한국토양비료학회지 제 39권 5호
Korean J. Soil Sci. Fert. Vol. 39, No. 5, 268-273 (2006)

연구보문

경사지 토양에서 강우량과 토성에 따른 물 유출 및 침투 특성

이현행* · 하상건 · 허승오 · 정강호 · 김원태 · 김계훈[1]

농촌진흥청 농업과학기술원, [1]서울시립대학교

Characteristics of Soil Water Runoff and Percolation in Sloped Land with Different Soil Textures

Hyun-Haeng Lee*, Sang-Keon Ha, Seung-Oh Hur, Kang-Ho Jung, Won-Tae Kim and Kye-Hoon Kim[1]

National Institute of Agricultural Science Technology, Suwon 441-707, Korea
[1]Dept, of Environmental Horticulture, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Soil loss induced by erosion has come to be a serious problem in Korea's sloped land since more than 70% of upland fields are located on the sloped land area. The purpose of this study was to investigate the phase of water flow in differently soil textured plot soil types by rainfall amount. Lysimeters with slope of 15%, 5 m in length, 2 m in width, and 1 m in depth were prepared and filled up with three different soil textures, such as sandy loam, loam, and clay loam, then relationships between seasonal rainfall and runoff, percolation were analyzed. Runoff and percolation rate were shown to increase linearly with increasing rainfall intensity in all the soil textures, but the starting threshold and increment rate in runoff and percolation occurrence were dependent differently upon soil textures. Percolation increment rate according to the increasing rainfall amount was 0.52, 0.36, and 0.57 for sandy loam, loam and clay loam soil respectively. The threshold rainfall amounts in which percolation occurs were 5.73 mm, 6.80 mm, and 12.86 mm for sandy loam, loam and clay loam respectively. Runoff increment rates were 0.42, 0.48 and 0.46 for sandy loam, loam and clay loam soil. The threshold rainfall amount in which runoff occurs was 10.50 mm in sandy loam, 7.76 mm in loam and 17.40 mm in clay loam. These different phases of water flow by soil texture could be used to suggest guidelines for the best management practice of the farming slope land.

Key words: Runoff, Percolation, Lysimeter, Erosion, Soil loss

서 언

토양의 침식은 물에 의한 침식과 바람에 의한 침식으로 크게 나눌 수 있는데 반습윤 기후지대인 우리나라에서는 바람보다는 물에 의한 침식이 주로 문제가 된다. 그러므로 환경보존을 위해서 토양의 침식을 극소화하고 토양을 보전하는 것이 무엇보다 시급히 해결되어야 할 중요한 과제 중 하나이다(Chang and Yun, 1994). 우리나라 경사지 밭은 여름철 집중강우에 의한 침식 위험성이 크고, 이 시기에 연간 토양유실의 80%이상이 발생하며 특히, 6월과 7월은 대부분 전작물을 수확한 후 작물에 의해 지표면이 피복되지 못한 시기이기 때문에 토양침식에 의해 작토가 유실되기 쉬운 상태이다(Yun et al., 1996). 토양유실은 작물의 생산성 저하를 유발할 뿐만 아니라 유실토의 퇴적으로 하천이나 저수지가 매몰될 수 있다. 또한 농경지의 토양유실을 통한 양분유실은 인근 농경지와 하천 및 지하수의 오염까지도 유발할 수 있다(Jung et al., 1985; Lee et al., 1998). 집중강우가 발생하는 시기에 강우량, 유거수량, 침투수량 및 토양의 침식량을 측정하는 것은 경사지 농경지의 토양 유실량을 평가하고 대책을 수립하는데 있어 대단히 중요하다. 지금까지 토양 유실량을 조사함으로써 토양 유실을 줄이기 위한 많은 연구가 이루어져왔다. 국내에서는 일정한 면적과 경사도를 갖춘 라이시미터를 이용하여 강우량과 유거수량을 측정하고, 양분 및 토사유출량 등을 조사하여 토양 관리방안을 제시하였으며(Jung et al., 1989; Oh et al., 1992; Park et al., 2005; Seo et al., 2005; Yun et al., 1996), 토양침식의 예측공식이나 내성을 이론적으로 분석하여 평가하기도 했다(Chang,

접 수 : 2006. 4. 3 수 리 : 2006. 8. 11
*연락저자 : Phone: +82312900287,
E-mail: soil20@hanmail.net

1996; Hyun, 2002; Jung, 1999). 또한, 국내외적으로도 재배법이나 피복작물을 이용하여 토양유실을 저감하고자 하는 많은 연구들이 수행되고 있다(Oh et al., 1989; Seo et al., 2005; Chang and Yun, 1994; Myers and Wagger, 1996; Smolikowski et al., 2001).

