

박사학위논문

제주도 토양의 침식 특성 및 경사지 토양침식 방지에 관한 연구



제주대학교 대학원

농화학과

강 호 준

2005년 12월

제주도 토양의 침식 특성 및 경사지 토양침식 방지에 관한 연구

지도교수 유 장 결

강 호 준

이 논문을 농학 박사학위 논문으로 제출함

2005년 12월

강호준의 농학 박사학위 논문을 인준함

심사위원장	(인)

위 원	(인)

위 원	(인)

위 원	(인)

위 원	(인)

제주대학교 대학원

2005년 12월

Soil Erosion Characteristics and Erosion Control of Sloped Upland in Jeju

Ho-Jun Kang

(Supervised by professor Zang-Kual U.)



A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Doctor of Agriculture

2005. 12.

Department of Agricultural Chemistry
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary

I. 서론	1
II. 연구사	3
1. 토양침식 예측	3
1) 토양침식 관련 인자	3
2) 토양침식에 대한 강우의 영향	5
3) 토양침식에 영향을 미치는 토양특성	6
2. 토양침식 방지	7
III. 재료 및 방법	9
시험 I. 인공강우기를 이용한 제주도 토양의 침식특성	9
1. 토양시료 채취 및 분석	9
1) 토양시료 채취	9
2) 토양 이화학성 분석	11
2. 인공강우기에 의한 토양침식 시험	12
1) 인공강우기 조건	12
2) 토양침식량 조사	13
3. 토양침식 관련 인자값 산정	15
1) 강우인자 (R)	15
2) 지형인자 (LS), 작물인자 (C) 및 토양관리인자 (P)	16
3) 토양침식성 인자 (K)	16

4) 토양침식과 토양물리적 특성과의 상관분석	17
5) 토양침식성 인자값 산정식	17
시험 II. 경사지토양의 토양침식 경감 연구	18
1. 시험포장 및 시험구 처리	18
1) 시험포장	18
2) 시험구 처리	20
2. 강우량 및 강우인자 산정	21
3. 토양침식, 유거수량 및 양분유실량 조사	21
4. 토양 화학적 특성 및 양분 유실량 분석	21
1) 토양 화학성	21
2) 양분 유실량	22
5. 감자 생육 및 수량조사	22
IV. 결과 및 고찰	23
시험 I. 인공강우기를 이용한 제주도 토양의 침식특성	23
1. 토양의 물리적 특성	23
1) 입경분포	23
2) 내수성 입단, 유기물, 용적밀도 및 포화수리전도도	25
2. 토양침식과 유거수 및 침투수와의 관계	30
3. 토양침식과 토양 물리적 특성과의 관계	32
1) 토양침식량과 점토, 미사 및 모래 함량과의 관계	32
2) 토양침식량과 내수성입단과의 관계	34
3) 토양침식량과 용적밀도, 유기물 및 포화수리전도도와의 관계	36
4. 유거수량	38
5. 침투수량	40
6. 토양침식량	42

7. 토양침식성 인자값 산정	47
1) 암갈색 토양의 토양침식성 인자	47
2) 농암갈색 화산회토양의 토양침식성 인자	53
3) 흑색 화산회토양의 토양침식성 인자	59
시험 II. 경사지 토양의 토양침식 경감 연구	67
1. 강우특성 및 강우인자	67
2. 토양 침식량	69
3. 유거수량 및 유거수율	71
4. 토양침식량과 강우특성 및 유거수와의 관계	73
5. 양분 유실량	75
1) 질소	75
2) 인산	77
3) 칼리	79
6. 토양의 화학적 특성	80
7. 감자 생육 및 수량	81
V. 적요	84
VI. 참고문헌	89

Summary

Experiment I. Soil erosion characteristics under rainfall simulator conditions in Jeju soil

The object of this study is to investigate the relationship between erodibility factors and physical characteristics of the Jeju soil in Korea under rainfall simulator conditions. In order to investigate the effect of soil particle size, water stable aggregate, soil organic matter content, bulk density, saturated hydraulic conductivity, runoff and infiltration water on soil erosion, the soil samples were collected from 5 sites of dark brown soil(DBS), 6 sites of very dark brown volcanic ash soil(VDBAS), and 8 sites of black volcanic ash soil(BVAS) in Jeju. The relations between soil erosion and some physical characteristics of the soil were tested.

Comparing the soil erodibility factor values which were calculated by rainfall simulator and USLE, the values from rainfall simulator were more reasonable than those from USLE in VDBAS and BVAS. Therefore we made two formulas to calculate the soil erodibility factor values more suitable for two soils.

1. Soil physical characteristics

The average contents of sand, silt and clay were 13.6%, 67.1% and 19.4% in DBS, 12.3%, 66.8% and 20.9% in DBVAS, and 10.2%, 71.0% and 18.8% in BVAS, respectively. Organic matter content and saturated hydraulic conductivity were remarkably high in BVAS, and very low in

DBS.

DBS had higher bulk densities, VDBVS medium ones, and BVAS lower ones. The average water stable aggregates were 68.6% in DBS, 81.8% in VDBVS, and 81.4% in BVAS, respectively.

2. The relationship of soil erosion with runoff and infiltration water

The relationship between soil erosion and runoff was positively correlated, but infiltration water was negatively correlated with soil erosion.

3. The relationship between soil erosion and soil physical characteristics

1) Clay, silt and sand

In DBS, the soil erosion was negatively correlated with clay, clay/silt, clay+very fine sand, clay/(silt+very fine sand) and clay+fine sand(0.02~0.2 mm), but positively correlated with silt/clay. In VDBAS, the relationship between the soil particle size and soil erosion was not significant, while in BVAS, the soil erosion was negatively correlated with silt/clay and positively correlated with clay+fine sand(0.02~0.2 mm).

2) Water stable aggregate

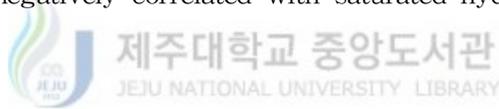
The relationship between soil erosion and water stable aggregate was observed only in the DBS and VDBAS. Soil erosion in DBS was positively correlated with water stable aggregate (0.25~0.5 mm, 0.1~0.25 mm+0.25~0.5 mm, 0.1~0.25 mm+0.25~0.5 mm+0.5~1.0 mm), but the water stable aggregates (0.5~1.0 mm+1.0~2.0 mm+>2.0 mm and 1.0~2.0 mm+>2.0 mm) were prone to decrease soil erosion without statistical

significancy. Soil erosion in VDBAS was positively correlated with water stable aggregate(0.1~0.25 mm, 0.25~0.5 mm and 0.1~0.25 mm+0.25~0.5 mm), but negatively correlated with water stable aggregate (0.5~1.0 mm +1.0~2.0 mm+ > 2.0 mm and 1.0~2.0 mm+ > 2.0 mm). However, in BVAS soil erosion was not correlated with water stable aggregate.

3) Bulk density, soil organic matter and saturated hydraulic conductivity

The bulk density did not significantly affect soil erosion, but the relationship between soil erosion and bulk density in DBS was considerably higher in comparison to VDBAS and BVAS. In DBS and VDBAS, soil erosion decreased with increasing of soil organic matter content, but in BVAS, there was no relationship between soil erosion and organic matter content.

Soil erosion was negatively correlated with saturated hydraulic conductivity in all soils.



4. The amount of runoff, infiltration water and soil erosion

The amount of runoff in all soils increased by 10 minutes, then remained the same, except Donghong series of DBS and Gujwa series of VDBAS. The amount of runoff with time has no difference between the colors of soil. The amount of infiltration water increased by 10 minutes, then was gradually reduced or was maintained constantly. The amount of infiltration water had no difference between the colors of soil and was affected by saturated hydraulic conductivity.

The amount of soil erosion in all soils increased gradually by 20 minutes and then remained the same. The amount of soil erosion in VDBAS and BVAS was rather higher when compared with DBS.

5. Equations for calculating soil erodibility factor values

Soil erodibility factor values calculated from rainfall simulator in DBS were significantly related to those of USLE. Consequently, soil erodibility factors(K) of USLE model were regarded to be useful tools for predicting soil erosion of DBS in Jeju.

In VDBVAS and BVAS, there was no relationship between soil erodibility factor(K) of USLE and the soil physical characteristics(soil particle size, soil organic matter). But soil erodibility factor(K) was related with water stable aggregate, runoff rate and infiltration rate in VDBVAS, and related with runoff rate, fine sand(0.02~0.2 mm), silt(0.002~0.02 mm), clay/(silt+very fine sand), saturated hydraulic conductivity and infiltration rate in BVAS.

Therefore, we made the formula for calculating soil erodibility value by using water stable aggregate, runoff rate and infiltration rate in VDBVAS :

$$K = -0.30021 + 0.02924X_1 + 0.0037X_2 + 0.00193X_3 + 0.00173X_4$$

(K : soil erodibility factor value, X_1 : 0.25~0.1 mm water stable aggregate %, X_2 : runoff rate %, X_3 : (0.1~0.25 mm)+(0.25~0.5 mm)+(0.5~1.0 mm)+(1.0~2.0 mm)+(>2.0 mm) water stable aggregate %, X_4 : infiltration rate %)

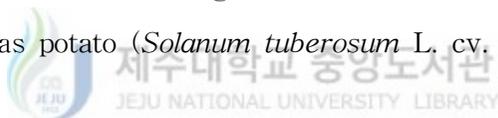
Also, we made the formula for calculating soil erodibility value by using runoff rate, fine sand(0.02~0.2 mm), silt(0.002~0.02 mm), clay/(silt+very fine sand), saturated hydraulic conductivity, and infiltration rate in BVAS :

$$K = -0.77342 - 0.00903X_1 - 0.07594X_2 + 0.03702X_3 + 0.0142X_4 - 0.01187X_5 + 1.10588X_6$$

(K : soil erodibility factor value, X_1 : runoff rate %, X_2 : saturated hydraulic conductivity cm h^{-1} , X_3 : fine sand $\%$ (0.02~0.2 mm), X_4 : silt $\%$ (0.002~0.02 mm), X_5 : infiltration rate %, X_6 : clay/(silt+very fine sand).

Experiment II. Soil erosion and nutrients control in sloped land

This study was conducted to investigate the effects of soil management practices for reducing soil erosion, runoff and nutrient loss in sloped land from 2003 to 2004 on a 10.5% nature sloped land. Experiments were carried out using 10 m \times 2.5 m field plots. Treatments of test plots were ① up and down culture (UDC), ② contour culture (CC), ③ contour+vinyl mulching culture (CVMC), and ④ contour+grass band culture (CGBC). The crop used for the test was potato (*Solanum tuberosum* L. cv. Dejima).



1. Rain characteristic and rain factor

The total rainfall during the experimental period was 310.6 mm in 2003, and 458.6 mm in 2004. Particularly it had the greatest amount of rainfall during September in 2003 and 2004.

2. Soil erosion, runoff and nutrient loss

The amount of soil erosion, runoff and nutrient(N, P, K) loss were higher in the UDC than those in the CC, CVMC, and CGBC, but there were no differences between CC and CGBC. Runoff and rainfall factor were positively correlated with the amount of soil erosion.

3. Soil chemical characteristics and yields

Soil chemical characteristics after experiment were improved by CVMC.

Tuber yields were 7.32 ton ha⁻¹ from UDC, 9.16 ton ha⁻¹ from CC, 14.74 ton ha⁻¹ from CVMC and 8.47 ton ha⁻¹ from CGBC.

Consequently, CVMC was the most effective cultivation method to decrease the soil erosion, runoff, nutrients loss and increase the yield of potatoes.



I. 서 론

토양침식은 지표면의 토양입자가 분산되고 이동되는 현상으로 원인에 따라 강우에 의한 수식(水蝕), 바람에 의한 풍식, 얼음에 의한 빙식, 하천수에 의한 하식, 바닷물에 의한 해식 등의 자연 침식과 경운에 의한 경운침식, 인간의 잘못된 토지 이용에 의해 비 이외에 바람의 작용을 심하게 받게 되어 가속적으로 진행되는 가속침식 등으로 나누어진다. 우리나라의 토양침식은 강우에 의한 침식이 대부분이며 풍식은 해안, 도서 지역 및 고령지에서 국부적으로 발생한다 (정 등, 1999).

강우에 의한 침식은 빗방울이 떨어질 때의 충격이나 빗물이 흐르는 힘에 의해 토양이 깎여 발생한다. 따라서 강우에 의한 침식은 비의 강도와 양, 경사의 기울기와 길이에 따라 달라진다. 강우에 의한 침식은 전개과정에 따라 면상침식, 세류(간)침식, 협곡침식으로 점차 심화된다.

토양침식에 직접 영향을 주는 요인은 강우, 경사도 및 경사장 이외에 토양 특성, 지표관리 및 토양관리 등이 있으며, 우리나라에서 토양침식에 관한 연구는 지금까지 많이 이루어졌으나, 대부분 강우에 의한 토양침식량 조사와 농지보전 기술개발에 중점을 두고 있다. 그리고 토양 침식량 예측 연구는 미국에서 개발된 USLE (Universal Soil Loss Equation) 모델의 각 인자를 우리나라 환경에 맞게 개발하여 이용하고 있다 (정 등, 1983; 정 등, 1989; 정 등, 1999).

제주도 토양은 주 점토광물이 allophane으로 표층은 다량의 유기물을 함유하고 있는 화산회토양이며, 토색은 흑색, 농암갈색 또는 암갈색을 띠고 있다. 제주도 전체 면적 중에 흑색토양 21%, 농암갈색토양 41%, 암갈색토양 17%로 분포되어 있으며 용적밀도가 낮아서 건조하면 바람에 날리기 쉬우며, 염기치환용량이 크고 인산 흡착력이 커서 일반 토양과 구별되는 특징을 가지고

있다 (엄 등, 1977). 이와 같이 기후와 토양특성이 다른 화산회토양으로 이루어진 제주지역에서 토양침식이나 농지보전에 관한 연구는 이루어진 적이 없다.

토양침식에 대한 포장실험은 장기간이 소요되며 자연조건하에서는 강우특성이 일정하지 않고 여러 가지 변이가 많아 효율적인 연구결과를 얻기에 어려움이 많다. 그러나 인공강우기를 이용하면 실내에서 연구목적에 따라 강우, 토양조건, 경사장 및 경사도 등의 조절이 가능하므로 토양침식 기작이나 이론적 접근은 인공강우 조건하에서 많이 이루어지고 있다 (정 등, 1976b; 오 등, 1989).

제주지역은 밭토양 위주 농업으로 밭 토양 면적은 58,503 ha이며 그 중의 46,582 ha가 경사도 2% 이상인 경사지에 분포하고 있다. 해발 200~500 m의 중산간 지대는 전체 면적의 27.9%로 목초지나 신개간지이며, 신개간지에는 주로 가을감자가 재배되고 있다.

특히 중산간지의 경사도는 10~35%로 토양침식이 일어나기 쉬운 조건에 있으며, 8~9월에 태풍이나 집중호우의 영향을 받아 경사지 밭에서 토양침식이 많이 발생하고 있다.

토양침식은 강우시 다량의 토양과 유기물 및 질소, 인산 등의 양분유실로 비옥도저하와 수질오염 원인이 되며, 농업으로 인해 발생하는 비점오염원의 오염부하량이 매우 많으므로 토양비옥도를 유지하면서 비점오염 물질의 배출을 최소화 할 수 있는 영농기술 개발이 필요하다. 특히 제주도와 같이 강우량이 많은 지역에서는 토양침식을 방지하는 문제가 중요하며, 토양침식을 억제하기 위한 토양개량이나 농지보전 농법이 연구개발 되어야 한다.

본 연구는 제주지역 토양에서 암갈색, 농암갈색, 흑색의 토양색별로 강우에 의한 토양침식 특성을 조사하여 제주지역에 적합한 토양침식성 인자값 산정식을 만들고, 경사지 감자재배 토양에서 보전처리에 의한 토양 및 양분유실 방지효과를 구명하여 토양보전 농법을 확립하고자 수행하였다.

II. 연구사

1. 토양침식 예측

1) 토양침식 관련 인자

토양침식에 영향을 주는 여러 인자들의 특성 구명, 토양침식량 예측 및 토양 보전에 대한 연구는 실험적인 방법을 통하여 꾸준히 연구되어 오고 있다. 토양 침식에 관한 최초의 연구는 19세기 후반에 독일의 Wollny (1888)로서 토양의 종류 및 지형이 침식량과 유거수량에 미치는 영향을 조사하였으며, 토양유실 방지법으로 부초나 작물피복으로 토양표면을 보호할 것을 강조하였다. 이런 Wollny의 연구방향은 미국 토양학자들에 의하여 계승되어 1930년대부터 본격화되기 시작하였다.

Baver (1933)는 토양침식을 지배하는 인자는 강우, 지형, 식생, 토양 등 이라고 구명하고 이 중에 토양침식에 직접 영향을 미치는 인자는 강우이며 특히, 강우의 계절적 분포와 강우량 및 강우강도라고 하였다. 토양침식예측 기술의 발전은 Cook (1936)에 의해서 강우가 토양침식에 영향을 주는 주요한 변이들을 증명함으로써 시작되었는데, 세 가지 주요 인자는 침식에 대한 토양의 민감성, 강우와 유거수의 잠재적인 침식도, 작물피복에 의한 토양보호라고 보고하였다. 그 후 토양침식량을 계산하기 위한 수식이 처음으로 Zingg (1940)에 의해서 토양 침식에 대한 경사도(S)와 경사장(L)의 영향이 수식화 되었으며, Smith (1941)는 Zingg의 식에 작물인자(C)를 추가하였다. Browning 등 (1947)은 Smith의 식에 토양침식 인자(K)와 토양관리 인자(P)를 추가하여 여러 가지 토양, 작부체계, 경사장에 대한 상호인자 값을 더욱 광범위하게 만들었다. 그리고 Musgrave (1947)에 의해서 강우인자에 30분 지속 강우가 포함되었다.

그 후 토양유실예측공식은 Wischmeier와 Smith (1960)에 의하여 발전되었으

며, 완전한 토양유실예측공식은 Wischmeier와 Smith (1965)에 의해서 USDA Agricultural Handbook No. 282에 토양유실예측공식 (USLE : Universal Soil Loss Equation)이 처음 제안되었다.

이 후 전 세계적으로 토양침식 예측 연구는 주로 USLE 예측공식에 의하여 수행되어 왔으며 이 예측식의 확립을 위하여 강우, 지형(경사도 및 경사장), 토양특성, 작물 및 토양관리인자의 계량화 및 보완연구가 이루어졌다.

우리나라에서도 USLE 방법의 활용 가능성이 신 등 (1976), 정 등 (1976a, b), 정 등 (1983), 신 등 (1983), 정 등 (1985a) 및 정 등 (1989)에 의하여 검토되어 왔다.

토양유실량 예측 공식 (USLE)은 $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$ 로 나타내며, USLE에 활용되고 있는 인자는 강우 (R), 토양특성 (K), 지형 (LS), 작물 (C), 토양관리 (P)의 5개 인자로 나타내며, 작은 구역에서의 면상 및 세류침식에 의한 경지의 연평균 토양유실량 (A)을 산정하기 위한 식이다.

그러나 USLE는 실험자료에 의한 경험적인 통계식으로 연평균 토양유실량을 예측하는 것이기 때문에 USLE의 사용은 여러 상황과 조건에서 각 인자들을 정확하게 평가하고 적용하기에는 제한적이다. 그래서 농경지와 공사지역의 토양침식인자 계산도표, 불규칙한 경사에서의 지형인자, 목장과 산림지역의 피복인자, 피복지의 경작과 관리의 영향, 건설지역의 침식예측, 미국 서부지역과 하와이의 토양침식 지수 등을 포함하는 수정 보완된 USLE가 USDA Agricultural Handbook No. 537에 보고되었다 (Wischmeier와 Smith, 1978). 이후 Renard 등 (1997)은 개발목장이나 산림지역의 토양침식량 산정을 위해서 기후인자를 수정하고, 토양의 계절적 변화에 대한 동결과 융해 등의 토양침식성 인자를 개발하였으며, 자갈피복에 의한 피복식생 인자 산정 및 경사장과 경사도 인자를 수정하여 새로운 계산과정을 추가한 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)가 발표되었다.

우리나라에서도 RUSLE의 적용을 위한 강수인자와 토양침식성 인자의 산출을 시도하였으며 (정 등, 1999), 또한, 강우인자, 식생피복인자, 보전관리인자는

USLE 방법으로, 토양침식성 인자와 경사인자는 RUSLE 방법으로 정리하여 전국의 토양유실량을 산정할 수 있도록 하였다 (Jung 등, 2004). 또한, 정 등 (2005)은 1 : 25,000 수치 정밀토양도에 RUSLE 인자를 대입하여 전국의 토양침식량을 산정하였다.

2) 토양침식에 대한 강우의 영향

토양침식은 강우와 지표유출과 같은 토양침식 발생인자들에 의하여 토양입자의 분리와 이동에 의하여 이루어진다 (Ellison, 1947).

Farmer와 Haveren (1971) 그리고 우 (1976)는 인공강우 장치를 이용한 시험 결과 강우강도가 토양침식에 가장 큰 영향을 끼친다고 하였으나, Farmer (1973)에 의하면 인공강우에 의한 침식량은 강우강도나 경사도의 차이에 의한 변화보다 유거수에 의한 영향이 가장 크다고 하였다. 또한 Tarchitzky 등(1984)도 유거수량이 증가할수록 침투수는 감소하였고, 토양침식량은 증가하였다고 하였다.

토양침식량은 강우강도가 증가함에 따라 지수 함수적으로 증가하며 (정 등, 1983; 황, 1976), 경사도 20%인 나지상태에서 강우량이 1/2 정도로 적지만, 강우강도가 5배 정도로 높았을 때 토양유실량은 12배 정도가 많았다고 보고하였다 (엄, 1986). 또한 토양침식은 강우량 및 강우강도 외에 우적의 타격력도 영향을 크게 미치는 것으로 보고되어 있다 (황, 1976).

정 등 (1983)은 1964년부터 1980년까지 전국 51개 측후소 및 분실의 강우량을 Wischmeier와 Smith (1978)가 제안한 식에 의하여 토양침식량 예측을 위한 강우인자(R) 값을 계산한 바 있으며, 포장에서 측정된 토양침식량과 토양유실예측공식에 의해 계산된 토양침식량을 비교하여 강우인자는 EI_{30} 을 사용하는 것이 타당하다고 하였다. 신 등 (1983)은 강우인자 값의 계산을 단순화하기 위하여 우리나라의 7월과 8월의 강우량에 따라 강우인자 값인 IAS-index를 제시하기도 하였다.

3) 토양침식에 영향을 미치는 토양 특성

토양침식은 토양밀도, 공극율, 입자의 크기, 투수율 등의 토양특성과 토양층 발달에 영향을 받으며 (Kleiss, 1970), 토양침식과 퇴적물은 점토함량과 상관관계가 있다 (Albert 등, 1980). 種田(1975)는 토양의 침식성을 좌우하는 요인은 토양의 조직구조, 투수성, 유기물 함량 등의 여러 요인이 있으나, 토양의 공극율이 가장 중요하다고 하였다. Tarchitzky 등(1984)는 토양의 용적밀도가 높을수록 우적충격에 의한 입단 파괴가 증가하였다고 보고하였으며, Truman 등 (1990)은 강우강도에 따라 토양중의 수분함량과 입단안정화는 토양내 입단화도에 영향을 받는데, 토양입자의 분리는 입단이 발달되어 있을수록 안정하다고 하였다.

토양유실은 토성, 입단의 안정성, 유기물 함량 및 화학성 등에 따라 변하며, 미사함량이 많을수록 유실이 쉽고 (Richter와 Negendank, 1977), 점토함량에 따라 침식이 다르게 나타나며 (Evans, 1980), 인공강우 하에서 점토함량이 증가함에 따라 유거수량은 증가하나 침투수량은 감소한다 (오 등, 1989).

정 등 (1976a)에 의해서 우리나라의 83개 토양통에 대하여 토양침식성이 조사되었는데, 토양침식성 인자 (K factor) 값은 대체로 토양입자가 미세할수록, 미사의 함량이 많을수록, 배수가 불량할수록 낮다고 하였다. 또한, K 값은 유기물 함량 3~13% 범위에서 역상관 관계가 나타났으나, 3% 이하에서는 유의성 있는 관계가 나타나지 않았다고 보고하였다. 또한 정 등 (1985c)에 의하면 토성별 토양유실량은 사양토, 양토, 식양토 순으로 토성이 미세할수록 증가하나 점토함량이 40%인 식토에서는 점토입자간 응집력과 강우의 타격력에 대한 저항성 및 내수성 입단의 증가로 토양유실량이 감소된다고 하였다.

우리나라에서 토양유실량 예측을 위한 토양침식성 인자 (K)를 산정하기 위하여 정 등 (1976b)이 인공강우기를 사용하여 시험한 결과 유거수량은 토양의 점토함량이 많을수록 증가하였으나, 토양침식량은 표토의 유기물 함량과 부의 상관이 나타났으며, 분산율과 점토 및 미사의 함량과 정상관을 보였으나, 가비중과는 상관이 없다고 하였다.

2. 토양침식 방지

물에 의한 토양침식을 방지할 수 있는 방법은 유거수의 양과 속도를 줄이고 빗방울에 의한 타격력을 줄이는 것 등이 있으며, 이를 위해 여러 가지 토양보전 농법에 대한 연구가 이루어지고 있다.

Gascho 등 (1998)은 인공강우하에서 토양 내의 질산태질소와 인산의 이동을 연구하였으며, 경사지 토양의 토양침식 방지는 부초재배가 가장 효과적이라는 것이 밝혀졌으며 (신과 신, 1980; 오 등, 1991; 김 등, 1991), 부초, 토층개량, 무경운 및 간작 등의 토양관리 방법에 의한 토양유실방지 효과와 토양유실 예측공식에 적용할 토양관리 인자가 구명되었다 (정 등, 1989).

또한, 토양유실 방지효과는 비닐멀칭보다 벗짚멀칭($300 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$)이 높으며 (정 등, 1985b), 오 등 (1992)에 의하면 경사지 토양에서 땅콩, 고추, 참깨를 비닐피복재배 및 무피복재배를 하면서 토양침식량을 조사한 결과, 비닐피복재배구가 37.0~38.7%가 감소하였으나 유거수율은 평균 18.6% 증가하였으며, 지면피복율이 높은 작물에서 유거수율이 감소하였다고 하였다.

