韓國土壤環境學會誌 Vol.2, No.1 99~107, 1997
Journal of KoSES Vol.2, No.1 99~107, 1997

原著

Ex-situ 토양세척기법에 의한 소수성 유기오염물질로 오염된 토양의 정화에 관한 연구

최상일 · 류두현* · 장 민

광운대학교 환경공학과
**전주대학교 생명과학부*

A Study on the Cleanup Process of HOCs-Contaminated Soil by *Ex-situ* Soil Washing Technology

Sang-il Choi · *Doohyun Ryoo · Min Jang

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University
**School of Biotechnology, Jeonju University*

ABSTRACT

In this study, a series of batch-scale tests were conducted to optimize the design parameters for the application of soil washing techniques to the hydrophobic organic compounds(HOCs)-contaminated soil and to find the effective methods for the recovery of surfactants from washing effluent by using solvent. Several nonionic surfactants (polyoxyethylene oleyl ester) and sophorolipid were applied to the artificially contaminated soil (4,000 mg n-dodecane/kg dry soil). The effects of washing time, concentration of surfactant solution, dilution ratio, and temperature on washing efficiencies were examined. Hydrophile-liphophile balance (HLB) number was proven to be one of the important parameters for soil washing. The HLB numbers of OA-5 and sophorolipid are too low to form a stable soil-water emulsion. They showed very low washing efficiencies less than 10%. If HLB number is in the proper range to form a stable soil-water emulsion, surfactant having higher solubility for HOCs shows higher washing efficiency. OA-14 having higher HLB number than OA-9 formed more stable soil-water emulsion. But its washing efficiency was about 20% due to a lower molar solubility ratio (MSR) than OA-9. OA-9, which forms a stable soil-water emulsion and has comparatively high solubility for HOCs, showed about 60% washing efficiency by itself. To recover anthracene effectively from OA-9 washing effluent by using benzene as an organic solvent, desirable temperature and pH

were 30℃ and 2, respectively.

key word : soil washing, surfactant, soil-water emulsion, recovery

요 약 문

본 연구에서는 일련의 회분식 규모의 실험을 통해 소수성 유기오염물질로 오염된 토양에 토양세척 기법을 적용함에 있어서 필요한 최적의 운전조건을 도출하고 세척후 분리된 상등액중에 포함된 유기오염물질 및 세척제를 유기용매를 이용하여 효율적으로 분리 · 회수하기 위한 방안을 모색하고자 하였다.

사용된 계면활성제는 토양과 결합될 우려가 적은 비이온계 계면활성제중 독성이 거의 없으며 국내에서 대량 생산되어 수급이 원활한 계면활성제를 선별하여 소수성 유기오염물질인 n-dodecane(4,000mg/kg dny Soil)으로 오염된 토양에 대해 세척시간, 계면활성제 용액의 농도, 진탕비, 온도 등에 따른 세척효율의 변화를 조사하였다. 실험결과 계면활성제의 HLB(hydrophile-liphophile balance)값이 MSR(molar solubility ratio) 값과 함께 토양세척시 중요한 변수로 작용하였다. HLB값이 낮아 유탁액을 형성하지 못하는 OA-5나 sophorolipid는 10% 이내의 극히 낮은 세척효율을 보였다. 그러나 안정된 유탁액을 형성하는 HLB값 범위내에서는 소수성 유기오염물질에 대한 액상실험에서의 용해도가 큰 계면활성제가 유리하였다. 높은 HLB값을 갖는 OA-14는 OA-9 보다 안정된 유탁액을 형성하지만 용해도에 대한 지표인 MSR값이 OA-9 보다 작아 약 20% 정도의 낮은 세척효율을 보였다. 안정된 유탁액을 형성하는 동시에 용해도가 높은 OA-9 용액이 단독으로 쓰일 때는 최대 60% 정도의 세척효율을 보였다. 또한 OA-9 세척유출수로부터 유기용매인 벤젠을 이용하여 anthracene을 회수하고자 하는 경우, 세척유출수의 온도를 30℃, pH는 2로 조절하는 것이 회수 효율 측면에서 바람직하다.

