대규모 산지유역 토양침식 평가를 위한 SEMMA 개선

SEMMA Revision to Evaluate Soil Erosion on Mountainous Watershed of Large Scale

신 승 숙* / 박 상 덕** / 이 종 설*** / 이 규 송****

Shin, Seung Sook / Park, Sang Deog / Lee, Jong Seol / Lee, Kyu Song

Abstract

SEMMA (Soil Erosion Model for Mountain Areas) should be revised to apply on mountain watershed of large scale. In this study, the basic structure of original SEMMA and methods to calculate main parameters are reviewed and the revised parameters are presented to expand a range of application. SEMMA-Ic is new model revised by a rate of vegetation cover which is substituted for index of vegetation structure to use specially NDVI for large scale areas. The correlation coefficient and the Nash-Sutcliffe simulation efficiency for the revised model decreased rather than those of original model. However the evaluation of the revised model on watershed showed the approximate simulation with measured sediment yield and the underestimated simulation when sediment yield is large. The additional research for channel erosion is needed so that soil erosion model for hillslopes is used to estimate sediment yield from a watershed.

Keywords : SEMMA, Mountainous watershed, Vegetation cover, Model revision

요 지

산지의 토양침식 모형인 SEMMA를 대규모 산지유역에 적용하기 위해서는 모형의 개선이 필요하다. 본 연구에서는 원래 SEMMA의 기본구조와 주요 매개변수의 산정방법을 설명하였고, 적용범위 확대를 위한 개선 매개변수들을 제시하였다. 특히 광범위한 지역에 대해 NDVI를 활용하기 위하여 식생구조지수 대신 식생피복지수를 사용하여 개선된 모형 SEMMA-Ic를 개발하였다. 개선모형의 모의결과 상관계수와 모의효율계수는 본래 모형보다 다소 감소하였다. 그러나 개선모형을 유역에 적용한 결과 실측값에 근접하게 모의했고, 토사유출량이 많은 경우에는 과소 예측하는 경향을 보였다. 따라서 산지 사면에서 개발한 토양침식 모형을 유역에 적용하기 위해서는 수로침식에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

핵심용어 : SEMMA, 산지유역, 식생피복, 모형개선

* 강릉원주대학교 방재연구소 전임연구원 (e-mail: cewsook@hanmail.net)

Associate Researcher, Institute for Disaster Prevention, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon 210-702, Korea

** 교신저자, 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (e-mail: sdpark@gwnu.ac.kr, Tel: 033-640-2417)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon 210-702, Korea

*** 국립재난안전연구원 안전연구실장 (e-mail: jlee@nema.go.kr)

Head of Safety Research Division, National Disaster Management Institute, Seoul 121-719, Korea

**** 강릉원주대학교 생물학과 교수 (e-mail: leeks84@gwnu.ac.kr)

Professor, Dept. of Biology, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon 210-702, Korea

1. 서론

인간 활동과 자연적인 요인에 의해 지구의 토양은 지속적으로 교란되고 있으며, 이들 지역에서 강우에 의해 발생하는 지표유출과 토양침식이 크게 증가하고 있다. 교란지역은 인간의 적극적인 경제·사회적 활동에 따른 농경지, 매립지, 개발지 등에서 행해지는 경작 활동을 위한 쟁기질 또는 공사를 위한 중장비의 사용에 의해 토양체가 극심하게 교란된 강교란지(heavy disturbed land)와 방목지, 벌목·조림지, 산불지역 등과 같이 지표식생이 변화하여 지표면의 토양만을 교란시키는 약교란지(light disturbed land)로 크게 구분할 수 있다. 강교란지는 극심한 토양의 교란 때문에 토양입자의 한계전단응력이 저하되어, 작은 외부의 자극에도 많은 양의 토양침식이 발생한다. 약교란지는 상대적으로 적은 토양침식이 발생하지만, 경사가 비교적 급하고, 상대적으로 넓은 면적을 차지하기 때문에 이들 지역에서 발생하는 토양침식도 간과할 수는 없다. 토양침식에 대한 관심은 과거에 농경지나 개발지역과 같은 강교란지에 집중되었지만, 최근에는 약교란지를 포함하는 대규모 유역의 토양침식 위험과 수질환경 평가를 위해 관심 범위가 확대되고 있다.

농경지를 기반으로 개발한 범용토양유실방정식 USLE (Wischmeier and Smith, 1965, 1978)는 개발지와 산림지역에도 적용 가능하도록 개선되었다. 이것이 Renard et al. (1997)에 의해 제시된 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 모형이다. 최근 광범위한 지역의 토양침식 평가를 위해 RUSLE의 지형 및 식생 매개변수 산정에 GIS기법을 도입하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다 (Kim et al., 2011; Oh et al., 2002). Lim et al. (2005)은 RUSLE를 GIS 기반으로 하는 SATEEC (Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control)를 개발하였고, 국내 유역에서 공간적으로 상이하게 분포하는 토양침식에 대해 토사유출률(sediment delivery ratio)을 고려하여 토사유출량을 평가하였다. 물리기반의 수문학적 토양침식 모형인 WEPP (Water Erosion Prediction Project)은 경작지, 방목지, 그리고 산림지의 소규모 사면부터 중규모 유역에 이르기까지 토양침식과 토사유출량 모의가 가능하다(Flanagan and Nearing, 1995). Renschler (2003)는 GIS 상에서 공간분석이 가능한 GeoWEPP을 제시하였으며, 이모형은 국내 유역의 유출 및 토사유출 평가에 활용되고 있다(Lee, 2007; Moon et al., 2010; Choi et al., 2011). Kim et al. (2007)은 소유역에 대한 토사유출량을 평가한 결과 GeoWEPP이 USLE보다 관측 값에 근사하게 모의함을 확

인하였다.

국토의 68%가 산림으로 이루어진 우리나라에서 산지사면과 유역을 대상으로 토양침식과 토사유출을 평가한 연구가 많이 이루어졌다(Park et al., 2005b; Park, 2008; Shin, 2002; Shin et al., 2008; Lee et al., 2004; Lee and Park, 2005). 이러한 연구를 기반으로 산지지역 토양침식 모형인 SEMMA를 개발하였다(Park et al., 2005a; Park et al., 2006; Park et al., 2012). Park and Shin (2011)은 산지사면에 대한 토양침식을 평가하기 위해 RUSLE, WEPP 및 SEMMA를 비교검토 하였는데, 우리나라의 산지 기후, 지표상태, 토양 및 지형 특성을 고려한 SEMMA가 다른 모형에 비해 상대적으로 우수한 모의결과를 보였다. 그러나 소유역 및 대규모 산지지역을 대상으로 적용 평가한 연구는 아직 미흡한 단계이다.

