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 내부유효인자는 내부확산 저항이 없는 경우를 가정한 반응속도에 대한 실제 총괄반응속도의 비이다.

② Thiele 계수의 제곱은 촉매입자 내의 확산속도에 대한 표면반응속도의 비의 척도이다.

③ 촉매입자의 지름이 작아지면 Thiele 계수가 감소하고, 내부유효인자는 1에 가까워진다.

④ 모든 화학반응에서 내부유효인자의 최댓값은 1이다.

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 내부유효인자의 정의와 Thiele 계수가 커질수록 내부확산 저항의 영향이 커진다는 관계를 구분하는 문제이다.

핵심 개념

내부유효인자는 촉매입자 내부 확산저항 때문에 실제 총괄반응속도가 이상적인 무확산저항 반응속도에 비해 얼마나 달라지는지를 나타내는 비이다.
Thiele 계수는 촉매입자 내부에서 반응이 확산보다 상대적으로 얼마나 빠른지를 나타내는 무차원수이며, 값이 클수록 내부 농도구배가 커지고 내부확산의 영향이 커진다.

선지별 해설

① O: 내부유효인자 η는 실제 총괄반응속도를 내부확산 저항이 전혀 없다고 가정한 반응속도로 나눈 값이므로 정의에 맞는 설명이다.
② O: Thiele 계수의 제곱은 촉매입자 내부의 표면반응속도와 확산속도의 비를 나타내는 척도이므로, 값이 클수록 반응이 확산보다 상대적으로 빠르다는 뜻이다.
③ O: 구형 촉매에서 입자 지름이 작아지면 특성길이가 줄어 Thiele 계수가 감소한다. 그러면 내부 농도구배가 완화되어 내부유효인자는 1에 가까워진다.
④ X: 틀린 부분은 "모든 화학반응에서"와 "최댓값은 1"이라는 단정이다. 등온의 일반적인 양의 반응차수 반응에서는 내부유효인자가 1 이하이지만, 비등온 발열반응처럼 입자 내부 온도가 더 높아지는 경우에는 1을 초과할 수도 있다. 올바르게는 "등온의 일반적인 반응에서는 내부유효인자가 1 이하이지만, 반응계 조건에 따라 1을 넘을 수도 있다."이다.

오답 포인트

4번은 교과서의 기본 성질인 $\eta \leq 1$을 아무 조건 없이 모든 화학반응에 확대 적용한 것이 함정이다. 이 명제는 보통 등온, 정상상태, 일반적인 양의 반응차수 조건에서 성립하며, 조건이 바뀌면 예외가 생긴다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

내부유효인자는 실제속도와 무확산저항속도의 비로, Thiele 계수는 반응과 확산의 경쟁 정도로 판단한다. 선지에 입자크기 감소나 확산 촉진이 나오면 먼저 Thiele 계수 감소를 떠올리고, 그 결과 내부유효인자가 1에 가까워지는 흐름으로 연결하면 된다. 또한 η의 상한을 묻는 선지는 등온 가정이 붙어 있는지부터 확인한다.

암기 포인트

Thiele 계수가 작을수록 확산저항이 약해지고 내부유효인자는 1에 가까워진다. $\eta \le 1$은 등온 기본형의 성질이지 모든 반응에 대한 절대명제는 아니다.

NoteBase

문 7. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 A→B 액상 2차 반응을 진행한다. CSTR 부피가 1L일 때, A의 전환율은 50%이다. A를 90% 전환하기 위해 필요한 CSTR 부피[L]는? (단, 반응기 부피 이외의 다른 조건은 변화시키지 않는다)

① 9

② 18

③ 36

④ 45

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 액상 2차 반응이 일어나는 CSTR의 설계식에서 반응기 부피가 $\frac{X}{(1-X)^2}$에 비례한다는 점을 이용해 필요한 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: CSTR 부피가 1 L일 때 전환율 $X = 0.5$이다.
구해야 할 값: 같은 조건에서 전환율 $X = 0.9$를 만들기 위한 CSTR 부피이다.
주의할 조건: 액상 2차 반응이므로 $-r_A = kC_A^2$이고, 액상에서 밀도가 일정하면 $C_A = C_{A0}(1-X)$이다.

사용할 공식

CSTR 설계식은 $V = \frac{F_{A0}X}{-r_A}$이다.
액상 2차 반응에서는 $-r_A = kC_A^2 = kC_{A0}^2(1-X)^2$이므로
$V = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2} \cdot \frac{X}{(1-X)^2}$
가 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 반응 차수와 반응기 형식이 모두 주어졌고, 반응기 부피 외 조건은 같으므로 V는 $\frac{X}{(1-X)^2}$의 비로 바로 비교할 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 같은 계수 $\frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2}$는 두 조건에서 동일하다.
2. 따라서
$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{X_2}{(1-X_2)^2}}{\frac{X_1}{(1-X_1)^2}}$
이다.
3. $X_1 = 0.5$, $V_1 = 1L$, $X_2 = 0.9$를 대입하면
$\frac{V_2}{1} = \frac{\frac{0.9}{(0.1)^2}}{\frac{0.5}{(0.5)^2}} = \frac{90}{2} = 45$
이므로 $V_2 = 45L$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X

- 9 L는 정답이 아니다. 틀린 표현은 필요한 부피를 9 L로 본 점이다.
- 올바르게는 액상 2차 반응 CSTR에서 $V \propto \frac{X}{(1-X)^2}$이므로 필요한 부피는 45 L이다.
- 9 L는 $(1-X)^2$를 빠뜨리고 1차 반응 CSTR처럼 $V \propto \frac{X}{1-X}$로 잘못 계산할 때 나오는 값이다.

② X

- 18 L는 정답이 아니다. 틀린 표현은 필요한 부피를 18 L로 본 점이다.
- 올바르게는 필요한 부피가 45 L이다.
- 18 L는 전환율 증가분만 보고 선형적으로 비례시켜 계산하거나 2차 반응의 $(1-X)^2$ 의존성을 충분히 반영하지 못한 오답이다.

③ X

- 36 L는 정답이 아니다. 틀린 표현은 필요한 부피를 36 L로 본 점이다.
- 올바르게는 필요한 부피가 45 L이다.
- 36 L도 CSTR 2차 반응 설계식 $V \propto \frac{X}{(1-X)^2}$을 정확히 적용하지 못한 값이다.

④ O

- 45 L는 계산 결과와 일치한다.
- $X = 0.5$에서 1 L가 필요할 때 $X = 0.9$에서는 $\frac{0.9/(0.1)^2}{0.5/(0.5)^2} = 45$배가 필요하므로 45 L가 맞다.

오답 포인트

가장 큰 함정은 CSTR 설계식의 X와 2차 반응 속도식에서 나오는 $(1-X)^2$를 함께 보지 않고, 1차 반응식 $\frac{X}{1-X}$처럼 처리하는 점이다. 전환율이 50%에서 90%로 올라가면 출구 농도 C_A가 크게 감소하므로 2차 반응에서는 필요한 부피가 급격히 커진다.

다시 나오면 이렇게 판단

CSTR 계산형 문제는 먼저 $V = \frac{F_{A0}X}{-r_A}$를 쓰고, 그다음 반응 차수에 맞게 $-r_A$를 $(1-X)$로 바꿔 넣어 V의 전환율 의존성을 만든 뒤 비율로 비교하면 된다.

암기 포인트

액상 2차 반응 CSTR은 $V \propto \frac{X}{(1-X)^2}$이므로 고전환율 영역에서 부피가 급격히 커진다.

NoteBase

문 8. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 순수한 A를 반응물로 이용하여 반응속도식이 $-r_A = k_f C_A - k_b C_B$인 $A \underset{k_b}{\overset{k_f}{\rightleftharpoons}} B$ 가역 액상 기초반응을 진행한다. 이 반응의 농도평형상수와 A를 50% 전환하기 위해 필요한 공간시간[min]을 바르게 연결한 것은? (단, C_j는 j의 농도, A의 초기농도는 $2\text{mol}\text{L}^{-1}$, k_f는 0.2min^{-1}, k_b는 0.1min^{-1}이다)

① 농도평형상수: 0.5, 공간시간: 5

② 농도평형상수: 0.5, 공간시간: 10

③ 농도평형상수: 2, 공간시간: 5

④ 농도평형상수: 2, 공간시간: 10

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 가역 1차 반응의 농도평형상수 K_C와, 주어진 전환율에서 CSTR 설계식으로 공간시간 τ를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 $C_{A0} = 2mol/L$, $k_f = 0.2min^{-1}$, $k_b = 0.1min^{-1}$, 목표 전환율 $X = 0.5$이다.
순수한 A를 공급하므로 액상 등밀도 조건에서 $C_A = C_{A0}(1 - X)$, $C_B = C_{A0}X$가 된다.
구해야 할 값은 농도평형상수와 공간시간이다.

사용할 공식

평형에서는 $-r_A = 0$이므로 $k_f C_{A,e} = k_b C_{B,e}$이다. 따라서
$K_C = \frac{C_{B,e}}{C_{A,e}} = \frac{k_f}{k_b}$
이다.
또한 CSTR 설계식은
$\tau = \frac{C_{A0}X}{-r_A}$
이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 등온 연속교반탱크반응기와 반응속도식 $-r_A = k_f C_A - k_b C_B$를 직접 주었기 때문이다.

계산 과정

1. 농도평형상수는 $K_C = k_f/k_b = 0.2/0.1 = 2$이다.
2. 전환율이 $X = 0.5$이므로 $C_A = 2(1 - 0.5) = 1mol/L$, $C_B = 2(0.5) = 1mol/L$이다.
3. 반응속도는 $-r_A = 0.2(1) - 0.1(1) = 0.1mol/(L \cdot min)$이다.
4. 따라서 공간시간은 $\tau = (2 \times 0.5)/0.1 = 10min$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
농도평형상수 0.5가 틀렸고 공간시간 $5min$도 틀렸다. 0.5는 k_b/k_f를 거꾸로 잡은 값이다. 또한 $5min$은 역반응항 k_bC_B를 무시했을 때 나오는 값이다. 틀린 표현 → 올바르게는 "농도평형상수는 2, 공간시간은 10분"이다.

② X
공간시간 $10min$은 맞지만 농도평형상수 0.5가 틀렸다. 평형에서는 $K_C = C_B/C_A = k_f/k_b$이므로 값은 2이다. 틀린 표현 → 올바르게는 "농도평형상수는 2"이다.

③ X
농도평형상수 2는 맞지만 공간시간 $5min$이 틀렸다. 실제 속도는 $-r_A = 0.2C_A - 0.1C_B$이고, $X = 0.5$에서 $C_A = C_B = 1$이므로 $-r_A = 0.1$이다. 따라서 $\tau = 10min$이 된다. 틀린 표현 → 올바르게는 "공간시간은 10분"이다.

④ O
농도평형상수는 $K_C = 0.2/0.1 = 2$이고, $X = 0.5$에서 $\tau = 10min$이므로 옳다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 두 가지이다. 첫째, 농도평형상수를 k_f/k_b가 아니라 k_b/k_f로 뒤집는 실수이다. 둘째, 가역반응인데도 역반응항 k_bC_B를 빼지 않고 $-r_A = k_fC_A$만 써서 공간시간을 $5min$으로 계산하는 실수이다.

