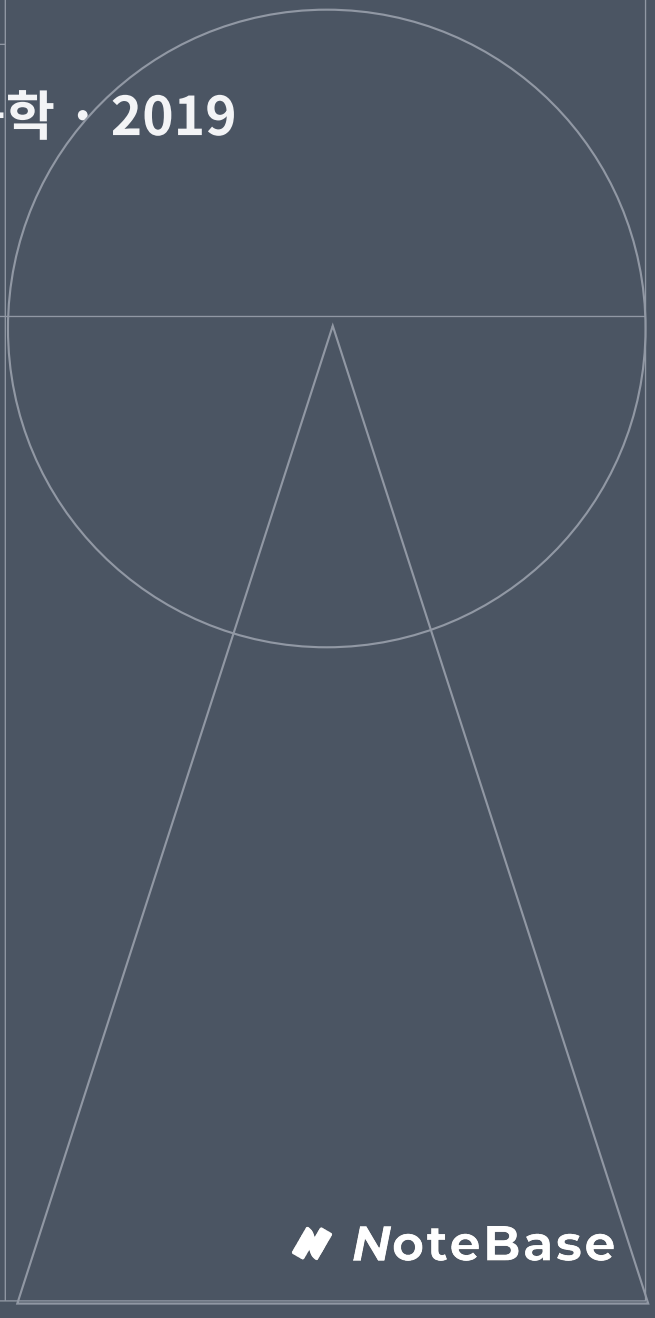
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2019



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2019

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2019

문 1. 등온 혼합흐름 반응기에서 A→B인 비가역 2차 액상 반응을 진행하여 전환율 80%를 얻었다. 이 반응을 같은 부피의 플러그흐름 반응기에서 조업한다면 전환율은? (단, 다른 조건은 변함없다)

① $\frac{4}{5}$
② $\frac{8}{9}$
③ $\frac{14}{15}$
④ $\frac{20}{21}$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 비가역 2차 액상반응에서 같은 부피의 CSTR와 PFR 설계식을 연결해 PFR의 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

- 주어진 값: CSTR에서 전환율 $X = 0.8$이다.
- 구해야 할 값: 같은 부피 PFR의 전환율 X이다.
- 주의할 조건: 액상반응이므로 밀도와 체적유량이 일정하고, 2차반응이므로 $-r_A = kC_{A0}^2(1-X)^2$이다.

사용할 공식

CSTR 설계식은 $V = \frac{F_{A0}X}{kC_{A0}^2(1-X)^2}$이다.
PFR 설계식은 $V = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2}\int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2} = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2}\left(\frac{1}{1-X}-1\right) = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2}\cdot\frac{X}{1-X}$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 CSTR는 출구 농도 하나로 반응속도를 평가하고, PFR는 반응기 전체에서 변하는 농도를 적분해 반영하기 때문이다.

NoteBase

기출OX 해설집 · 공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2019

계산 과정

1. CSTR 조건 $X = 0.8$을 설계식에 대입하면
$\frac{VkC_{A0}^2}{F_{A0}} = \frac{0.8}{(1-0.8)^2} = \frac{0.8}{0.04} = 20$
이다.
2. 같은 부피, 같은 조건의 PFR에서도 $\frac{VkC_{A0}^2}{F_{A0}}$ 값은 그대로 20이다.
3. 따라서 PFR에서는
$\frac{X}{1-X} = 20$
이므로
$X = 20(1-X) \Rightarrow 21X = 20 \Rightarrow X = \frac{20}{21}$
이다.

선지별 해설

① X
- $\frac{4}{5}$는 문제에서 이미 주어진 CSTR의 전환율이다. 같은 부피의 PFR은 2차반응에서 더 높은 전환율을 준다.
- 틀린 판단은 '같은 부피이면 전환율도 같다'는 것이다. 올바르게는 같은 부피 PFR의 전환율은 $\frac{20}{21}$이다.

② X
- $\frac{8}{9}$이면 $\frac{X}{1-X} = 8$이 된다. 그러나 같은 부피 조건에서 CSTR로부터 얻은 값은 $\frac{VkC_{A0}^2}{F_{A0}} = 20$이므로 맞지 않는다.
- 틀린 판단은 PFR 식의 좌변 값을 8로 두는 것이다. 올바르게는 $\frac{X}{1-X} = 20$이다.

③ X
- $\frac{14}{15}$이면 $\frac{X}{1-X} = 14$가 된다. 이 값도 같은 부피 조건 20을 만족하지 못한다.
- 틀린 판단은 중간 계산값을 14로 축소하는 것이다. 올바르게는 $\frac{X}{1-X} = 20$이므로 전환율은 $\frac{20}{21}$이다.

④ O
- $\frac{20}{21}$이면 $\frac{X}{1-X} = 20$이 되어 같은 부피 조건을 정확히 만족한다.
- 2차반응에서는 농도가 높은 구간을 먼저 지나가는 PFR이 같은 부피의 CSTR보다 유리하므로 이 선택지가 옳다.

오답 포인트

CSTR와 PFR의 설계식을 같은 형태로 착각하면 ①처럼 원래 전환율을 그대로 고르기 쉽다. 또 2차반응의 $(1-X)^2$ 항을 적분식으로 옮기는 과정에서 같은 부피 조건이 만드는 무차원수 20을 놓치면 ②, ③ 같은 값으로 흐르기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

같은 부피 비교 문제는 먼저 한 반응기 식으로 $\frac{VkC_{A0}^2}{F_{A0}}$ 값을 구한 뒤, 다른 반응기 식에 그 값을 그대로 대입해 전환율을 다시 푼다. 양의 차수 반응에서는 같은 부피일 때 보통 PFR의 전환율이 CSTR보다 크다.

암기 포인트

같은 부피, 양의 차수 반응이면 대체로 $X_{PFR} > X_{CSTR}$이고, 2차 액상반응의 PFR 설계식은 $\frac{X}{1-X}$ 꼴로 정리된다.

NoteBase

문 2. 다음과 같은 액상 평행반응이 경쟁적으로 진행된다. $\alpha_1 < \alpha_2, \beta_1 < \beta_2$ 경우, 원하지 않는 부산물 U에 비하여 원하는 생성물 D를 더 많이 얻기 위한 방법이 아닌 것은?

$A + B \rightarrow D,\ r_D = k_1 C_A^{\alpha_1} C_B^{\beta_1}$
$A + B \rightarrow U,\ r_U = k_2 C_A^{\alpha_2} C_B^{\beta_2}$

① 혼합흐름 반응기를 사용한다.

② 순환비(recycle ratio)가 큰 재순환 반응기(recycle reactor)를 사용한다.

③ 불활성물질로 희석된 원료를 사용한다.

④ 회분식 반응기를 사용한다.

정답 4번

출제 포인트

병렬반응에서 원하는 생성물의 반응차수가 더 낮을 때 선택도 $\frac{r_D}{r_U}$를 키우려면 반응물 농도를 어떻게 유지해야 하는지를 묻는 문제이다.

핵심 개념

상대 선택도는 $\frac{r_D}{r_U} = \frac{k_1}{k_2} C_A^{\alpha_1 - \alpha_2} C_B^{\beta_1 - \beta_2}$이다.
이 문제에서는 $\alpha_1 < \alpha_2, \beta_1 < \beta_2$이므로 $\alpha_1 - \alpha_2 < 0, \beta_1 - \beta_2 < 0$이다.
따라서 C_A와 C_B를 낮출수록 원하지 않는 부생성물 U보다 원하는 생성물 D의 선택도가 커진다. 즉 반응기 내부에서 반응물 농도를 낮고 균일하게 유지하는 방식이 유리하다.

NoteBase

선지별 해설

① O
혼합흐름 반응기(CSTR)는 반응기 전체가 출구와 같은 낮은 농도로 잘 섞여 있다. 부반응 U가 A, B 농도에 더 민감하므로 이런 낮은 농도 조건이 D 선택도에 유리하다.

② O
순환비가 큰 재순환 반응기는 거동이 혼합흐름 반응기에 가까워진다. 신선 원료가 크게 희석되어 반응기 내부의 C_A, C_B가 낮아지므로 고차수인 부반응 U가 더 억제된다.

③ O
불활성물질로 원료를 희석하면 A, B의 농도가 함께 낮아진다. 이때 반응차수가 더 큰 U의 속도가 상대적으로 더 크게 줄어들어 D 선택도가 증가한다.

④ X
회분식 반응기는 반응 초기에 A, B 농도가 가장 높다. 이 초기 고농도 구간에서는 반응차수가 더 큰 부반응 U가 상대적으로 더 유리하므로 D를 더 많이 얻기 위한 대표적 방법이 아니다.
틀린 표현은 "회분식 반응기를 사용한다"이다.
올바르게는 반응물 농도를 낮게 유지하는 혼합흐름형 운전, 큰 재순환비 운전, 또는 희석 운전이 유리하다.

오답 포인트

회분식 반응기도 시간이 지나면 농도가 내려가므로 유리하다고 착각하기 쉽다. 그러나 선택도는 초기의 높은 반응물 농도 구간에서 크게 손해를 볼 수 있으므로, 이 문제의 핵심은 "시간이 지나면 낮아진다"가 아니라 "처음부터 낮은 농도로 유지되는가"이다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응에서는 먼저 $\frac{r_{\text{desired}}}{r_{\text{undesired}}}$를 만든다. 원하는 반응의 차수가 더 낮으면 반응물 농도를 낮추는 반응기와 운전법을 고르고, 원하는 반응의 차수가 더 높으면 반대로 높은 농도를 유지하는 쪽이 유리하다.

