

자생식물 자귀풀 유식물에 의한 RDX 흡수, 분해 및 식물독성

이영기¹ · 배범한^{2*}

가천대학교 토목환경공학과

Uptake, Degradation and Phytotoxicity of RDX by Indigenous Plant *Aeschynomene indica* (Indian jointvetch) Seedling

Younggi Lee¹ and Bumhan Bae^{2*}

¹K-Water, Daejeon 34350, Korea

²Department of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

ABSTRACT

High explosive compounds such as RDX (hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine) from military shooting ranges may pose human health and ecological risks. In pot culture studies, Indian jointvetch (*Aeschynomene indica*) was evaluated as a candidate indigenous plant species for phytoremediation of RDX. The concentration of RDX ranged from blank to 10, 100, 150, 200, 300, and 400 mg/kg, and an Indian jointvetch seedling (approximately 5 cm) was transplanted into a pot containing shooting range soil. The pot culture lasted for 21 days in a controlled growth chamber. The toxic effects of RDX, such as necrosis on leaf edges, biomass reduction, and leaf/stem abscission, started with a 100 mg/kg to 400 mg/kg treatment. The effective concentration (EC₅₀) based on dry weight (n=10 for each treatment) for above-ground, root, and whole plant was 222.5, 69.6, and 181.4 mg-RDX/kg-soil, respectively. The analysis of RDX in the plant (n = 3) indicated a log-linear relationship between plant and soil RDX concentrations, with 95% of RDX translocated to the above-ground part. The maximum concentration was 6,259.9 µg/g-DW in the 400 mg-RDX/kg treatment. Furthermore, the cultivation of Indian jointvetch enhanced RDX removal by over 10% compared to the control group that did not culture the plant. Therefore, Indian jointvetch is a prominent native plant species for the phytoremediation of RDX at a military shooting range.

Key words : EC50, Explosives, Indian jointvetch, Phytoremediation, RDX, Shooting range

1. 서 론

고폭화약물질(High explosive)인 RDX(hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine)는 가장 널리 사용되는 화약물질 중의 한 종류로, 생물학적으로 난분해성이며 휘발성이 낮고(무차원 헨리상수, $H' = 2 \times 10^{-11}$), 중간 정도의 용해도(42 mg/L)와 낮은 Kow (LnKow = 0.87)로 토양에서 쉽게 이동하는 물질이다(Ainsworth et al., 1993). 독성과 발암성을 가진 RDX는 환경으로 배출되면 생태계에 악영향을 주고, 인체

위해가 높아서 미국 EPA에서는 먹는물 평생기준을 2.0 ppb로 엄격하게 규정하고 있다(US EPA, 1998). 군사격장에서 실탄 사격훈련 중에 불발 및 불완전폭발로 인해 환경으로 배출되는 화약물질은 토양에 침적된 다음 강우에 의해 지하수로 이동하거나, 오염토양과 입상의 잔류화약물질이 수계로 유입되어(Park et al., 2008; Bae and Park, 2014) 수체에 악영향을 주고 수원으로 사용될 경우 인체에 위해를 줄 수 있다. 또한 국내 경기도 ○○사격장의 위해성 평가 결과, 피탄지 인근 지역에서 RDX에 의한 비발암 위해도 50 이상으로 평가되어 정화가 필요한 것으로 보고된 바 있다(Ryu et al., 2007).

군사격장은 대부분 오지에 위치하여 동력원을 설치하기 어려운 반면, 부지가 넓어 식물상 정화공법과 같은 친환경적 정화법을 적용하기에 적합하다. 다수의 연구에 의하면 갈풀을 포함한 9종의 정수 및 수생식물(Best et al., 1997),

주저자: 이영기, K-water, 부장

*교신저자: 배범한, 가천대학교 토목환경공학과 교수

E-mail: bhbae@gachon.ac.kr

Received : 2025. 8. 21 Reviewed : 2025. 9. 4

Accepted : 2025. 10. 2 Discussion until : 2025. 12. 31

옥수수, 콩, 빨간 무, 상추, 토마토 등의 작물(Cataldo et al., 1990; Larson, 1997), 밀과 벼(Vila et al., 2007a)와 같은 곡물, 호밀풀 및 토끼풀을 포함하는 많은 수의 초본식물(Rocheleau et al., 2008; Winfield et al., 2004)과 목본인 포플라(Thompson et al., 1999)도 토양에서 RDX를 흡수/분해하였다. 식물이 흡수한 RDX는 곧바로 잎과 줄기를 포함하는 지상부로 이송되는데, 식물중에 따라 60% (Thompson et al., 1999) 혹은 80% 이상(Vila et al., 2007b)이 지상부에서 검출되었다. 지상부에서는 식물 효소에 의한 분해와 광분해가 동시에 발생하여 RDX보다 극성이며, 분자량이 300배 이상이 되는 전환산물이 생성되었다(Larson et al., 1999; Just and Schnoor, 2004). Hagan et al.(2016)은 16종의 속씨식물을 RDX 오염토양(농도 100, 500 및 1000 mg/kg)에 파종하여 75일간 재배하였다. 그 결과 16종의 식물에서 생장 저해가 관측되었고, 2종의 식물에서는 오히려 생장이 증진되었다. 특히 콩과식물인 왕관칼리나물(*Coronilla varia*)은 잎에 최대 36 mg/plant의 RDX를 축적하였다.

RDX를 분해할 수 있는 식물종이 다양하므로 국내 군 사격장에는 자생식물을 적용하는 것이 자연생태계 교란을 최소화 할 것이다. 상기한 경기도 ○○사격장 조사과정에서 현장에 자귀풀(*Aeschynomene indica*) 군락이 발견되었는데, 자귀풀은 파일럿 규모의 온실 실험에서 화약물질인 TNT(2,4,6-Trinitrotoluene)의 분해에 효과적임이 보고되었다(Lee et al., 2007). 콩과 식물인 자귀풀은 논두렁 및 제방에서 생장하므로 제방이 많은 국내 사격장에 적합하며, 현장에서 종자를 채종할 수 있으므로 종자수급에도 유리하다.

이에 본 연구에서는 자귀풀에 의한 식물상 정화 적용가능성을 검증하기 위해 해당 사격장 토양을 채운 화분에서 자귀풀 유식물을 재배하여 RDX의 흡수/분해 정도를 확인하고, 식물체량에 근거한 EC₅₀(Effective concentration)을 산정하였다. 사격장 RDX 오염도와 자귀풀의 RDX에 대한 내성 및 식물체내에서의 분해여부를 비교한 결과, 자귀풀의 현장적용 가능성이 있음을 확인하였다.

