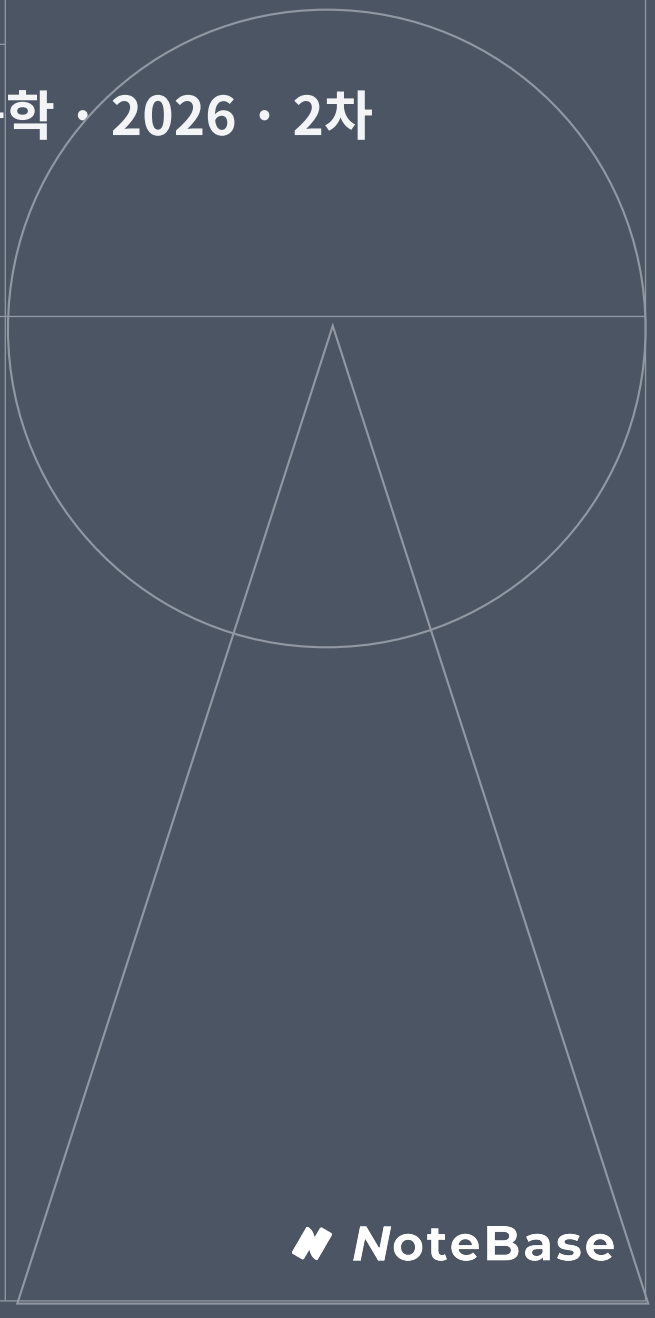
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2026 · 2차



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2026 · 2차

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2026 · 2차

문 1. 다음 반응이 기초반응일 때, 총괄반응차수는?

$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$

① 0

② 1

③ 2

④ 3

정답 4번

간단한 해설

기초반응에서는 **반응물의 화학양론계수가 속도식의 농도 지수**가 된다. 메테인과 물의 계수가 각각 1과 2이므로 총괄반응차수는 1 + 2 = 3이다.

계산 과정

속도식: 문제에서 **기초반응이라고 주어졌으므로** 반응물의 화학양론계수를 각 농도의 지수로 쓴다. 반응속도를 r, 속도상수를 k, 각 반응물의 농도를 C_{CH_4}, C_{H_2O}라 하면 속도식은 $r = kC_{CH_4}C_{H_2O}^2$이다.

차수 계산: 총괄반응차수는 **속도식에 나타난 반응물 농도의 지수 합**이다. 메테인에 대해 1차, 물에 대해 2차이므로 총괄반응차수는 1 + 2 = 3이다. 생성물인 이산화탄소와 수소의 계수는 이 합에 포함하지 않는다. 반응차수에는 단위가 없다.

계산된 총괄반응차수 3은 ④의 값에 해당한다.

NoteBase

문 2. 회분식반응기에서 $A + 3B \rightarrow C + 2D$ 비가역 액상 반응을 진행한다. 반응기 내 A와 B의 초기농도는 각각 10 mol m^{-3}와 9 mol m^{-3}이다. 제한반응물(limiting reactant)의 전환율이 0.50일 때, C와 D의 농도의 합[mol m^{-3}]은? (단, 반응기 내 C와 D의 초기농도는 0이다)

① 1.5

② 3.0

③ 4.5

④ 9.0

정답 3번

간단한 해설

제한반응물은 초기농도 자체가 아니라 **초기농도를 반응계수로 나눈 값**으로 판단하므로 B이다. B의 절반인 4.5 mol m^{-3}가 소모되면 화학양론에 따라 C와 D가 각각 1.5 mol m^{-3}, 3.0 mol m^{-3} 생성되어 농도의 합은 4.5 mol m^{-3}이다.

계산 과정

계산 조건: 이 문제에서는 액상 반응의 **부피 변화를 무시**하고 물질량의 반응계수 비를 농도 변화에 적용한다. 반응식은 $A + 3B \rightarrow C + 2D$이며, C와 D의 초기농도가 모두 0이므로 생성된 농도가 각 성분의 최종 농도이다.

제한반응물: 제한반응물은 반응계수에 따라 반응할 때 먼저 소진되는 물질이다. 같은 부피에서 A와 B의 초기농도를 각각 반응계수로 나누면 $\frac{10}{1} = 10$, $\frac{9}{3} = 3$이다. 이 값이 더 작은 **B가 제한반응물**이다. B가 전부 반응해도 필요한 A의 농도는 3 mol m^{-3}로, 초기농도 10 mol m^{-3}보다 작다.

B의 소모량: 전환율은 해당 반응물의 초기 물질량 중 반응한 비율이다. 부피가 일정할 때 B의 전환율은 $X_B = \frac{c_{B0} - c_B}{c_{B0}}$이다. 여기서 c_{B0}와 c_B는 각각 B의 초기농도와 반응 후 농도이다. 따라서 B의 소모 농도는 $9 \times 0.50 = 4.5$ mol m^{-3}이다.

C와 D의 생성량: 반응식에서 **B 3 mol이 소모될 때 C 1 mol과 D 2 mol이 생성**된다. 따라서 C의 농도는 $c_C = \frac{4.5}{3} = 1.5$ mol m^{-3}이고, D의 농도는 $c_D = \frac{2}{3} \cdot 4.5 = 3.0$ mol m^{-3}이다.

농도의 합: C와 D의 농도를 더하면 1.5 + 3.0 = 4.5 mol m^{-3}이며, ③의 4.5에 해당한다.

NoteBase

문 3. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 1차 반응을 진행한다. A의 전환율 0.50을 얻기 위해 필요한 공간시간은? (단, k는 반응속도상수이다)

① k

② 2k

③ $\frac{1}{k}$

④ $\frac{1}{2k}$

정답 3번

간단한 해설

CSTR에서는 **출구 농도와 같은 반응기 내부 농도**로 반응속도를 계산한다. 액상 1차 반응의 공간시간은 $\tau = \frac{X}{k(1-X)}$이므로, 전환율이 0.50이면 $\tau = \frac{1}{k}$이다.

계산 과정

조건과 물질수지: 정상상태의 이상 CSTR로 해석하며, 액상 반응에서는 밀도와 체적유량이 일정하다고 본다. 공간시간은 $\tau = \frac{V}{v_0}$로, 반응기 부피 V를 입구 체적유량 v_0로 나눈 값이다. A의 입구 몰유량을 F_{A0}, 전환율을 X라 하면, 정상상태에서 A의 유입량과 유출량의 차이는 반응에 의한 소모량과 같으므로 $F_{A0}X = (-r_A)V$이다.

속도식 적용: 비가역 1차 반응의 A 소모속도는 $-r_A = kC_A$이다. CSTR는 완전혼합되므로 **반응기 전체의 농도가 출구 농도와 같다**. 입구 농도를 C_{A0}라 하면 체적유량이 일정하므로 $C_A = C_{A0}(1-X)$이고, $F_{A0} = v_0 C_{A0}$이다. 이를 물질수지에 대입하면 $v_0 C_{A0} X = kC_{A0}(1-X)V$이므로 $\tau = \frac{V}{v_0} = \frac{X}{k(1-X)}$를 얻는다.

공간시간 계산: 전환율 X = 0.50은 공급한 A의 절반이 반응하고, 출구 농도는 입구 농도의 절반이 된다는 뜻이다. 따라서 $\tau = \frac{0.50}{k(1-0.50)} = \frac{1}{k}$이다. 1차 반응의 속도상수 k는 시간의 역수 차원을 가지므로 이 결과는 시간 차원이며, k를 분의 역수로 쓰면 공간시간의 단위는 분이다. 계산값은 ③의 $\frac{1}{k}$에 해당한다.

NoteBase

문 4. 등온 회분식반응기에서 $A \rightarrow B$ 액상 반응을 진행하여 다음과 같은 결과를 얻었을 때, 반응속도상수(k)는? (단, 반응속도는 $-r_A = kC_A^{\alpha}$로 표현되며, C_A는 A의 농도이고, α는 정수이다)

시간 [min]	0	1	2	3
C_A [mol L^{-1}]	1	0.9	0.8	0.7

① 0.1 min^{-1}

② 0.1 mol L^{-1} min^{-1}

③ 0.2 min^{-1}

④ 0.2 mol L^{-1} min^{-1}

정답 2번

간단한 해설

농도가 매 1분마다 0.1 mol L^{-1}씩 일정하게 감소하므로, 농도와 무관하게 속도가 일정한 **0차 반응**이다. 이때 반응속도상수는 농도의 감소속도와 같아 0.1 mol L^{-1} min^{-1}이다.

