HBNU
FCML
Functional & Chemical Materials Laboratory

국립 한밭대학교

5강 화학 평형 (1)

Chemical Equilibrium

화학생명공학과

윤창민 교수

Contents

3.1 평형 조건

3.2 평형 상수

3.3 압력으로 나타낸 평형식

3.4 불균일 평형

3.5 평형 상수의 응용

3.6 평형 문제의 풀이

3.7 Le Chatelier의 원리

화학 평형 (Chemical Equilibrium)

➢ 모든 반응물과 생성물의 농도가 시간에 따라 일정하게 유지되는 상태

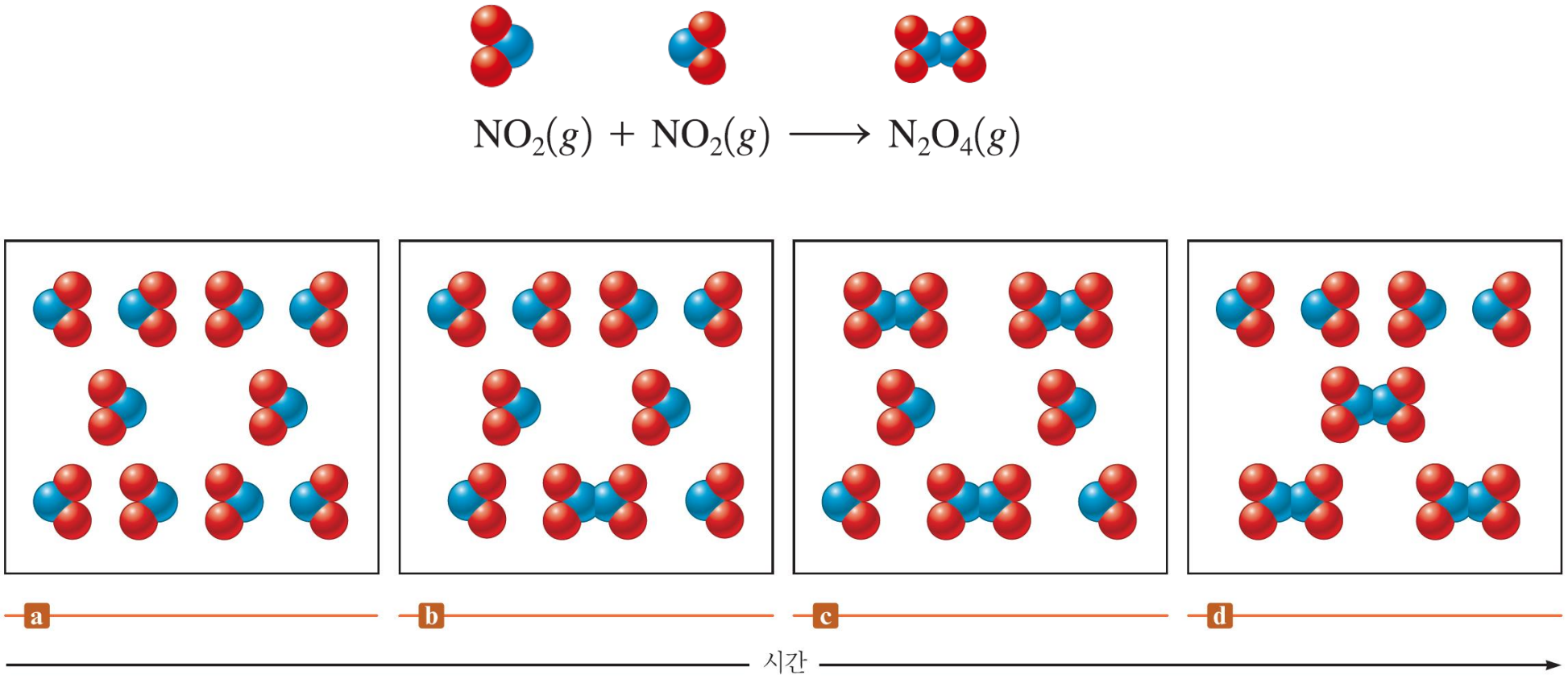


그림) 밀폐된 용기 속에서 시간이 지남에 따라, 반응 $2NO_2(g) \rightarrow N_2O_4(g)$의 분자 수준의 모습.
충분한 시간이 지난 후에는 용기 내의 NO_2와 N_2O_4의 분자 수가 일정해 진다(c와 d).

