

중금속으로 오염된 해양퇴적토의 전기동력학적 정화

김경조*·§ · 유종찬**·§ · 양중석*** · 백기태**·†

*성균관대학교 수자원전문대학원
440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

**전북대학교 환경공학과
561-756 전라북도 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

**한국과학기술연구원 강릉분원
210-340 강원도 강릉시 사임당로 679

(2013년 7월 1일 접수, 2013년 10월 1일 수정본 접수, 2013년 10월 9일 채택)

Electrokinetic Extraction of Metals from Marine Sediment

Kyung-Jo Kim*·§, Jong-Chan Yoo**·§, Jung-Seok Yang*** and Kitae Baek**·†

*Department of Water Resource, Sung Kyun Kwan University, 300 Chunchun-dong, Jangan-gu, suwon, Gyeonggi 440-746, Korea

**Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University,

664-14 1 Ga, Duckjin-dong, Duckjin-gu, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea

***KIST-Gangneung Institute, 679 Saimdang-ro, Gangneung, Gangwon-do 210-340, Korea

(Received 1 July 2013; Received in revised form 1 October 2013; accepted 9 October 2013)

요 약

퇴적토는 미사 및 점토와 같은 미세토의 함량이 높으며, 유기물질이 많으며, 완충능이 크기 때문에 퇴적토로부터 중금속을 제거하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는, 중금속으로 오염된 퇴적토에서 중금속을 제거하기 위해 2 V/cm의 일정한 전압경사를 적용한 실험실 규모의 전기동력학적 (EK) 정화공법을 사용하였다. 실험을 위해 적용한 음극 전해질로는 0.1 M의 ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), citric acid (CA), HNO₃, HCl, 그리고 수돗물을 사용하였으며, 양극 전해질로는 수돗물을 사용하여 순환시켜 주었다. 음극 전해질로 CA를 사용한 실험군에서 Ni, Cu, Zn, Pb는 각각 초기와 비교하여 92.4, 96.1, 97.1, 88.1%의 중금속 제거효율을 보였다. 높은 전압경사를 적용하게 되면, 음극 전해질 내에 citrate 및 EDTA가 퇴적토로 이동이 용이하게 되며, 그로 인해 중금속-킬레이트 화합물을 형성하여 중금속의 추출률을 높일 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로, 높은 전압경사를 적용한 EK 실험에서 음극 전해질로 EDTA 혹은 CA를 사용하면 퇴적토로부터 중금속을 효과적으로 추출할 수 있다고 판단된다.

Abstracts – Sediment contains a high fraction of organic matter, high buffering capacity, and a large portion of fine grained particles such as silt and clay, which are major barriers to remove heavy metals from sediments. In this study, a lab-scale electrokinetic (EK) technique was applied to remove heavy metals effectively from marine sediment at a constant voltage gradient of 2 V/cm. A concentration of 0.1 M of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), citric acid (CA), HNO₃, and HCl were circulated in the cathode, and tap water was circulated in the anode. CA extracted 92.4% of Ni, 96.1% of Cu, 97.1% of Zn, and 88.1% of Pb from marine sediment. A higher voltage gradient enhanced the transport of citrate and EDTA into the sediment and, therefore, increased metal extraction from the marine sediment through a complexation reaction between metals and the chelates. Based on these results, the electrokinetic process using a high voltage gradient with EDTA and CA might be useful to extract heavy metals from marine sediment.

Key words: EDTA, Electrokinetics, Marine Sediment, Processing Fluid, Voltage Gradient

1. 서 론

해양퇴적토는 유기물 및 토양과 같은 미세물질 함량의 비율이 높다. 또한 해양퇴적토는 토양과 마찬가지로 종종 다양한 유기 및 무

기 독성 화합물로 오염되어 있다. 한국에서는 바다의 수심을 유지하고 오염물질을 제거하기 위해 주기적으로 해양퇴적토를 준설해 왔으며, 준설된 퇴적토는 별도의 처리 없이 먼 바다에 다시 버려졌다[1]. 그러나, 현재 해양준설토를 포함한 육상에서 발생한 폐기물의 해양 투기는 바젤 협약에 의해 금지되어있기 때문에, 해양 준설퇴적토는 반드시 육상에서 처리해야 하는 실정이다[2]. 하지만, 미세토, 유기물질의 함량 및 알칼리도가 높은 해양퇴적토의 특성 때문에 일반적

