

중금속 오염토의 Electrokinetic 정화시 토체의 전기화학적 특성의 모델링

Modeling of Electrical and Chemical Characteristics During the Electrokinetic Remediation of Contaminated Soil by Heavy Metal

한 상 재*¹ Han, Sang-Jae

김 수 삼*² Kim, Soo-Sam

조 용 실*³ Cho, Yong-Sil

Abstract

During the electrokinetic remediation, direct current applied to a soil-water-electrolyte system derives the variations of fluid transport phenomena in soil-water system and soil-water interface characteristics. Therefore, these variations affect the electrokinetic reaction. In this study, lab-scale electrokinetic remediation tests were performed to characterize the electrical and chemical parameters variation in soil. During the test, voltage gradient, electrical current, zeta potential and pH variations were measured. On the basis of experimental results, computer modeling techniques predicting the variations of these parameters are suggested.

요 지

오염지반 정화를 위한 Electrokinetic 처리 과정에서 지반에 전류를 적용하면 흙-물 시스템 내에서 발생하는 유체의 이동 현상과 계면의 특성 변화가 발생하여 Electrokinetic 반응에 영향을 미친다. 본 논문에서는 지반 내에서 발생하는 전기적, 화학적 변수와 그 변화 특성을 규명하고자 실내실험을 수행하여, 시료의 전압, 전류, 제타포텐셜, pH 등의 전기 화학적 현상을 연구하였으며 이러한 인자들의 특성변화를 모델링하는 기법을 제시하였다. 그 결과 정화 도중 전압, 전류 변화를 각 농도에서 시간에 따른 지수함수로 표현할 수 있었으며 제타포텐셜의 변화를 pH와 오염농도에 따라 모델링 할 수 있었다.

Keywords : Electrical and chemical characteristics, Electrokinetic remediation, Heavy metal, Zeta potential

1. 서 론

오염토의 Electrokinetic(이하, EK) 정화처리는 지층에 전극을 삽입하여 흙속으로 직류를 통과시켜 오염물을 간극수와 흙으로부터 제거한 후 전극정에서 처리할

수 있게 하는 것으로, 기존의 펌핑 기법 등으로 처리하기 어려운 세립토에서 물과 오염물을 효과적으로 이동시킬 수 있다. 따라서 실트 및 점토가 많은 저 투수성 지반의 정화에 주로 적용되고 있는 기법이다(EPA, 1995; Pamukcu, 1992).

*1 한양대학교 공학기술 연구소 선임연구원 (Senior Researcher, The Research Institute of Engrg. & Technology, herp@orgio.net)

*2 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Professor Department of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

*3 중앙대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (Graduate Student Department of Civil and Environmental Engrg., Chung-Ang Univ.)

한편 지하정화를 위한 EK 정화처리 시 전기분해에 의한 화학작용이 발생한다. 이러한 현상으로, 흙-물 시스템 내에서 발생하는 유체의 이동 메카니즘과 계면의 특성 변화가 발생하여 EK 반응에 영향을 미치며 매체에서 이온 특성, 전기·수리학적 전도성, 점토화학 등의 특성 계수들간의 복잡한 상호반응에 의하여(Evangelou, 1998; Hunter, 1993) 총 시스템의 반응이 달라진다.

따라서 실제적으로 지반에 EK 정화 처리를 적용할 때는 전기삼투, 이온이동 등의 현상이 상호 복합적으로 작용하여 결과에 영향을 미치므로 오염토의 EK 정화처리의 해석은 단순한 오염물 이동 파악보다는 전기삼투 및 이온이동 현상의 해석과 오염물의 종류 및 농도에 영향을 받는 시스템 환경을 고려하여야 한다. 또한 효과적인 EK 정화처리 및 지반의 정화효과와 지반 거동을 정확히 예측하기 위해서는 지반의 초기조건과 환경을 고려하고, 시간과 위치에 따라 변하는 시료의 전기적·화학적·물리적 특성 변화 등을 고려한 정확하고 진보적인 해석이 요구된다.

본 논문의 목적은 포화된 점성토에서 EK 처리 시 시료 내에서 발생하는 제 현상의 복잡성과 상관성을 고려하여, 오염물의 이동과 EK 시스템의 반응을 고려한 유한차분 해석 프로그램을 개발하는데 있어 시료의 전기화학적 변수의 변화특성을 모델링하는 기법을 제시하는데 있다.

2. 이론적 배경

Helmholtz-Smoluchowski 이론은 전기삼투에 관한 이론 중 가장 초기에 그리고 광범위하게 이용되는 이론이다. 전기삼투유속 방정식은 다음과 같다(Mitchell, 1993).

$$v_e = -\frac{\epsilon \zeta}{\eta} E_z \quad (1)$$

여기서,

v_e : 전기삼투유속

E_z : z 방향에서 전압경사 ($\Delta E / \Delta z$)

η : 점성계수(N/m^2)

ϵ_0 : 진공상태에서 유전율($8.854 \times 10^{-12} C/V \cdot m$)

ϵ : 간극유체의 유전율

D : 유전체 상수($= \epsilon / \epsilon_0$) (20°C에서 물의 유전체 상수 = 80)이다.