암기 포인트

원하는 반응의 차수가 더 낮으면 낮은 농도가 답이며, CSTR·큰 재순환비·희석이 유리하다.

NoteBase

문 3. 등온 혼합흐름 반응기에서 $A \rightarrow B$인 비가역 1차 액상 반응이 진행된다. 이 반응의 반응속도상수가 1min^{-1}, A의 초기농도가 1molL^{-1}, A의 초기 몰유속이 100molmin^{-1}일 때, A의 전환율 80%를 얻기 위한 반응기의 부피[L]는?

① 100

② 200

③ 300

④ 400

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 등밀도 액상 1차 반응의 CSTR 설계식을 이용해 전환율 0.8에 필요한 반응기 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 $k = 1min^{-1}, C_{A0} = 1mol/L, F_{A0} = 100mol/min, X = 0.8$이다.
부피유량은 $v_0 = F_{A0}/C_{A0} = 100L/min$이다.
구해야 할 값은 CSTR 부피 V이다.

사용할 공식

$V = \frac{F_{A0}X}{-r_A}, \quad -r_A = kC_A = kC_{A0}(1-X)$
등온 액상 반응이고 밀도가 일정하므로 $C_A = C_{A0}(1-X)$가 성립한다. CSTR은 반응기 내부와 출구 조성이 같으므로 출구 농도로 반응속도를 계산한다.

계산 과정

1. 출구에서의 반응속도는 $-r_A = 1 \times 1 \times (1-0.8) = 0.2mol/(L \cdot min)$이다.
2. 설계식에 대입하면 $V = \frac{100 \times 0.8}{0.2} = 400L$이다.
3. 따라서 전환율 80%를 얻기 위한 반응기 부피는 $400L$이다.

선지 판단

1번 X: $100L$이면 $kV/v_0 = 1$이므로 $X = \frac{1}{1+1} = 0.5$이다. 전환율 80%에 못 미치므로 올바르게는 $400L$이어야 한다.
2번 X: $200L$이면 $kV/v_0 = 2$이므로 $X = \frac{2}{1+2} = \frac{2}{3} \approx 0.667$이다. 여전히 부족하므로 올바르게는 $400L$가 된다.
3번 X: $300L$이면 $kV/v_0 = 3$이므로 $X = \frac{3}{1+3} = 0.75$이다. 80%에 도달하지 못하므로 올바르게는 $400L$를 선택해야 한다.
4번 O: $400L$이면 $kV/v_0 = 4$이고 $X = \frac{4}{1+4} = 0.8$이다. 문제 조건의 전환율 80%를 정확히 만족한다.

NoteBase

오답 포인트

CSTR은 출구 농도 $C_A = C_{A0}(1 - X)$로 속도를 계산해야 하는데, 입구 농도 C_{A0}를 그대로 넣으면 부피를 과소평가한다. 또한 CSTR과 PFR의 설계식을 혼동하면 다른 값이 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

등밀도 액상 1차 CSTR은 먼저 $v_0 = F_{A0}/C_{A0}$를 구한 뒤, $V = \frac{v_0 X}{k(1-X)}$로 바로 정리해 대입하면 빠르게 판단할 수 있다.

암기 포인트

1차 등밀도 CSTR은 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$이고, 따라서 $\tau = \frac{X}{k(1-X)}$이다.

NoteBase

문 4. 등온 회분식 반응기에서 $A \rightarrow B$인 비가역 2차 액상 반응을 진행하여 반응 개시 후 전환율 20%에 도달하는 데 10min이 걸렸다. 전환율 50%에 도달하는 데 걸리는 시간[min]은? (단, 다른 조건은 변함없다)

① 20

② 30

③ 40

④ 50

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 등온 회분식 반응기에서 비가역 2차 액상 반응의 적분식 $\frac{X}{1-X} = kC_{A0}t$를 이용해 주어진 전환율에서 시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 전환율 $X = 0.2$일 때 $t = 10min$이다.
구해야 할 값: 전환율 $X = 0.5$에 도달하는 시간이다.
주의할 조건: 액상 반응이고 다른 조건이 변하지 않으므로 부피 일정으로 보고 $C_A = C_{A0}(1 - X)$를 쓴다.

사용할 공식

비가역 2차 반응 $-r_A = kC_A^2$의 등온 회분식 적분식은
$\frac{X}{1-X} = kC_{A0}t$
이다.
이 공식을 쓰는 이유: 액상 등온 회분식 반응기에서는 부피가 일정하므로 $C_A = C_{A0}(1 - X)$가 되고, 2차 반응 속도식을 적분하면 전환율과 시간의 관계가 위 식으로 정리된다.

NoteBase

계산 과정

1. $X = 0.2, t = 10min$을 대입하면
$\frac{0.2}{1-0.2} = kC_{A0} \times 10$
이므로
$0.25 = 10kC_{A0}$
이다.
2. 따라서
$kC_{A0} = 0.025$
이다.
3. $X = 0.5$일 때는
$\frac{0.5}{1-0.5} = kC_{A0}t$
이므로
$1 = 0.025t$
이다.
4. 따라서
$t = 40min$
이다.

선지별 해설

① X
- 20min은 전환율 X 자체를 시간에 비례시킨 값이다.
- 20min을 대입하면 $kC_{A0}t = 0.5$이므로 $\frac{X}{1-X} = 0.5$, 즉 $X \approx 0.333$이다. 따라서 20min이라는 값은 틀리고 올바르게는 $40min$이다.

② X
- 30min이면 $kC_{A0}t = 0.75$가 되어 전환율은 $X = \frac{0.75}{1+0.75} \approx 0.429$이다.
- 아직 $X = 0.5$에 도달하지 못하므로 30min이라는 값은 틀리고 올바르게는 $40min$이다.

③ O
- 계산 결과 $t = 40min$이므로 정답이다.
- $X = 0.2$에서 10min이 걸렸더라도 2차 반응은 전환율이 올라갈수록 속도가 더 감소하므로 $X = 0.5$까지 시간은 단순 비례로 구하지 않는다.

④ X
- 50min이면 $kC_{A0}t = 1.25$가 되어 전환율은 $X = \frac{1.25}{1+1.25} \approx 0.556$이다.
- $X = 0.5$를 이미 넘어선 시간이므로 50min이라는 값은 과대값이고 올바르게는 $40min$이다.

NoteBase

오답 포인트

전환율 X와 시간 t가 선형 비례한다고 착각하면 오답이 나온다. 이 문항은 2차 반응 적분식에서 비교해야 하는 값이 X 자체가 아니라 $\frac{X}{1-X}$라는 점을 노린 문제이다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분식 2차 반응 문제는 먼저 $\frac{X}{1-X} = kC_{A0}t$ 형태를 세우고, 주어진 한 점으로 kC_{A0}를 구한 뒤 목표 전환율을 다시 대입해 시간을 계산하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

부피 일정인 회분식 2차 반응은 X가 아니라 $\frac{X}{1-X}$가 시간에 비례한다.

NoteBase

문 5. 반응물 A의 초기농도(C_{A0})를 바꾸며 농도가 초기농도의 반이 되는 시간($t_{1/2}$)을 측정하는 반감기 방법을 이용하여 실험한 결과, C_{A0}에 대해 $t_{1/2}$이 변하지 않았다. 이 반응에 대해 A의 농도(C_A)와 시간(t) 사이의 선형관계를 얻을 수 있는 것은?

① C_A 대 t

② $\ln C_A$ 대 t

③ $\frac{1}{C_A}$ 대 t

④ $\frac{1}{C_A^2}$ 대 t

정답 2번

출제 포인트

반감기 $t_{1/2}$의 초기농도 의존성으로 반응차수를 판별하고, 그 차수의 적분 속도식에서 직선이 되는 변수를 찾는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건은 초기농도 C_{A0}를 바꾸어도 반감기 $t_{1/2}$가 일정하다는 것이다.
구해야 할 내용은 C_A와 t 사이에서 어떤 형태가 직선이 되는지이다.
주의할 조건은 반감기가 초기농도와 무관하면 1차 반응이라는 점이다.

사용할 공식

1차 반응의 반감기와 적분식은 다음과 같다.
$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$
$\ln C_A = \ln C_{A0} - kt$
이 공식을 쓰는 이유는 $t_{1/2}$가 C_{A0}와 무관하다는 조건이 1차 반응의 특징이기 때문이다.

계산 과정

1. 0차 반응이면 $t_{1/2} = \frac{C_{A0}}{2k}$이므로 초기농도에 따라 반감기가 변한다.
2. 1차 반응이면 $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$이므로 초기농도와 무관하다.
3. 따라서 이 반응은 1차 반응이다.
4. 1차 반응의 적분식 $\ln C_A = \ln C_{A0} - kt$에서 $\ln C_A$와 t가 직선관계가 된다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 'C_A 대 t '가 틀린 표현이다. 올바르게는 0차 반응에서만 $C_A = C_{A0} - kt$가 직선이 된다. 이 문제는 반감기가 초기농도와 무관하므로 1차 반응이다.
② O: 1차 반응의 적분식은 $\ln C_A = \ln C_{A0} - kt$이므로 $\ln C_A$ 대 t가 직선이다. 기울기는 $-k$, 절편은 $\ln C_{A0}$이다.
③ X: '$\frac{1}{C_A}$ 대 t '가 틀린 표현이다. 올바르게는 2차 반응에서 $\frac{1}{C_A} = \frac{1}{C_{A0}} + kt$가 직선이 된다. 2차 반응의 반감기는 $t_{1/2} = \frac{1}{kC_{A0}}$이므로 초기농도에 따라 변한다.
④ X: '$\frac{1}{C_A^2}$ 대 t '가 틀린 표현이다. 올바르게는 3차 반응에서 $\frac{1}{C_A^2} = \frac{1}{C_{A0}^2} + 2kt$가 직선이 된다. 이 경우에도 반감기는 초기농도에 의존한다.

오답 포인트

직선식만 외우고 반감기 조건을 연결하지 않으면 ③이나 ④처럼 고차 반응의 선형식에 끌리기 쉽다. 이 문항의 핵심 함정은 '어떤 그래프가 직선인가'를 바로 묻기 전에 '반감기가 초기농도와 무관한가'로 먼저 반응차수를 판별해야 한다는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

반감기 문제가 나오면 먼저 $t_{1/2}$가 C_{A0}에 의존하는지부터 본다. 무관하면 1차, 비례하면 0차, 역비례하면 2차로 판별한 뒤 그 차수의 적분식에서 직선 형태를 고르면 된다.

