

계면활성제를 이용한 불균질 매질에서 유기오염물(NAPL)의  
정화효율에 관한 실험

서형기·이민희·정상용

부경대학교 환경해양대학 환경지질과학과

**Study of Surfactant Enhanced Remediation Methods for  
Organic Pollutant(NAPL) Distributed over the Heterogeneous Medium**

**Hyunggi Seo · Minhee Lee · Sang Yong Chung**

*Department of Environmental Geosciences in Pukyong National University*

**ABSTRACT**

Column and box tests were performed to investigate the removal efficiency of NAPL using the surfactant enhanced flushing in heterogeneous medium. Homogeneous Ottawa sand and heterogeneous soil were used to verify the increase of remediation efficiency for the surfactant enhanced flushing in column test. Box tests with two different heterogeneous sub-structure were performed to quantify the capability of the surfactant enhanced flushing as a remediation method to remove NAPL from the heterogeneous medium. Two different grain size sand layers were repeated in the box to simulate the heterogeneous layer formation and the modified fault structure was built to simulate the fault system in the box. O-xylene as a LNAPL and PCE as a DNAPL were used and oleamide as a non-ionic surfactant. The maximum NAPL effluent concentration with 1% oleamide flushing in the homogeneous column test increased about 460 times compared to that with only water flushing and about 250 times increased in the real soil column test. In heterogeneous medium, the maximum effluent concentration increased about 150 times in 1% oleamide flushing and most of NAPL were removed from the box within 8 pore volume flushing, suggesting that the removal efficiency increased very much compared to in only water flushing. Results investigated the capability of the surfactant enhanced remediation method to remove NAPL even in heterogeneous medium.

**Key words** : surfactant, NAPL, heterogeneous medium, remediation, in-situ flushing

## 요약문

불균질 매질 내 분포하는 비 수용성 유기오염물(NAPL; non-aqueous phase liquid)을 계면활성제를 이용한 원위치 정화 방법으로 정화하는 칼럼 및 박스실험을 실시하였다. Ottawa 모래를 이용한 균질 칼럼실험을 통하여 NAPL에 대한 계면활성제용액의 정화 효율 증가를 검증하였고, 실제 오염지역의 토양을 이용한 칼럼실험을 통하여 불균질 토양에서의 정화 효율을 측정하였으며, 불균질 층리 구조와 단층구조를 모형화한 2차원 박스를 사용한 NAPL 정화 실험을 통하여 불균질 매질에서의 정화 효율을 규명하였다. LNAPL 오염원으로 o-xylene이, DNAPL 오염원으로 PCE(tetrachloroethylene)가 이용되었고, 계면활성제로는 비이온성 올리에마이드(oleamide)가, 매질로는 유류로 오염된 오염지역으로부터 채취한 실제토양과 Ottawa 모래가 실험에 사용되었다. 1% 계면활성제용액과 증류수를 주입하여 NAPL을 세정하였고 가스크로마토그래피(GC)를 이용하여 NAPL의 농도를 분석하였다. 균질 Ottawa 모래층진 칼럼의 경우 계면활성제를 주입할 경우가 증류수를 주입할 때보다 o-xylene의 최대유출농도가 약 460배, 불균질 토양의 경우 약 250배, 불균질 층상구조에서는 약 150배 증가를 나타내었다. 불균질 매질에서 계면활성제를 이용한 세정법(flushing method)으로 NAPL을 정화시, 균질 매질에서의 정화 효과보다는 정화 효율이 감소하나, 여전히 증류수만을 이용한 세정방법보다 훨씬 높은 정화 효과를 보이며, 빠른 시간 내에 NAPL이 정화되었음을 확인하였다. 본 실험을 통하여, 불균질 매질에서의 계면활성제를 이용한 토양세정방법의 효율성이 정량화 되었으며, 계면활성제를 이용한 채수주입법의 현장 적용가능성을 확인하였다.

