

## 수중입자의 표면 전기적 특성에 미치는 온도의 영향

오세진 · 김동수<sup>†</sup>

이화여자대학교 환경공학과

### The Influence of Temperature on the Surface Electrokinetic Features of Particulate Matters in Aqueous Environment

Sejin O · Dong-Su Kim<sup>†</sup>

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

(Received 2 February 2010, Revised 9 March 2010, Accepted 14 March 2010)

#### Abstract

To figure out the importance of temperature on electrochemical properties in water environment, calcium carbonate, one of important substances in water chemistry, was chosen to make suspensions. The result of electrokinetic potential of calcium carbonate suspensions revealed that it tended to increase as temperature increased. In addition, electrokinetic potential was negatively increased as suspensions became more basic. Its isoelectric point was *ca.* 7 regardless of temperature. The adsorption of hydrogen ions on calcium carbonate particles followed endothermic reaction. This result was verified by continuously measuring pH as adding HCl solution in calcium carbonate suspension. It explained that suspensions' potential was determined by DLVO theory which calculated total interaction energy between particles. Suspensions' total interaction energy was proportional to the value of electrokinetic potential. Furthermore, total interaction energy between particles increased as suspensions' temperature was increased.

**keywords** : Calcium carbonate, Electrokinetic potential, Temperature, Total interaction energy

## 1. 서론

수중에 존재하는 입자물질의 성격을 파악하는 것은 수중 환경을 이해하는데 있어 필요로 한다. 수중에 존재하는 입자물질의 종류 및 표면 전하는 수체 전체의 화학적 구성에 있어서 중요한 역할을 하기 때문이다(홍기훈 등, 1989). 다양한 입자물질 가운데 탄산칼슘의 경우, 자연계에서는 물론 산업공정에 있어서도 중요한 의미를 가진다. 탄산칼슘은 이산화탄소의 용해에 의해 생성되는 Carbonate Species들과 수중에 존재하는  $\text{Ca}^{2+}$  이온이 반응해 형성될 수 있는 고형 물질이다(Cheng et al., 2004). 수체에 존재하는  $\text{CaCO}_3$ 은 조건에 따라 미립상태의 콜로이드성 물질을 생성할 수 있으며 Alkalinity에도 영향을 주어 수체 내 완충능력을 변화시키기도 한다. 이러한  $\text{CaCO}_3$ 의 특성은 수중 생태계의 유지와도 관련이 있고 정도에도 영향을 주어 수체의 Biomass Productivity에 변화를 일으키기도 한다(Alimi et al., 2009; Bob and Walker, 2001). 또한 탄산칼슘을 비롯한 입자물질의 존재는 응집체의 양 및 폐수의 체류시간 및 처리과정 후 형성되는 슬러지의 특성을 결정짓기 때문에 폐수처리 시설의 운영에 있어 중요한 요인으로 여겨지고 있다.

제타전위라고도 불리는 Electrokinetic Potential은  $\text{CaCO}_3$

를 비롯해 수중에 존재하는 입자성 물질들의 거동을 이해하는데 필요로 한다. Electrokinetic Potential은 분산체 내의 입자와 액체의 계면상태를 설명해주는 인자로서 실험조건에 따라 전기영동, 전기침투, 흐름전위 및 침전전위 등 다양한 측정방법이 있다(이태섭 등, 2009). Electrokinetic Potential을 결정짓는 수중 입자성 물질의 거동에 미치는 힘은 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 입자 간 끌어당기는 힘으로 근본적으로 Dispersive Force에 의해 결정된다. 또 하나는 반발하는 힘으로 이는 주로 입자 표면의 전기적 요인에 의해 결정된다. 이러한 두 힘이 종합적으로 작용했을 때 양의 총 에너지 값을 가지면 전체적으로 입자들이 반발하는 양상이 나타나게 된다. 이와는 반대로 그 합이 음의 값을 가지면 반발하는 힘보다 끌어당기는 인력의 영향이 우세하여 결과적으로 입자들이 응집하게 될 것이라 생각할 수 있다(Liang et al., 2007). 따라서 분산체의 Electrokinetic Potential을 측정하고 그 경향을 파악함으로써 수체 내에서의 입자의 거동을 살펴볼 수 있으며 이를 바탕으로 수체 내 환경을 파악할 수 있을 것이라고 판단된다.

