

PU매체에 부착한 유류분해 bacteria를 이용한 오염토양 처리

조대철^{1*}, 허남수¹, 권성현²

Remediation of PAH-Polluted Soil by *Pseudomonas* sp. Adhered on PU Foam

Daechul Cho^{1*}, Nam-Soo Huh¹ and Sung-Hyun Kwon²

요약 토양의 생물학적 복원은 산업화로 무차별하게 오염되어 있는 국내 산업단지 주변과 지하수 환경보전을 위한 경제적 도구로 인식되어왔다. 본 연구는 친환경적 생물복원을 위한 기초자료를 얻기 위하여 유류로 오염된 양토에서 *Pseudomonas* sp. (KCCM 40055)를 접종한 polyurethane 매체환경을 적용, 유류의 성분중 PAH 분해도를 조사하였다. 다공성 매체로서 재현성이 뛰어나며 미생물 부착에 활용되어 온 polyurethane foam을 사용하여 미생물 부착성을 아울러 조사하였다. 사용된 PU중 최저공극 foam인 SR9-35C/G 의 경우 부착률과 PAH분해율이 가장 높았으며 토양함수율 증가에 따라 그 효율이 증가하였다.

Abstract Bioremediation has been recognized as one of the best tools for hydrocarbon contaminated soil and nearby groundwater which had been heavily polluted in industrial areas. Degradation of PAHs in PAH-polluted loam soil were investigated under polyurethane foam environment with adsorbed bacteria *Pseudomonas* sp. (KCCM 40055) in order to acquire vital data for the environmentally-friendly process and material. macroporous commercial polyurethane foam that is widely used for microbial attachment in such as sewage treatment was selected for experiments. We also examined the microbial adherence upon the media. SR9-35C/G among the PU samples showed the highest degree of attachment and bioconversion. The conversion efficiency increased with moisture content of soil.

Key Words : *Pseudomonas* sp., PAHs, polyurethane foam

1. 서론

생물복원은 환경분야에서 경제성을 인정받은 BET(best environmental technology)이며 토양과 지하수의 환경적 방제를 위해 고려되고 있는 한편, 장기간을 요하는 생물적 특성과 미생물의 특이성, 이동성, 환경의존성 등 제약을 많이 받는 단점이 있기도 하다. 따라서 생물복원을 토양/지하수 방제에 적극 활용하고자 하는 노력은 미생물의 고밀도 집적과 생존을 제고에 집중되고 있다. 그 가운데 하나가 저렴한 가격의 미생물 담체를 이용하는 방법으로서 이미 하폐수처리나 VOC와 같은 오염

기체 처리에 응용되고 있다.

Polyurethane[1]은 값이 싸고, 물리화학적 성질이 우수하여 미생물고정화 기질로써 유망하다. 필름의 형태로 세 포 점착과 생물학적 입자투과에 이용되고 있으며 표면개질과 같은 연구개발에 다양하게 사용되고 있다[2]. 이와 더불어 폴리우레탄 폼(PU foam)도 특유의 망상형 구조와 넓은 표면적으로 인해 세포나 미생물에 영양분 즉, 산소, 물 등의 공급을 용이하게 해주기 때문에 필름만큼 이점이 많으며 또 내화학적 및 기계적 강도도 우수하다[3].

유류에 많이 포함된 성분으로 PAH는 2개 이상의 벤젠링을 가지는 다환방향족 탄화수소로, 생분해성 분석이 용이하다. 이 다환방향족 탄화수소는 2, 3개의 벤젠핵을 가진 naphthalene ~ anthracene 류와 4, 6개의 벤젠핵을 가진 fluoranthenes ~ indeno(1,2,3-c,d)pyrene 류가 있다. 분자량이 적은 2, 3개 핵을 가진 PAH는 급성독성이 높으며, 분자량이 큰 방향족 중에서 어떤 것들은 발암성이 매우 높

이 논문은 2004년 순천대학교 교내연구비의 지원에 의하여 연구되었음

¹순천대학교 에너지환경공학과

²경상대학교 해양환경공학과(해양산업연구소)

*교신저자: 조대철(daechul@sch.ac.kr)

다고 알려져 있다[4]. PAH의 분해나 무독성 화합물로의 전환을 위해 최근 선진국에서는 미생물을 이용한 생물학적 정화법이 안정성, 효율성, 친환경성, 경제성 차원에서 각광받고 있다[5,6].

