

## 중금속으로 오염된 사격장토의 동전기 정화

-실내 파일럿 실험 중심으로-

한상재, 김병일, 이정철, 김수삼

한양대학교 토목환경공학과(1sj@korea.com)

### <요약문>

The purpose of this study is the development of hybrid horizontal electrokinetic(EK) remediation system on rifle range soil under unsaturated conditions. In order to remediate soil polluted by multi-species heavy metals, in pilot scale, a series of EK remediation tests are carried out. PVC and PDB(Plastic Drain Board) electrode systems that connected with the power supply of constant voltage and vacuum pressure of  $0.5\text{kgf/cm}^2$  are installed. The test results showed that the pH distribution in the sample is below 8, which is maintained until the test is finished, because of the injection of flushing solution. The final concentration, which is normalized by initial concentration, is ranged about 50 to 90%.

**key word** : EK remediation, Heavy metal, PDB

### 1. 서론

일반적으로 원위치 복원용 관정은 지표면에서 연직으로 오염심도까지 설치한다. 그러나 지면에 아스팔트 및 콘크리트 등으로 포장되어 있는 경우가 대부분이며 또한 오염물질이 지상 구조물 지하까지 확산되어 있는 경우가 많다. 따라서 수직 배관이 설치될 수 없는 경우가 많으며 가능하다고 하더라도 비용이 많이 드는 단점이 지적되어 왔다. 한편 산업 지역이 아니더라도 오염심도에 비해 면적이 넓은 부지의 경우 설치 개수의 증가로 인한 비용의 상승 및 지상의 유체 이송관의 설치로 인한 부지 이용성의 제약 등의 단점이 지적되어 왔다.

수평진공추출공법은 연직추출정(Vertical Well)을 이용하기 어려운 지형이나 오염지역의 오염물 분포가 얇은 깊이로 광범위하게 있을 경우 정화비용을 절감하기 위해서 그리고 지상 정화 장비의 가동 및 유지를 단순화시키기 위해서 이용되는 공법이다.

문헌 조사 및 본 연구 그룹의 자체 지반 조사를 토대로 한 결과 사격장의 경우 대부분 표층 50cm정도에서 오염 정도가 가장 심각한 것으로 나타나고 있으며, 앞으로의 지속적인 군부대 이전을 고려해 볼 때 사격장 오염부지의 정화에 대한 연구는 시급한 실정이다. 이에 본 연구에서는 실제 사격장의 표층 50cm를 정화 영역으로 선정하여 이에 대한 동전기 정화 기술의 적용 및 사격장토에 적합한 복합 동전기 기술을 개발하고자 실내 Pilot Scale 시험을 불포화조건에서 수행하였다.

## 2. 시료 특성

본 연구에서 사용된 시료는 서울시 OO사격장에서 약 20cm의 잔디층을 제거한 이후 약 20cm~60cm 깊이에 존재하는 시료로 교란된 상태로 채취하였다. 기본 특성은 표 1과 같고, 실내 파일럿 시험을 위해 No. 4번체로 체가름하여 사용하였다. 표 1에는 시료 특성을 제시하였다.

본 연구에서는 대상 종(Species)을 남으로 고려하여 이후 모든 농도 분석은 남에 대하여만 실시하였다. 남 농도 분석 방법은 국내 토양오염공정시험법을 준수하여 ICP 분석을 실시하였다.

표 1. 시료 특성

| Gs   | LL (%) | PI   | USCS | $r_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> ) | $\omega_{opt}$ (%) | 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. 복합수평동전기 정화 실험

복합수평동전기 정화 실험은 그림 1에 제시된 바와 같이 50×80×100cm의 대형토조에 최적함수비와 최대 흡윤단위중량을 고려하여 다짐도 95%이상이 되도록 시료를 다지면서, 전극봉을 수평으로 매설하고 일련의 동전기 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 전극봉은 2쌍으로 설치되었으며, 전극간 간격은 50cm이다. 수행된 시험의 조건은 표 2와 같다.