ζ : 제타포텐셜

일반적으로 점토의 경우에 제타포텐셜이 음(-)의 값이고, E_z 는 음극방향으로 정(+)의 값이므로 유체의 흐름은 음극을 향하게 된다. 그리고 Helmholtz-Smoluchowski 이론에 의한 전기삼투계수 k_e 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_e = \frac{\zeta D}{\eta} n \quad (2)$$

여기서,

k_e : 전기삼투계수 (cm^2/s V)

n : 간극율

식 (2)에서 k_e 는 간극의 크기와는 거의 무관하다 (Mitchell, 1993). 따라서, 일반적인 점토-물 시스템에서 제타포텐셜은 전기삼투계수 k_e 와 직접적으로 비례 관계가 있음을 알 수 있다. 전기삼투계수 k_e 는 제타포텐셜에 따라 달라지며 제타포텐셜은 흙 입자의 표면전하와 간극수의 이온농도 등의 함수이기 때문에 광물형태, 종류, 오염 농도에 따라 큰 변화를 보인다(Shang et al., 1994). 그러나 이러한 상황 이외에도 EK 처리 도중에 제타포텐셜은 시료내의 위치에 따라서도 계속 변화한다.

만약 제타포텐셜과 k_e 가 EK 처리 동안 일정하다면 실험 시에 측정되는 전기삼투량의 변화는 시간에 따라 일정하여 Fig. 1과 같은 일정한 거동을 보일 것으로 예상되지만, 일반적으로 이런 상황은 발생하지 않는다(한상재 등, 2001). 전기삼투 유량은 시간에 따라 감소하며 사실상 어느 정도 시간이 흘러가면 멈추는 현상이 발생되어 더 이상의 전기삼투 배수효과를 기대할 수 없게된다.

이러한 변화는 EK 정화처리 시 시료내의 pH 차이 발생으로 인한 제타포텐셜의 변화 때문이다. pH 차이의 원인은 양극과 음극 각각에서 물의 전기분해로 인해 생성되는 산과 염기 때문이며 일반적으로 양극에서 의 pH

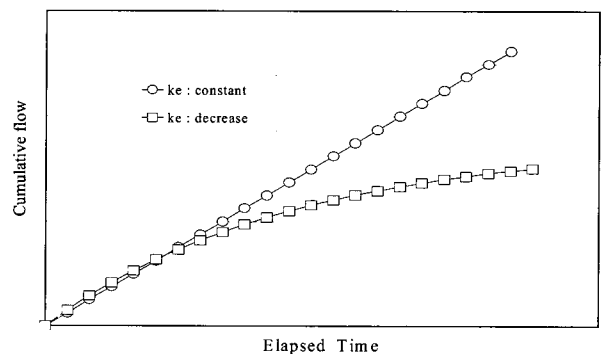


Fig. 1. Electroosmotic discharge volume with elapsed time (한상재 등, 2001)

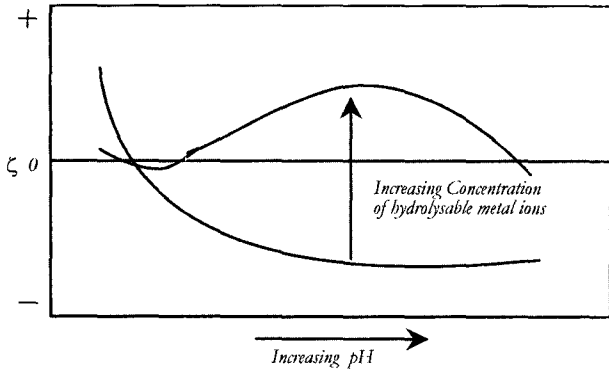


Fig. 2. Schematic illustration of the zeta potential behavior of kaolinite in the presence and absence of hydrolysable metal ions(West and Stewart, 1995)

는 2정도로 감소하고 음극에서의 pH는 수 시간만에 12에 도달한다. 음극으로의 물의 흐름으로 양극에서 발생한 산은 흡 속으로 이동할 것이고 동시에 염기는 음극에서 흡 속으로 확산될 것이다.

따라서 제타포텐셜은 시간에 따라 또 시료의 위치에 따라 변할 수 있는 가변인자이므로(김수삼 등, 2000), 전기삼투량은 EK 처리동안 일정하지 않다.

일반적으로 실험 결과를 바탕으로 금속이온의 존재에 따른 카올린의 제타포텐셜 변화는 Fig. 2와 같은 추세로 변화한다.

또한 지반에 직류를 가하면 초기 전극간 전압분포는 Fig. 3과 같이 거의 직선의 형상($a=b=c$)을 보여 전압경사가 일정하나 시료의 전도도의 변화로 시간에 따라 변하게 된다. 이러한 전압분포의 결과로 시료의 각 지점에서 각기 다른 전압경사($a' \neq b' \neq c'$)를 가지며 특히 음극부근에서 전압경사가 크게 작용하므로 전반적인 시료의 전압경사를 일정하게 가정한 기존의 이론으로는 정확한 EK 해석이 불가능하다.

한편 전기삼투 흐름의 추진력을 나타내는 전압경사(E_z)와 전기삼투계수(k_c)가 공간과 시간에 따라 변할 수 있는 인자이므로 이로 인해 각 지점에서의 흐름 차이($V_c = k_c E_z$)가 발생하고 흐름의 불균형으로 간극수압이 발현된다.

이상과 같이 시료내의 EK 거동을 판단하는 주요인자는 pH 발현이다. 일반적으로 pH 발현은 전기분해에서 발생되는데 전기분해에 영향을 미치는 가장 중요한 외부 요소는 패러데이 법칙에 의하여 전류의 크기이며(Eykholt and Daniel, 1994) 전류의 변화는 곧 전기분해 속도를 변화시켜 pH 발현 속도를 변화시킨다.

