

3차원 토양 실험장치에서 동전기-펜턴 공정의 전기삼투흐름 모사

박지연 · 김상준 · 이유진 · 기대정 · 양지원

한국과학기술원 생명화학공학과 (yearn@kaist.ac.kr, jwyang@kaist.ac.kr)

<요약문>

Removal of phenanthrene by electrokinetic method combined with Fenton-like process was studied in a model system. The scale of reactor was 100 cm in length, 100 cm in width, and 70 cm in height. The distance between electrodes was 70 cm. Indonesia kaoline was selected as a model soil. When constant voltage of 100 V was applied to this system, current decreased from 200 mA to 100 mA for 14 days. Total accumulated EOF was about 55,000 mL. The concentration of phenanthrene near anode was very low because direction of electroosmosis was from anode to cathode and hydrogen peroxide was supplied to anode reservoir. Phenanthrene concentration was increased as the location was far from anode because hydrogen peroxide was gradually decomposed and then the rate of hydroxyl radical production was decreased.

Key words: Electrokinetic remediation, Electroosmotic flow, Fenton-like reaction, Hydrogen peroxide

1. 서론

동전기 정화기술은 전기삼투(electroosmosis) 및 전기이동(electromigration)의 현상에 의해 저투수성 토양에서 물의 흐름과 오염물의 이동을 유도할 수 있기 때문에, 토양증기추출(SVE)이나 양수처리(pump-and-treat)와 같은 기존의 공정을 적용하기 어려운 저투수성 토양에 대해서 효과적인 오염물의 제거가 가능하다. 특히 오염지역의 특성상 굴착이나 다른 방법을 적용하기 어려운 건물이나 구조물 근처의 지역에서도 원위치 토양정화기술인 동전기 기술이 적용될 수 있다.

또한 펜턴 산화공정은 물에 쉽게 용해되지 않고, 생물학적 분해가 어려우며, 토양에 강하게 흡착되는 경향을 나타내는 유류오염물을 제거하기 위해서 사용되는 고급산화공정의 하나이다. 이는 토양 내에 과산화수소를 공급할 경우, 토양 내에 존재하는 철이 촉매로 작용하여 강력한 산화제인 OH 라디칼을 생성하고, 이 라디칼이 오염물과 반응하여 오염물의 무기산화분해를 가능하게 하는 것이다. 그러나 이 공정은 모래와 같이 투수성이 높은 토양에서는 적용이 용이한 반면, 저투수성 토양에서는 적용하는데 있어서 어려움이 있다. 따라서 저투수성 토양에 대하여 유류오염물을 효과적으로 제거하기 위하여 동전기 기술과 펜턴 산화공정이 결합된 동전기-펜턴 공정을 적용할 경우, 동전기 현상에 의한 과산화수소의 원활한 이동을 통하여 토양 내에 고르게 분포함으로써 높은 제거율을 기대할 수 있는 것이다.

동전기-펜턴 공정에서 오염물의 분해 및 제거는 전기삼투흐름에 의한 과산화수소의 이동에 의존하므로, 전기삼투현상에 의해 토양내 오염물을 제거하는 방향과 범위를 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 동전기-펜턴 공정의 현장 적용을 위한 기초 실험으로, 3차원 토양 실험장치에서 위치에 따른 오염물의 제거양상을 살펴봄으로써, 과산화수소의 이동방향을 예측하고 전기삼투흐름의 방향을 관찰하였다.

2. 실험재료 및 방법

실험에 사용된 토양시료는 덕유 세라믹스에서 구입한 인도네시아 카올린이다. 오염물질은 PAH의 하나인 phenanthrene이고, phenanthrene 오염토양은 인위적으로 약 150 mg phenanthrene/kg dry soil로 제조되었다. 전해질로 0.02 M 농도의 NaCl이 사용되었고, 과산화수소의 농도는 5 %로 조정하였다.

