

Article

https://doi.org/10.7745/KJSSF.2019.52.1.060  
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

# Study on Soil Erosion and Physical Characteristics of Jeju Volcanic Ash Soils Under a Rainfall Simulator Condition

Won-Pyo Park and Ho-Jun Kang<sup>1\*</sup>

Major of Plant Resources and Environment, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

<sup>1</sup>Jeju Special Self-governing Province Agricultural Research and Extension Services, Seogwipo 63556, Korea

\*Corresponding author: khj4066@korea.kr

## ABSTRACT

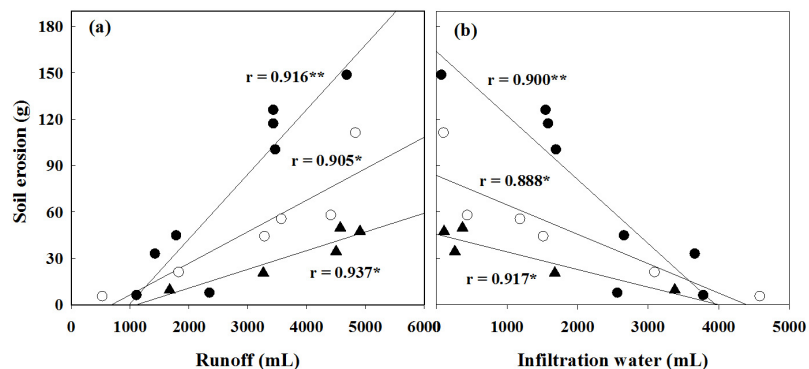
**Received:** February 15, 2019**Revised:** February 26, 2019**Accepted:** February 27, 2019

## ORCID

Won-Pyo Park

https://orcid.org/0000-0002-6547-6240

The objective of this study is to determine the effects of physical properties of soils on soil erosion under a rainfall simulator. The soil samples were collected from five sites of dark brown soil (DBS), six sites of very dark brown volcanic ash soil (VDBAS), and eight sites of black volcanic ash soil (BVAS) in Jeju Island. The rainfall simulator, which ran for 30 minutes at a slope gradient of 10%, determined the amounts of soil erosion, infiltrated water, and runoff water. The particle size distribution, water-stable aggregates distribution, bulk density, organic matter content, and saturated hydraulic conductivity in soils were analyzed as well. The amounts of soil erosion gradually increased and reached a steady state after 20 minutes. The amounts of soil erosion in BVAS were higher than that in other soils. It also correlated positively with the amounts of runoff water and related negatively to the amounts of infiltrated water. The amounts of soil erosion in DBS and BVAS had a significant negative correlation with some particle size fractions and saturated hydraulic conductivity ( $p < 0.05$ ). A significant positive correlation was observed between the amounts of soil erosion and the water-stable aggregates with the size smaller than 1 mm in DBS and VDBAS ( $p < 0.05$ ). The bulk density and organic matter content did not significantly affect the amount of soil erosion. These results concluded that the physical properties of soils affecting the amount of soil erosion varied among the color of soils in Jeju Island. It is suggested that the values of soil erodibility factor for the volcanic ash soils of Jeju Island need to be estimated with an alternative algorithm to predict the amount of soil erosion.

**Keywords:** Soil erosion, Soil physical properties, Rainfall simulator, Volcanic ash soil

Relationship between the amount of soil erosion and runoff (a) and infiltration water (b) in dark brown soil (▲), very dark brown volcanic ash soil (○), and black volcanic ash soil (●). \*\*Significant difference at 1%, \*Significant difference at 5%.



## Introduction

제주도는 타원형의 화산섬으로 한라산을 중심(해발 1,950 m)으로 주위에는 360여개의 크고 작은 기생화산이 분포하고 있다. 제주도의 지형은 한라산을 중심으로 동서사면은 완만한 경사를, 남북사면은 약간 급한 경사를 이루고 있어 고도가 높아질수록 토양유실이 우려된다. 제주도의 밭토양 면적은 61,088 ha로 이 중 46,582 ha는 경사지(2% 이상)에 분포하고 있다. 해발고도 200-500 m의 중산간 지대는 경사가 급한 지역(10-35%)으로, 이곳에서는 제주도 전체 면적의 27.9%가 목초지나 신개간지로 활용하고 있다. 이들 신개간지는 대부분 경사지에 위치해 있어 강원도의 고령지 토양(Jung et al., 1999)처럼 토양 유실이 일어나기 쉬운 조건이다. 특히 8-9월에 태풍이나 집중호우의 영향으로 지표면의 불완전한 피복 등의 이유로 경사지 밭에서 토양침식이 많이 발생하고 있는 실정이다. Oh et al. (2012)은 제주도가 상대적으로 강우량 및 강우빈도가 높은 지역으로 토양유실의 취약성이 높은 지역이라고 평가하였고, 많은 강우량으로 인해 토양유실량을 예측을 위한 강우인자 값은 제주도가 우리나라 평균  $4,147 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ yr}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 보다 약 1.5배 높게 산정되었다(Park et al., 2011). 이러한 평가에도 제주도에서 토양침식이나 농지보전에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다.

