

## 토질조건에 따른 납 오염토양의 Electrokinetic 정화 효율

김병일, 조용실\*, 한상재\*\*, 김수삼  
한양대학교 토목환경공학과 (geokbi@orgio.net)  
\*중앙대학교 토목공학과 (nicecys@orgio.net)  
\*\* 한양대학교 공학기술연구소(herp@orgio.net)  
한양대학교 토목환경공학과 교수(kimss@hanyang.ac.kr)

### 요 약 문

In this study, electrochemical characteristics variation and removal efficiency with initial pH and mineral compositions during electrokinetic remediation of lead contaminated soils were investigated. Test results showed that heavy metal transportation affected by soil characteristics and electrochemical characteristics varied during electrokinetic remediation. Therefore, in the application of enhanced electrokinetic remediation technique to increase removal efficiency, discrete selection of enhanced technique with characteristics of targeted soil were needed.

**key words** : electrokinetic remediation, soil characteristics, electrochemical characteristics, lead

### 1. 서론

오염된 지반으로부터 중금속을 제거하는 여러 방법 중 electrokinetic (이하 EK) 현상을 이용한 오염지반의 정화는 많은 연구자들에 의해 관심이 증대되고 있다. 그 이유는 전통적인 정화방법인 양수처리(pump and treat) 또는 토양세척법(soil washing) 등으로 정화할 수 없는 세립질 지반을 원위치에서 정화하기 위한 효과적인 대안으로 제시되고 있기 때문이다 (Acar and Alshwabkeh 1993; Alshwabkeh et al. 1999).

현재까지 대부분의 EK에 관한 연구는 kaolinite나 illite와 같은 순수점토 또는 혼합점토를 이용하여 실험을 수행하였다. 그러나, 실제 현장토의 거동은 유기물함량, 산화물의 형태 등에 따라 다른 경향을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 현장토의 EK 적용성을 파악하고 동일한 지역의 토질특성에 따른 정화특성을 규명하고자 하였다.

### 2. 실험

본 연구에서는 경기도 안산시 인근 공사현장에서 채취한 표토(0.3m)와 심토(5m)시료를 직사광선이 닿지 않는 곳에서 통풍이 잘되게 헤쳐놓고 풍건시킨 다음 고무망치로 분쇄하여 0.425mm(#40)체를 통과한 시료를 압밀시켜 액성한계 근처의 함수비를 갖도록 재조성하여 사용하였다. 또한 시료의 완충능을 평가하기 위하여 Yong et al.(1990)이 제안한 방법에 준하여 완충능 실험을 실시하였다. 시료의 화학적 구성과 공학적 특성을 각각 Table 2.1과 2.2에 정리하였다. 실험 조건은 Table 2.3에 나타내었으며 EK 실험장치의 구성을 Fig. 2.1에 나타내었는데 EK 정화실험기는 크게 정화셀, 전원공급장치, 계측장치, 기타 부속장치로 분

류할 수 있다. 실험장치는 EK 정화 실험셀과 유출수를 측정하는 메스실린더, 전원공급장치, 양극부의 일정수위를 유지하기 위한 mariotte bottle 그리고 전압과 전류의 측정장치로 구성되어 있다. 정화셀은 시료셀과 흑연판을 부착한 전극부, 실험동안 시료내의 전압을 측정하기 위한 전압측정 포트가 구성되어 있다.

실험 중 전압 분포와 전류밀도의 변화, 전기삼투 유량을 측정하였고, 실험이 종료된 후 시료를 10등분하여 각 section의 pH와 납농도를 분석하였다. 납농도는 토양오염공정시험법의 전처리를 통해 채취한 용액을 AAS (Varian spectrAA 220)을 이용하여 분석하였다.

Table 2.1 Chemical Composition of natural soil, mine tailing and MSWIF.

Chemical Composition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
Natural soil (0.3m)	61.33	18.47	6.07	1.32	0.83	1.32	3.29	1.36	0.10	0.17	6.58	100.37
Natural soil (5m)	63.65	17.35	5.40	0.73	0.87	1.21	3.64	0.82	0.10	0.14	6.66	100.57

Table 2.2 Index Properties of natural soil.

