

9. 반응 속도론

9.1. 반응 속도의 정의

(1) 평균 반응 속도

$aA + bB \rightarrow cC$ 반응에서 시간 Δt 동안 농도 변화를 평균 반응 속도로 나타내면 다음과 같다.

$$v = -\frac{1}{a} \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = -\frac{1}{b} \frac{\Delta[B]}{\Delta t} = \frac{1}{c} \frac{\Delta[C]}{\Delta t}$$

(2) 순간 반응 속도

$aA + bB \rightarrow cC$ 반응에서 시간 t 에서 순간 반응 속도를 나타내면 다음과 같다.

$$v = -\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{c} \frac{d[C]}{dt}$$

9.2. 속도 법칙과 반응 차수

속도 법칙은 실험적으로 결정하고 $aA + bB \rightarrow cC$ 에서 $v = k[A]$ 이면 1차 반응, $v = k[A]^2$ 또는 $v = k[A][B]$ 와 같은 식이면 2차 반응이다.

9.3. 적분 속도 법칙

(1) 1차 반응의 적분 속도 법칙

$v = k[A] = -\frac{d[A]}{dt}$ 일 때 $\ln[A] = -kt + \ln[A]_0$ 또는 $[A] = [A]_0 e^{-kt}$ 이고, 반감기는 $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$ 이다.

(2) 2차 반응의 속도 법칙

$v = k[A]^2 = -\frac{d[A]}{dt}$ 에서 변수 분리해 적분하면 $\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt$ 이고 반감기는 $t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0}$ 이다.

9.4. 반응 속도와 촉매, 온도 영향

(1) 활성화 에너지(E_a)

반응을 일으키는 데 필요한 최소한의 에너지를 뜻하며, 활성화 에너지 이상의 충돌 에너지를 가진 분자라고 다 반응하는 것은 아니다. 촉매를 넣으면 활성화 에너지가 감소해 반응 속도가 빨라진다.

(2) 균일 촉매와 불균일 촉매

균일 촉매는 반응물과 상이 같은 촉매로 촉매 농도가 반응 속도와 비례하고, 불균일 촉매는 반응물과 상이 다른 촉매로 백금, 팔라듐 같은 금속을 많이 사용한다.

(3) 효소

생체 촉매로서 단백질로 이루어져 있으며 온도와 pH에 따라 영향을 받는다. 촉매와 효소는 반응 경로를 변화시켜 반응 속도를 빠르게 만든다. 반응 속도를 감소시키는 것은 inhibitor(억제제)라 한다.

(4) 온도 영향 : 온도가 높을수록 활성화 에너지 이상에 도달하는 충돌 분자 수가 많아 반응 속도가 빨라진다. 온도가 10°C 높아지면 반응 속도는 약 2배 정도 빨라진다.

9.5. 아레니우스 식

실험적으로 얻어진 결과를 바탕으로 제안된 식이다.

$k = A \exp(-E_a/RT)$, k : 속도 상수, A : 아레니우스 인자

양변에 자연로그를 취해 얻은 식 $\ln k = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln A$ 에서 $\ln k$ 를 $\frac{1}{T}$ 에 관하여 도시하면 활성화 에너지와 아레니우스 인자¹⁾를 구할 수 있다. 활성화 에너지는 그래프를 도시하여 얻은 기울기가 $-\frac{E_a}{R}$ 과 같다는 사실에서, 아레니우스 인자는 y 절편이 $\ln A$ 와 같다는 사실로부터 얻을 수 있다. 활성화 에너지가 클수록(반응 속도가 느릴수록) 그래프의 기울기는 가파르고, 촉매를 사용하면 기울기가 완만해진다.

9.6. 반응 메커니즘

(1) 단일 단계 반응

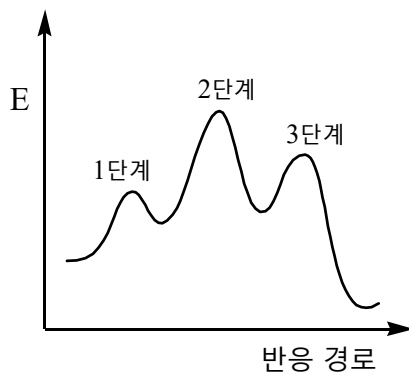
반응식에 나타난 화학종이 그대로 반응 속도에 반영되므로 실제 분자도를 알 수 있다.

