

17 장

평형

Table of Contents

17.1 화학 반응은 어떻게 일어나는가?

17.2 반응속도에 영향을 주는 조건

17.3 평형 조건

17.4 화학 평형: 동적 조건

17.5 평형상수: 개요

17.6 불균일 평형

17.7 Le Châtelier의 원리

17.8 평형 상수의 응용

17.9 용해도 평형

How Chemical Reactions Occur

17.1 화학반응은 어떻게 일어나는가?

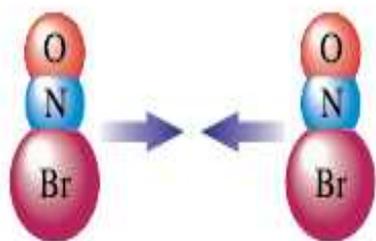
학습목표 : 화학반응이 어떻게 일어나는가에 대한 충돌
모형을 이해한다

Section 17.1

How Chemical Reactions Occur

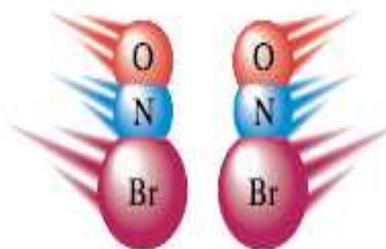
충돌 모형

- 분자는 반응이 일어나기 위해서는 충돌을 해야만 한다.



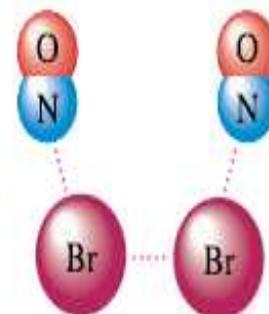
a

두 개의 BrNO 분자들이 빠른 속도로 접근한다.



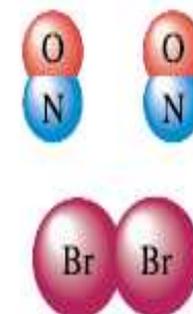
b

충돌이 일어난다.



c

충돌 에너지가 Br—N 결합을 깨뜨리고 Br—Br 결합을 형성하게 한다.



d

생성물: Br₂ 한 분자, NO 두 분자.

Conditions That Affect Reaction Rates

17.2 반응속도에 영향을 주는 조건

학습목표 : 활성화 에너지를 이해하고, 촉매가 반응속도를 빠르게 하는 방법을 이해한다.

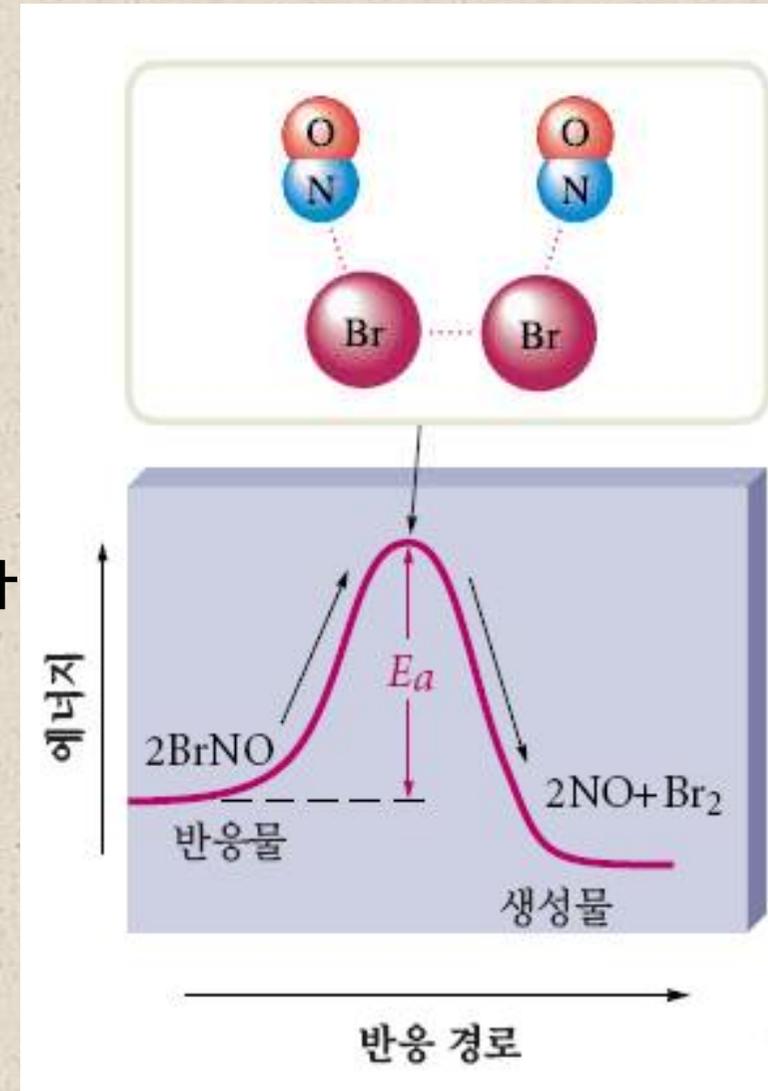
Section 17.2

Conditions That Affect Reaction Rates

활성화 에너지(activation energy, E_a)

- 반응을 일으킬 수 있는 최소의 에너지.

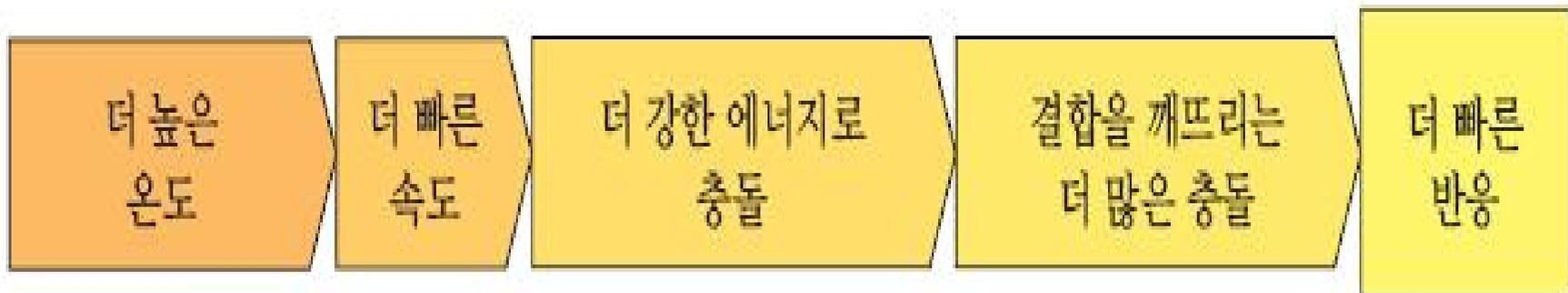
: 반응이 일어나기 위해서는 활성화 에너지라고 하는 최소한의 에너지가 필요. 충돌이 E_a 보다 높은 에너지를 갖게 되면 반응은 일어난다.



Section 17.2

Conditions That Affect Reaction Rates

- **농도** – 높은 농도에서는 더 많은 분자 수 때문에 더 많은 충돌이 일어나므로 반응속도가 증가한다.
- **온도** – 반응속도 증가.



