

점토의 산/염기 완충능

Acid/Base Buffer Capacity of Clays

김 건 하*¹ Kim, Geon-Ha

김 길 홍*² Kim, Kil-Hong

Abstract

pH of soil pore water is the most important factor in heavy metal retention and its migration in soil. Buffer capacities of clays such as kaolinite, hectorite, attapulgite, Na-bentonite were studied. The magnitude of buffer capacity is in the order of hectorite > Na-bentonite > attapulgite > kaolinite. Carbonate content and CEC of soil affect most on the buffer capacity and the effects of organic content and surface area were negligible. The diffuse double layer theory was applied to simulate acid-base titration tests of soil suspensions. In order to model the buffer capacity of soil, chemical interactions between proton and surface functional group were modeled using electrostatic adsorption model. Regression equation as functions of carbonate content and CEC was proposed as well. Predictions made by proposed models were compared with experimental data for model verification. Predictions made by electrostatic adsorption model agreed with experimental results best.

요 지

지반내 중금속의 저류와 이동에 대한 가장 중요한 인자는 토양 간극수의 pH이다. 점토의 완충능을 kaolinite, hectorite, attapulgite, Na-bentonite와 같은 4가지 점토에 대하여 연구하였다. 완충능의 크기는 hectorite>Na-bentonite>attapulgite>kaolinite의 순으로 나타났다. 완충능의 크기는 지반내 탄산염 함량과 양이온 교환능력이 완충능의 크기에 가장 영향을 미치며 유기물 함량과 비표면적의 영향은 적었다. 토양의 완충능을 모델링하기 위하여 수소 이온과 토양 표면의 화학반응기 간의 화학반응을 정전흡착모델을 이용하여 모델링하였다. 또한 탄산염 함량과 양이온 교환능력을 함수로 하는 회귀식을 제안하였다. 모델 검증에 위하여 모델 예측치와 실험치를 비교하였는데 정전흡착모델을 이용한 예측치가 실험치와 근사한 값을 나타냈다.

Keywords : Buffer capacity, Clay, Adsorption, Model.

1. 서론

우리나라에서 발생하는 고형폐기물의 상당량은 위생 매립으로 처리되고 있다. 위생매립지에서 발생한 침출수가 매립지 외로 유출되는 경우에는 물리적, 화학적, 생물학적인 복합과정을 거치면서 토양과 지하수내에서 이동하게 된다.

침출수 성분 중 일부는 지반에 잔류하게 되는데 그 양은 점토의 물리적, 화학적 성상에 따라 변한다. 매립지 침출수에서 중금속 형태의 오염물질 등이 발견되고 있는데 (Stewart와 Weber, 1976), 중금속은 인간과 동물 그리고 수중생물에 매우 유독한 오염물질이기 때문에 부적절하게 처리된 채 유출되는 침출수는 생태계 최종소비자인 인간의 건강에 치명적인 결과를 초래할 위험이 상당히 높다.

*1 정회원, 한남대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

*2 한남대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정

토양은 중금속을 잔류할 수 있는 능력을 가지고 있다고 알려져 있다(Elliott 등, 1981; Yong 등, 1986), 선행 연구에 따르면 토양의 중금속 잔류 능력은 점토의 성분, 침출수와 쓰레기의 특성에 따른 다양한 인자에 의해 영향을 받는다고 보고 있는데 만약 이러한 토양의 중금속 저류능력이 토양오염물질의 2차 확산을 방지하는 성질이라면 계속된 침출수의 유입은 토양의 중금속 저류능력을 저하시키는 결과를 가져올 수 있을 것이다. 이에 따라 중금속이 지반내를 급속하게 이동하여 결국 지하수의 유독성이 증가하게 된다.

토양내 중금속의 저류와 이동에 대한 가장 중요한 인자는 흙 간극수의 pH이다(Harter, 1983; Dowdy와 Volk, 1983; Elliott과 Liberati, 1986). 간극수의 pH가 낮은 경우 점토에 흡착되어 있는 중금속은 간극수중으로 용해되어 간극내를 이동할 수 있게 된다. 근래에 들어 산성비등의 영향으로 토양에 산성물질이 유입되는 경우가 빈번하므로 같은 양의 산성물질이 유입되었을 경우 pH가 변하는 정도에 따라 토양오염의 2차 확산의 정도가 달라질 수 있다. 토양은 간극수와 토양입자, 미생물, 또한 오염물질과 같은 여러 물질로 구성되어 있기 때문에 토양의 pH 변화에 영향을 미치는 인자가 매우 다양하다. 토양-오염물질-간극수의 시스템에 산이나 염기가 가해질 때 토양은 pH의 변화에 저항하는 성질을 가지고 있는데 이를 완충능(buffer capacity)라 한다. 토양의 완충능은 대체적으로 β 로 나타내는데, 단위 pH를 변화시키는데 필요한 강산이나 강염기의 농도로 정의되며 이는 식 (1)과 같다:

$$\beta = \frac{d C_b}{d pH} = \frac{d C_a}{d pH} \quad (1)$$

여기서 C_b = concentration of strong base (mol/L); 그리고 C_a = concentration of strong acid (mol/L)이다.

토양의 산/염기 완충능은 토양-오염물질-간극수로 이루어진 시스템의 pH변화와 직접적인 관련이 있기 때문에 토양에서 오염물질의 이동에 영향을 미치는 가장 중요한 인자중의 하나이다. 토양의 완충능을 유발시키는 요인은 여러 메커니즘으로 설명될 수 있는데 토양 중에 있는 자유탄산염(free carbonates), 규산(silicic acid)과 같은 약산, 유기물질, Al^{3+} 이나 Fe^{2+} 등의 양이온 및 간극수중의 H^+ 나 OH^- 가 흡착할 수 있는 유효 표면을 갖고 있는 점토 등이다(McBride, 1994; Cang 등, 1985), 이러한 토양의 완충능은 비표면적, pH, 전해질의 농도, 이온의 전하값, 온도 등의

함수이다(Singh과 Uehara, 1986).

토양의 완충능을 모사하기 위하여 여러 모델이 제안된 바 있다. van Breeman과 Wielemaker(1974)는 토양의 열역학 평형의 법칙을 응용하여 점토입자를 포함하는 여러 현탁액의 완충능을 계산하였으며 이를 pH 변화당 산과 염기의 농도로 표시하였다. 이 모델은 점토의 분자식이 알려진 경우, 즉 균질한 성상의 토양에 적용 가능하다. 그러나 점토의 경우에는 같은 분자식으로 나타내지만 두 점토간의 완충능은 큰 차이를 보이는 경우도 있다. Curtin 등(1996)은 토양중의 유기물질의 함량, 점토의 양, pH의 함수로 하는 점토의 산도(acidity)에 대한 모델을 제안하였다. 이 식은 50개의 다른 점토에 대하여 산-염기 적정실험을 통하여 회귀식을 구한 것이다. 이 모델이 통계에 근거한 경험식이기 때문에 이러한 접근방법은 이 모델이 실제지반에 적용될 때 많은 오차를 유발할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 산/염기 완충능력에 대한 개념을 지반에 적용시키고 점토의 물리화학적 특성과 완충능과의 관계를 알고자 하였다. 또한 토양의 완충능에 대한 심층적 이해를 바탕으로 하여 토양의 완충능을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 점토시료를 이용하여 실험 연구를 수행하였는데 이는 점토성 흙이 오염물질의 이송에 많은 영향을 미치는 인자이기 때문이다. 점토시료의 특성실험에 대한 정확도의 제고를 위하여 미국토양학회(Society of Soil Science of America)에서 제공하는 점토시료(source clay) 중 kaolinite, attapulgite, hectorite, 그리고 Wyoming Na-bentonite를 사용하였다.

시료의 물리화학적 성상의 분석항목은 pH(Thomas, 1996), 양이온 교환능력(cation exchange capacity: CEC; Sumner와 Miller, 1996), 표면적(surface area)(Eltantaway와 Arnold, 1973), 유기물함량(organic content; Swift, 1996), 탄산염함량(carbonate content; Loepfert와 Suarez, 1996) 등이다. 시료의 물리화학적 성상분석결과 Table 1과 같다.

Kaolinite은 1:1 구조로 4가지 점토 중에서 CEC, 표면적, 탄산염 함량이 가장 적다. Hectorite와 Na-bentonite는 2:1 구조로 hectorite는 탄산염 함량이 높고 Na-bentonite는 CEC가 높은 수치를 나타내고 있다.

