

동전기-페턴 공정을 이용한 2차원 토양 정화장치에서의 phenanthrene 제거

박지연¹ · 김상준² · 이유진² · 양지원^{2*}

¹한국에너지기술연구원, ²한국과학기술원 생명화학공학과

Removal of Phenanthrene by Electrokinetic-Fenton Process in a 2-dimensional Soil System

Ji-Yeon Park¹ · Sang-Joon Kim² · You-Jin Lee² · Ji-Won Yang^{2*}

¹Korea Institute of Energy Research

²Department of Chemical & Biomolecular Engineering, KAIST

ABSTRACT

Characteristics of phenanthrene removal in the Electrokinetic (EK)-Fenton process were investigated in a 2-dimensional test cell in a viewpoint of the effect of gravity and electroosmotic flow (EOF). When the constant voltage of 100 V was applied to this system, the current decreased from 1,000 to 290 mA after 28 days, because soil resistance increased due to the exhaustion of ions in soil by electroosmosis and electromigration. Accumulated EOF in two cathode reservoirs was 10.3 L and the EOF rate was kept constant for 28 days. At the end of operation, the concentration of phenanthrene was observed to be very low near the anode and increased in the cathode region because hydrogen peroxide was supplied from anode to cathode region following the direction of EOF. Additionally, the concentration of phenanthrene decreased at the bottom of the test cell because the electrolyte solution containing hydrogen peroxide was largely transported toward the bottom due to a low capillary action in the soil with high porosity. Average removal efficiency of phenanthrene by EK-Fenton process was 81.4% for 28 days. *In-situ* EK-Fenton process would overcome the limitations of conventional remediation technologies and effectively remediate the contaminated sites.

Key words : Electrokinetic remediation, Fenton-like reaction, Hydroxyl radical, Hydrogen peroxide

요약문

본 연구에서는 phenanthrene 오염토양 정화를 위한 동전기-페턴 공정을 2차원 토양 정화장치에서 실시하여, 중력 및 전기삼투흐름과 관련된 phenanthrene의 제거 특성을 조사하고자 하였다. 100 V의 정전압 조건 하에서 전류는 초기 1,000에서 290 mA까지 감소하였는데, 이는 토양 내 이온들이 전기삼투 및 전기이동에 의해 유출수를 따라 밖으로 배출되어 토양의 저항이 증가하였기 때문이다. 28일의 처리기간 동안 두 개의 음극 전극조로부터 배출되어 음극 탱크에 축적된 총 전기삼투유량은 10,280 mL였으며, 전기삼투유속의 감소는 발생하지 않았다. 실험 종료 후 토양 내의 phenanthrene 잔류량은 양극 부분은 매우 낮았으며 음극으로 갈수록 증가하였다. 이것은 과산화수소를 포함한 전해질 용액이 전기삼투에 의하여 양극에서 음극으로 공급되었기 때문이다. 또한 오염물의 농도는 바닥 부분에서 낮게 나타났으며 토양의 윗부분으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 이것은 공극의 크기가 큰 토양은 토양입자 표면과 유체 간에 모세관 인력이 작으므로 중력에 의한 물의 흐름이 존재하였기 때문이다. 실험 종료 후 토양 내의 대부분의 지점에서 잔류 오염물은 초기 농도의 20% 이하의 값을 나타냈으며, 동전기-페턴 공정에 의한 평균 phenanthrene 제거율은 81.4%였다. 원위치 오염토양 정화기술인 동전기-페턴 공정을 이용함으로써 다른 토양 정화기술의 한계점을 극복하고 효과적으로 오염토양을 정화할 수 있을 것으로 기대된다.

