

유류오염토양 정화를 위한 생물활성 촉진방법의 평가

김중화 · 김태승 · 윤정기 · 김혁
국립환경연구원 토양환경과
e-mail : green707@korea.com

Abstract

Bench-scale experiments conducted to evaluation of the biostimulation and bioaugmentation techniques in treatment of petroleum contaminated soil. The soil bioreactors were operated for a 52 day-period. PDB population in the stimulated treatments increased from 7×10^4 MPN/g soil in zero day to 4×10^7 MPN/g soil after 23 days. However, despite the initially higher PDB population in the augmented treatments, it was decreased PDB population with respect to time. The average biodegradation rate in the augmented treatments were greater than of the stimulated treatment in the early stage, but the average biodegradation rate in the latter stage were calculated 3~5mg/kg-day in the augmented treatments and 10.38mg/kg-day in the stimulated treatments. The TPH removal rate was calculated 20~30% in the augmented treatments and 53% in the stimulated treatments.

key word : petroleum hydrocarbon, bioaugmentation, biostimulation, biodegradation

1. 서 론

유류오염 토양에 대한 생물학적 정화는 적용방법 면에서 토양내 토착미생물의 활성을 촉진시키기 위해 질소, 인 등의 영양염류나 산소와 같은 전자수용체를 첨가하는 biostimulation 과 오염지역에 존재하는 미생물을 분리 후 실험실에서 집적배양하여 다시 주입하거나 대상 오염물질을 분해할 수 있는 미생물을 직접 주입하는 bioaugmentation로 분류할 수 있다.

Biostimulation은 대부분의 생물학적 정화에서 이용되는 방법이며 bioaugmentation에 비해 상대적으로 경제적인 방법으로 알려져 있다. 반면 bioaugmentation의 우수성은 여러 연구를 통해 소개되고 있으나¹⁾ 기존 토착미생물과 첨가한 미생물간의 효과를 규명하기 어렵고, 정화대상 토양에 미생물을 균질하게 분포시켜야하는 문제가 있으며 또한 실험실 조건에서 배양한 미생물은 현장 조건에 따라 그 활성이 달라진다는 점으로 인하여 현재에도 신중하게 고려되어지고 있다.

본 연구에서는 실제 유류로 오염된 토양을 채취하여 bench-scale의 반응기를 이용해 생물활성 방법인 biostimulation 과 서로 다른 농도의 미생물을 접종한 bioaugmentation의 효율성을 비교 평가하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법 및 운전

실험실 조건에서 토착미생물에 의한 유류분해능과 외부에서 배양된 미생물의 접종 (amendment)에 따른 유류분해능 평가를 위해 Table 1과 같이 토양을 처리하였다.

Table 1. Design of feeding experiment for reactor test

Treatment	Diesel contaminated soil	Nutrient addition	Microbial amendment 1%/TSW*	Microbial amendment 3%/TSW	Microbial amendment 9%/TSW
Control	○				
Biostimulation	○	○			
Bioaugmentaion I	○	○	○		
Bioaugmentaion II	○	○		○	
Bioaugmentaion III	○	○			○

* TSW: total soil weight in each reactor

대상 토양은 실제 유류누출사고에 의해 오염된 토양으로 현장에서 10 mm체로 체걸음 한 후 24 시간 풍건 하였고, batch 실험을 통해 얻어진 조건인 포장용수량 50%의 수분을 첨가하였으며 초기 TPH 농도(11,340 mg/kg)를 기준으로 TPH:N:P = 100:10:3 비로 영양염을 첨가하였다. 또한 bioaugmentaton 구에는 미생물 3종을 집적 배양 후 제제형태로 하여 3개의 반응기에 토양무게(25kg)의 1%, 3%, 9%의 제제를 첨가하였다. 사용된 반응기의 구조는 Fig 1과 같고, 산소농도 12% 이하가 되는 처리구에 대해 공기추출을 하였으며 반응기의 온도는 25~35℃를 유지하였다.