Attapulgite는 사슬구조(chain structure)로 표면적은 가

Table 1. Physicochemical Analysis of Clays

Parameters	Kaolinite	Attapulgite	Hectorite	Na-Bentonite
soil pH (pH _{pzc} ^{*1})	4.6	8.3	9.5	8.8
C.E.C (meq/100g)	2.0	19.5	43.9	76.4
surface area (m ² /g)	10.5	136.4	63.2	31.8
organic content(%)	12.6	8.7	1.2	8.8
carbonate content ^{*2}	n.d. ^{*3}	10.0	53.0	15.0
specific gravity	2.64	2.08	2.27	2.53

*1. point of zero charge
 *2. unit: mg/l as CaCO₃
 *3. not detected

Table 2. Alkalinity Measurement from Titration of Soil Suspension

Parameters	Kaolinite	Attapulgite	Hectorite	Na-Bentonite
soil pH	4.6	8.3	9.5	8.8
Hydroxide Alkalinity *	0.0	0.0	0.0	0.0
Carbonate Alkalinity *	0.0	0.0	3.0	3.0
Bicarbonate Alkalinity *	0.0	10.0	>50	13.0
Total Alkalinity *	0.0	10.0	>>50	16.0

* unit: mg/L as CaCO₃

장 넓지만 CEC나 탄산염 함량은 kaolinite 보다 약간 높은 수치를 나타내고 있다. 이들 점토시료 성상의 자세한 비교는 Mitchell (1993)에서 찾을 수 있다.

본 연구에서는 산/염기를 토양현탁액(clay suspension)에 첨가함에 따라 pH 변화를 나타내는 적정곡선을 구하였다. 산/염기 적정곡선의 기울기는 완충능의 크기를 나타

낸다.

점토:용액의 질량비를 1:10으로 하였으며 산과 염기의 첨가량을 각기 0~100 cmol H⁺ · kg soil⁻¹, 0~100 cmol OH⁻ · kg soil⁻¹로 하여 플라스틱 용기에 넣은 후, 대기와 접촉하지 않도록 밀봉한 상태에서 진탕배양기에서 25℃를 유지하면서 24시간 동안 진탕을 실시하였다. 시료의 pH는 전극을 점토 현탁액에 직접 넣어서 측정(Thomas, 1996)하였다. 같은 실험과정을 각 시료에 대하여 반복 실시하였다. 본 실험에서 사용된 강산과 강염기는 0.1 N HNO₃와 0.1 N NaOH이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 kaolinite, attapulgite, hectorite, Na-bentonite 등 4가지 점토시료를 이용하여 적정실험을 수행하여 작성한 산/염기 적정곡선이다. 단위 산 또는 염기의 첨가시 pH의 변화는 kaolinite > attapulgite > Na-bentonite > hectorite의 순으로 나타났다. Fig. 1에서 점선은 완충능이 전혀 없을 경우의 pH변화 예측치를 나타내는 것이다. Kaolinite는 소량의 산 또는 염기의 첨가에도 pH가 급격히 변하는 것을 알 수 있으며 따라서 kaolinite의 완충능은 4 종류 시료 중 가장 작다. 특히 hectorite의 경우는 다른 3종의 점토시료의 pH가 2이하를 나타낸 경우에도 pH 6 정도를 나타내었다. 이는 Table 1에서 나타난 것과 같이 hectorite의 탄산염 함량이 다른 3종의 점토보다 높기 때문이라고 생각되며 따라서 탄산염 함량이 높을수록 완충능이 높은 것을 알 수 있다. Fig. 1을 보면 Na-bentonite의 pH 변화가 attapulgite보다 완만한 것을 알 수 있다. Attapulgite와 Na-bentonite의 탄산염 함량의 양은 비슷한데 CEC는 Na-bentonite가 attapulgite보다 높다. Fig. 1에서 Na-bentonite의 완충능이 attapulgite보다 높은 것은 탄산염 함량보다 CEC의 영향으로 보인다. 이는 염기의 주입경우 Na-bentonite 현탁액의 pH의 변화율이 완만하다는 것을 보면 더욱 확실하다. 산을 주입하는 경우에는 점토의 탄산염과 반응하여 pH의 변화가 완만하지만 염기를 주입하는 경우에는 점토표면의 반응군(surface functional group)과 반응하여 수산화이온이 소모되기 때문이다.

