

TNT(2,4,6-trinitrotoluene)와 카드뮴의 복합오염이 어저귀의 TNT 흡수 및 생물학적 전환에 미치는 영향

김선영 · 배범한* · 장운영** · 이인숙†

이화여자대학교 생명과학과, 경원대학교 토목환경공학과*,
광운대학교 환경공학과**

적 요: 군사지역은 TNT와 같은 화약물질이 중금속과 복합으로 오염되어 있다. 따라서 TNT에 대해 식물상 복원공법을 적용할 때 중금속이 식물체의 오염물 제거, 변환, 축적 능력에 영향을 줄 것으로 예상된다. 본 연구에서는 토착 야초류인 어저귀(*Abutilon avicennae*)를 TNT와 Cd으로 복합 오염된 배지에서 수경재배하여 카드뮴이 식물에 의한 TNT 제거 및 전환에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과, 20 mgTNT/L와 1.3 mgCd/L이 복합으로 존재할 때 잎의 탄력 감소, 말림 현상, 황백화 현상, 낙엽형성, 생체량 감소 등과 같은 식물 독성효과가 상승하였다. 그러나, 어저귀는 소량의 카드뮴만을 흡수하는 종으로 배지내 카드뮴이 1.3 mg/L 존재하더라도 TNT 제거, 변환, 이동 및 니트로기의 환원위치에 유의적인 영향을 받지 않는다. 따라서 카드뮴과 TNT로 복합오염된 지역에 어저귀를 식재하면 TNT를 효과적으로 제거하리라 사료된다.

검색어: 복합오염, 식물상 복원공법, 어저귀, TNT, 카드뮴

서 론

과학기술의 발달에 따라 다양한 종류의 화학물질이 대량으로 생산, 사용되어 이들 물질에 대한 환경 오염이 사회적인 문제로 대두되고 있다. 그 중 폭발성 물질에 대한 문제는 전 세계적으로 토양과 지하수 관리에 큰 부담으로 작용하고 있다. 폭발성 물질이란 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) 등으로 대부분 니트로기를 포함한 유기 화합물이며, 제1차, 2차 세계 대전, 한국 전쟁, 베트남 전쟁 등을 거치면서 전세계적으로 주요 재래 무기나 핵무기의 원료로 쓰여졌다.

미국의 경우 화약류로 오염된 토양에서 TNT, TNB, DNB, 2,4-DNT, 2,6-DNT, RDX, HMX, Tetryl 등이 많이 검출되었고 그 중 80% 이상이 TNT로 보고되었다(US EPA 1993). 화약산업의 주생산물인 TNT는 과거 오래 동안 다량 생산되어 군사 지역, 폭발 시험지역, 포사격장, 병기폐기 지역에서의 야외 폭발과 연소에 의해 지하수와 토양을 오염시켰다(Crockett, 1995). TNT는 미국 환경보호청(US EPA) 주요 오염물에 등재된 독성 물질로 곰팡이, 효모, 세균 등의 성장을 억제하고 돌연변이를 일으키며 피부 자극, 호흡기 계통 장애, 빈혈, 간에 대한 발암물질로 알려져 있다. Dodard 등(1999)에 의하면 Mutatox와 녹조류를 이용한 독성실험을 통해 질소 방향족 폭발물 중 TNT가 가장 독성이 큰 물질이었다. 또한 제 1차, 2차 세계 대전 동안 무기 제조공장의

노동자들에게서 치명적인 황달 증상과 빈혈이 나타났음이 보고되었다.

군부대 주둔 지역은 폭발성 물질 외에도 각종 연료(가솔린, 디젤), 윤활유, 폐유, 용매, PCP(pentachlorophenol), 페인트 폐기물(VOC), 중금속, 축전지(납), 드라이클리닝 폐기물(할로겐화탄소), 제초제 등 일반적인 토양 오염물질이 복합오염을 형성하고 있으며, 독일의 경우 군사부지에 대하여 수행된 정밀조사에서 주요 오염 물질 중 중금속이 14.8%를 차지하였다(Schaefer, 1997). 최근 국내의 포사격 훈련장에서의 토양 내 중금속 오염을 조사한 결과 포사격장의 카드뮴 농도가 대조군에 비해 38배 높게 나타나 카드뮴에 의한 오염이 심각한 것으로 나타났다(김 등 2002). 카드뮴은 ATSDR(American Agency for Toxic Substances and Disease Registry)에 의해 선정된 주요 오염물질 10위(priority hazardous substance top ten)에 속하는 오염 물질로서 토양에 축적될 시 이동성이 적어 토양생물에게 발암 물질, 돌연변이 유발, 기형생물을 유발시키는 등의 독성효과를 나타낸다(Degraeve 1981).

