Relationship Between Soil Physical Properties and Erodibility Factor of Jeju Black Volcanic Ash Soils Under a Rainfall Simulator Condition

Won-Pyo Park and Ho-Jun Kang^{1*}

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

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

*Corresponding author: khj4066@korea.kr

ABSTRACT

Received: February 5, 2020

Revised: February 20, 2020

Accepted: February 25, 2020

ORCID

Won-Pyo Park

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

This study was conducted to determine the validity by comparing the soil erodibility factor (K) values, which were calculated by rainfall simulator conditions (K_{obs}) and in the Universal Soil Loss Equation (K_{USLE}) from eight sites of black volcanic ash soils (BVAS) in Jeju Island and developed a new soil erodibility factor equation based on the physical properties of BVAS. The K_{USLE} value showed negative values in BVAS, indicating other methods for soil erodibility estimation need to be developed. The K_{obs} value had a significant positive correlation with the runoff rate ($p < 0.01$) and positively correlated with fine sand (0.02 - 0.2 mm) and clay / (silt + very fine sand). A significant negative correlation was observed between the K_{obs} and silt (0.002 - 0.02 mm) ($p < 0.05$), saturated hydraulic conductivity (K_{sat}), and infiltration rate ($p < 0.01$), all of which indicate the effect of these physical properties on the soil erodibility factor. As a result of multiple regression analysis, $K = -0.1492 + 0.0036$ runoff rate - $0.0908 K_{sat} + 0.0112$ fine sand (0.02 - 0.2 mm) ($R^2 = 0.981$, $p < 0.01$). Therefore, the developed equation may be used as the soil erodibility estimation for USLE to predict soil erosion in BVAS on Jeju Island.

Keywords: Soil erosion, Soil physical properties, soil erodibility factor, Volcanic ash soil

Multiple regression analysis for the soil erodibility factor value (K) calculation in black volcanic ash soils on Jeju Island.

Model	Variable [†]	R ²	Adjusted R ²	Durbin-Watson	Mean Square	F	Pr > F
1	X ₁	0.8390	0.8122	2.17	0.13285	31.3	0.0014
2	X ₁ · X ₂	0.9499	0.9299	2.52	0.07521	47.4	0.0006
3	X ₁ · X ₂ · X ₃	0.9894	0.9815	1.23	0.05222	124.5	0.0002
4	X ₁ · X ₂ · X ₃ · X ₄	0.9965	0.9919	2.07	0.03945	215.2	0.0005
5	X ₁ · X ₂ · X ₃ · X ₄ · X ₅	0.9987	0.9954	1.20	0.03163	305.1	0.0033
6	X ₁ · X ₂ · X ₃ · X ₄ · X ₅ · X ₆	1.0000	0.9999	2.68	0.02639	8174.3	0.0085

[†]X₁, Runoff rate; X₂, Saturated hydraulic conductivity; X₃, Fine sand (0.02 - 0.2 mm); X₄, Silt (0.002 - 0.02 mm); X₅, Infiltration rate, X₆, Clay/(silt + very fine sand).

Introduction

경사지에 위치한 농경지는 평지에 비해 침투속도에 영향을 받기 때문에 강우에 의해 토양 유실이 일어나기 쉽다. 제주도의 밭토양 면적은 61,088 ha로 이 중 46,582 ha는 경사지 (2% 이상)에 분포하고 있다 (Park and Kang, 2019). 특히 제주도는 한라산 (해발 1,950 mm)을 중심으로 고도가 높아지고 주변에 약 360여개의 단성화산 (오름)이 산재해 있고 경사가 급한 (10 - 35%) 지역도 많다. 대부분 경사가 급한 지역은 중산간 지역 (고도 200 - 600 m)에 위치해 있으며, 주로 목초지나 감자, 무 등 채소작물이 재배되고 있다. 이런 경사지 밭에서는 지표면이 불완전하게 피복되어 태풍이나 집중호우에 의해 토양 유실이 발생하기 쉽다. 경작지 토양이 유실될 경우 토양과 함께 유기물 및 양분도 유실되면 작물의 생산성도 저하되고, 유실된 토양은 주변 하천으로 유입되어 제주도 주변 환경오염의 원인이 될 수 있다.

