

복합 유기 오염물로 오염된 세립질 지반의 Electrokinetic 정화 처리에 관한 연구

Electrokinetic Remediation of Organic Mixture Contaminated Soil

김 수 삼*¹ Kim, Soo-Sam

한 상 재*² Han, Sang-Jae

김 강 호*³ Kim, Gang-Ho

Abstract

In this research, phenol was selected as a representative hydrophilic organic compound and phenanthrene as a representative hydrophobic organic contaminant in petroleum. Fine-grained soil which was manufactured artificially in laboratory was contaminated and EK remediation tests were executed. Also, in order to increase removal efficiency, the surfactant that had been used with improvement technique at the pump-and-treat was used by enhanced method. In the test, the phenol which has high solubility is easily removed, but phenanthrene which has low solubility is almost not. Also, it seems to be the delay phenomenon that the phenanthrene is accumulated near the cathode department vicinity at the enhanced technique which applied the surfactant, but the removal efficiency increases as the surfactant concentration increases. By the test which increases with time, the enhanced method with increasing time is more efficient than the method with increasing surfactant.

요 지

본 연구는 유류 화합물 중 phenol을 대표적인 친수성 유기 화합물로, phenanthrene을 대표적인 소수성 유기오염물로 선정하여 실내에서 인위적으로 오염시킨 세립질 지반에 EK 정화 실험을 실시하였다. 또한, 유기 오염물의 제거효율을 높이기 위해 기존의 양수처리에서 향상기법으로 사용하는 계면활성제를 이용한 향상기법을 연구하였다. 실내 bench 스케일 실험결과, 물에 대한 용해도가 높은 phenol은 비교적 쉽게 제거되었지만, 용해도가 낮은 phenanthrene은 거의 제거되지 않음을 알 수 있었다. 또한, 계면활성제를 적용한 향상기법에서 phenanthrene이 음극부 근처에서 누적되는 지연현상을 보였지만, 농도가 증가할수록 제거효율은 증가하였다. 가동시간을 증가시킨 실험을 통해 시간을 증가시키는 것이 계면활성제의 농도를 증가시키는 것보다 효과적인 것을 알 수 있었다.

Keywords : EK remediation, Fine-grained soil, Phenanthrene, Phenol, Surfactant

1. 서 론

지반으로 유기 오염물이 유입되면, 지하수 흐름에 따

라 광범위한 지역으로 확산되며, 일단 지반이 오염되면 정화 처리에는 많은 시간과 비용이 소요된다. 특히, 유류 오염물과 같은 탄화수소(hydrocarbon) 화합물은

*1 정회원, 한양대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Hanyang Univ., kimss@hanyang.ac.kr)

*2 정회원, 한양대학교 공학기술연구소 선임연구원 (Member, Research Fellow, RIET, Hanyang Univ.)

*3 비회원, 중앙대학교 토목환경공학과 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environ Engrg., Chung-Ang Univ.)

물에 대한 용해도가 낮고, 지반에 쉽게 흡착되기 때문에 작은 유출에 대해서도 장기간 넓은 범위의 지반과 지하수를 오염시킨다(Harwell et al., 1999; 박준범 등, 1999). 또한, 유기 화합물로 오염된 지반은 물에 대해 용해도가 큰 친수성 유기 오염물뿐만 아니라 용해도가 낮은 소수성 유기 오염물이 혼합되어 있어(Kelsh et al., 1997) 전통적인 지반 정화 기법에 의한 정화의 어려움이 있다.

In-situ 지반 정화 기법은 최근 굴착에 대한 비용절감과 오염물에 대한 작업자의 안전과같은 여러 가지 이점 때문에 Ex-situ 정화 기법보다 선호되지만, 양수처리법(pump-and-treat), 토양증기추출법(soil vapor extraction)

및 생물학적 정화처리(bioremediation)과 같은 전통적인 In-situ 정화 처리는 낮은 투수계수를 가진 오염된 지반에 적용하기에 비효율적이다(Ho et al., 1995; Li et al., 2000). 이와 비교해 Electrokinetic(이하 EK) 정화 처리는 지반의 전기화학적 특성을 이용하여 중금속이나 유기 오염물을 정화하는 기법인데, 현재 투수계수가 낮은 지반에 효율적인 In-situ 정화 기법으로 대두되고 있다(Acar et al., 1992; Li et al., 2000).

