

Electrostatic Forces and The Electrical Double Layer

Dong-Myung Shin

Hongik University

Department of Chemical Engineering

Electrostatic Forces – Introduction

- 물과 접하고 있는 대부분의 표면은 적던 많던 간에 어떤 형태의 전하를 띠게 된다.
- **Colloid system**에서 전하가 있건 없건 간에 상호 작용을 하게 되면서 생기는 안정성, 환경으로부터의 민감성, 동전기 현상 (**electrokinetic properties**)
- 이전 **chapter** 에서 다룬 원자 분자간의 상호 작용을 좀더 발전 시켜서 **chapter 9**의 **colloidal systems**으로 발전 시킬 것이다.
- 표면 전하의 영향 :
electrokinetic properties: primary mechanism for stabilization

Electrostatic Forces – Interface Charges

- **SOURCES OF INTERFACIAL CHARGE**

표면에 전하를 갖게 하는 방법:

- 1) **Preferential (or differential) solution of surface ions**
- 2) **Direct ionization of surface group**
- 3) **Substitution of surface ions**
- 4) **Specific ion adsorption**
- 5) **Charges deriving from specific crystal structures.**

Electrostatic Forces

- SOURCES OF INTERFACIAL CHARGE**

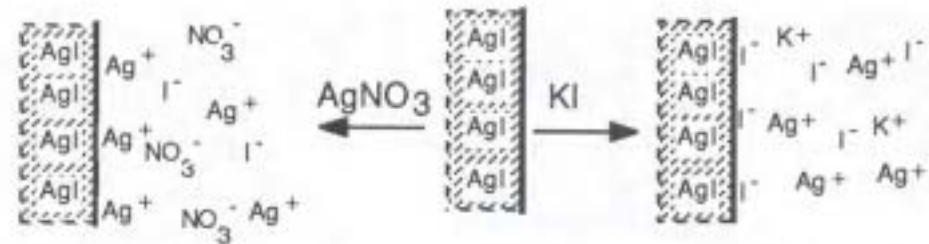
a) Preferential (or differential) solution of surface ions

b) Direct ionization of surface group

c) Substitution of surface ions

d) Specific ion adsorption

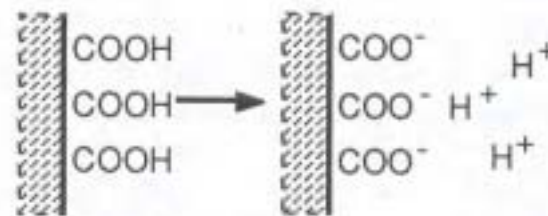
e) Charges deriving from specific crystal structures.



Net positive surface charge.

Net negative surface charge.

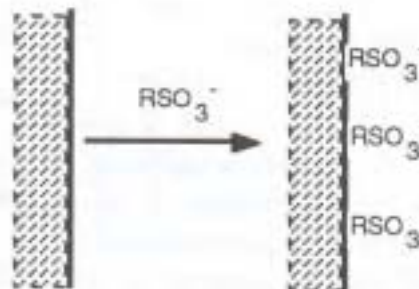
(a) Differential ion solubility.



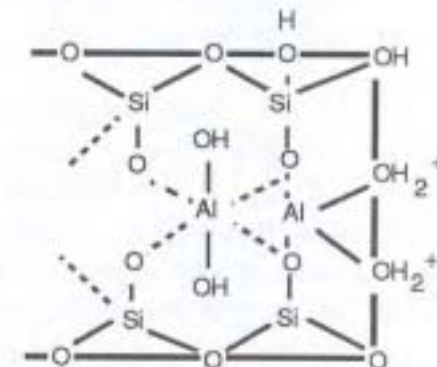
(b) Direct ionization of surface groups.



(c) Isomorphous ion substitution.



(d) Specific ion adsorption.



(e) Anisotropic crystals.

Figure 5.1. The principle sources of surface charge in solids.

Electrostatic Forces – Interface Charges

- **SOURCES OF INTERFACIAL CHARGE**

Differential Ion Solubility

용액에 잘 녹지 않는 고체의 표면에서 이온들이 우선적으로 용해되는 것을 이용

예) **silver halide colloids**

할로겐화은의 경우에는 물에 대한 용해도가 매우 낮다. 그래도 일부 이온은 천천히 녹아, 용해도곱 상수에 맞을 때 까지 녹는다.

AgI의 경우

$$K_{SP} = [Ag^+][I]^- = 10^{-16} \text{ mol L}^{-1} \quad (4.1)$$

두 이온이 같은 양씩 녹는 경우 : 각 이온의 농도는 **$10^{-8} \text{ mol L}^{-1}$** 이다.

Electrostatic Forces – Interface Charges

- **SOURCES OF INTERFACIAL CHARGE**

- **Differential Ion Solubility**

- **KI와 음전하 표면**

- → 표면의 전하는 0이다.

- 용액에 KI를 넣으면 → I⁻의 농도가 증가하고 <= common ion effect에 의하여 → I⁻가 적게 녹아 나오게 되고 → 표면에 I⁻가 많게 되어 음전하 표면

- **AgNO₃와 양전하 표면**

- 용액에 AgNO₃를 넣으면 → Ag⁺의 농도가 증가하고 → 공통이온효과에 의하여 → Ag⁺가 적게 녹아 나오게 되고 → 표면에 Ag⁺가 많게 되어 양전하 표면

이 두이온의 양을 잘 조절하면, 표면의 전하가 0이 된다. 이점을 **point of zero charge (ZPC)**라 부른다.

Electrostatic Forces – Interface Charges

- **SOURCES OF INTERFACIAL CHARGE**

Direct Ionization of Surface Groups

표면에 이온화 될 수 있는 기능기: 고분자 기능기 또는 **metal oxide**

Metal Oxide:

대부분이 **amphoteric** (음이온 양이온 모두 가능) : **pH**에 의하여 조절
각 물질마다 **ZPC**가 독특하다.

