

## 원위치 토양세척 공정의 효율향상을 위한 세제선정과 운전기법

손봉호 · 임봉수<sup>†</sup> · 어성욱<sup>\*</sup> · 이병호<sup>\*\*</sup>

대전대학교 환경공학과  
<sup>\*</sup>우송대학교 철도건설환경공학과  
<sup>\*\*</sup>(주)청림산업

## Selection of Surfactant and Operation Scheme for Improved Efficiency of In-situ Soil Flushing Process

Bong-Ho Son · Bong-Su Lim<sup>†</sup> · Seong-Wook Oa<sup>\*</sup> · Byung-Ho Lee<sup>\*\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Daejeon University  
<sup>\*</sup>Department of Railroad, Civil & Environmental Engineering, Woosong University  
<sup>\*\*</sup>Chong-lim, INC.

(Received 12 December 2005, Accepted 19 July 2006)

### Abstract

Several tests were conducted to optimize the design parameters of In-situ soil flushing processes for diesel contaminated soil. According to the batch extraction test for three anionic surfactants evaluation, Calgonit limiting bubble occurrence was selected for its higher oil cleaning efficiency. After optimum surfactant selection, there were many sets of column flushing tests. Over 70% of BTEX was removed in this surfactant dose with 400% of soil volume. In the case of no surfactant addition flushing in column, so called "blank flushing test", BTEX removal rate was 64%. But when we reused the effluent for the cleaning solution, the removal rate was decreased to 46.9%. This result showed reabsorption of oil occurred on the soil. With the addition of Calgonit solution to the diesel contaminated column, BTEX was removed up to 98.9% during the first flushing and 99.4% for the second recirculation flushing. In microcosm tests, diesel contaminated soils were cleaned by both surfactant flushing and biological activities. In anoxic condition, nitrate was used as an electron acceptor while the surfactant and the oil were used an electron donor. BTEX removal efficiency could be achieved up to 80% by biological degradation.

**keywords** : Anion surfactant, BTEX, Calgonit, Microcosm, Soil flushing

### 1. 서론

우리나라는 경제발전과 국민소득증대로 인해 차량 보유 대수가 증가하였고 주유소 설비 제한 규정이 삭제됨으로써 주유소와 유류저장시설이 급격히 증가하였다. 특히 주유소 지하매설 저장시설에서 NAPLs(Non Aqueous Phase Liquids)로 불리는 유류 및 유해화학물질의 누유로 인해 토양 생태계 파괴와 지하수 오염부지의 복원이 환경의 중요 문제로 거론되고 있다. 주유소를 포함한 유류판매소를 고려하였을 때, 지하 매설 배관은 통상 설치 후 7~10년 경과마다 부식으로 인한 누출이 발생하며, 지하매설 저장시설은 20~25년이 경과 후에 부식으로 인한 누출이 일어나고 있고 이런 점을 감안할 경우 전국 주유소 중 매년 전체 주유소의 15%에서 누유가 발생하고 있다고 할 수 있다.

오염된 토양이 이용되기 위해서는 현행 "토양환경기준법"에 의해 안전한 정도로 처리, 복구되어진 후 다시 본연의

용도로 활용될 수 있는데 현재까지 알려진 토양오염 복원 방법은 크게 굴착 - 정화 - 치환법, 원위치 오염복원방법 등이 있다(이, 2003). 오염물질의 확산 등을 염려하여 현재는 대부분 오염현장에서 원위치 복원방법을 권장하고 있으며 원위치 오염복원 방법으로는 생물학적인 방법과 기타 물리화학적 방법을 들 수 있다. 원위치 토양세정법(In-situ soil flushing)은 유류로 오염된 토양과 지하수를 동시에 정화하는 방법으로서, 기존의 양수처리법(Pump & treat method)을 활용하면서 오염지역의 주변 환경을 변화시키지 않고 토양과 지하수를 함께 처리할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 미국의 EPA superfund site에서 1,000 mg/L 정도의 높은 질산성질소 농도, TCE, BTEX 등에 대한 현장 제거실험이 진행 중이며 유럽의 경우 스위스, 독일 등에서 현장 생물복원을 통한 지하수내 질산성질소와 유기 오염물질 제거 연구를 수행했다(염 등, 1997). Table 1에 이미 완료되었거나 현재 진행중인 계면활성제를 이용한 오염토양 처리의 현장 처리결과를 나타내었다(GWRTAC, 1996).