오염된 토양의 복원에는 물리화학적 공법, 생물학적 공법 등 매우 다양한 기술이 적용될 수 있다. 그 중에서 식물상 복원 공법(Phytoremediation)이 최근 고독물질로 오염된 지역에 대한 정화기술로 많은 주목을 받고 있다. 특히, TNT와 같은 화약류는 생산공장이나 군부대 사격장 등 일반인 제한 지역에서만 사용되고 누출되는 지역적 특성을 가지며, 이 지역은 장비와 인원 등의 투입이 제한되므로 기존의 물리·화학·생물학적 복원 방식에 비하여 phytoremediation이 효율적으로 적용될 수 있다.

본 연구의 목적은 발아율과 유식물 성장 실험을 통해 TNT를

† Author for correspondence; Phone: 82-2-3277-2375, e-mail: islee@mm.ewha.ac.kr

가장 효과적으로 제거할 것으로 예상된 어저귀(배 등 2001)를 TNT와 Cd으로 복합 오염된 배지에서 수경 재배하여 카드뮴이 식물에 의한 TNT 제거 및 생물학적 변환에 미치는 영향을 고찰하고 식물상 복원공법을 군부대 오염지역에 적용시킬 때 필요한 기초 자료를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

수경재배

2개월 된 어저귀를 이용하여 TNT와 카드뮴으로 복합 오염된 배지에서 어저귀에 의한 TNT 제거 및 생물학적 전환 효과를 관찰하였다. 19.5 mgTNT/L로 오염된 TNT 오염구와 18.7 mgTNT/L와 1.3 mgCd/L 복합 오염구, 1.3 mgCd/L 만으로 오염된 Cd 오염구를 준비하여 어저귀를 동일한 밀도로 168시간 동안 수경재배하였다. 카드뮴 농도는 어저귀 생장을 50% 저해하는 값(EC₅₀)에 근거하였으며, 이 값은 국내 수질오염 기준치의 약 60배이다. TNT농도는 미국 EPA DWEL값의 1,000배로 오염토양 침출수 및 하천에서의 TNT 평균 농도이다(U.S EPA 1989). 수경재배는 growth chamber(FitotronTM, SANYO Inc. JAPAN)에서 이루어졌고, 낮 처리는 25°C에서 max. 40,000 lux 16시간, 밤은 23°C에서 8시간, 60%의 습도를 유지하였으며, 모든 실험은 3반복 실험을 실시하였다. 실험구마다 오염물(Cd and/or TNT)만을 첨가한 무식물군을 대조구로 하여 실험장치에 의한 흡착과 광분해에 의한 TNT 손실을 측정하였다. 168시간 동안 배지 시료를 일정 시간마다 채취하여 TNT는 HPLC로 카드뮴은 Flame-AAS(Perkin Elmer, AAS analysis 100)로 분석하였다. 168시간 후 식물체를 수거하여 액체질소로 분쇄한 후 16시간 동안 추출한 후 HPLC로 분석하였다(U.S. EPA SW-846. method 8330). 식물 내 TNT(Chem Service, USA)와 TNT 중간산물인 2-amino-4,6-dinitrotoluene(2ADNT), 4-amino-2,6-dinitrotoluene(4ADNT), 2-hydroxyl amino-4,6-dinitrotoluene(2HADNT), 4-hydroxyl-amino-2,6-dinitrotoluene(4HADNT), 2,4-diamino-6-nitrotoluene(2,4DANT), 2,6-diamino-4-nitrotoluene(2,6DANT)은 AccuStandard, Inc.에서 구입하였고, 식물체 안에서 발견되는 TNT 및 TNT 중간산물의 RT 값을 비교하여 정성하였다. 분석용매의 조성은 phosphate buffer 20mM(pH=6.0) 용액과 methanol 비가 48 : 52이며, 유량은 0.98 mL/min이었다. 분석용 칼럼은 SHISEIDO CAPCELL PAK C₁₈ column(5 μm particle size, 250×4.6mm.I.D)이었고, 시료의 주입량은 5 μL이며, 검출기의 파장은 UV 230nm이었다.

