

점토성 광물입자의 표면 전기적 거동에 따른 탁도 변화 특성

오세진 · 김동수[†]

이화여자대학교 환경공학과

Characteristics of the Turbidity Change of Clay Particulate Matter according to Its Surface Electrokinetic Behavior

Sejin O · Dong-Su Kim[†]

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University
(Received 3 December 2009, Revised 15 January 2010, Accepted 20 January 2010)

Abstract

Montmorillonite is one of representative inorganic clay particles. As the characteristics of clay particulate matter in aqueous environment determine the efficiencies of wastewater treatment and some industrial operations, it is essential to understand its aquatic behavior in relation with turbidity. The change of electrokinetic potential of montmorillonite suspension shows that it tends to negatively increase as the pH of suspension increases. In addition, it is observed that its potential is around 0mV when the solution pH is *ca.* 5. The turbidity of suspension is shown to be very low when pH is lower than its isoelectric point. However, the turbidity gradually enhances according to beyond isoelectric point. These results reveal that the correlation between electrokinetic potential and turbidity for clay mineral suspension is peculiar which should be fundamentally considered for systematic treatment of wastewater.

keywords : Electrokinetic potential, Isoelectric point, Montmorillonite, Turbidity

1. 서론

수중에서 입자성 물질의 거동에 대한 체계적인 고찰은 폐수처리과정 뿐 아니라 입자성 물질을 원료로 하는 여러 산업 공정의 효율적인 운영을 위해 필수적인 사항이라고 할 수 있다(문병현 등, 2005). 또한, 자연 수중계에서 역시 입자성 물질이 그 수중 생태계의 특성을 결정짓는데 있어 매우 중요한 역할을 한다는 측면에서도 이러한 입자성 물질의 거동을 예측하는 큰 의미를 지닌다. 입자성 물질이 응집하여 침전을 하게 되면 수중 하부에 혐기성 분위기를 형성함으로써 수중 용존산소가 고갈됨으로써 수중 생태계가 영향을 받을 것으로 예측할 수 있으며, 이와는 반대로 입자성 물질이 안정한 상태로 부유하게 되면 물의 탁도가 증가하여 빛의 투과성 및 이와 연관된 광합성 등의 반응이 영향을 받게 될 것이라 고려할 수 있다(Liang et al., 2007).

수중 환경에서의 입자성 물질은 특히 폐수처리 시설의 운영에 있어 직접적인 영향을 주는 요인이라고 할 수 있다. 즉, 폐수처리는 수중에 존재하는 입자성 물질 및 용존 유기물질의 처리과정이라고 할 수 있는 바, 폐수 중 존재하는 입자성 물질의 특성에 의거하여 사용되는 응집제의 양

및 폐수체류시간, 그리고 폐수처리과정에서 형성되는 슬러지의 특성들이 결정되어진다(Gibson et al., 2009). 특히, 폐수처리 후 발생하는 슬러지는 양적인 면에서는 전체 폐수의 1~2 Wt.%에 불과하지만 그 처리에 소요되는 비용은 경우에 따라 전체 폐수처리 비용의 50%에 달하기 때문에 슬러지 처리의 효율적인 운영은 경제적으로 큰 의미를 지닌다고 할 수 있다(Pan et al., 2005).

폐수에 포함되어 있는 입자성 물질은 무기성 물질과 유기성 물질로 대별할 수 있으며, 이 가운데 무기성 물질로 이루어진 입자들은 그 내용상 점토성 입자의 성격을 띠는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 수중에 존재하는 점토성 입자들의 표면 전기적 거동에 대한 체계적인 고찰은 폐수처리 과정에서 입자성 물질의 제거율을 향상시키기 위한 공정의 효율적 운영을 위해 필요한 사항이라고 할 수 있다. 수중 환경에서의 점토성 입자에 대한 표면 전기적 거동이나 탁도의 특성을 검토한 연구는 다양하게 진행되고 있으나 이들을 구조적인 특성에 따라 해석을 진행한 연구는 거의 이루어지지 않은 상황이라고 할 수 있다. 폐수처리과정에서의 탁도 제거는 주로 입자성 물질의 응집 및 침전에 의해 이루어지고 있으며, 앞서 언급한 바와 같이 폐수에 포함되어 있는 탁도의 상당 부분이 점토성 입자로 구성되어 있음을 고려할 때 이들 물질의 응집성을 결정짓는 표면 전기적 거동 및 탁도 변화의 상관성에 대한 고찰은 매우 의미 있는 자료를 제공해 줄 것이라고 예상할 수 있다