암기 포인트

반감기 일정이면 1차 반응이고, 1차 반응은 $\ln C_A$ 대 t가 직선이다.

NoteBase

문 6. 400 K에서 이상기체 A의 반응속도식이 (가)와 같다. 이 반응의 속도식이 (나)처럼 표현될 수 있다면, 반응속도상수 (k)의 값과 단위는? (단, p_A는 A의 기체압력, C_A는 A의 농도, 기체상수는 $R = 8 \times 10^{-5}$atm m^3 mol^{-1} K^{-1}이다)

(가) $-\frac{dp_A}{dt} = 4p_A^2$[atm h^{-1}]
(나) $-r_A = kC_A^2$[mol m^{-3} h^{-1}]

① 0.128m^3 mol^{-1} h^{-1}
② 0.256m^3 mol^{-1} h^{-1}
③ 0.128mol m^{-3} h^{-1}
④ 0.256mol m^{-3} h^{-1}

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 이상기체식 $p_A = C_ART$를 이용해 압력 기준 속도식을 농도 기준 속도식으로 바꾸고, 2차 반응 속도상수 k의 값과 단위를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 식은 $-dp_A/dt = 4p_A^2$이고, 구하는 식은 $-r_A = kC_A^2$이다.
온도는 $400K$, 기체상수는 $R = 8 \times 10^{-5} atmm^3mol^{-1}K^{-1}$이며, 이상기체이므로 $p_A = C_ART$가 성립한다.

사용할 공식

$p_A = C_ART, \quad -r_A = -\frac{dC_A}{dt}, \quad -\frac{dp_A}{dt} = RT\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)$
같은 반응을 압력식과 농도식으로 각각 쓴 것이므로, 이상기체 관계식으로 p_A를 C_A로 바꾸어 두 식의 계수를 비교하면 된다.

계산 과정

$p_A = C_ART \Rightarrow \frac{dp_A}{dt} = RT\frac{dC_A}{dt}$
$-\frac{dp_A}{dt} = RT\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = RTkC_A^2$
$C_A = \frac{p_A}{RT} \Rightarrow -\frac{dp_A}{dt} = RT \cdot k\left(\frac{p_A}{RT}\right)^2 = \frac{k}{RT}p_A^2$
따라서 $\frac{k}{RT} = 4$이므로 $k = 4RT = 4 \times 8 \times 10^{-5} \times 400 = 0.128$이다.
또한 4의 단위는 $atm^{-1}h^{-1}$이므로, k의 단위는 $(atm^{-1}h^{-1})(atmm^3mol^{-1}) = m^3mol^{-1}h^{-1}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① O: 계산 결과 $k = 0.128 m^3 mol^{-1} h^{-1}$이므로 맞다.
② X: 단위는 맞지만 값이 틀리다. $RT = 0.032$인데 이를 두 배로 계산하면 0.256이 되지만, 올바르게는 $k = 4RT = 0.128$이다.
③ X: 값은 같아 보여도 단위가 틀리다. k는 2차 속도상수이므로 단위가 $m^3 mol^{-1} h^{-1}$이어야 한다. $mol m^{-3} h^{-1}$는 속도 $-r_A$의 단위이다.
④ X: 값과 단위가 모두 틀리다. 올바른 값은 0.128이고, 올바른 단위는 $m^3 mol^{-1} h^{-1}$이다.

오답 포인트

p_A와 C_A를 같은 차원의 변수처럼 바로 바꾸거나, k의 단위를 반응속도 $-r_A$의 단위와 혼동하면 ③, ④ 같은 오답으로 이어진다. 또한 RT 계산을 잘못하면 ②처럼 값이 두 배로 틀어질 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

압력식과 농도식이 함께 나오면 먼저 $p = CRT$로 변수를 통일하고, 다음에 $dp/dt = RT dC/dt$를 적용해 계수를 비교한다. 마지막에는 속도상수의 단위를 반응차수에 맞게 검산하면 된다.

암기 포인트

이상기체의 같은 2차 반응에서는 $-dp/dt = ap^2$와 $-r = kC^2$가 대응할 때 $k = aRT$ 관계로 바로 연결된다.

NoteBase

문 7. 등온 혼합흐름 반응기에서 $A \rightarrow P$인 비가역 1차 반응이 진행된다. 반응물 A만을 반응기에 주입할 때, 부피가 V인 혼합흐름 반응기를 이용하여 얻을 수 있는 전환율이 80%이었다. 이를 대체하여 부피가 $\frac{V}{2}$인 혼합흐름 반응기 두개를 직렬로 연결한다면, 최종적으로 얻을 수 있는 전환율은? (단, 반응속도 상수와 부피유속은 동일하다)

① $\frac{3}{4}$
② $\frac{8}{9}$
③ $\frac{15}{16}$
④ $\frac{24}{25}$

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 등온 비가역 1차 반응의 혼합흐름반응기 설계식으로 직렬 CSTR의 최종 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 부피가 V인 단일 혼합흐름반응기에서 전환율이 80%이다.
구해야 할 값: 부피가 $V/2$인 혼합흐름반응기 2개를 직렬로 연결했을 때의 최종 전환율이다.
주의할 조건: 등온, 비가역 1차 반응이며 반응속도 상수와 부피유속이 동일하므로 각 반응기의 공간시간만 달라진다.

사용할 공식

혼합흐름반응기(CSTR)의 1차 반응 설계식은 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$ 이고, 같은 식을 $\frac{C_{A,\text{out}}}{C_{A,\text{in}}} = \frac{1}{1+k\tau}$ 로도 쓸 수 있다.
이 공식을 쓰는 이유: 문제의 반응기는 혼합흐름반응기이고 반응이 1차이므로 각 반응기마다 입구 농도와 출구 농도의 관계를 이 식으로 바로 연결할 수 있다.

계산 과정

1. 부피가 V인 단일 CSTR에서 전환율이 0.8이므로 $0.8 = \frac{k\tau}{1+k\tau}$ 이다. 이를 풀면 $k\tau = 4$이다.
2. 반응기 두 개를 $V/2$씩 나누면 각 반응기의 공간시간은 $\tau/2$이므로 각 반응기에서 $k\tau' = 2$이다.
3. 첫 번째 $V/2$ CSTR의 출구 농도비는 $\frac{C_{A1}}{C_{A0}} = \frac{1}{1+2} = \frac{1}{3}$ 이므로 첫 단계 전환율은 $1 - 1/3 = 2/3$이다.
4. 두 번째 $V/2$ CSTR에서도 같은 관계가 적용되어 $\frac{C_{A2}}{C_{A1}} = \frac{1}{3}$ 이다. 따라서 $\frac{C_{A2}}{C_{A0}} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{9}$ 이고, 최종 전환율은 $X = 1 - \frac{1}{9} = \frac{8}{9}$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① X

- 3/4는 두 개의 $V/2$ CSTR를 직렬로 연결한 효과를 반영하지 못한 값이다.
- 틀린 표현은 최종 전환율을 3/4로 본 점이다. 올바르게는 각 단계의 잔존분율이 1/3씩 곱해져 최종 전환율은 8/9이다.

② O

- 계산 결과 최종 전환율은 8/9이므로 옳다.
- 핵심은 단일 반응기의 80%를 그대로 쓰지 않고 먼저 $k\tau = 4$를 구한 뒤, 각 $V/2$ 반응기에서 $k\tau' = 2$를 적용하는 점이다.

③ X

- 15/16은 각 단계 뒤의 잔존분율을 1/4로 잘못 본 계산에서 나오는 값이다.
- 틀린 표현은 최종 잔존분율을 1/16으로 본 점이다. 올바르게는 각 단계의 잔존분율이 1/3이므로 최종 잔존분율은 1/9이고 전환율은 8/9이다.

④ X

- 24/25는 단일 V 반응기의 잔존분율 0.2를 두 번 곱한 것처럼 계산한 오답이다.
- 틀린 표현은 각 $V/2$ 반응기에서도 전환율이 80%라고 본 점이다. 올바르게는 $V/2$ 반응기 하나의 전환율은 2/3이고, 두 개 직렬의 최종 전환율은 8/9이다.

오답 포인트

단일 CSTR의 전환율 80%를 반으로 나눈 반응기에도 그대로 적용하면 오답이 된다. 먼저 전환율을 $k\tau$ 또는 잔존분율로 바꾼 뒤, 직렬 CSTR에서는 각 단계의 잔존분율을 곱해야 한다는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

CSTR 직렬 문제는 먼저 주어진 전환율을 $k\tau$로 환산하고, 각 반응기의 부피에 맞게 $k\tau$를 다시 구한다. 그다음 단계별 잔존분율 $\frac{1}{1+k\tau}$을 곱해 최종 전환율로 바꾸면 된다.

암기 포인트

1차 CSTR는 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$이고, 직렬 CSTR는 전환율을 더하지 않고 잔존분율 $\frac{1}{1+k\tau}$을 단계별로 곱한다.

NoteBase

문 8. 다음의 반응계에서 혼합흐름 반응기와 플러그흐름 반응기에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, B와 C의 초기농도는 0이다)

$A \rightarrow B,\ r_1 = k_1 C_A$
$B \rightarrow C,\ r_2 = k_2 C_B$

① 플러그흐름 반응기가 B의 최대농도를 얻는 데 혼합흐름 반응기보다 항상 짧은 공간시간을 요구한다.

② 반응기에서 얻어지는 B의 최대농도는 플러그흐름 반응기가 혼합흐름 반응기보다 항상 크다.

③ B의 총괄수율은 어떤 전환율에서도 플러그흐름 반응기가 혼합흐름 반응기보다 항상 크다.

④ $\frac{k_2}{k_1}$가 1보다 클 때, 높은 B의 총괄수율을 얻기 위해서는 A의 전환율을 낮추는 것이 유리하다.

정답 1번

출제 포인트

연속 1차 반응 $A \rightarrow B \rightarrow C$에서 플러그흐름반응기와 혼합흐름반응기의 중간생성물 B의 최대농도, 총괄수율, 최적 공간시간을 비교하는 문제이다.

핵심 개념

플러그흐름반응기(PFR)는 축방향 혼합이 없어 먼저 생성된 B가 뒤에서 오래 머물지 않으므로 중간생성물 회수에 유리하다.
혼합흐름반응기(CSTR)는 생성된 B가 곧바로 반응기 전체에 섞여 $B \rightarrow C$ 반응을 더 겪으므로 B의 농도와 수율이 불리하다.
B 최대농도를 주는 공간시간은 $\tau_{\max,\,\mathrm{PFR}} = \frac{\ln(k_2/k_1)}{k_2 - k_1}$, $\tau_{\max,\,\mathrm{CSTR}} = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$이다. 특히 $k_1 = k_2$이면 두 반응기 모두 $\tau_{\max} = 1/k_1$로 같다.

