

## 포탄 사격장 토양의 RDX에 의한 인근 하천 오염 예측

박정태<sup>\*,1)</sup> · 이동수<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 육군사관학교 토목·환경학과

<sup>2)</sup> 서울대학교 환경대학원 환경계획학과

### Prediction of Surface Water Contamination with RDX Transported from Soil in a Neighboring Firing Range

Jungtae Park<sup>\*,1)</sup> · Lee, Dong Soo<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Civil Engineering and Environmental Science, Korea Military Academy

<sup>2)</sup> Department of Environmental Planning Graduate School of Environmental Studies Seoul National University

(Received 30 August 2019 / Revised 15 November 2019 / Accepted 25 November 2019)

#### ABSTRACT

Recently, pollution from gunpowder due to shell shootings at military drilling sites has raised various environmental concerns. The purpose of this study is to predict the contamination level of RDX in the soil area of the firing range zone near Anwol river watershed, the study site, and the intake area, Anwol river and Imjin river, as a function of time and space. In this study, a multimedia model was developed to predict the variation of RDX contamination by rainfall. The range of the medium was limited to soil, water, and sediment, and excluded the atmosphere, taking into account the physical and chemical properties of RDX with low vapor pressure and low Henry's constant. The pollutant levels of the waters of compartments, including the last section of the Imjin River affecting the water intake, was compared with the environmental standard for RDX.

Key Words : RDX(화약물질 ; Trimethylenetrinitramine), Firing Range(포탄사격장), Soil Erosion(토양침식)

#### 1. 서론

최근 군사훈련 중 포탄사격 간 생기는 화약물질로 인한 토양, 수질오염이 중요한 환경문제의 하나로 대두되고 있다. 포탄 내 혼합 화약물질(주장약)은 기폭

장치에 의해 점화되어 포탄을 폭발시키는 역할을 하며 주로 Composition B가 사용되고 있다. Composition B는 TNT(TriNitroToluene) 40 %, RDX(Royal Demolition eXplosive) 60 %으로 혼합되어 있다<sup>[1]</sup>. TNT와 RDX는 폭발 시 불완전 산화 되거나 불발탄으로 인하여 토양 내에 유입된다<sup>[2]</sup>. 토양에 축적된 화약물질은 강우 시 물에 용해되거나 침식된 토양입자에 흡착되어 하천으로 이동할 가능성이 있다. 이렇게 이동한 RDX는 토

\* Corresponding author, E-mail: highparks@snu.ac.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

양 및 수중 생태계에 피해를 줄 수 있다<sup>3)</sup>.

포탄 사격장 피탄지에서의 화약물질에 대한 연구는 제한적인 범위에서 이루어져 왔다. 군 사격장 토양 오염에 대한 정밀조사 자료가 부족하며, 오염물질 분포와 거동에 대한 정보 역시 부족하다. 그리고 화약물질 오염은 다매체에 걸쳐 피해를 줄 수 있지만 토성에 따른 화약물질 분포<sup>4)</sup>와 토사유실과 화약물질의 이동 상관성<sup>5)</sup>, 수체 내 화약물질의 거동<sup>6)</sup> 등 단일매체 중심으로 연구가 이루어져 왔다.

본 연구는 오염데이터가 존재하는 포탄사격장 피탄지를 대상으로 선정하여 포탄사격훈련에 따른 오염영향을 다루고자 한다. 피탄지는 임진강의 취수장과도 가까워 인근 주민들에 대한 영향이 우려된다. 군은 이 영향을 파악하고 있어야 하며, 지자체에도 인지시켜 주민들에 대한 영향을 최소화시키는 데 앞장서야 한다.

따라서 본 연구의 목적은 첫째, 안월천 유역내의 피탄지 토양의 RDX 오염과 피탄지에서 유출된 RDX에 의해 인근 하천인 안월천과 임진강의 취수지역이 오염된 정도를 시공간의 함수로서 예측한다. 둘째, 피탄지에서 안월천으로 RDX의 이동경로를 파악하여 RDX의 이동저감을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구방법 및 범위

### 2.1 연구방법

본 연구에서는 강우에 의하여 시공간적으로 변하는 RDX의 다매체 오염도를 산정할 수 있는 다매체 모형을 개발하였다. 이 모형은 모두 3개의 하위 모형으로 구성되어 있으며, 하위모형에는 Digital Elevation Model (DEM)정보에 근거하여 8방향 중 가장 경사도가 큰 방향으로 물의 흐름이 이동한다는 원리를 적용하여 토양 내에서의 흐름방향을 정하는 모형, 강우조건에 따라 변하는 토사유실량과 지표유출량을 산정하는 모형, 각 매체의 시공간적인 오염도를 산정하는 모형으로 이루어져 있다. 각각의 하위모형은 개별 작업이 가능하도록 모듈화 하였다.

