

산불사면에 대한 토양침식모형의 적용 평가 - RUSLE, WEPP, SEMMA

Applying Evaluation of Soil Erosion Models for Burnt Hillslopes - RUSLE, WEPP and SEMMA

박상덕* · 신승숙**

Park, Sang Deog · Shin, Seung Sook

Abstract

Applicability of three soil erosion models for burnt hillslopes was evaluated. The models were estimated with the data from plots established after tremendous wildfire occurred in the east coastal region. Soil erosion and surface runoff were simulated by the Water Erosion Prediction Project (WEPP) and the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) of application mode for disturbed forest areas and the Soil Erosion Model for Mountain Areas (SEMMA) developed for burnt hillslopes. Simulated sediment yield and surface runoff were compared with the measured those. In maximum value of sediment yield, three models was under-predicted and RUSLE and WEPP had difference of over two times. SEMMA showed the best model response coefficient, determination coefficient and the model efficiency. In application of models to the soil erosion according to the elapsed year after wildfire, all models were underestimated in initial stage disturbed by wildfire. Evaluation of models in this burnt hillslopes was shown the tends to under-predict soil erosion for larger measured values. Although a lot of sediment can be generated in small rainfall event as fine-grained soil of the high water repellency was exposed excessively right after wildfire, this under-prediction was shown that those models have a limit to estimate the weighted factors by wildfire.

Keywords : SEMMA, WEPP, RUSLE, soil erosion, wildfire, model response coefficient

요 지

산불 사면의 토양침식에 대하여 세 개의 토양침식 모형의 적용성을 평가하였다. 영동지역에서 발생한 2000년 대규모 산불 지역 조사구에서 조사된 자료가 분석에 사용되었다. 본 연구에서 채택한 토양침식 모형은 경험적 모형인 RUSLE, 물리적 모형인 WEPP의 산림지역 적용 모드, 산불사면을 대상으로 개발된 SEMMA이다. 이들 모형으로 산정한 지표유출량과 토양 침식량을 관측치와 비교하였다. 적용결과 모든 모형들은 토사유출량의 최대치를 저평가 하였으며, RUSLE와 WEPP은 2배 이상의 차이를 보였다. SEMMA는 가장 좋은 모형반응계수, 결정계수, 모의효율을 나타내었다. 산불발생 경과연수에 따른 모형 적용 평가에서 산불에 의해 교란된 초기 단계에서는 모든 모형이 저평가하였다. 산불 사면에 대한 토양침식 모의 결과는 관측치가 크면 과소 예측하는 경향을 보였다. 산불직후 반발수력이 커진 고온습자 토양의 과대 노출로 작은 규모의 강우에도 많은 양의 토사유출이 발생할 수 있음에도 불구하고 이와 같이 과소 예측하는 것은 이들 모형이 산불의 영향으로 가중 되는 토양침식 영향인자를 반영하는데 한계를 갖고 있기 때문으로 보인다.

핵심용어 : SEMMA, WEPP, RUSLE, 토양침식, 산불, 모형반응계수

1. 서 론

토양침식의 위험도를 평가하고 침식조절방법을 결정하기 위해서 토양침식을 정량적으로 산정하는 것이 필요하다. 토양침식 및 토사유출 예측모형은 토사유출 영향인자들을 측정 한 자료에 근거하여 만든 경험적인 모형과 침식의 역학적 과정을 모사한 물리적 산정모형으로 크게 구분한다. 1970년 대 중반 이후 개발된 다양한 토양침식 모형의 구조는 농업

지역의 유출 및 토양침식에 작물의 재배방법과 윤작이 미치는 영향을 예측하기 위한 것이 지배적이었다. CREAMS (Knisel, 1980), ANSWERS(Beasley *et al.*, 1980), AGNPS (Young *et al.*, 1987), EPIC(Sharpley and Williams 1990a, b) 그리고 OPUS(Ferreira and Smith 1992; Smith 1992)가 그 대표적인 모형들이라 할 수 있다. 이들의 주요한 침식 성분은 USLE(Wischmeier and Smith 1965, 1978)의 기본 개념을 따른다. 침식능, 토성, 사면길이 및 경사, 지표

*정회원 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (E-mail : sdpark@gwnu.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 방재연구소 전임연구원 (E-mail : cewsook@hanmail.net)

상태, 관리인자로 이루어진 USLE는 지속적인 연구개발과 보완을 통해서 Renard 등(1997)에 의해 RUSLE 모형으로 개선되었다. 현재 RUSLE는 교란된 산림지역의 토양침식 예측에 사용될 수 있다. WEPP(Water Erosion Prediction Project) 모형은 소규모 사면에서부터 중소규모 유역에 이르는 지역에서 정량적인 토양침식량 예측을 위해 미국 농무성이 1995년에 개발한 물리기반 수문학적 토양침식 모형이다. WEPP은 경험적 모형인 USLE를 대체하기 위해서 개발되었으나 신뢰할 만한 결과를 주는 환경조건인지 여부가 확인될 때까지는 적용에 주의해야 한다(Nearing, 1998). 이 모형은 경작지, 방목지, 그리고 산림지에서 연속강우와 단일호우 조건에 대해 토양침식을 모의할 수 있다(Flanagan and Nearing, 1995). 우리나라에서도 산불지역 산지사면을 대상으로 단일강우 조건에 대한 토양침식 예측모형인 SEMMA(이규송 등, 2004a; 박상덕 등, 2005a, 박상덕 등, 2006)가 개발되었으나, 전 세계적으로 이용되고 있는 RUSLE나 WEPP과 같은 보편적 활용성을 갖기 위해서는 다양한 검증과 지속적인 개선이 필요하다.

모형의 적용성 평가를 위하여 RUSLE와 WEPP에 의한 계산 토사유출량과 실측 토사유출량을 비교한 연구사례는 특히 많다. Klik 와 Zartl(2001)은 오스트레일리아의 3개 완경사 조사구를 대상으로 WEPP과 RUSLE를 적용한 연구에서 RUSLE에 비해 WEPP이 각 강우사상에 대하여 비교적 실측값에 접근함을 보였다. 또한 장기간 토양침식에서는 WEPP이 실측값에 비해 과소 예측한 반면 RUSLE는 86~148% 정도로 과대 예측하였다. Bhuyan 등(2002)은 경작지에 대한 토사유출량 산정에 WEPP, ANSWERS, EPIC 모형을 적용하고 비교분석하였다. 각 모형에 의한 장기간의 평균토양손실 추정치를 보면, WEPP 모형에 의한 예측결과가 실측치에 비교적 근접한 범위 내에 있음을 확인하였다. Grønsten(2006)은 노르웨이 남동부에서 WEPP Hillslope 모형을 이용하여 지표유출을 예측한 결과 일반적으로 겨울에는 실측보다 더 작고 여름에는 훨씬 더 많은 지표유출을 모의하는 것을 확인하였다. 또한 그는 WEPP에서 추천하는 토양침식 매개변수 공식이 이 지역의 토양에 적합하지 않다는 것을 확인하였다. 경작지를 대상으로 모형의 적용성을 평가한 경우는 많으나, 산불지역을 대상으로 토양침식 예측모형을 적용한 사례는 적다. 신승숙(2002)은 산불지역 토사유출 연구에서 RUSLE는 산불지역에서 실측 토사유출량보다 과대 예측하므로 토사유출량 예측에 사용되기 위해서는 일정한 보정이 필요하다는 것을 제시하였다. 마수봉(2005)은 산불지역 산지사면의 소규모 조사구에서 WEPP에 의한 토양침식 예측이 실측에 근사적으로 접근하지만 산불초기에는 실측보다 과소평가하는 것을 확인하였다.

산불은 토양의 반발수성(hydrophobicity)을 증가시켜, 침투능 저하와 지표유출 가중을 통하여 토양침식을 증가시키는 주요 원인으로 작용한다(Scott and van Wyke, 1990; Inbar et al., 1997; Andreu et al., 2001; Wohlgemuth et al., 2001; Doerr et al., 2006; Onda et al., 2008). 이러한 이유로 산불 이후 초기 강우에 의한 토양침식량은 증가한다. 산불에 의한 반발수성 토양은 지표 토양체로부터 침식 및 유출되며, 식생 회복과 지표잔류물에 의해 토양 반발수성이 미치는 수문학

적 영향은 점차로 감소한다(신승숙 등, 2008). 산불지역 식생회복은 산불강도와 산불 이후 강우빈도에 크게 영향을 받는다(Doerr et al., 2006). 따라서 산불지역의 토양침식 모형 개발에 있어서 산불초기의 토양 및 지표 특성과 산불이후의 지표토양 및 식생의 변화가 고려되어야 한다.

본 연구에서는 경험적 모형인 RUSLE, 물리적 산정 모형인 WEPP, 그리고 우리나라 산불지역을 대상으로 개발한 SEMMA를 산불 산지사면에 적용하고 실측 토양침식량과 비교 분석하여 이들 모형의 적용성을 파악함으로써 궁극적으로 SEMMA 모형의 보완 및 개선에 기여하고자 한다.

