

## 오염물질 확산방지를 위한 운영중 군 사격장 환경관리방안에 대한 고찰

정재웅<sup>1</sup> · 문희선<sup>2</sup> · 남경필<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 건설환경공학부

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 지하수연구실

### An Environmental Management Protocol for the Mitigation of Contaminants Migration from Military Operational Ranges

Jae-Woong Jung<sup>1</sup> · Hee Sun Moon<sup>2</sup> · Kyoungphile Nam<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>National Instrumentation Center for Environmental Management, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University

<sup>2</sup>Groundwater Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

#### ABSTRACT

Pollutants such as heavy metals and explosives originating from the military operational ranges can be migrated to adjacent surface water body or offsite soil, and can affect to local residents and aquatic ecosystem. Therefore, Korea Ministry of the National Defense has established various guidelines for environmental management including the installation of pollutant migration prevention facilities (PMPFs) and monitoring methodologies for heavy metals in the operational range soil and effluent and sediment of PMPFs. However, current guidelines neither address the explosive compounds such as 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) nor suggest detailed environmental investigation protocol. This paper introduces the new “Environmental Management Manual for Military Firing Ranges”, which includes the environmental criteria for explosives as well as the detailed investigation protocol for the affected environmental media including soil, effluent and sediment of PMPFs.

**Key words :** Explosives, Military firing ranges, Environmental management, Risk assessment

#### 1. 서 론

최근 우리나라에서는 군 사격장 내 사격잔재물(불발탄, 방치된 총포탄 등)에서 발생하는 화약류 및 중금속이 군 사격장 지역주민이 사용하는 인근 수계로 유입되어 환경 및 인체에 영향을 미칠 가능성에 대한 문제가 환경이슈로 대두되었다. 2011년에는 여주 백석리 공군 사격장에서 발생한 화약류 및 중금속이 지역주민이 사용하는 인근 수계로 유입되어 지역주민의 발암확률이 증가하였을 가능성이 있다는 보도가 있었으며, 2012년에는 보령 공군 사격장에서 발생한 화약류와 중금속이 주변 바다에서 서식하는 조개류에 축적되었다는 보도가 있었다. 일반적으로 군 사격장에서는 군사훈련 등으로 인하여 납, 구리, 아연 등의 중

금속과 2,4,6-trinitrotoluene(TNT)나 hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine(RDX) 등 화약류 물질이 발생하는데, 이들은 인체건강과 생태계에 모두 악영향을 미칠 수 있는 물질로 군 사격장에서 발생하는 오염물질에 대한 체계적인 환경 관리가 절실히 요구된다. 특히, 운영 중 군 사격장은 내부 출입이 엄격하게 금지되어 있어 군 사격장 내부 자체의 오염보다는 군 사격장 오염물질이 토양 및 주변 수계로 확산 및 유입되어 지역 주민에게 노출되었을 때의 환경문제가 보다 심각하므로, 운영 중 군 사격장에 대해서는 군 사격장 오염물질의 오염확산 방지에 초점을 둔 환경관리 방안의 수립이 바람직하다.

우리나라 국방부에서도 최근 군 사격장에서 발생하는 사격잔재물로 인한 환경오염 방지를 위해 ‘군 환경관리

\*Corresponding author : kpnam@snu.ac.kr

Received : 2015. 10. 1 Reviewed : 2015. 11. 5 Accepted : 2015. 11. 28

Discussion until : 2016. 1. 31

훈령' 제29조에 '사격잔재물로 인한 토양오염 방지를 위해 관련지침에 따라 정기적으로 토양오염검사를 실시하고 대책이 필요할 경우 소요제기 및 중기계획에 반영하기 위해 노력한다'는 규정을 추가로 제정하는 한편(KDND, 2013), '군 사격장 등 환경오염 관리지침' 및 '군 사격장 오염확산 방지 지침' 등의 군 사격장 환경관리 관련지침을 제작하여 실무에 적용하고 있다(KDND, 2001a; KDND, 2001b). 이 두 지침에서는 운영 중 군 사격장에서 오염물질이 확산되는 것을 방지하는 오염확산방지시설(토류벽, 침사지, 저류지, 침강지, 정화식물, 탄두회수대 등)을 설치하도록 하는 한편 군 사격장 내 환경매질(토양, 오염확산방지시설 방류수 및 퇴적물)을 조사하고 그 결과 검출된 농도를 관련 환경기준과 비교해 필요한 조치를 취할 것을 권고하고 있다. 그러나, 현재 사용되는 군 사격장 환경관리 관련 지침은 다음과 같은 제한점을 가지고 있다. 첫째, 군 사격장에서는 중금속뿐 아니라 화약류 오염물질도 발생하는데(USEPA, 2014a; USEPA, 2014b), 우리나라의 현행 환경법률에서는 토양 및 수계 오염물질로 중금속 물질만을 규제대상으로 정하고 있어, 군 사격장 환경관련 지침에서 화약류 물질에 대한 관리는 제외되어있을 뿐만 아니라, 화약류에 대한 환경 기준치도 없는 실정이다. 둘째, 군 사격장 내 환경매질의 구체적인 조사 절차 및 평가 방법(예: 조사 시기, 시료채취 방법, 시료채취 개수 및 분석방법 등)이 제시되어 있지 않아 군 사격장 내부 및 주변지역 토양과 주변 수계에 대한 체계적인 환경 관리를 어렵게 하고 있다.

