한국지하수토양환경학회지 Vol. 13, No. 3, pp. 8~14, 2008 ≪短報≫

디젤 오염 토양 세척시 계면활성제 종류의 영향

양중석[1] · 이유진[2] · 김성혜[2] · 신현재[3] · 양지원[2]*
[1]한국과학기술연구원 강릉분원, [2]한국과학기술원 생명화학공학과, [3]조선대학교 생명화학공학과

Effect of Surfactant Types on Washing of Diesel-contaminated Soil

Jung-Seok Yang[1] · You-Jin Lee[2] · Seong-Hye Kim[2] · Hyun-Jae Shin[3] · Ji-Won Yang[2]*
[1]KIST Gangneung Institute
[2]Department of Chemical & Biomolecular Engineering, KAIST
[3]Department of Chemical & Biochemical Engineering, Chosun University

ABSTRACT

The effects of surfactant types and the ratio of nonionic and anionic surfactants on the washing of diesel contaminated soil were investigated. In batch tests, the nonionic surfactant, which has HLB within 12-13, showed a high diesel removal efficiency and Tergitol 15-S-7 (T15S7) with 20 g/L concentration exhibited the highest removal efficiency of 79-88% among the tested nonionic surfactants. Anionic surfactants, in general, showed lower removal efficiency than nonionic surfactants. In case of mixed surfactant system, the removal efficiency increased with nonionic surfactant concentration. With mixed surfactants of T15S7 and SDS as 3 : 1 ratio, diesel removal was enhanced to 76% with 10 g/L of the mixed surfactants. These results could be used in the selection of proper surfactants for remediation of diesel contaminated soils.

Key words : Soil washing, TPH (Total petroleum hydrocarbon), Surfactant

요 약 문

디젤로 오염된 토양을 효과적으로 정화하기 위해 계면활성제의 종류와 음이온성-비이온성 혼합 계면활성제의 비율에 따른 디젤 제거효율을 살펴보았다. 회분식 실험결과 비이온성 계면활성제의 HLB가 12-13 사이의 값을 갖는 경우 가장 좋은 제거 효능을 보였으며, 사용된 계면활성제 중에서는 Tergitol 15-S-7 (T15S7)이 20 g/L의 농도에서 79-88%의 가장 높은 디젤 제거능을 보였다. 음이온성 계면활성제는 대체로 비이온성 계면활성제에 비해 디젤 제거능력이 떨어졌다. 비이온성과 음이온성 혼합 계면활성제를 사용하였을 경우 디젤의 제거효율은 비이온성 계면활성제의 양에 따라 증가하였으며, T15S7 : SDS가 3 : 1의 비율로 혼합된 10 g/L의 계면활성제가 단일 계면활성제에 비해 상승된 76%의 디젤 제거율을 보였다. 이러한 연구결과는 현장 디젤 오염토양 복원시 적절한 계면활성제 선정의 기준을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

주제어 : 토양세척, 석유계총탄화수소, 계면활성제

1. 서 론

우리나라는 급격한 산업화를 통하여 경제 발전을 하였지만 반대급부로 환경오염 또한 증가하였다. 특히 토양오염은 오염의 실체를 파악하기 힘들며 한번 오염이 진행되면 고비용의 복원비용이 필요하기 때문에 이에 대한 관심이 고조되고 있다. 우리나라의 경우 토양오염 중 유류로 오염된 토양이 가장 일반적인 오염원으로 나타나고 있다. 이러한 유류오염을 유발할 수 있는 특정토양오염관리대상 시설은 현재 국내에 주유소 21,987소, 산업시설 14,153개

*Corresponding author : jwyang@kaist.ac.kr
원고접수일 : 2007. 8. 22 심사일 : 2007. 11. 19 게재승인일 : 2008. 5. 8
질의 및 토의 : 2008. 8. 31 까지

등이 있으며, 석유류 관련 시설로 22,239개가 등록되어 있다(환경부, 2006). 유류는 복합적인 탄화수소계 오염물이 혼합되어 있으며, 인간과 자연에 위해를 미칠 가능성이 높기 때문에 유류로 오염된 토양의 적절한 정화가 필요하다.

