

## 유류오염토양 처리를 위한 컬럼식 토양세정기술 평가

강희천<sup>1</sup>, 한병기<sup>2</sup>, 김정대<sup>3</sup>, 서승원<sup>4</sup>, 신철호<sup>5</sup>, 박준석<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>(재)환경기술정책연구원

02841 서울 성북구 안암로 145

<sup>2</sup>강원대학교 지구환경시스템공학과

25913 강원도 삼척시 중앙로 346

<sup>3</sup>한림성심대학교 보건환경과

24210 강원도 춘천시 동면 장학길 48

<sup>4</sup>(주)동명엔터프라이즈

06245 서울 강남구 역삼동 839-11

<sup>5</sup>(재)서해환경과학연구소

54817 전북 전주시 덕진구 호성동 1가 175

(2017년 8월 27일 접수; 2017년 9월 4일 수정본 접수; 2017년 9월 5일 채택)

## Evaluation of Soil Flushing Column Test for Oil-contaminated Soil Treatment

Hui-Cheon Kang<sup>1</sup>, Byeong-Gi Han<sup>2</sup>, Joung-Dae Kim<sup>3</sup>  
Seung-Won Seo<sup>4</sup>, Chul-Ho Shin<sup>5</sup>, and Joon-Seok Park<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>National Environment Lab.

145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea

<sup>2</sup>Department of Earth & Environmental Engineering, Kangwon National University

346 Joongang-ro, Samcheok-si, Gangwon-do 25913, Korea

<sup>3</sup>Department of Health & Environment, Hallym Polytechnic University

48 Janghak-gil, Dong-myeon, Chuncheon, Gangwon-do 24210, Korea

<sup>4</sup>Department of Environmental Business, Dongmyung Ent. Co., Ltd.,

839-11 Yeoksam-dong, Gangnam-gu, Seoul 06245, Korea

<sup>5</sup>Seohae Environment Science Institute

175 1-ga, Hoseong-dong, Deokjin-gu, Jeonju, Jeonrabuk-do 54817, Korea

(Received for review August 27, 2017; Revision received September 4, 2017; Accepted September 5, 2017)

### 요 약

본 연구는 오염현장에서 채취한 유류오염토양을 *in situ* 토양세정법으로 정화시 기술 적용성을 평가하기 위한 컬럼식 실험이다. 실험에 사용한 오염토양의 토성은 사토(sand)이었으며, 초기 TPH 오염농도는 9,369 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 세정용액으로 0.1% Tween-80을 사용하였으며, 반응기로는 아크릴 원형컬럼과 유리 시린지컬럼을 사용하였다. 아크릴 원형컬럼 실험에서 0.1% Tween-80을 1 PV 주입하였을 때 토양 TPH의 35%가 제거되었고 이후 5 PV까지도 제거효율이 약 40% 정도로 큰 증가가 나타나지 않았으나 7 PV 주입하였을 때 약 60%가 제거되었다. 아크릴 원형컬럼 대신 유리 시린지컬럼을 사용하여 체류시간을 증가시키자 5 PV까지는 아크릴 원형컬럼을 사용한 경우보다 제거효율이 전반적으로 약 3 ~ 12% 높았으나 7 PV를 모두 주입하였을 때의 제거효율은 약 60%로 서로 차이가 없었다. 단독 alum과 alum+polymer 혼합응집제를 사용하여 폐세정액을 응집처리한 결과 최적 주입농도는 두 경우 모두 150 mg L<sup>-1</sup>인 것으로 나타났다. 응집처리한 Tween-80 폐세정액에 Tween-80을 0.1% 농도로 새로 용해하여 재사용 세정을 실시한 결과의 제거효율은 41.0%로 재사용하지 않은 0.1% Tween-80의 32.0%보다 약 9% 높게 나타났다.

**주제어** : 토양세정, 컬럼식 실험, TPH(total petroleum hydrocarbon), 계면활성제

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: wan5155@kangwon.ac.kr; Tel: +82-33-570-6578; Fax: +82-33-570-6579

doi: 10.7464/ksct.2017.23.3.302 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract :** This study was conducted to evaluate the feasibility of *in situ* soil flushing for TPH-contaminated soil remediation with column test. The soil texture of the soil was sand and the initial TPH concentration was 9,369 mg kg<sup>-1</sup>. 0.1% Tween-80 was selected as surfactant solution. And the acrylic and the glass syringe columns were used as reactors. In the acrylic column test, 35% of the initial TPH was removed in 1 PV of flushing and approximately 40% in 5 PV and finally 7 PV showed about 60%. The glass column test showed 3 ~ 12% higher removal efficiency than that of acrylic test until 5 PV of flushing. However, there was no difference in TPH removal efficiency when 7 PV of surfactant was finally flushed. Both of alum only and alum+polymer mixed surfactants showed also the best coagulation efficiency in 150 mg L<sup>-1</sup> of concentraion. When Tween 80 was newly dissolved in 0.1% to the recovered solution after the coagulation treatment, the removal efficiency was increased from 32.0% to 41.0% in comparison to the new 0.1% Tween 80 solution without reuse by coagulation treatment.