경사 20%의 사과원에서 토양침식량은 청경재배구, 부초구, 목초구, 자연초생구 순으로 감소하며 (오 등, 1998), 고랭지 채소단지에서 협곡침식을 방지하기 위해서는 낙차공시설이 토양침식방지에 가장 효과적이며, 토양침식량은 초생대, 승수구, 계단전 등의 토양보전 농법으로 관행재배에 비해 80%를 줄일 수 있다고 하였다. 특히 20~25m 간격으로 50cm높이로 돌을 쌓아 침식방지를 유도하였는데, 5년 후에는 경사하부로 토양이 퇴적되어 완만한 경사면의 계단전이 조성되었다고 하였다 (오 등, 1997). 박 등 (2005)에 의하면, 고랭지 경사지에서 농경지 인근의 잡초를 이용한 골최소부초와 침식작용에 의하여 표면에 노출된 자갈을 이용하는 골자갈대를 설치하는 골최소부초와 골자갈대를 처리함으로써 45% 이상의 토양유실 저감효과와 유거수 발생을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났으나, 사양토인 석비례성토 지역인 경우는 토양유실량이 보전 처리구에서 61 ton ha^{-1} 이상이 발생하여 단일방법으로는 토양보전에 부족하다고 하였다.

또한 토양개량을 통한 토양침식방지 연구가 이루어 졌는데, 석고사용에 의한 침투수 증가 및 유출수와 토양침식에 대한 연구 (Agassi 등, 1981; Shainberg와 Singer, 1985)와 바람이 많고 점토가 많은 지역 (Miller, 1987; Reichert 등, 1994; Reichert와 Norton, 1994)에서 이루어 졌다. 조 등 (1985)은 친수성(親水性)인 Uresol과 소수성(疏水性)인 Bitumen을 처리하여 토양입단의 특성을 달리 하여 인공강우하에서 토양침식량을 측정한 결과 토양구조가 안정할수록 토양유실이 크게 억제되어 낮은 유실량/유거량비를 나타내었다고 하였다. 또한 윤 등 (1996)에 의하면 경사지에서 퇴비사용이 무시용구보다 토양침식량과 유거수량을 감소시켰고 침투수량은 증가되었으며, 토양화학성 개선으로 공극율, 내수성입단, 유효수분 함량이 증가하였다고 하였다.

최근에는 농경지에서 토양침식과 동반되는 유거수중의 질소, 인산 등의 양분 유실로 인한 수질오염을 일으키는 비점오염원 예측 모형개발 (김 등, 2001)과 소유역 단위의 토양침식 예측 (Moehansyah 등, 2004) 기술이 개발되고 있다. 또한, 농경지에서 오염유출을 줄이는 방법으로 토양침식억제 방법과 영농방법의 개선을 통한 최적영농방법에 대한 연구가 이루어지고 있다 (최 등, 2000).

Ⅲ. 재료 및 방법

시험 I. 인공강우기를 이용한 제주도 토양의 침식특성

1. 토양시료 채취 및 분석

1) 토양시료 채취

토양시료는 제주도 토양을 토양색에 따라 분류한 엄 등 (1977)의 보고에 의해 제주도 일원에서 암갈색 토양 5개, 농암갈색 화산회토양 6개 및 흑색 화산회토양 8개 지점을 대상으로 총 19개 지점에서 채취하였다 (Fig. 1).

토양시료는 0~15 cm 깊이로 채취하였으며, 채취된 시료는 풍건한 후 2 mm 체를 통과시켜 토양의 이화학성 분석과 토양침식 시험에 사용하였다.



Dark brown soil

- ① Gyorye ② Gueom ③ Donggwi ④ Donghong ⑤ Jocheon

Very dark brown volcanic ash soil

- ⑥ Gujwa ⑦ Ora ⑧ Jeju ⑨ Jungmun ⑩ Jungeom ⑪ Hallim

Black volcanic ash soil

- ⑫ Gimnyeong ⑬ Namwon ⑭ Songdang ⑮ Sineom ⑯ Wimi
⑰ Pyeongdae ⑱ Hangyeong ⑲ Haengwon

Fig. 1. Soil sampling sites.

2) 토양이화학성 분석

(1) 토양유기물

토양유기물 함량은 0.1 mm 체를 통과한 풍건토를 Tyurin법으로 분석하였는데, 시료 0.1 g에 0.4 N $K_2Cr_2O_7$ 10 mL를 가하여 200°C의 전열판에서 유기물을 분해시킨 후 0.2 N $Fe(NH_4)_2(SO)_2 \cdot 6H_2O$ 으로 적정하여 토양 부식중 탄소함량의 비 1.724를 곱하여 유기물 함량을 계산하였다.

(2) 토양입경

토양 입경분석은 2 mm 체를 통과한 풍건토양 10 g을 과산화수소를 사용하여 90°C의 전열판에서 유기물을 분해한 후 분산제 5% sodium hexametaphosphate 10 mL를 가한 후 18시간 동안 진탕시키면서 완전히 분산시켰다. 그리고 분산된 현탁액은 0.05 mm 체에 증류수를 사용하여 씻으면서 옮긴 후 체를 통과시켜 0.05 mm 이하의 입자를 Pipette법으로 측정하였다. 체 위에 남은 입자(모래)는 건조시킨 후 체분석 과정을 거쳐 미농무성법과 국제토양학회법에 의하여 입경 분석을 하였다 (농촌진흥청, 2000).

(3) 토양 내수성입단

토양 내수성입단은 2~4 mm의 풍건시료를 습식체별법으로 Yoder형 진탕기의 체위에 골고루 펼치고 10분간 증류수에 침지시킨 후 30분간 진탕하여 105°C에서 건조시켜 입단 무게를 칭량하였다. 그리고 분산제 5% sodium hexametaphosphate 10 mL를 가하여 완전히 분산시켜 체별하여 그 체에 걸리는 단립만을 모아 건조시켜 단립 무게를 칭량한 후 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$\text{내수성입단 (\%)} = \frac{\text{입단의 무게 (g)} - \text{단립의 무게 (g)}}{\text{건토의 중량 (g)}} \times 100$$

(4) 용적밀도

용적밀도는 2 inch 토양시료 채취 코어 (core)를 가지고 현장에서 토양구조가 파괴되지 않게 토양을 채취하여 뚜껑을 덮고 테이프를 사용하여 밀봉한 후 실험실에서 토양과 코어의 전체 중량을 정확히 칭량하였다. 그리고 105℃ 건조기에서 완전히 건조시켜 수분을 정량한 후 건조 토양무게를 코어부피로 나누어 구하였다.

(5) 포화수리전도도

포화수리전도도는 2 inch 토양시료 채취 코어를 가지고 토양을 채취하여 정수위에 의하여 측정하였으며, 인공강우 시험이 끝난 토양을 사용하였다. 토양은 코어를 가지고 구조가 파괴되지 않도록 채취하여 48시간 동안 28℃의 증류수를 이용하여 하부로부터 포화시킨 후 정수위를 유지하면서 60분간 투수량을 측정하여 다음 식에 의하여 계산하였다.


$$\text{수리전도도 (cm h}^{-1}\text{)} = \text{투수량 (cm}^3 \text{ h}^{-1}\text{)} \times \frac{\text{토주길이 (cm)}}{\text{토주 내 단면적 (cm}^2\text{)}} \times \frac{\text{t}^\circ\text{C에서 물의 점성계수}}{\text{25}^\circ\text{C에서 물의 점성계수}}$$

2. 인공강우기에 의한 토양침식 시험

1) 인공강우기 조건

본 연구에 사용된 인공강우기 (Eijkelkamp, 09.06 Rainfall Simulator, Netherlands)는 야외포장과 실내에서 사용이 간편한 소형으로 시험시 강우조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Conditions of rainfall simulator used in 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

2) 토양침식량 조사

토양침식 시험 장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 인공강우 시스템과 토양침식 시험용 상자로 구성되어있다.

토양침식 시험용 상자는 (넓이 26 × 30 cm, 깊이 15 cm) 1.2 mm 두께의 목재로 제작하였다. 내부바닥은 침투수의 배수와 토양의 모세관 포화가 잘 되도록 직경 5 mm인 둥근 FRP (fiberglass reinforced plastics) 막대로 깔았고, 그 위에 구멍이 2 mm인 스테인레스 망사를 넣었다. 그리고 토양이 하부로 유실되지 않도록 얇은 천 (gauze)을 두 겹으로 깔았다. 토양 층진은 2 mm 체를 통과한 토양을 토양별로 용적밀도를 고려하여 10 cm 두께로 층진하였다. 토양 포화는 타원형 플라스틱 용기에 토양침식 시험용 상자를 넣어 24시간 동안 하부로부터 모세관 포화를 시킨 후 24시간 동안 경사 10%에서 배수시켜 침식 시험에 사용하였다.

토양침식 시험은 경사도가 10%로 고정된 장치 위에 준비된 토양침식 상자를 놓고 인공강우장치를 조작하여 매 5분마다 유거수량과 침투수량을 30분 동안 측정하였다. 토양 침식량은 유거수에 포함된 토양을 여과지 (Advantec-Toyo No. 6)를 이용하여 여과한 후 105℃에서 24시간 동안 건조시켜 칭량하여 산출하였다.

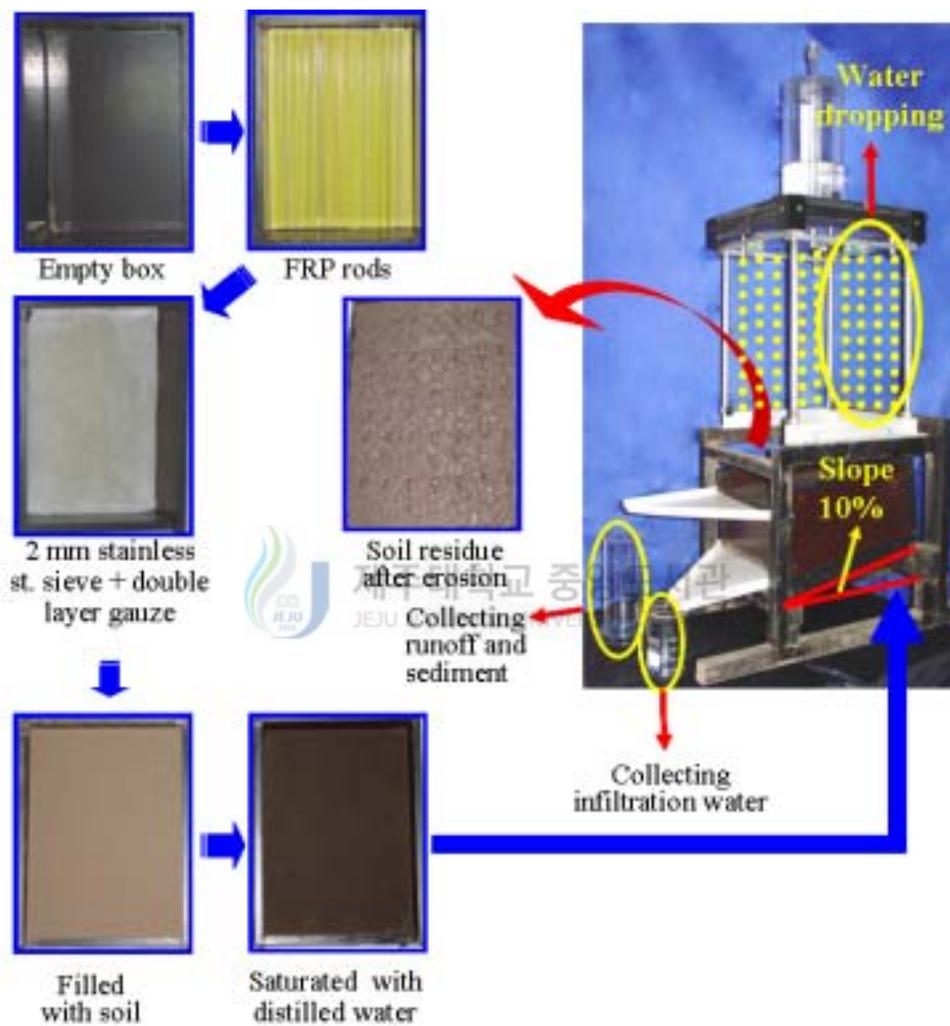


Fig. 2. Diagram of rainfall simulator used in experiment.

3. 토양침식 관련 인자값 산정

토양침식 관련 인자인 강우(R), 지형(LS), 작물(C) 및 토양관리(P) 인자값 산정은 인공강우시험 조건으로부터 USLE 공식 (Wischmeier와 Smith, 1978)을 이용하여 계산하였다. 그리고 토양침식성 인자값(K)은 실측값과 USLE 값을 비교하기 위하여 인공강우기에 의한 토양침식량의 실측치로 계산한 토양침식성 인자값 (K_{obs})과 USLE식을 이용한 토양침식성 인자값 (K_{USLE})을 산정하였다.

USLE에 의한 토양침식량 예측은 강우에 의한 토양침식량을 산출하기 위한 것으로 기본식은 다음과 같다.

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

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

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

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

LS : 지형인자, C : 작물인자, P : 토양관리인자

1) 강우인자 (R)

$$R = \sum(KE \cdot r/100) \cdot I_{30} \text{ ----- (2)}$$

KE = $210.3 + 89 \log I$ ($MTf \text{ m cm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)

I = 강우강도 (15 cm h^{-1})

r = 강우량 (7.5 cm)

I_{30} = 최대 30분 강우강도 (15 cm h^{-1})

R은 Table 1의 인공강우기 시험 조건들로부터 $354 \text{ MTf m cm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 계산되었다.

$$354 = (210.3 + 89 \log 15 \times 7.5 \div 100) \times 15$$

2) 지형인자 (LS), 작물인자 (C) 및 토양관리인자 (P)

$$LS = (X/22.13)^p \times [(0.43 + 0.30q + 0.043q^2)/6.613] \text{ ----- (3)}$$

$$L = (X/22.13)^p$$

X : 경사장 (0.3 m)

p : 지수 1% 미만이면 0.2 적용

1~3%는 0.3

3.5~4.5%는 0.4

5% 혹은 그 이상이면 0.5

$$S = (0.43 + 0.30s + 0.043s^2)/6.613 \quad s : \text{경사도}(\%)$$

지형인자는 본 연구의 시험조건으로부터 다음과 같이 0.136으로 계산되었다.

$$0.136 = (0.3/22.13)^{0.5} \times (0.43 + 0.30 \times 10 + 0.043 \times 10^2)/6.613$$

작물인자 (C)와 토양관리인자 (P)는 나지상태이므로 각각 1로 하였다.

3) 토양침식성 인자 (K)

(1) USLE에 의한 토양침식성 인자값 (K_{USLE}) 계산

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

$$M = (\text{미사} + \text{극세사}) \times (100 - \text{점토함량})$$

a = 유기물 (%)

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

1등급 : very fine granular < 1 mm

2등급 : fine granular 1~2 mm

3등급 : moderate or coarse granular 2~5 mm

4등급 : blocky, platy > 5 mm

c = 투수등급 (6등급) : 포화수리전도도로 등급구분 (USDA, 1983)

1등급 : rapid $\geq 36 \text{ cm h}^{-1}$

2등급 : moderate to rapid	3.6~36 cm h ⁻¹
3등급 : moderate	0.36~3.6 cm h ⁻¹
4등급 : slow to moderate	0.036~0.36 cm h ⁻¹
5등급 : slow	0.0036~0.036 cm h ⁻¹
6등급 : very slow	<0.0036 cm h ⁻¹

(2) 인공강우기의 토양유실량에 의한 토양침식성 인자값 (K_{obs}) 계산

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \text{ 이므로 } K = \frac{A}{R \cdot LS \cdot C \cdot P} \text{ ----- (5)}$$

A : 인공강우에 의해 실측된 토양 침식량 (ton ha⁻¹)

R : 강우인자, K : 토양침식성인자, LS : 지형인자, C : 작물인자,

P : 관리인자

4) 토양침식과 토양 물리적 특성과의 상관분석

토양 물리적 특성과 토양침식과의 관계는 SAS (Statistical Analysis Systems, Windows V8) 프로그램을 이용하여 토양색별로 토양침식량과 토양 물리적 특성들을 상관분석 하였다.

5) 토양침식성 인자값 산정식

토양침식성 인자값 산정식을 모델화하기 위한 통계분석은 SAS 프로그램을 이용하여 상관분석과 다중회귀분석을 하였다.

토양침식성 인자값 산정식은 토양색별로 인공강우에 의해서 조사된 토양침식량으로부터 산정된 토양침식성 인자값 (K_{obs})과 토양입경, 내수성입단, 포화수리전도도, 토양 유기물, 유거울 및 침투율 등의 토양 물리적 특성들과 상관분석을 통하여 유의성 있는 토양 물리적 특성들을 결정한 후, 토양 물리적 특성과 토양침식성 인자값 (K_{obs})과의 전방선택법 (forward

selection method)에 의한 다중회귀분석을 실시하여 토양색별로 토양침식성 인자값 산정식을 만들었다.

시험 II. 경사지토양의 토양침식 경감 연구

1. 시험포장 및 시험구 처리

1) 시험포장

본 시험은 2003년과 2004년에 9월부터 12월까지 2년 동안 제주도 북제주군 애월읍 봉성리 제주도농업기술원 농산물원종장에서 수행하였으며, 시험구는 경사도가 10.5%이고, 넓이가 가로 2.5 m, 세로 10 m이며, 각 시험구는 40 cm의 PVC (polyvinyl chloride) 평면판을 20 cm는 토양에 묻고 20 cm는 지상에 노출시켜 경계면을 만들어 시험구 밖으로 침식토양과 유거수가 유출되지 않도록 하였다.

각 처리구 하단부에는 침식토양과 유거수를 채취하기 위하여 침사탱크 (스테인레스 사각, 32 L) 1개와 집수탱크 2개 (스테인레스 사각통 360 L, 플라스틱 원형 500 L)를 설치하여 매 강우시마다 침식토양과 유거수를 채취하였다 (Fig. 3).

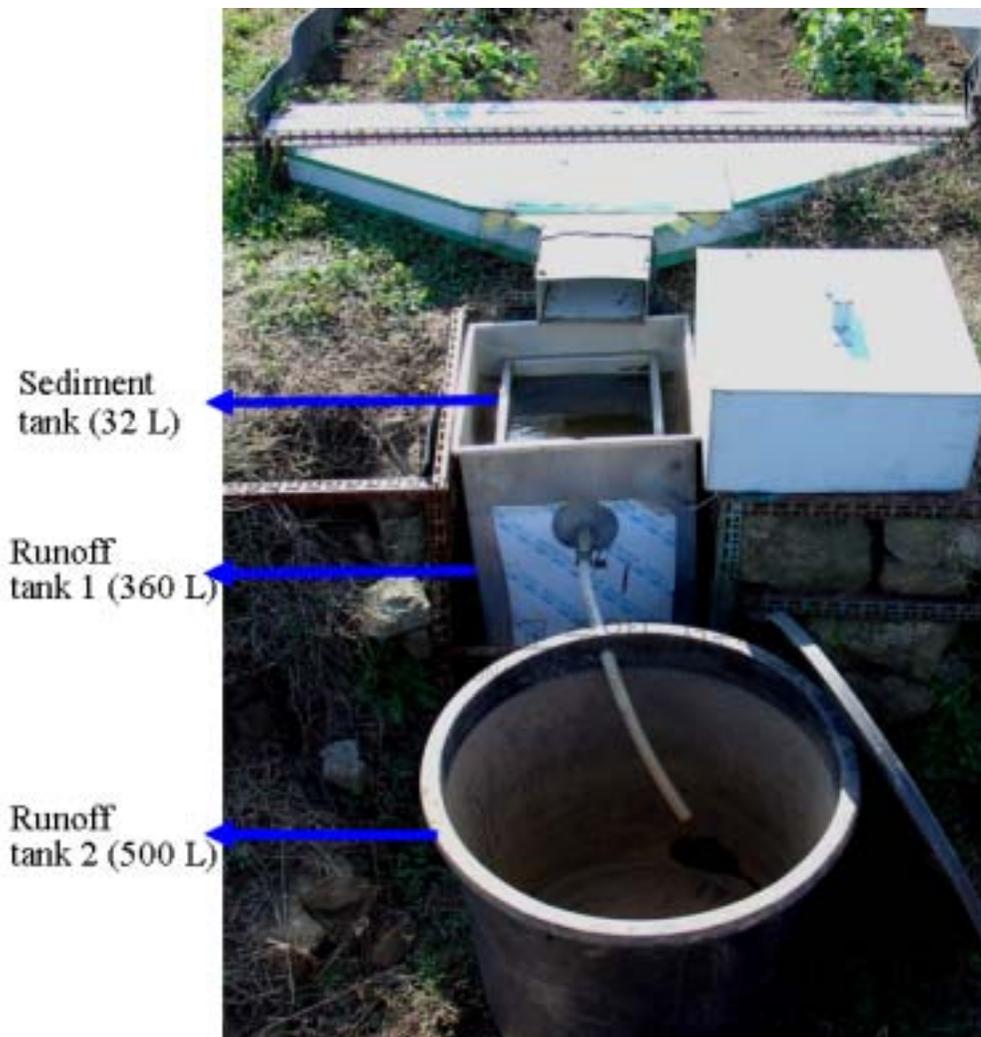


Fig. 3. Equipment for measuring the amount of soil sediment and runoff.

2) 시험구 처리

감자 (*Solanum tuberosum* L. cv. Dejima)를 공시작물로 가을재배하였다. 시험구 처리는 ① 상하경 재배구 ② 등고선 재배구 ③ 등고선+흑색비닐 멀칭 재배구 ④ 등고선+초생대 재배구의 4처리 난괴법 3반복으로 배치하였으며, 초생대는 경사장 하단에 폭 75 cm의 자연초생을 유지하였다.

시비량은 Table 2에서 보는 바와 같으며, 요소, 용성인비, 염화가리를 사용하였다. 감자재배는 9월 상순에 정식하여 12월 중순에 수확하였으며, 기타 재배관리는 제주도농업기술원 표준재배법에 준하여 시험하였다.

Table 2. Application rate of chemical fertilizers for potato cultivation

Year	Application rate (kg ha ⁻¹) ^a	Seeding date	Harvesting date
2003	150 - 170 - 130	Sep. 4	Dec. 15
2004	150 - 170 - 130	Sep. 3	Dec. 17

^aBasal application.

시험 전 토양화학적 특성은 Table 3에 보는 바와 같다.

시험토양은 농암갈색 화산회토양으로써 미사질 양토이며,新开간지이기 때문에 인산함량이 30.8 mg kg⁻¹으로 매우 낮았으며, 치환성양이온 함량도 일반 밭 토양에 비해 아주 낮았다.

Table 3. Physico-chemical characteristics of the soil before experiment

Soil texture	Particle size			pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	Ava. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex. cation (cmol _c kg ⁻¹)		
	Sand	Silt	Clay					K	Ca	Mg
Silt loam	2.9	72.4	24.7	5.1	0.18	49	30.8	0.57	0.53	0.21

2. 강수량 및 강우인자 산정

강수량은 우량계 (Model 260-2501, NovaLynx Crop., Grass Vally, USA) 를 설치하여 조사하였으며, 강우인자 계산은 USLE 의 강우인자 계산식 (식 2)으로 산출하였다.

강우인자 계산에 필요한 강우강도 및 강우침식지수는 시험기간 동안 매 강우가 12.5 mm 이상 연속된 강우를 대상으로 하였다. 강우와 강우 사이에 매 강우시간이 6시간 이내 일 때는 1회 강우, 6시간 이상 일 때는 2회 강우로 계산하였다. 그러나 1회 강우가 12.5 mm 이하인 경우는 15분 이내의 강우량이 6.25 mm 이상일 경우 1회 강우로 하였다 (Wischmeier와 Smith, 1978).

3. 토양침식, 유거수량 및 양분 유실량 조사

토양침식량은 침사탱크와 유거탱크에 있는 유거수 중의 토양을 합하여 침식량으로 하였으며, 침사탱크에 있는 토양은 직접 채취하여 건토중량법으로 측정하였고, 유거탱크에 있는 유거수에 포함된 토양은 입자가 고르게 분포되도록 저은 다음 그 중 일부를 2 L 폴리에틸렌 (polyethylene) 시료병을 사용하여 분취하였다. 분취한 유거수 중의 토양시료는 실험실내에서 여과지 (Advantec-Toyo No. 2)를 이용하여 여과하여 105℃로 건조한 후 계산하였다. 그리고 유거량은 유거탱크내의 유거수 량을 직접 측정하였다. 양분 유실량은 침식토양과 유거수 중의 양분함량을 각각 계산하여 침식토양과 유거수의 양에 양분함량을 곱하여 계산하였다.

4. 토양 화학적 특성 및 양분 유실량 분석

1) 토양 화학성

토양 pH는 시료와 증류수 비율을 1 : 5로 하여 pH 측정기로 (460CP,

ISTEC, Korea) 측정하였고, 유기물은 0.1 mm를 통과한 풍건토를 Tyurin 법으로 분석하였으며, 유효인산은 Lancaster법으로 측정하였다. 치환성양이온은 1 N ammonium acetate 법으로 추출하여 유도결합 플라즈마 원자 방출 분광계 (JY-70C, Jobin Yvon, France)로 측정하였다.

2) 양분 유실량

양분 유실량은 토양 중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 토양 10 g 에 증류수 50 mL를 가하여 30분간 진탕한 후 여과 (Advantec-Toyo No. 5C)하고, 유거수는 여과지를 이용하여 여과한 후 측정 시료로 하였다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 이온크로마토그래피 (Methron 790, Swiss)로, P와 K는 유도결합플라즈마 원자방출 분광계로 분석하였다.

5. 감자 생육 및 수량조사

생육은 정식 60일 후에 시험구당 20주를 선정하여 초장, 줄기수, 출아율을 조사하였다. 그리고 수량은 12월 중순에 수확하여 괴경이 5 g 이상인 감자를 대상으로 조사하였다 (농촌진흥청, 2003).



IV. 결과 및 고찰

시험 I. 인공강우기를 이용한 제주도 토양의 침식특성

1. 토양의 물리적 특성

1) 입경분포

토양 입경분포는 Table 4에 나타난 바와 같이 미국농무성법에 의하면, 암갈색 토양의 모래 함량은 평균 13.6%, 미사 67.1%, 점토 19.4%였으며, 농암갈색 화산회토양은 모래 12.3%, 미사 66.8%, 점토 20.9%이었다. 그리고 흑색 화산회토양은 모래 10.2%, 미사 71.0%, 점토 18.8%로 흑색 화산회토양의 미사 함량이 많은 경향이었다. 국제토양학회법에 의한 입경분포는 미사 함량이 암갈색 토양에서 평균 48.7%, 농암갈색 화산회토양에서 45.9%, 그리고 흑색 화산회토양에서 52.3%로 흑색 화산회토양이 미사 함량이 가장 많았다.