**주제어** : 계면활성제, NAPL, 유기오염물, PCE, xylene, 불균질매질, 토양세정법

## 1. 서론

비 수용성 유기오염물(NAPL)은 최근 많은 폐기물·쓰레기 처리장 주변에서 발견되고 있으며, 특히 지하로 유출된 NAPL의 지하수 및 토양오염은 현재 심각한 상태이고, 복잡하고 다양한 산업활동으로 인하여 오염은 계속 증가될 전망이다<sup>1)</sup>. 지하 내부에서의 NAPL은 고유한 물리·화학적 특징과 지하 매질의 불균질성으로 인하여 매질 내 거동과 분포를 예측하기가 어렵고, 정화할 경우에도 상당한 시간과 비용이 소요되며, 대부분의 경우 인체에 매우 유해한 성분들이므로 오염지역 주변에 심각한 환경문제를 발생시킨다<sup>2,3)</sup>. 미국을 비롯한 서구 여러 나라들은 이러한 유기오염물 특히 NAPL에 의한 오염의 심각성을 인식하고, 이미 수 년 전부터 이들 유기오염물들에 대한 다 방면의 연구가 이루어져 왔으며, 실제로 오염된 토양과 지하수

를 복원하는데 많은 투자를 하고 있다<sup>4,5,6,7)</sup>. 최근 국내에서도 유기오염물 정화를 위한 실험실내의 연구가 시작되었고, 유기오염물의 정화 방법들에 대한 효율성 연구 결과들이 지속적으로 보고되고는 있으나, 대부분의 연구들이 균질한 매질이나 모래를 이용한 실내 실험에 한정되어있다<sup>8,9)</sup>. 지난 십여 년 간 미국을 위주로 이루어진, 오염된 토양과 지하수로부터 유기오염물을 정화하는 과정에서 많은 시행착오와 문제점들이 발견되었으며, 이러한 문제점들은 지하에 유출된 유기오염물의 정화 효율성과 직접적인 관계가 있고, 주로 지하구조의 불균질성에 대한 지질학적 정보의 부족에서 나온다는 것을 인식하게 되었다<sup>10,11,12)</sup>. 따라서 현재 유기오염물 분야에서 이루어지고 있는 대부분의 학문적, 기술적 관심은 불균질한 지하구조에서의 유기오염물의 이동과 분포를 가능한 한 정량화하고, 각각의 불균질한 구조에 존재하는 유기오염물을 정화하는 방법의 개

발에 있다. 우리나라의 경우 지하수 분포가 균질한 대수층 내에 이루어져 있기보다는 풍화된 암반의 파쇄대를 따라 분포하는 경우가 많으며, 더구나 복잡한 지질 구조를 가지고 있어서, 유기오염물의 지하 유출시 지하구조의 불균질성이 이들을 정화하는데 미치는 영향은 매우 크므로, 이 분야에 대한 연구와 개발은 특히 중요하다. 현재까지 불균질한 지하 내부 구조가 NAPL 정화 효과에 커다란 영향을 끼치는 것으로 막연히 알려져 있을 뿐, 이에 대한 연구는 매우 미비한 형편이다.

본 연구에서는 NAPL로 오염된 토양 및 지하수를 정화하는 방법 중에서 계면활성제를 이용한 원위치 세정법(in-situ flushing method)에 의한 불균질 매질에서의 정화 효율을 정량화하기 위하여 칼럼 및 박스 실험을 실시하였다<sup>13,14</sup>. 먼저 균질 매질 칼럼을 이용한 계면활성제 용액 세정법의 정화 효율을 증류수만을 이용한 결과와 비교하였고, 실제 오염지역에서 채취한 불균질 토양을 이용한 칼럼실험으로부터, 토양 내에 존재하는 NAPL의 정화 효율을 측정하였다. 지하 내부의 층상구조와 단층구조를 모형화한 박스실험을 통하여, 불균질 구조 내 오염물질의 2차원 분포와 세정법에 의한 정화 과정을 가시화하여 측정하였으며, 불균질 매질로부터 NAPL의 정화 효율을 정량화하여 규명하였다.

## 2. 실험 방법

NAPL 정화에 사용된 세정액은 비이온 계면활성제 올리에마이드(oleamide, Akzo nobel회사제품, 상품명 : Ethomid O/17) 1% 용액과 끓인 증류수 (이하 문장에서는 증류수로 표현)이며, 사용된 NAPL은 o-xylene(Sigma-Aldrich회사제품, photometric grade)과PCE(tetrachloroethylene : Sigma-Aldrich회사제품, photometric grade)이다. Table 1에는 본 연구에 사용된 올리에마이드 1% 용액의 PCE와 o-xylene에 대한 용해도를 나타내었다. 실험에 사용된 매질은 실제 오염 토양 한 종류와 Ottawa 모래(US Silica Company 제품, F-35, F-110)이며, F-35 Ottawa sand는 체 가름을 하여 입자의 직경이 0.85mm 미만 0.425mm 이상인 조립질 모래만을 이용하였고, 실제 토양은 2mm 체를 통과한 토양을 70℃ 온도에서 12시간 동안 오븐에서 건조시킨 후 실험에 사용하였다. 실제 토양과 F-110 Ottawa sand(세

