



모니터링하였으며, 실제 자연토와 도시 하폐수 슬러지에의 적용성 및 수치모델을 개발하여 적용한 바 있다. 윤삼석(2002)의 경우 광미 등 퇴적토양에 축적된 중금속들을 제거하는데 있어서 동전기 정화 기술의 적용성 검토와 향상된 정화방안을 고찰한 바 있으며, 추출용매에 따른 탈착효과를 제시한 바 있다. 그는 최적의 조건으로 구연산과 SDS를 혼합한 용액을 사용할 것을 제안하였다. 이군택(2003)은 경유 오염 저수투성 토양의 생물학적 복원에 동전기적 현상의 적용 가능성에 대한 연구를 통해 시료의 중앙에 미생물을 접종하는 방법을 통해 미생물의 성장과 활동을 증진시켜 저투수 경유오염 토양에 대한 최적의 동전기 생물 복원방법을 제시하였다. 마지막으로 장경수(2003)의 경우 동전기 정화효율을 증대시키기 위해 향상기법으로써 화학약액을 사용하는 방안 및 화학약액을 효과적으로 주입하는 방안을 연구하였으며, 그 결과 용해제의 경우 0.05M을 주입하거나 이 용해제에 음이온성 계면활성제인 SDS를 CMC(한계 교질농도)의 2배 정도로 혼합하여 사용할 것을 제안하였다.

지금까지 국내에서 수행된 연구의 경우 대부분이 정화기간 증가에 따라 정화 효과가 증가한다는 것은 제시되어 있지만, 제거효율 증가에 대한 상세 메커니즘을 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요한 실정이며, 아울러 위의 모든 연구는 포화조건을 전제로한 실험 결과로 불포화조건에서의 실험 결과는 없는 상태이다. 이에 본 연구에서는 불포화조건에서 수행된 동전기 정화 실험 결과를 바탕으로 정화기간이 자연토의 정화 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

## 2. 문헌 고찰을 통한 동전기 정화기간에 따른 시료내 pH와 정화 특성

그림 1은 한상재(2000)에 의해 제시된 HERP에서 예측한 카올린에 대한 시간경과에 따른 시료내 pH 변화를 나타낸 것으로 경과 시간이 증가함에 따라 시료 내부에서 생성되는 산성 영역은 확대되고 있지만, 일정기간 이후가 되면 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 산전선의 이동속도와 염기전선의 이동속도가 평형상태에 있기 때문에 더 이상의 큰 변화는 발생하지 않는 것으로, 유사한 결과가 Hamdan(2002)에 의해 제시된 바 있다. 그러나 Acar(1993)는 완충능이 없는 Georgia kaolinite의 경우 시료내부에서 산전선이 염기전선을 중화시키면서 결국에는 시료의 음극쪽으로 이동하여 유출되면서 유출수의 pH가 저하될 수도 있다고 지적한 바 있다.

그림 2는 Acar et al.(1996)에 의한 정화기간에 따른 납농도의 변화를 제시한 것으로 실험 시작후 15일 동안에는 양극쪽의 납이 약간 감소하였으며, 이후 37일 및 50일 후 시료의 전 구간에서 납의 농도가 감소하였고, 음극부 쪽에서 증가하였다. 이로부터 납의 농도가 감소된 영역에서는 납이 음극쪽으로 이동하였고, pH Jump 지역에서 침전/누적 되었음을 제시하였다.

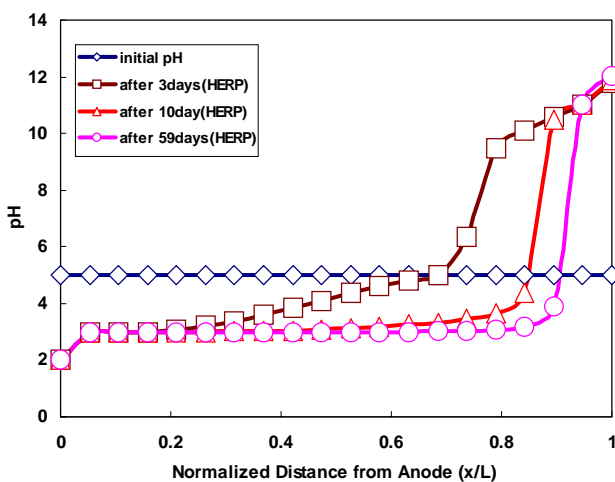


그림 1. 정화기간에 따른 시료내 pH 변화 (한상재, 2000)