PAH의 분해 연구를 하기 위한 모델 화합물로서 phenanthrene이 널리 이용되고 있다. phenanthrene은 비교적 환경시료에 고농도로 존재하고 발암성은 없으나 구조면에서는 다른 발암성이 있는 고분자 PAH와 유사한 특성을 갖고 있다. 또한, phenanthrene은 여러 종류의 PAH 중에서 용해도와 물리적 특성이 중간 단계이기 때문에 생물학적 연구를 통해 분해경로가 자세하게 연구되고 있다. 이러한 phenanthrene의 미생물에 의한 분해경로는 두 가지로 보고되는 바, 하나는 phenanthrene이 1-hydroxy-2-naphthoate까지 분해된 다음 다시 salicylate, catechol을 거쳐 완전 분해 되는 salicylate 분해 경로이고, 또 다른 하나는 phenanthrene이 1-hydroxy-2-naphthoate까지 분해된 후 salicylate가 아닌 phthalate, protocatechuate를 거쳐 완전 분해 되는 phthalate 분해 경로이다. 지금까지 밝혀진 phenanthrene 분해 세균의 속(genus)은 *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Alcaligenes*, *Flavobacterium*, *Mycobacterium* 등이 있다[7].

본 연구에서는 위와 같은 배경을 가지고 *Pseudomonas sp.*와 고정화 매체를 심분 활용한 시스템을 이용하여 유류에 오염된 토양층의 PAH에 대한 미생물 분해를 검토하고자 하였다. 망상형 구조이며 연속기공의 크기가 각각 다른 3종류의 동일 원천의 폴리우레탄 폼이 사용되었고, 사전 미생물 접종을 거쳐 분해 실험을 수행하였다. In situ 생물복원에서는 현장에 자생하는 토양미생물과 특이 화합물에 적응성이 강한 선별 미생물을 투입하는 경우가 많다. 본 연구는 PU매체가 미생물의 투입영역에서 housing 역할을 하도록 설정하여 scale-up 했을 경우 현장 파일로트 설계와 운영에 직접적으로 사용될 수 있는 초기 data를 생성하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

1) 실험 균주 및 고정화 매체

본 실험에서 사용한 균주는 *Pseudomonas sp.*(KCCM 40055)[8]이며 한국미생물보전센터에서 동결·건조된 것을 분양 받아 nutrient broth(Difco 0003, 30°C) 액체매체에 접종하여 24시간 배양 후 활성화 시켰다. 미생물을 점착시킬 매체로서 태승우레탄(주)에서 구입한 SR9-25C/G, SR9-30C/G, SR9-35C/G의 3가지를 사용한

바, 공극크기는 각각 25, 30, 35 PPI(part per inch)였다. 각각의 PU 폼의 규격은 15×30×10mm³로 절단하여 사용하였고 그 부피는 4.5cm³/개였고 무게는 0.120g±0.003g이었다. PU 폼은 1% 에탄올 용액을 펌프를 이용하여 흐르는 상태에서 10분간 세척하였다. 세척한 PU 폼은 80°C 조건에서 30~40분 동안 건조시켰다. 증류수 1000ml에 glucose 20g, KH₂PO₄ 1.0g, MgSO₄·7H₂O 0.5g, Yeast Extract 20g을 삼각 플라스크에 넣고 가압멸균하여 액체 배양액을 준비하였다. 따로 같은 조성으로 24시간 배양된 *Pseudomonas sp.* 배양액을 50ml 접종 시킨 후 PU 폼(1.2g)을 투입하여 37°C에서 24~120시간 동안 50rpm으로 배양하였다. 점착 실험 후, 샘플을 칭량하기 위해 세 번 세척하고 상온에서 진공 건조하였다. 칭량 후 샘플을 바로 토양과 혼합하여 실험하였다. 온도는 30°C, 37°C, 45°C로 하였다.

2) 오염토 제조 및 매체 삽입

이 실험에 이용한 토양은 충남 아산시 순천향대학교 아산에서 채취한 양토로서, 채취한 토양은 2mm체로 불순물을 거른 후 수분함량과 유기물 함량을 조사하였다. 수분함량은 직접법 중에서 중량법으로 105°C에서 Drying oven에 24시간 동안 건조하여 전후의 무게차로 계산하였으며 원토양의 수분함량은 28.2~33.0%였다.