다시 나오면 이렇게 판단

가역반응 CSTR 문제는 먼저 평형상수 관계식 $K_C = k_f/k_b$를 분리해서 보고, 다음으로 목표 전환율에서 C_A, C_B를 구한 뒤, 실제 반응속도 $-r_A = k_fC_A - k_bC_B$를 계산해서 $\tau = C_{A0}X/(-r_A)$에 넣는 순서로 판단하면 된다.

암기 포인트

가역 1차 반응 $A \rightleftharpoons B$에서는 $K_C = k_f/k_b$이고, CSTR 공간시간은 목표 전환율에서의 실제 순반응속도로 계산한다.

NoteBase

문 9. 등온 회분식반응기에서 $A + 2B \rightleftharpoons 2C + D$ 가역 액상 기초반응을 진행한다. A와 B의 초기농도는 각각 $5\text{mol}\text{L}^{-1}$와 $4\text{mol}\text{L}^{-1}$이다. 반응이 평형에 도달하였을 때 B의 전환율이 50%이면, 이 반응의 농도평형상수는? (단, C와 D의 초기농도는 $0\text{mol}\text{L}^{-1}$이다)

① $\frac{1}{16}$
② $\frac{1}{8}$
③ $\frac{1}{4}$
④ $\frac{1}{2}$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 평형 시 각 성분의 농도를 화학양론으로 구한 뒤 농도평형상수 K_c를 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
초기농도는 $A = 5, B = 4, C = 0, D = 0 mol/L$이다.
구해야 할 값:
농도평형상수 K_c이다.
주의할 조건:
반응식은 $A + 2B \rightleftharpoons 2C + D$이고, B의 전환율 50%는 B가 초기농도 4에서 2만큼 반응했다는 뜻이다.

사용할 공식

농도평형상수는 $K_c = \frac{[C]^2[D]}{[A][B]^2}$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유:
반응식 $A + 2B \rightleftharpoons 2C + D$에서 각 성분의 평형농도를 화학양론계수만큼 지수로 반영해야 하기 때문이다.

계산 과정

1. B의 전환율이 50%이므로 반응한 B는 $4 \times 0.5 = 2 mol/L$이다.
2. 반응식에서 $2B$가 반응할 때 A는 1, C는 2, D는 1의 비로 변한다. 따라서 B가 2만큼 감소하면 A는 1 감소, C는 2 증가, D는 1 증가한다.
3. 평형농도는 $A = 4, B = 2, C = 2, D = 1 mol/L$이다.
4. 이를 대입하면 $K_c = \frac{2^2 \times 1}{4 \times 2^2} = \frac{4}{16} = \frac{1}{4}$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① X

1/16은 B의 평형농도를 2가 아니라 초기농도 4로 두는 실수에서 나오는 값이다. 올바르게는 B의 평형농도는 2이므로 $K_c = 1/4$이다.

② X

1/8은 생성물 C의 제곱을 빠뜨려 $K_c = \frac{2 \times 1}{4 \times 2^2}$처럼 계산할 때 나오는 값이다. 올바르게는 $[C]$에 화학양론계수 2가 반영되어 $[C]^2$로 들어가야 한다.

③ O

평형농도 $A = 4, B = 2, C = 2, D = 1$을 식 $K_c = \frac{[C]^2[D]}{[A][B]^2}$에 대입하면 1/4가 된다. 따라서 3번이 옳다.

④ X

1/2는 분모의 $[B]^2$를 $[B]$로 잘못 쓰면 나오는 값이다. 올바르게는 B의 계수가 2이므로 분모는 $[B]^2$가 되어야 한다.

오답 포인트

전환율을 보고 평형농도를 먼저 정리하지 않으면 초기농도를 그대로 대입하거나, 화학양론계수 2를 지수에 반영하지 않는 실수가 나온다. 이 문항은 B의 50% 전환과 $[C]^2$, $[B]^2$를 동시에 점검하는 함정을 둔 문제이다.

다시 나오면 이렇게 판단

가역반응 계산형은 먼저 전환율로 평형농도를 구하고, 다음에 반응식의 계수를 그대로 K_c 식의 지수에 옮겨 대입하면 된다. 농도 정리 후 지수 검산까지 하면 오답을 줄일 수 있다.

암기 포인트

평형상수는 평형농도 대입, 지수는 화학양론계수 그대로이다.

NoteBase

문 10. Thiele 계수가 100 이상인 불균일계 고체 촉매반응을 외부확산이 속도제한단계가 아닌 유체속도에서 진행할 때, 다공성 구형 촉매 입자의 지름이 감소함에 따라 총괄반응속도가 증가하였다. 이 반응의 속도제한단계는?

① 촉매 활성점에서의 반응물 흡착

② 촉매 세공을 통한 반응물의 내부확산

③ 촉매 활성점에서의 표면반응

④ 촉매 활성점에서의 생성물 탈착

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 다공성 촉매입자에서 입자 크기 변화와 Thiele 계수를 근거로 총괄반응속도의 속도제한단계를 판별하는 문제이다.

핵심 개념

내부확산은 반응물이 촉매 세공 내부로 이동하는 단계이고, Thiele 계수가 매우 크면 입자 내부 농도구배가 커져 내부확산 저항이 커진다. 외부확산이 아닌 조건에서 입자 지름을 줄였더니 속도가 증가했다면 확산거리가 짧아져 내부확산 저항이 완화된 경우이다.

선지별 해설

1번 X: 흡착이 속도제한이면 반응물의 활성점 점유가 핵심이므로 입자 지름을 줄였다고 총괄반응속도가 뚜렷이 증가하는 현상을 직접 설명하기 어렵다. 틀린 표현은 "촉매 활성점에서의 반응물 흡착"이고, 올바르게는 입자 지름 감소에 따라 완화되는 단계는 세공 내 이동저항인 내부확산이다.
2번 O: Thiele 계수가 100 이상이면 반응속도가 확산속도보다 매우 커서 입자 내부 농도구배가 크게 형성되는 경우가 많다. 외부확산이 아니고 입자 지름 감소에 따라 속도가 증가했다면 확산거리가 짧아져 유효계수가 커졌다는 뜻이므로 촉매 세공을 통한 반응물의 내부확산이 속도제한단계이다.
3번 X: 표면반응이 속도제한이면 고유 반응속도상수와 활성점 특성이 지배적이므로 외부확산이 아닌 조건에서 입자 지름 변화의 영향은 크지 않다. 틀린 표현은 "촉매 활성점에서의 표면반응"이고, 올바르게는 입자 지름에 민감하게 반응속도가 변한 점이 내부확산 지배를 뜻한다.
4번 X: 생성물 탈착이 속도제한이면 생성물이 활성점에서 떨어져 나오는 화학적 단계가 병목이므로 입자 지름 감소 효과로 설명하기 어렵다. 틀린 표현은 "촉매 활성점에서의 생성물 탈착"이고, 올바르게는 세공 내부에서 반응물이 이동하는 내부확산이 병목이다.

NoteBase

오답 포인트

Thiele 계수가 매우 크다는 정보와 입자 지름 감소 시 속도 증가라는 정보를 따로 보면 헷갈리기 쉽다. 이 문항의 함정은 "외부확산이 아니다"만 보고 곧바로 표면반응을 고르는 데 있으며, 실제 판별점은 입자 크기 의존성이 내부확산 저항 완화를 보여 준다는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 외부확산 지배 여부를 배제한다. 그다음 입자 지름을 줄였을 때 속도가 빨라지면 세공 내 확산거리 감소 효과를 의심하고, Thiele 계수가 매우 크면 내부확산 지배 가능성을 가장 먼저 둔다. 반대로 입자 지름 변화에 속도가 거의 무감하면 표면반응, 흡착, 탈착 같은 활성점 단계 쪽을 본다.

암기 포인트

큰 Thiele 계수와 작은 입자에서의 속도 증가가 함께 나오면 내부확산 지배로 연결된다.

NoteBase

문 11. 등온 회분식반응기에서 $2A + B \rightarrow 3C + D$ 액상 반응을 진행한다. A와 B의 초기농도가 각각 $8\text{mol}\text{L}^{-1}$와 $5\text{mol}\text{L}^{-1}$이고 제한반응물(limiting reactant)의 전환율이 80 %일 때, 제한반응물과 C의 농도 $[\text{mol}\text{L}^{-1}]$를 바르게 연결한 것은? (단, C와 D의 초기농도는 $0\text{mol}\text{L}^{-1}$이다)

① 제한반응물: A, C의 농도: 6.4

② 제한반응물: A, C의 농도: 9.6

③ 제한반응물: B, C의 농도: 8

④ 제한반응물: B, C의 농도: 12

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 화학양론과 제한반응물 전환율을 이용해 생성물 C의 농도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 반응식: $2A + B \rightarrow 3C + D$
- 초기농도: $C_{A0} = 8molL^{-1}$, $C_{B0} = 5molL^{-1}$
- 제한반응물 전환율: 80%
- 초기 생성물 농도: $C_{C0} = 0molL^{-1}$, $C_{D0} = 0molL^{-1}$

구해야 할 값:
- 제한반응물과 최종 C의 농도

주의할 조건:
- 제한반응물은 단순히 초기농도가 작은 물질이 아니라 초기농도/화학양론계수가 더 작은 물질이다.

사용할 공식

제한반응물 판정:
(C_A0)/(2) 와 (C_B0)/(1) 를 비교한다.
생성물 농도 계산:
$C_C = C_{C0} + \frac{\nu_C}{\nu_A}(C_{A0}X_A)$
이 공식을 쓰는 이유:
- 반응식에서 $2A$가 반응할 때 $3C$가 생성되므로, A의 소모량에 $\frac{3}{2}$를 곱하면 C 생성량이 된다.

NoteBase

계산 과정

1. 제한반응물을 판정하면 $\frac{8}{2}=4, \frac{5}{1}=5$ 이므로 더 작은 쪽은 A이다. 따라서 제한반응물은 A이다.
2. A의 전환율이 80%이므로 A의 소모농도는 $8\times0.8=6.4 molL^{-1}$이다.
3. 반응식 $2A\rightarrow3C$를 적용하면 C의 생성농도는 $6.4\times\frac{3}{2}=9.6 molL^{-1}$이다.
4. 따라서 제한반응물은 A, C의 농도는 $9.6 molL^{-1}$이다.

선지별 해설

① X
- $\frac{8}{2}=4, \frac{5}{1}=5$ 이므로 제한반응물이 A라는 판단은 맞다.
- 다만 C의 농도를 $6.4 molL^{-1}$로 본 부분이 틀리다. $6.4 molL^{-1}$는 A의 소모농도이고, C는 $2A\rightarrow3C$ 비율을 적용해 $9.6 molL^{-1}$가 된다.
- 틀린 표현은 "C의 농도 6.4"이다. 올바르게는 "C의 농도 9.6"이다.

② O
- $\frac{8}{2}=4, \frac{5}{1}=5$ 이므로 제한반응물은 A이다.
- A의 소모농도는 $6.4 molL^{-1}$이고, C 생성농도는 $6.4\times\frac{3}{2}=9.6 molL^{-1}$이므로 선지의 두 내용이 모두 맞다.

