

Cu, Pb, As 복합 중금속오염 토양의 전기동력학적 정화에서 전해질의 영향 평가

박근용 · 김도형 · 백기태*

금오공과대학교 환경공학과

Evaluation of Processing Fluids on Electrokinetic remediation of Cu, Pb, As-contaminated soil

Geun-yong Park · Do-Hyung Kim · Kitae Baek*

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

ABSTRACT

Electrokinetic technology was applied to remediate Cu, Pb and As-contaminated paddy soil. Removal of metal is highly dependent on the processing fluid during electrokinetic treatment. Tap water, NaOH, HNO₃, Na₂EDTA, and citric acid were evaluated as the processing fluids to enhance metal removal. Cu and Pb were transported toward cathode, however, it did not removed from soil section, while 56.6% of As was removed at a acidic condition. The strong acidic condition with nitric acid as a processing fluid enhanced the desorption of As from soil surface. However, longer operation time is needed to get the higher removal of Cu and Pb, and the acidification of soil after electrokinetic treatment should be solved.

Key words : Electrokinetic remediation, Multi-metal contaminated soil, Processing fluids, pH control

1. 서 론

지난 수십 년간 우리나라에서는 2차 산업의 발전으로 인한 미연, 분진, 공장폐수와 각종 폐기물에 함유된 중금속들이 하천이나 공기로 배출되어 최종적으로 토양오염의 원인이 되었다(Kim et al., 2009a). 특히 구리, 납, 비소와 같은 중금속은 화석연료의 연소, 금속을 이용한 산업, 광석의 제련 및 농약의 사용과 같은 산업 활동에 의하여 토양 내 축적될 수 있으며, 광산, 제련소, 폐기물 매립장 등의 토양에서 높은 농도로 검출 되고 있다. 또한 주변 지하수와 하천, 농경지에 심각한 환경문제를 야기 시킨다(Azcue et al., 1994). 그 중 비소는 합금을 만들 때 첨가제로 사용하는데, 구리와 납에 미량으로 사용시 내열성과 굳기가 증가하는 특징을 보이며, 비소화합물은 방부제나 살충제 등으로 사용되고 있다. 비소에 장기간 노출시 구역질 · 구토 · 설사 등의 증상을 나타내며, 심할 경우 신경마비 · 지각 등의 부작용이 나타난다. 피부증상으로는 탈모 · 색소 침착 등도 나타난다. 단일비소는 독성을 지니

지 않지만, 비소화합물의 경우 사람이나 동물에게 독성과 발암성을 나타낸다(신현무 · 윤삼석, 2006).

이러한 중금속으로 오염된 토양은 자연정화가 어렵고 국소적 오염상태가 계속 유지되므로 인위적인 정화가 필요하다(경상북도, 2008). 중금속 오염토양의 정화에 이용되는 기술은 토양세척(soil washing) (박성우 등, 2009; 백기태 등, 2007), 고정화 및 안정화(solidification & stabilization), 전기 동력학적 정화(Electrokinetic remediation 이하 전기 동력학적 정화) 등이 있는데, 특히 최근 중금속의 이동성을 증가시키는 전기 동력학적 정화 기술이 활발히 연구되고 있다(Acar et al., 1995; Wang et al., 2005; 박성우 등, 2008). 전기 동력학적 정화기술은 토양세척기술로는 처리가 어려운 점토질 토양에서도 효과적으로 중금속류를 제거할 수 있어 미세토 처리에 주로 적용되고 있다(Acar et al., 1995). 전기 동력학적 정화 기술에 의한 토양에서의 주된 중금속 제거기작은 이온이동이다. 전극주변에서 물의 전기분해 반응으로 수소이온과 수산화이온이 생성되는데 음극에서의 수산화 이온이 양극으로

*Corresponding author : kbaek@kumoh.ac.kr

원고접수일 : 2010. 5. 31 심사일 : 2010. 6. 1 게재승인일 : 2010. 8. 26
질의 및 토의 : 2010. 12. 31 까지

전압경사에 따른 영향으로 이동하며 마찬가지로 양극에서의 수소이온이 음극으로 이동한다. 이때 토양에 포함된 중금속과 이온교환을 하게 되며, 이렇게 이온교환 반응으로 탈착된 중금속은 전기이동 현상에 의해 음극으로 이동하여 제거된다. 전기이동 현상에 의해 중금속을 제거하기 때문에 여러 종류의 중금속류가 복합적으로 오염되어 있어도 전기 동력학적 정화 기술을 적용하여 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 기대된다(Kim et al., 2009b).

