

국내 자생 포플러나무에 의한 디젤오염토양 정화특성 연구

장 순 웅*

경기대학교 환경공학과

Phytoremediation Study of Diesel Contaminated Soil by Indigenous Poplar Tree

Soon-Woong Chang*

Department of Environmental Engineering, Kyonggi University

ABSTRACT

In this study, uptake and toxicity of diesel (TPH) by poplar specie, *P. nigra* × *P. maximowiczii* were assessed in laboratory soil column experiments. Poplar cuttings were grown for 2 months and exposed to various concentration (0, 200, 500, 1000, 2000 mg/kg) of diesel for a period of 60 days. For diesel removal experiments, diesel was effectively removed in the range of lower concentration. but, the removal rate of diesel was rapidly decreased as increasing initial diesel concentrations. For the this reason, toxicity effects were evaluated by measuring in poplar cutting mass variation and monitoring transpiration. Exposure on higher diesel concentration resulted in decrease of biomass and transpiration accompanied by chlorosis and abscission, indicating toxic effect of diesel on the poplar tree. And also, we have observed that both removal efficiency of diesel and the microbial activity were higher at the bottom of the soil column. It was suggested that the plant formed the root zone at contaminated soil, stimulated microbial activity by plant root exudates, and played an important role in enhanced biodegradation of diesel.

Key words : Phytoremediation, Diesel, Poplar tree, *P. nigra* × *P. maximowiczii*

요 약 문

본 연구에서는 국내에 자생하는 포플러나무중 양황철을 대상으로 토양칼럼에서의 디젤(TPH) 제거 특성 및 식물체에 미치는 독성효과를 평가하였다. 포플러 삼목은 2달간 성장시킨 후 본 실험에 이용되었으며, 다양한 디젤농도(0, 200, 500, 1000, 2000 mg/kg)를 대상으로 60여 일간 진행되었다. 양황철에 의한 디젤 제거 실험에서 낮은 디젤농도에서는 효과적인 처리가 관찰된 반면, 농도가 증가할수록 처리효율은 급격하게 감소하였다. 또한 뿌리생장이 활발한 토양칼럼 하부에서의 처리효율이 상대적으로 높았다. 그리고 양황철 생장과 증산량을 비교하여 디젤의 양황철에 미치는 독성효과의 여부를 검토하였다. 실험기간동안 양황철의 황백화 현상, 뿌리성장 저하, 증산량 감소 현상 등이 관찰되었다. 또한 토양칼럼 깊이별 측정된 미생물 활성도 결과는 뿌리 생장이 많은 토양 칼럼 하부와 영양염류 및 디젤 분해미생물을 추가로 주입해준 경우가 높았다. 이러한 식물의 정화효과는 근권에 있는 토양미생물에 유용한 뿌리 분비물을 지속적으로 제공함으로써 미생물의 활발한 번식 및 분해활동이 더욱 촉진되는 것으로 보인다.

주제어 : 식물정화공법, 디젤, 포플러, 양황철

*Corresponding author : swchang@kyonggi.ac.kr

원고접수일 : 2006. 9. 1 게재승인일 : 2006. 9. 7

질의 및 토의 : 2006. 12. 31 까지

1. 서 론

식물을 이용한 정화기술은 유기 및 무기화합물로 오염된 지역을 정화하기 위해 식물을 이용하는 방법으로 bioremediation보다 고농도의 오염물에 대해 내성을 가지며 경제적이고 친환경적인 공법이다(하성훈, 1999). 특히 유기 독성물질로 오염된 수계 및 토양을 정화하기 위해 식물정화공정을 적용할 경우, 오염물이 짧은 고리를 가지고 $\log K_{ow}$ (log octanol:water partition coefficients)가 0.5에서 3사이인 경우 식물 뿌리에 효과적으로 흡수된다(하성훈, 1999; Schnoor et al., 1995). 또한 오염물이 지표로부터 5 m 이내에 얇게 퍼져 있으며 유기물이 풍부한 지역인 경우 제거 효율이 더욱 더 향상된다. 오염물질을 제거하는 식물의 메커니즘은 첫째, 뿌리를 통해 식물체내로 오염물을 직접 흡수하여 식물에 무독한 중간물질로 변환시킨 후 축적하며 둘째, 휘발성 오염물질을 공기를 통해 앞으로 직접 흡수한다. 셋째, 뿌리를 통해 삼출액과 효소를 분비하여 근권 내 미생물에 의한 생화학적 분해를 촉진시킨다(Anderson et al., 1994; Nair et al., 1992; Shimp et al., 1993; Simonich and Hites, 1995).