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kbaek@jbnu.ac.kr

§ two authors equally contributed to this work

‡ 이 논문은 KAIST 양지원 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

인 토양 정화 방법으로는 중금속으로 오염된 해양퇴적토를 정화하는 것이 매우 어렵다[1,3,4]. 일반적으로 중금속으로 오염된 토양 및 퇴적토를 정화하기 위한 처리기술로 토양세척법과 고형화/안정화 기술이 가장 많이 이용되고 있으나[5], 토양세척법은 미세토 및 유기물의 함량이 높은 토양을 처리하는데 적합하지 않으며, 고형화/안정화 기술은 총 토양의 부피를 증가시키고, 현재 우리나라의 현행법 상 중금속 추출은 전함량추출법을 바탕으로 하고 있기 때문에 적합하지 않다[6].

과거 20년 동안, 전기동력학적(electrokinetic, EK) 정화기술은 미세토의 함량이 많은 중금속 및 유기오염물질로 오염된 토양, 퇴적토, 슬러지, 광미뿐만 아니라 염류집적 토양의 처리를 위해 널리 사용되어 왔다[7-13]. Nystroem *et al.* [3]은 해양퇴적토로부터 중금속의 제거를 위해 전기영동 정화기술의 적용가능성을 평가하였으며, 반응기 내 낮은 pH의 퇴적토에서 중금속의 추출이 용이하다는 것을 확인하였다. EK 정화기술에서 중금속의 추출정도는 퇴적토 내 중금속의 존재형태에 크게 의존한다[14]. 하지만, 퇴적토 내 중금속의 존재형태는 주변 환경이나 오염원의 종류에 따라 매우 달라지며, 퇴적토의 산성화 및 염기화는 퇴적토 내 중금속의 존재형태를 변화시키는 효과적인 방법으로 알려져 있다[2,14-17].

EK 기술을 적용하는데 있어 전해질의 종류, 전압경사, 처리시간, 전극 간 거리에 따라 중금속의 추출효율은 달라질 수 있다. 또한, EK 기술을 적용하는 동안 음극 및 양극전해질의 순환, 산 용액을 이용한 별도의 전처리 및 높은 전압경사로 인해 퇴적토의 pH는 변화할 수 있다. 이 때, 높은 전압경사를 적용하게 되면 양극에서 수소이온의 발생을 유발하며, 여기서 발생한 수소이온은 음극 쪽으로 이동하여 반응기 내 퇴적토는 산성화 된다. 이전 연구에서, 중금속으로 오염된 해양퇴적토를 대상으로 1 V/cm의 전압경사를 이용한 실험실 규모의 EK 정화기술의 적용가능성에 대해 평가하였으며, 0.1 M의 HCl을 사용하였을 때, Ni, Cu, Zn, Pb는 초기와 비교하여 71.5%, 68.6%, 62.4%, 그리고 65.3%의 가장 높은 중금속 제거효율을 얻을 수 있었다[1]. 본 연구에서는 2 V/cm의 전압경사를 이용한 실험실 규모의 EK 정화기술을 적용하여 해양퇴적토 내 중금속의 제거효율을 비교하였다.

2. 실험재료 및 방법

2-1. 퇴적토의 특성분석

실험에 사용된 해양퇴적토 시료는 부산의 항만에서 채취하였으며, 채취된 시료는 75 °C에서 무게변화가 없을 때까지 건조한 후에 막자와 막자사발을 이용하여 잘게 부수어 10 mesh (2 mm) 체를 통과한 시료를 대상으로 잘 혼합하여 준비하였다. 본 시료의 물리화학적 특성은 Table 1에 나타내었다. 퇴적토 내 중금속의 추출은 토양오염공정시험기준에 따라 전함량추출법을 사용하였고, ICP-MS (Agilent 7500, USA)을 이용하여 분석하였다. pH와 전기전도도(electrical conductivity, EC)는 토양오염공정시험기준에 따라 토양과 증류수를 1:5 (wt/v%)로 맞추어 상온에서 일정시간 교반 후 1시간 동안 방치한 뒤 PH/ISE (Istek 735P, Korea) 장치를 이용하여 측정하였다. 퇴적토의 유기물 및 토성은 각각 ASTM D2974와 D421 방법을 사용하여 분석하였다. 퇴적토 내 탄산칼슘의 함량은 다음의 식을 사용하여 분석하였다[18].

$$\text{CaCO}_3(\%) = [(10 \times N_{\text{HCl}}) - (R \times N_{\text{NaOH}})] \times 0.05 \times 100 / W_t$$