환경부 가이아(GAIA) 사업의 일환으로 수행되고 있는 '군 사격장 부지 화약류·중금속 처리기술개발 연구단'에서는 2011년부터 군 사격장 환경조사, 평가 및 관리방안에 관한 연구를 수행하고 있으며, 그 결과물의 하나로 '토양 및 오염확산방지시설 조사, 평가 및 관리 매뉴얼'(이하 '군 사격장 환경관리 지침'(Environmental Management Guideline for Operational Ranges)이라 한다)을 제안하였다. '군 사격장 부지 화약류·중금속 처리기술개발 연구단'에서 제안하는 '군 사격장 환경관리 지침'에는 위해도에 기반한 화약류(TNT와 RDX)의 환경기준이 제안되었으며, 운영 중 군 사격장 환경관리를 위한 체계적인 조사 절차 및 각 환경매질 구체적인 조사, 분석 방법 등이 제시되어 있다. 본 총설은 '군 사격장 환경관리 지침'의 개략적인 내용으로써, 현재 군 사격장 관리지침에서 제외되어 있는 화약류의 유해특성을 소개하고, 군 사격장 환경관리를 위한 화약류의 환경 허용기준 및 도출 방법을 서술하며, '군 사격장 환경관리 지침'에서 제안하는 군 사격

장 환경관리 절차(환경조사 방법 및 조사결과에 따른 조치방안)를 소개하고자 한다. 국방부에서도 군 사격장 오염물질이 주변으로 확산되는 것을 방지하기 위한 각종 환경 관리 지침을 제작해 군 사격장 오염물질의 오염확산방지를 위한 노력을 수행하여 왔다. 그렇지만, 보다 실용성 있는 환경관리를 위해서는 현재 우리나라에서 규제되지 않는 TNT나 RDX 등 화약류 오염물질대환 구체적인 환경기준이 마련되어야 할 뿐 아니라 오염확산방지를 목적으로 하며 군 사격장 주변지역에 대한 환경조사를 통해 오염의 확산을 평가할 수 있는 지침이 절실히 요구된다.

현재 국방부에서 사용하고 있는 '군 사격장 환경관리 지침'은 군 사격장의 오염확산방지시설 설치/운영 및 주기적인 군 사격장 내부토양 환경조사에 초점을 맞추어 제작된 지침이다. 그러나 현재 운영중인 군 사격장이 1,400개가 넘을 정도로 매우 많을 뿐 아니라 지속적인 사격훈련으로 인해 내부토양에 대한 조사일정을 잡기가 쉽지 않은 군부대 입장에서 모든 군 사격장에 대해 주기적으로 내부토양에 대한 조사를 실시하는 것은 무리가 있어 현재 사용되는 지침의 효용성이 낮은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실질적으로 문제가 되고 있는 군 사격장 주변환경에 대한 조사 및 평가를 통해 군 사격장 환경관리를 실시하고 오염물질 확산이 우려되는 군 사격장에 대해 내부토양 정밀조사 및 적극적인 토양정화를 실시하는 것을 유도하는 '군 사격장 환경관리 지침'을 제작하였다.

## 2. 군 사격장에서 발생하는 오염물질의 종류 및 화약류 물질의 유해특성

우리나라 국방부의 현행 '군 사격장 등 환경오염 관리 지침'에서는 환경부 '토양환경보전법'에서 규제하는 8개 중금속 물질(납, 구리, 카드뮴, 아연, 비소, 수은, 니켈, 6가크롬)을 관리대상 물질로 설정하고 있다. 그러나 군 사격장에서는 불발탄 및 방치된 탄약의 파열, 부식 및 누출로 인해 포탄의 외관으로부터 유출되는 중금속뿐 아니라 화약류 물질(explosive compounds) 역시 주요 환경오염물질로 발생한다. 현재 우리나라 군에서 주로 사용되는 화약류 물질은 TNT와 RDX이므로, '군 사격장 환경관리 지침'에서는 중금속과 더불어 화약류 중 TNT와 RDX를 추가 관리대상 물질로 제안하고자 한다. 중금속의 인체 및 생태건강에 대한 유해성에 대해서는 널리 알려져 있으므로(KEITI, 2015) 본 총설에서는 TNT와 RDX의 유해성에 대해 서술하였다.

TNT는 폭발성이 강한 노란색 무취 고체물질로, 수류탄

군 사격장, 대전차포 군 사격장 및 곡사포 군 사격장에서 주로 발견되는 화약류 물질이다(Clausen et al., 2006; Hewitt et al., 2007; USEPA, 2012). TNT의 인체발암성이 확인되지 않았기 때문에 국제보건기구(World Health Organization, WHO)의 국제암연구센터(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 TNT를 발암성물질로 보기 어렵다고 판단한다(IARC, 1996). 반면, TNT에 노출된 암컷 쥐에게서 방광암이 발생하는 것이 확인되었기 때문에 USEPA에서는 TNT를 발암 가능성 물질(possible human carcinogen)로 분류한다(USEPA, 2014a). 또한, TNT는 간 세포 괴사와 재생 불량성 빈혈을 유발할 수 있는데, 1차 세계대전 당시 미국의 TNT 생산공장에서 17,000건이 넘는 TNT 중독사례가 보고되었고, 475명이 이로 인해 사망하였다(USEPA, 2014a).

RDX 역시 TNT와 마찬가지로 수류탄 군 사격장, 대전차포 군 사격장 및 곡사포 군 사격장에서 주로 발견되는 고체상 화약류 물질이다(Clausen et al., 2006; Hewitt et al., 2007; USEPA, 2012). RDX의 인체발암성이 확인되지 않았기 때문에 미국정부산업위생학자모임(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서는 RDX를 발암성물질로 보기 어렵다고 판단한다(ACGIH, 2011). 반면, RDX에 노출된 암컷 쥐에게서 간암이 발생하는 것이 확인되었기 때문에 USEPA에서는 RDX를 발암 가능성 물질(possible human carcinogen)로 분류한다(USEPA, 2014b). RDX에 과다노출되면 신경계 손상 및 발작이 일어나는 것이 확인되었고, 잠재적으로는 눈과 피부 염증, 두통, 피로, 떨림, 메스꺼움, 어지러움, 구토, 불면증 및 경련 등이 발생할 수도 있다(USEPA, 2014b).

즉, TNT나 RDX 노출로 인해 사람에게서 암이 발생하였다는 것을 확인한 자료가 없기 때문에 WHO나 ACGIH에서는 TNT와 RDX의 발암성을 인정하지 않는다. 반면, USEPA에서는 인체발암을 확인하지는 못하였지만 동물실험 결과를 바탕으로 TNT와 RDX가 사람에게 암을 유발할 가능성이 있다고 간주하여 위해도에 기반한 환경기준(Regional Screening Level, RSL) 도출 시 TNT와 RDX를 발암성물질로 설정하였다(USEPA, 2015). 캐나다에서는 WHO에서 제시하는 독성정보를 사용하여(Health Canada, 2010), TNT와 RDX를 비발암물질로 설정해 인체위해도 기반 화약류 토양기준(soil concentrations for military training sustainability - human health, SCMTS<sub>HH</sub>)을 도출하였다(Lachance et al., 2008). 본 연구에서는 보수적인 위해도 기반 화약류 환경기준 도출을 위해 TNT와 RDX를 발암 가능성 물질로 설정하였다.