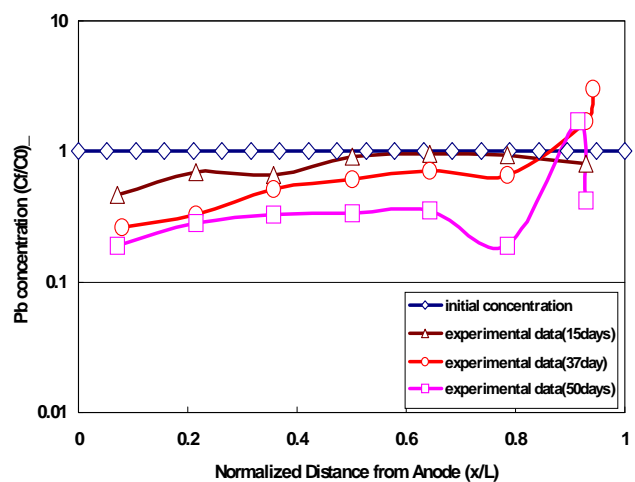


그림 2. 정화기간에 따른 잔류 납 농도 분포 (Acar et al., 1996)

### 3. 실험

#### 3.1 시료 특성

본 연구에서 사용된 시료는 서울시 OO사격장에서 약 20cm의 잔디층을 제거한 이후 약 20cm~60cm 깊이에 존재하는 시료로 교란된 상태로 채취하였다. 시료 특성은 표 1과 같고, 셀실험을 위해 No. 20체로 체가름하여 굵은 입자를 제거하여 사용하였다.

표 1. 시료 특성

Gs	LL (%)	PI	USCS	$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)	Initial pH	CEC (cmol/kg)	Organic content (%)	Carbonate content (%)	Specific area (m <sup>2</sup> /g)
2.56	25.4	N.P.	SW	1.74	15.4	6.6	3.91	3.36	0.18	10.5

#### 3.2 EK 정화 실험 장치 및 실험 조건

본 연구에서는 불포화 조건을 구현하기 위해 첫째, 시료의 초기 포화도는 최적함수비 상태인 82.8%로 하였고, 둘째 시료 내외부로의 물의 유출입을 막기 위해 시료와 전극 저수조 사이에 양이온교환막을 설치하였다(표 2 참조). 그 외 전압 등과 같은 나머지 실험 조건은 모두 동일하게 적용하였고, 사용된 실험기는 그림 3과 같다. 시료가 셀 내부에 장착되면 양 저수조를 부착한 후 외부에서의 동수경사 형성을 방지하기 위해 마리오바틀을 설치하였다.

표 2. 시험조건

Degree of saturation (%)	Applied voltage (V)	Duration (Days)	Solution filled in the reservoir		Used filter	
			+	-	+	-
82.8	25	10	Deionized water	Deionized water	CEM	CEM
		20				
		30				

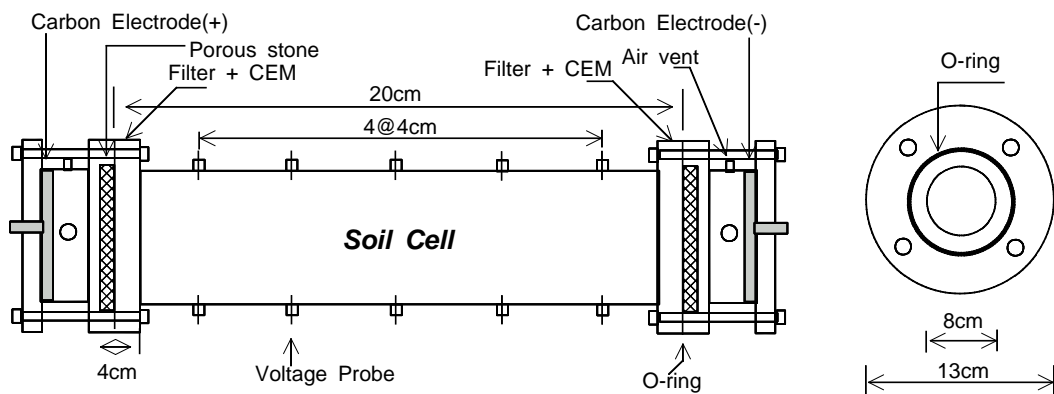


그림 3. 동전기 정화 시험 셀

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 전압, 전압경사 및 pH 변화

그림 4는 시험 종료 직전 시료 내부에서 형성된 전압과 pH를 양극으로부터 정규화된 거리에 따라 도시한 것이다. 산전선의 경우 10일동안 약 0.3지점까지 이동속도 0.75cm/day로 이동하였으며, 시간이 증가함에 따라 음극쪽으로 이동하였으나, 20일 이후에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 시료 내부에서의 산전선의 이동속도가 지속적으로 감소하여 염기전선의 이동속도와 평형상태에 이르렀기 때문으로 판단되며, 이는 그림 4에 제시된 기존 문헌 및 본 연구에서 산정된 산전선의 이동속도에서 확인할 수 있었다.

