

## TREECS 프로그램을 이용한 화약류 오염 군 사격장 토양의 TNT와 RDX 유출 특성 연구

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

<sup>1</sup>서울대학교 공과대학 건설환경공학부

<sup>2</sup>서울대학교 농생명과학대학 농생명과학공동기기원

### Application of TREECS Program to Predict the Fate of TNT and RDX from Firing Range

Gihyeon Yu<sup>1</sup> · Jae-Woong Jung<sup>2</sup> · Kyoungphile Nam<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>National Instrumentation Center for Environmental Management, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University

#### ABSTRACT

Attention to munitions constituents such as 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in the firing ranges is increasing due to their toxicity and high mobility to the environment. It is helpful to use a systemic model to predict the amount of contaminants for the establishment of environmental management of firing ranges. This study employed Training Range Environmental Evaluation and Characterization System (TREECS) program to estimate the mobility characteristics of TNT and RDX via groundwater leaching, soil erosion and surface water runoff. The prediction results of the TNT and RDX migration with TREECS showed that 68% of initial TNT and 21% of initial RDX were discharged through the soil erosion and the 20% of initial TNT and 54% of initial RDX ran out the firing range via the groundwater leaching. The rest of the initial TNT and RDX moved to adjacent surface water via surface runoff. The data suggest that soil erosion and surface runoff occupying 80% of TNT to the total amount are important migration pathways. On the other hand, groundwater leaching occupying 54% to the total amount was also important pathway for RDX.

**Key words :** Firing range, TNT, RDX, TREECS

#### 1. 서 론

최근 우리나라에서는 군 사격장에서 사격훈련으로 인해 발생한 화약류 오염물질이 주변지역으로 확산되어 사격장 지역주민에게 건강영향을 끼칠 수 있다는 우려가 대두되고 있다(Bae and Park, 2014, Cao et al., 2003, KMOE, 2005). 우리나라에서 주로 사용하는 화약류 물질은 2,4,6-trinitrotoluene(TNT)과 hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine(RDX)이며, 두 물질 모두 사람에게 암을 유발하거나 심각한 건강영향을 미칠 수 있는 물질로 알려져 있다(USEPA, 2012). 그렇지만 지속적인 사격훈련 및

불발탄 안전문제 등으로 인해 사격장 내부에 대한 적극적인 정화를 실시하는 것은 실질적으로 불가능하다. 따라서 군 사격장 환경오염에 대한 관리는 군 사격장 내부의 화약류 물질이 주변으로 확산되는 것을 방지할 수 있는 방향으로 나아가야 하며, 이를 위해서는 화약류 물질에 대한 이동해석이 선행되어야 한다.

이동해석을 위해서 Seasonal Soil Compartment Model (SESOIL), Pesticide Analytical Model(PESTAN)과 같은 프로그램을 사용할 수 있다. 이들 프로그램은 침투를 통한 오염물질의 수직이동, 토양과 오염물질의 흡착평형과 오염물질의 공극수로의 용해 등을 고려하고 있다. 하지만

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

Received : 2015. 10. 8 Reviewed : 2015. 11. 11 Accepted : 2015. 11. 28

Discussion until : 2016. 1. 31

일반적으로 군 사격장은 산간지역에 위치해 있기 때문에 강우 시 지하수침투(leaching), 토양침식(soil erosion) 및 표면유출(surface runoff) 등의 유출경로(migration pathway)를 통해 노출이 일어난다. 따라서 사격장 화약류 물질의 이동해석은 다양한 경로를 통해 오염물질 유출이 발생하는 것을 평가할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 상기한 유출경로별 오염물질 유출량을 예측할 수 있는 Training Range Environmental Evaluation and Characterization System(TREECS) 프로그램을 이용해 사격장 내 TNT와 RDX의 이동해석을 실시하였다. 먼저 사격장 현황 및 오염도 조사결과를 바탕으로 TREECS 프로그램을 이용하여 각 유출경로별(지하수유출, 토양침식 및 표면유출) TNT와 RDX의 유출량(mass flux)을 평가하고 비교하였다. 그리고 TNT와 RDX의 토양잔류가 경로별 유출량에 미치는 영향에 대해서도 평가하였다.

