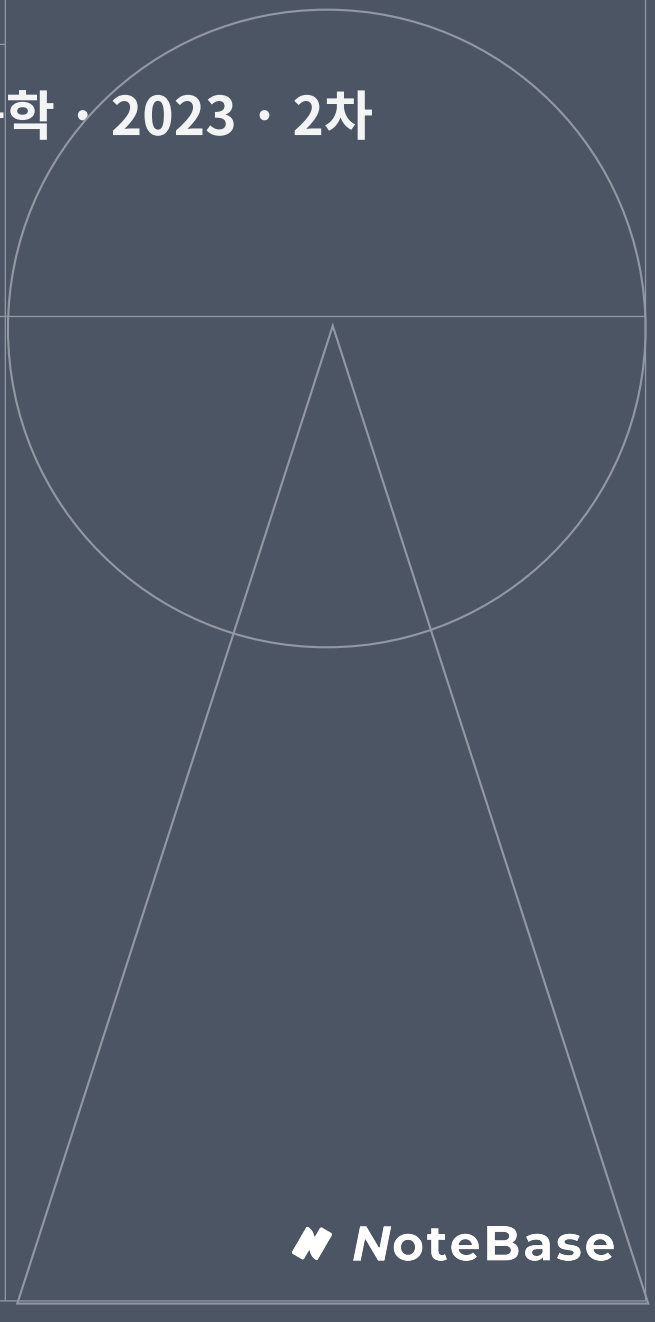
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2023 · 2차



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2023 · 2차

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2023 · 2차

문 1. 다음 분해반응이 기초속도법칙을 따를 때, 반응차수는?

$C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 + H_2$

① 0

② 1

③ 2

④ 3

정답 2번

출제 포인트

기초속도법칙을 따르는 소반응에서 반응차수는 반응물의 화학양론계수를 지수로 써서 구한다는 점을 묻는 문제이다.

핵심 개념

기초속도법칙을 따르는 소반응은 속도식의 지수가 반응물의 화학양론계수와 같다. 이 반응은 반응물 C_2H_6 한 종만 계수 1로 참여하므로 속도식은 $r = kC_2H_6$이고 전체 반응차수는 1이다.

선지별 해설

① X: 0차 반응이면 속도가 C_2H_6 농도와 무관해야 한다. 이 문제는 기초속도법칙을 따르므로 속도식이 $r = kC_2H_6$가 되어 0차가 아니다. 틀린 표현은 0차이다. 올바르게는 1차이다.
② O: 반응물은 C_2H_6 하나이고 화학양론계수가 1이므로 속도식의 지수도 1이다. 따라서 전체 반응차수는 1이다.
③ X: 2차 반응이면 속도식 지수의 합이 2여야 한다. 이 반응은 반응물 항이 C_2H_6 하나뿐이어서 지수 합이 1이다. 틀린 표현은 2차이다. 올바르게는 1차이다.
④ X: 3차 반응이면 반응물 농도 항의 총지수가 3이어야 한다. 이 문제의 기초속도법칙에서는 C_2H_6의 지수만 1로 들어간다. 틀린 표현은 3차이다. 올바르게는 1차이다.

NoteBase

오답 포인트

분해반응이라는 말만 보고 생성물이 두 개이므로 2차라고 착각하거나, 반응식 전체 계수 합을 반응차수로 오해하기 쉽다. 기초속도법칙에서는 생성물 계수는 반응차수 계산에 쓰지 않고 반응물 쪽 계수만 본다.

다시 나오면 이렇게 판단

문제에 기초속도법칙, 소반응, elementary step이 보이면 반응물 쪽 화학양론계수를 그대로 속도식 지수로 옮긴다. 그 지수들의 합을 전체 반응차수로 판단한다.

암기 포인트

기초속도법칙은 반응물 계수 = 속도식 지수, 반응차수는 그 지수의 합이다.

NoteBase

문 2. 화학 반응기에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 공간시간은 반응기 부피를 반응기로 유입되는 부피유량으로 나눈 것이다.

② 회분식반응기는 대규모 조업이나 개발이 완료된 공정, 그리고 연속운전이 용이한 공정에 사용된다.

③ 여러 개의 작은 동일 부피의 연속교반탱크반응기(CSTR)들이 직렬연결된 계로 플러그흐름반응기(PFR)를 근사하여 모델링할 수 있다.

④ 등온 1차 반응의 경우 동일한 반응조건에서 동일한 전환율을 달성하기 위해 필요한 연속교반탱크반응기 부피가 플러그흐름반응기 부피보다 일반적으로 더 크다.

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 공간시간의 정의, 회분식반응기의 적용 범위, CSTR 직렬계의 PFR 근사, 그리고 CSTR와 PFR의 부피 차이를 구별하는 문제이다.

핵심 개념

공간시간은 반응기 체적을 입구 부피유량으로 나눈 시간척도이다.
회분식반응기는 원료를 한 번 투입해 반응시킨 뒤 배출하는 비정상 조업 반응기이며 소규모 생산이나 공정 개발에 적합하다.
여러 개의 CSTR를 직렬로 연결하면 전체 거동이 플러그흐름에 가까워질 수 있다.
등온 1차 반응에서는 같은 전환율을 만들 때 보통 CSTR의 필요 부피가 PFR보다 크다.

NoteBase

선지별 해설

① O
공간시간은 보통 $\tau = V/v_0$로 정의하며, V는 반응기 부피이고 v_0는 반응기로 유입되는 부피유량이다. 선지는 정의를 그대로 설명하고 있어 옳다.

② X
틀린 부분은 "대규모 조업이나 개발이 완료된 공정, 그리고 연속운전이 용이한 공정"이라는 표현이다. 회분식반응기는 실제로는 소규모 생산, 공정 개발 단계, 다품종 소량생산, 연속운전이 불리한 공정에 주로 사용된다. 따라서 선지는 회분식반응기의 적용 대상을 연속식반응기 쪽으로 뒤바꾼 설명이다.

③ O
동일 부피의 CSTR 여러 개를 직렬로 연결하면 각 반응기에서 완전혼합이 일어나더라도 전체적으로는 축 방향 농도 변화가 생겨 PFR 거동에 가까워진다. 따라서 CSTR 직렬계로 PFR를 근사해 모델링할 수 있다.

④ O
등온 1차 반응에서 같은 전환율을 얻을 때 CSTR은 반응기 전체 농도가 출구농도와 같아 평균 반응속도가 낮다. 그래서 농도구배를 활용하는 PFR보다 일반적으로 더 큰 부피가 필요하다.

오답 포인트

회분식반응기의 특징을 연속식반응기의 특징과 바꿔 적으면 쉽게 틀리게 된다. 특히 "대규모 조업", "개발 완료", "연속운전이 용이"라는 말이 나오면 회분식이 아니라 연속식에 더 가까운 설명인지 먼저 봐야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 선지는 먼저 운전 방식과 혼합 상태를 기준으로 나누면 판단이 빨라진다. 회분식은 일괄 투입-반응-배출, CSTR은 완전혼합 연속흐름, PFR은 축방향 농도구배 유지로 정리하면 대부분의 선지를 구분할 수 있다.

암기 포인트

회분식은 소규모·개발용이고, CSTR 직렬은 PFR 근사에 쓰이며, 같은 전환율에서는 보통 $V_{CSTR} > V_{PFR}$이다.

NoteBase

문 3. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 $A \rightarrow B$ 액상 1차 반응을 진행하여 A의 전환율 50%를 얻었다. 동일한 반응조건에서 반응기 부피를 3배로 크게 할 경우, A의 전환율[%]은?

① 65

② 75

③ 85

④ 95

정답 2번

출제 포인트

등온 액상 1차 반응의 CSTR 설계식 $X_A = \frac{k\tau}{1+k\tau}$와 체류시간 τ가 반응기 부피 V에 비례한다는 점을 묻는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 처음 CSTR에서 전환율 $X_A = 0.5$이다.
구해야 할 값: 반응기 부피를 3배로 했을 때의 새 전환율이다.
주의할 조건: 동일한 반응조건이므로 k와 유량은 같고, 부피만 3배가 되어 τ도 3배가 된다.

사용할 공식

CSTR의 액상 1차 반응 설계식은 $X_A = \frac{k\tau}{1+k\tau}$이다.
또한 $\tau = \frac{V}{\nu_0}$이므로 유량 ν_0가 같으면 반응기 부피 V를 3배로 할 때 체류시간 τ도 3배가 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 등온 CSTR, 액상 1차 반응, 전환율 변화가 직접 주어졌기 때문이다.

계산 과정

처음 조건에서
$0.5 = \frac{k\tau}{1+k\tau}$
이므로
$0.5(1 + k\tau) = k\tau$
$0.5 = 0.5k\tau$
$k\tau = 1$
이다.
반응기 부피를 3배로 하면 τ가 3배이므로 새 값은 $k\tau = 3$이다.
따라서 새 전환율은
$X_A = \frac{3}{1+3} = \frac{3}{4} = 0.75$
이므로 75%이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 계산 결과는 65%가 아니라 75%이다. 틀린 표현은 전환율을 65%로 본 점이며, 올바르게는 $k\tau = 3$을 대입해 75%가 된다.
② O: 처음 조건에서 $k\tau = 1$을 구한 뒤 부피 3배로 $k\tau = 3$이 되어 $X_A = \frac{3}{4} = 75\%$가 된다.
③ X: 85%는 CSTR 1차 반응 설계식과 맞지 않는다. 틀린 표현은 전환율을 85%로 본 점이며, 올바르게는 같은 조건의 CSTR에서는 75%가 된다.
④ X: 95%는 체류시간 증가 효과를 과대평가한 값이다. 틀린 표현은 거의 완전전환처럼 95%로 본 점이며, 올바르게는 부피가 3배여도 $X_A = 75\%$이다.

오답 포인트

초기 전환율 50%를 보고 부피를 3배로 하면 전환율도 단순히 크게 뛰어 85%나 95%가 될 것처럼 직감하는 경우가 많다. CSTR의 1차 반응 전환율은 $X_A = \frac{k\tau}{1+k\tau}$ 형태이므로 선형 증가가 아니라는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

CSTR 1차 반응 문제는 먼저 초기 전환율로 $k\tau$를 역산하고, 그다음 부피 변화로 τ가 몇 배가 되는지 반영한 뒤 같은 설계식에 다시 대입해 판단한다.

암기 포인트

CSTR 1차 반응은 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$이며, 부피 배수 변화는 같은 유량에서 τ의 배수 변화와 같다.

NoteBase

문 4. 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 다음 세 개의 비가역 액상 기초반응이 경쟁적으로 진행된다. 반응 1, 반응 2, 반응 3의 반응속도상수 k_1, k_2, k_3가 모두 같을 때, 반응 시작 1시간 후 C 및 D에 대한 B의 총괄선택도 $S_{B/CD}$는? (단, S_B/CD = 생성된 B의 몰 수생성된 C와 D의 몰 수이다)

반응 1: $A \rightarrow B$
반응 2: $A \rightarrow C$
반응 3: $A \rightarrow D$

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

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 동일한 속도상수를 갖는 병렬 1차 반응에서 생성물 분배비와 총괄선택도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 반응 1: A → B
- 반응 2: A → C
- 반응 3: A → D
- 세 반응은 모두 비가역 액상 기초반응이다.
- $k_1 = k_2 = k_3$이다.
- 초기에는 순수한 A만 존재한다.

구해야 할 값:
- S_B/CD=생성된 B의 몰수생성된 C와 D의 몰수이다.

주의할 조건:
- 세 반응이 모두 A로부터 직접 경쟁하는 병렬반응이므로 생성물 비는 각 반응속도 비와 같다.
- 시간 1시간이라는 조건은 $k_1 = k_2 = k_3$이면 생성물 비에는 영향을 주지 않는다.

NoteBase

사용할 공식

병렬 1차 반응에서 순간 생성속도비는
$\frac{r_B}{r_C} = \frac{k_1 C_A}{k_2 C_A} = \frac{k_1}{k_2}, \quad \frac{r_B}{r_D} = \frac{k_1 C_A}{k_3 C_A} = \frac{k_1}{k_3}$
이다.

따라서 $k_1 = k_2 = k_3$이면

$r_B : r_C : r_D = 1 : 1 : 1$

이고, 생성 몰수비도 $N_B : N_C : N_D = 1 : 1 : 1$이 된다.

이 공식을 쓰는 이유:

세 반응이 모두 같은 반응물 A에 대한 기초 병렬반응이므로 각 생성물의 분배는 속도식 비로 바로 판단할 수 있다.

계산 과정

1. 각 반응의 속도는 $r_1 = k_1 C_A, r_2 = k_2 C_A, r_3 = k_3 C_A$이다.
2. $k_1 = k_2 = k_3$이므로 $r_1 : r_2 : r_3 = 1 : 1 : 1$이다.
3. 따라서 생성된 몰수도 $B : C : D = 1 : 1 : 1$이다.
4. 총괄선택도는

$S_{B/CD} = \frac{N_B}{N_C + N_D} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}$

이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
- $\frac{1}{4}$는 생성된 B를 전체 생성물 $B+C+D$와 비교한 값처럼 오해한 경우에 가깝고, 문제는 $C+D$에 대한 B의 비를 묻는다.
- 틀린 표현은 '총괄선택도가 $\frac{1}{4}$'라는 값이다. 올바르게는 $S_{B/CD}=\frac{1}{2}$이다.