NoteBase

선지별 해설

① X
틀린 부분은 "항상 짧은 공간시간"이다.
올바르게는 "플러그흐름 반응기가 최대 B 농도를 얻는 데 필요한 공간시간은 혼합흐름 반응기보다 짧거나 같고, $k_1 = k_2$이면 서로 같다"이다.
$k_1 = k_2$이면 $\tau_{max,\,PFR} = \tau_{max,\,CSTR} = 1/k_1$이므로 항상 더 짧다고 할 수 없다.

② O
플러그흐름 반응기는 역혼합이 없어 생성된 B가 반응기 전체의 같은 고농도 영역에 즉시 노출되지 않으므로 B의 최고 농도가 더 크게 나온다.
같은 조건에서 CSTR는 생성된 B가 즉시 섞여 $B \to C$ 소모를 더 많이 겪으므로 최대 B 농도가 더 낮다.

③ O
총괄수율은 반응한 A 중 실제로 B로 남아 있는 비율이다.
같은 A 전환율에서 CSTR는 생성된 B가 반응기 내 평균 농도에 즉시 노출되어 추가로 C로 넘어가기 쉽고, PFR는 농도구배 덕분에 과반응이 덜하므로 B의 총괄수율이 항상 더 크다.

④ O
$k_2/k_1 > 1$이면 B의 소모가 생성보다 상대적으로 빠르다.
따라서 A의 전환율을 너무 높이면 새로 생긴 B가 C로 더 많이 전환되어 총괄수율이 떨어지므로, 높은 B 총괄수율을 원할수록 낮은 전환율 구간이 유리하다.

오답 포인트

①의 "항상"이 함정이다. PFR가 중간생성물 회수에 유리하다는 사실과 최대농도 도달 공간시간이 언제나 더 짧다는 말을 같은 뜻으로 보면 틀리기 쉽다. $k_1 = k_2$에서는 두 반응기의 최적 공간시간이 같으므로 ①은 절대화 때문에 오답이다.

다시 나오면 이렇게 판단

연속반응 $A \to B \to C$에서 목표가 중간생성물 B이면 먼저 PFR가 농도와 수율 면에서 유리하다는 점을 잡는다. 그다음 선지에 "항상", "반드시" 같은 절대 표현이 있으면 $k_1 = k_2$ 같은 경계조건에서 예외나 동등조건이 있는지 확인하면 된다.

암기 포인트

중간생성물 B의 농도와 수율은 PFR가 유리하고, τ_{max}만은 $k_1 = k_2$에서 PFR와 CSTR가 같아진다.

NoteBase

문 9. 회분식 반응기에서 다음과 같은 2단계의 비가역 액상 반응이 진행된다. 원하는 생성물 R의 농도가 최대가 되는 시점에서 B의 농도가 $1\text{mol}\text{L}^{-1}$일 때, 이 시점에서 성분 A와 S의 농도 $[\text{mol}\text{L}^{-1}]$는? (단, A의 초기농도는 $C_{A0}=2.0\text{mol}\text{L}^{-1}$, B의 초기농도는 $3.0\text{mol}\text{L}^{-1}$, R과 S의 초기농도는 0이다)

반응식:

$A+B\rightarrow R,\ k_1=2.0\text{L}\text{mol}^{-1}\text{min}^{-1}$

$R+B\rightarrow S,\ k_2=1.0\text{L}\text{mol}^{-1}\text{min}^{-1}$

R의 최대 농도 $C_{R,\max}$ 관계식:

$\frac{C_{R,\max}}{C_{A0}}=\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{\left(\frac{k_2}{k_2-k_1}\right)},\ \frac{k_2}{k_1}\neq 1$

① A의 농도: 0.25, S의 농도: 0.75

② A의 농도: 0.25, S의 농도: 1.25

③ A의 농도: 0.50, S의 농도: 0.50

④ A의 농도: 0.50, S의 농도: 1.00

정답 3번

출제 포인트

중간생성물 R의 최대농도식과 반응량 물질수지를 함께 써서 C_A와 C_S를 구하는 문제이다.

조건 정리

초기농도는 $C_{A0}=2.0mol/L, C_{B0}=3.0mol/L, C_{R0}=0, C_{S0}=0$이다.

R의 농도가 최대인 시점에서 $C_B=1.0mol/L$이다.

반응은 $A+B\rightarrow R, R+B\rightarrow S$의 2단계 비가역 반응이다.

사용할 공식

주어진 최대농도 관계식은

$\frac{C_{R,\max}}{C_{A0}}=\left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{\frac{k_2}{k_2-k_1}}$

이다.

이 문제는 먼저 이 식으로 $C_{R,\max}$를 구한 뒤, 각 반응의 반응량을 두고 A, B, R, S의 물질수지를 세우면 된다.

NoteBase

계산 과정

$k_1 = 2.0$, $k_2 = 1.0$, $C_{A0} = 2.0$을 대입하면
$C_{R,\max} = 2.0\left(\frac{2.0}{1.0}\right)^{\frac{1.0}{1.0-2.0}} = 2.0 \times 2^{-1} = 1.0 mol/L$
이다.
제1반응의 반응량을 ξ_1, 제2반응의 반응량을 ξ_2라 두면
$C_A = 2.0 - \xi_1, \quad C_B = 3.0 - \xi_1 - \xi_2, \quad C_R = \xi_1 - \xi_2, \quad C_S = \xi_2$
이다.
주어진 조건 $C_B = 1.0$, $C_R = 1.0$을 넣으면
$\xi_1 + \xi_2 = 2.0, \quad \xi_1 - \xi_2 = 1.0$
이므로 $\xi_1 = 1.5$, $\xi_2 = 0.5$이다.
따라서
$C_A = 2.0 - 1.5 = 0.5 mol/L, \quad C_S = 0.5 mol/L$
이다.

선지 판단

1번 X: 제시값은 $C_A = 0.25 mol/L$, $C_S = 0.75 mol/L$이다. 이 값을 쓰면 $\xi_1 = 1.75$, $\xi_2 = 0.75$가 되어 $C_B = 3.0 - 1.75 - 0.75 = 0.5 mol/L$가 된다. 주어진 $C_B = 1.0 mol/L$ 조건을 만족하지 못하므로 틀리다. 틀린 표현은 $C_A = 0.25$, $C_S = 0.75$이고, 올바르게는 $C_A = 0.50$, $C_S = 0.50$이다.
2번 X: 제시값은 $C_A = 0.25 mol/L$, $C_S = 1.25 mol/L$이다. 이 경우 $\xi_1 = 1.75$, $\xi_2 = 1.25$가 되어 $C_R = \xi_1 - \xi_2 = 0.5 mol/L$로 계산된다. R의 최대농도 1.0과 맞지 않으므로 틀리다. 틀린 표현은 $C_A = 0.25$, $C_S = 1.25$이고, 올바르게는 $C_A = 0.50$, $C_S = 0.50$이다.
3번 O: $C_{R,\max} = 1.0 mol/L$, $C_B = 1.0 mol/L$에서 물질수지를 풀면 $\xi_1 = 1.5$, $\xi_2 = 0.5$이고, 따라서 $C_A = 0.5 mol/L$, $C_S = 0.5 mol/L$가 된다. 계산 결과와 일치하므로 옳다.
4번 X: 제시값은 $C_A = 0.50 mol/L$, $C_S = 1.00 mol/L$이다. $C_A = 0.50$이면 $\xi_1 = 1.5$까지는 맞지만 $C_S = 1.00$이면 $\xi_2 = 1.0$이 되어 $C_R = \xi_1 - \xi_2 = 0.5 mol/L$만 남는다. R의 최대농도 1.0과 모순이므로 틀리다. 틀린 표현은 $C_S = 1.00$이고, 올바르게는 $C_S = 0.50$이다.

오답 포인트

C_R 최대조건으로 구한 $C_R = 1.0 mol/L$를 빼먹고 $C_B = 1.0 mol/L$만 맞추면 C_S를 크게 잡는 실수가 나온다. 이 문제는 최대농도식과 두 개의 물질수지를 동시에 만족해야 한다는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

연속반응 계산형은 먼저 중간생성물의 최대조건으로 C_R를 확정하고, 그다음 반응량 ξ_1, ξ_2를 두어 남은 성분 농도를 푼다. 계산 순서는 최대조건 정리 → 물질수지 2식 작성 → 미지수 해석이다.

NoteBase

암기 포인트

연속반응의 중간생성물 최대문제는 $C_{R,\max}$를 먼저 구하고, $\xi_1 - \xi_2 = C_R$, $\xi_1 + \xi_2$는 B 소모량으로 연결한다.

NoteBase

문 10. $A \rightarrow R$**의 1차 기상 촉매반응이 진행된다. 촉매를 매우 미세하게 분쇄하여 촉매 내부에서 물질의 확산저항을 제거하였을 때, 촉매 단위 질량당 반응속도가 어떤 일정** A**의 농도에서** $2.0 \times 10^{-4} \text{mol} \text{s}^{-1} \text{g}^{-1}$ **이었다. 이 촉매를 직경** 0.5cm **구형으로 크게 성형한 촉매입자를 이용하여 동일 조건에서 반응 실험을 한 결과, 동일** A**의 농도에서 반응속도가** $1.5 \times 10^{-5} \text{mol} \text{s}^{-1} \text{g}^{-1}$**이었다. 이 성형 촉매 입자의 내부유효인자(internal effectiveness factor)는?**

① 0.075

② 0.10

③ 0.125

④ 0.15

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 내부 확산저항이 없는 기준 반응속도와 성형 촉매의 실제 반응속도를 비교하여 내부유효인자 η를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 내부 확산저항이 없을 때의 단위 질량당 반응속도 $r_0 = 2.0 \times 10^{-4} mols^{-1} g^{-1}$, 성형 촉매 입자에서의 실제 반응속도 $r = 1.5 \times 10^{-5} mols^{-1} g^{-1}$이다.
구해야 할 값은 성형 촉매 입자의 내부유효인자 η이다.
주의할 조건은 두 반응속도가 같은 A 농도, 같은 촉매 질량 기준으로 주어졌으므로 직경 $0.5cm$ 정보는 이미 실제 반응속도 r에 반영되어 있고, 추가 계산 없이 속도비만 취하면 된다는 점이다.

사용할 공식

=실제 반응속도내부 확산저항이 없을 때의 반응속도=(r)/(r_0)
이 공식을 쓰는 이유는 내부유효인자가 내부 확산 때문에 감소한 실제 반응속도가 본래의 고유 반응속도에 대해 얼마만큼 유지되는지를 나타내는 비율이기 때문이다.

계산 과정

1. 내부유효인자 정의를 적용하면 $\eta = r/r_0$이다.
2. 값을 대입하면 $\eta = (1.5 \times 10^{-5})/(2.0 \times 10^{-4})$이다.
3. 계산하면 $\eta = (1.5/2.0) \times 10^{-1} = 0.75 \times 0.1 = 0.075$이다.