Table 1. Characteristics of sediment used in this study

| Characteristics | Values |
|---|--------|
| pH | 7.7 |
| EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 842 |
| Organic content (wt%) (ASTM D2974) | 13.3 |
| Carbonate content (wt%) | 18 |
| Particle distribution (wt%) (ASTM D421) | |
| Sand (%) | 4.0 |
| Silt (%) | 89.4 |
| Clay (%) | 6.6 |
| Initial concentration (mg/kg, ± 0.5) | |
| Ni | 18 |
| Cu | 183 |
| Zn | 270 |
| Pb | 85 |

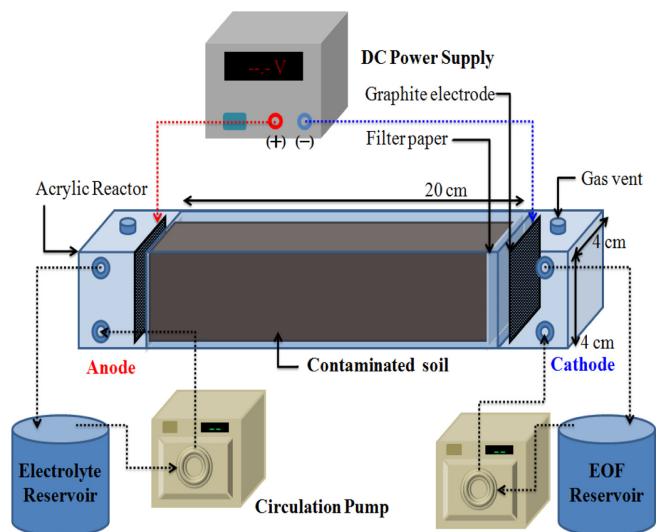


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

여기서, N_{HCl} 은 HCl 용액의 노르말농도, R은 사용된 NaOH의 부피, N_{NaOH} 은 NaOH 용액의 노르말 농도, 그리고 W_t 은 사용된 건조시료의 무게이다.

2-2. 실험장치 구성

본 실험에 사용된 실험실 규모의 EK 장치 구성은 Fig. 1에 나타내었다. EK 장치의 구성은 기본적으로 오염된 토양이 들어가는 chamber (L: 20 cm×H: 4 cm×W: 4 cm)을 중심으로 양쪽에 전극이 들어가는 chamber, 전해질 chamber (L: 4 cm×H: 4 cm×W: 4 cm), 그리고 전해질의 반복적인 순환을 위해 전해질 저장부분으로 나뉘며, 아크릴 재질로 된 반응기를 사용하였다. 실험에 사용된 전극은 흑연으로 된 전극을 사용하였으며 전해질이 들어가는 chamber의 양 끝에 배치하였다. 토양 chamber와 전해질 chamber의 경계면에는 여러 개의 작은 구멍을 내고 토양의 손실을 막기 위해 5B 여과지(Advantec Co., Japan)를 설치하였다.

2-3. EK 실험방법

실험에 사용된 퇴적토는 증류수를 이용해 수분함량을 약 30%로 설정한 후 최대한 압밀하여 토양 chamber에 채워 넣었고, 순환펌프

를 이용하여 1 L의 전해질을 양쪽 전해질 chamber에 2.4 mL/min의 일정한 속도로 순환시켜주었다. 전해질의 수위차에 의한 EOF의 영향을 제거하기 위해 반응기의 수평을 맞추었고, 직류전원공급장치 (0~60 V, 0~1.5 A)를 사용하여 전원을 공급해 주었다. 실험에 사용된 양극 전해질은 모두 수돗물을 사용하였으며, 음극 전해질은 0.1 M의 HCl, HNO₃, ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), 그리고 citric acid (CA)를 사용해 주었다. 추가적으로, 바탕시험을 위해 양극 모두 수돗물을 전해질로 사용한 실험을 실시하였다. 실험은 총 15일 동안 진행되었으며, 반응기에 2 V/cm의 전압경사를 적용해 주었으며, 실험이 진행되는 동안 전류변화를 측정하고, 매일 양극 순환수의 부피를 측정하여 전기삼투량(electro-osmotic flow, EOF)을 분석하였다. 실험이 종료된 후에는 토양 chamber 내 토양을 정확히 10등분하여, 105 °C에서 5시간 동안 건조한 후, pH, EC, 수분함량, 중금속의 농도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 토양 pH 분포 및 전류변화