본 연구에서는 전기 동력학적 정화기술을 적용하여 Cu, Pb 및 As가 복합적으로 오염된 토양에서 이를 정화하는데 있어서 다양한 전해질 용액을 사용하여 전류의 세기와 pH, 전해질 종류에 따른 중금속의 제거율 및 에너지비용에 대해서 연구하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 실험재료 및 장치

실험에 사용된 토양은 A지역에서 채취된 논 토양으로서 협작물을 제거하고 24시간 풍건시킨 후, 2 mm(10 mesh) 체를 이용하여 입자크기가 2 mm 이하인 것을 사용하였다.

평균농도는 Cu가 137.35 mg/kg, Pb이 373.2 mg/kg, As가 92.25 mg/kg이었다. 토양의 초기 pH는 6.4였고, 수분함량은 30%로 조절하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용한 반응기는 아크릴재질로 그 크기는 $4 \times 4 \times 20 \text{ cm}^3$ 로 이루어져 있으며, 양극부에 전류를 흐르게 하기 위해 양극에는 내구성이 높은 백금으로 코팅한 티타늄 전극을 사용하였고 음극에는 탄소전극($4 \times 4 \times 0.8 \text{ cm}^3$)을 사용하였다. 전원공급기는 최대 60 V와 1.5 A까지 조절이 가능한 가변 직류전원 공급기를 사용하였다. 순환수를 일정한 유량과 수압으로 공급 해주기 위해 펌프를 이용하였다. 양쪽에는 유출, 유입액을 저장할 순환용기를 양쪽 극에 각각 설치하였으며, 이를 구성하는 실험장치의 개요도는 Fig. 1과 같다. (a)는 일반적인 전기 동력학적 정화 실험구성으로써 양극부분에 전해질을 순환시키고 음극부분에서 전기삼투로 이동한 전해질을 모으는 형태이며, (b)는 양극 및 음극부분을 모두 순환시키는 시스템이다. (c)는 반응기의 모식도를 나타내었다.

2.2. 실험방법

전기 동력학적 정화 실험 장치에 토양 600 g을 수분함

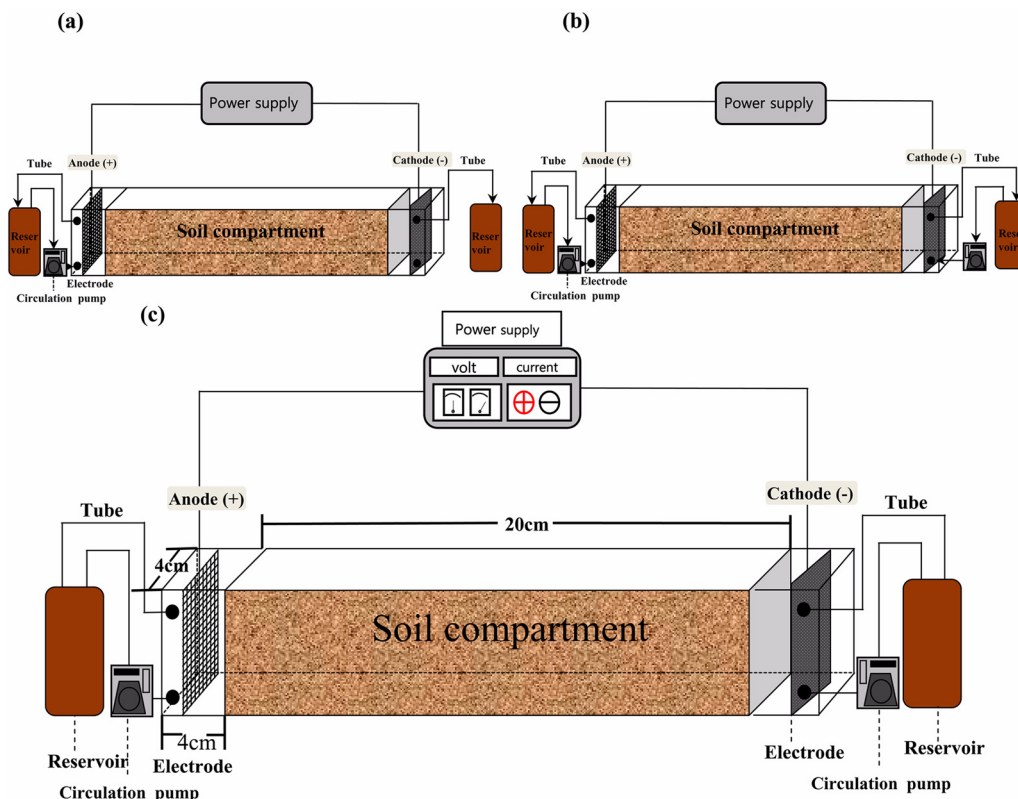


Fig. 1. Schematic diagram of electrokinetic remediation cell: (a) conventional electrokinetic remediation system, (b) catholyte conditioning system, and (c) dimension of electrokinetic remediation reactor.