계산 과정

반응속도식 적용: 액상 회분식반응기에서 부피 변화를 무시하면 A의 소모속도는 농도의 시간에 따른 감소속도와 같으므로 $-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^{\alpha}$이다. 등온 조건에서는 반응속도상수 k를 일정하게 취급한다.

반응차수 결정: 표에서 시간이 0, 1, 2, 3분으로 증가할 때 A의 농도는 1, 0.9, 0.8, 0.7 mol L^{-1}로 감소한다. 즉, **같은 시간 동안 같은 양의 농도가 감소**하므로 농도가 낮아져도 소모속도가 일정하다. 따라서 $\alpha = 0$인 0차 반응이며, 속도식은 $-\frac{dC_A}{dt} = k$, 적분식은 $C_A = C_{A0} - kt$이다. 여기서 C_{A0}는 초기 농도이다.

반응속도상수 계산: 초기부터 3분까지 감소한 농도 0.3 mol L^{-1}을 경과 시간으로 나누면 $k = \frac{C_{A0} - C_A}{t} = \frac{1 - 0.7}{3} = 0.1$이다. 0차 반응의 k는 **농도/시간의 단위**를 가지므로 0.1 mol L^{-1} min^{-1}이며, ②에 해당한다.

NoteBase

문 5. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 다음의 두 비가역 액상 기초반응이 동시에 진행된다. 출구에서 A의 농도가 0.5 mol L^{-1}일 때, 출구에서 B의 농도[mol L^{-1}]는? (단, 반응기에는 농도 2 mol L^{-1}의 A만 유입되며, k_1과 k_2는 각 반응의 반응속도상수이다)

$A \rightarrow B,\ k_1 = 0.2\ \text{min}^{-1}$
$A \rightarrow C,\ k_2 = 0.1\ \text{min}^{-1}$

① 0.6
② 0.8
③ 1.0
④ 1.2

정답 3번

간단한 해설

두 반응은 모두 A에 대한 1차 반응이므로, 소비된 A 중 **B로 전환되는 비율**은 $\frac{k_1}{k_1+k_2} = \frac{2}{3}$이다. A의 농도 감소량 1.5 mol L^{-1}에 이 비율을 곱하면 B의 출구 농도는 1.0 mol L^{-1}이다.

계산 과정

1. 조건과 반응속도: 정상상태에서 액상 반응의 부피유량이 일정하다고 두고, 유입 A 농도를 C_{A0}, 출구 A·B 농도를 각각 C_A, C_B, 공간시간을 $\tau = \frac{V}{Q}$로 나타낸다. 여기서 V는 반응기 부피, Q는 부피유량이다. CSTR는 완전혼합되므로 **반응기 내부 농도와 출구 농도가 같다**. 두 반응은 기초반응이므로 A의 전체 소멸속도는 $-r_A = (k_1 + k_2)C_A$, B의 생성속도는 $r_B = k_1 C_A$이다.

2. A 물질수지로 공간시간 계산: 정상상태에서는 A의 유입량과 유출량의 차이가 반응에 의한 소멸량과 같다. 따라서 $Q(C_{A0} - C_A) = V(k_1 + k_2)C_A$이며, 이를 정리하면 $\tau = \frac{C_{A0} - C_A}{(k_1 + k_2)C_A}$이다. 주어진 값을 대입하면 $\tau = \frac{2 - 0.5}{(0.2 + 0.1) \cdot 0.5} = 10$ min이다. 이 값은 출구 A 농도가 0.5 mol L^{-1}이 되도록 하는 공간시간이다.

3. B 물질수지로 출구 농도 계산: **B는 유입되지 않고 A에서 생성된다**. 따라서 정상상태 B 물질수지는 $QC_B = Vk_1C_A$이고, $C_B = \tau k_1 C_A$가 된다. 공간시간 10 min, 반응속도상수 0.2 min^{-1}, A 농도 0.5 mol L^{-1}을 대입하면 $C_B = 10 \cdot 0.2 \cdot 0.5 = 1.0$ mol L^{-1}이다.

계산된 B의 출구 농도 1.0 mol L^{-1}은 ③의 값과 일치한다.

NoteBase

문 6. 등온 충전층반응기(PBR)에서 압력강하 없이 A→B 비가역 기상 2차 반응이 진행된다. A의 초기농도는 1 mol L^{-1}이며, 부피유량은 10 L min^{-1}이다. A의 전환율이 0.80에 도달하기 위해 필요한 촉매의 양[kg]은? (단, A와 B는 이상기체이고, 촉매 단위 질량 당 반응속도식의 속도상수는 2 L^2 mol^{-1} min^{-1} kg^{-1}이다)

① 10

② 12

③ 16

④ 20

정답 4번

간단한 해설

A→B는 반응 전후 총 몰수가 같고 등온·압력 일정 조건이므로 **부피유량이 일정**하며, $C_A = C_{A0}(1 - X)$이다. 이 농도 관계를 촉매 질량 기준의 2차 반응 설계식에 넣어 전환율 0.80까지 적분하면 필요한 촉매량은 **20 kg**이다.

계산 과정

1. 전환율에 따른 농도: A→B는 A 1몰이 소모될 때 B 1몰이 생성되어 총 몰유량이 변하지 않는다. 이상기체가 등온이고 압력강하도 없으므로 **반응기 전체에서 부피유량이 일정**하다. 따라서 전환율을 X라 하면 $C_A = C_{A0}(1 - X)$이며, 입구 농도는 $C_{A0} = 1\text{mol L}^{-1}$이다.

2. 입구 A 몰유량: 입구 부피유량을 v_0, A 몰유량을 F_{A0}라 하면 $F_{A0} = C_{A0}v_0$이다. 주어진 값을 곱하면 $F_{A0} = 1 \cdot 10 = 10\text{mol min}^{-1}$이다. 이는 전환율을 A의 소모 몰유량으로 바꾸는 기준이다.

3. 촉매 질량 기준 설계식: 촉매 질량을 W, 촉매 단위 질량당 A 소모속도를 $-r'_A$라 한다. 2차 반응이므로 $-r'_A = kC_A^2$이고, 주어진 속도상수는 $k = 2\text{L}^2\ \text{mol}^{-1}\ \text{min}^{-1}\ \text{kg}^{-1}$이다. 정상상태 PBR의 미소 물질수지에서 $F_{A0}dX = (-r'_A)dW$이므로 $dW = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2}\frac{dX}{(1-X)^2}$이다. 속도가 **촉매 단위 질량 기준**이므로 적분으로 구하는 양도 촉매 질량이다.

4. 전환율 0.80까지 적분: 입구의 전환율 0에서 목표 전환율 0.80까지 적분하면 $W = \frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2}\int_0^{0.80}\frac{dX}{(1-X)^2}$이다. 앞의 계수는 $\frac{F_{A0}}{kC_{A0}^2} = \frac{10}{2 \cdot 1^2} = 5\text{kg}$이고, 적분값은 $\left[\frac{1}{1-X}\right]_0^{0.80} = \frac{1}{0.20} - 1 = 4$이다. 이 적분은 **전환율이 높아질수록 농도와 반응속도가 낮아지는 효과**를 반영한다.

5. 필요한 촉매량: W = 5 × 4 = 20 kg이다. 따라서 계산값은 ④의 20 kg에 해당한다.

NoteBase

문 7. 등온 회분식반응기에서 A → B 비가역 액상 기초반응을 진행한다. 반응 시작 5분 후 A의 농도는 20 mol L^{-1}이고, 반응 시작 10분 후 A의 농도는 10 mol L^{-1}이다. 해당 반응의 반응속도상수[min^{-1}]는? (단, ln2 = 0.7이다)

① 0.140

② 0.175

③ 0.350

④ 0.700

정답 1번

간단한 해설

A → B는 **1차 기초반응**이므로, 농도가 20 mol L^{-1}에서 10 mol L^{-1}로 절반이 되는 데 걸린 5분을 이용한다. 반응속도상수는 $k = \frac{\ln 2}{5}$이며, 주어진 값을 대입하면 0.140 min^{-1}이다.

계산 과정

1. 반응속도식: 기초반응 A → B는 A 한 분자가 관여하는 반응이므로 A에 대한 1차 반응이다. 액상 반응의 부피를 일정하게 취급하면 회분식반응기의 농도 변화는 $-\frac{dC_A}{dt} = kC_A$로 나타낸다. 여기서 C_A는 A의 농도, t는 반응 시간, k는 반응속도상수이며, 등온 조건에서는 k가 일정하다.

2. 두 측정 시점에 적용: 위 식을 시간 t_1에서 t_2까지 적분하면 $\ln\frac{C_1}{C_2} = k(t_2 - t_1)$이다. C_1과 C_2는 각각 두 시점의 A 농도이다. 이 문제에서는 5분과 10분의 농도를 비교하므로 **경과 시간은 10 − 5 = 5분**이다. 이 구간에서 농도가 절반으로 줄었으므로 농도비의 자연로그는 $\ln\frac{20}{10} = \ln 2 = 0.7$이다. 반응 시작 시점의 농도는 필요하지 않다.

3. 속도상수 계산: $k = \frac{\ln 2}{10-5} = \frac{0.7}{5}$이므로 반응속도상수는 0.140 min^{-1}이다. 농도비의 로그는 무차원이고 시간을 분으로 나누었으므로 단위는 min^{-1}이며, 계산값은 ①의 0.140에 해당한다.