3.1 평형 조건

$H_2O(g) + CO(g) \rightleftharpoons H_2(g) + CO_2(g)$: 높은 온도에서

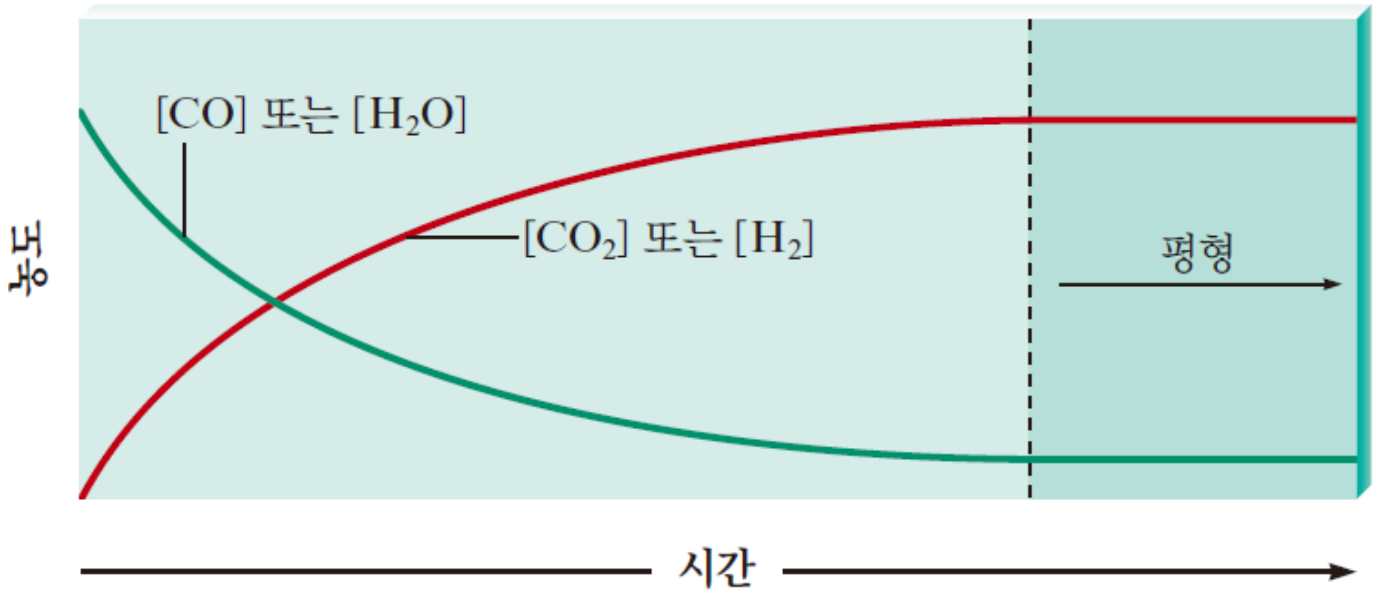
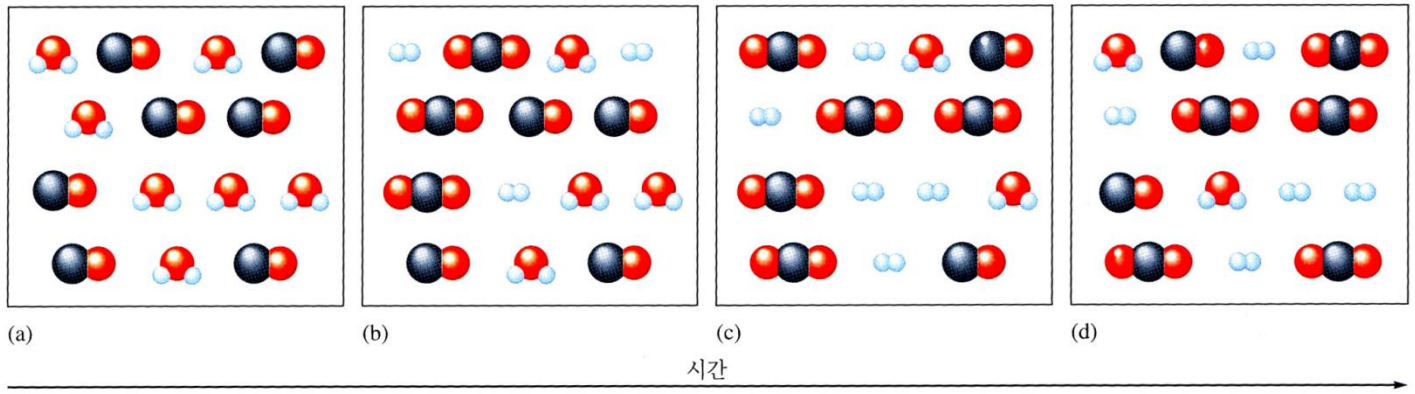
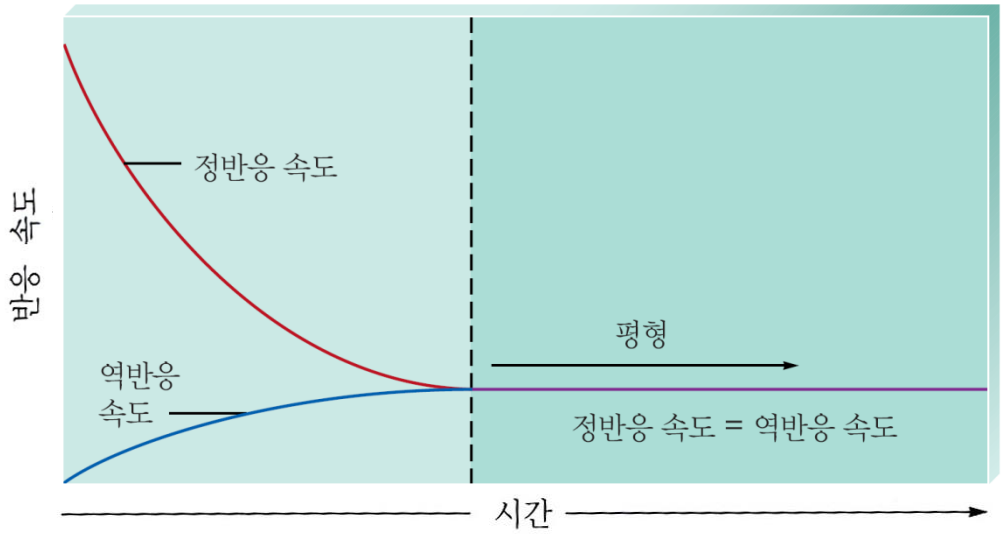


그림) 같은 몰수의 $H_2O(g)$와 $CO(g)$를 혼합하였을 때 반응, $H_2O(g) + CO(g) \rightleftharpoons H_2(g) + CO_2(g)$에 대한 시간에 대하여 정반응과 역반응의 속도 변화.

3.1 평형 조건



(a)	(b)	(c)	(d)
H_2O: 7개	H_2O: 4개	H_2O: 2개	H_2O: 2개
CO: 7개	CO: 4개	CO: 2개	CO: 2개
H_2: 0개	H_2: 3개	H_2: 5개	H_2: 5개
CO_2: 0개	CO_2: 3개	CO_2: 5개	CO_2: 5개



평형 도달 후

$$H_2O + CO \longrightarrow H_2 + CO_2$$

정반응의 속도

||

역반응의 속도

$$H_2O + CO \longleftarrow H_2 + CO_2$$

3.1 평형 조건

✓ 어떤 반응의 반응물과 생성물의 농도가 변하지 않으면 다음 두 가지 가능성이 존재

1) 그 계가 평형에 도달하였다.