기존의 식물정화 연구에 이용된 정화식물로는 포플러, 사시나무, 버드나무 등과 같은 목본류와 콩과, 벼과, 십자화과, 알팔파 등 초본류들이 오염효과에 탁월한 것으로 효과가 있는 식물로 보고되고 있다(여진기 등, 2002). 이 중에서도 포플러는 오염물질의 독성에 저항력이 강하며 상대적으로 다른 식물에 비하여 높은 농도의 오염물질의 존재시에도 생존하는 특성이 있다. 특히 전 세계적으로 25여종이 분포되어 있고 어떠한 조건에서라도 쉽게 적응하며 성장도 매우 빨라 줄기는 1년에 3-5 m까지 성장하고 뿌리는 지표면에서 약 3-4 m까지 뻗어나가는 장점을 가지고 있다. 그리고 약 5년 된 포플러 나무는 증산량이 100 L/day 정도로 상당히 많은 양의 물을 흡수함으로써 토양 및 지하수내 오염원의 효율적인 제거가 가능하다는 점에서 본 연구에서 대상식물로 선정하여 실험을 진행하였다(Schnoor et al., 1995).

토양 및 지하수 오염물질 중 디젤(경유)은 물보다 비중이 낮은 LNAPLs(Light Nonaqueous Phase Liquids)로 구분되며 가솔린에 비해 휘발성이나 용해도가 낮아 유류 저장시설에서 누출 시, NAPLs 상태로 토양 불포화층을 통해 토양내 공극수에 일부가 용해되어 액상으로 전환되며, 일부는 휘발되어 공극 내에 갇힌 상태로 존재한다. 이러한 NAPLs은 지하수면 상부에 축적되어 free product 상태로 존재하는 경향을 보이며, 모세관 현상에 의해 불

포화층 토양의 공극사이에 잔류포화(Residual saturation) 상태로 잔류하게 되어 장기적인 오염원으로 남게 된다. 이러한 점에서 경제적이며 환경친화적인 식물학적공정을 적용하면 효율적인 제거가 가능할 것으로 판단된다. 국내에서는 식물을 이용한 연구가 일부 진행되었으나, 주로 중금속을 대상으로 하거나 유기오염물질을 대상으로 한 연구에서도 알팔파와 같은 초본류를 이용한 실험이 대부분이다(백경화 등, 2002; 김현아 등, 2002; 심지현 등, 1999). 외국의 경우에는 포플러 등을 이용한 다양한 난분해성 오염원 처리를 위한 실험실 및 현장 적용 연구가 진행중에 있다(Briggs et al., 1982; Burken and Schnoor, 1997; Dietz and Schnoor; McFarland et al., 1990; Thompson et al., 1998).

본 연구에서는 국내에서 자생하는 포플러나무종 양황철(*P. nigra* × *P. maximowiczii*)을 대상으로 디젤오염토양 현장정화를 위한 가능성을 조사하였다. 디젤오염농도(TPH)를 200, 500, 1000, 2000 mg/kg로 변화를 주어 시간, 칼럼 깊이에 따른 TPH 제거효율, 식물체 성장량 및 증산량 비교를 통한 독성 평가, 그리고 미생물활성도 변화를 관찰함으로써 포플러에 의한 디젤오염 제거 특성을 파악하였다. 또한 토양 칼럼 내에 영양염류 및 디젤분해균주를 추가로 주입해줌으로써 TPH 제거 효율 향상여부를 조사하고, 이를 바탕으로 현장 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 칼럼실험

본 연구에서는 경기도 수원 소재 임업연구원에서 재배 중인 포플러나무종 양황철(*P. nigra* × *P. maximowiczii*)을 본 연구의 대상식물로 선정하였다. 현재 국내에서 자생 중인 대표적인 포플러수종은 양황철 외에도 이태리포플러, 현사시 등(여진기 등, 2002)이 있으나, 기초실험 결과 양황철이 고농도의 디젤에 대한 내성이 다소 강하여 본 연구에서 디젤오염토양 처리실험을 위해 사용되었다. 양황철 삽목을 15 cm로 일정한 길이로 자른 후, 화분에 일차 식재하였다. 그리고 약 2개월간 온실에서 키워 뿌리가 성장하고, 전체길이가 약 40 cm 정도 되었을 때 옹기 재질의 직경 12.5 cm, 길이 40 cm의 원통형 칼럼에 이식하였다. 본 실험은 토양칼럼에 이식한 후 5월초부터 60일간 수행하였으며, 실험은 자연광 조건을 유지하면서 환기 시설을 갖춘 온실에서 수행되었다(장순응 등, 2004). 토양은 온실 근처 야산에서 채취한 사질토양을 이용하였으며(Table 1), 디젤농도(TPH)를 200, 500, 1000, 2000 mg/

Table 1. Soil characteristics used in this study

Parameter	Value
CEC(meq/100g soil)	49
Porosity(%)	46.5
Moisture content(%)	10.4
OM(%)	3.2
pH	6.9