이상의 EK 정화 시 시료내의 시간에 따른 대표적인

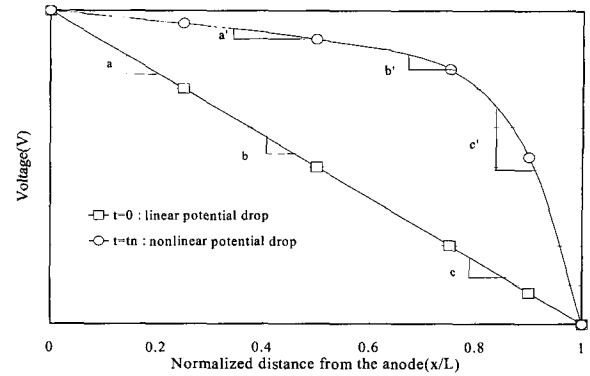


Fig. 3. Nonlinear variation of voltage gradient(김수삼 등, 1999)

인자들의 변화양상을 개략적으로 예측하면 우선, 전기분해 생성물로 인하여 시간에 따라 변하는 pH분포와 pH값에 따라 달라지는 중금속 분포 특성과 제타포텐셜이 변하여 전도도 변화를 유발시켜 비선형 전압 포텐셜 분포를 보이게 하고, 이러한 현상으로 전기삼투 흐름의 차이가 발생하여 간극수압 변화를 일으키는 상호 연관 시스템으로 되어 있다. 따라서 이들의 변화 양상을 변수 조건으로 고려하여 해석해야 한다.

3. EK 정화 특성 실험

3.1 실험장치

본 EK 정화 실험기는 크게 압밀 및 정화셀, 전기제어 장치, 계측장치, 기타 부속장치로 분류할 수 있으며, Fig. 4는 이러한 EK 정화 장치를 나타낸다. 주변장치로는 유출액을 저장할 수 있는 메스실린더, 전기회로 측정기기, 일정수두를 유지할 수 있는 장치 그리고 유입, 유출액의 pH를 측정할 수 있는 pH 메타 등으로 구성되어 있다.

Fig. 5의 EK 실험 셀은 압밀로 인한 시료 재조성과 EK 정화실험이 가능하도록 제작되었다. 본 장치에서는 전기삼투에 의한 배수량을 측정하기 위하여 음(-)극에 유출량 측정을 위한 메스실린더를 설치하였으며 양(+)극의 유입수 장치 중 유입수로 인한 수두경사의 변화를 방지하기 위하여 마리오 바틀(mariotte bottle)을 설치하여 일정한 수두를 유지하도록 하였다. 또한 전극에서의 전기분해에 의해 발생하는 가스가 시료에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 가스 배출을 위해 양극(+) 저수조의 물이 순환하도록 설계되었다.

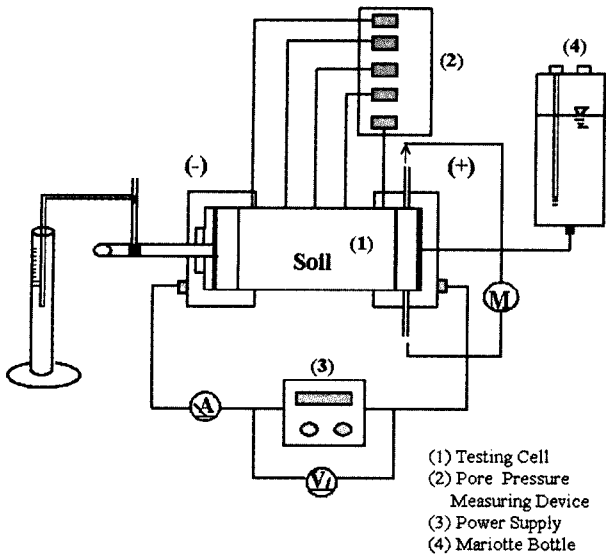


Fig. 4. Schematic diagram of the electrokinetic remediation test set up

3.2 실험종류 및 조건

제타포텐셜 측정용 시료의 농도 및 pH는 비교적 넓은 영역에 걸쳐 선정하여 산성과 염기성 전체의 변화를 파악하도록 하였다.

EK 정화 실험에서는 정화가동시간과 전압은 일정하게 유지하고 초기오염농도에 따른 EK 정화특성을 알아보았다. 정화가동시간은 12일이며 전압은 1V/cm로 일정하게 가하였고 대상시료인 카울린의 양이온 교환능(C.E.C.)값을 기준으로 오염농도를 정하여 각각 500, 3000ppm의 각 농도에서 실험 중에 양극으로부터 거리에 따른 전압분포, 전류의 변화를 살펴봄으로서 EK 현상에 의한 시료내 전기·화학적 시스템 변화를 알아보 고자 한다.

실험종류 및 조건을 정리하면 Table 1과 같다.

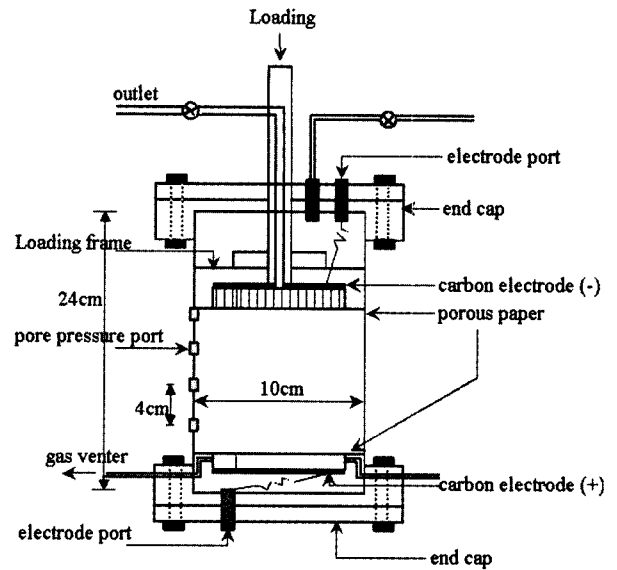


Fig. 5. Schematic diagram of the electrokinetic remediation cell

3.3 시료 및 시약

3.3.1 카울린 점토

뉴질랜드 산으로 비중은 2.65 ± 0.02 이다. 시료는 상온에서 보관하였으며 시료는 육안으로 볼 때 미백색의 입자가 매우 고운 분말상태로 시각적인 불순성이나 변색은 없었다.