주제어 : 토양세척, 계면활성제, 유탁액, 회수

1. 서 론

우리나라를 비롯하여 전세계적으로 급속한 산업화에 따른 각종 화학물질의 과다소비, 무분별한 사용, 부적절한 처리 및 불법폐기로 인하여 토양 및 지하수의 오염문제가 심각하게 대두되고 있다. 따라서 토양 및 지하수내에 존재하는 각종 유해 유기오염물질 및 중금속의 처리가 시급한 실정이다.

토양오염의 경우 일단 오염이 되고 나면, 지표수 및 지하수의 수질에도 악영향을 미치게 되는 등 주변 환경에 2차오염을 유발시키게 된다. 이러한 2차오염은 유동에 의하여 오염되지 않은 지역으로 확산되어 정화가 더욱 복잡하고 곤란하게 될 가능성이 있으므로, 오염된 토양은 신속히 정화되어야 한다. 미국을 비롯한 선진국에서는 오래전부터 오염토양의 정화에 막대한 노력을 기울여 다양한 기술들이 개발되어 일부는 실용화되고 있으나, 국내의 경우 이 분야에 대한 기술개발은 극히 초보적인 단계에 지나지 않고 있어 국내 실정에 맞는 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 토양세척기법은 1970년대 말에 유

류 유출로 인해 오염된 해안가 모래를 정화하기 위하여 미국환경보호청(United State Environmental Protection Agency; USEPA)에 의해 처음으로 개발되었다[1].

토양세척기법은 적절한 세척제(flushing agent)를 사용하여 토양입자에 결합되어 있는 유해 유기오염물질의 표면장력을 약화시키거나 중금속을 액상으로 변화시켜 토양입자로부터 유해 유기오염물질 및 중금속을 분리시켜 처리하는 기법으로, 적용방식에 따라 *in-situ* 토양세척기법(*in-situ* soil flushing)과 *ex-situ* 토양세척기법(*ex-situ* soil washing)으로 대별할 수 있다[2]. *In-situ* 토양세척기법은 토양의 투수성에 많은 제약을 받고 세척된 오염물질에 의한 2차오염의 우려가 있는 반면, *ex-situ* 토양세척기법은 토양을 굴착하여 세척처리하는 방식이므로 이러한 문제점이 발생되지 않는다.

본 연구는 정화대상 오염물질별로 세척효율이 양호하다고 판단되는 세척제들을 선별 적용하여 계면활성제의 특성에 관계한 세척 메커니즘을 해석한 후 토양세척에 가장 타당한 특성값을 갖는 계면활성제를 찾아 현장적용 가능한 최적 운전조건을 도출하고자 한다. 또한 세척 유출수 내에 존재하는 세척제 및 세척된 오염물질에 대한 처리기술에 대해서도 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용토양

토양은 서울특별시 도봉구에 위치한 녹천역 부근의 야산에서 채취하였고, 균일한 입경의 토양을 사용하기 위해 채취한 토양중 #4체(4.75mm)를 통과하는 토양만을 사용하여 실험하였다. 토양화학분석법(1988)에 제시된 방법에 의하여 토양의 pH를 측정한 결과 약 4.4였다. 사용된 토양의 particle density는 2.48 g/cm^3, bulk density는 1.43 g/cm^3, 공극률은 약 0.43이고 토양의 pH는 약 4.4였다. 토양에 대한 입자크기 분포곡선에 의하면 d_{10}은 0.18mm이고 d_{60}은 1.6mm로, 토양입자의 유효경은 0.18mm이고 균등계수는 8.89였다. 토양의 유기물질 함량은 1.6%(중량비)이고, 양이온 치환용량(cation exchange capacity, CEC)은 USEPA Method 9080(1986)을 이용하여 측정한 결과 4.08 meq/100g이었다.

