

2, 4, 6-trinitrotoluene에 대해 내성을 지닌 토착 식물종 선정에 대한 연구

배범한 · 김선영* · 이인숙* · 장윤영**

경원대학교 토폭환경공학과, *이화여자대학교 생물과학과, **광운대학교 환경공학과

A Study on the Screening of 2,4,6-trinitrotoluene Tolerant Indigenous Herbaceous Plants

Bumhan Bae · Sun-Young Kim* · In-Sook Lee* · Yoon-Young Chang**

Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungwon University

**Dept. of Biological Science, Ewha Womans University*

***Dept. of Environmental Eng., Kwangwoon University*

ABSTRACT

To select a suitable indigenous plant for the phytoremediation of TNT contaminated soil, eight representative species of native grasses were tested to identify TNT toxicity thresholds. The threshold was determined based on various factors including cumulative seed germination, root and shoot length, fresh biomass, and the amount of water uptake under various TNT concentrations. Phytotoxic effect of TNT on plants was increased with the increase in TNT concentration but the degree was varied between grass species. Concentrations up to 60-80mgTNT/liter did not affect germination of *Abutilion avicennae*, *Echinochloa crusgalli* var. *frumentacea*, and *Aeschynomene indica*.

Phytotoxicity threshold inhibition (50%) of *Abutilion avicennae*, *Echinochloa crusgalli* var. *frumentacea*, *Aeschynomene indica* were 5 - 40 mg TNT /liter for root length, 50 - 73 mgTNT/Liter for shoot length and 68 - 99 mgTNT/Liter for fresh biomass during 14days of seedling exposure. Root and shoot growth as well as fresh biomass decreased as TNT concentration increased. In addition, the amount of water uptake decreased with increasing TNT concentration in *Abutilion avicennae* and *Aeschynomene indica*. Comparison of toxicity thresholds for the tested grass species showed that sensitivity of plants to TNT was in the order of root length > shoot length > fresh biomass > germination rate. From these results, we concluded that *Abutilion avicennae* and

Aeschynomene indica had tolerance to TNT among the species tested.

Key Words: toxicity thresholds, 2,4,6-trinitrotoluene, native grasses, *Abutilion avicinnae*, *Aeschynomene indica*

요약문

TNT를 제거하기 위한 식물종을 선정하기 위해 8종의 대표적인 야초류를 이용하여 TNT 식물독성 임계점을 측정하였다. 독성 임계점은 TNT 농도변화에 대한 발아율, 유식물의 뿌리와 지상부의 생장을, 생체량 및 수분 흡수 능력 등을 비교하여 결정하였다. TNT가 식물에게 미치는 독성효과는 오염물의 농도와 식물종에 따라 다르게 나타났다. 60-80 mgTNT/L 농도는 어저귀, 식용파, 자귀풀 종자의 발아율에 영향을 미치지 못하였다. 발아 후 14일 동안 어저귀, 식용파, 자귀풀의 뿌리 생장에 있어 식물 독성 임계점(50%) 농도는 5 - 40 mgTNT/L이며 지상부 생장은 50 - 73 mgTNT/L, 생체량은 68 - 99 mgTNT/L이다. 뿌리와 지상부의 길이, 생체량은 TNT농도가 증가함에 따라 감소하였으며 수분 흡수량도 감소하였다. 야초류의 서로 다른 독성 임계점을 비교해 보면 뿌리 길이 > 지상부 길이 > 생체량 > 발아율 순으로 TNT에 대해 민감하게 반응하였다. 실험 결과, 8종의 식물 중에서 어저귀와 자귀풀은 TNT에 대해 내성을 지닌 종으로 판명되었다.

1. 서 론

제1차, 2차 세계 대전, 한국 전쟁, 베트남 전쟁 등 을 거치면서 전세계적으로 주요 재래 무기나 핵무기의 원료로 고폭발성 물질이 많이 쓰여졌다. 대표적인 폭발성 물질 TNT(2,4,6-trinitrotoluene), RDX(hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine), HMX(octahydro- 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine), 니트로글리세린(nitroglycerin) 등은 대부분 니트로기를 포함한 유기 화합물이다. 이 중 TNT ($C_7H_6N_3O_6$)는 1개의 방향족 고리를 가진 분자량 227의 유기 독성 물질로 토양과 물에 오염될 경우 분해가 잘 안 되는 안정한 물질이며 물에서는 제한된 용해도(100-120mg/L at 298 °K)를 가진다. TNT는 다른 유기 화합물과 달리 electron-withdrawing nitro group에 의해 화학적, 생물학적 산화와 가수분해가 잘 이루어지지 않는 물질이며 토양 입자에 대한 흡착력이 낮아 폭우 시 토양으로부터 쉽게 탈착되어 지하수를 통해 빠르게 이동하고 토양과 지하수를 오염

시키므로 오염지역을 정화하기 어렵다¹⁾.