피탄지에 낙하되는 포탄에 의한 RDX의 토양 배출량 산정을 위해서 포탄 내 화약물질 함량(1발 당 약 7 kg), 화약물질 잔류율, 1일 사격 발수(약 200발)를 고려하여 나온 1일 배출량(77 g), 배출 면적을 고려한 셀별 배출량(1.94 g)을 모형에 반영하였다. 임진강의 유량은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, Water Management

Information System[www.wamis.go.kr])의 연천군(필승교) 관측소의 일 유량 자료를 활용하였으며(2010년 기준), 안월천의 경우 하천유량에 대한 실측치가 없기 때문에, 강우량에 따라 하천유량에 영향을 주도록 가정하였다. 하지만 강우가 없을 때에도 하천의 흐름은 존재하기 때문에 최소 유량을 설정하여 안월천이 흐른다고 가정하였다. 최소유량은 군남홍수조절지 환경영향평가서에서 산정한 값을 이용하였으며 해당 값은 0.016 m<sup>3</sup>/sec이다. 기상자료에 활용하기 위하여 CORDEX (COordinated Regional Climate Down scaling EXperiment) East Asia(<https://cordex-ea.climate.go.kr/>)의 3시간 해상도의 강우량과 기온자료를 사용하였다.

시간 해상도는 1시간 단위이며, RDX는 토양에서는 고도가 높은 쪽에서 낮은 곳으로, 수체에서는 상류에서 하류로 이동하며, 임진강의 취수장까지는 확산으로 이동하는 것으로 가정하였다.

모형의 예측 결과 분석은 3단계로 진행하였다. 첫째, 60년간 토양, 수체, 저토 오염농도의 최대값, 평균값, 최소값을 확인하여 변화경향을 분석하였다. 둘째, 60년간 다매체 전체, 각 매체별 RDX의 유입, 유출(제거)율을 분석하고 주요 제거기작을 분석하였다. 마지막으로 정수장에 영향을 미치는 임진강의 마지막 구획을 포함한 10개의 구획의 수체 농도를 RDX의 환경기준과 비교, 분석하였다.

### 2.2 연구범위

Fig. 1과 같이 모형연구의 공간적 범위는 연천군 왕징면에 위치한 안월천 유역 내 포탄사격장(마방사격장) 피탄지와 안월천, 군남홍수조절댐이 맞닿아 있는 임진강의 일부이다. 안월천은 지방 2급 하천으로서 유역면적은 15,79 km<sup>2</sup>이며, 유로연장은 12.56 km에 달한다. 유역 중 사격장 피탄지 면적은 0.75 km<sup>2</sup>이며, 안월천 유역의 4.7 %를 차지한다. 안월천 유역에서 발원된 강물은 피탄지를 지나며 최종적으로 임진강과 합류된다.

2011년 준공된 군남홍수조절댐의 영향으로 수위가 34 m으로 높아짐에 따라 임진강 유역 중 12.09 km<sup>2</sup>의 면적이 수몰되며, 강우 시 사격장의 강우유출 및 토사유실로 인하여 임진강이 오염될 우려가 있다. 군남홍수조절댐 인근에 위치하고 있는 연천 취수장은 평균 취수량이 31,482 m<sup>3</sup>/일이며, 취수된 물은 정수장에서 평균 급수량 29,983m<sup>3</sup>/일로 급수된다<sup>7)</sup>. 급수구역은 연천읍, 전곡읍, 군남면, 청산면, 백학면, 미산면, 왕징면, 신서면, 중면, 장남면으로 2015년 9월 말 기준, 취

수인원이 38,241명에 달한다<sup>[8]</sup>. 시간적 범위는 사격장이 건설된 1957년부터 2016년 현재까지이다.

사격장 정밀조사 결과 RDX는 측정 장소 36곳 중 30곳에서 검출되었으며 최대치는 57.085 mg/kg이었다<sup>[9]</sup>. 반면, TNT는 16곳에서 검출되었고 최대치는 0.147 mg/kg으로 TNT에 비해 RDX의 오염정도가 심하다고 판단되어 연구대상 물질을 RDX로 선정하였다.