국내에서는 유류에 대한 비음이온성 계면활성제(NEODOL<sup>®</sup> 25-3, SOFTANOL<sup>®</sup>-90)와 음이온 계면활성제(SDS)를 이용

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
bslim@dju.ac.kr

**Table 1.** Soil flushing filed research test

Contaminant zone	Bordon canadian air force base	Copus christi dupont site	Estrie region, machine shop	GM NAO R&D center	Thouin sand quarry, quebec Canada	Traverse city field test
Contaminant & Concentration	271 L PCE	Carbon tetrachloride 100 mg/L (ground-water)	160,000 kg over the cutting oil	6,000 ppm PCB, 67,000 ppm oil	55,000 ppm Chlorinate solvent	1,000 ppm PCE, 1,000 ppm jet fuel
Summary of study	- 3*3*3 m <sup>3</sup> cell sand aquifer (organic carbon 0.1%) - Inject & extract well to each 5 ea - 2% surfactant 14pore Vol.(PV)	- Fine-sand layer (organic carbon 0.028%) - hydro-conductivity 10 <sup>-3</sup> m/sec - Injection well 6ea, one extraction well of center - 1% surfactant	- Contaminant zone surface from 2-4.3 m - fine-sand layer, ground water level 4 m - Hydro-conductivity 10 <sup>-4</sup> m/sec - Injection/extraction well (400 ea) - Free phase recover :select surfactant, test of toxic, control of hydronic	- Diameter 10 ft, depth 5 ft test cell - Treatment of washing solution :Activated carbon adsorption-PCBrm - Incrassate of surfactant using ultrafiltration	- 4.3*4.3*2 m silt sand - 1 ea (center injection well), extraction well 4 ea, monitoring well 12 ea - Washing order: 1.34 PV water, 0.54 PV polymer, 0.9 PV surfactant, 1.6 PV polymer, 1.4 PV water, microbes, nutritive solution	- High hydro-conductivity sand layer, contaminant zone (below 10 ft from surface) - Appiy of VCW - 5 ft well 2 ea - Injection:solution of surfactant (10*CMC) 540 gal
Result of study	- Top (PCE:10~1%) lower part (PCE:20~3%) Recovery 80%: during the total PCE	- Surfactant, adsorption biofouling growth - 12.5 PV recycle than 73 gal CTETrm	- 50 day : 37.5 m <sup>3</sup> free phase oil recovery - 60 day: 8 time washing than 14% recovery of contaminated	- First: PV 5.7 washing than 10% recovery of contaminated - Secondary: PV 2.3 washing than 14% recovery of contaminated	- Remaining DNAPL 86% recovery - Using polymer - Difficult middle zone washing of extraction well	- Concentration of washing solution: groundwater concentration 5-7times - Hydronic control extract flux/inject flux (10-15times over)

하여 실험한 결과 음이온 계면활성제가 흡착방지에 있어 효과가 있는 것으로 연구되었으며(이 등, 1999a, 1999b, 1999c), 현장에서의 in situ 적용 사례가 보고되어지고 있다 (이 등, 2002; 최 등, 2002). 유류 이외에도 VOC나 비소 등 중금속에 대한 토양 세척 공정은 실험실 및 현장 규모에서 많이 보고되고 있으나(김 등, 2005; 황 등, 2004) 대부분의 토양 세척은 세척제를 이용한 물리적 세척에 국한하여 기준 이하로의 후속처리를 위해서는 생물학적 처리 등의 후속처리를 요하고 있다.

본 연구는 디젤 오염지역의 정화를 위해 단기적인 세척 효율 향상을 위한 세제의 선정에 포함하는 투수성, 재흡착성 등의 현장 조건의 결정과, 후속처리를 위한 생물학적 처리의 효율을 병행할 수 있는 복합 처리 공정의 개발을 위해 수행되었다. 현장 처리에 적합한 적정세제의 선정과 선정된 세제를 이용하여 batch test와 column test를 통해서 오염된 토양에서의 적정 세제액량과 그에 따른 처리효율을 분석하였다. 또한 물리적인 세척 공정과 병행하여 장기적인 오염복원 효율 증대를 위한 미생물 병합 처리를 위해 질산

성 질소를 전자 수용체로 사용하는 방안을 microcosm test를 통해 평가하였다. 단일 공정의 적용으로 오염 복원이 어려운 유류오염 지역에 대해, 실증적이고 경제적이고 손쉽게 적용할 수 있는 오염 복원 공정 개발이 본 연구의 목적이었는바 물리적-생물학적 통합형 복원시스템의 개발에 중요 운전인자를 제공하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 사용세제의 종류 및 특성

토양에 흡착되어 있는 유류를 세척하기 위하여 몇 종의 세제를 가지고 세척실험을 실시하여 세제의 상태, 거품의 정도, 투수속도, 세척력 등을 파악하며 생물분해 시 장애가 없는 계면활성제를 찾아내었다. Table 2는 사용된 세제의 종류와 특성에 대하여 나타낸 것이다.

