



Erodibility evaluation of sandy soils for sheet erosion on steep slopes

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

^aResearch Professor, Institute for Disaster Prevention, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

^bProfessor, Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

^cAssistant Manager, Dongseo Engineering, Seoul, Korea

Paper number: 22-007

Received: 29 January 2022; Revised: 23 March 2022; Accepted: 28 March 2022

Abstract

Artificial disturbance in mountainous areas increases the sensitivity to erosion by exposure of the subsoil with a low loam ratio to the surface. In this study, rainfall simulations were conducted to evaluate the erodibility of sand and loamy sand in the interrill erosion by the rainfall-induced sheet flow. The mean diameters of sand and loamy sand used in the experiment were 0.936 mm and 0.611 mm, respectively, and the organic matter content was 2.0% and 4.2%, respectively. In the experimental plot, the runoff coefficient of overland flow increased 1.16 times in loamy sand rather than sand. Mean sediment yields of loamy sand and sand by sheet erosion were 3.71kg/m²/hr and 1.13kg/m²/hr respectively. The erodibility, the rate of soil erosion for rainfall erosivity factor, was 3.65 times greater in loamy sand than in sand. As the gradient of the steep slope increased from 24° to 28°, the sediment concentration and the erodibility for two soils increased by about 20%. The erodibility factor *K* of sandy soils for small plots was overestimated compared to the measured erodibility. This means that RUSLE can overestimate the sediment yields by sheet erosion on sandy soils.

Keywords: Sheet erosion, Loamy sand, Sand, Erodibility

급경사면의 면상침식에 대한 사질토양의 침식성 평가

신승숙^{a*} · 박상덕^b · 황윤희^c

^a강릉원주대학교 방재연구소 연구교수, ^b강릉원주대학교 토목공학과 교수, ^c(주)동서엔지니어링 대리

요 지

산지의 인위적인 교란은 양토 비율이 적은 심토를 지표에 노출시켜 침식의 민감도를 증가시킨다. 본 연구는 강우유입 면상흐름에 의해 발생하는 세류간 침식에 있어서 사질토(sand)와 양질사토(loamy sand)의 침식성(erodibility)을 평가하고자 강우모의 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 사질토와 양질사토의 평균입경은 각각 0.936 mm와 0.611 mm이고, 유기물함량은 각각 2.0%와 4.2%이었다. 실험 플롯에서 지표흐름의 유출계수는 양질사토가 사질토보다 1.16 배 증가하였다. 면상침식에 의한 양질사토와 사질토의 평균 토사유출량은 각각 3.71kg/m²/hr와 1.13kg/m²/hr 이었다. 강우침식능인자에 대한 토사유출량의 비인 침식성은 양질사토가 사질토보다 평균 3.65 배 컸다. 급경사면의 경사도가 24°에서 28°로 증가함에 따라 두 토양에 대한 유사농도와 침식성은 약 20%정도 증가하였다. 소규모 플롯에 대한 사질토양의 침식성인자 *K*는 실측 침식성에 비해 과대 산정되었다. 이 결과는 RUSLE가 사질토양에서 면상침식에 의해 발생하는 토사유출량을 과대평가할 수 있음을 의미한다.

핵심용어: 면상침식, 양질사토, 사질토, 침식성

*Corresponding Author. Tel: +82-33-640-1734
E-mail: cewsook@gwnu.ac.kr (S. S. Shin)

1. 서론

우리나라의 지황별 경사분포 자료에 따르면, 사면경사가 20° 이상인 급경사지, 험준지, 절험지가 산림 면적의 82.8%를 차지한다(KOSIS, 2010). 특히 험준한 산림지가 많이 분포하는 강원도는 이러한 급경사면이 88.6%를 차지하며, 전국에서 가장 큰 비중을 차지하는 지역이다. 급경사 산림지에서 산불, 벌목, 개발 등의 지표환경 변화는 잠재적인 토양침식 위험을 증가시킨다(Lee *et al.*, 2004; Lee and Joo, 2006; Kim *et al.*, 2008; Shin *et al.*, 2008, 2013; Seo *et al.*, 2010).

토양특성은 지표변화 지역에서 유출, 토양침식, 토사유출을 결정하는 중요한 인자 중 하나이다. 침식은 토양의 저항에 따라 10배 이상의 민감도 차이를 보인다. 토양의 침식성(erosibility)을 파악하기 위해서는 토양의 구성, 토양응집력, 전단강도, 침투능, 유기물 함량, 화학적 성분 등을 고려해야 한다. 실험실이나 현장에서 결정된 토양의 특성이나 강우에 대한 토양의 반응에 기초하여 간단한 침식성지수를 고안하려는 시도가 많이 있었다(Chorley, 1959; Combeau and Monnier, 1961; Bryan, 1968; Wischmeier *et al.*, 1971; Chisci *et al.*, 1989; Park *et al.*, 2012). Wischmeier *et al.* (1971)는 토양의 입자 분포, 유기물 함량, 구조 및 투과성을 아는 경우, 모노그램을 이용하여 침식성 인자를 산정할 수 있도록 하였다. 국내 토양침식 위험을 평가하기 위해 일반적으로 활용되는 RUSLE 모형은 Wischmeier *et al.* (1971)에 의한 모노그램 형태의 침식성인자 K 를 사용한다(Jung *et al.*, 1999; Joo *et al.*, 2000; Heo *et al.*, 2005; Kim and Kim, 2005). Shin *et al.* (1973)은 토양유실 실험을 통해 Wischmeier *et al.* (1971)가 제시한 토양침식성 공식을 우리나라에도 사용할 수 있음을 밝혔다. Jung *et al.* (1976)은 우리나라의 경사지를 대상으로 83개 토양통의 침식성인자 K 를 평가한 결과 0.05와 0.51의 범위였으며, 실트함량이 많을수록 증가하고, 유기물 함량이 높을수록 감소함을 보였다. 농경지의 토양을 대상으로 토양침식 실험을 통한 토양의 침식성인자와 피복인자를 평가한 연구에 따르면, 표면피복인자인 작물잔류물과 골재 비율 증가에 따른 침식량의 감소를 중점적으로 다루고 있다(Joo *et al.*, 2000). 이들 연구는 대부분 경사진 농경지의 토양유실을 저감하기 위해 수행한 것들이다. 토양침식은 경작활동의 농경지뿐만 아니라, 개발공사지나 산불지역과 같은 교란지역에서도 크게 증가한다. 재해영향 평가등의 협의 실무지침(MIS, 2021)에 따르면, 개발지역의 토양침식 및 토사유출 평가에 있어서 RUSLE공식을 원칙적으로 사용할 것을 권고하고 있다. 그러나 이러한 지역을 대상으로 토양의 침식성인자를 평가한 연구 사례는 거의 전무하

다. 산불지역을 대상으로 RUSLE, WEPP, SEMMA를 이용하여 침식량을 평가한 연구결과에 따르면, RUSLE와 WEPP은 식생피복이 적고(< 30%), 강우량이 큰 경우(> 380 mm)에 실제 침식량에 비해 과소 예측하는 것으로 확인되었다(Park and Shin, 2011). 이는 화재 직후 반발수성이 큰 미세입자 토양이 강우와 지표유출에 노출되어도 이들 모형이 산불의 영향인자를 반영하지 못하기 때문에 파악하였다. 농경지를 기반으로 개발된 RUSLE가 개발지나 산지를 대상으로 적용범위가 확대되었음에도 불구하고, 국내 적용에 있어서 주요 매개변수산정에 대한 세부적인 검토가 필요한 이유이다.