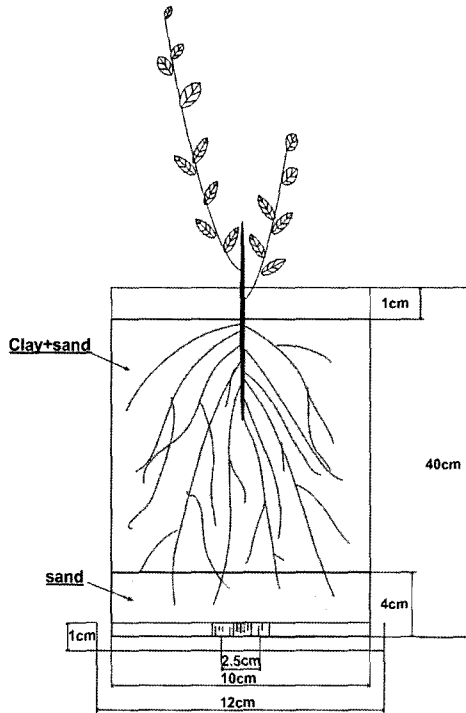


Fig. 1. Schematics of laboratory soil column setup of diesel uptake studies.

kg로 인위적으로 오염시켜 주었다. 원활한 배수를 위하여 철망이 설치된 하부에는 4 cm로 모래를 깔고 그 윗부분을 인공오염토양으로 채웠다(Fig. 1). 2-4일에 한번 씩 일정한 수분을 공급하여 전체적인 수분함량이 약 20-30%가 유지되도록 조절하였다. 관수에 의한 디젤 손실량을 보정하기 위해 디젤오염토양만을 넣은 칼럼을 대조구로 이용하여 비교실험을 진행하였으며, 모든 실험은 2반복구조로 진행되었다.

2.2. 디젤오염토양 분석방법

디젤오염토양의 분석은 초기, 30일, 60일 후 칼럼에서 토양시료(4 g)를 반복 채취하여 Dichloromethane(Sigma-Aldrich) 10 mL를 첨가하고 24시간 동안 shaking한 후 추출하였다. 이때 추출효율은 약 80% 정도였다. 추출시료 내의 디젤농도분석은 NWTPH-Dx(Northwest Petroleum Hydrocarbon Analytical Method for Semi-Volatile Petro-

leum Products)와 EPA Method 8500을 근거로 하여 디젤범위유기물(Diesel Range Organics, DRO)을 사용하여 n-alkane계의 물질만을 대상으로 분석하였으며, 표준물질로 UST Modified DRO Mix(Supelco. Co.)를 사용하여 Working Calibration Standard로 하였으며 최종적으로 DRO 농도 총합을 토양시료 건조중량으로 나누어 토양 1 kg당 포함되어 있는 디젤의 양(mg/kg)으로 환산하였다.

TPH 분석을 위하여 무수황산나트륨 4 g을 첨가하여 수분을 제거한 후 Cameo 17F Syringe Filter(OSMONICS, INC.)를 사용하여 여과하였다. 여과한 시료 2 µL를 FID가 장착된 가스크로마토그래피(HP6890)를 사용하여 TPH를 분석하였다. HP-5 column(5% Phenyl Methyl Siloxane, capillary, 50.0 m × 200 µ × 0.33 µ film)을 사용하였고 carrier gas는 1 mL/min의 속도로 99.99%의 nitrogen gas를 사용하였으며 make-up gas는 30 mL/min으로 조절하였다. 시료주입부의 온도는 250°C, 검출기의 온도는 290°C로 하였으며, split ratio는 10으로 유지하였으며, 오븐온도는 40°C에서 1분을 유지하다가 10°C/min으로 290°C까지 승온시킨 후 15분을 유지하였다.

2.3. 토양미생물활성도 측정

포플러에 의한 디젤오염토양 정화과정중에 토양내의 토착미생물 활성화 여부를 검토하기 위해 DHA(Dehydrogenase Activity)측정에 이용되는 INT(Iodonotrotetrazolium) assay를 이용하여 디젤농도에 따른 각각의 미생물 활성도를 측정하였다(Travers et al., 1982). 채취한 토양(1 g)에 0.25% INT(Sigma-Aldrich) 용액 1 mL를 첨가하고 38°C에서 24시간 배양한 후 Method 10 mL를 첨가한 후에 vortex mixer로 혼합하여 INT-formazen 상등액을 추출하였다 추출액을 Syringe filter를 이용하여 여과시킨 후 UV Spectrophotometer로 480 nm에서 비색정량하였다. Sterile control은 121°C에서 20분간 고압멸균을 통해 준비되었다. INT-formazan으로 검량선을 작성하여 µg/kg oven dry soil로 나타내었다

2.4. pH 및 토양유기물 함량

토양 중 pH는 토양환경공정시험법을 기준으로 하여, 50 mL 비이커에 2 mm 입경으로 구분한 토양 5 g과 증류수 25 mL를 넣어 저어주면서 1시간 방치 후 측정하였다. 토양의 유기물 함량은 KSF 2104 기준으로 강열감량법으로 분석하였다. 흙의 강열감량은 110°C의 강열을 가하여 얻은 산소무게를 건조토에 대한 백분율로 나타낸 것으로 2 mm 이하 입경으로 구분한 토양 5 g을 도가니에 넣어