지표관리 인자 C값 산정이 까다로운 RUSLE의 경우 NDVI와 C인자의 관계식을 이용하여 광범위한 지역의 토양침식을 평가하고 있다(De Jong, 1994; Van der Knijff et al., 1999). SEMMA의 경우도 대규모 지역에 대한 지표 및 지표하 식생을 고려한 식생구조 지수 I_{vcd} 를 산정하는 것이 용이하지 않다. 이러한 이유로 위성영상의 NDVI와 상관성이 높은 식생피복도 V_c 를 활용하여 모형을 개선하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대규모 산지지역의 토양침식을 평가하기 위해, SEMMA의 지표식생인자를 포함한 강우, 지형, 토양인자 등의 매개변수 산정을 사용자 편의를 고려하여 개선하였다.

2. SEMMA 개요

2.1 SEMMA 기본식

우리나라 산지를 대상으로 개발한 경험적인 토양침식 모형인 SEMMA (Park et al., 2005a)는 단일호우에 의해 산지사면으로부터 발생하는 토사유출량을 예측하기 위한 국내모형이다. 본 모형은 비교란 산지뿐만 아니라 산불, 벌목, 산사태, 사면관리 등의 산지환경 급변지역에도 적용 가능하다. 최근 Park et al. (2012)은 각 매개변수의 범위 및 관계 타당성을 기반으로 보완된 SEMMA 모형식 Eq. (1)을 다음과 같이 제시하였다.

$$q_s = \alpha RI^a I_{vcd}^b So^c To^d \quad (1)$$

여기서, q_s 는 단일호우사상에 의해 발생한 산지사면의 단위면적당 토사유출량(g/m²)이고, RI 는 강우에너지와 최대강우강도를 고려한 강우인자(J·h/m)이며, I_{vcd} 는 식생구조, 지표를 덮고 있는 피복물과 뿌리층을 고려한 지

표인자이다. S_o 는 산지토양의 유기물, 토심 및 토양과 자갈의 비율로 산정 가능한 토양인자이고, T_o 는 사면경사 및 길이를 고려한 지형인자이다. 계수 α 와 지수 a, b, c, d 는 강우량과 식생피복도 범위 조건에 따라 세분화된 8개의 식들에 의해 달라진다.

SEMMA는 USLE (Wischmeier and Smith, 1965)와 SLEMSA (Elwell, 1978)처럼 토양침식에 지배적인 매개변수들의 통계적 유효성을 바탕으로 하는 그레이 박스형의 경험적인 모형으로 강우, 지표, 토양 및 지형인자의 상관 및 회귀분석에 대한 다중회귀식으로 이루어져 있다. 본 모형은 얇은 지표면 유출에 빗물튀김 현상이 혼합하여 작용하는 면상침식(sheet erosion) 과정과 지표유출의 집중흐름에 의한 세류침식(rill erosion)에 의해 발생하는 토사의 이송과 퇴적 작용을 모두 포괄한다. 산지의 토양침식은 특히 강우규모와 식생분포에 지배적인 영향을 받는다. Park et al. (2005a)은 한 개의 방정식으로 제안된 초기 모형이 토양침식이 적은 경우 관측치보다 과대평가하고, 많은 경우 과소평가하는 한계를 보완하기 위해 토양침식의 수문·역학적 과정을 고려하여 강우량 범위와 지표식생피복 범위를 세분화하였다. 모형의 신뢰도를 높이기 위하여 강우량과 식생피복도 범위를 조정하고, 기본자료를 추가하여 토양침식량 산정 프로그램을 개발하였다(Park et al., 2006). 모형의 적용 범위는 산지로 제한되며, 농경지나 개발지역과 같이 인위적으로 크게 교란되거나 산림수문

적인 특성을 따르지 않는 사면에 대해서는 적용이 제한된다. Park et al. (2012)은 토양침식 과정에 있어서 각 매개변수 및 주요인자 산정의 물리적인 의미와 타당성을 재검토하고, RUSLE모형과의 비교 검토를 통해 SEMMA를 최종적으로 완성시켰다. 현장실측 자료의 다중회귀 분석에 의해 제시된 강우규모 및 식생분포별 모형 식들은 Table 1과 같다. 강우량 380 mm 이하이고 식생피복이 70%를 초과한 경우에 대한 모형의 결정계수는 0.6 이하로 다소 낮았고, 모형 예측의 정확도를 평가하는 Nash and Sutcliffe (1970)의 모의효율계수는 강우량 80 mm 이상이고 식생피복이 70% 이하인 경우에 높았다. 강우인자와 토양인자는 비례관계를 나타내었지만, 지표인자와 지형인자는 전반적으로 반비례 관계를 보였다.

2.2 주요 매개변수

SEMMA는 강우인자, 식생인자, 토양인자 및 지형인자를 산정하는 과정과 강우량과 식생피복도 범위에 따른 모형식을 채택하여 최종적으로 토양침식량을 산정하는 단계로 구성되어 있다.

강우인자 산정을 위해 강우운동에너지를 고려해야 하는데, 이는 총강우량과 최대강우강도의 함수로 표현된다 (Wischmeier and Smith, 1958; Renard et al., 1997). 침식능(erosivity) 지수는 토양침식에 직접 관여하는 강우 물방울의 지표면 타격에 의한 튀김(splash)뿐만 아니라 지

Table 1. Regression Model Equations of Soil Erosion Divided by Rainfall and Vegetation Cover
(Park et al., 2012)

Rainfall depth (mm)	Vegetation cover (%)	Multiple Regression Model	n	r	ENS
0<R≤80	0<Vc≤35	$q_s = 46.36 RI^{0.865} Ivcd r^{-0.579} So^{0.525} To^{-1.778}$	76	0.711	0.215
	35<Vc≤70	$q_s = 3.407 RI^{0.588} Ivcd r^{-1.770} So^{0.299} To^{-0.299}$	164	0.685	0.298
	70<Vc≤100	$q_s = 79.17 RI^{0.330} Ivcd r^{-1.480} So^{0.668} To^{-1.700}$	216	0.546	0.254
80<R≤380	0<Vc≤35	$q_s = 3.113 RI^{1.224} Ivcd r^{-0.788} So^{0.091} To^{-1.551}$	63	0.859	0.659
	35<Vc≤70	$q_s = 2.964 RI^{0.835} Ivcd r^{-2.114} So^{0.445} To^{-0.540}$	188	0.719	0.462
	70<Vc≤100	$q_s = 27.56 RI^{0.417} Ivcd r^{-1.475} So^{0.540} To^{-1.220}$	332	0.484	0.130
380<R	0<Vc≤70	$q_s = 2.477 RI^{1.022} Ivcd r^{-2.432} So^{1.172} To^{-0.996}$	20	0.903	0.885
	70<Vc≤100	$q_s = 0.00544 RI^{1.487} Ivcd r^{-3.252} So^{0.940} To^{1.171}$	42	0.763	0.182
Total		$q_s = \alpha RI^a Ivcd r^b So^c To^d$	1,101	0.794	0.864

