

물리적인 기반의 토양침식모델 개발

Physically-based Soil-water Erosion Model

- Based on Hairsine and Rose's Concept -

김 성 준
Kim, Seong Joon

Summary

A physically-based soil-water erosion model with simple hydrology and Rose & Hairsine's erosion concept is described, and was implemented in the form of computer program. The model derived from the concept of stream power(Bagnold, 1977) considers settling velocity characteristics of the soil and distinguishes between the processes of entrainment and re-entrainment. It deals separately with rill flow and sheet flow, handles vegetation in terms of soil contact cover, and has the ability to simulate soil movement on nonuniform slopes. The model predicted sediment concentrations reasonably with the results of McIsaac et al. (1990). It showed a capability to quantitatively predict the movement of soil on uniform and nonuniform slopes. Among the model parameters, soil depositability (ϕ) was the most sensitive from the sensitivity analysis.

I. 서 론

토양침식의 예측은 토양보전의 계획 및 설계를 위하여 가장 광범위하게 사용되며 가장 효과적인 도구이다. 현재 물에 의한 토양침식은 아직까지 대부분 USLE(Universal Soil Loss Equation, Wischmeier and Smith, 1978)를 사용하여 예측하고 있는 실정이다. 그러나 USLE는 토양손실의 변화를 통계적으로 설명해 주는 자료의 요약이므로, 자료의 범위를

벗어난 외삽에는 적합하지 않다. 또한 USLE는 고랑재배, 등고선재배, 조파재배 및 불균등 사면에서는 잘 맞지 않는다(Foster, 1991). 토양침식의 정확한 산정을 위한 기본적인 필요성(Soil Conservation Service, 1987)뿐만 아니라 공공정책의 개발과 실행, 지표유출로 이동된 화학물질의 평가 등 이들은 모두 좀더 나은 토양침식 예측모델을 요구하고 있다.

현재 토양침식의 예측경향으로는 물리적인 모델을 개발하는 연구가 활발하다. 침식과정

의 물리적인 모델은 그의 활용성을 검증하는 데이터베이스의 한계를 뛰어넘어 외삽 및 일반화할 수 있으며(Rose, 1993), 매개변수의 최소보정 또는 보정없이도 퇴사이동을 모의할 수 있는 능력을 가지고 있다(Bingner, 1990). 컴퓨터 프로그램으로 물리적인 모델을 실행한다는 것은 지형을 고려해야 하며(Elliot, 1993), 수문과 작물생육과 같이 침식조건에 영향을 주는 제반 과정들을 포함해야 한다(Foster and Lane, 1987). WEPP(USDA Water Erosion Prediction Project)은 물리적인 토양침식기법을 컴퓨터화하여 개발한 노력의 결과이다.

어떤 모델이 포장단위의 지표침식을 하천침식과 연계시켰다 할지라도 포장퇴사의 특성이 점토질에 치우쳐 있고 토양이 일반적으로 넓은 범위의 토립자들로 구성되어 있으므로 포장단위에서 일어나는 과정은 실제와 다르다(Hairsine and Rose, 1992a). 토양의 침전속도 특성을 고려한 과정은 점질 토립자의 분포등급 침식 및 침전을 고려할 수 있다. 또한 점질토의 운송과 취약퇴적층의 운송간의 구분은 stream power가 침식을 야기시키는 방법을 통하여 보다 나은 예측이 가능하다.

본 논문에서는 간단한 수문개념을 적용하여 토립자의 침전속도특성을 고려하고 토사의 운송과 재운송을 구분함으로써 물리적인 토양침식모델을 개발하였다. 불균등 사면자료를 입력시에도 프로그램이 수행되도록 하였다. 본 모델은 골흐름(rill flow)와 면흐름(sheet flow)을 모두 고려할 수 있으며, 각 흐름상태가 될 수 있는 가능성을 예측할 수 있다. 본 논문은 모델의 이론적인 배경을 기술하고, McIsaac et al.(1990)의 실험치와 본 모델의 결과를 비교하고, 다양한 사면경사(오목, 평평, 볼록) 조건하에서 모델을 적용시켜봄으로써 모델의 적용가능성을 보여주고자 한다.