③ X
- B를 제한반응물로 본 부분이 틀리다. 초기농도만 보면 $5<8$이라서 B가 작아 보이지만, 제한반응물 판정은 계수까지 나누어 비교해야 한다.
- C의 농도 $8 molL^{-1}$도 틀리다. 실제 계산값은 $9.6 molL^{-1}$이다.
- 틀린 표현은 "제한반응물 B, C의 농도 8"이다. 올바르게는 "제한반응물 A, C의 농도 9.6"이다.

④ X
- B가 제한반응물이라는 전제가 틀리다. 실제 제한반응물은 A이다.
- $12 molL^{-1}$는 B가 제한반응물이라고 잘못 가정하고 $5\times0.8=4 molL^{-1}$를 소모시킨 뒤 $3C$를 만들어 얻는 값이다. 실제 조건에는 적용되지 않는다.
- 틀린 표현은 "제한반응물 B, C의 농도 12"이다. 올바르게는 "제한반응물 A, C의 농도 9.6"이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 초기농도 8과 5만 비교해 B를 제한반응물로 고르는 데 있다. 제한반응물은 반드시 화학양론계수로 나눈 값인 8/2와 5/1을 비교해야 한다. 또 $6.4 molL^{-1}$는 A의 소모량일 뿐이며, 생성물 C에는 2 : 3 비율을 한 번 더 적용해야 한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

반응식이 주어지면 먼저 각 반응물의 초기농도/계수를 비교해 제한반응물을 정한다. 그다음 제한반응물의 소모량을 전환율로 구하고, 마지막에 화학양론비를 곱해 생성물 농도로 바꾼다.

암기 포인트

제한반응물은 초기농도/계수가 작은 쪽이고, 생성물량은 제한반응물 소모량 × 생성계수반응물계수로 연결된다.

NoteBase

문 12. 다음은 등온 회분식반응기에서 진행된 반응물 A의 비가역 액상 2차 반응 실험결과이다. 이 반응의 반응속도상수 $[Lmol^{-1}h^{-1}]$는? (단, C_A는 A의 농도 $[molL^{-1}]$이다)

시간[h]	0	1	2	3	4
C_A	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{40}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{60}$

① 10

② 20

③ 30

④ 40

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 등온 회분식반응기에서 비가역 액상 2차 반응의 적분식 $\frac{1}{C_A}-\frac{1}{C_{A0}}=kt$를 이용해 반응속도상수 k를 구할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

주어진 값은 시간 $t=0, 1, 2, 3, 4h$와 농도 $C_A=\frac{1}{20}, \frac{1}{30}, \frac{1}{40}, \frac{1}{50}, \frac{1}{60}mol/L$이다.
구해야 할 값은 반응속도상수 $k[Lmol^{-1}h^{-1}]$이다.
주의할 조건은 액상 2차 반응이므로 C_A 자체가 아니라 $1/C_A$와 시간의 직선관계를 사용해야 한다는 점이다.

사용할 공식

회분식반응기에서 비가역 액상 2차 반응의 적분식은 $\frac{1}{C_A}-\frac{1}{C_{A0}}=kt$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 반응차수가 2차라고 주어졌고, 표의 농도값을 역수로 바꾸면 시간에 따라 일정한 증가폭을 보여 $1/C_A$ 대 t의 기울기가 바로 k가 되기 때문이다.

계산 과정

초기농도는 $C_{A0}=\frac{1}{20}mol/L$이므로 $\frac{1}{C_{A0}}=20$이다.
각 시점에서 $\frac{1}{C_A}$를 쓰면 1시간 후 30, 2시간 후 40, 3시간 후 50, 4시간 후 60이다.
따라서 $\frac{1}{C_A}-\frac{1}{C_{A0}}$는 1시간 후 10, 2시간 후 20, 3시간 후 30, 4시간 후 40이다.
예를 들어 $t=1h$를 대입하면 $30-20=k\cdot 1$이므로 $k=10Lmol^{-1}h^{-1}$이다.
다른 시점으로 확인해도 $\frac{40-20}{2}=10$, $\frac{50-20}{3}=10$, $\frac{60-20}{4}=10$으로 같아 일관된다.

NoteBase

선지 판단

1번 O: 계산 결과 반응속도상수는 $k = 10 L mol^{-1} h^{-1}$이므로 옳다.
2번 X: 20은 $t = 2h$에서의 $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}}$ 누적증가량일 뿐 k가 아니다. 올바르게는 반응속도상수는 20이 아니라 10이다.
3번 X: 30은 $t = 3h$에서의 누적증가량이고 시간으로 나누지 않은 값이므로 틀리다. 올바르게는 반응속도상수는 30이 아니라 10이다.
4번 X: 40은 $t = 4h$에서의 누적증가량이고 기울기 개념을 빠뜨린 값이므로 틀리다. 올바르게는 반응속도상수는 40이 아니라 10이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 표에 적힌 분수 농도를 그대로 보지 말고 역수 $1/C_A$로 바꿔야 한다는 점이다. 또한 20, 30, 40은 각각 특정 시점까지의 누적변화량처럼 보일 수 있으나, 속도상수는 그 변화량을 시간으로 나눈 기울기라는 점을 놓치면 오답에 걸린다.

다시 나오면 이렇게 판단

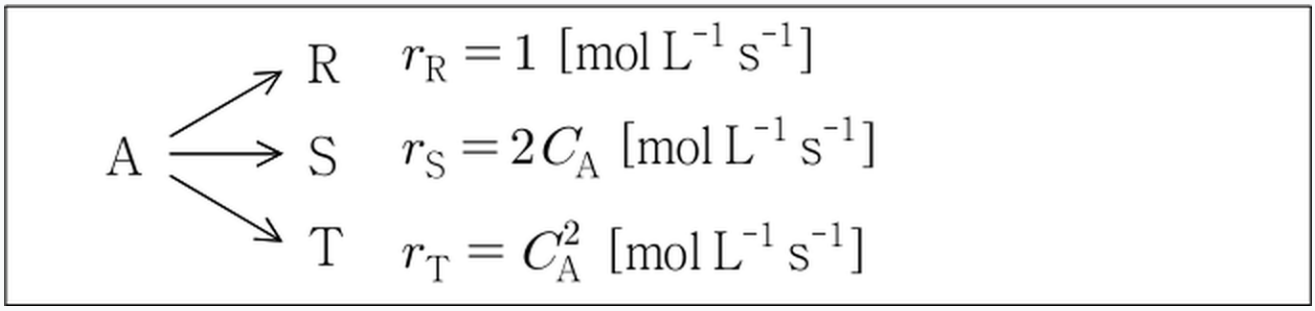
2차 회분반응 문제는 먼저 적분식이 $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt$인지 확인하고, 다음에 표의 농도를 역수로 바꾼 뒤, 마지막으로 $1/C_A$ 증가량을 시간으로 나누어 기울기 k를 판단한다.

암기 포인트

회분식 2차 반응은 C_A가 아니라 $1/C_A$가 시간에 대해 직선이고, 그 기울기가 k이다.

NoteBase

문 13. 다음 복합반응에서 반응물 A에 대한 생성물 S의 순간 수율(Y_S)은? (단, r_j는 j의 생성속도, C_A는 A의 농도, $Y_S = \frac{r_S}{-r_A}$이다)



① $\frac{C_A}{(1+C_A)^2}$
② $\frac{2C_A}{(1+C_A)^2}$
③ $\frac{C_A}{1+C_A^2}$
④ $\frac{2C_A}{1+C_A^2}$

정답 2번

출제 포인트

병렬 복합반응에서 순간 수율 $Y_S = \frac{r_S}{-r_A}$를 구할 때, A의 총 소모속도 $-r_A$를 각 병렬 경로의 속도 합으로 놓을 수 있는지를 묻는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- $r_R = 1$
- $r_S = 2C_A$
- $r_T = C_A^2$

구해야 할 값:
- $Y_S = \frac{r_S}{-r_A}$

주의할 조건:
- 세 반응은 모두 A에서 갈라지는 병렬반응이므로 A의 총 소모속도는 $-r_A = r_R + r_S + r_T$이다.

사용할 공식

$Y_S = \frac{r_S}{-r_A}, \qquad -r_A = r_R + r_S + r_T$

이 공식을 쓰는 이유:
순간 수율은 원하는 생성물의 생성속도를 반응물의 전체 소모속도로 나눈 값이며, 이 문제에서는 A가 R, S, T 세 경로로 동시에 소비된다.

NoteBase

계산 과정

1. A의 총 소모속도는 $-r_A = r_R + r_S + r_T = 1 + 2C_A + C_A^2$이다.
2. 따라서 $Y_S = \frac{r_S}{-r_A} = \frac{2C_A}{1 + 2C_A + C_A^2}$이다.
3. 분모를 정리하면 $1 + 2C_A + C_A^2 = (1 + C_A)^2$이므로 $Y_S = \frac{2C_A}{(1 + C_A)^2}$이다.

선지별 해설

① X: 분자가 C_A로 되어 있어 $r_S = 2C_A$의 계수 2가 빠졌다. 틀린 표현은 '분자 C_A'이며, 올바르게는 $2C_A$이다.
② O: $-r_A = 1 + 2C_A + C_A^2 = (1 + C_A)^2$이므로 $Y_S = \frac{2C_A}{(1 + C_A)^2}$가 된다.
③ X: 분자와 분모가 모두 틀렸다. 틀린 표현은 '분자 C_A'와 '분모 $1 + C_A^2$'이며, 올바르게는 분자 $2C_A$, 분모 $1 + 2C_A + C_A^2 = (1 + C_A)^2$이다.
④ X: 분자 $2C_A$는 맞지만 분모가 틀렸다. 틀린 표현은 '분모 $1 + C_A^2$'이며, 올바르게는 병렬반응 전체 소모속도를 반영한 $1 + 2C_A + C_A^2 = (1 + C_A)^2$이다.

오답 포인트

많이 틀리는 지점은 $-r_A$를 한 경로의 속도로만 보거나, 총 소모속도에서 상수항 1과 선형항 $2C_A$를 빠뜨려 $1 + C_A^2$처럼 쓰는 실수이다. ①은 r_S의 계수 2를 놓친 경우이고, ④는 총 소모속도의 중간항을 누락한 경우이다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응 수율 문제는 먼저 '분자=목표 생성물 속도, 분모=반응물 총 소모속도'로 둔 뒤, 분모에 모든 병렬 경로의 속도가 들어갔는지 확인하는 방식으로 판단한다. 마지막에는 분모를 전개형과 완전제곱형으로 모두 점검하면 오답 선지를 빠르게 걸러낼 수 있다.

암기 포인트

병렬 복합반응의 순간 수율은 '원하는 생성속도 ÷ 반응물 총 소모속도'이며, 이 문항에서는 $Y_S = \frac{2C_A}{1 + 2C_A + C_A^2} = \frac{2C_A}{(1 + C_A)^2}$이다.