n is the data number

r is the correlation coefficient

ENS is the Nash-Sutcliffe simulation efficiency

표 유출수에 의한 토사의 침식과 이송을 포함한다. 많은 연구자들이 강우강도와 강우운동에너지의 관계식을 제시하였는데 그들은 크게 로그함수(Wischmeier and Smith, 1978; Brandt, 1990), 지수함수(Coutinho and Toma's, 1995; Jayawardena and Rezaur, 2000; Van Dijk, 2002) 그리고 파워함수(Hudson, 1965; Steiner and Smith, 2000; Uijlenhoet and Stricker, 1999)로 구분할 수 있다. 초기 USLE에서는 로그함수를 사용했으나, 지수함수가 강우강도와 강우운동에너지 관계를 잘 묘사한다는 Kinnell (1981)의 연구결과를 인용하여 RUSLE에서는 Brown and Foster (1987)가 제시한 지수함수를 사용한다. 본 모형에서는 Van Dijk (2002)에 의해 제시된 지수함수를 사용하여 총 강우의 운동에너지를 산정하였다.

$$RE = 28.3 [1 - 0.52 \exp(-0.042 I_{ave})] \times R \quad (2)$$

여기서, RE 는 단위면적당 강우에너지(J/m^2)이고, I_{ave} 는 강우사상의 평균강우강도(mm/hr)이며, R 는 총강우량(mm)이다.

강우운동에너지지수 RI 는 $J/m/hr$ 의 단위로 강우운동에너지에 30분 최대강우강도 I_{30} (mm/hr)을 곱하여 다음 Eq. (3)과 같이 산정한다.

$$RI = RE \times I_{30} \quad (3)$$

이는 단일호우사상에 대한 확률강우 및 실제강우를 고려하여 강우인자 산정이 가능하다. 강우지수 산정을 위해 필요한 입력자료는 단일강우사상의 총강우량, 최대강우강도, 강우지속시간 등이다. 강우의 최대규모는 강우량 959.0 mm와 강우강도 113.5 mm/hr인 극한강우 범위를 포함하며, 토양침식 산정을 위한 강우운동에너지지수의 범위는 최대 2544.3 $J/m/hr$ 이다.

산지사면의 지표인자는 식생구조지수, 지표의 낙엽잔류물과 인공피복물, 그리고 잔뿌리량을 이용하여 산정가능하며, 산지교란 이후 지표관리 방법에 따른 식생회복과 뿌리양의 변화를 고려한다(Lee et al., 2004; Lee and Park, 2005). 식생구조는 일반적으로 교목층, 아교목층, 관목층, 초본층 및 낙엽층으로 구분하며 각 층별 식피율 자료는 지표인자 산정에 사용한다. 전체식피율 V_c (%)은 교목층, 아교목층, 관목층 및 초본층을 망라하여 살아 있는 식생이 지면을 덮는 정도를 의미한다. 모든 유형의 식피율은 지표면 위에 살아 있는 식생을 전체 면적에 수직으로 투영하였을 때 식생이 덮고 있는 정도를 백분율로 표시한 것이다. 식생구조지수 I_{vc} 는 각 식생층별 식피율을 합한 후 비율로 나타낸 것이다. 낙엽층을 고려한 식생구조지수 I_{vcd} 는 낙

엽층의 피복률을 포함하여 산정한 것이다.

$$I_{vc} = \sum V_{cl} / 100 \quad (4)$$

$$I_{vcd} = \sum V_{cdl} / 100 \quad (5)$$

위의 식생지수에서 V_{cl} 은 l 층의 식피율(%)을, V_{cdl} 은 낙엽층까지 포함한 l 층의 식피율(%)을 나타낸다.

잔뿌리와 같은 지표하 식생성분은 토양의 전단응력을 증가시키기 때문에 토양침식 감소에 크게 기여한다. Lee and Park (2005)은 뿌리직경 2 mm 이하의 잔뿌리 건조단위중량 W_R (g/m^2)이 지표식생의 구조지수 I_{vc} 와 매우 밀접한 관계를 가지고 있고, 지표식생 관리에 따라 다른 관계를 가짐을 제시하였다. 잔뿌리 최대건조단위중량 W_{Rmax} 은 선평사방의 초본식생이 극치일 때 800 (g/m^2)으로 가정하였다. Park et al. (2012)은 잔뿌리 최대건조중량에 대한 잔뿌리 건조중량에 비인 지표하 식생지수를 고려한 새로운 식생지수 I_{vcdr} 을 제시하였다.

$$I_{vcdr} = I_{vcd} + W_R / W_{Rmax} \quad (6)$$

지표와 지표하 식생 모두를 고려한 식생지수는 다른 지수들에 비해 토양침식량과의 상관계수가 가장 크게 나타났다. 식생지수 적용 범위는 0.06~3.30으로 RUSLE의 C 값 범위 0.0001~1.0보다 산정에 따른 오차 범위가 크지 않다는 장점을 갖는다.

토양의 침식성(erodibility)은 점토성분이 적고 실트와 모래성분이 많으면 증가한다. 점토입자는 점착 및 화학적인 결합력이 크기 때문이다(Yariv, 1976). 토양입경 0.063~0.250 mm 범위는 강우운동에너지에 의한 토양입자 박리(detachment)가 가장 용이하다(Poesen, 1981). SEMMA 개발 대상지의 토양은 0.05~2.0 mm 입경의 모래가 가장 큰 비율을 차지한다. 따라서 토양의 평균입경 증가는 모래성분 비율의 증가를 의미함으로 토양침식에 유리하게 작용한다. 그러나 입경 0.2 mm 이상의 토사입자는 직경이 증가함에 따라 한계전단속도가 증가한다(Savat, 1982). 특히 농경지의 토양 특성과 상이한 산지는 거칠고 굵은 자갈 입자를 많이 포함하고 있다(Luce, 1995). 전단 저항이 크고 미립토를 보호하는 역할을 하는 자갈 토양의 증가는 토양침식을 감소시킨다. 미립 토사에 대한 굵은 토사의 비를 토양비율지수 I_s 라 정의했다(Park et al., 2012).

$$I_s = S_r / (100 - S_r) \quad (7)$$

여기서, S_r 는 입경 2 mm 이하의 토양비율(%)이고, 100 -

S_r 은 입경 2mm 이상의 자갈토의 비율(%)이다. 토양에 포함된 유기물 함량은 토양의 응집안정(aggregate stability)에 영향을 미치기 때문에 유기물 함량의 증가는 토양 침식성을 감소시킨다(Voroney et al., 1981). 투수성 토양의 깊이를 나타내는 지표에서 모암까지의 거리인 토심은 산지에서 대체로 작지만, 지표 낙엽잔류물과 유기물 부엽토에 의해 증가한다. 토심의 증가는 침투와 지표하 흐름을 발달시키기 때문에 지표유출 감소에 따른 토사유출을 저감시킨다. 따라서 산지 토양의 침식성 및 수문학적 특성을 고려한 무차원 토양지수 S_o 를 사용한다.