카울린의 기본 물성치와 화학적 구성성분은 각각 Table 2와 같다. Table 2에서 유기물 함량은 KS F 2104-88에 의거 '1N 중크롬산 용액 산화법'을 이용하여 측정하였다. 화학적 성분 조성으로 볼 때 본 시료는 광물의 기본 구성 물질 외에 유기질 성분이 약간 포함된 비교적 불순물이 없는 순수한 카울린으로 판단된다.

3.3.2 질산납($Pb(NO_3)_2$)

질산납의 분자량은 331.21g이며 순도는 99.5%이고 수용성이다. 본 실험에서 오염물질로 납이온을 선택하였으므로 오염원으로서 질산납을 사용하였다.

Table 1. Test conditions for batch test, electrokinetic test and zeta potential test

Type	Code	Initial Pb con.	Duration	Applied voltage
		mg/kg		
EK Test	EK0	0	12days	1V/cm
	EK500	300		
	EK3000	1760		
Type	Code	pH	Pb con(ppm)	Measurement device
Zeta Potential Test	ZP1	2,4,6,8,10,12,14	0,10,50,500,3000	ESA-8000(Matec inc.)

Table 2. Physical and chemical compositions of kaolinite (%)

Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index	Activity	Specific Gravity	Passing #200(%)	pH at w=400%	USCS	CEC(Pb ²⁺) (mg/kg)
60.0	38.8	21.2	0.22	2.65	100	4.5-5	CH	1760
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₄ O ₃	TiO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Organic Content
50.4	35.5	0.25	0.05	Trace	Trace	Trace	Trace	8.4

Table 3. Amount of soil, dilute water and electrolyte for preparing suspension

CODE	Pb(II) Con. (ppm)	Weight of Pb(NO ₃) ₃ (g)	Volume of suspension (ml)	Weight of Soil (g)	Deionized water (ml)	Type of electrolyte	Initial pH	Titration solution
Pb0	0	0	210					
Pb10	10	0.0032	210					
Pb50	50	0.016	210	40	200	Pb(NO ₃) ₃	2	1M of NaOH
Pb500	500	0.16	210					
Pb3000	3000	0.96	210					

3.4 실험방법

3.4.1 제타포텐셜 측정실험

Matec Applied Science의 ESA-8000시스템을 사용하여(ESA-8000 Manual, 1996) 제타포텐셜 측정하였다. 제타포텐셜 측정을 위한 시료는 다음과 같은 절차에 따라 준비하였다.

- ① 공장제품인 kaolinite 시료를 325번체로 걸러서 큰 입자와 불순물을 제거한다.
- ② 메스실린더에 증류수를 투입하고, kaolinite를 침강시킨 후, Stoke's 법칙에서 계산한 침강시간이 경과 후 pipette을 사용하여 상청액을 분리한다.
- ③ 상청액과 질산납 및 염화나트륨을 혼합하여 0, 10, 50, 500, 3000ppm Pb(II)농도와 0, 230, 2300, 23000ppm Na 농도의 stock solution을 준비한다.
- ④ 각 전해질 농도에서 pH변화에 따른 Zeta Potential을 측정하기 위해 micro-pipette을 사용하여 상청액에 질산을 투입하고, 초기 pH를 2로 맞춘다. pH측정은 pH meter와 test paper를 사용하여 측정한다.
- ⑤ 현탁액의 균질성을 확보하기 위해 24시간동안 충분히 교반시킨다.

현탁액 시료 조성에 투입한 흙, 물, 전해질의 양을 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다.

3.4.2 EK 정화 특성실험

본 실험을 위해 시료는 No. 200체에 체가름을 행한 후, 재조성 시료(reconstituted sample)를 제조하여 사용하였다. 재조성 시료의 제조목적은 공장제품인 카올린

을 원지반 시료에 가까운 함수비와 구조상태로 재현하기 위한 것으로, 재조성 정화셀에 직경 10cm × 높이 24cm 체적의 슬러리 상태로 시료를 준비한 후, 압밀시켜 직경 10cm, 높이 16cm의 대략 액성한계 수준인 60% 함수비의 시료가 되게 하였다.

이와 같은 조건을 만족하도록 시료와 물의 양을 계산하여 준비하고 각 실험항목마다 오염농도가 다르므로 정해진 물의 양에 따라 시료 재조성 완료 시 0, 500, 3000ppm농도가 되도록 질산납용액을 준비하였다. 그리고 오염된 시료의 균질성을 확보하기 위해 충분히 교반을 하도록 하였다. 이때 물은 Barnstead Thermolyne Corp.의 EASYpure™ LF를 이용한 초순수를 제조하여 사용하였다. 시료농도 500ppm과 3000ppm은 각각 300, 1780mg/kg 으로 오염된 상태로 계산된다. 이러한 수치는 각각 국내 토양환경 보전법상의 농경지에서 납오염 대책기준(300mg/kg)과 대략 C.E.C. 이상에 해당하는 농도이다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 제타포텐셜의 변화

pH 변화에 따른 뉴질랜드산 카올린의 제타포텐셜 측정결과는 Fig. 6과 같다. 납의 농도가 0, 10, 50, 500, 3000ppm인 실험에서 제타포텐셜을 살펴보면 각각 2.96~-6.96(mV), 4.09~-7.5(mV), 5.39~-8.98(mV), 2.28~-6.48(mV), 2.3~-6.51(mV)의 값을 보여, 기존의 콜로이드 화학에서 제시했던 값(Hunter, 1993)보다 비교적

