韓國水資源學會論文集
第41卷 第6號□2008年 6月
pp. 565~574

DOI: 10.3741/JKWRA.2008.41.6.565

산불지역의 WEPP 매개변수 추정

Estimation of WEPP's Parameters in Burnt Mountains

박 상 덕*
Park, Sang Deog

Abstract

Fire-enhanced soil hydrophobicity often increases runoff and erosion in the mountain hillslope following severe wildfires. Estimation techniques for WEPP's parameters were studied in burnt mountain slopes. In burnt mountain slopes, the model over-predicted runoff in the small runoff and under-predicted runoff in the great runoff, and in the lower sediment runoff it had a tendency to over-predict soil loss. The effective hydraulic conductivity was most sensitive in the WEPP's runoff and its sediment runoff was mainly effected by the effective hydraulic conductivity, initial saturation, rill erodibility, and interrill erodibility. To improve the applicability of the WEPP, the adjustment coefficient of effective hydraulic conductivity was defined for runoff and the adjustment coefficient of rill erodibility and interrill erodibility was presented for sediment runoff. The adjustment coefficient of effective hydraulic conductivity in wildfire mountain slopes increased with maximum rainfall intensity of single storm and the vegetation height index. The adjustment coefficients of rill erodibility depended on soil components of size distribution curve and total rainfall depths in single storm. The adjustment coefficients of interrill erodibility decreased with increases of maximum rainfall intensity and vegetation height index. These results may be used in the application of WEPP model for wildfire mountain slopes.

keywords : WEPP, soil erosion, runoff, effective hydraulic conductivity, adjustment coeffecient, wildfire

요 지

산불에 따른 토양의 반발수력 증대로 산지의 유출량과 토양침식량이 가중된다. WEPP모형을 산불지역에 적용하기 위한 주요 매개변수들의 최적 추정기법에 대해 연구하였다. 산불지역에서 WEPP모형은 유출량이 적을 때 과대평가하고 많으면 과소평가하였으며 토양침식량이 적은 경우에도 과대 산정하는 경향이 있다. 산불지역에서 이 모형의 유출량 변화는 유효투수계수가 가장 큰 영향을 미치고 토사유출량 변화는 유효투수계수, 초기포화도, 세류침식계수, 세류간침식계수가 주로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 산불지역에서 WEPP의 적용성을 향상시키기 위하여 유출량에 대해서는 유효투수조정계수를 도입하고, 토사유출량에 대해서는 세류침식조정계수와 세류간침식조정계수를 도입하였다. 유효투수조정계수는 강우사상의 최대강우강도와 식생인자에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 세류침식조정계수는 입도분포의 토양성분 특성과 강우사상의 총강우량에 좌우되었으며 세류간침식조정계수는 최대강우강도와 식생고지수의 증가에 따라 감소하였다. 본 연구결과는 산불지역 사면에서 WEPP모형의 적용에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : WEPP, 토양침식, 유출, 유효투수계수, 조정계수, 산불

* 강릉대학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Eng. Kangnung National Univ., Gangneung, 210-702, Korea
(e-mail: sdpark@kangnung.ac.kr)

1. 서 론

식생피복이 소실된 산불지역에서 유출량 및 토양침식량 증가는 불가피한 현상이다. 특히 산불은 토양의 반발수성(hydrophobicity) 강화를 초래하기 때문에 산불지역의 유출과 토양침식을 가중시키는 원인의 하나로 알려져 있으며 광범위한 현장조사 자료들이 이를 뒷받침한다(Scott and van Wyke, 1990; Andreu *et al.*, 1996; Inbar *et al.*, 1997, Doerr *et al.*, 2006; Onda 2008). 또한 산불 사면의 반발수성은 침투를 방해하기도 하기 때문에 강우유출과 토양침식을 가중시키는 주원인이 되기도 한다(Wohlgemuth *et al.*, 2001). 산불에 의한 여러 변화들 중에서 토양의 반발수성이 미친 산지의 수문학적 영향들은 식생과 지표잔류물 회복에 따라 점차로 감소하게 될 것이다. 그러나 식생회복 속도가 산불강도와 산불 후 강우에 따른 침식빈도에 강한 영향을 받기(Doerr *et al.*, 2006) 때문에 식생회복이 느린 산불 지역에서 호우가 발생하면 유역의 홍수재해 위험가능성은 오랜 기간 지속될 수 있다. 이는 2000년 대규모 산불지역인 강릉 사천에서 2002년 발생한 태풍 루사로 인해 산불이 발생하지 않은 지역에 비해 약 11.3배나 넓은 면적에서 산사태가 발생되었으며, 이에 따른 토사유출로 하상이 상승되고 선상지를 형성하는 등 홍수피해가 가중된 것에서도 확인되고 있다. 따라서 산불지역에서 토양침식을 평가하기 위한 정량적인 연구가 시급하다(박상덕, 2005).

Soto and Diaz-Fierros(1998)는 스페인 북서부의 관목 사면에 소규모조사구를 설치하고 산불 후 4년간의 강우유출과 토양침식에 대한 산불의 영향을 조사하였다. 이들은 산불 후 1년이면 산불 전에 비하여 8.5배나 증가된다고 보고하였으며 WEPP 모형을 적용한 바 있다. 그 결과 WEPP이 유출량이나 침식량을 비교적 합리적으로 추정할 수 있으나 산불이 발생되지 않은 산지에서는 크게 과소평가되는 것으로 나타났다. 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. 이 경향은 구하고자 하는 토양침식 값이 개별적인 강우사상인지 또는 년 총량 혹은 연 평균량인지에 관계없으며, 예측모형이 경험적 모형인지 또는 물리기반 모형인지에도 상관없이 일관되게 나타났다. Zhang *et al.*(1996)은 미국 내 8개 지점의 65개 자연유출소규모 조사구 자료에 대하여 WEPP을 적용하고, 일반적으로 나타나는 작은 관측침식값 과대예측 및 큰 관측침식값 과소예측 현상이 강우사상의 개별성 여부에 관계없이 나타나는 것을 발견하였다. 이에 대해서는 Gjidley(1995)와 Kramer and Albert(1995)도 확인한 바 있다. 산불지역 산지에 대해서도 WEPP모형이 이러한 예측 현상을 나타내는지 또는 주로 농경지나 초지 등을 대상으로 개발된 WEPP모형이 산불지역 특성을 잘 반영하는지에 대해서 아직 충분히 확인되지 않고 있다.