[†] To whom correspondence should be addressed.
dongsu@ewha.ac.kr

(Damonte et al., 2007; Ersoy, 2005). 따라서 본 연구에서는 점토성 광물로서 Montmorillonite를 대상으로 하여 이 물질의 수중 pH의 변화에 따른 Electrokinetic Potential의 변화를 검토함과 동시에 동일한 pH조건에서 Montmorillonite 분산체의 탁도 변화를 조사하고, 이 점토성 물질의 결정학적 구조의 특성에 의거하여 이 두 결과의 상관성을 해석하고자 하였다.

점토성 광물 중에 대표적인 Montmorillonite는 Smectite에 속해있으며 흰색이나 옅은 분홍색, 노란색 등을 나타내고 무광택을 띠는 물질이다. Montmorillonite의 화학식은 $M_x(Al_{2-y}Mg_y)(Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O)$ 로, SiO_2 가 50% 이상을 차지하며 그 다음으로는 Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 순서대로 함량이 높으며 판상인 구조로 Tetrahedral(T) Sheet과 Octahedral(O) Sheet이 T-O-T와 같이 구성되어 있다(Cadene et al., 2005; Mineral Data Publishing, 2001). 본 연구에서의 이러한 검토는 폐수처리 시 입자성 물질의 거동 예측 및 효율적인 제거에 대한 중요한 기본적 개념을 제공해줄 수 있을 것으로 사료된다(Roussy et al., 2005).

2. 연구방법

2.1. 실험재료

수중 pH에 따른 Montmorillonite의 Electrokinetic Potential 및 탁도의 변화를 관찰하기 위해 3차 증류수에 질산 용액(HNO_3 , Ducksan Pure Chemical Co., Extra Pure) 혹은 수산화나트륨 용액($NaOH$, Samchun Pure Chemical Co., Extra Pure)을 조건에 맞게 적절히 첨가시켜 pH Meter(Orion pH/ISE Meter, Model 710A)로 pH를 1.02, 2.73, 3.50, 5.60, 7.02, 9.44, 10.35, 그리고 11.70인 용액을 제조하였다. 본 실험에서는 용액과 Montmorillonite의 비율을 20(mL):1(g)으로 결정하여, pH를 고정시킨 8개의 수용액을 200 mL씩 담은 비커에 10 g의 Montmorillonite(Montmorillonite K10, Aldrich Chemical)를 첨가하여 실험을 진행하였다. Montmorillonite 분산체는 교반기(Changshin Scientific Co., C-SK6)를 이용해 200 rpm의 속도로 10분간 교반시킨 후 입자들의 안정화를 위하여 정치시켰다. 1시간 후, 분산체 내의 Montmorillonite 입자들이 눈으로 관찰이 가능할 정도로 침전이 이루어져 안정화 상태가 되었을 때, 분산체의 표면에서 공통적으로 1 cm 깊이에서 용액을 채취하여 분석을 진행하였다.

2.2. 실험방법

Electrokinetic Potential의 측정은 전기영동 측정기기(Zeta Meter Inc., 3.0+)를 이용하였으며, 각 샘플을 3번씩 측정하는 것을 한 단위로 결정하고, 총 세 단위의 값을 관찰하였다. 이 때, 한 단위의 결과로 측정된 분산이 2.000을 넘는 세트가 존재할 경우, 이 값은 결과에서 배제시키고 나머지 값들의 평균값을 계산하여 실험 결과에 적용하였다.

안정화된 상태 이후의 Montmorillonite를 포함한 분산체의 탁도의 변화를 측정하고자 Turbidimeter(Hach Chemical Company, Model 2100A)를 이용하였다. 시료는 0.1, 1, 10

그리고 100NTU (Nephelometric Turbidity Unit)의 Standard Solution으로 보정을 한 후에 측정하였으며, 이러한 과정은 매 시료마다 반복적으로 진행하였다(ISO, 1990).

