

잔류유분 함유 반출처리토 재활용을 위한 호밀 식재 식물상 토성회복 가능성

박지은¹ · 배범한^{1*} · 주완호² · 배세달² · 배은주²

¹가천대학교 토목환경공학과

²(주)에이치플러스에코

Phyto-restoration Potential of Soil Properties using *Secale cereale* for Recycle of Soils with Residual TPHs (Total Petroleum Hydrocarbons) after Off-site Treatment

Jieun, Park¹ · Bumhan Bae^{1*} · Wanho, Joo² · Seidal Bae² · Enjoo Bae²

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University

²HplusEco, Ltd.

ABSTRACT

The amount of TPH contaminated soil treated at off-site remediation facilities is ever increasing. For the recycle of the treated-soil on farmlands, it is necessary to restore biological and physico-chemical soil characteristics and to remove residual TPH in the soil by an economic polishing treatment method such as phytoremediation. In this study, a series of experiments was performed to select suitable plant species and to devise a proper planting method for the phyto-restoration of TPH-treated soil. Rye (*Secale cereale*) was selected as test species through a germination test, among 5 other plants. Five 7-day-old rye seedlings were planted in a plastic pot, 20 cm in height and 15 cm in diameter. The pot was filled with TPH-treated soil (residual TPH of 1,118 mg/kg) up to 15 cm, and upper 5 cm was filled with horticulture soil to prevent TPH toxic effects and to act as root growth zone. The planted pot was cultivated in a greenhouse for 38 days along with the control that rye planted in a normal soil and the blank with no plants. After 38 days, the above-ground biomass of rye in the TPH-treated soil was 30.6% less than that in the control, however, the photosynthetic activity of the leaf remained equal on both treatments. Soil DHA (dehydrogenase activity) increased 186 times in the rye treatment compared to 10.8 times in the blank. The gross TPH removal (%) in the planted soil and the blank soil was 34.5% and 18.4%, respectively, resulting in 16.1% increase of net TPH removal. Promotion of microbial activity by root exudate, increase in soil permeability and air ventilation as well as direct uptake and degradation by planted rye may have contributed to the higher TPH removal rate. Therefore, planting rye on the TPH-treated soil with the root growth zone method showed both the potential of restoring biological soil properties and the possibility of residual TPH removal that may allow the recycle of the treated soil to farmlands.

Key words : Phytoremediation, Residual TPH removal, Root growth zone, rye, TPH polishing

1. 서 론

토양환경보전법 발효와 새로운 토양오염정화기술 개발 및 경험 축적으로, 국내에서도 유류저장탱크, 송유관 인근 오염지역 및 군부대에 이르기까지 유류오염토양을 물리·

화학적 및 생물학적 공법으로 정화하고 있다. 원위치에서 처리한 처리토는 되메움하거나 현장에 성토하고 있으며, 위치외 처리는 토양을 처리장까지 반출한 다음, 정화기준에 맞게 처리한다. MoE(2013) 통계에 의하면, 반출처리 대상오염물질은 대부분 TPH(total petroleum hydrocarbons)

*Corresponding author : bhbae@gachon.ac.kr

Received : 2014. 1. 13 Reviewed : 2014. 6. 3 Accepted : 2014. 6. 3

Discussion until : 2014. 8. 31

로, 처리 토량은 2007년 184천톤에서 2012년 429천톤으로 지속적으로 증가하여 5년간 평균 311천톤에 이르고 있다.

그러나 정화에 적용되는 공법에 따라 정화된 토양(이하 처리토)은 기존 토성이 변질되거나, 토양의 생물학적 능력을 상실하고, 잔류 유분에 의한 냄새와 독성으로 재활용이 어려워, 비용을 지불하고 위탁처리하거나 매립지에서 최종처분되고 있다. 매년 반출처리하는 유류오염 처리토가 수십만 톤에 이르며, 자원으로 재활용되어야 할 처리토가 토양으로서의 가치를 상실하고 폐기물이 되어 사회경제적 문제를 야기하고 있다. 이에 환경부에서도 반출처리토 재활용을 촉진하기 위해 정화토양의 품질인증제 및 의무사용처 지정 등에 대한 방안을 고려하고 있다(MoE, 2009).

처리토 재활용이 원활하지 않은 원인은 잔류유분에 의한 냄새 외에도, 처리에 적용된 정화공법에 따른 정화 토양의 물리화학적 및 생물학적 특성변화도 중요한 원인이다(Yi et al., 2013). 국내 토양환경보전법 TPHs 정화기준은 1지역, 2지역 및 3지역이 각각 500 mg/kg, 800 mg/kg 및 2,000 mg/kg으로, 잔류 TPHs 냄새로 인해 일반 토지나 농토에 살포할 수 없다. 또한 잔류 TPHs는 유막형성에 의한 발아 억제, 식물 성장 저해 및 생체량 감소 등과 같은 독성으로 작물 수확량 감소 원인이 된다(Choi, et al., 2010). 선별과정에 의한 미세토 함량증가와 유분에 의한 토양점착성 증가로 토양이 때알과 같이 뭉쳐 통기성이 감소하고, 토양 내 식물노화호르몬인 에틸렌 축적으로 인해 식물성장이 저해된다. 식물노화호르몬 에틸렌은 0.4 mg/kg 농도에서 콩과식물의 뿌리혹 발달을 억제하였다(MoE, 2007). 열처리법 혹은 저온열탈착법으로 처리시에는 고온에서 소성처리되어 물리화학적 특성이 변화하면서 영양물질 보유력이 감소하고, 각종 분해자(미생물)가 사멸되어 농작물 생산기반 및 물질순환작용으로서의 토양가치를 상실하게 된다. 이상과 같은 특성을 가진 처리토를 재활용하기 위해 (1) 처리토 잔류 TPHs 제거 (2) 섬유질 공급에 의한 투수성과 통기성 회복, (3) 토양 내 유기물 함량 증가, (4) 토양 내 미생물 활성도 증가 등의 토양성분 회복방안과 동시에, 단기간에 다량의 토양을 경제적으로 처리할 수 있어야 한다.

