

동전기-펜턴 공정을 이용한 phenanthrene 오염토양의 정화

양지원* · 박지연 · 김상준 · 이유진 · 기대정

한국과학기술원 생명화학공학과

Electrokinetic-Fenton Process for Removal of Phenanthrene

Ji-Won Yang* · Ji-Yeon Park · Sang-Joon Kim · You-Jin Lee · Dae-Jeong Ki

Department of Chemical & Biomolecular Engineering, KAIST

ABSTRACT

Feasibility of electrokinetic process combined with Fenton-like reaction was investigated for the removal of phenanthrene from contaminated soil. Transport of hydrogen peroxide by electroosmosis and decomposition of phenanthrene by Fenton-like reaction were observed in a model system. Electrical potential gradient and electroosmotic flow (EOF) at 10 mA were higher than those at 5 mA. High accumulated EOF resulted in high removal efficiency of phenanthrene because the large amount of hydrogen peroxide was transferred through the soil. Removal efficiency of phenanthrene by water washing was 8.5% for 7 days. The highest removal efficiency including phenanthrene decomposition was 95.6% for 14 days. After the operation, soil samples with removal efficiency of 95.6% showed low concentrations of phenanthrene and its intermediates. From this result, it was presumed that phenanthrene was decomposed to small molecules or mineralized to water and carbon dioxide due to continuous supply of hydrogen peroxide by electroosmotic flow.

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

요 약 문

본 연구에서는 동전기-펜턴 공정을 이용한 phenanthrene 오염토양 정화의 타당성을 확인하기 위해서, 토양 시스템 내에서 전기삼투흐름에 의한 과산화수소의 이동과 펜턴유사 반응에 의한 phenanthrene의 산화분해 양상을 살펴보았다. 10 mA와 5 mA의 두 가지 전류 조건 중에서, 10 mA일 때 더 높은 전압경사와 전기삼투유량이 관찰되었다. 높은 전기삼투유량은 토양 내로 많은 양의 과산화수소가 이동한 것을 의미하므로, phenanthrene 제거효율이 전기삼투유량이 증가함에 따라 증가한 것으로 판단된다. 동전기 정화기술만을 이용한 토양 세척에 의해 7일간의 가동기간 동안 8.5%의 phenanthrene이 제거되었다. Phenanthrene을 직접 산화분해하기 위하여 양극 전극조를 통하여 과산화수소 용액을 토양에 공급한 경우에는 14일 동안 최고 95.6%의 제거효율을 얻을 수 있었다. 실험 종료 후 95.6%의 제거효율을 나타낸 토양시료를 분석한 결과 phenanthrene의 중간산물이 거의 관찰되지 않았으므로, 과산화수소의 연속적인 주입을 통하여 가동기간 중간에 생성된 중간산물들이 저분자 물질로 산화분해 되었거나 물과 이산화탄소로 분해된 것으로 추정된다.

주제어 : 동전기 정화기술, 펜턴유사 반응, 수산화 라디칼, 과산화수소

1. 서 론

정유회사 및 화학공장으로부터 유류 및 유해화학물의 유출은 탱크 및 연결관의 부식, 지하변동 그리고 불량한

밀봉 등의 원인에 의해 유발될 수 있는데, 우리나라의 지하저장 탱크수(54,461 개, 1996년)를 감안해 볼 때 유류 누출로 인한 토양 오염은 심각할 것으로 예상된다. 특히 주유소의 경우에는 주민 거주지역에 가깝게 위치하므로

*Corresponding author : jwyang@kaist.ac.kr

원고접수일 : 2003. 10. 15 게재승인일 : 2003 12. 12

질의 및 토의 : 2004. 6. 30 까지

유류 누출로 인한 건강상의 위해가 초래될 수도 있으며, 이러한 유출로 토양 및 지하수의 오염이 가속화되고 있는 실정이다^{1,2)}.

