

유류오염토양 정화를 위한 토양세정기술의 적용성 기초연구

강희천 · 김정대* · 한병기 · 서승원** · 신철호*** · 박준석†

강원대학교 환경해양건설공학과, 한림성심대학교 보건환경과*

(주)동명엔터프라이즈**, (재)서해환경과학연구소****

(2015년 11월 17일 접수; 2015년 12월 14일 수정; 2015년 12월 17일 채택)

Fundamental Study for Feasibility on Soil Flushing for TPHs-Contaminated Soil Treatment

Hui-Cheon Kang · Joung-Dae Kim* · Byeong-Gi Han
Seung-Won Seo** · Chul-Ho Shin*** · Joon-Seok Park†

Dept. of Env. & Ocean Construction Eng., Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea

*Dept. of Health & Env., Hallym Polytechnic University, Chuncheon 24210, Korea

**Dept. of Env. Business, Dongmyung Ent. Co., Ltd., Seoul 06245, Korea

***Seohae Environment Science Institute, Jeonju 54817, Korea

(Received November 17, 2015; Revised December 14, 2015; Accepted December 17, 2015)

요약 : 본 연구는 실제 유류오염토양을 *in situ* 토양세정법으로 정화시 기술 적용성을 평가하기 위한 회분식 기초연구로 적정 계면활성제의 종류와 농도를 결정하고자 하였다. 증류수만의 진탕효과로 인한 TPH 제거는 약 30%이었으며, 계면활성제 희석시 사용되는 용액으로는 증류수를 사용한 경우에 비하여 지하수(해수 혼합)의 유입으로 인하여 약 2~6%의 효율저하가 나타났다. 토양과 계면활성제 용액비는 회분식 실험에서 TPH 제거효율에 미치는 영향이 미미하였다. 단독 또는 혼합 계면활성제 농도를 0.1~4.0 wt%까지 변화시켜 세정한 결과 종류별로는 Tween-80, SWA-1503, SWA-1503+SDS에서 평균 제거율이 80% 이상으로 대체적으로 높은 효율을 보였으며, 농도에 따른 차이는 크지 않아 0.1 wt% 농도를 최적 농도로 판단하였다.

주제어 : *In situ* 토양세정법, 회분식 실험, TPH, 계면활성제

Abstract : This research was performed to evaluate the feasibility of *in situ* soil flushing for TPH-contaminated soil remediation. It was conducted in batch test as fundamental research for *in situ* soil flushing. The 30% of initial TPH concentration was removed by shaking only in batch test. The removal efficiency of TPH in case of groundwater as surfactant dilution solution was approximate 2~6% lower than that of distilled water. Mixing ratio of soil to surfactant solution did not practically effect on the TPH removal efficiency. In the experiment of using single or

†Corresponding author
(E-mail: wan5155@kangwon.ac.kr)

mixed surfactant solution with 0.1~4.0 wt%, Tween-80, SWA-1503, SWA-1503+SDS showed averagely over 80%. It was determined that the optimum surfactant concentration was 0.1 wt% because there was no significant difference between concentrations of 0.1~4.0 wt%.

Keywords : *In situ soil flushing, Batch test, TPH, Surfactant*

1. 서론

토양세정법(Soil Flushing)은 토양에 흡착된 오염물질의 용해도를 증대시키기 위하여 첨가제(알코올, 착염물질, 산염기 용액 또는 계면활성제 등 오염물질 종류에 따라 다름)가 함유된 세정용액을 관정을 통하여 토양공극 내에 주입하여 토양에 흡착된 오염물질을 탈착시키고 수용액상이나 자유상으로 지상으로 추출하여 처리하는 물리/화학적 지중처리(*In situ*) 기술에 속한다. 주입관정을 통하여 유입된 세정용액은 지중(地中) 오염지역을 통과하면서 토양입자에 흡착된 오염물질의 용해도를 높여 토양입자로부터 탈착시키고 이를 추출정을 통하여 양수함으로써 오염지역의 토양을 정화한다. 양수된 물은 지상에서 배출허용기준까지 처리한 후 배출하거나 다시 지중으로 주입하는 등 재이용한다[1-6].

