

이연 또는 비소와 경유로 오염된 토양의 복합정화공법 개발

김혜영 · 박정훈*

전남대학교 공과대학 환경공학과

Development of Hybrid Remediation Method for Contaminated Soils with Zinc or Arsenic and Diesel

Hye-Young Kim · Jeong-Hun Park*

Department of Environmental Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

The purpose of this study was to develop the remediation method of contaminated soils with metals and petroleum. The diesel degrading strain was isolated and identified from the soil contaminated by petroleum at industrial sites. Diesel biodegradation experiment was performed by diesel degrading bacteria in both solution and soil slurry. Contaminated soils by Zn or As and diesel were treated consecutively by steam-vapor extraction, biodegradation, and acid washing. The strain was identified as *Pseudomonas aeruginosa*, and named as *Pseudomonas aeruginosa* TPH1. The optimal culture conditions of TPH1 were 20°C and pH 7.0, 3% of diesel concentration. Biodegradation of diesel was performed using the separated strain in liquid medium, and 63% of diesel was degraded in 72 hours. And 52% of diesel was removed in the tested soils. In the treatment of contaminated soils with diesel and Zn or As, 29% ~ 44% of diesel was reduced by steam-vapor extraction, 60% ~ 71% of diesel was removed after biodegradation. 47% of Zn and 96% of As were removed after acid(mixture of sulfuric and oxalic acids) washing. It is recommended that consecutive treatment method of steam-vapor extraction, biodegradation and acid washing is effective for remediation of complex contaminated soils with metals and petroleum.

Key words : Soil remediation, Diesel, *Pseudomonas aeruginosa* TPH1, Heavy-metals, Contaminated soil, Biodegradation, Washing

1. 서 론

산업화의 가속화로 유류는 중요한 에너지 자원으로서 산업과 가정에서 널리 사용되고 있다. 그러나 많은 양의 원유 또는 정제된 석유 제품들이 생산, 운반, 저장 등의 과정에서 사고 또는 인위적인 방출에 의해서 생태계로 유출되어 커다란 피해를 유발시키고 있다(Moriarty, 1988). 철도 및 산업부지나 군주둔지에서 유류와 중금속의 복합적인 오염이 흔히 보도되어왔다. 용산 국제업무 부지에서 2만여 입방미터의 토양이 중금속과 유류로 복합오염된 것으로 보도된 적이 있으며, 창원 중동지구의 복합오염, 부산 사하구 유류저장 시설 및 선박회사 주변에서 이연과

니켈, 유류의 복합오염, 하남시 미군공여지의 복합오염 등을 일부 보도된 사례로 들 수 있다(조선일보, 2009; 경남일보, 2008; 부산일보, 2009; 시대일보, 2008). 반환 예정인 미국기지가 총석유계탄화수소(TPH) 오염 기준치(500 mg/kg)를 최대 70배 초과하는 등 유류와 중금속에 의한 토양 오염이 심각한 것으로 나타났으며, 반환된 23곳 전체 기지의 토양오염을 치유하는 데 최소 276억원에서 최대 1,197억원이 소요될 것으로 추산되기도 하였다(우영식, 2008).

한편, 국내에는 약 900여개의 금속광산, 380여개의 석탄광산 및 1200여개의 비금속광산을 포함하여 총 2500개소의 크고 작은 광산들이 있으며, 이들 중에서 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산으로써 적절한 환경복원시설이 설치

*Corresponding author : parkjeol@jnu.ac.kr

원고접수일 : 2009. 12. 15 심사일 : 2009. 12. 19 게재승인일 : 2010. 3. 2
질의 및 토의 : 2010. 10. 31 까지

되지 않아 주변 생태계가 위협받고 있다. 광미나 광산내 유출수 등에 포함된 각종 중금속들은 독성이 크고 제거가 잘 되지 않는다. 이들 중금속들은 지하수 또는 다양한 경로를 통해 인간에게 위해를 줄 수 있으므로 이에 대한 정화대책이 시급한 실정이다(이종열, 2007; 한경욱, 2005).

오염된 토양을 처리하는 방법 중 일반적으로 휘발성이 높은 기술인 토양 증기추출(Soil vapor extraction)과 같은 공기 주입/추출방식 기술이 효과적으로 적용될 수 있는 반면, 국내에서 소비량이 가장 많은 연료이면서 토양오염 유발물질로서 상당한 부분을 차지하고 있는 경유의 경우 대부분의 구성물질이 비휘발성이므로 위와 같은 방법으로는 적절한 효과를 기대할 수 없다. 경유의 비점은 190°C~350°C로 200여종의 유기화합물로 구성되어 있으며, 약 70% 이상이 파라핀계 물질들이다. 이 물질들은 토양 미생물에 의해 분해가 용이한 성분들로 비교적 처리기간이 길어 잔류 오염이 발생할 수 있으며 처리과정을 조절하기 힘들다는 단점이 있지만 생물학적 복원방법에 적합하다고 할 수 있다(U.S. EPA, 1997; Cole, 1994; Macky et al., 1985).