## 2. 방 법

### 2.1. TREECS 프로그램

TREECS 프로그램에서 고려하는 유출경로들은 Fig. 1과 같으며(Dortch et al. 2009), 아래와 같은 세 가지 가정을 바탕으로 도출되었다. 첫째는 사격장 전체 부지에 대해 균일한  $Z_b$ (m)의 오염심도에서 Continuous Stirred-Tank Reactor(CSTR) 모형을 통해 표면유출과 지하수유출에 의해 유출하는 오염물질량을 고려한다는 것이다. 둘째는 토양에 존재하는 오염물질들이 충분히 물에 용해되어 토양과의 흡착평형을 이루고 있다는 가정이다. 셋째는 오염물질들의 헨리상수가 매우 낮기 때문에 휘발로 인한 손실을 고려하지 않고, 분해반응 또한 고려하지 않는다는 것이다. 사격장 부지로 유입되는 오염물질들이 토양침식, 표면유출, 및 지하수침투의 세 가지의 유출경로로 유출하는 것을 가정할 때 지배방정식은 아래 식 (1)과 같다.

$$\frac{dM}{dt} = L - F_l - F_e - F_r \quad (1)$$

여기서,  $M$ ,  $t$ 는 각각 사격장 부지 토양에 존재하는 오염물질량(g), 시간(yr)이다.  $L$ ,  $F_l$ ,  $F_e$  및  $F_r$ 은 각각 일년 동안 사격장 부지에 투입되는 초기오염물질량(g/yr), 일년 동안 지하수침투에 의한 오염물질 유출량(g/yr), 일년 동안 토양침식으로 유출되는 오염물질량(g/yr) 및 일년 동안 표면유출로 유출되는 오염물질량(g/yr)이다. 이 모형에서는 정상상태(steady state)를 가정하여 연 단위 유출량 산정이 가능하다. 오염부지 전체 면적에 대해서 오염물질이

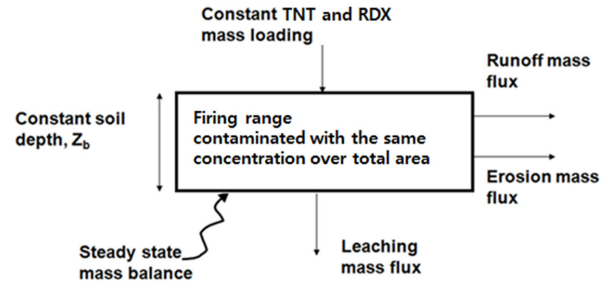


Fig. 1. Conceptual transport model of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in TREECS. Instant transfer from solid to aqueous phase, no volatilization and no decay are assumed (modified from Dortch et al., 2009).

동일하게 오염되어있다는 가정을 통해 단위 부피당 오염물질량( $C_{tt}$ ,  $g/m^3$ )을 산정할 수 있다. 아래 식 (2)는 오염물질의 평균 농도와 오염물질의 관계를 나타내는 식이다.

$$C_{tt} = \frac{M}{V} = \frac{M}{AZ_b} \quad (2)$$

여기서  $A$ 는 사격장 전체 면적( $m^2$ )이고,  $V$ 는 오염심도( $Z_b$ )를 고려한 사격장 토양부피( $m^3$ )이다. 지하수침투를 통한 오염물질의 유출량( $F_l$ ,  $g/yr$ )은 아래의 식 (3)을 통해 산정할 수 있다.

$$F_l = q_w A F_{dp} C_{tt} \quad (3)$$

여기서,  $q_w$ 는 연평균 Darcy 침투율( $m/yr$ )이고,  $F_{dp}$ 는 오염물질의 초기 유입량과 토양 공극수의 수분에 용해된 오염물질량의 관계를 나타내는 비례상수(unitless)이며, 아래 식 (4)에 의해 결정된다.

$$F_{dp} = \frac{1}{\theta_w + \rho_b K_d} \quad (4)$$

여기서,  $\theta_w$ 는 토양 내 수분 함량(unitless)을 나타내고,  $\rho_b$ 는 토양용적밀도( $g/cm^3$ ),  $K_d$ 는 각 오염물질의 토양 흡착계수(L/kg)를 의미한다. 흡착계수( $K_d$ )가 낮을수록 지하수침투를 통한 유출량이 증가한다. 강우 발생시 토양의 공극은 물로 포화되고 이 때, 오염물질이 공극수에 용해되어 지하로 유출한다(Dortch et al., 2009; Johnson and Dortch, 2014).

