

# 입자성 물질의 크기성질로서의 표면 전기적 특성 규명에 대한 기초연구

## Fundamental Studies on the Characteristics of the Surface Electrokinetic Behavior of Particulate Matter as an Extensive Property

오세진 · 김동수<sup>†</sup>  
Sejin O · Dong-Su Kim<sup>†</sup>

이화여자대학교 환경공학과  
*Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University*

(2010년 2월 3일 접수, 2010년 6월 4일 채택)

**ABSTRACT** : Generally, electrokinetic potential has been considered as an intensive property. In other words, electrokinetic potential is not affected by the amount of particulate matter. Montmorillonite, one of essential inorganic matter, was chosen to measure electrokinetic potential. The result of electrokinetic potential measuring experiment showed that the value observed to decrease as the amount of montmorillonite clay increased. This is due to the fact that total ions that adsorbed per unit mass were decreased as the amount of montmorillonite was increased. As a result, electrokinetic potential is considered as an extensive property. By using these results, total interaction energy of suspension was also checked, and revealed that total interaction energy was decreased as the amount of montmorillonite increased.

**Key Words** : *Electrokinetic potential, Extensive property, Montmorillonite*

**요약** : 일반적으로 전기 동역학적 전위는 세기성질로 알려져 있으며 이를 바탕으로 연구들이 진행되어 왔다. 본 연구에서는 대표적 무기성 물질인 몬모릴로나이트를 대상으로 하여 분산체를 제조해 전위를 측정하였다. 전기 동역학적 전위를 측정할 결과, 몬모릴로나이트의 질량이 증가할수록 전위값이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 몬모릴로나이트의 질량이 증가하면서 단위질량당 흡착하는 이온의 양이 적어지기 때문이라고 사료된다. 이러한 결과는 전위가 세기성질이 아닌 크기성질을 따른다고 생각할 수 있다. 또한 측정한 전기 동역학적 전위값을 통해 입자간 상호 에너지를 측정할 결과 몬모릴로나이트의 질량이 증가할수록 상호 입자간 에너지가 점차적으로 감소하는 경향이 관찰되었다.

**주제어** : 전기 동역학적 전위, 크기 성질, 몬모릴로나이트

### 1. 서론

수중에 존재하는 입자성 물질은 크게 유기성 물질과 무기성 물질로 구분할 수 있으며 이 중 점토성 입자는 무기성 물질을 대표하는 물질이라고 생각할 수 있다. 입자성 물질의 종류와 무관하게 이러한 물질들의 거동은 수환경의 성격을 결정한다는 점에서 중요한 의미를 가진다.

자연 수환경에서는 입자성 물질의 존재여부가 수중 생태계의 특성을 결정짓는 인자로서 작용한다. 입자성 물질이 응집해 점차적으로 무게가 증가해 침전하면 수중 하부에 혐기성 분위기가 조성되고 이에 부분적으로 수중 용존산소가 부족하게 되면서 수중 생태계에 영향을 주게 될 것으로 예상할 수 있다. 이와는 반대로 입자성 물질들이 안정한 상태로 존재하면 입자들이 부유하게 되고 이는 수환경 전체의 탁도를 높이는 효과를 나타내게 된다. 탁도의 증가는 빛의 투과를

감소시키는 역할을 하기 때문에 광합성량이 감소하는 등의 반응들이 일어나게 되면서 수생태계에 변화를 가져온다.<sup>1)</sup>

자연환경에서뿐 아니라 각종 산업시설에서의 입자성 물질의 파악 역시 중요하다. 특히 폐수처리 시설의 경우, 폐수 내 존재하는 입자성 물질에 따라 응집제의 양이나 종류, 폐수의 체류시간뿐 아니라 폐수처리과정 후에 생기는 슬러지의 특성 등이 달라지면서 폐수처리 이후의 과정에도 영향을 미친다.<sup>2)</sup> 특히 슬러지의 특성에 따라 폐수처리 전체에 드는 비용의 반 이상을 차지하는 경우도 있으므로 경제적으로도 큰 의미를 가진다.<sup>3)</sup>

