

《原著》

## 전극변환 동전기를 이용한 중금속 오염토양 처리에 관한 연구

최희철<sup>1</sup> · 이태진<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 환경공학과

<sup>2</sup>서울과학기술대학교 환경공학과

### A Study for Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil Using Electrokinetics with Swappable Electrode

Heechol Choi<sup>1</sup> · Tae-jin Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science & Technology

#### ABSTRACT

In this study, remediation of heavy metal contaminated soil was attempted by the electrokinetic process equipped with fixed or swappable electrode. Copper was more effectively removed with EDTA than citric acid. Zinc was much more removed than copper with both detergents. When electrokinetic with fixed electrode and detergents were applied to the contaminated soil, copper was removed about 28.52% ~ 35.25% and zinc was removed about 63.44% ~ 71.48%. When electrokinetics with swappable electrode and detergents were applied to the contaminated soil, the pseudo-first order reaction constants was higher about 16 ~ 50% than with fixed electrode in the case of zinc. It is conclusive that electrokinetics with swappable electrode could be an effective method for the remediation of heavy metal contaminated soil.

**Key words :** electrokinetic, swappable electrode, heavy metals, detergent

#### 1. 서 론

다양한 산업 활동의 증가와 끊임없는 개발로 인하여 지구가 날로 오염되고 있으며 환경보전의 문제가 큰 관심사로 부각되어지고 있다. 환경오염 중 토양오염은 수질오염이나 대기오염과는 달리 땅속에 숨어 있어서 쉽게 발견되지 않으며 그 피해가 순간 나타나는 것이 아니라 오랜 시간이 경과한 후에 나타나는 것이기에 사회적인 인식이 낮고 기술적 자립도도 낮은 실정이다.

현재 우리나라는 토양오염의 원인 물질들 중 21개 물질을 규제대상으로 규정하고 있으며, 그 중 카드뮴, 구리, 비소, 납, 아연, 니켈, 6가 크롬, 수은, 불소 등 9개 항목을 중금속으로 규제 하고 있어 토양오염에 중금속 규제 규정의 비중이 크다고 할 수 있다. 2006년 ‘폐금속광산 주변지역 환경오염실태 및 그 영향 조사’에 의하면 전국

폐금속 광산은 총 936개이며, 일반조사 및 개황조사 후 선정된 23개 광산의 정밀조사 결과 19개 광산이 토양오염우려기준을 초과하였다. 중금속류에 의해 토양이 오염되면 동식물에 독성을 나타내고 오랜 시간이 지나도 분해되지 않기 때문에 인위적으로 제거하지 않는 한 거의 영구적으로 축적되어 직간접적으로 인체에 심각한 영향을 미친다(Han et al., 2004).

중금속으로 오염된 토양에 대한 복원기술로는 토양 세척법(soil washing), 토양 세정법(soil flushing), 식물 정화(phytoremediation), 동전기 정화(electrokinetic remediation) 등의 다양한 방법들이 있다. 중금속오염토양 정화방법에 있어서 굴착하여 정화할 수 있는 현장에서는 토양 세척법(soil washing)을 많이 사용하고 있으나, 점토질의 경우엔 폐슬러지가 많이 발생하여 경제성이 떨어지고 2차 폐기물 발생이 있어서 입지가 작은 세립질 토양에는 적절하지 않

\*Corresponding author : leetj@seoultech.ac.kr

원고접수일 : 2012. 8. 17 심사일 : 2012. 10. 9 게재승인일 : 2012. 10. 9  
질의 및 토의 : 2012. 12. 31 까지

는 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2004). 반면, 세립질 토양에 흡착된 이온성 오염물질 제거를 위한 방법으로는 동전기 기술(Electrokinetic remediation: EK)이 각광을 받고 있다.

동전기 정화기술은 토양 내에 전극을 설치하고 전류를 흐르게 하여 전기적, 화학적, 수리학적 전도현상을 유발시켜 토양 내의 유체가 이동함으로써 오염물이 제거되는 방법으로 공급된 전기장에 의한 복합효과(coupling effect)에 의하여 토양 및 지하수로부터 오염물질을 제거할 수 있다고 보고된 바 있다(Hwang et al., 2004). 지반에서의 이러한 복합효과는 세립토에서 다양한 현상을 일으키는데, 토립자의 전기적 특성으로 인해 흡-물-전해질 또는 계면활성제 시스템에서 전기삼투(electroosmosis), 흐름포텐셜(streaming potential), 전기영동(electrophoresis), 침강포텐셜(sediment potential), 이온이동(ionic migration), 전기분해(electrolysis)의 동전기 현상이 발생된다. 전기삼투와 전기영동에서는 외부에서 전기장이 가해지며, 흐름 포텐셜과 침전 포텐셜에서는 표면에 관계된 흐름이 전기장을 유발한다. 한편 전기삼투와 흐름포텐셜은 고정된 고체상태에 적용이 되고, 전기영동과 침전 포텐셜은 이동이 자유로운 슬러리 상에 적용된다. 이온이동은 외부에서 전류가 가해졌을 때 극성을 따라 이동하면서 발생한다.