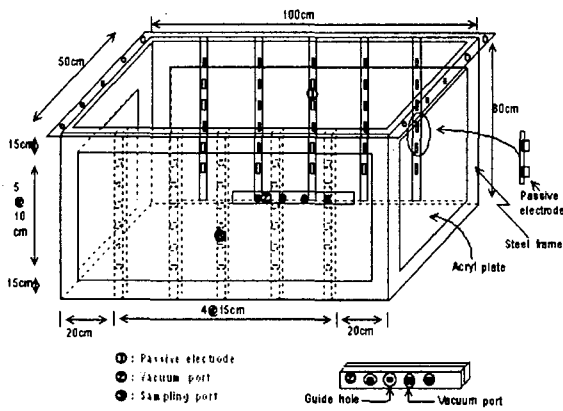


그림 1. 동전기 정화 실험 토조

표 2. 복합 동전기 정화 시험

| $C_0$ (mg/kg) | 기간 (days) | 전압 (V/cm) | 전극봉 |
|---------------|-----------|-----------|-----|
| 36.0          | 10        | 1.0       | PVC |
|               | 35        |           | PDB |

| 초기 함수비 (%) | 세척제         | 세척제농도 (mM) | 진공압 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|------------|-------------|------------|----------------------------|
| 13.1       | Citric acid | 50mM       | 0.5                        |

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 시료내 pH 변화

그림 2는 정화 기간중 샘플링을 통해 측정된 20일에서의 시료내 pH 분포를 나타낸 것이다. 양극(+)으로의 Citric acid 주입을 통해 전극봉이 위치한 곳에서 pH 변화가 급격한 것을 알 수 있다. 그림 3과 4의 경우 전극봉을 PVC전극봉과 PDB 전극봉을 사용한 위치에서의 정규화 거리 및 정화 기간별 pH 분포를 나타낸 것이다. 양극(+) 전극봉에서 멀어질수록 pH는 상승하였으며 또한, 모든 위치에서 진공압과 세척제의 영향으로 전체 pH가 8이하로 유지됨을 알 수 있다.

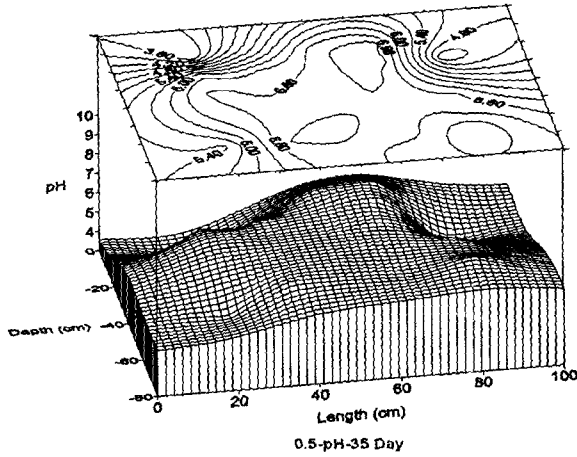


그림 2. 시험 완료 후 시료내 pH 분포

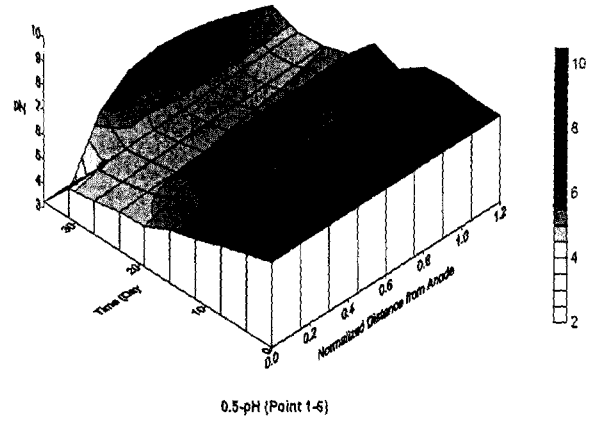


그림 3. 기간별 거리에 따른 pH 분포(PVC전극봉)