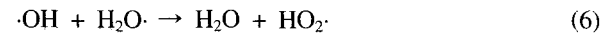
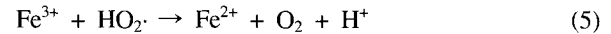
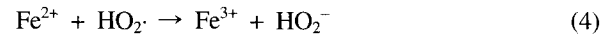
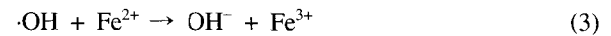
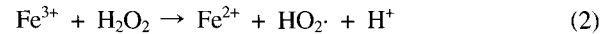
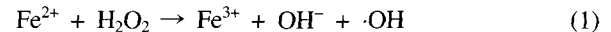
현재 유류 오염토양에 적용되고 있는 정화기술 중에서 *in-situ* 기술에 속하는 토양세척(soil washing), 토양증기추출(soil vapor extraction), 생물학적 처리기술(bioremediation) 등은 굴착이나 운송에 관련된 경비와 문제점을 축소할 수 있다는 장점이 있는 반면 토양의 물리·화학적 성질 및 오염물의 특성에 따라서 제거율이 현저히 달라지기 때문에 광범위하게 사용될 수 없다는 단점이 있다. 특히 모래와 같이 상대적으로 수리전도도가 높은 토양의 정화에 기존의 공법들을 적용할 경우 대체적으로 만족할 만한 처리 결과를 얻을 수 있지만, 저투수성 토양으로 갈수록 오염물 및 첨가제의 이동이 어려워짐으로 인해 많은 문제점들이 발생하게 된다^{3,4)}.

이를 해결하기 위한 새로운 방법으로 동전기 기술(electrokinetic process)을 들 수 있는데, 이는 오염된 매체에 전극을 통하여 소량의 전류를 공급함으로써 전기삼투(electroosmosis)나 전기이동(electromigration)과 같은 전기화학적 이동현상에 의해 중금속 이온이나 기타 오염물질을 이동·분리·회수하는 기술이다⁵⁻⁷⁾. 전기삼투는 포화된 토양 내에 전류가 가해지면 양이온들이 음극을 향하여 이동하면서 공극수를 함께 이동시킴으로써 물이 흐르는 현상이며, 전기이동은 전하를 띤 이온물질이 자신의 전하특성에 따라 음이온은 양극으로, 양이온은 음극으로 이동하는 현상이다⁸⁻¹⁰⁾.

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 동전기 기술만으로 처리가 가능한 반면, 유류오염물의 경우에는 물에 대한 낮은 용해도나 토양에 대한 높은 흡착력에 기인하여 제거가 어려우므로 계면활성제 세척, 생물학적 복원, 고급산화공정과 같은 다른 기술과 결합함으로써 제거율을 향상시킬 수 있다¹¹⁾.

과산화수소를 토양 내로 이동시켜 그 산화력을 이용해 유류오염물을 분해하는 동전기-펜턴 공정은, 2가 철과 과산화수소의 반응을 통하여 산화력이 매우 강한 OH 라디칼을 발생시키는 펜턴 공정과 과산화수소 및 오염물의 이동을 일으키는 동전기 공정의 결합을 통하여 높은 제거율을 기대할 수 있다¹²⁻¹³⁾. 펜턴 공정에 의한 토양으로부터 유류오염물의 제거는 다음과 같은 메커니즘에 의해

일어나게 된다.



이와 같은 연쇄적인 반응을 통하여 생성된 OH 라디칼은 강력한 산화제이기 때문에 대부분의 유류오염물질들과 빠르게 반응하여 직접적인 산화분해를 일으키게 된다¹⁴⁻¹⁵⁾. 이 외에도 위의 반응을 통하여 HO₂ 라디칼이 생성되지만, OH 라디칼에 비하여 반응성이 매우 작다고 알려져 있다.

동전기-펜턴 공정은 반응산물로 물과 이산화탄소 외에 독성이 없는 물질을 생산한다는 점에서 기존 기술에 비해 환경친화적이라 할 수 있으며, OH 라디칼의 강력한 산화분해와 전기화학적인 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-펜턴 공정을 이용한 유류오염토양 정화의 타당성을 살펴보기 위하여 오염된 저투수성 토양을 대상으로 이 기술을 적용하였을 때의 전기삼투유량 및 전압경사를 관찰하고, phenanthrene 중간산물의 생성여부를 분석하여 토양 내에서 phenanthrene의 산화분해 양상을 살펴보고, 동전기-펜턴 공정의 오염물에 대한 제거 효율을 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 오염물질은 대표적인 PAH(Poly Aromatic Hydrocarbon)의 하나인 phenanthrene(Sigma, >96%)이다. Phenanthrene은 물에 대한 용해도가 7.2 μM로 물에 녹지 않는 성질을 가지고 있다¹⁶⁾. Phenanthrene의 중간산물 중에서 9,10-phenanthrenquinone, 9-hydroxyphenanthrene, 2-phenylbenzaldehyde(Aldrich)의 세 가지를 선택하여 검량선을 작성하였다. Phenanthrene 및 그 중간산물의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 토양 시료로는 경남 산청에서 생산되는 kaolinite를 사용하였는데, 균일성을 유지하기 위하여 건조로에서 건조시킨 시료를 분쇄한 후, No. 100인체를 통과한 150 μm 이하의 입자만을 사용하였다. 실험