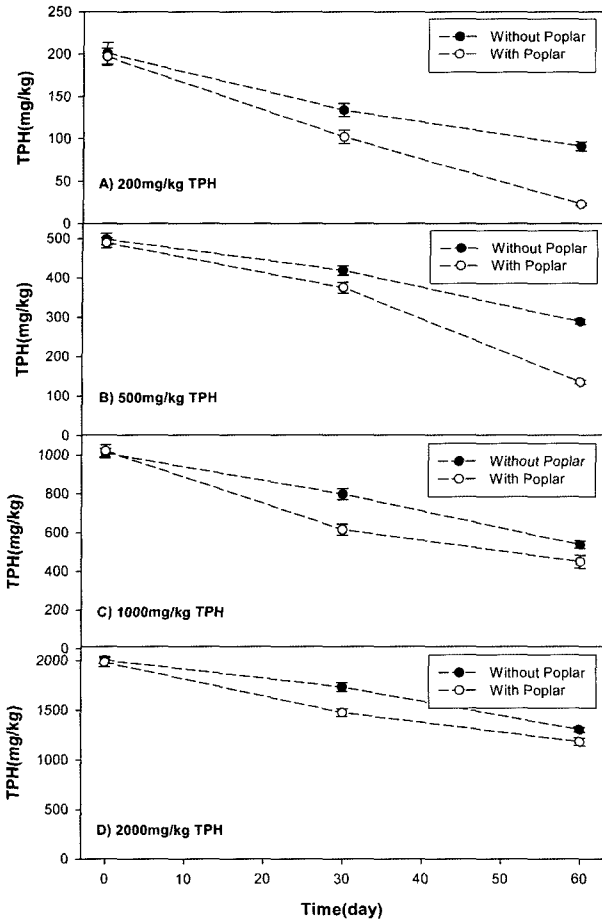


Fig. 2. TPH removal at different TPH concentration with/without poplar tree.

700-800°C에 3시간 가열한 후 데시케이터 안에 넣어 방 냉하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 양황철에 의한 TPH 처리 특성

오염물질을 제거하기 위한 식물정화공정은 일반적인 자연계에서는 식물체에 의한 흡수 및 분해, 미생물에 의한 분해, 그리고 주변환경에의 흡착 등에 의한 요소로 제거되어진다. 본 연구에서는 국내 자생하는 여러 포플러나무 중 양황철을 대상으로 디젤오염토양에서의 처리 가능성을 검토하였다. 초기 오염토양의 디젤농도는 200, 500, 1000, 2000 mg/kg의 조건으로 조정하였고, 위의 실험방법에서 설명한 바와 같이 2반복실험을 진행하였다.

Fig. 2는 초기, 30일, 60일후의 토양내의 상부에서 30 cm 지점, 즉 포플러의 뿌리가 가장 활성화된 부분의 디젤농도 변화를 보여주고 있다. TPH 초기 농도에 따라 TPH 처리결과는 다소 다르게 나타났다. 초기 TPH 농도가 증

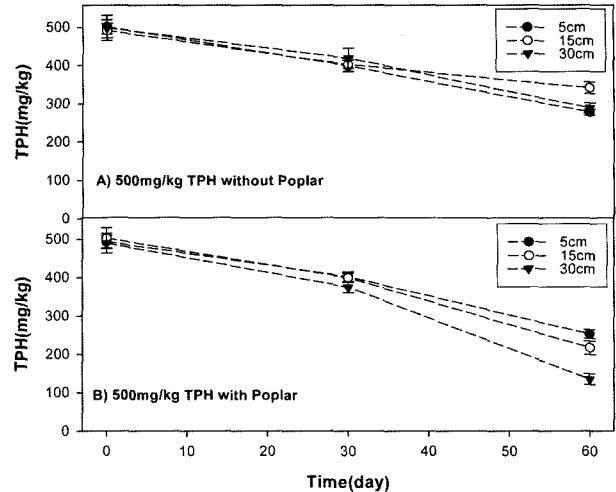


Fig. 3. Temporal change of soil TPH with/without poplar tree.

가함에 따라 TPH 제거량은 증가하였으나, 제거율은 오히려 감소했다. TPH 농도가 200, 500 mg/kg일 때는 시간이 경과함에 따라 지속적인 TPH 저감이 관찰된 반면, TPH 농도가 1000, 2000 mg/kg에서는 30일까지는 제거율이 증가하다 60일후에는 제거율이 감소하는 현상이 관찰되었다. 각 조건에서의 TPH 제거율은 200, 500, 1000, 2000 mg/kg TPH 초기농도에 따라 $88.3 \pm 4.5\%$, $72.4 \pm 3.2\%$, $56.1 \pm 2.6\%$, $40.7 \pm 3.9\%$ 로 나타났다. 그러나 Fig. 2에 보여주듯이 60일 실험기간동안 대조구에서도 휘발, 수분공급을 통한 손실 등으로 지속적인 TPH의 감소가 일어났다. 이를 보정할 때, 포플러 양황철에 의한 순 제거율은 각각 $33.5 \pm 2.1\%$, $30.4 \pm 2.4\%$, $9.3 \pm 0.5\%$, $5.4 \pm 0.4\%$ 로 관찰되었다. TPH 농도 증가에 따른 제거율 감소는 TPH 농도 증가에 따른 독성 영향으로 양황철의 생장이 저해되거나 미생물의 활성도 저하의 가능성도 배제할 수 없을 것으로 사료된다.

