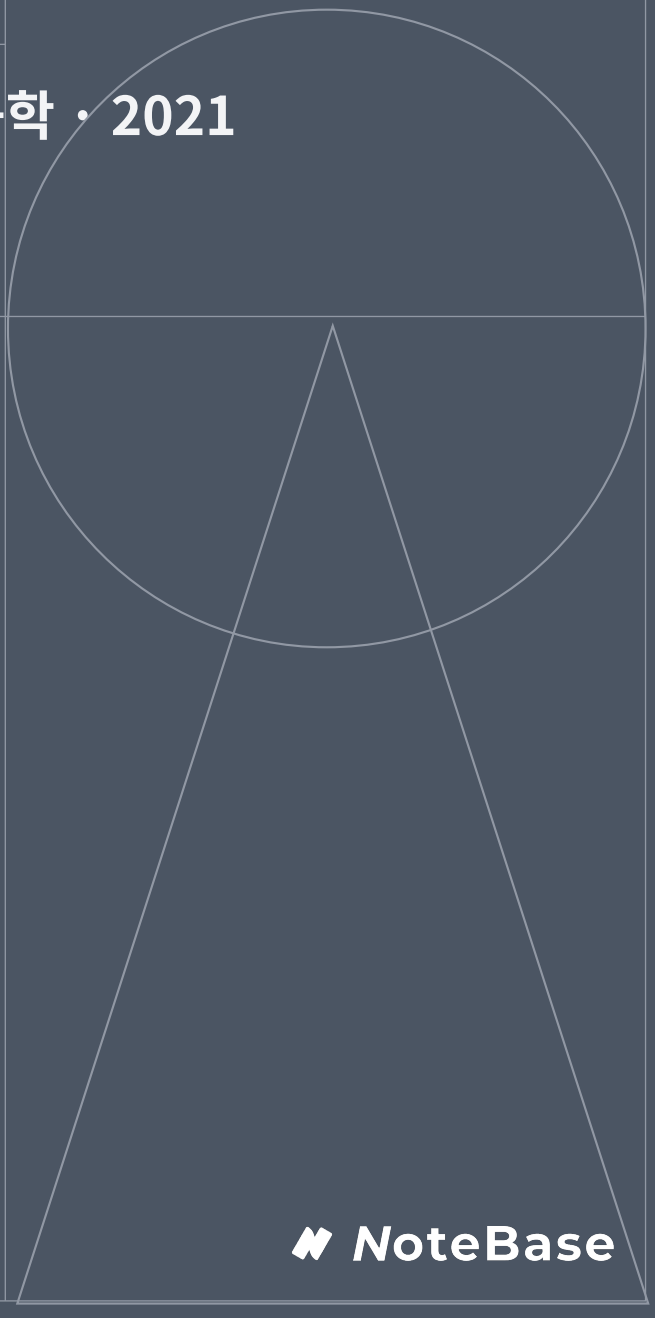
기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2021



NoteBase

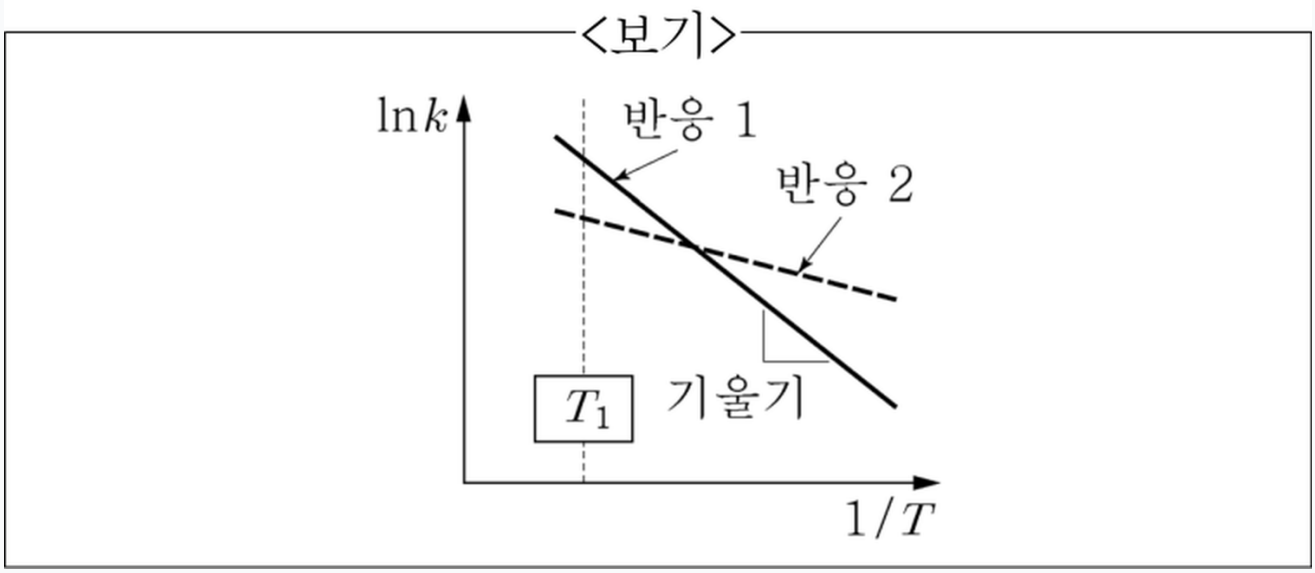
기출OX 해설집

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2021

공무원/서울시/7급 · 반응공학 · 2021

문 1. <보기>의 그림은 반응온도 T를 변화시키면서 반응속도상수 k를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 가장 옳은 것은?

<보기>



① 기울기는 활성화 에너지 값이다.

② 반응 1이 반응 2보다 낮은 활성화 에너지를 가진다.

③ 반응온도 T_1에서 반응 1보다 반응 2의 반응속도가 빠르다.

④ 반응 1에 비해 반응 2가 반응온도에 덜 민감하다.

정답 4번

출제 포인트

아레니우스 식 $\ln k = \ln A - E_a/(RT)$를 이용해 $\ln k$ 대 $1/T$ 그래프의 기울기와 높이를 해석하는 문제이다.

핵심 개념

$\ln k$ 대 $1/T$ 그래프의 기울기는 $-E_a/R$이다. 따라서 기울기 절댓값이 클수록 활성화에너지가 크고, 온도 변화에 따른 k의 변화도 더 크다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 기울기 자체는 활성화에너지 값이 아니라 $-E_a/R$이다. 틀린 표현은 '기울기는 활성화 에너지 값'이고, 올바르게는 '기울기는 활성화에너지를 기체상수로 나눈 값에 음수를 붙인 것'이다.
② X: 반응 1의 직선이 반응 2보다 더 가파르게 감소하므로 기울기 절댓값이 더 크다. 따라서 E_a는 반응 1이 더 크다. 틀린 표현은 '반응 1이 더 낮은 활성화 에너지'이고, 올바르게는 '반응 1이 반응 2보다 높은 활성화에너지를 가진다'이다.
③ X: T_1은 교차점의 왼쪽에 있으므로 그 지점에서는 반응 1의 직선이 반응 2보다 위에 있다. 따라서 $\ln k_1 > \ln k_2$이고 $k_1 > k_2$이다. 같은 조건에서 속도상수가 더 큰 쪽이 더 빠르므로 틀린 표현은 '반응 2의 반응속도가 빠르다'이고, 올바르게는 '반응 1의 속도상수가 더 크다'이다.
④ O: 반응 2는 반응 1보다 기울기 절댓값이 작다. 이는 활성화에너지가 더 작고, 온도 변화에 따라 k가 변하는 정도도 더 작다는 뜻이므로 반응온도에 덜 민감하다는 설명이 맞다.

오답 포인트

기울기를 활성화에너지 그 자체로 착각하거나, T_1에서 두 직선의 위아래 관계를 보지 않고 단순히 교차한다는 사실만 기억하면 ①, ③에 흔들리기 쉽다. 이 그래프에서는 기울기의 부호보다 절댓값과 특정 온도에서의 직선 높이가 핵심이다.

다시 나오면 이렇게 판단

먼저 $\ln k$ 대 $1/T$ 그래프의 기울기가 $-E_a/R$임을 떠올린다. 그다음 기울기 절댓값으로 활성화에너지와 온도 민감도를 비교하고, 특정 온도에서는 해당 $1/T$ 위치에서 어느 직선이 더 위에 있는지 확인해 k의 크기를 판단한다.

암기 포인트

$\ln k$ 대 $1/T$에서 가팔라질수록 E_a가 크고, 온도 민감도도 커진다.

NoteBase

문 2. 액상 반응이 혼합흐름반응기(CSTR)에서 일어난다. 이 반응기에서는 반응물 A가 $0.1\text{mol/L}\cdot\text{min}$의 속도로 반응되어 소멸되고 있다. 반응물 A의 유입속도 F_{A0}는 0.6mol/min이고, 전환율 X_A가 0.5라고 할 때 이 반응기의 부피[L]는?

① 3

② 4.5

③ 6

④ 9

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 혼합흐름반응기(CSTR)의 설계식 $V = F_{A0}X_A/(-r_A)$로 반응기 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 반응물 A의 유입속도 $F_{A0} = 0.6mol/min$
- 전환율 $X_A = 0.5$
- 반응물 A의 소멸속도 $-r_A = 0.1mol/L\cdot min$

구해야 할 값:
- 반응기 부피 V

주의할 조건:
- CSTR에서는 정상상태 물질수지로 $V = F_{A0}X_A/(-r_A)$를 바로 적용한다.

사용할 공식

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

이 공식을 쓰는 이유는 CSTR의 정상상태 설계식이 반응기 전체에서 동일한 출구 조건의 반응속도를 사용해 전환량을 부피와 연결하기 때문이다.

계산 과정

1. A의 전환으로 실제 반응한 몰유량을 구하면 $F_{A0}X_A = 0.6 \times 0.5 = 0.3mol/min$이다.
2. 이를 CSTR 설계식에 대입하면 $V = 0.3/0.1$이다.
3. 따라서

$V = \frac{0.6 \times 0.5}{0.1} = 3L$

이므로 반응기 부피는 3 L이다.

NoteBase

선지 판단

① O
- 계산 결과가 3 L이므로 맞는 선택지이다.

② X
- 4.5 L는 계산 결과와 다르므로 틀리다.
- 틀린 표현은 수치 4.5 L이다. 올바르게는 3 L이다.
- 주어진 값에서 $F_{A0}X_A = 0.3 mol/min$이므로 4.5 L가 나올 수 없다.

③ X
- 6 L는 전환량을 두 배로 본 값과 비슷한 과대계산이므로 틀리다.
- 틀린 표현은 수치 6 L이다. 올바르게는 3 L이다.
- $X_A = 0.5$를 반영하면 반응한 몰유량은 0.3mol/min인데, 이를 무시하면 부피를 크게 잡게 된다.

④ X
- 9 L는 계산값 3 L의 세 배로, 설계식을 잘못 적용한 값이므로 틀리다.
- 틀린 표현은 수치 9 L이다. 올바르게는 3 L이다.
- 주어진 반응속도 0.1 mol/L·min과 전환량 0.3mol/min을 쓰면 9 L가 아니라 3 L가 된다.

계산 결과가 3 L이므로 정답은 1번이다.

오답 포인트

전환율 X_A를 빼먹고 F_{A0}만 대입하거나, CSTR 설계식의 분자와 분모를 거꾸로 쓰면 부피를 과대계산하기 쉽다. 이 문항은 실제 반응한 몰유량이 $F_{A0}X_A$라는 점을 놓치면 오답으로 이어진다.

