

## 동전기적 토양복원에 적합한 계면활성제의 선정

이현호<sup>1</sup> · 박지연<sup>2</sup> · 김상준<sup>2</sup> · 이유진<sup>2</sup> · 양지원<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>LG 환경안전연구원

<sup>2</sup>한국과학기술원 생명화학공학과

## A study on Surfactants for Electrokinetic Soil Remediation

Hyun-Ho Lee<sup>1</sup> · Ji-Yeon Park<sup>2</sup> · Sang-Joon Kim<sup>2</sup> · You-Jin Lee<sup>2</sup> · Ji-Won Yang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>LG Institute of Environment, Safety & Health

<sup>2</sup>Department of Chemical & Biomolecular Engineering, KAIST

### ABSTRACT

Three different surfactants, APG, Brij30, and SDS, were tested to study the characteristics of sorption on soil surfaces, washing ability, biodegradability, and electrokinetic removal. Kaolinite and phenanthrene were selected as a model soil and a representative HOC, respectively. Phenanthrene was sorbed on kaolinite up to 2,200 mg/kg dry soil. The APG, Brij30, and SDS were sorbed on soil to 40, 7, and 4 g/kg soil, respectively. The washing ability of phenanthrene was in order of Brij30>SDS>APG. The biodegradability tested with sludge was in order of APG>Brij30>SDS. In the electrokinetic test, the highest removal efficiency was obtained with APG that exhibited the highest electroosmotic flow. To increase the removal efficiency of HOC in the electrokinetic remediation, the most important factor was the selection of surfactant which maximized the electroosmotic flow.

**Key words :** electrokinetic remediation, surfactant, phenanthrene, biodegradability

### 요 약 문

본 연구에서는 동전기적 토양복원에 적합한 계면활성제를 선정하는 방법으로 세 가지 계면활성제, APG, Brij30, SDS를 대상으로 토양에 흡착되는 계면활성제의 양, phenanthrene에 대한 용해도, 생분해도 및 동전기적 토양정화 현상을 살펴보았다. Phenanthrene은 kaolinite에 최대 2,200 mg/kg dry soil까지 흡착되었으며, APG, Brij30, SDS는 토양 1 kg당 각각 40, 7, 4 g이 흡착되었다. Phenanthrene의 용출효율은 계면활성제에 대해서 Brij30>SDS>APG의 순서로 나타났으며, 생분해도는 APG>Brij30>SDS의 순서로 나타났다. 동전기 정화실험에서는, 세 가지 계면활성제 중에서 전기삼투 흐름이 가장 원활한 APG가 phenanthrene에 대해 높은 제거율을 나타냈다. 이로부터 동전기적 토양복원에 적용하기 위해서는 계면활성제의 유기오염물에 대한 용출효율보다는, 전기삼투 흐름을 원활하게 할 수 있는 계면활성제를 선택하는 것이 보다 중요한 요소임을 알 수 있었다.

**주제어 :** 동전기적 복원기술, 계면활성제, phenanthrene, 생분해도

### 1. 서 론

다양한 경로를 통하여 토양으로 유출된 소수성 유기오염물들은 낮은 용해도와, 토양입자 표면과의 높은 친화력 그리고 느린 탈착을 때문에 토양 내를 이동하면서 장기적

인 토양지하수 오염을 초래하게 되므로, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이들 유기오염물질의 제거방법에 대한 다양한 정화기술이 개발되고 있다. 현재 소수성 유기오염물의 제거를 위하여 가장 많이 활용된 기술로는 토양세척/세정기술(soil washing/flushing)이 있으나 큰 효과는 얻지

\*Corresponding author : jwyang@kaist.ac.kr

원고접수일 : 2002. 11. 13 게재승인일 : 2003. 2. 20

못하고 있다. 한편 유기 오염토양 정화의 한 방법인 동전기 정화기술 (electrokinetic remediation)이 최근 경제적 · 기술적으로 타당성 있는 결과를 보고하고 있는데, 이는 오염 토양에 전기를 공급함으로써 전기 · 화학 · 수력학적인 현상들을 이용하여 토양 내의 공극수를 이동시켜 오염물을 제거하는 원위치 토양복원기술이다<sup>1)</sup>. 이때 전해질에 계면활성제를 첨가하게 되면, 토양 입자와 결합되어 있던 유기오염물들은 표면장력이 약해지면서 토양에서 탈착되어 계면활성제의 마이셀 내로 다량 흡수되고, 이때 마이셀은 공극수의 흐름을 따라 토양을 빠져나오으로써 유기오염물의 이동성 및 제거율을 향상시키게 된다<sup>2)</sup>.

