

동전기-펜턴 토양정화공정에서 공정변수에 따른 분해성능 비교

양지원 · 박지연 · 김상준 · 이유진

한국과학기술원 생명화학공학과

(jwyang@kaist.ac.kr, hana@kaist.ac.kr)

요약문

Removal of phenanthrene by electrokinetic (EK) method combined with Fenton-like process was studied in a model system. Sand and phenanthrene were selected as a model soil and a representative PAH. Sand was contaminated at the concentration of 500 mg phenanthrene/kg dry sand. Bentonite and kaolinite were inserted into the space between reservoir and contaminated soil. When hydrogen peroxide supplied to a soil system from the anode reservoir was transported through the soil by EK process, the Fenton-like reaction was occurred by naturally existing iron minerals in soil. When hydrogen peroxide was supplied into the system, it showed higher removal efficiency than when just water was used. Maximum removal efficiency of phenanthrene was 81.2 % for 7 days.

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

1. 서론

동전기 정화기술은 전기삼투 (electroosmosis) 및 전기이동 (electromigration)의 현상에 의해서 저투수성 토양에서 물의 흐름을 유도할 수 있기 때문에, 토양증기추출 (SVE)이나 양수처리 (pump and treat)와 같은 기존의 공정을 적용하기 어려운 지역에서도 효과적으로 유류오염물을 제거할 수 있다는 장점이 있다. 또한 오염지역의 특성상 굴착이나 다른 방법을 적용하기 어려운 건물이나 구조물 근처의 지역에 대해서도 동전기 기술이 적용될 수 있다. 이런 경우에 전극조에 물을 공급하면서 토양 내에 물의 흐름을 일정하게 유지할 수 있는 방법이 요구되는데, 전극조와 오염토양 사이에 적절한 채움토를 사용하여 물의 흐름을 조절할 수 있다. 또한, 토양 내에 일정한 함수율을 유지하면서 증력에 대항하여 전극조를 통하여 유출수가 배출되도록 하는 것도 중요하다.

물에 쉽게 용해되지 않고, 생물학적 분해가 어려우며, 토양에 강하게 흡착되어 있는 오염물을 제거하는 효율적인 방법으로 고급산화공정 (AOP)의 하나인 펜턴 산화공정을 들 수 있다. 토양 내에 과산화수소를 공급할 경우, 토양 내에 존재하는 철산화물과의 반응을 통하여 강력한 산화제인 OH 라디칼을 생성하게 된다. OH 라디칼은 오염물과 반응하여 직접적인 산화분해가 일어나게 된다.

동전기-펜턴 공정은 토양 내에 과산화수소를 공급하는데 있어, 동전기적 현상들을 이용하여 과산화수소가 골고루 분포할 수 있도록 하여 제거효율을 증대시키는 것이 목적이다. 본 연구에서는 유류오염지역의 정화를 위해 동전기-펜턴 공정을 적용하는데 있어서, 채움토를 사용하여 물의 흐름을 조절하는 경우에 대해서 전기삼투유량 및 오염물의 제거효율에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 실험재료 및 방법

실험에 사용된 토양시료는 입자 크기가 0.3 - 0.8 mm인 주문진 여과사이고, 오염물질은 phenanthrene이다. Phenanthrene 오염토양은 인위적으로 500 mg phenanthrene/kg dry sand로 제조되었다. 전극조와 오염토양 사이의 공간을 채우기 위한 채움토로써 bentonite와 kaolinite (<150

(μm)가 사용되었는데, 이는 토양 내로 공급되는 물의 유량을 조절하기 위한 것이다. 전해질로는 0.05 M NaCl이 사용되었고, 과산화수소의 농도는 3.5 %로 고정되었다.

반응기는 4 cm x 4 cm x 30 cm인 사각형 형태이고, 양쪽 각각 5 cm씩은 전극조 부분에 해당한다. 가운데 15 cm인 곳에 오염토양을 채우고 전극조와 토양 사이의 공간에 물과 혼합한 채움토를 채웠다. 전기삼투흐름에 의해 음극을 빠져나온 유출수는 한곳에 모이도록 하였다. 전극은 4 cm x 4 cm x 0.8 cm인 탄소전극을 사용하였다.

각각의 실험에 대한 공정변수는 Table 1과 같다. 전해질 및 과산화수소의 존재여부에 따른 실험과, 채움토의 종류에 따른 실험을 통하여 EOF (전기삼투유량)와 제거효율의 변화를 관찰하였다.

Table 1. 각각의 실험에 대한 공정변수

실험	전류 (mA)	전해질	H ₂ O ₂ 농도 (%)	채움토	기간 (일)
1	20	Water	-	Bentonite	7
2	20	Water	3.5	Bentonite	7
3	20	0.05 M NaCl	-	Bentonite	7
4	20	0.05 M NaCl	3.5	Bentonite	7
5	20	0.05 M NaCl	-	Kaolinite	7
6	20	0.05 M NaCl	3.5	Kaolinite	7

3. 결과

7일간의 accumulated EOF는 Figure 1과 같다. 물의 흐름은 전기삼투현상이 지배적이어서 양극에서 음극 방향으로 향하였다. 7일 동안 233-397 mL 사이의 값까지 점점 증가하는 양상을 보이고 있다. 4일이 지난 후에는 전해질을 사용하지 않은 경우, 기울기가 점점 감소하는 양상을 나타내었다. Sand의 경우 공극이 크기 때문에 전기삼투흐름의 속도가 빠르지만, 여기서는 공극이 작은 채움토에 의하여 유속이 저하되고 있음을 알 수 있다. 두 종류의 채움토에 대해서 EOF의 차이는 크게 나타나지 않았다.