동전기 정화기술의 세립질 중금속오염토양에 대한 기술 적용은 연구적 단계에서 그 효율성이 인정되고 있으나 현장 적용 면에서 그 적용기술의 안정성은 아직은 많이 미흡한 단계이다. 기존 동전기 실험의 연구결과에 의하면 중금속 오염토양에 전류를 흘리게 되면 양극에서 발생한 H 이온에 의하여 산전선이 형성되고 중금속이 용출된다. 이렇게 용출된 중금속은 반대되는 극을 향하는데, 양극을 떠 중금속은 음극을 향하여 이동한다. 이러한 양이온성 중금속이 음극에서 발생한 OH에 의하여 형성된 음극근처의 염기전선을 만나면 이온을 받아 전기의 극성을 상실하여 이동이 중지되고 흡수에 머무르게 된다. 이러한 현상으로 음극 가까운 지점에서는 중금속이 쌓여 잔류농도 값이 높게 나타나고 토양의 공극도 막아 전기삼투흐름을 방해한다고 발표된 바 있다(Lee et al., 2002).

본 연구에서는 동전기 적용 시 발생하는 중금속 축적현상을 해소하기 위해 전극변환을 통하여 토양 공극 내 용액의 극성을 교체 해줌으로서 음극주변에서 발생하는 염기전선을 방지하고자 하였다. 이를 위해 일정시간동안 양쪽 전극에 양극과 음극을 교차하여 공급하는 전극변환형 동전기 기술을 적용하여 오염토양 내 중금속의 제거효율을 살펴보았다. 동전기 적용 시 세정제로 시트르산(citric

**Table 1.** Characteristics of the contaminated soil

Components	Index value
Moisture Content	9.21%
pH	7.27
Bulk Density	1.228 g/cm <sup>3</sup>
Particle Density	2.220 g/cm <sup>3</sup>
Porosity	0.447

acid)과 EDTA를 이용하였으며 전극봉으로는 스테인리스, 백금, 그리고 흑연을 사용하여 그 결과를 비교 하였다. 가일차반응식을 이용하여 전극을 고정된 상태에서 동전기를 적용했을 때와 전극을 변환하면서 동전기를 적용하였을 때 중금속 제거효율을 비교 검토하였다. 토양은 구리 또는 아연으로 오염된 토양을 사용하였으며 현장 적용성을 확보하기 위한 실험에서는 아연으로 오염된 실제 현장 토양을 이용하여 실험하였다.

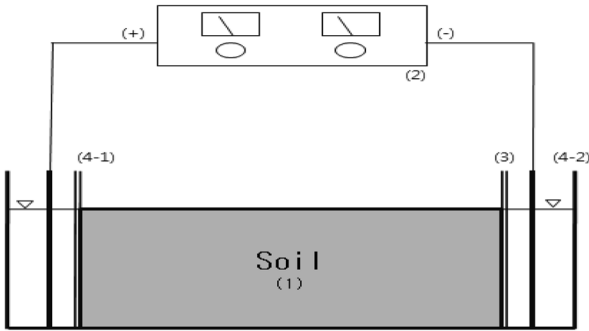
## 2. 실험재료 및 장치

### 2.1. 토양 시료

실험에 사용된 현장 토양은 안산공단의 00산업(주) 부지 내 토양으로 실험에 균일한 입경만의 토양을 사용하기 위하여 눈금간격 10 mesh를 통과하여 체거름된 토양 일정량을 채취하였으며, 중금속이 토양 내 고르게 분포될 수 있도록 충분히 교반을 하면서 토양을 혼합하였다. 현장성을 확보하기 위해 인위적인 pH의 조정이나 수분의 조정은 실시하지 않았다. 실험에 사용된 토양은 양토(Loam)이었으며 그 물리적 특징은 Table 1에 나타난 바와 같다.