2) 정반응과 역반응의 속도가 너무 느려 그 계가 평형에 도달하는 속도를 측정할 수 없다.
→ 큰 활성화 에너지를 가짐.

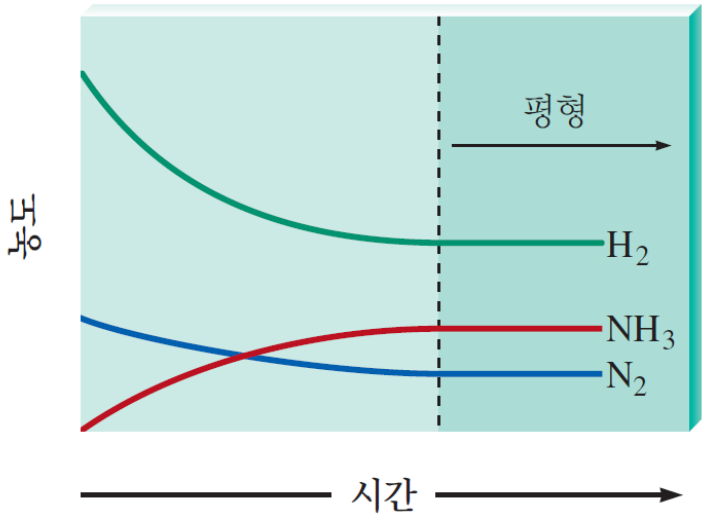
ex) 상온에서 $N_2(g)$와 $3H_2(g)$는 반응이 매우 느림

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$$

N≡N이 강한 삼중 결합!

activation energy를 낮추는 조건 필요
(예: 촉매 사용)

그림) 초기에 $N_2(g)$와 $H_2(g)$만을 섞었을 때, 반응 $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$에 대한 농도 변화.



3.2 평형 상수

➢ 질량 작용의 법칙(law of mass action)

$$jA + kB \rightleftharpoons lC + mD$$

- 평형 조건을 일반적으로 기술하는 방법
- 다음과 같은 평형식(equilibrium expression)으로 나타낼 수 있다

$$K = \frac{[C]^l[D]^m}{[A]^j[B]^k}$$

↑

평형상수: 관습적으로 단위 없이 쓴다

➢ 평형식 쓰기

예제 3.1) 다음 반응에 대한 평형식을 써라

$$4NH_3(g) + 7O_2(g) \rightleftharpoons 4NO_2(g) + 6H_2O(g)$$

풀이 ▶ 질량 작용의 법칙을 적용하면

$$K = \frac{[NO_2]^4[H_2O]^6}{[NH_3]^4[O_2]^7}$$

NO_2의 계수

H_2O의 계수

O_2의 계수

NH_3의 계수

➢ K 값의 계산

예제 3.2) Haber 공정에서 온도가 127°C일 때 각 화합물의 평형 농도는 다음과 같다.

$$[NH_3] = 3.1 \times 10^{-2}\,\text{mol/L}$$
$$[N_2] = 8.5 \times 10^{-1}\,\text{mol/L}$$
$$[H_2] = 3.1 \times 10^{-3}\,\text{mol/L}$$

a. 127°C에서 이 반응의 K 값을 계산하라.

b. 127°C에서 다음 반응의 평형 상수값을 계산하라.

$$2NH_3(g) \rightleftharpoons N_2(g) + 3H_2(g)$$

c. 127°C에서 다음 반응식의 평형 상수를 계산하라.

$$\tfrac{1}{2}N_2(g) + \tfrac{3}{2}H_2(g) \rightleftharpoons NH_3(g)$$

풀이 ▶

a. $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$

$$K = \frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3} = \frac{(3.1 \times 10^{-2})^2}{(8.5 \times 10^{-1})(3.1 \times 10^{-3})^3}$$
$$= 3.8 \times 10^4$$

➢ K 값의 계산

풀이 ▶

a. $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$

$$K = \frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3} = \frac{(3.1 \times 10^{-2})^2}{(8.5 \times 10^{-1})(3.1 \times 10^{-3})^3}$$
$$= 3.8 \times 10^4$$

b. $$K' = \frac{[N_2][H_2]^3}{[NH_3]^2}$$

$$K' = \frac{[N_2][H_2]^3}{[NH_3]^2} = \frac{1}{K} = \frac{1}{3.8 \times 10^4} = 2.6 \times 10^{-5}$$

c. $$K'' = \frac{[NH_3]}{[N_2]^{1/2}[H_2]^{3/2}}$$

$$\frac{[NH_3]}{[N_2]^{1/2}[H_2]^{3/2}} = \left(\frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3}\right)^{1/2}$$
$$K'' = K^{1/2}$$
$$= (3.8 \times 10^4)^{1/2} = 1.9 \times 10^2$$

3.2 평형 상수

$$jA + kB \rightleftharpoons lC + mD$$

위반응의 역반응에 대한 평형식: $K' = \frac{[A]^j[B]^k}{[C]^l[D]^m} = \frac{1}{K}$

반응식에 n을 곱하면, $njA + nkB \rightleftharpoons nlC + nmD$

$$K'' = \frac{[C]^{nl}[D]^{nm}}{[A]^{nj}[B]^{nk}} = K^n$$

3.2 평형 상수

➢ 평형 위치(equilibrium position)

- 화학 평형에서의 농도 set
- 평형 위치는 무수히 많음, 어떤 계의 특정한 평형 위치는 초기 농도에 달렸다.
- 같은 온도에서 *K*(평형상수) 값은 일정하지만 각 화학종의 평형 농도가 항상 일정한 것은 아니다.