따라서, 본 연구에서는 친·소수성 유기 오염물이 복합적으로 오염된 저투수성 세립질 지반을 실내에서 인위적으로 조성하여 EK 정화처리 시 용해도에 따른 거동을 분석하였고, 낮은 정화효율을 보이는 소수성 유기 오염물의 제거효율을 높이기 위한 향상기법으로 계면활성제를 이용한 연구를 수행하여 복합 유기화합물로 오염된 세립질 지반의 EK 정화 처리의 기초적인 자료로 활용하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 유기 오염물의 EK 정화 메커니즘

극성을 가진 중금속의 EK 정화 처리는 크게 정전기적 인력에 의한 전기 이온 이동, 전기삼투 흐름에 의한 이류 및 분산에 의한다. 따라서, 지반 내의 간극을 직경이 일정한 모세관 튜브관이라고 가정할 때, EK 정화 처리 시 오염물질의 이동은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Shapiro et al., 1996).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{D_i}{r^2} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - \frac{\partial}{\partial z} [C_i(u_{ei} - u_c)] + R_i \quad (1)$$

여기서,

C_i : 물질 i의 모세관에서의 평균농도

D_i : 물질 i의 분산계수

u_c : 이류속도(동수경수가 없다면 전기삼투흐름속도)

τ : 모세관의 굴곡도($\frac{dx}{dz}$)

u_{ei} : 전기이동 속도($\frac{z_i F D_i}{RT r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial z}$)

R_i : 물질 i의 외부반응 속도($\frac{\partial C_i}{\partial t}$)

T : 절대온도 (°K)

F : 패러데이의 상수(= 96,485C/mol)

Φ : 전압(V)

하지만, 극성이 없거나 적은 유기 오염물의 EK 정화 처리는 전기 이온 이동에 의한 정화 효과를 기대할 수 없으므로, 전기삼투흐름에 의한 이류와 분산이 주 정화 메커니즘이다(Acar et al., 1992; Li et al., 2000). 따라서, 유기 오염물의 EK 정화 처리 시 지반 내의 간극을 통한 오염물의 이동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{D_i}{r^2} \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + \frac{\partial C_i}{\partial z} u_c + R_i \quad (2)$$

2.2 계면활성제를 이용한 유기 오염물의 정화 메커니즘과 계면활성제의 선택

기존의 양수처리법에서 소수성 유기 오염물의 향상된 정화 처리를 위해 계면활성제를 적용할 때, 주요 메커니즘은 계면장력을 낮춤으로 인한 유기 화합물의 유동(mobilization)과 계면활성제 용액에서 화합물의 유동상 용해도(mobile phase solubility)를 증가시키는 것이다(Sabatini et al., 1990; Harwell et al., 1999).

이러한, 정화 메커니즘을 가진 계면활성제를 EK 정화 처리에 적용할 때, 다음과 같은 특성도 부가적으로 고려해야 한다.

- (1) 전기장 하에서 이온과 전기삼투 흐름에 유리한 전하 형성
- (2) 점토성분과의 낮은 흡착성
- (3) 계면활성제 손실을 최소화하기 위해 낮은 단량체 농도
- (4) 낮은 독성과 생분해성
- (5) 낮은 비용

따라서, 본 연구에서는 계면활성제의 용해도, 대상 유

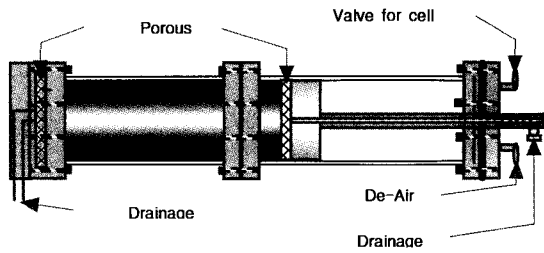


Fig. 1. The Schematic diagram of the reconstitute apparatus

기오염물질의 용해도, 토양 흡착성 등을 고려하고, 이온 결합이나 이온교환에 의하여 지반 내에 포집되어 흐름을 저해할 우려가 적은 비이온성 계면활성제 중에서 효과가 뛰어나고 독성이 거의 없는 것(Chang et al., 2000)으로 알려진 Triton X-100을 사용하였다. Triton X-100의 기본적인 물성치는 Table 1과 같다.

3. 실험

3.1 대상시료 및 시약

모래는 건축자재용 모래를 구입하여 수돗물과 초순

수수에 각각 1회씩 세척하여 사용하였고, 카올린은 공장 제품인 플로리다산 EPK 카올린을 구입하여 사용하였다.