제주도 토양은 토색에 따라 암갈색토, 농암갈색토 및 흑색토 구분하고 있으며 (Park et al., 1984; Song and Yoo, 1991), 토양유실이 취약한 중산간 지역에는 흑색화산회토가 주로 분포한다 (Moon et al., 2007). 제주도의 흑색토양은 유기물 함량이 12% 이상으로 높고, 용적밀도가 0.9 Mg m^{-3} 이하로 낮으며 (Park and Kang, 2019), 점토광물은 Al-유기복합체와 allophane이 주가 되는 Andisols이 많다 (Song and Yoo, 1991). Andisols는 점착성과 가소성이 약하고 (Shoji et al., 1993) 토양이 젖었을 때 입단의 안정도가 약해서 (Parfitt, 1990) 쉽게 분리된다. 또한 Andisols는 빗방울의 충격에 의해 토양입단이 쉽게 분리되고 (Kim and Miller, 1995; Fontes et al., 2004; Seguel and Horn, 2005), 유기물함량이 높고 용적밀도가 낮아 소수성 입단 (hydrophobic aggregates)이 부유 (floating)된 형태로 있기 때문에 유거수에 의해 토양 유실이 발생하기 쉽다 (Poulenard et al., 2001; Zehetner and Miller, 2006).

토양유실량을 추정하기 위해 전세계적으로 토양유실량 예측 공식 (Universal Soil Loss Equation, USLE)이 이용되고 있다. USLE는 $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$ 로 나타내며, 강우 (R), 토양특성 (K), 지형 (LS), 작물 (C), 토양관리 (P)의 5개 인자를 활용하여 연평균 토양유실량 (A)을 산정하기 위한 식이다 (Wischmeier and Smith, 1978). 이 중에서 토양침식성인자 (K)는 토양의 유기물 함량, 입경분포 (모래, 미사, 점토), 투수 및 구조 등급 등에 의해 계산되며 강우에 의한 침식 저항 능력을 나타낸다. 그러나 토양침식성인자 (K) 계산식은 토양의 유형에 따라 다른 계산식들이 개발되었다. EI-Swaify and Dangler (1976)은 하와이 화산회토양에서 0.25 mm 미만의 비내수성 입단, 0.002 - 0.05 mm와 0.002 - 0.1 mm의 미사, 0.1 - 2.0 mm의 모래 및 염기포화도를 기반으로 토양침식성인자 계산식을 개발하였다. 또한 미국 중서부 토양의 경우 입단지수, 용적밀도, montmorillonite 함량 등을 사용하기도 하였다 (Young and Mutchler, 1977). Jung et al. (1999)은 자갈이 많은 강원도 경사지 토양에서 USLE의 토양침식성인자 계산식에 자갈의 피복도를 고려한 보정식을 도입하였다. Jung et al. (2005)은 수치정밀토양도 (1:25,000)에 전국의 토양침식량을 평가하였으나 제주지역은 토양침식성 인자값에 보완이 필요하다고 하였다.

Park and Kang (2019)은 제주도 토양의 유실량 예측을 위해서는 토색에 따라 토양침식량과 관련이 있는 토양 물리적 특성을 고려해야 한다고 하였다. 암갈색토양은 입자크기, 내수성입단, 유거수, 침투수 및 포화수리전도도, 농암갈색토양은 내수성입단, 유거수 및 침투수, 흑색토양은 미사와 점토비율, 유거수, 침투수 및 포화수리전도도가 토양침식과 관련이 깊었다. 따라서 본 연구는 제주도 흑색화산회토양에서 인공강우 시험에 의해 산출된 토양침식성 인자값과 USLE의 토양침식성인자 계산값을 비교하여 타당성 여부를 결정하고, 인공강우 시험의 토양침식성 인자값과 제주지역 흑색화산회토양의 물리적 특성간의 상관관계 분석을 통해 토양침식성인자 산정식을 도출하고자 수행하였다.

Materials and Methods

토양시료 분석 토양시료는 제주도 정밀토양지도 (ASI, 1976)를 참고하여 0 - 15 cm 깊이로 흑색화산회토양 8 개 지점 (A - H)에서 채취하였다. 채취한 시료는 풍건한 후 2 mm 체를 통과시켜 토양 유기물과 물리성 분석 및 토양 유실 시험에 사용하였다.

토양 입경분석은 Pipette법으로 측정하였다 (Table 1). 토양 유기물은 Tyurin법으로 분석하였고, 용적밀도는 100 cm³ 토양시료채취 코어로 채취하여 건조 후 계산하였으며, 포화수리전도도는 48시간 동안 증류수를 이용하여 하부로 부터 포화시킨 후 정수위를 유지하면서 60분간 투수량을 측정하여 (NIAST, 2000)에 나타내었다 (Table 2).