표. 반응 $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$에 대한 세 가지 실험 결과

실험	초기 농도	평형 농도	$K = \frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3}$
I	$[N_2]_0 = 1.000\ M$ $[H_2]_0 = 1.000\ M$ $[NH_3]_0 = 0$	$[N_2] = 0.921\ M$ $[H_2] = 0.763\ M$ $[NH_3] = 0.157\ M$	$K = 6.02 * 10^{-2}$
II	$[N_2]_0 = 0$ $[H_2]_0 = 0$ $[NH_3]_0 = 1.000\ M$	$[N_2] = 0.399\ M$ $[H_2] = 1.197\ M$ $[NH_3] = 0.203\ M$	$K = 6.02 * 10^{-2}$
III	$[N_2]_0 = 2.00\ M$ $[H_2]_0 = 1.00\ M$ $[NH_3]_0 = 3.00\ M$	$[N_2] = 2.59\ M$ $[H_2] = 2.77\ M$ $[NH_3] = 1.82\ M$	$K = 6.02 * 10^{-2}$

➢ 평형 위치

예제 3.3) 600°C에서 이산화 황 기체와 산소가 반응하여 삼산화 황을 만드는 반응에서 초기 농도를 달리하여 다음 두 가지 실험 결과를 얻었다.

실험 1		실험 2	
초기	평형	초기	평형
$[SO_2]_0 = 2.00\ M$	$[SO_2] = 1.50\ M$	$[SO_2]_0 = 0.500\ M$	$[SO_2] = 0.590\ M$
$[O_2]_0 = 1.50\ M$	$[O_2] = 1.25\ M$	$[O_2]_0 = 0$	$[O_2] = 0.0450\ M$
$[SO_3]_0 = 3.00\ M$	$[SO_3] = 3.50\ M$	$[SO_3]_0 = 0.350\ M$	$[SO_3] = 0.260\ M$

이 두 가지 경우에 평형 상수가 같음을 보여라.

풀이 ▶ $2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2SO_3(g)$ 질량 작용의 법칙을 적용하면 $K = \dfrac{[SO_3]^2}{[SO_2]^2[O_2]}$

$$K_1 = \frac{(3.50)^2}{(1.50)^2(1.25)} = 4.36 \qquad K_2 = \frac{(0.260)^2}{(0.590)^2(0.0450)} = 4.32$$

K값은 실험 오차 범위 안에서 일정하다.

3.3 압력으로 나타낸 평형식

✓ **지금까지는 기체를 포함하는 평형반응을 농도로 기술하였다**

$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$ 에서 평형식을 농도로 나타내면,

$$K = \frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3} = \frac{C_{NH_3}{}^2}{(C_{N_2})(C_{H_2}{}^3)} = K_c$$

✓ **기체 상태의 평형은 압력으로 나타낼 수 있다.**

*기체의 평형 부분 압력(equilibrium partial pressure)*으로 나타내면 $K_p = \frac{P_{NH_3}{}^2}{(P_{N_2})(P_{H_2}{}^3)}$

$PV = nRT$ or $P = \frac{n}{V}RT = CRT$ **에서 (*C*는 기체의 몰농도)**

***K*와 K_p의 관계:** $K = \frac{C_{NH_3}{}^2}{(C_{N_2})(C_{H_2}{}^3)} = \frac{\left(\frac{P_{NH_3}}{RT}\right)^2}{\left(\frac{P_{N_2}}{RT}\right)\left(\frac{P_{H_2}}{RT}\right)^3}$

$$K_p(RT)^2$$

3.3 압력으로 나타낸 평형식

➢ K_p 값의 계산

예제 3.4) NOCl (nitrosyl chloride)의 생성 반응을 25°C에서 조사하였다

$$2NO(g) + Cl_2(g) \rightleftharpoons 2NOCl(g)$$

각 화합물의 평형 압력은 다음과 같다.

$$P_{NOCl} = 1.2 \text{ atm}$$
$$P_{NO} = 5.0 \times 10^{-2} \text{ atm}$$
$$P_{Cl_2} = 3.0 \times 10^{-1} \text{ atm}$$

25°C에서 이 반응의 K_p 값을 계산하라

풀이 ▶

$$K_p = \frac{P_{NOCl}{}^2}{(P_{NO_2})^2(P_{Cl_2})} = \frac{(1.2)^2}{(5.0 \times 10^{-2})^2(3.0 \times 10^{-1})}$$
$$= 1.9 \times 10^3$$

3.3 압력으로 나타낸 평형식

➢ 기체상태의 평형에서의 K와 K_p의 관계

$H_2(g) + F_2(g) \rightleftharpoons 2HF(g)$ 에서

$$K = \frac{[HF]^2}{[H_2][F_2]} = \frac{C_{HF}{}^2}{(C_{H_2})(C_{F_2})} = \frac{\left(\frac{P_{HF}}{RT}\right)^2}{\left(\frac{P_{H_2}}{RT}\right)\left(\frac{P_{F_2}}{RT}\right)} = \frac{P_{HF}{}^2}{(P_{H_2})(P_{F_2})} = K_p$$

이 반응에서는, K와 K_p가 같다. 이것은 균형 반응식에서 양쪽의 계수의 합이 같아 RT항이 상쇄되기 때문이다.

다음과 같은 일반적인 반응에서

$$jA + kB \rightleftharpoons lC + mD$$

$$PV = nRT \text{ or } P = \frac{n}{V}RT = CRT$$

$$K_p = \frac{(P_C{}^l)(P_D{}^m)}{(P_A{}^j)(P_B{}^k)} = \frac{(C_C \times RT)^l (C_D \times RT)^m}{(C_A \times RT)^j (C_B \times RT)^k}$$

$$= \frac{(C_C{}^l)(C_D{}^m)}{(C_A{}^j)(C_B{}^k)} \times \frac{(RT)^{l+m}}{(RT)^{j+k}} = K(RT)^{(l+m)-(j+k)}$$

$$= K(RT)^{\Delta n}$$

여기에서 $\Delta n = (l + m) - (j + k)$, 즉 기체 생성물과 기체 반응물에 대한 계수의 합의 차이이다.