이와 같은 이유로 수중에 존재하는 입자성 물질들의 거동에 대한 연구는 다양하게 진행되고 있다.<sup>4,5)</sup>

그러나 일반적으로 연구가 Electrokinetic Potential에 영향을 주는 입자물질의 종류나 첨가하는 이온들의 구성성분을 변화하는 방향으로 진행되고 있으며 수중 존재하는 입

<sup>†</sup>Corresponding author : E-mail : dongsu@ewha.ac.kr Tel : 02-3277-2394 Fax : 02-3277-3275

자의 양에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 이러한 이유는 Electrokinetic Potential이 세기성질을 따른다고 알려져 있기 때문이라고 사료된다.<sup>6,7)</sup> 따라서 본 연구에서는 실제 Electrokinetic Potential이 세기성질이 따르는지 확인하기 위해 대표적인 점토성 광물인 몬모릴로나이트를 대상으로 하여 질량의 차이가 pH에 따른 Electrokinetic Potential에 어떠한 영향을 미치는지 확인해보고 이 값을 이용하여 입자 간 상호 에너지를 측정해보기로 하였다.

몬모릴로나이트는 Smectite Group에 속해있는 대표적인 광물로 화학식은  $M_x(Al_{2-y}Mg_y)(Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ 과 같이 나타낸다. 이 중  $SiO_2$ 가 50%이상을 차지하며 그 다음으로는  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ 의 순서로 함량이 높다. 몬모릴로나이트는 판상인 구조로 Si이 포함되어있는 Tetrahedral(T) Sheet과 Al이 존재하는 Octahedral(O) Sheet이 2:1로 T-O-T와 같이 구성되어 있다.<sup>8,9)</sup>

## 2. 실험방법

본 연구에서는 몬모릴로나이트의 질량이 Electrokinetic Potential에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. pH를 맞추기 위해 증류수에 0.1 M의 HCl과 NaOH용액을 적절하게 조절하여 pH 1.59, 2.97, 4.51, 6.06, 7.80, 9.70 그리고 11.11인 용액을 제조하였다. 이후 각 용액별로 100 mL씩 삼각플라스크에 담았다. 그리고 몬모릴로나이트(Aldrich Chemicals)는 0.01, 0.1, 1, 그리고 10 g을 측정하여 각 용액에 첨가시켰다. 모든 분산체는 Shaking Incubator(Chang-shin Scientific co. C.SK.6)를 이용하여 25°C에서 200 rpm의 속도로 약 1시간동안 교반한 후 안정화를 위해 정치시켰다.

24시간동안 정치시킨 분산체는 전기영동 측정기기(Zeta Meter Inc., Model 3.0+)로 Electrokinetic Potential을 측정하였다. 측정된 Electrokinetic Potential을 바탕으로 몬모릴로나이트 질량에 따른 Potential의 변화 양상을 살펴본은 물론, Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO)이론에 적용하여 분산체 내 입자들 간 작용하는 에너지의 경향에 대해 관찰해 보았다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. pH에 따른 Electrokinetic Potential의 변화

일반적으로 Electrokinetic Potential은 세기성질로 알려

져 있으며 이를 기초로 하여 기존 연구들이 진행되어 왔다. 본 연구에서는 분산체의 Electrokinetic Potential이 분산질의 질량에 의한 영향을 받을 것이라고 판단되는 바 대표적 광토성 물질인 몬모릴로나이트를 대상으로 하여 질량을 0.01 g에서 10 g까지 변화를 주어 분산체의 Potential을 측정해보았다.