② X
- $\frac{1}{3}$은 $B:C:D=1:1:1$이라는 비 자체를 선택도로 잘못 옮긴 값이다. 선택도는 B와 $C+D$의 비이므로 분모가 2가 된다.
- 틀린 표현은 '총괄선택도가 $\frac{1}{3}$'라는 값이다. 올바르게는 $\frac{1}{1+1}=\frac{1}{2}$이다.

③ O
- 생성 몰수비가 $B:C:D=1:1:1$이므로 B 1몰에 대해 $C+D$는 2몰이다.
- 따라서 $S_{B/CD}=\frac{1}{2}$가 되어 옳다.

④ X
- $\frac{2}{3}$는 분자와 분모를 반대로 해석하거나 $C+D$를 1, B를 2로 잘못 잡은 경우의 오답이다.
- 틀린 표현은 '총괄선택도가 $\frac{2}{3}$'라는 값이다. 올바르게는 B가 1, $C+D$가 2이므로 $\frac{1}{2}$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 $B:C:D=1:1:1$이라는 생성물 비를 바로 선택도 값으로 착각하는 데 있다. 총괄선택도는 B 대 C와 D의 합의 비이므로 분모를 $C+D$로 묶어 2로 잡아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응 선택도 문제는 먼저 속도식 비를 본다. 반응차수와 반응물이 같으면 생성물 분배비는 속도상수 비와 같고, 이후 문제에서 요구한 분자와 분모를 정확히 다시 대입해 선택도를 계산하면 된다.

암기 포인트

같은 A의 병렬 1차 반응에서 k가 같으면 생성물 몰수비도 같고, 선택도는 '원하는 생성물 대 나머지 생성물 합'으로 계산된다.

NoteBase

문 5. 등온 회분식반응기에서 $A \rightarrow B$ 액상 반응을 진행하여 반응차수와 반응속도상수를 결정하려고 한다. A의 반감기는 A의 초기농도에 반비례하며, A의 초기농도가 $10\text{mol}\text{L}^{-1}$일 때 반감기가 10분이다. 이 반응의 반응차수와 반응속도상수를 바르게 연결한 것은?

① 반응차수: 1, 반응속도상수: 0.01min^{-1}

② 반응차수: 1, 반응속도상수: 0.1min^{-1}

③ 반응차수: 2, 반응속도상수: $0.01\text{Lmol}^{-1}\text{min}^{-1}$

④ 반응차수: 2, 반응속도상수: $0.1\text{Lmol}^{-1}\text{min}^{-1}$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 반감기의 초기농도 의존성으로 반응차수를 판별하고, 그 반감기 식으로 속도상수 k를 계산할 수 있는지를 묻는다.

조건 정리

주어진 값은 $t_{1/2}$가 초기농도 C_{A0}에 반비례한다는 점과, $C_{A0} = 10 mol L^{-1}$일 때 $t_{1/2} = 10 min$이라는 점이다.
구해야 할 값은 반응차수와 속도상수이다.
주의할 조건은 액상 등온 회분식반응기에서 반감기 식을 차수별로 구분해야 한다는 점이다.

사용할 공식

2차 반응의 반감기 식은 $t_{1/2} = \frac{1}{kC_{A0}}$이다.
1차 반응은 $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$로 초기농도와 무관하므로, 반감기가 초기농도에 반비례한다는 조건과 맞지 않는다. 따라서 이 문제는 2차 반응 식을 써야 한다.

계산 과정

반감기 $t_{1/2}$가 C_{A0}에 반비례하므로 반응차수는 2이다.
2차 반응 반감기 식 $t_{1/2} = \frac{1}{kC_{A0}}$에 $t_{1/2} = 10 min, C_{A0} = 10 mol L^{-1}$를 대입하면 $10 = \frac{1}{k \times 10}$이다.
따라서 $100k = 1$이고, $k = 0.01 L mol^{-1} min^{-1}$이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: 반응차수를 1로 본 것이 틀리다. 1차 반응의 반감기는 초기농도와 무관하므로, 반감기가 초기농도에 반비례한다는 조건을 설명하지 못한다. 올바르게는 반응차수는 2이다.
2번 X: 1번과 같이 반응차수를 1로 본 것이 먼저 틀리다. 속도상수 $0.1min^{-1}$도 1차 반응 가정에서만 의미가 있으므로 이 문제 조건과 맞지 않는다. 올바르게는 2차 반응으로 판단해야 한다.
3번 O: 반응차수 2는 반감기와 초기농도의 반비례 관계와 일치한다. 또 $k = \frac{1}{t_{1/2}C_{A0}} = \frac{1}{10 \times 10} = 0.01Lmol^{-1}min^{-1}$이므로 수치와 단위도 맞다.
4번 X: 반응차수 2는 맞지만 속도상수 값 $0.1Lmol^{-1}min^{-1}$이 틀리다. 올바르게는 $k = 0.01Lmol^{-1}min^{-1}$이다. 0.1은 $10 \times 10 = 100$ 계산을 잘못 처리하면 나오는 오답이다.

오답 포인트

반감기 식을 외형만 보고 대입하면 1차와 2차를 혼동하기 쉽다. 이 문제의 함정은 먼저 초기농도 의존성으로 차수를 판별해야 하는데, 이를 건너뛰고 수치만 맞추려는 데 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

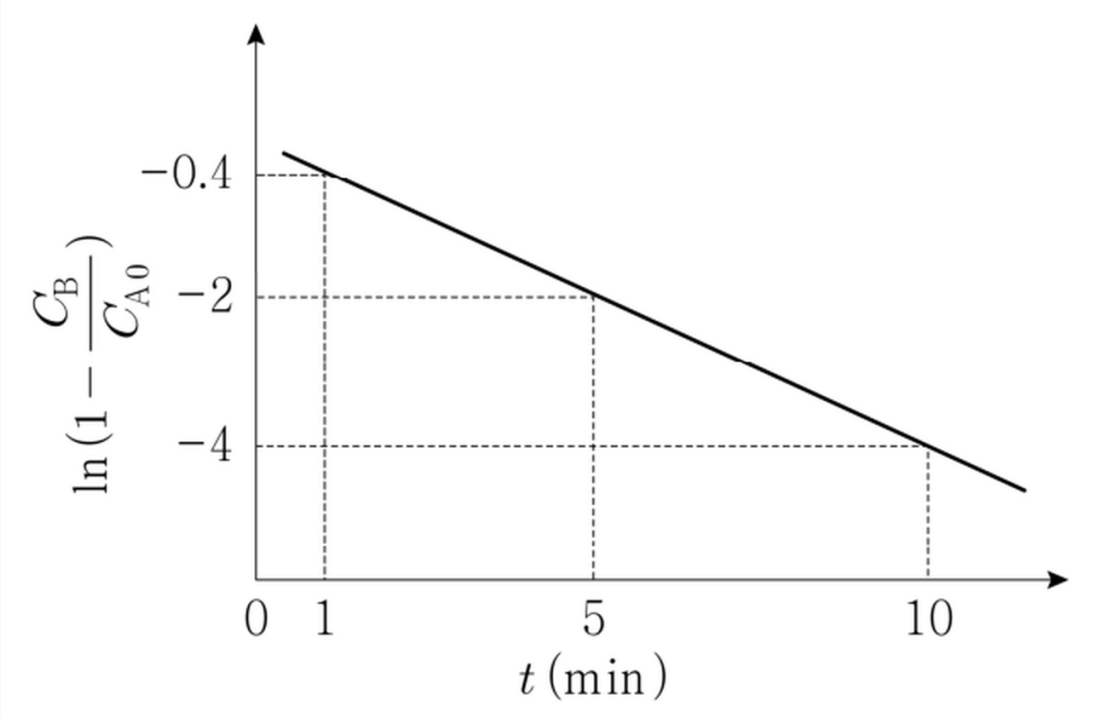
반감기 문제가 나오면 먼저 $t_{1/2}$가 초기농도와 무관한지, 반비례하는지부터 본다. 무관하면 1차, 반비례하면 2차로 판단한 뒤 해당 반감기 식에 수치를 대입하면 된다.

암기 포인트

1차 반응은 반감기가 일정하고, 2차 반응은 $t_{1/2} \propto \frac{1}{C_{A0}}$이다.

NoteBase

문 6. 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 액상 기초반응을 진행하여 다음 그래프를 얻었다. 동일한 반응조건에서 $10 L min^{-1}$의 A를 연속교반탱크반응기(CSTR)에 공급하여 반응을 진행할 경우, A의 전환율 60 %를 얻기 위해 필요한 CSTR 부피[L]는? (단, t는 반응시간, C_{A0}는 A의 초기농도, C_B는 t에서 B의 농도이다)



① 32.5

② 37.5

③ 42.5

④ 45

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 회분반응기 그래프에서 1차 반응속도상수 k를 구한 뒤, 이를 CSTR 설계식에 넣어 전환율 60%에 필요한 부피를 계산하는 문제이다.

조건 정리

- 그래프의 세로축은 $\ln\left(1-\frac{C_B}{C_{A0}}\right)$이다.
- 순수한 A로 시작한 $A \rightarrow B$ 반응이므로 $C_A = C_{A0} - C_B$이고, $1-\frac{C_B}{C_{A0}} = \frac{C_A}{C_{A0}}$이다.
- 따라서 그래프는 $\ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right) = -kt$를 뜻한다.
- 유량은 $10 L/min$, 목표 전환율은 $X = 0.6$이다.

NoteBase

사용할 공식

$\ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right) = -kt$

$-r_A = kC_A$

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

이 공식을 쓰는 이유는 주어진 그래프가 회분반응기에서의 1차 반응 직선식이고, 묻는 값은 동일 반응조건의 CSTR 부피이기 때문이다.

계산 과정

1. 그래프의 점 $(t = 5, y = -2)$를 쓰면 기울기는 $-2/5 = -0.4$이므로 $k = 0.4min^{-1}$이다.
2. 목표 전환율이 $X = 0.6$이므로 출구 농도는 $C_A = C_{A0}(1 - X) = 0.4C_{A0}$이다.
3. 출구에서의 반응속도는 $-r_A = kC_A = (0.4)(0.4C_{A0}) = 0.16C_{A0}$이다.
4. 유입 몰유량은 $F_{A0} = v_0C_{A0} = (10)C_{A0}$이다.
5. CSTR 설계식에 대입하면

$V = \frac{F_{A0}X}{-r_A} = \frac{(10C_{A0})(0.6)}{0.16C_{A0}} = 37.5L$

따라서 필요한 CSTR 부피는 37.5 L이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
- 필요한 CSTR 부피를 32.5 L로 본 값이다.
- 계산 결과는 $37.5L$이므로 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 "필요 부피가 32.5 L이다"이고, 올바르게는 "필요 부피가 37.5 L이다"이다.

② O
- $k = 0.4min^{-1}$, $X = 0.6$, $C_A = 0.4C_{A0}$를 적용하면 $V = 37.5L$가 된다.
- 따라서 37.5 L는 계산값과 일치하므로 옳다.

③ X
- 필요한 CSTR 부피를 42.5 L로 본 값이다.
- 출구농도를 $C_A = 0.4C_{A0}$로 두고 설계식을 계산하면 $42.5L$가 아니라 $37.5L$가 나온다.
- 틀린 표현은 "필요 부피가 42.5 L이다"이고, 올바르게는 "필요 부피가 37.5 L이다"이다.

④ X
- 필요한 CSTR 부피를 45 L로 본 값이다.
- 이 문제의 반응속도는 CSTR 출구조건인 $C_A = 0.4C_{A0}$에서 평가해야 하므로 결과는 $45L$가 아니라 $37.5L$이다.
- 틀린 표현은 "필요 부피가 45 L이다"이고, 올바르게는 "필요 부피가 37.5 L이다"이다.

오답 포인트

그래프의 세로축을 바로 $\ln(C_A/C_{A0})$로 바꾸는 연결을 놓치거나, CSTR 반응속도를 입구농도나 평균농도로 계산하면 오답이 된다. 이 문항의 핵심 함정은 회분반응기 그래프로 k를 구한 뒤 CSTR에서는 반드시 출구농도에서 $-r_A$를 평가해야 한다는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분반응기 그래프가 주어지면 먼저 직선식에서 k를 읽고, 연속반응기 문제로 바뀌면 목표 전환율로 출구농도를 구한 다음 CSTR 설계식 $V = F_{A0}X/(-r_A)$에 넣는 순서로 판단한다.

암기 포인트

1차 회분반응의 직선 그래프는 기울기 $= -k$이고, CSTR는 항상 출구농도로 반응속도를 계산한다.

NoteBase

문 7. 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 $A \rightarrow B$ 기상 2차 반응을 T_{PFR}에서 진행하여 전환율 X_A를 얻었다. 이 반응을 동일 부피의 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 진행하여 동일한 전환율을 얻기 위해 필요한 반응온도를 T_{CSTR}이라 할 때, 옳은 것은? (단, 반응속도상수는 아레니우스(Arrhenius) 식을 따르며, E_a는 활성화에너지, R은 기체상수이며, 반응기 종류와 반응온도 이외의 다른 반응조건은 동일하다)

① $\frac{R}{E_a}(T_{\mathrm{CSTR}} - T_{\mathrm{PFR}}) = \ln \frac{1}{1-X_A}$
② $\frac{R}{E_a}(T_{\mathrm{CSTR}} - T_{\mathrm{PFR}}) = \ln(1-X_A)$
③ $\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{\mathrm{CSTR}}} - \frac{1}{T_{\mathrm{PFR}}}\right) = \ln \frac{1}{1-X_A}$
④ $\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{\mathrm{CSTR}}} - \frac{1}{T_{\mathrm{PFR}}}\right) = \ln(1-X_A)$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 같은 부피에서 같은 전환율을 만들 때 2차 반응의 PFR 설계식과 CSTR 설계식을 비교하고, 그에 따른 속도상수 비를 Arrhenius 식으로 온도 관계식에 연결하는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건은 기상 2차 반응 $A \rightarrow B$, PFR 온도 T_{PFR}, CSTR 온도 T_{CSTR}, 같은 반응기 부피, 같은 전환율 X_A이다.
구해야 할 값은 같은 X_A를 얻기 위한 T_{CSTR}와 T_{PFR}의 관계식이다.
주의할 조건은 PFR과 CSTR의 성능 차이 때문에 같은 전환율이면 CSTR 쪽이 더 큰 속도상수 k를 필요로 한다는 점과, Arrhenius 식은 온도 자체가 아니라 $1/T$로 연결된다는 점이다.