**Keywords :** Soil flushing, Column test, TPH (total petroleum hydrocarbon), Surfactant

## 1. 서론

토양세정(soil flushing)은 첨가제(알코올, 착염물질, 산·염기 용액 또는 계면활성제 등 오염물질 종류에 따라 다름)가 함유된 세정용액을 관정을 통하여 토양공극 내에 주입하여 오염물질 용해도를 증대시키고 토양에 흡착된 오염물질을 탈착시킨 후 수용액상이나 자유상 형태로 지상으로 추출하여 처리하는 물리/화학적 지중처리(*in situ*) 기술이다[1-5]. 토양세정 기술은 세정액을 사용한다는 점에서 짧은 시간 내에 토양복원이 가능하고 비교적 경제성이 우수한 장점이 있는 토양세척(soil washing) 기술과 처리 메카니즘이 유사하다[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[4,7,8]. 특히 계면활성제는 계면의 자유에너지를 낮출 뿐만 아니라 계면의 성질을 현격히 변화시키며 물에 대해 용해성이 적은 물질을 열역학적으로 안정한 상태로 용해시킬 수 있는 중요한 화학물질이다[4,7,8]. 세정용액은 중력이나 외부력에 의해 이동되며 세정부산물 또한 추출정을 통해 포집된다. 세정 후 세정용액은 비용절감을 위하여 재이용하는 것이 바람직하다[4, 7,8]. 계면활성제를 함유한 용액을 처리하여 재이용할 때 슬러지와 잔존고형물이 발생하는데 이는 처분하기 전에 적절한 처리를 해야 하며, 처리 후 잔존하는 계면활성제의 농도 및 특성은 적절한 평가를 거친 후 현장에 적용되어야 한다[4,7,8].

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 오염현장에서 채취한 유류오염토양을 *in situ* 토양세정법으로 정확히 기술 적용성을 평가하기 위하여 실시되었다. 회분식 선행 연구에서는 적정 계면활성제의 종류와 최적 주입농도를 결정한 바가 있으며[5], 이를 바탕으로 본 연구에서는 실제 오염토양에 적용하기 위한 컬럼식 연구를 실시하였다. 또한 토양세정 후 발생하는 폐세정액의 재사용 가능성도 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

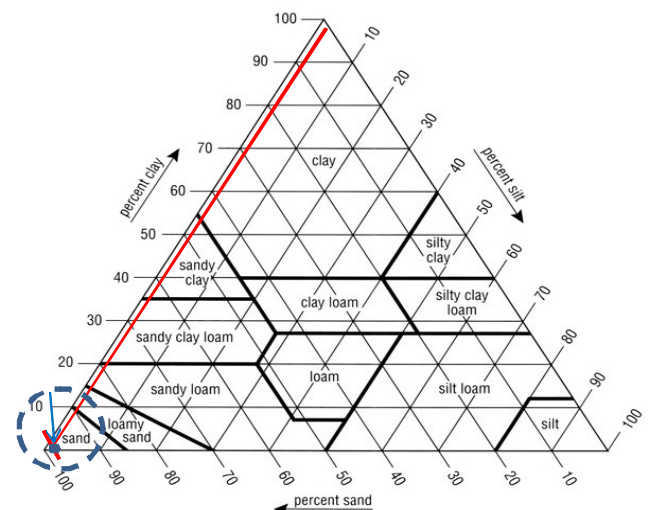
### 2.1. 실험재료

본 연구에 사용한 토양시료는 지하유류저장탱크(underground

storage tanks, USTs)에서 장기간 유류가 누출되어 산화가 진행된(aged) 강원도 동해안의 A지역에서 채취하였으며, 채취 후 즉시 실험실로 운반하여 균일하게 혼합하고 0~4 °C 냉장실에 보관하였다[5]. 채취한 오염토양은 풍건시키고 2 mm 체(sieve)로 거른 후 통과한 입자를 대상으로 Calgon test를 실시한 결과 모래(sand)와 미사(silt)가 각각 98.04%와 1.96%를 차지하였으며[5], 미국 농무성의 토양삼각법[9]에 따른 토성은 사토(sand)로 판명되어 토양세정 기술을 적용하기에 적합한 것으로 판단되었다(Table 1, Figure 1). 실험토양의 공극률은 48%이었으

