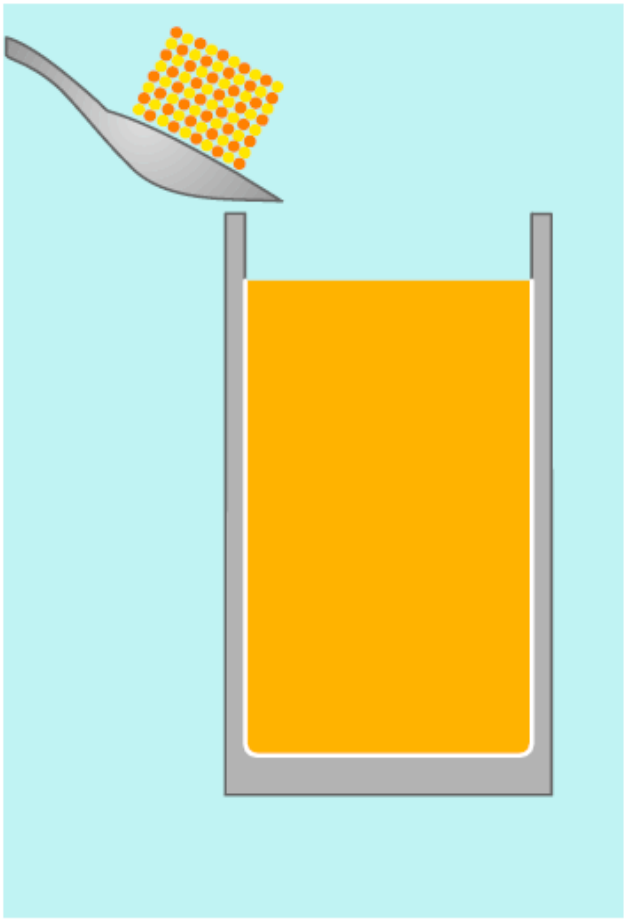
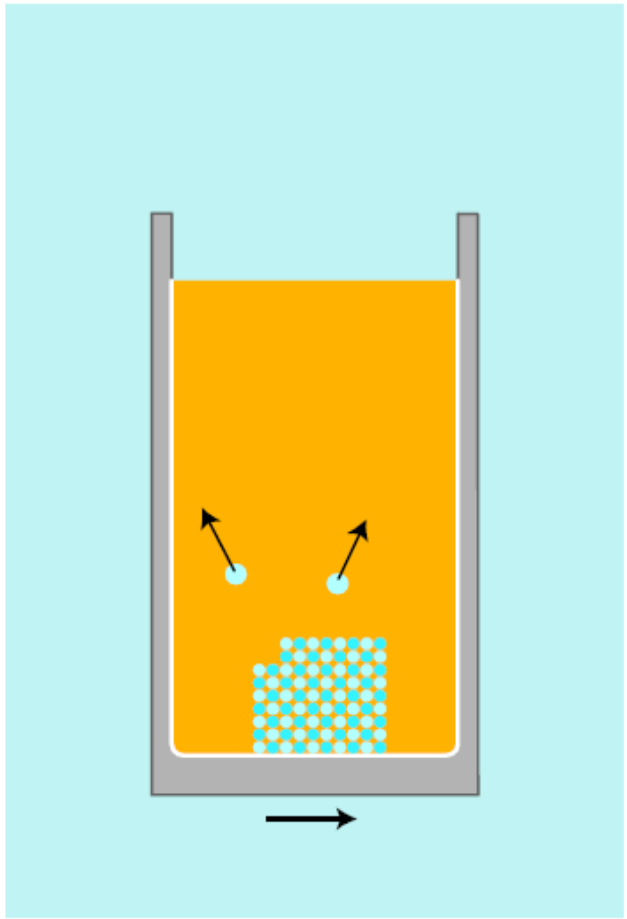
제11장 화학평형

11.1 가역 반응과 비가역 반응
11.2 화학 평형
11.3 화학 평형의 법칙
11.4 균일 평형과 불균일 평형
11.5 Le Chatelier's law