고분자 표면:

carboxylic acid and salts (---COOH , $\text{---COO}^- \text{M}^+$)

sulfonic acid and salts ($\text{---SO}_3\text{H}$, $\text{---SO}_3^- \text{M}^+$)

sulfuric acid esters and salts ($\text{---OSO}_3\text{H}$, $\text{---OSO}_3^- \text{M}^+$)

basic amino groups (---NR_3 , R=H or organic groups)

quaternary ammonium groups ($\text{---NR}_4^+ \text{X}^-$)

Electrostatic Forces – Interface Charges

- **SOURCES OF INTERFACIAL CHARGE**

Direct Ionization of Surface Groups

Degree of ionization

COOH - (neutral) COO⁻ (anionic - basic condition)

NR₃ (neutral) NR₃H (cationic - acidic condition)

**sulfonic acid or ester - 대부분 anionic (중성으로 할려면 아주 강산성이
어야 한다)**

Quarternary ammonium salts - 대부분 cationic

amino acid (---C(NH₂)COOH)의 경우 pH에 따라 전하 다름.

Electrostatic Forces – Interface Charges

- **SOURCES OF INTERFACIAL CHARGE**

- **Substitution of Surface Ions**

Isomorphous substitution ; 어떤 구조에 속해 있는 이온이 그 이온 보다 작은 원자가를 갖는 이온으로 치환되는 것.

예) **silicon atom (valency =4+) in clay** 가 **aluminium (3+)**로 바뀌는 경우
표면은 음이온을 띠게 된다. (그림 5.1c)

pH를 낮추면 **ZPC**로 만들 수 있다.

Electrostatic Forces – Interface Charges

- **SOURCES OF INTERFACIAL CHARGE**

Specific Ion Adsorption

금표면 : 염소이온의 흡착

AuCl_4^- 와 유사한 표면을 형성

현실적으로는 계면활성제의 흡착; 양이온성 및 음이온성 표면 형성

Charge inversion

carboxylate ($-\text{COO}^- \text{Na}^+$) 음이온성

→ di- or tri-valent ions 첨가 → 양이온성 표면의 형성

: 생물학적인 막에서 관찰된다.

Electrostatic Forces – Interface Charges

- **SOURCES OF INTERFACIAL CHARGE**

Anisotropic Crystals

kaolinite clay

Aluminosilicates - 음이온과 양이온 표면을 다 생성할 수 있다.

결정 면의 노출된 형태에 따라서 양이온 표면을 만들기도 하고 음이온 표면을 만들기도 하며, 둘 다 모두를 갖고 있기도 하다. 또한, 한 개 이상의 **ZPC**를 형성하기도 한다.

이러한 비 대칭적 이온 특성에 의하여 물을 가하면 부피가 **10배** 가량 증가한다.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Coulomb's Law**

진공하(F_{el})에서 두 개의 전하가 q_1 과 q_2 이 거리 r 만큼 떨어져 있을 때,

$$F_{el} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2} \quad (5.1)$$

무한대 거리에서 r 만큼의 거리로 두 개의 전하를 갖다 놓는데 필요한 일은

$$W(r) = \int_{\infty}^r F_{el} dr = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r} \quad (5.2)$$

두 개의 전하가 같으면, $w(r)$ 은 양이고 상호작용은 반발력이다. 반대 전하면, 친화력.

전하 q_1 이 고립된 공간에 있다고 하면, 거리 r 이 되는 지점에 전계를 형성한다. 이때, q_1 에서 부터 무한대 되는 거리에서 r 까지의 거리로 전하를 옮기는데 필요한 일은 $q_1/(4\pi\epsilon_0 \epsilon r)$ 이다.

이 양이 전하 q_1 에 의하여 거리 r 에 형성된 **electrical potential** Ψ 이 된다.

식5.1에 따르면 전하 q_2 를 q_1 에서 거리 r 안에 갖다 놓는데 필요한 일은 $q_2\Psi$ 이다.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Boltzmann's Distribution and the Electrical Double Layer**

단원자나 한 이온이 아닌 **many body problem**을 접근하기 위하여 필요.
어떤 입자가 기준 상태에서 ΔG 만큼의 에너지를 갖는 확률.

에너지가 **0**인 거리에서의 농도를 c_0 이고, 이곳에서 거리 r 만큼 떨어진 곳의
농도가 c 라면, 확률은 c 를 포함하면서 표현될 수 있다. 온도가 T 일 때,
Blotzmann distribution은 다음과 같이 주어진다.

$$c = c_0 \exp(-\Delta G/kT) \quad (5.3)$$

이 식을 전하를 띤 물질이 **Coulomb's law**를 따르고, 식 **5.3**은 어떤 점에서의
전기장 Ψ 이 작용하고 있을 때 어떤 점에서의 양이온의 농도는 다음 식으로
주어진다.

$$c_+ = c_0 \exp(-z_+ e\Psi/kT) \quad (5.4)$$

여기서 z_+ 는 양이온의 전하이므로 c_0 는 Ψ 이 **0**인 영역에서 양이온의 농도이다.
비슷한 접근을 음이온에 대하여 할 수 있다.

$$c_- = c_0 \exp(+z_- e\Psi/kT) \quad (5.5)$$

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Boltzmann's Distribution and the Electrical Double Layer**

용액 전체는 전기적으로 중성이거나, 국부적으로는 전기적 불균형이 있을 수 있다.

음전장 Ψ 에 대하여, 음전하보다 양전하가 많을 것이다.

$z_- = z_+ = 1$ 일 때, 과량은 다음 식으로 주어질 수 있다.