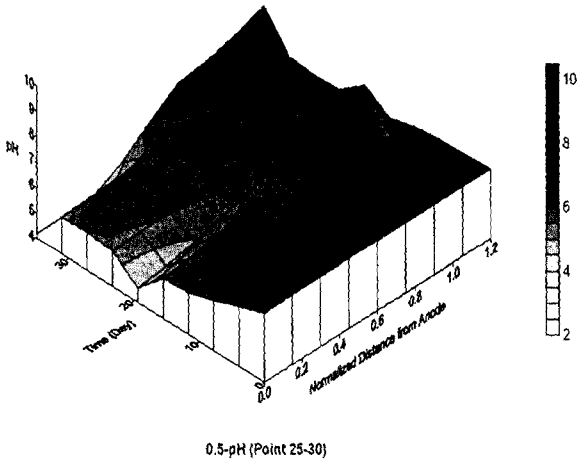


그림 4. 기간별 거리에 따른 pH 분포(PDB전극봉)

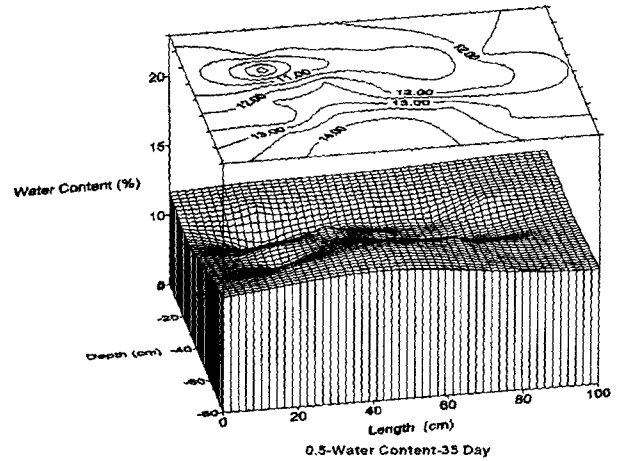


그림 5. 시료내 함수비 분포

## 4.2 함수비 변화

본 연구에서의 파일럿 실험은 불포화 조건에서 수행되었으며, 양극(+) 부근의 건조현상을 해결하고 납의 음극영역에의 침전을 방지하기 위하여 킬레이트제인 Citric acid(50mM)을 지속적으로 양극(+)에 주입하였다. 그림 5는 시험 종료 직전 위치별 함수비 분포를 나타낸 것으로 양극(+) 부근에서의 함수비가 크게 감소하지 않은 것으로 보아 건조현상을 방지한 것으로 판단되며, 추가적으로 토조 최하단에서의 함수비 변화가 크지 않은 것으로 보아 본 연구에서 도입한 진공추출공법으로 침층으로의 2차 오염은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

## 4.3 농도 변화

그림 16의 경우 정화기간 20일에서의 위치별 정규화된 납 농도 분포를 나타낸 것으로 대체로 전 범위에 걸쳐 초기 농도에 비해 약 80~90% 정도의 납이 잔존하는 것으로 나타났다. 그러나 정화기간 35일에서의 납 농도 분포는 약 50~90% 정도의 납이 잔존하였다. 따라서 정화기간이 더 길어진다면 지속적인 정화가 가능할 것으로 판단된다.

위치별 농도분포는 양극(+)에서보다는 음극(-)에서 더 작은 납농도를 보였다. 이는 주입된 세척제인 Citric acid로 인하여 납이 음극을 향하여 이동하였으며, 진공추출공법에 의해 음극에서 추출되었음을

나타내는 결과이다.

