

## 비친수상유기물질(HOC)로 오염된 토양의 정화를 위한 동전기-생물활성화공정의 개발

양지원<sup>†</sup>, 김상준, 박지연, 이유진, 기대정

한국과학기술원 생명화학공학과 (jiwonyang@kaist.ac.kr)

### <요약문>

When an electrokinetic process is applied to a HOC-contaminated soil, hybrid types combined with soil flushing, chemical oxidation, and bioremediation are generally used. Especially when the electrokinetic process is combined with bioremediation, the hybrid technology can solve several limits of bioremediation such as low microbial mobility, low soil temperature, and shortage of nutrients in subsurface circumstance. Because microbial surface is charged negatively, the microorganism moves from cathode to anode under electrical field. In this study, mixed culture mainly-consisted by *Pseudomonas* sp. was applied to remediate pentadecane-contaminated kaolinite with particle size less than 300 $\mu$ m. This remediation system was named as 'electrokinetic bioaugmentation' and consisted of model aquifer, electrode reservoirs, bioreactor, power supply, and pump. The mixed culture above 0.5 of optical density in bioreactor was supplied to two reservoirs and penetrated soil when the electric current was applied. To enhance the removal efficiency, the optimal medium composition, electric current, and voltage were investigated.

**key word** : electrokinetic bioaugmentation, microbial mobility, *Pseudomonas* sp.

### 1. 서론

최근에는 오염토양의 복원에 이용되는 기술로 토양내의 오염물의 이동성을 강제적으로 증가시켜 제거하는 동전기 기술이 각광을 받고 있다. 동전기 기술의 원리는 오염토양의 양 옆면에 전극을 삽입하고 낮은 직류전류를 유발시킴으로써 지하에서의 다양한 물질의 이동을 일으키는 것이다.

생물학적 복원기술은 오염토양의 내생 미생물 혹은 외래 미생물을 이용하여 오염물을 생물학적으로 분해시키는 것을 말한다. 이 기술은 미생물을 이용하기 때문에 토양의 온도, 함수율, 영양원, 전자공여체 등과 같은 미생물 성장조건을 적절히 유지했을 때 보다 빠르게 처리가 가능하나 토양환경이라는 특성상 생물학적 복원기술은 낮은 미생물의 이동성, 낮은 토양온도, 영양원 부족과 같은 문제가 존재한다. 이러한 단점은 동전기 기술과 결합하여 해결할 수 있는데 미생물 표면이 음전하를 띠므로 동전기는 미생물을 음극에서 양극으로의 이동성을 증가시키며 토양자체의 저항으로 토양온도를 미생물에 적합한 온도로 상승시킬 수 있다. 또한 미생물에 필요한 질소와 인과 같은 영양원을  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 와 같은 이

온의 형태로 공급할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 동전기 기술과 생물학적복원을 결합한 동전기-생물활성법을 이용하여 토양내 알칸계 오염물질의 제거효율을 조사하였다.

## 2. 본 론

### 실험방법

본 연구에서 사용한 동전기 시스템은 BR(bioreactor, 생물반응기)의 전해질이 모두 펌프를 통해 AR(anode reservoir, 양극전해조), CR(cathode reservoir, 음극전해조)과 순환하므로 전력에 의해서 생성되는 수소 및 수산화이온과 상관없이 생물반응기 및 토양의 pH를 유지할 수 있는 구조이다. 이와 같은 형태에서는 토양을 통과한 미생물 혹은 생계면활성제로 용해된 유류오염물이 외부에 배출없이 생물반응기로 이동되므로 높은 균체량을 유지할 수 있다. 동시에 용해된 오염물에 충분한 체류 시간을 준다면 생물학적으로 완전 분해가 가능하여 2차 처리의 번거로움을 덜 수 있는 형태이다. 하지만 BR에서 미처 분해되지 못한 오염원이 AR로 이동한다면 전기삼투흐름을 따라서 토양에 침투될 수 있으므로 토양으로 재침투에 의해 공정시간이 길어질 수 있다. 생물반응기에서 미생물 배양에 사용된 전해질의 성분은 인산염무기배지에 5g/L  $KNO_3$  그리고 10g/L glucose를 각각 전자수용체와 공급체로 공급하였다. 멸균된 전해질 1L를 전류를 공급하기 전 BR에서 미생물을 접종하여 배양하였고 optical density(600nm)가 0.5이상으로 증가된 후에는 AR, CR에 전해질을 나누어 공급한 다음 전류를 도입하였다. 모델토양은 300 $\mu$ m이하 입자크기의 kaolinite를 사용하였다. EK 반응기는 직사각형(4×4×20cm<sup>3</sup>)형태이고 kaolinite 450g을 함수율 25%로 조절하여 압밀없이 충전하였다. AR과 CR의 부피는 모두 20 mL이며 전극재질은 백금을 도금한 티타늄으로 양 전해조 바깥쪽에 위치하게 하였다.