**Table 1.** Materials and experimental condition for this study

Parameter	Unit	Condition	
Soil	Particle diameter	mm	• <2.00
	Soil texture	-	• Sand
	Porosity	-	• 0.48
	Initial TPH Conc.	mg kg <sup>-1</sup>	• 9,368.5 ± 412.9
Kind of flushing solution	-	• Tween-80 • Groundwater as a control	
Surfactant concentration	%	• 0.1	
Added volume of surfactant	PV (pore volume)	• 1~7	



**Figure 1.** Point of the soil texture classification.

**Table 2.** Characteristics of surfactant used in this study

Commercial name	Tween-80 (POE20) <sup>a)</sup>
Chemical name	polyoxyethylene sorbitan monooleate
Ionic character	non-ionic
Molecular formula	C <sub>64</sub> H <sub>124</sub> O <sub>26</sub>
Molecular weight (g)	1,310
Shape	liquid with high viscosity
pH	6-8
HLB <sup>a)</sup>	15.0
CMC <sup>b)</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	13~15
Viscosity (cps) at 25 °C	400-620
Interfacial tension	-
Surface tension (mN m <sup>-1</sup> )	47 at 0.1% Tween80 57 at 0.7% Tween80 28.6 at CMC

a) reference [Kang et al, 2015]

b) Hydrophilic-Liphophilic Balance

c) Critical micelle concentration

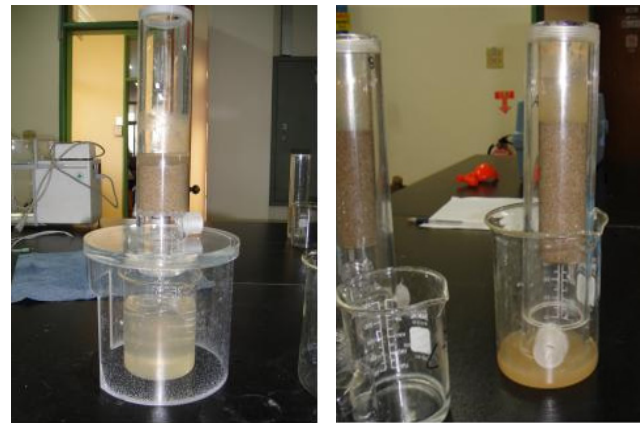
며, 용적밀도는 1.4 g cm<sup>-3</sup>으로 측정되었다. GC-FID(GC-2010, Shimadzu, Japan)를 이용하여 3반복(triplicate) 분석한 결과 초기 평균 TPH 오염농도는 9,368.5 ± 412.9 mg kg<sup>-1</sup>이었다(Table 1) [5]. 이후 토양세정 실험에서의 TPH 분석기기 및 조건은 초기 토양시료 분석과 모두 동일하게 하였다.

세정을 위한 계면활성제로는 HLB (hydrophilic-liphophilic balance)가 15.0, CMC (critical micelle concentration)이 13 ~ 15 mg L<sup>-1</sup>인 Tween-80 (POE20)을 선정하였으며, 기본적인 특성을 Table 2에 나타내었다[5].

## 2.2. 실험조건 및 방법

회분식 선행 연구[5]에서는 계면활성제의 종류와 최적 주입 농도를 결정하였다. 그러나, 실제 오염현장을 토양세정 처리할 때에는 회분식 실험에서와 같은 진탕효과를 기대할 수 없으므로 현장 특성을 최대한 모사하기 위하여 컬럼식으로 실험하였다. 컬럼은 내경 5 cm, 높이 25 cm의 아크릴 원통컬럼과 내경 4 cm, 높이 25 cm의 유리 시린지컬럼을 사용하였으며, 아크릴 원통컬럼에는 토양이 하부로 흘러내리지 않도록 다공판을 설치하였다(Figure 2). 컬럼식 실험시 토양의 충전밀도는 1.4 g cm<sup>-3</sup>으로 맞추어 실시하였다.