NoteBase

문 14. $A \rightarrow B$ 등온 액상 1차 반응을 플러그흐름반응기(PFR)와 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 각각 진행한다. 두 반응기에 공급되는 반응물의 부피유량과 초기농도는 동일하다. 두 반응기에서 A의 전환율(X_A)이 동일할 때, PFR 부피(V_{PFR})와 CSTR 부피(V_{CSTR})의 비$\left(\frac{V_{\mathrm{PFR}}}{V_{\mathrm{CSTR}}}\right)$는?

① $\left(\frac{1-X_A}{X_A}\right)\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$
② $\left(\frac{X_A}{1-X_A}\right)\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$
③ $\left(\frac{1-X_A}{X_A}\right)\frac{1}{\ln(1-X_A)}$
④ $\left(\frac{X_A}{1-X_A}\right)\frac{1}{\ln(1-X_A)}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 액상 1차 반응에서 같은 전환율 X_A를 만들 때 PFR과 CSTR의 설계식으로 부피비 V_{PFR}/V_{CSTR}를 구하는 문제이다.

조건 정리

- 반응: $A \rightarrow B$
- 반응 차수: 액상 1차 반응
- 두 반응기 조건: 부피유량과 초기농도가 동일하다
- 비교 대상: 같은 전환율 X_A에서의 V_{PFR}/V_{CSTR}
- 액상 반응이므로 밀도 변화가 없다고 보고 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$를 쓴다.

사용할 공식

PFR 설계식은
$V_{PFR} = F_{A0}\int_0^{X_A}\frac{dX_A}{-r_A}$
CSTR 설계식은
$V_{CSTR} = \frac{F_{A0}X_A}{(-r_A)_{exit}}$
1차 액상 반응이므로
$-r_A = kC_A = kC_{A0}(1 - X_A)$
를 사용한다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 반응기 종류가 PFR과 CSTR로 주어졌고, 같은 반응물 공급조건과 같은 전환율에서 필요한 반응기 부피를 직접 비교해야 하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. PFR은
$V_{PFR} = F_{A0}\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{kC_{A0}(1-X_A)}$
이고 $F_{A0} = v_0 C_{A0}$이므로
$V_{PFR} = \frac{v_0}{k}\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{1-X_A} = \frac{v_0}{k}\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$
이 된다.

2. CSTR은 출구조건을 그대로 쓰므로
$V_{CSTR} = \frac{F_{A0}X_A}{kC_{A0}(1-X_A)} = \frac{v_0}{k}\frac{X_A}{1-X_A}$
이 된다.

3. 따라서 부피비는
$\frac{V_{PFR}}{V_{CSTR}} = \frac{\frac{v_0}{k}\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)}{\frac{v_0}{k}\frac{X_A}{1-X_A}} = \left(\frac{1-X_A}{X_A}\right)\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$
이다.

선지별 해설

① O
- $\left(\frac{1-X_A}{X_A}\right)\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$는 위에서 유도한 정확한 V_{PFR}/V_{CSTR} 식이다.
- PFR 식의 로그항과 CSTR 식의 $\frac{X_A}{1-X_A}$를 나누면 그대로 ①이 된다.

② X
- ②는 $\left(\frac{X_A}{1-X_A}\right)\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$로서 분수항이 뒤집혀 있다.
- 틀린 표현은 $\frac{1-X_A}{X_A}$ 대신 $\frac{X_A}{1-X_A}$를 쓴 부분이다.
- 올바르게는 $\left(\frac{1-X_A}{X_A}\right)\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$이다.

③ X
- ③은 로그항을 $\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$가 아니라 $\frac{1}{\ln(1-X_A)}$ 형태로 잘못 바꾸었다.
- 틀린 표현은 로그항의 위치와 부호이다. $\ln(1-X_A)$는 $0 < X_A < 1$에서 음수이므로 이 식은 물리적으로도 부적절하다.
- 올바르게는 역수가 아니라 $\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right) = -\ln(1-X_A)$가 곱해져야 한다.

④ X
- ④는 ②처럼 분수항도 뒤집혔고, ③처럼 로그항도 $\frac{1}{\ln(1-X_A)}$로 잘못 썼다.
- 틀린 표현은 $\frac{1-X_A}{X_A}$를 $\frac{X_A}{1-X_A}$로 뒤집은 점과, $\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$를 역수 형태로 바꾼 점이다.
- 올바르게는 $\left(\frac{1-X_A}{X_A}\right)\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$이다.

NoteBase

오답 포인트

가장 흔한 함정은 PFR과 CSTR 설계식을 서로 바꾸어 쓰거나, $\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$를 $\ln(1-X_A)$ 또는 그 역수로 잘못 처리하는 점이다. 특히 ②는 비율을 뒤집은 경우이고, ③과 ④는 로그항을 잘못 다뤄 음수 또는 비정상적인 식이 나오게 한 경우이다.

다시 나오면 이렇게 판단

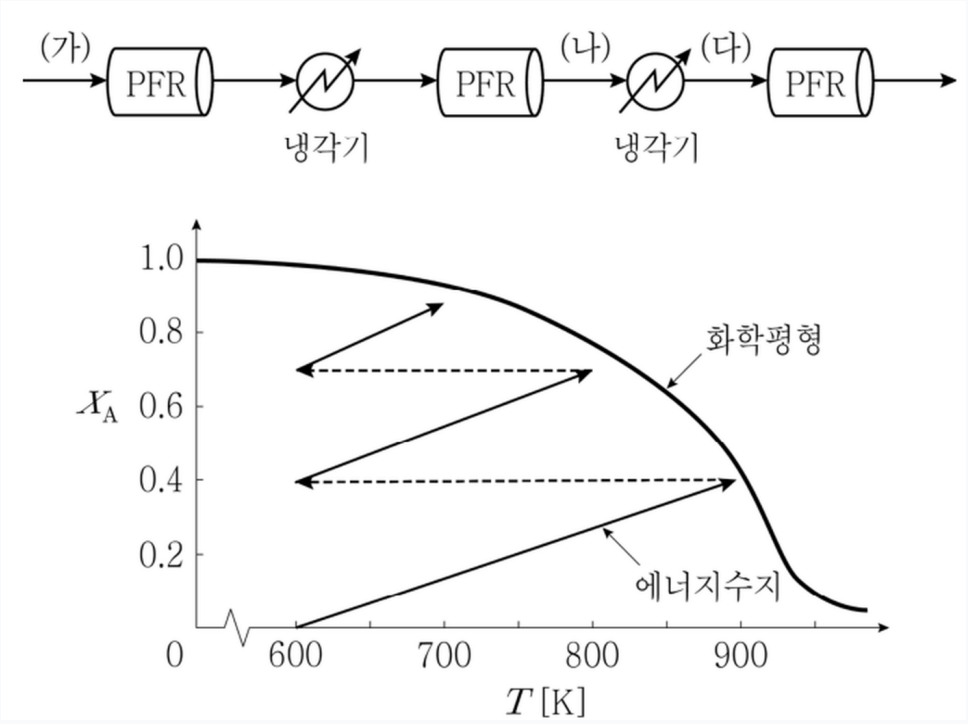
반응기 부피 비교 문제는 먼저 각 반응기의 설계식을 따로 쓴 뒤, 반응속도식 $-r_A$를 대입해 각각의 V를 구하고 마지막에 비를 취하면 된다. 1차 액상 반응에서 PFR은 로그형, CSTR은 $\frac{X_A}{1-X_A}$형이라는 점을 기준으로 판단할 수 있다.

암기 포인트

액상 1차 반응에서 같은 전환율 기준으로 PFR은 $\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$, CSTR은 $\frac{X_A}{1-X_A}$ 형태가 나온다.

NoteBase

문 15. A ⇄ B 가역 발열 반응에서 높은 전환율을 얻기 위해 그림과 같이 세 개의 단열 플러그흐름반응기(PFR)와 두 개의 냉각기를 조합하여 반응공정을 구성한다. 흐름에 따른 온도 (T)와 A의 전환율 (X_A)의 변화는 아래 그래프와 같다. (가) 위치에서의 흐름 온도가 600 K일 때, (나)와 (다) 위치에서 흐름 온도[K]를 바르게 연결한 것은?



① (나): 800, (다): 600

② (나): 800, (다): 700

③ (나): 900, (다): 600

④ (나): 900, (다): 700

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 가역 발열 반응의 다단 단열 PFR 공정에서 반응기 구간은 에너지수지선을 따라가고, 냉각기 구간은 전환율이 일정한 수평 이동이라는 점을 그래프에서 읽어 내는 문제이다.

NoteBase

선지별 해설

① O: (가)에서 $T = 600K$, $X_A = 0$로 시작한 첫 번째 PFR은 에너지수지선을 따라 올라가 화학평형선과 약 $900K$, $X_A \approx 0.4$에서 만난다. 첫 번째 냉각기에서는 전환율이 그대로인 채 온도만 낮아져 약 $600K$, $X_A \approx 0.4$가 된다. 두 번째 PFR은 여기서 다시 에너지수지선을 따라 올라가 약 $800K$, $X_A \approx 0.67$에 도달하므로 (나)는 $800K$이다. 두 번째 냉각기에서는 같은 전환율에서 다시 약 $600K$로 수평 이동하므로 (다)는 $600K$이다.
② X: (나)=$800K$는 맞지만, (다)=$700K$는 냉각기 구간을 잘못 읽은 값이다. 그림의 냉각 구간은 전환율 일정의 수평선으로 약 $600K$까지 되돌아간다. 틀린 표현은 '(다)=700 K'이고, 올바르게는 '(다)=600 K'이다.
③ X: (나)=$900K$는 첫 번째 PFR 출구 온도에 해당한다. (나)는 두 번째 PFR 뒤의 위치이므로 첫 번째 출구 온도를 그대로 쓸 수 없다. 틀린 표현은 '(나)=900 K'이고, 올바르게는 '(나)=800 K'이다. (다)=$600K$ 자체는 맞지만, 조합 전체는 오답이다.
④ X: (나)=$900K$로 본 점도 틀리고, (다)=$700K$로 본 점도 틀리다. 두 번째 PFR 출구는 약 $800K$, 두 번째 냉각기 출구는 약 $600K$로 읽힌다. 틀린 표현은 '(나)=900 K, (다)=700 K'이고, 올바르게는 '(나)=800 K, (다)=600 K'이다.

오답 포인트

가역 발열 반응에서는 온도가 오를수록 평형 전환율이 내려가므로, 각 단열 PFR은 평형선에 닿을 때마다 더 진행하기 어려워진다. 출제자는 첫 번째 PFR 출구 온도 $900K$를 두 번째 PFR 출구인 (나)로 착각하게 하거나, 냉각기에서 전환율까지 변한다고 오해하게 만드는 함정을 두었다.

다시 나오면 이렇게 판단

다단 단열 PFR 문제는 먼저 반응기 구간을 에너지수지선의 사선 이동으로 찾고, 각 냉각기 구간을 전환율 일정의 수평 왼쪽 이동으로 읽는다. 그다음 각 위치가 몇 번째 반응기 출구인지, 몇 번째 냉각기 출구인지 순서대로 대응시키면 된다.

암기 포인트

가역 발열 다단 PFR은 반응기에서는 사선으로 평형선까지 가고, 냉각기에서는 수평으로 저온 쪽으로 돌아간다.