아래의 식 (5)는 TREECS에서 산술적 계산을 통해서 토양침식으로 유출하는 오염물질량( $F_e$ ,  $g/yr$ )을 구하는 식이다.

$$F_e = AC_{tt}E \quad (5)$$

여기서,  $A$ 는 사격장 전체 면적( $m^2$ )이고,  $C_{tt}$ 는 단위부피당

오염물질의 농도( $g/m^3$ )이며, E는 연평균 토양 침식량( $m/yr$ )이다.  $F_e$ 는 침식된 토양에 흡착된 오염물질과 토양 입자 그리고 침식된 토양에 존재하는 공극수를 모두 포함하는데, 단위면적당 연평균 토양침식량( $m^3/m^2/yr$ )만큼의 토양이 사격장 주변지역으로 유출한다고 볼 수 있다. 따라서 토양침식으로 유출되는 오염물질량은 초기 토양에 존재하는 오염물질의 농도와 비례관계에 있다.

표면유출을 통한 오염물질의 유출량( $F_r$ ,  $g/yr$ )을 산정하는 식은 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$F_r = A d_e (1 - e^{-k}) C_u N \tag{6}$$

$$k = \frac{a \phi F_{dp} P}{\rho_b d_e N} \tag{7}$$

여기서,  $d_e$ 는 강우에 의해 공극수가 방출되는 토양 심도 (soil exchange layer thickness, m),  $P$ 는 연평균 강수량 ( $m/yr$ ),  $N$ 은 토양 공극률(unitless)을 나타낸다.  $d_e$ 와  $a$ 는 토성과 토양표면의 식생과 토양의 이용 목적 등을 반영하는 값들이다. 또한, 오염물질의 흡착계수가 낮을수록 표면 유출을 통해 사격장에서 주변지역으로 유출하는 오염물질량은 증가하게 된다.

### 2.2. 오염물질 유출 평가 대상 부지 특성

본 연구에서는 우리나라 OO 사격장(부지면적 1.32  $km^2$ )의 2009년부터 2011년까지의 사격장 내부 토양에서 실측한 TNT와 RDX의 농도자료 및 토양용적밀도, 수분함량, 공극률 및 유기탄소함량 등의 부지 특성(Table 1)을 바탕으로 TRECS 프로그램을 이용해 TNT와 RDX의 유출특성을 평가하였다. 연도별 오염농도 자료는 Jung (2014)의 논문에서 인용하였다(Table 1). 이 때, 유출이 발생할 수 있는 심도인 1 cm 이내에 모든 오염물질의 존재한다고 가정해 오염농도를 단위면적 당 오염량으로 환산하였다(USEPA, 1988). 토양용적밀도, 수분함량 및 공극률은 사격장 부지의 토성으로 도출하였다. TRECS 프로그램을 이용하여 표면유출과 지하수침투를 통한 오염물질의 유출량을 산정할 때, TNT와 RDX의 토양 흡착계수가 반영된다. TNT와 RDX 같은 유기오염물질의 토양 흡착계수는 토양유기탄소 함량과 관계가 있기 때문에(토양 흡착계수( $K_d$ )는 유기탄소 분배계수( $K_{oc}$ )와 토양유기탄소 함량( $f_{oc}$ ) 곱으로 표현됨), 두 물질의 토양 흡착계수를 도출하기 위해서는 부지특이적인 유기탄소함량 자료가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 OO 사격장에서 채취한 토양시료의 유기탄소함량 분석을 실시하였으며, 유기탄소함량 분석은 Walkley-Black법으로 측정하였다(Walkley and

Black, 1934). TNT의 토양 흡착계수는 유기탄소함량 외에도 점토광물 함량 및 교환성 양이온의 종류 등에도 크게 영향을 받기 때문에(Pennington et al., 1999; Jung, 2014), TNT의 토양 흡착계수는 토양 유기탄소함량과 TNT의 유기탄소 분배계수의 곱으로 단순화하여 도출할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 OO 사격장에서 채취한 토양을 이용한 흡착실험을 통해서 TNT의 토양 흡착계수를 2.30  $mL/g$ 으로 도출하였다(Table 1). RDX는 벤젠 고리를 가지고 있지 않아 극성을 보이지 않으므로 점토광물에 흡착되지 않는다(Jung, 2014). 즉, RDX의 경우 토양 유기물에 소수성으로 흡착되는 현상만 일어나기 때문에 본 연구에서는 TRECS에서 제공하는 RDX의 유기탄소 분배계수( $K_{oc}$ , 13.2  $mL/g$ )와 본 토양의 유기탄소 함량( $f_{oc}$ , 1.48%)을 이용해 RDX의 흡착계수( $K_d$ )를 0.20  $mL/g$ 로 도출하였다(Table 1).