Fig. 3은 각 처리구별 오염물의 분해에 따른 각 깊이에서의 오염 농도 변화 양상을 시간에 따라 나타낸 것이다. 토양 상부에서 5 cm, 15 cm, 30 cm 지점을 비교한 결과로서 30 cm 지점에서의 TPH 제거율이 가장 높게 나타났다. 60여일 기간 동안 뿌리 생장으로 흡수 증가로 다른 지점에 비해 상대적으로 높은 제거효율을 보여주고 있다. 알팔파에 의한 유사한 실험에서는 상부에서 제거효율이 높게 관찰되었었는데, 알팔파 종자를 뿌리고 생장하는 과정중에 제거가 일어난다. 특히, 알팔파는 초본류로 뿌리 생장이 크지 않아 토양 표토층에서의 TPH 제거율이 상대적으로 높게 관찰되기도 하였다(심지현 등, 1999).

위에서 설명한 바와 같이 식물정화에 의한 오염원 제거

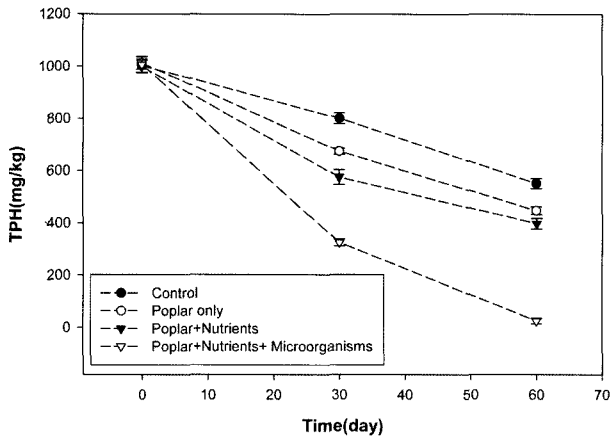


Fig. 4. TPH removal on the variation of column condition.

는 뿌리에서의 흡수를 통한 식물체내에서의 분해, 흡착, 토양내의 토착미생물의 활성화로 인한 제거 등을 고려할 수 있는데, 본 실험에 사용된 토양은 디젤에 노출된 적이 없는 토양이라 60일간의 실험에서 토착미생물에 의한 제거효과는 크지 않을 것으로 사료된다. Fig. 4는 TPH 농도 1000 mg/kg을 대상으로 영양물질을 공급한 경우와 디젤분해미생물을 추가로 공급해 줌으로써 TPH 제거효율의 극대화를 유도할 수 있는지를 비교한 결과를 보여준다. 영양물질만을 공급해준 경우에는 포플러를 식재한 경우와 별다른 차이가 없었으나, 디젤분해미생물을 접종한 경우에는 제거효율이 약 20% 증가하였다. 즉, 위의 실험결과로 볼 때, 60여일 기간 동안 제거된 TPH양은 토양내의 토착미생물에 의한 제거보다는 포플러 양항철에 의한 많은 제거가 일어났음을 예상할 수 있다.

3.2. 디젤 독성 평가

TPH 제거실험 결과를 보면, 초기 TPH 농도 증가에 따라 제거효율이 감소함을 볼 수 있다. TPH의 독성으로 인한 영향이라고 볼 수 있는데, Fig. 5는 TPH로 인한 포플러의 성장저해를 비교하기 위한 지표로 실험초기와 실험종류 후의 포플러 양항철의 건중량을 비교한 결과이다.

대조구에서는 양항철이 지속적으로 성장하여 약 20%의 건중량이 증가한 반면, TPH 농도가 증가할수록 양항철의 건중량은 감소하였다. 특히, 1000, 2000 mg/kg TPH 조건에서는 실험시작 후 약 20일 경과 후부터 양항철 윗부분에서 황백화 현상이 나타나기 시작했다. 잎이 황색에서 암갈색으로 변하기 시작하고, 실험종류 후에는 상당량의 잎이 떨어졌고, 뿌리의 생장은 대조구에 비해 상당히 적었다. 즉, TPH 독성이 포플러 성장에 상당한 저해를 미치고 있다고 할 수 있다. 고농도 축산폐수를 적용한 경우

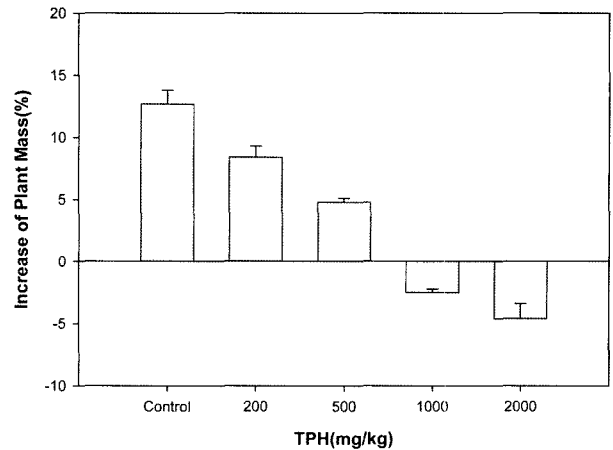


Fig. 5. The weight loss of poplar tree by exposure in different TPH concentration.