(2) 분자도

반응 차수가 얼마인지를 알 수 있으며 일분자 반응, 이분자 반응, 삼분자 반응처럼 나타낸다.

(3) 반응 메커니즘

반응이 일어나는 단계를 모두 나타낸 것으로 각 단일 단계 반응 중 가장 느린 반응이 전체 반응 속도와 같고 이 단계를 속도 결정 단계라 한다. 속도 결정 단계는 에너지 도표에서 가장 높은 에너지 언덕을 넘어가는 단계를 나타내며, 전체 반응이 발열 반응이거나 흡열 반응인 것은 관계가 없다.



위와 같은 반응 메커니즘을 가지는 반응이라면 속도 결정 단계는 2단계, 전체 반응은 발열 반응이라는 것을 보여준다.

1) 정확하게는 아레니우스 인자에 자연로그를 취한 값($\ln A$)이다.

[연습 문제]

1. $aA \rightarrow bB$ 반응에 대한 반응 속도를 측정하여 이를 시간 대 $1/[A]$ 으로 도시하였더니 직선이 얻어졌다. 반응 차수를 결정하여라. [영남대]

- ① 0차 반응 ② 1차 반응 ③ 2차 반응
④ 3차 반응 ⑤ 알 수 없다.

2. 다음의 화학 반응에 관한 설명 중 올바른 것만을 보기에서 모두 고른 것은?

—<보 기>—

- ㄱ. 일반적으로 활성화 지배 반응은 활성화 에너지가 큰 경우이다.
 ㄴ. 불균일 촉매 반응에서 반응물의 상은 모두 같아야 한다.
 ㄷ. 반응 속도에 영향을 주는 것은 농도, 촉매, 온도 등이다.
 ㄹ. 충돌 에너지 합이 활성화 에너지보다 큰 반응물은 모두 생성물로 전환된다.

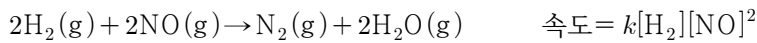
- ① ㄱ, ㄷ ② ㄴ, ㄷ ③ ㄱ, ㄴ, ㄷ
④ ㄱ, ㄷ, ㄹ ⑤ ㄴ, ㄷ, ㄹ

3. 기체 일산화질소와 산소를 반응시키면 빠르게 반응하여 이산화질소 기체를 생성한다. 서로 다른 농도를 혼합하여 다음의 실험 결과가 얻어졌다. 알맞은 속도 법칙은 무엇인가? [조선대]

실험	$[NO]$ (mol/L)	$[O_2]$ (mol/L)	초기 속도(mol/L)
1	1×10^{-4}	1×10^{-4}	2.0×10^{-6}
2	1×10^{-4}	3×10^{-4}	6.0×10^{-6}
3	2×10^{-4}	3×10^{-4}	2.4×10^{-5}

- ① 반응 속도 = $k[O_2][NO]$ ② 반응 속도 = $k[O_2]^2[NO]$
 ③ 반응 속도 = $k[O_2][NO]^2$ ④ 반응 속도 = $k[O_2]^3[NO]$
 ⑤ 반응 속도 = $k[O_2]^2[NO]^2$

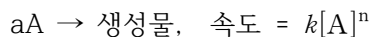
4. 아래 반응식과 속도 법칙을 근거로 제시된 메커니즘이 (가), (나), (다)이다. 이에 대한 설명으로 맞는 것은? [전남대]



(가) 메커니즘 $\text{H}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{N}(\text{느림})$ $\text{N} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}(\text{빠름})$ $\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{빠름})$	(나) 메커니즘 $\text{H}_2 + 2\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}(\text{느림})$ $\text{N}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}(\text{빠름})$
(다) 메커니즘 $2\text{NO} \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_2(\text{빠른 평형})$ $\text{N}_2\text{O}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}(\text{느림})$ $\text{N}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}(\text{빠름})$	

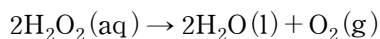
- ① 메커니즘 (가)와 (나)는 타당하다.
 ② 메커니즘 (나)와 (다)는 타당하다.
 ③ 메커니즘 (나)는 타당하지 않다.
 ④ 메커니즘 (다)는 타당하지 않다.