중금속으로 오염된 토양의 위해성 저감 대안으로 고려할 수 있는 방법은 중금속의 오염이동 가능성을 최소화시키는 불용화방법(고형화·안정화법)과 중금속을 추출/분리하는 방법(토양세척/세정법)으로 크게 나눌 수 있다. 이 중에서 토양 세척법은 적절한 세척제를 사용하여 유기오염물질과 중금속을 동시에 제거할 수 있으며, 오염된 토양의 부피도 크게 감소시킬 수 있어 오염물질의 양을 단시간에 줄일 수 있을 뿐만 아니라 경제성 및 효율성이 탁월하여 중금속으로 오염된 토양의 오염물질 농도저감을 위한 가장 적절한 정화공법으로 고려될 수 있다(Yarlagadda et al., 1995; 서상기 외, 2008; 조도순 · 김준호, 1995).

본 연구에서는 복합적으로 오염된 토양을 정화하기 위한 방법을 개발하고자 하였으며, 경유를 분해하는 미생물을 오염된 토양으로부터 분리동정하고, 분리된 균주의 성장에 영향을 미치는 인자의 최적조건을 도출하였으며, 분리된 균주를 이용하여 경유의 분해능을 평가 하였다. 또한 분리된 균주와 증기추출, 산세척을 복합적으로 이용하여 경유와 아연 또는 비소로 동시에 오염된 토양을 정화하는 방법을 개발 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 균주의 분리 및 배지 조성

경유를 분해하는 균주를 분리하기 위해 전남 지역의 여

수산업단지에서 유류로 오염된 토양을 채취하여 실험에 사용하였다. 균 분리용 및 경유 분해능 실험에 사용된 배지(Mineral Salt Medium)의 조성은 증류수 용액 1 L당 KH_2PO_4 3.4 g, Na_2HPO_4 3.55 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1 g, Hunter mineral Base 10 mL이었다. Hunter mineral Base은 증류수 용액 1 L당 Nitritotriacetic acid 10.0 g, MgSO_4 14.45 g, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.00925 g, $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 3.335 g, $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.099 g, Stock salts solution 50 mL이었다(Gerhardt et al. 1994). 균주의 분리는 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 먼저 채취한 토양 1 g을 yeast 1%(w/v)을 포함한 MSM 액체배지 10 mL에 호기적 조건으로 35°C, 150 rpm으로 수일간 성장시켜 대조군과의 탁도 차이를 통해 균주의 성장을 확인하였다. 성장이 확인된 균주들은 경유(diesel)을 탄소원으로 하는 신선한 최소염 배지에 3회 이상 계대 배양하여 원하는 균주를 분리하고자 하였다. 배양으로 얻어진 단일 콜로니는 고체의 한천배지에 도말함으로써 원하는 균주를 순수분리 할 수 있었다. 한편 분리된 균을 본 연구에 사용하기 위하여, 계대 배양액을 탄소원으로 경유를 포함한 MSM배지 200 mL에 2 mL를 접종하여 성장시켰으며, 균의 성장정도는 탁도와 색의 변화를 통하여 파악하였고, 대수성장기 말에 있는 균을 실험에 사용하였다.

2.2. 균주의 동정

분리된 경유 분해 균주는 그람염색을 통한 현미경상에서의 관찰 및 솔젠트(주)에 의뢰하여 16S rRNA 염기서열 분석을 통하여 동정하였다. 16S rRNA sequence는 NCBI(National Center for Biotechnology Information)의 Blast program을 사용하여 GenBank database로부터 비교하였다.

2.3. 균주의 배양

전배양은 300 mL 삼각플라스크에 배지 200 mL, 탄소원인 경유 1%(v/v)와 분리된 strain TPH1을 접종하여 35°C, 150 rpm에서 4일간 호기적으로 배양하였다. 본 배양은 전배양과 같은 조건으로 배양액의 1%(v/v)를 새로운 배지에 접종하여 배양하였으며, 균주의 성장은 UV-visible spectrophotometer로 파장 600 nm에서 측정하였다.

2.4. 액체배지에서의 경유 분해

분리균주에 의한 액체배지에서 경유의 분해능을 알아보기 위한 실험방법은 다음과 같다. 20 mL 바이알에 2 mL MSM배지를 넣고 기질인 경유를 1%(v/v) 넣은 후 시간에 따른 분해율을 분석하였다. 균주 배양액 200 mL를

conical tube에 넣고, 3000 rpm에서 10분간 원심분리 한다. 원심 분리 후 상등액은 버리고, 다시 멸균된 인산염완충(20 mM, pH 7.0) 용액을 주입하여 혼합하고 원심 분리하는 과정을 3회 반복하여 기질로 이용되었던 경유를 제거하고자 균주를 세척 하였다. 세척된 균주를 실험에 이용하고자 MSM배지 일정량을 주입하였을 때 O.D(600 nm)값이 7.776(CFU : 11.8×10^9)이었고 경유로 오염된 20 mL vial에 20 μ l씩 접종하였다. 이 후 20°C, 150 rpm shaking incubator에서 배양시켜 시간에 따른 처리효율을 확인하였다.