암갈색 토양의 토양통별 모래함량은 교래통이 26.0%로 가장 높았으며, 동귀통이 17.3% 이었고, 구엄통, 동홍통 및 조천통이 각각 6.9, 9.4 및 8.3%로 낮게 나타났다. 미사함량은 구엄통, 동귀통 및 조천통이 각각 78.9, 70.6 및 79.2%로 높고, 교래통과 동홍통이 52.0와 55.0%로 낮게 나타났다. 점토함량은 동홍통이 35.6%로 가장 높았고, 교래통이 22.1%이었으며, 구엄통, 동귀통 및 조천통에서 각각 14.3, 12.2 및 12.6%로 낮게 나타났다.

농암갈색 화산회토양의 토양통별 입경분포를 보면, 모래함량은 한림통이 29.2%로 가장 높았으며, 구좌통 12.0%, 중문통 10.8%, 제주통 9.9% 및 오라통 8.8%로 비슷하였으며, 중엄통이 2.9%로 가장 낮게 나타났다.

Table 4. Particle size of soils used in the experiment

Soil colors	Soil series	U. S. Department of Agriculture										International Soc. of Soil Sci.				
		Sand (%)										Coarse Sand(%) (2.0~0.2)	Fine sand (%) (0.2~0.02)	Silt(%) (0.02~0.002)	Clay(%) (<0.002)	Soil texture
		2.0~1.0	1.0~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	Tot al	0.05~0.002	Clay(%) (<0.002)	Soil texture						
mm												mm				
Dark brown soil	Gyorye	3.9	6.0	6.4	6.4	3.4	26.0	52.0	22.1	SiL	17.2	30.9	29.9	22.1	CL	
	Gucom	0.4	0.9	1.6	2.6	1.4	6.9	78.9	14.3	SiL	3.4	17.7	64.6	14.3	SiL	
	Donggwi	1.8	4.0	4.1	4.9	2.4	17.3	70.6	12.2	SiL	10.8	18.6	58.4	12.2	SiL	
	Donghong	0.5	1.4	1.9	2.7	3.0	9.4	55.0	35.6	SiL	4.1	40.9	19.4	35.6	SiL	
	Jocheon	0.2	1.1	2.0	3.8	1.2	8.3	79.2	12.6	SiL	3.9	16.9	66.6	12.6	SiL	
Very dark brown volcanic ash soil	Mean	1.4	2.7	3.2	4.1	2.3	13.6	67.1	19.4	7.9	25.0	47.8	19.4	25.4	SiC	
Black volcanic ash soil	Gujwa	0.5	1.8	2.9	4.0	2.8	12.0	62.6	25.4	SiL	5.8	31.6	37.2	25.4	SiC	
	Ora	0.4	1.2	2.2	3.2	1.9	8.8	73.1	18.0	SiL	4.4	22.5	55.1	18.0	SiCL	
	Jeju	0.6	1.8	2.5	3.2	2.0	9.9	73.6	16.5	SiL	5.3	21.1	57.0	16.5	SiCL	
	Jungmun	0.2	1.0	1.8	3.3	4.5	10.8	68.8	20.4	SiL	3.5	27.7	48.5	20.4	SiCL	
	Jungeom	0.1	0.3	0.4	0.7	1.4	2.9	72.4	24.7	SiL	1.0	26.7	47.6	24.7	SiCL	
Hallim	2.4	4.9	7.7	11.0	3.2	29.2	50.3	20.5	SiL	16.4	33.3	29.8	20.5	CL		
Mean	0.7	1.8	2.9	4.2	2.6	12.3	66.8	20.9	6.1	27.1	45.9	20.9	20.9	20.9		
Black volcanic ash soil	Gimnyeong	3.5	3.8	2.5	2.6	3.0	15.4	61.2	23.4	SiL	10.2	28.7	37.7	23.4	CL	
	Namwon	0.4	0.6	0.9	1.5	2.2	5.5	74.9	19.6	SiL	2.0	23.1	55.3	19.6	SiCL	
	Songdang	1.0	2.2	2.9	5.8	3.3	15.3	64.7	20.1	SiL	6.8	28.5	44.6	20.1	CL	
	Sineom	0.2	0.4	0.4	0.6	1.7	3.4	76.6	20.0	SiL	1.1	22.3	56.6	20.0	SiCL	
	Wimi	0.2	0.5	0.5	2.0	2.6	5.8	78.6	15.6	SiL	1.4	20.0	63.0	15.6	SiCL	
Pyeongdae	0.3	1.0	1.1	1.0	3.2	6.7	76.7	16.6	SiL	2.6	20.7	60.1	16.6	SiCL		
Hangyeong	0.2	0.7	1.1	2.0	2.2	6.2	73.3	20.6	SiL	2.3	24.5	52.8	20.6	SiCL		
Haengwon	4.1	4.9	4.8	6.5	3.2	23.5	62.2	14.3	SiL	14.6	23.2	47.9	14.3	SiL		
Mean	1.2	1.8	1.8	2.8	2.7	10.2	71.0	18.8	5.1	23.9	52.3	18.8	18.8	18.8		

미사함량은 오라통, 제주통 및 중엄통이 각각 73.1%, 73.6% 및 72.4%로 높고, 한림통이 50.3%로 가장 낮게 나타났다. 점토함량은 구좌통과 중엄통이 25.4%와 24.7%로 높았으며, 제주통이 16.5%로 가장 낮게 나타났다.

흑색 화산회토양의 토양통별 모래함량은 행원통이 23.5%로 가장 높았으며, 김녕통과 송당통이 각각 15.4와 15.3%이었고, 그 외 토양은 3.4~6.7%로 아주 낮게 나타났다. 미사함량은 남원통, 신엄통, 위미통, 평대통 및 한경통이 73.3% 이상으로 높게 나타났고 김녕통, 송당통 및 행원통이 61.2~64.7%로 낮게 나타났다. 점토함량은 김녕통이 23.4%로 가장 높았으며, 남원통, 송당통, 신엄통 및 한경통이 20.0%내외 였으며 위미통, 평대통 및 행원통이 15%내외로 낮게 나타났다.

각 토양통의 토성은 미국농무성법에 의하여 분류하면 미사질양토로 동일하였으며, 국제토양학회법으로는 암갈색 토양은 미사질양토, 농암갈색과 흑색 화산회토양은 미사질식양토가 대부분이었다.

토양입경 분포는 토양의 물리적·화학적 성질을 좌우하는 중요한 토양의 특성인데, 허 등 (1984)의 우리나라 밭토양 표토의 모래, 미사 및 점토비율은 각각 47.1, 37.0 및 15.9%라고 보고한 것 보다 모래비율은 낮고 미사비율은 매우 높게 나타났으며 점토는 다소 높게 나타나, 제주도 토양과 육지부의 토양은 토양입경 분포에 큰 차이가 나타났다. 또한 제주도 농암갈색 화산회토의 점토함량이 26.5%였다고 한 것 (박 등, 1985) 보다 다소 낮게 나타났으며, 흑색 화산회토의 점토함량이 21.9%였다는 결과와 비슷하였다.

2) 내수성 입단, 유기물, 용적밀도 및 포화수리전도도

토양의 내수성 입단, 유기물, 용적밀도 및 포화수리전도도는 Table 5에 나타내었다.

토양색별 내수성 입단율은 암갈색 토양에서 평균 68.6%이었으며, 농암갈색 화산회토양과 흑색 화산회토양은 각각 81.8%와 81.4%로 암갈색토양보다 높았으나 화산회토양간에는 차이가 없었다.

Table 5. Physical characteristics of soil used in the experiment

Soil colors	Soil series	Water stable aggregate (%)						Organic matter (g kg ⁻¹)	Bulk density (g cm ⁻³)	Saturated hydraulic conductivity (cm h ⁻¹)
		0.1 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 1.0 mm	1.0 ~ 2.0 mm	> 2.0 mm	Total			
Dark brown soil	Gyorye	8.8	9.9	12.0	16.3	6.8	53.9	23.3	1.20	0.85
	Gueom	14.7	21.7	20.9	19.5	3.1	79.9	21.9	1.45	0.08
	Donggwi	17.3	23.1	14.6	7.7	2.1	64.9	21.6	1.41	0.20
	Donghong	4.4	9.7	19.2	29.3	28.3	90.9	51.3	1.12	1.06
	Jocheon	23.4	16.6	6.1	6.7	0.5	53.3	20.8	1.50	0.11
	Mean	13.7	16.2	14.6	15.9	8.2	68.6	27.8	1.34	0.46
Very dark brown volcanic ash soil	Gujwa	0.3	0.3	0.4	4.9	70.7	76.5	200.0	0.70	2.30
	Ora	3.6	8.2	15.3	27.1	28.8	83.0	44.3	1.12	0.37
	Jeju	4.5	9.6	16.7	29.9	28.2	88.9	61.3	1.09	0.46
	Jungmun	8.3	10.2	10.3	14.3	23.0	66.1	72.5	0.92	0.15
	Jungeom	1.5	2.9	6.6	23.9	53.6	88.5	59.9	1.09	0.85
	Hallim	1.2	2.4	3.8	13.6	66.8	87.8	90.8	0.76	0.56
Mean	3.2	5.6	8.9	19.0	45.2	81.8	88.1	0.95	0.78	
Black volcanic ash soil	Gimnyeong	0.4	0.8	1.0	12.9	68.0	83.2	221.0	0.65	1.13
	Namwon	3.1	7.0	14.9	31.3	37.5	93.9	152.0	0.71	0.11
	Songdang	1.5	2.3	4.3	17.7	68.1	93.9	193.0	0.68	0.85
	Sineom	4.8	9.5	13.4	18.4	33.5	79.6	147.0	0.63	1.17
	Wimi	3.8	7.2	13.2	27.7	40.6	92.5	180.0	0.68	1.53
	Pyeongdae	0.1	0.1	0.2	5.8	57.0	63.3	135.0	0.59	2.27
Hangyeong	1.9	2.9	5.3	20.5	59.8	90.4	182.0	0.56	0.22	
Haengwon	0.6	0.5	0.7	8.4	43.9	54.2	172.0	0.72	0.96	
Mean	2.0	3.8	6.6	17.8	51.1	81.4	172.8	0.65	1.03	

크기별 내수성 입단은 0.1~0.25 mm, 0.25~0.5 mm 및 0.5~1.0 mm 입단은 암갈색 토양이 각각 평균 13.7, 16.2 및 14.6%였으며, 농암갈색 화산회토양은 각각 평균 3.2, 5.6 및 8.9%였고, 흑색 화산회토양은 각각 평균 2.0, 3.8 및 6.6%로 암갈색 토양이 높았다. 그러나 1.0~2.0 mm와 2.0 mm 이상의 입단은 농암갈색 토양에서 평균 19.0과 45.2%, 흑색 화산회토양이 평균 17.8과 51.1%로 암갈색 토양의 15.9와 8.2%보다 높았다. 육지부의 토양의 내수성 입단율은 4.2~33.8%였다는 김 등 (2004)의 보고보다 제주도 토양의 내수성 입단율은 높게 나타났다.

암갈색 토양의 토양통별 총 내수성 입단율은 동홍통이 90.9%로 가장 높았으며, 구엄통이 79.9% 였고, 교래통, 동귀통 및 조천통이 각각 53.9%, 64.9% 및 53.3%로 낮았다. 동홍통이 내수성 입단율이 높은 것은 유기물 함량이 51.3 g kg^{-1} 으로 많고, 점토비율이 35.6%로 많아 토양입자를 강하게 결합하여 입단구조를 발달시키기 때문이다 (김 등, 2004). 교래통, 구엄통, 동귀통 및 조천통은 유기물 함량이 $20.8 \sim 23.3 \text{ g kg}^{-1}$ 으로 낮고 점토비율도 12.6~22.1%로 낮아 내수성 입단율이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 내수성 입단의 크기별 분포는 0.1~0.25 mm, 0.25~0.5 mm, 0.5~1.0 mm 및 1.0~2.0 mm에 골고루 분포하였으나, 유기물 함량이 높은 동홍통은 1.0~2.0 mm와 2.0 mm 이상의 큰 입단이 많았으며, 유기물 함량이 낮은 구엄통, 동귀통 및 조천통은 0.1~0.25 mm, 0.25~0.5 mm 및 0.5~1.0 mm의 내수성 입단이 많게 나타났다.

농암갈색 화산회토양의 토양통별 내수성 입단율은 오라통, 제주통, 중엄통 및 한림통이 각각 83.0%, 88.9%, 88.5% 및 87.8%로 높았으며, 구좌통이 76.5%였고, 중문통이 66.1%로 가장 낮았다. 토양통별 내수성 입단의 크기별 분포는 1.0~2.0 mm와 2.0 mm이상의 입단으로 대부분 분포되어 있었다. 구좌통과 한림통은 2.0 mm이상이 70.7%와 66.8%로 대부분을 차지하였는데, 유기물 함량이 200.0 g kg^{-1} 과 90.8 g kg^{-1} 으로 높았기 때문에 판단된다.

흑색 화산회토양의 토양통별 내수성 입단율은 남원통, 송당통, 위미통 및 한경통이 각각 93.9%, 93.9%, 92.5% 및 90.4%로 높게 나타났으며, 김녕통이 83.2%, 신엄통이 79.6%이었으며, 평대통이 63.3%과 행원통이 54.2%로 낮았다. 행원토이 내수성 입단율이 낮은 것은 유기물 함량이 172.8 g kg^{-1} 으로 많으나, 모래 함량이 23.5%로 많고 점토 함량이 14.3%로 낮아 토양 입자간에 결합력이 약하기 때문이라고 생각된다. 내수성 입단의 크기별 분포는 1.0~2.0 mm와 2.0 mm이상의 입단으로 대부분 분포되어 있었다.

멕시코 화산회토양의 내수성 입단은 45~87%였다는 보고 (Geissert, 2003)와 같이 본 시험에서도 화산회토양의 내수성 입단은 54.2~93.9%로 비슷한 경향이였다. 이와 같이 화산회토에서 내수성 입단율이 높은 것은 유기물 함량이 많기 때문이다 (윤 등, 1996; Geissert, 2003).

유기물 함량은 암갈색 토양에서 평균 27.8 g kg^{-1} , 농암갈색 화산회토양 88.1 g kg^{-1} 및 흑색 화산회토양 172.8 g kg^{-1} 으로 토양색별로 차이가 크게 나타났다. 암갈색 토양의 토양통별 유기물 함량은 동홍통이 51.3 g kg^{-1} 으로 가장 높았으며, 그 외에는 $20.8\sim 23.3 \text{ g kg}^{-1}$ 으로 비슷하였다. 허 등 (1984)의 우리나라 전국 밭토양의 유기물 함량은 22.8 g kg^{-1} 이라고 한 것과 비슷하였다.

농암갈색 화산회토양의 유기물 함량은 구좌통이 200.0 g kg^{-1} 으로 가장 높았으며, 나머지 토양은 $44.3\sim 90.8 \text{ g kg}^{-1}$ 으로 토양통간에 큰 차이가 나타났다. 흑색화산회토양의 유기물 함량도 $135.0\sim 221.0 \text{ g kg}^{-1}$ 으로 토양 통간에 차이가 나타났다. 박 등 (1985)의 보고에 의하면 제주도 농암갈색 화산회토의 유기물 함량은 95.9 g kg^{-1} 이며, 흑색화산회토의 유기물 함량은 174 g kg^{-1} 이라고 보고한 것과 비슷하였다. 이와 같이 제주도의 화산회토가 유기물 함량이 높은 것은 제주도 화산회토의 주점토 광물은 allophane으로, 이 allophane 함량이 많아짐으로서 유기물이 allophane과 복합체를 형성하여 난분해성으로 토양에 존재하기 때문이다 (엄 등, 1977;

이 등, 1983).

용적밀도는 암갈색 토양에서 평균 1.34 g cm^{-3} , 농암갈색 화산회토양 0.95 g cm^{-3} 및 흑색 화산회토양 0.65 g cm^{-3} 로 암갈색 토양이 가장 높게 나타났다. 암갈색 토양에서 토양통별 용적밀도는 동홍통이 1.12 g cm^{-3} 으로 가장 낮았으며, 교래통, 구엄통, 동귀 및 조천통이 각각 1.20, 1.45, 1.41 및 1.50 g cm^{-3} 로 높게 나타났다. 엄 등 (1977)이 제주도 암갈색 토양의 용적밀도는 $1.12 \sim 1.39 \text{ g cm}^{-3}$ 라고 한 것보다 다소 높게 나타났다. 농암갈색 화산회토양의 토양통별 용적밀도는 오라통, 제주통 및 중엄통이 1.12, 1.09 및 1.09 g cm^{-3} 로 높고 구좌통, 중문통 및 한림통이 0.70, 0.92 및 0.76 g cm^{-3} 으로 낮게 나타났다. 이것은 엄 등 (1977)이 제주도 농암갈색 화산회토양의 용적밀도는 $0.80 \sim 0.98 \text{ g cm}^{-3}$ 라고 한 것과는 다소 차이가 있었다. 흑색 화산회토양의 용적밀도는 남원통이 0.71, 행원통이 0.72 g cm^{-3} 로 높게 나타났으며, 한경통과 평대통이 0.56과 0.59 g cm^{-3} 로 가장 낮게 나타났다. 이것은 엄 등 (1977)이 제주도 흑색 화산회토양의 용적밀도는 0.85 g cm^{-3} 이하라고 한 보고와 비슷하다.

포화수리전도도는 암갈색 토양에서 평균 0.46 cm h^{-1} , 농암갈색 화산회토양 0.78 cm h^{-1} 및 흑색 화산회토양 1.03 cm h^{-1} 로 암갈색 토양에서 가장 낮았다.

암갈색 토양에서 토양통별 포화수리전도도는 동홍통이 1.06 cm h^{-1} 으로 가장 높았으며, 구엄, 동귀 및 조천통은 0.08, 0.20 및 0.11 cm h^{-1} 로 낮았다. 농암갈색 화산회토양은 구좌통이 2.30 cm h^{-1} 으로 가장 높았으며, 중문통이 0.15 cm h^{-1} 로 가장 낮았다. 흑색 화산회토양은 김녕통, 신엄통, 위미통 및 평대통이 1.13 cm h^{-1} 이상으로 높았으며 남원통과 한경통이 각각 0.11 과 0.22 cm h^{-1} 로 가장 낮았다. 이와 같이 토양 간에 포화수리전도도가 차이가 있는 것은 용적밀도가 낮은 토양에서는 물의 흐름이 용이하고, 용적밀도의 증가에 의하여 수리전도도는 감소한다는 보고 (김 등, 1997)와 같이 용적밀도가 높은 암갈색 토양의 포화수리전도도가 낮고, 용

적밀도가 낮은 화산회토양에서 높게 나타났다.

2. 토양침식과 유거수 및 침투수와의 관계

토양침식에 영향을 끼치는 유거수와 침투수의 영향을 조사하기 위하여 토양침식과 유거수량 및 침투수량과의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

토양침식과 유거수량과의 상관계수는 암갈색 토양 0.937, 농암갈색 화산회토양 0.905 및 흑색 화산회토양 0.916로 고도의 유의적인 정의 상관이 나타났고, 침투수량과는 암갈색 토양 -0.917 , 농암갈색 화산회토양 -0.888 및 흑색 화산회토양 -0.900 으로 유의적인 부의 상관이 나타났다.

Farmer (1973)와 Tarchitzky 등(1984)에 의하면, 강우에 의한 토양표면으로부터 물의 유거는 강우강도가 토양의 침투능력과 수분보유능력 보다 크게 작용할 때에 발생되며, 토양침식량은 유거수량이 많아지면 운반작용이 커져 증가된다고 보고 되어있다. 또한 Kim과 Miller (1995)는 토양침식은 유거율에 의하여 결정된다고 하였는데 본 연구에서도 유거수량이 많아질수록 토양침식량이 증가하였다.

침투수는 강우량이 증가함에 따라 감소하는데 이런 감소는 빗방울의 충격에 의한 점토의 분리로 인하여 토양표면에 피각(皮殼)이 형성되기 때문이다 (Ben-hur, 1992). 이런 피각 (皮殼) 형성은 물의 침투를 감소시켜 이로 인한 유거수의 증가가 표토의 침식을 일으키는데 (Bissonnais와 Michael, 1992), 본 연구에서도 침투수량이 많아질수록 토양침식량은 감소하였다.

이상과 같이 토양침식은 물 침투력이 높으면 표면 유거수량이 감소로 인하여 침식이 감소된다. 또한 토양침식은 빗방울의 에너지에 의하여 토양입자의 분리와 유거수로 인한 토양입자의 이송에 의해 발생되므로 유거수와 침투수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 생각된다.

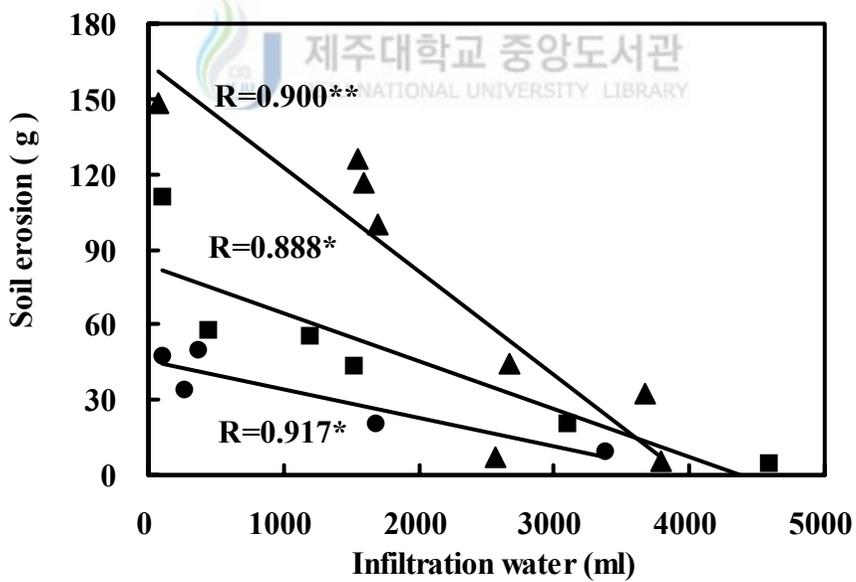
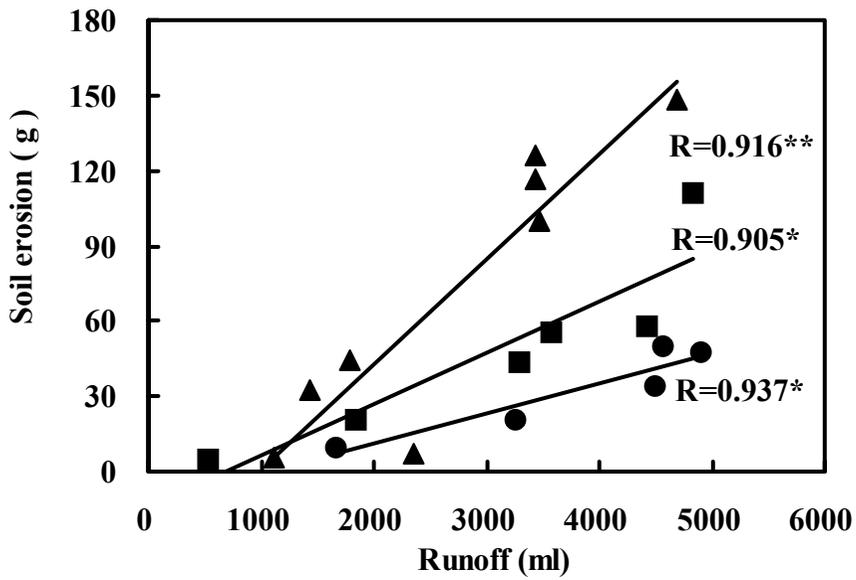


Fig. 4. Relationship between soil erosion, runoff and infiltration water in dark brown soil(●), very dark brown volcanic ash soil(■) and black volcanic ash soil (▲).

토양색별로 토양침식량은 유거수량과 침투수량에 따라 차이가 나타났는데, 흑색 화산회토양의 토양침식량이 가장 많았으며, 농암갈색 화산회토양이 중간이었고, 암갈색 토양이 가장 적었다. 이런 결과는 화산회토양에서 유거수는 표토의 침식에 있어 중요한 인자이며 (Eusebio 등, 2001), 화산회토양은 용적밀도가 낮아 가벼우며 (신과 김, 1975; 엄 등 1977), 화산회토양의 침식은 용적밀도가 낮은 andisol의 특징으로 인하여 입단의 부유 (浮遊, floating)를 통하여 일어나므로 (Poulenard 등, 2001) 유거수에 의해서 토양침식이 많은 것으로 생각된다.

3. 토양침식과 토양 물리적 특성과의 관계

1) 토양침식량과 점토, 미사 및 모래 함량과의 관계

토양색별 토양침식량과 점토, 미사 및 모래와의 상관관계는 Table 6에서 보는 바와 같이 암갈색 토양과 흑색 화산회토양에서만 유의적으로 나타났다.

암갈색 토양에서 토양침식과 점토와의 상관계수는 -0.901 , 점토/미사와는 -0.921 , 점토+극세사와는 -0.901 , 점토/(미사+극세사)와는 -0.920 및 점토+세사($0.02\sim 0.2$ mm)와는 -0.913 으로 부의 상관을 보였으며, 미사/점토와는 0.890 으로 정의 상관을 보였다.

농암갈색 화산회토양에서 토양침식과 점토와의 상관계수는 -0.599 였으며, 극세사와는 0.633 이었으나 유의성은 없었다.

흑색 화산회토에서 토양침식은 미사/점토와 상관계수가 -0.727 로 부의 상관관계가 나타났으며, 점토+세사($0.02\sim 0.2$ mm)는 상관계수가 0.723 으로 정의 상관관계가 나타났다. 그러나 점토와는 0.642 , 점토/미사와는 0.635 , 점토+극세사와는 0.649 및 점토/(미사+극세사)와는 -0.643 이었으나 유의성은 없었다.

Table 6. Relationship between soil erosion and particle size

Particle size	Correlation coefficient		
	Dark brown soil (n=5)	Very dark brown volcanic ash soil (n=6)	Black volcanic ash soil (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 at $P < 0.05$.

점토함량은 토양침식에 대한 저항도 결정에 중요한 역할을 하는 토양의 응집력을 결정하는 것이므로 침식성을 나타내기에 적합하며, 토성별 특성은 침식성 검토에 필요한 인자이다. 오 등 (1989)에 의하면 토양침식은 점토함량이 많을수록 증가하였으나 점토함량이 40.2%인 토양에서는 오히려 감소하였다고 하였는데, 본 시험에서는 암갈색 토양에서 점토함량이 많을수록 토양침식이 감소하는 부의 상관을 나타내었다. 이것은 빗방울의 충격에 의해서 파괴된 점토가 물에 의해 수송되어 공극을 채워 토양표면에 피각(皮殼)을 형성하므로써 유거수에 의한 저항성이 증대되어 토양침식이 감소하였기 때문이다 (West 등, 1992).