### 2.3. 토양 침식 인자

사격장 부지에서 연평균 발생하는 토양 손실량을 산정하기 위해서 아래 식 (8)과 같은 토양유실예측공식(Universal Soil Loss Equation, USLE) (Dortch et al., 2009)을 이용했다.

$$SE = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{8}$$

여기서,  $SE$ 는 일년 동안 발생한 토양 침식량( $tons/ha/yr$ )이다. 강우인자(rainfall and runoff factor,  $R$ )는 침식에 영향을 주는 강우를 고려하는 값으로, 사격장부지의 강우 기록을 통해 연 평균값 40.53( $MJ/mm/ha$ )를 사용했다. 토양 침식성인자(soil erodibility factor,  $K$ )로 입자의 분포와 토양층의 특성을 이용하여 결정되며, 본 연구에서는  $K$ 의 기본값으로 0.22( $tons/ha/R$ )를 적용하였다. 경사인자(slope length-gradient factor,  $LS$ )는 28.60의 값을 가지며, 이는 토양 유실에 대한 경사의 영향을 반영한다. 작부관리인자(cover factor,  $C$ )는 토양피복인자로 표면에 존재하는 식생의 영향을 고려하며, 대상사격장 토양의 60% 이상이 풀로 덮여있기 때문에, 0.042로 하였다. 토양관리인자(support practice factor,  $P$ )는 경사지 보전 관리의 영향을 반영하며, 별도의 토양관리활동이 없어 1로 하였다(Table 1). 이들 값은 Jung(2014)의 논문에서 인용하였다.

### 2.4. 연평균 강수 특성인자

사격장 토양에 존재하는 오염물질은 강우 시 발생하는 침투를 통한 지하수로의 유입 또는 표면유출을 통해 주변 지역으로 유출이 발생한다. 이러한 유출경로에 대한 해석

**Table 1.** Site-specific characteristics and characteristics of soil contaminants and meteorological data for TREECS operation

(A) Soil characteristics				
Parameters	Values		Units	
Soil bulk density	1.49		g/cm <sup>3</sup>	
Volumetric moisture content	0.12		unitless	
Porosity	0.437		unitless	
Fractional organic carbon content	0.0148		unitless	
Sorption coefficient				
K <sub>d</sub> for TNT <sup>1)</sup>	2.30		mL/g	
K <sub>d</sub> for RDX <sup>2)</sup>	0.20		mL/g	

(B) Exposed maximum TNT and RDX concentration and their mass per unit area				
Years	Exposed Maximum Conc. (mg/kg-soil) <sup>3)</sup>		Mass per unit area (g/m <sup>2</sup> )	
	TNT	RDX	TNT	RDX
2009	19.00	63.30	0.28	0.94
2010	73.80	156.6	1.10	2.33
2011	33.90	109.6	0.51	1.63

(C) Soil erosion parameters for USLE				
Parameters	Values		Units	
Rainfall factor (R)	40.53		MJ/mm/ha	
Soil erodibility factor (K)	0.22		tons/ha/R	
Slope length-gradient factor (LS)	28.60		Unitless	
Crop management factor (C)	0.04		Unitless	
Conservation Practice factor (P)	1.00		Unitless	

(D) Average annual meteorological parameters by HGCT				
Parameters	Years			Units
	2009	2010	2011	
Avg. annual Rainfall	1.32	1.23	1.60	m/yr
Avg. annual infiltration	0.23	0.21	0.34	m/yr
Avg. annual Runoff	0.51	0.59	0.66	m/yr
Avg. annual Rain Days	112	118	110	days/yr

1) Derived by sorption test

2) The sorption coefficient of RDX when the fractional organic carbon content of soil is 0.0148.

