

## Alfalfa를 이용한 디젤오염토양의 phytoremediation

심지현·이준규·심상규·황경엽·장윤영\*

한국과학기술연구원 환경복원연구센터, \*광운대학교 환경공학과

### **Phytoremediation of diesel-contaminated soils using alfalfa**

**Jee-Hyun Shim, Jun-Kyu Lee, Sang-Gyu Shim, Kyoung-Yub Hwang,  
Yoon-Young Chang\***

*Korea Institute of Science and Technology, Environment Research Center, Kwangwoon University,*

*\*Department of Environmental Engineering*

## ABSTRACT

In the past several years phytoremediation, defined as the use of plants for removing contaminants from media such as soils or water, has attracted a great deal of interest as a potentially useful remediation technology. We attempted to assess the effectiveness of phytoremediation of diesel-contaminated soils in a green house. Screening test for selecting an appropriate plant was performed by observing the harmful effects of diesel dosage on the growth of 4 plants. Alfalfa was selected as a potentially useful plant among corn and barnyard grasses due to its high tolerance to the toxicity of diesel in growth. Bioremediation of the artificial diesel-contaminated soil packed in the PVC columns(0.3m in diameter × 1m in length) with air supplied, alfalfa planted, and alfalfa and air supplied was investigated for 100 days. The results of the column test showed plant effects on enhancing the biodegradation of diesel in the contaminated soils compared to the control column which had no plant. Injecting air to the columns during phytoremediation also showed additional effects on the removal rate of diesel. Comparison

of microbial activity in each test column showed a beneficial effect of plants in the soil remediation processes. This results can be explained microbial activity in rhizosphere is a crucial factor for removing diesel.

**Key words** : phytoremediation, alfalfa, column test, contaminated soils, rhizosphere,

## 요 약 문

식물을 이용하여 토양이나 지하수 등의 매질로부터 오염물을 제거하는 기술인 phytoremediation은 지난 몇 년간 활용잠재성이 높은 환경복원기술로 많은 관심을 받아왔다. 본 연구에서는 현장조건을 모사한 그린하우스에서 이러한 phytoremediation에 의한 디젤로 오염된 토양의 정화효과를 조사하였다. 처리실험에 적합한 식물을 선정하기 위하여 인위적으로 디젤로 오염시킨 토양에서 증가에 따른 대상식물인 알팔파, 옥수수, 피, 물피의 생장을 저하정도를 관측하여 내성이 강한 알팔파를 정화식물로 이용하였다. 디젤오염토양의 처리실험은 공기주입, 알팔파 파종, 공기주입과 알팔파 파종이 함께 적용된, PVC 파이프형태의 처리구에서 오염토양의 정화정도를 약 100일간 관측하였다. 칼럼 실험결과, 오염물의 제거속도에 기여하는 식물의 긍정적 효과가 관측되었으며 또한 지속적으로 토양내로 공기를 공급하여줌으로써 phytoremediation의 처리효율을 더욱 향상시킬 수가 있었다. 실험종료 후 각각의 처리구에서 토양 깊이별 미생물의 활성을 간접적으로 측정된 결과, 이러한 식물의 정화효과는 근권에 있는 토양미생물에게 유용한 뿌리 분비물을 지속적으로 제공함으로써 미생물의 활발한 번식 및 분해활동을 유지시켜 오염물의 분해를 더욱 촉진시키는 것으로 보인다.

**주제어** : phytoremediation, 알팔파, 칼럼 test, 오염토양, 근권

## 1. 서 론

식물을 이용하여 오염된 토양이나 지하수를 정화하는 phytoremediation기술은 특히, 오염정도가 심하지 않은 대규모 오염부지나 지하수의 정화에 효과적인 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 이 기술은 현장 적용시 토양의 유실량이 적고 인근주민의 수용도가 높으며 그 효과가 장기적인 지속성을 유지할 수 있어 적용범위가 빠르게 확대되고 있다.

토양복원기술이 앞서 있는 선진국에서는 90년대 부터 정화효과가 있는 식물선정과 적합한 대상 오염물질에 대한 연구가 특히 유기계 유해화합물 처

리에 적용하기 위하여 본격적으로 진행되어 왔으며, 현재는 이 분야의 전문기술을 보유하고 있는 기업들에 의해 현장적용의 상용화 단계까지 이른 상태이다. 국내에도 이러한 phytoremediation기술의 발전가능성은 크며 점차 많은 관심과 연구가 이루어지고 있다.