3. 결과 및 고찰

3.1. pH에 따른 Electrokinetic Potential의 변화

본 연구에서는 수중에서 중요한 역할을 하는 입자성 물질들의 거동을 살펴보기 위해 점토성 광물인 Montmorillonite를 대상으로 pH의 변화에 따른 전기적 거동과 탁도의 변화 양상을 살펴보았다.

pH의 변화에 따른 Montmorillonite 분산체의 Electrokinetic Potential의 변화를 Fig. 1과 같이 나타내었다. pH4 이하의 산성에서는 Electrokinetic Potential값이 양의 값을 유지했다. pH2.73에서는 10 mV를 넘는 11.4 mV를 나타내었지만, 이후의 pH인 3.5에서는 8.47 mV로 포텐셜이 양의 값을 유지하되 감소하는 경향을 나타내었다. pH가 점차 증가하면서 pH5에 가까운 지점에서 Isoelectric Point인 0 mV가 관찰되었다. Isoelectric Point 이상이라고 판단되는 pH 이후부터는 분산체의 포텐셜이 음의 값으로 관찰되었으며 pH가 증가할수록 Electrokinetic Potential값이 점차 음의 방향으로 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 음의 방향으로의 증가는 pH5.5에서 9까지보다 pH9 이후의 염기성인 조건에서 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 관찰되었으며 제조한 분산체 중 염기성이 가장 강력한 pH11.7에서 측정된 Electrokinetic Potential은 -16.33 mV이었다. 이와 같이 관찰된 Isoelectric Point는 현재까지 다양한 연구의 결과와 유사하다(Delgado et al., 1986; Itami and Fujitani, 2005). Montmorillonite 분산체의 pH에 따른 Electrokinetic Potential의 경향은 Montmorillonite 입자의 표면 때문이 아닌 모서리의 전하적 특성에 따른 것이라고 파악된다.

Montmorillonite 입자 표면은 음전하를 나타낸다. 이는 동형치환에 의한 것으로 Octahedral Sheet에 있는 Al^{3+} 이 Mg^{2+} 이나 Fe^{2+} 로 치환되고, Tetrahedral Sheet에 존재하는

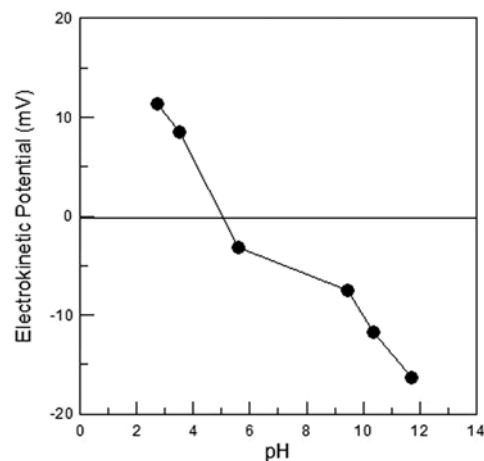


Fig. 1. Variation of the electrokinetic potential of montmorillonite suspension according to pH.

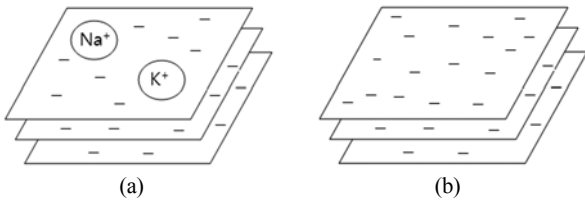


Fig. 2. Status of the facial charge of montmorillonite (a) before and (b) after adding montmorillonite to water.

Si⁴⁺이 Al³⁺으로 바뀌게 되기 때문이다(Zarzycki and Thomas, 2006). Montmorillonite의 판상 사이에는 약 1~2 nm의 공간이 존재하며 이곳에는 이온교환이 가능한 Na⁺, K⁺, Ca²⁺ 등 다양한 양이온들이 존재하고 있다. 이러한 이온들은 Montmorillonite과 양이온 교환반응이 일어나면서 Montmorillonite의 표면에 양전하와 음전하가 동시에 띠게 된다(Fig. 2(a) 참조). 그러나 Montmorillonite가 수중에 존재하게 되면 수화가 잘되는 Na⁺이나 K⁺이 떨어져 나가게 되면서 Fig. 2(b)에 나타난 것과 같이 입자의 표면이 음전하만 띠게 된다.