2. 실험방법 및 분석방법

2.1. 화분실험

개황조사와 정밀조사에서 확인된 ○○사격장 오염도는 피탄지 RDX 평균 및 최고 농도가 각각 13.4 및 57.1 mg/kg 이고, 식물이 없는 포탄 crater에서는 529.6 mg/kg이었다(Ryu et al., 2007). 이에 피탄지와 가깝지만 화약물질로 오염되지 않은 곳에서 토양을 채취한 후, 실험실에서

화약물질을 분석하여 재확인하였다. 대상 사격장 토양은 순도 99% 이상의 RDX로 인위적으로 오염시켰는데, 오염도는 각각 무처리군(Blank), 10, 100, 150, 200, 300 및 400 mg/kg으로 하였다. 화분실험은 미국 EPA의 'Ecological effects test guideline'(US EPA, 2012)에 의해 수행하였다. RDX를 흡착하지 않는 재질의 화분에 RDX 오염토양 65 g을 농도별로 10개씩 넣은 다음, 미리 사격장 비오염토에서 파종하여 길이 5 cm로 재배한 자귀풀 유식물을 각각 1개씩 정식하였다. 준비된 화분은 식물생장상에서 낮/밤 18/6시간, 광도 20,000 Lux, 온도 25°C 및 습도 40% 조건에서 21일간 재배하였다. 또한 자귀풀 생장을 돕기 위해 액체 비료(하이포넥스, 하이포넥스코리아)를 1/1000배 희석해 매일 5 mL씩 주입하였다. 이때 토양미생물에 의한 RDX 분해를 확인하기 위해 대조군으로 각 농도별로 2배수의 대조군(Control) 반응조도 동일하게 운영하였다.

실험 종료 후, 모든 식물체(n=10)를 뿌리가 상하지 않게 수거하여 생체량 및 건조중량을 측정하고, 생장이 활발한 3개체와 대조군 토양은 별도로 수거하여 토양과 식물체 내 RDX 및 전환산물 농도를 분석하였다. 또한 토양의 DHA(Dehydrogenase Activity)를 측정하였다.

2.2. 분석방법 및 화약물질

토양 RDX 분석방법은 SW-846 method 8330B(US EPA, 2006)를 일부 수정하여 사용하였다. 방법은 다음과 같다. 토양은 알루미늄 접시에 담아 상온의 암소에서 풍건하고, 건조한 시료는 30번 체를 이용하여 체가름한다. 40 mL amber vial에 토양시료 10 g과 ACN(Acetonitrile) 20 mL을 첨가한 후, Teflon-lined cap으로 밀봉하고 20°C 이하의 초음파 수조에서 18시간 동안 초음파로 추출한다. 이후 30분간 토양을 침전시키고, 상정액 5 mL과 5 g/L CaCl₂ 용액 5 mL을 vial에 충분히 혼합시킨 후 15분간 침전하여 상정액을 0.2 µm PTFE filter(Whatman Co.)로 여과하였다. 이때 초기의 3 mL은 버리고 나머지 시료를 HPLC 분석하였다.

식물체에서의 화약물질 추출은 보고된 방법을 사용하였다(Lee and Bae, 2015). 식물체는 3차 증류수로 깨끗하게 세척하고 -40°C에서 동결건조한 다음, 0.5 cm 크기로 절단하였다. 절단 식물체는 액체질소를 담아 동결시키고 스테인리스 막자와 사발로 잘게 분쇄한 다음 토양과 동일한 방법으로 추출하였다. 이때 추출단계에서 식물체 화약물질의 회수율을 검증하기 위해 1,3-DNB(dinitrotoluene)를 주입하였고, 추출 시료는 극성물질을 florisis로 제거한 다음, HPLC로 분석하였다. 식물체 분석실험 결과, DNB 회수율은

$93.2 \pm 5.4\%$ 이었다.

RDX 및 전환산물인 MNX(mononitroso-RDX), DNX(Dinitroso-RDX) 및 TNX(Trinitro-RDX)는 HPLC-UV로 분석하였다. HPLC는 Varian ProStar 소프트웨어를 사용하였고, 분석칼럼은 Shiseido CAPCELL PAK RP C-18 column(4.6×250 mm, 5 μ m)이며, 유량 0.8 mL/min(Water : Methanol = 45 : 55), UV 230 nm, 40°C의 조건으로 운영하였다. 추출한 시료는 2회 분석하고 그 평균값을 사용하였다. 미량 RDX 농도 7회 분석으로 산정한 HPLC 검출한계는 3 μ g/L, 정량한계는 31 μ g/L이었다.

토양특성은 산림과학원(NIFoS, 2014)법을 사용하였는데, 토양 pH는 토양:중류수(1:5) 방법으로, 유기물 함량은 강열감량법으로, 토성은 피펫법으로 측정하였다. 식물 재배 전후 토양의 DHA는 Pepper and Gerba(2004)법으로 측정하였다.

RDX(99%+)는 국방과학연구소에서 공급받았고, HPLC 정량에 사용한 표준물질은 AccuStandard (New Haven, CT, USA)에서 구매하였다. 전환산물인 MNX, DNX 및

TNX는 모두 Technical grade(순도<70%)로 SRI International의 Dr. R. Spangord가 공여해 주었다. 전환산물을 확인할 수 있었으나, 순도가 낮아 정량하지는 못했다. 실험에 사용된 추출용매, 분석용매는 모두 HPLC급이었으며, 다른 화학물질은 ACS급이었다. 또한 RDX 인공오염원수 제조에는 고순도(18.3 M Ω -cm) 탈이온수를 사용하였다. 실험 자료는 Microsoft Excel 2016을 사용하여, 신뢰한계 95% 및 이분산 가정 두 집단의 조건으로 T-test를 실시하였다.

3. 결과 및 분석

3.1. 화분에서 자귀풀 생장

채취한 토양의 pH는 6.98로 중성이었으며, 토성은 silty sand이고, 식생이 잘 유지되어 유기물 함량은 19.5%로 높은 편이었다. 다만 토성에 미사함량이 높아 물빠짐이 매우 우수하지는 않았다. 자귀풀 재배시에도 관수에 많은 시간이 소요되었다.

