한국지하수토양환경학회 추계학술발표회
2003년 9월 26~27일 제 주 대 학 교

토양환경복원과 관련 동전기 기술의 적용에 대한 저항상태에 따른 전기삼투량 변화의 이해

양지원†, 김상준, 박지연, 이유진, 기대정

한국과학기술원 생명화학공학과 (jiwonyang@kaist.ac.kr)

<요 약 문>

Recently electrokinetic process is known to be a promising remediation technology for the contaminated soils with heavy metals, radionuclides, organic matters, and so on. The contaminants in electrokinetic technology are removed mainly by three mechanisms; electroosmosis, electromigration, and electrophoresis. When direct current is introduced between two electrodes planted in soil, a large amount of hydrogen ions is formed and moves from anode to cathode with the other cations contained in electrolyte. The water flow caused by the movement of cations is called as electroosmosis. Especially for non-ionic pollutants, the electroosmotic flow(EOF) is the most important removal mechanism among them and transports contaminants from anode to cathode along the water flow. In this study, characteristics of electroosmotic flow was investigated according to the resistance state of soil. The decrease, maintenance, and increase of soil resistance could be obtained by controlling ions in soil. When the resistance of soil was decreasing or maintained, the EOF is proportional to electric current and voltage, respectively and when the resistance was increasing, the EOF is proportional to only electric current not voltage.

key word : electrokinetic, electroosmosis, resistance, cation

1. 서 론

동전기 정화는 토양 내에 직류전기를 사용하여 토양으로부터 오염물질을 추출하는 것이다. 토양 내에 설치된 전극에 직류전기가 가해지면 동전기 현상이 발생하여 토양-물-전해질 시스템이 물리·화학적, 수리학적으로 변화되어 오염물질이 이동·제거된다. 공극수에 존재하거나 토양입자 표면으로부터 탈착된 물질들은 자신들의 전하특성에 따라 양극 또는 음극 방향으로 이동하게 된다. 전기장 하에서 토양 내의 물질의 이동은 주로 확산, 이온이동, 전기삼투에 의한 이류, 전기영동에 의해서 일어난다. 또한 토양의 광물구성, 공극수의 성분, 전도도, 전기·화학적 특성, 공극율과 굴곡도 등의 여러 가지 환경변수들도 각각의 흐름에 영향을 미친다. 토양 공극수 내 화학물질의 이동 결과, 음이온으로 대전된 물질은 양극으로 모이게 되고 양이온 물질들은 음극 주위에서 침전되거나 이온의 형태로 음극 주위로 모이게 된다. 또한 비이온성 물질의 경우 전기삼투의 영향 하에서 음극으로 이동하여 모이게 된다. 그러면 양

극이나 음극에 모인 유출수에 섞어있는 오염 물질들을 지상으로 추출하여 이온교환법이나 화학적 침전, 전기 · 화학적 방법, 막 분리 등의 환경공학적 처리방법을 이용하여 오염물질을 제거하게 된다.

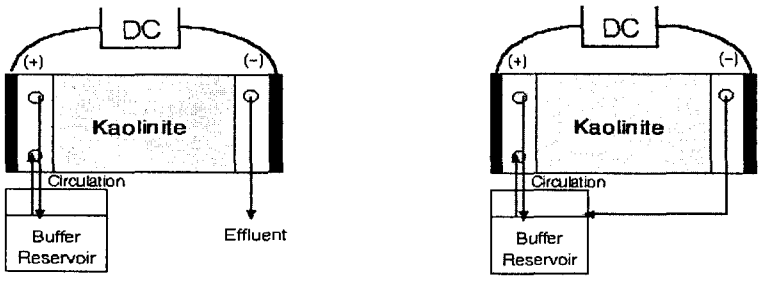
특히 전기삼투현상과 관련하여 전기삼투유량은 비이온성 오염물질에 대한 계면활성제 및 산화제와 같은 첨가제를 이용한 제거에서 주요 고려대상이 되고 있으며 이미 알려진 Helmholtz-Smoluchowski의 경험식에 의하여 다음과 같이 정의된다. 여기서 k_e($cm^2/V \cdot s$)는 전기삼투계수, i_e(V/cm)는 전위경사, A(cm^2)는 시료의 단면적, k_i($cm^3/amp \cdot sec$)는 전기삼투 물이동 효율, I(amp)는 전류 그리고 σ (siemens/cm)는 전극을 가로지르는 토양의 겉보기 전도도이다.

$$q_e = k_e\, i_e\, A = k_i\, I = \frac{k_e}{\sigma}\, I \qquad (1)$$

식 (1)에서 전기삼투유량은 전위경사와 전류에 비례하고 있는데 이러한 관계는 토양저항의 증가 및 감소 그리고 안정과 같은 변화상태에 따라 다르게 적용된다. 본 연구에서는 토양저항의 상태에 따른 도입 전류 및 전압이 전기삼투유량의 변화에 미치는 영향을 관찰하였다.

