

# 토양세척법과 동전기 정화 기술을 이용한 중금속 오염지반의 원위치 정화

김병일, 한상재, 이군택\*, 김수삼

한양대학교 토목환경공학과, \*서울대학교 농생대 (geokbi@ihanyang.ac.kr)

## <요약문>

In this study the field-scale tests were performed in which in-situ E/K remediation technologies were applied, and then the results were present. For traditional E/K remediation method the efficiency of remediation is not large, but the enhanced method with citric acid significantly increases the removal efficiency. Also EDTA, reported as a good enhancement agent for removal of heavy metals, is similar to that of citric acid. Therefore citric acid is preferred rather than EDTA in view of the cost on the contaminant removal per unit concentration.

key word : Electrokinetic Remediation, Citric acid, EDTA

## 1. 서론

전국의 클레이 사격장의 토양이 심각하게 오염된 것으로 보고된 이후 이에 대한 적절한 정화 방안 수립이 지속적으로 요구되고 있다(환경부, 2000). 오염된 사격장의 정화를 위한 기술중 본 연구에서는 동전기 정화 기술에 대한 현장 적용성을 검증하고자 실제 운용되고 있는 클레이 사격장에서의 시험 시공을 수행하였다. 이때 대상 사격장 부지내에 대한 토양오염 정밀조사 결과 가장 오염이 심한 남의 경우 토양오염 우려기준을 초과하는 지역의 면적은 2379.79m<sup>2</sup>, 오염토양의 부피는 476m<sup>3</sup>, 무게는 대략 781톤 정도로 나타나 이 지역을 포함한 영역에서 시험을 수행하였다.

## 2. 시험시공

현장 시험 시공은 오염이 가장 심각한 지역에서 이루어 졌으며, 결정된 영역에 대하여 정화기간, 부지사용 허가 면적 등을 고려하여 최종 시험 시공 대상 단면을 선정하였다. 이때 정화 영역 깊이는 (+)극과 (-)극간 거리인 0.5m로 설정하였으며, 이는 지반 조사 결과 남의 대부분이 깊이 0~40cm내에 존재하였기 때문이다. 동일 전극간 간격은 1m 그리고 전극봉의 길이는 10m로 하였다. 시험 시공에서 적용된 조건은 Case 4의 경우 비향상 동전기 기법으로 흐름 조건은 Open system으로 상하부에서의 물의 유출입이 가능한 시스템이다. 향상된 동전기 시험의 경우 2가지로 구분하였다. 향상된 복합동전기(1)의

경우 상부(+)에서 시트르산이 용해되어 있는 세척용액을 주입하는 것이 그 특징이며(Case 1), 향상된 복합동전기(3)의 경우 세척제로 EDTA를 사용한 실험이며, 나머지 조건은 모두 동일하다(Case 3). 모든 조건에서 동일한 사항은 정화기간(148일), 전압의 크기(50V), 진공압(0.5kg/cm<sup>2</sup>), 각 섹션별로 총 5쌍의 전극봉이 포함된다는 것이다.

한편, 현장에 투입된 시스템은 크게 전력공급 시스템, 주입시스템, 추출시스템 및 중앙 통제실로 이루어져 있다. 또한, 중앙통제실에는 실시간 모니터링 및 제어가 이루어지도록 컴퓨터가 연결되어 있으며, 전체 시스템에 문제가 발생하였을 경우 실시간 전원 차단 및 경고 발생 등이 가능하여 신속히 대처할 수 있도록 하였다.

Table 1. Test conditions

Test	Case	Flushing solutions	Electrode		Vacuum	Voltage
			+	-		
Enhanced E/K 1	1	Citric(50mM)	⊙	⊙	0.5kg/cm <sup>2</sup>	48V
Enhanced E/K 3	3	EDTA(50mM)	⊙	⊙	0.5kg/cm <sup>2</sup>	48V
Traditional E/K 2	4	Water	⊙	⊙	0.5kg/cm <sup>2</sup>	48V

< Legend >  
 ⊙ : (-) electrode with stainless electrode(Extraction system)  
 ⊙ : (+) electrode with stainless electrode(Injection system)