시료 내부에서의 전압은 약 10일 동안 거의 선형적인 분포를 보인 것과는 달리 10일 이후에는 0.3~0.7 지점의 전압이 감소하면서 전압경사가 변화하는 것으로 나타났다. 이 역시 30일 조건의 실험에서 나타나는 각 위치별 전압경사의 변화를 통해 확인할 수 있다(그림 6). 초기 40시간까지는 0.1지점에서의 전압경사가 가장 큰 값을 보이다 약 100시간 이후 0.3지점에서의 전압경사가 가장 큰 값을 보였다. 또한 지속적으로 증가하던 0.3지점에서의 전압경사는 약 400시간이 지난 후 감소하기 시작하였으며, 이때 0.5 지점에서의 전압경사가 증가하기 시작하였다. 이로부터 시간 경과에 따라 납이온이 음극쪽으로 이동하고 있음을 간접적으로 판단할 수 있었다.

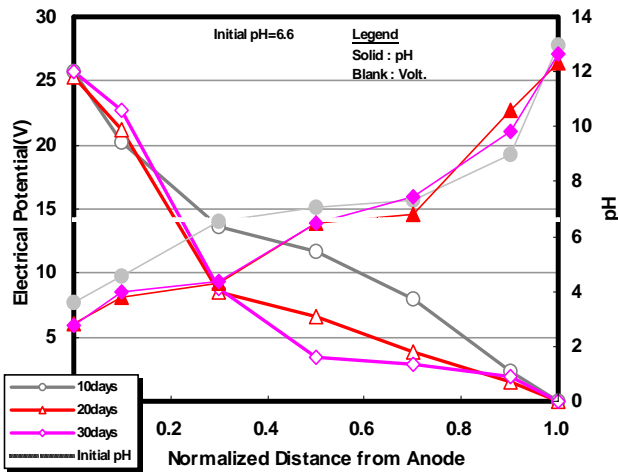


그림 4. 전압과 pH와의 관계

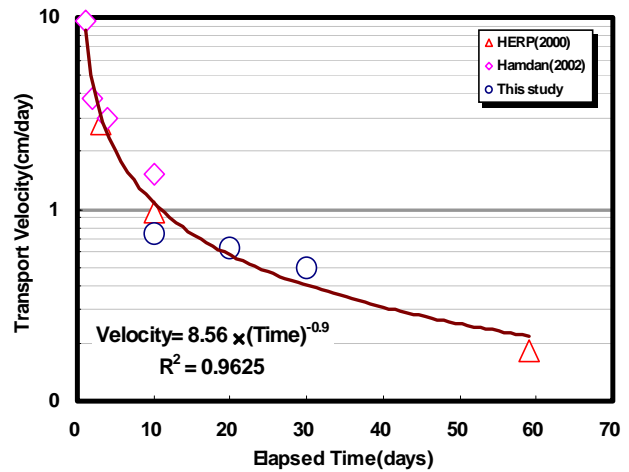


그림 5. 증가시간에 따른 산전선의 이동속도

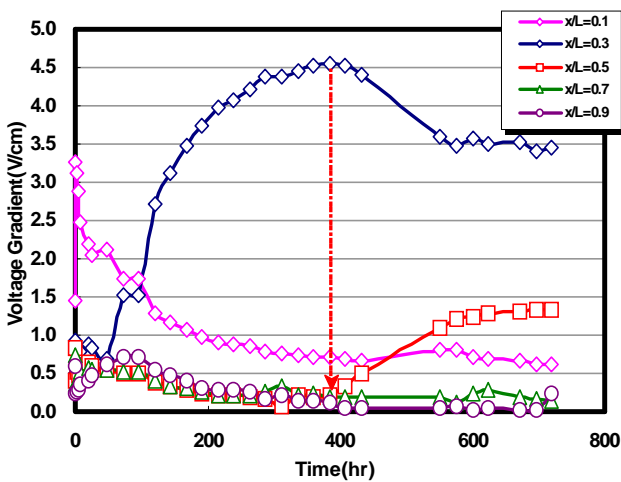


그림 6. 증가시간에 따른 전압경사의 변화

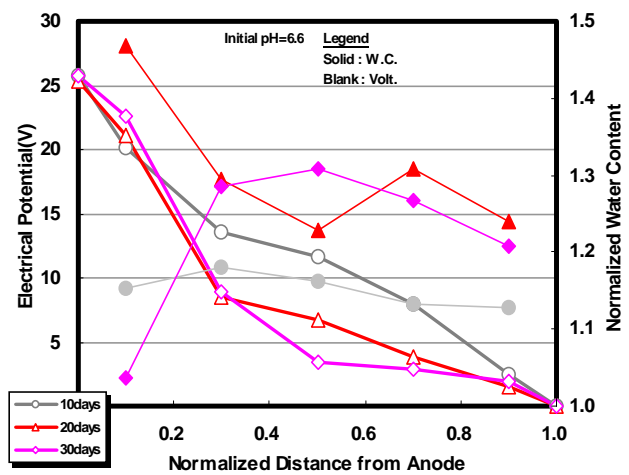


그림 7. 전압과 정규화된 함수비의 관계

#### 4.2 전압과 함수비의 관계

전압과 정규화된 함수비의 관계를 나타내는 그림 7의 경우 정화기간 10일에서는 거의 선형적인 전압 분포로 인하여 시료 내부에서의 함수비는 거의 유사한 값을 보인 반면, 정화기간 20일과 30일에서는 유사한 전압분포를 나타내었음에도 불구하고 양극쪽에서의 함수비가 전혀 다른 경향을 보이고 있다. 