5. 화학반응식의 계수(a)와 속도법칙의 지수(n)와의 관계 중 옳은 것은? [덕성여대]



- ① 화학 반응식의 계수 (a)가 속도 법칙에서 지수 (n)이다.
 ② 화학 반응식의 계수 (a)가 2개 이상인 경우 그 합이 속도 법칙의 지수 (n)이다.
 ③ 반응 차수가 0인 반응은 존재하지 않는다.
 ④ 화학 반응식의 계수 (a)와 속도 법칙에서의 지수 (n)사이에는 직접적인 관계는 없고 실험적으로 결정된다.

6. 과산화수소는 다음 반응식과 같이 분해된다.



이 반응은 과산화수소 농도에 대해 1차 반응으로 나타난다. 이 반응의 반감기($t_{1/2}$)에 대하여 바르게 나타낸 것은? (단, k 는 속도 상수이고 $[\text{H}_2\text{O}_2]_0$ 는 처음 농도를 가리킨다.)

- ① $\frac{k}{\ln 2}$ ② $\frac{\ln 2}{k}$ ③ $\frac{k}{[\text{H}_2\text{O}_2]_0}$ ④ $\frac{[\text{H}_2\text{O}_2]_0}{\ln 2}$

7. 반응 속도는 여러 가지 조건에 따라 영향을 받을 수 있다. 보기는 반응 속도에 영향을 끼치는 몇 가지 조건을 나타낸 것이다. 반응 속도를 증가시킬 수 있는 조건을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

—<보 기>—

- ㄱ. 계에 촉매를 첨가한다.
 ㄴ. 생성물의 농도를 증가시킨다.
 ㄷ. 가열하여 계의 온도를 높인다.
 ㄹ. 활성화 에너지를 증가시키는 물질을 첨가한다.

- ① ㄱ, ㄴ ② ㄱ, ㄷ ③ ㄴ, ㄷ
 ④ ㄴ, ㄹ ⑤ ㄷ, ㄹ

8. $A \rightarrow B + C$ 형태의 어떤 반응에서 속도 상수는 $k = 1.00 \times 10^{-4} \text{M}^{-1}\text{s}^{-1}$ 이다. 이 반응의 처음 반응물 농도가 $[A] = 0.100\text{M}$ 일 때 이 반응에 대한 다음 설명 중 옳은 것은?

- ① 이 반응은 1차 반응이다.
 ② 반응물 농도($[A]$)와 시간을 도시하면 기울기가 속도 상수와 같다.
 ③ 반응물 농도가 0.100M 일 때와 0.050M 일 때 속도 상수 크기는 같다.
 ④ 이 반응의 반감기는 초기 농도와 관계없이 일정한 값을 가진다.

9. 염화나이트릴(NO_2Cl) 열분해는 다음 메커니즘으로 일어난다고 한다.

1단계 $\text{NO}_2\text{Cl}(\text{g}) \rightarrow \text{NO}_2(\text{g}) + \text{Cl}(\text{g})$ (느리다)

2단계 $\text{Cl}(\text{g}) + \text{NO}_2\text{Cl}(\text{g}) \rightarrow \text{NO}_2(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g})$ (빠르다)

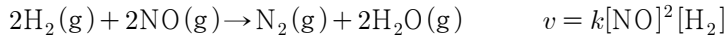
위 메커니즘으로 알 수 있는 것을 보기에서 모두 고른 것은?

—<보 기>—

- ㄱ. 전체 반응 속도는 $[\text{NO}_2\text{Cl}]$ 에 비례한다.
 ㄴ. 1단계는 1분자 반응, 2단계는 2분자 반응이다.
 ㄷ. 전체 반응식은 $2\text{NO}_2\text{Cl}(\text{g}) \rightarrow 2\text{NO}_2(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g})$ 이다.
 ㄹ. 염소 원자는 반응을 촉진하는 촉매로 작용한다.

- ① ㄱ, ㄴ ② ㄴ, ㄷ ③ ㄷ, ㄹ
 ④ ㄱ, ㄴ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ, ㄹ

10. 다음은 반응식과 속도식을 나타낸 것이다.



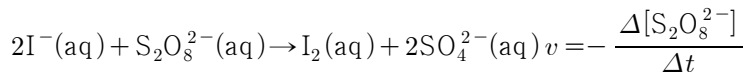
위 반응에 대하여 속도 상수 k 를 변화시킬 수 있는 것을 보기에서 모두 고른 것은?