(여진기 등, 2002)에는 포플러의 성장에 별다른 영향을 미치지 않은 반면, atrazine에 노출된 경우에는 2주간의 실험결과에도 식물체에 상당한 저해를 미치는 결과를 보여주기도 하였다(장순웅, 2004). 즉, 식물체 성장에 저해를 미칠 가능성이 있는 오염물질인 경우, 노출농도가 높을수록 오염물질이 식물체내로 흡수되어 식물의 광합성 작용, 호흡작용, 증산작용 및 효소반응을 억제하고 뿌리의 수분 흡수 능력을 저하시키는 등의 독성효과를 나타낼 것이다 (Thomson et al., 1998).

위 결과를 검증하기 위한 방법으로, 실험 종류 후 칼럼 아래부분에 받침대를 대고 칼럼 60 cm 부근까지 포화시켜 포플러 양항철에 의한 증산량을 비교하였다. 대조군에서는 평균 33 mL/day로 지속적으로 수분이 흡수된 반면, 초기 TPH 농도가 증가한 경우에는 급격하게 증산량이 감소하였다(Fig. 6). 즉, TPH 노출기간동안 TPH 노출로 인한 독성영향으로 식물체의 흡수 능력이 급격하게 감소되어 있다고 볼 수 있다. 일반적으로, atrazine, 유류물질과 같은 유기 독성물질은 식물체에 의해 선택적으로 흡수되지 않고 식물체 뿌리 근처의 수분유동에 의해 수동적으로 이동하므로 수분 흡수량이 좋은 식물일수록 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있다. 따라서 수분 흡수량의 감소는 오염물의 체내 유입속도를 감소시키는 중요한 요인이 된다.

3.3. 토양미생물의 활성도, 유기물함량 및 pH

살아있는 미생물세포에서 분비되는 탈수소화효소는 유기체 내부에서 일어나는 생화학적 산화과정인 탈수소화를 촉진하는 세포내 효소로서 그 효소의 활성도는 미생물 자체의 활성도를 간접적으로 나타낸다(Travers et al., 1982). 본 연구에서는 TPH와 식물 유무에 따른 토양미생물의 활

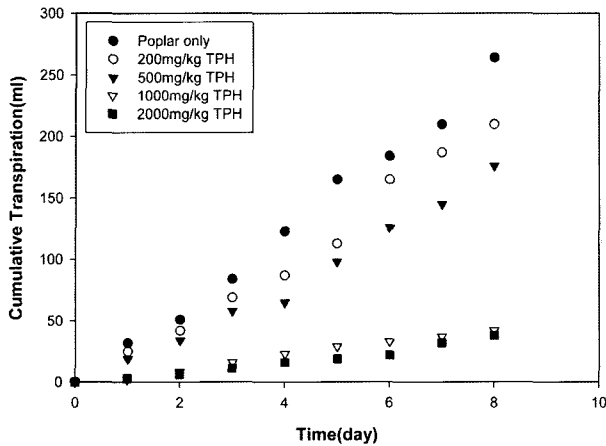


Fig. 6. Cumulative transpiration of poplar tree after exposing on TPH after 60 days.

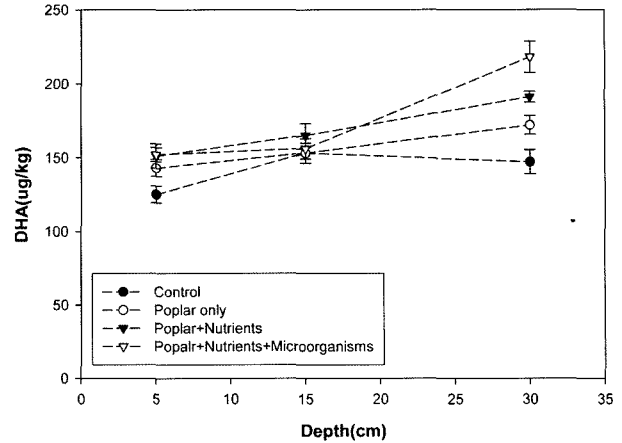


Fig. 8. Dehydrogenase activity on the variation of column condition.