Table 1에서 보인 것과 같이 hectorite가 Na-bentonite보다 CEC가 낮다는 것을 보면 완충능에 가장 영향을 미치는 인자는 탄산염 함량이고 그 다음이 CEC임을 알 수 있으며 유기물 함량과 표면적의 영향은 적은 것으로 생각된다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 보인 적정곡선을 식 (1)을 이용하여

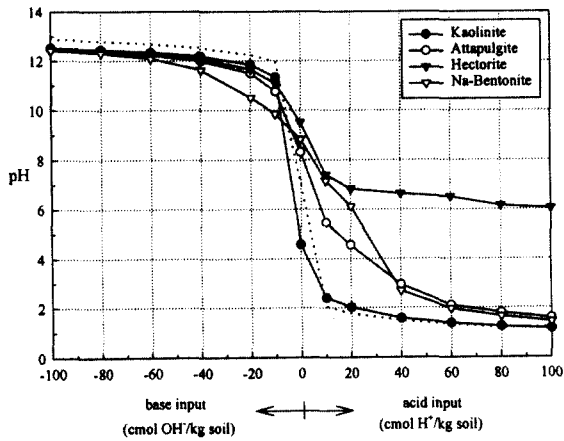


Fig 1. Acid/base Titrations Curves of Clays

각 산/염기 주입량에 대한 완충능의 크기를 나타낸 것이다. Kaolinite의 경우, 소량의 산/염기 주입량으로도 pH가 변하므로 0 부근에서의 완충능의 크기가 가장 작으며 같은 지점에서의 hectorite의 경우는 완충능의 크기가 가장 큰 것을 알 수 있다. Na-bentonite는 미량의 산/염기 주입의 경우에는 완충능의 크기가 가장 크지만 지속적인 주입의 경우에는 완충능의 크기가 가장 작다. 이는 점토의 투수계수의 감소를 위하여 Na-bentonite를 현장 흡과 혼합하는 경우 혼합토가 산성물질의 유입시 pH의 급격한 변화가 발생할 수 있다는 것을 뜻하며 따라서 Na-bentonite를 이용한 지반오염물질 차단벽의 설계시 이에 대한 고려가 필요하다.

점토속의 탄산염은 용존 탄산염, CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 의 상태로 존재한다. 용존 상태 탄산염의 농도는 고체상태의 탄산염과 기체상태의 탄산염의 평형식을 통해 결정된다. 탄산염은 상대적으로 용해도가 높기 때문에 pH 완충능으로 반응한다. 이런 특성 때문에 토양에서 매우 중요한 역할을 한다. 탄산염은 알칼리도(alkalinity), 즉 산을 중화시키는 물질로 작용하는데 이러한 반응을 통하여 토양에 산을 주입하는 경우 pH의 변화가 적게 발생한다. 본 연구에서 실험은 토양현탁액을 사용하여 수행하였는데 Fig. 1과 같은 적정곡선을 이용하여 토양현탁액의 알칼리도(alkalinity)를 구하였다. 알칼리도는 수산화(OH⁻) 알칼리도, 탄산염(CO_3^{2-}) 알칼리도, 중탄산염(HCO_3^-) 알칼리도가 있으며 이의 합을 총알칼리도라 한다. 이의 측정 및 계산방법은 Standard Methods(APHA, 1989)에 나타나 있다.

알칼리도의 크기는 hectorite > Na-bentonite > attapulgite

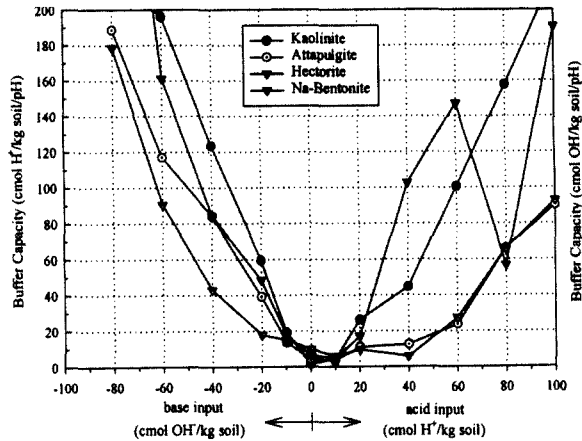


Fig 2. Buffer Capacity Curves of Kaolinite, Attapulgite, Hectorite, and Na-Bentonite as a Function of Acid/Base Input

> kaolinite로 Fig. 1에서 보인 완충능의 크기순과 일치한다. Hectorite의 경우는 중탄산염 알칼리도가 다른 점토시료보다 높은 것으로 나타나 있다. 중탄산염 알칼리도는 pH 8.3과 4.5 사이에 존재하므로 이 pH구간에서 hectorite의 완충능이 다른 점토시료보다 높은 것을 설명할 수 있다. Hectorite 현탁액에서 중탄산염 알칼리도가 크게 나타난 것은 점토 중에 있는 탄산염이 용해된 것으로 생각된다.