NoteBase

문 8. 부피가 500 L인 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 순수한 A를 반응물로 A → B 비가역 액상 1차 반응을 진행하여, A의 전환율 0.50을 얻었다. 동일한 반응에 대하여 A의 전환율 0.75에 도달하기 위해 필요한 PFR의 부피[L]는? (단, A의 초기농도, A의 공급 몰유량, 반응온도는 모두 동일하다)

① 750

② 1,000

③ 1,250

④ 1,500

정답 2번

간단한 해설

액상 1차 반응의 PFR에서는 미반응 A의 비율을 절반으로 줄이는 데 같은 부피가 필요하다. 전환율 0.75는 미반응 비율을 1 → 0.50 → 0.25로 두 번 줄인 상태이므로, 필요한 부피는 **500 L의 두 배인 1,000 L**이다.

계산 과정

전환율을 X, A의 입구 농도를 C_{A0}, 입구 몰유량을 F_{A0}, 반응속도상수를 k라 한다. 액상 반응에서 체적유량을 일정하게 보면 $C_A = C_{A0}(1 - X)$이고, 비가역 1차 반응의 A 소모속도는 $-r_A = kC_A$이다. **반응온도가 같으므로** 두 조건에서 속도상수도 같다.

PFR에서는 흐름 방향으로 농도가 달라지므로 각 위치의 반응속도를 반영해 부피를 구한다. 물질수지에 따른 설계식은 $V = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$이다. 입구 체적유량을 $v_0 = F_{A0}/C_{A0}$라 두고 속도식을 대입하여 적분하면 $V = \frac{v_0}{k}\ln\frac{1}{1-X}$가 된다. 따라서 부피는 전환율 자체가 아니라 **미반응 비율의 역수에 대한 로그값**에 비례한다.

전환율 0.50에서의 부피를 V_1, 전환율 0.75에서의 부피를 V_2라 한다. 초기농도와 공급 몰유량이 같아 입구 체적유량도 같으므로 두 부피의 비에서 v_0/k가 소거된다. 각 조건의 로그항은 $\ln\frac{1}{1-0.50} = \ln 2$, $\ln\frac{1}{1-0.75} = \ln 4$이다. 따라서 $\frac{V_2}{V_1} = \frac{\ln 4}{\ln 2} = 2$이다. 이는 미반응 비율을 0.50에서 0.25로 더 줄이는 데 처음과 같은 500 L가 추가로 필요하다는 뜻이다.

필요한 전체 부피는 $V_2 = 2V_1$이므로 $2 \times 500 = 1{,}000$ L이다. 이는 ②의 1,000 L와 일치한다.

NoteBase

문 9. 반응 $A + B \rightarrow C$에 대해, A의 초기농도(C_{A0})와 B의 초기농도(C_{B0})에 따라 다음과 같은 초기 반응속도($-r_{A0}$)를 얻었다. 이에 대한 A와 B의 반응차수를 바르게 연결한 것은? (단, 반응온도는 동일하다)

$C_{\mathrm{A0}}\,[\mathrm{mol\,L^{-1}}]$	$C_{\mathrm{B0}}\,[\mathrm{mol\,L^{-1}}]$	$-r_{\mathrm{A0}}\,[\mathrm{mol\,L^{-1}\,s^{-1}}]$
0.3	2.0	5.0×10^{-3}
0.6	4.0	40.0×10^{-3}
0.6	8.0	160×10^{-3}

① A의 반응차수: 1차, B의 반응차수: 1차

② A의 반응차수: 1차, B의 반응차수: 2차

③ A의 반응차수: 2차, B의 반응차수: 1차

④ A의 반응차수: 2차, B의 반응차수: 2차

정답 2번

간단한 해설

A의 농도를 일정하게 두고 B의 농도만 2배로 하면 초기 반응속도가 4배가 되므로 **B는 2차**이다. 두 농도를 모두 2배로 했을 때 속도가 8배가 되는 것은 B에 의한 4배 증가와 A에 의한 2배 증가가 곱해진 결과이므로 **A는 1차**이다.

NoteBase

계산 과정

속도식 설정: 초기 반응속도를 $-r_{A0} = kC_{A0}^{m}C_{B0}^{n}$으로 둔다. 여기서 m과 n은 각각 A와 B의 반응차수이며, 농도가 반응속도에 미치는 영향을 나타내는 지수이다. 모든 실험의 **반응온도가 같으므로 속도상수 k는 동일**하게 취급한다. 표의 농도 단위는 mol/L, 초기 반응속도 단위는 mol/(L·s)이며, 같은 단위끼리 비를 취하므로 단위가 소거된다.

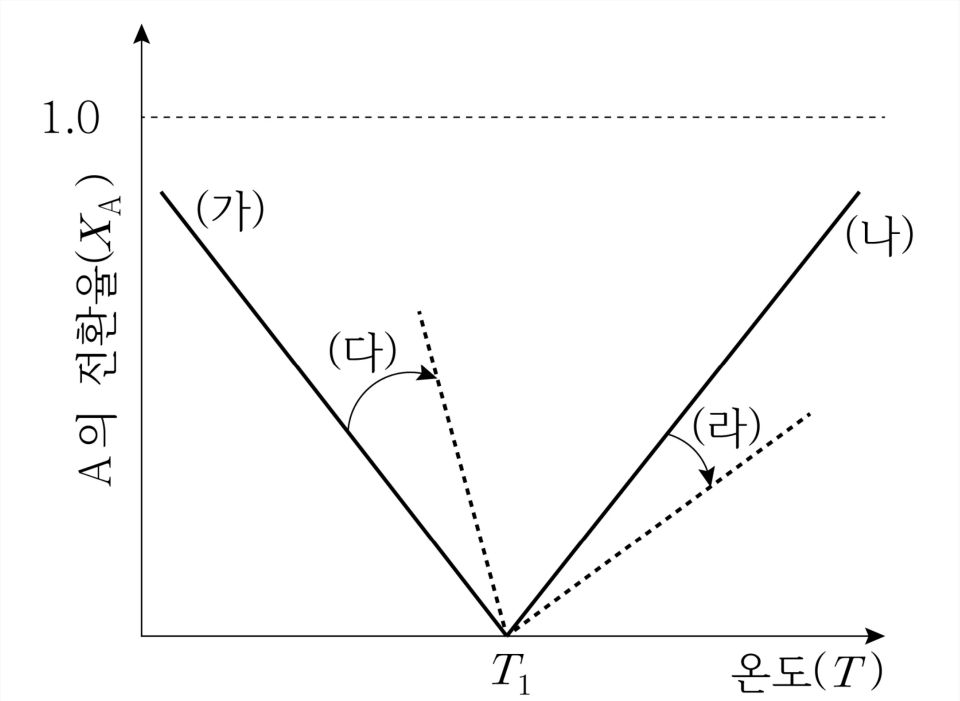
B의 반응차수: 표의 둘째 행과 셋째 행을 비교한다. A의 초기농도는 0.6 mol/L로 일정하고 B의 초기농도는 4.0 mol/L에서 8.0 mol/L로 2배가 된다. 속도비는 $\frac{160\times10^{-3}}{40.0\times10^{-3}} = 4$이다. **A의 농도 효과가 소거**되므로 $4 = \left(\frac{8.0}{4.0}\right)^{n} = 2^{n}$에서 $n = 2$이다.

A의 반응차수: 표의 첫째 행과 둘째 행에서는 A의 초기농도가 0.3 mol/L에서 0.6 mol/L로, B의 초기농도가 2.0 mol/L에서 4.0 mol/L로 각각 2배가 된다. 속도비는 $\frac{40.0\times10^{-3}}{5.0\times10^{-3}} = 8$이므로 $8 = 2^{m}\cdot 2^{2}$이다. 이 중 B의 농도 변화에 따른 증가분은 4배이므로, **전체 속도비를 B에 의한 증가배수로 나누면** A의 효과만 남는다. 따라서 $2^{m} = \frac{8}{4} = 2$에서 $m = 1$이다.

A의 반응차수는 1차, B의 반응차수는 2차이며, 이는 ②의 연결과 일치한다.

NoteBase

문 10. 다음은 제한반응물(limiting reactant) A의 전환율(X_A)에 관한 연속교반탱크반응기(CSTR)의 단열조작선(adiabatic operating line) 그래프이다. 흡열반응과 불활성물질 감소에 각각 해당하는 것을 바르게 연결한 것은? (단, T_1은 공급온도이다)



① 흡열반응: (가), 불활성물질 감소: (다)

② 흡열반응: (가), 불활성물질 감소: (라)

③ 흡열반응: (나), 불활성물질 감소: (다)

④ 흡열반응: (나), 불활성물질 감소: (라)

정답 2번

간단한 해설

흡열반응은 단열 상태에서 반응이 진행될수록 **온도가 낮아지므로** (가)에 해당한다. 불활성물질이 감소하면 혼합물의 열용량이 줄어 같은 전환율에서 온도 변화가 커지므로, 전환율을 세로축으로 한 조작선은 **기울기 절댓값이 작아지는** (라)처럼 변한다.

NoteBase

대응 관계 해설

가로축은 온도 T, 세로축은 A의 전환율 X_A이며, 전환율이 0이면 온도는 공급온도 T_1이다. 그림과 같은 직선 근사에서 반응열과 열용량을 일정하게 보면 단열 에너지수지는 $X_A = \frac{C}{-\Delta H_r}(T - T_1)$로 쓸 수 있다. 여기서 C는 공급되는 A 1몰당 혼합물의 열용량이고, ΔH_r는 A 1몰 반응에 대한 반응엔탈피이다. 따라서 이 그래프의 기울기는 $\frac{C}{-\Delta H_r}$이다.

흡열반응 → (가): 흡열반응은 $\Delta H_r > 0$이며, 외부에서 열을 공급받지 않는 단열 상태에서는 반응에 필요한 에너지를 혼합물의 현열에서 얻는다. 따라서 전환율이 증가하면 **공급온도보다 온도가 낮아진다**. 그림에서 T_1의 왼쪽 위로 뻗는 음의 기울기 선 (가)가 이에 해당한다. 반대로 (나)는 전환율이 증가할수록 온도가 높아지는 발열반응의 조작선이다.