Table 1. Particle size distribution of black volcanic ash soils used in the experiment.

Soil samples	USDA [†]							ISSS [‡]			Clay (%)
							Coarse Sand (%)	Fine sand (%)	Silt (%)		
	2.0 - 1.0 (mm)	1.0 - 0.5	0.5 - 0.25	0.25 - 0.1	0.1 - 0.05	Total (%)	0.05 - 0.002 (mm)	2.0 - 0.2 (mm)	0.2 - 0.02	0.02 - 0.002	
A	3.5	3.8	2.5	2.6	3.0	15.4	61.2	10.2	28.7	37.7	23.4
B	0.4	0.6	0.9	1.5	2.2	5.5	74.9	2.0	23.1	55.3	19.6
C	1.0	2.2	2.9	5.8	3.3	15.3	64.7	6.8	28.5	44.6	20.1
D	0.2	0.4	0.4	0.6	1.7	3.4	76.6	1.1	22.3	56.6	20.0
E	0.2	0.5	0.5	2.0	2.6	5.8	78.6	1.4	20.0	63.0	15.6
F	0.3	1.0	1.1	1.0	3.2	6.7	76.7	2.6	20.7	60.1	16.6
G	0.2	0.7	1.1	2.0	2.2	6.2	73.3	2.29	24.5	52.8	20.6
H	4.1	4.9	4.8	6.5	3.2	23.5	62.2	14.6	23.2	47.9	14.3

[†]United States Department of Agriculture of classification.

[‡]International Soil Science society of classification.

Table 2. Organic matter (O.M.), bulk density (Bd), and saturated hydraulic conductivity (Ksat) of black volcanic ash soils used in the experiment and soil erosion (A) and rate of runoff and infiltration water under a rainfall simulator condition.

Soil samples	O.M. (g kg ⁻¹)	Bd (Mg m ⁻³)	Ksat (cm h ⁻¹)	A (ton ha ⁻¹)	Runoff rate (%)	Infiltration rate (%)
A	221	0.65	1.13 (3) [†]	12.8	59.4	29.1
B	152	0.71	0.11 (4)	19.0	80.2	1.31
C	193	0.68	0.85 (3)	16.1	58.8	26.6
D	147	0.63	1.17 (3)	4.18	24.5	62.7
E	180	0.68	1.53 (3)	0.75	19.1	64.7
F	135	0.59	2.27 (3)	0.95	40.3	43.9
G	182	0.56	0.22 (4)	15.0	58.8	27.2
H	172	0.72	0.96 (3)	5.70	30.6	45.5

[†]Permeability: Division by saturated hydraulic conductivity.

인공강우기에 의한 토양침식 시험 시험에 사용한 인공강우장치 (Eijkelkamp, 09.06 Rainfall simulator, The Netherlands)와 토양침식 시험용 상자 (넓이 26×30 cm, 깊이 15 cm)는 Park and Kang (2019)이 사용한 것과 동일하게 하였으며, 강우조건은 Table 3과 같다.

토양침식 시험은 경사도가 10%로 고정된 장치 위에 준비된 토양침식 상자를 놓고 인공강우장치를 조작하여 30분 동안 매 5분마다 유거수량과 침투수량을 측정 하였다. 토양 침식량은 유거수에 포함된 토양을 여과지 (Advantec-Toyo No. 6)를 이용하여 여과한 후 105°C 에서 24시간 동안 건조시켜 칭량하여 산출하였다. 침투수량은 침식상자 하부로 침투되는 물의 양을 30분 동안 측정하였다. 유거수량과 침투수량은 인공강우시험에 사용한 총 물량의 비율로 산출하였다 (Table 2).

토양침식 관련 인자값 산정 토양침식 관련 인자인 강우 (R), 지형 (LS), 작물 (C) 및 토양관리 (P) 인자값 산정은 인공강우시험 조건으로부터 USLE 공식 (Wischmeier and Smith, 1978)을 이용하여 계산하였다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, A : 연간 토양유실량 ($\text{Mg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)

R : 강우인자 ($\text{MTf m cm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$)

K : 토양침식성인자 ($\text{MT h MTf}^{-1} \text{m}^{-1} \text{cm}^{-1}$)

LS : 지형인자, C : 작물인자, P : 토양관리인자

강우인자는 Table 3의 인공강우기 시험 조건들로부터 $354 \text{ MTf m cm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$ 로 계산되었다. 지형인자 (LS)는 본 연구의 시험 조건으로부터 0.136으로 계산되었다. 작물인자 (C)와 토양관리인자 (P)는 나지상태이므로 각각 1을 적용 하였다.

