



계면활성제/응집제를 이용한 나프탈렌 오염토양 처리

박준석, 박종은*, 신철호*, 박희정**

삼척대학교 환경공학과, (재)서해환경과학연구소*, 환경부 자연보전국 자연정책과**

(2004년 5월 13일 접수, 2004년 6월 1일 채택)

Treatment of Naphtalenes-Contaminated Soil by Surfactant/ Coagulant

Joon-Seok Park, Jong-Un Park*, Chul-Ho Shin*, Hee-Jung Park**

Dept. of Env. Eng., Samcheok National University, *Seohae Environment Science, **Institute Ministry of Environment, Nature Conservation Bureau, Nature Policy Division

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate in situ soil flushing and coagulation for naphtalenes-contaminated soil remediation. Mixed-surfactant of 1% POE12 and 1% SDS (1 : 1 by volume basis) was used as a flushing solution. When 5 pore volumes of mixed -surfactant were added to soil column, the flushing efficiencies of 2-methylnaphtalene and 1,5-dimethylnaphtalene with about 1,500 mg/kg(dry soil) were approximately 80% and 60% respectively. In adding 13 pore volumes of mixed-surfactant, the flushing efficiencies of 2-methylnaphtalene and 1,5-dimethylnaphtalene were 90% and 82%. However, considering in situ soil flushing with distilled water, about 42% and 71% were flushed for 2-methylnaphtalene and 1,5-dimethylnaphtalene by surfactant-only. For about 10,000 mg/kg(dry soil) diesel-contaminated soil, 40% and 70% of TPH were flushed-out in 5 pore volumes and 13 pore volumes addition. However, for naphtalenes in diesel TPH, 90% of flushing efficiency was discovered in adding only 5 pore volumes of flushing solution. There was not discovered significant difference among coagulation efficiencies of 6 kinds of polymers, and the coagulation efficiencies were near 50%.

Key Words : In situ flushing, surfactant, polymer coagulant, naphtalenes

초 록

본 연구에서는 PAHs 중에서 흔히 높은 농도로 발견되고 있는 나프탈렌 오염토양에 대하여 지중토양세정으로 세정한 후 세정된 용액을 고분자 응집제로 처리하였다. 오염물질로는 2-methylnaphtalene과

1,5-dimethylnaphtalene을 사용하였다. 세정용액으로는 POE12와 SDS를 1 : 1 (부피비)로 혼합한 계면활성제를 사용하였다. 혼합계면활성제의 주입횟수를 5 pore volume까지 증가시켰을 때 2-methylnaphtalene의 세정효율은 지속적으로 1,5-dimethylnaphtalene의 제거율은 다소 선형적으로 증가하여 각각 약 80%와 60%가 세정되었다. 13 pore volume으로 세정한 후 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene의 세정효율은 각각 약 90%와 82%로 2-methylnaphtalene이 1,5-dimethylnaphtalene 보다 다소 높았으나, 물에 의하여 세정된 부분을 보정하면 약 42%와 71%로 상대적으로 소수성인 1,5-dimethylnaphtalene의 세정효율이 더 높았다. 약 10,000 mg/kg(건조토양)의 디젤 TPH는 5 pore volume의 주입에서 약 40%의 세정효율만을 나타내었으며, 추가적으로 13 pore volume까지 첨가하였을 때 약 70%의 세정효율을 보였다. 그러나 디젤내 나프탈렌 성분은 세정용액을 4 pore volume 까지 주입하였을 때까지 세정효율이 급격히 증가하였으며, 5 pore volume을 가하였을 때 90%가 세정되어 디젤 TPH의 40%보다 두 배 이상 높은 세정효율을 나타내었다. 2-Methylnaphthalene 과 1,5-dimethylnaphthalene 오염토양 용출세정액은 6가지 고분자 응집제로 처리한 결과 응집제 모두 50% 부근의 비슷한 제거율을 나타내었다.