불활성물질 감소 → (라): A와 다른 반응물의 공급 조건 및 공급온도를 유지하면서 불활성물질만 줄이면, 반응열을 함께 흡수하거나 내놓는 혼합물의 열용량 C가 작아진다. 같은 전환율에서는 반응으로 발생하거나 소비되는 열량이 같으므로 온도 변화의 절댓값은 더 커진다. 그러나 이 그림은 **온도가 가로축, 전환율이 세로축**이므로 기울기 절댓값은 오히려 작아진다. (라)는 양의 기울기 선이 더 완만해지는 변화이므로 불활성물질 감소에 해당한다. (다)는 음의 기울기 절댓값이 커지는 변화로, 불활성물질 감소에 따른 변화와 반대이다.

흡열반응은 (가), 불활성물질 감소는 (라)에 대응하므로 ②의 연결과 일치한다.

NoteBase

문 11. 등온 멤브레인 반응기(membrane reactor)에서 $A \rightleftharpoons B + C$ 가역 기상 기초반응을 진행한다. 반응 중 멤브레인을 통해 생성물 C만 반응기에서 선택적으로 제거할 때, 이에 대한 설명으로 옳은 것은?

① A의 전환율은 평형전환율을 넘어설 수 있다.

② C의 선택적 제거는 반응의 평형상수를 증가시킨다.

③ 반응기 내 모든 위치에서 평형 조성이 유지된다.

④ A의 전환율은 멤브레인의 투과도와 무관하다.

정답 1번

간단한 해설

C를 선택적으로 제거하면 역반응이 억제되어 A가 더 반응한다. 따라서 **C를 제거하지 않을 때의 평형전환율**을 넘어서는 전환율을 얻을 수 있다.

선지별 해설

① O: 전환율은 공급된 A 중 반응한 비율이다. 생성물 C를 제거하면 역반응에 참여하는 C의 농도가 낮아져 정반응이 더 진행된다. 이에 따라 같은 온도·압력 및 원료 조건에서 **C를 제거하지 않는 경우의 평형전환율을 넘어설 수 있다**. 선지의 평형전환율은 이러한 생성물 제거가 없는 경우의 기준값을 뜻한다.

② X: 일정한 반응의 **평형상수는 온도에 의해 결정된다**. 등온 조건에서 C를 제거해도 평형상수 자체는 변하지 않는다. C의 제거는 반응 혼합물의 조성을 바꾸어 정반응이 더 진행되도록 한다.

③ X: 평형에서는 정반응속도와 역반응속도가 같아 순반응속도가 0이다. C가 계속 제거되면 조성이 바뀌고, 이에 따라 두 반응속도의 균형도 달라진다. 따라서 반응기 내 모든 위치에서 평형 조성이 유지되는 것이 아니라, 일반적으로 **반응과 C의 제거가 함께 진행되며 조성이 달라진다**. 반응이 제거보다 매우 빠르면 국소적으로 평형에 가까울 수 있지만, 이는 별도의 근사 조건이다.

④ X: 멤브레인의 투과도는 **C가 제거되는 속도에 영향을 준다**. 다른 조건이 같을 때 투과도가 달라지면 반응기 내 C의 농도와 역반응속도가 달라질 수 있으므로, A의 전환율도 영향을 받는다. 따라서 전환율은 멤브레인의 투과도와 무관하지 않다.

NoteBase

문 12. 부피가 V인 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 2차 반응을 진행하여, A의 전환율 0.50을 얻었다. 부피가 $\frac{V}{3}$인 등온 플러그흐름반응기(PFR) 3개를 직렬로 연결하여 동일한 반응을 진행할 때, 마지막 반응기 출구에서 A의 전환율은? (단, A의 초기농도, A의 공급 몰유량, 반응온도는 동일하다)

① $\frac{1}{2}$
② $\frac{2}{3}$
③ $\frac{3}{4}$
④ $\frac{4}{5}$

정답 2번

간단한 해설

같은 온도의 직렬 PFR 3개는 **총부피가 같은 하나의 PFR**로 계산할 수 있다. CSTR의 전환율 0.50에서 얻은 반응 조건을 PFR 설계식에 적용하면 마지막 출구의 전환율은 $\frac{2}{3}$, 약 66.7%이다.

계산 과정

1. 반응속도와 농도 관계: 초기농도를 C_{A0}, 공급 몰유량을 F_{A0}, 속도상수를 k, 최초 공급량 기준 전환율을 X라 한다. 액상 반응이므로 부피유량이 일정한 것으로 취급하면 $C_A = C_{A0}(1 - X)$이다. 비가역 2차 반응의 A 소모속도는 $-r_A = kC_A^2$이며, 반응온도가 같으므로 두 반응기에서 같은 k를 사용한다.

2. CSTR에서 반응 조건 구하기: 정상상태 CSTR는 내부가 완전히 혼합되어 **반응기 전체의 농도가 출구농도와 같다**. 따라서 설계식은 $F_{A0}X = kC_{A0}^2(1 - X)^2V$이다. 주어진 전환율 $X = 0.50$을 대입하면 $\frac{kC_{A0}^2V}{F_{A0}} = \frac{0.50}{(1 - 0.50)^2} = 2$이다. 이 무차원 값은 주어진 반응속도·공급 조건과 부피의 관계를 나타내며, PFR 계산에도 그대로 사용할 수 있다.

3. 직렬 PFR의 전체 부피: 각 PFR의 부피가 $\frac{V}{3}$이므로 전체 부피는 $3 \cdot \frac{V}{3} = V$이다. 같은 등온 조건에서 앞 반응기의 출구가 다음 반응기의 입구로 이어지므로 **반응 진행을 각 반응기에서 처음부터 다시 계산하지 않는다**. 최초 유입을 기준으로 한 전환율을 이어서 사용하면 부피 V인 하나의 PFR로 계산할 수 있다.

4. PFR 설계식 적분: PFR에서는 흐름 방향에 따라 농도와 반응속도가 변하므로 미소부피의 물질수지 $F_{A0}dX = (-r_A)dV$를 적분한다. 마지막 출구 전환율을 X_f라 하면 $\frac{kC_{A0}^2V}{F_{A0}} = \int_0^{X_f} \frac{dX}{(1 - X)^2}$이다. 적분값은 $\frac{1}{1 - X_f} - 1 = \frac{X_f}{1 - X_f}$이므로, 앞에서 구한 값을 넣으면 $\frac{X_f}{1 - X_f} = 2$이다.

5. 최종 전환율: $X_f = 2(1 - X_f)$에서 $3X_f = 2$, 즉 $X_f = \frac{2}{3}$이다. 전환율은 공급된 A 중 반응한 비율이므로 단위가 없으며, 약 66.7%에 해당한다. 이 값은 ②의 $\frac{2}{3}$과 일치한다.

NoteBase

문 13. 다음 두 반응이 동시에 진행될 때, A의 전환율 0.80에서 U에 대한 D의 순간 선택도($S_{D/U}$)는 0.5이다. D가 생성되는 반응속도식의 속도상수(k_D) [min^{-1}]는? (단, A의 초기농도는 40 mol L^{-1}이고, $S_{D/U} = \frac{r_D}{r_U}$, r_j는 j의 생성 속도, C_A는 A의 농도이다)

A → U, $r_U = 0.5C_A^2$ [mol L^{-1} min^{-1}]
A → D, $r_D = k_D C_A$ [mol L^{-1} min^{-1}]

① 0.5

② 1.0

③ 2.0

④ 4.0

정답 3번

간단한 해설

순간 선택도는 그 시점의 **생성 속도비**이므로, 전환율 0.80에서 남은 A의 농도 8 mol L^{-1}을 사용한다. 주어진 속도식을 선택도 정의에 대입하면 $k_D = 0.5S_{D/U}C_A$이므로 속도상수는 2.0 min^{-1}이다.

계산 과정

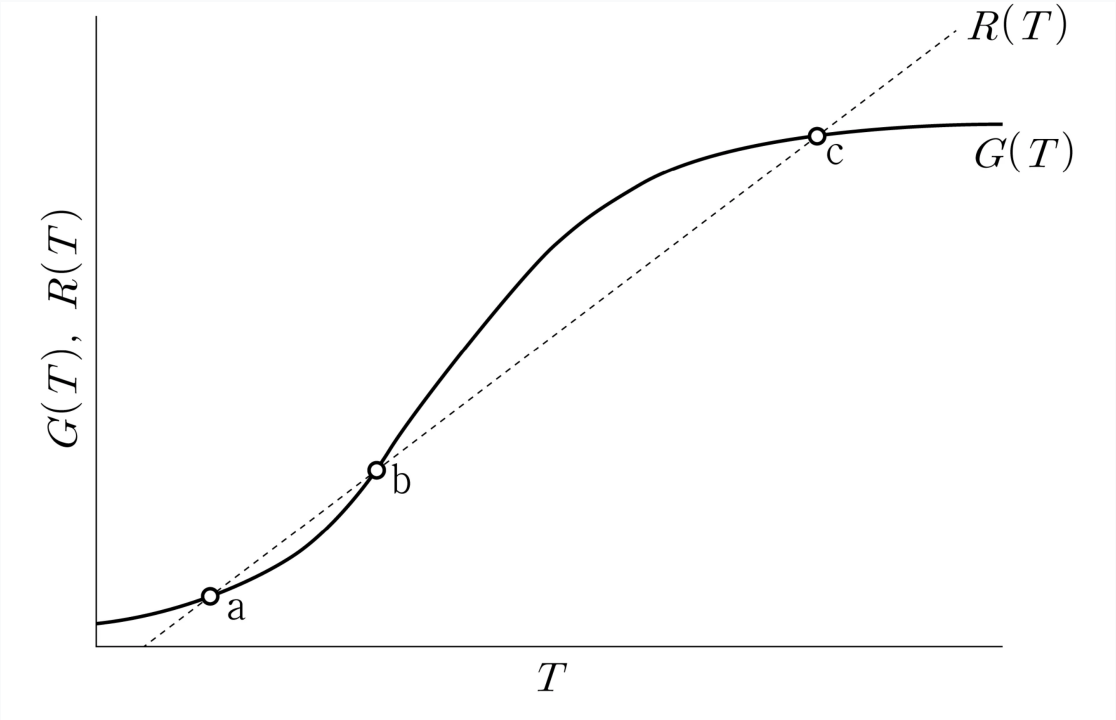
1. 전환율에서 A의 농도 구하기: 전환율 $X_A = 0.80$은 초기 A의 80%가 반응하여 20%가 남았다는 뜻이다. 반응에 따른 부피 변화가 없다고 두면 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$이므로, $C_A = 40 \cdot (1 - 0.80) = 8$ mol L^{-1}이다. 이후 속도식에는 초기농도가 아니라 **이 시점에 남은 농도**를 넣는다.