Montmorillonite 분산체의 안정성과 관련하여 가장 중요한 역할을 하는 것은 pH와 수체 내 존재하는 전해질로 알려져 있다(Tombác and Szekeres, 2004). 이 가운데, pH가 Montmorillonite의 안정성과 관련하여 중요한 역할을 하는 이유는 분산체 내의 pH에 따라 나타나는 분해 작용이 Montmorillonite의 표면 포텐셜을 결정짓는 입자 모서리의 전하에 영향을 주기 때문이다(García-García et al., 2009). 즉, Montmorillonite 입자의 모서리 부분은 판상에 존재하는 Si(O-Si-O)와 Al(O-Al-O)의 결합들이 끊어진 Si⁺나 Si-O⁻ 상태로 존재한다. 이 때, Montmorillonite을 물에 교반시켜 분산체를 형성하면 식 (1)이나 (2)의 반응이 일어나면서 Si는 Si-OH(Silanol)을, Al은 Al-OH(Aluminol)을 생성한다(Kinsela et al., 2010).



Isoelectric Point보다 낮은 pH의 경우 (1)과 같은 반응이 일어나면서 Si⁺ (혹은 Si-OH₂⁺)가 형성되어 Electrokinetic Potential이 양의 값을 나타낸다. 반대로 Isoelectric Point보다 높은 pH의 분산체는 (2)의 반응이 나타나면서 Silanol Group에서 Si-O⁻ (또는 Si-(OH)₂⁻나 Si-O⁻·H₂O)이 생성되고, 이로서 Isoelectric Point이상에서는 음의 Potential값이 관찰되는 것이라고 사료된다. 이 내용을 바탕으로 하여 Montmorillonite 분산체의 Electrokinetic Potential은 Montmorillonite의 구조에 따라 다음의 식과 같이 표현할 수 있다고 판단된다(Dufan et al., 2000).

$$\zeta_{\text{edge}} = \frac{(\zeta_{\text{SiO}_2} + 2\zeta_{\text{Al}_2\text{O}_3})}{3} \quad (3)$$

Montmorillonite 분산체의 pH에 따른 Electrokinetic Poten-

tial의 결과를 바탕으로 Total Interaction Energy와 표면의 포텐셜 값 등을 도출할 수 있다. 표면의 포텐셜의 경우, 이를 구하기 위해 필요로 하는 전제조건들이 부족하기 때문에 대략적인 값만 알아낼 수 있다는 한계가 존재한다(Bergaya et al., 2006). 그러나 분산체의 Total Interaction Energy는 Derjaguin - Landau - Verwey - Overbeek (DLVO)이론을 이용해 V_T 값을 도출해 내어 나타낼 수 있으며 최근에는 기존의 DLVO이론을 확장하여 표현하기도 한다(Benítez et al., 2007; Shaw, 1992). V_T(Total Interaction Energy)는 van Der Waals Attraction을 나타내는 V_A와 Repulsion Electrostatic Potential을 나타내는 V_R의 합으로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다(Liang et al., 2007).

$$V_T = V_A + V_R \quad (4)$$

van Der Waals attraction은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다(Benítez et al., 2007).

$$V_A = -\frac{A}{6} \left[\left(\frac{2a^2}{H^2 + 4aH} \right) + \left(\frac{2a^2}{H^2 + 4aH + 4H^2} \right) + \ln \left(\frac{H^2 + 4aH}{H^2 + 4aH + 4H^2} \right) \right] \quad (5)$$