**Table 1. Solubility of NAPL in water and 1% oleamide sodium**

Compound	Aqueous solubility (mg/l)	Solubility in 1% oleamide (mg/l)	Solubility ratio
PCE	200	34,000	170
o-xylene	165	16,000	97

**Table 2. Result of grain size distribution of real soil and F-110 Ottawa sand**

Sieve no.	Mesh size (mm)	Soil A		F-110 Ottawa sand	
		Remained soil in mesh (g)	Percent finer by weight (%)	Remained soil in mesh (g)	Percent finer by weight (%)
# 10	2.000	0.15	99.63	—	100
# 20	0.850	4.33	88.82	—	100
# 40	0.425	11.98	58.92	0.08	99.83
# 60	0.250	7.30	40.67	0.44	98.87
# 140	0.150	8.59	19.22	2.39	93.63
# 200	0.075	5.69	5.01	40.75	4.27
fan	—	2.00	0.51	1.94	0.02
Total	—	40.04	—	45.60	—

립질 모래)의 입자 분포 상태를 알아보기 위해 입도 분석을 실시하였다(Table 2).

2.1 칼럼실험

채 기름 후 오븐에서 건조시킨 시료들을 지름이 2.5cm, 길이가 15cm인 유리칼럼(Kimble/Kontes회사제품, 모델명: Chromaflex column)에 넣고 충전하였다. 칼럼의 상부와 하부는 Teflon 재질의 여과판과 연결호스가 스크류캡으로 고정되어있다. 칼럼에 증류수를 2~3배의 공극체적(pore volume)을 0.2ml/min의 속도로 흘려보내어 공극을 증류수로 채웠다. 그리고 염색물질인 Sudan- IV (Sigma-Aldrich회사제품)로 빨갛게 염색시킨 PCE와 o-xylene 1g씩을 칼럼 중앙부에 오염시키고 계면활성제와 증류수를 펌프를 통해 0.5ml/min의 속도로 하부에서 상부로 주입시키며 정화하였다. 유출되는 용액은 Teflon용기에 담아 보존하였고 일정한 시간 간격으로 2ml 샘플병에 담아서 가스크로마토그래피(GC, 모델명: HP6890)로 농도를 측정하였으며 PCE와 o-xylene의 질량으로 환산하여 제거된 양을 계산하였다. 그리고 시간에 따른 농도 변화와 주입된 세정액의 양을 공극체적 단위로 환산하여 농도 이력 곡선으로 나타내고 세정법의 정화 효율을 측정하였다. Table 3은 실험에 사용된 칼럼과 시료들의 특징을 나타내었다. GC 분석에서 검출기(detector)는 FID(flame ionization detector)를 사용하였으며 길이가 30m 직경이 530 $\mu$ m(film thickness: 3  $\mu$ m)인 capillary voc-column(Supelco 회사제품)을 사용하였다. 2ml 샘플병에 담긴 유출액 0.1 $\mu$ l(split ratio 10:1)가 오

토샘플러 주입장치에 의해 주입되었고, 주입부(inlet)의 온도 조건은 200 $^{\circ}$ C이며 초기 오븐 온도는 70 $^{\circ}$ C이며 20 $^{\circ}$ C/min으로 150 $^{\circ}$ C까지 승온하였고(분석시간 총 7분) 검출기의 온도는 250 $^{\circ}$ C로 하였다. 칼럼 내 이동 가스(carrier gas)는 질소(순도 99.99%)를 사용하였으며 칼럼 내 속도는 5.0ml/min 이었다.

2.2 불균질 박스실험

박스실험은 가로, 세로, 높이가 각각 10, 30, 20cm인 유리 박스에 Ottawa 모래 F-35(조립질 모래)와 F-110(세립질 모래)를 이용하여 층상구조와 단층구조를 만들었다. 세정과정은 층상구조의 경우 2개의 채수정과 4개의 주입튜브를 사용하였고, 단층구조의 경우 각각 1개의 채수정과 주입정을 사용한 채수주입법을 이용하였다. 실제 지하 내부에서는 세립질 퇴적물과 조립질 퇴적물이 교호하며 퇴적되어 형성된 층상구조가 잘 관찰되므로, 이러한 불균질 층상구조를 모형화하기 위하여, 층상구조는 유리 박스 하부로부터 7.5cm 높이로 F-35 Ottawa 모래를 채웠으며 2cm 두께의 F-110 Ottawa 모래와 3cm 두께 F-35 Ottawa 모래를 2번씩 교호시키며 채웠고 제일 상부 층은 1cm 두께로 F-110 Ottawa 모래를 덮어 구성하였다. 박스 상부를 파라핀 필름으로 덮어 실험 중에 NAPL의 휘발을 최소화하였다. Fig. 1은 층상구조를 재현하여 실험한 박스의 모습이다. 서로 연결된 4개의 호스를 매질 상부에 꽂아서 계면활성제와 증류수를 주입하였으며 지름이 1.2cm 길이가 25cm인 스테인리스관에 0.2~0.3cm 간격으로 스크린을 내어 박스 양쪽 벽 측에 고정시켜 채수정으로 사용하였다. 먼저 증류