유류로 오염된 토양을 정화하는 방법에는 토양세척(soil washing)이나 토양세정(soil flushing)과 같은 물리화학적 방법과 미생물을 이용한 생물학적 방법(bioremediation)이 있다. 이 중 토양세척과 토양세정시 일반적으로 유류가 물에 잘 녹지 않기 때문에 물에 대한 용해도를 높이기 위하여 계면활성제를 사용하는 방법이 사용되어 왔다(김철웅 등, 2001; 문혜준 등, 2002; 우승한 · 박종문, 2003; 이민희 등, 2002; 최상일 등, 2002; Deshpande et al., 1999; Vreysen and Maes, 2005; Zhu et al., 2005). 계면활성제는 친수성기를 가진 머리 구조와 소수성기를 가진 꼬리 구조를 가진 분자로 수용액 상에서 일정농도 이상(임계미셀농도, critical micelle concentration, CMC)에서 미셀을 형성한다. 형성된 미셀내부는 계면활성제 소수성기가 모여져 있기 때문에 소수성 오염물을 쉽게 흡수 및 저장할 수 있다. 또한 계면활성제가 오염물에 흡착하여 토양에 존재하는 소수성 오염물과 물 사이의 계면장력을 줄여줌으로서 오염물을 수용액 상으로 쉽게 이동시킨다.

소수성 오염물질 중 하나인 디젤 또한 계면활성제 용액을 통하여 토양에서 효과적으로 제거할 수 있으나, 토양에 존재하는 양이온과 유기물 등에 의하여 많은 계면활성제가 침전 및 흡착으로 그 본래의 의도된 역할을 하지 못하게 된다. 또한 토양 내 소수성 오염물질을 보다 효율적으로 제거하기 위하여 최근 이온성 계면활성제와 비이온성 계면활성제를 혼합하여 이용하는 예가 늘고 있다. 최상일 외(2002)의 연구에서는 POE_{14}와 SDS의 혼합 계면활성제를 이용하여 total petroleum hydrocarbon (TPH)를 제거할 경우 계면활성제 배합비가 1 : 1일 경우 단일 계면활성제를 이용할 경우에 비해 약 2-8%의 TPH 제거효율 증가가 있었다. Zhu et al.(2005)은 0.8%의 비이온 계면활성제 AEO_9와 0.1% 음이온 계면활성제 AES를 사용하였을 경우 1%의 AEO_9를 사용하였을 경우보다 10%, 1% AES를 사용하였을 경우보다 20% 높은 디젤 제거효능이 있음을 보고하였다. Yuan et al.(2007)은 카올린에서 hexachlorobenzene(HCB)를 제거하는데 비이온성 계면활성제인 Tween 80 (TW80)와 음이온성 계면활성제인 SDBS, 양이온성 계면활성제인 myristyl pyridinium bromide(MPB)을 단독 또는 혼합하여 이용하였을 경우, SDBS-TW80과 MPB-TW80 시스템 모두 이온성 계면활성제 단독의 경우보다 HCB의 제거율은 높으나 TW80보다는 적었다.

혼합 계면활성제의 이용의 목적은 계면활성제의 혼합으로 인한 토양으로의 계면활성제 흡착을 줄이고, 음이온성 계면활성제의 장점인 온도 변화에 민감하지 않는다는 점과 비이온성 계면활성제의 장점인 지용성 물질의 용해도가 높다는 장점이 상승적으로 작용하길 바라는 점에 있다. 하지만 이러한 혼합 계면활성제의 사용은 앞서 살펴본 바와 같이 오염물질이나 사용한 계면활성제의 종류에 따라서 그 효능이 달라지기 때문에 이에 대한 보다 자세한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 유류 중 대표적인 물질인 디젤로 오염된 토양을 대상으로 대표적인 비이온성 계면활성제와 음이온성 계면활성제를 선정하여 토양의 특성, 계면활성제의 종류와 특성에 따른 디젤 제거효능을 파악하고 이 결과를 기반으로 선정한 비이온성-음이온성 혼합 계면활성제의 디젤 제거능력을 파악하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

계면활성제를 이용하여 디젤로 오염된 토양을 정화하기 위해 2가지 토양을 사용하였다. 하나는 포항 A군부대에 오염된 토양(Soil A)으로 디젤오염농도가 4,095 mg/kg 이었으며 C_{12}-C_{22} 사이의 오염물이 존재하였다(Fig. 1). 다른 하나의 토양은 부산시 B주유소에서 채취한 토양으로 디젤 오염농도가 300 mg/kg으로 낮은 오염농도를 보여 인위적으로 인근 주유소에서 구입한 디젤과 섞어 한 달간 방치한 토양(Soil B)으로 16,297 mg/kg의 디젤 오염도를 보였다. 각 토양의 특성은 Table 1에 정리하였다.

사용한 계면활성제는 비이온성 계면활성제와 음이온성 계면활성제로 각 계면활성제의 특성은 Table 2에 정리하였다. 여기서 비이온성 계면활성제와 음이온성 계면활성제 중 SDS는 Sigma-Aldrich(USA)에서 구입하였고, Calfax 16-L(CAL)은 Pilot Chemical(USA), AMA-80I (AMA)는 Fluka(USA)에서 각각 구입하였다. 디젤 추출에 이용한 n-hexane은 Merck(Denmark)사의 제품을 이용하였으며, 기타 추출시 사용한 물품은 Sigma-Aldrich사의 제품을 이용하였다.