이 때 A는 Hamaker 상수로 Montmorillonite에 적합한 2.25×10⁻²⁰ J을 이용하였다. Hamaker 상수는 입자간 Attraction과 관련이 있어 상수의 값이 증가할수록 입자간의 Attraction이 증가함을 나타낸다(Helmy, 1998). 식에서의 a는 입자의 반지름 값으로 Montmorillonite의 경우 판상의 구조를 가지고 있기 때문에 Cadene 등(2005)의 연구에서 측정된 Montmorillonite의 크기의 평균(360 nm 길이, 250 nm 너비, 1.2 nm 높이)의 부피를 구의 부피로 전환시켜 반지름 값(29.54 nm)을 나타내었다. 식에서의 H는 입자간의 거리를 의미한다. Repulsion Electrostatic Potential을 나타내는 V_R은 다음과 같이 표현한다(Quemada and Berli, 2002).

$$V_R = 2\pi\epsilon\epsilon_0\psi_0^2 \ln [1 + \exp(-\kappa H)] \quad (6)$$

여기서 ε는 매체의 유전율로 8.854×10⁻¹² F/m이며, ψ₀는 Stern Potential을 의미하나 이를 대신하여 Electrokinetic potential값을 대입하기도 한다(Adamson and Gast, 1997). 식 내의 κ는 입자 주변의 전기이중층의 두께 혹은 Debye's Length인 κ⁻¹을 나타내는 식 (7)을 이용해 구할 수 있다(García-García et al., 2009).

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\epsilon k_B T}{2IeF}} \quad (7)$$

이 때, k_B는 볼츠만 상수(=1.37×10⁻²³ J/K)를, T는 절대온도(298K)를, e는 Electron의 Charge(=96500c/6×10²³)를, 그리고 F는 패러데이 상수(=96485c/mol)를 의미한다.

$$I = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2 \quad (8)$$

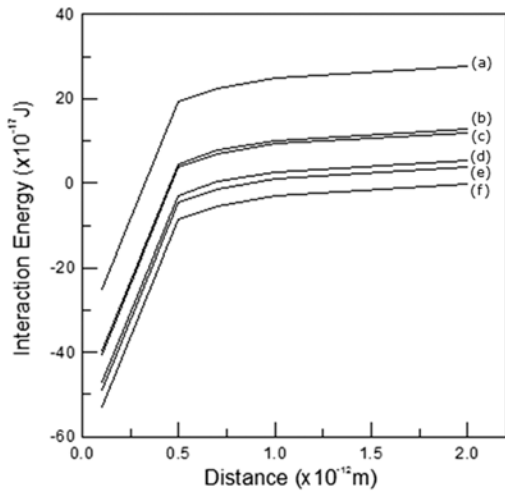


Fig. 3. Total interaction energy diagram of montmorillonite suspension with different pH ((a) pH11.7, (b) pH10.35, (c) pH2.73, (d) pH3.5, (e) pH9.44 and (f) pH5.6).

식 (7)에서의 I는 이온의 세기로 식 (8)과 같이 표현되며 이 때 c는 몰농도를, z는 전하를 가리킨다. 위의 식들을 이용하여 pH에 따른 Montmorillonite 분산체의 Total Interaction Energy를 측정된 결과 Fig. 3과 같이 나타났다.

Montmorillonite 분산체의 Total Interaction Energy의 경향을 살펴보면, 입자간의 거리가 0일 때는 음의 방향으로 무한대를 나타냈다. 이후, 입자간의 거리가 증가하면서 에너지 값이 점차적으로 증가하다가 Electrokinetic Potential값에 따라 어느 정도 거리가 되면 0으로 수렴하는 경향을 나타내었다. Fig. 3은 Electrokinetic Potential의 차이가 입자간 에너지에 어떤 영향을 주는지 알기 위해 0부터 2.0 pm 까지 나타낸 것이다. Total Interaction Energy는 분산체의 pH별로 측정된 Electrokinetic Potential 결과의 절대값과 비례하게 나타났다. 즉, Electrokinetic Potential의 값이 크게 나타난 pH11.7(-16.33 mV)의 분산체가 가장 큰 Total Interaction Energy를 나타냈으며, 절대값이 가장 작은 -4.64 mV(pH5.6)인 분산체에서 가장 작은 에너지 값이 관찰되었다.