TNT는 곰팡이, 효모, 세균 등의 성장을 억제하고 돌연변이와 유전자변이를 일으키며 사람의 피부를 자극하고, 호흡기 계통의 장애, 뇌혈, 간에 대한 발암물질로 알려져 있어 미국 환경보호청(US EPA)에서는 TNT를 priority pollutants로 발암 가능한 물질(Class C)로 규정하고 있다²⁾. 따라서 무기제조공장과 군사지대, 군대 사격장의 오염된 토양이나 지하수들은 시급한 복원을 필요로 하고 있다.

TNT로 오염된 토양의 복원에는 물리화학적인 공법, 생물학적 공법 등 매우 다양한 기술이 적용될 수 있다. 그 중에서 식물상 복원 공법(Phytoremediation)이 최근 고폭물질로 오염된 지역에 대한 정화기술로 많은 주목을 받고 있다. 식물상 복원공법이란 유기·무기 화합물로 오염된 지역을 정화하기 위해 식물을 이용하는 방법으로 미생물을 이용한 bioremediation 보다 더 높은 농도의 오염물에 대해 내성을 가지며 경제적이고 친환경적인 공법이다. 유기 오염 물질을 제거하는 식물의 메커니즘은 첫째,

뿌리를 통해 식물체 내로 오염물을 직접 흡수하여 식물에 무독한 중간 물질로 변환시킨 후 축적하며 둘째, 휘발성 오염물질을 공기를 통해 잎으로 직접 흡수한다. 셋째, 뿌리를 통해 삼출액(exudates)과 효소를 분비하여 식물근권(rhizosphere) 내 미생물에 의한 생화학적 분해를 촉진시킨다^{3~6}.

Phytoremediation 공법의 적용에 있어 가장 중요한 단계는 특정 오염물질에 대해 내성을 지닌 뿐 아니라 오염물을 흡수하여 분해하는 능력을 지닌 식물체를 선정하는 것이다. 국내에 자생하는 토착 야초류(native grasses)는 내성의 범위가 넓어 다양한 온도 조건과 우리나라의 토양에 쉽게 적응하여 군집을 형성하며, 넓은 뿌리 표면적을 가지고 있어 미생물에 의한 생물학적 분해를 강화시킬 뿐만 아니라 높은 증산량으로 뿌리 근처에 있는 오염물의 이동을 감소시켜 오염된 토양을 효과적으로 정화시킬 수 있는 식물군이라 볼 수 있다. 또한, 외래종을 사용할 때 발생할 수 있는 국내 자연 생태계의 교란 등을 방지 할 수 있다.

본 연구의 목적은 TNT로 오염된 토양의 phytoremediation의 적용에 사용할 수 있는 식물체를 선정하기 위해 국내의 토착 야초류 7종과 외래종 1종을 다양한 농도의 TNT에 노출하여 발아율, 유식물의 뿌리와 지상부의 생장속도, 생체량, 물흡수 능력 등을 비교하여 TNT의 식물 독성 효과를 알아보고 TNT로 오염된 토양을 정화시킬 수 있는 내성종을 선별하는 것이다.

2. 실험

2.1 식물의 종자 수집

2000년 6월에 농진청(수원 소재)으로부터 7종의 국내산 야초류 종자를 분양받았다. 이들은 어저귀, 식용피, 물피, 돌피, 자귀풀, 텔비름, 여뀌 바늘이며 오차드글라스는 종자 상회에서 구입하였다. 이들 종자는 TNT가 발아에 미치는 영향과 발아 후 유식물(seedling)에 대한 생장 억제 효과의 연구에 사용되었다.(Table 1)

2.2 내성 실험

TNT(99%, ChemService Co.)는 HPLC용 메탄올에 녹여 stock을 준비하였다. 3g agar/L을 포함하는 무영양 배지를 120도에서 20분간 멸균하고 TNT stock 용액을 agar 용액에 희석하여 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 mgTNT/L의 고체배지를 준비한다. 종자(Table 1)의 표면을 70% 에탄올에서 1분간, 하이포염소산(sodium hypochlorite)에서 10분간 잘 교반하여 살균한 뒤, 멸균수를 이용해 세척하였다. 세척한 종자 15개씩을 각각의 plate에 옮긴다. plate는 TNT의 광분해 및 발아를 위하여 알루미늄박으로 감싼 뒤 실내온도 25도°C, 습도 60%를 유지한 growth chamber에서 14일간 발아 상태를 관찰하였다. 모든 실험은 TNT의 광분해를 막기 위해 어두운 곳에서 실행하였다. 14일 후 농도별로 15개체씩 무작위로 수거