*Corresponding author : jwyang@kaist.ac.kr

원고접수일 : 2004. 3. 22 게재승인일 : 2005. 5. 31

질의 및 토의 : 2005. 12. 31 까지

주제어 : 동전기 정화기술, 펜텐유사반응, 수산화 라디칼, 과산화수소

1. 서 론

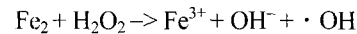
다양한 경로를 통하여 토양으로 유출된 유류 및 유해화합물들로 인하여 토양 및 지하수의 오염이 심각한 수준에 이르고 있다. 특히 물에 잘 녹지 않는 소수성 오염물질들이 토양 내로 유출될 경우, 토양에 흡착되거나 NAPL (non-aqueous phase liquid) 상태로 존재하면서 오랜 기간에 걸쳐 주변 토양 및 지하수를 오염시키게 된다. PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons)는 대표적인 소수성 유기오염물질의 하나로 두 개 이상의 벤젠 고리가 결합되어 있는 구조를 가지고 있으며, 석유나 석탄을 사용하는 공장지역 또는 기타 유류보관소, 원목 저장소 주변에서 높은 농도로 발견되고 있다. 낮은 농도에서도 독성이 강하며, 대부분이 발암물질로 알려져 있는 PAHs는 일반적으로 휘발성이 낮아 증기주입이나 진공추출 등의 기체를 이용한 복원기술의 적용이 어렵고, 물에 대한 용해도가 낮아 지하수를 이용한 토양세척의 효율도 제한되어 있다(염익태 등, 1997).

동전기 공정(electrokinetic process)은 오염된 매체에 전극을 통하여 소량의 전류를 공급함으로써 전기삼투(electroosmosis)나 전기이동(electromigration)과 같은 전기·화학적 이동현상에 의해 중금속 이온이나 기타 오염물질을 이동·분리·회수하는 기술이다(이현호 등, 1999; Lageman, 1993; Acar and Alshawabkeh, 1993). 전기삼투는 음전하를 띠고 있는 토양의 표면에 인력에 의하여 높은 농도로 존재하는 양이온들이 공급된 전기장에 의해 음극으로 한꺼번에 이동하면서 발생한 운동량(momentum)이 공극수를 이동시키는 현상이며, 전기이동은 전하를 띤 이온물질이 자신의 전하특성에 따라 음이온은 양극으로, 양이온은 음극으로 이동하는 현상이다(Acar et al., 1995; Lee and Yang, 2000).

동전기 기술은 과거에는 주로 연약지반 개량, 기초지반 보강, 지하굴착 보조공법 등의 지반공학분야에서 사용되어 왔으나, 현재에는 토양환경복원 그리고 수처리 부분에 적용되고 있으며, 중금속뿐만 아니라 각종 유류오염물질의 처리에도 이용되고 있다. 중금속의 경우에는 물에 녹아 이온성을 나타내므로 전기이동 현상을 이용하여 동전기 기술만으로 처리가 가능한 반면, 유류오염물질의 경우에는 물에 대한 낮은 용해도나 토양에 대한 높은 흡착력에 기인하여 제거가 어려우며 대부분 극성을 나타내지 않으므로 이를 제거하는 데는 한계가 있다. 따라서 계면활성

제 세척, 생물학적 복원, 고급산화공정과 같은 다른 기술과 결합함으로써 제거율을 향상시킬 수 있다(Ko et al., 2000).

과산화수소를 토양 내로 이동시켜 그 산화력을 이용해 유류오염물을 분해하는 동전기-펜텐 공정은, 2가 철과 과산화수소의 반응을 통하여 산화력이 매우 강한 OH 라디칼을 발생시키는 펜텐 공정과 과산화수소 및 오염물의 이동을 야기시키는 동전기 공정과의 결합을 통하여 높은 제거율을 기대할 수 있다(Yang and Long, 1999; Yang and Liu, 2001). 동전기-펜텐 공정에서 OH 라디칼의 생성은 다음과 같은 반응에 의하여 일어나게 된다(Watts and Dilly, 1996; Teel et al., 2001).



이와 같은 반응을 통하여 생성된 OH 라디칼은 강력한 산화력을 가지고 있기 때문에, 대부분의 유류오염물질과 빠르게 반응하여 직접적인 산화분해를 일으킨다.

동전기-펜텐 공정은 반응산물로 물과 이산화탄소 외에 독성이 없는 물질을 생산한다는 점에서 기존 기술에 비해 환경친화적이라 할 수 있으며, OH 라디칼의 강력한 산화분해와 전기·화학적인 이동성 향상에 의하여 비교적 짧은 시간 내에 오염지역을 처리할 수 있는 경제적인 공정이다. 또한 물질의 이동이 어려운 저투수성 토양에서도 공정 적용이 가능하며, *in-situ* 공정으로 운전이 간편하여 비용 또한 절감할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 동전기-펜텐 공정의 현장 적용을 위한 기초 실험으로 2차원 토양 정화장치에서 여러 가지 동전기적 현상들을 관찰하고, 중력 및 전기삼투흐름과 관련된 phenanthrene의 2차원적 제거 특성을 조사함으로써 공정의 scale-up에 따라 고려되어야 하는 인자들을 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험재료

