

《原著》

RUSLE 모델에 의한 군사격장 피탄지 토양유실량 평가: 토양 유실과 오염 화약물질 이동 상관성

공효영¹ · 이광표¹ · 이종열¹ · 김범준² · 이아름² · 배범한^{2*} · 김지연¹

¹(주)아름다운환경건설

²가천대학교 토목환경공학과

Assessment of Soil Loss at Military Shooting Range by RUSLE Model: Correlation Between Soil Loss and Migration of Explosive Compounds

Hyo-young Gong¹ · Kwang-pyo Lee¹ · Jong-yeol Lee¹ · Bumjoon Kim²
Ahreum Lee² · Bumhan Bae^{2*} · Ji-yeon Kim¹

¹Beautiful Environmental Construction Co., Ltd.

²Department of Civil & Environment Engineering, Gachon University

ABSTRACT

The applicability and accuracy of Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model on the estimation of soil loss at impacted area of shooting range was tested to further the understanding of soil erosion at shooting ranges by using RUSLE. At a shooting range located in northern Kyunggi, the amount of soil loss was estimated by RUSLE model and compared with that estimated by Global Positioning System-Total Station survey. As results, the annual soil loss at a study site (202 m long by 79 m wide) was estimated to be 2,915 ton/ha/year by RUSLE and 3,058 ton/ha/year by GPS-TS survey, respectively. The error between two different estimations was less than 5%, however, information on site conditions should be collected more to adjust model coefficients accurately. At the study shooting range, sediments generated by rainfall was transported from the top to near the bottom of the sloping face through sheet erosion as well as rill erosion, forming a gully along the direction of the storm water flow. Coarser fractions of the sediments were redeposited in the limited area along the channel. Distribution characteristics of explosive compounds in soil before and after summer monsoon rainfall in the study area were compared with the erosion patterns. Soil sampling and analyses results showed that the dispersion of explosive compounds in surface soil was consistent with the characteristics of soil erosion and redeposition pattern of sediment movements after rainfalls.

Key word: Soil loss, GPS-TS, RUSLE, RDX, TNT

1. 서 론

사격장에서는 사용되는 포탄에서 유래하는 화약물질이 토양에 침적되고, 훈련과정에서 탄두 폭발력에 따라 지형이 변화되어 주변 생태계를 교란하고, 피탄지 토양유실을 유발하는 등 다양한 환경문제가 발생할 수 있다. 화약 물질은 고도로 산화되어 호기성 조건의 표토에서는 난분해성이며, 독성이 강해 생태계에 위해를 줄 수 있는 물질이다(Yinon, 1990). 사격장에서 탄두 폭발시 불완전 산화

혹은 불발탄 파손 등에 의해 자연계로 배출되는 화약물질은 토양을 오염시키고, 오염된 토양이 침식 등에 의해 피탄지 및 주변지역으로 넓게 확산될 수 있다.

토양침식(Soil erosion)은 주로 물이나 바람에 의하여 표토의 일부분이 유실되는 것으로 기후, 토양, 식생, 토양 관리 방법 및 지형 등이 영향 요소이다. 풍침식은 바람이 한계풍속에 도달하면 토양 입자가 부유, 도약 및 표면포행으로 이동되며, 수침식은 강우시 빗방울과 지표면 유출수의 에너지에 기인한다(NDMI, 1998). 이와 같은 침식으

*Corresponding author : bhbae@gachon.ac.kr

원고접수일 : 2012. 12. 1 심사일 : 2012. 12. 10 게재승인일 : 2012. 12. 11

질의 및 토의 : 2013. 2. 28 까지

로 인해 토사가 이동하여 발생하는 결과가 토양유실(Soil loss)이다. 특히 우리나라는 물에 의한 침식이 많이 일어날 수 있는 지형적 특성과 기상요인을 가지고 있고, 산경사면에 위치한 군사격장 피탄지는 빈번한 사격으로 식물이 자라지 못해 지표면이 나지화되어 강우에 의한 침식이 심각하다.

사격장에서 화약물질 오염토양에 대한 저감 및 정화방안을 도출하기 위해서는 화약물질 확산원인이 되는 토양유실량에 대한 정량적인 평가가 선행되어야 한다. 사격장 피탄지에는 불발탄이 산재하고 있어 조사자의 인체에 심각한 위해를 줄 가능성이 높아 방대한 면적에 대한 전면적인 측량이 어렵다. 일부 지역에 대한 GPS 관측값과 토공량 산출 수치프로그램에 의한 평가는 피탄지 전체에 대한 측량값이 아니므로 대표성을 갖지 못하는 경우가 많다. 따라서 방대한 면적에 대한 이론적인 토양유실량을 산출할 경우, 강우, 기온, 경사 등 관련요소가 많고 복합적인 요소에 의해 결정되기 때문에 정확한 예측이 어려우므로 토양유실량 예측 모델을 적용하고, 그에 대한 검증을 하는 것이 경제적인 것이다.

대표적인 토양유실량 추정방법으로는 강우에 의한 토양유실을 예측하는 USLE(Universal Soil Loss Equation, Wischmeier and Smith, 1978)가 있다. USLE는 유역에서 발생하는 연간 토양유실량을 산정하기 위해 제시된 경험적인 방법에 의해 개발되었으며, 1970년대 이후 폭넓게 사용되었다. 이후 보다 정확한 토양유실량을 예측하기 위해 식생의 계절적 피복변화를 반영하고 개별 강우에 대한 토양유실량을 산정할 수 있도록 수정 보완된 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)가 개발되었고(Renard et al., 1997), 국내외에서 토지이용에 따른 토양침식위험도에 대한 연구와 효율적인 유역관리를 위한 토사유출량 산정에 널리 사용되었다(Tuan and Shibayama, 2003; Fu et al., 2006). 미국 테네시 동부 돌리네에서 방사성 세슘과 RUSLE를 활용하여 토양침식 및 침전속도에 관한 비교 연구(Turnage et al., 1997)가 보고되었고, 국내에서는 주로 농촌지역 또는 산림지역에 서의 토사유출량 추정에 사용되었다(Kim et al., 2004; Fu et al., 2006; Yang et al., 2003; Ryan et al., 2003).