2.2. 회분식 디젤제거 실험

단일 계면활성제를 이용한 회분식 실험은 50 mL의 원심분리 vial에 5 g의 디젤오염토양과 5, 10, 20 g/L의 계

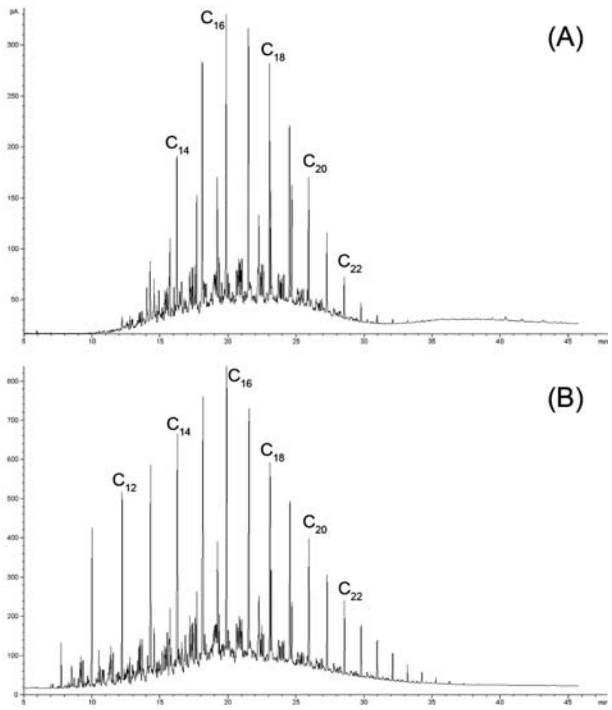

Fig. 1. GC Chromatogram of diesel extracted from (A) Soil A and (B) Soil B.

Table 1. The characteristics of the used soils

	Soil A	Soil B	Ref.
pH	5.52	7.07	ASTM[a] D4977
Particle	Silty clay loam	Sand	USDA[b]
Sand (%)	7.3	90	ASTM[a] D422
Silt (%)	57.3	3.7	ASTM[a] D422
Clay (%)	35.5	6.3	ASTM[a] D422
Organic content (%)	7.97	3.07	ASTM[a] D2974

[a] American Society of Testing and Materials
[b] United States Department of Agriculture

면활성제 용액 25 mL를 넣고 drum rotary shaker (25°C)에서 3시간 동안 30 rpm으로 교반하여 디젤의 제거가 이루어지도록 하였다. 이후 vial을 5,000 rpm에서 1시간 원심분리한 후 상등액과 토양을 분리하였으며, 상등액에서는 계면활성제 농도를 토양에서는 잔류 디젤 농도를 측정하였다. 혼합 계면활성제를 이용한 디젤 제거 실험은 단일 계면활성제 용액 대신 총 5 또는 10 g/L의 농도가 되도록 음이온성 계면활성제와 양이온성 계면활성제의 무게 농도비가 0 : 1, 0.25 : 0.75, 0.5 : 0.5, 0.75 : 0.25, 1 : 0가 되도록 제조하여 이용하였다. 혼합 계면활성제의 영향 파악시 사용한 비이온성 계면활성제는 TW80과 Tergitol 15-S-7(T15S7)이었으며, 음이온 계면활성제는 SDS, CAL, AMA이다. 기타 실험조건은 단일 계면활성제를 이용하여 진행한 회분식 실험과 동일한 조건을 이용하였다.

2.3. 분석방법

수용액 내 계면활성제의 농도는 UV(Waters 490E, Waters, USA)를 장착한 고성능액체크로마토그래피(HPLC, Waters, USA)를 이용하여 측정하였다. 칼럼은 Waters Symmetry C_{18} column을 이용하였으며 계면활성제의 정량은 246 nm에서 진행하였다. 이동상 용매는 acetonitrile과 물을 4 : 1 비율로 만들어 1 mL/min으로 흘려주었다.