### 3. 군 사격장 환경관리를 위한 환경조사 방법 및 환경기준

#### 3.1. 환경조사 방법

운영 중 군 사격장에서 관리대상이 되는 환경매질은 군 사격장 오염확산방지시설의 방류수/퇴적물, 군 사격장 내부 토양과 군 사격장 주변 토양이다. 군 사격장 방류수의 경우 오염확산방지시설의 유출부에서 시료를 채취하며, 시료채취 방법은 현행 '수질오염공정시험기준'의 '시료의 채취 및 보존 방법'(ES 04130.1c)을 따른다(KMOE, 2015a). 군 사격장 퇴적물의 경우 '수질오염공정시험기준'의 '퇴적물 채취 및 시료조제'(ES 04160) 방법에 따라 오염확산방지시설 하부에 쌓인 퇴적물을 채취해 시료를 조제한다(KMOE, 2014).

군 사격장 내부 및 주변 토양의 경우 현행 '토양정밀조사의 세부방법에 관한 규정' 상의 군 사격장 조사 방법에 따라 조사계획을 설정하고(KMOE, 2013a), 구체적인 토양시료채취 방법은 '토양오염공정시험기준'의 '시료의 채취 및 조제'(ES 07130) 방법을 따른다(KMOE, 2013b). 다만, 현행 '토양오염공정시험기준'에서는 5개 시료를 채취해 하나의 분석용 시료로 제조하도록 하고 있지만, 군 사격장 내부 토양에서는 화약류나 중금속 오염물질이 입자상으로 존재하며, 무작위적으로 국소지역에 분포되는 특성을 보이기 때문에(즉, 오염도의 불균질성이 매우 크기 때문에), 군 사격장 내부 토양 조사 시에는 오차를 최소화하기 위해 다수의 시료를 채취해 혼합하는 증분시료채취법(Incremental sampling)의 적용이 요구된다(Hewitt et al., 2007). 증분시료채취법이란 30에서 100개의 증분시료를 혼합해 하나의 분석시료로 제조하는 시료채취법이며, 군 사격장에서는 최소 30개의 증분시료를 채취해 혼합하여야 오염의 불균질성으로 인한 오차를 최소화할 수 있다고 보고되고 있다(Hewitt et al., 2007).

각 환경매질 내 농도분석 시 중금속의 경우 우리나라의 토양 및 수질 내 오염물질 농도분석 공정시험기준에 따라 농도분석을 실시하고(KMOE 2013c; KMOE, 2015b), 화약류의 경우 우리나라에 분석기준이 없으므로 세계표준기구(International Standardization Organization, ISO)의 토양 및 수질 내 화약류 분석방법을 이용해 농도분석을 실시한다(ISO, 2009; ISO, 2013). 퇴적물 조사목적은 퇴적물을 군 사격장 내부 토양으로 재활용하는 것이 가능한지를 판단하고, 불가능한 경우 퇴적물을 어떤 폐기물(지정 폐기물 혹은 건설폐기물)로 처리하여야 할지 결정하는 것이므로(Fig. 1), 퇴적물 분석 시에는 수질오염공정시험기

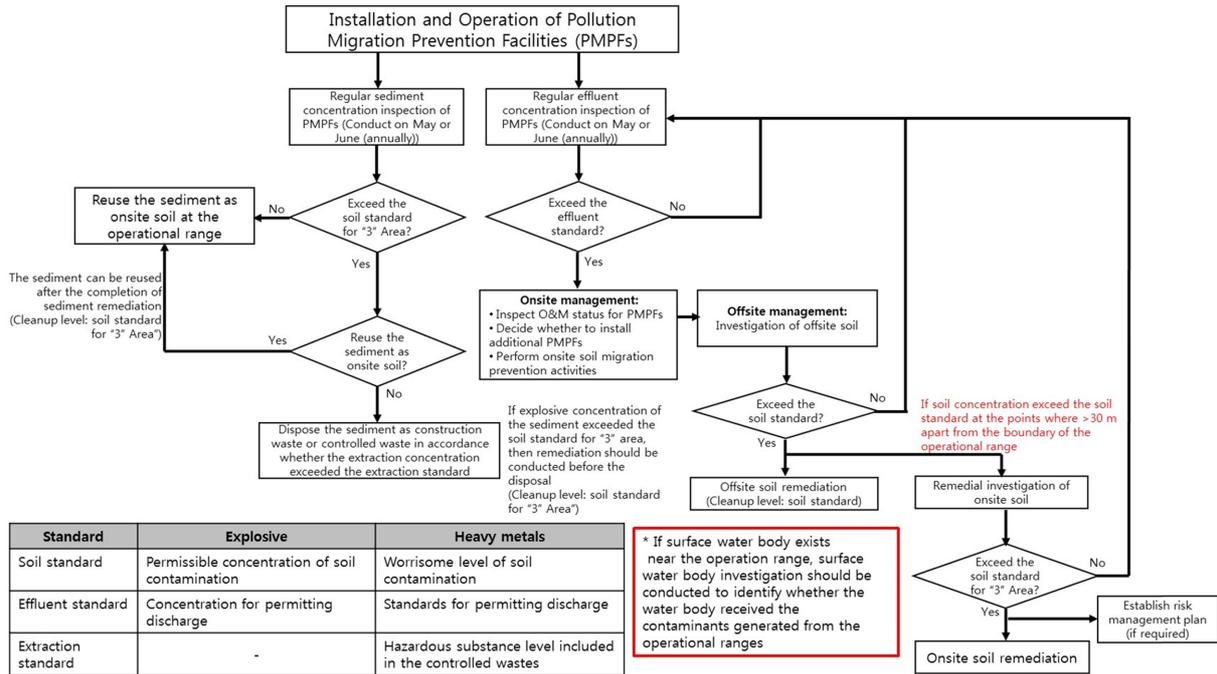


Fig. 1. Environmental management scheme suggested by the ‘Environmental Management Guideline for Operational Ranges’.