암갈색 토양에서 미사함량이 많을수록 토양침식이 증가되는 것은 미사

함량이 많으면 빗방울의 충격에 대한 저항력은 있어도 일단 빗방울에 파괴된 입자나 불안정한 미세입단이 유거수에 의해 쉽게 이동되기 때문에 침식이 큰 것으로 (McIntyre, 1958) 생각된다.

토양침식은 토양유기물 함량이 적을 때에는 유기물 효과가 감소되고 토성(土性)에 의하여 좌우되는데 (정 등, 1976a), 암갈색 토양은 동홍통 이외에는 유기물 함량이 20.8~23.3 g kg⁻¹으로 낮아 토양침식과 입자크기와 밀접한 상관이 나타난 것으로 생각된다.

흑색 화산회토양에서 토양침식과 입자크기와의 관계는 암갈색 토양과 농암갈색 화산회토양과는 다른 경향을 보였는데, 비록 유의성은 없었지만 점토가 많으면 침식이 증가되고 미사가 많으면 침식이 감소되는 상관이 나타났다. 흑색 화산회토양은 용적밀도가 낮아 가볍기 때문에 강우에 의해 파괴된 가벼운 점토가 유거수에 의해 쉽게 이동되고, 미사는 토양공극을 채우기 때문이라고 생각된다.

토양침식은 밀도, 공극율, 입자의 크기, 투수율 등의 토양특성과 관계가 깊은데 (Kleiss, 1970), 흑색화산회토에서 토양침식과 점토, 미사와의 관계는 단독적인 영향보다는 점토, 미사 및 모래와의 상호 비율이 토양침식에 영향을 주는 것으로 생각된다.

2) 토양침식량과 내수성입단과의 관계

토양침식에 미치는 내수성입단의 영향을 조사하기 위하여 토양침식과 내수성입단과의 상관관계를 분석한 결과는 Table 7에 나타내었다.

내수성입단은 암갈색 토양과 농암갈색 화산회토양에서 토양침식에 영향을 끼쳤으나, 흑색 화산회 토양에서는 큰 영향을 끼치지 않은 것으로 조사되었다.

암갈색 토양에서 토양침식과 내수성입단과의 관계는 직경 0.25~0.5 mm 입단과 토양침식과는 상관계수가 0.976으로 고도의 정의 상관이 나타났으며, (0.1~0.25 mm)+(0.25~0.5 mm)과는 상관계수가 0.917 및 (0.1~0.25

mm)+(0.25~0.5 mm)+(0.5~1.0 mm)과는 상관계수가 0.949로 정의 상관이 나타나 직경 1.0 mm 이하 입단이 많으면 토양침식이 많이 발생하는 것으로 조사되었다. 반면에 (1.0~2.0 mm)+(>2.0 mm) 입단과 토양침식과는 상관계수가 -0.762로 부의 상관이 나타났으나, 유의성은 없었다.

Table 7. Relationship between soil erosion and water stable aggregate

Water stable aggregate	Correlation coefficient		
	Dark brown soil (n=5)	Very dark brown volcanic ash soil (n=6)	Black volcanic ash soil (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
(0.5~1.0 mm)+(1.0~2.0 mm)+ (>2.0 mm)	-0.631	-0.843*	0.666
(1.0~2.0 mm)+(>2.0 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)+ (>2.0 mm)	-0.227	-0.550	0.560

**Significant at $P < 0.01$, *Significant at $P < 0.05$.

농암갈색 화산회토양에서 토양침식과 내수성입단과의 관계는 0.1~0.25 mm의 내수성 입단과는 상관계수가 0.954로 고도의 정의 상관이 나타났으며, 0.25~0.5 mm 입단과도 상관계수가 0.849로 정의 상관이 나타났다. 그러나 (0.5~1.0 mm)+(1.0~2.0 mm)+(>2.0 mm) 입단과는 상관계수가 -0.843으

로 부의 상관성이 나타났으며, (1.0~2.0 mm)+(>2.0 mm) 입단과는 상관계수가 -0.893으로 부의상관 관계가 나타나 1.0 mm 이하 입단이 많으면 토양 침식이 많이 발생하는 것으로 조사되었다.

흑색 화산회토양에서 (0.5~1.0 mm)+(1.0~2.0 mm)+(>2.0 mm) 입단과 토양침식량과의 상관계수는 0.666으로 정의 상관성이 나타났으나, 유의성은 나타나지 않았다.

입단은 강우강도가 높은 지역에서 유거수와 침식에 민감한 토양의 침식 지표로 이용되고 있는데 (Barthes와 Roose, 2002), 토양입단의 안정화는 강우시 경작지에서 토양침식을 결정하는 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다 (Truman 등, 1990). 신 등 (1981)에 의하면 비산침식 (飛散浸蝕)에 의하여 이동된 토양의 입단분포는 세사(0.1~0.25 mm)가 가장 많이 비산 (飛散)된다고 한 바와 같이 본 시험에서도 0.1~0.25 mm와 0.25~0.5 mm 입단과 토양침식과는 정의 상관성이 나타나서 작은 입단이 토양침식에 가장 예민하게 반응하는 것으로 조사되었다.

Truman 등 (1990)에 의하면 강우강도는 토양의 입단과괴에 영향을 주며, 토양입자의 분리는 입단이 발달되어 있을수록 안정하다고 하였다. 또한 조 등 (1985)은 사양토와 미사질양토에 토양 입단의 특성을 달리한 후 인공강우기하에서 토양침식량을 조사한 결과, 초기 유거가 일어나는 시간은 입단발달 상태에 따라 다르게 나타난다고 하였다.

결론적으로, 화산회토는 경미 (輕微)하고 토양구조의 발달이 약하며 점토피막이 없고, 가소성 (可塑性)이 없어 (엄 등, 1977) 물방울의 충격에 의해 토양입단이 분리 (Kim과 Miller, 1995)되어 토양침식이 발생된 것으로 추정된다.

3) 토양침식량과 용적밀도, 유기물 및 포화수리전도도와의 관계

토양침식과 용적밀도, 유기물 및 포화수리전도도와의 관계는 Table 8에 나타내었다.

Table 8. Relationship between soil erosion and physical characteristics

Physical characteristics	Correlation coefficient		
	Dark brown soil (n=5)	Very dark brown volcanic ash soil (n=6)	Black volcanic ash soil (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 at $P < 0.01$, *Significant at $P < 0.05$.

암갈색토양에서 토양침식과 용적밀도는 상관계수 0.860 으로 용적밀도가 높아짐에 따라 토양침식이 증가되는 정의 상관이 나타났으나, 유의성은 나타나지 않았다. 유기물 함량과의 상관계수는 -0.762로 유기물이 많을수록 토양침식이 감소하는 부의 상관이 나타났지만 유의성은 없었다. 포화수리전도도와 토양침식과는 -0.919 로 유의적인 부의 상관이 나타났다. 농암갈색 화산회토양에서도 암갈색 토양과 같은 경향이 나타났는데, 토양침식과 유기물 함량과의 상관계수는 -0.664로 유기물이 많으면 토양침식량이 감소하는 부의 상관이 나타났으나 유의성은 없었다. 포화수리전도도와 상관계수는 -0.787로 부의 상관을 보였으나 유의성이 나타나지 않았다. 흑색 화산회토양에서는 토양침식과 포화수리전도도와 상관계수는 -0.841로 고도의 유의적인 부의 상관이 나타났다.

토양침식과 용적밀도와는 윤 등 (1996)에 의하면 정의 상관을 보인다고 하였는데 본 시험에서도 암갈색 토양에서 토양침식은 용적밀도가 높아짐에 따라 증가되는 정의 상관이 나타났다. 또한 토양침식은 유기물 함량이 많을수록 감소되며 (정 등, 1976b), 토양 유기물은 토양 입자들을 결합시

키고, 입단을 증가시키며 빗방울의 충격으로 인한 토양입자의 분리를 감소시켜 토양침식이 감소된다 (윤 등, 1996). 또한 유기물은 입단형성을 촉진시키고 입단의 안정도를 증가시켜 물리성을 좋은 상태로 유지시켜 강우로 공급되는 물을 땅속으로 빨리 스며들게 함으로서 경사지에서 유거수의 감소로 인해 토양유실을 억제시키는 (임, 1978) 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 암갈색 토양과 농암갈색 화산회토양의 토양침식은 유기물 함량이 많으면 감소되는 경향이였다. 또한, 포화수리전도도가 높을수록 토양침식이 감소된 것으로 나타났는데, 이는 강우가 토양속으로 침투되는 양이 많아 유거수가 줄어들었기 때문인 것으로 판단된다.

4. 유거수량(Runoff)

유거수량의 경시적 변화는 암갈색 토양의 동홍통과 농암갈색 화산회토양의 구좌통을 제외한 모든 토양에서 강우 10분후 까지 증가되다가 이후로는 일정하게 유지되는 경향이였다 (Fig. 5).

동홍통과 구좌통에서 시간이 지남에 따라 유거수량이 계속적으로 증가되는 것은 입단율이 높아 강우 초기에 토양에 쉽게 침투되다가 빗방울의 충격에 의해 입단이 파괴되어 점토가 공극을 메우면서 수리전도도가 감소되고 (Frenkel 등, 1978), 토양입단 붕괴가 토양표면에 얇은 피막을 형성하므로써 (Agassi 등, 1985), 유거수량에 영향 (Helalia 등, 1988)을 주기 때문인 것으로 판단된다. 조립질인 토양에서 유거수는 배수성을 증가시키는 대공극 양이 많기 때문에 유거수가 쉽게 토양에 침투되다가 강우에 의해 토양입단이 분리되고 토양공극을 메꾸기 때문에 유거수의 양이 증가한다고 한 오 등 (1989)의 실험결과와 유사한 경향이였다.

암갈색 토양의 동홍통, 농암갈색 화산회토양의 구좌통과 중엄통 및 흑색화산회토양의 신엄통, 행원통, 위미통의 토양들의 유거수량이 적은 것은 포화수리전도도가 높아 물의 침투가 용이한 때문인 것으로(김 등, 1997) 생각된다.

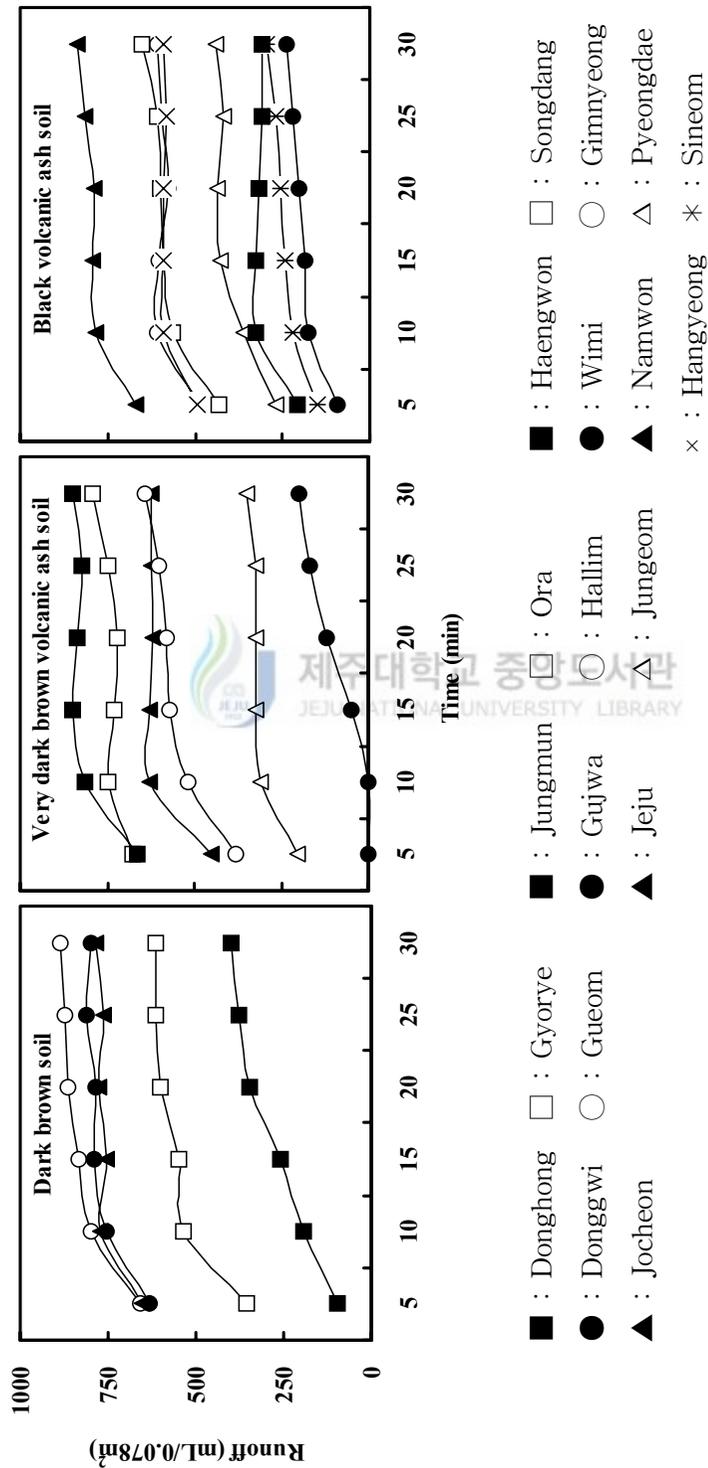


Fig. 5. Change of the runoff by elapsed time of rainfall.

암갈색 토양의 구엄통, 동귀통 및 조천통 그리고 농암갈색 화산회토양의 중문통, 오라통, 제주통 및 한림통의 유거수량이 많은 것은 미사함량이 많고, 용적밀도가 높아 유거수량이 많은 것으로 판단된다. 김 등 (1997)에 의하면 포화수리전도도는 용적밀도가 높으면 감소된다고 보고하였는데 본 연구에서도 용적밀도가 높은 구엄통, 동귀통 및 조천통에서 포화수리전도도가 낮아 토양속으로 침투되는 물의 양이 적어 유거수량이 많았다. 그리고 흑색 화산회토양의 남원통, 송당통 및 한경통은 포화수리전도도가 낮기 때문에 유거수량이 많은 것으로 판단된다.

유거수는 토양침식에 중요하게 기여하는 인자이므로 (Eusebio 등, 2001), 농경지에서 토양입자 분리와 수송을 통한 토양침식의 최소화를 위해서는 침투수 증대와 유거수량을 감소시킬 수 있어야 토양침식을 최소화할 수 있다고 판단된다.

5. 침투수량 (Infiltration water)



토양별 침투수량의 변화는 강우 10분 경과까지는 증가되다가 이후로는 완만하게 감소되거나 일정하게 유지되는 경향이였다 (Fig. 6).

암갈색 토양인 동홍통에서 침투수량이 가장 많은 것은 1.0~2.0 mm와 2.0 mm 이상의 내수성 입단율이 높고 포화수리전도도가 1.06 cm h⁻¹로 높아 물의 침투가 용이하였다고 생각된다. 교래통은 내수성 입단율이 53.9%로 다른 토양에 비해 낮았으나 모래 함량이 26.1%로 많으며 포화수리전도도가 각각 26.1%, 0.85 cm h⁻¹로 다른 토양에 비해 높고 1.0~2.0 mm와 2.0 mm 이상의 내수성 입단 비율도 높아 물 침투가 쉽게 이루어졌다고 판단된다. 동귀통, 구엄통 및 조천통의 침투수량은 아주 적었는데 용적밀도가 1.41~1.50 g cm⁻³으로 높고 포화수리전도도가 0.08~0.20 cm h⁻¹로 낮았기 때문인 것으로 판단된다.

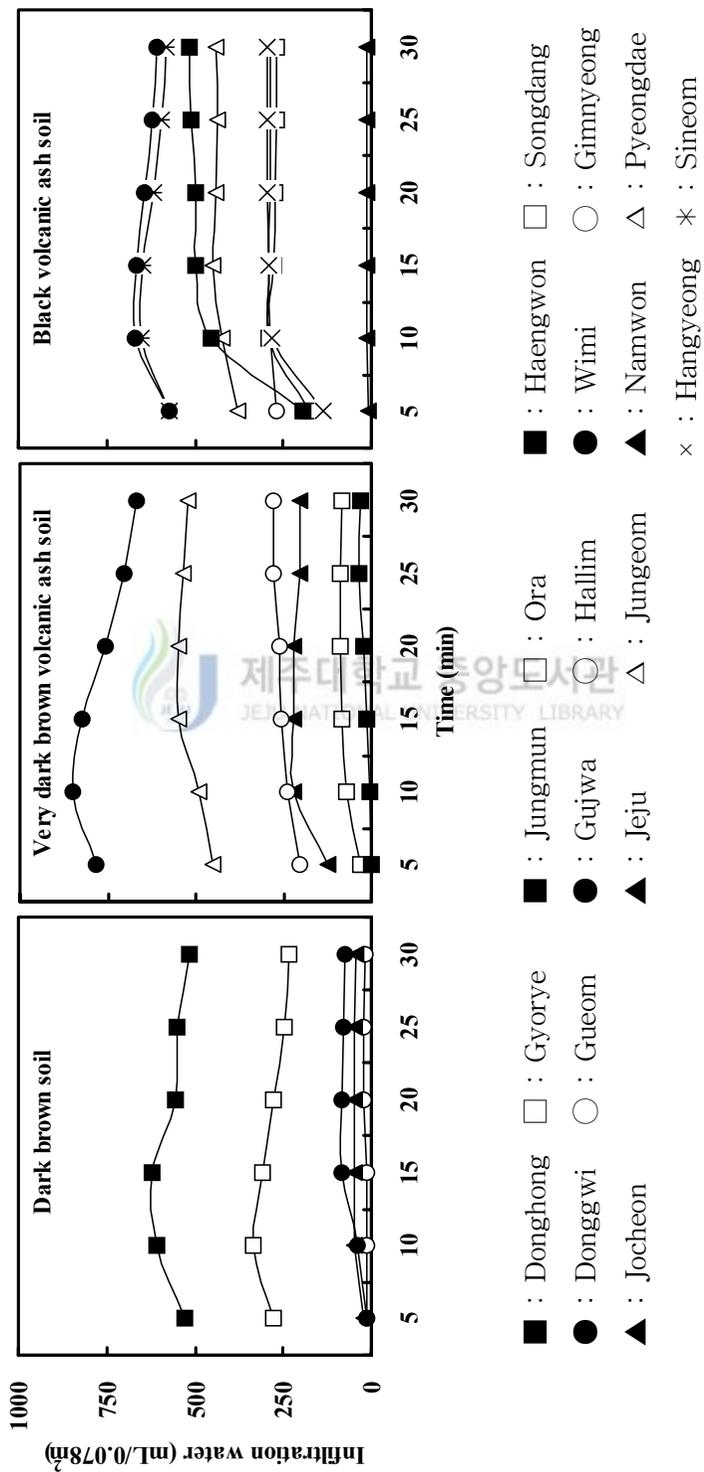


Fig. 6. Change of the infiltration water by elapsed time of rainfall.

농암갈색 화산회토양에서도 포화수리전도도가 높은 구좌통과 중엄통에서 침투수량이 많았으며, 포화수리전도도가 낮은 한림, 제주, 오라 및 중문통에서 적었다.

흑색 화산회토양에서도 포화수리전도도가 높은 위미, 신엄, 행원 및 평대통이 침투수량이 많았으며, 남원통에서는 포화수리전도도가 0.11 cm h^{-1} 로 낮아 침투수가 거의 발생되지 않았다.

침투수량의 감소는 강우에 의한 토양 피각 (被殼) 형성 (Helalia 등, 1988) 과 점토의 분산에 의해 공극이 채워짐으로서 포화수리전도도의 감소 (Frenkel 등, 1978) 등에 의해서 일어나므로 토양의 입단을 발달시키는 토양 관리가 필요하다. 또한 침투수량의 증가는 유거수에 의한 토양침식을 감소시키기 때문에 (Eusebio 등, 2001; Miller, 1987; 정 등, 1989) 빗방울의 충격에 의한 입단의 안정도를 증가시킴으로서 토양표면 피각 (被殼) 형성을 감소시켜 침투수량을 증가시키는 토양과 작물재배 등의 관리 방법 (조 등, 1985; Castro와 Logan, 1991; Ben-hur, 1992; Eusebio 등, 2001)이 필요한 것으로 판단된다.

윤 등 (1996)에 의하면 작물재배로 인한 입단의 발달은 경사지에서 침투수량을 많이 하고 유거수량을 적게 하여 토양침식량을 줄일 수 있다고 하였다. 또한, andisol 토양에서 강우에너지가 높았을 때 토양표면이 채워짐으로서 유거수가 증가되므로 토양물리성을 개선시키고 토양피막 형성을 방지하기 위해서는 최소경운과 윤작체계가 이루어져야 한다고 하였다 (Poulenard 등, 2001).

6. 토양 침식량

토양침식량은 대부분 토양에서 시간이 경과됨에 따라 증가하다가 20분이 경과되면서 일정하게 유지되는 경향이었으며, 암갈색토양 보다 농암갈색과 흑색 화산회토양에서 증가하였다 (Fig. 7).

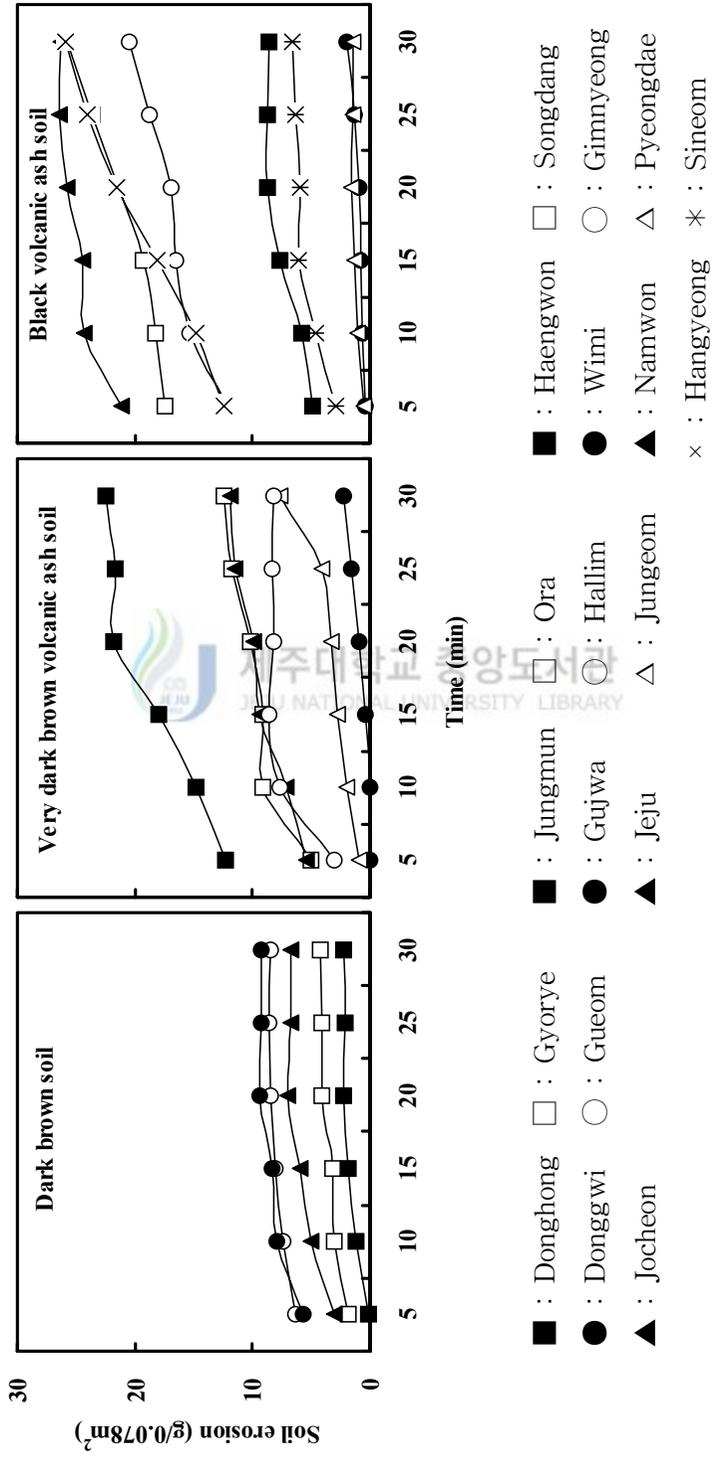


Fig. 7. Change of the soil erosion by elapsed time of rainfall.

토양침식은 빗방울의 충격에 의해 토양입단이 분리되면서 침식이 증가하다가 강우에너지가 일정하게 유지되면서 침식량이 일정하게 유지되었다 (Renard 등, 1997; Sharma 등, 1991; 오 등, 1989)는 보고와 일치 하였다. 또한, Moore와 Michael (1990)의 토양입단의 결합력이 빗방울의 충격에너지 보다 커서 초기에는 입단분리가 덜 일어나다가 빗방울에 의해서 에너지가 계속 가해지고 수분함량이 증가하면서 입단의 안정화가 감소하여 토양침식량은 일정하게 유지된다고 한 결과와 유사하였다.

암갈색과 흑색 화산회토양이 암갈색토양 보다 토양침식이 많은 것은 화산회 토양은 화산회 물질로 형성된 특별한 환경 때문에 토양의 물리·화학적 특성이 일반 토양과 달라 allophane과 관련된 특별한 수리 (水理) 특성을 가지고 있는데, allophane 토양의 특징은 가소성 (可塑性)없고 토양이 젖었을 때 입단의 안정도가 약하여 (Parfitt, 1990), 집약적인 경작에 의해 많은 침식이 발생되기 (Fontes 등, 2004) 때문이다. 또한, 화산회토양은 빗방울의 충격에 의해 토양 입단이 쉽게 분리되어 토양침식이 일어난다는 연구보고 (Parfitt, 1990; Kim과 Miller, 1995; Fontes 등, 2004; Seguel와 Horn, 2005)와 일치 하였다.

한편, 화산회토는 수식 (水蝕)에 대한 저항성이 강하며 (Warkentin, 1985), 입단이 안정한 물리적 특성 때문에 침식에 대한 저항력이 강하다 (Maeda와 Soma, 1985; Nanzyo 등, 1993)는 보고와 상반된 연구결과 들은 본 연구에서는 시간이 경과하면서 토양침식량이 일정하게 유지되는 것과 관련이 있는 것으로 생각된다.