배지에서의 오염물 제거 속도론

각각의 실험구에서 시간에 따른 오염물 제거를 비교하기 위해 배지내 오염물 농도를 측정하여 유사 1차 제거 속도상수(k)를 산정하고 식물체의 단위 중량당 제거율(K) 산정에 이용하였다.

$$\ln \frac{C}{C_0} = -k \cdot t \quad (1)$$

$$K = \frac{k}{P} \quad (2)$$

여기서, C는 TNT 농도(mg/L), t는 시간(hours), k는 유사 1차 제거 속도상수(h⁻¹), P는 식물밀도(wet plant concentration, g/mL)이다. K는 plant normalized rate constant(mL · g⁻¹ · h⁻¹)로 식물 고유의 오염물 흡수 능력을 반응조당 식물 밀도에 대해 일반화시킨 값으로서 (2)식을 이용하여 계산되었다.

결과 및 고찰

독성효과

어저귀를 TNT 오염구(19.5 mg/L), TNT+Cd 복합 오염구(18.7 mg/L, 1.3 mg/L), Cd 오염구(1.25 mg/L)에서 168시간 동안 수경 재배한 결과, 노출 60시간 이후 모든 구에서 잎의 탄력이 없어지고 말림 현상이 나타났으며, 아래쪽 잎부터 황색으로 변하고 낙엽현상이 진행되었다. 이러한 현상은 TNT와 Cd의 일반적인 식물 독성증후이다(Cho and Park 1999, Thompson *et al.* 1998, Smock *et al.* 1997). 노출 전·후의 식물체 생체량 변화를 측정한 결과 TNT + Cd 복합 오염구에서 42.93%의 생장 저해를 나타내었으며, TNT 오염구 30.13%, Cd 오염구 14.15%을 나타내어 복합 오염구에서의 생체량 감소가 가장 크게 나타났다(Table 1). 이는 0.1ppm Cd과 0.005% LAS가 복합으로 존재할 때 *Lemna minor*의 생장에 미치는 저해 효과가 상승하였음과 동일한 결과이다(Singh *et al.* 1994). 따라서 TNT와 Cd이 토양 내 복합으로 존재할 때 식물이 받는 독성 증후는 단일물질 보다 상승된 독성 효과를 나타낼 것으로 사료된다.

배지에서의 TNT 제거 속도론

어저귀를 TNT 오염구와 TNT+Cd 복합 오염구에 노출시켰을 때, 배지의 TNT 농도는 카드뮴 유무에 상관없이 유사 일차 속도 반응을 나타내었다(Fig. 1). 노출 168시간 이후, TNT 오염구에서 초기 TNT 양의 63.4%(±23.7)가 제거되었으며, 복합 오염구에서는 73.4%(±7.36)가 제거되어 복합 오염구에서 더 많은 TNT가 제거되었으나 Student T-test에 의하여 두 값 사이에는 통계적으로 유의적인 차이가 없었다(p>0.05). 유사 1차 TNT 제거 속도상수(k)는 TNT 오염구에서 0.18(±0.156) d⁻¹, 복합 오염구에서는 0.19(±0.067) d⁻¹로 비슷한 수치를 나타내었고, K값은 TNT

Table 1. Loss of biomass in *Abutilon avicennae* after exposed to 2,4,6-trinitrotoluene(TNT) and/or Cd over 168 hours(n=3)

	Initial biomass(g)	Biomass loss(%) after 168h
TNT treatment	37.54 ±*(0.76)	30.13 ± (2.78)
TNT + Cd treatment	38.21 ± (1.29)	42.93 ± (3.32)
Cd treatment	35.33 ± (1.17)	14.15 ± (3.57)

*() Standard Deviation.