### 2.2. Batch & column test

Separate Funnel에 토양 25 g을 채우고 디젤 2 g을 인공

**Table 2.** Characteristics of applied surfactants

Detergent name	Calgonit	Orange clean	Soy clean
Use	Dishwasher	Dishwasher	Dishwasher
Specific	- The bubble is few - The price is cheap - The purchase does ease - Excellent from The antifungal and sterilizing power	- The aesthetic effect is few - Almost there is not bubble creation - The purchase is difficult	- Environment characteristic detergent - It makes the bean with the materials and there is skin aging prevention and a skin protection function - Excellent from the antifungal and sterilizing power - The price is expensive

오염시켰다. 사용된 토양은 사질토로서 공극비가 0.47, 함수비 12%이며 디젤유는 시중에서 판매되는 연료용을 사용하였는데 C-9 ~ C-20이 주성분이며 끓는점은 160~370°C이다. 여기에 물과 각각의 세제를 주입하고 10분간 흔들어준 다음 빠져나온 세정액 및 토양을 분석하였다. 실험방법은 선정된 세제 각 1%를 100~400 mL까지 주입하고 증류수를 이용하여 공시험을 실시하였다. 세정액과 디클로로 메탄이 충분리가 잘 일어나지 않으면 염산을 첨가하여 계면활성제의 활성능력을 없애고 추출하였고, 토양시료는 토양추출법(환경부, 2002)으로 분석하였다.

Column test를 위해 사용된 장치의 모식도는 Fig. 1에 나타낸 것과 같으며 인위적으로 오염된 토양을 column(10.5 cm × Ø 4.5 cm = 167 cm<sup>3</sup>)에 채운 후 펌프를 이용하여 세정액을 10 mL/min으로 중력에 의해서 오염된 토양층을 통과시켜 통과된 세정액을 분석하고 또한 잔존 오염물의 농도를 알기 위해서 column에 충전된 토양도 분석하였다.

세정액은 거품이 적고 가격이 저렴하며 구입이 용이한 calgonit을 1% 농도로 실험하였고 column에 사용한 오염된 토양의 공극률은 0.47이고 오염농도는 20 mg<sup>diesel</sup>/0.25 kg<sub>soil</sub>이었다. Column의 투수실험은 토양 250 g을 column에 채우고 미량유량펌프를 이용하여 500 mL 물을 주입하였다. 이때 소요되는 시간을 측정하여 투수성을 판정하였다. 흐름은 중력식으로 하향류로 실시하였으며 상부 흡에서 3 cm 정도 수위가 유지되도록 운영하였다. Column을 이용한 세제별 효율 비교에는 흡으로 충전된 column에 디젤을 80 mg/g의 농도로 주입하여 인공적으로 오염을 유발하였으며 3종의 세제를 각각 1%, 2%의 농도로 500 mL씩 주입하였다. Column test시 주입액의 온도에 의한 영향을 알아보기 위해서 세정액의 온도를 20°C와 95°C로 주입하였다.

### 2.3. Soil microcosm test

유류로 오염된 토양의 무산소 조건에서의 생물학적 분해와 세제 주입 유무에 따른 분해 정도를 분석하기 위해

microcosm test를 실시하였다. Microcosm은 165 mL serum bottle에 건조토양시료 10 g(4.5 mL), 증류수 79~100 mL, 디젤 2 g(2.35 mL), 세제 1 g/100 mL(active 3, 4)을 주입하여 제작하였다.

Table 3은 microcosm의 각 조건을 나타낸 것으로 각 실험당 오차 검증을 위해 bottles은 3개씩 제작하였으며 모두 10 g의 토양과 디젤 2 g을 넣었고 Live 1과 Live 2에서는 토양과 디젤만을 넣었으나 Live 2에서는 미생물의 작용을 비교하기 위해서 autoclave를 시행하였다. 또한 질산성질소의 작용을 확인하기 위해서 Live 3에 질산성질소를 주입하여 실험하였으며 미생물에 의한 분해 실험을 위해서 Active 1에서는 질산성질소를 주입하지 않았고, Active 3,4에는 세제를 넣어 세제의 작용을, Active 4에서는 미생물 억제제(sodium azide)를 넣어 순수한 생물 분해도를 측정하기 위해 각각의 실험을 수행하였다.

### 2.4. 분석 방법

토양에 흡착되어 있는 유류분석은 토양오염 공정시험법에 따라 추출하여 GC(Varian CP-3800)로 분석하였고 추출 순서는 Fig. 2와 같으며 GC분석조건은 Table 4와 같다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 적정세제 선정 및 batch test 결과

적정 세제의 선정을 위해 투수성, 유류세척효율, 거품 발생도를 기준으로 하였는데 그 결과가 Table 5에 정리되어 있다. 대표적인 음이온 세제인 SDS(Sodium doecyl sulfate)와 거품발생이 억제되고 생물 분해도가 향상된 상업용 calgonit을 선정하였는데, calgonit이 SDS보다 투수속도가 2.8배 빠른 속도로 측정되었는데, SDS에서는 거품 발생이 많고, 슬러리 형태의 침전물이 생성되어 토양층의 공극을 막아 상대적으로 거품생성량이 적은 calgonit보다 일정 토양층을 통과하는데 소요되는 시간이 오래 걸린 것으로 판