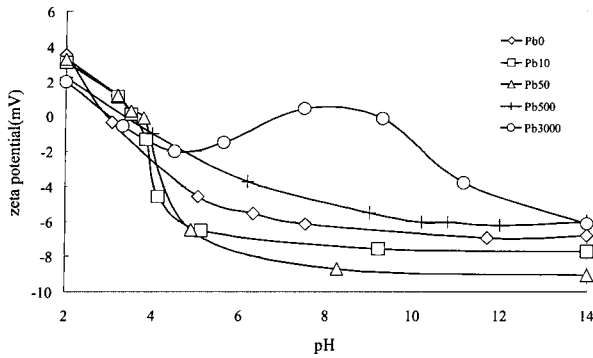


Fig. 6. Variation of zeta potential with pH distribution

낮은 값을 보였다. 저 농도일때는 값이 없을 때 보다 음의 값으로 증가하였으나, 50ppm 이상의 고농도부터는 농도가 증가함에 따라 수치는 감소하는 경향을 보여, 일반적으로 음의 값을 갖는 토립자의 제타포텐셜에 납농도가 미치는 영향은 시료의 pH 변화에 따라 그 거동이 크게 달라짐을 확인할 수 있다. 여기서 토립자의 전하가 0일때의 pH 즉, 영전하점은 pH 3.5부근으로 판단된다.

3000ppm 실험에서는 세 번에 걸쳐 영 전하점이 발생하였는데 pH 3 부근에서 처음 발생하여 pH가 증가할수록 제타포텐셜 값이 음으로 증가하다가 역전되어 pH 7 부근에서 두 번째의 영전하점이 발생하였다. 이후 제타포텐셜은 양의 방향으로 다소 증가하다가, pH 9.2 부근에서 세 번째의 영 전하점이 발생하였고 이점 이상에서는 제타포텐셜의 음의 값이 계속 증가하였다. 이때 처음의 영전하점은 카울린 콜로이드의 영전하점이고 두 번째는 부분적으로 콜로이드 입자들을 둘러싸고 있는 금속수산화물(metal hydroxides)의 침전이 발생하는 점이며, 세 번째는 금속수산화물이 콜로이드 입자들을 완전히 둘러싸서 발생하는 금속수산화물의 영 전하점으로

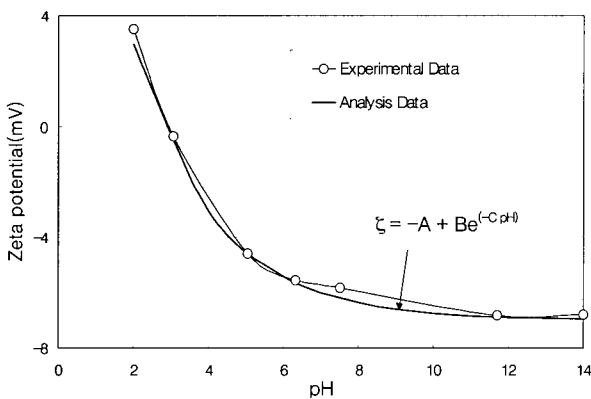


Fig. 8. Example of zeta potential variation

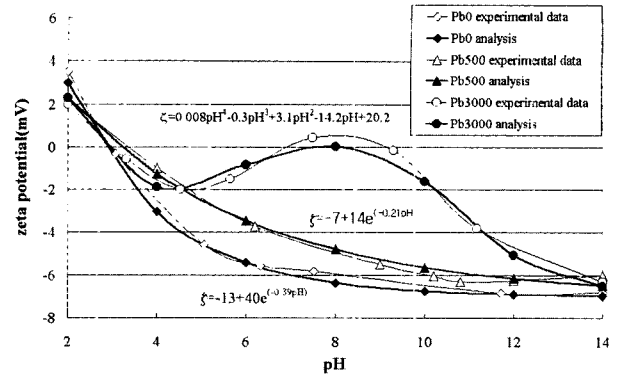


Fig. 7. Variation of analytical zeta potential with pH distribution

판단된다(Riddick, 1968).

따라서, 제타포텐셜은 해당 토질 고유 특성 및 간극유체의 pH와 이온농도에 따라 변한다고 할 수 있으며, 이는 EK 처리동안에 상수로서 존재하지 않고 위치와 시간에 따라 변한다는 것을 제시하고 있다.

이와 같은 제타포텐셜의 변화를 EK 정화 해석시 고려하기 위해서는 pH에 따른 제타포텐셜의 관계식을 구하여야 한다. 이를 위하여 실험결과로 나온 각각의 곡선을 회귀분석하면 Fig. 7과 같은 함수식을 얻을 수 있다.

따라서 일반적인 CEC 이하의 오염농도에서, pH에 따른 제타포텐셜의 분포는 Fig. 8과 같이 지수함수로 표현이 가능하며 EK 정화해석 시 시료의 pH 변화에 따라 각 위치에서 제타포텐셜을 지수식으로 고려하면 정확한 전기삼투 거동 변화를 파악할 수 있다고 판단된다.

4.2 EK 정화 실험 결과

4.2.1 전류의 변화

Fig. 9는 오염되지 않은(0ppm) 시료의 시간에 따른 전류의 변화를 나타낸 것으로서 실험초기에 전류는 15mA이었으며, 이는 시간이 경과함에 따라 감소하여 100시간정도 경과 후 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 10은 500ppm으로 오염된 시료의 시간에 따른 전류의 변화를 나타낸 것으로서 실험초기에 18mA를 나타낸 전류는 시간이 경과함에 따라 지수함수 관계로 감소하고 100시간 이후 완만히 거동함을 알 수 있다.