자귀풀 화분 실험 결과, 일부 자귀풀에서는 화약물질에

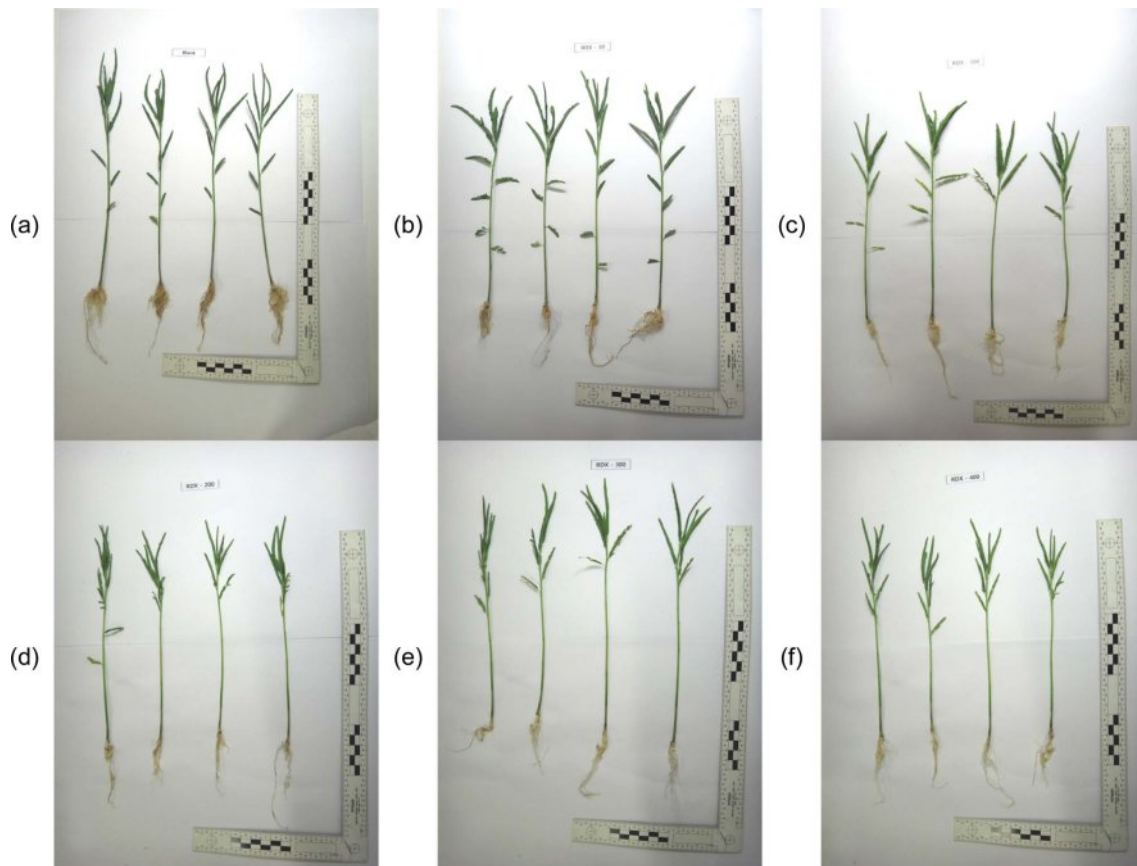


Fig. 1. Comparison of *Aeschynomene indica* seedling growth reveals decreased root development and increased branch abscission with higher RDX concentration (mg/kg) in the pot soil. (a) blank, (b) 10, (c) 100, (d) 200, (e) 300, (f) 400.

의한 스트레스로 인하여, RDX 200 mg/kg 이상 고농도에서 자귀풀 잎의 끝부분이 새까맣게 타들어가는 현상이 발생하고, 토양 RDX 농도에 비례하여 길이생장이 저해되는 것이 관측되었다. 수확한 자귀풀을 비교하면 더욱 명확하다(Fig. 1). RDX 농도 100 mg/kg 이상에서는 잎과 아래 줄기의 탈락(abscission)현상이 발생하였는데, 이와 같은 잎/줄기의 탈락 현상은 타 연구에서도 보고되었다. 최고농도 4,000 mg-RDX/kg의 토양에 6종의 외떡잎식물과 9종의 쌍떡잎식물을 12일간 재배한 결과, 쌍떡잎식물에서만 줄기의 탈락이 관측되었다(Winfield et al., 2004). 탈락구역(abscission zone)은 쌍떡잎식물의 잎자루(petioles)나 꽃자루(pedicels)에 생성되는 조직으로, 식물발달단계에 의해 또는 영양물질 부족, 탈수, 저산소 등의 외부 환경조건 스트레스로 인해 활성화되어 탈락구역의 세포벽이 변형되어 잎/줄기를 탈락시킨다(Li and Su, 2024).

그러므로 RDX에 의한 다양한 산화 스트레스(Yang et al., 2021) 및 식물생리 변화로 인해 쌍떡잎식물의 탈락현상이 발생한 것이라 판단되며, 먼저 발생하여 다량의 RDX에 노출돼 스트레스를 받은 하부 가지부터 순차적으로 탈락한 것이라 추론할 수 있다. 반면 외떡잎식물은 잎이 줄기를 감싸는 잎집(sheath) 구조이므로, 잎이 노화/건조되어도 탈락하지 않고 그대로 유지되어 생체량도 감소하지 않는다. 이와 같은 구조적 차이는 생체량에 근거하여 영향농도값을 결정함에 있어 오류 혹은 편의의 원인이 될 수 있다. 생물로 기능하지 못하지만 중량에 포함되므로 상대적으로 높은 EC값을 산출하는 것이므로, 실험 자료 선별에 각별한 주의가 필요할 것이라 사료된다.

또한 Fig. 1에서와 같이 RDX 100 mg/kg부터 농도 증가에 따라 식물뿌리의 밀도 및 길이생장 감소가 확인된다. 토양 RDX 농도 100 mg/kg은 RDX의 잠재적 위해 판단 및 정화목표 설정을 위한 기준으로 제시된 바 있다(Talmage et al., 1999). 식물체량의 변화를 건조중량(n = 10)으로 비교하면 Fig. 2와 같다. Blank 처리군에서 지상부 및 뿌리 건량은 각각 145.3 ± 35.5 및 35.1 ± 17.1 mg-DW이었으나, RDX 100 mg/kg에서는 지상부 및 뿌리 건량은 각각 83.7 ± 22.7 및 17.8 ± 5.8 mg-DW로 감소하였는데, 통계적으로 유의($p < 0.05$)하였다. 반면 RDX 400 mg/kg에서는 각각 67.6 ± 11.3 및 16.0 ± 4.6 mg-DW로, RDX 100 mg/kg 이상 농도에서는 감소세가 둔화되어 일정값에 접근하는 형태를 보이고 있다. RDX 농도 증가에 의한 길이생장 저해, 가지 탈락 및 생체량 감소와 같은 명확한 독성 효과에도 불구하고, 21일간의 실험에서 각 농도별로 식재한 자귀풀 유식물 10개체는 모두 성장하였다. 이 결과는 Winfield et