문헌에 나타난 phytoremediation 기술에 의해 효과적으로 처리될 수 있는 오염물들을 보면 Aromatic hydrocarbons, Halogenated aromatic hydrocarbons, Nitroaromatic hydrocarbons, Organophosphorus compounds, Phenoxy acids, Heavy metals,

Radioactive substances, Ureas, Ester 등으로 적용 대상의 범위가 넓음을 알수 있으며<sup>2-5)</sup> 정화식물로는 포플러, 사시나무, 버드나무 등과 같은 목본류와 콩과, 벼과, 십자화과, 대극과 등과 같은 초본류 등이 오염토양정화에 탁월한 효과가 있는 식물로 보고되고 있다<sup>6-8)</sup>.

오염된 토양에서 식물에 의한 유기오염물의 제거촉진효과는 토양내 뿌리활동으로 오염물질을 분해하는데 중요한 역할을 담당하는 토양미생물의 분해활동을 높여주는 것과 뿌리에서 분비되는 분해효소에 의해 직접적으로 오염물의 독성을 저감시키는 효과 등이 알려져 있다. 뿌리활동에 의한 미생물의 활성은 다음 몇 가지 사실로 설명된다. 1) 뿌리는 전체 광합성 산물에 10~20%에 해당되는 양의 아미노산, 지방족, 아미이드, 당류와 같은 용해성 확산물질과 점액질을 분비하여 미생물 성장에 필요한 탄소원과 에너지를 공급하고, 2) 광합성 과정 중 생성된 산소가 뿌리를 통해 방출되어 근권에 호기조건을 형성하며 이 때 많은 양의 산소가 토양미생물에게 전달됨으로써 이들의 분해 활동을 증진시키며, 3) 근권은 미생물에게 좋은 서식처를 제공함으로써 상당한 수의 미생물 군집이 형성되는데 박테리아의 경우 그 점유율은 뿌리 표면적의 4~10%에 해당하는 것으로 알려져 있다<sup>9)</sup>.

본 연구에서는 식물을 이용하여 경유(디젤)로 오염된 토양의 정화효과를 알아보기 위하여 먼저 몇 가지 식물에 대해 대상오염물에 대한 내성시험을 통해 적합한 정화식물 선별연구를 수행하였으며, 현장조건을 모사한 온실에 설치한 칼럼형태의 장치에 디젤로 오염된 토양을 채우고 선정된 식물을 적용하여 오염물의 농도변화를 장기적으로 관측함으로써 유류오염토양복원을 위한 식물정화기술의 적용가능성을 추정하였다. 그 외에 공기주입에 따른 비교실험을 통하여 현장위주의 공정개발에 연구중점을 두었으며 정화과정 중 오염원의 변화양상을 분석하여 운전의 최적화를 위한 기본 설계지식을

얻고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 적합 식물선정 실험

phytoremediation적용에 있어 식물의 선별은 매우 중요하다. 대상식물이 가져야 할 조건은 강한 자생력과 넓고 깊은 뿌리분포, 그리고 성장속도가 빠르며 오염원에 대한 강한 내성을 가지고 있는 것이 바람직하다. 이에 본 연구에서는 선별기준에 부합된다고 판단되는 4종류의 수종, 즉 자주개자리, 옥수수, 돌피, 물피를 선정하여(Table 1) 오염물질(디젤)농도에 따른 시간별 성장 test와 발아 test를 거쳐 오염물에 대한 내성이 강하고 적응력이 강한 식물을 최종 선별하였다.

Table 1. List of plants applying for phytoremediation test.

| plant                    | scientific name                        |
|--------------------------|--|
| alfalfa                  | Medicago sativa                        |
| corn                     | Zea mays                               |
| barnyard grass(grass I)  | Echinochloa crus-galli var. praticola  |
| barnyard grass(grass II) | Echinochloa crus-galli var. crus-galli |

### 2.2 오염물질(디젤)농도에 따른 시간별 식물생장을 측정 및 발아

알팔파(*Medicago sativa*), 옥수수(*Zea mays*), 돌피(*Echinochloa crus-galli* var. *praticola*), 물피(*Echinochloa crus-galli* var. *crus-galli*)를 디젤로 오염된 토양에 적용하여 10주간 디젤오염농도에 따른 생장율을 비교 측정하였다. 2mm이하의 토양을 선별하여 인위적으로 디젤을 오염시켜 각각 오염농도가 0, 500, 1000,