실험에서 사용한 시료의 기본 물성치를 알기 위해 KS F 기준에 의거하여 실내 실험을 하였다.

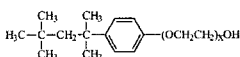
각 시료의 기본 물성치는 Table 2에 제시되어 있다. 대상 유기 오염물은 원유에 존재하는 화합물 중 물에 대한 용해도가 높은 phenol를 대표적인 친수성 유기 오염물로 선정하였고, 용해도가 낮은 phenanthrene을 소수성 유기 오염물질로 사용하였다. 각 유기 오염물의 물리·화학적 특성을 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

본 논문에서 사용한 phenol과 phenanthrene은 순도 99, 99.5%로 Aldrich chemical company, Inc에서 구입하였다.

3.2 시료조성

본 연구에서는 현장의 저투수성 세립질 지반을 실내에서 조성하기 위해 ASTM D 422 기준으로 모래와 카올린을 중량비로 7 : 3으로 혼합한 후, 함수비가 액성한

Table 1. Physical and chemical properties of Triton X-100

Name	Structure	Molecular weight	HLB*	CMC**(mg/L)
Triton X-100		625	13.5	628

* HLB : hydrophilic lipophile balance
**CMC : Critical Micelle Concentration

Table 2. Soil properties used in this test

Sand					EPK Kaoline					
Coefficient of uniformity C_u	Coefficient of curvature C_g	Effective grain size D_{10}	Specific gravity	pH at $w=500\%$	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Specific gravity	Plastic index	Specific surface area (m^2/g)	pH at $w=500\%$
2.80	0.91	0.10	2.56	7.65	54.5	30.9	2.65	22.6	24.25	4.84

Table 3. Physical and chemical properties of phenol

Name	Chemical formula	Molecular weight	Specific gravity	Melting point ($^{\circ}C$)	Boiling point ($^{\circ}C$)	Water solubility (mg/l, $25^{\circ}C$)	Henry's law constants ($atm \cdot m^3/mole$)	Vapor pressure (mmHg, $20^{\circ}C$)	LD50* (mg/kg)
Phenol	C_6H_6O	94.12	1.07	40.9	181.8	9,300	3.97×10^{-7}	0.2	317

*LD50 : Lethal dose 50

Table 4. Physical · chemical properties of phenanthrene

Name	Chemical formula	Molecular weight	Specific gravity	Melting point ($^{\circ}C$)	Boiling point ($^{\circ}C$)	Water solubility (mg/l, $25^{\circ}C$)	Henry's law constants ($atm \cdot m^3/mole$)	Vapor pressure (mmHg, $20^{\circ}C$)
phenanthrene	$C_{14}H_{10}$	178	0.98	100	340	1.29	2.56×10^{-4}	2.1×10^{-4}

계 값인 21.5% 근처로 예압밀하였다(Fig. 1). 압밀실험을 통해 구한 혼합토의 수리학적 투수계수 k_h 는 $1.5 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 이었다.

폐기된 가스생산공장(manufactured gas plant; MGP) 부지에서의 일반적인 phenanthrene의 분포는 26~333mg/kg 정도로 분포하고(염익태 등, 1997), 유류 오염물로 오염된 지역의 phenanthrene 오염 분포는 2.67 $\mu\text{g/kg}$ ~3,600mg/kg 정도로 매우 다양한 분포를 나타낸다(Page et al., 1998). 따라서, 초기 phenanthrene의 오염 농도를 일반적인 MGP 부지와 유류오염지역에서 오염 분포의 평균치인 약 100mg/kg이하로 오염시켰다.

Acar et al.(1992)에 의하면, 카올린에 1mg/g의 phenol이 흡착된다. 따라서, 초기 phenol의 오염 농도를 점성토 30% 함유된 흙에 완전히 흡착되는 농도인 100~200 mg/kg으로 설정하였다.

phenanthrene과 같은 소수성 유기 오염물은 물에 거의 용해되지 않기 때문에 아세톤과 같은 유기용제에 적정 농도로 오염시키고 시료와 교반한 후, 유기용제를 휘발시켜 시료를 오염시켰다. 친수성 유기 오염물인 phenol은 물에 대한 용해도가 높기 때문에 적정 오염농도 만큼 물에 용해시킨 후, 흙과 교반하여 오염시켰다. 대상시료와 유기화합물의 완전한 흡착을 위해 24시간 교반하였

고, 시료를 조성하는 시료 재조성기에서 1주일 이상 방치하였다.