실험에 사용된 토양시료는 입자 크기가 0.3-0.8 mm인 주문진 여과사이고, 벤토나이트는 수력학적 경사에 의하여 전해질이 토양 내로 유입되는 것을 방지하기 위하여 사용되었다. 오염물질은 PAHs의 하나인 phenanthrene (Sigma 사)이고, phenanthrene 오염토양은 phenanthrene-아세톤 용액을 토양과 혼합한 후 아세톤을 증발시켜 인위

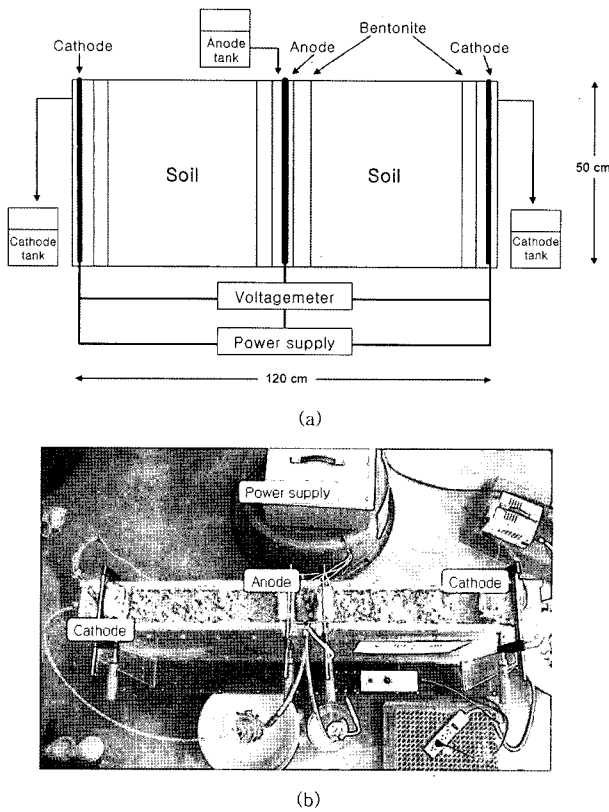


Fig. 1. Schematic diagram of test cell for EK-Fenton process.

적으로 약 100 mg phenanthrene/kg dry soil로 제조되었다. 양극에 공급되는 전해질 용액은 35% 과산화수소 용액 (Junsei 사)을 0.05 M KH_2PO_4 를 사용하여 3.5%로 희석함으로써 제조되었다.

2.2. 실험장치

2차원 토양 정화장치의 모형을 Fig. 1에 나타내었다. 가로 120 cm, 높이 50 cm, 너비 10 cm인 2차원 토양 실험장치의 양쪽 끝에 각각 음극 전극조를 설치하고, 가운데 부분에 양극 전극조를 설치하였다. 일반적으로 토양의 저항은 전극 간의 간격에 비례하므로 정전압 조건에서 저항의 감소는 전류의 상승을 유발한다. 따라서 토양 중간에 양극의 삽입은 전류의 증가와 함께 전기삼투유량의 증가를 유도할 수 있으므로 효과적인 오염물의 제거를 기대할 수 있다. 전극조의 크기는 가로 5.5 cm×높이 50 cm×너비 10 cm이고, 전극조 윗부분에는 밸브구멍을 설치하여 유입수 및 유출수의 흐름을 가능하게 하였다. 수위가 일정한 양극 전극조에서 주입된 과산화수소 용액은 전기삼투흐름에 의해 토양 내 공극을 통과하여 양쪽에 설치되어 있는 음극 전극조를 통하여 일정 수위 이상이 되