한 분자 내에 친수성기와 소수성기의 화학적 작용기를 모두 가지고 있는 계면활성제는 소수성기를 이루고 있는 알킬사슬의 길이가 길수록 유기오염물에 대한 용해도가 증가하고, 친수성기가 클수록 감소하게 된다. 그러나 일반적으로 알킬사슬의 길이가 길수록 계면활성제의 토양에 대한 흡착량이 증가하는 경향을 보이게 되므로, 소수성기가 우세하면 유기오염물에 대한 용해능력은 증가하는 반면, 토양에의 흡착량이 증가하여 마이셀의 감소에 의한 용해능력의 감소를 초래하므로 용도에 알맞은 적절한 계면활성제를 선택하는 것이 중요하다<sup>3)</sup>.

계면활성제를 종류 별로 비교해 보면, 양이온성 계면활성제는 유기오염물에 대한 용해도는 우수하지만, 음전하를 띠는 토양 입자에 흡착하는 경향이 강하고 생분해도가 낮은 편이어서 토양정화에는 선호되지 않는다. 음이온성 계면활성제는 토양 흡착능력이 작고 유기오염물에 대한 제거효율도 높은 편이며, 비이온성 계면활성제는 일반적으로 경제적이며 용해도도 양호한 편이다<sup>3)</sup>.

계면활성제를 토양정화에 이용할 경우의 단점으로는, 계면활성제가 토양에 붙어있는 유기오염물 표면에 단층 (mono layer)이나 복층(double layer)의 형태로 흡착되어 유기오염물의 탈착을 방해하다가 복원 종료 후에 토양 공극수의 계면활성제 농도가 낮아지면서 흡착된 계면활성제가 마이셀을 형성하여 유기오염물의 유동성을 오히려 증가시키기도 하고, 때로는 복원 종료 후 남아있는 계면활성제가 오염원으로 작용하여 2차 토양오염을 유발하기도 한다.

계면활성제를 이용한 동전기 정화기술은 토양 내에서 소수성 유기오염물의 용해도를 증가시키고 토양 내에서의 오염물 이동을 가속화하는 기술로서, 특히 복원이 어려운 점토 토양에서 물질 이동을 증가시켜 토양정화 속도를 향상시킬 수 있다. 동전기 정화기술을 이용하여 토양에 전기를 공급하면 전해질의 전기분해 반응에 의하여 양극에서는 과량의 수소이온이 생성되고 음극에서는 과량의 수산화이온

이 생성되면서 이 이온들이 토양으로 유입되어 토양 내의 화학적 변화를 일으키게 된다. 동전기 정화기술에서 물질 (공극수 및 오염물)의 이동은 전기삼투(electroosmosis), 전기이동(electromigration)에 의해 주로 이루어진다<sup>4)</sup>. 전기삼투는 전기장 하에서 토양 입자의 확산이중층 내의 양이온들이 음극으로 이동하면서 공극수를 함께 이동시키는 현상이고, 전기이동은 전하를 띤 이온물질이 자신의 전하 특성에 따라 음이온은 양극으로, 양이온은 음극으로 이동하는 현상이다. 일반적으로 확산이중층의 두께가 증가할수록 전기삼투 흐름도 증가하게 된다.

본 연구에서는 저투수성 토양에서 소수성 유기오염물을 효과적으로 제거하기 위하여, 세 가지 계면활성제 APG, Brij30, SDS에 대한 표면장력, 토양 흡착정도, phenanthrene 용해도, 생분해도 및 계면활성제를 이용한 동전기 정화실험 결과를 비교함으로써 전기장 하에서 토양 내의 오염물의 이동 및 제거를 최대한 용이하게 할 수 있는 계면활성제의 선택기준을 알아보려고 한다<sup>5-10)</sup>.

## 2. 실험방법

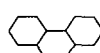
### 2.1. 실험재료

토양 시료는 경남 산청에서 생산되는 kaolinite를 건조로에서 건조시킨 후 분쇄하여 150 μm 이하의 입자를 사용하였다. 소수성 유기오염물로는 phenanthrene(Sigma, 96+%)이 선택되었으며(Table 1), 계면활성제로는 비이온성 계면활성제인 alkyl polyglucoside(trade name: APG, Henkel Korea)와 polyoxyethylene(4) lauryl ether(trade name: Brij30, Aldrich), 음이온성 계면활성제인 sodium dodecyl sulfate (SDS, Sigma, 99+%)가 사용되었다(Table 2). 특히 APG의 경우에는 식품에 사용되는 계면활성제로서 낮은 독성과 높은 생분해도를 가지고 있다.