### 2.2. 세정제

토양세정제로는 gluconate, oxalate, Citranox, ammonium acetate, phosphoric acid, EDTA, citric acid, and nitri-lotriacetic acid(NTA) 등이 있으나 EDTA, NTA, 그리고 시트르산이 비교적 효과적인 세정제로 알려져 있다. 그 중 NTA는 Class II 발암물질로 규정되어 있어 현장 적용이 사실상 어렵다(Peters, 1999). 따라서 본 실험에서는 EDTA와 시트르산을 중금속오염 토양 세정제로 선정하였으며, EDTA(Duksan Pure Chemical)의 경우 0.001, 0.005, 0.01, 0.03, 그리고 0.05 M의 농도로 제조하였으며 Citric acid(Kanto Chemical)의 경우 0.005, 0.01, 0.03, 0.05, 그리고 0.1 M로 제조하여 토양 공극을 포화할 수 있도록 공급하였다.



- (1) Electrokinetic remediation set
- (2) Power supply
- (3) Plastic web & filter paper
- (4-1) Anode
- (4-2) Cathode

Fig. 1. Schematic diagram of the electrokinetic process.

2.3. 분석 및 실험 방법

토양 시료에 포함되어 있는 중금속의 초기 농도를 알아보기 위하여 함량실험을 하였으며, 시료 내 총 중금속함량은 Chlopecka et al.(1996)과 Ure(1990)이 제시한 방법(HF/HClO<sub>4</sub>/HNO<sub>3</sub>분해법)을 이용하였다. 분해가 완료된 시료 내 중금속의 농도는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP: Inductively Coupled Plasma, Model No.: HP-4500, Hewlett Packard Co.)를 이용하여 분석하였다. 이외의 실험은 토양공정시험법에 준하여 실험하였다.

2.4. 실험 장치

동전기(electrokinetic) 실험장치는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 전기적 절연과 측면에서의 압력을 견딜 수 있는 아크릴 판을 사용하였으며, 장치는 너비 5 cm 높이가 3 cm 그리고 길이 12 cm의 규격을 가지며 양쪽 수조 내 전극의 간격은 10 mm로 하였다. 실험에 사용된 전극은 흑연, 백금, 또는 스테인레스 전극을 사용하였다. 또한 여과지와 아크릴 망으로 구성된 스크린을 설치하였고 여과지는 이온성 물질의 투과를 원활히 하도록 하고 토양 시료 등 입자상 물질은 수조 내 유입을 막기 위하여 사용되었으며, 아크릴 망은 여과지를 지지하는 역할을 한다. 동전기 반응장치의 운전은 양쪽 수조에 EDTA, Citric Acid, 또는 증류수의 용액을 채운 후 동전기 공급과 더불어 주기적으로 세정제를 주입하였으며, 최종반응 시간(72시간) 이후 토양시료를 5개의 section으로 자른 후 각 section에 대하여 토양의 pH와 중금속 구리와 아연의 잔류량을 분석하였다(Jee et al., 2006).

전극변환실험은 Fig. 1에 나타난 형식을 유지하면서 너비 0.5 m × 길이 1.0 m × 높이 1.2 m의 반응조가 되도록

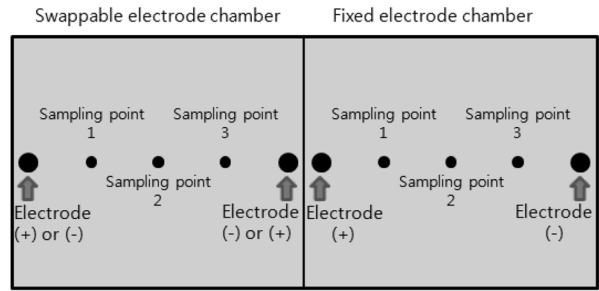


Fig. 2. Sampling points of electrokinetic chamber.

2개조로 나누어 2개의 독립된 공간으로 제작하여 실험하였다. 전극봉은 반응조 안에 높이 1.1 m PVC 유공관 내 70 cm 간격으로 2개씩 고정하여 스테인레스로 제작한 전극봉을 장착하였고, 두 개의 반응조 중 1개의 반응조에는 양극과 음극을 24시간 간격으로 전극변환을 하여 실험하였으며, 다른 한쪽의 반응기에서는 비교 실험을 위해 양극과 음극을 고정하여 정전압을 걸어주었다. 전력 공급은 정전압 1.43 volts/cm(100 V)로 공급하였고 시료는 24시간마다 양쪽 전극의 거리를 4등분하여 3지점에서 채취하였다(Fig. 2).