우리나라 산불지역의 토사유출에 대한 연구를 위하여 이규송과 정연숙(1999)은 1996년 고성 산불지역에서 12㎡의 고정구를 설치하여 토사유출량을 조사한 바 있다. 2000년 대규모 동해안 산불이 발생한 이후 산불지역의 강우유출 및 토양침식에 대한 조사 연구에 의하면 산불로 인한 토양침식량 증가는 대단히 크며(국립방재연구소, 2000~2003; 박상덕 등, 2005) 식생구조의 발달과 밀접한 관련이 있다. 즉 산불이 산지의 식생을 감소시켜 사면의 표토에 작용하는 강우에너지와 유수의 토양침식 에너지를 증가시키 때문에 토양침식량이 증가한다(Hibbert, 1985; Andreu *et al.*, 2001). 이규송 등(2004)의 연구에 의하면 산불지역의 식생구조 회복에 약 20년이 필요하기 때문에 산불지역 토사유출은 하천수계에 장기적인 영향을 미칠 수 있으므로 산불지역 토양침식에 대한 연구는 대단히 중요하다.

WEPP은 미국 농무성이 강우에 의한 토양침식을 추정하기 위해 1985년 개발에 착수한 물리적 과정 모형으로서 토양침식 및 유출 과정을 재현하는데 유용하다. 본 연구는 산불지역 산지사면의 강우유출 및 토양침식에 대한 WEPP의 적용성을 평가하고 그 최적매개변수 추정기법을 개발하고자 하는 것이다.

2. WEPP모형

WEPP(Water Erosion Prediction Project)모형은 사면에서부터 중소규모 유역에 이르기까지 토양침식량을 정량적으로 예측하기 위하여 미국 농무성이 1995년에 개발한 물리기반 수문학적 토양침식 모형이다. 이 모형은 경험적인 토양침식 모형인 USLE를 대체하기 위해서 개발되었으나 신뢰할 만한 결과를 주는 환경조건인지의 여부가 확인될 때까지는 적용에 주의해야 한다(Nearing, 1998). WEPP모형의 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 되어 있다. 입력자료는 식생조건과 관리방법, 사면, 토양, 기후의 4가지 범주로 분류된다. 또한 모형은 경작지와 방목지, 연속강우와 단일호우 조건에 대해 적

용될 수 있다(Flanagan and Nrearing, 1995). WEPP 모형에서는 토사의 박리와 퇴적에 따른 순 침식량을 정상유사연속방정식 (1)을 사용하여 추정한다.

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (1)$$

여기서 G는 유사량($kg_o/s/m$), x 는 사면의 하류방향 거리(m), D_i 는 세류간 침식량($kg_o/s/m^2$), D_f 는 세류 침식량($kg_o/s/m^2$)이다. 세류간 침식은 세류사이 사면에서 발생된 침식토사가 세류에 도달하는 유사량으로 정의한다. Meyer and Wischmeier(1969)에 의하면 세류간 침식량은 강우강도에 관련되나 WEPP 모형에서는 사면경사조건을 고려하고 강우강도와 유량의 곱에 비례하는 것으로 하였으며(Flanagan and Nearing, 1995) 그 비례상수를 세류간침식계수라 한다. 세류침식은 세류의 유사이송능력이 세류내 토사박리량을 초과하는 경우에 대해 다음 Eq. (2)로 표현된다.

$$D_f = D_c(1 - \frac{G}{T_c}) \quad (2)$$

여기서 D_c 는 세류에서 유수에 의한 토립자 박리능($kg_o/s/m^2$)이며 T_c 는 세류의 유사이송능력($kg_o/s/m$)이다. 세류사 이송은 Eq. (3)과 같이 세류내 토입자에 작용하는 유수의 전단응력이 토립자의 한계전단응력를 초과하는 경우에 발생한다.

$$D_c = K_r(\tau_f - \tau_c) \quad (3)$$

여기서 K_r 은 세류침식계수(s/m)이고 τ_f 는 토립자에 작용하는 유수의 전단응력(P_a)이며 τ_c 는 토립자에 작용하는 유수의 한계전단응력(P_a)을 나타낸다.

3. WEPP의 적용

3.1 소규모조사구

산불지역 사면의 유출과 토양침식에 WEPP을 적용하기 위한 대상지점은 강원도 동해안 지역의 강릉시 사천면 노동리 일원과 삼척시 원덕읍 임원에 위치하고 있으며 각 조사구의 위치는 Fig. 1에 나타내었다. 이 지점은 2000년 대규모 동해안 산불이 발생한 지역이며 2001년에 소규모조사구가 설치되고 강우사상에 따른 유출량과 토사유출량이 조사되었다. Table 1은 본 연구에서 적용된 소규모조사구의 주요 특성을 나타내며 소규모조사구의 면적은 12.46~54.52㎡, 사면길이는 3.98~

