

포트 재배에 의한 화약물질 오염토양 정화용 내오염성 식물 선정

이아름 · 배범한*

가천대학교 토목환경공학과

Selection of Tolerant Plant Species using Pot Culture for Remediation of Explosive Compounds Contaminated Soil

Ahreum Lee · Bumhan Bae*

Department of Civil & Environmental Engineering, Gachon University

ABSTRACT

Nine plant species were selected through vegetation survey at three military shooting ranges at northern Gyeonggi Province. Plants were germinated in normal soil and three seedlings were transplanted to a bottom sealed pot containing sandy loam soils contaminated with either RDX (291 mg/kg) or TNT (207 mg/kg). Planted, blank (without plant), and control (without explosive compound) pots were grown in triplicate at a green house for 134 days. During cultivation, transplanted plants exhibited chlorosis and necrosis in flower and leaf by explosive toxicity and stress. Only three plants, Wild soybean, Amur silver grass, Reed canary grass, survived in TNT treated pot, while seven plant species except for field penny cress and jimson weed, thrived in RDX treated pot. Appreciable amount of TNT (61.6~241.2 mg/g-D.W.) was detected only in plant roots. Up to 763.3 mg/g-D.W. along with 4-amino-2,6-dinitrotoluene, an intermediate of TNT, accumulated in the root of wild soybean. In addition, azoxy compounds, abiotic intermediates of TNT, were detected in TNT treated soils. RDX absorbed average 1,839.95 mg/kg in shoot and 204.83 mg/kg in root. Most of TNT in plant was accumulated in underground part whereas RDX was localized in aerial part. Material balance calculation showed that more than 95% of the initial TNT was removed in the planted pots whereas only 60% was removed in the blank pot. The amount of RDX removed from soil was in the order of Amur Silver Grass (51%) > Chickweed (43%) > Evening primrose (38%). Based on the results of pot cultures, Amur silver grass and Reed canary grass are selected as tolerant remedial plants for explosive toxicity.

Key words : Pot culture, Phytoremediation, RDX, TNT, Toxicity

1. 서 론

식물상정화공법은 식물을 이용하여 토양, 수질 및 지하수내 오염물질을 분해, 흡수, 안정화, 축적, 근권여과, 증발산 등으로 유기 및 무기 오염물질을 제거하거나, 그 이동성을 감소시켜 오염물질의 위해성을 저감시키는 방법을 총칭한다. 이 중에서 유기물질인 화약물질은 식물상 안정화, 근권여과, 식물분해 및 식물휘발의 기작으로 정화할 수 있다(USEPA, 2000).

화약물질 내성식물에 대한 연구는 1980년 중반부터 시작되었다. Palazzo and Leggett(1986)은 기름골(yellow nutsedge, *Cyperus esculentus*)을 TNT(2,4,6-Trinitrotoluene)

를 넣은 물에 수경재배한 결과 5 mg/L 이상에서 식물 지상부 및 특히 뿌리 성장이 저해되었는데, 이는 제조제 dinitroaniline 효과와 유사하였다. 또한 노출 후, 식물세포에서 추출가능한 물질의 90% 이상은 주로 2- 혹은 4-aminodinitrotoluene(2A, or 4ADNT)과 미량의 TNT로, 기름골이 TNT를 환원할 수 있다는 것을 보여주었다. Cataldo et al.(1989)는 왜성 강낭콩(bush bean, *Phaseolus vulgaris*), 밀(*Triticum aestivum*) 및 참새귀리(blando brome, *Bromus mollis*)의 3종 식물을 TNT에 노출시킨 결과, 왜성 강낭콩이 TNT를 가장 잘 흡수하였으며 흡수한 TNT의 77%는 뿌리에 축적되었다. 식물체에서 회수된 TNT 혹은 TNT 환원물질(2A 및 4ADNT)은 20% 이하이었고,

*Corresponding author : bhbae@gachon.ac.kr

Received : 2015. 10. 1 Reviewed : 2015. 11. 12 Accepted : 2015. 11. 26

Discussion until : 2016. 1. 31

나머지는 추출불가물질 혹은 극성물질로 존재하였다. Harvey et al.(1991)는 강낭콩을 수경재배로 RDX(Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine)에 노출시킨 결과, 흡수된 RDX 대부분이 지상부에 축적되었고, 노출 7일 후 일부는 극성물질로 분해되었다. Sens et al.(1998)은 ^{14}C -TNT를 이용하여 강낭콩이 흡수한 화약물질의 전환 및 세포 내 분포를 연구하였다. 강낭콩을 원형질과 5종류의 세포벽 유도체로 분리하여 각 부분에 존재하는 화약물질량과 존재 형태를 측정된 결과, TNT는 첨가 2주 후에 원형질과 세포벽에 50%씩 균등하게 분포하였다. TNT는 세포벽에서 리그닌과 주로 결합하였고, 원형질에서는 용해된 전환산물로 존재하였다.

목본 중에서는 포플러가 가장 폭넓게 연구되었다. Thompson et al.(1998)은 수경재배 및 토양실험에서 포플러가 흡수한 TNT중에서 75%는 뿌리에 잔류하고 10%만이 지상부로 이동한 것으로 보고하였다. 대부분의 TNT는 식물체에서 추출이 불가능한 형태로 전환되었으며, 투입량의 10% 이하만이 식별할 수 있었다. 또한 TNT는 4ADNT 혹은 2ADNT로 환원되거나, TNT보다 극성인 미지물질로 전환되었다. 후속되는 연구에서 조직배양한 포플러를 RDX에 노출시키자, RDX가 빛의 유무에 상관없이 hexahydro-1-nitroso-3,5-dinitro-1,3,5-triazine(MNX) 및 hexahydro-1,3-dinitroso-5-nitro-1,3,5-triazine(DNX)로 환원되었다(van Aken et al., 2004). 빛이 존재할 경우에는 분해가 더 진행되어 formaldehyde(CH_2O), 메탄올(CH_3OH) 및 이산화탄소로 완전히 분해되었다. 그러나 잎 추출물을 RDX에 노출한 경우에는 빛의 존재 하에서만 환원이 발생하였다. 이상의 결과는 (i) 광원에 독립적인 온전한 식물세포에 의한 RDX의 환원 (ii) 식물/광원 작용에 의해 매개되어 RDX, MNX 및 DNX 고리가 C-1 화합물(formaldehyde 및 메탄올)로 분해하는 경로 및 (iii) 광원에 독립적인 온전한 식물세포에 의한 완전무기화 반응 순으로 분해가 진행된다는 것을 의미한다.

국내에서도 화약물질을 식물로 정화하는 연구가 진행되었다. Bae et al.(2002)에 의하여 국내 토착식물인 어저귀(*Abutilon avicennae*)와 자귀풀(*Aeschynomene indica*)을 수경재배하며 TNT에 노출한 결과, 배양액 TNT 농도가 60 mg/L일 때의 TNT 제거량이 가장 많았고, 7일 후에 식물 추출액에서 다수의 TNT 전환산물이 검출되었다. 또한, 토양에 TNT를 120 mg/kg으로 인공오염한 뒤, 어저귀를 정식하여 50일간 column 실험을 운영하여 재배한 결과, 식물재배구에서는 초기 TNT 대비 23.2%만의 TNT가 잔류하였고, 대조구에서는 48.1%의 TNT가 잔류하여 식

물식재 시 TNT 제거량이 증가되었다(Chang et al., 2004).

수생식물에 의한 화약물질 분해도 많이 연구되었다. Hughes et al.(1997)은 수생식물인 물수세미(*Myriophyllum aquaticum*), 유라시아 물수세미(*Myriophyllum spicaticum*) 및 조직배양한 매일초(*Catharanthus roseus*)를 7일 간 ^{14}C -TNT에 노출한 결과, 완전무기화는 일어나지 않았지만 식물체로부터 평균 27%의 방사성 동위원소를 추출할 수 있었고, 식물체가 흡수한 양의 6%만이 TNT, 4ADNT 혹은 2ADNT로 회수되었다. 즉, 흡수한 TNT의 94%는 미확인물질로 전환되었고, 그 중에서 48%는 식물체에 중합되어 추출이 불가능한 물질로 전환되었다. Medina et al.(2004)은 다양한 수생식물로 선별실험을 실시하여 민물늪 조류인 차축조(stonewort)와 물채송화(parrot feather)가 TNT에 대한 내오염성이 있음을 확인하였다. 물채송화를 이용한 수경재배에서 식물체내에서 TNT 전환물질인 aminodinitrotoluenes(ADNTs) 및 diamidinotrotoluenes(DANTs)가 검출되었고, 5 mg/L 이하의 농도에서 TNT의 제거동역학은 Michaelis-Menton 식을 따르는 것으로 보고하였다. Bhadra et al.(2001)은 무균배양조건에서 추적자를 사용하여 물수세미와 매일초를 RDX에 노출시킨 결과, RDX를 흡수하여 일부는 세포내 그대로 잔류하였고, 나머지는 미지의 물질로 전환되어 식물체에 결합하여 존재하였다.