다시 나오면 이렇게 판단

계산형 CSTR 문항은 먼저 반응기 종류를 확인하고, 다음에 F_{A0}, X_A, $-r_A$를 식 $V = F_{A0}X_A/(-r_A)$에 그대로 넣어 계산하면 된다. 분자에는 반응한 몰유량, 분모에는 단위부피당 반응속도가 온다는 구조를 먼저 확인하면 된다.

암기 포인트

CSTR 부피는 반응한 몰유량을 반응속도로 나눈 값이므로 $V = F_{A0}X_A/(-r_A)$이다.

NoteBase

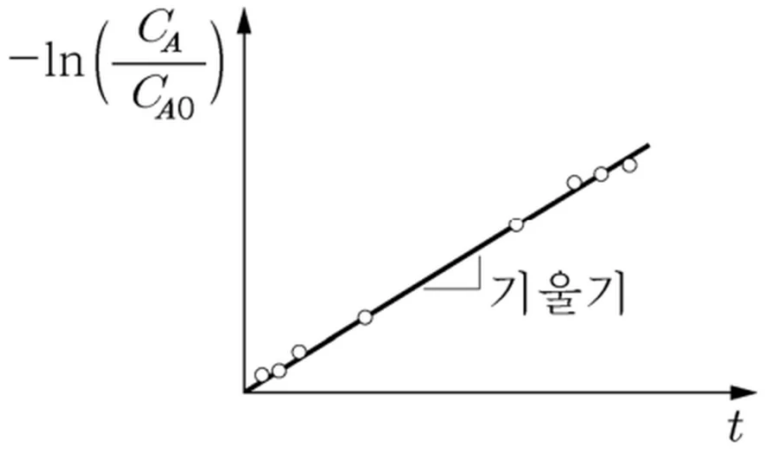
문 3. 반응물 A와 촉매 C에 의한 균일계 촉매 반응이 등온 회분식반응기에서 진행된다. 반응이 <보기 1>과 같이 두 개의 기초반응 경로로 일어나고 있을 때, 반응시간(t)에 따라 반응물 농도(C_A)의 변화를 측정한 결과가 <보기 2>와 같았다. 기울기에 대해 옳게 표현한 것은? (단, 반응 전 A의 농도는 C_{A0}, 촉매의 농도는 C_C이다.)

<보기 1>

$$A \xrightarrow{k_1} R$$

$$A + C \xrightarrow{k_2} R + C$$

<보기 2>



① $k_1 + k_2$

② $k_1 k_2$

③ $k_1 + k_2 C_A$

④ $k_1 + k_2 C_C$

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 평행 반응의 속도식을 합쳐 의사 1차 반응식으로 만든 뒤, $-\ln(C_A/C_{A0})$ 대 t 그래프의 기울기를 해석하는 문제이다.

NoteBase

조건 정리

주어진 반응은 $A \to R$와 $A + C \to R + C$의 두 경로이다.
촉매 C는 반응식에서 소모되지 않으므로 농도 C_C를 상수로 본다.
구해야 할 값은 $-\ln(C_A/C_{A0})$ 대 t 직선의 기울기이다.

사용할 공식

전체 소모속도는 두 경로의 합이므로
$-\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A + k_2 C_A C_C = (k_1 + k_2 C_C) C_A$
적분하면
$-\ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right) = (k_1 + k_2 C_C)t$
이 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 두 반응이 같은 반응물 A를 평행하게 소모하고, 촉매 농도 C_C가 일정하여 전체 반응이 A에 대한 의사 1차식으로 정리되기 때문이다.

계산 과정

1. 첫 번째 경로의 속도는 $r_1 = k_1 C_A$이다.
2. 두 번째 경로의 속도는 $r_2 = k_2 C_A C_C$이다.
3. 전체 속도는 $r_1 + r_2 = (k_1 + k_2 C_C) C_A$이다.
4. 이를 적분하면 $-\ln(C_A/C_{A0}) = (k_1 + k_2 C_C)t$이므로 그래프의 기울기는 $k_1 + k_2 C_C$이다.

선지별 해설

① X: $k_1 + k_2$는 잘못이다. 두 번째 경로는 촉매가 참여하므로 속도항이 $k_2 C_A C_C$이고, 기울기에는 반드시 C_C가 포함되어야 한다. 틀린 표현은 "k_2만 더한다"이고, 올바르게는 "$k_2 C_C$를 더한다"이다.
② X: $k_1 k_2$는 잘못이다. 평행 반응의 전체 속도는 각 경로 속도의 합으로 정리되며 속도상수의 곱으로 정리되지 않는다. 틀린 표현은 "속도상수를 곱한다"이고, 올바르게는 "$k_1 C_A$와 $k_2 C_A C_C$를 더한다"이다.
③ X: $k_1 + k_2 C_A$는 잘못이다. 두 번째 경로에 들어가는 것은 반응물 농도 C_A가 아니라 촉매 농도 C_C이다. 또한 기울기가 C_A를 포함하면 시간이 지날수록 값이 변해야 하므로 직선 기울기가 일정하다는 그래프와도 맞지 않는다. 틀린 표현은 "$k_2 C_A$"이고, 올바르게는 "$k_2 C_C$"이다.
④ O: 전체 속도식은 $-dC_A/dt = (k_1 + k_2 C_C) C_A$이고, 적분형은 $-\ln(C_A/C_{A0}) = (k_1 + k_2 C_C)t$이다. 따라서 그래프의 기울기는 $k_1 + k_2 C_C$이다.

오답 포인트

두 번째 반응식 $A + C \to R + C$에서 촉매 C가 반응물처럼 보인다는 이유로 C_A를 한 번 더 곱하거나, 촉매 농도 항을 빼먹는 실수가 자주 나온다. 이 문항은 "촉매가 참여하지만 소모되지 않는다"는 점과, 직선 그래프의 기울기가 상수여야 한다는 점을 함께 확인하는 함정을 둔 문제이다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

평행 반응이 둘 이상이면 먼저 전체 속도를 각 경로 속도의 합으로 쓴다. 그다음 상수로 둘 수 있는 농도는 묶어서 의사 반응속도상수로 정리하고, 적분형의 좌변과 그래프 축을 맞춰 기울기가 무엇인지 판단한다.

암기 포인트

촉매 농도가 일정한 균일계 촉매반응은 k_2C_C를 포함한 의사 1차식으로 정리된다. $-\ln(C_A/C_{A0})$ 대 t 직선의 기울기는 전체 1차 속도상수이다.

NoteBase

문 4. <보기>의 반응에서 원하는 반응생성물 E와 R의 선택도(selectivity)를 최대로 하기 위하여 반응물의 농도를 조절하는 방법은?

<보기>

• 원하는 액상반응

$A + B \rightarrow E + R,\ \frac{dC_E}{dt} = \frac{dC_R}{dt} = k_1 C_A C_B^{0.5}$

• 원하지 않는 액상반응

$A + B \rightarrow X + Y,\ \frac{dC_X}{dt} = \frac{dC_Y}{dt} = k_2 C_A^{0.5} C_B^{1.5}$

① C_A는 낮게, C_B는 높게

② C_A는 높게, C_B는 낮게

③ C_A, C_B 모두 낮게

④ C_A, C_B 모두 높게

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 원하는 반응속도와 원하지 않는 반응속도의 비로 선택도를 세운 뒤, 각 반응물 농도가 선택도에 어떤 방향으로 작용하는지를 판단하는 문제이다.

조건 정리

원하는 반응은 $A + B \rightarrow E + R$이고 속도는 $r_1 = k_1 C_A C_B^{0.5}$이다.
원하지 않는 반응은 $A + B \rightarrow X + Y$이고 속도는 $r_2 = k_2 C_A^{0.5} C_B^{1.5}$이다.
구해야 할 값은 원하는 반응의 선택도를 최대로 만드는 C_A, C_B의 조절 방향이다.

사용할 공식

선택도는 원하는 반응속도를 원하지 않는 반응속도로 나눈 비로 본다.

$S = \frac{r_1}{r_2} = \frac{k_1 C_A C_B^{0.5}}{k_2 C_A^{0.5} C_B^{1.5}} = \frac{k_1}{k_2} C_A^{0.5} C_B^{-1} = \frac{k_1}{k_2} \frac{C_A^{0.5}}{C_B}$

이 공식을 쓰는 이유는 두 반응이 병렬반응이므로 원하는 생성물의 수율을 높이려면 원하는 반응속도가 원하지 않는 반응속도보다 상대적으로 더 커져야 하기 때문이다.

계산 과정

1. 선택도 S를 r_1/r_2로 둔다.
2. C_A의 지수는 $1 - 0.5 = 0.5$이므로 C_A가 커질수록 선택도는 증가한다.
3. C_B의 지수는 $0.5 - 1.5 = -1$이므로 C_B가 커질수록 선택도는 감소한다.
4. 따라서 선택도를 최대로 하려면 C_A는 높게, C_B는 낮게 해야 한다.

NoteBase

선지 판단

① X: C_A를 낮추면 $C_A^{0.5}$가 작아져 선택도가 감소하고, C_B를 높이면 분모의 C_B가 커져 선택도가 더 감소한다. 틀린 표현은 "C_A는 낮게, C_B는 높게"이고, 올바르게는 "C_A는 높게, C_B는 낮게"이다.
② O: $S \propto C_A^{0.5}/C_B$이므로 C_A를 높이고 C_B를 낮추면 선택도가 최대가 된다.
③ X: C_B를 낮추는 방향은 맞지만 C_A를 낮추면 선택도가 함께 줄어든다. 틀린 표현은 "C_A, C_B 모두 낮게"이고, 올바르게는 "C_A는 높게, C_B는 낮게"이다.
④ X: C_A를 높이는 효과는 맞지만 C_B를 높이면 선택도가 감소하므로 최대가 될 수 없다. 틀린 표현은 "C_A, C_B 모두 높게"이고, 올바르게는 "C_A는 높게, C_B는 낮게"이다.

오답 포인트

각 반응식의 차수를 따로 보지 않고 단순히 두 반응 모두 $A + B$ 반응이므로 농도를 같이 올리거나 같이 내리면 된다고 생각하면 틀린다. 이 문항의 함정은 B가 원하는 반응에서는 0.5차이지만 원하지 않는 반응에서는 1.5차로 더 크게 작용한다는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬반응 선택도 문제는 먼저 $S = r_{desired}/r_{undesired}$를 세우고, 각 성분 농도의 지수가 정리된 뒤 양수면 높이고 음수면 낮추는 방식으로 판단한다.

암기 포인트

병렬반응 선택도는 속도비로 본다. 정리한 뒤 $S \propto C_A^{0.5}/C_B$처럼 남으면 분자 성분은 높이고 분모 성분은 낮춘다.

NoteBase

문 5. 순수한 기체 A를 반응물로 이용하여 고체 촉매 표면 S에서 <보기>의 단계를 거치는 반응 $A \rightarrow B$를 진행한다. 속도결정단계가 단계 1(A의 흡착단계)이라고 할 때, 반응물 A의 초기 소모속도에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은?

<보기>

단계 1: $A + S \leftrightarrow A \cdot S$ (A의 흡착단계, 속도결정단계)

단계 2: $A \cdot S \leftrightarrow B \cdot S + C$ (표면반응단계)

단계 3: $B \cdot S \leftrightarrow B + S$ (B의 탈착단계)

① 반응물 A의 초기 소모속도는 반응온도의 영향을 받는다.

② 반응물 A의 초기 소모속도는 반응물 A의 초기 분압에 비례한다.

③ 반응물 A의 초기 소모속도는 촉매 표면의 활성점 수에 의존한다.