### 실험결과

Fig. 1은 동전기-생물활성화 공정에서 생물반응기(BR) 전해질의 pH와 optical density의 변화를 보여주고 있다. 주로 *Pseudomonas* sp.로 구성되어 있는 혼합균주(mixed culture)는 글루코스를 전자공여체 및 탄소원으로 이용하여 수소이온을 생성한다. 따라서 생물반응기 내의 pH는 시간에 따라 낮아지게 되는데 도입 전류가 높을 수록 pH는 낮게 나타났다. 이것은 전류가 높을 수록 많은 산소가 양극에서 생성되어 글루코스를 산화하는데 이용되었기 때문이며 오염물의 농도가 높을 수록 pH가 낮은 이유는 오염물인 pentadecane이 미생물의 베타-산화( $\beta$ -oxidation)에 의해 alkyl chain의 말단이 아세트기로 산화되므로 이때 생성된 수소이온에 의해 pH가 더욱 낮아졌기 때문이라고 생각된다. Optical density 결과에서는 BR로 유입된 토양 및 micro-emulsion의 형성이 미생물 균체량에 영향을 미치고 있으므로 특별한 경향을 관찰할 수 없었다.

Fig. 2-(a)는 14일 동안의 운전 후에 토양의 각 부분에 대한 함수율과 제거효율을 측정한 것이다. 초기의 25%에 비해 약 3%의 수분감소가 나타났으며 전체적으로 양극보다는 음극부분에 함수율이 높게 나타났다. 이것은 시간이 지남에 따라 전기삼투흐름이 미세토양을 음극부분에 쌓이게 하여 물의 흐름을 방해하였기 때문이다. Fig. 2-(b)는 2주간의 복원공정후에 남아있는 토양내 pentadecane의 농도를 나타낸 것이다. 각 위치에서 균질하게 제거되었음을 알 수 있었으며 Table 1에 결과를 요약하였다. 다양한 초기오염농도와 전류공급에 대하여 1,300-4,400ppm의 pentadecane이 제거되었음을 알 수 있었다. 대개 전류밀도 1.88mA/cm<sup>2</sup>에서 최고의 제거효율을 보였으며 초기농도 5,000ppm에서는 이보다 높은 농도의 경우보다 토양에 강하게 흡착된 부분이 많으므로 적은 양의 오염물이 제거되었다. 토양에 존재하는 미

생물의 농도는 양극부분, 중간, 음극부분의 순서로 높게 관찰되었으며 이것은 미생물의 표면은 음전하를 띠고 있으므로 그와 반대극인 양극부분에 많이 몰려 있는 것으로 생각된다(data not shown). 또 다른 전자공여체인 nitrate가 배지에 포함되었을 경우 공급전류 1.88mA/cm<sup>2</sup>, 초기오염농도 1,000ppm에서 2주동안 운전한 결과 100%의 제거효율을 얻을 수 있었다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 동전기 생물활성화 공정을 유류오염토양 복원에 적용한 결과 2주 동안 약 1,300-4,400ppm의 오염물을 제거할 수 있었다. 최적의 처리효율은 전류밀도가 1.88mA/cm<sup>2</sup>일 때였으며 초기오염농도가 높을 수록 제거되는 농도가 높게 나타났다. 미생물은 주로 음극에 높은 농도로 측정되었으나 토양의 위치별 제거량과는 어떤 관계를 보이지 않았다. 공정이 종료된 후 생물반응기에서는 잔류 C15가 검출되지 않은 것으로 보아 일차적으로 생계면활성제에 의해 토양으로부터 씻겨진 오염물은 전량 생분해된 것으로 판단된다.