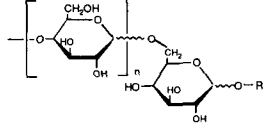
### 2.2. Phenanthrene 흡착평형 실험

50 mL 병에 토양 10 g과 6,000 ppm 이하의 농도에 따른 phenanthrene-아세톤 용액 30 mL를 넣고 24시간 동안 교반시킨 후, 아세톤을 증발시키며 토양을 건조하였다. 이

Table 1. Properties of phenanthrene<sup>11)</sup>

Compound	Formula	MW	Solubility in distilled water (μM)
phenanthrene	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> 	178.23	7.2

**Table 2.** Properties of the surfactants<sup>9, 11-13)</sup>

Compound	Formula	MW	Solubility in distilled water ( $\mu\text{M}$ )	CMC (0.1 M NaCl)	HLB
APG		390	Complete	-	7-9
Brij30	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_4\text{OH}$	362	-	$5.5 \times 10^{-5}$ M	9.7
SDS	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$	288.4	Complete	$1.45 \times 10^{-3}$ M	-

후, 증류수 30 mL를 각각의 토양에 넣고 12시간 교반시킨 후, 토양에 흡착되지 않고 토양 입자 사이의 공극에 존재하는 phenanthrene을 증류수 위로 떠오르게 하여 제거하였다. 같은 방식으로 여러 번 세척하여 토양에 흡착되지 않은 phenanthrene를 제거하고 토양을 건조시킨 다음, 메탄올로 토양에 흡착된 phenanthrene을 추출하여 HPLC(Waters 490E Detector/717 Autosampler/510 Pump 및 Symmetry C<sub>18</sub> Column)로 phenanthrene의 농도에 따른 토양 흡착량을 정량하였다.

**2.3. 계면활성제의 표면장력**

계면활성제가 토양에 흡착되는 성질을 확인하기 위하여 토양의 유무에 따른 계면활성제 용액의 농도 별 표면장력을 측정하였다. 2g의 토양에 각각의 계면활성제 용액 20 mL를 넣고 24시간 동안 교반한 후 표면장력을 측정하였다.

**2.4. Phenanthrene 용해도**

계면활성제에 따른 phenanthrene의 용해도를 알아보기 위해, 25 mL 병에 과량의 phenanthrene를 녹인 아세톤을 넣은 후 아세톤을 증발시켜 내벽에 도포시킨 후, 토양의 유무에 따른 농도 별 계면활성제 용액 20 mL를 넣어 48시간 동안 교반시킨 후 상층액을 HPLC로 분석하여 추출된 phenanthrene을 정량하였다.

**2.5. 계면활성제의 생분해도**

각 계면활성제의 생분해성을 검토하기 위해 폐수처리장(대전종말하수처리장)의 슬러지를 이용하여<sup>13-15)</sup>, 농도가 1700 mg dry cell/L인 슬러지 50 mL와 1 g/L 계면활성제 50 mL, trace metal solution 0.1 mL(MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 25 g/L, CaCl<sub>2</sub> 4.96 g/L, yeast extraction 2 g/L, FeCl<sub>3</sub> 0.5 g/L, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 3 g/L, KI 3 g/L, MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 1 g/L, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 2 g/L, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 1.4g/L, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 1 g/L, EDTA sodium salt 1.27g/L), (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1.4mL, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.6 mL를 250 mL

삼각플라스크에 넣고 30°C, 150 rpm의 배양기에서 8일간 배양하면서 COD 변화를 측정하였다.

**2.6. 동전기 정화실험**

**2.6.1 토양시료 및 전해질**

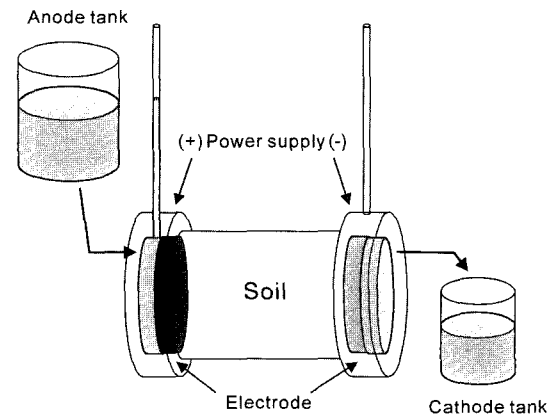
입자 크기 150  $\mu\text{m}$  이하의 토양을 이용하여 초기농도 500 mg phenanthrene/kg dry soil의 시료를 제조하였으며, 전해질은 각각의 계면활성제 용액에 대하여 5 g/L(pH 4)로 제조하였다.

**2.6.2 실험장치**

동전기 실험장치(Fig. 1)에서 균일하게 압밀된 토양은 직경 4 cm, 길이 10 cm의 유리로 된 원통관에 장착되었으며, 전해질은 양극탱크(anode tank)에서 수력학적 경사를 일정하게 하여 공급하였다. 실험에 사용된 전극은 흑연판(두께 0.8 cm, 지름 8 cm)을 사용하였으며, 흑연판에는 일정한 간격으로 지름 3 mm의 구멍을 천공하여 전해질의 유동을 원활하게 하였다. 전원공급기는 직류 전원공급기(최대 200V)를 사용하였다.