2. 토양침식 모형 및 분석기법

2.1 RUSLE

미국의 ARS(Agricultural Research Service)는 1954년에 전국적인 토양침식 연구자료를 통합관리하기 위하여 전국 유출 및 토양침식 센터를 설립하였다. 유출 및 토양침식을 측정하기 위한 10,000여개 이상의 조사구로부터 수집된 기본적인 자료를 바탕으로 Wischmeier와 Smith를 비롯한 많은 연구자들은 1965년에 USLE(Universal Soil Loss Equation)를 개발하였다. 기존 시험지역 이외의 목장이나 산림지역 등과 같이 적용범위를 확대하기 위해 강우인자 수정, 계절적인 변화를 고려한 토양인자 개발, 사면길이 및 경사인자 수정 및 지표관리 인자에 대한 상세한 접근법으로 Renard 등(1997)은 USLE를 개선한 RUSLE(Revised Universal Soil Erosion)를 식 (1)과 같이 제시하였다.

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

여기서 A 는 단위면적당 평균 토양침식량이고, R 은 강우에너지인자, K 는 토양침식인자, L 은 사면길이인자, S 는 사면경사인자, C 는 피복인자, P 는 토양보존대책인자이다. R 은 EI_{30} 지수로 알려진 강우에너지와 30분 최대강우강도의 곱으로 연강우 및 단일호우에 대해 산정가능하다. 토양의 침식성 인자 K 는 5가지 토양 및 토양특성인자를 이용하며, 건설 및 광산 지역에 대한 적용 범위가 확대되었다. 사면길이-경사 인자인 LS 는 사면경사 각에 따라 사면길이의 형상에 따라 산정 방법이 나뉘지며, 불규칙한 사면에 대해 몇 개의 구간으로 분할하여 각 구간별 토양침식량을 산정할 수 있다. C 는 종속인자 기법을 이용하며, 인자들을 크게 지상, 지표, 지하인자의 세 부류로 나누어 각각의 인자들을 곱하여 산정한다. 토양보존대책인자 P 는 종속인자를 도입하여, 등고선 대책인자, 대상채배 대책인자, 단구효과대책인자를 고려한다. 본 모형은 농경지, 건설현장, 광산지역 및 산림지역에 적용가능하며, 사면의 토양손실량을 평가하는 모형이므로 유역평가 시에는 토사유출률(sediment delivery ratio)을 고려해야 한다.

2.2 WEPP

WEPP(Water Erosion Prediction Project)은 사면에서 중소규모 유역에 이르기까지 토양침식량을 정량적으로 예측하기 위하여 미국 농무성이 1995년에 개발한 물리기반 수문학적 토양침식 모형이다. WEPP의 구성은 일별 기후를 모의하기 위한 추계학적인 기상자료 모의발생, 수정 Green-Ampt

침투식을 토대로 한 침투 및 유출, 토양과 물의 상호작용, 식생 생장, 식생잔류물분해, 배수 등의 요소로 구성되어 있다. 입력자료는 식생조건과 관리방법, 사면, 토양, 기후의 4가지 범주로 분류된다. 또한 모형은 경작지와 방목지, 연속강우와 단일호우 조건에 대해 적용할 수 있다(Flanagan and Nearing, 1995). 토사유출의 물리적 산정 모형은 다음 연속 방정식 (2)를 사용하고 있다.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - e(x, t) = q_x(x, t) \quad (2)$$

여기서 A 는 유수 단면적, C 는 유사농도, e 는 순 이송을 또는 침식율, q_x 는 유수 단위 길이 당 유사의 유입량이다. 두 드러진 특징은 전체 사면이나 사면의 각 지점에 대한 토양 손실의 시·공간적인 분포를 추정할 수 있다는 것이다. 사면에 모형 적용 시 고려해야 할 사항은 세류 및 세류간 침식, 토양의 운반과 퇴적, 강우의 침투, 토양의 압밀, 토양입자의 박리와 강우침투에 대한 식생의 잔존물과 천개식물의 영향 등을 포함한다. 그러므로 이 모형은 지형, 표면의 조도, 토양특성, 식생의 시공간적 변화에 적합한 토양침식 예측모형으로서 적용 범위가 광범위하여 산지에도 적용이 가능하다.

2.3 SEMMA

우리나라 산지사면의 토양침식 예측 모형인 SEMMA(Soil Erosion Model for Mountain Area)는 토양침식에 영향을 미치는 주요인자인 강우인자, 지표인자, 토양인자, 지형인자들과 상관분석 및 다중회귀분석을 통한 경험식으로 식 (3)과 같다(이규송 등, 2004a).

$$q_s = \alpha R^a I_{vcr}^b S_f^c L S^d \quad (3)$$

여기서 α 는 상수이고, a, b, c, d 는 지수이며, 강우인자인 R 는 강우에너지지수로서 강우에너지와 30분 최대강우강도의 곱이다. 지표인자인 I_{vcr} 는 지하부를 고려한 식생피복도지수이며, 토양인자 S_f 는 토양구조지수, 지형인자 LS 는 지형인자 지수이다. SEMMA는 이러한 인자들로 구성된 토양침식 회귀모형식으로 지표유출량 산정식도 이와 유사한 형태이다. 토양침식은 지표면 유출과 빗물퇴김에 의한 침식과정과 세류에 의한 토사의 이송과정을 포괄한다. 산불지역의 토양침식은 특히 강우규모와 식생분포에 지배적인 영향을 받는다. 박상덕 등(2005a)은 토양침식이 적은 경우 관측치보다 과대평가하고 많은 경우 과소평가하는 한계를 보완하기 위하여, 토양침식과정을 고려한 강우량 범위와 지표식생피복 범위에 따라 세분하여 회귀모형식을 제시하였다. 모형의 신뢰도를 높이기 위하여 강우량 및 식생피복도 범위를 조정하고 기본자료를 추가하여 SEMMA를 수정하고 토양침식량 산정 프로그램을 개발하였다(박상덕 등, 2006). 이 모형의 적용 범위는 산지로 제한되며 농경지나 개발지역 등에 대한 적용성은 평가되지 않았다.

2.4 주요 매개변수

산지사면에 적용하기 위한 SEMMA, RUSLE, WEPP의 각 매개변수들은 서로 같거나 상이하다. SEMMA는 강우인자, 식생인자, 토양인자, 지형인자들을 산정하는 과정과 최종적으로 강우량과 식생피복도를 활용하여 토양침식량을 구하

는 단계로 구성되어 있다. 미국의 RUSLE는 경험적인 모형으로서 강우에너지계수, 피복인자, 침식계수, 토양보존대책인자, 사면길이경사 계수로 구성되어 있으며, WEPP는 물리과정모형으로서 강우재현과 식생생장에 필요한 기후를 비롯하여 토양, 지형, 지표관리 및 보전기법을 고려한다. 이들 각 모형에서 사용하고 있는 매개변수들은 강우·기후, 지표·관리, 토양, 지형으로 구분할 수 있다. RUSLE와 SEMMA의 강우·기후 및 지형인자들은 거의 비슷하나, 지표·관리인자와 토양인자들은 상이하다. RUSLE는 산림 식생피복, 관리상태 그리고 지표저류 지형에 의한 강우운동에너지와 지표유출수의 에너지 저감비율로 지표·관리 인자를 고려한다(Dissmeyer and Foster, 1984). SEMMA는 산불이후 식생의 회복에 따른 식생구조(이규송 등, 2004b), 지표잔류물 및 뿌리 분포를 고려한 지표식생지수(이규송과 박상덕, 2005)를 사용한다. WEPP은 지표식생 및 잔류물의 생물량을 기준으로 역학적인 영향을 평가하며, 특히 산림지역의 식생피복 상태에 의해 세류 및 세류간 흐름을 구분하며, 세류 및 세류간 구간의 지상피복뿐만 아니라 지표피복 상태를 고려한다. 식생피복 산정에 있어서 각 식물의 기본 생물량을 활용한다. 산불영향은 화재로 인해 감소한 식생 생물량을 고려한다(Arnold *et al.*, 1995). 토양인자에 있어서, RUSLE는 2 mm이하 토양의 유기물함량, 토성을 활용한 토양침식인자 K 를 고려하고(Wischmeier *et al.*, 1971) 계절별 토양침식인자 산정이 가능하다(Hann *et al.*, 1994). WEPP은 토양의 토성뿐만 아니라, 초기포화도와 투수계수, 세류 및 세류간 침식에 있어서 토사입자의 한계전단응력에 대해 중점적으로 고려한다. SEMMA는 토양의 입도분포를 파악하여 평균입경과 지표면을 덮고 있는 토양 및 자갈비율을 산정한다. 그리고 산불 강도와 식생회복에 의해 결정되는 유기물함량, 토심 등 산지사면의 토양특성을 고려한 매개변수들을 이용한다. 각 모형들이 지형인자로 사면경사, 사면길이를 고려한다. RUSLE와 WEPP은 경사와 길이가 증가함에 따라 토양침식량이 증가하는 관계를 보이지만, SEMMA는 산불이후 사면의 화재목과 재생식물의 줄기, 잔류물, 뿌리 등과 같은 흐름저류인자들에 의해 침식토사가 퇴적되어, 사면길이에 반비례 관계를 보이며, 사면경사외도 반비례관계를 갖는다(박상덕 등, 2005a & 2006).

2.5 모형의 분석기법

토양침식 모형은 주어진 입력변수들에 대한 동일한 결과는 적용 횟수와는 관계없이 만들어지는 결정론적인 모형이다. 복잡한 모형 시스템에 의해 만들어진 예측 에러는 모든 입력변수와 모형의 구조적 에러에 일반적인 영향을 받는다. 복잡한 모형의 예측 에러를 평가하기 위해 민감도분석(sensitivity analysis) 기법을 사용한다. 민감도분석은 입력 매개변수의 변화에 대한 출력치의 변화를 예측하는 방법으로(McCuen, 1973) 식 (4)와 같이 정의한다.

$$S_a = \frac{(O_2 - O_1)/O_{12}}{(I_2 - I_1)/I_{12}} \quad (4)$$

여기서, S_a 는 무차원 민감도이고, I_1 는 최소 입력치, I_2 는 최대 입력치, I_{12} 는 최소·최대 입력치의 평균이고, O_1 는 최소 입력치의 출력치, O_2 는 최대 입력치의 출력치, O_{12} 는 출력치

들의 평균을 의미한다.