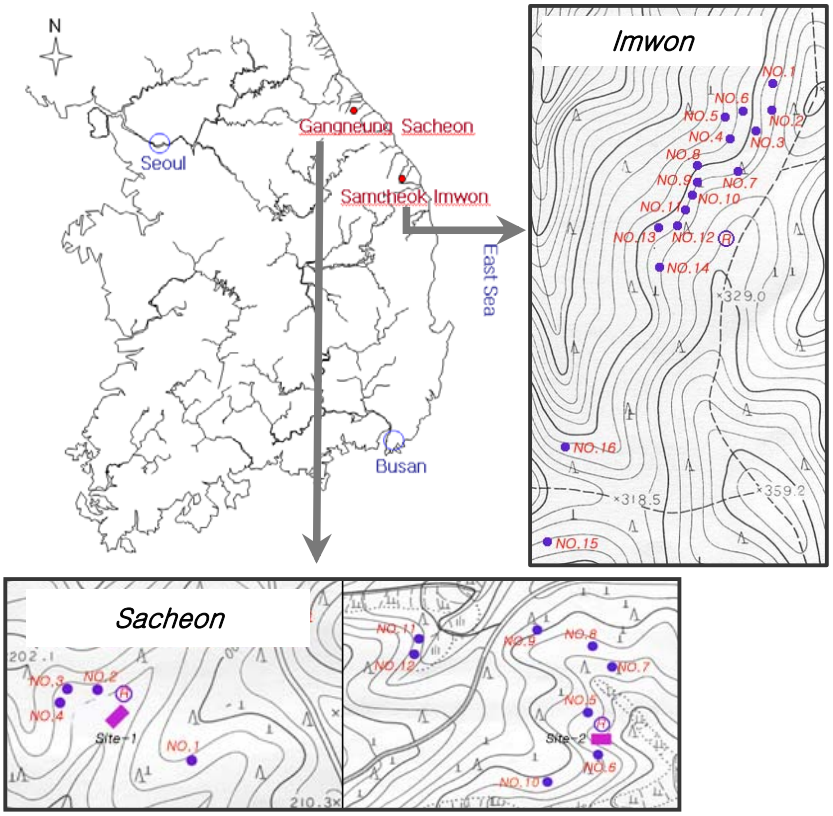


Fig. 1. Location Map of Plots

Table 1. Characteristics of Soil Erosion Plots

Plot name	Area (㎡)	Slope length (m)	Slope gradient (%)	Mean diameter of soil particles (mm)	Fire severity	Vegetation coverage (%)	Location
SC1	12.46	3.98	52.1	1.06	5	50	Gangwon Gangneung Sacheon Nodong
SC3	54.52	10.64	46.6	1.20	5	30	
SC4	27.88	10.44	47.7	0.97	5	50	
SC5	28.73	6.93	55.4	1.81	5	15	
SC10	18.57	6.52	49.9	1.03	5	20	
IW3	29.52	8.75	43.5	2.38	5	30	Gangwon Samcheok Wondeok Imwon
IW4	35.32	9.10	55.4	1.60	5	80	
IW5	22.12	7.12	47.7	1.61	4	85	
IW6	32.01	10.95	56.6	1.50	4	50	
IW14	30.31	11.98	48.8	2.13	5	20	

11.98m, 사면경사는 43.5~56.6%, 토양의 평균입경은 0.97~2.38mm의 범위에 있고 산불강도는 4등급 이상이다. 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(국립방재연구소, 2001). 식생피복도는 산불 다음 해인 2001년의 경우로서 15~85%의 범위를 나타낸다.

3.2 적용조건

본 연구에서 적용한 강우사상은 2001부터 2003년까지 발생한 총 20개의 단일강우이며 그 주요특성은 Table 2에 제시한 바와 같다. 강우사상별 총강우량은 20~959mm이고 최대강우강도는 6.0~113.5mm/hr의 범위에 이른다. 본 연구에서 적용한 WEPP 모형은 Version 2006.5이다. 이 모형의 매개변수 중에 토양의 초기포화도에 대해서는 호우사상별 강우 직전의 현장 실측자료가 없고 산지의 강우 이후 토양함수량의 변화에 대한 모형이 전무하므로 Table 3과 같이 선행강우조건을 가정하여 적용하였다. 여기서 초기포화도는 토양공극의 포화도를 나타내며 초기함수량을 추정하는데 사용되고 자료가 없는 경우는 70%를 가정하여 사용하도록 추천되고 있다. 표토층의 함수량은 강우의 침투, 배수, 토양에서의 증발, 저층토양의 침루 등의 일일조건에 따라 달라지며 저층토양의 함수량은 침루, 식생의 증산작용, 배수형태 등에 영향을 미친다. 세류간침식계수 K_i 는 kg s/m^{4}의 단위이고 다음 Eq. (4)에서 구하며 세류침식계수K_r 은 Eq. (5)를 적용하여 추정한다.

$$K_i = 2,728,000 + 192,100\,VFS \tag{4}$$

$$K_r = 0.00197 + 0.0003\,VFS + 0.3863e^{-1.84\,ORGMAT} \tag{5}$$

여기서 VFS 는 토양의 고운모래 함유량(%)이며 $ORGMAT$는 토양의 유기물함량(%)이다. WEPP 모형의 적용을 위한 유효투수계수 K_b는 토양의 종류, 함수량, 체적밀도 등에 따라 달라지며 mm/hr의 단위이며 Eq. (6)을 사용하여 추정한다.

$$K_b = -0.265 + 0.0086\,SAND^{1.8} + 11.46\,CEC^{-0.75} \tag{6}$$

여기서 $SAND$ 는 모래함유량(%)이고 CEC 는 토양의 양이온교환능($meg/100g$)이다.