Fig. 2에 2 V/cm의 전압경사를 적용한 EK 실험 후 퇴적토 내 구간별 pH 분포를 나타내었다. HCl과 HNO₃을 사용한 실험군에서 퇴적토 내 전체적인 pH 분포는 양극 부근을 제외하고는 대체로 중성을 유지하였다. 양극 부근에서는 전기분해 반응으로 인한 수소이온의 발생에 의해 산성화를 유발하였으며, 이를 제외한 다른 구간에서는 생성된 수산화이온의 이동과 퇴적토의 높은 완충능력에 의해 중성 또는 약 염기성화를 유발하였다. 그로 인해, 산성용액을 계속 순환시켜주어도 불구하고 양극 부근을 제외한 전체적인 퇴적토의 pH는 큰 변화가 없이 중성 또는 약 염기성으로 유지되었다. 퇴적토의 평형 pH는 중금속의 이동성이나 추출능에 큰 영향을 미친다. 대부분의 양이온 중금속들은 수소이온과의 이온교환반응으로 인해 퇴적토로부터 탈착되기 때문에 산성의 조건에서 추출능이 높다고 알려져 있다[3]. 반대로 염기성 조건에서는 수소이온 보다는 수산화이온의 양이 많기 때문에 중금속의 추출능이 떨어진다. 그러므로, 본 실험에서 퇴적토 내 pH 분포를 바탕으로 볼 때, 높은 전압경사에서 산성 전해질은 중금속의 추출효율을 증가시키기 어렵다고 판단된다.

Fig. 3에 EK 실험 동안 각 실험군에서의 전류변화를 나타내었다. 모든 실험군에서 전류는 EK 실험이 진행되는 동안 거의 일정하게 유지되었다. EK 시스템에서 전류는 퇴적토 내 이온물질의 제거와 함

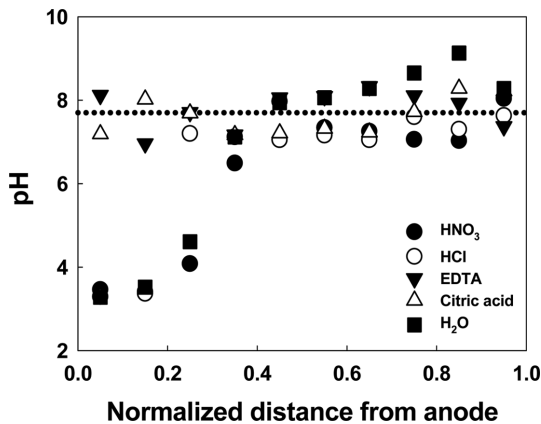


Fig. 2. pH distribution of sediment after EK treatment.

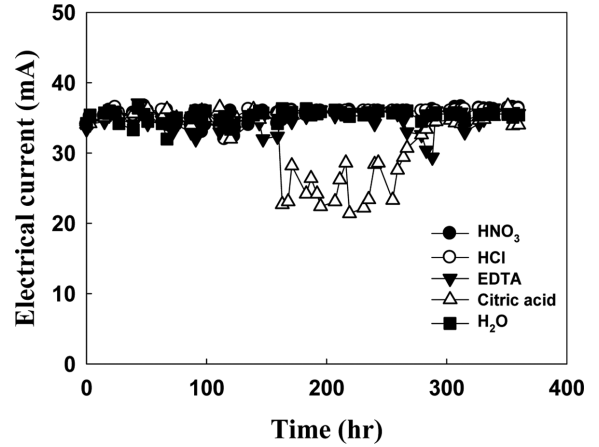


Fig. 3. Current change for each EK treatment.

께 점점 감소하는 것이 일반적이다. 전해질의 종류에 따른 EOF의 영향으로 인해 퇴적토 내 이온의 감소와 함께 EK 처리 동안 전류의 변화를 유발시킨다. CA를 사용한 실험군에서, 전류는 150시간 이후에 약간 감소하였으며 그 이후에 증가와 감소를 반복하였고 다시 이전 본래의 전류 값으로 유지되었다. 이번 연구에서는 퇴적토로부터 중금속의 용해 및 탈착능을 높이기 위하여 EK 시스템에 높은 전압경사를 적용시켰다. 하지만, 이러한 높은 전압경사를 적용시킴으로 인해, 실험 동안 전류가 높게 유지됨으로써 퇴적토를 처리하기 위해 높은 전력소모를 야기하였다.