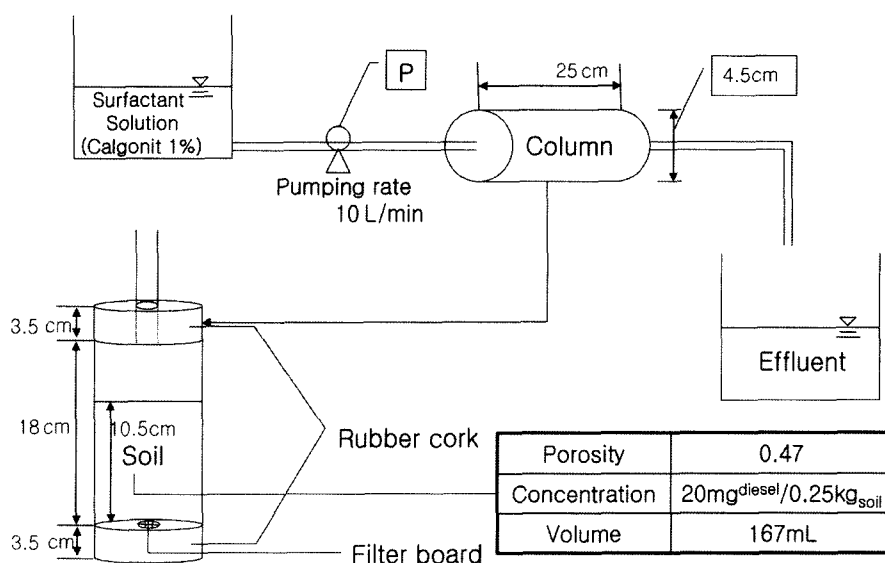
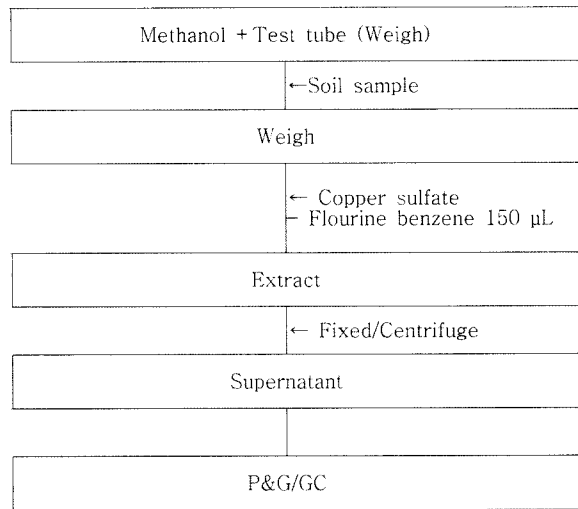


Fig. 1. Schematic diagram of applied equipments for column test.

**Table 3.** Matrix of soil microcosm.

Phase	Oil (E.D)	NO <sub>3</sub> -N (E.A)	Microbes	Surfactant	Poison	DW	Soil (10 g)
Live 1	Y	N	N	N	N	Y (100mL)	Y
Live 2	Y	N	N	N	N	Y* (100mL)	Y*
Live 3	Y	Y	N	N	N	Y (90mL)	Y
Active 1	Y	N	Y	N	N	Y (100mL)	Y
Active 2	Y	Y	Y	N	N	Y (90mL)	Y
Active 3	Y	Y	Y	Y	N	Y (80mL)	Y
Active 4	Y	Y	Y	Y	Y	Y (79mL)	Y

Y\* = autoclave, E.D=Electron Donor, E.A=Electron Acceptor



**Fig. 2.** Soil extract method.

**Table 4.** GC conditions for BTEX analysis

GC-Model	Varian CP-3800
Carrier gas	He (29 mL/min)
Detector	Flame Ionization Detector (FID)
Column	CP-Sil 5CB Capillary Length : 25 m Inner Diameter : 0.25 mm Film Thickness : 0.25 µm Stationary Phase : Silica
Oven	30°C (5 min)→20°C/min → 80°C→20°C/min→150°C (2 min)
Injection	200°C
Detector	230°C

단된다(Saito, 1967; Liu et al., 1991; Tokiwa, 1968). 또한 액상 음이온 성분인 soy clean과 orange clean이 적용되었는데 각각 9.62 cm/min와 8.62 cm/min의 투수속도를 보이고 있다. 성상이 분말일 경우에는 거품에서 다시 거품이 아닌 형태로 되돌아가는 시간이 오래 걸려 투수속도가 거품생성에 밀접한 관련이 있으며 성상이 액상인 경우에는

**Table 5.** Test results for selected surfactant

Name of detergent	States of sample	Formation of foam	Permeability velocity (cm/min)
SDS	Powder	Large	4.17
Calgonit	Powder	Small	11.63
Soy clean	Liquid	Medium	9.62
Orange clean	Liquid	Small	8.62

거품생성도 많이 발생하지 않으며 거품이 많이 발생하더라도 거품에서 물성이 변하는 시간이 짧아 투수속도에는 많은 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다(Rosen, 1989).

