

유류오염토양 정화를 위한 phytoremediation 이용에 관한 연구

심지현, 이준규, 장윤영, 심상규, 황경엽

한국과학기술연구원

요 약 문

현재 세계적인 토양환경복원의 추세는 단기간의 높은 처리효율을 기대하는 장치위주의 복원기술적용에서 좀 더 처리시간은 걸리나 저비용의 효율적인 처리기술선택으로 옮겨가고 있다. 이는 지금까지 무리한 투자에서 발생한 부작용을 최소화하기 위해서 취해지고 있는 변화로 식물을 이용한 환경복원기술(phytoremediation)은 이러한 변화에 가장 잘 부응하는 발전 가능성이 매우 높은 미래 복원기술 가운데 하나이다. 이에 본 연구에서는 phytoremediation을 이용하여 디젤로 오염된 토양을 복원하고자 하였다. 먼저 대상오염물에 대한 정화능을 나타내는 식물을 선별하기 위해 알팔파, 옥수수, 피, 물피의 오염농도별 생장률을 살핀 결과 알팔파가 오염농도에 따른 성장저해를 가장 덜 받는 것으로 나타났다. 이에 알팔파의 발아 test를 거친 후 실제상황을 모사하기 위한 column test를 실시하여 디젤의 제거효율을 살펴보았다. 1)외부로부터 pipe line을 따라 공기를 주입하여 산소를 보충한 처리구와 2)알팔파를 심은 처리구, 3)알팔파와 공기를 넣어준 처리구를 설계하여 디젤의 제거과정을 알아본 결과 제거효과가 가장 높은 처리구는 공기와 알팔파를 함께 넣어준 처리구였다. 이를 통해 유류로 오염된 토양에서 산소가 미생물활동에 커다란 제한요인이라는 것과 phytoremediation 공정에 공기주입구를 장착함으로써 식물만으로 처리할 때 대두되는 시간적 제약의 문제를 다소 경감시킬 수 있음이 밝혀져 앞으로 이의 활용가능성이 주목된다.

주제어 ; phytoremediation, 알팔파, column test

I. 서론

각종 산업원료로 가장 많이 쓰이는 석유탄화수소는 그 사용량의 급증과 더불어 여러 다른 매질을 통해 상당량이 자연환경에 노출되어 큰 피해를 낳고 있다. 유류오염원이 토양에 유입되면 휘발성·수용성이 낮아 높은 농도로 토양에 잔류하게 되며 많은 양이 지하로 침투하여 지하수 오염의 원인이 되기도 한다. 이들 유류오염물을 제거하는데 있어 기존의 장치위주의 물리·화학·생물학적 처리방법은 개선효과에 비해 과도한 비용출원이 불가피하다. 따라서 비록 장기적이지만 경제적이고 처리과정에서 생기는 부가적 오염원의 발생 및 확산을

방지하는 환경친화적인 복원기술개발이 시급한 실정이다.

식물을 이용한 환경복원기술(phytoremediation)은 환경친화적 신기술로서 아직 성장단계에 있지만 무한한 잠재성으로 인해 환경복원기술이 앞서 있는 국가에서 산·학·연 협동으로 실험실과 현장에서 동시에 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이 기술은 토양, 수질, 대기 모든 분야에서의 적용이 가능하고 엄청난 처리비용과 처리과정이 복잡한 오염토양 정화를 위한 미래 환경복원 기술로 주목받고 있으며 특히 최근에 유해성 유기화합물의 제거에 대한 식물의 효과가 알려지면서 연구에 활기를 띠고 있다.

본 연구에서는 식물을 이용한 환경복원기술(phytoremediation)로 디젤로 오염된 토양을 복원하고자 하였다. 먼저 대상오염물에 대한 정화능을 나타내는 식물을 선별하고 핵심기술을 현장에 적용할 수 있게 온실을 설치하여 공정개발위주의 연구를 수행하였다. 선정된 식물의 정화능 연구를 위한 column test를 시행하여 오염제거 과정을 모니터링하고 식물의 성장환경을 최적화하기 위한 조건을 알아보았다.