④ 반응물 A의 초기 소모속도는 반응물 A의 흡착 평형상수에 의해 변한다.

정답 4번

출제 포인트

속도결정단계가 흡착단계일 때 초기 속도가 흡착 평형식이 아니라 전진 흡착속도식으로 결정된다는 점을 묻는 문제이다.

핵심 개념

속도결정단계가 1단계 $A + S \rightleftharpoons A \cdot S$이면 초기 소모속도는 가장 느린 전진 흡착속도에 의해 지배된다. 초기에는 표면이 거의 비어 있고 생성물 B도 없으므로 $-r_{A,0} \propto k_1 P_{A,0} C_{S,0}$로 볼 수 있다. 여기서 k_1은 흡착의 전진 속도상수이고, $C_{S,0}$는 초기 활성점 수이다. 흡착 평형상수 K_A는 흡착평형이 먼저 성립한다고 둘 때 쓰는 값이므로 이 경우의 초기 속도 지배식과 직접 연결되지 않는다.

NoteBase

선지별 해설

① O
반응온도가 바뀌면 전진 흡착 속도상수 k_1이 변하므로 초기 소모속도도 변한다. 속도결정단계가 흡착단계여도 속도상수는 온도의 영향을 받는다.

② O
초기에는 표면 빈자리가 거의 일정하므로 $-r_{A,0}$는 $P_{A,0}$에 비례한다. 따라서 반응물 A의 초기 분압이 커지면 초기 소모속도도 커진다.

③ O
초기 속도식에 포함되는 $C_{S,0}$는 사용 가능한 활성점 수를 뜻하므로 촉매 표면의 활성점 수가 많을수록 초기 흡착속도도 커진다.

④ X
틀린 부분은 흡착 평형상수에 의해 초기 소모속도가 변한다고 본 점이다. 이 문항은 1단계 흡착 자체가 속도결정단계이므로 초기 속도는 흡착 평형식이 아니라 전진 흡착속도식으로 본다. 올바르게는 반응물 A의 초기 소모속도는 주로 k_1, $P_{A,0}$, 초기 활성점 수에 의해 결정된다.

오답 포인트

흡착이 들어가면 바로 Langmuir형 흡착 평형상수 K_A를 떠올리는 경우가 많다. 그러나 이 문항은 흡착평형이 빠르게 성립하는 경우가 아니라 흡착 자체가 가장 느린 단계라는 조건을 먼저 줬다. 이 조건을 놓치면 ④를 옳다고 오판하기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

표면반응 메커니즘 문제에서는 먼저 속도결정단계가 평형단계인지 실제 속도지배단계인지를 구분한다.
속도결정단계가 흡착단계이면 평형상수보다 그 단계의 전진 속도상수와 반응물 분압, 이용 가능한 활성점 수를 먼저 본다.

암기 포인트

흡착 평형이면 K_A, 흡착 속도지배이면 $k_1 P_A S$가 먼저이다.

NoteBase

문 6. 반응온도를 500K에서 1,000K으로 증가시켰을 때, 반응속도상수가 2배 증가하였다. 이 반응에 대한 활성화에너지[J/mol]는? (단, 반응속도상수는 Arrhenius 관계식을 따르며, $R = 8\text{J/mol} \cdot \text{K}$이며, ln2=0.7, ln3=1.1로 가정한다.)

① 5,600

② 8,800

③ 11,200

④ 17,600

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 Arrhenius 식을 이용해 온도 변화에 따른 반응속도상수의 비로부터 활성화에너지를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $T_1 = 500K$, $T_2 = 1000K$, $k_2/k_1 = 2$, $R = 8J/(mol \cdot K)$, $\ln 2 = 0.7$
구해야 할 값: 활성화에너지 E
주의할 조건: Arrhenius 식은 온도 자체의 차이가 아니라 $1/T$의 차이로 정리한다.

사용할 공식

$k = Ae^{-E/(RT)}$
따라서
$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$
이 공식을 쓰는 이유: 같은 반응의 두 온도 조건을 비로 두면 빈도인자 A가 소거되고, 반응속도상수의 비와 $1/T$ 차이만으로 활성화에너지를 구할 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 반응속도상수 비를 로그로 바꾸면 $\ln(k_2/k_1) = \ln 2 = 0.7$이다.
2. 온도항은 $\frac{1}{500} - \frac{1}{1000} = \frac{1}{1000}$이다.
3. 따라서 $0.7 = \frac{E}{8} \cdot \frac{1}{1000}$이므로 $E = 0.7 \times 8 \times 1000 = 5600J/mol$이다.

선지별 해설

① O: 계산 결과가 $5600J/mol$이므로 일치한다.
② X: 8,800은 계산값과 다르다. 올바르게는 활성화에너지가 $5600J/mol$이다.
③ X: 11,200은 계산값의 2배로 과대계산한 값이다. 올바르게는 활성화에너지가 $5600J/mol$이다.
④ X: 17,600은 계산값과 크게 다르다. 올바르게는 활성화에너지가 $5600J/mol$이다.

NoteBase

오답 포인트

Arrhenius 식에서 $1000 - 500 = 500$ 같은 온도차를 직접 넣는 실수가 잦다. 이 문제는 온도차가 아니라 $\frac{1}{500} - \frac{1}{1000}$ 같은 역수 차이를 써야 하며, 증가 비율도 $\ln 2$로 처리해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

온도 변화에 따른 속도상수 문제는 먼저 두 조건의 비를 Arrhenius 식으로 묶고, 다음에 $1/T$ 차이를 계산한 뒤 마지막에 미지수 E를 푼다. 온도 자체의 차이와 역수 차이를 구분하면 계산이 안정된다.

암기 포인트

Arrhenius 비식은 $\ln(k_2/k_1) = \frac{E}{R}(1/T_1 - 1/T_2)$ 형태로 정리하며, 온도는 항상 역수 차이로 넣는다.

NoteBase

문 7. 어느 이상기체에 대하여 등온 등압 기상 1차 반응으로 이 일어나고 있다. 초기 A 농도는 1.0 mol/L이고 50%의 비활성 기체가 존재하는 경우 반응물 A가 75% 전환 후 A 농도[mol/L]는?

$A \rightarrow 3R$

① $\frac{1}{7}$
② $\frac{1}{5}$
③ $\frac{1}{3}$
④ $\frac{1}{2}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 등온·등압 기상반응에서 몰수 증가가 있을 때 농도식 $C_A = C_{A0}\frac{1-X}{1+\varepsilon X}$를 적용해 전환 후 A 농도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 $A \rightarrow 3R$, $C_{A0} = 1.0 mol/L$, 전환율 $X = 0.75$, 비활성 기체 50%이다.
50% 비활성 기체이므로 초기 A의 몰분율은 $y_{A0} = 0.5$이다.
구해야 할 값은 전환 후 A 농도이다.

사용할 공식

사용 공식은 $C_A = C_{A0}\frac{1-X}{1+\varepsilon X}$, $\varepsilon = y_{A0}\Delta\nu$이다.
이 반응은 이상기체의 등온·등압 반응이므로 반응 중 총몰수가 변하면 부피도 함께 변한다. 따라서 남은 A의 몰수만 보는 것이 아니라, 총몰수 증가에 따른 희석까지 같이 반영해야 한다.

계산 과정

먼저 화학양론으로 $\Delta\nu = 3 - 1 = 2$이다.
따라서 $\varepsilon = y_{A0}\Delta\nu = 0.5 \times 2 = 1$이다.
이를 농도식에 대입하면 $C_A = 1.0 \times \frac{1-0.75}{1+1\times 0.75} = \frac{0.25}{1.75} = \frac{1}{7} mol/L$이다.

NoteBase

선지 판단

① O: 계산 결과가 정확히 $\frac{1}{7} mol/L$이므로 옳다.
② X: $\frac{1}{5}$는 분모의 팽창항을 1.75가 아니라 더 작게 잡아 총몰수 증가를 과소평가한 값이다. 올바르게는 $\frac{1}{7} mol/L$이다.
③ X: $\frac{1}{3}$은 75% 전환 후 남는 A가 25%라는 점을 잘못 적용한 값이다. 올바르게는 남은 몰수 $0.25C_{A0}$에 팽창까지 반영한 $\frac{1}{7} mol/L$이다.
④ X: $\frac{1}{2}$는 비활성 기체 50%만 보고 농도를 단순 절반으로 본 값에 가깝다. 반응 전환과 $A \rightarrow 3R$에 따른 부피 팽창을 함께 반영해야 하므로 올바르게는 $\frac{1}{7} mol/L$이다.

오답 포인트

비활성 기체 50%를 단순히 농도 절반으로 해석하거나, 전환율 $1 - X$만 반영하고 등온·등압에서의 부피 팽창을 빼먹으면 오답이 된다. 이 문항의 핵심 함정은 $y_{A0} = 0.5$와 $\Delta \nu = 2$를 곱해 $\varepsilon = 1$을 만드는 단계이다.

다시 나오면 이렇게 판단

등온·등압 기상반응에서 몰수 변화가 보이면 먼저 $\Delta \nu$를 구하고, 초기 몰분율로 $\varepsilon = y_{A0} \Delta \nu$를 만든 뒤 $C_A = C_{A0} \frac{1 - X}{1 + \varepsilon X}$에 넣어 판단한다.

암기 포인트

등온·등압 기상반응 농도식은 남은 몰수 $1 - X$와 팽창항 $1 + \varepsilon X$를 함께 본다. 이 문항은 $y_{A0} = 0.5$, $\Delta \nu = 2$, $\varepsilon = 1$이다.

NoteBase

문 8. 반응식 $A + B \rightarrow C + D$로 주어지는 기초 2차 액상 반응에서 반응속도상수 k는 $1.5\text{L/mol} \cdot \text{sec}$이다. 유입농도 $C_{A0} = C_{B0} = 0.2\text{mol/L}$일 때, 7초 동안 플러그흐름반응기(PFR)에서 반응시켰을 때, 출구로 나가는 A의 전환율은? (단, 소수점 셋째 자리에서 반올림한다.)

① 0.21

② 0.35

③ 0.68

④ 0.75

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 등밀도 액상 플러그흐름반응기에서 기초 2차 반응의 설계식을 이용해 전환율 X를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 $k = 1.5L/mol \cdot sec$, $C_{A0} = C_{B0} = 0.2mol/L$, 체류시간 $\tau = 7sec$이다.
구해야 할 값은 출구에서의 A 전환율 X이다.
초기농도가 같고 반응식이 $A + B \rightarrow C + D$이므로 반응기 내내 $C_A = C_B = C_{A0}(1 - X)$로 둘 수 있다.

사용할 공식

반응속도식은 $-r_A = kC_AC_B = kC_A^2$이다.
등밀도 액상 PFR의 설계식은
$\tau = C_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A} = \frac{1}{kC_{A0}}\int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2} = \frac{1}{kC_{A0}}\left(\frac{1}{1-X} - 1\right)$
이다.
이 공식을 쓰는 이유는 액상 반응이라 체적유량 변화가 없고, A와 B의 초기농도가 같아 기초 2차 반응식을 C_A^2 꼴로 바로 적분할 수 있기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. $kC_{A0}\tau = 1.5 \times 0.2 \times 7 = 2.1$이다.
2. 따라서
$\frac{1}{1-X} - 1 = 2.1$
이므로
$\frac{1}{1-X} = 3.1$
이다.
3. 따라서 $1 - X = \frac{1}{3.1} = 0.32258$이고,
$X = 1 - 0.32258 = 0.67742$
이다.
4. 소수점 셋째 자리에서 반올림하면 $X \approx 0.68$이다.