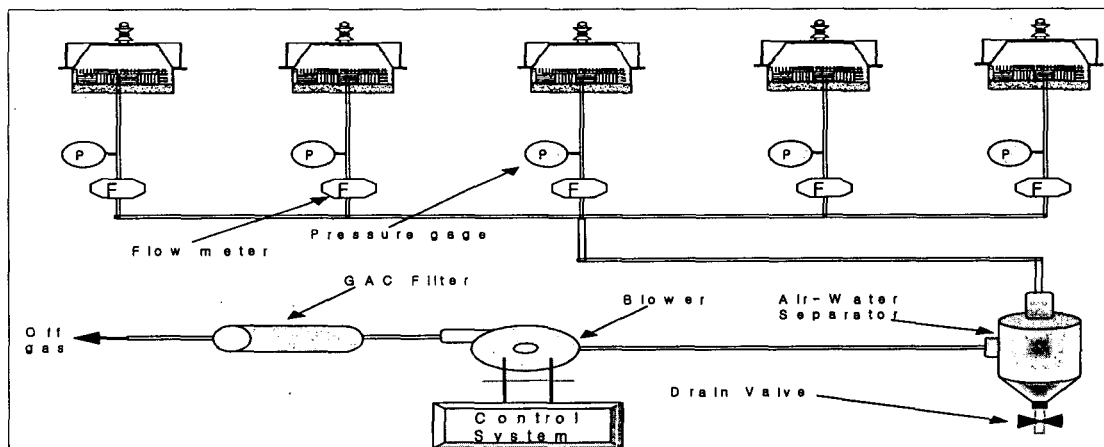


Fig. 1. The schematic diagram of reactor system

2.2 분석방법

평가를 위한 분석은 infrared gas 측정기를 이용하여 주기적으로 CO₂ 와 O₂ 농도의 변화량을 측정하였고, 채취한 토양의 TPH는 GC/FID를 이용하여 분석 하였다. 또한 유류분해 미생물(PDB)의 측정은 최적확수(Most probable number: MPN)계수법을 이용하였다.

2.3 결과 및 고찰

생물학적 분해과정에서 유기물질이 세포로 전환하는 비율은 유기물질의 분해력을 나타내며

이는 미생물의 양을 측정함으로써 알 수 있다. 하지만 이러한 평가는 시료의 채취와 분석이 어려운 토양의 특성상 좀 더 경제적이고 효율적인 방법을 이용하게 되는데 세포전환시 발생하는 CO₂ 와 이때 소모하는 산소의 양을 측정함으로써 생분해의 간접적인 지표로 활용할 수 있다.²⁾ Fig. 2는 반응기 운전 후 52일까지의 CO₂ 발생량과 산소소모량에 의한 생분해율을 나타낸 것으로, 공기추출 후 초기 17일까지는 bioaugmentation 구에서의 CO₂ 발생량과 생분해율이 대조구나 biostimulation 구에 비해 높게 측정되었으나 17일 이후 운전이 종료되는 시점까지는 오히려 biostimulation 구에서의 CO₂ 발생량 및 생분해율이 높게 나타났다. 미생물 접종 농도를 달리한 bioaugmentation (1,3,9%/TSW) 구간에는 큰 차이를 나타내지 않았다.

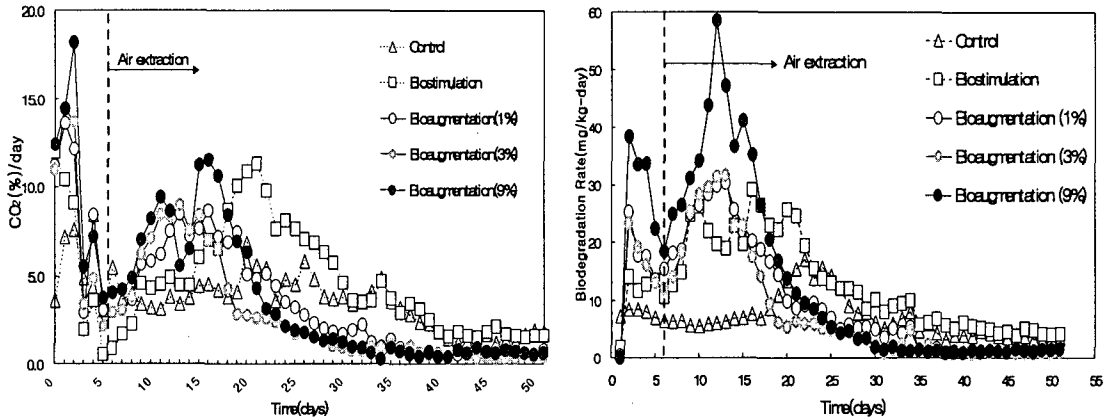


Fig. 2 Evolution rate of carbon dioxide and changes of biodegradation rate

한편 토양 내에서의 생분해는 미생물의 활성과 토양매질의 특성 등 여러 요인으로 인하여 실제 분해경향이 다르게 나타날 수 있어, 간접지표인 CO₂ 발생량과 산소소모량의 측정만으로는 미생물에 의한 유류분해율을 이해하는데 한계가 있다. 따라서 본 실험에서는 Fig 3에서와 같이 유류를 유일한 탄소원으로 증식하는 유류분해 미생물(PDB)의 밀도와 시간의 경과에 따른 잔류 TPH량을 측정함으로써 실질적인 유류분해 정도를 알아보았다. Fig 3에서와 같이 초기 PDB 밀도는 bioaugmentation 구가 biostimulation 구보다 비교적 높게 접종되었음을 알 수 있다. 그러나 시간이 경과함에 따라 biostimulation 구에서 미생물의 증식이 지속적이고 활발히 일어나 운전 후 23일에는 4×10^7 MPN/g soil까지 급격히 증가하였다. 반면 bioaugmentation 구에서의 PDB 밀도는 시간이 경과함에 따라 오히려 감소하였다. 이러한 현상은 접종된 미생물들이 기존 토착미생물과의 공생관계가 원활하지 못하였기 때문으로 판단되며, Vogel³⁾의 연구에서처럼 실험실에서 배양된 미생물이 환경이 다른 토양에 접종되면서 활성에 제한을 받은 것으로 사료된다.