식물 중에서 농작물을 이용하여 화약물질을 제거하려는 연구도 진행되었는데, 중자를 얻기 쉽고, 농작물 재배법 및 관련 정보가 풍부하기 때문이라 판단된다. Vila et al.(2007a)은 옥수수, 대두, 밀 및 벼를 ^{14}C -TNT와 ^{14}C -RDX 오염토양에서 42일간 재배한 다음, 지상부 및 지하부에 축적된 화약물질량을 정량하였다. 그 결과, RDX는 섭취량의 80%가 지상부에 축적된 반면, TNT는 25% 이하만이 지상부에 축적되었다. 다른 연구와 동일하게, TNT는 50% 이상이 대사되어 식물체와 결합된 반면, RDX는 지상부에 원형 그대로 존재하였다. 후속되는 연구에서는 벼를 RDX 오염토양에서 40일간 재배하였는데, 벼가 흡수한 RDX의 89%가 지상부에 축적되었고 그 중에서 95%가 벼의 끝단에 축적되면서 괴사하는 현상이 발생하였다(Vila et al., 2007b). 이에 괴사현상을 RDX의 식물독성에 기인하는 것으로 추정하였다. Chen et al.(2011)은 옥수수, 수단 수수, 밀 및 대두를 RDX에 수경재배 혹은 토양재배로 노출시킨 결과, 지상부 축적 RDX는 저농도(21~100 mg/kg)에서는 노출농도에 따라 비례하였고, 고농도(220~903 mg/kg)에서는 노출농도에 비례하지 않는다고 하였다. 밀은 최대 2,800 mg-RDX/kg-D.W.을 축적하였으

며, 옥수수는 100 mg-RDX/kg 토양에서 재배 4주후 5개 식물체가 총 3,267 ug의 RDX를 제거하였다. 그러나 농작물을 화약물질 정화에 이용하면 먹이사슬에 의한 화약물질 전달위해가 있다. 상기한 바와 같이 식물이 섭취한 RDX 대부분이 지상부에 원형대로 축적되기 때문에, 동물 사료 혹은 식용으로 사용된다면 먹이연쇄를 통해 화약물질이 소비자 및 2차 소비자에게 전달될 가능성이 있다. 다양한 동물실험 결과가 이와 같은 위험성을 경고하고 있다(Fellows et al., 2006; Major, et al., 2007; Sarrazin et al., 2009).

우리나라 군부대 및 사격장과 같은 군사시설은 대부분 자연녹지 및 산지에 위치하고 있다. 특히, 사격장은 탄약 폭발 및 불발탄의 위험성, 훈련 시 발생하는 폭음 등으로 인하여 산 속 경사면에 설치되어 있다. 경사면 피탄지는 지속적 사격훈련으로 나지화 되어있어, 화약물질로 오염된 피탄지 토양이 강수에 의해 하류 지역으로 확산될 가능성이 매우 높다. 따라서 사격장의 지형적 조건을 고려하여 사격장 전면에 있는 넓은 배후 초지에 화약물질을 정화하는 식물상정화공법(phytoremediation)을 적용한다면, 부지 활용도를 높이고 친환경적 사격장 관리가 가능할 것이다. 식물상정화공법은 식물과 근권미생물의 상호기작을 이용하여 오염물질을 축적, 분해 및 무독화하며, 유지관리가 쉬운 특징을 가지고 있어(Vila et al., 2007a), 국내 군 훈련장 실정에 적합한 공정이라 사료된다.

이에 포탄 사격 훈련으로 인해 화약물질로 오염된 사격장 토양을 정화하거나 오염물질 배출을 저감하는 유지관리법으로 식물상정화공법을 적용하기 위해, 사격장에 자생하는 토착식물 중에서 화약물질 흡수 및 제거율이 우수한 고생체량 다년생 식물종을 선정하고자 포트 재배로 내오염성 토착식물 선별연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 식물종 선정

경기도 북부지역 3개 사격장 현장식생조사를 실시하고, 식물체를 채취한 다음 분석한 결과를 바탕으로 Table 1과 같은 다년생 초본식물 9종을 선정하였다. 선정 식물은 독말풀(Jimson weed, *Datura stramonium*, Ds), 들콩(Wild soybean, *Glycine soja*, Gs), 등근매듭풀(Korean clover, *Kummerowia stipulacea*, Ks), 물억새(Amur silver grass, *Miscanthus sacchariflorus*, Ms), 달맞이꽃(Evening prime rose, *Oenothera biennis*, Ob), 갈풀(Reed canary grass, *Phalaris arundinacea*, Pa), 장구채(Janggoochae, *Melandryum firmum*, Mf), 쇠별꽃(Chickweed, *Stellaria aquatica*, Sa), 말냉이(Field pennycress, *Thlaspi arvense*, Ta)로, 모두 토착식물이다.

실험에 사용한 토양은 일반토양과 경기도 OO 사격장 토양을 1:1 비율로 섞은 후, 20번 체로 체가름하고 식물 성장에 필요한 투수성 및 통기성을 확보하기 위해 중량비로 30%의 주문진사를 첨가하였다. 이 토양에 TNT(2,4,6-Trinitrotoluene) 혹은 RDX(Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine)를 acetone에 용해시켜 골고루 뿌리고 혼합하고, 서늘하고 그늘진 곳에서 4주에 걸쳐 매일 재혼합하여 acetone을 휘발시켜 제거하였다. 인공오염토양내 화약물질 분석결과, TNT 및 RDX 농도는 각각 291 및 207 mg/kg으로, 이 농도는 경기도 OO사격장 표토에서 측정된 최고농도에 근접한 값에 해당한다(Gong et al., 2012).

토성(soil texture)은 micro-pipette법으로 분석하여 삼각도표법에 의하여 구별하였다. TNT, RDX 토양은 점토함량 약 13%, 미사함량 15~18%, 모래함량 68~72%로 양질사토(loamy sand)에 해당하였다. TNT, RDX 첨가구의 blank 초기토양의 pH는 각각 6.62, 6.56으로 측정되어 약

Table 1. Native perennial plants selected for pot culture experiment through field vegetation survey at three military shooting ranges at northern Gyeonggi Province

Common name	Scientific name	Family name
Jimson weed	<i>Datura stramonium</i> var. <i>chalybea</i> Koch	Solanaceae
Wild soybean	<i>Glycine soja</i> Siebold & Zucc.	Leguminosae
Korean clover	<i>Kummerowia stipulacea</i> (Maxim.) Makino	Leguminosae
Amur silver grass	<i>Miscanthus sacchariflorus</i> (Maxim.) Benth.	Poaceae
Evening primrose	<i>Oenothera biennis</i> L.	Onagraceae
Reed canary grass	<i>Phalaris arundinacea</i> L.	Poaceae
Janggoochae	<i>Melandryum firmum</i> (S. et Z.) Rohrb	Caryophyllaceae
Chickweed	<i>Stellaria aquatica</i> (L.) Scop.	Caryophyllaceae
Field pennycress	<i>Thlaspi arvense</i> L.	Brassicaceae

산성을 띄었으며, 식물 생육의 pH 유효범위(6.0~7.0)를 만족하였다. 배수구가 없는 Pot 반응조에 화학물질 인공오염토양을 2 kg씩 담고, 식물매트에서 발아한 유식물을 정식하여 3배수로 포트를 만들고 134일간 온실(30°C)에서 재배하였다. 재배기간 중에는 별도의 시비는 하지 않고, 관수만 하였다. 이 때, 화학물질 오염토양에 식물을 식재하지 않은 blank처리구와 비오염토양에 식물을 식재한 control 처리구도 동시에 운영하였다.