2000, 3000 ppm인 시료토양을 준비한 후 석회( $\text{CaCO}_3$ )를 첨가하여 산도를 교정하였다. 식물성장에 필요한 영양분을 공급하기 위해 옥수수, 돌피, 물피의 경우 요소  $22\text{g}/\text{m}^2$ , 용성인비  $75\text{g}/\text{m}^2$ , 염화加里  $25\text{g}/\text{m}^2$ 을 혼합하여 주었으며 자주개자리는 복합비료  $100\text{g}/\text{m}^2$ 과 붕사  $2\text{g}/\text{m}^2$ 을 입자상으로 상토에 균일하게 넣어주었다. 옥수수는 종자 30립을 뿌린 후 본엽 3개 출아시 2개체만 남도록 솎아주었으며 자주개자리, 돌피, 물피는 약  $500\text{mg}$ 의 종자를 흩뿌려주었다. 발아 7일부터 1주일마다 지상부의 길이를 측정하였다. 또한 디젤오염농도에 따른 발아율을 알아보기 위해 디젤농도 0, 5000, 10000, 20000, 30000 ppm으로 오염시킨 토양에 각각 약 50개의 종자를 심은 후 7일 후의 발아율을 측정하였다.

### 2.3 Green house 제작 및 column test

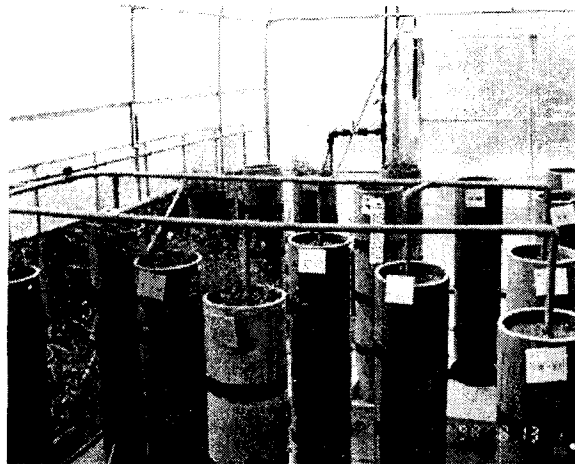
환기시설을 갖춘  $5\text{m} \times 6.5\text{m} \times 3.6\text{m}$  규모의 온실에서 자연광 조건을 유지하며 6월 중순부터 10월 초까지 실험실 규모의 처리성능 실험을 수행하였다. 선정식물(알팔파)적용여부와 제한 환경요인 조절을 통한 디젤오염토양의 정화효과를 알아보기 위해 컬럼시험을 다음과 같이 준비하였다(Pic. 1). 실험용기로 사용한 PVC pipe(외경 26.5cm, 내경 24cm, 길이 1m)에 각 25cm 간격의 높이로 원주를 따라 지름 2cm의 구멍을 12개씩 내어 sampling port로 이용하였다. 이와 같이 상·중·하층으로 깊이별 시료를 채취하여 분석함으로써 시간의 변화에 따른 깊이별 오염물질의 이동 및 제거과정의 관측이 용이하게 하였다.

이 용기에 야산에서 채취한 사질토양을 2mm체를 사용하여 체를 친 후 1000 ppm TPH농도가 되도록 디젤을 인공적으로 오염시켜 주었다. 이 때 석회를 부식토와 섞어 토양 pH를 5.0에서 7.0으로 교정하였다. 원활한 배수를 위하여 철망이 설치

된 하부에는 15cm 두께로 굵은 모래를 깔고 그 위에 인공오염토양을 채워주었다. 4일간의 안정기간을 거친 후 식물을 파종하였고 토양수분은 인공적으로 20~30%내외로 조절하였다.

### 2.4 처리구

자연적인 정화와 토양내 공기를 주입하여 in situ bioremediation의 효과를 촉진하는 경우에 비하여 phytoremediation의 처리향상효과를 알아보기 위하여 네가지 조건에 따라 처리구를 설정하였다. 즉 1) 순수 디젤오염토양만 주입하여 control로 설정한 경우 2) control에 알팔파를 식종한 경우 3) control에 공기주입구를 설치한 경우 4) control에 알팔파와 공기주입구를 설치한 경우 각각에 대해 오염물의 처리속도를 관측하였다. 여기서 공기주입구는 PVC pipe(외경 22 mm, 내경 16 mm, 길이 1 m)에 3.2 mm 구경의 공기구멍을 12개 내어 처리구용기 중심에 설치하여 토양내 균일한 호기적 조건을 형성하도록 하였고 공기의 주입은 콤프레서를 이용하여 4시간 간격으로 10분 동안 공급되도록 하였다.