<보 기>

ㄱ. 수소 기체나 NO 기체를 더 넣어 준다.
 ㄴ. 반응계의 온도를 변화시킨다.
 ㄷ. 적당한 촉매를 사용한다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ

11. 다음 반응을 25°C에서 조사한 결과가 다음과 같다.



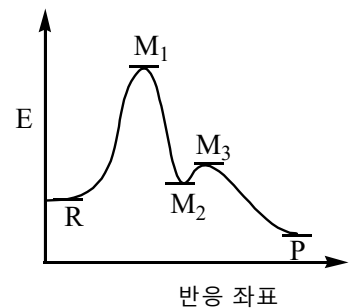
$[\text{I}^-]_0(\text{mol/L})$	$[\text{S}_2\text{O}_8^{2-}]_0(\text{mol/L})$	초기 속도($\text{mol/L} \cdot \text{s}$)
0.080	0.040	12.5×10^{-6}
0.040	0.040	6.25×10^{-6}
0.080	0.020	6.25×10^{-6}

이 반응의 속도식으로 타당한 것은?

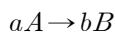
- ① $v = k[\text{I}^-][\text{S}_2\text{O}_8^{2-}]$ ② $v = k[\text{I}^-]^2[\text{S}_2\text{O}_8^{2-}]$ ③ $v = k[\text{S}_2\text{O}_8^{2-}]^2$
 ④ $v = k[\text{I}^-][\text{S}_2\text{O}_8^{2-}]^2$ ⑤ $v = k[\text{I}^-]^2$

12. 오른쪽 그림은 반응 $\text{R} \rightarrow \text{P}$ 진행에 대하여 에너지 변화를 나타낸 것이다. 다음 중 이에 대한 설명으로 옳은 것은?

- ① 반응은 $\text{M}_1 \sim \text{M}_3$ 를 지나는 3단계로 이루어진다.
 ② 이 반응의 속도 결정 단계는 두 번째 단계이다.
 ③ 반응이 진행되면 계는 에너지를 잃어 냉각된다.
 ④ 이 반응의 활성화 에너지는 반응물이 M_1 에 이르기 위해 필요한 에너지이다.



[13-15] 다음과 같은 일반식으로 일어나는 반응이 있다고 하자.



어떤 온도에서 초기 농도가 $[A]_0 = 2.00 \times 10^{-2} M$ 인 상태에서 시간에 따른 농도 변화를 측정해 시간에 대한 $\ln[A]$ 를 도기한 결과 직선을 얻었고 기울기는 $-2.97 \times 10^{-2} \text{min}^{-1}$ 으로 나타났다.

13. 이 반응은 몇 차 반응인가?

- ① 0차 ② 1차 ③ 2차 ④ 알 수 없다.

14. 이 반응에서 반응물 농도가 $1.00 \times 10^{-2} M$ 로 될 때까지 걸리는 시간은 얼마인가? (단, $\ln 2 = 0.693$, $\ln 10 = 2.30$, $\ln 2.97 = 1.09$ 이다.)

- ① 23.3분 ② 23.3초 ③ 1.78분 ④ 1.78초

15. 이 반응의 속도 상수 k 는 얼마인가?

- ① $5.94 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$ ② $5.94 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$
 ③ $2.97 \times 10^{-2} \text{min}^{-1}$ ④ $-2.97 \times 10^{-2} \text{min}^{-1}$

16. 아레니우스식은 실험적으로 얻어진 식으로 속도 상수(k)가 절대 온도(T) 사이의 관계를 나타낸 것으로 양변에 자연로그를 취해 나타낼 수도 있다.

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad \ln k = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln A$$

아레니우스식이 가지는 의미를 설명한 것으로 옳지 않은 것은?

- ① 온도가 높을수록 k 의 크기는 감소한다.
 ② 반응물의 배향에 따른 영향은 아레니우스 인자 A 에 포함된다.
 ③ 서로 다른 온도에서 측정한 결과를 $1/T$ 에 대해 도시하면 기울기로부터 E_a 를 구할 수 있다.
 ④ 반응에 촉매를 사용하면 $\ln k(y\text{-축})$ 와 $1/T(x\text{-축})$ 도시 그래프의 기울기가 완만해진다.

10. 화학 평형

10.1. 평형의 정의

(1) 가역 반응과 비가역 반응

가역 반응은 정반응과 역반응이 모두 일어나는 것이고, 비가역 반응은 정반응만 일어난다.