NoteBase

문 16. 다음 반응메커니즘으로 오존O_3이 산소O_2로 분해된다. 산소 라디칼$O\bullet$에 유사 정상상태 가정(pseudo steady-state hypothesis)을 적용하여 유도한 오존의 소멸속도는? (단, 모든 반응은 기초반응이며, k_1, k_2, k_3는 반응속도상수이고, C_j는 j의 농도이다)

$O_3 \rightarrow O_2 + O\bullet$
$O_2 + O\bullet \rightarrow O_3$
$O_3 + O\bullet \rightarrow 2O_2$

① $\frac{k_1 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$
② $\frac{k_1 k_3 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_1 C_{O_3}}$
③ $\frac{2k_3 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_1 C_{O_3}}$
④ $\frac{2k_1 k_3 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 산소 라디칼 $O\cdot$에 유사 정상상태 가정을 적용해 중간체 농도를 제거한 뒤, 오존의 순소멸속도 $-dC_{O_3}/dt$를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 기초반응 속도식은 $r_1 = k_1 C_{O_3}$, $r_2 = k_2 C_{O_2} C_{O\cdot}$, $r_3 = k_3 C_{O_3} C_{O\cdot}$이다.
구해야 할 값은 오존의 순소멸속도 $-dC_{O_3}/dt$이다.
유사 정상상태 가정은 중간체인 산소 라디칼 $O\cdot$에만 적용된다.

사용할 공식

유사 정상상태 가정은 $\frac{dC_{O\cdot}}{dt} = 0$이다.
따라서 $0 = r_1 - r_2 - r_3 = k_1 C_{O_3} - k_2 C_{O_2} C_{O\cdot} - k_3 C_{O_3} C_{O\cdot}$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유는 $O\cdot$가 생성과 소멸을 반복하는 반응중간체이므로, 그 농도를 정상상태로 두면 최종 속도식을 $C_{O\cdot}$ 없이 정리할 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 라디칼 정상상태식에서 $C_{O\cdot}$를 정리하면 $C_{O\cdot} = \frac{k_1 C_{O_3}}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$ 이다.
2. 오존의 순변화식은 $\frac{dC_{O_3}}{dt} = -r_1 + r_2 - r_3$ 이므로 순소멸속도는 $-\frac{dC_{O_3}}{dt} = r_1 + r_3 - r_2$ 이다.
3. 정상상태식에서 $r_1 = r_2 + r_3$ 이므로 $-\frac{dC_{O_3}}{dt} = 2r_3$ 이다.
4. 따라서 $-\frac{dC_{O_3}}{dt} = 2k_3 C_{O_3} C_{O\cdot} = \frac{2k_1 k_3 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
$\frac{k_1 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$는 $C_{O\cdot}$ 식에 C_{O_3}만 한 번 더 곱한 중간형에 가깝고, 실제 순소멸속도에 필요한 $2k_3$가 빠져 있다. 틀린 표현 → 올바르게는 $\frac{2k_1 k_3 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$이다.

② X
분모의 마지막 항을 $k_1 C_{O_3}$로 둔 것이 잘못이다. 라디칼 소멸항은 3단계의 $k_3 C_{O_3} C_{O\cdot}$이므로 분모는 $k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}$가 되어야 한다. 또한 오존 순소멸속도는 $2r_3$이므로 계수 2도 필요하다. 틀린 표현 → 올바르게는 $\frac{2k_1 k_3 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$이다.

③ X
계수 2는 반영했지만 분모와 분자가 모두 잘못되었다. 정상상태식에서 분모 마지막 항은 $k_1 C_{O_3}$가 아니라 $k_3 C_{O_3}$이고, $C_{O\cdot}$를 대입하면 분자에는 k_1도 남아야 한다. 틀린 표현 → 올바르게는 $\frac{2k_1 k_3 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$이다.

④ O
$O\cdot$에 유사 정상상태를 적용하면 $C_{O\cdot} = \frac{k_1 C_{O_3}}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$이고, 오존의 순소멸속도는 $2r_3$이므로 $\frac{2k_1 k_3 C_{O_3}^2}{k_2 C_{O_2} + k_3 C_{O_3}}$가 된다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 유사 정상상태로 얻은 중간체 농도식을 그대로 최종 속도식으로 착각하는 경우이다. 이 문항에서는 2단계가 오존을 다시 생성하므로 오존의 순소멸속도가 r_1이나 r_3 하나로 끝나지 않고, 정상상태 조건을 대입하면 $2r_3$로 정리된다는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

중간체가 보이면 먼저 그 종에 유사 정상상태를 적용해 농도를 제거하고, 그다음 원래 물질의 순생성·순소멸식에 각 단계의 화학양론을 반영해 최종 속도를 정리하면 된다.

암기 포인트

유사 정상상태는 중간체에 적용하고, 최종 속도는 원물질의 순변화식까지 써서 화학양론 계수를 반영해야 한다.

NoteBase

문 17. $1\text{mol}\text{L}^{-1}$**의 순수한 A를 반응물로 이용하여 직렬로 연결된 두 개의 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서** $2A \rightarrow B$ **액상 기초반응을 진행한다. 첫 번째 반응기 출구에서 A의 농도가** $0.5\text{mol}\text{L}^{-1}$**이고, 두 번째 반응기 부피가 첫 번째 반응기 부피의 2배일 때, 두 번째 반응기 출구에서 A의 농도** $[\text{mol}\text{L}^{-1}]$**는?**

① 0.15

② 0.25

③ 0.35

④ 0.45

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 액상 기초반응 $2A \rightarrow B$가 일어나는 직렬 CSTR에서 설계식과 부피비를 이용해 두 번째 반응기 출구의 A 농도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 유입 A 농도는 $C_{A0} = 1mol/L$이다.
- 첫 번째 반응기 출구 농도는 $C_{A1} = 0.5mol/L$이다.
- 두 번째 반응기 부피는 첫 번째 반응기 부피의 2배이다.
- 반응은 기초반응이므로 A의 소모속도는 $-r_A = KC_A^2$ 꼴이다.

구해야 할 값:
- 두 번째 반응기 출구 농도 C_{A2}이다.

주의할 조건:
- CSTR은 각 반응기 출구 농도로 반응속도를 계산한다.

사용할 공식

CSTR 설계식은 $V = \frac{F_{A0}X_A}{-r_A} = \frac{v(C_{A,in} - C_{A,out})}{-r_A}$ 이다.
이 문제는 액상 반응이므로 체적유량 v를 일정하게 둘 수 있고, 각 반응기 출구 농도에서의 $-r_A = KC_A^2$를 대입하면 된다.

NoteBase

계산 과정

1. 첫 번째 반응기에 대해

$V_1 = \frac{v(1-0.5)}{K(0.5)^2} = \frac{0.5v}{0.25K} = \frac{2v}{K}$

2. 두 번째 반응기는 부피가 2배이므로

$V_2 = 2V_1 = \frac{4v}{K}$

3. 두 번째 반응기 설계식을 세우면

$V_2 = \frac{v(0.5-C_{A2})}{KC_{A2}^2} = \frac{4v}{K}$

따라서

$\frac{0.5-C_{A2}}{C_{A2}^2} = 4$

$0.5 - C_{A2} = 4C_{A2}^2$

$4C_{A2}^2 + C_{A2} - 0.5 = 0$

4. 근의 공식을 적용하면

$C_{A2} = \frac{-1+\sqrt{1+8}}{8} = \frac{2}{8} = 0.25mol/L$

음의 농도는 물리적으로 불가능하므로 버린다.

NoteBase

선지별 해설

① X
- 계산 결과는 $0.25 mol/L$이므로 0.15는 틀리다.
- 틀린 표현은 출구 농도를 0.15로 둔 점이다. 올바르게는 두 번째 출구 농도는 $0.25 mol/L$이다.
- 0.15는 두 번째 반응기 부피가 더 크다는 이유만으로 농도가 지나치게 작아질 것이라고 감으로 판단할 때 나올 수 있는 값이다.

② O
- 두 번째 CSTR 설계식에 부피비 2를 반영하면 $C_{A2} = 0.25 mol/L$가 나온다.
- 따라서 정답 선택지는 ②이다.

③ X
- 계산 결과는 $0.25 mol/L$이므로 0.35는 틀리다.
- 틀린 표현은 출구 농도를 0.35로 둔 점이다. 올바르게는 두 번째 출구 농도는 $0.25 mol/L$이다.
- 0.35는 첫 번째 출구 농도 0.5에서 감소량을 선형적으로 짧게 잡거나, 반응속도의 C_A^2 의존성을 충분히 반영하지 않을 때 나올 수 있는 오답이다.

④ X
- 계산 결과는 $0.25 mol/L$이므로 0.45는 틀리다.
- 틀린 표현은 출구 농도를 0.45로 둔 점이다. 올바르게는 두 번째 출구 농도는 $0.25 mol/L$이다.
- 0.45는 두 번째 반응기에서 농도 변화가 거의 없다고 잘못 가정하거나, 부피가 2배라는 조건을 설계식에 반영하지 않을 때 나올 수 있는 값이다.

오답 포인트

첫 번째 반응기에서 구한 출구 농도 $0.5 mol/L$를 두 번째 반응기의 유입농도로 바꾸어 넣지 않으면 식이 틀어진다. 또한 CSTR은 출구 농도로 속도를 평가하므로, 평균농도나 유입농도를 넣는 실수가 자주 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 CSTR 계산형은 각 반응기마다 유입농도와 출구농도를 따로 잡고, CSTR 설계식에 출구농도 기준 속도를 넣은 뒤, 반응기 부피비를 연결해서 푼다고 판단하면 된다.

암기 포인트

CSTR은 출구농도로 속도를 계산하고, 직렬 반응기는 앞단 출구가 뒷단 유입이 된다는 점이 핵심이다.

NoteBase

문 18. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 다음의 액상 반응을 진행한다. A와 B가 1:1.3의 몰비율로 혼합된 반응물이 반응기에 유입되며, 반응기 입구에서 A의 농도는 2molL^{-1}이다. 반응기 부피는 2L이고 출구에서 A의 전환율이 80 %일 때, 반응기 입구에서 A의 몰유량 $[\text{molmin}^{-1}]$은? (단, $-r_A$는 A의 소멸속도, C_j는 j의 농도이다)

$A + B \rightarrow R + S$
$-r_A = 2C_AC_B[\text{molL}^{-1}\text{min}^{-1}]$

① 1
② 1.5
③ 2
④ 2.5

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 정상상태 CSTR 물질수지와 출구 조성으로 반응속도를 계산한 뒤, $F_{A0}X_A = (-r_A)V$로 입구의 A 몰유량을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 A와 B의 입구 몰비 $1 : 1.3$, $C_{A0} = 2mol/L$, 반응기 부피 $V = 2L$, A 전환율 $X_A = 0.8$이다.
구해야 할 값은 반응기 입구에서 A의 몰유량 F_{A0}이다.
액상 CSTR이므로 반응기 내부 농도는 출구 농도와 같다고 본다.