2.2 대상 유기오염물질

본 연구에서는 산업체에서 많이 사용되고 있으며, 유류 등의 유출로 인해 오염될 가능성이 많다고 판단되는 물질중 휘발성 및 생분해성이 비교적 낮은 지방족의 n-dodecane과 방향족의 anthracene을 대상 유기오염물질로 선정하였다. 선정된 오염물질의 일반적인 특성은 Table 1과 같고, 소수성 유기오염물질의 분석은 gas chromatography로 하였다.

2.3 회분식 토양세척실험

대상 오염물질에 의해 오염된 토양은 다음과 같은 방법을 사용하여 인공적으로 제조하였다. 건조시킨 #4 통과 토양을 필요한 양만큼 용기에 넣고 용매에 용해시킨 정량의 유기오염물질을 주입한 후, 충분히 섞이도록 회전혼합장치를 이용하여 2일간 교반하였다. n-dodecane의 용매로는 n-hexane을 사용하였다. 초기 토양내 오염물질의 농도로는 n-dodecane 4,000 mg/kg dry soil을 이용하였다.

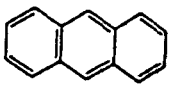
(1) 세척시간에 의한 영향

Kinetic study를 통해 반응에 대한 평형상태를 확인하였다. 평형상태의 도달여부는 *ex-situ* 토양세척기법 적용시 정화공정에 소요되는 시간을 결정짓는 중요한 운전 인자중 하나이다. 계면활성제의 특성에 따른 세척영향을 파악하기 위해 계열이 같으면서도 특성이 서로 다른 polyoxyethylene oleyl ester계열의 비이온계 계

면활성제인 OA-5, OA-9, OA-14와 적용성 검토를 위해 선정된 생물계면활성제 sophorolipid를 이용하여 kinetic study를 실시하였다.

오염시킨 토양을 #12체를 사용하여 #4~#12 토양과 #12체를 통과하는 토양으로 분류한 후, 각각의 중량비를 적용하여 250mL 삼각플라스크에 25g씩 정량 주입하였다. 이러한 조작은 원래의 토양과 유사한 입경분포를 갖는 토양시료를 얻어 토양입경의 편중에 의한 오류를 방지하기 위함이었다. 계면활성제 용액의 농도는 0.5%(중량비)를 일괄적으로 적용하였으며, 진탕비는 1:5로 하였다. 진탕기에서 빠른 속도로 교반하며 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 10시간 경과시 시료를 채취하였다.

Table 1. The Properties of Target Organic Contaminants

Compound Characteristic	n-dodecane	anthracene
Classification	aliphatic	aromatic
Structure	$CH_3(CH_2)_{10}CH_3$	
Molecular Weight	170.34	178.24
mp. (℃)	-9.6	216.3
bp. (℃)	216.3	340
Density	0.7487	1.283

(2) 계면활성제 용액의 농도에 의한 영향

앞의 kinetic study에서 검토된 계면활성제중 세척효율이 비교적 양호한 계면활성제에 대해 용액의 농도를 ~5%(중량비)로 변화시키며 용액의 농도에 따른 세척효율을 검토하였다. 이때 계면활성제 용액의 진탕비는 1:5로 하였다.

(3) 계면활성제 용액의 진탕비에 의한 영향

진탕비는 오염토양의 무게에 대한 계면활성제 용액부피의 비를 뜻한다. *Ex-situ* 토양세척기법의 합리적 적용을 위해서는 효율적이며 경제적인 계면활성제 용액의 진탕비를 구하는 것이 매우 중요하다. 계면활성제 OA-9와 OA-14 용액의 진탕비를 1:4, 1:5, 1:6, 1:7로 변화시키며 적용하였다. OA-9의 경우 1% 이상의 농도에서는 거의 유사한 세척력을 보였으나, 이후 적용될 혼합계면활성제와의 세척효율 비교를 위해, 계면활성제 용액의 농도는 3%(중량비)로 고정하였다.