사용할 공식

PFR 설계식은 $V = \frac{F_{A0}}{k_{PFR}C_{A0}^2}\int_{F_{A0}0}^{X_A}\frac{dX_A}{(1-X_A)^2} = \frac{F_{A0}}{k_{PFR}C_{A0}^2}\frac{X_A}{1-X_A}$ 이다.
CSTR 설계식은 $V = \frac{F_{A0}X_A}{k_{CSTR}C_{A0}^2(1-X_A)^2}$ 이다.
Arrhenius 식은 $k = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 반응기 종류에 따른 설계식 차이와 반응온도에 따른 속도상수 변화를 함께 묻고 있기 때문이다.

계산 과정

1. 같은 부피와 같은 전환율이므로 PFR과 CSTR의 설계식을 같게 둔다.
$\frac{F_{A0}}{k_{PFR}C_{A0}^2}\frac{X_A}{1-X_A} = \frac{F_{A0}X_A}{k_{CSTR}C_{A0}^2(1-X_A)^2}$
2. 공통항을 약분하면 $\frac{1}{k_{PFR}(1-X_A)} = \frac{1}{k_{CSTR}(1-X_A)^2}$ 이고, 따라서 $k_{CSTR} = \frac{k_{PFR}}{1-X_A}$ 이다.
3. 따라서 속도상수 비는 $\frac{k_{CSTR}}{k_{PFR}} = \frac{1}{1-X_A}$ 이다.
4. Arrhenius 식을 비로 쓰면 $\ln\left(\frac{k_{CSTR}}{k_{PFR}}\right) = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{CSTR}} - \frac{1}{T_{PFR}}\right)$ 이다.
5. 이를 대입하면 $\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right) = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{CSTR}} - \frac{1}{T_{PFR}}\right)$ 이고, 정리하면 $\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{CSTR}} - \frac{1}{T_{PFR}}\right) = \ln(1-X_A)$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: Arrhenius 식은 $T_{CSTR} - T_{PFR}$ 같은 온도차로 정리되지 않고 $(1/T_{CSTR} - 1/T_{PFR})$ 형태로 정리된다. 틀린 표현은 $\frac{R}{E_a}(T_{CSTR} - T_{PFR})$ 이고, 올바르게는 $\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{CSTR}} - \frac{1}{T_{PFR}}\right)$ 이다.
② X: ①과 마찬가지로 온도차를 그대로 쓰는 형태가 틀렸다. 또한 올바른 최종식은 $\ln(1 - X_A)$와 연결된다. 틀린 표현은 $\frac{R}{E_a}(T_{CSTR} - T_{PFR}) = \ln(1 - X_A)$ 이고, 올바르게는 $\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{CSTR}} - \frac{1}{T_{PFR}}\right) = \ln(1 - X_A)$ 이다.
③ X: 좌변이 $\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{CSTR}} - \frac{1}{T_{PFR}}\right)$이면 우변은 $\ln(1 - X_A)$가 되어야 한다. $\ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right)$를 쓰려면 부호가 반대로 바뀌어야 한다. 틀린 표현은 우변의 부호이고, 올바르게는 $\ln(1 - X_A)$ 이다.
④ O: 같은 부피에서 같은 전환율을 만들려면 2차 반응에서는 CSTR이 PFR보다 더 큰 k가 필요하므로 $k_{CSTR}/k_{PFR} = 1/(1 - X_A)$ 이다. 이것을 Arrhenius 식으로 바꾸면 $\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{CSTR}} - \frac{1}{T_{PFR}}\right) = \ln(1 - X_A)$가 되어 ④가 맞다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 두 가지이다. 첫째, PFR과 CSTR의 성능 차이로부터 $k_{CSTR} > k_{PFR}$가 나온다는 점을 놓치고 부호를 반대로 쓰는 경우이다. 둘째, Arrhenius 식을 쓸 때 온도차 $T_{CSTR} - T_{PFR}$로 착각하는 경우이다. 이 문항은 ①, ②에서 온도차 형태를 미끼로 두고, ③에서 로그항의 부호를 바꿔 헷갈리게 만든 문제이다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 비교 계산형은 먼저 각 반응기의 설계식으로 k의 비를 구하고, 그다음에만 Arrhenius 식으로 온도식을 만든다. Arrhenius 식이 나오면 최종형은 항상 T가 아니라 $1/T$ 차이로 정리되는지 확인하면 된다.

암기 포인트

2차 반응에서 같은 V, 같은 X_A이면 CSTR이 더 불리하므로 $k_{CSTR} = k_{PFR}/(1 - X_A)$이고, Arrhenius 정리는 T가 아니라 $1/T$로 본다.

NoteBase

문 8. 변용 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow 2B$ 기상 1차 반응을 일정 온도 및 압력에서 진행하여, 반응 시작 10분 후 반응기 부피가 50 % 증가하였다. 이 반응의 반응속도상수 $\min^{-1}$는? (단, $\ln 2 = 0.7$이다)

① 0.07

② 0.7

③ 1.4

④ 7.0

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 일정 온도·압력의 변용 회분식반응기에서 부피 증가율로 전환율 X를 구한 뒤, 기상 1차 반응의 회분식 속도식으로 k를 계산하는 문제이다.

조건 정리

- 주어진 값: 순수한 A, 반응식 $A \rightarrow 2B$, 기상 1차 반응, 일정 온도·압력, $t = 10min$, 반응기 부피 50% 증가
- 구해야 할 값: 반응속도상수 $k[min^{-1}]$
- 주의할 조건: 일정 온도·압력에서는 기체 총몰수 증가율과 부피 증가율이 같다.

사용할 공식

$\frac{V}{V_0} = \frac{N_T}{N_{T0}} = 1 + X$

$X = 1 - e^{-kt}$

이 공식을 쓰는 이유: 순수한 A가 $A \rightarrow 2B$로 반응하면 총몰수는 $1 - X + 2X = 1 + X$가 되므로 부피 증가분으로 전환율을 바로 구할 수 있다. 또 1차 반응의 회분식 물질수지는 $dN_A/dt = -kN_A$이므로 $X = 1 - e^{-kt}$를 사용한다.

계산 과정

1. 부피가 50% 증가했으므로 $V/V_0 = 1.5$이다.
2. 따라서 $1 + X = 1.5$이므로 $X = 0.5$이다.
3. 1차 반응식에 대입하면 $0.5 = 1 - e^{-10k}$이고, 따라서 $e^{-10k} = 0.5$이다.
4. 양변에 자연로그를 취하면 $10k = \ln 2$이므로 $k = \ln 2/10 = 0.7/10 = 0.07min^{-1}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① O
- 계산 결과가 $0.07 min^{-1}$이므로 맞다.
- 부피 증가 50%를 먼저 전환율 $X = 0.5$로 바꾸고, 그다음 $X = 1 - e^{-kt}$에 넣으면 바로 확인된다.

② X
- $0.7 min^{-1}$이면 10분 후 $X = 1 - e^{-7}$이 되어 거의 완전반응 수준이므로, 부피가 50%만 증가했다는 조건과 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 속도상수 값 0.7이고, 올바르게는 $0.07 min^{-1}$이다.

③ X
- $1.4 min^{-1}$이면 10분 후 $X = 1 - e^{-14}$가 되어 역시 $X = 0.5$와 전혀 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 속도상수 값 1.4이고, 올바르게는 $0.07 min^{-1}$이다.

④ X
- $7.0 min^{-1}$은 차원상 너무 큰 값이며, 이런 값이면 반응 초기에 거의 모두 전환되어 부피 증가가 50%에 머물 수 없다.
- 틀린 표현은 속도상수 값 7.0이고, 올바르게는 $0.07 min^{-1}$이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 반응식의 화학양론으로 부피가 늘어난다는 사실만 보고 속도상수에 계수 2를 잘못 곱하는 데 있다. 먼저 일정 온도·압력에서 $V/V_0 = 1 + X$로 전환율을 구한 뒤, 1차 반응식에 따로 넣어야 한다. 또 $\ln 2 = 0.7$을 구한 뒤 시간을 나누지 않으면 ②처럼 한 자리 큰 오답이 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

기상 회분반응기에서 일정 온도·압력 조건이 보이면 먼저 부피 변화로 전환율 X를 구한다. 그다음 반응차수에 맞는 회분식 적분형을 적용하고, 마지막에 단위가 min^{-1}인지 검산하면 된다.

암기 포인트

순수 A의 $A \rightarrow 2B$에서 일정 온도·압력이라면 $V/V_0 = 1 + X$이다. 1차 회분식은 $X = 1 - e^{-kt}$이므로, $X = 0.5$이면 $k = \ln 2/t$이다.

NoteBase

문 9. $200L$ **정용 등온 회분식반응기를 이용하여 초기조건** $500K$**,** $80atm$**에서** $A \rightarrow B + C$ **기상 2차 반응을 진행한다. 초기 반응물이 A 75 %와 비활성기체 25 %로 구성되어 있을 때, A의 전환율 80 %를 얻기 위해 필요한 반응시간**$[min]$**은? (단, 기체는 모두 이상기체이고, 반응속도상수는** $0.1Lmol^{-1}min^{-1}$**, 기체상수는** $0.08atmLmol^{-1}K^{-1}$**이다)**

① $\frac{20}{3}$
② $\frac{40}{3}$
③ $\frac{60}{3}$
④ $\frac{80}{3}$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 정적 회분식반응기에서 기상 2차 반응의 적분식과 초기 농도 C_{A0} 계산을 연결해 반응시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

반응기 부피는 $200L$로 일정하다.
초기 전체 농도는 $C_{T0} = \frac{P}{RT} = \frac{80}{0.08 \times 500} = 2mol/L$이다.
초기 A의 몰분율은 0.75이므로 $C_{A0} = 0.75 \times 2 = 1.5mol/L$이다.
구해야 할 값은 전환율 $X = 0.8$에 도달하는 시간이다.

사용할 공식

정적 회분식반응기에서 A의 2차 반응은 $-r_A = kC_A^2$ 이고, 적분하면 $t = \frac{1}{k}\left(\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}}\right)$ 이다.
또한 정적계에서는 부피가 일정하므로 $C_A = C_{A0}(1 - X)$ 를 바로 쓸 수 있다.
이 문제는 반응속도식이 농도만으로 표현되고 반응기 부피가 일정하므로 이 적분식을 적용하는 상황이다.

계산 과정

전환율이 0.8이면 $C_A = C_{A0}(1 - X) = 1.5 \times 0.2 = 0.3mol/L$이다.
따라서
$t = \frac{1}{0.1}\left(\frac{1}{0.3} - \frac{1}{1.5}\right) = 10\left(\frac{10}{3} - \frac{2}{3}\right) = 10 \times \frac{8}{3} = \frac{80}{3}min$
이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: $\frac{20}{3}min$은 2차 반응 적분식을 적용한 계산값과 맞지 않는다. 올바른 값은 $\frac{80}{3}min$이다.
2번 X: $\frac{40}{3}min$은 초기 A 농도와 전환율 0.8을 반영한 결과보다 작다. 올바르게는 $t=\frac{80}{3}min$이다.
3번 X: $\frac{60}{3}min$도 $C_A=0.3mol/L$를 대입한 적분 결과와 일치하지 않는다. 올바른 값은 $\frac{80}{3}min$이다.
4번 O: $C_{A0}=1.5mol/L$, $C_A=0.3mol/L$를 넣으면 $t=\frac{80}{3}min$이 되므로 옳다.

오답 포인트

비활성기체 25% 때문에 전체 몰수 변화를 복잡하게 추적해야 한다고 오해하기 쉽지만, 이 문제는 정적계이므로 시간 계산에는 먼저 C_{A0}만 정확히 구하면 된다. 가장 흔한 실수는 전체 초기농도 $2mol/L$를 그대로 C_{A0}로 쓰거나, 2차 반응 적분식 대신 1차 반응식처럼 처리하는 경우이다.

다시 나오면 이렇게 판단

정적 회분식 기상반응 시간 문제는 먼저 $\frac{P}{RT}$로 전체 초기농도를 구하고, 몰분율을 곱해 C_{A0}를 만든다. 그다음 반응차수에 맞는 적분식을 고른 뒤 $C_A=C_{A0}(1-X)$를 넣어 시간을 계산하면 된다.

암기 포인트

정적 회분식 2차 반응은 $t=\frac{1}{k}\left(\frac{1}{C_A}-\frac{1}{C_{A0}}\right)$, 그리고 $C_A=C_{A0}(1-X)$의 조합으로 푼다.

NoteBase

문 10. 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 $A + 2B \rightarrow C$ 기상반응을 진행한다. 반응물 A와 B는 동일한 농도로 8 atm, 1,000 K에서 반응기로 유입되며, 반응기 입구에서 전체 반응물의 부피 유량은 $5.0 L min^{-1}$이다. 제한반응물(limiting reactant)의 전환율이 80 %일 때, 반응기 출구에서 A와 C의 몰유량$[mol min^{-1}]$을 바르게 연결한 것은? (단, 기체는 모두 이상기체이고, 기체상수는 $0.08 atm L mol^{-1} K^{-1}$이다)

① A의 몰유량: 0.10, C의 몰유량: 0.10

② A의 몰유량: 0.10, C의 몰유량: 0.15

③ A의 몰유량: 0.15, C의 몰유량: 0.10

④ A의 몰유량: 0.15, C의 몰유량: 0.15

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 이상기체식으로 입구 총 몰유량을 구하고, 제한반응물 B의 전환율 80%를 반응식 $A + 2B \rightarrow C$에 맞춰 출구 몰유량으로 바꾸는 문제이다.

조건 정리

반응식은 $A + 2B \rightarrow C$이다.
입구 총 몰유량은 $F_{T0} = Pv_0/RT = (8 \times 5.0)/(0.08 \times 1000) = 0.50$이다.
A와 B는 동일 농도이므로 $F_{A0} = F_{B0} = 0.25$이다.
필요한 화학양론 비는 $A : B = 1 : 2$인데 실제 공급비는 $1 : 1$이므로 제한반응물은 B이다.
B의 전환율은 $X_B = 0.80$이다.