NoteBase

선지별 해설

① O: $\eta = 0.075$이므로 옳다.
② X: 내부유효인자는 0.10이 아니라 0.075이다. 지수 $10^{-5}/10^{-4} = 10^{-1}$ 처리를 대충 하거나 비율 계산을 반올림하면 이런 오답이 나온다.
③ X: 내부유효인자는 0.125가 아니라 0.075이다. 실제 반응속도를 기준 반응속도로 나누어야 하므로 $1.5/2.0 = 0.75$를 먼저 정확히 계산해야 한다.
④ X: 내부유효인자는 0.15가 아니라 0.075이다. 분모와 분자를 바꾸거나 속도 감소 비율을 두 배로 잘못 읽으면 이런 값이 나온다.

오답 포인트

직경 $0.5cm$가 주어졌다고 해서 Thiele 수나 구형 촉매 공식을 다시 세우려는 접근이 함정이다. 이 문항은 이미 두 반응속도를 모두 제시했으므로 내부유효인자는 정의대로 속도비만 계산하면 된다. 또한 지수 계산에서 $10^{-5}/10^{-4} = 10^{-1}$임을 놓치면 소수점 위치가 쉽게 틀어진다.

다시 나오면 이렇게 판단

내부유효인자를 묻는데 확산저항이 없는 기준 반응속도와 실제 반응속도가 함께 주어지면 먼저 $\eta = r/r_0$를 적용한다. 그다음 계수 비와 지수 비를 따로 계산해 소수점 위치를 검산하면 된다.

암기 포인트

내부유효인자는 항상 실제 속도 ÷ 고유 속도이므로 $\eta \le 1$이다.

NoteBase

문 11. 플러그흐름 반응기에서 $2A \rightarrow 5R$인 균일계 기상반응이 진행된다. 반응초기에 50%의 불활성기체와 50%의 반응물 A가 공급된다고 할 때, 부피변화분율 ε_A는?

① 0.5

② 0.75

③ 1.0

④ 1.25

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 기상 반응의 부피변화분율 ε_A를 초기 몰분율과 화학양론 계수 변화로 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 $2A \rightarrow 5R$이다.
초기 공급물은 A 50%, 불활성기체 50%이다.
구해야 할 값은 부피변화분율 ε_A이다.

사용할 공식

기상 반응에서 $\varepsilon_A = y_{A0}\frac{\Delta\nu}{a}$이다.
여기서 y_{A0}는 A의 초기 몰분율, a는 반응식에서 A의 계수, $\Delta\nu$는 총 몰수 변화이다.
이 공식을 쓰는 이유는 등온·등압 기상반응에서 총 몰수 변화가 부피변화에 직접 반영되기 때문이다.

계산 과정

반응식에서 A의 계수는 $a = 2$이다.
총 몰수 변화는 $\Delta\nu = 5 - 2 = 3$이다.
초기 몰분율은 $y_{A0} = 0.5$이다.
따라서 $\varepsilon_A = y_{A0}\frac{\Delta\nu}{a} = 0.5 \times \frac{3}{2} = 0.75$ 이다.

NoteBase

선지 판단

1번: X. 계산 결과는 0.75이므로 0.5는 맞지 않는다. 이 값은 초기 몰분율 $y_{A0}=0.5$만 보고 $\frac{\Delta\nu}{a}=\frac{3}{2}$를 누락한 경우의 오답이다. 틀린 표현은 '부피변화분율이 0.5이다'이고, 올바르게는 '부피변화분율은 0.75이다'이다.
2번: O. $\Delta\nu=3$, $a=2$, $y_{A0}=0.5$를 대입하면 $\varepsilon_A=0.75$가 되어 맞다.
3번: X. 계산 결과 0.75와 다르므로 맞지 않는다. 이 값은 계수 변화와 초기 조성 반영을 잘못 처리한 오답이다. 틀린 표현은 '부피변화분율이 1.0이다'이고, 올바르게는 '초기 몰분율과 계수 변화를 함께 반영한 0.75이다'이다.
4번: X. 계산 결과 0.75와 다르므로 맞지 않는다. 이 값은 총 몰수 증가만 크게 보고 초기 A의 몰분율 0.5를 과대평가한 오답이다. 틀린 표현은 '부피변화분율이 1.25이다'이고, 올바르게는 'A의 초기 몰분율 0.5를 곱한 0.75이다'이다.

오답 포인트

불활성기체가 섞여 있으면 y_{A0}를 반드시 곱해야 하는데, 반응식의 몰수 변화만 보고 계산하면 오답이 된다. 또한 a는 반응식에서 A의 계수 2라는 점을 놓치면 값이 달라진다.

다시 나오면 이렇게 판단

기상 반응의 부피변화분율 문제는 먼저 A의 초기 몰분율 y_{A0}, 다음으로 A의 계수 a, 마지막으로 총 몰수 변화 $\Delta\nu$를 정리한 뒤 $\varepsilon_A=y_{A0}\frac{\Delta\nu}{a}$에 대입해 판단한다.

암기 포인트

기상 반응의 부피변화분율은 '초기 몰분율 × 총 몰수 변화 ÷ 반응물 계수'로 정리된다.

NoteBase

문 12. 불균일 반응(heterogeneous reaction)의 예로 옳지 않은 것은?

① 공기 중에서 탄소입자의 연소

② 호기성 발효(aerobic fermentation)

③ 에틸아세테이트의 가수분해 반응

④ 물에 빠진 못이 녹스는 현상

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 불균일 반응과 균일 반응을 상의 수가 하나인지, 서로 다른 상의 계면에서 반응이 일어나는지로 구분할 수 있는지를 묻는다.

핵심 개념

불균일 반응은 기체-고체, 액체-고체처럼 둘 이상의 상이 공존하고 반응이 주로 계면에서 진행되는 반응이다.
균일 반응은 반응물이 하나의 상 안에 함께 존재하여 같은 상 내부에서 진행되는 반응이다.
이 문항의 판단 축은 반응계가 단일상인지, 서로 다른 상의 접촉면을 포함하는지이다.

선지별 해설

1번: O. 공기 중 탄소입자의 연소는 고체 탄소와 기체 산소가 접촉하는 기-고 반응이므로 불균일 반응의 예가 맞다.
2번: O. 호기성 발효는 액상 배지 속 미생물이 기체 산소를 공급받아 반응하는 계이므로 기-액 또는 기-액-고 성격을 띠는 불균일 반응으로 본다.
3번: X. 에틸아세테이트의 가수분해 반응은 반응공학에서 보통 같은 액상 내부에서 진행되는 균일 액상 반응으로 다룬다. 틀린 표현은 불균일 반응의 예라는 점이다. 올바르게는 균일 반응의 예이다.
4번: O. 물에 빠진 못이 녹스는 현상은 고체 철이 물과 용존 산소와 반응하는 액-고 계 반응이므로 불균일 반응의 예가 맞다.

오답 포인트

액체가 들어가면 모두 균일 반응이라고 단순화하면 틀린다. 핵심은 물질 이름이 아니라 상의 개수와 계면 존재 여부이다. ③은 액상 반응이라는 점 때문에 불균일처럼 보일 수 있으나, 반응공학 분류에서는 같은 액상 내부 반응으로 처리한다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 반응물과 반응장이 기체, 액체, 고체 중 몇 개의 상으로 나뉘는지 본다. 서로 다른 상이 접촉하는 계면 반응이면 불균일 반응이고, 한 상 내부에서 섞여 진행되면 균일 반응으로 판단한다.

NoteBase

암기 포인트

불균일 반응은 계면 반응, 균일 반응은 단일상 반응이다.

NoteBase

문 13. 온도가 T_1에서 T_2로 증가하였을 때, 반응속도상수가 2배 증가하였다. 이 반응에 대한 활성화 에너지(E)와 반응온도의 관계식은? (단, 반응속도상수는 Arrhenius 관계식을 따르며, R은 기체상수, T_1과 T_2에서 빈도인자(frequency factor)는 동일한 값을 갖는다)

① $\frac{E}{R} = \frac{2(T_2 - T_1)T_2}{T_1}$
② $\frac{E}{R} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln 2$
③ $\frac{E}{R} = \frac{(T_2 - T_1)T_2}{T_1} \ln 2$
④ $\frac{E}{R} = \frac{2T_1 T_2}{T_2 - T_1}$

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 Arrhenius 식에서 두 온도에서의 반응속도상수 비 $k_2/k_1 = 2$를 이용해 E/R의 식을 정리하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 온도가 T_1에서 T_2로 증가할 때 반응속도상수는 2배가 된다.
구해야 할 값: E/R과 반응온도의 관계식이다.
주의할 조건: 빈도인자 A는 T_1, T_2에서 동일하므로 비를 취하면 A가 소거된다.

사용할 공식

Arrhenius 식은 $k = Ae^{-E/(RT)}$ 이다.

이 공식을 쓰는 이유:
문제에서 반응속도상수, 활성화에너지, 온도의 관계를 직접 묻고 있고, 빈도인자가 동일하다고 했으므로 Arrhenius 식을 두 온도에서 나누어 정리하면 E/R를 바로 구할 수 있다.

계산 과정

1. 두 온도에서의 식을 쓰면 $k_1 = Ae^{-E/(RT_1)}, \quad k_2 = Ae^{-E/(RT_2)}$ 이다.
2. 비를 취하면 $\frac{k_2}{k_1} = e^{-E/R(1/T_2 - 1/T_1)} = e^{(E/R)(1/T_1 - 1/T_2)}$ 이다.
3. 문제에서 $k_2/k_1 = 2$ 이므로 $2 = e^{(E/R)(1/T_1 - 1/T_2)}$ 이고, 양변에 로그를 취하면 $\ln 2 = \frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) = \frac{E}{R}\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}$ 이다.
4. 따라서 $\frac{E}{R} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln 2$ 이다.

NoteBase

선지 판단

① X

주어진 비 $k_2/k_1 = 2$를 로그로 바꾸면 반드시 $\ln 2$가 남아야 한다. 이 선지는 $\ln 2$가 없고 2를 그대로 넣어 식이 틀렸다. 틀린 표현은 $\frac{E}{R} = \frac{2(T_2 - T_1)T_2}{T_1}$ 이고, 올바르게는 $\frac{E}{R} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}\ln 2$ 이다.

② O

Arrhenius 식을 두 온도에서 나눈 뒤 $k_2/k_1 = 2$를 대입하면 $\frac{E}{R} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}\ln 2$ 가 되어 선택지와 일치한다.