제주도 화산회토양은 주 점토광물이 allophane으로 표토는 다량의 유기물을 함유하고 있으며 토색은 흑색, 농암갈색 및 암갈색을 띠고 있다(Park et al., 1984). 제주도 전체 면적 중에 흑색토 21%, 농암갈색토 41%, 암갈색토 17%로 분포되어 있으며 용적밀도가 낮아서 건조하면 바람에 날리기 쉬우며, 염기치환용량이 크고 인산 흡착력이 커서 일반 토양과 구별되는 특징을 가지고 있다(Hur et al., 2006; Song and Yoo, 1991). 토양유실은 토성, 입단의 안정성, 유기물함량 및 화학성 등에 따라 변하며, 미사 함량이 많을수록 유실되기 쉽다(Richter and Negendank, 1977). Truman et al. (1990)은 강우강도에 따라 토양 중의 수분함량과 입단 안정화는 토양 내 입단화도에 영향을 받으며, 토양입자의 분리는 입단이 발달되어 있을수록 안정하다고 하였다. 그러나 화산회토양은 가소성이 약하고 토양이 젖었을 때 입단의 안정도가 약하기 때문에(Parfitt, 1990), 빗방울의 충격에 의해 토양입단이 쉽게 분리되어 토양 유실이 일어난다(Fontes, 2004; Kim and Miller, 1995; Parfitt, 1990; Seguel and Horn, 2005). 또한 화산회토양의 유실은 용적밀도가 낮은 Andisols의 특징 때문에 입단의 부유(floating)를 통하여 일어나므로 유기수에 의해서 토양 유실량이 많아진다(Poulenard et al., 2001).

토양침식에 직접 영향을 주는 요인은 강우, 경사도 및 경사장 이외에 토양특성, 지표관리 및 토양관리 등이 있으며, 토양침식량 예측 연구는 미국에서 개발된 USLE (Universal Soil Loss Equation) 모델의 각 인자를 우리나라 환경에 맞게 개발하여 이용하고 있다(Cheong et al., 1983; Hyun et al., 2002; Jung et al., 1999; Jung et al., 2004). 특히, USLE의 토양침식성인자는 점토, 미사, 유기물 함량, 투수 및 구조등급에 의해 인자 값이 계산되나(Wischmeier and Smith, 1978), 이런 인자들이 모든 토양에서 유효한 것은 아니다. 예를 들어, Jung et al. (1999)은 자갈이 많은 강원도 경사지 토양에서 자갈에 의한 투수 영향 및 지피 효과를 고려하여 토양침식성인자를 보정하였고, 자갈의 영향을 고려하지 않은 경우보다 15% 낮은 값을 갖는다고 보고하였다. Renard et al. (1997)은 하와이 화산회토양, 미국 중서부지역의 석회질토양과 같은 특별한 조건에 있는 토양들은 특정한 식이 필요하다고 하였다. Jung et al. (2005)은 우리나라 전역의 토양침식 위험성 평가에서 제주도 화산회토양에서는 일반토양과 같은 방법으로 토양침식성인자를 산출하였으나 보완된 연구가 필요하다고 하였다. 따라서 제주도 화산회토양에 대한 토양의 유실량 예측을 위해서는 토양침식성인자값 산출을 위한 요인들을 결정할 필요가 있다.

본 연구에서는 인공강우를 이용하여 제주지역 토양에서 암갈색, 농암갈색 및 흑색의 토색별로 강우에 의한 토양침식 특성을 조사하여 토양침식과 관련 있는 토양 물리적 특성과의 관계를 분석하였다.

## Materials and Methods

**토양시료 채취 및 분석** 토양은 제주도 일원에 있는 토양을 토색에 따라 암갈색토 5개, 농암갈색토 6개 및 흑색토 8개 지점에서 채취하였다. 토양시료는 0-15 cm 깊이로 채취하였으며, 채취된 시료는 풍건한 후 2 mm 체를 통과시켜 토양 유기물과 물리성 분석 및 토양 유실 시험에 사용하였다.

토양유기물 함량은 Tyurin법으로 분석하였으며, 토양 입경분석은 Pipette법으로 측정하였다. 용적밀도는 2 inch 토양시료 채취 코어로 채취하여 계산하였으며, 포화수리전도도는 증류수를 이용하여 48시간 동안 하단 포화시킨 후 정수위를 유지하면서 60분간 투수량을 측정하였다 (NIAST, 2000). 토양 내수성입단은 2-4 mm의 풍건 시료를 습식 체별법으로 Yoder형 진탕기의 체위에 골고루 펼치고 10분간 증류수에 침지시킨 후 30분간 진탕하여 105°C에서 건조시켜 무게를 측정 후 분산제 (5% sodium hexametaphosphate) 10 mL를 가하여 완전히 분산시켜 체별하여 그 체에 걸리는 단립만을 모아 건조시켜 평량한 후 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$\text{입단 (\%)} = \frac{\text{입단의 무게 (g)} - \text{단립의 무게 (g)}}{\text{건토의 중량 (g)}} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