강우에 의한 토양의 침식과 유실은 크게 세 가지 과정으로 일어난다. 먼저 강우 타격에 의한 입자의 비산이 일어나며 다음으로 유거수의 흐름에 의한 토양의 침식, 그리고 유거수에 의한 입자의 유동이 일어난다. 이 때 유거수량은 강우량 및 강도와 토양의 수분조건 및 침투특성에 의해 결정된다. 따라서 토양의 침식 및 물 유출 양상의 해석을 위해서는 토양수분 조건과 침투특성에 따른 해석이 중요하다. 이에 본 연구는 라이시미터 조건에서 강우량에 의한 지하침투수 및 유출 특성을 평가하여 물 흐름의 양상을 파악하고 우리나라와 같은 조건에서 토성에 따른 유출 또는 지하침투의 임계 강우량(incident threshold rainfall amount)을 산정하여 경사지 농경지의 토양 유실에 대한 대책을 수립하는데 필요한 자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

본 시험은 2003년 5월부터 9월까지 수행되었고, 농업과학기술원에 설치된 경사 15%인 라이시미터(2 m × 5 m × 0.5 m)에 양토, 식양토, 사양토를 채운 후 실시하였다. 강우량은 방재기상정보 시스템을 이용하여 월별로 강우량과 EI_{30}을 산정하였다. EI30은 USLE (Wischmeier and Smith, 1965, 1978; Renard et al., 1997)에서 추천하고 있는 공식에 따라 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$KE = 210.3 + 89 \times \log[I] \ (m\ MTf\ ha^{-1}\ cm^{-1})$$

$$EI_{30} = (\Sigma(KE \cdot R)/100) \times \text{Maximum 30 minute rainfall intensity}$$

여기서, KE(Kinetic energy)는 운동에너지이고 I는 시간당 강우강도(cm hr^{-1})이며 R은 강우량(cm), EI30(kinetic energy times maximum 30-min intensity)은 강우를 강도별로 구분하여 강도에 따른 운동에너지를 구한 것에 그 강우의 30분 최대 강우강도를 곱하여 구한다.

유실토양은 집수구에 있는 물을 일정하게 채취하여 토양입자를 고르게 분산하도록 교반한 후 500 mL 채취통에 담아 증발시킨 후 남아있는 토양과 함께 집수구 물을 밖으로 배수시킨 후 집수구내에 남아있는 토양을 채취하여 풍건시켜 무게를 측정하여 함께 계산하였다.

지하 침투수량은 라이시미터 토양층을 투과하여 침투되어 나오는 물을 모아 집수구 하단부에 연결된 유공관을 통해 흘러나온 것을 수집하여 측정하였다. 흘러나온 지하침투수량은 측정 단위량(resolution unit)이 200 mL인 tipping bucket type인 유량계를 설치하여 측정하고, 측적된 자료는 저장 장치(Watchdog, model 200, USA)에 연결하여 10분 간격으로 저장하였다.

물 지표 유출량은 라이시미터 구획 밖으로 유출되지 않도록 사각 집수구(80 cm × 100 cm × 100 cm)를 만들어 측정하였다.