7일간의 제거효율은 각각의 실험에 대하여 Figure 2와 같이 나타난다. 과산화수소를 사용하지 않은 경우 (실험 1, 3, 5번)의 제거효율은 과산화수소를 사용한 경우 (실험 2, 4, 6번)보다 월등히 떨어지는 것을 알 수 있다. 전기삼투흐름에 의한 단순한 세척효과는 강력한 산화반응인 펜텐유사 반응보다 효율이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 물만을 사용한 1번 실험에서 양극에서 음극 방향으로 물의 흐름이 형성됨에 따라 양극 부분의 phenanthrene이 이동하여 음극에 쌓이는 양상을 보여 final/initial 오염물의 농도비가 1.5까지 증가하였다. 이는 오염물이 음극 전극조 앞의 bentonite 층을 잘 빠져나가지 못해서 생기는 현상으로 사료된다. 그러나 나머지 실험 (3번과 5번)에 대해서는 오염물이 음극 근처에 쌓이지 않고 어느 정도의 제거효율을 보이고 있는데, 이는 전해질의 이동과 함께 오염물의 일부가 유출수를 통하여 빠져나갔기 때문이라 생각된다. 같은 조건에 대하여 채움토로 kaolinite를 사용하였을 경우에 bentonite를 사용하였을 경우보다 조금 높은 제거효율을 보이고 있다. 이는 kaolinite를 통한 오염물의 이동이 bentonite를 통한 이동보다 용이하기 때문이라고 사료된다. 각각의 공정변수에 따른 EOF와 제거효율을 Table 2에 정리하였다. 2번 실험의 경우에 397 mL의 accumulated EOF와 81.2 %의 가장 높은 제거효율을 보이고 있다.

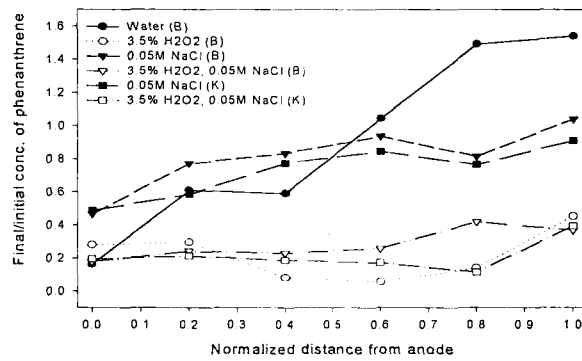
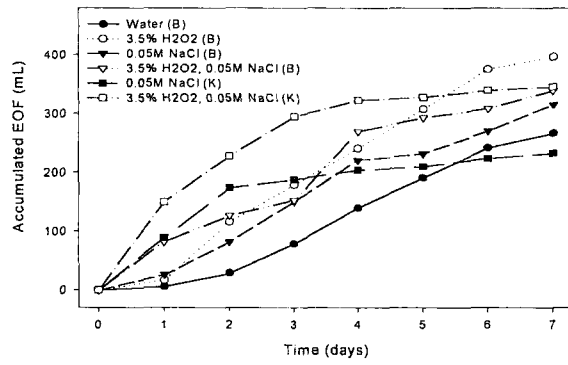


Figure 2. Removal efficiency of phenanthrene in soil

Table 2. EOF와 제거효율

실험	Accumulated EOF (mL)	제거효율 (%)
1	267	8.2
2	397	81.2
3	316	17.8
4	340	71.4
5	233	26.6
6	346	80.3

4. 결론

1) 7일 동안 발생한 accumulated EOF는 최고 397 mL였다. 채움토로 kaolinite를 사용하였을 경우가 bentonite보다 제거효율이 약간 증가하였는데, 이는 bentonite보다 오염물이 이 층을 빠져나가기가 용이했기 때문에 일부가 씻겨나갔기 때문이라고 사료된다.

2) Phenanthrene의 제거효율은 7일 동안 최고 81.2 %였다. 토양 내에서 펜톤유사반응을 통하여

phenanthrene의 산화분해가 일어났기 때문이며, 공극수의 흐름에 의한 단순 세척에 의한 제거보다 훨씬 높은 제거효율을 나타냈다.

사사

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- 1) Liesbet Van Cauwenberghe, "Electrokinetics", GWRTAC, 1-17, 1997
- 2) Gordon C.C. Yang and Yu-Wen Long, "Removal and degradation of phenol in a saturated flow by in-situ electrokinetic remediation and Fenton-like process", *J. of Hazardous materials*, 259-271, 1999
- 3) Gordon C.C. Yang and Chyi-Yech Liu, "Remediation of TCE contaminated soils by in situ EK-Fenton process", *J. of Hazardous Materials*, 317-331, 2001