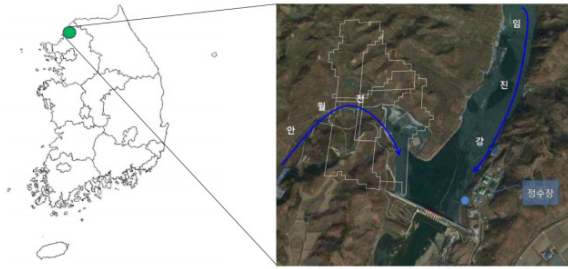


Fig. 1. Location of study plots around anwol river

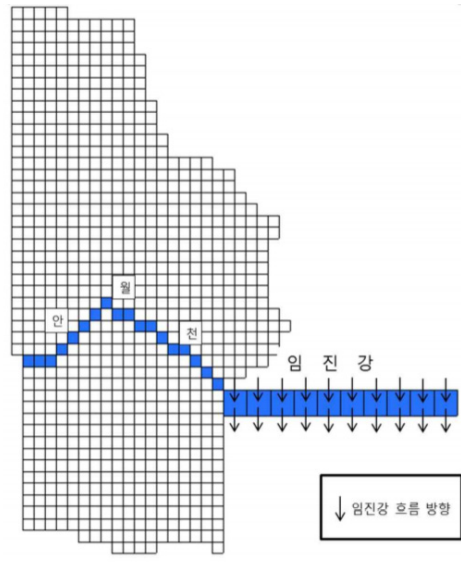


Fig. 3. Cell of study plots  
(White cell : Soil, Blue cell : water)

### 3. 모형개발

#### 3.1 개발된 다매체 모델의 원리

##### 3.1.1 환경매체

RDX의 증기압과 헨리상수가 낮은 물리화학적 특성을 감안하여 매질의 범위를 대기를 제외한 토양, 수체, 저토로 한정하였다. Fig. 2와 같이 토양 셀이 1194개, 수체, 저토 셀이 28개로 구성되었으며, Fig. 3과 같이 전체 연구지의 크기를 30 m × 30 m 셀로 나타내었을 때, 가로 26개, 세로 47개의 길이로서 총 셀의 개수는 1222개로 구성된다. 임진강과 안월천이 합류되는 부분은 하류에서 정수장까지 300 m × 50 m 크기인 10개 구획으로 나누었으며 단계별 농도를 파악하였다.

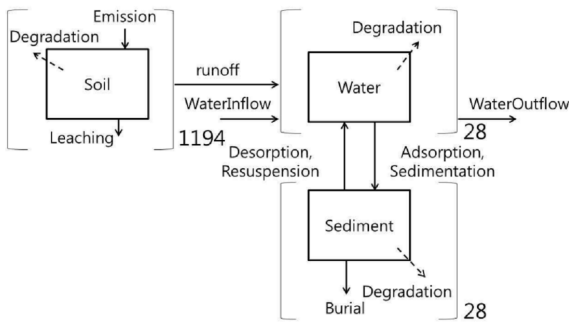


Fig. 2. Soil, water, sediment model

##### 3.1.2 물질수지방정식

본 모형에서 오염물질의 전체 변화속도는 각 셀 (cell)에서의 매시간의 오염물질변화속도의 합이다.

$$V_{sys} \frac{dC_{sys}}{dt} = \frac{dM_{sys}}{dt} = \sum \frac{dM_i}{dt} \quad (1)$$

$V_{sys}$  : 시스템 부피(m<sup>3</sup>)

$C_{sys}$  : 시스템 내 오염물질 몰농도(mol/m<sup>3</sup>)

$M_{sys}, M_i$  : 시스템, 단일 셀 내 오염물질 몰수(mol)

각 셀 내 오염물질 변화속도는 유입률-유출률 값이다.

$$\frac{dM_i}{dt} = E_i + \sum_j (T_{j,i} - T_{i,j}) + (F_{in} - F_{out}) - R_i \quad (2)$$

$E_i$  :  $i$  셀로의 오염물질의 직접 배출

$T_{j,i}, T_{i,j}$  :  $j$  셀에서  $i$  셀로의 유입, 유출

$F_{in}, F_{out}$  : 하천의 이류를 통한 유입 및 제거(수체)

$R_i$  : 분해에 의한 제거

##### 3.1.3 매체별 반영기작

본 모형에서의 매체별 반영기작은 Table 1~3과 같다.

Table 1. Transport process in soil

출발	목적	기작	수식	설명
토양	·	분해	$k_{soil} \cdot V_{soil} \cdot C_{SM}$	$k_{soil}$ : 토양 내 분해 반응속도 상수, [1/h] $V_{soil}$ : 토양 부피, [m <sup>3</sup> ] $C_{SM}$ : 토양 내 RDX농도, [mol/m <sup>3</sup> ]
	수체	강우유출	$U_{wro} \cdot A_{soil} \cdot \left(\frac{C_{SM}}{K_{smsgw}}\right)$	$U_{wro}$ : 강우 유출 속도, [m/h] $A_{soil}$ : 토양 면적, [m <sup>2</sup> ] $K_{smsgw}$ : 토양매질-토양 내 용존상 간 오염물의 분배 계수
	수체	토사유실	$U_{sro} \cdot A_{soil} \cdot \left(\frac{C_{SM}}{K_{smsgp}}\right)$	$U_{sro}$ : 토사 유출 속도, [m/h] $K_{smsgp}$ : 토양매질-토양 내 입자상 간 오염물의 분배 계수
	지하수	침출	$U_{Leach} \cdot A_{soil} \cdot \left(\frac{C_{SM}}{K_{smsgw}}\right)$	$U_{Leach}$ : 침출 속도, [m/h]