산림 비율이 높은 강원도 지역의 토지이용에 따른 표토 토성별 차지하는 면적을 살펴보면, 사양토(sandy loam) 비율이 전체면적의 55% 정도로 가장 큰 비중을 차지한다(KOSIS, 2010). 일반 표토의 경우 영양분과 부식된 토양을 포함하는 양토(loam)로 이루어져 있지만, 고랭지의 농경지, 개발공사지, 산불지역 등의 지표교란 지역의 경우 양토 비율이 적은 심토가 노출되어 사질토(sand)나 양질사토(loamy sand)의 토양특성을 보이기도 한다(Kim *et al.*, 2005; Jeong *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2012; Shin *et al.*, 2013, 2019). 따라서 본 연구에서는 점토함량 15% 이내의 대표적인 토성인 양질사토와 사질토에 대한 토양침식의 변화를 파악하기 위해 강우모의 토양침식 실험을 수행한다. 세류가 발생하지 않는 소규모 플롯에서 강우유입 면상흐름에 의해 발생하는 세류간 침식에 대한 사질토양의 침식성을 파악하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 실험장비

강우유입 면상흐름에 의한 세류간 토양침식 실험을 위해 Shin *et al.* (2016)에 의해 고안된 강우모의 토양침식 실험장치를 사용하였다(Fig. 1(a)). 압력분사식 인공강우를 발생시키는 강우모의 실험장치는 Meyer and Harmon (1979)에 의해 제안된 노즐 Veejet 80100 두 개가 설치되어 있다. 노즐 설치 높이는 지면으로부터 4 m 정도이다. 인공강우의 물 공급은 용수공급용 펌프에 연결된 압력조절 밸브와 회전 모터의 속도를 조절하여 강우량과 강우강도를 제어하는 것이 가능하다. 모의분사 강우의 재현 강우강도는 60 mm/hr~130 mm/hr 범위이다. 세류간침식 실험을 위한 토양상자는 0.6 m × 0.8 m × 0.3 m의 크기로 두 개가 설치되어 있으며, 경사 0°~30° 범위로 완경사부터 험준지까지 조절이 가능하다. 토양상자 출구부는 지표유출량과 토사유출량의 측정이 용이하도록 유도판이

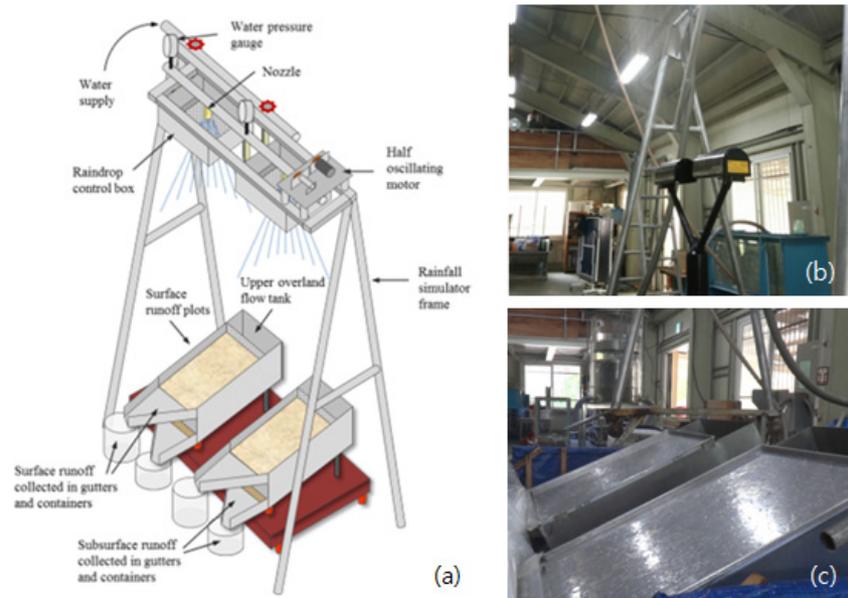


Fig. 1. Schematic of rainfall simulator (a) and experimental pictures of disdrometer pasivel measuring rainfall kinetic energy (b) and steel container to measure rainfall intensity (c)

설치되어 있다. 침투수가 지표하 흐름 형태로 빠져나가도록 지하수 배수망과 유도판이 설치되어 있다. 강우운동에너지는 Fig. 1(b)에서 보여준 것처럼 강우입자분포(DSD)와 낙하속도를 자동 계측하는 광학디스크로메타인 Pasivel를 이용하여 측정하였다. 실제 모의강우의 강우강도를 측정하기 위해 그리고 일정한 강우강도 규모로 재현하기 위해 스틸 용기를 Fig. 1(c)처럼 제작하여 사용하였다.

2.2 실험방법

사질토양에 대한 면상침식 실험을 수행하기 위해 토양은 기존 현장 시험사이트인 강릉시 사천면 노동리와 석교리 일대 산지토양을 사용하였다(Park *et al.*, 2012). 이 지역은 산불이후 강우사상에 따른 지표유출과 토양침식을 조사한 곳으로 실측 토양침식 자료를 확보하고 있어서 추후 비교 분석이 가능하다. 토성을 파악하기 위하여 체가름시험을 통한 입도분포 분석을 수행하였다. 국제토양학회법에 따르면 토양의 종류는 토양입자의 크기와 조합에 의해 구분되며, 점토, 실트, 모래의 구성 비율을 기본으로 토양을 분류한다. 토양종류는 미국 자연자원보전국(Natural Resources Conservation Service, NRCS)의 기준으로 분류하며 크게 11가지로 구분한다. 토양은 통일분류법으로 분류한 결과 SP에 해당하며, 입도분포가 불량인 사질토(sand)와 양질사토(loamy sand)에 해당한다(Table 1). 사질토의 평균입경은 0.936 mm이고, 양질사토의 평균입경은 0.611 mm이었다. 유기물함량을 파악하기 위해