이는 20일에서의 전압경사가 0.3지점 이후 완만해지면서 0.1지점의 급격한 전압경사로 인하여 이동된 물이 이 영역에서 지체되어 함수비가 크게 증가된 것으로 사료된다. 이와 반대의 경향 때문에 30일에서는 0.1 지점에서의 함수비가 감소한 것으로 사료되지만, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 4.3 전류와 전압간의 관계

흙을 통과하는 전류는 흙의 전도도에 의존적이기 때문에 결국 간극수에 존재하는 이온종의 농도에 의존적이라 할 수 있다. 즉, 간극수에 존재하는 이온농도가 높을수록 흙을 통과하는 전류는 증가하게 되는 것이다(Hamdan, 2002). 그림 8에 제시된 바와 같이 모든 실험에서의 전류는 유사한 변화 양상을 보이고 있으며, 초기 전류가 증가한 것은 물의 전기분해로 인하여 생성된 산전선의 영향으로, 양극쪽에 인접한 영역에 존재하는 간극수의 전도도가 증가하였기 때문이며, 이후 전류가 감소하는 것은 pH Jump 영역에서의 물의 생성, 이온 고갈 및 흡착/침전 등으로 인하여 간극수에서의 이온농도가 감소하였기 때문이다.

그림 9의 경우 전압과 전류의 관계를 나타낸 것으로 약 40시간까지는 산전선의 영향으로 간극수에서의 이온농도 증가로 인하여 전류와 전압 모두 각 위치별로 증가하고 있으며 그 이후에는 전류와 전압이 동시에 감소하기 시작하였다. 이는 간극수에 존재하는 납 이온이 음극쪽으로 배출됨에 따른 이온농도의 감소 때문이며 약 480 시간 이후 전류는 일정해진 반면 시료 내부에서의 이온이동으로 인하여 0.3 지점에서의 전압이 증가하는 것으로 나타났다.

