

## Remediation of Diesel-Contaminated Soil by Electrokinetically Supplied Bacterial Cells

이효상 · 이기세

명지대학교 환경·생물공학과

(Tel.(0335) 330-6392, hyosang72@hanmail.net)

### ABSTRACT

The use of electrokinetic injection and transport for the distribution of an NAPLs-degrading microorganism in a sandy soil bed was studied. After the injection of the cell into cathode side of bed, an electric current was applied. The transport of cell through the sandy soil was achieved by electrokinetics, mainly by electrophoresis. The pH control in electrode chamber plays an important role to achieve desirable cell transport because  $H^+$  generated at anode is toxic or inhibits the transport of cells. Electrokinetic distribution rate of bacterial cells changed depending on the applied electric current and pH. The degradation of diesel by electrokinetically transport cells were monitored.

---

**Key word** : electrokinetic cell transport, bioremediation, diesel degradation

### I. 서론

전기동력적 정화 공정은 오염된 토양내에 전극을 설치하여 낮은 DC 전류를 이용하여 오염물질을 제거하는 현장내(in-situ) 토양 정화 기술이다. 전기동력학 현상은 전기삼투(electroosmosis)와 전기영동(electrophoresis), 두가지 현상으로 구분되는데 전기삼투란 토양입자 세공내에서 용매가 이동하는 것으로 보통의 경우 토양 입자 표면은 음전하로 대전되어 있으므로 세공내의 유도유체층은 양전하를 띠게 되어 전기장이 존재하면 전기삼투에 의해서 음극쪽으로 이동된다. 전기영동은 세공내에 존재하는 대전 입자들이 전기장이 존재시 반대쪽 전극의 방향으로 이동하는 현상을 말한다. 실험실 뿐만아니라 실 토양에서도 전기동력적 정화공정을 이용하여 오염된 토양내에 중금속, 유기물, 비수용액상을 제거할 수 있다.

전기동력적 정화공정의 유체의 흐름은 전기장내에서만 존재하기 때문에 유

체의 흐름을 조절할 수 있고, 기존의 pump-and treat 방법으로 정화하기 어려운 점토 같은 세공이 작은 토양내에서도 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

물리화학적 처리방법은 오염원을 분해하는 것이 아니라 단지 분리시키는 과정이므로 생물학적 처리방법이 더욱 효과적이고 경제적인 방법이다. 생물학적 정화기술은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 첫째는 토착미생물의 활성화 및 성장을 위해서 외부로부터 인위적으로 영양원 및 산소원을 공급해주는 방법이고, 둘째는 분해능이 우수한 균을 토양내에 주입시켜서 오염원을 제거하는 기술이다.

미생물의 표면은 이온 그룹에 의해서 양쪽성을 띠고 있지만 일반적으로 중성 pH에서는 약한 음전하를 띠고 있어 전기장 형성 시 전기영동에 의해서 음극쪽으로 이동할 수 있다. 또한 전기삼투에 의해서도 일부 양극쪽으로 이동할 수 있다.

본 실험에서는 전기동력학을 이용하여 미생물을 토양내 균일한 분포를 위해서 전류값, buffer의 이온세기, buffer의 pH, 전극실의 pH 변화에 따른 미생물의 이동을 관찰하였고, 또한 각 buffer의 pH에서 이동한 미생물에 의해서 토양오염 diesel 분해율을 관찰하였다.

## II. 실험 재료 및 방법

본 실험에서 사용된 칼럼은 plexiglass 재질로 길이 20cm, 높이 8cm, 폭 6cm인 top-open 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 크게 음극방, 토양, 양극방 3부분으로 나뉘어 진다. 토양의 길이는 15cm이고 전극으로는 흑연판(5cm × 5cm)을 사용했다. 토양과 전극방 사이에는 30 $\mu$ m polypropylene sintered disk를 사용했다. 각 전극방에 펌프를 이용하여 전극액을 순환시켰고, Mariotte bottle를 양극방에 연결하여 일정한 수위를 유지시킴으로써, 전해질의 흐름은 오직 전기삼투에 의해서만 일어나게 하였다.

토양은 일반 건축 자재용 모래를 구입하여 No. 16 sieve(직경 1.19mm)를 이용하여 토양의 입자 크기를 일정하게 하였다. 멸균한 토양을 건조기에서 105 $^{\circ}$ C로 24시간 건조시킨 후 데시케이터에서 보관하여 사용하였다. 900g 모래를 다짐장치를 이용하여 충진 시켰고, 이때 밀도는 1.67g/cm<sup>3</sup>이고 다공성도는 0.35이다. 충진 시킨 후 Mariotte bottle를 양극액에 연결시킨 후 완충용액으로 24시간 동안 포화시켰다. 전해질 용액인 완충용액을 pH7(phosphate 완충용

액), pH9(carbonate 완충용액), 혼합완충용액(phosphate + ammonium 완충용액)을 이용하여 미생물의 이동을 관찰하였다. 또한 경유와 토양의 비를 4000mg/kg으로 오염시킨 후 전기동력으로 미생물을 이동시킨 후 경유 분해율을 GC로 분석하였다.