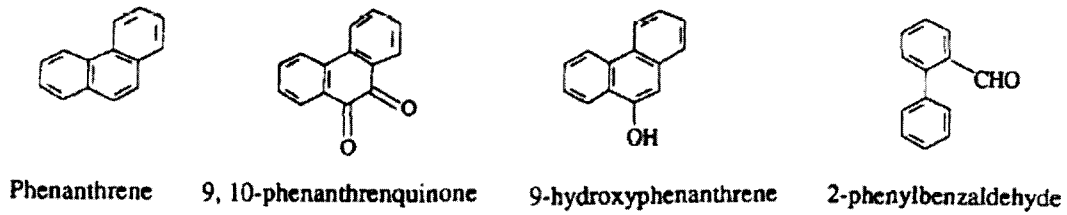


Fig. 1. Formulas of phenanthrene and its intermediates.

에 사용된 과산화수소(Junsei)는 35% 용액을 3.5 및 1.0%의 농도로 희석하였다.

Phenanthrene으로 토양을 인위적으로 오염시키기 위하여, phenanthrene-아세트 용액을 토양과 혼합한 후 아세톤을 증발시키고, 토양 입자의 표면에 흡착되지 않고 토양 내의 공극에 존재하는 phenanthrene을 제거하기 위하여 물로 여러 번 세척한 후 건조시켰다. 이는 동전기-펜텐 공정의 운전 중에 세척효과에 의한 오염물의 제거를 배제하기 위해서였다. 각각의 반응기에 오염된 토양과 증류수를 혼합하여 채우고 특수하게 제작된 장치에서 압밀(consolidation)하였다. 각 반응기로부터 토양의 일부를 채취하여 초기오염농도, 철의 양, 공극비, 초기 함수율, 초기 pH를 측정하는데 사용되었다.

2.2 실험장치

동전기적 토양정화장치는 반응기, 전극, 전원장치로 구성되어 있다(Fig. 2). 반응기는 직경 4 cm, 길이 10 cm의 원통관으로, 반응기 내에서의 phenanthrene의 흡착에 의한 손실을 최소화하기 위해서 유리 재질로 제작되었다. 5, 10 mA(0.4, 0.8 mA/cm²)의 정전류 조건하에서 조업되었으며, 반응기 양끝에는 체적이 75 cm³인 전극조를 부착하였고 유입수 및 유출수의 유동을 위한 공간과 밸브구멍 그리고 가스의 방출을 위한 밸브구멍을 설치하였다. 전해질의 공급은 양극탱크(anode tank)의 수위를 일정하게 유지

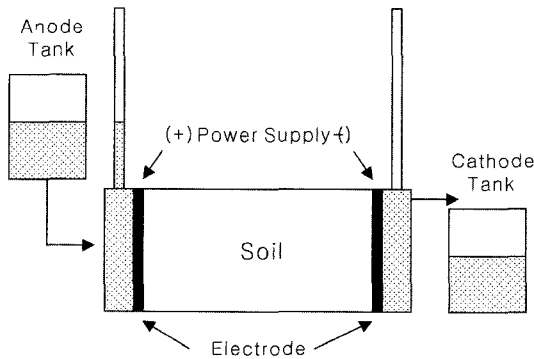


Fig. 2. Schematic diagram of electrokinetic remediation test cell.

하기 위하여 항상 같은 수리학적 경사에서 같은 유량이 공급되도록 하였다.

오염토양 시료가 내재된 원통관을 동전기 장치에 조립하고 원통관 양단의 전극조 내에 전극판을 설치하여 이로부터 전원이 공급되도록 하였다. 전극판은 전극조 내의 물속에 설치하여 직접 토양 시료에 접촉되지 않도록 하였다.