수중에 존재하는 다양한 입자물질들의 조건에 따른 Electrokinetic Potential에 대한 연구들은 현재까지도 활발하게 진행되고 있다. 특히  $\text{CaCO}_3$ 를 비롯한 수중에 존재하는 Carbonate 물질들의 경우, 전기화학적 특성이 수체 내의 용해나 침전 등 환경 전체에 미치는 영향력이 크기 때문에

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
dongsu@ewha.ac.kr

이들 연구의 중요성이 점차 강조되고 있다(Moulin and Roques, 2003). 그러나 이러한 입자성 물질들의 전기적 거동을 다루는 연구 중 온도가 미치는 영향에 대한 실험 및 분석은 아직 부족한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 수중 입자성 물질 중 중요한 역할을 차지하는  $\text{CaCO}_3$ 를 대상으로 하여 온도 변화가  $\text{CaCO}_3$  분산체의 Electrokinetic Potential 값에 변화를 야기하는지 측정해보고 그 원인을 분석해보고자 하였다. 또한, 실험 결과를 Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek(DLVO) 이론에 적용시켜 각 분산체의 입자간 상호 에너지를 측정하여 온도와 입자의 안정성과의 관계를 파악해보기로 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 탄산칼슘 분산체 제조

본 실험에서는 온도가 수중 입자의 표면 전기적 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 수중에 존재하는 대표적인 입자물질인 탄산칼슘을 선택하여 분산체를 제조하기로 하였다. pH에 따른 영향을 관찰하기 위해 1차 증류수에 0.1M HCl과 NaOH를 이용하여 pH Meter(Orion pH/ISE Meter, Model 710A)로 증류수의 pH를 2.15에서 12까지로 고정하였다. 100 mL씩 담은 용액에 탄산칼슘(Duksan Chemical Co. > 99.9% Pure) 0.5 g을 첨가한 후 미리 맞춰놓은 10, 25 그리고 40°C의 Shaking Incubator(K.M.C. 8480s)에 넣고 30분간 200 rpm의 속도로 교반시켰다. 각 온도는 유지하되 안정화를 위해 하루 동안 정지시킨 후 샘플을 분석하였다. 시간에 따른 분산체의 pH 변화를 우려하여 안정화 후 분산체의 pH를 측정된 결과 값이 크게 차이가 나지 않았다. DLVO이론 등 실험 결과를 분석하기 위해 필요한 탄산칼슘 입자의 반지름은 Feng 등(2007)에서 측정된 값인 1.0  $\mu\text{m}$ 를 사용하였다.

### 2.2. 탄산칼슘 분산체의 pH 변화

탄산칼슘 분산체의 산성용액 첨가에 따른 pH의 변화를 살펴보기 위해 HCl용액을 이용해 일정 부피씩 적정하며 pH 변화를 관찰해보기로 하였다. 실험에 사용할 분산체의 경우 Electrokinetic Potential을 측정할 때와 동일한 조건으로 하여 0.5 g의 탄산칼슘을 100 mL의 1차 증류수에 첨가하였다. 준비된 분산체는 Plate에 두고 일정 속도로 계속 교반시켜 주었다. 첨가하는 부피에 따른 pH의 감소를 살펴보기 위해 HCl 0.01M을 준비하여 일정량을 계속 첨가하면서, pH Meter (Orion pH/ISE Meter Model 710A)를 이용하여 연속적으로 pH를 측정하였다.

### 2.3. 분석방법

Electrokinetic Potential의 측정은 전기영동 측정기기(Zeta Meter Inc., Model 3.0+)를 이용하였다. 이 기기는 전극을 넣고 직류 전압을 가했을 때 콜로이드 입자가 어느 한쪽의 전극을 향해서 이동하는 현상인 전기영동의 원리를 통해 Electrokinetic Potential을 측정한다. 온도에 의한 Electro-

kinetic Potential의 경향을 측정하기 위해 각 샘플을 측정할 때마다 Incubator에서 꺼내서 바로 분석하였다. 세 번의 측정을 한 단위(Unit)로 보았으며 각 샘플을 총 다섯 Unit을 측정하였다. 이 때, 측정된 Unit의 분산값이 2.0을 넘는 경우는 실험 결과에서 제외했으며 나머지를 평균을 내어 전위 값으로 표기하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 온도에 따른 Electrokinetic Potential의 변화

온도가 분산체의 Electrokinetic Potential의 변화에 미치는 영향을 파악하고자 10, 25, 그리고 40°C에서의 Electrokinetic Potential을 Zeta Meter를 이용해 측정해 보았다. Fig. 1은 분산체의 온도에 따른 Electrokinetic Potential이다.

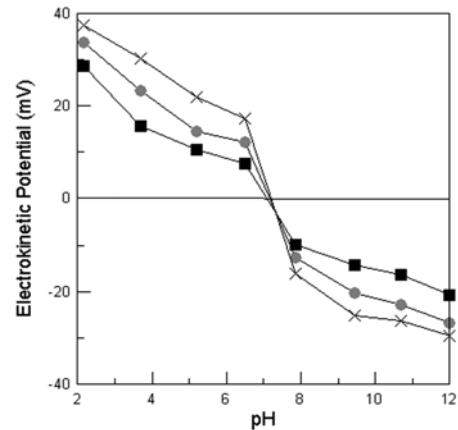


Fig. 1. Change of electrokinetic potential according to pH in different temperature condition (■ = 10°C, ● = 25°C, × = 40°C).

