

토양내 Phenanthrene의 생물학적분해에 미치는 계면활성제와 환경변수의 영향

류두현 · 최상일* · 김광수**

전주대학교 환경과학과 · 생명과학부**

광운대학교 환경공학과*

Effect of Surfactants and Environmental Factors on the Bioremediation of Phenanthrene

Doohyun Ryoo · Sang-il Choi* · Kwangsoo Kim**

Department of Environmental Science and Technology, Jeonju University

*Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University**

*School of Life Science, Jeonju University***

ABSTRACT

The biodegradation of [C^{14}]phenanthrene was studied in water and soil-water systems with nonionic surfactants and biosurfactant: polyoxyethylene alkyl ester ($C_{17}H_{33}COO(C_2H_4O)_nH$) and sophorolipid. The extents of solubilization and biodegradation were monitored by radiotracer technique. Experimental results showed that surfactant concentrations above the critical micelle concentration were toxic to the phenanthrene-degrading bacteria in soil or active sludge and the presence of surfactant micelles inhibited mineralization of PAHs. Solubility and bioavailability of phenanthrene in water and soil-water system were enhanced by mixed surfactants system. The optimum water content and hydrogen concentration were 30%(w/v), pH 7, respectively.

Key words: surfactant, environmental factor, polycyclic aromatic hydrocarbon, biodegradation.

요 약 문

오염된 토양 중 phenanthrene의 분해에 미치는 비이온계 계면활성제와 생물계면활성제의 영향을 살펴보았다. 비이온계 합성 계면활성제로 polyoxyethylene oreyl ester($C_{17}H_{33}COO(C_2H_4O)_nH$)와 생물계면활성제인 sophorolipid를 적용하였다. 계면활성제의 농도, 수분함량, 접촉균 처리 방법 및 종류, pH, 온도, 부가영양분 등의 변수들이 phenanthrene의 생분해에 미치는 영향을 비교실험 하였다. 계면활성제 농도가 CMC이하의 경우 계면활성제는 phenanthrene의 생분해를 촉진하였으나, CMC 값 이상의 영역에서는 계면활성제가 미생물의 phenanthrene 분해작용을 저해하였다. 30%의 수분함량과 pH 7, 30℃에서, 부가영양분으로 glucose를 10g/L수준으로 첨가하였을 때 좋은 분해도를 나타내었다. 충진제로 짚이 첨가되는 경우 토양:짚의 중량비가 5:2이고, 수분함량이 50%인 경우 phenanthrene의 분해가 촉진되었다.

주제어 : 계면활성제, 환경변수, 다환방향족, 생분해.

1. 서 론

다환방향족화합물(polycyclic aromatic hydrocarbons ; (PAHs))는 소수성유기화합물(hydrophobic organic compound ; (HOCs))로 매우 낮은 수용성을 나타내는 화합물이다. 이 화합물은 두개 또는 그 이상의 방향족 고리를 기본구조로 가지며 독성과 돌연변이를 유발시킬 수 있는 난분해성 물질로 알려져 있다¹⁻⁴⁾. PAH는 휘발성과 수용성 및 생분해성이 낮기 때문에 PAHs에 오염된 토양을 복원하기 위해서는 제한된 기술만이 이용될 수 있으며, 여러 기술 중 계면활성제 수용액을 이용한 *in-situ*, *ex-situ* 세척법이 가장 바람직한 기술로 평가되고있다.

계면활성제는 분자내에 친수성과 소수성 작용기를 갖는 양성화합물로서 주로 화학적 합성물질이 사용되고 있다. 토양세척용으로 계면활성제가 적용되는 경우 일반적으로 생분해 속도가 느리고 독성이 강한 화학계면활성제를 사용하는 것 보다 생물체에 의해 생합성되는 생물계면활성제 용액을 사용하는 세척법에 관심이 모아지고 있다⁵⁾. 생물계면활

성제는 기존의 화학합성 계면활성제와는 달리 미생물 생체내에서 생산되는 물질로서 일반적으로 생분해도가 높고 독성이 낮다. 발효조건의 변화에 따라 분자구조의 일부분의 변화가 가능하여 다양한 물성의 제품을 생산할 수 있어 특이적인 목적에 이용될 수 있는 장점을 가지고 있다⁶⁻⁹⁾.