2. 두 생성 속도 구하기: U의 생성 속도는 $r_U = 0.5C_A^2$이므로, $r_U = 0.5 \cdot 8^2 = 32$ mol L^{-1} min^{-1}이다. 순간 선택도 $S_{D/U} = r_D/r_U = 0.5$는 **D의 생성 속도가 U의 생성 속도의 절반**이라는 뜻이다. 따라서 $r_D = S_{D/U}r_U = 0.5 \cdot 32 = 16$ mol L^{-1} min^{-1}이다.

3. 속도상수 구하기: D의 속도식 $r_D = k_D C_A$를 정리하면 $k_D = \frac{r_D}{C_A} = \frac{16}{8} = 2.0$ min^{-1}이다. 생성 속도를 농도로 나누므로 단위는 min^{-1}이며, 이 값은 ③의 2.0에 해당한다.

NoteBase

문 14. 다음은 열교환기가 설치된 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 발열 비가역 반응이 진행될 때, 반응기 온도(T)에 따른 발생열($G(T)$)과 제거열($R(T)$)을 나타낸 그래프이다. 이에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, a, b, c는 $G(T)$와 $R(T)$의 교점이며, $R(T)$는 직선이다)



① 열교환기에 의한 총괄 열전달 계수와 열교환 면적의 곱이 증가하면 R(T)의 기울기는 감소한다.

② 원료의 유입 온도가 증가하면 R(T)는 기울기의 변화 없이 오른쪽으로 이동한다.

③ a와 c에서는 반응기가 안정적인 정상상태로 운전된다.

④ b에서 반응기 온도가 미세하게 상승하면, 반응기 온도는 c를 향해 더 증가한다.

정답 1번

간단한 해설

열교환기의 총괄 열전달 계수와 면적의 곱 UA가 증가하면, 온도 상승에 따른 제거열 증가량이 커져 $R(T)$의 기울기는 **감소하는 것이 아니라 증가한다**.

NoteBase

선지별 해설

가로축은 반응기 온도 T, 세로축은 발생열 $G(T)$과 제거열 $R(T)$이다. 두 값이 같은 교점은 정상상태이며, $G(T) > R(T)$이면 온도가 상승하고 $G(T) < R(T)$이면 하강한다. 열제거 직선을 나타내는 모형에서 $R(T) = C(T - T_0) + UA(T - T_c)$로 쓸 수 있다. 여기서 C는 유입류의 열용량 유량, T_0는 원료 유입 온도, T_c는 냉각매체 온도이며, U와 A는 각각 총괄 열전달 계수와 열교환 면적이다. 각 조건 변화는 나머지 조건을 일정하게 두고 판단한다.

① X: 제거열 직선의 기울기는 $R'(T) = C + UA$이다. 따라서 UA가 증가하면 같은 온도 상승에 대해 제거되는 열이 더 많이 증가하므로, 기울기는 **감소하지 않고 증가한다**.

② O: 원료 유입 온도 T_0가 높아지면 같은 반응기 온도에서 원료를 데우는 데 필요한 열 $C(T - T_0)$이 감소한다. 따라서 $R(T)$는 아래로 평행 이동한다. 기울기가 양수인 직선이므로 이는 **오른쪽으로 평행 이동**하는 것과 같으며, $C + UA$는 변하지 않는다.

③ O: a와 c에서는 점선인 제거열 직선의 기울기가 실선인 발생열 곡선의 기울기보다 크다. 각 교점에서 온도가 조금 높아지면 $R(T) > G(T)$가 되어 온도가 내려가고, 조금 낮아지면 $G(T) > R(T)$가 되어 온도가 올라간다. 이처럼 작은 온도 변화가 생겨도 **원래 교점으로 되돌아가는** 정상상태이다.

④ O: b에서는 발생열 곡선의 기울기가 제거열 직선의 기울기보다 크다. 온도가 조금 높아져 b의 오른쪽으로 가면, c에 이르기 전까지 $G(T) > R(T)$이므로 **발생열이 제거열보다 많아** 온도가 계속 상승한다. 따라서 b는 불안정한 정상상태이며, 온도는 높은 온도의 안정 정상상태인 c를 향해 증가한다.

NoteBase

문 15. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 A → B 비가역 액상 반응을 진행하며, 반응속도식은 $-r_A = \frac{kC_A}{1+KC_A}$ [mol L^{-1} min^{-1}]이다. 초기농도 10 mol L^{-1}의 A를 반응물로 공급하고, 공간시간 60 min으로 운전하여 B를 생산하였다. 동일한 반응기에서 B의 생산량을 10% 증가시키기 위해 공급해야 하는 반응물 A의 초기농도[mol L^{-1}]는? (단, k=0.1 min^{-1}, K=1 L mol^{-1}, A의 공급 부피유량과 반응온도는 동일하다)

① 11.0

② 11.5

③ 16.0

④ 16.5

정답 4번

간단한 해설

공급 부피유량이 같으므로 B 생산량을 10% 늘리려면 **A의 입구·출구 농도차를 10% 늘려야 한다**. 농도차를 5에서 5.5 mol L^{-1}로 높이면 필요한 출구 A 농도는 11 mol L^{-1}가 되므로, 공급 농도는 16.5 mol L^{-1}이다.

계산 과정

1. CSTR의 물질수지: 공급 A 농도를 C_{A0}, 출구 A 농도를 C_A, 부피유량을 q, 반응기 부피를 V라 한다. 정상상태에서 A의 유입량과 유출량의 차이는 반응 소모량과 같으므로 $q(C_{A0} - C_A) = V(-r_A)$이다. 액상 반응의 부피유량을 일정하게 취급하고 공간시간 $\tau = V/q$를 쓰면 $C_{A0} - C_A = \tau(-r_A)$이다. CSTR는 완전혼합되므로 속도식에는 **반응기 내부와 같은 출구 농도**를 대입한다.

2. 기존 운전의 출구 농도: $C_{A0} = 10$ mol L^{-1}, 공간시간 60 min과 주어진 속도상수를 대입하면 $10 - C_A = \frac{6C_A}{1+C_A}$이다. 농도의 수치를 mol L^{-1} 기준으로 넣어 정리하면 $(10 - C_A)(1 + C_A) = 6C_A$, 즉 $(C_A - 5)(C_A + 2) = 0$이다. 음의 농도는 불가능하므로 출구 A 농도는 5 mol L^{-1}이다. 따라서 A의 반응 농도차는 10 − 5 = 5 mol L^{-1}이며, A → B의 몰비가 1:1이므로 이는 단위 유체 부피당 생성된 B의 양이다.

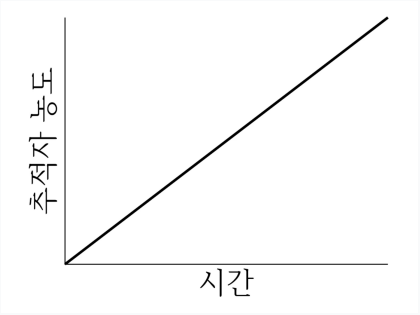
3. 생산량 증가에 필요한 출구 농도: B의 생성 몰유량은 $q(C_{A0} - C_A)$이다. 부피유량이 같으므로 생산량 10% 증가는 **반응 농도차를 1.1배**로 만드는 조건이다. 새 농도차는 $5 \times 1.1 = 5.5$ mol L^{-1}이다. 동일한 반응기와 부피유량이므로 공간시간은 60 min으로 유지되고, 등온이므로 속도상수도 같다. 새 출구 농도를 C'_A라 하면 $5.5 = \frac{6C'_A}{1+C'_A}$이다. 이를 풀면 $5.5(1 + C'_A) = 6C'_A$이므로 $C'_A = 11$ mol L^{-1}이다.

4. 필요한 공급 농도: 새 공급 농도는 출구에 남는 A 농도에 반응으로 소모된 농도차를 더한 값이다. 따라서 $C'_{A0} = 11 + 5.5 = 16.5$ mol L^{-1}이며, ④의 16.5와 일치한다.