**2.6.3 실험조건 및 분석방법**

동전기 정화실험은 증류수와 세 가지 계면활성제 용액



**Fig. 1.** Schematic diagram of electrokinetic remediation test.

(5 g/L)을 전해질로 이용하여 정전류 조건(10 mA, 0.80 mA/cm<sup>2</sup>)하에서 14일 동안 진행하였다. 반응기 양쪽에 설치되어 있는 전극 사이의 전압경사 및 음극을 통하여 유출수로 배출되는 전기삼투 흐름이 측정되었으며, 실험 종료 후 phenanthrene의 농도는 각각의 토양 시료를 11개의 조각으로 등분하여 건조시킨 후, 메탄올로 추출하여 HPLC로 정량하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Phenanthrene의 흡착평형곡선

Kaolinite에 대한 phenanthrene의 흡착평형곡선에서 토양에 대한 흡착평형점은 2,200 mg phenanthrene/kg dry soil로 나타났다(Fig. 2). 이 결과로부터 토양에 첨가된 phenanthrene의 상당부분이 토양에 흡착되지 않는 상태로 존재한다는 것을 알 수 있었으며, 인위적으로 오염토양을 제조할 경우에는 토양에 흡착되지 않은 phenanthrene의 양이 반드시 고려되어야 할 것으로 사료된다.

#### 3.2. 계면활성제의 표면장력

각 계면활성제의 임계농도를 확인하기 위하여 농도에 따른 계면활성제의 표면장력을 측정하였다(Fig. 3). 표면장력은 농도가 증가할수록 감소하다가 일정한 값을 가지게 되는데, APG, Brij30 및 SDS의 임계농도는 각각 1.0, 0.1, 0.6 g/L으로 나타났다.

계면활성제 용액 내에 토양이 존재할 경우의 표면장력은 계면활성제 용액 자체의 표면장력보다 높은 값을 가지

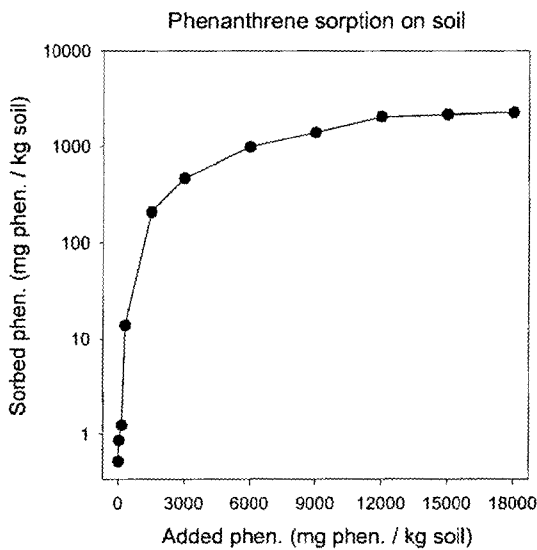
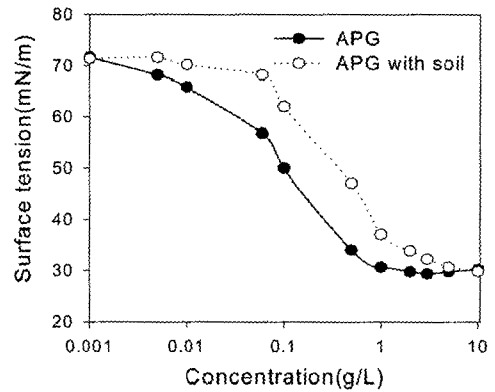
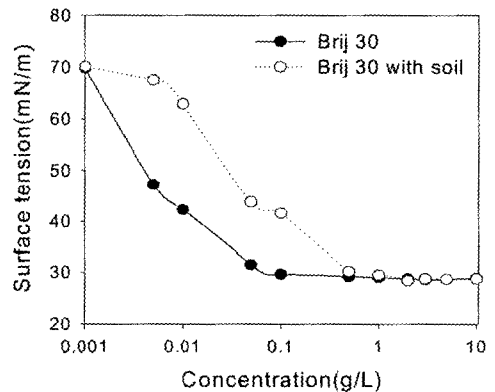


Fig. 2. Adsorption-equilibrium curve of phenanthrene on kaolinite.

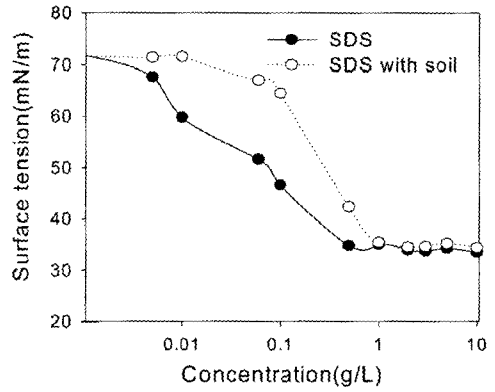
는데, 이는 계면활성제의 일부가 토양에 흡착되어 계면활성제의 농도가 감소되었기 때문이다. 계면활성제 내에 토양이 존재할 경우의 APG, Brij30 및 SDS의 임계농도는 각각 5.0, 0.8, 1.0 g/L으로 나타나, 각각의 계면활성제는 토양 1 kg당 40, 7, 4 g이 흡착되었음을 알 수 있었다. APG의 경우 많은 OH기를 가지고 있으므로 토양의 여러 금속산화물과 수소결합을 하기 때문에 높은 값을 나타낸 것으로 예상되며, SDS의 경우 음이온성 계면활성제로서



(a) APG



(b) Brij30



(c) SDS

Fig. 3. Surface tension of surfactants with their concentrations. (a) APG, (b) Brij30, (c) SDS.