II. 모델의 기본이론

Hairsine과 Rose(1992a,b)의 침식 기본이론은 “지표면과 물사이에서 발생하는 전단응력에 대응하여 지표유출시에 발생하는 일의 비율”로 정의되는 stream power개념이다. Stream power(Ω , W/m²)는 다음 식과 같이 표현된다(Bagnold, 1977).

$$\Omega = \rho g S R_h V \dots\dots\dots (1)$$

여기서 ρ =물의 밀도 (kg/m³), g =중력가속도 (m/s²), S =사면경사 (m/m), R_h =동수반경 (m), V =유속 (m/s)이다.

1. 면 흐름(sheet flow)

Stream power의 일부는 토사의 운송(entrainment) 및 재운송(re-entrainment)과정을 통하여 지표유출시에 퇴사농도를 증가시키는 역할을 한다. 운송한계(transport limit, Foster, 1982)라 불리는 농도 상한치 C_t (kg/m³)는 나지상태에서의 sheet flow상태에서 Hairsine and Rose(1992a)가 제시한 다음 식과 같다.

$$C_t = \frac{F\rho}{\Phi} \left(\frac{\sigma}{\sigma - \rho} \right) SV \dots\dots\dots (2)$$

여기서 F =토양침식에 유효한 stream power의 비율, σ =퇴사밀도 (kg/m³), Φ =토양침전능 (soil depositability, m/s)이다. 토양침전능은 다음 식과 같다(Rose, 1993).

$$\Phi = \sum_{i=1}^I V_i/I \dots\dots\dots (3)$$

여기서 i =입의 등급, V_i =토립자 총량을 I 개의 등급으로 구분하여 가정한 퇴사침전속도 (m/s). 운송한계 C_t 는 지표면이 퇴적층으로 완전히 덮여 있을 때 발생하는 최대농도이다.

따라서 Rose는 간단한 침식매개변수 $\beta(0 \leq \beta \leq 1)$ 를 도입하여 C_t 를 실제농도로 환산하는 방법을 제시하였다.

$$\bar{C} = \bar{C}_t^\beta \dots\dots\dots (4)$$

여기서 \bar{C} =침식기간의 평균퇴사농도 (kg/m^3), \bar{C}_t =운송한계에서의 평균퇴사농도 (kg/m^3). 본 모델에서 β 는 침식이 예상되어 퇴사농도가 운송한계에 도달할 때의 상한치(high β)와 침전이 예상되어 퇴사농도가 운송한계에 미치지 못할 때의 하한치(low β)를 갖는다.

2. 골 흐름(rill flow)

대부분의 경우 지표유출은 sheet flow보다는 rill을 형성하면서 발생한다. 폭이 $W_r(\text{m})$ 이고 수심이 $D(\text{m})$ 인 직사각형 rill을 가정하면 C_t 는 다음 식으로 표현할 수 있다(Hairsine and Rose, 1992b).

$$C_t = \frac{F}{\phi} \left(\frac{\sigma}{\sigma - \rho} \right) \frac{\Omega}{gD} \left(\frac{W_r}{W_r + 2D} \right) \dots\dots\dots (5)$$

여기서 $W_r/(W_r + 2D)$ 는 전단응력이 윤변($W_r + 2D$)에 균등하게 작용할지라도 재운송은 rill의 바닥에 있는 퇴적층에서만 발생하므로 첨가한다. 또한 동수경사는 $R_h = D$ 대신에 $R_h = W_r D / (W_r + 2D)$ 이므로 sheet flow와는 그 표현이 다르다. 따라서 직사각형 rill에 대한 C_t 는 다음과 같다.

$$C_t = \frac{F \rho S V}{\phi} \left(\frac{\sigma}{\sigma - \rho} \right) \left(\frac{W_r}{W_r + 2D} \right)^2 \dots\dots\dots (6)$$

3. 식생 흐름(vegetation flow)

식생피복은 지표면의 조도(roughness)를 증가시키고 토양이 지나고 있는 전단응력의 일부를 흡수하므로 결국 지표흐름에서의

stream power를 감소시킨다.