사용할 공식

$F_{T0} = \frac{Pv_0}{RT}$
$F_B = F_{B0}(1 - X_B), \quad F_A = F_{A0} - \frac{1}{2}F_{B0}X_B, \quad F_C = \frac{1}{2}F_{B0}X_B$
이 공식을 쓰는 이유:
주어진 압력, 온도, 부피 유량으로 먼저 입구 총 몰유량을 구해야 하고, 제한반응물 B의 소비량이 정해지면 반응계수 비로 A 소비량과 C 생성량을 바로 연결할 수 있기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 이상기체식으로 입구 총 몰유량을 구하면 $F_{T0} = 0.50$이다.
2. A와 B가 동일 농도이므로 $F_{A0} = F_{B0} = 0.25$이다.
3. 반응식에서 같은 초기 몰수 공급이면 B가 제한반응물이다. 필요한 비는 $A : B = 1 : 2$인데 실제 공급비는 $1 : 1$이기 때문이다.
4. B 전환율이 80%이므로 B 소비량은 $0.25 \times 0.80 = 0.20$이다.
5. 반응식 $A + 2B \rightarrow C$에서 B를 2몰 소비할 때 A 1몰이 소비되고 C 1몰이 생성되므로, A 소비량과 C 생성량은 각각 $0.20/2 = 0.10$이다.
6. 따라서 출구 몰유량은 $F_A = 0.25 - 0.10 = 0.15$, $F_C = 0.10$이고 단위는 $molmin^{-1}$이다.

선지 판단

1번 X: C의 몰유량 0.10은 맞지만 A의 몰유량을 0.10으로 둔 부분이 틀리다. B 소비량 0.20을 A 소비량으로 그대로 놓은 오류이고, 올바르게는 A 소비량이 0.10이므로 출구 A는 0.15이다.
2번 X: A의 몰유량 0.10도 틀리고 C의 몰유량 0.15도 틀리다. 올바르게는 $F_A = 0.15$, $F_C = 0.10$이다.
3번 O: 계산 결과 출구 A는 0.15, C는 0.10이므로 정답이다.
4번 X: A의 몰유량 0.15는 맞지만 C의 몰유량을 0.15로 둔 부분이 틀리다. C 생성량은 B 소비량과 같지 않고 B 소비량의 절반이므로 올바르게는 0.10이다.

오답 포인트

제한반응물의 전환율을 모든 성분의 전환율처럼 그대로 적용하면 틀린다. 이 문항은 B가 제한반응물이라는 점과, 계수 2 때문에 A 소비량과 C 생성량이 B 소비량의 절반이라는 점을 분리해서 봐야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

기상 반응 계산은 전체 몰유량 계산 → 각 성분의 입구 몰유량 분배 → 제한반응물 판정 → 전환율로 제한반응물 소비량 계산 → 화학양론으로 다른 성분 몰유량 환산 순서로 판단한다.

암기 포인트

전환율은 제한반응물 기준이고, 다른 성분의 변화량은 반응계수 비로 환산한다.

NoteBase

문 11. 아레니우스(Arrhenius) 식 $k(T) = Ae^{-E_a/RT}$에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, k는 반응속도상수, T는 절대온도, A는 빈도인자, E_a는 활성화에너지, R은 기체상수이다)

① 활성화에너지는 반응이 일어나기 위해서 반응물들이 반드시 넘어야 하는 에너지 장벽이다.

② 반응온도가 높을수록 반응속도상수는 증가한다.

③ 반응속도상수는 반응물 농도의 함수이다.

④ $\ln k$를 $1/T$에 대해 도시하여, 기울기로부터 활성화에너지를 구할 수 있다.

정답 3번

출제 포인트

이 문항은 아레니우스 식에서 반응속도상수 k가 무엇의 함수인지와 $\ln k$-$1/T$ 직선화 해석을 구분하는지를 묻는 문제이다.

핵심 개념

반응속도상수 k는 주어진 반응의 고유한 속도 척도로서 아레니우스 식에 따르면 주로 온도 T의 함수이다.
반응속도는 보통 $r = kC_A^n$처럼 농도의 영향을 받지만, 농도항은 반응속도식에 들어가고 k 자체는 농도와 구분된다.
아레니우스 식을 로그화하면 $\ln k = \ln A - (E_a/R)(1/T)$가 되므로, $\ln k$를 $1/T$에 대해 그리면 기울기는 $-E_a/R$이다.

선지별 해설

① O
활성화에너지 E_a는 반응물이 생성물로 가기 전에 넘어야 하는 최소 에너지 장벽을 뜻하므로 옳은 설명이다.

② O
아레니우스 식 $k = Ae^{-E_a/RT}$에서 T가 커지면 지수항의 값이 커져 k가 증가하므로 옳은 설명이다.

③ X
틀린 부분은 \"반응속도상수는 반응물 농도의 함수\"라는 표현이다.
올바르게는 반응속도가 반응물 농도의 함수이고, 반응속도상수 k는 주로 온도의 함수이다.

④ O
$\ln k = \ln A - (E_a/R)(1/T)$이므로 $\ln k$ 대 $1/T$ 그래프의 기울기에서 $-E_a/R$를 얻고, 그로부터 활성화에너지 E_a를 구할 수 있다.

NoteBase

오답 포인트

반응속도식의 농도항과 반응속도상수 k를 섞어 생각하면 ③에 속기 쉽다. 이 문항은 \"속도는 농도의 영향을 받는다\"는 사실을 \"속도상수도 농도의 함수이다\"로 바꿔 놓은 함정을 사용하였다.

다시 나오면 이렇게 판단

속도식에서 농도는 반응속도 r에 붙는 항인지, 아니면 속도상수 k 자체를 설명하는지 먼저 분리해서 본다. 아레니우스 식이 제시되면 k는 온도와 활성화에너지의 관계로 판단하고, 농도는 별도의 반응속도식 항으로 처리한다.

암기 포인트

농도는 반응속도를 바꾸고, 온도는 반응속도상수 k를 바꾼다. 아레니우스 플롯의 기울기는 $-E_a/R$이다.

NoteBase

문 12. 정상상태 플러그흐름반응기(PFR)에서 $A \rightarrow B$ 반응을 진행할 때, A에 관한 물수지식으로 옳은 것은? (단, F_{A0}는 반응기로 공급되는 A의 몰유량, X_A는 A의 전환율, V는 반응기 부피, $-r_A$는 A의 소멸속도, t는 반응시간이다)

① $-r_A = F_{A0}\frac{dX_A}{dV}$
② $-r_A = \frac{F_{A0}}{V}dX_A$
③ $-r_A = \frac{F_{A0}}{V}\frac{dX_A}{dt}$
④ $-r_A = VF_{A0}\frac{dX_A}{dt}$

정답 1번

출제 포인트

정상상태 플러그흐름반응기의 설계식과 전환율 정의를 연결하여 $-r_A$와 X_A, V의 미분관계를 쓰는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건은 정상상태 PFR, 반응 $A \rightarrow B$, 공급 몰유량 F_{A0}, 전환율 X_A, 반응기 부피 V, 소멸속도 $-r_A$이다.
구해야 할 식은 A 성분 물수지식이다.
정상상태 PFR에서는 시간 t가 아니라 반응기 축 방향의 부피 좌표 V에 대해 설계식을 쓴다.

사용할 공식

$F_{A0}dX_A = -r_A dV$
따라서
$-r_A = F_{A0}\frac{dX_A}{dV}$
이 공식을 쓰는 이유는 PFR의 미소 부피 dV에 대한 성분 A의 정상상태 물수지가 바로 이 형태이기 때문이다.

계산 과정

1. 전환율 정의에서 $F_A = F_{A0}(1 - X_A)$이다.
2. 이를 미분하면 $dF_A = -F_{A0}dX_A$이므로 $-dF_A = F_{A0}dX_A$이다.
3. 정상상태 PFR의 설계식 $\frac{dF_A}{dV} = r_A$를 쓰면 $-\frac{dF_A}{dV} = -r_A$이다.
4. 두 식을 결합하면 $-r_A = F_{A0}\frac{dX_A}{dV}$가 된다.

NoteBase

선지별 해설

① O: $-r_A = F_{A0}\frac{dX_A}{dV}$는 정상상태 PFR의 기본 설계식과 정확히 일치한다.
② X: $-r_A = \frac{F_{A0}}{V}dX_A$는 미분변수 dV가 빠져 있어 식의 형태와 차원이 모두 맞지 않는다. 틀린 표현은 $\frac{F_{A0}}{V}dX_A$이고, 올바르게는 $F_{A0}\frac{dX_A}{dV}$이다.
③ X: $-r_A = \frac{F_{A0}}{V}\frac{dX_A}{dt}$는 시간 미분을 사용해 PFR 설계식을 배치반응기처럼 바꾼 것이어서 틀리다. 틀린 표현은 $\frac{dX_A}{dt}$를 물수지의 기본 미분변수로 둔 점이고, 올바르게는 $\frac{dX_A}{dV}$를 사용한다.
④ X: $-r_A = VF_{A0}\frac{dX_A}{dt}$는 시간 미분을 잘못 사용한 데다 V를 곱해 차원까지 더 어긋난다. 틀린 표현은 $VF_{A0}\frac{dX_A}{dt}$이고, 올바르게는 $F_{A0}\frac{dX_A}{dV}$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 전환율 X_A가 보이자마자 시간을 넣어 배치반응기 식으로 연결하는 데 있다. PFR의 정상상태 설계식은 항상 V에 대한 미분형으로 시작하며, 시간 t는 직접적인 독립변수가 아니다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 물수지식을 묻는 문항에서 먼저 반응기 종류를 확인하고, PFR이면 $\frac{dF_A}{dV} = r_A$, CSTR이면 유입-유출-반응, 배치반응기이면 $\frac{dC_A}{dt}$ 형태를 떠올리면 된다. 전환율이 주어지면 마지막에 $F_A = F_{A0}(1 - X_A)$를 연결한다.

암기 포인트

정상상태 PFR은 시간식이 아니라 부피식이며, 핵심식은 $-r_A = F_{A0}\frac{dX_A}{dV}$이다.

문 13. 원통형 플러그흐름반응기(PFR)에서 $A \rightarrow B$ 액상 2차 반응을 일정 온도에서 진행하여 A의 전환율 80%를 얻었다. 반응기 부피가 $12L$이고 평균유속이 $10mmin^{-1}$일 때, 반응기 단면적의 지름 $[m]$은? (단, 반응속도상수는 $1Lmol^{-1}min^{-1}$, A의 초기농도는 $1molL^{-1}$, 원주율 $\pi = 3$이다)

① 0.01

② 0.02

③ 0.03

④ 0.04

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 액상 2차 반응의 PFR 설계식으로 입구 체적유량을 구한 뒤, 평균유속과 단면적 관계에서 반응기 지름을 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 반응기 부피 $V = 12L$, 반응속도상수 $k = 1Lmol^{-1}min^{-1}$, 초기농도 $C_{A0} = 1molL^{-1}$, 전환율 $X = 0.8$, 평균유속 $u = 10mmin^{-1}$, 원주율 $\pi = 3$이다.
구해야 할 값은 반응기 단면의 지름 d이다.
액상 반응이므로 밀도 변화가 없어서 체적유량을 일정하게 둘 수 있다.

사용할 공식

PFR 설계식은 $V = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$이다.
액상 2차 반응이므로 $-r_A = kC_A^2 = kC_{A0}^2(1-X)^2$, $F_{A0} = v_0C_{A0}$이어서 $V = \frac{v_0}{kC_{A0}}\int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2} = \frac{v_0}{kC_{A0}} \cdot \frac{X}{1-X}$가 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 PFR, 액상 2차 반응, 전환율이 주어져 있어 먼저 입구 체적유량 v_0를 설계식으로 구해야 하기 때문이다.

계산 과정

1. PFR 설계식에 값을 대입하면 $12 = \frac{v_0}{1 \times 1} \cdot \frac{0.8}{0.2} = 4v_0$이므로 $v_0 = 3Lmin^{-1}$이다.
2. 이를 SI 단위로 바꾸면 $3Lmin^{-1} = 0.003m^3min^{-1}$이다.
3. 평균유속 $u = Q/A$이므로 단면적은 $A = \frac{Q}{u} = \frac{0.003}{10} = 0.0003m^2$이다.
4. 원형 단면에서 $A = \pi d^2/4$이고 $\pi = 3$이므로 $d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.0003}{3}} = \sqrt{0.0004} = 0.02m$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 계산된 지름은 $0.02m$이므로 $0.01m$는 맞지 않는다. 틀린 표현은 "0.01"이고, 올바르게는 "0.02"이다. 이 값은 단면적을 구한 뒤 지름으로 바꾸는 과정에서 제곱근 처리를 잘못했을 때 나올 수 있다.
② O: PFR 설계식으로 구한 체적유량 $Q = 0.003m^3min^{-1}$, 평균유속 $u = 10mmin^{-1}$를 적용하면 단면적은 $0.0003m^2$, 지름은 $0.02m$가 된다. 따라서 ②가 옳다.
③ X: $0.03m$라면 단면적이 $A = \pi d^2/4 = 3 \times 0.03^2/4 = 0.000675m^2$가 되어 주어진 유속과 유량 조건에 맞지 않는다. 틀린 표현은 "0.03"이고, 올바르게는 "0.02"이다. 이 값은 유량을 $3Lmin^{-1}$로 구하고도 단위변환이나 면적 계산을 느슨하게 처리했을 때 생긴다.
④ X: $0.04m$는 정답의 2배라서 단면적이 4배인 $0.0012m^2$가 된다. 그러면 같은 유량에서 평균유속이 $2.5mmin^{-1}$로 떨어져 주어진 $10mmin^{-1}$와 모순된다. 틀린 표현은 "0.04"이고, 올바르게는 "0.02"이다. 이 값은 지름과 단면적의 제곱 관계를 놓쳤을 때 나온다.

오답 포인트

전환율 $X = 0.8$일 때 $X/(1-X) = 4$를 반대로 쓰거나, $3Lmin^{-1}$를 $0.003m^3min^{-1}$로 바꾸지 않으면 전부 다른 수치가 나온다. 또 원형 단면은 면적에서 바로 지름이 나오지 않고 $A = \pi d^2/4$를 거쳐 제곱근을 취해야 한다는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

PFR 계산형은 반응기 설계식으로 먼저 유량이나 체류시간을 구하고, 그다음 유속식 $u = Q/A$로 기하학량을 연결해 판단한다. 마지막에는 단위변환과 지름-단면적의 제곱 관계를 함께 검산하면 된다.

암기 포인트

액상 2차 PFR은 $V = (v_0/kC_{A0}) \cdot X/(1-X)$, 원형 단면은 $A = \pi d^2/4$ 순서로 연결된다.

NoteBase

문 14. 등온 회분식반응기에서 $A \rightarrow B$ 액상 0차 반응을 진행한다. A의 초기 농도는 $1\text{mol}\text{L}^{-1}$이며, 반응 시작 30분 후 A의 농도가 $0.2\text{mol}\text{L}^{-1}$로 감소하였다. 이 반응의 반응속도상수$[\text{mol}\text{L}^{-1}\text{h}^{-1}]$는?