Table 1. Investigation and analysis method of contaminants in various environmental media at operational ranges

Environmental media	Investigation method	Analysis method	
		Heavy metals	Explosives
Effluent of pollutant migration prevention facilities	KMOE, 2015a	KMOE, 2015b	ISO, 2009
Sediment in pollutant migration prevention facilities	KMOE, 2014	KMOE, 2013c KMOE, 2015c	ISO, 2013
Onsite and offsite soil	KMOE, 2013a KMOE, 2013b	KMOE, 2013c	ISO, 2013

준에 명시된 퇴적물 내 오염물질 농도분석방법보다는 토양 및 폐기물 분석기준을 적용한다(KMOE, 2013c; KMOE, 2015c). 상기한 각 환경매질별 시료채취 및 농도분석 방법을 Table 1에 요약하였다.

3.2. 군 사격장 환경관리 시 적용되는 환경기준

군 사격장 환경관리를 위한 중금속에 대한 토양, 방류수 및 퇴적물(지정폐기물로 처리할지 혹은 건설폐기물로 처리할지 결정) 환경기준은 각각 현행 ‘토양환경보전법’ 상의 토양오염우려기준, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 상의 배출허용기준 및 폐기물관리법 상의 지정폐기물에 함유된 유해물질 기준을 적용할 수 있다. 현재 우리나라에는 TNT와 RDX등의 화약류에 대한 환경 허용 기준이 존재하지 않기 때문에, ‘군 사격장 환경관리 지침’에서는 TNT와 RDX의 토양오염허용기준과 군 사격장 오염확

산방지시설 방류수의 배출허용농도를 도출하였다. 한편, 군 사격장 오염확산방지시설의 퇴적물이 TNT나 RDX로 오염된 경우, TNT나 RDX에 대한 폐기물 용출기준이 없기 때문에 준설한 퇴적물을 현실적으로 폐기물로 처리하기보다는 토양으로 취급하여 본 연구에서 도출, 제안하는 3지역 우려기준까지 정확히 후 폐기물로 처리하거나 군 사격장 내부 토양으로 재사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 아래에 군 사격장 환경관리 시 적용되는 화약류 환경기준에 대한 설명 및 도출 절차를 서술하였다.

3.2.1. 화약류 토양오염허용농도

화약류 토양오염허용농도는 인체위해도에 기반해 도출되었으며, 이 때 현행 토양오염우려기준과 동일하게 부지용도를 1, 2, 3지역으로 구분하였다. 인체위해도 기반 토양오염허용농도 도출 시 설정한 노출경로는 우연한 토양

**Table 2.** ‘Permissible concentration of soil contamination’ for 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) suggested by the ‘Environmental Management Guideline for Operational Ranges’

Contaminant	Permissible soil concentration (mg/kg)		
	“1” Area	“2” Area	“3” Area
TNT	25	460	460
RDX	48	260	260

섭취(incidental ingestion of soil), 토양 피부접촉(dermal contact with soil) 및 실외 비산먼지 흡입(outdoor fugitive dust inhalation)이다. 1지역 위해도 기반 토양오염허용농도 도출 시에는 주거지역 노출계수 기본값을 사용하였고, 2지역과 3지역 위해도 기반 허용농도 도출 시에는 비주거지역 노출계수 기본값을 사용하였다. 또한, 토양오염허용농도 도출 시 현행 토양오염물질 위해성평가지침을 준용해 목표발암위해도와 목표비발암위해도를 각각  $10^{-5}$ 와 1로 설정하였다. 토양오염허용농도 도출을 위해 사용한 수식과 노출계수 및 오염물질 독성정보를 첨부자료(각각 Table S1, Table S2 및 Table S3)에 참고문헌과 함께 나타내었으며, 이를 이용해 도출한 TNT와 RDX의 1, 2, 3지역 토양오염허용농도(permissible concentration of soil contamination)는 Table 2와 같다. TNT의 경우 목표비발암위해도를 1로 설정하였을 때 토양오염허용농도가 목표발암위해도를  $10^{-5}$ 로 설정하였을 때의 토양오염허용농도보다 낮았기 때문에 Table 2에 명시된 TNT의 토양오염허용농도는 비발암위해도에 기반해 도출된 수치이다. 반대로, RDX의 경우 목표발암위해도를  $10^{-5}$ 로 설정하였을 때 토양오염허용농도가 목표비발암위해도를 1로 설정하였을 때의 토양오염허용농도보다 낮았기 때문에 Table 2에 명시된 RDX의 토양오염허용농도는 발암위해도에 기반해 도출된 수치이다.

### 3.2.2. 오염확산방지시설 방류수의 화약류 배출허용농도

군 사격장 오염확산방지시설 방류수의 배출허용농도는 우리나라 배출허용기준 도출 절차를 준용해 도출되었다(국립환경과학원, 2009). 배출허용기준을 도출하기 위해서는 우선 인체위해도 및 수생태독성 기반 수질준거치를 결정하여야 하며, 두 수질준거치 중 낮은 값이 최종 수질준거치가 된다. 인체위해도 기반 수질준거치 도출 시 적용되는 노출경로는 음용과 어류 섭취이나, 군 사격장 주변에서 일상적인 어업 활동이 거의 없을 것으로 판단해 군 사격장 배출허용농도 도출 시 어류 섭취 경로는 제외되었다. 인체위해도 기반 수질준거치는 발암성 기반 수질준거

치와 비발암성 기반 수질준거치로 다시 구분되며, 두 수질준거치 중 낮은 수질준거치가 인체위해도 기반 수질준거치가 된다. 이 때 목표발암위해도와 목표비발암위해도를 각각  $10^{-5}$ 와 1로 설정하였다(국립환경과학원, 2009). 상기 방법을 이용해 도출한 TNT와 RDX의 인체위해도 기반 수질준거치(water quality criteria - human health)는 Table 3과 같다. 상기한 토양오염허용농도와 마찬가지로 TNT의 경우 목표비발암위해도를 1로 설정하였을 때 수질준거치가 목표발암위해도를  $10^{-5}$ 로 설정하였을 때의 수질준거치보다 낮았기 때문에 Table 3에 명시된 TNT의 수질준거치는 비발암위해도에 기반해 도출된 수치이다. 반대로, RDX의 경우 목표발암위해도를  $10^{-5}$ 로 설정하였을 때 수질준거치가 목표비발암위해도를 1로 설정하였을 때의 수질준거치보다 낮았기 때문에 Table 3에 명시된 RDX의 수질준거치는 발암위해도에 기반해 도출된 수치이다.