③ X

분수 정리가 잘못된 식이다. $\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$는 $\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}$로 정리되어야 하는데, 이 선지는 역으로 뒤집혀 있다. 틀린 표현은 $\frac{E}{R} = \frac{(T_2 - T_1)T_2}{T_1}\ln 2$ 이고, 올바르게는 $\frac{E}{R} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}\ln 2$ 이다.

④ X

이 선지도 $\ln 2$를 빠뜨리고 2를 직접 계수처럼 넣은 오답이다. 로그를 취한 뒤에는 2가 아니라 $\ln 2$가 남는다. 틀린 표현은 $\frac{E}{R} = \frac{2T_1 T_2}{T_2 - T_1}$ 이고, 올바르게는 $\frac{E}{R} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}\ln 2$ 이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 반응속도상수가 2배가 되었다는 조건을 보고 2를 그대로 식에 남기는 것이다. Arrhenius 식을 비로 만든 뒤에는 지수식을 로그로 풀어야 하므로 2가 아니라 $\ln 2$가 남는다. 또 $1/T$ 차이를 통분할 때 $\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}$를 거꾸로 쓰는 실수도 자주 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

온도 두 점에서 속도상수 비를 주면 먼저 $k = Ae^{-E/(RT)}$를 두 식으로 쓴 뒤 비를 취해 A를 소거한다. 그다음 k_2/k_1 값을 대입하고 로그를 취해 $\ln$ 항이 남는지 확인하면 된다.

암기 포인트

Arrhenius 두 점 비교는 $\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$ 로 정리된다는 점을 기억해 두면 된다.

NoteBase

문 14. 다음과 같은 반응 $A \rightarrow B$가 활성화된 A^*를 경유해서 진행된다. A^*에 대해 유사 정상상태 가정(pseudo steady state assumption)을 사용하여 유도된 반응속도식은? (단, C_A는 A의 농도, C_{A^*}는 A^*의 농도이다)

A + A [k_-1]k_1 A^* + A, r_1 = k_1 C_A^2 - k_-1 C_A C_A^*

$A^* \rightarrow B,\ r_2 = k_2 C_{A^*}$

① $r_2 = \frac{k_{-1}k_2 C_A}{k_1 C_A^2 + k_2}$
② $r_2 = \frac{k_{-1}k_2 C_A^2}{k_1 C_A + k_2}$
③ $r_2 = \frac{k_1 k_2 C_A^2}{k_{-1} C_A + k_2}$
④ $r_2 = \frac{k_1 k_2 C_A}{k_{-1} C_A^2 + k_2}$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 활성중간체 A^*에 유사정상상태 가정을 적용하여 r_2를 C_A만으로 유도하는 문제이다.

조건 정리

주어진 속도식은 $r_1 = k_1 C_A^2 - k_{-1} C_A C_{A^*}$, $r_2 = k_2 C_{A^*}$이다.
구해야 할 값은 $A \rightarrow B$의 반응속도 r_2를 C_A의 식으로 나타내는 것이다.
유사정상상태이므로 중간체 A^*의 축적속도는 0이다.

사용할 공식

$\frac{dC_{A^*}}{dt} = r_1 - r_2 = 0$
이 공식을 쓰는 이유는 A^*가 반응 중간체이므로 유사정상상태에서 생성속도와 소멸속도가 같아지기 때문이다.

계산 과정

1. $0 = k_1 C_A^2 - k_{-1} C_A C_{A^*} - k_2 C_{A^*}$이다.
2. C_{A^*}를 묶으면 $k_1 C_A^2 = (k_{-1} C_A + k_2) C_{A^*}$이다.
3. 따라서 $C_{A^*} = \frac{k_1 C_A^2}{k_{-1} C_A + k_2}$이다.
4. 이를 $r_2 = k_2 C_{A^*}$에 대입하면 $r_2 = \frac{k_1 k_2 C_A^2}{k_{-1} C_A + k_2}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
분자에 k_{-1}가 들어가는데, A^*의 생성항 계수는 k_1이다.
또한 생성항이 $k_1C_A^2$이므로 C_A의 차수는 2차가 유지되어야 한다.
틀린 표현은 $\frac{k_{-1}k_2C_A}{k_1C_A^2+k_2}$이고, 올바르게는 $\frac{k_1k_2C_A^2}{k_{-1}C_A+k_2}$이다.

② X
분자와 분모에서 k_1과 k_{-1}의 위치를 서로 바꾼 식이다.
틀린 표현은 $\frac{k_{-1}k_2C_A^2}{k_1C_A+k_2}$이고, 올바르게는 $\frac{k_1k_2C_A^2}{k_{-1}C_A+k_2}$이다.

③ O
유사정상상태를 적용하면 $C_{A^*}=\frac{k_1C_A^2}{k_{-1}C_A+k_2}$이고, 여기에 $r_2=k_2C_{A^*}$를 대입하면 $r_2=\frac{k_1k_2C_A^2}{k_{-1}C_A+k_2}$가 된다.

④ X
분자에서 C_A가 한 번 빠졌고, 분모에는 없어야 할 C_A^2가 들어가 있다.
$k_{-1}C_AC_{A^*}$에서 C_{A^*}를 묶으면 분모 항은 $k_{-1}C_A$가 되어야 한다.
틀린 표현은 $\frac{k_1k_2C_A}{k_{-1}C_A^2+k_2}$이고, 올바르게는 $\frac{k_1k_2C_A^2}{k_{-1}C_A+k_2}$이다.

오답 포인트

중간체 A^*의 물질수지를 세울 때 생성항 $k_1C_A^2$와 소멸항 $k_{-1}C_AC_{A^*}+k_2C_{A^*}$를 한 줄에 정리하지 않으면 k_1과 k_{-1}의 위치를 바꾸거나 C_A의 차수를 잘못 옮기기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

활성중간체 문제는 먼저 0 = 생성항 − 소멸항으로 중간체 물질수지를 세우고, 중간체 농도를 푼 다음 마지막에 원하는 반응속도식에 대입하면 된다.

암기 포인트

유사정상상태는 중간체 축적이 0이라는 뜻이므로 r_생성 = r_소멸로 바로 정리된다.

NoteBase

문 15. 초기 부피가 V_0인 등온 정압 회분식 반응기에서 반응물 A의 초기농도를 C_{A0}로 균일계 0차 반응을 진행하여 최종적으로 부피가 V로 되었을 때의 반응시간은? (단, ε_A는 부피변화분율, k는 반응속도 상수, $\Delta V = V - V_0$이다)

① $\frac{C_{A0}}{k\varepsilon_A}\ln\frac{V}{V_0}$
② $-\frac{1}{k}\left(1-\frac{\Delta V}{\varepsilon_A V_0}\right)$
③ $\frac{1}{k}\frac{(1+\varepsilon_A)\Delta V}{V_0\varepsilon_A-\Delta V}$
④ $\frac{\varepsilon_A}{k}\ln\left(1-\frac{\Delta V}{V_0\varepsilon_A}\right)$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 등온 정압 회분식 반응기에서 0차 반응의 설계식과 기체 팽창식 $V = V_0(1+\varepsilon_A X_A)$를 결합해 반응시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 초기부피 V_0, 최종부피 V, 초기농도 C_{A0}, 부피변화분율 ε_A, 속도상수 k이다.
구해야 할 값은 부피가 V가 될 때까지의 반응시간 t이다.
정압 회분식이므로 반응이 진행되면 전환율 X_A에 따라 부피가 $V = V_0(1+\varepsilon_A X_A)$로 변한다.

사용할 공식

회분식 반응기 설계식은 $N_{A0}\frac{dX_A}{dt} = (-r_A)V$이다.
0차 반응이므로 $(-r_A) = k$, 또 $N_{A0} = C_{A0}V_0$이므로
$\frac{dX_A}{dt} = \frac{kV}{C_{A0}V_0} = \frac{k}{C_{A0}}(1+\varepsilon_A X_A)$
가 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 반응속도는 0차라 상수이지만 정압 조건 때문에 부피 V가 전환율에 따라 변하므로, V를 X_A의 함수로 두고 적분해야 하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 식을 분리하면
$dt = \frac{C_{A0}}{k}\frac{dX_A}{1+\varepsilon_A X_A}$
이다.
2. $X_A = 0$에서 X_A까지 적분하면
$t = \frac{C_{A0}}{k\varepsilon_A}\ln(1+\varepsilon_A X_A)$
이다.
3. 정압 기체반응의 부피식 $V = V_0(1+\varepsilon_A X_A)$에서
$1+\varepsilon_A X_A = \frac{V}{V_0}$
이므로
$t = \frac{C_{A0}}{k\varepsilon_A}\ln\frac{V}{V_0}$
가 된다.

선지 판단

1번: O. 적분 결과가 바로 $t = \frac{C_{A0}}{k\varepsilon_A}\ln\frac{V}{V_0}$이므로 맞다.
2번: X. 시간식을 선형식처럼 처리한 오답이다. 정압 0차 반응은 $1+\varepsilon_A X_A$가 분모에 들어가므로 로그 적분이 되어야 한다. 또한 C_{A0}가 빠져 차원도 맞지 않는다. 올바르게는 $t = \frac{C_{A0}}{k\varepsilon_A}\ln\frac{V}{V_0}$이다.
3번: X. 분수형 유리식은 로그 적분이 아니라 $(1-aX)^{-1}$ 또는 고차반응 형태를 잘못 섞은 결과이다. 이 식도 C_{A0}가 빠져 있다. 올바르게는 $t = \frac{C_{A0}}{k\varepsilon_A}\ln\frac{V}{V_0}$이다.
4번: X. 로그의 형태를 쓰기는 했지만 $1-\frac{\Delta V}{V_0\varepsilon_A} = 1-X_A$로 잘못 두어 부호와 인수가 틀렸다. 정압 팽창에서는 $1+\varepsilon_A X_A = \frac{V}{V_0}$를 써야 하며, 역시 C_{A0}도 필요하다. 올바르게는 $t = \frac{C_{A0}}{k\varepsilon_A}\ln\frac{V}{V_0}$이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 0차 반응이라는 말만 보고 $t = \frac{C_{A0}X_A}{k}$를 바로 쓰는 데 있다. 그 식은 부피가 일정할 때만 그대로 쓸 수 있고, 정압 회분식에서는 V가 X_A에 따라 변하므로 반드시 $V = V_0(1+\varepsilon_A X_A)$를 먼저 대입해 로그 적분을 해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

정압 기체 회분반응 문제는 먼저 V와 X_A의 관계를 세우고, 다음에 회분식 설계식 $N_{A0}dX_A/dt = (-r_A)V$에 넣어 적분 형태가 선형인지 로그형인지 판단한다. 0차 반응이어도 부피가 변하면 시간식이 단순 선형식으로 끝나지 않는다.