시간에 따른 배양액내 잔류 경유량 측정은 배양액 2 mL에 2 mL의 DCM(Dichloromethane)을 주입한 다음 30초간 강하게 vortexing한 후, 소량의 무수황산나트륨을 이용하여 수분을 제거하였다. 이렇게 추출된 용매는 2 mL sample vial에 담아 GC-FID를 이용하여 분석하였다.

2.5. 토양에서의 경유 분해

20 mL 바이얼에 4가지 토양(흑운지토양, 광주토양, 아연오염토양, 비소오염토양)을 각각 1 g, MSM배지 4 mL을 넣고 121°C에서 15분간 autoclave 시킨 후, 경유 2%(v/v)로 각각 오염시켰다. 흡착평형을 이루고자 슬러리 용액은 실온에서 roller로 7일간 8 rpm으로 혼합시켰다. 혼합 후 세척된 균주(O.D. 600 nm : 4.365)를 1%(v/v) 주입하고 8 rpm으로 rolling 시켜 시간에 따른 오염물질의 생물학적 분해를 수행하였다.

시간에 따른 경유의 잔류 농도를 측정하기 위해 20 mL 바이얼을 2000 rpm, 20분 동안 원심분리 시켜, 배양액을 제거한 후 메탄올 4 mL를 넣고 8 rpm roller로 2일간 혼합하여 토양에 남아있는 경유를 추출 시킨다. 원심 분리하여 추출용액 1 mL만을 취해 HPLC로 분석하였다.

2.6. 실험토양 분석

실험에 사용된 토양은 표면의 잡초나 유기물층을 제거한 후 표토층(0~15 cm)으로부터 채취하여 그늘에서 건조한 후 2 mm 체를 통과시켰다. 국제 토양학회의 토양삼각

도에 의해 사용 토양의 토성은 알아보았고, 총 유기탄소 함량은 TOC analyzer(SSM-5000A, Shimadzu)을 이용하였다.

아연 및 비소의 오염농도 측정을 위하여 토양오염공정 시험 기준에 준하여 전처리 하였으며, 전처리 후 용액 내 농도는 ICP-OES을 이용하여 분석하였다. Table 1은 실험 토양의 특성을 나타내었다.

2.7. 아연 또는 비소와 경유로 오염된 토양 처리 시스템

경유 및 중금속으로 오염된 토양을 정화하기 위해 스템을 이용한 열탈착 및 생물학적 처리, 세척법을 복합적으로 적용하고자 하였다. 세척법에 사용된 산 용액은 pH 0.32으로 강산성을 띄고, 산으로 세척된 토양의 pH는 3.97로 나타났다. 대부분의 미생물은 pH 6~8 부근의 영역에서 성장속도가 최적이고, 이보다 높거나 낮으면 성장속도가 현저하게 감소한다(구자공 외, 2007). 따라서 오염 토양 처리 시스템을 스템을 이용한 열탈착이 끝난 후 미생물을 이용해 생물학적 처리를 하고, 마지막으로 산 세척 처리하는 것으로 구성하였다.

실험방법은 다음과 같다. 아연 또는 비소로 각각 오염된 토양에 인위적으로 5%(v/v)의 경유를 골고루 분사하고 섞어주어 밀봉한 다음 경유가 토양에 흡착할 수 있도록 7일간 보관한다. 중금속과 경유가 복합적으로 오염된 토양의 경유 제거를 위해 30 mL 컬럼에 오염된 토양 10 g을 넣은 후 10분간 자체 제작된 스템 증기 추출시켰다. 증기 추출시의 온도는 93°C 이며 10분간 총 30 mL의 증류수가 증기로 이용되었다. 증기 추출 후 경유의 처리를 위해 세척된 균주(O.D. 600 nm : 0.455)가 포함된 MSM 배지 10 mL를 6시간마다 1번씩 총 40 mL 흘려주며 하루 동안 배양시켰다. 배양이 끝난 후 선행실험으로 높은 중금속 제거 효과를 보여준 황산 1M과 옥살산 1M을 1:4 비율로 섞은 용액 100 mL를 진공을 건 상태에서 주입하여 아연과 비소를 제거하고자 하였다(Fig. 1)(김해영, 2008; 이주리, 2008). 각 과정별 경유와 중금속의 농도는 2.6에 제시한 방법과 동일하게 수행하였다.

Table 1. The properties of soils

Soil	TOC (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture	Concentration of pollutant
Heukeumji	13	70	22	8	Sandy loam	-
Gwangju	0.4	71	23	6	Sandy loam	-
Zn contaminated soil	1.28	56	34	10	Sandy clay	1792 ppm
As contaminated soil	1.79	66	19	15	Sandy clay loam	2.59 ppm