Fig. 3에서는 간극수중의 이온이 점토입자에 흡착하는 과정을 보이고 있다. 음성의 전기적 성질을 띠는 점토입자의 표면에는 표면반응군(surface functional group)으로 불리는 화학반응기가 존재하는데 간극수 중의 이온은 이들과 반응하여 표면에 흡착하게 된다. 따라서 이들 이온간의 전기적 성질을 고려한 흡착모델, 즉 정전흡착모델(electrostatic adsorption model)을 이용하여 흡착을 설명할 필요가 있다.

만약 산성 또는 염기성의 오염물질이 토양을 통과할 때 오염물질의 점토 표면에서의 흡착 및 탈착은 간극수 pH의 함수이므로 토양의 완충능의 영향을 받는다. 또한 오염물질의 간극수중의 용존농도에 영향을 미치므로 이는 확산 이중층의 두께에 영향을 미치게 되고 따라서 점토의 투수계수의 변화를 초래할 수 있다. 일반적인 토양에서 간극수의 pH가 증가할수록 투수계수는 감소하는 것이 증명되었다(Mitchell, 1993).

4. 모델의 개발 및 적용

본 연구에서는 토양의 산/염기 완충능은 점토의 탄산염 함량과 이온교환반응에 의하여 주로 발생한다고 가정

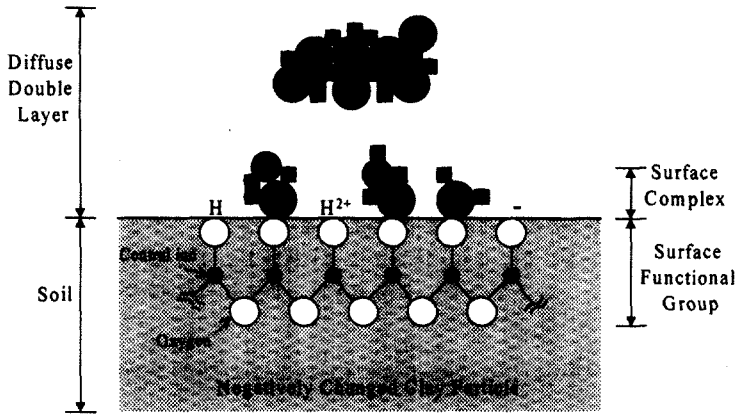


Fig 3. Ion Adsorption on Clay Surface

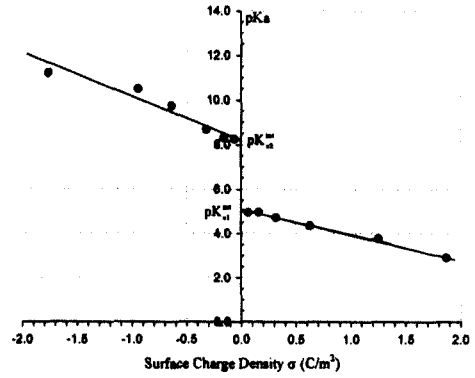


Fig 5. Surface Charge Density vs. pKa for Kaolinite

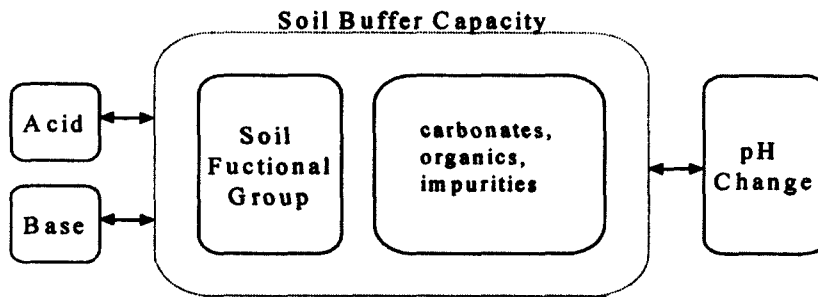
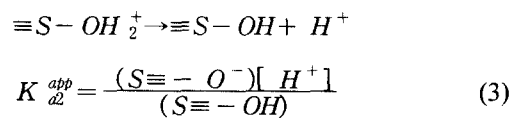
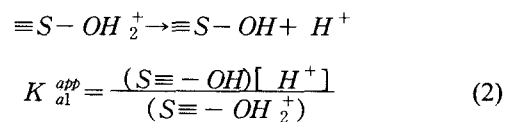