Table 6에 batch test 결과를 보여주고 있으며, Fig. 3에서 보면 교반하지 않고 정지한 경우 BTEX 추출농도는 물 + 디젤 < 물 + 디젤 + SDS + HCl < 물 + 디젤 + calgonit의 순으로 나타났으며 이는 20,000 mg/L의 디젤에서 추출된 농도로서 각각 2.59 mg/L, 10.20 mg/L, 23.60 mg/L으로 분석되었다.

교반하였을 경우에도 정지한 경우와 같은 결과를 보여주고 있는데 각각 23.00 mg/L, 43.52 mg/L, 70.09 mg/L의 농도로 분석되어 교반하지 않은 시료는 용매에 녹는 양이 현저히 떨어지는 것을 볼 수 있었다. 세제의 선정시 투과속도가 가장 빠른 calgonit와 가장 느린 SDS를 이용하여 비교 실험하였는데 calgonit가 SDS보다 높은 농도로 분석되

**Table 6.** BTEX concentration of used flushing agents

Concentration of injection : 2 g diesel/100 mL distilled water (DW) dechloro-methane 99.9%

Condition of reaction	BTEX (mg/L)	Diesel (mg/L)
DW + diesel (fix)	2.59	20,000
DW + diesel (mix)	23.00	
DW + diesel + calgonit (fix)	23.60	
DW + diesel + calgonit (mix)	70.09	
DW + diesel + SDS + HCl (fix)	10.21	
DW + diesel + SDS + HCl (mix)	43.52	

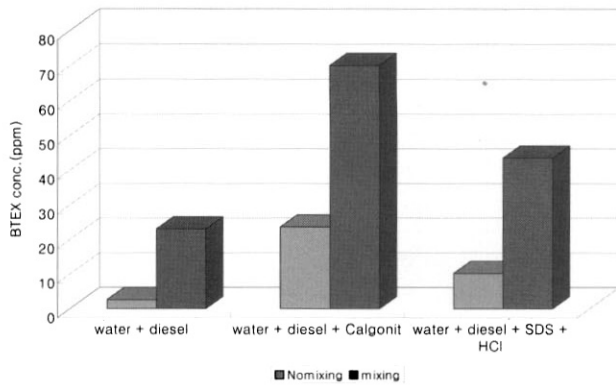


Fig. 3. BTEX concentration after batch flushing test.

어 같은 농도의 디젤을 추출하는데 SDS보다는 calgonit가 우수하였다. 추출하여 분석하는 과정에서 SDS는 층 분리가 이루어지지 않아서 염산을 주입하여 분석하였다.

SDS와 calgonit를 이용한 토양세척 batch test 결과로서 세제 종류별 토양내 BTEX 잔존율을 Fig. 4에 나타내었다. 이때 비교 실험을 위하여 세제를 첨가하지 않고 물만을 주입한 상태의 시료를 제작하여 동일 조건에서 분석하였다. 각각의 세정액은 토양 부피의 200~ 800%까지 변화시켜 실험을 수행하였고 세정액 주입량을 증가시킬수록 토양 내 유류분은 점차 감소하는 양상을 나타내었다. 물만 주입한 경우 주입량이 증가할수록 유류 잔존율이 약간 감소하나 휘발에 의한 영향을 고려할 경우 거의 변화가 없는 것으로 나타나고 있다. 토양내의 유분, 특히 BTEX 성분은 물과의 접촉에 의해 약 20% 정도가 물에 녹는 것으로 나타나고 있다.

한편 1종의 비이온계와 2종의 음이온계 세제의 적용 결과 거품 발생이 억제된 음이온계 세제인 calgonit가 토양 내 유류 세척에 가장 우수한 것으로 나타났는데 토양 부피의 400% 적용시 효율이 가장 뛰어난 것으로 나타났다. 이 세제의 경우는 400% 적용시 70% 이상의 유류 오염물질을 토양으로부터 세척 제거하는 것으로 나타났으며 800% 적용시에는 약 85%까지 제거가 가능한 것으로 나타나고 있다.

세제에 의해 발생하는 거품이 토양내로 세제가 침투하는 것을 방해하는 것으로 나타났으며, 토양 오염물질의 제거를 위한 세척제 선정시 거품 발생 억제 유무는 상당히 중요한 인자인 것으로 나타났다(Attwood et al., 1983). 적용 세제

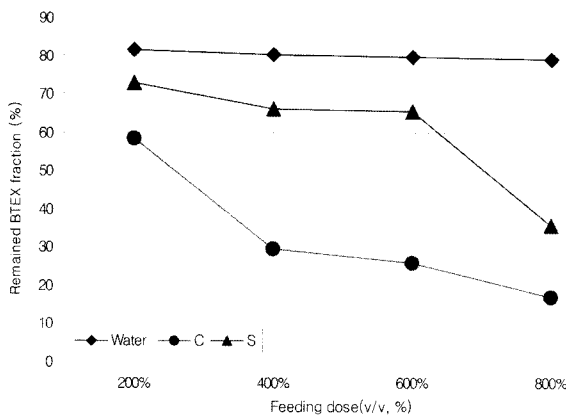


Fig. 4. BTEX contents of flushing reagent after diesel cleaning.