계면활성제 농도는 선행 연구[5]에서 우수한 효율을 나타내었던 0.1%로 결정하였으며, 현장에서 채취한 지하수를 사용하여 계면활성제를 희석하고 농도를 조절하였다. 계면활성제 세정효율을 비교하기 위한 대조시험으로 현장 지하수만을 사용한 실험도 실시하였다. 계면활성제는 중력배수식으로 1~7 PV (pore volume)까지 컬럼에 주입하였으며, 주입시 각 PV에 해당하는 용액이 다 배수된 후 바로 이어서 다음 PV 용액을 주입하였다. 컬럼식 실험을 위하여 각 PV에 맞추어 컬럼 개수를 준비하여 진행하였다. 예를 들어, 계면활성제 1 PV를



(a) acrylic column test

(b) glass syringe column test

**Figure 2.** Photograph of the soil flushing column test.

주입한 시료는 토양을 전량 꺼내고 TPH 분석에 사용하였으며, 2 PV 분석시 새로운 칼럼에 대하여 연속적으로 총 2 PV를 주입하는 방법을 이용하였다.

계면활성제를 이용하여 토양을 세정한 후 발생하는 폐세정액(세정하기 전의 깨끗한 세정용액과 구분하기 위하여 편의상 본 논문에서는 폐세정용액이라 칭함)의 재사용 가능성을 평가하기 위하여 0.1% Tween-80 폐세정액에 대하여 단독 alum과 alum+polymer (alum 농도의 1/1,000로 맞춤)의 2가지 응집제를 사용하여 Jar test를 실시하였고, 응집처리 후 다시 세정용액으로 사용하는 실험을 실시하였다. 재사용 실험시 조건은 현장 지하수만 사용한 경우(Case A), 7 PV 폐세정액을 150 mg L<sup>-1</sup> alum과 0.15 mg L<sup>-1</sup> polymer 혼합응집제로 처리 후 계면활성제를 더 투입하지 않고 세정한 경우(Case B), Case B에 새로이 Tween-80을 0.1% 농도로 추가 용해한 경우(Case C)이며, 이들 용액의 세정효율을 세정에 사용하지 않은 깨끗한 0.1% Tween-80을 사용한 경우(Case D)와 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 컬럼식 세정효율

회분식 선행 연구[5]에서 제거특성이 우수하였던 0.1% Tween-80과 현장 지하수만을 사용하여 컬럼식 세정실험을 실시한 결과를 Figure 3에 나타내었다. 아크릴 원통컬럼에 0.1% Tween-80을 1 PV 주입하였을 때 35%가 제거되었고 이후 5 PV까지도 제거효율이 약 40% 정도로 큰 증가가 나타나지 않았으나 7 PV 주입하였을 때는 약 60%가 제거되었다. 현장 지하수만을 1 PV 주입하였을 때 4.7%가 제거되었고 4 PV부터 약 20%가 제거되었으나 이후 7 PV까지 증가하였음에도 불구하고 더 이상의 제거효율 증가는 없었다. 현장 지하수(대조실험)에 대한 제거효율을 차감하면, 1~7 PV까지 0.1% Tween-80 계면활성제 주입에 의한 TPH 제거효율 효과는 약 40% 정도인 것으로 평가되었다. 참고로 선행 회분식 실험에서는 증류수를 이용한 진탕만으로도 약 30%가 제거되었다[5]. 현장 지하수만으로 진탕하거나 단순 세정으로도 어느 정도의 제거효율이 얻어진 것

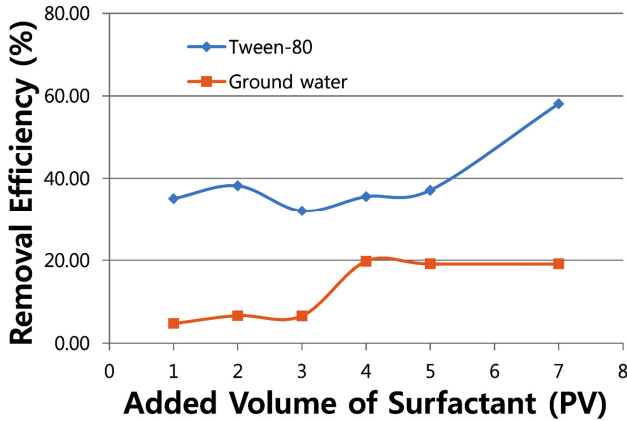


Figure 3. Removal efficiency of TPH with surfactant addition using acrylic column.