암갈색 토양에서 토양침식량이 적은 것은 교래통과 동홍통은 미사 함량이 각각 52.0%과 55.0%로 적고 다른 토양에 비해 점토 함량은 22.1%와 35.6%로 높으며, 내수성 입단율도 0.5~1.0 mm, 1.0~2.0 mm 및 2.0 mm 이상의 입단율이 높기 때문이다. 이에 비하여 토양침식량이 많은 동귀통, 구엄통 및 조천통은 미사 함량이 70.6~79.2%로 많고 점토 함량도 12.2~14.3%로 낮으며, 내수성입단 비율도 0.1~0.25 mm, 0.25~0.5 mm 크기가 많아 토양침식량이 많

았으며, 포화수리전도도가 $0.08 \sim 0.20 \text{ cm h}^{-1}$ 로 낮아 토양침식량이 많았다고 생각된다. 이와 같이 같은 토양색에서도 토양통에 따라 토양침식량이 차이가 나타나는 것은 토양 물리적 특성의 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

농암갈색 화산회토양에서도 토양침식은 토양통 간에 차이가 크게 나타났는데 중문통이 가장 많았으며, 구좌통이 가장 낮았다. 중문통의 토양침식은 강우시작부터 다른 토양에 비해 침식량이 많았으며 20분까지 계속적으로 증가되다가 20분 후부터 일정하게 유지되었다. 이것은 내수성입단이 66.1%로 다른 토양 76.5%~88.9%보다 낮고 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 과 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 크기의 입단이 18.5%로 많기 때문이며 포화수리전도도가 0.15 cm h^{-1} 로 가장 낮기 때문으로 생각된다. 오라통과 제주통의 토양침식 10분 경과까지 급격히 증가되다가 그 후부터 완만하게 증가되는 경향으로 두 토양 간에 아주 유사하게 나타난 것은 토양입자분포(모래, 미사, 점토), 내수성 입단 및 포화수리전도도의 물리적 특성이 아주 비슷하였기 때문이다. 한림통의 토양침식은 10분 경과까지 급격히 증가되다 15분까지는 아주 완만하게 증가되었으나, 15분 경과부터는 일정하게 유지되는 경향이었는데, 토양입자 크기가 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 사이인 입자가 11.0%로 높고 점토함량도 20.5%로 높아 강우초기에 입자가 강우에 의해 입자가 파괴되면서 침식이 일어난 결과라고 판단된다. 중엄통은 시간이 경과됨에 따라 계속적으로 증가되는 경향이였다. 이것은 미사와 점토가 각각 72.4%와 24.7%로 높고 내수성 입단율도 88.5%로 높으나 형성된 입단이 강우에 의해 입단이 파괴되면서 계속적으로 토양침식이 증가한 것이라 생각된다. 구좌통은 강우 초기에는 침식이 거의 발생되지 않았으며, 30분 경과까지 아주 적은 양이지만 완만하게 증가되었는데, 포화수리전도도가 2.30 cm h^{-1} 으로 매우 높아 침투수량이 많았기 때문이라고 생각된다.

흑색 화산회 토양의 토양침식은 농암갈색 화산회토의 경우와 같이 토양통 간에 차이가 크게 나타났다. 남원통이 가장 침식량이 많았으며, 강우초기부터 침식량이 많이 발생되었다. 이것은 미사함량이 74.9%로 높고 내수성입단 비율이 93.9%로 높으나 작은 입단인 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 부터 2.0 mm 이상까지 분포하였

으며, 포화수리전도도가 0.11 cm h^{-1} 로 낮기 때문이다. 한경통은 강우 초기부터 30분까지 계속해서 침식이 증가되었는데 이것은 미사함량이 73.3%로 많고 포화수리전도도가 0.22 cm h^{-1} 로 낮아 유거수량이 많았기 때문이다. 김녕통과 송당통은 침식이 경향이 비슷하였는데 모래, 미사 및 점토함량이 서로 비슷하였기 때문이며, 김녕통에 비해 송당통이 침식량이 많은 것은 내수성 입단율은 김녕통 83.2%에 비해 93.9%로 높으나 1.0~2.0 mm 입단이 각각 12.9%와 17.7%, 0.5~1.0 mm 입단이 각각 1.0%와 4.3%, 0.25~0.5 mm 입단이 각각 0.8%와 2.3%로 차이가 있으며, 미사(0.02~0.002 mm) 함량이 송당통이 많고, 포화수리전도도는 1.13 cm h^{-1} 과 0.85 cm h^{-1} 로 두 토양 간에 차이가 있기 때문이다. 행원통과 신업통의 토양침식 경향은 유사하게 나타났으나 토양침식량의 차이는 두 토양 간에 토양입자 크기와 내수성 입단의 토양 물리적 특성차이 때문이다. 행원통이 신업통에 비해 토양침식량이 많은 것은 내수성입단이 낮았기 때문으로 생각된다. 평대통과 위미통에서 거의 토양침식이 일어나지 않은 것은 미사함량이 각각 76.7%와 78.6%로 높고 점토함량이 각각 16.6%와 15.6%로 낮아 토양침식이 일어나기 쉬운 조건이나, 포화수리전도도가 각각 1.53 cm h^{-1} 과 2.27 cm h^{-1} 로 아주 높아 물 침투가 잘 되어 유거수의 양이 적었기 때문으로 생각된다.

토양침식과 관계가 깊은 인자는 미사와 극세사 함량, 입단의 크기 및 투수성이므로 토양특성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이며, 우 (1976)에 의하면 토양침식량은 조립질 토양보다 세립질 토양에서 증가된다고 하였다. 토양침식은 토성이 미세하지만 미사의 함량이 많고 입단이 잘 발달되지 못한 토양은 빗방울에 대한 저항력은 있어도 일단 빗방울에 파괴된 입자나 불안정한 미세입단이 유거수에 의해 쉽게 침식이 일어날 수 있다 (McIntyre, 1958). 또한, 미사함량이 40~60%에서 침식이 가장 심하고 (Richter와 negendank, 1977), 점토함량에 따라 침식이 다르며 점토함량이 9~30% 사이에서 침식에 가장 민감하며 (Evans, 1980), 점토함량이 30~35%이상이면 토양응집력이 크고 내수성입단의 안정성이 커 유거수량은 증가하나 토양침식량은 감소된다 (Kirkby와 Morgan, 1980).

입단은 토양침식 지표로 이용되고 있으며 (Barthes와 Roose, 2002), 토양입단의 안정화는 강우시 경작지에서 토양침식을 결정하는 중요한 역할을 한다 (Truman 등, 1990). 입단은 유기물함량이 높고 (윤 등, 1996), 점토함량이 높을수록 높으며 (김 등, 2004), 토양입단 함량에 따라 토양침식에 차이가 있다. 조 등 (1985)에 의하면 인공강우하에서 토양입단 크기에 따른 토양침식량은 입단발달에 따라 초기 유거가 일어나는 시간은 늦어졌다고 하였다. 또한 EI-Swaify와 Dangler (1976)에 의하면 하와이 화산회토양에서 토양침식과 관련이 있는 토양침식성 인자는 비내수성 입단, 미사, 모래 및 염기포화도이며, 토양특성에 따라 토양침식성 인자들의 변이가 많다고 하였다.

결론적으로 토양침식과 관계가 깊은 토양 물리적 특성들은 입자크기, 내수성입단, 유거율 및 침투율이며, 토양침식을 일으키는 것은 강우가 가지고 있는 에너지이며 이 에너지가 토양입자를 분리시키지 못하거나 유거수에 의해 토양입자를 운송하지 못하면 토양침식은 발생되지 않는다. 따라서 토양 물리적 특성을 개선시켜 입단을 안정화시키고 유거수를 줄여 토양침식을 줄이는 방법이 필요하다.

7. 토양침식성 인자값 산정

1) 암갈색 토양의 토양침식성 인자

(1) 인공강우기와 USLE에 의한 토양침식성 인자값 (K) 비교

가. 인공강우기에 의한 토양침식성 인자값 (K_{obs})

토양침식을 예측하기 위하여 가장 많이 사용되는 식은 Wischmeier와 Smith (1965)에 의해서 제안된 USLE (Universal Soil loss Equation)이며 (식 1), 이 식에서 가장 중요한 인자는 강우인자 (R)과 토양침식성 인자 (K)이다.

인공강우기 시험에 의해서 실측된 토양침식량으로부터 아래의 식에 의하여 산정된 토양침식성 인자값 (K_{obs})을 Table 9에 나타내었다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \text{ 이므로 } K = \frac{A}{R \cdot LS \cdot C \cdot P} \text{ 이다.}$$

여기서 A : 토양유실량, R : 강우인자, K : 토양침식성인자, LS : 지형인자, C : 작물인자, P : 관리인자 이다.

Table 9. Soil erodibility factor values (K_{obs}) of dark brown soil calculated from rainfall simulator

Soil series	A ^a	R ^b	LS ^c	C ^d	P ^e	K_{obs} ^f
Gyorye	2.64	354	0.136	1	1	0.055
Gueom	6.08	354	0.136	1	1	0.126
Donggwi	6.38	354	0.136	1	1	0.133
Donghong	1.24	354	0.136	1	1	0.026
Jocheon	4.42	354	0.136	1	1	0.092

^aA : soil erosion amount from rainfall simulator(ton ha⁻¹)

^bR : rainfall factor

^cLS : slope length and steepness factors

^dC : crop factor

^eP : soil practice factor

^f $K_{obs} = A/(R \cdot LS \cdot C \cdot P)$

인공강우기에 의해 산정된 각 토양별 K_{obs} 값은 동홍통이 0.026로 가장 낮고 교래통이 0.055, 조천통이 0.092, 구엄통이 0.126 이었으며, 동귀통이 0.133 으로 가장 높게 조사되었다.

나. USLE에 의한 토양침식성 인자값 (K_{USLE})

USLE에 의한 토양침식성 인자값 (K_{USLE})은 토양 물리적 특성을 이용하

여 아래 식에 의하여 계산하여 Table 10에 나타내었다.

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

여기서 M = (미사 + 극세사) × (100 - 점토함량)

a = 유기물 (%)

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

c = 투수등급 : 포화수리전도도로 등급 구분 (USDA, 1983)

1 등급 : $\geq 36 \text{ cm h}^{-1}$

2 등급 : $3.6 \sim 36 \text{ cm h}^{-1}$

3 등급 : $0.36 \sim 3.6 \text{ cm h}^{-1}$

4 등급 : $0.036 \sim 0.36 \text{ cm h}^{-1}$

5 등급 : $0.0036 \sim 0.036 \text{ cm h}^{-1}$

6 등급 : $< 0.0036 \text{ cm h}^{-1}$

Table 10. Soil erodibility factor values (K_{USLE}) of dark brown soil calculated from USLE

Soil series	Very fine sand (0.1~0.05)	Silt (0.05~0.002)	Clay (<0.002)	Organic matter	Permeability ^a	Structure	K_{USLE} ^b
	mm			%			
Gyorye	3.4	52.0	22.1	2.33	3	1	0.343
Gueom	1.4	78.9	14.3	2.19	4	1	0.651
Donggwi	2.4	70.6	12.2	2.16	4	1	0.603
Donghong	3.0	55.0	35.6	5.13	3	1	0.198
Jocheon	1.2	79.2	12.6	2.08	4	1	0.673

^aPermeability : division by saturated hydraulic conductivity

$${}^bK_{USLE} = [2.1(\text{silt} + \text{very fine sand})(100 - \text{clay})]^{1.14}(10^{-4})(12 - \text{organic matter}) + 3.25(\text{structure} - 2) + 2.5(\text{permeability} - 3) / 100 \times 1.292.$$

이때 투수등급은 USDA (1983)에서 포화수리전도도를 기준으로 등급화된 값을 적용하였으며, 구조등급은 토양구조가 파괴되었기 때문에 1등급을 적용하였다. 또한, U.S 단위를 Metric 단위로 환산하기 위하여 1.292를 곱하였다.

USLE의 공식에 의하여 조사된 K_{USLE} 값은 동홍통이 0.198, 교래통이 0.343, 동귀통이 0.603, 구엄통이 0.651 및 조천통이 0.673 으로 나타났다. K_{USLE} 값은 극세사와 점토가 많을수록 작고, 미사 함량이 많고 투수등급이 높을수록 컸다.

(2) 인공강우기와 USLE에 의한 토양침식성 인자값 (K) 관계

USLE의 토양침식성 인자값 산정에 이용되는 토양 물리적 특성인 점토, 미사, 유기물함량 및 투수등급을 Table 9에 나타난 인공강우기 시험의 토양침식성 인자값 (K_{obs})과 Table 10에 나타난 USLE의 토양침식성 인자값 (K_{USLE})과의 상관분석 결과는 Table 11에 나타내었다.

Table 11. Correlation coefficients between soil erodibility factor values (K) and physical characteristics

Physical characteristics	Correlation coefficient	
	K_{obs}^a	K_{USLE}^b
Clay(%)	-0.901*	-0.954**
Silt(%)	0.800	0.935*
Organic matter content(%)	-0.761	-0.819
Permeability	0.914*	0.963**

^a K_{obs} : soil erodibility factor value observed by rainfall simulator test

^b K_{USLE} : soil erodibility factor value determined by USLE.

**Significant at $P < 0.01$, *Significant at $P < 0.05$

인공강우기에서 조사된 토양침식성 인자값 (K_{obs})과 점토와의 상관계수는 -0.901 로 부의 상관이 나타났으며, 투수등급과는 상관계수가 0.914 로 정의 상관이 나타났다. 또한 미사와는 상관계수가 0.800 으로 정의 상관이 나타났으나 유의성은 없었으며, 유기물 함량과는 상관계수가 -0.761 로 부의 상관이 나타났으나 유의성은 없었다. USLE의 토양침식성 인자값 (K_{USLE})과 점토와의 상관계수는 -0.997 로 부의 상관이 나타났으며, 투수등급과는 상관계수가 0.963 으로 정의 상관이 나타났다. 또한 미사와는 상관계수가 0.935 로 정의 상관이 나타났다. 유기물 함량과는 상관계수가 -0.819 로 부의 상관이 나타났으나 유의성은 없었다.

위의 결과에 나타난 바와 같이 인공강우기와 USLE의 토양침식성 인자값은 점토와 유기물 함량과는 부의상관이 나타났으며, 미사와 투수등급은 정의 상관이 나타났다. 이것은 USLE와 인공강우기 시험에 의해서 조사된 토양침식성 인자값은 동일한 토양 물리적 특성들에 의해 영향을 받는 것을 의미하는 것이다.

또한 인공강우기 시험에 의해 조사된 토양침식성 인자값 (K_{obs})과 USLE에 의해 산정된 토양침식성 인자값 (K_{USLE})을 상관분석 한 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 상관계수가 0.901 로 서로 직선적인 관계가 인정되었다. 그러나 본 연구에서 인공강우기에 의하여 산정된 K_{obs} 값과 USLE 방법에 의하여 산정된 K_{USLE} 값을 비교하면, USLE 방법으로 산출된 K_{USLE} 값이 $4.5\sim 7.6$ 배 높게 나타났다. 정 등 (1976b)에 의하면 포장에서 인공강우기를 이용하여 토양침식성 인자값을 산출하여 자연강우와 비교한 결과, 자연강우에서 토양침식성 인자값이 3.05 배 크다고 하였는데, 본 연구는 실내에서 인공강우기에 의한 시험으로 실제 포장조건에서 토양구조나 투수등급의 차이 때문인 것으로 추정된다.

USLE의 토양침식성 인자는 점토, 미사, 유기물 함량, 투수 및 구조등급으로 구성되는데 이 같은 토양 물리적 특성들은 기존에 농촌진흥청에서 조사되어 있는 토양조사 자료 (NIAST, 2000)를 이용하여 산정할 수 있는

장점이 있다.

따라서 제주도 암갈색 토양에서 토양침식량을 예측하기 위하여 토양침식성 인자를 산정하는 데에는 USLE의 토양침식성 인자 산정식을 사용하여도 가능할 것으로 판단된다.

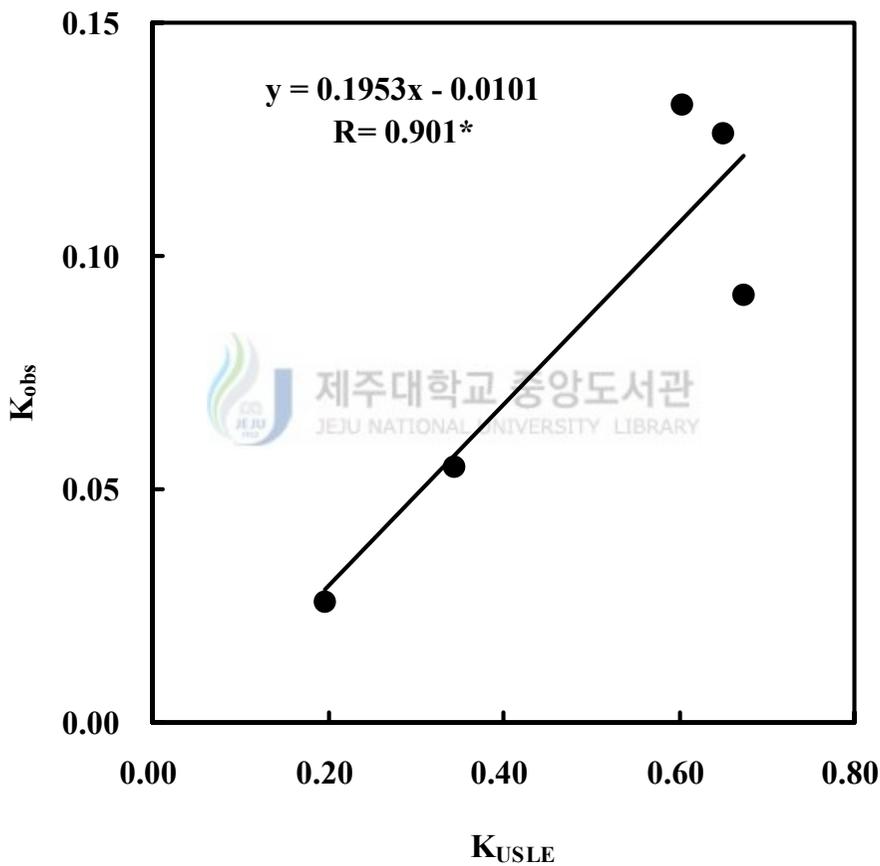


Fig. 8. Relationship between K_{obs} and K_{USLE} in the dark brown soil (K_{obs} : soil erodibility factor value observed by rainfall simulator test, K_{USLE} : soil erodibility factor value determined by USLE).

2) 농암갈색 화산회 토양의 토양침식성 인자

(1) 인공강우기와 USLE의 토양침식성 인자값 (K) 비교

가. 인공강우기에 의한 토양침식성 인자값 (K_{obs})

USLE에 사용되는 토양침식성 인자값 계산식이 제주도 농암갈색 화산회 토양에 적용이 가능한지를 검토하기 위하여 인공강우기 시험에서 얻은 토양침식량으로 부터 산정된 토양침식성 인자값 (K_{obs})을 Table 12에 나타내었다.

Table 12. Soil erodibility factor values (K_{obs}) of very dark brown volcanic ash soil calculated from rainfall simulator

Soil series	A ^a	R ^b	LS ^c	C ^d	P ^e	K_{obs} ^f
Gujwa	0.66	354	0.136	1	1	0.014
Ora	7.39	354	0.136	1	1	0.153
Jeju	7.07	354	0.136	1	1	0.147
Jungmun	14.23	354	0.136	1	1	0.296
Jungeom	2.66	354	0.136	1	1	0.055
Hallim	5.63	354	0.136	1	1	0.117

^aA : soil erosion amount from rainfall simulator(ton ha⁻¹)

^bR : rainfall factor

^cLS : slope length and steepness factors

^dC : crop factor

^eP : soil practice factor

$$^f K_{obs} = A / (R \cdot LS \cdot C \cdot P)$$

농암갈색 화산회토양에서 인공강우기 시험에서 실측된 토양침식량으로 부터 산출된 K_{obs} 값은 중문통이 0.296 으로 가장 높았으며, 오라통 0.153, 제주통 0.147, 한림통 0.117, 중엄통이 0.055 및 구좌통이 0.014 로 가장 낮게 나타났다.

K_{obs} 값이 0.014 로 가장 낮은 구좌통은 포화수리전도도가 2.30 cm h⁻¹

으로 아주 높아 유거수의 발생이 적어 토양침식도 적게 나타난 것으로 생각된다. 이와는 반대로 중문통에서 K_{obs} 값은 0.296 으로 가장 높았는데 포화수리전도도가 0.15 cm h^{-1} 로 낮아 강우의 투수성이 나쁘고, 0.1~0.25 mm와 0.25~0.5 mm 크기의 입단이 18.5% 로 다른 토양에 비해 많기 때문이다.

나. USLE에 의한 토양침식성 인자값 (K_{USLE})

USLE의 토양침식성 인자 계산식에 의한 토양침식성 인자값 (K_{USLE})은 Table 13에 나타내었다.

Table 13. Soil erodibility factor values (K_{USLE}) of very dark brown volcanic ash soil calculated from USLE

Soil series	Very fine sand (0.1~0.05)	Silt (0.05~0.002)	Clay (<0.002)	Organic matter	Permeability ^a	Structure	K_{USLE} ^b
	mm			%			
Gujwa	2.77	62.6	25.4	20.00	3	1	-0.370
Ora	1.9	73.1	18.0	4.43	3	1	0.406
Jeju	2.0	73.6	16.5	6.13	3	1	0.320
Jungmun	4.5	68.8	20.4	7.25	4	1	0.273
Jungeom	1.4	72.4	24.7	5.99	3	1	0.280
Hallim	3.2	50.3	20.5	9.08	3	1	0.086

^aPermeability : division by saturated hydraulic conductivity

$${}^b K_{USLE} = [2.1(\text{silt} + \text{very fine sand})(100 - \text{clay})]^{1.14} (10^{-4})(12 - \text{organic matter}) + 3.25(\text{structure} - 2) + 2.5(\text{permeability} - 3) / 100 \times 1.292.$$

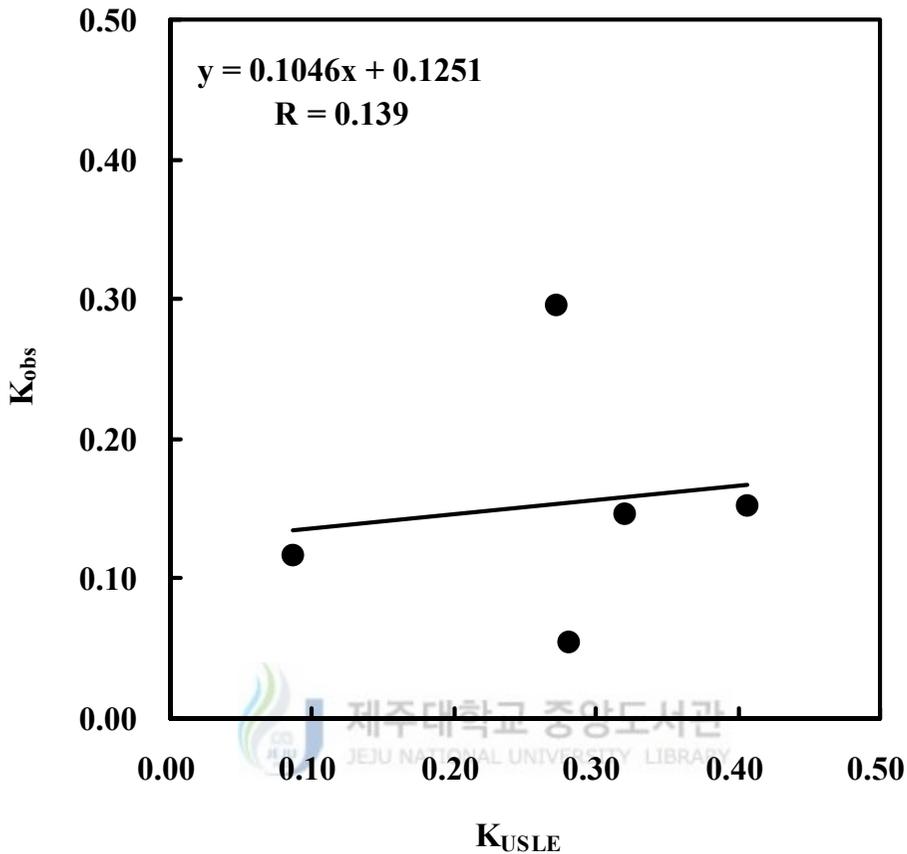


Fig. 9. Relationship between K_{obs} and K_{USLE} in the very dark brown volcanic ash soil (K_{obs} : soil erodibility factor value observed by rainfall simulator test, K_{USLE} : soil erodibility factor value determined by USLE).

농암갈색 화산회토양의 물리적 특성을 이용하여 USLE 식에 의하여 산출된 토양별 토양침식성 인자값 (K_{USLE})은 구좌통이 -0.370 으로 음의 값을 나타내었다. 이는 구좌통의 유기물 함량이 12% 이상인 경우로서 USLE 식으로 토양침식성 인자를 산출하는데 일부 문제가 있을 수 있는 것으로 판단된다.

토양침식성 인자값 (K_{USLE})이 음의 값인 구좌통을 제외하고 유기물이 12% 이하인 농암갈색 화산회토양에서 USLE식에 의해서 계산된 토양침식성 인자값 (K_{USLE})과 인공강우기에 의한 토양침식성 인자값 (K_{obs})을 상관분석 한 결과는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 상관계수가 0.139로 낮았다.

이와 같이 상관성이 낮게 나타난 것은 USLE 식의 토양침식성 인자값 (K_{USLE}) 산출시 토성과 유기물에 의해서 계산하도록 되어 있으나, 농암갈색 화산회토양에서 토양침식은 토성보다는 내수성 입단에 의해서 더 많은 영향을 받기 때문인 (Table 6과 7) 것으로 추측된다.

결론적으로 제주도 농암갈색 화산회토양에서 토양침식량을 예측하기 위해서 USLE의 토양침식성 인자값 (K_{USLE}) 산정식을 적용하는 것은 적합하지 못하다고 판단된다.

(2) 농암갈색 화산회토양에서 토양침식성 인자값 산정식

토양침식성 인자값 (K)에 영향을 미치는 인자를 구명하기 위하여 인공강우기 시험에 의해서 조사된 토양침식성 인자값 (K_{obs})과 내수성입단, 유거울 및 침투율을 상관분석 한 결과는 Table 14와 같다.

토양침식성 인자값 (K_{obs})과 각 인자들과의 상관분석 결과, 0.1~0.25 mm 내수성입단, 0.25~0.5 mm 내수성 입단 및 유거울은 유의적인 정의 상관이 나타났으며, 각 인자들의 상관계수는 각각 0.954, 0.848 및 0.905이었다. 반면에 (1.0~2.0 mm)+(>2.0 mm) 내수성 입단, 2.0 mm 이상의 내수성 입단 및 침투율은 유의적인 부의 상관이 나타났으며, 각 인자들의 상관계수는 각각 0.893, 0.812 및 0.888이었다. 따라서 토양침식성 인자값 (K_{obs})은 0.1~0.25 mm 내수성 입단, 0.25~0.5 mm 내수성 입단 및 유거울이 증가할수록 커지며, (1.0~2.0 mm)+(>2.0 mm) 내수성 입단, 2.0 mm 이상의 내수성 입단 및 침투율이 증가할수록 작아지는 경향을 나타내고 있다.