2. 본 론

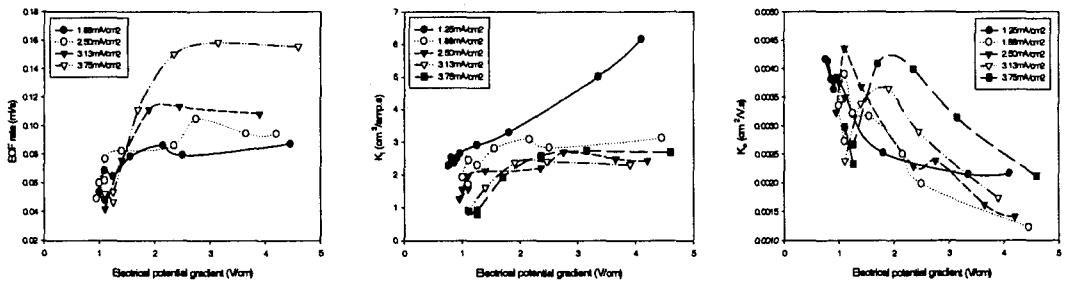
본 연구에서 사용한 동전기 시스템은 Fig. 1와 같다. System I(S1)은 오염토양복원에 일반적으로 사용되는 형태로써 양극 전해조(AR)와 완충 전해조(BR) 사이를 펌프를 이용하여 전해질이 순환하고 있으며 음극 전해조(CR)에는 재순환이 없고 전극높이 이상의 유체는 월류되어 배출되는 열린 구조이다. S1에서는 AR에서 공급된 양이온이 처음에는 토양의 전도도를 높이므로 정전류에 상태에서 전압이 감소하게 되지만 시간이 지남에높아져 전압이 올라가게 된다. 따라서 S1에서는 토양저항의 감소와 증가상태의 데이터를 얻을 수 있다. System II(S1)에서 AR은 펌프를 통해 BR과 순환하고 CR에서 월류된 유출수는 다시 BR로 공급되므로 BR의 pH를 장기간 유지할 수 있는 닫힌 구조이다. 따라서 유출수로 이동된 양이온은 다시 AR로 공급될 수 있으므로 토양내 이온농도가 유지되어 저항이 변하지 않는 안정상태를 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용한 전해질은 인산염 완충용액을 이용하였으며 구성성분은 4.4 g/L KH_2PO_4, 18.1 g/L $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$이었다. 이와 같이 제조된 전해질 1 L를 공정이 시작되기 전 BR, AR, CR에 나누어 공급하였다. 모델토양은 150 μm이하 입자크기의 고령토(kaolinite white O)를 사용하였다. 동전기 반응기에서 토양이 담겨지는 부분은 직사각형(4×4×20 cm^3)이고 kaolinite 380 g을 3차 증류수 160 mL에 반죽하여 압밀없이 충진하였다. AR과 CR의 부피는 모두 20 mL이며 전극재질은 카본으로 양 전해조 바깥쪽에 위치하게 하였다. 완충기의 역할을 하는 BR에는 약 960 mL의 전해질을 채웠으며 AR과 CR에 펌프(EYELA, Japan)를 통해 순환시켰다.



(a) Sytem I (b) System II

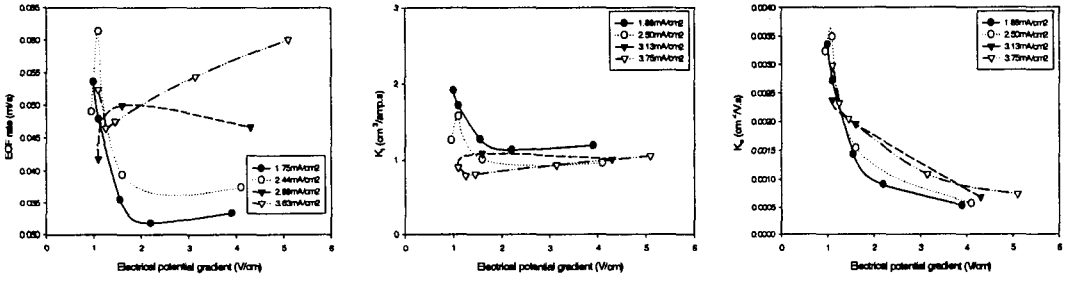
Figure 1. Schematic diagram of electrokinetic process for control of resistance