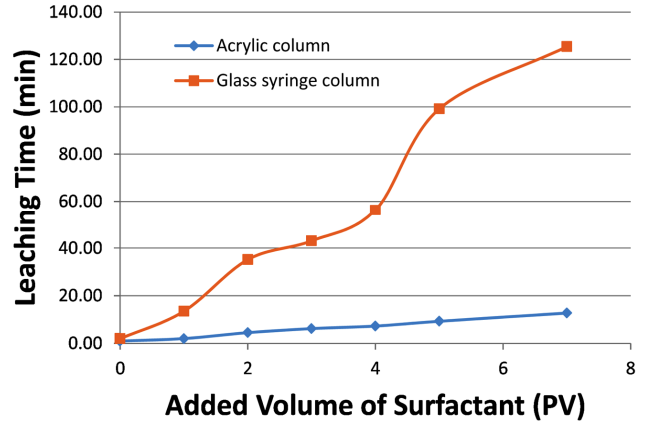


Figure 4. Leaching time of 0.1% Tween-80 surfactant addition from column.

은 본 실험토양이 모래(sand)와 미사(silt)가 98.04%에 이르는 사토(sand)이기에 가능하였던 것으로 보인다. 토양세정시스템 예측모형의 매개변수 분석에서 토양입경이 클수록 처리효율이 매우 좋으며 다른 변수들보다 오염복원 효과에 미치는 영향이 매우 크다[10]. Son et al. [11]은 공극률이 47%인 BTEX 오염토양에 대한 컬럼실험을 실시한 결과 증류수만으로 1회 세정하였을 때에도 64%가 제거되었다고 보고하였다. 이는 토양 공극률이 크고 BTEX 성분은 물과의 접촉에 의해서도 약 20% 정도가 물에 녹기 때문이다. Cho and Kim [12]은 공극이 0.16, 0.20, 0.29인 토양을 Tween-80으로 토양세정 처리하였는데 모두 40 PV이 넘어서야 비로소 유류가 용해되기 시작하였다. 본 연구에 사용된 토양은 공극률이 48%로 토양세정에 적합하였기 때문에 1 PV부터 TPH 감소가 가능하였던 것으로 판단된다. 실제 현장에서는 1 PV 세정액을 모두 통과시키고 지상으로 다시 양수하는 것만도 많은 시간이 소요되고 이는 복원기간을 늦추고 비용을 증가시키는 원인이 된다. 따라서 토양세정기술을 적용할 때에는 토양입경(공극률)이 적합한지 [10]를 가장 우선적으로 고려해야 할 것으로 생각된다.

아크릴 원통컬럼을 사용하여 하향류식으로 중력배수한 경우 계면활성제 용액이 빠른 시간에 용출되어 충분한 접촉시간을 유도하지 못할 수 있다. 따라서 유리 시린지컬럼에 아크릴 원통컬럼과 동일 용적밀도(1.4 g cm<sup>-3</sup>)로 오염토양을 100 mL 충전한 후 세정실험을 실시하였다. 첫 유출액이 빠져나오는데 아크릴 원통컬럼에서는 0.95분, 유리 시린지컬럼에서는 1.92분이 각각 소요되었다(Figure 4). 유리 시린지컬럼을 사용한 경우 하부 유출구가 매우 좁아 1 PV이 빠져나가는데 약 14분이 소요되는데 반하여 아크릴 원통컬럼에서는 2분만에 모두 용출되었다. 7 PV이 모두 용출되는데 소요되는 시간은 유리 시린지 컬럼(125.4분)이 아크릴 원통컬럼(12.72분) 보다 약 10배 정도 길었다.

유리시린지 컬럼 사용으로 체류시간을 증가시키자(Figure 4) 5 PV까지는 아크릴 원통컬럼을 사용한 경우보다 제거효율이 전반적으로 약 3~12% 높았다(Figure 5). 그러나 7 PV을 모두 주입하였을 때의 제거효율은 약 60%로 동일하였다. 따

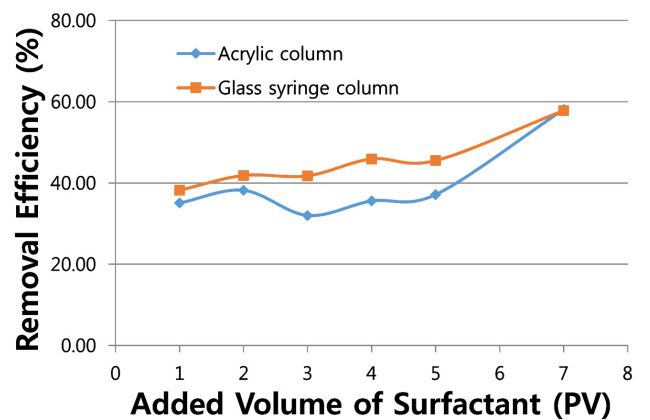


Figure 5. Removal efficiency of TPH in acrylic and glass syringe columns with 0.1% Tween-80.