식생상태에서 지표유출로 인한 퇴사농도를 표현하기 위하여 하향사면에서의 단위 폭당 지표유출조건에서 사면의 시작부분은 나지이고, 곧바로 ($x=0$, 여기서 x 는 사면길이) 식생이 존재한다고 가정한다. $Q = P - I(\text{m/s})$ 의 일정한 초과강우가 있다고 하면(여기서 Q 는 초과강우량, P 는 강우, I 는 침투), 지표유출 $q(x)$ 는 사면길이 x 의 함수로 표현된다.

$$q(x) = q_0 + Qx \dots\dots\dots (7)$$

여기서 $q(x)$ 단위폭당 지표유출량 (m^2/s), q_0 =사면 시작점($x=0$)에서의 단위폭당 지표유출량 (m^2/s). 식생으로 지표유출이 들어가면서 농도는 급격히 변화할 것이다. 생각보다는 짧은 거리($x=x_0$)에서 퇴사농도는 최소치에 도달할 것이며, 그 이후부터는 농도의 변화가 포착하기가 힘들어진다.

흐름의 법칙에 근거하여 퇴사유동의 변화는 운송율과 재운송율에서 퇴적율을 제하면 된다. 운송을 배제한 상태에서 재운송의 발생여부는 사면이 새로이 형성된 퇴적층의 정도에 달려 있다. 사면의 일부가 퇴적층을 이루어 운송과 재운송이 함께 작용하는 부분($x > x_0$)에 대해서는 퇴사농도가 증가한다고 가정하는 것이 바람직하다. Hairsine and Rose(1992a)는 퇴적층이 지표면의 일부(H)를 덮고 있다고 가정한 상태에서 운송과 재운송이 함께 발생하는 상태를 기술한 바 있다. 여기서는 이들이 제시한 임의의 등급(i)에 속하는 토립자의 운송율(r_i , $\text{kg}/(\text{m}^2/\text{s})$)을 식생조건에 맞게 적용하였다.

$$r_{ri} = (1 - H) \frac{F \phi}{J} (1 - C_g) \dots\dots\dots (8)$$

여기서 J =토양 운송의 비에너지 (J/kg), H =퇴적층 비율, C_g =잠재피복비율, 따라서 $(1 -$

C_g 는 나지비율이 된다 ($0 \leq C_g \leq 1$, $C_g = 0$ 이면 나지). 식생피복시에 등급 i 의 재운송 (r_{ri} , $\text{kg}/(\text{m}^2/\text{s})$)은 다음과 같다(Hairsine and Rose, 1992a).

$$r_{ri} = \frac{\alpha_i H F \Phi}{gD} \left(\frac{\sigma}{\sigma - \rho} \right) \frac{M_{di}}{M_{dt}} (1 - C_g) \dots\dots\dots (9)$$

여기서 M_{di}/M_{dt} = 퇴적층에서 등급 i 의 질량비, α_i = 불균등 수직퇴적분포를 허용하는 매개변수이다.

퇴적층 비율 H 와 stream power Ω 는 기본적인 매개변수들로 표현이 가능하다. 나지의 전단응력에 영향을 줄 잠재피복비율 C_g 를 활용하면 식 (1)에 의하여 Ω 는 결정된다. $\tau_s = \rho gSD(N/\text{m}^2)$ 가 지표면 총전단응력이라면, τ_s 는 나지에서 전단응력(τ_{ss})과 식생에서의 전단응력(τ_{sc})의 두 부분으로 나눌 수 있다. 나지에 사용된 전체전단응력의 비(τ_{ss}/τ_s)는 나지비율 ($1 - C_g$)의 함수로 나타낼 수 있다. 식생은 잠재피복비율 C_g 만큼 차지하고 있고 유속이 감소되어 경계층을 감소시키므로 이 함수는 다음과 같이 비선형함수로 가정할 수 있다(Siepel, 1994).

$$\frac{\tau_{ss}}{\tau_s} = (1 - C_g)^n \dots\dots\dots (10)$$

여기서 n (나지전단계수)은 실측자료로부터 모형을 보정하여 결정한다. 나지상태에서의 전단응력과 stream power는 다음과 같다.