Section 17.2

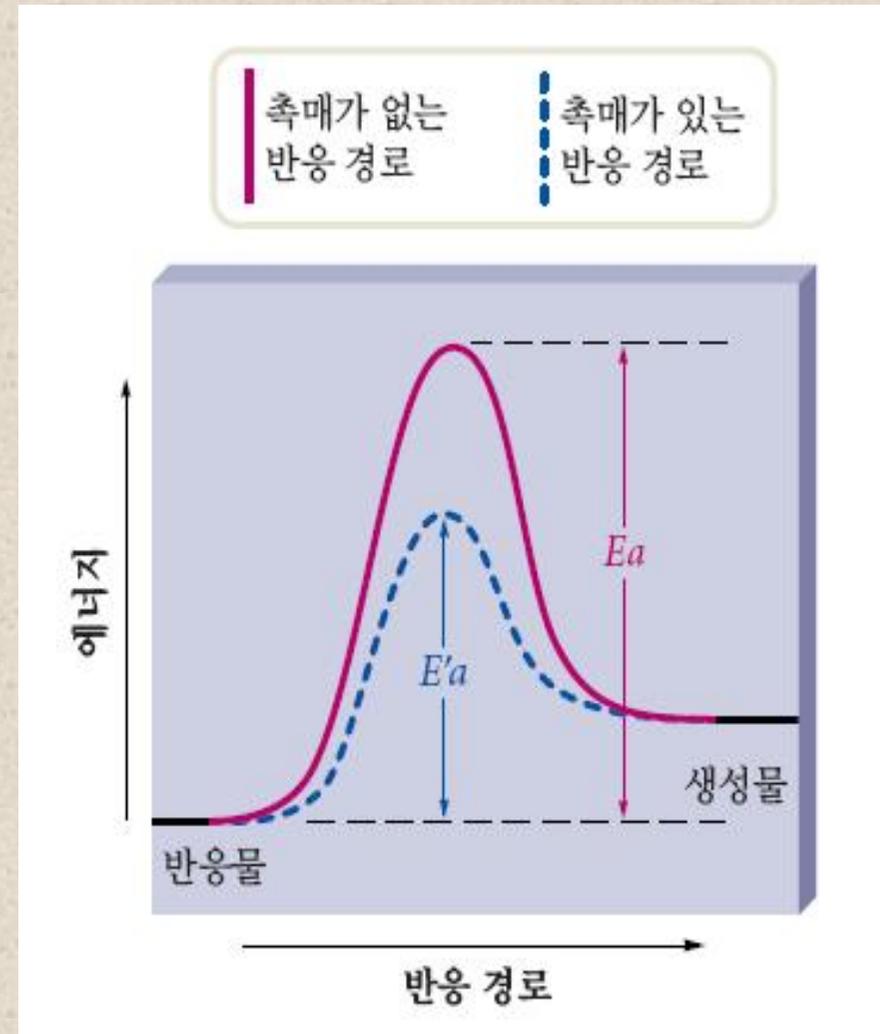
Conditions That Affect Reaction Rates

촉매

- 소모되지 않고 반응속도만 증가시킬 수 있는 물질.

냉장고와 에어컨에 널리 사용되는 CF_2Cl_2 와 같은 프레온이 분해되어 생성된다

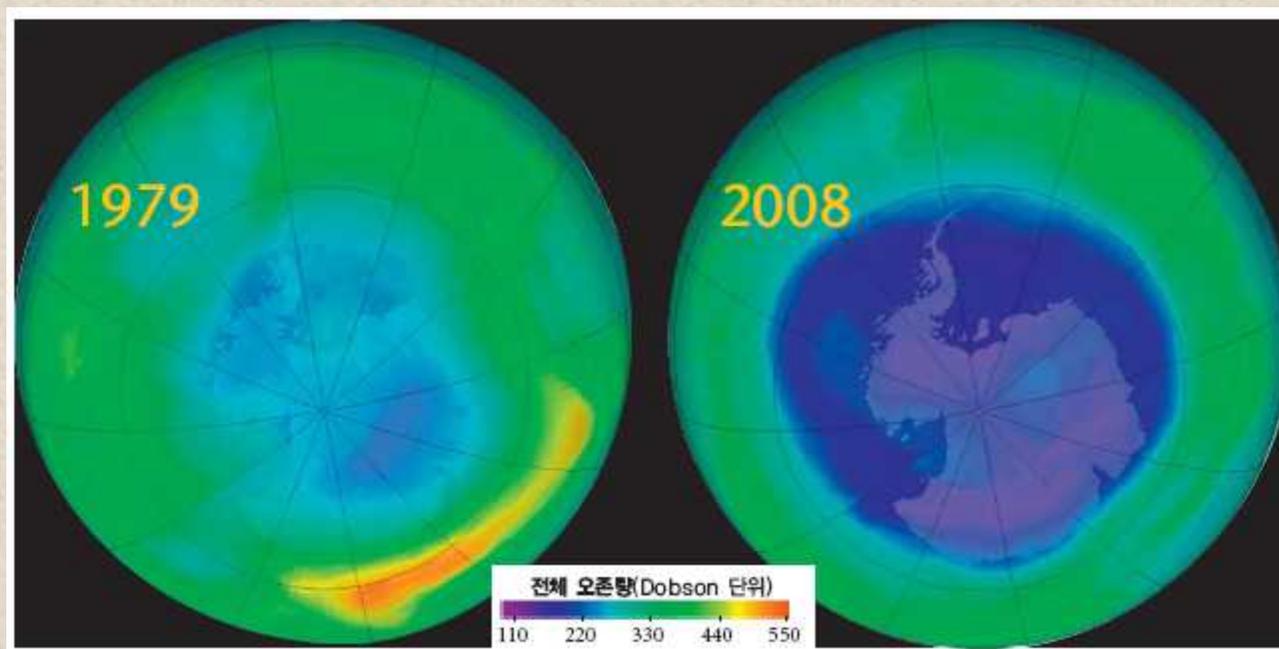
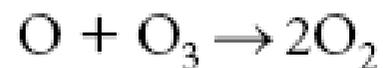
→ 염소 원자의 촉매작용에 의한 오존, O_3 의 분해



Section 17.2



반응식의 양변에서 같은 화학종을 없애고 정리하면 다음 식이 된다.



[Return to TOC](#)

Section 17.3

The Equilibrium Condition

17.3 평형조건

학습목표 : 평형이 어떻게 이루어지는가에 대한 이해한다.

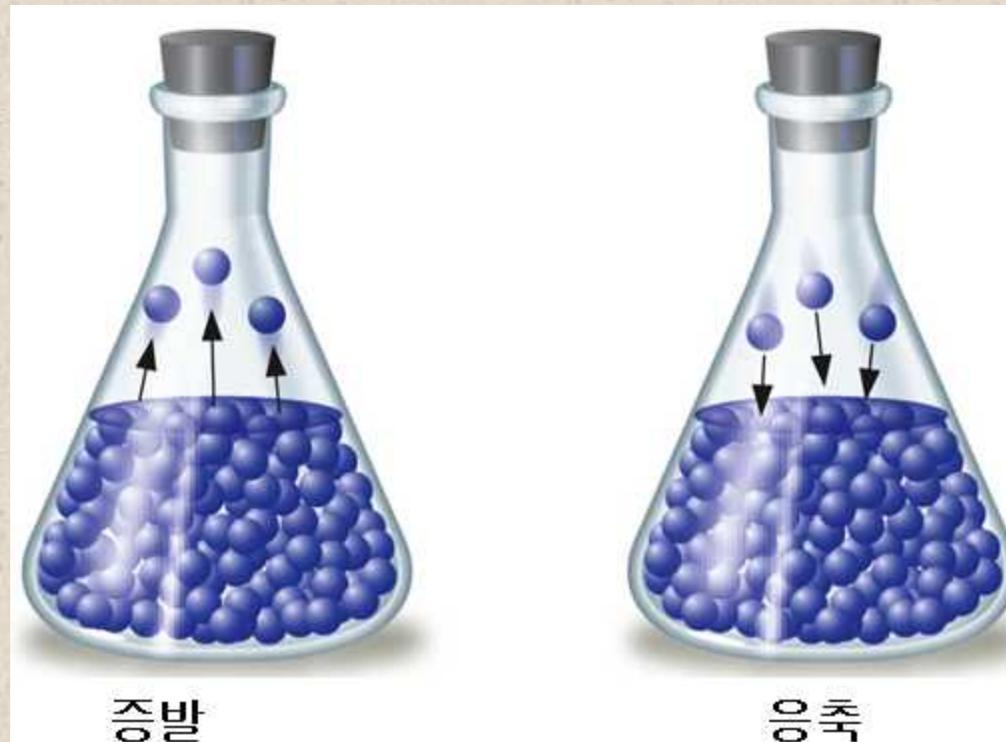
Section 17.3

The Equilibrium Condition

평형 (equilibrium)

한 과정이 다른 과정의 정반대인 두 과정의 정확한 균형

- 두 과정의 정확한 균형, 한 과정은 다른 과정의 정반대.



[Return to TOC](#)

Section 17.3

The Equilibrium Condition

화학적 평형

- 모든 반응물과 생성물의 농도가 일정한 동적 상태.



a

초기에는 액체 상태에서 증기상태로 분자의 알짜 이동이 일어난다.



b

얼마 후 증기 상태 물질의 양이 일정하게 된다. 증기압과 액체의 수위가 일정하게 유지된다.



c

평형 상태는 상당히 동적이다. 액체로부터 탈출하는 분자 수 만큼 기체로부터 액체로 되돌아오기 때문에 증기압과 액체의 수위는 일정하게 유지된다.

Section 17.4

Chemical Equilibrium: A Dynamic Condition

17.4 화학평형 : 동적 조건

학습목표 : 화학평형 특성에 대하여 공부한다.