토양 내 존재하는 디젤 측정은 토양오염공정시험방법을 수정하여 수행하였다. 구체적으로 토양 5 g을 50 mL 원심분리 vial에 넣고 5 g의 무수황산나트륨과 25 mL의 hexane을 넣은 후 3분간 초음파추출기를 이용하여 추출하였다. 이후 5,000 rpm으로 10분간 원심분리한 후 모은 상등액에 동일한 방법으로 한 번 더 추출한 상등액을 추가하여 총 50 mL의 상등액을 회수하였다. 모아진 상등액을

Table 2. Physico-chemical properties of used surfactants in this study

Abbr.	Trade Name	Chemical Name	M.W.[a]	HLB[b]	Type[c]
TW80	Tween80	POE[d](20) sorbitan monooleate	1308	15.0	N
T15S5	Tergitol 15-S-5	POE[d](5) secondary alcohol	423	10.5	N
T15S7	Tergitol 15-S-7	POE[d](7) secondary alcohol	515	12.1	N
T15S9	Tergitol 15-S-9	POE[d](9) secondary alcohol	607	13.3	N
B30	Brij 30	POE[d](4) lauryl ether	362	9.7	N
B56	Brij 56	POE[d](10) cetyl ether	683	12.9	N
B78	Brij 78	POE[d](20) stearyl ether	1152	15.3	N
SDS	SDS	Sodium dodecyl sulfate	288	–	A
CAL	Calfax 16L	Disodium hexadecylbenzene disulfonate	642	–	A
AMA	AMA-80I	Sodium dihexyl sulfosuccinate	388	–	A

[a] Average molecular weight (g/moL), [b] Hydrophilic-Lipophilic Balance, [c] N: Nonionic; A: Anionic, [d] Polyoxyethylene (-OCH_2-CH_2-)

무수황산나트륨으로 탈수한 후 회전증발농축기를 이용하여 최종 2 mL까지 농축하였다. 농축된 시료 2 mL를 0.3 g의 실리카겔로 정제한 후 정제된 액 중 2 μL를 가스크로마토그래피(GC)에 주입하였다. 토양오염공정시험방법에서는 추출용매로 디클로로메탄을 이용하도록 되어있으나 토양에 계면활성제가 존재할 경우 디젤의 추출 효율이 n-hexane에 비하여 떨어지는 경향을 보여 본 실험에서는 n-hexane을 이용하여 디젤을 추출하였다.

디젤농도 정량은 HP-5 capillary column을 장착한 GC (HP6890N, FID detector)를 이용하였으며, 주입구의 온도는 300°C, 검출기의 온도는 320°C, 칼럼의 온도는 50°C에서 2분간 정지 후 10°C/min로 300°C까지 올린 다음 300°C에서 20분간 정지하였다. 운반가스로 헬륨을 1 mL/min으로 흘려주었다. 농도는 크로마토그램에서 바탕선(C_8)-바탕선(C_{40}) 적분방법을 이용하여 검량하였으며, 토양에 잔류하여 함께 추출된 계면활성제가 크로마토그램에 나타난 경우에는 계면활성제의 GC 피크를 바탕선(C_8)-바탕선(C_{40}) 적분 면적에서 뺀 부분만을 면적 계산하여 디젤 농도를 정량하였다.

3. 결과 및 고찰

비이온성 계면활성제를 이용하여 토양에 존재하는 디젤 추출 효율을 Fig. 2에 표시하였다. 전반적으로 Soil A에 비하여 Soil B에서 디젤의 추출 효율이 높았으며 이는 토양 입자의 구성 차이와 Soil A가 실제 디젤 오염이 진행된 후 오랜 기간 지난 토양이고 Soil B는 인공적으로 오염을 시킨 토양이기 때문으로 파악된다. 디젤의 제거를 계면활성제의 특성 중 하나인 Hydrophilic-Lipophilic Balance (HLB)를 이용하여 HLB가 10-16 사이의 디젤 제거능을 나타내면 Fig. 3과 같은 경향이 나타난다. 이를 살펴보면 HLB가 12-13 사이인 계면활성제가 디젤 제거 효율이 가장 높은 것을 알 수 있다. B30의 경우 HLB값이 9.7에 해당하고 계면활성제로 인하여 용액이 emulsion이 형성되어 sand가 많은 토양에는 디젤의 제거능이 높으나 silt와 clay 비율이 높은 토양에서는 토양에 흡착하는 양이 많이 디젤 제거능이 급격히 떨어지는 경향을 보였다. 사용한 계면활성제 중 20 g/L의 T15S7과 B30을 사용한 경우 각각 Soil A에서 79%, Soil B에서 90.7%의 가장 높은 디젤 제거 효능을 보였다.