3.3 WEPP 적용성 및 개선방안

산불지역 소규모 조사구에 WEPP 모형을 적용한 결과 유출량은 Fig. 2와 같고 토양침식량은 Fig. 3에 나타낸 것과 같다. 유출량이 1mm이하인 경우 WEPP의 유출량은 과대 산정되고 10mm이상으로 큰 경우에는 과소평가되는 것으로 나타났다. 토양침식량이 적은 경우에도 WEPP의 토양침식량은 과대 산정된다. 산불지역이 아닌 경우 이러한 현상은 여러 연구자들(Ghidley, 1995; Kramer and Albert, 1995, Zhang *et al.*, 1996)에 의하여 확인된 바 있으며 Nearing(1998)은 환경조건에 관련된 처리함수로서 침식모형의 예측상 편의에 관련되어 있을 뿐만 아니라 오히려 결정론적 모형의 처리상

Table 2. Rainfall Events for the Application of the WEPP Model

Location	Year	Rainfall events	Rainfall depth (mm)	Maximum rainfall intensity (mm/hr)	Plots
Sacheon	2001	6. 29~30 7. 14~16 7. 23~24 7. 30~31	34.0 59.0 34.0 30.0	8.5 11.0 18.0 8.5	SC1, SC3, SC4
		7. 14~16 7. 23~24 7. 30~31	59.0 29.5 30.5	11.0 14.0 7.5	SC5, SC10
	2002	7. 5~6 8 31~9. 1	162.0 892.0	24.5 92.0	SC1, SC3, SC4
		7. 5~6 8 31~9. 1	123.5 959.0	24.5 113.5	SC5, SC10
	2003	6. 27~28 7.3 7.21~23 7.28~29 9.18~19	108.0 54.0 58.0 24.0 120.5	13.5 6.0 7.5 12.0 23.0	SC5, SC10
Imwon	2001	7. 15~16 9. 6~8 9. 9~10	85.0 47.0 185.0	12.5 13.0 15.0	IW3, IW4, IW5 IW6, IW14
	2002	7. 5~6 8 31~9. 1	182.0 211.0	39.0 51.0	
	2003	7.3 7.28~29 8.18~20 8.24~25	61.5 20.0 62.0 36.0	8.5 6.5 8.5 9.0	

Table 3. Initial Saturation Level for the Application of the WEPP Model

Total 7-day antecedent rainfall depths (mm)	Total 3-day antecedent rainfall depths (mm)	Initial saturation level Si, (%)
0	0	50
0~2	0	70
	1	75
2~5	0	80
	2	85
5~10	0	85
	5	90
Over 10	0	90
	Over 5	95

관측자료의 무작위성분을 나타내는데 존재하는 한계에 관련되어 있다고 가정한 바 있다. 이는 완벽한 결정론적 토양침식 모형이 작거나 큰 관측 값에 관련된 편의가 어떻게 발현되는 가를 나타내며 모형의 적용에 관련된 환경조건의 처리함수로서 과정상 침식량을 정확히 예측한다면 이는 정상적이며 예상되는 바라고 하였다. 따라서 본 연구에서 WEPP모형의 적용상 과대 과소 문제는 모형의 개발이나 그 자체가 지니는 본질적인 한계로 인한 것일 수 있다. 적용결과 과대 혹은 과소 산정시 토양침식의 경우 실측치와의 일치 정도를 나타내는 선에서 넓게 흩어져 있는 것을 Fig. 2와 Fig. 3의 비교에서 확인할 수 있으며, 이에 대해서 Nearing(1998)은 토양침식 자료의 자연변동성이 크기 때문이라고 지적한 것과 같은 맥락인 것으로 판단된다. Wendt *et al.*은

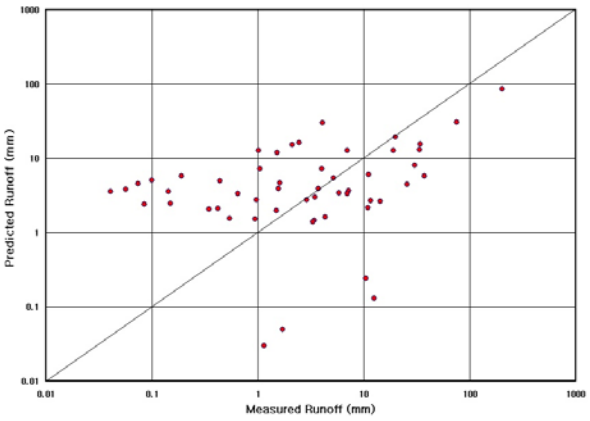


Fig. 2. Comparison of Measured and Predicted Runoff by the WEPP Model

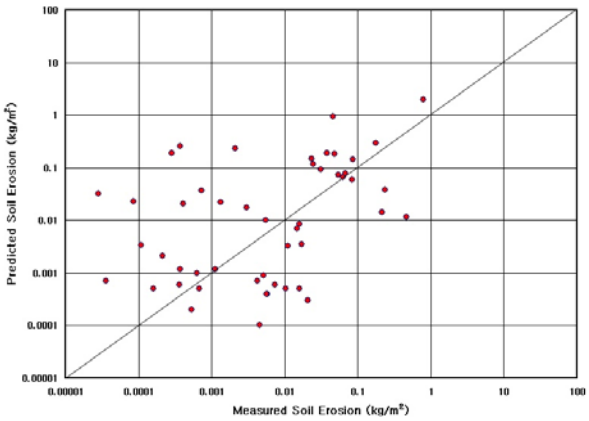
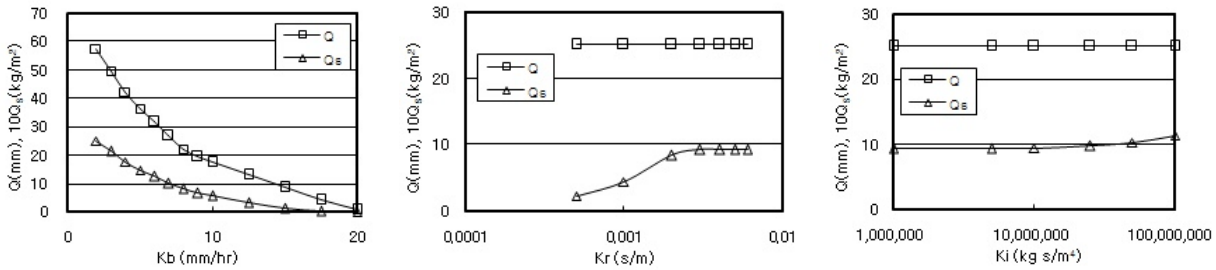