Chemical Equilibrium: A Dynamic Condition

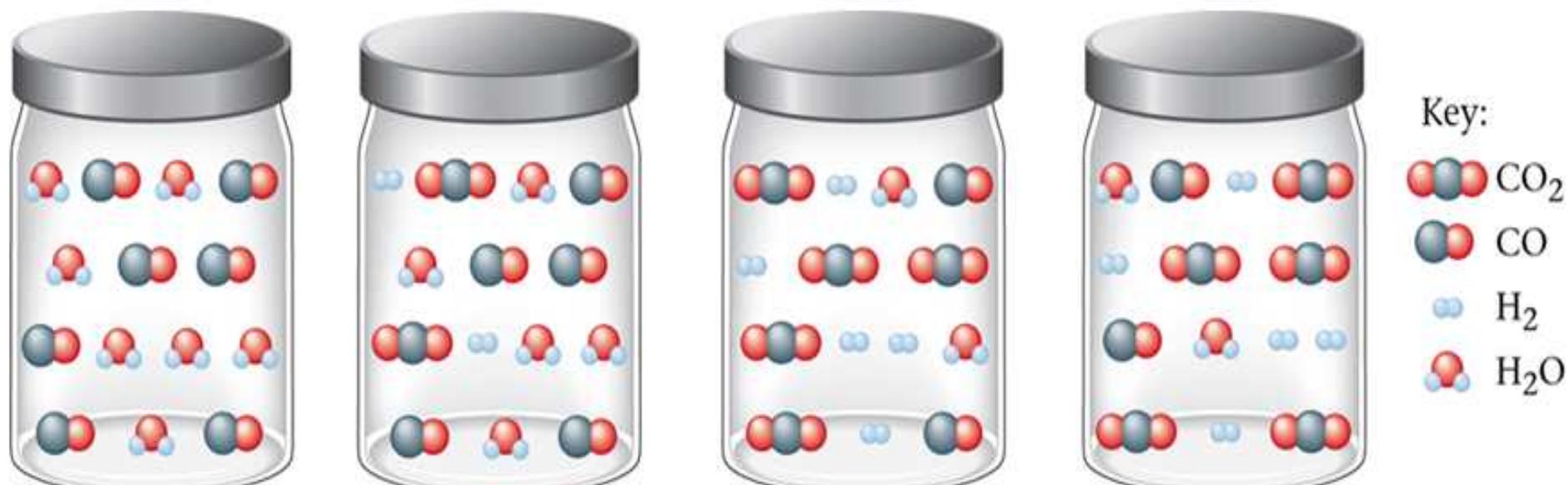
화학적 평형

- 분자 수준에서 보면 대단히 격렬한 활성이 있다.
평형은 정지 상태가 아니고 활성이 강한 동적 상태이다.

Section 17.4

Chemical Equilibrium: A Dynamic Condition

H₂O 와 CO 가 반응하여 시간 흐름에 따른 CO₂ 와 H₂ 생성 반응

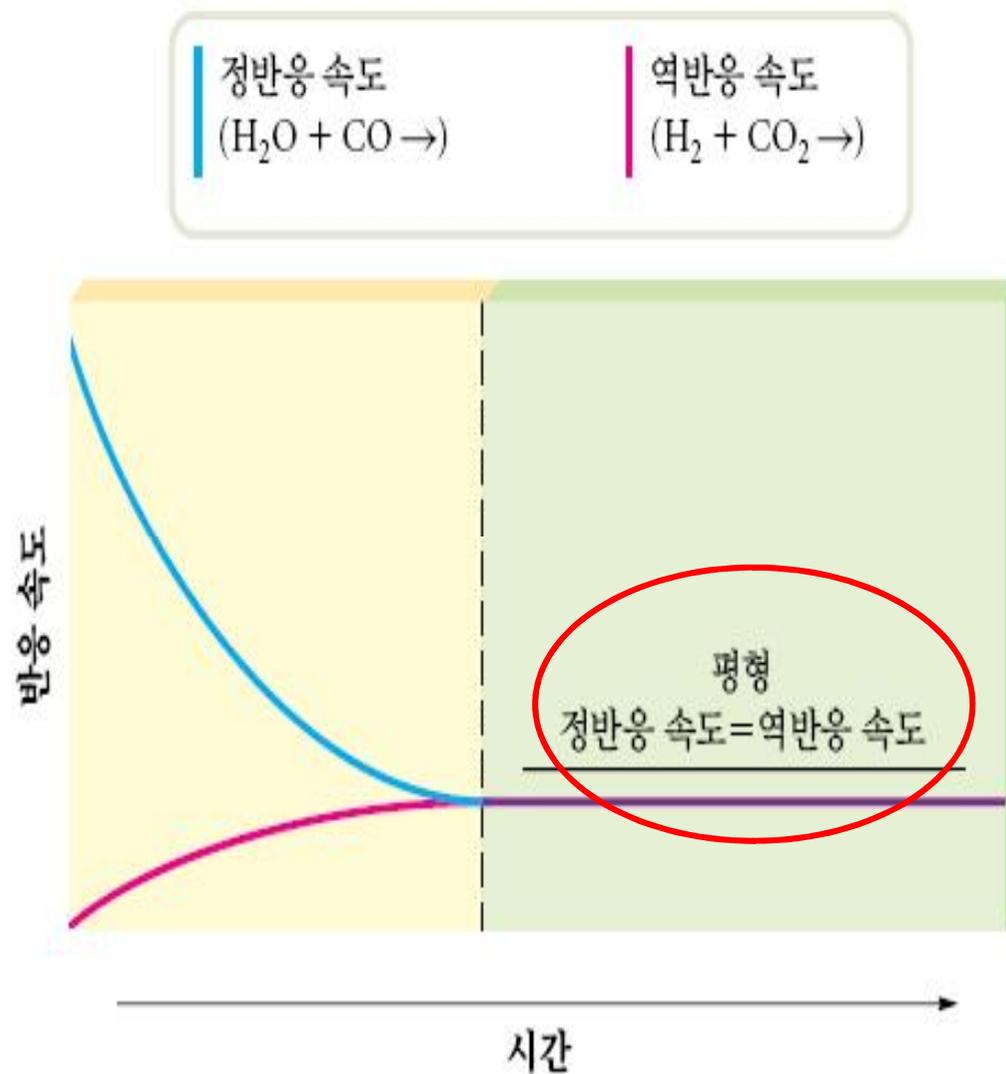


H ₂ O	7	5	2	2
CO	7	5	2	2
H ₂	0	2	5	5
CO ₂	0	2	5	5

Section 17.4

그림 17.8

같은 몰수의 $\text{H}_2\text{O}(g)$ 와 $\text{CO}(g)$ 를 혼합할 때 $\text{H}_2\text{O}(g) + \text{CO}(g) \rightleftharpoons \text{H}_2(g) + \text{CO}_2(g)$ 에 대한 정반응 속도와 역반응 속도의 시간에 따른 변화. 초기에 정반응 속도는 감소하고 역반응 속도는 증가한다. 정반응과 역반응의 속도가 같아질 때 평형에 도달하게 된다.



Chemical Equilibrium: A Dynamic Condition

화학 평형

- 농도는 정반응의 속도와 역반응의 속도가 같아지는 농도에 도달하게 된다.

Section 17.5

The Equilibrium Constant: An Introduction

17.5 평형상수 : 개요

학습목표 : 화학평형의 법칙을 이해하고 평형상수 계산
방법을 배운다.

The Equilibrium Constant: An Introduction

화학 평형의 법칙 : 실험적 관찰로부터 만들어진 것.

여러 반응에 대한 실험을 통해 평형

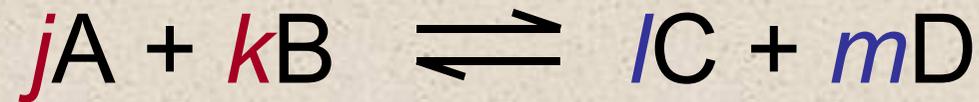
상태는 평형식이라 불리는 특정비로 나타냄

→ 평형 상수 (K , equilibrium constant)

Section 17.5

The Equilibrium Constant: An Introduction

평형 상태에서 다음 반응에 대해:



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

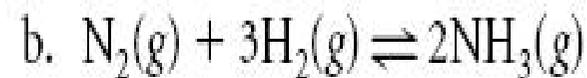
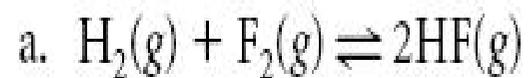
- A, B, C, 와 D = 화학종
- 대괄호 = 평형 상태에서 화학종의 농도
- $j, k, l,$ 와 m = 균형 맞춘 반응식에서의 계수
- K = 평형 상수(단위 없이 주어진다).