다양한 처리공법 중에서 식물상 정화공법은 친환경 녹색기술로 저농도 오염토양의 대용량처리에 적절한 경제적 공법이다. 식물을 식재하면 식물 및 미생물 대사과정에서 생성된 유기물질과 영양물질이 토양에 편입되고, 식물에 의하여 토양에 산소가 공급되는 장점이 있다(Gurska et al., 2009). 특히 오염도가 중간 이하인 토양을 식물상정화

법으로 정화하거나 안정화할 때, 적절한 식물종 선택은 정화목표달성에 매우 중요한 인자이다(Salt et al., 1995; Wang and Oyaizu, 2009).

정화식물은 크게 목본과 초본으로 분류되며, 그 특성이 다른 만큼 목적 및 적용 대상도 다르다. 목본으로는 포플러(*Populus nigra* X) (Chang, 2006), *Salix alba* 및 *Salix viminalis*(Mleczeck, et al., 2010), *Salix rubens* 및 *Salix triandra*(Cunha et al., 2012)와 같은 버드나무 및 장대(kenaf, *Hibiscus cannabinus* L.) (Abioye et al., 2012) 등의 연구되었다. 목본은 생체량은 높지만 재배 기간이 초본에 비해 길고 토양에 섬유질 공급을 위해서는 목본과쇄가 필요하여 본 연구 목적에 맞지 않다. 섬유질 공급이 쉬운 초본으로는 알팔파(*Medicago sativa* Riley) (Schwab, et al., 2006), 이탈리아 호밀풀, 수수, 콩, 및 벼를 포함한 12종 초본(Kaimi et al., 2007)과 상추, 밀, 기장, 무, 붉은토끼풀 및 밀 등이 연구되었다(Banks and Schultz, 2005). 다수의 식물로 실험하는 것은 유류 오염토양에 의한 식물독성 발현이 식물종 특이적이기 때문이다(Merkel et al., 2005). 또한 결과산출에 필요한 실험기간이 길기 때문에 선별단계로 발아실험을 선행하여 내오염성을 확인한다(Banks and Schultz, 2005). 지금까지 유류오염토양 정화가 가능한 수중, 수생 및 육상 초본 식물에 대한 많은 연구가 완료되었고, 오염지역 기후 및 토양 적응성, 식물뿌리 깊이, 오염물질 추출능 혹은 분해능, 식재 및 관리 용이성, 수분 흡수 혹은 증발산량이 높은 식물 등을 기준으로 하여 새로운 식물 선정 연구도 지속적으로 진행되고 있다(US EPA, 2001).

오염물질에 대한 내오염성 및 오염물질 제거능 이외에도 식물상정화공법의 성공적 적용에 중요한 식물종 선별 요인으로는 종자/종묘 취득 용이성, 재배기술 확보여부, 단위면적당 식물생산량, 뿌리 구조 등이 있다. 종자 취득 용이성과 재배기술 확보는 식물상정화의 경제성에 직접 연관되기에 새로운 식물종 개발보다는 작물을 사용하는 것이 유리하다. 현장 우점종이 있다면 이미 현장 기후 및 토양 등의 환경조건에 적응해 있으므로, 현장 우점종에서 식물종을 선별하는 것도 고려되어야 할 것이다. 고생체량 식물은 전반적으로 증발산량과 오염물질 제거량이 높고, 경작 후 갈아엎으면 처리토에 다량의 섬유질을 공급할 수 있다. 뿌리구조도 큰 영향을 준다. 직근(tap root)에 비해 수염뿌리(hairy root)는 오염물질과 뿌리조직과의 접촉 면적이 넓고, 유전적 특성과 식물대사 특성이 안정적이며, 뿌리삼출액이 많아 근권미생물 활성을 높이고, 일부가 손상되어도 다른 뿌리 조직이 살아 있어 생존성이 높다

(Huang et al., 2005; Suza et al., 2008).

본 연구는 식물상정화공법으로 처리토를 재활용 가능한 토양으로 전환하기 위한 고생체량 식물을 선별하고, 단기간에 경제적이고 안정적으로 재배하는 방안을 개발하기 위해 수행하였다. 다섯 종의 초본에 대한 발아실험 결과에서 호밀을 선정하고, 처리토에서 생장할 수 있게 고안한 방법으로 식재한 다음, 온실에서 재배하였다. 식물에 대한 식물독성 발현 현상과 광합성 지표를 지속적으로 모니터링하고 지상부 식물생체량과 최종토양의 미생물활성도 변화 및 TPH 제거량을 비교·평가하여, 처리토를 농토로 재활용할 수 있는 가능성을 조사하였다.