Table 3. Information of each column test

	Porosity	Pore volume (cm <sup>3</sup> )	Medium	Contaminant(g)		Flushing solution	Flow rate (ml/min)
				PCE	o-xylene		
Column A	0.35	26	F-35 Ottawa sand	—	1	oleamide 1%	0.5
Column B	0.39	28.58	F-35 Ottawa sand	—	1	water	0.5
Column C	0.47	34.5	Soil A	1	1	oleamide 1%	0.5

Table 4. Information of each box test

	Heterogeneous structure	Pore volume (cm <sup>3</sup> )	Contaminant(g)		Flushing solution	Flow rate (ml/min)
			PCE	o-xylene		
Box A	Layer system	1,335	8	8	oleamide 1%	1.0
Box B	Layer system	1,750	8	8	water	1.0
Box C	Fault system	1,300	8	8	oleamide 1%	1.0

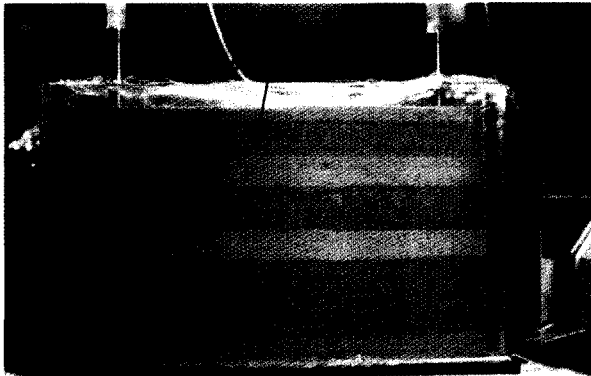


Fig. 1. Box A with heterogeneous layers.

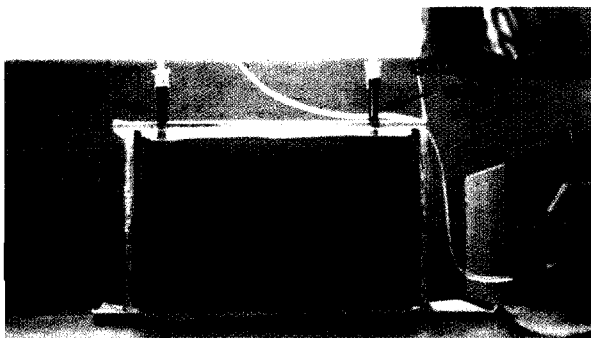


Fig. 2. Box C with modified fault system.

수로 박스 내 공극을 채워 포화시킨 후, PCE와 o-xylene을 각각 8g씩 최상부 F-35 Ottawa 모래 층에 주입하여 오염시켰다. 박스 상부 층으로부터 세정액을 주입하여 완전히 포화시키고 배출정을 통해 유출시키는 방법을 반복적으로 수행하여 정화하였으며 유출되는 용액은 Teflon 용기에 담고 일부를 2mL 샘플병에 담아 GC로 농도 분석을 실시하여 NAPL의 정화 효율을 측정하였다.

불균질 단층구조 실험에서는 F-110과 F-35

Ottawa sand를 이용하여 박스 내에 단층대(fault zone)를 형성함으로써 매질의 불균질성을 구체화하였다. 세립질의 F 110 Ottawa sand로 박스를 약 50° 기울기로 수직으로 절단하였으며, 상하 층면으로 연장시켜 단층구조를 재현하였다. Fig. 2는 불균질 단층구조를 보여주는 박스실험 모습이다. 단층 형태의 세립질 모래층을 따라 PCE와 o-xylene 8g 씩 오염시켰으며, 유출 경로를 관찰하기 위해 fluorescein(Aldrich Chemical Company 제품)으로 증류수를 초록색으로 염색하여 1 공극체적만큼 주입한 후, 1% 올리에마이드 용액으로 세정하여 정화하였다. 주입정과 배출정을 구분함으로써 계면활성제의 주입과 유출을 동시에 이루어지게 하였으며, 염색된 증류수의 이동을 통하여 불균질 매질에서의 세정액의 이동을 가시화하였으며, 채수정으로부터 유출되는 용액의 농도는 GC로 분석하였다. Table 4는 실험에 사용된 박스와 시료들의 특징을 나타내었다.