(2) 화학 평형의 정의

정반응 속도와 역반응 속도가 같을 때 평형에 이르렀다 하고 정반응과 역반응이 계속 일어나고 있는 동적 평형이다.

(3) 평형 상태와 정류 상태

평형 상태는 반응물과 생성물 사이에 정반응 속도와 역반응 속도가 같은 것을 가리키고, 정류 상태는 중간 생성물의 소멸 속도와 생성 속도가 같아 중간 생성물의 농도가 일정하게 유지되는 경우다.

10.2. 평형 상수

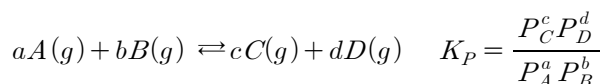
(1) 질량 작용 법칙

반응에 관여하는 물질의 농도를 반응 계수만큼 거듭제곱한 비로 나타내 평형 상수를 사용한다.



(2) 압력 평형 상수(K_p)

기체 반응의 경우 각 기체의 부분 압력이 몰 농도와 비례하므로 압력 평형 상수를 부분 압력으로 나타낼 수 있다. $P = \frac{nRT}{V} = MRT$ 이므로 $K_p = \frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} = (RT)^{(a+b)-(c+d)} K$ 관계가 성립한다.



(3) 불균일 평형에서 평형 상수

불균일 평형에서 순수한 고체나 순수한 액체는 농도가 상수이므로 평형 상수에 포함시켜 계산한다.

(4) 용매가 반응에 관여할 때 평형 상수

보통의 용액에서 용매가 반응에 관여해도 용매의 농도는 거의 일정하기 때문에 용매 농도 역시 평형 상수에 포함시켜 계산한다.

(5) 2가지 이상의 평형이 연속된 형태

반응 메커니즘이 2가지 이상의 평형이 연속된 형태에서는 전체 반응의 평형 상수는 단계별 평형 상수의 곱과 같다. 반응이 2개 단계로 평형을 이루며 진행되는 반응이라면 전체 평형 상수는 다음과 같다.

$$K = K_1 K_2, \quad (K_1 : 1\text{단계 평형 상수}, K_2 : 2\text{단계 평형 상수})$$

10.3. 반응 지수

(1) 평형 상수 계산

반응 계수를 고려하여 계산한다. $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{g})$ 반응에서 처음 반응물 농도를 1M라고 하면 $K = \frac{(2x)^2}{(1-x)(1-x)}$ 이다.

(2) 반응 진행 방향과 반응 지수(Q)

모든 반응은 평형을 향해 진행한다는 것을 염두에 두고 초기 농도를 이용해 계산한 반응 지수와 평형 상수를 비교해 반응 진행 방향을 예측한다.

$Q > K$: 정반응보다 역반응이 빠르게 진행되다가 평형에 이른다.

$Q = K$: 정반응 속도와 역반응 속도가 같아 우연히 평형 상태에 있는 경우다.

$Q < K$: 정반응이 역반응보다 빠르게 진행되다가 평형에 이른다.

10.4. 평형 이동

(1) 르 샤틀리에 원리

한 평형 상태에서 외부에서 가한 변화를 거스르는 방향으로 평형이 이동해 새 평형에 이른다.

(2) 농도, 압력 변화의 영향

외부에서 반응물을 첨가하면 반응물을 제거하는 방향으로, 생성물을 첨가하면 역반응쪽으로 평형이 이동한다. 반응 지수와 평형 상수를 비교해 판단한다. 기체 반응에서 용기에 압력을 가해 부피가 줄어들면 압력을 가하면 압력이 줄어드는 방향(분자 수가 줄어드는 방향)으로 평형이 이동한다.

(3) 온도 변화의 영향

발열 반응은 가열하면 평형 상수가 감소하므로 역반응쪽(열을 흡수하는 방향)으로 평형이 이동하고, 흡열 반응은 가열하면 정반응쪽(열을 흡수하는 쪽)으로 평형이 이동한다.

(4) 평형과 수득률

기체 반응에서 압력이 증가할 때 수득률이 증가하면 반응물 계수보다 생성물 계수가 작아 정반응 쪽으로 우세하게 진행되고, 계를 가열하여 수득률이 증가하면 정반응이 흡열 반응이다.

(5) 촉매와 수득률

촉매는 최종 수득률에 영향을 미치지 않고 반응 시간만 단축할 뿐이다.