➢ K_p에서 K값의 계산

예제 3.5) 예제 3.4에서 구한 K_p값을 사용하여 25°C에서 다음 반응의 K값을 계산하라

$$2NO(g) + Cl_2(g) \rightleftharpoons 2NOCl(g)$$

풀이 ▶ $K_p = K(RT)^{\Delta n}$

$T = 25 + 273 = 298\ K$이고

$\Delta n = 2 - (2 + 1) = -1$

↗ 생성물 계수의 합 ↖ 반응물 계수의 합

Δn ↓

$$K_p = K(RT)^{-1} = \frac{K}{RT}$$

$$\begin{aligned} K &= K_p(RT) \\ &= (1.9 \times 10^3)(0.08206)(298) \\ &= 4.6 \times 10^4 \end{aligned}$$

3.4 불균일 평형

➢ **반응물과 생성물이 두 개 이상의 상을 구성할 때**

✓ **불균일 평형의 예**

$$CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$$

질량 작용의 법칙을 그대로 적용하면,

$$K' = \frac{[CO_2][CaO]}{[CaCO_3]}$$

그러나 실험에 의하면 불균일 평형의 위치는 순수한 액체나 고체의 양에 무관함.

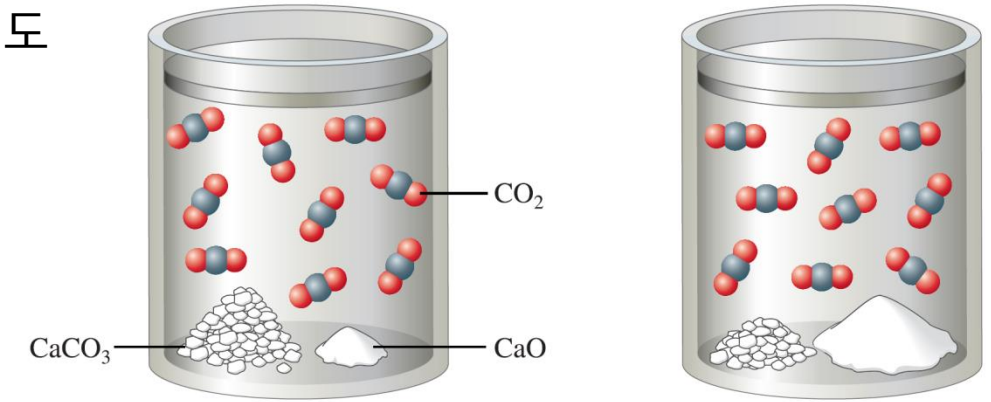
∵ 순수한 액체나 고체의 농도는 변함이 없음. (일정)

$$K' = \frac{[CO_2]C_1}{C_2} \qquad K = \frac{C_2K'}{C_1} = [CO_2]$$

평형식에 순수한 액체나 고체의 농도는 포함시키지 않음.

C_1, C_2: 고체 CaO와 고체 $CaCO_3$의 농도

반응 $CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$의 평형 위치는 반응 용기 속에 존재하는 $CaCO_3(s)$와 $CaO(s)$의 양과는 무관하다.



3.4 불균일 평형

✓ **또 다른 예**

액체 물이 분해하여 수소 기체와 산소 기체를 만드는 반응

$$2H_2O(l) \rightleftharpoons 2H_2(g) + O_2(g)$$

$K = [H_2]^2[O_2]$이고, $K_p = (P_{H_2}{}^2)(P_{O_2})$ **물은 순수한 액체이므로 평형식에 불포함.**

만일 이 반응을 물이 수증기로 존재하는 조건에서 진행시킨다면,

$$2H_2O(g) \rightleftharpoons 2H_2(g) + O_2(g)$$

$K = \dfrac{[H_2]^2[O_2]}{[H_2O]^2}$ 와 $K_p = \dfrac{(P_{H_2}{}^2)(P_{O_2})}{P_{H_2O}{}^2}$ **수증기의 농도 또는 압력은 변할 수 있으므로 평형식에 포함.**

➢ 불균일 평형의 평형식

예제 3.6) 다음 각 반응에 대하여 K와 K_P를 써라.

a. 고체 오염화 인이 분해하여 액체 삼염화 인과 염소 기체가 생기는 반응

b. 짙은 푸른색의 황산 구리(II)·오수화물을 가열하여 물을 수증기의 형태로 제거하고 흰색 고체 황산 구리(II)를 얻는 반응

풀이 ▶ **a.**

$$PCl_5(s) \rightleftharpoons PCl_3(l) + Cl_2(g)$$

$$K = [Cl_2] \quad \text{및} \quad K_p = P_{Cl_2}$$

b.

$$CuSO_4 \cdot 5H_2O(s) \rightleftharpoons CuSO_4(s) + 5H_2O(g)$$

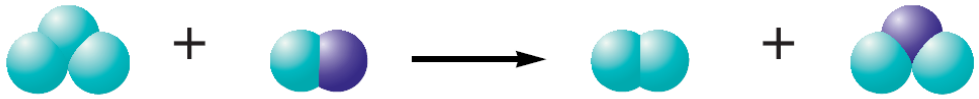
$$K = [H_2O]^5 \quad \text{및} \quad K_p = (P_{H_2O})^5$$

3.5 평형 상수의 응용

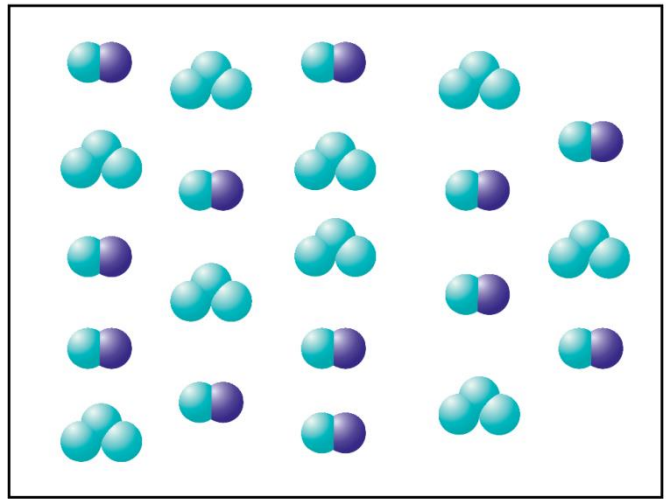
✓ **어떤 화학 반응의 평형 상수를 알면,**

- 반응의 진행 정도
- 어떤 농도가 평형 조건을 나타내는지의 여부
- 주어진 초기 농도로부터 도달할 수 있는 평형의 위치 등을 예측 가능

3.5 평형 상수의 응용



← 이 반응의 평형 상수가 16이라고 가정하면,



$$\frac{(N_{\bigcirc\bigcirc})(N_{\bigcirc\bigcirc\bigcirc})}{(N_{\bigcirc\bigcirc})(N_{\bigcirc\bigcirc})} = 16$$