II. 재료 및 방법

먼저 심근성 식물로 환경에 적응력이 강하고 성장속도가 빠르다고 판단되는 4종류의 수종, 알팔파, 옥수수, 물피, 피를 선정하여 10주간 디젤오염농도에 따른 성장을 비교하였다. 디젤오염농도 0, 500, 1000, 2000, 3000 ppm인 토양을 윗면 직경 19cm, 밑면직경 12cm, 높이 24cm의 플라스틱 화분에 담고 각각 4개의 종자를 뿌려 발아 7일부터 1주일마다 지상부의 길이를 측정하였다. 디젤오염농도에 따른 발아율을 알아보기 위해 디젤오염농도 0, 5000, 10000, 20000, 30000 ppm의 토양을 윗면 직경 21cm, 밑면직경 18.5cm, 높이 8.5cm의 플라스틱 용기에 담고 알팔파 50개, 옥수수 15개, 물피 30개, 피 50개의 종자를 심은 후 7일 후의 발아율을 측정하였다.

알팔파 및 제한 환경요인 조절을 통한 오염토양 복원을 위한 column test는 다음과 같은 방법으로 실시하였다. 실험용기는 PVC로 제작하여 외경 26.5cm, 내경 24cm의 pipe를 1m 길이로 절단하여 상부에서 25cm 간격으로 세 층의 깊이에서 각각 원주를 따라 수평하게 지름 2 cm의 구멍을 12개씩 내었다. 공기를 주입하기 위하여 외경 22mm, 내경 16mm의 PVC pipe를 1m씩 절단하여 상부에서 38cm 깊이에서 4cm 간격으로 원주를 따라 수평하게 지름 3.2mm의 구멍을 4개씩 내었다. 이 용기에 KIST내의 야산에서 채취한 토양을 디젤 1000ppm농도로 오염시킨 후, 물리적 및 화학적 특성을 분석한 후, 석회를 부식도와 섞어 산도를 교정하였다. 석회 및 영양분 처리일로부터 4일 후에 식물을 파종하였다. 한달 간격으로 깊이별 토양시료를 채취하여 GC로 TPH(Total petroleum hydrocarbon)를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

표 1은 오염농도에 따른 시간별(Δt) 각 식물의 성장길이(ΔL), 즉 성장률($\Delta L/\Delta t$)을 비교한 결과로서 디젤 농도가 500ppm이하인 경우 성장에 별다른 영향을 받지 않았으나 전체적으로 오염농도가 높을수록 생장이 지연되는 경향을 보였다. 각 식물의 최고농도치에서의 성장률을 보면 물피, 옥수수의 경우는 각각의 대조구에 비해 성장률이 15%, 30%, 32%의 감

소를 보인 반면 알팔파의 경우 9%의 감소를 보여 알팔파가 오염농도에 따른 성장저해를 가장 덜 받는 것으로 나타났다. 오히려 알팔파의 경우 디젤농도 500, 1000ppm일 때 대조구에 비해 성장률이 높게 나타났다. 참고로 오염농도에 따른 알팔파의 발아율 측정결과는 표 2에 나타내었다.

표 1. 피, 물피, 옥수수, 알팔파의 오염농도(ppm)별 시간에 따른 길이성장($\Delta L/\Delta t$)

농도(ppm)	$\Delta L/\Delta t$			
	피	물피	옥수수	알팔파
0	5.17	7.34	7.92	1.58
500	5.04	7.34	7.94	2.28
1000	4.15	5.81	6.69	1.98
2000	4.13	6.74	6.79	1.28
3000	4.38	5.13	5.4	1.42

표 2. 오염농도에 따른 알팔파의 발아율(%)