강우와 강우사이 시간이 6시간 미만이고 그 강우량이 12.7 mm 인 것을 1회 강우로 설정하여 1회 강우마다 지하침투수량과 유출량을 토성에 따라 비교분석하여 마이크로소프트 엑셀(version, 2003)로 회귀분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

시험기간 중 강우 특성은 Table 1에 나타내었다. 우리나라의 강우량은 여름철에 집중적으로 높아지는데 본 연구에서도 7월이 가장 높았고 8월과 9월도 높은 수치를 나타냈다. EI30은 7월이 가장 높았고 다음으로 6월이 높게 나타냈다. 시험기간 중 총 강우량은 809.0 mm, EI_{30}은 252.7을 나타내었는데 7월의 강우량과 EI_{30}가 각각 전체의 45%, 50%로 매우 편중되는 값을 나타냈다. 또한 이 시기에 가장 많은 토양유실이 일어났다. 우리나라는 5, 6월초까지는 일반적으로 강우량도 적고, 토양수분함량도 적기 때문에 강우량에 의한 지하침투수량과 유출량이 적게 나타난다. 6월 중순 이후부터 9월까지는 강우량도 많고, EI_{30}과 토양수분함량도 높기 때문에 이 시기에는 지하 침투수량과 유거수량이 매우 높게 나타내었다(Table 2).

시험기간 동안 유출수량은 사양토, 식양토, 양토 순으로 증가하는 경향을 보였고, 지하침투수량은 사양토가 가장 높았으며 식양토와 양토는 거의 같게 나타났다. 일반적으로 토양 유실량은 강우에 따라 유출수량이 높을수록 증가한다고 보고된(Hur et al., 2005; Yun et al., 1996) 연구들과는 달리, 본 연구에서는 유

Table 1. Monthly rainfall amount and EI30 value measured during 5 months of year 2004.

	May	June	Jul.	Aug.	Sep.	Total
Rainfall (mm)	45.5	124.0	365.0	147.0	173.0	809.0
EI_{30}	4.2	51.4	126.7	39.4	31.1	252.7

출량과 토양 유실량의 관계는 일관된 양상을 보이지 않았다. 실험기간동안 전체 토양 유실량을 토성에 따라 비교해 보면 식양토가 가장 높았고 다음은 양토와 사양토 순이었다. 식양토는 미사와 점토 함량이 높고 점토 함량이 37.5~50%로 사양토와 양토에 비해 점착력이 크고 보수력은 크지만 배수성이 좋지 않아 작물이 생육하는데 다소 불리한 점을 가지고 있다. 또한 식양토는 강우가 없고 토양이 건조해 질 때 심하게 균열이 간다(Rajaram and Erbach, 1998). 또한 식양토는 양토나 사양토에 비해 총 공극량은 많지만 공극 크기는 매우 작기 때문에 배수가 잘 되지 않는다. 이러한 특성을 지닌 식양토에서 강우가 발생하면 지표 유출량이 많아지고 토립의 분산이 쉽게 일어나서 유출량과 함께 토양 유실량 또한 높게 발생되어 지표 유출량과 토양 유실량은 다른 토성보다 높게 발생한 것으로 판단된다(Table 2). 토양수분 보유능은 증산량은 고려하지 않고 강우량만을 이용하여 조사해보면 다음과 같다. 시험기간 중 전체 강우량이 809 mm로 각 라이시미터 시험구당 부피로 환산하면 8,090 L가 된다. 전체 강우량과 유출량과 유거수량과의 차이를 조사하면 토성에 따른 토양수분 보유능을 파악할 수 있었다. 시험기간 동안 수분 보유능은 식양토가 4,092 L로 가장 높았고 다음은 사양토가 3,844 L, 양토가 3,523 L순으로 나타내었다.

강우량에 따른 지하침투수량의 관계는 양토($r^2=0.8367^{**}$), 식양토($r^2=0.7231^{**}$), 사양토

Table 2. Runoff, percolating water and soil loss per plot area in 15% slope upland according to soil textures.

	Sandy loam	Loam	Clay loam
Volume of runoff (L)	1,633 (20.2)†	2,231 (27.6)	1,681 (20.8)
Volume of Percolation (L)	2,613 (29.5)‡	2,336 (28.9)	2,337 (28.9)
Mass of Soil loss (kg)	11.9	17.6	26.9

† runoff rate (total runoff volume/total rainfall volume)

‡ percolation rate (total percolation volume/total rainfall volume).