(4) 온도에 의한 영향

계면활성제의 작용에 대한 온도의 영향을 토양 입경별로 살펴보았다. 오염된 토양을 체분리하여 각 입경별(#4~#7, #7~#12, #12~#30, #30~#60, #60~)로 토양시료 5g씩을 vial에 넣고 계면활성제 OA-9, OA-14용액을 농도 3%(중량비), 진탕비 1:5(25mL)로 적용하였다. 진탕기내의 온도를 25, 35, 45℃로 고정하여 각각의 온도에서 12시간씩 교반한 후 시료를 취해 분석하였다.

2.4 소수성 유기오염물질의 회수

Anthracene 300mg/kg dry soil에 대하여 회분식 토양세척 실험에서 가장 세척효율이 우수하다고 판단된 OA-9를 3%용액으로 주입하되 진탕비는 1:5로 하여 12시간 동안 25℃에서 진탕세척하였다. 세척후 1시간 동안 정치하여 토양을 침전시킨 후 상등액을 분리하였다. 세척후 분리된 상등액중에 포함된 유기오염물질을 유기용매를 이용하여 효율적으로 분리 · 회수하기 위하여 상등액의 pH와 분리회수 온도에 따른 영향을 검토하였다. 상등액의 pH에 의한 영향을 살펴보기 위하여 pH를 1~13으로 조절한 상등액 3mL에 benzene 7mL를 넣은 후, 25℃에서 30분간 진탕교반 하였다. 교반후 정치하여 분리된 상층의 유기용매 1mL를 취하여 3,000rpm에서 30분간 원심분리한 후 상층의 시료를 취하여 GC로 분석하였다. 분리회수 온도가 유기오염물질의 회수에 미치는 영향은 5~50℃ 영역에서 살펴보았

다. 세척후 분리된 상등액의 pH를 5로 조절하여 3mL를 취하고 여기에 benzene 7mL를 넣은 후, 정해진 온도에서 30분간 진탕 교반한 후 앞에서와 같은 방법으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 회분식 토양세척 실험

(1) 세척시간에 의한 영향

Fig. 1은 각 계면활성제 용액에 대해 시간에 따른 세척효율의 변화를 나타낸 것으로, 그래프의 y좌표는 초기 토양에 존재했던 오염물질의 질량(M_0)에 대한 경과된 시간별로 남아있는 오염물질의 질량(M_t)비를 나타낸다. 적용된 계면활성제 중 OA-5와 sophorolipid의 제거율이 극히 낮은 반면 OA-9는 약 40%, OA-14는 약 20%의 세척효율을 보이고 있다. 액상 용해도 실험에서는 OA-5와 sophorolipid가 소수성 유기오염물질에 대해 우수한 용해도를 보였지만, 여타 계면활성제에 비해 상대적으로 낮은 HLB값을 갖고 있다. 계면활성제 용액은 HLB값이 감소됨에 따라 친유성으로 변하며 물에 대한 용해성이 떨어지게 되는데, 이는 외관상으로는 반투명에서 현탁액, 현탁액에서 불용성의 순서로 변하게 된다. 또한 친유성이 강해질수록 계면활성제 용액의 고체상에 대한 표면장력은 낮아지게 되므로 고액분리가 쉬워지게 된다. OA-5와 sophorolipid는 고액분리 현상이 현저하여 교반후 5분이내에 유탁현상이 사라지며, OA-9는 10시간 정도 후에야 유탁현상이 사라지고 OA-14는 유탁현상이 잘 사라지지 않았다.

