

Electrokinetic Soil Flushing with Nonionic Surfactant for Removal of Phenanthrene

이유진 · 박지연 · 김상준 · 기대정 · 양지원

한국과학기술원 생명화학공학과 (jiny@kaist.ac.kr)

ABSTRACT

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are representative hydrophobic organic carbons (HOCs). Surfactant-enhanced electrokinetic (EK) remediation is an innovative *in-situ* technology that can effectively remove HOCs from low-permeability soils. In this study, the electrokinetic remediation using Tergitol 15-S-12, a nonionic surfactant, was conducted for the removal of phenanthrene from kaolinite. Tergitol 15-S-12 was used at concentrations of 1.5, 2.0, 2.5 and 7.5 g/L to enhance the solubility of phenanthrene. When the surfactant solution was applied to EK system, high electrical potential gradient was maintained and the amount of electroosmotic flow decreased. Removal efficiency of phenanthrene was proportional to the concentration of Tergitol 15-S-12 because the solubility and mobility of phenanthrene was enhanced by surfactant micelle. Therefore, the suitable concentration of nonionic surfactant Tergitol 15-S-12 is expected to improve the removal efficiency of PAHs in EK remediation.

key words : electrokinetic remediation, phenanthrene, nonionic surfactant

1. 서 론

대표적인 소수성 유기물질 중 하나인 다환방향족 탄화수소화합물 (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)은 석유나 석탄을 공정하는 공장지역 또는 유류보관소 주변에서 높은 농도로 발견되고 있다. 이들은 대부분 휘발성이 낮아 증기주입이나 진공추출 등 기체를 이용한 복원기술의 적용이 어렵고, 물에 대한 용해도가 낮으며 토양에 대한 흡착도가 높기 때문에 토양세척 (pump and treat)의 효율도 제한되어 있다.¹⁾

최근 들어 소수성 오염물질을 물 속에 효과적으로 용해시키는 방법의 하나로 계면활성제를 사용하는 방법이 많이 연구되고 있다.^{1,2)} 이 때 잔류하는 계면활성제는 2차 오염을 야기할 수 있으므로 오염물에 대한 용해도가 높으면서도 토양에의 흡착이 적고 생분해성이 뛰어난 계면활성제를 선택하는 것이 중요하다.²⁾

그러나 점토와 같은 세립질 지반에서는 투수계수가 낮아서 계면활성제 용액을 직접적으로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 토양의 전기화학적 특성의 이용하여 저투수성 토양의 처리에 효율적인

in-situ 정화기법인 동전기 기술과 계면활성제를 함께 이용하면 소수성 유기물질로 오염된 토양의 정화 효율을 증가시킬 수 있을 것이다.^{1,2)}

본 실험에서는 phenanthrene으로 오염된 저투수성 토양 처리 시, 비이온성 계면활성제인 Tergitol 15-S-12를 이용하여 향상된 기법의 동전기 기술을 적용하여 오염물의 제거 가능성에 대해 연구하였다. 또한 계면활성제의 농도에 따른 동전기 현상 및 제거 효율의 변화를 관찰하여 효율적인 공정 적용을 위한 계면활성제의 농도에 대해 조사하였다.

2. 실험재료 및 방법

토양 시료는 경남 산청에서 생산되는 kaolinite-white O이며, 시료를 건조시킨 후 분쇄하여 150 μm 이하의 입자만을 사용하였다. PAH로는 phenanthrene (Sigma, 96+%)이 선택되었으며 초기오염농도는 30 0~500 mg/kg soil 정도로 하였다. 계면활성제는 alcohol ethoxylate 계열의 비이온성 계면활성제인 Tergitol 15-S-12 (Sigma)를 사용하였다 (표 1). Tergitol 15-S-12는 11~15개의 탄소사슬로 이루어진 알코올과 평균적으로 12.3개의 ethylene oxide 그룹이 결합하여 이루어진 혼합물로서 생분해도가 높은 것으로 알려져 있다.³⁾