사용할 공식

사용 공식은
$F_{A0} - F_A = (-r_A)V$,
$F_A = F_{A0}(1 - X_A)$,
$-r_A = 2C_AC_B$
이다.
이 문제는 정상상태 CSTR에서 출구 조성으로 반응속도를 구할 수 있고, A의 소멸량이 곧 $(-r_A)V$와 같아지는 상황이므로 이 공식을 사용한다.

NoteBase

계산 과정

먼저 출구에서 A의 농도는
$C_A = C_{A0}(1 - X_A) = 2(1 - 0.8) = 0.4 mol/L$
이다.
입구에서 B의 농도는 몰비가 1 : 1.3이므로
$C_{B0} = 1.3 C_{A0} = 1.3 \times 2 = 2.6 mol/L$
이다.
A가 0.8 전환되면 A 소모량은 $2 \times 0.8 = 1.6 mol/L$이고, 화학양론이 $A + B \rightarrow R + S$이므로 B도 같은 양만큼 소모된다. 따라서 출구에서 B의 농도는
$C_B = 2.6 - 1.6 = 1.0 mol/L$
이다.
반응속도는
$-r_A = 2 C_A C_B = 2 \times 0.4 \times 1.0 = 0.8 mol/L \cdot min$
이다.
정상상태 CSTR 물질수지를 적용하면
$F_{A0} X_A = (-r_A) V = 0.8 \times 2 = 1.6 mol/min$
이므로
$F_{A0} = \frac{1.6}{0.8} = 2 mol/min$
이다.

선지별 해설

① X: 선지값 $1 mol/min$은 $F_{A0} X_A = 1.6 mol/min$을 만족하지 못한다. $F_{A0} = 1 mol/min$이면 A 소멸량은 $0.8 mol/min$에 불과하므로 틀린 값이다. 올바른 값은 $2 mol/min$이다.
② X: 선지값 $1.5 mol/min$은 최종 단계에서 1.6/0.8 계산을 잘못한 값에 가깝다. CSTR 물질수지에 따르면 $F_{A0} = 2 mol/min$이므로 틀린 값이다.
③ O: 출구 농도 $C_A = 0.4 mol/L$, $C_B = 1.0 mol/L$에서 $-r_A = 0.8 mol/L \cdot min$이고, $(-r_A)V = 1.6 mol/min$이다. 이를 전환율 0.8로 나누면 $F_{A0} = 2 mol/min$이 되어 옳다.
④ X: 선지값 $2.5 mol/min$은 $F_{A0} X_A = (-r_A)V$에서 전환율로 나누는 대신 다른 수를 대입한 오산에 해당한다. 문제 조건을 모두 반영하면 입구 A 몰유량은 $2 mol/min$이어야 한다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 C_B를 입구 몰비 1.3으로만 보고 그대로 대입하는 경우와, CSTR 물질수지에서 $F_{A0} X_A$로 정리하지 않고 전환율을 빠뜨리는 경우이다. 이 문항은 B가 과잉이지만 반응으로 $1.6 mol/L$만큼 함께 소모된다는 점을 놓치면 오답이 나온다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

CSTR 계산형 문항은 먼저 출구 농도부터 구하고, 그 농도로 반응속도를 계산한 뒤, 마지막에 $F_{A0}X_A = (-r_A)V$를 적용하는 순서로 판단한다. 화학양론비가 1 : 1이면 B 소모량도 A 소모량과 같게 본다.

암기 포인트

정상상태 CSTR은 출구 조성으로 속도를 구하고, A 소멸량은 항상 $F_{A0}X_A = (-r_A)V$로 연결된다.

NoteBase

문 19. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 순수한 A를 반응물로 이용하여 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 액상 1차 반응을 진행한다. A의 전환율이 50%일 때, 공간시간[min]과 출구에서 B의 농도[$\mathrm{mol L^{-1}}$]를 바르게 연결한 것은? (단, A의 초기농도는 $1\mathrm{mol L^{-1}}$, k_1은 $0.1\mathrm{min^{-1}}$, k_2는 $0.2\mathrm{min^{-1}}$이다)

① 공간시간: 5, B의 농도: $\frac{1}{3}$

② 공간시간: 5, B의 농도: $\frac{1}{6}$

③ 공간시간: 10, B의 농도: $\frac{1}{3}$

④ 공간시간: 10, B의 농도: $\frac{1}{6}$

정답 4번

출제 포인트

CSTR에서 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 연속 1차 반응이 일어날 때, A의 전환율로 공간시간을 먼저 구하고 중간생성물 B의 정상상태 물질수지로 출구농도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- $C_{A0} = 1 mol/L$
- $k_1 = 0.1 min^{-1}, k_2 = 0.2 min^{-1}$
- A의 전환율 $X_A = 0.5$

구해야 할 값:
- 공간시간 τ
- 출구에서 B의 농도 C_B

주의할 조건:
- CSTR이므로 출구 농도와 반응기 내부 농도가 같다.
- B는 생성과 동시에 C로 소비되므로 k_2 항을 함께 넣어야 한다.

사용할 공식

공식은 다음과 같다.

$$X_A = \frac{k_1\tau}{1+k_1\tau}, \qquad C_A = C_{A0}(1 - X_A), \qquad C_B = \frac{\tau k_1 C_A}{1+k_2\tau}$$

이 공식을 쓰는 이유는 액상 1차 반응이 일어나는 정상상태 CSTR에서는 각 성분에 대해 유입-유출+생성-소비 물질수지를 바로 세울 수 있기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. A의 전환율 식에 $X_A = 0.5$를 대입한다.
$0.5 = \frac{0.1\tau}{1+0.1\tau}$
2. 정리하면 $0.5 + 0.05\tau = 0.1\tau$이므로 $\tau = 10min$이다.
3. 출구의 A 농도는
$C_A = C_{A0}(1 - X_A) = 1 \times (1 - 0.5) = 0.5mol/L$
이다.
4. B의 물질수지를 적용하면
$C_B = \frac{\tau k_1 C_A}{1 + k_2\tau} = \frac{10 \times 0.1 \times 0.5}{1 + 0.2 \times 10} = \frac{0.5}{3} = \frac{1}{6}mol/L$
이다.

선지별 해설

① X
- 틀린 표현은 "공간시간 5"와 "B의 농도 1/3"이다.
- $\tau = 5min$이면 $X_A = \frac{0.1 \times 5}{1 + 0.1 \times 5} = \frac{1}{3}$이 되어 문제 조건인 전환율 50%를 만족하지 못한다.
- 올바르게는 "공간시간은 $10min$, B의 농도는 $1/6mol/L$"이다.

② X
- 틀린 표현은 "공간시간 5"이다.
- B 농도를 1/6으로 적었더라도 전환율 50%를 만드는 공간시간은 $5min$이 아니라 $10min$이다.
- 올바르게는 "공간시간은 $10min$, B의 농도는 $1/6mol/L$"이다.

③ X
- 틀린 표현은 "B의 농도 1/3"이다.
- 공간시간 $10min$은 맞지만, B는 생성된 뒤 다시 C로 소비되므로 $1 + k_2\tau$가 분모에 들어가야 한다. 따라서 $C_B = 1/6mol/L$이다.
- 올바르게는 "공간시간은 $10min$, B의 농도는 $1/6mol/L$"이다.

④ O
- A 전환율 50%로부터 $\tau = 10min$이 나오고, 그 값을 B 물질수지에 넣으면 $C_B = 1/6mol/L$가 된다.
- 계산 결과와 일치하므로 옳은 연결이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 두 단계이다. 첫째, A의 전환율 식에서 CSTR 공식을 쓰지 않고 단순히 $k_1\tau = X_A$처럼 처리하면 공간시간을 잘못 잡기 쉽다. 둘째, B를 중간생성물로 보지 않고 생성항 $k_1 C_A$만 보고 소비항 $k_2 C_B$를 빼먹으면 B 농도를 크게 계산하게 된다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

연속반응 CSTR 계산형은 먼저 반응물 A의 전환율로 τ를 확정하고, 그다음 중간생성물 B에는 생성항과 소비항이 모두 들어간 물질수지를 세워 판단한다. 공간시간과 농도를 한 번에 추정하지 않고 성분별로 순서대로 푸는 것이 안전하다.

암기 포인트

CSTR 연속 1차 반응은 반응물 전환율로 τ를 먼저 구하고, 중간생성물은 "생성 k_1C_A, 소비 k_2C_B"를 함께 넣어 계산하는 구조이다.

NoteBase

문 20. V는 효소반응속도$[gL^{-1}h^{-1}]$, V_m은 최대 효소반응속도$[gL^{-1}h^{-1}]$, K_M은 미카엘리스 상수$[gL^{-1}]$, C_S는 기질의 농도$[gL^{-1}]$일 때, 미카엘리스-멘텐(Michaelis-Menten) 식을 따르는 효소-기질 반응을 진행한다. C_S/V를 C_S에 대해 도시하여 얻은 하네스-울프 플롯(Hanes-Woolf plot)의 기울기가 0.5이고 $C_S = 0$에서 절편이 1.5일 때, V_m과 K_M을 바르게 연결한 것은?

$$V = \frac{V_m C_S}{K_M + C_S}$$

① V_m: 1, K_M: 3

② V_m: 1, K_M: 4

③ V_m: 2, K_M: 3

④ V_m: 2, K_M: 4

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 미카엘리스-멘텐 식을 하네스-울프 식으로 선형화하여 기울기와 절편에서 V_m과 K_M를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 식은 $V = \frac{V_m C_S}{K_M + C_S}$이다.
하네스-울프 플롯은 $\frac{C_S}{V}$를 y축, C_S를 x축으로 둔다.
기울기는 0.5이고, $C_S = 0$에서 절편은 1.5이다.

사용할 공식

$\frac{C_S}{V} = \frac{K_M + C_S}{V_m} = \frac{1}{V_m} C_S + \frac{K_M}{V_m}$
하네스-울프 플롯은 $\frac{C_S}{V}$ 대 C_S의 직선식이므로 기울기에서 $\frac{1}{V_m}$, 절편에서 $\frac{K_M}{V_m}$를 바로 읽을 수 있다.

계산 과정

1. 기울기 $= \frac{1}{V_m} = 0.5$이므로 $V_m = 2$이다.
2. 절편 $= \frac{K_M}{V_m} = 1.5$이므로 $\frac{K_M}{2} = 1.5$이다.
3. 따라서 $K_M = 3$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 기울기 0.5는 $\frac{1}{V_m} = 0.5$를 뜻하므로 $V_m = 2$이다. 따라서 $V_m = 1$은 틀리며, 올바르게는 $V_m = 2$이다.
② X: 절편 1.5는 $\frac{K_M}{V_m} = 1.5$를 뜻한다. $V_m = 2$를 대입하면 $K_M = 3$이므로 $K_M = 4$는 틀리며, 올바르게는 $K_M = 3$이다.
③ O: 기울기에서 $V_m = 2$, 절편에서 $K_M = 3$이 되어 보기와 정확히 일치한다.
④ X: $V_m = 2$는 맞지만 절편 조건 $\frac{K_M}{2} = 1.5$를 만족하려면 $K_M = 3$이어야 한다. 따라서 $K_M = 4$는 틀리며, 올바르게는 $K_M = 3$이다.