Fig 4. Concept of pH Change of Soil-Contaminant-Porewater System

하고 이의 모델을 제안하고자 하였다. 간극수 중의 산 또는 염기는 점토표면의 표면 반응군과 반응하게 되며 점토에 포함되어 있는 유기물질이나 탄산과 같은 완충능 유발물질과 반응하게 된다. 산/염기의 표면착물형성(surface complexation) 이외에도 유기물질과 탄산, 약산등에 의하여 발생하는 완충능이 있다고 가정하였다. Fig. 4는 이러한 개념을 보여주고 있다.

표면반응군은 수소이온의 결합과 분리(protonation-deprotonation) 반응과 흡착반응의 정도를 결정하게 된다. 표면반응군은 점토와 간극수간의 전기적 성질의 결정에도 영향을 미치므로 오염물질의 점토표면에서의 착화물 형성에도 영향을 미치게 된다.

따라서 본 연구에서는 정전흡착모델을 이용하여 점토의 표면적, 오염물질의 농도등의 변화를 고려할 수 있도록 하였다. H^+ 또는 OH^- 이온은 점토의 표면반응군과 반응한 후에 점토표면에 착물(complex)을 형성하게 된다. 점토의 수소이온의 결합-분리반응 다음과 같이 나타낼 수 있다:



여기서 $\equiv S-OH$ = surface hydroxyl group (mole/m³ of suspension); $\equiv S-OH_2^+$ = protonated surface hydroxyl group (mole/m³ of suspension); $\equiv S-O^-$ = deprotonated surface hydroxyl group (mole/m³ of suspension); K_{a1}^{app} , K_{a2}^{app} = apparent equilibrium constant (dimensionless)이다.

적정곡선의 임의의 점에서, 수소이온의 총 농도를 알 수 있는데 적정곡선은 일정량의 토양에 산이나 염기를 가했을 때의 pH 변화와의 관계를 나타내기 때문이다. 산-염기 적정곡선의 어느 한 점에서 수소이온의 수지식(proton balance)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_A - C_B + [OH^-] - [H^+] = (\{S-OH_2^+\} - \{S-O^-\}) + \frac{d_s A_s C_{bc} C_s}{N_a} \quad (4)$$

여기서 A_s = specific surface area of the soil (m^2/g); C_a = concentration of strong acid (mol/L); C_b = concentration of strong base (mol/L); C_{bc} = capacity concentration (g/g); C_s = soil concentration (g/L); d_s = surface site density of the soil (m^{-2}); N_a = Avogadro's number ($6.023 \times 10^{23} mol^{-1}$) 이다.

식 (2),(3),(4)를 풀면 점토의 pH를 예측할 수 있다. 미지수는 $[H^+]$, $\{S-OH_2^+\}$, $\{S-O^-\}$, $\{S-OH\}$, K_{a1}^{app} , K_{a2}^{app} , C_{bc} 등 7개이고 식은 3개이다. $\{S-OH_2^+\}$ 나 $\{S-O^-\}$ 은 점토 현탁액의 pH에 따라 그 중 하나를 무시할 수 있다. 염기성 상태에서는 $\{S-O^-\}$ 의 농도가 매우 높으므로 $\{S-OH_2^+\}$ 의 농도를 무시할 수 있으며 산성일 때는 $\{S-OH_2^+\}$ 의 농도가 매우 높으므로 $\{S-O^-\}$ 의 농도를 무시할 수 있다. K_{a1}^{app} , K_{a2}^{app} 는 산-염기 적정실험치를 표면 전하량(surface charge density)에 따라 도시하여 얻을 수 있다(Stumm와 Morgan, 1996). Fig. 5는 Na-bentonite에 대하여 적정실험치를 이용하여 평형 상수를 구한 것이다. Fig. 5에서 pK_{a1}^{app} 의 값은 5.1, pK_{a2}^{app} 의 값은 8.2이다.

K_{a1}^{app} , K_{a2}^{app} 의 값을 알면 미지수는 4개이고 식은 3개인 상태가 되는데 시행착오법으로 변수의 값을 구할 수 있다. 이러한 시행착오법은 비교적 좁고 넓은 범위에서 반복하여 미지수의 값을 구할 수 있다(Dzombak과 Morel, 1990).