Fig. 3. Comparison of Measured and Predicted Soil Erosion by the WEPP Model



(a) Kb (b) Kr (c) Ki

Fig. 4. Sensitivity Analysis for WEPP's Parameters, Kb, Kr, and Ki, at IW14(2001. 7. 14-15)

(1986) 개별호우에 따른 관측 침식자료의 변동계수 조사를 통해서 과소 혹은 과대 산정된 특성이 토양침식량의 규모에 좌우된다는 것을 확인한 바 있다.

WEPP 모형의 적용성을 향상시키기 위하여 IW14지점을 대상으로 매개변수가 유출 및 토양침식량변화에 미치는 영향을 평가하였다. Fig. 4는 WEPP모형의 매개변수 Kb, Kr 및 Ki에 대한 유출량 Q와 토사유출량 Qs에 미치는 영향을 조사한 것이다. 유출량의 경우에는 유효투수계수와 초기포화도의 순으로 예측결과의 변화에 미치는 영향이 크고 토양침식량의 경우에는 유효투수계수, 세류침식계수, 초기포화도, 세류간침식계수의 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 선정된 산불지역 토양침식 조사구에 대한 WEPP의 적용성 향상방안을 강구하기 위하여 다음과 같은 절차를 따랐다.

① 산불지역 사면에 대해서 강우사상별 WEPP 모형이 제시하는 각 매개변수를 산정하고 이를 이용하여 유출 및 토양침식량을 산정한다.

② 위에서 산정한 WEPP의 매개변수를 그 민감도를 고려하여 유효투수계수, 세류침식계수, 세류간침식계수의 순서로 매개변수 조절하여 WEPP에 의한 유출량 및 토양침식량이 실측 유출 및 토양침식량에 근접하는 최적매개변수를 추정한다.

③ 각 최적매개변수에 대한 조정계수를 구하고 조정계수와 소규모 조사구간의 특성을 조사한다.

4. 최적 매개변수 추정

4.1 유효투수계수

WEPP 모형은 Green-Ampt의 침투모형을 사용하여 침투량을 추정한다. 여기서 투수계수는 WEPP의 적용에 적합하도록 조정되었으며 이를 유효투수계수라고 하고 Eq. (6)을 제시하였다. 유효투수계수는 WEPP모형을 이용하여 유출량과 토양침식량을 산정하는데 대단히 민감한 변수이다. 본 연구에서는 WEPP모형을 산불지역 산지 사면에 적용한 결과 유출량이 적을 경우에는 과대 산정하고 많을 때는 과소 산정하는 경향을 나타내고 있으므로 WEPP 모형으로 실측에 가까운 유출량을 구할 수 있는 유효투수계수를 Eq. (7)과 같이 제시하였다.

$$K_{badj} = C_a K_b \tag{7}$$

여기서 K_{badj} 는 조정유효투수계수이고 C_a 는 유효투수계수의 조정계수이다. 유효투수조정계수는 Fig. 5에서 알 수 있듯이 최대강우강도에 따라 달라지고 사면의 식생인자 H_{cdl} 에 좌우되었으며 그 관계식은 다음 Eq. (8)과 같이 얻어졌다.

$$C_a = -0.228 + 0.0613 I_{\max} + 0.00227 H_{cdl} \quad (8)$$

여기서 $I_{\max}$ 는 최대강우강도(mm/hr)이고 H_{cdl} 은 식생고지수이다. 식생고지수는 이규송과 박상덕(국립방재연구소, 2001)이 산지의 토사유출 및 강우유출량과 식생의 관계를 파악하기 위하여 식생요인을 지수화한 것으로 Eq. (9)와 같다.

$$H_{cdl} = \sum (H_{dl} \times V_{cdl}) \quad (9)$$

여기서 H_{dl} 과 V_{cdl} 은 각각 초본층, 관목층, 아교목층, 교목층, 낙엽층을 나타내는 l 층의 식생고(m)와 그 피복도(%)이며 낙엽층의 두께는 cm단위이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 동일한 최대강우강도조건에서 식생고지수가 증가함에 따라 유효투수조정계수는 증가하는 경향을 나타내고 있으며 이는 Eq. (6)의 유효투수계수가 식생고와 그 피복도가 증가함에 따라 과소 추정되는 것을 나타낸다. 본 연구에서 유효투수계수의 조정계수를 위한 Eq. (8)에 사용된 자료의 범위는 $I_{\max}$ 는 6~113.5 mm/hr, H_{cdl} 는 3.3~465.0, C_a 는 0.12~7.731이었으며 Eq. (8)의 결정계수는 0.915를 나타내었다. Pan과 Shangguan(2006)은 사면경사가 15%이고 식생피복도가 다양한 초지조사구에 대한 실험에서 식생이 유출과 유사량을 충분히 저감시킬 수 있다는 것을 보여주었다. 초지조사구는 나지에 비하여 유출의 경우 14~25%, 유사량에 대해서는 81~95%를 줄이고 호우시 유출보다는 유사량을 줄이는데 중요한 역할을 한다는 것을 확인하였다. WEPP에서는 유효투수계수를 토양인자의 항으로 나타내고 있으나 이는 Green-Ampt의 투수계수와는 다른 WEPP모형에 적합한 투수계수를 의미하기 때문에 토양특성 뿐만 아니라 호우의 조건 및 식생조건에 따라서도 달라진다. 이는 WEPP모형에서 목축지나 휴경지 등의 식생을 고려할 때 강우와 식생조건을 추가하여 산정할 수 있도록 한 것에서도 확인할 수 있다. 따라서 산지의 경우 유효투수계수 추정에 있어 최대강우강도와 식생고지수를 적용한 것은 타당한 것으로 판단된다.

