

## 동전기-생물학적복원기술과 계면활성제를 이용한 phenanthrene 오염토양의 정화

김상준, 박지연, 이유진, 양지원

한국과학기술원 생명화학공학과 환경복원공학연구실 (jwyang@kaist.ac.kr)

### <요약문>

The electrokinetic bioremediation employing electrolyte circulation method was carried out for the cleanup of phenanthrene-contaminated kaolinite, and microorganism used in the biodegradation of phenanthrene was *Sphingomonas* sp. 3Y. The electrolyte circulation method supplied ionic nutrients and the microorganism into soil, and inhibited the significant pH change of soil by increasing the soil buffering capacity by providing phosphate buffer compounds. When the remediation process was conducted without surfactant, the removal efficiency of phenanthrene, at the initial concentration of 200 ppm, was 69% for only 7 days. Higher microbial population and lower phenanthrene concentration were observed in the anode and middle regions of soil specimen than in the cathode region. The higher density of microorganism was because the microbial movement was in the direction of the anode part due to the negative surface charge. When Triton X-100 and APG of 20 g/l were used to improve the bioavailability of phenanthrene strongly adsorbed onto soil surface, about 90 and 38% of phenanthrene removal were obtained. Consequently, it was confirmed that the microorganism preferred APG to phenanthrene as carbon source and so the removal efficiency with APG decreased less than that without APG.

**key word** : electrokinetic bioremediation, *Sphingomonas* sp. 3Y, phenanthrene, kaolinite, APG, Triton X-100

### 1. 서론

본 연구의 동전기-생물학적복원(electrokinetic bioremediation)에서는 오염토양의 복원을 위해 미생물의 대사를 이용하고 있다. 오염물의 분해위치는 원위치로써 토양내에서 제거가 이루어지며 현장에 설치되는 생물반응기의 역할은 미생물 및 영양염류를 공급하고 토양 pH를 미생물이 잘 활동할 수 있는 범위의로 유지시키는 역할을 한다. 만일 사용된 미생물의 계면활성제를 잘 생산하는 것이라면 오염물은 토양밖으로 추출되어 생물반응기로 이동될 수 있는데 이때 미생물은 토양보다 생물반응기내에서의 성장조건이 더 좋으므로 오염물 제거 및 성장 속도가 증대될 수 있다.

토양세척법과 같은 오염토양복원기술은 유류오염물을 대상으로 할 경우 주로 용매 및 계면활성제를

이용한다. 계면활성제는 토양입자와 오염물간의 인력을 감소시켜 용액상으로 이동시키므로 오염물제거에 효과가 있다. 토양세척법은 주로 투수성이 좋은 토양에서 사용되며 지하수의 흐름을 이용하여 세척수를 오염지대로 통과시킨다. 본 연구의 복원대상 토양이 불균일한 조직이거나 저투수 토양인 경우에도 동전기 사용이 지하환경에서 여러 가지 물질의 이동을 상승시키는데 유용한 도구가 된다. 따라서 계면활성제의 극성에 따라 전기삼투 및 전기이동이 주요 이동메커니즘이 된다. 비이온성 계면활성제의 경우 전기영동에 의해 양극에서 음극으로 이동되므로 오염물을 음극전해조에서 모으는 방식으로 오염물이 제거되게 된다. 이온성계면활성제의 경우 계면활성제의 극성과 동일한 극성의 전해조에서 공급해야하며 전기이동에 의해 오염물을 포획한 미셀(micelle)은 반대 극성의 전해조로 이동된다.

*Sphingomonas* sp.는 본 실험에 사용된 배양조건에서 계면활성제를 생산하지 않았다. 따라서 단기간에서 제거효율을 증대시키기 위해 외부의 계면활성제 주입을 고려하였다. 계면활성제의 선택은 계면활성제가 미생물의 활성에 영향을 주는 여부, 오염물과 비교하여 탄소 및 에너지원으로 경쟁여부, 오염물에 대한 용해도, 생분해성 등을 고려해야한다. 본 연구에서는 두가지 계면활성제를 선택하여 생물반응기를 통하여 토양에 공급하므로써 동전기-생물학적복원에서 어떤 방식으로 작용할 수 있는지 실험하였다.

