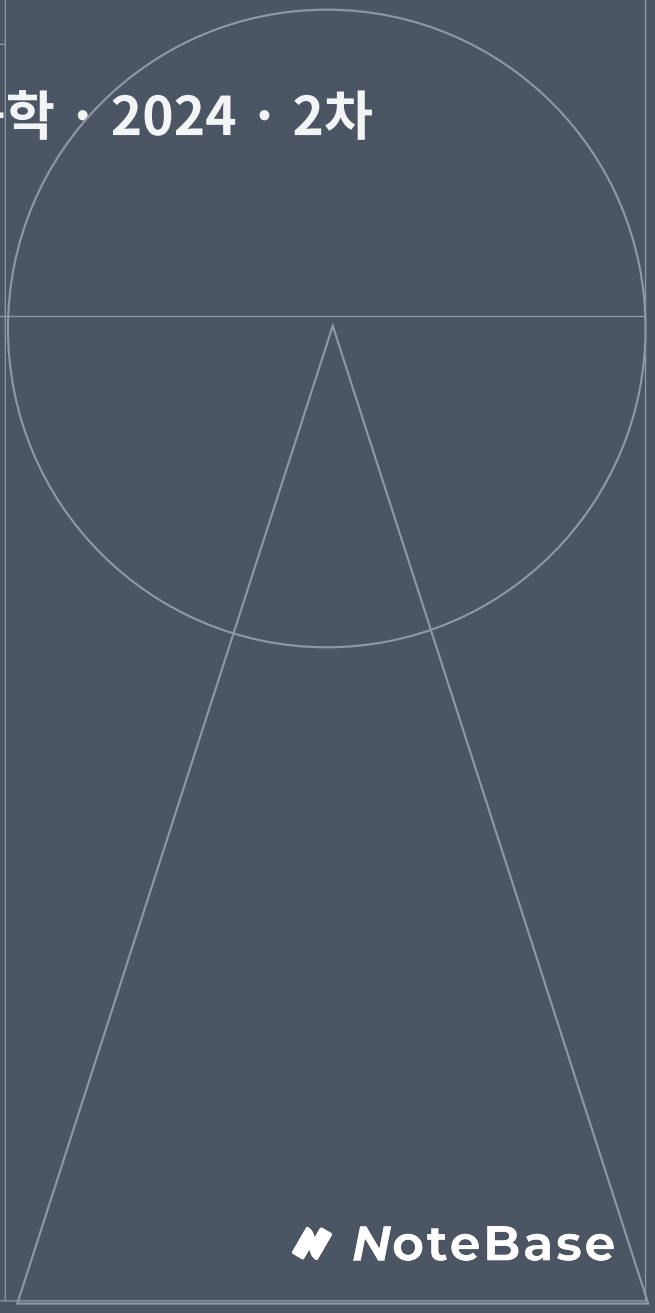
기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2024 · 2차



NoteBase

기출OX 해설집

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2024 · 2차

공무원/국가직/7급 · 반응공학 · 2024 · 2차

문 1. 불균일계 촉매 반응의 해석에 사용되는 유효 인자(effectiveness factor)의 정의는?

① 촉매 표면의 유체 경막을 통한 확산 속도를 촉매 기공 내에서의 확산 속도로 나눈 값

② 실제 반응속도를 촉매 기공을 통한 확산이 없는 경우를 가정한 반응속도로 나눈 값

③ 촉매 입자의 부피를 확산이 일어나는 입자 내 기공의 표면적으로 나눈 값

④ 실제 반응속도를 촉매 기공 내에서의 확산 속도로 나눈 값

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 다공성 촉매에서 유효 인자가 무엇의 비로 정의되는지를 묻는 문제이다.

핵심 개념

유효 인자는 다공성 촉매 입자 내부에서 실제로 나타나는 전체 반응속도를, 내부 확산 저항이 전혀 없다고 가정할 때의 반응속도로 나눈 값이다.
외부 유체 경막을 통한 확산은 외부 물질전달 저항이고, 촉매 기공 내부 확산은 내부 물질전달 저항이므로 유효 인자의 정의와 직접 같은 비가 아니다.
따라서 핵심 구별축은 '실제 반응속도 대비 무확산 가정 반응속도'인지, 아니면 단순한 확산속도끼리의 비교인지이다.

NoteBase

선지별 해설

1번: X. 유효 인자는 반응속도의 비이지, 촉매 표면의 유체 경막 확산속도를 기공 내 확산속도로 나눈 값이 아니다. 틀린 표현은 '확산 속도를 … 확산 속도로 나눈 값'이다. 올바르게는 '실제 반응속도를 내부 확산이 없다고 가정한 반응속도로 나눈 값'이다.
2번: O. 실제 반응속도를 촉매 기공을 통한 확산이 없는 경우의 가상 반응속도로 나눈 값이 유효 인자의 정의에 해당한다. 내부 확산 저항 때문에 실제 반응속도는 이 값보다 작거나 같아진다.
3번: X. 촉매 입자 부피를 기공 표면적으로 나눈 값은 기하학적 특성이나 대표 길이와 관련된 양일 수는 있어도 유효 인자의 정의는 아니다. 틀린 표현은 '부피를 … 표면적으로 나눈 값'이다. 올바르게는 '실제 반응속도와 무확산 가정 반응속도의 비'이다.
4번: X. 실제 반응속도를 기공 내 확산속도로 나누는 비는 유효 인자가 아니다. 유효 인자는 반응과 확산을 비교하는 값이 아니라, 확산 제한이 있을 때의 실제 반응 성능을 무확산 기준 반응 성능과 비교하는 값이다. 틀린 표현은 '확산 속도로 나눈 값'이다. 올바르게는 '내부 확산이 없을 때의 반응속도로 나눈 값'이다.

오답 포인트

확산이 반복해서 등장하므로 유효 인자를 확산속도끼리의 비로 오해하기 쉽다. 이 문항은 '유효 인자 = 반응속도비'라는 정의를 알고 있는지, 아니면 경막확산·기공확산 같은 전달 현상 용어에 끌리는지를 가른다.

다시 나오면 이렇게 판단

유효 인자, effectiveness factor가 보이면 먼저 분자가 실제 반응속도인지 확인한다. 다음으로 분모가 '내부 확산 저항이 없다고 가정한 기준 반응속도'인지 보면 정답을 빠르게 고를 수 있다. 분모와 분자가 모두 확산속도이거나 기하학적 크기이면 바로 제외된다.

암기 포인트

유효 인자 = 실제 반응속도 / 무내부확산 가정 반응속도이다.

NoteBase

문 2. 등온 회분식반응기에서 A⇄B 가역 액상 반응을 진행할 때, 반응의 농도평형상수는 19이다. 진행 초기에 순수한 A만 반응기 내에 존재하였다면, A의 평형전환율[%]은?

① 65

② 75

③ 85

④ 95

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 등온 회분식반응기에서 가역 $A \rightleftharpoons B$ 반응의 농도평형상수와 평형전환율의 관계를 이용해 A의 평형전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 농도평형상수는 19이다.
구해야 할 값: A의 평형전환율이다.
주의할 조건: 액상 $A \rightleftharpoons B$의 화학양론이 1:1이고, 진행 초기에 순수한 A만 존재하므로 평형에서 $C_A = C_{A0}(1 - X_e)$, $C_B = C_{A0}X_e$가 된다.

사용할 공식

사용 공식은 $K_c = \frac{C_{Be}}{C_{Ae}} = \frac{X_e}{1 - X_e}$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 등온 액상 1:1 가역반응에서 부피 변화가 없고 처음에 A만 있으므로 평형농도를 전환율 하나로 바로 표현할 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. 평형상수 식에 값을 대입하면 $19 = \frac{X_e}{1 - X_e}$이다.
2. 양변을 정리하면 $19(1 - X_e) = X_e$이므로 $19 = 20X_e$이다.
3. 따라서 $X_e = \frac{19}{20} = 0.95$이므로 평형전환율은 95%이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 65%는 $K_c = 19$를 만족하지 못한다. $X_e = 0.65$이면 $\frac{X_e}{1-X_e} = \frac{0.65}{0.35} \approx 1.86$이므로 평형상수와 맞지 않는다. 틀린 값 65% → 올바르게는 95%이다.
② X: 75%는 $X_e = 0.75$일 때 $\frac{0.75}{0.25} = 3$이므로 역시 $K_c = 19$와 다르다. 틀린 값 75% → 올바르게는 95%이다.
③ X: 85%는 $X_e = 0.85$일 때 $\frac{0.85}{0.15} \approx 5.67$이므로 평형상수 19에 못 미친다. 틀린 값 85% → 올바르게는 95%이다.
④ O: 95%는 $X_e = 0.95$일 때 $\frac{0.95}{0.05} = 19$가 되어 주어진 평형상수와 정확히 일치한다.

오답 포인트

평형상수 19를 전환율 19%나 0.19로 직접 읽으면 오답이 된다. 이 문항의 함정은 평형상수를 곧바로 백분율로 착각하거나, $K_c = \frac{X_e}{1-X_e}$에서 분자와 분모를 바꾸어 쓰는 데 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

가역 1:1 반응에서 처음에 반응물 하나만 존재하면 먼저 평형농도를 전환율로 표현한 뒤 K_c를 $\frac{X_e}{1-X_e}$ 꼴로 놓고 푼다. 값이 1보다 훨씬 크면 생성물 쪽 평형이므로 전환율이 100%에 가깝게 나와야 한다.

암기 포인트

순수한 A로 시작하는 $A \rightleftharpoons B$ 1:1 가역반응은 $K_c = \frac{X_e}{1-X_e}$, 따라서 $X_e = \frac{K_c}{1+K_c}$이다.

NoteBase

문 3. 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 A → B 비가역 액상 2차 반응을 진행한다. 초기 반응물 A의 50%가 소모될 때까지 4분이 소요되었다. 동일 조건에서 초기 반응물 A의 80%가 소모되는 데 걸리는 시간[min]은?

① 12

② 16

③ 20

④ 24

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 등온 액상 회분식반응기에서 2차 반응의 적분식 $t = \frac{X_A}{kC_{A0}(1-X_A)}$를 이용해 전환율 변화에 따른 시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 순수한 A를 반응물로 하는 비가역 액상 2차 반응, $X_A = 0.5$일 때 시간은 4분이다.
구해야 할 값: $X_A = 0.8$일 때 걸리는 시간이다.
주의할 조건: 액상 회분식반응기이므로 부피를 일정하게 보고, 2차 반응 적분식을 사용해야 한다.

사용할 공식

2차 반응 회분식반응기의 적분식은 $\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt$ 이다. 전환율 X_A를 쓰면 $C_A = C_{A0}(1 - X_A)$이므로 $t = \frac{X_A}{kC_{A0}(1-X_A)}$ 가 된다.
이 공식을 쓰는 이유: 문제에서 회분식반응기, 액상, 비가역 2차 반응이 주어졌으므로 시간과 전환율의 관계를 직접 주는 적분식이 필요하기 때문이다.

계산 과정

1. $X_A = 0.5$일 때 $4 = \frac{0.5}{kC_{A0}(1-0.5)} = \frac{1}{kC_{A0}}$ 이므로 $kC_{A0} = 0.25$ 이다.
2. $X_A = 0.8$일 때 $t = \frac{0.8}{0.25(1-0.8)}$ 이다.
3. 계산하면 $t = \frac{0.8}{0.05} = 16$ 이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: 계산 결과가 16이므로 12는 맞지 않는다. 이 값은 전환율을 시간에 단순 비례시키는 식으로 처리할 때 나오는 오답이다. 틀린 표현은 "80% 소모에 12분"이고, 올바르게는 "80% 소모에 16분"이다.
2번 O: 2차 반응 적분식에 $X_A = 0.8$을 대입하면 시간이 16이 되므로 옳다.
3번 X: 20은 $t = \frac{1}{kC_{A0}(1 - X_A)}$처럼 분자 X_A를 빠뜨리면 나오는 값이다. 틀린 표현은 "80% 소모에 20분"이고, 올바르게는 $t = \frac{X_A}{kC_{A0}(1 - X_A)}$를 써서 16으로 계산하는 것이다.
4번 X: 24는 2차 반응의 적분식으로는 나오지 않는 과대평가 값이다. 50% 소모 시간 4분을 임의 비례로 늘리면 생기는 오답이다. 틀린 표현은 "80% 소모에 24분"이고, 올바르게는 "80% 소모에 16분"이다.
계산 결과 16이므로 정답은 2번이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 전환율을 시간에 선형 비례시키는 데 있다. 2차 반응에서는 t가 X_A에 단순 비례하지 않고 $\frac{X_A}{1 - X_A}$에 비례하므로, 50%에서 80%로 갈 때 추가 시간 증가가 직선적으로 계산되지 않는다.

