

경사지에서 고추 정식시기에 따른 토양유실과 유출수에 대한 식생피복 효과

조희래 · 하상건* · 현승훈¹ · 허승오 · 한경화 · 홍석영 · 전상호 · 김은진² · 이동성²

국립농업과학원, ¹고려대학교, ²충남대학교

Effect of Red Pepper Canopy Coverages on Soil Loss and Runoff from Sloped Land with Different Transplanting Dates

Cho H.R., S.K. Ha*, S.H. Hyun², S.O. Hur, K.H. Han, S.Y. Hong, S.H. Jeon, E.J. Kim¹, and D.S. Lee¹

National Academy of Agricultural Science, Suwon 441-707, Korea

¹Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, 136-713, Korea

²Chungnam National University, Daejeon, 350-764 Korea

As sloped farmland is subject to runoff and soil erosion and consequently require appropriate vegetative coverage to conserve soil and water, a field study was carried out to evaluate the impact of crop canopy coverage on soil loss and runoff from the experimental plot with three different textural types (clay loam, loam, and sandy loam). The runoff and soil loss were examined at lysimeters with 15% slope, 5 m in length, and 2 m in width for five months from May to September 2009 in Suwon (37° 16' 42.67" N, 126° 59' 0.11" E). Red pepper (*Capsicum annum* L. cv. Daechon) seedlings were transplanted on three different dates, May 4 (RP1), 15 (RP2), and 25 (RP3) to check vegetation coverage. During the experimental period, the vegetation coverage and plant height were measured at 7 day-intervals and then the 'canopy cover subfactor' (an inverse of vegetation cover) was subsequently calculated. After each rainfall ceased, the amounts of soil loss and runoff were measured from each plot. Under rainfall events >100 mm, both soil loss and runoff ratio increased with increasing canopy cover subfactor ($R^2=0.35$, $p<0.01$, $R^2=0.09$, $p<0.1$), indicating that as vegetation cover increases, the amount of soil loss and runoff reduces. However, the soil loss and runoff were depending on the soil texture and rainfall intensity (i. e., EI_{30}). The red pepper canopy cover subfactor was more highly correlated with soil loss in clay loam ($R^2=0.83$, $p<0.001$) than in sandy loam ($R^2=0.48$, $p<0.05$) and loam ($R^2=0.43$, $p<0.1$) plots. However, the runoff ratio was effectively mitigated by the canopy coverage under the rainfall only with $EI_{30}<1000$ MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ ($R^2=0.34$, $p<0.05$). Therefore, this result suggested that soil loss from the red pepper field could be reduced by adjusting seedling transplanting dates, but it was also affected by the various soil textures and EI_{30} .

Key words: Soil erosion, Crop coverage, Soil texture, Rainfall, Red pepper

서 언

농경지에서의 물에 의한 토양유실 (water erosion)은 경운으로 인한 표토의 교란상태, 식생관리에 의한 피복 상태, 토양관리 인자에 따라 크게 달라지며 특히 적절한 토양관리가 이루어지지 않은 경사지에서 토양유실은 증가한다. 토양유실은 주로 표토에서 일어나는데 농업적 측면에서 토양의 비옥도와 작물의 생산 환경을 악화시

키며, 토양 및 유출수와 동반 유실되는 비료, 농약, 기타 오염물질이 수계로 유입되어 부영양화나 수질오염 등의 환경적인 문제를 유발한다 (ASCE, 1975).