3.3 EK 정화 실험

EK 정화 실험은 친수성과 소수성이 혼합되어 있는 복합 유기 오염물로 오염된 지반에서 물에 대한 용해도에 따른 제거효율을 분석하였고, 정화 효율을 높이기 위한 향상기법으로 사용하는 계면활성제의 농도와 가동 시간에 따라 정화효율을 분석하였다.

실험 중 각 조건별로 유출량과 양극(兩極) 저수조의 pH 분포를 측정하고, 실험이 종료된 후 시료를 10등분하여 셀 내부의 시료에 남아있는 phenol과 phenanthrene의 양과 pH, 함수비를 분석하였다.

본 논문의 실험 조건은 Table 5와 같다.

본 논문에서 사용한 EK 정화 시험기의 구성도는 Fig. 2와 같다. 시험기의 재질은 유기 오염물의 흡착을 최소화하기 위해 유리과 비슷한 재질을 가진 아우코닝사의 Autoglass[®]를 사용하였다. EK 정화 시험기는 양쪽에 일정한 용량을 가진 저수조와 시료를 포함한 정화셀, 일정한 수위를 유지시키기 위한 Mariotte bottle, 일정한 전압을 가하기 위한 power supply, 전기삼투 유량을 측정하

Table 5. Test Conditions

Code		Test conditions					Soil type
		Contaminant	Initial concentration (mg/kg)	Surfactant	Duration (days)	Voltage (V)	
복합 유기 오염물의 EK 정화처리	EKM	phenol + phenanthrene	172.03 + 79.16	×	28	32	sand 70% kaolin 30%
phenol의 EK 정화처리 I	EKL I	phenol	166.44	×	12	32	sand 70% kaolin 30%
phenol의 EK 정화처리 II	EKL II	phenol	167.84	×	14	32	sand 70% kaolin 30%
phenol의 EK 정화처리 III	EKL III	phenol	171.41	×	23	32	sand 70% kaolin 30%
phenol의 EK 정화처리 IV	EKL IV	phenol	169.42	×	28	32	sand 70% kaolin 30%
phenanthrene의 향상된 EK 정화 처리 I	EKE 1C	phenanthrene	76.50	1CMC	28	32	sand 70% kaolin 30%
phenanthrene의 향상된 EK 정화 처리 II	EKE 2C	phenanthrene	80.22	2CMC	28	32	sand 70% kaolin 30%
phenanthrene의 향상된 EK 정화 처리 III	EKE 3C	phenanthrene	78.13	3CMC	28	32	sand 70% kaolin 30%
phenanthrene의 향상된 EK 정화 처리 IV	EKE 4C	phenanthrene	94.48	4CMC	28	32	sand 70% kaolin 30%
phenanthrene의 향상된 EK 정화 처리 V	EKE 4CL	phenanthrene	72.84	4CMC	56	32	sand 70% kaolin 30%
phenanthrene의 향상된 EK 정화 처리 VI	EKE 10C	phenanthrene	82.34	10CMC	28	32	sand 70% kaolin 30%

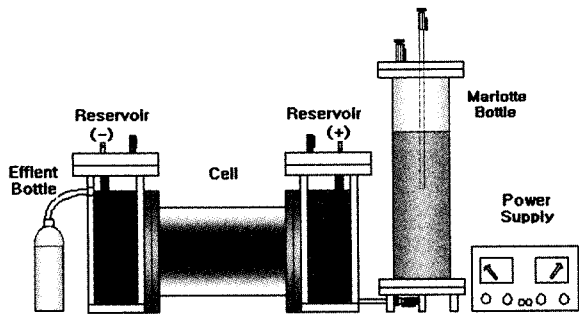


Fig. 2. A schematic diagram of the electrokinetic remediation set up

기 위한 호박색 집수병 등으로 구성되어 있다.

3.4 유기 화합물 분석

시료 내부의 유기 화합물을 분석하기 위해 흙 샘플 3g을 유리병에 담고, 9ml의 methylene chloride와 methyl alcohol을 1:1로 혼합한 용액을 첨가하였다. 캡으로 막은 후, 200rpm으로 약 24시간 동안 shaking table을 이용하여 교반하였다. 교반 후 상부 액상부분을 분리시켜 원심분리 튜브관에 넣은 후 약 1500rpm으로 30분간 원심분리하였다. 층분리가 발생하면, 하부층(혼합용액)을 채취하여 분석하였다.