$$\tau_{ss} = \rho gSD(1 - C_g)^n \dots\dots\dots (11)$$

$$\Phi = \tau_{ss} V = \rho gSDV(1 - C_g)^n \dots\dots\dots (12)$$

식생상태에서의 유속은 x 의 함수로 추정할 수 있다. 유속은 Manning식의 동수반경(R_h)와 관계된다. sheet flow에서는 $R_h = D$ 이므로, Manning식을 D 로 정리하면,

$$D = R_H = \left(\frac{Vn}{S^{1/2}} \right)^{3/2} \dots\dots\dots (13)$$

여기서 n = Manning 조도계수이다. n 은 입력 매개변수로 처리할 수도 있지만, 본 연구에서는 다음과 같이 C_g 의 선형함수로 표현하였다.

$$n = 0.05C_g + 0.03 \dots\dots\dots (14)$$

식 (7)과 식 (13)을 연속방정식($q = VD$, 단위폭)에 대입하여 V 로 정리하면 다음 식과 같다.

$$q_0 + Qx = V \left(\frac{Vn}{S^{1/2}} \right)^{3/2} \dots\dots\dots (15)$$

$$V = \frac{S^{0.3}}{n} (q_0 + Qx)^{0.4} \dots\dots\dots (16)$$

본 논문에서는 $x \geq x_0$ 에서의 침식에서 재운송율이 퇴적율과 같다고 가정한다. 이 가정은 운송율과 재운송율의 합이 퇴적율을 초과하고, 재운송은 운송보다 훨씬 이전에 발생하므로 타당하다(Siepel, 1994). 임의의 등급 i 에 대한 퇴사유동의 변화는 다음 식과 같다.

$$\frac{dq_{si}}{dx} = r_i + r_{ri} - d_i \dots\dots\dots (17)$$

여기서 d_i = 퇴적율 ($\text{kg}/(\text{m}^2/\text{s})$). 재운송율과 퇴적율을 같게 놓고 ($r_{ri} = d_i$), 모든 토립자 등급(I)을 합하여 H 에 대하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$H = \frac{gcD\Phi}{F\Phi(1 - C_g)} \left(\frac{\sigma - \rho}{\sigma} \right) \dots\dots\dots (18)$$

이제 퇴사의 질량보존의 법칙에 근거한 미분방정식을 풀면 퇴사농도를 구할 수 있다. r_i 에 식 (8), (12), (16), (18)을 대입하고, q 에 식 (7)을 대입하여 모든 토립자등급 I에 대하여 합하면 다음과 같은 미분방정식 (19)와 해 (20)을 얻을 수 있다.

$$\frac{dc}{dx} (q_0 + Qx) + c \left[Q + \frac{DG\phi}{J} \left(\frac{\sigma - \rho}{\sigma} \right) \right] = \frac{F\phi gDS^{1.3}}{Jn^{0.6}} (q_0 + Qx)^{0.4} (1 - C_g)^{n+1} \dots (19)$$

$$c = \frac{F\phi S^{1.3}}{n^{0.6} \left[1.4 \frac{JQ}{Dg} + \phi \left(\frac{\sigma - \rho}{\sigma} \right) \right]} (1 - C_g)^{n+1} \left[(q_0 + Qx)^{0.4} - (q_0 + Qx_0)^{0.4} \right] + c_{min} \quad x \geq x_0 \dots (20)$$

모델은 각 사면말단에서의 퇴사농도를 계산하고, 사면의 길이가 x_0 ($\approx 1m$) 보다는 훨씬 길므로 식 (20)은 대부분의 식생조건에 만족한다. 그러나 사면길이가 x_0 보다 짧을 경우에 모델은 $x=0$ 에서의 농도 c_0 와 $x=x_0$ 에서의 c_{min} 을 선형내삽하여 사면말단에서의 농도를 추정해야 한다.

III. 모델의 개발

모델은 입력자료로서 일련의 경사자료를 받아들여 각 경사마다 지표조건이 나지와 식생상태를 구분하여 처리한다. 나지조건에서는 Hairsine and Rose(1992a,b), Rose(1993)가 제시한 운송 및 재운송이론에 근거하여 처리한다. 식생상태에서의 토사운송 및 재운송은 식(19)에 의하여 계산된다. 사면에서 순침식 또는 순퇴적이 발생하는 상태에 따라 rill flow 인지 sheet flow 인지를 판단한다. 식생상태에서의 흐름은 긴 사면과 짧은 사면으로 구분하여 처리한다.