농업활동 중 작물재배는 작물을 생산하는 동시에 지 표면을 피복시킴으로써 강우 시 작물이 강우를 일차적으로 차단시켜 토양 표면의 타격력을 감소시키고 토립의 분산 및 비산을 줄임으로써 (Osborn, 1954) 토양유실을 억제한다. Jung et al. (1985)은 작부체계 및 작목별로 토양유실량을 조사하여 작부인자를 구하였고 Lee et al. (2007)은 범용토양유실예측식 USLE (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier and Smith, 1978)를 수정 보완한 모델인 개정토양유실예측식 RUSLE

접수 : 2010. 5. 26 수리 : 2010. 6. 11

*연락처 : Phone: +82312900337

E-mail: ha0sk@korea.kr

(Revised Universal Soil Loss Equation, Renard et al., 1997)의 토양유실 세부인자인 수관피복인자를 구하였다. USLE는 장기간의 토양유실을 예측하는데 적합하다면 RUSLE는 식생의 계절적 피복 변화를 반영하고 개별 강우사상에 대한 토양유실과 토양유실인자의 효과를 파악하는데 유용하다. 지금까지의 토양유실 관련 작물피복에 대한 연구는 연간 발생한 토양유실에 대한 작물의 기여도를 하나의 값으로 구한 것으로 작물 피복으로 인한 연간 토양유실 억제효과를 평가하기에는 효과적이었지만, 작물생육단계별 식생피복정도에 따른 토양유실정도를 분석하기에는 힘든 면이 있다. 그러나 작물생육단계에 따른 식생이 피복되는 정도를 구하여 침식 당시의 식생피복정도와 유실량의 관계를 분석한다면 유실에 대한 식생피복효과를 평가할 수 있다.

포장에서의 식생군락의 분광학적 특성은 작물생육에 따라 토양과 식생이 차지하는 면적 비율 변화와 식물의 전체적인 구조를 이루는 구성요소의 변화에 따라 달라질 수 있으며 (Penuelas and Filella, 1998) 이를 정량화한 식생지표 (vegetation index)가 개발되어 왔다. 이 중에서 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse et al., 1974)는 공간변이성을 갖는 포장에서 생육 중의 녹색 생체량이나 엽면적 지수의 정량적인 평가에 적합하다고 (Jackson and Huete, 1991; Wiegand et al., 1991) 평가되어 널리 활용되고 있다. 이런 면에서 작물피복에 대한 공간변이성을 갖는 포장 실험에서 시간경과에 따른 식생 피복정도를 측정할 때 NDVI를 이용할 수 있을 것이다. Lee et al. (2007)의 연구에서도 발작물에 대한 수관피복인자를 산출할 때 NDVI를 이용하여 식생피복도를 구하였다.

따라서 본 연구에서는 토양유실 시험포장에서 고추의 정식시기를 달리함에 따른 식생피복도의 차이가 토양유실량과 유출수량에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

이를 위해 RUSLE의 '강우인자' 및 피복율과 초장을 반영하는 작물인자의 한 subfactor인 '수관피복인자'를 사용하여 토양유실량 및 유출수량 간의 관계에 대해 분석하였다.

재료 및 방법

시험포장 본 연구는 수원시 권선구 서둔동에 위치한 국립농업과학원의 토양유실 시험 포장(37° 16' 42.67" N, 126° 59' 0.11" E)에서 2009년 5월부터 9월까지 수행되었다. 규격은 너비 2 m, 경사장 5 m, 깊이 1 m, 경사도 15%인 3개의 시험포 (Fig. 1)를 운영하였는데 각 시험포의 토성은 식양토, 양토, 사양토였다. 각 시험포는 4개의 plot으로 세분하여 총 12개의 plot을 운영하였다. plot의 끝부분에 집수구를 설치하여 강우 후 유실토양과 표면 유출수를 저장하고 그 양을 측정하였다. 시험 전 시험포장 표토의 점토함량은 식양토, 양토, 사양토에서 각각 27.0%, 21.1%, 14.2%였다 (Table 1). 고추정식은 경사장에 직각방향으로 이랑을 만들고 각각 5월 4일, 15일, 25일에 고추 (*Capsicum annum* L. cv. Daechon)를 정식하였으며 1개의 나지구를 두었다. 이 때 고추의 재식거리는 33×71 cm로 하였다. 편의상 나지구는 'bare soil', 5월 4일 정식한 plot은 'RP1', 5월 15일 정식한 plot은 'RP2', 5월 25일 정식한 plot은 'RP3'라고 표기하였다.