핵심용어 : 지중토양세정, 계면활성제, 고분자 응집제, 나프탈렌

1. 서론

지하유류탱크(USTs, Underground Storage Tanks)의 유출사고나 기타 유독성 오염물질에 의한 오염은 다양한 경로를 통해 작간접적으로 인간에게 피해를 주게 된다. 특히 소수성 유기물질의 경우 일단 땅속으로 방출되면 토양에 흡착되거나 NAPL(Non-aqueous Phase Liquid)로 남아 토양 내 미생물 활동이나 화학적 분해에 의해서 잘 제거되지 않고 오랜 기간에 걸쳐 주변 지하수의 오염원으로 작용한다. 이러한 물질 중 대표적인 소수성 유기물질 그룹중 하나가 PAHs(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, 다환방향족탄화수소류)이다¹⁾. PAHs란 2가지 이상의 방향족 고리가 융합된 유기화합물을 말한다. 실온에서 PAHs는 고체상태이며, 이 부류의 화합물은 비점과 융점이 높으나 증기압이 낮고, 분자량 증가에 따라 극히 낮은 물용해도를 나타내는 것이 일반적인 성질이다. PAHs는 여러 유기용매에 용해되며 친유성이 높고 화학적으로는 다소 불활성이다²⁾. PAHs는 대부분 휘발성이 낮아 토양증기추출의 적용이 어렵다. PAHs 중에서 나프탈렌 화합물은 동물실험에서 태아독성 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으

며, 최소의 투여량으로도 쥐에서 사산율 증가, 태아 재흡수, 태아중량 감소 및 기형발생률 증가를 나타내는 것으로 보고되고 있다²⁾. 나프탈렌의 log Kow(octanol-water partition coefficient)와 log Km(micelle-water partition coefficient)은 3.36과 2.61이다³⁾. 나프탈렌 화합물은 디젤에도 포함되어 있는 대표적인 PAHs 화합물이다. 염 등(1997)⁴⁾은 coar tar로 오염된 뉴욕주 한 지역의 토양오염도를 측정된 결과 16가지의 PAHs 중에서 나프탈렌이 가장 높게 검출되었다고 하였다.

기존의 토양복원기술은 일차적으로 오염물질이 토양에 흡착되어 있거나 비수용성 액상물질(NAPL, Non-Aqueous Phase Liquid) 상태에서 물 또는 기체와 같은 유동상태로의 전이를 필수적인 단계로 하고 있기 때문에 디젤이나 PAHs로 오염된 토양에서와 같이 오염물의 물질전달이 느린 상태에서는 그 처리 효율이 제한될 수밖에 없다. 이런 지역의 효과적인 복원을 위해서는 오염물질이 유동층으로의 전이가 가속화될 수 있도록 하는 공정이 필요하다. 계면활성제를 이용한 지중토양 세정(in situ soil flushing)은 소수성 오염물질의 용해도를 증가시킴으로써 수중으로의 물질전달을 원활하게 하여 토양으로부터 오염물질을 분리해내

[Table 1] Characteristics of Soil used in this Study

Item	Value
Soil texture	sandy loam
Sand (%)	71.2
Silt (%)	16.3
Clay (%)	12.5
Moisture content (%)	15.0
TOC (%)	0.5
VS (%)	4.7
pH	6.7
CEC (meq/100g)	33.7
Porosity	0.36

는 방법이다.

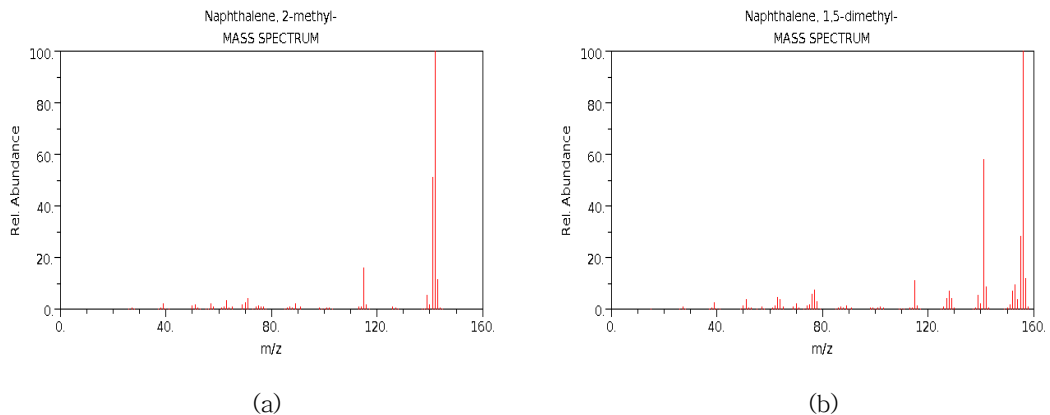
본 연구는 PAHs 중에서 흔히 높은 농도로 발견되고 있는 나프탈렌 오염토양에 대하여 지중토양 세정으로 세정한 후 세정된 용액을 고분자 응집제로 처리하는 방안을 검토하기 위하여 실시하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