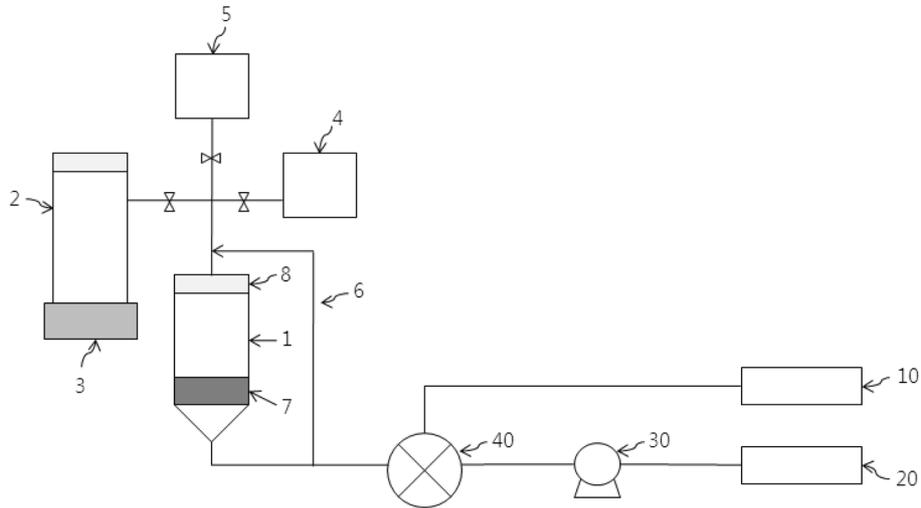


Fig. 1. Schematic of the remediation process; 1. reactor, 2. steam generator, 3. heater, 4. strain medium, 5. acid solution, 6. recycle of acid solution, 7. filter, 8. distributor, 10. gas remover, 20. liquid tank, 30. vacuum pump, 40. gas-liquid separator.

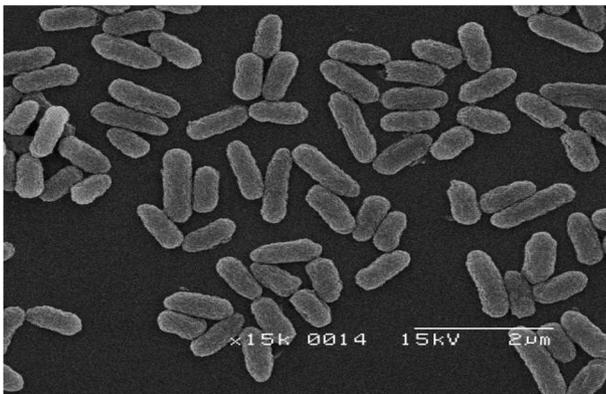


Fig. 2. The morphological observation of strains by SEM.

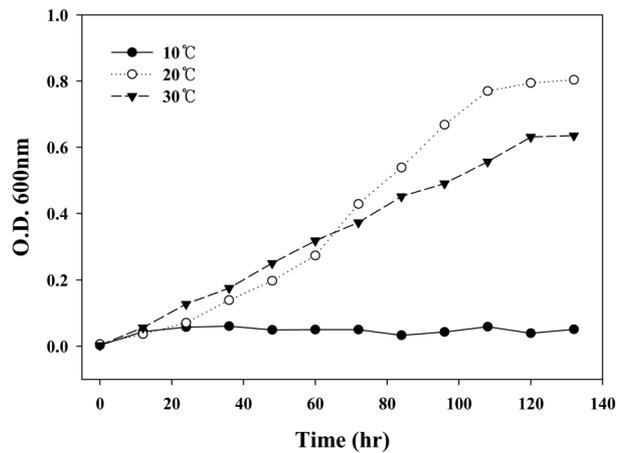


Fig. 3. The effect of temperature on cell growth of TPH1 in MSM liquid medium.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분리균주의 동정

본 연구에서 순수 분리된 TPH1 균주는 LB 고체 배지에서 배양한 다음 전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 분리된 TPH1의 세포 형태는 Fig. 2와 같이 간균이었고, 그람 염색 결과 그람 음성균으로 나타났다. TPH1을 16S rRNA를 통해 염기서열을 분석한 결과를 토대로 GenBank database로부터 비교하였더니 *Pseudomonas aeruginosa*와 99%의 상동성을 나타내었으며, *Pseudomonas aeruginosa* TPH1으로 명명하였다.

3.2. 분리균주의 성장특성

TPH1의 최적 성장 온도를 조사하기 위해 배양온도를

10°C, 20°C, 30°C로 실험을 수행한 결과 Fig. 3에서 알 수 있듯이 20°C에서 성장이 가장 좋은 균임을 알 수 있었다. pH에 대한 영향을 보고자 실험을 수행한 결과(Fig. 4) pH 7.0에서 최적 성장을 나타냈다. 이는 산성이나 알칼리성에서 보다는 중성에서 균의 성장이 활발함을 알 수 있었다. 따라서 순수분리된 *Pseudomonas aeruginosa* TPH1은 배양온도 20°C, 초기 pH 7.0에서 최적의 성장을 보였다.