효과적인 수분 조절을 위해 실험에 들어가기 전에 토양을 drying oven에 105°C에서 24시간 완전 건조하고, 토양 내 다른 유기화합물 및 불순물을 제거하기 위해서 phenanthrene(Acros organics Co. LTD; Purity 98%)과 naphthalene(Sigma chemical Co. LTD; Purity 97%)을 Acetone으로 녹여 토양 300g에 혼합하여 50ppm(50mg total PAHs/kg-soil)으로 각각 오염시켰고, 균일하게 오염을 시키기 위해 계면활성제 brij35를 2.5mg/L를 주입하고, 300rpm에서 진탕한 후, 오염된 토양을 상온에서 이를 정도 방치하여 용매를 휘발시켰다[9]. 미생물을 담지한 PU매체를 오염된 토양에 균일하게 배분·혼합 후 상온에 방치하면서 이틀에 한번씩 수분유지를 하였고, 전체적인 산소공급을 위하여 주기적으로 토양을 뒤집어 주었다. 시료는 3일 간격으로 채취하였다.

3) PAH 분석

실험에 사용한 PAH는 phenanthrene 과 naphthalene 두 종류이며 그들의 물리적 특성과 구조가 표 1에 나와 있다. 폼을 포함한 토양시료 3g를 20ml 바이알(유기물 제거를 위해 아세톤 세 번, 헥산 세 번으로 세척하여 완전히 건조시킴)을 채취하여 아세톤 10ml를 넣고 5분 동안

200rpm으로 진탕한 후, 1시간동안 40℃이하를 유지하며 Sonication에 초음파처리를 하였다. 유리칼때기에 거름종이를 깔고 무수황산나트륨(105℃에서 24시간 Drying Oven에 건조시킴) 10g를 넣고 시료를 부어 여과시켰다. 그 중 1ml를 취한 후 internal standard에 30μl를 넣었다.

전처리한 시료는 GC/MS(Gas Chromatograph/Mass Spectrometer)를 이용하여 PAH를 분석하였다. GC는 HP6890 GC와 MSD 5973으로 구성된 장비를 이용하였으며, 칼럼은 HP5 crosslinked 5% ph Me silicon capillary column(50m×0.2mm×0.11μm film thickness)를 사용하였다. 작업조건은 GC의 운반 가스로서 순도 99.999의 초고순도 헬륨(유니온 가스)을 사용하여 분당 1ml로 흐르도록 유지하고, 온도 프로그램은 70℃에서 2분간, 5℃/min로 80℃까지 온도를 올리고, 30℃/min로 240℃까지 온도를 올려서 분석하였다. Injector의 온도는 200℃, 압력은 37psi이고, 시료는 GC용 10μl짜리 syringe를 사용하여 1μl를 주입하였고, 30 : 1의 split ratio로 GC 내로 주입되었다.

4) PU foam의 광학현미경 및 SEM 관찰

PU 폼 (미생물 점착 전후)은 광학현미경(Olympus BX41) 400배율과 주사전자현미경(JEOL JSM-5310)을 사용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

1) PU 폼에의 미생물 점착

그림 1a는 각각 30℃,37℃,45℃에서 초음파장치로 PU 폼에 부착된 미생물을 탈착·정량한 것이다. 공극 크기는 동일하게 SR9-35C/G로 하였고 시간경과에 따라 세가지 공극 폼에의 미생물 부착량을 산정하였다. 부착량은 시간에 따라 증가하였고 그 비율은 서로 달랐다. 37℃일 때 가장 많은 미생물이 부착되어 72시간 경과후 PU폼에는 0.648mg-biomass/mg-PU의 부착량이 기록되었다. 대체로 48시간 경과후 추가부착은 둔화됨을 알 수 있었다.

그림 1b는 같은 온도에서 서로 다른 공극에 부착되는 미생물의 차이를 보여준다. 실험 온도를 37℃로 하고 공극 크기가 각각 다른 SR9-35C/G, SR9-30C/G, SR9-25C/G의 3가지 PU폼에 72시간까지 미생물을 배양하였다. 공극의 크기는 SR9-35C/G, SR9-30C/G, SR9-25C/G의 순서이다. 72h이 지난 후 SR9-35C/G 제품에서 0.648mg-biomass/mg-PU로 미생물이 최대로 부착되었으며 이는 같은 부피의 PU폼에서 공극이 작을수록 미생물이 실제로 부착될 수 있는 표면적이 커지기 때문이다.