**Pic. 1.** Experimental apparatus for a column test

실험은 약 100일간 진행되었으며 일정간격(약 20~40일)으로 각 처리구의 동일 깊이에서 3개의 sampling port를 통하여 시료를 채취, 토양 중 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)를 측정하여 그 결과치를 평균값으로 나타내었다. 토양 내 뿌리밀도는 실험 종료 후 토양칼럼을 일정한 길이로 절단하여 각 절단된 토양칼럼 내의 총 뿌리길이를 측정하여 각 깊이별 토양부피 당 뿌리의 길이 밀도를 계산하였다.

### 2.5 GC 분석

토양중 TPH분석은 미국 EPA Methods(8020)을 기준으로 하여 먼저 채취한 토양 5g에 15g의 무수황산나트륨을 첨가하여 수분을 제거한 후 추출용매 MtBE(tert-Butylmethylether) 10ml를 넣어 마개를 닫은 후 30분간 sonication 추출을 하였다. 추출상등액을 Membrane Filter로 여과하여 4℃에서 일정 보관 후 capillary column과 FID가 장착된 Gas Chromatography(HP5890)를 이용하여 TPH를 측정하였다.

### 2.6 토양미생물활성도 측정

토양미생물 활성에 미치는 식물뿌리의 효과를 알아보기 위하여, 실험종료 후 각각의 처리구에서 채취한 토양에서 미생물의 활성도를 일반적으로 Dehydrogenase Activity(DHA) 측정에 널리 사용되는 INT(iodonitrotetrazolium) assay방법을 이용하여 측정하였다<sup>10)</sup>.

각 토양 1 g에 0.25% INT용액(Sigma Chemical Co.) 1ml 씩을 주입하고 38℃에서 24시간 배양한 후 10 ml methanol을 첨가하여 vortex mixer로 1분간 혼합하고 INT-formazan 상등액을 추출하였다. 추출액은 Whatman GF/C filter paper를 이용하여 여과시킨 후 U.V. spectrophotometer를 이용하여 480 nm 파장에

서 INT-formazan을 비색정량하였다. INT-formazan(Sigma Chemical Co.)으로 만든 표준 곡선을 이용하여 계산된 흡광도 계수는  $\mu\text{g/ml}$ 로 나타내었고, 이 값은 다시  $\mu\text{g/g}$  oven dry soil로 환산해 주었다. 이 때 sterile control로 사용될 시료들은 먼저 121℃에서 20분간 고압멸균을 통해 준비하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 적합 식물선정

Table 2는 오염농도에 따른 시간별( $\Delta t$ ) 각 식물의 성장길이( $\Delta L$ ), 즉 성장률( $\Delta L/\Delta t$ )을 비교한 결과로서 디젤 농도가 500ppm이하인 경우 성장에 별다른 영향을 받지 않았으나 오염농도가 높을수록 전체적으로 생장이 지연되는 경향을 보였다. 단지 500ppm의 오염토양에서 피를 제외한 다른 식물의 경우에 시간에 따른 성장율이 대조구에 비해 다소 높은 특이한 경향을 보여 주었다.

Carr(1919)는 낮은 농도범위인 0.75% 원유로 오염된 토양에서 콩과식물인 Glycine max L. Merr.의 생장이 대조구에 비해 촉진되고 뿌리혹의 발달이 촉진된다고 보고하고 있다<sup>11)</sup>. 그러나 일반적으로 높은 오염농도에서는 탄화수소의 분해과정

**Table 2.** Comparison of the growth rates ( $\Delta L/\Delta t$ ) of plants in soil artificially contaminated with four different degrees of diesel

| Concentration diesel (ppm) | $\Delta L/\Delta t$ |          |      |         |
|----------------------------|---------------------|----------|------|---------|
|                            | grass I             | grass II | corn | alfalfa |
| 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    |

에서 발생하는 Mn과 Fe의 과잉생성 및 인·질소 원의 부동화현상으로 인해 식물체에 독성효과를 미치는 것으로 알려져 있다<sup>2)</sup>.

각 식물의 최고 토양오염농도치(3,000ppm)에서의 생장률을 대조구에서의 값과 비교하여 보면, 피, 물피, 옥수수의 경우 생장률이 15%, 30%, 32%의 감소를 보인 반면 알팔파의 경우 9%의 감소를 보여 알팔파가 오염농도에 따른 성장저해가 가장 낮은 것으로 나타났고(Fig. 1), 오히려 디젤 농도 500, 1,000 ppm에서 대조구에 비해 더 높은 생장률을 보여주었다.

