



Effective power for interrill erosion by rainfall-induced sheet flow

Shin, Seung Sook^a · Park, Sang Deog^{b*}

^aResearch Center for River Flow Impingement and Debris Flow, Gangneung-Wonju National University

^bDepartment of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University

Paper number: 18-024

Received: 16 March 2018; Revised: 16 May 2018; Accepted: 16 May 2018

Abstract

Interrill erosion on a hillslope results from the combined action of the detachment of soil particles by raindrop impact and the sediment transport of surface runoff. This study newly defined the rainfall power which detaches soil particles and the sheet-flow power contributed to sediment transport in terms of energy expenditure rate of soil erosion and presented the effective power equation for interrill erosion by rainfall-induced sheet flow. The rainfall and sheet-flow power was evaluated by factors related with rainfall, slope, and runoff and coefficients of the power equation were analyzed based on references. Furthermore it was confirmed that the relative scales between the rainfall power and the sheet-flow power according to rainfall intensity reflect on the hydrological response and physical process of interrill erosion. From application of the field data for surface runoff and soil erosion it was verified that the rainfall and sheet-flow power is an appropriate equation to estimate a interrill erosion.

Keywords: Rainfall power, Sheet-flow power, Interrill erosion, Rainfall intensity, Surface runoff

강우유발 면상흐름에 의한 세류간 침식에 대한 유효동력

신승숙^a · 박상덕^{b*}

^a강릉원주대학교 수충부 및 토석류 방재기술연구단, ^b강릉원주대학교 토목공학과

요지

사면에서의 세류간 토양침식은 빗물방울의 지표면 타격에 의한 토양입자의 박리와 면상흐름에 의한 토사이송의 상호작용에 의한 결과이다. 본 연구는 토양입자를 박리하는 강우동력과 유사이송에 기여하는 면상흐름동력을 토양침식을 위한 에너지 소비율 측면에서 새롭게 정의하고, 강우유발 면상흐름에 의한 세류간 토양침식의 유효동력 함수를 제시하였다. 강우, 경사, 유출과 관계된 인자들에 따른 강우·면상흐름의 동력을 평가하고, 기존 연구 자료를 바탕으로 이 함수의 상수들을 분석하였다. 또한 강우와 면상흐름 동력의 상대적인 크기 변화는 세류간 토양침식의 물리적 과정과 수문학적 반응을 반영함을 확인하였다. 지표유출 및 토양침식 실측자료를 세류간침식 평가 모형들에 적용한 결과 강우·면상흐름동력 함수가 가장 높은 정확도를 보여 세류간 토양침식 평가에 적합하다는 것을 확인하였다.

핵심용어: 강우동력, 면상흐름동력, 세류간침식, 강우강도, 지표유출

1. 서론

거친 경사면에서 수심이 얇은 면상흐름(sheet flow)은 그 물과 같은 유로 망이 광범위하게 형성되는 지표유출의 한 형

태를 보인다. 이러한 면상흐름은 빗방울이 지면을 직접 타격 하는 공간을 제공하고, 타격 과정에서 난류를 강화시켜 더 많은 토양침식을 일으킨다(Palmer, 1964). 수심이 증가하면 강우의 지표타격과 빗물튀김(raindrop splash)에 의한 토양입자의 분리(detachment) 현상은 줄어든다(Torri *et al.*, 1987). 경사진 지표면에 대한 토양침식 모형 대부분은 수심이 얇은 세류간(interrill) 면상흐름에 의한 토양침식과 수심이 증가된

*Corresponding Author. Tel: +82-33-640-2417
E-mail: sdpark@gwnu.ac.kr (S. D. Park)

세류(rill) 또는 집중흐름(concentrated flow)에 의한 토양침식을 구분하여 다른 지배방정식을 사용한다(Flanagan and Nearing, 1995; Morgan *et al.*, 1998; Nearing *et al.*, 2011). 급경사 산림지역이나 야대지는 환경사지에 비해서 유출 및 침투 속도가 빠르기 때문에 강우강도 증가에 따른 세류간 면상흐름의 수심변화가 적고, 집중흐름에 의한 세류나 구곡의 발생이 개발 나지나 경작지에 비해 상대적으로 적다. 개발이나 경작지에 비해 토양체 교란이 상대적으로 약한 산불지역조차 세류가 쉽게 발달하지는 않는다(Shakesby and Doerr, 2006). 즉 경작이나 개발이 이루어지지 않은 경사면에서 세류간 침식이 지배적인 면적을 차지함을 의미한다. 따라서 이러한 사면에 대한 토양침식을 정량적으로 평가하기 위해서는 세류간 토양침식을 추정하는 모형이 필요하다.

세류간 토양침식을 평가하기 위해 여러 연구자들(Liebenow *et al.*, 1990; Elliot *et al.*, 1996; Kinnell, 1991; Kinnell, 1993; Zhang *et al.*, 1998; Wei *et al.*, 2009; Morgan, 1978; Torri *et al.*, 1987; Shin *et al.*, 2017)은 실험 자료를 바탕으로 경험적인 모형들을 제시해왔다(Table 1). 초기의 모형에서는 침식능(erosivity) 인자로 강우강도만을 사용하였으며, 다른 침식 요인으로 토성과 지형인자를 고려하였다. Liebenow *et al.* (1990)은 토양종류별 세류간 침식량(D_i)을 결정하기 위해 토양침식성(soil erodibility, K_i), 강우강도(I), 사면경사(S)의 함수를 제시하였다. Flanagan and Nearing (1995)이 제시한 수문학적 토양침식 및 토사유출 추정 모형인 WEPP은 세류간 침식에 대해 Elliot *et al.* (1996)이 제시한 식을 사용하였다. 수집한 자료 중에 세류간 침식성에 대해 분석하였으며, 강우강도의 제곱에 비례하는 Eq. (2)를 제시하였다. 강우유발 면상흐름의 세류간 토양침식은 강우충돌과 면상흐름의 각각의 역할과 이들의 상호작용에 의한 결과이다. Kinnell (1991, 1993)

은 강우가 작용하는 얇은 수심의 세류간 흐름에 의해 이송되는 토양입자를 고려하기 위하여 Eq. (3)처럼 추가적인 인자로 흐름유량을 사용하였다. 이 때, I^2 보다는 l 에 더 직접적으로 반응함을 확인하였고, 토양침식성을 결정하기 위한 추가적인 연구를 수행하였다. 강우입자 충돌에 의한 토양입자 분리와 면상흐름 이송능력(transport capacity)의 강화를 역학적으로 설명하기 위해서는 강우강도가 유용하고, 면상흐름에 의한 유사 이송을 묘사하기 위해서는 지표유출과 경사를 고려할 필요가 있다. Zhang *et al.* (1998)은 세류간 토양침식 메커니즘과 매개변수들의 상호작용을 고려하여 실험 자료를 바탕으로 Eq. (4)를 제안했다. 그의 모형에서는 유출률과 경사의 지수들을 Kinnell (1991, 1993)과는 다른 값들을 사용한다. Nearing *et al.* (2011)이 제시한 비경작 야대지에 대한 토양침식 및 토사유출 추정 모형인 RHEM은 Wei *et al.* (2009)의 식을 사용하였다. 이것은 야대지 사면의 강우모의 데이터를 활용하여 강우강도와 유출률에 대한 다중회귀 모형이다. 비교란 지역의 토양침식에 상대적으로 크게 영향을 미치지 않는 지형인자는 고려하지 않는다. 세류간 토양침식 모형은 물리적인 접근과정이 매우 복잡하고, 많은 매개변수를 필요하기 때문에 매개변수 추정에 따른 오차가 크게 증가할 수 있어서 대부분이 경험적 데이터의 통계적인 분석에 의존해왔다. 이들 모형의 매개변수는 실험데이터의 회귀분석에 의해 결정되며, 각 연구지역의 기후, 토양, 지형 등의 특성에 따라 개발식의 형태는 달라졌다. 따라서 지역적인 특성에 의해 변화가 심한 주요 매개변수들의 지수들을 일반화시킬 수 있는 물리적인 모형이 필요하다.