다시 나오면 이렇게 판단

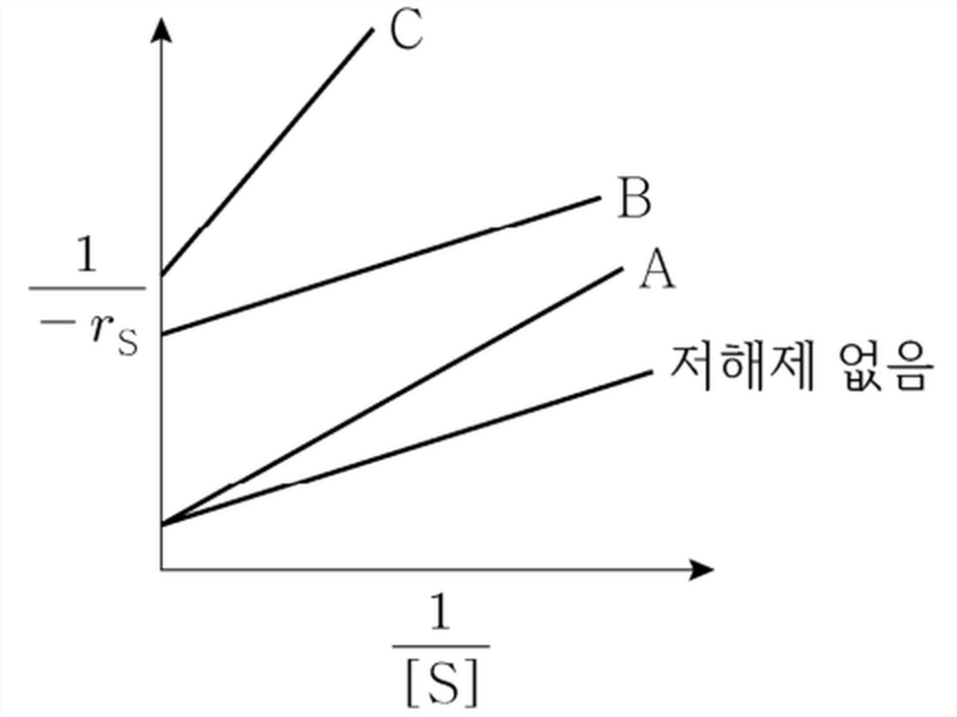
회분식반응기 계산형 문제는 반응차수를 먼저 확인한 뒤 해당 적분식을 고른다. 그다음 주어진 전환율 한 점으로 kC_{A0}를 구하고, 같은 식에 목표 전환율을 다시 대입해 시간을 계산한다.

암기 포인트

액상 2차 회분반응은 $t \propto \frac{X_A}{1 - X_A}$ 형태로 기억하면 전환율과 시간이 선형 비례하지 않는다는 점을 바로 떠올릴 수 있다.

NoteBase

문 4. 다음 그림은 저해제 첨가에 대한 특정 효소의 라인위버-버크 플롯(Lineweaver-Burk plot)이다. 특정 효소에 저해제가 작용하는 방식은 경쟁(competitive), 무경쟁(uncompetitive), 비경쟁(noncompetitive) 저해로 구분되며, 저해제 A, B, C를 각각 첨가한 결과를 그래프로 나타내었다. 저해제가 없을 때의 그래프 기울기는 B의 그래프 기울기와 같고, A 및 C의 그래프 기울기와는 다르다. 각 저해제와 저해제가 작용하는 방식을 바르게 연결한 것은? (단, $[S]$는 기질의 농도, $-r_S$는 기질의 분해 속도이다)



① 저해제 A: 경쟁 저해, 저해제 B: 무경쟁 저해, 저해제 C: 비경쟁 저해

② 저해제 A: 경쟁 저해, 저해제 B: 비경쟁 저해, 저해제 C: 무경쟁 저해

③ 저해제 A: 무경쟁 저해, 저해제 B: 경쟁 저해, 저해제 C: 비경쟁 저해

④ 저해제 A: 무경쟁 저해, 저해제 B: 비경쟁 저해, 저해제 C: 경쟁 저해

정답 1번

출제 포인트

라인위버-버크 플롯에서 기울기 K_m/V_{max} 와 y-절편 $1/V_{max}$ 의 변화를 읽어 경쟁 저해, 무경쟁 저해, 비경쟁 저해를 구분하는 문제이다.

NoteBase

선지별 해설

① O. A는 저해제 없음과 y-절편이 같고 기울기만 커져 V_{max} 는 같고 K_m 만 커지는 경쟁 저해이다. B는 저해제 없음과 기울기가 같아 평행선이므로 K_m 와 V_{max} 가 같은 비율로 감소하는 무경쟁 저해이다. C는 y-절편이 커지고 기울기도 달라져 V_{max} 감소가 나타나는 비경쟁 저해이다.
② X. B와 C의 연결이 틀렸다. B는 비경쟁 저해가 아니라 무경쟁 저해이다. 저해제 없음과 기울기가 같은 평행선이기 때문이다. C는 무경쟁 저해가 아니라 비경쟁 저해이다. V_{max} 감소로 $1/V_{max}$ 가 커진다.
③ X. A와 B의 연결이 틀렸다. A는 무경쟁 저해가 아니라 경쟁 저해이다. 저해제 없음과 y-절편이 같아 V_{max} 가 일정하다. B는 경쟁 저해가 아니라 무경쟁 저해이다. 평행선 패턴이므로 K_m/V_{max} 가 일정하다.
④ X. A와 C의 연결이 틀렸다. A는 무경쟁 저해가 아니라 경쟁 저해이다. C는 경쟁 저해가 아니라 비경쟁 저해이다. 경쟁 저해라면 저해제 없음과 y-절편이 같아야 하는데 C는 y-절편 자체가 커져 있다.

오답 포인트

무경쟁 저해와 비경쟁 저해를 모두 V_{max} 를 낮추는 저해라고만 기억하면 B와 C를 서로 바꾸기 쉽다. 이 문항은 '기울기 동일이면 무경쟁', 'y-절편 동일이면 경쟁'이라는 시각 단서를 정확히 읽는지를 묻는다.

다시 나오면 이렇게 판단

라인위버-버크 플롯은 먼저 기준선과의 관계를 본다. y-절편이 같으면 경쟁 저해, 기울기가 같아 평행이면 무경쟁 저해, 둘 다 변하면서 V_{max} 감소가 드러나면 비경쟁 저해로 판단한다.

암기 포인트

경쟁은 $1/V_{max}$ 고정, 무경쟁은 평행 이동, 비경쟁은 V_{max} 감소로 절편 상승이다.

NoteBase

문 5. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow R \rightarrow S$ 연속반응을 진행한다. 각 단계의 반응이 모두 비가역 액상 1차 반응일 때, R의 농도를 최대로 얻기 위한 공간시간은? (단, $k_1 \neq k_2$이다)

① $\frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$
② $\sqrt{k_1 k_2}$
③ $\frac{\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right)}{k_2 - k_1}$
④ $\frac{k_2 - k_1}{\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right)}$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 연속반응 $A \rightarrow R \rightarrow S$가 일어나는 CSTR에서 정상상태 물질수지로 C_R를 구한 뒤, 이를 최대로 만드는 공간시간 τ를 찾는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건은 순수한 A를 반응물로 하는 CSTR, 반응식 $A \rightarrow R \rightarrow S$, 각 단계 모두 비가역 액상 1차 반응, 그리고 $k_1 \neq k_2$이다.
구해야 할 값은 R의 농도 C_R가 최대가 되는 공간시간 τ이다.
주의할 조건은 CSTR이므로 배치반응기나 PFR의 농도식이 아니라 정상상태 출구농도 식을 써야 한다는 점이다.

사용할 공식

CSTR 정상상태 물질수지를 쓰면
$C_A = \frac{C_{A0}}{1 + k_1 \tau}$
$C_R = \frac{\tau k_1 C_A}{1 + k_2 \tau} = \frac{\tau k_1 C_{A0}}{(1 + k_1 \tau)(1 + k_2 \tau)}$
가 된다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 반응기가 CSTR이라고 주어졌고, R의 최대 농도는 정상상태 출구농도 C_R를 τ의 함수로 만든 뒤 최댓값 조건으로 구하기 때문이다.

계산 과정

1. A에 대한 CSTR 정상상태 수지에서 $C_A = \frac{C_{A0}}{1 + k_1 \tau}$를 얻는다.
2. R에 대한 정상상태 수지에서 생성항은 $k_1 C_A$, 소멸항은 $k_2 C_R$이므로 $C_R = \frac{\tau k_1 C_A}{1 + k_2 \tau}$가 된다.
3. 이를 C_A에 대입하면 $C_R = \frac{\tau k_1 C_{A0}}{(1 + k_1 \tau)(1 + k_2 \tau)}$이다.
4. 상수 $k_1 C_{A0}$를 제외하고 $f(\tau) = \frac{\tau}{(1 + k_1 \tau)(1 + k_2 \tau)}$를 최대로 두면 된다.
5. 미분하면
$\frac{df}{d\tau} = 0 \Rightarrow (1 + k_1 \tau)(1 + k_2 \tau) - \tau\{k_1(1 + k_2 \tau) + k_2(1 + k_1 \tau)\} = 0$
6. 정리하면 $1 - k_1 k_2 \tau^2 = 0$이므로 $\tau = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$이다.

NoteBase

선지 판단

1번: O. CSTR에서 $C_R = \frac{\tau k_1 C_{A0}}{(1+k_1\tau)(1+k_2\tau)}$를 최대화하면 $1 - k_1 k_2 \tau^2 = 0$이 되어 $\tau = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$가 나온다.
2번: X. $\sqrt{k_1 k_2}$는 시간의 역수 차원을 가지므로 공간시간 τ가 될 수 없다. 틀린 표현은 역수를 빠뜨린 점이고, 올바르게는 $\tau = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$이다.
3번: X. $\frac{\ln(k_2/k_1)}{k_2 - k_1}$는 직렬 1차 반응에서 배치반응기나 PFR의 중간생성물 농도가 최대가 되는 시간식으로 쓰이는 값이다. 이 문제는 CSTR이므로 적용 대상이 다르다. 올바르게는 CSTR에서 $\tau = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$이다.
4번: X. $\frac{k_2 - k_1}{\ln(k_2/k_1)}$는 3번 식의 역수 형태로, 역시 CSTR 최대 중간생성물 조건과 맞지 않는다. 또한 차원도 시간이 아니라 시간의 역수 형태가 된다. 올바르게는 $\tau = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 직렬반응에서 자주 보는 배치반응기 또는 PFR의 최대 중간생성물 시간식 $\frac{\ln(k_2/k_1)}{k_2 - k_1}$를 그대로 가져오는 데 있다. 반응기 종류가 CSTR로 바뀌면 농도식 자체가 달라지므로, 익숙한 식을 바로 대입하면 3번으로 오답 처리된다. 2번과 4번은 역수와 차원을 점검하지 않으면 걸리기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

연속반응 최대 중간생성물 문제는 먼저 반응기 종류를 확인하고, 그 반응기의 정상상태 또는 시간의존 농도식을 세운 뒤, 마지막에 최대조건을 미분으로 잡는 순서로 판단한다. 익숙한 배치식과 CSTR식을 섞지 않으면 된다.

암기 포인트

직렬 1차 반응의 최대 중간생성물은 CSTR이면 $\tau = 1/\sqrt{k_1 k_2}$, 배치반응기·PFR이면 $\tau = \ln(k_2/k_1)/(k_2 - k_1)$로 구분된다.

NoteBase

문 6. 등온 정압 회분식반응기에서 $A + 2B \rightarrow 3C + 4D$ 비가역 기상 기초반응을 진행한다. 초기 반응물은 $2\text{mol}L^{-1}$의 A, $4\text{mol}L^{-1}$의 B, $4\text{mol}L^{-1}$의 비활성 기체만으로 구성된다. A의 전환율이 25%일 때, C의 농도 $[\text{mol}L^{-1}]$는? (단, 모든 기체는 이상기체로 가정한다)

① 1.00

② 1.25

③ 1.50

④ 1.75

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 등온·정압 이상기체 반응에서 총몰수 변화와 비활성기체를 함께 고려하여 생성물 C의 농도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 반응식: $A + 2B \rightarrow 3C + 4D$
- 초기농도: $C_{A0} = 2$, $C_{B0} = 4$, 비활성기체 $= 4[mol/L]$
- A 전환율: $X_A = 0.25$

구해야 할 값:
- C의 농도 C_C

주의할 조건:
- 기상 반응이고 등온·정압이므로 반응이 진행되면 총몰수 증가에 따라 부피가 변한다.

사용할 공식

사용 공식은
$C_i = \frac{C_{A0}(\Theta_i + \frac{\nu_i}{-\nu_A}X_A)}{1 + \varepsilon X_A}$
이다.
여기서 $\Theta_C = 0$, $\nu_C = 3$, $\nu_A = -1$이고,
$\varepsilon = y_{A0}\Delta\nu$
이다.
이 공식을 쓰는 이유는 정압 이상기체 반응에서는 총몰수 변화가 곧 부피변화로 이어지므로, 생성물 농도를 구할 때 분모의 $1 + \varepsilon X_A$ 보정이 반드시 필요하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 초기 총농도는 $C_{T0} = 2 + 4 + 4 = 10[mol/L]$이다.
2. 초기 A의 몰분율은 $y_{A0} = 2/10 = 0.2$이다.
3. 반응 전후 총몰수 변화는 $\Delta\nu = (3 + 4) - (1 + 2) = 4$이므로 $\varepsilon = 0.2 \times 4 = 0.8$이다.
4. 따라서
$C_C = \frac{2 \times 3 \times 0.25}{1 + 0.8 \times 0.25} = \frac{1.5}{1.2} = 1.25[mol/L]$
이다.
5. 따라서 C의 농도는 $C_C = 1.25[mol/L]$이므로 정답은 ②이다.

선지별 해설

① X
- 1.00은 주어진 반응식과 등온·정압 이상기체 조건을 옳게 적용하면 도출되지 않는 값이다.
- 틀린 표현은 'C의 농도가 1.00[mol/L]이다'이다. 올바르게는 총몰수 증가에 따른 부피 팽창까지 반영한 1.25[mol/L]이다.

② O
- 표준 반응공학 계산에 따르면 $C_C = 1.25[mol/L]$이므로 ②는 옳다.
- 총몰수 증가에 따른 부피 팽창까지 반영한 값이라는 점이 핵심이다.

③ X
- 1.50은 생성된 C의 양 $3 \times 2 \times 0.25 = 1.50$만 계산하고, 정압 기상반응의 부피 팽창 보정을 빼먹으면 나오는 값이다.
- 틀린 표현은 '정압 기상반응인데도 농도 계산에서 부피 변화를 무시한 값'이다. 올바르게는 $1 + \varepsilon X_A = 1.2$로 나누어 1.25[$mol/L$]가 되어야 한다.

④ X
- 1.75는 주어진 조건과 화학양론으로는 도출되지 않는 값이다.
- 틀린 표현은 'C의 농도가 1.75[mol/L]까지 증가한다'이다. 올바르게는 생성된 C의 몰수와 부피 팽창을 함께 반영한 1.25[mol/L]이다.