Index Properties	Gs	Liquid limit	Plastic limit	% passing No.200 sieve	USCS
Natural soil 1 (0.3m)	2.65	35.6	25	19.9	SC
Natural soil 2 (5m)	2.66	36.7	26.9	17.5	SC

Table 2.3 Test conditions for electrokinetic test.

	Spiked lead con. (mg/kg)	Detected lead con. (mg/kg)	Duration (days)	Voltage (V)	Initial pH
NS-T1	1,000	690.3	12	35	5.49
NS-T2	1,000	944.0	12	35	8.07

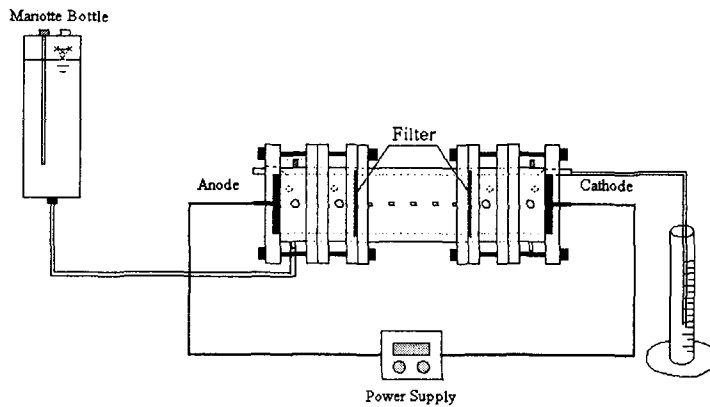


Fig. 2.1 Experimental set up of EK remediation.

### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3.1은 실험에 사용한 2가지 시료에 대한 적정곡선을 작성하여 나타낸 것이다. Fig. 3.1에서 볼 수 있듯이 동일한 산 첨가량에 대하여 산완충능은 natural soil 2가 natural soil 1보다 크게 나타났다. 특히 natural soil 1의 경우, 시료를 투입하지 않고 산용액만 첨가한 blank 곡선과 거의 같은 거동을 보이는 것으로 볼 때 산에 대한 완충능이 거의 없음을 알 수 있다. 반면 natural soil 2의 경우 산이 첨가됨에 따라 natural soil 1의 pH에 근접하였으나 10cmol/kg 이후 적정곡선이 기울기가 급격히 감소함을 보여 시료의 완충능에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

한편 Table 2.3의 초기 납추출농도는 약 250 mg/kg의 차이를 보이는데, 그 이유는 NS-T1시료가 NS-T2시료보다 중금속의 결합력이 큰 점토함유량, 철산화물, 인의 함유량이 약간 높기

때문인 것으로 판단되며 이러한 거동이 EK 거동에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 시료의 초기 pH 조건, 완충능, 기타 산화물의 함량 등이 EK 거동에 크게 영향을 미치는 인자인 것으로 판단되며 이러한 결과는 Fig. 3.2에서 확인할 수 있다.

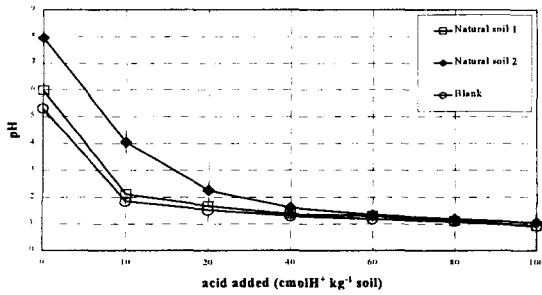


Fig. 3.1 pH titration curves of natural soil 1 and 2.