고액분리 현상이 발생되면 계면활성제 용액이 현탁액 내지 불용성으로 변하면서 토양과의 친화력이 떨어져서 오염토양과 원활한 접촉이 일어나지 못하므로 토양으로부터 오염물질의 제거가 제대로 일어날 수 없게 된다. 따라서 토양세척에는 낮은 HLB값으로 인해 고액분리가 쉽게 일어나는 계면활성제를 사용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

한편, OA-14는 OA-9보다 높은 HLB값을 갖고 있어 안정된 미세토양입자의 유탁액을 형성하지만 용해도의 지표인 MSR값이 각각 0.64와 0.83으로 OA-9가 OA-14보다 높은 용해력을 보이고 있기 때문에 OA-9의 세척효율이 OA-14보다 높게 나타나는 것으로 판단된다. 결론적으로, 고액혼화가 잘 발생되는 적절한 HLB값을 갖는 동시에 소수성 유기오염물질에 대해 우수한 용해력을 보이는(MSR값이 높은) 계면활성제 용액이 토양세척에 적합한 것으로 판단된다. Sophorolipid의 경우, 제조방법에 따라 8에서 13까지의 HLB값을 지닐 수 있지만 본 실험에 적용된 sophorolipid는 고액분리가 잘되는 현상으로 미루어 보아 HLB값이 낮으리라 추측된다.

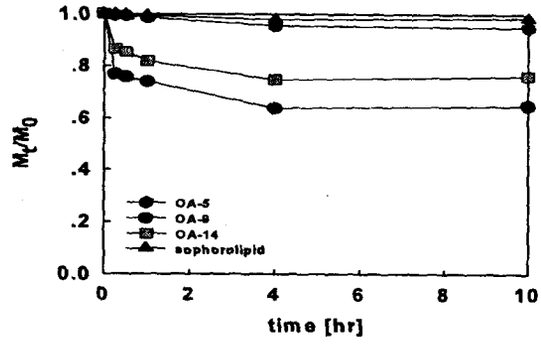


Fig. 1. M_t/M_0 vs. Time
(n-dodecane 4,000mg/kg dry soil, dilution ratio = 1 : 5, conc. of surfactant solution = 0.5 %, temperature = 25℃)

(2) 계면활성제 용액의 농도에 의한 영향

계면활성제 OA-9, OA-14 용액의 농도를 각각 0.3, 0.5, 0.8, 1, 2, 3, 4, 5%로 적용한 결과, OA-9의 농도가 0~1% 범위에서 증가되는 경우 세척효율이 급격하게 증가되나 1% 이상에서는 뚜렷한 세척효율의 차이를 발견할 수 없었다.

본 실험 조건하에서 OA-9 용액으로 도달할 수 있는 최대 세척효율은 2% 일 때 약 60% 이며,

OA-14의 경우 20% 미만이었다(Fig. 2).

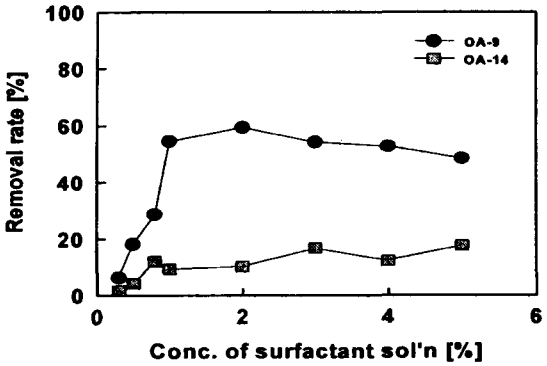


Fig. 2. Removal Rate vs. Concentration of Surfactant Solution (n-dodecane 4,000 mg/kg dry soil, dilution ratio = 1 : 5, shaking time = 10hr, temperature = 25℃)

(3) 계면활성제 용액의 진탕비에 의한 영향

본 실험 조건하에서는 각 계면활성제 용액의 진탕비가 세척효율에 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다(Fig. 3). 진탕비를 너무 크게 하는 경우 소요되는 계면활성제의 양과 처리해야할 세척 유출액이 많아져 공정원가의 상승을 초래하고, 반면 진탕비가 너무 작은 경우 교반중에 임펠러가 마모되고 동력장치에 과부하가 걸릴 수 있으므로 적절하다고 판단되는 진탕비인 1 : 5로 실험을 실시하였다.