길이 100 cm, 높이 70 cm, 너비 100 cm인 3차원 토양 실험장치에 양극 전극조와 음극 전극조를 각각 설치하고, 양극과 음극 사이의 거리를 70 cm로 하였다(Fig. 1). 각 전극조의 크기는 10 cm × 10 cm × 70 cm이다. 양극 전극조로 주입된 과산화수소 용액이 토양 공극을 통과하여 음극 전극조에 일정 수위 이상으로 축적되면 펌핑에 의해 밖으로 배출된다. 양극에는 탄소 전극이 사용되었고, 음극에는 stainless steel 전극이 사용되었다. 전극조의 바깥 부분은 전극조 내로의 토양의 침입을 막기 위하여 천으로 감싸 주었다. 양극 전극조로의 과산화수소 용액의 공급은 일정한 유량을 유지할 수 있는 정량펌프를 사용하여 공급하였다. 100 V의 정전압 조건하에서 14 일간 조업되었다.

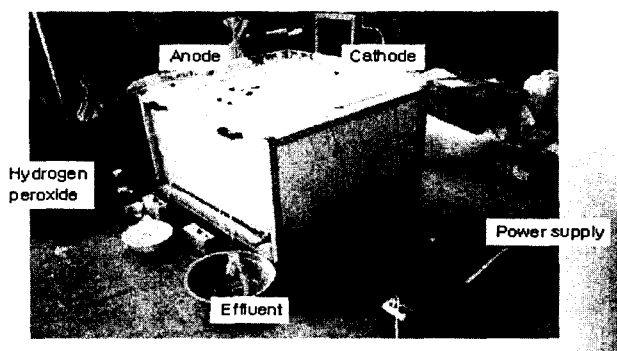


Fig. 1. 3차원 토양 실험장치

3. 결과 및 고찰

100 V의 정전압 하에서 2주간의 전류 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 초기 전류인 200 mA에서 시간이 지남에 따라 100 mA까지 감소하였다. 이는 양극 전해조에 공급되는 전해질이 전기삼투 및 전기이동 현상에 의해 유출수로 빠져나가 토양 시스템 내의 이온 농도가 감소하고, 이로 인해 전도도가 감소하여 생기는 현상으로 생각된다. 3차원 실험장치에서는 실험실 규모의 반응기에서보다 상당히 높은 전류값을 보이고 있는데, 이는 저항이 길이에 비례하고, 단면적에 반비례한다는 특성으로부터 거리도 증가하였지만, 단면적 또한 증가하였기 때문에 나타난 현상이라고 사료된다.

Fig. 3은 14 일간 축적된 전기삼투유량을 나타낸다. 약 55,000 mL의 많은 양의 전기삼투유량이 관찰되었다. 초기 토양 내에 약 270 L의 많은 양의 물이 포함되어 있으므로(함수율 약 35 %), 전기삼투유량에는 전기삼투흐름에 의해 양극에서 음극으로 이동한 과산화수소의 이동 뿐만 아니라 토양 내의 물의 흐름 또한 포함되어 있을 것이라 사료된다.