또한 토사유출량 산정을 위한 새로운 기법 개발에 관한 연구도 진행되었다. 새로운 인자계산법, 토사유출량 산정을 위한 데이터의 적정 해상도 및 새로운 평가기법에 대한 연구들과(Lee et al., 2001; Jang et al., 2002; Lee et al., 2003; Lewis et al., 2005; Lim et al., 2005), 다양한 토사유출량 모델링 기법에 대한 비교 연구를 통하

여 기존 기법들에 대한 개선점들이 제시되었다(Stolpe, 2005; Fu et al., 2006). 이런 연구를 기반으로 광범위한 유역 전반에 걸친 토지 자원 관리를 위한 기초연구 등에서도 토사유출량 산정을 위한 모델링이 적용되고 있다(Park, 2003; Oh and Jung, 2005; Park and Kim, 2006). 최근에는 환경평가와 관련하여 유역의 강우유출에 따른 토지이용별 오염물질의 유출량 산정에도 광범위하게 활용되어, 댐 유역에서 토사유출량 발생 저감 효과 분석과 같은 국내 연구사례연구가 수행된 바 있다(Yoon et al., 2007).

사격장과 같이 위험한 지역에서 오염된 토양과 물질의 이동 및 유실을 직접 관측하기 어렵다. 이에, 사격장 피탄지 인근에 설정된 연구지역에 대한 RUSLE(개정토양유실 공식) 토사유출량 예측값과 GPS 관측에 의한 토양유실량 측정값을 비교하여 RUSLE 정확성을 검증하고, 이를 바탕으로 오염물질의 정화 및 유출 감소를 위한 대책에 사용할 수 있는 지 여부를 확인하고자 본 연구를 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1. GPS-TS 측량에 의한 토양유실량 산정

사격장 토사유출량을 정량적으로 확인하기 위하여 경기도 OO지역에 위치한 국내 최대 규모 포사격장에서 피탄지 하부 지역(202 m × 79 m)을 연구지역으로 선정한 다음, AshTech Promark2 GPS-TS(Total Station) 장비로 측량하였다. GPS-TS는 현장에서 위성 신호를 전송받는 기지국과 이동국으로 구성되며, 실시간 정확도는 정지측량시 수평오차 5 mm ± 1 ppm, 수직오차 10 mm ± 2 ppm이다. 측량은 이동국을 이동하며 좌표와 고도를 측정하고, 관측값을 이동국 GPS에 저장하였다. 저장된 좌표는 AshTech사의 AshTech Solution 프로그램을 사용하여 좌표 관측값을 불러들이고, 국내 전문회사인 (주)지토피아에서 주문 제작한 토공량 산정 수치프로그램을 사용하여 3차원으로 지형분석을 한 다음 계산된 수치로 토공량 변화를 비교하였다. 현장 연구지역에 대한 GPS 측정은 2011년 3월부터 11월까지 매월 32지점을 측량하였고, 2011년 9월 25일에는 강수량이 많아 60 지점의 좌표를 측량하였다.

2.2. 토양유실 평가를 위한 RUSLE 모델

강수에 의한 토양유실량을 산출하기 위하여 가장 많이 사용되는 식이 USLE(Universal Soil Loss Equation)이다. USLE 기본식은 다음과 같다(Wischmeier and Smith, 1978).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

A : 연평균 토양유실량($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$)
 R : 강우인자($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$)
 K : 토양침식인자($\text{Mg} \cdot \text{hr} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)
 LS : 지형인자(경사인자)
 C : 식생피복인자
 P : 관리인자

Wischmeier와 Smith(1979)가 처음으로 발표한 USLE는 1970년대 이후 폭넓게 사용하고 있다. 이 공식은 1990년대 초반에 그 내용이 보완되어 개정된 새로운 토양유실량 예측공식이 개발되었다. RUSLE는 Renard et al.(1997)이 USDA Agriculture Handbook 282(Wischmeier and Smith, 1978)를 근간으로 지피, 토양 수분 상태 등과 관련된 일부 인자를 보완한 후 전산화한 것이다. 물론, RUSLE가 기존 USLE의 기본인자들을 사용하고는 있지만, 그 중 몇 가지는 더욱 세분화하고 인자들의 상호관계가 강화되어 토양유실량 예측 정확성이 증가되었다.

2.2.1. 강우침식인자(R)

강우침식인자(Rainfall erosivity factor) R은 강우가 면 상 · 세류침식에 미치는 영향 혹은 토양침식능력으로 강우량, 강우강도, 계절별 강우분포 등에 따라 결정된다. R 값은 강우량과 강우강도 사이의 상호관계를 고려하여 계산한 전체 운동에너지로서 연중 내린 각 강우의 운동에너지를 모두 합한 값으로 표현된다. 특히 강우강도가 클수록 빗방울의 운동에너지가 증가하므로 토양을 쉽게 분산 탈리시켜 R값에 미치는 영향이 크고, 강우량이 많을수록 유거량이 증가하여 분산/탈리된 토양입자 운반량이 증가한다. 따라서 연중 강우량이 같더라도 강우강도가 높을수록 토양유실량이 증가한다.

강우침식인자는 다음과 같은 일련의 식으로 유도된다. 우선 강우의 총 에너지는 식 (2)와 같다.

$$E = \sum_{k=1}^M e_k \cdot V_k \quad (2)$$

여기서, E는 강우의 총 에너지(MJ/ha), e_k 는 k번째 시간 구간에 대한 강우량(mm), k는 강우기간 중 강우강도가 일정하다고 가정하는 시간구간이며, M은 총 시간구간의 수이다.

식 (2)에 사용된 단위에너지(e)는 다음식과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} e &= 0.119 + 0.0873 \log I & \text{if } I \leq 36 \\ e &= 0.283 & \text{if } I > 36 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 단위에너지(e)의 단위는 $\text{MJ/ha} \cdot \text{mm}$, 강우강도(I)는 mm/hr 이다.

총 강우에너지와 강우량과의 관계는 매우 밀접하며, 30분 최대 강우강도(I_{30})를 곱하여 산정한다. 침식도(erosivity) 산정에 포함시키는 강우량이 12.7 mm 이하이며, 다른 강우와의 사이에 무 강우시간이 6시간 이상 지속되면 침식도 산정에 제외시킨다. 하지만 15분 최대강우강도가 12 mm/hr 를 넘어서면 침식도 산정에 포함시킨다. 연간침식도는 강우에 대한 침식도를 모두 합하여 구한다(Wischmeier and Smith, 1965, 1978).

$$R_i = \sum_{j=1}^J (EI_{30})_j \quad (4)$$

여기서, R_i 는 연간침식도, I_{30} 은 개별 강우의 30분 최대 강우강도, EI_{30} 은 각 강우에 대한 침식도, J는 연간 강우의 총 수이다. 따라서 연평균 강우침식인자 R은 다음과 같다.

$$R = \frac{\sum_{e=1}^N R_e}{N} \quad (5)$$

여기서, R은 연평균 강우침식인자, R_e 는 위 식으로부터 산정한 각 강우에 대한 침식도, N은 연간침식도에 적용한 총 년 수이다.