선지별 해설

① X
0.21는 계산된 전환율과 맞지 않는다. 틀린 표현은 "전환율이 0.21이다"이다. 올바르게는 "전환율은 약 0.68이다"이다. 이 값은 $kC_{A0}\tau = 2.1$를 전환율로 그대로 잘못 읽거나 소수점 위치를 혼동할 때 나오기 쉽다.

② X
0.35도 계산 결과와 맞지 않는다. 틀린 표현은 "전환율이 0.35이다"이다. 올바르게는 "전환율은 약 0.68이다"이다. 이 값은 2차 반응 적분식을 쓰지 않고 1차 반응처럼 단순 처리할 때 생기기 쉬운 오답이다.

③ O
계산 결과 $X = 0.67742$이므로 소수점 셋째 자리에서 반올림하면 0.68이다. 따라서 ③이 옳다.

④ X
0.75는 실제 계산값보다 크다. 틀린 표현은 "전환율이 0.75이다"이다. 올바르게는 "전환율은 약 0.68이다"이다. 이 값은 $\frac{1}{1-X} = 3.1$에서 역수를 취하는 과정을 빠뜨리거나 반올림을 과도하게 할 때 생기기 쉬운 오답이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 PFR 설계식을 바로 $\tau = \frac{X}{kC_{A0}(1-X)}$ 또는 적분형으로 정리해야 하는데, 이를 1차 반응식과 혼동하거나 $kC_{A0}\tau$를 전환율 자체로 착각하는 데 있다. 또한 마지막에 0.67742를 0.68로 반올림하는 단계도 놓치기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

등밀도 액상 반응기 계산 문제는 먼저 C_A와 C_B를 전환율 X로 표현한 뒤, 반응차수에 맞는 PFR 설계식을 적분형으로 세운다. 그다음 $kC_{A0}\tau$를 계산해 식에 대입하고, 끝에서 반올림 조건까지 확인하면 된다.

NoteBase

암기 포인트

등농도 기초 2차 액상 PFR에서는 $kC_{A0}\tau = \frac{X}{1-X}$로 바로 정리된다.

NoteBase

문 9. <보기>는 액상 내 비가역 기초반응이다. <보기>의 반응을 위해 혼합흐름반응기(CSTR)와 플러그흐름반응기(PFR)를 차례로 직렬로 연결하고자 한다. 각 반응기의 단독 전환율은 각각 $X_{\mathrm{CSTR}} = 0.5$, $X_{\mathrm{PFR}} = 0.8$이라 할 때, 두 반응기를 모두 통과하는 데 걸리는 시간[분]은? (단, $\ln 10 = 2.3$, $\ln 5 = 1.6$으로 한다.)

<보기>

$A \rightarrow B$

$C_{A0} = 10\mathrm{mol/L},\ k = 0.02\mathrm{min}^{-1}$

① 50

② 80

③ 130

④ 165

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 1차 액상 비가역 반응에서 CSTR과 PFR의 단독 전환율로 각 반응기의 체류시간을 구한 뒤, 직렬 연결 시 총 체류시간을 합산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 $k = 0.02min^{-1}$, $X_{CSTR} = 0.5$, $X_{PFR} = 0.8$이다.
구해야 할 값은 CSTR과 PFR를 차례로 모두 통과하는 총 시간이다.
액상 반응이므로 밀도 변화가 없다고 보고 공간시간과 체류시간을 같은 방식으로 계산한다.

사용할 공식

CSTR의 1차 반응 설계식은 $\tau_{CSTR} = \frac{X}{k(1-X)}$ 이다.
PFR의 1차 반응 설계식은 $\tau_{PFR} = \frac{-\ln(1-X)}{k}$ 이다.
문제에서 각 반응기의 단독 전환율을 주었으므로, 각 반응기를 단독 운전했을 때의 체류시간을 먼저 구하고 직렬 연결의 총 시간을 더하면 된다.

계산 과정

1. CSTR의 체류시간은 $\tau_{CSTR} = \frac{0.5}{0.02(1-0.5)} = \frac{0.5}{0.01} = 50min$ 이다.
2. PFR의 체류시간은 $\tau_{PFR} = \frac{-\ln(1-0.8)}{0.02} = \frac{-\ln 0.2}{0.02} = \frac{\ln 5}{0.02} = \frac{1.6}{0.02} = 80min$ 이다.
3. 두 반응기를 모두 통과하는 총 시간은 $\tau_{total} = 50 + 80 = 130min$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
50분은 CSTR 하나만 단독으로 통과할 때의 시간이다. 두 반응기를 모두 지난 총 시간을 묻고 있으므로 '50분'이라는 표현이 틀렸고, 올바르게는 '총 시간은 130분이다'가 된다.

② X
80분은 PFR 하나만 단독으로 통과할 때의 시간이다. CSTR 시간을 누락한 값이므로 틀렸고, 올바르게는 'CSTR 50분과 PFR 80분을 합한 130분이다'가 된다.

③ O
CSTR 시간 50분과 PFR 시간 80분을 합하면 130분이다. 두 반응기를 차례로 직렬 통과하는 총 시간이므로 맞는 선지이다.

④ X
165분은 주어진 단독 전환율을 그대로 설계식에 넣어 계산하면 나오지 않는 값이다. 직렬 연결이라는 이유로 전환율을 다시 조합하거나 불필요한 추가 계산을 한 오답이며, 올바르게는 '각 반응기의 단독 체류시간을 합한 130분'이다.

오답 포인트

①과 ②는 각각 한 반응기만의 시간을 고르게 만드는 함정이다. '각 반응기의 단독 전환율'이라는 표현을 보면 먼저 각 반응기의 시간을 따로 계산해야 하고, 최종 발문이 '두 반응기를 모두 통과하는 데 걸리는 시간'인지 확인해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 반응기 시간 문제는 먼저 각 반응기의 단독 설계식으로 체류시간을 구한 뒤, 발문이 총 시간인지 최종 전환율인지 구분해서 처리한다. 총 시간을 묻는 경우에는 각 반응기 시간을 더하면 된다.

암기 포인트

1차 반응에서 CSTR은 $\tau = \frac{X}{k(1-X)}$, PFR은 $\tau = \frac{-\ln(1-X)}{k}$ 이며, 직렬 통과 시간은 각 반응기 체류시간의 합이다.

NoteBase

문 10. 등온 촉매충전층반응기(PBR)에서 압력강하가 없는 2차 비가역 기상 반응 $A \rightarrow B$가 진행된다. <보기>의 조건에서 전환율 75%에 도달하기 위해 필요한 촉매의 양[kg]은? (단, 모든 기체는 이상기체이다.)

<보기>

- 반응물 A의 초기 농도 $C_{A0} = 1\text{mol/L}$
- 반응물 A의 부피 유속 $v_0 = 10\text{L/min}$
- 반응속도상수 $k = 2\text{L}^2/\text{mol} \cdot \text{min} \cdot \text{kg}$

① 10

② 15

③ 20

④ 30

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 압력강하가 없고 $A \rightarrow B$로 총 몰수 변화가 없는 기상 PBR에서 $C_A = C_{A0}(1 - X)$를 적용해 필요한 촉매량 W를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 $C_{A0} = 1\text{mol/L}$, $v_0 = 10\text{L/min}$, $k = 2\text{L}^2/(\text{mol} \cdot \text{min} \cdot \text{kg})$, $X = 0.75$이다.
구해야 할 값은 전환율 75%에 도달하는 데 필요한 촉매량 W이다.
주의할 조건은 등온, 압력강하 없음, 이상기체, $A \rightarrow B$의 1 대 1 반응이므로 총 몰수와 부피유량이 변하지 않는다는 점이다.

사용할 공식

PBR 설계식은 $W = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r'_A}$ 이고, 2차 반응이므로 $-r'_A = kC_A^2$ 이다.
이 문제에서는 압력강하가 없고 $A \rightarrow B$라서 총 몰수 변화가 없으므로 $C_A = C_{A0}(1 - X)$ 를 그대로 대입할 수 있다.

계산 과정

먼저 F_{A0}를 구하면 $F_{A0} = C_{A0}v_0 = 1 \times 10 = 10\text{mol/min}$ 이다.
반응속도식은 $-r'_A = kC_A^2 = 2\{1(1 - X)\}^2 = 2(1 - X)^2\text{mol/(kg} \cdot \text{min)}$ 이다.
따라서 $W = 10\int_0^{0.75} \frac{dX}{2(1-X)^2} = 5\int_0^{0.75}(1 - X)^{-2}dX$ 이다.
적분하면 $W = 5\left[\frac{1}{1-X}\right]_0^{0.75} = 5\left(\frac{1}{0.25} - 1\right) = 5(4 - 1) = 15\text{kg}$ 이다.

NoteBase

선지 판단

① X: 계산 결과는 10 kg가 아니라 15 kg이다. 10 kg는 $(1-X)^{-2}$ 적분 효과를 충분히 반영하지 못해 촉매량을 과소평가한 값이다.
② O: PBR 설계식과 2차 반응속도식을 적용하면 필요한 촉매량은 정확히 15 kg이므로 옳다.
③ X: 필요한 촉매량은 20 kg가 아니라 15 kg이다. 20 kg는 농도 감소를 지나치게 크게 잡아 촉매량을 과대평가한 값이다.
④ X: 필요한 촉매량은 30 kg가 아니라 15 kg이다. 30 kg는 주어진 조건에서 계산된 적분값과 전혀 일치하지 않는 과대 계산값이다.

오답 포인트

기상 반응이라고 해서 항상 부피유량이 변한다고 생각하면 틀리기 쉽다. 이 문항은 $A \rightarrow B$의 1 대 1 반응이고 압력강하도 없으므로 $\varepsilon = 0$으로 보아 $C_A = C_{A0}(1-X)$를 바로 써야 한다는 점이 핵심 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

PBR 계산형 문제는 먼저 F_{A0}를 구하고, 그다음 속도식에 들어갈 농도 C_A가 전환율에 따라 어떻게 바뀌는지 확인한 뒤, 마지막에 설계식 적분으로 W를 계산하는 순서로 판단한다.

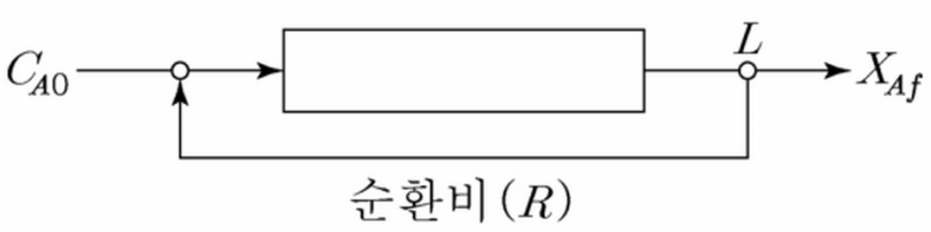
암기 포인트

압력강하가 없고 $A \rightarrow B$처럼 총 몰수 변화가 없으면 기상 PBR에서도 $C_A = C_{A0}(1-X)$가 그대로 성립한다.

NoteBase

문 11. <보기>와 같이 순환비 R가 5인 등온 플러그흐름반응기(PFR)를 이용해 균일계 2차 비가역 액상 반응 $A \rightarrow B$가 진행된다. 순환지류 지점 L 이후 반응물 A의 전환율 X_{Af}로 80%를 얻었다. 순환비를 무한대(∞)로 증가시킨 경우, 얻을 수 있는 반응물 A의 전환율[%]은? (단, 유입되는 반응물 A의 농도는 C_{A0}로 나타내고, 순환비 이외의 다른 반응조건은 변화시키지 않는다.)