온도와 무관하게 pH가 증가함에 따라 전위의 값이 음의 방향으로 점차 증가하였으며 pH 7 부근에서 전기이동이 없어 Electrokinetic Potential이 0이 나타나는 Isoelectric Point(IEP, 등전점)가 관찰되었다. 분산체의 온도의 증가는 Electrokinetic Potential의 증가를 야기하는 것으로 관찰되었다. Electrokinetic Potential값은 분산체의 안정성과 비례한다. 따라서 동일한 pH의 조건에서 높은 온도의 분산체가 상대적으로 더 안정하다고 판단된다. 각 pH에서의 온도에 따른 Electrokinetic Potential 차이를 비교해 보기 위해 온도를 독립변수로, Electrokinetic Potential을 종속변수로 하여 1차 방정식( $y=ax+b$ )으로 나타내 보았다(Table 1 참조). Isoelectric Point 부근과 강산(pH2.15)과 강염기(pH12)의 조건에서는 온도에 따른 Electrokinetic Potential의 차이가 비교적 적게 나타났다.

온도의 증가에 따른 Electrokinetic Potential의 변화 양상은 다음과 같은 식을 이용해서 설명할 수 있다. Electrokinetic Potential은 전기장에서의 입자들의 위치와 이동에 따라 관련이 되어있으며, 이러한 입자들의 이동성은 다음의 Smoluchowski 식을 이용한다(Sze et al., 2003).

**Table 1.** The first order equation and coefficient of determination between temperature and electrokinetic potential

| pH                                     | 2.15   | 3.7    | 5.2    | 6.5    | 7.86    | 9.45    | 10.7    | 12      |
|--|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Slope (a)                              | 0.2911 | 0.4863 | 0.3824 | 0.3241 | -0.2066 | -0.3597 | -0.3268 | -0.3    |
| y-intercept (b)                        | 25.943 | 10.834 | 6.014  | 4.193  | -7.644  | -10.89  | -13.572 | -18.123 |
| Coefficient of determination ( $r^2$ ) | 0.994  | 0.9997 | 0.9665 | 0.9981 | 0.9957  | 0.9963  | 0.9716  | 0.961   |

$$U_E = 4\pi\epsilon_o\epsilon_r \frac{\zeta}{6\pi\mu} (1 + \kappa a) \quad (1)$$

이 식을 Zeta Potential( $\zeta$ )에 대한 식으로 변형하면 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{U_E 6\pi\mu}{4\pi\epsilon_o\epsilon_r} \left( \frac{1}{1 + \kappa a} \right) \quad (2)$$

여기서,

$U_E$  = Electrophoretic Mobility

$\epsilon_o$  = 진공상태에서의 전기적 유전상수(Electrical Permittivity of Vacuum)  
=  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  = 유전상수(Dielectric Constant) 혹은 상대유전율(Relative Permittivity)

$\zeta$  = Zeta Potential

$\mu$  = 분산체의 점성

$\kappa$  = Debye-Hückle 변수

$a$  = 입자의 반지름

식에서의  $\epsilon_o$  값은 온도의 변화에 불변하는 값이지만 유전상수(혹은 상대유전율)인  $\epsilon_r$ 는 온도 의존적이다. Dielectric Constants of Materials(2007)에 따르면 증류수의 경우, 0°C에서는 88, 20°C에서는 80.1, 100°C에서는 55.3, 그리고 200°C에서는 34.5의 값을 나타내는 것으로 알려져 있다. 실험을 진행한 온도에서의 유전상수를 알아내고자 위의 네 값을 이용하여 식 (3)과 같은 1차 방정식을 도출해 내었으며, 이 때 결정계수는 1이었다.

$$y = 88.043e^{-0.005x} \quad (3)$$

이 때, x축은 온도(°C)를, y축은 유전상수 값을 나타낸다. 식 (2)에서의  $\zeta$ 는 제타전위(Zeta Potential)이며 본 연구에서는 Fig. 1의 결과인 Zeta Meter를 이용해 측정된 Electrokinetic Potential를 대입하였다.  $\kappa$ 는 Debye-Hückle 변수로  $\kappa$ 의 역수는 전기이중층의 두께를 나타내는 값으로 사용하기도 한다. 다음의 식과 같이 표현할 수 있으며 식 내에서의  $n_0$ 는 이온의 농도,  $z$ 는 이온의 원자가,  $e$ 는 전자의 Charge (=96500c/(6×10<sup>23</sup>)),  $k_B$ 는 볼츠만상수(1.37×10<sup>-23</sup> J/K), 그리고 T는 절대온도(K)를 의미한다(García-García et al., 2009).

$$\kappa = \sqrt{\frac{2n_0 z^2 e^2}{\epsilon_o \epsilon_r k_B T}} \quad (4)$$

그러나 실제로 분산체의 Electrokinetic Potential과 관련해서  $\kappa$  값을 계산하여 나타내기 보다는 식 (1)에서의 (1+ $\kappa a$ )를  $f(\kappa a)$  혹은 Henry's Function으로 간단하게 표기한다. 이 때, 액체 내 존재하는 이온들의 농도가 일반적인 수체에서의 농도 범위 정도라면 Smoluchowski Approximation( $f(\kappa a)=1.5$ )를 적용하며 액체가 아니거나 유전상수 값이 작고 입자들의 크기가 작은 경우에는 Hückel Approximation에 따라  $f(\kappa a)$ 을 간단하게 1로 표기한다(Hunter, 1988; Ohshima, 2002). 식 (5)는 식 (2)에서의 (1+ $\kappa a$ )를 Henry's Function으로 나타낸 것이다.

