

WEPP 모형을 이용한 경사지 토양유실량 추정

Estimating of Soil Loss from Hillslope Using WEPP Model

손정호* · 박승우 · 강민구 (서울대)

Son, Jung Ho · Park, Seung Woo · Kang, Min Goo

Abstract

The purpose of this study was to estimate of soil loss form hillslope using WEPP(Water Erosion Prediction Project) model. WEPP model was developed for predicting soil erosion and deposition, fundamentally based on soil erosion prediction technology. The model for predicting sediment yields from single storms was applied to a tested watershed. Surface runoff is calculated by kinematic wave equation and infiltration is based on the Green and Ampt equation. Governing equations for sediment continuity, detachment, deposition, shear stress in rills, and transport capacity are presented. Tested watershed has an area of 0.6ha, where the runoff and sediment data were collected. The relative error between predicted and measured runoff was -16.6~2.2 %, peak runoff was -15.6~2.2% and soil loss was -23.9~356.5%.

1. 서론

우리나라 국토면적의 64.7%에 해당되는 약 643만 ha가 산지이며, 농경지는 19.1%인 190만 ha이며 이중 밭의 면적은 75만 ha로 국토면적의 7.5%를 차지한다. 이들 밭토양은 필지규모가 작으며, 불규칙한 다각형형태로 경사지에 분포하며, 유기물 함량이 작고, 모래함량이 많고 토양 구조의 발달이 미약하기 때문에 토양침식을 받기 쉬우며, 년강우량의 대부분이 집중되는 6~8월에 많은 양의 표토가 유실된다.

경사지로부터 유실된 토사는 하류의 댐, 저수지, 수로 등의 수리구조물에 퇴적되어 내용적을 감소시키거나 통수능력을 감소시켜 기능을 저하시키며, 이를 준설하기 위하여 막대한 예산의 투입이 필요하다. 또한, 유실되는 토사는 하천의 농도를 높이며 토립자와 함께 비료나 농약성분이 유실되어 호수의 부영양화를 초래하거나 하류구간의 심각한 수질 문제를 일으키기도 한다.

침식과 퇴적 등에 의한 경사지의 토양유실 문제를 해결하는 최선의 방법은 토양침식이 발생하는 곳이나 인접한 지점에서 침식량을 억제하거나 조절하는 것이다. 이를 위해서는 침식원을 분명히 하고, 이로 인한 하류구간의 영향을 규명해야 하나, 경사지의 토양유실량을 실측하고 분석하는데는 많은 경비와 시간이 소요되고, 결과도 특정한 지역에 국한된다는 단점을 갖고 있다. 따라서, 대상구역의 토양침식을 모의할 수 있는 모형을 적용하게 되며, 적절한 모형은 토

지이용 등에 따른 유역의 침식 및 퇴적량의 변화를 분석할 수 있으며 저감대책을 강구할 수 있다.

경사지로부터 토양유실 예측 방법은 Wishmeier 등이 USLE 식을 제안 후 인자간의 영향을 고려한 RUSLE 식으로 발전해 왔으며, 1970년대 이후에는 ANSWERS, CREAMS, MODANSW, WEPP 모형 등과 같이 수문모형과 결합한 토양유실모형이 개발되어 토양유실량 추정에 사용되고 있다. WEPP(Water Erosion Prediction Project) 모형은 단일 포장 형태의 경사지나 유역의 경우에 의한 유출 및 토양유실을 예측하기 위한 모형으로 Laflen 등(1991)에 의해 개발되어 미국 농무성을 중심으로 수정 보완되어 오고 있다.

본 연구는 경사지 토양유실량 추정 및 저감방안 마련을 위한 기초적인 연구로서, 단일포장에서 강우사상에 의한 유출 및 토양유실량의 추정에 대한 WEPP 모형의 적용성을 평가하였다.