Fig. 1에 나타난바와 같이 pH가 증가함에 따라 Electrokinetic Potential이 (+)에서 (-)값으로 증가하는 것으로 관찰되었다. 이 때 몬모릴로나이트의 질량과는 무관하게 모든 경우에서 Isoelectric Point는 pH7에 가깝게 나타났다. Isoelectric Point의  $\pm 0.5$ 인 범위에서는 Electrokinetic Potential이 급격하게 변화하였으며 Isoelectric Point를 기준으로 하여 점대칭인 경향이 관찰되었다. 이러한 결과는 동형치환에 따라 영구적으로 음전하를 가지고 있는 몬모릴로나이트 입자 모서리의 전하들이 pH에 의존적이기 때문이라고 사료된다.<sup>10)</sup> 본 실험에서의 몬모릴로나이트 분산체는 다른 이온염류를 첨가하지 않았으므로  $H^+$ 이온과  $OH^-$ 이온이 분산체의 포텐셜을 결정하는 이온으로 작용하고 있다. 따라서 질량과 무관하게 pH7 부근에서  $H^+$ 이온과  $OH^-$ 이온의 농도가 같아져 Electrokinetic Potential값이 0인 Isoelectric Point가 나타나고 이를 기준으로 부호가 다른 Electrokinetic Potential이 나타나는 것이라고 사료된다.

몬모릴로나이트는 그 입자의 모서리 부분의 Si(O-Si-O)와 Al(O-Al-O)의 결합이 끊어져  $Si^+$ 나  $Si-O^-$ (혹은  $Al^+$ 나  $Al-O^-$ )상태로 존재한다. 이 때, 증류수와 몬모릴로나이트를 교반시키면 결합들이 끊어져 전하를 띠고 있던 상태에서 Si은 Silanol Group(Si-OH)을, Al은 Aluminol Group(Al-OH)을 형성한다.<sup>11)</sup> 이러한 Group들은 몬모릴로나이트의 pH에 따른 Electrokinetic Potential의 결과에 영향을

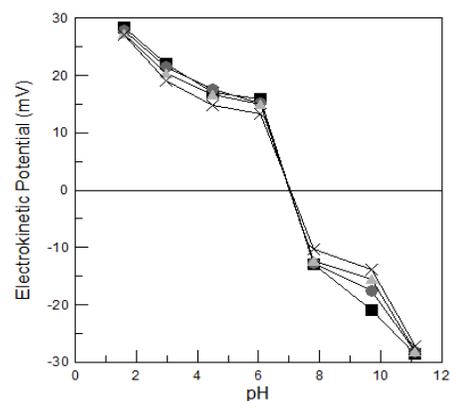


Fig. 1. Change of electrokinetic potential according to the amount of montmorillonite at different pH (■=0.01 g, ●=0.1 g, ▲=1 g, ×=10 g).

미칠 것이라고 사료된다. 다시 말해 Isoelectric Point보다 보다 낮은 pH인 경우에 Silanol Group에서는  $\text{Si}^+$  혹은  $\text{Si-OH}_2^+$ , Aluminol Group에서는  $\text{Al}^+$  혹은  $\text{Al-OH}_2^+$ 와 같은 양전하를 띠는 물질들이 형성되면서 Electrokinetic Potential이 양의 값을 나타낸다. 이와는 반대로 Isoelectric Point보다 pH가 클 경우에는 Silanol Group의 경우  $\text{Si-O}^-$  (또는  $\text{Si-(OH)}_2^-$ 나 혹은  $\text{Si-O}^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ )가 생성되고, Aluminol Group도 마찬가지로 음전하를 띠는 물질들이 형성되면서 음의 값의 Electrokinetic Potential이 측정된 것이라고 사료된다.