토양세척에 사용되는 계면활성제는 대상 오염물질에 대한 용해도가 높고 세척력이 우수하여야 하며 저농도의 계면활성제 용액으로도 세척이 가능하여야 한다. *In-situ*의 토양세척의 경우 용액의 표면장력이 낮아 다공성 매질인 토양에 대한 침투성이 우수한 계면활성제가 요구되며, *ex-situ*의 토양세척의 경우에는 토양세척물의 혼합성이 좋아야 한다¹⁰⁾. *In-situ*, *ex-situ*세척 후 토양에 대한 흡착성이 낮고, 토양 미생물군에 대한 독성이 적고, 비용이 저렴하여야 한다¹⁰⁾. 세척된 토양은 보통 계면활성제 용액의 탈수과정을 거친 후 매립하게 된다. 탈수과정 후에도 일부의 계면활성제는 토양입자에 부착하거나, 토양내 세척용액의 형태로 잔류하게 된다.

Table 1. Characteristics of Chemical Surfactants

Surfactants	Composition	EO ¹ Mol (n)	pH (1% Soln.)	W ₂ C (%)	Type	HLB ³
POE ₅	Polyoxy ethylene Oleyl Ester C ₁₇ H ₃₃ COO(C ₂ H ₄ O) _n H	5	5.0~	0.5	Yellowish Oily Liquid	8.6
POE ₉		9	7.0			11.5
POE ₁₄		14				13.6

1. Ethylene oxide 2. Water content and 3. Hydrophile-lipophile balance

토양내 잔류하는 계면활성제는 토양내 미생물 군집에 영향을 주어 세척 후 잔존하는 유기오염물질에 대한 미생물 분해능에 영향을 줄 수 있다.

따라서, 계면활성제 용액을 사용한 *in-situ*, *ex-situ* 세척 후 잔류하는 계면활성제가 오염물질의 분해능에 미치는 영향을 규명하면 계면활성제 용액을 이용한 세척 후 행구어 내는 공정의 횟수 및 방법의 도출이 가능하다.

본 연구에서는 계면활성제 용액을 이용하여 토양을 세척하는 경우 잔존하는 소수성 유기오염물질 중 phenanthrene의 분해에 미치는 계면활성제의 영향을 살펴보고자 하였다. 계면활성제의 종류별 잔류 농도에 따른 phenanthrene의 분해에 대한 영향을 살펴보고, phenanthrene의 분해에 미치는 수분함량의 영향, pH의 영향, 산소의 필요 유·무, 기타 부가탄소원의 영향, 미생물군집의 영향 등을 규명하여, 토양세척 후 적합한 매립조건을 규명하고자 하였다. 또한 생물학적인 분해과정을 촉진하기 위하여 계면활성제를 포함하는 영양원을 주입하는 경우, 요구되는 조건을 확립하고자 하였다.¹¹⁻¹³⁾

2. 재료 및 방법

2.1 대상 계면활성제의 선정

화학계면활성제로 비이온 계면활성제인 polyoxyethylene oleyl ester계 계면활성제 중, 구조식이 C₁₇H₃₃COO(C₂H₄O)_nH로 oleic acid 몰당 ethylene oxide 부가 물수가 5, 9, 14인 POE₅, POE₉, POE₁₄를 선정하였으며, 일반적인 성질은 Table 1과 같다. 생물계면활성제는 효모인 *Candida bombicola* (ATCC 22214)를 이용하여 glycolipid계 생물계면활성제인 sophorolipid를 생산, 정제하여 적용하였다. 또한 음이온계 계면활성제인 sodium dodecyl sulfate(SDS)를 비교하여 적용하였다. Sophorolipid를 생산하기 위해 YM 배지에서 24시간 종배양을 거친 후 Table 2의 조성을 갖는 배지에 10% 수준으로 접종하여 30℃, 350rpm에서 7일간 발효기(한국발효기, KF-5L)를 이용 배양하였다. 생물계면활성제를 정제하기 위해 배양이 끝난 후 8,000g, 4℃에서 30분간 원심분리하여 갈색 층의 sophorolipid를 취하였다. 상청액 부분에 잔존하는 sophorolipid를 회수하기 위하여 동량의 ethylacetate로 2~3회 처리 후 감압하에 휘발 농축하였다.

2.2 토양 시료의 제조

4~10(2.0~4.75mm)의 표준체를 사용하여 균일한 입径의 토양을 선별하였다. 선별된 토양에

Table 2. Medium Composition for the Sophorolipid Production by *Candida bombicola*(ATCC 22214)

Components	Composition (%)
KH ₂ PO ₄	0.1
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.5
CaCl ₂	0.01
NaCl	0.01
Urea	0.07
Glucose	10
Peptone	0.5
Corn oil	10

PAHs의 일종인 phenanthrene을 벤젠에 녹여 300ppm 수준으로 인위적인 오염을 시킨 후, 0.5 μ Ci phenanthrene-9-¹⁴C(Sigma Co., USA)를 labeling하였다. 50mL의 PP 재질 tube에 각각의 조건을 만족하는 처리구를 제조하여 실험을 시행하였다.