**인공강우장치 및 토양침식량 조사** 시험에 사용한 인공강우장치는 야외포장과 실내에서 사용이 간편한 소형 인공강우장치 (Eijkelkamp, 09.06 Rainfall simulator, The Netherlands)로 시험 강우조건은 Table 1과 같다. 토양침식 시험용 상자 (넓이 26 × 30 cm, 깊이 15 cm)의 내부바닥은 침투수의 배수와 토양의 모세관 포화가 잘 되도록 직경 5 mm인 둥근 FRP (Fiberglass reinforced plastics) 막대를 깔았으며, 토양 충전은 2 mm 체를 통과한 토양을 토양별 용적밀도를 고려하여 10 cm 두께로 충전하였다. 토양침식 시험은 토양을 24시간 동안 모세관 포화를 시킨 다음 24시간 동안 경사 10%에서 배수시킨 후 진행하였다. 토양침식 상자를 경사도가 10%로 고정된 장치 위에 놓고 인공강우장치를 조작하여 30분 동안 매 5분마다 유거수량과 침투수량을 측정하였다. 토양침식량은 유거수에 포함된 토양을 여과 한 후 105°C에서 24시간 동안 건조시켜 평량하여 산출하였다.

**Table 1.** Conditions of rainfall simulator used in the soil erosion experiment.

Total rainfall during simulation	75 mm
Duration of the simulation	30 min
Intensity of the simulation	150 mm h <sup>-1</sup>
Total volume of simulation	5,850 mL (195 mL min <sup>-1</sup> )
Average fall height	0.4 m
Diameter of drops	5.9 mm
Mass of drops	0.1 g
Number of capillary tubes	49 ea
Surface area of test plot	0.078 m <sup>2</sup>
Kinetic energy	354 MT hr m <sup>-1</sup> MTf <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup>

**통계분석** 토양 물리적 특성과 토양침식량과의 관계는 토색별로 인공강우에 의해서 실측된 토양침식량과 토양 입경, 내수성입단, 포화수리전도도, 유기율 및 침투율 등의 토양물리적 특성들의 상관분석을 통하여 유의성 있는 토양 물리적 특성들을 평가하였다.

## Results and Discussion

**인공강우 실험에 사용한 토양의 유기물 함량 및 물리적 특성** 암갈색토의 평균 입경분포는 모래 13.6%, 미사 67.1%, 점토 19.4%였으며, 농암갈색 화산회토는 모래 12.3%, 미사 66.8%, 점토 20.9%였다. 그리고 흑색 화산회토는 모래 10.2%, 미사 71.0%, 점토 18.8%로 토색별로 차이가 없었다 (Table 2). 토색별 내수성입단율은 암갈색토에서 평균 68.6%, 농암갈색 화산회토와 흑색 화산회토는 각각 81.8%와 81.4%로 암갈색토 보다 높았으나 화산회토간에는 차이가 없었다. 크기별 내수성입단 중 0.1-0.25 mm, 0.25-0.5 mm 및 0.5-1.0 mm 입단은 암갈색토가 농암갈색이나 흑색 화산회토보다 높았으나 1.0-2.0 mm 및 2.0 mm 이상의 입단은 농암갈색과 흑색 화산회토가 암갈색토보다 높았다 (Table 3). 유기물 함량은 암갈색토에서 평균 27.8 g kg<sup>-1</sup>, 농암갈색 화산회토 88.1 g kg<sup>-1</sup> 및 흑색 화산회토 173 g kg<sup>-1</sup>으로 유기물 함량이 높은 토양일수록 토색이 진한 경향을 보였다. 용적밀도는 암갈색토에서 평균 1.34 Mg m<sup>-3</sup>, 농암갈색 화산회토 0.95 Mg m<sup>-3</sup> 및 흑색 화산회토 0.70 Mg m<sup>-3</sup>로 농암갈색과 흑색 화산회토가 암갈색토보다 낮았다. 포

**Table 2.** Particle size distribution of soils used in the experiment.

Soil colors	Sand (%)					Total (%)	Silt (%)	Clay (%)
	2.0-1.0	1.0-0.5	0.5-0.25 (mm)	0.25-0.1	0.1-0.05			
DBS <sup>†</sup>	1.4 (0.2-3.9) <sup>†</sup>	2.7 (0.9-6.0)	3.2 (1.6-6.4)	4.1 (2.6-6.4)	2.3 (1.2-3.4)	13.6 (6.9-26.0)	67.1 (52.0-79.2)	19.4 (12.2-35.6)
VDBAS	0.7 (0.1-2.4)	1.8 (0.3-4.9)	2.9 (0.4-7.7)	4.2 (0.7-11.0)	2.6 (1.4-4.5)	12.3 (2.9-29.2)	66.8 (50.3-73.6)	20.9 (16.5-25.4)
BVAS	1.2 (0.2-4.1)	1.8 (0.6-4.9)	1.8 (0.4-4.8)	2.8 (0.6-6.5)	2.7 (1.7-3.5)	10.2 (5.5-23.5)	71.0 (61.2-78.6)	18.8 (14.3-23.4)

<sup>†</sup> Mean (Min-Max).

<sup>‡</sup> DBS, Dark brown soil; VDBAS, Very dark brown volcanic ash soil; BVAS, Black volcanic ash soil.