암기 포인트

정압 회분식 0차 반응은 속도는 상수여도 부피가 변하면 $V = V_0(1+\varepsilon_A X_A)$ 때문에 시간식이 로그형으로 바뀐다.

NoteBase

문 16. 단열 혼합흐름 반응기에서 다음의 액상반응이 상변화 없이 진행된다. 반응 개시 후 전환율이 75%에 도달하였을 때의 반응기 온도[K]는? (단, C_A는 A의 농도, A의 초기농도는 $4.0\text{mol}\text{L}^{-1}$, 반응 초기온도는 300K, 반응열은 $\Delta H_R = -20\text{kcal}\text{mol}^{-1}$, 반응기 부피당 열용량은 $\rho C_p = 1\text{kcal}\text{L}^{-1}\text{K}^{-1}$이며, 반응의 ΔH_R, ρ 및 C_p는 모두 온도에 무관하며 일정한 값을 갖는다)

$A \rightarrow B, \quad -r_A = kC_A[\text{mol}\text{L}^{-1}\text{min}^{-1}]$

① 330

② 345

③ 360

④ 375

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 단열 액상 회분반응기의 에너지수지 $\Delta T = \frac{(-\Delta H_R)C_{A0}X}{\rho C_p}$를 적용해 전환율이 주어졌을 때 반응기 온도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 초기온도 $T_0 = 300K$, 초기농도 $C_{A0} = 4.0mol/L$, 전환율 $X = 0.75$, 반응열 $\Delta H_R = -20kcal/mol$, 체적당 열용량 $\rho C_p = 1kcal/(L \cdot K)$이다.
구해야 할 값: 전환율 75%일 때 반응기 온도이다.
주의할 조건: 단열, 상변화 없음, ΔH_R, ρ, C_p 일정이므로 방출된 반응열이 전부 온도상승으로 간다.

사용할 공식

단열 액상 회분반응기에서는
$\rho C_p(T - T_0) = (-\Delta H_R)C_{A0}X$
이므로
$T = T_0 + \frac{(-\Delta H_R)C_{A0}X}{\rho C_p}$
를 사용한다.
이 공식을 쓰는 이유는 시간이나 속도상수 k가 아니라 전환율에 따른 누적 반응열만으로 온도상승이 결정되기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 전환율 0.75에서 반응한 A의 양은 $C_{A0}X = 4.0 \times 0.75 = 3.0 mol/L$이다.
2. 이때 발생한 열량은 $(-\Delta H_R)C_{A0}X = 20 \times 3.0 = 60 kcal/L$이다.
3. 따라서 온도상승은 $\Delta T = \frac{60 kcal/L}{1 kcal/(L \cdot K)} = 60K$ 이고, 반응기 온도는 $T = 300 + 60 = 360K$ 이다.

선지 판단

1번 X: $330K$라고 했지만 계산된 온도상승은 $30K$가 아니라 $60K$이다. 전환율에 해당하는 반응량 $3.0 mol/L$를 절반만 잡은 값에 가깝고, 올바르게는 $360K$이다.
2번 X: $345K$라고 했지만 이는 온도상승을 $45K$로 잘못 본 값이다. 반응열, 초기농도, 전환율을 모두 곱해야 하므로 올바르게는 $360K$이다.
3번 O: 단열조건에서 계산한 최종온도는 $360K$이므로 맞다.
4번 X: $375K$라고 했지만 이는 온도상승을 $75K$로 과대평가한 값이다. 잔존 농도와 반응한 농도를 혼동하지 말아야 하며, 올바르게는 $360K$이다.
계산 결과 $360K$이므로 정답은 3번이다.

오답 포인트

전환율 X는 남아 있는 농도가 아니라 반응한 비율이다. 따라서 열발생량은 C_A가 아니라 $C_{A0}X$로 계산해야 하며, 반응속도식의 k가 보인다고 해서 이를 계산에 끌어오면 방향을 잘못 잡게 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

단열 반응기 온도 문제는 먼저 반응으로 소모된 양을 $C_{A0}X$로 구하고, 그다음 $(-\Delta H_R)$ ×소모량으로 열발생량을 계산한 뒤, 마지막에 ρC_p로 나누어 온도상승으로 바꾸는 순서로 판단한다.

암기 포인트

단열 액상반응기의 온도상승은 $\Delta T = \frac{(-\Delta H_R)C_{A0}X}{\rho C_p}$ 이고, 발열반응이면 $-\Delta H_R > 0$로 넣어 온도가 상승한다.

NoteBase

문 17. 일정한 온도에서 기상반응이 일어나는 충전층 반응기(packed-bed reactor)에서 촉매 입자 크기에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 에르군(Ergun) 식은 다공성 입자가 충전된 층에서의 압력강하를 계산하는 식이다.

② 촉매 입자의 직경이 작아지면 반응물과 생성물의 촉매 내부 확산저항이 작아진다.

③ 유동층에 비하여 고정층에서는 매우 작은 입자의 촉매 사용이 가능하다.

④ 촉매 입자의 직경이 커지면 반응기 내의 압력강하가 작아진다.

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 충전층 반응기에서 촉매 입자 크기가 내부 확산저항과 압력강하에 미치는 영향을 구분하는 문제이다.

핵심 개념

충전층 반응기는 고정된 촉매 입자층을 통과시키며 반응시키는 장치이고, 입자 직경이 작아지면 내부 확산거리가 짧아져 내부 확산저항은 줄지만 압력강하는 커진다.
에르군 식은 충전층의 압력강하를 입자 직경, 공극률, 유체 속도와 연결하는 식이다.
유동층은 입자를 떠받쳐 운전하므로 작은 입자 사용이 비교적 쉽지만, 고정층은 너무 작은 입자를 쓰면 압력강하가 과도해진다.

NoteBase

선지별 해설

① O
에르군 식은 충전층에서의 압력강하를 계산하는 대표식이므로 옳다. 다공성 촉매 입자가 충전된 층에서도 층 전체 압력강하 평가에 사용한다.

② O
촉매 입자 직경이 작아지면 입자 내부에서 반응물이 확산해야 하는 거리가 짧아지므로 내부 확산저항이 작아진다. 생성물의 외부 배출 경로도 짧아져 내부 물질이동 제한이 완화된다.

③ X
틀린 부분은 "고정층에서는 매우 작은 입자의 촉매 사용이 가능하다"는 표현이다. 고정층은 입자가 너무 작아지면 압력강하가 크게 증가하므로 매우 작은 입자 사용이 오히려 어렵다. 올바르게는 "유동층에 비해 고정층에서는 매우 작은 입자의 촉매 사용이 어렵다"이다.

④ O
에르군 식에서 압력강하는 입자 직경이 커질수록 감소하므로 옳다. 입자 사이 유로가 상대적으로 커져 유체 저항이 줄어든다.

오답 포인트

입자를 작게 하면 반응에는 유리하다는 점만 기억하면 ③을 맞는 말처럼 보기 쉽다. 이 문항은 "내부 확산저항 감소"와 "압력강하 증가"가 동시에 일어난다는 점을 분리해서 보아야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

촉매 입자 크기 문제는 먼저 입자를 작게 했을 때 반응기 성능이 두 방향으로 바뀐다고 판단한다. 내부 확산저항은 감소하고, 충전층 압력강하는 증가한다. 고정층에서 작은 입자 사용 가능성을 묻는 선지는 압력강하 때문에 대체로 부정문이 정답이 된다.

암기 포인트

작은 입자: 내부 확산저항 감소, 압력강하 증가이다.

NoteBase

문 18. 정용 회분식 반응기에서 순수한 반응물인 사산화이질소(N_2O_4)가 이산화질소(NO_2)로 분해되는 등온 가역 기상반응이 다음과 같이 진행된다. 이 반응의 농도평형상수(K_c)는? (단, C_{A0}는 사산화이질소의 초기농도, X_e는 평형전환율이다)

$N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$

① $K_c = \frac{4X_e^2}{C_{A0}(1-X_e)}$
② $K_c = \frac{4C_{A0}X_e}{(1-X_e)^2}$
③ $K_c = \frac{4C_{A0}X_e^2}{(1-X_e)}$
④ $K_c = \frac{C_{A0}X_e^2}{4(1-X_e)}$

정답 3번

출제 포인트

정용 회분식 반응기에서 평형전환율 X_e를 각 성분의 평형농도로 바꾸고, $K_c = \frac{C_{NO_2,e}^2}{C_{N_2O_4,e}}$를 세우는 문제이다.

조건 정리

반응은 $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$이다.
초기에 순수한 N_2O_4만 있으므로 초기농도는 C_{A0}이다.
정용 반응기이므로 부피가 일정해서 농도는 몰수 변화에 비례한다.
평형전환율이 X_e이면 N_2O_4의 평형농도는 $C_{A,e} = C_{A0}(1-X_e)$이고, 생성된 NO_2의 평형농도는 $C_{NO_2,e} = 2C_{A0}X_e$이다.

사용할 공식

농도평형상수는
$K_c = \frac{C_{NO_2,e}^2}{C_{N_2O_4,e}}$
이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 등온 가역 기상반응의 농도평형상수 K_c를 묻고 있고, 주어진 값이 평형전환율 X_e이므로 이를 평형농도로 바꾸어 바로 대입하면 되기 때문이다.

계산 과정

1. 반응물 N_2O_4의 평형농도는 $C_{N_2O_4,e} = C_{A0}(1-X_e)$이다.
2. 생성물 NO_2는 반응식 계수 2이므로 평형농도는 $C_{NO_2,e} = 2C_{A0}X_e$이다.
3. 이를 평형상수식에 대입하면
$K_c = \frac{(2C_{A0}X_e)^2}{C_{A0}(1-X_e)} = \frac{4C_{A0}^2X_e^2}{C_{A0}(1-X_e)} = \frac{4C_{A0}X_e^2}{1-X_e}$
이므로 3번 식이 맞다.

NoteBase

선지별 해설

① X: K_c에는 C_{A0}가 분모가 아니라 분자에 남아야 한다. 틀린 표현은 $\frac{4X_e^2}{C_{A0}(1-X_e)}$이고, 올바르게는 $\frac{4C_{A0}X_e^2}{1-X_e}$이다.
② X: NO_2 농도를 제곱해야 하므로 X_e는 제곱, $(1-X_e)$는 1차로 남아야 한다. 틀린 표현은 $\frac{4C_{A0}X_e}{(1-X_e)^2}$이고, 올바르게는 $\frac{4C_{A0}X_e^2}{1-X_e}$이다.
③ O: $C_{NO_2,\,e}=2C_{A0}X_e$, $C_{N_2O_4,\,e}=C_{A0}(1-X_e)$를 그대로 대입하면 $K_c=\frac{4C_{A0}X_e^2}{1-X_e}$가 되어 정답이다.
④ X: 생성물 계수 2를 반대로 처리하면 이런 축소된 값이 나온다. 틀린 표현은 $\frac{C_{A0}X_e^2}{4(1-X_e)}$이고, 올바르게는 $\frac{4C_{A0}X_e^2}{1-X_e}$이다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 생성물 NO_2의 화학양론계수 2를 빼먹거나, K_c에서 생성물 농도는 제곱되고 반응물 농도는 1차로 들어간다는 점을 놓치는 것이다. ②처럼 X_e와 $(1-X_e)$의 지수를 뒤바꾸거나, ①처럼 C_{A0} 위치를 거꾸로 두는 실수가 자주 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

가역 반응의 평형상수 문제는 반응식 계수대로 평형농도를 먼저 적고, 그다음 생성물은 분자, 반응물은 분모에 넣어 지수까지 반응계수대로 확인하면 된다. 정용계이면 농도 변화가 전환율에 바로 비례한다는 점을 함께 본다.