전극은 흑연판으로 하였는데, 이는 티타늄이나 백금과 같은 금속 전극의 경우에 전극조에서 과산화수소의 분해가 일어나서 토양으로 유입되기 전에 소모되는 현상이 발생하여 이런 부반응을 막기 위하여 선택되었다. 흑연판 내에는 일정한 간격으로 직경 3 mm 크기로 천공하여 전원 공급 및 물의 유동을 원활히 하도록 하였다. 토양 시료의 양끝에는 유리섬유로 된 여과지(Whatman사)를 두 장씩 두어서 토양 시료가 전극조로 유입되는 것을 방지하고, 과산화수소에 의한 여과지의 분해를 최소화하였다. 전원공급기는 최대 200 V까지 전압 공급이 가능한 직류 전원공급기를 사용하였으며, 내재되어 있는 전류계와 전압계로부터 전류 및 전압을 측정하였다.

2.3. 실험조건 및 분석방법

각각의 반응기에 들어가는 토양은 180 g이고, 제조된 토양시료의 초기 오염농도는 약 400 mg phenanthrene/kg dry soil이었다. 토양 내의 철의 양을 측정하기 위하여, 토양 5g을 3.3 M HNO₃, 50 mL에 넣고 48시간 동안 교반한 후 AAS(Atomic Absorption Spectrophotometry, Perkin Elmer사)로 분석하였다. Kaolinite 내에는 약 1000 mg/kg dry soil의 철이 존재하였으며, 추가적인 철 촉매의 주입 없이도 충분한 펜텐유사 반응이 발생하였다. 토양의 공극비(void ratio)는 0.5-0.7의 범위 내에 있었고, 초기 함수율은 30-40%이며, pH는 4.5-4.9이었다. 공정 중에는 반응기 내의 전압변화와 전기삼투유량이 측정되었다. 공정 종료 후에는 각각의 토양 시료를 11개의 조각으로 등분하여 건조시킨 후, 토양 내에 잔존하는 phenanthrene 및 중간산물의 농도를 분석하였다. 각각의 시료는 메탄올로 추출한 후, 254 nm의 파장에서 C₁₈ Symmetry Column을 사

Table 1. Experimental Conditions

Exp.	Current (mA)	H ₂ O ₂ (%)	Period (day)
1	10	-	7
2	10	3.5	7
3	10	1.0	7
4	5	3.5	14
5	10	3.5	14

용하여 HPLC(High Performance Liquid Chromatography, Waters사)로 정량하였다. Eluent는 acetonitrile(Merck)과 물을 85:15의 비율로 혼합하여 제조하였으며, 펌프의 유속은 1 mL/min이었다. 같은 조건에서 네 가지 물질(phenanthrene, 9,10-phenanthrenquinone, 9-hydroxyphenanthrene, 2-phenylbenzaldehyde)에 대한 peak time은 각각 7.85±0.15, 3.35±0.05, 3.60±0.20과 7.10±0.20, 4.35±0.05분 이었다.

Table 1은 각 실험에 적용되는 공정 변수들을 나타내고 있다. 10 mA의 전류에 3.5% 농도의 과산화수소를 사용한 Exp. 2를 기본 실험으로 하여 전류가 5 mA로 낮아지거나, 과산화수소의 농도가 1.0%로 감소할 때의 토양 내에서 일어나는 전류 및 전압의 변화와 제거효율을 비교하였다. 또한 가동기간이 증가함에 따라 오염물의 전기삼투유량 및 제거효율의 변화 양상을 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전압경사 및 전류 변화

Fig. 3는 가동기간 동안의 전압경사를 나타낸다. 10 mA의 전류 조건에서 전압경사는 초기에 감소하였다가 점차 증가하여 최대값인 20 V/cm에 도달하였다. 초기의 전기경사 감소현상은 전극에서의 물의 전기분해에 의해 양극에서 생성된 수소이온과 음극에서 생성된 수산화이온이 토양 내로 침투하면서, 이온농도의 증가로 토양 내 전기전도도가 증가하여 생긴 현상으로 1일 후에는 다시 증가하는 경향을 보인다. 이는 토양에 이미 미량으로 존재하거나 전극 반응으로 생성된 이온들이 전기삼투흐름에 의하여 유출수로 지속적으로 빠져나가기 때문이다. 반면, 5 mA의 전류 조건에서는 낮은 전압경사를 보이는데, 이는 저항이 일정한 조건에서 $V=I \times R$ (전압=전류×저항)의 상관관계에 의해 전류가 전압에 비례하기 때문이다.