<보기>



① 60

② 70

③ 75

④ 80

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 재순환 PFR의 혼합입구 농도를 구한 뒤, 같은 반응기 부피 조건에서 $R \rightarrow \infty$일 때 CSTR 한계식으로 전환율을 다시 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 순환비 $R = 5$, 균일계 2차 비가역 액상반응 $A \rightarrow B$, 기존 전체 전환율 $X_{Af} = 0.8$이다.
구해야 할 값: $R \rightarrow \infty$일 때의 전체 전환율 X이다.
주의할 조건: 액상반응이므로 체적유량은 일정하고, 전체 출구농도는 $C_{Af} = C_{A0}(1 - X_{Af}) = 0.2C_{A0}$이다.

사용할 공식

재순환 혼합점에서 반응기 입구 농도는 $C_{Ai} = \frac{C_{A0} + RC_{Af}}{1+R}$이다.
액상 2차 반응 PFR 설계식은 $V = \frac{v}{k}\left(\frac{1}{C_{Af}} - \frac{1}{C_{Ai}}\right)$ 이다.
$R \rightarrow \infty$이면 재순환 PFR은 완전혼합반응기 한계로 가므로 $V = \frac{v_0 C_{A0} X}{kC_A^2} = \frac{v_0}{kC_{A0}} \frac{X}{(1-X)^2}$ 를 쓴다.
이 공식을 쓰는 이유는 재순환이 매우 크면 반응기 입구 조성이 출구 조성과 거의 같아져 backmixing이 극대화되기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. $R = 5$일 때 전체 출구농도는 $C_{Af} = 0.2C_{A0}$이고, 반응기 입구 농도는 $C_{Ai} = \frac{C_{A0} + 5(0.2C_{A0})}{1+5} = \frac{C_{A0}}{3}$ 이다.
2. 이때 반응기 통과 체적유량은 $v = (1+R)v_0 = 6v_0$이므로, PFR 설계식에서 $V = \frac{6v_0}{k}\left(\frac{1}{0.2C_{A0}} - \frac{1}{C_{A0}/3}\right) = \frac{12v_0}{kC_{A0}}$ 이다.
3. $R \to \infty$이면 같은 반응기 부피에 대해 $\frac{v_0}{kC_{A0}}\frac{X}{(1-X)^2} = \frac{12v_0}{kC_{A0}}$ 이므로 $\frac{X}{(1-X)^2} = 12$ 이다.
4. 정리하면 $12(1-X)^2 = X$ 이고, $12X^2 - 25X + 12 = 0$ 이다. 해는 $X = \frac{25 \pm 7}{24}$이고, 물리적으로 가능한 값은 $X = \frac{18}{24} = 0.75$이다.
5. 따라서 $R \to \infty$일 때 전환율은 75%이다.

선지별 해설

① X
60%라면 $\frac{X}{(1-X)^2} = \frac{0.60}{0.40^2} = 3.75$이므로 같은 반응기 부피 조건에서 나온 12를 만족하지 못한다. 틀린 수치 → 올바르게는 75%이다.

② X
70%라면 $\frac{X}{(1-X)^2} = \frac{0.70}{0.30^2} \approx 7.78$이므로 역시 12보다 작다. 틀린 수치 → 올바르게는 75%이다.

③ O
75%라면 $\frac{X}{(1-X)^2} = \frac{0.75}{0.25^2} = 12$가 되어 계산식과 정확히 일치한다. 따라서 정답이다.

④ X
80%는 $R = 5$일 때 이미 주어진 기존 전환율이다. $R \to \infty$에서는 재순환이 지나치게 커져 완전혼합반응기 거동으로 수렴하므로, 2차 반응의 전환율은 80%가 아니라 75%가 된다. 틀린 수치 → 올바르게는 75%이다.

오답 포인트

순환비를 무한대로 키우면 전환율도 그대로 올라간다고 보면 ④를 고르기 쉽다. 그러나 2차 반응은 같은 부피에서 PFR 성능이 CSTR보다 좋으므로, 재순환이 무한대로 커져 backmixing이 심해지면 전환율이 오히려 낮아질 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

재순환 반응기 문제는 먼저 전체 출구농도로 C_{Af}를 구하고, 재순환비로 혼합입구농도 C_{Ai}를 계산해 반응기 부피 상수 $Vk/(v_0C_{A0})$를 고정한다. 그다음 $R \to \infty$ 조건은 CSTR 한계로 바꿔 $\frac{X}{(1-X)^2}$ 형태를 푼다.

암기 포인트

재순환 PFR에서 $R \to \infty$이면 CSTR 한계로 본다. 2차 반응은 일반적으로 PFR 성능이 CSTR보다 좋아서, 재순환이 과도하면 전환율이 내려갈 수 있다.

NoteBase

문 12. 부피 변화가 없는 비가역 반응 $A \rightarrow B$를 정상상태의 플러그흐름반응기(PFR)로 진행시키고자 한다. 이때 반응기 설계 과정에서 반응차수에 따라 다양한 성능식이 사용될 수 있다. 이 반응기와 관련하여 반응물의 초기농도 C_{A0}, 반응속도상수 k, 전환율 X_A, 공간시간 τ의 관계식과 관련이 없는 것은?

① $k\tau = X_A C_{A0}$

② $k\tau = -\ln(1 - X_A)$

③ $k\tau C_{A0}(1 - X_A) = X_A$

④ $k\tau(1 - X_A) = X_A$

정답 4번

출제 포인트

부피 변화가 없는 정상상태 PFR 설계식에 반응차수별 속도식 $-r_A = kC_A^n$을 대입하여 τ-X_A 관계를 구분하는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건은 부피 변화가 없고, 비가역 반응 $A \rightarrow B$가 정상상태 PFR에서 진행된다는 점이다.
구해야 할 것은 반응차수별로 성립하는 C_{A0}, k, X_A, τ 관계식 중 관련이 없는 식 1개이다.
농도는 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$로 쓸 수 있다.

사용할 공식

PFR의 공간시간 관계식은
$\tau = C_{A0}\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{-r_A}$
이다.
반응차수가 n차이면 속도식은 $-r_A = k[C_{A0}(1 - X_A)]^n$가 된다.
따라서 각 차수별로 이 적분식을 정리하면 선지의 식이 어느 차수에서 나오는지 판별할 수 있다.

NoteBase

계산 과정

1. 0차 반응에서는 $-r_A = k$이므로
$\tau = \frac{C_{A0}}{k}\int_0^{X_A} dX_A = \frac{C_{A0}X_A}{k}$
이고, 정리하면 $k\tau = X_A C_{A0}$이다.
2. 1차 반응에서는 $-r_A = kC_{A0}(1-X_A)$이므로
$\tau = \frac{1}{k}\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{1-X_A} = \frac{-\ln(1-X_A)}{k}$
이고, 정리하면 $k\tau = -\ln(1-X_A)$이다.
3. 2차 반응에서는 $-r_A = kC_{A0}^2(1-X_A)^2$이므로
$\tau = \frac{1}{kC_{A0}}\int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(1-X_A)^2} = \frac{1}{kC_{A0}}\cdot\frac{X_A}{1-X_A}$
이다.
따라서 $k\tau C_{A0} = \frac{X_A}{1-X_A}$, 즉 $k\tau C_{A0}(1-X_A) = X_A$이다.
4. 결국 ①, ②, ③은 각각 0차, 1차, 2차 반응의 PFR 식이고 ④만 일반식과 맞지 않는다.

선지별 해설

① O. 0차 반응의 PFR 설계식은 $k\tau = X_A C_{A0}$이므로 옳다.
② O. 1차 반응의 PFR 설계식은 적분 결과가 로그형이 되어 $k\tau = -\ln(1-X_A)$이므로 옳다.
③ O. 2차 반응의 PFR 설계식은 $k\tau C_{A0} = X_A/(1-X_A)$이므로 이를 정리한 $k\tau C_{A0}(1-X_A) = X_A$는 옳다.
④ X. 이 식은 2차 반응식에서 반드시 남아야 하는 C_{A0}가 빠져 있어 일반적인 PFR 설계식이 아니다. 틀린 표현은 $k\tau(1-X_A) = X_A$이고, 올바르게는 $k\tau C_{A0}(1-X_A) = X_A$이다.

오답 포인트

2차 반응식을 외울 때 C_{A0} 항을 빠뜨리기 쉽다는 점이 함정이다.
0차는 상수형, 1차는 로그형, 2차는 $X_A/(1-X_A)$형이며 2차에서만 C_{A0}가 분명하게 남는다는 점을 함께 기억해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

PFR 관계식 문제는 먼저 $\tau = C_{A0}\int dX_A/(-r_A)$를 쓰고, 차수별 속도식 $-r_A$를 대입해 적분형이 상수형인지, 로그형인지, $(1-X_A)^{-1}$형인지 확인하면 된다.
그다음 식의 차원과 C_{A0} 포함 여부까지 검산하면 누락된 항이 있는 오답을 걸러낼 수 있다.

암기 포인트

무부피변화 PFR의 대표식은 0차 $k\tau = C_{A0}X_A$, 1차 $k\tau = -\ln(1-X_A)$, 2차 $k\tau C_{A0} = X_A/(1-X_A)$이다.

NoteBase

문 13. 반응차수가 1인 비가역 기초반응 $A \rightarrow B$이 있다. 이 반응을 0.4 L의 혼합흐름반응기(CSTR)에서 액체 상태를 유지시키며 정상상태로 진행시킬 때의 전환율은 50%이다. 동일한 유속, 농도, 온도, 압력 조건에서 전환율을 90%까지 끌어 올리기 위해서 필요한 플러그흐름반응기(PFR)의 부피와 가장 가까운 값[L]은? (단, $\ln 10 = 2.3$으로 한다.)

① 0.08

② 0.40

③ 0.92

④ 5.75

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 1차 비가역 액상반응에서 CSTR 설계식으로 $\tau = v_0/k$를 구한 뒤, PFR 설계식으로 목표 전환율 90%에 필요한 부피를 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 CSTR 부피 0.4 L, CSTR에서의 전환율 50%, 목표 전환율 90%이다.
구해야 할 값은 같은 유속, 농도, 온도, 압력 조건에서 PFR의 부피이다.
액상 1차 반응이므로 밀도 변화가 없고, $-r_A = kC_A = kC_{A0}(1 - X)$를 적용할 수 있다.

사용할 공식

CSTR에서는
$V_{CSTR} = \frac{v_0}{k}\frac{X}{1-X}$
를 사용한다.
PFR에서는
$V_{PFR} = \frac{v_0}{k}\int_0^X \frac{dX}{1-X} = \frac{v_0}{k}\ln\frac{1}{1-X}$
를 사용한다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제 조건이 액상 1차 비가역반응이며, CSTR과 PFR의 대표 설계식을 그대로 적용할 수 있는 전형적인 경우이기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

먼저 CSTR 조건으로 v_0/k를 구한다.

$0.4 = \frac{v_0}{k}\frac{0.5}{1-0.5} = \frac{v_0}{k}$

따라서

$\frac{v_0}{k} = 0.4L$

이다.

이 값을 PFR 식에 대입하면

$V_{PFR} = 0.4\ln\frac{1}{1-0.9} = 0.4\ln 10$

이다.

$\ln 10 = 2.3$이므로

$V_{PFR} = 0.4 \times 2.3 = 0.92L$

이다.

선지별 해설

① X

- 0.08 L는 PFR 설계식 $V = (v_0/k)\ln\{1/(1-X)\}$에 전혀 맞지 않는 값이다.
- 올바르게는 $V = 0.92L$이다.