$$S_o = (D_m \times I_s) / (O_m \times S_d) \quad (8)$$

여기서, D_m 는 지표토양의 평균입경(mm), I_s 는 무차원 토양비율지수, O_m 은 토양에 포함된 유기물의 비로 무차원이며, S_d 는 토심(mm)이다. 토양의 입도분포와 평균입경은 음건토양의 체분석을 통하여 구한다. 유기물함량은 토양시료를 음건하여 2mm 체로 친 다음 일차적으로 105°C에서 건조하고 이차적으로 600°C 건조로에서 4시간 이상 태워 유기물 함량을 구한다. 토심은 철봉을 이용하여 조사지점에서 5~6회 측정하여 평균값을 사용한다. 모형 개발 대상지의 토양 평균입경 범위는 0.69~3.29mm이며, 토성 분류에 따르면 거친 모래에 해당한다. 토성의 경우 점토(<0.002mm)는 $0.8 \pm 0.4\%$, 실트(0.002~0.05mm)는 $3.7 \pm 1.7\%$, 모래(0.05~2.0mm)는 $67.9 \pm 8.8\%$, 자갈(>2.0mm)는 $27.6 \pm 9.5\%$ 의 범위이다.

지형인자는 RUSLE모형에서 사용하는 사면길이와 경사인자를 그대로 사용한다. 지형인자 산정을 위해 사면경사 및 사면길이를 입력 자료로 사용한다. McCool et al. (1987, 1993)은 USLE 기본 자료를 광범위하게 평가하여 수정된 사면경사인자를 제시하였다.

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad ; \quad \sin \theta < 0.09 \quad (9)$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50 \quad ; \quad \sin \theta \geq 0.09 \quad (10)$$

여기서, θ 는 사면경사이며, 위의 식들은 최대 84% 경사의 교란지에서 측정된 자료를 바탕으로 한다.

사면길이 인자는 USLE의 기본 자료로부터 McCool et al. (1987, 1993)에 의해 제시된 식을 변형한 것이다.

$$L = [\lambda / 10.0]^m \quad (11)$$

여기서, λ 은 수평 투영 사면길이(m)이고, m 은 사면길이 지수로 세류와 세류간 침식 비율에 관계된다(Foster et al., 1977; McCool et al., 1989, 1993).

지형인자는 사면경사 및 길이인자의 곱으로 다음 Eq. (12)와 같다.

$$T_o = L \times S \quad (12)$$

산지사면에서의 토양침식은 사면 경사와 길이에 대해 반비례관계를 갖는다. 토양침식과 사면경사각 관계의 지수는 경사가 증가함에 따라 감소한다. 이것은 산지의 사면이 급경사일수록 자갈이나 돌이 지표를 덮고 있는 비율이 증가하여 침식 가능한 토양의 공급이 제한되기 때문이다. 또한 경사 증가는 지표유출보다 지표하 흐름을 증가시킨다(Heusch, 1970; Odemherho, 1986). 일반적으로 남향 사면의 경우 강한 햇빛에 의한 함수량 저하로 식생발달이 북향사면보다 저조하다. 식생과 뿌리층이 잘 발달한 북향 사면에서는 남향사면보다 상대적으로 토사유출량이 적으며, 급한 경사를 유지하는 것이 가능하다. 산지의 사면은 세류 발달이 용이하지 않으므로 사면길이가 증가할수록 토사유출량이 감소한다(Gilley et al., 1985). 식생과 낙엽층이 발달한 산지사면의 경우 흐름지체 및 저류공간이 많아서 침투량은 증가하고 지표유출은 줄어든다. 이러한 이유로 산지사면의 토양침식은 완경사의 경작지나 교란지의 사면길이·경사인자와는 상반되는 결과를 초래한다. 그러나 극한강우에 의해 산지사면에서 지표흐름이 크게 발생하는 경우는 세류흐름에 의한 토사유출이 증가하기 때문에 사면길이와 경사 증가에 따른 토사유출량도 증가한다(Park et al., 2012).

현장 토양침식은 가로길이 3~4m와 세로길이 3.3~20.7m인 평균면적 $26.0 \pm 12.5 \text{ m}^2$ 의 소규모 조사구에서 실행되었다. 사면경사의 범위는 28.7~78.1%로서 평균 $51.2 \pm 10.7\%$ 이었다. 위치는 상·중·하로 나누어 주로 능선 부인 상과 사면 중심부인 중에 분포하고, 방위 및 방향은 일률적이지 않았다.

3. 모형개선

3.1 개선방향

산지사면의 소규모 조사구를 대상으로 개발된 토양침식 모형 SEMMA를 광범위한 산지의 토양침식량 평가를 위해 활용하려면 모형을 개선할 필요성이 있다. 유역이나 넓은 지역에서는 토양침식 주요 매개변수를 측정하거나 추출하는 것이 용이하지 않기 때문이다.

토양침식 예측 평가를 위한 강우에너지지수는 실제 발생한 단일강우사상에 대한 경우뿐만 아니라 앞으로 발생할 확률강우량에 대해서도 산정 가능해야한다. National

Disaster Management Institute (2011)은 연평균 강우에너지 지수 산정결과를 관측소별 DB로 구축하고 있다. 단일호우사상에 대한 경우는 지역별 Huff누가곡선을 사용하여 지속기간별 강우량 분포 및 강우운동에너지를 산출하였다. 실제 강우량과 확률강우량 자료를 활용하여 SEMMA의 강우인자를 산정하는 것이 가능하다.

SEMMA의 식생인자인 지표와 지표하 식생 모두를 고려한 식생지수 I_{vcd} 를 광범위한 지역에서 직접 조사하기란 힘든 일이다. 그러나 위성영상의 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 활용은 광범위한 지역의 지표인자 산정을 가능케 한다. 최근에 고해상도 위성영상의 자료 취득이 용이해지면서 RUSLE의 지표인자 C값 산정을 위한 NDVI의 활용이 증가하고 있다(De Jong, 1994; Van der Knijff et al., 1999; De Asis and Omasa, 2007; Drake et al., 1997). 국내에서도 전국단위 월별 식생변화에 따른 MODIS NDVI 영상자료를 구축하였으며(Park et al., 2010), Kim et al. (2011)은 홍천지역을 대상으로 현장 식생피복도 V_c 와 위성영상으로 판독한 NDVI의 상관관계를 제시하였다. Lee and Won (2012)은 위성영상의 NDVI 픽셀 값을 식생여부에 따라 최소와 최대의 이분법적인 시각으로 해석하여 다음 Eq. (13)을 제시하였다.