## 2. 본론

### 재료 및 방법

대상오염토양은 산청에서 생산된 카올린나이트를 seive no. 50을 통과한 것을 사용하였으며 phenanthrene-acetone 용액을 이용하여 200 ppm으로 오염시켰다. 초기 함수량을 증류수를 이용하여 25%로 조절하였다. 오염물 분해를 위한 미생물은 *Sphingomonas* sp. 3Y를 이용하였다. 전해질 구성성분은(g/l) 5.0 KNO<sub>3</sub>, 0.6 NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 1.6 Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 0.7 KCl, 0.3, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3.0 MgSO<sub>7</sub> · H<sub>2</sub>O, 3.0, 0.002 CaCl<sub>2</sub>이며 사용한 계면활성제는 20 g/l APG와 20 g/l Triton X-100으로 생물반응기의 전해질 1 l에 포함하였다. 이 밖에 전해질 순환속도는 6.7 ml/min이었으며 7일동안 운전하였다. 사용한 동전기 반응기의 형태는 Fig. 1과 같으며 공급전류는 1.88 mA/cm<sup>2</sup>이었다.

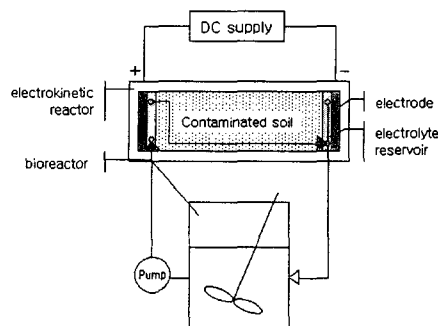


Fig. 1 Schematic diagram of electrokinetic bioremediation

### 결과 및 토의

Fig. 2에서 초기 미생물 공급량은 모두 비슷하였으나 APG의 경우 20 g/l APG를 포함한 전해질에 미생물을 공급한 직후의 미생물 농도는 크게 감소되었다. 즉 APG에 의해서 미생물활성이 크게 감소되는 것을 알 수 있었으며 Triton X-100 경우에도 약간의 활성감소가 관찰되었다. pH변화는 음극전해조에서 Mg(OH)<sub>2</sub>가 생성됨에 따라서 점점 감소하였다.

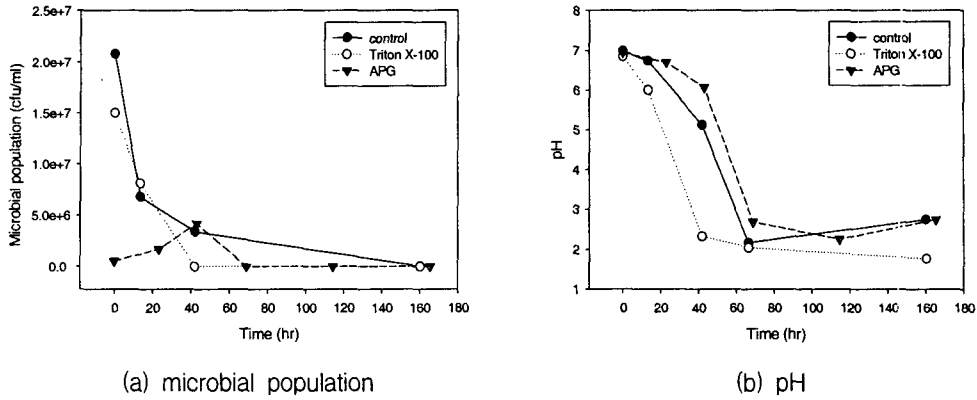


Fig. 2 동전기-생물학적복원에서 계면활성제 종류에 따른 생물반응기의 미생물 성장특성

Fig. 3은 토양내 미생물의 변화를 보여주고 있다. 모든 경우에서 공정 중반부터는 미생물이 주로 중간위치에서 많이 분포되고 있는 것을 관찰 할 수 있었는데 이것은 비록 전해질의 pH는 감소되나 토양 pH는 중간위치에서 중성영역이 존재하므로 미생물이 높은 활성을 보이고 있는 것으로 판단된다. 초반의 양극부분에 미생물이 편중하는 것은 아직 생물반응기내에 미생물 농도가 충분하여 비록 낮은 pH에 의해 미생물이 불활성화된다하더라도 계속해서 공급이 가능하기 때문이다. (b)에서 40시간이후에 미생물농도가 측정되지 못했는데 이것은 표면장력이 감소하여 추출정에서 토양용액의 추출이 어려웠기 때문이었다.