라서 토양세정의 경우 초기 PV 투입단계에서는 체류시간을 최대한 증가시켜야 하며, 일정 주입량 이후에는 체류시간의 영향이 크게 감소하는 경향을 보이므로 체류시간을 굳이 높이지 않는 것이 공정효율과 처리시간을 최적으로 유지시키는 방법이 될 것으로 판단되었다. Yoo et al. [13]은 중금속오염 토양에 대한 세정실험 동안 토양세정제를 통해 추출되는 중금속의 총량도 중요하지만 얼마나 빠른 시간 내에 중금속을 효과적으로 추출할 수 있는지에 따라 토양세정공정의 기간 및 소요되는 비용과 같은 전체적인 토양세정공정의 효율 및 적용가능성이 결정된다고 하였다.

### 3.2. 폐세정액 응집처리

계면활성제를 이용하여 토양을 세정한 후 발생하는 폐세정액에는 계면활성제 뿐만 아니라 미세토양입자와 TPH의 구성 성분인 지방족 및 방향족 유기화합물 등이 포함되어 있다[4]. 이 폐세정액은 서로 간의 복잡한 상호작용에 의해 엉켜서 일부 무거운 것은 가라앉고 대부분은 현탁 상태로 존재한다[4]. 토양세정 기술에서 계면활성제 비용이 차지하는 비중은 무시하기 어려우며, 발생하는 폐세정액을 바로 폐수처리시설로

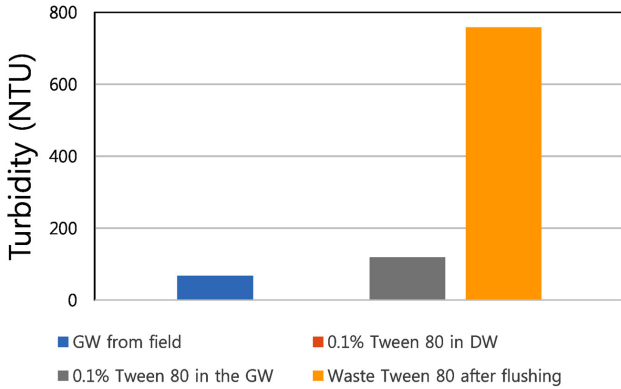


Figure 6. Comparison of solution turbidity in some cases.

보낼 경우 처리비용 또한 간과하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 가능하면 폐세정액을 재사용하기 위하여 응집처리 후 세정용액으로의 재사용 가능성을 평가하였다.

먼저 계면활성제 세정(flushing)이 탁도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 현장 지하수, 증류수에 용해한 0.1% Tween 80 세정액, 현장 지하수에 용해한 0.1% Tween 80 세정액, 그리고 7 PV 세정 후 폐세정액의 탁도를 측정하였다(Figure 6). 증류수에 용해한 0.1% Tween 80 세정액의 탁도는 1.2 NTU를 나타내어 계면활성제에 의한 탁도 유발은 미미한 것으로 판단되었다. 그러나 현장 지하수에 용해한 0.1% Tween 80 세정액의 탁도는 119.0 NTU로 높았는데 이는 현장 지하수가 67.9 NTU의 탁도를 갖고 있기 때문이다. 0.1% Tween 80으로 7 PV 세정 후 폐세정액의 탁도는 758.0 NTU로 급격히 증가하였다.

폐수를 응집하여 처리할 때 가장 적합한 응집제의 종류, 첨가량, 첨가 조건 등을 판단하기 위해 Jar test를 실시하는데 이 실험에 미치는 영향은 주로 pH와 응집제의 농도이다[4]. 그러나 실제 오염도양 복원 현장에서는 pH를 조절하는 것이 번거롭고 쉽지 않기 때문에 본 실험에서는 작업 특성을 고려하여 pH 조절을 하지 않았다. 초기 758.0 NTU이었던 폐세정액의 탁

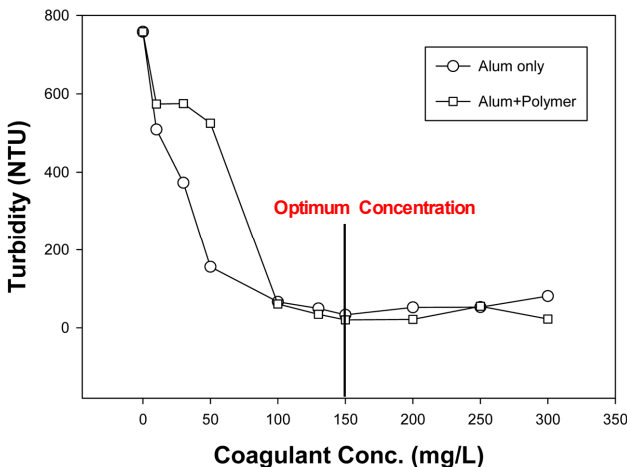


Figure 7. Turbidity variation of waste flushing solution by coagulant addition.