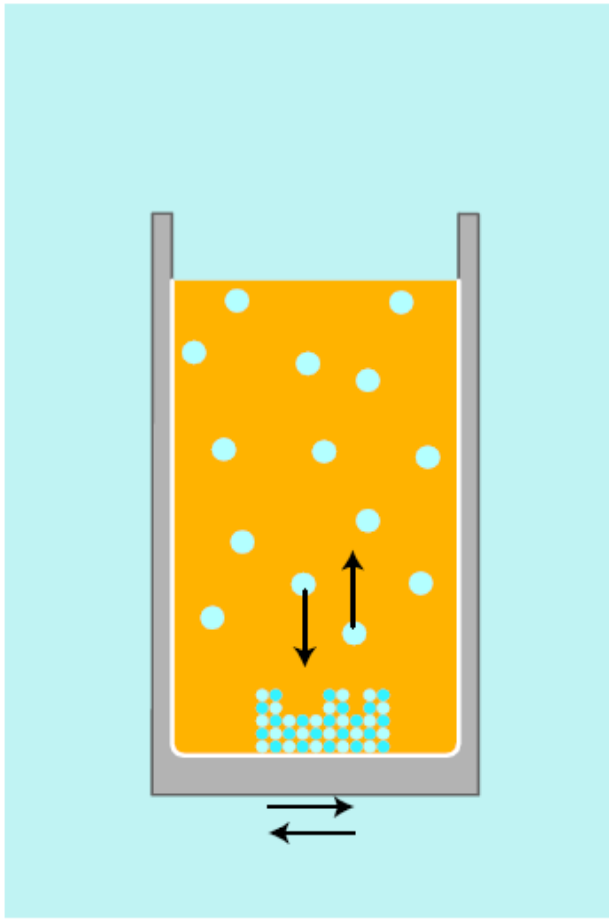
화학 평형 (chemical equilibrium)



Sugar(s)
반응 전



Sugar(s) $\longrightarrow$ Sugar(aq)
반응 개시



Sugar(s) $\rightleftarrows$ Sugar(aq)
동적 평형

중원대학교
JUNGWON UNIVERSITY

11.1 가역 반응과 비가역 반응

(1) 가역반응(reversible reaction)

– 정반응과 역반응이 동시에 일어나는 반응

– 반응물과 생성물이 계속적으로 상호 교환하여 반응물과 생성물의 농도가 일정하게 유지되는 동적 평형 상태

$$2HI(g) \underset{\text{냉각}}{\overset{\text{가열}}{\rightleftarrows}} H_2(g) + I_2(g)$$

$$CH_3COOH(aq) \leftrightharpoons CH_3COO^-(aq) + H^+(aq)$$

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

(2) 비가역 반응(irreversible reaction)

– 정반응과 역반응 중 **한 쪽 방향으로만 진행되는 반응**

– 일반적으로 기체가 발생하거나 침전이 생기는 반응

– 산과 염기의 중화반응에 의해 H_2O가 생기는 반응은 역반응이 일어나기 어려움

$$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)\uparrow$$

$$AgNO_3(aq) + NaCl(aq) \rightarrow AgCl(s)\downarrow + NaNO_3(aq)$$

$$HCl(aq) + NaOH(aq) \rightarrow NaCl(aq) + H_2O(\ell)$$

문제 11.1 염화나트륨과 질산바륨이 반응하여 질산나트륨과 염화바륨이 생기는 반응은 가역 반응이다. 화학 반응식으로 나타내어라.

11.2 화학 평형

- 가역 반응에서 정반응과 역반응의 **속도가 같으면** 겉보기에는 반응이 정지된 것 같으나 실제는 정반응과 역반응이 같은 속도로 진행이 되고 있는 상태를 **동적 평형(dynamic equilibrium)**이라고 함
- **화학 평형 상태(chemical equilibrium state)**

$$aA + bB \underset{v_2}{\overset{v_1}{\rightleftharpoons}} cC + dD$$

화학평형 : v_1(정반응속도) = v_2(역반응속도)

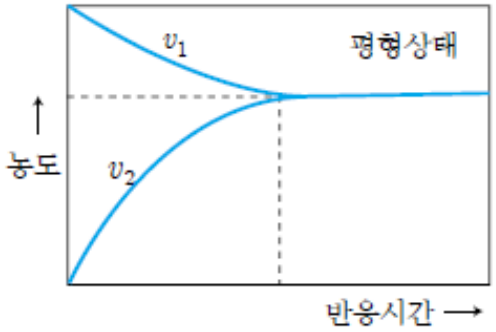


그림 11.1 평형상태에 도달할 때까지의 v_1와 v_2의 농도변화

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

찬물에서: 당 (s) ⟶ 당 (aq)

당을 더 많이 첨가할 수록 : 당 (s) ⟶⟵ 당 (aq)

용해되는 양은 역반응이

일어나기 전까지 계속 증가

역반응의 속도는 역반응과 정반응의 속도가 같아질 때까지 계속 증가:

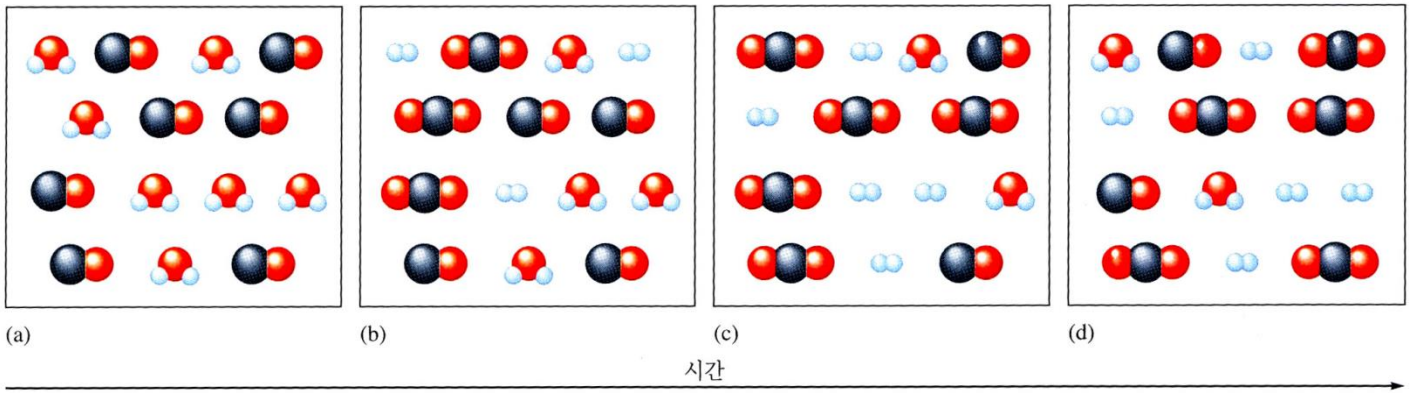
$Rate_f = Rate_r$

$$\text{당 (s)} \underset{Rate_r}{\overset{Rate_f}{\rightleftharpoons}} \text{당 (aq)}$$

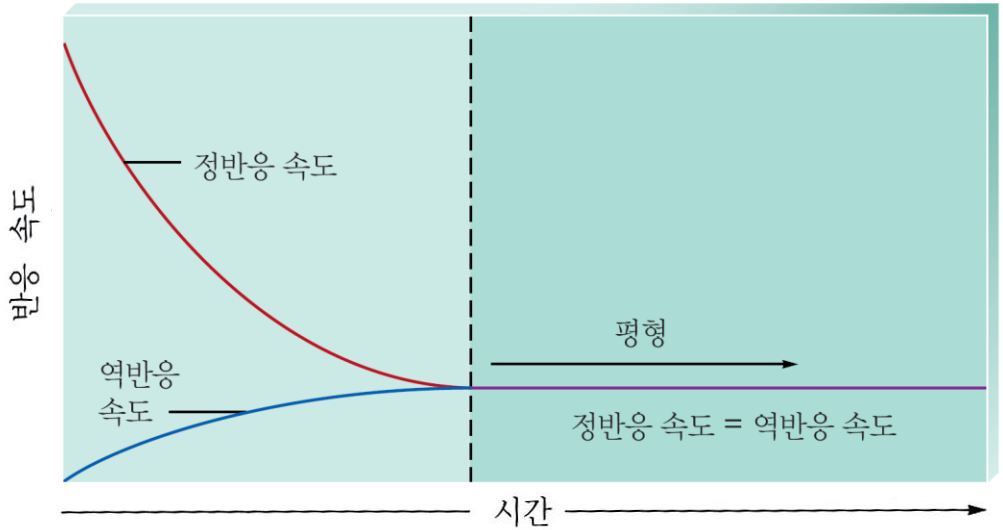
정반응의 속도와 역반응의 속도가 같은 상태를 평형상태라 말하며

정반응과 역반응은 계속 진행되지만 속도는 같다.

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY



(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

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

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

어떤 반응의 반응물과 생성물의 농도가 변하지 않으면 다음 두 가지 가능성

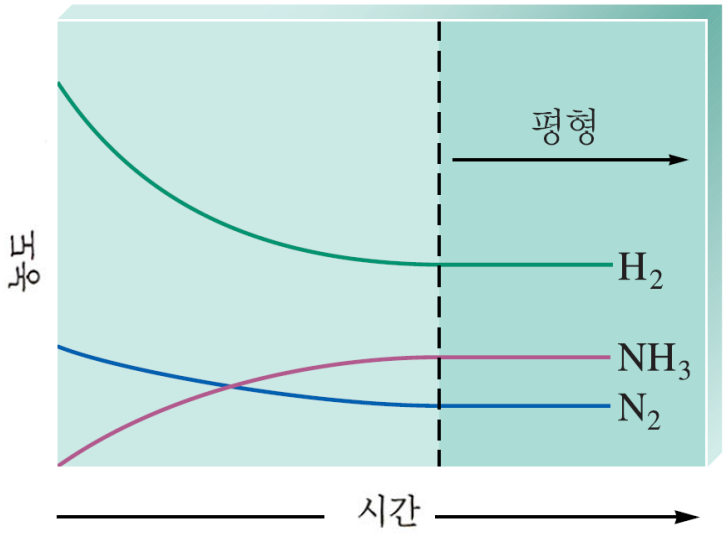
1. 그 계가 **평형**에 도달하였다
2. 정반응과 역반응의 속도가 너무 느려 그 계가 평형에 도달하는 속도를 측정할 수 없다