Table 1. Korea native Grasses for toxicological Tests

Scientific Name	Local Name	Family	Habit
<i>Abutilion avicinnae</i>	어저귀	아욱과	1년초
<i>Aeschynomene indica</i>	자귀풀	콩과	1년초
<i>Echinochloa crusgalli var. frumentacea</i>	식용피	벼과	1년초
<i>Echinochloa crusgalli var. oryzicola</i>	물피	벼과	1년초
<i>Echinochloa crusgalli</i>	돌피	벼과	1년초
<i>Dactylis glomerata</i>	오차드글라스	벼과	다년초
<i>Amaranthus retroflexus</i>	텔비름	비름과	1년초
<i>Ludwigia prostrata</i>	여뀌바늘	바늘꽃과	1년초

하여 뿌리와 지상부의 길이 및 생체량을 측정하였다. 이 때, 새순(radicle)이 발생한 종자는 발아 가능한 종자(germination capacity)로 취급했으며 1cm 이상 생장한 종자는 유식물로 취급하였다. 발아 실험은 각 농도 당 3반복씩 시행하였다.

2.3 식물체의 수분 흡수 능력 실험

성체 어저귀와 자귀풀을 이용하여 TNT가 뿌리를 통한 수분 흡수 능력에 미치는 영향을 알아보았다. 0, 3, 6, 12, 24, 48 mgTNT/L에서 어저귀와 자귀풀을 4일 동안 수경재배 하였다. 수경재배용 반응조와 배지는 모두 멸균 처리하였으며 실험 기간 동안 알루미늄 박을 이용해 빛을 차단하였다. 노출 전 후 식물체의 생체량과 수분의 양을 측정하였고, 실험전 후 반응조 내 수경재배용 배양액 양의 차이를 식물 뿌리가 흡수한 수분양으로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 내성 실험

TNT에 대해 내성을 지닌 식물을 선정하기 위해

TNT 농도에 따른 발아율과 지상부, 지하부(뿌리)의 길이, 생체량을 조사하였다. 어저귀, 자귀풀, 식용피는 60mgTNT/L 이상의 농도에서도 대조군과 동일한 발아율(germination capacity, %)을 보였다. 발아 후 1cm 이상 생장한 종자의 비율(seedling, %)을 살펴보면 자귀풀의 경우 발아한 종자가 모두 1cm 이상의 유식물로 생장하였고 어저귀는 50mgTNT/L, 식용피는 40mgTNT/L 이상의 농도에서 발아 후 생장을 멈춘 종자가 발견되었다. 이로써 어저귀, 자귀풀, 식용피의 발아율은 TNT에 의해 영향을 받지 않으나 어저귀와 식용피는 TNT 독성으로 인해 발아 후 유식물로의 생장이 저해를 받을 수 있음을 알 수 있었다 (Fig. 1).

물피와 돌피는 40mgTNT/L 까지는 대조군과 비슷한 발아율을 보이나 TNT 농도가 그 이상 증가함에 따라 발아율이 감소하였다. 여뀌 바늘과 텔비름은 20mgTNT/L 이상의 농도에서 발아율이 급격히 감소하여 여뀌 바늘은 40mgTNT/L, 텔비름은 60mgTNT/L 농도에서 전혀 발아하지 않았다. 오차드글라스는 7.5mgTNT/L 이상의 농도에서 발아율이 떨어지기 시작하여 30mgTNT/L에서는 발아율이 0에 도달하였다 (Fig. 2).

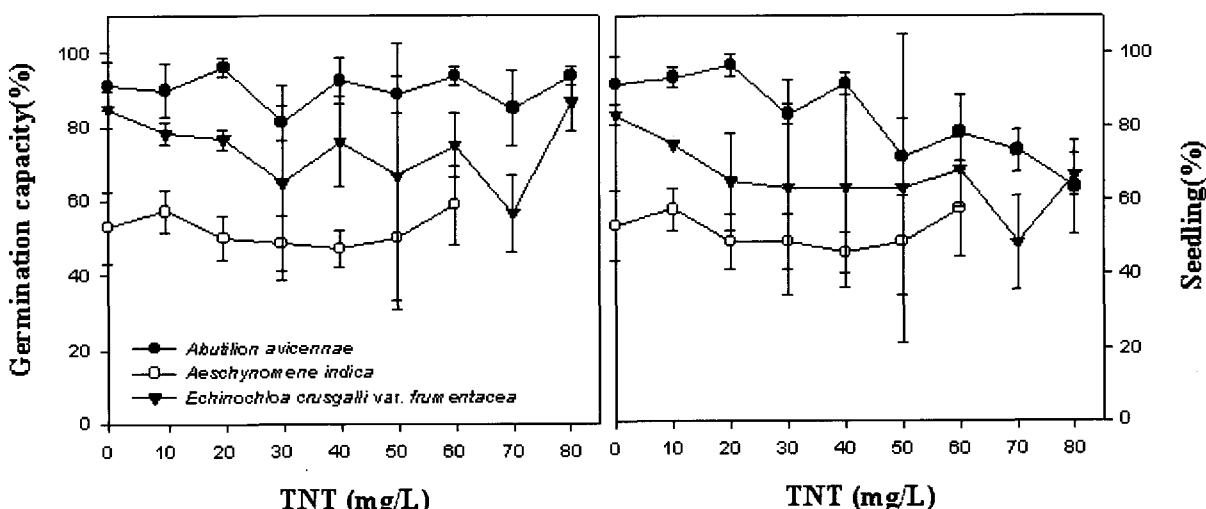


Fig. 1. Percents of germination capacity(%) and seedling(%) of *Abutilion avicinnae*, *Aescynomene indica* and *Echinochloa crusgalli* var. *frumentacea* at 14days as affected by TNT. Seedling length was over 1cm. Bars represent standard errors of mean.