디젤농도 (ppm)	발아율
0	72
5000	82
10000	60
20000	6
30000	2

그림 1-4는 column test를 나타낸 결과이다. 43일, 65일에 상층에 비해 중·하층에서 디젤의 농도가 높게 나온 것은 일정한 시간 간격마다 식수할 때 물분자가 토양 내로 침투하여 오염물질을 수직적으로 이동시켰기 때문이다. 그림 2는 공기를 주입하였을 경우 TPH 농도의 변화를 나타낸 것으로 43일 이후에 공기가 주입되는 중·하층 부위 (표층으로부터 깊이 50cm, 75cm) 제거효율이 대조구에 비해 높게 나타났다.

유류로 오염된 토양에서는 산소가 제한요인으로 강하게 작용하기 때문에 공기의 주입을 통한 산소의 보충은 호기성 조건에서 높은 활성을 보이고 TPH의 생분해활동을 전담하는 facultative heterotrophs의 활동을 촉진시켜 오염물의 분해가 보다 활발히 일어나는 것으로 보인다.

알팔파 처리구에서는 65일 이후 대조구와 공기를 주입한 처리구에 비해 상층부위에서 TPH의 분해가 활발한 것으로 나타났다(그림 3). 65일 이후에 효과가 나타난 것은 알팔파의 성장과 뿌리의 성장속도와 관련이 있는 것으로서 상·중층에서 뿌리의 성장과 활동이 활발한 시기가 65일 이후에 관찰되기 때문이다. 근권이 형성되면 뿌리분비물이나 뿌리조직의 부패과정 중에 탄소원을 분비하는데 이 에너지원과 뿌리계로부터 방출되는 산소가 오염물질을 분해하는 미생물들의 활성속도를 높이게 된다.

공기와 알팔파를 넣어준 처리구에서 오염물질의 제거효율이 상층에서 하층까지 가장 높았

다(그림 4). 특히 94일 이후 상·중·하층 부위에서 각각 0, 17.25, 5.98ppm의 농도만이 검출되어 대부분의 TPH가 분해된 것으로 나타나 그 처리속도가 가장 빠름을 알 수 있다. 이는 상·중층 부위에 형성된 알팔파의 근권의 영향과 이에 따른 미생물의 활동, 중·하층에 연속적으로 유입된 공기가 미생물 성장의 제한요인을 보상하여 나타난 결과라 할 수 있어 이의 활용가능성이 높음을 알 수 있다.