량 30%로 하여 압밀하여 넣어주었다. 전기 동력학적 정화실험은 일정한 전압을 유지하며 2주에 걸쳐 5가지 순환수를 사용하여 Table 1과 같이 실험을 진행하였다. Exp. 1은 대조실험으로써 수돗물을 순환시켜주었고, Exp. 2에서는 염기성 조건을 인위적으로 만들어 주기 위해 H^+ 이온이 발생하는 양극에 NaOH를 순환시켜 주었으며, 반대로 Exp. 3은 산성 조건에 따른 효과를 보기 위하여 OH^- 이온이 발생하는 음극쪽에 HNO_3 를 순환 시켰다. Exp. 4와 Exp. 5는 각각 citric Acid과 Na_2EDTA 를 음극순환수로 사용하여 중금속 및 As의 제거에 미치는 영향을 평가하였다. 실험이 진행되는 동안 순환수는 2일마다 교체하였고 교체 시 pH와 순환용기의 부피변화를 측정하여, 전기 삼투 흐름(electro-osmosis flow; 이하 EOF)의 양을 추정하였다(조정민 등, 2009). 실험에 1 V/cm의 정전압을 2주 동안 적용하였으며 실험이 진행되는 동안 각각의 전류 변화를 관찰 하였다.

2주 후 전기 동력학적 정화 실험을 종료하고 반응기 내의 토양을 각각 10등분하여 용기에 담아 105°C에서 4시간 건조시킨 후 수분함량을 측정하였다. 건조토양 5 g에 증류수 25 mL를 넣은 후 1시간 정치를 시키고, pH meter(isTEK, pH-250L, KOREA)를 이용하여 pH를 측정하였다. 또한 토양 중 중금속의 농도는 토양오염공정시험기준(환경부, 2008)에 따라 분석 하였다. Cu와 Pb은 토양 10 g에 0.1N HCl를 50 mL 취한 후 1시간 진탕 후 여과지를 이용하여 여과를 거치고 As는 토양 10 g에 1.0 N HCl를 50 mL 취한 후 30분 진탕 후 여과지를 이용하여 여과를 거쳐 ICP-Mass(Agilent 7500, USA)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 전류 및 EOF

토양을 통해서 흐르는 전류는 전해질에 존재하는 이온의 농도에 영향을 받는 전기전도도에 의해 좌우되며, 이온의 농도가 높을수록 토양에 흐르는 전류 또한 높아진다(Cho et al., 2009). 본 연구에서는 1 V/cm의 정전압을

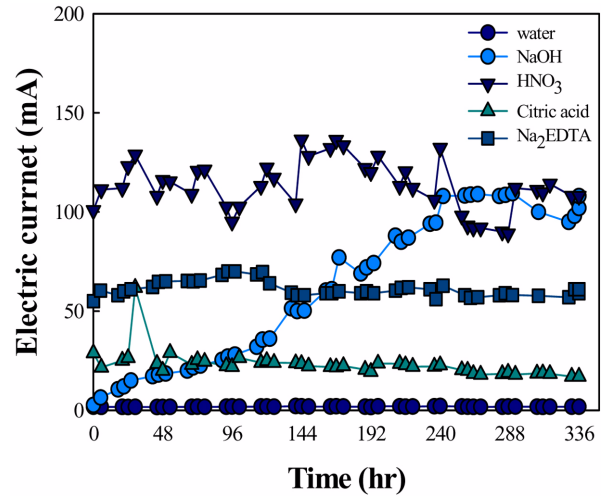


Fig. 2. Time course of electrical current during electrokinetic treatment.

적용하였으며 실험이 진행되는 동안 측정된 전류의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 수돗물을 이용한 대조실험에서 약 0.11 mA/cm²로 전류가 가장 낮게 유지되었다. NaOH를 사용한 실험에서는 전류값이 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. HNO_3 를 순환 시킨 경우 순환수를 교환할 때마다 전류의 변화가 있었지만 가장 높은 전류를 유지하였다. 이는 전압이 일정한 가운데 전해질로 사용한 HNO_3 용액에 의하여 pH가 감소되어 토양 구성물질 등의 용출이 일어나 오염물질인 중금속의 용해도가 증가하였기 때문이다. 따라서 토양으로부터 중금속이 탈착되어 나와 공극수에는 높은 농도의 이온이 존재하게 되며 전기전도도가 증가하여 전류가 증가 하였다(Al-Hamdan et al., 2008). citric acid와 EDTA를 사용한 실험에서는 전류가 일정하게 유지되었다.