(4) 온도에 의한 영향

계면활성제 용액의 온도에 의한 영향을 각 입경별 세척효율로 나타냈다. OA-9의 경우 온도가 상승됨에 따라 작은 입경에 대한 세척효율은 오히려 감소하는 경향을 보이고 있는 반면, OA-14의 경우는 온도가 상승됨에 따라 토양입경의 전 범위에 걸쳐 세척효율은 급격히 상승하였다(Fig. 4). 이러한 현상들은 각 계면활성제가 온도에 민감할 뿐만 아니라 계면활성제마다 다른 운점(cloud point)을 갖고 있기 때문인 것으로 생각된다. 온도가 상승하게 되면 계면활성제의 소수성 유기오염물질에 대한 용해력이 증가하다 어느 이상의 온도에서는 계면활성제 용액이 불투명한 상태로 바뀌면서 소수성 유기오염물질에 대한 용해도가 급격히 감소하게 된다. 이때의 온도를 운점이라 하며 비이온계 계면활성제의 특징중 하나이다.

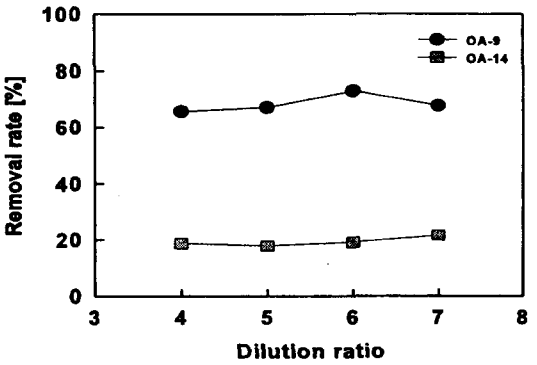


Fig. 3. Removal Rate vs. Dilution Ratio of Surfactant Solution (n-dodecane 4,000 mg/kg dry soil, conc. of surfactant solution = 3%, shaking time = 10hr, temperature = 25℃)

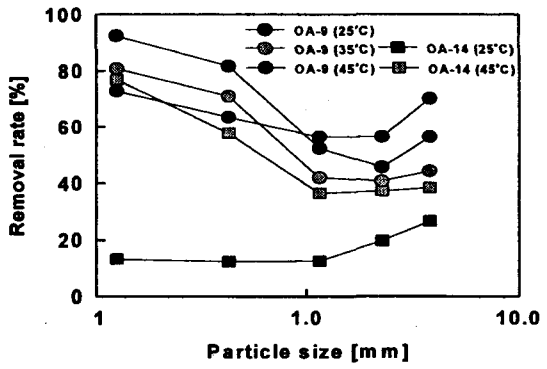


Fig. 4. Removal Rate vs. Particle Size (n-dodecane 4,000mg/kg dry soil, OA-9, OA-14 3%, dilution ratio = 1 : 5, shaking time = 12 hr)

OA-9의 경우, OA-14에 비해 상대적으로 낮은 운점범위(35~40℃)를 갖는데 이는 상승된 온도(35℃ 및 45℃)에서 계면활성제의 물에 대한 용

해도가 감소하여 오염토양에 대한 세척효율이 떨어진 것으로 생각되며, OA-14는 OA-9보다 높은 운점범위를 갖고 있어 본 실험의 온도에서는 계면활성제 분자가 물에 대해 용해도가 감소하기 보다는 미셀 크기가 증가하여 오히려 세척효율이 상승한 것으로 보인다.