3) Jung, 2014

을 위해서는 일별 강수량, 일별 평균 및 최고 기온자료가 필요하며, 이들 자료는 기상청(<http://www.kma.go.kr/>) 홈페이지에 게시된 2009년부터 2011년까지의 매해 기상자료로부터 확보하였다. 이후, TREECS 프로그램 내에 있는 Hydro-Geo-Characteristics-Toolkit(HGCT)를 사용하여, 각 연도별 연평균 강수량(rainfall), 침투량(infiltration), 표면 유출량(runoff), 연평균 강우발생일(rain days)을 Table 1 과 같이 도출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. TREECS 구동에 필요한 입력 값 도출 결과

사격장 토양 토성은 모래(sand), 실트(silt), 및 점토(clay)가 각각 84.20%, 2.36%, 그리고, 13.44%로 함유되어, 양질사토(loamy sand)로 판단되었다. HGCT 프로그램에서 제공하는 양질사토인 토양의 토양용적밀도, 수분 함량 및 공극률 기본값은 각각 1.49 mg/m<sup>3</sup>, 12% 및 43.70%이다(Table 1).

대상 사격장 부지에서 TNT의 농도는 2009년도에 19.0 mg/kg으로 가장 낮은 농도를 보이고, 2010년도에 가장 높은 농도인 73.80 mg/kg로 측정되었다. RDX는 63.3 mg/kg으로 측정된 2009년에 가장 낮은 농도를 보이고, 156.6 mg/kg인 2010년에 가장 높은 농도가 측정되었다 (Table 1).

토양유실에측공식(Universal Soil Loss Equation, USLE)을 이용해 도출한 단위면적당 토사유실량은 4.452(tons/acre/yr, 단위 환산 시 6.69E-4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/yr)이었으며(Table 1), 이는 매년 0.669 mm 두께의 사격장 부지 표토가 강우에 의해 유실된다는 것을 의미한다. Gong et al.(2012)은 정확한 토사유실량을 예측하기 위해 식생의 계절적 피복변화를 반영한 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)를 이용해 본 연구 대상 사격장 부지에서 유실되는 토양의 중량을 산정하였고, 최대 3,058 ton/ha/year로 산출되었다.

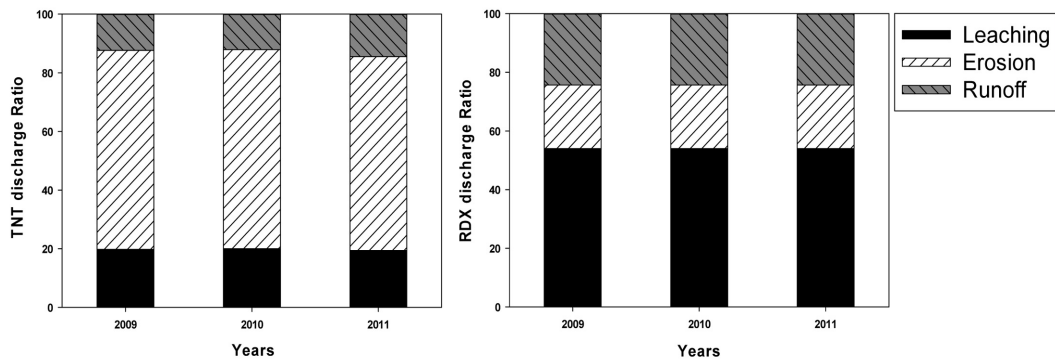
HGCT를 이용해 도출한 사격장 오염농도가 가장 높은 2010년의 연평균 강우량, 연평균 침투량, 연평균 표면유출량은 각각 1.23 m/yr, 0.21 m/yr, 0.059 m/yr로 산출되었다. 이에 반해, 오염농도가 가장 낮은 2009년의 경우 연평균 강우량, 연평균 침투량, 연평균 표면유출량은 각각 1.32 m/yr, 0.23 m/yr, 0.051 m/yr로 산출되었다(Table 1).