2.2. 분석방법

화학물질은 HPLC로 분석하였다. HPLC 시스템은 Varian Prostar Gradient System으로 구성되어 있으며, 칼럼은 Shiseido CAPCELL PAK RP C-18 column(4.6 × 250 mm, 5 μm) 분석 조건은 유량 0.8 mL/min(Methanol : Water = 55 : 45)와 190~600 nm scanning mode이며, 정량은 UV 230 nm에서 실시하였다.

토양 내 화학물질 분석방법은 USEPA에서 개발한 SW-846 method 8330B(USEPA, 2006)와 동등한 방법으로 다음과 같다. 배양이 끝난 pot 반응조의 근권토양을 알루미늄 접시에 수집하여 상온 및 암소에서 풍건하고, 풍건한 건조시료는 균질화하기 위해 30분 체로 체거름 하였다. 40 mL amber vial에 토양시료 10 g과 ACN(Acetonitrile) 20 mL을 첨가한 후, Teflon-lined cap으로 밀봉하고 30°C 이하의 초음파수조에서 18시간 동안 추출하였다. 추출 후, 30분간 방치하여 토양을 침전시킨 후, 상징액 5 mL과 5 g/L CaCl₂용액 5 mL을 vial에 충분히 혼합시킨 후 15분간 침전시켰다. 상징액은 0.2 μm PTFE filter로 여과하였다. 초기의 3 mL은 버리고 나머지 시료를 HPLC로 분석하였다.

재배가 끝난 식물에 묻은 미세토양 및 이물질질을 증류수로 세척하였다. 식물은 지상부/지하부로 나누고 약 0.5 cm 크기 자른 후, 48시간 동안 동결 건조하였다. 스테인리스 사발에 건조식물체와 액체질소를 넣고, 스테인리스 막자로 잘게 분쇄하였다. 분쇄과정에서 액체질소로 동결 후 해빙과정에서 식물이 대기 중 수분을 흡수함에 따라 분쇄식물시료는 다시 24시간 동결 건조하였다. 그 다음, 40 mL 원심분리 vial에 건조식물시료 0.2 g과 내부표준물질 1,3-DNB(Dinitrobenzene)를 주입하고, 10 mL ACN을 첨가하여 Teflon-lined cap으로 밀봉하였다. 밀봉한 시료는 상온 20°C 이하의 초음파 수조에서 18시간 추출한 후, 3000 rpm 으로 10분간 원심분리하고 상징액을 취하였다. 상징액 내 극성물질은 Bond Elut florisil cartridge (Agilent Co.)로 제거하여, 최종 HPLC 분석시료를 얻었다.

급성독성은 Microtox와 동등한 성능을 가진 Lumistox로 측정하였다. 이 때, Microtox에서 독성의 기준물질로 사용하는 폐놀에 대한 독성을 측정하여 상대기준치로 설정하고 토양에서 측정된 독성값과 상대 비교하였다. 토성은 마이크로 피펫법으로, 토양 pH는 DIW 50 mL에 토양 10 g을 넣고 잘 저어준 다음, 1시간 후에 보정한 pH meter로 측정하였다. 기타 토양의 물리화학적 특성은 서울대학교 농생명과학공동기기원에서 우리나라 공정시험기준 혹은 이와 동등한 방법으로 분석하였다.

HPLC 분석에서 TNT, RDX, 4,4',6,6'-tetranitro-2,2'-azotoluene(2,2'-Azo), 2,2',6,6'-tetranitro-4,4'-azotoluene(4,4'-Azo) 및 2,2',6,6'-tetranitro-4,4'-azoxytoluene(4,4'-Azoxy)의 정량에 사용한 표준물질은 AccuStandard(New Haven, CT, USA)에서 구매하였고, 실험에 사용된 추출용매와 분석용매는 모두 HPLC급이었으며 다른 화학물질은 ACS급이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 포트 토양의 물리화학적 특성

포트 실험에 사용된 토양의 실험 전·후 물리화학적 성분변화는 Table 2와 같다. TNT, RDX 토양의 토성은 점

Table 2. Physico-chemical characteristics of soils used for pot culture

	TNT	RDX	unit
Initial blank pot soil			
Texture	Loamy Sand	Loamy Sand	-
pH	6.62	6.56	-
Moisture content	2.40	6.98	%
Organic matter	0.30	0.33	g
Final blank pot soil			
pH	7.59	7.86	-
Moisture content	5.00	6.56	%
Organic matter	0.28	0.28	g
Electrical conductivity	0.49	0.59	dS/m
T-N	0.061	0.05	%
T-P	229.37	233.27	mg/kg
Effective phosphate (P ₂ O ₅)	28.03	30.98	mg/kg
Ammonia (NH ₄ ⁺)	N.D.	0.005	mg/kg
NO ₃ ⁻	109.44	124.64	mg/kg
CEC	13.24	12.26	cmol/kg
Exchangeable K	77.22	92.76	mg/kg
Exchangeable Na	77.24	72.09	mg/kg

* N.D. = Not Detected.

토함량 약 13%, 미사함량 15~18%, 모래함량 68~72%로 양질사토(loamy sand)에 해당하였다. TNT, RDX 첨가구의 blank 초기토양의 pH는 각각 6.62, 6.56으로 측정되어 약산성을 띄었으며, 식물 생육의 pH 유효범위(6.0~7.0)를 만족하였다. 최종 TNT, RDX 토양의 pH는 초기값에 비해 각각 14.7, 19.8% 증가한 7.59, 7.86으로 측정되었다. 재배 기간 동안 pH가 증가하여 근권토양은 약산성에서 중성토양으로 변화하였다. 토양습수율은 관수로 변화하였지만, 유기물 함량은 초기 인공오염 토양에서 0.30~0.33 g이었으나, 실험 후에는 0.28 g으로 소량 감소하였다.

실험 종료 토양에서 TNT, RDX 첨가구의 무식재구(blank) 토양의 전기전도도(EC)는 각각 0.49, 0.59 dS/m이었다. 전질소(T-N)는 TNT, RDX 첨가구 토양에서 각각 0.06, 0.05%이었으나, 암모니아 농도는 TNT 첨가구 토양에서는 불검출, RDX 첨가구는 0.005 mg/kg으로 매우 낮았다. 반면에, 총인은 TNT 첨가구에서 229.37 mg/kg, RDX 첨가구에서 233.27 mg/kg의 높은 농도로 함유되어 있었고, 유효인산은 평균 29.52 mg/kg으로 분석되었다. 치환성 K⁺, Na⁺의 측정결과, TNT 및 RDX 첨가구의 토양에서 72.09~92.76 mg/kg이고, 양이온치환용량은 TNT 13.24 cmol/kg, RDX 12.26 cmol/kg으로 분석되었다. 전반적으로 TNT 혹은 RDX 첨가구 토양의 물리·화학적 특성은 토성이 동일하므로 큰 차이를 보이지 않았다.

3.2. 식물 성장 및 생체량 측정

2012년 2월 13일에 화학물질(TNT 혹은 RDX) 인공오염 토양에 식물 9종을 식재한 후, 재배 35, 66, 100, 134일에 주기적으로 식물 지상부 길이를 측정하며 식물성장변화를 관찰하였다. 비오염토양인 대조구에 식재한 식물들은 꾸준한 성장을 보였다. TNT 및 RDX 첨가구에 식재한 식물은 화학물질에 의한 스트레스나 독성 때문에 성장 저하 또는 사멸하는 것이 관찰되었다. 예를 들어 대조구에 식재한 쇠별꽃은 66~100일 사이에 6.13 cm에서 28.1 cm로 정상적으로 길이성장 하였지만, TNT 첨가구는 온실재배 35일에 사멸하였다. 재배종료 후, RDX 첨가구는 11.78 cm로 측정되어 길이 성장이 대조구 대비 61% 감소하였다. 독말풀과 말냉이는 황백화현상이 나타나면서 TNT 및 RDX 첨가구에서 모두 사멸하였다. 장구채는 식물 성장 특성상 지상부 길이가 아닌 잎의 길이를 측정하여 비교하였다. 대조구에 유식물을 식재하였을 때 잎의 길이는 약 6 cm로 재배 종료 후의 길이와 동일함을 보여 다른 식물들에 비해 더딘 성장을 보였다. 이후 RDX 첨가구에서 134일 이후 잎의 말단부분이 마르면서 3.53 cm

에서 2.4 cm로 감소하였고, TNT 첨가구에서는 모두 사멸하였다.