Fig. 3은 시간의 경과에 따른 전기 삼투량의 변화를 나타낸 것이다. 축적된 EOF의 양은 양극과 음극의 순환수 부피 변화로부터 산출하였다. 이때 음극 순환수가 초기량(1L) 보다 적어지면 EOF의 부피가 감소한 것으로써 이는 음극방향으로 흐르던 EOF가 양극 방향으로 이동방향이 바뀌었다는 것을 의미한다(Baek et al., 2009). 전기삼투는 전압경사에 의해 유체가 이동하는 것으로, 함수비와 토양

Table 1. Experimental conditions for electrokinetic remediation operation

exp. #	Voltage gradient (V/cm)	Time (day)	Anolyte	Catholyte
Exp. 1	1	14	Water	Water
Exp. 2	1	14	NaOH 0.1 M	—
Exp. 3	1	14	MgSO ₄ 0.1 M	HNO ₃ 0.1 M
Exp. 4	1	14	MgSO ₄ 0.1 M	Citric Acid 0.1 M
Exp. 5	1	14	MgSO ₄ 0.1 M	Na ₂ EDTA 0.1 M

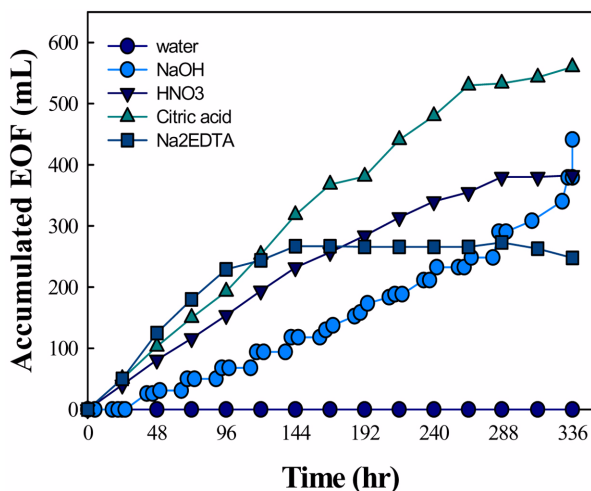


Fig. 3. Accumulated electro-osmotic flow during electrokinetic remediation.

의 종류, 이온의 종류, 공극유체의 이온농도에 의해서 영향을 받는다. 일반적으로 전기삼투현상에 의해 토양입자 사이의 공극수는 음극으로 흘러 유출이 된다. NaOH를 사용한 실험에서의 EOF는 초기에는 점차 증가 하였다가 288시간 이후 급격히 증가 하였다. HNO₃와 citric acid는 240시간을 전후로 증가에서 점차 일정한 양이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. EDTA 순환 실험에서 144시간 까지 267 mL의 EOF가 발생하였으나 이후 조금씩 감소하여 실험 종료시에는 248 mL로 누적 EOF가 줄어들었다.

Fig. 2와 Fig. 3을 보면 NaOH를 사용한 실험에서 전류의 상승으로 인하여 전기 삼투량이 상승 하였고, HNO₃와 citric acid 전해질로 사용한 경우 초기에 전류가 흐르기 시작을 하면서 EOF 양도 증가하였으며, 시간이 지날수록 전류가 안정화 되어가면서 전기삼투량 또한 감소하는 것을 알 수 있다. NaOH의 경우 산성조건인 HNO₃와 비교하였을 때 최종적으로 EOF의 양이 많이 발생한 것을 알 수 있다. 이는 pH가 증가 할수록 토양의 제타전위 또한 음(-)의 값을 가지기 때문에 보다 많은 양의 양(+)이온이 음극으로 이동하게 된다(Li et al., 1996). EDTA 경우 초기에는 EOF가 양극에서 음극으로 이동하다가 전류의 감소시간인 144시간 이후로는 EOF의 방향이 반대로 변화된 것으로 보인다. 토양표면이 음전하에서 양전하로 변화되면서 수산화이온이 토양표면에 흡착되어 EOF흐름의 변화에 원인이 된다(Kim et al., 2009a).