2.2.2. 토양침식성인자 (K)

토양침식성인자(soil erodibility factor) K는 토양이 가지는 본래의 침식 가능성을 나타내는 것이다. 토양에는 여러 가지 형태가 있으며 각각의 토양이 가지는 K값은 강우의 단위침식능력에 의하여 유실된 양을 나타내는 것으로 식생이 없는 나지상태로 유지된 길이 22.1 m, 경사 9%의 표준포장에서 실시한 실험에 의하여 얻어진다. 토양침식성인자 K값에 영향을 끼치는 토양의 중요한 두 가지 특성은 침투율과 토양구조의 안정성이다. 침투율이 높으면 유거량이 적어지고, 토양구조가 안정화되면 토양이 빗물의 타격력에 견디는 힘이 강해지며 유거수가 생기더라도 쉽게 쓸려 내려가지 않게 된다. 특히, 철이나 알루미늄의 가수산화물이 많이 함유되어 있는 토양은 입단이 강하게 결합되어 있어 수식 저장성이 강하다. 토양침식인자 K는 일반적으로 토성(texture), 유기물 함량, 토양구조(structure), 침투성 등과 같은 토양 특성에 따라 결정된다.

본 연구에서는 국립방재연구소(NDMI, 1998)에서 제시된 자료를 바탕으로 Wischmeier and Smith (1978)에 의

해 제시된 토성, 유기물, 토양구조 및 투수성의 토양특성을 이용한 관계식에서 산정하였다.

$$K = [2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25 (S - 2) + 2.5 (P - 3) / 100] \quad (6)$$

여기서 M 은 (% very fine sand + % silt) \times (100 - % clay), S 는 structure code (1-4), P 는 permeability code (1-6)이며, OM 은 % 유기물 함량이다.

2.2.3. 경사장인자 및 경사도인자 LS

경사장인자(L , Slope Length Factor)와 경사도인자(S , Slope Steepness Factor)는 토양침식에 미치는 경사면의 길이와 경사도의 영향을 두 값의 곱, LS 로 나타낸다. LS 값은 표준포장(길이 22.1 m, 경사도 9%)에서 실험을 하여 그 수치를 구한 것으로, 경사면은 길이가 길어질수록 유거가 더 많이 집중될 수 있기 때문에 침식량이 많아지고, 경사도가 커질수록 유거의 속도가 증가하며, 이로 인한 침식력 증가로 침식량 역시 증가한다. 경사도와 경사장은 독립되어 작용하기보다는 서로 유기적으로 상호 작용하면서 침식에 관여하기 때문에 이들 인자를 하나의 결합된 값으로 이용하는데, 경사도가 경사장에 비하여 침식에 미치는 영향이 크다.

사면길이인자(L , Slope Length Factor)는 주어진 사면 길이와 22.1 m의 사면길이에 대한 토양손실량비이며, 사면경사인자(S , Slope Steepness Factor)는 주어진 사면경사와 9%의 사면경사에 대한 토양손실량비를 의미하며, 두 개의 인자를 지형인자(LS)로 사면길이사면경사 계수라고 한다. 강우에 의한 침식은 사면길이(slope) 및 경사도(steeptness)에 따라 달라진다.

LS 의 평가에 대하여 Wischmeier and Smith(1978)은 다음과 같은 경험식을 제시하였다.

$$LS = (\lambda / 72.6)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad (7)$$

여기서 λ 는 경사의 길이(f), θ 는 경사각, m 은 경사도 5% 이상인 경우 0.5, 경사도 3.5~3.4%인 경우 0.4, 경사도 1~3%인 경우 0.3, 경사도 1% 미만인 경우 0.2이다.

최근 GIS 기법의 발달로 지형분석을 위한 자료처리 분야에서 지형요소인 LS 인자를 계산하는 방법에 대한 많은 연구가 있었다. 이는 기존의 계산보다 신속하게 사면의 길이를 계산하는 방법이다. 사면의 정의를 GIS상의 격자구조 내에서 계산하는 방법은 기존의 LS 계산기법 등을 정리하여 일반적인 GIS 프로그램에 사용할 수 있는 알고리즘을 활용하였다. 또한 소유역의 개념과 등고선 수직 면

적 등을 이용한 방법들이 개발되었다(Moore and Burch, 1986).

2.2.4. 작부관리인자(C)

작부관리인자(crop management factor) C 는 각 작물을 생육시기별로 나누어 생육시기별 작부상태의 토양유실량에 대한 나지 상태의 토양유실량비에 각 생육단계별 강우인자를 곱하여 얻은 값을 모두 합한 것이다. 토양이 거의 피복되어 있지 않은 곳의 C 값은 1.0에 가깝고, 식물의 잔재물로 피복되어 있거나 매년 식생이 조밀한 곳의 C 값은 0.1 이하이다. C 값은 지역과 식물의 종류에 따라 또는 토양관리에 따라 매우 달라진다. USLE나 RUSLE 기법에서 농경지나 토양의 관리기법이 침식에 미치는 영향을 반영하거나 토양보존대책 중 토양의 관리가 토양침식에 미치는 상대적 영향을 비교하기 위하여 피복지형인자를 이용하고 있다. 지형인자는 보존대책이 연평균 토양유출량에 어떤 영향을 미치는지 또는 건설 활동, 농경 활동 등의 토양 관리계획 기간 중 시간적으로 어떻게 분포되는가를 나타내고 있다.

토지피복요소는 경작지의 종류와 경작물의 밀도가 토양 유실에 미치는 영향을 고려한 요소에 해당된다. USGS의 연구내용을 기초로 분류된 대분류(경작지, 식생지, 초지, 거주지, 물)의 토지이용현황을 바탕으로 USDoA(Wischmeier and Smith, 1978)에서 산출한 C 값을 연구지역의 토지이용에 용이하도록 일부 수정하여 각각의 토지 피복요소에 등급을 설정하였다. Park(2003)과 Kim and Oh(2004)에서 설정한 수역 0.0, 시가화지역 0.02, 나지 1.0, 습지 0.0, 초지 0.05, 산림 0.07, 논 0.3, 밭 0.23 등급을 적용하였다.