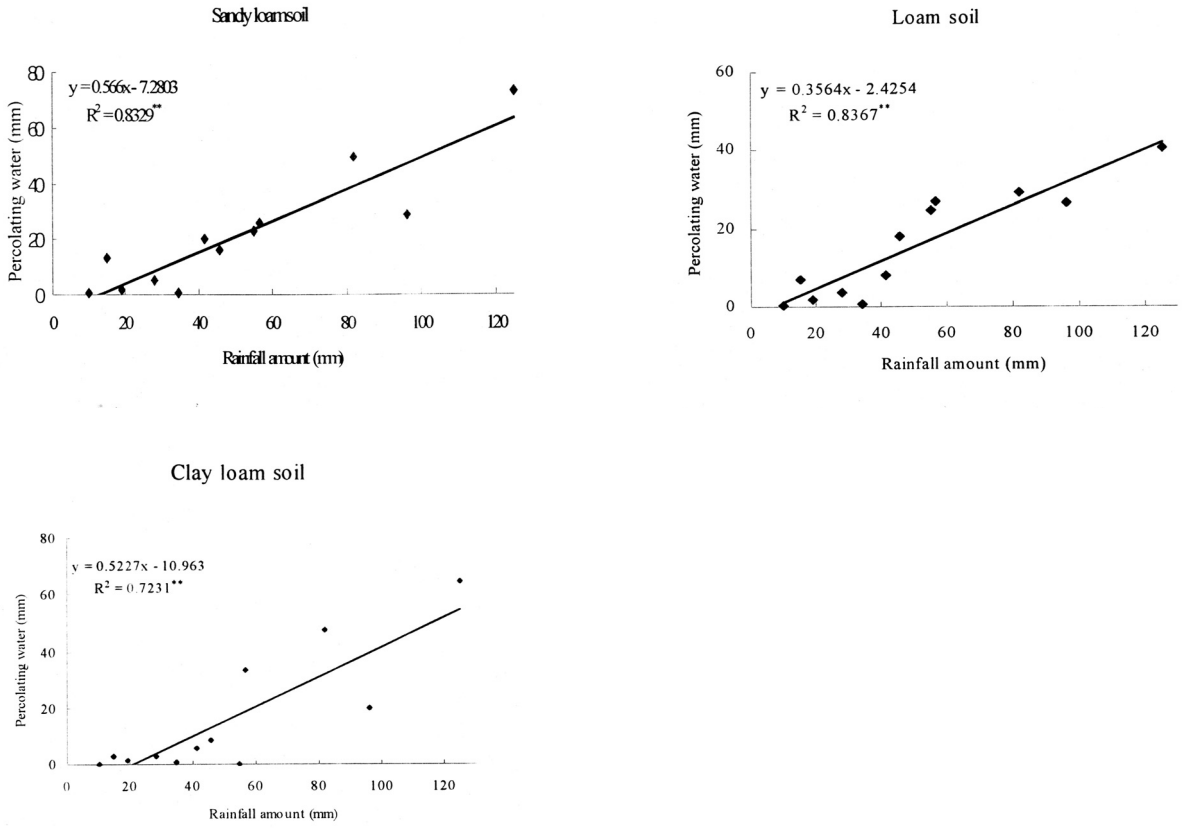

Fig. 1. Relationship between rainfall and percolation amount of lysimeter.

Table 3. Regressive relationships between rainfall and percolation according to soil textures.

Soil texture	Regression equation	A†	Threshold rainfall (mm)	r^2
Sandy loam	Y=0.5227X-10.963	0.52	5.73	0.7237**
Loam	Y=0.3564X-2.4254	0.36	6.80	0.8367**
Clay loam	Y=0.5660X-7.2803	0.57	12.86	0.8329**

† Percolating water increment rate correspondent to unit rainfall amount.

(r^2=0.8329**)에서 모두 강우량이 증가할수록 지하침투수량이 선형으로 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 1). 강우량과 지하침투수량과의 관계를 이용하여 강우량이 증가함에 따라 지하침투수량의 증가비율과 지하침투수가 발생하기 시작하는 강우량(threshold rainfall amount)을 Table 3에 나타내었다. 1년 중 강우량이 높은 시험기간 동안 강우량이 증가함에 따라 지하침투수량이 발생하는 증가비율은 식양토에서 0.57로 가장 높았으며, 사양토와 양토에서 각각 0.52, 0.36순으로 나타났다. 지하침투수가 발생되기 시작하는 강우량은 수분 보유능이 가장 높은 식양토에서 강우량이 12.86 mm이상이 되어야만 침투수량이 발생하기 시작하여 다른 토성에 비해 가장 높은 수치를 나타내었고 이때의 토양수분은 38.6% 조건이었다. 양토에서는 강우량이 6.80 mm 이상이 되었을 때 지하침투수가 발생하였고 사양토는 5.73 mm이었는데 각각 토양수분 함량은 24.4%, 27.2%를 나타내었다.