모형 예측의 정확도는 Nash-Sutcliffe(1970)의 의해 제시된 모의효율에 의해 평가한다. 모의효율은 최초에 매개변수 교정에 의한 모형 예측의 개선을 평가하기 위해 개발되었다. 무차원 모의효율은 다음 식 (5)와 같다.

$$E_{NS} = \frac{1 - \sum_{i=1}^n (M_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (5)$$

여기서, E_{NS} 는 무차원 모의효율계수이고, M_i 는 i 번째의 관측치, P_i 는 i 번째의 예측치, \bar{M} 는 관측치의 평균을 의미한다.

모형의 관측치와 예측치의 정확도를 평가하기 위해 선형 회귀방정식을 고려한다. 1차원 선형방정식은 기울기와 절대치를 갖는다. 그러나 이러한 관계식은 최대치의 과대 및 과소평가에 의해 기울기가 결정되는 경향이 커지게 되고, 이는 절대치를 결정짓는데 중요한 역할을 한다. 따라서 이러한 오류를 줄이기 위해서는 절대치를 0으로 고정시키는 것이 현명한 분석이다. 즉 관측치가 0이면, 예측치도 0이다 라는 가설은 참이기 때문이다. 따라서 모형의 예측치와 실제 관측치와의 관계를 나타내면 식 (6)과 같이 선형함수로 표현이 가능하다.

$$C_{mr} = \frac{P_m}{M_r} \quad (6)$$

여기서, C_{mr} 는 관측치에 대한 예측치의 비율로서 모형반응계수(model response coefficient)이고, P_m 는 모형 예측치이고, M_r 은 실제 관측치이다. 모형반응계수가 1에 가까울수록, 모형 예측의 정확도가 높다는 것을 의미한다.

3. 모형적용

3.1 실측자료

강원도 동해안지역의 2000년 산불발생 이후 2001년에 토양침식 특성을 파악하기 위해 산지사면에 소규모 조사구(plot)를 설치하였고, 각 조사구에서 강우인자, 지표인자, 토

양인자, 지형인자 등과 강우에 따른 유출량 및 토양침식량을 조사하였다(박상덕과 이규송, 2007). 우리나라 연 강수량의 60% 이상이 5월~9월 사이에 집중하기 때문에 현장조사는 이 시기에 이루어졌다. 모형적용 대상지점은 지표식생, 지형, 강우 등을 고려하여, 강릉시 사천에 위치한 5개소와 삼척시 임원에 위치한 5개 소규모 조사구를 임의로 선정하였다. Table 1은 본 연구에서 적용한 조사구의 주요특성을 나타낸 것이다. 지형특성을 살펴보면, 면적은 9.74~67.66 m², 사면 길이는 3.27~14.92 m, 사면경사는 16.0~35.3° 범위이다. 토양의 평균입径은 0.67~2.45 mm, 토심은 21.3~37.0 cm, 유기물 함량은 2.47~4.84% 범위이다. 조사구의 전체 식생피복도는 20~85%, 지표잔류물은 0~80% 범위로 다양하다. 산불강도는 5등급으로 구분하는데, 산불등급 4는 강수간화 피해지로서 불길의 높이가 다소 높지만 수관층에는 이르지 못하고 산불발생 후 수관층의 모든 잎이 지면에 떨어져 식생이 사망한 경우이며, 산불등급 5는 수관화로 불길이 수관층까지 번져 식생이 사망한 경우의 산불피해 정도를 나타낸다(박상덕 등, 2001).

모형평가를 위해 사용한 자료 수는 2001년부터 2003년까지 강우사상에 따른 각 조사구별 총 74개이다. 강우사상의 평균강우량은 203.3±205.6 mm 이고, 평균최대강우강도는 26.6±23.9 mm/hr 이었으며, 최대강우사상 강우량은 959 mm, 최대강우강도는 113.5 mm/hr 이었다. 강우가 산지사면의 지표유출에 기여하는 짧은 수문학적 과정에서는 강우시의 증발량은 무시할 수 있으며, 식생에 의한 차단손실도 고려하지 않았다. 따라서 침투량은 강우량에 대한 유출량의 차로 산정가능하다. Fig. 1은 강우량에 따른 지표유출고과 침투고를 나타낸 것이다. 여기서 지표유출고는 강우시 조사구에서 유출된 물의 체적을 사면의 투영면적으로 나눈 것이다. 식생상태에 따라 식생피복이 30%보다 큰 경우와 작은 경우를 고려해 보면, 식생피복이 30%를 초과한 경우 지표유출에 기여하는 강우량은 20%정도 이지만, 식생피복이 30%이하인 경우는 약 40%인 것을 알 수 있다. 즉, 식생피복이 낮은 경우는 식생피복이 높은 경우에 비해 거의 두 배 지표유출이 많이 발생하였다. 식생피복이 높은 경우, 지표면의 잔류

Table 1. Characteristics of topography, soil and vegetation in each plot

Plot name	Area (m ²)	Slope length (m)	Slope steepness (°)	Direction (°)	Soil mean diameter (mm)	Soil depth (cm)	Organic matter content (%)	Vegetation cover (%)	Residual layer (%)	Fire intensity
SC6	28.7	6.57	35.3	20	0.78	37.0	4.84	80-85	30-75	5
SC7	16.4	5.46	21.5	230	0.95	21.3	3.97	30-35	20-30	5
SC8	9.7	3.27	27.8	260	1.05	34.3	4.38	20-35	8-20	5
SC9	13.1	4.29	26.4	180	0.67	33.4	3.96	75-85	60-75	5
SC18	27.2	6.80	31.0	180	0.97	32.6	3.79	85	85	5
IW3	29.5	8.75	23.5	330	2.36	31.1	3.60	30-55	0-10	5
IW7	21.1	5.50	20.0	15	2.25	27.2	2.47	40-55	15-40	4
IW8	67.7	14.92	16.0	280	2.45	26.5	2.91	45-55	15-30	3
IW9	26.4	8.37	27.0	260	2.29	26.4	3.41	65-85	35-80	2
IW14	30.3	9.90	26.0	255	2.13	29.0	3.50	20-25	0-5	5
Ave.	27.0	7.38	25.5	201	1.59	29.9	3.68	54.5	35.9	4.4
S.D.	16.0	3.35	5.5	106	0.76	4.7	0.68	24.12	28.0	1.1

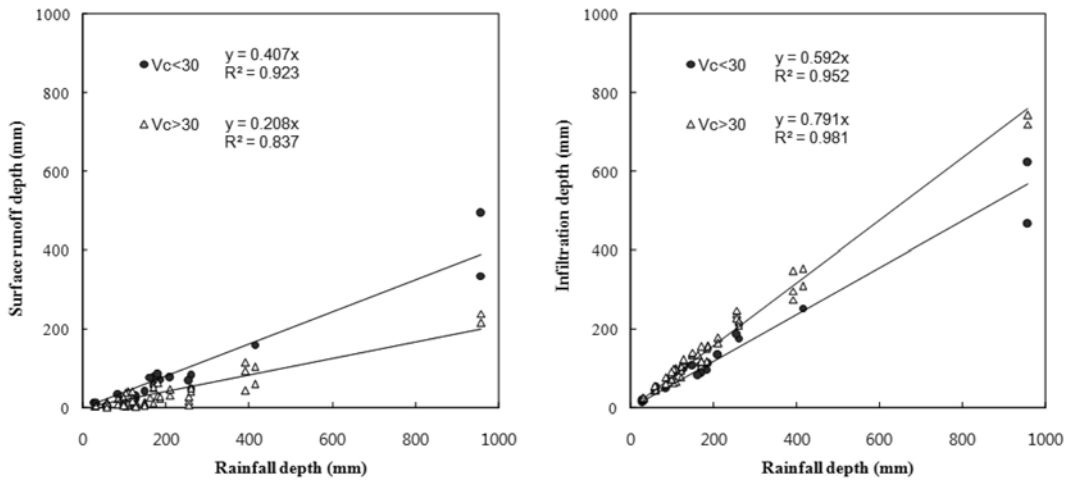


Fig. 1 Comparison of surface runoff depth and infiltration depth with rainfall depth according to vegetation coverage