한편, 수생태독성 기반 수질준거치는 최소 4개의 서로 다른 분류학적 그룹(어류군, 무척추동물군, 식물군, 기타군)에서 최소 5개의 서로 다른 국내종 만성 무영향농도(no observed effect concentration, NOEC)를 이용해 종민감도분포곡선(species sensitivity distribution, SSD)을 도출하고, SSD 상에서 95%의 생물종을 보호할 수 있는 수준의 농도로 결정된다(국립환경과학원, 2009). 만약 국내종에 대한 만성 독성자료가 부족할 시에는 상기 4개 분류학 그룹에서 최소 5개의 서로 다른 국내종 급성 독성자료를 이용해 SSD를 도출하고, SSD 상에서 95%의 생물종을 보호할 수 있는 수준의 농도를 수생태독성 기반 수질준거치로 결정한다. 만약 국내종에 대한 급성 독성자료도 부족하면 USEPA에서 제안하는 수생태독성 기반 수질준거치를 인용한다(국립환경과학원, 2009). 평가 결과, TNT와 RDX의 국내종 만성 및 급성독성자료가 부족해 SSD를 도출할 수 없어 ‘군 사격장 환경관리 지침’에서는 USEPA에서 사용하는 수생태독성 수질준거치를 인용해 TNT와 RDX의 수생태독성 수질준거치(water quality criteria - environment)를 결정하였다(Table 3).

TNT와 RDX 모두 인체위해도 기반 수질준거치가 수생태독성 기반 수질준거치보다 낮아 인체위해도 기반 수질준거치가 최종 수질준거치로 결정되었다. 우리나라에서 수질오염물질에 대한 배출허용기준은 가, 나, 특례지역과 청정지역 기준으로 구분되며, 가, 나, 특례지역의 배출허용기준은 수질준거치에 희석배수인 10을 곱해 도출되고, 청정지역에서는 보수적인 기준 설정을 위해 가, 나, 특례지역 배출허용기준을 10으로 나눈 값을 배출허용기준으로

**Table 3.** ‘Water quality criteria’ and ‘concentration for permitting discharge’ for 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in the effluent of pollutant migration prevention facilities suggested by the ‘Environmental Management Guideline for Operational Ranges’

Contaminant	Water quality criteria (mg/L)		Concentration for permitting discharge (mg/L)	
	Human health	Environment	“Ga”, “Na”, “Designated ” Area	“Clean” Area
TNT	0.01	0.1	0.1	0.01
RDX	0.007	0.36	0.07	0.007

결정한다(NIER, 2009). ‘군 사격장 환경관리 지침’에서 제시된 TNT와 RDX의 가, 나, 특례지역 배출허용농도 (concentration for permitting discharge - “Ga”, “Na” and “Designated” Area) 역시 TNT와 RDX의 수질준거치에 10을 곱한 수치로 결정되었고, 청정지역 배출허용농도 (concentration for permitting discharge - “Clean” Area)는 가, 나, 특례지역 수질준거치를 10으로 나눈 값으로 결정되었다(Table 3).

#### 4. 군 사격장 환경관리 절차(안)

‘군 사격장 환경관리 지침’에서는 군 사격장을 운영 중 군 사격장과 폐쇄/폐쇄예정 군 사격장으로 구분하여 관리하도록 하며, 폐쇄/폐쇄예정 군 사격장 내부 토양에 대해서는 ‘토양환경보전법’과 ‘토양환경평가지침’(고시 제2014-182호)에 따라 토양환경평가를 실시해 오염도를 조사하고, 토양오염기준(중금속: 토양오염우려기준, 화약류: 토양오염허용농도)을 초과하면 기준을 충족할 수 있도록 토양정화를 실시하면 된다. 이 때, 필요시(예: 향후 재개발 계획이 아직 수립되어 있지 않은 경우 등) 군 사격장 내부 토양에 대해 위해성평가를 수행하여 위해도 저감 대책 등 정화와 관리방안을 수립할 수 있으며, 위해성평가 대상은 향후 군 사격장 재개발 이후 부지에서 생활할 사람들로 한다. 폐쇄/폐쇄예정 군 사격장에 대한 토양환경평가 및 정화는 ‘토양환경보전법’과 ‘토양환경평가지침’을 참고하여 수행하면 된다. 본 총설에서는 운영 중 군 사격장에 대해 Fig. 1과 같은 환경관리 절차(안)를 제안하고자 한다.

운영 중 군 사격장의 환경관리는 기본적으로 오염확산 방지시설을 설치, 운영해 군 사격장 내 오염물질의 주변 지역으로의 확산을 방지하는 것을 원칙으로 한다. 운영 중 군 사격장 위해성평가의 목적은 군 사격장에서 외부로 유출되는 오염물질에 의해 군 사격장 주변 지역주민에게 해로운 건강 영향이 발생하는 것을 방지할 수 있는 환경관리방안을 수립하는 것이다. 이 때, 군 사격장 하류방향으로 하천 등 수계가 인접해 있어(USEPA의 경우 6.4 km 이내(USEPA, 1992)) 군 사격장 오염물질이 주변 수계로

유입될 가능성이 높은 경우 오염물질이 주변 수계로 유입되었는지 확인하는 조사를 실시하여야 한다. 군 사격장에서는 강우 시 지속적인 토사유출로 인해 군 사격장 내부 토양이 유실될 수 있으므로, 오염확산방지시설을 설치하여 유실된 토양의 외부확산을 방지하여야 한다. 이러한 오염확산방지시설이 제대로 작동하고 있는지를 확인하기 위해 연 1회 오염확산방지시설의 퇴적물 및 방류수 정기조사를 실시하여야 한다. 우리나라에서는 여름철의 집중호우로 인해 7월~9월에 오염물질 유출이 가장 심할 것으로 예상되므로, 이에 대한 예방 차원에서 5월~6월 중에 방류수 및 퇴적물에 대한 정기조사를 실시할 것을 제안한다.