3.2. pH distribution

실험 종료 후 토양 구간별 pH를 Fig. 4에 나타내었다. pH 변화는 전기 삼투에 의하여 공극수의 흐름이 양극에

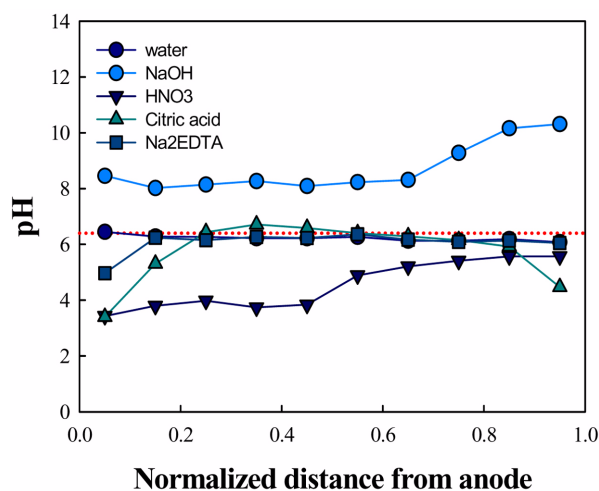


Fig. 4. pH distribution in soil section after Electrokinetic remediation experiment.

서 음극으로 이동하며 변화되고, 또한 전기분해에 의해 양극에서는 생성된 수소이온(H⁺)이 전기 이동에 의해 음극 방향으로의 이동에 따른 것이고, 음극에서 생성된 수산화이온(OH⁻) 또한 전기이동에 의해 양극방향으로 이동에 따라 변화된다(Kim et al., 2010). 이온의 이동성이 수산화이온의 이동성 보다 약 1.76배(H⁺의 확산계수 $93.1 \times 10^{10} \text{m}^2/\text{sec}$, OH⁻ : $52.8 \times 10^{10} \text{m}^2/\text{sec}$)정도 크기 때문에, 수소이온이 더 빨리 이동 하게 되어 시간 경과에 따라 토양의 산성화가 발생한다(Alshawahkeh and Acar., 1996; Al-Hamdan., et al., 2008). 토양에서의 pH변화는 중금속의 용해도에 영향을 줄 수 있으며 이는 물질의 이동 및 제거율에 영향을 준다. 수돗물을 사용한 대조실험에서 물의 전기분해 반응으로 전해질의 pH 측정 결과 산성 및 염기성을 띄어야 함에도 불구하고 변화가 나타나지 않았는데 이는 토양의 완충용량이 크기 때문인 것으로 사료된다. NaOH를 순환수로 사용하였을 경우 H⁺가 발생 되는 Anode에 NaOH를 순환 시켜 중화되어 염기성을 띄어 pH가 높게 나오는 것을 볼 수 있다. HNO₃, citric acid와 EDTA를 사용한 실험의 양극부근에서 H⁺의 발생으로 pH가 초기보다 감소하였다. 강산인 HNO₃를 순환한 실험에서 pH가 가장 낮게 유지 되어 양극 주변의 pH는 3.5 이하로 감소하였다. 또한, 약산성을 띄는 citric acid의 순환으로 OH⁻가 생성되는 음극에 pH가 초기보다 낮게 나타났다.

3.3. 제거율 평가

3.3.1. Cu, Pb 제거율

전기동력학적 정화 실험을 마친 후 각 반응기의 토양을 분석하여 Cu, Pb의 제거율(C/C₀)을 Fig. 5에 나타내었다.

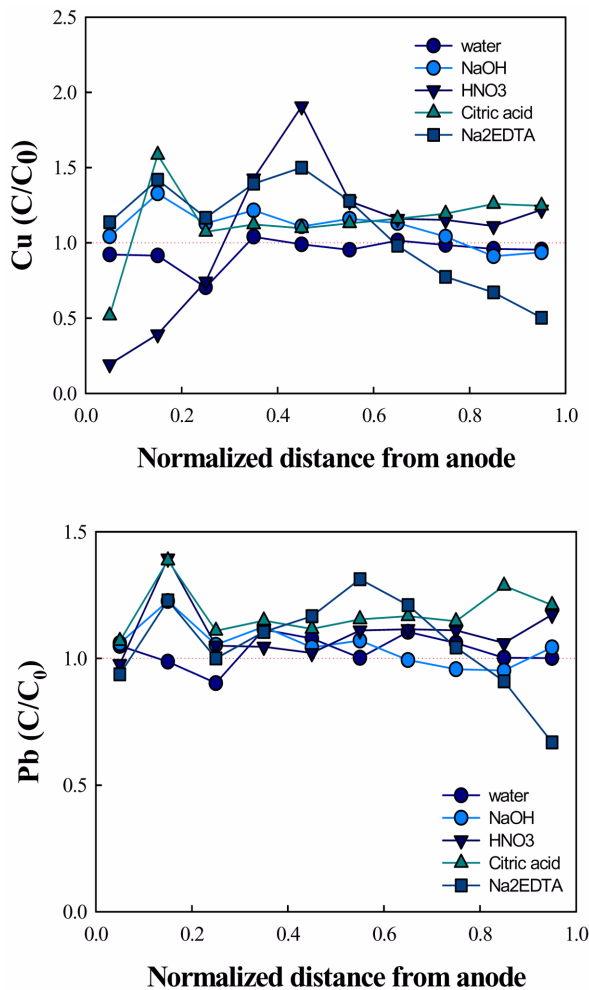


Fig. 5. Distribution of Cu and Pb in soil section after Electrokinetic remediation experiment.