액상 샘플 5ml를 유리병에 담고, 5ml의 methylene chloride 용액과 혼합하였다. 캡으로 막은 후, 200rpm으로 약 6시간 동안 shaker table을 이용하여 교반하였다. 교반 후 상부 액상부분을 분리시키고, 원심분리 튜브관에 넣은 후 약 1500rpm으로 30분간 원심분리하였다. 층분리가 발생하면, 하부층(혼합용액)을 채취하여 분석하였다.

본 논문에서는 비휘발성 물질이나 열에 불안정한 물질의 측정에 효율적(Sawyer, 1994)이라고 알려진 HPLC (High Performance Liquid Chromatography)를 기본 분

석기기를 선정하였고, phenanthrene은 향상기법으로 사용한 계면활성제 Triton X-100과 피크점이 겹쳐 GC(Gas Chromatography)를 이용하여 측정하였다.

각 물질에 대한 분석기기의 운영조건은 Table 6~Table 7과 같이 기존 Peiró et al.(2001)의 논문과 EPA Method 5515(USEPA, 1996)를 참조하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 용해도에 따른 제거효율

복합 유기 오염물의 EK 정화 실험인 EKM이 종료된 후, 시료 내에 잔류하는 phenol과 phenanthrene의 농도를 초기 농도로 정규화하면, Fig. 3과 같다.

물에 대한 용해도가 큰 phenol은 약 99%이상의 높은 제거율을 보인 반면, 용해도가 작은 phenanthrene은 손실율을 감안하고 시료 내에 일정한 농도분포를 보이는 것으로 보아 거의 제거되지 않음을 알 수 있었다.

이는 폐놀이가 물에 대한 용해도가 크고, 물-옥탄올 분배계수가 1.47로 토립자로부터 비교적 쉽게 탈착(Acar et al., 1992)되어 전기삼투에 의한 이유로 제거되지만, 소수성 유기 오염물인 phenanthrene은 수소 결합으로 연결되어 있는 물분자들과 친화하지 못하여 미량을 제외하고는 물에 녹지 못하고 물로부터 분리되어 토립자에 흡착(염익태 등, 1997)되어있기 때문에 전기삼투에 의한 이유만으로는 거의 제거되지 않은 것으로 판단된다.

이러한 실험 결과로부터 유기 오염물의 EK 정화 처리는 물에 대한 용해도에 따라 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다.

이를 시료 내의 잔류 유기 오염물과 유출수의 유기 오염물로 질량 수지(mass balance)을 계산하면 Fig. 4과

Table 6. Test conditions for the HPLC analysis

Analyte	Mobile phase composition	Flow rate(ml/min)	Wave Length(nm)
Triton X-100	75% CH ₃ OH : 25% H ₂ O	1.0	254
phenol*	50% CH ₃ OH : 50% H ₂ O	0.8	280

* Peiró et al. 2001

Table 7. Test conditions for the GC analysis

Analyte	Mobile phase	Flow rate(ml/min)	Temperature		
			Injector	Detector	Program
phenanthrene	He	1	200	250	130-290 4°C/min