오염확산방지시설 퇴적물 내 중금속 및 화약류 오염물질 농도가 3지역 토양기준 이내인 경우 퇴적물을 군 사격장 내부 토양으로 재활용할 수 있다. 반면, 퇴적물 내 중금속 농도가 토양기준을 초과하면 오염토양을 정화하여 재사용하거나 퇴적물을 폐기물로 처리할 수 있으며, 이 때, 퇴적물을 지정폐기물로 처리할지 혹은 건설폐기물로 처리할지를 결정하기 위해 폐기물용출시험을 실시한다. 중금속 용출농도가 폐기물용출기준을 초과하면 지정폐기물로 처리하고 그렇지 않으면 건설폐기물로 처리하면 되는데, 현재 화약류에 대한 폐기물용출기준은 없으므로, 화약류 물질이 토양기준을 초과한 경우에는 3지역 토양기준까지 정화하는 것이 바람직하다고 판단된다.

한편, 오염확산방지시설 방류수에 대해서는 방류수 내 오염물질 농도가 배출기준(중금속: 배출허용기준, 화약류: 배출허용농도)을 초과하면 오염확산방지시설의 운영상태를 점검하고 확산방지시설의 추가설치가 필요한지 결정하며, 군 사격장 내부토양의 오염물질이 유입되는 것을 방지하는 조치를 취하는 등 방류수 내 오염물질 농도를 배출기준 이내로 유지, 저감시킬 수 있는 조치를 취하여야 한다. 또한, 군 사격장 외부의 주변 토양조사도 실시한다. 여기서 군 사격장 주변 토양은 군 사격장 경계와 군 사격장 주변 수계 사이의 토양을 의미하며, 이 때 군 사격장 주변 수계는 군 사격장 경계와 군 사격장에서 하류방향으로 가장 가까운 하천(USEPA에서는 6.4 km 이내의 수계)을 의미한다(USEPA, 1992).

군 사격장 주변 토양 조사 결과 검출된 오염도가 그 지목에 해당하는 토양기준(1지역, 2지역, 3지역)을 초과하면 현행 '토양환경보전법'에 준하여 정밀조사를 실시하고, 그 결과에 따라 토양정화 여부를 결정하면 될 것이다. 군 사격장 주변 토양 조사 결과 그 지역에 해당하는 허용농도를 초과하고, 주변환경에 미치는 영향이 크다고 판단되면(예를 들어 군 사격장 경계로부터 30 m 이상 떨어진 지점에서 토양농도가 기준을 초과하여 검출되어 오염물질의 지속적인 확산이 이미 이루어졌다고 판단되면(USDOD, 2007)), 현행법에 따라 군 사격장 내부 정밀조사를 실시하여 적절한 조치를 취하는 것이 바람직하며, 필요 시 부지특이적 위해성평가를 통해 오염물질 이동성 저감 등의 위해관리방안을 수립, 실시할 수 있다.

## 5. 결 론

군 사격장 및 주변지역에서 발생하는 환경문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 군 사격장 내부토양에 대한 적극적인 정화를 실시해 오염원을 제거하는 것이 가장 바람직하겠지만, 상시적인 사격훈련으로 인해 오염물질의 지속적인 발생은 불가피하며, 불발탄 등으로 인한 안전문제로 인해 군 사격장 내부토양에 대한 적극적인 정화는 거의 불가능하다 할 수 있다. 또한, 운영 중 군 사격장은 내부 출입이 엄격하게 금지되어 있어 실제로 군 사격장 내부 자체의 오염보다는 군 사격장 오염물질이 토양 및 주변 수계로 확산 및 유입되어 지역 주민에게 노출될 확률이 더 크므로, 군 사격장 오염물질의 오염확산방지에 초점을 둔 환경관리방안이 더 바람직하고 현실적이다.

본 총설에서는 현 군 사격장 환경관리지침의 제한점을 보완하고자 인체위해도를 고려한 TNT와 RDX 화약류 오염물질에 대한 환경매질 허용농도를 제안하였으며, 오염확산방지시설에서 발생하는 방류수 및 퇴적물에 대한 환경조사를 주기적으로 실시하는 것을 시작으로 하는 군 사격장 환경관리 절차(안)를 제시하였다. 즉, 오염확산방지시설의 방류수나 퇴적물 내 오염물질 농도가 기준을 초과하면 오염확산방지시설 보완 및 주변지역 토양조사를 추가로 실시해 오염확산을 방지할 수 있는 조치를 취하고 군 사격장 외부토양으로 유출된 오염물질에 대한 처리를 실시하여야 한다. 군 사격장 외부토양에 대한 조사와 더불어 오염원 관리를 위해 군 사격장 내부토양에 대한 정밀조사를 실시하고 기준을 초과한 토양에 대한 정화작업을 실시하여야 한다. 그러나, 지속적인 사격행위 및 불발탄 안전문제로 인해 정화작업이 어려운 군 사격장에 대해

서는 위해성평가를 통한 위해관리방안을 수립하는 방안도 검토될 수 있을 것이다.

## 사 사

본 연구는 환경산업기술원의 토양지하수오염확산방지사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- ACGIH, 2011, Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices, Cincinnati, OH.
- Clausen, J.L., Korte, N., Dodson, M., Robb, J., and Rieven, S., 2006, Conceptual Model for the Transport of Energetic Residues from Surface Soil to Groundwater by Range Activities, United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, ERDC/CRREL TR-06-18.
- Health Canada, 2010, Federal Contaminated Site Risk Assessment in Canada Part II: Health Canada Toxicological Reference Values (TRVs) and Chemical-Specific Factors, Version 2.0, Ottawa, Ontario, Canada, ISBN: 978-1-100-17925-4.
- Hewitt, A.D., Jenkins, T.F., Walsh, M.E., Walsh, M.R., Bigl, S.R., and Ramsey, C.A., 2007, Protocols for Collection of Surface Soil Samples at Military Training and Testing Ranges for the Characterization of Energetic Munitions Constituents, United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, ERDC/CRREL TR-07-10.
- IARC, 1996, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Volume 65: Printing Processes and Printing Inks, Carbon Black and Some Nitro Compounds - Summary of Data Reporting and Evaluation, Lyon, France.
- ISO, 2009, Water Quality - Determination of Certain Explosives and Related Compounds - Method Using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) with UV Detection, ISO 22478:2006.
- ISO, 2013, Soil Quality - Determination of Selected Explosives and Related Compounds - Part I: Method Using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) with Ultraviolet Detection, ISO 11916-1.
- KDND, 2001a, Environmental Pollution Management Guidance for Military Operational Ranges, Director General Office for Military Installations Planning.
- KDND, 2001b, Guidance for the Prevention of Pollution Migration from Operational Ranges.
- KDND, 2013, Directive for the Military Environmental Management, Office for Military Installations Planning and the Envi-

ronment, Directive Number 1583.