분산질의 질량에 따른 Electrokinetic Potential을 측정할 결과, pH와 무관하게 질량이 증가할수록 전위값이 감소하였다. 질량에 따른 Electrokinetic Potential의 차이는 강산성 (pH1.59)과 강염기성(pH11.11)인 경우 0.01 g과 10 g간의 차이가 -1.5 mV 이하로 적게 나타났다. 이에 반해 나머지 pH에서는 질량에 따라 2.5 mV 이상의 차이가 나타나기도 했으며 특히 pH9.7의 분산체에서는 0.01 g인 경우 Electrokinetic Potential이 -20.9 mV인 반면 10 g일 때는 -13.84 mV로 그 차이가 7 mV에 가까울 정도로 크게 관찰되었다. 이와 같은 결과는 Electrokinetic Potential 이 세기성질이 아닌 크기성질로서의 고려대상이 될 수 있음을 나타낸다. 몬모릴로나이트 분산체에 존재하는 이온은 수소이온과 수산화이온이며 이 중 수소이온을 대상으로 하여 질량에 따른 분산체의 Electrokinetic Potential의 경향을 다음 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

각 분산체에는 동일한 양의 증류수를 첨가했으므로 존재하는 이온의 수는 동일하다고 생각할 수 있다. 분산체를 교반시켜 주면 이온들이 몬모릴로나이트의 표면에 흡착하게 되는데, (a)와 같이 분산질의 질량이 적은 경우 적은 분산질에 많은 양의 이온이 흡착될 것이라고 예상할 수 있다. 그러나 분산질의 질량이 (a)보다 증가하여 (b)와 같이 되면 동일한 양의 이온이 존재하더라도 이온이 흡착할 수 있는 분산질이 많아지면서 단위질량당 흡착하는 이온의 양은 감소하게 된다. 수

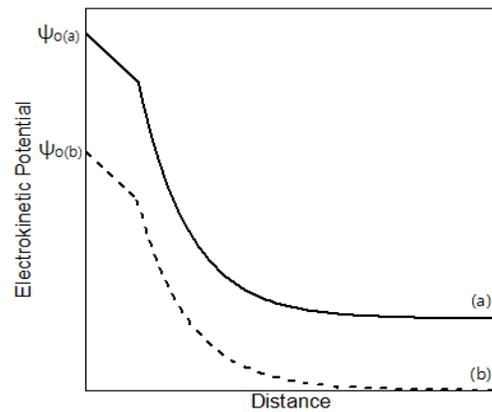


Fig. 3. The change of Gouy and Champan(GC) model according to the relative amount of particulate in suspension ((a) small amount, (b) large amount).

소이온은 물론 수산화이온도 마찬가지로 Potential을 결정짓는 이온들이므로 위와 같은 질량에 따른 흡착양상은 분산체의 Electrokinetic Potential에 영향을 줄 것이라고 사료된다.

따라서 Fig. 2의 (a)에서 (b)와 같이 질량이 증가하는 경우, Poisson-Boltzmann식을 바탕으로 만들어진 Gouy와 Chapman 모델(혹은 전기이중층 이론)에서 나타나는 Surface Potential인  $\psi_0$ 값이 Fig. 3의 (a)에서 (b)와 같이 감소하게 된다. 이러한 전위값의 감소는 Electrokinetic Potential에도 영향을 주므로 분산질의 질량이 Electrokinetic Potential의 변화에 영향을 준다고 생각할 수 있다.

### 3.2. 질량에 따른 Total Interaction Energy의 변화

DLVO이론을 통해 분산체의 Total Interaction Energy를 도출할 수 있으며, 최근에는 상호 입자간 에너지를 자세하게 표현하기 위해 DLVO이론을 더 확장하여 표현하기도 한다.<sup>12)</sup> 따라서 본 연구에서는 측정된 질량에 따른 Electrokinetic Potential를 나타낼 뿐 아니라 이 값을 DLVO이론에 적용하여 Total Interaction Energy을 비교해 보았다.