10.5. 평형 상수의 열역학적 의미

(1) 기체 상 평형 반응과 자유 에너지

$G = G^\circ + nRT \ln P$ 에서 $\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K_p$ 이므로 평형 상태는 $\Delta G = 0$ 인 것을 이용해 나타낼 수 있다. $\ln K = -\frac{\Delta G^\circ}{RT} = -\frac{\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \frac{\Delta S^\circ}{R}$ 이다.

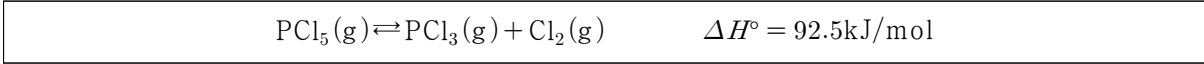
(2) 열역학적 의미

$\ln K$ 와 $1/T$ 를 도시하면 기울기로부터 반응의 ΔH° , y 절편에서 ΔS° 를 결정할 수 있다.

[연습 문제]

1. 다음과 같은 평형 반응을 생각해보자.

[전남대]



조건을 다음과 같이 변화시킬 때 평형은 어느 쪽으로 이동하는가?

(가) 온도를 올린다	(나) 염소 기체를 반응 혼합물에 첨가한다
(다) 압력을 증가시킨다	(라) 촉매를 첨가한다.

- ① (가) 왼쪽, (나) 오른쪽, (다) 변화없음, (라) 오른쪽
 ② (가) 왼쪽, (나) 왼쪽, (다) 오른쪽, (라) 변화없음
 ③ (가) 오른쪽, (나) 오른쪽, (다) 변화없음, (라) 왼쪽
 ④ (가) 오른쪽, (나) 왼쪽, (다) 왼쪽, (라) 변화없음

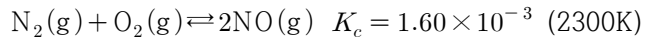
2. 다음 각 평형에 대한 평형 상수식을 바르게 나타내지 않은 것은?

- ① $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 3\text{CO}(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{Fe}(\text{l}) + 3\text{CO}_2(\text{g}) \quad K_c = \frac{[\text{Fe}]^2 [\text{CO}_2]^3}{[\text{CO}]^3}$
 ② $4\text{Fe}(\text{s}) + 3\text{O}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) \quad K_c = \frac{1}{[\text{O}_2]^3}$
 ③ $\text{BaSO}_4(\text{s}) \rightleftharpoons \text{BaO}(\text{s}) + \text{SO}_3(\text{g}) \quad K_p = P_{\text{SO}_3}$
 ④ $\text{BaSO}_4(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Ba}^{2+}(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) \quad K_{sp} = [\text{Ba}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$

3. 평형 상태와 정류 상태는 겉보기에 큰 차이가 없다. 평형 상태와 정류 상태에 대한 다음 설명 중 옳은 것은?

- ① 평형 상태는 정반응과 역반응이 정지되어 변화가 일어나지 않는 상태이다.
 ② 정류 상태는 정반응 속도와 역반응 상태가 같아 겉보기 변화가 없는 반응을 가리킨다.
 ③ 평형 상태는 정반응 속도와 역반응 속도가 같은 것이고 정류 상태는 중간체의 생성과 소멸 속도가 같아 겉보기 변화가 없는 것이다.
 ④ 평형 상태는 정반응 속도와 역반응 속도가 같아 겉보기 변화가 없는 것이고 정지된 반응이 아니지만, 정류 상태는 정반응 속도와 역반응 속도는 같지만 정지된 반응을 가리킨다.

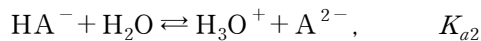
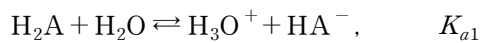
4. 일산화질소(NO)는 자동차 엔진에서 고온 반응에 의해 생성된다.



2300K에서 N_2 와 O_2 초기 농도가 모두 1.40M라면 평형에 이르렀을 때 $[\text{NO}]$ 는 얼마인가?

- ① 0.0375 ② 0.0275 ③ 0.0750 ④ 0.0550

5. 수용액에서 이양성자 산의 이온화는 단계별 이온화 상수를 이용해 설명할 수 있다.



전체 이온화 반응의 이온화 상수(K_a)를 K_{a1} 과 K_{a2} 를 이용해 바르게 나타낸 것은?