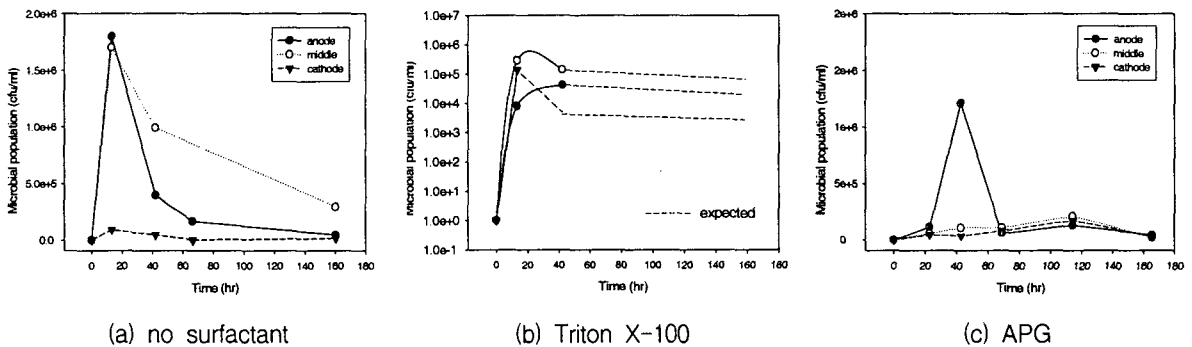


Fig. 3 동전기-생물학적복원에서 계면활성제 공급에 따른 토양내 미생물농도변화

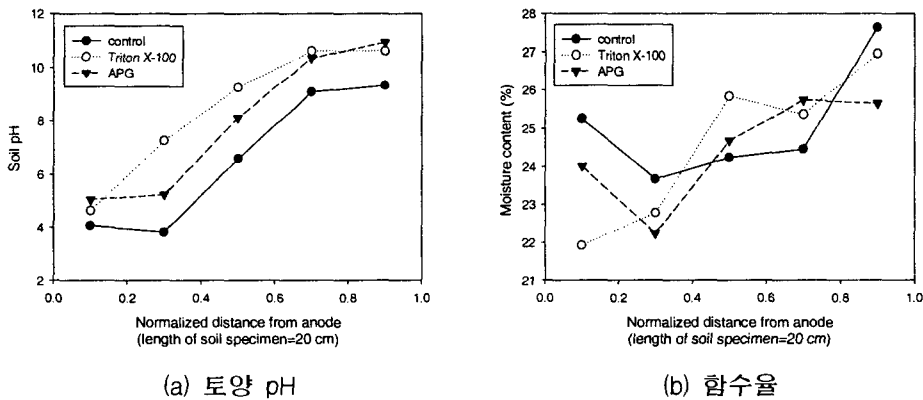


Fig. 4 동전기-생물학적복원의 공정종료 후 토양 pH와 함수율 분포

Fig. 4와 같이 토양 pH는 4에서 10까지 분포하였으며 계면활성제를 첨가하였을 때 토양 pH가 약간 높게 관찰되었다. 함수율은 전체적으로 22-28%의 범위로 분포하였다. Fig. 5에서 미생물 첨가시 제거효율은 APG < no surfactant(control) < Triton X-100의 순서로 나타났다. 특이한 점은 APG의 첨가가 control 실험보다 낮은 제거효율을 나타낸 것이다. 미생물을 첨가하지 않은 경우인 (b)와 비교하면 도리어 미생물을 첨가하지 않았을 때 APG에서의 제거효율이 높게 나타났다. Triton X-100의 경우 약 0.02 g/l의 낮은 CMC를 가지므로 20 g/l의 농도로 주입하였을 때 상당한 제거효율을 얻을 수 있었으며 미생물 첨가시 제거효율은 증가되었다.