물리적인 접근 방법을 모색한 Morgan (1978)은 환경사면의 토양침식에 대해 강우운동에너지(E_k)와 유출수에너지(E_p)의 관계를 분석하여 최적의 회귀식인 Eq. (6)을 제시하였다.

Table 1. Characteristics for model equations to estimate interrill erosion

Forms	References	Model equations	Main parameters
Rainfall intensity equations	Liebenow <i>et al.</i> (1990)	$D_i = K_i I^p S$ (1)	Soil erodibility, Rainfall intensity, Slope steepness
	Elliot <i>et al.</i> (1996)	$D_i = K_i I^2 S L$ (2)	Soil erodibility, Rainfall intensity, Slope steepness, Slope length
Rainfall intensity and runoff rate equations	Kinnell (1991, 1993)	$D_i = K_i I q f(S)$ (3)	Soil erodibility, Rainfall intensity, Runoff rate, Slope steepness
	Zhang <i>et al.</i> (1998)	$D_i = K_i I q^{1/2} S^{2/3}$ (4)	Soil erodibility, Rainfall intensity, Runoff rate, Slope steepness
	Wei <i>et al.</i> (2009)	$D_i = K_i I^{1.052} q^{0.592}$ (5)	Soil erodibility, Rainfall intensity, Runoff rate
Rainfall energy and runoff energy or depth equations	Morgan (1978)	$D_i = K_i E_k^{0.49} E_p^{0.33}$ (6)	Soil erodibility, Rainfall kinetic energy, Runoff potential energy
	Torri <i>et al.</i> (1987)	$D_i = \frac{K_i}{\rho_s} E_k e^{-zh}$ (7)	Soil erodibility, Rainfall kinetic energy, Runoff depth
	Shin <i>et al.</i> (2017)	$D_i = K_i (E_k + E_p)^b$ (8)	Soil erodibility, Rainfall kinetic energy, Runoff potential energy

그러나 이 식은 토양침식에 대한 강우 및 유출 에너지의 역학적 의미를 분명하게 해석하지 못했을 뿐만 아니라, 다른 경험적인 토양침식 함수보다 정확성이 떨어지는 결과를 초래했다 (Morgan, 1980). Morgan *et al.* (1998)에 의해 제시된 유럽에서 개발한 토양침식 및 토사유출 모형인 EUROSEM은 강우와 유출수에 의한 토양입자 분리를 따로 고려한다. 강우타격에 의해 분리되는 토양침식은 강우운동에너지에 관계되며, 지표유출의 수심이 증가함에 따라 감소하는 모돌인 Eq. (7)을 사용하고 있다 (Torri *et al.*, 1987). 침식을 강화하는 면상흐름의 영향과 상호작용에 대해 고려하지 않기 때문에 세류간 침식을 저평가할 우려가 있다. 특히 급경사 산림지역이나 야대지는 낙엽과 유기물 층에 의해 지표흐름의 수심 확보가 어렵기 때문에 강우와 면상흐름의 상호작용이 왕성한 세류간 침식이 지배적이다. 급경사면의 토양침식에 있어서 강우운동에너지의 빗물튀김과 지표유출수에 의한 이송 능력을 통합적으로 설명하기 위해 에너지보존 이론에 근거한 강우운동에너지와 유출수위치에너지 합인 형태로 토양침식 모형을 제시한 경우도 있다 (Shin *et al.*, 2017). 그러나 이 모형은 단일강우 사상에 의해 발생한 토양침식 및 유출수의 총량적인 측면에서 접근했기 때문에, 시간에 따른 에너지와 침식물의 변화를 고려하지는 않았다. 시간에 따른 토양침식의 변화를 파악하기 위해 시간에 따른 에너지의 변화인 동력 이론의 개발이 필요한 단계이다.

실제 사면 토양침식에 대한 강우의 영향을 고려하기 위해 대표적인 강우강도를 비롯해 강우낙하 속도, 강우운동에너지 및 강우동력 등에 대한 이론적 정립이 활발히 이루어져왔다 (Ferro, 1998; Schmidt, 1993; Gabet and Dunne, 2003). 여기서 강우운동에너지는 비체적과 비시간 두 가지 형태로 표현된다. 비체적 강우운동에너지와 비시간 강우운동에너지는 강우강도와 관계되어 있다. 인용된 연구자료 (Sempere-Torres *et al.*, 1992)에 따르면, 비시간 운동에너지는 비체적 운동에너지보다 산포도 이분산성이 상대적으로 작으며, 강우의 입자 크기분포 (Drop Size Distribution)에 덜 민감하다 (Salles *et al.*, 2002). 즉 비시간 운동에너지와 강우강도의 관계는 비체적 운동에너지보다 더 적합하다 것을 의미한다. 비시간 강우운동 에너지를 일반적으로 강우동력 또는 강우에너지 플럭스 밀도라고 표현한다 (Kinnell, 1991; Smith and De Veaux, 1992, Madden *et al.*, 1998; Steiner and Smith, 2000).

비시간 강우운동에너지를 산정하기 위해서는 강우입자 사이즈, 낙하속도 측정뿐만 아니라 강우입자분포 분석을 수행해야 한다. 강우입자의 시공간적 다양성 때문에 이를 측정하기가 어려움에도 불구하고, 강우운동에너지와 강우강도의

일반적인 관계를 이끌어내는 것이 가능하다. 많은 연구자들은 강우운동에너지와 강우강도의 관계를 경험적인 멱, 지수, 로그, 선형 함수 형태로 제시해왔다 (Wischmeier and Smith, 1958; Zanchi and Torri, 1980; Rosewell, 1986; Brown and Foster, 1987; Brandt, 1990; McIsaac, 1990; Smith and De Veaux, 1992; Coutinho and Tomás, 1995; Uijlenhoet and Stricker, 1999; Steiner and Smith, 2000; Salles *et al.*, 2002; Van Dijk *et al.*, 2002; Fornis *et al.*, 2005; Lee and Won, 2013; Shin *et al.*, 2016). 몇몇의 연구자들은 자연강우 사상에는 강우운동에너지의 상한 값이 존재함으로 제한된 값에 수렴하는 지수함수를 사용할 것을 제안했다 (Hudson, 1963; Baruah, 1973; Wischmeier and Smith, 1978; Carter *et al.*, 1974; Kinnell, 1981; Rosewell, 1986; Brown and Foster, 1987). Salles *et al.* (2002)은 강우의 입자 크기분포 모델들을 고려함에 있어서 수학적으로 가장 적합한 함수는 멱함수임을 제시했다. 강우운동에너지와 강우강도 관계의 통계적이고 물리적인 관점에서 멱함수가 가장 적합한 수학적 함수임에도 불구하고, 이러한 경험식들은 다른 함수 형태에 비해 강우운동에너지 산정결과와 편차가 가장 심하다. 이러한 문제를 해결하고자, 최근 Shin *et al.* (2016)은 일정한 강우강도 범위에서 강우입자 크기가 균일하게 분포한다는 이상적인 가정 하에 동력 이론을 기본으로 하는 일반적인 멱함수 형태의 강우운동에너지 식인 Eq. (9)를 제시하였다.

$$E_k = 10.3 I^{11/9} \quad (9)$$

여기서, E_k 비시간 강우운동에너지 ($J/m^2/h$)이고, 이론적인 유도에 의해 지수는 11/9이었으며, 계수는 강우 발생지역의 위치, 지형, 기후적인 특성에 따라 상이한 기존의 경험적 멱함수들로부터 10.3으로 추정하였다. 이 함수는 USLE (Wischmeier and Smith, 1958)와 EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998)에서 사용한 로그함수들 (Wischmeier and Smith, 1958; Brandt, 1990) 그리고 RUSLE (Renard *et al.*, 1997)와 SEMMA (Park *et al.*, 2012)에서 사용한 지수함수들 (Brown and Foster, 1987; Van Dijk *et al.*, 2002)의 추정 결과와 비교해 합리적인 범위의 상대적 차이를 보였다.