2. 실험방법 및 분석방법

2.1. 발아실험

TPH 오염토양에서 식물 종자의 발아정도를 확인하기 위해 발아실험을 수행하였다. 본 연구에서는 유류오염 처리토를 식물로 후처리하여 경제적으로 농경지에 사용가능한 토양으로 전환하는 것이 목적이므로, 단기간에 속성으로 재배가능하고 재배 후에는 토양의 통기성과 투수성을 증진하기 위해 멀칭재로 사용할 수 있는 식물로 선정하였다. 또한 유류오염토양은 탄소성분은 풍부하지만, 질소성분이 결핍되는 경우가 많으므로 질소를 고정할 수 있는 식물도 고려대상에 포함하였다. 선정된 식물종은 외떡잎 식물인 호밀(*Secale cereale*), 옥수수(*Zea mays*)와 쌍떡잎 식물인 해바라기(*Helianthus annuus*) 돌콩(*Glycine soja* Siebold & Zucc.), 쇠별꽃(*Stellaria aquatica*(L.) Scop.)을 포함한 총 5종이었다.

원예용 72구 식물모종판에 TPH 처리토와 대조군으로 원예용 상토를 각각 채운 후, 모종판 한 구당 식물 종자 2개씩 총 144개의 종자를 파종하였다. 파종한 식물모종판은 온실에서 총 15일간(2013년 5월 4일~2013년 5월 18일) 재배하고, 싹이 나온 유식물을 계수하였다. 이 때, 처리토는 에이치플러스에코(주)에서 저온열탈착법으로 처리한 토양을, 원예용 상토는 코코피트 65~70 wt%, 피트모스 13~17 wt%, 질석 6~8 wt%, 제올라이트 3~5 wt%, 펄라이트 5~8 wt%, 수용성비료, 항균물질 및 습윤제 등이 살균된 상태로 배합된 제품을 사용하였다.

2.2. 포트실험

PVC 재질 포트(높이 20 cm, 직경 15 cm)에, 처리구에는 처리토를, 대조구에는 원예용 상토를 각각 15 cm까지 채우고 다짐한 다음, 상토에서 7일간 성장한 건강한 호밀

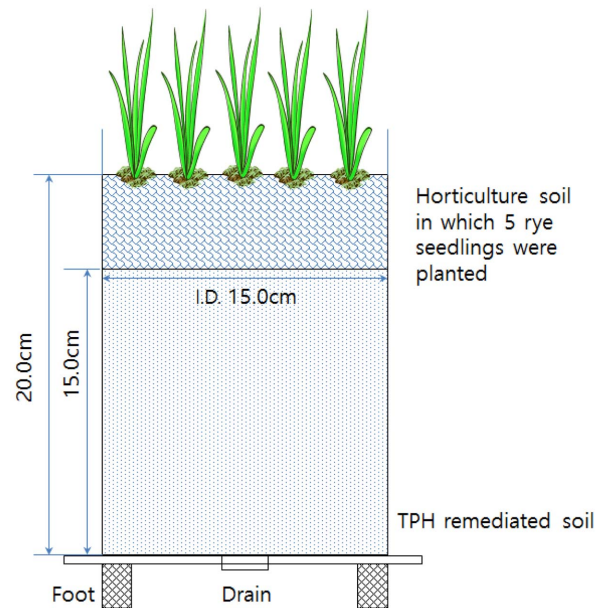


Fig. 1. Schematic diagram of a PVC pot and planting method used in the experiments.

유식물 5개체를 그 상부에 두었다. 이후 상부에 상토를 5 cm 깊이로 채워 식물포트를 완성하였다(Fig. 1). 상토 5 cm를 사용한 것은, 발아실험 중에 처리토 수분이 증발하면 딱딱하게 굳어 물의 투수가 원활하지 않아 식물이 시들기 시작하고, 처리토에서 싹이 튼 유식물 성장 저하가 관측되었기 때문이다. 이에 식물뿌리가 자리를 잡고 성장할 수 있는 공간을 제공하기 위해 첨가하였다. 실험은 호밀식재 처리토(처리구), 호밀식재 상토(대조구), 호밀 비식재 처리토(무식재구)로 구성하였고, 모두 2반복 실험하였다. 실험기간 중, 초기식재 시 복합비료(N:P:K = 21:17:17) 3 g을 시비하고, 1주일 간격으로 2 g 씩 총 3회 시비하였다. 또한 비교를 위해 발아율이 높았던 옥수수를 처리토에 식재하였다. 포트는 2013년 5월 10일부터 2013년 6월 17일까지 38일간 온도조절이 없는 자연 상태의 온실에서 재배하면서, 2일에 한 번 100 mL 씩 관수하였다.

2.3. 분석방법

토성은 No. 270체로 모래를 먼저 거르고, 침강실린더로부터 1회에 미사와 점토를, 2회에 점토를 취하는 micro-pipette method(Gee and Bauder, 1986)으로 측정하고, 미국 USDA 삼각토성표로 결정하였다. 토양 pH는 습윤 토양 5 g에 증류수 25 mL을 넣고 1시간 진탕 후 pH meter로 측정하였다. 강열감량(Loss on Ignition, LOI)은 건조토양 5 g을 도가니에 담아 600°C 고로에서 1시간 소각 후 건조량 당 백분율로 계산하고, 토양 유기물함량

(Organic Content, OC)는 다음의 식 (1)에 의해 결정하였다(Kitila, et al, 2011).