TNT 혹은 RDX 첨가구에서 돌콩의 길이성장은 대조구 대비 각각 35 및 4.5% 감소하였고, 말냉이와 유사하게 잎이 타는 현상이 나타났다. 비오염토양(대조구)에 식재한 둥근매듭풀은 분지수를 확인하기 어려울 정도로 성장하였지만, TNT 첨가구에서는 모두 사멸하였고 RDX 첨가구에서는 길이 성장이 대조구(30.25 cm) 대비 54% 감소하였다. 달맞이꽃은 100일 동안 뚜렷한 줄기의 성장이 나타나지 않았다. 여름이 되자 대조구 및 RDX 첨가구는 각각 51, 12 cm까지 자랐으나 TNT 첨가구에서는 높은 독성으로 인해 사멸하였다. 벼과식물로 알려진 물억새와 갈풀은 반응조별 유사한 길이성장을 보였다. 대조구 대비 평균 52% 및 38%의 길이성장이 감소하였으나, 내성을 가지고 있어 지속적으로 성장한 것으로 판단된다.

온실재배가 끝난 후, 대조구(control), TNT 및 RDX 첨가구에 식재한 식물은 지상부와 지하부로 나누어 토사를 제거한 뒤 생체량 및 건조중량을 비교하였다(Fig 1&2). 비오염토양에 식재한 9종의 식물 중 달맞이꽃(61.08 g), 갈풀(50.21 g), 쇠별꽃(43.14 g), 둥근매듭풀(22.60 g) 순서로 높은 지상부 생체량을 보였고, 지하부 생체량은 갈풀(8.90 g), 쇠별꽃(7.43 g), 물억새(3.39 g), 둥근매듭풀(2.75 g) 순서로 높게 측정되었다. TNT 및 RDX 반응조에 식재한 식물은 화학물질의 독성 및 스트레스로 인하여 대조구에 비해 생체량이 현저히 낮았다. 또한, TNT 첨가구에 식재한 쇠별꽃, 독말풀, 장구채, 말냉이, 둥근매듭풀, 달맞이꽃과 RDX 첨가구에 식재한 독말풀, 말냉이가 모두 피사하였다.

TNT 첨가구에 정식한 물억새 지상부 및 지하부 생체량은 대조구(control) 대비 각각 1.13 g, 1.73 g으로 29.6%, 22.6% 감소하였고, RDX 첨가구에 정식한 물억새 지상부 및 지하부 생체량은 각각 2.09 g 및 0.38 g으로 대조구 대비 24.6% 및 35.5% 감소하였다. TNT, RDX 오염토양에 식재한 갈풀생체량은 지상부는 각각 6.11 g 및 13.08 g으로 대조구 대비 15.6%, 28.5%의 감소율을 나타냈고, 지하부는 각각 3.93 g 및 6.83 g 측정되어 생체량이 31.7%, 30.4% 감소하였다.

식물의 건조중량은 70°C에서 24시간 동안 건조한 후 측정하였다. 전반적으로 생체량이 높은 식물이 건조중량도 높았다. 대조구에 식재한 식물의 지상부는 갈풀(16.38 g), 달맞이꽃(9.18 g), 둥근매듭풀(8.74 g) 순으로, 지하부는 갈풀(18.48 g), 쇠별꽃(12.10 g), 물억새(5.16 g)으로 높았다. 그러나 TNT 첨가구에 식재한 식물의 지상부는 갈풀(2.56

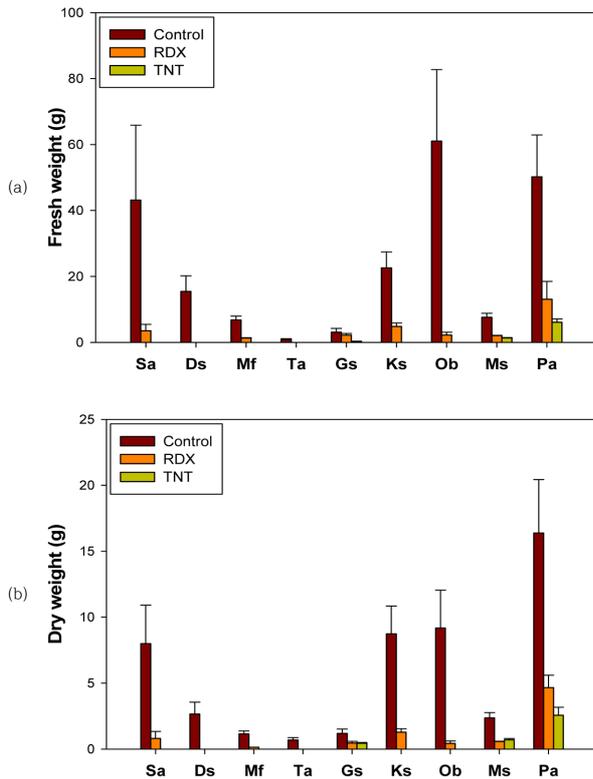


Fig. 1. Fresh and dry weight of aerial parts of the plants grown in the pot (g). (a) Fresh weight, (b) Dry weight (Sa: *Stellaria aquatica*, Ds: *Datura stramonium*, Mf: *Melandryum firmum*, Ta: *Thlaspi arvense*, Gs: *Glycine soja*, Ks: *Kummerowia stipulacea*, Ob: *Oenothera biennis*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

g), 물억새(0.70 g), 말냉이(0.44 g) 순이었으며, 지하부는 갈풀(5.85 g), 물억새(1.83 g), 말냉이(0.23 g)로 대조구와 큰 차이를 보였다. RDX 첨가구의 식물 지상부는 갈풀(4.66 g), 둥근매듭풀(1.28 g), 쇠별꽃(0.81 g)으로 지하부는 갈풀(5.62 g), 물억새(1.16 g), 쇠별꽃(0.84 g) 측정되었다. 이상과 같이 식물의 생체량과 건조중량의 결과를 종합하면 갈풀, 물억새가 TNT, RDX 등과 같은 화학물질의 독성을 견디며 생육하는 내성종이라 판단된다.

3.3. 식물체 내 화학물질 농도

화학물질 처리구에서 성장한 식물은 화학물질 흡수/분해할 가능성이 높기 때문에 포트에 식재한 9종의 식물 중 재배기간 동안 사멸하지 않고 지속적으로 성장한 식물을 지상부와 지하부로 나누어 화학물질을 분석하였다. 식물체내 화학물질 분석시 첨가한 DNB 회수율은 TNT 분석시는 $100.3 \pm 7.5\%$ (n=18), RDX 분석에서는 $99 \pm 13.6\%$ (n=45)이었다. RDX의 표준편차가 큰 이유는 한 시료에서 회수율이 186%이었기 때문이다.

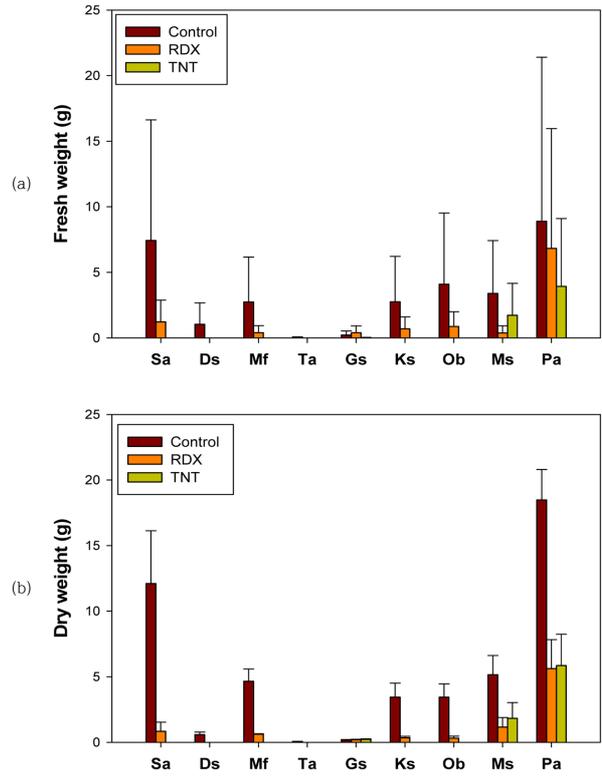


Fig. 2. Fresh and dry weight of roots of the plants grown in the pot (g). (a) Fresh weight, (b) Dry weight (Sa: *Stellaria aquatica*, Ds: *Datura stramonium*, Mf: *Melandryum firmum*, Ta: *Thlaspi arvense*, Gs: *Glycine soja*, Ks: *Kummerowia stipulacea*, Ob: *Oenothera biennis*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