균주의 탄소원으로 이용되었던 경우 농도의 영향을 알아보하고자 1%, 2%, 3%, 4%(v/v)으로 농도를 달리하여 20°C, 150 rpm에서 분리 균주의 성장특성을 확인하였다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 *Pseudomonas aeruginosa*

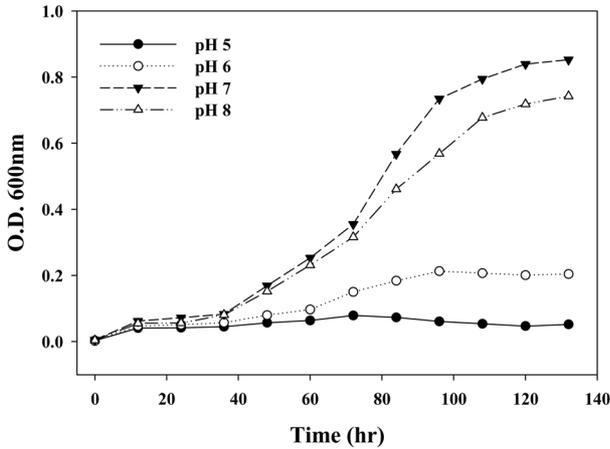


Fig. 4. The effect of pH on cell growth of TPH1 in MSM liquid medium.

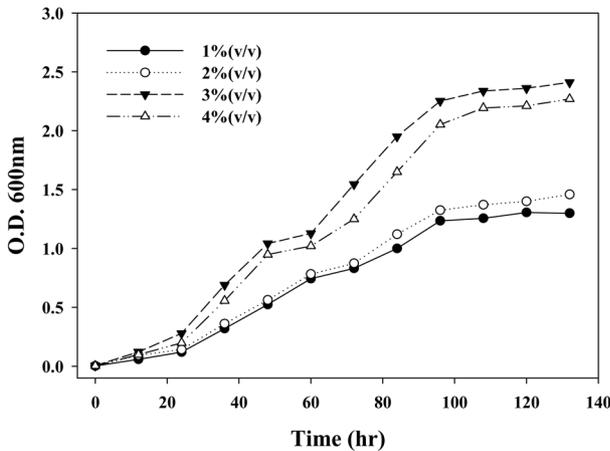


Fig. 5. The growth of isolated strain TPH1. Diesel as a carbon source was added to MSM-medium at 20°C, pH 7.0, 150 rpm.

TPH1은 1%(10,000 ppm) 이상의 농도에서 성장이 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다. 그 중 3%(30,000 ppm)에서 성장이 가장 좋았고, 4%(40,000 ppm)에서는 성장이 둔화됨을 알 수 있었다.

3.3. 균주에 의한 경유 분해

3.3.1. 액상배지에서의 경유분해능

순수 분리된 *Pseudomonas aeruginosa* TPH1에 의한 액상에서의 경유 분해율을 파악하기 위해 GC분석을 통하여 제거율을 확인하였다. 24시간 간격으로 배양액을 회수하여 추출한 sample을 분석한 결과 Fig. 6에서와 같이 배양 72시간에 균을 넣지 않은 대조군 실험에서 25%가 손실되었으나, TPH1을 접종한 시료의 경우 경유의 농도가 63% 제거되는 높은 분해율을 보였다.

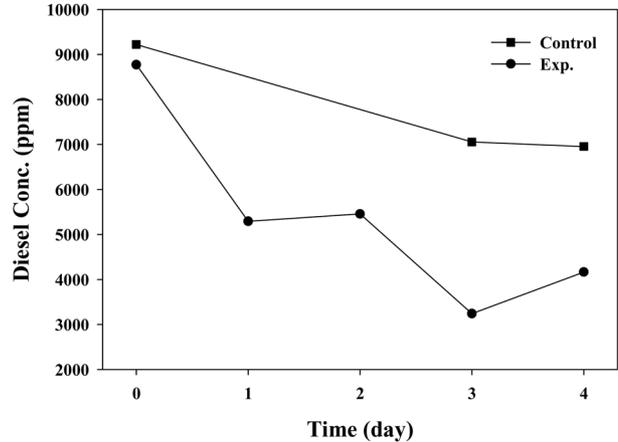


Fig. 6. The biodegradation of 1.0% treated diesel oil by *Pseudomonas aeruginosa* TPH1.

3.3.2. 토양에서 분리균주의 경유 분해

Fig. 7은 *Pseudomonas aeruginosa* TPH1에 의한 토양에서의 경유 분해율을 나타내는 것으로, 각각의 토양 대조군에서 경유 0%~20%가 손실 되었으나, 균주를 주입한 실험군에서 흑음지토양 51%, 광주토양 36%, 아연오염토양 38%, 비소오염토양 52%의 경유 제거 효과를 보였다.

일반적으로 토양에서 유기탄소함량이 증가할수록 유기물질이 토양에 강하게 흡착되어 이동이 지연된다(이윤국 외, 2007). 흑음지토양에서 경유의 흡착량이 광주토양보다 높고 광주토양보다 미생물에 의한 분해가 서서히 일어난 이유도 흑음지토양이 광주토양보다 유기물 함량이 높기 때문인 것으로, 20일 동안 분해가 일어나지 않은 부분은 강한 흡착으로 인해 생물 이용성에 제한이 있는 것으로 사료된다.

Pseudomonas aeruginosa TPH1은 아연오염토양과 비소오염토양에서도 경유 분해 효과를 보여주었다. 아연과 비소로 오염된 토양임에도 불구하고 다른 오염되지 않은 토양에서와 비슷한 경유 분해 효과를 나타냈다. 이는 아연과 비소가 경유의 생물학적 분해에 특별한 저해인자로 작용하지 않은 것으로 판단된다.