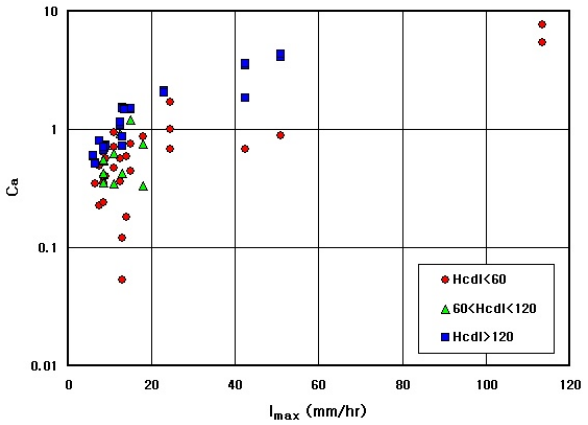


Fig. 5. Influence of Maximum Rainfall Intensity (I_{max})and Vegetation Height Index (H_{cdl}) on Adjustment Coefficient (Ca) of Effective Hydraulic Conductivity

4.2 세류 및 세류간 침식계수

WEPP모형에서 토사유출량 변화는 유효투수계수 이외에 세류침식계수에 가장 민감하게 반응하고 다음으로 세류간침식계수에 따라 달라진다. 따라서 산불지역의 경우 실측토사유출량에 가까운 토사유출량을 추정하기 위해서 조정세류침식계수 K_{radj} 와 조정세류간 침식계수 K_{iadj} 를 다음 Eq. (10) 및 (11)과 같이 구한다.

$$K_{radj} = C_r K_r \quad (10)$$

$$K_{iadj} = C_i K_i \quad (11)$$

여기서 C_r 는 세류침식조정계수(adjustment coefficient of rill erodibility)로서 그 최대치는 0~1이며, C_i 는 세류간침식조정계수(adjustment coefficient of interrill erodibility)이다. 본 연구에서 조정세류침식계수는 WEPP모형에서 제안하는 한계를 초과하지 않는다고 가정한다. 실제로 C_r 을 1이상으로 증가시켜도 WEPP모형에서 토양침식량이 증가하지 않으며 이 경우 WEPP에 의한 토양침식량이 실측토양침식량보다 작다. 또한 세류침식조정계수가 1보다 작은 경우는 WEPP에 의한 토양침식량이 실측토양침식량보다 크다.

조정된 세류간침식계수가 약 4,000,000 kg s/m^4 보다 크면 세류침식조정계수는 1이고, Eq. (5)에서 구한 값을 사용하여야 한다. 이때 최대 강우강도는 약 18mm/hr보다 작고 평균강우강도는 약 5mm/hr보다 작은 것으로 나타났다. 조정된 세류간침식계수가 이 값보다 작으면 세류간침식조정계수는 1이고 세류침식조정

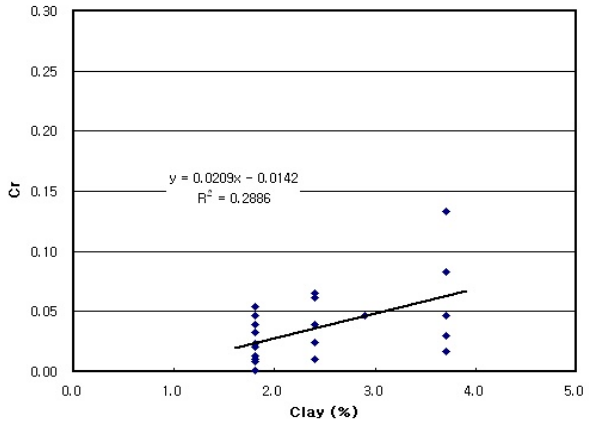


Fig. 6. Relationship between Adjustment Coefficients of Rill Erodibility and Clay of Soil (Cr < 0.15)

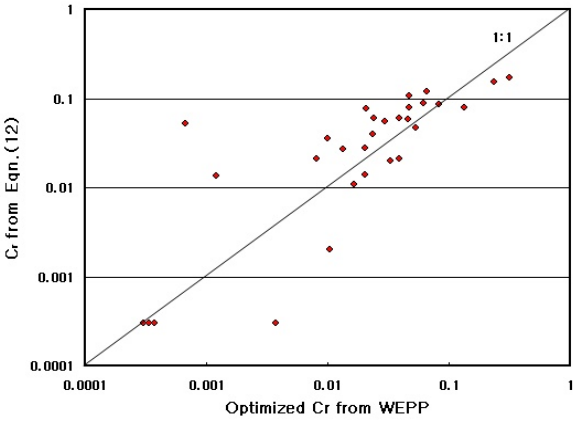


Fig. 7. Comparison of optimized from WEPP and computed Cr from Eq.(12) (Ci < 1)