Table 14. Correlation coefficients between soil erodibility values (K) calculated from rainfall simulator and physical characteristics

Physical characteristics	Correlation coefficient	Regression equation
0.1~0.25 mm % WSA ^a	0.954*	Y=0.0317X+0.0282
0.25~0.5 mm % WSA	0.849*	Y=0.0194X+0.0214
(1.0~2.0 mm)+(>2.0 mm) % WSA	0.893*	Y=-0.0052X+0.4639
>2.0 mm % WSA	0.812*	Y=-0.0037X+0.2948
Runoff rate(%)	0.905*	Y=0.0032X-0.037
Infiltration rate(%)	0.888*	Y=-0.003X+0.02228

^aWSA : water stable aggregate

*Significant at P<0.05.

토양침식성 인자값 (K_{obs})과 높은 상관성이 나타난 내수성입단, 유거율 및 침투율을 대상으로 전방선택법 (forward selection method)에 의해 회귀분석한 결과를 Table 15에 나타내었다.

Table 15. Multiple regression analysis for the soil erodibility factor value calculation in very dark brown volcanic ash soil

Model	Variable ^a	R ²	Adjusted R ²	Durbin-Watson	Mean Square	F	Pr > F
1	X ₁	0.9103	0.8878	2.10	0.04335	40.6	0.0031
2	X ₁ · X ₂	0.9628	0.9380	2.18	0.02293	38.8	0.0072
3	X ₁ · X ₂ · X ₃	0.9995	0.9987	2.54	0.01587	1330.6	0.0008
4	X ₁ · X ₂ · X ₃ · X ₄	1.0000	0.9999	1.79	0.01191	23704.5	0.0049

^aX₁ : water stable aggregate % 0.1~0.25 mm

X₂ : runoff rate(%)

X₃ : water stable aggregate % >2.0 mm

X₄ : infiltration rate(%).

Table 15에는 4 개의 회귀모형을 보여주고 있으며, 첫 번째 모형에서는 0.1~0.25 mm 의 내수성 입단이 입력되었으며, 두 번째 모형에서는 0.1~0.25 mm 의 내수성 입단과 유거율이 입력되었다. 세 번째 모형에서는 0.1~0.25 mm 의 내수성 입단, 유거율 및 2.0 mm 이상의 내수성 입단이 입력되었으며, 네 번째 모형에서는 0.1~0.25 mm의 내수성 입단, 유거율, 2.0 mm 이상 내수성 입단 및 침투율이 입력되었다.

모형의 적합도 판정을 위한 분산분석 결과, 결정계수 (R^2)와 조정된 결정계수 (Adj.- R^2)는 독립변수가 추가됨에 따라 1.0과 0.9999까지 증가되었으며, 자기상관이 있는지를 설명해주는 Durbin-Watson 통계량 값은 1.79로 기준값인 2에 가까운 값을 나타내 자기상관이 존재하지 않은 것으로 판단된다. 독립변수가 1 개인 모형 1의 P 값은 0.01보다 작아 X_1 (0.1~0.25 mm 내수성 입단)이 토양침식성 인자값을 설명하는데 유의한 것으로 나타났다. 변수가 하나씩 추가되어 만들어지는 네 가지 모형의 P 값은 모두 0.01 보다 작아 유의성이 있으므로 네 가지 모형은 종속변수인 토양침식성 인자값 추정을 위한 회귀식을 만드는데 적합한 것으로 판단되었다. 그러나 네 번째 모형의 조정된 결정계수가 0.9999로 제일 높아 보다 정확한 토양침식성 인자값을 산정하기 위해서는 네 번째 모형을 선택하는 것이 보다 유리한 것으로 판단된다.

따라서 종속변수인 토양침식성 인자값과 독립변수인 0.1~0.25 mm 내수성 입단, 2.0 mm 이상 내수성 입단, 유거율 및 침투율과의 회귀분석 결과를 Table 16에 나타내었다.

Table 16. Parameters of soil physical characteristics variables, calculated from regression analysis

Variable ^a	Parameter calculated	Std. Error	F Value	Pr > F
Intercept	-0.30021	0.02144000	196.1	0.0454
X ₁	0.02924	0.00030361	9274.8	0.0066
X ₂	0.00370	0.00027574	179.9	0.0474
X ₃	0.00193	0.00003578	2915.6	0.0118
X ₄	0.00173	0.00025339	46.5	0.0927

Adjusted R² = 0.999

^aX₁ : water stable aggregate % 0.1~0.25 mm, X₂ : runoff rate(%)
X₃ : water stable aggregate % >2.0 mm, X₄ : infiltration rate(%)

위의 Table 16으로부터 아래의 다중 회귀식이 산출되었다.

$$K = -0.30021 + 0.02924X_1 + 0.0037X_2 + 0.00193X_3 + 0.00173X_4$$

위 식에서 K : 토양침식성 인자값, X₁ : 0.1~0.25 mm 내수성 입단 %, X₂ : 유거울 (%), X₃ : >2.0 mm 내수성 입단 %, X₄ : 침투율 (%)이다.

따라서 위의 식을 사용하면 제주도 농암갈색 화산회토양에서 USLE의 토양침식량 예측식에 사용되는 토양침식성 인자값을 산정할 수 있다고 판단된다.

3) 흑색 화산회 토양의 토양침식성 인자

(1) 인공강우기와 USLE의 토양침식성 인자값 (K) 비교

가. 인공강우기에 의한 토양침식성 인자값 (K_{obs})

USLE에 사용되는 토양침식성 인자값 계산식이 제주도 흑색 화산회토양에

적용이 가능한지를 검토하기 위하여 인공강우기로 시험에서 얻은 토양침식량으로 부터 산정된 토양침식성 인자값 (K_{obs})을 Table 17에 나타내었다.

Table 17. Soil erodibility factor values (K_{obs}) of black volcanic ash soil calculated from rainfall simulator

Soil series	A ^a	R ^b	LS ^c	C ^d	P ^e	K_{obs} ^f
Gimnyeong	12.83	354	0.136	1	1	0.266
Namwon	19.03	354	0.136	1	1	0.395
Songdang	16.11	354	0.136	1	1	0.335
Sineom	4.18	354	0.136	1	1	0.087
Wimi	0.75	354	0.136	1	1	0.016
Pyeongdae	0.95	354	0.136	1	1	0.020
Hangyeong	14.98	354	0.136	1	1	0.311
Haengwon	5.70	354	0.136	1	1	0.118

^aA : soil erosion amount from rainfall simulator(ton ha⁻¹)

^bR : rainfall factor

^cLS : slope length and steepness factors

^dC : crop factor

^eP : soil practice factor

^f $K_{obs} = A / (R \cdot LS \cdot C \cdot P)$

흑색 화산회토양에서 인공강우기 시험에서 조사된 토양침식량으로 부터 산정된 토양침식성 인자값 (K_{obs})은 남원통이 0.395 로 가장 컸으며, 송당통이 0.335, 한경통이 0.311로 높았으며, 김녕통이 0.266, 행원통이 0.118, 신업통이 0.087, 평대통이 0.020, 위미통이 0.016 순으로 작았다.

토양침식성 인자값 (K_{obs})이 낮은 신업통, 평대통 및 위미통은 포화수리 전도도가 1.17~2.27 cm h⁻¹로 높아 침투수량이 많아 유거수량의 적어 토양침식이 적게 나타난 것으로 생각된다. 토양침식성 인자값 (K_{obs})이 높은

남원통, 송당통 및 한경통은 포화수리전도도가 0.11~0.85 cm h⁻¹로 낮아 투수성이 불량하여 유거수가 많고, 세사(0.02~0.2 mm)의 함량이 23.1~28.5%로 많기 때문인 것으로 판단된다.

나. USLE에 의한 토양침식성 인자값 (K_{USLE})

USLE에 사용되는 토양침식성 인자값 계산식이 제주도 흑색 화산회토양에 적용이 가능한지를 검토하기 위하여 USLE의 토양침식성 인자 계산식에 의한 토양침식성 인자값 (K_{USLE})은 Table 18에 나타내었다.

Table 18. Soil erodibility factor values (K_{USLE}) of black volcanic ash soil calculated from USLE

Soil series	Very fine sand (0.1~0.05) mm	Silt (0.05~0.002) mm	Clay (<0.002) mm	Organic matter %	Permeability ^a	Structure	K _{USLE} ^b
Gimnyeong	3.0	61.2	23.4	22.1	3	1	-0.466
Namwon	2.2	74.9	19.6	15.2	4	1	-0.163
Songdang	3.3	64.7	20.1	19.3	3	1	-0.381
Sineom	1.7	76.6	20.0	14.7	3	1	-0.179
Wimi	2.6	78.6	15.6	18.0	3	1	-0.407
Pyeongdae	3.2	76.7	16.6	13.5	3	1	-0.116
Hangyeong	2.2	73.3	20.6	18.2	4	1	-0.321
Haengwon	3.2	62.2	14.3	17.2	3	1	-0.287

^aPermeability : division by saturated hydraulic conductivity

$${}^bK_{USLE} = [2.1(\text{silt} + \text{very fine sand})(100 - \text{clay})]^{1.14}(10^{-4})(12 - \text{organic matter}) + 3.25(\text{structure} - 2) + 2.5(\text{permeability} - 3) / 100 \times 1.292.$$

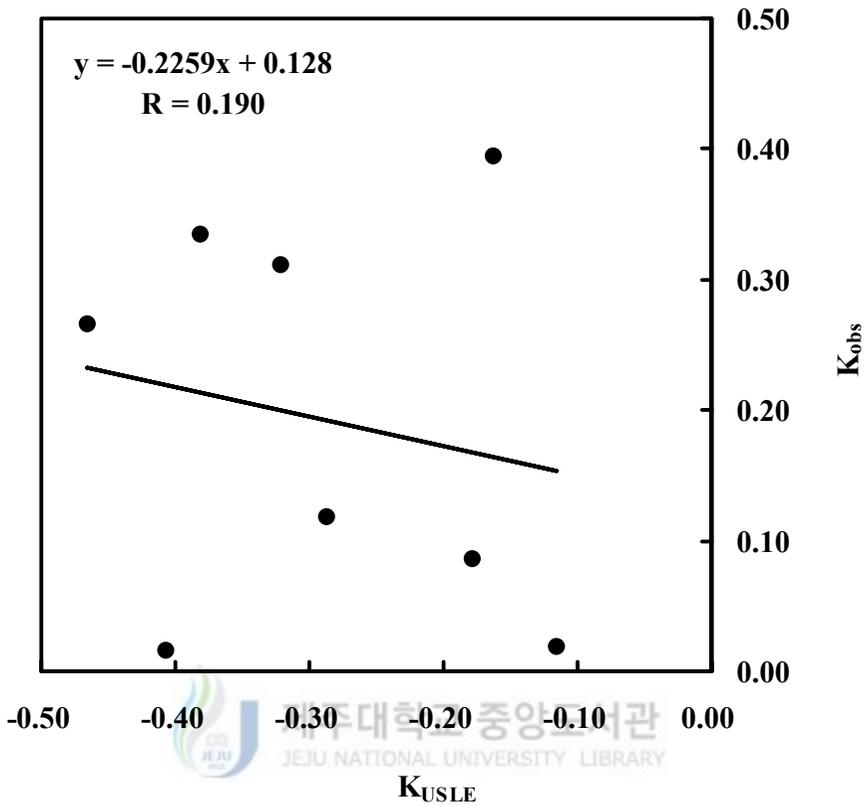


Fig. 10. Relationship between K_{obs} and K_{USLE} in the black volcanic ash soil (K_{obs} : soil erodibility factor value observed by rainfall simulator test, K_{USLE} : soil erodibility factor value determined by USLE).

흑색 화산회토양의 물리적 특성을 이용하여 USLE 식에 의하여 산출된 토양통별 토양침식성 인자값 (K_{USLE})은 모두 음의 값을 나타내었다.

이러한 결과는 USLE 식의 토양침식성 인자 산출시 토성과 유기물에 의해서 계산하도록 되어 있으나, 흑색 화산회토양의 유기물 함량은 12% 이상이며, 흑색 화산회토양에서 토양침식은 미사/점토, 점토+세사(0.02~0.2 mm)에 의해서 영향을 받기 때문인 (Table 6과 7) 것으로 판단된다. 또한

USLE 식과 인공강우기에 의해서 계산된 토양침식성 인자값을 상관분석한 결과, 상관계수가 0.190으로 낮게 나타났다 (Fig. 10).

USLE의 토양침식성 인자값 (K_{USLE})은 모든 토양에서 유효한 것은 아니며, 하와이 화산회토, 미국 중서부지역의 석회질토양과 같은 특별한 조건에 있는 토양들은 특정한 식이 유효하다고 하였는데 (Renard 등, 1997), 제주도 흑색 화산회토양에서 토양침식성 인자값 (K)을 산출하기 위해서는 새로운 방식이 필요하다.

(2) 흑색 화산회토양에서 토양침식성 인자값 산정식

토양침식성 인자값 (K)에 영향을 미치는 인자를 구명하기 위하여 인공강우기 시험에 의해서 조사된 토양침식성 인자값 (K_{obs})과 토양입경, 유거울, 침투율 및 포화수리전도도를 상관분석한 결과는 Table 19와 같다.

Table 19. Correlation coefficients between soil erodibility values(K) calculated from rainfall simulator and physical characteristics

Physical characteristics	Correlation coefficient	Regression equation
Silt %(0.002~0.02 mm)	0.710*	$Y = -0.0127X + 0.8457$
Fine silt %(0.02~0.2 mm)	0.697	$Y = 0.0323X - 0.5762$
Clay/(silt+very fine sand)	0.642	$Y = 1.7386X - 0.2543$
Runoff rate(%)	0.916**	$Y = 0.0065X - 0.1092$
Saturated hydraulic conductivity(cm h^{-1})	0.840**	$Y = -0.1817X + 0.3806$
Infiltration rate(%)	0.900**	$Y = -0.0064X + 0.436$

**Significant at $P < 0.01$, *Significant at $P < 0.05$.

토양침식성 인자값과 각 인자들과의 상관분석 결과, 유거울의 상관계수

는 0.916으로 유의적인 정의 상관성이 나타났으며, 세사(0.02~0.2 mm)와 점토/(미사+극세사)의 상관계수는 각각 0.697과 0.642로 정의 상관성이 나타났으나 유의적인 차이는 없었다. 미사(0.002~0.02 mm), 포화수리전도도 및 침투율과는 부의 상관성이 나타났으며, 각 인자들의 상관계수는 각각 0.710, 0.840 및 0.900이었다. 따라서 제주도 흑색 화산회토양에서 토양침식성 인자 값은 유거율, 침투율 및 포화수리전도도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났고, 토양입자 크기와 비율에 따라 상관계수가 0.642~0.710으로 서로 비슷한 수준으로 흑색 화산회토양에서 토양침식성 인자에는 여러 인자들이 복합적으로 작용하는 것으로 나타났다.

토양침식성 인자값 (K_{obs})과 상관성이 높은 토양입경, 유거율, 포화수리전도도 및 침투율을 대상으로 전방선택법에 의해 회귀분석 결과를 Table 20에 나타내었다.

Table 20. Multiple regression analysis for the soil erodibility factor value calculation in black volcanic ash soil

Model	Variable ^a	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

^aX₁ : runoff rate(%), X₂ : saturated hydraulic conductivity(cm h⁻¹)

X₃ : fine sand %(0.02~0.2 mm), X₄ : silt %(0.002~0.02 mm)

X₅ : infiltration rate(%), X₆ : clay/(silt+very fine sand).

Table 20에는 6 개의 회귀모형을 보여주고 있으며, 첫 번째 모형은 유거율이 입력되었으며, 두 번째 모형은 유거율과 포화수리전도도가 입력되었다. 세 번째 모형은 유거율, 포화수리전도도 및 세사(0.02~0.2 mm), 네 번째 모형은 유거율, 포화수리전도도, 세사(0.02~0.2 mm) 및 미사(0.002~0.02 mm), 다섯 번째 모형은 유거율, 포화수리전도도, 세사(0.02~0.2 mm), 미사(0.002~0.02 mm) 및 침투율, 그리고 여섯 번째 모형은 유거율, 포화수리전도도, 세사(0.02~0.2 mm), 미사(0.002~0.02 mm), 침투율 및 점토/(미사+극세사)가 입력되었다.

모형의 적합도 판정을 위한 분산분석 결과, 결정계수 (R^2)와 조정된 결정계수 (Adj.- R^2)는 독립변수가 추가됨에 따라 1.0과 0.9999까지 증가되었으며, 자기상관이 있는지를 설명해주는 Durbin-Watson 통계량 값은 2.68로 기준값인 2에 가까운 값을 나타내 자기상관이 존재하지 않은 것으로 판단된다. 독립변수가 1 개인 모형 1의 P 값은 0.01보다 작아 X_1 (유거율)이 토양침식성 인자값을 설명하는데 유의한 것으로 나타났다. 변수가 하나씩 추가되어 만들어지는 여섯 가지 모형의 P 값은 모두 0.01보다 작아 유의성이 나타나고 있으므로 여섯 가지 모형은 종속변수인 토양침식성 인자값 추정을 위한 회귀식을 만드는데 적합한 것으로 판단되었다.

그러나 여섯 번째 모형의 조정된 결정계수가 0.9999로 높아 보다 정확한 토양침식성 인자값을 산정하기 위해서는 여섯 번째 모형을 선택하는 것이 보다 유리한 것으로 판단된다.

따라서 종속변수인 토양침식성 인자값과 독립변수인 유거율, 포화수리전도도, 세사(0.02~0.2 mm), 미사(0.002~0.02 mm), 침투율 및 점토/(미사+극세사)와의 회귀분석 결과를 Table 21에 나타내었다.

Table 21. Parameters of soil physical characteristics variables, calculated from regression analysis

Variable ^a	Parameter Estimate	Std. Error	F Value	Pr > F
Intercept	-0.77342	0.02960	682.6	0.0244
X ₁	-0.00903	0.00125	36.1	0.0092
X ₂	-0.07594	0.00185	1691.6	0.0155
X ₃	0.03702	0.00135	752.4	0.0232
X ₄	0.01420	0.00103	189.0	0.0462
X ₅	-0.01187	0.00119	99.5	0.0636
X ₆	1.10588	0.13910	63.2	0.0797

Adjusted R² = 0.999

^aX₁ : runoff rate(%), X₂ : saturated hydraulic conductivity(cm h⁻¹)
X₃ : fine sand %(0.02~0.2 mm), X₄ : silt %(0.002~0.02 mm)
X₅ : infiltration rate(%), X₆ : clay/(silt+very fine sand).

위의 Table 21로부터 아래의 다중 회귀식이 산출되었다.

$$K = -0.77342 - 0.00903X_1 - 0.07594X_2 + 0.03702X_3 + 0.0142X_4 - 0.01187X_5 + 1.10588X_6$$

위 식에서 K : 토양침식성 인자값, X₁ : 유거율(%), X₂ : 포화수리전도도(cm h⁻¹), X₃ : 세사 %(0.02~0.2 mm), X₄ : 미사 %(0.002~0.02 mm), X₅ : 침투율(%), X₆ : 점토/(미사+극세사) 이다.

따라서 위의 식을 사용하면 제주도 흑색 화산회토양에서 USLE의 토양 침식량 예측식에 사용되는 토양침식성 인자값을 산정할 수 있다고 판단된다.

시험 II. 경사지 토양의 토양침식 경감 연구

1. 강우특성 및 강우인자

시험기간 동안 강우량은 Fig. 11에 나타난 바와 같이 감자생육 기간동안 9월 1일부터 12월 31일 까지 총강우량이 2003년에는 310.6 mm이었고, 2004년에는 458.6 mm이었다. 강우는 2003년과 2004년 9월에 집중되는 현상이 나타났다으며, 9월 중순 강우량은 평년보다 많았다.

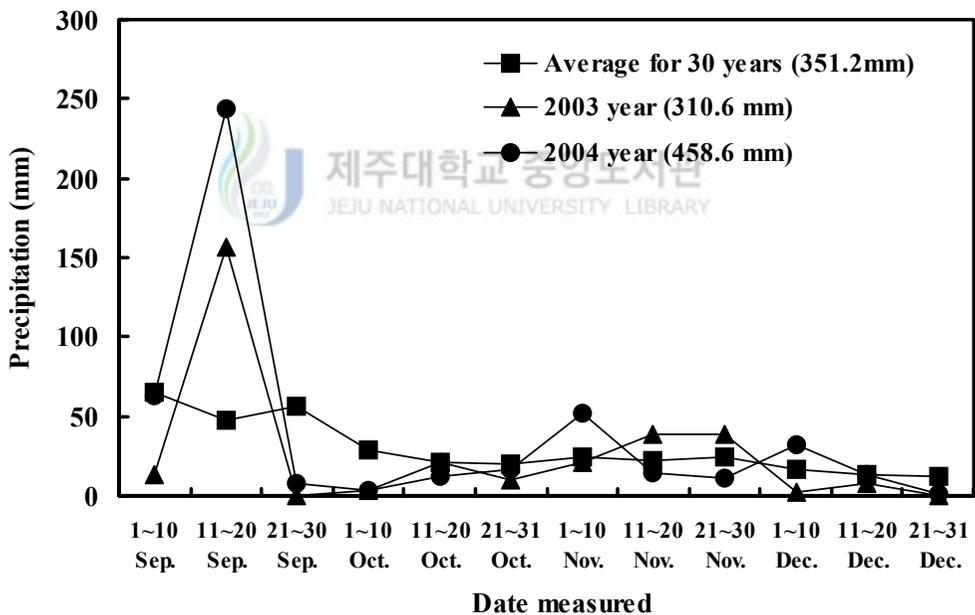


Fig. 11. Rainfall characteristics during experimental periods.

9월은 가을감자 정식시에 경운에 의한 토양이 교란된 상태이며, 감자생육 초기로 감자에 의한 토양피복이 충분히 되지 않기 때문에 토양침식에 대한 방어력이 약하여 (Fontes 등, 2004; 양 등, 2005) 토양유실이 발생하기 쉬운 조건에 노출되어 있다.

시험 기간 중 강우량과 강우인자는 토양침식이 발생했을 때만을 대상으로 Table 22에 나타내었다.

Table 22. Rainfall and rainfall factor during experimental periods

Item	Year	Sep. 11~12	Sep. 16	Sep. 18	Nov. 10	Total
Rainfall (mm)	2003	147.8				148.8
	2004	60.7	54.3	60.7	33.3	209.0
		Mean				178.9
Rainfall factor (EI ₃₀) ^a	2003	100.0				100.0
	2004	33.0	71.3	60.6	18.8	183.7
		Mean				141.9

^a EI₃₀ = Σ(KE · r/100) · I₃₀, I₃₀ : maximum 30 minute rainfall intensity

KE = 210.3 + 89 log I, I = rainfall intensity (cm h⁻¹), r = rainfall (cm)

강우인자를 USLE의 계산방법 (Wischmeier와 Smith, 1978)에 따라 계산한 결과, 2003년 9월의 강우인자는 강우량 147.8 mm일 때 100으로 가장 컸으며, 2004년 9월 12일 강우량이 60.7 mm일 때 강우인자는 33, 9월 16일 강우량이 54.3 mm일 때 강우인자는 71.3, 9월 18일 강우량이 60.7 mm일 때 강우인자는 60.6으로 강우량이 적었을 때 강우인자가 컸다. 위와 같이 비슷한 강우량 일지라도 강우인자가 차이가 나타나는 것은 강우의 성질에 따라 EI₃₀ 값이 다르기 때문이다 (정 등, 1983). EI₃₀ 값은 강우량이 많더라도 장시간 동안 내렸다면 작으며, 짧은 시간 동안 강한 강도의 비가 내리면 커지게 되기 때문이다.

토양침식은 강우 및 유거수와 같은 토양침식 발생인자들에 의하여 토양입자의 분리와 이동에 의하여 이루어지는데 (Ellison, 1947), 강우인자는 토양침식에 가장 큰 영향을 미치므로 (Farmer와 Haveren, 1971; 우, 1976; 황, 1976; 정 등, 1983), 강우특성을 파악함으로써 토양침식을 용이하게 설명할 수 있다.

2. 토양침식량

재배방법에 따른 토양침식량을 2개년 동안 (2003년~2004년) 조사한 결과는 Table 23에 나타내었다.

Table 23. Effects of the different treatments on the soil erosion (ton ha⁻¹)

Treatments	Year	Sep. 11~12	Sep. 16	Sep. 18	Nov. 10	Total	Index ^a
Up and down slope	2003	76.9				76.9	
	2004	2.42	8.62	5.57	1.42	18.0	
		Mean				47.5	100
Contour	2003	56.5	-	-	-	5.65	
	2004	0.32	0.32	0.35	0.33	1.23	
		Mean				28.9	61
Contour + vinyl mulching	2003	2.19	-	-	-	2.19	
	2004	0.33	0.34	0.34	0.31	1.21	
		Mean				1.70	3.6
Contour + grass band	2003	48.9	-	-	-	4.89	
	2004	0.26	0.37	0.28	0.28	1.19	
		Mean				25.0	53

^aIndex : rate of different treatments on up and down slope.

토양침식량은 2년 동안 강우 양상이 상이하여 년차 간에 차이가 크게 나타났으며, 토양침식은 9월에 대부분 발생되었다. 2003년에는 태풍의 영향으

로 등고선+비닐멀칭 재배구를 제외한 모든 처리에서 침식이 심하게 나타났다. 2003년도에 등고선 재배구와 등고선+초생대 재배구에서 토양침식량이 등고선+비닐멀칭 재배구보다 월등히 많은 것은 이랑사이에 고여 있던 물이 한꺼번에 유거가 일어나면서 이랑을 연쇄적으로 붕괴시켜 침식량이 많았다. 그러나 등고선+비닐멀칭 재배구는 이랑으로 물이 유거가 발생되었지만, 비닐멀칭이 이랑을 보호하는 역할을 함으로서 이랑붕괴가 일어나지 않았기 때문에 토양침식이 발생되지 않은 것으로 판단된다.

2003년도의 토양침식량이 2004년 보다 모든 시험구에서 많은 것은 각 강우사상별 강우인자 값이 컸기 때문으로 생각된다. 토양침식량은 강우량이 적어도 강우강도가 높으면 많은데 (엄, 1986), 본 연구에서 2003년도에 강우인자가 단 1회에 100으로 높아 토양이 물을 흡수·저장할 수 있는 한계를 넘게 되어 토양을 분산시키는 작용과 운반작용이 커져 토양침식이 많아졌다고 생각된다.