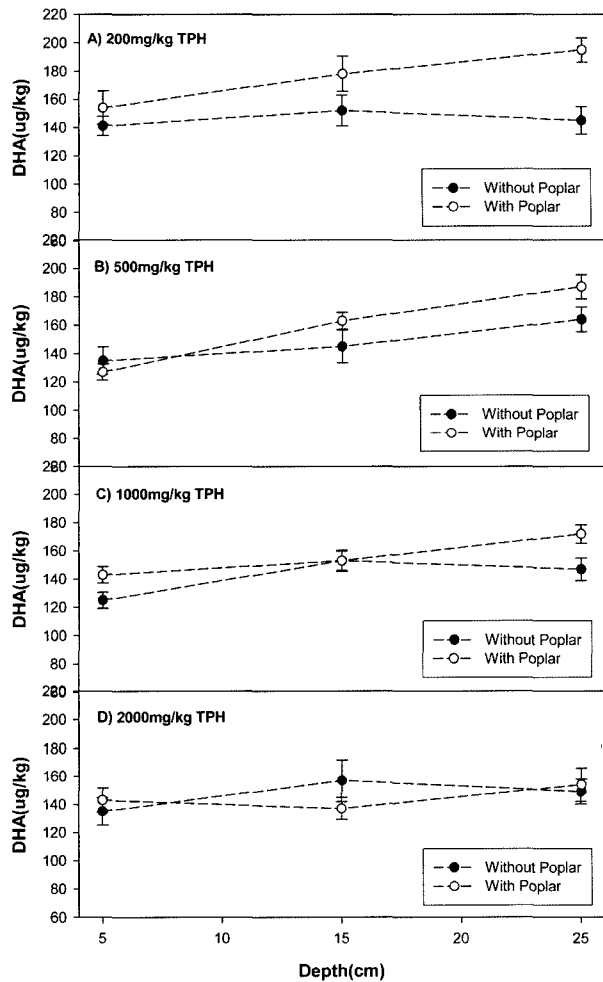


Fig. 7. Dehydrogenase activity in soil column on different TPH concentration with/without poplar tree.

성 변화를 알아보기 위해 탈수소화효소의 활성도를 INT를 이용하여 측정하였다. 식물 유무에 따른 미생물활성도

는 식물이 존재할 때가 식물이 존재하지 않을 때에 비해 높게 나타났으며, 뿌리밀도가 높은 하층부에서 다소 높은 것으로 관찰되었다(Fig. 7).

또한 Fig. 8은 토양내에 영양물질 및/또는 디젤분해미생물을 추가 주입한 경우, 60일 경과 후에 토양 깊이에 따른 미생물활성도를 보여주고 있다. 이 경우에도 뿌리밀도가 높은 하층부와 디젤분해미생물을 주입해준 경우가 미생물활성도가 높았다. Lee 등(1993)은 오염된 토양에서 오염된 토양에서 식물뿌리 근처의 미생물 활동이 주변 토양 미생물에 비하여 상대적으로 높게 나타난다는 결과를 보고하기도 하였다. 디젤의 생물학적 분해속도 역시 미생물활성도 결과는 TPH 제거에 대한 미생물의 역할 및 뿌리생장의 효과를 뒷받침하고 있다. 또한 촉진된 토양미생물의 활동에 의한 유류의 생물학적 분해속도 항상 역시 TPH 제거에 기여한 요인 중 하나라고 사료된다.

또한 실험기간동안 토양 내 유기물함량 및 pH 변화를 관찰하였으나, 본 논문에서는 자료제시 없이 간단히 결과에 대해서만 설명하였다. 유기물함량은 TPH 제거율이나 미생물활성도에 비해 큰 차이를 나타내지 않았지만, 식물의 뿌리가 발달한 60 cm 부근의 토양에서는 10.5-13.2%의 높은 유기물함량 결과 나타났다. 이는 일반적으로 알려진 바와 같이 탄수화물이 풍부한 젤 형태의 다양한 화학종으로 구성되어 있는 뿌리 분비물의 영향에 의한 것으로 추정된다(Baker and Brooks, 1989). 또한 토양의 pH는 시간이 경과함에 따라 모든 처리구에서 다소 낮아지는 경향을 나타내었는데, 유기물분해 또는 식물체 뿌리로부터 생성되는 저분자성 유기산과 CO₂의 증가에 기인하는 것으로 판단된다(Ferro, et al., 1994; Chang and Corapcioglu, 1998; Chang and Corapcioglu, 1997).

4. 결 론

본 연구에서는 국내에 자생하는 포플러나무중 양황철을 대상으로 대표적인 유류오염물질인 디젤의 제거특성을 조사하였다. 초기 TPH 농도에 따른 제거 특성, TPH가 포플러에 미치는 독성 평가 및 토양내 미생물활성도 조사를 통한 효과적인 유류오염토양 복원을 위한 식물정화공법의 적용 가능성을 조사하였다.

초기 TPH 농도가 높아짐에 따라 TPH 제거량은 증가하나 제거효율은 급감하였다. 또한 저농도 조건에서는 실험기간인 60일 동안 지속적으로 TPH가 제거 되었으나, 고농도에서는 처리효율이 급격하게 감소하였다. 이 결과는 두 가지 측면에서 설명이 가능하다. 첫째, 본 실험에 사용된 포플러 양황철은 2개월 정도 성장한 양황철을 대상으로 진행한 연구결과로 낮은 TPH 제거 가능성을 발견하였기에 수년 성장한 포플러 수종인 경우에는 고농도 오염지역이라도 현장복원이 가능할 수 있다는 점이다. 물론 추후 지속적인 실험과 검증이 필요한 연구의 한 부분이다. 둘째, 2개월 성장한 포플러로 대상으로 하였기에 고농도 TPH에 노출 시 독성 영향을 받았다. 식물체 건중량 및 증산량 비교실험을 통해 고농도 디젤에 노출 시 독성 영향이 관찰되었는데, 그러나 이 결과 역시 수년 성장한 포플러 대상으로 TPH 노출농도 증가에 따른 독성영향 역시 조사할 필요가 있다.