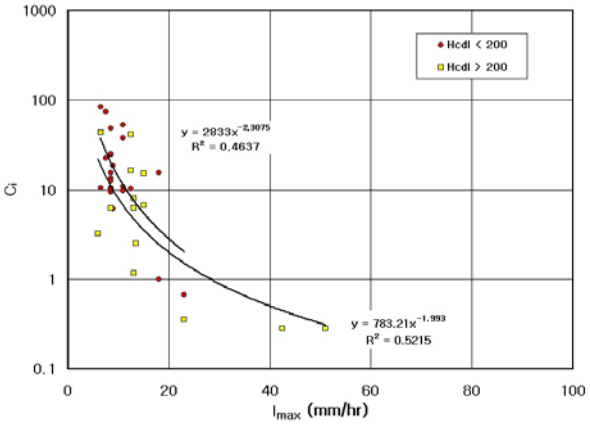


Fig. 8. Influence of Maximum Rainfall Intensity (I_{max})and Vegetation Height Index (H_{cdl}) on Adjustment Coefficient (Ci) of Interrill Erodibility

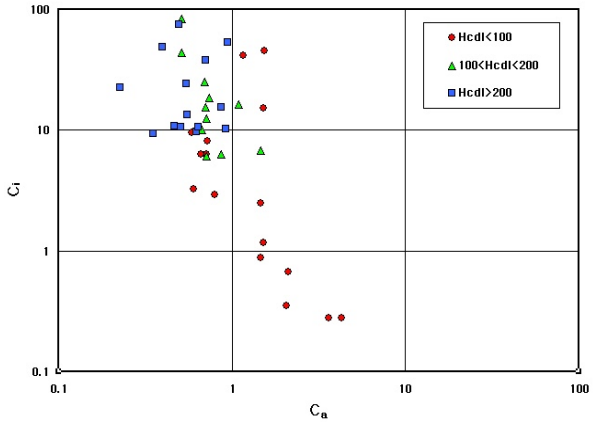


Fig. 9. Relationship between Adjustment Coefficients, Ci and Ca, of Interrill Erodibility and Effective Hydraulic Conductivity

계수는 0.0006~0.4의 범위에 있다. 여기서 세류침식조정계수는 강우강도와 식생고지수에는 거의 관계가 없었으며 토양특성과 호우사상의 총 강우량에 좌우되는 것으로 분석되었다. Fig. 6은 세류침식조정계수가 0.15이하에서 입도분포상의 점토성분과의 관계를 나타낸 것이다. 다중상관분석 결과 세류침식조정계수는 K_i가 0.8~1이면 Eq. (12)의 절대치를 사용되어야 하며 K_i가 약 0.8보다 작으면 $C_r = 0.0003$ 이다.

$$C_r = 3.8408 - 0.10236 log R - 0.4808 CLAY - 3.0404 log S_r + 1.0237 e^{0.01 SAND} \quad (12)$$

여기서 $CLAY$와 $SAND$는 토양입도분포에서 점토와 모래의 백분율(%)을 의미하여 S_r은 점토에 대한 모래의 비를 나타낸다. 이 식의 모든 매개변수들은 유의수준 0.001이하이고 결정계수는 0.563이었다. Fig. 7은 세류간조정계수가 1보다 작은 경우에 대하여 Eq. (12)를 사용한 경우 세류조정계수와 WEPP모형을 적용할 경우 최적세류조정계수간의 관계를 타나내는 것이다. Eq. (12)를 사용할 경우 최적 C_r 값에 비하여 편차가 비교적 큰 것은 식의 도출에 적용된 산불지역 소규모 조사구의 한계에 따른 것으로 판단되며 이에 대한 확대연구가 필요하다.

세류간침식조정계수는 Fig. 8에서 알 수 있듯이 최대강우강도와 식생고지수에 관련되어 있으며, 동일한 강우강도에서 식생고지수가 작으면 세류간침식조정계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 식생고지수가 작으면 WEPP모형에 의한 토양침식량이 다소 과소 산정되

고 이때는 세류간침식계수를 조정하여 보다 실측치에 가까운 토양침식량을 구할 수 있음을 나타낸다. Fig. 9는 유효투수조정계수와 세류간침식조정계수의 관계를 나타내는 것이다. 이 관계를 식으로 나타내면 Eq. (13)과 같으며 이 식의 결정계수는 0.557이다.

$$\log C_i = 1.21 - 1.01 log C_a - 0.00207 H_{cdl} \quad (13)$$

식생고가 클 때가 작을 때에 비하여 유출량이 작게 산정되기 때문에 토양침식량을 위해서는 보다 큰 세류간침식조정계수가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 산불지역에서 단일 강우사상에 대해 WEPP을 적용하고 최적의 유출량과 토양침식량을 추정할 수 있는 매개변수에 대하여 연구하였으며 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 산불지역에 WEPP모형을 적용하면 유출량은 관측 유출량이 1mm이하인 경우 과대 예측되고 10mm 이상에서는 과소 평가되는 것으로 나타났으며, 관측 토양침식량이 적으면 예측 토양침식량이 과대 산정되는 경향이 있다. 산불지역에서 WEPP의 결과변화는 유출량의 경우 유효투수계수가 가장 민감하게 영향을 미치고 토사유출량의 경우에는 유효투수계수, 초기포화도, 세류침식계수, 세류간침식계수의 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2) 산불지역 사면에 대한 WEPP모형의 적용성을 개선하기 위해 유출량에 대해서는 유효투수조정계수를 도입하고 토사유출량의 경우에는 세류침식조정계수와 세류간침식조정계수를 정의하였으며 각 조정계수에 대한 관계식과 적용방안을 제시하였다. 유효투수조정계수는 강우사상의 최대강우강도와 식생인자가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

3) 조정된 세류간침식계수가 약 4,000,000 kg s/m^4 보다 크면 세류침식조정계수는 1이 되고, 세류간침식계수가 이 값보다 작으면 세류침식조정계수는 0.0006~0.4의 범위로 나타났으며 대응하는 세류간침식조정계수는 1이 되었다. 다중회귀분석결과 세류침식조정계수는 호우사상의 총강우량, 토양입도분포의 모래 및 점토 성분과 점토에 대한 모래의 비에 따라 달라지고, 세류간침식조정계수는 최대강우강도와 식생고지수의 증가에 따라 감소하였다.