**Table 3.** Water-stable aggregates distribution, organic matter (O.M.), bulk density (Bd), and saturated hydraulic conductivity (Ksat) of soils used in the experiment.

Soil colors	Water-stable aggregates (mm) distribution (%)					Total	O.M. (g kg <sup>-1</sup> )	Bd (Mg m <sup>-3</sup> )	Ksat (cm h <sup>-1</sup> )
	0.1- 0.25	0.25-0.5	0.5- 1.0	1.0- 2.0	1.0- 2.0				
DBS <sup>†</sup>	13.7 (4.4-23.4) <sup>†</sup>	16.2 (9.7-23.1)	14.6 (6.1-20.9)	15.9 (6.7-29.3)	8.2 (0.5-28.3)	68.6 (53.3-90.9)	27.8 (20.8-51.3)	1.34 (1.20-1.45)	0.46 (0.08-1.06)
VDBAS	3.2 (0.3-8.3)	5.6 (0.3-10.2)	8.9 (0.4-16.7)	19.0 (4.9-29.9)	45.2 (23.0-70.7)	81.8 (66.1-88.9)	88.1 (44.3-200)	0.95 (0.70-1.12)	0.78 (0.15-2.30)
BVAS	2.0 (0.1-4.8)	3.8 (0.1-9.5)	6.6 (0.7-14.9)	17.8 (8.4-31.3)	51.1 (33.5-68.1)	81.4 (54.2-93.9)	173 (135-221)	0.70 (0.56-1.09)	1.03 (0.11-2.27)

<sup>†</sup> Mean (Min-Max).

<sup>‡</sup> DBS, Dark brown soil; VDBAS, Very dark brown volcanic ash soil; BVAS, Black volcanic ash soil.

화수리전도도는 암갈색토에서 평균  $0.46 \text{ cm h}^{-1}$ , 농암갈색 화산회토  $0.78 \text{ cm h}^{-1}$  및 흑색 화산회토  $1.03 \text{ cm h}^{-1}$ 로 암갈색토가 가장 낮았다.

**토양 침식량** 토양침식량은 모든 토양에서 시간이 경과됨에 따라 증가하다가 20분이 경과되면서 일정하게 유지되는 경향이었으며, 암갈색토보다 농암갈색과 흑색 화산회토에서 증가하였다 (Fig. 1). 이러한 결과는 빗방울의 충격에 의해 토양입단이 분리되면서 토양침식이 증가하다가 강우에너지가 일정하게 유지되면서 침식량이 일정하게 유지되었다 (Renard et al., 1997; Sharma, 1991; Oh, 1989)는 보고와 일치하였다. 또한 토양입단의 결합력이 빗방울의 충격에너지 보다 커서 초기에는 입단분리가 덜 일어나다가 빗방울에 의해서 에너지가 계속 가해지고 수분함량이 증가하면서 입단의 안정화가 감소하여 토양침식량이 일정하게 유지된다고 보고한 Moore and Singer (1990)의 결과와 유사하게 나타났다.

농암갈색과 흑색 화산회토가 암갈색토보다 토양침식량이 많은 것은 화산회토양의 화산회 물질로 형성된 특별한 환경 때문에 토양의 물리화학적 특성이 일반 토양과 달라 allophane과 관련된 특별한 수리 특성을 가지고 있기 때문이다. Allophane 토양의 특징은 점착성과 가소성이 없고 토양이 젖었을 때 입단의 안정도가 약하여 (Parfitt, 1990), 집약적인 경작에 의해 많은 침식이 발생 (Fontes, 2004)할 가능성이 높다. 많은 연구자들은 화산회토양의 침식이 빗방울의 충격에 의해 토양입단이 쉽게 분리되어 일어난다고 보고한 바 있다 (Fontes, 2004; Kim and Miller, 1995; Parfitt, 1990; Seguel and Horn, 2005). 그러나 화산회토양은 수식에 대한 저항성이 강하며 (Shoji et al., 1993), 입단이 안정한 물리적 특성 때문에 침식에 대한 저항력이 강하다 (Maeda and Soma, 1985)는 보고와 상반된 결과이다. 이러한 화산회토양의 침식 저항성은 시간이 경과하면서 토양침식량이 일정하게 유지되는 것에 영향을 미친 것으로 생각된다.

**토양침식량과 유거수량, 침투수량과의 관계** 유거수와 침투수가 토양침식에 끼치는 영향을 조사하기 위하여 토양침식량과 유거수량 및 침투수량과의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 토양침식량과 유거수량과의 상관계수는 암갈색토 0.937, 농암갈색 화산회토 0.905 및 흑색 화산회토 0.916로 고도의 유의적인 정의 상관관이 나타났고, 침투수량과는 암갈색토 -0.917, 농암갈색 화산회토 -0.888 및 흑색 화산회토 -0.900으로 유의적인 부의 상관관이 나타났다.