[Return to TOC](#)

예제 17.1

평형식 쓰기

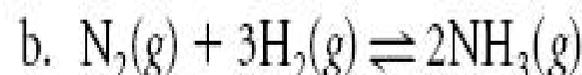
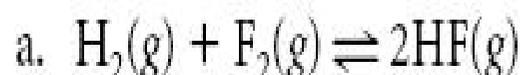
다음 반응의 평형식을 쓰시오.



예제 17.1

평형식 쓰기

다음 반응의 평형식을 쓰시오.



풀이

화학 평형의 법칙을 적용하여 생성물을 반응물 위에 놓고(mol/L로 나타낸 농도 표시를 위해 []를 사용) 균형 맞춘 화학 반응식의 해당 계수를 각 농도의 지수로 써넣는다.

a.
$$K = \frac{[\text{HF}]^2}{[\text{H}_2][\text{F}_2]}$$

← 생성물(계수 2가 지수 2가 됨)
← 반응물(계수 1이 지수 1이 됨)

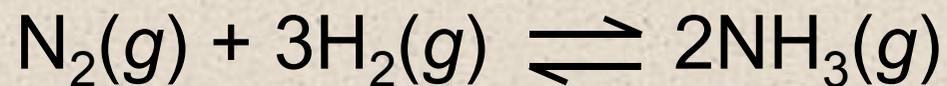
계수가 1일 때는 지수에 쓰지는 않지만, 존재한다고 생각하면 된다.

b.
$$K = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2][\text{H}_2]^3}$$

Section 17.5

The Equilibrium Constant: An Introduction

예제

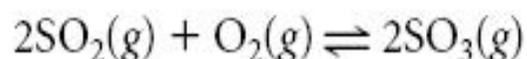


$$K = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2][\text{H}_2]^3}$$

예제 17.2

평형 상수의 계산

대기 중에서 이산화 황이 산소와 반응하여 삼산화 황을 생성하는 반응은, SO_3 가 수분과 결합하여 산성비의 주성분인 황산을 만들기 때문에 환경적으로 중요한 의미를 갖는다. 아래 결과는 기체 이산화 황과 산소가 600°C 에서 반응하여 삼산화 황을 생성하는 실험에서 얻은 것이다.

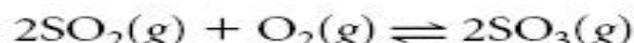


	초기	평형
실험 I	$[\text{SO}_2]_0 = 2.00 \text{ M}$	$[\text{SO}_2] = 1.50 \text{ M}$
	$[\text{O}_2]_0 = 1.50 \text{ M}$	$[\text{O}_2] = 1.25 \text{ M}$
	$[\text{SO}_3]_0 = 3.00 \text{ M}$	$[\text{SO}_3] = 3.50 \text{ M}$
실험 II	$[\text{SO}_2]_0 = 0.500 \text{ M}$	$[\text{SO}_2] = 0.590 \text{ M}$
	$[\text{O}_2]_0 = 0$	$[\text{O}_2] = 0.045 \text{ M}$
	$[\text{SO}_3]_0 = 0.350 \text{ M}$	$[\text{SO}_3] = 0.260 \text{ M}$

화학 평형의 법칙은 K 값이 두 실험에서 같아야 한다고 예측한다. 각 실험에서 관찰된 평형 상수를 계산하여 이를 증명해 보시오.

풀이

균형 맞춘 반응식은



이다. 화학 평형의 법칙으로부터 다음과 같이 평형식을 쓸 수 있다.

$$K = \frac{[\text{SO}_3]^2}{[\text{SO}_2]^2[\text{O}_2]}$$

실험 I에서 관찰된 다음과 같은 평형 농도를,

$$[\text{SO}_3] = 3.50 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_2] = 1.50 \text{ M}$$

$$[\text{O}_2] = 1.25 \text{ M}$$

평형식에 대입하여 K 값을 구한다.

$$K_{\text{I}} = \frac{(3.50)^2}{(1.50)^2(1.25)} = 4.36$$

실험 II의 평형에서는

$$[\text{SO}_3] = 0.260 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_2] = 0.590 \text{ M}$$

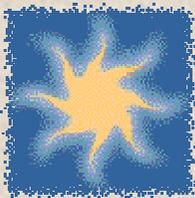
$$[\text{O}_2] = 0.045 \text{ M}$$

$$K_{\text{II}} = \frac{(0.260)^2}{(0.590)^2(0.045)} = 4.32$$

계산된 K_{I} 과 K_{II} 값은 예상한대로 거의 같음을 알 수 있다. 즉 반응열에 의한 차이와 실험오차 범위 내에서 K 값은 일정하다. 이들 실험은 계에 두 개의 서로 다른 평형 위치가 존재하지만, 평형 상수 K 값은 실제로 일정함을 보여준다. ■

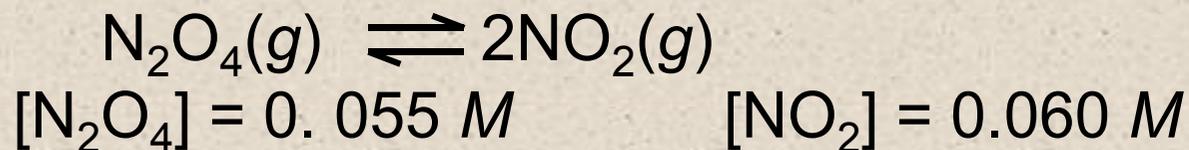
Section 17.5

The Equilibrium Constant: An Introduction



연습

아래 반응에서, 주어진 농도에서 평형상수 값을 계산하라.



- a) $K = 0.050$
- b) $K = 0.92$
- c) $K = 1.1$
- d) $K = 0.065$**

$$K = (0.060)^2 / 0.055 = 0.065$$

Section 17.6

Heterogeneous Equilibria

17.6 불균일 평형

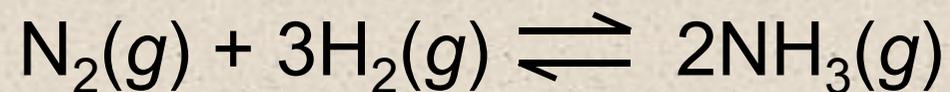
학습목표 : 평형식의 구성에서 액체와 고체의 역할을 이해한다

[Return to TOC](#)

Heterogeneous Equilibria

균일 평형

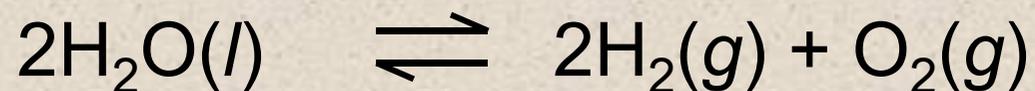
- 균일 평형- 같은 상 존재:



Heterogeneous Equilibria

불균일 평형

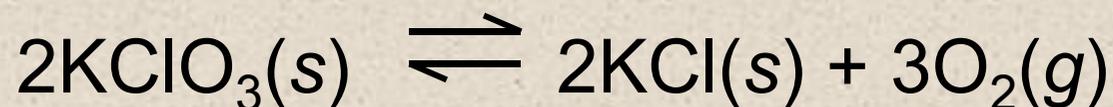
- 불균일 평형- 한 개 이상의 상 존재:



Section 17.6

Heterogeneous Equilibria

- 불균일 평형의 위치는 존재하는 순수한 고체나 액체의 양에 의존하지 않는다.
- 순수한 고체와 액체의 농도는 변할 수 없기 때문
 - 순수한 액체나 고체의 농도는 상수이다.



$$K = [\text{O}_2]^3$$

예제 17.3

불균일 평형의 평형식 작성

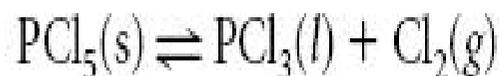
다음 과정의 K 에 관한 식을 쓰시오.

- 고체 오염화 인이 액체인 삼염화 인과 염소 기체로 분해된다.
- 진한 청색의 고체 황산 구리(II) 오수화물($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)을 가열하여 수증기가 방출되고 백색의 고체 황산 구리(II)가 생성된다.



풀이

a. 반응식은



이 경우 순수한 고체인 PCl_5 나 순수한 액체인 PCl_3 는 평형식에 포함되지 않는다.

$$K = [\text{Cl}_2]$$

b. 반응은



두 고체는 평형식에 포함되지 않는다. 평형식은 다음과 같다.

$$K = [\text{H}_2\text{O}]^5$$

Le Châtelier's Principle

17.7 르샤틀리에 원리

학습목표 : 평형상태에 있는 계가 교란을 받을 때 일어나는
변화를 예측하는 방법을 공부한다.