토양세정법은 생분해가 불가능한 중금속의 경우 활용도가 높으나 살충제, 휘발성 및 준휘발성 유기화합물질 처리시에는 높은 세정제 비용으로 인하여 타 공정에 비하여 다소 경제성이 낮은 단점이 있다. 또한 투수성이 낮은 토양의 경우 세정용액의 이동에 제약을 받기 때문에 처리효율이 떨어지며, 계면활성제와 같은 세정용액에 의해 2차오염이 발생될 가능성이 있을 뿐만 아니라 오염물질의 이동성을 증가시켜 비오염지역 특히 포화지역으로의 오염물질 확산을 초래하기도 한다. 그러나, 이러한 단점에도 불구하고 지상에 철거하기 곤란하거나 운영 중인 구조물이 존재하여 토양굴착이 어렵고 현실적으로 *ex situ* 정화 방법의 적용이 불가능할 경우에는 지중처리 기술을 고려해야 할 필요성이 있다[1-6].

토양 내 유기오염물질의 처리를 위한 토양세정법의 세정용액으로는 계면활성제나 용매 등이 사용될 수 있으며, 이는 토양입자에 결합되어 있는 유해성 유기오염물질의 표면장력을 약화시켜 토양으로부터 분리-용해시키는 역할을 한다. 특히 계면활성제는 계면의 자유에너지를 낮출 뿐만 아

니라 계면의 성질을 현격히 변화시키며 물에 대해 용해성이 적은 물질을 열역학적으로 안정한 상태로 용해시킬 수 있는 중요한 화학물질이다. 세정용액은 중력이나 외부력에 의해 이동되며 세정부산물 또한 추출정을 통해 포집된다. 세정 후 세정용액은 비용질감을 위하여 재이용하는 것이 바람직하다. 계면활성제를 함유한 용액을 처리하여 재이용할 때 슬러지와 잔존고형물이 발생하는 데 이는 처분하기 전에 적절한 처리를 해야 하며, 처리 후 잔존하는 계면활성제의 농도 및 특성은 적절한 평가를 거친 후 현장특성에 적용되어야 한다[3,7-8].

국내 토양의 토성은 대체적으로 미사토가 많아 오염토양 역시 이러한 토성을 갖는 경우가 대부분이며, 아직까지 *in situ* 토양세정을 이용한 현장정화기술의 적용사례와 기술축적은 매우 미미한 상황이다. 본 연구는 실제 유류오염토양을 *in situ* 토양세정법으로 정확히 기술 적용성을 평가하기 위한 기초연구로 실시되었다. 회분식으로 적정 계면활성제의 종류와 농도를 결정하는 단계로 토양세척(Soil Washing)의 개념과 다르지 않지만 추후 현장 토양세정을 위한 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

오염토양은 지하유류저장(Underground Storage Tank, UST)에서 누출된 유류로 장기간에 걸쳐 오염이 진행된 강원도 동해안의 A지역에서 채취하였다. 채취한 토양은 즉시 실험실로 운반한 후 균등성을 확보하기 위하여 균일하게 혼합하고 0~4°C 냉장실에 보관하였다.

토양세정법에서 가장 중요한 것은 적정 세정제(계면활성제)를 선정하고 최적화된 운전조건을 도출하는 것이다. 계면활성제는 현장적용시 구입이 용이하도록 하기 위하여 가능한 시중에서 주로