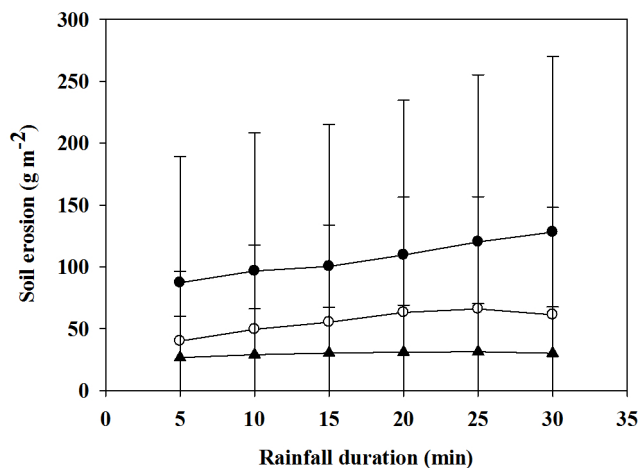
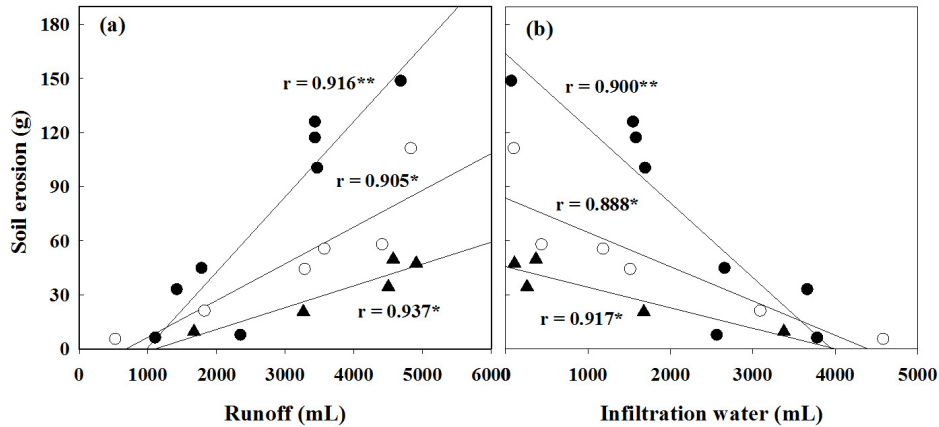


Fig. 1. Change of the amount of soil erosion by elapsed time of rainfall in dark brown soil (▲), very dark brown volcanic ash soil (○), and black volcanic ash soil (●).





**Fig. 2.** Relationship between the amount of soil erosion and runoff (a) and infiltration water (b) in dark brown soil (▲), very dark brown volcanic ash soil (○), and black volcanic ash soil (●). \*\*Significant difference at 1%, \*Significant difference at 5%.

강우에 의한 토양표면으로부터 물의 유거는 강우강도가 토양의 침투능력과 수분보유능력 보다 크게 작용할 때에 발생되며 (Farmer, 1973; Tarchitzky, 1984), 토양침식은 유거율에 의하여 결정된다 (Hur et al., 2005; Kim and Miller, 1995). 본 연구에서도 유거수량이 많아질수록 토양침식량이 증가하였다. 침투수는 강우량이 증가함에 따라 감소하는데 이런 감소는 빗방울의 충격에 의한 점토의 분리로 인하여 토양표면에 얇은 막이 형성되기 때문이다 (Ben-hur et al., 1992). 또한 Bissonnais and Singer (1992)는 토양 표면 피막 (surface sealing) 형성이 물의 침투를 감소시켜 이로 인한 유거수의 증가가 표토의 침식을 일으킨다고 하였는데 본 연구에서도 침투수량이 많아질수록 토양 침식량은 감소하였다. 토양침식은 빗방울의 에너지에 의한 토양입자의 분리와 유거수로 인한 토양입자의 이송에 의해 발생되므로 토양침식은 모든 토양에서 유거수와 침투수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 생각된다.

토색별 토양침식량은 흑색 화산회토의 토양침식량이 가장 많았으며, 농암갈색 화산회토가 중간이었고, 암갈색토가 가장 적었다. 이런 결과는 화산회토양에서 유거수는 표토의 침식에 중요한 인자이며, 화산회토양의 침식은 용적밀도가 낮은 Andisols의 특징으로 인하여 입단의 부유 (floating)를 통하여 일어나므로 (Poulenard et al., 2001) 유거수에 의한 토양침식이 많은 것으로 생각된다.

**토양침식량과 점토, 미사 및 모래함량과의 관계** 토색별 토양침식량과 점토, 미사 및 모래와의 상관관계는 Table 4와 같다. 암갈색토에서 토양침식량과 점토와의 상관계수는 -0.901, 점토/미사는 -0.921, 점토+극세사 -0.901, 점토 / (미사+극세사) -0.920 및 점토+세사 (0.02-0.2 mm) -0.913으로 부의 상관을 보였으며, 미사/점토는 0.890으로 정의 상관을 보였다. 농암갈색 화산회토에서 점토와 토양침식량과의 상관계수는 -0.599였으며, 극세사와는 0.633이었으나 유의적인 차이는 없었다. 흑색 화산회토에서 토양침식량은 미사/점토와 상관계수가 -0.727로 부의 상관관계가 나타났으며, 점토+세사 (0.02-0.2 mm)는 상관계수가 0.723으로 정의 상관관계가 나타났다.