Korea Environmental Industry and Technology Institute (KEITI), 2015, Pollutants Information, available at [http://www.sec.re.kr/pollutants.do?method=arsenic\\_01](http://www.sec.re.kr/pollutants.do?method=arsenic_01).

KMOE, 2013a, Rules on the Remedial Investigation Methodology of Soils, KMOE Notice 2013-59.

KMOE, 2013b, Soil Contamination Testing Standard - Sampling, ES 07130.

KMOE, 2013c, Soil Contamination Testing Standard - Metals, ES 07400.

KMOE, 2014, Water Contamination Testing Standard - Sediment Sampling, ES 04160.

KMOE, 2015a, Water Contamination Testing Standard - Sampling, ES 04130.1c.

KMOE, 2015b, Water Contamination Testing Standard - Metals, ES 04400.0.

KMOE, 2015c, Wastes Testing Standard - Metals, ES 06400.

Lachance, B., Bergeron, P.-M., Bérubé, V, Sunahara, G.I., and Robidoux, P.Y., 2008, Validation of Environmental Military Threshold Values for Explosives in Soil, Final Report (Draft), National Research Council Canada, Montreal, Quebec, Canada,

NRC #49926.

NIER, 2009, Study on Extended Authorization of Specific Toxic Substance and Establishment of the Effluent Standard.

USDOD, 2007, Munitions Response Site Prioritization Protocol Primer, Office of the Deputy Under Secretary of Defense, Washington, DC, USA.

USEPA, 1992, Hazard Ranking System Guidance Manual, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 540-R-92-026.

USEPA, 2012, Site Characterization for Munitions Constituents, EPA Federal Facilities Forum Issue Paper, EPA-505-S-11-001.

USEPA, 2014a, Technical Fact Sheet - 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT), Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 505-F-14-009.

USEPA, 2014b, Technical Fact Sheet - Hexahydro-1,3,5-Trinitro-1,3,5-Triazine (RDX), Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 505-F-14-008.

USEPA, 2015, Freshwater Screening Benchmarks, available at <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/eco/btag/sbv/fw/screen-bench.htm>.

## Supplemental Materials

**Table S1.** Equations for the derivation of ‘permissible concentration of soil contamination’

(1) Permissible concentration of soil contamination for “1 Area” (PCSC<sub>res</sub>)

Exposure route	Carcinogenic effect	Noncarcinogenic effect
Soil ingestion	$PCSC_{res-ca-ing} = \frac{TR \times LT \times 365 \left(\frac{days}{years}\right)}{SF_o \times EF_r \times IFS \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$PCSC_{res-nc-ing} = \frac{THQ \times ED_{rc} \times 365 \left(\frac{days}{years}\right) \times BW_c}{\frac{1}{RfD_o} \times EF_r \times ED_{rc} \times IRS_c \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$
Dermal contact with soil	$PCSC_{res-ca-der} = \frac{TR \times LT \times 365 \left(\frac{days}{years}\right)}{\frac{SF_o}{ABS_{GI}} \times EF_r \times ABS_d \times DFS \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$PCSC_{res-nc-der} = \frac{THQ \times ED_{rc} \times 365 \left(\frac{days}{years}\right) \times BW_c}{\frac{1}{RfD_o \times ABS_{GI}} \times EF_r \times ED_{rc} \times ABS_d \times SA_{rc} \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$
All routes	$PCSC_{res-ca} = \frac{1}{\frac{1}{SL_{res-ca-ing}} + \frac{1}{SL_{res-ca-der}}}$	$PCSC_{res-nc} = \frac{1}{\frac{1}{SL_{res-nc-ing}} + \frac{1}{SL_{res-nc-der}}}$
Final PCSC <sub>res</sub>	$PCSC_{res} = \text{Min}(SL_{res-ca}, SL_{res-nc})$	

(2) Permissible concentration of soil contamination for “2 Area” and “3 Area” (PCSC<sub>ind</sub>)

Exposure route	Carcinogenic effect	Noncarcinogenic effect
Soil ingestion	$PCSC_{ind-ca-ing} = \frac{TR \times LT \times 365 \left(\frac{days}{years}\right) \times BW_a}{SF_o \times EF_i \times ED_i \times IRS_a \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$PCSC_{ind-nc-ing} = \frac{THQ \times DE_i \times 365 \left(\frac{days}{years}\right) \times BW_a}{\frac{1}{RfD_o} \times EF_i \times ED_i \times IRS_a \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$
Dermal contact with soil	$PCSC_{ind-ca-der} = \frac{TR \times LT \times 365 \left(\frac{days}{years}\right) \times BW_a}{\frac{SF_o}{ABS_{GI}} \times EF_i \times ED_i \times ABS_d \times SA_i \times AF_i \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$	$PCSC_{ind-nc-der} = \frac{THQ \times ED_i \times 365 \left(\frac{days}{years}\right) \times BW_a}{\frac{1}{RfD_o \times ABS_{GI}} \times EF_i \times ED_i \times ABS_d \times SA_i \times 10^{-6} \left(\frac{kg}{mg}\right)}$
All routes	$PCSC_{ind-ca} = \frac{1}{\frac{1}{SL_{ind-ca-ing}} + \frac{1}{SL_{ind-ca-der}}}$	$PCSC_{res-nc} = \frac{1}{\frac{1}{SL_{ind-nc-ing}} + \frac{1}{SL_{ind-nc-der}}}$
Final PCSC <sub>ind</sub>	$PCSC_{ind} = \text{Min}(SL_{ind-ca}, SL_{ind-nc})$	