$$\zeta = \frac{U_E 3\mu}{2\epsilon_o \epsilon_r f(\kappa a)} \quad (5)$$

이 때 온도에 따라 변하는 값은 유전상수( $\epsilon_r$ )이며 이는 Electrokinetic Potential와 반비례한다. 즉, 분산체의 온도가 증가할수록 유전상수의 값은 점차적으로 감소하고 이로서 Electrokinetic Potential이 증가하는 것으로 판단된다. 이와 같이 온도가 증가함에 따른 Electrokinetic Potential의 증가 경향은 탄산칼슘 분산체를 대상으로 한 본 연구는 물론, 석영, 카올리나이트, 실리카 등에서도 관찰되었다(Evenhuis et al, 2006; Rodríguez and Araujo, 2006).

### 3.2. 탄산칼슘 분산체의 pH 변화에 따른 Potential의 경향

탄산칼슘 분산체의 입자간 상호에너지를 측정하기 전에 분산체 내의 입자들의 열화학적 성격을 파악하고자 0.01M 염산 용액을 분산체에 연속적으로 적정하면서 pH를 측정해보았다.

pH 변화를 살펴보기 위한 탄산칼슘 분산체의 염산용액 첨가는 분산체의 성격을 변화시킬 것이라 예상할 수 있다. 상온의 조건에서 탄산칼슘 입자와 관련하여 나타날 수 있는 반응들은 다음과 같다.



이 때, 수체에 존재하는 칼슘의 농도( $C_{T,Ca}$ )는  $Ca^{2+}$ ,  $CaOH^+$ ,  $CaHCO_3^+$ ,  $CaCO_3^0$ 의 합으로 표현된다. 이 값은 상온의 조건에서 pH가 증가할수록 점차적으로 감소한다 (Snoeyink and Jenkins, 1980). pH 뿐 아니라 온도에 따라 용해도 등이 변화할 것이라 사료되므로 분산체의 온도나 첨가하는 염산의 농도에 따라서 각 이온의 농도 및 용해도가 변화할 것이라 예측할 수 있다.

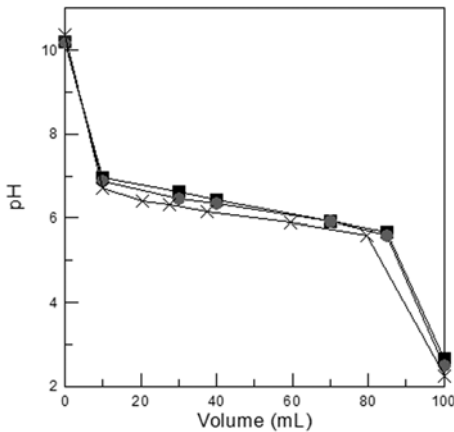


Fig. 2. Changes of pH of  $CaCO_3$  suspension according to the volume of 0.01M HCl (■ = 10°C, ● = 25°C, × = 40°C).

Fig. 2는 염산용액을 첨가하지 않은 상태에서 최대 100 mL까지 첨가한 탄산칼슘 분산체의 pH의 변화를 나타낸 것이다. 모든 온도의 조건에서 10 mL 부근까지는 pH가 급격히 떨어지는 경향을 보였으나 이후의 pH 5에서 7의 범위에서는 많은 양의 염산용액을 첨가하더라도 크게 변화하지 않았다. 첨가하는 염산용액이 90 mL 이상이 되면 분산체 내의 탄산칼슘 입자들이 용해되면서 분산체가 투명하게 되었다. 이 때, pH는 급격히 하강하여 pH 2 부근으로 측정되었으며, 그 이후에는 더 이상 뚜렷한 pH의 감소는 나타나지 않았다.

온도에 따른 분산체의 pH의 변화를 살펴보면 온도가 증가하면서 분산체의 pH가 감소하는 것이 관찰되었다. 탄산칼슘 입자에 흡착하는 수소이온의 수가 증가하면 분산체의 pH는 감소하는 반면, Electrokinetic Potential은 증가하는 경향이 나타날 것이라 사료된다. 따라서 탄산칼슘 분산체의 경우, 온도가 증가할수록 분산체의 pH는 감소하고 Electrokinetic Potential은 증가했으므로 분산체 내 입자의 수소가 흡착반응은 흡열반응이라고 생각할 수 있다. 이와 같은 결과를 전기 이중층 이론에 적용해보면 온도에 따른 Electrokinetic Potential이 미치는 영향을 다음 Figure와 같이 표현할 수 있다.