**EPA Method 5515

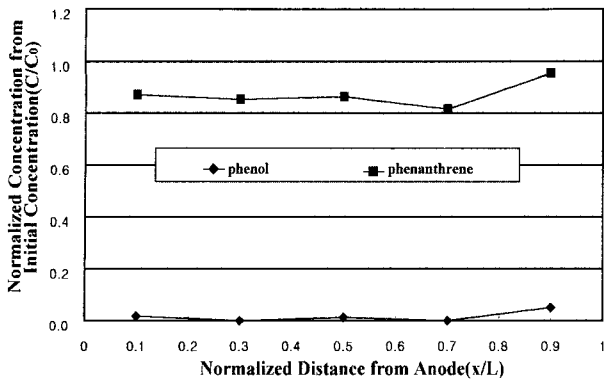


Fig. 3. Normalized residual organic contaminant distribution after EKM test

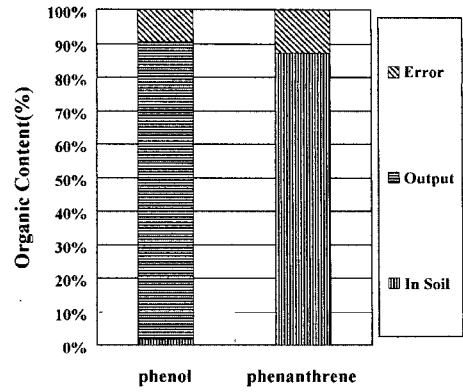


Fig. 4. Mass balance for EKM test

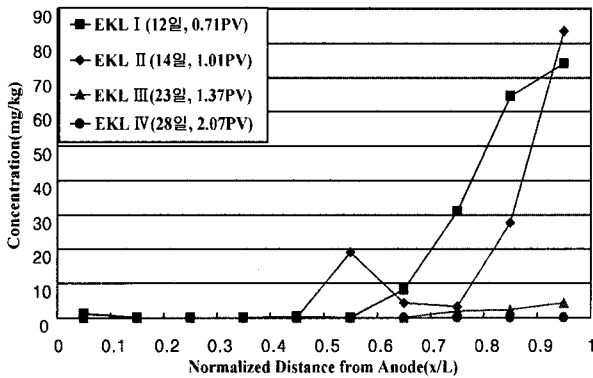


Fig. 5. Phenol distribution in soil after EK test

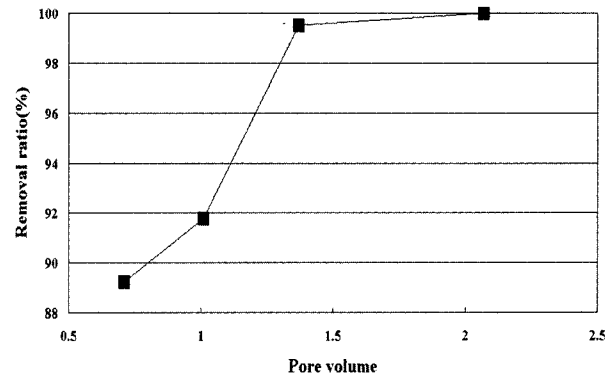


Fig. 6. Removal rate of phenol with pore volume after EK test

같이 나타났다.

phenol은 시료 내에 약 1.66%가 잔류하고 유출수에서 약 89.2%가 검출되었고, phenanthrene은 시료 내에 약 87.13%가 잔류하고 있고, 유출수에서 약 0.3% 미만으로 거의 제거되지 않았다. 실험이 종료된 후, phenol과 phenanthrene에 대한 손실은 각각 약 9.43, 12.87%가 발생하였는데, 이는 시료를 추출하는 과정에서 발생하는 휘발이나 정화셀과 전극(탄소봉)에 흡착, 분석기기의 검출한계 미만의 양 등의 원인으로 사료된다.

이 실험 결과로부터 phenol과 같은 친수성 유기 오염물은 별도의 향상기법이 필요하지 않을 것으로 판단되나 phenanthrene과 같은 소수성 유기 오염물은 정화 효율을 높이기 위한 향상기법이 필요할 것으로 판단된다.

4.2 시간에 따른 phenol의 EK 정화 처리 효율

가동시간을 달리한 phenol의 EK 정화 실험이 종료된 후, 시료 내의 잔류하는 농도 분포는 Fig. 5과 같이 나타났다.

약 12, 14일 가동한 EKL I 과 II 에서는 음극(-)부 근처에서 약간 지연되는 경향을 보였지만, 가동 시간 23일

이후에서는 이러한 경향을 보이지 않았다.

이를 가동시간에 따른 전기삼투 누적유량을 시료의 간극부피인 pore volume으로 나타내면, 각각 0.71, 1.01, 1.37, 2.07 pore volume으로 나타났는데, 이를 제거 효율과의 관계를 나타내면 Fig. 6과 같이 전기삼투 유량이 간극부피비 1배 이상에서 90% 이상의 높은 제거효율을 보이는 것을 알 수 있었다.

4.3 계면활성제를 이용한 phenanthrene의 향상된 EK 정화 처리

phenanthrene의 EK 정화 실험이 종료된 후, 시료 내의 잔류 phe농도로 정규화하여 계면활성제의 농도에 따른 분포를 나타내면 Fig. 7과 같이 나타났다.