$$V_c = 116.28 \times NDVI + 3.453 \quad (13)$$

식생피복도는 백분율(%) 단위이므로 모형의 지표인자로 지수화 시키기 위해 식생피복지수 I_c 를 제시한다.

$$I_c = V_c / 100 \quad (14)$$

RUSLE에서의 토양인자는 경작지 토양에 초점을 맞추고 있기 때문에 자갈에 대한 영향을 크게 고려하지 않는다. 그러나 SEMMA의 경우 산지토양을 대상으로 하기 때문에 암석조각(rock-fragment)에 대한 영향인자가 상대적으로 중요하다. 따라서 평균입경의 경우 산지토양의 자갈을 포함한 평균입경을 산정하도록 하며, 자갈비율 증가에 따라 토양침식은 감소하는 반비례 관계식을 사용한다. 토양통별 통과중량 백분율 자료는 Korean Soil Information System에서 용이하게 취득이 가능하다. 자갈토가 없는 경우 토양비율지수는 무한대로 증가하기 때문에 토양비율은 최대 95%로 제한한다. 표토의 토양입경 2mm 이상에 대해서는 자갈비율로 사용하고 그 이하에 대해서는 토양비율로 간주한다. 토양통별 물리적·화학적 특성을 제공하기 때문에 유기물 함량뿐만 아니라 표토부터 심토까지의 거리인 토심 정보도 쉽게 얻을 수 있다. 토심

에 대한 자료가 불명확한 경우 다음 Eq. (15) 같이 토심과 유기물 함량 관계식을 활용하여 토심을 산정할 수 있다.

$$Sd = 0.055 Om^{1.183} \quad (15)$$

지형인자는 SEMMA 기본 모형식의 사면길이·경사인자 산정식을 그대로 사용한다. 대상 유역의 DB로 구축된 DEM을 보정하는 과정(Filling)을 거친 후 흐름 8방향을 기반으로 격자흐름방향(Flow direction)을 추출한다. 격자흐름누적값(Flow accumulation)을 이용하여 하천망을 생성하면, 사용자가 유역출구점을 지정함으로써 유역경계가 형성된다(National Disaster Management Institute, 2011). 지형분석 과정에서 추출한 유역의 격자흐름방향과 격자흐름누적값들과 유역의 DEM으로부터 추출한 경사(도)와 경사(%)를 가지고 사면경사길이인자 산정에 활용한다. 사면경사인자는 SEMMA 기본식에서 사용한 McCool (1987)의 식을 그대로 사용한다. 사면길이인자는 평균사면길이 10m를 고려하는 SEMMA의 길이인자식에 상류기여면적을 고려한 Desmet and Govers (1996)에 의해 제시된 식을 조합한 것이다.

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij-in} + D^2)^{m+1} - A_{ij-in}^{m+1}}{D^{m+2} \times X_{ij}^m \times 10^m} \quad (16)$$

여기서, L_{ij} 는 격자에 대한 사면길이 인자, A_{ij-in} 는 격자에 유입되는 상류 기여면적(m^2)이며, D 는 격자 크기(m)이다. X_{ij} 는 흐름방향에 직교하는 등고선 길이 비율이고, m 은 사면길이 먹지수를 의미한다.

3.2 SEMMA 개선식

대규모 산지 유역에 SEMMA를 이용하여 토양침식을 정량적으로 평가하는데 있어 지표인자와 지형인자를 구하는 것이 까다롭고 번거로운 일이다. 따라서 이 인자들을 직접 측정하는 것보다 위성영상이나 수치지도의 DEM 자료 등을 활용하여 간접적으로 구하는 것이 실용성을 높이는 방안이다. 따라서 대상유역의 위성영상과 DEM을 이용하여 지표인자와 지형인자를 산정하는 방법과 실무적으로 사용자 편의를 도모하기 위하여, 자료 취득이 용이한 공공기관에서 제공하는 강우 및 토양 자료들을 활용하는 방안을 제안하였다. SEMMA에서 자료취득 및 산정이 복잡한 식생구조인자 대신 전체 식생피복지수를 고려한 개선 모형식은 다음과 같다.

$$q_s = \alpha RI^a I_c^b So^c To^d \quad (17)$$

1,099개의 현장 실측자료에 대한 다중회귀 분석에 따른

토양침식 산정식은 Table 2와 같다. 개선 모형의 지수와 계수에 대한 변화 그리고 값의 범위는 본래 모형의 값들과 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 모형의 상관계수 0.764와 모의효율계수 0.690은 본래 모형보다 다소 감소한다. 지형인자인 사면길이경사인자는 강우량 380 mm 이상의 경우를 제외하고 토양침식과 반비례 관계를 보였다. 집중 또는 극한 호우 시 지표유출수 발달로 토양침식 및 이송이 지배적인 영향을 받게 되면, 사면길이 및 경사인

자의 증가에 따라 토사유출이 가중하기 때문이다.

원래 SEMMA 모형식으로 산정한 토사유출량과 개선된 SEMMA-Ic의 모의결과를 실측 토사유출량과 비교하여 나타낸 것이 Fig. 1이다. 개선 SEMMA의 모의결과가 본래 모형보다 낮은 결정계수를 보인다. 관측값이 작으면 과대 예측하고 관측값이 크면 과소 예측하는 토양침식모형의 일반적인 경향(Nearing, 1998)이 원래모형뿐만 아니라 개선모형에서도 나타난다. Table 3은 본래 SEMMA와

Table 2. Model Equations of Revised SEMMA-Ic to Apply on Wide Area

Rainfall depth (mm)	Vegetation cover (%)	Multiple Regression Model	n	r	ENS
0<R≤80	0<Vc≤35	$q_s = 38.658 RI^{0.855} Ic^{-0.500} So^{0.607} To^{-1.631}$	76	0.705	0.196
	35<Vc≤70	$q_s = 0.419 RI^{0.590} Ic^{-3.157} So^{0.052} To^{-0.312}$	164	0.643	0.285
	70<Vc≤100	$q_s = 9.428 RI^{0.385} Ic^{-5.487} So^{0.237} To^{-1.793}$	216	0.580	0.233
80<R≤380	0<Vc≤35	$q_s = 2.223 RI^{1.225} Ic^{-0.761} So^{0.191} To^{-1.401}$	63	0.854	0.637
	35<Vc≤70	$q_s = 0.291 RI^{0.882} Ic^{-3.546} So^{0.009} To^{-0.742}$	188	0.632	0.414
	70<Vc≤100	$q_s = 2.559 RI^{0.459} Ic^{-6.373} So^{0.140} To^{-1.192}$	332	0.534	0.144
380<R	0<Vc≤70	$q_s = 0.0316 RI^{0.972} Ic^{-3.946} So^{0.587} To^{0.063}$	20	0.893	0.693
	70<Vc≤100	$q_s = 0.000248 RI^{1.189} Ic^{-11.52} So^{0.033} To^{1.316}$	40	0.773	0.109
Total		$q_s = \alpha RI^a Ic^b So^c To^d$	1,099	0.764	0.690

n is the data number

r is the correlation coefficient

ENS is the Nash-Sutcliffe simulation efficiency

Fig. 1. Comparison of Sediment Yields Simulated by Original SEMMA (Park et al., 2012) and Revised SEMMA-Ic (n=1099)