3.2. pH에 따른 탁도의 변화

pH의 변화에 따른 Montmorillonite 분산체의 탁도 변화 양상을 살펴보고자 Fig. 1과 동일한 pH의 조건에서 탁도를 측정하였다(Fig. 4참조). 전체적으로 분산체의 pH가 증가할수록 탁도가 증가하는 것으로 관찰되었다. Isoelectric Point 이하의 분산체인 경우, pH 1.02에서는 거의 0에 가까운 0.01 NTU, pH2.73에서는 0.16 NTU, 그리고 pH3.5에서 0.45 NTU의 값이 측정되었다. 이는 모두 1 NTU도 안 되는 값으로 육안으로는 세 pH의 탁도를 구분하는 것이 불가능하였다. 그러나 Isoelectric Point 이후에는 탁도의 값이 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. pH5.6에서는 4.2 NTU이었으나 이후 pH7.02에서는 11 NTU, 그리고 pH9.44에서는 17 NTU를 나타내면서 분산체가 점차적으로 탁해지는 경향을 확인할 수 있었다. pH9 이후의 Electrokinetic Potential이 음의 방향으로 급격한 증가를 나타낸 것과 유사하게

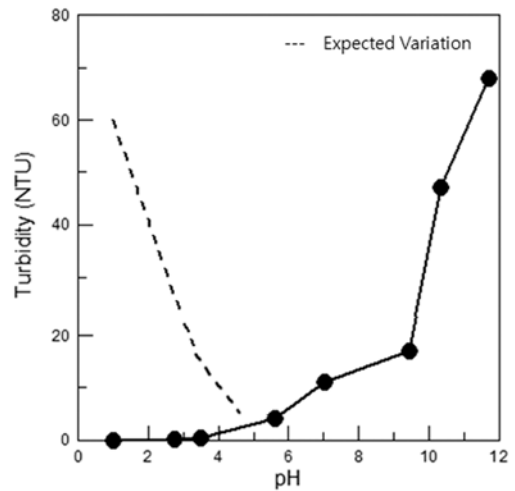


Fig. 4. Change of the turbidity of aqueous solution with montmorillonite clay according to pH.

탁도 역시 분산체가 점차적으로 염기성이 되면서 급격한 증가를 보였다.

일반적으로 예상할 수 있는 Fig. 4의 점선인 경우와 다르게 나타난 Montmorillonite 분산체의 pH에 따른 탁도의 변화는 Electrokinetic Potential의 결과와 마찬가지로 Montmorillonite입자 모서리의 pH에 따른 전하 양상의 변화에 의한 것이라고 사료된다. 분산체의 pH가 Isoelectric Point 이하의 경우에는 Montmorillonite 모서리 부분의 전하가 양전하를 띠게 되면서 음전하를 띠는 입자 표면과의 응집이 일어나 서로 엉키게 될 것이다(Fig. 5(a) 참조). 이와 같이 입자간 응집이 일어나게 되면 분산체의 탁도에 영향을 주어 낮은 값의 탁도가 나타나게 될 것이라고 생각할 수 있다. 그러나 분산체 내의 pH가 Isoelectric Point보다 큰 값이면 Montmorillonite 모서리가 더 이상 양전하를 띄지 않게 되면서 모서리를 포함한 표면 전체에 음전하가 나타나게 된다. 이와 같이 표면 전체가 음전하일 경우, Fig. 5(b)와 같이 입자들이 서로 응집하지 않고 반발하게 되고 이로서 분산체의 탁도를 증가하는 결과가 관찰되는 것이라 판단된다.

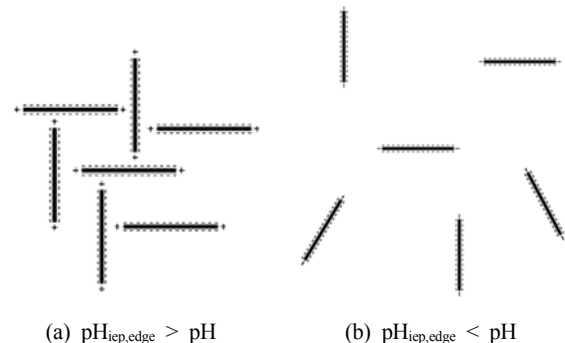


Fig. 5. Change of the agglomerating status of montmorillonite suspension according to pH.

