

계면활성제 거품(Foam)을 이용한 토양칼럼 내 유류 및 중금속 동시 제거 연구

허정현 · 정승우*

군산대학교 환경공학과

Simultaneous Removal of Heavy Metals and Diesel-fuel from a Soil Column by Surfactant Foam Flushing

Jung-Hyun Heo · Seung-Woo Jeong*

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

Simultaneous removal of heavy metals (Cd, Pb) and diesel-fuel from a soil column was evaluated by respectively flushing with sodium dodecyl sulfate (SDS) solution, mixture of SDS and sodium iodide (SDS + NaI), and surfactant foam (SDS + NaI foam). First, this study evaluated these flushing methods to the heavy metals only-contaminated soil for removal of heavy metals from the heavy-metal only contaminated soil column. After 7 pore volume flushing of the soil column, Cd removal efficiencies from the soil were 40% by SDS solution, 50% by SDS + NaI mixture, and 60% by surfactant foam. The flushing results implied that anionic surfactant and ligand can be efficiently applied to extraction of Cd from the heavy metal contaminated soil. Furthermore, surfactant foam flushing showed an increased flushing efficiency with enhancing the contact between surfactant solution and soil. However, Pb removal efficiency by these flushing methods did not show any difference unlike those of Cd. Second, this study eventually evaluated flushing methods for simultaneous removal of heavy metals and diesel-fuel from the soil column with 7 pore volume flushing. Diesel-fuel removal efficiencies were 50% by SDS + NaI flushing and 90% by SDS + NaI foam flushing. Cd removal efficiency by the foam flushing reached to 80% which was higher than the result of the previous heavy metals only-contaminated soil experiment. This result implied that diesel-fuel could act as a metal-solvent while it contacted to heavy metals present in the soil. This study clearly showed that surfactant foam flushing simultaneously removed heavy metals and diesel fuel from the soil column.

Keywords : Soil flushing, Surfactant, Heavy metal, Fuel, Foam

1. 서 론

토양은 그동안 부지 내 사용이력을 가장 잘 보존하고 있는 매체이다. 따라서 중금속 및 유류 오염물질들이 부주의하게 관리되어온 산업지역일 경우, 부지 내 토양오염의 가능성이 매우 높다. 오염 토양 부지 내 오염물질에 대한 정화작업이 이루어지지 않고 공동주택단지건설, 지하공간이용과 같은 토지의 재활용이 이루어진다면 인체 및 생태계에 미치는 악영향은 매우 크게 나타날 것이다. 그러므로 발생된 토양오염 부지에 대한 정화는 토지 재활

용에 앞서 선결되어야 할 필수 사항이다.

산업지역 토양오염의 특성은 중금속 및 유류 등의 복합적인 오염물질로 오염되어 있는 특징을 가지고 있다. 미국 토양오염정화지역인 슈퍼펀드(Superfund) 사이트의 49%가 중금속과 유기오염물질이 동시에 존재하는 복합오염지역인 것으로 알려져 있다(USEPA, 1997). 근래 부산 문현지구 토양오염지역에서도 유류 및 중금속으로 오염된 토양과 지하수가 발견되어 대규모 복원작업이 진행되었다(부산시, 2003).

대부분의 토양오염 복원 기술은 중금속과 유기오염물질

*Corresponding author : swjeong@kunsan.ac.kr

원고접수일 : 2011. 10. 24 심사일 : 2011. 10. 28 게재승인일 : 2011. 10. 28

질의 및 토의 : 2011. 12. 31 까지

각각에 대해 적용되고 있다. 복합 오염토양일 경우 동일한 토양에 대해 각 오염물질별로 정화작업이 이루어져야 하므로 시간 소요가 많고 고비용이 소요되는 문제점을 안고 있다. 또한 복합오염 토양부지가 갖고 있는 위해도는 각 오염물질로 오염된 부지가 갖고 있는 위해도에 비해 위해성이 크게 나타나 오염물질의 노출을 최소화하고, 단기간에 위해도를 떨어뜨릴 수 있는 복합 오염토양 처리 기술 개발과 적용에 대한 요구가 증대되고 있다(USEPA, 2001). 그러나 토양으로부터 복합오염물질 제거에 대한 요구가 증대되고 있지만 중금속과 유기오염물질들을 동시에 제거할 수 있는 복원기술에 대한 연구는 극히 부족한 실정이다. 본 연구는 음이온성 계면활성제 및 리간드를 이용하여 토양중금속을 추출하고 동시에 유류오염물질도 토양으로부터 제거할 수 있는 복합오염물질 제거공정을 연구하고자 하였다.