비시간 강우운동에너지인 강우동력 (rainfall power)은 세류간 토양침식량을 평가하는데 주로 사용되었고, 흐름동력 (flow power) 개념인 수류력은 세류 및 하천흐름에서 토사이송을 해석하는데 주로 활용하였다. 집중흐름이나 하천흐름에 의한 유사이송을 해석하기 위한 주요 변수로 유속이나 수류력뿐만 아니라 물리적인 개념의 수류력 (stream power)과

단위수류력(unit stream power)을 사용하는 것이 가능하다. 수류력 이론은 물체의 이송에 소요된 에너지 감소율은 유사량과 관계가 있음을 의미한다(Bagnold, 1966; Chang, 1979). Yang(1972)은 등류흐름에서 유체의 위치에너지 손실률은 유사농도에 영향을 끼친다는 단위수류력 개념을 소개하였다. 이러한 식들은 집중흐름이나 세류(rill)을 포함하는 면상흐름에 의한 유사이송을 해석하는데 유용하지만, 강우유발로 흐름이 복잡한 세류간 면상흐름의 토양침식에 있어서는 일반적으로 사용하지 않는다. 특히 면상흐름에서 유속을 측정하는 것이 어렵기 때문에 상대적으로 측정이 용이한 유량 또는 유출률을 주로 사용한다.

Table 1에서 언급한 것과 같이 세류간 침식을 정량적으로 평가하기 위해서는 강우인자뿐만 아니라 유출인자도 함께 고려해야 한다. 그러나 이들 산정 모형은 주요 매개변수의 지수들이 개발자마다 서로 달라서 기후, 토양, 지형 특성이 상이한 지역에 일반적으로 적용하는데 한계가 있다. 따라서 세류간 토양침식에 대해 Shin *et al.* (2012)이 시도했었던 강우동력과 흐름동력 이론을 재정립하여, 물리적인 접근방법으로 모형을 일반화시키고자 한다. 본 연구에서는 멱함수 형태의 비시간 강우운동에너지 식을 기반으로 강우동력을 고려하고, 면상흐름을 동력이론에 근거하여 재해석한다. 세류간 침식에 대해 강우와 면상흐름의 유효동력은 토양입자를 상류에서 하류로 이동시키는데 필요한 에너지 소비율에 비례하는 관계로부터 일반적 강우·면상흐름 동력함수를 제시하고, 이에 대한 타당성을 검토하고자 한다.

2. 동력이론 정립

2.1 강우동력

대부분의 강우운동에너지가 지표 토양과의 충돌에서 소산되기 때문에 암석과 같은 비침식성 경사면에서조차도 이러한 운동에너지는 흐르는 물의 운동에너지에 기여하는 부분이 거의 없다(Pearce, 1976). 침식성 토양에 충돌하는 빗방울은 지표면 토양을 통합시키거나 분산시킨다. 빗방울 충돌이 토양입자들을 튀김에도 불구하고 수평면에서 순 이송율은 0에 가깝다(Moss *et al.*, 1979). Wright (1986)는 경사면 수평방향의 빗방울 속도성분이 튀김을 일으키는 작은 물방울의 분산을 결정한다는 것을 발견했다. 경사진 표면에서 빗방울 충격 지점으로부터 튀어 나온 토양입자들의 비산 거리는 국부적인 경사에 의존하지만(Moss *et al.*, 1979), 상향 경사보다는 하향 경사로 더 많은 입자들이 더 멀리 이동하는 것이 사실이다

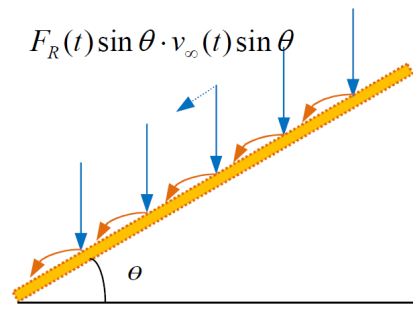


Fig. 1. Schematic of erosion by rainfall power on steep hillslope

(Moss *et al.*, 1979). 나지 토양뿐만 아니라 다양한 식물로 덮인 경사면 토양에서도 하향경사로 튕겨 나가는 토양입자가 일반적으로 더 많다(Mati, 1994). 이러한 결과는 사면이 기울어질수록 토양입자를 분리시킬 수 있는 강우충격력의 중력 성분이 증가하기 때문이다(Torri and Poesen, 1992). 일정한 강우강도 범위에서 균일한 크기의 강우입자가 경사면을 타격한다고 가정하였을 때, 강우동력은 Fig. 1과 같이 강우입자의 경사방향 수평성분의 총 무게와 경사방향 종말속도 성분으로 표현 가능하다.

따라서 경사면의 세류간 토양침식에 유효한 강우동력(P_{cR})은 빗방울 충돌 지점에서 경사방향 수평성분의 강우무게와 경사방향 종말속도의 내적으로 산정한다.

$$P_{cR}(t) = F_R(t) \sin \theta \cdot v_{\infty}(t) \sin \theta \quad (10)$$

여기서, F_R 는 빗방울의 총 무게(N/m^2)이고, v_{∞} 는 빗방울의 종말속도(m/s)이며, θ 는 사면경사($^{\circ}$)이다.

빗방울의 총 무게는 빗물의 비중량과 강우량의 곱으로 산정할 수 있다.

$$F_R(t) = \gamma_w \frac{R(t)}{1000} = \gamma_w \frac{I(t)}{1000} dt \quad (11)$$

여기서, γ_w 는 강우의 비중량(N/m^3)이고 R 은 강우량(mm)이며, I 는 강우강도(mm/hr), dt 는 단위시간(hr)이다.

Atlas and Ulbrich (1977)는 자유낙하 하는 강우입자의 평균 종말속도를 강우입경의 함수로 제시하였다.

$$v_{\infty} = 17.67 D^{2/3} \quad (12)$$

여기서, D 는 강우의 균일입경(mm)이고, 종말속도는 강우입경의 2/3 승에 비례한다.

강우입자 플럭스 밀도에 의해 유도한 강우강도 식에서 강우입자 평균입경이 균일하다는 가정 하에 단위면적당 단위시간당 균일직경 D 를 가진 강우입자의 개수를 $X(D)$ 이라고 하면, 강우강도 식은 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$I = \frac{\pi}{0.6} X(D) D^3 \quad (13)$$

일반적 멱함수를 제시했던 Shin *et al.* (2016)의 비시간 강우운동에너지 산정 식처럼 강우입자의 종말속도는 강우강도의 2/9 승에 비례하고 강우동력은 강우강도의 11/9 승에 비례한다. 균일입경 강우에 대한 종말속도식과 강우의 무게에 대한 식을 세류간 토양침식에 유효한 강우동력 함수에 대입하여 정리하면 다음 Eq. (14)를 얻는다.

$$P_{eR}(t) = \alpha I(t)^{11/9} \sin^2 \theta dt \quad (14)$$

여기서, α 는 상수이며, 강우동력은 강우강도와 사면기울기의 함수가 된다.