강우량 및 강우인자 산정 강우량은 수원시 국립농업과학원 포장 인근에 위치한 기상대로부터 제공하는 한 시간 단위로 측정된 강우데이터를 이용하였다. 강우시 발생하는 토양유실량은 1회 강우사상을 기준으로 측정하였는데, 이 때 1회 강우사상이란 RUSLE (Renard

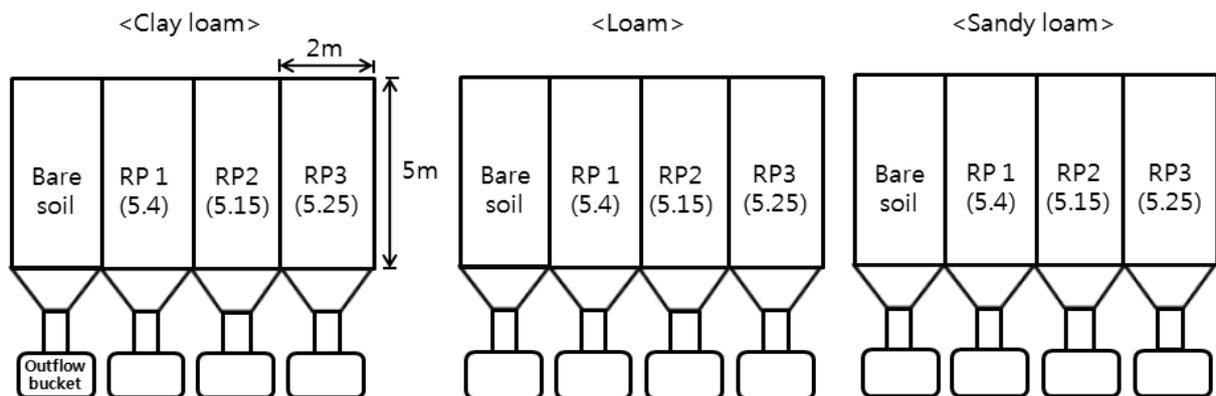


Fig. 1. The sketch of three experimental plots. Each plot was tilted as slopiness of 15% and subdivided into four sectors to differentiate transplanting dates. (RP1, field plot red pepper transplanted on May 4; RP2, red pepper transplanted on May 15; RP3, red pepper transplanted on May 25).

Table 1. Physical characteristics of topsoils collected from the experimental plots (0-15 cm) prior to transplanting red pepper seedlings.

Plot	Sand	Silt	Clay
	----- % -----		
Clay loam	30.0	43.0	27.0
Loam	47.7	31.1	21.1
Sandy loam	59.9	25.8	14.2

Table 2. Saturated hydraulic conductivity of the experimental plots.

	Clay loam	Loam	Sandy loam
Saturated hydraulic conductivity (cm hr ⁻¹)	0.037	0.719	0.801

et al., 1997)에서 정의하는 ‘강우와 다음 강우사이 시간이 6시간 이하이고 그 강우량 합이 12.7 mm 이상일 때’ 또는 ‘합이 12.7 mm 이하일 때는 15분 이내의 강우가 6.35 mm 이상일 때’로 보았다. 이 기준에 따라 강우사상별로 토양유실예측모델 RUSLE에 의한 강우인자를 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다 (Renard et al., 1997).

$$EI_{30} = \sum(e \cdot I \cdot t) / 100 \cdot I_{30} \text{ (MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}) \text{ 식 (1)}$$

$$e = 0.119 + 0.0873 \times \log I \text{ (MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1})$$

$$I \leq 76 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$$

$$e = 0.283 \quad I > 76 \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$$

$$I = \text{강우강도 (mm hr}^{-1})$$

$$t = \text{시간 (hr)}$$

$$I_{30} = 30 \text{분 최대 강우강도 (mm hr}^{-1})$$

RUSLE를 이용하여 수 년 간의 강우사상에 대해서 강우인자 산출 시 강우인자는 $\sum(EI_{30})/N$ 으로 계산하지만 본 연구에서는 개별 강우사상에 대한 강우효과에 대해 알아보려고 하였으므로 1회 강우사상의 EI_{30} 을 구하였다.