Table 1. Texture of soils using on erosion experiment

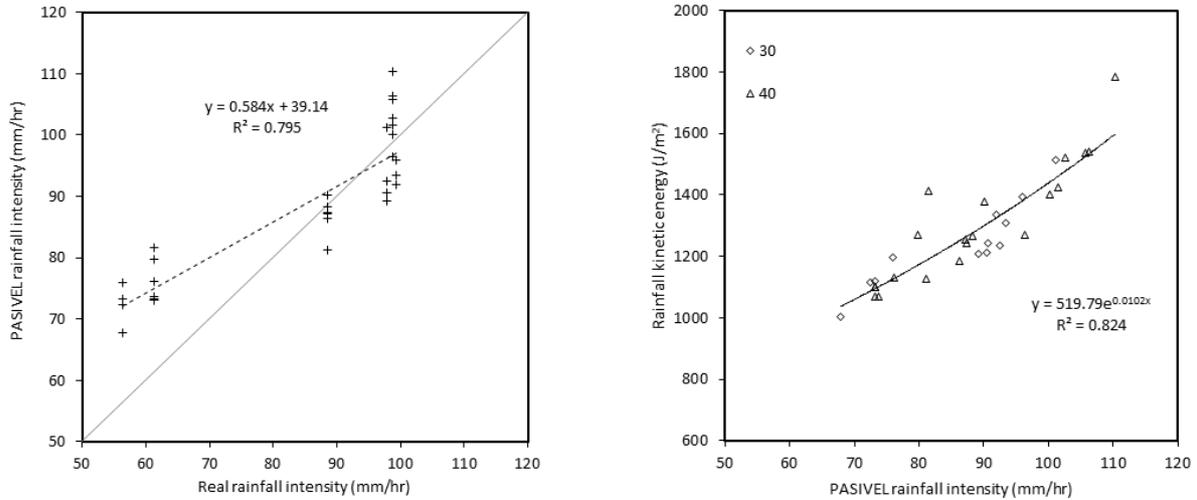
Texture	Sand	Loamy sand
Clay (%)	1.0	3.0
Silt (%)	4.0	14.1
Sand (%)	73.0	80.4
Gravel (%)	22.0	12.5
Mean diameter (mm)	0.936	0.611
Bulk density (g/cm ³)	1.78	1.10
Organic matter content (%)	2.05±0.08	4.20±0.09
Share strength (kg/cm ²)	0.480±0.048	0.599±0.072

토양을 600°C 도가니에 태워 탄소제거에 따른 무게 변화를 측정된 결과 사질토는 2.0%, 양질사토는 4.2%의 유기물함량을 보였다. 선행강우 이후 습윤상태의 지표토양에 대한 전단응력을 측정하기 위해 Torvane을 사용하였다(Fig. 2). Torvane은 전단응력을 간단하고 빠르게 측정할 수 있는 검사 장치로서 보정계수는 0.2 kg/cm²를 고려한다. 각 토양상자를 4개 구역으로 나누고 4개 지점에서 전단응력을 측정하여 평균값을 계산한 결과 사질토는 0.48 kg/cm², 양질사토는 0.60 kg/cm²의 전단강도를 보였다.

두 개의 토양상자에 사질토양을 다지면서 채우고, 다짐도와 함수조건을 동일 조건으로 만들어 주기 위해 본 실험에 앞서 선행강우를 발생시킨다. 선행강우로 인한 지표교란이나 침식이 발생하지 않도록 토양상자를 수평으로 맞추고, 강우입자가 작은 안개비 형태의 인공강수를 20분간 분사하였다. 선



Fig. 2. Torvane test of saturated sand and loamy sand used on sheet erosion by rainfall simulation



(a) Relationship between Pasivel rainfall intensity and real rainfall intensity (b) Relationship between rainfall kinetic energy and Pasivel rainfall intensity

Fig. 3. Calculation of kinetic energy of simulated rainfall from the relationships between Pasivel rainfall intensity and real rainfall intensity (a) and rainfall kinetic energy and Pasivel rainfall intensity (b)

행강우 모의가 끝나고 두 시간 경과 후 토양상자의 경사를 실험조건의 경사로 조절한다. 본 실험에 앞서 일정규모의 모의 강우를 재현하기 위하여 스틸 용기를 사용하여 10분 동안 발생한 강우량을 측정하였다. 본 실험의 강우량은 지속시간 30분 강릉지역 Gumble 확률분포형(MCT, 2000)에 대한 빈도별 20년(70.5 mm), 80년(88.9 mm), 500년(112.2 mm)의 강우강도 규모를 고려하였다. 강우노즐의 회전 빈도가 분당 30회~40회인 경우 인공강우가 안정적으로 재현되었다. 강우강도는 각 강우모의 실험조건에 따라 다소 차이가 있으며, 최소 60 mm/hr에서 최대 130 mm/hr 범위로 모의 가능했다. 강우운동에너지는 강우강도별 Pasivel에 의해 측정된 결과를 활용한다. 동일 강우모의기를 사용하여 연구했던 Nam *et al.* (2015)의 측정 자료에 따르면, 일정한 강우강도 조건에서 Pasivel로 측정된 강우운동에너지는 자연강우의 운동에너지 산정식에 비해 약 58%정도를 재현하는 것으로 확인된바 있다. 그러나 인공강우의 강우강도를 스틸 용기로 정확하게 측정할 결과 Pasivel로 측정된 강우강도와 차이가 있음을 확인하였다(Fig. 3(a)). 강우강도가 90 mm/hr보다 작은 경우 Pasivel이 과대 측

정하는 것으로 확인되었다. 이는 낮은 강우강도에도 인공강우의 입자가 일반적으로 자연강우보다 크고, 회전하는 노즐의 움직임에 따른 국소적 강우강도 측정의 편차가 크게 발생하기 때문이다. Fig. 3(b)는 강우노즐의 회전 빈도 30회와 40회인 경우 Pasivel에 의한 강우강도와 강우운동에너지의 관계를 나타낸 것이다. 따라서 실측 강우강도와 Pasivel 측정결과를 비교한 Fig. 3(a)와 Pasivel의 강우강도와 강우운동에너지 관계를 나타낸 Fig. 3(b)를 이용하여 낙하하는 인공강우 입자들의 운동에너지를 산정하였다.

강우모의 본 실험은 30분 동안 진행되었고, 2분 간격으로 10초 동안 유출수의 샘플을 수집하였다. 지표 토사를 포함하는 샘플 유출수는 여과장치에 의해 토사와 유출수를 분리하였다. 채집용기에 의해 수집된 총 지표유출수의 부피를 측정하고, 총 토사와 여과지 샘플 토사는 105°C에서 건조시켜 건조무게를 측정하였다. 본 실험은 토양조건 사질토와 양질사토, 강우강도 최소 65 mm/hr부터 최대 127 mm/hr 범위, 경사조건 24°와 28° 조건에 따라 총 21회 강우모의실험을 수행하였고, 두 개의 토양상자로부터 총 42개 실험 결과를 얻었다.