면 음극 탱크로 배출되며, 양극 전극조에서는 과산화수소의 연속적인 주입을 위해 양극 탱크와 양극 전극조 사이를 정량펌프를 이용해서 순환하도록 하였다. 양극으로는 탄소 전극이 사용되었는데, 이는 백금 또는 이리듐으로 코팅된 티타늄 전극이 양극으로 사용된 경우, 양극 전극조에서 과산화수소의 분해가 일어나 토양으로 유입되기 전에 소모되는 현상이 발생하므로 이러한 부반응을 막기 위해서였다. 음극으로는 stainless steel 전극이 사용되었다. 전극조와 토양이 접촉하는 부분은 토양 시료가 전극조 내로 유입되는 것을 막기 위하여 철을 이용하여 감싸주었다. 전극조 사이의 공간에 오염토양을 채우고, 토양과 접촉하는 면에 위치한 전극조 안의 다공성 공간에는 물과 오염되지 않은 벤토나이트를 혼합하여 채움으로써 수력학적 경사에 의하여 전해질이 토양 내로 유입되는 것을 방지하였다. 최대 150 V까지 전압 공급이 가능한 직류 전원공급기를 사용하여, 100 V의 정전압 조건하에서 28일간 조업되었다.

2.3. 실험조건 및 분석방법

토양 내 철의 양을 측정하기 위하여, 토양 5 g을 3.3 M HNO_3 50 mL에 넣고 48시간 동안 교반하여 추출한 후 상등액을 AAS(Atomic Absorption Spectrophotometry, Perkin Elmer 사)로 분석하였다. 그 결과 주문진 여과사로부터 충분한 펜턴유사 반응이 일어날 수 있는 수준인 약 3,830 mg/kg dry soil의 철이 추출되었으며, 실제 예비실험에서 철 촉매의 펜턴유사 반응이 일어남을 확인하였다. 공정 중에는 반응기 내의 전류 변화와 전기삼투유량이 측정되었다. 실험 종료 후 토양에 남아있는 phenanthrene의 농도를 측정하기 위하여, 채취한 시료를 건조시킨 후, 토양 1 g과 메탄올 10 mL를 24시간 동안 교반하고 254 nm의 파장에서 C_{18} Symmetry Column을 사용하여 HPLC(High Performance Liquid Chromatography, Waters 사)로 정량하였다. Eluent는 acetonitrile (Merck 사)과 물을 85 : 15의 비율로 혼합하여 제조하였으며, 유속은 1 mL/min이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전류 변화

28일의 조업기간 동안 토양 시스템의 전류 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 전류가 초기 1,000 mA(1 mA/cm^2)에서 시간이 지남에 따라 점점 감소하여 290 mA(0.29 mA/cm^2)까지 변화였다. 이는 양극 전극조에 공급되는 전해질

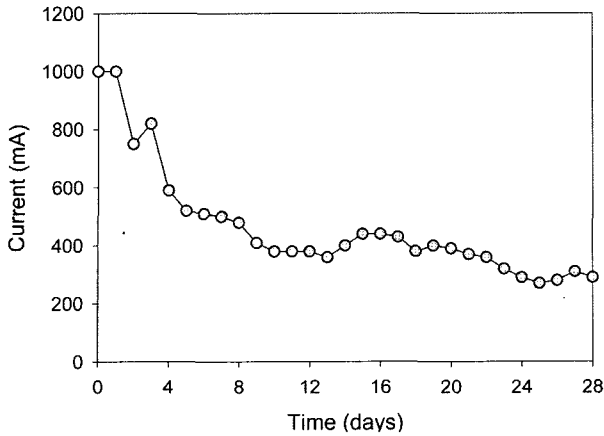


Fig. 2. Profile of current in the soil system.

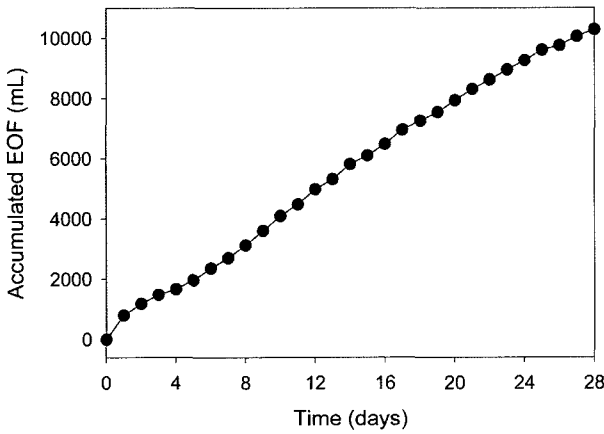


Fig. 3. Accumulated electroosmotic flow.