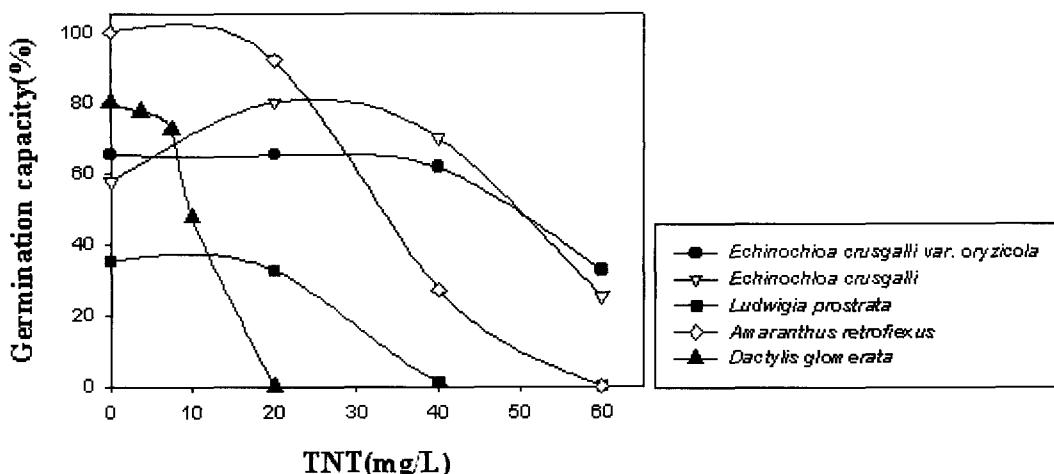


Fig. 2. Percents of germination capacity(%) of grasses at 14days as affected by TNT.

이상의 발아율 결과를 통해 어저귀, 자귀풀, 식용피 > 물피, 돌피 > 텔비름 > 여뀌바늘 > 오차드글라스 순으로 TNT에 대해 내성을 가졌음을 알 수 있었다. 이처럼 TNT에 노출되었을 때 식물종마다 발아율이 다른 이유는 종별 내성뿐만 아니라 종자의 크기와 종피의 특징으로 설명할 수 있다. 어저귀와 자귀풀 종자는 다른 종자들에 비해 크기가 크며 두껍고 단단한 껍질로 둘러싸여 있고 식용피는 여러 겹의 겨로 둘러싸여 있다. 하지만 다른 종자들은 크기가 작고 약한 종피를 가지고 있었다. 어저귀, 자귀풀 종자와 같은 딱딱한 종피는 종자 안으로 TNT와 같은 외부 물질이 침투해 들어오는 것을 막을 수 있으며 식용피의 경우 포엽(lemma)과 화포(palea)를 통해 화학물질이 배(embryo)로 이동하는 것을 물리적으로 제한할 수 있다. 또한 종자의 크기가 크면 떡잎 안에 발아에 필요한 양분을 다량 가지고 있어 발아 시 외부 오염 물질에 덜 민감할 수 있다^{7~8}.

발아에 있어 TNT에 대해 내성을 지닌 종으로 판명된 어저귀, 자귀풀, 식용피를 이용하여 TNT가 지하부(뿌리)와 지상부의 생장 및 생체량에 미치는 영향을 알아보았다. TNT가 뿌리 형태에 미치는 영향은 뿌리 길이가 감소하고 뿌리털이 발달하지 않으며 뿌리 모양이 나선형으로 휘어 자란다. 또한 뿌리 색깔이 대조군에 비해 갈색으로 변하였고 고농도의 TNT

에서는 뿌리의 괴사현상(necrosis)이 관찰되었다. 어저귀의 뿌리 생장은 TNT 농도가 증가함에 따라 1차적 ($y=-0.0439x+4.516$, $R^2=0.925$)으로 감소하였다. 자귀풀과 식용피는 대조군과 비교해 10mgTNT/L에서 심한 생장 저해를 받으며 급격하게 뿌리 길이가 감소하였다(Fig. 3).