모델은 C-언어를 이용하여 프로그램을 구성하였다. 본 모델의 흐름도는 Fig. 1과 같다. 입력자료로는 모델의 일반매개변수와 일련의 사면관련 매개변수로 이루어져 있다. 일반매개변수는 강우강도(r), 사면폭(S_w), rill의 폭에 대한 깊이의 비(r_r), rill의 밀도(r_d), 침식매개변수(β)의 상·하한값($B_h \cdot B_l$), 퇴사 침전

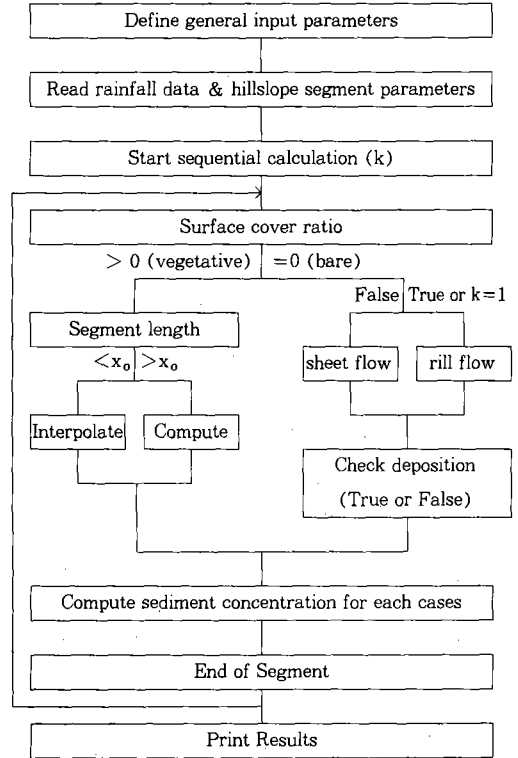


Fig. 1. Model flow chart

농(ϕ), stream power의 유효율(F), 식생으로 인한 최소퇴사농도(c_{min}), 토양운송의 비에너지(J), c_{min} 이 발생하는 사면길이(x_0), 나지전단계수(expn)이다. 사면관련 매개변수로는 사면길이(S_l), 사면경사(S), 식생피복비율(C_g)이다. 일련의 사면의 길이, 경사, 식생상태를 입력하므로써 다양한 복합사면조건을 만들어 낼 수 있다. 출력자료로는 각 사면별 퇴사농도, 순퇴적율, 유출심, 유출율, 유속 및 입력자료이다.

IV. 모델의 적용

1. 모델의 결과와 실험자료의 비교

본 모델의 적용성을 검토하기 위하여 균등사면의 토양침식 실험포장에서 2년('84~'85) 동안 미국 일리노이주 북서부 농업시험연구소

(Agricultural Research and Demonstration Center)로부터 얻은 McIsaac et al.(1990)의 자료와 본 모델의 결과를 비교하였다. 실험은 Tama silt loam 토양에 63.5mm/hr의 강우조건에서 행해졌다. 포장의 크기는 길이 11m×폭 3m, 지표피복은 거의 나지상태(작물 잔여

피복비율 : 10% 미만), 사면경사는 6%~10%의 조건이었다. 모델의 매개변수들은 Table-1과 같다. 그 결과는 Fig. 2와 같으며, 모델의 결과치가 실험치의 경향을 잘 표현해 주고 있음을 볼 수 있다.

Table-1. Input Parameters and values for model evaluation

Parameter	Description	Value	
		for model evaluation	for sensitivity analysis
r(mm/hr)	Steady-state net rainfall	63.5	60.0
S _w (m)	Hillslope width	3	3
r _r	Ratio of rill width to depth	10	3
r _d (rills/m)	Rill density	6~7.5	1
B _l	low value of β deposition	0.8	0.8
B _h	high value of β erosion	1.0	1.0
Φ(m/s)	Soil depositability	0.35	0.1
F	Fraction of stream power effective in erosion	0.1	0.1
c _{min} (kg/m ³)	Minimum sediment concentration due to vegetation	1.0	1.0
J(J/kg)	Specific energy of entrainment	20	20
x _o (m)	Downslope distance at c=c _{min}	1	1
expn	Value of exponent in the relationship $\tau_{ss}/\tau_s = (1 - C_g)^n$	9.1	9.1