$$OC(\%) = [(0.458 \times LOI) - 0.4] \times 1.724 \quad (1)$$

토양 DHA(DeHydrogenase Activity)는 Pepper and Gerba (2004)의 방법에 따라 건조토양 6g에 TTC(triphenyl-tetrazolium chloride)를 넣고 1주일간 배양하여 생성된 TPF(triphenyl formazan)를 측정하였다. 식물 광합성 활성은 Hanstech Handy PEA로 측정하였다. 측정원리는 다음과 같다. 식물의 잎이 햇빛을 흡수하여 광합성에 필요한 에너지를 소모하고 여분의 에너지는 열선 혹은 형광선으로 재방출한다. 식물이 스트레스, 독성물질, 오염물질 및 영양소 부족 등으로 광합성 활성이 감소하면, 광합성에 사용되는 에너지가 줄어드는 대신 형광선 방출량이 증가한다. 따라서 일정한 조건에서 방출되는 형광선량을 측정하면, 식물 잎에서의 광합성 활성을 다음의 식 (2)로 평가할 수 있다(Hansatech Instrument Ltd., 2006).

$$F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m \quad (2)$$

여기서, F_o 는 fluorescence origin의 약어로, 광합성시스템 II에 있는 안테나 구조의 클로로필 a에서 배출되는 기저 형광선량을 의미하며, F_m 은 maximum fluorescence로 충분한 빛이 조사되어 있을 포화시키고 클로로필 전지수용체인 Q_a 가 완전 환원되었을 때 방출되는 형광선의 최대량을 의미한다. F_v 는 형광선 방출량으로 $F_m - F_o$ 로 표현되며, 일반적으로 건강한 광합성 시스템일수록 F_v/F_m 은 증가하며, 그 최대값은 0.85로 보고되고 있다(Hansatech Instrument Ltd., 2006).

실험이 종료된 다음, 호밀 지상부는 수확하여 60°C에서 24시간 건조하여 건조중량을 측정하였다. 초기 및 식물재배 후의 TPH 농도 및 토양의 이화학적 성분(T-N, T-P 및 available P)는 서울대학교 농업과학공동기기센터(NICEM)에 의뢰하여 분석하였다. 초기 토양에 대한 NICEM 의뢰 이화학적 분석 이외에 모든 실험과 분석은 최소 2배수 이상 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 처리토 토성과 생물학적/물리화학적 특성

실험에 사용된 처리토의 토성을 측정한 결과는 Table 1과 같다. 정화 선별과정에서의 점토 유실로 모래 57.6%, silt 41.9%, clay 0.4%인 사양토(sandy loam)이었다. 처리토는 모래함량이 높음에도 불구하고 배수가 불량하였고, 건조시키면 단단하게 굳는 특성이 있었다. 상기 식 (1)에 의한 유기물 함량 4.86%로 계산한 C:N 비율은 347:1로, 탄소함량이 높은 침엽수림 혹은 활엽수림에서 관측된 C:N 비율인 178~218:1보다 훨씬 높은 값을 보이고 있다(Han et al., 2008). 평형상태의 일반토양 C:N비는 12:1이며(BC MoA, 2010), 농토에 C:N 비가 높은 처리토를 혼합하면 식물에서 질소기아현상이 발생하므로 개선되어야 할 것이다. 또한, 정화과정에서의 열처리로 인해 토양미생물이 거의 사멸하였기에 처리토 DHA는 0.74 g-TPF/g-dry soil로 미생물활성이 매우 낮았다. 초기 TPH는 1,118 mg/kg이었다. 토양 품질은 물질순환, 유기물 전환률 및 생물학적 활성 및 생체량 등과 연관된 최소한의 물리적, 생물학적 및 화학적 매개변수로 판단한다(Dick, 1996; Nielsen and Winding, 2002). Table 1에서와 같은 토양 특성 매개변수로 보면, 처리토는 배수 및 통기성이 불량하고 과도한 C:N 비율과 낮은 미생물 활성도 및 잔류 TPH로 인해 그대로 농토에 재활용하기에는 부적합하다.

Table 1. Initial physico-chemical characteristics of TPH remediated soil

Parameter	Value
pH	7.16 ± 0.07
Water content (%)	23.0 ± 1.04
LOI (%)	7.03 ± 0.30
DHA(g-TPF/g-dry soil) ^a	0.04 ± 0.14
T-N (%) ^b	0.014
T-P (mg/kg) ^b	219.97
Available P, P ₂ O ₅ (mg/kg) ^b	16.87
TPH (mg/kg) ^b	1,118

^aWithout glucose additon

^bAnalyzed at NICEM and only the final values were provided.

Table 2. Germination rate(%) of 5 plant species sown on TPH remediated soil and horticulture soil

Plant	Number of seed	TPH remediated soil	Horticulture soil
Rye (<i>Secale cereale</i>)	144	70	84
Sunflower (<i>Helianthus annuus</i>)	72	37	26
Wild soybean (<i>Glycine soja</i> Siebold & Zucc.),	72	67	69
Maize (<i>Zea mays</i>)	72	72	71
Water chickweed (<i>Stellaria aquatica</i> (L.) Scop.)	144	1	31

3.2. 발아실험

식물종 선택을 위하여 실시한 발아실험의 결과는 다음의 Table 2와 같다. 이 때 발아 판별기준은 외떡잎식물은 3엽 이상, 쌍떡잎식물은 2엽 이상이 완벽한 형태로 자란 것을 기준으로 하였다. 처리토에서의 발아율은 옥수수 > 호밀 > 돌콩의 순이었다. 상토에서의 발아율은 호밀 > 옥수수 > 돌콩의 순으로 호밀이 가장 높았다. 옥수수는 처리토와 상토에서의 발아율이 거의 동일하였다. 또한 해바라기는 처리토 및 상토에서 각각 37% 및 26%로 발아율은 낮았으나, 처리토에서 더 높은 발아율을 보였다. 반면, 쇠별꽃은 상토에서 31%로 발아율이 낮아 약 70%가 발아하지 않는 종자임을 감안하더라도, 처리토에서는 99%가 발아하지 않아 가장 큰 발아저해를 보였다.