3. 실험결과 및 논의

3.1. 세정제를 이용한 중금속의 용출특성

토양세척법은 오염된 토양을 세정제로 정화하는 방법으로 기존의 많은 연구들이 선행되어 그 결과를 발표한 바 있다. Lee et al.(1993)과 Amrate et al.(2005)과 Hanay et al.(2009)에 의하면, 중금속의 용출에 EDTA가 탁월한 효과가 있다고 하였고, Kang(1994)는 4가지 저분자 유기산(acetic acid, citric acid, oxalic acid, succinic acid)을 사용하여 실험 한 결과 시트르산은 납의 용출에 적합하며 (Yang & Lin, 1998), 옥살산과 석신산은 구리와 아연의 용출에 적합하다고 하였으며, Cheong et al.(1997)은 납과 구리의 용출에는 시트르산, 아연의 경우에는 옥살산이 적합하다고 보고 한 바 있다. 본 실험에서는 기존의 실험에서 비교되지 않은 EDTA와 저분자 유기산중 시트르산을 세정제로 선정하고 그 처리 효율을 비교하여 보았다.

오염된 토양의 초기 구리농도는 76,450 mg/Kg이며, EDTA 0.001 M에서는 1.75%, 0.005 M에서는 1.92%, 0.01 M에서 4.18%, 0.03 M에서 6.70%의 제거효율을 보였으며, 0.05 M에서 약 7.5%의 제거효율을 나타내었다. 또한 각각의 EDTA 농도에서 반응이 시작되고 30분 이내에 모든 EDTA 농도에서 중금속의 용출이 완료되어 탈착

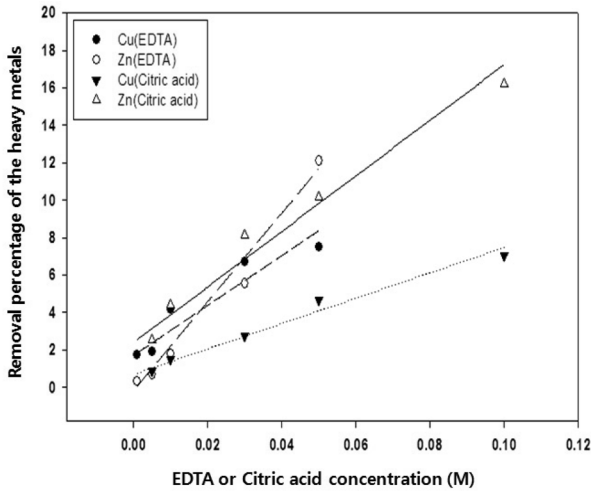


Fig. 3. Removal ratios of copper and zinc with EDTA or citric acid addition in the contaminated soil.

평형량을 나타내었다. 아연에 오염된 토양의 초기농도는 56,015 mg/Kg이며, EDTA 0.001 M에서는 0.33%, 0.005 M에서는 0.70%, 0.01 M에서 1.78%, 0.03 M에서 5.54%, 0.05 M에서 12.10%의 제거 효율을 보이고 있다. 이러한 결과는 EDTA의 세정효과에 있어서 아연이 구리 보다 더 민감하다는 것을 나타낸다.

시트르산을 사용한 경우 구리 오염 토양의 경우 0.005 M에서 0.9%, 0.01 M에서 1.53%, 0.03 M에서 2.73%, 0.05 M에서 4.66%, 0.1 M에서 7.03%로 나타났다. 아연 오염 토양의 경우 0.005 M일 때 2.51%, 0.01 M일 때 4.41%, 0.03 M일 때 8.12%, 0.05 M일 때 10.17%, 0.1 M일 때 16.19%의 제거율을 나타내었다. 시트르산의 경우에서도 아연의 제거효율이 구리의 제거효율보다 좋은 것을 알 수 있다. EDTA와 시트르산에서의 구리의 아연의 제거특성은 기존의 연구논문(Jee et al., 2006)과 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 3에 EDTA와 Citric acid의 농도에 따른 구리와 아연의 제거효율을 종합적으로 나타내었으며 세정제의 종류에 상관없이 구리보다 아연의 제거효율이 높은 것으로 나타났으며 세정제의 농도에 비례하여 중금속 제거량은 비례하였다. 구리의 경우 세정제로서 EDTA를 사용하였을 때 용출능이 높다는 것도 확인할 수 있었다.