오답 포인트

가장 흔한 실수는 생성물의 생성량만 계산하고 정압 기상반응의 부피 증가를 빼먹는 것이다. 이 실수를 하면 ③의 1.50이 바로 나온다. 등온·정압 기상반응에서는 총몰수 증가로 부피가 팽창하므로 농도 계산에서 $1 + \varepsilon X_A$ 보정을 반드시 반영해야 한다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

기상 반응에서 등온·정압 조건이 보이면 먼저 총몰수 변화 $\Delta\nu$를 계산하고, 다음에 $\varepsilon = y_{A0}\Delta\nu$를 구해 분모의 $1 + \varepsilon X$ 보정이 필요한지부터 판단한다. 그 뒤 생성량을 넣어 최종 농도를 계산하면 된다.

암기 포인트

등온·정압 기상반응 농도식의 핵심은 '생성량 계산 후 $1 + \varepsilon X$로 부피 팽창을 보정한다'는 점이다.

NoteBase

문 7. 부피 10L의 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 1차 반응을 진행한다. 유입되는 반응물 A의 초기농도는 $1\text{mol}\text{L}^{-1}$이고 온도가 400K일 때, 반응기가 400K에서 등온을 유지하면서 A의 전환율 90%를 얻기 위해 필요한 열 제거 속도[$\text{kcal}\text{min}^{-1}$]는? (단, 400K에서 반응열 ($\Delta H_R$)은 $-20\text{kcal}\text{mol}^{-1}$이고 반응속도상수는 0.05min^{-1}이며, 축일은 무시한다)

① 1

② 5

③ 10

④ 50

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 CSTR 설계식으로 반응물의 실제 반응속도를 구한 뒤, 등온 에너지수지로 열 제거 속도를 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 반응기 부피 $10L$, 유입농도 $C_{A0} = 1mol/L$, 전환율 $X = 0.9$, 속도상수 $k = 0.05min^{-1}$, 반응열 $\Delta H_R = -20kcal/mol$이다.
구해야 할 값은 반응기를 $400K$로 유지하기 위한 열 제거 속도이다.
유입과 반응기 온도가 모두 $400K$이므로 현열 변화는 없고 반응열만 제거하면 된다.

사용할 공식

CSTR 설계식은 $V = \frac{F_{A0}X}{-r_A}$ 이고, 액상 1차 반응이므로 $-r_A = kC_A$ 이다.
등온 에너지수지에서 필요한 열 제거 속도의 크기는 $\dot{Q}_{rem} = (-\Delta H_R) \times (F_{A0}X) = (-\Delta H_R) \times V(-r_A)$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유는 CSTR에서는 출구 조성이 반응기 내부 조성과 같으므로 $C_A = C_{A0}(1 - X)$로 반응기 내부 속도를 바로 계산할 수 있고, 등온 조건에서는 단위시간당 반응한 몰수에 반응열을 곱하면 제거해야 할 열량이 되기 때문이다.

계산 과정

1. 반응기 내부 농도는 $C_A = C_{A0}(1 - X) = 1 \times (1 - 0.9) = 0.1mol/L$ 이다.
2. 반응속도는 $-r_A = kC_A = 0.05 \times 0.1 = 0.005mol/(L \cdot min)$ 이다.
3. 단위시간당 반응한 A의 몰수는 $F_{A0}X = V(-r_A) = 10 \times 0.005 = 0.05mol/min$ 이다.
4. 필요한 열 제거 속도는 $\dot{Q}_{rem} = 20 \times 0.05 = 1kcal/min$ 이다.

NoteBase

선지별 해설

① O
계산 결과 필요한 열 제거 속도는 $1kcal/min$이므로 옳다.

② X
$5kcal/min$으로 보는 것은 실제 반응한 몰수 $0.05mol/min$를 5배 크게 본 값이다.
틀린 표현은 "필요한 열 제거 속도는 $5kcal/min$이다"이고, 올바르게는 "필요한 열 제거 속도는 $1kcal/min$이다"이다.

③ X
$10kcal/min$은 반응기 내부 농도 $C_A = 0.1mol/L$ 대신 유입농도 $C_{A0} = 1mol/L$를 그대로 넣어 $-r_A = 0.05mol/(L \cdot min)$로 계산할 때 나오는 오답이다.
틀린 표현은 "필요한 열 제거 속도는 $10kcal/min$이다"이고, 올바르게는 "전환율 90%이므로 반응기 내부 농도는 $0.1mol/L$, 필요한 열 제거 속도는 $1kcal/min$이다"이다.

④ X
$50kcal/min$은 반응열 계산에서 실제 반응속도와 단위를 무시하고 과대평가한 값이다.
틀린 표현은 "필요한 열 제거 속도는 $50kcal/min$이다"이고, 올바르게는 "실제 반응한 A는 분당 $0.05mol$이므로 필요한 열 제거 속도는 $1kcal/min$이다"이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 CSTR에서 속도식을 유입농도에 바로 넣는 실수이다. CSTR은 반응기 내부와 출구의 농도가 같으므로 반드시 $C_A = C_{A0}(1 - X)$를 먼저 구해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

등온 CSTR 계산형 문항은 C_A 산정 → $-r_A = kC_A$ 계산 → $V = F_{A0}X/(-r_A)$ 또는 $F_{A0}X = V(-r_A)$ 적용 → 반응열 곱셈 순서로 판단하면 된다.

암기 포인트

CSTR 열수지는 내부농도로 속도를 구하고, 분당 반응몰수에 $-\Delta H_R$를 곱하면 된다.

NoteBase

문 8. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 초기농도 $1\text{mol}\text{L}^{-1}$의 순수한 A를 반응물로 다음 두 개의 비가역 액상 기초 반응을 경쟁적으로 진행한다. 반응기 내에서 생성물 U에 대한 D의 순간 선택도 ($S_{D/U}$)는 4이고, 반응기 출구에서 A의 농도는 $0.10\text{mol}\text{L}^{-1}$이다. 반응기 출구에서 D의 농도 [$\text{mol}\text{L}^{-1}$]는? (단, $S_{D/U}=\frac{r_D}{r_U}$, r_j는 j의 생성속도 [$\text{mol}\text{L}^{-1}\text{min}^{-1}$]이다)

◯ 반응 1: $2A \rightarrow D$
◯ 반응 2: $A \rightarrow U$

① 0.30
② 0.35
③ 0.40
④ 0.45

정답 3번

출제 포인트

경쟁반응이 일어나는 정상상태 CSTR에서 순간 선택도 $S_{D/U}=r_D/r_U$와 화학양론을 함께 써서 생성물 D의 출구 농도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 $C_{A0}=1 mol L^{-1}$, $C_A=0.10 mol L^{-1}$, $S_{D/U}=r_D/r_U=4$이다.
반응식은 반응 1이 $2A \rightarrow D$, 반응 2가 $A \rightarrow U$이다.
구해야 할 값은 출구의 C_D이다.
선택도는 D와 U의 생성속도비이며, 반응 1에서는 D 1몰 생성에 A가 2몰 소모된다는 점이 핵심이다.

사용할 공식

정상상태 CSTR에서 유입이 없는 생성물은 $C_D=\tau r_D$, $C_U=\tau r_U$이므로 $C_D/C_U=r_D/r_U=4$이다.
또한 A의 감소량은 두 반응의 화학양론을 반영하여 $C_{A0}-C_A=2C_D+C_U$로 쓸 수 있다.
이 식을 쓰는 이유는 반응 1이 $2A \rightarrow D$이어서 D 1몰당 A가 2몰씩 소모되기 때문이다.

계산 과정

1. $C_D/C_U=4$이므로 $C_D=4C_U$이다.
2. A의 감소량은 $1-0.10=0.90 mol L^{-1}$이다.
3. 화학양론식 $2C_D+C_U=0.90$에 $C_D=4C_U$를 대입하면 $2(4C_U)+C_U=9C_U=0.90$이다.
4. 따라서 $C_U=0.10 mol L^{-1}$, $C_D=4C_U=0.40 mol L^{-1}$이다.

NoteBase

선지별 해설

① X: $0.30 mol L^{-1}$는 선택도 4만 보고 A 감소량 0.90을 단순 배분하거나 $2A \rightarrow D$의 계수 2를 빠뜨릴 때 나오는 오답 접근이다. 틀린 부분은 $0.30 mol L^{-1}$이라는 수치이며, 올바르게는 $0.40 mol L^{-1}$이다.
② X: $0.35 mol L^{-1}$는 $C_D/C_U = 4$와 $2C_D + C_U = 0.90$을 동시에 만족하지 못한다. 틀린 부분은 $0.35 mol L^{-1}$이라는 수치이며, 올바르게는 $0.40 mol L^{-1}$이다.
③ O: $C_D = 4C_U$, $2C_D + C_U = 0.90$을 함께 풀면 $C_D = 0.40 mol L^{-1}$가 된다. 선택도와 화학양론을 모두 반영한 값이므로 옳다.
④ X: $0.45 mol L^{-1}$는 A 감소량 $0.90 mol L^{-1}$의 절반을 곧바로 D 농도로 보는 식의 오해에 가깝다. 실제로는 U도 함께 생성되므로 틀린 부분은 $0.45 mol L^{-1}$이라는 수치이고, 올바르게는 $0.40 mol L^{-1}$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 선택도 $r_D/r_U = 4$를 곧바로 A 소비 분율로 오해하는 데 있다. 반응 1은 D 1몰 생성에 A 2몰이 들어가므로, 반드시 $2C_D + C_U = 0.90$처럼 화학양론 계수를 함께 반영해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

경쟁반응 CSTR 문제는 먼저 선택도로 생성물 사이의 비를 세우고, 다음에 반응식 계수를 넣은 성분수지로 총 소모량을 연결하면 된다. 선택도 비와 A 소비 계수를 분리해서 보는 판단이 재출제 기준이다.

암기 포인트

CSTR 경쟁반응은 생성물비는 선택도로, 총 소모량은 화학양론으로 묶어서 푼다. 이 문항에서는 $C_D : C_U = 4 : 1$, $2C_D + C_U = 0.90$만 세우면 끝난다.

NoteBase

문 9. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 초기농도 $5\text{mol}\text{L}^{-1}$의 순수한 A를 반응물로 다음 세 개의 비가역 액상 반응을 경쟁적으로 진행한다. 반응물 A에 대한 생성물 D의 순간 수율(Y_D)을 최대로 유지하기 위한 반응물 A의 전환율[%]은? (단, $Y_D = \frac{r_D}{-r_A}$, r_j는 j의 생성속도$[\text{mol}\text{L}^{-1}\text{min}^{-1}]$, C_A는 A의 농도$[\text{mol}\text{L}^{-1}]$이다)

◯ 반응 1: $A \rightarrow U$, $r_U = C_A$
◯ 반응 2: $A \rightarrow D$, $r_D = C_A^2$
◯ 반응 3: $A \rightarrow T$, $r_T = C_A^3$

① 60
② 70
③ 80
④ 90

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 CSTR의 출구농도 C_A를 기준으로 경쟁 병렬반응의 순간 수율 Y_D를 식으로 만든 뒤, 이를 최대화하는 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 초기농도 $C_{A0} = 5mol/L$, 반응속도 $r_U = C_A$, $r_D = C_A^2$, $r_T = C_A^3$이다.
구해야 할 값은 생성물 D의 순간 수율 $Y_D = \frac{r_D}{-r_A}$가 최대가 될 때의 A 전환율이다.
CSTR이므로 반응기 내부 농도와 출구 농도가 같아서 전환율은 $X = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}}$로 바로 연결된다.

사용할 공식

$-r_A = r_U + r_D + r_T = C_A + C_A^2 + C_A^3$
$Y_D = \frac{r_D}{-r_A} = \frac{C_A^2}{C_A + C_A^2 + C_A^3} = \frac{C_A}{1 + C_A + C_A^2}$
$X = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}}$
이 공식을 쓰는 이유는 세 반응이 모두 A를 소모하는 병렬반응이므로 전체 A 소모속도는 각 생성속도의 합이 되고, CSTR에서는 그 농도 C_A가 곧 출구농도이기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 전체 A 소모속도를 정리하면 $-r_A = C_A + C_A^2 + C_A^3$이다.
2. 순간 수율을 C_A의 함수로 쓰면
$Y_D = \frac{C_A}{1 + C_A + C_A^2}$
이다.
3. 이를 미분하면
$\frac{dY_D}{dC_A} = \frac{(1 + C_A + C_A^2) - C_A(1 + 2C_A)}{(1 + C_A + C_A^2)^2} = \frac{1 - C_A^2}{(1 + C_A + C_A^2)^2}$
이므로 최대 조건은 $1 - C_A^2 = 0$, 즉 $C_A = 1mol/L$이다.
4. 따라서 최적 전환율은
$X = \frac{5 - 1}{5} = 0.8 = 80\%$
이다.

선지 판단

① X
60% 전환이면 $C_A = 5(1 - 0.6) = 2mol/L$이다. 이때의 순간 수율은 $Y_D = \frac{2}{1 + 2 + 4} = \frac{2}{7}$로 최대값이 아니다. 틀린 값 60% → 올바르게는 80%이다.

② X
70% 전환이면 $C_A = 1.5mol/L$이다. 이때의 순간 수율은 $Y_D = \frac{1.5}{1 + 1.5 + 2.25}$로 $C_A = 1$일 때보다 작다. 틀린 값 70% → 올바르게는 80%이다.

③ O
80% 전환이면 $C_A = 1mol/L$이고, $\frac{dY_D}{dC_A} = 0$을 만족하는 최대점이다. 따라서 D의 순간 수율을 최대로 유지하는 전환율은 80%이다.

④ X
90% 전환이면 $C_A = 0.5mol/L$이다. 3차 반응은 줄어들지만 원하는 반응 $r_D = C_A^2$도 함께 너무 작아져 순간 수율 최대점에서 벗어난다. 틀린 값 90% → 올바르게는 80%이다.