2.3 침식성 인자

토사체로부터 토양입자의 분리와 이송에 대한 토양의 저항을 침식성이라 일반적으로 정의한다. 토양입경 0.002 mm 이하인 점토의 함량이 증가하면, 점착성 또는 화학적 결합력에 의해 토양입자 분리에 대한 저항능력이 증가한다(Savat and De Ploey, 1982; Poesen, 1987). 유기물과 결합한 점토 입자는 토양의 집합(aggregate)을 형성하여 토양을 더욱 안정하게 만든다. 점착성의 영향이 적으면서 입경이 모래보다 상대적으로 작은 실트는 저항능력이 가장 작으며, 침식에 대한 민감도가 가장 크다. Richter and Nengendank (1977)는 실트함량이 40%~60%인 경우 가장 침식되기 쉬운 토양임을 제시했다. 모래의 함량이 증가할수록 마찰저항에 의한 전단강도가 증가하기 때문에 침식 민감도는 감소한다.

토양의 침식성지수에 대한 연구는 많은 사람들에 의해 수행되어 왔다(Chorley, 1959; Combeau and Monnier, 1961; Bryan, 1968; Wischmeier *et al.*, 1971; Chisci *et al.*, 1989; Park *et al.*, 2012). 경험적 토양침식 모형인 USLE (Wischmeier and Smith, 1965)와 RUSLE (Renard *et al.*, 1997)에서 토양의 침식성은 주어진 토양에 있어서 강우와 유출 충격의 통합에 의한 토양침식 정도를 의미한다. 토양의 침식성은 실험적인 표준 플롯에서 강우침식능인자(rainfall erosivity factor), EI_{30} 에 대한 토양 침식량의 비로 정의한다. 표준 플롯의 사면 길이 22.1 m, 사면경사 9%의 나지 상태에 사면길이(L)와 사면경사(S) 인자, 피복인자(C), 토양보존대책인자(P)가 모두 1.0 일 때 토양침식성인자 K 는 Eq. (1)과 같이 표현한다.

$$K = \frac{\text{Measured erosion}}{\sum EI_{30}} \quad (1)$$

Wischmeier *et al.* (1971)는 55개의 미국 중서부 농경지의 측정자료를 기초로 5가지의 토양 및 토양특성인자를 이용하여 K 를 산정할 수 있는 모노그램을 제시하였으며, K 는 Eqs. (2) and (3)을 이용하여 산정 가능하다.

$$K = \frac{1}{100} [2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25 (S_1 - 2) + 2.5 (P_1 - 3)] \quad (2)$$

$$M = (MS + VFS)(100 - CL) \quad (3)$$

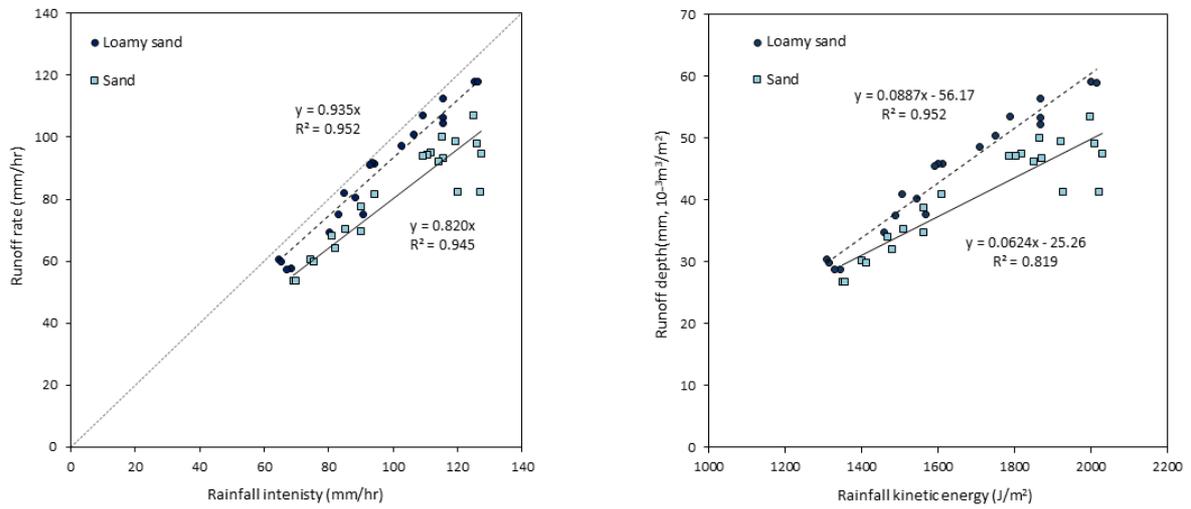
여기서, K 의 단위는 tons/acre/EI 이고, M 에 대한 적용범위는 $MS + VFS \leq 70$ 이다. 또한, CL 은 입도분포곡선에서 점토(≤ 0.002 mm)의 백분율(%), MS 는 실트(0.002 mm~0.05 mm)의

백분율(%), VFS 는 매우 고운 모래(0.05 mm~0.1 mm)의 백분율(%), OM 은 토양 중에 포함된 유기물질의 백분율(%)이다. S_1 은 토양의 구조를 나타내고, P_1 은 토양의 투수성을 나타내는 값이다. 침식성인자 K 는 계절의 영향과 암석의 함량에 따라 토양의 밀도와 투수계수가 변화하기 때문에 이를 반영하여 보정하는 것이 가능하다. 그러나 본 연구는 강우모의 실험을 통한 사질토양의 침식성을 평가하기 때문에 계절의 영향을 고려할 필요가 없으며, 암석의 함량이 40% 이내이기 때문에 투수성 등급평가에 크게 영향을 끼치지 않는다.