2.3 CMC값과 표면장력

0.01~10g/L 농도범위의 계면활성제 용액을 희석하여 제조한 후 표면장력계(Fisher Scientific Co. Surface Tensiomat21, USA)를 사용하여 표면장력의 변화를 측정하였다. 계면활성제의 농도가 감소함에 따라 표면장력은 증가하게 된다. 계면활성제의 종류에 따라 특정 계면활성제 농도 이하에서 표면장력의 기울기가 급격히 증가하게 되며, 이때의 계면활성제 농도를 임계미셀농도(Critical Micelle Concentration, CMC)라한다. 표면장력이 급격히 변화하기 전·후의 값들을 직선회귀 분석하여 두 개의 직선식을 구한 후 교차점을 계산하여 그때의 계면활성제 농도를 CMC값으로 결정하였다¹⁵⁾.

2.4 생분해에 미치는 영향인자

2.4.1 계면활성제의 영향

비이온계 계면활성제인 polyoxyethylene oleyl ester계 중 ethylene oxide 부가 몰수가 5, 9, 14인 POE₅, POE₉, POE₁₄와 *Candida bombicola*(ATCC 22214)로부터 생산된 생물계면활성제인 sophorolipid, 음이온계 계면활성제인 SDS가 단일 성분으로 구성된 수용액 및 2성분으로 조합된 혼합 계면활성제 수용액이 적용되었다. 0~1g/L의 계면활성제 농도범위에서 토양의 수분함량을 30%로 보정하고 활성오니를 접종하여 30 $^{\circ}$ C에서 그 변화를 관찰하였다. 사용되어진 활성오니는 전주 하수종말처리장의 폭기조에서 취하여 사용하였다. 미생물에 의해 분해된 phenanthrene의 양을 측정하기 위해 분해과정 중 발생된 이산화탄소를 2M NaOH 수용액으로, 그 밖의 휘발성 물질을 methylamine 수용액을 이용하여 35일간의 처리과정 중 시간별로 포집한 후, 1.5ml의 시료를 취하여 1.5ml의 cocktail solution(Ultima Gold, Packard, USA)와 첨가한 후 scintillation counter(Packard Co. TRI-CARB 2300TR, USA)를 사용하여 측정하였다.

2.4.2 기타 인자의 영향

Polyoxyethylene oleyl ester계 계면활성제 수용액에 대해 측정된 CMC값 부근농도인 0.1g/L와 CMC값 이하인 0.01g/L의 계면활성제 수용액을 20%~50%(w/v)포함하는 토양에 대해 phenanthrene의 미생물 분해성을 비교 실험하였다. 미생물에 의하여 분해된 phenanthrene은 전술한 실험법에 따라 포집하여 측정하였다.

기체조성의 영향을 살펴보기 위해, 계면활성제의 농도가 1g/L인 경우 산소를 통기한 호기적인 경우와 질소를 통기한 혐기적인 조건을 비교하여 실험하였다. 하수종말처리장에서 채취한 활성오니

를 접종 균체로 사용하였다. 계면활성제가 CMC이하 농도인 0.1g/L와 0.01g/L인 경우 살균처리 하지 않은 토양에 접종 균체를 적용한 경우와 접종균체는 적용하지 않고 살균과정을 거치지 않은 토양에 적용한 경우, 토양을 살균한 후 접종한 처리구로 나누어 비교 실험하였다.

부가되는 탄소원의 영향을 살펴보기 위해 0.1g/L와 10g/L의 glucose가 첨가된 경우를 비교하여 실험하였다.

pH의 영향을 살펴보기 위해 다른 조건은 전술한 실험법과 동일하게 설정하고 pH 5와 pH 7로 조절하여 phenanthrene의 분해성을 비교하였다.

2.5 충전물의 영향

본 연구에서는 농가 부산물인 짚이 충전물로 사용되는 경우를 비교 실험하였다^{10,14)}. 짚을 직경 4~5mm정도로 균일하게 파쇄한 후, 인위적으로 phenanthrene에 오염된 토양 50g에 대하여 5:0.5, 5:1, 5:2, 5:3(w/w)의 비율로 각각 혼합하여 비교 실험하였다. 충전물이 첨가되는 경우 분해에 미치는 계면활성제의 역할을 살펴보기 위해서 각 농도의 계면활성제용액을 30~50%(w/v)의 수분함량 수준으로 조절하여 각 처리구를 제조하여 55℃에서 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CMC값과 표면장력