특히 식용피는 50mgTNT/L 이상의 농도에서 뿌리가 외부로 생성되지 않고 2mm 이하의 짧은 막대형으로 겨 안에 존재했다. 이는 종자로부터 뿌리가 발생함에 따라 물에 녹아 있는 독성 물질과 접촉하게 되어 뿌리 세포의 생장과 분화가 저해를 받기 때문이다. 뿌리의 길이를 대조군과 비교하여 50 %의 생장저해를 받는 TNT 농도를 식물 독성 임계점(PT_{50})으로 보았을 때 과종 후 14일 동안 어저귀의 뿌리 생장에 대한 PT_{50} 은 40mgTNT/L이고 자귀풀과 식용피는 각각 5.9mgTNT/L, 5.0mgTNT/L이었다. 또한 어저귀는 60mgTNT/L 농도에서도 뿌리 생장율이 1.2mm/d로 Peterson *et al.* (1998)이 동일한 조건에서 phytoremediation 공법에 적합한 종이라 보고 한 switchgrass, smooth bromegrass의 뿌리 생장을 (0.05mm/d, 0.06mm/d) 보다 약 20배 높은 생장을 보였다⁹. 따라서 어저귀는 뿌리 생장에 있어 TNT에 대해 가장 큰 내성을 지닌 종임을 알 수 있었다.

TNT가 지상부 생장에 미치는 영향을 보면 어저귀

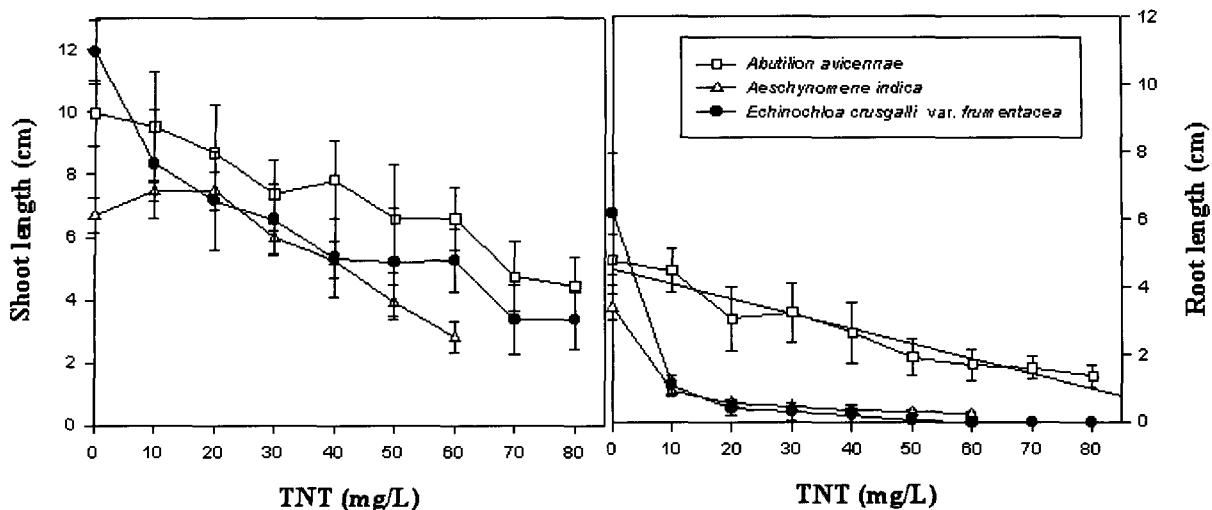


Fig. 3. Shoot and root lengths(cm) of *Abutilion avicinnae*, *Aeschynomene indica*, and *Echinochloa crusgalli* var. *frumentacea* at 14days as affected by TNT. Bars represent standard errors of mean

의 경우 TNT 농도가 증가함에 따라 지상부 길이가 1차적 ($y=-0.0692x+10.06$, $R^2=0.953$) 으로 감소하여 뿌리 생장과 동일한 경향을 보였다. 자귀풀은 20mgTNT/L 농도까지는 대조군과 비슷한 생장 상태를 보였으며 그 이상으로 TNT 농도가 증가함에 따라

지상부의 길이가 감소하기 시작하였다. ($y=-0.114x+9.63$ $R^2=0.99$) 식용피 지상부도 TNT 농도가 증가함에 따라 1차적 ($y=-0.0904x+9.892$ $R^2=0.862$) 으로 감소하였다. TNT 농도 변화량에 따른 지상부의 감소량을 비교해 보면 어저귀는 0.069, 식용피는

Table 2. Phytotoxicity Threshold 50% (PT50) of Germination Rates, Root and Shoot Length, and Biomass in Native Grasses