3-2. 전기삼투흐름

Fig. 4에 EK 실험 동안 양극에서 음극으로 발생한 EOF를 나타내었다. 전체적으로 시간이 지남에 따라 EOF의 부피는 점차 증가하는 경향을 보였고, 전해질에 따른 EOF의 양은 다소 차이가 있었다. 전해질로 CA와 EDTA를 사용한 실험군에서 가장 많은 EOF가 발생하였고, HNO₃과 수돗물을 사용한 실험군에서 가장 적은 EOF가 발생하였다. EOF는 퇴적토표면의 제타포텐셜(zeta potential)과 관련있으며, 이는 전해질의 pH에 주로 영향을 받는다. 만약 pH가 낮아 퇴적토의 제타포텐셜이 양(+)의 값을 가지게 되면 EOF의 발생량은 낮아진다. 반대로, pH가 높아 퇴적토의 제타포텐셜이 음(-)의 값을 가지게 되면 전기의 흐름에 따라 EOF의 발생량은 많아진다. Kaya and Yukselen [19]은 음이온 계면활성제가 토양의 제타포텐셜 이 음의 값

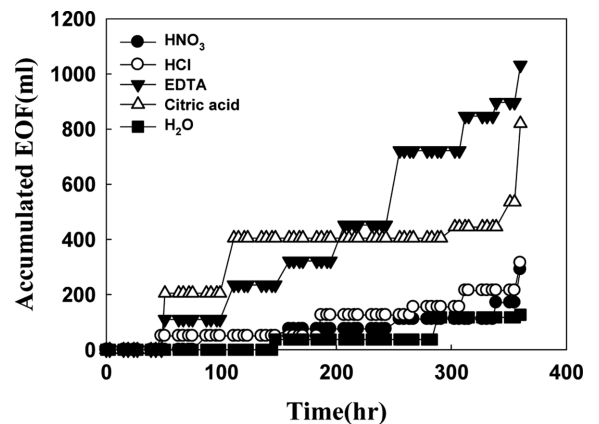


Fig. 4. Accumulated EOF with elapsed time.

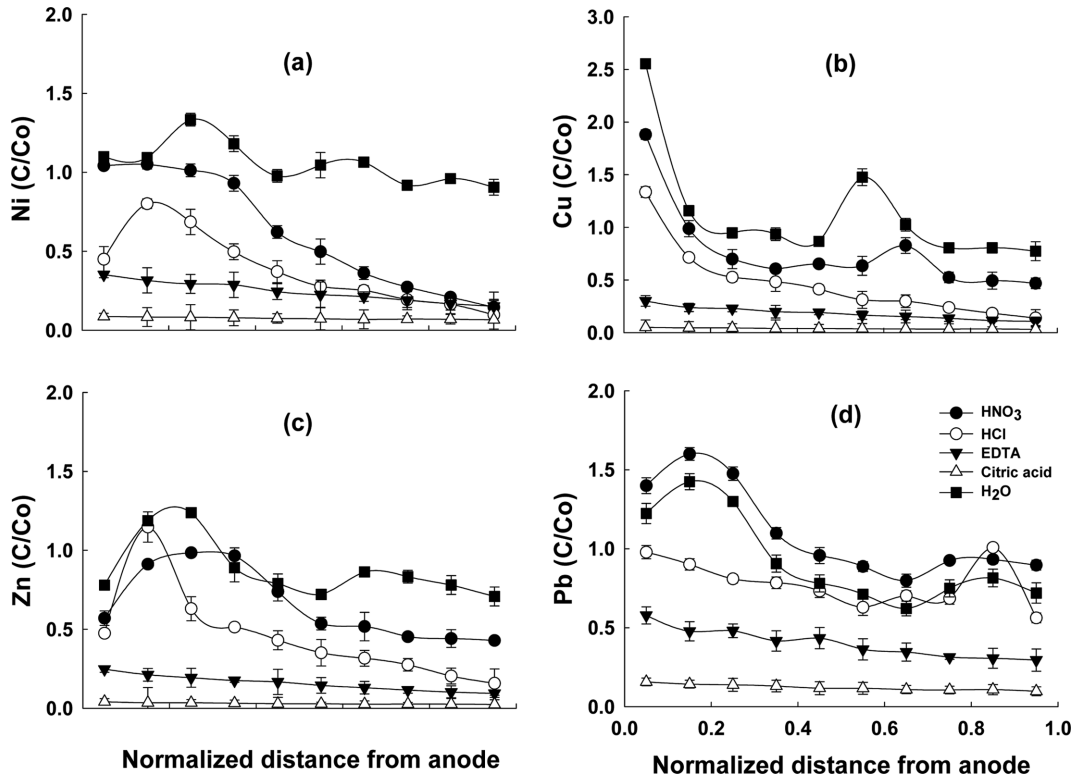


Fig. 5. (a) Ni, (b) Cu, (c) Zn, and (d) Pb distributions in sediment after EK treatment.