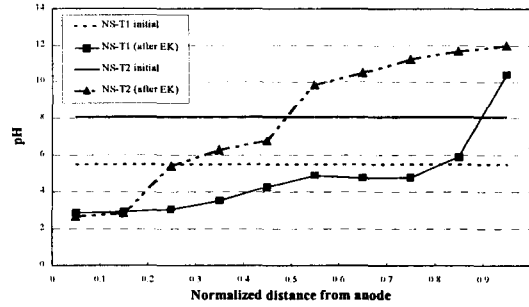


Fig. 3.2 pH variation in soil after EK treatment.

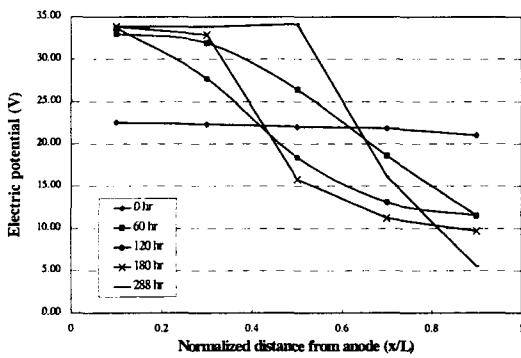


Fig. 3.3 Electric potential variation during NS-T1 test.

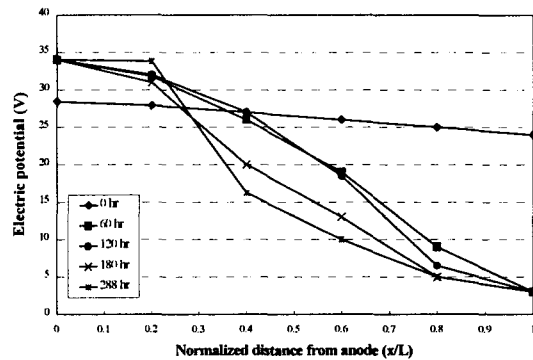


Fig. 3.4 Electric potential variation during NS-T2 test.

Fig. 3.3과 3.4는 EK 정화과정동안 전압의 변화를 나타낸 것이다. 시간이 경과함에 따라 양극쪽의 전압경사는 평탄화되고 음극쪽은 급격한 전압경사의 변화를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 초기 pH가 낮은 시료의 전압경사는 양극으로부터 정규화한 거리 약 0.6부근에서 급변하였지만 초기 pH가 높은 Fig. 3.4에서는 양극으로부터 정규화한 거리 약 0.3부근에서 급변함을 알 수 있다. 이와 같이 전압경사가 급변하는 지점은 Fig. 3.2의 pH 분포도에서 pH가 급변하는 지점과 일치한다.

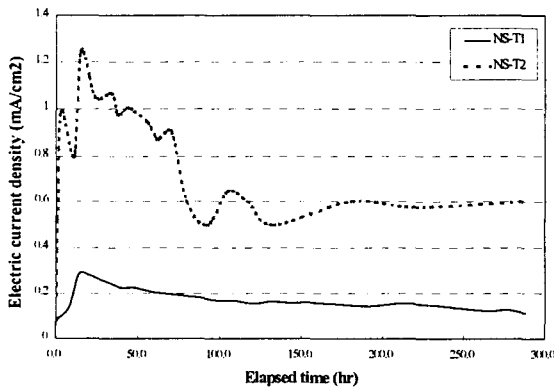


Fig. 3.5 Variation electric current density during EK treatment.

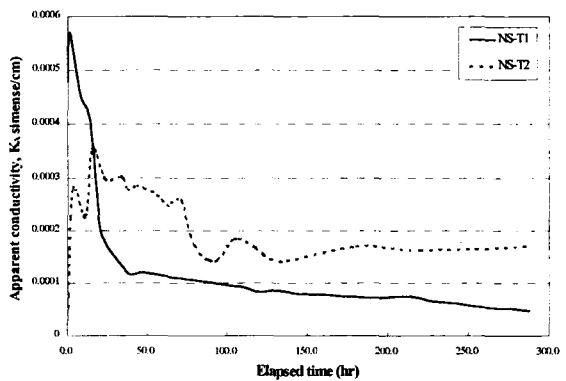


Fig. 3.6 Variation apparent conductivity during EK treatment.