① 0.4

② 0.8

③ 1.6

④ 3.2

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 등온 회분식반응기에서 액상 0차 반응의 적분식 $C_A = C_{A0} - kt$를 이용해 반응속도상수 k를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 초기 농도는 $C_{A0} = 1mol/L$, 30분 후 농도는 $C_A = 0.2mol/L$이다.
구해야 할 값: 반응속도상수 k이다.
주의할 조건: 0차 반응이므로 농도 감소량을 시간으로 나누며, 30분은 $0.5h$로 바꾸어 계산한다.

사용할 공식

0차 반응의 적분식은 $C_A = C_{A0} - kt$ 이므로 $k = \frac{C_{A0} - C_A}{t}$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유는 0차 반응에서는 속도가 농도와 무관하게 일정하므로 농도가 시간에 따라 직선적으로 감소하기 때문이다.

계산 과정

1. 농도 감소량은 $1 - 0.2 = 0.8mol/L$이다.
2. 시간 30분은 $0.5h$이다.
3. 따라서 $k = \frac{0.8}{0.5} = 1.6molL^{-1}h^{-1}$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: $0.4 mol L^{-1} h^{-1}$는 남아 있는 농도 $0.2 mol/L$를 시간 $0.5h$로 나눈 값이다. 0차 반응의 k는 잔존 농도가 아니라 감소한 농도 $(1 - 0.2)$를 사용해야 하므로, 틀린 표현은 계산 대상이고 올바르게는 감소량 $0.8 mol/L$를 써야 한다.
② X: $0.8 mol L^{-1} h^{-1}$는 농도 감소량 $0.8 mol/L$는 맞게 잡았지만 30분을 $1h$처럼 처리한 값이다. 틀린 표현은 시간 환산이고 올바르게는 30분을 $0.5h$로 바꾸어 나누어야 한다.
③ O: 0차 반응 적분식에 따라 $k = (1 - 0.2)/0.5 = 1.6 mol L^{-1} h^{-1}$가 된다. 초기 농도와 30분 후 농도의 차를 시간으로 나눈 값과 일치하므로 옳다.
④ X: $3.2 mol L^{-1} h^{-1}$는 30분을 $0.25h$처럼 잘못 바꾸거나 시간을 절반으로 한 번 더 나눈 경우에 나오는 값이다. 틀린 표현은 시간 단위 변환이고 올바르게는 30분은 $0.5h$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 0차 반응이라는 조건을 보고도 농도 자체를 나누거나, 30분을 시간 단위로 바꾸지 않는 데 있다. 특히 ②와 ④는 시간 환산 실수 하나로 바로 나오는 값이라서 단위 검산이 핵심이다.

다시 나오면 이렇게 판단

0차 반응 계산형은 먼저 $C_A = C_{A0} - kt$를 떠올리고, 다음에 감소량 (초기값-최종값)을 구한 뒤, 시간을 문제에서 요구한 단위로 환산해서 나눈다. 마지막에는 k의 단위가 $mol L^{-1} h^{-1}$인지 확인하면 된다.

암기 포인트

0차 반응은 농도가 시간에 따라 직선적으로 감소하므로 k=농도감소량/시간이다.

NoteBase

문 15. 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 액상 기초반응을 진행하여 반응 시작 20분 후 A의 전환율 80%를 얻었다. 동일한 반응물을 동일한 반응조건에서 부피가 2 L인 플러그흐름반응기(PFR)에 공급하여 반응을 진행할 경우, A의 전환율 80%를 얻기 위한 A의 부피유량 $[Lmin^{-1}]$은?

① 0.1

② 0.15

③ 0.2

④ 0.25

정답 1번

출제 포인트

회분식 1차반응식으로 속도상수 k를 구하고, 같은 1차 액상반응의 PFR에서는 공간시간 $\tau = V/\nu_0$가 같은 전환율에서 회분식 반응시간과 같아진다는 점을 묻는 문제이다.

조건 정리

주어진 값

- 등온 회분식반응기에서 순수한 A로 액상 기초반응 $A \rightarrow B$를 진행한다.
- 반응 시작 20분 후 전환율은 80%이다.
- 같은 반응을 부피 $2L$인 PFR에서 같은 조건으로 진행한다.
- PFR에서도 목표 전환율은 80%이다.

구해야 할 값

- 부피유량 ν_0 $[L/min]$

주의할 조건

- 액상 기초반응 $A \rightarrow B$는 1차반응으로 본다.
- 액상이라 밀도 변화가 없으므로 $C_A = C_{A0}(1 - X)$이다.

사용할 공식

회분식 1차반응식은

$t = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-X}$

PFR 1차 액상반응식은

$\tau = \frac{V}{\nu_0} = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-X}$

이다.

이 공식을 쓰는 이유는 액상 1차반응에서 같은 전환율 X를 만들 때 회분식 시간식과 PFR 공간시간식의 적분형이 같기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 회분식 데이터로 속도상수 k를 구한다.
$20 = \frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-0.8} = \frac{1}{k}\ln 5$
$k = \frac{\ln 5}{20}(min^{-1})$
2. 같은 전환율 80%를 얻는 PFR의 공간시간은
$\tau = \frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-0.8} = 20min$
이다.
3. 따라서 필요한 부피유량은
$\nu_0 = \frac{V}{\tau} = \frac{2L}{20min} = 0.10L/min$
이다.

선지별 해설

① O
- 계산 결과 $\nu_0 = 0.10L/min$이므로 맞다.

② X
- $0.15L/min$이면 공간시간은 $\tau = 2/0.15 \approx 13.3min$이다. 필요한 20분보다 짧아 전환율 80%에 도달하지 못한다. 틀린 수치 $0.15L/min$ → 올바르게는 $0.10L/min$이다.

③ X
- $0.20L/min$이면 공간시간은 $10min$이다. 같은 1차 액상반응에서 전환율 80%를 얻는 데 필요한 시간 20분의 절반이므로 틀리다. 틀린 수치 $0.20L/min$ → 올바르게는 $0.10L/min$이다.

④ X
- $0.25L/min$이면 공간시간은 $8min$이다. 반응기가 너무 빨리 통과되어 목표 전환율 80%를 만들 수 없다. 틀린 수치 $0.25L/min$ → 올바르게는 $0.10L/min$이다.

오답 포인트

회분식에서 얻은 20분을 PFR의 공간시간과 연결하지 못하면 유량을 크게 잡는 실수가 나온다. 또 V/ν_0와 ν_0/V를 뒤집거나, 1차반응의 적분식을 쓰지 않고 감으로 비례 계산하는 경우가 많다.

다시 나오면 이렇게 판단

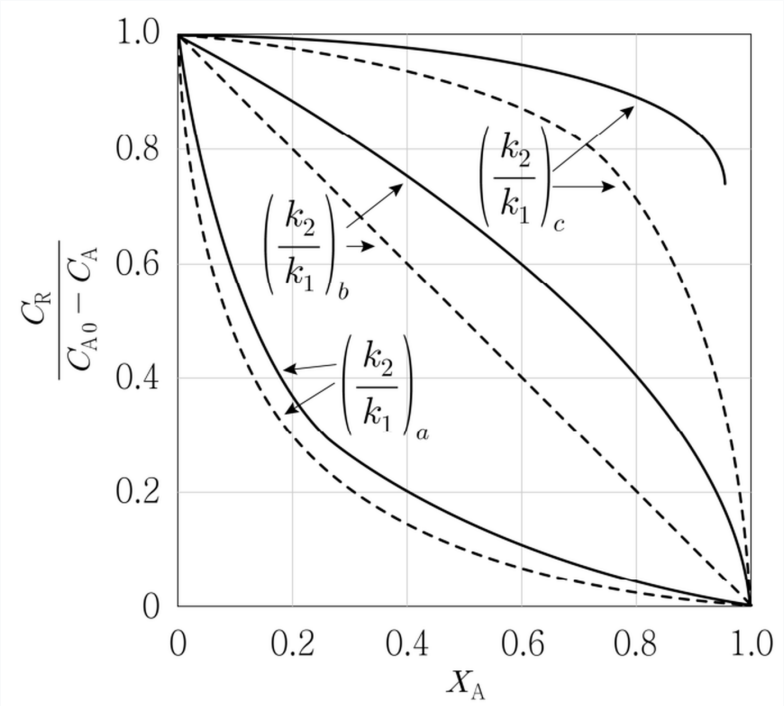
액상 1차반응에서 회분식 자료와 PFR 설계가 함께 나오면 먼저 회분식으로 필요한 시간 t를 구한 뒤, 같은 전환율에서는 그 시간을 그대로 PFR 공간시간 $\tau = V/\nu_0$에 대응시켜 판단한다.

암기 포인트

액상 1차반응은 같은 전환율 X에서 회분식 반응시간과 PFR 공간시간이 같다.

NoteBase

문 16. 그림은 연속교반탱크반응기(CSTR)와 플러그흐름반응기(PFR)에서 진행한 $A \rightarrow R \rightarrow S$ 연속 액상 1차 반응에 대해 A의 전환율(X_A)과 R의 수율($\frac{C_R}{C_{A0}-C_A}$)과의 관계를 반응속도상수 비율($\frac{k_2}{k_1}$)에 따라 나타낸 그래프이다. CSTR을 나타내는 것과 반응속도상수 비율의 크기 비교를 바르게 연결한 것은? (단, 모든 반응은 순수한 A를 반응물로 일정 온도에서 진행한다)



① CSTR: 점선, 반응속도상수 비율의 크기 비교: $\left(\frac{k_2}{k_1}\right)_a > \left(\frac{k_2}{k_1}\right)_b > \left(\frac{k_2}{k_1}\right)_c$

② CSTR: 점선, 반응속도상수 비율의 크기 비교: $\left(\frac{k_2}{k_1}\right)_a < \left(\frac{k_2}{k_1}\right)_b < \left(\frac{k_2}{k_1}\right)_c$

③ CSTR: 실선, 반응속도상수 비율의 크기 비교: $\left(\frac{k_2}{k_1}\right)_a > \left(\frac{k_2}{k_1}\right)_b > \left(\frac{k_2}{k_1}\right)_c$

④ CSTR: 실선, 반응속도상수 비율의 크기 비교: $\left(\frac{k_2}{k_1}\right)_a < \left(\frac{k_2}{k_1}\right)_b < \left(\frac{k_2}{k_1}\right)_c$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 $A \rightarrow R \rightarrow S$ 연속 1차 반응의 그래프에서 반응기 형상에 따른 R 수율 곡선 모양과 k_2/k_1 변화에 따른 곡선의 위아래 위치를 함께 판단하는 문제이다.

NoteBase

선지별 해설

① O
- CSTR의 정상상태에서는 $\frac{C_R}{C_{A0}-C_A}=\frac{1-X_A}{1-X_A+(k_2/k_1)X_A}$가 된다. 특히 $k_2/k_1=1$이면 수율이 $1-X_A$가 되어 직선으로 나타나므로 점선 군이 CSTR에 해당한다.
- 같은 X_A에서 k_2/k_1가 커질수록 중간생성물 R이 더 빨리 S로 소모되어 수율이 낮아지므로 아래쪽 곡선일수록 k_2/k_1가 더 크다. 따라서 $(k_2/k_1)_a>(k_2/k_1)_b>(k_2/k_1)_c$가 맞다.

② X
- "점선"은 맞지만 $(k_2/k_1)_a<(k_2/k_1)_b<(k_2/k_1)_c$가 틀리다.
- 틀린 표현은 반응속도상수 비율의 크기 비교이다. 올바르게는 $(k_2/k_1)_a>(k_2/k_1)_b>(k_2/k_1)_c$이다.

③ X
- "실선"이 틀리다. 실선은 PFR 거동이고, CSTR은 점선이다.
- 틀린 표현은 CSTR을 실선으로 본 부분이다. 올바르게는 CSTR은 점선이며, 비율 크기 비교는 $(k_2/k_1)_a>(k_2/k_1)_b>(k_2/k_1)_c$이다.

④ X
- "실선"도 틀리고 $(k_2/k_1)_a<(k_2/k_1)_b<(k_2/k_1)_c$도 틀리다.
- 올바르게는 CSTR은 점선이며, 아래쪽 a 곡선일수록 k_2/k_1가 더 크다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 반응기 종류와 속도상수 비율의 방향을 서로 바꿔 읽는 데 있다. CSTR은 완전혼합 때문에 같은 전환율에서 생성된 R이 반응기 안에 더 오래 머물러 추가 반응을 겪으므로 PFR보다 수율이 불리하고, k_2/k_1가 커질수록 수율 곡선은 아래로 내려간다.

다시 나오면 이렇게 판단

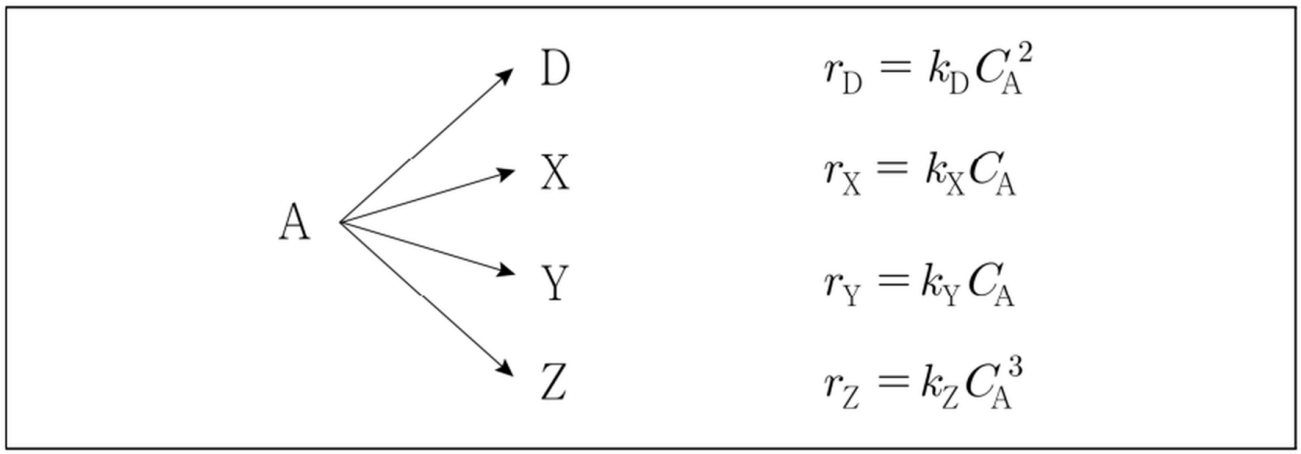
중간생성물 수율 그래프가 나오면 먼저 CSTR 식에서 $k_2/k_1=1$일 때 $1-X_A$ 직선이 되는지를 본다. 그다음 같은 X_A에서 곡선이 낮을수록 $R\rightarrow S$가 상대적으로 더 빠르다고 판단한다.