등고선 재배구의 토양침식량은 평균 28.9 ton ha^{-1} 으로 상하경재배구의 평균 47.5 ton ha^{-1} 에 비해 39%가 감소되었다. 이러한 결과는 신 등 (1999)이 상하경 재배보다 등고선 재배가 34.5~40.9%의 토양침식량이 감소되었다고 한 결과와 일치하였다. 이와 같이 상하경 재배구의 토양침식량이 등고선 재배구보다 많은 것은 등고선 재배구는 이랑에 의해 물의 흐름이 차단되었고, 상하경 재배구는 경사하부로 물이 내려오면서 토양입자 운반이 증가된 결과로 생각된다.

등고선+비닐멀칭 재배구의 토양침식량은 평균 1.70 ton ha^{-1} 으로 상하경 재배구 보다 96%나 감소되었으며, 등고선 재배구의 28.9 ton ha^{-1} 보다도 94%나 감소되었다. 오 등 (1992)의 비닐멀칭 재배에 의한 토양침식 방지효과는 평균 38%정도 이었다는 결과보다도 토양침식방지 효과가 크게 나타났다.

등고선+초생대 재배구의 토양침식량은 평균 25.0 ton ha^{-1} 으로 상하경 재배구의 평균 47.5 ton ha^{-1} 보다 47%가 감소되었는데, 이것은 초생대가 유거수 중의 토양입자의 흐름을 막아 초생대에 토양입자가 퇴적되었기 때문이라

고 생각된다.

결론적으로, 등고선 재배는 상하경 재배에 비해 토양침식을 감소시켰으며, 등고선 재배중에서도 비닐멀칭 재배구가 토양침식 방지에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

3. 유거수량 및 유거수율

재배방법별 유거수량과 유거수율은 Table 24와 25에 나타내었다.

유거수량 (Table 24)은 상하경 재배구에서 평균 815 ton ha⁻¹ 이었으며 등고선 재배구는 293 ton ha⁻¹, 등고선+초생대 재배구는 247 ton ha⁻¹, 등고선+비닐멀칭 재배구는 122 ton ha⁻¹ 순으로 적어져, 상하경 재배구에 비하여 각각 64%, 70%, 86%가 감소되었다.

Table 24. Effects of the different treatments on runoff amount

Treatments	Year	Runoff (ton ha ⁻¹)				Total	Index ^a
		Sep. 11~12	Sep. 16	Sep. 18	Nov. 10		
Up and down slope	2003	696	-	-	-	696	
	2004	181	360	318	75	934	
			Mean			815	100
Contour	2003	512	-	-	-	512	
	2004	15.2	25.2	22.4	10.3	73.1	
			Mean			293	36
Contour + vinyl mulching	2003	144	-	-	-	144	
	2004	15.2	29.2	25.5	10.4	80.3	
			Mean			112	14
Contour + grass band	2003	416	-	-	-	416	
	2004	14.0	27.8	24.9	10.6	77.3	
			Mean			247	30

^aIndex : rate of different treatments on up and down slope.

Table 25. Effects of different treatments on the runoff rate

Treatments	Year	Runoff rate ^a (%)				Mean	Index ^b
		Sep. 11~12	Sep. 16	Sep. 18	Nov. 10		
Up and down slope	2003	47.3	-	-	-	47.3	
	2004	29.8	66.3	52.4	22.5	42.8	
			Mean			45.0	100
Contour	2003	34.8	-	-	-	34.8	
	2004	2.5	4.6	3.7	3.1	3.5	
			Mean			19.1	43
Contour + vinyl mulching	2003	9.8	-	-	-	9.8	
	2004	2.5	5.4	4.2	3.1	3.8	
			Mean			6.8	15
Contour + grass band	2003	28.3	-	-	-	28.3	
	2004	2.3	5.1	4.1	3.2	3.7	
			Mean			16.0	36

^aRunoff rate : Runoff (ton ha⁻¹)/rainfall (ton ha⁻¹) × 100

Rainfall : 147.2 mm (2003. Sep. 11~12) → 1,472 ton ha⁻¹

60.7 mm (2004. Sep. 11~12) → 607 ton ha⁻¹

54.3 mm (Sep. 16) → 543 ton ha⁻¹

60.7 mm (Sep. 18) → 607 ton ha⁻¹

33.3 mm (Nov. 10) → 333 ton ha⁻¹

^bIndex : rate of different treatments on up and down slope.

유거울 (Table 25)은 강우량에 대한 유거수량의 비율로서 상하경 재배구의 45.0%에 비해 등고선 재배구는 19.1%, 등고선+초생대재 배구는 16.0%, 등고선+비닐멀칭 재배구는 6.8%순으로 감소되었다. 이와 같은 결과는 Sombatpanit 등 (1995)의 상하경 재배구가 등고선 재배구보다 유거수량이 많다는 보고와 같은 경향이였다.

한편 오 등 (1991)에 의하면 작물재배기간 동안 총 강우량이 평균 933.5 mm이고 강우인자가 480.3으로 높아 등고선이랑으로 물이 흐르는 경우는 비

닐피복구가 무피복 재배구보다 물 유거율이 12% 증가하였다고 하였다.

본 시험에서의 총 강우량은 평균 178.9 mm이었으며, 강우인자는 평균 141.9로 낮아 비닐피복 재배구에서 유거수가 등고선 이랑에 의해 차단되었기 때문에 유거수량과 유거율이 낮은 것으로 판단된다.

허 등 (2005)에 의하면 경사도 17%인 옥수수 재배포장에서 유거수에 의한 토양침식이 발생할 최소한의 조건은 유거수량이 2.3 ton ha^{-1} 이고 토양침식에 대한 토양의 임계저항은 0.51 Pa 이상이면 토양침식이 발생되며 이 이하에서는 유거수가 발생되어도 토양침식이 일어나지 않는다고 하였다. 또한, Fontes 등 (2004)에 의하면 화산회토양에서 유거수량은 목초지에서 총강우량의 1% 만이 발생되었으나, 토양이 경운되거나 작물에 의해 피복이 완전하지 않았을 때 강우량의 20% 까지 급격히 증가하였다고 하였다. 따라서 경사지에서 토양침식을 감소시키기 위해서는 유거수를 줄일 수 있는 등고선 재배가 필요하다고 생각된다.



4. 토양침식량과 강우특성 및 유거수와의 관계

토양침식에 미치는 강우량, 강우강도 및 유출수량의 영향을 조사하기 위하여 상하경재배구만을 대상으로 토양침식량과 강우특성과의 관계는 Fig. 12에 나타내었다.

시험기간 동안에 강우에 의한 토양침식은 5회였는데 태풍으로 인하여 일일 강우량이 147 mm이었던 2003년 9월 11일을 제외하고 토양침식과 강우특성과의 관계를 보면, 토양침식량과 강우량과는 상관계수가 0.458로 유의성이 없었으나, 강우인자와의 상관계수는 0.972로 정의 상관이 나타났으며, 유거수량과도 상관계수가 0.946으로 유의적인 정의 상관이 나타났다.

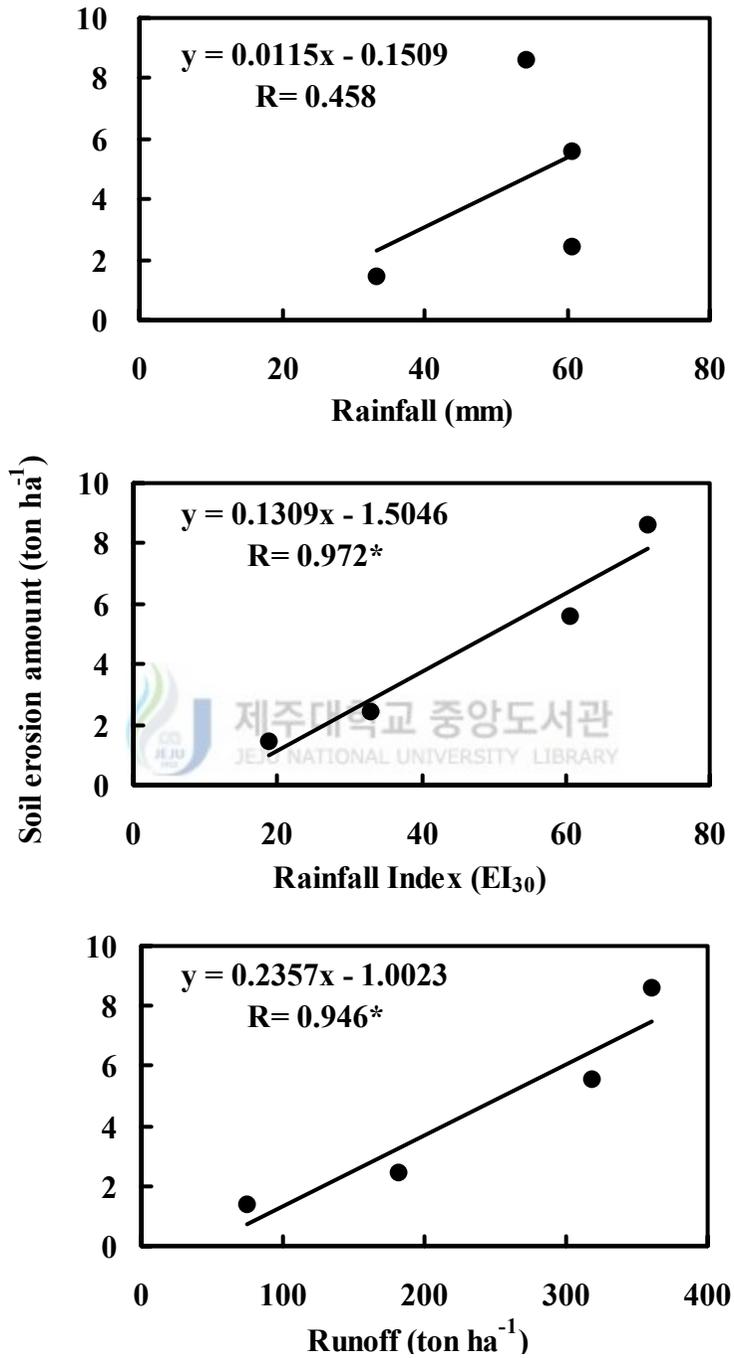


Fig. 12. Relationship of soil erosion with rainfall, rainfall index, and runoff in up and down slope culture.

이와 같은 결과는 허 등 (2005)의 토양침식과 유거수량과는 정의 직선관계가 나타났다는 보고와 일치하였으며, 강우인자 값과 토양침식량과의 관계는 강우강도가 증가함에 따라 토양침식량이 지수 함수적으로 증가한다 (황, 1976)는 결과와 같은 경향을 보였다.

토양침식량은 유거수량이 많아지면 증가되는데 (Farmer, 1973, Tarchitzky 등, 1984), 유거수량이 많아지면서 운반작용이 커져 토양침식이 많아지는 것으로 생각된다. 유거수는 토양침식에 중요한 인자이며 (Eusebio 등, 2001), 빗방울의 에너지에 의하여 토양입자의 분리와 유거수로 인한 토양입자의 이송에 의해 발생되므로 토양침식은 유거수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 생각된다.

이런 결과는 Ahmad 등 (2005)이 강우강도로 토양침식과 유거수량을 예측할 수 있다고 보고한 것과 같이, 본 연구에서도 토양침식량은 유거수와 강우강도 사이에 밀접한 관계가 나타났다. 유거수는 토양침식을 유발시키며, 양분유실까지 동반한다는 점을 고려하면 경사지에서 유거수량을 줄이는 것은 지력보전과도 직결될 것으로 생각된다.

5. 양분 유실량

1) 질소

재배방법별 침식토양과 유출수에 의한 질소의 유실량은 Table 26과 같다.

토양침식에 의한 질소의 유실은 대부분 질산태질소 형태로 유실이 된 것으로 조사되었다. 이것은 시용된 화학비료중의 질소가 질산태질소로 산화되었기 때문으로 대부분의 질소유실은 질산태질소 형태로 유실되었으며, 질산태질소에 비하여 암모니아태질소는 소량이었다.

Table 26. N losses by sediment and runoff from 2003 to 2004

Treatments	Year	Sediment					Runoff					Total	
		NO ₃ -N	NH ₄ -N	T-N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	T-N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	T-N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	T-N
----- kg ha ⁻¹ -----													
Up and down slope	2003	5.19	0.249	5.44	2.71	1.31	4.02	7.90	1.56	9.46			
	2004	0.464	0.051	0.515	1.49	1.10	2.59	1.95	1.15	3.10			
	Mean	2.83	0.150	2.98	2.10	1.21	3.31	4.93	1.36	6.28			
Contour	2003	3.96	0.139	4.10	1.90	0.85	2.75	5.86	0.989	6.85			
	2004	0.021	0.001	0.031	0.325	0.285	0.610	0.046	0.295	0.341			
	Mean	1.99	0.075	2.07	1.11	0.568	1.68	2.95	0.642	3.60			
Contour+ vinyl mulching	2003	0.218	0.010	0.228	0.609	0.154	0.763	0.641	0.164	0.805			
	2004	0.026	0.005	0.031	0.117	0.101	0.218	0.143	0.106	0.249			
	Mean	0.122	0.007	0.129	0.363	0.128	0.491	0.392	0.135	0.527			
Contour+ grass band	2003	3.28	0.119	3.40	1.89	0.671	2.56	3.73	0.79	4.52			
	2004	0.023	0.006	0.029	0.227	0.189	0.416	0.250	0.195	0.445			
	Mean	1.65	0.062	1.71	1.06	0.430	1.49	1.99	0.493	2.48			

이와 같은 결과는 정 등 (2000)의 질소의 유실은 질산태질소가 대부분이고 암모니아태 질소는 소량이었다고 한 결과와 같은 경향이였다.

재배방법에 따른 침식토양에 의한 질산태 질소의 평균 유실량은 상하경 재배구에서 2.83 kg ha^{-1} , 등고선 재배구는 1.99 kg ha^{-1} , 등고선+초생대 재배구는 1.65 kg ha^{-1} , 등고선+비닐멀칭 재배구는 0.122 kg ha^{-1} 으로 상하경 재배구보다 등고선 재배구에서 감소되었으며, 등고선+비닐멀칭 재배구가 가장 적은 것으로 나타났다. 암모니아태 질소도 질산태 질소와 같은 경향으로 상하경 재배구에서 평균 0.150 kg ha^{-1} 으로 가장 많고 등고선+비닐멀칭 재배구에서 0.007 kg ha^{-1} 으로 가장 낮게 나타났다.

유거수에 의한 총질소 유실은 상하경 재배구에서 평균 3.31 kg ha^{-1} 보다 등고선 재배구가 평균 1.68 kg ha^{-1} 으로 50%가 감소되었으며, 등고선+비닐멀칭 재배구는 0.491 kg ha^{-1} 으로 상하경 재배구보다 86%가 감소되었다. 또한, 등고선 재배구의 1.68 kg ha^{-1} 보다도 20%나 감소되었다. 이와 같은 결과는 박 등 (2005)의 상하경 재배에 비해 등고선재배 만으로도 유거수에 의한 질소유실량을 34~45% 줄일 수 있다고 한 결과와 비슷하였다.

이와 같은 질소의 유실은 토양비옥도를 저하시켜 작물의 생산성을 저하시키므로 (Poudel 등, 1999), 등고선 재배와 같은 질소의 유실을 감소시킬 수 있는 영농방법이 필요하다.

2) 인산

재배방법별 토양과 유거수에 의한 인산 유실량은 Table 27과 같다.

총인산 유실량은 토양침식이 많은 상하경재배구에서 평균 2.84 kg ha^{-1} 으로 가장 많았으며 등고선+비닐멀칭 재배구가 평균 0.106 kg ha^{-1} 으로 가장 적었다. 또한 인산의 유실은 대부분 토양에 의해서 유실되었으며, 유출수로 는 소량이 유실되었다.

Table 27. P₂O₅ losses by sediment and runoff from 2003 to 2004

Treatments	Year	Sediment	Runoff	Total
		----- (kg ha ⁻¹) -----		
Up and down slope	2003	4.07	0.145	4.22
	2004	1.39	0.059	1.45
	Mean	2.73	0.102	2.84
Contour	2003	2.71	0.010	2.81
	2004	0.084	0.010	0.093
	Mean	1.40	0.055	1.45
Contour + vinyl mulching	2003	0.094	0.029	0.123
	2004	0.076	0.013	0.089
	Mean	0.085	0.021	0.106
Contour + grass band	2003	2.76	0.077	2.84
	2004	0.094	0.011	0.105
	Mean	1.43	0.044	1.47

화산회토양은 주 점토광물이 비결정인 allophane 이므로 인산 고정력이 아주 커서 비료로 시용된 인산 대부분은 Al-P와 Fe-P 형태로 토양에 흡착되어 (유 등, 1975) 토양에 의해 유실이 나타난 것이라고 생각된다. 또한 용성인비 비료의 특성은 구용성 인산 20%를 함유한 비료로 물에는 녹지 않는 특성으로 인해 인산유실은 유거수보다 토양에 의해 일어나는데, 시비된 인산이 토양입자에 흡착되어 있거나 용해되지 않은 비료자체가 토양과 함께 유실된다.

인산과 질소는 토양침식이나 유거수에 의해 하천이나 호수 부영양화를 촉진시키므로 (Levin와 Schindler, 1989), 제주도와 같이 지하수에 의존하는 지역에서 강우시 토양과 유거수에 의해서 발생하는 비점오염 물질은 하천이나 지하수 오염을 일으킬 수 있다는데 문제가 크다. 따라서 농업에서 발생하는 비점오염원을 줄이기 위해서는 토양침식과 유거수를 줄이는 영농방법이 필요하다 (최 등, 2000).

3) 칼리

재배방법별 토양과 유거수에 의한 칼리 유실량은 Table 28에 나타낸 바와 같이 2003년도에는 등고선+비닐멀칭 재배구를 제외한 모든 처리구에서 토양에 의해서 많이 발생하였으며, 2004년도에는 유거수에 의하여 유실이 많이 발생되었다. 이것은 2003년도에는 토양침식이 단 1회에 76.93 ton ha⁻¹이 일어나 토양에 흡착되었던 칼리가 유실되었다고 생각된다.

Table 28. K₂O losses by sediment and runoff from 2003 to 2004

Treatments	Year	Sediment	Runoff	Total
		----- kg ha ⁻¹ -----		
Up and down slope	2003	24.66	5.11	29.76
	2004	3.59	4.08	7.66
	Mean	14.12	4.59	18.71
Contour	2003	16.26	3.13	19.39
	2004	0.281	0.543	0.824
	Mean	8.27	1.84	10.11
Contour+ vinyl mulching	2003	0.684	1.06	1.74
	2004	0.269	0.324	0.593
	Mean	0.477	0.692	1.17
Contour+ grass band	2003	17.60	2.71	20.31
	2004	0.254	0.437	0.691
	Mean	8.93	1.57	10.50

칼리비료를 시용하면 수용성, 치환성 및 비치환성칼리로 존재하는데, 토양침식이 발생될 때 토양에 흡착된 칼리가 토양과 함께 유실되었다고 생각된다. 물에 의해서도 토양용액에 이온으로 존재하는 칼리가 유실되는데, 류(1977)는 물에 의한 칼리의 용탈은 칼리가 액상에 있을 때 일어나며, 양이온 치환용량이 높은 토양에서는 용탈되는 양이 적고 양이온치환용량이 낮은 토양에서는 용탈이 쉬우며 산성토양에서는 토양에 흡착된 Al이 칼리에

의해서 치환되기 어려워 용탈은 더욱 쉬어진다고 하였다.

본 시험에서도 2003년 토양침식이 0.219 ton ha⁻¹ 으로 적었던 등고선+비닐멀칭 재배구와 2004년에는 모든 처리구에서 유출수에 의해서 칼리가 많이 유실되었는데, 시험포장의 pH가 5.0으로 산성이었고, 제주도 화산회토 양의 특성은 난분해성 유기물이 다량으로 집적되고 양이온치환용량은 높으나 칼리가 용탈되기 쉬워 (류와 송, 1984) 유거수에 의해서 칼리유실이 많이 일어났다고 생각된다.

6. 토양의 화학적 특성

시험 후 토양의 화학적 특성을 Table 29에 나타낸 바와 같이 pH는 5.0으로 재배방법 별로 차이가 없었다. EC는 등고선+비닐멀칭 재배구가 0.32 dS m⁻¹ 로 가장 높았는데 이것은 토양과 유거수에 의한 양분유실이 적게 일어났기 때문이다. 유기물 함량은 51~52 g kg⁻¹으로 차이가 없었으며, 유효인산 함량은 상하경 재배구 41.8 mg kg⁻¹으로 가장 낮았고 등고선+비닐멀칭 재배구와 등고선+초생대 재배구가 49.6 mg kg⁻¹과 49.4 mg kg⁻¹ 으로 가장 높았다.

Table 29. Chemical characteristics of the soil at the end of experiment

Treatments	pH (1:5)	E.C. (dS m ⁻¹)	O.M. (g kg ⁻¹)	Ava. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex. cation(cmol _c kg ⁻¹)		
					K	Ca	Mg
Up and down slope	5.0	0.22	51	41.8	0.61	0.52	0.22
Contour	5.0	0.26	52	45.4	0.73	0.53	0.23
Contou + vinyl mulching	5.0	0.32	51	49.6	0.80	0.53	0.30
Contour+grass band	5.0	0.27	51	49.4	0.74	0.54	0.26

치환성 칼리와 마그네슘 함량은 상하경 재배구에 비해 등고선 재배구에서 많아지는 경향으로 토양침식과 유거수량이 적어 양분유실도 적게 일어난 것으로 생각된다. 상하경 재배구가 등고선 재배구나 등고선+비닐멀칭 재배구보다 수확기 토양 인산과 칼리함량이 적은 것은 제주도화산회 토양과 같이 인산 고정능력이 강한 토양조건과 감자가 칼리를 많이 필요로 하는 작물이라는 점에서 작물생산에 제한요소로 작용할 수 있다.

경사지에서 비닐피복 감자재배는 토양침식과 양분유실 방지를 위한 재배 방법으로 가장 타당한 방법인데 (최 등, 2000), 본 시험에서도 등고선+비닐멀칭 재배구가 토양침식과 유거수를 줄임으로서 토양비옥도 유지에 가장 효율적인 방법이라고 생각된다.

7. 감자 생육 및 수량

재배방법에 따른 감자의 생육은 Table 30과 같다.

초장은 등고선+비닐멀칭 재배구에서 평균 40.1 cm로 가장 컸으며, 그 외 처리는 평균 27.7~28.3 cm로 차이가 없었다. 줄기수와 출아율은 재배방법 별로 큰 차이가 없었다.

재배방법 별 평균 감자수량은 등고선+비닐멀칭 재배구에서 14.74 ton ha⁻¹으로 가장 많았으며, 그 다음 등고선 재배구가 9.16 ton ha⁻¹, 등고선+초생대 재배구가 8.47 ton ha⁻¹, 상하경 재배구가 7.32 ton ha⁻¹으로 가장 낮았다.

이와 같이 수량 차이는 토양침식과 유거수에 의한 양분유실과 관계 깊은 것으로 Poudel 등 (1999)은 경사지에 작물을 재배했을 때 상하경 재배보다 등고선 재배가 수량이 33% 증가되었다고 하였고, 경사지의 황폐화는 토양 침식이 발생되지 않더라도 유거수에 의한 양분유실로 인하여 경사상부에서 먼저 발생되므로 작물생산성에 큰 차이가 있다고 하였다.

Table 30. Growth and tuber yield of potato with the cultivation treatments

Treatments	Year	Height (cm)	Number of stem(ea/plant)	Sprout emergence (%)	Yield (ton ha ⁻¹)	Index ^a
Up and down slope	2003	28.0	3.8	94.5	6.51	
	2004	27.4	3.8	93.2	8.13	
	Mean	27.7	3.8	93.9	7.32	100
Contour	2003	29.4	3.8	94.0	8.95	
	2004	26.5	3.8	92.7	9.37	
	Mean	28.0	3.8	93.4	9.16	125
Contour+ vinyl mulching	2003	39.0	3.9	93.0	13.70	
	2004	41.1	3.9	93.0	15.78	
	Mean	40.1	3.9	93.0	14.74	201
Contour+ grass band	2003	28.0	3.9	94.0	8.28	
	2004	28.6	3.9	93.0	8.38	
	Mean	28.3	3.9	93.5	8.47	116

^aIndex : rate of different treatments on up and down slope.

감자의 3요소 시비량에 따른 시비반응은 칼리 > 인산 > 질소 순으로 칼리의 반응이 가장 높으며, 수량증가 효과는 질소 79%, 인산 18% 및 칼리 15%라고 하였다(이 등, 1989). 감자는 토양의 무기양분 부족에 대한 적응력이 약하기 때문에 시비효과가 큰 작물이며 (김 등, 1985), 인산과 칼리비료를 표준시비보다 20%와 40%를 증비하였을 때 2~3년차 수량증가율은 5~22%이었고, 생육도 양호하였다(이 등, 2002)고 하였다.

본 연구에서 등고선+비닐멀칭 재배구보다 모든 시험구에서 수량이 낮은 것은 토양침식과 유거수에 의한 양분의 손실로 인하여 수량이 감소하였기 때문이라고 판단된다.

결과적으로 경사지에서 적절한 재배방법에 따라 토양침식 방지효과 뿐만 아니라 토양중의 비료성분의 유실을 줄일 수 있어 토양의 비옥도를 증진시킬 수 있다고 생각된다. 양분의 유실은 토양침식량과 유거수량에 따라 좌우

되므로 토양침식 방지는 지력보존과 직결되어 경사지에서 토양비옥도와 작물생산을 유지하려면 등고선+비닐멀칭 재배가 가장 효과적인 방법이라고 판단된다.



V. 적 요

시험 I. 인공강우기를 이용한 제주도 토양의 침식특성

이 연구의 목적은 인공강우기 조건에서 제주도 토양의 토양침식성 인자와 물리적 특성과의 관계를 조사하기 위하여 수행되었다. 토양침식에 대한 토양 입자 크기, 내수성 입단, 토양 유기물 함량, 용적밀도, 포화수리전도도, 유거수 및 침투수의 영향을 조사하기 위하여, 토양시료는 암갈색 토양 5개소, 농암갈색 화산회토양 6개소 및 흑색 화산회토양 8개소에서 채취하였으며, 토양침식과 토양 물리적 특성과의 관계를 조사하였다. 또한, 인공강우기와 USLE에 의해서 산정된 토양침식성 인자값을 비교한 결과, 농암갈색과 흑색 화산회토양의 토양침식성 인자값은 인공강우기 시험의 값이 USLE보다 적합하였다. 따라서 농암갈색과 흑색 화산회토양에서 USLE의 토양침식성 인자값 계산을 위한 2개의 식을 만들었다.