계면활성제는 비수용상액체(Nonaqueous phase liquids : NAPLs)로 오염된 지역의 토양세정(soil flushing) 및 토양 세척(soil washing) 공정에 널리 사용되고 있는 세정·세척제이다(이민희외, 2002; Chu and Chan, 2003). 최근 계면활성제를 토양의 중금속 제거에도 적용하고자 하는 노력이 시도되고 있으며(Mulligan et al., 2001; 김수삼 외, 2003), 계면활성제의 중금속 추출 효과를 증대시키기 위한 음이온성 리간드 사용도 연구되어졌다 Shin et al. (2005)는 비이온성계면활성제와 NaI를 사용할 경우 토양 내 Cd의 탈착을 계면활성제만을 사용하였을 때에 비해 두 배까지 증대시켰고, 허정현·정승우(2008)는 음이온성 계면활성제와 NaI를 사용하여 토양 카드뮴의 추출율을 2.7 배까지 증가시켰으나 Pb의 경우는 Na리간드 사용 시 오히려 감소시킨다고 보고하였다. 그러나 지금까지 음이온성 리간드와 계면활성제를 사용한 토양 중금속 탈착 연구는 모두 회분식 연구결과이며 연속식 토양칼럼에서의 평가는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구는 인공오염 중금속 토양칼럼에서 음이온성 리간드와 계면활성제를 사용한 토양 중금속 탈착 제거를 먼저 연구하였다.

지금껏 계면활성제를 이용한 토양세정공정 운영상 문제점은 불균질 토양내 우선흐름경로(preferential flow paths) 형성으로 인한 계면활성제와 비수용상액체(NAPL : Nonaqueous phase liquid)간 접촉 한계에 있었다(Taylor et al., 2004). 불균질 토양에서 계면활성제와 오염물질(NAPL)간 접촉을 증대시키기 위해 계면활성제 거품(foam) 세정기술이 연구되어졌다. Jeong and Corapcioglu (2003)는 계면활성제만을 사용한 NAPL제거율은 41%였지만 계면활성제 거품을 사용할 경우 99%까지 향상시킬 수

있음을 보고하였다. 계면활성제 거품 세정연구의 대부분 대상물질은 NAPL이었으며 중금속 제거를 위한 연구사례는 Mulligan and Wang(2006), 단 1건이었다. 그러나 본 연구가 시도하는 토양내 중금속 및 유류가 복합적으로 오염된 경우 계면활성제 거품을 이용한 정화연구는 국내·외적으로 연구된 사례가 없다.

본 연구의 첫 번째 목적은 연속식 토양칼럼에서 음이온성 리간드와 계면활성제 및 거품을 사용하여 토양 중금속 연속 탈착제거 가능성을 평가하고자 하였다. 두 번째 연구목적은 중금속 및 유류로 복합 오염된 토양을 대상으로 계면활성제 거품을 적용하여 중금속과 유류 동시 제거 가능성을 평가하고자 하였다. 본 연구에서는 허정현·정승우(2008)연구결과 적은 탄소 개수 및 마이셀의 크기로서 토양과의 접촉 및 용탈에 효율적인 음이온계면활성제 Sodium dodecyl sulfate(SDS)를 사용하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1. 토양

토양시료는 전북 군산시 관여산에서 채취하였으며 체분석(No 10, 2 mm)을 통하여 자갈을 제거한 후 건조기에서 수분을 제거하였다. 실험 토양의 물리 화학적 특성은 Table 1과 같다. 토양특성분석은 SSSA(2002)에 제시된 방법에 준하였다. 유기물 함량은 Loss on ignition method를 이용하여 분석하였고, 토양 pH는 Determination-pH in water method를 기준으로 Ismatek pH meter를 이용하여 분석하였다. 토성(Soil texture)은 침강법을 이용하여 분석하였고 Porosity는 칼럼에 토양을 채운 후 증류수를 주입하여 포화되는 부피를 측정하여 계산하였다. Permeability는 Corey's Equation을 기반으로 계산하였다.