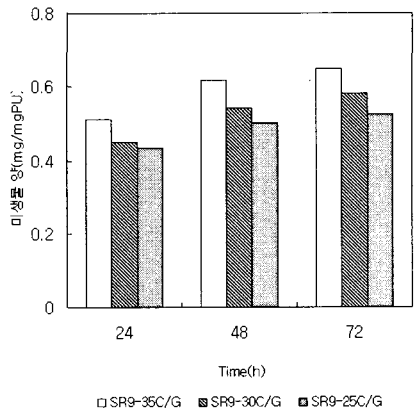
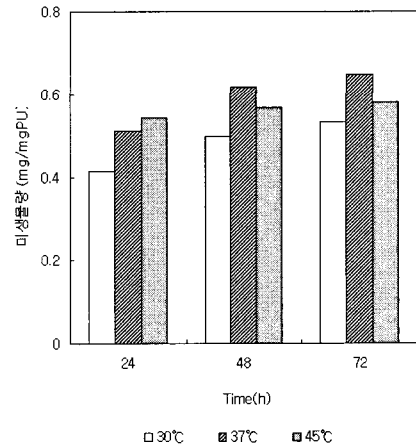




그림 1. 온도변화(왼쪽) 및 폼 공극크기(오른쪽)에 따른 bacteria점착 비교

표 1. 여러 PAH의 물리적 특성 [10]

고리 수	화합물	화합식	구조식	분자량	끓는점 (℃)	증기압	발암성
2	Naphthalene	C ₁₀ H ₈		128.17	218	40mmHg (119.3 ℃)	없음
3	Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀		178.23	340	1mmHg (118.2 ℃)	없음

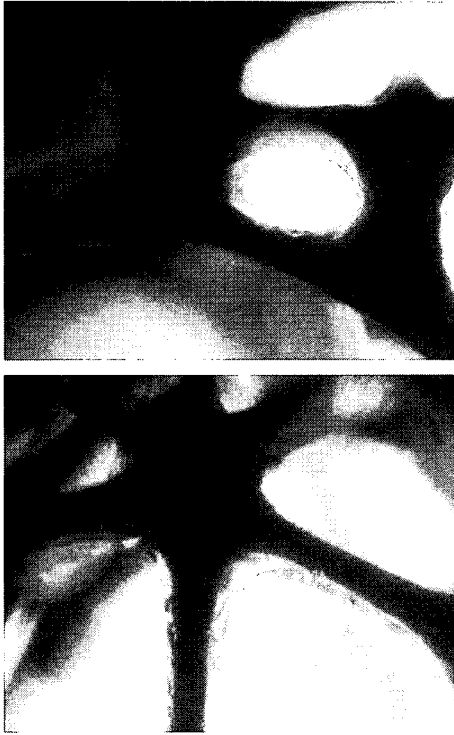


그림 2. Bacteria 부착전후의 PU품 표면 사진 (광학현미경 x400; 위: 부착 전, 아래: 부착 후)

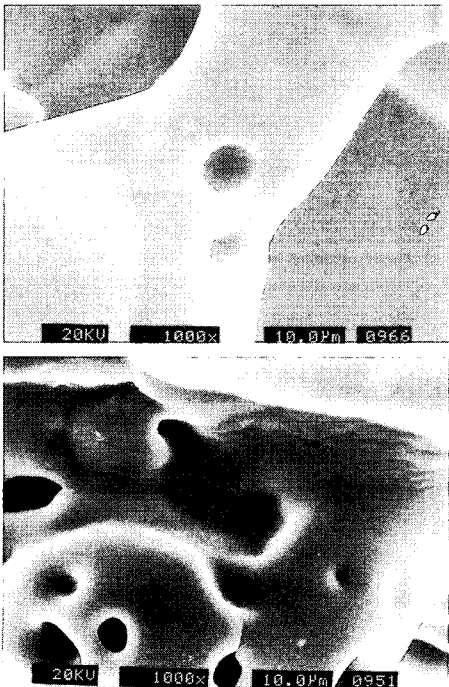


그림 3. Bacteria 부착전후의 PU품 표면 사진 (SEM x1000; 위: 부착 전, 아래: 부착 후)

그림2 와 3은 각각 광학현미경과 주사전자현미경 (SEM)으로 관찰한 PU품의 미생물 부착전후의 상태를 보여준다. 광학현미경에서 폼구조의 연속기공 구조를 분명히 볼 수 있었고 SEM으로는 확대된 기공의 세부형태와 미생물 부착에 영향을 줄 수 있는 표면의 거칠기, 미세공극을 다수 확인할 수 있었다.