3.2 소수성 유기오염물질의 회수

세척후 분리된 상등액중에 포함된 anthracene을 유기용매를 이용하여 분리 · 회수하는 경우, 계면활성제와 토양 혼합체의 pH가 5 이하로 됨에 따라 유기용매에 의한 anthracene의 회수농도가 증가되었으며 pH 2에서 최대값을 나타내었다(Fig. 5). 비이온계 계면활성제에 대한 양이온을 갖는 수소기의 영향은 다른 이온계 계면활성제에 비해 그다지 큰 영향을 끼치지 않지만 pH가 감소함에 따라 미셀의 외부지역을 차지하는 계면활성제의 head group중의 산소분자가 용액중의 수소분자와 O-H 결합을 이루어[3] 미셀이 견고하지 못한 구조로 바뀌게 되어 용매에 의한 오염물질의 회수농도가 증가하게 되는 결과를 낳는다. 또한 pH가 5에서 증가됨에 따라 회수농도는 약간 증가되었으나 그다지 큰 변화를 얻을 수 없었다.

유기용매로 사용된 벤젠의 빙점이 5℃이므로, 빙점보다 높은 온도에서 온도를 변화시키면서 용해도의 변화를 살펴보았다. 회수온도가 낮아질수록 회수되는 농도가 감소하다 빙점인 5℃ 부근에서 급격히 증가되었으며, 이러한 현상에 대한 원인은 다음과 같다. 낮은 온도의 계면활성제 용액의 경우, 계면활성제의 물에 대한 용해도가 감소하여 계면활성제에 의해 형성된 미셀에 용융되어 있던 anthracene이 수중으로 다시 배출되게 된다. Anthracene은 소수성이므로 물에 대한 용해도가 매우 낮아 유기용매층과 접촉하는 경우 물보다 용해도가 큰 유기용매층으로 이동하여 용해되는 것으로 판단된다. 비이온계 계면

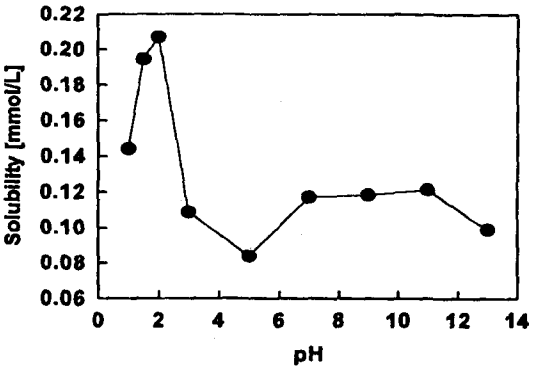


Fig. 5. Solubility of Anthracene vs. pH (Anthracene 300mg/kg dry soil, OA-9 3%, dilution ratio = 1 : 5, shaking time = 12 hr, temperature = 25℃)

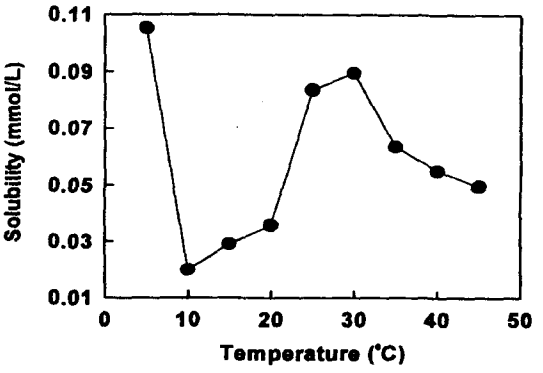


Fig. 6. Solubility of Anthracene vs. Temperature (Anthracene 300mg/kg dry soil, OA-9 3%, dilution ratio = 1 : 5, shaking time = 12 hr, pH = 5)

활성제의 경우 온도가 일정 값까지 상승되면 불투명한 상태로 변화하게 되며, 이러한 온도를 운점(cloud point)이라 한다. OA-9의 경우 운점은 35℃ 부근으로 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 온도가 30℃ 정도까지의 범위에서는 온도가 증가됨에 따라 유기용매에 대한 anthracene의 용해도가 증가하였는데 이는 운점에 이를 때까지 온도가 증가함에 따라 미셀의 크기가 커져[4] 유기용매에 의해 쉽게 용출될 수 있기 때문이다. 온도가 30℃ 이상에서 용해도가 오히려 감소하는 이유는 운점이상의 온도에 의한 영향으로 미셀이 깨

지며 형성된 계면활성제 분자들이 anthracene과 경합하며 유기용매층으로 용해되어 상대적으로 오염물질에 대한 용해도가 떨어지기 때문이다.