	PT ₅₀			
	Germination	Shoot length	Root length	Biomass (Fresh weight)
어저귀	80mg/L TNT에서도 대조군과 동일한 발아능력을 지님	72.9mgTNT/L	40mgTNT/L	98.6mgTNT/L
자귀풀	60mg/L TNT에서도 대조군과 동일한 발아능력을 지님	49.4mgTNT/L	5.9mgTNT/L	68mgTNT/L
식용피	80mg/L TNT에서도 대조군과 동일한 발아능력을 지님	54.9mgTNT/L	5mgTNT/L	73.9mgTNT/L
물피	60mgTNT/L	40mgTNT/L	8.9mgTNT/L	36mgTNT/L
돌피	54mgTNT/L	27.8mgTNT/L	8.9mgTNT/L	38mgTNT/L
여뀌바늘	29mgTNT/L	ND*	ND	ND
털비름	33.3mgTNT/L	15mgTNT/L	8.9mgTNT/L	11.6mgTNT/L
오차드글라스	11mgTNT/L	10mgTNT/L	2mgTNT/L	ND

* ND no determination

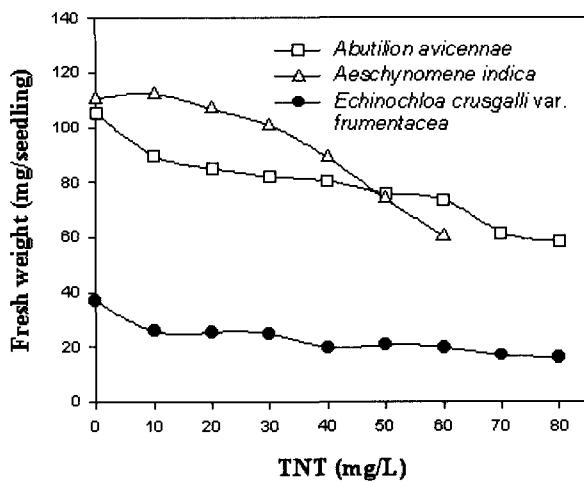


Fig. 4. Fresh weight of *Abutilion avicinnae*, *Aeschynomene indica* and *Echinochloa crusgalli* var. *frumentacea* at 14days as affected by TNT.

0.090, 자귀풀은 0.11로 어저귀가 자귀풀과 식용피에 비해 지상부가 받는 TNT 독성효과가 적음을 알 수 있었다. (Fig. 3.) 지상부 길이에 대한 PT_{50} 은 어저귀가 72.9mgTNT/L로 매우 높아 고농도의 TNT에서도 안정적으로 생장할 수 있음을 알 수 있고 자귀풀과 식용피는 각각 49.4mgTNT/L, 54.9mgTNT/L이었다.

TNT가 생체량에 미치는 영향을 알아보기 위해 파종 후 14일된 유식물을 15개체 씩 임의 선정하여 생체량을 측정하였다. 자귀풀은 0~40 mgTNT/L 노출 구간에서 어저귀와 식용피에 비해 큰 생체량을 나타내었다. 60 mgTNT/L 농도에서 어저귀와 자귀풀의 생체량은 개체 당 각각 75.6 mg, 60.2 mg으로 식용피 19.6 mg보다 3~4배 가량 큰 생체량을 가지고 있다.

Table 2는 본 연구에서 내성종 선정을 위해 사용한 야초류의 발아율, 지상부와 뿌리의 길이 생장, 생체량을 대조군과 비교하여 생장에 있어 50 % 저해를 받는 TNT 농도(PT_{50})를 나타내었다. 어저귀, 식용피, 자귀풀 종자는 발아율에 있어 발아에 있어 60~80 mgTNT/L 농도에 의해 영향을 받지 않으므로 PT_{50} 값을 찾지 못하였다. 뿌리 생장에 있어 어저귀,

식용피, 자귀풀의 식물 독성 임계점(PT_{50})은 5~40 mgTNT/L이며 지상부 생장은 50~73 mgTNT/L, 생체량은 68~99 mgTNT/L이다. 따라서 TNT는 뿌리 생장에 가장 큰 저해를 주며 지상부 생장 > 생체량 > 발아율 순으로 독성 효과를 나타낸을 알 수 있었다. Peterson *et al.* (1996, 1998)은 tall fescue, switchgrass, smoothgrass을 TNT에 노출하였을 때 뿌리보다 지상부에 더 큰 독성효과를 받았다고 보고 하였으나^{7, 10} French *et al.* (1999)는 tobacco 종자를 0.05mM TNT를 포함한 배지에서 발아시켰을 때 뿌리가 발달하지 않아 seedling이 죽었다고 보고하였다¹². 또한 cress, turnip, oat, wheat는 발아에 전혀 영향을 미치지 못하는 TNT 농도에서 유식물의 생장이 매우 감소하여 발아율보다는 유식물의 생장이 더 예민하게 식물 독성 효과를 나타낸다고 보고하여 본 실험과 유사한 결과를 나타내었다¹³.

오염된 지역을 정화하기 위해 사용되는 식물종은 오염물에 노출되더라도 뿌리가 잘 발달하고 생체량이 큰 식물종 일수록 효과적이다. 이에 어저귀는 TNT에 노출되더라도 지상부와 지하부의 생장속도가 빠르며 생체량도 크므로 TNT에 대해 내성을 가진 식물종이라 볼 수 있다. 또한 자귀풀은 TNT에 의해 뿌리 발달이 저해를 받으나 생체량이 크며 발아에 있어서도 0~60mgTNT/L에 의해 영향을 받지 않고 유식물로 생장함으로 TNT로 오염된 토양에서 안정적으로 발아하여 TNT를 제거할 수 있을 것을 것이다.