2) PAH 생분해와 수분조절효과

그림 4는 토양에서의 페난트렌의 농도 변화를 나타낸 것이다. 반응 초기부터 48시간까지는 농도변화 폭이 적었다. 48시간부터 192시간까지는 상당히 빠른 농도감소를 보였고, 192시간 이후에는 그 감소속도가 낮아지면서 576시간까지 극히 낮은 변화율을 보였다. 이는 초기에 미생물이 토양 환경에 대한 적응시간(lag time)이 필요하며 일단 적응되면 공대사와 같은 메카니즘을 사용하여 생분해 및 제거가 한결 쉬어짐을 말해준다. 한편, 멸균과정을 거치고 폼을 삽입하지 않은 토양조건(control)에서 생분해는 실험오차 범위 내에서 거의 이루어지지 않았다. 자연상태의 흙(soil)에서 페난트렌은 54%제거 되었으며 세정/강열을 한 흙(sterile soil)에서는 약 50%로 자연상태의 흙에서 제거율이 약간 높음을 알 수 있다.

그림 5는 시간에 따른 $\ln(C_0/C_t)$ 변화를 나타낸 것이다. 1차 반응의 경우에는 $\ln(C_0/C_t)=kt$ 라는 직선 식을 유도할 수 있다. 이 그림에서 점종초기 즉 0시간에서 48시간까지를 뺀 그 이후에는 거의 직선을 이루고 증가하고 있다. 그러나 240시간이 지나면 다시 증가폭이 감소되어 직선에서 벗어나고 있다. 즉 48시간부터 240시간까지는 1차 반응구간이라 할 수 있다. 이 때의 반응속도 상수 k를 구하면 자연상태의 흙의 경우에는 $0.0738d^{-1}$ 이고 세정/강열한 흙의 경우에는 $0.0671d^{-1}$ 로 자연상태의 흙에서의 k값이 높아 생분해 능력은 자연상태의 토양을 이용하는 것이 유리함을 알 수 있었다.

그림 6과 7은 토양에서의 나프탈렌의 농도 변화 및 log형태의 반응제거율을 나타낸 것이다. 반응초기 즉 배양 직후부터 48시간까지는 잔류농도나 제거율의 변화 폭이 적었다(그림 6). 48시간부터 144시간까지는 매우 빠르게 농도감소가 일어났고 이후 820시간에 걸쳐 미소하지만 지속적인 농도감소가 일어났다. 전체적으로 나프탈렌이 페난트렌에 비해 제거율이 높는데 (70-80%; 600h 기준), 이는 나프탈렌이 페난트렌에 비해 분자구조가 간단하여 생분해가 용이하기 때문이라고 생각된다. 또한 나프탈렌이 페난트렌에 비해 휘발성이 강하여 일부 휘발되었다고 사료된다. 흙의 종류에 따른 제거율을 보면, 자연상태의 흙의 경우 제거율은 95%이고 세정/강열을 한 흙에서는 92%로 자연상태의 흙의 제거율이 역시 높았다.

그림 7을 보면, 나프탈렌이 반응중기(~520시간)까지는 1차반응을 따르지 않으며 이후에는 선형1차식 형태를 보인다. 반응중기의 반응차수는 0.72로 나타났다. 미생물에 의한 유해물질 제거 반응이 대부분 1차 반응인 것을 고려한다면 나프탈렌의 제거 반응은 다소 특이성을 보인다고 할 수 있다.

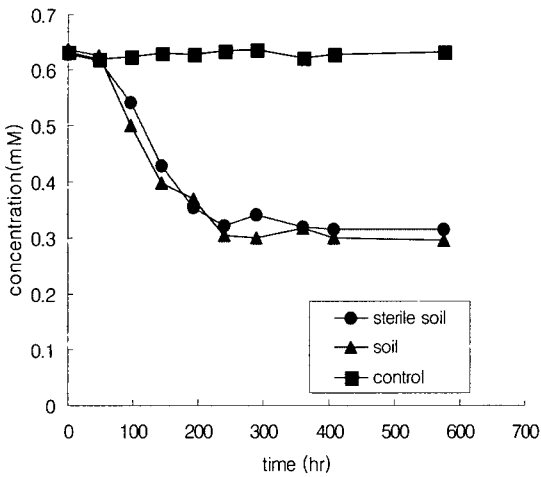


그림 4. PU매체에 부착한 *Pseudomonas sp.* 에 의한 phenanthrene 잔류농도(25 °C)