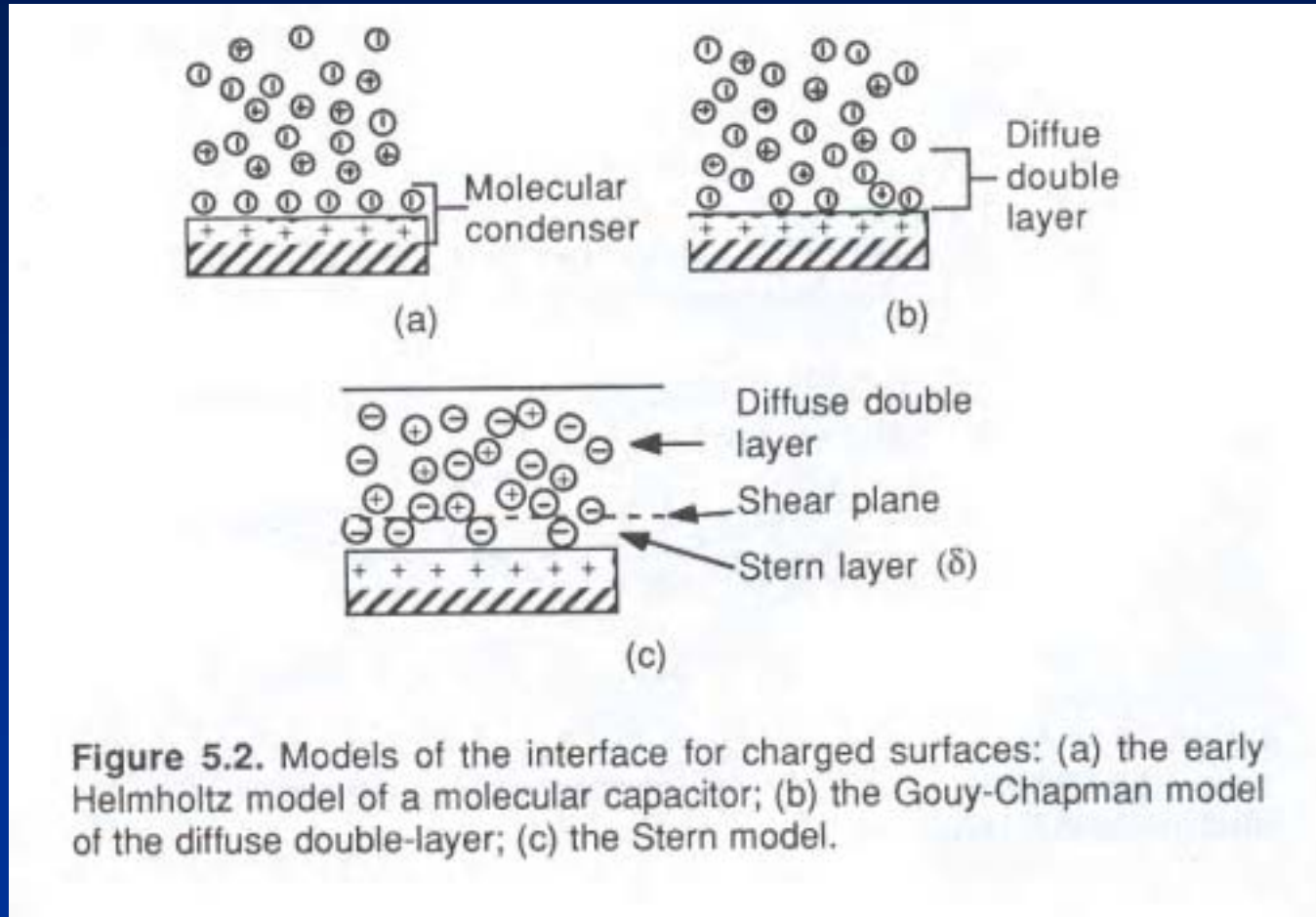
$$c_+ c_- = c_o [\exp(-e\Psi/kT) - \exp(+e\Psi/kT)] \quad (5.6)$$

반대 전하에 의하여 전하가 과량으로 있는 영역을 전계에 의한 **ionic atmosphere** 또는 **charge cloud**라 한다.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Double Layer Thickness: The Debye Length**

앞서 말한 **Charged cloud**를 일반적으로 **electrical double layer (EDL)**이라고 한다.



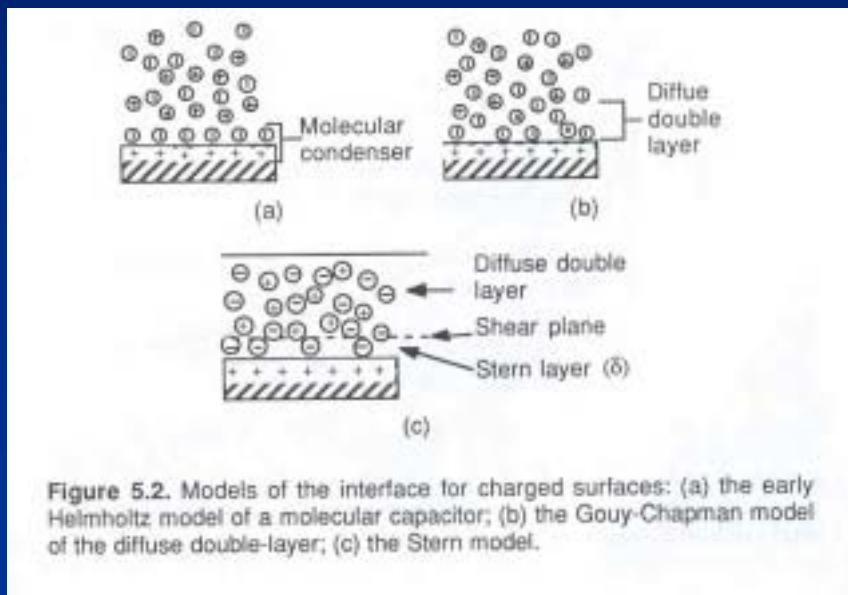
Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Double Layer Thickness: The Debye Length**

Helmholtz model: like molecular capacitor → 전하가 두 평행면에 정렬

수학적으로 쉽게 처리할 수 있으나, **diffuse layer**가 존재하기 때문에 문제. **diffuse layer**에서는 두 개의 전하가 식5.6에 의한 양만큼의 차이로 존재한다. 이를 고려하면 좀더 정확한 계산이 된다.

Gouy-Chapman model: 다른 전하가 표면쪽으로 접근 가능



Stern Model: 표면에 붙어있는 전하가 표면의 격자, 전하를 갖고 있는 물질의 **steric effect** 때문에 붙어 있는 물질 주위에 공간이 있을 수 있다는 것. 이 첫 층 위에 **diffuse double layer** 형성된다. 이 층의 두께, δ 는 약 수 **angstroms** 정도 이고, 이는 단지 일정 크기의 하전된 물질이나 기능기가 표면에 붙어있다는 것이다.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Double Layer Thickness: The Debye Length**

Boltzmann distribution은 한 개의 하전 된 입자에 관계된 이론은 쉬운 편이 나. 입자가 많이 있는 시스템에 대하여는 상당히 복잡한 편이다. 실제적인 시스템에 적용하는 데에는 전계가 표면에서의 거리에 지수 함수적으로 떨어진다는 **Debye-Huckel** 근사 법에 의거하여 계산한다.

$$\Psi = \Psi_0 \exp(-\kappa z) \quad (5.7)$$

κ 는 전기이중층 두께의 역수이고, **Debye length**라 부른다.