2의 예 : $N_2(g) + 3H_2(g) \leftrightarrows 2NH_3(g)$

상온에서 $N_2(g)$와 $3H_2(g)$는 반응이 매우 느림

∵N≡N ; 강한 삼중 결합

→ activation energy를 낮추는 조건 필요 (예: 촉매 사용)



중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

11.3 화학 평형의 법칙

- 화학 반응이 평행상태에 있을 때는 생성물질의 농도의 곱과 반응물질의 농도의 곱의 비는 온도가 일정하면 항상 일정함
- 이를 화학 평형의 법칙(law of chemical equilibrium)이라 함
- 가역반응이 평형상태에 있을 때

$$aA + bB \underset{v_2}{\overset{v_1}{\rightleftharpoons}} cC + dD$$

- $V_1=V_2$는 다음과 같은 관계가 성립함

$$K = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b}$$

[A],[B],[C],[D] 평형 상태에서 각 물질의 몰 농도

- K를 평형상수라고 하며, 온도가 일정하면 반응물질과 생성물질의 농도에 관계없이 K값은 일정함

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

11.4 균일 평형과 불균일 평형

(1) 균일 평형

– 반응 물질과 생성 물질이 모두 같은 상태에 있는 반응의 평형을 **균일 평형(homogeneous equilibrium)**이라고 함

– 기체와 기체의 반응으로 기체가 생성될 때, 액체와 액체가 반응하여 액체가 생성될 때의 평형이 균일 평형

$$H_2(g) + I_2(g) \rightleftarrows 2HI(g)$$

$$CH_3COOH(\ell) + C_2H_5OH(\ell) \rightleftarrows CH_3COOC_2H_5(\ell) + H_2O(\ell)$$

아세트산 에탄올 아세트산에틸

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

(2) 불균일 평형

– 둘 이상의 상들이 존재하는 반응에서의 평형을 **불균일 평형 (heterogeneous equilibrium)**이라고 함

– 고체와 기체가 포함하는 경우 화학 평형의 법칙은 다음과 같음

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

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

위 식에서 $[CaCO_3]$와 $[CaO]$는 순수한 고체이므로 이들의 농도는 일정함

평형 상수식은 고체의 일정한 농도를 포함시켜 다음과 같이 씀

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

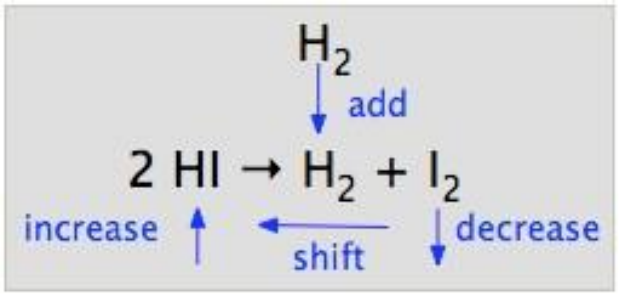
$$K' = [CO_2]$$

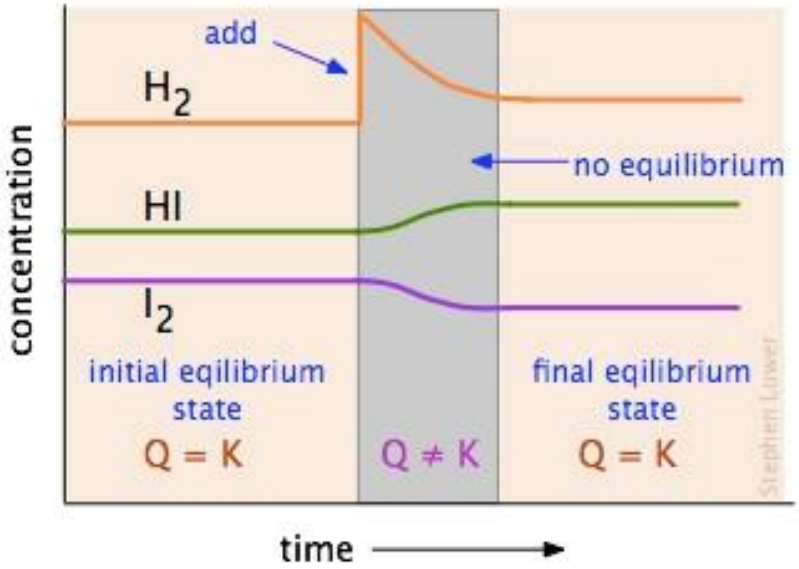
– 고체 물질이 반응에 관여 할 때는 고체 물질을 평형상수식에 나타내지 않고 기체의 몰 농도만으로 나타냄

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

11.5 Le Chatelier's law (르샤틀리에의 원리)

- 가역 반응이 평형 상태에 있을 때, 농도•압력 및 온도와 같은 반응 조건을 변화시키면, 그 조건의 변화를 없애려는 방향으로 반응이 진행되어 새로운 평형 상태에 이름
- 이 법칙을 Le Chatelier's law 또는 평형 이동의 법칙이라고 함





Q (reaction quotient)
K (equilibrium constant)

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

(1) 농도의 영향

– 평형 상태에 있는 반응에 있어서 그 속에 있는 어떤 물질의 농도를 증가시키면, 그 물질의 농도를 감소시키려는 방향으로 반응이 진행됨

반응 물질의 농도를 증가시키면 ⇒ 생성계 쪽으로 반응이 진행한다(정반응).