이 전기삼투 및 전기이동 현상에 의해 유출수를 통하여 빠져나가 토양 시스템 내의 이온 농도가 감소함으로써 토양 저항이 증가하였기 때문이다(양지원 등, 2001). 9 일 후부터는 전류가 크게 감소하지 않았는데 이것은 전기삼투에 의한 전해질의 토양 내로의 공급속도와 전기이동 및 전기삼투에 의한 이온의 토양 밖으로의 배출속도가 비슷해져서 토양 내 이온의 농도 변화가 작기 때문이다.

3.2. 전기삼투유량

Fig. 3에 28일 동안 두 개의 음극 전극조를 통하여 발생한 전기삼투유량의 축적량을 나타내었다. 총 10,280 mL의 전기삼투유량이 발생하였으며, 전기삼투유속의 감소현상은 발생하지 않았다. 이것은 양극 전극조를 통한 계속적인 양이온의 공급과 수소 이온의 생산에 의해 전기삼투 현상이 지속되었기 때문이다. 만일 전해질의 공급이 적

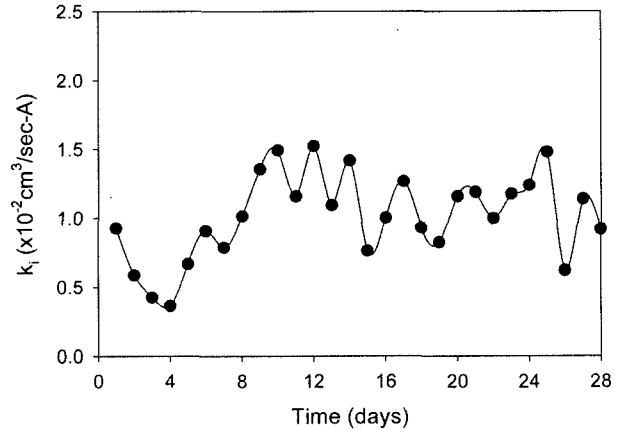
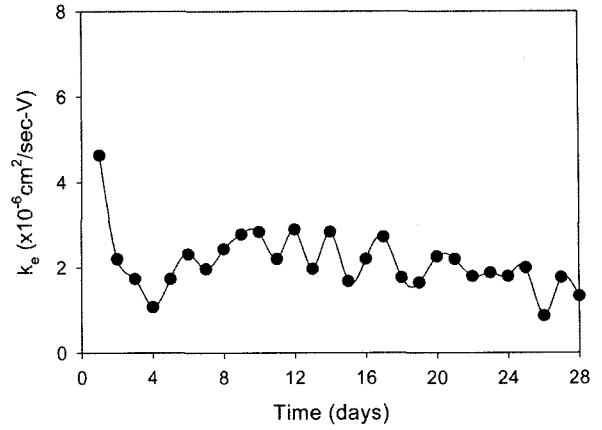


Fig. 4. Coefficient of electroosmotic permeability, k_e and coefficient of water-transport efficiency, k_i .

절한 속도로 유지되지 않았다면, 양극에서의 산화반응에 따라 발생하는 과도한 수소 이온에 의해 토양의 제타포텐셜은 크게 감소되고 이로 인해 전기삼투유량은 감소되었을 것이다.

두 개의 음극 전극조로부터 발생된 전기삼투유량을 바탕으로 전기삼투 현상과 전압 및 전류와의 관계를 나타내는 상수인 k_e (coefficient of electroosmotic permeability)와 k_i (coefficient of water-transport efficiency)를 계산하였다(Hamed et al., 1991) (Fig. 4). k_e 는 대부분 1.5×10^{-6} – 3.0×10^{-6} cm²/sec-V의 범위 내에 있었으며, k_i 는 0.5×10^{-2} – 1.5×10^{-2} cm³/sec-A 사이에 대부분의 값이 포함되었다. 28일 동안 k_e 와 k_i 의 감소 현상이 관찰되지 않았으며, 이러한 결과는 비교적 원활한 전기삼투유량이 발생하였다는 것을 보여주고 있다. 하지만 이 값들은 clay에서 측정된 k_e 와 k_i 보다 낮게 관찰되었으며, 이는 공극이 큰 토양에서 전기삼투흐름이 중력의 영향으로 토양의 아래쪽으로 향하면서 유속을 일부 감소시켰기 때문인 것으로 사료된다(양지연 등, 2004).