### 3. 결과 및 토의

칼럼 및 박스에서 유출되는 용액의 PCE와 o-xylene 농도를 세정용액의 양과 비교하여 그래프로 나타내었으며, 실험 결과들은 Table 5에 나타내었다. Column A와 Column B는 F-35 Ottawa sand 매질 내에 o-xylene으로 오염시킨 후, 1% 계면활성제 용액과 증류수로 세정하여 정화 효율을 측정하였다(Fig. 3). Column A는 올리에마이드 1%용액으로 세정하였을 때, 최대유출농도가 7400 mg/l에 이르며, 약 20 공극체적 세정 후, 대부분의 o-xylene이 제거되었음을 나타내는 반면, 증류수로 세정한 Column B의 경우에는 최대유출농도가 16 mg/l 정도이고, 100

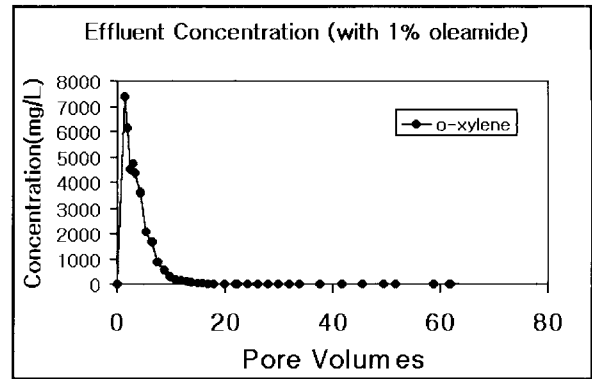
**Table 5. Result of column and box test**

	Maximum effluent concentration (mg/l)		Total flushing amount (pore volumes)
	PCE	o-xylene	
Column A	—	7,400	60
Column B	—	16	100
Column C	5,100	2,500	36
Box A	1,370	1,120	2.4
Box B	28	30	3.6
Box C	4,970	3,930	8

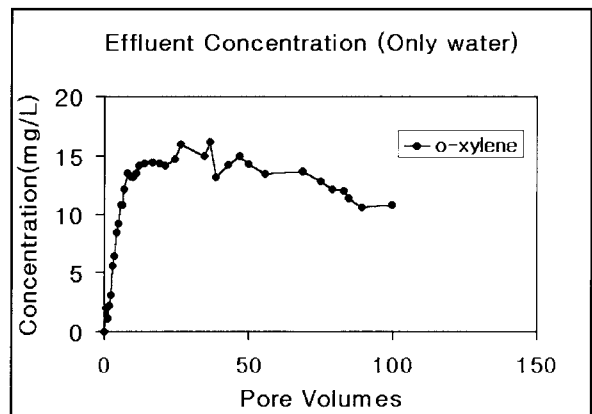
공극체적 이상 흘러보낸 이후에도 10 mg/l 이상으로 유지되는 결과를 보여줌으로써, 계면활성제용액을 이용한 세정법의 정화 효율성의 증가를 보여준다(Fig. 3). Column C는 실제 토양을 이용하여 실험하였으며, PCE와 o-xylene 1g 씩을 혼합하여 오염시켰다. Column C에서의 최대유출농도는 PCE의 경우 8400 mg/l, o-xylene의 경우 4020 mg/l로서 증류수를 이용한 세정의 경우보다 약 250배 증가하였으며, 약 40 공극체적의 세정 후 대부분의 NAPL이 제거되었다(Fig. 4). 실제 토양칼럼의 경우 균질 매질 칼럼과는 다르게, 20 - 30 공극체적에서 Tailing 현상이 나타나는데, 이것은 실제 오염지역의 정화시 정화 효율을 감소하고 정화 시간을 증가시키는 원인이 되며, 주로 토양의 불균질 특성 때문에 발생한다. 이러한 불균질 매질의 영향에도 불구하고, 실제 토양에 관한 계면활성제를 이용한 세정법의 전체적인 정화 효율 결과는 매우 높게 나타났으며, 따라서 NAPL로 오염된 실제 오염 토양 정화에 계면활성제를 이용한 원위치 세정법이 효과적으로 사용될 수 있음을 검증할 수 있었다.