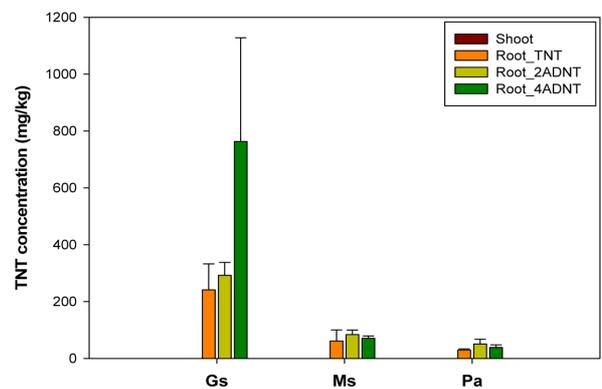


Fig. 3. Concentrations of TNT and its metabolites in shoot and root of the test plants (Gs: *Glycine soja*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

TNT 첨가구에 식재한 갈풀, 물억새, 돌콩의 지하부에는 29.25~241.17 mg/kg의 TNT와 TNT의 분해산물인 2ADNT, 4ADNT가 각각 50.48~291.99 mg/kg, 38.36~763.29 mg/kg으로 검출되었지만, 지상부에는 불검출되었다(Fig. 3). 식물체량을 고려한 지하부 TNT양은 갈풀 0.19 mg, 물억

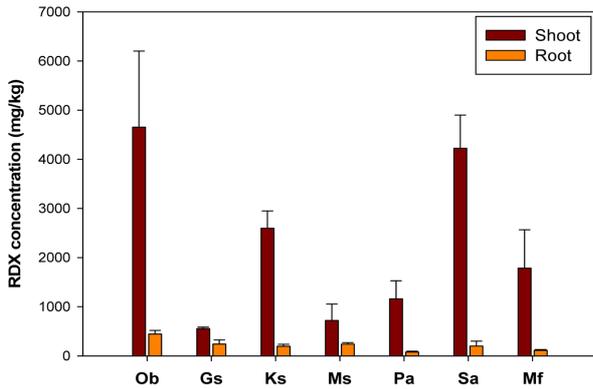


Fig. 4. RDX concentration in shoot and root of the test plants (Sa: *Stellaria aquatica*, Mf: *Melandryum firmum*, Gs: *Glycine soja*, Ks: *Kummerowia stipulacea*, Ob: *Oenothera biennis*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

새 0.09 mg, 돌콩 0.05 mg으로 양이 크지 않았다. 보고에 의하면 돼지풀(*Ambrosia artemisiifolia*), 금관화(*Asclepias syriaca*) 및 캐나다 미역취(*Solidago canadensis*) 등은 토양 내 TNT 농도 범위와 관계없이 식물체 지상부/지하부 모두 0.5 mg/kg 이하로 TNT를 축적하였다. 또한 2ADNT와 4ADNT는 일부 식물의 지하부에 검출되었고, 시험 식물들 중 돼지풀 지상부에서만 2ADNT(4.5 mg/kg), 4ADNT(10.7 mg/kg)이 검출되었다. 이 결과는 TNT 및 TNT 분해산물은 지하부에서 지상부로의 TNT 이동이 제한적이라는 것을 의미하며(Sens et al., 1998), 본 연구에서도 동일한 경향을 보이고 있다.

RDX 첨가구에서는 사멸한 독말풀과 말냉이를 제외한 7종 식물에서 RDX가 검출되었고, 달맞이꽃, 쇠별꽃, 둥근매듭풀 순서로 RDX 농도가 높았다. 지상부는 평균 1,839.95 mg/kg, 지하부는 평균 204.83 mg/kg으로 측정되어 지상부는 지하부보다 약 9배의 RDX가 검출되었다. 일반적으로 RDX 오염토에서 성장한 수많은 식물들에서 지하부보다 지상부 RDX 농도가 높았다. 연구에 의하면, 아까시나무(*Robinia pseudo-acacia*)는 지하부 5.77 mg/kg, 지상부 17.2 mg/kg의 RDX를, 자이언트해바라기(*Helianthus nuttallii*)는 지하부 4.28 mg/kg, 지상부 8.61 mg/kg의 RDX를 축적하여 지하부보다 지상부에 2~3배의 RDX가 축적되었다(Schneider et al., 1996). 식물체량을 고려하면 지상부 내 RDX량은 0.25~5.19 mg으로 산정되고, 갈풀, 쇠별꽃, 둥근매듭풀 순서로 축적되었다. 또한, 지하부 내 RDX량은 0.05~0.43 mg으로, 갈풀, 물억새, 달맞이꽃으로 축적되었다. 따라서 상기의 RDX 흡수능과 다르게 식물 생체량을 고려하였을 때, 생체량이 큰 갈풀이 RDX를 많이 흡수하는 식물종으로 판단된다.

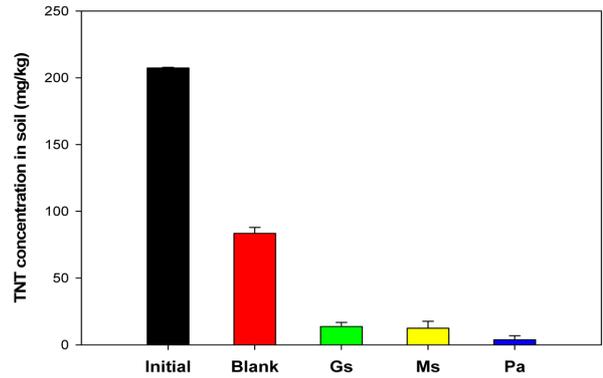


Fig. 5. Concentrations of TNT in the initial and final pot soil (Gs: *Glycine soja*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

축적계수(Accumulation factor, AF)는 토양 내 오염물질이 식물 뿌리로 이동하여 축적되는 지표이며(Karami and Shamsuddin, 2010), 전좌계수(Translocation factor, TF)는 식물 뿌리를 통해서 지상부로 오염물질을 흡수하는 연속적 전위를 나타내는 이동 지표이다(Tu and Ma, 2002). TNT 첨가구의 AF는 4.9~17.6으로 돌콩이 가장 높게 산정되었으나, 지상부 내 TNT는 불검출되어 TF는 산정하지 못했다. RDX 첨가구의 AF는 0.4~2.4이었고, TF는 2.3~21.0으로 AF보다 높게 산정되었다. Burken (2003) 및 Vila et al.(2007b)에 의하면 초기 RDX 농도의 89% 정도가 벼의 뿌리에서 잎으로 전이되었고, 토양 내 TNT는 뿌리에서 흡수된 후 약 25%의 TNT만 지상부에 이동되어 축적되었다. 또한 hybrid poplar를 이용한 화학물질 흡수능 실험결과, TNT는 지하부, RDX는 지상부에 선택적으로 축적되었다. 선행연구와 본 연구를 종합하면, TNT는 대부분 지하부에 흡수 및 축적되어 존재하고, RDX는 식물의 지상부까지 운반되어 축적됨을 알 수 있었다(Vila et al., 2007a).