### 3. 결과 및 고찰

토양세척공법과 동전기공법의 혼합형태인 향상된 동전기정화 공법의 적용성을 검증하고자 실시된 시험 시공 결과는 그림 1~3과 같다. 먼저 대조군으로 선택된 비향상 E/K공법의 경우 초기 오염농도가 비교적 낮은 지역에서 수행되었으며, 최종 농도는 초기 농도에 비해 크게 제거되지는 않은 것으로 나타났다. 이는 남의 형태가 주로 탄산결합형태를 취하고 있었기 때문에 양극에서 형성된 수소이온에 의한 이온교환이 원활하지 않아 제거가 다소 어려웠기 때문인 것으로 판단된다(그림 1). 그러나, 향상제로 유기산인 시트르산을 주입한 조건의 경우 초기 오염농도가 높았음에도 불구하고 최종 잔류농도는 작아 제거율이 상당히 높은 것으로 나타났다. 이는 킬레이트제인 시트르산과 납이온이 킬레이트를 형성하여 탈착이 비교적 수월하였음을 나타내는 결과이다. 또한, 본 연구에서의 대상 부지의 배경농도(Background concentration)가 6mg/kg~10mg/kg인 것으로 고려할 때, 더 이상의 제거는 큰 의미가 없을 것으로 판단된다(그림 2). 시트르산과 유사하게 기존 연구에서 중금속 제거에서 탁월한 효과를 보여왔던 EDTA를 향상제로 사용한 경우 역시 제거율은 상당히 높게 나타났다. 그러나 EDTA와 시트르산의 제거율은 비슷하게 나타났지만, 세척제의 단가를 고려하면 단위 농도를 제거하기 위한 정화비용은 시트르산이 훨씬 더 유리함을 알 수 있었으며, 추가적으로 시트르산은 지반에 잔류하더라도 생분해 될 수 있기 때문에 향후 향상된 E/K 정화 기술에 대한 적용성이 뛰어난 것으로 사료된다.

추가적으로 지면관계상 결과는 제시하지 않았지만, 시간경과에 따른 CASE 별 소비 전력량을 살펴보면 CASE 1의 경우, 148일동안 총 약 0.8kWh의 전력이 소비되었으며, CASE 3(EDTA를 주입제로 사용)의 경우 가장 큰 전력(약 1kWh)이 소모되었다. 이는 전 CASE에 걸쳐 동일한 전압을 가해주고 EDTA를 주입한 경우, 전류가 가장 크게 발생하였기 때문이다. CASE 4는 약 0.3kWh가 소비되어 가장 작은 전력 소모를 보였다. 이는 향상제가 사용되지 않은 조건으로 시료 내부에서의 전류 운반자인 이온이 작아 발생된 전류가 가장 작았기 때문이다.