토양은 J사에서 오염되지 않은 것을 채취하여 햇빛이 들지 않는 곳에서 풍건시킨 후 2mm 체를 통과한 것만을 실험에 사용하였다. 사용된 토양은 토성분석⁵⁾ 결과 사질양토(sandy loam)이었으

며, pH와 TOC는 각각 6.7과 0.5%이었다[Table 1]. 오염물질로는 디젤의 GC/MS 분석결과 PAHs 계열화합물 중에서 높은 농도로 검출되며 물용해도 차이가 큰 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene을 선정하였다. 2-Methylnaphtane과 1,5-dimethylnaphtalene의 물용해도는 각각 25 mg/L와 3.1 mg/L이다 [Table 2]. 2-Methylnaphtane(Aldrich, USA) 과 1,5-dimethylnaphtalene(Aldrich, USA)을 n-hexane에 용해한 후 약 15%로 수분이 조절된 비오염토양에 초기농도가 약 1,500 mg/kg(건조 토양)이 되도록 분사하여 고르게 혼합하였다. 이 과정에서 혼합은 오염토양내 n-hexane을 휘발시키는 역할을 한다. 오염시킨 토양은 밀봉하여 실온에서 3주간 방치시킨 후 실험에 사용하였다. 디젤 중에서 검출되는 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene의 크로마토그래프를 GC/MS의 라이브러리에서 확인하여 [Fig. 1]에 나타내었다. 계면활성제 세정용액으로는 1.0% POE12와 1.0% SDS 계면활성제를 1 : 1 (부피 비)로 혼합한 것을 사용하였다. POE12는 비이온계이고 SDS는 음이온계 계면활성제이며, 군산 H사에서 구입하였다[Table 3]. 고분자 응집제는 이온 특성에 따라 음이온계, 비이온계, 양이온계로 나눌 수 있다. 계면활성제로 토양을 세정한 후 유출용액에 대한 고분자 응집제의 응집 특성을 알아



[Fig. 1] Mass spectrums of (a) 2-methylnaphthalene and (b) 1,5-dimethylnaphthalene.

[Table2] Physicochemical Property of 2-Methylnaphtalene and 1,5-Dimethylnaphtalene

Item	2-methylnaphtalene	1,5-dimethylnaphtalene
Molecular Formula	C ₁₁ H ₁₀	C ₁₀ H ₆ (CH ₃) ₂
MW (g/mol)	142.2	156.2
Melting point (°C)	34.58	77-82
Boiling point (°C)	241	-
Density (at 20°C, g/cm ³)	1	1.02
Water Solubility (mg/L)	25	3.1

[Table3] Physicochemical Property of Surfactant used in this Study

Item	POE12	SDS
Chemical Name	polyoxyethylene	sodium dodecyl sulfate
Ionic Characteristic	nonionic	anionic
Molecular Formula	C ₁₇ H ₃₃ COO(C ₂ H ₄ O) ₁₂ H	CH ₃ (CH ₂) ₁₁ OSO ₃ Na ⁺
pH	5.0-6.5	5.0-6.5
HLB ^{a)}	13.1	-