발아한 유식물의 초기 성장에도 처리토의 악영향은 뚜렷하였다. 상토에서 자란 식물은 Fig. 2에서와 같이 처리토에서 자란 식물에 비해 성장이 2배 이상 빠르고, 잎이 짙은 녹색이었다. 그 중에서, 유식물 성장에서 큰 차이가 나지 않는 식물은 호밀로, 처리토에서의 초기 성장도 왕성하였다. 또한 호밀은 타감작용(allelopathy)으로 잡초를 억제하고 토양으로 환원하면 지력을 증진하는 녹비식물(Lee et al, 2010)로 본 연구 목적에 부합하여 포트실험에 호밀을 적용하였다.

3.3. 포트실험

식재한지 일주일 후부터 처리토에 식재한 호밀 지상부에서 잎이 노랗게 변하는 황백화 현상이 나타나고, 주로 주변부 잎이 탈색되면서 시들었다. 이는 잔류 TPH에 의한 식물독성이 발현된 것으로 판단된다. 다른 연구에서는 2개월 된 목본을 TPH 200~2,000 mg/kg 오염토양에 식재하자 초기에 식물독성이 발현되었는데(Chang, 2006), 본 연구에서는 15일된 유식물을 식재하여 초기 생체량 대비 오염도가 높아 심각한 황백화 현상이 발생한 것이라 판단된다. 식재 약 2주 후에서야 호밀이 이식에 의한 스트레스와 TPH 독성을 견디어 내고, 황백화 현상이 사라짐과 동시에 왕성히 성장하기 시작하였다. 그러나 외견상으로도 상토 식재 호밀에 비해 처리토 식재 호밀의 초장이 짧고 가지의 수도 적으며 전체적인 지상부 생체량이 많지 않았다. 식물의 성장과 관련된 매개변수를 비교하기 위해, 식재 38일 후 호밀 광합성 활성을 5회 측정하였다(Table 3). 측정 결과, 처리토에 식재한 호밀은 평균 0.808 Fv/Fm, 상토에 식재한 호밀은 평균 0.796 Fv/Fm로, 두 처리구 간에 유의적인 차이는 없었다. 반면에, 호밀의 지상부 생체량은 큰 차이를 보였는데, 처리토 식재구의 지상부 생

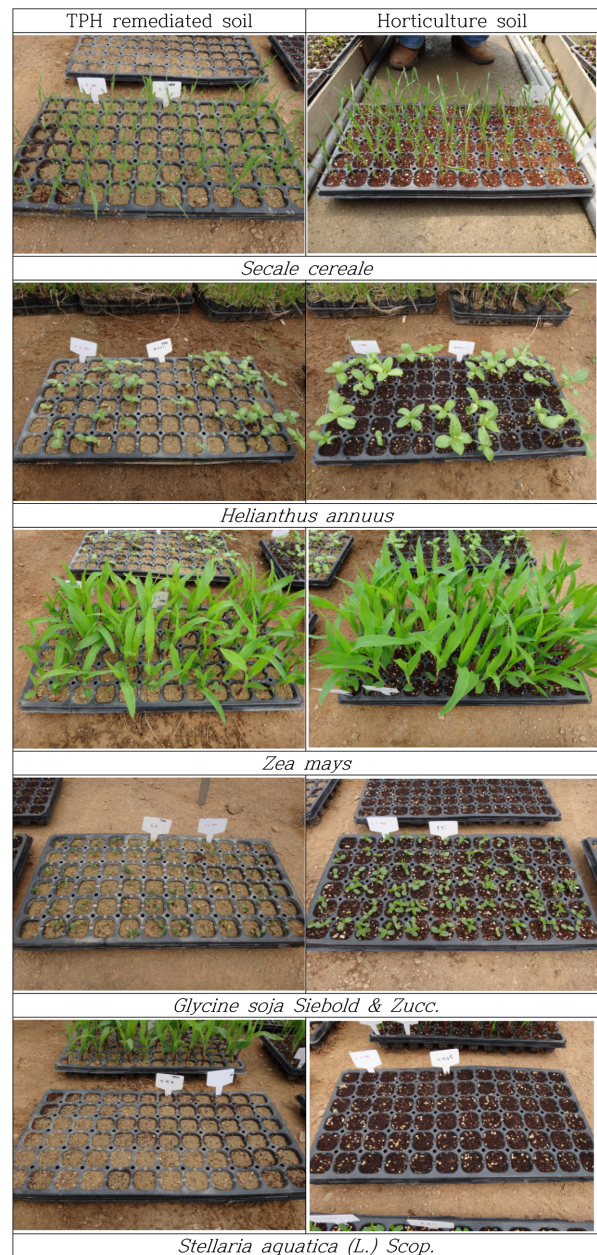


Fig. 2. Germination and early growth of plant seedlings on TPH remediated soil and horticulture soil.