Table 3. Comparison of Statistical Analysis for Parameters of Original and Revised Models

Rainfall depth (mm)	Vegetation cover (%)	SEMMA				SEMMA-Ic			
		<i>RI</i>	<i>Ivcd</i>	<i>So</i>	<i>To</i>	<i>RI</i>	<i>Ic</i>	<i>So</i>	<i>To</i>
0<R≤80	0<Vc≤35	0.652***	0.154	0.227*	-0.202	0.652***	0.189	0.227*	-0.202
	35<Vc≤70	0.494***	-0.405***	0.269***	-0.242**	0.494***	-0.400***	0.269***	-0.242**
	70<Vc≤100	0.221**	-0.307***	0.302***	-0.309***	0.221**	-0.442***	0.302***	-0.309***
80<R≤380	0<Vc≤35	0.776***	0.031	0.107	-0.221	0.776***	0.056	0.107	-0.221
	35<Vc≤70	0.448***	-0.517***	0.128	-0.212**	0.448***	-0.416***	0.128	-0.212**
	70<Vc≤100	0.258***	-0.300***	0.247***	-0.231***	0.258***	-0.431***	0.247***	-0.231***
380<R	0<Vc≤70	0.574***	-0.737***	0.365	-0.151	0.574***	-0.789***	0.365	-0.151
	70<Vc≤100	0.519***	-0.442***	0.226	0.037	0.430***	-0.556***	0.380*	0.084
Total		0.409***	-0.489***	0.355***	-0.220***	0.406***	-0.456***	0.361***	-0.220***

*: Significant effect ($p<0.05$), **: High significant effect ($p<0.01$), ***: Very high significant effect ($p<0.001$)

개선 SEMMA-Ic의 강우규모와 식생피복별 모형식의 주요 인자에 대한 통계적 유의성을 검토한 결과이다. 통계 분석결과 강우 및 식생인자에 대한 유의성이 토양 또는 지형인자보다 높은 것으로 나타났다. 식생피복이 높은 경우 강우인자의 유의성과 상관계수가 낮아진다. 본래 SEMMA의 식생인자는 식생피복 범위 35~70%에서만 상대적으로 상관계수가 컸지만, 개선 SEMMA의 경우는 식생피복 70% 이상에서도 상관계수가 양호한 것으로 파악되었다. 강우량이 380 mm 이하이고 식생피복율이 큰 경우 강우인자의 영향이 감소하는 반면에 토양 및 지형인자의 유의성이 상대적으로 증가하였다. 종합적인 자료에 대한 본래 SEMMA와 개선 SEMMA의 유의성 결과 및 상관계수는 큰 변화가 없었지만, 지표인자에 대한 상관계수는 다소 감소하였다.

3.3 모형적용

산지사면과 유역의 토양침식을 정량적으로 모의하기 위한 모형을 개발한 후 모형검증이 이루어져야 한다.

개선모형 적용을 위한 유역은 산불발생 이후 벌목, 조림 및 토사유출방지대책이 시행된 곳으로 산불뿐만 아니라 인위적인 지표교란이 발생한 지역이다. 본 유역은 산지 지표교란 지역에 대한 시간경과에 따른 토사유출 특성 변화를 파악하고자 국립방재연구소에서 운영하는 시험유역이다. 유역의 지형 및 토양특성에 대한 자료는 Table 4에 제시한 것과 같다. 시험유역은 Fig. 2와 같은 지형적인 특성을 가지고 있으며, 유역면적은 6,820 m², 유역길이는 126 m이고, 유역경사는 30.2%인 소유역이다(Shin et al.,

Table 4. Characteristics of Topography and Soil for the Experimental Watershed (2002 to 2004)

Characteristic	Unit	Values
Area	(m ²)	6,820
Basin length	(m)	126
Steepness	(%)	30.2
Soil depth	(cm)	39.0
Bulk density	(g/cm ³)	0.92
Organic matter content	(%)	4.95
Soil mean diameter	(mm)	0.89
Gravel	(%)	20.3
Sand	(%)	70.9
Silt and clay	(%)	8.8
Vegetation coverage	(%)	52.3~77.2

2013). 토심, 토양가비중, 유기물 함량, 평균입경 및 토양 성분비 등의 자료는 연구기간동안의 유역 전체 평균치를 나타낸 것이다. 식생피복도는 조사기간 동안의 최소 및 최대평균치의 범위를 나타낸 것이다.

유역에서 발생한 토사유출량과 SEMMA-Ic에 의해 모의한 결과를 비교 검토하기 위해 2001년부터 2004년까지 17개 강우사상에 대해 고려했다. 최대규모의 강우사상은 2003년 9월 7일에 발생한 강우량 392.0 mm이고, 1시간 최대강우강도는 32 mm/hr인 경우로 토사유출량이 단위 ha당 2톤이 발생하였다. 유역에서 실측한 토사유출량과

Fig. 2. Location and Topographical Map of Experimental Watershed (Shin et al., 2013)

Fig. 3 The Relationship between Measured and Simulated Sediment Yields by Revised SEMMA-Ic from Experimental Watersheds

SEMMA-Ic의 모의 결과를 비교하기 위해 Fig. 3과 같이 나타내었다. 실측치와 예측치 사이의 상관계수는 0.892이고, 모의효율계수 0.786으로 상당히 양호한 모의결과를 보였다. 실측 토사유출량에 대한 총 모의 토사유출량의 비율은 68.6%로 실제보다 적게 예측하였다. 특히 큰 강우에 대해 모형이 과소평가하는 결과를 보였다. 이는 큰 호우시 유역의 수로 발달에 의한 침식이 증가하기 때문이다. SEMMA는 사면에서 발생하는 토사유출량을 예측하는 모형이므로 유역에 적용할 경우 수로발달에 의한 토사유출을 고려해야 한다. 규모가 작은 강우에 대해서는 모형이 과대평가하는 경향을 보였다. 이는 산지지형의 지표상태가 식생의 줄기, 뿌리 및 낙엽층 발달에 의해 침식된 토사의 이동이 제한되기 때문으로 판단된다. 사면과 유역의 토사유출량 산정을 위해 RUSLE 또는 WEPP 적용 연구에 따르면 WEPP은 실측값에 근접하게 또는 저평가하는 반면, RUSLE는 과대평가하는 경향이 있다(Klik and Zartl, 2001; Bhuyan, 2002; Kim et al., 2007). 농경지나 개발지와 같은 강교란지를 대상으로 개발한 RUSLE의 경우 지표관리인자 C값의 과대평가와 토사유출률(SDR)의 저평가는 유역으로부터의 토사유출량을 과대 산정하는 결과를 초래한다. 물리기반의 수문 모형인 WEPP은 유역 유출수가 저평가되는 경우 수로침식을 모의하지 않기 때문에 과소평가할 우려가 있다. SEMMA는 경험적인 모형이기는 하나, 유역 적용 시에 RUSLE처럼 토사유출률(SDR)을 고려하기 보다는 수로침식을 고려한 모의기법을 활용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