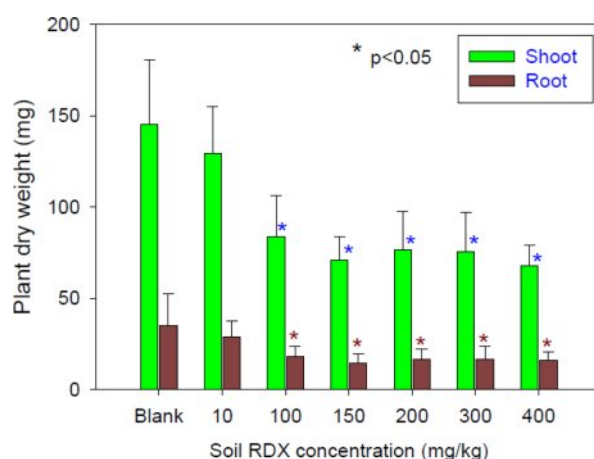


Fig. 2. Comparison of the dry weight of shoots and roots of *Aeschynomene indica* seedlings cultivated in pot culture for 21 days. Error bar represents standard deviation.

al.(2004)가 15종의 식물체에서 관측한 것과 같이, 성장 단계에서 다양한 독성이 발현되어 생장이 둔화되었지만, 식물을 사멸시키는 영향은 없었다는 결과와 동일하다.

3.2. 건조중량에 의한 EC₅₀ 평가

실험에서 측정된 각 처리군에서의 자귀풀 건조중량값은 4변수 로지스틱 회귀모형(식 (1))에 의해 AAT Bioquest 웹사이트에서 EC₅₀을 산정하였다. 이때 비교를 위해, 지상부, 뿌리 및 전체 건량에 대해 각각 계산하였다(Fig. 3). 회귀모형에 의해 산정된 EC₅₀값은 지상부 222.5 mg-RDX/kg-soil이고, 뿌리는 69.6 mg-RDX/kg-soil로 지상부에 비해 뿌리에 대한 RDX의 독성이 3.2배 높았다. 그에 따라 자귀풀 전체건량으로 산정된 EC₅₀값도 감소하여 181.4 mg-RDX/kg-soil로 산정되었다.

$$y = d + \frac{a-d}{1 + \left(\frac{EC_{50}}{C}\right)^b} \quad (1)$$

여기서, a = 최저 주입농도에서의 반응,

b = Slope factor (C점에서의 기울기)

c = 변곡점 값,

d = 최고(무한값) 주입농도에서의 반응

뿌리는 RDX와 처음 접촉하고 흡수하는 관문이며, 지상부로 이송하는 역할을 수행하므로 독성에 가장 민감하게 반응하는 식물 기관이다. 알팔파를 수경재배하며 40 mg/L의 RDX에 노출한 결과, 뿌리 호흡이 2.2배 증가하였는데 이는 기본대사 저해가 일어남을 의미하며, 대사산물로 생장에 관여하는 지질 및 지질유사물질이 증가하고, RDX의

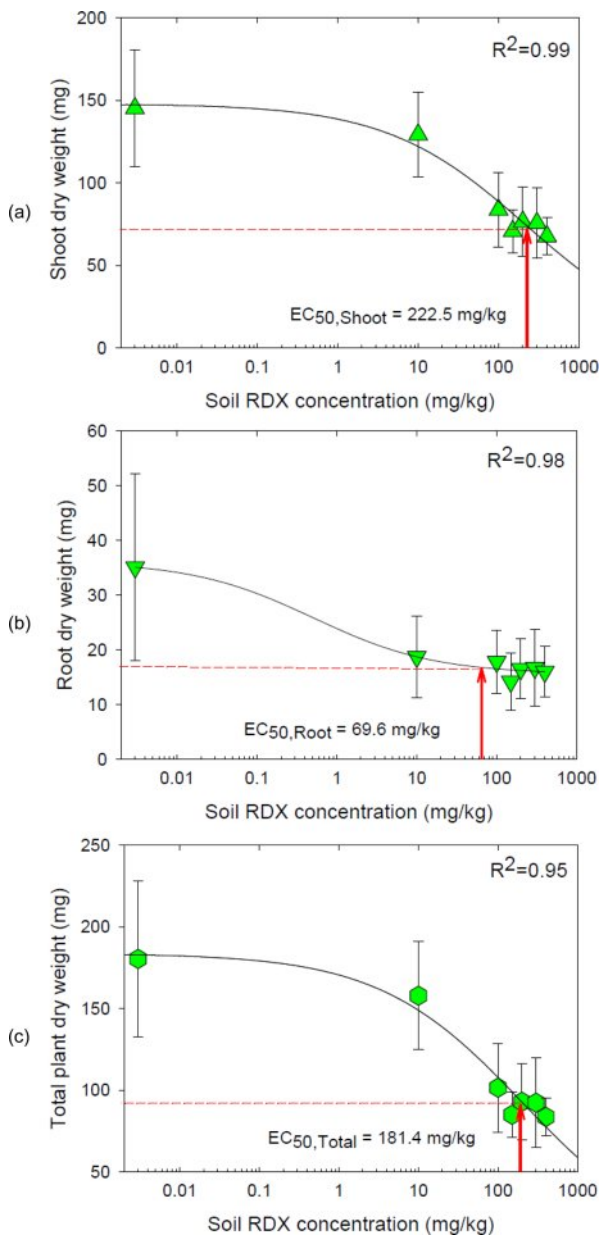


Fig. 3. Estimated 50% effective concentration (EC_{50}) of *Aeschynomene indica* on soil RDX by 4 parameter logistic model using plant dry mass (a) above-ground, (b) root, (c) total. Error bar represents standard deviation.

독성 제거에 필요한 단백질 생산에 필요한 arginine과 aminoacyl-tRNA 생합성이 증가하였다(Yang et al., 2021). 또한 본 연구에서와 같이 RDX 농도 증가에 따라 뿌리

생체량도 감소하였다. 뿌리가 흡수한 RDX는 신속하게 지상부로 이동된다. Brentner et al.(2010)은 phosphor imager autoradiography로 식물체내 방사성 추적자 분포를 시각화한 결과, 이동된 RDX는 줄기보다 잎에, 그리고 오래된 잎일 수록 축적량이 증가하며, 외떡잎식물에서는 잎의 첨단에, 쌍떡잎식물은 잎의 가장자리에 더욱 많이 축적되었다. 또한, 잎에서는 엽록체와 세포벽과 같이 리그닌화한 조직에 분포하였는데(Brentner et al., 2010), 이는 격리에 의해 독성을 감소하고 식물광분해(phyto-photolysis)로 RDX 분해를 증진시킨다(Just and Schnoor, 2004). 이상의 기작으로 인해 RDX 독성이 완화되어 EC_{50} 값도 증가한 것이라 판단된다.