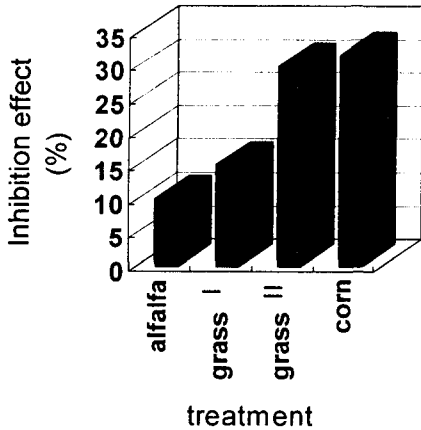


Fig. 1 Inhibition effect(%) of diesel contamination (3,000ppm) on the growth rate ( $\Delta L/\Delta t$ ) of plants compared with uncontaminated conditions.

위의 생장률 실험결과를 토대로 처리실험을 위한 정화식물로 알팔파를 선정하였으며 더 높은 농도 범위에서 알팔파를 파종한 후 발아율을 관측함으로써 적용가능 토양오염농도에 대한 예비실험을 수행하였다. Table 3에서 나타난 실험결과에서 알 수 있듯이, 토양오염농도 5,000~10,000 ppm 범위까지는 알팔파의 발아율에 미치는 토양오염의 영

Table 3. Germination rate of alfalfa seeds in soil artificially contaminated with four different degrees of diesel

| Conc. of diesel (ppm) | germination(%) |
|-----------------------|----------------|
| 0                     | 72             |
| 5000                  | 82             |
| 10000                 | 60             |
| 20000                 | 6              |
| 30000                 | 2              |

향이 뚜렷하게 나타나지 않았으나 그 이상의 농도에서는 심한 저해현상이 관찰되었다.

3.2 디젤의 처리성능 실험

94일 이후 비교적 식물뿌리의 분포가 잘 발달된 각 처리구 상층부위(지표에서 25cm 깊이까지)에서의 제거효율을 비교하여 Fig. 2에 나타내었다.

대조구, 공기주입 처리구, 알팔파를 심은 처리구, 공기와 알팔파를 넣어준 처리구 각각의 토양 중 디젤오염(TPH) 제거율을 보면 60, 72, 79, 97%로 나타나 토양 중 디젤분해 속도에 미치는 식

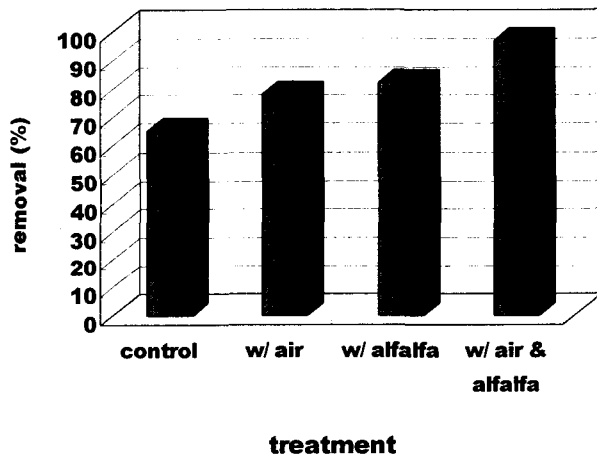


Fig 2. TPH removal in each treatment after 94 days after seeding.

물의 영향을 분명하게 보여주고 있으며 특히 공기 주입을 통한 호기적 조건의 첨가로 식물정화효과를 극대화 할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 공정개선을 통해 기존의 phytoremediation의 처리속도한계를 크게 향상시킬 수 있는 가능성을 제시한다고 볼 수 있다.

Fig. 3, 4, 5, 6은 각 처리구에서 토양 중 오염물의 이동과 생물학적 분해에 따른 각 깊이에서의 오염농도 변화 양상을 시간에 따라 나타낸 결과이다. 대부분의 처리구에서 약 60일까지의 오염농도 분포가 중·하층에서 더 뚜렷하게 나타난 이유는 실험기간 중 토양의 수분보정을 위해 표층에서 주기적으로 유입되는 물의 흐름에 의해 오염물이 하향 이동된 것으로 볼 수 있다.

공기를 주입한 처리구에서 시간에 따른 깊이별 토양 TPH의 변화양상(Fig. 4)을 보면, 오염물의 이동에 의해 오염농도가 집중적으로 분포된 중 하층부위에서 오염물의 감소율이 대조구에 비하여 높게 나타남을 알 수 있는데 이는 균일한 공기주입으로 토양내에 미생물 활동에 필요한 충분한 호기적 조건을 제공하여 대조구에 비해 미생물의 분해활동이 더 향상된 것으로 볼 수 있다.