하전된 표면에서 $1/\kappa$ 의 거리에서의 **potential**은 $1/e$ 배만큼 된다.

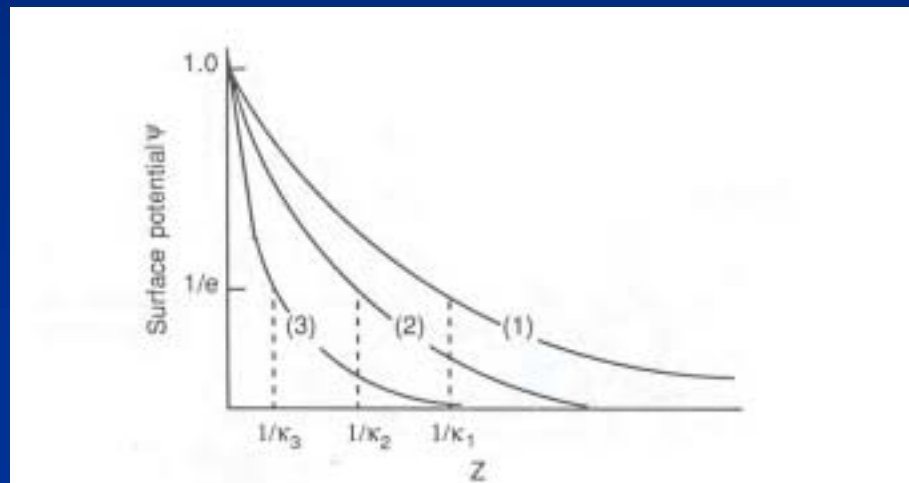


Figure 5.3. Illustration of the decay of surface potential with distance from the surface in various electrolyte concentration ranges: (1) low; (2) medium; and (3) high.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- Double Layer Thickness: The Debye Length

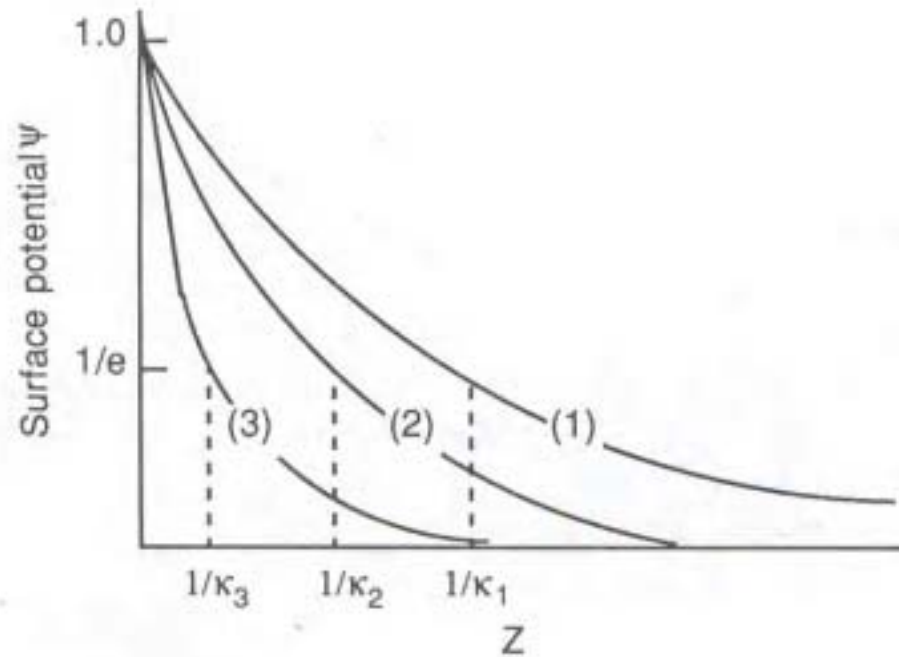


Figure 5.3. Illustration of the decay of surface potential with distance from the surface in various electrolyte concentration ranges: (1) low; (2) medium; and (3) high.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Double Layer Thickness: The Debye Length**

surface potential이 낮은 경우(<25mV), 전기 이중층 두께 계산식은 아래와 같다.

$$1/\kappa = \left[\frac{\epsilon_0 \epsilon kT}{e^2} \sum_i c_i z_i^2 \right]^{1/2} \quad (5.8)$$

이식에서 알 수 있는 것은

- 1) 전기이중층의 두께는 전해질의 농도의 역수에 비례한다.
- 2) 이온의 원자가의 제곱의 역수에 비례

이러한 두가지 성질이 많은 **colloid system**의 안정성을 이해하는데 중요하다. 표5.1은 25°C 전해질 수용액에서 전해질 농도가 증가하면서 두께가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이온전하의 역할도 볼 수 있다.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Double Layer Thickness: The Debye Length**

$$1/\kappa = \left[\frac{\epsilon_0 \epsilon kT}{e^2} \sum_i c_i z_i^2 \right]^{1/2} \quad (5.8)$$

표5.1은 25°C 전해질 수용액에서 전해질 농도가 증가하면서 두께가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이온전하의 역할도 볼 수 있다.

Table 5.1. Double-layer thickness ($1/\kappa$) for various electrolytes in water.

Electrolyte (mol L ⁻¹)	$1/\kappa$ (nm)				
	1:1(MX)	1:2(MX ₂)	2:2(MX)	1:3(MX ₃)	2:3(M ₂ X ₃)
10 ⁻⁴	30.4	17.6	15.2	15.2	13.6
10 ⁻³	9.6	5.57	4.81	4.81	4.30
10 ⁻²	3.0	1.76	1.52	1.52	1.36
10 ⁻¹	0.96	0.56	0.48	0.48	0.43
1	0.30	0.18	0.15	0.15	0.14

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Double Layer Thickness: The Debye Length**

. 계산을 간단히 하기 위하여 다음과 같이 간단히 하였다.