실험에 사용된 동전기적 토양정화장치 (그림 1)는 직경 4 cm, 길이 10 cm의 원통관으로 phenanthrene의 흡착을 최소화하기 위해 유리재질로 제작되었으며 반응기 양끝에는 체적이 75 cm^3 인 전극조를 부착하였다. 균일하게 압밀된 토양을 반응기 속에 장착하고 계면활성제 용액을 0 (control), 1.5, 2.0, 2.5, 7.5 g/L의 농도로 anode tank로부터 공급하였다. Anode tank의 수위는 일정하게 유지하여 항상 같은 수리학적 경사에서 같은 유량이 공급되도록 하였다. 전극은 흑연판으로 하였으며, 10 mA의 정전류 조건하에서 조업하였다. 전원공급기는 직류 전원공급기를 사용하였고 최대 200 V까지의 전압을 공급할 수 있다.

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

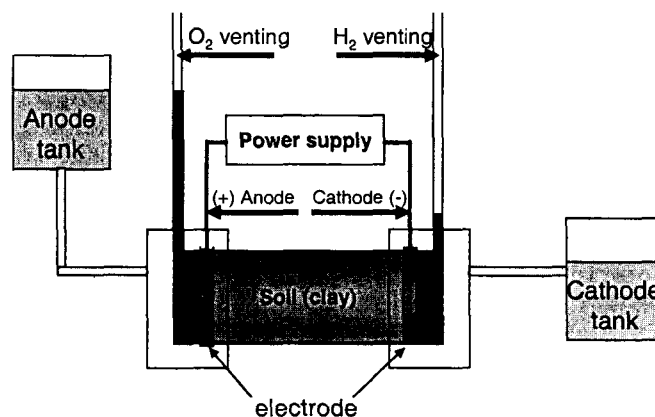


그림 1 Schematic diagram of electrokinetic remediation test

표 1 Properties of Tergitol 15-S-12

	Formula	MW	CMC (mg/L)	WSR (ppm/ppm)
Tergitol 15-S-12	R-(OCH ₂ CH ₂) _n -OH R: C ₁₁ -C ₁₅	738	110	0.017

3. 결 과

[그림 2]는 실험이 진행되는 동안의 평균전기경사 (V/cm)의 변화를 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 전기경사는 점차로 높은 값을 나타내게 되는데, 이는 양극에서 전기분해에 의해 생성된 수소이온이 음극으로 이동하면서 토양 표면의 확산이중층의 두께를 감소시켜 공극수의 흐름을 방해함으로써 토양내부의 저항이 점차로 증가하였기 때문이다. 또한 계면활성제 용액이 사용되었을 때 조금 더 높은 전기경사가 유지되었는데, 이것은 계면활성제로 인해 토양입자와의 상호작용 및 공극에서의 물리적인 저항이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다.

동전기 실험의 전기삼투유량 변화는 [그림 3]과 같다. 전반적으로 운전초기에는 높은 유량이 발생하다가 점차로 기울기가 감소하는 경향이 나타났으며 이는 양극에서 발생한 수소이온이 음극으로 이동함에 따라 확산이중층의 두께가 감소하면서 전기삼투유량 또한 감소하였기 때문이다. 또한 계면활성제의 농도가 낮을수록 더 많은 양의 전기삼투흐름이 발생하였는데, 이는 전기삼투유량이 용액의 점도에 반비례한다는 경향과 일치한다.