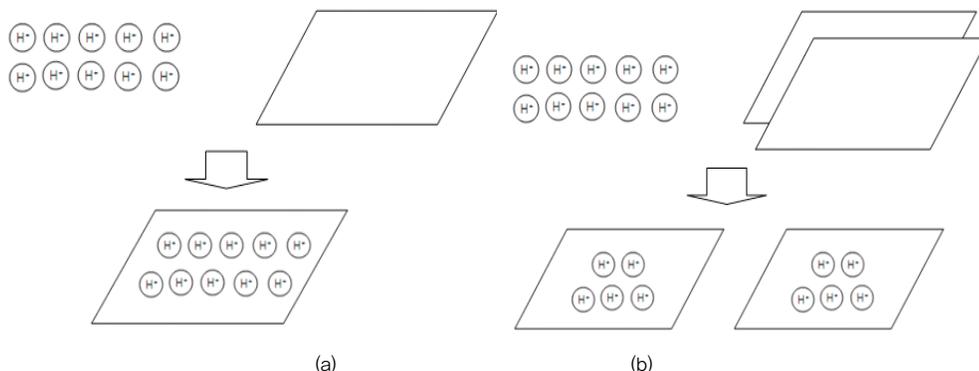


Fig. 2. The adsorption characteristics of montmorillonite suspensions according to the amount of montmorillonite.

식 (1)에 나타난 바와 같이 DLVO이론은 반 데르 발스 인력과 전기이중층의 척력의 합으로 나타내며, 이로써 입자들 간 거리에 따른 전체 상호에너지를 추정할 수 있다.

$$V_T = V_A + V_R \quad (1)$$

여기서  $V_A$ 는 반 데르 발스 인력을,  $V_R$ 은 전기이중층의 척력을 나타낸다.<sup>13)</sup> 일반적으로 표현되는 van der Waals Interaction은 식 (2)와 같다.

$$V_A = -\frac{Aa}{12H} \quad (2)$$

이 때,  $A$ 는 Hamaker 상수이며,  $a$ 는 입자의 반지름이고  $H$ 는 입자간의 거리를 의미한다. 그러나 식(2)와 같은 경우는 작은 크기의 입자들이  $H \ll a$ 인 조건에서 사용되며, 이러한 가정하에 측정된 반 데르 발스 값은 입자들 간 형성되는 전기적 자기 복사에너지가 전달되는 시간 등 무시되는 조건이 있어 실제  $V_A$ 값보다는 적게 측정된다. 따라서 본 연구에서는 정확성을 높이기 위해 다음 식(3)을 적용하였다.<sup>12)</sup>

$$V_A = -\frac{A}{6} \left[ \left( \frac{2a^2}{H^2 + 4aH} \right) + \left( \frac{2a^2}{H^2 + 4aH + 4a^2} \right) \right] + \ln \quad (3)$$

Hamaker 상수는 입자간 인력과 상관관계가 있어 Hamaker 상수값이 증가할수록 입자간의 인력이 증가함을 의미하며 본 실험에서는 몬모릴로나이트 분산체에 적합한  $5 \times 10^{-20}$  J을 사용하였다. 몬모릴로나이트는 판상의 구조로 되어 있으므로 이를 적절한 반지름으로 표기하기 위해 Cadene et al.<sup>8)</sup> 연구에서 나타난 몬모릴로나이트의 크기들의 평균인 길이 360 nm, 너비 250 nm와 높이 1.2 nm를 이용해 부피를 구한 후 구로 전환시켜 반지름 값을 도출하였고, 그 결과 반지름은 약 29.54 nm로 나타났다.

전기이중층의 척력을 나타내는  $V_R$ 은 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_R = 2\pi\epsilon a\psi^2 \ln [1 + \exp(-\kappa H)] \quad (4)$$

이 때  $\epsilon$  는 매체의 유전율로  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m이다.  $\psi_0$ 는 본래 Stern Potential을 의미하지만 이를 대신하여 Electrokinetic Potential값을 대입하기도 한다.<sup>14)</sup>  $\kappa$  는 전기이중층의 두께를 나타내는  $\kappa^{-1}$ 을 통해서 구할 수 있으며 이는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{sk_B T}{21eF}} \quad (5)$$

이 식에서  $k_B$ 는 볼츠만 상수 ( $=1.37 \times 10^{-23}$  J/K)를 나타내고  $T$ 는 절대온도를 의미해 실험에서의 25 °C를 전환하여 298 K를 대입하였다.  $e$ 는 전하의 Charge ( $=96500c/(6 \times 10^{23})$ )를, 그리고  $F$ 는 패러데이 상수 ( $=96485c/mol$ )를 의미한다. 식 (5)에서의  $I$ 는 이온의 세기로 분산체 내에 존재하는 모든 이온의 몰농도에 이온 전하의 제곱을 곱한 값을 모두 더한 후 2로 나눠 표현한다.