3. 실험결과

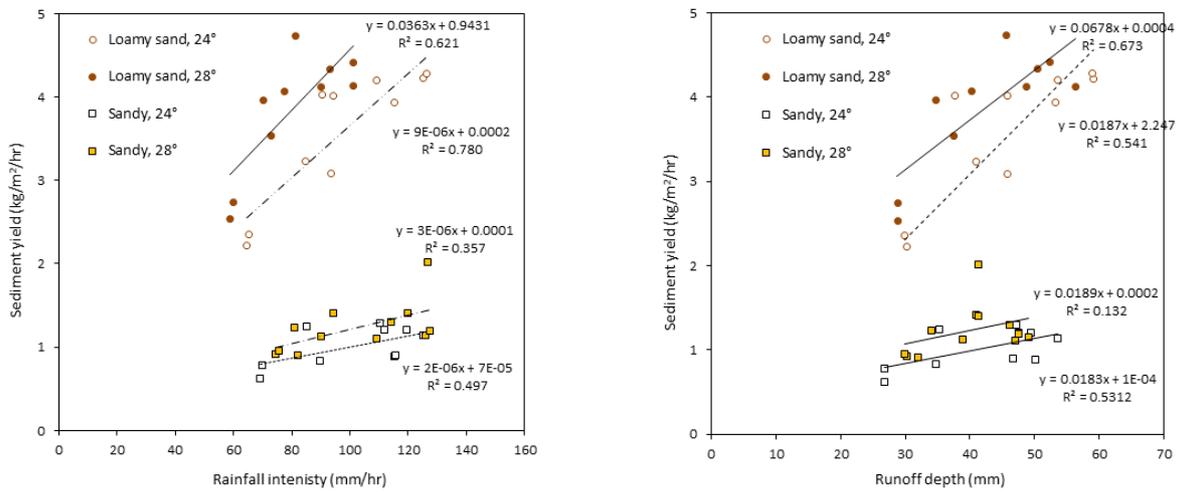
3.1 면상침식

인공강우의 강우량은 32 mm~64 mm 범위이고, 이에 대한 강우운동에너지는 1,300 J/m²~2,030 J/m²의 범위로 산정되었다. 두 종류의 토양에 대한 강우모의 실험에서 강우강도가 증가함에 따라 지표유출량은 증가하였다(Fig. 4). 평균 지표유출량은 양질사토에서 44.0 mm/hr, 사질토에서 40.7 mm/hr로 상대적으로 강우량이 적었던 양질사토에서 많은 지표유출량이 발생하였다. 양질사토의 유출율 0.93이었으며 사질토보다 0.13 더 크게 나타났다. 사질토의 침투능이 양질사토보다 크기 때문에 양질사토의 지표유출량이 상대적으로 많이 발생한 것이다. 지표유출량은 강우강도와 경사가 증가하여도 큰 변화가 없었으며, 강우발생이 멈추면 현저히 감소하였다. 양질사토의 점토성분이 강우의 침투를 저해하고, 모래보다 많은 양의 수분을 함유하는 있는 것으로 파악되었다. 평균 토양침식량의 경우 양질사토에서 3.71 kg/m²/hr (18.6 ton/ha) 사질토에서 1.13 kg/m²/hr (5.65 ton/ha)가 발생하여 강우량이 상대적으로 적었던 양질사토에서 3.28 배 크게 발생하였다(Fig. 5). 사면경사 28°에서 양질사토와 사질토 모두 최대 침식량을 보였다. 양질사토는 강우강도 92.7 mm/hr에서 최대 침식량 23.7 ton/ha가 발생하였고, 사질토는 강우강도 126.9 mm/hr에서 최대 침식량 10.1 ton/ha가 발생하였다. 토양 입자의 크기가 작아질수록 외력에 저항하는 전단응력이 작아지기 때문이다. Table 2는 양질사토와 사질토에 대한 모의강우에 의한 유출 및 토양침식 결과를 비교한 것이다. 유출계수는 양질사토가 사질토보다 1.16 배 증가했지만, 유사농도는 평균 3.03 배로 크게 증가했다. 경사 24°에서 28°로 증가함에 따라 사질토와 양질사토의 유사농도는 각각 25.7%와 18.1% 증가하였다. RUSLE의 강우침식능인자에 대한 토양침식의 비인 침식반응비는 유사농도의 비율보다 더 컸다. 양질사토의 침



(a) Relationship between runoff rate and rainfall intensity (b) Relationship between runoff depth and rainfall kinetic energy

Fig. 4. Responses of surface runoff in loamy sand and sand according to rainfall size



(a) Relationship between sediment yield and rainfall intensity (b) Relationship between sediment yield and runoff discharge

Fig. 5. Responses of sediment yield in loamy sand and sand of slope 24° and 28° according to rainfall and runoff discharge

Table 2. Relative comparison of rainfall factors, runoff factors, and sediment factors for loamy sand and sand

Texture	Rainfall depth (mm)	Rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall kinetic energy (J/m²)	Rainfall erosivity factor (10 ⁷ J·mm/ha·hr)	Runoff depth (mm)	Runoff coefficient	Sediment yield (kg/m²/hr)	Sediment concentration (kg/m³)	Sediment response rate (ton/ha/EI)
Loamy sand	47.2±9.9	94.5±19.7	1,626±224	157.8±53.7	43.9±10.2	0.93±0.05	3.71±0.75	42.7±6.73	0.124±0.026
Sand	50.7±10.2	101.5±20.4	1,709±240	178.1±58.4	40.7±8.5	0.80±0.06	1.13±0.29	14.1±3.5	0.034±0.010
Ratio	0.93	0.93	0.95	0.88	1.08	1.16	3.28	3.03	3.65

식반응비는 0.124 ton/ha/EI로 사질토 0.034 ton/ha/EI보다 평균 3.65 배 컸다. 침식량은 강우강도와 유출량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 비례관계를 보였다(Fig. 5). 토양침식은 사질토보다 양질사토에 대한 유의성이 더 높게 나타났

다. 사면경사 4°의 증가에 의해 침식반응비는 사질토의 경우 18.3% 증가하였고, 양질사토는 19.6% 증가하였다.

우리나라 산지를 대상으로 개발된 토양침식 모형인 SEMMA (Park *et al.*, 2012)는 자연 강우사상에 의해 발생한 토양침식

실측 자료를 이용하여 다중회귀분석을 통해 제시한 경험적 모형이다. 본 모형은 2002년 태풍 루사에 의해 발생한 1시간 최대강우강도 113.5 mm/hr와 총 강우량 959 mm에 의해 발생한 토양침식 자료를 포함하고 있다. 산불지역에 설치된 9.74 m²의 소규모 플롯에서 발생한 침식량은 159.17 ton/ha으로 관측 자료 중에 가장 컸다. 토양은 사질토이고, 지표면을 덮고 있는 식생의 피복율은 20% 이하였으며, 경사는 27.8°로 급경사였다. 이 강우 사상에 대한 강우침식능인자 EI₃₀은 2,426.2 (10⁷J·mm/ha·hr)로서 침식반응비는 0.067 ton/ha/EI를 보였다. 동일한 강우사상에 의해 두 번째 규모로 발생한 인근 플롯의 침식량은 80.06 ton/ha 이었다. 이 플롯의 면적은 16.37 m²이고, 경사는 21.5°이며, 식생피복율은 30% 이하인 곳이다. 이 토양침식에 대한 침식반응비는 0.033 ton/ha/EI로 산정되었다. 본 실험의 인공강우에 의한 사질토의 침식반응비와 현장에서 집중호우에 의한 침식반응비가 유사함을 확인할 수 있다. 그러나 강우의 규모와 지속시간, 플롯 면적, 지표 피복상태 등의 차이가 있기 때문에 산정 결과들의 단순 비교에는 주의가 필요하다.