Soil A에 대해 비이온성 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 디젤의 제거효율이 급격히 증가하였으나 Soil B에서는 그 증가량이 크지 않았다. 또한 Fig. 3에서 Soil B의

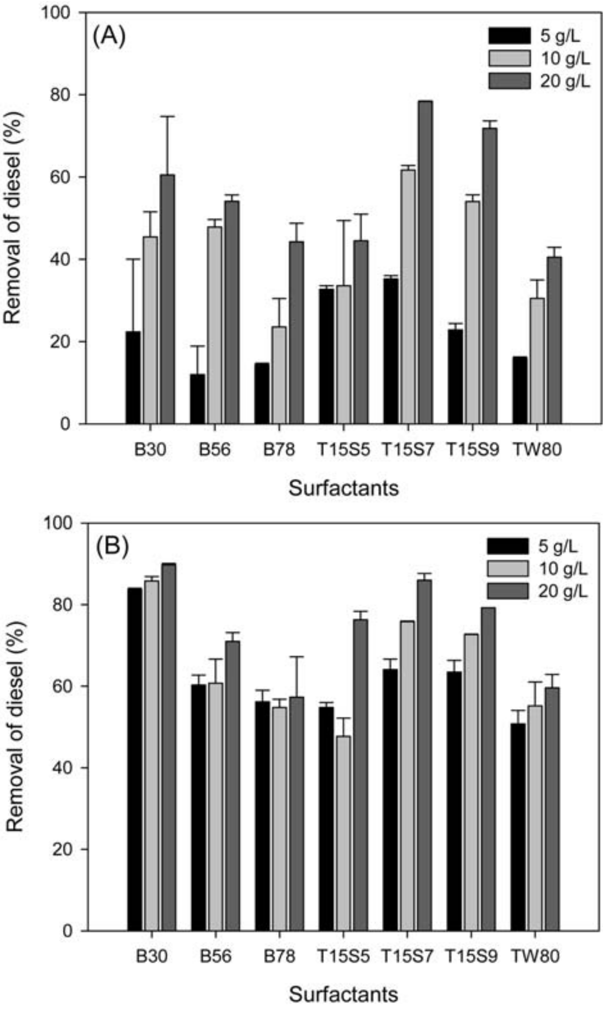

Fig. 2. Effect of nonionic surfactants on the removal of diesel from (A) Soil A and (B) Soil B.

경우 계면활성제의 농도에 따른 전체적인 디젤 제거 경형이 계면활성제의 HLB에 따라 비슷하였으나 Soil A에서는 10, 20 g/L의 계면활성제를 사용하였을 경우 Soil B와 경향이 비슷하였고, 5 g/L를 이용하였을 경우는 다른 농도와 디젤 제거 경향이 달랐다. 이러한 원인은 Soil A의 특성이 clay와 slit 함량이 35.5%와 57.3%로 총 92.7%에 달하는 반면 Soil B는 6.3%와 3.7%로 총 10%정도 밖에 되지 않기 때문으로 판단된다. 즉 계면활성제가 clay와 slit가 많은 토양에 흡착이 더 많이 되기 때문에 수용액 상에 존재하는 계면활성제 농도가 낮아져 결과적으로 디젤을 제거하는 효능이 떨어지기 때문이다. 이는 Fig. 4를 통하여 대략적인 경향을 살펴볼 수 있다. T15S7 계면활성제의 경우 Soil A에서 15-20 mg/g soil에 해당하는 계면활성제가 토양에 흡착되었으나 Soil B에서는 2.5 mg/g soil 이하의 계면활성제만 토양에 흡착되었다. 즉 Soil A