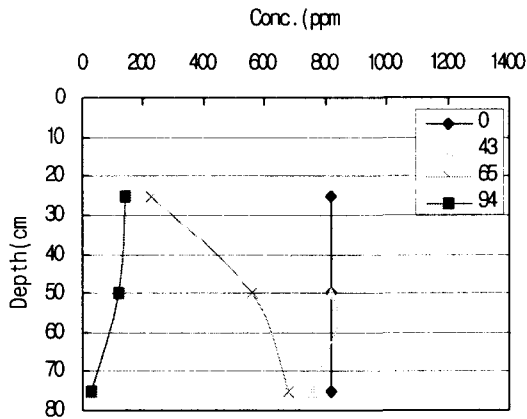


그림 1. 대조구(디젤 1000ppm으로 오염된 토양)에서의 깊이별 농도변화

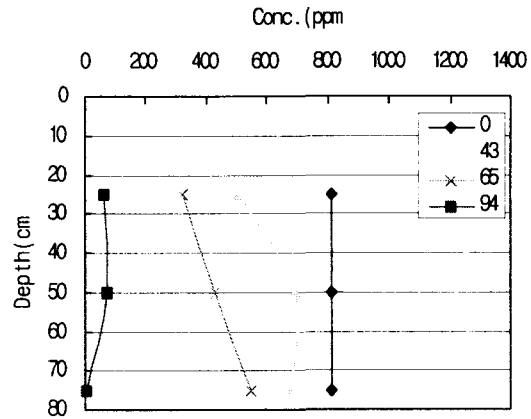


그림 2. 공기를 주입한 Column에서의 깊이별 농도변화

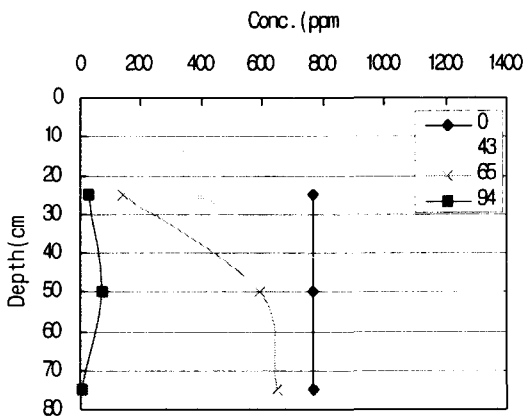


그림 3. 알팔파를 심은 Column에서의 깊이별 농도변화

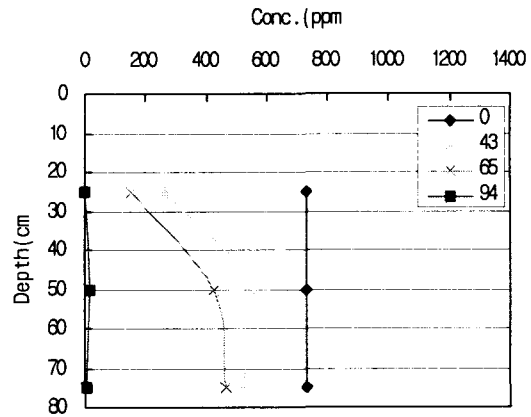


그림 4. 공기주입 및 알팔파 Column에서의 깊이별 농도변화

IV. 결론

본 연구에서는 식물을 이용한 환경복원기술(phytoremediation)로 디젤로 오염된 토양을 복원하고자 하였다. 실제상황을 모사하기 위한 column test를 실시하였다. 세가지의 처리구, 즉 1)공기주입 처리구, 2)알팔파를 심은 처리구, 3)공기 주입과 알팔파를 함께 고려한 처리구로 설계하여 디젤의 제거효율을 살펴본 결과 제거효과가 가장 높은 처리구는 공기와 알팔

파를 함께 넣어준 처리구였다. 이를 통해 유류로 오염된 토양에서 산소가 미생물활동에 커다란 제한요인이라는 것과 공기주입구를 첨가하여 장착함으로써 식물만으로 처리할 때 대두되는 시간적 제약의 문제를 다소 경감시킬 수 있음이 밝혀져 앞으로 이의 활용가능성이 주목된다. 앞으로 phytoremediation 기술을 현장에 적용시키기 위한 선정된 공정인자를 바탕으로 최적화 연구 및 공정설계·개선에 관한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- Brar G.S. 1997. Challenges of phytoremediation applications in the field and success strategies. In *Phytoremediation* 127-168. IBC library series, Southborough Ma.
- Cunningham, S.D., Anderson, T.A., Schwab, A.P., Hsu, F.C. 1996. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Advances in Agronomy*. 56:55-114.
- Ecological Engineering Homepage <http://www.Ecological Engineering.com>
- Ferro, A.M. et al.(1996) Uptake and Biodegradation of Volatile Petroleum Hydrocarbons in Planted Systems. *Phytoremediation*, IBC Conference, Alington, VA.
- Harvey Black, 1995, "Absorbing Possibilities: Phytoremediation", *Environmental Health Perspectives*, Vol(103), Num(12, Dec.)
- Jerald L. Schnoor, 1997, "Phytoremediation" Technology Evaluation Report(TE-98-01), October, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center pp. 1-37
- Raskin, I. (1996) Making Phytoremediation Work. Presented at Conference on Phytoremediation-Cost-Effective Clean-Up, International Business Communications, Arlington, Virginia, May 8-10, 1996