3.2 토양 침식성

소규모 플롯의 면상침식에 대한 토양 침식성을 평가하기 위해 RUSLE의 강우침식능인자(EI₃₀)에 대한 토사유출량의 관계를 Fig. 6과 같이 나타내었다. 1차원함수 관계의 기울기에 해당하는 강우모의 실험에 의한 양질사토와 사질토의 침식성은 각각 0.111과 0.030를 보여 토성에 의해 3.27 배의 토양 침식성 차이를 보였다. 그러나 토성을 이용한 RUSLE의 침식성인자는 각각 0.650과 0.571로 단지 1.14 배의 차이를 보였다(Table 3). RUSLE의 침식성은 표준 플롯에 대한 사면 길이 경사인자, 피폭인자, 토양보존대책인자가 모두 1.0일 때 토양의 침식성인자 K를 나타낸다. 그러나 본 실험조건의 사면 길이와 경사는 이와 같지 않기 때문에 LS 인자가 1이 아니며, 토양에 자갈함량은 지표면을 피복하는 종속인자로 작용하여 C도 1이 아니다. 따라서 Eq. (4)와 같이 강우모의에 의한 실측 침식성 산정 시에 사면 길이경사인자와 피폭인자에 따른 보정이 필요하다.

$$K = \frac{\text{Measured erosion}}{\sum EI_{30} \cdot LS \cdot C} \quad (4)$$

소규모 토양상자에 대한 지형인자 LS는 평균 0.356으로 산정되었다. 농경지에 대한 피복인자의 경우 선행토지이용, 수관피복, 지표면피복, 지표면조도, 토양의 함수량에 대한 종속

인자를 고려한다. 암석피복에 대한 영향을 수관피복 또는 표면피복 종속인자에서 고려할 수 있으나, 농경지를 대상으로 하기 때문에 수관피복율, 유효 뿌리깊개와 경작 잔유물 질량에 대한 피복면적비 등을 인자로 사용한다. 건설과 산림지역에 대한 지표인자도 암석피복에 대한 종속인자를 구체적으로 고려하지 않는다. 따라서 사면 길이경사인자만을 고려하여 실측 침식성을 보정하였다(Table 3). 양질사토와 사질토에 대한 RUSLE의 침식성인자는 보정 침식성인자에 비해 1.98 배와 6.77 배의 차이를 보였다. RUSLE는 양질사토에 대한 침식성인자를 2 배정도 크게 평가하는 반면, 사질토에 대해서는 지나치게 과대평가하였다. 실측한 토양침식량과 RUSLE에 의해 모의된 토양침식량을 비교한 Fig. 7에서도 RUSLE 모형이 사질토에 대해 토양침식량을 과대 예측하는 것으로 확인되었다.

RUSLE는 표준 플롯의 사면길이 22.1 m, 사면경사 9%의 완경사 사면에 대한 토양침식 실험을 통해 개발된 것으로 세류 발달에 의한 토양침식의 영향이 크다. 그러나 본 실험은 플롯 규모가 작기 때문에 침식민감도에 있어서 강우 튀김(splash)

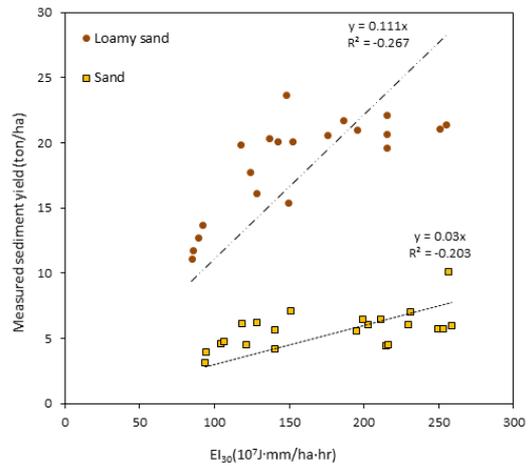


Fig. 6. Erodibilities measured by rainfall simulation for loamy sand and sand soils

Table 3. Comparison of erodibilities measured by rainfall simulation and erodibilities evaluated by RUSLE

Texture	^a Erodibility by rainfall simulation (tons/ha/EI)	^b Erodibility considering LS factors (tons/ha/EI)	^c Erodibility by RUSLE (tons/ha/EI)	Ratio (c/b)
Loamy sand	0.111	0.312	0.617	1.98
Sand	0.030	0.084	0.571	6.77
Ratio	3.27	3.27	1.081	

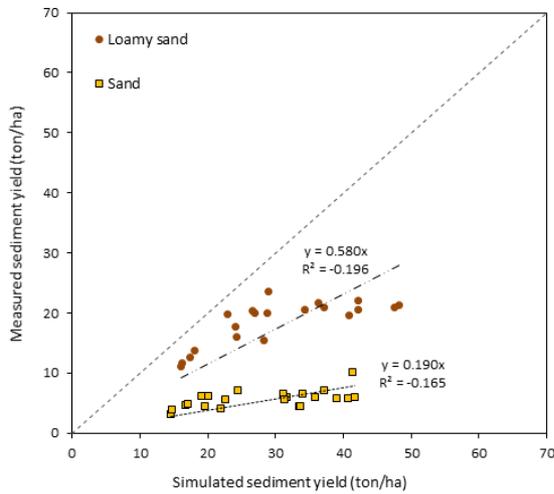


Fig. 7. The relationships between measured sediment yield and sediment yield simulated by RUSLE for loamy sand and sand soils

과 면상침식(sheet erosion)의 상호작용이 중요하게 작용한다. RUSLE에서 여전히 사질토에 대한 침식성을 과대 산정하는 것은 면상흐름에 의한 침식이 지배적인 소규모 플롯에 대해 세류침식의 가능성을 반영하고 있기 때문이다. 면상흐름은 양질사토의 미세입자를 분리(detachment) 및 이송(transport) 시키지만, 사질토의 굵은 모래입자는 이송시킬 수 없기 때문에 사질토에서 더욱 작은 토양 침식성을 보인 것이다. 급경사 산지나 야대지는 화재 지역조차도 집중흐름에 의한 세류 발달이 경작지나 개발지에 비해 상대적으로 쉽게 발생하지 않는다(Shakesby and Doerr, 2006). 이들 지역은 지표토양의 물리적 교란이 상대적으로 크지 않기 때문에 토양의 압밀도가 일반적으로 크다. 화재직후 강우에 의해 미립자는 씻겨나가고, 굵은 입자만이 남겨지면, 표토실링(sealing) 효과에 의해 침식민감도는 더욱 감소한다. 이러한 토양을 대상으로 RUSLE를 활용하여 토양침식을 평가하면, 침식량을 과대 예측할 수 있다. 실제 산불사면에 대한 RUSLE의 적용 평가 연구에 따르면, 산불 초기 화재로 많은 미립토가 노출되어 침식에 취약하지만 모형은 이를 모의하지 못했으며, 또한 산불경과 3년 이후 지표면 실링효과와 경화에 의해 침식량이 감소하지만, 모형은 이를 과대평가하는 결과를 초래했다(Park and Shin, 2011).