(3) Supplemental equations

Factor	Equation
IFS	$\frac{ED_{rc} \times IRS_c}{BW_c} + \frac{(ED - ED_{rc}) \times IRS_a}{BW_a}$
DFS	$\frac{ED_{rc} \times SA_{rc} \times AF_{rc}}{BW_c} + \frac{(ED - ED_{rc}) \times SA_{ra} \times AF_{rc}}{BW_a}$

**Table S2.** Default values used for the ‘permissible concentration of soil contamination’ (PCSC) derivation

Factor	Definition	Unit	Value	Source
PCSC <sub>res</sub>	PCSC for “1 Area”	mg/kg	–	–
PCSC <sub>ind</sub>	PCSC for “2 Area” and “3 Area”	mg/kg	–	–
PCSC <sub>res-ca</sub>	PCSC for “1 Area” for the carcinogenic effect	mg/kg	–	–
PCSC <sub>res-nc</sub>	PCSC for “1 Area” for the noncarcinogenic effect	mg/kg	–	–
PCSC <sub>ind-ca</sub>	PCSC for “2 Area” and “3 Area” for the carcinogenic effect	mg/kg	–	–
PCSC <sub>ind-nc</sub>	PCSC for “2 Area” and “3 Area” for the noncarcinogenic effect	mg/kg	–	–
PCSC <sub>res-ca-ing</sub>	PCSC for “2 Area” and “3 Area” for the carcinogenic effect - soil ingestion	mg/kg	–	–
PCSC <sub>res-ca-der</sub>	PCSC for “1 Area” for the carcinogenic effect - dermal contact with soil	mg/kg	–	–
PCSC <sub>res-nc-ing</sub>	PCSC for “1 Area” for the noncarcinogenic effect - soil ingestion	mg/kg	–	–
PCSC <sub>res-nc-der</sub>	PCSC for “1 Area” for the noncarcinogenic effect - dermal contact with soil	mg/kg	–	–
PCSC <sub>ind-ca-ing</sub>	PCSC for “2 Area” and “3 Area” for the carcinogenic effect - soil ingestion	mg/kg	–	–
PCSC <sub>ind-ca-der</sub>	PCSC for “2 Area” and “3 Area” for the carcinogenic effect - dermal contact with soil	mg/kg	–	–
PCSC <sub>ind-nc-ing</sub>	PCSC for “2 Area” and “3 Area” for the noncarcinogenic effect - soil ingestion	mg/kg	–	–
PCSC <sub>ind-nc-der</sub>	PCSC for “2 Area” and “3 Area” for the noncarcinogenic effect - dermal contact with soil	mg/kg	–	–
TR	Target risk	unitless	10 <sup>-5</sup>	1)
THQ	Target hazard quotient	unitless	1	1)
SF <sub>o</sub>	Oral slope factor	(mg/kg-day) <sup>-1</sup>	Table S3	2)
RfD <sub>o</sub>	Oral reference dose	mg/kg-day	Table S3	2)
ABS <sub>GI</sub>	Fraction of contaminant absorbed in gastrointestinal tract	unitless	Table S3	2)
EF <sub>r</sub>	Exposure frequency - residential area (“1 Area”)	days/year	350	2)
EF <sub>i</sub>	Exposure frequency - non-residential area (“2 Area” and “3 Area”)	days/year	250	2)
ED <sub>r</sub>	Exposure duration - residential area (“1 Area”)	years	25	3)
ED <sub>rc</sub>	Exposure duration for children - residential area (“1 Area”)	years	6	2)
ED <sub>i</sub>	Exposure duration - non-residential area (“2 Area” and “3 Area”)	years	25	2)
LT	Lifetime	years	78.6	3)
BW <sub>c</sub>	Body weight - children	kg	15	3)
BW <sub>a</sub>	Body weight - adults	kg	62.8	3)
IRS <sub>c</sub>	Soil ingestion rate - children	mg/day	300	3)
IRS <sub>a</sub>	Soil ingestion rate - adults	mg/day	100	2)
IFS	Age-adjusted soil ingestion rate	mg-years/kg-day	150	–
ABS <sub>d</sub>	Fraction of contaminant absorbed dermally from soil	unitless	Table S3	2)
SA <sub>rc</sub>	Skin surface area that can adhere soil - residential (“1 Area”) children	cm <sup>2</sup> /day	2,571	3)
SA <sub>ra</sub>	Skin surface area that can adhere soil - residential (“1 Area”) adults	cm <sup>2</sup> /day	5,517	3)
SA <sub>i</sub>	Skin surface area that can adhere soil - non-residential (“2 Area” and “3 Area”) adults	cm <sup>2</sup> /day	3,177	3)
AF <sub>rc</sub>	Soil adherence factor - residential (“1 Area”) children	mg/cm <sup>2</sup>	0.2	2)
AF <sub>ra</sub>	Soil adherence factor - residential (“1 Area”) adult	mg/cm <sup>2</sup>	0.07	2)
AF <sub>i</sub>	Soil adherence factor - nonresidential (“2 Area” and “3 Area”) adult	mg/cm <sup>2</sup>	0.12	2)

1) Target risk described in Korean Risk Assessment Guidance for Soil Contaminants

2) USEPA, 2015, Regional Screening Table (<http://www2.epa.gov/risk/regional-screening-table>)

3) Derived by statistical treatment of the data described in Korean Exposure Factors Handbook (Jang et al., 2007)

**Table S3.** Toxicity data of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) for the derivation of 'permissible concentration of soil contamination' (PCSC)

Explosive	SF <sub>o</sub> ((mg/kg-day) <sup>-1</sup> )	RfD <sub>o</sub> (mg/kg-day)	ABS <sub>GI</sub> (unitless)	ABS <sub>d</sub> (unitless)
TNT	3.0E-02	5.0E-04	1	0.032
RDX	1.1E-01	3.0E-03	1	0.015

Source: USEPA, 2015, Regional Screening Table (<http://www2.epa.gov/risk/regional-screening-table>)