Table 1. Surfactant characteristics for this research

Commercial name	Tween-80 (POE20)	SWA-1503 ^{a)}	SDS
Chemical name	polyoxyethylene sorbitan monooleate	-	sodium dodecyl sulfate
Ionic character	non-ionic	non-ionic	anionic
Molecular formula	C ₆₄ H ₁₂₄ O ₂₆	C ₅₇ H ₁₀₂ O ₂₀	C ₁₂ H ₂₅ SO ₄ Na
Molecular weight (g)	1,310	1,106	288
Shape	liquid with high viscosity	liquid with high viscosity	solid
pH	6-8	-	5.0-6.5
HLB ^{a)}	15.0	14.9	-
CMC ^{b)} (mg/L)	13~15	50	1,455
Viscosity (cps) at 25°C	400-620	-	-
Interfacial tension	-	-	-
Surface tension (mN/m)	47 at 0.1% Tween80 57 at 0.7% Tween80 28.6 at CMC	-	-

a) reference [9]

b) Hydrophilic-Liphophilic Balance

c) Critical Micelle Concentration

사용되는 4가지 계면활성제를 선정하였으며, 계면활성제의 주요 특성을 Table 1에 나타내었다. 선정된 계면활성제는 Tween-80 (POE20), SWA-1503, SDS와 Bioversal이며, 이 중 Bioversal은 오염토양 정화를 위한 계면활성제를 생산하는 미국 회사의 브랜드명으로 일반적 특성은 제공받지 못하여 제시하지 못하였다. Tween-80(POE20)은 분자량이 1,310 g인 비이온계 계면활성제로 점도가 높은 액상이며, HLB(Hydrophilic-Liphophilic Balance)와 CMC(Critical micell concentration)는 각각 15.0과 13~15 mg/L를 나타내고 있다. SWA-1503는 분자량이 1,106 g인 비이온계 계면활성제로 점도가 높은 액상이며, HLB와 CMC는 각각 14.9와 50 mg/L이다. SDS는 음이온계 계면활성제로 분자량은 288 g으로 Tween-80 (POE20)이나 SWA-1503에 비하여 낮았으나 CMC는 1,455 mg/L로 높았다.

2.2 실험조건

본 연구를 위한 실험조건을 Table 2에 나타내었다. 먼저 계면활성제 희석용액이 영향을 미칠 수 있으므로 증류수와 지하수(해수 일부 혼합)를 사용하여 실험하였다. 증류수 이외에 지하수를 고

려한 이유는 실험대상 오염부지의 경우 해안가에 인접하고 있어 현장 적용시 해수가 혼합된 지하수 인입의 영향을 받을 수도 있다고 생각되었기 때문이다. 대조실험으로 증류수만을 사용하여 용출실험을 실시하였다. 계면활성제 종류에 따른 최적농도를 결정하기 위하여 단독 계면활성제와 혼합 계면활성제에 대하여 농도를 0.1~4.0 wt%까지 변화시켜 회분식 실험을 실시하였다. 혼합 계면활성제는 단독 계면활성제 농도의 50%에 해당하는 기여율로 두 가지를 절반씩 동일하게 섞어 조제하였다. 예를 들면, 1.0 wt% SWA-1503+SDS용액은 각각 SWA-1503와 SDS가 0.5 wt%의 농도가 되도록 혼합한 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오염토양 특성

오염토양의 입도 및 토성을 분석하기 위하여 오염토양을 풍건시킨 후 체거름을 실시하였고 미세입자의 분포특성을 좀 더 살펴보기 위하여 250 μ m 미만의 입자에 대하여 입도분석기(Analysette-22 NanoTec, Germany)를 이용한 기기분석도 실시하였다. 체거름 결과 전체 입자

Table 2. Experimental condition

Surfactant type / Experiment parameter	Tween-80	SDS	SWA-1503	Biovrersal	SWA-1503+SDS	SWA-1503+Bioversal	SDS+Bioversal
Effect of solution kind for surfactant dilution	Kind of solution for surfactant dilution = distilled water, groundwater mixed with sea water (distilled water only used as a blank)						
Effect of mixing ratio with soil to surfactant	soil : surfactant ratio = 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4, 1 : 5						
Effect of surfactant concentration	Surfactant conc.(wt%) = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0						

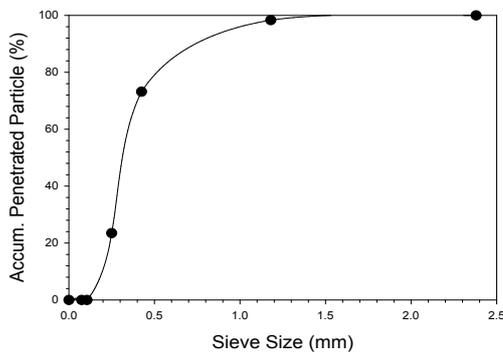


Fig. 1. Particulate distribution of contaminated soil used in this soil by sieving.