암기 포인트

$A \rightleftharpoons 2B$, 순수 A, 정용계이면 $C_{A,\,e}=C_{A0}(1-X_e)$, $C_{B,\,e}=2C_{A0}X_e$, 따라서 $K_c=\frac{4C_{A0}X_e^2}{1-X_e}$이다.

NoteBase

문 19. 플러그흐름 반응기에서 수용액 반응물 A의 분해 반응을 수행한 결과, 1차 반응속도로 분해되며 그 농도가 반으로 감소하는 데 공간시간이 7min이었다. 동일한 반응을 A의 부피유속 $2Lmin^{-1}$로 공급하며, 각각의 부피가 20L인 두 개의 직렬로 연결된 연속혼합흐름 반응기에서 수행했을 때, 최종적으로 얻을 수 있는 전환율은? (단, $\ln 2 = 0.7$이며, 반응온도는 동일하다)

① 0.50

② 0.58

③ 0.67

④ 0.75

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 플러그흐름 반응기에서 구한 1차 반응 속도상수를 이용해, 직렬 연결된 연속혼합흐름 반응기 두 기의 최종 전환율을 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 플러그흐름 반응기에서 농도가 반으로 감소하는 공간시간이 7분, $\ln 2 = 0.7$, 부피유속이 $2Lmin^{-1}$, 각 반응기 부피가 $20L$이라는 점이다.
구해야 할 값은 두 개의 직렬 CSTR을 지난 뒤의 최종 전환율이다.
반응은 1차 반응이고 액상 반응이므로 밀도 변화가 없다고 보고 $\tau = V/q$를 그대로 적용한다.

사용할 공식

플러그흐름 반응기에서 1차 반응은 $C_A = C_{A0}e^{-k\tau}$를 쓴다.
연속혼합흐름 반응기 한 기의 출구농도는 $C_{A,out} = \frac{C_{A,in}}{1+k\tau}$를 쓴다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 먼저 PFR 자료로 속도상수 k를 구하게 하고, 그다음 같은 온도에서 작동하는 직렬 CSTR의 단계별 농도 변화를 묻고 있기 때문이다.

계산 과정

1. PFR에서 농도가 반으로 감소했으므로 $\frac{C_A}{C_{A0}} = \frac{1}{2} = e^{-k\tau}$이다.
2. 따라서 $k = \frac{\ln 2}{7} = \frac{0.7}{7} = 0.1min^{-1}$이다.
3. 각 CSTR의 공간시간은 $\tau = \frac{V}{q} = \frac{20}{2} = 10min$이다.
4. 각 반응기마다 $1 + k\tau = 1 + 0.1 \times 10 = 2$이므로 출구농도는 입구농도의 절반이 된다.
5. 첫 번째 반응기 출구는 $C_{A1} = \frac{C_{A0}}{2}$, 두 번째 반응기 출구는 $C_{A2} = \frac{C_{A1}}{2} = \frac{C_{A0}}{4}$이다.
6. 최종 전환율은 $X = 1 - \frac{C_{A2}}{C_{A0}} = 1 - \frac{1}{4} = 0.75$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X

- 0.50은 CSTR 한 기만 지난 뒤의 전환율에 해당한다. 이 문항은 부피가 $20L$인 CSTR 두 기가 직렬로 연결되어 있으므로 한 기만 계산한 값이 틀린 표현이다.
- 올바르게는 두 번째 반응기까지 반영해 최종 전환율을 0.75로 계산해야 한다.

② X

- 계산 결과는 0.75이므로 0.58은 맞지 않는다. 두 반응기의 단계별 농도 감소를 모두 반영하지 못한 값이어서 틀린 표현이다.
- 올바르게는 각 반응기에서 농도가 절반씩 감소하므로 최종 농도비는 1/4, 전환율은 0.75이다.

③ X

- 0.67은 두 반응기 $40L$를 하나의 CSTR로 합쳐 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau} = \frac{2}{3}$처럼 계산할 때 나오는 값이다. 하지만 직렬 CSTR 두 기는 하나의 큰 CSTR 한 기와 같지 않으므로 틀린 표현이다.
- 올바르게는 각 반응기를 순서대로 계산해 $C_{A0} \to C_{A0}/2 \to C_{A0}/4$로 본다.

④ O

- 각 반응기의 $k\tau$가 1이므로 반응기 하나를 지날 때마다 농도가 절반이 된다. 두 기를 지나면 $C_A/C_{A0} = 1/4$ 이므로 최종 전환율은 0.75가 된다.
- 따라서 정답은 4번이다.

오답 포인트

직렬 CSTR 두 기를 하나의 CSTR 한 기처럼 합쳐 버리거나, 첫 번째 반응기까지만 계산하고 멈추는 실수가 가장 흔하다. 이 문항의 함정은 같은 총부피라도 반응기 형식과 연결 방식에 따라 전환율 식이 달라진다는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 주어진 반응기 자료로 k를 구하고, 그다음 반응기 종류에 맞는 설계식을 선택해 단계별로 출구농도를 넘겨 계산한다. 직렬 CSTR은 총부피를 한 번에 넣지 않고 반응기 수만큼 순차 계산하면 된다.

암기 포인트

1차 반응에서 PFR은 $e^{-k\tau}$, CSTR은 $1/(1+k\tau)$이며, 직렬 CSTR은 단계별 농도비를 곱해서 계산한다.

NoteBase

문 20. 플러그흐름 반응기로부터 생성물 흐름을 분리하여 그중의 일부를 반응기 입구로 재순환시키는 재순환 반응기에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 순환비는 반응계를 떠나는 유체의 부피를 반응기 입구로 되돌아가는 유체의 부피로 나눈 값이다.

② 일반적으로 반응속도가 양의 차수일 때 재순환 반응기가 플러그흐름 반응기보다 낮은 전환율을 나타낸다.

③ 순환비를 높일수록 혼합흐름 반응기의 특성을 나타낸다.

④ 재순환 반응기에서 자동촉매반응(autocatalytic reaction)이 일어날 때 일정한 전환율을 얻으면서 반응기의 부피를 최소로 하는 최적의 순환비는 반드시 존재한다.

정답 1번

출제 포인트

재순환 반응기의 순환비 정의와, 재순환이 플러그흐름 특성을 혼합흐름 특성 쪽으로 바꾸는 효과를 구별하는 문제이다.

핵심 개념

재순환 반응기는 반응기 출구 유체의 일부를 다시 입구로 보내 입구 조성을 바꾸는 장치이다.
플러그흐름 반응기(PFR)는 축방향 혼합이 거의 없어 같은 부피에서 양의 차수 반응에 유리하다.
순환비 R는 반응기 입구로 되돌아가는 재순환 유량 v_R를 계를 떠나는 신선한 공급(순 출구) 유량 v_0로 나눈 값, 즉 $R = \frac{v_R}{v_0}$으로 정의한다. 여기서 분자는 되돌아가는 유량이고 분모는 계를 떠나는 유량이다.
순환비가 커질수록 입구에서의 되섞임이 강해져 거동이 혼합흐름 반응기(CSTR)에 가까워지고, $R \to \infty$이면 CSTR에 수렴한다.

NoteBase

선지별 해설

① X
틀린 부분은 "반응계를 떠나는 유체의 부피를 반응기 입구로 되돌아가는 유체의 부피로 나눈 값"이라는 정의이다.
올바른 순환비는 반응기 입구로 되돌아가는 재순환 유량 v_R를 계를 떠나는 신선한 공급 유량 v_0로 나눈 값, 즉 $R = \frac{v_R}{v_0}$이다. 반면 선지 ①은 계를 떠나는 유량 v_0를 되돌아가는 유량 v_R로 나누어 $v_0/v_R = 1/R$로 서술했으므로, 분자와 분모가 뒤바뀐 역수를 순환비라고 잘못 적은 것이다.

② O
양의 차수 반응은 반응물 농도가 높을수록 속도가 크다. PFR은 입구의 높은 농도를 축방향으로 활용하므로 같은 조건에서 전환율이 유리하고, 재순환 반응기는 재순환 유체가 신선한 공급물을 희석해 PFR보다 낮은 전환율을 보이기 쉽다.

③ O
순환비가 커지면 반응기 입구로 많은 유체가 되돌아와 신선한 공급물과 강하게 섞인다. 그 결과 반응기 내부의 농도 변화가 작아져 이상 혼합흐름 반응기와 비슷한 거동을 나타내며, 극단적으로 $R \to \infty$이면 CSTR에 수렴한다.

④ O
자기촉매반응은 생성물이 반응속도를 높이므로, 재순환으로 생성물을 입구에 되돌리면 초기 반응속도를 키울 수 있다. 반대로 재순환이 지나치면 희석과 큰 내부순환유량 때문에 비효율이 생기므로, 일정 전환율에서 반응기 부피를 최소로 하는 중간값의 최적 순환비가 존재한다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 ①의 순환비 정의를 방향만 바꾸어 제시한 점과, 발문이 "옳은 것"이 아니라 "옳지 않은 것"이라는 점이다. 또 ③은 재순환이 크면 PFR 성능이 더 좋아질 것처럼 느끼기 쉽지만, 실제로는 혼합효과가 커져 CSTR 쪽으로 가까워진다.

다시 나오면 이렇게 판단

재순환 반응기 문제는 먼저 순환비가 "되돌리는 유량이 분자, 계를 떠나는 유량이 분모"라는 정의를 확인한다. 그다음 순환비가 증가하면 혼합이 강해져 PFR에서 CSTR 쪽으로 이동한다는 축으로 선지를 판단하면 된다. 자기촉매반응이 나오면 생성물 재도입의 이점과 과도한 희석의 불이익이 동시에 생겨 최적 순환비가 생긴다고 본다.

암기 포인트

재순환비 $R = \frac{v_R}{v_0}$는 되돌리는 쪽이 분자이고, 재순환이 커질수록 거동은 PFR보다 CSTR에 가까워진다.

NoteBase