초기 조건	새로운 조건
9 분자	$9 - 5 = 4$ 분자
12 분자	$12 - 5 = 7$ 분자
0 분자	$0 + 5 = 5$ 분자
0 분자	$0 + 5 = 5$ 분자

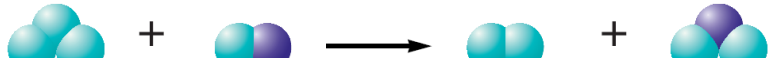
새로운 조건이 이 반응계의 평형을 나타내는 것인가?

$$\frac{(N_{\bigcirc\bigcirc})(N_{\bigcirc\bigcirc\bigcirc})}{(N_{\bigcirc\bigcirc})(N_{\bigcirc\bigcirc})} = \frac{(5)(5)}{(4)(7)} = 0.9$$

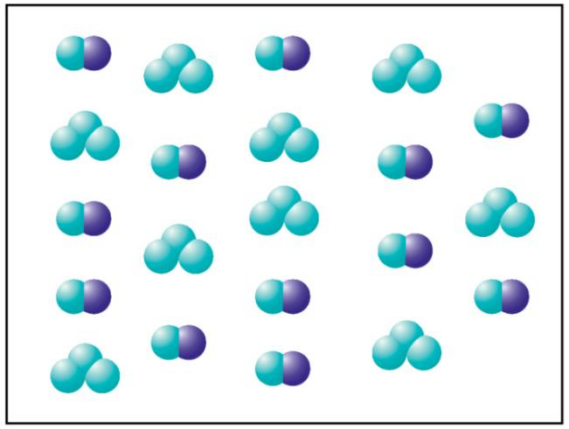
∴ **아니다.**

16보다 작으므로 계가 오른쪽으로 가야됨!

3.5 평형 상수의 응용



$$\frac{(N_{\bullet\bullet})(N_{\bullet\bullet})}{(N_{\bullet\bullet})(N_{\bullet\bullet})} = 16 \quad \text{(평형상수=16)}$$



초기 조건

9 분자

12 분자

0 분자

0 분자

x 없어짐

x 없어짐

x 형성됨

x 형성됨

평형 조건

$9 - x$ 분자

$12 - x$ 분자

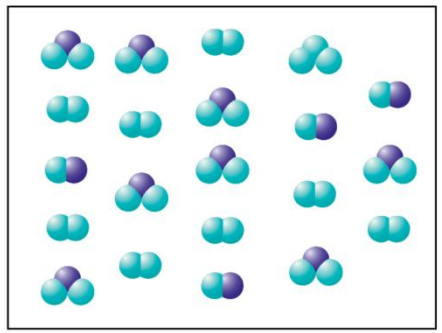
x 분자

x 분자

$$\frac{(N_{\bullet\bullet})(N_{\bullet\bullet})}{(N_{\bullet\bullet})(N_{\bullet\bullet})} = 16 = \frac{(x)(x)}{(9-x)(12-x)}$$

$$\frac{(x)(x)}{(9-x)(12-x)} = \frac{(8)(8)}{(9-8)(12-8)} = \frac{64}{4} = 16$$

$$\therefore \quad x = 8$$



평형 혼합물에는

8 분자, 8 분자,

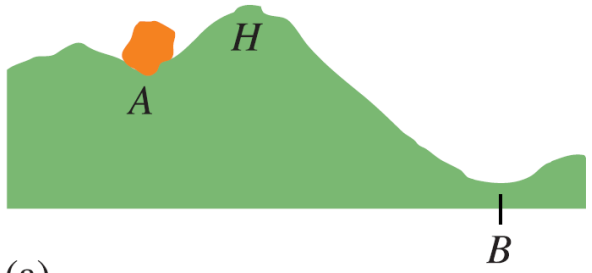
1 분자 및 4 분자가 들어있음

3.5 평형 상수의 응용 – 반응 진행의 정도

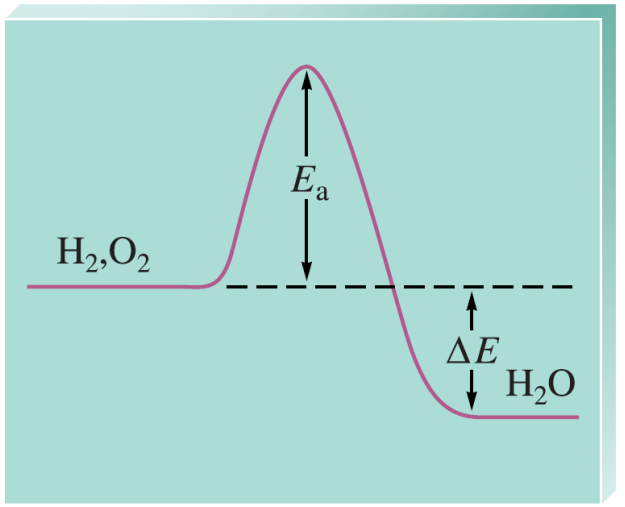
➢ 반응의 진행 정도

1) K >> 1 이면, 반응이 오른쪽으로 치우침, 평형 상태에 거의 생성물만 존재

2) K << 1 이면, 반응이 왼쪽으로 치우침, 평형 상태에 거의 반응물만 존재



(a)



(b)

✓ ***K*는 Δ*E*와 관련,**

✓ **평형에 도달하는 시간(반응 속도)은 E_a와 관련**

✓ 위의 (b)에서 H_2O는 H_2, O_2보다 더 안정하나 너무 큰 E_a 때문에 상온에서는 반응이 진행되지 않음.

3.5 평형 상수의 응용 – 반응 지수

➢ 반응 지수(Reaction Quotient)

어떤 반응의 반응물과 생성물을 섞었을 때, 그 반응이 평형에 있는지, 또는 평형에 도달하기 위해 반응이 어느 방향으로 진행하는지 예측

⟹ 반응 지수(Q)를 구해서 반응성을 예측함.