Fig.1에 계면활성제 용액의 농도에 따른 표면장력의 변화를 예시하였다. CMC값을 전후하여 계면활성제 농도에 대한 표면장력이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 1과 같은 방법에 의해 측정되어진 각 계면활성제에 대한 CMC값의 변화를 Table 3에 나타내었다. Polyoxyethylene oleyl ester계 비이온 계면활성제인 POE₅, POE₉,

Table 3. Critical Micelle Concentrations and Surface Tensions of Surfactant Solutions

Surfactant	CMC(g/L)	Surface Tension' (dynes/cm)
POE ₅	0.086	32.09
POE ₉	0.101	36.62
POE ₁₄	0.083	38.69
SDS	2.310	40.69
Sophorolipid	0.083	40.81

1. Surface tension was measured at 5g/L of surfactant concentration.

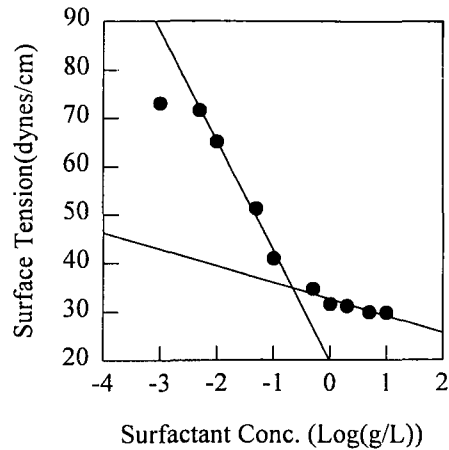


Fig. 1 Variation of aqueous phase surface tension at various concentrations of POE₅ (0.001 - 5g/L).

POE₁₄의 CMC값이 상대적으로 낮았으며 생체 계면활성제인 sophorolipid도 낮은 값을 나타내었다. 반면 비교 목적으로 적용된 음이온 계면활성제인 SDS는 다른 계면활성제에 비해 CMC값이 월등히 높음을 알 수 있다.

CMC값은 계면활성제의 세척력을 나타내는 중요한 변수로, CMC값이 낮은 계면활성제를 토양세척기법에 사용하는 경우 적은 사용량으로도 원하는

세척력을 얻을 수 있는 장점이 있다. 한편 같은 비극성기 구조를 갖는 동일 계열의 계면활성제 중에서는 대체적으로 ethylene oxide 부가 물수가 높을수록, 즉 계면활성제 중 극성기가 커질수록 표면장력이 증가함을 알 수 있었다. 계면활성제 수용액의 표면장력이 낮을수록 다공성 매질에 대한 침투력이 증가하게 되어 토양세척 용도로 적합하고, 특히 계면활성제용액의 표면장력이 낮아야 *in-situ* 토양세척에 유리한 것으로 추측된다.

3.2 생분해에 미치는 영향인자

3.2.1 계면활성제의 영향

0~1g/L 범위의 계면활성제 수용액을 일정량 포함하는 토양에 대해 phenanthrene의 분해에 미치는 계면활성제의 종류 및 농도의 영향을 Fig. 2에 나타내었다. 수분함량이 30%인 경우 35일 후 phenanthrene의 생분해 정도를 측정한 결과 각

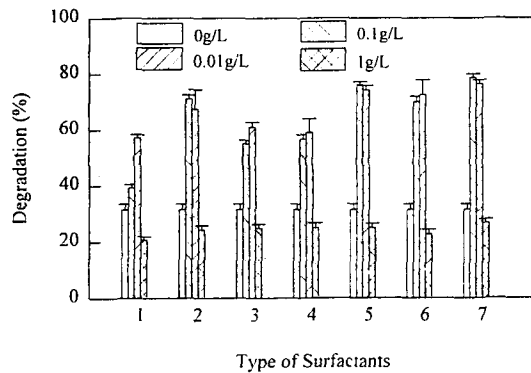


Fig. 2 Degradation of ¹⁴C-phenanthrene at various concentrations of surfactants.

Water contents were uniformly 30% (v/w). Type of surfactants ;
 1 : POE₅, 2 : POE₉, 3 : POE₁₄,
 4 : SDS, 5 : sophorolipid,
 6 : POE₅+SDS and
 7 : POE₅+sophorolipid.

대상 계면활성제에 대해 CMC값 이하 농도범위인 0.1g/L이하의 농도범위에서는 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 PAHs의 생분해도가 증가됨을 알 수 있었다. 특히 sophorolipid를 적용시킨 경우 계면활성제를 첨가하지 않은 경우에 비해 CMC 이하의 농도에서 분해도가 약 3배 증가함을 알 수 있다. 단일성분의 화학 계면활성제를 적용시킨 경우 POE₅의 분해도가 가장 높았고, 2성분의 계면활성제 혼합용액의 경우 POE₅와 sophorolipid를 동량비로 혼합한 경우 최고의 분해도를 나타내었다.