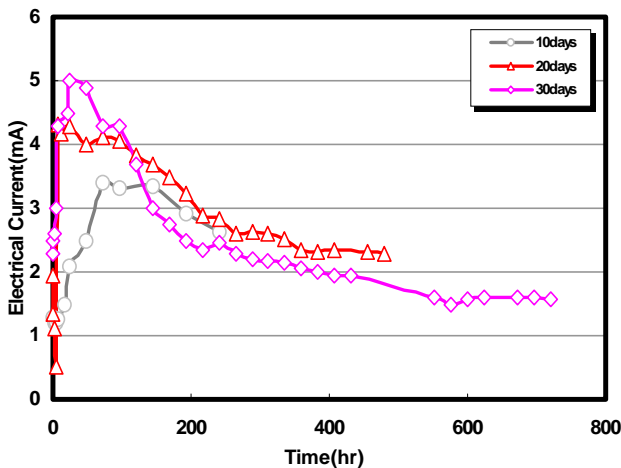


그림 8. 증가 시간에 따른 전류의 변화

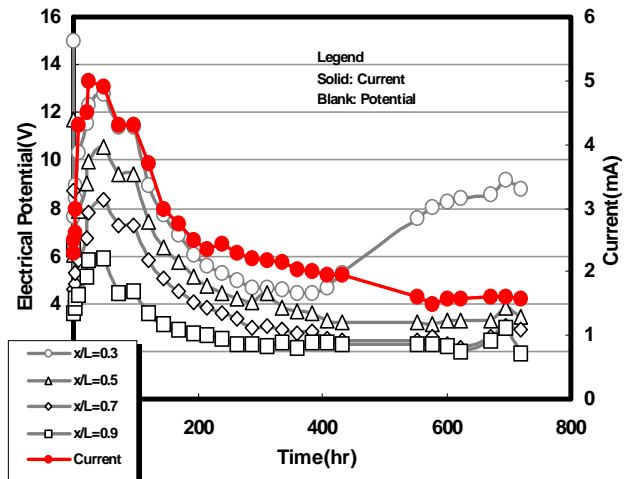


그림 9. 전압과 전류의 관계

#### 4.4 잔류 납농도, pH 및 전압간의 상관관계

정화기간별 시료 내부에서 잔류하는 납농도를 그림 10 그리고 11과 같이 pH와 전압에 대하여 각각 도시하여 보았다. 먼저, 그림 10의 경우 정화기간 10일에서 양극쪽에 인접한 0.1 지점에서 납의 누적이 발생한 것은 이후 영역인 0.3 지점에서의 pH가 초기 값인 6.6으로 변화하지 않았고, 정화기간이 상대적으로 짧아 납이 이 지점까지 이동하지 못한 것으로 판단된다. 그러나 20일 이후에는 지속적인 이동이 발생하여 거의 전 구간에서 납 이온의 감소가 나타났고, 30일에서는 20일과 유사한 pH가 시료 내부에서 생성되었음에도 불구하고 0.1 지점에서의 납 농도가 가장 작게 나타났다. 이는 산전선의 이동속도와 염기전선의 이동속도가 평형상태에 도달하더라도 전기이온이동(EM)에 의해 지속적으로 납 이온이 이동하였다는 것을 나타내는 결과라 판단된다. 이는 그림 11에서의 전압경사의 변화로 역시 설명가능하다. 즉,

30일의 경우 전압경사가 0.5지점까지 상당히 급하게 형성된 것은 이온의 고갈로 인한 전기전도도의 감소가 그 원인이며, 이로 인하여 이 지점에서의 EM 속도가 가장 크게 나타났을 것으로 판단된다. 따라서 많은 양의 납 이온이 음극쪽으로 이동하였을 것이다.