3.2. 전극 별 중금속 오염 토양의 제거 효율

토양 내에 전극을 삽입하고 직류전원을 연결하면 전자는 전원의 음극으로부터 양극으로 흐른다. 이때 음극에서는 용액에 전자를 주고 양극에서는 용액으로부터 전자를 얻어서 전극 바로 주위에서 물은 이온화되어 전기분해가

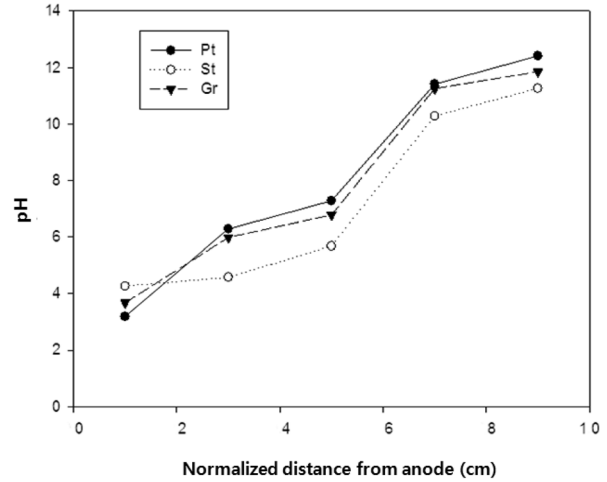


Fig. 4. pH profiles with different electrodes (Pt : platinum, St : stainless steel, Gr : graphite) at each node of the soil column.

일어난다. 따라서 양극에서는 물의 산화가 일어나고 음극에서는 물의 환원이 일어나므로 양극에서는 산소기체와 수소이온이 방출되고 음극에서는 수소기체와 수산화 이온이 방출되어 양극에서는 산전선(acid front)이 생성되고 음극에서는 염기전선(base front)이 형성된다(Kim et al., 2001; Rajic et al., 2012).

본 실험에서는 전극봉을 흑연, 백금, 또는 스테인레스 전극을 사용하여 포화된 토양에 9 V의 전압으로 전류를 흘려 준 후 반응기 내 한쪽 전극에서 1, 3, 5, 7, 9 cm 떨어진 지점에서 72시간 후 pH를 측정하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 전극 종류에 따른 각 시료채취 지점에서 pH 차이는 미미하였으나 양극으로부터 음극 쪽으로 산성에서 염기성으로 변화하는 양상이 토양에 동전기 공급하였을 때 보여지는 전형적인 pH 변화양상을 나타내었다.

구리오염 토양에 0.05 M EDTA를 주입하고 전극에 전원을 공급하였을 때 구리의 제거효율은 백금, 스테인리스, 그리고 흑연전극에서 각각 31.51%, 35.25%, 그리고 29.85%로 분석되었다. 아연 오염 토양의 경우, 같은 조건에서 아연의 제거율은 백금, 스테인리스, 그리고 흑연전극에서 각각 68.7%, 69.91%, 63.44%로 분석되었다. 각 전극별 제거효율의 차이가 극명하게 드러나지 않지만 스테인리스 전극을 사용하였을 때 가장 좋은 제거 효율을 보이고 있다.

같은 토양에 0.1 M 시트르산을 주입하고 전극에 전원을 공급하였을 때 구리의 제거효율은 백금, 스테인리스, 그리고 흑연전극에서 각각 32.91%, 28.52%, 그리고 32.73%로 분석되었다. 아연의 제거 효율은 백금, 스테인리스, 그

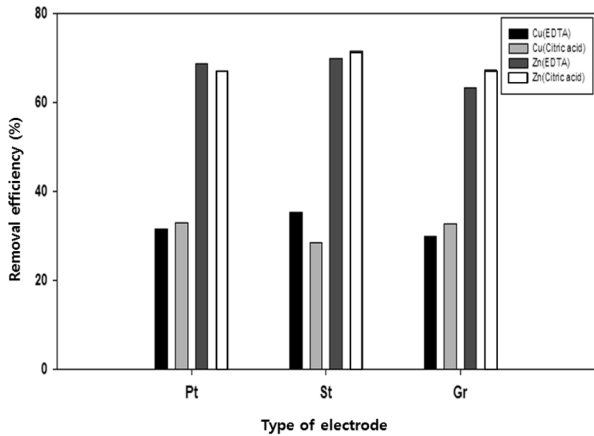


Fig. 5. Removal efficiency of heavy metals using different electrodes (Pt : platinum, St : stainless steel, Gr : graphite). EDTA or citric acid were used as a detergent.

리고 흑연전극에서 각각 67.09%, 71.48%, 그리고 67.27%로 분석되었다.