II. 모형의 구성

1. 수문모형

WEPP 모형에서 지표유출은 강우강도가 침투율을 초과할 경우 발생하며, 식 (1)과 같은 Kinematic wave 방정식을 사용하여 계산한다.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = ri - f = V \quad (1)$$

$$q = \alpha h^{3/2}, \quad \alpha = CV^2S \quad (2)$$

여기서, y 는 수심 (cm), q 는 단위폭당 유량(cm^2/h), x 는 거리 (cm), ri 는 강우강도 (cm/h), V 는 초과강우량 (cm/h), α 는 수위-유량계수, C 는 Chezy 마찰계수, S 는 경사를 나타낸다.

침투량은 식 (3)과 같은 Green-Ampt 식을 사용하여 계산한다.

$$f_t = k_e \left(1 + \frac{N_s}{F}\right) \quad (3)$$

여기서, f 는 침투율(mm/h), k_e 는 유효포화수리전도도(cm/h), t 는 시간, N_s 는 유효 메트릭 포텐셜(cm), F 는 누가침투량(cm)을 나타낸다.

식 (3)에서 유효 메트릭 포텐셜(N_s)는 식 (4)와 같이 계산한다.

$$N_s = (\eta_e - \theta)\phi \quad (4)$$

여기서, η_e 는 0~20 cm 표층의 유효 공극율, θ 는 토양수분, ϕ 는 습윤전진 모세관 포텐셜 (average wetting front capillary potential, cm)을 나타낸다.

2. 토양침식 모형

토양침식 모형의 지배방정식은 식 (5)와 같이 정상상태의 유사 연속방정식을 사용한다.

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (5)$$

여기서, x 는 거리(m), G 는 유사량 ($\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}$), D_i 는 골간침식율, D_f 는 골침식율을 나타낸다. 골간 침식율 D_i 는 식 (6)과 같이 골이나 수로 등으로 유사가 운송되는 과정을 개념화하여 계산한다.

$$D_i = K_i \times I \times I_e \times S_f \times \text{SDR} \quad (6)$$

여기서, K_i 는 골간토양침식능 ($\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}$), I 는 강우강도(m/s), I_e 는 골간 유출율(m/s), S_f 는

경사, SDR은 골간유사운송비율을 나타낸다.

골 침식율 D_f 은 수리학적 전단응력이 토양의 한계전단응력을 초과하고, 유사운송능 보다 유실량이 작을 경우 발생하게 되며 식 (7)과 같다.

$$D_f = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) \quad (7)$$

여기서, D_c 는 골흐름에 의한 토양분리능($\text{kg/s} \cdot \text{m}^2$), T_c 는 골에서 유사운송능($\text{kg/s} \cdot \text{m}$)을 나타낸다.

골 흐름의 수리학적 전단응력이 토양의 한계전단응력을 초과할 때 토양분리능 D_c 는 식 (8)과 같다.

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_c) \quad (8)$$

여기서, K_r 은 골침식능(s/m), τ_f 는 토양입자에 작용하는 전단응력, τ_c 는 한계전단응력(Pa)을 나타낸다.

III. 모형의 적용

1. 시험포장

모형의 적용성을 평가하기 위하여 김(1989)이 ANSWERS 모형의 적용성을 평가하기 위하여 강우에 의한 유출량과 토양유실량을 측정된 서울대학교 농업생명과학대학 부속 목장의 경작초지를 선정하였다. 선정된 시험포장의 면적은 약 0.6ha 이며, 작물은 옥수수-수단그라스, 피이다. 시험포장의 토양분포는 (그림 1)과 같으며, 토양의 종류는 원곡, 고평통이며, 물리적 특성은 <표 1>과 같다.

<표 1> 시험포장 토양의 물리적 특성

Type	토양통명	토양입자분포 (%)			OMC (%)	토성
		Silt+VFS	Sand	Clay		
I	원곡	52.7	29.8	13.9	1.4	Loam
II	고평	59.3	5.9	34.8	1.0	Silty Clay

2. 유출량 및 유사량 조사

시험포장으로 부터의 유출량은 김 (1989)이 유출구의 말단에 H 프름을 제작하여 수위-유량 관계를 구한 후 수위로부터 유량으로 환산한 결과를 이용하였다. 시험포장의 유출에 따른 토양 유실량은 시험포장의 유출수를 채수하여 수문곡선의 상승부와 하강부로 분류한 유량과 유사농도의 관계를 규명한 식 (9), (10)과 같은 유출량-유사농도 관계를 이용하여 계산하였다.

$$\text{수문곡선 상승부} : S = 0.651Q^{1.73} \quad (9)$$

$$\text{수문곡선 하강부} : S = 26.891 - 0.653Q + 0.275Q^2 \quad (10)$$

여기서, S는 유사농도(mg/l), Q는 유량(l/s)를 나타낸다.