생성물질의 농도를 증가시키면 ⇒ 반응계 쪽으로 반응이 진행한다(역반응).

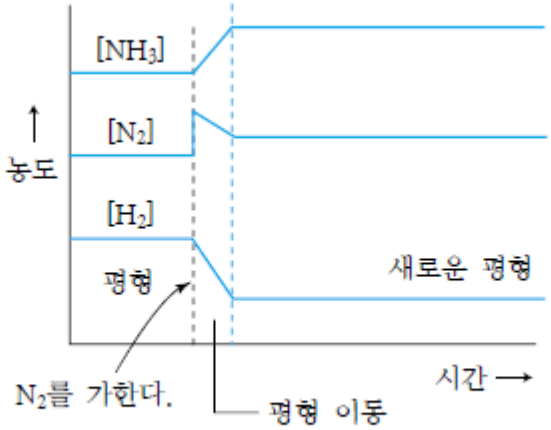


그림 11.2 $N_2(g) + 2H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g)$의 평형에 N_2를 가했을 때, 각 성분의 농도 변화

예제 다음의 가역 반응이 평형 상태에 있을 때, ( )와 같은 조건을 주면 반응은 어느 방향으로 진행되겠는가?

(a) $C(s) + H_2O(g) \rightleftarrows CO(g) + H_2(g)$ (CO의 첨가)

(b) $N_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2NO(g)$ (NO의 제거)

풀이 (a) CO를 가하면 [CO]가 감소하는 방향으로 반응이 진행된다(역방향).

(b) NO를 제거하면 [NO]가 증가하는 방향으로 반응이 진행된다(정방향).

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

문제 11.2

다음의 각 평형식에서 주어진 변화가 생겼을 때 방향변화와 농도변화를 설명하라.

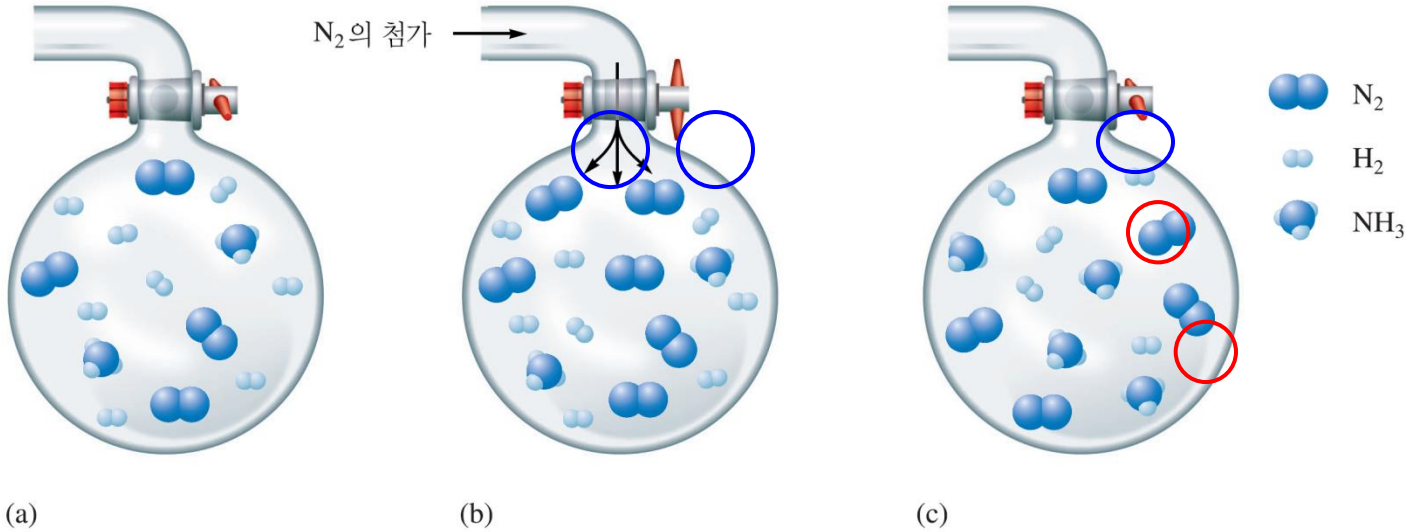
(a) $H_2(g) + I_2(g) \rightleftarrows 2HI(g)$
$[H_2]$의 증가

(b) $H_2(g) + CO_2(g) \rightleftarrows H_2O(g) + CO(g)$
$[H_2O]$의 증가

(c) $N_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2NO(g)$
$[O_2]$의 감소

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

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



(a) N_2, H_2, NH_3의 초기 평형 혼합물. (b) N_2의 첨가. (c) (a)보다 많은 양의 N_2 (N_2의 첨가 때문)와 적은 양의 H_2 및 많은 양의 NH_3를 가지고 있는 계의 새로운 평형 위치.