2.2.5. 토양보전인자(P)

작부체계에 의한 토양관리 이외에도 경사도가 크고 경사장이 긴 지역에서는 유거의 속도나 방향을 조절하기 위하여 인공구조물을 설치하거나 다른 조치들을 실시해야 한다. 이와 같은 토양보전활동들은 토양보전인자(conservation practices factor) P 값으로 나타나는데, 이 P 값은 상·하경에 의하여 재배되는 시험구의 연간 토양유실량에 대한 토양보전처리구의 연간 토양유실량의 비로 나타낸다. 만약, 토양관리활동이 없을 경우 P 값은 1이며 토양관리가 이루어지면 그 값이 작아진다.

2.3. 토양 내 화약물질농도 분석

토사유출량과 함께 연구지역 토양 내 2종 화약물질인

TNT(2,4,6-Trinitrotoluene)와 RDX(1,3,5-Trinitroperhydro-1,3,5-triazine) 농도분포 변화를 확인하기 위해 2011년 4월, 8월, 11월에 사격장 피탄지 아래 지역에 설정한 20개 지점에서 표토시료를 채취하였다. Wheel sampling법으로 채취한 시료는 플라스틱 백에 담은 다음 4°C 아이스박스로 냉장하여 실험실로 이송하고, 분석을 시작할 때까지 -25°C에 보관하였다(Jenkins et al., 1997). 토양 내 화학물질 분석은 KATS(2007) 화학물질 분석제안방법 ‘KS 규격(안) 및 ISO/TC 한국제안서(2007년)’에 준하여 분석하였다. 분석방법을 간단히 기술하면 다음과 같다. 시료는 암소에서 풍건한 다음 No. 30체로 체가름하고, 10.0 g을 정량하여 갈색병에 담고 20 mL ACN(Acetonitrile)을 첨가하였다. 이후 30°C 이하 초음파 수조(Ultrasonic 4020, JAC)에서 18시간 추출하여 0.2 μ m PTFE filter로 여과하고 HPLC-PDA(Prostar290, Varian)로 분석하였다. 분석조건은 Shiseido CAPCELL PAK RP C-18 column(4.6 \times 250 mm, 5 μ m)을 이용하여, 유량 0.8 mL/min(methanol : D.I.W. = 55 : 45)과 UV 230 nm의 조건에서 분석하였다. 분석은 시료당 2회 실시하고 그 평균값을 분석값으로 하였다.

표토토양의 화학물질 분포도는 Surfer ver. 8 프로그램을 사용하여 측량한 좌표를 지형도로 만들고, 지형 위에 화학물질별(TNT 및 RDX) 농도 분석값을 입력하여 3차원 분포도를 작성하였다. 2011년 4월, 8월, 11월 토양시료를 분석한 화학물질별 농도 분포를 표현하여 월별 오염물질 분포변화를 비교하였다.

3. Results and Discussion

3.1. GPS-TS 측량에 의한 연구지역 토양유실량 산정

2011년 4월과 11월의 GPS-total station 측량 결과를 바탕으로 피탄지 연구지역(202 m \times 79 m, 면적 15,958 m²)에 대하여 Fig. 1과 같은 지형도를 각각 작성하였다. 두 지형도를 비교하면 4월에 비해 11월에는 좌상부 지역이 깊게 침식되어 골이 형성되었고, 중앙에 위치한 3개의 봉우리 중 2개가 침식으로 유실되었다. 또한 남쪽방향으로 얇은 골이 형성된 것이 뚜렷하다. 토양 유실 방향과 유실 부분을 확인하기 위해 두 지형도를 중첩한 결과는 Fig. 1(c)와 같다. 여기서 노란색은 11월 지형도이고 붉은색은 4월 지형도로, 노란색 지역이 유실된 양을 나타내고 있다. Fig. 1(c)에서는 토사유실이 두 방향으로 발생하고 있음을 뚜렷하게 보여준다. 첫 번째로 상부의 노란색 표시부분이 유실되면서 바로 아래 지역의 붉은색 표시지역으로 침적

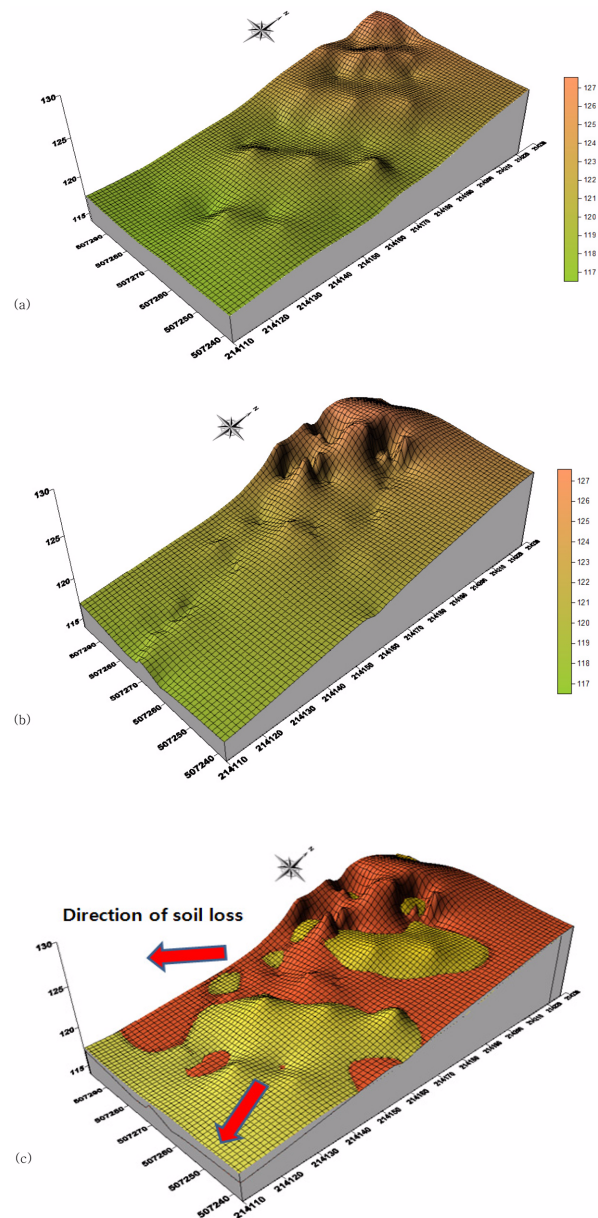


Fig. 1. Three dimensional surface topography of the study area (a) April, 2011, (b) November, 2011, and (c) Superposed surface topography (yellow, April; red, November) which revealed two distinctive directions of soil loss.