✓ 반응 지수는 질량 작용의 법칙에 초기 농도를 대입하여 얻는다.

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$$

$$Q = \frac{[NH_3]_0^{\,2}}{[N_2]_0[H_2]_0^{\,3}}$$

✓ **Q = K, 평형**

✓ **Q > K, 평형 상태에 비해 생성물이 반응물 보다 많음.**
평형은 왼쪽으로 이동

✓ **Q < K, 평형 상태에 비해 반응물이 생성물 보다 많음.**
평형은 오른쪽으로 이동

3.5 평형 상수의 응용 – 반응 진행의 정도

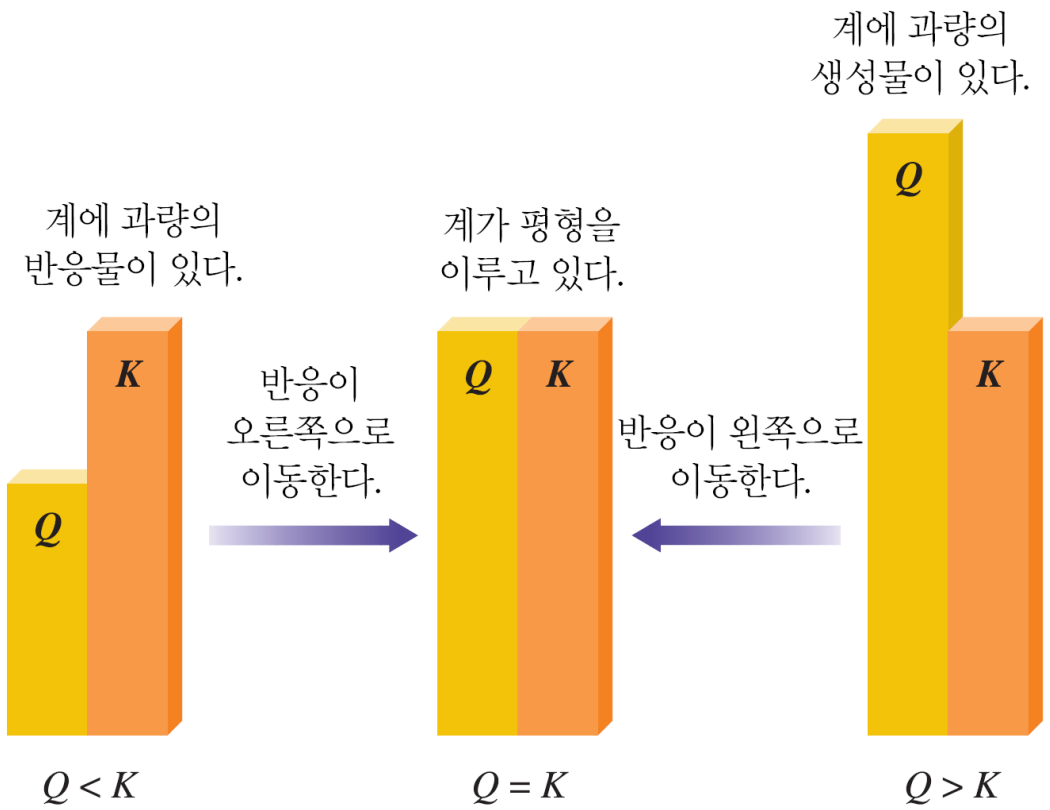


그림) 반응 지수, Q와 평형 상수, K 사이의 관계.

3.5 평형 상수의 응용 – 반응 진행의 정도

➢ 반응 지수의 사용

예제 3.7) 500°C에서 암모니아 합성 반응의 평형 상수는 6.0×10^{-2} 이다. 다음 각 경우 계가 평형에 도달하기 위하여 이동하는 방향을 예측하라.

a. $[NH_3]_0 = 1.0 \times 10^{-3}\,M$; $[N_2]_0 = 1.0 \times 10^{-5}\,M$; $[H_2]_0 = 2.0 \times 10^{-3}\,M$

b. $[NH_3]_0 = 2.00 \times 10^{-4}\,M$; $[N_2]_0 = 1.5 \times 10^{-5}\,M$; $[H_2]_0 = 3.54 \times 10^{-1}\,M$

c. $[NH_3]_0 = 1.0 \times 10^{-4}\,M$; $[N_2]_0 = 5.0\,M$; $[H_2]_0 = 1.0 \times 10^{-2}\,M$

풀이 ▶

a.
$$Q = \frac{[NH_3]_0^2}{[N_2]_0[H_2]_0^3} = \frac{(1.0 \times 10^{-3})^2}{(1.0 \times 10^{-5})(2.0 \times 10^{-3})^3}$$
$$= 1.3 \times 10^7$$

$N_2 + 3H_2 \longleftarrow 2NH_3$

$K < Q$ 역반응이 일어남

b.
$$Q = \frac{[NH_3]_0^2}{[N_2]_0[H_2]_0^3} = \frac{(2.00 \times 10^{-4})^2}{(1.50 \times 10^{-5})(3.54 \times 10^{-1})^3}$$
$$= 6.01 \times 10^{-2}$$

$K = Q$ 계는 평형에 있고, 어느 방향으로도 이동하지 않음

c.
$$Q = \frac{[NH_3]_0^2}{[N_2]_0[H_2]_0^3} = \frac{(1.0 \times 10^{-4})^2}{(5.0)(1.0 \times 10^{-2})^3}$$
$$= 2.0 \times 10^{-3}$$

