

# Effect of Electrolyte Concentration on Surfactant-Enhanced Electrokinetic Removal of Phenanthrene

이유진, 박지연, 김상준, 양지원

한국과학기술원 생명화학공학과 (e-mail : jiny@kaist.ac.kr)

## <ABSTRACT>

Surfactant-enhanced electrokinetic (EK) process was investigated to remove polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from low-permeable soils. Phenanthrene and kaolinite were selected as a representative PAH and a model soil, respectively. A nonionic surfactant Tergitol 15-S-12 was applied to improve the solubility of phenanthrene and sodium chloride was used as an electrolyte at the various concentrations from 0.001 to 0.1M. The addition of electrolyte affected both the removal efficiency and operation cost. When electrolyte was introduced, the electrical potential gradient became low and thus power consumption was reduced. However, as electrolyte concentration increased, the electroosmotic flow also decreased, so the removal efficiency of contaminant decreased. Therefore, the removal efficiency and power consumption should be considered simultaneously to determine the optimum surfactant concentration, so a relatively lower concentration of electrolyte than certain value is desired.

**key words** : electrokinetic remediation, phenanthrene, nonionic surfactant, electrolyte

## 1. 서론

대표적인 소수성 유기화합물인 다환방향족 탄화수소 화합물 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)은 낮은 농도에서도 독성이 강하며 그 중 많은 물질이 발암물질로 알려져 있다. 이들은 대부분 휘발성이 낮고 물에 대한 용해도가 낮으며 토양에 대한 흡착도가 높기 때문에 일반적인 토양증기추출 법이나 토양세척기술로는 높은 효율을 기대하기 어렵다. 특히 저투수성 토양에서는 물질의 이동이 용이하지 않으므로 제거율이 현저히 감소될 것이다. 현재 저투수성 토양에서 토양과 소수성 오염물, 세척액 사이의 상호작용을 증가시킬 수 있는 방법으로 계면활성제로 향상된 동전기 기술이 활발히 연구되고 있다.<sup>1),2)</sup>

본 실험에서는 계면활성제로 향상된 동전기 기술의 효율적인 운전을 위해 주요 공정변수 중 하나인 전해질 농도의 영향을 알아보았다. 이를 위해 점토의 일종인 kaolinite로부터 phenanthrene을 제거하기

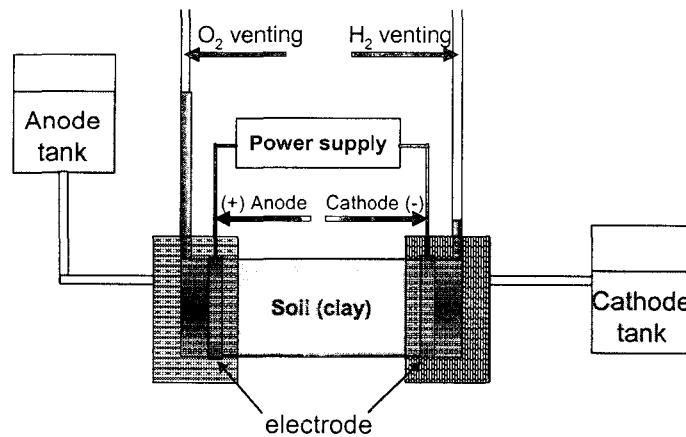
위해, 비이온성 계면활성제인 Tergitol 15-S-12와 동전기 기술을 함께 사용한 공정에서 NaCl의 농도에 따른 영향을 알아보고, 적절한 전해질의 농도에 대해 조사하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

토양 시료는 경남 산청에서 생산되는 kaolinite-white O이며, 시료를 건조시킨 후 분쇄하여 150  $\mu\text{m}$  이하의 입자만을 사용하였다. PAH로는 phenanthrene (Sigma, 96+%)이 선택되었으며 초기오염농도는 40 0~500 mg/kg soil 정도로 하였다. 계면활성제는 alcohol ethoxylate 계열의 비이온성 계면활성제인 Tergitol 15-S-12 (Sigma)를 사용하였다 (평균 분자량: 738. CMC: 110 mg/L).<sup>3)</sup>