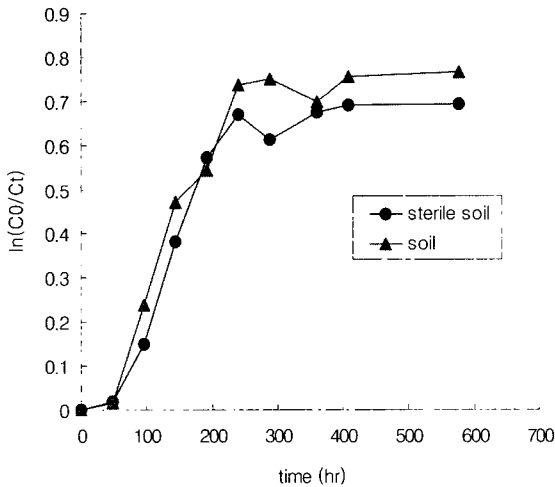


그림 5. PU매체에 부착한 *Pseudomonas sp.* 에 의한 phenanthrene 분해속도론(1차 반응) 분석

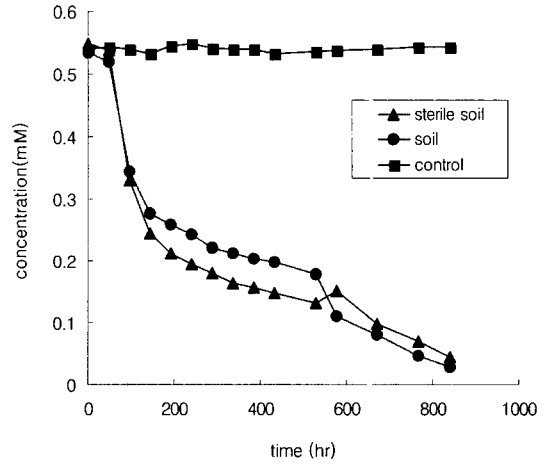


그림 6. PU매체에 부착한 *Pseudomonas sp.* 에 의한 naphthalene 잔류농도(25 °C)

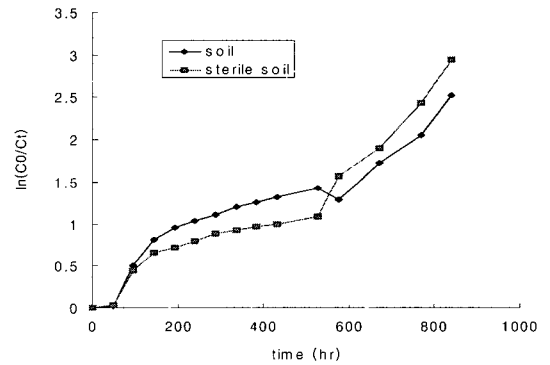


그림 7. PU매체에 부착한 *Pseudomonas sp.* 에 의한 naphthalene 분해속도론(1차 반응) 분석

토양 수분율 효과는 이전 논문[11]에서 사용한대로 15~25%, 45~55%, 80%이상의 토양 함수율을 유지하여 phenanthrene, naphthalene의 제거효율을 관찰하였다(그림 8,9). 80%이상의 함수율에서 phenanthrene이 완전하게 40%수준의 분해를 보였고, 15~25% 경우도 역시 40%를 약간 웃도는 제거효율이 관찰되었다. 45~55%의 토양 함수율일 경우 51%로 제거효율이 가장 높았으며, 이는 미생물의 대사 작용 및 토양상의 성장이동에 가장 적합하였기 때문으로 사료된다. 한편, naphthalene 함유된 PU 폼에서는 80% 이상의 함수율인 경우에는 50%수준의 잔류농도를 보였으며, 15~25% 와 45~55% 경우에는 각각 84.5%, 94.7%의 제거효율로서 phenanthrene 에 비하여 높은 제거 수준을 보였다. 즉, 토양 수분율이 감소하거나 증가함에 따라 제거효율은 낮아지며 특히 80%의 높

은 수분함유율은 미생물에 성장과 대사작용에 부적절한 것으로 판명되었으며, 이것은 토양의 일부분이 혐기화되는 것에 기인하는 것으로 보여 진다.