오답 포인트

반응차수가 큰 부반응을 줄이려면 전환율을 무조건 크게 잡아야 한다고 오해하기 쉽다. 이 문항은 $r_T = C_A^3$만 보고 C_A를 아주 낮게 잡으면 된다고 판단하는 실수를 노린다. 순간 수율은 분자 r_D와 분모 $-r_A$를 함께 봐야 하므로, 원하는 반응속도 r_D까지 지나치게 줄어드는 구간은 오히려 불리하다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

경쟁 병렬반응의 선택도·수율 최대화 문제는 먼저 Y 또는 S를 농도 C_A의 함수로 정리한 뒤, 그 함수를 미분해 최적 C_A를 찾고 마지막에 전환율로 바꿔 판단한다. CSTR에서는 반응기 농도와 출구농도가 같다는 점을 바로 연결하면 된다.

암기 포인트

병렬반응 수율 최적화는 반응차수만 보지 않고 Y=목표 생성속도전체 소모속도를 만든 뒤 최적 C_A를 찾는 문제이다.

NoteBase

문 10. 등온 관형 충전층반응기(PBR)에서 기상 반응을 진행한다. 이에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 고정층 PBR은 연속흐름반응기이다.

② 관의 길이가 일정할 때, 관의 직경이 증가할수록 반응 온도를 일정하게 유지하기 어려울 수 있다.

③ 관의 직경이 일정할 때, 관의 길이가 증가할수록 출구에서의 압력은 감소할 수 있다.

④ 에르군(Ergun) 식에 의하면, 공탑속도가 감소할수록 출구에서의 압력은 감소한다.

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 등온 관형 충전층반응기(PBR)의 연속흐름 특성, 열제거 특성, 압력강하 경향을 구별할 수 있는지를 묻는다.

핵심 개념

PBR은 고정된 촉매층을 유체가 연속적으로 통과하는 관형 반응기이다.
관 직경이 커지면 부피 대비 열교환 면적이 줄어 등온 유지가 더 어려워질 수 있다.
압력강하는 층 길이와 공탑속도가 클수록 커지며, 출구압력은 $P_{out} = P_{in} - \Delta P$ 관계로 정해진다.

선지별 해설

1번: O. 고정층 PBR은 촉매가 반응기 안에 고정되어 있고 반응물은 계속 흘러가는 연속흐름반응기이다.
2번: O. 관 길이가 같을 때 직경이 커지면 부피에 비해 외부로 열을 주고받는 면적 비가 작아져 반응 온도를 일정하게 유지하기가 더 어려워질 수 있다.
3번: O. 관 직경이 일정하면 충전층 길이가 길수록 압력강하가 커지므로 출구압력은 더 낮아질 수 있다.
4번: X. 틀린 표현은 "공탑속도가 감소할수록 출구에서의 압력은 감소한다"이다. 에르군식에서는 공탑속도가 작아질수록 압력강하 ΔP가 감소하므로, 같은 입구압력이라면 출구압력은 감소가 아니라 증가한다.

오답 포인트

4번은 압력강하와 출구압력을 같은 방향으로 착각하면 틀리기 쉽다. 공탑속도 감소는 압력강하 감소를 뜻하므로 출구압력은 반대로 높아진다.

다시 나오면 이렇게 판단

PBR 문제는 먼저 연속흐름 여부를 확인하고, 다음으로 열제거는 면적 대 부피 비로, 압력은 출구압력=입구압력-압력강하 관계로 판단하면 된다.

암기 포인트

PBR은 연속흐름, 큰 관은 등온 유지 불리, 긴 층과 빠른 유속은 압력강하 증가이다.

NoteBase

문 11. 촉매에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

① 불균일계 촉매 반응에는 2개 이상의 상(phase)이 수반된다.

② 촉매의 표면에서 일어나는 물리흡착은 발열반응이다.

③ 촉매는 선택도와 수율 모두에 영향을 미칠 수 있다.

④ 촉매는 반응속도와 열역학적 평형 모두에 영향을 미칠 수 있다.

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 촉매가 반응속도에는 영향을 주지만 열역학적 평형 자체는 바꾸지 않는다는 점과, 불균일계 촉매반응 및 흡착의 기본 성질을 구분하는 문제이다.

핵심 개념

불균일계 촉매반응은 서로 다른 2개 이상의 상이 함께 존재하는 촉매반응이다.
물리흡착은 분자 간 인력에 의한 비교적 약한 흡착으로 일반적으로 발열과정이다.
촉매는 활성화에너지를 낮추어 반응속도와 생성물 선택성에는 영향을 줄 수 있지만, 평형상수와 평형조성 같은 열역학적 평형값은 바꾸지 못한다.

선지별 해설

① O
불균일계 촉매반응은 보통 고체 촉매와 기체 또는 액체 반응물처럼 서로 다른 상이 함께 존재한다. 따라서 2개 이상의 상이 수반된다는 설명은 옳다.

② O
촉매 표면에서의 물리흡착은 반응물이 표면에 붙으면서 에너지를 방출하는 과정이므로 일반적으로 발열로 본다. 따라서 이 설명은 옳다.

③ O
촉매는 원하는 반응 경로를 더 빠르게 진행시키거나 부반응을 상대적으로 억제하여 선택도를 바꿀 수 있다. 그 결과 원하는 생성물의 수율에도 영향을 미칠 수 있으므로 옳다.

④ X
틀린 부분은 "열역학적 평형 모두에 영향을 미칠 수 있다"는 표현이다. 촉매는 정반응과 역반응의 활성화에너지를 함께 낮추어 평형 도달 속도만 바꿀 뿐, 평형상수나 평형조성 자체는 바꾸지 못한다. 올바르게는 "촉매는 반응속도에는 영향을 미치지만 열역학적 평형에는 영향을 미치지 않는다"이다.

NoteBase

오답 포인트

④는 반응속도에 영향을 준다는 사실을 평형 자체를 바꾼다는 말로 과장한 함정이다. 촉매가 빠르게 만든다는 점과 평형 위치를 이동시킨다는 점을 혼동하면 이 선지에 흔들리기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

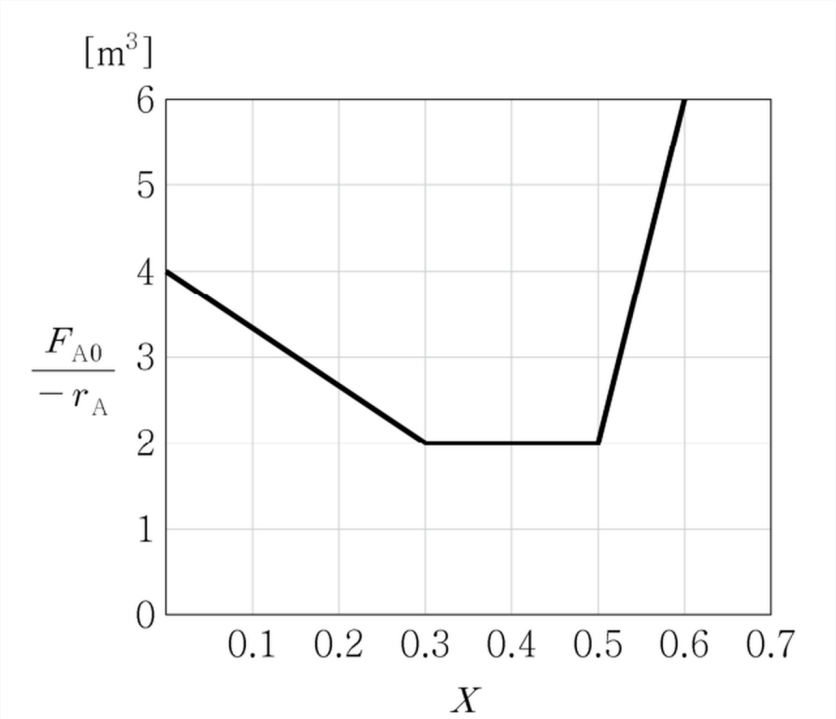
촉매 관련 선지를 보면 먼저 속도론 성질과 열역학 성질을 분리해서 본다. 활성화에너지, 반응속도, 선택도 변화는 촉매의 영향 범위에 들어가고, 평형상수와 평형조성 변화는 촉매의 영향 범위가 아니다.

암기 포인트

촉매는 빠르게는 만들지만 평형은 바꾸지 않는다.

NoteBase

문 12. 다음 그림은 특정 조건에서 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 반응에 대한 레벤스필(Levenspiel) 도표이다. 플러그흐름반응기(PFR)와 연속교반탱크반응기(CSTR) 중 선택한 2개의 반응기를 직렬로 연결하여 전체 반응기를 구성하고, 순수한 A를 반응물로 도표에서와 같은 반응을 진행한다. 첫 번째 반응기의 출구에서 A의 전환율 0.3, 두 번째 반응기의 출구에서 A의 최종전환율 0.6을 얻기 위해 필요한 두 반응기 부피의 합이 가장 작은 조합은? (단, 같은 종류의 반응기를 선택할 수 있으며, F_{A0}는 첫 번째 반응기에 유입되는 A의 몰유량 [mol s^{-1}], $-r_A$는 A의 소멸 속도 [mol m^{-3} s^{-1}], X는 A의 전환율이다)



① 첫 번째 반응기: CSTR, 두 번째 반응기: CSTR

② 첫 번째 반응기: CSTR, 두 번째 반응기: PFR

③ 첫 번째 반응기: PFR, 두 번째 반응기: CSTR

④ 첫 번째 반응기: PFR, 두 번째 반응기: PFR

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 레벤스필 도표에서 각 구간의 면적과 출구값 직사각형을 비교하여, $X = 0 \rightarrow 0.3$ 구간과 $X = 0.3 \rightarrow 0.6$ 구간에서 각각 PFR과 CSTR 중 어느 반응기가 더 작은 부피를 갖는지를 판단하는 문제이다.

NoteBase

선지별 해설

① X

첫 번째 반응기에서 CSTR는 $0.3 \times 2 = 0.6m^3$로 맞지만, 두 번째 반응기에서 CSTR는 출구값 $F_{A0}/(-r_A) = 6$을 써서 $0.3 \times 6 = 1.8m^3$가 된다. 이 구간의 최소 부피는 PFR의 면적 $0.8m^3$이므로 틀리다. 틀린 표현은 두 번째 반응기를 CSTR로 둔 점이고, 올바르게는 첫 번째는 CSTR, 두 번째는 PFR이다.

② O

첫 번째 반응기는 CSTR가 더 작다. $X = 0 \to 0.3$에서 PFR 면적은 $\frac{4+2}{2} \times 0.3 = 0.9m^3$, CSTR는 $0.3 \times 2 = 0.6m^3$이다. 두 번째 반응기는 PFR가 더 작다. $X = 0.3 \to 0.6$에서 PFR 면적은 $2 \times 0.2 + \frac{2+6}{2} \times 0.1 = 0.8m^3$, CSTR는 $0.3 \times 6 = 1.8m^3$이다.

③ X

두 번째 반응기에서 CSTR를 택한 순간 부피가 $1.8m^3$로 커진다. 첫 번째 반응기도 PFR이면 $0.9m^3$이므로 전체는 $2.7m^3$이다. 틀린 표현은 두 반응기 모두 최소 조합으로 보았다는 점이고, 올바르게는 첫 번째를 CSTR, 두 번째를 PFR로 두어야 한다.

④ X

두 번째 반응기를 PFR로 둔 판단은 맞지만, 첫 번째 반응기를 PFR로 두면 $0.9m^3$로 CSTR의 $0.6m^3$보다 크다. 전체도 $1.7m^3$로 ②의 $1.4m^3$보다 크다. 틀린 표현은 첫 번째 반응기를 PFR로 둔 점이고, 올바르게는 첫 번째는 CSTR이다.

오답 포인트

CSTR는 구간 면적이 아니라 출구점 높이의 직사각형이고, PFR는 곡선 아래 면적이라는 점을 섞어 버리면 오답이 된다. 특히 $X = 0.3 \to 0.6$ 구간은 끝점 $X = 0.6$에서 값이 6까지 커지므로 CSTR 부피가 급격히 커진다는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

레벤스필 도표에서는 각 구간마다 PFR는 면적, CSTR는 출구 높이의 직사각형으로 따로 계산한 뒤 더 작은 쪽을 고르면 된다. 감소 구간에서는 CSTR가 유리할 수 있고, 증가 구간에서는 PFR가 유리할 수 있다.

암기 포인트

레벤스필 도표에서 PFR는 곡선 아래 면적, CSTR는 출구점 직사각형이다. 내려가면 CSTR가, 올라가면 PFR가 유리한 경우가 많다.

NoteBase

문 13. 등온 플러그흐름반응기(PFR)에서 순수한 A를 반응물로 A → B 비가역 액상 2차 반응을 진행한다. 반응물 A의 초기농도가 $1\text{mol}\text{L}^{-1}$일 때, A의 전환율 90%를 얻기 위해 필요한 공간시간은 90분이다. 반응물 A의 초기농도만 $2\text{mol}\text{L}^{-1}$로 높였을 때, 동일한 전환율을 얻기 위해 필요한 공간시간[min]은? (단, 반응속도상수는 변함없다)

① 30

② 45

③ 60

④ 90

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 액상 등밀도 PFR에서 2차 반응의 공간시간이 초기농도에 어떻게 비례하는지를 이용해 같은 전환율에서 필요한 공간시간을 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 반응은 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 2차 반응이다.
- 반응물은 순수한 A이다.
- $C_{A0} = 1mol/L$일 때 $X = 0.9$를 얻는 공간시간은 90분이다.
- $C_{A0} = 2mol/L$로 높였을 때 같은 전환율 $X = 0.9$를 구한다.

구해야 할 값:
- 새로운 공간시간 τ

주의할 조건:
- 반응속도상수 k는 같고, 액상이라 밀도 변화가 없다고 본다.

사용할 공식

액상 등밀도 PFR의 2차 반응에서는 $-r_A = kC_A^2$, $C_A = C_{A0}(1 - X)$이므로
$\tau = \int_0^X \frac{dX}{kC_{A0}(1-X)^2} = \frac{1}{kC_{A0}} \frac{X}{1-X}$
가 된다.