표면전위의 값이 같다고 가정할 때, Fig. 2의 실험결과에 따라 Stern Potential(Fig. 3의 (a) 거리에서의 Potential값)은 온도가 증가할수록 적은 값을 나타낼 것으로 판단된다. 그러나 이후의 거리에 따른 전위의 영향이 Fig. 3과 같이 나타날 것이라 예상되면서 Fig. 3에서의 (b)지점에서와 같이 두 그래프가 만나는 점 이후에는 온도가 증가할수록 거리

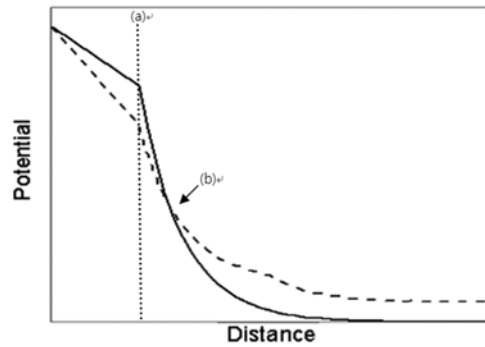


Fig. 3. Schematic representation of double layer of  $CaCO_3$  suspension according to temperature (—: low temperature, ---: high temperature).

에 따른 전위가 더 큰 값을 가지게 되어 Fig. 1과 같은 Electrokinetic Potential 결과가 관찰되는 것이라고 사료된다. 이러한 결과는 탄산칼슘 분산체의 Electrokinetic Potential이 분산체의 열역학적인 성격보다는 입자간 에너지에 의해 결정된다고 사료되며, 이러한 입자간 상호 에너지는 DLVO이론을 적용해 나타낼 수 있다.

### 3.3. 온도에 따른 입자간 상호 에너지

분산체 내의 입자들의 성격을 파악하기 위해 측정된 Electrokinetic Potential의 결과를 바탕으로 DLVO이론을 적용해 입자간 상호 에너지 값을 도출할 수 있다. 입자간 상호 에너지 값( $V_T$ )은 식 (12)에서의  $V_A$ 인 반 데르 발스 에너지와 Repulsion Electrostatic Potential인  $V_R$ 의 합으로 나타낼 수 있다(Liang et al., 2007).

$$V_T = V_A + V_R \tag{12}$$

이 때, 입자들이 서로 응집하는 상태일 경우  $V_T$ 이 음의 값을 나타낸다. 최근에는 입자성 물질의 성격에 따라 DLVO이론을 확장시켜 표현하기도 한다. 한 예로, 분산체 내의 입자가 미생물 등과 같이 생물학적으로 관련 있을 때에는 기존의 입자간 상호 에너지 값에 추가의 식을 적용한다. 반 데르 발스 에너지는 다음과 같이 표현한다.

$$V_A = -\frac{A}{6} \left[ \left( \frac{2a^2}{H^2 + 4aH} \right) + \left( \frac{2a^2}{H^2 + 4aH + 4a^2} \right) + \ln \left( \frac{H^2 + 4aH}{H^2 + 4aH + 4a^2} \right) \right] \tag{13}$$

A는 Hamaker 상수로 값이 커질수록 입자 간 인력이 증가함을 나타낸다. 탄산칼슘의 경우 Oshima 등(1982)에서 도출된 값인  $(3.6 \pm 0.8) \times 10^{-21}$  J에 따라  $3.6 \times 10^{-21}$  J을 적용하였다. a는 입자의 반지름으로 Feng 등(2007)이 측정한 값인 1.0  $\mu m$ 을 대입하였으며, H는 입자간 거리를 의미한다. 반 데르 발스 에너지는  $V_A = -Aa/12H$ 로 간단하게 나타내기도 하나 이와 같이 표현되는 경우, 입자 간 형성되는 전기적 자기 복사에너지가 절단되는 시간 등 값의 계산에 무시되는 조건들이 생겨나 실제 값보다 작게 측정된다는 단점이

있다. 따라서 본 연구에서는 본래 식 그대로를 적용하였다. Repulsion Electrostatic Potential을 나타내는  $V_R$ 은 다음과 같이 표현한다(Chang and Chang, 2002).

$$V_R = \frac{\epsilon_o \epsilon_r a \phi^2}{2} \ln[1 + \exp(-\kappa H)] \quad (14)$$

여기서  $\psi_o$ 는 Stern Potential을 의미하나 이를 대신하여 Electrokinetic Potential값을 대입하기도 한다(Adamson and Gast, 1997). 따라서 본 실험에서는 실험에서 측정된 Fig. 1의 결과를 대입하였다. 식 내의  $\kappa$ 는 식 (4)를 통해 구할 수 있다. 위의 식들을 이용해 입자 간 거리에 따른 상호에너지 값을 나타내 보면 다음 Fig. 4와 같은 경향을 나타낸다.