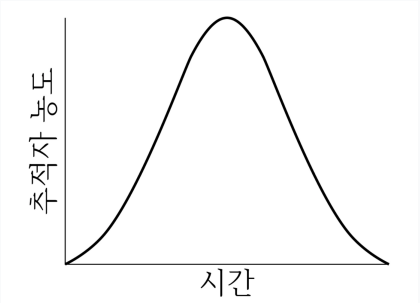
NoteBase

문 16. 관형 반응기 내에서의 체류시간분포(residence time distribution)를 얻기 위해 추적자(tracer)를 펄스(pulse) 형태로 반응기 입구에 주입했을 때, 반응기 출구에서 관찰되는 추적자의 농도분포는? (단, 축 방향으로의 분산이 발생한다)

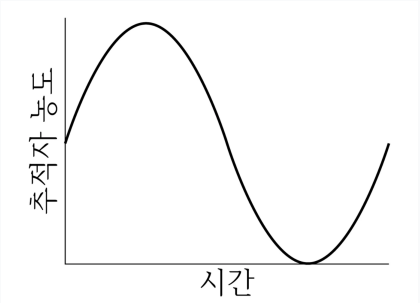
①



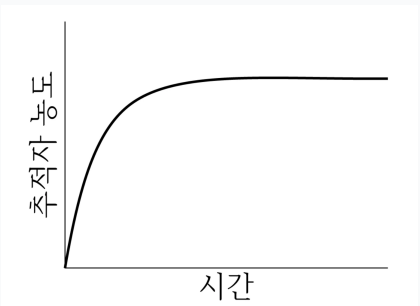
②



③



④



정답 2번

간단한 해설

축 방향 분산은 추적자의 **출구 도달 시간을 퍼뜨린다**. 짧게 주입한 추적자가 시간에 걸쳐 배출되므로 출구 농도는 증가하여 **하나의 봉우리**를 만든 뒤 다시 0에 가까워진다.

NoteBase

도식 해설

가로축은 시간, 세로축은 추적자 농도이다. 펄스 주입은 추적자를 짧은 시간 동안 한 번 넣는 방식이다. 축 방향 분산이 있으면 추적자가 흐름 방향으로 퍼져 일부는 먼저, 일부는 나중에 출구에 도달한다. 따라서 출구에서는 입력 펄스보다 **시간 폭이 넓어진 농도곡선**이 관찰된다.

①: 농도가 시간에 따라 계속 직선적으로 증가한다. 한 번 넣은 유한한 양의 추적자가 배출되는 펄스 실험에서는 충분한 시간이 지나면 농도가 0에 가까워져야 하므로 이 모양은 맞지 않는다.

②: 농도가 낮은 값에서 증가하여 하나의 최댓값을 지난 뒤 다시 감소한다. 먼저 도달한 추적자에 이어 주된 추적자 무리가 나오면서 농도가 높아지고, 뒤늦게 도달하는 추적자까지 빠져나가면 농도가 낮아진다. 이 **폭을 가진 단일 봉우리**가 축 방향 분산이 있는 관형 반응기의 펄스 응답을 나타낸다.

③: 농도가 증가했다 감소한 뒤 다시 증가한다. 이 문제에서 주어진 단일 펄스와 축 방향 분산에 따른 응답은 추적자 무리가 퍼져 지나가며 하나의 봉우리를 형성하는 것이므로, 그림의 재상승과는 다르다.

④: 농도가 증가한 뒤 0이 아닌 일정한 값에 머문다. 이는 추적자를 일정한 농도로 계속 공급하는 **계단 입력의 응답**에 해당하는 형태이다. 짧게 주입을 끝내는 펄스 입력에서는 추적자가 배출된 뒤 출구 농도가 다시 0에 가까워진다.

NoteBase

문 17. 부피가 일정한 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 비가역 연속 1차 반응을 진행한다. B의 농도가 최대일 때, A의 농도 [mol L^{-1}]는? (단, $k_1 = 3\ min^{-1}$, $k_2 = 6\ min^{-1}$, A의 초기 농도는 2 mol L^{-1}이다)

① 0.8

② 1.0

③ 1.2

④ 1.4

정답 2번

간단한 해설

B의 농도가 최대인 순간에는 **B의 생성속도와 소멸속도가 같다**. 주어진 연속 1차 반응의 농도식에 이 조건을 적용하면 A는 초기 농도의 절반인 1.0 mol L^{-1}이 된다.

계산 과정

1. 조건과 A의 농도: A와 B의 농도를 각각 C_A, C_B, 반응시간을 t(min)라 둔다. **부피가 일정한 회분식반응기**이므로 유입·유출 및 부피 변화에 따른 항 없이 반응에 의한 농도 변화를 계산한다. 등온이므로 속도상수는 일정하며, A의 1차 소멸식은 $\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A$이다. 초기 농도 2 mol L^{-1}과 $k_1 = 3\ min^{-1}$을 적용하면 $C_A = 2e^{-3t}$이다. 이하 농도식의 값은 mol L^{-1} 단위이다.

2. B의 농도: B는 A에서 생성되고 C로 전환되어 소멸하므로 $\frac{dC_B}{dt} = k_1 C_A - k_2 C_B$이다. 순수한 A로 시작하므로 $C_B(0) = 0$이다. 앞의 A 농도식을 대입한 $\frac{dC_B}{dt} + 6C_B = 6e^{-3t}$를 이 초기조건으로 풀면 $C_B = 2(e^{-3t} - e^{-6t})$를 얻는다.

3. B 농도의 최대 조건: 최대점에서는 **순생성속도가 0**이므로 $k_1 C_A = k_2 C_B$이다. $x = e^{-3t}$로 두면 $C_A = 2x$, $C_B = 2(x - x^2)$이므로 최대 조건은 $6x = 12(x - x^2)$이다. 유한한 시간에는 $x > 0$이므로 양변을 $6x$로 나누면 $1 = 2(1 - x)$, 즉 $x = \frac{1}{2}$이다. B의 농도 변화율은 $6x(2x - 1)$이며, 시간이 지나 x가 1에서 0으로 감소할 때 이 지점 전에는 양수, 후에는 음수이므로 실제 최대점이다.

4. 구하는 A의 농도: $C_A = 2x = 2 \cdot \frac{1}{2} = 1.0$ mol L^{-1}이다. 이는 선택지 ②의 1.0에 해당한다.

NoteBase

문 18. 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 A→B 비가역 액상 기초반응을 진행하며, 반응속도상수는 아레니우스(Arrhenius) 식을 따른다. 온도 400 K에서 A의 전환율이 0.70에 도달할 때까지 1시간이 소요되었다. 동일한 초기 조건에서 온도만 800 K로 증가시킬 경우, 전환율 0.70을 달성하기 위해 필요한 반응시간[h]은? (단, 기체상수는 8.3 J mol^{-1} K^{-1}, 활성화 에너지는 33.2 kJ mol^{-1}이며, 빈도인자는 온도에 상관없이 일정하다)

① $e^{-0.5}$

② e^{-2}

③ e^{-4}

④ e^{-5}

정답 4번

간단한 해설

같은 전환율에 도달하는 시간은 **반응속도상수에 반비례**한다. 아레니우스 식에 따라 800 K의 속도상수는 400 K의 e^5배이므로, 필요한 시간은 e^{-5}h이다.

계산 과정

A→B는 A 한 분자가 반응하는 기초반응이므로 1차 반응이며, 속도식은 $-r_A = kC_A$이다. 여기서 C_A는 A의 농도, k는 해당 온도에서의 반응속도상수이다. 회분식반응기에서 A의 몰수를 N_A라 하면 $\frac{dN_A}{dt} = -kN_A$이므로, 전환율 X와 반응시간 t의 관계는 $kt = -\ln(1 - X)$이다.

400 K와 800 K에서의 속도상수와 시간을 각각 $k_{400}, t_{400}, k_{800}, t_{800}$으로 둔다. 두 경우 모두 **목표 전환율이 0.70으로 같으므로** $k_{400}t_{400} = k_{800}t_{800}$이다. 따라서 $\frac{t_{800}}{t_{400}} = \frac{k_{400}}{k_{800}}$이며, 초기 농도나 각 속도상수의 절댓값을 따로 구할 필요가 없다.

빈도인자를 a라 하면 아레니우스 식은 $k = ae^{-E_a/(RT)}$이다. **빈도인자가 두 온도에서 같으므로** 속도상수의 비를 취하면 a가 소거된다. 활성화 에너지를 기체상수와 같은 에너지 단위로 바꾸면 33.2 kJ/mol = 33,200 J/mol이고, $\frac{E_a}{R} = \frac{33{,}200}{8.3} = 4000$K이다. 따라서 $\ln\frac{k_{800}}{k_{400}} = 4000\left(\frac{1}{400} - \frac{1}{800}\right) = 5$이며, $\frac{k_{800}}{k_{400}} = e^5$이다. 이는 온도를 높이면 반응속도상수가 증가함을 뜻한다.

400 K에서 걸린 시간은 1 h이므로 $t_{800} = t_{400}\frac{k_{400}}{k_{800}} = 1 \cdot e^{-5}$h이다. 필요한 반응시간은 e^{-5}h로, ④의 값에 해당한다.

NoteBase

문 19. 공극이 있는 촉매 입자 내에서 반응물의 평균 확산을 나타내기 위해 사용되는 유효확산계수(effective diffusivity)와 반비례 관계인 것은?

① 굴곡도

② 분자 확산계수

③ 세공분율

④ Knudsen 확산계수

정답 1번

간단한 해설

굴곡도가 커지면 세공 속 확산 경로가 더 길고 복잡해져 물질 이동이 어려워진다. 다른 조건이 같을 때 유효확산계수는 **굴곡도에 반비례**한다.

공통 해설

다공성 촉매 입자에서는 실제로 확산할 수 있는 공극의 비율과 경로의 굴곡을 반영하여 유효확산계수를 정한다. 통상적인 공극 모형에서 그 관계는 $D_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon}{\tau} D_p$이다. 여기서 ε은 입자 전체 부피 중 공극이 차지하는 비율인 세공분율, τ는 굴곡도, D_p는 세공 내부의 확산계수이다.

다른 인자가 일정하면 **굴곡도가 커질수록** 확산 경로를 우회하는 정도가 커져 유효확산계수는 작아진다. 굴곡도는 관계식의 분모에 있으므로 유효확산계수와 반비례한다. 반면 세공분율은 분자에 있으므로 유효확산계수와 비례한다.