알팔파를 심은 처리구에서는 초기에 식물뿌리의 미 성장으로 대조구에 비하여 처리효과의 차이가 나타나지 않으나 65일 이후 대조구와 공기를 주입한 처리구에 비해 상층부위에서 TPH의 분해가 활발한 것으로 나타났다(Fig. 5). 65일 이후에 효과가 나타난 것은 알팔파 뿌리의 성장속도와 관련이 있는 것으로서 상·중층에서 뿌리의 활발한 성장과 활동이 65일 이후 관찰되기 때문이다. 공기를 주입한 처리구와 비교해 볼 때, 초기에 뿌리의 발달이 왕성한 상층부위는 달리, 중 하층부에서는 처리효과가 큰 차이로 낮게 나타나고 있는데 시간이 경과함에 따라 뿌리의 분포가 더 깊은 위치까지 확산되면서 점차 그 차이가 좁혀짐을 알 수 있다.

공기와 식물의 효과를 동시에 적용한 처리구에

서의 오염물의 처리양상(Fig. 6)을 보면 오염물질의 제거효율이 상층에서 하층까지 고르게 높게 나타났는데 특히 94일 이후 상·중·하층 부위에서 각각 0, 17, 6 ppm의 낮은 농도의 TPH 값을 보여주고 있다. 이는 근권에 발달된 미생물 집단의 분해활동이 지속적 공기주입에 의한 충분한 호기적 상태에서 높게 유지 될 수 있었던 것으로 판단된다.

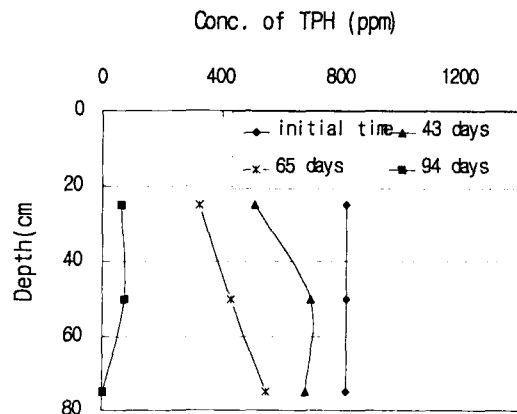


Fig. 3. Temporal and spatial variations of TPH concentrations in the unvegetated column soils (control)

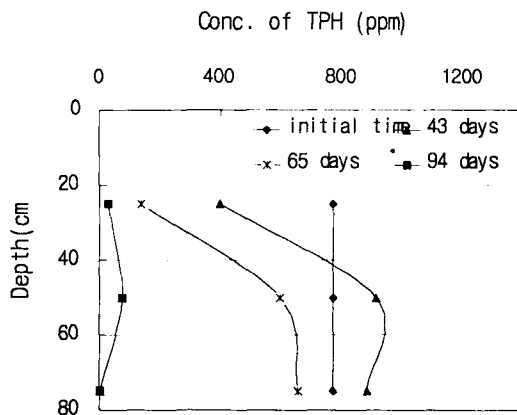


Fig. 4. Temporal and spatial variations of TPH concentrations in the air-injected column soils

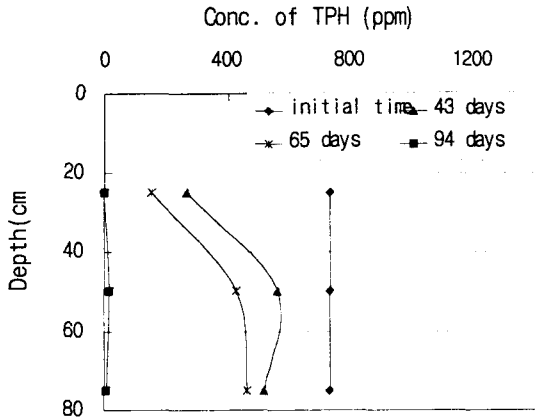


Fig. 5. Temporal and spatial variations of TPH concentrations in the alfalfa-planted column soils

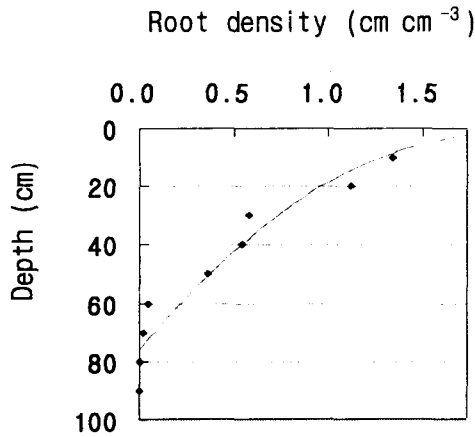


Fig. 6. Temporal and spatial variations of TPH concentrations in the air-injected and alfalfa-planted column soils

유류로 오염된 토양에서는 갑자기 증식하는 미생물의 분해활동으로 인해 산소가 고갈되고 오염입자에 의해 공기의 확산이 저해되어 식물뿌리의 질식현상이 발생하는 등 산소가 제한요인으로 강하게 작용하는 것으로 보고되고 있다<sup>13)</sup>. 특히 대기와 접촉하는 상층부위보다는 중·하층으로 내려가면서 토양환경이 혐기성으로 변하여 산소의 부족현상이

더욱 심화된다.