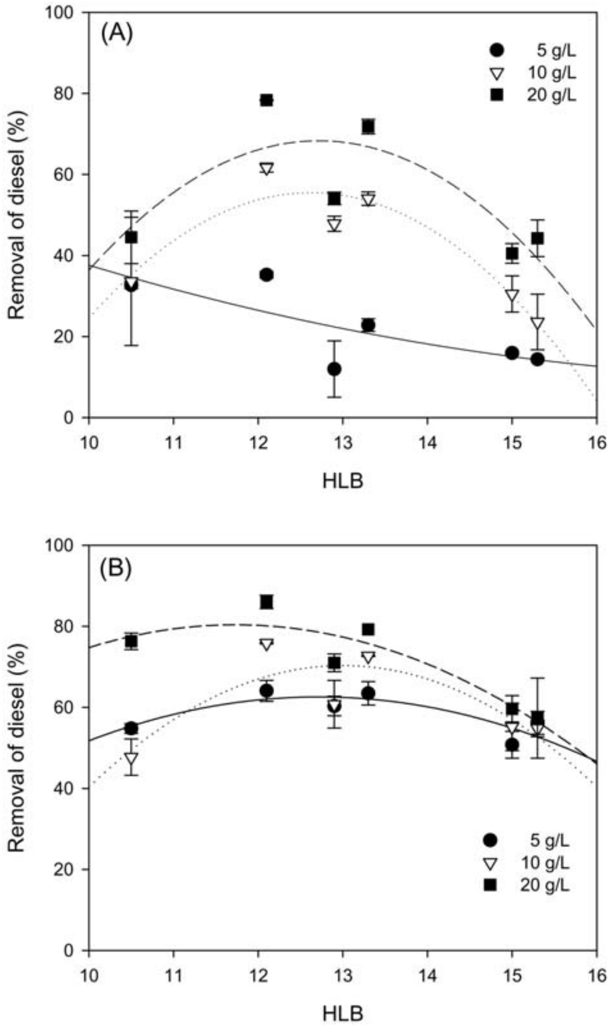

Fig. 3. Correlation between surfactant HLB value and removal efficiency of diesel from (A) Soil A and (B) Soil B.

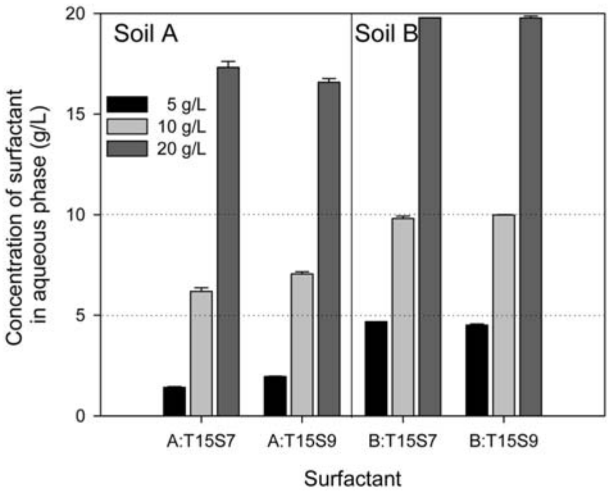

Fig. 4. Surfactant concentration in aqueous phase after soil washing with Soil A and Soil B.

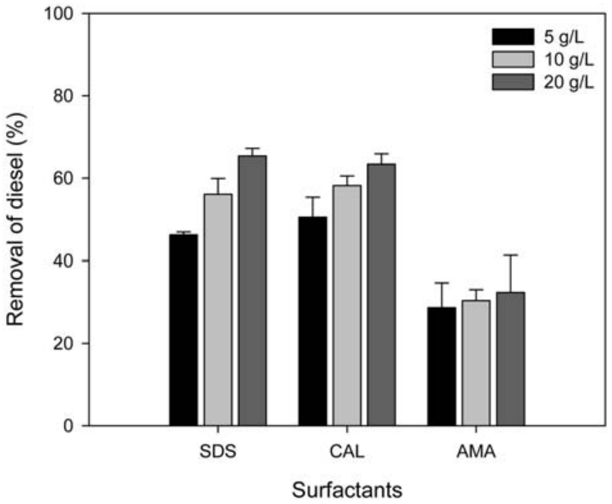

Fig. 5. Effect of anionic surfactant on the removal of diesel from Soil B.

에서는 5 g/L의 T15S7 계면활성제 용액을 사용하였을 경우 디젤을 토양으로부터 탈착시킬 수 있는 수용액상의 계면활성제 양이 2 g/L가 되지 않는 반면 Soil B에서는 4.8 g/L의 계면활성제가 디젤 탈착에 이용되는 것을 알 수 있다. 이러한 실험 결과를 통하여 오염토양의 특성에 따라 계면활성제 흡착을 고려한 계면활성제 농도 결정이 필요한 것으로 사료된다. 또한 토양에 흡착된 계면활성제는 토양의 2차 오염을 유발하여 TPH로 검출되기도 하기 때문에 토양의 특성에 따라 계면활성제를 이용한 토양 세척 기법의 적용을 달리해야 할 것으로 판단된다.

음이온성 계면활성제를 사용하였을 경우 디젤 제거 효율을 Fig. 5에 나타내었다. 사용한 음이온성 계면활성제 중 SDS가 가장 성능이 좋았다. 그러나 전반적으로 음이온성 계면활성제의 성능이 비이온성에 비해 떨어진 결과를 얻었으며 SDS와 CAL을 이용하였을 경우 사용한 농도에 따라 50-70%의 디젤 제거율을 보였다. 이는 Soil B에는 앞서 살펴본 바와 같이 계면활성제의 흡착이 무시할 정도일 때 비이온성 계면활성제가 음이온성 계면활성제 보다 디젤 제거 능력이 뛰어남을 말한다. 만약 흡착이 많이 일어나는 경우는 음이온성 계면활성제가 일반적으로 비이온성 계면활성제보다 토양에 흡착되는 양이 적으므로 음이온성 계면활성제의 성능이 높아질 것으로 판단된다. Soil A에서 음이온 계면활성제를 이용하여 디젤을 제거할 경우 원심분리를 통하여 고액분리가 쉽게 일어나지 않았으며 콜로이드 형태의 잔류물이 수용액 상에 존재하여 토양의 침전 저하 문제점이 발생하였다.