계면활성제를 주입하지 않은 EKM 실험의 phenanthrene은 초기에 거의 이동이 발생하지 않았지만, 계면활성제를 주입한 향상기법에서는 양극(+)으로부터 정규화한 거리비 0.3 지점 근처에서는 초기 농도에 비해 감소하였고, 0.7 지점 근처에서는 누적되는 지연현상을 보였다. 또한, 10CMC를 주입한 EKE 10C에서는 4CMC

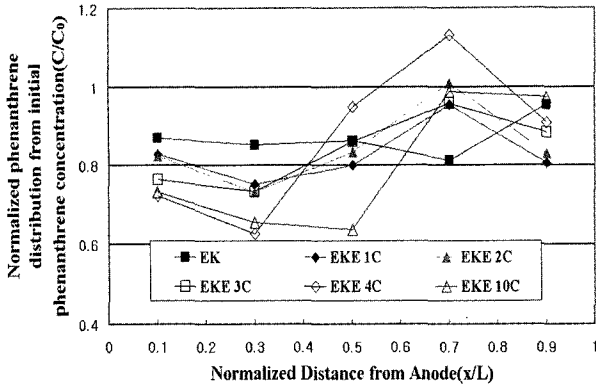


Fig. 7. Normalized phenanthrene distribution from initial phenanthrene concentration with surfactant concentration after EK test

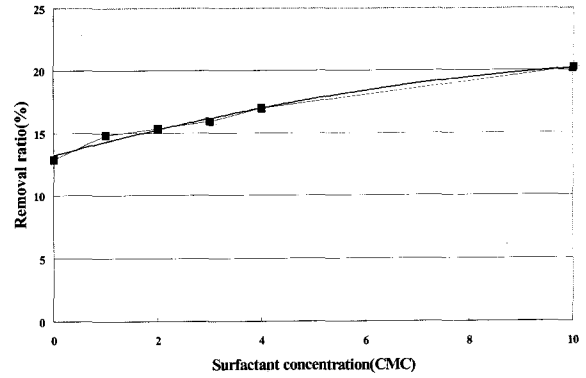


Fig. 8. Removal rate of phenanthrene with surfactant concentration

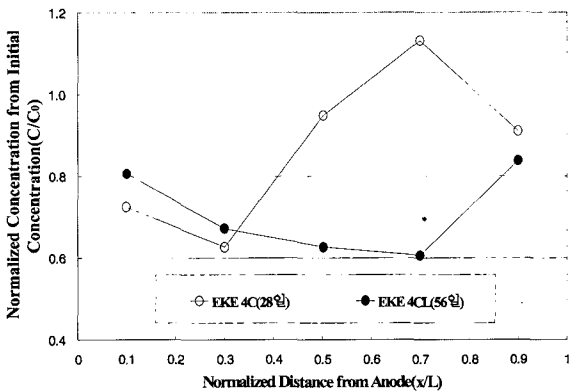


Fig. 9. Phenanthrene distribution with time after EK test

를 주입한 EKE 4C보다 음극(-)부 근처에서 지연되는 현상을 적게 보여 계면활성제 농도가 클수록 누적으로 인한 지연이 적게 발생하는 것을 알 수 있었다.

이를 계면활성제 농도에 따른 정화효율로 나타내면 Fig. 8와 같이 $R^2 = 0.984$ 인 $y = -0.0418x^2 + 1.1146x + 13.214$ 로 나타나 계면활성제의 농도가 높아질수록 정화효율은 2차함수로 증가하는 경향을 보였다. 이는 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 clogging, 흡착, emulsion phase 형성 등에 의해 전기삼투 흐름이 감소하였기 때문이다. 또한, 고농도의 Triton X-100을 주입함에 따른 2차오염문제를 야기할 수 있다. 따라서, 계면활성제의 농도 증가보다는 가동시간을 증가시킬 필요성이 제기되었다.

계면활성제 4CMC를 주입한 EKE 실험에서 가동시간 28일, 56일 이후의 시료 내의 잔류 phenanthrene의 분포를 초기 농도로 정규화하면 Fig. 9와 같이 나타났다.

가동시간 28일인 EKE 4C에서는 음극(-)부 근처에서

누적되어 지연되었지만, 56일 가동한 EKE 4CL에서는 누적된 phenanthrene이 음극(-) 저수조로 제거되는 것을 알 수 있었다. 따라서, 음극(-) 근처에서 누적으로 인해 발생하는 지연은 가동시간을 증가시켜 전기삼투 흐름으로 제거될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

복합 유기 오염물로 오염된 지반을 실내에서 재현하여 물에 대한 용해도에 따른 EK 정화 효율을 살펴보고, 높은 제거효율을 보이는 phenol을 대상으로 시간에 따른 EK 정화 실험을 실시하여 제거효율을 분석하였다.