중 calgonit의 효율은 200% 적용시에도 가장 우수한 것으로 나타났으며, 세척제 양을 증가시킬 경우에도 효율의 차이는 지속적으로 증가하며, 이러한 batch test 결과를 근거로 볼 때 거품 발생이 억제된 음이온계 calgonit가 가장 우수한 것으로 나타났으며 그 주입량은 토양 부피의 400%일 때가 가장 효율적인 것으로 나타났다.

### 3.2. Column test 결과

실제 현장과 유사한 조건으로 제작된 column을 이용하여 유류 세척 실험을 수행하였다. Column test를 위해서 우선적으로 세정액의 토양내 통과속도를 결정하여야 하며 이를 위해 토양 250 g이 채워진 column에 증류수 500 mL를 통과시켜 통과시간을 측정하였다. 증류수가 column을 통과하는 속도는 10 mL/min으로 나타났으며 calgonit의 경우 유막을 에멀전화시키며 저항을 감소시켜 오히려 통과속도가 향상되었으며 이때의 속도는 11.63 mL/min으로 나타났다. 그리고 SDS는 4.17 mL/min으로 나타났다. SDS의 경우는 유분의 에멀전화가 일어남과 동시에 세제에 의해 발생된 거품이 흐름을 방해하여 통과속도가 작아지는 것으로 나타났다(Yeom et al., 1993).

세척액의 온도에 따른 영향을 분석하기 위해 세척액의 온도를 20°C와 95°C로 주입하여 실험하였는데 그 결과가 Fig. 5에 나타난 것과 같이 95°C일 때 물과 Calgonit 그리고 SDS가 각각 14.71 mL/min, 35.46 mL/min, 26.18 mL/min이었고 20°C일 때는 10 mL/min, 11.63 mL/min, 4.17 mL/min으로 95°C가 20°C보다 통과 속도가 빨랐고 세 가지 세척액 중 Calgonit의 성능이 가장 좋은 것으로 분석되었다. 온도가 높을수록 통과 속도가 빠르게 나타났는데 이는 투수계수에 영향을 미치는 점성계수의 영향으로 침투수의 흐름특성이 온도에 의해서 물의 점성을 변화시키는 것으로 사료되어 물의 점성이 95°C일때 20°C의 경우보다 작기 때문에 95°C에서 통과속도가 빠른 것으로 판단된다.

Column test 결과 세척 효율을 분석하기 위해 세척 후 column 내 토양의 잔존 BTEX 농도를 분석하였다. 세제 주입 없이 증류수만 통과 시켰을 경우 1회 세척시 36%의 잔존율을 나타냈다. 이는 64%의 제거율을 의미하며 증류수만을 주입하였을 때 토양 흡착 유류의 수용화에 의해 60% 이상이 제거되는 것으로 나타났다. 1회 세정액을 다시

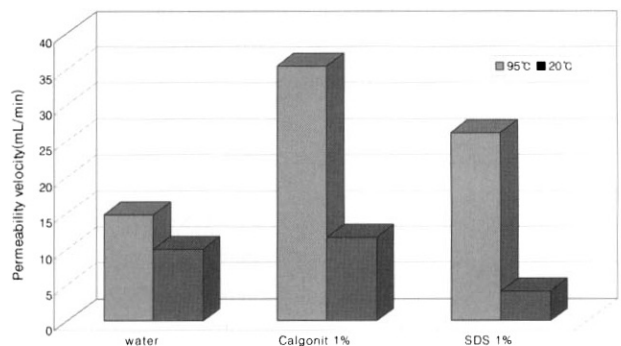


Fig. 5. Permeability velocity of flushing agent in different temperature.

column 내로 재주입하여 재순환하였을 때 column 내의 잔존율은 53.1%로 증가하였는데 이는 수용화 되어있던 유류분이 토양 내 재흡착에 기인한 것으로 판단된다. Calgonit의 경우 1회 세척만으로 98.9%의 높은 제거효율을 보이고 있으며 2회 세척시 99.4%가 제거되는 것으로 나타났다. 1회 세척만으로도 증류수 주입시 BTEX 제거효율에 비해 약 2.7배 증가하였다.