2.2 면상흐름동력

자연 경사면에서 면상흐름은 시간과 장소에 따라 일정하지 않으며 강수량과 침투율에 의해 비정상 부등류를 형성한다. 면상흐름에 대한 빗방울의 영향은 하천 흐름보다는 더 복잡하다(Emmett, 1970). 그러므로 대부분의 면상흐름은 빗방울의 충돌과 불규칙한 지형 때문에 진정한 난류흐름을 보인다. 세류간 침식에서 지표유출은 강우 충격에 의해 분리된 토양입자를 이송시키는 역할을 주로 한다. 면상흐름의 동력은 단위시간동안 지표면 유출에 기여하는 유출수의 운동에너지 변화량이고, Fig. 2처럼 경사방향 성분의 지표유출수 무게와 유속을 내적한 결과와 같다.

$$P_Q(t) = F_Q(t) \sin \theta \cdot v_s(t) \quad (15)$$

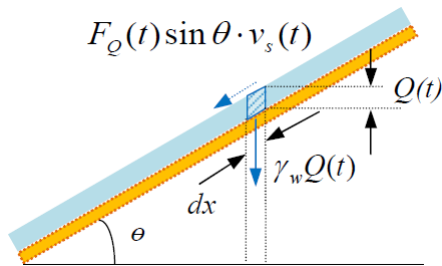


Fig. 2. Schematic of erosion by sheet-flow power on steep hillslope

여기서, $P_Q(t)$ 는 지표유출수의 동력($J/m^2/s$)이고, $F_Q(t)$ 는 유출수의 무게(N/m^2)이며, $v_s(t)$ 는 일정시간 동안 면상흐름의 평균 유속(m/s)이다. 사면기울기 방향에 대한 지표유출수의 무게는 유출수의 단위중량(N/m^3), 지표유출의 수심(m), 사면경사의 곱에 비례한다.

$$F_Q(t) = \gamma_w h(t) \sin \theta \quad (16)$$

Holton (1945)은 자연사면 지표흐름에 난류영역과 층류영역이 혼합된 흐름 상태가 존재한다고 가정하였다. 난류에 대한 평균 유속(m/s)은 Manning 공식에 의해 추정 가능하다.

$$v_s(t) = \frac{1}{n} h(t)^{2/3} S^{1/2} \quad (17)$$

지표면의 1차원적 제어요소로 수심과 유효유량이 고려되며, 1차원 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial v_s}{\partial x} = q(t) \quad (18)$$

지표유출이 무한한 사면에 비해 충분히 미세한 공간이라고 가정하면, 공간함수는 0이 된다. 그러므로 유출률은 미세 시간동안의 수심변화이다. 면상흐름에 대한 유출률은 평균수심에 비례한다.

$$dh = q(t) dt \quad (19)$$

작은 그리드 요소에서 유출량이 일정하다면, 토양입자를 토양체로부터 분리시키고, 이송시키기 위한 유출수의 동력 ($J/m^2/s$)은 다음과 같이 표현된다.

$$P_Q(t) = \beta q(t)^{5/3} \sin \theta S^{1/2} dt \quad (20)$$

여기서, β 는 상수이다. 따라서 면상흐름동력은 유출률의 5/3 승에 비례하고, 사면경사의 1/2 승에 비례한다.

2.3 세류간침식 추정함수

토양침식을 역학적인 개념의 일로 정의하면, 침식에 따른 에너지 소비와 같다. 미세 길이의 사면에서 균일하게 토양침식이 발생한다고 가정하면, 토양침식의 일(W_s)은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$W_s = q_s \sin \theta \frac{dx}{2} \tag{21}$$

여기서, q_s 는 단위면적당 토양침식량(g/m^2)이고, dx 는 미세 사면길이(m)이다(Fig. 2).

토양침식에 필요한 에너지 소비율을 일률($J/m^2/s$)로 표현하면, Eq. (22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_s(t) = D_i \sin \theta \frac{dx}{2} \tag{22}$$

지표면에 작용하는 강우와 지표유출수의 에너지는 대부분이 지표면과의 마찰에 의해 소멸된다. 강우운동에너지의 단지 0.2% 정도가 그리고 유출수의 3~4% 만이 토양침식이라는 일에 소비되는 것으로 알려져 있다(Pearce, 1976). 토양침식의 일률을 강우동력과 면상흐름동력의 수학적 함수로 제시하는 것에 한계가 있으며, 다음 Eq. (23)과 같이 침식의 일률이 유효한 강우동력과 면상흐름동력의 합에 비례하는 관계로부터 토양침식의 관계를 설명하는 것은 가능하다.

$$D_i \propto 2 [\alpha I(t)^{11/9} \sin \theta + \beta q(t)^{5/3} S^{1/2}] \frac{dt}{dx} \tag{23}$$

토양침식률이 강우동력 및 면상흐름동력의 합에 비례하는 관계를 비례상수로 나타내면, 침식의 내적 요인인 침식성인자 K_i 를 대입하여 세류간 토양침식량 산정식을 얻을 수 있다.

$$D_i = K_i [\alpha I(t)^{11/9} \sin \theta + \beta q(t)^{5/3} S^{1/2}] \frac{dt}{dx} \tag{24}$$

세류간 토양침식률($g/m^2/s$)을 사면의 단위길이와 단위시간에 발생하는 것으로 고려하면, 미분변수들은 1이 된다.

$$D_i = K_i [\alpha I^{11/9} \sin \theta + \beta q^{5/3} S^{1/2}] \tag{25}$$

이 식은 세류간 토양침식률을 평가하기 위한 강우·면상흐름 동력 함수로서 강우강도, 유출률, 사면경사의 매개변수에 의해 산정가능하다. 세류간 토양침식을 평가하기 위해 기존에 Kinnell (1991, 1993), Zhang *et al.* (1998), Wei *et al.* (2009) 등에 의해 제시된 식들에 비하여 다소 복잡한 것 같으나, 구성된 주요 매개변수는 강우강도, 유출률, 사면경사, 토양침식성인자들로 거의 유사하다. 강우충격에 의해 토양입자 분리와 지표유출수의 유사이송을 동력과 일률이라는 관점에서 재해

석하여 제시한 세류간 토양침식의 추정함수라는 점이 중요한 의미를 갖는다.

3. 동력함수 평가

3.1 정량적 평가

강우입자의 충돌과 면상흐름의 상호작용에 의해 발생하는 세류간 토양침식에 있어서 강우충격과 면상흐름의 상대적인 토양침식 기여도에 대한 연구는 많지 않다(Proffitt and Rose, 1991; Nam *et al.*, 2015). 이를 분리하는 것이 용이하지도 않을 뿐더러, 이들의 상호작용이 에너지를 감소시켜 토양침식에 직접적으로 영향을 끼치기 때문이다. 위에서 제시한 강우·면상흐름 동력 식에서 상수 α, β 는 강우운동에너지와 유출수운동에너지에 의한 토양침식의 기여도 평가의 지표가 될 수 있다. Smith and De Veaux (1992), Uijlenhoet and Stricker (1999), Steiner and Smith (2000), Fornis *et al.* (2005) 등의 멱함수들을 살펴보면, 강우동력함수에서 상수 α 는 8.46~13.0의 범위였다. Shin *et al.* (2016)은 이 연구자들에 의한 강우운동에너지($J/m^2/h$)의 멱함수 경험식들로부터 α 를 10.3으로 추정하였다. 지표유출수는 빗물 낙하속도에 비해 유출속도가 작고, 침투에 의한 손실이 커지면 유출수량이 적어지기 때문에 강우운동에너지에 비해 상대적으로 매우 작은 운동에너지를 갖는다. 그러나 면상흐름의 운동에너지는 토양침식에 이용되는 에너지 비율이 상대적으로 크고 일 효율이 높기 때문에 실측 유사량이 상대적으로 많은 것으로 알려져 있다(Morgan, 1986). 따라서 면상흐름 동력의 상수 β 는 세류간 토양침식에서 지표유출수에 의한 침식 비율과 효율을 결정하는데 중요한 지표가 된다. 그렇지만 앞서 언급한 것과 같이 이 상수들에 대한 연구사례가 거의 없다. 이를 규명하기 위해서는 강우, 토양, 경사, 지표 조건에 따른 많은 실험 연구가 필요하다. 강우·면상흐름 동력 함수를 완성하기 위해 주요 매개변수인 강우강도, 사면경사, 유출률에 따른 강우동력 및 면상흐름동력을 정량적으로 평가하였다. 평가에 사용한 주요 매개변수의 범위는 Table 2와 같다.