For 1:1 electrolytes (eg. NaCl)

$$1/\kappa = 0.304[MX]^{-1/2} \quad (5.9)$$

For 2:1 and 1:2 electrolytes (eg. CaCl₂, Na₂SO₄)

$$1/\kappa = 0.178[MX_2]^{-1/2} \quad (\text{or } [M_2X]^{-1/2}) \quad (5.10)$$

For 2:2, 3:1 or 1:3 electrolytes (eg. MgSO₄, LaCl₃, Na₃PO₄)

$$1/\kappa = 0.152[MX]^{-1/2} \quad (\text{or } [MX_3]^{-1/2} \text{ or } [M_3X]^{-1/2}) \quad (5.11)$$

For 2:3 or 3:2 electrolytes (eg. Ca₃(PO₄)₂, Al₂(SO₄)₃)

$$1/\kappa = 0.136[M_3X_2]^{-1/2} \quad (\text{or } [M_2X_3]^{-1/2}) \quad (5.12)$$

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Double Layer Thickness: The Debye Length**

. 앞의 내용을 정리하면, 전기 이중층의 두께는

전해질 농도, 전해질의 원자가 및 표면의 전하량에 의존한다. 식 5.8에 따르면, 이온의 국지적 농도는 그림 5.4a와 같고 국지적 **charge density** (전하밀도 $C_+ - C_-$)는 그림 5.4b와 같다. 전하 밀도가 일정할 경우, c_0 의 증가에 의한 점진적인 전해질의 흡착이 표면의 전하를 줄이지는 않는다. 그림 5.4b의 밑 넓이는 표면 전하량과 같다.

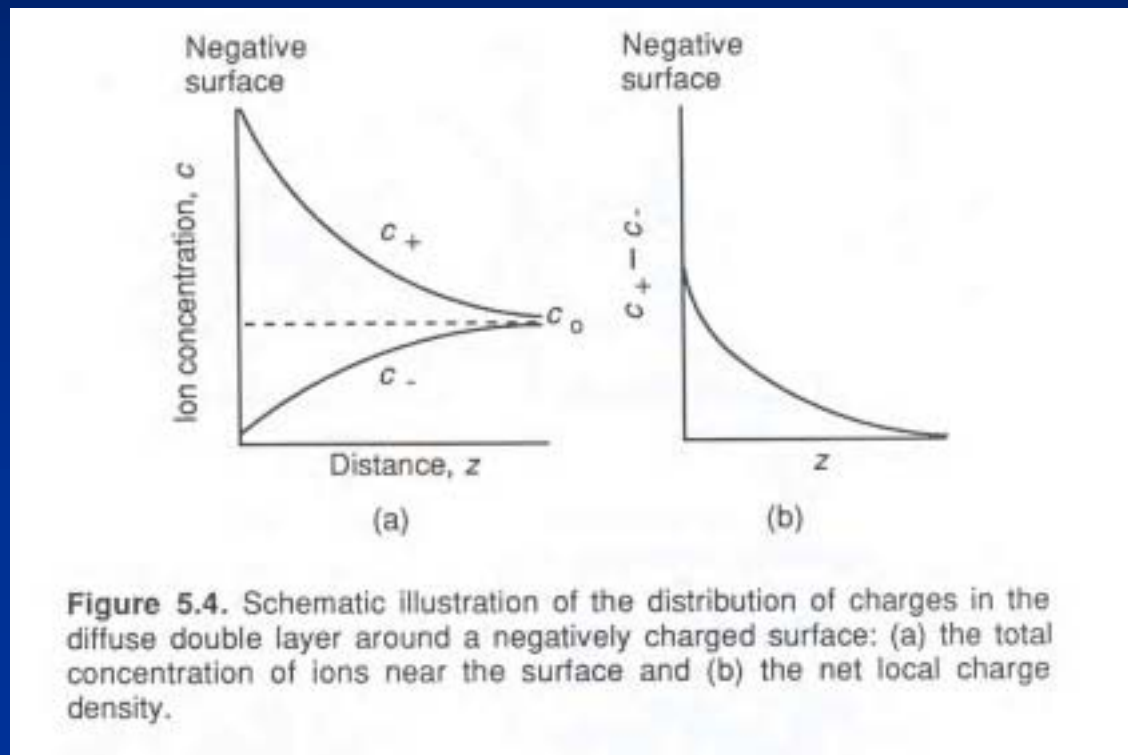


Figure 5.4. Schematic illustration of the distribution of charges in the diffuse double layer around a negatively charged surface: (a) the total concentration of ions near the surface and (b) the net local charge density.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- Double Layer Thickness: The Debye Length

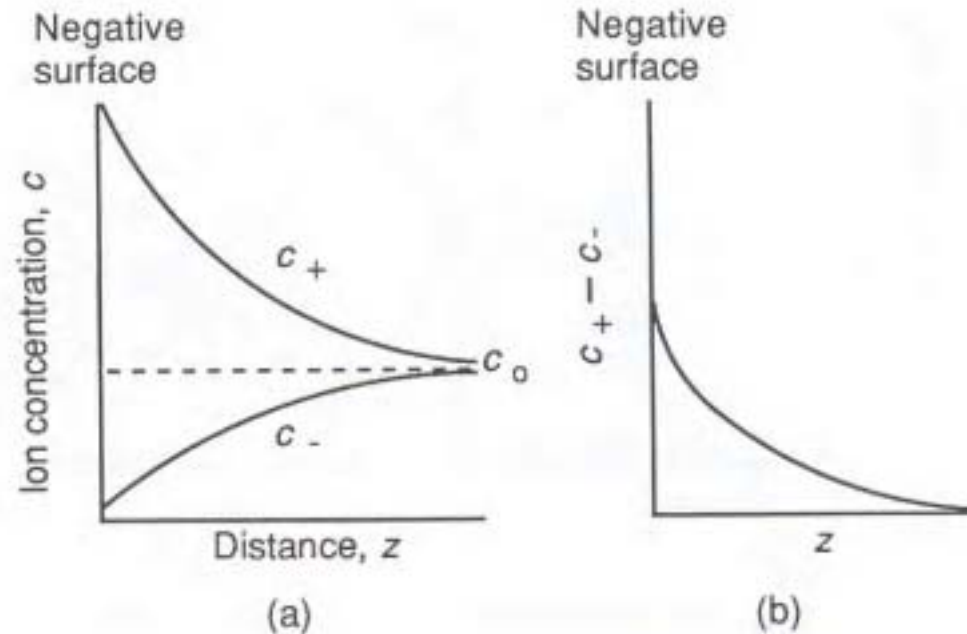


Figure 5.4. Schematic illustration of the distribution of charges in the diffuse double layer around a negatively charged surface: (a) the total concentration of ions near the surface and (b) the net local charge density.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Double Layer Thickness: The Debye Length**