- ① $K_a = K_{a1} \times K_{a2}$ ② $K_a = K_{a1} + K_{a2}$
 ③ $K_a = K_{a1}/K_{a2}$ ④ $K_a = K_{a2}/K_{a1}$

6. $\text{CoCl}_4^{2-}(\text{aq}) + 6\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}(\text{aq}) + 4\text{Cl}^-(\text{aq})$ 반응에 대하여 다음과 같이 조작했을 때 CoCl_4^{2-} 농도가 감소하는 것은? (단, 정반응은 발열 반응이다.)

- ① HCl을 가한다. ② 용액을 가열한다.
 ③ $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ 를 가한다. ④ 용액을 물로 묽힌다.

7. 반응 지수(Q)를 이용하면 반응의 진행 방향을 예측할 수 있다. 평형 상수를 K 라 할 때 다음 설명 중 옳지 않은 것은?

- ① $Q > K$ 이면 역반응 속도가 정반응 속도보다 빠르게 진행된다.
 ② $Q = K$ 이면 우연히 정반응 속도와 역반응 속도가 같은 평형 상태이다.
 ③ $Q < K$ 일 때 반응물 농도가 증가하고 생성물 농도가 감소한다.
 ④ 초기 반응에서 정반응 속도가 역반응 속도보다 빠르면 반응은 정반응이 우세하다.

8. 다음 평형 반응 중에서 반응 용기 부피를 증가시켰을 때 평형이 오른쪽으로 이동하는 것을 모두 고른 것은?

- | | |
|--|--|
| (a) $\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3(\text{g})$ | (b) $\text{PCl}_5(\text{g}) \rightleftharpoons \text{PCl}_3(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g})$ |
| (c) $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{g})$ | (d) $\text{COCl}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g})$ |

- ① (a), (b) ② (a), (c) ③ (b), (d) ④ (c), (d)

9. 다음 자료는 $2\text{NO}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{N}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ 반응에 대한 정반응 속도 상수(k_f)와 역반응 속도 상수(k_r)를 나타낸 것이다.

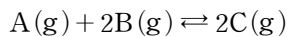
온도(K)	$k_f(\text{M}^{-1}\text{s}^{-1})$	$k_r(\text{M}^{-1}\text{s}^{-1})$
1400	0.29	1.1×10^{-6}
1500	1.3	1.4×10^{-5}

위 자료에서 알 수 있는 것을 보기에서 모두 고른 것은?

- <보 기>
- | |
|---|
| <p>ㄱ. 정반응은 발열 반응이다.</p> <p>ㄴ. 평형 상수는 $K_c = \frac{k_f}{k_r}$로 나타낼 수 있다.</p> <p>ㄷ. 온도를 높이면 정반응 속도 증가율보다 역반응 속도 증가율이 더 크다.</p> |
|---|

- ① ㄱ ② ㄱ, ㄴ ③ ㄴ, ㄷ ④ ㄱ, ㄴ, ㄷ

10. 다음 반응이 밀폐 용기 안에서 일어난다.



반응이 일어나는 온도가 500K 이고, 평형 상수가 $K_p = 50$ 이다. 평형 압력이 $P_A = 0.50\text{atm}$ 이고, $P_B = 1.0\text{atm}$ 일 때 생성물 C의 압력은 얼마인가?

- ① 3.0atm ② 4.0atm
 ③ 5.0atm ④ 6.0atm

11. 500K에서 $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{g})$ 의 평형 상수는 $K_c = 160$ 이다. $[\text{H}_2]$, $[\text{I}_2]$, $[\text{HI}]$ 가 각각 $4.8 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$, $2.4 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$, $1.2 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 라 할 때 이 상태에 대한 보기의 설명 중 옳은 것을 모두 고른 것은?

- <보 기> -

- ㄱ. 정반응은 발열 반응이다. 나. 정반응만 빠르게 진행된다.
ㄴ. 평형에 이를 때까지 생성물의 양이 증가한다.

- ① \perp ② \sqsubset ③ \neg, \perp ④ \neg, \sqsubset

12. 일정한 온도에서 밀폐된 2.0 L 용기에서 $2\text{SO}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{SO}_3(\text{g})$ 반응이 SO_2 0.20 몰, O_2 0.10 몰을 넣고 반응시켜 평형이 이루어졌을 때 SO_3 의 농도는 0.050 M 이었다. 평형 상수는 얼마인가?