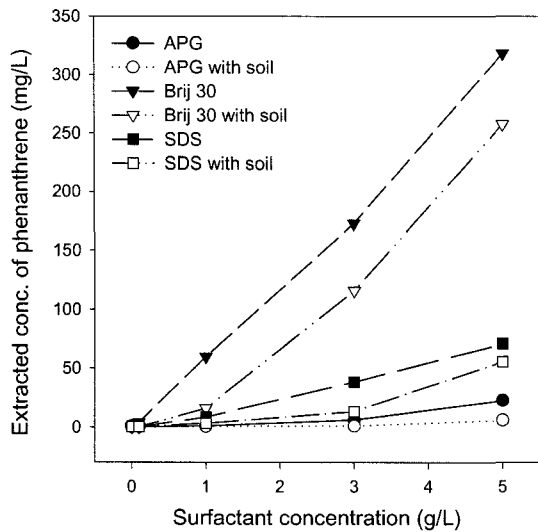


Fig. 4. Solubility of phenanthrene according to surfactants.

토양표면의 음전하와 반발하여 가장 낮은 흡착능을 보인 것으로 사료된다.

### 3.3. 계면활성제에 의한 phenanthrene의 용해성

Fig. 4는 계면활성제의 농도에 따른 phenanthrene의 용해도를 나타낸다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이, 같은 농도의 계면활성제에 대하여 Brij30이 phenanthrene에 대해 높은 용해도를 나타내었다. 하지만 APG와 SDS의 임계농도는 Brij30의 각각 10배, 6배에 달하기 때문에, 본 연구에서 사용된 5 g/L 이하의 계면활성제 농도는 APG와 SDS가 phenanthrene을 탈착하는데 충분한 양이 아닌 것으로 판단되며 보다 높은 농도에서의 용출효율을 비교한다면 용출량의 향상이 있을 것으로 예상된다. 즉, 각각의 계면활성제에 대하여 임계농도의 5배의 농도에 해당하는 지점인 5.0, 0.5, 3.0 g/L에서의 용출량을 비교하면 23, 30, 38 mg/L로 계면활성제 별로 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 또한 토양이 첨가되었을 경우에는 계면활성제의 일부가 토양에 흡착되어 마이셀을 형성할 수 있는 계면활성제의 양이 감소하여 더 낮은 용해도를 보이게 된다. 따라서 높은 용출효율을 기대하기 위해서는 토양에 흡착되는 정도를 고려하여 계면활성제의 농도를 결정하여야 할 것이다.

### 3.4. 계면활성제의 생분해성

슬러지를 이용한 각 계면활성제의 생분해도를 검토한 결과 Fig. 5와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. APG는 4일 후 초기 COD 값의 65%가 분해되었고, 그 후 일정한 값

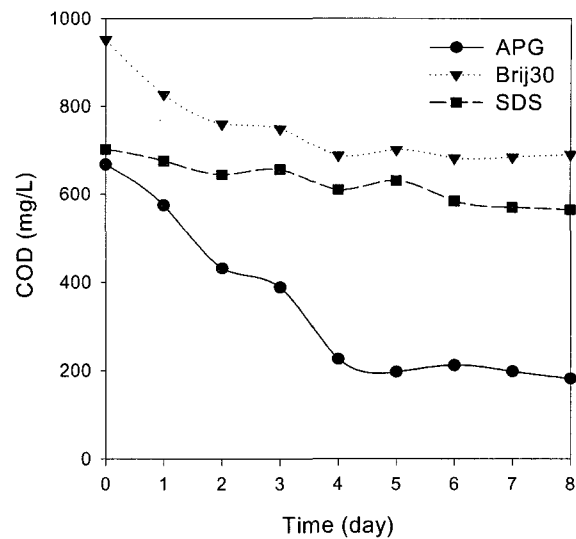


Fig. 5. Biodegradability of surfactants with time.

을 유지하였다. 반면 Brij30은 4일 후 26%가 제거되었고, SDS는 거의 분해되지 못하였다. 이 결과로부터 APG가 Brij30과 SDS 보다 빠른 속도로 분해된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 APG의 경우 복원 종료 후 토양에 잔존하여도 생분해 속도가 빠를 뿐만 아니라 식품 첨가제로 사용될 정도로 독성이 적어 2차 오염의 가능성은 적은 것으로 사료된다.