1. 토양의 물리적 특성

암갈색 토양에서 모래, 미사 및 점토의 평균함량은 13.6%, 67.1% 및 19.4%였으며, 농암갈색 화산회토양은 모래 12.3%, 미사 66.8%, 점토 20.9%이었다. 그리고 흑색 화산회토양은 모래 10.2%, 미사 71.0%, 점토 18.8%였다. 토양 유기물 함량과 포화수리전도도는 흑색 화산회토양에서 가장 높았고, 암갈색 토양에서 가장 낮았다. 용적밀도는 암갈색 토양에서 가장 높았으며, 농암갈색 화산회토양이 중간이었고, 흑색 화산회토양이 가장 낮았다. 내수성입단은 암갈색 토양이 평균 68.6% 였으며, 농암갈색과 흑색 화산회토양은 각각 81.8%와 81.4%이었다.

2. 토양침식과 유거수 및 침투수와의 관계

토양침식과 유거수와의 관계는 정의 상관이 나타났으며, 침투수와의 부의 상관이 나타났다.

3. 토양침식과 토양 물리적 특성과의 관계

1) 점토, 미사 및 모래

암갈색 토양에서 토양침식과 점토, 점토/미사, 점토+극세사, 점토/(미사+극세사) 및 점토+세사(0.02~0.2 mm)와는 부의 상관을 보였다. 그러나 미사/점토와는 정의 상관이 나타났다. 농암갈색 화산회토양에서 토양침식과 토양입자크기와의 관계는 유의성이 없었으나, 흑색 화산회토에서 토양침식은 미사/점토 와는 부의 상관이 나타났고, 점토+세사(0.02~0.2 mm)와는 정의 상관이 나타났다.

2) 내수성 입단

토양침식과 내수성 입단과 상관관계는 암갈색 토양과 농암갈색 화산회 토양에서만 나타났다. 암갈색 토양에서 토양침식은 내수성입단(0.25~0.5 mm, 0.1~0.25 mm+0.25~0.5 mm, 0.1~0.25 mm+0.25~0.5 mm+0.5~1.0 mm)과 정의상관을 보였으나, 0.5~1.0 mm+1.0~2.0 mm+>2.0 mm과 1.0~2.0 mm+>2.0 mm 크기의 내수성 입단과는 토양침식이 감소하는 경향이였으나 유의성은 없었다. 농암갈색 화산회 토양에서 토양침식은 내수성입단 0.1~0.25 mm, 0.25~0.5 mm 및 0.1~0.25 mm+0.25~0.5 mm과 정의 상관을 보였으나, 0.5~1.0 mm+1.0~2.0 mm+> 2.0 mm과 1.0~2.0 mm+> 2.0 mm 크기의 내수성 입단과는 부의상관이 나타났다. 그러나 흑색 화산회 토양은 내수성입단과 상관이 없었다.

3) 용적밀도, 토양 유기물 및 포화수리전도도

용적밀도는 토양침식에 영향을 주지 못하였으나, 암갈색 토양에서 용적 밀도와 토양침식과의 상관은 농암갈색과 흑색 화산회토양보다 높았다. 암

갈색 토양과 농암갈색 화산회토양에서 토양침식은 유기물 함량이 증가함에 따라 감소하였으나, 흑색화산회토에서 토양침식과 유기물함량과는 관련이 없었다. 포화수리전도도와 토양침식과는 모든 토양에서 부의 상관성이 나타났다.

4. 유거수량, 침투수량 및 토양침식량

유거수량은 암갈색 토양의 동홍통과 농암갈색 화산회 토양의 구좌통 이외에는 모든 토양에서 강우 10분까지 증가되다가 이후에는 일정하게 유지되는 경향이였다. 토양색 간에도 시간경과에 따른 유거수량은 차이가 없었다.

침투수량은 10분 까지 증가되다가 완만하게 감소되거나 일정하게 유지되는 경향이였으며, 토양색 간에 큰 차이가 없었다.

토양침식량은 모든 토양에서 20분 까지 증가되다가 이후에는 일정하게 유지되는 경향이였고, 토양침식량은 암갈색 토양보다 농암갈색이나 흑색 화산회토양에서 많았다.

5. 토양침식성 인자값 산정식

- 1) 암갈색토양에서 인공강우기에 의해 산출된 토양침식성 인자값은 USLE의 토양침식성 인자값과 유의적인 상관성이 나타났다. 따라서 암갈색 토양에서 토양침식량을 예측하기 위해서는 USLE의 토양침식성 인자들을 사용하여도 가능할 것으로 판단되었다.
- 2) 농암갈색과 흑색 화산회토에서 USLE의 토양침식성 인자와 토양입자 크기, 토양 유기물 함량과는 관련이 없었다. 그러나 농암갈색 화산회토양에서 토양침식성 인자는 내수성입단, 유거율 및 침투율과 관련이 있었으며, 흑색 화산회토양에서는 유거율, 세사(0.02~0.2 mm), 미사(0.002~0.02 mm), 점토/(미사+극세사), 포화수리전도도 및 침투율과 관련이 있었다.

따라서 농암갈색 화산회토양에서 내수성입단, 유거율 및 침투율을 사용하여 토양침식성 인자값 산정을 위한 회귀식을 만들었다.

$$K = -0.30021 + 0.02924X_1 + 0.0037X_2 + 0.00193X_3 + 0.00173X_4$$

위 식에서 K : 토양침식성 인자값, X_1 : 0.1~0.25 mm 내수성 입단(%), X_2 : 유거율(%), X_3 : >2.0 mm 내수성입단(%), X_4 : 침투율(%)이다.

또한, 흑색 화산회토양에서 유거율, 세사(0.02~0.2mm), 미사(0.002~0.02 mm), 점토/(미사+극세사), 포화수리전도도 및 침투율을 사용하여 토양침식성 인자값 산정을 위한 회귀식을 만들었다.

$$K = -0.77342 - 0.00903X_1 - 0.07594X_2 + 0.03702X_3 + 0.0142X_4 - 0.01187X_5 + 1.10588X_6$$

위 식에서 K : 토양침식성 인자값, X_1 : 유거율(%), X_2 : 포화수리전도도(cm h^{-1}), X_3 : 세사 %(0.02~0.2 mm), X_4 : 미사 %(0.002~0.02 mm), X_5 : 침투율(%), X_6 : 점토/(미사+극세사)이다.

시험 II. 경사지토양의 토양침식과 양분유실 경감 연구

본 시험은 경사지에서 토양침식, 유거수 및 양분유실을 경감시키기 위한 토양관리방법의 효과를 구명하기 위하여 2003년부터 2004년 까지 수행하였다. 시험구의 경사는 10.5%이고, 각 시험구의 크기는 10 m × 2.5 m 이었다. 시험구 처리는 ① 상하경 재배, ② 등고선 재배, ③ 등고선+비닐멀칭

재배, ④ 등고선+초생대 재배의 4처리였으며, 감자(*Solanum tuberosum* L. cv. Dejima)를 재배하여 토양유실량, 유출수량 및 양분유실에 미치는 영향을 조사하였다.

1. 강우특성 및 강우인자

시험기간 동안 총 강우량은 2003년에는 310.6 mm, 2004년 458.6 mm이었으며, 9월에 가장 많았다.

2. 토양침식량, 유거수량 및 양분유실량

토양침식량, 유거수량 및 양분 유실량은 등고선 재배구, 등고선+비닐멀칭 재배구, 등고선+초생대 재배구보다 상하경 재배구에서 가장 많았으나, 등고선 재배구와 등고선+초생대 재배구간에는 차이가 없었다. 또한, 유거수 및 강우인자는 토양침식량과 유의적인 정의상관이 나타났다.

3. 토양화학성 및 수량

시험 후 토양화학적 특성은 등고선+비닐멀칭 재배구에서 개선되었고, 수량은 상하경 재배구 7.32 ton ha⁻¹, 등고선 재배구 9.16 ton ha⁻¹, 등고선+비닐멀칭 재배구 14.7 ton ton ha⁻¹ 및 등고선+초생대 재배구 8.47 ton ha⁻¹이었다.

결론적으로, 등고선+비닐멀칭 재배구가 토양침식, 유거수 및 양분유실을 줄이고 수량을 증가시키는데 가장 효과적인 재배방법이었다.



VI. 참고문헌

- Agassi, M., I. Shainberg and J. Morin. 1981. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. Soil Sci. Soc. Am. J., 45 : 848~851.
- Agassi, M., J. Morin and I. Shainberg. 1985. Effect of raindrop impact energy and water salinity on infiltration rates of sodic soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 49 : 186~190.
- Ahmad, H. A., H. T. Borresen and L. E. Haugen. 2005. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean. Soil and Tillage Research.,
- Alberts, E. E., W. C. Moldenhauer and G. R. Foster. 1980. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill flow. Soil Sci. Soc. Am. J., 44 : 590-595.
- 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.
- Baver, L. D. 1933. Some soil factors affecting erosion. Agric. Eng., 14(2) : 51~52.
- Ben-hur, M., R. Stern, A. J. van merwe and I. Shainberg. 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 J. S. Michael. 1992. Crust runoff and erosion to soil water content and successive rainfalls. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56 : 1893~1903.
- Browning, G. M., C. L. Parish and J. A. Glass. 1947. A method for determining the use and limitations of rotation and conservation practices in control of soil erosion in Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23 : 249~264.
- Castro, C. F., and T. J. Logan. 1991. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55 : 1407~1413.
- 최중대, 박지성, 김정제, 양재의, 정영상, 윤세영. 2000. 산지에서의 환경보전형 농업을 위한 토양의 질 평가 : 유사자료의 분석과 최적영농방법의 제안. *한국환경농학회지*, 19(3) : 201~205.
- Cook, H. L. 1936. The nature and controlling variables of the water erosion process. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1 : 60~64.
- EI-Swaify, S. A. and E. W. Dangler. 1976. Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters. In "Soil erosion: Prediction and control, Soil conserv. Soc. Am., Ankeny, Iowa. pp.105~114.
- Ellison, W. D. 1947. Soil erosion studies-Part I. *Agric. Eng.*, 28(4) : 145~146.
- Eusebio, V. E. Jr., L. D. Norton, J. L. Oropeza and B. Figueroa. 2001. Soil erosion of indurated volcanic soil from the semiarid area of the valley of Mexico, pp.789~795. In "D. E. Stott, R. H. Mohtar and G. C.

- Steinhardt(eds). 2001. Sustaining the global farm. Selected papers from the 10th international soil conservation organization meeting held May 24~29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National soil erosion research laboratory.
- Evans, R. 1980. "Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls : an empirical viewpoint", In Kirkby, M. J. and R. P. C. Morgan, (eds), Soil erosion, Wiley, 19~28.
- Farmer, E. E. and B. P. Van Haveren. 1971. Soil erosion by overland flow and raindrop splash on three mountain soils. USDA Forest serv. Res. Pap. INT-100, p.14.
- Farmer, E. E. 1973. Relative detachability of soil particles by simulated rainfall. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 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.
- Frenkel, H., J. O. Goertzen and J. D. Rhoades. 1978. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. Soil Soc. Am. J., 42 : 32~39.
- Gascho, G. J., R. D. Wauchope, J. G. Davis, C. C. Truman, C. C. Dowler, J. E. Hook, H. R. Sumner and A. W. Johnson. 1998. Nitrate-nitrogen, soluble, and bioavailable phosphorus runoff from simulated rainfall after fertilizer application. Soil Sci. Soc. Am. J., 62 : 1711-1718.
- Geissert, D. 2003. Erodibility of andisols. Is the K factor estimation

- suitable for volcanic ash soils? In "Soil erosion and geomorphic features of land degradation"(ed. Paul F. Hudson). International association for geomorphologists and mexican society of geomorphology mexico city. Oct. 27th-Nov. 2nd 2003.
- 황 증. 1976. 강우가 토양침식에 미치는 영향. 경상대학교 논문집, 15 : 69~73.
- Helalia, A. M., J. Letey, and R. C. Graham. 1988. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. Soil Sci. Soc. Am. J., 52 : 251~255.
- 허봉구, 조인상, 민경범, 엄기태. 1984. 우리나라 토양의 대표적인 물리화학적 특성 : 정밀토양조사결과를 중심으로. 한국토양비료학회지, 17(4) : 330~336.
- 허승오, 정강호, 하상건, 곽한강, 김정규. 2005. 옥수수재배 경사지 밭에서 물 유출에 따른 토양유실 예측공식. 한국토양비료학회지, 38(2) : 66~71.
- 조인상, 조성진 and M. De Boodt. 1985. 토양입단의 안정성과 친수성이 토양 유실에 미치는 영향. 한국토양비료학회지, 18(4) : 373~377.
- 정종배, 김민경, 김복진. 2000. 복숭아 과수원에서 측정된 강우에 의한 질소와 인의 지표면 유실. 한국농화학회지, 43(2) : 124~129.
- 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. Kor. J. Soil Sci. Fert., 37(4) : 199~206.
- 정강호, 손연규, 홍석영, 허승호, 하상건. 2005. 수치지정밀 토양도를 이용한 전국 토양 유실량의 평가 및 침식 위험지역의 분석. 한국토양비료학회지, 38(2) : 59~65.
- 정필균, 고문환, 임정남, 엄기태, 최대웅. 1983. 토양유실량 예측을 위한 강우

- 인자의 분석, 한국토양비료학회지, 16(2) : 112-118
- 정필균, 고문환, 엄기태. 1985a. 토양유실량 예측을 위한 작부인자 검토 .한국 토양비료학회지, 18(1) : 7-13.
- 정필균, 이광식, 고문환, 엄기태, 하호성, 1985b. Mulching 방법별 토양온도와 토양물리성 변화. 한국토양비료학회지, 18(4) : 366~372.
- 정필균, 오세진, 김영호, 김선관. 1985c. 토성별 토양 및 양분 유실량 조사. 농업기술연구소. 시험연구보고서, pp.158~160.
- 정필균, 고문환, 엄기태. 1989. 경사지 토양보전을 위한 토양관리인자 구명. 농사시험연구논문집, 31(4) : 16~22.
- 정영상, 신재성, 신용화. 1976a. 경사지 토양의 침식성 인자에 관하여. 한국토양비료학회지, 9 : 109-115.
- 정영상, 신재성, 신용화. 1976b. 야산개발지의 토양침식에 관하여. 한국토양비료학회지, 9 : 9-16.
- 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의. 1999. 강원도 경사지 토양유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수인자와 토양침식성 인자의 검토. 한국토양비료학회지, 32(1) : 31~38.
- Kim K. H. and W. P. Miller. 1995. Soil detachment by single and multiple waterdrops. Agricultural Chemistry and Biotechnology, 38(2) : 151~156.
- 김이열, 조현준, 한경화. 2004. 유기성 물질 시용에 따른 농경지 토양물리성 변화 연구. 한국토양비료학회지, 37(5) : 304~314.
- 김민경, 최윤영, 김복진, 임준영, 정종배. 2001. 소규모 농업유역에서 질소와 인의 하천 부하에 대한 AGNPS 모형의 적용. 한국환경농학회지, 20(3) :

192~200.

김필주, 이도경, 정덕영, 1997. 토양의 용적밀도에 따른 포화수리전도도 및 음이온의 용출양상. 한국토양비료학회지, 30(3) : 234~241.

種田行男. 1975. 農地の土壤侵蝕量の豫測. 農土論集., 56 : 8~12.

김승열, 유언하, 한병희, 채제천. 1985. 가리질 비종과 시비수준이 감자의 수량 및 품질에 미치는 영향. 한국원예학회지, 26(3) : 246~253.

김영호, 정필균, 오세진, 고문환. 1991. 부초수준별 토양유실 방지효과. 농사시험연구논문집, 33(1) : 29~34.

Kirkby M. J. and R. P. C. Morgan. 1980. Soil erosion, John Wiley and Sons Ltd: New York.

Kleiss, H. J. 1970. Hillslope sedimentation and soil formation in northeastern Iowa. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 34 : 287~290.

이춘수, 이계준, 신관용, 안재훈, 이정태, 허봉구. 2002. 고랭지 성토지에서 감자 및 배추에 대한 인산과 칼리 증시효과. 한국토양비료학회지, 35(6) : 372~380.

이상규, 차규석, 김인탁. 1983. 제주도 화산회토양의 이화학적 특성 및 유기물 성장에 관한 연구. 한국토양비료학회지, 16(1) : 20~27.

이신찬, 송덕희, 문재현, 송창훈. 1989. 겨울감자 3요소 시비적량 시험. 제주농업시험연구보고서, pp.205~215.

Levine, S. L. and D. W. Schindler. 1989. Phosphorus, nitrogen and carbon dynamics of experimental lake 303 during recovery from eutrophication. Can. J. Fish Adqat. Sci., 46 : 2~10.

- 임정남, 조영길, 김동환, 신용화. 1978. 야산개발지의 토양유실에 관한 연구. 1. 물리성 개선이 토양보전 및 작물수량에 미치는 효과. 농사시험연구보고, 20 : 11~20.
- Maeda, T. and K. Soma. 1985. Classification of andisols in Japan based on physical properties. International clay conference. The clay minerals Society, Denver, pp.174~178.
- McIntyre, D. S. 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. Soil Sci., 85 : 261~266.
- Miller, W. P. 1987. Infiltration and soil loss of three gypsum-amended ultisols under simulated rainfall. Soil Sci. Soc. Am. J., 51 : 1314~1320.
- Moehansyah H., B. L. Maheshwari and J. Armstrong. 2004. Field evaluation of selected soil erosion models for catchment management in Indonesia. *Biosystems Engineering*, 88(4) : 491~506.
- Moore, D. C. and J. S. Michael. 1990. Crust formation effects on soil erosion processes. Soil Sci. Soc. Am. J., 54 : 1117~1123.
- Musgrave, G.W. 1947. The quantitative evaluation of factors in water erosion a first approximation. J. Soil and Water Cons., 2 : 133~138.
- Nanzyo, M., S. Shoji, and R. Dahlgren. 1993. Physical characteristics of volcanic ash soil, pp.189~201. In "Volcanic ash soil. Genesis, Properties and utilization"(eds. Shoji, S., Dahlgren, R., Nanzyo, M.) (Eds.), Development in Soil Science, vol. 21, Elsevier, Amsterdam.
- NIAST. 2000. Taxonomical classification of Korean Soils. National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea.

- 농촌진흥청. 2003. 농업과학기술연구조사분석기준. 농촌진흥청, pp.519~526.
- 농촌진흥청. 2000. 토양 및 식물체 분석법. 농업과학기술원. 수원. 202pp.
- 오세진, 김태순, 정필균, 고문환. 1989. 인공강우하에서 점토함량과 경사도에 따른 토양침식 양상. 농사시험연구논문집(토양비료편). 31(4) : 29-41.
- 오세진, 정필균, 김영호. 1991. 경사지토양의 토양관리에 따른 토양유실 방지. 농사시험연구논문집. 33(3) : 68~72.
- 오세진, 정필균, 엄기태. 1992. 작물별 비닐피복에 따른 토양유실 방지효과. 농사시험연구논문집. 34(2) : 30~35.
- 오세진, 정필균, 신제성. 1997. 밭토양 보전농법 실용화 연구. 농업기술연구소 시험연구사업보고서(농업환경부편). p.463~467.
- 오세진, 정필균, 장용선. 1998. 산지 사과원에서 토양유실 방지 효과. 농업환경논문집. 40(2) : 6~10.
- Parfitt, R. L. 1990. Allophane in New Zealand : a review. Aus. J. of Soil Research. 28 : 343~360.
- 박창서, 김이열, 조성진. 1985. 화산회토 분류 및 CEC에 대한 유기물과 점토의 기여도. 한국토양비료학회지, 18(2) : 161~168.
- 박철수, 정영상, 주진호, 이원정, 양재의. 2005. 골부초와 자갈대에 의한 고랭지 감자재배지 토양보전 효과. 한국환경농학회지, 24(1) : 29~33.
- Poudel, D. D., D. J. Midmore and L. T. West. 1999. Erosion and productivity of vegetable systems on sloping volcanic ash-derived Philippine soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 63 : 1366~1376.

- Poulenard, J., P. Podwojewski, J. L. Janeau and J. Collinet. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian Paramo : effect of tillage and burning. *Catena*, 45 : 185~207.
- Reichert, J. M., L. D. Norton and C. H. Huang. 1994. Sealing, amendment, and rain intensity effects on erosion of high-clay soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58(4) : 1199~1205.
- Reichert, J. M. and L. D. Norton. 1994. Fluidized bed bottom-ash effects on infiltration and erosion of swelling soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58(5) : 1483~1488.
- 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). USDA-ARS Agricultural Handbook No. 703. 384pp.
- 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.
- 유인수, 유순호, 윤정희. 1975. 제주도 전 토양의 비옥도 현황과 개량. *한국토양비료학회지*, 8(3) : 121~132
- 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.
- Shainberg, I. and M. J. Singer. 1985. Effect of electrolyte concentration on the hydraulic properties of depositional crust. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49 : 1260~1263.

- 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(2) : 301~307.
- 신복우, 류현철, 정지호, 양창휴, 강승원, 한상수., 1999. 호남지역 경사지 토양 보전농법 실용화 연구. 호남농업시험장 시험연구사업보고서, pp.429~436.
- 신제성, 정영상, 신용화. 1976. 토양유실량 예측에 관하여. *농사시험연구보고*, 18 : 1~8.
- 신제성, 신용화. 1980. 토양보전인자가 토양유실에 미치는 영향. *농사시험연구보고*, 22 : 36-41.
- 신제성, 고문환, 임정남. 1981. 야외에서 Splash Erosion 측정에 관한 연구. *한국토양비료학회지*, 14(3) : 104~109.
- 신제성, 고문환, 임정남. 1983. 토양유실량 예측을 위한 강우인자의 추정. *한국토양비료학회지*, 16(2) : 106~111.
- 신영화, 김형욱. 1975. 화산회토양의 특성에 관하여. *한국토양비료학회지*, 8(3) : 113~119.
- Smith, D. D. 1941. Interpretation of soil conservation data for field use. *Agr. Eng.*, 22 : 173~175.
- Sombatpanit, S., C. W. Rose, C. A. Ciesiolka and K. J. Coughlan. 1995. Soil and nutrient loss under rozelle at Khon Kaen, Thailand. *Soil Technology* 8 : 235~241.
- Tarchitzky, J., A. B. 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.
- 엄기태, 1986. 토양침식과 보전대책. 1986년도 방제과학 WORKSHOP “농업 재해와 방제” 한국과학기술단체연합회. 서울. pp.41~51.
- 엄기태, 주영희, 이경수. 1977. 제주도 종합개발계획을 위한 토양특성의 연구. 농사시험연구보고, 19 : 1~17.
- USDA. 1983. Soil survey manual, USDA Handbook. 18.
- Warkentin, B. P. 1985. Properties of andisols important to engineering. VI International soil classification workshop, Chile and Ecuador, Sociedad Chilena de la Ciencia del suelo. Part I : Papers, pp.121~150.
- West, L. T., Chiange S. C. and Norton L. D. 1992. The morphology of surface crust : In Sumner, ME and Stewar, BA(eds). soil crusting : Physical and chemical processes. Boca Roton:Lewis Publi., pp.73~92.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1960. A universal soil-loss estimating equation to guide conservation form planning. In Trans. seventh Cong. Int. Soil Sci. Soc. Madison. Wisc., pp.418~425.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agri. Handbook No. 282. U.S.D.A. Washington. D. C., p.47.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning Agri. Handbook No. 537. U.S.D.A. Washington. D. C., p.58.

Wollny, E. 1888. Untersuchungen uber die sickerwassermengen in verschiedenen bodenarten, Forsch. a.d. Gebiete d. Agri. Physick. Band II. Seite pp.1~68.

양동윤, 김진관, 김주용, 김민석. 2005. 토양침식에 미치는 토양표면상태의 영향. 한국지형학회지, 12(2) : 63~72.

우보명. 1976. 토양침식에 작용하는 몇 가지 요인의 영향에 관한 연구. 한국임학회지, 29 : 54~101.

윤봉기, 정필균, 오세진, 김선관, 유인수. 1996. 퇴비시용이 토양유실량과 토양이화학성에 미치는 영향. 한국토양비료학회지, 29(4) : 336-341.

류순호, 1977. 밭토양의 물리성과 가리. 한국토양비료학회지, 10(3) : 189~201.

류순호, 송관철. 1984. 제주도 토양의 화학적 특성 조사연구. I. 지대별 화학적 특성변화. 한국토양비료학회지, 17(1) : 1~6.

Zingg, A.W. 1940. Degree and length of land slope sa it affects soil loss in runoff. Agr. Eng., 21 : 59~61.

감사의 글

이 논문을 완성하기 까지 저에게 따뜻한 시선과 마음으로 지켜봐주신 고마운 분들께 감사의 말씀을 드리고자 합니다.

학문적으로 부족했던 저에게 학문의 길을 가르쳐 주시고, 낮 설고 어려운 길임에도 학문을 계속할 수 있도록 배려하여 이 과정을 무사히 마칠 수 있도록 하여 주신 유장걸 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 가운데서도 부족한 논문이나마 심사를 맡아주시고 부족한 부분을 바로잡아 주신 전북대학교 한강원 교수님, 농업과학기술원 하상건 박사님, 제주대학교 김찬식 교수님, 제주도농업기술원 이신찬 박사님께 감사의 글을 올립니다. 항상 관심을 가지시고 격려하여 주신 고정삼 교수님, 류기중 교수님, 현해남 교수님, 김문철 교수님, 송성준 박사님께도 감사를 드립니다.

본 논문이 빛을 볼 수 있도록 배려를 해주신 제주도농업기술원 김영문 원장님, 문정수 기술지원국장님, 한원탁 환경농업과장님을 비롯한 직원 여러분께 감사를 드립니다. 그리고 실험과 자료정리를 하는 동안 싫은 표정하나 없이 언제나 즐거운 마음으로 도와준 강태우, 박원표 후배에게도 감사를 드립니다. 시험을 수행하는 동안 많은 도움을 주셨던 농업과학기술원 허승호 연구사님, 정강호 연구사님, 제주도농업기술원 고부영 담당님, 김동현 지도사, 김유경 연구사, 유지혁 연구사에게도 감사를 드립니다. 아울러 업무의 인연으로 만나 어려움을 함께 나누면서 저를 도와준 실험실 가족 여러분들에게도 감사를 드립니다.

항상 말없이 저를 지켜봐 주신 어머니님, 장인어른, 장모님, 형수님, 항상 격려의 말씀을 아끼지 않으셨던 매형, 누님, 사촌들을 비롯한 친지들께 고마움을 전합니다. 끝으로 제가 힘들고 지칠 때 마다 편안하게 기댈 수 있는 안식처와 같은 역할을 해주면서 늘 제게 힘을 주었던 사랑하는 김수정, 그리고 재훈, 지연, 혜진에게 감사와 사랑의 마음을 전하면서 돌아가신 아버님과 형님의 영전에도 이 소고를 드립니다.