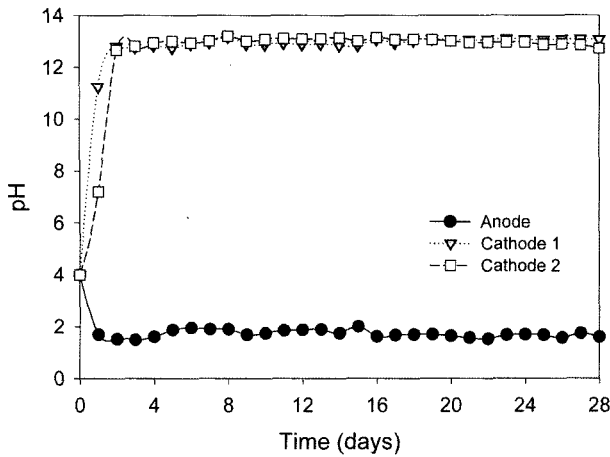


Fig. 5. pH profile of anolyte and catholyte.

3.3. 전해질의 pH 변화

Fig. 5는 양극과 음극 전극조에서의 시간에 따른 pH 변화를 나타내고 있다. 초기 pH는 4였고, 양극에서는 전기분해에 의한 수소 이온의 생성에 의하여 pH가 2 근처까지 감소하였고, 음극에서는 수산화 이온의 생성으로 13 근처까지 증가하였다. 일반적으로 양극으로부터 생성된 산전선(acid front)이 전기삼투 현상에 의해 음극으로 이동하면서 음극 전극조의 수산화 이온을 중화시켜 음극 전극조에서의 pH가 점점 감소하는 현상을 나타내지만(Acar et al., 1992), 이 실험에서는 그런 현상이 나타나지 않았다. 이것은 2차원 실험장치에서의 전류값이 높기 때문에 음극에서 물의 전기분해에 의한 수산화 이온의 생성속도가 산전선의 이동에 의한 수산화 이온의 중화속도보다 우세하였기 때문이다. 다시 말해서, 양극과 음극 사이의 거리가 약 50 cm로 상대적으로 멀어서 일부 수소 이온은 음극 전극조에 도달하기 전에 수산화 이온과 만나서 중화되었을 것이다. 또한 벤토나이트의 높은 완충능력에 의해 양극을 통하여 전개되는 산전선의 일부가 전극조 앞부분에서 벤토나이트와 반응하여 수산화 이온을 중화시킬 수 있는 수소 이온의 양을 감소시켰기 때문인 것으로 생각된다(Acar and Alshawabkeh, 1993).

3.4. 함수율 변화

실험이 종료된 후 토양 내의 함수율의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 토양 표면을 0 (cm), 바닥을 -50 (cm)으로 표시하였다. 전체 토양 내의 함수율은 7-27%의 분포를 가지고 있었으며, 25% 이상의 함수율은 물로 포화되어 있는 상태를 의미한다. 함수율은 양극에서 음극으로 향할수록, 그리고 토양의 표면에서 바닥으로 갈수록 증가하였

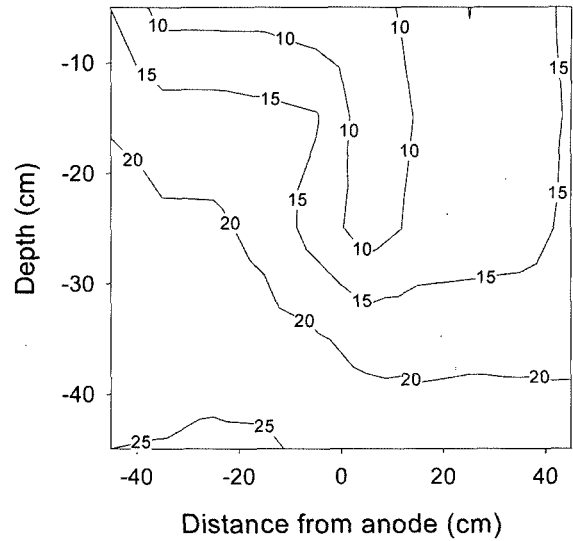


Fig. 6. Moisture content of soil at the end of operation.