토성에 따라 강우와 유출량과의 관계를 조사하였다. 강우량에 따른 유출수량의 관계는 사양토(r^2=0.7877**), 양토(r^2=0.7368**), 식양토(r^2=0.7858**), 에서 모두 강우량이 증가할수록 유출수량이 선형으로 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 2). 강우량과 유출수량과의 관계를 이용하여 강우량이 증가함에 따라 유출수의 증가비율과 유출수가 발생하기 시작하는 강우량을 모형 관계식에서 산출하였고, 이를 Table 4에 나타내었다. 강우량에 따른 유출수량 및 지하침투수량은 모두 강우량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으나, 토성에 따라 강우량의 단위 증가에 따른 유출수의 단위 증가비율과 유출이 발생되기 시작하는 시점의 강우량은 다소 다른 양상을 보였다. 강우량에 비해 유출되는 양이 양토는 0.48, 식양토와 사양토는 각각 0.46, 0.42로 토성에 따라 큰 차이는 없었으나 사양토<식양토<양토로 가면서 조금씩 높아졌다. 유출수가 발생되기 시작하는 강우량을 조사한 결과, 양토에서는 강우량이 17.4 mm가 되었을 때 유출이 발생되기 시작하였고 사양토는 10.5 mm, 식양토는 7.76 mm에서 유출이 발생하기 시작되었다. 따라서 강우량이 증가함에 따라 양토에서 가장