경유 분해용 미생물 균주는 *Pseudomonas*계 박테리아인 OSD 균주를 사용하였다. 지수성장에 있는 미생물을 주사기를 이용하여 음극으로부터 4.5cm 거리에 주입을 하였다. 미생물 이동실험의 확인은 각 위치(음극으로부터 1.5cm, 3.5cm, 7.5cm, 10.5cm, 13.5cm)에서 용액을 채취하여 고체배지에 일정량을 주입 후 균의 개체 수를 확인하여 백분율로 나타내었다.

### III. 실험 결과 및 고찰

24시간동안 전기를 적용 후 토양의 pH를 그림1에 도식화하였다. 그림에서 보듯이 펌프를 사용하지 않고, 0.05M phosphate 완충용액을 전해질로 24시간 동안 전류를 적용 시 양극근처에서는 pH 2, 음극근처에서 pH 12로 극심한 pH 변화가 되는 것을 알 수 있다. 토양내 pH 변화는 미생물에게 유해하거나 수소이온이 미생물의 표면에 흡착이 되어서 표면전하가 음극에서 양극으로 바뀌어서 이동이 반대쪽(음극)으로 이동될 수 있고 시간이 지남에 따라 미생물을 사멸시킬 수 있다. 따라서 전해질 recycle이나 주기적 교환을 통한 pH 조절이 필수적이라고 사료되었다.

전기동력기술로 미생물의 이동은 전기영동과 전기삼투에 의해서 이루어질 수가 있는데 본 실험에서는 전기삼투보다는 전기영동에 의해서 미생물의 전하와 반대 전극방향인 양극으로 이동되는 것이 관찰되었다. 따라서 OSD는 주어진 조건에서 표면이 음전하를 띠고 있음을 간접적으로 알 수가 있다.

그림 2는 0.05M phosphate buffer(pH7) 조건에서 40mA로 24시간 전기를 적용 시 미생물의 이동을 나타낸 그림이다. 토양내 pH변화를 최소화하기 위하여 80mL/hr로 전극방 전해질을 순환시켰고, 고농도 완충용액(1M, 0.1M)과 저농도(0.005M)에서는 미생물의 이동에 실패를 하였다. 고농도 완충용액을 사용 시에는 전류의 transference number가 대부분 완충용액의 이온에 의해서 이루어지므로 균의 이동이 관찰이 안되어지는 것으로 간주되고, 또한 저농도 사용 시에는 완충능력이 없어 미생물의 이동이 안되어지는 것으로 사료된다. 또한 전류를 3mA, 6mA, 12mA, 20mA로 48시간동안 실험을 하였으나, 토양내 미생

물을 주어진 시간동안 균일하게 분포시키는데 실패를 하였다. 이는 OSD의 표면 전하가 낮아 상대적으로 낮은 전류에서는 이동이 관찰이 안되어지는 것으로 사료되고, 또한 OSD의 hydrophobicity가 86%로 상당히 높아, 토양내 강하게 흡착이 되는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 토양을 diesel로 4000mg/kg으로 오염시킨후 40mA 전류로 24시간 동안 전기를 적용한 후 2, 4, 6일후 토양을 분석하여 이동한 미생물에 의해 diesel의 생분해를 관찰한 것이다. 미생물을 주입한 지점(음극으로 4.5cm)은 2일후 약 40% 제거가 보이고, 6일후 50% 제거가 관찰이 되었다. 양극쪽으로 이동한 미생물들도 6일이 지나서 전지점에서 50% 제거가 관찰이 되었다.

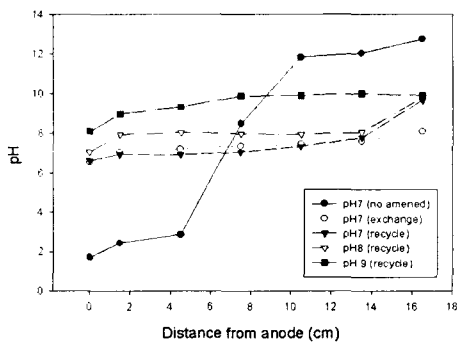


Fig. 1. pH gradient developed after 24hr electrokinetics

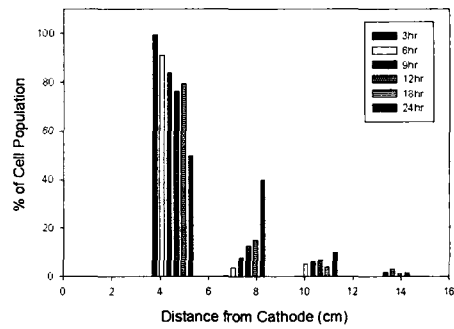


Fig. 2. Cell distribution by electrokinetics at 40mA, pH7

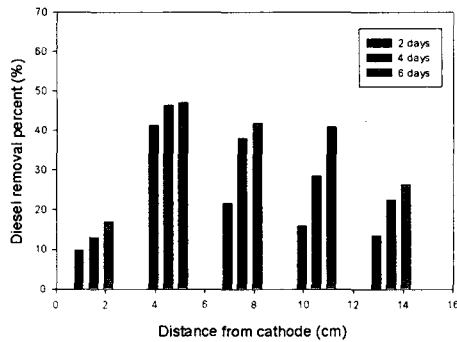


Fig. 3. Biodegradation of diesel by electrokinetically transported cell at 2, 4, 6 days after 24hr electrokinetics at 40mA, pH 7