이 공식을 쓰는 이유:
같은 반응, 같은 전환율 X, 같은 k에서는 $\frac{X}{1-X}$ 값이 같으므로 $\tau \propto \frac{1}{C_{A0}}$ 관계만 남기면 되기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. $X = 0.9$는 두 경우 모두 같고, k도 같다.
2. 따라서 공간시간은 초기농도에 반비례한다.
3. C_{A0}를 $1mol/L$에서 $2mol/L$로 2배 높이면 필요한 공간시간은 절반이 된다.
4. 따라서

$\tau_2 = 90 \times \frac{1}{2} = 45min$

이다.

선지별 해설

① X

- 30분은 기존 공간시간의 1/3 값이다. 초기농도를 2배로 높였으므로 공간시간은 절반까지만 줄어든다.
- 틀린 표현은 30분이라는 수치이다. 올바르게는 45분이다.

② O

- 계산 결과가 $45min$이므로 정답이다. 같은 전환율의 액상 2차 PFR에서는 $\tau \propto 1/C_{A0}$가 성립한다.

③ X

- 60분은 공간시간이 농도 증가에 비례해 줄어든 관계를 잘못 적용한 값이다. 90분에서 절반이 되어야 하므로 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 60분이라는 수치이다. 올바르게는 45분이다.

④ X

- 90분은 초기농도 변화가 없다고 본 값이다. 그러나 2차 반응에서는 초기농도를 높이면 반응속도가 커져 같은 전환율에 필요한 공간시간이 감소한다.
- 틀린 표현은 90분이라는 수치이다. 올바르게는 45분이다.

오답 포인트

2차 반응식 자체를 길게 적지 않아도 같은 전환율에서는 τ가 $1/C_{A0}$에 반비례한다는 점을 놓치면 90분을 그대로 고르거나 절반보다 더 많이 줄인 값을 고르기 쉽다. 특히 초기농도를 2배로 하면 속도는 순간적으로 C_A^2에 따라 커지지만, 최종적으로 필요한 공간시간은 이 문제의 PFR 적분식에서 절반으로 정리된다는 점이 함정이다.

다시 나오면 이렇게 판단

액상 등밀도 PFR 계산형에서 같은 전환율을 비교하면 먼저 τ 식에 들어가는 X, k, C_{A0} 중 무엇이 바뀌는지 본다. 이 문제처럼 X와 k가 같으면 C_{A0}에 대한 비례관계만 정리해 빠르게 판단할 수 있다.

NoteBase

암기 포인트

액상 등밀도 PFR 2차 반응에서 같은 전환율이면 $\tau \propto 1/C_{A0}$이다.

NoteBase

문 14. 동일 부피의 등온 연속교반탱크반응기(CSTR) 3개를 직렬로 연결하여 전체 반응기를 구성한다. 구성된 반응기에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 1차 반응을 진행하며, 공급되는 반응물의 부피유량은 $2Lmin^{-1}$이다. 마지막 반응기 출구에서 A의 농도가 첫 번째 반응기에 유입되는 A의 초기농도의 $\frac{1}{8}$이 되는 데 필요한 각 반응기의 부피 [L]는? (단, 반응속도상수는 $0.5min^{-1}$로 모든 반응기에서 동일하다)

① 2

② 4

③ 6

④ 8

정답 2번

출제 포인트

동일 부피의 CSTR 3기를 직렬로 연결한 1차 반응에서 최종 농도비가 $(1+k\tau)^{-3}$가 됨을 이용해 각 반응기의 체류시간과 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 반응기 수: 3기
- 각 반응기 부피: 동일
- 유량: $q = 2Lmin^{-1}$
- 반응속도상수: $k = 0.5min^{-1}$
- 최종 농도비: $C_{A3}/C_{A0} = 1/8$

구해야 할 값:
- 각 반응기의 부피 V

주의할 조건:
- 액상 1차 반응이므로 각 CSTR에서 $C_{A,out}/C_{A,in} = 1/(1+k\tau)$를 쓴다.
- 직렬 3기이므로 이 농도비를 3번 곱한다.

사용할 공식

각 CSTR 하나에 대해

$$\frac{C_{A,out}}{C_{A,in}} = \frac{1}{1+k\tau}, \quad \tau = \frac{V}{q}$$

직렬 3기 전체에 대해

$$\frac{C_{A3}}{C_{A0}} = \left(\frac{1}{1+k\tau}\right)^3$$

이 공식을 쓰는 이유는 동일한 1차 CSTR이 직렬로 연결되면 각 반응기에서의 농도 감소비가 같은 형태로 연속해서 곱해지기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 최종 농도비 조건을 대입한다.

$\left(\frac{1}{1+k\tau}\right)^3 = \frac{1}{8}$

2. 양변에 역수를 취하면

$(1+k\tau)^3 = 8$

따라서

$1+k\tau = 2$

3. $k = 0.5min^{-1}$를 대입하면

$1 + 0.5\tau = 2 \Rightarrow 0.5\tau = 1 \Rightarrow \tau = 2min$

4. $\tau = V/q$이므로

$V = q\tau = (2Lmin^{-1})(2min) = 4L$

따라서 각 반응기의 부피는 $4L$이다.

선지별 해설

① X: $V = 2L$이면 $\tau = V/q = 1min$이고, 이때 최종 농도비는 $(1 + 0.5 \times 1)^{-3} = 1/3.375$이다. 요구 조건인 1/8에 맞지 않는다. 올바르게는 각 반응기 부피가 $4L$이다.

② O: $V = 4L$이면 $\tau = 2min$이고, 최종 농도비는 $(1 + 0.5 \times 2)^{-3} = 2^{-3} = 1/8$이 된다. 문제 조건과 정확히 일치한다.

③ X: $V = 6L$이면 $\tau = 3min$이고, 최종 농도비는 $(1 + 0.5 \times 3)^{-3} = 2.5^{-3} = 1/15.625$이다. 반응이 너무 많이 진행된 값이다. 올바르게는 각 반응기 부피가 $4L$이어야 한다.

④ X: $V = 8L$이면 $\tau = 4min$이고, 최종 농도비는 $(1 + 0.5 \times 4)^{-3} = 3^{-3} = 1/27$이다. 역시 1/8보다 훨씬 작아 과도한 반응이 일어난다. 올바르게는 각 반응기 부피가 $4L$이다.

오답 포인트

직렬 CSTR 문제에서 전체 농도비 1/8을 반응기 하나의 농도비로 착각하면 오답이 나온다. 또한 3기 직렬을 하나의 단일 CSTR처럼 보고 $1/(1 + 3k\tau)$ 형태로 처리해도 틀린다. 이 문제의 핵심은 반응기 하나의 감소비를 먼저 세우고 그것을 3번 곱하는 구조를 잡는 데 있다.

다시 나오면 이렇게 판단

동일한 1차 CSTR이 직렬로 주어지면 먼저 한 반응기의 식 $C_{out}/C_{in} = 1/(1 + k\tau)$를 쓴다. 그다음 직렬 개수만큼 농도비를 곱해 전체 식을 만든 뒤, 마지막에 $\tau = V/q$를 대입해 부피를 구하면 된다.

암기 포인트

동일한 1차 CSTR n기 직렬이면 전체 농도비는 $C_{An}/C_{A0} = (1 + k\tau)^{-n}$이다.

NoteBase

문 15. 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 1차 반응을 진행하여, 반응 12분 후 A의 전환율 70%를 얻었다. 초기농도 $4\text{mol}\text{L}^{-1}$의 순수한 A를 $10\text{mol}\text{min}^{-1}$의 몰유량으로 등온 플러그흐름반응기(PFR)에 공급하여 같은 반응을 진행할 때, 동일한 전환율을 얻기 위해 필요한 PFR의 부피 [L]는? (단, 반응속도상수는 변함없다)

① 10

② 20

③ 30

④ 40

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 회분반응기에서 얻은 1차 반응의 전환율-시간 관계를 이용해 동일 전환율을 만드는 액상 PFR의 체류시간과 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 전환율 $X = 0.7$, 회분반응 시간 $t = 12min$, 공급 몰유량 $F_{A0} = 10mol/min$, 초기농도 $C_{A0} = 4mol/L$이다.
구해야 할 값: 동일 전환율 $X = 0.7$을 얻는 PFR 부피 V이다.
주의할 조건: 액상 1차 반응이고 반응속도상수는 변하지 않으므로, 회분반응기와 PFR의 전환율 식을 같은 k로 연결할 수 있다.

사용할 공식

1차 회분반응기 식은 $t = \frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-X}$ 이다.
1차 액상 PFR 식은 $\tau = \frac{V}{v_0} = \frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-X}$ 이다.
체적유량은 $v_0 = \frac{F_{A0}}{C_{A0}}$ 이다.
이 공식을 쓰는 이유는 액상 1차 반응에서 회분반응기 시간식과 PFR 체류시간식의 우변이 동일하므로, 같은 전환율에서는 $t = \tau$가 되기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 회분반응기에서 $X = 0.7$일 때
$12 = \frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-0.7} = \frac{1}{k}\ln\frac{1}{0.3}$
이다.
2. 같은 1차 액상 반응을 PFR에서 같은 전환율로 진행하면
$\tau = \frac{1}{k}\ln\frac{1}{1-0.7} = 12min$
이므로 필요한 체류시간은 $12min$이다.
3. 공급 체적유량은
$v_0 = \frac{F_{A0}}{C_{A0}} = \frac{10mol/min}{4mol/L} = 2.5L/min$
이다.
4. 따라서 PFR 부피는
$V = v_0\tau = (2.5L/min)(12min) = 30L$
이다.

선지별 해설

① X: $10L$은 계산 결과와 다르다. 같은 전환율에서 필요한 체류시간은 $12min$이고 체적유량은 $2.5L/min$이므로 필요한 부피는 $30L$이다. 틀린 값 $10L$은 $30L$로 고쳐야 한다.
② X: $20L$은 계산 결과와 다르다. 1차 액상 PFR에서는 회분반응기에서 $12min$에 얻은 전환율 70%를 그대로 체류시간 $12min$로 대응시키므로 $V = 30L$가 된다. 틀린 값 $20L$은 $30L$로 고쳐야 한다.
③ O: $30L$은 $v_0 = 2.5L/min$, $\tau = 12min$을 적용한 결과와 정확히 일치한다.
④ X: $40L$은 계산 결과보다 큰 값이다. 이 문제의 핵심은 같은 전환율에서 $t = \tau = 12min$이라는 점이므로 필요한 부피는 $30L$이다. 틀린 값 $40L$은 $30L$로 고쳐야 한다.

오답 포인트

문제의 $10mol/min$을 바로 체적유량으로 읽거나, 회분반응기 시간 $12min$과 PFR 체류시간이 같은 형태의 식으로 연결된다는 점을 놓치면 오답이 된다. 이 문항의 함정은 속도상수 k를 굳이 수치로 계산하지 않아도 같은 전환율이면 $t = \tau$라는 관계로 바로 넘어갈 수 있다는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

액상 등밀도 1차 반응에서 회분반응기와 PFR가 같은 전환율을 묻으면 먼저 $t = \tau$가 되는지 확인하고, 그다음 $v_0 = F_{A0}/C_{A0}$로 체적유량을 구해 $V = v_0\tau$로 마무리하면 된다.

암기 포인트

액상 1차 반응의 동일 전환율에서는 회분반응기 시간과 PFR 체류시간이 같다. 이후 $V = (F_{A0}/C_{A0})\tau$로 부피를 구한다.

NoteBase

문 16. 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 3차 반응을 진행한다. 반응물 A의 초기농도를 C_{A0}, 반감기를 $t_{1/2}$이라고 할 때, $\ln t_{1/2}$을 $\ln C_{A0}$에 대하여 그린 직선의 기울기는? (단, 반응속도상수는 모든 조건에서 동일하다)

① -3

② -2

③ 2

④ 3

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 등온 회분식반응기에서 액상 3차 반응의 적분속도식을 이용해 반감기 $t_{1/2}$와 초기농도 C_{A0}의 관계를 구하고, $\ln t_{1/2}$ 대 $\ln C_{A0}$ 직선의 기울기를 찾는 문제이다.

조건 정리

주어진 조건은 순수한 A가 반응물이고, 반응은 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 3차 반응이며, 반응속도상수 k는 일정하다는 점이다.
구해야 할 값은 $\ln t_{1/2}$를 $\ln C_{A0}$에 대해 그렸을 때 직선의 기울기이다.
반감기에서는 $C_A = C_{A0}/2$가 된다.

사용할 공식

3차 반응의 회분식 적분식은
$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^3, \qquad \frac{1}{C_A^2} - \frac{1}{C_{A0}^2} = 2kt$
이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 등온 회분식반응기와 액상 3차 반응이 직접 주어졌기 때문이다. 반감기는 이 적분식에 $C_A = C_{A0}/2$를 대입하면 바로 구할 수 있다.

NoteBase

계산 과정

1. 반감기 조건 $C_A = C_{A0}/2$를 적분식에 대입하면
$\frac{1}{(C_{A0}/2)^2} - \frac{1}{C_{A0}^2} = 2kt_{1/2}$
이 된다.

2. 이를 정리하면
$\frac{4}{C_{A0}^2} - \frac{1}{C_{A0}^2} = \frac{3}{C_{A0}^2} = 2kt_{1/2}$
이므로
$t_{1/2} = \frac{3}{2kC_{A0}^2}$
이다.

3. 양변에 자연로그를 취하면
$\ln t_{1/2} = \ln\left(\frac{3}{2k}\right) - 2\ln C_{A0}$
이므로 $\ln t_{1/2}$ 대 $\ln C_{A0}$ 직선의 기울기는 -2이다.

선지별 해설

① X: -3은 3차 반응이라는 차수만 보고 기울기도 그대로 -3이라고 오해한 값이다. 실제 반감기는 $t_{1/2} = 3/(2kC_{A0}^2)$이므로 C_{A0}의 지수는 -2이다. 올바르게는 기울기가 -2이다.