실험에 사용된 동전기적 토양정화장치(그림 1)는 직경 4 cm, 길이 10 cm의 원통관으로 phenanthrene의 흡착을 최소화하기 위해 유리재질로 제작되었으며 반응기 양끝에는 체적이 75  $\text{cm}^3$ 인 전극조를 부착하였다. 균일하게 압밀된 토양을 반응기 속에 장착하고 양극으로부터 각각 0, 0.001, 0.005, 0.01, 0.1 M 농도의 NaCl (Junsei, 99.5+%)을 포함한 Tergitol 15-S-12 2.5 g/L 용액을 주입하였다. Anode tank의 수위는 일정하게 유지하여 항상 같은 수리학적 경사에서 같은 유량이 공급되도록 하였다. 전극은 흑연 판으로 하였으며, 10 mA의 정전류 조건하에서 조업하였다. 전원공급기는 직류 전원공급기를 사용하였고 최대 200 V까지의 전압을 공급할 수 있다.

반응기는 2주간 운전되었으며 운전기간 동안 주기적으로 전압 변화와 전기삼투유량, 유출수의 pH를 관찰하였다. 실험 종료 후 시료를 원판 모양의 11개의 절편으로 절단하여 건조시킨 후 메탄올로 추출하여 HPLC 분석을 통하여 남아있는 phenanthrene을 정량하였다.



[그림 1] Schematic diagram of electrokinetic remediation test

## 3. 결 과

동전기 공정에서는 전류의 흐름을 돕기 위하여 전해질을 포함한 세척액이 자주 사용된다. 이때 사용되는 전해질의 농도는 전력 소모량뿐만 아니라 전기삼투유량에도 영향을 주므로 적절한 농도의 전해질의 사용은 효율적인 공정운전을 위해 중요하다.

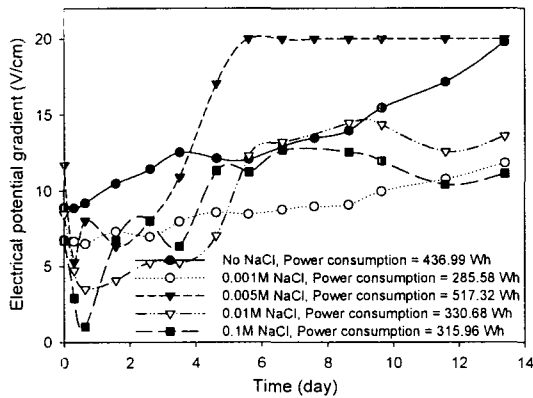
실험이 진행되는 동안의 평균전위경사 (V/cm)의 변화는 그림 2와 같다. 시간이 경과함에 따라 전위경사는 점차 증가하였는데, 이는 전기장 하에서의 이온이동과 수소이온과 수산화이온의 중화반응에 의해 공극수 내의 이온농도가 점차 감소하였기 때문이다. 전해질로서 NaCl을 사용한 경우, 대부분 계면활성

제만 사용한 경우보다 이온 농도의 증가로 인해 낮은 전위경사가 유지되었으며, 이로부터 전력 소모량도 감소하였다. 그러나 전해질의 농도 증가에 따른 전력 소모량의 감소 변화는 크지 않은 것으로 관찰되었다.

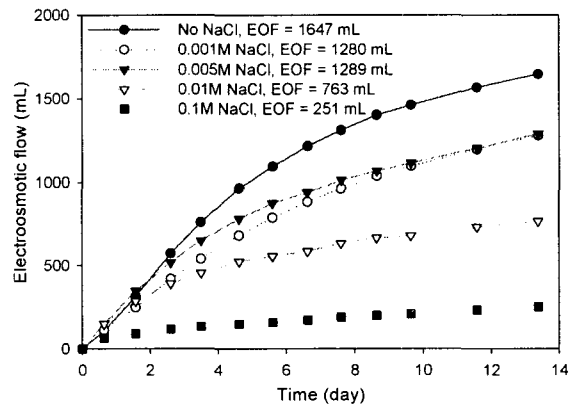
동전기 실험의 전기삼투유량은 전해질을 사용하지 않은 경우 가장 많이 발생하였으며 (1647 mL), 전해질의 농도가 증가할수록 감소하였다 (그림 3). 이는 전해질의 농도가 증가함에 따라 용액의 이온 세기가 증가하여 토양의 제타포텐셜이 감소하였기 때문으로 사료된다.

유출수의 pH는 초기에는 음극의 수산화 이온에 의해 증가하였다가, 전기삼투흐름에 의해 양극의 수소이온이 음극으로 이동함에 따라 점차로 낮아졌으며 전해질의 농도가 낮을수록 빨리 감소하였다 (그림 4). 이로부터 유출수의 pH가 전기삼투유량의 발생량과 직접적인 관계가 있음을 알 수 있었다.