체량 평균값은 96.6 g으로 상토에 식재한 호밀 지상부 생체량 139.26 g에 비해 약 30.6% 감소하였다.

유류오염토양에 의한 식물성장저해는 일반적이다. 벼과 수변식물인 *Spartina patens*를 원유 640 mg/g에 오염된 토양에 식재하여 온실에서 재배한 결과, 줄기 밀도, 지하부 및 지상부 생체량 등과 같은 생체량 지수가 대조구에 비해 50% 이상 감소하였다(Lin and Mandelssohn, 2008). Masakorala et al.(2013)에 의하면 녹두(mung bean, *Vigna radiata*)를 유류오염토양에 식재하여 발아율, 대사 및 초

Table 3. Comparison of plant and soil characteristics for each treatment at the end of pot experiment in a greenhouse

Parameter	TPH remediated soil	Horticulture soil	Blank
Photosynthetic activity	0.808 ± 0.01	0.796 ± 0.03	—
Above-ground biomass (g)	96.6 ± 1.07	139.26 ± 29.44	—
T-N (%)	0.032 ± 0	—	0.018 ± 0.001
T-P (mg/kg)	301.68 ± 0.64	—	230.79 ± 2.52
Available P, P ₂ O ₅ (mg/kg)	15.78 ± 3.30	—	8.15 ± 0.15
DHA(g-TPF/g-dry soil) ^a	138.9 ± 6.5*	—	8.6 ± 1.6
TPH (mg/kg)	732.5 ± 193	—	912 ± 139

^aValues are from the soil that has not received glucose before incubation

*p < 0.05

**Fig. 3.** Comparison of root development of rye after 38 days of cultivation in TPH remediated soil and horticulture soil.

기 성장에 대하여 측정한 결과, TPH 농도 1% 이하에서도 식물성장 저해가 관측되었다. 특히, TPH 오염도가 증가함에 따라 식물체 클로로필 함량이 1% 일 때 1.17% 감소하였고, 2.9%에서는 무려 45.64%가 감소하였다. 이 상과 같이 유류 독성에 의한 클로로필 함량 감소와 그에 따른 광합성 활성 둔화가 식생체량 저감으로 귀착되는 것 이라 판단할 수 있다. 이상의 연구에서도 관측된 바와 같 이, 잔류 TPH의 독성에 의한 초기 호밀성장기에 발생한 황백화 현상 등이 지상부 생체량 감소원인이라 할 수 있다.

지하부 생체량도 주요한 식물활성지표이다. 호밀 지하 부를 수확하기 위해 Fig. 3과 같이 포트에서 토양을 분리 하자 각 처리구마다 광범위한 뿌리발달이 확인되었다. 그 러나 상토 식재구에서는 코코피트와 호밀뿌리가 결합되어 분리할 수 없었고, 처리토 식재구에서는 토양 점성으로 인 해 세척과정에서 2차 뿌리가 거의 유실되었다. 이에 지하 부 생체량을 정확히 측정 할 수 없었다.

최종 수확토양의 T-N 및 T-P는 처리토 호밀식재구에서 각각 0.032% 및 301.68 mg/kg이었고, 무식재구에서는 각 각 0.018% 및 230.79 mg/kg으로 Table 1에 기술된 초기 값에 비해 증가하였다. 이는 실험과정에서 사용한 복합비 료에 기인한 것이라 판단된다. 가장 큰 변화는 미생물활 성 지표인 DHA이다. 처리토 호밀식재구에서의 DHA는 초기 0.74에서 138.9 g-TPF/g-dry soil로 약 186배 증가

한 반면, 무식재구에서는 8.15 g-TPF/g-dry soil로 10배 정도 밖에 증가하지 않았다. 미생물 활성도 증가는 뿌리 의 발달에 기인하는 것이라 사료된다. 뿌리에서 배출되는 삼출액과 산소전달, 뿌리 발달로 인한 토양 내 통기성 증 가가 가장 큰 원인이라 판단된다.

이상과 같은 원인에 의해, 초기 TPH 1,118 mg/kg 토 양에 호밀 유식물을 정식하여 38일간 재배한 토양의 잔류 TPH가 732.5 mg/kg으로 초기 대비 34.5%가 제거되었다. 무식재구에서도 관수에 의한 용출, 자연감쇄 및 휘발 등 으로 TPH가 18.4% 제거되어, 순제거율은 16.1%로 관측 되었지만 t-test에 의한 유의성 검정 결과(p < 0.05), 유의 하지는 않았다. 이는 두 개의 처리구 중에서 하나의 처리 구 값이 너무 높은 것에 기인하는 것이라 판단된다. 타 연구에서 TPH 1,000 mg/kg 토양에 4개월 된 목본을 60 일 간 재배한 결과, TPH 순제거율은 9.3%이었다(Chang, 2006). 이 차이는 목본과 초본의 성장특성이 다르기 때문 이라 사료된다. 일반적으로 초본은 목본보다 단기간에 빨 리 성장하고 사멸하므로 본 연구와 같이 저농도 오염토의 단기 처리에 적합하며, 목본은 초기성장은 느리지만 장기 적으로 생체량이 크고 대심도까지 뿌리가 발달하므로 고 심도 및 고농도 장기처리에 적합하다. 따라서 하나의 지 표로 단순하게 비교하기는 어렵지만, 본 연구목적에는 호 밀이 적절한 식물종인 것이라 할 수 있다.