관측된 데이터가 없는 경우 침식성을 예측하기 위해 널리 사용되는 Wischmeier *et al.* (1971)의 모노그래프는 점토의 비율이 감소하고 실트와 매우고운모래의 비율이 증가함에 따라 토양 침식성 K 가 증가한다. 점토 입자는 빗방울 운동에너지가 점토를 구성하는 미네랄의 접착력 또는 화학적 결합력을 극복해야 침식이 가능하다. 빗방울 충돌로 1 kg의 토사를 분리하는데 필요한 운동에너지에 대한 연구에 따르면, 토양입경이 약

0.125 mm 일 때 최소 에너지가 필요하고, 0.063~0.250 mm 입자는 분리에 가장 취약한 것으로 나타났다(Poesen, 1987). 예를 들어 미사질양토, 양토, 고운모래, 사질양토와 같은 범위에 있는 입자들이 분리가 잘 되는 토성이다(Morgan, 1986). 본 실험에서 실트와 매우고운모래 비율이 상대적으로 많았던 양질사토의 침식성이 사질토의 침식성보다 컸던 이유이다.

침식민감도는 토성뿐만 아니라 수분함량에도 영향을 받으며, 토양 함수가 증가할수록 침식량도 증가한다. 수분은 토양 입자의 결합력을 약화시킬 뿐만 아니라, 토양 포화 시간을 단축시켜 지표유출을 용이하게 발생시킨다. 본 연구에 사용된 습윤한 양질사토의 초기전단응력은 사질토보다 컸지만, 강우모의에 의한 수분공급량이 많아짐에 따라 유출계수가 큰 양질사토에서 더 많은 토양침식이 발생한 것이다.

토양의 밀도나 다짐도 또한 토양의 침식성에 영향을 주는 주요 요인이다. 다짐의 효과는 지표유출과 토양침식에 있어서 궁정적으로 작용할 것이라는 일반적인 개념이 모든 조건에서 타당한 것이 아니다(Gomez and Nearing, 2005). Park *et al.* (2013)은 사질토의 나지교란사면에서 다짐과 비다짐에 따른 토양침식의 변화를 강우모의 실험을 통해 파악한 결과 완경사(5°)보다 급경사(20°)에서 다짐에 의한 토양침식 저감효과가 상대적으로 큰 것을 확인하였다. 완경사에서는 다짐이 비다짐보다 4배 많은 토사유출량을 보였지만, 급경사에서는 비다짐이 다짐보다 2배의 토사유출량 증가를 보였다. 면상흐름이 지배적인 완경사의 경우는 비다짐사면의 거친조도가 저류 및 유속저감 효과에 크게 기여하는 반면, 세류흐름이 지배적인 급경사의 경우는 유속이 빠르기 때문에 다짐으로 인한 토양자체의 전단저항의 증가가 토양입자 분리를 감소시키는데 크게 기여했다. 표토의 밀도는 계절적인 온도와 수분 변화의 영향을 받는다. 늦은 여름보다 이른 봄과 늦은 겨울 동안에 강우규모 대비 상대적으로 더 많은 토양침식이 발생한다. 특히 이른 봄 해동한 토양은 밀도가 작기 때문에 집중호우가 발생하면, 지표유출에 의한 침식이 심각해 질 수 있다(Van Klaveren and McCool, 1998). 나지토양에 작용하는 빗방울의 충격은 미세한 토양 입자를 압축과 분산시킴에 의해 지표면을 조밀한 층으로 만든다. 표각층(crust layer)으로 알려진 이 부분은 침투능을 감소시키고, 지표유출수를 증가시켜 궁극적으로 침식을 증가시키는 결과를 초래한다(Bradford *et al.*, 1992; Nam *et al.*, 2015). 또한 침식률은 경사 증가와 함께 증가하고, 더 가파른 경사면에서는 더 많은 미사질토가 침식된다(Fullen *et al.*, 1996). 선택적 실트와 점토 고갈은 토양구조를 변화시키고, 결국 토양의 침식성도 변화시키는 결과를 초래한다.