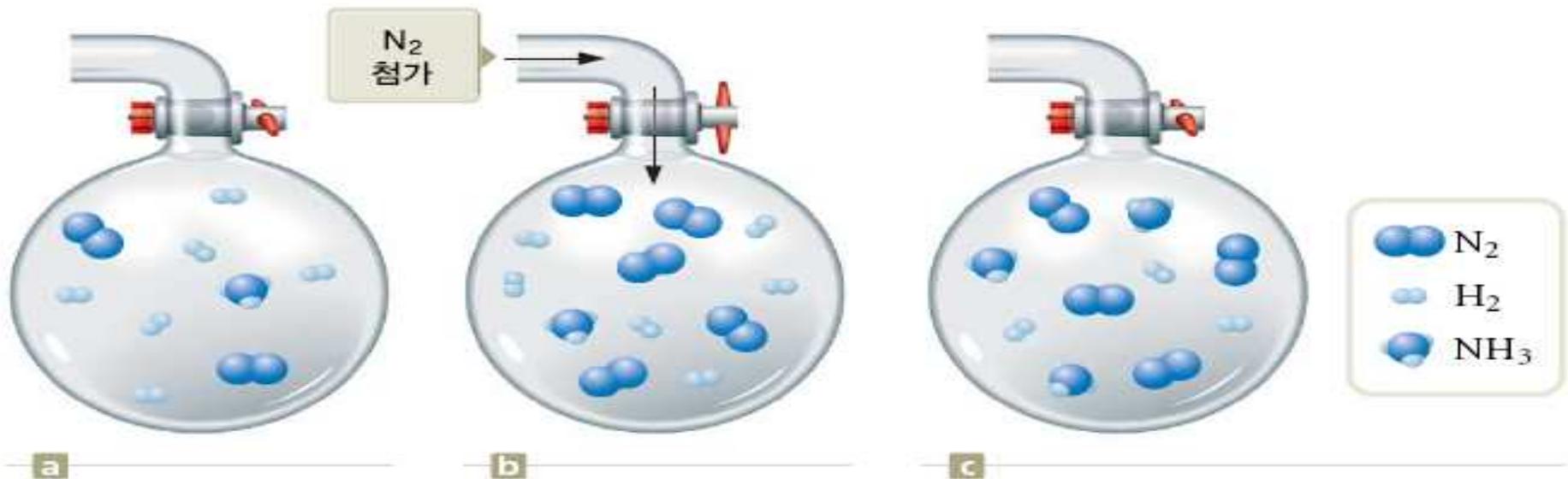
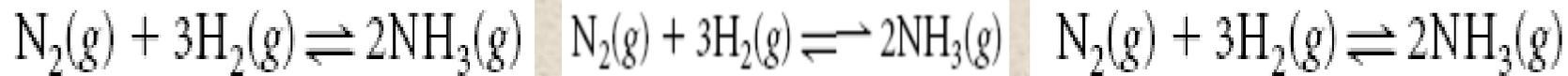
Le Châtelier's Principle

르샤트리에 원리

- 평형 상태에 있는 어떤 계에 변화가 주어지면 평형 위치는 그 변화의 효과를 감소시키는 방향으로 진행된다.

농도 변화의 효과

- 반응물이나 생성물이 첨가될 때 첨가되는 성분이 제거되는 방향으로 계의 평형이 이동한다.
- 반응물이나 생성물이 제거되면, 제거되는 성분이 많아지는 방향으로 계의 평형이 이동한다.



a N_2 , H_2 , NH_3 의 초기 평형 혼합물.

b 질소의 첨가.

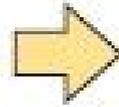
c **a**에서보다 더 많은 N_2 (N_2 가 첨가되었으므로), 더 적은 H_2 , 더 많은 NH_3 를 포함하는 계의 새로운 평형 위치

실험 I

$$[\text{N}_2] = 0.399 \text{ M}$$

$$[\text{H}_2] = 1.197 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_3] = 0.203 \text{ M}$$



N_2 1.000 mol/L를
가한다.

실험 II

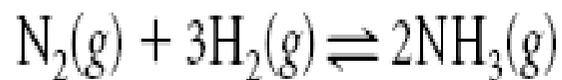
$$[\text{N}_2] = 1.348 \text{ M}$$

$$[\text{H}_2] = 1.044 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_3] = 0.304 \text{ M}$$

- 위치 I: $K = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2][\text{H}_2]^3} = \frac{(0.203)^2}{(0.399)(1.197)^3} = 0.0602$
- 위치 II: $K = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2][\text{H}_2]^3} = \frac{(0.304)^2}{(1.348)(1.044)^3} = 0.0602$

**K 값은 절대
바뀌지 않는다**



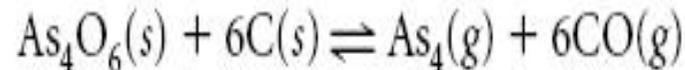
→ 질소가 첨가되면 가해진 질소가 소모되면서 평형이
오른쪽으로 이동하게 될 것을 올바르게 예측

→ 암모니아가 가해졌다면 계는 암모니아를 소모하는 방향인
왼쪽으로 이동

예제 17.4

Le Châtelier 원리의 응용: 농도 변화

비소(As_4)는 먼저 그 광석을 산소와 반응시켜 고체 As_4O_6 를 생성시키는 과정을 통해 자연으로부터 얻는다(As_4O_6 는 0.1 g 이상만 복용해도 치명적인 독성 화합물인데 탐정 소설로 유명해진 그 “비소”이다). 그리고 나서 As_4O_6 는 탄소를 사용하여 환원된다.



다음의 조건 변화에 반응하여 일어나는, 위 반응의 평형 위치 이동방향을 예측하십시오.

- 일산화 탄소 첨가
- $\text{C}(s)$ 나 $\text{As}_4\text{O}_6(s)$ 의 첨가 혹은 제거
- $\text{As}_4(g)$ 제거

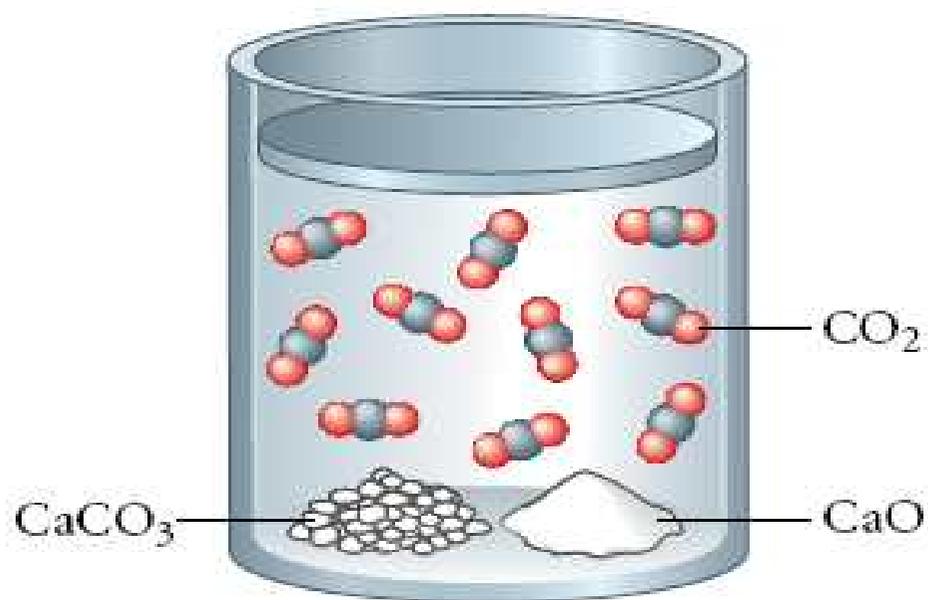
풀이

- a. Le Châtelier 원리는 농도가 증가하는 물질로부터 멀어지는 이동을 예측한다. CO가 가해질 때 평형 위치는 왼쪽으로 이동하게 될 것이다.
- b. 순수한 고체는 평형 위치에 영향을 주지 않으므로 탄소나 육산화 사비소의 양을 변화시켜도 평형에는 영향이 없을 것이다.
- c. 기체 비소가 제거되면 평형 위치는 오른쪽으로 이동하여 더 많은 생성물을 만들 것이다. 공업적 생산 공정에서는 수득률을 증대시키기 위하여 종종 연속적으로 생성물을 제거한다.