인공강우기 시험의 토양유실량에 의한 토양침식성 인자값 (K_{obs})은 Eq. (2)에 의해 계산 하였다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \text{ 이므로 } K_{(\text{obs})} = \frac{A}{R \cdot LS \cdot C \cdot P} \quad (\text{Eq. 2})$$

Table 3. 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^{-1}
Total volume of simulation	5,850 mL (195 mL min^{-1})
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^2
Kinetic energy	$354 \text{ MTf m cm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$

K_{obs} 값과 USLE에 의한 토양침식성 인자값 (K_{USLE})을 비교하기 위하여 K_{USLE} 값은 USLE의 토양침식성인자 계산 Eq. (3)에 의해 계산하였다.

$$100K = 2.1M^{1.14}(10^{-4})(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \quad (\text{Eq. 3})$$

M = (미사 + 극세사) $\times$ (100 - 점토함량)

a = 유기물 (%)

b = 구조등급 (1 - 4등급) : 1등급 적용 (토양구조가 파괴되어 1등급 적용)

c = 투수등급 (6등급) : 포화수리전도도로 등급구분

통계분석 인공강우 실험에 의해 산출된 K_{obs} 은 토양입경, 유기율, 포화수리전도도 및 침투율과의 상관성을 분석하였고, 다중회귀분석을 통해 토양침식성인자에 영향을 주는 요인을 조사하였다. 다중회귀분석의 독립변수는 K_{obs} 와 상관성이 높은 토양물리적 특성 자료가 변수로 사용되었고, 독립변수의 다중공선성 진단은 분산팽창계수 (Variance Inflation Factor, VIF)를 이용하였다. 모든 통계분석은 SPSS 18.0 (SPSS Inc. Chicago, USA)을 이용하여 $p < 0.05$ 의 수준에서 유의성을 검토하였다.

Results and Discussion

인공강우와 USLE의 토양침식성 인자값 (K) 비교 USLE에 사용되는 토양침식성인자 계산식이 제주도 흑색 화산회토양에 적용이 가능 여부를 검토하기 위하여 인공강우기 시험의 토양유실량에 의해 산출된 K_{obs} 값과 USLE의 토양침식성인자 계산식에 의한 K_{USLE} 값을 Table 4에 나타내었다. K_{obs} 값은 B, C 및 G 토양이 각각 0.395, 0.335, 0.311로 가장 컸으며, A, H, D, F 및 E 토양 순으로 낮았다. 이러한 결과는 Park and Kang (2019)의 결과와 같이 제주도의 흑색화산회토양에서 미사와 점토비율, 유기수, 침투수 및 포화수리전도도가 토양침식과 관련이 있는 것으로 판단된다 (Park and Kang, 2019). Table 1과 2의 흑색화산회토양의 물리적 특성에 대한 결과를 보면, K_{obs} 값이 높은 B, C 및 G 토양은 포화수리전도도가 0.11 - 0.85 cm h⁻¹로 투수성이 불량하여 유기수 (유기율 58 - 80%)가 많았고, 세사

Table 4. Soil erodibility factor value (K) of black volcanic ash soil calculated under rainfall simulator and USLE.

Soil samples	$K_{obs}^{\dagger}$	$K_{USLE}^{\ddagger}$
A	0.266	- 0.466
B	0.395	- 0.163
C	0.335	- 0.381
D	0.087	- 0.179
E	0.016	- 0.407
F	0.02	- 0.116
G	0.311	- 0.321
H	0.118	- 0.287

[†] K_{obs} : Observed soil erodibility value using a rainfall simulator test.

[‡] K_{USLE} : Soil erodibility factor value calculated by USLE.

(0.2 - 0.02 mm)의 함량이 23.1 - 28.5%로 많았다. 반면에 K_{obs} 값이 낮은 D, E, 및 F 토양은 포화수리전도도가 1.17 - 2.27 cm h^{-1} 로 높아 침투수량 (침투율 43 - 65%)이 많고 유거수량의 적어 토양침식량이 적었다.