4. 결 론

본 연구는 점토함량이 적은 사질토양의 침식저항을 파악하기 위해 강우모의 토양침식 실험을 수행하였다. 인공강우의 강우강도의 범위는 60~130 mm/hr 이었다. 강우운동에너지는 강우입자분포와 낙하속도를 자동 계측하는 Pasivel를 이용하여 측정하였다. 사질토양에 대한 면상침식 실험을 위해 입도분포가 불량인 사질토(sand)와 양질사토(loamy sand)를 사용하였다. 이들의 평균입경은 각각 0.936 mm와 0.611 mm 이었고, 유기물함량은 각각 2.0%와 4.2% 이었다. Torvane으로 측정된 습윤토양의 전단강도는 사질토에서 0.48 kg/cm², 양질사토에서 0.60 kg/cm²의 값을 보였다. 강우모의에 의해 발생한 지표흐름의 유출량은 양질사토에서 44.0 mm 사질토에서 40.7 mm로 양질사토에서 상대적으로 많은 지표유출량이 발생하였다. 토양침식도 양질사토에서 3.71 kg/m²/hr, 사질토에서 1.13 kg/m²/hr로 발생하여 양질사토에서 상대적으로 많은 양이 발생하였다. 양질사토는 사질토에 비해 유출계수는 단지 1.16 배 증가한 반면, 침식반응비는 3.65 배로 크게 증가하였다. 경사 24°에서 28°로 증가함에 따라 유사농도와 침식반응비가 사질토와 양질사토 모두 약 20%정도 증가함을 보였다. 국내 토양침식 위험을 평가하기 위해 일반적으로 사용되는 RUSLE 모형의 토양 침식성인자와 토양침식량을 산정하여 실측값과 비교분석하였다. 토양 침식성인자 K는 실측 침식성에 비해 과대 산정되는 것으로 평가되었다. 특히 사질토에 대한 침식성인자의 과대 산정은 RUSLE가 면상침식에 대한 토양침식량을 과대평가하는 결과를 초래했다. 국내 토양침식 위험도 평가에 있어서 급경사지 사질토양을 대상으로 RUSLE 적용할 경우 세류 발달이 활발하지 않는 지역에서는 토양침식량을 과대 예측할 우려가 있음을 확인했다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부(No. 2019R1A2C1009285)와 교육부(2021R1A6A1A03044326)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업으로 이에 감사를 표합니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Bradford, J.M., Truman, C.C., and Huang, C. (1992). "Comparison of three measures of resistance of soil surface seals to raindrop splash." *Soil Technology*, Vol. 5, pp. 47-56.
- Bryan, R.B. (1968). "The development, use and efficiency of indices of soil erodibility." *Geoderma*, Vol. 2, pp. 5-26.
- Chisci, G., Bazzoffi, P., and Mbagwu, J.S.C. (1989). "Comparison of aggregate stability indices for soil classification and assessment of soil management practices." *Soil Technology*, Vol. 2, pp. 113-133.
- Chorley, R.J. (1959). "The geomorphic significance of some Oxford soils." *American Journal of Science*, Vol. 257, pp. 503-572.
- Combeau, A., and Monnier, G. (1961). "A method for the study of structural stability: Application to tropical soil." *African Soils*, Vol. 6, pp. 33-52.
- Fullen, M.A., Yi, Z., and Brandsma, R.T. (1996). "Comparison of soil and sediment properties of a loamy sand soil." *Soil Technology*, Vol. 10, pp. 35-45.
- Gomez, J.A., and Nearing, M.A. (2005). "Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment." *Catena*, Vol. 59, pp. 253-266.
- Heo, S.G., Kim, K.S., Sagong, M., Ahn, J.H., and Lim, K.J. (2005). "Evaluation of SWAT applicability to simulate soil erosion at highland agricultural lands." *Journal of Korean Society of Rural Planning*, Vol. 11, No. 4, pp. 67-74.
- Jeong, J.G., Seo, B.M., Ha, S.H., and Lee, D.W. (2006). "A measurement of hydraulic conductivity of disturbed sandy soils by particle analysis and falling head method." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 16, No. 1, pp. 15-21.
- Joo, J.H., Yang, J.E., Kim, J.J., Jung, Y.S., Choi, J.D., Yun, S.Y., Ryu, K.S. (2000). "Assessment of soil aggregates and erodibility under different management practices in the mountainous soils." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 33, No. 2, pp. 109-115.
- Jung, Y.S., Kwon, Y.K., Lim, H.S., Ha, S.K., and Yang, J.E. (1999). "R and K Factors for an Application of RUSLE on the Slope Soils in Kangwon-Do, Korea." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 32, No. 1, pp. 31-38.
- Jung, Y.S., Shin, J.S., and Shin, Y.H. (1976). "Erodibility of the soils of Korea." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 9, No. 2, pp. 109-115.
- Kim, C.G., Shin, K., Joo, K.Y., Lee, K.S., Shin, S.S., and Choung, Y. (2008). "Effects of soil conservation measures in a partially vegetated area after forest fires." *Science of the total Environment*, Vol. 399, pp. 158-164.
- Kim, K.T., and Kim, J.H. (2005). "Analysis of soil erosion hazard zone by cropland." *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 7, No. 1, pp. 107-117.
- Kim, S.S., Kim, T.H., Lee, S.M., Park, D.S., Zhu, Y.Z., and Hur, J.H. (2005). "Mobility of pesticides in different slopes and soil collected from Ganwon alpine sloped-land under simulated rainfall conditions." *The Korean Journal of Pesticide Science*,

- Vol. 9, No. 4, pp. 316-329.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2010). *Slope distribution by location*. National Forest Inventory, Korea Forest Service.
- Lee, H.H., and Joo, J.D. (2006). "Characteristics of soil erosion on the forest fired sites by using rainfall simulator." *Journal of Korean Society of Forest Science*, Vol. 95, No. 6, pp. 649-656.
- Lee, J.Y., Yang, D.Y., Kim, J.Y., and Chung, G.S. (2004). "Application of landsat ETM image to estimate the distribution of soil types and erosional pattern in the wildfire area of Gangneung, Gangwon province, Korea." *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 25, No. 8, pp. 764-773.
- Meyer, L.D., and Harmon, W.C. (1979). "Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes." *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 22, No. 1, pp. 100-103.
- Ministry of Construction Transportation (MCT) (2000). *Probability rainfall map in Korea*. Research Report on Water Resource Management Technique Development in 1999.
- Ministry of the Interior and Safety (MIS) (2021). *Guidelines for consultation on disaster impact assessment, etc.*. No. 2021-01, pp. III-39-45.
- Morgan, R.P.C. (1986). *Soil erosion and conservation*. Longman, Harlow, UK.
- 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." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 1, pp. 595-604.
- Park, S.D., and Shin, S.S. (2011). "Applying evaluation of soil erosion models for burnt hillslopes - RUSLE, WEPP, and SEMMA." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 31, No. 3B, pp. 221-232.
- Park, S.D., Lee, K.S., and Shin, S.S. (2012). "A statistical soil erosion model for burnt mountain areas in Korea - RUSLE approach." *Journal of Hydrologic Engineering ASCE*, Vol. 17, pp. 292-304.
- Park, S.D., Shin, S.S., Kim, S.J., and Chio, B. (2013). "Effects of surface compaction treatment on soil loss from disturbed bare slopes under simulated rainfalls." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 5, pp. 559-568.
- Poesen, J. (1987). "Transport of rock fragments by rill flow: A field study." *Catena Supplement*, Vol. 8, pp. 35-54.
- 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, U.S.
- Richter, G., and Negendank, J.F.W. (1977). "Soil erosion processes and their measurement in the German area of the Moselle river." *Earth Surface Processes*, Vol. 2, pp. 261-278.
- Savat, J., and De Ploey, J. (1982). "Sheetwash and rill development by surface flow." *Badland geomorphology and piping*, Edited by Bryan, R., and Yair, A., Geo Books, Norwich, UK, pp. 113-126.
- Seo, J.I., Chun, K.W., Kim, S.W., and Kim, M.S. (2010). "Rainfall pattern regulating surface erosion and its effect on variation in sediment yield in post-wildfire area." *Journal of Korean Society of Forest Science*, Vol. 99, No. 4, pp. 534-545.
- 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, J.S., Lee, J.K., and Passeur J.E. (1973). *The universal soil loss equation and erosion lysimeter studies*. ROKFAO Joint Project, Mimeograph, p. 23.
- 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., Cho, J.W., and Lee, K.S. (2008). "Effect of vegetation recovery for surface runoff and soil erosion in burned mountains, Yangyang." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, pp. 393-403.
- Shin, S.S., Park, S.D., Lee, S.K., and Nam, M.J. (2016). *Soil erosion experimental equipment*. Korean Intellectual Property Office, 10-1656769.
- Shin, S.S., Park, S.D., Pierson, F.B., and Williams, C.J. (2019). "Evaluation of physical erosivity factor for interrill erosion on steep vegetated hillslopes." *Journal of Hydrology*, Vol. 571, pp. 559-572.
- Van Klaveren, R.W., and McCool, D.K. (1998). "Erodibility and critical shear stress of a previously frozen soil." *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 41, pp. 1315-1321.
- 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., U.S.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., and Cross, B.V. (1971). "A soil erodibility monograph for farmland and construction sites." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 26, pp. 189-193.