Table 2. Transport process in water

출발	목적	기작	수식	설명
수체	·	이류	$Q_{in} \cdot C_{(w,in)} - Q_{out} \cdot C_w$	$Q_{in}, Q_{out}$ : 하천 이류부피 속도, [m <sup>3</sup> /h] $C_{(w,in)}$ : 수체 내 오염물질 농도, [mol/m <sup>3</sup> ] $C_w$ : 수체 내 전체 오염물질 농도, [mol/m <sup>3</sup> ]
	·	분해	$k_w \cdot V_w \cdot C_w$	$k_w$ : 수체 내 분해 반응속도 상수, [1/h] $V_w$ : 수체 부피, [m <sup>3</sup> ]
	저토	흡착	$k_{owscd} \cdot A_{wscd} \cdot \frac{1}{(1+K_{pss})} \cdot C_w$	$k_{owscd}$ : 수체방향 물질 전달 계수, [m/h] $A_{wscd}$ : 저토 면적, [m <sup>2</sup> ] $K_{pss}$ : 수체입자-수체 내 용존상 간 오염물의 분해 계수
	저토	침강	$U_{ssdep} \cdot A_{wscd} \cdot \frac{K_{pss}}{(1+K_{pss})} \cdot C_w$	$U_{ssdep}$ : 저토 침강 속도, [m/h]

Table 3. Transport process in sediment

출발	목적	기작	수식	설명
저토	·	분해	$k_{sed} \cdot V_{sed} \cdot C_{SLM}$	$k_{sed}$ : 저토 내 분해 반응속도 상수, [1/h] $V_{sed}$ : 저토 부피, [m <sup>3</sup> ] $C_{SLM}$ : 저토 내 오염물질 농도, [mol/m <sup>3</sup> sediment]
	수체	흡착	$k_{owscd} \cdot A_{wscd} \cdot \frac{C_{SLM}}{K_{sdmsdw}}$	$k_{owscd}$ : 수체방향 물질 전달 계수, [m/h] $A_{wscd}$ : 저토 면적, [m <sup>2</sup> ] $K_{sdmsdw}$ : 토양매질-토양 내 용존상 간 오염물의 분해 계수
	수체	재부유	$U_{resus} \cdot A_{wscd} \cdot \left(\frac{C_{SLM}}{K_{sdmsdp}}\right)$	$U_{resus}$ : 저토 재부유 속도, [m/h] $K_{sdmsdp}$ : 저토매질-저토 내 입자상 간 오염물의 분해 계수
	저토아래	매장	$U_{burial} \cdot A_{wscd} \cdot \frac{C_{SLM}}{K_{sdmsdw}}$	$U_{burial}$ : 저토 매장 속도, [m/h]

Table 4. Factor of solid runoff

종 류	내 용
R factor	1957년부터 2016년까지 1시간 해상도
K factor	국립농업과학원( <a href="http://www.ast.go.kr">http://www.ast.go.kr</a> )에서 제작한 연천 정밀토양도
C factor	토지 이용 및 식생 피복에 따른 식생피복인자 값 <sup>[11]</sup>
LS factor	지형인자를 구하는 식 이용 <sup>[12]</sup> $L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)m$ $S = 65.41\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065$
P factor	침식조절인자 표 참고 <sup>[13]</sup>

3.2 토사유실과 지표유출량 산출

3.2.1 토사유실량 산출

토양유실량을 측정하기 위한 대표적인 방법은 Wischmeier 등<sup>[10]</sup>에 의해 고안된 USLE(Universal Soil Loss Equation)가 있다. USLE는 강우(R), 토양침식(K), 지형(LS), 피복관리(C), 침식조절(P)의 5개 인자로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 Table 4의 자료를 통하여 구하였으며 이를 GIS로 나타낸 결과는 Fig. 4와 같다.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \tag{2}$$

3.2.2 지표유출량 산출

지표유출량을 구하기 위한 식은 다음과 같다<sup>[14]</sup>.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \tag{3}$$

Q = 지표유출량(mm)

P = 누적강우량(mm)

S = 토양의 강우최대흡수량(mm)

I<sub>a</sub> = 초기손실량(mm)

3.3 입력자료의 구축

3.3.1 구축자료의 목록

지리정보체계(Geographic Information System, GIS)와 의 원활한 활용을 위해 Table 5와 같이 수치표고자료, 정밀토양도, 토지피복도의 3종류의 지도를 활용하였으며, 각 수치지도의 공간적 범위는 Table 6과 같이 통일함으로써 정보의 원활한 교환이 가능하도록 하였다. 수치표고자료의 경우, 지역의 토사유출량 산정 시 20 m × 20 m인 경우 실제와 유사한 값을 구할 수 있으며, 해상도가 유사하며 구하기 용이한 30 m × 30 m 해상도 자료를 사용하였다<sup>[15]</sup>.