식물에 대한 RDX의 EC_{50} 을 산정한 연구는 많지 않다. Simini et al.(2013)은 5종의 서로 다른 특성을 가진 RDX 오염토양(최대 10,000 mg/kg)에 호밀풀과 피를 56일간 재배한 다음, 건량과 생체량 변화로 EC_{50} 을 측정하였는데, 각각 호밀풀과 피의 EC_{50} 값은 20–323 mg-RDX/kg 및 59–226 mg-RDX/kg의 범위에서 크게 변화하였다. 이 결과는 토양특성에 따라 식물에 가해지는 RDX 독성이 크게 변화한다는 점과 외떡잎식물임에도 EC_{50} 값이 상당히 낮다는 점에서 주목할 만하다. 반면, 2종의 RDX 오염 토양(최대 10,000 mg/kg)에 호밀풀을 21일간 재배한 실험에서는 호밀풀 생장에 대한 독성효과가 전혀 관측되지 않았다(Rocheleau et al., 2008). 두 연구결과는 동일한 식물도 실험기간, 토양 특성 및 재배 조건과 환경에 따라 독성발현에 큰 편차가 있으며, 특정 식물종에 대하여는 적용현장토양과 조건을 최대한 반영한 실험의 필요성을 의미한다고 판단된다.

3.3. 토양 및 자귀풀의 RDX 농도

실험 종료 후, 회수하여 측정한 대조군 및 식물 식재구 토양의 RDX 농도는 Tables 1 및 2와 같다. 자귀풀을 식재하지 않고, 토양에 식물영양액(Hoagland solution)을 지속적으로 공급하면서 배양한 control pot의 RDX 농도는 식물을 식재하지 않아도 토양 미생물이 배양온도와 영양물질에 의해 활성화되어 RDX를 분해하였다. 이 결과는 ○○사격장 토양이 오랫동안 화약물질에 노출되었기 때문에 RDX를 분해하는 미생물이 자연적으로 발생했음을 의미

Table 1. RDX concentrations in the control pot soils incubated in the growth chamber for 21days without *Aeschynomene indica* seedling

	RDX 10	RDX 100	RDX 150	RDX 200	RDX 300	RDX 400
RDX Avg. (mg/kg)	0.97	78.20	140.92	185.59	294.05	366.78
Standard deviation	0.55	14.48	3.31	4.78	6.06	1.54

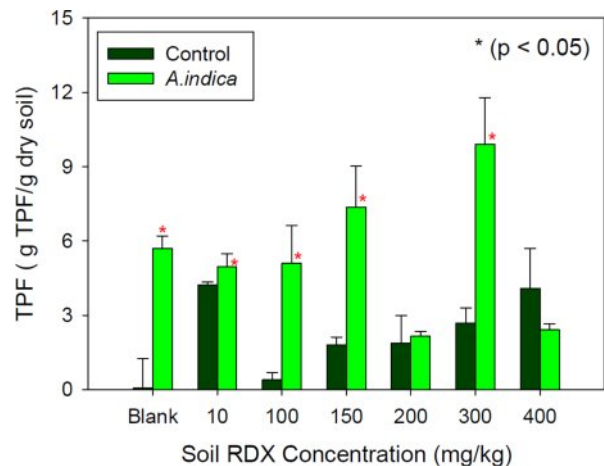
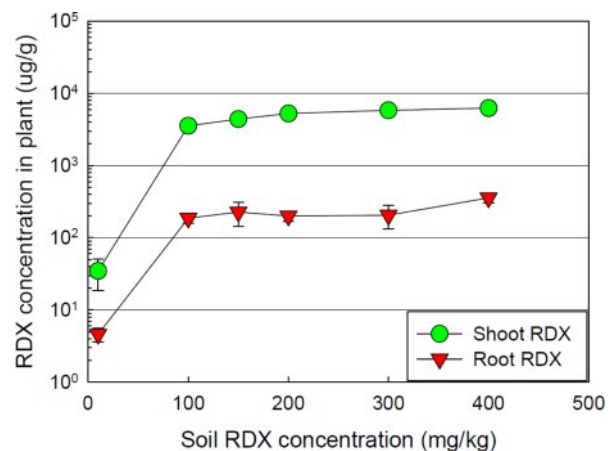
Table 2. RDX concentrations in the pot soils cultivated with *Aeschynomene indica* seedling for 21 days

	RDX 10	RDX 100	RDX 150	RDX 200	RDX300	RDX 400
RDX Avg. (mg/kg)	0.38	51.28	84.30	127.02	199.56	255.28
Standard deviation	0.03	2.15	3.59	16.61	10.57	12.14

한다. 타 연구에서도 RDX 오염토양에서 분해 미생물을 분리한 바 있다(Crocker et al., 2006). 생물학적 RDX 분해는 초기 농도가 낮을수록 분해율이 높아서, 최종 RDX 농도도 낮은 경향을 보이고 있다. RDX 농도가 10 mg/kg인 경우 21일 후 농도는 0.97 mg/kg으로 약 90%가 제거되었으나, RDX 400 mg/kg에서는 366.78 mg/kg으로 8.3%만이 제거되었다. RDX 총제거량으로 계산하면 RDX 10 반응조에서 0.59 mg-RDX가 제거되었고, RDX 400 반응조에서 2.16 mg-RDX가 토양미생물의 작용에 의하여 분해되었다.

자귀풀을 식재한 경우에 토양 내 잔류하는 RDX는 큰 폭으로 감소하였고, 그 효과는 농도가 높을수록 현저하였다. RDX 10 반응조에서는 0.38 mg/kg이 잔류하여 96.2%가 제거되었고, RDX 400에서는 36.2%가 제거되어 255.28 mg/kg이 잔류하였다. 이를 RDX 제거량으로 환산하면, RDX 10 반응조에서는 0.63 mg-RDX가 제거되었고, RDX 400 반응조에서는 9.41 mg-RDX가 제거되었다. RDX 400 mg/kg에서, 단지 21일 동안의 자귀풀 식재로 자귀풀 미식재시에 비해 RDX 제거량이 4.4배 증가하였다. RDX 제거량 증가는 (i) 식물체에 의한 RDX 직접 흡수 및 분해 (ii) 식물체 뿌리에서 배출되는 삼출물(exudates)에 의한 근권미생물 활성화에 의한 생물학적 분해증진에 의한 것으로 사료된다(Low et al., 2008). 이때, Control 및 식물 식재구 토양 모두에서 RDX 전환산물인 MNX, DNX 및 TNX가 일부 검출되었으나 농도를 정량할 수가 없었고, 특이한 추이도 관측되지는 않았다.