암갈색토에서 점토함량이 많을수록 토양침식이 감소하는 부의 상관을 나타내었다. 이것은 빗방울의 충격에 의해서 파괴된 점토가 물에 의해 토양 공극으로 수송되어 공극을 채워 토양표면에 크리스트를 형성함으로써 유거수에 의한 저항성이 증대되어 토양침식이 감소하였기 때문이다 (West et al., 1992). 암갈색토에서 미사함량이 많을수록 토양 침식이 증가되는 것은 미사함량이 많으면 빗방울의 충격에 대한 저항력은 있어도 일단 빗방울에 파괴된 입자나 불완

**Table 4.** Correlation coefficients between the amount of soil erosion and particle size distribution of the soils.

Particle size fractions	DBS <sup>†</sup> (n=5)	VDBVAS (n=6)	BVAS (n=8)
Clay (<0.002 mm)	-0.901*	-0.599	0.642
Silt (0.002-0.05 mm)	0.801	0.202	-0.378
Very fine sand (0.05-0.1 mm)	-0.637	0.633	-0.063
Clay/Silt	-0.921*	-0.526	0.635
Clay + Very fine sand	-0.901*	-0.379	0.649
Clay / (Silt + Very fine sand)	-0.920*	-0.579	0.643
Silt/Clay	0.890*	0.460	-0.727*
Silt + Very fine sand + Fine sand	0.848	0.452	-0.435
Clay + Fine sand (0.02-0.2 mm)	-0.913*	-0.462	0.723*

\*Significant difference at 5%.

<sup>†</sup>DBS, Dark brown soil; VDBAS, Very dark brown volcanic ash soil; BVAS, Black volcanic ash soil.

전한 미세입단이 유거수에 의해 쉽게 이동되기 때문에 침식이 큰 것으로 생각된다 (McIntyre, 1958). 흑색 화산회토에서 토양침식과 입자크기와의 관계는 유의적인 차이는 없었지만 점토가 많으면 침식이 증가되고 미사가 많으면 침식이 감소되는 경향이였다. 토양침식은 밀도, 공극률, 입자의 크기, 투수율 등의 토양특성과 관계가 깊은데 (Kleiss, 1970; Ruhe, 1975), 흑색 화산회토에서 토양침식과 점토, 미사와의 관계는 단독적인 영향보다는 점토, 미사 및 모래와의 상호 비율이 토양침식에 영향을 주는 것으로 생각된다.

**토양침식량과 내수성입단과의 관계** 토양침식에 미치는 내수성입단의 영향을 조사하기 위하여 토양침식량과 내수성입단과의 상관관계를 분석한 결과는 Table 5에 나타내었다. 내수성입단은 암갈색토와 농암갈색 화산회토에서 토양침식에 영향을 끼쳤으나, 흑색 화산회토에서는 큰 영향을 끼치지 않은 것으로 조사되었다. 특히 암갈색토와 농암갈색토는 1.0 mm 이하의 내수성입단이 많으면 토양침식이 많이 발생하는 것으로 나타났다. 암갈색토에서는 토양침식량과 0.25-0.5 mm 입단에서, 농암갈색 화산회토에서는 0.1-0.25 mm 입단에서 상관계수가 각각 0.976과 0.954로 고도의 유의성을 갖는 정의 상관이었다. 반면에 흑색 화산회토에서 0.5 mm 이상 입단의 분포비율이 높으면 토양침식량이 증가되는 경향이였으나, 유의적인 차이가 나타나지는 않았다.

강우강도가 높은 지역에서 유거수와 침식에 민감한 토양의 침식 지표로 입단이 이용되고 있다 (Barthes and Roose,

**Table 5.** Correlation coefficients between the amount of soil erosion and water-stable aggregates of the soils.

Water-stable aggregates	DBS <sup>†</sup> (n=5)	VDBVAS (n=6)	BVAS (n=8)
0.1-0.25 mm	0.719	0.954**	0.084
0.25-0.5 mm	0.976**	0.849*	0.063
(0.1-0.25 mm) + (0.25-0.5 mm)	0.917*	0.914*	0.071
(0.1-0.25 mm) + (0.25-0.5 mm) + (0.5-1.0 mm)	0.949*	0.782	0.005
> (0.1-0.25 mm) + (0.25-0.5 mm)	-0.631	-0.843*	0.666
> (0.1-0.25 mm) + (0.25-0.5 mm) + (0.5-1.0 mm)	-0.762	-0.893*	0.650
> (0.1-0.25 mm) + (0.25-0.5 mm) + (0.5-1.0 mm) + (1.0-2.0 mm)	-0.227	-0.550	0.560

\*\*Significant difference at 1%; \*Significant difference at 5%.

<sup>†</sup>DBS, Dark brown soil; VDBAS, Very dark brown volcanic ash soil; BVAS, Black volcanic ash soil.

2002). Shin et al. (1981)에 의하면 비산침식에 의하여 이동된 토양의 입단분포는 세사(0.1-0.25 mm)가 가장 많이 비산되었으며, 본 연구의 암갈색토와 농암갈색토에서도 0.5-0.25 mm 입단과 토양침식량과는 정의 상관성이 나타나 세사가 토양침식에 가장 예민하게 반응하는 것으로 조사되었다. 그러나 흑색 화산회토는 가볍고 토양구조의 발달이 약하며 점토 피막이 없고, 가소성이 없어 물방울의 충격에 의해 토양입단이 분리 (Kim and Miller, 1995; Parfitt, 1990)되어 토양침식이 발생된 것으로 판단된다.