암기 포인트

CSTR은 혼합 때문에 중간생성물 수율이 PFR보다 불리하고, k_2/k_1가 클수록 R 수율 곡선은 아래로 내려간다.

NoteBase

문 17. 다음 복합반응에서 반응물 A가 분해되어 1개의 목적 생성물 D와 3개의 비목적 생성물 X, Y, Z가 생성된다. X, Y, Z에 대한 D의 순간 선택도 $S_{D/XYZ}$가 최대가 될 때, 반응물 A의 농도는? (단, r_j는 j의 생성속도, k_j는 j의 생성반응에 대한 반응속도상수, C_A는 A의 농도, $S_{D/XYZ} = \frac{r_D}{r_X + r_Y + r_Z}$이다.)



① $\sqrt{\frac{k_Z}{k_D}}$
② $\sqrt{\frac{k_X + k_Y}{k_Z}}$
③ $\sqrt{\frac{k_D}{k_X + k_Y + k_Z}}$
④ $\sqrt{\frac{k_X + k_Y + k_Z}{k_D}}$

정답 2번

출제 포인트

병렬 복합반응에서 순간 선택도 $S_{D/XYZ}$를 반응물 농도 C_A의 함수로 정리한 뒤, 미분하여 극대 조건을 찾는 문제이다.

조건 정리

주어진 속도식은 $r_D = k_D C_A^2$, $r_X = k_X C_A$, $r_Y = k_Y C_A$, $r_Z = k_Z C_A^3$이다.
구해야 할 값은 $S_{D/XYZ} = \frac{r_D}{r_X + r_Y + r_Z}$가 최대가 되는 C_A이다.
주의할 조건은 각 생성물의 반응차수가 서로 달라서 선택도를 먼저 하나의 C_A 함수로 합쳐야 한다는 점이다.

사용할 공식

순간 선택도는 다음과 같이 정리된다.
$S_{D/XYZ} = \frac{k_D C_A^2}{k_X C_A + k_Y C_A + k_Z C_A^3} = \frac{k_D C_A}{k_X + k_Y + k_Z C_A^2}$
이 공식을 쓰는 이유는 선택도의 최댓값은 각 생성속도를 따로 비교하는 것이 아니라, 선택도 전체를 C_A의 단일 함수로 만든 뒤 극값 조건 $\frac{dS}{dC_A} = 0$으로 찾아야 하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 분모를 $a = k_X + k_Y$, $b = k_Z$로 두면
$S = \frac{k_D C_A}{a + bC_A^2}$
이다.

2. C_A에 대해 미분하면
$\frac{dS}{dC_A} = k_D \frac{(a + bC_A^2) - C_A(2bC_A)}{(a + bC_A^2)^2} = k_D \frac{a - bC_A^2}{(a + bC_A^2)^2}$
이다.

3. 극대 조건은 $\frac{dS}{dC_A} = 0$이므로
$a - bC_A^2 = 0$
$C_A^2 = \frac{k_X + k_Y}{k_Z}$
따라서
$C_A = \sqrt{\frac{k_X + k_Y}{k_Z}}$
이다.

선지별 해설

① X
- $\sqrt{\frac{k_Z}{k_D}}$는 미분 결과에서 나오지 않는다. 선택도를 미분하면 k_D는 공통인자로 소거되고, 남는 조건은 $k_X + k_Y - k_Z C_A^2 = 0$이다.
- 틀린 표현은 "k_D"가 최적 농도를 결정한다는 점이다. 올바르게는 $C_A = \sqrt{\frac{k_X + k_Y}{k_Z}}$ 이다.

② O
- $S_{D/XYZ} = \frac{k_D C_A}{k_X + k_Y + k_Z C_A^2}$를 C_A에 대해 미분하면 $C_A^2 = \frac{k_X + k_Y}{k_Z}$가 된다.
- 따라서 $C_A = \sqrt{\frac{k_X + k_Y}{k_Z}}$ 이므로 ②가 맞다.

③ X
- $\sqrt{\frac{k_D}{k_X + k_Y + k_Z}}$는 선택도 미분식과 맞지 않는다. 극대조건에서는 k_D가 소거되고, k_Z는 C_A^2의 계수로만 남는다.
- 틀린 표현은 "k_X+k_Y+k_Z"를 한꺼번에 더한다는 점이다. 올바르게는 $C_A = \sqrt{\frac{k_X + k_Y}{k_Z}}$ 이다.

④ X
- $\sqrt{\frac{k_X + k_Y + k_Z}{k_D}}$도 마찬가지로 k_D를 남겨 두고, k_Z를 k_X, k_Y와 같은 방식으로 더한 식이라서 틀리다.
- 틀린 표현은 "모든 속도상수를 단순 합산하여 비로 둔다는 점이다. 올바르게는 $k_X + k_Y$는 분모의 1차항 묶음으로, k_Z는 C_A^2 항의 계수로 작용하므로 $C_A = \sqrt{\frac{k_X + k_Y}{k_Z}}$ 이다.

NoteBase

오답 포인트

①, ③, ④는 목표생성물의 속도상수 k_D가 최적 농도식에 끝까지 남는다고 착각하게 만든 선지이다. 이 문제에서는 선택도를 C_A의 함수로 만들면 k_D가 공통인자로 소거된다. 또 k_X, k_Y는 1차항 묶음이고 k_Z는 3차 반응에서 온 C_A^2 계수이므로, 모든 속도상수를 단순히 더하는 방식으로는 극대조건을 만들 수 없다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응 선택도 문제는 먼저 r_목적 Σ r_비목적를 하나의 C_A 함수로 정리하고, 공통인자를 소거한 뒤 $\frac{dS}{dC_A}=0$으로 최적 농도를 찾는 순서로 판단한다.

암기 포인트

선택도 최대 조건은 선택도 함수를 먼저 만들고 미분해서 찾는다. 이때 공통인자 k_D는 극대조건에서 소거될 수 있다.

NoteBase

문 18. 동일한 부피의 연속교반탱크반응기(CSTR) n개를 직렬로 연결하여 $A \rightarrow B$ 액상 기초반응을 일정 온도에서 진행한다. CSTR 한 개의 공간시간(τ)은? (단, k는 반응속도상수, C_{A0}는 첫 번째 반응기로 유입되는 A의 농도, C_A는 n번째 반응기 출구에서 A의 농도이다)

① $\frac{n}{k}\left[1-\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$
② $\frac{1}{k}\left[1-\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$
③ $\frac{1}{k}\left[n\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{\frac{1}{n}}-1\right]$
④ $\frac{1}{k}\left[\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{\frac{1}{n}}-1\right]$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 1차 반응이 일어나는 동일 부피 CSTR n개를 직렬 연결했을 때 농도비와 공간시간 τ의 관계를 구하는 문제이다.

조건 정리

- 주어진 조건: 액상 1차 반응 $A \rightarrow B$, 동일 부피 CSTR n개 직렬 연결, 각 반응기의 공간시간은 모두 τ이다.
- 입구 농도: 첫 번째 반응기 유입 농도는 C_{A0}이다.
- 출구 농도: n번째 반응기 출구 농도는 C_A이다.
- 구해야 할 값: 한 개 CSTR의 공간시간 τ이다.

사용할 공식

$QC_{A,i-1}-QC_{A,i}-kC_{A,i}V=0$
$C_{A,i}=\frac{C_{A,i-1}}{1+k\tau}, \qquad \tau=\frac{V}{Q}$
$C_A=\frac{C_{A0}}{(1+k\tau)^n}$
이 공식을 쓰는 이유는 각 반응기가 정상상태 1차 반응 CSTR이므로 단계마다 출구농도가 $1+k\tau$만큼 나누어지고, 동일한 반응기 n개가 직렬이어서 그 관계가 반복되기 때문이다.

계산 과정

1. 한 개의 CSTR에 대해 물질수지를 세우면 $C_{A,i}=\frac{C_{A,i-1}}{1+k\tau}$이다.
2. 이를 n개 직렬에 적용하면 $C_A=\frac{C_{A0}}{(1+k\tau)^n}$이다.
3. 식을 정리하면 $(1+k\tau)^n=\frac{C_{A0}}{C_A}$이다.
4. 양변에 $\frac{1}{n}$제곱을 취하면 $1+k\tau=\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{1/n}$이다.
5. 따라서 $\tau=\frac{1}{k}\left[\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{1/n}-1\right]$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 식 앞에 $\frac{n}{k}$가 붙는 형태는 직렬 CSTR의 누적식을 선형 합으로 오해한 결과이다. 직렬 CSTR은 단계별 농도비가 곱으로 누적되므로 $n\tau$가 직접 앞에 곱해지지 않는다. 틀린 표현은 $\frac{n}{k}\left[1-\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right)^{1/n}\right]$이고, 올바르게는 $\frac{1}{k}\left[\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{1/n}-1\right]$이다.
② X: $\frac{1}{k}\left[1-\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right)^{1/n}\right]$는 농도비 방향을 반대로 쓴 식이다. 정확한 정리는 $(1+k\tau)^n=\frac{C_{A0}}{C_A}$에서 시작해야 하므로 괄호 안은 $\frac{C_{A0}}{C_A}$가 되어야 한다. 틀린 표현은 $1-\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right)^{1/n}$이고, 올바르게는 $\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{1/n}-1$이다.
③ X: $\frac{1}{k}\left[n\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{1/n}-1\right]$는 n을 지수 관계가 아니라 계수처럼 넣은 식이어서 틀리다. 직렬 n개는 $(1+k\tau)^n$으로 처리되므로 n은 거듭제곱과 $\frac{1}{n}$제곱으로 나타나야 한다. 틀린 표현은 $n\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{1/n}$이고, 올바르게는 $\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{1/n}$이다.
④ O: $C_A=\frac{C_{A0}}{(1+k\tau)^n}$에서 정리하면 $\tau=\frac{1}{k}\left[\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{1/n}-1\right]$가 된다. 농도비 방향과 $\frac{1}{n}$제곱 처리도 모두 맞으므로 옳다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 직렬 CSTR을 PFR처럼 선형적으로 생각하거나, $\frac{C_{A0}}{C_A}$와 $\frac{C_A}{C_{A0}}$를 뒤집는 데 있다. 또한 n개 직렬이라는 조건을 보고 $n\tau$가 단순 계수처럼 앞에 나온다고 착각하면 ①이나 ③으로 흐르기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 CSTR 계산형은 먼저 한 개 반응기의 출구식 $C_{A,out}=\frac{C_{A,in}}{1+k\tau}$을 세운 뒤, 동일 반응기 n개이면 그 식을 n번 적용해 $(1+k\tau)^n$ 꼴로 판단하면 된다. 마지막에는 농도비 방향이 $\frac{C_{A0}}{C_A}$인지 다시 확인하면 된다.

암기 포인트

동일한 1차 CSTR n개 직렬이면 $C_A=C_{A0}/(1+k\tau)^n$이고, 역으로 풀면 $\tau=\frac{1}{k}\left[\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right)^{1/n}-1\right]$이다.

NoteBase

문 19. 50 L 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 발열 액상기초반응을 진행한다. A의 초기농도가 $1\text{mol}\text{L}^{-1}$, 초기 반응온도가 400 K일 때, 지속적인 열제거로 반응기의 온도를 400 K로 유지한다. 반응 시작 5분 후 열제거 속도[$\text{kcal}\text{min}^{-1}$]의 크기는? (단, 교반기에 의해 반응기에 가해진 일은 무시하고, 반응속도상수는 0.2min^{-1}, 반응열 $\Delta H_R(400\text{K}) = -10\text{kcal}\text{mol}^{-1}$이다)

① $\frac{100}{e}$

② $\frac{150}{e}$

③ $\frac{200}{e}$

④ $\frac{250}{e}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 등온 회분식반응기에서 1차반응의 순간 반응속도를 구한 뒤 반응열을 곱해 열제거 속도를 계산하는 문제이다.

조건 정리

- 주어진 값: 반응기 부피 $50L$, 초기농도 $C_{A0} = 1mol/L$, 속도상수 $k = 0.2min^{-1}$, 시간 $t = 5min$, 반응열 $\Delta H_R = -10kcal/mol$이다.
- 구해야 할 값: 반응 시작 5분 후의 열제거 속도이다.
- 주의할 조건: 반응기 온도를 $400K$로 일정하게 유지하므로 열제거 속도의 크기는 그 시점의 열발생 속도와 같다.

사용할 공식

회분식 1차반응이므로 농도는 $C_A = C_{A0}e^{-kt}$ 이고, 순간 반응속도는 $-r_A = kC_A$ 이다. 따라서 열제거 속도의 크기는 $\dot{Q} = V(-r_A)|\Delta H_R|$ 로 계산한다.
이 공식을 쓰는 이유는 액상 회분식반응기에서 부피가 일정하고, 등온 조건이라 외부로 제거되는 열량이 반응이 그 순간에 발생시키는 열량과 같기 때문이다.

계산 과정

1. 5분 후 A의 농도는 $C_A = 1 \times e^{-0.2 \times 5} = e^{-1}mol/L$ 이다.
2. 그 시점의 반응속도는 $-r_A = 0.2 \times e^{-1} = \frac{0.2}{e}mol/(L \cdot min)$ 이다.
3. 반응기 전체의 몰반응속도는 $V(-r_A) = 50 \times \frac{0.2}{e} = \frac{10}{e}mol/min$ 이다.
4. 열발생 속도이자 열제거 속도의 크기는 $\dot{Q} = \frac{10}{e} \times 10 = \frac{100}{e}kcal/min$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① O: 계산 결과 열제거 속도는 $\frac{100}{e} kcal/min$ 이다. 등온 유지 조건이므로 이 값이 그대로 제거해야 할 열의 크기이다.
② X: $\frac{150}{e} kcal/min$ 은 계산값보다 $\frac{50}{e} kcal/min$ 크게 잡은 값이다. 회분식반응기의 순간 열제거 속도는 5분 시점의 순간 반응속도로 계산해야 하므로 올바른 값은 $\frac{100}{e} kcal/min$ 이다.
③ X: $\frac{200}{e} kcal/min$ 은 정답의 2배이므로 반응속도나 반응열에 불필요한 배수를 중복 적용한 값이다. 이 반응은 $A \rightarrow B$ 1:1 반응이므로 추가 계수 없이 $V(-r_A)|\Delta H_R|$ 만 적용하며, 올바른 값은 $\frac{100}{e} kcal/min$ 이다.
④ X: $\frac{250}{e} kcal/min$ 은 5분이라는 시간을 속도식 바깥에서 다시 배수로 곱한 경우처럼 과대평가한 값이다. 시간 $t = 5min$ 은 e^{-kt} 안에 이미 반영되므로 올바른 열제거 속도는 $\frac{250}{e}$ 가 아니라 $\frac{100}{e} kcal/min$ 이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 5분 후의 누적 발열량과 5분 시점의 순간 열발생 속도를 혼동하는 데 있다. 등온 회분식반응기에서는 먼저 $C_A = C_{A0}e^{-kt}$ 로 그 시점 농도를 구하고, 그다음 순간 반응속도에 반응열을 곱해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분식 등온 발열반응 문제는 시간 t 를 먼저 농도식 e^{-kt} 에 넣어 순간 농도를 구하고, kC_A 로 순간 속도를 만든 뒤, 마지막에 부피와 반응열을 곱하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

등온 회분식 발열반응의 열제거 속도는 누적열량이 아니라 순간식 $\dot{Q} = V(-r_A)|\Delta H_R|$ 로 계산한다.