Fig. 2는 S1에서 저항이 감소상태에 있을때 전기관련변수와 전기삼투유량 간의 관계를 보여주고 있다. Fig. 2-(a)에서 전기삼투유량은 전류밀도와 전압경사에 각각 비례하는 경향을 나타내었으며 Fig. 2-(b)와 같이 물전달효율상수(k_i)는 전압경사에 비례하고 전류밀도에 반비례하여 나타났다. 전기삼투투과상수(coefficient of electroosmotic permeability, ke)의 경우 전압경사가 높을 수록 낮은 경향을 보였으나 전류밀도가 높을 수록 높은 값을 나타내었다. Fig. 3는 저항이 증가상태일때의 전기관련변수와 전기삼투유량의 관계를 보여주고 있다. Fig. 3-(a)에서 전기삼투유량은 전류에는 비례하는 경향을 나타내었으나 전압경사의 증가에 대해서는 연관이 없었으며 마찬가지로 전압경사의 증가에 대해서 물전달효율상수값은 일정한 값을 나타내었다. 전압경사의 증가에 따라 전기삼투투과상수는 감소하였다(Fig. 3-(b), (c)).



(a) EOF rate (b) ki (c) ke

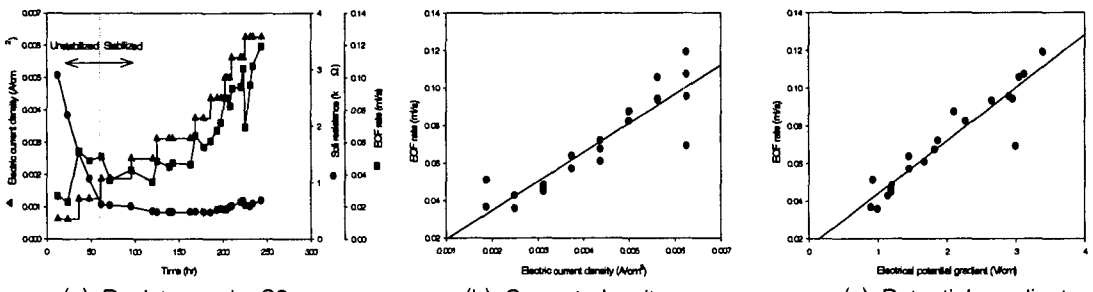
Figure 2. Change of electrical variables with time when soil resistance decreased



(a) EOF rate (b) ki (c) ke

Figure 3. Change of electrical variables with time when soil resistance increased

Fig. 4-(a)는 저항을 안정한 상태로 유지하기 위해 S2를 운전한 결과이며 전기삼투유량에 대한 전류의 효과를 관찰하기 위해 단계적으로 전류를 증가시켰다. 저항이 안정한 구간에 유지되는 구간에서 Fig. 5-(b), (c)와 같이 전기삼투유량은 전류밀도와 전압경사에 각각 비례하는 것으로 나타났다.



(a) Resistance in S3 (b) Current density (c) Potential gradient

Figure 4. Change of EOF rate with electrical variables when resistance was stable in S3

3. 결 론

본 연구에서는 저항상태에 따른 전류밀도 및 전압경사와 전기삼투 사이의 관계를 조사하였다. 저항이 감소 및 일정한 상태에서는 전기삼투유량은 전류밀도와 전압경사에 각각 비례하는 경향을 보였으나 저항이 증가상태에 있을 때는 오직 전류에 비례하여 증가하였다.

4. 사 사

본 연구는 국가지정연구실사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

5. 참고문헌

1) Hamed, J. et al., *J. of Geotechnical Engineering*, vol.117, 241-271(1991)
2) DeFlaun, M.F. & Condee, C.W., *J. of Hazardous Material*, vol.55, 263-277(1997)
3) Yang, J.W. *et al., J. of KSEE*, vol.25, 426-433(2003)