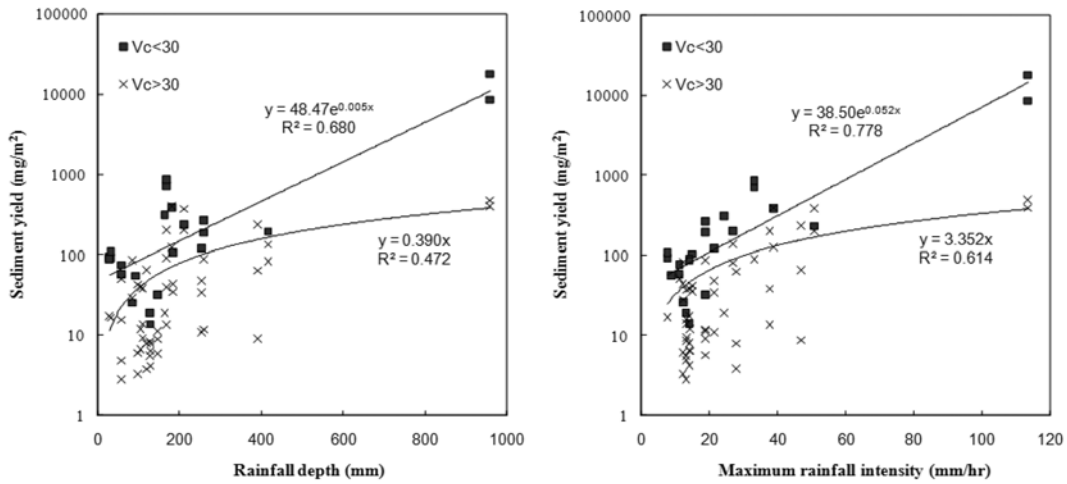


Fig. 2 Relation of rainfall depth and maximum rainfall intensity to sediment yield according to vegetation coverage

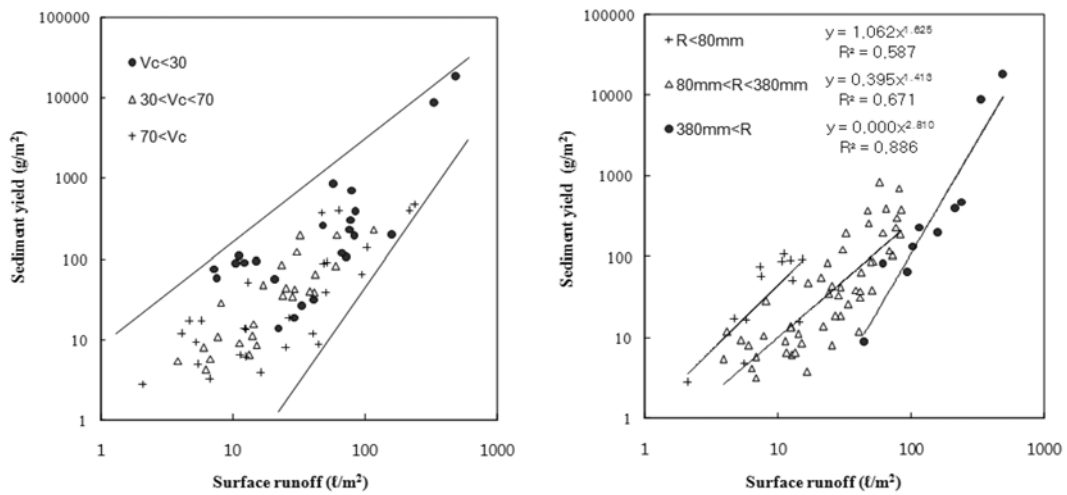


Fig. 3 Response of sediment yield for surface runoff according to vegetation coverage and rainfall depth

물이나, 낙엽층에 의해 저류공간이 확보되고, 식생 잔뿌리에 의한 물의 흡수 및 유기물 토양의 물 보유 능력이 증가함에 따라 지표유출보다는 침투를 유도하고 이에 따라 침투량도 증가한다. 강우의 낙하운동에너지에 의해 토사입자는 토양체로부터 분리되고, 침투능 이상의 강우강도가 발생하면, 지표 유출에 의한 세류와 세류간 흐름으로 분리 및 운반에 의해 산지사면에서 유출된다. 강우사상의 총강우량과 최대강우강도는 토사유출을 일으키는 에너지 산정에 중요한 인자이다. Fig. 2은 총강우량과 1시간 최대강우강도에 따른 토사유출량

의 변화를 식생피복 상태에 따라 구분하여 나타낸 것이다. 식생피복이 30%를 초과하는 경우, 강우인자에 대한 토사유출의 관계는 선형이지만, 나지비율이 큰 경우 이들은 지수함수를 갖는다. 따라서 강우의 규모가 커짐에 따라 사면으로부터 침식되는 토양은 식생분포에 따라 큰 차이를 보이며, 극한강우에서는 토사유출량이 100배 이상 차이가 발생하였다. 이는 산불발생 이후 식생회복이 빠른 지역은 산불이 발생하지 않은 조사구보다 약 2배의 유출 및 토양침식이 발생하지만, 나지상태의 조사구는 10배정도의 차이를 보이는 것과 비

슷한 결과이다(신승숙 등, 2008). 토사유출량은 지표유출량이 증가할수록 증가한다. Fig. 3에서 보면, 강우량이 클수록 유출량은 증가하며, 토사유출의 상한선은 식생피복 30%이하인 조사구에서 결정되며, 하한선은 식생피복 70%이상인 조사구에 의해 결정된다. 강우량 범위에 따른 유출 및 토양침식의 관계에서, 예를 들어 토사유출량이 100 g/m² 발생하였을 때, 유출량은 5~100 l/m²로 범위가 매우 크며, 강우량이 증가함에 따라 유출량도 증가했다. 80 mm이하의 적은 강우에도 상대적으로 많은 양이 토사유출이 발생하는데 이는 지표식생이 없는 조사구에서의 반응에 의한 것이며, 380 mm이상의 많은 강우에도 상대적으로 적은 양의 토사유출이 발생하는 것은 지표식생 분포에 의해 크게 제어되기 때문이다.

3.2 민감도 분석

토양침식 모형 매개변수들의 중요도는 입력치의 최대·최소 범위에 따른 출력치의 반응 범위에 의해 결정된다. 각 모형에서 사용하고 있는 매개변수들 중에 토양침식에 영향을 미치는 주요 입력 매개변수에 대한 민감도 분석결과를 나타낸 것이 Table 2이다. 토양침식에 있어서, 세 모형 모두 강우인자에 대한 민감도 반응이 컸다. RUSLE는 특히 잔뿌리 갖고 있는 나지면적과 사면경사에 대해 민감도가 높았으며, WEPP은 토양의 한계 전단응력과, 능선조도계수 및 사면의 길이·경사에 지배적인 영향을 받았으며, SEMMA는 식생인자와, 사면 경사에 대한 영향이 큰 것으로 평가되었다. 각 모형의 지표인자의 경우 식생피복도가 증가하면 토양침식량은 감소 관계를 보이며, 높은 민감도를 갖는다. WEPP은 세류와 세류간의 피복을 달리 고려하며, 세류의 피복이 상대적으로 중요하게 작용한다. 그러나 산불지역의 경우 화

재목과 재생식물의 줄기, 잔류물, 뿌리 등과 같은 지표인자들에 의해 세류 발달이 용이하지 않으며, 실제 사방공법에 의한 극심한 교란 지역을 제외하고 세류흐름이 뚜렷하지 않았다. 토양침식에 있어서 높은 민감도를 갖는 침투와 관계되는 매개변수는 시·공간적인 변화가 크기 때문에 모형에서 다루기가 어렵다. 표토층의 함수량은 강우의 침투, 배수, 토양에서의 증발, 저층토양의 침투 등에 영향을 받는다. WEPP에서는 민감도가 높은 초기 토양함수상태와 유효투수계수를 고려하지만, RUSLE와 SEMMA에서는 이에 대해 고려하지 않는다. 토양의 매개변수들의 민감도 결과는 대체로 낮은 편이지만, WEPP의 한계전단응력과 SEMMA의 토양비율에 대한 민감도는 높았다. 특히 WEPP에서는 세류 및 세류간 침식성을 고려하며, 한계전단응력은 토양침식량 결정에 중요한 역할을 했다. SEMMA의 토양비율은 표토의 부피와 그 속에 포함된 침식이 용이한 토양의 비율로서 토양비율 지수 산정 시에 토양비율뿐만 아니라 암석비율을 고려한다. 산사면 경사와 길이에 대한 민감도 결과에서 주목할 부분은 SEMMA의 경우만 반비례 민감도를 보이는 것이다. 이는 산림지역 유출 흐름특성에 의해 사면길이가 길수록 산지사면의 유출흐름 저해요인이 증가하고(Gilley *et al.*, 1985; Poesen, 1984), 급경사 사면일수록 지표토양의 암석화 현상이 가중되어(Heusch, 1970; Odemerho, 1986; Quinn *et al.*, 1980) 단위면적당 토양침식량이 상대적으로 감소하기 때문이다. 각 모형의 많은 입력변수들이 낮은 민감도를 보이는 원인은 모형 알고리즘의 불충분한 확인에 의한 결과라 판단된다.