이와 같이 DLVO이론을 적용해 나타낸 입자간 상호 에너지는 입자의 특성에 따라 Potential과 거리간의 관계가 달라질 수 있다. 다음은 이를 적용해 나타낸 질량에 따른 몬모릴로나이트 분산체의 입자간 상호 에너지이다.

각 Fig. 4의 x축은 입자 간 거리를 나타낸 것으로 각 분산체에 따른 변화를 살펴보기 위해 1 pm부터 3000 pm까지 나타내었다. y 축은 입자간 상호 에너지(J)로 계산한 결과에  $10^{-16}$ 을 곱해 표현하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 1 pm부터 20 pm까지는 입자간 상호 에너지가 소폭 증가하는 경향을 보이다가 그 이후 거리부터는 점차 감소하는 것으로 관찰되었다. Fig. 4에 나타나지 않은 1 pm 이하의 거리에서는 0으로 가까워질수록 점차적으로 음의 방향으로 증가하는 경향을 보였으며 입자 간 거리가 3000 pm 이상인 경우 분산체의 pH나 몬모릴로나이트의 질량과는 무관하게 입자 간 거리가 점차 증가하면서 0으로 수렴하였다. pH에 따른 몬모릴로나이트 분산체의 입자간 상호 에너지를 비교해보면 질량이 증가할수록 입자간 에너지가 점차 감소하는 경향이 관찰되었다. 단, pH가 4.51인 경우에는 몬모릴로나이트 함량이 0.01 g인 분산체와 0.1 g인 분산체의 순서가 바뀌어 나타났다. pH에 따른 비교를 해보면 상대적으로 강산성과 강염기성인 경우, 입자간 거리가 증가함에 따라 입자간 상호 에너지가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그에 비해 Isoelectric Point주변의 pH인 6.06이나 7.8인 분산체에서는 입자간 거리가 증가하더라도 에너지가 크게 감소하지 않았다. 그리고 또한 이 둘의 경우에는 다른 pH와는 달리 10 g을 첨가한 몬모릴로나이트 분산 Electrokinetic Potential때문이라고 사료된다. 이는 DLVO 이론에서 분산체에 따라 다르게 적용되는 값이 Electrokinetic Potential 밖에 없기 때문이다. 따라서, 질량에 따른 Electrokinetic Potential 값이 상이할수록 질량에 따른 입자간 상호 에너지 차이가 뚜렷하게 관찰된 것이며 이 둘이 비례관계에 있는 것이다.