을 가지도록 유발하여 더 많은 EOF가 발생하였다고 보고하였다. 본 실험에서는 음극전해질로 HNO₃, HCl, 수돗물을 사용한 실험군에서 CA 혹은 EDTA에 비하여, 양극 부근에서는 퇴적토의 pH가 약 3으로 산성상태이었기 때문에 EOF의 양이 비교적 적었다. 하지만 반대로 CA와 EDTA를 사용한 실험군에서는 실험이 끝난 후, 퇴적토의 pH는 전 구간에서 중성 혹은 염기성을 유지하였기 때문에 비교적 많은 EOF가 발생하였다.

3-3. 중금속 제거

EK 실험 후 반응기 각 구간별 중금속의 농도 및 전체적인 실험결과를 Fig. 5와 Table 2에 각각 나타내었다. 또한, 전압경사의 변화에

따른 중금속의 제거율을 비교하기 위해, 이전 1 V/cm의 전압경사를 이용한 EK 실험과의 중금속의 제거율을 Table 3에 나타내었다[1]. 음극전해질로 HCl을 사용한 실험군에서 Ni, Cu, Zn, Pb는 각각 62.1, 53.6, 55.1, 22.1%의 제거율을 보였지만, 이전 1 V/cm의 낮은 전압경사를 적용한 EK 실험과 비교하여 더 낮은 제거율을 보였다[1]. EK 시스템에 높은 전압경사를 적용하게 되면 양극에서는 HCl의 활발한 전기화학적 반응에 의해 염소가스가 발생하고 수용액 중에 Cl₂(g)가 더 많이 발생하기 때문에 토양으로부터 염소이온이 손실되어 중금속과 결합할 수 있는 염소이온이 줄어들게 되고, 이로 인해 Me(OH)_n 형태로 중금속이 침전을 하여 이동성이 줄어들게 된다.

EDTA를 사용한 실험군에서는 Ni, Cu, Zn, Pb는 각각 75.6, 81.6,

Table 2. Summary of overall EK performance (2 V/cm)

| | | HNO ₃ | HCl | EDTA | CA | Tap water |
|------------------------|----|------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Removal efficiency (%) | Ni | 7.2±0.04 | 62.1±0.06 | 75.6±0.06 | 92.4±0.05 | -5.8±0.04 |
| | Cu | 22.3±0.06 | 53.6±0.05 | 81.6±0.04 | 96.1±0.05 | -13.5±0.06 |
| | Zn | 34.5±0.04 | 55.1±0.06 | 84.2±0.04 | 97.1±0.03 | 12.1±0.04 |
| | Pb | 8.7±0.04 | 22.1±0.04 | 60.0±0.06 | 88.1±0.03 | 26.0±0.05 |
| Final soil pH | | 3.5-8.0 | 3.3-7.6 | 7.0-8.3 | 7.1-8.2 | 3.2-9.1 |
| Accumulative EOF (mL) | | 291 | 350 | 1032 | 820 | 127 |

Table 3. Removal efficiencies of heavy metals on EK process (1 V/cm) [1]

| | | HNO ₃ | HCl | EDTA | CA | Tap water |
|------------------------|----|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Removal efficiency (%) | Ni | 42.0±0.04 | 67.0±0.06 | 13.2±0.06 | 49.4±0.05 | 13.9±0.04 |
| | Cu | 11.1±0.06 | 67.0±0.05 | 7.5±0.04 | 69.8±0.05 | 37.6±0.06 |
| | Zn | 16.6±0.04 | 69.5±0.06 | 1.6±0.04 | 67.8±0.03 | 21.5±0.04 |
| | Pb | 7.9±0.04 | 67.8±0.04 | 1.7±0.06 | 57.7±0.03 | 20.0±0.05 |

84.2, 60.0%의 제거율을 보였으며, 이전 1 V/cm의 낮은 전압경사를 적용한 실험보다 더 높은 제거율을 보였다. 이는 EOF에 의해 퇴적토 chamber로 EDTA가 빠르게 이동하여 metal-EDTA의 화합물을 형성하였기 때문이다.