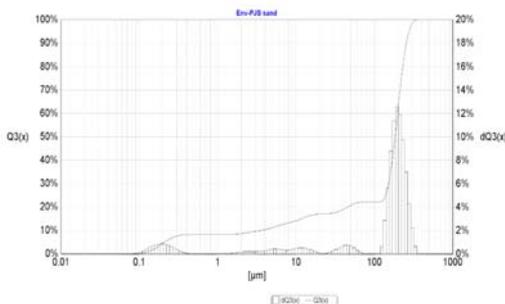


Fig. 2. Particulate distribution of contaminated soil used in this soil by particle size analyzer.

중 약 50%가 0.250~0.425 mm 사이에 해당되었으며, 0.250 mm 미만과 0.425~1.180 mm 사이의 입자가 각각 약 25%를 차지하였다. 1.180~2.380 mm 사이의 입자는 1.68%로 전체에서 차지하는 비율은 극히 미미한 것으로 나타났다(Fig. 1). 입도분석기 측정결과에서는 180 µm가 주요 입자크기로 나타났으며, clay 입자는 거의 없고 미량의 silt 입자가 존재하였다(Fig. 2). 따라서 체거름과 입도분석기 결과에 의하면 토성은 사토(sand)로 판단되었다.

오염토양의 초기 농도는 서로 다른 지점에서 3개의 시료를 채취한 후 전처리하고 GC-FID (GC-2010, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. 오염토양의 TPH 농도는 8,892.6~9,631.4 mg/kg의 범위이었으며, 평균농도는 9,368.5 ± 412.9(4.4%)로 나타났다. 초기 오염토양의 가스 크로마토그램을 Fig. 3에 나타내었다. 초기 TPH 농도를 고려할 때 본 오염토양은 정화 후 우려기준 3지역(TPH < 2,000 mg/kg)을 만족시키기 위해서는 79% 이상의 제거효율이 되어야 할 것으로 판단되었다.

3.2. 진탕효과 및 계면활성제 희석용액의 영향

회분실험에서 진탕효과의 영향을 살펴보기 위하여 토양 : 증류수 혼합비를 1 : 1, 3, 5로 변화시킨 후 폐기물용출시험 방법에 근거하여 수평진탕을 실시하였다. 이 때 좌우 진폭은 4~5cm로

하였으며, 무리한 진탕효과의 영향을 줄이기 위하여 진탕강도와 시간은 폐기물용출시험 방법보다 약한 30회/분과 2시간으로 하였다. 오염토양의 TPH 초기농도는 9,368 mg/kg이다. 증류수만으로 진탕하여 대조 실험을 하였을 때 토양에 대한 증류수 혼합비의 차이는 거의 없었으며, 초기 TPH 농도 대비 약 30%가 제거되었다(Table 3). 이는 회분식 실험의 경우 증류수 혼합량 보다 진탕에 의한 효과가 크게 작용한다는 것을 의미하는 것이다. 실제로 많은 연구자들이 이와 같은 세척 또는 세정 실험 연구를 진행할 때에 대조실험을 간과하여 계면활성제 세정효율이 과평가 되는 경우가 있다.