2.2. 중금속 오염 토양 제조

준비된 토양 1000 g을 비이커에 넣고 CdCl₂(Kanto Inc, 99.9%)로 생성한 Cd 100 ppm 용액과 Pb(NO₃)₂(Kanto

Table 1. Soil characteristics

Characteristics	Measured values
Organic matter contents (%)	4.5%
pH	6.2
Soil texture	Loamy sand
Porosity	0.418
Permeability	$3.34 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$

Table 2. Properties of surfactant used in the study

Surfactant	Molecular formula	CMC	Biodegradable	At 10 mM	
				Density(g/ml) / Viscosity(cp)	pH
SDS	CH ₃ (CH ₂) ₁₁ OSO ₃ Na	8 mM ¹	Yes ²	0.989/1.97	6.1

¹김수삼, 2003, ²김용식 외, 2005

Inc.99.9%)로 생성한 Pb 250 ppm 용액을 1:1 비율로 혼합하여 4 L 넣어준다. 토양과 중금속 용액의 접촉이 원활하도록 7일간 12시간 간격으로 15분간 혼합을 시켜준다. 7일이 경과된 시료는 100°C의 오븐에 48시간 동안 넣어 중금속 용액을 증발시킨다. 건조된 중금속 토양에 증류수 4 L를 넣고 교반기를 이용하여 15분간 교반한 후 증류수만 여과를 통하여 분리하였다. 분리된 토양 시료는 100°C의 오븐에 48시간 동안 넣어 수분을 완전히 제거한 후 사용하였다. 완성된 중금속 오염 토양의 농도는 Cd 100 ± 8 mg/kg 이며 Pb 500 ± 20 mg/kg이었다. 1D-칼럼 실험에 충전된 모든 토양은 Cd과 Pb 오염토양이다.

2.3. 계면활성제 및 리간드

본 연구에 사용되었던 계면활성제인 Sodium dodecyl sulfate(SDS)는 JUNSEI(81065-1501) 제품이다. 계면활성제의 특성은 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 SDS의 농도는 10 mM를 사용하였다. 본 연구의 세척제에 음이온성 리간드를 첨가하기 위하여 사용된 화학물질은 NaI(Kanto Inc.)를 이용하였다. 모든 실험은 각각의 분자량을 구하여 wt% 농도는 mM 농도로 변환하여 사용하였다. NaI는 1D Column에 사용할 계면활성제 용액에 용해시켰으며 본 연구에 사용된 NaI농도는 100 mM이었다.

2.4. 1D 칼럼

Fig. 1은 본 연구에 사용된 1D 칼럼 실험장치 구성을 도시하였다. 1D 칼럼은 스테인리스 소재로 내경 5.5 cm에 16.5 cm의 길이를 가지며 내부 부피는 314 ml, 토양충진시 내재투수계수는(permeability)는 $3.34 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ 이다.

중금속 토양시료는 증류수로 세척 후 105°C에서 24시간 이상 건조 후 칼럼 실험에 사용하였다. 매 실험마다 동일한 투수성(permeability)을 유지하기 위하여 토양시료 20 g을 채울 때 마다 214 g의 무게를 가진 탄성이 없는 고무롤 13 cm 높이에서 12번 씩 떨어뜨렸다(St-Pierre et al., 2004). 토양시료가 채워진 칼럼에 이산화탄소를 10 ml/min으로 3 공극부피(PV: Pore Volume) 주입하였고, 공기가 탈리된 증류수를 0.2 ml/min으로 23시간 동안 2 PV 만큼 주입하여 포화상태로 만들었다. 이 조작이 완

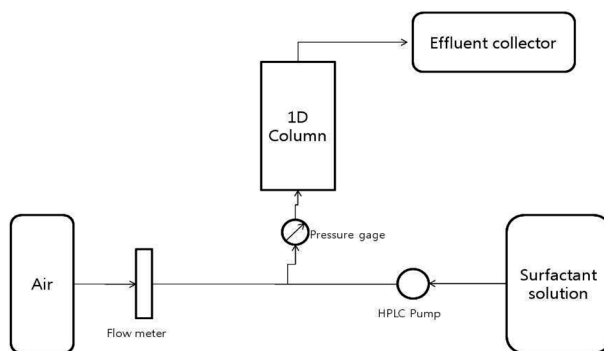


Fig. 1. A schematic diagram of 1D column experiment set-up.

료된 시점을 실험 시작 시점으로 설정하였다.

본 연구에 사용된 계면 활성제 거품은 1D 칼럼 내 주입구와 유출구에 유리솜 필터를 장착하여 계면활성제 용액과 공기가 Filter를 통과할 때 거품이 제조되도록 구성하였다.