3.3 적용 및 분석

모형적용 평가에 있어서 매개변수의 정확한 데이터를 입력

Table 2. Sensitivity analysis (S_a) of main input parameters of RUSLE, WEPP (Schröder, 2000) and SEMMA. Bold values indicate the input parameters that have the influence on the response variables ($S_a \geq \pm 0.90$)

RUSLE		WEPP		SEMMA	
Parameter	S_a	Parameter	S_a	Parameter	S_a
Rainfall index	1.00	Rainfall intensity	1.92	Rainfall index	0.99
Amount of rainfall	1.00	Rainfall duration	1.15	Amount of rainfall	0.95
Rainfall intensity	1.00	Interrill cover	-0.08	Rainfall intensity	0.87
Rainfall duration	-0.29	Rill cover	-0.81	Rainfall duration	-0.18
Cover factor	1.00	Bulk density	0.00	Vegetation index	-1.03
Bare & fine root mass	1.00	Ridge height	-0.00	Weight of fine roots	-1.00
Canopy coverage	-0.68	Ridge roughness	-1.87	Vegetation coverage	-1.03
Height of canopy	0.56	Submerged residue mass	0.19	Soil index	0.67
Erodibility factor	1.00	Initial soil saturation level	1.11	Organic matter	-0.52
Percentage organic matter	-0.34	Effective conductivity	-1.23	Mean size of soil particles	0.54
Percentage clay	-0.01	Interrill erodibility	0.28	Depth of the soil layer	-0.54
Percentage silt	0.22	Rill erodibility	0.83	Ratio of soil	1.54
Percentage very fine sand	0.07	Organic matter	-0.41	Topography index	-1.10
Length and slope factor	1.00	Cation exchange capacity	0.25	Slope angle	-1.08
Slope angle	0.98	Critical hydraulic shear	-1.45	Slope length	-0.86
Slope length	0.79	Rock volume in topsoil	0.16		
		Slop length	1.09		
		Slope steepness	1.07		

하는 것이 중요하다. 단일강우 사상에 대한 토양침식량을 추정하기 위해 시간단위 강우의 총강우량, 강우시간 및 최대강우강도 등을 사용하였다. 사면이 길지 않고 형상이 복잡하지 않아 직선사면으로 평가하였다. RUSLE 적용을 위해 토양침식인자는 토양입도분포에 따른 토성과 유기물함량을 고려하였다. 결빙기 이후 5월~9월 호우기간의 조사 자료를 활용함으로써 계절영향을 고려하지 않았다. 산지 급경사면의 표토층 암석화는 지속적인 토양침식에 의한 장감화 현상으로 암석 비율이 클수록 침식이 감소한다. 그러나 본 모형의 경우 토양내의 암석은 침투율을 감소시켜 침식을 가중시키는 인자로 보기 때문에 모형적용에 있어서 암석토양의 포화투수계수를 별도로 고려하지 않았다. 피복인자 C는 산불이후 벌목이나 사방작업에 의한 지표교란이 이루어지지 않았기 때문에 함몰지형 및 단구효과를 고려하지 않았다. 잔뿌리 피복패트의 나지비율과 재생 식생의 피복과 키를 중점적으로 고려하여 산정하였다. 토양보존대책인자 또한 산불이후 토양보존을 위해 대책이 수행되지 않기 때문에 고려하지 않았다. WEPP 적용을 위한 토양 매개변수는 유기물함량과 모래함량의 실측자료를 사용하고, 초기포화도의 경우 선행강우에 의해 결정하였다. 세류간침식성, 세류침식성, 한계전단응력을 결정하기 위해 강우, 식생 및 토양특성 자료의 범위를 고려하는 것이 필요하였다(박상덕, 2008). 지표관리인자는 산불이후 세류 및 세류간 지표식생피복도, 초기지표조도, 뿌리질량 및 잔존물량 등을 고려하여 산정하였다. 경작이후 경과시간, 초기 이랑높이 등과 같은 토양보존 대책에 따른 영향 인자를 고려할 수 있으나, 본 실측자료는 경작활동이 없으므로 이를 고려하지 않았다. 산불강도가 커짐에 따라 토양의 세류침식성이 증가하는데, 실측자료의 산불강도는 높은 것으로 처리하였다. SEMMA 적용을 위해 토양의 주요 매개변수로 유기물함량, 토심, 토양과 자갈의 비율에 관한 자료를 사용하였다. 산불이후 회복식생 구조를 고려한 식생구조지수를 산정하였다.

실측 조사한 각 매개변수를 토대로 RUSLE, WEPP, 그리고 SEMMA 모형에 적용하여, 토양침식량을 산정하였다. 모의에 의한 토양침식량과 산지사면에서 실측 조사한 토양침식량과의 관계를 비교한 결과는 Fig. 4이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이, RUSLE과 WEPP 모형 모두 1:1 대응선상에

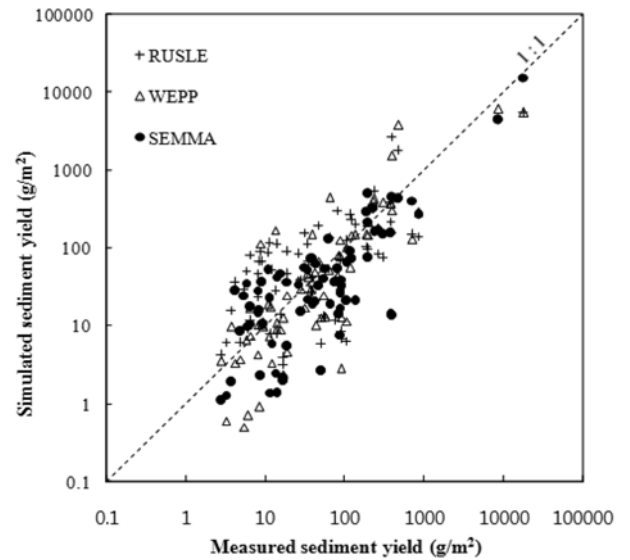


Fig. 4 Measured and simulated sediment yield

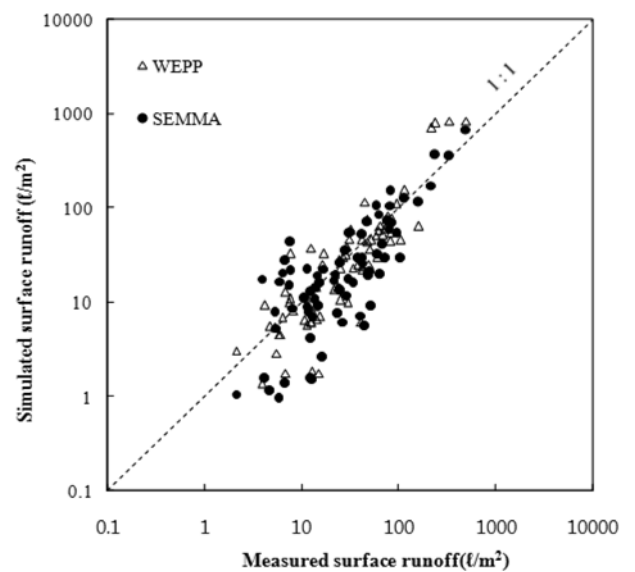


Fig. 5 Measured and simulated surface runoff

비교적 잘 맞는 것으로 보이며, SEMMA 모형과 비교하여 보았을 때, 큰 차이가 없어 보인다. 그러나 그 좌표가 대수 지 눈금이라는 점을 고려할 때 모의한 결과와 실측값이 최대 10배 이상 차이가 나는 경우도 발생한다. WEPP과

Table 4. Comparison of statistical analyses of the measured values in the fields and values simulated by RUSLE, WEPP, and SEMMA for sediment yield and surface runoff (N=74)

Statistical parameters	Sediment yield (g/m ²)				Runoff (l/m ²)		
	Measured	RUSLE	WEPP	SEMMA	Measured	WEPP	SEMMA
Min	2.79	3.14	0.50	1.09	2.10	1.37	0.95
Max	17994.11	5470.05	6141.60	15403.19	492.58	842.64	679.33
Mean	462.05	282.00	310.59	337.99	49.99	72.26	48.59
S.D.	2295.40	869.62	1040.74	1846.77	76.53	178.52	98.13
C _{mr}		0.347	0.387	0.789		1.913	1.142
R ²	-	0.771	0.670	0.967	-	0.797	0.888
E _{NS}	-	0.525	0.542	0.933	-	-1.297	0.788

C_{mr} is the coefficient of model response (If 0.5 < C_{mr} < 2.0, those are Bold values)

R² is the coefficient of determination (If 0.5 < R², those are Bold values)

E_{NS} is the Nash-Sutcliffe simulation efficiency (If 0.5 < E_{NS}, those are Bold values)

SEMMA 모형을 적용하여 모의한 지표유출량과 실측 지표유출량과의 관계는 Fig. 5에 나타내었다. 위의 관계를 보다 정량적으로 평가하기 위하여, Table 2와 같이 통계치를 제시한다. 토사유출에 있어서, 최대치는 각 모형의 모의결과들이 모두 저평가 하였으며, 특히 RUSLE와 WEPP은 2배 이상 차이를 보였다. 실측값과 모의결과를 비교하기 위해 선형관계의 모형반응계수(C_{MR}) 결정계수(R^2)와 모의효율(E_{NS})을 살펴본 결과 모형반응계수는 SEMMA가 1에 가장 근접했으며, 결정계수는 RUSLE가 WEPP보다는 컸고, 모의효율은 0.5이상으로 비슷한 결과를 보였다. 실측자료가 SEMMA 모형개발에 활용했던 원본 자료인 만큼 모형적용 결과 가장 높은 상관관계 및 모의효율을 보였다. RUSLE는 지표유출을 모의

하지 못하기 때문에, WEPP과 SEMMA의 결과만을 분석하였다. WEPP은 최대치와 평균 지표유출량을 과대평가하였고, 유출량이 적은 경우는 적게 평가하였다.