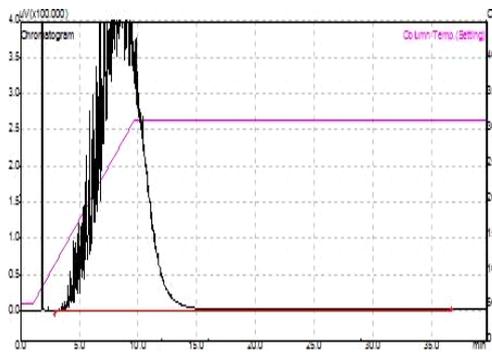


Fig. 3. Gas chromatograph of TPH for the contaminated soil in this study.

Table 3. Effect of shaking in batch test

Mixing ration with soil to surfactant solution	TPH removal efficiency (%)
1 : 1	30.38
1 : 3	30.23
1 : 5	29.60

실험대상 오염부지는 해안에 인접해 있어 해수가 일부 혼합된 지하수의 유입으로 TPH 제거효율에 영향을 미칠 수도 있을 것으로 생각된다. 따라서 토양세정기술의 현장 적용시 해수가 혼합된 지하수의 유입으로 인한 제거효율 저하 또는 증가가 나타날 수 있어 이에 대한 영향을 검토하였다. 계면활성제는 SWA-1503를 사용하여 농도를 0.1~4.0 wt%로 변화시켰으며, 회분식 진탕시 토양과 계면활성제의 혼합비는 1 : 3으로 하였다[10]. 실험결과 해수의 유입으로 인하여 약

2~6%의 효율저하가 나타날 수 있는 것으로 확인되었으며, 가장 저농도인 0.1 wt%에서는 해수가 혼합된 지하수를 사용한 경우가 증류수를 사용한 경우에 비하여 5.8%의 효율저하가 나타났다(Fig. 4). 이러한 결과는 염분(NaCl)의 첨가가 TPH 제거효율을 증가시킨다는 타 연구결과와 다소 상이한 결과였으며, 이는 실제 실험에 사용된 오염토양 부지에서 추출한 지하수의 NaCl 농도가 높지 않았기 때문으로 생각된다. 따라서, 추후 NaCl의 농도를 변화시키거나 100% 해수를 사용하여 검토할 필요가 있을 것으로 생각된다. NaCl 0.4M (바닷물의 NaCl 농도는 약 0.6 M)을 첨가하면 음이온 계면활성제 SDS의 CMC가 8 mM에서 1 mM 이하로 떨어진다고 보고된 바 있다[11].

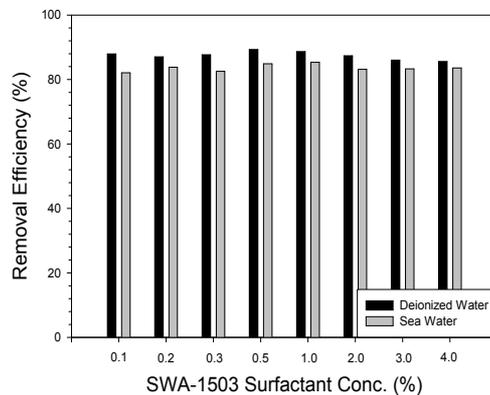


Fig. 4. Effect of solution kind for surfactant dilution on TPH removal efficiency in batch test.

3.3. 토양과 계면활성제 용액비의 영향

회분식 실험시 토양에 대한 계면활성제 용액비가 TPH 제거에 미치는 영향을 알아보기 위하여 토양과 계면활성제 용액비를 1 : 1~5로 변화시켜 2시간 진탕하였다. 오염토양의 TPH 초기농도는 9,368 mg/kg이다. 토양과 계면활성제 용액비가 회분식 실험에서 TPH 제거효율에 미치는 영향을 살펴보면 1 : 2~3에서 다른 비율에 비하여 다소 높은 제거효율을 나타내었으나 큰 차이는 없어 이는 크게 영향을 미치는 인자가 아닌 것으로 판단되었다(Fig. 5). 다른 연구보고서[10]에서는 1 : 0.5, 1 : 1, 1 : 2로 변화시켜 실시한 결과 1 : 1에서 가장 제거효율이 높았다.