식물의 식재 방법도 매우 중요한 변수이다. 발아실험에 서 발아율이 호밀보다 높았고 생장도 빨랐던 옥수수를 상 토 5 cm를 넣지 않은 상태로 유식물을 식재하여 동일한 조건에서 재배하였다. 상토에서는 옥수수가 왕성하게 생 장하였지만, 상부 5 cm의 뿌리 발달공간이 없는 조건으로 재배한 처리토에서는 옥수수가 제대로 성장하지 못하였다 (Fig. 4). 이 때, 두 식물의 성장이 워낙 큰 차이가 나서 식물생체량은 측정하지 않았다. 옥수수는 호밀과 동일한 수염뿌리 구조를 가지고 있으나, 호밀이 좁고 깊게 뿌리

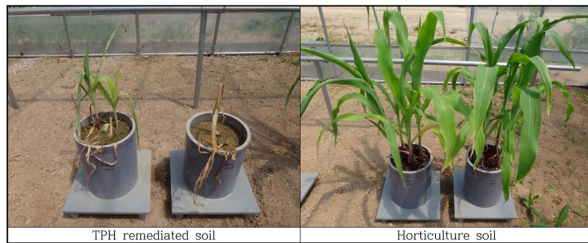


Fig. 4. Comparison of maize growth in horticulture soil and in TPH remediated soil which does not have a 5 cm upper normal soil zone for root development.

가 나는 반면, 옥수수는 초기에 넓고 그리고 나중에 깊게 자라는 특성을 가지고 있다. 그러므로 옥수수는 초기에 뿌리가 넓게 성장할 공간을 갖지 못하여 고사한 반면, 호밀은 본 연구에서 개발한 방법과 같이 상토 5 cm의 뿌리 공간으로 인하여 성장이 가능하였다.

4. 결 론

식물상정화공법으로 반출처리한 처리토를 잔류 TPH를 제거하고 토성의 자연적 성질을 회복하여 농지에 재활용 가능한 토양으로 전환하기 위한 식물중 선별과 재배법 개발 연구를 진행하였다. 적용 식물 선별을 위해 발아실험을 실시하고, 호밀을 적용식물로 선정하였다. 포트실험에서 호밀 유식물을 상부 5 cm에 식물이 자랄 수 있는 뿌리성장공간을 두는 방법으로 식재한 다음, 온실에서 재배하고 실험 종료시 지상부 생체량, 식물 광합성 지표, 토양 내 미생물 활성 변화 및 TPH 제거량을 대조군 및 무처리군과 비교하였다.

포트 실험에서 정식한 호밀의 초기 성장 시, 처리토 잔류 TPH에 의해 황백화 현상이 관측되었지만, 호밀은 독성을 견디고 성장하였다. 그 결과, 재배 38일 후 처리토 식재 호밀의 지상부 생체량은 상토 식재 호밀에 비해 30.6% 감소하였다. 반면, 식물활성 매개변수인 광합성 활성에서는 차이가 없었다. 따라서 초기 유식물의 독성이 호밀 지상부 성장에 중요하며 이를 완화할 수 있는 방안도 동시에 고려되어야 할 것이다. 본 연구에서는 상부에 5 cm의 비오염토양을 두어 호밀의 수염뿌리가 자랄 수 있는 공간을 두었으나, 이 공간을 더욱 깊게 하는 방법, TPH 분해 미생물 식중법 등도 고려대상이 될 수 있을 것이다.

호밀 식재 토양에서는 무식재구에 비해 토양 DHA가 초기값에 비해 186배 이상 증가하였고, 무식재구에 비해 TPH 제거율이 18% 이상 높았고, TPH 순제거율은 16.1%

이었다. 이 결과는 식물성장에 의한 직접 흡수 및 분해, 뿌리발달로 인한 토양 내 투수성 및 통기성이 증가, 삼출물에 의한 토양미생물 활성 증가 및 생물학적 분해 증진의 상호작용에 의한 것으로 판단된다. 더욱이 호밀은 대표적인 녹비식물로, 초봄부터 약 3개월 이상 재배가 가능하고, 성장 후 생체를 토양으로 환원하면 토양비옥도를 높이고 섬유질 공급에 의한 통기성이 증가하여 농지 및 산지에 재활용이 가능한 토양으로 처리할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 (주)에이치플러스에코와 환경부 환경산업기술원 GAIA Project No. 173-111-036에서 일부 지원으로 수행되었습니다.