시료채취 및 분석방법 시료는 강우사상마다 발생한 유실토양과 표면 유출수를 채취하였다. 토양유실량 조사는 각 시험구 plot 아래에 위치한 집수구에 모인 토양 전체를 채취하고 건조한 후 무게를 측정하였고, 토성분석은 hydrometer 법을 이용하였다 (농촌진흥청 국립농업과학원, 2000).

식생조사 2009년 6월 1일부터 9월 초순까지 각각의 plot에서 대표 열을 정해 놓고 그 열에 대해 생육단

계별로 Crop Circle-red (Holland Scientific, ACS-210)을 이용하여 식물체의 피복도와 초장 (草場)를 측정하였다. ‘작물에 의한 피복율’은 작물에 대한 복사선의 반사를 원리를 이용한 지상원격측정센서 Crop Circle-red로 측정하여 구한 식생지수 ‘NDVI’ (Rouse et al., 1974)와 ERDAS image 9.1을 이용한 ‘사진영상 분석치’의 선형관계를 상관분석을 통해 구하였다. NDVI는 입사광에 대한 작물의 반사율을 이용한 식생지수로 다음과 같은 식에 의해 산출되었다.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

‘NIR’은 센서의 근적외선 파장 (880±10 nm)에 대한 반사율로 잎의 밀도에 비례하며 ‘Red’는 적색 파장 (650±5 nm)에 대한 반사율로 엽록소의 밀도에 비례하며 (Tucker et al., 1985) 이 값들로 얻어진 NDVI는 -1~1사이의 값을 갖는데 식생의 피복도가 커짐에 따라 수치가 커진다. 측정은 센서의 광원이 식물체의 끝으로부터 90 cm 높이를 유지하면서 이랑과 수직방향으로 하였고, 사진은 생육초기에 정해놓은 군락의 2 m 높이에서 촬영하였고 ERDAS image 9.1을 이용하여 단위면적에 대한 식생피복면적을 수치화하였다 (Fig. 2). NDVI와 영상분석수치의 상관분석을 통해 구한 ‘피복율’과 ‘초장’을 이용하여 유실예측모델 RUSLE의 작물인자 C factor의 subfactor 중 하나인 ‘수관피복인자 (Canopy cover subfactor, CC)’를 다음의 식을 이용하여 구하였다 (Renard et al., 1997).

$$\text{Canopy Cover Subfactor} = 1 - F_c \cdot \exp(-0.1 \cdot H) \text{ 식 (2)}$$

$$F_c (\%, \text{작물에 의한 피복율}) =$$

$$\frac{\text{단위면적 내의 작물피복면적}}{\text{단위면적}} \times 100 \text{ 식 (3)}$$



Fig. 2. Photographic measurement of canopy cover of red pepper. -Yellow quadrat in figure 2, unit area.

H = 식생의 초장 (ft)

수관피복인자 (CC, canopy cover subfactor)는 0-1 값을 가지며, 피복율이 클수록 작은 값을 가진다.

자료분석 수관피복인자와 토양유실률 및 유출수율의 관련성을 알아보기 위하여 SAS 9.1을 이용하여 회귀분석을 하였다.

결과 및 고찰

강우특성 2009년 5월부터 9월까지 연구가 수행되었는데, 이 기간에 발생한 총 강우량은 1,197.9 mm, EI₃₀은 7,582.9 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹이었고, 특히 7월에 발생한 강우량은 760.9 mm로 본 연구기간 강우량의 63.5%, EI₃₀은 6,432.7 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹로 본 연구기간 EI₃₀의 84.8%로 집중강우가 발생하였다 (Table 3). Jung et al. (2004)의 연구결과에 의하면 우리나라 158개 시군의 평균 EI₃₀은 4,276 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹이었고, 본 연구 포장과 같은 지역인 수원군은 4,913 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹이었는데, 과거 평균치에 비해 매우 큰 값을 보였고, 다른 지역에 비해 강한 강도의 강우가 발생하였다고 추측할 수 있다.