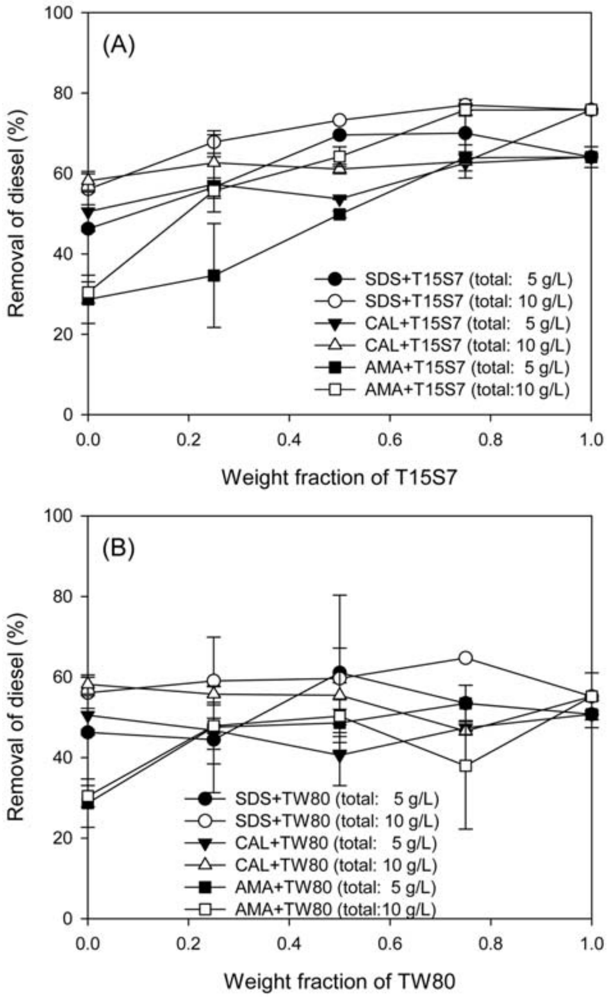

Fig. 6. Effect of anionic+nonionic (A: T15S7; B: TW80) mixed surfactants on the removal of diesel from Soil B.

디젤 제거에 비이온성과 음이온성 혼합 계면활성제의 능력을 파악하기 위하여 단일 계면활성제 상에서 Soil A와 B에서 모두 높은 제거 효능을 보인 비이온성 계면활성제 1종(T15S7)과 평균적인 제거 효능을 보인 비이온성 계면활성제 1종(TW80)을 선정한 후 음이온성 계면활성제 3종(SDS, CAL, AMA)의 혼합을 통하여 디젤제거 경향을 살펴보았다. Fig. 6의 결과에서 보는 바와 같이 비온성 계면활성제와 음이온성 혼합 계면활성제는 각 계면활성제의 디젤 제거능에 비례하여 제거능이 증가하는 것을 알 수 있었다. 음이온성 계면활성제와 비이온성 계면활성제의 디젤 제거 효능이 비슷한 경우인 TW80과 SDS, CAL의 혼합의 경우 계면활성제 비율에 따른 디젤 제거 효능이 변화가 미미하였으나, 음이온성 계면활성제보다 비이온성 계면활성제의 디젤 제거 효능이 높은 T15S7과 SDS, CAL, AMA의 혼합 계면활성제의 경우 T15S7의 비율이 커짐에 따라 디젤 제거 효율 또한 증가하였다. 음이온성-비이온성 혼합 계면활성제의 경우 단일 계면활성제에 비해 CMC가 낮아지는 경향이 있으며 이는 토양에 흡착되는 계면활성제의 양을 줄여주는 효과를 낸다(Yang et al., 2005). 또한 계면활성제가 혼합됨으로써 음이온성 계면활성제 단량체 간의 반발력을 감소시켜 미셀의 크기와 응집체 수가 커지는 결과를 가져오기 때문에 전체적인 디젤의 용해도 또한 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다(최상일 등, 2002). Zhu et al.(2005)의 결과에 의하면 음이온계면활성제인 AES와 양이온 계면활성제인 AEO_9를 0.1%와 0.8%를 혼합하여 디젤을 제거할 경우 각각 1%를 이용하여 제거할 경우에 비하여 10-20%의 디젤 제거효능이 상승하였다고 보고하였다. 본 연구에서는 T15S7의 비이온성 계면활성제의 무게 비율이 50-75%일 때가 100%일 때보다 2-10% 이내에서 디젤 제거율이 소폭 상승한 결과를 얻을 수 있었으며, 전반적으로 비이온성:음이온성 계면활성제가 3 : 1일 경우 가장 효능이 좋았다. 실험한 계면활성제 배합에서는 T15S7과 SDS를 3 : 1로 배합하여 총 10 g/L의 농도의 계면활성제 용액을 사용하여 Soil B를 처리할 경우 76%의 가장 높은 디젤 제거율을 보였다. 이러한 연구결과로부터 비슷한 제거효능을 가진 음이온성-비이온성 혼합 계면활성제 상에서는 혼합에 따른 디젤 제거 상승효과가 없었으나, 성능에 차이가 존재하는 계면활성제 간의 혼합에는 혼합에 의한 디젤 상승효과가 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 내려진 결론은 다음과 같다.