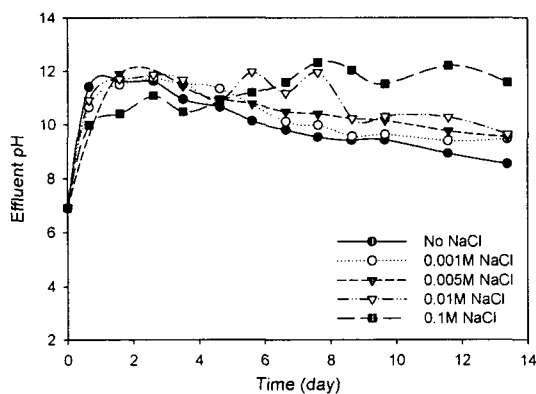
그림 5는 실험이 종료된 후 제거되지 않고 토양 속에 잔류하고 있는 phenanthrene의 양과 제거율을 나타낸다. Phenanthrene의 제거효율은 계면활성제만 사용한 경우 58.28 %로 가장 높았으며 전해질의 농도가 높을수록 감소하였다. 이는 전기삼투유량에 비례하는 결과로써, 계면활성제로 향상된 동전기 기술에서 전기삼투유량이 오염물의 제거효율을 결정하는 중요한 요소임을 알 수 있다.



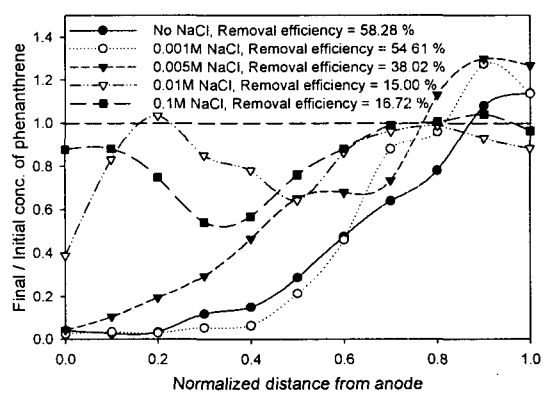
[그림 2] Electrical potential gradient



[그림 3] Electroosmotic flow



[그림 4] pH profile of effluent



[그림 5] Removal efficiency of phenanthrene

## 4. 결론

본 연구에서는 계면활성제와 동전기 기술을 이용한 오염토양 처리 공정에서 대표적인 PHAs인 phenanthrene을 kaolinite로부터 제거하기 위해 비이온성 계면활성제인 Tergitol 15-S-12를 선정하고 전해질로서 NaCl을 함께 주입하여, 공정에 대한 전해질 농도의 영향을 알아보았다.

전해질의 첨가는 제거효율과 전력 소모량의 두 가지 측면에 모두 영향을 미쳤다. 전해질이 사용되었을 때, 이온 농도의 증가로 인해 계면활성제만 사용한 경우에 비해 상대적으로 낮은 전위경사가 유지되어 전력 소모량이 감소하였다. 그러나 전해질 농도가 증가함에 따라 전기삼투유량이 감소되어 제거효율 또한 낮아지게 되었다. 따라서 오염물에 대한 높은 제거효율과 전력 소모량의 감소를 함께 고려할 때, 0.001M의 NaCl을 사용하는 것이 가장 효과적이었다.

결론적으로, 계면활성제로 향상된 동전기 기술에서 낮은 농도의 전해질 사용은 공정의 효율을 높이는 데 효과적일 것이다.

## 사 사

본 연구는 국가지정연구실사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다 (M1-0203-00-0001).

## 참고문헌

- 1) R. E. Saichek, K. R. Reddy, "Effects of system variables on surfactant enhanced electrokinetic removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from clayey soils", *Environ. Technol.*, 24(4), pp.503-516 (2003)
- 2) 이현호, 박지연, 김상준, 이유진, 양지원, "동전기적 토양복원에 적합한 계면활성제의 선정", 한국지하수토양환경학회지, 8(1), pp.1-8 (2003)
- 3) J.-L. Li, B.-H. Chen, "Solubilization of model polycyclic aromatic hydrocarbons by nonionic surfactant", *Chem. Eng. Sci.*, 57, pp.2825-2835 (2002)