3.2 수분 흡수량 실험

식물을 이용하여 유기 오염물을 제거할 시 식물의 오염물 제거 능력은 뿌리의 수분 흡수량과 큰 상관관계를 가지고 있다. 따라서 오염물 제거를 위해 phytoremediation 공법에 적합한 식물종은 오염물에 대해 내성을 지닐 뿐만 아니라 수분 흡수 능력이 뛰어나 오염물을 많이 흡수할수록 효과적인 식물종이라 볼 수 있다. 중금속의 경우 식물의 능동·수동 수송에 의해 오염물을 흡수하거나 배출 할 수 있으나 TNT와 같은 유기 오염물은 물의 흐름에 의해 수동적으로 식물체에 들어갈 수 있으므로 내성종으로 선정된 어저귀

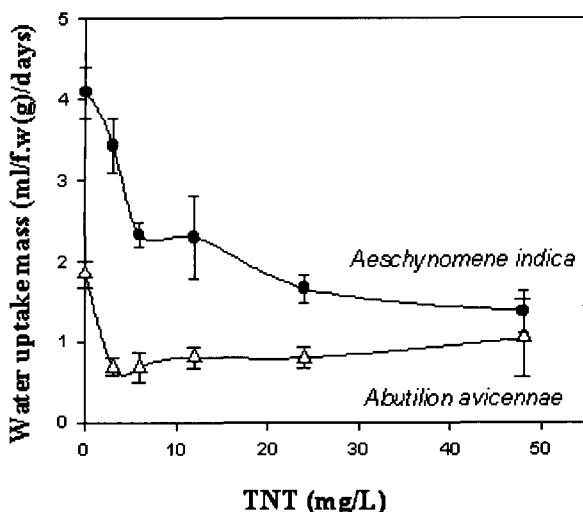


Fig. 5. Effects of TNT on water uptake rates of *Abutilion avicennae* and *Aeschynomene indica* after a 4-day exposure. Bars represent standard errors of mean.

와 자귀풀의 수분흡수 능력을 비교하는 것은 두 식물 종의 TNT 제거 능력을 간접적으로 알 수 있는 중요한 데이터이다¹⁰. 어저귀와 자귀풀의 수분 흡수 능력과 TNT 농도와의 관계를 알아보기 위해 0, 3, 6, 12, 24, 48mgTNT/L에서 두 식물종을 수경 재배하였다. 그 결과 어저귀는 3mgTNT/L 농도에서 수분 흡수 능력이 대조구에 비해 급격히 감소하였다. 그러나 그 이상의 TNT 농도에서는 3mgTNT/L에 노출되었을 때와 비슷한 수분 흡수능력을 나타내었다. 이는 어저귀가 TNT에 노출되더라도 안정적으로 수분을 흡수 할 수 있음을 증명하는 것이다. 자귀풀의 수분 흡수량은 6mgTNT/L 까지 급속하게 감소하였으며 그 이상의 농도에서는 서서히 감소하였다. 그러나 자귀풀은 0mgTNT/L에서 어저귀에 비해 물 흡수 능력이 2배 이상 크며 TNT에 노출되더라도 어저귀의 대조군과 보다 더 높은 수분 흡수 능력을 보여주었다.

이는 자귀풀이 논, 강뚝과 같은 습한 지역에서 잘 서식하는 생태적 특성을 가졌기 때문이다. 따라서 자귀풀은 TNT로 오염된 토양이나 물에서 오염물을 잘 흡수하여 효과적으로 제거할 수 있는 식물종이라 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 phytoremediation 공법을 TNT로 오염된 지역에 적용하기 위해 발아율과 유식물의 생장 연구를 수행하여 TNT에 대해 내성을 가진 야초류를 선정하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 어저귀, 자귀풀, 식용피의 발아율은 TNT 농도 (0 - 80 mgTNT/L)에 영향을 받지 않았다. 어저귀의 뿌리 생장은 TNT 농도가 증가함에 따라 1차적으로 감소하였고 자귀풀과 식용피는 대조군과 비교해 10mgTNT/L에서 심한 생장 저해를 받았다. TNT에 의한 지상부의 감소량도 어저귀가 자귀풀, 식용피에 비해 적었다. 생체량은 0-40 mgTNT/L 노출 구간에서 자귀풀이 어저귀, 식용피 보다 큰 생체량을 나타내었으며 60 mgTNT/L 농도에서 어저귀와 자귀풀의 생체량은 식용피에 비해 3-4배 가량 컸다.
2. 본 연구에서 내성종 선정을 위해 사용한 야초류의 발아율, 지상부와 뿌리의 길이, 생체량을 대조군과 비교하여 50 % 저해를 받는 TNT 농도 (PT_{50})를 비교하였을 때 TNT는 뿌리 생장에 가장 큰 저해를 주며 지상부 > 생체량 > 발아율 순으로 독성 효과를 나타냄을 알 수 있었다.
3. 어저귀는 TNT에 노출되더라도 지상부와 지하부(뿌리)의 생장속도가 빠르고 생체량이 크다. 또 한 자귀풀은 TNT에 의해 뿌리 발달이 저해를 받으나 생체량이 크며 발아에 있어서 TNT 농도에 영향을 받지 않으므로 TNT에 대해 내성을 지닌 식물종이다.
4. 어저귀는 3mgTNT/L에 노출되었을 시 수분 흡수 능력이 감소하나 그 이상의 TNT 농도에 노출되더라도 수분 흡수율은 감소하지 않는다. 자귀풀의 수분 흡수량은 TNT 농도에 따라 감소하나 TNT에 노출되더라도 어저귀보다 더 높은 수분 흡수 능력을 보여주었다.
5. 이상의 연구를 통해 국내산 토착 야초류 중 어저귀와 자귀풀은 TNT에 대해 내성을 가진 종으로 판명되었으며 phytoremediation 을 이용하여