a) Hydrophilic-Liphophilic Balance

[Table4] Physicochemical Property of Polymer Used in this Study

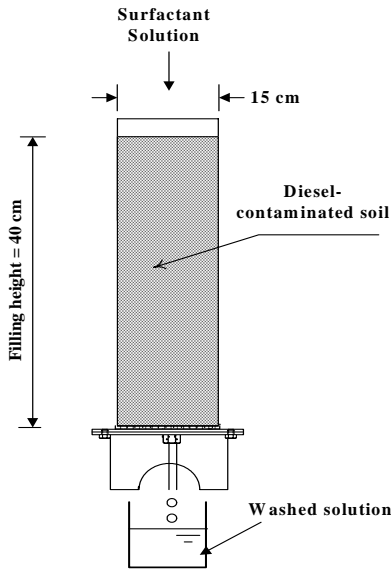
Commercial Name	Ionic Characteristic	Viscosity (cps) 0.1 % Aqueous Solution	pH	Bulk Density (g/mL)	MW(×10 ⁶)
A601P	anionic, middle	190~250	6~8	0.6~0.8	14
A331P	anionic, strong	200~270	6~8	0.7~0.9	15
N100P	non-ionic	40~80	6~8	0.6~0.7	12
N101P	non-ionic	40~80	6~8	0.6~0.7	12
C101P	cationic, middle	190~230	4~7	0.6~0.8	6
YCX4	cationic, weak	120~180	4~7	0.6~0.8	4

보기 위하여 음이온계(A601P, A331P), 비이온계(N100P, N101P), 양이온계(C101P, YCX4)의 응집제를 각각 2가지씩 선정하여 실험하였다 [Table 4].

토양세정 실험에 사용된 칼럼은 원통형 아크릴로 제작하였으며, 지름과 높이는 각각 15cm와 60cm이었다(Fig. 2). 칼럼하부에는 토양이 빠지지 않도록 다공판을 설치하였으며 칼럼에 디젤오염토양 10 kg을 넣고 높이가 40cm될 때까지 타격충전하여 용적밀도가 1.4 g/cm³가 되도록 하였다. 충전된

토양 상부에는 아크릴 다공판을 설치하여 세정용액 주입시 토양표면 전체에 균일하게 주입될 수 있도록 하였다. 세척횟수의 영향을 평가하기 위하여 계면활성제를 단계적으로 총 13 pore volume까지 주입하고 중력배수시킨 후 토양과 세정액내 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene을 분석하였다.

토양세정 후 용출용액에 대한 최적응집제 주입량을 결정하기 위하여 용출액 500 mL에 0.2% 응집제를 1~7 mL로 증가시키면서 jar-test를 실시하



[Fig. 2] Experimental schematic for soil flushing.

었다. Jar-test 결과에 따라 정해진 주입량으로 6 가지 응집제를 토양세정 용출액에 투여하여 응집 실험을 실시하였다.

2.2 분석방법

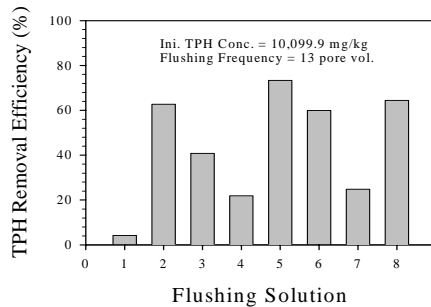
토양내 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene 농도는 토양을 20 g 채취하여 토양오염공정시험법(1999)⁶⁾의 초음파추출법에 따라 전처리한 후 GC/MS(Varian Saturn

2000, USA)로 분석하였다. 분석에 사용된 GC칼럼은 DB5(60 m length × 0.32 mm internal diameter × 0.25 μm film thickness)이었다. 토양세정액과 고분자응집제를 이용하여 처리한 후 용액내에 존재하는 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene의 분석은 대상용액에 NaCl을 넣어 혼합한 후 계면활성제의 마이셀(micelle)을 파괴시켰다⁷⁾. 여기에 n-hexane을 넣고 교반한 후 초음파 추출하고 1시간 이상 정치시킨 후 상등액을 동일한 GC/MS로 분석하였다.

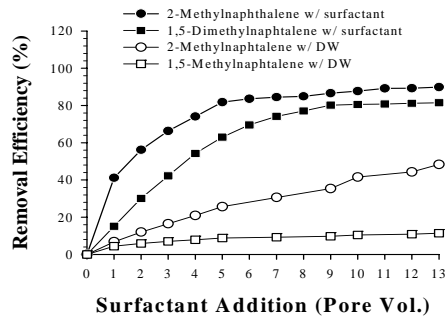
3. 결과 및 고찰

3.1 계면활성제 세정효율

디젤오염토양을 대상으로 실시한 회분식 반응결과 계면활성제를 1% 농도로 사용하였을 때 세정효율이 가장 높았다(자료 미제시). 또한 계면활성제의 농도를 1%로 고정하고 디젤오염 토양칼럼에 계면활성제를 13 pore volume까지 연속주입한 세정실험에서는 POE12, SDS, SFT85 등을 단독으로 사용한 경우 보다 POE12와 SDS 계면활성제를 혼합한 경우의 세정효율이 더 우수하였다(Fig. 3). 증류수를 사용한 경우에는 4%의 가장 낮은 세정효율을 나타내었고, POE12 한 가지로 세정한 경우에는 약 60%의 세정효율을 나타내었다. 그러나 계면활성제를 혼합하여 사용한 경우에는 비이온계면활성제인 POE12에 음이온계면활성제인