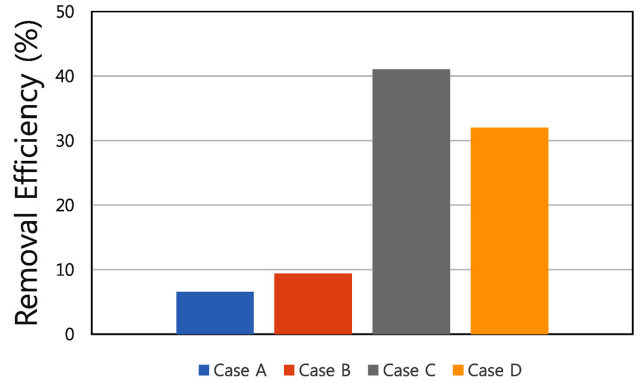


Figure 8. Comparison of removal efficiency for reuse feasibility of waste flushing solution.

도는 alum 농도가 증가하면서 급격히 감소하였다가 150 mg L<sup>-1</sup>의 농도에서 가장 낮은 33.0 NTU를 나타내었고, 농도가 더 높아지자 탁도가 소폭 증가하였다(Figure 7). Alum에 polymer를 혼합하여 주입한 경우에도 150 mg L<sup>-1</sup>에서 가장 낮은 20.2 NTU를 보였으며, 이후 alum만을 사용한 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 응집제로 alum만을 사용한 경우보다 alum에 polymer를 1/1,000 정도 혼합한 경우가 탁도 제거효율이 다소 높았지만 큰 효과가 있다고 보기는 어려웠기 때문에 비용이나 공정 편의성을 고려할 때 alum만을 사용하는 것이 alum+polymer 혼합응집제를 사용하는 것보다 좋을 것으로 판단되었다. 응집제 최적 주입농도는 두 경우 모두 150 mg L<sup>-1</sup>인 것으로 나타났다.

폐세정액의 재사용 가능성을 알아보기 위하여 응집처리 후 다시 세정용액으로 사용하는 실험을 실시하였다. Case A는 현장 지하수, Case B는 7 PV 폐세정액을 150 mg L<sup>-1</sup> alum과 0.15 mg L<sup>-1</sup> polymer 혼합응집제로 처리 후 계면활성제를 더 투입하지 않은 경우, Case C는 Case B에 새로이 Tween-80을 0.1% 농도로 추가 용해한 경우이며, 이들 용액의 세정효율을 세정에 사용하지 않은 깨끗한 0.1% Tween-80을 사용한 경우(Case D)와 비교하였다. 세정효율은 이들 용액을 사용하여 컬럼식으로 3 PV 세정하였을 때를 기준으로 비교하였다. 응집처리만 한 Case B의 제거효율(9.4%)은 증류수만 사용한 경우(Case A)의 6.6%보다 약 3% 정도 높았다(Figure 8). 이는 Figure 7의 NTU 변화에서도 볼 수 있듯이 폐세정액 응집처리시 다량의 계면활성제 성분도 동시에 응집침강 되었기 때문으로 판단된다. 7 PV 폐세정액을 응집처리한 후 Tween-80을 0.1%로 새로 용해하여 재사용 세정을 실시한 Case C의 제거효율은 41.0%를 나타내었으며, 이는 깨끗한 0.1% Tween-80의 32.0% 보다 약 9% 제거효율을 증가시켰다. 차후 실험에서는 폐세정액의 응집처리 후 계면활성제를 반복 주입하여 사용할 경우 제거효율이 얼마만큼 증가할 수 있으며, 재사용가능 횟수는 어느 정도인지 면밀히 평가할 필요가 있을 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구는 실제 오염현장에서 채취한 유류오염도양을 *in situ*

토양세정법으로 정화시 기술 적용성을 평가하기 위하여 컬럼식 실험으로 실시되었으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 아크릴 원형컬럼 실험에서 0.1% Tween-80을 1 PV 주입 시 토양 중 TPH가 35%가 제거되었고 이후 5 PV까지도 제거 효율이 약 40% 정도로 큰 증가가 나타나지 않았으나 7 PV를 주입하였을 때는 약 60%가 제거되었다. 그러나, 현장 지하수(대조실험)에 대한 제거효율을 차감하면 7 PV 주입 시 약 40% 정도인 것으로 평가되었다.