되고, 나머지는 남서방향으로 유실되었다. 두 번째로 연구지역 하부에서는 낮은 봉우리 3개와 그 아래 지역이 모두 유실되면서 남남동방향으로 토사가 이동하는 것이 확인되었다. 이와 같이 뚜렷한 토사유실이 발생한 것은 Table 1에서와 같이 2011년 6월~8월에 걸쳐 1,000 mm 이상의 많은 강우가 있었기 때문이라 판단된다. 특히 2011년 7월 27일 당일에만 211 mm의 폭우가 있었다(WAMIS, 2012).

Table 1. Monthly precipitation and estimated R factor of the study site

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Sum
Average precipitation (mm) in 2002~ 2011	6	16	16	53	78	120	408	331	126	21	13	0	1,188
Monthly precipitation (mm) in 2011	4	22	6	68	99	314	818	245	29	14	43	5	1,667
R-factor	11	27	11	72	111	442	2,049	1779	307	41	11	0	4,860

Table 2. Estimated bulk soil volume by customized soil volume computation program

	April, 2011	November, 2011	Annual soil loss
Bulk soil volume (m ³)	1,926,789.3	1,928,511.8	1,722.5

Table 3. Representative soil characteristics of Songsan soil series and matching K values (NDMI, 1998)

Soil series	Distribution of particle size (%)					K [tonnes/ha/R]		
Song san	Gravel > 2 mm	Sand 0.1~2.0	Very Fine Sand 0.05~0.1	Silt 0.002~0.05	Clay < 0.002	Organic Matter	Erickson method	Wischmeir nomograph
	7.7	46.8	10.9	25.0	17.3	2.41	0.32	0.22

GPS 측량결과를 바탕으로 토공량 산정프로그램으로 2011년 4월과 11월 사이의 토공량 차이를 산정한 결과 유실된 토량은 1,723 m³이었다(Table 2). 연구지역 면적에 대하여 일반화하고, 유실토량에 용적밀도(bulk density) 1.80을 대입하여 질량단위로 환산하면 2,915 ton/ha/year의 토사유실이 발생한 것으로 평가되었다. 이 때, 토사유실의 원인이 되는 12월~3월 강수량이 매우 적기 때문에 4월~11월 평가량을 연평균 토사유실량으로 보아도 무방할 것이라 판단하였다.

3.2. RUSLE에 의한 연구지역 토양유실량 평가

우량자료는 연구대상 사격장 최근접 지역에 위치한 국토해양부 고문 관측소의 우량 측정 자료를 활용하였으며, 관측시작년도 2002년부터 2011년까지의 강우량 자료를 평균하여 강우인자를 산정하고 토양유실량 계산에 사용하였다. 연구지역 사격장 주변 지역의 2002~2011년까지 10년간 연평균 강우량은 1,188 mm이고, 강우인자 R은 4,860 MJ · mm⁻¹ · ha⁻¹이다(Table 1). Jung et al.(2004)은 기존의 자료로부터 거리역산자승가중치법을 이용하여 시군별 강우인자를 계산하였는데, 우리나라와 연천지역의 R 평균 값은 각각 4,210 및 4,923 MJ · mm⁻¹ · ha⁻¹으로 본 연구의 결과와 비슷한 경향을 보였다. 이에 본 연구에서는 RUSLE 입력값으로 10년간 토양유실량의 R값은 4,860 MJ · mm⁻¹ · ha⁻¹를, 연평균 강우침식인자(R)은 486 MJ · mm⁻¹ · ha⁻¹ · yr⁻¹를 적용하였다.

연구지역의 토양침식인자는 2 단계로 결정하였다. 첫 단계에서는 농업과학기술연구원에서 구축한 개략 토양도와 국립방재연구소(NDMI, 1998)에서 제시한 토양통을 확인하고 연구대상지역의 토성, 유기물, 토양구조 및 투수성의 토양특성에 대한 자료를 확인하였다. 그 결과 연구대상지역 토양은 송산통으로 그 토양 특성은 Table 3과 같다. K값 산정은 Erickson 방법과 Wischmeir 도표에 의한 방법이 제시되어 있는데 본 연구에서는 Wischmeir 도표에 의한 방법으로 산정하였다. Table 3의 송산통 토양특성을 바탕으로 토양침식성도표(Fig. 3)에서 미사와 극세사를 합한 함량 35.9%를 기점으로 하여 모래의 함량 46.8%와 유기물의 함량 2.41%, 토양구조 2, 투수성 3을 적용하여 구한 K 값은 0.22 tonnes/ha/R이었다.

사면길이 및 경사도 인자(LS)는 지형인자로 수치지형도(1 : 25,000)를 이용하여 수치표고모델(DEM) 변환 후 계산하였다. 본 모델에서 LS는 평균값인 28.6으로 적용하였다. 경사장 및 경사도인자 LS는 Wischmeier and Smith (1978)이 제시한 LS 경험식을 1 : 25,000의 수치지형도를 이용하여 DEM(Digital Elevation Map)을 생성하여 측정하였다(Fig. 3). 수치지형도에서 산정한 연구대상지역의 LS값은 최소 16.1, 최대 219.9으로 평균 28.6의 값을 보였다.

작부관리인자(C)는 토양피복인자로 수역 0.0, 시가화지역 0.02, 나지 1.0, 습지 0.0, 초지 0.05, 산림 0.07, 논 0.3, 밭 0.23 등급으로 나뉜다. 연구지역은 현재 사격장으

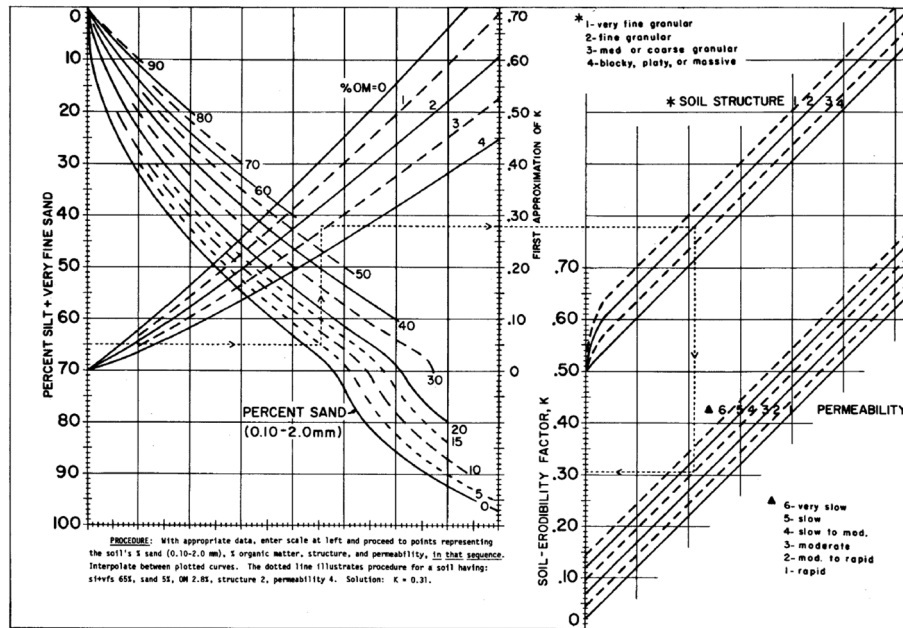


Fig. 2. The soil-erodibility nomograph. Where the silt fraction does not exceed 70 percent, the equation is $100K = \{2.1 \times 10^{-4}(12-OM)M^{1.14} + 3.25(S-2) + 2.5(P-3)\}$ (Wischmeier and Smith, 1978).