Table 5. Maps used in GIS

종 류	내 용	출 처
지형	30 m × 30 m DEM 자료	수치표고자료 (1:50,000)
토양	90 m × 90 m 벡터 형식	정밀토양도 (1:25,000)
토지피복	90 m × 90 m 벡터 형식	토지피복도 (1:50,000)

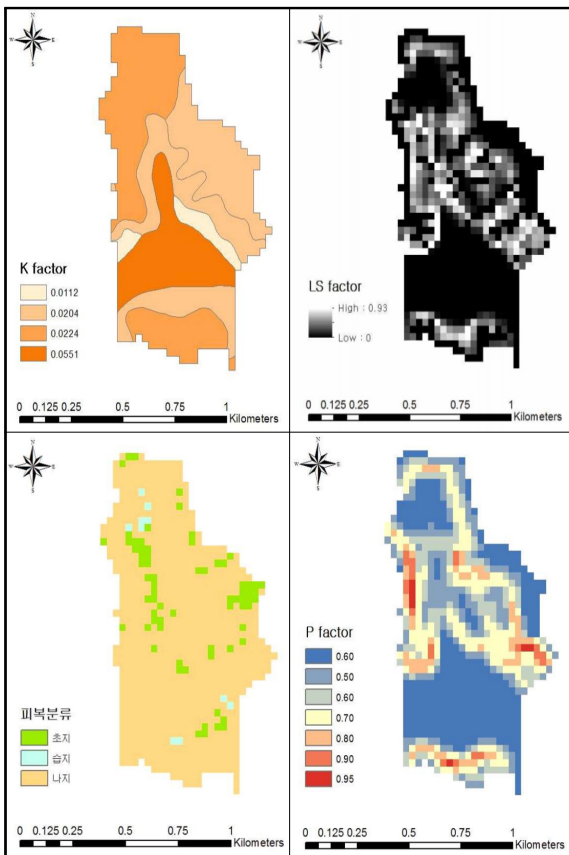


Fig. 4. Results of calculation by solid runoff factor

Table 6. Spatial extent of map

경계	위도	경도	TM y	TM x
좌상	38.12136	127.0029	613469	200269
좌하	38.10512	127.0030	611669	200269
우상	38.12126	127.0165	613469	201439
우하	38.10515	127.0162	611669	201439

3.3.2 흐름방향(Flowdirection) Grid 생성

지표면에 대하여 수문학적 특성을 반영하는 요소 중 가장 중요한 것은 DEM에서 모든 셀의 흐름의 방향을 결정하는 것인데 ArcMAP의 Flow Direction의 흐름방향 정의 기능을 활용하여 분석하였다.

셀의 방향은 8개이고, 하나의 셀의 인접 8개 셀의 고도 값을 비교 후 흐름의 방향을 정한다. 즉, 각 셀들의 흐름방향은 Fig. 5와 같이 8방향 중의 1방향으로 흘러가게 되는데 중심 셀을 기준으로 8가지 방향을 나타내는 값을 가지게 된다<sup>16)</sup>.

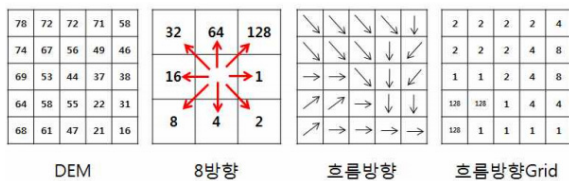


Fig. 5. Execute flow direction definition

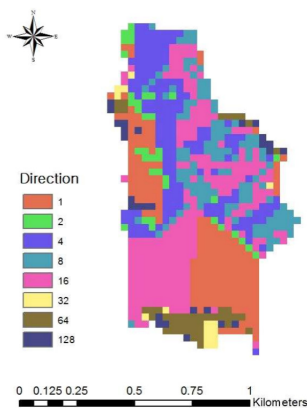


Fig. 6. Direction of surface runoff in watershed

이 과정을 반복적으로 수행하여 흐름방향 래스터 모형을 생성하게 되는데 Fig. 6은 피탄지의 흐름방향

Grid를 나타낸다. 본 연구에는 흐름방향 Grid를 모형에 연결하였다.

3.3.3 초기조건

초기조건은 Table 7과 같다.