흑색화산회토양의 K_{USLE} 은 모두 음의 값을 나타내었다 (Table 4). 이러한 결과는 USLE 식의 토양침식성인자 계산식이 토성과 유기물에 의해서 계산하도록 되어 있으나, 흑색 화산회토양의 유기물 함량은 12% 이상으로 Eq. (1)에 의하면 음의 값이 되기 때문이다 (Table 2). Bonilla and Johnson (2012)도 칠레 토양에서 유기물함량과 토양침식성 인자값과는 관련이 없었다고 보고하였다. 이러한 이유로 토양유실량을 평가하기 위해서 유기물 함량에 대한 제한이 없는 기하학적 평균입도 (geometric mean diameter)만을 이용한 토양침식성인자 계산식을 이용하기도 한다 (Zhang et al., 2008; Bonilla and Johnson, 2012; Bagarello et al., 2012). 또한 Renard et al. (1997)은 USLE의 토양침식성인자 요인들이 모든 토양에서 유효한 것은 아니며, 하와이의 화산회토양이나, 미국 중서부지역의 석회질토양과 같이 특별한 조건에 있는 토양들은 특정한 계산식이 유효하다고 하였다. 예를 들어, EI-Swaify and Dangler (1976)은 하와이 화산회토양에서 0.25 mm 미만의 비내수성 입단, 0.002 - 0.05 mm 와 0.002 - 0.1 mm의 미사, 0.1 - 2.0 mm의 모래 및 염기포화도를 기반으로 토양침식성 인자식을 개발하였고, 토양특성에 따라 토양침식성 인자들이 변이가 많다고 하였다. 따라서 제주도 흑색 화산회토양에서 토양침식성 인자값 (K)을 산출하기 위해서는 새로운 방식이 필요하다.

흑색 화산회토양에서 토양침식성 인자값 산정식 토양침식성 인자값 (K)에 영향을 미치는 인자를 구명하기 위하여 인공강우기 시험의 토양유실량에 의해 산출된 K_{obs} 값과 토양입경, 유거율, 침투율 및 포화수리전도도와 상관분석 결과를 Table 5에 나타내었다. K_{obs} 값과 유거율와의 상관계수는 0.916으로 유의적인 정의 상관관계를 나타냈으며, 세사 (0.02 - 0.2 mm)와 점토/(미사+극세사)와의 상관계수는 각각 0.697과 0.642로 정의 상관을 보였으나, 유의적인 차이는 없었다. 미사 (0.002 - 0.02 mm), 포화수리전도도 및 침투율과는 부의 상관이 나타났으며, 각 인자들의 상관계수는 각각 0.710, 0.840 및 0.900이었다. 따라서 제주도 흑색화산회토양에서 토양침식성 인자값은 유거율, 침투율 및 포화수리전도도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 토양입자 크기와 비율에 따라 상관계수가 서로 비슷한 수준인 0.642 - 0.710이므로 흑색화산회토양에서 토양침식성 인자에는 여러 인자들이 복합적으로 작용하는 것으로 나타났다.

K_{obs} 값과 상관이 높은 토양입경, 유거율, 포화수리전도도 및 침투율을 대상으로 전방선택법 (Forward selection method)에 의해 다중회귀분석 한 결과는 Table 6과 같다. Table 6은 6개의 회귀모형을 보여주고 있으며, 유거율, 포화수리전도도, 세사 (0.02 - 0.2 mm), 미사 (0.002 - 0.02 mm), 침투율 및 점토/(미사+극세사)순으로 입력되었다.

Table 5. Correlation coefficients between soil erodibility values (K) calculated using physical properties and a rainfall simulator.

Physical properties	Correlation coefficient	Regression equation
Silt (0.002 - 0.02 mm)	0.710*	$Y = -0.0127X + 0.8457$
Fine sand (0.02 - 0.2 mm)	0.697	$Y = 0.0323X - 0.5762$
Clay/(silt + very fine sand)	0.642	$Y = 1.7386X - 0.2543$
Saturated hydraulic conductivity	0.840**	$Y = -0.1817 + 0.3806$
Runoff rate	0.916**	$Y = 0.0065X - 0.1092$
Infiltration rate	0.900**	$Y = -0.0064X + 0.436$

*Significant difference at 5%.