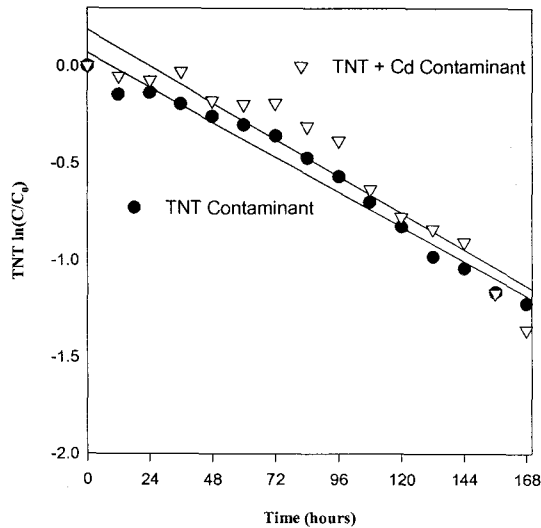


Fig. 1. Changes in 2,4,6-trinitrotoluene(TNT) concentration over the incubation period (168hr) in the hydroponic culture media of TNT and/or Cd by *Abutilon avicennae*.

오염구에서 $4.8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 복합 오염구에서는 $4.9 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 로 어저귀가 배지에서 TNT를 제거하는 데 있어 Cd이 영향을 미치지 않았다(Table 2). 무식물 배지에서의 TNT 농도는 168시간 동안 일정하여 TNT가 반응조 표면에 흡착하거나 광분해되지 않았으며, 카드뮴과 반응하여 전환되지 않았음을 보여 주었다.

TNT와 같은 유기 독성물질은 식물 뿌리 근처의 수분 유동에 의해 흡수되므로(Trapp and McFarlane 1995) 위의 결과는 Cd이 어저귀의 증산작용에 의한 수분 흡수능력에 영향을 주지 못했음을 나타낸다. 이처럼 식물체가 TNT에 노출되었을 때 지상부 성장과 생체량은 감소하였으나 광합성 작용 및 증산 작용은 영향을 받지 않았음이 보고되어(Sun *et al.* 2000), TNT가 식물의 생리 기능에 따라 다른 독성영향을 미침을 알 수 있다.

TNT 환원물 TNT 오염구와 TNT + Cd 복합 오염구 배지에서 TNT의 일차 환원물질인 4ADNT와 2ADNT가 검출되었다. 4ADNT는 각 오염구에서 12시간 경과 후 검출되기 시작하였으며, 2ADNT는 24시간 경과 후 부터 검출되기 시작하여 시간이 지남에 따라 그 양이 점점 증가하였다(Fig. 2). 4ADNT 유사 1차

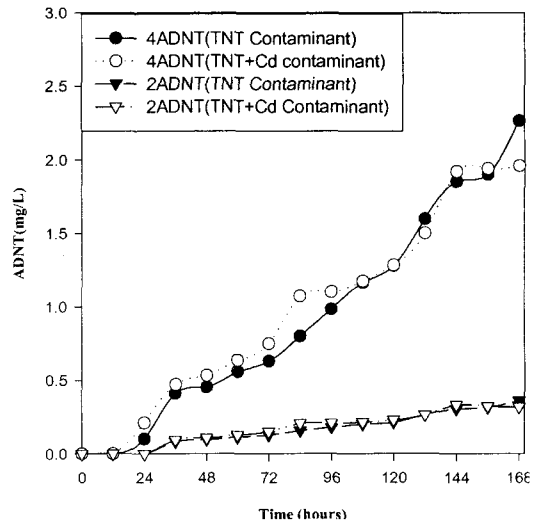


Fig. 2. Changes in 4(2)-aminodinitrotoenues(ADNTs) concentration over the incubation period (168hr) in the hydroponic culture media of TNT and/or Cd by *Abutilon avicennae*.

생성 속도상수(k)는 TNT 오염구에서 0.406 d^{-1} , 복합구에서는 0.322 d^{-1} 이었고, 2ADNT에 대한 k값은 각각 0.271 d^{-1} , 0.230 d^{-1} 로 두 오염구 간의 ADNTs 생성에 대한 k 값은 통계적(Student T-test)으로 유의적 차이가 없었다($p > 0.05$, Table 3). 따라서 어저귀에 의한 TNT 환원은 카드뮴에 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