중금속은 중성영역의 pH에서 안정한 상태로 존재한다. 순환수 NaOH의 약염기성 조건에서 중금속의 용출이 잘 일어나지 않았으며 제거도 일어나지 않았다. 순환수 HNO₃에 의한 산성 영역에서는 중금속의 용해도가 높아지고 용출량이 증가하게 된다(Ryu et al., 2010). 따라서 Cu가 양극부에서 많이 용출되어 전기 이동에 의하여 음극방향으로 이동하여 중간부분에 많이 축적되어 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 구리의 경우 전기 동력학적 공정에 의하여 제거는 되지 않았지만 이동성은 크게 나타났다. citric acid를 사용한 실험에서 양극과 가장 가까운 토양구간의 pH가 HNO₃를 사용한 실험 다음으로 낮게 나타남에 따라서 낮은 pH 조건에서 탈착된 Cu가 양극으로부터 2번째 토양구간에 축적되었다. Na₂EDTA는 킬레이트 화합물로 중금속과 결합하여 음전하를 띠므로 음극 순환수로 사용한 EDTA가 음극 주변의 토양에서 중금속과 결합하여 전

기적 이동에 의하여 양극방향으로 이동하므로 Cu 및 Pb의 농도가 음극쪽에서 가장 낮았고 중앙부분에서 높게 나타났다. Pb는 Cu에 비하여 낮은 이동성을 보였으며, 제거율 또한 크게 나타나지 않았다. 이는 Pb이 Cu보다 토양에 더 강하게 흡착되어 있기 때문에 제거하기 어려운 것이라 사료된다.

3.3.2. As 제거율

전기동력학적 정화 실험을 마친 후 각 반응기의 토양을 분석하여 As의 제거율(C/C_0)을 Fig. 6에 나타내었고, As의 pH에 따른 존재형태를 Fig. 7에 나타내었다. As의 경우에는 순환수 HNO₃의 산성조건에서의 제거효율이 가장 높게 나타났다. 이는 As의 pH에 따른 존재 형태와 또한 EOF의 흐름과 전기적 이동 방향이 같아져 As 이동에 효

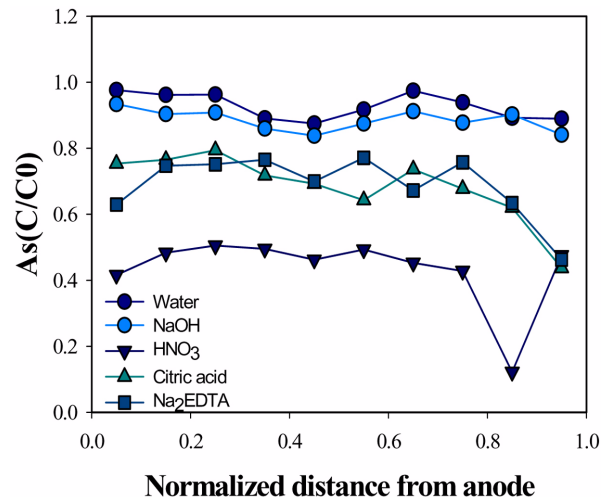


Fig. 6. Distribution of As in soil section after electrokinetic remediation experiment.

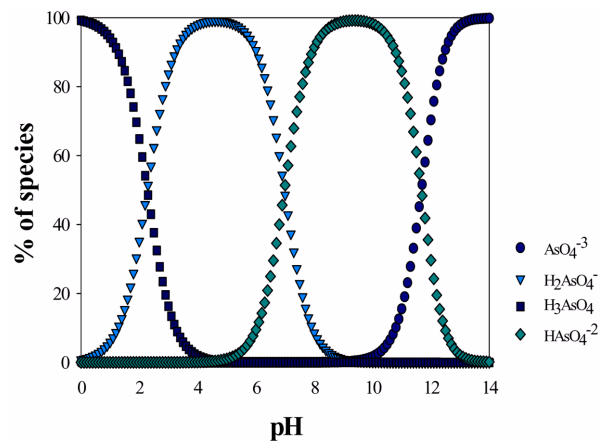


Fig. 7. Distribution of As species with pH.