계에 N_2 분자를 가해주면
N_2와 H_2 사이의 충돌수가
증가하여 정반응의 속도가 증가

Le Châtelier의 원리에 의하면
질소의 첨가 ⟶ 계는 질소를 소비하는
방향으로 이동

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

(2) 온도의 영향

– 평형 상태에 있는 반응에 온도를 높이면 온도를 내리게 하는 방향(←), 즉 흡열하는 방향으로 반응이 진행되고, 온도를 내리면 발열하는 방향(→)으로 반응이 진행됨

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g) + 22\ kcal$$

반응계의 온도를 높이면 ⇒ 흡열반응 쪽으로 반응이 진행한다.

반응계의 온도를 낮추면 ⇒ 발열반응 쪽으로 반응이 진행한다.

발열반응: 반응 과정에서 계가 열을 방출하는 반응
흡열반응: 계가 열을 흡수함으로써 진행되는 반응

예제 다음의 반응이 평형 상태에 있을 때, 온도를 높이면 반응은 어느 방향으로 이동하겠는가?

$$2SO_2 + O_2 \rightleftarrows 2SO_3 + 45\ kcal$$

풀이 가열하면 흡열하는 방향, 즉 역방향으로 반응이 진행된다.

온도 변화의 영향

용기의 온도를 높이면, 반응의 종류에 상관없이 에너지를 소비하는 방향으로 반응 진행

$N_2(g) + 3H_2(g) \leftrightarrows 2NH_3(g) + 92\ kJ$

발열 반응 : 역반응 일어남

$556\ kJ + CaCO_3(s) \leftrightarrows CaO(s) + CO_2(g)$

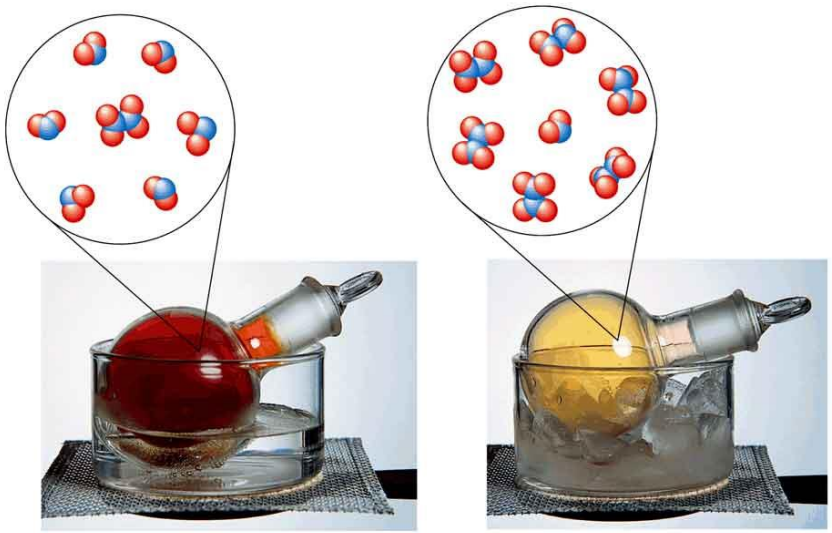
흡열 반응 : 정반응 일어남

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

온도 변화의 영향

$$58\ kJ + N_2O_4(g) \underset{}{\overset{0°C}{\rightleftharpoons}} 2NO_2(g) \quad (100°C)$$

무색 / 갈색



온도가 변화하면 $N_2O_4(g) \rightarrow 2NO_2(g)$의 평형이 이동한다.

(a) 100°C에서 많은 양의 NO_2가 존재하여 플라스크는 뚜렷한 적갈색을 띤다.

(b) 0°C에서 평형은 무색의 $N_2O_4(g)$로 이동한다.