3. 모형의 적용

(1) 지표유출요소

WEPP모형에서는 동일 구역에서 구역의 작부체계나, 토양 특성이 다른 경우 여러개의 지표유출요소로 나뉘어서 유출을 계산한 다음 합성하여 구역의 유출 및 토양유실량을 계산한다. 따라서, 시험포장 토양의 물리적 특성이 두가지로 대별되므로 시험포장을 두 개의 지표유출요소로 구분하였다.

(2) 토양침식능

토양유실량에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 토양침식능에 관련된 매개변수로 골간침식능 (K_i), 골침식능 (K_r), 한계전단응력 (τ_c)은 <표 2>와 같이 WEPP 모형에서 적용하는 토양 성분과 토양 침식능과의 관계식을 이용하였다. <표 2>와 같이 토양침식능에 관련된 매개변수는 경작토양의 모래함양 30 %을 기준으로 과다, 과소로 구분된다.

<표 2> 토양 침식능 매개변수

모래함양	K_i (kg · s/m ⁴)	K_r (s/m)	τ_c (Pa)
30% 이상	$2728000 + 192100 \times VFS$	$0.00197 + 0.0003 \times VFS + 0.03863e^{(-1.84 \times OM)}$	$2.67 + 0.065 \times Clay - 0.058 \times VFS$
30% 이하	$6054000 - 55130 \times Clay$	$0.0069 + 0.134 \times e^{(-0.20 \times Clay)}$	3.5

VFS : Very Fine Sand 함유율 (%), Clay : 점토함유율 (%)

(3) 적용 결과

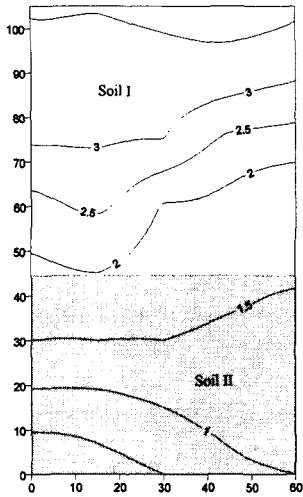
WEPP 모형의 적용성은 시험포장의 St712~St715의 4개의 폭우사상에 대하여 유출량과 토양유실량을 모의 하여 실측치와 비교하여 평가하였다. 모의 사상의 강우량은 29.2~71.2 mm이었으며, 유출율은 13.1~74.0 %이었다.

<표 3>은 실측치와 모의치의 총유출량, 침투유출량, 토양유실량을 비교한 것이며, (그림 2)~(그림 4)는 이를 도식적으로 나타낸 것이다. 실측치와 모의치간의 상대오차는 총유출량이 -16.6~2.2 %, 침투유출량이 -15.6~4.0 %, 토양유실량이 -23.9~356.4%를 나타냈다.