② O: $\ln t_{1/2} = \ln(3/2k) - 2\ln C_{A0}$이므로 $\ln C_{A0}$의 계수인 -2가 직선의 기울기이다.

③ X: 2는 기울기 크기만 보고 부호를 반대로 읽은 값이다. C_{A0}가 커질수록 $t_{1/2}$는 $1/C_{A0}^2$에 비례하여 감소하므로 양의 기울기가 될 수 없다. 올바르게는 -2이다.

④ X: 3은 부호도 반대이고 크기도 맞지 않는 값이다. 반감기식에서 3은 분자 상수로만 남고, 로그 직선의 기울기는 C_{A0} 앞의 지수인 -2로 결정된다. 올바르게는 -2이다.

오답 포인트

가장 흔한 함정은 반응 차수가 3차라는 사실만 보고 기울기도 -3으로 적는 실수이다. 이 문제의 기울기는 차수 자체가 아니라 반감기식에서 C_{A0}가 어떤 지수로 들어가는지로 정해진다. 또 로그 그래프의 기울기는 상수항이 아니라 $\ln C_{A0}$의 계수라는 점을 놓치면 3이나 2를 고르기 쉽다.

다시 나오면 이렇게 판단

회분식 반응기의 반감기 문제가 나오면 먼저 해당 차수의 적분속도식으로 $t_{1/2}$를 C_{A0}에 대한 식으로 만든다. 그다음 $t_{1/2} \propto C_{A0}^{m}$ 꼴에서 로그를 취해 기울기가 m이라는 점으로 바로 연결하면 된다.

암기 포인트

액상 3차 반응의 반감기는 $t_{1/2} \propto C_{A0}^{-2}$이므로 $\ln t_{1/2}$ 대 $\ln C_{A0}$의 기울기는 -2이다.

NoteBase

문 17. 플러그흐름반응기(PFR)에서 $A + B \rightarrow C$ 비가역 액상 반응을 진행한다. 반응물 A와 B는 동일한 몰유량 및 200 K의 일정한 온도로 반응기 입구에서 유입되며, 반응기는 단열로 운전된다. 반응열 (ΔH_R)이 $-2{,}000 \text{cal} \text{mol}^{-1}$로 일정하고 반응기 출구에서 A의 전환율이 80 %일 때, 반응기 출구에서의 온도[K]는? (단, A, B, C의 정압비열[$\text{cal} \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$]은 각각 5, 15, 20이며, 반응은 상변화를 수반하지 않는다)

① 280

② 310

③ 340

④ 370

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 단열 플러그흐름반응기에서 반응열과 출구 혼합물의 열용량을 이용해 출구온도를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값은 $T_0 = 200K$, $X_A = 0.8$, $\Delta H_R = -2000 cal mol^{-1}$이다.
입구 몰유량은 $F_{A0} = F_{B0} = F_0$로 같고, 출구 몰유량은 $F_A = 0.2F_0$, $F_B = 0.2F_0$, $F_C = 0.8F_0$이다.
정압비열은 $C_{p,A} = 5 cal mol^{-1} K^{-1}$, $C_{p,B} = 15 cal mol^{-1} K^{-1}$, $C_{p,C} = 20 cal mol^{-1} K^{-1}$이다.
단열 운전이므로 반응에서 방출된 열이 모두 출구 유체의 현열 증가로 전환된다.

사용할 공식

$F_{A0} X_A (-\Delta H_R) = \sum_i F_i C_{p,i} (T - T_0)$

이 식을 쓰는 이유는 반응기가 단열이고, 액상이며, 상변화가 없고, 반응열과 비열이 일정하다고 주어졌기 때문이다.

계산 과정

1. A의 반응량은 $F_{A0} X_A = 0.8F_0$이므로 방출열은 $0.8F_0 \times 2000 = 1600F_0 cal$이다.
2. 출구 혼합물의 열용량 유량은 $0.2F_0 \times 5 + 0.2F_0 \times 15 + 0.8F_0 \times 20 = 20F_0 cal K^{-1}$이다.
3. 에너지수지를 적용하면 $1600F_0 = 20F_0 (T - 200)$이다.
4. 따라서 $T - 200 = 80$, $T = 280K$이다.

NoteBase

선지 판단

① O
계산 결과가 $280K$이므로 옳다.

② X
$310K$는 계산값과 일치하지 않는다. 틀린 표현은 "출구온도가 310K이다"이고, 올바르게는 "출구온도는 280K이다"이다.
이 오답은 출구 조성에 따른 혼합물 열용량을 잘못 합산할 때 나올 수 있다.

③ X
$340K$는 에너지수지 결과보다 과대하다. 틀린 표현은 "출구온도가 340K이다"이고, 올바르게는 "출구온도는 280K이다"이다.
이 오답은 반응열의 부호를 혼동하거나 방출열을 과대평가할 때 나올 수 있다.

④ X
$370K$ 역시 계산값과 맞지 않는다. 틀린 표현은 "출구온도가 370K이다"이고, 올바르게는 "출구온도는 280K이다"이다.
이 오답은 출구 혼합물 전체의 열용량 대신 일부 성분만 고려할 때 나올 수 있다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 단열 반응기라는 조건만 보고 반응열을 바로 온도상승에 연결하면서, 출구 조성으로 계산해야 하는 $\sum F_i C_{p,i}$를 빼먹는 데 있다. 특히 생성물 C가 $0.8F_0$만큼 존재하므로 C의 비열 기여를 반드시 포함해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

단열 반응기 온도 문제는 먼저 전환율로 출구 조성을 구하고, 그다음 방출열 $= F_{A0}X(-\Delta H_R)$과 출구 혼합물의 열용량 유량 $\sum F_i C_{p,i}$를 연결해 ΔT를 계산하면 된다.

암기 포인트

단열 반응기에서는 "반응열 = 출구 혼합물 현열 증가"이고, 열용량 합산은 입구가 아니라 출구 조성 기준이다.

NoteBase

문 18. 등온 반응기에서 다음 두 개의 균일계 비가역 반응을 경쟁적으로 진행한다. 일정한 온도에서 생성물 U에 대한 D의 순간 선택도($S_{D/U}$)를 증대하기 위한 전략으로 옳지 않은 것은? (단, $S_{D/U} = \frac{r_D}{r_U}$, r_j는 j의 생성 속도, C_j는 j의 농도이다)

◯ 반응 1: A+Bk_1D, $r_D = k_1 C_A C_B$
◯ 반응 2: A+Bk_2U, $r_U = k_2 C_A^2 C_B^2$

① 플러그흐름반응기(PFR)보다는 연속교반탱크반응기(CSTR)를 사용한다.

② 기상 반응이라면 높은 압력보다는 낮은 압력에서 반응기를 운전한다.

③ 반응에 참여하지 않는 물질로 희석한 원료를 사용한다.

④ B에 A를 천천히 유입시키는 반회분식반응기(semi-batch reactor)보다는 회분식반응기를 사용한다.

정답 4번

출제 포인트

이 문제는 경쟁 평행반응에서 순간 선택도 $S_{D/U}$의 농도 의존성을 보고 어떤 조작이 선택도를 키우는지 판단하는 문제이다.

핵심 개념

경쟁 평행반응에서는 원하는 생성물과 원하지 않는 생성물의 속도식 비를 먼저 정리한다.
이 문항에서는 $S_{D/U} = \frac{r_D}{r_U} = \frac{k_1 C_A C_B}{k_2 C_A^2 C_B^2} = \frac{k_1}{k_2 C_A C_B}$ 이다.
따라서 C_A와 C_B가 낮을수록 D의 선택도는 커진다. 원하는 반응의 총차수는 2차, 원하지 않는 반응의 총차수는 4차이므로 반응물 농도를 낮게 유지하는 조작이 유리하다.

NoteBase

선지별 해설

① O
CSTR는 반응기 전체가 출구 농도 수준으로 잘 혼합되어 있으므로 반응물 농도가 전반적으로 낮다. 이 문항처럼 원하지 않는 반응이 더 고차수이면 높은 농도에서 더 크게 불리해지므로 PFR보다 CSTR가 선택도 향상에 유리하다.

② O
기상 반응에서 일정 온도라면 압력을 낮출수록 각 성분의 농도도 함께 낮아진다. $S_{D/U}$가 $1/(C_A C_B)$에 비례하므로 고압보다 저압 운전이 D 선택도 증가에 유리하다.

③ O
불활성 물질로 원료를 희석하면 C_A와 C_B가 모두 감소한다. 그러면 고차수인 부반응 U의 속도가 더 크게 줄어들어 선택도가 증가한다.

④ X
틀린 부분은 "반회분식반응기보다는 회분식반응기를 사용한다"이다.
실제로는 B에 A를 천천히 주입하는 반회분식반응기가 회분식반응기보다 유리하다. A를 천천히 넣으면 C_A를 낮게 유지할 수 있어 $C_A C_B$가 작아지고, 그만큼 $S_{D/U}$가 커진다.

오답 포인트

④는 B가 반응기 안에 많이 남아 있으면 불리하다고만 생각하면 흔들리기 쉽다. 그러나 이 문항의 핵심은 $S_{D/U}$가 $C_A C_B$의 역수라는 점이므로, 회분식처럼 A와 B를 처음부터 함께 높게 두는 경우보다 한 성분이라도 낮게 유지하는 반회분식이 더 유리하다.

다시 나오면 이렇게 판단

경쟁 평행반응 문제는 먼저 선택도 $r_{desired}/r_{undesired}$를 나누어 농도 항이 분자에 남는지 분모에 남는지 본다. 원하지 않는 반응의 총차수가 더 크면 반응물 농도를 낮추는 조작, 즉 CSTR, 저압, 희석, 느린 주입 반회분식을 고른다.

암기 포인트

고차수 부반응이 문제이면 농도를 낮춘다. CSTR, 저압, 희석, 반회분식이 같은 방향의 해법이다.

NoteBase

문 19. 동일 부피의 연속교반탱크반응기(CSTR) 2개를 직렬로 연결하여 전체 반응기를 구성한다. 구성된 반응기에서 순수한 A를 반응물로 A → B 비가역 등온 액상 반응을 진행하며, 두 반응기의 운전조건을 다르게 하여 첫 번째 반응기와 두 번째 반응기에서의 반응속도를 동일하게 유지한다. 두 번째 반응기 출구에서 A의 최종전환율이 80 %일 때, 첫 번째 반응기 출구에서 A의 전환율[%]은?

① 20

② 30

③ 40

④ 60

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 동일 부피의 두 CSTR에서 각 반응기 출구 반응속도가 같을 때 CSTR 설계식으로 첫 번째 반응기의 전환율을 구하는 문제이다.

조건 정리

- 두 반응기는 직렬 연결된 동일 부피 CSTR이다.
- 반응은 $A \rightarrow B$ 비가역 등온 액상 반응이다.
- 두 반응기에서의 반응속도는 같으므로 $-r_{A1} = -r_{A2}$이다.
- 두 번째 반응기 출구의 최종 전환율은 80%이므로 $X_2 = 0.8$이다.
- 구해야 할 값은 첫 번째 반응기 출구 전환율 X_1이다.

사용할 공식

CSTR 설계식은 $V = \frac{F_{A0}(X_{out} - X_{in})}{-r_A}$ 이다.
첫 번째 반응기는 $X_{in} = 0$, $X_{out} = X_1$이고, 두 번째 반응기는 $X_{in} = X_1$, $X_{out} = X_2$이다. 각 반응기의 부피가 같고 반응속도도 같으므로 두 반응기에서 필요한 전환 증가분이 같아진다.

NoteBase

계산 과정

1. 첫 번째 반응기에 대해

$V_1 = \frac{F_{A0}X_1}{-r_{A1}}$

2. 두 번째 반응기에 대해

$V_2 = \frac{F_{A0}(X_2 - X_1)}{-r_{A2}}$

3. $V_1 = V_2$, $-r_{A1} = -r_{A2}$, $X_2 = 0.8$ 이므로

$\frac{F_{A0}X_1}{-r_A} = \frac{F_{A0}(0.8 - X_1)}{-r_A}$

4. 공통항을 약분하면

$X_1 = 0.8 - X_1$

5. 따라서

$2X_1 = 0.8, \quad X_1 = 0.4$

즉 첫 번째 반응기 출구 전환율은 40%이다.

선지별 해설

① X

- 계산 결과 $X_1 = 0.4$이므로 20%는 맞지 않는다. 틀린 표현은 '20%'이고, 올바르게는 '40%'이다.

② X

- 동일 부피와 동일 반응속도 조건에서는 각 CSTR의 전환 증가분이 같아야 하므로 30%는 설계식과 맞지 않는다. 틀린 표현은 '30%'이고, 올바르게는 '40%'이다.

③ O

- $X_1 = 0.4$이므로 첫 번째 반응기 출구 전환율은 40%이다. 최종 전환율 80%를 두 반응기가 같은 전환 증가분으로 나누어 가진 결과와도 일치한다.

④ X

- 60%라면 두 번째 반응기에서의 전환 증가분이 20%만 남게 된다. 그러나 두 반응기의 부피와 반응속도가 같으므로 전환 증가분은 같아야 한다. 틀린 표현은 '60%'이고, 올바르게는 '40%'이다.

오답 포인트

많이 틀리는 지점은 '순수한 A가 처음 들어가므로 첫 번째 반응기 전환율이 더 커야 한다'는 직관에 끌리는 경우이다. 이 문제는 이미 두 반응기에서의 반응속도를 같게 유지한다고 주어졌으므로, CSTR 설계식에서는 부피가 같을 때 전환 증가분도 같아진다.

NoteBase

다시 나오면 이렇게 판단

직렬 CSTR 문제에서 각 반응기의 부피가 같고 출구 반응속도도 같으면 먼저 각 반응기에 CSTR 설계식을 따로 쓴다. 그다음 $V_1 = V_2$, $-r_{A1} = -r_{A2}$를 대입해 각 반응기의 전환 증가분이 같은지 확인하면 된다.