Table 7. Initial condition

조건	수치
RDX 배출 전 토양, 수체, 저토 농도	0 mol/m <sup>3</sup>
기상조건, 농도변화 해상도(R factor연계)	1시간
토양오염깊이(155 mm 사격시)	0.3 m
안월천 유량	지표유출량
임진강 유량	일 유량 자료
안월천 / 임진강 수심	0.4 m / 23 m
임진강 저토 깊이	0.03 m

3.3.4 배출량 추정

화약물질은 Fig. 7과 같이 포탄이 떨어지는 지점에 골고루 분산되어 30 m × 30 m 40개의 셀(숫자 : 셀번호)에 1.94 g(0.0087 mol)이 60년간 1시간 단위로 배출된다고 가정하였다.

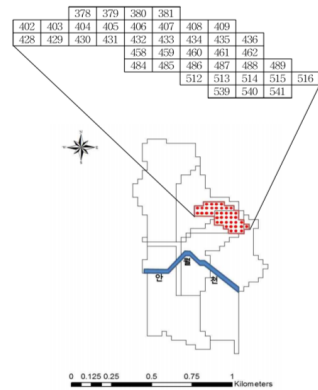


Fig. 7. Location of the RDX in the shooting range

3.3.5 토양에서 안월천으로의 RDX 유입지점 산정  
배출된 오염물질은 Fig. 8과 같이 흐름방향 Grid에 의하여 710번 셀과 743번 셀에서 안월천에 유입됨을 가정하였으며, 모델에서는 710, 743번셀에 인접한 셀의 농도가 오염물질 유입 시 증가하도록 설정하였다.

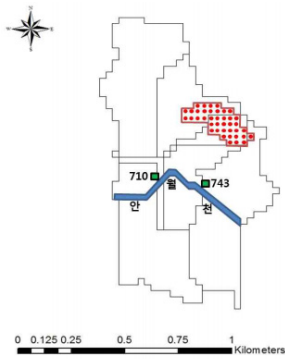


Fig. 8. Soil compartment in which pollutant flows into the water body

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 기상분석

Fig. 9와 같이 60년간(1957~2016년)의 년 강우량의 평균은 1145 mm/year이며 최대값은 1704 mm/year, 최소값은 602 mm/year이다. 각 수치의 추세를 그린 결과 모두 기울기와 R-제곱 값이 0에 가까워 증가 또는 감소 추세를 보인다고 말하기는 어렵다.

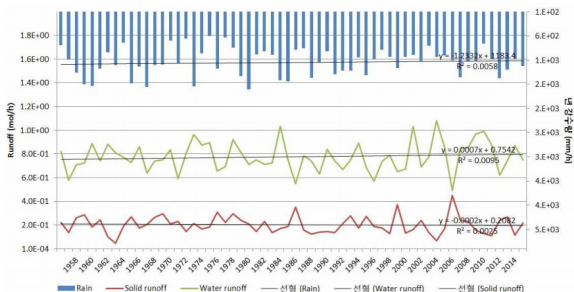


Fig. 9. Changes in rainfall, soil loss, and surface runoff over 60 years

##### 4.2 매체별 오염도의 시·공간적 변화 예측 및 분석

모델 활용을 통하여 산출한 각 매체별 60년간의 농도변화를 분석하였다. Fig. 10과 같이 매체별 평균값의 변화는 통계적으로 상승이나 하강 추세를 보이지 않으므로 매체 내 RDX의 축적은 일어나지 않음을 알 수 있다. 배출량이 없는 토양(포탄 낙하 X)은 있는 토양(포탄 낙하로 유발된 화약물질로 오염된 토양)에 비하여 농도변화가 크며 Table 8과 같이 상대표준편차로

나타내면 2.15배에 달한다. 그 이유는 배출 토양은 주기적인 화약물질의 배출로 인하여 비교적 높은 농도가 유지된 반면 미배출 토양은 배출이 없고 강우에 의한 급격한 변화 때문이다.

Table 8. The maximum, average, and minimum values of cell average for 60 years.(mol/m<sup>3</sup>) (RSD : Relative Standard Deviation)

	토양(배출 有)	토양(배출 無)	수체(water)	저토(sediment)
셀 개수	40개	40개	13개	13개
최대값	$2.27 \times 10^{-5}$	$5.67 \times 10^{-8}$	$2.76 \times 10^{-3}$	$7.50 \times 10^{-4}$
평균값	$5.76 \times 10^{-6}$	$2.92 \times 10^{-10}$	$2.10 \times 10^{-3}$	$4.00 \times 10^{-4}$
최소값	$2.47 \times 10^{-6}$	$4.69 \times 10^{-13}$	$1.29 \times 10^{-3}$	$2.29 \times 10^{-4}$
RSD	223.81	481.80	42.99	13.25