토양유실 및 유출수 Table 5은 연구기간 동안 발생한 토양유실량과 나지구에 대한 고추정식 처리구에서의 토양유실량의 비율을 나타낸 표로 5월부터 9월까지 유실량을 관찰하였으나 토양유실 및 유출수 대부분이 이 기간에 발생하므로 연간 발생량으로 나타내었다. 토양유실은 나지구에서는 양토에서 205.8 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, 식양토에서 143.8 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, 사양토에서 103.4 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, 고추정식 처리구에서는 양토 60.1-91.2 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, 식양토 47.5-103.7 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, 사양토 24.9-58.4 Mg ha⁻¹ yr⁻¹가 발생하였는데 나지구와 고추정식 처리구 모두 양토에서 대체로 가장 많이 발생하였고, 식양토, 사양토 순으로 발생하였다. 한편 Morgan et al. (1988)은 농업 전문가들이 관심을 가질 적정수준의 토양침식량은 10 Mg ha⁻¹ yr⁻¹라고 하였으며, Park and Son (1998)은 비점오염 발생 한계 토사 침식 허용량은 1 Mg hr⁻¹라고 하였는데 이들 기준에 의하면 위 조건과 같은 밭토양에서는 자원적·환경적 측면에서 지속적인 토양보전관리가 매우 절실하다고 판단된다. 나지구 대비 고추정식 처리구의 토양유실량의 비는 고추정식을 가장 빨리 한 RP1 처리구가 24-33%로 나지구에 비해 67-76%의 토양유실저감 효과를 볼 수 있었다. RP2 처리구는 나지구에 비해 32-47%의 토양이 유실되었고, RP3 처리구는 44-72%로 토양유실이

Table 3. Monthly rainfall amount and EI₃₀.

	May	June	Jul.	Aug.	Sept.	total
Rainfall amount (mm)	96.5	107.0	760.9	194.0	39.5	1,197.9
EI ₃₀ (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹)	69.6	287.0	6432.7	686.6	106.9	7,582.9

Table 4. Changes in canopy cover subfactor of red pepper.

Soil texture	Clay loam			Loam			Sandy loam		
	RP1	RP2	RP3	RP1	RP2	RP3	RP1	RP2	RP3
7.7	0.602	0.745	0.878	0.599	0.756	0.935	0.590	0.714	0.862
7.13	0.631	0.699	0.829	0.582	0.711	0.873	0.597	0.672	0.831
7.20	0.547	0.632	0.775	0.540	0.709	0.884	0.543	0.630	0.797
7.27	0.558	0.601	0.709	0.550	0.684	0.881	0.565	0.648	0.784

Table 5. Total soil loss and soil loss ratio in plots with different transplanting dates.

Treatment	Clay loam			Loam			Sandy loam		
	Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹								
Bare soil	143.8 (100)			205.8 (100)			103.4 (100)		
RP1	47.5 (33)			60.1 (29)			24.9 (24)		
RP2	63.4 (44)			97.4 (47)			32.7 (32)		
RP3	103.7 (72)			91.2 (44)			58.4 (57)		

-() indicate soil loss ratio.

-Soil loss ratio (%)=(soil loss from RP1 plot/soil loss from bare soil plot)×100.

Table 6. Particle size distribution of eroded soils.