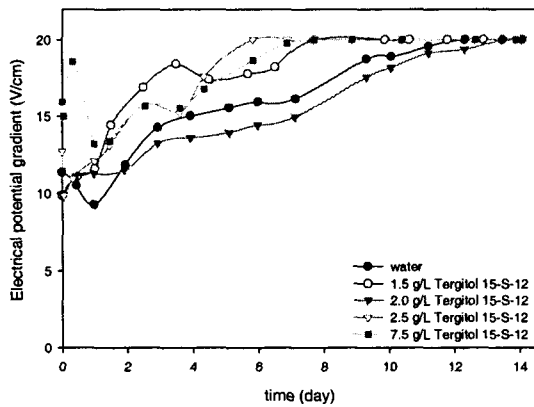


그림 2 Electrical potential gradient

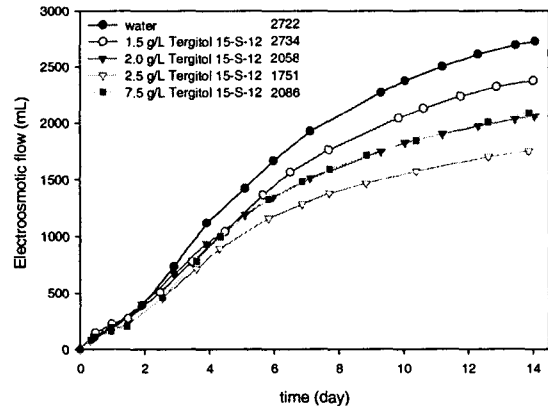


그림 3 Electroosmotic flow

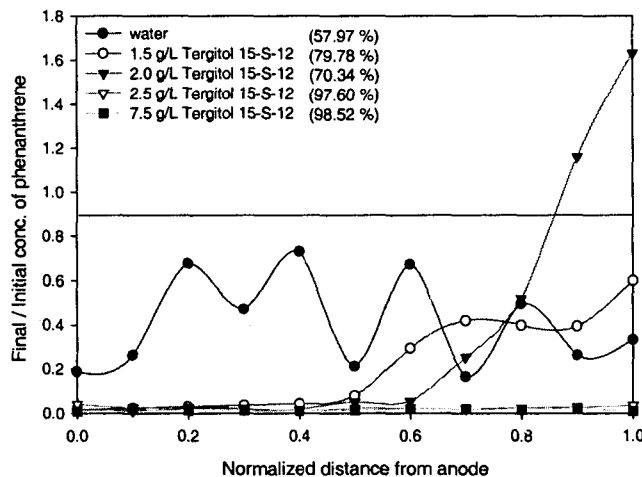


그림 4 phenanthrene의 제거효율

[그림 4]는 실험이 종료된 후 제거되지 않고 토양 속에 잔류하고 있는 phenanthrene의 양과 제거율을 나타낸다. 계면활성제를 사용하지 않고 증류수만 사용한 경우 2722 mL의 많은 전기삼투유량이 발생하였음에도 불구하고 58 %의 제거만이 이루어진 반면, Tergitol 15-S-12를 동전기 기술과 함께 사용하

였을 경우에는 70~99 %의 높은 제거효율을 얻을 수 있었다. 이는 Tergitol 15-S-12에 의해 phenanthrene의 용해도와 유동성이 증가하였기 때문이라고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 계면활성제와 동전기 기술을 이용한 오염토양 처리 공정에 적용 가능한 계면활성제로서 Tergitol 15-S-12를 선정하여 phenanthrene의 제거율을 조사함으로써 이 계면활성제의 적용가능성 및 공정 적용을 위한 적정 농도 범위를 알아보고자 하였다.

동전기 기술과 Tergitol 15-S-12를 함께 적용하였을 때, 계면활성제의 농도가 높아짐에 따라 토양과의 상호작용에 의한 저항증가로 전기경사는 높게 유지되며 전기삼투유량은 감소하게 된다. 그러나 계면활성제의 농도가 증가할수록 전기삼투유량이 감소함에도 불구하고 제거효율은 증가하였는데, 이는 계면활성제가 소수성 오염물의 용해도 및 유동성을 증가시켜 오염물을 효과적으로 제거했기 때문인 것으로 생각된다.

또한 Tergitol 15-S-12 용액의 농도를 2.5, 7.5 g/L로 적용했을 때 사용한 계면활성제의 양이 약 3배 증가한 것에 비해서 제거효율은 각각 97.6 과 98.5 %로 0.9 % 증가하였다. 이와 같이 제거효율은 계면활성제의 농도에 정비례하는 것은 아니므로 적절한 계면활성제 농도를 선정하여 이를 주입하는 것이 경제적이며 효율적으로 오염물을 제거하는 방법이 될 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)