세공 내부에서 분자 확산이 지배적이면 D_p는 분자 확산계수로, Knudsen 확산이 지배적이면 Knudsen 확산계수로 나타낸다. 따라서 각 지배 영역에서 공극 구조가 같을 때 유효확산계수는 해당 확산계수에 **비례**하며, 반비례하는 인자는 굴곡도이다.

NoteBase

문 20. 부피가 1,000 L인 등온 회분식반응기에서 A → B 비가역 액상 1차 반응을 진행하며, 반응속도상수는 0.05 min^{-1}이다. A의 초기 농도는 2 mol L^{-1}이며, 전환율 0.875까지 반응시킨 후 배출한다. 매 회분마다 반응시간 외에도 충전, 가열, 배출, 세척에 총 30분이 소요된다. 24시간 동안 최대 생산할 수 있는 B의 양[kmol]은? (단, ln2 = 0.7이고, 반응기는 24시간 연속 가동하며, 완결된 회분만 생산량에 포함한다)

① 35

② 40

③ 42

④ 72

정답 1번

간단한 해설

목표 전환율에 도달하는 반응시간은 42분이며, 부대시간을 포함하면 한 회분에 72분이 걸린다. 24시간에 **완결되는 20회분**에서 B가 회분당 1.75 kmol씩 생성되므로 최대 생산량은 35 kmol이다.

계산 과정

A → B는 몰비가 1:1인 반응이다. 한 회분에 투입하는 A의 양은 2 × 1,000 = 2,000 mol = 2 kmol이며, 전환율 0.875는 **초기 A의 87.5%가 반응한다**는 뜻이다. 따라서 회분당 B 생성량은 2 × 0.875 = 1.75 kmol이다.

액상 반응의 부피를 일정하게 보면, 1차 반응에서는 $\frac{C_A}{C_{A0}} = 1 - X = e^{-kt}$가 성립한다. 여기서 C_A는 시간 t에서 A의 농도, C_{A0}는 초기 농도, X는 전환율, k는 반응속도상수이다. 등온 조건에서 k가 일정하므로, X = 0.875까지 필요한 시간은 $t = \frac{-\ln(1-X)}{k} = \frac{\ln 8}{0.05} = \frac{3 \times 0.7}{0.05} = 42\text{min}$이다.

회분당 소요시간에는 **반응 외 작업시간도 포함**한다. 충전·가열·배출·세척에 드는 30분을 더하면 한 회분에 42 + 30 = 72분이 걸린다. 24시간은 24 × 60 = 1,440분이므로 완결할 수 있는 회분 수는 $N = \left\lfloor \frac{1{,}440}{72} \right\rfloor = 20$이다. 완결된 회분만 세므로 나눈 값의 정수 부분을 취하며, 이 문제에서는 20회분이 정확히 24시간에 해당한다.

24시간 동안 B의 최대 생산량은 회분당 생성량과 완결 회분 수를 곱한 1.75 × 20 = 35 kmol이며, ①의 값과 일치한다.

NoteBase

문 21. 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 $A \rightleftharpoons B$ 가역 액상 기초반응을 진행한다. 동일한 몰유량의 A와 B가 반응기로 공급될 때, 반응속도식($-r_A$)은? (단, k_A는 정반응의 반응속도상수, C_{A0}는 A의 초기농도, K_C는 농도평형상수, X_A는 A의 전환율이다)

① $k_A C_{A0}(1 - X_A)$
② $k_A C_{A0}\left(1 - \frac{1 - X_A}{X_A K_C}\right)$
③ $k_A C_{A0}\left[1 - X_A\left(1 + \frac{1}{K_C}\right)\right]$
④ $k_A C_{A0}\left[(1 - X_A) - \frac{(1 + X_A)}{K_C}\right]$

정답 4번

간단한 해설

B도 A와 같은 몰유량으로 유입되므로, B의 농도는 **유입된 양과 반응으로 생성된 양의 합**인 $C_B = C_{A0}(1 + X_A)$이다. A의 순소모속도는 **정반응 속도에서 역반응 속도를 뺀 값**이므로, 이 B 농도를 역반응 항에 반영한다.

계산 과정

1. 가역 기초반응의 속도식: $A \rightleftharpoons B$는 양방향 모두 1차인 기초반응이다. 역반응 속도상수를 k_r라 하면 A의 순소모속도는 $-r_A = k_A C_A - k_r C_B$이다. 평형에서는 양방향 속도가 같으므로 $K_C = \frac{C_{B,e}}{C_{A,e}} = \frac{k_A}{k_r}$이며, 아래첨자 e는 평형상태를 뜻한다. 따라서 $-r_A = k_A\left(C_A - \frac{C_B}{K_C}\right)$로 쓴다.

2. 전환율에 따른 농도: 액상 반응의 부피유량을 일정하게 취급한다. 동일한 몰유량의 A와 B가 함께 유입되므로 유입농도는 $C_{B0} = C_{A0}$이다. A의 전환율 X_A는 유입 A 중 순소모된 비율이므로 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$이다. A가 순소모된 만큼 B가 1:1로 생성되므로 $C_B = C_{B0} + C_{A0}X_A$, 즉 $C_B = C_{A0}(1 + X_A)$이다. 여기서 **B의 유입농도를 빠뜨리지 않는 것**이 핵심이다. CSTR은 완전혼합되므로 이 농도들이 반응기 내부와 유출액의 농도이다.

3. 농도 대입: 두 농도를 가역반응 속도식에 대입하면 $-r_A = k_A C_{A0}\left[(1 - X_A) - \frac{1 + X_A}{K_C}\right]$이다. 대괄호의 첫 항은 A 농도에 따른 정반응 기여이고, 둘째 항은 B 농도에 따른 역반응 기여이다. X_A와 K_C는 무차원이며, 전체 식은 농도를 시간으로 나눈 반응속도 단위를 갖는다. 도출한 식은 ④와 일치한다.

NoteBase

문 22. 다음 두 기상 반응이 동시에 진행될 때, U에 대한 D의 선택도를 높이는 방법으로 옳지 않은 것은? (단, C_j는 j의 농도, r_j는 j의 생성속도, T는 온도이다)

$A + B \rightarrow D,\ r_D = 800e^{-2000/T}C_A^{0.5}C_B$
$A + B \rightarrow U,\ r_U = 10e^{-300/T}C_AC_B$

① 반응온도를 높인다.

② 반응기 내 A의 농도를 낮춘다.

③ 반응기 내 B의 농도를 낮춘다.

④ 반응기 운전압력을 낮춘다.

정답 3번

간단한 해설

B에 대한 반응차수가 두 반응에서 모두 1이므로, 생성속도비에서 B의 농도항이 소거된다. 따라서 온도와 A의 농도가 같다면 **B의 농도를 낮춰도 선택도는 변하지 않는다**.

선지별 해설

U에 대한 D의 순간 선택도는 두 생성속도의 비인 $S_{D/U} = \frac{r_D}{r_U}$이며, 값이 클수록 U에 비해 D가 더 많이 생성된다. 두 반응이 진행되는 양의 농도 범위에서 주어진 속도식을 나누면 상수비는 $800 \div 10 = 80$, 온도 지수항은 $e^{-1700/T}$, A의 농도항은 $C_A^{0.5-1}$이 된다. B의 농도항은 소거되므로 $S_{D/U} = 80e^{-1700/T}C_A^{-0.5}$이다.

① O: 농도가 일정할 때 온도 T가 높아지면 $-1700/T$가 덜 음수가 되어 지수항이 커진다. 따라서 **온도를 높이면 선택도가 증가**한다. 이는 D 생성반응의 속도가 U 생성반응의 속도보다 온도 상승에 더 민감하게 증가하기 때문이다.

② O: 선택도는 $C_A^{-0.5}$에 비례하므로 A의 농도를 낮추면 커진다. A에 대한 반응차수가 D 생성반응에서는 0.5, U 생성반응에서는 1이므로, A의 농도를 낮추면 **U의 생성속도가 더 큰 비율로 감소**하여 D에 유리해진다.

③ X: 두 반응의 생성속도가 모두 C_B에 비례하므로, 온도와 A의 농도가 일정하면 B의 농도를 낮출 때 두 생성속도가 같은 비율로 감소한다. 따라서 **B의 농도만 낮춰서는 선택도가 높아지지 않는다**. 농도 조절로 선택도를 높이려면 B가 아니라 A의 농도를 낮춰야 한다.

④ O: 기체를 이상기체로 보고 **온도와 몰분율이 일정한 조건**에서 비교하면 $C_A = \frac{y_AP}{RT}$이다. 여기서 y_A는 A의 몰분율, P는 압력, R은 기체상수이다. 압력을 낮추면 A의 농도가 낮아지므로 $C_A^{-0.5}$가 커져 선택도가 증가한다. 이때 B의 농도도 낮아지지만, B의 농도항은 생성속도비에서 소거되므로 선택도에 직접 영향을 주지 않는다.

NoteBase

문 23. 불균일 촉매반응의 표면반응모델에 대한 설명으로 옳은 것은?

① 반응물 A와 반응물 B가 서로 다른 유형의 활성점에 흡착한 경우에는 표면반응이 일어나지 않는다.

② 흡착된 화합물의 표면반응속도는 분자들에 의해 점유된 촉매 활성점의 농도와 무관하다.

③ 엘레이-리디얼(Eley–Rideal) 메커니즘은 흡착된 분자와 기체 분자 간의 반응을 설명한다.

④ 랭뮤어(Langmuir) 등온선은 촉매 활성점에서 표면반응 속도를 나타낸다.

정답 3번

간단한 해설

엘레이-리디얼 메커니즘에서는 **표면에 흡착된 분자와 기체 상태의 분자**가 직접 반응한다. 두 반응물이 모두 촉매 표면에 흡착되어 있을 필요는 없다.