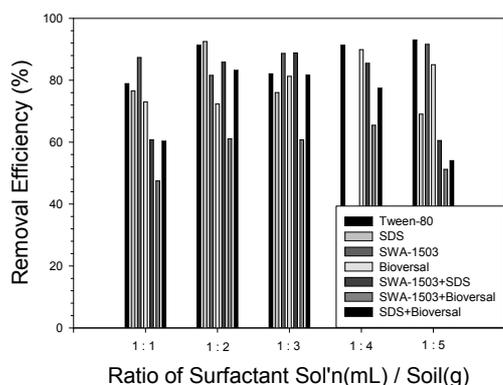


Fig. 5. Effect of mixing ratio with soil to surfactant on TPH removal efficiency in batch test.

3.4. 계면활성제 농도의 영향

토양세정기술을 적용하여 유류오염토양을 복원할 때 필요한 최적의 계면활성제 종류 및 농도를 선정하기 위하여 4가지 단독 계면활성제를 선정하여 단독 또는 혼합용액을 조제한 후 회분식으로 실험하였다. 오염토양의 TPH 초기농도는 9,368 mg/kg로 앞의 실험과 동일하였다. 계면활성제 농도를 0.1~4.0 wt%까지 변화시켜 세정한 결과 Tween-80, SWA-1503, SWA-1503+SDS에서 평균 제거율이 80% 이상으로 대체적으로 높은 효율을 보였으며, 농도에 따른 차이는 크지 않았다(Fig. 6과 7). 이는 앞에서도 언급되었듯이 회분식 실험에서 진탕에 의한 효과가 크게 작용했을 것으로 판단되며, Tween-80, SWA-1503, 그리고 SDS의 CMC(Critical Micelle Concentration, 임계미셀농도)가 각각 13~15 mg/L, 50 mg/L, 그리고 1,455 mg/L로 실험조건에 비하여 낮기 때문인 것으로 사료된다. 본 연구에서 계면활성제 농도가 0.1 wt%인 경우 일부 계면활성제를 제외하고 대부분 80% 이상(이때의 TPH = 1,874 mg/kg 미만임) 제거가 가능하였으며, 계면활성제 비용 등을 고려할 때 최적 계면활성제 농도는 0.1 wt%로 판단되었다. 농도 변화에 따른 계면활성제별 제거효율을 평균하였을 때 Tween-80이 89.8%로 가장 높았고, 다음으로는 SWA-1503+SDS(87.7%), SWA-1503(87.5%), SWA-1503+Bioversal(79.4%), SDS(79.2%), SDS+Bioversal(76.2%) 순이었다. 또한 특성이 다른 계면활성제를 혼합하였을 때 TPH

제거효율을 크게 증가시키지 못하였으므로 혼합 계면활성제 사용은 불필요하다고 판단되었다.

계면활성제가 세정효과를 보기 위해서는 CMC 이상의 농도를 사용하여야 하며, 일반적으로 농도가 증가할수록 표면장력이 낮아지는 것으로 알려져 있다. 3가지 계면활성제와 물을 이용하여 토양세정을 실시할 때 표면장력을 측정 한 연구 결과를 살펴보면 다음과 같다[10]. P-SSE라는 계면활성제를 사용하였을 때 표면장력은 0.5~1%에서 약 57 dyne/cm이었으나 2~100% 범위에서는 52 dyne/cm 정도로 저하하였다. 이는 물의 표면장력 72.75 dyne/cm (20°C기준)에 비하여 비교적 낮은 수준으로 표면장력을 저하시키는 것으로 실제 토양 표면에 흡착되어 있거나 공극 내에 존재하는 유류의 세정에 좋은 효과를 나타낼 것으로 보고하였다. 그러나 이러한 결과에서 본 연구자의 의견은 0.5% 이상의 농도를 사용하였을 때 표면장력이 크게 저하하지 않았기 때문에 농도를 증가시키는 것은 경제적 관점에서 볼 때 바람직하지 않을 것으로 생각되며, 그 보다는 저농도로 주입 횟수를 증가시키거나 조용매 등의 사용이 더 효율적일 수 있을 것으로 판단된다.