Fig. 11은 EK3000의 시간에 따른 전류의 변화를 나타낸 것으로서 실험초기에 전류는 23mA이었으며 이는 시간이 경과함에 따라 감소하며 150시간정도 경과 후 완만해짐을 알 수 있다.

시간이 경과함에 따라 이온은 소멸되어 저항은 커지

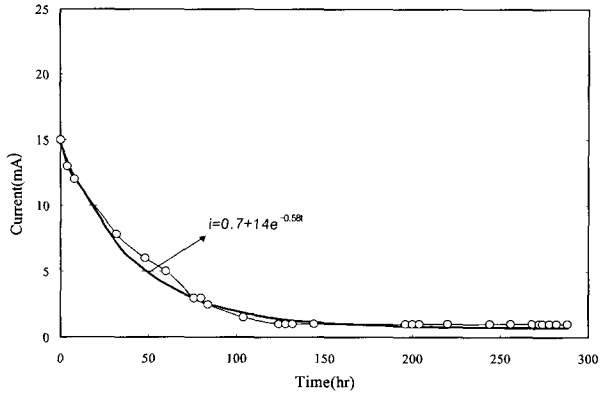


Fig. 9. Electrical current with time during EK0 test

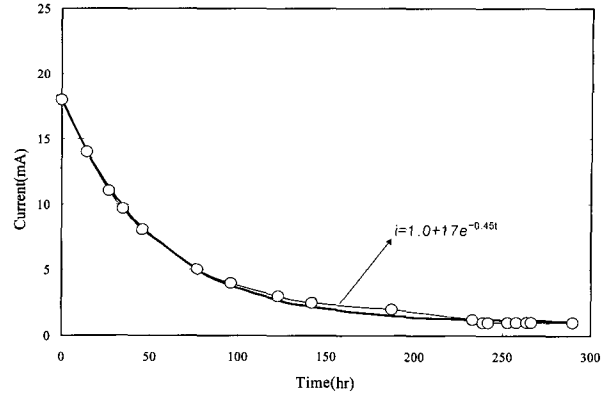


Fig. 10. Electrical current with time during EK500 test

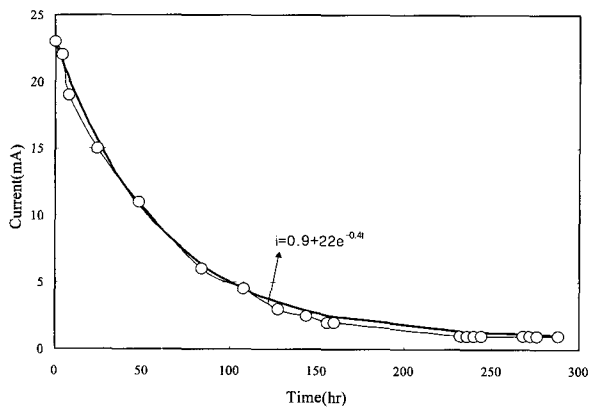


Fig. 11. Electrical current with time during EK3000 test

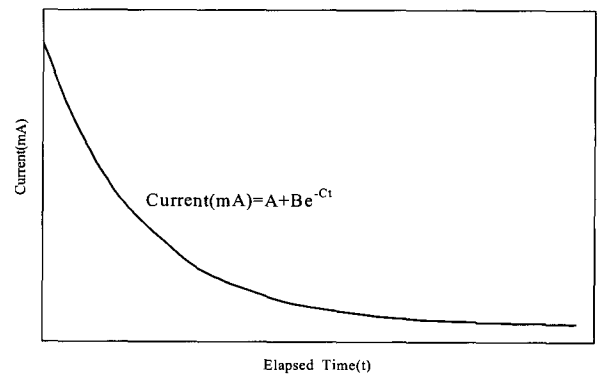


Fig. 12. Scheme of current variation

고 전류는 감소하는 경향을 나타내며, 이때 납농도가 증가할수록 전도도는 증가하여 초기 전류는 더 큰 값을 보인다. 전류크기는 일정시간동안 급격히 감소하며 이후에는 완만한 감소추세를 보인다.

각 농도에서의 전류변화를 나타내는 곡선을 초기의 전류와 최종의 전류를 구하여 시간의 함수로서 표기하여 구하면 일반적으로 Fig. 12와 같이 지수함수로서 가능하다.

4.2.2 전압분포의 변화

전압의 변화는 다음 Fig. 13~Fig. 15에서 보는 바와 같이 초기 전압분포곡선은 완만한 직선형을 나타내는데 오염농도가 증가할수록 위로 볼록한 형태를 보인다. 정화가동시작 후 시간이 경과할수록 수용액상 착화 화합물 형성에 의해 저항은 증대되어 전기경사 감소는 급격히 일어난다.

실험이 완료된 시점에서의 양극부근에서의 전압경사는 음극부근에서의 전압경사에 비하여 EK0에서는 12배 정도 차이가 났으며 EK500, EK3000 시험에서는 28배

정도 차이가 발생하였다. 또한 오염농도가 높을수록 시간 진행에 대한 각 지점의 전압크기 변화 기울기는 더 급격하게 증가한다.