선지별 해설

① X: 반응물 A와 B가 **서로 다른 유형의 활성점에 흡착되어도** 표면반응이 가능하다. 이중 활성점 모델에는 같은 유형의 활성점에 흡착된 두 반응물의 반응뿐 아니라, 서로 다른 유형의 활성점에 흡착된 두 반응물의 반응도 포함된다. 활성점 유형이 다르다는 이유만으로 반응이 일어나지 않는다고 할 수 없다.

② X: 표면반응속도는 **반응물이 점유한 활성점의 농도에 의존한다**. 흡착된 분자는 표면반응에 참여하는 반응물이므로, 그 표면농도가 속도식에 들어간다. 예를 들어 흡착된 A가 B로 변하는 단순한 비가역 단분자 표면반응에서는 온도가 일정할 때 반응속도가 흡착된 A의 표면농도에 비례한다.

③ O: 엘레이-리디얼 메커니즘은 **흡착된 반응물과 기체 상태의 반응물이 직접 반응**하는 모델이다. 한 반응물만 먼저 표면에 흡착하고, 다른 반응물은 기체 상태에서 접근하여 반응한다. 두 반응물이 모두 흡착된 뒤 반응하는 랭뮤어-힌셜우드 메커니즘과 구별된다.

④ X: 랭뮤어 등온선은 일정한 온도에서 **기체 압력과 평형 흡착량의 관계**를 나타낸다. 표면반응속도 자체를 나타내는 식이 아니다. 균일한 활성점에 단분자층 흡착이 일어나고 흡착 분자 사이의 상호작용이 없다고 가정하며, 흡착량 또는 활성점의 점유율을 구하는 데 사용한다. 반응속도를 구하려면 이 흡착 관계와 별도로 표면반응의 속도식이 필요하다.

NoteBase

문 24. 등온 및 정압 조건의 이상적인 흐름반응기에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightleftharpoons 2B$ 가역 기상 기초반응을 진행한다. A의 초기농도(C_{A0})와 A의 평형전환율(X_{Ae})로 나타낸 해당 반응의 농도평형상수는? (단, A와 B는 이상기체이다)

① $\frac{2X_{Ae}}{(1-X_{Ae})}$
② $\frac{C_{A0}X_{Ae}}{(1+X_{Ae})}$
③ $\frac{4C_{A0}X_{Ae}^2}{(1-X_{Ae})(1+X_{Ae})}$
④ $\frac{4C_{A0}X_{Ae}^2}{(1-X_{Ae})(1+2X_{Ae})}$

정답 3번

간단한 해설

등온·정압의 이상기체 반응에서는 **총 몰유량 증가에 따라 체적유량도 증가**한다. 이를 반영한 평형농도를 $K_c = C_{Be}^2/C_{Ae}$에 대입하면 $K_c = \frac{4C_{A0}X_{Ae}^2}{(1-X_{Ae})(1+X_{Ae})}$가 된다.

계산 과정

1. 평형 몰유량: 입구 A의 몰유량을 F_{A0}라 하자. 평형전환율 X_{Ae}는 공급된 A 중 평형에 이를 때까지 반응한 비율이다. A 1몰이 반응하면 B 2몰이 생성되고, 입구에는 순수한 A만 있으므로 $F_{Ae} = F_{A0}(1-X_{Ae})$, $F_{Be} = 2F_{A0}X_{Ae}$이다. 따라서 평형 총 몰유량은 $F_{Te} = F_{A0}(1+X_{Ae})$이다.

2. 체적유량 변화: 이상기체식에서 체적유량은 $v = F_T RT/P$이다. **온도와 압력이 일정**하므로 체적유량은 총 몰유량에 비례한다. 입구 체적유량을 v_0라 하면 평형 체적유량은 $v_e = v_0(1+X_{Ae})$이다. 즉, 반응에 따른 기체의 팽창을 농도 계산에 반영해야 한다.

3. 평형농도: 농도는 각 성분의 몰유량을 체적유량으로 나눈 값이며, 초기농도는 $C_{A0} = F_{A0}/v_0$이다. 따라서 $C_{Ae} = \frac{C_{A0}(1-X_{Ae})}{1+X_{Ae}}$, $C_{Be} = \frac{2C_{A0}X_{Ae}}{1+X_{Ae}}$이다. 두 식의 분모에 있는 $1+X_{Ae}$는 **기체 팽창에 따른 농도 감소**를 나타낸다.

4. 농도평형상수: 반응식의 화학양론계수가 A는 1, B는 2이므로 $K_c = \frac{C_{Be}^2}{C_{Ae}}$이다. 위의 평형농도를 대입하면 $K_c = \left(\frac{2C_{A0}X_{Ae}}{1+X_{Ae}}\right)^2 \frac{1+X_{Ae}}{C_{A0}(1-X_{Ae})}$이고, 정리하면 $K_c = \frac{4C_{A0}X_{Ae}^2}{(1-X_{Ae})(1+X_{Ae})}$이다. 이 식은 ③과 일치한다. 이 문제처럼 농도 자체로 정의한 농도평형상수의 단위는 농도 단위와 같다.

NoteBase

문 25. $A \rightarrow B$ **비가역 액상 반응에서 A의 전환율(X_A)에 따른 반응속도($-r_A$)는 다음과 같으며, 부피가 V_1인 단일 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 해당 반응을 진행하여 A의 최종 전환율 0.80을 얻었다. 동일한 최종 전환율을 얻을 수 있도록 직렬 연결된 2개의 흐름반응기 전체의 최소 부피를 V_2라 할 때, 반응기 부피의 감소량($V_1 - V_2$) [m^3]은? (단, A의 공급 몰유량은 50 kmol h^{-1}로 일정하고, $-r_A$는 온도와 무관하며, 흐름반응기는 CSTR 또는 플러그흐름반응기(PFR)이다)**

$0 \le X_A \le 0.4$일 때, $-r_A = \frac{X_A + 0.6}{30}$ [kmol m^{-3} h^{-1}]
$0.4 \le X_A \le 0.8$일 때, $-r_A = \frac{1}{100X_A - 10}$ [kmol m^{-3} h^{-1}]

① 1,200

② 1,600

③ 1,800

④ 2,200

정답 1번

간단한 해설

반응속도가 증가하는 전환율 0~0.4 구간은 **CSTR**로, 반응속도가 감소하는 0.4~0.8 구간은 **PFR**로 구성할 때 전체 부피가 최소가 된다. 단일 CSTR의 부피는 2,800 m^3이고 최적 직렬 구성의 부피는 1,600 m^3이므로, 감소량은 1,200 m^3이다.

NoteBase

계산 과정

설계식: 공급 몰유량을 $F_{A0} = 50\ \text{kmol h}^{-1}$, 반응속도의 역수를 $g(X_A) = \frac{1}{-r_A}$라 둔다. 입구·출구 전환율을 각각 X_i, X_o라 하면, 정상상태 몰수지에서 CSTR 부피는 $V_{\text{CSTR}} = F_{A0}(X_o - X_i)g(X_o)$이다. 이는 내부가 출구 상태로 완전히 혼합되기 때문이다. PFR은 흐름에 따라 반응속도가 달라지므로 $V_{\text{PFR}} = F_{A0}\int_{X_i}^{X_o} g(X_A)dX_A$이다. 여기서 각 전환율은 최초 공급된 A를 기준으로 한다. 역수의 단위는 $\text{m}^3\ \text{h kmol}^{-1}$이므로 몰유량을 곱하면 부피 단위 m^3이 된다.

단일 CSTR의 부피: 출구 전환율 0.8에서 $g(0.8) = 100 \cdot 0.8 - 10 = 70$이다. 단일 CSTR 전체에는 **출구 전환율에서의 반응속도**를 적용하므로 $V_1 = 50 \cdot 0.8 \cdot 70 = 2800\ \text{m}^3$이다.

최소 부피의 구성: 전환율 0~0.4에서는 $g(X_A) = \frac{30}{X_A + 0.6}$가 50에서 30으로 감소하고, 0.4~0.8에서는 $g(X_A) = 100X_A - 10$이 30에서 70으로 증가한다. 전환율을 가로축, 반응속도의 역수를 세로축으로 보면 CSTR 부피는 출구 높이의 직사각형 면적에, PFR 부피는 곡선 아래 면적에 비례한다. 따라서 감소 구간은 **최솟값 30을 출구 높이로 쓰는 CSTR**로 처리하고, 증가 구간은 **곡선을 따라가는 PFR**로 처리하는 것이 유리하다. CSTR 출구를 0.4보다 앞에 두면 더 높은 역수를 쓰게 되고, 뒤에 두면 증가 구간까지 높은 출구 역수를 일괄 적용한다. 그러므로 첫 CSTR의 출구 전환율을 0.4로 두고 다음 PFR로 0.8까지 반응시키면 전체 최소 부피를 얻는다.

첫 CSTR의 부피: 전환율 0.4에서 $-r_A = \frac{0.4 + 0.6}{30} = \frac{1}{30}\ \text{kmol m}^{-3}\ \text{h}^{-1}$이다. 따라서 $V_{\text{CSTR}} = 50 \cdot 0.4 \cdot 30 = 600\ \text{m}^3$이다.

뒤 PFR의 부피: 전환율 0.4~0.8에서 반응속도의 역수는 30에서 70으로 선형 증가한다. 따라서 적분 면적은 **양 끝 높이의 평균에 전환율 증가량을 곱한 사다리꼴 면적**이며, $V_{\text{PFR}} = 50 \cdot \frac{30 + 70}{2} \cdot 0.4 = 1000\ \text{m}^3$이다.

부피 감소량: 두 반응기의 최소 총부피는 $V_2 = 600 + 1000 = 1600\ \text{m}^3$이다. 따라서 $V_1 - V_2 = 2800 - 1600 = 1200\ \text{m}^3$로, ①의 1,200에 해당한다.

NoteBase