Fig. 5는 불균질한 매질들이 교호하는 층상구조에서 PCE와 o-xylene을 오염시킨 후, 1 % 계면활성제 용액과 증류수로 세정한 결과를 보여주고 있다. 계면활성제 용액으로 세정한 경우, 최대유출농도가 PCE는 5140 mg/l, o-xylene 은 4425 mg/l를 나타내며, 약 3 공극체적 이내에 정화되나, 증류수로 세정한 경우, NAPL의 농도가 약 30 mg/l 이하를 나타내며 지속적으로 매질 내에 존재하고 있음을 나타낸다. 수평적으로 불균질한 층들로 이루어진 이러한 구조에서도, 약

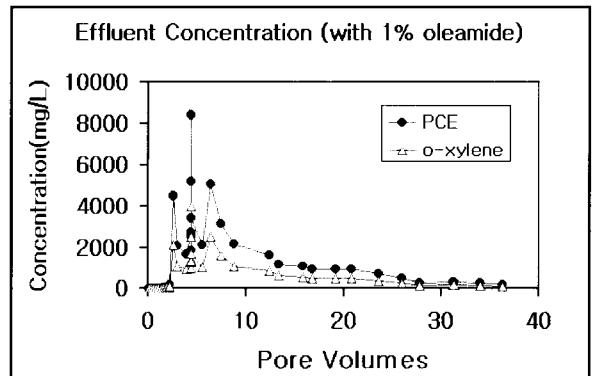
(A)



(B)



**Fig. 3. (A) Result of Column A with 1% oleamide flushing, (B) Result of Column B with only water flushing.**



**Fig. 4. Result of Column C with 1% oleamide flushing.**

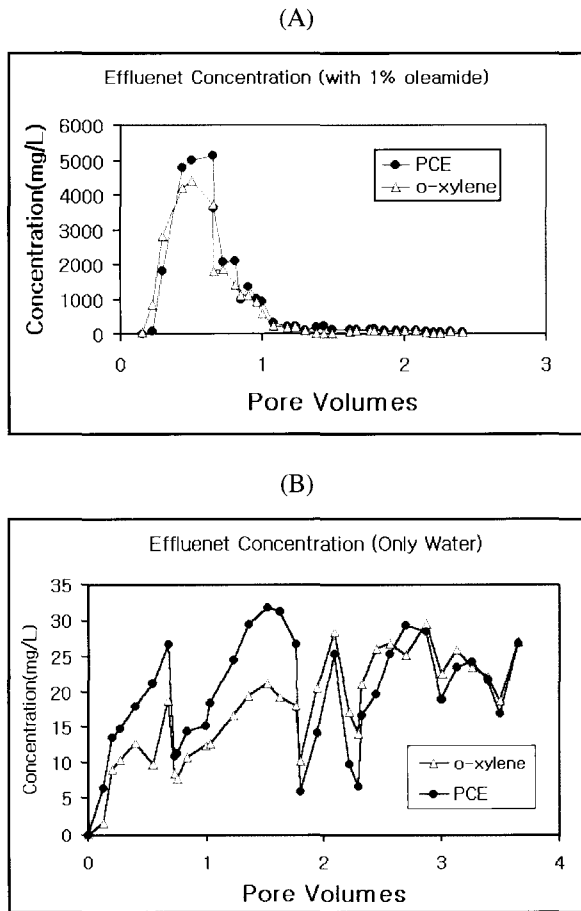


Fig. 5. (A) Result of Box A with 1% oleamide flushing, (B) Result of Box B with only water flushing.

150배 이상의 유출 농도 차이를 보이며, 약 3 공극체 적 이내에서 대부분의 NAPL이 제거되는 것으로 미루어, 계면활성제를 이용한 세정법이 불균질한 매질에서도 효과적으로 사용될 수 있음을 보여준다. Fig. 6과 Fig. 7은 불균질 층상 박스실험에서, 빨강계 염색된 NAPL들이 세립질층과 조립질층 경계부에 자유상으로 존재하는 것을 보여주며, 상부로부터 계면활성제 세정용액의 주입에 의하여 입자들 사이에 분포하는 NAPL들이 에멀션(emulsion)화되어, 우유빛을 띄며, 하부 세립질층으로 확산되어 제거되는 현상을 보여준다. 에멀션현상은 계면활성제의 micellization에 의한 NAPL 용해도 증가보다 훨씬 많은 양의 NAPL을 포

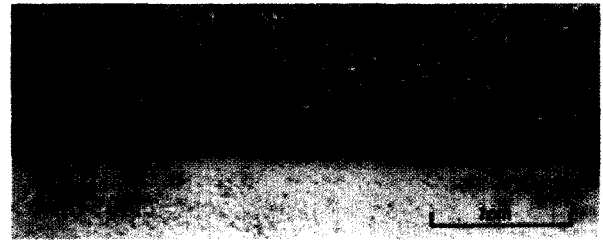


Fig. 6. NAPL distribution between fine and coarse sand layer in Box A.