4) 산불지역에 WEPP을 적용하면 유출량과 토양침식량의 규모에 따라서 과대 혹은 과소 산정될 수 있다. 이는 WEPP의 매개변수를 조정하면 실측치에 가까운 예측 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구의 결과를 이용하여 산불지역 사면의 유출 및 토양침식량을 보다 현실적으로 추정할 수 있을 것이다. 또한 산불지역에서 적용 사면과 강우사상의 범위를 확대할 때 WEPP모형의 편의성 분석, 강우 직후 시간에 따른 산지토양의 포화도 변화와 세류침식 및 세류간침식 조정계수의 특성, WEPP의 주요 매개변수 추정기법 등에 관한 추후 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 강릉대학교 학술진흥재단의 해외장기파견연구비 지원에 의한 것으로 강릉대학교에 감사드립니다.

참 고 문 헌

국립방재연구소 (2001). **강원도 산불지역 재해의 저감대책 수립**. pp. 185-226.

국립방재연구소 (2002). **산불재해에 대한 요인분석과 대책**. pp. 61-68.

국립방재연구소 (2003). **산지지역 우수 및 토사유출량 관측 및 저감대책 수립**. pp. 29-91.

박상덕 (2005). "산불지역 2차피해방지를 위한 하천관리." 동해안 대형산불의 교훈 : 진단과 예방 및 복구, 강원발전연구원, 연구보고서 05-01, pp. 65.-79.

박상덕, 신승숙, 이규송 (2005). "산불지역 유출 및 토양침식 민감도." **한국수자원학회 논문집,** 한국수자원학회, 제38권, 제1호, pp. 59-71.

이규송, 정연숙 (1999). "산불로 교란된 고성지역에서 자연복원지와 조림복원지의 영양염류수지 비교." 동해안연구, Vol. 10, No. 1, pp. 137-153.

이규송, 정연숙, 김석철, 신승숙, 노찬호, 박상덕 (2004). "동해안 산불로 피해지에서 산불 후 경과 년 수에 따른 식생 구조의 발달.", **한국생태학회지**, 한국생태학회, Vol. 27, No. 2, 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.

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.

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.

Flanagan, D. C. and Nrearing, M. A. (1995). *USDA-Water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation*. NSERL Report No.10 West Lafayette, IN: USDA-ARS NAtional Soil Erosion Research Laboratory.

Ghidey, F.E., Alberts, E.E., and Kramer, L.A. (1995). "Comparison of run-off and soil loss predictions from the WEPP hillslope model to measured values for eight cropping and mangement treatment." *ASAE* paper No. 95-2385, ASAE Publ., St. Josehp, MI.

Hibbert, A.R. (1985). "Storm runoff and sediment production after wildfire in Chaparral." *In Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwes*t, AWRA: Las Vegas, NV; pp. 31-42.

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.

Kramer, L. A., and Alberts, E. E. (1995). "Validation of WEPP 95.1 daily erosion simulation." *ASAE* paper No. 95-2385, ASAE Publ., St. Josehp, MI.

Lane, L.J., Nichlls, M.H., Levick, L.R., and Kidwell, M.P. (2001). A simulation model for erosion and sediment yield at the hillslope scale. In: Harmon, R.S., Doe,w.w.III, Landscape Erosion and Evolution Modeling, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp.201-237.

Lundekvam, H. E. (2007). "Plot study and modelling of hydrology and erosion in southeast Norway." *CATENA,* Vol. 71. pp.200-209.

McCuen R. H. (1973). "The role of sensitivity analysis in hydraulic modeling". *Journal of Hydrlolgy,* Vol. 18. pp.37-53.

Meyer, L. D. and Wischmeier, W. H. (1996). "Mathmatical simulation of the process of soil erosion by water." *Trans. of the ASAE*, Vol. 12, No. 6, pp. 754-758.

Nearing, M. A. (1998). "Why soil erosion models over-predict small soil losses and uner-predict large soil losses." *CATENA,* Vol. 32. pp. 15-22.

Nearing MA, Deer-Ascough L, and Laflen J. M. (1990). "Sensitivity of the WEPP hillslope version soil erosion model." *Trans. of the ASAE,* Vol. 33, pp. 839-849.

Onda, Y., Dietrich, W. E. and Booker F. (2008). "Evolution of Overland flow after a sever forest fire, Pont Reyes, California." *CATENA,* Vol. 72. pp. 13-20.

Pan, C. and Shangguan Z. (2006). "Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions." *Journal of Hydrology,* Vol. 331. pp. 178-185.

Park, S.D., Lee, K.S., Huang, C.H., Yoon, Y.H. and Shin, S. S. (2005). "Postfire Soil Erosion in Burnt Mountain Slopes." *Proceedings of 31st IAHR Congress: Water Engineering for the Future-Choices and Challenges*, IAHR, Soul, Korea, pp. 3748-3756.

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 Hydrlolgy,* Vol. 121. pp. 239-256.

Soto, Benedicto and Diax-Fierros, Francisco (1998). "Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model." *CATENA,* Vol. 31. pp. 267-268.

Wendt, R. C., Alberts, E.E., and Hjelmfelt, A.T. Jr. (1986). "Validation of run-off and soil loss from fallow experimental plots." *SSSAJ,* Vol. 50, pp. 730-736.

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.

Zhang, X.C., Nearing, M. A., Risse, L. M., and McGreger, K. C. (1996). "Evaluation of run-off and soil loss predicting using natural run-off plot data." *Trans. of the ASAE*, Vol. 39, No. 3, pp. 855-863.

(논문번호:08-30/접수:2008.02.29/심사완료:2008.04.10)