대조군에서 RDX를 주입하지 않은 토양과 자귀풀 식재구에서의 DHA는 각각 0.08 및 5.70 g-TPF/g-soil로, 자귀풀 식재로 인해 DHA가 71배 증가하였다(Fig. 4). 자귀풀은 콩과식물로 토양에서의 질소고정미생물 활성화 및 뿌리 삼출액 등이 영향을 준 것으로 사료된다. RDX를 주입한 대조군에서는 RDX의 분해에 관여하는 미생물이 활성화되어 DHA가 증가하였는데, RDX 10 mg/kg에서 DHA가 4.2 g-TPF/g-soil로 가장 높았고, RDX 100 mg/kg 이상에서는 RDX 독성으로 인해 4 이하의 값을 보였다. 자귀풀 식재구에서의 DHA는 200 및 400 mg/kg 처리구를 제외하고 대조구에 비해 모두 유의적($p < 0.05$)으로 높은 값을 보였다. 콩과식물 재배에 의한 토양미생물 활성증가는 여러

**Fig. 4.** Soil DHA(dehydrogenase activity) after 21 days of incubation with or without cultivation of *Aeschynomene indica* seedling. Error bar represents standard deviation.**Fig. 5.** RDX concentration in the shoot and root of *Aeschynomene indica* seedling after 21 days of cultivation in the pot. Error bar represents standard deviation.

연구에서 보고되었다. 중금속 오염토양에 콩과식물인 렌틸을 녹비식물로 파종하고 약 90일 재배한 결과, DHA가 대조군 대비 1.2~1.5배 증가하였다(Bae et al., 2021). 또한 2년간 벼-밀-녹두를 윤작하고 벼-밀 윤작과 비교한 결과, 토양미생물 탄소량이 27% 증가하고, DHA도 38% 증가하였다(Borase et al., 2021). 이상의 결과와 같이 자귀풀 식재가 RDX의 분해증진 이외에도 토양미생물상 활성화에 긍정적인 영향을 준다는 것을 의미한다.

자귀풀의 지상부 및 지하부 RDX 농도는 Fig. 5와 같다. 자귀풀이 흡수한 RDX의 대부분은 지상부에 존재하였고, 지상부 최고농도는 RDX 400 mg/kg 화분에서 6259.9 µg/g-DW이다. 또한 토양과 동일하게 식물체내에서도 RDX 환원산물인 MNX, DNX 및 TNX가 검출되어 자귀풀에 의한 RDX의 환원도 관찰되었다. 식물이 흡수한 RDX는 식물체 내에서 환원되어 3종의 환원산물을 생성한다. RDX를 흡수한 옥수수(Larson et al., 1997), 호밀풀(Best et al., 1997; Rocheleau et al., 2008) 및 갈풀(Just and Schnoor, 2004)에서도 동일하게 전환산물이 검출된 바 있다. 지하부에서의 RDX 농도는 상대적으로 낮았다. 처리군 RDX 농도별로 차이가 있으나, 평균으로 환산하면 23.6 ± 11.9 배 낮았다. 즉 자귀풀이 흡수한 RDX의 95% 정도가 지상부로 이송되었다는 것을 의미한다. 상기한 바와 같이 식물체에 따라 차이가 있으나, 벼를 사용한 실험에서 벼가 흡수한 RDX가 최대 90% 지상부에 존재한다고 보고하였다(Vila et al., 2007b). 자귀풀은 비반추 초식동물 및 돼지에 대한 독성이 있어, 초식동물이 선호하지 않은 식물이다(USGS, 2025). 또한 자귀풀 종자 20%를 함유한 사료를 돼지에게 공급한 결과, 모두 사멸할 만큼 독성이 강하여, 야생동물 특히 멧돼지에 의한 섭식 우려는 없다(Oliveira et al., 2004). 그러나 타 생물종에 의한 섭식으로 먹이사슬로의 전이 및 축적 가능성이 있으므로 현장실험시에는 지속적인 모니터링이 필요할 것이다.

본 연구에서는 재배기간이 21일로 매우 짧아 확인하지 못하였지만, 자귀풀이 흡수한 RDX를 완전히 분해하는 지에 대한 확인이 필요하다. 포플라를 RDX 오염배지에 수경재배하고, 그 잎을 물로 용출시킨 결과, 흡수한 RDX의 약 24%가 RDX의 전환산물 형태로 용출되었다(Yoon et al., 2006). 자귀풀은 1년생 식물이므로, 가을에 시들어 지표면에서 물과 접촉하고, 식물체내 물질이 용출될 가능성이 있다. 그러므로 자귀풀의 생애주기에 해당하는 연구를 수행하여 식물체내 물질의 용출여부를 확인하는 것이 필요하다.

3.4. RDX 물질수지

자귀풀 식재 화분에서의 토양 및 식물체에 대한 물질수지를 산정한 결과는 Fig. 6과 같다. 그림에서와 같이 저농도에서는 RDX가 토양미생물에 의한 분해, 식물에 의한 흡수/분해로 90% 이상이 제거되고 10% 미만이 잔류하였다. 자귀풀 미식재 대조군에서는 100 mg/kg에서는 토양에 약 80%가 잔류하였고, 150 mg/kg 이상에서는 90% 이상이 그대로 남아있었다. 자귀풀 유식물을 식재한 경우에는 100 mg/kg 이상에서 평균 $77.8 \pm 5.5\%$ 만이 토양에 잔류