또한, 낮은 제거효율을 보이는 phenanthrene의 향상기법으로 계면활성제 농도별, 시간별로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 물에 대해 용해도가 높은 phenol은 EK 정화 실험에서 높은 제거 효율을 보였지만, 만, 용해도가 낮은 phenanthrene은 거의 제거되지 않았다. 따라서, 일반적으로 유기 오염물로 오염된 지반이 복합적으로 오염된 지반이기 때문에 소수성 유기 오염물에 대한 향상기법을 적용해야 한다.
- (2) phenol과 같은 친수성 유기 오염물은 전기삼투에 의한 흐름량이 간극부피 1배 이상에서 약 90%이상의 높은 제거효율을 보였다. 이는 친수성 유기 오염물이 물에 대한 용해도가 높아 전기삼투에 의한 이유만으로 쉽게 제거되기 때문이다.
- (3) 계면활성제를 이용한 향상된 EK 정화 실험에서 계면활성제 농도가 CMC 단위로 증가함에 따라 phenanthrene

의 제거효율은 증가하는 것을 알 수 있었다.

- (4) 계면활성제를 이용한 향상된 EK 정화 처리에서 농도 증가보다 가동시간을 증가시키는 것이 제거율 향상에 효율적임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2001년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박준범, 윤현석, 김준섭 (1999), "계면활성제 탈착촉진법을 이용한 폴리클로네이티드 바이페닐(PCBs)과 페놀류(Phenols)에 의하여 오염된 지반의 정화 방안", 한국지반공학회논문집, 제15권, 제5호, pp.241-357.
2. 염익태, Ghosh, M. M., 안규홍 (1997), "계면활성제를 이용한 오염된 토양으로부터의 Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)의 세척", 대한환경공학회지, Vol.19, No.9, pp.1111-1124.
3. 한상재, 김수삼 (2001), "Electrokinetic 정화기술 적용시 날 오염토에서 간극수 흐름과 간극수압의 발현특성", 대한토목학회지, 제21권, 제2-C호, pp.177-186.
4. Acar, Y. B. and Li, H.(1992), "Phenol Removal From Kaolinite By Electrokinetic", *J. of Geotechnical Eng.*, Vol.118, No.11, pp. 1837-1852.
5. ASTM(1997), "Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.04.08 Designation: D420-D4914.
6. Chang, M. C., Huang, C. R., and Shu, H. Y.(2000), "Effects of surfactants on extraction of phenanthrene in spiked sand", *Chemosphere*, Vol.41, pp.1295-1300.
7. Harwell, J. H., Sabatini, D. A., and Knox, R. C.(1999), "Surfactants for ground water remediation", *Colloids and Surfaces*, Vol.151, pp.255-268.
8. Ho, S. V., Athmer, C. J., Heitkamp, M. A., and Brackin, J. M. (1995), "Integrated in situ soil remediation technology: The Lasagna process", *ES&T*, 29(10), pp.2528-2534.
9. Kelsh, D. J. and Parsons, M. W.(1997), "Department of energy sites suitable for electrokinetic remediation", *J. of Hazardous Materials*, Vol.55, pp.109-116.
10. Li, A., Cheung, K. A., and Reddy, K. R.(2000), "Cosolvent-enhanced electrokinetic remediation of soils contaminated with phenanthrene", *J. of Environmental Engineering*, Vol.126, No.6, pp.527~533
11. Page, D. S., Boehm, P. D., Douglas, G. S., Bence, A. E., Burns, W. A., and Mankiewicz, P. J.(1998), "Petroleum sources in the Western Gulf of Alaska/Shelikoff Strait Area", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.36, No.12, pp.1004-1012.
12. Peiró, A. M., Ayllón, J. A., Peral, J., and Domé, X.(2001), "TiO₂-photocatalyzed degradation of phenol and ortho-substituted phenolic compounds", *Applied Catalysis B: Environmental* 30, pp.359-373.
13. Sabatini, D. A. and Austin, T. A.(1990), "Adsorption desorption and transport of pesticides in groundwater: A Critical Review", *J. Irrig. Drainage Div.*, ASCE 116, pp.3-15.
14. Sawyer, C. N., McCarty, P. L., and Parkin, G. F.(1994), *Chemistry for environmental engineering*, 4th edition, McGraw-Hill, ISBN 89-425-0213-X.
15. Shapiro, A. P.(1996), "Electrokinetic modeling", *Topical Report for Tasks*, Monsanto company, DOE Contract Number, DE-AR21-94MC31185.
16. USEPA.(1996), *SW-846 Manual; Method 5515*.
17. Watt, R. J.(1997), *Hazardous wastes: Sources Pathways Receptors* John Wiley & Sons, Inc.

(접수일자 2002. 6. 12, 심사완료일 2002. 7. 30)