오답 포인트

하네스-울프 플롯에서 기울기를 V_m로, 절편을 K_M로 바로 읽는 실수가 자주 나온다. 이 문항은 기울기 $= \frac{1}{V_m}$, 절편 $= \frac{K_M}{V_m}$라는 비례관계를 혼동하면 ①, ②, ④ 같은 오답으로 흐르게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

미카엘리스-멘텐 식이 직선형 플롯으로 바뀌면 먼저 y축과 x축이 무엇인지 확인하고, 그다음 직선식 $y = ax + b$ 꼴로 정리해 기울기와 절편이 각각 어떤 물리량을 뜻하는지 대응시키면 된다.

암기 포인트

하네스-울프 플롯은 $\frac{C_S}{V}$ 대 C_S이며, 기울기는 $\frac{1}{V_m}$, 절편은 $\frac{K_M}{V_m}$이다.

NoteBase

문 21. 플러그흐름반응기(PFR) 뒤에 연속교반탱크반응기(CSTR)를 직렬로 연결하여 $A \rightarrow B$ 등온 액상 1차 반응을 진행한다. 각 반응기에서 공간시간이 동일할 때, CSTR 출구에서 A의 농도는? (단, C_{A0}는 A의 초기농도, k는 반응속도상수, τ는 공간시간이다)

① $\frac{C_{A0}e^{-k\tau}}{1+k\tau}$
② $\frac{C_{A0}e^{-k\tau}}{1+2k\tau}$
③ $\frac{kC_{A0}e^{-k\tau}}{1+k\tau}$
④ $\frac{kC_{A0}e^{-k\tau}}{1+2k\tau}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 액상 1차 반응에서 PFR과 CSTR를 직렬로 연결했을 때 각 반응기의 설계식을 순서대로 적용해 최종 출구농도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 반응은 $A \rightarrow B$인 액상 1차 반응이고, PFR과 CSTR의 공간시간은 각각 τ로 동일하다.
구해야 할 값: 두 번째 반응기인 CSTR 출구의 A 농도이다.
주의할 조건: 두 반응기의 공간시간이 같다는 뜻은 각각이 τ라는 뜻이지, CSTR 식의 분모를 $1+2k\tau$로 바꾸는 뜻이 아니다.

사용할 공식

PFR 출구: $C_{A1} = C_{A0}e^{-k\tau}$
CSTR 출구: $C_{A2} = \frac{C_{A1}}{1+k\tau}$
이 공식을 쓰는 이유: 액상 1차 반응에서 PFR은 체류 동안 농도가 연속적으로 감소해 지수식이 되고, CSTR은 반응기 내부 농도와 출구 농도가 같아 정상상태 물질수지로 위 식이 된다.

계산 과정

1. 첫 번째 PFR 출구 농도는 $C_{A1} = C_{A0}e^{-k\tau}$이다.
2. 이 값이 두 번째 CSTR의 유입 농도이므로 $C_{A,\,\mathrm{in}} = C_{A0}e^{-k\tau}$이다.
3. CSTR 설계식을 적용하면 $C_{A2} = \frac{C_{A,\,\mathrm{in}}}{1+k\tau} = \frac{C_{A0}e^{-k\tau}}{1+k\tau}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① O: 계산 결과가 $\frac{C_{A0}e^{-k\tau}}{1+k\tau}$이므로 맞다.
② X: 틀린 표현은 분모의 $1+2k\tau$이다. 올바르게는 CSTR 하나의 공간시간만 반영해 $1+k\tau$가 되어야 한다. $1+2k\tau$는 두 반응기의 공간시간을 CSTR 분모에 한꺼번에 넣은 오용이다.
③ X: 틀린 표현은 분자의 $kC_{A0}e^{-k\tau}$이다. 올바르게는 분자에 k가 붙지 않고 $C_{A0}e^{-k\tau}$만 남는다. k를 곱하면 농도가 아니라 반응속도 차원이 되어 출구농도 식이 아니다.
④ X: 틀린 표현은 분자의 k와 분모의 $1+2k\tau$이다. 올바르게는 $\frac{C_{A0}e^{-k\tau}}{1+k\tau}$이다. 이 선택지는 ②의 분모 오용과 ③의 차원 오류가 함께 들어간 식이다.

오답 포인트

첫 반응기 PFR의 지수감소식과 두 번째 CSTR의 분수형 설계식을 따로 써야 하는데, 이를 한 식으로 뭉개면서 분모를 $1+2k\tau$로 쓰거나 분자에 k를 붙이는 실수가 자주 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 반응기 문제는 앞 반응기 출구를 먼저 구한 뒤 그 값을 다음 반응기 유입값으로 넘겨 순서대로 계산하면 된다. PFR은 지수식, CSTR은 $\frac{C_{in}}{1+k\tau}$ 꼴이라는 점을 분리해 판단한다.

암기 포인트

1차 반응 직렬 연결은 PFR에서 $e^{-k\tau}$, CSTR에서 $\frac{1}{1+k\tau}$를 순서대로 곱한 형태가 된다.

NoteBase

문 22. 정상상태 단열 플러그흐름반응기(PFR)에서 $3\text{mol}\text{L}^{-1}$의 순수한 A를 반응물로 이용하여 상변화 없는 $A \rightarrow B$ 발열 액상 반응을 진행한다. 반응기 입구와 출구에서 온도가 각각 400K과 460K일 때, 반응기 출구에서 A의 전환율은? (단, 반응열 $\Delta H_R = -25\text{kcal}\text{mol}^{-1}$, 반응기 부피당 열용량 $\rho C_p = 1{,}000\text{cal}\text{L}^{-1}\text{K}^{-1}$이며, ΔH_R, ρ 및 C_p는 모두 온도에 무관하며, 일정한 값을 갖는다)

① 0.8

② 0.85

③ 0.9

④ 0.95

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 단열 액상 반응기의 에너지수지식으로 온도 상승량에서 전환율을 바로 구할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

주어진 값: 순수한 A의 농도는 3 mol L^-1, 입구 온도는 400 K, 출구 온도는 460 K, 반응열은 $\Delta H_R = -25 kcal/mol = -25{,}000 cal/mol$, $\rho C_p = 1{,}000 cal L^{-1} K^{-1}$이다.
구해야 할 값: 출구 전환율 X이다.
주의할 조건: 정상상태, 단열, 액상, ρ와 C_p가 일정하므로 반응열이 모두 유체의 현열 상승으로 전환된다.

사용할 공식

단열 액상 반응기의 에너지수지는 $\rho C_p (T - T_0) = (-\Delta H_R) C_{A0} X$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유: 열출입이 없는 단열 조건이므로 반응에서 방출된 열량이 그대로 유체의 온도 상승량과 같아지기 때문이다.

계산 과정

1. 온도 상승량은 $\Delta T = 460 - 400 = 60 K$이다.
2. 단위 부피당 현열 증가는 $\rho C_p \Delta T = 1{,}000 \times 60 = 60{,}000 cal/L$이다.
3. 전환율 100%일 때 단위 부피당 방출열은 $(-\Delta H_R) C_{A0} = 25{,}000 \times 3 = 75{,}000 cal/L$이다.
4. 따라서 $X = \frac{60{,}000}{75{,}000} = 0.8$이다.

NoteBase

선지 판단

1번: O. 계산된 전환율이 0.8이므로 맞다.
2번: X. 0.85는 올바른 전환율보다 크다. 이 값은 출구 온도가 약 $463.75K$일 때에 해당하며, 이 문제 조건 460 K와 맞지 않는다. 틀린 표현은 전환율을 0.85로 본 점이고, 올바르게는 전환율은 0.8이다.
3번: X. 0.9는 출구 온도가 약 $467.5K$일 때의 값이다. 문제의 온도 상승량 60 K를 과대평가한 값이다. 틀린 표현은 전환율을 0.9로 본 점이고, 올바르게는 전환율은 0.8이다.
4번: X. 0.95는 출구 온도가 약 $471.25K$일 때의 값이다. 반응열 대부분이 방출되었다고 잘못 본 결과이다. 틀린 표현은 전환율을 0.95로 본 점이고, 올바르게는 전환율은 0.8이다.

오답 포인트

반응열이 음수라는 사실에만 끌려 부호를 그대로 대입하면 식이 꼬인다. 단열 발열 반응에서는 $(-\Delta H_R)$를 양의 방출열로 바꾸고, 온도 상승량 ΔT와 초기농도 C_{A0}를 곱하는 구조를 먼저 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

단열 액상 반응기 문제는 먼저 ΔT를 구하고, 다음에 $\rho C_p \Delta T$와 $(-\Delta H_R)C_{A0}$를 비교해 전환율 X를 계산하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

단열 발열 액상 반응기는 온도 상승분이 곧 반응 진행도이므로 $X = \rho C_p \Delta T / \{(-\Delta H_R)C_{A0}\}$로 바로 연결된다.

NoteBase

문 23. $A(g)+B(g)\rightarrow C(g)$ **기상 반응이 고체 촉매상에서 다음의 흡착 및 표면반응 과정을 거쳐 진행된다. 정상상태에서 표면반응이 속도제한단계일 때, 총괄반응속도식으로 옳은 것은? (단, S는 촉매 표면 활성점 위에 반응물이 흡착되지 않은 빈자리(vacant site),** $A\bullet S$**는 S에 흡착된 A,** C_t**는 촉매 표면 활성점의 전체 농도,** P_j**는** j **기체의 분압,** K_a**는 흡착평형상수,** k_s**는 표면반응속도상수이다)**

흡착: $A(g)+S\rightleftharpoons A\bullet S$
표면반응: $A\bullet S+B(g)\rightarrow C(g)+S$

① $k_sK_aP_AP_BC_t$
② $\frac{k_sK_aP_AC_t}{1+K_aP_A}$
③ $\frac{k_sK_aP_BC_t}{1+K_aP_A}$
④ $\frac{k_sK_aP_AP_BC_t}{1+K_aP_A}$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 랑뮤어형 단일 흡착 평형과 활성점 수지를 이용해 표면반응 속도지배식의 전체 속도식을 유도할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

주어진 과정은 흡착 $A(g)+S\rightleftharpoons A\cdot S$, 표면반응 $A\cdot S+B(g)\rightarrow C(g)+S$이다.
속도지배단계는 표면반응이므로 전체 속도는 표면반응 속도로 둔다.
A만 흡착하고 B는 기상에서 바로 반응하므로 흡착항은 P_A에만 걸리고 반응속도식에는 P_B가 곱해진다.

사용할 공식

흡착평형에서 $K_a=\frac{C_{A\cdot S}}{P_AC_S}$이므로 $C_{A\cdot S}=K_aP_AC_S$이다.
활성점 수지는 $C_t=C_S+C_{A\cdot S}$이다.
표면반응 속도는 $r=k_sP_BC_{A\cdot S}$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 A의 표면피복률을 흡착평형으로 구한 뒤, 그 흡착종이 B와 반응하는 속도지배단계에 그대로 대입해야 하기 때문이다.