[Fig. 3] Comparison of TPH removal efficiency in flushing with 13 pore volumes of surfactant solutions (1 = distilled water; 2 = POE12; 3 = SDS; 4 = SFT85; 5 = POE12+SDS; 6 = POE12+SFT85; 7 = SDS+SFT85; 8 = POE12+POE12)



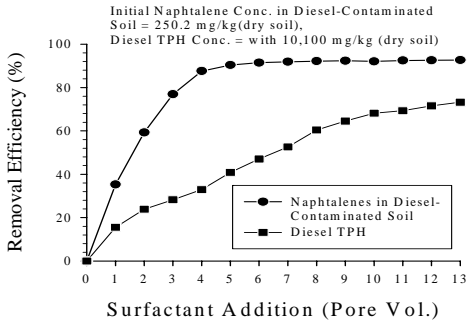
[Fig. 4] Removal efficiencies of 2-methylnaphthalene and 1,5-dimethylnaphthalene with POE12+SDS mixed-surfactant addition (initial concentration = 1,524 mg/kg of dry soil for 2-methylnaphthalene, 1,501 mg/kg of dry soil for 1,5-dimethylnaphthalene)

SDS를 혼합하였을 때 POE12 한 가지를 사용한 경우보다 약 10%의 세정효율이 증가하였으나 그 외에는 오히려 감소하거나 비슷하였다. 그러므로 나프탈렌 오염토양을 처리하기 위한 본 실험에서는 세정효율이 가장 우수하였던 POE12와 SDS를 혼합한 계면활성제를 총 농도가 1%가 되도록 1 : 1(부피비)로 혼합하여 사용하였다.

[Fig. 4]는 2-methylnaphthalene과 1,5-dimethylnaphthalene을 POE12+SDS 계면활성제로 세정한 결과이다. 이 때 각 화합물의 초기농도는 약 1,500 mg/kg(건조토양)이었다. 1 pore volume으로 세정하였을 때 2-methylnaphthalene과 1,5-dimethylnaphthalene은 각각 약 40%와 15%가 세정되었다. 여기에서 1 pore volume은 토양공극이 차지하는 1 부피를 의미하며, 본 실험에 사용된 토양의 공극률은 36%이었다[Table 1 참조]. 혼합계면활성제를 연속적으로 첨가하면서 농도를 분석한 결과 첨가횟수를 5 pore volume까지 증가시켰을 때 2-methylnaphthalene의 제거율은 지속적으로 1,5-dimethylnaphthalene의 제거율은 다소 선형적으로 증가하였다. 7 pore volume 이상에서는 혼합계면활성제의 첨가에 따른 제거율의 증가가 매우 미미함을 볼 수 있었다. 13 pore volume으로 세정한 후 2-methylnaphthalene과 1,5-dimethylnaphthalene의 최대 제거율은 각각