따라서 토양내 호기적 조건은 분해 미생물 활성의 증진뿐 아니라 뿌리의 성장에도 중요한 영향을 미칠 수 있는데, 본 실험에서 100일 경과 후 깊이별 뿌리의 밀도를 측정 한 결과, 공기와 알팔파를 함께 처리한 처리구에서 알팔파만 넣어준 처리구에 비해 공기주입구가 장착된 중·하층 부위에서 많은 양의 뿌리가 상대적으로 잘 발달되어 있어 위 사실을 뒷받침해주고 있다(Fig. 7).

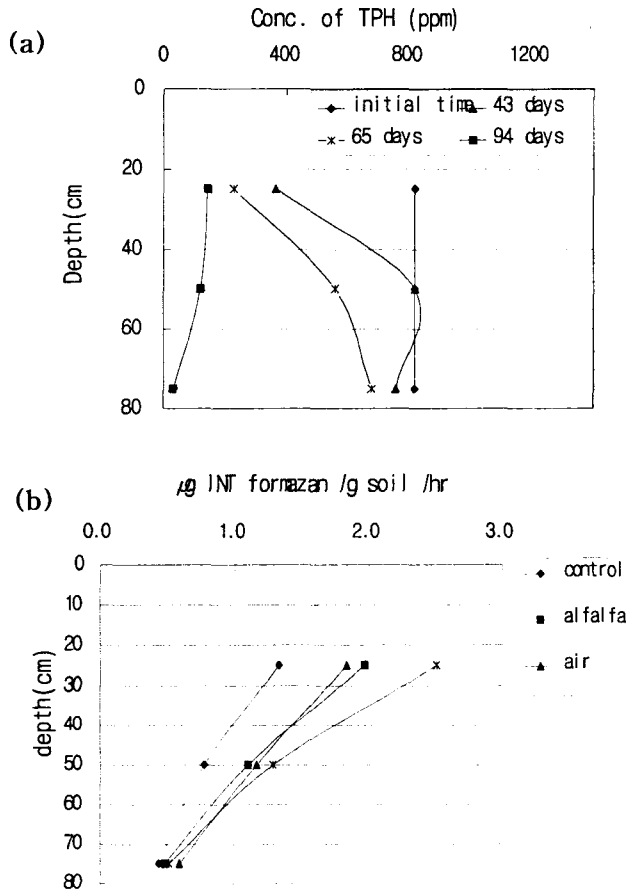


Fig. 7. Rooting density(cmcm-3) profiles of (a) the only alfalfa-planted column and (b) 속 alfalfa-planted and air-injected column at 100 day after seeding.



### 3.3 각 처리구에서의 토양미생물 활성도 변화

생장 미생물세포에서 분비되는 dehydrogenase는 유기체 내부에서 일어나는 생화학적 산화과정인 탈수소화를 촉진하는 세포내효소(endoenzyme)로서 그 효소의 활성도를 측정하여 미생물 자체의 활성도를 간접적으로 나타내는데 사용한다<sup>14)</sup>. 따라서 본 연구에서도 공기주입과 식물적용에 따른 토양미생물의 활동변화를 알아보기 위하여 실험종료 후 각 처리구에서 깊이별로 일정량의 토양시료를 채취하여 토양 중 dehydrogenase의 활성도를 INT assay 방법에 따라 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

각 처리구별 미생물의 활성도를 비교해보면 알팔파와 공기를 넣어준 처리구에서 미생물의 높은 활성도가 특히 상층부에서 뚜렷이 나타났다. 다음으로 알팔파 처리구, 공기주입 처리구, 대조구 순으로 점차 낮아지는 경향을 보여 주었다. 이러한 결과는 알팔파의 뿌리성장, aeration 등이 미생물 활성도에 긍정적인 영향을 나타냄을 보여주고 있으며 90일 경과 후 각 처리구에서의 디젤의 처리양상과 일치하는 것으로 나타나 촉진된 토양미생물의 활동에 의한 디젤의 생물학적 분해속도 향상이 토

양 중 오염물의 제거효율에 미치는 식물의 기여도 가운데 하나임을 알 수 있었다. Lee 등(1993)의 연구결과도 이러한 관측을 뒷받침하여 주고 있는데 오염된 토양에서 식물뿌리 근처의 미생물 활동이 주변 토양미생물에 비하여 상대적으로 높게 나타나고 있음을 보여주었다<sup>14)</sup>.