- . 실제로 많은 양의 **colloid**가 있는 경우에는, 표면간의 거리가 매우 가깝다. 이러한 이유로 인하여 상호작용에 빈번히 일어나게 되면, 표면저하 총량이 바뀌게 되고 결국 전기적 특성 자체도 처음과 다르게 된다. 이들 중 가장 크게 생각하여야 할 부분이 표면에 특정 이온이 흡착한다는 사실이다.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Specific Ion Adsorption and the Stern Layer**

관계되는 식을 유도 할 경우에 다음과 같은 가정을 하였다.

1) 이온은 **point charge**이다.

유효반경은 **solvated ion**의 수에 의존하고 실제로 영향을 많이 미친다.

2) 어떤 점에서 전하가 생성될 때, 균일한 전하가 존재 할 수 있도록 전하가 표면에 퍼져나간다.

3) 반대 전하는 아주 가까이 접근할 수 있다.

4) 용매는 이중층에 단지 유전률로만 영향을 미친다.

전기이중층 내에서 유전률은 일정하다.

* 물같은 경우에는 하전된 표면에서 물 분자의 배향으로 인하여 유전율이 한 차수 정도 떨어진다.

또한 이온들이 표면에 선택적으로 흡착됨으로 인하여 물이 떨어져 나가는 현상(**dehydration**)도 있다.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Specific Ion Adsorption and the Stern Layer**

대부분의 가정이 큰 오차를 야기하지는 않지만, 가장 큰 오차를 줄 수 있는 부분은 표면의 전하 밀도가 일정하다는 것이다. 전해질의 농도가 증가하면 표면의 조건이 바뀌게 되고, 또는 두 개의 하전된 표면이 접근하게 되면 거리에 따라서 표면 전하밀도가 변하면서 접하게 되면 전하 밀도가 0이 된다. 이를 **surface regulation**이라 부르고, 최종 결과는

표면 **electric potential**이 줄어들고,

전기이중층의 두께가 얇아지며,

이론적으로 계산된 **potential**, ψ_0 , 보다 작은 크기로 반발력이 작용하게 된다.

Stern Layer에 있는 이온들의 **mobility**는 상당히 제한되어 있다. 반면

diffuse double layer의 이온들은 표면의 전하를 효율적으로 가리거나 중화시키는 역할을 한다. 가림 효과에 의하여 **potential**이 바뀌었으므로 **Gouy-Chapman potential** 인 ψ_0 을 급격히 전장이 줄어드는 **Stern potential** ψ_s 로 바꾸어 주어야 한다. 이 **Stern potential**이 정상적으로 줄어들면서 0이 된다.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Specific Ion Adsorption and the Stern Layer**
- 그림 5.5b는 **specific adsorption** 이 전기이중층에 미치는 두 가지 예를 보여준다.
- **Curve 1:**
Polyvalent counter ion 또는 surface active ion of opposite charge
-> **charge reversal (ie. ψ_s has opposite sign to ψ_o)**
- **Curve 2:**
표면과 같은 전하를 갖는 이온 또는 계면활성물질(**surface active species**)
-> **increase in Stern-Potential ($\psi_s > \psi_o$)**

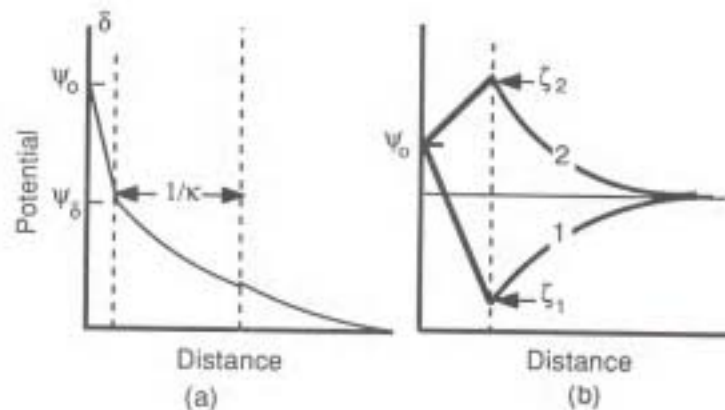


Figure 5.5. Schematic illustration of the electrostatic potential energy curve: (a) according to the Stern model and (b) the effect of adsorption of polyvalent or surface-active counterions (curve 1) and surface-active co-ions (curve 2).

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- Specific Ion Adsorption and the Stern Layer