미생물 세포는 유기탄소 이외의 구성물질로 다른 원소들을 포함하고 있으므로 미생물 대사작용시에는 탄소 이외에 다른 영양염류들을 필요로 한다. 유기독성물질에는 질소와 인이 미생물 세포가 필요로 하는 만큼 충분히 있지 않으므로 보통 암모늄이온과 인산염을 필요로 하는 경우가 많다(Guo et al., 2005). 4가지 토양에서의 경유 농도 변화를 살펴보면, 8일 이후로 경유 농도가 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 TPH1이 탄소원으로 경유를

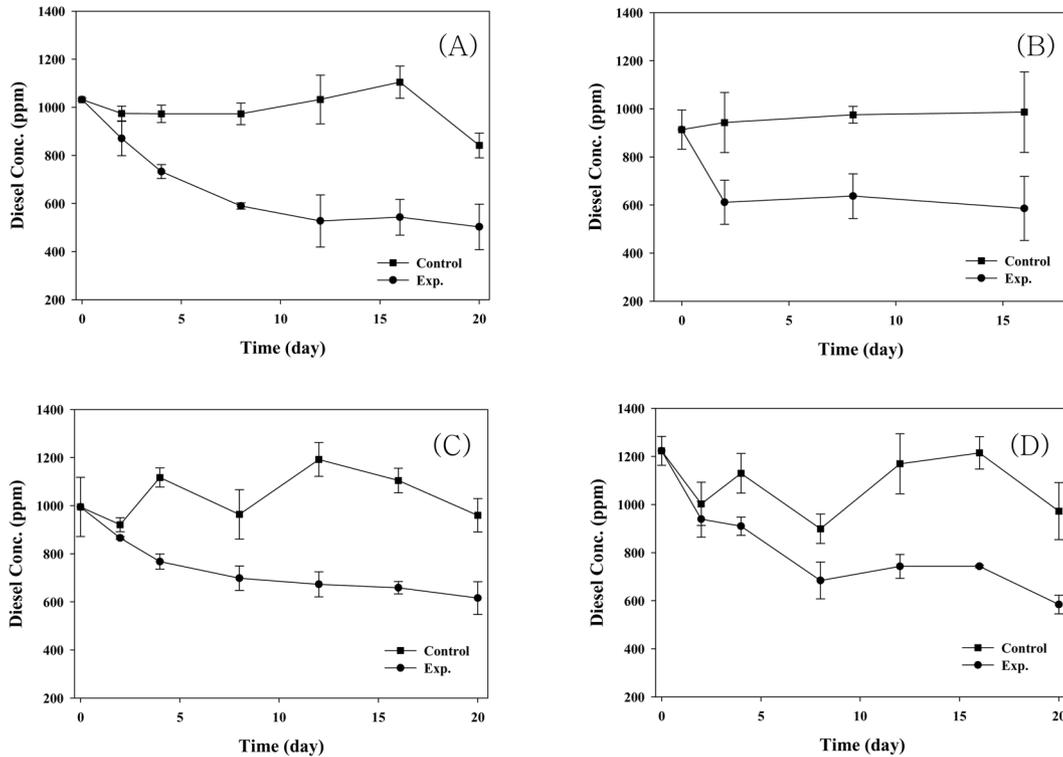


Fig. 7. The diesel concentration in four different soils; (A) Heuкеumji, (B) Gwangju, (C) Zn contaminated soil, (D) As contaminated soil. Error bar is the standard deviation of triplicate measurements.

이용하지만 대사작용을 지속할 수 있는 다른 영양염류의 공급이 없기 때문에 나타나는 현상이라고 보여진다. 이미 많은 연구 등을 통해 미생물을 이용하여 유류오염 토양을 복원하는데 있어 영양염류 질소원이 유류의 분해에 영향을 미치는 제한 인자로 알려져 있다(박천보 외, 2001).

이와 같이 유기물 함량이 높은 토양의 오염물질 흡착을 저해하기 위해 계면활성제를 이용하거나 균주의 대사작용을 지속시킬 수 있는 영양염류의 공급과 같은 관계 요소를 최적화 한다면 TPH1의 높은 경유 분해 효율을 보일 것으로 사료된다. 또한, 중금속이 분리균주의 생물학적 분해에 영향을 미치지 않으므로 분리균주를 경유와 중금속이 복합적으로 오염된 토양 처리에 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4. 아연 또는 비소와 경유로 오염된 토양의 복합처리 시스템

각 처리 단계별로 경유와 중금속의 농도를 알고자 각기 다른 컬럼을 이용해 순차적으로 처리 공정을 수행하여 Fig. 8, Fig. 9와 같은 결과를 볼 수 있었다. 컬럼 A는 처리하지 않는 토양, 컬럼 B는 스팀을 이용한 증기추출 처리 공정을 거친 토양, 컬럼 C는 스팀을 이용한 증기추출