**3.2. 오염물질의 완전 유출을 가정했을 때의 유출량 예측 결과**

사격장 토양에 존재하는 TNT와 RDX가 사격장 토양에서 모두 유출되는 것을 가정했을 때, TREECS를 이용해 각 경로별(토양침식, 표면유출, 지하수유출) 유출량을 도출했다. TNT와 RDX의 농도가 각각 73.8, 156.6 mg/kg으로 측정되어 다른 해보다 높은 오염농도를 보이는 2010년에 대한 유출해석 결과를 보면, 0.747 g/m<sup>2</sup>의 TNT가 토양침식으로 유출되고, 표면유출을 통해 0.133 g/m<sup>2</sup>의 TNT가 유출되며, 0.22 g/m<sup>2</sup>의 TNT가 지하수유출을 통해서 유출된다. RDX는 토양침식으로 0.505 g/m<sup>2</sup>이 유출되고, 표면유출로 0.568 g/m<sup>2</sup>이 유출되며, 지하수유출을 통해 1.260 g/m<sup>2</sup>이 유출된다(Table 2). 초기 오염농도가 높을수록 각 경로별 유출되는 TNT와 RDX의 농도가 높았다. 연도별 사격장 토양의 오염농도의 차이에 의한 유출량의 차이를 배제하고 경로별 유출량의 특성을 파악하기 위해, 사격장의 초기 오염물질량에 대한 각 경로별 유출량의 비(g/g)를 알아보았다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 연도에 따른 각 경로별 TNT와 RDX의 유출 비율(g/g)에는 큰 차이가 없었다. TNT의 경우 초기 오염량의 6%, 13% 및 20%가 각각 토양침식, 표면유출 및 지하수유출을 통해 유출되었으며, RDX의 경우 초기 오염량의 21%, 24% 및 54%가 토양침식, 표면유출 및 지하수유출을 통

**Table 2.** Mass distribution of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in three migration pathways under completely discharging scenario

Migration pathway	TNT (g/m <sup>2</sup> )			RDX (g/m <sup>2</sup> )		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Leaching	0.056	0.220	0.098	0.509	1.260	0.882
Soil Erosion	0.192	0.747	0.334	0.204	0.505	0.354
Runoff	0.035	0.133	0.073	0.230	0.568	0.397



**Fig. 2.** Ratio of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) mass flux in each pathway to total amount under completely discharging scenario.

해 유출되었다. 사격장 부지 지표면에서 발생하는 오염물질의 유출에는 토양침식과 표면유출이 있는데, TNT의 초기 오염량의 80%, RDX의 초기 오염량의 46%가 이러한 지표면 유출을 통해 유출되는 것으로 예측되었다(Fig. 2).

2009년에서 2011년까지의 유출결과를 보면, TNT는 토양침식을 통해서 가장 많이 유출되고, 표면유출을 통해 가장 적은 양이 유출되는 것으로 예측되었다. 반면에 RDX는 지하수유출을 통해서 가장 많은 양이 유출되었다. 이러한 결과는 RDX는 물에 용출되어 유출되고, TNT는 토양에 흡착되어 토양침식에 의해 주로 유출되는 특성에 기인하는 것으로 여겨진다(Gong et al., 2012).

**3.3. 토양에 잔류하는 오염물질이 있다고 가정했을 때의 유출량 예측결과**

화약류는 공극수에 용해된 상태로 존재할 수 있고 토양에 흡착되어 존재하거나 입자상태로 사격장 토양에 잔류할 수 있다(Dortch et al., 2009). TREECS에서는 토양에 유출되지 않는 TNT와 RDX의 잔류량을 도출할 수 있다. 연도에 따라서 사격장토양의 오염농도가 다르기 때문에 유출된 후에 토양에 잔류되는 양에서도 차이가 보였다. 토양에 잔류하는 TNT와 RDX의 양은 사격장 부지의 초기 오염농도에 비례하였다(Table 3). TNT와 RDX의 농도가