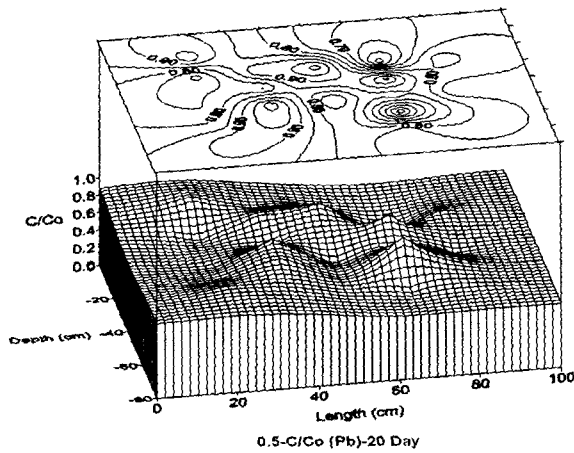


그림 6. 시료내 납농도(D=20일)

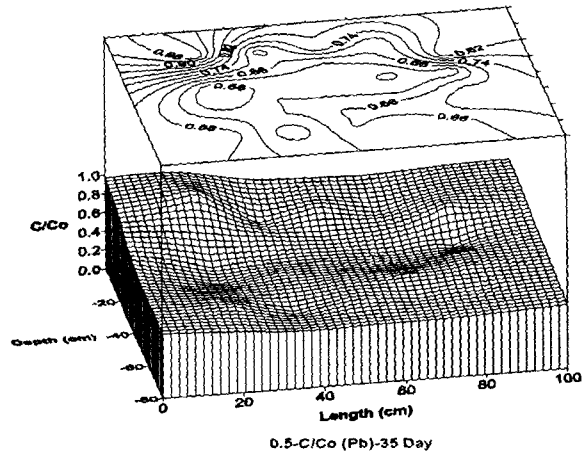


그림 7. 시료내 납농도(D=30일)

## 5. 결론

현장에서 교란된 상태로 채취한 오염된 사격장토를 대상으로 실내 파일럿 스케일의 복합수평동전기 정화 기술을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 양극(+) 전극봉이 위치한 곳에서 pH가 급격하게 변화하였으며, Citric acid(50mM)을 지속적으로 주입한 결과 양극(+) 전극봉에서 멀어질수록 pH는 상승하였으며 또한, 모든 위치에서 진공압과 세척제의 영향으로 전체 pH가 8이하로 유지됨을 알 수 있다.
- 2) 정화 기간이 경과함에도 불구하고 세척제의 주입을 통해 모든 위치에서 유사한 함수비 값을 보여, 양극(+) 부근의 건조현상을 방지하였으며, 토조 최하단에서의 함수비 변화가 크지 않아 심층으로의 2차 오염 우려는 없는 것으로 나타났다.
- 3) 정화기간 20일에서의 위치별 정규화된 납 농도 분포는 전 범위에 걸쳐 초기 농도에 비해 약 80~90% 정도의 납이 잔존하는 것으로 나타났다. 그러나 정화기간 35일에서의 납 농도 분포는 약 50~90% 정도의 납이 잔존하였다. 따라서 정화기간이 더 길어진다면 지속적인 정화가 가능할 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌

1. Alshawabkeh, A. N. (2001) Basic and Applications of Electrokinetic Remediation, Handouts Prepared for a Short Course, COPPE-UFRJ
2. 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.
3. Lindgren, E.R., Mattson, E. D. and Kozak, M.W.(1991), Electrokinetic Remediation of Contaminated Soils, Proceedings of the ER'91 Conference, Pasco, WA, pp. 151-158.
5. Lindgren, E. R., Matthew G. Hankins, Mattson, E. D., Patrick M. Duda(1998), Electrokinetic Demonstration at the Unlined Chromic Acid Pit, Sandia National Laboratory
6. Looney, B. B. and Falta, R. W.(2000), Vadose zone-Science and technology solutions, Battle Press