2.5. 중금속과 디젤 동시 오염 토양칼럼 준비

‘2.4절’과 같이 준비된 1D 중금속 오염 토양칼럼에 디젤을 주입하여 중금속 및 디젤유(Diesel fuel) 동시 오염 조건을 구비하였다. 디젤유는 시중에 판매되는 주유소의 디젤유를 사용하였다. 본 연구에 사용된 디젤유는 실험중 식별을 용이하게 하기 위해 Oil-Red-O로 염색(0.5g(Oil-Red-O)/L(Diesel-fuel))하였다. 디젤유는 실린지 펌프(Model 781100, Kd Scientific) 사용하여 토양칼럼 공극부피의 10%에 해당하는 14 ml를 칼럼 하단에서 0.12 ml/min 유속으로 주입하였다. 디젤유를 토양 내에 고르게 분산시키기 위하여 공기가 탈리된 증류수를 2 ml/min의 유속으로 칼럼 하단에서 상단방향으로 3 PV 주입하였다. 이 조작이 완료된 시점을 실험 시작 지점으로 잡았다.

2.6. 1D 토양칼럼 세정 방법

본 연구에서 적용한 세정용제는 증류수, 10 mM SDS Solution, 10 mM SDS + 100 mM NaI Solution, 10 mM SDS + 100 mM NaI Foam(1:9 = SDS + NaI solution : Air)로 분류하여 실험하였다. 중금속 단독 오염 토양 또는 중금속 및 유류 복합 오염토양을 충전한 1D 칼럼에

1 ml/min의 속도로 각 평가 세척 용제를 1D 칼럼 하단 주입부에 주입하고 상단 유출부로 유출되는 용액을 공극 부피 단위로 채취하여 중금속의 농도 및 디젤 농도를 분석하였다.

2.7. 유출수 분석 및 제거율 산정

유출수내 중금속 분석은 EPA Method 3050B의 질산-과산화수소 추출법으로 전처리하고 AAS(Perkin Elmer 3110)를 이용하여 중금속 농도를 분석하였다. 유출수내 디젤은 수질오염공정시험기준상에 기재된 노말 헥산 추출 물질 시험법을 이용하여 디젤의 함량을 분석하였다. 1-D 토양칼럼 내 중금속 및 유류제거율은 초기 토양 중금속 및 유류함량 대비 유출되는 각 물질의 유출량으로 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 중금속 오염토양 칼럼에서 계면활성제, 리간드화 계면활성제 및 거품을 이용한 토양중금속 추출 실험

연속식 토양칼럼에서 음이온성 리간드와 계면활성제 및 거품을 사용하여 토양 중금속 연속 탈착 제거 가능성을 평가하였다. Fig. 2는 Cd 100 mg/kg, Pb 500 mg/kg으로 오염된 토양칼럼에 증류수(Water), 음이온성 계면활성제 용액(즉, SDS), 음이온성 계면활성제 및 리간드의 혼합용액(SDS + NaI, 또는 이하 “리간드화 계면활성제”), 리간드화 계면활성제 거품(SDS + NaI Foam)을 주입하여 추출되는 Cd 용출량으로 부터 토양 Cd 제거율 변화를 도시한 것이다. 반면 Fig. 4는 동일 실험에서 Pb 용출량으로 부터 토양 Pb 제거율 변화를 도시한 것이다.

Fig. 2의 Cd 제거율을 보면 증류수만을 이용한 경우 토양 Cd는 거의 유출되지 않았지만 SDS를 사용하였을 경우 약 40% Cd이 용출되었다. 음이온성 계면활성제에 의해 형성된 마이셀 표면의 음이온이 양이온 중금속추출에 영향을 미쳤다고 볼 수 있다(Wang and Mulligan, 2004). 음이온 계면활성제인 SDS에 음이온 NaI를 첨가할 경우(“SDS + NaI”) Cd의 추출율은 약간 증가하는 것으로 나타났다. 수중에서 해리된 I가 Cd과 결합하여 CdI₂ 화합물을 생성한다(Shin et al., 2005). 이 생성된 화합물은 수용성으로 계면활성제에 용해되어 토양에서 Cd 용탈을 이끌어 내므로 리간드화 계면활성제(SDS + NaI)가 계면활성제 단독(SDS only)의 경우 보다 높은 Cd 제거율을 보이고 있다.