우리나라 산지사면에서 발생하는 토양침식을 모의하기 위해 개발한 SEMMA를 대규모 산지유역에 적용 가능하도록 모형을 개선하였다. 사용자 편의를 위하여 주요 매개변수들을 용이하게 취득하는 방법을 제시하였다. 용이하게 취득한 매개변수들을 활용하여 광범위한 지역에 대한 토양침식위험 및 토사유출을 모의하기 위해 SEMMA의 대표적인 인자들을 대체시켰다. 강우와 토양인자의 경우 실체측정 자료 부재 시 공용자료의 활용방안을 제안했으며, 지형인자의 경우 대규모 유역의 DEM를 활용하여 대규모 유역에서의 사면길이인자를 산정하는 방법에 대해 제시하였다. 특히 식생구조지수인 지표인자는 광범위한 지역에서 실측하여 평가하는 것이 어렵기 때문에, 위성영상의 NDVI지수와 상관관계가 높은 식생피복지수로 교체하였다. 식생피복지수를 지표인자로 하고, 강우, 토양, 지형인자 등과 토양침식량과의 관계를 이용하여 다중회귀분석을 수행하였고, 강우와 식생피복 범위별로 세분화된 새로운 SEMMA-Ic 모형을 제시하였다. 대규모 유역 토양침식 평가를 위해 개선된 SEMMA-Ic는 본래의 SEMMA에 비해 상관계수 및 모의효율계수가 감소하였다. 그러나 주요인자에 대한 유의성 검토에서는 양호한 것으로 평가되었다. 개선 모형을 시험유역에 적용하여 모의한 결과와 실측 토사유출량과 비교 검토하였다. 실측치가 큰 경우 모형이 과소 예측하는 경향을 보였으나, 전반적인 모의결과의 상관계수와 모의효율계수는 각각 0.892와 0.786으로 높게 평가되었다. 개선모형을 대규모 유역

적용 시 수로 퇴적 및 침식에 따른 토사유출량 변화를 고려한다면, 모형의 활용도가 더욱 높아질 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산지토양침식에 관련한 국립방재연구원의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 진심으로 감사의 뜻을 표합니다.

References

- Bhuyan, S.J., Kalia, P.K., Janssen K.A., and Barnes, P.L. (2002). "Soil loss Predictions with three erosion simulation models." *Environmental Modeling & Software*, Vol. 17, pp. 137-146.
- Brandt, C.J. (1990). "Simulation of the size distribution and erosivity of raindrops and throughfall drops." *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 15, pp. 687-698.
- Brown, L.C., and Foster, G.R. (1987). "Storm erosivity using idealized intensity distributions." *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 30, pp. 379-386.
- Choi, J.W., Shin, M.H., Cheon, S.U., Shin, D.S., Lee, S.J., Moon, S.J., Ryu, J.C., and Lim, K.J. (2011). "Evaluation of runoff prediction from a coniferous forest watersheds and runoff estimation under various cover degree scenarios using GeoWEPP watershed model." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 27, No. 4, pp. 425-432.
- Coutinho, M.A., and Tomas, P.P. (1995). "Characterization of raindrop size distributions at the Vale Formoso Experimental Erosion Center." *Catena*, Vol. 25, pp. 187-197.
- De Asis, A.M. and Omasa, K. (2007). "Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear spectral mixture analysis of landsat ETM data." *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 62, pp. 309-324.
- De Jong, S.M. (1994). *Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a mediterranean Environment*, Ph.D. Thesis, Utrecht University, Utrecht.
- Desmet, P.J.J., and Govers, G.G. (1996). "A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 51, No. 5, pp. 427-433.
- Drake, N.A., Zhang, X., Berkhout, E., Bonifacio, R., Grimes, D., Wainwright, J., and Mulligan, M. (1997). Modeling soil erosion at global and regional scales using remote sensing and GIS techniques, *Spatial Analysis for Remote Sensing and GIS*, Edited by P. Atkinson, pp. 241-261.
- Elwell, H.A. (1978). "Modelling soil losses in Southern Africa." *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 117-127.
- Flanagan, D.C., and Nearing, M.A. (eds)(1995). *USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP) version 95.7, hillslope profile and watershed model documentation*. National Soil Erosion Research Laboratory Report 10. US Department of Agriculture-Agricultural Search Service, West Lafayette.
- Foster, G.R., Meyer, L.D., and Onstad, D.A. (1977). "A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates." *Transaction of the American Society of Agricultural Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 683-687.
- Gilley, J.E., Woolhiser, D.A., and McWhorter, D.B. (1985). "Interrill soil erosion-Part II: Testing and use of model equations." *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 28, pp. 154-159.
- Heusch, B. (1970). "L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental." *Annales de Recherches Forestières de Maroc*, Vol. 12, pp. 9-176.
- Hudson, N.W. (1965). *The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion*. MSc, Thesis, University of Cape Town, South Africa.
- Jayawardena, A.W., and Rezaur, R.B. (2000). "Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong." *Hydrol. Process*, Vol. 14, pp. 1069-1082.
- Kim, G.H., Lee, J.S., Jung, J.H., and Won, S.Y. (2011). "A comparative analysis of field surveying vegetation data and NDVI from KOMPSAT-2 satellite imagery." *Journal of Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 4, pp. 405-411.
- Kim, M.S., Kim, J.K., and Yang, D.Y. (2007). "Application and comparison of GeoWEPP model and USLE