잔류 TPH량은 대조구를 포함한 모든 처리구에서 시간의 경과함에 따라 TPH 농도가 감소하였음을 알 수 있다. 제거율을 보면 biostimulation 구에서는 운전 후 52일 동안 초기 TPH의 53%가 제거되었고 상이한 농도 미생물제제를 첨가한 bioaugmentation 구에는 20~30%의 분해율로 biostimulation 구보다 낮게 나타났다.

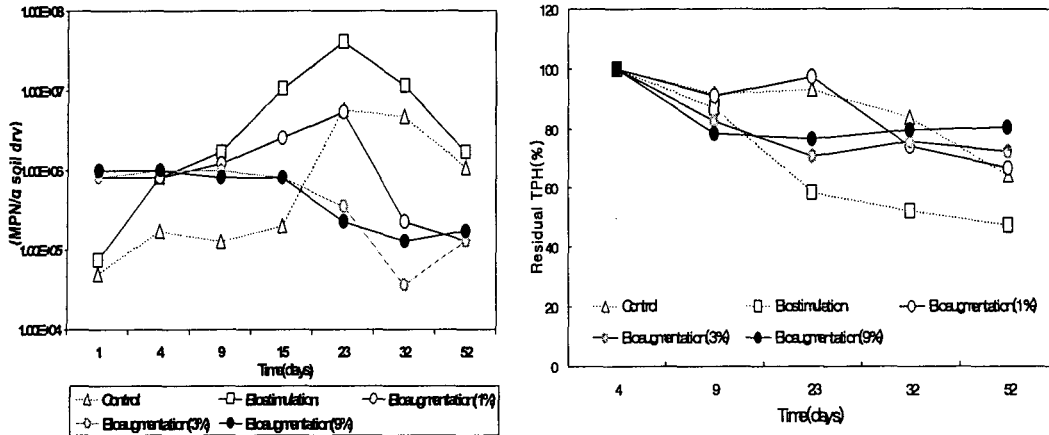


Fig. 3 Changes of petroleum degradation bacteria population density in soil and Changes of TPH with respect to time(GC/FID)

3. 결론

유류오염토양에 대한 biostimulation 과 bioaugmentation 의 효율성을 평가하기 위해 실시된 bench-scale의 반응기 실험결과, 초기 CO₂ 발생량과 산소소모율은 bioaugmentation 구에서 높게 나타났으나 반응기 운전 17일 이후 biostimulation 구에서의 발생량 및 소모량이 높게 나타났다. 또한 유류 분해 미생물(PDB)의 밀도는 bioaugmentation 구에서 초기 높은 농도로 집중되었음에도 불구하고 시간이 경과함에 오히려 감소하였다. 그러나 biostimulation 구에서는 지속적인 증가로 인하여 반응기 운전 후 23일에는 4×10⁷ MPN/g soil까지 증가하였다. 한편 TPH 분해율은 biostimulation 구에서 운전 후 52일 동안 초기 TPH의 53%가 제거되었고 상이한 농도 미생물제제를 첨가한 bioaugmentation 구에는 20~30%의 분해율로 biostimulation 구보다 낮게 나타났다. 본 연구에서는 bioaugmentation 방법이 biostimulation 방법보다 비용이나 기술면에서 어려움에도 불구하고 TPH의 분해능은 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 효율적인 유류오염토양의 정화를 위해서는 충분한 적용성시험(treatability test)을 거친 후 오염토양에 적절한 농도의 영양염의 첨가와 산소공급을 한다면 외부에서 배양한 미생물을 접종하지 않아도 충분한 분해효과를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

1. Atlas, R.M. (1991) Microbial hydrocarbon degradation bioremediation of oil spills. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 52, 149-156.
2. Deshusses, M.A. (1997) Transient Behavior of Biofilters: Start-up, Carbon Balances, and Interactions between Pollutants, *Journal of Environmental Engineering*, Jun, 563-568
3. T. M. Vogel, (1996) "Bioaugmentation as a soil bioremediation approach", *Current Opinion in Biotechnology*, 7, 311-316.