계산 과정

1. 흡착평형식으로 $C_{A\cdot S}=K_aP_AC_S$를 둔다.
2. 이를 활성점 수지 $C_t=C_S+C_{A\cdot S}$에 대입하면 $C_t=C_S(1+K_aP_A)$이므로 $C_S=\frac{C_t}{1+K_aP_A}$이다.
3. 따라서 $C_{A\cdot S}=\frac{K_aP_AC_t}{1+K_aP_A}$이다.
4. 속도지배 표면반응식에 대입하면 $r=k_sP_BC_{A\cdot S}=\frac{k_sK_aP_AP_BC_t}{1+K_aP_A}$ 이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: $k_s K_a P_A P_B C_t$는 흡착에 따른 빈자리 감소가 빠져 있다. 틀린 표현은 분모가 없다는 점이고, 올바르게는 $\frac{k_s K_a P_A P_B C_t}{1 + K_a P_A}$이다.
2번 X: $\frac{k_s K_a P_A C_t}{1 + K_a P_A}$는 기상 반응물 B의 분압 P_B가 빠져 있다. 표면반응식이 $A \cdot S + B(g)$ 형태이므로 올바르게는 P_B가 곱해져야 한다.
3번 X: $\frac{k_s K_a P_B C_t}{1 + K_a P_A}$는 A의 흡착량을 정하는 P_A가 빠져 있다. 틀린 표현은 $K_a P_B$만 남긴 점이고, 올바르게는 $K_a P_A P_B$가 함께 들어가야 한다.
4번 O: $\frac{k_s K_a P_A P_B C_t}{1 + K_a P_A}$는 A의 흡착평형, 활성점 수지, 속도지배 표면반응식을 모두 반영한 식이므로 옳다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 흡착종 농도 $C_{A \cdot S}$를 바로 $K_a P_A C_t$로 두어 분모 $(1 + K_a P_A)$를 빼먹는 점이다. 또 B는 흡착하지 않더라도 속도지배 표면반응의 반응물이라서 P_B가 반드시 곱해진다는 점을 놓치기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

고체촉매 속도식 문제는 먼저 어떤 종이 흡착하는지 확인하고, 그다음 흡착평형식과 활성점 수지로 표면피복량을 구한 뒤, 마지막에 속도지배단계 속도식에 대입하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

단일 흡착 랑뮤어형 속도식은 흡착종은 분자에, 빈자리 효과는 $(1 + K_a P_A)$ 분모에 들어간다.

NoteBase

문 24. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 $A + 3B \rightarrow 2C$ 액상 반응을 진행한다. C의 생성속도가 $10\text{mol}\text{L}^{-1}\text{s}^{-1}$이고 A의 전환율이 90%일 때, 공간시간[s]은? (단, A의 초기농도는 $10\text{mol}\text{L}^{-1}$이다)

① 0.9

② 1.2

③ 1.5

④ 1.8

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 CSTR 설계식 $\tau = \frac{C_{A0}X_A}{-r_A}$와 화학양론 관계 $r_C = 2(-r_A)$를 연결해 공간시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $r_C = 10 mol L^{-1} s^{-1}$, $X_A = 0.9$, $C_{A0} = 10 mol L^{-1}$
구해야 할 값: 공간시간 τ
주의할 조건: 주어진 속도는 C의 생성속도이므로 A의 소모속도로 바로 쓰지 않고 화학양론으로 환산해야 한다.

사용할 공식

화학양론 관계는 $-r_A = \frac{r_C}{2}$이다.
CSTR 설계식은 $\tau = \frac{C_{A0}X_A}{-r_A}$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 정상상태 액상 CSTR에서 공간시간이 기준 성분 A의 유입농도, 전환율, 그리고 A의 반응속도로 정해지기 때문이다.

계산 과정

1. 반응식 $A + 3B \rightarrow 2C$에서 C는 A 1몰이 반응할 때 2몰 생성되므로 $r_C = 2(-r_A)$이다.
2. 따라서 $-r_A = \frac{10}{2} = 5 mol L^{-1} s^{-1}$이다.
3. A의 전환량은 $C_{A0}X_A = 10 \times 0.9 = 9 mol L^{-1}$이다.
4. 그러므로 $\tau = \frac{10 \times 0.9}{5} = \frac{9}{5} = 1.8 s$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 계산 결과는 $1.8s$이므로 0.9는 맞지 않는다. C의 생성속도 r_C를 그대로 A의 소모속도로 두면 화학양론 계수 2를 빠뜨리게 된다. 올바르게는 공간시간이 $1.8s$이다.
② X: 계산 결과는 $1.8s$이므로 1.2는 맞지 않는다. 전환된 A의 양 $C_{A0}X_A = 9 mol L^{-1}$ 또는 속도 환산을 중간에 잘못 처리한 값이다. 올바르게는 $-r_A = 5 mol L^{-1} s^{-1}$를 써서 $1.8s$가 된다.
③ X: 계산 결과는 $1.8s$이므로 1.5는 맞지 않는다. 반응식의 계수를 섞어 쓰거나 기준 성분을 A로 고정하지 않으면 이런 오차가 생긴다. 올바르게는 A 기준 CSTR 식으로 계산한 $1.8s$이다.
④ O: $r_C = 10 mol L^{-1} s^{-1}$이면 $-r_A = 5 mol L^{-1} s^{-1}$이고, $\tau = \frac{10 \times 0.9}{5} = 1.8s$이므로 옳다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 C의 생성속도 r_C를 A의 소모속도 $-r_A$와 같은 값으로 두는 것이다. 이 문제에서는 반응식의 화학양론 때문에 $r_C = 2(-r_A)$가 먼저 성립한다. 또한 B의 계수 3에 시선을 빼앗겨 A 기준 설계식을 놓치기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

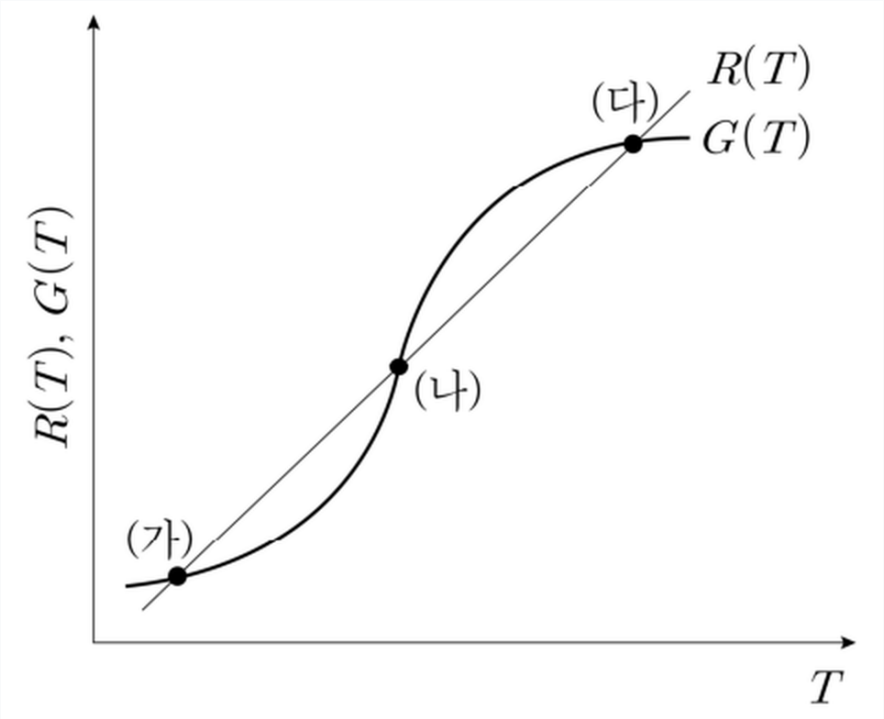
공간시간을 묻는 CSTR 계산형 문제에서는 먼저 어떤 성분 기준의 속도가 주어졌는지 확인하고, 반응식으로 설계식 기준 성분의 속도로 환산한 뒤 $\tau = \frac{C_{A0}X_A}{-r_A}$에 대입하면 된다.

암기 포인트

CSTR 공간시간은 기준 성분의 전환량을 그 성분 반응속도로 나눈 값이며, 다른 성분의 속도는 화학양론으로 먼저 바꾼다.

NoteBase

문 25. 다음은 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 비등온 반응이 진행될 때, 발생열 $G(T)$와 제거열 $R(T)$를 이용하여 다중정상상태의 T에 관한 안정성을 나타낸 그림이다. 안정적인 정상상태로 운전되고 있는 지점만을 (가) ~ (다)에서 모두 고르면? (단, T는 온도이다)



① (가)

② (나)

③ (가), (다)

④ (가), (나), (다)

정답 3번

출제 포인트

비등온 CSTR의 다중정상상태에서 각 교점의 안정성은 발생열 $G(T)$와 제거열 $R(T)$의 교점 근처 기울기 비교로 판단하며, 안정 조건은 $dR/dT > dG/dT$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
(가)는 안정점이지만 안정적인 정상상태가 (가) 하나만 있는 것은 아니다. (가)에서는 온도가 조금 올라가면 $R(T) > G(T)$가 되어 식고, 조금 내려가면 $G(T) > R(T)$가 되어 다시 올라오므로 안정적이다. 틀린 표현은 안정점을 (가)만으로 한정한 부분이다. 올바르게는 안정점이 (가), (다)이다.

② X
(나)에서는 교점에서 발생열 곡선의 기울기가 제거열 직선보다 더 크다. 그래서 온도가 조금만 변해도 $G(T) - R(T)$의 변화가 교란을 더 키워 원래 점으로 돌아오지 못하므로 불안정하다. 틀린 표현은 (나)를 안정점으로 본 부분이다. 올바르게는 (나)는 불안정점이다.

③ O
(가)와 (다)는 모두 교점에서 제거열 증가율이 발생열 증가율보다 크다. 즉 $dR/dT > dG/dT$이므로 작은 온도 교란이 생겨도 다시 원래 평형점으로 복귀한다. 따라서 안정적인 정상상태는 (가), (다)이다.

④ X
(가)와 (다)를 포함한 점은 맞지만, (나)까지 포함한 부분이 틀리다. 중간 교점인 (나)는 불안정점이므로 안정적인 정상상태 목록에 들어가지 않는다. 올바르게는 (가), (다)이다.

오답 포인트

교점이 세 개 보인다고 해서 세 점이 모두 정상적으로 운전 가능한 것은 아니다. 이 문제의 함정은 교점의 존재와 안정성을 같은 것으로 보는 데 있다. 특히 가운데 교점 (나)는 평형 자체는 성립하지만 작은 온도 교란이 생기면 더 멀어지는 불안정점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

각 교점에서 온도를 아주 조금 오른쪽과 왼쪽으로 흔들어 본다고 생각하면 된다. 오른쪽에서 $R(T) > G(T)$, 왼쪽에서 $G(T) > R(T)$가 되어 다시 교점으로 되돌아오면 안정점이고, 그 반대면 불안정점이다. 기울기로는 $dR/dT > dG/dT$이면 안정, $dR/dT < dG/dT$이면 불안정이다.

암기 포인트

비등온 CSTR 안정성은 교점의 개수보다 교점에서 제거열 선의 기울기가 더 큰지가 핵심이다.

NoteBase