전극에 전원을 공급하지 않고 EDTA와 시트르산을 세정액으로 사용하였을 때 토양 내 구리의 제거 효율은 각각 약 7.48%, 7.03%이었음을 상기할 때, 세정액과 전원을 공급한 동전기 반응에서 나타난 30% 내외의 제거 효율은 동전기 기술의 사용으로 인한 제거효율의 상승작용을 잘 나타낸다고 보여진다. 또한 동전기를 공급하지 않은 상태에서 EDTA나 시트르산을 이용한 아연의 제거효율이 약 12~16%로 나타났었으나, 동전기와 세정액이 사용되었을 때 60% 이상의 제거효율을 보이고 있어 아연의 경우도 구리와 마찬가지로 동전기에 의한 제거효율의 상승을 명확히 확인할 수 있었다. 본 실험에서 상대적으로 좋은 효율을 보인 전극은 스테인리스 전극이었으나 그 차이가 매우 미미하였다. 세정제와 동전기를 사용하였을 때 나타난 제거효율을 Fig. 5에 종합적으로 나타내었다.

결론적으로 동전기와 세정제를 이용한 중금속 오염토양의 정화에 있어서 아연이 구리 오염토양보다 처리하기 수월하며 세정제의 종류나(본 실험의 경우 EDTA 또는 시트르산) 전극의 종류에 따라서 두드러진 차이점이 나타나지 않았다. 이는 전극의 전도율이 백금, 스테인리스, 그리고 흑연 순으로 낮아짐을 고려할 때 백금 전극의 경우 제거효율이 높을 것으로 기대되었으나 전극 별 제거율의 차이가 미미한 것은 토양의 매질에 불균질성의 기여에 의한 것으로 판단되었다.

3.3. 전극변환에 따른 중금속 용출 특성

전극변환형 동전기 처리방법의 아연오염 토양 처리효율

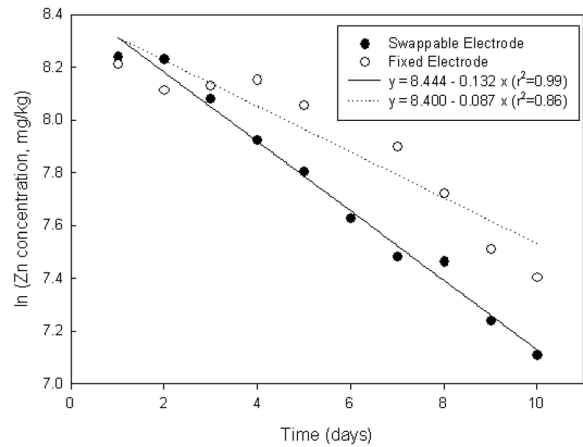


Fig. 6. Regression analysis for zinc removal from the contaminated soil by electrokinetic with swappable or fixed electrode in the presence of citric acid.

을 비교하기 위해 Eq. 1에 나타낸 바와 같이 처리 결과를 가일차반응식으로 해석하였다.

$$C = C_o \cdot e^{-kt} \tag{1}$$

Eq. 1의 양변에 대수를 취하고 정리하면 Eq. 2와 같다.

$$\ln C = \ln C_o - k \cdot t \tag{2}$$

여기서, C = t 시간 후 아연의 농도(mg/Kg), C<sub>o</sub> = 아연의 초기 농도(mg/Kg), k = 가일차반응속도 상수(hr<sup>-1</sup>) 그리고 t = 시간(hr)이다.

먼저 세정제로는 0.05 M의 시트르산을 공급하고 스테인리스 재질로 된 전극봉을 사용하여 전극변환 동전기 실험을 실시하였다. 비교 실험을 위하여 두 개의 반응조를 준비한 후 100 V 전압으로 전극을 변환시킨 조건과 전극을 고정된 조건에서 각각 실험하였다. 토양에서 아연농도의 변화는 양극, 양극과 음극 사이, 음극의 인근 세 지점에서 시간대 별로 시료를 채취하여 평균하였다. 이 때 나타난 아연의 농도 변화를 Fig. 6에 도식하였다. 전극 변환을 적용하였을 때 아연의 농도변화를 살펴보면 가일차반응의 반응속도 상수(k)는 0.132/day로 나타났고, 전극을 고정하였을 때 속도상수는 0.087/day로 나타나 시트르산과 전극변환을 적용하였을 때 아연의 제거속도가 전극고정 하였을 때 보다 약 50% 개선되는 것으로 나타났다.