실측자료의 지표유출 및 토사유출량 분석에서 알 수 있듯이(Fig. 3), 산지사면의 토양침식 및 토사유출은 지표식생 상태 및 강우인자에 지배적으로 영향을 받는다. 또한 산불지역은 화재 이후 시간경과에 따라 식생이 회복되며, 각 조사구의 회복 능력에 따라 식생회복 속도가 다르다(박상덕 등, 2005b), 본 연구지역이 산불 발생 1년이 경과된 시점부터 조사되었다는 점을 고려하여, Table 2와 같이 산불발생 경과연수, 식생분포 및 강우규모에 따라 구분하여 각 모형의 모의결과를 통계 분석하였다. 자료의 최소, 최대, 평균, 표준편

Table 3. Comparison of real sediment yield with results simulated by RUSLE, WEPP and SEMMA

Model	Ranges	Min.	Max.	Ave.	S.D.	C_{MR}	R^2	E_{NS}	
Real sediment yield	Elapsed year after wildfire	1	16.78	834.5	140.97	231.46	-	-	-
		2	11.98	17994.1	1524.84	4307.44			
		3	2.79	230.6	32.15	50.85			
	Vegetation coverage (%)	$0 < Vc \leq 30$	13.91	17994.1	1039.89	3558.34			
		$30 < Vc \leq 70$	4.19	196.9	41.15	51.29			
		$70 < Vc \leq 100$	2.79	475.0	86.70	144.48			
	Rainfall depth (mm)	$0 < RE \leq 80$	2.79	106.9	51.26	38.43			
		$80 < RE \leq 380$	3.22	834.5	103.74	170.43			
		$380 < RE$	8.84	17994.1	2818.22	5952.71			
RUSLE	Elapsed year after wildfire	1	3.14	149.3	46.30	49.55	0.202	0.321	0.083
		2	13.70	5470.1	878.91	1542.56	0.348	0.727	0.484
		3	4.15	312.6	68.23	72.17	1.310	0.283	-0.580
	Vegetation coverage (%)	$0 < Vc \leq 30$	6.36	5470.1	442.94	1237.13	0.343	0.927	0.521
		$30 < Vc \leq 70$	29.13	326.1	108.33	92.51	1.916	0.447	-2.212
		$70 < Vc \leq 100$	3.14	2691.5	216.54	608.08	2.902	0.521	-12.446
	Rainfall depth (mm)	$0 < RE \leq 80$	3.14	14.3	7.60	3.56	0.105	-1.170	-1.373
		$80 < RE \leq 380$	6.16	537.5	94.69	102.62	0.446	-0.100	0.176
		$380 < RE$	90.95	5470.1	1585.26	1970.77	0.347	0.656	0.430
WEPP	Elapsed year after wildfire	1	2.40	287.4	56.75	70.20	0.295	0.628	0.274
		2	3.30	6141.6	1003.17	1856.45	0.387	0.608	0.503
		3	0.50	442.0	52.75	101.03	1.397	0.418	-1.519
	Vegetation coverage (%)	$0 < Vc \leq 30$	2.80	6141.6	493.37	1453.93	0.381	0.828	0.555
		$30 < Vc \leq 70$	0.50	215.9	43.41	57.01	1.070	0.946	0.925
		$70 < Vc \leq 100$	0.60	3821.0	284.66	785.00	3.840	0.550	-23.376
	Rainfall depth (mm)	$0 < RE \leq 80$	2.40	38.5	12.90	11.44	0.212	0.113	-0.902
		$80 < RE \leq 380$	0.50	430.9	86.21	114.23	0.576	0.437	0.500
		$380 < RE$	43.00	6141.6	1834.62	2391.97	0.386	0.503	0.532
SEMMA	Elapsed year after wildfire	1	1.97	405.3	59.05	104.63	0.421	0.871	0.507
		2	5.40	15403.2	1117.74	3494.19	0.790	0.966	0.928
		3	1.09	317.8	44.25	63.12	1.215	0.846	0.699
	Vegetation coverage (%)	$0 < Vc \leq 30$	20.81	15403.2	777.55	2870.03	0.381	0.828	0.931
		$30 < Vc \leq 70$	13.99	75.2	34.28	19.16	1.070	0.946	0.344
		$70 < Vc \leq 100$	1.09	440.8	41.06	116.61	3.840	0.550	0.410
	Rainfall depth (mm)	$0 < RE \leq 80$	1.09	54.8	22.68	19.32	0.372	0.106	-0.385
		$80 < RE \leq 380$	1.28	405.3	61.79	82.33	0.576	0.437	0.895
		$380 < RE$	2.24	15403.2	2152.57	4836.59	0.791	0.964	0.922

차, 선형기울기, 결정계수 및 모의효율을 순차적으로 나타내었다. 산불발생 경과연수에 따른 모형 적용 평가에서는 산불초기에 모든 모형이 저평가하였고, 특히 RUSLE 모형이 가장 작게 모의하였다. 지표식생 분포가 적은 경우 대부분 모형이 저평가하였으며, 380 mm 초과와 강우량 380 mm 초과와 강우량의 경우 상관계수가 높았고, 식생분포 30%이하인 경우만 모의효율이 높았다. WEPP도 RUSLE와 비슷한 결과를 보였으나, 모의효율에서는 더욱 좋은 결과를 보였다. 특히 지표식생 30%~70% 범위에서 모형반응계수, 결정계수 및 모의효율이 모두 월등히 좋았다. 산불발생 경과 3년, 70% 초과와 식생분포 그리고 80 mm 이하의 강우에 대해서 세 개의 모형 모두 모의결과 신뢰도가 낮았다. 이는 실제 이러한 조건 하에서 토양침식 및 토사유출 과정을 제어하는 인자들의 영향력이 상대적으로 커지지만, 모형에서 이를 재현하는데 한계를 가지고 있기 때문으로 판단된다.

박상덕(2008)은 산불지역에 WEPP을 적용한 결과 유출량이 적을 때 과대평가하고 많으면 과소평가하였으며, 토양침식량이 적은 경우에도 과대 산정하는 경향을 확인하였다. Nearing(1998)은 많은 토양침식 자료들을 이용하여 다양한 침식모형을 평가하면서 관측 침식값이 작으면 과대 예측되고, 관측 침식값이 크면 과소 예측되는 침식모형의 일반적인 경향이 지속적으로 제기되고 있는 점에 대하여 연구하였다. 이러한 경향은 처리기능의 모형예측에서 치우침과 필연적으로 관계가 있는 것이 아니고, 결정론적인 모형의 처리 범위 내에서 측정 자료의 무작위 변동성분 제시에 따른 한계 때문으로 보였다. 본 연구에서도 이들 모형의 토양침식 모의결과는 관측치가 크면 과소 예측하는 침식모형의 일반적인 경향을 보였다. Table 3의 산불 경과연수, 식생피복도 그리고 강우량에 따른 구간별 모형반응계수의 변화를 Fig. 6과 같이 제시하였다. 모형반응계수는 산불 경과연수가 길수록, 식생피복이 높을수록 증가하는 경향을 보인다. 반대로 말하면, 산불초기, 나지상태에서 모형반응계수가 상대적으로 작았다. 모형반응계수가 1에 가까울수록 모형 예측이 정확하다는 것을 의미하는데, 식생피복이 30-70% 범위와, 강우량 80-380 mm 범위에서 이들 모형이 대체로 정확하게 모의한다는 것을 확인할 수 있었다. 모형반응계수가 1보다 작은 경우는 물리적인 자연현상을 모형이 제한적인 인자들만으로 재현하는데 한계가 있음을 의미한다. 산불직후 반발수력이 커진 고

은입자의 토사가 넓은 범위의 나지형태로 노출되어 작은 규모의 강우 발생에도 많은 양의 토사유출이 발생하는데, 이들 모형이 이러한 영향인자의 가중을 간과하고 있기 때문으로 보인다. 따라서 제한범위의 주요 매개변수를 다시 검토해서 모형을 보완하거나, 개선하는 것이 필요하다.

4. 고 찰

농업지역을 기반으로 개발된 경험적인 모형 RUSLE의 산불지역에 대한 모형평가 사례는 많지 않다. 최근 RUSLE는 모형의 간편성 때문에 GIS를 이용한 광범위 지역의 공간적 안정성 평가에 주로 활용된다. Nyhan *et al.*(2001)은 BAER와 강화된 USLE 접근모형을 산불지역의 토양침식량을 추정하는데 사용하였다. 산불의 강도와 토양의 반발수력을 고려한 USLE는 화재지역의 적용에 있어서 보존 수단의 공간적 평가에 효과적임을 확인하였다.

물리적 모형인 WEPP의 적용범위 확대에 대한 연구는 활발하게 이루어지고 있으며, 산지지역 및 산불사면에 적용 가능한 모형 개발이 이루어지고 있다(Moffet 등, 2007). Soto & Díaz-Fierros(1998)는 스페인 서부 산지의 산불에 의한 유출량과 토양침식의 모의실험에 있어서 WEPP 모형의 모의결과와 관측치가 상당히 일치함을 보였으나, 산불이 발생하지 않은 지역에서는 과소평가하는 것을 확인하였다. WEPP의 가장 민감한 변수들은 투수계수(hydraulic conductivity), 세류간침식성(interrill erodibility), 세류침식성(rill erodibility), 한계전단응력(critical shear stress)으로, 이러한 입력변수들은 토양침식의 반응메커니즘이 WEPP 모형에 적용 시 얼마나 민감하게 반응하느냐에 따라 결정된다. 모형의 신뢰성을 높려면 각각의 민감한 변수들에 대한 연구가 필요하다고 밝힌 바 있다. Wilcox 등(1998)은 미 남서부 지역에 대해 WEPP 모형에 의한 유출 예측성을 평가하였다. 교란된 지역으로부터 발생한 유출량은 모형의 예측값과 비교적 일치하였지만 교란이 일어나지 않은 자연 상태의 지역에서는 그 예측성이 낮았다. 조사구에 대한 상세한 정보가 있어도 그 예측성이 떨어지는 이유는 지표면의 토양인자와 강우특성에 관계있는 투수계수가 시간이 지남에 따라 다양하게 변할 수 있기 때문이라고 하였다. 또한 사면에 대한 WEPP의 예측값은 실측값보다 비교적 크게 나타났다. 그 이유는 모형이 면적에 대한 적용범위에 한계가 있을 수 있다고 보였다. Savabi(2001)는 미 동부 플로리다주의 지표수문모형에 있어