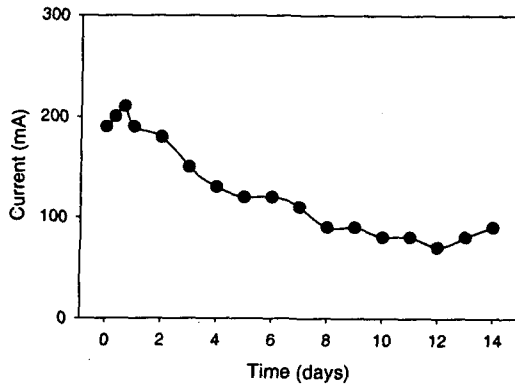


Fig. 2. 전류 변화

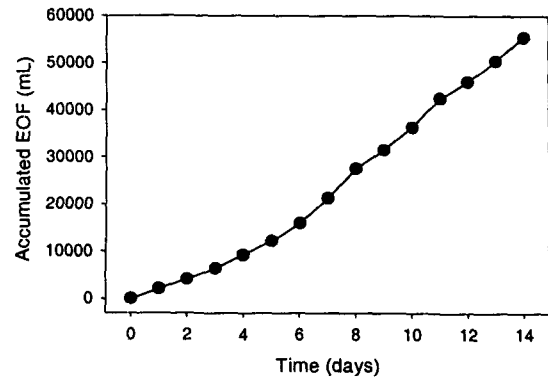


Fig. 3. 전기삼투유량

실험 종료 후 토양 내의 phenanthrene의 분포는 Fig. 4와 같다. 윗부분의 가운데에 양극 전극조가 있고, 아래부분의 가운데에 음극 전해조가 있다. 위로부터 깊이 별로 10, 20, 30, 40, 50 cm의 위치에서의 결과를 보여주고 있다. 전기삼투흐름의 방향이 양극에서 음극으로 향하고, 양극 전해조에서 과산화 수소 용액이 높은 농도로 공급되므로 양극 근처에서 phenanthrene의 농도가 가장 낮게 나타났다. 양극에서 음극으로 갈수록 phenanthrene의 농도가 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 과산화수소가 이동하면서 분해되어 수산화 라디칼의 생성 속도가 감소하기 때문이다. 양극과 음극으로부터 좌우로 멀어질수록 phenanthrene의 농도가 높게 나타나는데, 이로부터 이곳으로의 과산화수소의 이동이 거의 없었다는 것을 알 수 있다. 깊이가 깊어질수록 압밀현상에 의한 공극감소로 전기삼투흐름이 원활하지 않아 양극 근처에서만 phenanthrene의 제거 양상을 보이고 있다.

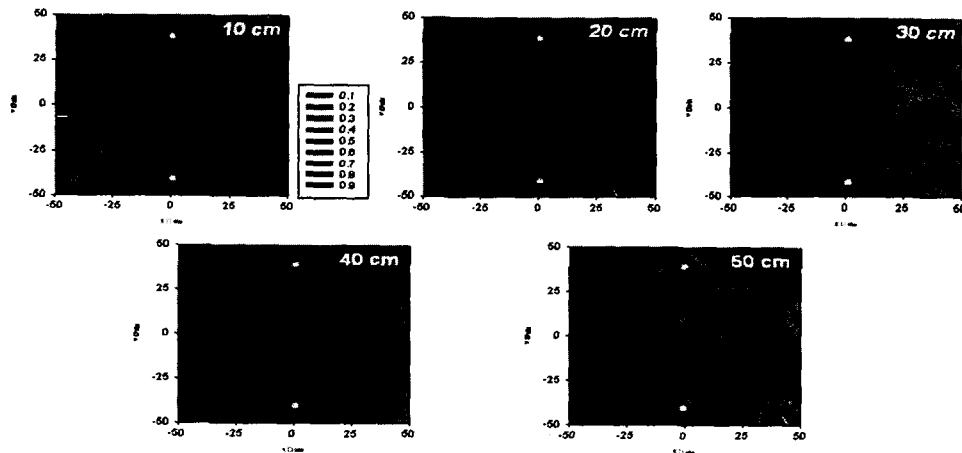


Fig. 4. 토양 내 phenanthrene의 분포

4. 결론

본 연구에서는 2차원 토양 실험장치에 동전기-펜턴 공정을 적용하여 다음과 같은 동전기적 현상들을 관찰하였다.

- 1) 100 V의 정전압 조건하에서 전류는 200 mA에서 100 mA까지 감소하였다.
- 2) 14 일간 축적된 전기삼투유량은 약 55,000 mL로 많은 양의 전기삼투유량이 관찰되었다.

3) 조업 후 양극 근처에서 phenanthrene의 농도가 가장 낮게 나타났다. 양극에서 음극으로 갈수록 phenanthrene의 농도는 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 양극과 음극으로부터 좌우로 멀어질수록 phenanthrene의 농도가 높게 나타났으며, 이로부터 이 부분에는 과산화수소의 이동이 없었다는 것을 알 수 있다. 깊이가 깊어질수록 전기삼투효율이 원활하지 않아 양극 근처에서만 phenanthrene의 제거 양상을 보이고 있다.

5. 사 사

본 연구는 국가지정연구실사업과 차세대 핵심환경기술개발사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

6. 참고문헌

- (1) Kong, S.-H., Watts, R. J., Choi, J.-H., "Treatment of petroleum-contaminated soils using iron mineral catalyzed hydrogen peroxide", Chemosphere, 37, 1473-1482 (1998)
- (2) Yang, C. C., Liu, C. Y., "Remediation of TCE contaminated soils by in-situ EK-Fenton process", Journal of Hazardous Materials, B85, 317-331 (2001)