각각의 계면활성제 농도에서 sophorolipid는 POE₅와 거의 비슷한 생분해도를 나타내는 것을 볼 수 있었다. 반면 CMC 이상의 범위인 1g/L의 계면활성제가 적용되는 경우 phenanthrene의 분해에 저해현상을 야기하여, 계면활성제를 적용하지 않았을 경우에 비해 생분해도가 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서 CMC값 이하의 계면활성제를 적용하는 경우에는 미셀을 형성하지 않고 소수성 유기오염물질의 수용성을 증가시켜 미생물에 의한 유기오염물질의 분해가 촉진되나, CMC값 이상의 경우는 계면활성제의 미생물에 대한 독성으로 인하여 소수성 오염물질의 생분해도가 저해를 받는다. 또한 미셀 형성에 따라 대부분의 소수성 유기오염물질이 미셀 내에 존재하여 미생물이 용이하게 기질을 이용할 수 없게되어 생분해도가 급격히 감소함을 알 수 있다. POE계와 sophorolipid, SDS중 2성분 조합으로 제조한 계면활성제 혼합 수용액 중에서 소수성 유기오염물질에 대한 용해도가 우수하여, 토양세척용으로 적합하다고 판단된 POE₅와 SDS, POE₅와 sophorolipid가 동량비로 혼합된 용액을 적용시킨 경우에⁹⁾, 각각의 계면활성제를 단독으로 적용시킨 경우보다 생분해성이 증진되었다.

3.2.2 기타 인자의 영향

계면활성제에 의하여 미생물 분해성이 증진된다

고 판단된 CMC값 이하의 계면활성제 농도 범위인 0.1g/L와 0.01g/L농도의 계면활성제 수용액을 적용시켜 각 토양 시료에 대한 수분함량을 변화시킨 경우, 35일경과 후의 생분해도를 Fig. 3에 나타내었다.

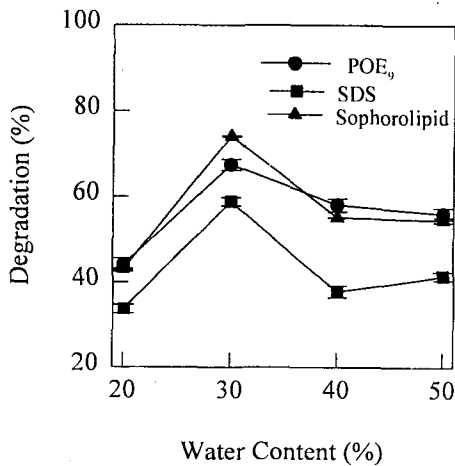


Fig. 3 Degradation of ¹⁴C-phenanthrene at various water contents. Surfactant concentrations were uniformly 0.1g/L(w/v). The percent of degradation was the cumulative value over 35 days.

수분을 20~50%(w/v) 포함하는 토양 중 phenanthrene의 생분해도를 측정된 결과, 수분함량 30%에서 가장 높은 분해도를 보였다. 수분함량이 낮은 토양의 경우 영양원의 공급 및 흡수가 원활하지 않아 미생물의 생육이 저해되고, 계면활성제의 첨가에 따른 미생물에 의한 분해성이 억제되는 것으로 판단된다. 또한 30%이상의 수분을 포함하는 토양의 경우, 수분함량이 증가할수록 phenanthrene의 분해성이 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 수분함량이 지나치게 높은 경우 미생물의 생육과 미생물에 의한 유기오염물질의 분해에 필요한 산소전달이 원활하지 않아 일어나는

것으로 추측된다. 실험에 사용된 토양의 경우 수분함량이 20% 이하의 경우 자유수(free water)가 존재하지 않아 유동하는 수분이 없고, 30% 이상의 경우에는 토양이 자유수를 갖는 slurry를 형성하게 된다. 따라서 유기오염물질을 효과적으로 분해하기 위해서는 slurry상태를 유지하면서 산소의 전달이 용이한 30% 정도로 수분함량을 유지하는 것이 가장 적합한 조건임을 알 수 있다.