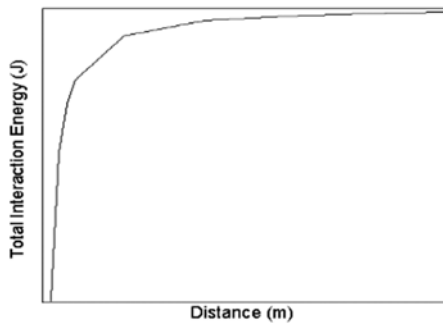


Fig. 4. Overall tendency of total interaction energy of  $\text{CaCO}_3$  suspension.

입자 간 거리가 작아질수록 반 데르 발스 힘에 의한 인력이 증가하여 입자간 상호 에너지 값이 음의 방향으로 무한대 증가하였다. 그러나 분산체의 조건에 따라 일정 거리 ( $5 \times 10^{-16}$  m에서  $1 \times 10^{-15}$  m사이)가 되면 입자간 상호 에너지에 미치는 영향이 인력보다 Repulsion Electrostatic Potential이 더 증가함에 따라 pH, 온도 그리고 Electrokinetic Potential 값에 의해 일정한 양의 상수로 수렴하는 경향이 관찰되었다. 각 온도에 따른 입자간 상호 에너지의 차이를 비교해 보고자 입자간 거리를  $5 \times 10^{-16}$  m에서  $1 \times 10^{-14}$  m까지로 축소하고 y축(에너지)을  $-6 \times 10^{-13}$  J에서  $3 \times 10^{-13}$  J로 고정하여 다음과 같이 나타내 보았다.

Fig. 5에서 나타난 바와 같이 동일한 pH의 분산체인 경우, 온도가 증가할수록 입자간 상호 에너지 값이 증가하였다. 이는 온도가 증가할수록 분산체 내 입자들이 서로 반발하게 된다는 것을 의미한다. pH에 따른 변화를 살펴보면 산성인 조건에서는 온도에 따른 에너지 값의 차이가 비교적 뚜렷하게 관찰되었는데 이는 산성인 조건에서의 Electrokinetic Potential값이 pH가 중성이거나 염기성인 경우보다 상대적으로 큰 값을 가지기 때문이라고 사료된다. 또한 동일한 온도의 조건에서는 pH와는 무관하게 Electrokinetic Potential의 절대값이 클수록 입자가 갖는 상호에너지 값이 증가하였다. 다시 말해 Electrokinetic Potential이 큰 값을 가지는 분산체일수록 입자가 가지는 전하값이 크기 때문에 입자간 반발이 증가하게 되어 입자간 상호 에너지 값의 증가를 야기하는 것이라고 판단된다.

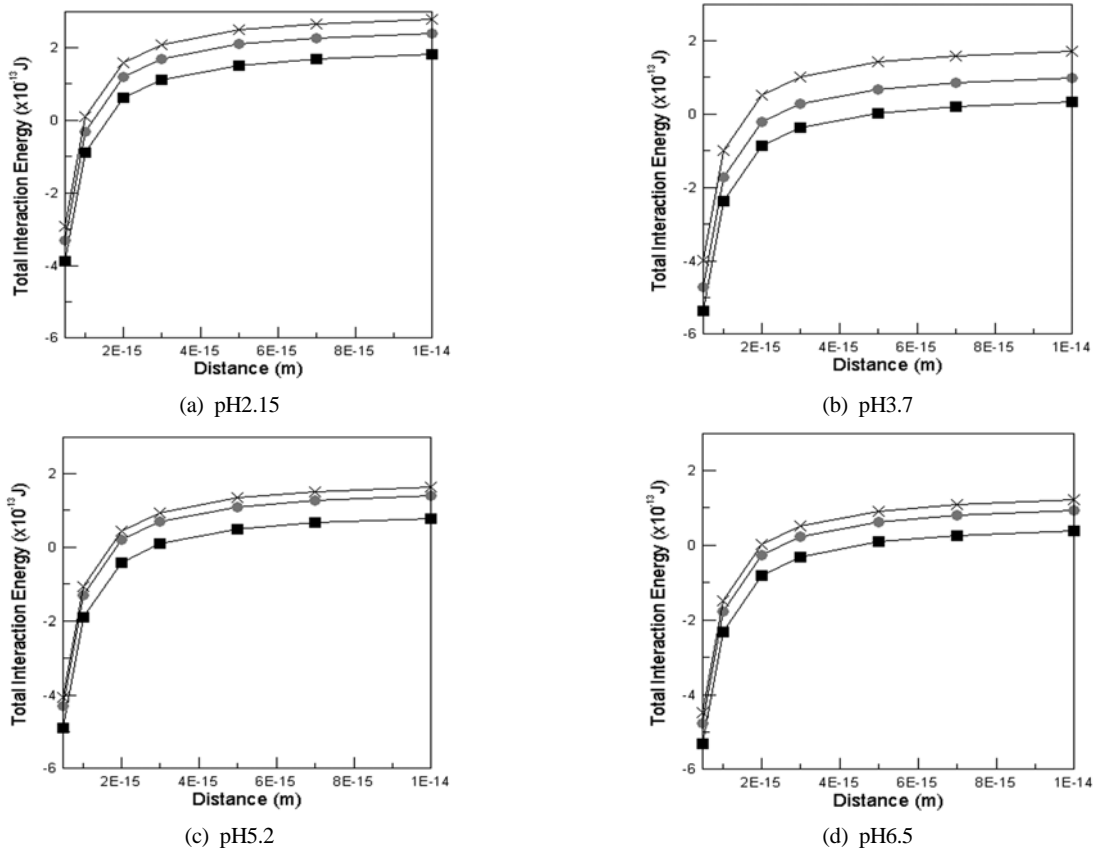


Fig. 5. Total interaction energy of  $\text{CaCO}_3$  suspension according to pH on different temperature (■=10°C, ●=25°C, ×=40°C).