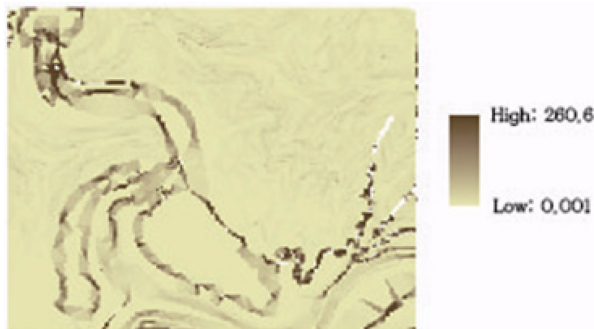


Fig. 3. Constructed digital elevation map of the shooting range for estimation of LS factor in the study area.

로 사용되는 지역으로 약간의 피복이 있지만 거의 나지상태에 가깝기 때문에 C값은 1로 적용하였다. 토양보전인자(P)는 토양보전대책인자로 연구지역은 사격장이기 때문에 별도의 토양관리활동이 없어 1로 적용하였다.

RUSLE 모델에 계산된 R값, K값, LS값을 적용해 보면 (Table 4), 강수 인자 $R = 486 \text{ MJ} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$, 토양 인자 $K = 0.22 \text{ ton/ha/R}$, 경사인자 $LS = 28.6$ 으로 연평균 토양유실량 A의 최대값은 3,057.9 (ton/ha/year)이다.

즉, 적절한 토양 관리도 하지 않고, 작물을 재배하지 않은 나지 상태, 즉 $C \times P = 1$ 일 때, 연간 ha 당 최대 약 3,058 ton의 표토가 유실될 수 있는 것으로 평가되었다.

GPS-TS로 측정된 토사유실량 결과와 RUSLE 2.0 프로그램으로 토사유실량을 예측한 결과를 비교해 본 결과, Fig. 2에서와 같이 GPS-TS로 측정된 토양유실량은 2,915 ton/ha/year이었고, RUSLE 모델로 예측한 토양유실량의 최대값은 3,058 ton/ha/year로 산출되었다(Table 2). 두 가지 방법의 토사유실량 분석결과의 오차범위는 4.66%로 큰 차이가 나지 않았다.

3.3. 사격장 표토에서 화학물질 이동

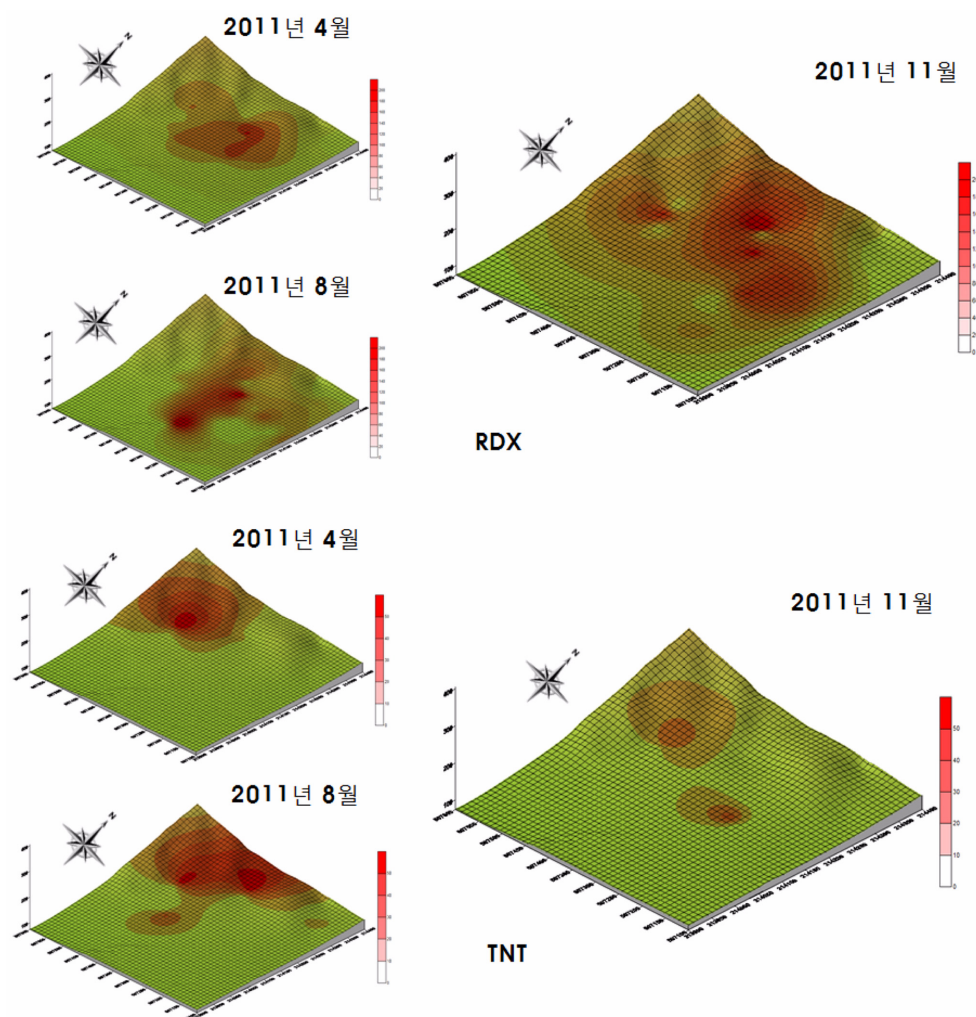
사격장 피탄지 아래 지역에 위치한 연구지역 내외에 설정한 20개 지점에서 채취한 토양시료 내 TNT 및 RDX 농도는 Table 5에 요약하였다. Median 값으로 비교할 때, RDX는 4월에 15.85 mg/kg에서 8월 46.36 mg/kg, 11월에 50.66 mg/kg으로 점차 오염도가 증가하는 양상이었으며, 사격훈련이 지속된 결과로 판단된다. 반면에 TNT는 4월에 0.44 mg/kg, 8월에 0.56 mg/kg, 11월에 0.41 mg/kg