또한 미생물의 활성도와 토양내 유기물질 변화의 상관관계를 통하여 유류로 오염된 토양에서의 식물의 정화촉진효과에 식물 근권내 발달된 토양 미생물의 활발한 분해활동 역시 중요한 역할을 차지하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 디젤을 포함한 유류오염토양을 복원하기 위한 방법으로 포플러를 이용한 식물정화공정 적용이 가능할 것으로 예상되나, 고농도 오염지역 정화시 적용을 위해 최소 1년 이상 된 포플러 수종을 대상으로 한 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

김경훈, 성기준, 장윤영, 이철효, 2003, 탄화수소계 화합물 오염 토양 정화를 위한 Phytopyile 적용효과, 한국폐기물학회지, **20**(8),

793-798.

김현아, 배범한, 장윤영, 이인숙, 2002, 철광산 및 포사격장 식물의 중금속 제거에 관한 연구, 한국생태학회지, **25**(1), 7-14.

백경화, 장윤영, 배범한, 이인숙, 2002, 카드뮴 오염 토양에 Phytoremediation의 적용 가능성 연구, 한국생태학회지, **25**(3), 175-180.

여진기, 김인식, 구영분, 김태수, 손두식, 2002, 축산폐수 처리에 따른 포플러 수종 및 클론별 오염물질 흡수능력 및 내성, 한국폐기물학회지, **19**(8), 912-920.

장순웅, 이시진, 박재홍, 2004, 포플러에 의한 Atrazine 제거 특성 연구, 한국폐기물학회지, **21**(6), 627-633.

하성훈, 1999, 식물정화기술을 활용한 오염지역의 환경복원, 현대환경리포트, **9**, 72-86.

Anderson, T.A., Kruger, E.L., and Coats, J.L., 1994, Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant, *Chemosphere*, **28**, 1551-1557.

Baker, A.J. and Brooks, R.R., 1989, Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements-A review of their distribution, ecology and phytochemistry, *Biorecovery*, **1**, 81-126.

Briggs, G.G., Bromilow, R.H., and Evan, A.A., 1982, Relationships between lipophilicity and root uptake and translocation of non-ionized chemicals by barley, *Pesti. Sci.*, **13**, 495-504.

Burken, J.G. and Schnoor J.L., 1997, Uptake and metabolism of atrazine by poplar tree, *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 1399-1406.

Chang, Y. and Corapciglu, M.Y., 1997, Effect of roots on water flow in unsaturated soil, *J. Irrig. and drain. Eng.*, **123**(3), 202-209.

Chang, Y. and Corapciglu, M.Y., 1998, Plant-enhanced subsurface bioremediation of nonvolatile hydrocarbons, *J. Environ. Eng.*, **124**(2), 162-169.

Dietz A. and Schnoor J.L., 2001, Phytotoxicity of chlorinated aliphatics to hybrid poplar, *Environ. Toxicol. Chem.*, **20**, 389-393.

Ferro, A.M., Sims, R.C., and Bugbee, B.J., 1994, Hycrest crested wheatgrass accelerates the degradation of pentachlorophenol in soil, *J. Environ. Qual.*, **23**, 272-279.

Lee, M.D. and Banks, M.K., 1993, Bioremediation of petroleum contaminated soil using vegetation. A microbial study, *J. Environ. Sci. Health A.*, **28**(10), 2187-2198.

McFarland, C., Pflieger, T., and Fletcher, J., 1990, Effect, uptake and disposition of nitrobenzene in several terrestrial plants, *Environ. Toxicol. Chem.*, **9**, 513-520.

Nair, D.R., Burken, J.G., Licht, L.A., and Schnoor, J.L., 1992, Mineralization and uptake of triazine pesticide in soil-plants sys-

tems, *J. Environ. Eng.*, **119**, 842-854.

Schnoor, J.L., Licht, L.A., McCutcheon, S.C., Wolfe, N., and Carreira, L.H., 1995, Phytoremediation of organic and nutrient contaminant, *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 318-323.

Shimp, J.F., Tracy, J.C., Davis, L.C., Lee, E., Huang, W., Erickson, L.E. and Schnoor, J.L., 1993, Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **29**, 2905-2914.

Simonich, S.L. and Hites, R.A., 1995, Organic pollutant accumulation in vegetation, *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 2905-2914.

Thompson, P.L., Ramer, L.A., Guffey, A.P., and Schnoor, J.L., 1998, Decreased transpiration in poplar trees exposed to 2,4,6-trinitrotoluene, *Environ. Toxicol. Chem.*, **17**, 902-906.

Travers, J.T., Mayfield, J., and Inniss, W.E. 1982, Measurement of electron transport system(ETS) activity in soil, *Microbiol. Ecol.*, **8**, 163-168.