Phenanthrene의 분해에 영향을 주는 미생물군집의 영향을 살펴보기 위해 계면활성제 POE₉, SDS, sophorolipid 수용액을 30% 포함하는 토양에 대해, 하수종말처리장의 폭기조에서 수집한 활성오니를 멸균처리되지 않은 토양에 접종한 경우와, 멸균된 토양에 활성오니를 접종한 경우, 멸균처리되지 않은 토양에 활성오니를 접종시키지 않은 경우를 각각 비교하여 실험하였다. 토양을 멸균처리한 후 활성오니를 접종한 경우는 멸균처리를 거치지 않고 활성오니를 접종하지 않아 토양 내에 원

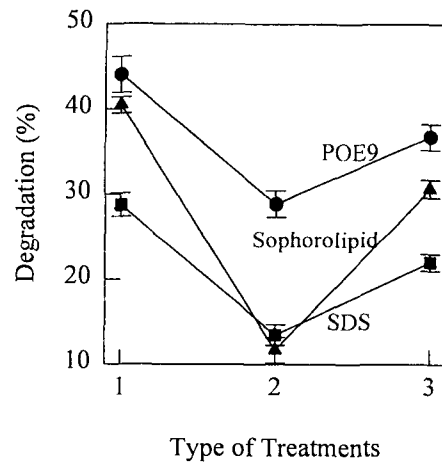


Fig. 4 Effect of micro-flora on the degradation of ¹⁴C-phenanthrene : 1. Inoculated subsequent to sterilization ; 2. Neither sterilized nor inoculated ; 3. Inoculated without sterilization.

래 존재하는 미생물 군집만으로 phenanthrene이 분해되는 경우보다 오염물질의 분해도가 약 50% 정도 증가하였다(Fig. 4). 또한, 멸균과정을 거치지 않고 활성오니를 첨가한 경우가 멸균과정을 거치지 않고 활성오니를 접종하지 않아 토양내 미생물에 의해 분해되는 경우보다 분해도는 높으나, 멸균한 후 활성오니를 접종한 경우에 비해 낮은 분해도를 보였다. 즉, phenanthrene의 분해에는 활성오니의 미생물군집이 더 효과적임을 알 수 있다. 토양의 미생물과 활성오니의 미생물이 같이 분해에 참가하는 경우, 미생물간의 경쟁에 의해 오히려 저해됨을 알 수 있다. 비교의 목적으로 멸균된 토양에 활성오니를 접종하지 않은 경우는 분해되지 않았다.

계면활성제 용액 중 농도를 변화시키며 미생물 군집의 생육을 촉진하기 위해 첨가된 탄소원인 포도당의 phenanthrene 생분해성에 대한 영향을 30%의 수분을 함유하는 경우에 대해 살펴보았다. POE₉, SDS, sophorolipid 계면활성제 모두의 경우, 탄소원인 포도당의 부가량이 감소함에 따라 phenanthrene의 생분해도가 감소하였다. 즉, 탄소원이 부가됨에 따라 미생물 군집의 생육은 촉진되나 미생물에 의하여 선호되지 않은 탄소원인 phenanthrene의 분해성은 감소하는 것을 알 수 있다. Glucose농도 10g/L의 경우는 부가영양분이 미생물의 성장에 도움을 주게되어 저농도 처리구인 1g/L보다 좋은 분해도를 나타내었다.

Glucose농도 10g/L와 1g/L를 비교한 결과 계면활성제 용액 농도가 CMC값 이하(0.01g/L)인 경우 생분해도는 거의 비슷하게 나타났다. 반면, 계면활성제 농도가 높을수록 탄소원에 대한 영향이 커서, 계면활성제용액의 농도가 CMC값 이하인 0.01g/L에서 높은 분해도를 나타내었고 CMC 값 이상인 1g/L에서는 거의 분해가 되지 않음을 볼 수 있었다(Fig. 5).

Phenanthrene의 분해에 미치는 수소이온농도

의 영향을 pH 5~7의 범위에서 살펴보았다. pH가 감소함에 따라 phenanthrene의 생분해성이 감소하였다(Fig. 6). 실험에 사용된 토양의 pH는 5정도이고, 접종된 활성오니액의 pH는 7정도로 pH가 5부근에서 성장한 토양의 미생물 군집보다

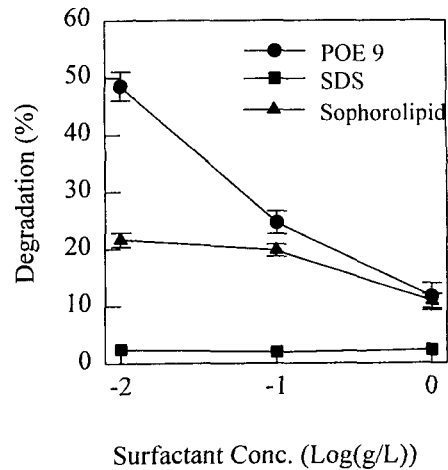


Fig. 5 Effect of supplemental carbon source on the degradation of ¹⁴C-phenanthrene. Glucose concentration is 10g/L.