암기 포인트

동일 부피 CSTR 두 기에서 반응속도까지 같으면 각 반응기의 전환 증가분도 같다.

NoteBase

문 20. 효소(E)와 기질(S)이 결합하여 중간체($E \cdot S$)를 형성하는 반응 메커니즘에 대한 해석을 위해, 중간체의 유사 정상상태 가정에 따른 미카엘리스-멘텐(Michaelis-Menten) 식을 이용한다. 이에 대한 설명으로 옳지 않은 것은? (단, K_M은 미카엘리스 상수, $V_{\max}$는 최대 반응속도, $-r_S$는 반응속도, $[S]$는 기질의 농도이다)

① K_M은 기질과 효소의 상호작용을 나타내는 척도이다.

② $[S] \ll K_M$일 때, 미카엘리스-멘텐 식은 $-r_S \approx \frac{V_{\max}[S]}{K_M}$로 근사된다.

③ $[S] = K_M$일 때, 반응속도는 최대가 된다.

④ $V_{\max}$는 전체 효소 농도에 영향을 받지만, K_M은 영향을 받지 않는다.

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 미카엘리스-멘텐 식 $-r_S = \frac{V_{\max}[S]}{K_M + [S]}$에서 K_M, $V_{\max}$, $[S]$의 물리적 의미와 농도 구간별 속도 거동을 묻는 문제이다.

핵심 개념

K_M는 반응속도가 $V_{\max}$의 절반이 되는 기질 농도이며, 효소와 기질의 결합 친화도와 속도상수를 함께 반영하는 상수이다.
$V_{\max}$는 효소가 기질로 포화될 때 도달하는 한계 반응속도이며 전체 효소 농도에 비례한다.
$[S] \ll K_M$이면 $-r_S$는 $[S]$에 비례하고, $[S] \gg K_M$이면 $-r_S$는 $V_{\max}$에 가까워진다.

NoteBase

선지별 해설

① O

K_M는 효소와 기질이 얼마나 잘 상호작용하는지를 나타내는 대표 척도로 쓸 수 있다. 일반적으로 K_M가 작을수록 적은 $[S]$에서 반최대 속도에 도달하므로 기질에 대한 친화성이 큰 편으로 해석한다.

② O

$[S] \ll K_M$이면 분모의 $K_M + [S]$에서 $[S]$를 무시할 수 있으므로 $-r_S \approx \frac{V_{\max}[S]}{K_M}$가 된다. 이 구간에서는 속도가 $[S]$에 비례하는 1차 거동을 보인다.

③ X

틀린 부분은 $[S] = K_M$일 때 반응속도가 최대가 된다는 표현이다. 실제로는 $[S] = K_M$를 대입하면 $-r_S = \frac{V_{\max}K_M}{K_M + K_M} = \frac{V_{\max}}{2}$가 되어 최대가 아니라 반최대 속도이다. 최대 속도는 $[S]$가 매우 커져 효소가 포화될 때 $V_{\max}$에 점근한다.

④ O

$V_{\max} = k_2[E]_T$로 나타낼 수 있으므로 전체 효소 농도 $[E]_T$가 커지면 $V_{\max}$도 커진다. 반면 $K_M = (k_{-1} + k_2)/k_1$는 속도상수 조합으로 정해지므로 같은 효소-기질계에서는 전체 효소 농도 변화에 직접 영향받지 않는다.

오답 포인트

③은 K_M를 최대속도 조건으로 착각하게 만드는 선지이다. K_M는 최대속도 농도가 아니라 반최대속도 농도라는 점을 혼동하면 오답이 된다.

다시 나오면 이렇게 판단

미카엘리스-멘텐 선지는 먼저 $-r_S = \frac{V_{\max}[S]}{K_M + [S]}$에 $[S] \ll K_M$, $[S] = K_M$, $[S] \gg K_M$를 각각 대입해 본다. 그러면 저농도에서는 1차, $[S] = K_M$에서는 $V_{\max}/2$, 고농도에서는 $V_{\max}$ 접근이라는 판단이 바로 정리된다.

암기 포인트

$[S] = K_M$이면 속도는 $V_{\max}/2$이고, 최대속도는 $[S] \gg K_M$의 효소 포화 상태에서 나타난다.

NoteBase

문 21. 부피 10 L의 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 기초 반응을 진행하여, A의 전환율 50 %를 얻었다. 이 반응기의 입구에 공급되는 반응물의 흐름을 반으로 나누어, 각각 부피 2.5 L와 7.5 L의 등온 CSTR에 반응물로 주입하여 같은 반응을 진행한다. 반응 후 두 반응기 출구에서의 흐름을 다시 하나로 합칠 때, 최종적으로 얻을 수 있는 A의 전환율은? (단, 반응속도상수는 모든 반응기에서 동일하다)

① $\frac{2}{15}$
② $\frac{4}{15}$
③ $\frac{7}{15}$
④ $\frac{8}{15}$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 1차 비가역 액상반응의 CSTR 설계식으로 각 병렬 반응기의 전환율을 구한 뒤, 합류 후 최종 전환율을 유량가중 평균으로 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 전체 CSTR 부피는 10L, 기존 전환율은 50%이다.
구해야 할 값: 부피 2.5L와 7.5L의 두 등온 CSTR에 반씩 나누어 주입한 뒤 다시 합쳤을 때의 최종 전환율이다.
주의할 조건: 액상 기초반응이므로 $A \rightarrow B$는 1차 반응으로 보고, 두 반응기 입구 유량은 각각 전체의 절반이다.

사용할 공식

1차 반응 CSTR의 설계식은 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$, $\tau = \frac{V}{v_0}$이다.
이 공식을 쓰는 이유: 등온 액상 기초반응 $A \rightarrow B$는 밀도 변화가 없는 1차 반응으로 다룰 수 있고, CSTR 전환율은 체류시간 τ로 바로 계산할 수 있기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 원래 10L CSTR에서 $X = 0.5$이므로
$0.5 = \frac{k\tau}{1+k\tau}$
따라서 $k\tau = 1$이다.
2. 원래 체류시간은 $\tau = \frac{V}{\nu_0} = \frac{10}{\nu_0}$이므로 $k \cdot \frac{10}{\nu_0} = 1$, 따라서 전체 유량은 $\nu_0 = 10k$이다.
3. 유량을 반으로 나누면 각 반응기 유량은 $\nu_0/2 = 5k$이다. 따라서
작은 반응기: $\tau_1 = \frac{2.5}{5k} = \frac{0.5}{k}$, $X_1 = \frac{k\tau_1}{1+k\tau_1} = \frac{0.5}{1.5} = \frac{1}{3}$
큰 반응기: $\tau_2 = \frac{7.5}{5k} = \frac{1.5}{k}$, $X_2 = \frac{k\tau_2}{1+k\tau_2} = \frac{1.5}{2.5} = \frac{3}{5}$
4. 두 출구 유량은 같으므로 최종 전환율은 유량가중 평균이다.
$X = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{\frac{1}{3}+\frac{3}{5}}{2} = \frac{\frac{5}{15}+\frac{9}{15}}{2} = \frac{14}{15} \cdot \frac{1}{2} = \frac{7}{15}$
따라서 최종 전환율은 $\frac{7}{15}$이다.

선지별 해설

① X
- 최종 전환율이 $\frac{2}{15}$라는 뜻인데, 병렬 두 CSTR의 출구를 다시 합친 전체 전환율은 유량가중 평균 $\frac{7}{15}$가 되어야 하므로 맞지 않는다.
- 틀린 표현은 "최종 전환율이 $\frac{2}{15}$이다"이고, 올바르게는 "최종 전환율이 $\frac{7}{15}$이다"이다.

② X
- $\frac{4}{15}$도 계산 결과와 다르다. 작은 반응기의 $\frac{1}{3}$과 큰 반응기의 $\frac{3}{5}$를 합류 후 평균하면 $\frac{7}{15}$가 된다.
- 틀린 표현은 "최종 전환율이 $\frac{4}{15}$이다"이고, 올바르게는 "최종 전환율이 $\frac{7}{15}$이다"이다.

③ O
- 작은 반응기 전환율은 $\frac{1}{3}$, 큰 반응기 전환율은 $\frac{3}{5}$이고, 두 유량이 같으므로 전체 전환율은 $\frac{1}{2}\left(\frac{1}{3}+\frac{3}{5}\right) = \frac{7}{15}$이다.
- 병렬 CSTR의 합류 후 전환율을 유량가중 평균으로 처리한 값이므로 옳다.

④ X
- $\frac{8}{15}$는 정답 $\frac{7}{15}$보다 크며, 주어진 조건으로 계산한 어느 단계에서도 나오지 않는다.
- 틀린 표현은 "최종 전환율이 $\frac{8}{15}$이다"이고, 올바르게는 "최종 전환율이 $\frac{7}{15}$이다"이다.

오답 포인트

원래 10L CSTR의 전환율 50%를 보고 전체 전환율도 비슷할 것이라고 직감으로 고르기 쉽다. 이 문항의 함정은 병렬로 나눈 뒤 각 반응기의 체류시간이 달라진다는 점과, 마지막 합류 전환율이 단순 합이 아니라 유량가중 평균이라는 점이다.

다시 나오면 이렇게 판단

병렬 CSTR 계산형 문제는 먼저 기존 반응기 자료로 $k\tau$ 또는 기준 유량을 구하고, 각 반응기의 τ와 전환율을 따로 계산한 뒤, 마지막에 출구 유량 비율로 평균한다.

NoteBase

암기 포인트

1차 CSTR은 $X = \frac{k\tau}{1+k\tau}$, 병렬 후 합류 전환율은 각 출구 전환율의 유량가중 평균이다.

NoteBase

문 22. 일정 부피의 등온 회분식반응기에서 초기농도 $10\text{mol}\text{L}^{-1}$의 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow 2B$ 비가역 기상 기초 반응을 진행하여, 반응 2시간 후 A의 전환율 90%를 얻었다. 초기농도가 동일한 순수한 A를 $10\text{mol}\text{h}^{-1}$의 몰유량으로 플러그흐름반응기(PFR)에 공급하여, 등온 및 정압 조건에서 같은 반응을 진행한다. A의 전환율 90%를 얻기 위해 필요한 PFR의 부피 $[L]$는? (단, $\ln 10 = 2$이며, 반응속도상수는 모든 조건에서 동일하다)

① 3.1

② 6.2

③ 31

④ 62

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 등온 회분식반응기에서 구한 1차 반응 속도상수를 이용하여, 기상 팽창이 있는 PFR의 설계식으로 필요한 부피를 계산하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값:
- 회분식반응기, 일정 부피, 순수한 A, $C_{A0} = 10mol/L$
- 반응식: $A \rightarrow 2B$
- 2시간 후 전환율 $X = 0.9$
- PFR 공급조건: 순수한 A, $F_{A0} = 10mol/h$

구해야 할 값:
- PFR에서 $X = 0.9$를 얻기 위한 부피 V

주의할 조건:
- 회분식반응기는 일정 부피이므로 $C_A = C_{A0}(1 - X)$를 쓴다.
- PFR은 기상, 등온, 정압이므로 반응 중 몰수 증가를 반영해 $C_A = C_{A0}\frac{1-X}{1+X}$를 써야 한다.

NoteBase

사용할 공식

1. 일정 부피 회분식반응기의 1차 반응식:

$kt = -\ln(1 - X)$

2. 기상 등온·정압 PFR 설계식:

$V = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$

3. 이 반응은 기초반응이므로 속도식은

$-r_A = kC_A$

이고, 순수한 A를 공급하는 $A \rightarrow 2B$ 반응에서는

$C_A = C_{A0}\frac{1-X}{1+X}$

이다.

이 공식을 쓰는 이유:

회분식반응기 데이터로 먼저 k를 구한 뒤, 같은 반응을 PFR에서 수행하므로 PFR 설계식에 같은 k와 기상 팽창에 따른 C_A 변화를 넣어야 하기 때문이다.

NoteBase

계산 과정

1. 회분식반응기에서 속도상수 k를 구한다.

$kt = -\ln(1-X) = -\ln(0.1) = \ln 10 = 2$

주어진 시간이 2시간이므로

$k = \frac{2}{2} = 1h^{-1}$

이다.

2. PFR에서의 농도와 속도식을 쓴다.

$A \rightarrow 2B$이므로 총 몰수 증가가 있고, 순수한 A 공급이므로

$\varepsilon = 1$

이다. 따라서

$C_A = 10\frac{1-X}{1+X}(mol/L)$

이고,

$-r_A = kC_A = 1 \cdot 10\frac{1-X}{1+X} = 10\frac{1-X}{1+X}(mol/L \cdot h)$

이다.

3. PFR 설계식에 대입한다.

$V = 10\int_0^{0.9} \frac{dX}{10(1-X)/(1+X)} = \int_0^{0.9} \frac{1+X}{1-X} dX$

$\frac{1+X}{1-X} = -1 + \frac{2}{1-X}$

이므로

$V = [-X - 2\ln(1-X)]_0^{0.9}$

$V = -0.9 - 2\ln(0.1) = -0.9 + 2\ln 10 = -0.9 + 4 = 3.1L$

이다.

NoteBase

선지별 해설

① O
- 계산 결과 필요한 PFR 부피는 $3.1L$이므로 옳다.

② X
- $6.2L$는 회분식반응기에서 $k=1h^{-1}$가 아니라 $k=0.5h^{-1}$로 잘못 계산해 전체 부피를 두 배로 키울 때 나오는 값이다.
- 틀린 표현은 최종 부피를 $6.2L$로 본 점이다. 올바르게는 필요한 부피가 $3.1L$이다.

③ X
- $31L$는 $F_{A0}=10mol/h$를 대입한 뒤, 속도식의 $C_{A0}=10mol/L$가 분모에서 상쇄되는 점을 놓쳐 부피를 10배 크게 잡을 때 나오는 값이다.
- 틀린 표현은 최종 부피를 $31L$로 본 점이다. 올바르게는 필요한 부피가 $3.1L$이다.