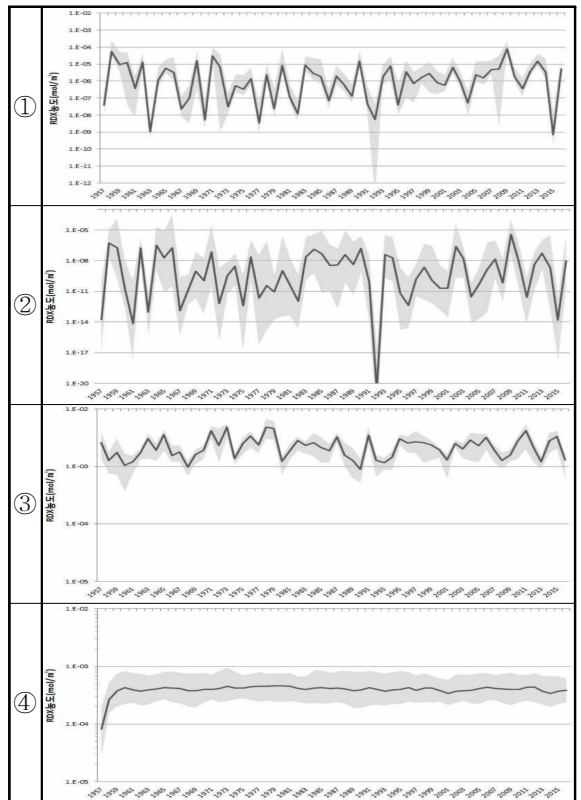


Fig. 10. Change in concentration by media for 60 years(① : Soil in emissions, ② : Soil without emissions, ③ : Water, ④ : Sediment)



4.3 60년간 다매체 내 RDX 유출·입 비율

Fig. 11과 같이 60년간 다매체(토양, 수체, 저토)에서 일어나는 RDX 제거 기작의 총 누적량은 수체 내 분해 > 토양 내 분해 > 지하수 유출 > 이류 순이다. 전체 양 중 90.6%가 분해(수체 내 분해 74.2%, 토양 내 분해 16.4%)로 제거되었으며, 8.7%가 지하수로 유출되었다. 이는 대부분의 양이 토양과 수체 내에서 분해, 제거되거나 지하수로 이동함을 의미한다.

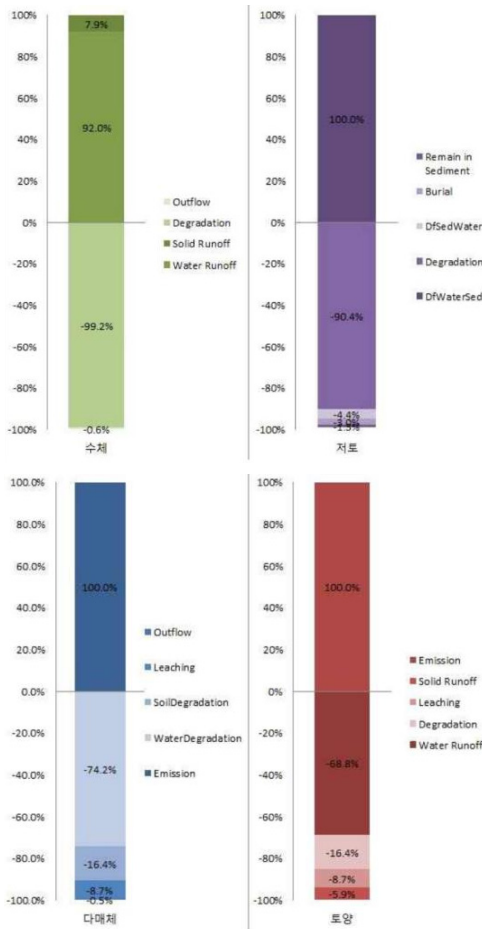


Fig. 11. RDX outflow ratio for 60 years

4.4 안월천 하류에서의 RDX 농도변화

Fig. 12와 같이 사격장 피탄지에서 안월천으로 흘러 들어가는 셀(743번)의 RDX의 농도는 1년 중 9개월 이상 인체에 대한 건강권고치(DWEL) 0.1 mg/L와 Cancer risk 0.3 mg/L, 생태허용 최대농도(EMPC) 0.056 mg/L를 초과하였다.