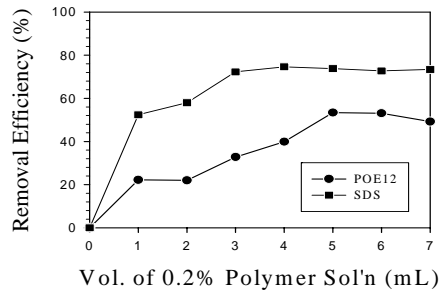
약 90%와 82%이었다. 2-Methylnaphthalene의 세정효율이 1,5-dimethylnaphthalene보다 다소 높았던 것은 각 화합물의 물용해도 차이인 것으로 생각된다. 2-Methylnaphthalene의 물용해도는 25 mg/L이며, 1,5-dimethylnaphthalene의 물용해도는 3.1 mg/L이다. 물용해도가 0.2 mg/L 정도인 디젤에 동일한 농도의 POE12+SDS 계면활성제를 사용하여 세정한 경우에는 73%가 제거되었었다[Fig. 3 참조]. 증류수만으로 세정한 경우에는 물용해도가 높았던 2-methylnaphthalene이 물용해도가 상대적으로 낮았던 1,5-dimethylnaphthalene 보다 높은 세정효율을 나타내었으며, 각각의 세정효율은 약 48%와 11%이었다[Fig. 4]. 이는 앞서 언급하였듯이 동일한 계면활성제 사용시 2-methylnaphthalene의 세정효율이 1,5-dimethylnaphthalene보다 높았던 것은 물용해도 차이에 의하여 더 많이 증류수에 녹아나왔기 때문이다. 계면활성제는 일반적으로 소수성 유기오염물질에 효과적으로 적용되는데 물용해된 부분을 보정하여 계면활성제에 의하여 제거된 양만을 계산하면 상대적으로 소수성이었던 1,5-dimethylnaphthalene의 세정효율이 71%로 2-methylnaphthalene의 42% 보다 높았다.

초기농도를 디젤 10,100 mg TPH/kg(건조토양)으로 오염시킨 토양에서 나프탈렌 화합물의 농도를 분석하였더니 250.2 mg naphthalenes/kg(건



[Fig. 5] Removal efficiency of napthalenes in diesel with surfactant addition

조토양)이었다. 여기에 POE12+SDS 계면활성제를 13 pore volume까지 증가시키면서 세정한 후 나프탈렌 세정효율을 살펴보았다(Fig. 5). 디젤 오염 토양중의 나프탈렌 화합물은 [Fig. 4]의 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene처럼 계면활성제 혼합용액을 4 pore volume까지 가하였을 때 세정효율이 급격히 증가하였으며, 5 pore volume의 정도를 가하였을 때 90%의 세정효율을 나타내었다. 그러나 100여 가지 이상의 화합물들로 이루어진 디젤 오염토양에서는 5 pore volume의 계면활성제 혼합용액 첨가로는 약 40%의 효율만을 나타내었으며, 13 pore volume까지 첨가하였을 때 약 70%의 세정효율을 보였다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 물용해 차이인 것으로 판단되며 나프탈렌의 물용해도는 31 mg/L로 디젤의 0.2 mg/L에 비하여 약 160배 이상 높았다. 또한 디젤은 서로 다른 특성을 가진 화합물이 복합되어 있기 때문에 계면활성제의 특성에 맞는 성분들이 선택적으로 세정되었을 것으로 생각된다. 염 등(1997)⁴⁾은 PAHs에 대한 용출효율을 분석한 결과 분자량이 커질수록 세척효율이 저하하였다고 하였다. 본 실험에서 디젤오염토양을 세정한 경우에 생물학적 처리나 토양증기추출과 같은 물리적 처리로 제거가 잘 되지 않는 PAHs 성분 중 나프탈렌 화합물을 쉽게 세정할 수 있었다. 이에 대한 연구가 추가적으로 더 진행된다면 생물학적 또는 물리적 처리와 토양세정기술을 연계하는 처리에 대한 방향이 제시될 수



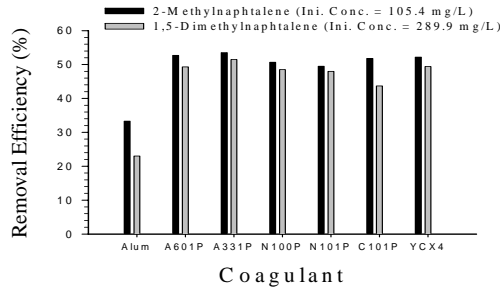
[Fig. 6] Jar-test of A601P polymer for POE12 and SDS surfactant flushed-solutions

있을 것으로 판단된다.