리간드화 계면활성제와 공기를 혼합하여 제조한 거품을 주입하였을 경우인 SDS + NaI Foam은 SDS + NaI에 비

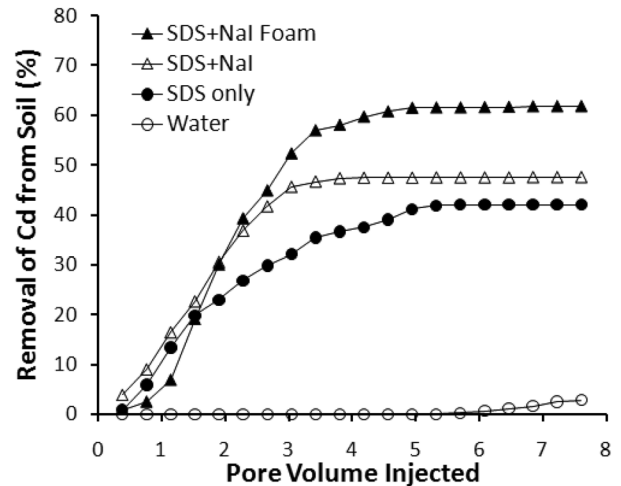


Fig. 2. Removal of Cd from soil column by surfactant-based flushing and water flushing (SDS = 10 mM, Cd = 100 mg/kg, Pb = 500 mg/kg, NaI = 100 mM); Foam was generated by a 1 : 9 ratio of SDS + NaI solution and air.

해 약 10% 정도 증가된 Cd 제거율을 보여주었다. 계면활성제를 거품형태로 불균질 토양에 주입할 경우 거품은 우선흐름경로를 통해 먼저 진행되는 특징이 있다(Huh et al., 1989; Owete and Brigham, 1987). 거품이 우선흐름 경로를 거쳐 파과(breakthrough)에 도달하게 되면 거품은 우선흐름경로에 멈추게 된다. 우선흐름경로에 멈추게 된 거품은 토양과 마찰력을 나타내게 되므로 당분간 쉽게 움직이지 않게 된다. 따라서 연이어 토양칼럼에 주입한 거품은 우선흐름경로 이외 흐름경로를 찾아 진행하게 된다(Chowdiah et al., 1998; Jeong and Corapcioglu, 2003). 이 과정을 거듭하면서 계면활성제 거품은 토양칼럼 내 모든 흐름경로를 통과하게 되면서 토양과의 접촉이 증대된다. 따라서 리간드화계면활성제 거품(SDS + NaI Foam)을 주입하였을 때 Cd 제거율이 리간드화 계면활성제(SDS + NaI) 및 계면활성제(SDS)만을 주입하였을 경우에 비해 상대적으로 높게 나타났다.

계면활성제 거품을 주입하였을 때 토양 내 흐름경로에서 거품이 마찰력을 보이며 거품과 토양간 접촉이 증대되고 있음을 확인하기 위하여 본 연구는 세정용액 주입압력을 측정하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 토양칼럼에 계면활성제거품(SDS + NaI Foam)과 계면활성제용액(SDS + NaI)을 주입하였을 때 주입압력을 지속적으로 관찰하였다. 계면활성제 거품이 1 PV 이상 주입되는 시점에서 주입압력이 높아져 40-50 psi 압력을 유지하였다. 이는 주입된 거품이 토양공극 간 마찰을 보이고 있으므로 이를 극복하고 토양공극 사이 흐름경로를 통과하기 위해서는

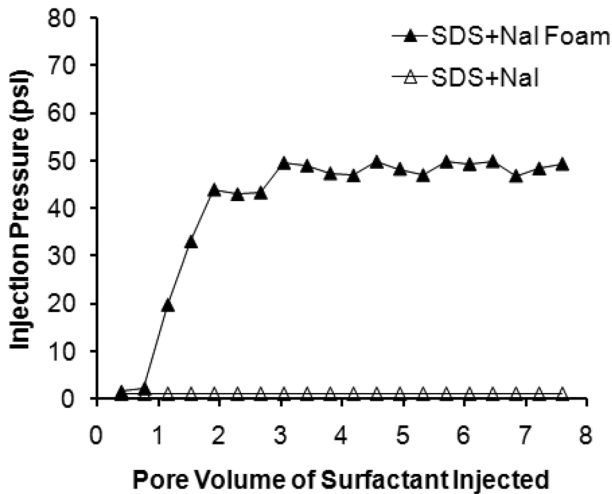


Fig. 3. Change in injection pressure during surfactant and surfactant foam flushing: (SDS = 10 mM, NaI = 100 mM); Foam was generated by a 1 : 9 ratio of SDS + NaI solution and air.

일정한 압력이 유지되어야 함을 보여준다. 따라서 지속적으로 주입된 거품은 토양칼럼 내 우선흐름경로 뿐 아니라 대부분의 흐름경로를 거치면서 토양과의 접촉을 증대시켰음을 시사하고 있다.