표 13.4 반응, $58\ kJ + N_2O_4(g) \rightleftharpoons 2NO_2(g)$에 대한 평형 위치의 이동

변화	이동
$N_2O_4(g)$의 첨가	오른쪽
$NO_2(g)$의 첨가	왼쪽
$N_2O_4(g)$의 제거	왼쪽
$NO_2(g)$의 제거	오른쪽
$He(g)$의 첨가	변화 없음
용기의 부피 감소	왼쪽
용기의 부피 증가	오른쪽
온도의 증가	오른쪽
온도의 감소	왼쪽

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

(3) 압력의 방향

– 평형 상태에 있는 반응에 전체의 압력을 증가시키면, 압력을 감소시키는 방향, 즉 몰수가 감소하는 방향(→)으로 반응이 진행됨

– 압력을 감소시키면, 압력이 증가하는 방향(←), 즉 몰수가 증가하는 방향으로 반응이 진행됨

– 반응물과 생성물의 분자수가 같은 반응에서는, 압력에 영향을 받지 않음

압력을 높이면 ⇒ 반응은 기체의 몰수가 감소하는 방향으로 진행한다.

압력을 낮추면 ⇒ 반응은 기체의 몰수가 증가하는 방향으로 진행한다.

예제 다음의 가역 반응이 평형 상태에 있을 때, 압력을 크게 하면 평형은 어느 방향으로 이동하겠는가?

(a) $N_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2NO(g)$
(b) $2NO(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2NO_2(g)$
(c) $C(s) + CO_2(g) \rightleftarrows 2CO(g)$

풀이

(a) 양쪽의 분자수가 같으므로 압력의 영향을 받지 않는다.
(b) 반응 물질의 분자수가 많으므로 압력을 가하면 정방향으로 반응이 진행된다.
(c) $C(s)$는 화학 평형의 법칙에 나타내지 않는다. 반응 물질의 분자수가 적으므로 역방향으로 반응이 진행된다.

문제 11.3

용기 내의 부피가 감소하면 다음 평형은 어떻게 변하는가?

(a) $2NO_2Cl(g) \rightleftarrows 2NO_2(g) + Cl_2(g)$

(b) $2IBr(g) \rightleftarrows I_2(g) + Br_2(g)$

(c) $2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2SO_3(g)$

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

압력의 변화가 일어나는 경우

1. 기체 반응물 또는 생성물을 첨가 또는 제거
2. 반응에 참여하지 않는 비활성 기체를 첨가
3. 용기의 부피를 변화시킴

▶ 반응에 참여하지 않는 비활성 기체를 첨가하면

→ 전체 압력은 높이지만,

→ 반응물이나 생성물의 농도나 부분압력에는 아무런 영향을 미치지 않는다.

