

Phenanthrene 오염토양의 정화를 위한 동전기-생물학적복원기술의 적용과 전류밀도의 영향

김상준, 박지연, 이유진, 양지원

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

<요약문>

Electrokinetic bioremediation was conducted on phenanthrene-contaminated soil to study the effects of soil temperature and pH on microbial population and removal efficiency at different current densities from 0.63 to 3.13 mA cm⁻². Microorganism used in the biodegradation of phenanthrene was *Sphingomonas* sp. 3Y, which was isolated from a diesel-contaminated site. The microorganism was successfully penetrated into the contaminated soil by electrokinetic phenomena and the highest microbial population was observed in the middle region of soil specimen where soil pH was near neutral. Therefore, phenanthrene removal occurred mainly at anode and middle parts of soil specimen due to a relatively high microbial population. Also, the highest removal efficiency of 68.8% was obtained at 1.88 mA cm⁻² while low degradation was detected at 3.13 mA cm⁻². It was presumably because the soil temperature at 1.88 mA cm⁻² was close to the appropriate temperature of about 30°C while the temperature increase to above 45°C at 3.13 mA cm⁻² inhibited the microbial activity severely.

key word : electrokinetic bioremediation, *Sphingomonas* sp., phenanthrene, electric current density, soil temperature

1. 서론

다환성 방향족 탄화수소 (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)는 대표적인 비친수성 오염물로 발암물성이며 돌연변이를 일으킨다. 기존의 복원 기술로 PAH로 오염된 토양을 처리할 경우 오염물의 낮은 휘발도, 이동성, 용해도, 분해성에 의해 처리에 한계가 있다. 특히 원위치 생물학적복원기술 (*in situ* bioremediation)의 경우 수십년 동안 다양한 오염지역에 널리 적용되었는데 이 기술은 경제적이며 유독성 첨가제 및 후처리가 필요 없으며 또한 환경 및 주민 친화적인 공정이다. 하지만 비균질성 및 저투수도양에서는 미생물의 대사작용을 활성화시키기가 어렵는데 이와같은 토양내에서는 영양원, 전자공여체/수용체 그리고 미생물이 이동하는데 있어 심각한 장애가 있기 때문이다. 따라서 이 경우 추가적인 조치가 필요하게 된다.

불활성 전극을 통하여 낮은 직류전류를 토양에 공급하였을때 전기삼투, 전기영동, 전기이동과 같은 동전기 현상이 토양내 물질의 이동성을 증가시키게 된다. 따라서 비친수성 오염물질을 제거하기위해 생물

학적복원기술을 도입할 때 동전기 현상을 적용하면 토양내에 균질하고 가속화된 영양원과 미생물의 공급을 가능하게 할 수 있다.

직류전류 전기장 (direct current field)은 미생물의 생장인자인 pH, 용존산소, 그밖에 토양화학적 상태를 변화시킨다. 또한 전류의 적용은 토양내에 온도상승을 일으킬 수 있다. 그러나 원위치 생물학적복원 기술에서 미생물 활성화에 대한 직류전류 전기장의 영향에 대한 보고는 거의 없다. 그러므로 동전기-생물학적복원기술 (electrokinetic bioremediation)에서 오염물의 제거효율에 밀접한 관련이 있는 미생물 활성화에 대한 직류전류 전기장 밀도의 영향을 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 phenanthrene 오염토양의 처리를 위해 동전기-생물학적복원기술을 실행하였으며 다양한 전류밀도에서 미생물 활성화와 제거효율에 대한 토양 온도 및 pH의 영향을 조사하였다.

2. 본론

재료 및 방법

대상오염토양은 산청에서 생산된 카울린나이트를 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 KNO₃, 0.6 NaH₂PO₄, 1.6 Na₂HPO₄, 0.7 KCl, 0.3, Na₂SO₄, 3.0 MgSO₇ · H₂O, 3.0, 0.002 CaCl₂이며 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 0.63, 1.88, 3.13 mA cm⁻²이었다.

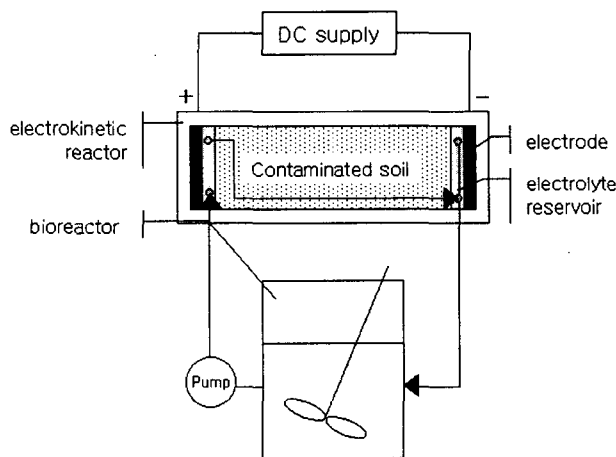


Fig. 1 Schematic diagram of electrokinetic bioremediation

결과 및 토의

Fig. 2에서 보는 바와 같이 생물반응조내의 pH와 미생물농도는 서서히 감소하였다. 이것은 전기분해 반응에 의해 전극에서는 산과 염기가 생성되는데 본 연구에서는 수산화이온이 Mg이온과 결합하여 침전되어 없어지기 때문에 전체적인 pH는 점점 낮아지게 되었다. 비록 전해질 순환이 없는 경우와 비교하여 pH의 저감속도는 상당히 줄어들었으나 시간이 지남에 따라 pH가 감소되었고 미생물의 활성화는 저해되었다.