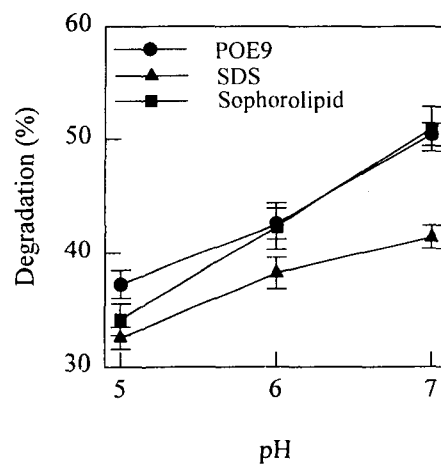


Fig. 6 Effect of pH on the degradation of ¹⁴C-phenanthrene. Surfactant concentration was 0.01g/L.

는 pH 7부근에서 성장된 활성오니의 미생물이 더 효과적으로 phenanthrene을 분해하는 것으로 추측된다.

활성제인 POE₉와 생물 계면활성제인 sophorolipid에 비해 매우 낮은 phenanthrene의 생분해성을 나타내었다.

3. 3 충전물의 영향.

3.3.1 수분함량의 영향

충진물인 짚이 포함된 경우 수분함량 30~50%의 범위에서 35시간 경과한 후 phenanthrene의 생분해 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 비이온계 polyoxyethylene oleyl ester계의 비이온 계면활성제에 ethylene oxide 부가 mole수가 9인 POE₉와 생물계면활성제인 sophorolipid의 경우 모두 50%의 수분함량에서 높은 분해도를 나타내었다. 이러한 현상은 slurry 형태로 수분함량이 유지되었을 때 수분에 의한 영양분의 전달이 용이하여 미생물의 대사가 활발해지는 것으로 추측된다. 비교의 목적으로 사용되었던 음이온계 계면활성제인 SDS는 각각의 수분함량 조건에서 비이온계 계면

3.3.2 혼합비의 영향

퇴비화의 경우 최적의 수분함량으로 판단된 50%에서 기질과 충진물로 사용한 짚의 비율을 조절하면서 실험한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

50g의 토양에 대하여 5:0~5:3 (w/w)까지의 비율로 짚을 혼합하며 실험한 결과 5:2 (w/w)의 배합비율에서 가장 높은 분해도를 나타내었다. 충진물인 짚을 넣지 않았을 경우에는 수분이 과다하여 slurry를 형성하고 산소공급을 저해하여 미생물 분해성을 저해하는 것으로 판단된다. 짚의 혼합배율이 필요이상으로 과다한 경우 대부분의 수분이 충진제인 짚에 흡수되어, 토양 중의 실제 수분이 감소하여 phenanthrene의 분해성이 감소하게 된다.

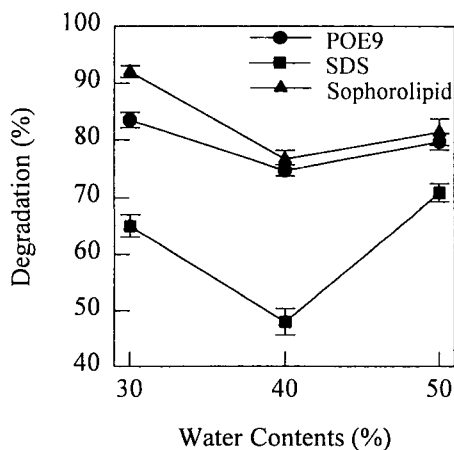


Fig. 7 Degradation of ¹⁴C-Phenanthrene by compositing at various water contents in compost (5 : 1, w/w) for 35 days. Surfactant concentrations were uniformly 0.01g/L.

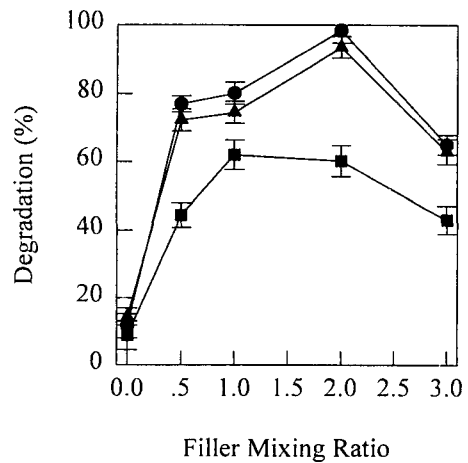


Fig. 8 Degradation of ¹⁴C-Phenanthrene by compositing at various filler contents for 35 days. Surfactant concentration and water content were 0.01g/L and 50%, respectively.

4. 결 론

소수성 유기오염물질인 PAHs 중 phenanthrene의 생분해성에 미치는 여러 인자의 영향을 규명하였다. 대상으로 한 비이온 계면활성제와 생물계면활성제인 sophorolipid의 농도가 CMC값 이하의 영역에서는 계면활성제 농도가 증가함에 따라 생분해성이 증가하였으나 계면활성제의 농도가 CMC값 이상에서는 계면활성제에 의해 PAH 생분해에 저해작용이 나타났다.