→ 평형에 영향을 주지 않음

▶ 기체 계가 들어 있는 용기의 부피를 줄이면

→ 반응물과 생성물 모두의 농도나 부분압력 증가

→ 몰수를 줄이는 방향(부피가 줄어드는 방향)으로 반응 진행

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

압력 변화의 영향

기체계가 들어 있는 용기의 부피를 줄이면

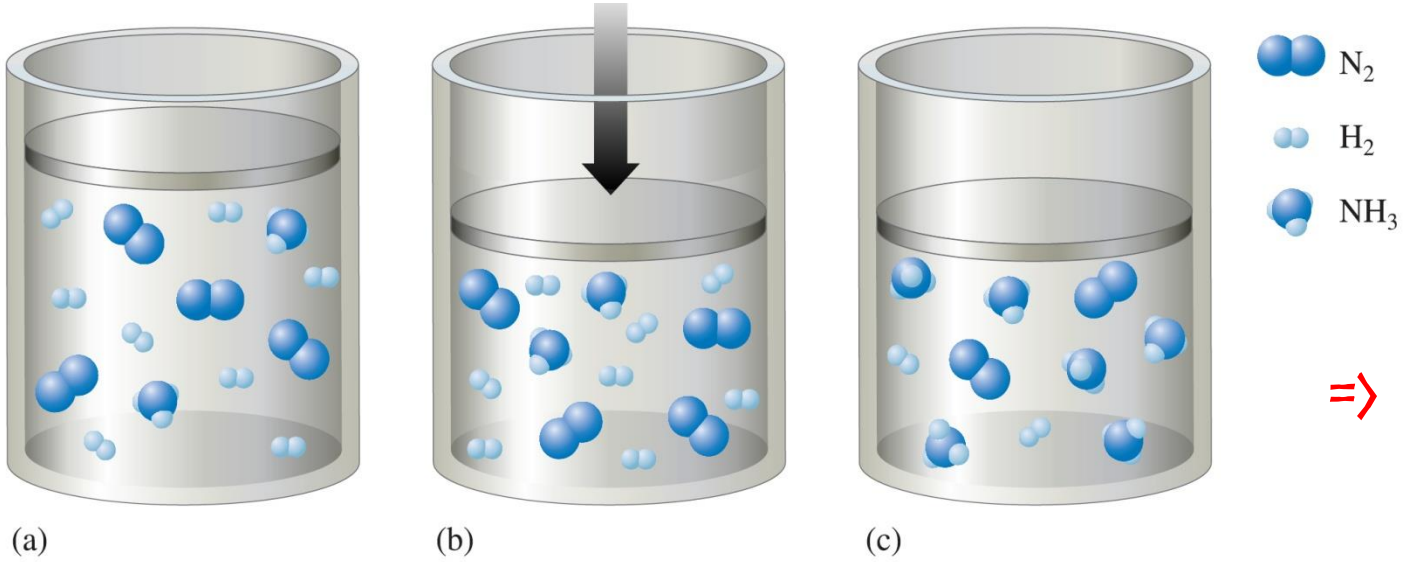
⟶ 반응물과 생성물 모두의 농도나 부분압력 증가

⟶ 몰수를 줄이는 방향(부피가 줄어드는 방향)으로 반응 진행

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

오른쪽: 2개 분자

왼쪽: 4개 분자 (압력: $N_2 + 3H_2 \rangle 2NH_3$)



⇒ 정반응

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

(4) 촉매의 역할

– 촉매(catalyst)란 반응과정에서 소모되지 않으면서 반응속도를 변화시키는 물질

– 촉매는 정•역 양쪽의 반응 속도를 모두 빠르게(정촉매)하거나 또는 느리게(부촉매) 함

– 촉매는 평형 상태에 도달하는 시간을 단축시키는 것이 원칙이나, 평형을 이동시키지는 못함

위키백과

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

에너지 (Energy)

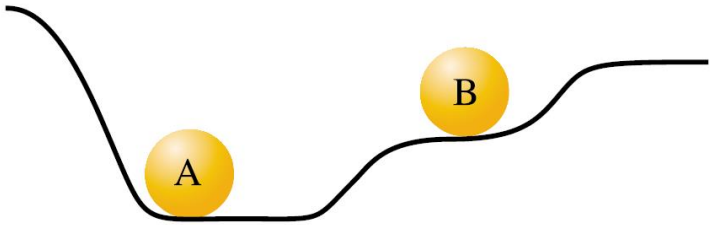
- **에너지:** 물체의 일을 할 수 있는 능력
  - 운동에너지 (kinetic energy): 움직임에 의한 에너지. 움직이는 차량, 보일러의 수증기, 굴러 떨어지는 바위, 댐에 갇힌 물의 방류
  - 위치에너지 (potential energy): 물체가 그 위치에서 잠재적으로 지니는 에너지, 포텐셜 에너지
  - 화학에너지 (chemical energy): 음식물 분자들이 더 작은 화학적 에너지를 지닌 더 단순한 분자로 대사될 때 방출되는 에너지

- **에너지 보존 법칙:** 에너지는 다른 형태로 바뀔 수는 있지만 새로 만들어지거나 소멸되지 않음

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY



(a) 초기



(b) 최종

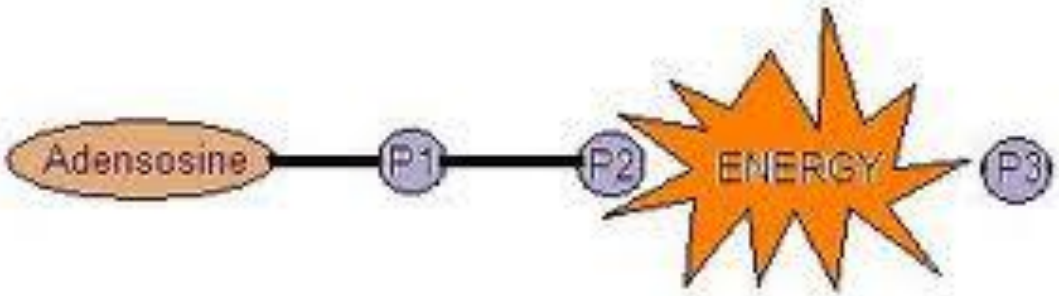
처음 위치에서 공 A의 퍼텐셜 에너지는 공 B보다 높다. (b) A가 언덕을 따라 굴러 내려오면서 잃게 되는 퍼텐셜 에너지는 마찰로 언덕 표면을 가열하거나(마찰 가열) B의 퍼텐셜 에너지를 증가시키는데 사용된다.



ATP (adenosine triphosphate)

에너지 방출

ADP (adenosine diphosphate)



Adenosine triphosphate is reduced to adenosine diphosphate (ADP) or adenosine monophosphate, depending on how many phosphate groups break off.

ATP: one of the principle compounds that living things use to store energy

중원대학교 JUNGWON UNIVERSITY

열 (에너지의 전달)

- 열에 의해 이동되는 에너지의 양을 나타내는 SI 단위로 주울(joule, J)
- 열 에너지에 대한 또 다른 단위는 칼로리 (calorie, cal)
- 1 cal = 4.184 J
- 1 cal: 1 g의 물을 14.5°C에서 15.5°C까지 1°C 변화시키는데 필요한 열량