Fig. 4는 Cd 100 mg/kg, Pb 500 mg/kg으로 오염된 토양칼럼에 증류수(Water), 음이온성 계면활성제 용액(즉, SDS), 리간드화 계면활성제(SDS + NaI), 리간드화 계면활성제 거품을 주입하여 추출되는 Pb 용출량으로 부터 토양 Pb 제거율 변화를 도시한 것이다. Pb의 경우는 Cd과 달리 계면활성제, 리간드화 계면활성제 및 거품 간 Pb 제거율 차이가 거의 나지 않았다. Cd과 달리 Pb는 음이온성이온과 반응하여 주로 불용성 염을 만들어 내므로 역시 음이온성 계면활성제 및 I⁻이온과 반응하여 불용성 침전염이 형성되었을 것으로 판단된다(Whitten et al., 2006). 형성된 불용성 침전염은 토양칼럼 밖으로 유출되지 않고 여전히 토양칼럼에 존재하고 있으므로 제거율에는 큰 영향을 미치지 않았다. 이와 같은 결과는 토양정화과정중 주입하는 세정제 및 산화제 등과 오염물질 간 반응이 성공적으로 이루어졌다 하더라도 반응산물의 형태가 용존상으로 존재하지 않고 불용성염으로 존재할 경우 토양 내에 여전히 존재하여 토양 중금속의 농도는 변함이 없게 될 수 있음을 시사한다.

3.2. 중금속 및 디젤유 복합오염 토양칼럼에서 리간드화 계면활성제 및 거품을 이용한 토양중금속 및 디젤유 동시 제거 실험

Fig. 5는 중금속(Cd, Pb)과 디젤유로 오염된 토양칼럼으

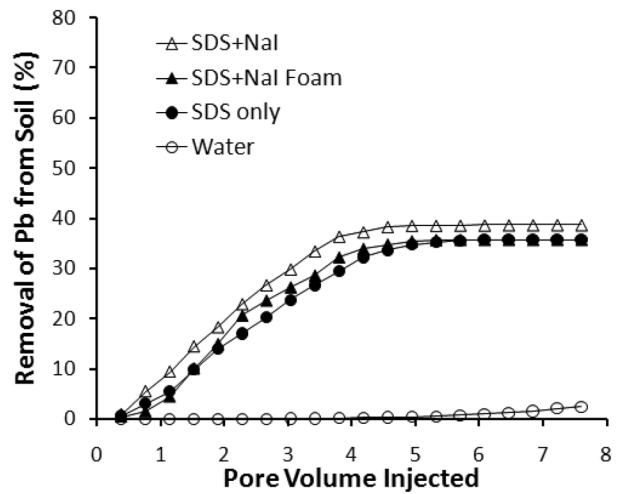


Fig. 4. Removal of Pb from soil column by surfactant-based flushing and water flushing (SDS = 10 mM, Cd = 100 mg/kg, Pb = 500 mg/kg, NaI = 100 mM); Foam was generated by a 1 : 9 ratio of SDS + NaI solution and air.

로 부터 리간드화 계면활성제(SDS + NaI) 및 리간드화 계면활성제 거품(SDS+NaI Foam)을 이용한 디젤유 제거율과 Cd, Pb 제거율을 같이 도시하였다. 계면활성제 거품 세정(SDS + NaI Foam)의 경우 7 PV만의 계면활성제용액을 사용하여 90%에 가까운 디젤유를 제거할 수 있었다. 반면 계면활성제(SDS + NaI)만을 사용할 경우 약 50%의 디젤유를 제거하였다. 이는 3.1절에서 이미 언급하였다시피 계면활성제 거품은 우선흐름경로를 통해 진행하면서 우선흐름경로에 머물고 있는 디젤유와 접촉하여 디젤유를 용해(solubilization) 또는 이동(mobilization)시켜 제거하게 된다(Jeong and Corapcioglu, 2003, Jeong and Corapcioglu, 2005). 파파에 도달한 이후 거품은 우선흐름경로에 머물러 있게 되어 마찰력을 나타내게 되므로 이후 계속 주입되는 거품은 토양 내 다른 경로를 통해 이동하게 된다. 계면활성제 거품은 토양칼럼 내 우선흐름경로이외 경로를 통해서도 진행할 수 있으므로 토양공극에 잔류하는 디젤유를 용해 또는 이동시켜 토양칼럼 밖으로 유출시키므로 계면활성제 용액보다 상대적으로 많은 디젤유를 제거할 수 있었다.