전기분해반응 결과 양극에서 생성된 수소이온은 확산이나 이류에 의해 음극으로 이동하며, 전도도를 증가시키는 반면 음극근처에서는 양극으로부터 이동한 산

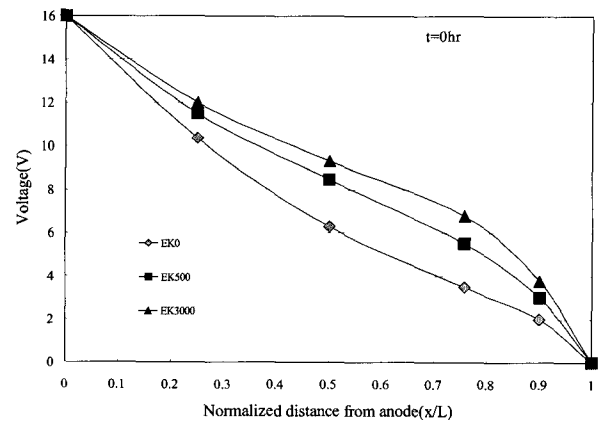


Fig. 13. Electrical potential distribution for elapsed time ; t=0hr

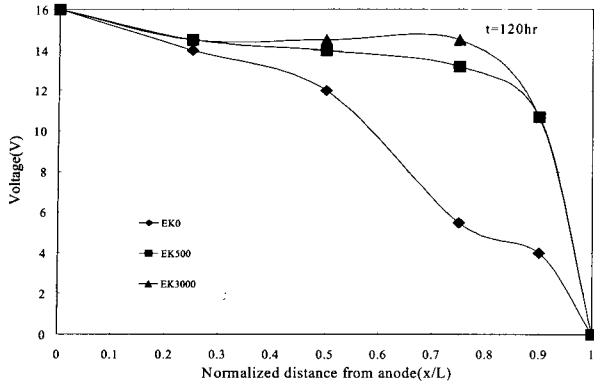


Fig. 14. Electrical potential distribution for elapsed time: t=120hr

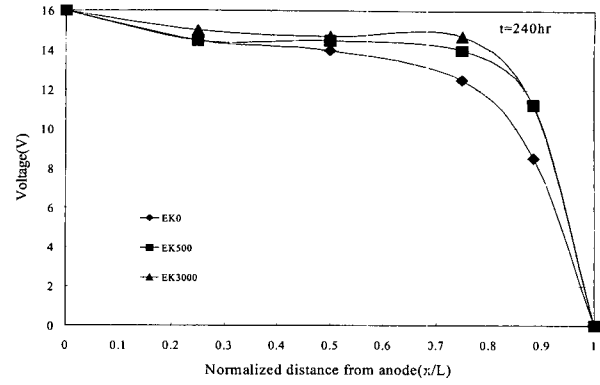


Fig. 15. Electrical potential distribution for elapsed time: t=240hr

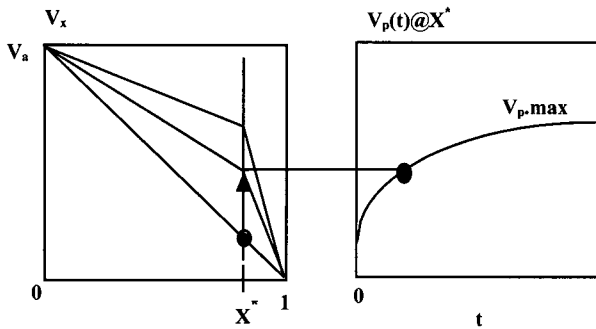


Fig. 16. Simplified diagram of electrical potential distribution

전선과 염기전선이 만나 물을 생성하고 수산화납 침전물에 기인하여 수소이온의 이동은 지연되며, 이는 비전도도 물질로서 저항을 증가시킨다.

따라서 시간이 경과함에 따라 음극영역근처에서 저항은 증대되어 전압크기가 급격히 감소하므로 비선형적인 분포를 이룬다. 이 때 전기경사가 급격히 감소하는 영역은 대략 $x/L \approx 0.8$ 정도에서 발생한다. 이러한 전압포텐셜 변화 현상을 수식화 하기 위하여 Fig. 16과 같이 급격한 전압분포 변화를 보이는 전압축의 위치와 그곳에서의 전압 크기를 정할 수 있는데 전압이 변하는 축인 X^* 의 위치를 정하고 시간에 따라 축에서 전압의 지수함수적인 증가를 나타내는 지수식을 구할 수 있다.

$$V_p(t) = V_{p,max} - [V_{p,max} - V_a(1 - X^*)] e^{-kt} \quad (3)$$

여기서,

$V_{p,max}$ 는 시간 경과에 따른 전압변화 발생 축에서의 전압크기, V_a 는 가해진 전압, k =지수상수 이다.

일단 전압포텐셜 분포를 구하면 각 위치에서의 전압 $E(x)$ 는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

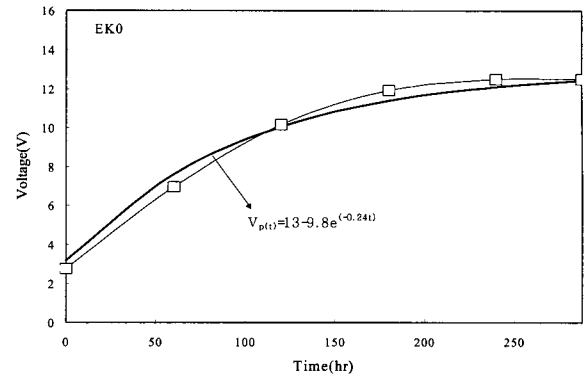


Fig. 17. Voltage distribution with time at $x/L \approx 0.8$: EK0

$x/L < X^*$ 일 때

$$E(x) = -\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_a - V_p(t)}{X^*} \quad (4)$$

$x/L \geq X^*$ 일 때

$$E(x) = -\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_p(t)}{1 - X^*} \quad (5)$$