본 연구에서는 CEC, 탄산염 함량 등 점토시료의 물리화학적 상상 분석 결과와 완충능간의 회귀식을 이용하여 완충능의 크기를 예측하여 보았다. 4 종류의 점토시료의 완충능을 측정하여 작성한 회귀식의 일반형은 식(5)와 같다.

$$pH = CEC^b + \frac{(1 + CAR)^a}{1 + e^{-\frac{[H^+]_{inp} - X_0}{\dots}}} \quad (5)$$

여기서 $[H^+]_{inp}$ = proton concentration input = $C_a - C_b$ (mg/l); CAR = carbonate content (mg/l as $CaCO_3$); CEC = cation exchange capacity (meq/100g soil); a, b, X_0 = constants이다.

화학모델인 MINTEQA2를 이용하여 토양현탁액의 pH를 예측하여 보았다. MINTEQA2는 토양의 유기물질이나 불순물등으로 인한 완충능을 모사할 수 없으며 따라서 실험치와 다른 예측치를 보일 수 있다.

Fig. 6은 kaolinite 현탁액의 산/염기 적정 결과와 식(4), MINTEQA2, 식(5) 등의 예측결과와 비교한 것이다.

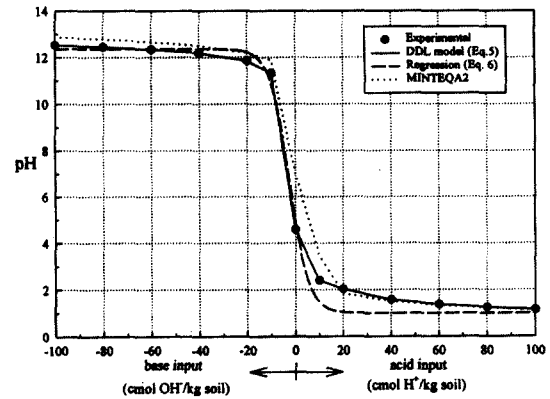


Fig 6. Comparisons of Computational and Experimental of Tirtation of Kaolinite

확산이중층 이론을 응용하여 모델을 이용하여 kaolinite의 산/염기 적정실험을 모사할 수 있었다. MINTEQA2나 회귀식의 예측치는 실제 실험을 통한 적정곡선과 차이가 있었다. 이는 토양내의 탄산염으로 인한 알칼리도를 고려할 수 없기 때문으로 생각된다. 회귀식의 경우에는 토양현탁액내의 토양농도를 고려하지 못하므로 다른 조건에서는 회귀식을 적용하지 못하는 단점이 있다.

5. 결론

토양내 중금속의 저류와 이동에 대한 가장 중요한 인자는 간극수의 pH이다. 간극수 pH변화율을 나타내는 완충능을 kaolinite, hectorite, attapulgite, Na-bentonite와 같은 4가지 점토에 대하여 연구하였다. 토양의 완충능을 모사하기 위하여 수소 이온과 수산화 이온의 점토와의 반응을 확산이중층 이론을 응용하여 적용하였다. 또한 탄산염 함량과 양이온 교환능력을 함수로 하는 회귀식을 작성하여 예측모델을 제안하였다. 또한 MINTEQA2를 이용하여 적정실험을 모사하였는데 이와 같은 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 산 또는 염기의 첨가시 pH 변화의 크기는 kaolinite > attapulgite > Na-bentonite > hectorite 로 나타났다. 완충능에 가장 영향을 미치는 인자는 탄산염 함량이고 그 다음이 유기물 함량으로 나타났다.
- (2) 알칼리도의 크기는 hectorite > Na-bentonite > attapulgite > kaolinite로 완충능의 크기순과 같다. Hectorite는 중탄산염 알칼리도가 높으며 이는 다른 점토보다 높은 수치를 나타낸다.