3.3. Montmorillonite 분산체의 Electrokinetic potential과 탁도간의 상관관계

앞에서 측정된 결과들을 바탕으로 Electrokinetic Potential

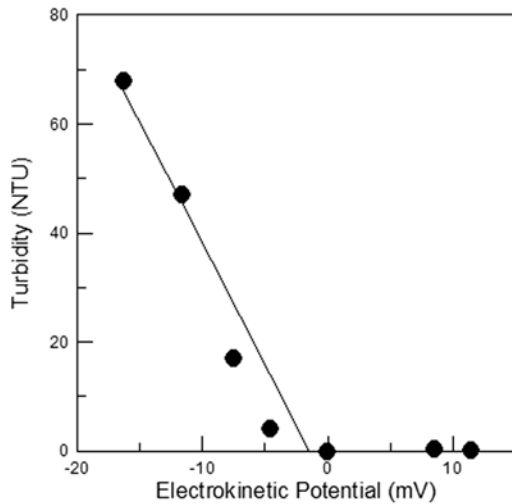


Fig. 6. Correlation between electrokinetic potential and turbidity of montmorillonite suspension.

과 탁도의 관계를 Fig. 6과 같이 나타내었다. 일반적인 입자성 물질들의 Electrokinetic Potential과 탁도의 관계는 Electrokinetic Potential이 0 mV인 지점에서 0 NTU에 가까운 탁도를 나타내며 이를 최저 꼭지점으로 하는 식 (9)와 같은 2차 방정식이 나타난다(Benitez et al., 2007).

$$\tau = \tau_H + a\zeta + b\zeta^2 \quad (9)$$

이 때, τ 는 탁도 값이며, τ_H 는 Electrokinetic Potential이 0 일 때의 탁도를, 그리고 ζ 는 Electrokinetic Potential을 의미한다. 그러나 본 연구에서 진행한 Montmorillonite는 위의 예상과 같은 결과가 나타나지 않았다.

$$\tau = a + b\zeta \quad (10)$$

Montmorillonite 분산체의 경우, 음의 Electrokinetic Potential에서는 그 값이 음의 방향으로 증가할수록 탁도가 점차적으로 증가하는 경향을 나타냈으나, 양의 Electrokinetic Potential 값은 거의 0 NTU값을 유지하는 것으로 관찰되었다. 이러한 이유는 Montmorillonite 입자 모서리의 전하양상이 pH에 따라 변화하기 때문이라고 생각할 수 있다. Fig. 5의 결과 중 음의 값을 가지는 Electrokinetic Potential에 따른 탁도의 변화를 살펴본 결과, 탁도와 Electrokinetic Potential간에 식 (10)과 같은 1차 방정식을 도출할 수 있었으며 이때 a값은 -6.653, b값은 -4.4619로 나타났다($R^2=0.9556$).

4. 결론

본 연구에서는 폐수처리과정을 포함, 입자성 물질을 다루는 다양한 산업 공정의 운영에서 수중 내 존재하는 입자성 물질의 성격을 파악하는 것이 중요하다고 판단하는 바, 점토성 광물인 Montmorillonite을 대상으로 하여 분산체에 따른 Electrokinetic Potential을 측정하고 동일한 조건에서의

탁도의 변화를 확인해 보고자 하였다. pH에 따른 분산체의 Electrokinetic Potential을 측정해 본 결과, Isoelectric Point라고 판단되는 pH5 부근으로 관찰되었다. 일반적으로 나타나는 Electrokinetic Potential과 탁도와는 달리 Montmorillonite 분산체의 경우 Isoelectric Point 이하의 pH 분산체에서는 거의 1 NTU 이하의 낮은 탁도가 관찰되었고 이후 pH에서는 급격한 탁도의 증가가 확인되었다. 이러한 Electrokinetic Potential과 탁도의 경향은 pH에 따라 변화하는 Montmorillonite 입자 모서리의 전하에 따른 것이라 사료된다.

사 사

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0093-461).