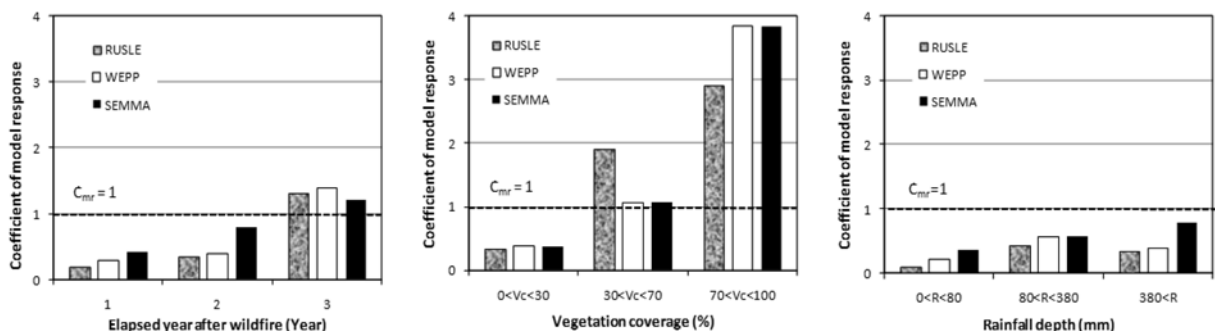


Fig. 6 Variations for coefficients of model response according to the elapsed year after wildfire, vegetation coverage and rainfall depth

서 투수계수, 토양의 침식성, 토양의 수분 보수성과 같은 인자들을 결정하는 연구를 수행하였다. WEPP 모형의 매개변수들 중 이러한 인자들이 중요하지만 포화 투수계수, 침식성, 토양 보수성과 같은 토양의 수리적 특성을 결정하는데 있어서 표준화된 방법이 없기 때문에 그러한 매개변수 결정이 우선되어야 한다고 보고한 바 있다.

산림지역은 전형적인 농업지역과는 달리 사면이 급경사에 토양이 거친 입자로 이루어져있는 경우가 많다. 게다가 산림지역의 지상과 지표피복은 경작이나 방목지의 그것과는 다르다(Luce, 1995). 최근 과학자들은 산림지역의 수문 및 침식에 영향을 미치는 유출발생 메커니즘에서 초과강우가 이들 지역과는 상당히 다르다는 것을 인식했다(Elliot *et al.*, 1996; Covert, 2003). 본 연구 대상지역이 급경사 산지사면이라는 점을 고려할 때, WEPP은 사면의 지표유출 수문특성에서 초과강우에 의한 유출 해석을 평면 흐름의 연속방정식으로 산정한다. 사면의 토양침식 과정에 있어서 세류에서의 토사이송을 묘사하기 위해 정류상태의 토사 연속방정식을 사용한다. 세류에 의한 토사입자의 분리는 세류의 수리학적 전단응력이 토양의 한계전단응력을 초과할 때 발생한다. 세류간침식은 표준세류간침식성, 유효강우강도, 세류간유출률, 토사전달율, 노출표준인자, 세류와의 거리 및 세류간폭의 함수이다. 즉 토사입자는 유효강우와 유출수에 의해 토양체로부터 분리·이송되는 수동적인 형태로 다루어진다. 그러나 실제 급경사의 지표토양은 자체의 위치에너지가 크기 때문에, 강우에너지와 초과유출량이 큰 경우 그에 따른 많은 양의 분리·이송 토사의 자체 운동에너지가 상대적으로 크게 작용할 것이다. 지표유출의 경우, 관측치가 큰 경우에도 과대 예측하는 결과를 보였다. 대부분의 자연 산림지역은 지표하 흐름이 지배적이다(Luce, 1995). WEPP 모형을 산림지역에 적용할 때 유역에서의 지표하 흐름과 유량이 과소 산정된다(Elliot *et al.*, 1995). 산지사면의 토양 및 지표상태에 따라 다를 수 있지만, 이를 역으로 생각하면, WEPP이 산림지역의 사면에서 지표유출량을 과대평가할 우려가 있다. 위의 내용을 정리하면, 급경사 산불사면의 관측 토양침식과 지표유출이 큰 경우, WEPP은 토양침식량을 과소평가하고, 지표유출량을 과대평가한다. 토양침식에 있어서, RUSLE도 마찬가지로의 결과를 보인다. SEMMA의 경우는 그 편차는 확실히 적다. 이는 관측결과와 모의결과의 관계를 식생분포와 강우량분포에 따라 세분화하여, 단순 회귀모형을 개발하였기 때문에 물리적인 모형의 이론적인 부분의 세부 메커니즘의 적용 한계에 따른 부정확한 예측을 커버하는 장점을 갖는다. Covert *et al.*(2005)은 교란된 산림유역에서의 유출 및 토양 침식 모의에 있어서 WEPP은 지표하흐름 과정을 충분히 묘사할 필요성을 강조하였다. 2004년 이전에 개발된 WEPP은 산림지역의 수문과 침식에 있어서 정확하게 모의하는데 한계가 있어서, Dun *et al.*(2009)는 산림지역의 지표하 흐름과 유량의 저평가를 개선하기 위한 연구를 수행하였다. 산림지역은 농업지역보다 경사가 급하며, 토심이 얇은 기공성 토양으로 낮은 투수성의 기반을 가지고 있어, 기반으로 깊은 침투는 적으나, 지표하 흐름이 많이 발생하는 것을 고려하여 개선된 WEPP 모형을 평가하는 등의 지속적인 연구가 이루어지고 있다.

SEMMA의 모형적용 평가에 있어서, 모형개발에 사용한 기초자료를 모형평가에 활용했다는 맹점을 내포하고 있는 것은 사실이다. 그러나 SEMMA는 산불이후의 식생회복 구조, 산지사면의 토양 특성을 고려한 토양지수 그리고 산지사면의 지형인자 특성을 반영한 모형 함수를 갖추고 있어, 우리나라 산불지역 산지사면에 적용 가능할 것으로 평가된다. 우리나라 산불지역의 사면을 대상으로 개발된 SEMMA가 세계적으로 널리 활용되고 있는 RUSLE와 WEPP처럼 신뢰성 높은 모형으로 발전하기 위해서는 모형의 구조와 매개변수에 대한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

5. 결 론

산불지역 사면의 토양침식을 정량적으로 예측하기 위한 모형을 개발 하거나 기존 모형을 검증하는 과정은 중요하다. 본 연구에서는 우리나라 산지사면을 대상으로 개발한 SEMMA와 경험적인 모형인 RUSLE와 물리적인 모형인 WEPP의 산림지역 적용 모드를 이용하여 산불지역 사면의 토양침식 및 지표유출을 모의하였다. 이들 모형을 적용하고 평가하기 위해 사용한 기초자료는 강원도 산불지역 사면에 설치된 소규모 조사구에서 측정된 1,000개 이상의 자료 중에서 임의로 선정한 74개 자료이었다. 지표유출량은 식생피복이 적은 경우 식생피복이 높은 경우에 비해 거의 두 배정도 많이 발생하였다. 또한 강우인자에 따른 토사유출의 관계는 나지비율이 큰 사면에서 극한강우가 발생하면, 100배 이상 토사유출량이 차이나는 것으로 확인되었다. 토사유출량은 지표유출량이 증가할수록 증가하였다. 지표유출에 의한 토양의 침식이나 운반은 사면의 식생상태에 지배적으로 영향을 받았다. 산불지역 사면에서 모형으로 산정한 토사유출량을 토대로 할 때 본 연구에서 적용한 세 모형은 모두 최대치를 저평가하였다. 특히 RUSLE와 WEPP는 실측치와 2배 이상 차이를 보였으며 실측치와의 계산치 관계의 결정계수는 RUSLE가 WEPP보다는 크나 모의효율은 0.5이상으로 비슷한 결과를 보였다. 모형 적용에 사용된 실측자료가 SEMMA의 개발에 활용되었던 자료인 만큼 SEMMA가 가장 높은 상관관계 및 모의효율을 보였다. 산지사면의 지표유출에 모형을 적용한 결과 WEPP은 최대와 평균적인 크기의 유출량에 대해서는 과대평가하고 유출량이 적은 경우에는 적게 평가하였다. 산불발생 경과연수, 지표침식, 강우규모에 따라 구분하여 각 모형의 적용성을 분석한 결과 산불 초기에는 모든 모형이 토사유출량을 저평가하였고, 특히 RUSLE 모형이 가장 적게 모의하였다. 식생피복도가 낮은 경우 대부분 모형이 저평가하였으며, 강우량이 380 mm를 초과하는 경우에도 저평가하였다. RUSLE는 산불발생 1년과 2년 경과 시점, 식생피복 70% 이하와 강우량 380 mm 초과에 상관계수가 특히 높았고, 식생피복 30%이하인 경우만 모의효율이 높았다. WEPP도 RUSLE와 비슷한 결과를 보였으나 모의효율에서는 보다 좋은 결과를 보였다. 산불발생 경과 3년, 70% 초과와 식생피복, 강우량 80 mm 이하에 대해서 세 모형 모두 적용의 신뢰도가 낮았다. 이들은 관측치가 작으면 과대 예측하고 관측치가 크면 과소 예측하는 토양침식 모형의 일반적인 경향을 보였으나 지표유출에 대해서는 관

측치가 큰 경우에도 과대 예측하였다.