### 4. 사 사

본 연구는 국가지정연구실사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

### 5. 참고문헌

- 1) DeFlaun, F.L. & Condee, C.W., *J of Hazardous Materials*, 55, 263-277(1997)
- 2) Yang, J.W. *et al.*, *J. of KSEE*, vol.25, 426-433(2003)

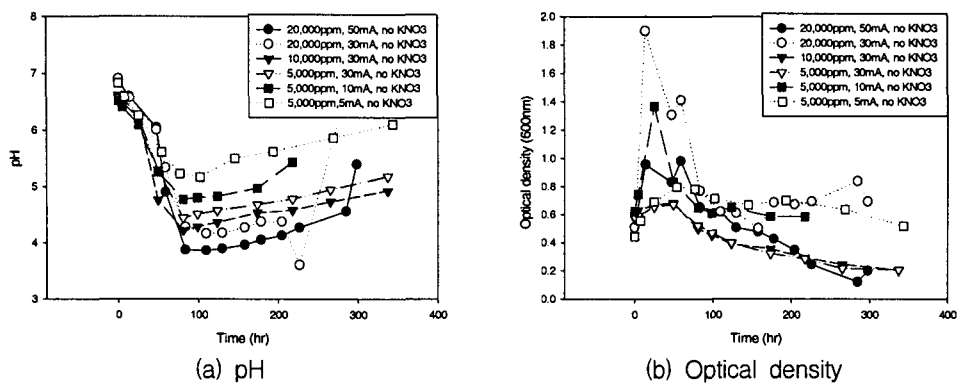


Figure 1. Microbial property in bioreactor of electrokinetic bioaugmentation during operation

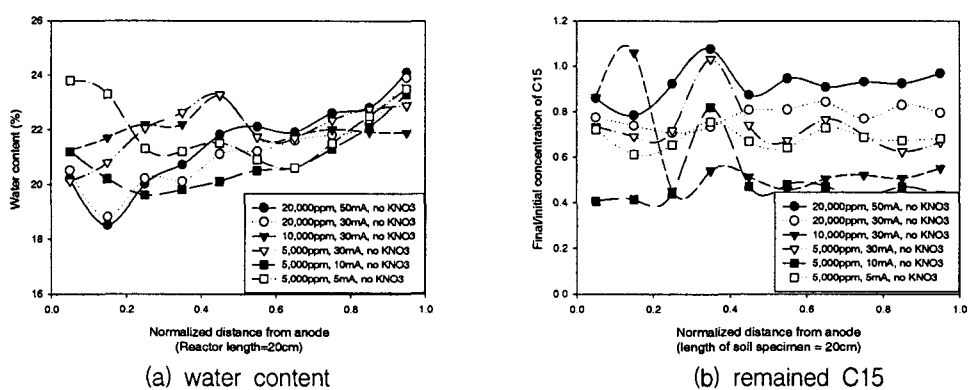


Figure 2. Soil property remediated by electrokinetic bioaugmentation for 14 days

Table 1. Summary of removal efficiency of electrokinetic bioaugmentation for pentadecane-contaminated kaolinite

Initial conc. of C15 (ppm)	Applied current density (mA/cm <sup>2</sup> )	Removal efficiency (%)
20,000	3.13	8.2
20,000	1.88	22.2
10,000	1.88	40.3
5,000	1.88	26.7
5,000	0.63	51.7
5,000	0.32	31.8