References

- Abioye, O.P., Agamuthu, P., and Abdul Aziz, A.R., 2012, Phytotreatment of soil contaminated with used lubricating oil using *Hibiscus cannabinus*, *Biodegradation*, **23**, 277-286.
- Banks, M.K. and Schultz, K.E., 2005, Comparison of plants for germination toxicity tests in petroleum- contaminated soils, *Water Air Soil Pollut.*, **167**, 211-219.
- British Columbia Ministry of Agriculture (BC MoA), 2010, The Canada - British Columbia Environmental Farm Plan Program, Reference Guide, 8-1 p.
- Chang, S.-W., 2006, Phytoremediation study of diesel contaminated soil by indigenous *Poplar* tree, *J. Soil Groundw. Environ.*, **11**(5), 51-58.
- Choi, M.-Z., Kim, J.-Y., Kim, J.-H., and Choi, S.-I., 2010, A study on effects of oil contaminated soil on the growth of plant, *J. Soil Groundw. Environ.*, **15**(1), 50-56.
- Cunha, A.C.B., Sabedot, S., Sampaio, C.H., Ramos, C.G., and Silva, A.R., 2012, *Salix rubens* and *Salix triandra* species as phytoremediators of soil contaminated with petroleum-derived hydrocarbons, *Water Air Soil Pollut.*, **223**, 4723-4731.
- Dick, R., 1996, Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: Doran J, Jones A (eds) *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America, Madison, 121-156.
- Gee, G.W. and Bauder, J.W., 1986, Particle-size Analysis, In Klute A., Eds., *Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and mineralogical methods*, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, 383-411.
- Gurska, J., Wang, W.X., Gerhardt, K.E., Khalid, A.M., Isherwood, D.M., Huang, X.D., Glick, B.R., and Greenberg, B.M., *J. Soil Groundw. Environ.* Vol. 19(3), p. 25-32, 2014

- 2009, Three year field test of a plant growth promoting rhizobacteria enhanced phytoremediation system at a land farm for treatment of hydrocarbon waste, *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 4472-4479.
- Hansatech Instrument Ltd., 2006, Handy PEA Operation Manual, 6th Edition, 12 p.
- Han, S.I., Cho, M.H., and Whang, K.S., 2008, Comparison of phylogenetic characteristics of bacterial populations in a Quercus and Pine humus forest soil, *Kor. J. Microbiol.*, **44**(3), 237-243.
- Huang, X.-D., El-Alawi, Y., Gurska, J., Glick, B.R., and Greenberg, B.M., 2005, A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soils, *Microchemical J.*, **81**(1), 139-147.
- Kaimi, E., Mukaidani, T., and Tamaki, M., 2007, Screening of twelve plant species for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil, *Plant Prod. Sci.*, **10**(2), 211-218.
- Kitila, H., Godbold, K., and D., Omed, H., 2011, Assessment and comparison of soil carbon pool under Silvo-pastoral agroforestry system in the north wales, UK, *IJSER*, **2**(3), 1-15.
- Lee, B.M., Lee, J.H., Oh, Y.J., Lee, S.B., Kang, C.K., Jee, H.J., and Lee, J.H., 2010, Weed occurrence as influenced by living mulch, soil, incorporation, and cutting treatment of rye in organic soybean field, *Kor. J. Weed Sci.*, **30**(2), 167-170.
- Lin, Q. and Mendelssohn, I.A., 2008, Determining tolerance limits for restoration and phytoremediation with *Spartina patens* in crude oil-contaminated sediment in greenhouse, *Arch. Agron. Soil Sci.*, **54**(6), 681-690.
- Masakorala, K., Yao, J., Chandankere, R., Yuan, H., Liu, H., Yu, C., and Cai, M., 2013, Effects of petroleum hydrocarbon contaminated soil on germination, metabolism and early growth of green gram, *Vigna radiata* L. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **91**, 224-230.
- Merkel, N., Schultze-Kraft, R., and Infante, C., 2005, Phytoremediation of petroleum-contaminated soils in the tropics-assessment of tropical grasses and legumes for enhancing oil-degradation, *Water Air Soil Pollut.*, **165**, 195-209.
- Mleczek, M., Paweł Rutkowski, P., Rissmann, I., Kaczmarek, Z., Golinski, P., Szentner, K., Strazynska, K., and Stachowiak, A., 2010, Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*, *Biomass Bioenergy*, **34**, 1410-1418.
- Ministry of Environment (MoE), 2007, Guideline for Contaminated Soils Remediation, Ministry of Environment, 179 p.
- Ministry of Environment (MoE), 2009, Study on the Management of Off-Site Remediated Soil, Korean Environment Corporation. 134 p.
- Ministry of Environment (MoE), 2013, Data for Contaminated Soil Remediation (in Excel format), 2-3.
- Nielsen, M. and Winding, A., 2002, Microorganisms as Indicators of Soil Health, National Environmental Research Institute, NERI Technical Report No. 388, Denmark, 13 p.
- Pepper, I.L. and Gerba, C.P., 2004, Environmental Microbiology, 2nd Edition, Elsevier Academic Press, Burlington, MA, USA, 71-76.
- Salt, D.E., Blaylock, M., Kumar, P., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I., and Raskin, I., 1995, Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants, *Nat. Biotechnol.*, **13**, 468-474.
- Schwab, P., Banks, M.K., and Kyle, W.A., 2006, Heritability of phytoremediation potential for the Alfalfa cultivar Riley in petroleum contaminated soil, *Water Air Soil Pollut.*, **177**, 239-249.
- Suza, W., Harrks, R.S., and Lorence, A., 2008, Hairy roots: From high-value metabolite production to phytoremediation, *Electronic Journal of Intergrative Biosciences*, **3**(1), 57-65.
- US EPA, 2001, Brownfields Technology Primer: Selecting and Using Phytoremediation for Site Cleanup, Office of Solids Waste and Energy Response, EPA 542-R-01-00, 5 p.
- Yi, Y., Kim, G., and Sung, K., 2013, Effects of soil remediation methods on the biological properties of soils, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(3), 71-81.
- Wang, Y. and Oyaizu, H., 2009, Evaluation of the phytoremediation potential of four plant species for dibenzofuran-contaminated soil, *J. Hazard. Mater.*, **168**, 760-764.