3.4. 포트 토양 내 화학물질 농도

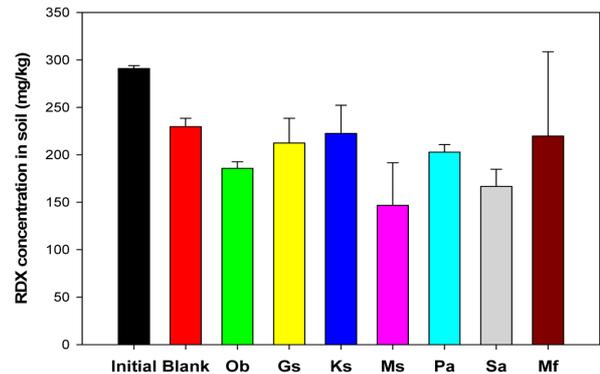
식물을 식재하지 않은 blank구에서 토양 미생물에 의한 화학물질 환원 및 무생물학적 제거로 TNT가 감소하여 실험종료시 농도가 83.5 mg/kg로 감소하였다. 화학물질 독성을 극복하고 생육이 관찰된 식물 포트 토양의 TNT 농도는 이보다 낮은 3.75~69.06 mg/kg 범위에 있었고, 갈풀, 물억새, 돌콩 순서로 TNT가 제거되었다(Fig. 5). 최종 포트토양의 TNT 농도는 초기농도에 비해 급격히 감소되었으나, 상기한 바와 같이 식물체가 흡수한 TNT는 많지 않았다. 매일초(*Catharanthus roseus*)와 앵무새깃(*Myriophyllum aquaticum*)에 의한 TNT 분해연구에서 monoamino 화합

Table 3. The concentration of azo- and azoxy compounds in the rhizosphere soil in the TNT treated pots

Plant	Average concentration (mg/kg)		
	44' azoxy	22' azo	44' azo
<i>Glycine soja</i> Siebold & Zucc.	6.58 (±2.82)	N.D.	N.D.
<i>Miscanthus sacchariflorus</i> (Maxim.) Benth.	0.74 (±0.16)	N.D.	N.D.
<i>Phalaris arundinacea</i> L.	0.50 (±0.20)	N.D.	N.D.

물(2ADNT 및 4ADNT)은 식물에 의해 1차 환원과정을 통해 생성되고, 2,4- 및 2,6-diaminotoluenes과 azoxy 화합물은 강한 환원 조건과 수산화아민(hydroxylamine, NH_2OH)의 의해 생성된다(Subramanian and Shanks, 2003; Yoon et al., 2005). 또한 TNT는 토양에서 생물학적/무생물학적 반응에 의해 azo- 및 azoxy- 화합물로 중합되고, 약 40%가 토양에 비가역적으로 결합하여 추출이 불가능하였다(Comfort et al., 1995). 이에 TNT 첨가구 토양에 대해 4,4',6,6'-tetranitro-2,2'-azotoluene(2,2'-Azo), 2,2',6,6'-tetranitro-4,4'-azotoluene(4,4'-Azo) 및 2,2',6,6'-tetranitro-4,4'-azoxytoluene(4,4'-Azoxy)을 추가로 분석하였다. 그 결과, 돌콩, 물억새, 갈풀을 재배한 TNT 첨가구 토양에서 2,2'-Azo 및 4,4'-Azo는 불검출되었으나, 4,4'-Azoxy가 0.4~6.58 mg/kg 범위로 검출되었다(Table 3). 이 결과는 상기 연구에서와 같이, TNT는 분해과정에서 상당량의 TNT가 azoxy- 혹은 azo- 화합물로 전환되어 토양 내 축적됨을 의미한다.

RDX 첨가구에서 식물을 식재하지 않은 blank구의 최종토양농도는 229.7 mg-RDX/kg이었다. 반면 식물을 식재한 최종토양농도는 146.69~222.50 mg-RDX/kg으로, 토양의 RDX가 초기농도 대비 24~50%가 제거되었으며, 물억새 식재구에서 가장 많이 제거되었다(Fig. 6). 식물에 의한 RDX 분해기작은 (i)식물체에 의한 화약물질의 직접 흡수 및 분해 (ii)잎에서의 광분해 (iii)식물체 뿌리에서 배출되는 삼출물(exudates)에 의한 근권미생물 활성화에 의한 생물학적 분해증진에 의한 것으로 구분할 수 있다. Just and Schnoor(2004)는 갈풀 RDX 용액 수경재배에서 태양광을 모사한 빛에 노출된 갈풀 앞에서 RDX의 1차 분해산물로 N_2O 와 4-nitro-2,4-diazabutanol이 검출되었는데, 잎을 통과하는 UV에 의하여 흡수된 RDX가 분해되는 직접광분해와 엽록소 내부 세포막에 결합된 trap 엽록소가 RDX에 전자를 공급하는 간접광분해로 설명하였다. 이 두 기작을 합하여 식물광분해(phytophotolysis)로 하였다. Van Aken et al.(2004)은 조직 배양한 포플러(*Populus deltoides nigra* DN-34)를 사용하여 유사한 실험을 실시한 결과, 포플러 조직체는 RDX를 C-1 화합물로 분해하

**Fig. 6.** Concentrations of RDX in initial and final pot soil (Sa: *Stellaria aquatica*, Mf: *Melandryum firmum*, Gs: *Glycine soja*, Ks: *Kummerowia stipulacea*, Ob: *Oenothera biennis*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

는데 빛이 필요하였다. 본 연구에서 식물재배가 여름철에 진행되었기 때문에 식물광분해도 다른 RDX 제거 기작과 함께 중요한 요소가 되었으리라 사료된다.

3.5. 토양 급성 독성 분석 결과

식물 및 근권미생물에 의해 전환되는 화약물질 전환산물에 대한 급성독성을 측정하여 무독화 여부를 확인하였다. Lumistox로 발광저해도(%)를 기본으로 한 독성분석결과는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. 초기 TNT 오염토양은 207.4 mg/kg의 고농도이어서 TNT 독성발현으로 74%의 높은 발광저해도가 관측되었다. 실험 종료 후, 식물을 식재하지 않은 blank 토양에서는 51%의 발광저해도로 초기 토양에 비하여 감소하였지만, 134일 이후에도 토양 내 TNT 독성이 잔류함을 증명하였다. 식물 식재구에서는 물억새, 갈풀 및 돌콩에서의 발광저해도가 각각 17%, 20% 및 48%로 감소하였는데, 물억새 식재구에서의 독성감소가 가장 현저하였다. 초기 RDX 오염토양의 급성독성은 고농도(290 mg/kg)임에도 불구하고, 발광저해도는 27%로 매우 낮았다. 최종토양의 발광저해도는 blank 토양 28%, 식물 식재구는 19.8~27.5%로 측정되었는데, 물억새, 갈풀, 달맞이꽃 순으로 토양 급성독성이 감소하였다. 그러나 RDX 첨가구의 초기 및 최종토양의 발광저해도는 통계적

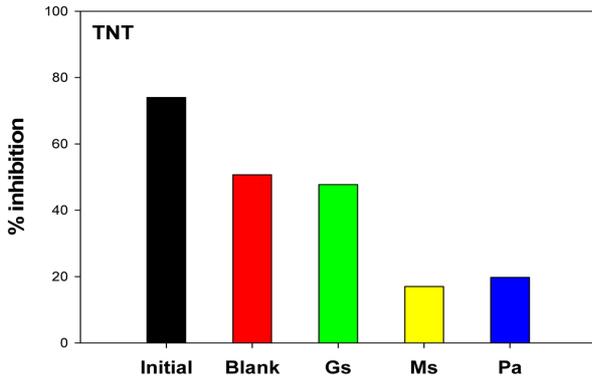


Fig. 7. Acute toxicity (% inhibition of luminescent bacteria) of TNT pot soil measured by Microtox equivalent Lumistox (Gs: *Glycine soja*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

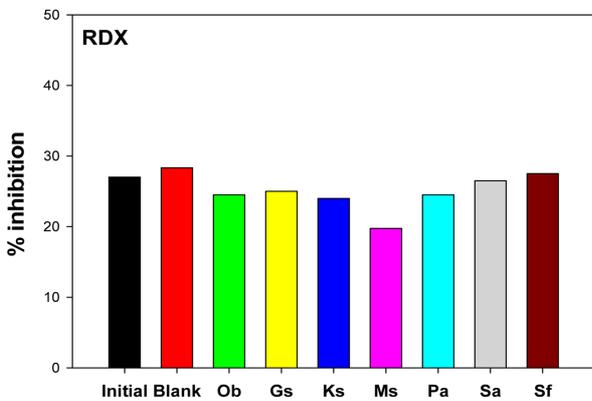


Fig. 8. Acute toxicity(% inhibition of luminescent bacteria) of RDX pot soil measured by Microtox equivalent Lumistox (Sa: *Stellaria aquatica*, Mf: *Melandryum firmum*, Gs: *Glycine soja*, Ks: *Kummerowia stipulacea*, Ob: *Oenothera biennis*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

Weyer and Geol(1995)는 발광박테리아(photobacterium phosphoreum)에 의한 Microtox™ 측정에서 발광을 감소가 50% 이상이면 맹독성(extremely toxic), 35~50% 고독성(highly toxic), 10~35% 중간독성(moderately toxic), 0~10% 약독성(weakly toxic), 0% 이하는 무독화라고 분류하였다. 식물재배 종료 후, TNT 첨가구에 식재한 갈풀과 물억새 재배토양의 발광저해도는 초기토양 대비 각각 54% 및 57%가 감소하여 맹독성에서 중간독성으로 독성기준이 완화되었다. TNT는 식물의 직접적 흡수나 뿌리에서 배출되는 삼출물에 의해 활성화된 근권미생물에 의하여 TNT가 제거되거나 분해되어 독성이 감소되었음을 의미한다. 그러나 RDX 첨가구의 초기 및 최종토양의 급성독성은 약 30% 미만으로 관측되어 중간독성단계로 독성

감소가 현저하지 않았다.