$N_2 + 3H_2 \longrightarrow 2NH_3$

$Q < K$ 정반응이 일어남

∴ 강의 Review

➢ 질량 작용의 법칙(law of mass action)

$$jA + kB \rightleftharpoons lC + mD$$

- 평형 조건을 일반적으로 기술하는 방법
- 다음과 같은 평형식(equilibrium expression)으로 나타낼 수 있다

$$K = \frac{[C]^l[D]^m}{[A]^j[B]^k}$$

↑

평형상수: 관습적으로 단위 없이 쓴다

∴ 강의 Review

✓ **지금까지는 기체를 포함하는 평형반응을 농도로 기술하였다**

$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$ 에서 평형식을 농도로 나타내면,

$$K = \frac{[NH_3]^2}{[N_2][H_2]^3} = \frac{C_{NH_3}{}^2}{(C_{N_2})(C_{H_2}{}^3)} = K_c$$

✓ **기체 상태의 평형은 압력으로 나타낼 수 있다.**

*기체의 평형 부분 압력(equilibrium partial pressure)*으로 나타내면 $K_p = \frac{P_{NH_3}{}^2}{(P_{N_2})(P_{H_2}{}^3)}$

$PV = nRT$ or $P = \frac{n}{V}RT = CRT$ **에서 (*C*는 기체의 몰농도)**

***K*와 K_p의 관계:** $K = \frac{C_{NH_3}{}^2}{(C_{N_2})(C_{H_2}{}^3)} = \frac{\left(\frac{P_{NH_3}}{RT}\right)^2}{\left(\frac{P_{N_2}}{RT}\right)\left(\frac{P_{H_2}}{RT}\right)^3}$

$$K_p(RT)^2$$

∴ 강의 Review

➢ 기체상태의 평형에서의 K와 K_p의 관계

$H_2(g) + F_2(g) \rightleftharpoons 2HF(g)$ 에서

$$K = \frac{[HF]^2}{[H_2][F_2]} = \frac{C_{HF}{}^2}{(C_{H_2})(C_{F_2})} = \frac{\left(\frac{P_{HF}}{RT}\right)^2}{\left(\frac{P_{H_2}}{RT}\right)\left(\frac{P_{F_2}}{RT}\right)} = \frac{P_{HF}{}^2}{(P_{H_2})(P_{F_2})} = K_p$$

이 반응에서는, K와 K_p가 같다. 이것은 균형 반응식에서 양쪽의 계수의 합이 같아 RT항이 상쇄되기 때문이다.

다음과 같은 일반적인 반응에서

$jA + kB \rightleftharpoons lC + mD$

$$PV = nRT \text{ or } P = \frac{n}{V}RT = CRT$$

$$K_p = \frac{(P_C{}^l)(P_D{}^m)}{(P_A{}^j)(P_B{}^k)} = \frac{(C_C \times RT)^l (C_D \times RT)^m}{(C_A \times RT)^j (C_B \times RT)^k}$$

$$= \frac{(C_C{}^l)(C_D{}^m)}{(C_A{}^j)(C_B{}^k)} \times \frac{(RT)^{l+m}}{(RT)^{j+k}} = K(RT)^{(l+m)-(j+k)}$$

$$= K(RT)^{\Delta n}$$

여기에서 $\Delta n = (l + m) - (j + k)$, 즉 기체 생성물과 기체 반응물에 대한 계수의 합의 차이이다.

∴ 강의 Review

➢ **반응물과 생성물이 두 개 이상의 상을 구성할 때**

✓ **불균일 평형의 예**

$$CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$$

질량 작용의 법칙을 그대로 적용하면,

$$K' = \frac{[CO_2][CaO]}{[CaCO_3]}$$

그러나 실험에 의하면 불균일 평형의 위치는 순수한 액체나 고체의 양에 무관함.

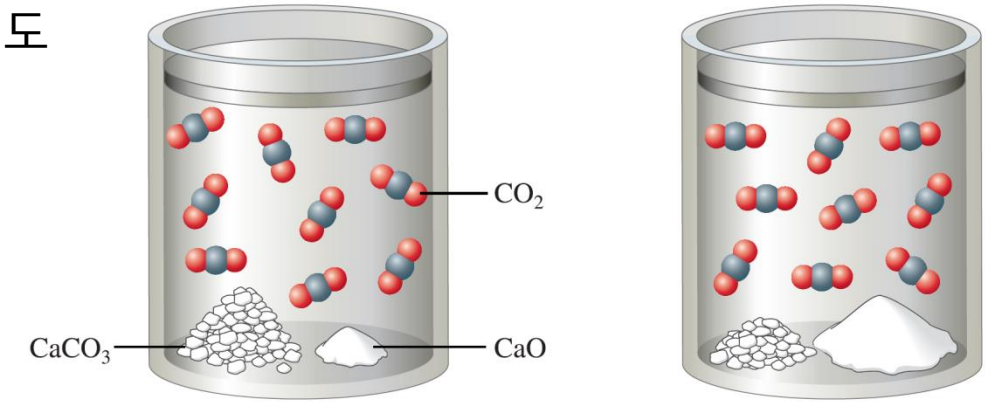
∵ 순수한 액체나 고체의 농도는 변함이 없음. (일정)

$$K' = \frac{[CO_2]C_1}{C_2} \qquad K = \frac{C_2K'}{C_1} = [CO_2]$$

평형식에 순수한 액체나 고체의 농도는 포함시키지 않음.

C_1, C_2: 고체 CaO와 고체 $CaCO_3$의 농도

반응 $CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$의 평형 위치는 반응 용기 속에 존재하는 $CaCO_3(s)$와 $CaO(s)$의 양과는 무관하다.



∴ 강의 Review

➢ 반응 지수(Reaction Quotient)

어떤 반응의 반응물과 생성물을 섞었을 때, 그 반응이 평형에 있는지,
또는 평형에 도달하기 위해 반응이 어느 방향으로 진행하는지 예측

⟹ 반응 지수(Q)를 구해서 반응성을 예측함.

✓ 반응 지수는 질량 작용의 법칙에 초기 농도를 대입하여 얻는다.

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$$

$$Q = \frac{[NH_3]_0^{\,2}}{[N_2]_0[H_2]_0^{\,3}}$$

✓ **Q = K, 평형**

✓ **Q > K, 평형 상태에 비해 생성물이 반응물 보다 많음.**
평형은 왼쪽으로 이동

✓ **Q < K, 평형 상태에 비해 반응물이 생성물 보다 많음.**
평형은 오른쪽으로 이동