② X

- 0.40 L는 CSTR에서 얻은 v_0/k 값만 그대로 적은 값이다.
- PFR은 목표 전환율 90%를 반영한 $\ln 10$ 항이 추가되므로 $0.4L$가 아니라 $0.92L$가 된다.

③ O

- 계산 결과 $V_{PFR} = 0.4\ln 10 = 0.92L$이므로 정답이다.
- 1차 반응의 PFR은 전환율에 대해 로그식으로 부피가 결정된다는 점이 핵심이다.

④ X

- 5.75 L는 0.4×2.3을 해야 하는데 이를 반대로 나누는 식으로 처리한 경우에 나오는 오답이다.
- 올바르게는 $0.4 \times 2.3 = 0.92L$이다.

오답 포인트

이 문제의 함정은 CSTR에서 구한 0.4 L를 PFR 부피로 착각하거나, PFR 식의 $\ln\{1/(1-X)\}$를 빠뜨리는 데 있다. 특히 ②는 CSTR 값과 PFR 값을 구분하지 못하면 고르기 쉬운 오답이다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 비교 계산 문제는 먼저 주어진 반응기 식으로 v_0/k 또는 τ를 역산하고, 그다음 목표 반응기에 맞는 설계식을 다시 적용하는 순서로 판단한다. CSTR은 $X/(1-X)$, PFR은 로그식이라는 구조 차이를 먼저 확인하면 된다.

암기 포인트

1차 액상반응에서 CSTR은 $V \propto X/(1-X)$, PFR은 $V \propto \ln\{1/(1-X)\}$이다.

NoteBase

문 14. 2차 반응식이 $r = kC_A^2$라고 하면 등부피의 혼합흐름반응기(CSTR)에서의 물질 수지식으로부터 구한 C_A의 농도에 관한 표현으로 옳은 것은? (단, τ는 공간시간, k는 반응속도상수, C_{A0}는 초기농도이다.)

① $C_A = \frac{-1 + (1 + 4k\tau C_{A0})^{1/2}}{2k\tau}$
② $C_A = \frac{-1 + (1 + 4k\tau C_{A0})^{2}}{2k\tau}$
③ $C_A = \frac{1 + (1 + 4k\tau C_{A0})^{2}}{2k\tau}$
④ $C_A = \frac{1 + (1 + 4k\tau C_{A0})^{1/2}}{2k\tau}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 등부피 CSTR의 정상상태 물질수지식으로부터 C_A에 대한 2차 방정식을 세우고, 물리적으로 가능한 근을 고르는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 반응속도식 $r = kC_A^2$, 공간시간 $\tau = V/v$, 입구농도 C_{A0}이다.
구해야 할 값은 반응기 출구 농도 C_A이다.
등부피 정상상태 CSTR이므로 $F_{A0} - F_A = rV$를 바로 적용할 수 있다.

사용할 공식

물질수지는 $F_{A0} - F_A = rV$ 이다.
등부피이므로 $F_A = vC_A$를 대입하면 $v(C_{A0} - C_A) = VkC_A^2$ 이고, $\tau = V/v$이므로 $C_{A0} - C_A = k\tau C_A^2$ 가 된다.
따라서 $k\tau C_A^2 + C_A - C_{A0} = 0$ 의 2차 방정식을 푼다.
이 공식을 쓰는 이유는 CSTR에서는 반응기 내부 농도가 출구 농도와 같아 반응속도를 kC_A^2로 바로 쓸 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 물질수지를 정리하면 $k\tau C_A^2 + C_A - C_{A0} = 0$ 이다.
2. 2차 방정식의 해는 $C_A = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4k\tau C_{A0}}}{2k\tau}$ 이다.
3. 농도는 음수가 될 수 없으므로 양의 근만 남기면 $C_A = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4k\tau C_{A0}}}{2k\tau}$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① O: $C_A = \frac{-1+\sqrt{1+4k\tau C_{A0}}}{2k\tau}$ 로 2차 방정식의 양의 근을 정확히 쓴 표현이다.
② X: 판별식 전체에 제곱근이 와야 하는데 $(1+4k\tau C_{A0})^2$로 잘못 썼다. 틀린 표현은 "1/2"가 아니라 "2"를 둔 부분이며, 올바르게는 $\frac{-1+\sqrt{1+4k\tau C_{A0}}}{2k\tau}$ 이다.
③ X: 분자 부호와 판별식 처리가 모두 틀렸다. 틀린 표현은 "+1"과 $(1+4k\tau C_{A0})^2$이며, 올바르게는 분자가 $-1+\sqrt{1+4k\tau C_{A0}}$가 되어야 한다.
④ X: 제곱근은 맞지만 분자 첫 항이 $+1$이면 2차 방정식 해 공식과 맞지 않는다. 틀린 표현은 분자의 "+1"이며, 올바르게는 $-1+\sqrt{1+4k\tau C_{A0}}$ 이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 물질수지를 세운 뒤 해 공식에서 판별식에 제곱근을 빼먹거나, 분자 첫 항의 부호를 $+1$로 바꾸는 실수이다. ②와 ③은 판별식 처리 오류를, ④는 해 공식의 부호 오류를 노린 선지이다.

다시 나오면 이렇게 판단

CSTR 농도 계산 문제는 먼저 $F_{A0}-F_A=rV$로 수지를 세우고, v와 V를 $\tau=V/v$로 정리한 뒤, 마지막에 2차 방정식의 해 중 농도로 가능한 양의 근만 남기는 순서로 판단한다.

암기 포인트

2차 반응 CSTR은 $C_{A0}-C_A=k\tau C_A^2$로 두고, 해는 항상 2차 방정식의 양의 근을 택한다.

NoteBase

문 15. 부피 변화가 없는 비가역 1차 반응 (A→B)이 있다. 이 반응을 10 L의 혼합흐름반응기(CSTR) 내에서 등온 및 등압 조건으로 진행하여 40%의 전환율을 얻었다. 동일한 크기의 혼합흐름반응기(CSTR)를 이용하여 최종 전환율을 올리기 위해서는 반응기를 순차적으로 연결할 수 있다. 동일한 반응 조건에서 위에서 사용한 10 L 혼합흐름반응기(CSTR)의 직렬 연결을 통해 최종 전환율을 85% 이상으로 올리기 위한 총 혼합흐름반응기(CSTR) 수의 최솟값은?

① 1

② 2

③ 3

④ 4

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 동일한 체류시간을 갖는 CSTR를 직렬로 연결할 때 1차 반응의 누적 전환율을 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 비가역 1차 반응 $A \rightarrow B$
- 단일 10 L CSTR에서 전환율 40%
- 각 CSTR의 크기와 반응 조건은 모두 동일하다.

구해야 할 값:
- 최종 전환율이 85% 이상이 되기 위한 총 CSTR 수

주의할 조건:
- 묻는 값은 추가 설치 대수가 아니라 총 반응기 수이다.

사용할 공식

단일 CSTR의 1차 반응 전환율은 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$ 이다.
따라서 $k\tau = \frac{X}{1-X} = \frac{0.4}{0.6} = \frac{2}{3}$ 이다.
같은 CSTR를 n기 직렬로 연결하면 각 반응기 출구 농도비가 반복되어 $\frac{C_{A,n}}{C_{A,0}} = \left(\frac{1}{1+k\tau}\right)^n$ 이고, 전체 전환율은 $X_n = 1 - \left(\frac{1}{1+k\tau}\right)^n$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유:
- 각 반응기가 같은 부피와 같은 조건을 가지므로 모든 단계에서 $k\tau$ 값이 같기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 단일 CSTR의 전환율 40%로부터 $k\tau$를 구하면 $k\tau = 2/3$ 이다.
2. 한 반응기를 지날 때 남는 농도비는 $\frac{1}{1+k\tau} = \frac{1}{1+2/3} = \frac{3}{5} = 0.6$ 이다.
3. 따라서 n기 직렬 연결 시 전체 전환율은 $X_n = 1 - (0.6)^n$ 이다.
4. $n = 3$이면 $X_3 = 1 - 0.6^3 = 1 - 0.216 = 0.784$ 이므로 78.4%이다.
5. $n = 4$이면 $X_4 = 1 - 0.6^4 = 1 - 0.1296 = 0.8704$ 이므로 87.04%이다.
6. 85% 이상을 처음 만족하는 최소 정수는 4이므로 총 CSTR 수는 4기이다.

선지 판단

① X
- 1기이면 전환율은 문제에서 이미 주어진 40%이다. 85% 이상에 한참 못 미친다.
- 틀린 표현은 '총 반응기 수가 1기면 충분하다'는 뜻이고, 올바르게는 총 4기가 필요하다.

② X
- 2기 직렬이면 $X_2 = 1 - 0.6^2 = 0.64$ 이므로 전환율은 64%이다. 여전히 85% 미만이다.
- 틀린 표현은 '총 2기면 충분하다'는 뜻이고, 올바르게는 총 4기가 필요하다.

③ X
- 3기 직렬이면 $X_3 = 0.784$ 이므로 전환율은 78.4%이다. 85% 이상 조건을 만족하지 못한다.
- 이 값은 추가로 3기를 더 단다는 뜻으로 오해하면 헷갈릴 수 있으나, 문제는 총 반응기 수를 묻고 있다.
올바르게는 총 4기이다.

④ O
- 4기 직렬이면 $X_4 = 0.8704$ 이므로 전환율은 87.04%이다. 처음으로 85% 이상을 만족한다.
- 따라서 최소 총 반응기 수는 4기이므로 정답과 일치한다.

오답 포인트

단일 CSTR의 전환율 40%를 반응기 수에 단순히 곱하면 안 된다. CSTR 직렬 연결은 전환율이 아니라 각 단계의 농도비가 곱해진다. 또한 문제는 추가 설치 수가 아니라 총 반응기 수를 묻는다는 점도 자주 놓친다.

다시 나오면 이렇게 판단

같은 CSTR가 직렬로 반복되면 먼저 단일 반응기의 전환율로 $k\tau$를 역산하고, 그다음 $C_{out}/C_{in} = 1/(1 + k\tau)$가 단계마다 곱해진다고 본다. 마지막에는 목표 전환율을 만족하는 최소 정수 n을 확인하면 된다.

암기 포인트

동일한 1차 CSTR 직렬 연결은 전환율보다 농도비 C/C_0가 단계별로 곱해진다고 기억하면 계산이 바로 풀린다.

NoteBase

문 16. 부피가 변하는 회분식반응기에 기체 A를 100% 채우고 <보기>의 반응을 20분 동안 진행한 결과, 초기 반응기 부피의 2배로 팽창하였다. 동일한 초기 조건 및 반응기에서 기체 A와 비활성 기체 B가 75% : 25%로 희석된 원료를 사용할 때, 초기 반응기 부피의 2배로 팽창하는 데 걸리는 시간[min]은? (단, 반응 원료를 제외한 다른 반응조건은 변화시키지 않으며, 모든 기체는 이상기체이다.)

<보기>

$A \rightarrow 3R$(0차 반응)

① 10

② 20

③ 30

④ 40

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 기상 가변부피 회분식반응기에서 0차 반응의 몰수 증가와 부피 팽창식을 함께 써서 같은 부피비에 도달하는 시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

- 반응식: $A \rightarrow 3R$, 0차 반응
- 순몰수 변화: A 1몰이 반응하면 전체 몰수는 2몰 증가한다.
- 순수 A 충전 시 20분 후 $V/V_0 = 2$
- 희석 원료 사용 시 초기 조성은 $y_{A0} = 0.75$, $y_{B0} = 0.25$
- 구해야 할 값: 희석 원료에서 $V/V_0 = 2$가 되는 시간

NoteBase

사용할 공식

기상 이상기체, 등온·등압으로 보면 $V \propto N_T$ 이므로
$\frac{V}{V_0} = \frac{N_T}{N_{T0}}$
또한 0차 반응이므로
$-r_A = k$
회분식 물질수지는
$N_{A0}\frac{dX}{dt} = kV$
이다.