Fig. 4은 가동기간 동안의 전류변화를 나타낸 것이다. 5 mA일 경우 정전류가 유지되는 반면, 10 mA일 경우에는 전압경사가 최대값에 도달함으로써 전류가 감소하는 경향이 가동기간의 중간에 나타났다. 이러한 전류의 감소

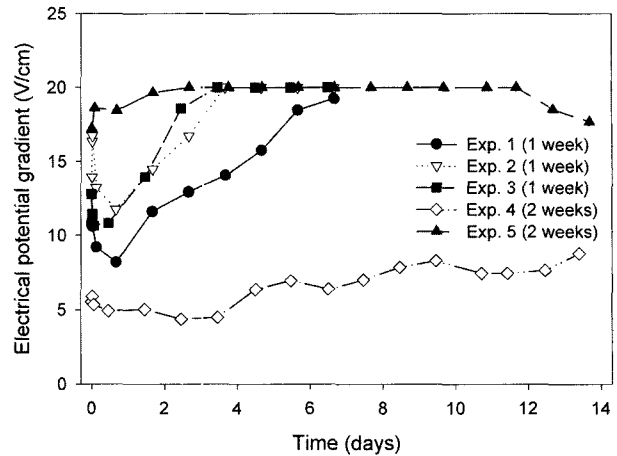


Fig. 3. Electrical potential gradient.

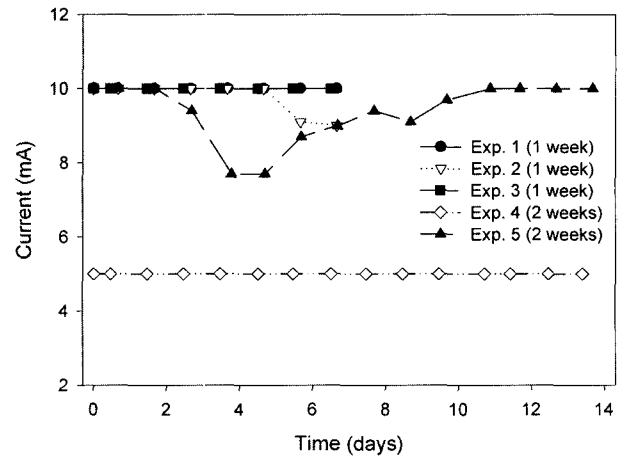


Fig. 4. Profile of current.

는 정전압 상태에서 저항의 증가에 기인한 현상이다.

3.2. 전기삼투유량

가동기간 동안의 총 전기삼투유량을 Fig. 5에 나타내었다. 전류가 10 mA일 경우에, 전류가 5 mA일 경우보다 높은 전기삼투유량을 보이고 있다. 또한 10 mA 전류를 사용한 각각의 실험에 대해서는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이로부터 전기삼투유량은 전류에 비례하여 증가한다는 것을 알 수 있다. 14일의 가동기간 동안 전류가 2배로 증가하였을 때, 총 전기삼투유량은 3.5배 증가하였다. 이는 전류가 증가하면 전압경사도 높아지므로 많은 양의 이온이 이동할 뿐만 아니라, 전극과 이온 사이에 작용하는 인력의 크기가 증가하여 이온들이 빠른 속도로 음극 탱크(cathode tank)로 이동하게 되어 이에 따라 그 주변의 유체도 동시에 빠른 속도로 이동하여서 높은 전기삼투유량을 보인 것으로 사료된다.

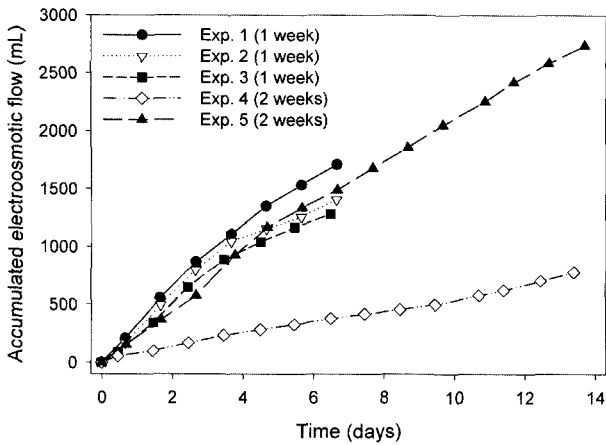


Fig. 5. Accumulated electroosmotic flow.