- 디젤로 오염된 토양을 세척하는데 사용된 비이온성 계면활성제 중 T15S7이 토양의 특성에 관계없이 좋은 성능을 보였으며, 디젤 제거능은 계면활성제의 HLB가 12-13에서 최고였다. 20 g/L의 T15S7을 이용하였을 경우 Soil A에서는 79%, Soil B에서는 88%의 디젤 제거율을 보였다.
- 음이온성 계면활성제는 디젤 제거에 있어 비이온성보다 성능이 떨어졌으며, 사용한 음이온성 계면활성제 중 SDS가 가장 높은 디젤 제거효능을 보였다. 20 g/L의 SDS를 사용하여 Soil B에서 63%의 디젤을 제거하였다.
- 비이온성 계면활성제와 음이온성 계면활성제를 혼합하여 디젤을 제거한 경우, 음이온성 계면활성제보다 디젤 제거능이 높은 T15S7을 비이온성 계면활성제로 이용하였을 경우 배합비에 따른 디젤 제거의 상승효과

를 관찰하였으며, 음이온성 계면활성제와 디젤 제거능이 비슷한 TW80을 비온성 계면활성제로 이용하였을 경우 배합비에 따른 디젤 제거 효능의 차이는 미미하였다. 총 10 g/L의 T15S7와 SDS를 3 : 1의 비로 배합하여 Soil B를 세척하였을 경우 T15S7 단독으로 제거할 경우에 비해서 약 2% 향상된 76%의 디젤 제거율을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 국가지정연구실사업(M1-0203-02-0001)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김철웅, 김영호, 이기서, 구기갑, 이정민, 2001, 토양으로부터 오일의 제거에 있어서 비이온 계면활성제 종류의 영향, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**(1), 88-93.

문혜준, 임영경, 김윤관, 주춘성, 방기연, 정욱진, 이승우, 2002, 생물계면활성제를 이용한 디이젤 오염토양세척기술에 관한 연구, 지하수토양환경, **7**(2), 13-22.

우승한, 박종문, 2003, 오염토양 세척공정에서 모델링을 통한 최적 계면활성제의 선별, 지하수토양환경, **8**(3), 61-73.

이민희, 정상용, 최상일, 강동환, 김민철, 2002, 계면활성제 원위치 토양 세정법을 이용한 유류 오염 지역 토양 · 지하수 정화 실증 시험, 지하수토양환경, **7**(4), 77-86.

최상일, 소정현, 조장환, 2002, 계면활성제를 이용한 원위치 토양세정 기법 적용을 위한 기초 특성 연구, 지하수토양환경, **7**(4), 87-91.

환경부, 2006, 환경백서, 서울, p. 618.

Deshpande, S., Shiau, B.J., Wade, D., Sabatini, D.A., and Harwell, J.H., 1999, Surfactant selection for enhancing ex situ soil washing, *Wat. Res.*, **33**(2) 351-360.

Vreysen, S. and Maes, A., 2005, Remediation of a diesel contaminated, sandy-loam soil using low concentrated surfactant solutions, *J. Soils & Sedments*, **5**(4), 240-244.

Yang, K., Zhu, L., and Zhao, B., 2005, Minimizing losses of nonionic and anionic surfactants to a montmorillonite saturated with calcium using their mixtures, *J. Colloid Interf. Sci.*, **291**, 59-66.

Yuan, S., Shu, Z., Wan, J., and Lu, X., 2007, Enhanced desorption of hexachlorobenzene from kaolin by single and mixed surfactants, *J. Colloid Interf. Sci.*, **314**, 167-175.

Zhu, K., Hart, W., and Yang, J., 2005, Remediation of Petroleum-contaminated loess soil by surfactants-enhanced flushing technique, *J. Environ. Sci. Health*, **40**, 1877-1893.