Section 17.7

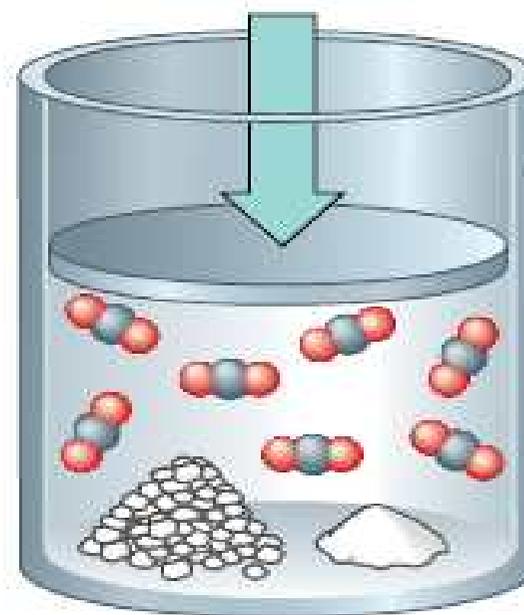
Le Châtelier's Principle

부피 변화의 영향



a

계가 초기의 평형에 있다.



b

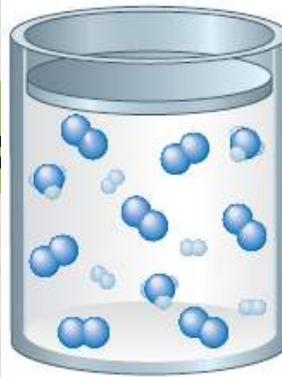
피스톤을 아래로 누르면 부피는 감소하고 압력은 증가한다. 계는 CO_2 분자가 소모되는 방향으로 이동하고, 따라서 압력은 다시 낮아진다.

Section 17.7

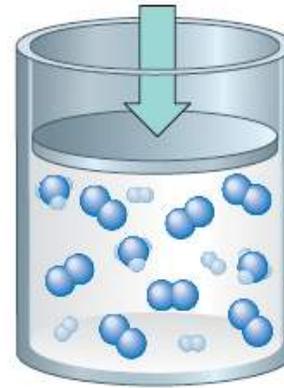
Le Châtelier's Principle

부피 변화의 영향

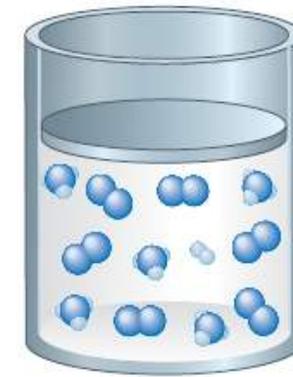
- 부피 감소



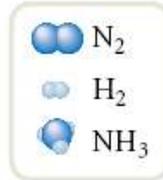
a
평형에 있는 $\text{NH}_3(\text{g})$, $\text{N}_2(\text{g})$, $\text{H}_2(\text{g})$ 의 혼합물.



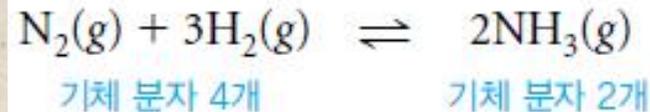
b
부피가 갑자기 감소한다.



c
 NH_3 는 더 많아지고, N_2 와 H_2 는 더 적어지는 계의 새로운 평형 위치. 용기의 부피가 감소하면 $\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3(\text{g})$ 의 반응은 오른쪽으로 이동한다(더 적은 분자수 방향으로).



- 계는 기체 분자 수 가장 적은 방향으로 이동한다.



부피의 감소가
압력을 증가시키므로
계는 압력을 낮추는
방향



존재하는 전체 기체 분자수를
줄이게 된다. 평형 위치는
오른쪽으로 이동

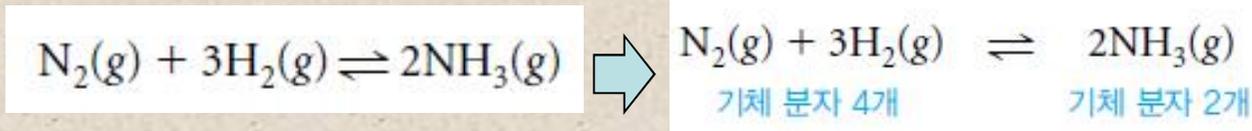
[Return to TOC](#)

Section 17.7

Le Châtelier's Principle

부피 변화의 영향

- 부피 증가
- 계는 압력이 증가하는 방향으로 이동한다.



부피의 증가가
압력을 감소시키므로
계는 압력을 높이는
방향

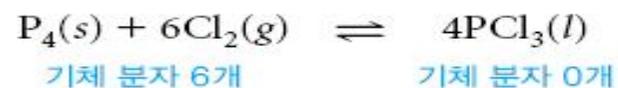


존재하는 전체 기체 분자수를
늘리게 된다. 평형 위치는
왼쪽으로 이동

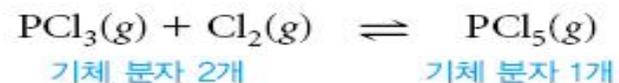
예제 17.5**Le Châtelier 원리의 응용: 부피 변화**

다음의 각 과정에서 부피가 감소할 때 일어날 수 있는 평형 위치의 이동을 예측하시오.

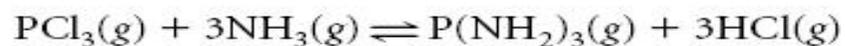
a. 다음 반응에 의한 액체 삼염화 인의 제조



b. 다음 반응에 의한 기체 오염화 인의 제조



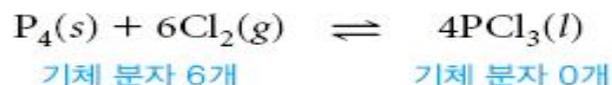
c. 암모니아와 삼염화 인의 반응



예제 17.5**Le Châtelier 원리의 응용: 부피 변화**

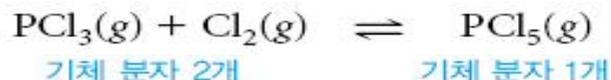
다음의 각 과정에서 부피가 감소할 때 일어날 수 있는 평형 위치의 이동을 예측하시오.

a. 다음 반응에 의한 액체 삼염화 인의 제조

**풀이 a**

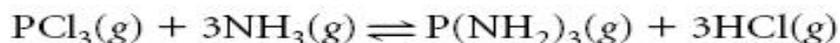
P_4 와 PCl_3 는 각각 순수한 고체와 액체이므로 Cl_2 에 의한 영향만을 고려하면 된다. 부피가 감소하면, 처음에는 Cl_2 의 압력이 증가하여 평형 위치는 오른쪽으로 이동할 것이고, 기체 Cl_2 는 소모되어, 압력이 감소하게 된다(초기의 변화를 상쇄시키기 위해).

b. 다음 반응에 의한 기체 오염화 인의 제조

**풀이 b**

생성물은 한 분자뿐이고 반응물은 2분자이므로 부피 감소(압력증가)는 평형을 오른쪽으로 이동시킬 것이다. 즉, 계는 존재하는 분자수를 줄임으로써 감소된 부피(증가한 압력)에 반응하려 할 것이다.

c. 암모니아와 삼염화 인의 반응

**풀이 c**

균형 맞춘 반응식의 양변은 둘 다 4개씩의 기체 분자를 갖고 있다. 따라서 부피의 변화

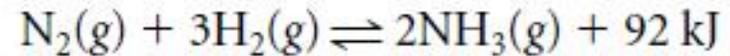
는 평형 위치에 아무런 영향을 주지 않을 것이다. 어떤 방향으로 이동하더라도 존재하는 분자수가 변하지 않으므로, 이 경우 어떤 이동도 없다.

[Return to TOC](#)

Le Châtelier's Principle

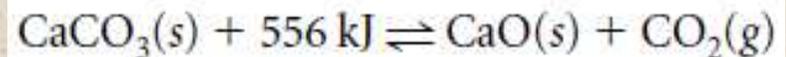
온도 변화의 영향

- K값은 온도에 따라 변한다. K값의 변화의 방향을 예측하기 위하여 르샤트리에의 원리를 이용할 수 있다.
- **발열 반응(Exothermic reaction)** – 열을 생성하는 반응
 - 평형에 있는 계를 가열하여 에너지를 가하면, 평형 위치가 에너지를 소모하는 방향으로 이동한다. 즉 **왼쪽** 방향으로 이동할 것이다.