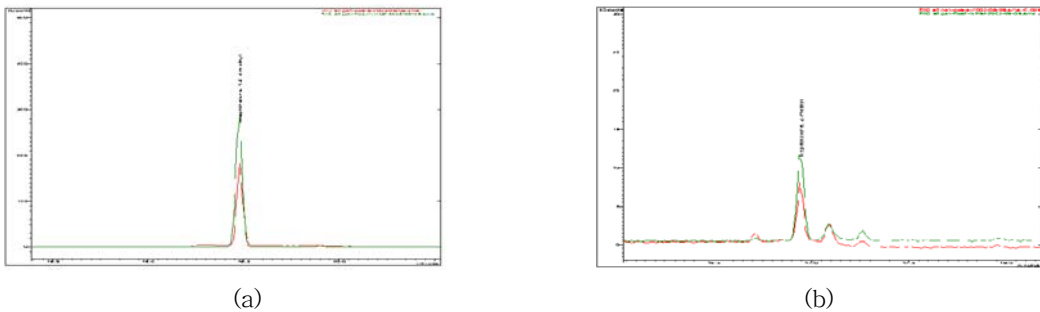
3.2 유출액 응집처리

계면활성제에 의해 토양세정된 용출세정액에는 미세토양입자와 세정된 유기오염물질이 포함되어 있다. 이 세정액은 서로간의 복잡한 상호작용에 의해 엉켜서 일부 무거운 것은 가라앉고 대부분은 현탁 상태로 존재한다. 따라서 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene을 포함하고 있는 계면활성제 및 부유토양입자를 응집침전 시키기 위해 고분자 응집제를 주입하여 처리하였다. 먼저 최적의 응집주입량을 결정하기 위해 복합물질인 디젤오염토양에 대하여 POE12와 SDS로 각각 토양세정한 후 용출세정액 500 mL에 0.2% 고분자 응집제를 1~7mL로 증가시키면서 jar-test를 실시하였다. 고분자 응집제로는 A601P를 사용하였다. POE12로 세정한 용출액은 0.2% A601P를 3 mL 가하였을 때 약 70%가 응집제거 되었으며, SDS로 세정한 용출액은 5 mL를 가하였을 때 최대의 응집 효율(50%)을 나타내었다(Fig. 6). 그러므로 혼합계면활성제 용출액에 고분자 응집제 5 mL를 첨가하는 것이 적절할 것으로 판단되었다.

Jar-test 결과에 따라 용출액에 0.2% 고분자 응집용액을 5 mL 첨가한 후 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene의 응집효율을 살펴 보았다. 응집제로는 일반적으로 많이 사용되고 있는 황산알루미늄(alum, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)과 고분자 응집제인 A601P, A331P, N100P,



[Fig. 7] Removal efficiencies of 2-methylnaphthalene and 1,5-dimethylnaphthalene in POE12+SDS surfactant flushed-solution by polymer coagulants



[Fig. 8] Gas chromatograph of (a) 2-methylnaphthalene and (b) 1,5-dimethylnaphthalene in POE12+SDS surfactant flushed-solution before and after coagulation with A601P polymer

N101P, C101P, YCX4를 사용하였다. 고분자 응집제의 특성은 [Table 4]에 제시되어 있다. 2-Methylnaphthalene와 1,5-dimethylnaphthalene으로 오염시킨 토양을 SDS+POE12 혼합계면활성제로 세척한 후 유출액을 고분자 응집제로 처리한 결과 응집제 모두 50% 부근의 제거율을 나타내었으며, 고분자 응집제 종류에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다 [Fig. 7]. 그러나 일반적으로 널리 이용되고 있는 황산알루미늄만을 사용하여 응집침전 시킨 경우는 2-methylnaphthalene와 1,5-dimethylnaphthalene에 대하여 각각 33%와 23%가 응집 제거되었다. 또한 토양에 대한 세정효율과 마찬가지로 2-methylnaphthalene에 대한 응집효율이 1,5-dimethylnaphthalene보다 다소 높게 나타났다.

[Fig. 8]은 2-methylnaphthalene와 1,5-dimethylnaphthalene에 대하여 용출된 세정

액을 A601P로 응집처리 하였을 때의 가스 크로마토그래프를 나타낸 것이다. 각 그래프는 응집처리 전후의 가스 크로마토그래프를 중첩하여 피크 크기가 서로 비교될 수 있도록 하였다. 응집처리 후에 가스 크로마토그래프의 피크가 감소하였으나 응집에 의한 제거효율은 50% 수준에 그쳐 큰 감소폭은 보이지 않고 있다.