Table 4. Values of RUSLE coefficients used for the estimation of annual soil loss of the study area

R	K	LS	C	P	A
($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$)	($\text{Mg} \cdot \text{hr} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)				($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$)
486	0.22	28.6	1	1	3058

Table 5. Concentrations of explosive compounds in soil collected in and around the study area (n = 20/month)

	RDX (mg/kg-soil)			TNT (mg/kg-soil)		
	Apr. 2011	Aug. 2011	Nov. 2011	Apr. 2011	Aug. 2011	Nov. 2011
Minimum	0.43	0.12	0.09	0.07	0.09	0.05
Maximum	86.38	265.29	257.61	26.57	59.56	15.60
Median	15.85	46.36	50.66	0.44	0.56	0.41
Average	25.87	60.01	71.95	2.25	7.91	1.71

**Fig. 4.** Temporal changes of explosive compounds (TNT and RDX) distribution in topsoil of the study area.

으로 전반적인 오염도는 큰 변화가 없었다. RDX 오염도 증가는 포탄 폭발로 인해 비산된 화약물질 오염토양 및 불완전 연소된 화약물질의 강하와 피탄지에 내린 강수 유출로 인한 화약물질 이동이 원인이라 할 수 있다. 반면에 연구지역이 산등성이에 있는 피탄지와 100 m 아래 지역에 위치하고, 연구기간 중에 연구지역내에서 토사유출에 영향을 줄 만큼 많은 분화구가 관찰되지 않았으며, 연구

지역이 충분히 넓기 때문에 폭발에 의한 토양 비산이 연구지역에서의 토양유실에 큰 영향을 주지는 못한 것으로 사료된다.

오염분포를 확인하기 위해 수치지도와 Surfer ver. 8 프로그램을 사용하여 좌표에 측정값을 넣고 농도 분포를 작성한 결과는 Fig. 4와 같다. 2011년 4월에는 피탄지역인 산경사면부터 바로 아래 지역에 집중하여 TNT 및 RDX

오염원이 위치하고 있다. 이후 5~8월 사이에 1,231 mm의 강우가 내린 후, RDX 오염원은 주로 남서 방향으로, TNT 오염원은 남동 방향으로 이동함과 동시에 전반적 오염범위가 증가하였다. 이와 같은 오염원 이동방향은 상기한 바와 같은 토양유실 방향과 일치하고 있으며, 남서방향으로 생긴 깊고 긴 물결을 따라 화학물질이 빠르게 이동한 결과이다.

2011년 8월 이후 약 300 mm 이상의 강우가 더 내린 다음의 양상은 매우 특이하다. RDX는 오염범위가 확산되면서 남동방향으로 이동하는 경향을 보였고, TNT는 전반적인 오염도가 감소되면서 오염범위도 감소하였다. TNT의 LogKow는 1.86이고 Koc는 2,812로 토양에 강하게 흡착되는 반면, RDX는 LogKow 0.86, Koc 89.1로 TNT에 비해 토양에 흡착되거나 지체되지 않는 특성을 가진다(Walsh et al., 1995). 그러므로 11월에 TNT 오염원 분포범위가 좁고 오염도가 낮은 것은 강수에 의한 토양 이동과 함께 사격장 외부로 이송되어 잔류량이 미미하기 때문이라 할 수 있다. 반면에 RDX는 강수에 의한 토사 이동과 동시에, 물에 의해 토양층 사이로 확산되는 현상이 발생하여 오염범위가 크게 넓어진 것이라 사료된다. 이 상에서와 같이 RDX 이동은 토사의 유동흐름과 방향은 일치하지만, 잔류하는 양이 많아 흐름의 방향을 알려주는 지표가 되고 TNT 오염원 이동은 강수에 의한 토사 이동과 거의 유사한 특성을 보이는 것이 확인되었다.

화학물질 이동 특성을 보다 정확히 이해하기 위해서는 부가적인 연구가 필요하다. 일반적으로 토양입자가 작을수록 오염도가 높고 강수에 의한 유실이 쉽게 발생하므로, 입도별 오염도를 동시에 평가한다면 토양유실과 화학물질 이동에 대한 상관성이 보다 명확해 질 것이다.

4. 결 론

경기도 OO 사격장에서 발생하는 토양유실량을 평가하기 위하여, 두 연구기관에서 설정한 연구지역에 대하여 RUSLE 2.0 프로그램과 GPS-TS 측량법에 기반을 둔 토사유실량을 각각 독립적으로 산출한 다음 비교하였다. 현장 수치지도 및 강수량 자료를 이용하여 RUSLE 프로그램에 필요한 인자값을 산출하여 토사유실량을 예측하였고, GPS-TS로 측량한 좌표와 고도를 3차원으로 변환하여 토공량을 산정한 값과 비교하였다.

그 결과, 사격장내 토양유실은 지면에 식물피복이 없는 나지의 특수한 조건과 여름철 집중 강우에 의하여 사격장 피탄지 상부에서 심하게 나타났으며, 피탄지 하단은 유실

된 토양의 일부가 퇴적되거나 하천으로 유출되었다. GPS-TS에 의한 측량값과 RUSLE 2.0에 의한 토사유실량 예측값을 비교하였을 때 5%의 오차를 보인 것은, 국지적 토사유실량 예측에 대한 RUSLE 활용가능성을 보여준 것이라 사료된다. 그러나 GPS-TS 측량과 RUSLE 2.0에 의해 각각 산정한 토사유출량 비교가 사격장 피탄지 아래에 설정한 연구지역에 국한되었고, 1회의 연구결과이므로 RUSLE의 유용성을 논의하기에는 자료가 부족하다. 더구나, RUSLE에서는 1년을 기준으로, 측량/토공량 산정에서는 강수가 많았던 7개월에 대한 결과를 비교하였기에 시간적 경계도 맞지 않는다. 따라서 향후 지속적인 자료축적으로 RUSLE 2.0에 사용되는 계수 자료를 조정하고, 다른 토사유출모델을 적용하여 비교·평가한다면 더욱 정교한 예측이 가능할 것이다.