Table 2. Removal efficiency of Cu, Pb and As after electrokinetic remediation experiment and energy expenditure

	Removal efficiency(%)			Energy expenditure (kWh/ton)
	Cu	Pb	As	
Water	5.6	-3	7.2	22.3
Na ₂ EDTA	-8.2	-5.8	11.5	756.9
HNO ₃	-5.8	-10.5	56.6	1385.4
Citric acid	-13.8	-17.9	31.6	283.8
NaOH	-10	-5.2	31.1	747.0

과적으로 작용하여 높은 이동성과 제거율 보였다. 이처럼 산성조건에서는 용해도가 증가하였기 때문이다. 이는 비소의 특성으로 일반적으로 산화 조건 pH 2~7에서는 음이온성 금속인 H_2AsO_4^- 형태로 중성조건 pH 7 부근에서는 HAsO_4^{2-} 와 같은 형태로 존재한다(Dean, 1985). 실험에서 나타난 산성조건에서의 pH 범위가 pH 3~6 이므로, 토양 시료내 비소가 이온을 띤 상태로 존재하기 때문에 전기적 이동 및 전기 삼투흐름에 의해서 제거 되었다. 그러므로 전극 주변의 pH가 산성을 나타낸 순환수 HNO_3 와 citric acid 실험에서 용출된 As가 이동하여 제거 된 것을 알 수 있다. pH가 8~9로 유지된 NaOH를 순환시킨 실험에서도 As가 음극부에서 양극부로의 이동이 보였다. 일반적으로 As는 염기조건에서 OH^- 와 비소의 이온교환에 의해 탈착이 증가하는 것으로 알려져 있다(Baek et al., 2009). 그러나, 본 연구에서는 NaOH를 순환수로 사용하더라도 pH가 약 염기상태를 유지하여 As의 탈착이 활발히 일어나지 않은 것으로 판단된다. 수돗물을 순환수로 사용한 실험에서는 토양의 pH변화가 나타나지 않았다. 이로 인해 As의 이동성이 제거가 관찰되지 않았다.

3.3. 평균제거율 및 에너지 소비량

Cu, Pb 및 As의 평균 제거율을 Table 2에 나타내었다. As의 경우 전반적으로 제거율이 높게 나타났으며 산성일 때 제거율이 높았다. 이는 비소가 철산화물에 흡착되어 있어, 산성조건에서 철산화물의 용해가 증가하면서 비소의 용출 및 탈착이 증가한 것으로 판단된다. Cu의 경우 수돗물을 순환수로 사용한 경우 이동과 제거가 매우 적게 관찰되었다. 이는 공극수가 이동하는데 여러 가지 영향에 의해 이동성이 낮았을 것이라 사료되며 Pb의 이동성은 Cu보다 더 낮은 것으로 나타났다. 이는 Pb이 Cu보다 pH에 따른 이동성 변화에 더 민감하며, pH 4.0 이상에서는 Pb가 OH^- 와 침전을 형성하기 때문으로 판단된다.

HNO_3 의 전력소비가 가장 많은 것은 산성조건에서 광물의 용해 및 해리가 증가되어 전류가 증가하였기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 복합 중금속으로 오염된 토양에 중금속을 제거하는 실험을 하기 위하여 중금속으로 오염된 논 토양을 채취하였으며 5가지 순환수 조건을 다르게 하고 정전류 조건에서 전기 동력학적 정화기술을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전기역학적 정화에서 정전압 하에서 전류의 증가는 전기 삼투량의 증가를 가져왔다. NaOH를 순환시킨 실험에서 전류가 점차 상승을 하자 전기 삼투량이 상승 하였고, 순환수 HNO_3 와 citric acid 같은 경우 실험 초기에 전기삼투흐름이 많이 발생하였으나 시간이 지날수록 전류가 안정화 되어가면서 전기삼투흐름 또한 안정화가 되었다. Na₂EDTA의 경우 초기에는 전기삼투 흐름이 양극에서 음극으로 이동하다가 124시간 이후 전류가 감소하면서 EOF의 방향이 반대로 변화된 것으로 보인다.

2. Cu와 Pb는 이동성은 하였으나, 제거는 되지 않은 것으로 보아 토양표면에 강하게 흡착되었으며, Cu보다 Pb의 이동성이 낮고 흡착능이 더 강한 것으로 나타났다.

3. As의 제거에서는 산성조건에서 용출이 일어나 HNO_3 와 citric acid를 사용한 실험에서 이동하고 제거되었다. 이는 산성조건에서 철산화물의 용해가 증가하여 철산화물에 흡착된 형태로 존재하는 비소 또한 용해되었기 때문으로 판단된다.