Table 1을 보면 그 차이를 보다 명확히 비교할 수 있다. 전해질의 세척효과에 의한 제거가 7.5 %를 나타내었다. APG의 경우 계면활성제를 사용하지 않은 경우가 사용한 경우보다 1.72배나 높은 제거효율을 가졌다. 즉 *Sphingomonas* sp.는 APG를 탄소 및 에너지원으로 이용하는 것으로 판단되며 따라서 phenanthrene보다 APG를 보다 우선하여 분해하는 것으로 생각된다.

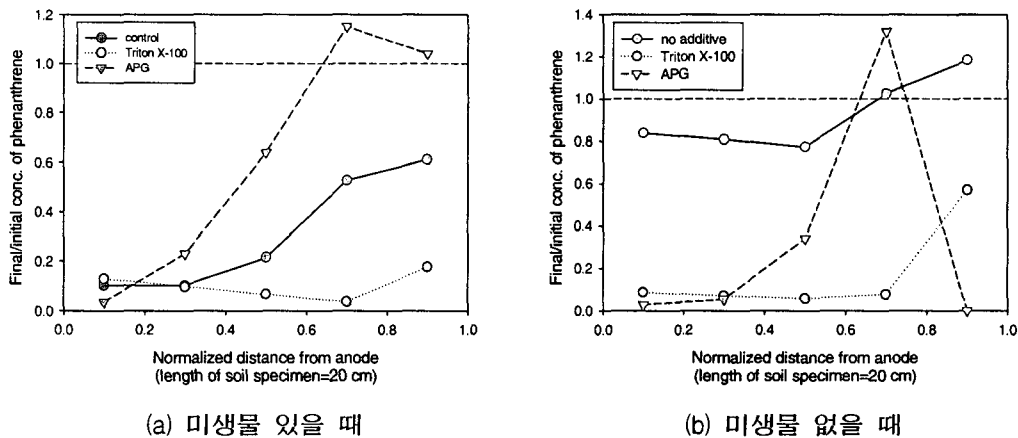


Fig. 5 동전기-생물학적복원의 종료후 미생물 첨가유무에 따른 토양내 잔류 phenanthrene 비율

Table 1 동전기-생물학적복원에서 계면활성제 첨가에 따른 제거효율

Surfactant	Removal efficiency (%)	
	<i>Sphingomonas</i> sp.	No microorganism
No addition	68.8	7.5
20 g/l Triton X-100	89.9	82.8
20 g/l APG	37.8	65.0

### 3. 결론

동전기-생물학적복원의 제거효율을 높이고 처리기간을 단축하기 위해 APG와 Triton X-100의 두 가지 계면활성제를 첨가하였으며 그 결과 *Sphingomonas* sp.는 오염물인 phenanthrene보다 APG를 탄소원으로써 우선하기 때문에 제거효율이 도리어 사용하지 않은 경우보다 감소하였다. Triton X-100의 경우 높은 세척효과를 나타냈으며 제거효율 또한 미생물을 사용했을 때 증가되는 것을 확인하였다. 결론적으로 미생물을 도입한 동전기-생물학적복원에서는 계면활성제의 도입에 있어 계면활성제 자체의 독성 및 세척력도 중요하지만 탄소원으로써 오염물보다 우선되어서는 안되는 것을 확인하였다.

#### 4. 참고문헌

- 1) Lee, H.-H. and Yang, J.-W., A new method to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation, *Journal of Hazardous Materials*, 77(1-3), 227-240(2000).
- 2) Rabbi, M.F., Clark, B., Gale, R.J., Ozsü-Acar, E., Pardue, J., Jackson, J., In situ TCE bioremediation study electrokinetic cometabolite injection, *Waste Management*, **20**, 279-286(2000).