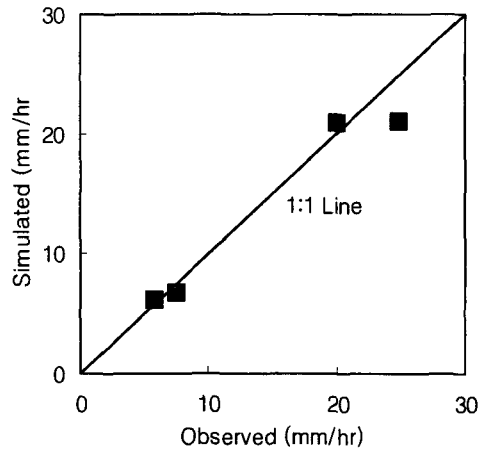
<표 3> 폭우사상별 실측치와 모의치 비교

강우 사상	강우량 (mm)	유출율 (%)	총유출량 (mm)			침투유출량 (mm/h)			토양 유실량 (kg)		
			실측	모의	RE	실측	모의	RE	실측	모의	RE
St712	71.2	13.1	9.34	8.22	-12.0	7.52	6.73	-10.5	2.8	12.78	356.4
St713	39.8	47.0	29.47	24.58	-16.6	24.88	21.00	-15.6	37.9	36.9	-2.6
St714	29.2	63.4	18.51	18.91	2.2	5.82	6.17	6.0	18.3	13.92	-23.9
St715	51.5	64.6	33.29	32.56	-2.2	20.06	20.87	4.0	52.5	51.42	-2.1

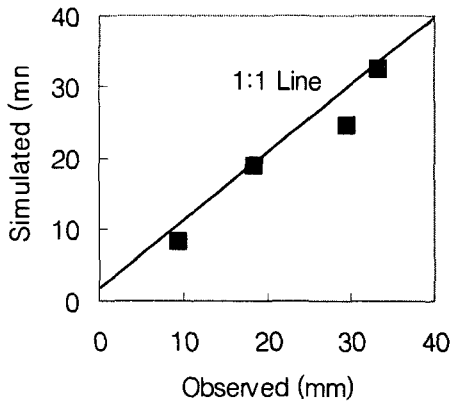
RE : Relative Error (%)



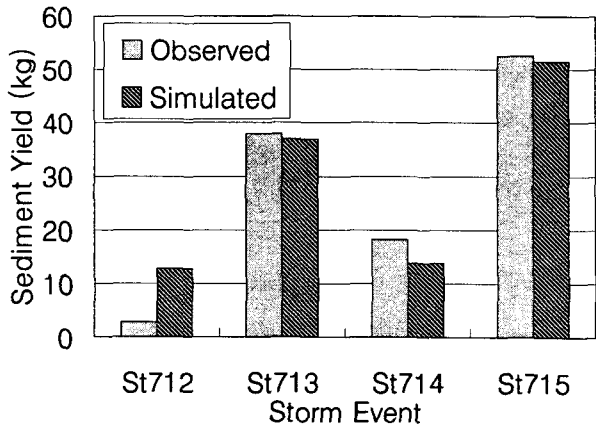
(그림 1) 시험포장 지형



(그림 2) 첨두유출량 실측치와 모의치 비교



(그림 3) 총유출량 실측치와 모의치 비교



(그림 4) 토양유실량 실측치와 모의치 비교

IV. 요약 및 결론

본 연구는 경사지 토양유실량 추정 및 저감방안 마련을 위한 기초적인 연구로서, 단일포장에 서 강우사상에 의한 유출 및 토양유실량의 추정에 대한 WEPP 모형의 적용성을 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① WEPP 모형의 적용성을 평가하기 위하여 단일 포장의 St712~St715의 4개의 폭우사상에 대하여 유출량과 토양유실량을 모의 하여 실측치와 비교하였다.
- ② 실측치와 모의치간의 상대오차는 실측치와 모의치간의 상대오차는 총유출량이 -16.6~2.2 %, 첨두유출량이 -15.6~4.0 %, 토양유실량이 -23.9~356.4%를 나타냈다.

참 고 문 헌

1. 김진택, 1989, 소유역의 토양침식 및 퇴적모형의 적용, 서울대학교 석사학위논문.
2. 농촌진흥청, 농업과학기술원, 2000, 발토양환경보전기술 종합보고서(1995~1999).
3. 이병렬, 김영찬, 1999, 자바/소켓을 이용한 DOS-WEPP(Water Erosion Prediction Project)의 인터넷 활용모형, 농업정보과학, 1(1) : 43-48.
4. Flanagan, D.C., and M.A. Nearing, 1995, USDA-Water Erosion Prediction Project : Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47097-1196
5. Laflen, J.M., L. J. Lane and G. R. Forster, 1991, WEPP : A new generation of erosion prediction technology. J. soil and water conservation, 46(1) : 34-38.
6. Savabi M. R., 1994, Modeling Subsurface Drainage and Surface Runoff with WEPP, J. irrigation and drainage engineering, 119(5) : 801-813.