방출된
에너지

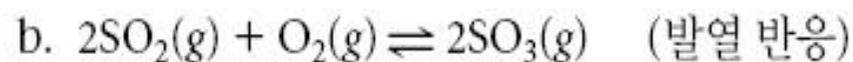
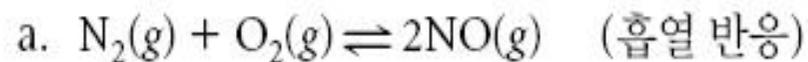
- **흡열 반응(Endothermic reaction)** – 열을 흡수하는 반응
 - 평형에 있는 계를 가열하여 에너지를 가하면, 평형 위치가 **오른쪽**으로 이동할 것이다.



필요한
에너지

예제 17.6**Le Châtelier 원리의 응용: 온도의 변화**

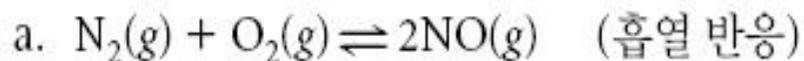
다음의 각 반응에 대하여 온도가 상승할 때 평형이 어떻게 이동할 것인지 예측하십시오.



예제 17.6

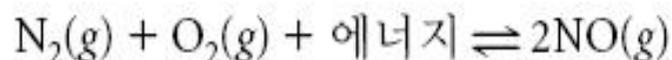
Le Châtelier 원리의 응용: 온도의 변화

다음의 각 반응에 대하여 온도가 상승할 때 평형이 어떻게 이동할 것인지 예측하십시오.

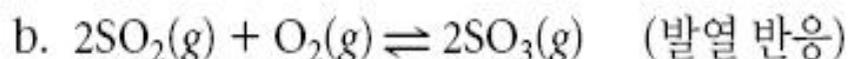


풀이 a

흡열 반응이므로 에너지를 반응물로 볼 수 있다.

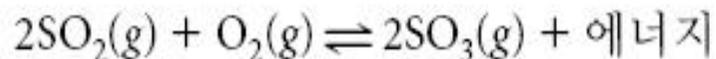


따라서 평형은 온도 상승(에너지 증가)에 따라 오른쪽으로 이동한다.



풀이 b

발열 반응이므로 에너지는 생성물로 취급한다.



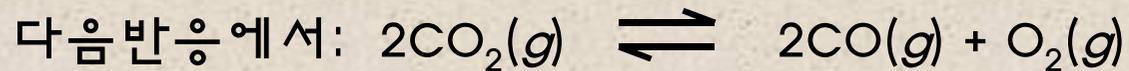
온도가 상승하면 평형은 왼쪽으로 이동한다.

Section 17.7

Le Châtelier's Principle



개념 점검



평형 위치에서 반응물의 방향으로 이동시키려면 다음 중 몇개의 변화를 주어야 할까?

- I. CO 기체 제거. 평형위치 생성물 방향으로 이동
- II. O₂ 기체 첨가.
- III. CO₂ 기체 제거.
- IV. 용기의 부피감소에 의해 압력의 증가가 일어난다

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

Section 17.7

Le Châtelier's Principle



개념 점검

수소 기체를 생성하는 방법을 다음 흡열반응으로 나타낼 수 있다 :

$$\text{CH}_4(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g})$$

생성되는 수소 기체의 양을 감소하기 위해서는 다음 중 몇 개의 변화를 주어야 하나? → 왼쪽으로

- I. $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 첨가
- II. 용기 부피 2배로 증가
- III. $\text{CH}_4(\text{g})$ 제거
- IV. 온도 증가 (반응물에 가열)

a) 1 (III) 왼쪽으로

b) 2

c) 3

d) 4

Section 17.8

Applications Involving the Equilibrium Constant

17.8 평형상수의 응용

학습목표 : 평형 상수로부터 평형 농도를 계산하는 방법을
배운다

Applications Involving the Equilibrium Constant

반응의 정도

- K 값이 1보다 큰 것은 평형에서 반응 계 내부는 생성물로 이루어져있다는 뜻이다. - 평형은 오른 쪽이다
 - 반응이 완전히 완결되었음을 의미한다.



$$K = \frac{[B]}{[A]}$$

$$\frac{[B]}{[A]} = 10,000$$

Applications Involving the Equilibrium Constant

반응의 정도

- K 값이 1보다 작은 것은 평형에서 반응 계 내부는 반응물로 이루어져있다는 뜻이다.- 평형은 왼쪽이다
 - 반응이 제대로 진행되지 않음을 의미 한다.

Section 17.8

Applications Involving the Equilibrium Constant

- 계의 K 값은 평형 농도 세트를 알면 계산 가능하다.
- K 값과 몇 개의 평형 농도를 알려주면 알려지지 않은 평형 농도를 계산 할 수 있다.



$$K = \frac{[\text{PCl}_3][\text{Cl}_2]}{[\text{PCl}_5]}$$

예제 17.7

평형식을 이용하여 평형 농도 계산

기체 오염화 인이 염소와 삼염화 인 기체로 분해된다. $K = 8.96 \times 10^{-2}$ 가 되는 온도에서, PCl_5 와 PCl_3 의 평형 농도는 각각 $6.70 \times 10^{-3} \text{ M}$ 과 0.300 M 이었다고 한다. 평형에서 Cl_2 의 농도를 계산하시오.

풀이 방향

평형에서 존재하는 $[\text{Cl}_2]$ 를 결정하고자 한다.

주어진 자료

이 반응에서 균형 맞춘 반응식은



이고, 평형 상수 K 는

$$K = \frac{[\text{PCl}_3][\text{Cl}_2]}{[\text{PCl}_5]} = 8.96 \times 10^{-2}$$

으로 나타낼 수 있는데, 다음 농도를 알고 있다.

$$[\text{PCl}_5] = 6.70 \times 10^{-3} \text{ M}$$

$$[\text{PCl}_3] = 0.300 \text{ M}$$

풀이 과정

우리는 $[\text{Cl}_2]$ 를 계산하고자 한다. 평형식을 재배열하여 Cl_2 의 농도를 계산해 보도록 하자. 우선 다음의 평형식에서

$$K = \frac{[\text{PCl}_3][\text{Cl}_2]}{[\text{PCl}_5]}$$

양변을 $[\text{PCl}_3]$ 로 나누면

$$\frac{K}{[\text{PCl}_3]} = \frac{\cancel{[\text{PCl}_3]}[\text{Cl}_2]}{\cancel{[\text{PCl}_3]}[\text{PCl}_5]} = \frac{[\text{Cl}_2]}{[\text{PCl}_5]}$$

다음으로, 양변에 $[\text{PCl}_5]$ 를 곱하면

$$\frac{K[\text{PCl}_5]}{[\text{PCl}_3]} = \frac{[\text{Cl}_2]\cancel{[\text{PCl}_5]}}{\cancel{[\text{PCl}_5]}} = [\text{Cl}_2]$$

그러면, 주어진 값을 대입하여, $[\text{Cl}_2]$ 를 계산할 수 있다.

$$[\text{Cl}_2] = K \times \frac{[\text{PCl}_5]}{[\text{PCl}_3]} = (8.96 \times 10^{-2}) \frac{(6.70 \times 10^{-3})}{(0.300)}$$
$$[\text{Cl}_2] = 2.00 \times 10^{-3}$$

Cl_2 의 평형 농도는 $2.00 \times 10^{-3} \text{ M}$ 이다.

Section 17.8

Applications Involving the Equilibrium Constant



개념 점검

평형이 오른쪽으로 치우쳐 있다면, K 값은

-----.

크다 (혹은 >1)

평형이 왼쪽으로 치우쳐 있다면, K 값은

-----.

작다 (혹은 <1)

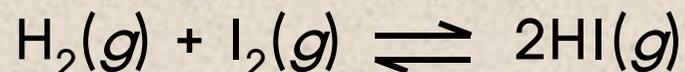
Section 17.8

Applications Involving the Equilibrium Constant



개념 점검

주어진 온도에서, $K = 50$ 인 반응에서:



H_2 의 평형 농도를 계산 하라:

$$[\text{I}_2] = 1.5 \times 10^{-2} M, [\text{HI}] = 5.0 \times 10^{-1} M$$

a) $1.5 \times 10^{-2} M$

b) $3.0 \times 10^{-2} M$

c) $5.0 \times 10^{-1} M$

d) $3.3 \times 10^{-1} M$

$$K = (\text{HI})^2 / (\text{H}_2)(\text{I}_2)$$

$$50 = (5.0 \times 10^{-1})^2 / (\text{H}_2)(1.5 \times 10^{-2})$$

$$(\text{H}_2) = 3.3 \times 10^{-1} M$$

Solubility Equilibria

17.9 용해도 평형

학습목표 : 염의 용해도가 주어졌을 때 용해도 곱을 계산하는
방법과 용해도 곱으로부터 염의 용해도를 계산
하는 방법을 배운다.