감사의 글

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

참고문헌

- 미수봉(2005) 소규모 조사구 규모의 산지사면에서 유출 및 토양 침식에 대한 WEPP의 적용. 공학석사논문, 강릉대학교, pp. 39-79.
- 박상덕 등(2001) 강원도 산불지역 재해의 저감대책 수립 연구보고서, 11-1310148-000088-01, 행정자치부 국립방재연구소, pp. 196-198.
- 박상덕 등(2005a) 산지의 토양침식모형(SEMMA) 실용화 연구 연구보고서, 11-1660030-00035-01, 소방방재청 국립방재연구소, pp. 55-64.
- 박상덕 등(2006) 지역특성을 고려한 토양침식모형의 매개변수 선정 방안 연구보고서, 11-1660080-000017-01, 국립방재교육연구원 방재연구소, pp. 4-26.
- 박상덕(2008) 산불지역의 WEPP 매개변수 추정. 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제41권 제6호, pp. 565-574.
- 박상덕, 신승숙, 이규송(2005b) 산불지역의 유출 및 토양침식 민감도. 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제1호, pp. 60-61.
- 박상덕, 이규송(2007) 산불지역 강우유출 및 토사유출 조사 자료집. 강릉대학교 방재연구소.
- 신승숙(2002) 산지유역의 토사유출에 관한 연구. 공학석사논문, 강릉대학교, pp. 47-51.
- 신승숙, 박상덕, 조재웅, 이규송(2008) 양양 산불지역 지표유출 및 토양침식에 대한 식생회복의 영향. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권 제4B호, pp. 393-403.
- 이규송 등(2004a) '04년도 산지시험유역 운영을 통한 토사재해 저감효과 분석 연구보고서, 11-1660030-000003-01, 소방방재청 국립방재연구소, pp. 97-118.
- 이규송, 박상덕(2005) 산화적지에서 지상부 식생구조와 표토에 분포하는 세균의 관계. 한국생태학회지, 한국생태학회, 제28권, 제3호, pp. 149-156.
- 이규송, 정연숙, 김석철, 신승숙, 노찬호, 박상덕(2004b) 동해안 산불 피해지에서 산불 후 경과 년 수에 따른 식생 구조의 발달. 한국생태학회지, 한국생태학회, 제27권 제2호, pp. 99-106.
- Andreu, V., Imeson, A.C., and Rubio, J.L. (2001) Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. *CATENA*, Vol. 44, pp. 80-82.
- Arnold, J.G., Wetz, M.A., Alberts, E.E., and Flanagan, D.C. (1995) Chapter 8. Plant growth component. In: D. C. Flanagan, and M. A. Nearing (Editors), *WEPP Technical Documentation*, NSERL Report No. 10, West Lafayette, IN.
- Beasley, R.P., Huggins, L.F., and Monke, E.J. (1980) ANSWERS, a model for watershed planning. *Transactions of the American Association of Agricultural Engineers* Vol. 23, pp. 938-944.
- 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.
- Covert, S.A. (2003) *Accuracy Assessment of WEPP-based Erosion Models on Three Small, Harvested and Burned Forest Watersheds*. MS Thesis, Univ. Idaho, Moscow, ID.
- Covert, S.A., Robichaud, P.R., Elliot, W.J., and Link, T.E. (2005) Evaluation of runoff prediction from WEPP-based erosion models for harvested and burned forest watersheds. *Trans. ASAE*, Vol. 48, pp. 1091-1100.
- Dissmeyer, G.E. and Foster, G.R. (1984) *A Guide for Predicting Sheet and Rill Erosion on Forest Land*. Forest Service Technical Publication RA-TP6, United States Department of Agriculture.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Blake, W.H., Chafer, C.J., Humphres, G.S., and Wallbrink, P.J. (2006) Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*, Vol. 319, pp. 295-311.
- Dun, S., Wu, J.Q., Elliot, W.J., Robichaud, P.R., Flanagan, D.C., Frankenberger, J.R., Brown, R.E., and Xu, A.C. (2009) Adapting the water erosion prediction project (WEPP) model for forest applications. *Journal of Hydrology*, Vol. 366, pp. 46-54.
- Elliot, W.J., Luce, C.H., and Robichaud, P.R. (1996) Predicting sedimentation from timber harvest areas with the wepp model. In: *Proc. 6th Fed. Interagency Sedimentation Conf., March 10-14, 1996*. Las Vegas, NV. pp. IX-46-53.
- Elliot, W.J., Robichaud, P.R., and Luce, C.H. (1995) Applying the WEPP erosion model to timber harvest areas. In: *Proc. ASCE Watershed Manage Conf., August 14-16, 1995*. San Antonio, TX, pp. 83-92.
- Ferreira, V.A. and Smith, R.E. (1992) *OPUS, an integrated simulation model for transport of nonpoint-source pollutants at the field scale, vol., user manual*. U.S. Department of Agricultural Search Service 90. US Depart Agriculture-Agricultural Research Service, Washington DC.
- 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.
- 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.
- Grønsten, H.A. (2006) Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the WEPP Hillslope model. *Soil & Tillage Research*, Vol. 82, pp. 186-199.
- Haan, D.T., Barfield, B.J., and Hayes, J.C. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press. pp. 277-284.
- Heusch, B. (1970) L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marseuses du Pré-Rif occidental. *Annales de Recherches Forestières de Maroc*. Vol. 12, pp. 9-176.
- Inbar, M., Wittenberg, L., and Tamir M. (1997) Soil erosion and forestry management after wildfire in a Mediterranean woodland, Mt. Carmel, Israel. *IJWF*, Vol. 7, pp. 285-294.
- 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.
- Knisel, W.G(ed) (1980) *CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. US Department of Agriculture Conservation Research Report 26. US Depart Agriculture-Science and Education Administration, Washington DC.
- 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.
- McCuen, R.H. (1973) The role of sensitivity analysis in hydraulic modeling. *Journal of Hydrology*. Vol. 18, pp. 37-53.
- Moffet, C.A., Pierson, F.B., Robichaud, P.R, Spaeth, K.E., and Hardegree, S.P. (2007) Modeling soil erosion on steep sagebrush rangeland before and after prescribed fire. *CATENA* Vol. 32, pp. 218-228.

- 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.
- 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.
- Nyhan, J.W., Koch, S., Balice, R., and Loftin, S. (2001) *Estimation of soil erosion in burnt forest areas of the Cerro Grande Fire in Los Alamos, New Mexico*. Res. Pap. Los Alamos, NM: US Department of Energy, Ecology Group, Los Alamos National Laboratory. pp. 25.
- 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.
- Onda, Y., Dietrich, W.E., and Booker, F. (2008) Evolution of overland flow after a severe forest fire, Pont Reyes, California. *CATENA*, Vol. 72, pp. 13-20.
- Poesen, J. (1984) The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband*. Vol. 49, pp. 117-131.
- Quinn, N.W., Morgan, R.P.C., and Smith, A.J. (1980) Simulation of soil erosion induced by human trampling. *Journal of Environmental Management*. Vol. 10, pp. 155-165.
- 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 Research Service, Washington DC.
- Savabi, M.R. (2001) Determining soil water characteristics for application of WEPP model in south Florida, *ASAE*, Vol. 44, No. 1, pp. 59-70.
- Schröder, A. (2000) Chapter 11. WEPP, EUROSEM, E_D2: Results of Applications at the Plot Scale. In *Soil Erosion: Application of Physically Based Models*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Scott, D.F. and van Wyke, D.B. (1990) The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behavior of an afforested catchment. *Journal of Hydrology*, Vol. 121, pp. 239-256.
- Sharpley, A.N. and Williams, J.R.(eds) (1990a) *EPIC: Erosion/Productivity Impact Calculator 2, user manual*. US Department of Agriculture Technical Bulletin 1768. US Department of Agriculture - Agricultural Research Service, Washington DC.
- Sharpley, A.N. and Williams, J.R.(eds) (1990b) *EPIC: Erosion/Productivity Impact Calculator2, user manual*. US Department of Agriculture Technical Bulletin 1768. US Department of Agriculture-Agricultural Research Service, Washington DC.
- Smith, R.E. (1992) *OPUS, an integrated simulation model for transport of nonpoint-source pollutants at the field scale I, documentation*. US Department of Agriculture-Agricultural Research Service 98. US Department of Agriculture-Agricultural Research Service, Washington DC.
- Soto, B. and Diaz-Fierros, F. (1998) Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: Comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. *CATENA*, Elsevier, Vol. 31, pp. 257-270.
- Wilcox, B.P. and Simanton, J. R. (1998) *Predicting Runoff in Semi-arid Woodlands : Evaluation of the WEPP Model*. Modeling Soil Erosion by Water, pp. 131-140.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., and Cross, B.C.(1971) A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 26, No. 5, pp. 189-193.
- 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.
- Wohlgemuth, P.M., Hubbert, K.R., and Robichaud, P. (2001) The effect of log erosion barriers on post-fire hydrologic response and sediment yield in small forest watersheds, southern California. *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 3053-3066.
- Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., and Anderson, W.P. (1987) *AGNPS, Agricultural Nonpoint Source Pollution Model, a watershed analysis tool*. Agricultural Research Service Conservation Research Report 35. US Department of Agriculture-Agricultural Research Service, Washington DC.

(접수일: 2010.10.29/심사일: 2011.2.1/심사완료일: 2011.4.15)