Table 2. Range of parameters used to evaluate the rainfall and sheet-flow power

Parameters	Symbols	Range of parameters
Rainfall intensity (mm/hr)	I	1~120
Slope (°)	S	20, 25
Runoff coefficient	C	0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Coefficient α	α	10
Coefficient β	β	10, 5, 3

강우강도의 범위는 1~120 mm/h이며, 사면경사는 급경사지 범위인 20°와 25°를 고려한다. 자연사면에서 유출물은 토양의 종류와 구조, 공극의 분포에 따라 다양하게 변화하기 때문에, 우리나라 산지사면에서 실측한 Shin *et al.* (2013)의 유출계수 범위인 0.2~0.5에 대하여 검토하였다. 본 연구에서는 상수 β 의 변화에 따른 면상흐름 동력을 평가하기 위해서 강우동력 상수 α 를 편의상 10으로 사용한다. 이는 기존 연구자들이 제시한 상수 범위의 중간 값에 해당하는 것이다(Smith and De Veaux, 1992; Uijlenhoet and Stricker, 1999; Steiner and Smith, 2000; Fornis *et al.*, 2005). 주어진 매개변수 범위에 따른 면상흐름 동력을 평가한 결과 Figs. 3 and 4의 그래프를 얻었다. Fig. 3은 사면경사가 20°인 경우이고, Fig. 4는 사면경사가 25°인 경우이다. 경사가 큰 경우 면상흐름 동력이 상대적으로 크게 나타났다. 면상흐름 동력은 강우강도, 지표상태, 토양 조건 등에 의해 변화하는 유출계수가 작아짐에 따라 감소하였다. 상수 β 의 값이 α 와 동일한 10인 경우와 그에 절반인 5인 경우 그리고 그보다 작은 3인 경우를 평가해 보았다. 상수 β 가

10인 경우 면상흐름 동력은 유출계수가 상대적으로 적은 0.2일 때, 강우동력과 비슷한 값의 범위를 보였다. 상수 β 가 5인 경우 면상흐름 동력은 유출계수가 0.3과 0.4의 범위에서 강우동력과 비슷한 값을 보였다. 상수 β 가 3인 경우는 유출계수가 0.4~0.5 범위에서 면상흐름 동력이 강우동력과 비슷한 범위에 위치하였다. 이러한 결과는 경사 20°와 25°에서 모두 유사한 경향을 보였다. 산지사면 소규모 조사구의 강우튀김과 면상흐름의 토양침식 연구에 따르면(Ghaharamani *et al.* 2011), 나지사면에서 강우튀김에 의한 침식이 면상흐름의 약 16% 정도 차지함을 보였다. 이는 조사구 출구부에서 발생하는 강우튀김 효과의 토양침식만을 측정했기 때문에 전체 급경사면에서 발생하는 강우튀김에 의한 침식 효과는 상대적으로 증가할 것으로 보인다. Shin *et al.* (2017)은 강우튀김과 면상흐름 토양침식에 대한 유효에너지 평가에 있어서 강우운동에너지는 토양침식에 30%정도 기여하는 것으로 평가하였다. 나지사면의 유출계수는 토양의 종류와 구조 그리고 대공극의 분포에 따라 국소적인 영향을 많이 받는다. 나지사면의

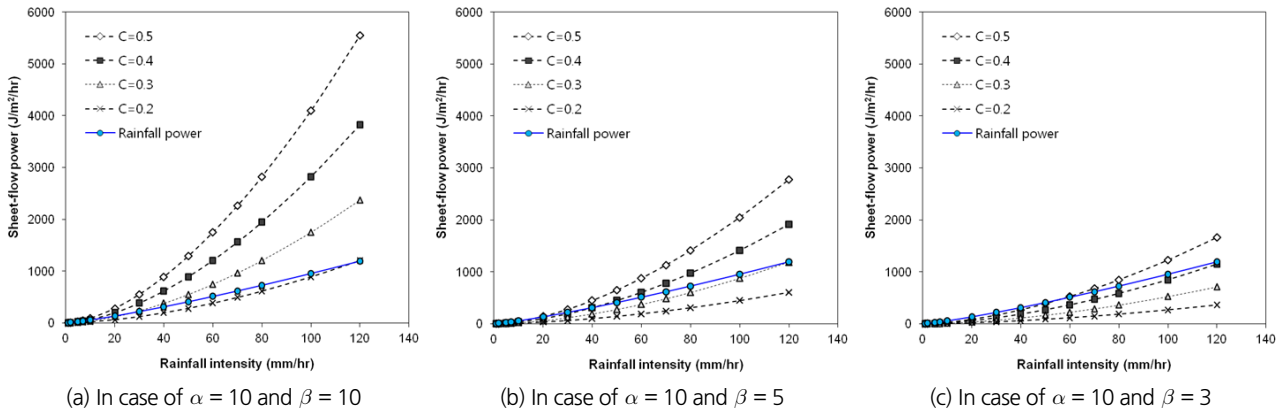


Fig. 3. The variation of sheet-flow power according to coefficient β on a 20° hillslope with various runoff coefficients (0.5, 0.4, 0.3, 0.2)

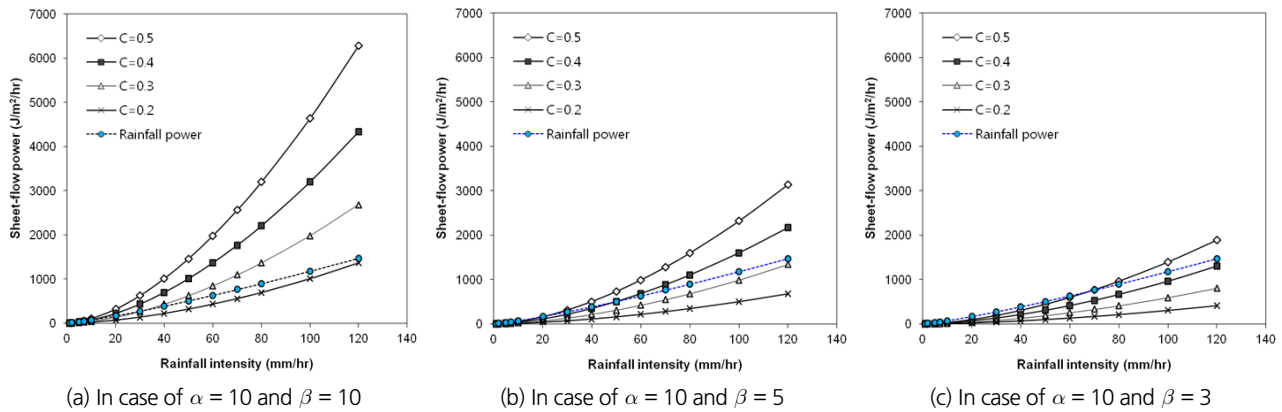


Fig. 4. Variations of sheet-flow power according to coefficient β on a 25° hillslope with various runoff coefficients (0.5, 0.4, 0.3, 0.2)

유출계수를 조사한 Pierson *et al.* (2008)과 Shin *et al.* (2013)의 연구 자료에 따르면 유출계수는 0.3~0.5의 범위를 보였다. 이 범위에서 면상흐름동력과 강우동력을 비교해 보면, 상수 β 가 5인 경우가 기존 연구 자료에 대체로 부합하는 것으로 평가되었다. 그러나 실질적인 실험 연구를 바탕으로 타당성 있는 근거를 제시한 것은 아니기 때문에 이를 단정지어 사용할 수는 없다.