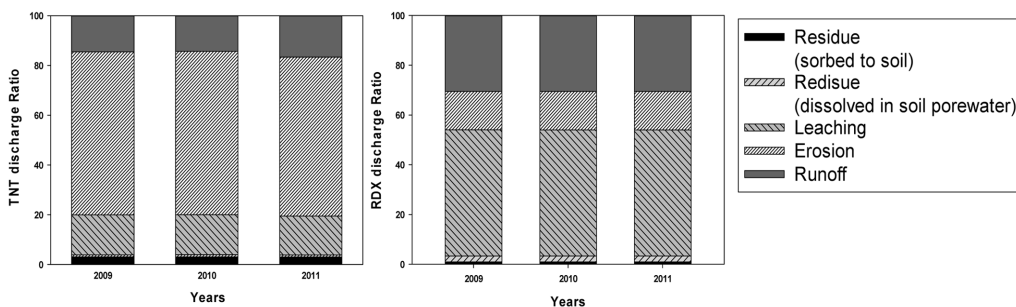
모두 높은 2010년에 토양에 흡착되는 양 또한 가장 많았다. 토양에 잔류하는 TNT와 RDX의 농도는 각각 2.26과 1.53 mg/kg이었고, 초기 오염농도 대비 각각 3%와 1%를 차지했다. 토양 공극수에 용해되어있는 TNT와 RDX의 농도 또한 2010년에 TNT는 0.95 mg/L(전체 대비 0.9%), RDX는 5.45 mg/L(전체 대비 2.3%)로 가장 높았다.

2010년 TNT에 대한 유출해석 결과를 보면, 완전유출을 가정할 경우(Table 2) 토양침식을 통한 유출량은 0.75 g/m<sup>2</sup>(68%)이었으나, 토양잔류를 고려한 경우(Table 3) 0.72 g/m<sup>2</sup>(66%)로 감소하였다. RDX의 경우, 완전유출을 가정할 경우 토양침식을 통한 유출량은 0.505 g/m<sup>2</sup>(21%, Table 2)이었으나 토양잔류를 가정할 경우 0.360 g/m<sup>2</sup>(15%, Table 3)으로 감소하였다. 반면에 2010년 토양 잔류를 고려하지 않은 경우(Table 2), 표면유출을 통한 TNT의 유출량은 0.133 g/m<sup>2</sup>(12%)이었으나 토양 내 잔류를 고려한 경우에는(Table 3) 0.158 g/m<sup>2</sup>(14%)이었고, 표면유출을 통한 RDX의 농도는 토양 잔류를 고려한 경우 0.568 g/m<sup>2</sup>(24%, Table 2)이었으나, 토양 잔류를 고려하지 않은 경우에는 0.713 g/m<sup>2</sup>(30%, Table 3)이었다(Fig. 3). 즉, 토양 잔류를 고려한 경우 TNT의 지표면에서의 유출량(표면유출과 토양침식)은 초기 오염량의 80%를 차지하고, RDX의 지표면에서 발생하는 유출량은 초기 오염량의

**Table 3.** Mass distribution of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in three migration pathways soil residual mass scenario<sup>1)</sup>

Migration pathway	TNT			RDX		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Leaching (g/m <sup>2</sup> )	0.0454	0.177	0.079	0.478	1.183	0.828
Soil Erosion (g/m <sup>2</sup> )	0.185	0.722	0.323	0.146	0.360	0.252
Runoff (g/m <sup>2</sup> )	0.0412	0.158	0.0841	0.288	0.713	0.499
Sorbed to soil (mg/kg)	0.581	2.263	1.012	0.618	1.530	1.071
Dissolved in porewater (mg/L)	0.244	0.951	0.425	2.204	5.450	3.817

1) "soil residual mass scenario" means that it was assumed that a portion of TNT and RDX remained in soil (i.e., sorbed to soil and dissolved in porewater) during TREECS operation.



**Fig. 3.** Ratio of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) mass flux in each pathway to total amount under soil residual mass scenario (i.e., it was assumed that a portion of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) remained in soil (i.e., sorbed to soil and dissolved in porewater) during TREECS operation).