시트르산 대신 0.05 M의 EDTA를 공급하고 같은 조건에서 아연의 제거효율을 Fig. 7에 나타내었다. 살펴보았다. 전극 변환을 적용하였을 때 가일차반응의 반응속도 상수

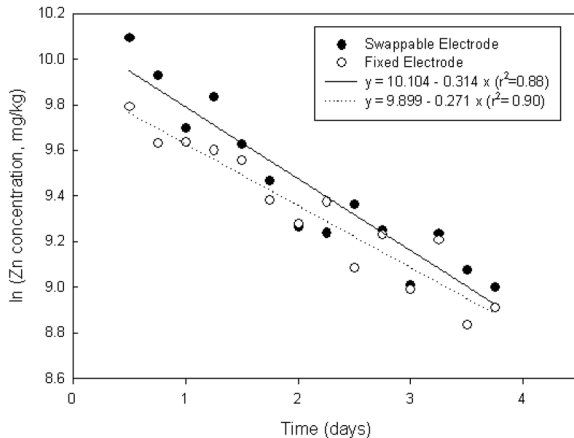


Fig. 7. Regression analysis for zinc removal from the contaminated soil by the electrokinetic with swappable or fixed electrode in the presence of EDTA.

(k)는 0.314/day로 나타났고, 전극을 고정하였을 때 속도 상수는 0.271/day로 나타나 시트르산과 전극변환을 적용하였을 때 아연의 제거속도가 전극고정 하였을 때 보다 약 16% 개선되는 것으로 나타났다.

결론적으로 아연이 오염된 토양처리에 동전기를 적용함에 있어서 제거 속도는 세정제로 시트르산을 공급하였을 때 보다 EDTA를 공급하였을 때 보다 효과적인 것으로 나타났다. 전극을 고정하는 것 보다 전극변환형 동전기 공급을 세정제와 같이(본 실험의 경우 시트르산 또는 EDTA) 활용하는 것이 처리효율을 약 16~50% 개선할 수 있었다.

이와 유사한 사례로서는 동전기의 펄스전기를 활용하여 중금속의 이동 속도를 증가시키고 제거효율을 높였다고 Ko(2007)에 의해 발표된 바 있으며 이는 펄스전기 방식에서 전압을 계속 걸어주는 것보다 강도를 높였다가 낮추었다 함으로서 중금속을 토양으로부터 수월하게 이동시켜 효과적으로 제거 할 수 있었다고 한다.

본 연구에서는 이러한 펄스뿐 아니라 전극변환을 통해서도 효과적인 중금속 제거가 가능하다는 것을 보여주었으며 이는 앞에서 언급한 바와 같이 일정시간 간격으로 토양 공급 내 용액의 pH를 교체 해줌으로서 음극주변에 염기전선을 방지하는 효과를 내었고 이로 인해 아연의 극성이 유지되어 침전하는 현상없이 토양으로부터 제거할 수 있었던 것으로 사료된다. 전극변환형 동전기를 보다 효과적으로 현장에서 사용하기 위해 최적의 전극변환 시간 간격을 조사하거나 또는 펄스전기 공급과 전극변환을 동시에 적용하여 중금속의 제거를 살펴보는 후속 연구가 차후 수행되는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 세정제와 동전기를 이용하여 토양에 오염된 중금속 제거 특성을 살펴본 것으로 실험을 통하여 얻어진 주요한 연구결과는 다음과 같다.

1. 세정제를 이용한 중금속 오염토양 처리에 있어서 실험에 사용된 농도의 범위에서 적용된 EDTA의 농도가 높아질수록 구리의 제거량이 비례적으로 높아지는 경향을 나타내었으며 0.05M에서 약 7.5%의 제거효율을 나타내었다. EDTA를 이용한 아연 용출 실험 결과도 구리와 마찬가지로 비례적으로 제거량이 증가하였으며 0.05M에서 12.10%의 제거효율이 나타났다. EDTA의 세척능이 시트르산 보다 약간 뛰어났으며 두 종류의 세정제 공히 아연의 탈착량이 구리의 탈착량보다 높았다.

2. 전극봉의 재질을 백금, 스테인리스, 흑연으로 달리하여 세정제와 동전기를 오염토양에 적용한 결과 구리와 아연에서 제거효율은 28.52%~35.25%와 63.44%~71.48%로 각각 분석되었으며 전극 간 차이가 미미하였다. EDTA와 시트르산을 세정제로 사용하였을 때 토양 내 구리 및 아연의 제거 효율이 약 7~16%로 나타났음을 고려할 때, 동전기와 세정제가 사용되었을 때 30~60% 이상으로 제거효율이 상승되는 것을 확인할 수 있었다.