- ① 20 ② 30 ③ 40 ④ 50

13. 평형 상태에서 계의 자유 에너지 변화(ΔG)는 0이다. 이것을 이용하면 열역학적으로 평형 상수를 구할 수 있다. 다음은 평형 상수(K_p)를 나타낸 것이다.

$$\ln K_P = -\frac{\Delta G^\circ}{RT} = -\frac{\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \frac{\Delta S^\circ}{R}$$

$\ln K_p$ 와 $1/T$ 를 도시했을 때 다음 설명 중 옳지 않은 것은?

- ① 흡열 반응은 온도가 높을수록 평형 상수값이 증가한다.
- ② 서로 다른 온도에서 나온 결과를 도시하면 직선을 얻을 수 있다.
- ③ 발열 반응은 직선 기울기가 양이고, 흡열 반응은 직선 기울기가 음이다.
- ④ 직선의 기울기로부터 반응의 엔탈피 변화와 엔트로피 변화를 얻을 수 있다.
- ⑤ 도시한 직선을 외역장해 세로축과 만난 점으로부터 반응의 엔트로피를 구할 수 있다.

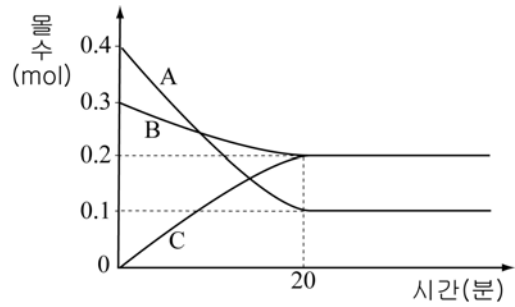
14. 평형 상태에서 괄호 안의 조작으로 평형을 오른쪽으로 이동하는 것을 보기에서 있는 대로 고르면? (단, Hb는 헤모글로빈을 나타낸다.)

-<보 기>-

- ㉑. $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ (pH 증가)
 ㉒. $2\text{CO}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{g}) + \text{C}(\text{s})$ (용기 부피 감소)
 ㉓. $\text{Hb}(\text{CO})_4(\text{aq}) + 4\text{O}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{Hb}(\text{O}_2)_4(\text{aq}) + 4\text{CO}(\text{g})$ (P_{CO} 증가)

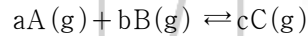
- ① \perp ② \sqsubset ③ \neg, \perp ④ \neg, \sqsubset

15. A 기체와 B 기체가 반응하면 C 기체가 생성된다.
 그래프는 1 L의 용기 속에 0.4 몰의 A 기체와 0.3 몰의 B 기체를 넣고 온도를 $t^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지시켰을 때, 시간에 따른 각 기체의 몰수 변화를 나타낸 것이다. 위 그래프에 대한 해석으로 옳지 않은 것은? (단, 화학 반응식은 가장 간단한 정수비로 나타낸다.)



- ① 화학 반응식은 $3A(g) + B(g) \rightleftharpoons 2C(g)$ 이다.
- ② $t^{\circ}\text{C}$ 에서 반응의 평형 상수(K)는 10이다.
- ③ 용기 속의 기체의 전체 압력은 처음보다 감소한다.
- ④ 20 분 이후에는 정반응의 속도와 역반응의 속도가 같다.
- ⑤ $t^{\circ}\text{C}$ 에서 1 L의 용기에 A, B, C 기체를 0.1 몰씩 넣으면 정반응이 우세하게 일어난다.

16. 반응물과 생성물이 모두 기체인 다음 반응에서 압력과 온도를 변화시키면서 생성물 C의 양(%)을 측정하여 표와 같은 결과를 얻었다.



온도 압력	300 $^{\circ}\text{C}$	500 $^{\circ}\text{C}$	700 $^{\circ}\text{C}$
100기압	52.0	10.6	2.2
300기압	71.0	26.4	7.3
600기압	84.2	42.2	12.6

이 반응에 대한 다음 설명 중 옳은 것은?

- ① 수득률을 높이려면 고온, 고압 조건일수록 유리하다.
- ② 정반응은 엔탈피가 증가하는 반응이다.
- ③ 온도가 높을수록 정반응 속도는 빨라진다.
- ④ 압력이 높을수록 수득률이 증가하므로 $a+b < c$ 를 만족한다.