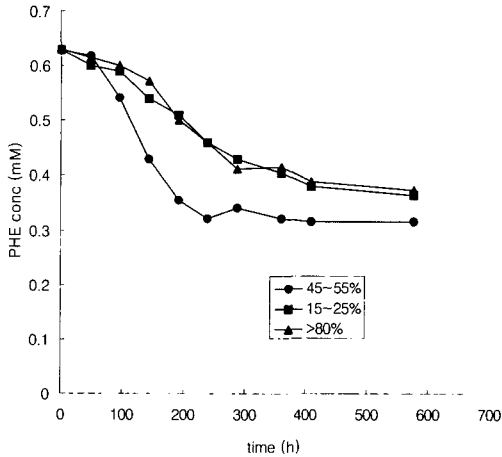


그림 8. 함수율에 따른 PU매체토양에서의 phenanthrene 생분해(25 °C)

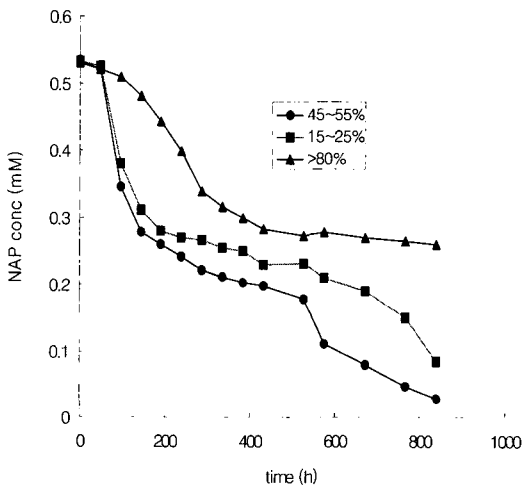


그림 9. 함수율에 따른 PU매체토양에서의 naphthalene 생분해(25 °C)

그림 10은 시간단계에 따른 PAH 분해속도변화를 나타낸 것이다. 반응초기, 즉 배양직후부터 48시간까지는 흙의 종류나 제거물질에 상관없이 0.005mM/d에서 0.007mM/d사이의 낮은 제거 속도를 보였다. 그 중 자연상태의 흙에서의 나프탈렌이 0.007mM/d로 가장 높은 제거속도를 보였다. 분해기에서는 모든 물질이 반응초기보다 높은 제거 속도를 보였다. 자연상태의 흙이 세정/강열

한 흙에 비해 0.005mM/d만큼 제거속도가 컸으며 정제기 때는 페난트렌의 제거속도가 급격히 떨어진 반면, 자연상태의 흙에서의 나프탈렌은 생분해가 초기만큼 계속적으로 진행되었고 세정/강열을 한 흙에서의 나프탈렌도 비슷한 양상을 보였다. 나프탈렌의 경우 실험에서의 최대 제거율은 92%-95%에 달하였다.