2) 아크릴 원형컬럼 대신 유리 시린지컬럼을 사용한 실험에서 체류시간을 증가시키자 5 PV까지는 아크릴 원형컬럼을 사용한 경우보다 제거효율이 전반적으로 약 3~12% 높았으나 7 PV를 모두 주입하였을 때의 제거효율은 약 60%로 서로 차이가 없었다. 따라서 현장에서 공정효율과 처리시간을 고려할 때 초기 PV 투입단계에서는 체류시간을 최대한 증가시키고 일정량 주입 이후에는 높은 체류시간을 적용하지 않는 것이 필요한 것으로 판단된다.

3) 폐세정액에 단독 alum과 alum+polymer 혼합응집제를 사용한 결과 최적 주입농도는 두 경우 모두 150 mg L<sup>-1</sup>로 나타났다.

4) 응집처리한 Tween-80 폐세정액에 Tween-80을 0.1% 농도로 새로 용해하여 재사용 세정을 실시한 경우의 제거효율은 41.0%로 재사용하지 않은 0.1% Tween-80의 32.0% 보다 약 9%p 높게 나타났다.

## 감사

본 연구는 (주)동명엔터프라이즈와 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호-201510019)로 연구하였으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Ministry of Environment (Korea), "Guideline for Remediation Technology of Oil-Contaminated Soil," Research Report, 2007.
2. Park, J.-S., "Treatment of Contaminated Soil Using Soil Flushing," *Geoenv. Eng.*, **6**(1), 27-32 (2005).
3. Choi, S.-I., So, J.-H., and Cho, C.-H., "A Study on the Basic Characteristics of In-Situ Soil Flushing Using Surfactant," *Korean Soc. Soil and Groundwater Environ.*, **7**(4), 87-91 (2002).
4. Park, J.-U., Park, J.-S., Shin, C.-H., Won, C.-H., and Kim, S.-H., "Treatment of Diesel-contaminated Soil and Flushed-Solution Using Soil Flushing Process and Coagulation," *Korean Soc. Waste Manage.*, **21**(6), 588-597 (2004).
5. Kang, H.-C., Kim, J.-D., Han, B.-G., Seo, S.-W., Shin, C.-H., and Park, J.-S., "Fundamental Study for Feasibility on Soil Flushing for TPHs-contaminated Soil Treatment," *J. Korean Oil Chem.'s Soc.*, **32**(4), 740-747 (2015).
6. Ahn, S.-K., Kim, C., Lee, J.-M., Lee, G.-C., Shon, Z.-H., Jung, B.-G., and Yoon, T.-K., "Removal Characteristics of Lead-contaminated Soil at Military Shooting Range by Using Soil Washing Process," *Clean Technol.*, **18**(4), 390-397 (2012).
7. Kim, K.-H., "A Study on Determination of Cleansing Agent for TPH Contaminated Soil," Master Thesis, Woosong University, Daejeon, 2010.
8. Kim, D.-H., "Flushing of Petroleum-contaminated Soil Using Mixed Surfactants," Master Thesis, Kyungsoong University, Busan, 2010.
9. Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P. Y., and Schroeder, E. D., *Bioremediation Principles*, McGraw-Hill Co., Malaysia, 1998, pp. 26-27.
10. Park, J.-J., "The Characteristics of Soil Remediation by Soil Flushing System Using PVDs," *J. Korean Environ. Res. & Reveg. Technol.*, **10**(5), 76-86 (2007).
11. Son, B.-H., Lim, B.-S., Oa, S.-W., and Lee, B.-H., "Selection of Surfactant and Operation Scheme for Improved Efficiency of In-situ Soil Flushing Process," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **22**(5), 824-830 (2006).
12. Cho, D., and Kim, H.-S., "Kinetics of *in situ* Surfactant Soil Flushing at Moderate Washing Conditions," *Korean J. Chem. Eng.*, **19**(5), 783-790 (2002).
13. Yoo, J.-C., Kwak, S.-J., Lee, J.-S., Jeon, P.-Y., Park, E.-R., and Baek, K.-T., "Remediation of Metal-Contaminated Soil Combined with In-Situ Soil Mixing and Soil Flushing Process," *J. Korean Soc. Environ. Technol.*, **17**(1), 1-10 (2016).