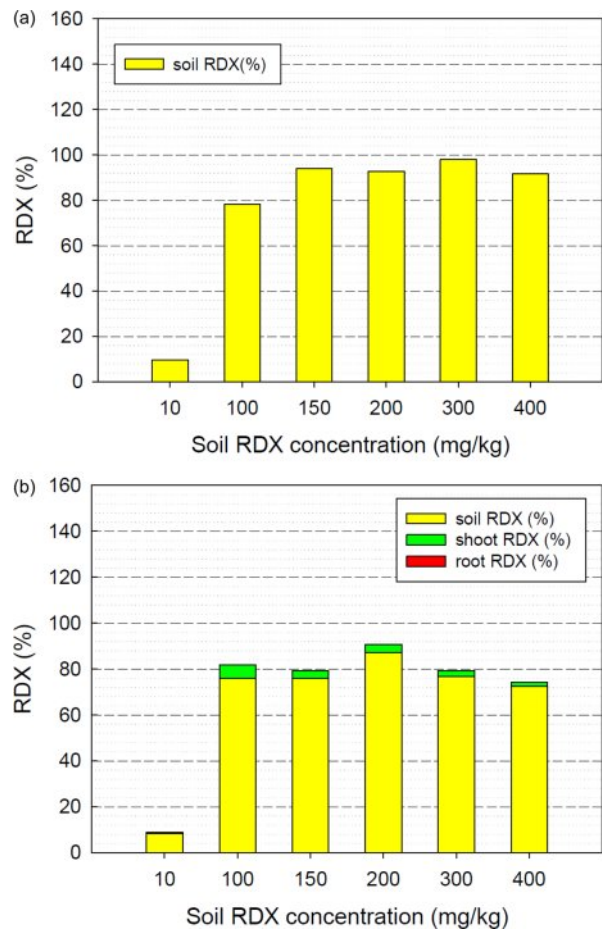


Fig. 6. Material balance of RDX in the pot soil and plant material after 21 days of cultivation. (a) Control pots (n = 2), (b) pots (n = 3) planted with *Aeschynomene indica* seedling.

하여 RDX 제거가 최소 10% 이상 증가하였다. 자귀풀이 흡수한 양은 평균 $3.3 \pm 1.5\%$ 로 고농도일수록 흡수비율은 감소하는 경향을 보였다. 뿌리에 흡수된 양은 모두 소숫점 2자리 이하로 논외로 하였다. 식재 화분이 침출수가 빠져 나갈 수 없는 구조이므로, 침출수로 인한 물질손실은 없다. 그러나 탈락한 잎과 줄기는 흘날려 썩이고 혼재하여 구분할 수 없게 되어서 건량 산정에 제외하였는데, 탈락한 잎과 줄기는 초기 성장한 식물체로 다량의 RDX를 축적했을 가능성이 매우 높다(Brentner et al., 2010). 그러므로 약 20%에 해당하는 물질수지 부족은 탈락한 잎과 줄기에 기인한다고 판단된다. 작물 4종(콩, 옥수수, 밀 및 수수)을 일반토에서 발아시킨 다음 5 cm 크기의 유식물을 RDX 오염토양에 정식하여 28일간 재배한 실험에서도 유사한 결과가 산출되었다. 이 연구에서도 콩잎과 줄기의 탈락이 관측되었고, RDX 490 mg/kg의 오염토에 재배한 경우, 약 30~35%의 물질수지가 부족하였다. 식물체내 RDX는

대부분 어미물질이 전환되지 않고 그대로 검출되었으며, 최고농도는 2,800 $\mu\text{g-RDX/g-DW}$ 에 불과하였다(Chen et al., 2011).

4. 결 론

사격장 토양을 RDX로 인공오염시킨 토양에서 10배수로 재배한 자귀풀 유식물이 흡수한 RDX와 그 전환산물(MNX, DNX 및 TNX)을 분석한 결과, 자귀풀은 토양에서 흡수한 RDX를 95% 이상 지상부에 축적하였고, 초기 토양 RDX농도 400 mg/kg 에서 최고 6259.89 $\mu\text{g-RDX/g-DW}$ 를 축적하였다. 그 중에서 일부는 식물체의 환원작용으로 MNX, DNX 및 TNX로 전환되어 자귀풀은 RDX 흡수 및 분해능이 있음이 재확인되었다. 고농도 RDX 오염처리군에서는 독성에 의해 자귀풀 잎의 끝단이 검게 변하고 잎과 줄기가 탈락하는 현상이 발생하였다. 이로 인해 토양 RDX 농도가 증가할수록 자귀풀 식물체량은 감소하였지만, RDX 400 mg/kg 처리군에서도 모든 개체가 성장하였다.

식물건량을 기준으로 지상부 및 지하부의 EC_{50} 을 산정한 결과 각각 222.5 및 69.6 mg-RDX/kg-soil 로 뿌리에 대한 RDX 독성이 더욱 높았다. 식물전체에 대한 EC_{50} 은 181.4 mg/kg 으로, 타 연구와 비교해도 높은 값으로 나타났다. 따라서 자귀풀은 고농도 화약물질이 검출되는 피탄지를 제외한 하부 방향의 화약물질 오염토양의 정화에 충분히 사용가능할 것이라 판단된다.

그러나 자귀풀이 흡수한 RDX를 분해하지 못한다면 다시 용출되어 토양으로 환원될 가능성이 있으므로, 단기간이 아닌 생애주기 전체 기간에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한 적용하고자 하는 지역의 토양 및 자연환경을 최대한 반영하여 처리도 실험을 수행하는 것도 필요하다. 본 연구는 국내에 산재한 군사격장 화약물질에 대한 생태위해성 평가에 유용한 자료로 사용될 수 있고, 화약물질 저감을 위한 식물상 정화공법 선정 및 적용, 설계, 운영 및 유지관리를 결정함에 있어 참고 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

Ainsworth C.C., Habilitrvey S.D., and Szecsody J.E., 1993, Relationship between the Leaching Characteristics of Unique Energetic Compounds and Soil Properties, U.S. Army Medical Research and Development Command, Fort Detrick, Frederick, MD. AD-A-267-580.

AAP Bioquest, <https://www.aatbio.com/tools/ic50-calculator>,

[accessed 25. 06. 30.]

Bae, B. and Park, J., 2014, Distribution and migration characteristics of explosive compounds in soil at military shooting ranges in Gyeonggi province. *JKGES*, **15**(6), 17-29.

Bae, B., Park, H., and Kang, S., 2021, Effects of mixed planting of green manure crops supplemented with humic substance on the biological soil health indicators of reclaimed soils. *J. Soil Groundw. Environ.*, **26**(5), 49-59.

Best, E.P., Zappi, M.E., Fredrickson, H.L., Sprecher, S.L., Larson, S.L., and Ochman, M., 1997, Screening of aquatic and wetland plant species for phytoremediation of explosives-contaminated groundwater from the Iowa Army Ammunition Plant. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **829**, 179-194.

Borase, D.N., Murugeasn, S., Nath, C.P., Hazra, K.K., Singh, S.S., Kumar, N., Singh, U., and Praharaj, C.S., 2021, Long-term impact of grain legumes and nutrient management practices on soil microbial activity and biochemical properties. *Arch. Agron. Soil Sci.*, **67**(14), 2015-2032.