- (3) 점토의 완충능은 수소이온의 흡착 및 화학반응을 고려한 2단계 모델을 이용하여 모델링 할 수 있었다. 확산 이중층모델과 정전흡착모델을 이용하여 토양현탁액의 산-염기 적정실험을 모사하였다. 본 연구에서 제안한 이론 모델을 이용한 토양현탁액의 pH변화예측치와 실험치는 매우 근사한 값을 나타냈다.
- (4) 토양의 탄산염 함량과 양이온 교환능력을 고려한 경험식을 제안하였다. 이 모델은 pH변화를 정확히 예측할 수 없었는데 이온과 토양 표면간의 정전화학반응을 고려할 수 없기 때문으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한남대학교 교비연구비의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. APHA. (1989), Standard Methods, APHA, AWWA, and WPCF., Washington.
2. Buckman, H. O, and Brady, N. C. (1969), The nature and properties of soils, 7th ed., Macmillan, London.
3. Cang, D, Wang, J., and Zhang, X. (1985), "Acidity." Physical chemistry of paddy soils, Science Press, Beijing, China, pp.131 ~ 156.
4. Curtin, D., Campbell, C. A., and Messer, D. (1996), "Prediction of titrable acidity and soil sensitivity to pH change." J. Environ. Qual. ASA, 25(6), pp. 1280 ~ 1284.
5. Dowdy, R. H., and Volk, V. V. (1983), "Movement of heavy metals in soils." Proceedings of American Society of Agronomy and the Soil Science Society of America, Atlanta, Georgia, 29 Nov.3 Dec. 1981, pp. 229 ~ 239.
6. Dzombak, D. A., and Morel, F. M. M. (1990), Surface complexation modeling. John Wiley & Sons, New York, N.Y.
7. Elliott, H. A., Liberati, M. R., and Huang, C. P. (1986), "Competitive adsorption of heavy metals by soils." J. Environ. Qual., Vol. 15, pp. 214 ~ 219.
8. Eltantawy, I. N. and Arnold, P. W. (1973), "Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether (EGME) method for surface area estimation of clays." Soil Sci. Vol. 24, pp. 232 ~ 238.
9. Elliott, H. A., and Liberati, M. R. (1981), "Properties affecting retention of heavy metals from wastes applied to northeastern U.S. soils." In Huang, C.P.(ed.) Industrial waste. Proc. 13th Mid-Atlantic Conf., Newark, DE. 29-30 June. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI. pp. 95 ~ 104.
10. Harter, R. D. (1983), "Effect of soil pH and adsorption of lead, copper, zinc, and nickel." Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 47., pp. 47 ~ 51.
11. Loeppert, R. H. and Suarez, D. L. (1996), "Carbonate and Gypsum." Method of Soil Analysis: 3. Chemical Analysis., Soil Science Society of America, pp. 437 ~ 474.
12. McBride, M. M. (1994), Environmental chemistry of soils. Oxford University press, New York, Oxford.
13. Mitchell, J. K. (1993), Fundamentals of Soil Behavior., John Wiley and Sons, Inc. New York.
14. Mowbray, T., and Schlesinger, W.H. (1988), "The buffer capacity of organic soils of the bluff mountain fen, North Carolina." Soil Sci., 146(2), pp. 73 ~ 79.
15. Schofield, R. K., and Samson, H. R. (1954), "Flocculation of kaolinite due to the attraction of oppositely charged crystal faces." Discussion of Faraday Society Vol. 18, pp. 135 ~ 145.
16. Singh, U., and Uehara, G. (1986), "Electrochemistry of the double-layer: Principles and applications to soils." Soil physical chemistry, Sparks, D. L., ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 1 ~ 38.
17. Stewart, B. A., and Weber, L. R. (1976), "Consideration of soils for accepting wastes, in land application of waste material." Soil Conservation Society of America, pp. 8 ~ 21.
18. Stumm, W., and Morgan, J. J. (1996), Aquatic chemistry. 3rd Ed., John Wiley & Sons, New York, NY.
19. Sumner, M. E., Miller, W. P. (1996), "Cation exchange capacity and exchange coefficients." Method of Soil Analysis: 3. Chemical Analysis., Soil Science Society of America, pp.1201 ~ 1229.
20. Swift, R. S. (1996), "Organic matter characterization." Method of Soil Analysis: 3. Chemical Analysis., Soil Science Society of America, pp. 1011 ~ 1069.
21. Thomas, G. W. (1996), "Soil pH and soil acidity." Method of Soil Analysis: 3. Chemical Analysis., Soil Science Society of America, pp. 475 ~ 490.
22. Van Breeman, and Wielemaker, W. G. (1974), "Buffer intensities and equilibrium pH of minerals and soils, II. Theoretical and actual pH of minerals and soils." Soil, Sci. Soc. Proc. Vol.38, pp. 61 ~ 66.
23. Yong, R. N., Warith, M. A. and Boonsinsuk, P. (1986), Migration of leachate solution through clay liner and substrate. Hazardous and Industrial Solid Waste Testing and Disposal : Sixth Volume. ASTM STP 933, pp. 208 ~ 225.

(접수일자 2000. 8. 10)