3. 전극변환식 동전기를 적용하여 중금속 제거량을 가일차반응식으로 해석하였을 때 시트르산의 경우 반응속도 상수(k)는 0.132/day이었으나 전극고정 동전기의 경우 0.087/day로 나타났으며, EDTA의 경우 반응속도 상수(k)는 0.314/day로 나타났고, 전극고정인 경우 0.271/day로 나타나 전극변환을 적용하였을 때 아연의 제거속도가 약 16~50% 개선되는 효과가 있었다.

본 연구는 오염토양의 동전기의 적용에 있어서 중금속 제거 효율을 개선시키는 방법으로 전극변환 동전기의 적용을 시도하였으며 실험결과에 나타난 바와 같이 제거효율의 상승을 확인할 수 있었다. 그러나 본 실험결과는 전극변환 동전기 적용의 기초실험의 결과를 공유하는 것이며 후속연구로 펄스공급형 전극변환 동전기의 적용 또는 전극변환 시간 간격에 따른 처리효율 등과 같은 연구가 이어지게 되기를 기대하는 바이다.

#### 사 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Amrate, S., Akretche, D.E., Innocent, C., and Seta, P., 2005, Removal of Pb from a calcareous soil during EDTA-enhanced electrokinetic extraction, *Sci. Total Environ.*, **349**, 56-66.
- Cheong, D.C., Lee, J.H., and Choi, S.I., 1997, Application of Soil Washing Technology to the Soil Contaminated by Heavy Metals, *J. of KoSES*, **2**(2), 53-60.
- Chlopecka, A., Bacon, J.R., Wilson, M.J., and Kay, J., 1996, Forms of cadmium, lead, and zinc in contaminated soils from southwest poland, *J. Environ. Qual.*, **25**, 69-79.
- Han, S.J., Kim, B.I., and Kim, S.S., 2004, The Characteristics of Electrokinetic Remediation of Natural Soil according to Flushing Solutions, *J. of KSEE*, **26**(4), 467-474.
- Hanay, O., Hasar, H., and Kocer, N.N., 2009, Effect of EDTA as washing solution on removing of heavy metals from sewage sludge by electrokinetic, *J. Hazard. Mater.*, **169**, 703-710.
- Hwang, S.S., Park, S.S., and Wan Namkoong, 2004, Extraction Kinetics of Heavy Metals from Contaminated Soil by Soil Washing, *J. of KSEE*, **26**(11), 1181-1190.
- Jee, S.H., Ko, S.O., Park, G.H., and Park, M.H., 2006, Evaluation of Soil Washing Technology for the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil, *J. of KSEE Conference Proceeding*, Dec 2, 1525-1529.
- Kang, S.K., 1994, The Mobilization of Heavy Metals from Contaminated Soil Using Low Molecular Weight Organic Acids, Ph. D. Thesis, Oregon State University.
- Kim, S.O. and Kim, K.W., 2001, Monitoring of electrokinetic removal of heavy metals in tailing-soils using sequential extraction analysis, *J. Hazard. Mater.*, **85**(3), 195-211.
- Kim, U.H., Han, S.J., and Kim, S.S., 2004, Effect of the Soil Chemical Properties on the Remediation of Soil Contaminated with Phenanthrene Using Electrokinetic-Fenton Process Phenanthrene, *J. of KSEE*, **26**(2), 200-210.
- Ko, S.H., 2007, Certificate No 195 New Excellent Technology : the Ministry of Environment.
- Lee, H.S., Hong, S.M., Ko, S.H., and Lee, K.S., 2002, EDTA-Enhanced Electrokinetic Removal of Cu and Zn from Contaminated Sandy Soil, *J. of KGES*, **3**(1), 37-45.
- Lee, K.C., Lee, H.J., Lee, M.H., Kim, S.S., Kim, D.H., Kim, Y.H., and Yun, J.K., 1993, A Study of Soil Remediation Methods of Contaminated Land, *Report of NIER*, 93-22-391.
- Peters, R.W., 1999, Chelant extraction of heavy metals from contaminated soils, *J. Hazard. Mater.*, **66**(1-2), 151-210.
- Rajic, L., Dalmacija, B., Dalmacija, M., Roncevic, S., and Perovic, S.U., 2012, Enhancing electrokinetic lead removal from sediment :Utilizing the moving anode technique and increasing the cathode compartment length, *Electrochimica Acta*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2012.02.029>.
- Ure, A.M., 1990, Method of analysis for heavy metals in soils, Heavy Metal in soil, Alloway, B. J. (Ed.), Blackie and Sons Ltd., 40-80.
- Yang, G.C.C., Shuen-Long Lin, 1998, Removal of lead from a silt loam soil by electrokinetic remediation, *J. Hazard. Mater.*, **58**, 285-299.