ADNTs의 생성량을 살펴보면 TNT 오염구 배지에서 4ADNT가 $2.265 \text{ mg} (\pm 0.68)$, 2ADNT가 $0.362 \text{ mg} (\pm 0.051)$ 생성되었고, 복합구에서는 각각 $1.96 \text{ mg} (\pm 0.38)$ 과 $0.319 \text{ mg} (\pm 0.021)$ 생성되어 초기 TNT 양의 15.7%, 14.4%가 각각 ADNTs로 환원되었다($p > 0.05$). 이는 *Myriophyllum spicatum*을 168시간 동안 TNT에 노출하였을 때 초기 TNT 물수의 약 10~20%가 일차환원물질로 전환된 결과와 유사한 결과이다(Hughes *et al.* 1997, Pavlostathis *et al.* 1998). 또한 배지에서 생성된 4ADNT 양은 TNT 오염구와 복합구에서 2ADNT에 비해 모두 6배 이상 높았다. 이는 미생물에 의한 TNT의 생물학적 전환(Fiorella and Spain 1997)과 동일한 결과로서 식물과 미생물의 TNT 일차 환원경로는 para- 위치에서의 amination이 우점하며, 카드뮴이 TNT의 amination 위치에

Table 2. Uptake of 2,4,6-trinitrotoluene(TNT) in *Abutilon avicennae* culture medium at TNT and TNT + Cd contamination(n=3)

	TNT contaminant	TNT + Cd(Co-contaminant)
Removal(%)	63.36 ± 23.68	73.36 ± 8.24
Removal mass(mg/reactor)	12.35 ± 4.21	13.65 ± 1.99
Removal rates(mg/day)	1.728 ± 0.888	2.016 ± 0.264
Pseudo-first order rate constant (k, d ⁻¹)	0.18 ± 0.156 (R ² =0.971)	0.1889 ± 0.067 (R ² =0.913)
Plant-normalized rate constant(K, mL · g ⁻¹ · d ⁻¹)	4.8 ± 4.152	4.896 ± 1.56
Plant-normalized removal mass(mg · F.W.g ⁻¹)	0.33 ± 0.111	0.36 ± 0.0552

Table 3. First-reduction metabolites from TNT and TNT + Cd contaminant media(n=3)

	TNT contaminant	TNT + Cd (Co-contaminant)
2ADNT		
Formation mass(mg/reactor)	0.362 ± 0.051	0.319 ± 0.021
Formation rates(mg/day)	0.0528	0.0504
Pseudo-first order rate constant(k, d ⁻¹)	0.271(R ² =0.991)	0.230(R ² =0.943)
4ADNT		
Formation mass(mg/reactor)	2.265 ± 0.68	1.96 ± 0.38
Formation rates(mg/day)	0.319	0.298
Pseudo-first order rate constant(k, d ⁻¹)	0.406(R ² =0.867)	0.322(R ² =0.906)

영향을 미치지 않음을 의미한다.

아직까지 어저귀가 TNT 환원 효소를 뿌리 밖으로 배출한다는 연구 결과는 보고된 바 없으며 배지에서 검출된 과량의 1차 환원물질이 식물에 의한 것인지 미생물에 의한 것인지 확인할 수 없다. 그러나 본 실험에서는 반응조를 암 처리하여 TNT의 광 분해를 막고, 미생물에 의한 환원을 막기 위해 streptomycin sulfate(항생제)를 100 mg/L 과량 첨가하였으며, 미생물 거름 필터를 통해 공기를 주입하였으므로 배지에 존재하는 과량의 ADNTs가 식물에 의해 생성될 수 있음을 간과할 수 없다.

어저귀를 Cd 오염구와 TNT+Cd 복합 오염구에서 168시간 노출하였을 때, 배지의 Cd 농도는 약 96시간 이후부터 감소하였다(Fig. 3). 노출 168시간 이후, Cd 오염구에서는 초기 Cd 양의 6.14%(±2.32)가 제거되었으며, 복합 오염구에서는 7.36%(±2.14)가 제거되었다. 그러나 무식물 배지에서 유리 용기의 흡착에 의해 초기량의 3.3%가 제거되어 어저귀에 의해 제거된 카드