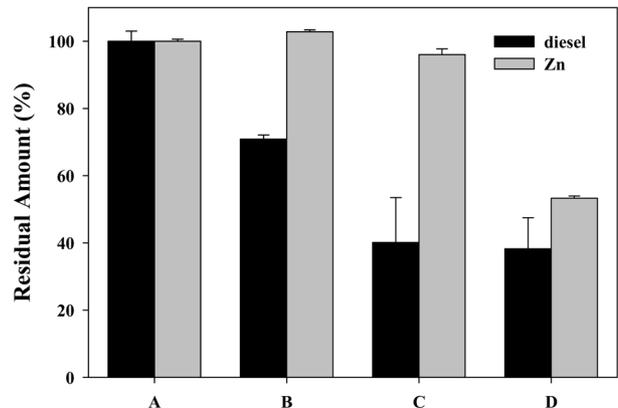


Fig. 8. The residual amount (%) of diesel and Zn after each treatment on soil ; A) Control, B) (Steam + vacuum), C) (Steam + vacuum) + TPH1, D) (Steam + Vacuum) + TPH1 + Acid washing. Error bar is the standard deviation of triplicate measurements.

출과 미생물에 의한 처리 공정을 거친 토양, 컬럼 D는 스팀을 이용한 증기추출과 미생물에 의한 처리를 거쳐 산 세척 공정을 거친 토양을 나타내고 있다.

경유는 스팀을 이용한 증기추출 과정을 거쳤을 때 29%~44%가 제거 되었다. 이는 휘발성 및 준휘발성 유기화합물이 스팀과 증기추출에 의해 배출된 것으로 판단된다.

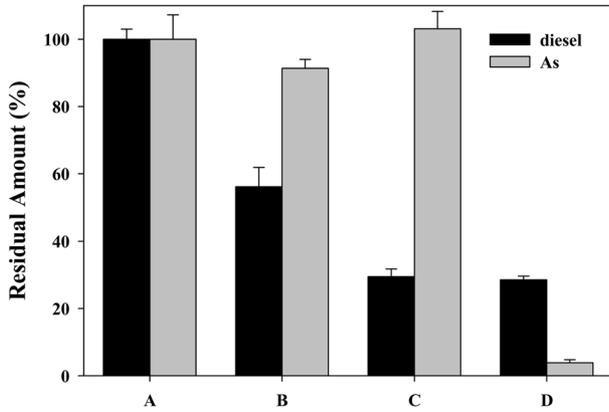


Fig. 9. The residual amount(%) of diesel and As after each treatment on soil; A) Control, B) (Steam + vacuum), C) (Steam + vacuum) + TPH1, D) (Steam + Vacuum) + TPH1 + Acid washing. Error bar is the standard deviation of triplicate measurements.

TPH1을 주입한 후 농도는 60%~71%까지 제거되었다. 산세척은 경유의 농도 변화에 영향을 거의 주지 않는 것으로 나타났다. 토양 세척은 오염물질의 물리화학적 특성 중 세척 효율의 영향인자로 수용성과 휘발성을 들 수 있다(Guo et al., 2005). 경유는 기술린에 비해 휘발성이 낮고 비중 및 점도가 큰 물질이기 때문에 토양 내에서의 이동성이 작은 편이며, 물에 대한 용해도가 낮다(안민정 외, 2003). 따라서 이미 스팀을 이용한 증기추출 과정에서 휘발할 수 있는 부분이 제거되었고, 물에 대한 용해도가 낮기 때문에 산세척에서는 경유 제거 효과가 없는 것으로 판단된다.

아연과 비소는 스팀을 이용한 증기추출과 미생물의 주입과정을 거치는 동안 제거 효과가 거의 없으나, 산세척 시 아연 47%, 비소 96%의 높은 제거 효율을 보였다. 중금속은 유기오염물질과 달리 대체로 비휘발성이며, 용해 또는 생물학적 분해가 어려운 특성을 지니고 있다. 산세척법은 이처럼 생물학적 분해가 어려운 중금속을 빠른 시간 안에 처리할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구 결과에서 중금속의 추가적인 제거가 필요할 경우 마지막 단계인 산세척을 필요에 따라 반복적으로 수행하면 될 것으로 사료된다. 또한 사용하는 세척제의 종류에 따라 광범위한 유기 및 무기오염물질을 제거할 수 있고, 선별과정을 통하여 효과적으로 오염토양의 부피를 감소시킬 수 있기 때문에 타 공정과 복합적으로 사용할 경우 그 활용도가 더 높아질 수 있다(환경부, 2007).