Schnoor et al.(2006)은 hybrid poplar 조직배양세포로 TNT와 RDX 흡수 및 제거 거동을 연구하면서, 수경재배 용액의 독성을 Microtox로 측정하였다. 그 결과 수경재배 용액에서의 독성이 13일 후 제거되었다. 본 연구결과에서도 식물식재구 전반에 걸쳐 발광저해도가 감소하였으므로, 식물식재에 의한 TNT와 RDX 농도 감소이외에도, 식물에 의해 전환된 물질 혹은 식물체에서 배출하는 물질의 독성이 어미물질인 TNT와 RDX에 비해 낮기 때문이라 할 수 있다.

3.6. 물질 수지

초기 및 최종 근권토양과 식물체 내 화학물질 농도 분석 결과를 종합하여 TNT 및 RDX 반응조의 물질수지를 산정하였다(Fig. 9 & Fig. 10). 식물을 정식하지 않은 blank는 토양 내 초기 TNT량 대비 60%의 TNT가 제거되었다. 반면에, 식물을 정식한 TNT 첨가구에서는 초기량 대비 95%의 TNT가 제거되고, 5%만이 토양 내 잔류하였다. Blank와 비교하였을 때 TNT 제거율이 매우 우수하지만 식물체내 흡수된 TNT량은 1% 미만으로 현저하게 낮은 수준이었다. TNT는 azoxy 화합물로 중합되어 토양에 흡착되거나, 비가역적으로 결합된 것으로 판단된다.

RDX 처리구의 blank에서도 토양 미생물 또는 기타 환경적인 요인에 의해 약 30%의 RDX가 제거되었다. 반면 식물식재구에서 초기 RDX대비 제거비율은 물억새(51%) > 쇠별꽃(43%) > 달맞이꽃(38%) > 갈풀(31%) 순이었고, 식물이 흡수한 RDX량은 갈풀(0.99%) > 쇠별꽃(0.78%) > 물억새(0.12%) > 달맞이꽃(0.03%)이었다. 이 중에서 갈풀 > 등근매듭풀 > 물억새의 순으로 생체량이 컸다. 초기 토양 RDX 농도가 고농도였으므로 상기 식물들은 RDX에 대한 내성과 흡수/분해능이 있음을 의미한다. Schnoor et al. (2006)은 조직배양한 포플러를 ¹⁴C-RDX 20 mg/L 용액에 넣고 빛에 노출시켜 명배양한 결과, 배양 60일 후 물질수지는 용액 15%, 완전무기화 17.2%, 조직추출물 13.3%, 잔류물 39.5%으로 총 85%로 산정되었다. 상기 실험의 대조구 물질수지는 용액 89.1%, 무기화 0%, 조직추출물 1.9%, 잔류물 92.6%로 산정되었다. 본 연구에서는 ¹⁴C-화약물질을 사용하지 않아 무기화 여부를 확인할 수 없지만, 식물을 기반으로 한 화학물질의 식물정화는 토양 및 토양 용액에서 화학물질을 흡수하고, 식물체내에 축적하거나 분해과정을 통하여 전환산물로 변환하여, 최종적으로 완전 무기화할 수 있음을 의미한다.

이상의 연구 결과를 종합하면 다음과 같다. 본 연구에

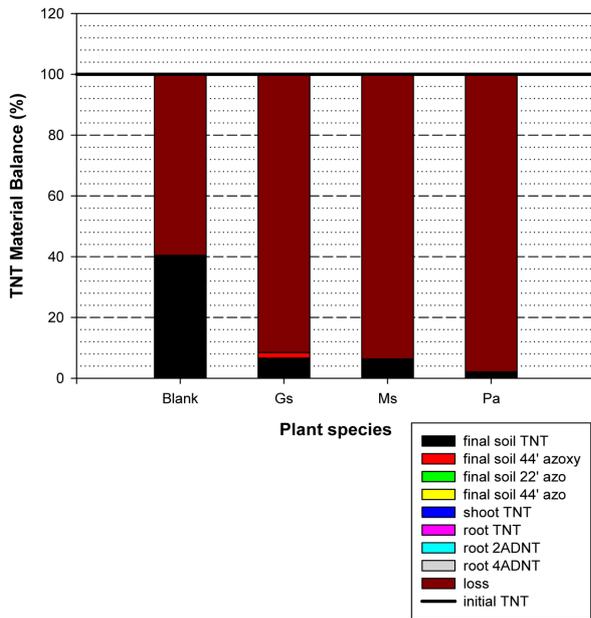


Fig. 9. Material balance in the TNT treated pot culture (Gs: *Glycine soja*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

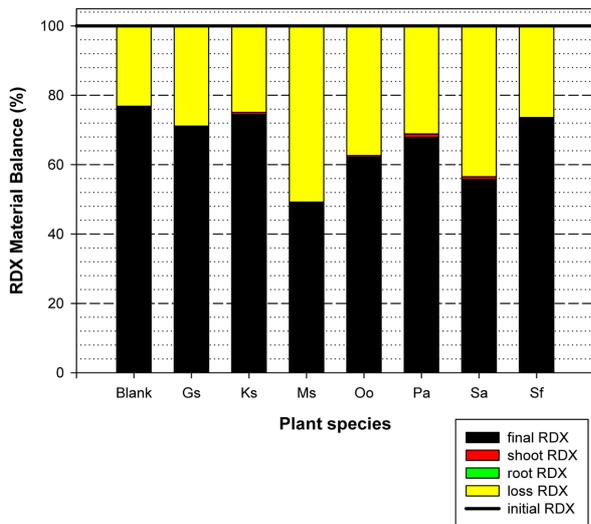


Fig. 10. Material balance in the RDX treated pot culture (Sa: *Stellaria aquatica*, Mf: *Melandryum firmum*, Gs: *Glycine soja*, Ks: *Kummerowia stipulacea*, Ob: *Oenothera biennis*, Ms: *Miscanthus sacchariflorus*, Pa: *Phalaris arundinacea*).

서 측정된 RDX의 TF는 2.3~21.0로 식물체가 흡수한 대부분의 RDX가 지상부로 이동되므로 식물광분해가 활발하다면, 지상부 RDX 농도가 낮아야 할 것이다. 실험 결과, 식물체내 RDX 농도는 물억새(720 mg/kg)가 돌콩(554 mg/kg) 다음으로 낮았고, 토양 RDX 잔류농도는 146.7 mg/kg으로 가장 낮았다. 그러므로 물억새는 실험한 다른

식물중에 비해 토양에서 활발히 RDX를 흡수하여 지상부로 이동하고, 잎에서의 식물광분해로 RDX를 제거하였다고 간접적으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

1) 국내 화학물질 오염토양을 정화하는 식물종을 선정하기 위해, 사격장에서 우점하는 식물종을 선별하여 pot 재배를 실시하였다. 화학물질 첨가구에 식재한 대부분의 식물들은 대조구 대비 화학물질의 독성과 스트레스로 인하여 성장률이 저조하였다. 그 중, 물억새와 갈풀은 생체량 및 길이성장이 감소하였으나 고농도 화학물질에 대한 내오염성이 있음을 확인하였다.

2) 식물에 의해 TNT는 지하부에 축적되고, RDX는 지상부로 이동되어 축적되었으며, 이 결과는 선행 연구결과와 일치하였다.