(unit : %)

Plot	(mm)	Sand					Silt	Clay
		2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	0.05-0.002	<0.002
Clay loam	Average	3.1	7.8	7.3	5.3	5.1	51.9	19.5
	Range	(0.6-5.4)	(1.5-12.7)	(0.7-13.2)	(0.1-13.6)	(0.8-10.3)	(39.7-64.2)	(13.1-32.1)
Loam	Average	9.7	13.4	7.9	6.0	7.9	37.9	17.2
	Range	(4.2-15.0)	(6.7-21.0)	(3.1-12.8)	(0.5-14.0)	(3.9-13.4)	(24.3-53.9)	(11.4-26.4)
Sandy loam	Average	12.5	17.3	9.9	7.5	7.2	33.9	11.7
	Range	(4.1-19.2)	(6.9-27.0)	(3.1-16.0)	(0.6-21.5)	(2.6-18.1)	(17.1-58.5)	(6.2-21.9)

Table 7. Total runoff and runoff ratio measured from plots with different transplanting dates.

Treatment	Clay loam	Loam	Sandy loam
	----- 10 ³ L ha ⁻¹ yr ⁻¹ -----		
Bare soil	6,793 (100)	8,142 (100)	5,287 (100)
RP1	5,585 (82)	6,007 (74)	3,329 (63)
RP2	5,595 (82)	6,105 (75)	4,460 (84)
RP3	7,147 (105)	6,556 (81)	5,332 (101)

- () indicate runoff ratio.

- Runoff ratio (%) = runoff from RP1 plot/runoff from bare soil plot × 100

발생해 RP1 처리구에 비해 크게는 두 배 이상의 차이를 보였다. 토양유실발생이 일어날 정도의 강우가 7월에 집중적으로 발생한 것을 감안할 때 고추정식을 20일 정도 늦추었을 때 식생피복이 낮게 형성되어 (Table 4) 토양유실의 피해가 커질 수 있다고 판단되었다. 유실된 토양의 입도분석 결과 고추 정식 전 토성과 비교하였을 때 유실토양에서 미사는 6.8-8.9% 더 많았고, 모래와 점토는 각각 1.4-5.5%, 2.5-7.5% 적었다 (Table 6). 이는 미사가 모래와 점토에 비해 토양표면으로부터 분리되기 가장 쉬워 유실이 잘 일어난다 (Bouyoucos, 1935)는 결과와 같았으며, 미사 함량이 많은 토양은 토양관리에 각별히 신경을 써야할 것으로 생각된다.

Table 7은 연구기간 동안 발생한 유출수량과 나지구 유출수량에 대한 고추정식 처리구 유출수량의 비율을 나타내었다. 유출수량은 양토에서 가장 많았고 식양토, 사양토 순으로 발생하였다. 앞의 결과에서 토양유실량 역시 양토에서 가장 많았고 식양토, 사양토 순으로 발생하여 토양유실량은 강우에 따라 유출수량이 높을수록 증가된다고 보고된 (Hur et al., 2005; Yun et al., 1996) 연구결과와 같은 양상이었다. 나지구 유출수량에 대한 고추정식 처리구 유출수량의 비는 토성과 정식처리에 따라 달랐는데, 식양토 RP1은 82%, 양토 RP1은 74%, 사양토 RP1은 63%로 발토양에 멀칭을 하지 않은 채로 5월 4일에 고추 정식하였을 때 유출수 저감효과가 18-37%로 그리 크지 않았다. 특히 식양토에서 그 효과가 가장 낮았는데 이는 식양토에서의 침투속도

가 0.037 mm hr⁻¹로 양토 (0.719 mm hr⁻¹)와 사양토 (0.801 mm hr⁻¹)에서의 침투속도에 비해 느린 것에서 그 이유를 찾을 수 있다. 유출수 발생이 대체로 모든 토성에서 많았던 것을 감안할 때 고추를 재배할 때 토양유실 뿐 아니라 유출수로부터 유실되는 양분을 고려하여 토양관리를 하여야 할 것으로 판단된다. 한편 식양토 RP3와 사양토 RP3 plot에서 유출수 발생이 나지에 비해 많았는데 이는 유실발생시 토양수분상태나 토양표면상태 등을 함께 검토해야 할 것으로 생각된다.