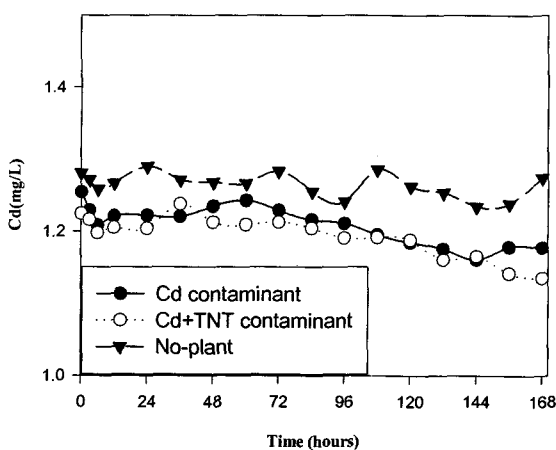


Fig. 3. Changes in Cd concentration over the incubation period(168hr) in the hydroponic culture media of Cd and/or TNT by *Abutilon avicennae*.

Table 4. Disappearance of Cd in *Abutilon avicennae* cultures at Cd and TNT +Cd contaminant media(n=3)

	Cd contaminant	TNT + Cd (Co-contaminant)
Removal(%)	6.14 ± 2.32	7.36 ± 2.14
Removal mass(mg/reactor)	0.077 ± 0.029	0.089 ± 0.026
Removal rates(mg/day)	0.00936 ± 0.00384	0.0096 ± 0.0024
Pseudo-first order rate constant (k, d ⁻¹)	0.00792 ± 0.00288	0.00888 ± 0.00139
Plant-normalized rate constant (K, mL · g ⁻¹ · d ⁻¹)	0.2256 ± 0.0792	0.228 ± 0.0312
Plant-normalized removal mass (mg · F.W.g ⁻¹)	0.0022 ± 0.00078	0.0023 ± 0.00059

뮴은 각각 2.84%, 4.06%에 불과하다. 유사 1차 Cd 제거 속도상수(k)는 Cd 오염구에서 0.00792(±0.00288) d⁻¹, 복합 오염구에서는 0.00888(±0.00139) d⁻¹로 어저귀에 의한 TNT 제거 속도상수 값의 5%에 지나지 않아 어저귀는 TNT에 비해 카드뮴을 미량 흡수하였음을 알 수 있다(Table 4). 따라서 어저귀는 카드뮴 차단 증으로 사료되며, 이러한 내성 기작으로 인해 카드뮴이 과량 존재하더라도 TNT가 단일 오염구와 동일하게 제거되는 것으로 사료된다. 실제로 식물이 중금속을 뿌리 밖으로 배출하거나 막투과성을 낮추어 중금속이 체내로 유입되는 양을 줄이는 등의 내성기작이 있음이 보고되었다(Prasad 1995).

식물체 내 TNT 전환물 및 물질 수치

수경재배 후 식물체를 추출한 결과 각 오염구의 뿌리와 줄기에서 모두 TNT 및 ADNTs가 발견되었으며, 모든구에서 ADNTs 양이 TNT에 비해 3배 가량 과량으로 존재하였다(Fig. 4). 배지에 존재하는 TNT와 ADNTs의 몰 비가 두 구에서 모두 약 5 : 2 임을 감안할 때 ADNTs는 TNT에 비해 뿌리에 잘 흡수되거나 또는 뿌리 세포 안에서 TNT가 환원될 수 있음을 나타낸다. 그러나 TNT의 logKOW 값이 2.05이며, 4ADNT는 2.10, 2ADNT는 1.85로 뿌리 통과정도는 비슷하다. 따라서 뿌리 추출액에 존재하는 과량의 ADNT는 TNT가 식물체에서 환원되어 생성되었음을 나타낸다. 또한 카드뮴 존재 여부에 상관없이 식물체 안에서 TNT 환원 대사가 활발히 일어나 TNT 양이 줄고 ADNTs 양이 증가한 것으로 사료된다.