3.3. Phenanthrene 제거효율

실험 종료 후 phenanthrene의 토양 내 분포를 Fig. 6 에 나타내었다. 가로축의 0.0은 양극을 의미하고 1.0은 음극을 의미한다. 양극으로부터 공급되는 전해질이 과산화수소를 포함하지 않았을 경우(Exp. 1), 양극 근처에만 phenanthrene의 제거가 나타나서, 8.5%의 제거효율을 보였다. 즉 물의 세척효과 만으로는 토양에 흡착되어 있는 phenanthrene을 효과적으로 이동시켜 제거하기 어렵다는 것을 의미한다. 과산화수소가 전해질 내에 첨가되었을 경우에는 phenanthrene이 산화분해되는 양상을 나타내고 있는데, 양극에서 음극으로 과산화수소 용액이 이동하기 때문에 양극 부분에서의 제거율은 높고 음극 부분으로 갈수록에서의 제거율이 점점 감소하였다. 전기삼투유량이 가장 많은 경우(Exp. 5)에서는 양극에서 음극에 걸쳐 거의 대부분의 오염물이 제거되었고 제거효율은 95.6%였다.

Table 2에는 각각의 조업조건에 따른 전기삼투유량과 제거효율을 표시하였다. 과산화수소의 농도가 3.5%로 같은

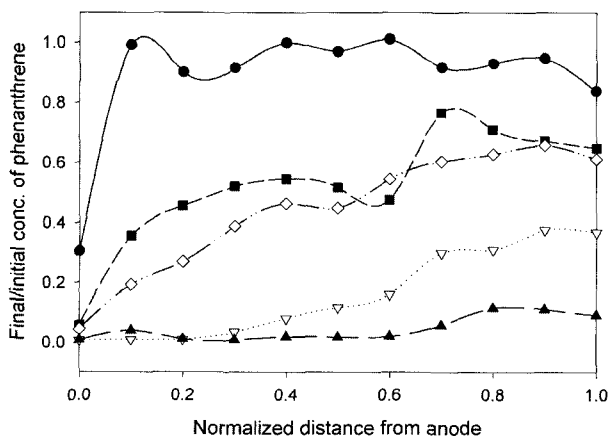


Fig. 6. Phenanthrene concentration in soil.

Table 2. Removal Efficiency of Phenanthrene in Soil

Exp.	Current (mA)	H ₂ O ₂ (%)	Period (day)	Total EOF (mL)	Removal eff. (%)
1	10	-	7	1710	8.50
2	10	3.5	7	1406	84.2
3	10	1.0	7	1280	46.3
4	5	3.5	14	779	54.7
5	10	3.5	14	2737	95.6

경우에 대하여, 전기삼투유량이 클 때 제거효율 또한 높게 관찰되었다. 이는 전기삼투유량이 높을수록 phenanthrene 이 수산화 라디칼과 접촉할 기회가 많아져서 더 많은 양의 오염물이 분해되었기 때문이다. 과산화수소의 농도를 달리한 Exp. 2와 Exp. 3을 비교하면 농도를 3.5배 증가시켰을 경우 제거효율은 1.8배 증가하였다. 이는 과산화수소로부터 생성된 수산화 라디칼의 짧은 수명 때문에 일부 라디칼이 오염물과 접촉하지 못하고 그대로 소모되었기 때문이다. 따라서 높은 농도의 과산화수소를 사용할 때 빠른 분해효율과 더불어 과산화수소의 소모량과 같은 경제적 측면 또한 고려하여 적절한 농도를 결정하는 것이 중요하다. 전류의 크기를 달리한 Exp. 4와 Exp. 5의 경우에 14일간의 가동기간 동안 5 mA인 경우에는 낮은 전기삼투유량에 기인하여 낮은 제거효율을 보이고 있다. 그러므로 높은 전류의 적용이 과산화수소가 분해되기 전에 음극까지 빨리 이동할 수 있도록 도움으로써 과산화수소의 소모를 줄일 수 있다는 측면에서 타당하다고 사료된다.