참고문헌

- 문병현, 서규태, 장덕준(2005). 하천에 함유된 부유입자의 특성에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **21**(5), pp. 500-504.
- Adamson, A. W. and Gast, A. P. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces 6th edition*, John Wiley and Sons, Inc.
- Benítez, E. I., Genovese, D. B., and Lozano, J. E. (2007). Effect of pH and ionic strength on apple juice turbidity: Application of the extended DLVO theory. *Food Hydrocolloids*, **21**, pp. 100-109.
- Bergaya, F., Theng, B. K. G., and Lagaly, G. (2006). *Handbook of Clay Science(First edition) Developments in Clay Science*, Elsevier.
- Cadene, A., Durand-Vidal, S., Turq, P., and Brendle, J. (2005). Study of individual Na-montmorillonite particles size, morphology, and apparent charge, *Journal of Colloid and Interface Science*, **285**, pp. 713-730.
- Damonte, M., Sánchez, R. M. T., and Afonso, M. S. (2007). Some aspects of the glyphosate adsorption on montmorillonite and its calcined form. *Applied Clay Science*, **36**, pp. 86-94.
- Delgado, A., González-Caballero, F., and Bruque, J. M. (1986). On the zeta potential and surface charge density of montmorillonite in aqueous electrolyte solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, **113**, pp. 203-211.
- Dufan, J. D. G., Ramos-Tejada, M. M., Arroyo, F. J., and González-Caballero, F. (2000). *Journal of Colloid and Interface Science*, **229**, pp. 107-117.
- Ersoy, B. (2005). Effect of pH and polymer charge density on settling rate and turbidity of natural stone suspension. *International Journal of Mineral Processing*, **75**, pp. 207-216.
- García-García, S., Wold, S., and Jonsson, M. (2009). Effects of temperature on the stability of colloidal montmorillonite particles at different pH and ionic strength. *Applied clay chemicals*, **43**, pp. 21-26.
- Gibson, J. H., Hon, H., Farnood, R., Droppoa, I. G., and Seto, P. (2009). Effects of ultrasound on suspended particles in

- municipal wastewater. *Water Research*, **43**, pp. 2251-2259.
- Helmy, A. K. (1998). The Limited Swelling of Montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, **207**, pp. 128-129.
- International Organization for Standards (ISO) (1990). International Standard ISO 7207-Water Quality- Determination of Turbidity.
- Itami, K. and Fujitani, H. (2005). Charge characteristics and related dispersion/flocculation behavior of soil colloids as the cause of turbidity. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **265**, pp. 55-63.
- Kinsela, A. S., Tjitradjaja, A., Collins, R. N., Waite, T. D., Payne, T. E., Macdonald, B. C. T., and White, I. (2010). Influence of calcium and silica on hydraulic properties of sodium montmorillonite assemblages under alkaline conditions, *Journal of Colloid and Interface Science*, **343**(1), pp. 366-373.
- Liang, Y., Hilal, N., Langston, P., and Starov, V. (2007). Interaction forces between colloidal particles in liquid : Theory and experiment. *Advances in Colloid and Interface Science*, **134-135**, pp. 151-166.
- Mineral Data Publishing (2001). <http://www.handbookofmineralogy.org/>.
- Pan, J. R., Huang, C., Jiang, W., and Chen, C. (2005). Treatment of wastewater containing nano-scale silica particles by dead-end microfiltration: evaluation of pretreatment methods. *Desalination*, **179**, pp. 31-40.
- Quemada, D. and Berli, D. (2002). Energy of interaction in colloids and its implications in rheological modeling, *Advances in Colloid and Interface Science*, **98**, pp. 51-85.
- Roussy, J., Vooren, M. V., Dempsey, B. A., and Guibal, E. (2005). Influence of chitosan characteristics on the coagulation and the flocculation of bentonite suspensions. *Water Research*, **39**, pp. 3247-3258.
- Shaw, D. J. (1992). *Introduction to Colloid and Surface Chemistry 4th edition*, Butterworth / Heinemann.
- Tombácz, E. and Szekeres, M. (2004). Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes. *Applied clay chemicals*, **27**, pp. 75-94.
- Zarzycki, P. and Thomas, F. (2006). Theoretical study of the acid-base properties of the montmorillonite/electrolyte interface: Influence of the surface heterogeneity and ionic strength on the potentiometric titration curves. *Journal of Colloid and Interface Science*, **302**, pp. 547-559.