NoteBase

문 20. 고체 촉매가 균일하게 충전된 등온 충전층반응기(PBR)에서 $A \rightarrow B$ 기상 반응을 진행할 때, 압력강하는 $\frac{P}{P_0} = (1 - \alpha W)^{1/2}$ 식을 따른다. 반응기 길이가 5m일 때, 입구에서 압력이 10atm, 출구에서 압력이 8.66atm이었다. 동일한 반응조건에서 반응기 길이를 15m로 늘려 반응기 부피를 3배로 크게 했을 때, 반응기 출구에서의 압력[atm]은? (단, P_0는 반응기 입구에서 압력, P는 반응기 출구에서 압력, α는 압력강하 파라미터, W는 촉매 무게, 0.866의 제곱은 0.75이다)

① 1.5

② 2.5

③ 5.0

④ 7.5

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 충전층반응기에서 압력강하식과 촉매량 비례관계를 이용해 반응기 길이와 부피가 변할 때의 출구 압력을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 식은 $\frac{P}{P_0} = (1 - \alpha W)^{1/2}$이다.
초기 조건에서 $P_0 = 10atm$, $P = 8.66atm$이므로 $\frac{P}{P_0} = 0.866$이다.
반응기 길이를 $5m$에서 $15m$로 늘려 부피를 3배로 키웠고, 동일한 충전조건이므로 촉매 무게 W도 3배가 된다.

사용할 공식

$\frac{P}{P_0} = (1 - \alpha W)^{1/2}$
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 충전층반응기의 압력강하가 이 식을 따른다고 직접 주어졌고, 동일한 반응조건에서는 촉매 무게 변화만 반영하면 새 출구 압력을 바로 계산할 수 있기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 처음 반응기에서 $0.866^2 = 0.75$이므로
$1 - \alpha W_1 = 0.75$
따라서
$\alpha W_1 = 0.25$
2. 반응기 부피와 길이를 3배로 늘렸으므로 촉매량도 3배가 되어
$W_2 = 3W_1$
따라서
$\alpha W_2 = 3\alpha W_1 = 3 \times 0.25 = 0.75$
3. 새 출구 압력비는
$\frac{P}{P_0} = (1 - 0.75)^{1/2} = \sqrt{0.25} = 0.5$
4. 따라서 출구 압력은
$P = 0.5 \times 10 = 5.0atm$

선지별 해설

① X: 출구 압력은 $1.5atm$가 아니다. 올바르게는 αW가 0.75가 되어 $P/P_0 = 0.5$이므로 $P = 5.0atm$이다.
② X: 출구 압력은 $2.5atm$가 아니다. $1 - \alpha W_2 = 0.25$에서 바로 $P/P_0 = 0.25$로 두면 제곱근을 빠뜨린 계산이 된다.
③ O: $\alpha W_1 = 0.25$, $\alpha W_2 = 0.75$이므로 $P/P_0 = \sqrt{0.25} = 0.5$, 따라서 $P = 5.0atm$이 되어 맞다.
④ X: 출구 압력은 $7.5atm$가 아니다. 0.75는 새 압력비가 아니라 αW_2의 값이므로, 올바르게는 $P/P_0 = \sqrt{1 - 0.75} = 0.5$이다.

오답 포인트

처음 조건에서 구한 0.75를 압력비로 착각하거나, $1 - \alpha W$에 제곱근이 붙는다는 점을 놓치면 ②나 ④ 같은 오답으로 흐르기 쉽다. 또 길이와 부피가 3배가 되면 촉매 무게 W도 3배가 된다는 비례관계를 놓치면 전체 계산이 틀어진다.

다시 나오면 이렇게 판단

압력강하식이 주어지면 먼저 기존 조건으로 αW를 역산하고, 장치 크기 변화에 따라 W가 몇 배가 되는지 반영한 뒤, 마지막에 제곱근까지 포함해 새 P/P_0를 구하면 된다.

암기 포인트

충전층 압력강하는 먼저 αW를 구하고, 크기 변화 후 다시 $1 - \alpha W$에 제곱근을 적용해 압력비를 계산하는 구조이다.

NoteBase

문 21. 다음은 플러그흐름반응기(PFR)의 반응기 입구에 추적자를 펄스 입력(pulse input)한 후 반응기 출구에서 시간에 따른 추적자 농도를 측정한 결과이다. 반응기에서 유체의 평균체류시간[min]은? (단, 35분 이후 추적자는 검출되지 않는다)

시간[min]	0	5	10	15	20	25	30	35
추적자 농도[g L^{-1}]	0	2	5	7	3	2	1	0

① 11.25

② 13.25

③ 14.25

④ 15.25

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 펄스 추적자 실험의 출구 농도 곡선으로부터 평균체류시간 $\bar{t}$를 사다리꼴 적분으로 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:

- 시간은 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 min이다.
- 추적자 농도는 0, 2, 5, 7, 3, 2, 1, 0 g/L이다.

구해야 할 값:

- 평균체류시간 $\bar{t}$이다.

주의할 조건:

- 35분 이후 추적자가 검출되지 않으므로 적분 구간은 0분부터 35분까지이다.
- 펄스 입력 실험이므로 $\bar{t} = \frac{\int tC(t)dt}{\int C(t)dt}$를 사용한다.

사용할 공식

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty tC(t)dt}{\int_0^\infty C(t)dt}$$

이 공식을 쓰는 이유:

펄스 추적자 실험에서는 출구 농도 곡선 $C(t)$를 정규화한 체류시간분포의 평균이 평균체류시간이 되므로, 농도-시간 자료로 분자 $\int tC(t)dt$와 분모 $\int C(t)dt$를 계산하면 된다.

NoteBase

계산 과정

1. 분모를 사다리꼴 적분으로 구한다.

$\int C(t)dt \approx \frac{5}{2}\{(0+2)+(2+5)+(5+7)+(7+3)+(3+2)+(2+1)+(1+0)\} = 100$

2. 각 시각에서 $tC(t)$를 구하면 0, 10, 50, 105, 60, 50, 30, 0이다.

3. 분자를 사다리꼴 적분으로 구한다.

$\int tC(t)dt \approx \frac{5}{2}\{(0+10)+(10+50)+(50+105)+(105+60)+(60+50)+(50+30)+(30+0)\} = 1525$

4. 평균체류시간을 계산한다.

$\bar{t} = \frac{1525}{100} = 15.25min$

따라서 평균체류시간은 $15.25min$이다.

선지별 해설

① X: 계산 결과 평균체류시간은 $15.25min$이므로 11.25는 일치하지 않는다. 틀린 표현은 "11.25"이며, 올바르게는 "15.25"이다. 이런 값은 사다리꼴 적분의 합계를 일부 누락했을 때 나오는 오답이다.

② X: $\bar{t} = \frac{\int tC(t)dt}{\int C(t)dt} = \frac{1525}{100}$이므로 13.25는 틀리다. 틀린 표현은 "13.25"이며, 올바르게는 "15.25"이다. 분자 적분값을 잘못 더하면 이런 값으로 흔들리기 쉽다.

③ X: 표의 모든 구간을 반영한 평균체류시간은 $15.25min$이므로 14.25도 틀리다. 틀린 표현은 "14.25"이며, 올바르게는 "15.25"이다. 후반부 꼬리 구간의 기여를 과소평가하면 작은 값이 나온다.

④ O: 사다리꼴 적분으로 $\int C(t)dt = 100$, $\int tC(t)dt = 1525$를 얻으므로 $\bar{t} = 15.25min$이 된다. 계산 결과와 정확히 일치한다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 단순히 농도값의 산술평균을 내는 것이 아니라, 시간축에 대한 면적과 1차 모멘트를 각각 적분해야 한다는 점이다. 특히 $tC(t)$ 값을 다시 만들어 분자를 적분해야 하는데, 이를 생략하거나 마지막 25~35분 구간의 꼬리 면적을 빼먹으면 더 작은 오답이 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

펄스 추적자 평균체류시간 문제는 먼저 $\int C(t)dt$와 $\int tC(t)dt$를 구분해서 표를 만든 뒤, 두 적분을 같은 방식으로 계산하고 마지막에 분자/분모를 나누는 순서로 판단한다.

암기 포인트

펄스 입력 평균체류시간은 $\bar{t} = \frac{\int tC(t)dt}{\int C(t)dt}$이며, 분자는 $tC(t)$의 면적이라는 점이 핵심이다.

NoteBase

문 22. 정상상태 단열 플러그흐름반응기(PFR)에서 $A + B \rightarrow C$ 액상 기초 반응을 진행한다. 동일한 몰유량의 A와 B가 반응기로 공급되고, 반응기 입구와 반응기 출구에서의 온도가 각각 T_1과 T_2일 때, 반응기 출구에서 A의 전환율(X_A)은? (단, 반응한 A의 단위몰당 반응열 $\Delta H_R = -6{,}000 \text{cal mol}^{-1}$, A와 B의 열용량 $C_{P,A} = C_{P,B} = 15 \text{cal mol}^{-1}\text{K}^{-1}$, C의 열용량 $C_{P,C} = 30 \text{cal mol}^{-1}\text{K}^{-1}$이고, 반응열과 열용량은 모두 온도에 무관하며 일정한 값을 갖는다)

① $\frac{T_2 - T_1}{100}$
② $\frac{T_2 - T_1}{150}$
③ $\frac{T_2 - T_1}{200}$
④ $\frac{T_2 - T_1}{300}$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 단열 반응기의 에너지수지를 이용해 출구 전환율 X_A를 구하는 계산형 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 반응식은 $A + B \rightarrow C$이다.
- 정상상태 단열 PFR이다.
- A와 B는 동일한 몰유량으로 공급되므로 $F_{A0} = F_{B0} = F_0$이다.
- 반응열은 $\Delta H_R = -6000 cal mol^{-1}$이다.
- 열용량은 $C_{P,A} = C_{P,B} = 15 cal mol^{-1} K^{-1}$, $C_{P,C} = 30 cal mol^{-1} K^{-1}$이다.
- 입구와 출구 온도는 각각 T_1, T_2이다.

구해야 할 값:
- 출구에서 A의 전환율 X_A이다.

주의할 조건:
- 열용량과 반응열은 온도와 무관한 상수이다.
- 생성물 C의 열용량이 반응물 A와 B의 열용량 합과 같아서 총 열용량 유량이 전환율과 무관하게 일정하다.

NoteBase

사용할 공식

단열 에너지수지는 반응으로 방출된 열이 모두 유체의 온도 상승에 쓰인다는 관계이다.
$(-\Delta H_R)F_{A0}X_A = \sum_i F_{i,\,\text{out}} C_{P,\,i}(T_2 - T_1)$
이 문제에서는
$F_{A,\,\text{out}} = F_0(1 - X_A), \quad F_{B,\,\text{out}} = F_0(1 - X_A), \quad F_{C,\,\text{out}} = F_0 X_A$
이므로 출구 혼합물의 총 열용량 유량은
$15F_0(1 - X_A) + 15F_0(1 - X_A) + 30F_0X_A = 30F_0$
이다.
따라서 반응열과 감열 상승을 바로 연결할 수 있다.

계산 과정

1. 출구 총 열용량 유량을 구하면 $30F_0$이다.
2. 단열 에너지수지를 쓰면
$6000F_0X_A = 30F_0(T_2 - T_1)$
이다.
3. $30F_0$로 나누면
$X_A = \frac{T_2 - T_1}{200}$
이다.

선지별 해설

① X
- 분모가 100인 부분이 틀렸다. 단열 에너지수지로 구한 값은 $X_A = \frac{T_2 - T_1}{200}$이므로 이 식은 전환율을 2배 크게 계산한 값이다. 올바르게는 $\frac{T_2 - T_1}{200}$이다.

② X
- 분모가 150인 부분이 틀렸다. 출구 혼합물의 총 열용량 유량이 $30F_0$로 일정하다는 조건을 정확히 반영하면 분모는 200이 되어야 한다. 올바르게는 $\frac{T_2 - T_1}{200}$이다.

③ O
- 계산 결과가 $X_A = \frac{T_2 - T_1}{200}$이므로 ③은 단열 에너지수지와 정확히 일치한다.

④ X
- 분모가 300인 부분이 틀렸다. 이 식은 같은 온도상승에 대해 전환율을 실제보다 작게 계산한 값이며, 반응열 $6000F_0X_A$와 감열 증가량 $30F_0(T_2 - T_1)$의 균형을 만족하지 못한다. 올바르게는 $\frac{T_2 - T_1}{200}$이다.

NoteBase

오답 포인트

이 문항의 함정은 반응이 진행되어도 총 열용량 유량이 변하지 않는다는 점이다. $15 + 15 = 30$이고 생성물 C의 열용량도 30이므로, 전환율에 따라 조성이 바뀌어도 전체 $\sum F_i C_{P,i}$는 항상 $30F_0$이다. 이 점을 놓치면 분모를 100, 150, 300처럼 임의로 잘못 두기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

단열 반응기 문제는 먼저 반응열과 감열 상승을 같게 두고, 다음에 출구 혼합물의 $\sum F_i C_{P,i}$가 전환율에 따라 변하는지 확인한다. 이 문제는 그 합이 상수이므로 에너지수지를 한 줄로 정리하면 된다.

암기 포인트

등몰 $A + B \rightarrow C$에서 $C_{P,A} + C_{P,B} = C_{P,C}$이면 총 열용량 유량이 일정하므로 $(-\Delta H_R)X$와 $C_{P,tot}\Delta T$를 바로 연결할 수 있다.