Fig. 5(b)는 계면활성제 거품(SDS + NaI Foam) 세정시 디젤유와 함께 존재하고 있었던 토양 중금속 Cd과 Pb의 제거율을 도시하였다. Fig 5(b)에서도 역시 Pb에 비해 Cd의 제거율이 상대적으로 높게 나타났으며 Cd의 제거율이 7PV에서 이미 80%에 도달하였다. 이는 Fig 2의 중금속만 존재하던 토양칼럼 계면활성제 거품 세정결과 Cd 제거율 보다 높은 값을 보여준다. 디젤유에는 많은 탄화

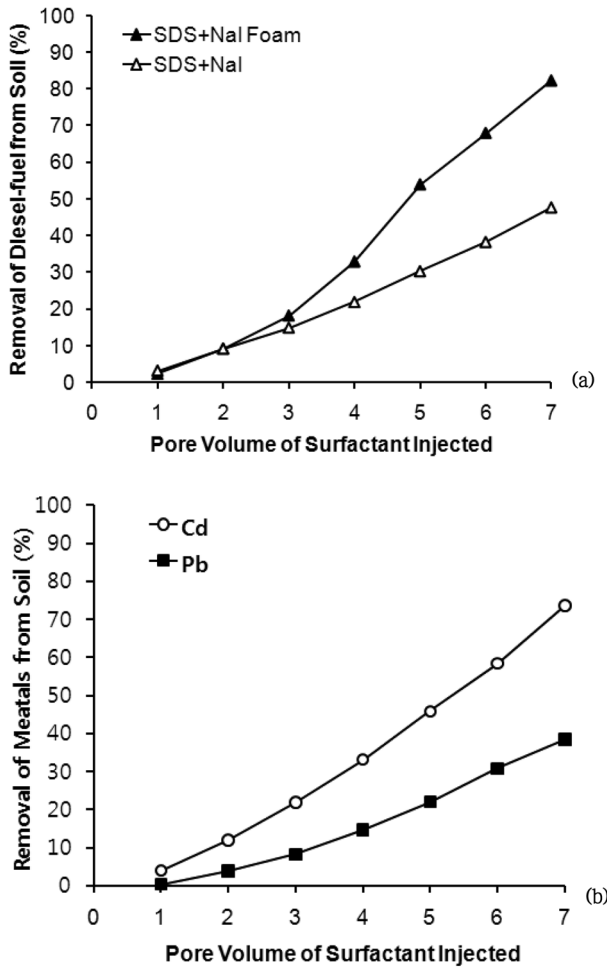


Fig. 5. Removal of diesel-fuel and heavy metals from soil column by surfactant (SDS + NaI) and surfactant foam (SDS + NaI Foam) flushing: (a) Diesel-fuel (b) change in heavy metal removal during surfactant foam flushing; Experimental conditions: SDS = 10 mM, Cd = 100 mg/kg, Pb = 500 mg/kg, Diesel-fuel saturation = 0.10, NaI = 100 mM.

수소화합물이 포함되어 있어 토양중금속 용출 증대에 영향을 미쳤던 것으로 보인다.

디젤유와 중금속 복합오염 토양에 대해 7 PV 리간드화 계면활성제 거품을 적용한 결과 유류는 90% 제거율을 보였고 중금속 역시 Cd 80%, Pb 40%의 제거율을 보여 유류 및 중금속 동시제거효과 가능성을 보였다. 특이할 사항은 중금속이 유류와 같이 존재할 경우 중금속의 추출율이 증대되는 효과를 보여주었다. 본 연구결과는 유류와 중금속 동시제거를 위한 계면활성제 거품세정의 첫 번째 가능성에 관한 연구이므로 이를 바탕으로 유류와 중금속간의 상호작용 및 계면활성제 거품세정의 주요 인자 등 보다 세부적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

중금속 Cd 및 Pb으로 오염된 토양과 두 중금속 및 디젤유로 오염된 복합오염토양을 대상으로 계면활성제(SDS), 리간드화 계면활성제(SDS + NaI) 및 거품(SDS + NaI Foam)을 이용한 토양세정연구 결과 다음의 결과를 도출하였다.

(1) 중금속 Cd 및 Pb 오염토양 칼럼 7 PV 세정결과, Cd 제거율은 계면활성제(SDS)용액만 사용 시 약 40%, 리간드화 계면활성제(SDS+NaI)세정 시 50%, 거품(SDS + NaI Foam)세정 시 60%였다. 음이온성 계면활성제 및 음이온성 리간드가 양이온성 토양중금속 Cd 용출에 효과적으로 사용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 거품의 경우 세정액과 토양간의 접촉을 증대시켜 상대적으로 높은 용출효과를 보였다. 그러나 Cd과 달리 Pb은 세정방법간 제거율 차이가 거의 나타나지 않았다.