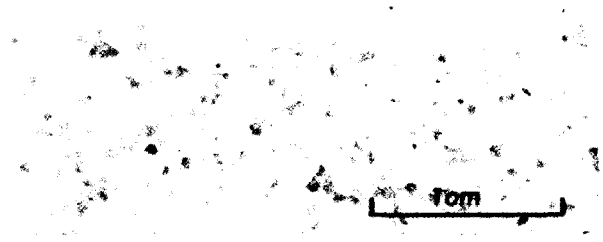


Fig. 7. Emulsion with 1% oleamide flushing in Box A.

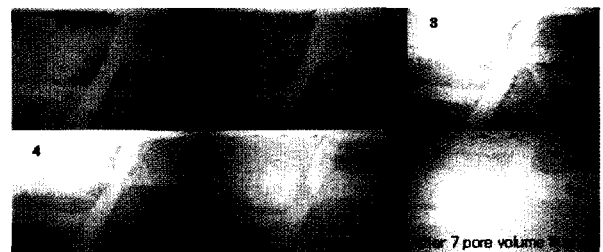


Fig. 8. Flow pattern and remediation process of Box C (1, 2 : 1 pore volume water flushing, 3, 4, 5, 6 : 1% oleamide flushing).

함하여 거의 NAPL 상으로 유출되므로 정화 효율을 높이는 데 중요한 원인이 된다<sup>19)</sup>.

Fig. 8은 간단한 지하 단층구조를 모형화한 불균질 지하 매질에서, 세정과정에 따른 세정용액의 흐름과 NAPL의 정화 과정을 보여주고 있다. Fig. 8의 1과 2는 초록색으로 염색된 증류수가 불균질 구조내를 이

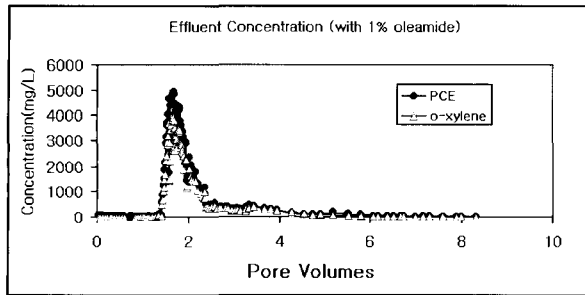


Fig. 9. Results of Box C with 1% oleamide flushing.

동하는 모습을 보여주고 있으며, 3에서 6까지의 그림은 1 공극체적의 증류수 주입 후, 1% 계면활성제용액을 주입하여 세정하는 과정을 보여준다. 수직으로 연장된 세립질의 매질에 의해서, 계면활성제 세정용액이 불규칙한 속도를 가지고 주입정에서 채수정으로 이동하고 있으나, 8 공극체적(증류수 1 공극체적 + 계면활성제 용액 7 공극체적) 후에는 매질의 경계부에 존재하는 NAPL을 제외하고는 대부분이 제거됨을 보여주고 있다. 계면활성제 용액으로 세정한 경우, 최대 유출농도는 PCE의 경우 약 5000 mg/l, o-xylene의 경우 약 3900 mg/l를 나타내는데 이것은 물의 용해도에 약 25배에 해당하는 농도이고, 증류수만을 이용한 세정농도에 약 150배에 해당하는 농도이다(Fig 9). 8 공극체적 세정 후에, 박스 내 9곳(매질의 경계부와 세립질층 내)에서 시료를 채취하여, 실험 후에 남아있는 NAPL의 양을 측정하였으며, 9곳 모두 0.5 mg/l 이하의 농도를 나타내어, 불균질 매질임에도 불구하고 대부분의 NAPL이 효과적으로 제거되었음을 확인하였다.