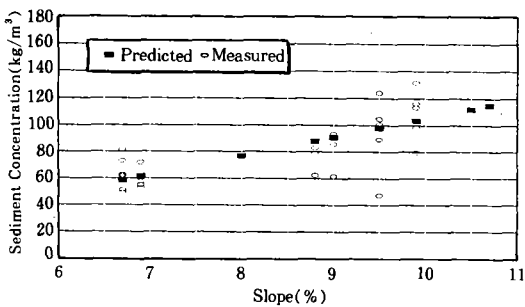


Fig. 2. Sediment concentration versus slope for nearly bare soil(Data from McIsaac, et al., 1990)

2. 모델의 민감도 분석

모델의 정량적인 거동을 파악하고자 매개변

수들에 대한 민감도를 분석하였다. 민감도분석을 위한 모델의 기준매개변수는 Table-1과 같으며, 총 7개(r_r, r_d, B_l, Φ, F, J, expn)의 매개변수에 대하여 기준값의 10%, 50%, 150%, 200%의 값을 가질 경우의 퇴사농도 변화량을 살펴보았다. 4개 매개변수(r_r, r_d, B_l, Φ)는 나지상태에서의 rill flow 또는 sheet flow와 관련된 매개변수로서, 그 결과는 Fig. 3과 같다. 토양침전능(Φ)이 가장 민감한 매개변수로 나타났으며, 나머지 B_l, r_r, r_d의 순으로 비슷한 민감도를 보였다. 한편 3개 매개변수(F, J, expn)는 식생상태에서의 흐름과 관련된 매개변수로서, 우선 식생피복비율(C_g)의 변화에 따른 퇴사농도변화는 Fig. 4와 같다. Table-1

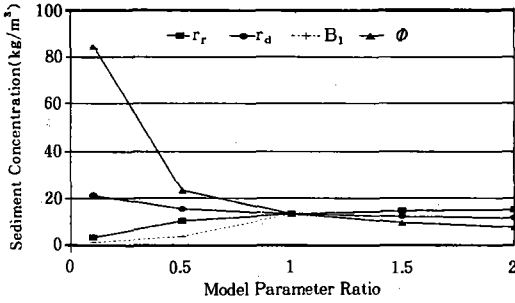


Fig. 3. Sensitivity analysis for model parameters under the condition of $C_g=0$

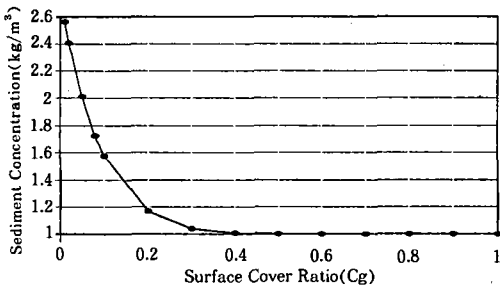


Fig. 4. Sediment concentration versus surface contact cover

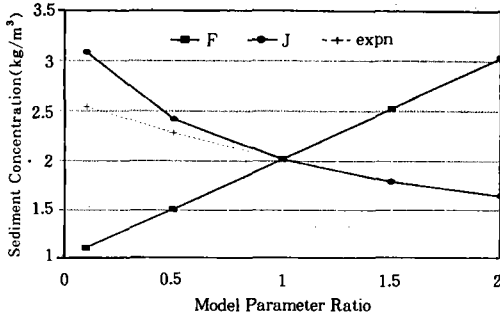


Fig. 5. Sensitivity analysis for model parameters under the condition of $C_g=0.04$

의 조건에서 C_g 가 0.4 이상이면 퇴사 농도에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. C_g 를 0.4로 고정시킨 상태에서 이들 매개변수의 민감도결과는 Fig. 5와 같은 바, F, J, expn의 순으로 비슷한 민감도를 보였다. 이상의 결과로부터 식생피복상태보다 나지상태에서 모델의 민감도가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