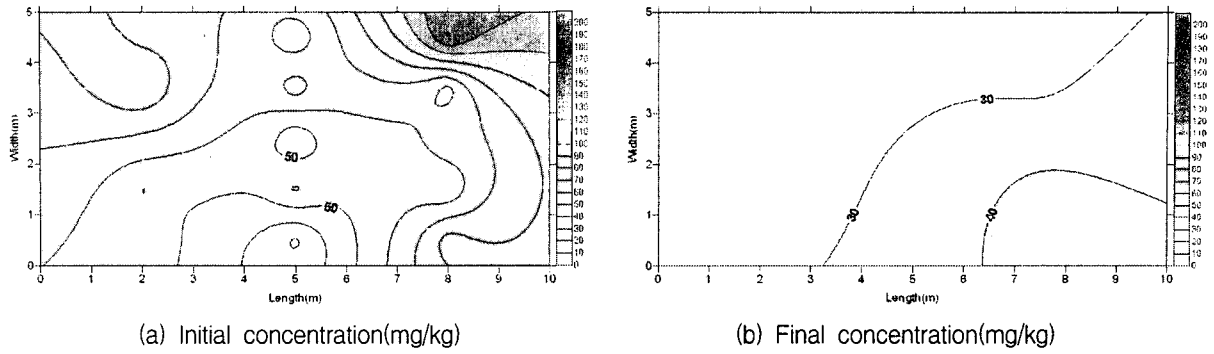


Fig. 1. The final concentration in the ground after traditional E/K 2 test

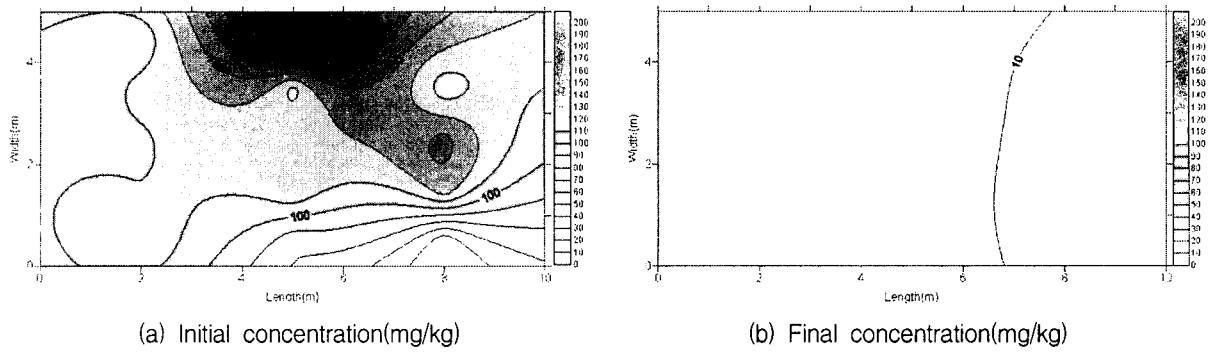


Fig. 2. The final concentration in the ground after enhanced E/K 1 test

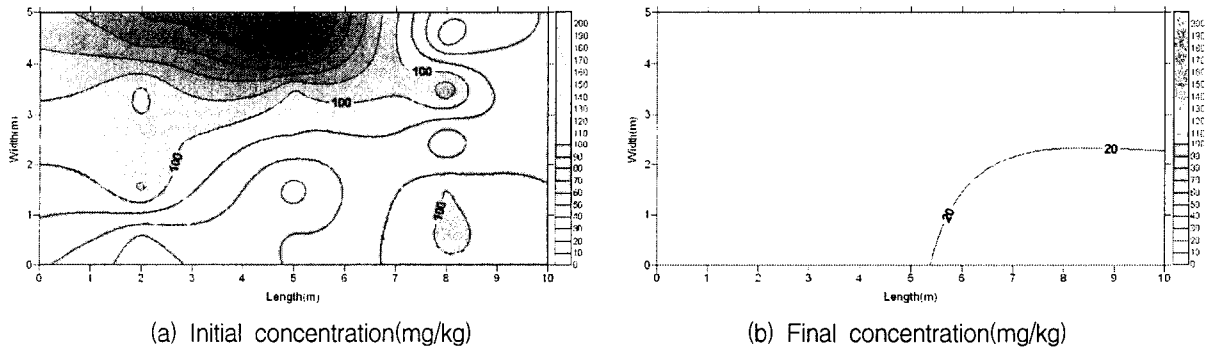


Fig. 3. The final concentration in the ground after enhanced E/K 1 test

#### 4. 결론 및 요약

본 연구에서는 중금속으로 오염된 사격장에 적용된 원위치 동전기 정화 기술에 대한 현장 시험시공 결과를 제시하였다. 향상제가 사용되지 않은 E/K 기법의 경우 최종 농도는 초기 농도에 비해 크게 제거되지 않은 것으로 나타났으며, 향상제로 시트르산을 주입한 조건의 경우 초기 오염농도가 높았음에도 불구하고 최종 잔류농도는 작아 제거율이 상당히 높은 것으로 나타났다. 또한, 중금속 제거에 탁월한 효과를 보이는 EDTA를 향상제로 사용한 경우 역시 제거율은 상당히 높게 나타났다. 그러나 EDTA와 시트르산의 제거율이 비슷하게 나타났지만, 세척제의 단가를 고려하면 단위 농도를 제거하기 위한 정화비용은 시트르산이 훨씬 더 유리함을 알 수 있었다.

## 5. 참고문헌

1. 한상재(2000). "E/K 기법에 의한 오염토의 전기삼투와 중금속 이동 특성", 중앙대학교 박사학위 논문.
2. Li, A., Cheung, K. A., and Reddy, K. R.(2000). "Cosolvent-enhanced electrokinetic remediation of soils contaminated with phenanthrene", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 126(6), 527-533.
3. Saichek, R. E.(2000). 'Electrokinetically enhanced in-situ flushing for HOC-contaminated soils", *Ph. D Thesis, University of Illinois at Chicago*.
4. Taha, M. R., Acar, Y. B., Gale, R. J. and Zappi, M. E.(1994). "Surfactant enhanced electrokinetic remediation of NAPLs in soils", *1st Int. Congress on Environmental Geotechnics*, Edmonton, Alberta, Canada, pp. 373-377.
5. Yeung A. T., Hsu, C. N. and Menon, R. M.(1996). "EDTA-enhanced electrokinetic extraction of lead", *J. of Geotechnical Engineering* 122(8), pp. 666-673.