46%를 차지하며, 이는 토양 잔류를 고려하지 않은 결과 (TNT와 RDX의 지표면 유출량은 각각 초기 오염량의 82%와 54%이었음)와 큰 차이가 없었다. 반면에 TNT와 RDX 모두 지하수유출로 인한 유출량은 감소했고, 이러한 경향은 2010년뿐만 아니라 다른 해에서도 동일하게 확인이 되었다. 그럼에도 불구하고 토양 잔류 고려 여부와 상관없이 TNT와 RDX는 각각 토양침식과 지하수유출을 통해서 가장 높은 비율로 유출되는 것으로 예측되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 TREECS 프로그램을 이용하여 사격장 부지에서 화약류 오염물질의 토양잔류 유무를 고려하여 TNT와 RDX의 외부로의 유출량을 도출했다. 사격장 부지에서 TNT와 RDX의 완전유출을 가정한 경우 TNT는 토양침식을 통해 초기 오염량의 68%가 유출되고, RDX는 지하수유출로 54%가 유출되었다. TNT의 초기 오염량의 20%는 지하수침투를 통해 유출이 되었고, RDX는 초기 오염량의 24%가 표면유출을 통해 유출이 되었다. 그리고 TNT는 표면유출을 통해서 12%가 유출이 되고, RDX는 토양침식을 통해서 22%가 유출이 되었다. 특히, 초기 오염량에 대해 TNT의 80%, RDX는 46%가 토양침식과 표면유출로 주변 환경으로 유출된다. 토양흡착과 토양 내 공극수에 용해되어 존재하는 TNT와 RDX의 토양잔류를 고려하면, TNT와 RDX 모두 토양침식으로 유출되는 양이 감소하고, 표면유출로 유출되는 오염물질량이 증가하였다. 그렇지만, 토양 잔류를 고려한다고 해도 토양에 흡착되거나 공극수에 용해된 상태로 존재하는 TNT와 RDX의 비율이 낮았기 때문에, 토양 잔류 고려 여부에 상관없이 지표면에서 발생하는 유출량(토양침식량과 표면유출량)은 유사하였다. 토양 잔류를 고려하였을 때 토양에 존재하는 TNT와 RDX의 양은 초기 오염량에 대해 각각 3%와 1% 정도를 차지하였고, 토양 공극수에 존재하는 TNT와 RDX의 양은 초기 오염량에 대해 각각 1%와 2%를 차지하였다. 즉, 사격장에서 주변 환경으로 화약류의 유출을 관리하기 위해서는 TNT는 토양침식과 표면유출을 관리할 수 있는 확산방지시설을 설치하는 것이 효과적이고 RDX는 지하수침투를 관리하는 것이 효과적이라고 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 환경부의 토양지하수 오염방지기술개발사업

인 GAIA(Geo-Advanced Innovative Action) Project의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

- Bae, B. and Park, J., 2014, Distribution and migration characteristics of explosive compounds in soil at military shooting ranges in Gyeonggi Province, *J. Kor. Geo-Environ. Soc.*, **15**(6), 17-29.
- Cao, X., Ma, L.Q., Chen, M., Hardison, Jr., D.W., and Harris, W.G., 2003, Weathering of lead bullets and their environmental effects at outdoor shooting ranges, *J. Environ. Qual.*, **32**, 526-534.
- Dortch, M.S., Gerald, J.A., and Johnson, B.E., 2009, Methods for Tier 1 modeling within the training range environmental evaluation and characterization system, available at <http://el.erdc.usace.army.mil/elpubs/pdf/trel09-11.pdf>.
- 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 Ground. Environ.*, **17**(6), 119-128.
- Jung, J.W., 2014, Risk management of TNT/heavy metals in active firing ranges by mobility control using MKP/bentonite, Ph.D dissertation, Seoul national university.
- Johnson, B.E. and Dortch, M.S., 2014, Application of TREECS modeling system to Strontium-90 for Borschi Watershed near Chernobyl, Ukraine, *J. Environ. Radioact.*, **131**, 31-39.
- KMOE, 2005, The Development of Hybrid Electrokinetic Remediation Technique Using Solar Energy on Shooting Range Soils Contaminated by Heavy Metals.
- Pennington, J.C., Gunnison, D., Harrelson, D.W., Brannon, J. M., Zakikhani, M., Jenkins, T.F., Clarke, J.U., Hayes, C.A., Myers, T., and Perkins, E., 1999, Natural Attenuation of Explosives in Soil and Water Systems at Department of Defense Sites: Interim report, Technical Report EL-99-8, U.S.; Army Engineer Waterways Experiment Station: Vicksburg, MS.
- USEPA, 1988, Superfund Exposure Assessment manual, EPA/540/1-881001, Available at [http://rais.ornl.gov/documents/Exposure\\_Assessment\\_Manual\\_1988\\_EPA5401881001.pdf](http://rais.ornl.gov/documents/Exposure_Assessment_Manual_1988_EPA5401881001.pdf)
- USEPA, 2012, 2012 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories, EPA 822-R-09-011. Office of Water, Washington, DC, USA.
- Walkley, A. and Black, I.A., 1934, An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method, *Soil Sci.*, **37**(1), 29-38.