### 3.3. Soil microcosm test 결과

토양미생물에 의한 유류성분을 생물학적 제거를 위해 microcosm bottle을 이용하여 soil microcosm test를 2주간 실시하였고 결과를 Table 7에 정리하였다. Calgonit과 디젤유, 그리고 질산성질소와 미생물을 혼합하여 주입하였고 미생물은 하수처리장 포기조의 미생물을 이용하였으며 주입량은 200 mg/L 농도의 미생물을 용적대비 0.2%로 주입하였다. Table 7은 Live 1 ~ Active 4까지의 결과를 나타낸 것인데 99.26 ~ 100.45 mg/L의 초기 BTEX농도로 시작한 실험 결과 약 216시간 경과 후 Live 1 19.02 mg/L, Live 2 9.5 mg/L, Live 3 48.54 mg/L, Active 1 19.74 mg/L, Active 2 68.66 mg/L, Active 3 78.65 mg/L, Active 4 0.93 mg/L로 Active 3이 가장 많이 제거되었다. Live 1은 microcosm bottle에 soil+디젤+증류수만 주입, Live 2는 Live 1과 조건은 같고 고압증기 멸균시킨 후 배양하였으며, Live 3에는 Live 1에 질산성질소를 주입하여 전자수용체로 이용하였다. 미생물을 주입하지 않은 Live bottle에서 보면 전자수용체인 질산성질소를 주입시킨 경우가 48.54 mg/L로 BTEX를 48.3% 제거하였다. 미생물을 주입한 Active bottle에서는 미생물을 주입하지 않은 Live 경우보다 제거가 많이 됨을 알 수 있는데 Active 2는 Live 3와 동일한 조건에서 미생물을 주입한 것이다. Active 2는 68.66 mg/L의 BTEX를 제거하여 Live 3보다 1.4배 정도 많은 제거를 보였으며 Active 2와 동일한 조건에 세제를 주입한 Active 3은 78.65 mg/L의 BTEX 제거로 Active 2보다는 1.1배 이상 많은 BTEX를 제거하였는데, 이는 전자수용체인 질산성질소 영향이 주된 요인으로 나타났고 세제가 반응을 촉진시킴으로서 Active 2 bottle보다 제거량이 많은 것으로 판단된다. Active 4에서는 poison과 증류수를 79 mL 주입한 것

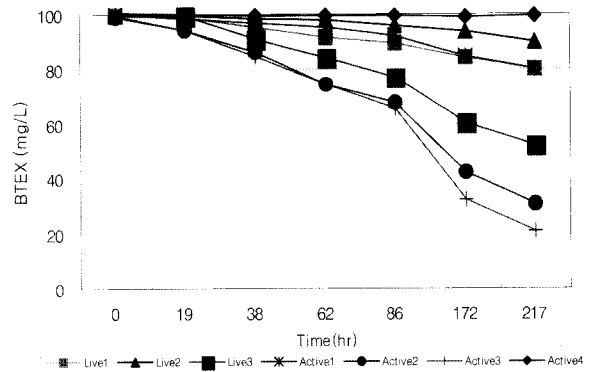


Fig. 6. BTEX degradation of each bottles during soil microcosm test.

으로, 100.33 mg/L의 BTEX 농도로 제작하여 실험한 결과 약 216시간 경과 후 0.93 mg/L가 제거되었다. Active 4는 BTEX가 거의 제거되지 않았다. 이는 poison의 주입결과에 의한 것으로 토양미생물과 질산성질소에 의해서 BTEX가 제거되는 것을 반증하는 것이기도 하다. Fig. 6은 microcosm 운전 경과시간에 따른 BTEX 잔류 농도를 그래프로 나타낸 것으로 가장 효율이 높은 Active 4에서 216시간 경과 후 약 80%의 BTEX가 제거되는 것을 보여주고 있다.

### 4. 결론

- 1) Batch test에서 1종의 비이온계와 2종의 음이온계세제의 적용 결과 거품 발생이 억제된 음이온계 세제인 calgonit이 토양 내 유류 세척에 가장 우수한 것으로 나타났으며 토양 용적대비 세척액 용적 400% 적용시 70%이상의 유류 오염물질을 세척 제거하는 것으로 나타났다.
- 2) Column test결과 calgonit의 경우 1회 세척만으로 98.9%의 높은 제거효율을 보이고 있으며 2회 세척 시 99.4%의 제거효율을 보였다.
- 3) 세척액의 온도에 따른 영향을 분석한 95°C일 때 물과 Calgonit 그리고 SDS가 각각 14.71 mL/min, 35.46 mL/min, 26.18 mL/min이었고 20°C일 때는 10 mL/min, 11.63 mL/min, 4.17 mL/min으로 95°C가 20°C보다 통과 유속이 빠르므로 고온으로 세정액을 주입 시 점성계수

Table 7. Results of soil microcosm test

(Unit : mg/L)

hr	Mode	L1	L2	L3	A1	A2	A3	A4
0		99.26	99.47	100.45	99.74	99.14	99.70	100.33
19.0		98.71	99.28	99.24	98.40	94.01	94.21	99.85
37.5		95.19	98.37	91.12	97.12	86.34	84.82	99.64
61.5		91.75	97.96	84.23	95.35	74.22	74.44	99.68
85.5		89.77	96.00	77.16	92.33	67.85	65.60	99.60
171.5		84.59	93.62	60.26	84.77	41.94	32.27	99.01
216.5		80.24	89.97	51.91	80.00	30.48	21.05	99.40
	Removed Concentration	19.02	9.5	48.54	19.74	68.66	78.65	0.93

(L : Live, A : Active)

가 작아져 낮은 온도로 주입하는 것보다 세척 효율이 증대되는 것으로 나타났다.