- model to natural small catchment-A case study in Danwol-dong, Icheon-si." *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 40, No. 1, pp. 103-113.
- Kinnell, P.I.A. (1981). "Rainfall intensity kinetic-energy relationships for soil loss prediction." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 45, No. 1, pp. 153-155.
- Klik, A., and Zartl, A.S. (2001). "Comparison of Soil Erosion Simulations Using WEPP and RUSLE with Field Measurements." *Soil Erosion Research for the 21st Century*, ASAE.701P0007, pp. 350-353.
- Korean Soil Information System. www.soil.rda.go.kr
- Lee, J.S. (2007). A study on characteristic analysis of soil erosion models in Korea and foreign country. Report No. NIDP-PR-2007-05-01, National Institute for Disaster Prevention, pp. 145-167.
- Lee, J.S., and Won, J.Y. (2012) "Suggestion of cover-management factor equation for mountain area in RUSLE." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 79-85.
- Lee, K.S., and Park, S.D. (2005). "Relationship between the aboveground vegetation structure and fine roots of the topsoil in the burnt forest areas, Korea." *Journal of Ecology Field Biology*, Vol. 28, No. 3, pp. 149-156.
- Lee, K.S., Choung, Y., Kim, S.C., Shin, S.S., Ro, C.H., and Park, S.D. (2004). "Development of vegetation structure after forest fire in the east coastal region." *Korea. Journal of Ecology Field Biology*, Vol. 27, No. 2, pp. 99-106.
- Lim, K.J., Saggong, M., Engel, B.A., Tang, Z., Choi, J., and Kim, K.S. (2005). "GIS-based sediment assessment tool." *CATENA*, Vol. 64, pp. 61-80.
- Luce, C.H. (1995). "Forests and wetlands." In: Ward, A.D., Elliot, W.J. (Eds.), *Environmental Hydrology*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 253-283.
- McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R., Mutchler, C.K., and Meyer, L.D. (1987). "Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation." *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, Vol. 30, No. 5, pp. 1387-1396.
- McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R., Mutchler, C.K., and Meyer, L.D. (1989). "Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation." *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, Vol. 32, No. 5, pp. 1571-1576.
- McCool, D.K., Foster, G.R., and Weesies, G.A. (1993). "Slope length and steepness factor." In *Predicting Soil Erosion by Water-A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (Renard et al., eds.), Chap. 4, USDA-ARS Special Publication.
- Moon, J.P., Kim, T.C., Lee, S.H., Kwon, J.K., Lee, S.J., and Lim, K.J. (2010). "Soil erosion reduction plan for watershed with sloping fields of highland agriculture by using GEOWEPP model." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 52, No. 6, pp. 135-144.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles." *J. Hydrol.*, Vol. 10, pp. 282-290.
- National Disaster Management Institute (2011). *Soil erosion analysis system based on Web GIS*. Publication No. 11-1311526-000015-14, pp. 29-32.
- Nearing, M.A. (1998). "Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses." *CATENA*, Vol. 32, pp. 15-22.
- Odemerho, F.O. (1986). "Variation in erosion-slope relationship on cut slopes along a tropical highway." *Singapore Journal of Tropical Geography*, Vol. 7, pp. 98-107.
- Oh, D.K., Kim, J.H., and Shim, S.B. (2002). "Analysis of watershed soil loss using GIS (II)." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 4B, pp. 421-428.
- Park, S.D. (2008). "Estimation of WEPP's parameters in burnt mountains." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 6, pp. 565-574.
- Park, S.D., and Shin, S.S. (2011). "Applying evaluation of soil erosion models for burnt hillslopes-RUSLE, WEPP, and SEMMA." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 3B, pp. 59-71.
- Park, S.D., Lee, K.S. Kim, G.H., Shin, S.S., Chae, K.S., Cho, J.W., Kim, M.K., Kwag, T.B., and Hong, S.C. (2006). *An estimation plan of the parameters for the soil erosion model considering regional characteristic*. Publication No. 11-1660080-000017-01, National Institute for Disaster Prevention, pp. 4-26.
- Park, S.D., Lee, K.S., and Shin, S.S. (2012). "Statistical Soil Erosion Model for Burnt Mountain Areas in Korea-RUSLE Approach." *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 292-304.

- Park, S.D., Lee, K.S., Kim, K.H., Shon, G.I., Lee, H.S., Kim, M.M., Kwon, H.H., and Shin, S.S. (2010). *Operation of the experimental watersheds for sediment and deriving vegetation parameters in national mountain areas*. National Institute for Disaster Prevention, pp. 311-366.
- Park, S.D., Lee, K.S., Shin, S.S., Chae, K.S., Kim, T.G., and Won, D.K. (2005a). *A basic study on the development of the soil erosion model in the mountain area (SEMMA)*. Publication No. 11-1660030-00035-01, National Institute for Disaster Prevention, pp. 55-64.
- Park, S.D., Shin, S.S., and Lee, K.S. (2005b). "Sensitivity of runoff and soil erosion in the burnt mountains." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 1, pp. 59-71.
- Poesen, J. (1981). "Rainwash experiments on the erodibility of loose sediments." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 6, pp. 285-307.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yoder, D.C. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Department of Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-Agricultural Search Service, Washington DC.
- Renschler, C.S. (2003). "Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach." *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 1005-1017.
- Savat, J. (1982). "Common an uncommon selectivity in the process of fluid transportation : field observations and laboratory experiments on bare surfaces." *CATENA Supplement*, Vol. 1, pp. 139-60.
- Shin, S.S. (2002). *A study on the sediment runoff of mountain watersheds*. MSc, Thesis, Kangnung National University, Gangneung, Gangwon, Republic of Korea.
- Shin, S.S., Park, S.D., and Lee, K.S. (2013). "Sediment and hydrological response to vegetation recovery following wildfire on hillslope and the hollow of a small watershed." *Journal of Hydrology*, Vol. 499, pp. 154-166.
- Shin, S.S., Park, S.D., Cho, J.W., and Lee, K.S. (2008). "Effects of vegetation recovery for surface runoff and soil erosion in burned mountains, Yangyang." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 4B, pp. 393-403.
- Steiner, M., and Smith, J.A. (2000). "Reflectivity rain rate and kinetic energy flux relationships based on raindrop spectra." *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 39, pp. 1923-1940.
- Uijlenhoet, R., and Stricker, J.N.M. (1999). "A consistent rainfall parameterization based on the exponential raindrop size distribution." *J. Hydrol.*, Vol. 218, pp. 101-127.
- Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., and Montanarella, L. (1999). *Soil Erosion Risk in Italy*, EUR 19022 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Van Dijk, A.I.J.M., Bruijnzeel, L.A., and Rosewell, C.J. (2002). "Rainfall intensity-Kinetic energy relationships." *Journal of Hydrology, Elsevier Science B.V.*, pp. 1-23.
- Voroney R.P., van Veen, J.A., and Paul, E.A. (1981). "Organic carbon dynamics in grassland soils. II. Model validation and simulation of the long-term effects of cultivation and rainfall erosion." *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 61, No. 211-224.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1958). "Rainfall energy and its relationship to soil loss." *Trans. AGU* Vol. 39, pp. 285-291.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1965). *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains*. Agriculture hand book 282. US Department of Agriculture, Washington DC
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning*. Agriculture Handbook 537. US Department of Agriculture-Science and Education Administration, Washington DC.
- Yariv, S. (1976). "Comments on the mechanism of soil detachment by rainfall." *Geoderma*, Vol. 15, pp. 393-399.

논문번호: 13-048	접수: 2013.05.14
수정일자: 2013.06.26	심사완료: 2013.06.26