### 3.5. 동전기 정화실험

#### 3.5.1 전기경사(Electrical potential gradient)

Fig. 6은 동전기 정화실험의 전기경사(V/cm)를 나타낸다. 전해질로 증류수만 사용하였을 경우에는 8일 후에 전원공급기의 최대 전기경사인 20 V/cm에 도달하여 정전류 조건이 유지되지 못하고 토양저항의 증가에 따른 전류 감

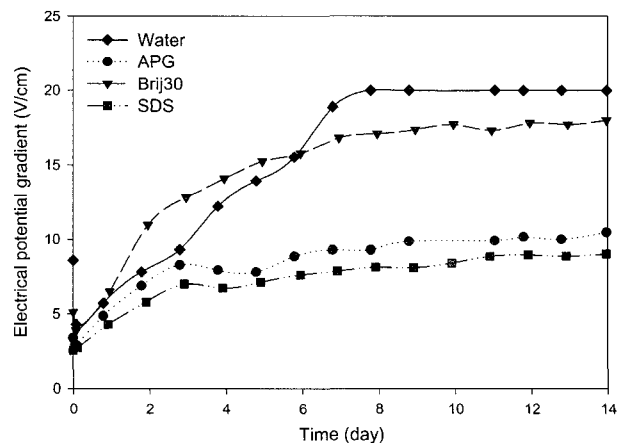


Fig. 6. Electrical potential gradient with time.

소현상을 초래하였다. 이는 양극에서 증류수의 전기분해로 생성된 과량의 수소이온이 토양 내로 유입되면서 토양 입자의 확산이중층 두께를 감소시키고 공극수의 수소이온 증가로 인한 입자간의 척력을 증가시키면서 공극수의 흐름을 방해하게 되어 토양내부의 저항 증가와 함께 전기경사 증가율이 크게 되었기 때문이다.

전해질로 계면활성제 용액을 사용하였을 때 전기경사도의 증가율은 각각의 계면활성제에 대하여 Brij30>APG>SDS의 순으로 나타났다. 전기경사도의 증가가 크게 나타나는 것은 상대적으로 토양자체의 저항증가가 크다는 것을 의미하는데 이를 계면활성제의 특성과 비교해 보면, 비이온성 계면활성제인 Brij30의 경우가 다른 경우보다 양극의 전기분해 반응에 의한 수소이온의 영향을 상대적으로 크게 받은 것으로 보이며, APG는 비이온성 계면활성제이지만 많은 OH기를 가지고 있으며 물에 대한 용해도가 Brij30보다 높기 때문에 저항값이 Brij30보다 작게 나타난 것으로 사료되며, SDS는 음이온성 계면활성제로서 전해질의 수소이온의 영향을 감소시켜 상대적으로 낮은 전기경사 증가도를 보인 것으로 판단된다.

3.5.2 전기삼투 흐름(Electroosmotic flow)

Fig. 7은 동전기 정화실험의 전기삼투 흐름을 나타내고 있다. 전반적으로 초기에는 높은 유량을 나타내다가, 시간이 지날수록 기울기가 감소하는 경향을 보였다. 이를 앞의 전기경사(Fig. 6)와 비교해 보면 토양내의 수소 이온농도 증가로 인하여 토양입자의 확산이중층 두께를 감소시켜 입자간의 척력 증가로 전기삼투 흐름을 방해한 것으로 사료된다.

증류수를 전해질로 사용하였을 경우가 가장 많은 전기삼투 흐름을 관찰할 수 있었는데 이는 전해질이 토양 공극 사이를 통과할 때 같이 이동해야 하는 계면활성제로

인한 토양입자와의 화학적 상호작용 및 입자 공극에서의 물리적 저항이 적었기 때문으로 사료된다.

또한, Brij30의 경우에는 다른 경우의 실험보다 훨씬 낮은 전기삼투 흐름을 보이고 있는데 이는 Brij30를 물에 용해시킬 때 용액이 투명하지 않고 부열계 에멀전(emulsion)을 형성하는 양상(증류수  $A_{600}=2.80$ )을 나타내는데, 이로 인해 토양의 공극을 통과하는데 있어 물리적 저항을 크게 받거나 공극 막힘 현상에 의해 전기삼투 흐름이 원활하지 못했던 것으로 사료된다. 이에 비하여 비이온성 계면활성제인 APG와 음이온성 계면활성제인 SDS를 비교하면, APG를 사용하였을 때의 전기삼투 흐름이 약간 크게 나타났으며, 음이온성 계면활성제인 SDS는 양극으로 이동하려는 전기영동적인 흐름과 음극으로 향하는 물의 전기삼투 현상에 의한 흐름이 서로 반대 방향인 것에 기인하여 계면활성제가 토양 내를 충분히 통과하지 못하는 문제점을 야기시킬 수도 있는 것으로 사료된다.