**Significant difference at 1%.

Table 6. Multiple regression analysis for the soil erodibility factor value (K) calculation in black volcanic ash soils on Jeju Island.

Model	Variable [†]	R ²	Adjusted R ²	Durbin-Watson	Mean Square	F	Pr>F
1	X ₁	0.8390	0.8122	2.17	0.13285	31.3	0.0014
2	X ₁ · X ₂	0.9499	0.9299	2.52	0.07521	47.4	0.0006
3	X ₁ · X ₂ · X ₃	0.9894	0.9815	1.23	0.05222	124.5	0.0002
4	X ₁ · X ₂ · X ₃ · X ₄	0.9965	0.9919	2.07	0.03945	215.2	0.0005
5	X ₁ · X ₂ · X ₃ · X ₄ · X ₅	0.9987	0.9954	1.20	0.03163	305.1	0.0033
6	X ₁ · X ₂ · X ₃ · X ₄ · X ₅ · X ₆	1.0000	0.9999	2.68	0.02639	8174.3	0.0085

[†]X₁, Runoff rate; X₂, Saturated hydraulic conductivity; X₃, Fine sand (0.02 - 0.2 mm); X₄, Silt (0.002 - 0.02 mm); X₅, Infiltration rate, X₆, Clay/(silt + very fine sand).

모형의 적합도 판정을 위한 분산분석 결과, 결정계수 (R^2)와 조정된 결정계수 (R^2)는 독립변수가 추가됨에 따라 각각 1.0과 0.9999까지 증가 되었다. 변수가 하나씩 추가되어 만들어지는 여섯 가지 모형의 p값은 0.01 보다 작아 유의성이 나타남으로 여섯 가지 모형은 종속변수인 토양침식성 인자값 추정을 위한 회귀식을 만드는데 적합하였다. 또한 Durbin-Watson 통계량은 2.68로 잔차의 독립성이 어느 정도 만족한 것으로 판단된다. Durbin-Watson 값은 0부터 4까지의 범위를 가지며, 2에 가까울수록 잔차의 자기상관이 없다고 판단한다. 그러나 토양의 물리적 특성은 독립적이지 않기 때문에 6번째 회귀모형에서 독립변수 간에 상관관계가 높을 경우 다중공선성의 문제가 발생할 수 있다. 포화수리전도도와 침투율 ($r=0.66, p<0.05$), 세사와 미사 ($r=0.93, p<0.01$) 및 세사와 점토/(미사+극세사) ($r=0.914, p<0.01$)는 유의한 상관관계를 나타내었고, 다중공선성에 대한 회귀분석을 검정할 수 있는 분산팽창계수 (VIF) 값이 10 이상으로 다중공선성이 발생하였다. 상관관계가 높은 독립변수를 제거하고 회귀분석을 다시 수행한 결과, 종속변수인 토양침식성 인자값 (K)과 독립변수인 유거율, 포화수리전도도 및 세사 (0.02 - 0.2 mm)와의 다중회귀식을 아래와 같이 구하였다.

$$K = -0.1492 + 0.0036X_1 - 0.0908X_2 + 0.0112X_3 \quad (R^2 = 0.981, p < 0.01)$$

위 식에서 K는 토양침식성 인자값, X₁는 유거율, X₂는 포화수리전도도, X₃은 세사 (0.02 - 0.2 mm) 이다. 이 회귀식은 VIF값이 1.4에서 2.0으로 다중공선성의 문제가 없다고 판단된다.

본 연구에서 유거율은 토양침식성인자 산정식에 중요한 인자였으며, Kim and Miller (1995)와 Hur et al. (2005)은 유거율에 의해서 토양침식이 결정된다고 하였다. 특히 Andisols에서 유거수에 의한 토양침식은 Al(Fe)-유기복합체 형성으로 유기물함량이 높고 용적밀도가 낮아 소수성 입단 (hydrophobic aggregates)이 부유 (floating)된 형태로 발생한다 (Poulenard et al, 2001; Zehetner and Miller, 2006). Poulenard et al. (2001)에 의하면 Andisols에서 소수성 입단의 부유는 Al(Fe)-유기복합체의 존재로 토양의 발수성발달과 관련있다고 하였다. 화산회토양의 발수성은 침투수를 감소시키고 표토의 유실수 및 침식을 증가시킬 수 있다 (Poulenard et al., 2004; Kawamoto et al., 2007). 제주도는 바람이 많아 토양 지표면이 빠르게 건조되기 때문에 토양의 발수성이 발달되어 강우에 의해 소수성 입단이 유실될 가능성이 높다.