168시간 이후 식물 반응조에서의 TNT 물질 수치는 Table 5와 같다. 실험 종료 후 초기 TNT 몰수 중 54.21%, 복합구는 44.12%만이 회수되었다. 식물체 내 존재하는 TNT와 ADNTs 양은 TNT 구에서 각각 0.55%, 1.76%, 복합 오염구에서 각각 0.88%, 2.13%로 존재하였다. Hughes 등(1997)은 *Myriophyllum aquaticum*과 *Catharanthus roseus*를 무균 배양한 결과 TNT와 ADNTs가 최고 0.4%, 1.4% 검출되어 본 실험과 유사한 결과를 나타내었다. TNT

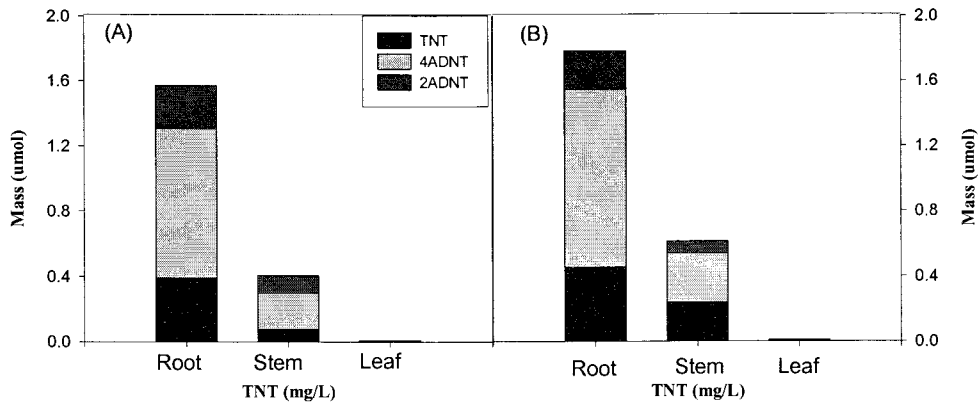


Fig. 4. Mass of TNT, 4ADNT and 2ADNT in extracts of *Abutilon avicennae* after incubation periods (168hr) in the hydroponic culture media of TNT(A) and TNT+Cd(B).

Table 5. Mass balance data from systems after 7 days of incubation

Sample	TNT (% mol added)	4A26DNT (% mol added)	2A46DNT (% mol added)	recovery (% mol added)
TNT Medium	36.3	13.5	2.15	
Plant extaction	0.55	1.31	0.45	
Total	36.8	14.81	2.6	54.21
TNT+ Cd Medium	26.6	12.4	2.01	
Plant extaction	0.88	1.74	0.39	
Total	27.48	14.14	2.5	44.12

구와 복합구 배지에서 TNT가 약 63%, 73% 제거되었나 식물중의 TNT와 ADNTs가 이처럼 소량인 것은 식물이 TNT를 축적하지 않고 식물 고유의 대사과정을 통해 전환하기 때문이다. 실제로 식물체에 흡수된 TNT는 ADNTs로 전환된 후 식물체 안의 당, 아미노산, 유기산의 -NH₂ 활성자리와 치환하여 결합체를 형성할 수 있음이 보고되었다(Bhadra *et al.* 1999). 이처럼 어저귀는 카드뮴은 차단하고 TNT는 식물체 안으로 흡수한 후 독성이 덜한 환원물질 및 결합체로 전환시킬 수 있으므로 어저귀를 TNT와 카드뮴으로 복합 오염된 토양에 식생하였을 때 초식동물의 잎 섭취에 따른 생물농축 현상을 방지할 수 있을 것이다. 앞으로 식물상 복원공법을 통해 어저귀를 활용하고자 할 때 토양내 TNT를 최대한 흡수·전환 하고 일차 생산량을 증가시키기 위해 TNT 오염물에 대한 어저귀의 생리적 기작을 밝히는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30900-002-3)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

인용문헌

김현아, 배범한, 장운영, 이인숙. 2002. 철광산 및 포사격장 식물의 중금속 축적에 관한 연구. 한국생태학회지 25:7-14.

배범한, 김선영, 이인숙, 장운영. 2001. 2,4,6-trinitrotoluene에 대해 내성을 지닌 토착 식물종 선정에 대한 연구. 한국지하수토양환경학회지 6: 3-11.

Bhadra, R., D.G. Wayment, J.B. Hughes and J.V. Shanks. 1999. Confirmation of conjugation processes during TNT metabolism by axenic plant roots. Environ. Sci. Technol. 33:446-452.

Cho, U.H. and J.O. Park, 1999. Distribution and phytotoxicity of cadmium in tomato seedlings. Journal of Plant Biology 42:49-56.

Crockett, A.B., Craig, H.D., Jenkins, T.F. and Sisk, W.E. 1995. Field sampling and selecting on-site analytical methods for explosives in soil. EPA/540/S-97/501, pp.1-9.