4. 에너지 비용과 제거율을 비교하였을 때 HNO_3 보다 citric acid가 제거효율이 높았다. 또한 HNO_3 보다는 citric acid가 토양환경 및 생태계에 미치는 영향도 적기 때문에 실제오염지역에 적용 시 고려사항이 된다.

5. 전함량 분석에 의한 중금속 분석과 2주보다 오랜 기간의 실험을 통해 제거율을 향상시키는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원(KEITI)의 GAIA 사업 중금속 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 경상북도, 2008, 2007 환경백서, 제5장 토양환경 및 지하수 보전, p. 547-548.
- 박성우, 조정민, 류병곤, 김경조, 백기태, 양중석, 2008, Zn와 Ni로 오염된 토양의 산을 이용한 전처리 및 산순환 동전기 정화의 타당성 연구, *지하수토양환경*, **13**(6), 17-22.
- 박성우, 이재영, 권태순, 김경조, 정근욱, 백기태, 2009, 세척제를 이용한 아연오염 철도토양의 정화 타당성 연구, *지하수토양환경*, **14**(1), 78-82.
- 백기태, 김도형, 서창일, 양중석, 이재영, 2007, 염산을 사용한 납오염 토양의 토양세척에 의한 정화, *지하수토양환경*, **12**(3), 17-22.
- 신현무, 윤삼석, 2006, 동전기법에 의한 폐 중금속광산 퇴적토 내의 비소제거 특성, *한국환경과학회지*, **15**, 279-286.
- 조정민, 류병곤, 박성우, 김경조, 백기태, 2009, 동전기 정화기술을 이용한 Zn, Ni, F 복합오염 토양의 정화, *지하수토양환경*, **14**(1), 36-43.
- 환경부, 2008, 토양오염공정시험기준.
- Acar, Y.B., Gale, R.J., Alshawabkeh, A.N., Marks, R.E., Puppala, S., Bricka, M., and Parker, R., 1995, Electrokinetic remediation : Basics and technology status, *J. Hazard. Mater.*, **40**, 117-137.
- Alshawabkeh, A.N. and Acar, Y.B., 1996, Electrokinetic remediation. : Theoretical model, *J. ASCE, J. Geotech. Eng.*, **122**, 186-196.
- Al-Hamdan, A.Z. and Reddy, K.R., 2008, Transient behavior of heavy metals in soil during electrokinetic remediation, *Chemosphere*, **71**, 860-871.
- Azcue, J. M., Mudroch, A., Rosa, F., and G. E. M. Hall, 1994, Effects of abandoned gold mine tailings on the arsenic concentration in water and sediments of Jack of Clubs Lake, BC. *Environ. Technol.*, **15**, 669-678.
- Baek, K., Kim, D.H., Park, S.W., Ryu, B.G., Batjargal, T., and Yang, J.S., 2009, Electrolyte-conditioning-enhanced electrokinetic remediation of arsenic-contaminated mine tailing, *J. Hazard. Mater.*, **161**, 457-462.
- Cho, J.M., Kim, K.J., Chung, K.Y., Hyun, S., Baek K., 2009, Restoration of saline soil in cultivated land using electrokinetic process, *Sep. Sci. Technol.*, **44**, 2371-2384.
- Dean, J. A., Lange's Handbook of Chemistry, 1985, 14th. Edition, McGraw Hill, New York, 1856pp.
- Kim, D.H., Ryu, B.G., Park, S.W., Seo, C.I., Baek, K., 2009a, Electrokinetic remediation of Zn and Ni-contaminated soil, *J. Hazard. Mater.*, **165**, 501-505.
- Kim, D.H., Jeon, C.S., Ko, S.H., Yang, J. S., 2009b, Electrokinetic remediation of fluorine-contaminated soil: Conditioning of anolyte, *J. Hazard. Mater.*, **161**, 565-569.
- Kim, K.J., Cho, J.M., Baek K., Yang, J. S., Ko, S.H., 2010, Electrokinetic removal of chloride and sodium from tidelands, *J Appl Electrochem*, **40**, 1139-1144.
- Li, Z., Yu, J.W., and Neretnieks, I., 1996, A new approach to electrokinetic remediation of soil polluted by heavy metals, *J. Contam. Hydrol.*, **22**, 241-253.
- Ryu, B.G., Yang, J. S., Kim, D.H., Baek K., 2010, Pulsed electrokinetic removal of Cd and Zn from fine-grained soil, *J Appl Electrochem*, **40**, 1039-1047.
- Wang, J.Y., Zhang, D.S., Stabnikova, O., and Tay, J.H., 2005, Evaluation of electrokinetic removal of heavy metals from sewage sludge, *J. Hazard. Mater.*, **B124**, 139-146.