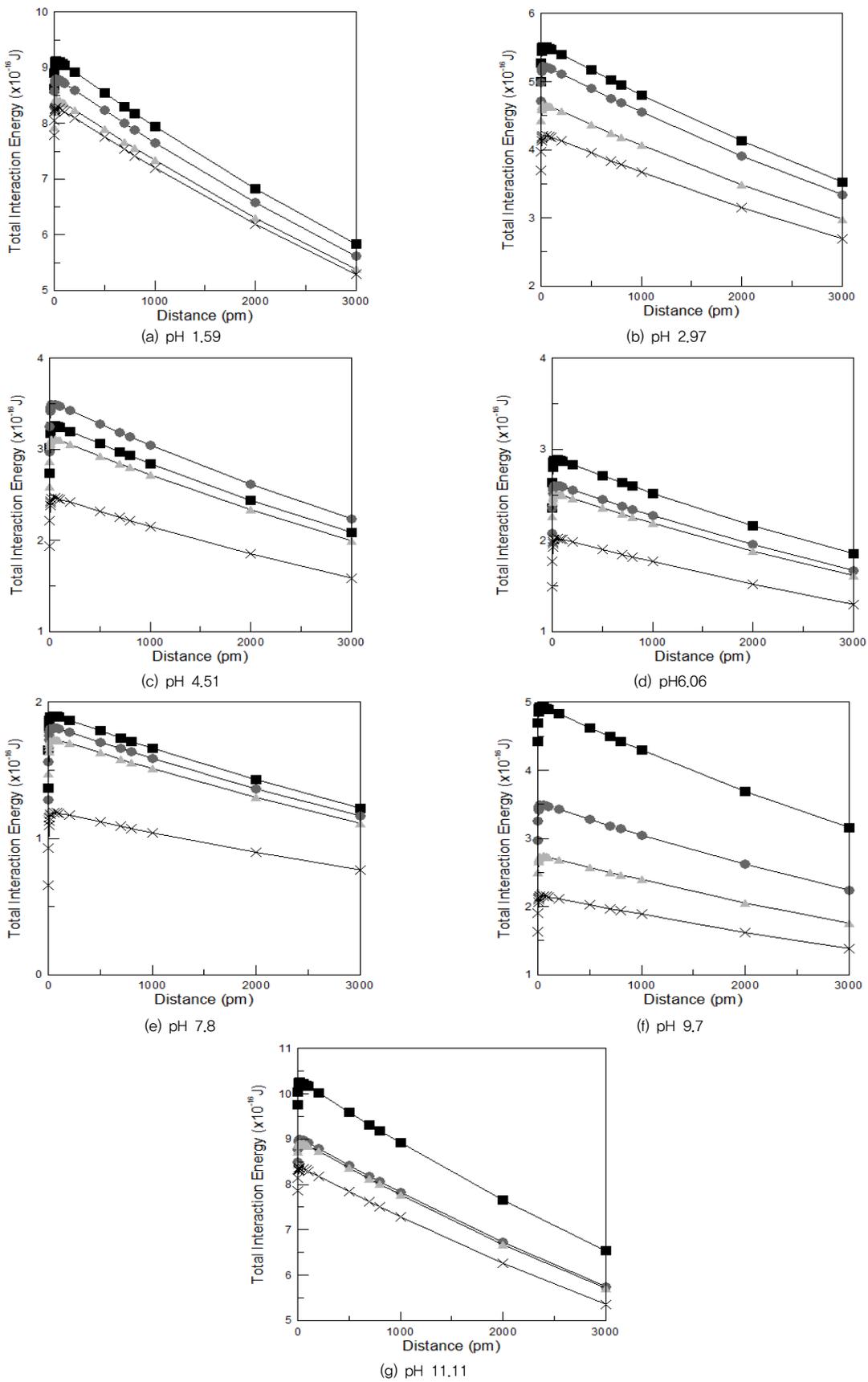


Fig. 4. Total interaction energy diagram of montmorillonite suspension according to the amount of montmorillonite at different pH ( $\blacksquare$  =0.01 g,  $\bullet$ =0.1 g,  $\blacktriangle$ =1 g,  $\times$ =10 g).

분산체 내의 분산질의 양이 증가하게 되면 분산질에 흡착하는 이온의 양이 감소하게 되면서 입자 간에 발생하는 에너지 역시 감소하게 된다. 따라서 분산질 질량의 증가는 Electrokinetic Potential과 입자간 상호 에너지의 감소를 야기한다고 사료된다.