## 4. 결 론

본 연구에서는 유류오염토양복원을 위한 phytoremediation 기술의 적용가능성을 알아보았으며 식물에 따라 기술적용이 가능한 오염농도범위가 존재함을 알 수 있었다. 또한 유류로 오염된 토양에서 식물의 정화촉진효과는 식물근권내 발달된 토양미생물의 활발한 분해활동이 중요한 역할을 차지하고 있음을 식물뿌리분포와 미생물의 활성도와 처리결과와의 상관관계를 통해 알 수 있었다. 또한 공기주입에 따른 충분한 호기적 조건을 유지함으로써 식물의 정화촉진 효과를 더욱 향상시킬 수 있었다.

마지막으로 본 연구의 실험결과에서도 보여 주었듯이 phytoremediation의 성공적인 현장적용을 위해서는 관개나 강우 등에 의한 오염물의 토양내 이동을 충분히 고려한 공정설계가 필요하며 이를 위한 최적화 기술개발이 뒷받침되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Schnoor, J.L., Licht, L.A., McCutcheon, S.C., Wolfe, N.L. and Carreira, L.H. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environ. Sci. Technol.*, 29(7), pp. 318-323 (1995)
2. April, W., Sims, R.C. (1990). Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil. *Chemosphere*, 20 : 253-265

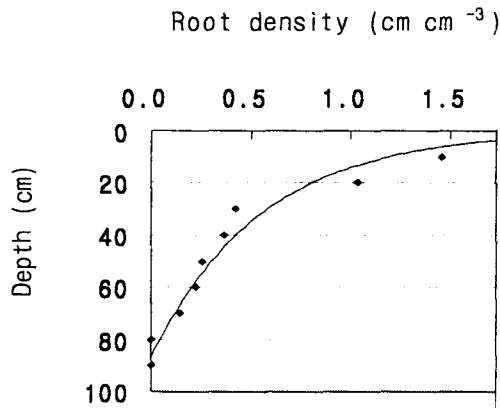


Fig. 8. Dehydrogenase activity(DHA) profiles in each test column at 100 day.

3. Ferro, A.M., Sims, R.C., and Bugbee, B. Hycrest crested wheatgrass accelerates the degradation of pentachlorophenol in soil. *J. Environ. Qual.* 23 : 272-279 (1994)
4. Mueller, W.F., Bedell, G.W., and Jackson, P.J. Bioremediation of High Explosive wastes by Higher Plants. Paper 44c, AlchE Summer 5. Hsu, T.S., and Bartha, R. Accelerated mineralization of two organophosphate insecticides in the rhizosphere. *Appl. Environ. Microbiol.* 37 : 36-41 (1979)
6. Gudín, C. Interaction between oil-vegetation and soil. In *Proceedings of the international Symposium on Ground Water Pollution by Oil Hydrocarbons*, June 5-9, Prague, Czechoslovakia, pp. 411-17 (1978)
7. Brown, S.L., Chaney, R.L., Angle, J.S., and Baker, A.J.M. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. *Soil. Sci. Am. J.* 59 : 125-133 (1995)
8. Terry, N., Carlson, C., Raab, T.K., and Zayed, A. Rates of Se volatilization among crop species. *J. Environ. Quality.* 21 : 341-344 (1992)
9. Forth, H.D. *Fundamentals of Soil Science*. 8th edition. Wiley, New York. (1990)
10. Trevors, J.T., Mayfield, J., and Inniss, W.E. Measurement of electron transport system(ETS) activity in soil. *Microb. Ecol.* 8 : 163-168 (1982)
11. Carr, R. H. 1919. Vegetative growth in soil containing crude petroleum, *Soil Sci.* 8 : 67-68 (1919)
12. Udo, E. J. and Fayemi, A. A. A. The effect of oil pollution of soil on germination, growth and nutrient uptake of corn. *J. Environ. Qual.*, Vol. 4, No. 4, pp. 537-540 (1975)
13. Casida LE Jr, Klein DA, Santaro R. Soil dehydrogenase activity. *Soil Sci* 98 : 371-378 (1964)
14. Lee, M.D., Banks, M.K. *J. Environ. Sci. Health* A28, 2187-2198 (1993)