**토양침식량과 용적밀도, 유기물 함량 및 포화 수리전도도와의 관계** 토양침식량과 용적밀도, 유기물 및 포화수리전도도와의 상관관계는 Table 6에 나타내었다. 암갈색토에서 토양침식량과 용적밀도는 상관계수 0.860으로 용적밀도가 높아짐에 따라 토양침식이 증가되는 정의 상관성이 나타났으나, 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 유기물 함량과의 상관계수는 -0.762로 유기물이 많을수록 토양침식량이 감소하는 부의 상관성이 나타났지만 유의적인 차이는 없었다. 포화수리전도도와 토양침식량과는 -0.919로 유의적인 부의 상관성이 나타났다. 농암갈색 화산회토에서도 암갈색토와 같은 경향을 보였으며 유기물 함량과 토양침식량의 상관계수는 -0.664로 유기물이 많으면 토양침식량이 감소하는 부의 상관성이 나타났으나 유의적인 차이는 없었다. 포화수리전도도와의 상관계수가 -0.787로 부의 상관을 보였으나 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 흑색 화산회토에서 토양침식량과 포화수리전도도는 상관계수가 -0.841로 고도의 유의적인 부의 상관성이 나타났다.

토양침식과 용적밀도는 Yun et al. (1996)에 의하면 정의 상관을 보인다고 하였는데 본 시험에서도 암갈색토에서 토양침식은 용적밀도가 높아짐에 따라 증가되는 정의 상관성이 나타났다. 또한 토양침식은 유기물 함량이 많을수록 감소되는데 (Jung et al. 1976; Yun et al. 1996) 본 시험에서도 암갈색과 농암갈색토에서 부의 상관성이 나타났다. 또한, 모든 토양에서 포화수리전도도가 높을수록 토양침식이 감소된 것으로 나타났는데 강우가 토양속으로 침투되는 양이 많아 유거수가 줄어들었기 때문인 것으로 판단된다.

**Table 6.** Correlation coefficients between the amount of soil erosion and selected properties of the soils.

	DBS <sup>†</sup> (n=5)	VDBVAS (n=6)	BVAS (n=8)
Bulk density	0.860	0.253	-0.374
Organic matter	-0.762	-0.664	0.390
Saturated hydraulic conductivity	-0.919*	-0.787	-0.841**

\*\*Significant difference at 1%; \*Significant difference at 5%.

<sup>†</sup>DBS, Dark brown soil; VDBAS, Very dark brown volcanic ash soil; BVAS, Black volcanic ash soil.

## Conclusions

본 연구는 인공강우 조건에서 제주도 토양의 토양침식량과 물리적 특성과의 관계를 토색별로 분석하였다. 토양침식량은 모든 토양에서 시간이 경과됨에 따라 증가되다가 20분이 경과되면서 일정하게 유지되는 경향이었고, 토양침식량은 암갈색토보다 농암갈색이나 흑색 화산회토에서 많았다. 화산회토양은 가볍고 가소성이 없어 물방울의 충격에 의해 토양입단의 분리되어 유거수에 의해서 토양 유실량이 많아졌다. 토양침식량과 유거수와의 관계는 정의 상관성이 나타났으며, 침투수와의 부의 상관성이 나타났다. 토양침식과 관계가 깊은 토양 물리적 특성들은 토색에 따라 다양하였다. 암갈색토는 입자크기, 내수성입단, 유거수, 침투수 및 포화수리전도도였고, 농암갈색토는 내수성입단, 유거



수 및 침투수였으며, 흑색 화산회토는 미사와 점토비율, 유거수, 침투수 및 포화수리전도도가 토양침식과 관련이 깊었다. 따라서 제주도 토양의 유실량 예측을 위해서는 토색에 따라 토양침식량과 관련이 있는 물리적 특성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