중금속과 경유가 동시에 오염된 토양을 스팀증기추출과 생물학적 분해로 경유를 제거한 다음 산세척을 이용하여 중금속을 제거하는 복합적인 방법을 이용할 경우 경유와

중금속 제거에 모두 효과적이며, 현장 적용 가능성이 높을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서 유류오염토양으로부터 경유 분해 균주를 분리하였으며, 분리된 균은 *Pseudomonas aeruginosa*로 동정되었고, TPH1이라 명명하였다. 균주의 최적 성장조건은 회분식 배양에서 20°C, pH 7.0로 나타났다. 액체배지에서의 *Pseudomonas aeruginosa* TPH1의 경유 분해 실험 결과 경유의 63%가 제거되는 높은 분해율을 보였으며, 중금속(Zn, As)오염토양과 오염되지 않는 토양에서 36%~52%의 비슷한 경유 분해율을 보여주었으며, 이는 분리균주가 경유를 생물학적으로 분해할 때 아연과 비소가 특별한 저해인자로 작용하지 않는 것으로 판단된다. 중금속과 경유가 복합적으로 오염된 토양 처리를 위한 복합 처리 공정을 개발하였으며, 복합 처리 시스템은 스팀 증기추출 후 분리균주의 생물학적 처리과정을 거친 다음 경유 60%~71%가 제거되었고, 순차적인 산세척 후 아연 47%, 비소 96%가 제거되는 효과를 보였다. 중금속과 유류가 복합적으로 오염된 토양의 정화방법에 있어 스팀증기추출과 분리균주의 생물학적 분해를 통해 경유를 제거하고, 순차적으로 산세척을 이용한다면 경유와 중금속의 효율적인 처리 방법이 될 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 환경부와 한국환경산업기술원의 토양지하수 오염방지기술개발사업(GAIA Project) 및 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

경남일보, 2008, 창원 중동지구 토양 오염 심각, <http://www.idomin.com/news/articleView.html?idxno=260271>.

구자공, 김경숙, 동종인, 박용하, 배우근, 양지원, 염익태, 윤석표, 이재영, 이주삼, 장윤영, 정재훈, 최상일, 황경엽, 황종식, 2007, 토양환경공학, 향문사, 서울, p. 211-222.

김해영, 2008, 증기추출 장치 및 미생물 분해를 포함하는 복합 공정에 의한 토양 정화, 전남대학교 석사학위논문.

박천보, 허병기, 윤현식, 2001, 유류 오염지역으로부터 분리된 균주를 이용한 디젤유의 분해, 한국생물공학회지, 16(6), 632-637.

부산일보, 2009, 일광 폐광산공단지오염심각, <http://news20.busan.com/news/newsController.jsp?subSectionId=1010010000&>

newsId=20091218000139.

서상기, 이상화, 손정호, 장윤영, 2008, 폐광산 주변 오염토양 정화를 위한 실규모 토양세척공정 적용, 한국지하수토양환경학회지, **13**(2), 70-75.

시대일보, 2008, 하남시 미군공여지 환경오염 실태조사결과, http://www.sidaeilbo.co.kr/news/NewsContent.php?news_id=%BB%E7%C8%B8&seq=18988&sc=&keyword=

안민정, 한윤전, 임현섭, 최기현, 권오범, 최영출, 정병철, 2003, 디젤유 분해균주의 특성 및 토양배양, 한국미생물공학회, **39**(2), 108-113.

우영식, 2008, 반환 미군기지 12곳 환경오염 실태공개 마무리, 연합뉴스, 2008.01.29.

이윤국, 김혜영, 김만, 박정훈, 2007, 토양에 따른 나프탈렌의 흡·탈착 특성, 한국폐기물학회지, **24**(3), 251-259.

이종열, 2007, 유·무기산 혼합 용출체의 재순환 시스템을 적용한 중금속오염 토양 처리공법 개발, 환경부보고서.

이주리, 문덕현, 김혜영, 최경균, 박정훈, 2008, 옥살산과 무기산을 이용한 오염토양(Cd, Pb)의 중금속 제거, 대한환경공학회 추계학술연구발표회집, p. 162.

조도순, 김준호, 1995, 수중 초본식물의 중금속 내성에 대한 연구, 한국생태학회지, **18**(1), 147-156.

조선일보, 2009, 용산 국제업무지구부지 중금속 기름오염도 심각, http://news.chosun.com/site/data/html_dir/2009/11/12/2009111200177.html

한경욱, 2005, 유해중금속으로 오염된 달천광산 주변 토양에 대한 토양세척 적용, 경성대학교 석사학위논문.

환경부, 2007, 오염토양 정화방법 가이드라인, p. 159.

Cole, G.M., 1994, Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites, CRC Press. Inc., Boca Raton, Florida. p. 37-74.

Gerhardi, P., Murray, R.G.E., Wood, W.A., and Krieg, N.R., 1994, Methods for General and Molecular Bacteriology American Society for Microbiology, Washington, D.C.

Guo, C.L., Zhou, H.W., Wong, Y.S., and Tam, N.F.Y., 2005, Isolation of PAH-degrading bacteria from mangrove sediments and their biodegradation potential, Marine Pollution Bulletin.

Macky, D., Shiu, W.Y., Chau, A., Southwood, J., and Johnson, C.I., 1985, Environmental Fate of Diesel Fuel Spills on Land, Report for Association of American Railroads, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto.

Moriarty, F., 1988, Exotoxicology: the study of pollutants in ecosystem, 2nd ed., Academic Press, London.

U.S. EPA, 1997, Analysis of Selected Enhancement for Soil Vapor Extraction, EPA-542-R-97.

Yarlagadda, P.S., Mastumoto, M.R., Vanbenschoten, J.E., and Kathuria, A., 1995, Characteristics of Heavy Metals in Contaminated Soils, *Journal of Environmental Engineering*, **121**(4), 276-286.