3) 식물을 식재한 TNT 첨가구 토양의 급성독성은 발광저해도로 초기 대비 최고 57%가 감소되어 화학물질의 무독화과정이 나타났으나, RDX 첨가구의 초기 및 최종토양의 발광저해도는 30% 이하로 측정되어 독성감소가 현저하지 않았다.

4) 초기/최종 토양 및 식물체 내 지상부/지하부 화학물질 농도를 고려하여 물질수지를 산정한 결과, TNT 첨가구에는 초기농도 대비 94% TNT가 제거되었고, 식물체내 흡수된 TNT양은 1% 미만이었다. RDX 첨가구에서 물억새가 51%의 우수한 제거율을 보였고, 갈풀은 선정된 식물 중 RDX를 지상부 1161 mg/kg, 지하부 80 mg/kg으로 축적하여 식물체 내 RDX 흡수량이 가장 높았다.

5) 벼과식물인 물억새, 갈풀은 화학물질에 대한 내성과 흡수능 및 제거능을 갖춘 다년생 토착식물로 군사격장 식물상정화공법 적용가능성이 높은 식물종으로 판명되었다.

사 사

본 연구는 환경부 환경산업기술원 GAIA Project No.173-111-036 지원으로 수행되었습니다. 온실식물관리에 도움을 주신 (주)에코존 위재경 대표에게 감사드립니다.

References

Bae, B., Kim, S.Y., Lee, I.S., and Chang, Y.Y., 2002, Kinetics of uptake and phytotransformation of 2,4,6-trinitrotoluene by indigenous grasses in hydroponic cultures, *Kor. Chem. Eng. Res.*, **24**,

675-687.

Bhadra, R., Wayment, D.G., Williams, R.K., Barman, S.N., Stone, M.B., Hughes, J.B., and Shanks, J.V., 2001, Studies on plant-mediated fate of the explosives RDX and HMX, *Chemosphere*, **44**, 1259-1264.

Burken, J.G., 2003, Uptake and metabolism of organic compounds: green-liver model, John Wiley and Sons, 59-84.

Cataldo, D.A., Harvey, S., Fellows, R.J., Bean, R.M., and McVeety B.D., 1989, An Evaluation of the Environmental Fate and Behavior of Munitions Materiel (TNT, RDX) in Soil and Plant Systems: The Fate and Behavior of TNT, USDOD Project Order No. 88PP8853, Pacific Northwest Laboratory, PNL-7370.

Chang, Y.Y., Y.S. Kwon, S.Y. Kim, I.S. Lee, and Bae, B., 2004, Enhanced degradation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) in a soil column planted with Indian mallow (*Abutilon avicennae*). *J. Biosci. Bioeng.*, **97**, 99-103.

Chen, D., Liu, Z.L., and Banwart, W., 2011, Concentration-dependent RDX uptake and remediation by crop plants, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, **18**, 908-917.

Comfort, S.D., Shea, P.J., Hundal, S., Li, Z., Woodbury, B.L., Martin, J.L., and Powers, W.L., 1995, TNT transport and fate in contaminated soil, *J. Environ. Qual.*, **24**(6), 1174-1182.

Fellows, R.J., Driver, C.R., Cataldo, D.A., and Harvey, S.D., 2006, Bioavailability of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) to the prairie vole (*Microtus ochrogaster*), *Environ. Toxicol. Chem.*, **25**(7), 1881-1886.

Gong, H.Y., Lee, K.P., Lee, J.Y., Kim, B., Lee, A., Bae, B., and Kim, J.Y., 2012, Assessment of soil loss at military shooting range by RUSLE model: Correlation between soil loss and migration of explosive compounds, *J. Soil Groundw. Environ.*, **17**(6), 119-128.

Harvey, S.D., Fellows, R.J., Cataldo, D.A., and Bean, R.M., 1991, Fate of the explosive hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in soil and bioaccumulation in bush bean hydroponic plants, *Environ. Toxicol. Chem.*, **10**, 845-855.

Hughes, J., Shanks, J., Vanderford, M., Lauritzen, J., and Bhadra, R., 1997, Transformation of tnt by aquatic plants and plant tissue cultures, *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 266-271.

Just, C.L. and Schnoor, J.L., 2004, Phytophotolysis of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in leaves of reed canary grass, *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 290-295.

Karami, A. and Shamsuddin, Z.H., 2010, Phytoremediation of heavy metals with several efficiency enhancer methods, *Afr. J. Biotech.*, **9**(25), 3689-3698.

Major, M.A., Reddy, G., Berge, M.A., Patzer, S.S., Li, A.C., and Gohdes, M., 2007, Metabolite profiling of ¹⁴C hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in Yucatan miniature pigs, *J. Toxicol. Environ. Health, A.*, **70**(14), 191-202.

Medina, V.F., Larson, S.L., Agwaramgbo, L., Perez, W., and Escalon, L., 2004, Treatment of trinitrotoluene by crude plant extracts, *Chemosphere*, **55**, 725-732.

Palazzo, A.J. and Leggett, D., 1986, Effect and disposition of TNT in a terrestrial plant, *J. Environ. Qual.*, **15**, 49-52.

Sarrazin, M., Dodard, S.G., Savard, K., Lachance, B., Robidoux, P.Y., Kuperman, R.G., Hawari, J., Ampleman, G., Thiboutot, S., and Sunahara, G.I., 2009, Accumulation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine by the earthworm *Eisenia andrei* in a sandy loam soil, *Environ. Toxicol. Chem.*, **28**(10), 2125-2133.

Schneider, K., Oltmanns, J., Radenberg, T., Schneider, T., and Pauly-Mundegar, D., 1996, Uptake of nitroaromatic compounds in plants: Implication for risk assessment of ammunition site, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **3**(3), 135-138.

Schnoor, J.L., Aken, B.V., Brentner, L.B., Tanaka, S., Flokstra, B., and Yoon, J.M., 2006, Identification of Metabolic Routes and Catabolic Enzymes Involved in Phytoremediation of the Nitro-Substituted Explosives TNT, RDX and HMX; Final Technical Report, SERDP CU1317, Civil and Environmental Engineering The University of Iowa, Iowa city, U.S.A.

Sens, C., Scheidemann, P., Klunk, A., and Werner, D., 1998, Distribution of ¹⁴C-TNT and Derivatives in Different Biochemical Compartments of *Phaseolus vulgaris*, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **5**(4), 202-208.

Sens, C., Scheidemann, P. and Werner, D., 1999, The distribution of ¹⁴C-TNT in different biochemical compartments of the monocotyledonous *Triticum aestivum*, *Environ. Pollut.*, **104**, 113-119.

Subramanian, M. and Shanks, J.V., 2003, Role of plants in the transformation of explosive. In: Phytoremediation: Transformation and control of contaminants. (McCutcheon, S.C. and Schnoor, J.L. eds.), New Jersey: Wiley-Interscience Inc., 389-408.

Thompson, P.L., Ramer, L.A., and Schnoor, J.L., 1998, Uptake and transformation of TNT by hybrid poplar trees, *Environ. Sci. Technol.*, **32**(7), 975-980.

Tu, C. and Ma, L.Q., 2002, Effects of arsenic concentrations and forms on arsenic uptake by the hyperaccumulator ladder brake, *J. Environ. Qual.*, **31**, 641-647.

USEPA, 2000, Drinking water standards and health advisories, EPA 822-B-00-001, USA.

USEPA, 2006, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846 method 8330B.

van Aken, B., Yoon, J.M., Just, C.L., and Schnoor, J.L., 2004, Metabolism and mineralization of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine inside poplar tissues (*Populus deltoides nigra* DN-34), *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 4572-4579.

Vila, M., Lorber-Pascal, M., and Laurent, F., 2007a, Fate of RDX and TNT in agronomic plants, *Environ. Pollut.*, **148**, 148-

154.

Vila, M., Mehier S., Lorber-Pascal, S., and Laurent F., 2007b, Phytotoxicity to and uptake of RDX by rice, *Environ. Pollut.*, **145**, 813-817.

Weyer, K.U. and Geol, P., 1995, Vertical ranking of toxicity tests

with luminescent bacteria, International Association of Hydrogeologists Congress, June 4-10.

Yoon, J.M., Oliver, D.J., and Shanks, J.V., 2005, Plant Transformation Pathways of Energetic Materials (RDX, TNT, DNTs), NABC Report **17**, 103-115.