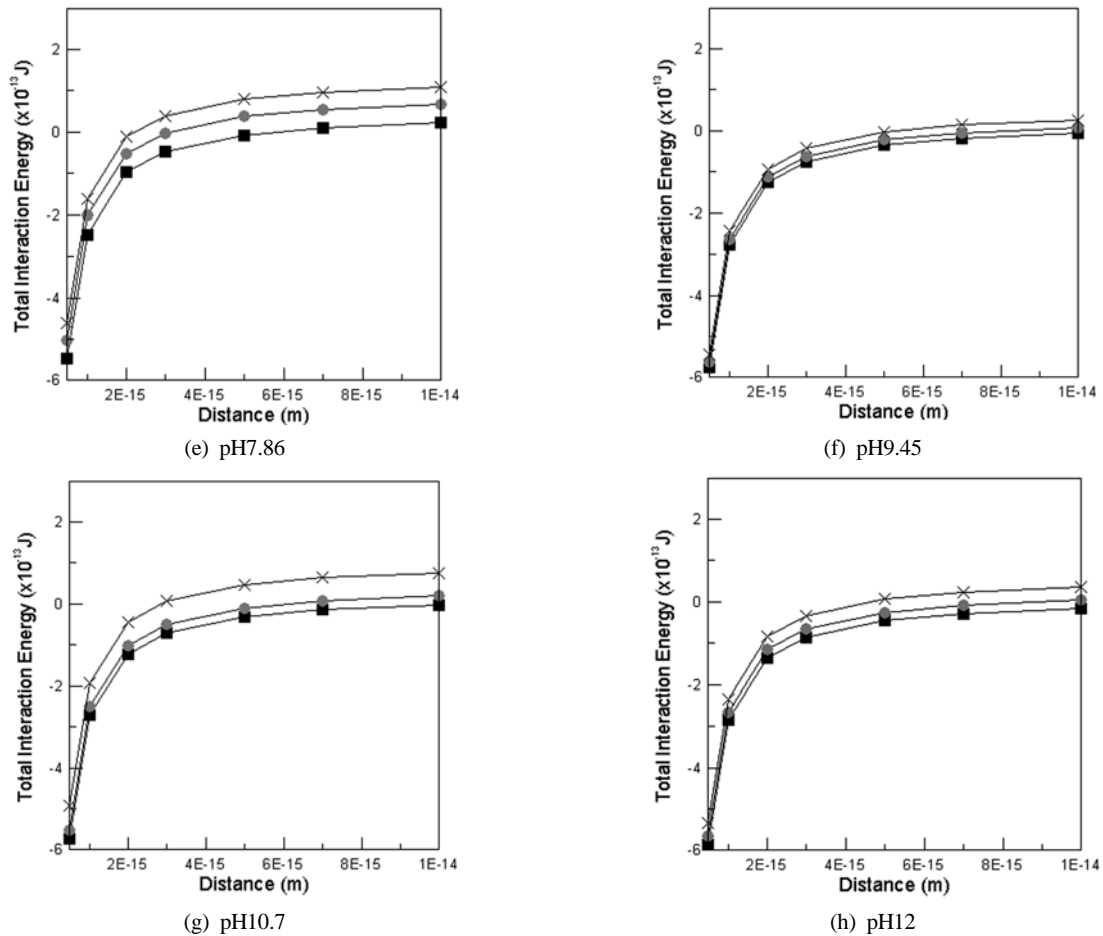


Fig. 5. Total interaction energy of  $\text{CaCO}_3$  suspension according to pH on different temperature (■=10°C, ●=25°C, ×=40°C). (continued)

#### 4. 결론

본 연구에서는 수중에서 중요한 역할을 하는 입자성 물질인  $\text{CaCO}_3$ 를 대상으로 온도에 따른 전기적 거동을 살펴보고자 Electrokinetic Potential을 측정하였다. 또한 열역학적 정보를 수집하기 위해 염산용액을 연속적으로 주입하면서 pH를 측정하였으며 이와 같은 실험의 결과를 바탕으로 다음 결론을 도출하였다.