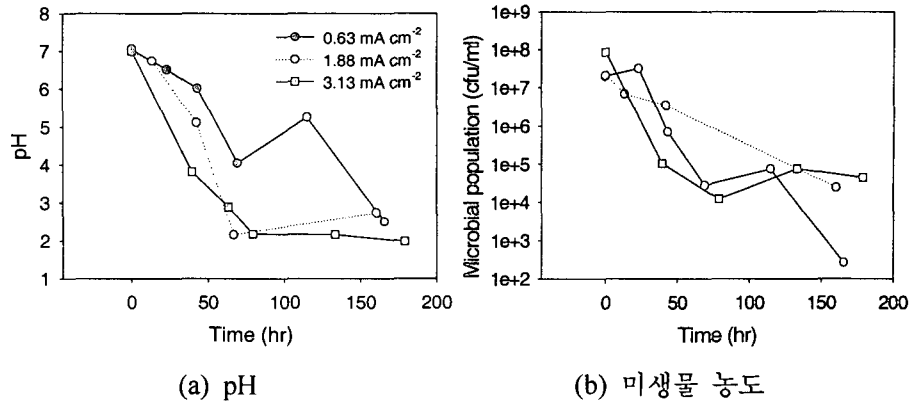


Fig. 2 Phenanthrene-오염토양의 동전기-생물학적복원기술에서 전류밀도에 따른 pH와 미생물농도의 변화

Fig. 3에서 토양온도는 처음에는 감소하였다가 일정하게 되었는데 이것은 토양온도가 전기장세기와 전기전도도를 반영하는 토양저항에 좌우되기 때문이다. 또한 겔보기 전도도의 변화를 통해서 이온이 생물반응조에서 토양으로 전기적으로 이동되어서 전기전도도를 증가시켰으며 그 농도가 전해질 순환 방식에 의해 정상상태에 이르렀음을 유추할 수 있었다. 토양온도는 전류밀도에 비례하였는데 특히 3.13 mA cm⁻²에서는 45°C 이상으로 증가하였다.

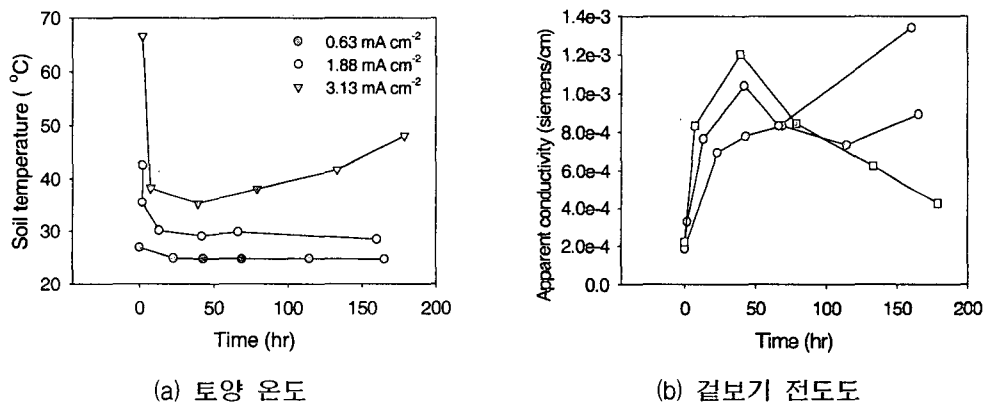


Fig. 3 Phenanthrene-오염토양의 동전기-생물학적복원기술에서 토양온도와 겔보기 전도도의 변화

Fig. 4는 전류밀도에 따른 토양표본의 양극, 중간, 음극부분의 미생물농도를 보여주고 있다. 공정초반에서 토양내 미생물농도는 미생물의 생물반응조로부터의 유입에 의해 증가되었으며 후반에는 생물반응조의 3이하의 낮은 pH의 영향 때문에 미생물의 농도가 감소되었다. 전체적으로 가장 낮은 미생물농도는 3.13 mA cm⁻²에서 관찰되었고 1.88 mA cm⁻²에서는 가장 높은 값을 나타내었다. 이것은 미생물의 활성이 높은 온도에서는 극심하게 저해되기 때문이다. 환경에서 미생물 표면은 일반적으로 음전하를 띠고 있으므로 전기장하에서는 양극으로 이동된다. 하지만 본 연구에서는 중간부분의 토양이 상대적으로 높은 미생물 농도를 보여주고 있었는데 이것은 미생물의 활성이 전극부분의 큰 pH 변화에 의해 저해되었기 때문이다. 토양 pH는 양극에서 음극으로의 거리로 볼때 4에서 11로 변화하였으며 이것은 토양내 미생물에게 phenanthrene을 분해할 수 있는 pH 영역을 제공하였다 (Fig. 5).