CA는 다른 전해질과 비교하여 가장 좋은 중금속 제거율을 얻을 수 있었으며, Ni, Cu, Zn, Pb이 각각 92.4, 96.1, 97.1, 88.1%의 제거율을 얻을 수 있었다. 모양과 결합하고 있는 중금속은 EDTA 혹은 citrate과 매우 강하게 결합하기 때문에 중금속 추출에 매우 용이한 물질로 잘 알려져 있다. 따라서, EDTA와 마찬가지로 높은 전압경사로 인해 전기이동 및 EOF에 의해 퇴적으로 citrate의 투입이 활발해져 퇴적토 내 중금속과 metal-citrate를 형성하여 제거되었을 것이라 판단된다.

HNO₃은 HCl과 마찬가지로 강한 무기산에도 불구하고 중금속의 제거율은 HCl보다 훨씬 더 낮은 것을 확인할 수 있었다. chloride는 중금속과 결합하여 화합물을 형성할 수 있지만 nitrate는 중금속과 결합할 수 있는 형태가 없기 때문에 중금속의 추출이 비교적 어렵다[20]. 그 결과, Ni, Cu, Zn, Pb는 각각 38.5, 22.3, 34.5, 7.5%의 제거율을 얻었으며, 이전 1 V/cm을 적용한 실험과 비교하여 대체로 비슷한 중금속의 제거율을 얻을 수 있었다.

앞에서도 언급했듯이, 퇴적으로부터 중금속의 제거는 추출제에 따른 퇴적토의 pH와 깊은 관련이 있다[22]. 하지만 Fig. 2에서 보듯이, EK 실험 후 전체적인 퇴적토의 pH는 약 염기성을 보였다. 따라서, metal-chloride, metal-EDTA, metal-citrate와 같은 결합반응에 의해 퇴적으로부터 중금속이 제거된 것으로 판단된다. 양이온 중금속들은 일반적으로 전기이동(electromigration)에 의해 음극 쪽으로 이동하며, 음극부근에 집적된다[7,22]. 하지만 HCl, HNO₃, 수돗물을 사용한 실험군에서, 여러 중금속 화합물은 음이온 형태로 존재하게 되어 주로 양극부근에 집적되었다. 따라서, 중금속 화합물들은 EOF 보다는 전기이동에 의해 양극 쪽으로 이동하였으며, 이는 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 음극 쪽으로의 EOF가 많이 발생하지 않은 것으로 증명할 수 있다. EDTA와 CA의 경우, 중금속과 강하게 결합하여 EOF에 의해 퇴적으로부터 중금속들을 제거할 수 있었다.