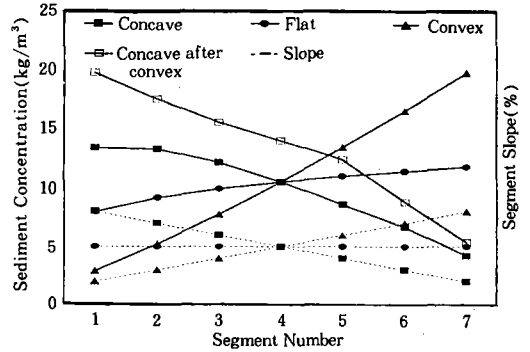


Fig. 6. Quantitative comparison of sediment concentration for complex slopes (concave, uniform, convex and concave following convex)

3. 불균등사면에서의 모델적용 예

본 모델을 이용하여 나지상태에서 불록(2%~8%, 1% 균일증가), 오목(8%~2%, 1% 균일감소), 불록+오목(2%~8%~2%, 1% 균일증가후 균일감소), 균등(5%)한 연속사면에 대한 각각의 퇴사농도 분포를 살펴보았으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 오목한 사면은 사면의 초입부에서 현저한 토양손실이 발생하여 사면 말단부로 가면서 점차 줄어들었다. 이는 각 사면의 밑부분에서 퇴적이 발생하는 것을 짐작할 수 있다. 균등 및 불록한 사면은 시작부터 끝까지 토양침식이 증가함을 보여주고 있으며, 불록한 사면이 균등사면보다는 훨씬 큰 비율로 토양침식을 일으키는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

물리적인 토양침식모형을 개발하여 C-언어로 프로그램을 작성하였다. 프로그램은 일반 매개변수와 지표피복비율, 복합사면경사 등 일련의 사면관련 매개변수를 입력자료로 받아들인다. 본 모델은 rill flow(골 흐름)와 sheet flow(면 흐름)를 모두 고려할 수 있으며, 각

흐름상태가 될 수 있는 가능성을 예측할 수 있다. 또한 토양의 침전속도특성을 반영하며, 운송과 재운송과정을 구분하여 계산한다.

Mclsaac et al.(1990)의 실험치와 비교한 결과, 퇴사농도의 경향을 잘 표현할 수 있었으며, 다양한 경사(오목, 균등, 볼록)에서의 토사 이동량을 모의해 봄으로써 모델의 적용성을 검토하였다. 모델 매개변수들의 민감도를 분석한 결과, 토양침전능(soil depositability, ϕ)이 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 모델의 결과는 Hairsine and Rose(1992)의 방법이 토양침식을 예측하는데 상당한 잠재력을 보였다.

참 고 문 헌

1. Bingner, R. L. 1990. Comparison of the components used in several sediment yield models. Transactions of the ASAE 33(4) : 1229-1238.
2. Elliot, W. J. and J. M. Laflen. 1993. A process-based rill erosion model. Transactions of the ASAE 36(1) : 65-72.
3. Foster, G. R. and L. J. Lane, compilers. 1987. User requirements : USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report No. 1. W. Lafayette, IN : USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory.
4. Foster, G. R. 1991. Advances in wind and water erosion prediction. Journal of Soil and Water Conservation 46(1) : 65-72.
5. Hairsine, P. B. and C. W. Rose. 1992a. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles : 1. Sheet flow. Water Resources Research 28(1) : 237-243.
6. Hairsine, P. B. and C. W. Rose. 1992b. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles : 2. Rill flow. Water Resources Research 28(1) : 245-250.
7. Mclsaac, G. F., J. K. Mitchell, and M. C. Hirschi. 1990. Contour and conservation tillage for corn and soybeans in the Tama silt loam soil. Transactions of the ASAE 33(5) : 1541-1550.
8. Rose, C. W. 1993. Erosion and sedimentation. In Hydrology and Water Management in the Humid Tropics-Hydrological Research Issues and Strategies for Water Management, edited by M. Bonnell, M. M. Hufschmidt, and J. S. Gladwell. UNESCO.
9. Siepel, A. C. 1994. Reentrainment and settling velocity in a physically-based erosion model, Honors Committee, Cornell University.
10. Soil Conservation Service. 1987. Soil and water conservation research and education progress and needs. Washington, DC : SCS, USDA.

(접수일자 : 1997년 4월 24일)