Fig. 7에 초기 오염토양 시료와 95.6%의 제거효율을 보인 Exp. 5의 공정 종료 후 토양 시료에 대한 HPLC 분

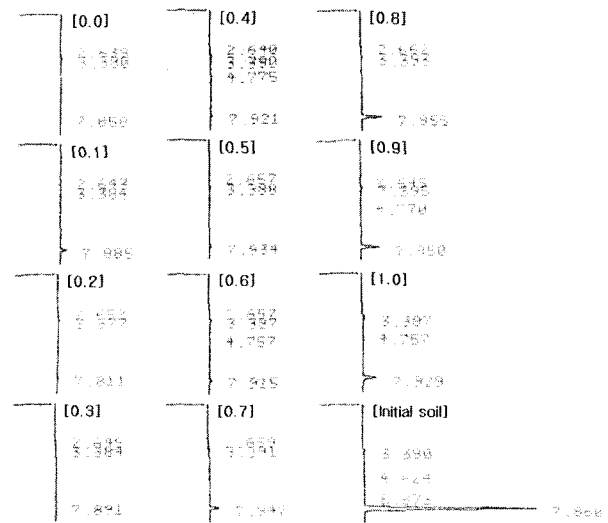


Fig. 7. Results of HPLC Analyses (Exp. 5).

Table 3. Content of 9,10-phenanthrenequinone and Phenanthrene (Exp. 5)

Normalized distance from anode	Concentration (mmol/kg soil)	
	9,10-phenanthrenequinone	Phenanthrene
0	0.045	0
0.1	0.037	0.065
0.2	0.046	0.001
0.3	0.041	0
0.4	0.049	0.018
0.5	0.044	0.016
0.6	0.051	0.022
0.7	0.046	0.107
0.8	0.049	0.238
0.9	0.061	0.227
1.0	0.083	0.182
Initial soil	0.057	2.239

석 peak를 나타내었다. 상대적으로 큰 peak를 나타낸 9,10-phenanthrenequinone(3.35±0.05분)와 phenanthrene(7.85±0.15분)의 농도 분포를 Table 3에 나타내었다. 초기 토양의 오염농도는 2.239 mmol/kg soil(399.1 mg phenanthrene/kg soil)이고, 이와 비교할 때 Exp. 5의 토양 시료에 대하여 모두 0.238 mmol/kg soil(42.5 mg/kg soil) 이하의 농도를 나타내므로 많은 양의 phenanthrene이 동전기-펜턴 공정기간 동안 분해되었음을 알 수 있다. 하지만 중간산물의 하나인 9,10-phenanthrenequinone의 농도는 초기 오염토양과 공정 적용 후에 모두 낮은 값으로 나타났으며, 다른 산물들의 peak area도 작게 나타났다. 이로부터 동전기-펜턴 공정을 이용한 phenanthrene의 산화분해는 지속적으로 장시간 동안 과산화수소 용액을 한 방향으로 조금씩 흘려주는 공정이기 때문에 세 가지의 중간산물 또한 분해되어 더 작은 저분자 물질이 되었거나 결국 무해화 되었을 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 phenanthrene 오염토양의 정화를 위해 동전기-펜턴 공정이 적용되었을 경우의 전압경사 및 전류, 전기삼투유량, phenanthrene 제거효율, phenanthrene 중간산물의 분해에 대한 결과로부터 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

1) 10 mA의 전류 조건에서는 5 mA의 전류 조건에서보다 높은 전압경사를 나타내었다. 10 mA의 조건에서는 초기에 전압경사의 감소현상이 나타나다가, 1일 후부터 다

시 증가하는 경향을 나타내었다. 5 mA의 전류 조건이 가동기간 동안 일정하게 유지되는 반면, 10 mA의 가동기간 중간에 약간 감소하는 경향을 보였다.

2) 전기삼투유량은 5 mA의 전류 조건에서보다 10 mA의 전류 조건에서 크게 나타났다. 즉 14일의 가동기간 동안 전류가 2배 증가했을 때, 총 전기삼투유량은 3.5배 증가했다.