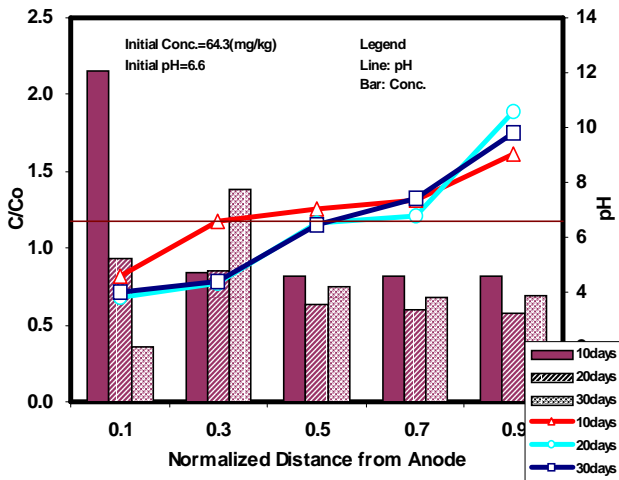


그림 10. 잔류 납농도와 pH와의 관계

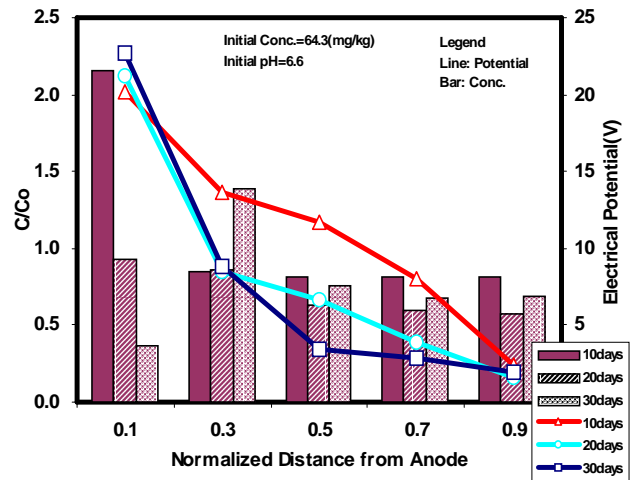


그림 11. 잔류 납농도와 전압과의 관계

## 5. 결론

본 연구에서는 정화기간이 불포화 조건에서의 자연토의 동전기 정화 특성에 미치는 영향을 규명하기 위해 시험 기간을 10일, 20일 그리고 30일로 변화시키면서 실내 컬럼 시험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 산전선의 경우 10일동안 0.75cm/day 속도로 음극쪽을 향하여 이동하였으며, 일정기간 이후에는 산전선의 영역이 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 즉, 산전선의 이동속도는 정화기간이 증가함에 따라 제곱함수의 특성으로 감소하여 염기전선의 이동속도와 평형상태에 이르렀다.
2. 정화기간 10일에서는 거의 선형적인 전압분포로 인하여 시료 내부에서의 함수비는 거의 유사한 값을 보인 반면, 국부적인 전압분포의 변화로 인하여 정화기간 20일과 30일에서는 양극쪽에서의 함수비가 다른 경향을 보였다.
3. 상대적으로 산전선의 이동이 작았던 정화기간 10일에서는 양극쪽에 인접한  $x/L=0.1$  지점에서 납의 누적이 발생하였으나, 20일 이후에는 지속적인 이동이 발생하여 거의 전 구간에서 납 농도의 감소가 나타났고, 30일에서는 20일과 유사한 pH가 시료 내부에서 생성되었음에도 불구하고 전기이온이동을 통해 0.1 지점에서의 납까지 음극쪽으로 이동하였다.

## 참고문헌

1. 김순오 (2001) “중금속 오염 토양 및 슬러지의 전기동력학적 처리”, 광주과학기술원 박사학위논문.
2. 이군택 (2002) “동전기력 공정을 이용한 경유 오염 난투수 토양의 생물학적 복원”, 서울대학교 박사학위논문.
3. 윤삼석 (2002) “Electrokinetic 기술에 의한 광산퇴적토의 중금속 정화 특성”, 경성대학교 박사학위논문.
4. 한상재 (2000) “Electrokinetic 기법에 의한 오염토의 전기삼투와 중금속 이동 특성”, 중앙대학교 박사학위논문.

학위 논문.

5. 장경수 (2003) “중금속 오염토에 대한 동전기 정화효율의 향상기법”, *인하대학교 박사학위논문*.
6. 정하익 (1996) “Electrokinetic 정화기술에 의한 오염지반내의 중금속 제거” *인하대학교 박사학위논문*.
7. Acar, Y. B., and Alshawabkeh, A. N. (1993). "Principles of electrokinetic remediation", *J. of Environ. Sci. Technol.*, Vol. 27, No. 13, 2638-2647.
8. Acar, Y. B., and Alshawabkeh, A. N. (1996a). "Electrokinetic remediation. I: Pilot-Scale tests with lead-spiked kaolinite", *J. of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 3, 173-185.
9. Acar, Y. B., and Alshawabkeh, A. N. (1996b). "Electrokinetic remediation. II: Theoretical model", *J. of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 3, 186-196.
10. Alshawabkeh, A. N. (2001) "Basic and Applications of Electrokinetic Remediation", *Handouts Prepared for a Short Course*, COPPE-UFRJ.
11. 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, 797-815.
12. Gray, D. H., and Mitchell, J. K. (1967) "Fundamental aspects of electro-osmosis in soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation*, Vol. 93, SM 6, 209-236.
13. Hamdan, A. Z. (2002), "Speciation, Distribution and Mobility of Heavy Metals in Soils during Electrokinetic Remediation", *University of Illinois at Chicago, Ph.D Thesis*.
14. Hamed, J., Acar, Y. B., and Gale, R. J. (1991) "Pb(II) removal from kaolinite by electrokinetics" *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 2, 240-271.