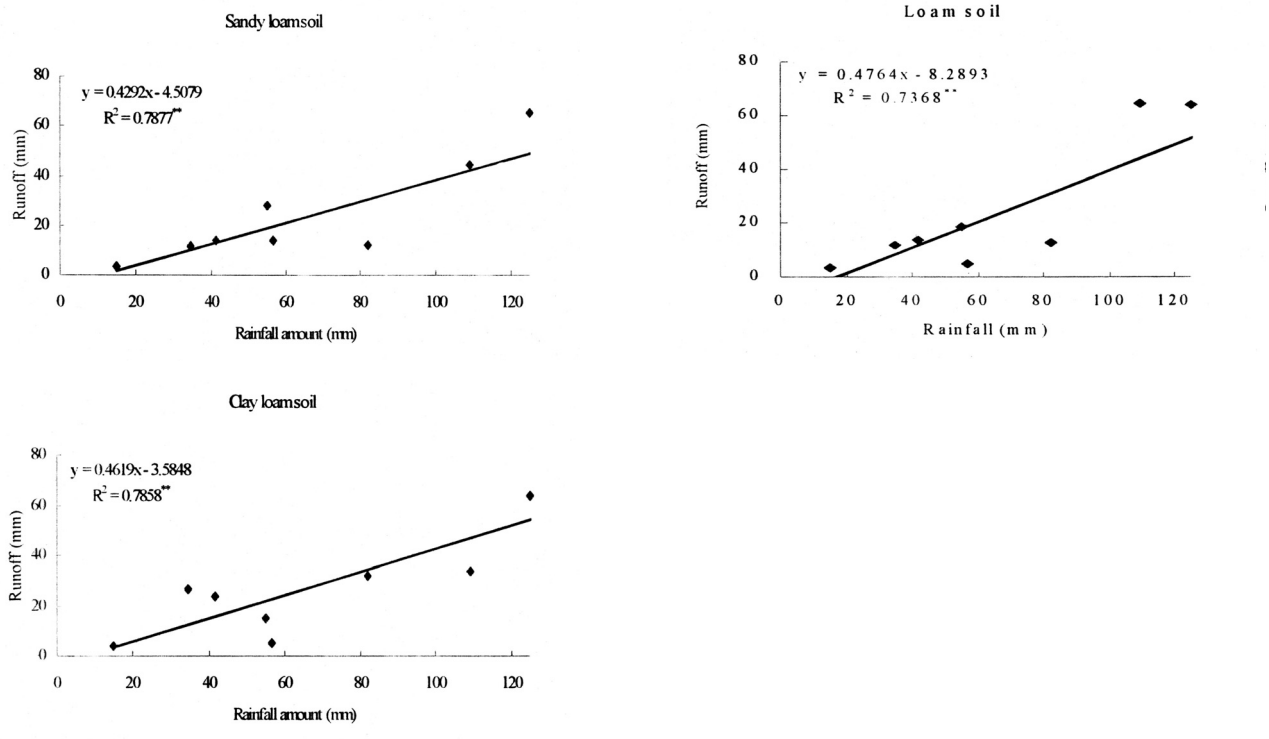

Fig. 2. Relationship between rainfall and runoff amount of lysimeter.

Table 4. Regressive relationships between rainfall and runoff amount according to soil textures.

Soil texture	Regression equation	A†	Threshold rainfall (mm)	r^2
Sandy loam	Y=0.4292X-4.5079	0.42	10.50	0.7877**
Loam	Y=0.4764X-8.2893	0.48	17.40	0.7368**
Clay loam	Y=0.4619X-3.5849	0.46	7.76	0.7858**

† Runoff increment rate correspondent to unit rainfall amount.

많은 물이 유출되었고, 다음으로 식양토, 사양토 순으로 나타났고 가장 적은 강우량으로 유출이 발생할 수 있는 토성은 식양토임을 알 수 있었다. 식양토는 강우가 증가함에 따라 발생하는 유출량은 양토보다 적었으나 강우에 의한 유출이 발생되는 시점이 다른 토성에 비해 매우 빨랐으나 강우가 증감함에 따라 발생하는 유출량은 양토보다는 적었다. 앞으로 토성에 따라 강우량과 유출량과의 상호 관계를 더 자세히 조사하기 위해서는 토양구조적인 측면에서도 더 심도 있는 연구를 함께 수행할 필요가 있다고 본다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 4월부터 6월까지는 강우량과 EI_{30}은 낮았다. 이에 따라 토양수분 함량도 낮았을 것으로 예상된다. 따라서 전체적으로 유출량, 지하침투수량, 발생 임계 지하침투수량이 낮았으나, 7월부터 9월까지는 강우량 증가와 함께 토양수분함량도 높았을 것이고 이에 따라 유출량, 지하침투수량, 임계 지하침투수량이 높게 나타났을 것으로 생각된다. 나지 상태에서 강우에 의한 유출량은 양토에서 가장 높고 강우량의 증가에 따른 유출량은 양토에서 가장 높았으나 토양 유실량은 식양토에서 가장 높은 것으로 나타나, 나지 상태에서 식양토의 관리가 다른 토성에 비해 매우 중요할 것으로 생각된다. 또한, 본 연구에서 유도된 토성별 강우량에 따른 유출수량과 침투수량간의 상관관계를 이용하여 토성별 강우량에 따른 유출수량과 침투수량 예측이 가능하기 때문에, 이는 경사지 밭토양의 오염원인인 양분유실과 토양유실을 감소시키기 위한 대책을 마련하는데 도움이 되리라 판단된다.

적 요

우리나라 밭토양은 70% 이상이 경사지에 위치하고 있기 때문에 침식에 의한 토양유실이 매우 심각한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 토성 간 강우량 및 EI_{30}에 따른 토양 유실량과 유출수량 및 지하침투수량을 비교함으로써 토성 및 강우형태에 따른 물 흐름 양상을 파악하여 토양유실을 방지하는데 이용하고자 하였다. 본 연구에는 우리나라 밭토양의 중간 경사도 15%의 조건으로하여 라이시미터 토양에서 실험을 실시하였고 강우량과 EI_{30}, 토양 유실량과 유출수량, 지하침투수량을 조사하여 강우량과 토성에 따라 침투수량과 유출량과의 관계를 보았다. 강우량에 따른 유출수량 및 지하침투수량은 모두 강우량이 증가함에 따라 증가하는 정의 상관관계를 보였고 토성에 따라 강우량이 증가함에 따른 유출수의 상대적인 증가비율과 유출이 발생되는 최소 강우량은 다소 일률적인 양상을 보이지 않았다.