3.2 상대적 평가

본 단계에서는 강우동력과 면상흐름동력의 상대적인 크기와 역학적 의미를 파악하기 위해 일정한 값의 매개변수를 식에 대입하여 각각의 동력에 대한 상대적인 비율을 확인하고자 한다. 사면 경사는 20°와 25°인 경우이며, 상수 α 는 10이고, β 는 5인 경우에 대해 유출계수가 0.5에서 0.3으로 감소하는 사례이다. 사면경사 20°인 경우, 다양한 유출계수에 따른 상대적인 강우동력과 면상흐름동력을 살펴본 결과 Fig. 5와 같았다. 유출계수가 0.5인 경우, 강우강도가 20 mm/h 이상부터

강우동력보다 면상흐름동력이 상대적으로 커지기 시작하여 120 mm/h인 경우에는 강우동력과 면상흐름동력이 각각 3.0 : 7.0의 비율을 보였다. 유출계수가 0.4인 경우는 강우강도 약 40 mm/h 시점에서 이러한 역전 현상이 나타났으며, 강우강도 120 mm/h에서는 강우동력과 면상흐름동력의 비율이 3.8 : 6.2를 보였다. 유출계수가 0.3인 경우는 강우동력이 면상흐름동력보다 전체적으로 컸으며, 강우강도가 120 mm/h일 때 이들은 거의 같은 비율을 보였다. 유출계수가 큰 사면의 경우 면상흐름동력이 강우동력보다 상대적으로 커지는 시점이 낮은 강우강도에서도 가능하지만, 유출계수가 작은 경우는 면상흐름동력이 강우동력과 같아지려면 강한 강우강도의 집중호우를 필요로 한다. 이러한 경향은 Fig. 6과 같이 사면경사 25°에서도 유사하였다. 즉 강우강도가 커짐에 따라 강우동력보다 면상흐름동력이 상대적으로 커짐을 의미한다. 이것은 강우와 면상흐름의 상호작용에 의해 발생한 토사유출에 대한 상대적 기여율 실험 연구(Proffitt and Rose)를 해석할 수 있는 이론적 근거가 된다. 일반적으로 세류간 침식은 유출률이 높은 급

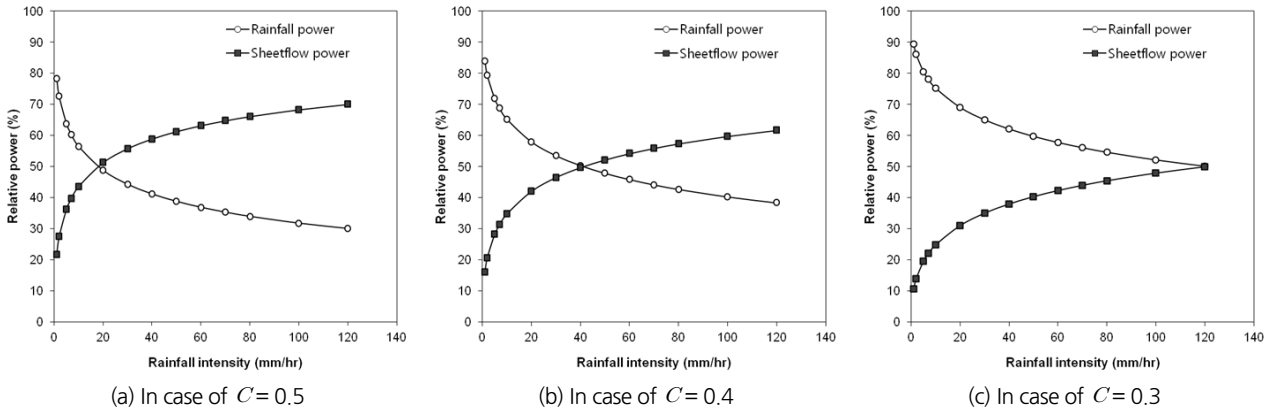


Fig. 5. Relative power rates of rainfall power and sheetflow power for various runoff coefficients (0.5, 0.4, 0.3) in slope of 20°

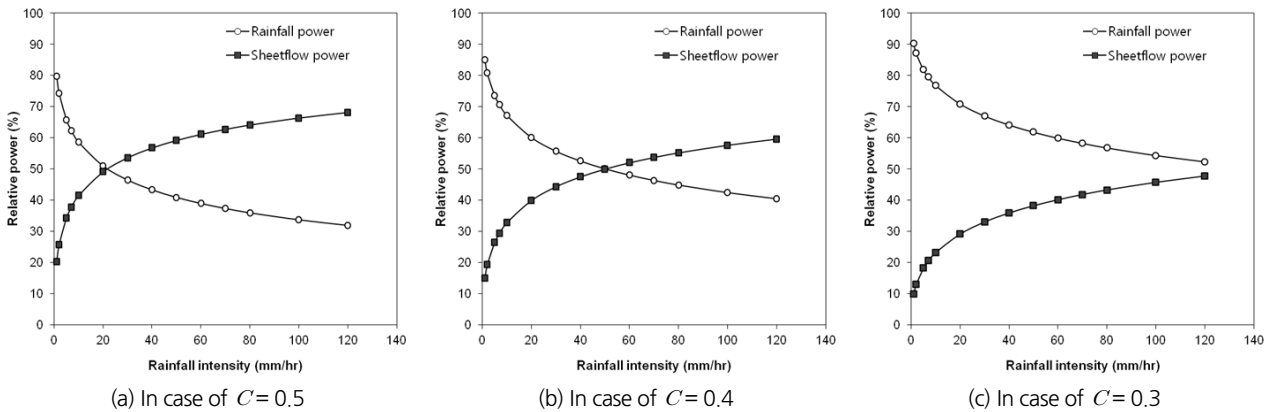


Fig. 6. Relative power rates of rainfall power and sheetflow power for various runoff coefficients (0.5, 0.4, 0.3) in slope of 25°

경사 나지에서 강우입자 튀김보다는 지표유출수의 이송능력에 의해 지배적인 영향을 받으며, 대공극과 많은 저류공간을 포함하는 유기물 토양에서는 지표유출수의 이송능력보다는 강우입자의 충돌에 의해 지배적인 영향을 받는다(Bryan, 1974; Bryan and Luk, 1981; Ghahramani *et al.*, 2011). 강우·면상흐름동력 함수는 이러한 세류간 토양침식의 수문학적 인 의미를 표현하고 있으며, 침식에 대한 물리적인 개념을 설명하는 것이 가능하다.

3.3 동력함수 적용

강우·면상흐름동력 함수를 평가하기 위해 강우에 의해 경사면에서 발생한 유출 및 토양침식 자료가 필요하다. Shin *et al.* (2008)은 2005년 산불 직후 식생 회복이 다른 사면에 10개 소의 소규모 조사구를 설치하여, 강우사상별 유출 및 토양침식을 조사하였다. 이 조사구들 중에 식생회복이 거의 없는 3개의 소규모 조사구에서 총 15회 강우사상에 의해 발생한 지표 유출 및 토양침식 자료를 활용하였다. 세류간 토양침식에 대한 강우·면상흐름동력 함수의 활용 가치를 평가하기 위해 기존에 개발된 세류간 토양침식 추정 모형들과 비교하였다. 세류간 토양침식의 침식능인자로 세계에서 보편적으로 이용되는 경험적 토양침식 모형인 RUSLE (Renard *et al.*, 1996)의 강우지수(R)를 고려한다. 또한 세류간 토양침식 추정 모형으로 강우강도와 경사, 사면길이를 고려한 Elliot *et al.* (1996) 함수와 유량을 추가적으로 고려한 Zhang *et al.* (1998)의 함수 그리고 야대지 사면을 대상으로 개발한 Wei *et al.* (2009) 모형을 평가하였다. 본 연구에서 토양침식성에 대해 중점을 두고 있지 않기 때문에 침식성인자 K_i 는 1로 가정한다. 강우지수를 비롯해 기존 세류간 토양침식 추정 모형들과 강우·면상흐름동력 함수를 실제 토양침식량과의 상관분석을 수행하였다 (Table 3). 측정된 토양침식과 세류간 토양침식 추정 모형들과의 상관관계에서 강우·면상흐름동력 함수가 3개의 조사구에서 모두 가장 큰 상관계수를 보였다. 그 다음은 강우강도와

유출량을 고려한 Zhang *et al.* (1998)과 Wei *et al.* (2009) 식이 높은 상관계수를 보였다. 침식능인자로 강우강도만을 고려한 Elliot *et al.* (1996)은 강우운동에너지를 고려하는 RUSLE의 강우지수보다도 낮은 상관계수를 보였다. 궁극적으로 강우·면상흐름동력이 세류간 토양침식을 평가하는데 있어서 기존 세류간 토양침식 추정 모형들보다 높은 정확도를 보였다.