- 4) Microcosm test시 디젤유로 오염된 토양에서 세제와 미생물 및 질산성질소를 이용하여 BTEX농도를 처리한 결과 216시간 경과 후 평균 BTEX농도는 100 mg/L에서 20 mg/L로, 80%이상 제거율을 나타낸다. 이는 생물학적인 처리방법으로 오염물질의 확산이 없고 미생물의 지속적인 분해로 오염물질을 완전히 처리할 수 있으며, 재오염시 바로 복원이 가능할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초(R01-2004-000-10494-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사합니다.

## 참고문헌

- 김용식, 손영규, 김지형, 송지현, Toluene의 생물학적 분해능 향상을 위한 계면활성제의 선정, *지하수토양환경*, **10**(4), pp. 26-32 (2005).
- 염익태, 안규홍, 계면활성제를 이용한 In-situ 토양세척, *한국토양환경학회지*, **2**(2) pp. 9-24 (1997).
- 이민효, *토양·지하수오염*, 동화기술, pp. 89-90 (2003).
- 이민희, 정상용, 최상일, 강동환, 김민철, 계면활성제 원위치 토양세척법을 이용한 유류 오염지역의 토양, 지하수 정화 실증 시험, *지하수토양환경*, **7**(4), pp. 77-86 (2002).
- 이재원, 박규홍, 박준범, LNAPL로 오염된 토양의 정화를 위한 계면활성제 세척법 적용에 있어서 BTEX 및 계면활성제의 흡착특성 분석, *한국물환경학회지*, **15**(4), pp. 555-570 (1999a).
- 이재원, 박규홍, 박준범, 포화지층내 저비중 비수용성 유기용매의 유동제거를 위한 계면활성제법의 조작인자 도출, *대한환경공학회지*, **21**(11), pp. 2059-2070 (1999b).
- 이재원, 박규홍, 박준범, 포화지층내 저비중 비수용성 유기용매의 용해제거를 위한 계면활성제법의 최적 조작인자 도출, *한국지반공학회*, **15**(2), pp. 153-164 (1999c).
- 최상일, 소정현, 조장환, 계면활성제 원위치 토양세척 기법 적용을 위한 기초 특성 연구, *지하수토양환경*, **7**(4), pp. 87-91 (2002).
- 환경부, *토양오염공정시험방법*, 동화기술, pp. 658-661 (2002).
- 황정성, 최상일, 장민, 비소로 오염된 토양에 대한 토양세척 기법의 적용성 연구, *지하수토양환경*, **9**(1), pp. 104-111 (2004).
- Attwood, D. and Florence, A. T., *Surfactant System; Their Chemistry, Pharmacy and Biology*, chap. 5, *Chapman and Hill, Inc.*, New York, NY (1983).
- Groundwater Remediation Technologies Analysis Center (GWR-TAC), *Technology Evaluation Report; Surfactant/Co-solvent* (1996).
- Liu, Z., Laha, S. and Luthy, R. G., Surfactant Solubilization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Compounds in Soil-water Suspensions, *Wat. Sci. Tech.*, **23**, pp. 475-485 (1991).
- Rosen, M. J., *Surfactant and Interfacial Phenomena*, Chap., 3-4, 2nd ed., *John Willy & Sons, Inc.*, New York (1989).
- Saito, H. and Shnoda, K., The Solubilization of Hydrocarbons in Aqueous Solutions of Nonionic Surfactants, *J. Colloid Interface Sci.*, **24**, pp. 10-15 (1967).
- Saito, S., Solubilization Properties of Polymer-Surfactant Complexes, *J. Colloid Interface Sci.*, **24**, pp. 227-234 (1967).
- Tokiwa, F., Solubilization Behavior of Sodium Dodecylpolyoxyethylene Sulfates in Relation to Their Polyoxyethylene Chain Lengths, *J. Phys. Chem.*, **72**, pp. 1214-1217 (1968).
- Yeom, I. T. and Ghosh, M. M., Surfactants in Mobilizing Soil-bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Nonionic Surfactant, *Proceedings CSCE-ASCE national conference on environment engineering(NCEE)*, Montreal, Canada, pp. 1342-1352 (1993).