본 시험 기간동안 강우량 단위 증가에 따른 침투수량의 증분량은 식양토가 0.57 으로 가장 높았으며, 다음으로 사양토와 양토가 각각 0.52, 0.36 순으로 나타났다. 지하침투수가 발생되기 시작하는 강우량은 식양토에서 12.86 mm으로 가장 높았고, 양토는 6.80 mm, 사양토는 5.73 mm 로 나타났다.

토성별 강우량 단위 증가에 따른 유출수의 증분량은 토성에 따라 큰 차이는 없었으나 양토에서 0.48로 가장 높았고 식양토, 사양토는 0.46, 0.42 순이었고 유출발생 최소강우량도 양토가 17.4 mm로 가장 높았으며 사양토는 10.5 mm, 식양토는 7.76 mm 순으로 나타내었다.

인 용 문 헌

Chang, N. K., and S. M. Yun. 1994. The soil and mineral nutrient erosion on the floors of vegetations. Kor. Turfgrass Sci. 8:149-165.

Hyun, B.K., M.S. Kim, K.C. Eom, K.K. Kang, H.B. Yun, M.C. Seo, and K.S. Sung. 2002. Evaluation on national environmental functionality of farming on soil loss using the USLE and replacement cost method. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 35:361-371.

Hur, S.O., K.H. Jung, S.K. Ha, H.K. Kwark, and J.G. Kim. 2005. Mathematical description of soil loss by runoff at inclined upland of maize cultivation. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 38:66-71.

Jung, P.K., M.H. Ko, and K.T. Um. 1985. Discussion of cropping management factor for estimation soil loss. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 18:7-13.

Jung, P.K., M.H. Koh, and K.T. Um. 1989. Evaluation of soil erosion management practices on sloped farm land. Res. Rept. RDA. 31:16-22.

Jung, Y.S., Y K. Kwon, H.S. Lim, S.K. Ha, and J.E. Yang. 1999. R and K factors for an application of RUSLE on the slope soils in Kangwon-Do. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 32:31-37.

Lee, N.J., S.J. Oh, and P.K. Jung. 1998. Soil loss and water runoff in a watershed in Yeoju. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 31:211-215.

Myers, J.L., and M.G. Wagger. 1996. Runoff and sediment loss

from three tillage systems under simulated rainfall. Soil & Tillage Research. 39:115-159.

Oh, S.J., P.K. Jung, Y.H. Kim, M.H. Um, and K.T. Um. 1989. Effect of soil erosion control with different pasture establishments on slope land. Res. Rept. RDA. 31:24-28.

Oh, S.J., P.K. Jung, and K.T. Um. 1992. Soil erosion control with vinyl mulch of different crops. Res. Rept. RDA. 34:30-35.

Park, C.S., Y.S. Jung, J.H. Joo, and G.J. Lee. 2005. Measurement technique for soil loss estimation using laser distance meter in sloped upland. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 38:127-133.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCOOL, and D.C. Yoder, 1997. Predicting soil erosion water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation(RUSLE). Agric. Handbook No. 703. U.S. Dept. Agric., Washington DC, USA.

Rajaram, G., and D.C. Erbach. 1998. Drying stress effect on mechanical behavior of clay loam soil. Soil & Tillage Research 49:147-158.

Smolikowski, B., H. Puig, and E. Roose. 2001. Influence of soil protection techniques on runoff, erosion and plant production on semi-arid hillsides of cabo verde. Agriculture, Ecosystems and Environment. 87:67-80.

Seo, J.H., J.Y. Park. and D.Y. Song. 2005. Effect of cover crop hairy vetch on prevention of soil erosion and reduction of nitrogen fertilization in sloped upland. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 38:134-141.

Yun, B.K., P.K. Jung, S.J. Oh, S.K. Kim, and I.S. Ryu. 1996. Effect of compost application on soil loss and physico-chemical properties in lysimeter. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 29:336-341.

Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of rocky mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. Agric. Handbook No. 282. US Dept. Agric., Washington DC, USA.

Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agric. Handbook No. 537. US Dept. Agric., Washington DC, USA.