- 1) 분산체의 Electrokinetic Potential을 측정한 결과, 온도가 증가할수록 Potential값이 증가하였으며 이러한 경향은 Smoluchowski식을 통해 설명될 수 있다. pH의 영향을 살펴보면 pH가 증가할수록 전위 값이 음의 방향으로 증가하는 경향을 나타냈으며 Isoelectric Point는 온도와 무관하게 약 pH 7부근에서 관찰되었다.
- 2) 탄산칼슘 분산체에 염산용액을 첨가하면서 pH를 측정할 결과 수소이온의 흡착은 흡열반응을 따른다고 사료된다. 이 결과로 분산체의 Electrokinetic Potential값이 입자간의 거리가 Stern Potential을 결정짓는 거리 이상에서 결정되어진다고 판단된다.
- 3) 분산체의 Electrokinetic Potential의 값을 DLVO이론에 적용시킨 결과, 동일한 온도의 조건에서 입자간 상호 에너지

가 낮아 측정된 Electrokinetic Potential에 비해하게 나타나는 것으로 관찰되었다. 또한 온도가 증가할수록 입자간 상호 에너지가 증가하였는데 이는 분산체의 온도가 높을수록 입자들이 더 반발하는 경향을 보인다고 할 수 있다.

4) 수중에서의 입자성 물질의 존재 및 그 거동에 대한 연구는 수체 내 일어날 수 있는 다양한 반응들에 영향을 줄 수 있다는 점에서 의미가 있다고 사료된다. 따라서 본 연구는 탄산칼슘 뿐 아니라 수체에 존재하는 다양한 입자들의 전기적 거동을 이해하는 데 바탕이 되어줄 수 있을 것이라고 판단된다.

#### 사 사

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

#### 참고문헌

- 이태섭, 이상연, 이주희, 홍승관(2009). 중공사막 외부표면의 제타전위 측정방법 고찰. *상하수도학회지*, 23(3), pp. 353-362.
- 홍기훈, 조성록, 박선규(1989). 소양호 수온약층 존속기간

- 동안의 영양염류와 입자성 부유물질. *수질보전 한국물환경학회지*, **5**(1), pp. 35-46.
- Adamson, A. W. and Gast, A. P. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces 6th edition*, John Wiley and Sons, Inc.
- Alimi, F., Tlili, M. M., Amor, M. B., Maurin, G., and Gabrielli, C. (2009). Effect of magnetic water treatment on calcium carbonate precipitation: Influence of the pipe material. *Chemical Engineering and Processing*, **48**, pp. 1327-1332.
- Bob, M. and Walker, H. W. (2001). Enhanced adsorption of natural organic matter on calcium carbonate particles through surface charge modification. *Colloids and Surfaces*, **191**, pp. 17-25.
- Chang, I. Y. and Chang, K. P. (2002). The role of hydration force on the stability of the suspension of *Saccharomyces cerevisiae*-application of the extended DLVO theory, *Colloid Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects Sci.*, **211**, pp. 66-77.
- Cheng, B., Lei, M., Yu, J., and Zhao, X. (2004). Preparation of monodispersed cubic calcium carbonate particles via precipitation reaction. *Materials Letters*, **58**, pp. 1565-1570.
- Dielectric Constants of Materials (2007). Clipper Controls. [http://www.clippercontrols.com/info/dielectric\\_constants.html/](http://www.clippercontrols.com/info/dielectric_constants.html/).
- Evenhuis, C. J., Guijt, R. M., Macka, M., Marriott, P. J., and Haddad, P. R. (2006). Variation of zeta-potential with temperature in fused-silica capillaries used for capillary electrophoresis. *Electrophoresis*, **27**, pp. 672-676.
- Feng, B., Yong, A. K., and An, H. (2007). Effect of various factors on the particle size of calcium carbonate formed in a precipitation process. *Materials Science and Engineering A*, **445-446**, pp. 170-179.
- 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.
- Hunter, R. J. (1988). *Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications*, Academic Press, UK.
- 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.
- Moulin, P. and Roques, H. (2003). Zeta potential measurement of calcium carbonate. *Journal of Colloid and Interface Science*, **261**, pp. 115-126.
- Oshima, H. (2002). Modified henry function for the electrophoretic mobility of a charged spherical colloidal particle covered with an ion-penetrable uncharged polymer layer. *Journal of Colloid and Interface Science*, **252**(1), pp. 119-125.
- Oshima, H., Inoko, Y., and Mitsui, T. (1982). Hamaker constant and binding constants of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  indipalmitoylphosphatidylcholine/water system. *Journal of Colloid and Interface Science*, **86**(1), pp. 57-72.
- Rodríguez, K. and Araujo, M. (2006). Temperature and pressure effects on zeta potential values of reservoir minerals. *Journal of Colloid and Interface Science*, **300**, pp. 788-794.
- Snoeyink, V. L. and Jenkins, D. (1980). *Water Chemistry*, John Wiley and Sons.
- Sze, A., Erickson, D., Ren, L., and Li, D. (2003). Zeta-potential measurement using the Smoluchowski equation and the slope of the current-time relationship in electroosmotic flow. *Journal of Colloid and Interface Science*, **261**, pp. 402-410.