Section 17.9

Solubility Equilibria

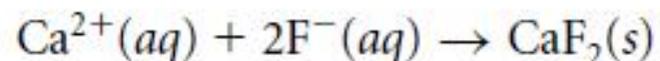
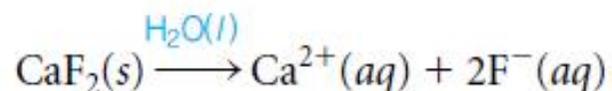
용해도 평형

- 평형 조건은 과량의 고체, $MX(s)$ 를 포함한 포화 용액에도 적용 할 수 있다.
 - $K_{sp} = [M^+][X^-] = \text{용해도 곱 상수 또는 용해도 곱}$
 - K_{sp} 값은 $MX(s)$ 의 용해도를 측정함으로써 계산 할 수 있다.

고체 염이 용해 (용해도, mol/L) \rightarrow Ca^{2+} 와 F^- 농도가 증가

\rightarrow 이온들끼리 충돌하여 고체 염을 다시 생성시키는 가능성이 증가

\rightarrow 평형(용액 포화)



$$K_{sp} = [Ca^{2+}][F^-]^2$$

[return to TOC](#)

Section 17.9

Solubility Equilibria

용해도 평형

- 용해도 곱 평형 상수(K_{sp})는 주어진 온도에서 주어진 고체에 대한 값이다.



$$K_{sp} = [\text{Bi}^{3+}]^2 [\text{S}^{2-}]^3$$

예제 17.8

용해도곱 식 쓰기

다음의 고체가 물에 용해되는 반응의 균형 맞춘 반응식과 각 고체의 K_{sp} 를 쓰시오.

- a. $\text{PbCl}_2(s)$ b. $\text{Ag}_2\text{CrO}_4(s)$ c. $\text{Bi}_2\text{S}_3(s)$

[Return to TOC](#)

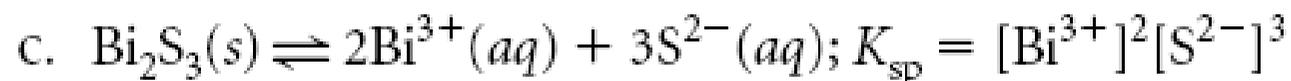
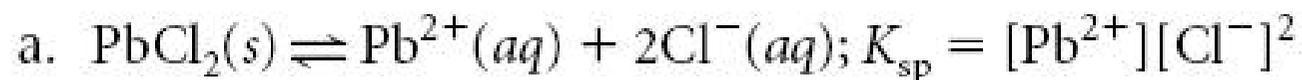
예제 17.8

용해도곱 식 쓰기

다음의 고체가 물에 용해되는 반응의 균형 맞춘 반응식과 각 고체의 K_{sp} 를 쓰시오.

- a. $\text{PbCl}_2(s)$ b. $\text{Ag}_2\text{CrO}_4(s)$ c. $\text{Bi}_2\text{S}_3(s)$

풀이



예제 17.9

용해도곱 계산

브로민화 구리(I), CuBr은 25 °C에서 2.0×10^{-4} mol/L의 용해도를 갖는다. 즉 물 1.0 L에 과량의 CuBr(s)를 넣으면 고체 2.0×10^{-4} 몰이 녹아 포화 용액을 만들게 됨을 알 수 있다. 이 고체의 K_{sp} 값을 계산하시오.

풀이

풀이 방향

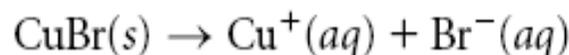
25 °C에서 고체 CuBr의 K_{sp} 값을 계산하고자 한다.

주어진 자료

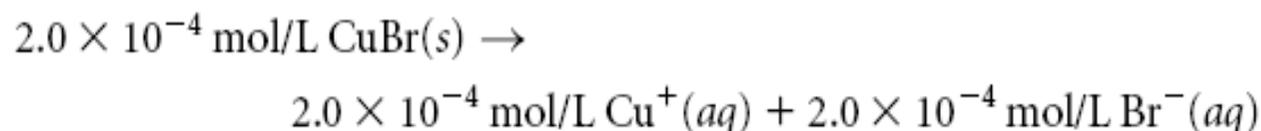
- 25 °C에서 CuBr의 용해도는 2.0×10^{-4} M.
- $\text{CuBr}(s) \rightleftharpoons \text{Cu}^+(aq) + \text{Br}^-(aq)$
- $K_{sp} = [\text{Cu}^+][\text{Br}^-]$

풀이 과정

이온의 평형 농도인 $[\text{Cu}^+]$ 와 $[\text{Br}^-]$ 를 알 수 있다면, K_{sp} 값을 계산할 수 있다. CuBr 의 용해도 측정치는 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 이며, 고체 2.0×10^{-4} 몰이 물 1.0 L에 용해되어 평형을 이루게 된다는 것을 뜻한다. 반응은



가 되고, 따라서



평형 농도는

$$[\text{Cu}^+] = 2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$$

$$[\text{Br}^-] = 2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$$

이들 평형 농도로부터 CuBr 의 K_{sp} 값을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{\text{sp}} &= [\text{Cu}^+][\text{Br}^-] = (2.0 \times 10^{-4})(2.0 \times 10^{-4}) \\ &= 4.0 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

K_{sp} 값의 단위는 생략한다.

예제 17.10

K_{sp} 값으로부터 용해도 계산

고체 $\text{AgI}(s)$ 의 K_{sp} 값은 25°C 에서 1.5×10^{-16} 이다. 25°C 에서 물에 대한 $\text{AgI}(s)$ 의 용해도를 계산하시오.

풀이

풀이 방향

25°C 에서 AgI 의 용해도를 결정하고자 한다.

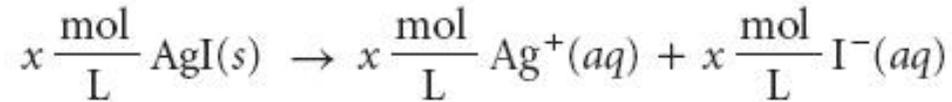
주어진 자료

- $\text{AgI}(s) \rightleftharpoons \text{Ag}^+(aq) + \text{I}^-(aq)$
- 25°C 에서, $K_{sp} = [\text{Ag}^+][\text{I}^-] = 1.5 \times 10^{-16}$

[Return to TOC](#)

풀이 과정

이 고체의 용해도를 모르기 때문에 평형에 도달하는데 $x \text{ mol/L}$ 가 용해된다고 생각한다. 따라서,



평형에서는

$$[\text{Ag}^+] = x \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$
$$[\text{I}^-] = x \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

이들 농도를 위의 평형식에 대입하면,

$$K_{\text{sp}} = 1.5 \times 10^{-16} = [\text{Ag}^+][\text{I}^-] = (x)(x) = x^2$$

따라서,

$$x^2 = 1.5 \times 10^{-16}$$
$$x = \sqrt{1.5 \times 10^{-16}} = 1.2 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$$

$\text{AgI}(s)$ 의 용해도는 $1.2 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$ 이다.

Section 17.9

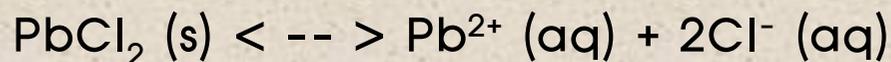
Solubility Equilibria



개념 점검

증류수에 PbCl_2 염을 녹여 PbCl_2 포화 용액을 만들었다면, K_{sp} 값은 얼마인가? 이 때 Pb^{2+} 농도는 $1.6 \times 10^{-2} \text{ M}$ 이다

- a) 2.6×10^{-4}
- b) 2.0×10^{-4}
- c) 3.2×10^{-2}
- d) 1.6×10^{-5}



$$K_{sp} = [\text{Pb}^{2+}] [\text{Cl}^-]^2 = (1.6 \times 10^{-2}) (3.2 \times 10^{-2})^2 = 1.6 \times 10^{-5}$$

Section 17.9

Solubility Equilibria



개념 점검

물에서 염화은(AgCl)의 용해도를 계산하라.

$$K_{\text{sp}} = 1.6 \times 10^{-10}$$

a) $1.3 \times 10^{-5} \text{ M}$

b) $1.6 \times 10^{-10} \text{ M}$

c) $3.2 \times 10^{-10} \text{ M}$

d) $8.0 \times 10^{-11} \text{ M}$

$$\begin{aligned} K_{\text{sp}} &= [\text{Ag}^+][\text{Cl}^-] \\ 1.6 \times 10^{-10} &= (x)(x) = x^2 \\ x &= 1.3 \times 10^{-5} \text{ M} \end{aligned}$$