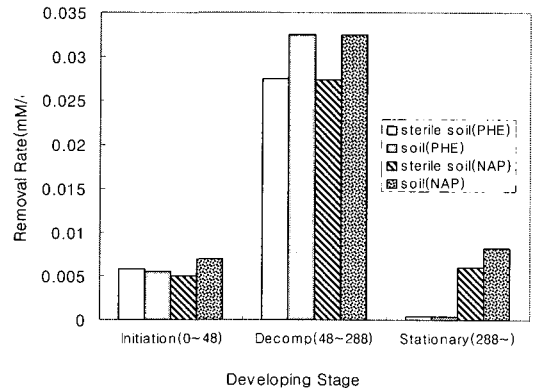


그림 10. PU매체에 부착한 *Pseudomonas sp.*에 의한 PAH 분해속도의 단계별 비교

4. 결론

본 연구는 PAH 유류에 오염된 토양에 일정기간 성장시킨 *Pseudomonas spp.*를 부착한 연속기공을 가진 PU품을 삽입하여 생분해 정도를 실험한 것이다. 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 미생물의 고농도 집적을 위해 도입한 PU품은 기공이 비교적 작고 37 °C 온도에서 시험한 sample에서 최적의 세균 부착을 보였다.
- 2) Phenanthrene의 생분해 경우, 실온에서 약 2일 정도의 미생물 적응기간(lag)이 요구되었으며 1차반응속도에 근거한 분해율을 나타내었다. 그러나 잔류하는 페난트렌의 생분해가 이후 현저히 저해되어 평균 50%정도의 최종 분해율을 보였다. 미생물 biomass와 영양소 결핍에 따른 활성저하가 원인으로 제기되었다.
- 3) Naphthalene분해의 경우 전반기에는 0.7차 반응속도를 따르고 후반에는 1차 반응으로 나타나 두개의 뚜렷한 분해속도 양상을 보였다. phenanthrene에 비해 생분해성이 좋을 뿐 아니라 자연회발 및 농도 감소에 따른 제거율 증가 등이 특징적이었다. 최종 제거율은 최대 95%에 달하였다.
- 4) 이전 연구결과에서와 같이 토양함수율의 경우 중간함

수율인 50%대에서 최적 분해가 이루어졌다.

5) Phenanthrene과 naphthalene은 대표성 있는 PAH(유류)이며 lab-scale에서 생성된 본 data로서 모형 토양에서의 생물복원 시험과 향후 특정 사이트의 파일럿 시험에서도 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 다만, 본 연구에서는 제한요인이 아니었지만 scale-up시 담지매체에 원활히 산소를 공급하는 공학적 방법론이 사전에 제시되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] M. D. Lelah and S. L. Cooper, "Effects of sulfonate Incorporation on in vitro Leucocyte Adhesion to Polyurethanes." *Biomater.*, 16, 457-466, 1995.

[2] M. Pulat and D. Babayigit, "Surface modification of PU membranes by graft copolymerization with acrylamide and itaconic acid monomers." *Polym. Test.* 20, 209-219, 2001.

[3] H. J. Busscher, G. I. Geertsema-Doorbusch and H. C. van der Mei, "Adhesion to silicon rubber of yeasts and bacterial isolated from voice prosheses: influence of salivary conditioning films." *J. Biomed. Mater. Res.*, 34, 201-209, 1997.

[4] L. H. Keith and W. A. Telliard, "Priority pollutants I - A perspective view." *Environ Sci Technol* 13, 416-423, 1979.

[5] R. M. Atlas, "Bioremediation of fossil fuel contaminated soils. In: Hinchey RE, Olfenbuttel RF (ed) *In Situ bioremediation.*" Butterworth-Heinemann, Boston, Mass, p. 14-32, 1991.

[6] M. A. Heitkamp and C. E. Cerniglia, "Mineralization of polycyclic aromatic hydrocarbons by a bacterium isolated from sediment below an oil field," *Appl Environ Microbiol* 54,1612-1614, 1988.

[7] C. E. Cerniglia, "Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons," *Adv Appl Microbiol* 58, 3117-3121, 1984.

[8] Catalogue of strains (6th Ed.), KCCM, 1998.

[9] Z. Zheng, and J. P. Obbard, "Oxidation of PAH by the white rot fungus, *Phanerochaete chrysosporium*," *Enz. Microbial Technol.*, 31, 3-9, 2002.

[10] L. H. Keith and M. M. Walker, EPA's Clean Air Act Air Toxics Database Vol. II - Air Toxics Chemical and Physical Properties, Lewis Pub., 1991.

[11] S. H. Kwon, S. H. Yoo, D. Cho, N. S. Huh and J. H. Kim, "A study of PAH biodegradation in soil by

Bacillus subtilis mixed with wooden media," *J. KAIS.* 6(3), 255-260, 2005.

조 대 철(Daechul Cho)

[정회원]



- 1985. 2. : 서울대학교 화학공학과(공학사)
- 1996. 2. : Purdue Univ. (공학박사)
- 2000. 3. ~ 현재 : 순천향대학교 에너지환경공학과 부교수

<관심분야>

바이오계면현상, 생물학적 수질대기환경처리, 토양정화

허 남 수(Nam-Soo Huh)

[정회원]



- 2005. 2. : 순천향대학교 환경공학과(공학사)
- 2005. 3. ~ 현재 : 순천향대학교 환경공학과 연구조교

<관심분야>

생물학적 토양정화, 미생물 담체

권 성 현(Sung-Hyun Kwon)

[정회원]



- 1988. 2. : 부경대학교 환경공학과(공학사)
- 1997. 2. : Univ. Southern California 환경공학과 (공학박사)
- 2000. 9. ~ 현재 : 경상대학교 해양환경공학과 부교수

<관심분야>

생물환경공학, 생물학적 토양정화, 생물학적 폐기물 처리