이 공식을 쓰는 이유는 반응이 진행되면 $A \rightarrow 3R$ 때문에 전체 몰수가 늘어나고, 가변부피 반응기에서는 그 몰수 증가가 곧 부피 증가로 연결되기 때문이다.

계산 과정

1. 순수 A를 넣은 경우 전체 몰수는 $N_T = N_{A0}(1 - X) + 3N_{A0}X = N_{A0}(1 + 2X)$ 이다. 따라서 $V/V_0 = 1 + 2X$ 이다.
2. 20분 후 $V/V_0 = 2$ 이므로 $1 + 2X = 2$, 따라서 $X = 0.5$ 이다.
3. 0차 반응에서 $N_{A0}dX/dt = kV = kV_0(1 + 2X)$ 이므로
$t = \frac{N_{A0}}{2kV_0}\ln(1 + 2X) = \frac{C_{A0}}{2k}\ln(1 + 2X)$
이다. 순수 A에서는 $C_{A0} = C_{T0}$ 이므로
$20 = \frac{C_{T0}}{2k}\ln 2$
를 얻는다.
4. A:B=75:25인 경우 $N_T = N_{T0} + 2N_{A0}X = N_{T0}(1 + 2y_{A0}X) = N_{T0}(1 + 1.5X)$ 이다.
5. 다시 $V/V_0 = 2$ 이려면 $1 + 1.5X = 2$ 이므로 $X = 2/3$ 이다.
6. 이때 0차 반응식은
$N_{A0}\frac{dX}{dt} = kV = kV_0(1 + 1.5X)$
이고 $N_{A0}/V_0 = C_{A0} = 0.75C_{T0}$ 이므로
$t = \frac{N_{A0}}{1.5kV_0}\ln(1 + 1.5X) = \frac{0.75C_{T0}}{1.5k}\ln 2 = \frac{C_{T0}}{2k}\ln 2$
이다.
7. 따라서 희석했어도 $V/V_0 = 2$ 에 도달하는 시간은 그대로 20분이다.

NoteBase

선지별 해설

① X
- 10분이라는 판단은 틀리다. 0차 반응에서는 희석으로 초기 A 몰분율이 줄어들어도, 2배 팽창에 필요한 전환율이 0.5에서 2/3으로 함께 바뀌어 시간이 절반으로 줄지 않는다.
- 틀린 표현은 "소요 시간이 10분이다"이고, 올바르게는 "소요 시간은 20분이다"이다.

② O
- 희석 원료에서도 $V/V_0 = 2$ 조건을 대입하면 최종적으로 $t = (C_{T0}/2k)\ln 2$ 가 되어 순수 A일 때와 같은 값이 나온다. 계산 결과가 20분이므로 옳다.

③ X
- 30분이라는 판단은 틀리다. 필요한 전환율이 더 커졌다는 이유만으로 시간을 전환율에 단순 비례시켜 잡으면 안 된다. 가변부피 0차 반응에서는 V가 커질수록 kV도 커져 반응 진행식이 로그형으로 적분된다.
- 틀린 표현은 "소요 시간이 30분이다"이고, 올바르게는 "소요 시간은 20분이다"이다.

④ X
- 40분이라는 판단은 틀리다. 비활성 기체가 들어갔다고 해서 시간이 두 배로 늘어나는 구조가 아니다. 이 문제에서는 희석 효과와 부피 팽창식이 상쇄되어 같은 부피비까지 가는 시간이 변하지 않는다.
- 틀린 표현은 "소요 시간이 40분이다"이고, 올바르게는 "소요 시간은 20분이다"이다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 0차 반응이라는 이유만 보고 시간을 전환율에 단순 비례시키거나, 반대로 희석 때문에 시간이 무조건 길어진다고 보는 것이다. 이 문항은 $A \rightarrow 3R$ 로 전체 몰수가 늘어나 부피가 변하고, 그 부피가 다시 kV 항에 들어간다는 점을 함께 봐야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

가변부피 기상 회분식 계산형은 먼저 V/V_0 를 전환율 X 로 바꾸고, 그다음 회분식 수지 $N_{A0}dX/dt = kV$ 에 대입해 적분식으로 판단한다. 희석 기체가 있으면 y_{A0} 가 부피식과 초기 A 농도식에 동시에 들어가는지 함께 확인한다.

암기 포인트

0차 가변부피 기상 회분식은 $N_{A0}dX/dt = kV$ 이고, 희석 효과는 V/V_0 식과 C_{A0} 식에 함께 들어가 상쇄될 수 있다.

NoteBase

문 17. 플러그흐름반응기(PFR)에서 비가역 액상 1차 반응 $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$는 <보기>의 반응식으로 표기된다. 초기 농도를 C_{A0}라 할 때, 공간시간 τ에 따른 C의 농도 C_C로 옳은 것은?

<보기>

$A \rightarrow B,\ r_1 = k_1 C_A$

$A \rightarrow C,\ r_2 = k_2 C_A$

① $C_C(\tau) = C_{A0}\frac{k_2}{k_2 - k_1}(1 - e^{-(k_1 + k_2)\tau})$

② $C_C(\tau) = C_{A0}\frac{k_1}{k_2 - k_1}(1 - e^{-(k_1 + k_2)\tau})$

③ $C_C(\tau) = C_{A0}\frac{k_2}{k_2 + k_1}(1 - e^{-(k_1 + k_2)\tau})$

④ $C_C(\tau) = C_{A0}\frac{k_1}{k_2 + k_1}(1 - e^{-(k_1 + k_2)\tau})$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 PFR의 공간시간 τ에 대해 병렬 비가역 1차 반응의 물질수지를 세워 생성물 C의 농도식을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 반응은 $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$의 병렬 반응이다.
속도식은 $r_1 = k_1 C_A$, $r_2 = k_2 C_A$이다.
구해야 할 값은 공간시간 τ에서의 $C_C(\tau)$이다.

사용할 공식

$\frac{dC_A}{d\tau} = -(r_1 + r_2) = -(k_1 + k_2)C_A$
$\frac{dC_C}{d\tau} = r_2 = k_2 C_A$
이 공식을 쓰는 이유는 PFR의 액상 등밀도계에서 공간시간 τ를 따라 성분 농도 변화가 반응속도로 바로 표현되기 때문이다. 또한 C는 $A \rightarrow C$ 경로에서만 생성되므로 생성항은 $k_2 C_A$만 들어간다.

NoteBase

계산 과정

1. 반응물 A의 총 소멸속도는 $(k_1 + k_2)C_A$이므로
$C_A(\tau) = C_{A0}e^{-(k_1 + k_2)\tau}$
2. 생성물 C의 농도는
$\frac{dC_C}{d\tau} = k_2 C_A = k_2 C_{A0} e^{-(k_1 + k_2)\tau}$
3. 초기 생성물 농도를 0으로 두고 적분하면
$C_C(\tau) = \int_0^\tau k_2 C_{A0} e^{-(k_1 + k_2)t} dt = C_{A0}\frac{k_2}{k_1 + k_2}(1 - e^{-(k_1 + k_2)\tau})$
따라서 $C_C(\tau)$는 $C_{A0}\frac{k_2}{k_1 + k_2}(1 - e^{-(k_1 + k_2)\tau})$이다.

선지별 해설

① X: 분모가 $k_2 - k_1$인 점이 틀렸다. 병렬 반응에서 A의 총 소멸속도상수는 두 경로의 합인 $k_1 + k_2$이다. 틀린 표현은 $\frac{k_2}{k_2 - k_1}$이고, 올바르게는 $\frac{k_2}{k_1 + k_2}$이다.
② X: 분자와 분모가 모두 틀렸다. C의 생성속도는 $r_2 = k_2 C_A$이므로 분자는 k_2가 되어야 하고, 분모도 $k_2 - k_1$가 아니라 $k_1 + k_2$가 되어야 한다. 올바르게는 $C_{A0}\frac{k_2}{k_1 + k_2}(1 - e^{-(k_1 + k_2)\tau})$이다.
③ O: 분자는 $A \to C$ 경로의 속도상수 k_2이고, 분모는 A의 총 소멸속도상수 $k_1 + k_2$이므로 유도식과 정확히 일치한다.
④ X: 분모 $k_1 + k_2$는 맞지만 분자가 k_1인 점이 틀렸다. 이 식은 생성물 B의 농도식 $C_B(\tau)$에 해당한다. $C_C(\tau)$로 고치면 분자가 k_2가 되어야 한다.

오답 포인트

병렬 반응에서는 생성물별 분자는 해당 경로의 속도상수이지만, 반응물 A의 지수항과 적분 뒤 분모는 항상 총 소멸속도상수 $k_1 + k_2$로 묶인다. $k_2 - k_1$ 형태를 넣거나 B의 식과 C의 식을 뒤바꾸면 오답이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬 1차 반응 PFR이 나오면 먼저 A에 대해 총 소멸속도 $(k_1 + k_2)C_A$를 쓴 뒤, 구하려는 생성물의 경로 속도상수만 분자에 남기는 구조인지 확인하면 된다.

암기 포인트

병렬 1차 반응의 생성물 식은 해당 경로 상수 ÷ 전체 상수 합의 형태이다.

NoteBase

문 18. 액상 비가역 2차 반응 $A \rightarrow B$의 속도상수는 $k = 0.01 L/mol \cdot sec$이고 초기농도C_{A0}는 $1 mol/L$라고 가정한다. 이때 회분식반응기에서 99.9%의 전환율에 도달하기 위하여 필요한 시간[sec]은?

① 99

② 999

③ 9,990

④ 99,900

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 액상 등부피 회분식반응기에서 비가역 2차 반응의 적분식으로 99.9% 전환에 필요한 시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: $k = 0.01 L/(mol \cdot sec)$, $C_{A0} = 1 mol/L$, $X = 0.999$이다.
구해야 할 값: 회분식반응기에서 목표 전환율에 도달하는 시간 t이다.
주의할 조건: 액상 반응이므로 부피가 일정하다고 보고 $C_A = C_{A0}(1 - X)$를 적용한다.

사용할 공식

비가역 2차 반응의 회분식 적분식은 $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt$이다.
전환율을 쓰면 $C_A = C_{A0}(1 - X)$이므로 $t = \frac{1}{kC_{A0}} \cdot \frac{X}{1 - X}$가 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제 조건이 액상 비가역 2차 반응의 회분식반응기이기 때문이다.

계산 과정

1. 목표 전환율 99.9%는 $X = 0.999$이다.
2. $1 - X = 0.001$이므로 $\frac{X}{1 - X} = \frac{0.999}{0.001} = 999$이다.
3. $kC_{A0} = 0.01 \times 1 = 0.01$이므로 $\frac{1}{kC_{A0}} = 100$이다.
4. 따라서 $t = 100 \times 999 = 99{,}900 sec$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 계산 결과는 99초가 아니라 99,900초이다. 99는 2차 반응 적분식을 전혀 적용하지 않고 시간을 지나치게 작게 본 값이다. 틀린 표현은 시간값 99이고, 올바르게는 99,900초이다.
② X: 계산 결과는 999초가 아니라 99,900초이다. 999는 $\frac{X}{1-X} = 999$까지만 구하고 앞의 $\frac{1}{kC_{A0}} = 100$을 곱하지 않은 값이다. 틀린 표현은 시간값 999이고, 올바르게는 99,900초이다.
③ X: 계산 결과는 9,990초가 아니라 99,900초이다. 9,990은 100을 곱한 뒤 자릿수를 한 번 덜 올린 값으로, 0.001 때문에 시간이 크게 증가하는 점을 놓친 오답이다. 틀린 표현은 시간값 9,990이고, 올바르게는 99,900초이다.
④ O: $t = \frac{1}{kC_{A0}} \cdot \frac{X}{1-X} = 100 \times 999 = 99{,}900 sec$이므로 옳다.