POE12와 SDS를 혼합한 계면활성제로 세정한 후 용출세정액을 가장 응집효율이 좋았던 A331P를 사용하여 처리한 경우의 오염물질 총제거량을 검토하여 보았다. 오염토양을 세정하여 응집처리할 경우 토양세정된 양이 모두 유출된 세정액 속에 존재한다고 가정하면, 초기농도 1,524 mg/kg(건조토양)인 2-methylnaphthalene에 대해서는 $1,524 \text{ mg/kg} \times 0.90(\text{세정효율}) \times 0.54(\text{응집효율}) = 741 \text{ mg/kg}$, 1,5-dimethylnaphthalene에 대해서는 $1,501 \text{ mg/kg} \times 0.82(\text{세정효율}) \times 0.52(\text{응집효율}) = 640 \text{ mg/kg}$ 이 최종적으로 토양

으로부터 세정 및 응집에 의해 제거되었다고 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구는 PAHs 중에서 높은 농도로 발견되는 나프탈렌 오염토양을 지중토양세정으로 처리한 후 세정된 용출액을 고분자 응집제로 처리하는 방안의 효율성을 검토하기 위하여 실시하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. POE12 + SDS 혼합계면활성제의 주입횟수를 5 pore volume까지 증가시켰을 때 2-methylnaphtalene의 세정효율은 지속적으로 1,5-dimethylnaphtalene의 제거율은 다소 선형적으로 증가하여 각각 약 80%와 60%가 세정되었다. 13 pore volume으로 세정한 후 2-methylnaphtalene과 1,5-dimethylnaphtalene의 세정효율은 각각 약 90%와 82%로 2-methylnaphtalene이 1,5-dimethylnaphtalene 보다 다소 높았다. 이는 물용해도 차이 때문이며 물에 의한 세정을 보정하면 계면활성제만의 세정효율은 각각 42%와 71%로 상대적으로 소수성인 1,5-dimethylnaphtalene이 높게 나타났다.
2. 디젤오염토양을 POE12 + SDS 혼합계면활성제로 세정하였을 때 디젤 TPH는 5 pore volume의 주입에서 약 40%의 세정효율만을 나타내었으며, 추가적으로 13 pore volume까지 첨가하였을 때 약 70%의 세정효율을 보였다. 그러나 디젤내 나프탈렌 성분은 세정용액을 4 pore volume 까지 주입하였을 때까지 세정효율이 급격히 증가하였으며, 5 pore volume을 가하였을 때 90%가 세정되어 디젤 TPH의 40%보다 두 배 이상 높은 세정효율을 나타내었다.
3. 2-Methylnaphtalene와 1,5-dimethylnaphtalene 오염토양을 SDS+POE12 혼합계면활성제로 세척한 후 유출액을 6가지 고분자 응집제로 처리한 결과 응집제 모두 50% 부근의 비슷한 제거율을 나

타내었다. 그러나 응집에서 범용되고 있는 황산알루미늄만을 사용하여 응집침전 시킨 경우는 2-methylnaphtalene와 1,5-dimethylnaphtalene에 대하여 각각 33%와 23%가 응집 제거되었다.

참고문헌

1. Volkering, F., Breure, A.M., van Anel, J.G., and Relkens, W.H., Influence of Nonionic Surfactants on Bioavailability and Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Appl. & Environ. Microbil., Vol.61, No. 5, pp 1699-1705 (1995)
2. WHO, IPCS, Environmental Health Criteria 202, Selected Non-Heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (1998)
3. Jafvert, C.T., Sediment- and Saturated-Soil-Associated Reactions Involving an Anionic Surfactant (Dodecylsulfate). 2. Partition of PAH Compounds among Phases, Environ. Sci. Technol., Vol.25, No.6, pp 1039-1045 (1991)
4. 염익태, Ghosh, M.M., 안규홍, 계면활성제를 이용한 오염된 토양으로부터의 Polycyclic Aromatic Hydrocarbon(PAH)의 세척, 대한환경공학회지, 제19권, 제9호, pp 1111-1124 (1997)
5. 농촌진흥청, 농업기술연구소 : 토양화학분석법 (1978)
6. 환경부 : 토양오염공정시험방법 (1999)
7. 최상일, 장민, 황경엽, 류두현, 혼합 계면활성제에 적용된 각종 첨가제가 토양세척 효율에 미치는 영향, 한국토양환경학회지, 제3권, 제1호, pp 65-74 (1998)