박 등[8]은 약 10,000 mg/kg의 디젤 오염토양에 대하여 0.5~4%의 계면활성제 농도로 회분식 토양세정을 실시한 결과 1 wt% 농도로 하였을 때 세정효율이 가장 높았으며, POE12를 단독으로 사용한 경우와 POE12+SDS를 혼합한 경우에 각각 76%와 84%가 세정되어 혼합에 의하여 약 8%의 제거효율이 증가하였다. 본 연구에서는 계면활성제 농도에 의한 차이가 크지 않아 0.1%가 최적 농도인 것으로 판단하였으며, 박 등[8]의 연구결과와 다소 차이가 나는 것은 대상토양의 토성 때문인 것으로 생각된다. 본 연구의 토양은 사토로 박 등[8]의 연구에 사용된 사질양토 보다 진탕에 의한 효과가 크게 나타났을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구는 실제 유류오염토양을 *in situ* 토양세정법으로 정확히 기술 적용성을 평가하기 위한 회분식 기초연구로 적정 계면활성제의 종류와 농도를 결정하고자 하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

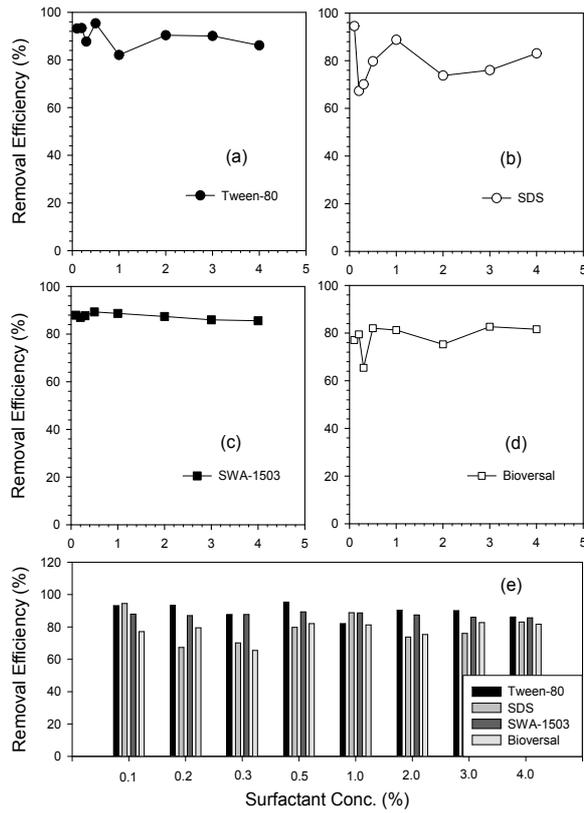


Fig. 6. Effect of a single surfactant-concentration on TPH removal efficiency in batch test.

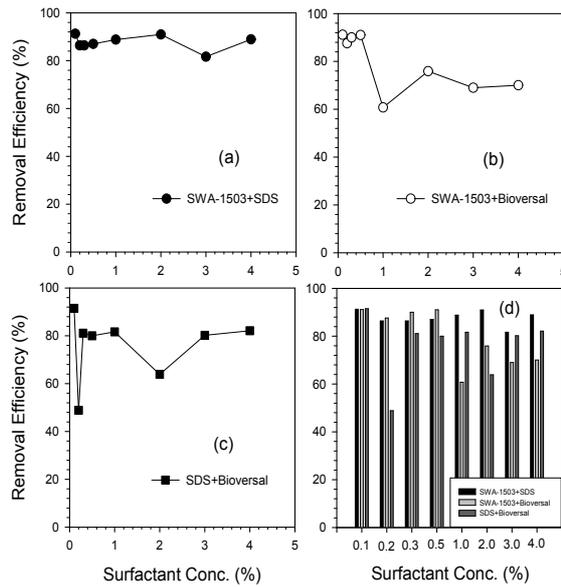


Fig. 7. Effect of a mixed surfactant-concentration on TPH removal efficiency in batch test.