3.5.3 Phenanthrene 제거효율

Fig. 8과 Table 3에는 동전기 복원실험 종료 후 토양 내에 남아있는 phenanthrene의 양과 제거율을 나타내었다. 계면활성제에 따른 제거율은 APG>SDS>Brij30의 순서로 높게 나타났다. 이 순서는 Fig. 7의 전기삼투 흐름과 동일한 결과를 보여주고 있다. 즉 전기삼투 흐름의 양이 많을수록 제거율이 증가하는 현상을 보여주는 것이다. 특히 Brij30의 경우 증류수의 제거율과 비슷하게 나타났는데 증류수에 용해된 Brij30이 에멀전 형태로 존재하면서 토양 내의 공극 사이를 통과하면서 계면활성제의 역할을 제대로 하지 못한 것으로 사료된다. 즉, 토양세척/세정기술에서와는 달리, 동전기 정화기술에서 소수성 유기오염물의 제거율을 높이기 위해서는, APG와 같이 비록 phenanthrene의 용해도는 낮지만 전기삼투 흐름을 원활하게 하여 지속

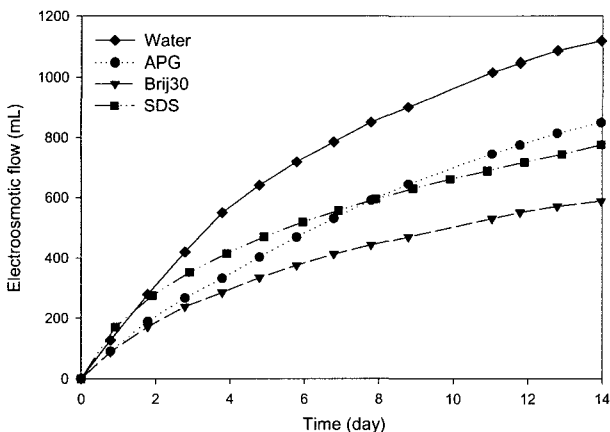


Fig. 7. Accumulated electroosmotic flow with time.

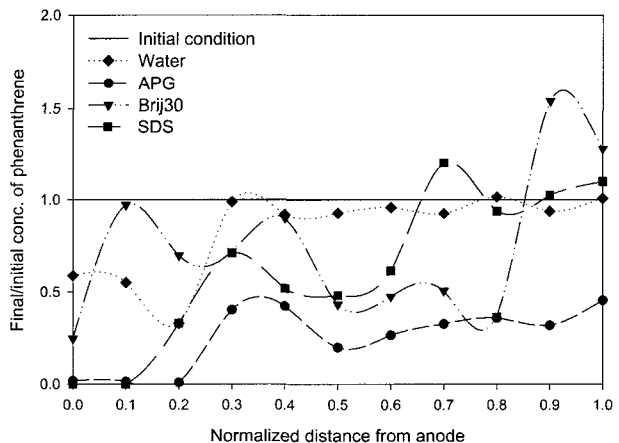


Fig. 8. Phenanthrene content in soil after the experiment.

**Table 3.** Removal efficiency of phenanthrene in electrokinetic remediation (2 weeks)

Electrolyte	Water	APG	Brij30	SDS
Removal efficiency (%)	16.5	64.6	18.7	33.9

적으로 오염물과 계면활성제의 접촉기회를 높이고, 토양 공극을 원활하게 이동할 수 있는 것이 중요한 요소임을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

동전기적 토양복원을 위한 계면활성제를 선정할 때 어느 한가지 기준만으로 판단할 수는 없으며 환경친화성, 경제성, 효율성과 같은 다각적인 관점에서 살펴보아야 한다. 따라서 본 연구에서는 동전기 토양정화 기술에 적합한 계면활성제를 선정하는 방법으로 토양에 흡착되는 계면활성제의 양, phenanthrene에 대한 용해도, 생분해도 및 동전기 실험 결과를 살펴보았다.

(1) APG, Brij30, SDS의 임계농도는 각각 1.0, 0.1, 0.6 g/L이었으며, 계면활성제의 토양흡착이 있을 경우 임계농도가 각각 5.0, 0.8, 1.0 g/L이 되어 각각의 계면활성제에 대하여 토양 1 kg당 40, 7, 4 g이 흡착됨을 알 수 있었다.

(2) Phenanthrene의 용출효율은 5 g/L이하 동일한 양의 계면활성제에 대해서 Brij30>SDS>APG 순서로 나타났으며, 폐수처리장의 활성슬러지를 이용한 계면활성제의 생분해도 실험에서는 APG>Brij30>SDS 순서로 높게 나타났다. APG의 경우 다른 계면활성제보다 상대적으로 많은 양이 토양 내에 잔류하지만, 생분해가 높고 독성이 낮아 APG로 인한 토양의 2차 오염가능성은 낮은 것으로 나타났다. Brij30의 경우에는 세 계면활성제 중 중간수준의 토양흡착율을 나타냈으며 용출효율이 높은 것으로 나타났다. 생분해도의 수준은 중간정도로 전체적으로 적용성이 높게 판단되었다. 반면, SDS의 경우는 비록 토양에는 가장 낮은 흡착율을 보였으나 용출효율이 높지 않고 생분해도가 낮아서 2차 오염의 가능성이 있는 것으로 나타났다.