따라서 OA-9를 적용하는 경우 30℃, pH 2에서 유기용매인 벤젠을 이용하여 세척유출수로부터 anthracene을 회수하는 것이 바람직하다. Anthracene을 회수한 후 세척유출수중의 계면활성제는 온도를 낮추고, pH를 5로 다시 조절한 후 재사용할 수 있다.

4. 결 론

안정적으로 국내에서 생산 및 공급가능한 화학계면활성제 중에서 효율적으로 현장에 적용할 수 있는 토양세척제를 선별하여 소수성 유기오염물질로 오염된 토양에 대해 토양세척실험을 한 결과는 다음과 같다.

1. 세척용액이 안정된 유탁액을 형성하는데 결정적인 역할을 하는 HLB값이 토양세척시 가장 중요한 역할을 하는 변수였다. 소수성 유기오염물질에 대한 용해력은 우수하나 HLB값이 낮은 OA-5와 sophorolipid는 아무리 높은 농도를 적용하더라도 세척용액이 곧 고액분리되는 현상이 나타나므로 극히 미비한 세척효율을 보인 반면, 비록 소수성 유기오염물질에 대한 용해력은 OA-5나 sophorolipid보다 떨어지지만 안정된 유탁액이 형성되는 OA-9와 OA-14는 OA-5나 sophorolipid보다 높은 세척력을 보였다.
2. 계면활성제 용액이 안정된 유탁액을 형성하는 HLB값의 범위내에서는 용해도에 대한 지표인 MSR값이 중요한 역할을 하는데, 본 연구에서 적용된 OA-9와 OA-14에 대한 MSR값의 측정치는 각각 0.83과 0.64이고 세척효율은 각각 60%와 20%로 MSR값이 높을수록 토양 세척효율이 우수하였다.
3. OA-9와 OA-14의 농도에 따른 영향은 ~5%(중량비)의 농도를 적용한 결과, 세척효율은 OA-9는 ~1%까지는 급상승하다 1~5%에서는 거의 변화가 없었다. 토양세척에 대한 한계효율은 OA-9와 OA-14가 각각 60%와 20%이었다. 진탕비에 따른 영향은 거의 없었으며 최적의 진탕비로 1:5를 선정하였다.
4. OA-9의 경우, OA-14에 비해 상대적으로 낮은 운점범위(35~40℃)를 갖는데 이는 상승된 온도(35℃ 및 45℃)에서 계면활성제의 물에 대한 용해도가 감소하여 오염토양에 대한 세척효율이 떨어진 것으로 생각되며, OA-14는 OA-9보다 높은 운점범위를 갖고 있어 본 실험의 온도에서는 계면활성제 분자가 물에 대해 용해도가 감소하기 보다는 미셀 크기가 증가하여 오히려 세척효율이 상승한 것으로 보인다.
5. OA-9 세척유출수로부터 유기용매인 벤젠을 이용하여 anthracene을 회수하고자 하는 경우, 세척유출수의 온도를 30℃ pH는 2로 조절하는 것이 회수 효율 측면에서 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 국가 선도기술 개발사업인 G7 project의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Grasso, D. (1993), Hazardous Waste Site Remediation, Lewis Publishers, USA.
2. U.S. Environmental Protection Agency (1990), Handbook on In Situ Treatment of Hazardous Waste-Contaminated Soils, EPA/540/2-90/002, Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development, USEPA, Cincinnati, OH.

3. Drew Myers (1992), Surfactant Science and Technology, Second Edition, VCH Publishers : 121.
4. Nakagawa, T. and K. Shinoda, in Colloidal Surfactants, edited by K. Shinoda, T. Nakagawa, B. Tamamushi, and T. Isemura, Academic, New York, 1963.