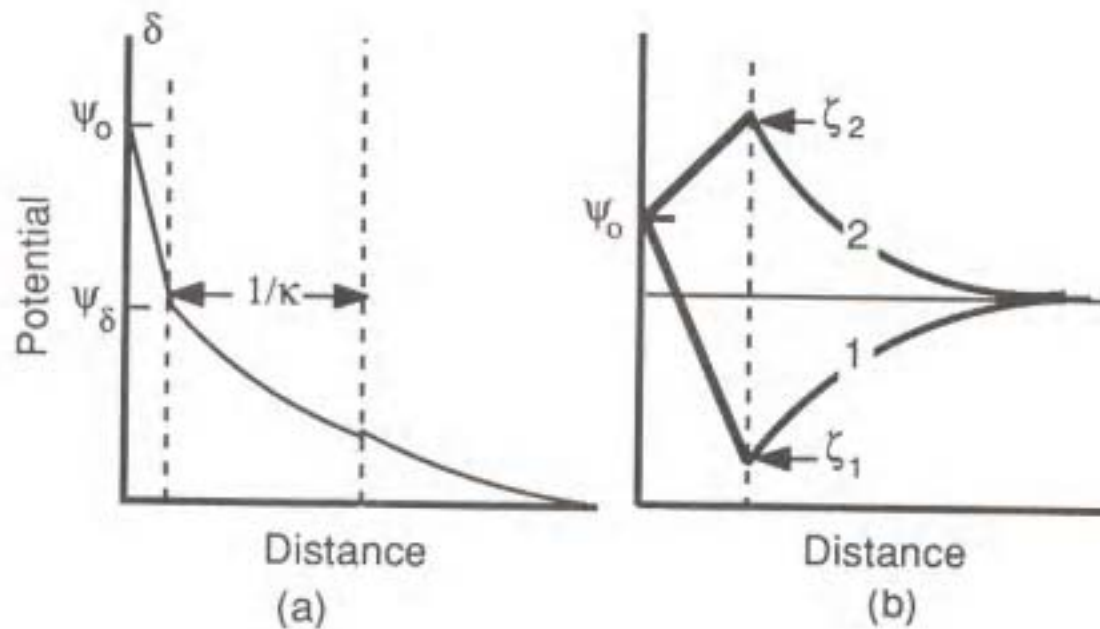


Figure 5.5. Schematic illustration of the electrostatic potential energy curve: (a) according to the Stern model and (b) the effect of adsorption of polyvalent or surface-active counterions (curve 1) and surface-active co-ions (curve 2).

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Specific Ion Adsorption and the Stern Layer**
- 실제로 **electrokinetic** 현상을 통하여 입자의 이동을 이론적으로 계산하면 ψ_s 가 추산된다. 전해질 용액에서 하전된 입자의 이동을 점도와 관계하여 알아보면, 전기 이중층에서 **Stern**층 못 미처까지가 이동할 수 있는 영역이고, **Stern**층은 표면에 붙어 있다. 용액과 같이 움직이는 곳과 표면과 같이 있는 영역을 나누는 선을 **Shear plane**이라 한다. (그림5.6)

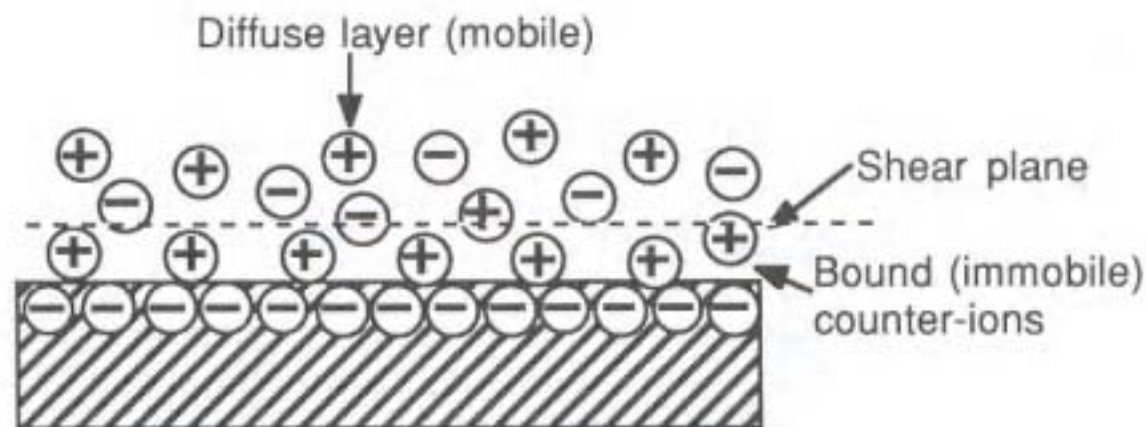


Figure 5.6. Schematic illustration of the physical meaning of the shear plane in relation to the surface potential and ion mobility in electrophoretic phenomena.

Electrostatic Forces – Theory: Coulomb's Law

- **Specific Ion Adsorption and the Stern Layer**
- **shear plane**에서는 점도의 변화가 매우 크기는 하나 정확한 위치를 아는 것은 상당히 어렵다. 대략 **Stern layer**의 바로 바깥으로 인식하고 있고, 이 경우 **potential**은 ψ_s 보다 약간 작다.
- **Electrokinetic potential (zeta potential)**
- **Shear plane**에서의 **Potential**을 **Electrokinetic potential** 또는 ζ (zeta)potential이라 한다.
- 다음 절에서 측정법을 이야기 할 예정이다. 이중층 이론의 연구할 시에는 대부분의 경우에 ζ 과 ψ_s 이 같다고 본다. 그 이유는 실험상의 조그만 오차 범위에 들어가기 때문이다. 그러나, 전해질의 농도가 높거나, 전계가 높거나, 비이온성 물질의 흡착으로 인하여 **shear plane**이 표면에서 상당히 멀리 떨어져 있는 경우이다 (이때는 ζ 이 ψ_s 보다 적게 된다).
- 실제 시스템에 적용하는 데에는 상당히 큰 어려움이 있다. 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하기 때문에 큰 문제에 봉착하게 된다. 그리고 발견된 현상들로부터 적절한 내용을 얻어내는 것도 쉽지는 않다. 그러나, 특수한 경우에만 해당될 수는 있으나, 고전계에서의 문제는 좀 더 발전된 이론으로 많은 부분을 설명할 수 있었다. 이 경우에도 새로운 시스템에 적용할 수 있는가는 문제이다.

Electrostatic Forces – Eletrokinetic Phenomena

- **Introduction**

전기장을 걸었을 때 전기 이중층의 일부분이 움직이는 현상이 있다. 이러한 현상을 총괄적으로 이야기 하여 **eletrokinetic phenomena**라 하고 다음과 같은 4가지 종류가 있다.

1. **Electroosmosis** : 전기장에서 전하를 띤 정지된 표면에 대하여 액체가 움직이는 것. **fixed surface: capillary tube or porous plug.**
2. **Electrophoresis** : 전기장에서 정지된 액체에 대하여 전하를 띤 표면과 전기이중층이 같이 움직이는 것. **eletrophoresis is the complement of electro-osmosis.**
3. **Streaming potential** : 정지된 하전면에 액체를 강제로 흘리면 전기장이 형성된다.
4. **Sedimentation potential** : 정지된 표면에 대하여 하전된 입자가 움직일 때 생성된 전기장.