4. 결 론

세류간 토양침식은 강우입자가 지표를 타격하여 발생하는 토양입자의 박리와 지표유출수의 흐름에 의한 유사이송의 상호작용에 의해 이루어진다. 본 연구에서는 토양입자의 박리 현상을 일으키는 강우동력과 유사이송에 기여하는 면상흐름동력에 대해 새롭게 유도하고, 강우·면상흐름동력 식을 제시하였다. 이 함수의 상수를 결정하기 위해 강우강도, 경사, 유출계수에 따른 강우동력과 면상흐름동력의 변화를 분석하여, 상수의 적합한 범위를 파악하였다. 급경사면 유출물의 기존 연구자료를 바탕으로 유출계수를 0.2~0.5 범위로 대입했을 때, 강우동력과 면상흐름동력 산정결과를 비교해본 결과 상수 α 가 10이고, 상수 β 는 5인 경우에 부합하는 것으로 평가되었다. 그러나 실험 자료를 바탕으로 타당성을 제시한 것이 아니기에 상수를 결정하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 강우인자, 지형조건, 토양 및 지표 조건에 의해 결정되는 강우강도, 경사, 유출물에 따른 강우동력과 면상흐름동력의 상대적 변화를 평가하였다. 강우동력과 면상흐름동력의 상대적 비율에서 강우강도와 유출물이 증가함에 따라 면상흐름동력 비율이 크게 증가하였다. 이는 세류간 토양침식에서 지표유출수의 증가로 면상흐름의 유사이송 능력이 증가함을 강우·면상흐름동력 함수가 물리적으로 설명하는 부분이다. 이러한 동력 함수의 적용 가능성을 평가하기 위해 현장에서 측정된 지표 유출 및 토양침식 자료를 활용하였다. 기존에 개발된 세류

Table 3. Correlation analysis between soil erosion and erosivity factor (rainfall index of RUSLE), interrill-erosion equations (Elliot *et al.*, 1996; Zang *et al.*, 1998; Wei *et al.*, 2009), and rainfall-sheet power for three plots

Interrill erosion equations	Soil erosion (g/m ²)			
	Plot-1	Plot-2	Plot-3	Ave.
Rainfall index	0.723**	0.619**	0.677**	0.673**
Elliot Eq. (2)	0.686**	0.563**	0.665**	0.638**
Zhang Eq. (4)	0.794**	0.720**	0.759**	0.757**
Wei Eq. (5)	0.785**	0.711**	0.757**	0.751**
Power Eq. (25)	0.886**	0.772**	0.868**	0.842**

** : High significance level ($p < 0.001$)

간 토양침식 추정 모형들과 강우·면상흐름동력 함수의 적용 결과를 실측 토양침식량과의 상관분석을 통해 평가하였다. 적용한 3개의 모든 조사구에서 강우·면상흐름동력 함수가 가장 높은 상관계수를 보여, 세류간 토양침식량 추정에 있어서 정확도가 높은 식임을 확인하였다. 본 모형은 물리적 기반의 동력 함수이기 때문에 기후, 토양, 지형 특성이 다른 지역에 일반적인 모형으로 적용 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 성과는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1C1A2A01055469).

References

- Atlas, D., and Ulbrich, C. W. (1977). "Path- and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, No. 12, pp. 1322-1331.
- Bagnold, R. A. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics*. U.S. Geological Survey Professional Paper 422-J.
- Baruah, P. C. (1973). *An investigation of drop size distribution of rainfall in Thailand*. MSc Thesis No. 528, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Brandt, C. J. (1990). "Simulation of the size distribution and erosivity of raindrops and throughfall drops." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 15, No. 8, pp. 687-698.
- Brown, L. C., and Foster, G. R. (1987) "Storm erosivity using idealized intensity distributions." *Transactions of the ASAE*, Vol. 30, pp. 379-386.
- Bryan, R. B. (1974). "Water erosion by splash and wash and the erodibility of Albertan soils." *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, Vol. 56, No. 3/4, pp. 159-181.
- Bryan, R. B., and Luk, S. H. (1981). "Laboratory experiments on the variation of soil erosion under simulated rainfall." *Geoderma*, Vol. 26, No. 4, pp. 245-265.
- Carter, C. E., Greer, J. D., Braud, H. J., and Floyd, J. M. (1974). "Raindrop characteristics in south central United States." *Transactions of the ASAE*, Vol. 17, pp. 1033-1037.
- Chang, H. H. (1979). "Geometry of rivers in regime." *Journal of the Hydraulics Division American Society of Civil Engineers*, Vol. 105, No. HY6, pp. 691-706.
- Coutinho, M. A., and Tomás, P. P. (1995). "Characterisation of raindrop size distributions at the Vale Formoso Experimental Erosion Center." *CATENA*, Vol. 25, No. 1-4, pp. 187-197.
- Elliot, W. J., Luce, C. H., and Robichaud, P. R. (1996). "Predicting sedimentation from timber harvest areas with the wepp model." *Proceedings 6th Federal Interagency Sedimentation Conference*, March 10-14, Las Vegas, N.V., pp. IX-46-53.
- Emmett, W. W. (1970). *The hydraulics of overland flow on hillslopes*. USGS Professional Paper 662A. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Ferro V. (1998). "Evaluating overland flow sediment transport capacity." *Hydrological Processes*, Vol. 12, No. 12, pp. 1895-1910.
- Flanagan, D. C., and Nearing, M. A. (Eds.)(1995). *USDA-Water Erosion Prediction Project: technical documentation*. NSERL Rep. No. 10. National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN.
- Fornis, R. L., Vermeulen, H. R., and Nieuwenhuis, J. D. (2005). "Kinetic energy-rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies." *Journal of Hydrology*, Vol. 300, No. 1-4, pp. 20-32.
- Gabet, E. J., and Dunne D. (2003). "Sediment detachment by rain power." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 1, pp. 1002.
- Ghahramani, A., Ishikawa, Y., Gomi, T., Shiraki, K., and Miyata, S. (2011). "Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope: A plot-scale study." *CATENA*, Vol. 85, No. 1, pp. 34-47.
- Holton, R. E. (1945). "Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology." *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 56, No. 3, pp. 275-370.
- Hudson, N. W. (1963). "Raindrop size distribution in high intensity storms." *Rhodesian Journal of Agricultural Research*, Vol. 1, pp. 6-11.
- Kinnell, P. I. A. (1981). "Rainfall intensity-kinetic energy relationship for soil loss prediction." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 45, No. 1, pp. 153-155.
- Kinnell, P. I. A. (1991). "The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows." *Transactions of the ASAE*, Vol. 34, No. 1, pp. 161-168.
- Kinnell, P. I. A. (1993). "Interrill erodibilities based on the rainfall intensity flow discharge erosivity factor." *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 319-332.
- Lee, J. S., and Won, J. Y. (2013). "Analysis of the characteristic of monthly rainfall erosivity in Korea with derivation of rainfall energy equation." *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 3, pp. 177-184.
- Liebenow, A. M., Elliot, W. J., Laflen, J. M., and Kohl, K. D. (1990). "Interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils." *Transactions of the ASAE*, Vol. 33, No. 6, pp. 1882-1888.
- Mati, B. M. (1994). "Splash transport of soil on a slope under various crop covers." *Agricultural Water Management*, Vol. 26, No. 1-2, pp. 59-66.
- McIsaac, G. F. (1990). "Apparent geographic and atmospheric influences on raindrop sizes and rainfall kinetic energy."

- Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 45, No. 6, pp. 663-666.
- Morgan, R. P. C. (1978). *Recherches sur l'érosion des sols sableux en Bedfordshire, Angleterre*. Paper presented to colloquium on Agricultural Soil Erosion in Temperate Non-Mediterranean Climates, l'Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Morgan, R. P. C. (1986). *Soil erosion and conservation*. Longman, Harlow.
- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., and Styczen, M. E. (1998). "The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 23, No. 6, pp. 527-544.
- Morgan, R. P. D. (1980) "Field studies of sediment transport by overland flow." *Earth Surface Processes*, Vol. 5, No. 4, pp. 307-316.
- Moss, A. J., Walker, P. H., and Hutka, J., (1979). "Raindrop-simulated transportation in shallow water flows: an experimental study." *Sedimentary Geology*, Vol. 22, No. 3-4, pp. 165-184.
- Nam, M. J., Park, S. D., Lee, S. K. and Shin, S. S. (2015). "Interaction between raindrops splash and sheet flow in interrill erosion of steep hillslopes." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 48, No. 7, pp. 595-604.
- Nearing, M. A., Wei, H., Stone, J. J., Pierson, F. B., Spaeth, K. E., Weltz, M. A., Flanagan, D. C., and Hernandez, M. (2011). "A rangeland hydrology and erosion model." *Transactions of the ASABE*, Vol. 54, No. 3, pp. 1-8.
- Palmer, R. S. (1964). "The influence of a thin water layer on water-drop impact forces. International Association of Science of Hydrology." *Publication 65, General Assembly*, Berkeley.
- 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 Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 17, No. 2, pp. 292-304.
- Pearce, A. J. (1976). "Magnitude and frequency of erosion by Hortonian overland flow." *Journal of Geology*, Vol. 84, No. 1, pp. 65-80.
- Pierson, F. B., Robichaud, P. R., Moffet, C. A., and Spaeth, K. E. (2008). "Fire effects on rangeland hydrology and erosion in a steep sagebrush-dominated landscape." *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 2916-2929.
- Proffitt, A. P. B., and Rose, C. W. (1991). "Soil erosion processes. I. The relative importance of rainfall detachment and runoff entrainment." *Aust. J. Soil Res.*, Vol. 29, pp. 671-683.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., and Yoder, D. C. (1997). "Prediction soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", *USDA Agricultural Handbook No. 703*. USDA, Washington, DC.
- Rosewell, C. J. (1986). "Rainfall kinetic energy in eastern australia." *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 25, No. 11, pp. 1965-1971.
- Salles, C., Poesen, J., and Sempere-Torres, D. (2002). "Kinetic energy of rain and its functional with intensity." *Journal of Hydrology*, Vol. 257, No. 1-4, pp. 256-270.
- Schmidt, J. (1993). "Modeling long-term soil loss and landform change, in overland flow." *Hydraulic and Erosion Mechanics*, Edited by A. J. Parsons.
- Sempere-Torres, D., Salles, C., Creutin, J. D., and Delrieu, G. (1992). "Quantification of soil detachment by raindrop impact: performance of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms." *Erosion and sediment transport monitoring programs in river basin*, IASH, Publ. No. 210, pp. 115-124.
- Shakesby, R. A., and Doerr, S. H. (2006). "Wildfire as a hydrological and geomorphological agent." *Earth-Science Reviews* Vol. 74, No. 3-4, pp. 269-307.
- Shin, S. S., Park, S. D., Cho, J. W., and Lee, K. S. (2008). "Effects of vegetaton recovery for surface runoff and soil erosion in burned mountains, Yangyang." *Journal of Civil Engineering KSCE*, Vol. 499, pp. 154-166.
- Shin, S. S., Park, S. D., and Lee, K. S. (2013). "Sediment and hydrological response to vegetation recovery following wildfire on hillslopes and the hollow of a small watershed." *Journal of Hydrology*, Vol. 499, pp. 154-166.
- Shin, S. S., Park, S. D., and Choi, B. K. (2016). "Universal power law for relationship between rainfall kinetic energy and rainfall intensity." *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, pp. 1-11. doi: 10.1155/2016/2494681.
- Shin, S. S., Park, S. D., Hwang, Y. (2017). "Evaluation of effective energy for splash and sheet erosion on post-fire steep hillslopes." *Proceedings 19th EGU General Assembly*, Vienna, Austria, p. 11962
- Shin, S. S., Park, S. D., Pierson, F. B., Al-Hamdan, O. Z., and Williams, C. J. (2012). *Rainfall and sheet power equation for interrill erosion on steep hillslope*. AGU Fall Meeting ID: 1491578.
- Smith, J. A., and De Veaux, R. D. (1992). "The temporal and spatial variability of rainfall power." *Environmetrics*, Vol. 3, No. 1, pp. 29-53.
- Steiner, M., and Smith, J. A. (2000). "Reflectivity, rain rate, and kinetic energy flux relationships based on raindrop spectra." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 39, No. 11, pp. 1923-1940.
- Torri, D., and Poesen, J. (1992). "The effect of soil surface slope on raindrop detachment." *CATENA*, Vol. 19, No. 6, pp. 561-577.
- Torri, D., Sfalanga M., and Del Sette, M. (1987). "Splash detachment: runoff depth and soil cohesion." *CATENA*, Vol. 14, No. 1-3, pp. 149-155.
- Uijlenhoet, R., and Stricker, J. N. M. (1999). "A consistent rainfall parameterization based on the exponential raindrop size distribution." *Journal of Hydrology*, Vol. 218, No. 3-4, pp. 101-127.
- Van Dijk, A. I. J. M, Bruijnzeel, L. A., and Rosewell, C. J. (2002) "Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature review," *Journal of Hydrology*, Vol. 261, No. 1-4, pp. 1-23.

- Wei, H., Nearing, M. A., Stone, J. J., Guertin, D. P., Spaeth, K. E., Pierson, F. B., Nichols, M. H., and Moffett, C. A. (2009) "A new splash and sheet erosion equation for rangelands." *Soil and Water Management and Conservation*, Vol. 73, No. 4, pp. 1386-1392.
- Wischmeier, W. H., and Smith, D. D. (1958). "Rainfall energy and its relationship to soil loss." *Transactions of the American Geophysical Union*. Vol. 39, No. 2, pp. 285-291.
- 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.
- Wright, A. C. (1986). "A physically-based model of the dispersion of splash droplets ejected from a water drop impact." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 11, No. 4, pp. 351-367.
- Yang C. T. (1972) "Unit stream power and sediment transport." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 98, No. 10, pp. 1805-1826.
- Zanchi, C., and Torri, D. (1980). "Evaluation of rainfall energy in central Italy." Edited by De Boodt, M., Gabriels, D. *Assessment of Erosion*, Wiley, Toronto, pp. 133-142.
- Zhang, X. C., Nearing, M. A., Miller, W. P., Norton, L. D., and West, L. T. (1998). "Modeling interrill sediment delivery." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 62, No. 2, pp. 438-444.