Fig. 3.5와 3.6은 EK 처리동안 두 시료의 전류밀도의 변화와 겔보기 전도도의 변화를 나타낸 것이다. 초기 pH가 낮은 NS-T1보다 초기 pH가 높은 NS-T2의 전류밀도가 높게 발현되었으나, 겔보기 전도도의 경우 초기에는 NS-T1에서 오히려 높게 나타났다. 이러한 차이는 상대적으로 초기 pH가 낮기 때문에 이온의 탈착과 이동이 활발함을 의미하는 것이다. 전류는 초기에 증가하였다가 이후 천천히 감소하는 경향을 나타내었다. Li et al.(1997)은 초기에 전류가 증가하는 이유는 낮은 pH영역에서 흡 표면으로부터의 탈착과 침전물의 용해에 따른 이온종의 증가때문이라고 제시하였다. 또한 시간경과에 따른 전류밀도의 감소와 그로 인한 전기전도도의 감소는 일반적으로 산과 염기가 만나 물이 형성되거나 전극에 침전물이 형성되기 때문이다(Acar and Alshwabkeh 1993, Sah and Lin 2000). 전반적으로 전류밀도와 겔보기 전도도의 변화는 유사한 경향을 나타내었다.

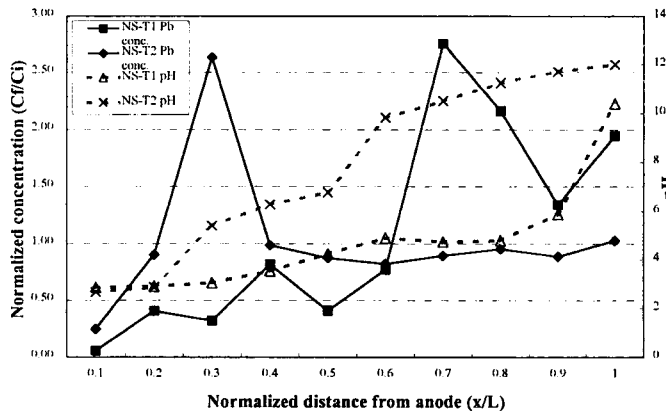


Fig. 3.7 Relationship between normalized concentration of Pb(II) and pH in soil after EK treatment.

Fig. 3.7은 EK 실험종료 후 납의 초기농도에 대한 상대농도와 pH와의 관계를 나타낸 것이다. NS-T1이 NS-T2보다 음극방향으로 더 많이 이동하였음을 알 수 있으며 이때의 pH와의 관계를 살펴보면 납이 누적된 지점은 pH가 약 5이상으로 급변하는 지점이며 이 지점은 Fig. 3.3과 3.4에 나타낸 전압이 급변하는 지점과 일치한다.

#### 4. 결론

납으로 오염된 EK 정화 시 시료의 초기 pH와 광물의 조성등의 토질특성에 따라 시료내의 납의 이동특성에 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한 전류밀도, 전기전도도, pH의 전기화학적 변화에 도 상당한 차이가 발생함을 알 수 있었다. 따라서, 자연토의 EK 정화 시 정화효율을 증진시키기 위한 향상기법의 선택 및 적용시 이러한 초기 pH와 광물조성을 고려하여야 할 것으로 판단되며, 시료의 물리화학적, 전기화학적 특성에 관한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 5. 참고문헌

1. Acar, Y. B. and Alshwabkeh, A. N. (1993). "Principles of Electrokinetic Remediation." *Environmental Science and Technology*, Vol. 27, No. 13, 2638-2647.
2. Li, z., Yu, J. W., and Neretnieks, I. (1997). "Removal of Pb(II), Cd(II) and Cr(III) from sand by electromigration." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 55, 295-304.
3. Yong, R. N., Warkentin, B. P., Phadungchwit, Y. and Galvez, R. (1990). "Buffer capacity and lead retention in some clay materials." *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 53, 53-67, 1990.