Fig. 17~Fig. 19는 $x/L=0.8$ 지점에서 시간경과에 따른 전압크기 변화를 시간에 따라 식 (3)을 적용하여 나

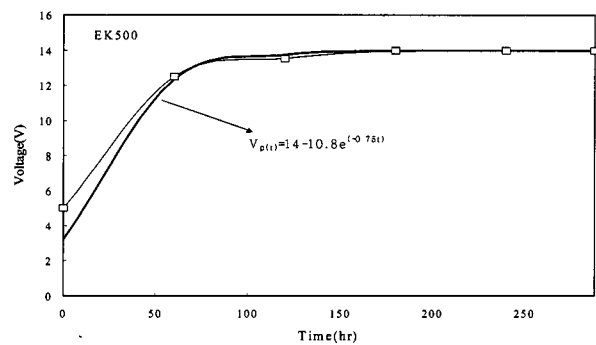


Fig. 18. Voltage distribution with time at $x/L \approx 0.8$; EK500

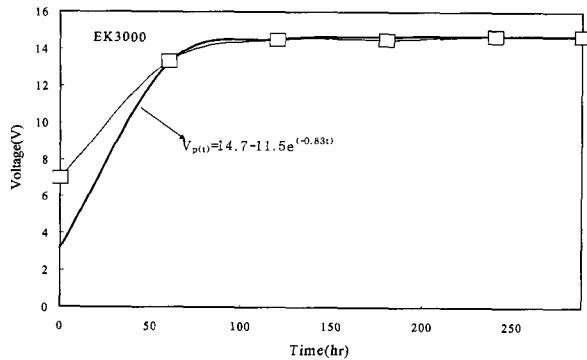


Fig. 19. Voltage distribution with time at $x/L \approx 0.8$; EK3000

타낸 것이다. 시간에 따라 선형적으로 전압은 증가하나 이후 일정해짐을 알 수 있고 오염농도가 증가할수록 변화는 급격히 발생하여 안정화되는 시간도 빠르다.

5. 결론

본 논문에서는 중금속 오염지반의 정화를 목적으로 EK 기법을 적용 할 때 지반 내에서 발생하는 전기화학적 현상으로 인한 변수의 특성 변화를 규명하고, 이를 모델링하는 방안을 제시하고자 하였다.

이를 위해 납으로 오염된 카올린에 대해 실내실험을 수행하여, EK 처리 동안 변화하는 시료내의 전압, 전류, 제타포텐셜, pH 등의 전기 화학적 현상간 상관성을 연구하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) EK 정화 시 시료 내 반응의 변화 요인은 전기분해에 의한 pH 변화이다. 시료 내 pH의 변화가 발생하면 점토표면에서의 제타포텐셜과 시료 내 전도도 차이가 유발된다.
- (2) EK 처리동안 시료의 전기적 특성 변화로 시간에 따라 전류는 감소하였으며 이때 초기 오염 농도에 따라 다른 양상을 보였으며 이러한 변화는 지수함수로서 표현이 가능하였다.
- (3) 점토의 제타포텐셜은 pH와 간극수내 오염물질의 농도에 따라 민감한 반응을 보였다. 즉, 본 실험에서 납 이온농도가 카올린의 CEC보다 작을 때 pH가 증가할수록 음의 값으로 제타포텐셜은 증가하였고 오염물의 농도가 증가할수록 제타포텐셜은 감소하였다. 따라서 실제 지반에서 EK를 적용할 때 오염농도와 토질특성에 따라 제타포텐셜의 변화를 고려하여 전기삼투 흐름을 예측하여야 한다.

- (4) 시료내에서 전기전도도의 변화로, 전압분포는 초기의 직선형에서 시간에 따라 비선형 분포를 보였다. 이 변화 추세는 초기 오염 농도가 높을수록 빠르게 진행되었으며 시간경과에 따른 이의 변화를 전극 간 한 지점($x/L=0.8$)을 기준으로 수식화 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2000년 과학기술부 국가지정연구실 사업(과제번호: 2000-N-NL-01-C-161)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 김수삼, 한상재, 임성철(2000), "점성토 전기삼투 배수와 Zeta Potential의 상관성", 한국지반공학회 논문집, 제16권, 제6호, pp.69~77.
2. 김수삼, 한상재, 정승용(1999), "E/K 배수 시스템에서 전기/화학적 변화에 관한 연구", 대한 토목학회 논문집, 제19권, 제3-4호, pp.767~774.
3. 한상재, 김수삼(2001), "Electrokinetic 정화기술 적용 시 납 오염토에서의 간극수 흐름과 간극수압 발현 특성", 대한토목학회 논문집, 제21권, 제2-C호, pp.177~186.
4. EPA(1995), *In-situ remediation technology status report; Electrokinetics*, EPA 542-K-94-009.
5. ESA-8000 Manual(1996), Matec Applied Science(1996).
6. Evangelou, V. P.(1998), *Environmental soil and water chemistry; Principles and applications*, John Wiley & Sons.
7. Eykholt, G. R., and Daniel, D. E. (1994), "Impact of system chemistry on electroosmosis in contaminated soil," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.5, pp.797~815.
8. Hunter, R. J.(1993), *Introduction to modern colloid science*, Oxford University Press.
9. Mitchell, J. K.(1993), *Fundamentals of soil behavior*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., pp.340~370.
10. Pamukcu, S., and Wittle, J. K.(1992), "Electrokinetics for removal of low-level radioactivity from soil," *Fourteenth Annual Department of Energy Low-Level Radioactive Waste Management Conference*, Phoenix, Arizona, November.
11. Riddick, T. M.(1968), *Control of colloid stability through zeta potential*, Livingston Publishing Company, Wynnewood, Pennsylvania, pp.21~24.
12. Shang, J. Q., Lo, K. Y., and Quigley, R. M.(1994), "Quantitative determination of potential distribution in Stern-Gouy double-layer model," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.5, pp.624~636.
13. West, L. J., and Stewart, D. I. (1995), "Effect of zeta potential on soil electrokinetics." *Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication*, No.46, Vol.2-2, pp.1535~1549.

(접수일자 2001. 8. 9, 심사완료일 2001. 12. 26)