3) 동전기 공정에서 phenanthrene의 물에 의한 세척효율은 8.5%였다. 과산화수소가 사용되었을 경우 14 일의 가동기간 동안의 phenanthrene 제거효율은 95.6%였다. 과산화수소의 농도를 3.5%에서 1.0%로 3.5배 감소시켰을 때 제거효율의 감소율은 1.8 배였으며, 5 mA에서는 낮은 전기삼투유량에 기인하여 10 mA에서보다 낮은 제거효율을 보였다.

4) 95.6%의 제거효율을 보인 실험결과에서 세 가지의 중간산물 9,10-phenanthrenequinone, 9-hydroxyphenanthrene, 2-phenylbenzaldehyde의 농도를 분석한 결과, 공정 적용 후 토양에 중간산물의 농도가 0.083 mmol/kg soil 이하로 phenanthrene의 초기 농도인 2.239 mmol/kg soil에 비하여 극히 적음을 알 수 있었다. 이로부터 이 공정이 과산화수소 용액을 한 방향으로 연속적으로 공급하는 공정이기 때문에 중간에 생성된 중간산물들이 더 작은 저분자 물질로 분해되었을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국가지정연구실사업(과제번호 M1-0203-00-0001)과 차세대 핵심환경기술개발사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 최상일, 소정현, 조장환, "계면활성제를 이용한 원위치 토양 세정 기법 적용을 위한 기초 특성 연구", *J. of KoSSGE*, 7(4), pp. 87-91 (2002).
- 한상재, 김강호, 김수삼, "폐놀로 오염된 토양의 Electrokinetic 정화 처리 현상에 관한 연구", *J. of KSEE*, 24(7), pp. 1243-1252 (2002).
- 정하익, 지반환경공학, 유림, 태훈출판사, 서울 (1998).
- Calabrese, E.J., Kostecki, P.T., Hydrocarbon contaminated soils and groundwater, Lewis Publishers, Inc., U.S.A. (1992).
- Acar, Y.B., Gale, R.J., Alshawabkeh, A.N., Marks, R.E., "Electrokinetic remediation: Basics and technology status", *J. of Hazardous Materials*, 40, pp. 117-137 (1995).
- Virkutyte, J., Sillanpaa, M., Latostenmaa, P., "Electrokinetic

- soil remediation-critical overview”, *The Science of the Total Environment*, **289**, pp. 97-121 (2002).
7. Yeung, A.T., Hsu, C.N., and Menon, R.M., “EDTA-enhanced electrokinetic extraction of lead”, *J. of Geotechnical Engineering*, **122**(8), pp. 666-673 (1996).
 8. Lageman, R., “Electroreclamation”, *Environ. Sci. Technol.*, **27**(13), pp. 2648-2650 (1993).
 9. Acar, Y.B., Alshwabkeh, A.N., “Principles of electrokinetic remediation”, *Environ. Sci. Technol.*, **27**(13), pp. 3638-2647 (1993).
 10. Lee, H.H., Yang, J.W., “A new methode to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation”, *J. of Hazardous Materials*, **B77**, pp. 227-240 (2000).
 11. Ko, S.O., Schlautman, M.A., Carraway, E.R., “Cyclodextrin-enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from a model clay soil”, *Environ. Sci. Technol.*, **34**, pp. 1535-1541 (2000).
 12. Yang, G.C.C., and Long, Y.W., “Removal and degradation of phenol in a saturated flow by in-situ electrokinetic remediation and Fenton-like process”, *J. of Hazardous Materials*, **B69**, pp. 259-271 (1999).
 13. Yang, G.C.C., and Liu, C.Y., “Remediation of TCE contaminated soils by in-situ EK-Fenton process”, *J. of Hazardous Materials*, **B85**, pp. 317-331 (2001).
 14. Watts, R.J., and Dilly, S.E., “Evaluation of iron catalysts for the Fenton-like remediation of diesel-contaminated soils”, *J. of Hazardous Materials*, **51**, pp. 209-224 (1996).
 15. Teel, A.L., Warberg, C.R., Atkinson, D.A., and Watts, R.J., “Comparison of mineral and soluble iron Fenton's catalysts for the treatment of trichloroethylene”, *Wat. Res.*, **35**(4), pp. 977-984 (2001).
 16. Ko, S.O., Schlautman, M.A., and Carraway, E.R., “Partitioning of hydrophobic organic compounds to sorbed surfactants : 1. Experimental studies”, *Environ. Sci. Technol.*, **32**, pp. 2769-2775 (1998).