(2) 중금속 두 종류 및 디젤유로 복합 오염된 토양칼럼 7 PV 세정결과, 디젤유 제거율은 리간드화 계면활성제(SDS + NaI)세정 시 50%, 거품(SDS + NaI Foam)세정 시 90%였다. 그리고 Cd 제거율도 80%에 달하였는데 이는 중금속만 존재하던 토양칼럼 세정결과보다 높은 제거율을 보여 함께 존재하는 디젤유가 용매로 작용한 것으로 보인다. 본 연구는 중금속 및 유류 복합오염 토양에 대한 계면활성제 거품세정 평가결과 중금속 및 유류 동시제거 효과를 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 신진교수연구지원사업(KRF-2006-331-D00302)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김수삼, 김병일, 한상재, 김정환, 2003, 납으로 오염된 철성분 함유토의 동전기정화 특성에 세척제가 미치는 영향, 지하수토양환경, 9(1), 54-62.
- 김용식, 손영규, 김지형, 송지현, 2005, Toluene의 생물학적 분해능 향상을 위한 계면활성제의 선정, 지하수토양환경, 10(4), 26-32.
- 부산시, 2003, 문현지구 토양환경 복원사업의 성공적 성과사례-문현금융단지 오염부지 정화사업중심 연구보고서
- 이민희, 정상용, 최상일, 강동환, 김민철, 2002, 계면활성제 원위치 토양 세정법을 이용한 유류 오염 지역 토양, 지하수 정화실증시험, 지하수토양환경, 7(4), 77-86.

- 허정현, 정승우, 2008, NaI 리간드화 계면활성제에 의한 토양 내 Cd과 Pb 추출연구, *지하수토양환경*, **13**(5), 74-80.
- Chowdhia, P., Misra, B.R., Kilbane, J.J., Sivastava, V.J., and Hayes, T.D., 1998, Foam propagation through soils for enhanced in-situ remediation, *Journal of hazardous materials*, **62**, 265-280.
- Chu, W. and Chan, K.H., 2003, The mechanism of the surfactant-aided soil washing system for hydrophobic and partial hydrophobic organics, *The Science of the Total Environment*, **307**, 83-92.
- Huh, D.G., Cochrane, T.D., and Kovarik, F.S., 1989, The effect of microscopic heterogeneity on CO₂ foam mobility: part 1-mechanistic study. *J. Pet. Technol.* **41**(8), 872-879.
- Jeong S-W. and Corapcioglu, M.Y., 2003, A micromodel analysis of factors influencing NAPL removal by surfactant foam flooding, *Jour. Contam. Hydrol.* **60**, 77-96.
- Jeong, S-W. and Corapcioglu, M.Y., 2005, Force analysis and visualization of NAPL removal during surfactant-related floods in a porous medium, *Journal of Hazardous Materials*, **126**(1-3), 8-13.
- Mulligan, C.N. and Wang, S., 2006, Remediation of a heavy metal-contaminated soil by a rhamnolipid foam, *Engineering Geology*, **85**, 75-81.
- Mulligan, C.N., Yong, R.N., and Gibbs, B.F., 2001, Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review, *Engineering Geology*, **60**, 371-380.
- Owete, O.S. and Brigham, W.E., 1987, Flow behavior of foam porous micromodel study, *SPE Reserv. Eng.* **2**(8), 315- 323.
- Shin, M., Barrington, S.F., Marshall, W.D., and Kim, J.W., 2005, Effect of surfactant alkyl chain length on soil cadmium desorption using surfactant/ligand systems, *Chemosphere*, **58**, 735-742.
- SSSA, 2002, Methods of Soil Analysis, Soil Science Society of America, Inc., Wisconsin, USA.
- St-Pierre, C., Martel, R., Gabriel, U., Lefebvre, R., Robert, T., and Hawari, J., 2004, TCE recovery mechanisms using micellar and alcohol solutions: phase diagrams and sand column experiments, *Journal of Contaminant Hydrology*, **71**, 155-192.
- Taylor, T.P., Rathfelder, K.M., Pennell, K.D., and Abriola, L.M., 2004, Effects of ethanol addition on micellar solubilization and plume migration during surfactant enhanced recovery of tetrachloroethene, *Jour. Contam. Hydrol.*, **69**(1-2), 73-99.
- USEPA, 1997, *Recent Developments for In Situ Treatment of Metal Contaminated Soils*, EPA/542/R97/004, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC.
- USEPA, 2001, *Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report*, EPA/542/R01/004, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC.
- Wang, S. and Mulligan, C.N., 2004, Rhamnolipid Foam enhanced remediation of Cadmium and Nickel contaminated soil, *Water, Air & Soil Pollut.*, **157**, 315-330.
- Whitten, K.W. Davis, R.E., Peck, M.L., and Stanley, G.G., 2006, General Chemistry, Thomson Learning Inc.