1. 증류수만으로 진탕하여 대조 실험을 하였을 때 토양에 대한 증류수 혼합비의 차이는 거의 없었으며, 초기 TPH 농도 대비 약 30%가 제거되었다. 이는 회분식 실험의 경우 증류수 혼합량 보다 진탕에 의한 효과가 크게 작용한다는 것을 의미한다.
2. 가장 저농도였던 0.1 wt%에서는 해수가 혼합된 지하수를 사용한 경우가 증류수를 사용한 경우에 비하여 5.8%의 효율저하가 나타나 지하수(해수 혼합)의 유입으로 인하여 약 2~6%의 효율저하가 나타날 수 있는 것으로 확인되었다.
3. 토양과 계면활성제 용액비가 회분식 실험에서 TPH 제거효율에 미치는 영향을 살펴보면 1 : 2~3에서 다른 비율에 비하여 다소 높은 제거효율을 나타내었으나 큰 차이는 없어 큰 영향을 미치는 인자가 아닌 것으로 판단되었다.
4. 계면활성제 농도를 0.1~4.0 wt%까지 변화시켜 세정한 결과 Tween-80, SWA-1503, SWA-1503+SDS에서 평균 제거율이 80% 이상으로 대체적으로 높은 효율을 보였으며, 농도에 따른 차이는 크지 않아 0.1 wt% 농도를 최적 농도로 결정하였다. 특성이 다른 계면활성제를 혼합하였을 때 단독 계면활성제에 비하여 TPH 제거효율을 크게 증가시키지 못하였으므로 현장에서의 혼합 계면활성제 사용은 고려하지 않는 것이 좋을 것으로 판단되었다.
2. J. S. Park, Treatment of contaminated soil using soil flushing, *Geoenv. Eng.*, **6**(1), 27-32(2005).
3. K. H. Kim, A study on determination of cleansing agent for TPH contaminated soil, *Master thesis, Woosong Univ.* (2010).
4. S. I. Choi, J. H. So, C. H. Cho, A study on the basic characteristics of in-situ soil flushing using surfactant, *Kor. Soc. of Soil and Groundwater Env.*, **7**(4), 87-91(2002).
5. H. J. Moon, Y. K. Lim, Y. K. Kim, C. S. Joo, K. Y. Bang, W. J. Chung, S. W. Lee, A study on remediation of diesel-contaminated soil biosurfactant-enhanced soil washing, *Kor. Soc. of Soil and Groundwater Env.*, **7**(2), 13-22(2002).
6. H. Seo, M. Lee, S. Y. Chung, Study of surfactant enhanced remediation methods for organic pollutant(NAPL) distributed over the heterogeneous medium, *Kor. Soc. of Soil and Groundwater Env.*, **6**(4), 51-59(2001).
7. D. H. Kim, Flushing of petroleum-contaminated soil using mixed surfactants, *Master thesis, Kyungsung Univ.* (2010).
8. J. U. Park, J. S. Park, C. H. Shin, C. H. Won, S. H. Kim, Treatment of diesel-contaminated soil and flushed-solution using soil flushing process and coagulation, *J. Kor. Soc. of Waste Manage.*, **21**(6), 588-597(2004).
9. C. Lee, Y. Jang, Performance of soil flushing for contaminated soil using surfactant, *J. of Kor. Geoenv. Soc.*, **12**(6), 17-23(2011).
10. Ministry of Environment, Development of hybrid remediation system for soil & groundwater pollution (2004).
11. K. D. Nam, Fundamental physical property of surfactant, Suseowon (1997).

감사의 글

본 연구는 (주)동명엔터프라이즈와 2014년도 강원대학교 학술연구조성비(관리번호-220140041)로 연구하였으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Environment, Guideline for remediation technology of oil-contaminated soil (2007).