Conclusions

본 연구는 제주지역 흑색화산회토양에서 인공강우 시험의 토양유실량에 의해 산출된 토양침식성 인자값 (K_{obs})과 USLE의 토양침식성 인자값 (K_{USLE})을 비교하여 타당성 여부를 결정하고 흑색화산회토양에 적합한 토양침식성인자 산정식을 도출하였다. USLE 식에 의하여 계산된 흑색화산회토양의 K_{USLE} 은 12% 이상의 높은 유기물 함량 때문에 음의 값을 나타내어 제주도 흑색화산회토양에서 토양침식성 인자값 (K)을 산출하기 위해서는 새로운 계산식이 필요하였다. 제주도 흑색화산회토양에서 토양침식성 인자값은 유기물, 침투율, 세사 (0.02 - 0.2 mm), 미사 (0.002 - 0.02 mm), 점토/(미사+극세사), 포화수리전도도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 상관분석 결과를 바탕으로 제주도 흑색화산회토양의 물리적 특성과 인공강우 시험의 토양유실량에 의해 산출된 K_{obs} 값을 이용하여 다중회귀식을 구한 결과 유기물, 포화수리전도도 및 세사 (0.02 - 0.2 mm)가 토양침식성 인자값에 영향을 미치는 주요 변수로 확인되었다. 토양 침식은 토양의 구조, 투수성, 입자의 크기 등의 토양특성, 토양층위 발달, 경운, 작물재배 관리 등에 영향을 받기 때문에 실제 침식이 발생하는 현장에서 실험구를 설치하여 토양유실량과 관련된 추가 연구가 필요하다. 또한 화산회 토양은 유기물함량이 높고 용적밀도가 낮아 소수성 입단이 부유된 형태로 유기수에 의해 토양 유실량이 많아지므로, 향후 제주도 화산회토양에 대한 토양 침식관련 연구에 소수성 입단과 관련하여 토양의 발수성에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

References

- ASI. 1976. Cheju Do detailed soil map. Agricultural Sciences Institute.
- Bagarello, V., C. Di Stefano, V. Ferro, G. Giordano, M. Iovino, and V. Pampalone. 2012. Estimating the USLE soil erodibility factor in Sicily, South Italy. *Appl. Eng. Agric.* 28:199-206.
- Bonilla, C.A. and O.I. Johnson. 2012. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*. 189:116-123.
- El-Swaify, S.A. and E.W. Dangler. 1976. Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic properties. In: El-Swaify, S.A., Moldenhauer, W.G., Lo, A. (Eds.), *Soil Erosion: Prediction and Control*. Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, pp. 105-114.
- 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.
- 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., 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.
- Kawamoto, K., P. Moldrup, T. Komatsu, L.W. de Jonge, and M. Oda. 2007. Water repellency of aggregate-size fractions of a volcanic ash soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:1658-1666.
- Kim, K.H. and W.P. Miller. 1995. Soil detachment by single and multiple waterdrops. *Appl. Biol. Chem.* 38:151-156.
- Moon, K.H., H.C. Lim, and H.N. Hyun. 2007. Distribution of soil series in Jeju Island by proximity and altitude. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:221-228.

- NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- 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, W.P. and H.J. Kang. 2019. Study on soil erosion and physical characteristics of Jeju volcanic ash soils under a rainfall simulator condition. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52:60-69.
- Poulenard, J., J.C. Michel, F. Bartoli, J.M. Portal, and P. Podwojewski. 2004. Water repellency of volcanic ash soils from Ecuadorian páramo: effect of water content and characteristics of hydrophobic organic matter. *Eur. J. Soil Sci.* 55:487-496.
- 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.
- Seguel, O. and R. Horn. 2005. Mechanical behavior of a volcanic ash soil (Typic Hapludand) under static and dynamic loading. *Soil Till. Res.* 82:109-116.
- 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.
- 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.
- Young, R. A. and C.K. Mutchler. 1977. Erodibility of some Minnesota soils. *J. Soil and Water Cons.* 32:180-182.
- Zehetner, F. and W.P. Miller. 2006. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena*. 65:201-213.
- Zhang, K.L., A.P. Shu, X.L. Xu, Q.K. Yang, and B. Yu. 2008. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China. *J. Arid Environ.* 72:1002-1011.