TNT로 오염된 지역을 정화할 시 사용 가능한 식물종 임을 밝힐 수 있었다.

5. 감사의 글

본 연구는 2000년 경기환경기술개발센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다. 또한, 종자분양을 도와주신 농업기술경영 상담위원 홍종운 박사님과 작물시험장의 유용환 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Rieger P.G. and Knackmuss H.J., "Basic knowledge and perspectives on biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene and related nitroaromatic compound in contaminated soil", *In Biodegradation of Nitroaromatic Compound*, J.S. Spain Eds. Plenum Press, New York, (1995)
2. Collie S.L., Donnelly K.C. Bae B., Autenrieth R.L. and Bonner J.S., "Degradation of 2,4,6-trinitrotoluene(TNT) in an aerobic reactor", *Chemosphere*, **31**(4), pp3025-3032, (1995)
3. Anderson T.A., Kruger E.L. and Coats J.R., "Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant", *Chemosphere*. **28**, pp1551-1557, (1994)
4. Newman A., "Plant enzymes set for bioremediation field study", *Environ. Sci. & Technol.*, **29**, pp18A, (1995)
5. Walton B.A. and Anderson T.A., "Microbial degradation of trichloroethylene in the rhizosphere : potential application to biological remediation of waste sites", *Appl. Environ. Microbial.*, **56**, pp1012-1016, (1990)
6. Jordahl J.L., Foster L., Schnoor J.L. and Alvarez P.J.J., "Effect of hybrid poplar tree on microbial populations important to hazardous waste bioremediation", *Environmental Toxicology and Chemistry*, **16**(6), pp1318-1321, (1997)
7. Peterson M.M., Horst G.L., Shea P.J. and Comfort S.D., "Germination and seedling development of switchgrass and smooth bromegrass exposed to 2,4,6-trinitrotoluene", *Environmental Pollution*. **99**, pp53-59, (1998)
8. Gong P., Wilke B.M. Strozzi E. and Fleischmann S., "Higher plant seed germination and early seedling growth test" : evaluation and refinement for the use in ecotoxicological assessment of soil. In : Proceedings of the International Symposium on Soil, Human and Environment Interaction, May 4-11, 1997, Nanjing , China(in press), (1998)
9. Won W.D., Di Salvo L.H. and Ng I., "Toxicity and mutagenicity of 2,4,6-trinitrotoluene and its microbial metabolites", *Appl. Environ. Microbial.*, **31**, pp576-580, (1976)
10. Peterson M.M., Horst G.L., Shea P.J., Comfort S.D. and Peterson R.K.D., "TNT and 4-amino-2,6-dinitrotoluene influence on germination and early seedling development of tall fescue", *Environmental Pollution*, **93**, pp57-62. (1996)
11. Pavlostathis S.G., Comstock K.L., Jacobson M.E. and Saunders F.M., "Transformation of 2,4,6-trinitrotoluene(TNT) by the aquatic plant *Myriophyllum spicatum*", *Environmental Toxicology & Chemistry*, **17**, pp2266-2273, (1998)
12. French C.E., Rosser S.J., Davies G.J., Nicklin S. and Bruce N.C., "Biodegradation of explosives by transgenic plants expressing pentaerythritol tetranitrate reductase". *Nat. Biotechnol.*, **17**, pp491-495, (1999)
13. Gong P., Wilke B.M. and Fleischmann S., "Soil-based phytotoxicity of 2,4,6-trinitrotoluene(TNT) to terrestrial higher plants". *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **36**, pp152-157, (1999)

〈원고접수일 : 2001. 7. 13〉