(3) 동전기적 토양정화 실험에서 전기경사 증가율은 증류수>Brij30>APG>SDS, 전기삼투 흐름은 증류수>APG>SDS>Brij30, 그리고 phenanthrene의 제거율은 APG>SDS>Brij30>증류수의 순서로 크게 나타났다. 이로써 동전기 토양정화에서는 전해질(계면활성제 용액)을 지속적으로 흘려주기 때문에, 계면활성제의 소수성 유기오염물에 대한 용해도보다는 전기삼투 흐름을 원활하게 하여 유

기오염물과 계면활성제간의 접촉기회를 높이고 토양 공극을 원활하게 이동할 수 있는 계면활성제를 선정하는 것이 중요하다는 결론을 내릴 수 있었다.

(4) 이상과 같이 동전기 정화기술을 이용한 토양정화시에 계면활성제의 선택기준은

첫째, 전기삼투 흐름을 원활하게 하고 토양공극을 원활하게 이동하며

둘째, 생분해도가 높고, 독성이 낮으며

셋째, 소수성 유기오염물에 대한 용해도가 높은 순서로 선택하여야 할 것으로 사료된다.

#### 사 사

본 연구는 국가지정연구실사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 김재섭, 김권일, 이기세 “전기동력기술과 계면활성제를 이용한 모래토양 컬럼으로부터의 디젤 제거”, *J. of KSEE*, **21**(6), pp. 1073-1083 (1999).
- 염익태, Ghosh, M. M., 안규홍 “계면활성제를 이용한 오염된 토양으로부터의 Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)의 세척”, *J. of KSEE*, **19**(9), pp. 1111-1124 (1997).
- 김종성, 김재섭, 이기세 “비이온계 계면활성제의 소수성 구조가 카올린 토양에서 흡착 및 경유 제거에 미치는 영향”, 대한환경공학회 '99추계연구발표회논문집(II), 광주과학기술원, pp. 373-374 (1999).
- 정하의, 지반환경공학, 유림, 태훈출판사, 서울, pp. 608-634 (1998).
- Yeom, I. T., Ghosh, M. M., Cox, C. D., and Ahn, K. H. “Dissolution of polycyclic aromatic hydrocarbons from weathered contaminated soil”, *Wat. Sci. Tech.*, **34**, pp. 335-342 (1996).
- Chang, M. C., Huang, C. R., and Shu, H. Y. “Effects of surfactants on extraction of phenanthrene in spiked sand”, *Chemosphere*, **41**, pp. 1295-1300 (2000).
- Jafvert, C. T. “Sediment and saturated soil associated reactions involving an anionic surfactants (dodecylsulfate). 2. Partitioning of PAHs”, *Environ. Sci. Technol.*, **25**, pp. 1039-1045 (1991).
- Yeh, D. H., Pennell, K. D., and Pavlostathis, S. G. “Toxicity and biodegradability screening of nonionic surfactants using sediment-derived methanogenic consortia”, *Wat. Sci. Tech.*, **38**(7), pp. 55-62 (1998).
- 이병민 “환경친화성 계면활성제”, 제 7회 정밀화학 심포지움 계면활성제 workshop, KAIST, pp. 5-25 (1998).
- Hall-Manning, T. J., Holland, G. H., Rennie, G., Revell, P.,

- Hines, J., Barratt, M. D., and Basketter, D. A. "Skin irritation potential of mixed surfactant systems", *Food and Chemical Toxicology*, **36**, pp. 233-238 (1998).
11. Ko, S. O. "Electrokinetic surfactant-enhanced remediation of hydrophobic organic pollutants in low permeability subsurface environments", *Texas University*, U.S.A. (1998).
  12. Eichhorn, P., and Knepper, T. P. "Investigations on the metabolism of alkyl polyglucosides and their determination in wastewater by means of liquid chromatography electro-spray mass spectrometry", *J. of Chromatography A*, **854**, pp. 221-232 (1999).
  13. 염익태, 이상현, 안규홍 "오염토양 중 디젤성분의 생분해 처리성 평가", *J. of KSEE*, **21**(8), pp. 1519-1527 (1999).
  14. Yuan, Y. S., Wei, S. H., and Chang, B. V. "Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a mixed culture", *Chemosphere*, **41**, pp. 1463-1468 (2000).
  15. 김인범, 이명천, 서인선, 신평균 "물성에 따른 생분해성 고분자의 생분해도 영향", *Polymer*, **19**(6), pp. 727-733 (1995).