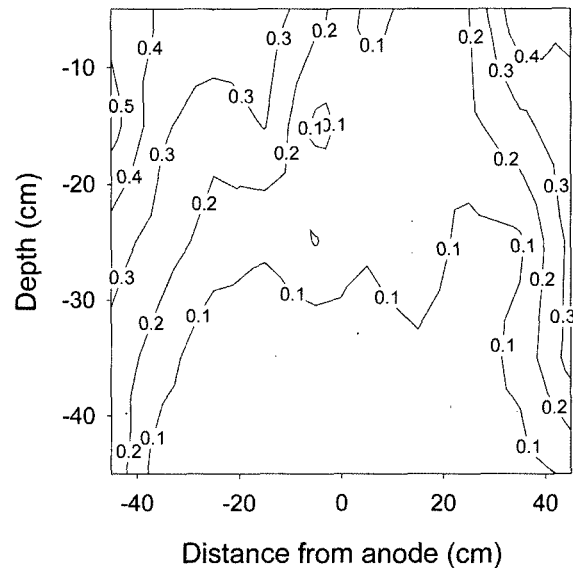


Fig. 7. Content of phenanthrene in soil at the end of operation (-Non-dimensional concentration, $C_{final}/C_{initial}$).

다. 이것은 공극이 큰 토양은 유체에 대한 모세관 인력이 미미하므로 전기삼투흐름에 의해 토양 내로 침투한 전해질은 중력의 영향으로 토양의 아래쪽으로 이동하였기 때문이다. 양극 근처의 함수율이 낮게 나타난 것은, 전해질이 수력학적 경사에 의해 토양 내로 유입되는 것을 벤토나이트가 효과적으로 조절하였으며 전기삼투흐름이 원활하였다는 것을 의미한다.

3.5. Phenanthrene 제거율

실험 종료 후 토양 내에 남아있는 phenanthrene의 농도

를 초기 농도로 나누어서 계산된 정규화된 phenanthrene의 농도분포는 Fig. 7과 같다. 양극 전극조에서 과산화수소 용액이 공급되고 전기삼투흐름의 방향이 양극에서 음극으로 향하기 때문에, 양극 근처에서 오염물의 농도가 가장 낮게 나타났다. 또한 음극으로 갈수록 오염물의 농도가 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 양극 부분의 오염물은 과산화수소에 의해 대부분 쉽게 분해가 가능하지만 음극 주변의 오염물은 과산화수소가 음극에 도달하기 전에 촉매반응에 의해 수산화 라디칼로 되면서 소모되는 경우가 많아 분해될 기회가 적기 때문이다. 바닥으로 갈수록 오염물의 농도가 감소하는 것은, 함수율의 분포와 마찬가지로 토양의 공극이 커서 중력의 영향을 받아 전기삼투흐름의 대부분이 아래쪽에서 형성되었기 때문이다. 음극에 근접한 부분에서는 잔류 오염물이 초기 농도의 30-40% 가까이 남아 있었지만 대부분의 지점에서 잔류 오염물은 초기 농도의 20% 이하의 값을 나타내고 있기 때문에 전체적인 phenanthrene 제거율은 81.4%였다. 따라서 대부분의 phenanthrene이 수산화 라디칼에 의해 토양 내에서 산화분해 되었을 것으로 생각된다. 또한 유출수와 벤토나이트 층에서 phenanthrene이 거의 발견되지 않은 결과로부터, 물의 세척효과에 의하여 음극 전극조로 이동한 일부 phenanthrene은 음극 전극조까지 이동한 과산화수소에 의해서 산화분해 되었을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차원 토양 정화장치에 phenanthrene 오염토양의 정화를 위한 동전기-펜턴 공정을 적용하여 동전기적 현상들과 오염물의 제거 양상을 관찰함으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 100 V의 정전압 조건하에서 전류는 1,000 mA에서 290 mA까지 감소하였다. 이는 전기삼투 및 전기이동 현상에 의한 토양 내 이온 농도의 감소가 토양저항을 증가시켰기 때문인 것으로 사료된다.
- 2) 28일간 두 개의 음극 탱크에 축적된 총 전기삼투유량은 10,280 mL였으며, 지속적인 전해질의 공급으로 전기삼투유속의 감소 현상은 발생되지 않았다.
- 3) 전기분해 반응에 의해 양극 전극조의 pH는 2까지 감소하였고, 음극 전극조의 pH는 13까지 증가하였다. 토양 내에서의 수소 이온과 수산화 이온의 중화 반응과 벤토나이트의 높은 완충능력에 기인하여 pH는 28일간 그대로 유지되었다.
- 4) 실험 종료 후 토양 내의 함수율은 양극 부분이 가장