④ X
- $62L$는 k를 절반으로 잘못 구한 오류와, 10배 상쇄를 놓친 오류가 동시에 들어간 값이다.
- 틀린 표현은 최종 부피를 $62L$로 본 점이다. 올바르게는 필요한 부피가 $3.1L$이다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 회분식반응기와 PFR에서 같은 1차 반응이라도 농도식이 같지 않다는 점이다. 회분식 일정 부피에서는 $C_A=C_{A0}(1-X)$를 쓰지만, 기상 등온·정압 PFR에서는 몰수 증가 때문에 $C_A=C_{A0}\frac{1-X}{1+X}$가 된다. 또한 회분식 데이터에서 $k=1h^{-1}$를 바로 뽑아야 하는데 시간을 2시간으로 나누지 않으면 오답으로 이어진다.

다시 나오면 이렇게 판단

반응기 비교 계산문제는 먼저 주어진 반응기에서 k를 구하고, 다음으로 목표 반응기의 유동조건에 맞는 $C_A(X)$를 정한 뒤, 마지막에 설계식 $V=F_{A0}\int dX/(-r_A)$에 넣어 적분하는 순서로 판단한다.

암기 포인트

일정부피 회분식 1차반응은 $kt=-\ln(1-X)$, 기상 등온·정압에서 순수한 $A\rightarrow 2B$는 $C_A=C_{A0}\frac{1-X}{1+X}$이다.

NoteBase

문 23. 온도 T_0에서의 반응속도상수 k_0와 활성화 에너지 E_a를 알고 있을 때, 아레니우스(Arrhenius) 식을 적용하여 임의의 다른 온도 T에서의 반응속도상수를 나타낸 것으로 옳은 것은? (단, R은 기체상수이다)

① $k_0 \exp\left[-\frac{R}{E_a}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]$
② $k_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]$
③ $k_0 \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]$
④ $k_0 \exp\left[\frac{R}{E_a}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]$

정답 3번

출제 포인트

이 문제는 아레니우스 식을 두 온도 T_0, T에 각각 적용한 뒤 비율식으로 정리하여 다른 온도에서의 반응속도상수 k를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 온도 T_0에서의 반응속도상수 k_0, 활성화에너지 E_a, 기체상수 R
구해야 할 값: 임의의 다른 온도 T에서의 반응속도상수 k
주의할 조건: 아레니우스 식의 지수부는 $\frac{E_a}{R}$와 온도의 역수 차로 정리되며, 부호와 분자·분모를 바꾸지 않아야 한다.

사용할 공식

아레니우스 식은 $k = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$이다.
온도 T_0에서는 $k_0 = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT_0}\right)$이다.
따라서 두 식을 나누면 $\frac{k}{k_0} = \exp\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right] = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]$이다.
이 공식을 쓰는 이유는 문제에서 기준 온도 T_0에서의 속도상수 k_0와 활성화에너지 E_a를 이미 주었으므로, 전지수인자 A를 직접 구하지 않고도 비율식으로 k를 바로 표현할 수 있기 때문이다.

계산 과정

1. $k = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$, $k_0 = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT_0}\right)$를 쓴다.
2. 두 식을 나누어 $\frac{k}{k_0} = \exp\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right]$를 얻는다.
3. 괄호 안 순서를 바꾸면 부호가 바뀌므로 $k = k_0\exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]$가 된다.

NoteBase

선지별 해설

① X: 지수부 계수가 $-\frac{R}{E_a}$로 되어 있어 분자와 분모가 뒤바뀌었다. 올바르게는 $\frac{E_a}{R}$가 들어가야 하므로 $k_0 \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]$가 맞다.
② X: $\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)$ 앞 부호가 음수라서 지수부 부호가 반대로 되었다. 올바르게는 $+\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)$이다. 이 식은 역수 차의 순서를 바꾼 뒤 부호를 함께 바꾸지 않은 실수에서 나온다.
③ O: $k = k_0 \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]$로 아레니우스 식을 정확히 정리한 형태이다.
④ X: 계수가 $\frac{R}{E_a}$로 되어 있어 $\frac{E_a}{R}$를 거꾸로 쓴 식이다. 올바르게는 $\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)$가 지수부에 들어가야 한다.

오답 포인트

이 문항의 함정은 두 가지이다. 하나는 $\frac{E_a}{R}$를 $\frac{R}{E_a}$로 뒤집는 비율 혼동이고, 다른 하나는 $\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)$를 $\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)$로 바꾸면서 부호를 같이 바꾸지 않는 실수이다.

다시 나오면 이렇게 판단

기준 온도에서의 속도상수 k_0가 주어지면 아레니우스 식을 두 온도에 대해 각각 쓴 뒤 두 식을 나누어 A를 소거한다. 그다음 역수 차의 순서를 바꾸면 지수부 부호도 함께 바뀌는지만 확인하면 된다.

암기 포인트

아레니우스 온도변환식은 $k = k_0 \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]$ 꼴이며, $\frac{E_a}{R}$와 부호를 함께 본다.

NoteBase

문 24. 등온 연속교반탱크반응기(CSTR)에서 초기농도 $10\text{mol}\text{L}^{-1}$의 순수한 A를 반응물로 $A \rightarrow B$ 비가역 액상 1차 반응을 진행한다. A의 전환율이 70 %일 때, 반응기 출구에서 B를 $63\text{mol}\text{min}^{-1}$의 몰유량으로 생산하기 위해 필요한 반응기의 부피[L]는? (단, 반응속도상수는 0.3min^{-1}이다)

① 35

② 70

③ 350

④ 700

정답 2번

출제 포인트

이 문제는 CSTR 설계식과 전환율 정의를 이용해 필요한 반응기 부피를 구하는 문제이다.

조건 정리

주어진 값: 초기농도 $C_{A0} = 10 mol/L$, 전환율 $X = 0.7$, 반응속도상수 $k = 0.3 min^{-1}$, B 생성량 $F_B = 63 mol/min$이다.
구해야 할 값: 반응기 부피 V이다.
주의할 조건: 액상 1차 반응의 CSTR에서는 출구 농도로 반응속도를 계산한다.

사용할 공식

$F_B = F_{A0}X$, $-r_A = kC_A$, $C_A = C_{A0}(1 - X)$, $V = F_{A0}X/(-r_A)$이다.
이 공식을 쓰는 이유: CSTR는 반응기 전체 조성이 출구 조성과 같다고 보므로 출구 농도로 속도를 계산하고, B 생성 몰유량으로부터 유입 A 몰유량을 먼저 역산해야 하기 때문이다.

계산 과정

1. $F_B = F_{A0}X$이므로 $F_{A0} = 63/0.7 = 90 mol/min$이다.
2. 출구의 A 농도는 $C_A = 10(1 - 0.7) = 3 mol/L$이다.
3. 출구 반응속도는 $-r_A = kC_A = 0.3 \times 3 = 0.9 mol/(L \cdot min)$이다.
4. 따라서 $V = F_{A0}X/(-r_A) = 90 \times 0.7/0.9 = 70 L$이다.

NoteBase

선지 판단

1번 X: 계산 결과는 70 L이므로 35는 틀리다. '35'라는 값이 틀린 표현이며, 올바르게는 70 L이다. 이런 값은 B 생성량 63 mol/min을 유입 A 몰유량처럼 바로 쓰거나 전환율 처리를 잘못했을 때 나온다.
2번 O: 계산 결과가 70 L이므로 맞는 선택지이다.
3번 X: 계산 결과는 70 L이므로 350은 틀리다. '350'이라는 값이 틀린 표현이며, 올바르게는 70 L이다. 이런 값은 출구 속도나 농도 계산을 건너뛰고 몰유량만으로 부피를 과대평가할 때 나오기 쉽다.
4번 X: 계산 결과는 70 L이므로 700은 틀리다. '700'이라는 값이 틀린 표현이며, 올바르게는 70 L이다. 이런 값은 $-r_A$를 한 자리 작게 계산하거나 단위를 잘못 다룰 때 생긴다.

오답 포인트

CSTR는 PFR처럼 적분하지 않고 출구 농도에서의 속도를 바로 넣는다. 또한 B 생성 몰유량 63 mol/min은 곧바로 유입 A 몰유량이 아니라 $F_{A0}X$이므로 먼저 F_{A0}를 역산해야 한다.

다시 나오면 이렇게 판단

생성물 몰유량이 주어지면 먼저 전환율 관계식 $F_B = F_{A0}X$로 유입 몰유량을 구한다. 그다음 출구 농도 $C_A = C_{A0}(1 - X)$를 만든 뒤 CSTR 설계식 $V = F_{A0}X/(-r_A)$에 출구 속도를 넣어 계산한다.

암기 포인트

액상 1차 CSTR는 '전환율로 F_{A0} 역산 -> 출구농도 계산 -> $-r_A = kC_A$ -> $V = F_{A0}X/(-r_A)$' 순서로 정리된다.

NoteBase

문 25. 등온 회분식반응기에서 순수한 A를 반응물로 다음 세 개의 비가역 액상 기초 반응을 연속적으로 진행한다. 중간 생성물 B의 유사 정상상태를 가정했을 때, 반응시간에 따른 P의 농도를 나타낸 것으로 옳은 것은? (단, $2k_1 < k_3$, t는 반응시간, C_{A0}는 A의 초기농도이다)

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

① $\frac{k_1 C_{A0}}{k_3 - 2k_1}(e^{-2k_1 t} - e^{-k_3 t})$
② $\frac{k_1 C_{A0}}{k_3 - 2k_1}(e^{-2k_1 t} - e^{-2k_3 t})$
③ $\frac{k_3 C_{A0}}{k_3 - 2k_1}(e^{-2k_1 t} - e^{-k_3 t})$
④ $\frac{k_3 C_{A0}}{k_3 - 2k_1}(e^{-2k_1 t} - e^{-2k_3 t})$

정답 1번

출제 포인트

이 문제는 중간생성물 B의 유사정상상태를 적용해 A와 P의 속도식을 세우고, P의 농도식 $C_P(t)$를 구하는 문제이다.

조건 정리

- 반응 1: $A \rightarrow B + C$
- 반응 2: $A + B \rightarrow P$
- 반응 3: $P \rightarrow D$
- B는 유사정상상태이므로 $\frac{dC_B}{dt} = 0$이다.
- 초기조건은 $C_A(0) = C_{A0}$, $C_P(0) = 0$이다.

사용할 공식

$\frac{dC_B}{dt} = k_1 C_A - k_2 C_A C_B = 0$
$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A - k_2 C_A C_B$
$\frac{dC_P}{dt} = k_2 C_A C_B - k_3 C_P$
유사정상상태에서는 B의 생성속도와 소비속도가 같아져 $r_1 = r_2$가 된다. 따라서 B를 먼저 제거하면 A와 P만의 미분방정식으로 정리할 수 있다.

NoteBase

계산 과정

1. B의 유사정상상태에서

$k_1 C_A = k_2 C_A C_B$

이므로

$C_B = \frac{k_1}{k_2}$

이다.

2. 이를 A의 수지식에 대입하면

$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A - k_2 C_A\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = -2k_1 C_A$

이므로

$C_A = C_{A0} e^{-2k_1 t}$

이다.

3. P의 수지식은

$\frac{dC_P}{dt} = k_2 C_A\left(\frac{k_1}{k_2}\right) - k_3 C_P = k_1 C_A - k_3 C_P$

이므로

$\frac{dC_P}{dt} + k_3 C_P = k_1 C_{A0} e^{-2k_1 t}$

이다.

4. $C_P(0) = 0$을 적용해 풀면

$C_P = \frac{k_1 C_{A0}}{k_3 - 2k_1}(e^{-2k_1 t} - e^{-k_3 t})$

이다.

NoteBase

선지별 해설

① O
- 유도된 P의 농도식과 정확히 일치한다. 생성항은 k_1C_A이고 소멸항은 1차반응 k_3C_P이므로 지수항은 e^{-2k_1t}와 e^{-k_3t}의 차로 나타난다.

② X
- e^{-2k_3t}가 잘못되었다. $P \rightarrow D$는 1차반응이므로 P의 고유감쇠항은 e^{-k_3t}이어야 한다.
- 틀린 표현은 e^{-2k_3t}이고, 올바르게는 e^{-k_3t}이다.

③ X
- 분자 계수가 k_3C_{A0}로 되어 있는데, P를 만드는 원천항은 반응 2의 속도 $k_2C_AC_B = r_1 = k_1C_A$이므로 계수는 k_1C_{A0}이어야 한다.
- 틀린 표현은 분자 k_3C_{A0}이고, 올바르게는 k_1C_{A0}이다.

④ X
- 분자 계수를 k_3C_{A0}로 둔 것도 틀리고, 감쇠항을 e^{-2k_3t}로 둔 것도 틀리다. 생성항 계수는 k_1, P의 소멸 지수는 k_3가 한 번만 들어간다.
- 틀린 표현은 k_3C_{A0}와 e^{-2k_3t}이고, 올바르게는 k_1C_{A0}와 e^{-k_3t}이다.

오답 포인트

유사정상상태를 적용하면 B만 없어지는 것이 아니라 $r_1 = r_2$가 되어 A의 소모속도가 $k_1C_A + r_2 = 2k_1C_A$로 정리된다는 점이 핵심이다. 또 P의 소멸반응은 1차이므로 감쇠항이 e^{-k_3t}인데, 이를 e^{-2k_3t}로 착각하거나 생성항 계수를 k_3로 바꾸는 실수가 자주 나온다.

다시 나오면 이렇게 판단

유사정상상태 중간생성물이 보이면 먼저 그 종에 대해 생성속도와 소비속도를 같게 둔다. 그다음 목표 생성물의 수지식에서 생성항의 계수는 어느 반응이 실제로 만들어 주는지, 소멸항의 지수는 몇 차반응인지 분리해서 본다.

암기 포인트

유사정상상태 B이면 $r_1 = r_2$가 되고, 따라서 A는 $2k_1$로 감소하며 P는 k_1C_A로 생성되고 k_3C_P로 소멸된다.

NoteBase