#### 4. 결론

칼럼과 박스를 이용한 세정실험을 통해 불균질 매질에서의 NAPL에 대한 계면활성제의 정화 효과를 검증하였다. O-xylene이 LNAPL로, PCE가 DNAPL로 사용되었으며, 비이온 계면활성제인 oleamide 1%(Wt%)가 이용되었다. 매질의 공극 내에 존재하는 NAPL은 계면활성제 용액 세정에 의해, 에멀션과 용해된 수용액상태로 제거되었다. 실제 토양의 경우,

1% 농도의 계면활성제를 주입한 칼럼의 PCE와 o-xylene의 최대유출농도가 증류수를 이용한 경우보다 약 250 배 증가하였으며, 불균질 구조 박스실험에서는 약 150배 증가하였다. 불균질 매질의 경우 균질 매질보다 정화 효율이 감소하고, 약간의 Tailing 현상을 보이고 있으나, 전반적인 정화 효율의 관점에서 유출농도의 증가에 따른 정화 시간이 매우 단축되는 결과를 얻었다. 불균질 층상구조와 단층구조를 모형화한 박스실험에서는 적절한 주입정과 채수정의 설치에 의한 채수수입법에 의해 대부분의 NAPL을 정화할 수 있었다. 불균질 층상구조실험에서는 3 공극체적 세정 이후 박스 내에 존재하는 NAPL의 최대 농도는 0.5 mg/l 이하였으며, 불균질 단층모형 실험에서는 8공극체적 세정 이후 0.5 mg/l 이하를 나타낸다. 본 실험 결과는 일반적으로 정화가 어렵다고 막연히 여겨져 왔던 불균질 매질에서의 유기오염물 정화가 계면활성제를 이용한 적절한 채수주입법에 의해 가능하다는 것을 확인하였다. 세정법을 이용한 정화방법의 보다 정확한 효율성 실험을 위해서는 모형화된 불균질 매질의 실험보다, 훼손되지 않은 실제 불균질 매질에 대한 세정실험 결과가 필요하며, 다양한 불균질 매질에 대한 정화 연구가 현재 실험 중에 있다.

#### 5. 사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 2000-2-13200-001-2) 지원으로 수행되었음.

#### 6. 참고 문헌

1. Pankow, J.F. and Cherry, J.A., Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater, Waterloo press, pp. 522(1996).
2. EPA, Laboratory investigation of residual liquid organics from spills, leaks, and the disposal of hazardous wastes in groundwater. EPA/600/6-90/004, Ada, Oklahoma, pp. 261(1990).
3. Mercer, J.W. and Cohen, R.M. "A review of



- immiscible fluids in the subsurface : properties, models, characterization and remediation”, *J. Contam. Hydrol.*, 6, pp. 107-163(1990).
4. Schwillie, F., Dense chlorinated solvents in porous and fractured media- model experiments, translated by Pankow, J.F., Lewis Publishers, pp. 176(1988).
  5. Fiorenza, S., Miller, C.A., Oubre, C.L., and Ward, C.H., NAPL Removal : Surfactants, Foams, and Microemulsions, Lewis Publishers, Florida, pp. 552(2000).
  6. Riser-Roberts, E., Remediation of petroleum contaminated soils, Lewis Publishers, Florida, pp. 542(1998).
  7. Anderson, W.C., Innovative site remediation technology : Soil Washing/Soil Flushing, volume 3., American Academy of Environmental Engineers, pp. 1-57(1993).
  8. 환경부, 오염토양 복원기술 및 제도 발전에 관한 연구 용역, 제 2차년도 최종보고서, 한국토양환경학회, pp. 167(1998).
  9. 환경부, 오염토양 정화기술 개발, 선도기술개발사업 유해폐기물 처리기술 사업, 1차년도 보고서, 삼성건설 기술연구소, pp. 558(1995).
  10. Fetter, C.W., Contaminant Hydrogeology, 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey, pp. 500(1998).
  11. Shan, C., Javandel, I., and Witherspoon, P.A. “Characterization of leaky faults : study of air flow in faulted vadose zones”, *Water Resources Research*, 35, pp. 2007-2013 (1999).
  12. Kueper, B. H. and McWhorter, D.B. “The behavior of dense, nonaqueous phase liquids in fractured clay and rock”, *Ground Water*, 29, pp. 716-728(1991).
  13. 이 민희, “계면활성제를 이용한 토양내 유기오염물 (NAPL)의 정화 효율에 관한 실험”, *지질학회지*, 37(1), pp. 45-56(2001).
  14. Lee, M. “The remediation of tetrachloroethylene by surfactant flushing in both the saturated and the unsaturated zone”, *Environmental Technology*, 19, pp. 1073-1083(1998).
  15. Rosen, M.J. Surfactant and interfacial phenomena. John Wiley and Sons, New York, pp. 170-202(1989).
- 〈원고접수일 : 2001. 9. 17〉