이중 **electrophoresis**가 가장 중요함.

Electrostatic Forces – Electrokinetic Phenomena

- Introduction

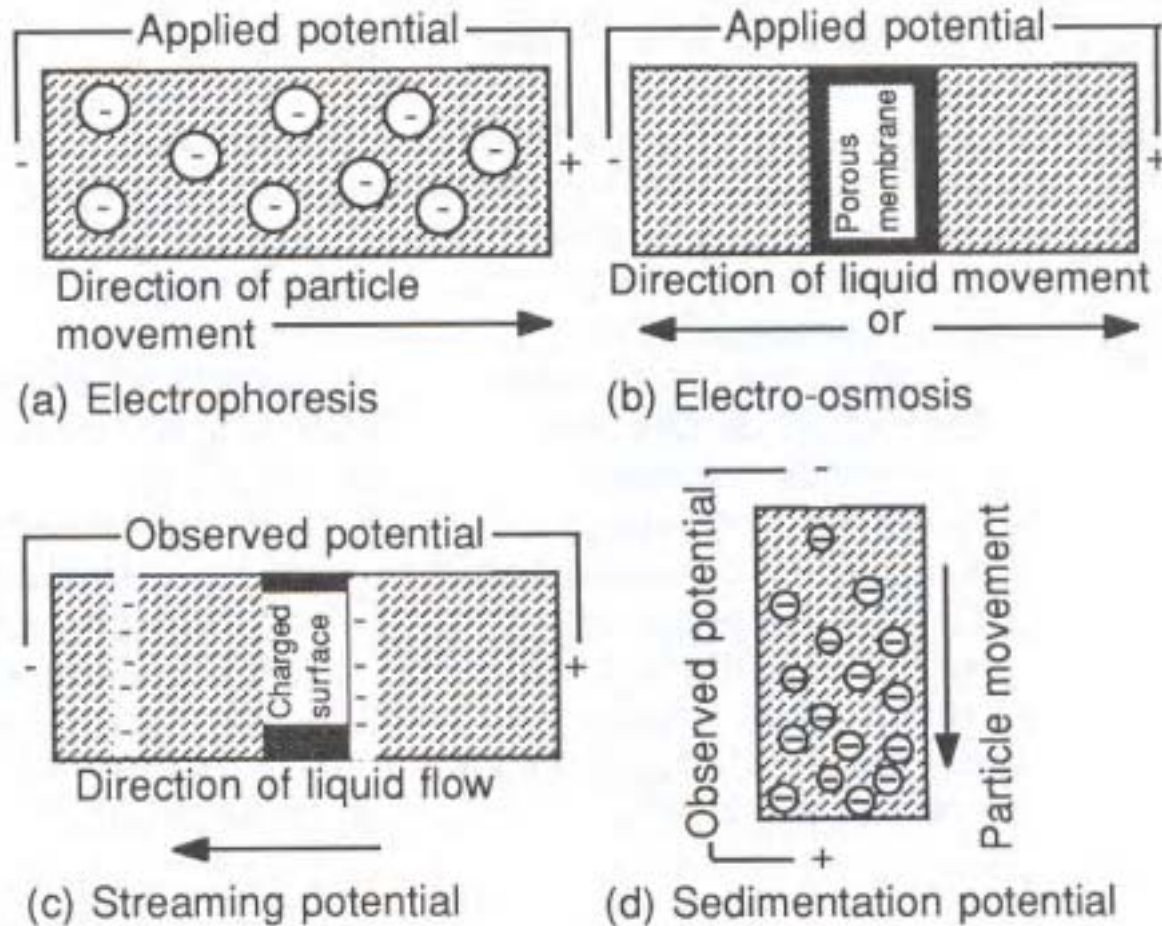


Figure 5.7. Four principle types of electrokinetic phenomena.

Electrostatic Forces – Electrokinetic Phenomena

- **Particle Electrophoresis**

Microscope electrophoresis 또는 **microelectrophoresis**라고도 불린다. 가장 쉽고 유용하게 **colloid** 입자의 전기적 특성을 연구할 수 있는 기술이다. 현미경으로 입자를 관찰할 수 있다면 (**200nm** 크기 정도), **electrokinetic** 효과를 직접 관찰할 수 있다. 기사가 시판되고 있다.

이 실험으로 알 수 있는 물리적 성질

1) electrical nature of surface

- charge sign

- charge density (indirect measurement)

- effect of pH, electrolyte content and valency on charge

2) electrical nature of soluble species -

- Polymers or surfactants** (표면에 흡착된 것)

예) 단백질의 전하를 잘 모를 때

단백질을 성질을 잘 아는 고체 표면에 흡착 시킨 다음 **electrophoresis**를 하게 되면, 입자의 **mobility**가 단백질의 전하에 영향을 받는다. 이를 이용하면, 단백질의 전기적 성질을 유추할 수 있다.

Electrostatic Forces – Electrokinetic Phenomena

- **Moving Boundary Electrophoresis**
- 전기장 내에서 전개 매질과 **colloid sol** 이나 용액사이에 형성된 경계면의 움직임을 연구하는 것이다.
- **electrophoretic mobility** 및 작은 양의 분리에 이용된다.
- 용액 내에 여러 종류의 전하를 갖는 물질이 있으면 이를 분액으로 받아서 분리하거나, 적어도 몇 개의 물질이 있는지를 알 수 있다.

Electrostatic Forces – Electrokinetic Phenomena

- **Gel (or Zone) Electrophoresis**

반응성이 적은 고체나 젤을 지지물로 사용하여 전기 영동을 한다.

(**Moving boundary** 방법 보다 **convection** 이나 **vibrational disturbance**와 같은 문제들을 제거할 수 있다.)

분리 조건 : **Charge , Molecular weight.**

생체 물질 분리에 많이 사용 - 적은 양으로도 가능하다.

분리에 문제가 있을 경우 (즉 우연히 같은 자리에 두 물질이 같이 나온 경우)
- 2차원적인 방법을 사용