낮았고 음극으로 갈수록 증가하였다. 또한 토양의 표면으로부터 바닥으로 갈수록 함수율이 증가하였다. 공극이 큰 토양은 모세관 현상에 의한 유체와의 인력이 미미하므로 중력의 영향으로 양극에서 음극으로의 전기삼투흐름이 대부분 토양의 아래쪽에서 이동하였기 때문이다.

5) 오염물의 농도는 양극 근처에서 가장 낮게 나타났으며 음극으로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 바닥으로 갈수록 오염물의 농도가 감소하였다. 실험 종료 후 81.4%의 높은 phenanthrene 제거율을 나타내었다. 따라서 원위치 오염토양 정화기술인 동전기-펜턴 공정은 다른 토양 정화기술이 적용되기 어려운 지역에서도 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 전극의 극성을 바꾸어 전기삼투흐름의 방향을 반대로 유도한다면 음극 부분에 잔류하는 오염물을 추가적으로 제거할 수 있어 더욱 높은 제거율을 얻을 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 국가지정연구실사업과 차세대 핵심환경기술 개발사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 박지연, 김상준, 이유진, 양지원, 2004, 3차원 토양 실험장치에서 Phenanthrene 오염토양 정화를 위한 동전기-펜턴 공정, *J. of KSEE*, **26**(6), 697-702.
- 양지원, 김상준, 박지연, 이유진, 2002, 동전기 복원에 있어서 전기삼투량 변화에 미치는 양이온의 역할, *J. of KSEE*, **24**(12), 2183-2190.
- 염익태, Ghosh, M.M., 안규홍, 1997, 계면활성제를 이용한 오염된 토양으로부터의 Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)의 세척, *J. of KSEE*, **19**(9), 1111-1124.
- 이현호, 백기태, 양지원, 1999, 동전기 정화기술을 이용한 kaolinite-white O에서의 납 제거, *J. of KSEE*, **21**(9), 1751-1760.
- Acar, Y.B., Li, H., and Gale, R.J., 1992, Phenol removal from kaolinite by electrokinetics, *J. of Geotech. Eng.*, **118**(11), 1837-1852.
- Acar, Y.B. and Alshawabkeh, A.N., 1993, Principles of electrokinetic remediation, *Environ. Sci. Technol.*, **27**(13), 2638-2647.
- Acar, Y.B., Gale, R.J., Alshawabkeh, A.N., and Marks, R.E., 1995, Electrokinetic remediation: Basics and technology status, *J. of Hazardous Materials*, **40**, 117-137.
- Hamed, J, Acar, Y.B., and Gale, R.J., 1991, Pb(II) removal from kaolinite by electrokinetics, *J. Geotech. Eng.*, **117**(2), 241-271.

- Ko, S.O., Schlautman, M.A., and Carraway, E.R., 2000, Cyclodextrin-enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from a model clay soil, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 1535-1541.
- Lageman, R., 1993, Electroreclamation, *Environ. Sci. Technol.*, **27**(13), 2648-2650.
- Lee, H.H. and Yang, J.W., 2000, A new methode to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation, *J. of Hazardous Materials*, **B77**, 227-240.
- Teel, A.L., Warberg, C.R., Atkinson, D.A., and Watts, R.J., 2001, Comparison of mineral and soluble iron Fenton's catalysts for the treatment of trichloroethylene, *War. Res.*, **35**(4), 977-984.
- Watts, R.J. and Dilly, S.E., 1996, Evaluation of iron catalysts for the Fenton-like remediation of diesel-contaminated soils, *J. of Hazardous Materials*, **51**, 209-224.
- Yang, G.C.C. and Long, Y.W., 1999, Removal and degradation of phenol in a saturated flow by *in-situ* electrokinetic remediation and Fenton-like process, *J. of Hazardous Materials*, **B69**, 259-271.
- Yang, G.C.C. and Liu, C. Y., 2001, Remediation of TCE contaminated soils by *in-situ* EK-Fenton process, *J. of Hazardous Materials*, **B85**, 317-331.