화학물질 오염분포 변화에서는 RDX가 TNT에 비해 확산성이 높았으며, 이는 TNT가 토양에 흡착되어 이동하는 반면 RDX는 물에 용출되어 이동하는 특성에 기인한다. 그러므로 주요오염물질에 따라 정화 및 유출방지시설에 대한 설계도 변화하여야 할 것이다. 전반적으로 사격장내 토양의 이동방향과 화학물질의 확산 방향이 일치하므로, 토양보전 및 화학물질의 유출을 방지하기 위한 침전지, 저류지 및 저습지 설치가 필요하다. 동시에 침사지 및 저습지에서 토사 유출감소 이외에도 오염물질을 분해할 수 있는 기작이 작동할 수 있는 기능성을 부여하는 것도 필요하다. 동시에 피탄지 하부에는 빗방울의 타격력 및 수류 에너지를 감소하기 위하여 다년생 초본을 지피식물로 식재하여 토양 안정성을 높이는 방안도 토사유출을 감소시킬 수 있다. 이 때 적용하는 식물에 의한 화학물질 흡수, 분해, 축적이 발생할 수 있도록 화학물질 내성을 가진 정화식물로 선정하는 것이 필요할 것이다.

사 사

본 연구는 환경부 환경산업기술원 GAIA Project No. 173-111-036 지원과 한국수자원공사의 일부 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Fu, G., Chen, S., and McCool, D.K., 2006, Modeling the Impacts of No-Till Practice on Soil Erosion and Sediment Yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS, *Soil and Tillage Research*, **85**, 38-49.

- Jang, Y.R., Lee, G.S., and Cho, G.S., 2002, The Determination of Resolution for Quantification of Soil Loss in GIS Environment, *The Journal of GIS Association of Korea*, **10**(2), 301-316.
- Jenkins, T.F., Walsh, M.E., Thorne, P.G., Thiboutot, S., Ampleton, G., Ranney, T.A., and Grant, C.L. 1997, Assessment of Sampling Error Associated with Collection and Analysis of Soil Samples at a Firing Range Contaminated with HMX, US CRREL Special Report 97-227.
- Jung, K.H., Sonn, Y.K., Hong, S.Y., Hur, S.O., and Ha, S.K., 2005, Assessment of National Soil Loss and Potential Erosion Area using the Digital Detailed Soil Maps, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **38**(2), 59-65.
- KATS (Korean Agency for Technology and Standards), 2007, Draft, Soil Quality-Analysis of Explosive Compounds in Soil by HPLC.
- Kim S.M., Im, S.J., and Park, S.W., 2004, Estimation of the Forestry Area Decrease Effect on the Soil Erosion in Rural Watershed, *Journal of Korean Society of Rural Planning*, **10**(1), 19-26.
- Kim, J.H. and Oh, D.K., 2004, Analysis of Soil Erosion Hazard Zone by R Factor Frequency, *The Journal of GIS Association of Korea*, **7**(2), 47-56.
- Lee, G.S., Jang, Y.L., and Jo, G.S., 2003, The Analysis of Optimum Resolution with Different Scale of Soil Map for the Calculation of Soil Loss, *The Journal of GIS Association of Korea*, **6**(3), 1-10.
- Lee, G.S., Lee, H.J., Lim, S.H., and Cho, G.S., 2001, The Influence Analysis of Topographic Factor on Soil Erosion Model Using GIS, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **21**(4-D), 545-554.
- Lewis, L.A., Verstraeten, G., and Zhu, H., 2005, RUSLE Applied in a GIS Framework: Calculating the LS Factor and Deriving Homogeneous Patches for Estimating Soil Loss, *International Journal of Geographical Information Science*, **19**(7), 809-829.
- Lim, K.J., Sagong, M., Engel, B.A., Tang, Z., Choi, J.D., and Kim, K.S., 2005, GIS-Based Sediment Assessment Tool, *Catena*, **64**, 61-80.
- Moore, I. and Burch, G., 1986, Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Society of America Journal*, **50**, 1294-1298.
- NDMI (National Disaster Management Institute), 1998, Study on the Sediment Yield Estimation due to Land Development(II), NIDP-98-01.
- Oh, J.H. and Jung, S.G., 2005, Potential Soil Loss Prediction for Land Resource Management in the Nakdong River Basin, *Journal of Korean Society of Rural Planning*, **11**(2), 9-19.
- Park, G.H., 2003, Soil Erosion Risk Assessment of the Geumho River Watershed using GIS and RUSLE Methods, *The Journal of GIS Association of Korea*, **6**(4), 24-36.
- Park, J.S. and Kim, G.H., 2006, Estimation of Soil Loss by Land Use in the Geum River Basin using RUSLE Model, *Journal of Korean Society on Water Quality*, **22**(4) 619-625.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D. K., and Yoder, D. C., 1997, Predicting Soil Loss by Water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE), Handbook No. 703.
- Ryan, P., Murphy, S., and McKenzie, N.J., 2003, Assessing Soil Erosion Hazard for Australian Forest Management, *Forest and Wood Products Research and Development Corporation*.
- Stolpe, N.B., 2005, Comparison of the RUSLE, EPIC, and WEPP Erosion Models as Calibrated to Climate and Soil of South-Central Chile, *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant*, **55**, 2-8.
- Tuan, L.T. and Shibayama, T., 2003, Long-Term Variation of Sediment Discharge to Coastal Environment, *Coastal Engineering Journal*, **45**(2), 275-293.
- Turnage, K.M., Lee, S.Y., Foss, J.E., Kim, K.H., and Larsen, I.L., 1997, Comparison of soil erosion and deposition rates using radiocesium, RUSLE, and buried soils in dolines in East Tennessee, *Environmental Geology*, **29**(1/2), 1-10.
- Walsh, M.E., T.F. Jenkins, and P.G. Thorne, 1995, Laboratory and Field Analytical Methods for Explosives Residues in Soil; Proceedings of the Symposium on Alternatives to Incineration for Disposal of Chemical Munitions and Energetics, **2**, 17.
- WAMIS (Water Management Information System), 2012, <http://www.wamis.go.kr/>
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D., 1978, Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide to Conservation Planning, US DoA, Agricultural Handbook No.537.
- Yang, I.T., Park, J.H., and Chun, K.S., 2003, A Study on Soil loss in Forest fire area, *Journal of the Korean Society for GeoSpatial Information System*, **11**(2), 11-16.
- Yinon, J., 1990, Toxicity and Metabolism of Explosives, CRC Press New York.
- Yoon, S.W., Ye, L., and Chung, S.W., 2007, Application of SWAT Model for Estimating Soil Erosion in Daecheong Dam Watershed, *Korean Society on Water Environment · Korean Society of Water and Wastewater Association Spring Conference Symposium*, 1101-1110.