수분 함량이 20~50%의 범위에 대해 phenanthrene의 생분해성을 비교 실험한 결과, 수분함량 30% 즉, slurry상태를 유지하며 자유수가 없는 경우 분해도가 높았고, 중성인 pH 7에서, 온도는 30℃일 때 최고의 분해도를 나타내었다. 토양을 멸균처리하여 활성오니를 접종하고 균체가 자라는데 필요한 부가영양분(탄소원)을 첨가 하였을 때 오염물질의 분해가 상승되었다.

충진제가 혼합된 경우 50%의 수분함량에서 충진제인 짚을 토양대비 5 : 2의 수준으로 혼합한 경우 가장 높은 분해도를 보였다.

감사의 글

본 연구는 1995년 전주대학교 학술연구조성비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 1998년도 광운대학교 교내연구비 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Andres K. Koch, Othmar Kappeli, Armin Fiechter and Jakob Reiser. "Hydrocarbon assimilation and biosurfactant production in *Pseudomonas aeruginosa* mutants," *J. Bacteriol.*, **73**(13), pp. 4212-4219 (1991)
2. Andreas Tiehm, "Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of synthetic surfactants," *Appl. Environ. Microbiol.*, **60**(4), pp. 258-263 (1994)
3. Anne-Marie Davila, Remy Marchal and Jean-Paul Vandecasteele, "Kinetics and balance of a fermentation free from product inhibition : sophorose lipid production by *Candida bombicola*," *Appl. Microbiol. Biotech.*, **38**, pp. 6-11 (1992)
4. Boris N. Aronstein, Yolanda M. Calvillo and Martin Alexander, "Effect of surfactants at low concentrations on the desorption and biodegradation of sorbed aromatic compounds in soil," *Environ. Sci. Technol.*, **25**(10), pp. 1728-1731 (1991)
5. D. G. Cooper and D.A. Paddock, "Production of a biosurfactant from *Torulopsis bombicola*," *Appl. Environ. Microbiol.*, **47**(1), pp. 173-176 (1984)
6. Frank Volkering, Anton M. Breure and Johan G, "Influence of nonionic surfactants on bioavailability and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons," *Appl. Environ. Microbiol.* **61**(6), pp. 1665-1705 (1995)
7. Susumu Ito and Shigeo Inoue, "Sophorolipids from *Torulopsis bombicola* : Possible relation to alkane uptake," *Appl. Environ. Microbiol.* **43**(6), pp. 1278-1283 (1982)
8. William C. McCaffrey and David G. Cooper. "Sophorolipids production by *Candida bombicola* using self-cycling fermentation," *J. Ferment. Bioeng.* **79**(2), pp. 146-151 (1995)
9. Xiaoping Wang, Xiaobing Yu and Richard Bartha, "Effect of bioremediation on polycyclic aromatic hydrocarbon residues in soil," *Environ. Sci. Technol.* **24**, pp. 1086-1089 (1990)

10. Yimin Zhang and Raina M. Miller, "Enhanced octadecane dispersion and biodegradation by a *Pseudomonas* Rhamnolipid surfactant (Biosurfactant)," *Appl. Environ. Microbiol.* **58**(10), pp. 3276-3282 (1992)
11. Yimin Zhang and Raina M. Miller, "Effect of Rhamnolipid(Biosurfactant) structure on solubilization and biodegradation of *n*-Alkane," *Appl. Environ. Microbiol.* **61**(6), pp 2247-2251 (1995)
12. I.S.Ahn, L. W. Lion and M.L. Shuler, "Microscale-based modeling of polynuclear aromatic hydrocarbon transport and biodegradation in soil," *Biotechnology and Bioengineering*, **51**, pp. 1-14 (1996)
13. 이영, 이상엽, 양지원, 박창호. "생물계면활성제" *생물화공*, **10**(2), pp. 53-63 (1996)
14. M. Kastner and B. Mahro "Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil affected by the organic matrix of compost." *Appl. Microbiol Biotechnol.*, **44**, pp. 668-675 (1996)
15. 최상일, 류두현, 김광수, 장민, "Solubilization of Naphthalene in Nonionic Surfactant Solution." *한국수질보전학회지*, **12**(3), pp.297-304 (1996)
16. 최상일, 류두현, 장민, "Ex-situ 토양세척 기법에 의한 소수성 유기오염물질로 오염된 토양의 정화에 관한 연구", *한국토양환경학회지* **2**(1), pp.99-107(1997)