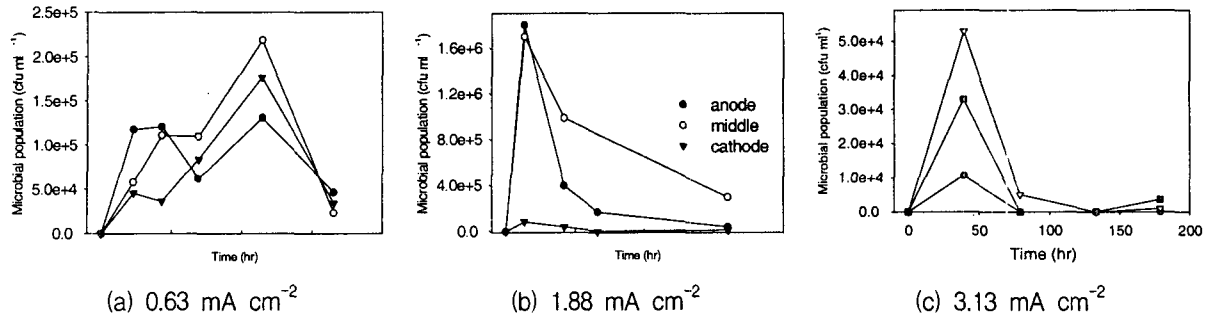


Fig. 4 전류밀도에 따른 토양의 위치별 미생물 농도의 변화

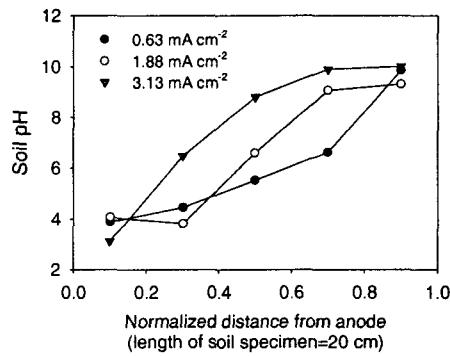


Fig. 5 토양 pH의 분포

Fig. 6은 7일 동안 동전기-생물학적복원기술을 운전한 후에 토양내에 잔류하는 phenanthrene의 초기농도에 대한 비율을 보여주고 있다. 0.63과 1.88 mA cm²의 전류밀도에서 제거효율은 각각 41.0과 68.8%였으며 phenanthrene의 분해는 미생물의 분포가 상대적으로 높은 주로 양극과 중간부분에서 일어났다. 그러나 3.13 mA cm²에서는 토양내 phenanthrene이 거의 분해되지 않았는데 그때의 제거율은 4.6%에 불과하였다. 이것은 높은 토양 온도가 미생물의 활성이 극심하게 저해하였기 때문이다.

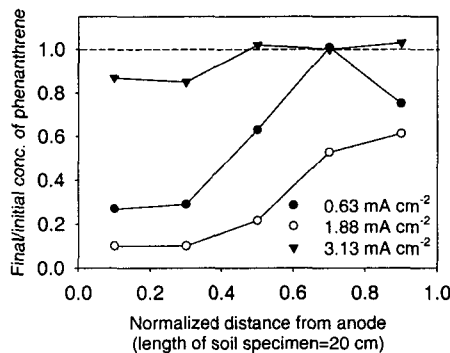


Fig. 6 7일간의 동전기-생물학적복원기술의 공정후 토양내 잔류하는 phenanthrene의 비율

3. 결론

Sphingomonas sp.는 7일간의 동전기-생물학적복원기술의 도입에서 좋은 phenanthrene의 분해를 보여

주었다. 이 미생물은 성공적으로 토양내로 동전기현상에 의해 공급되었음을 확인 할 수 있었다. 전류밀도의 증가는 생물반응조내의 pH감소속도를 증가시켰으나 실제 토양내에서는 인산염공급으로 인한 토양 완충능의 향상으로 중성영역의 토양 pH가 관찰되었다. 따라서 미생물의 오염물 분해도 이루어질 수 있었다. 가장 높은 분해율은 1.88 mA cm⁻²에서 관찰되었으며 가장 낮은 값은 3.13 mA cm⁻²이었다. 이것은 이와 같이 높은 전류밀도에서는 토양저항이 45℃이상으로 유지되는 시간구간이 관찰됨으로써 미생물의 활성이 거의 저해되었기 때문이다. 본 연구의 결과로부터 최적의 전류밀도 값이 존재하고 있음과 전류밀도에 따라 미생물의 활성이 높은 토양온도와 큰 pH 변화에 의해 완전히 저해될 수 있었음을 확인할 수 있었다.

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., Ozsu-Acar, E., Pardue, J., Jackson, J., In situ TCE bioremediation study electrokinetic cometabolite injection, *Waste Management*, 20, 279-286(2000).