4. 결 론

중금속으로 오염된 해양준설퇴적토를 제거하기 위하여 2 V/cm의 전압경사를 적용한 실험실 규모의 EK 실험을 진행하였다. 일반적으로 중금속들은 산성 조건에서 추출이 잘 된다고 알려져 있지만, 높은 알칼리도 및 완충능을 가진 해양퇴적토의 특성상 EK 실험 후의 전체적인 퇴적토의 pH는 강한 산성용액을 전해질로 사용함에도 불구하고 약 염기성으로 유지되었다. EK 실험이 진행되는 동안 모든 실험군에서 EOF는 양극 쪽에서 음극 쪽으로 이동하였으며, 이는 EDTA와 CA를 사용한 실험군에서 뚜렷한 이동성을 확인할 수 있었다. EK 시스템 적용 후 각 전해질에 따른 중금속의 제거율은 citric acid > EDTA > HCl > HNO₃ > tap water 순이었으며, EDTA의 경우 이전의 1 V/cm의 전압경사와 비교하여 높은 중금속의 제거효율을 얻을 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국연구재단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Kim, K. J., Kim, D. H., Yoo, J. C. and Baek, K., "Electrokinetic Extraction of Heavy Metals from Dredged Marine Sediment," *Sep. Purif. Technol.*, **79**, 164-169(2011).
- Park, S. Y., Park, G. Y., Kim, D. H., Yang, J. S. and Baek K., "Electrokinetic Separation of Heavy Metals from Wastewater Treatment Sludge," *Sep. Sci. Technol.*, **45**, 1982-1987(2010).
- Nystrom, G. M., Ottosen, L. M. and Villumsen, A., "Test of Experimental Set-ups for Electrodialytic Removal of Cu, Zn, Pb and Cd from Different Contaminated Harbour Sediments," *Eng. Geol.*, **77**, 349-357(2005).
- Meegoda, J. N. and Perera, R., "Ultrasound to Decontaminate Heavy Metals in Dredged Sediments," *J. Hazard. Mater.*, **85**, 73-89(2001).
- Li, F., Bade, R., Oh, S. and Shin, W. S., "Immobilization of Heavy Metals in a Contaminated Soil Using Organic Sludge Char and Other Binder," *Korean J. Chem. Eng.*, **29**, 1362-1372(2012).
- Yoo, J. C., Lee, C. D., Yang, J. S. and Baek, K., "Extraction Characteristics of Heavy Metals from Marine Sediments," *Chem. Eng. J.*, **228**, 688-699(2013).
- Yeung, A. T., "Milestone Developments, Myths, and Future Directions of Electrokinetic Remediation," *Sep. Purif. Technol.*, **79**, 124-132(2011).
- Acar, Y. B. and Alshwabkeh, A. N., "Principles of Electrokinetic Remediation," *Environ. Sci. Technol.*, **27**, 2638-2647 (1993).
- Jeon, C. S., Yang, J. S., Kim, K. J. and Baek K., "Electrokinetic Removal of Petroleum Hydrocarbon from Residual Clayey Soil Following a Washing Process," *Clean-Soil Air Water*, **38**, 189-193(2010).
- Kim, W. S., Park, G. Y., Kim, D. H., Jung, H. B., Ko, S. H. and Baek, K., "In situ Field Scale Electrokinetic Remediation of Multi-metals Cocontaminated Paddy Soil: Influence of Electrode Configuration," *Electrochim. Acta.*, **86**, 89-95(2012).
- Jo, S. U., Kim, D. H., Yang, J. S. and Baek, K., "Pulse-enhanced Electrokinetic Restoration of Sulfate-containing Saline Greenhouse Soil," *Electrochim. Acta.*, **86**, 57-62 (2012).
- Kim, D. H., Jo, S. U., Choi, J. H., Yang, J. S. and Baek, K., "Hexagonal two Dimensional Electrokinetic Systems for Restoration of Saline Agricultural Lands: A Pilot Study," *Chem. Eng. J.*, **198-199**, 110-121(2012).
- Yang, J. W. and Lee, Y. J., "Status of Soil Remediation and Technology Development in Korea," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **45**, 311-318(2007).
- Ryu, B. G., Park, G. Y., Yang, J. W. and Baek, K., "Electrolyte Conditioning for Electrokinetic Remediation of As, Cu, and Pb-Contaminated Soil," *Sep. Purif. Technol.*, **79**, 170-176(2011).
- Yang, J. S., Lee, J. Y., Baek, K., Kwon, T. S. and Choi, J., "Extraction Behavior of As, Pb, and Zn from Mine Tailings with Acid and Base Solutions," *J. Hazard. Mater.*, **171**, 443-451(2009).
- Kim, D. H., Ryu, B. G., Park, S. W., Seo, C. I. and Baek, K., "Electrokinetic Remediation of Zn and Ni-contaminated Soil," *J. Hazard. Mater.*, **165**, 501-505(2009).
- Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G. and Richer-Lafleche, M., "Soil Washing for Metal Removal: A Review of Physical/chemical Technologies and Field Applications," *J. Hazard. Mater.*, **152**, 1-31(2008).

18. Jain, C. K., "Metal Fractionation Study on Bed Sediments of River Yamuna, India;" *Water Res.*, **38**, 569-578(2004).
19. Kaya, A. and Yukselen, Y., "Zeta Potential of Soils with Surfactants and Its Relevance to Electrokinetic Remediation;" *J. Hazard. Mater.*, **120**, 119-126(2005).
20. Bodog, I., Polyak, K. and Hlavay, J., "Determination of Heavy Metals in Lake and River Sediments by Selective Leaching;" *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, **66**, 79-94(1997).
21. Altaee, A., Smith, R. and Mikhalovsky, S., "The Feasibility of Decontamination of Reduced Saline Sediments from Copper Using the Electrokinetic Process;" *J. Environ. Manage.*, **88**, 1611-1618(2008).
22. Acar, Y. B., Gale, R. J., Alshawabkeh, A. N., Marks, R. E., Puppala, S., Bricka, M. and Parker, R., "Electrokinetic Remediation - Basics and Technology Status;" *J. Hazard. Mater.*, **40**, 117-137 (1995).