오답 포인트

99.9% 전환이면 $1 - X = 0.001$이 되어 분모가 매우 작아지므로 시간이 급격히 커진다. ②와 ③ 같은 오답은 $\frac{1}{kC_{A0}}$를 누락하거나 자릿수를 잘못 처리할 때 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분식 2차 반응 시간 문제는 먼저 X를 소수로 바꾸고, 다음에 $C_A = C_{A0}(1 - X)$를 연결한 적분식 $t = \frac{1}{kC_{A0}} \cdot \frac{X}{1-X}$에 넣어 계산하면 된다.

암기 포인트

회분식 비가역 2차 반응은 $t \propto \frac{X}{1-X}$이므로 전환율이 1에 가까워질수록 필요한 시간이 급격히 커진다.

NoteBase

문 19. 원하는 생성물 B의 생산을 더 효율적으로 하기 위한 플러그흐름반응기(PFR) 또는 혼합흐름반응기(CSTR)의 반응기 설계 전략으로 가장 옳지 않은 것은?

① 반응 $A \rightarrow B$가 비가역 2차 반응일 때, PFR이 동일한 부피의 CSTR보다 전환율을 높이는 데 더 유리하다.

② 직렬반응 $A \rightarrow B \rightarrow C$를 PFR에서 진행할 때는, 환류(recycle) 비율을 높이면 B의 생산량을 증가시키는 데 더 유리하다.

③ 경쟁반응 $A \rightarrow B$와 $A \rightarrow D$가 있고 $A \rightarrow B$의 활성화에너지가 더 높다면, 온도를 높이는 것이 B 대비 D의 생산량을 줄이는 데 더 유리하다.

④ 경쟁반응 $A \rightarrow B$와 $A \rightarrow D$의 반응차수가 다르다면, 반응물 A의 초기농도를 변화시켜 B와 D의 상대적인 양을 제어할 수 있다.

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 PFR과 CSTR의 유동 특성, 직렬반응의 중간생성물 선택도, 경쟁반응에서의 온도·농도 효과를 구분하는 문제이다.

핵심 개념

PFR은 축방향 혼합이 거의 없어 입구의 높은 반응물 농도를 유지하므로 고차 반응의 전환율과 직렬반응의 중간생성물 확보에 유리하다.
CSTR은 완전혼합으로 반응기 전체 농도가 출구 농도와 같아 고차 반응에는 불리하지만 조성이 균일하다.
직렬반응 $A \rightarrow B \rightarrow C$에서 원하는 중간생성물 B는 너무 오래 머물면 다시 C로 소모되므로 back-mixing이나 recycle 증가는 대체로 불리하다.
경쟁반응에서는 활성화에너지 차이와 반응차수 차이 때문에 온도와 초기농도 변화로 선택도를 조절할 수 있다.

NoteBase

선지별 해설

① O
비가역 2차 반응은 속도식이 $r = kC_A^2$로 농도 의존성이 크다. PFR은 입구에서 높은 C_A를 유지하므로 같은 부피의 CSTR보다 평균 반응속도가 커져 전환율을 높이기 유리하다.

② X
틀린 부분은 "환류 비율을 높이면 B의 생산량을 증가시키는 데 더 유리하다"는 표현이다. 실제로는 직렬반응 $A \rightarrow B \rightarrow C$에서 원하는 중간생성물 B를 늘리려면 B가 C로 더 진행되기 전에 빼내는 쪽이 유리하다. recycle을 키우면 back-mixing이 증가하여 PFR 거동이 CSTR에 가까워지고 B의 추가 소모가 쉬워지므로 일반적으로 불리하다.

③ O
경쟁반응에서 원하는 반응 $A \rightarrow B$의 활성화에너지가 더 크면 온도 상승 시 그 반응의 속도상수가 상대적으로 더 크게 증가한다. 따라서 B 선택도가 올라가고 B 대비 D의 생산량을 줄이는 전략으로 온도 상승이 유리할 수 있다.

④ O
경쟁반응의 반응차수가 다르면 선택도는 C_A에 의존한다. 따라서 반응물 A의 초기농도를 변화시켜 B와 D의 상대 생성량을 제어할 수 있다.

오답 포인트

②는 recycle이 항상 전환율이나 생산량을 높인다는 일반론을 그대로 적용하면 틀리기 쉽다. 이 문항은 전체 전환율이 아니라 직렬반응의 원하는 중간생성물 B의 선택도를 묻기 때문에, 체류시간 증가와 back-mixing이 오히려 B 손실로 이어진다는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

원하는 생성물이 최종생성물인지 중간생성물인지부터 구분하면 판단이 빨라진다. 고차 단일반응은 높은 반응물 농도를 오래 유지하는 PFR 쪽이 유리하고, 직렬반응의 중간생성물은 과반응과 back-mixing을 줄이는 쪽이 유리하다. 경쟁반응은 활성화에너지 차이는 온도로, 반응차수 차이는 농도로 선택도를 가른다고 보면 된다.

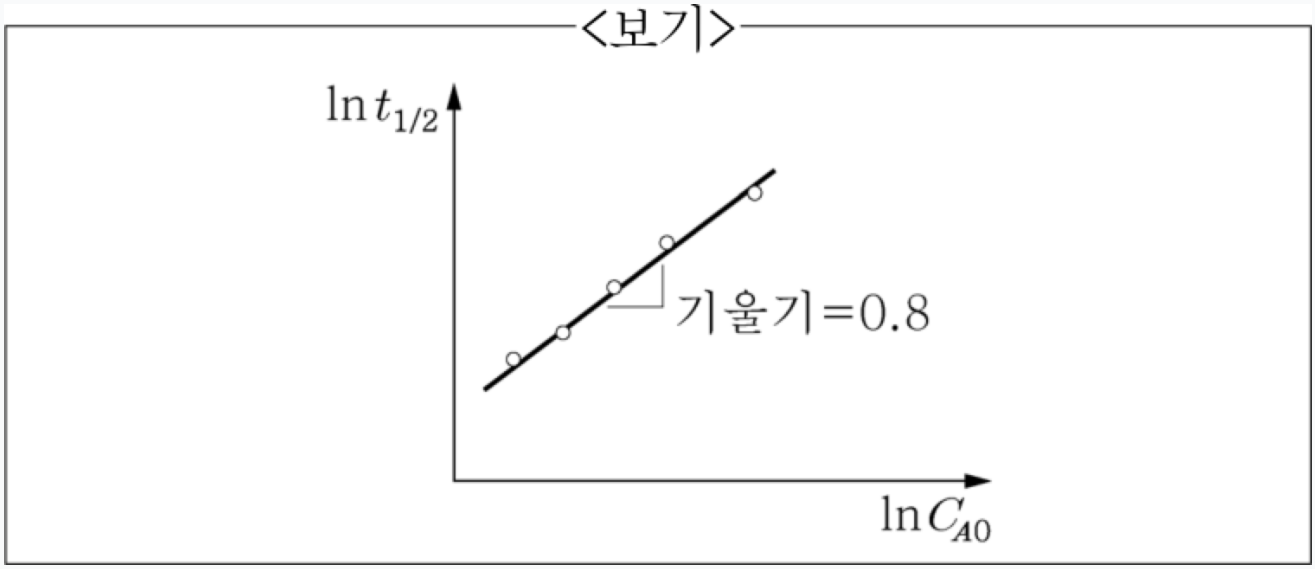
암기 포인트

고차 단일반응과 직렬 중간생성물은 PFR 쪽이 유리하고, 경쟁반응의 선택도는 활성화에너지는 온도로, 반응차수는 농도로 조절된다.

NoteBase

문 20. 액상에서 일어나는 단일 비가역 반응 $A \rightarrow B$에 대하여 반응물 A의 초기농도에 대한 반감기 (반응물 A의 농도가 초기농도의 절반이 되는 데 걸리는 시간)를 조사하였더니 <보기>와 같이 결과가 나타났다. 이 반응의 차수 n은?

<보기>



① 0

② 0.2

③ 0.8

④ 1.8

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 n차 반응의 반감기 식에서 $\ln t_{1/2}$와 $\ln C_{A0}$의 기울기 관계를 이용해 반응차수 n을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:

- 액상 단일 비가역 반응 $A \rightarrow B$
- $\ln t_{1/2}$ 대 $\ln C_{A0}$ 직선의 기울기 = 0.8

구해야 할 값:

- 반응차수 n

주의할 조건:

- 반감기와 초기농도의 로그-로그 관계에서 기울기를 읽어야 한다.

NoteBase

사용할 공식

$n \neq 1$인 n차 반응의 반감기는
$t_{1/2} = \frac{2^{n-1}-1}{k(n-1)C_{A0}^{n-1}}$
이다.
따라서
$\ln t_{1/2} = \ln\left(\frac{2^{n-1}-1}{k(n-1)}\right) + (1-n)\ln C_{A0}$
가 된다.
이 공식을 쓰는 이유:
- 문제에서 $\ln t_{1/2}$와 $\ln C_{A0}$의 직선 기울기를 직접 주었으므로 기울기 $= 1-n$ 관계를 바로 사용할 수 있다.

계산 과정

1. 위 식에서 $\ln C_{A0}$의 계수는 직선의 기울기이므로 기울기는 $1-n$이다.
2. 문제에서 기울기가 0.8이므로
$1-n = 0.8$
이다.
3. 따라서
$n = 1-0.8 = 0.2$
이다.

선지별 해설

① X
- $n = 0$이면 기울기는 $1-n = 1$이 되어야 하므로 제시된 기울기 0.8과 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 "$n = 0$"이고, 올바르게는 "$n = 0.2$"이다.

② O
- 기울기 $= 1-n = 0.8$이므로 $n = 0.2$가 된다. 계산 결과와 일치하므로 옳다.

③ X
- $n = 0.8$이면 기울기는 $1-n = 0.2$가 되어야 하므로 그래프의 기울기 0.8과 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 "$n = 0.8$"이고, 올바르게는 "$n = 0.2$"이다.

④ X
- $n = 1.8$이면 기울기는 $1-n = -0.8$이 되어 직선의 기울기가 음수가 되어야 한다. 그림은 양의 기울기 0.8이다.
- 틀린 표현은 "$n = 1.8$"이고, 올바르게는 "$n = 0.2$"이다.

NoteBase

오답 포인트

기울기를 $n-1$로 잘못 두면 부호를 반대로 읽게 된다. 특히 $n=1$일 때만 반감기가 초기농도와 무관하므로 기울기 0이 되고, 이 관계를 기준으로 $1-n$인지 빠르게 점검할 수 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

반감기와 초기농도의 로그-로그 그래프가 나오면 먼저 기울기가 $1-n$인지 확인한 뒤, 주어진 기울기를 대입해 n=1-기울기로 바로 정리하면 된다.

암기 포인트

n차 반응에서 $\ln t_{1/2}$ 대 $\ln C_{A0}$의 기울기는 $1-n$이다.

NoteBase