Brentner, L.B., Mukherji, S.T., Walsh, S.A., and Schnoor, J.L., 2010, Localization of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) and 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) in poplar and switchgrass plants using phosphor imager autoradiography. *Environ. Pollut.*, **158**(2), 470-475.

Cataldo, D.A., Harvey, S.D., and Fellows, R.J., 1990, An Evaluation of the Environmental Fate and Behavior of Munitions Materiel (TNT, RDX) in Soil and Plant Systems. The Environmental Fate and Behavior of RDX. U.S. Army Medical Research and Development Command. Fort Detrick, Frederick, MD. Project 88PP8853, Am. 4.

Chen, D., Liu, Z.L., and Banwart, W., 2011, Concentration-dependent RDX uptake and remediation by crop plants. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **18**(6), 908-917.

Crocker, F.H., Indest, K.J., and Fredrickson, H.L., 2006, Biodegradation of the cyclic nitramine explosives RDX, HMX, and CL-20. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **73**(2), 274-290.

Hagan, F.L., Koeser, A.K., and Dawson, J.O., 2016, Growth changes of eighteen herbaceous angiosperms induced by hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine(RDX) in soil. *Int. J. Phytorem.*, **18**(1), 94-102.

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

Larson, S.L., 1997, Fate of explosive contaminants in plants. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **829**, 195-201.

Larson, S.L., Jones, R.P., Escalon, L., and Parker, D., 1999, Classification of explosives transformation products in plant tissue. *Environ. Toxicol. Chem.*, **18**(6), 1270-1276.

- Lee, A. and Bae, B., 2015, Selection of tolerant plant species using pot culture for remediation of explosive compounds contaminated soil, *J. Soil Groundw. Environ.*, **20**(6), 73-84.
- Lee, I., Baek, K., Kim, H., Kim, S., Kim, J., Kwon, Y., and Bae, B., 2007, Phytoremediation of soil co-contaminated with heavy metals and TNT using four plant species. *J. Environ. Sci. Health., Part A*, **42**(13), 2039-2045.
- Li, J., and Su, S., 2024, Abscission in plants: from mechanism to applications. *Adv. Biotechnol.*, **2**, 27.
- Low, D., Tan, K., Anderson, T., Cobb, G. P., Liu, J., and Jackson, W.A., 2008, Treatment of RDX using down-flow constructed wetland mesocosms. *Ecol. Eng.*, **32**(1), 72-80.
- NIFoS (National Institute of Forest Science), 2014, Soil and Plant Analytical Method, 11-1400377-000748-01.
- Oliveira, F.N., Barros, R.R., Rissi, D.R., Rech, R.R., Figuera, R.A., and Barros, C.S., 2004, Focal symmetrical encephalomalacia in swine from ingestion of *Aeschynomene indica* seeds. *Vet. Hum. Toxicol.*, **46**(6), 309-311.
- Park, S., Bae, B., Kim, M., and Chang, Y., 2008, Distribution and behavior of mixed contaminants, explosives and heavy metals, at a small scale military shooting range. *Journal of KSWE*, **24**(5), 523-532.
- Pepper, I.L. and Gerba, C.P., 2004, Environmental Microbiology: A Laboratory Manual, 2nd Ed., Elsevier Academic Press, MA, USA.
- Rocheleau, S., Lachance, B., Kuperman, R.G., Hawari, J., Thiboutot, S., Ampleman, G., and Sunahara, G.I., 2008, Toxicity and uptake of cyclic nitramine explosives in ryegrass *Lolium perenne*, *Environ. Pollut.*, **156**(1), 199-206.
- Ryu, H., Han, J.K., Jung, J.W., Bae, B., and Nam, K., 2007, Human health risk assessment of explosives and heavy metals at a military gunnery range, *Environ. Geochem. Health*, **29**(4), 259-269.
- Simini, M., Checkai, R.T., Phillips, C.T., Kolakowski, J.E., and Kurnas, C.W., 2013, Toxicities of TNT and RDX to Terrestrial Plants in Five Soils with Contrasting Characteristics, U.S. Army Edgewood Chemical Biological Center: Aberdeen Proving Ground, MD., No. ECBC-TR-1091.
- Talmage, S.S., Opresko, D.M., Maxwell, C.J., Welsh, C.J., Cretella, F.M., Reno, P.H., and Daniel, F.B., 1999, Nitroaromatic munition compounds: environmental effects and screening values. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, 1-156.
- Thompson, P.L., Ramer, L.A., and Schnoor, J.L., 1999, Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine translocation in poplar trees. *Environ. Toxicol. Chem.*, **18**(2), 279-284.
- US EPA, 1998, Health Advisory for Hexahydro-1,3,5-Trinitro-1,3,5-Triazine (RDX) Technical Report PB90-273533. Office of Drinking Water, Washington, DC.
- US EPA. 2006, Method 8330B (SW-846): Nitroaromatics, Nitramines, and Nitrate Esters by High Performance Liquid Chromatography (HPLC), Revision 2. Washington, DC.
- US EPA., 2012, Ecological Effects Test Guidelines OCSPP 850.4100: Seedling Emergence and Seedling Growth, EPA 712-C-012, Office of Chemical Safety and Pollution Prevention, Washington, DC.
- USGS (United States Geological Service), 2025, Plants of Louisiana, <https://warcapps.usgs.gov/PlantID/Species/Details/1964>, [accessed 25. 09. 10.]
- Vila, M., Lorber-Pascal, S., and Laurent, F., 2007a, Fate of RDX and TNT in agronomic plants. *Environ. Pollut.*, **148**(1), 148-154.
- Vila, M., Mehier, S., Lorber-Pascal, S., and Laurent, F., 2007b, Phytotoxicity to and uptake of RDX by rice. *Environ. Pollut.*, **145**(3), 813-817.
- Winfield, L.E., Rodger, J.H., and D'surney, S.J., 2004, The responses of selected terrestrial plants to short (< 12 days) and long term (2, 4 and 6 weeks) hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) exposure. Part I: Growth and developmental effects. *Ecotoxicology*, **13**(4), 335-347.
- Yang, X., Zhang, Y., Lai, J.L., Luo, X.G., Han, M.W., Zhao, S.P., and Zhu, Y.B., 2021, Analysis of the biodegradation and phytotoxicity mechanism of TNT, RDX, HMX in alfalfa (*Medicago sativa*), *Chemosphere*, **281**, 130842.
- Yoon, J.M., Aken, B.V., and Schnoor, J.L., 2006, Leaching of contaminated leaves following uptake and phytoremediation of RDX, HMX, and TNT by poplar. *Int. J. Phytorem.*, **8**(1), 81-94.