## References

- Barthes, B. and E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*. 47:133-149.
- Ben-Hur, M., I. Shainberg, R. Stern, and A. J. van der Merwe. 1992. Slope and gypsum effects on infiltration and erodibility of dispersive and nondispersive soils. *Soil Sci. Am. J.* 56:1571-1576.
- Bissonnais, Y.L. and M.J. Singer. 1992. Crust runoff and erosion to soil water content and successive rainfalls. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1893-1903.
- Cheong, P.K., M.H. Ko, J.N. Im, K.T. Um, and D.U. Choi. 1983. Rainfall erosion factor for estimation soil loss. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 16:112-118.
- Farmer, E.E. 1973. Relative detachability of soil particles by simulated rainfall. *Soil Sci. Am. J.* 37:629-633.
- Fontes, J.C., L.S. Pereira, and R.E. Smith. 2004. Runoff and erosion in volcanic soils of Azores: simulation with OPUS. *Catena* 56:199-212.
- Hur, S.O., K.H. Jung, S.K. Ha, H.K. Kwak, and J.G. Kim. 2005. Mathematical description of soil loss by runoff at inclined upland of maize cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38:66-71.
- Hur, S.O., K.H. Moon, K.H. Jung, S.K. Ha, K.C. Song, H.C. Lim, and G.G. Kim. 2006. Estimation model for simplification and validation of soil water characteristics curve on volcanic ash soil in subtropical area in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39:329-333.
- Hyun, B.K., M.S. Kim, K.C. Eom, K.K. Kang, H.B. Yun, M.C. Seo, and K.S. Sung. 2002. Evaluation on national environmental functionality of farming on soil loss using the USLE and replacement cost method. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 35:361-371.
- Jung, Y.S., J.S. Shin, and Y.H. Shin. 1976. Runoff and soil loss on newly reclaimed upland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 9:9-16.
- Jung, Y.S., Y.K. Kwon, H.S. Lim, S.K. Ha, and J.E. Yang. 1999. R and K factors for an application of RUSLE on the slope soils in Kangwon-Do, Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 32:31-38.
- Jung, K.H., W.T. Kim, S.O. Hur, S.K. Ha, P.K. Jung, and Y.S. Jung. 2004. USLE/RUSLE factors for national scale soil loss estimation based on the digital detailed soil map. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37:199-206.
- Jung, K.H., Y.K. Sonn, S.Y. Hong, S.O. Hur, and S.K. Ha. 2005. Assessment of national soil loss and potential erosion area using the digital detailed soil maps. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38:59-65.
- Kim, K.H. and W.P. Miller. 1995. Soil detachment by single and multiple waterdrops. *Applied Biological Chemistry* 38:151-156.
- Kleiss, H.J. 1970. Hillslope sedimentation and soil formation in northeastern Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 34:287-290.
- Maeda, T. and K. Soma. 1985. Classification of Andisols in Japan based on physical properties. International clay conference. The clay minerals Society, Denver.
- McIntyre, D.S. 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Sci.* 85:261-266.
- Moore, D.C. and M.J. Singer. 1990. Crust formation effects on soil erosion processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1117-1123.
- NIASST. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA,

- Suwon, Korea.
- Oh, S.J. 1989. Aspects of soil erosion with different clay content under simulated. Master's thesis of Konkuk University. Seoul, Korea.
- Oh, Y.J., M.H. Kim, Y.E. Na, S.H. Hong, W.K. Paik, and S.T. Yoon. 2012. Vulnerability assessment of soil loss in farm area to climate change adaption. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:711-716.
- Parfitt, R.L. 1990. Allophane in New Zealand - a review. *Soil Research* 28:343-360.
- Park, C.S., K.T. Um, and L.Y. Kim. 1984. Variation of soil characteristics for soil color groups in Jeju-Do Korean J. *Soil Sci. Fert.* 17:141-146.
- Park, C.W., Y.K. Sonn, B.K. Hyun, K.C. Song, H.C. Chun, Y.H. Moon, and S.G. Yun. 2011. The redetermination of USLE rainfall erosion factor for estimation of soil loss at Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:977-982.
- Poulenard, J., P. Podwojewski, J.L. Janeau, and J. Collinet. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45:185-207.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Vol. 703. Washington, DC, United States Department of Agriculture.
- Richter, G. and J.F.W. Negendank. 1977. Soil erosion processes and their measurement in the German area of the Moselle river. *Earth Surf. Proc.* 2:261-278.
- Ruhe, R.V. 1975. *Geomorphology: geomorphic processes and surficial geology*. Houghton Milfflin Co., Boston, MA, USA.
- Seguel, O. and R. Horn. 2005. Mechanical behavior of a volcanic ash soil (Typic Hapludand) under static and dynamic loading. *Soil and Tillage Research.* 82:109-116.
- Sharma, P.P., S.G. Gupta, and W.J. Rawls. 1991. Soil detachment by single raindrops of varying kinetic energy. *Soil Sci. Soci. Amer. J.* 55:301-307.
- Shin, J.S., M.H. Ko, and J.N. Im. 1981. A measurement of splash erosion under natural rainfall. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 14:104-109.
- Shoji, S., R. Dahlgren, and M. Nanzyo. 1993. Genesis of volcanic ash soil. In *Development in Soil Science*, vol. 21, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Song, K.C. and S.H. Yoo. 1991. Andic properties of major soils in Cheju Island. I. Characterization of volcanic ash soils by selective dissolution analysis. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 24:86-94.
- Tarchitzky, J., A. banim, J. Morin, and Y. Chen. 1984. Nature, formation and effects of soil crusts formed by water drop impacts. *Geoderma* 33:135-155.
- Truman, C.C., J.M. Bradford, and J.E. Ferris. 1990. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1385-1392.
- West, L.T., S.C. Chiange, and L.D. Norton. 1992. The morphology of surface crust. p. 73-92. In M.E. Sumner and B.A. Stewart (ed.) *Soil crusting: Chemical and physical processes*. Lewis Publ. Boca Roton, FL, USA.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning Agri. Handbook No. 537*. U.S. Dept. Agr. Washington. DC, USA.
- Yun, B.K., P.K. Jung., S.J. Oh., S.K. Kim, and I.S. Ryu. 1996. Effects of compost application on soil loss and physico-chemical Properties in lysimeters. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29:336-341.