NoteBase

문 23. 등온 회분식반응기에서 $5\text{mol}\text{L}^{-1}$의 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 액상반응을 진행한다. 반응 시작 2시간 후 B의 농도$[\text{mol}\text{L}^{-1}]$는? (단, $k_1 = 0.1\text{h}^{-1}$, $k_2 = 0.05\text{mol}\text{L}^{-1}\text{h}^{-1}$, $e^{-0.2} = 0.8$이다)

① 1

② 0.9

③ 0.1

④ 0.05

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 연속반응 $A \rightarrow B \rightarrow C$에서 B의 생성속도와 소모속도를 합쳐 $2h$ 후 B의 농도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 초기농도 $C_{A0} = 5molL^{-1}$, $k_1 = 0.1h^{-1}$, $k_2 = 0.05molL^{-1}h^{-1}$, $t = 2h$, $e^{-0.2} = 0.8$이다.
구해야 할 값은 $2h$ 후 B의 농도 C_B이다.
주의할 조건은 k_1은 1차, k_2는 0차 속도상수이므로 B는 생성과 동시에 일정 속도로 소모된다는 점이다.

사용할 공식

$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A, \qquad \frac{dC_B}{dt} = k_1 C_A - k_2$
따라서
$C_A = C_{A0} e^{-k_1 t}, \qquad C_B = C_{A0}(1 - e^{-k_1 t}) - k_2 t$
이다.
이 공식을 쓰는 이유는 $A \rightarrow B$의 속도는 C_A에 비례하고, $B \rightarrow C$의 속도상수 단위가 $molL^{-1}h^{-1}$이므로 B의 소모는 시간에 대해 일정한 0차 반응이기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 먼저 A의 남은 농도를 구하면
$C_A(2) = 5e^{-0.2} = 5 \times 0.8 = 4 mol L^{-1}$
이다.
2. 따라서 $2h$ 동안 A가 B로 바뀐 양은
$5 - 4 = 1 mol L^{-1}$
이다.
3. 같은 시간 동안 $B \rightarrow C$로 소모된 양은
$k_2 t = 0.05 \times 2 = 0.1 mol L^{-1}$
이다.
4. 따라서 B의 실제 농도는
$C_B(2) = 1 - 0.1 = 0.9 mol L^{-1}$
이다.

선지 판단

① X
$1 mol L^{-1}$은 A가 B로 전환된 양만 계산한 값이다. 틀린 표현은 `$2h$ 후 $B$ 농도는 $1 mol L^{-1}$`이다. 올바르게는 `$B \rightarrow C$로 $0.1 mol L^{-1}$가 추가로 소모되므로 $2h$ 후 $B$ 농도는 $0.9 mol L^{-1}$`이다.

② O
계산 결과 $C_B(2) = 0.9 mol L^{-1}$이므로 옳다.

③ X
$0.1 mol L^{-1}$은 B가 남은 농도가 아니라 $2h$ 동안 $B \rightarrow C$로 소모된 양이다. 틀린 표현은 `남은 $B$ 농도가 $0.1 mol L^{-1}$`이라는 판단이다. 올바르게는 `소모량 $0.1 mol L^{-1}$을 생성량 $1 mol L^{-1}$에서 빼서 남은 농도는 $0.9 mol L^{-1}$`이다.

④ X
0.05는 속도상수 k_2의 수치일 뿐 $2h$ 후 B의 농도가 아니다. 틀린 표현은 `$k_2$ 값 자체가 곧 $B$ 농도`라는 해석이다. 올바르게는 `$k_2$에 시간을 곱해 소모량 $0.1 mol L^{-1}$을 구한 뒤, 이를 생성량에서 차감해야 한다`이다.

오답 포인트

속도상수의 단위를 보고 반응차수를 먼저 판별하지 않으면 두 반응을 모두 1차로 오해하기 쉽다. 또 A가 B로 바뀐 양 $1 mol L^{-1}$을 그대로 정답으로 두고, $B \rightarrow C$의 소모량 $0.1 mol L^{-1}$을 빼지 않는 실수가 자주 나온다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

중간생성물 농도 문제는 먼저 속도상수 단위로 반응차수를 정리하고, 다음에 `생성속도 - 소모속도` 물질수지를 세운 뒤, 마지막으로 생성 누적량에서 소모 누적량을 빼는 순서로 판단한다.

암기 포인트

h^{-1}이면 1차, $molL^{-1}h^{-1}$이면 0차이며, 중간생성물 농도는 `생성 누적량 - 소모 누적량`으로 정리된다.

NoteBase

문 24. 분자체(molecular sieve) 촉매인 제올라이트에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 천연물질에서 얻어질 수 있는 분자체 촉매이다.

② 제올라이트 세공의 크기에 따라 다양한 분자들의 체류시간을 조절할 수 있다.

③ 미세한 활성물질 입자를 제올라이트 표면에 분산시켜 담지 촉매를 제조할 수 있다.

④ 제올라이트를 활용하면 반응속도를 증가시킬 수는 있지만, 목적 생성물의 선택도를 향상시킬 수 없다.

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 제올라이트의 분자체 기능과 담지 촉매 지지체 기능, 그리고 형상선택성에 따른 선택도 향상 가능성을 구분하는 문제이다.

핵심 개념

제올라이트는 규칙적인 미세세공을 가진 알루미노실리케이트로서 분자체 역할을 하는 다공성 촉매이다.
분자체 기능의 핵심은 세공 크기에 따라 분자의 확산, 흡착, 체류가 달라지는 점이다.
형상선택성의 핵심은 세공 구조가 반응물이나 생성물의 출입을 가려 반응속도뿐 아니라 목적 생성물의 선택도도 높일 수 있다는 점이다.
담지 촉매 지지체로 사용할 때는 금속 등의 활성종을 제올라이트 표면이나 세공 내에 분산시켜 촉매 기능을 부여할 수 있다.

NoteBase

선지별 해설

① O
천연 제올라이트는 실제로 존재하므로 제올라이트는 천연물질에서 얻어질 수 있는 분자체 촉매라는 설명이 맞다.

② O
제올라이트의 세공 크기가 다르면 분자별 확산 속도와 흡착 정도가 달라지므로 분자의 체류시간을 조절할 수 있다.

③ O
제올라이트는 큰 비표면적과 미세세공 구조를 가져 활성물질을 잘 분산시키는 지지체로도 쓰인다. 따라서 미세한 활성물질 입자를 분산시켜 담지 촉매를 제조할 수 있다는 설명은 맞다.

④ X
틀린 부분은 "목적 생성물의 선택도를 향상시킬 수 없다"는 표현이다.
제올라이트는 형상선택 촉매로 작용하여 특정 반응물만 세공에 들어가게 하거나, 특정 생성물만 잘 빠져나오게 하므로 목적 생성물의 선택도를 향상시킬 수 있다.

오답 포인트

④는 촉매의 기능을 반응속도 증가에만 한정한 것이 함정이다. 제올라이트는 산점 때문에 반응속도도 높이지만, 분자체 세공 때문에 생성물 분포까지 바꿀 수 있다는 점을 놓치면 틀리기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

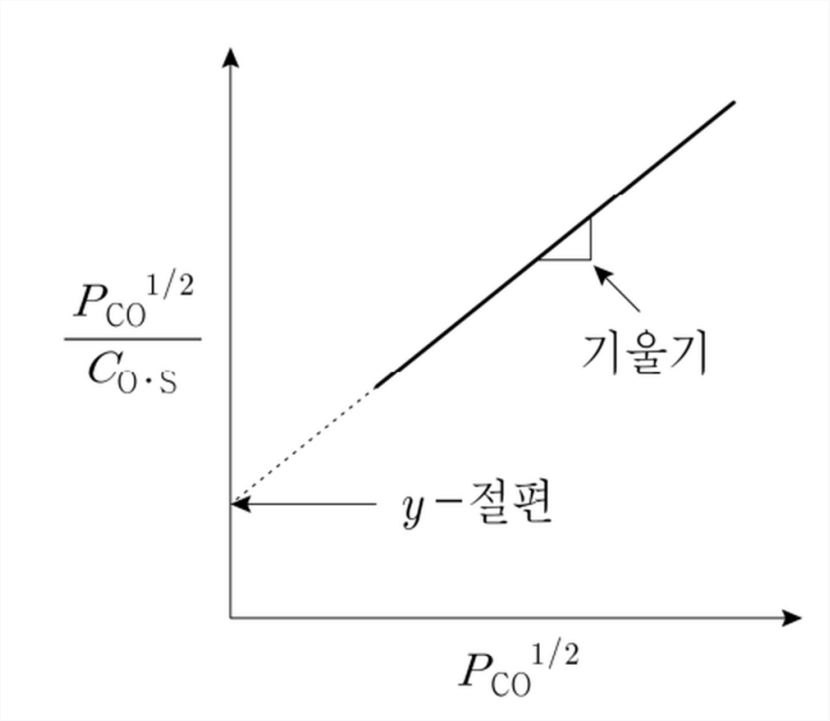
제올라이트 선지는 먼저 세공 크기와 형상선택성이 언급되는지 본다. 세공이 반응물의 출입과 생성물의 분포를 가르면 선택도 향상 가능성이 있으므로, "선택도에는 영향이 없다" 같은 단정은 틀린 진술로 판단된다.

암기 포인트

제올라이트는 분자체이자 형상선택 촉매이므로 속도와 선택도에 모두 영향을 줄 수 있다.

NoteBase

문 25. 고체표면 활성점(S)에 일산화탄소(CO)의 해리 흡착($CO + 2S \rightleftharpoons C \cdot S + O \cdot S$)에 대한 흡착등온식으로부터 다음 그래프를 얻었다. 이 그래프의 기울기와 y-절편을 바르게 연결한 것은? (단, P_{CO}는 CO의 분압, $C_{O \cdot S}$는 O·S의 농도, C_t는 전체활성점 농도, K_A는 흡착평형상수이다)



① 기울기: $\frac{1}{C_t}$, y-절편: $\frac{1}{C_t K_A^{1/2}}$
② 기울기: $\frac{2}{C_t}$, y-절편: $\frac{1}{C_t K_A^{1/2}}$
③ 기울기: $\frac{1}{C_t}$, y-절편: $\frac{1}{C_t K_A}$
④ 기울기: $\frac{2}{C_t}$, y-절편: $\frac{1}{C_t K_A}$

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 해리 흡착 평형식과 활성점 수지식을 결합해 직선식의 기울기와 y-절편을 읽는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 $CO + 2S \rightleftharpoons C \cdot S + O \cdot S$이다.
해리 흡착이므로 생성되는 $C \cdot S$와 $O \cdot S$의 농도는 같아 $C_{C \cdot S} = C_{O \cdot S}$이다.
전체 활성점 수지식은 $C_t = C_S + C_{C \cdot S} + C_{O \cdot S} = C_S + 2C_{O \cdot S}$이다.

NoteBase

사용할 공식

흡착 평형식은 $K_A = \frac{C_{C\cdot S} C_{O\cdot S}}{P_{CO} C_S^2}$이다.
이 문제에서는 $C_{C\cdot S} = C_{O\cdot S}$이므로 $K_A = \frac{C_{O\cdot S}^2}{P_{CO} C_S^2}$로 단순화된다. 직선식으로 바꾸려면 C_S를 활성점 수지식으로 제거한 뒤 $\frac{P_{CO}^{1/2}}{C_{O\cdot S}}$를 $P_{CO}^{1/2}$의 일차식으로 정리하면 된다.

계산 과정

평형식에서
$C_{O\cdot S} = K_A^{1/2} P_{CO}^{1/2} C_S$
이다.
이를 수지식 $C_t = C_S + 2C_{O\cdot S}$에 대입하면
$C_t = C_S(1 + 2K_A^{1/2} P_{CO}^{1/2})$
이므로
$C_S = \frac{C_t}{1 + 2K_A^{1/2} P_{CO}^{1/2}}$
이다.
따라서
$C_{O\cdot S} = \frac{C_t K_A^{1/2} P_{CO}^{1/2}}{1 + 2K_A^{1/2} P_{CO}^{1/2}}$
이고, 이를 정리하면
$\frac{P_{CO}^{1/2}}{C_{O\cdot S}} = \frac{1}{C_t K_A^{1/2}} + \frac{2}{C_t} P_{CO}^{1/2}$
이다.
따라서 기울기는 $\frac{2}{C_t}$, y-절편은 $\frac{1}{C_t K_A^{1/2}}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
기울기가 $\frac{1}{C_t}$로 제시되어 틀리다. 실제 직선식의 $P_{CO}^{1/2}$ 앞 계수는 $\frac{2}{C_t}$이다.
틀린 표현은 "기울기 $\frac{1}{C_t}$"이고, 올바르게는 "기울기 $\frac{2}{C_t}$"이다.

② O
유도된 직선식이 $\frac{P_{CO}^{1/2}}{C_{O\cdot S}} = \frac{1}{C_t K_A^{1/2}} + \frac{2}{C_t} P_{CO}^{1/2}$이므로 기울기 $\frac{2}{C_t}$, y-절편 $\frac{1}{C_t K_A^{1/2}}$가 맞다.

③ X
y-절편을 $\frac{1}{C_t K_A}$로 본 점이 틀리다. 평형식에서 농도와 분압의 관계를 정리하면 K_A가 아니라 $K_A^{1/2}$가 남는다.
틀린 표현은 "y-절편 $\frac{1}{C_t K_A}$"이고, 올바르게는 "y-절편 $\frac{1}{C_t K_A^{1/2}}$"이다.

④ X
기울기와 y-절편을 모두 잘못 연결한 선지이다. 기울기는 해리 흡착 때문에 활성점 두 개가 소비되어 $\frac{2}{C_t}$가 되고, y-절편은 K_A가 아니라 $K_A^{1/2}$가 포함된다.
틀린 표현은 "y-절편 $\frac{1}{C_t K_A}$"이고, 올바르게는 "y-절편 $\frac{1}{C_t K_A^{1/2}}$"이다.

오답 포인트

해리 흡착식에서 가장 자주 틀리는 부분은 두 가지이다. 첫째, 생성물 두 종이 각각 한 자리를 차지하므로 활성점 수지식이 $C_t = C_S + 2C_{O\cdot S}$가 된다는 점을 놓치기 쉽다. 둘째, $K_A = \frac{C_{O\cdot S}^2}{P_{CO} C_S^2}$에서 제곱근을 취해야 하므로 y-절편에 $K_A^{1/2}$가 들어가는데 이를 K_A로 잘못 쓰기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

해리 흡착 직선화 문제는 먼저 생성물 두 종의 농도 관계를 맞추고, 다음에 활성점 수지식을 세운 뒤, 마지막에 문제에서 준 축 변수에 맞게 식을 일차식 $y = a + bx$ 형태로 정리하면 된다.

암기 포인트

해리 흡착 $CO + 2S$는 활성점 두 자리를 쓰므로 기울기에 2가 붙고, 평형식은 제곱근 정리로 $K_A^{1/2}$가 남는다.

NoteBase