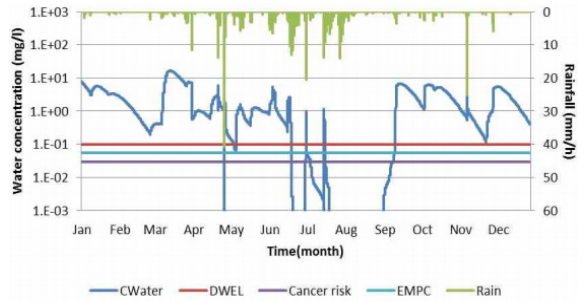


Fig. 12. Comparison between anwalchon RDX concentration and health promotion values and EMPC

5. 결론

본 연구의 목적은 첫째, 안월천 유역내의 피탄지 토양의 RDX 오염과 피탄지에서 유출된 RDX에 의해 인근 하천인 안월천과 임진강의 취수지역이 오염된 정도를 시공간의 함수로서 예측, 둘째, 피탄지에서 안월천으로 RDX의 이동경로를 파악하여 RDX의 이동저감을 위한 기초자료를 제공하는 것이다.

연구결과, 매체별 RDX 오염농도는 강우사상에 큰 영향을 받는다. 일정한 배출량에도 불구하고 강우유출과 하천의 이류도중 토양과 수체 내에서 많은 양이 분해되며, 토양, 수체, 저토 농도는 축적되는 경향이 없이 일정함을 알 수 있다. 각 매체별 분해기작 및 속도에 관련하여 세부적인 고찰이 필요할 것으로 보인다.

안월천 하류에 서식하는 동물들은 하천 물을 섭취하거나 번식하는 과정에서 RDX에 직접적으로 노출될 수 있다. 따라서 강우시 피탄지 토양에서 안월천으로 토사 및 우수가 유입되는 곳에 오염 저감 조치가 이루어진다면 좋을 것이다.

취수장 주변의 하천에는 RDX농도가 건강권고치를 초과하지 않아 주민의 식수 섭취에 대한 위험은 없으며, 또한 임진강에 서식하고 있는 어류의 섭취를 통한 RDX의 인체 노출이 위험이 될 수 있지만, RDX의 생체 축적의 가능성이 낮기 때문에 이 위험 또한 낮다. 그러나 만약 다른 피탄지 주변에 비슷한 규모의 지천이 있으며 그 주변에 주민이 거주하고 있다면 영향을 무시할 수 없을 것이라 판단되며, 본 연구에 개발된 모형과 평가방법이 적용될 수 있으리라 기대된다.



## References

- [1] Pichtel, J., "Distribution and Fate of Military Explosives and Propellants in Soil: A Review," *Applied and Environmental Soil Science*, 2012.
- [2] Brannon, J. M., Pennington, J. C., "Environmental Fate and Transport Process Descriptors for Explosives," *Engineer Research and Development Center Vicksburg MS Environment LAB*, 2002.
- [3] Abadin, H., Smith, C., Ingerman, L., Lladós, F. T., Barber, L. E., Plewak, D., Diamond, G. L., "Toxicological Profile for RDX, Atlanta," *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, 2012.
- [4] Bumhan Bae, Jieun Park, "Distribution and Migration Characteristics of Explosive Compounds in Soil at Military Shooting Ranges in Gyeonggi Province," *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 17-29, 2014.
- [5] Gong Hyo-Young, Lee Kwang-Pyo, Lee Jong-Yeol, Kim Bumjoon, Lee Ahreum, Bae Bumhan, Kim Ji-Yeon, "Assessment of Soil Loss at Military Shooting Range by RUSLE Model: Correlation Between Soil Loss and Migration of Explosive Compounds," *Korean Society of Soil and Ground water Environment*, pp. 119-128, 2012.
- [6] Yoon, Hye In, "Simulation of the Transport and Fate of TNT and RDX in an Impounded Water Body," 2002.
- [7] K-water, "Environmental Impact Assessment for Construction Project in Kunnam Flood Control Site," 2005.
- [8] General Civil Service Section of Yeoncheon-gun, "Population and Households at the End of September 2015," 2015.
- [9] K-water, "Environmental Impact Assessment for Construction Project in Kunnam Flood Control Site," 2005.
- [10] W. H. Wischmeier, D. Smith., "Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning," *United States Department Of Agriculture*, 1978.
- [11] Ministry of Environment, "Notification on Investigation of Erosion Status of Topsoil," 2012.
- [12] W. H. Wischmeier, D. Smith., "Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning," *United States Department Of Agriculture*, 1978.
- [13] Ministry of Environment, "Notification on Investigation of Erosion Status of Topsoil," 2012.
- [14] Cronshey, R., "Urban Hydrology for Small Watersheds," *US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division*, 1986.
- [15] Jeong In Ju, Lee Jung Min, Kim Sang Yong, Lee Jong Chool, "A Study on the Effect of Grid Size to Extract Topographical Parameters by DEM," *Journal of the Korea Society for Geospatial Information Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 67-75, 2002.
- [16] Kim Hyuk, "Calculation of Pollutant Loadings from the Koeup and Sinyang Stream Catchments of the Koheung Estuary Lake Using Geographical Information Systems and EMC," 2001.