Degraeve, N. 1981. Carcinogenic, teratogenic and mutagenic effects of cadmium. Mutat. Res. 86:115-135.

Dodard, S.G., A.Y. Renoux and J. Hawari. 1999. Ecotoxicity characterization of dinitrotoluenes and some of their reduced metabolites. Chemosphere 38:2071-2079.

Fiorella, P.D. and J.C. Spain. 1997. Transformation of 2,4,6-trinitrotoluene by *Pseudomonas pseudoalcaligenes* JS52. Appl. Environ. Microbiol. 63: 2007-2015.

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

Pavlostathis, S.G., K.L. Comstock, M.E. Jacobson and F.M. Saunders. 1998. Transformation of 2,4,6-trinitrotoluene(TNT) by the aquatic plant *Myriophyllum spicatum*. Environ. Toxicol. Chem. 17: 2266-2273.

- Prasad, M.N.V. 1995. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants. *Environmental and Experimental Botany* 35:525-545
- Schaefer, K.W. and F. Boeren. 1997. International experience and expertise in registration, investigation, assessment, and clean-up of contaminated military sites. Research Project No. 10340102/01 UBA-FB 97-012/e Federal Environmental Agency.
- Singh, J., G. Chawla, S.H.N. Naqvi and P.N. Viswanathan. 1994. Combined effect of cadmium and linear alkyl benzene sulfonate on *Lemna minor* L. *Ecotoxicology* 3:59-67.
- Smock, L.A., D.L. Stoneburner and J.R. Clark. 1997. The toxic effects of trinitrotoluene(TNT) and its primary degradation products on two species of algae and the fathead minnow. *Wat. Res.* 31:266-271.
- Sun, W.H., G.L. Horst, R.A. Drijber and T.E. Elthon. 2000. Fate of 2,4,6-trinitrotoluene in axenic sand culture systems containing smooth bromegrass. *Environ. Toxicol. Chem.* 19:2038-2046.
- Thompson, P.L., L.A. Ramer, A.P. Guffey and J.L. Schnoor. 1998. Decreased transpiration in poplar tree exposed to 2,4,6-trinitrotoluene. *Environ. Toxicol. Chem.* 17: 902-906.
- Trapp, S. and J.C. McFarlane 1995. Plant contamination : Modelling and Simulation of Organic Chemical Process, Lewis Publisher, Boca Raton.
- US EPA. 1993. Approaches for the remediation of federal facility sites contaminated with explosives or radioactive wastes. EPA/625/R-93/013
- US EPA. 1989. Office of Drinking Water. Health Advisory on 2,4,6-trinitrotoluene. PB90-273566

(2002년 2월 23일 접수; 2002년 4월 1일 채택)

Combined Effect of 2,4,6-trinitrotoluene(TNT) and Cadmium on Uptake and Phytotransformation of TNT by *Abutilon avicennae*

Kim, Sun-Young, Bumhan Bae*, Yoon-Young Chang** and In-Sook Lee†

Dept. of Life Science, Ewha Womans University, Seoul, Korea

Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungwon University, Seoul, Korea*

Dept. of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea **

ABSTRACT : Most of army depots contaminated with co-contaminants, 2,4,6-trinitrotoluene(TNT) and heavy metals. In phytoremediation for the TNT, heavy metals may inhibit mineralization, transformation and sequestration of TNT by the plant. We studied effect of cadmium on TNT degradation and transformation by *Abutilon avicennae* in hydroponic cultures. When cultured in 20 mgTNT/L and 1.3 mgCd/L, the plant displayed phytotoxicities; reduction of leaf fresh, leaf roll, chlorosis, leaf loss and fresh weight loss. Phytotoxicity was severer in the combined contaminants than in single contaminant. Because *A. avicennae* uptake just a little cadmium, 1.3 mgCd/L included in the TNT medium did not influence significantly TNT transformation, translocation and distribution by *A. avicennae*. Therefore, the soil solution containing cadmium would not affect TNT degradation by *Abutilon avicennae* in Army depots polluted with TNT.

Key words : *Abutilon avicennae*, Cadmium, Co-contaminants, Phytoremediation, TNT(2,4,6-trinitrotoluene)