#### 4. 결론

일반적으로 Electrokinetic Potential은 세기성질로 인식되어왔다. 본 연구에서는 실질적으로 분산질의 양이 분산체의 전기적 거동에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고자 대표적 점토성 물질인 몬모릴로나이트를 대상으로 하여 Zeta Meter를 이용해 Electrokinetic Potential을 측정하고 이를 바탕으로 DLVO이론에 적용하여 입자간 상호 에너지를 도출해보았다. 몬모릴로나이트 분산체의 Isoelectric Point는 pH7부근으로 나타났으며 몬모릴로나이트 표면 모서리의 성격에 따라 pH가 증가하면서 Electrokinetic Potential이 음의 방향으로 증가하는 경향이 관찰되었다. Isoelectric Point는 분산질의 양과 무관하게 유사한 값을 나타냈다. 분산체의 pH와는 무관하게 양이 증가할수록 Electrokinetic Potential이 점차적으로 감소하였다. 이는 분산질의 양이 증가하면서 분산체 내에 존재하는 이온들이 단위질량 당 흡착하는 양이 감소하게 되기 때문이라고 사료된다. 이는 Electrokinetic Potential의 측정에 있어 질량이 기존에 알고 있었던 세기성질이 아닌 크기성질임을 나타내준다. Electrokinetic Potential의 결과를 바탕으로 측정한 입자간 상호 에너지는 입자간의 거리가 증가할수록 0으로 수렴하는 경향을 나타냈으며 그 값은 Electrokinetic Potential의 절대값에 비례하였다. 또한 분산질의 질량이 증가할수록 입자간 상호 에너지가 감소하였다.

**KSEE**

#### 사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0001901).

#### 참고문헌

1. Liang, Y., Hilal, N., Langston, P., and Starov, V., "Interaction forces between colloidal particles in liquid : Theory and experiment," *Advances in Colloid and Interface Sci.*, 134-135,

151-166 (2007).  
 2. Gibson, J. H., Hon, H., Farnood, R., Droppa, I. G., and Seto, P., "Effects of ultrasound on suspended particles in municipal wastewater," *Water Res.*, **43**, 2251-2259(2009).  
 3. Björklund, J., Geber, U., and Rydberg, T., "Energy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge," *Resources, Conservation and Recycling*, **31**, 293-316 (2001).  
 4. Takahashi, T., Ohkubo, T., and Ikeda, Y., "Montmorillonite alignment induced by magnetic field: Evidence based on the diffusion anisotropy of water molecules," *J. Colloid Interface Sci.*, **299**, 198-203 (2006).  
 5. Tombácz, E., and Szekeres, M., "Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspension: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes," *Appl. Clay Sci.*, **27**, 75-94 (2004).  
 6. Yuan, C. and Chiang, T., "Enhancement of electrokinetic remediation of arsenic spiked soil by chemical reagents," *J. Hazard. Mater.*, **152**, 309-315 (2008).  
 7. Lyklema, J., "Molecular interpretation of electrokinetic potentials," *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **15**(3), 125-130, (2010).  
 8. Cadene, A., Durand-Vidal, S., Turq, P., and Brendle, J., "Study of individual Na-montmorillonite particles size, morphology, and apparent charge," *J. Colloid Interface Sci.*, **285**, 713-730 (2005).  
 9. G. Lagaly, S. Ziesmer, "Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersions", *Adv. in Colloid and Interface Science*, **100-102**, 105-128 (2003).  
 10. 임성철, "Electrokinetic 배수와 Zeta Potential의 상관성에 관한 실험적 연구," 석사학위논문, 중앙대학교 대학원, (2008).  
 11. Kinsela, A. S., Tjitradjaja, A., Collins, R. N., Waite, T. D., Payne, T. E., Macdonald, B. C. T., and White, I., "Influence of calcium and silica on hydraulic properties of sodium montmorillonite assemblages under alkaline conditions," *J. Colloid Interface Sci.*, **343**(1), 366-393 (2009).  
 12. Benítez, E. I., Genovese, D. B., and Lozano, J. E., "Effect of pH and ionic strength on apple juice turbidity: Application of the extended DLVO theory." *Food Hydrocolloids*, **21**, 100-109 (2007).  
 13. Liang, Y., Hilal, N., Langston, P., and Starov, V., "Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment," *Adv. Colloid Interface Sci.*, **134-135**, 151-166 (2007).  
 14. Adamson, A. W. and Gast, A. P., *Physical Chemistry of Surfaces* 6th edition, John Wiley and Sons, Inc. (1997).