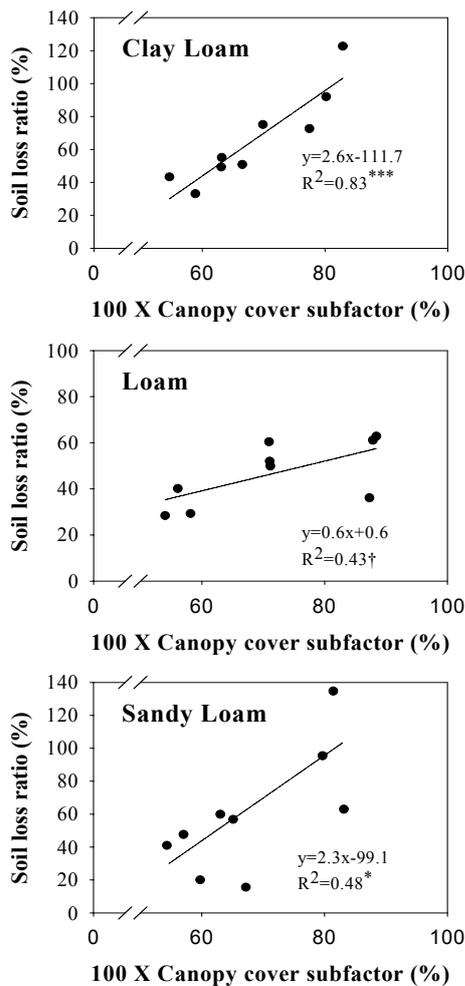
수관피복인자와 토양유실률, 유출수율 관계 토양 유실량과 유출수량에 대한 식생 피복효과를 알아보기 위하여 강우사상별 식생피복에 대한 토양유실량과 유출수량을 알아보았다. 이 때 식생피복정도 대한 영향을 보기 위해 피복도 이외의 조건을 제한하여 100 mm 이상 강우에서의 유실발생을 관찰하였다. 식생피복은 앞서 구한 ‘수관피복인자’로, 토양유실률 및 유출수율은 각각 ‘나지구에 대한 고추정식 처리구 RP1, RP2, RP3에서의 토양유실량 및 유출수량의 비율’로 계산하여 수관피복인자와 토양유실률, 유출수율의 관계를 알아보았다. Table 8은 강우사상별 발생한 유실에 대해 ‘100×수관피복인자 (X)’와 ‘토양유실률 (Y1)’ 및 ‘유출수율 (Y2)’의 단순회귀분석결과를 나타낸 표이다. Figure 3는 강우사상별 발생한 토양유실에 대해 토성별 수관피복인자와 토양유실률의 관계를 나타내는 그래프이다. X축의 수관피복인자는 식생피복도가 커질수록 작은 값을 갖는데

Table 8. The relationship between 100×canopy cover subfactor (% X) and soil loss ratio (% Y1), runoff ratio (% Y2) under rainfall over 100 mm.

		Class	Regression equation	R ²
Soil loss ratio		Total	Y=1.1X-27.9	0.35**
	Plot	Clay loam	Y=2.6X-111.7	0.83***
		Loam	Y=0.6X+0.6	0.43 [†]
		Sandy loam	Y=2.3X-99.1	0.48*
	Rainfall type	I	Y=1.0X-27.7	0.47*
		II	Y=1.3X-35.0	0.31*
Runoff ratio		Total	Y=0.6X+47.6	0.09 [†]
	Plot	Clay loam	Y=0.8X+42.5	0.21 (ns)
		Loam	Y=0.3X+55.7	0.05 (ns)
		Sandy loam	Y=1.1X+13.2	0.20 (ns)
	Rainfall type	I	Y=1.4X-13.7	0.34*
		II	Y=-0.1X+102.0	0.01 (ns)

- [†], *, **, *** Significant at the 0.10, 0.05, 0.01 and 0.001 probability level, respectively. ns means 'no significance'.

- Rainfall type I, rainfall with EI₃₀<1,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹; Rainfall type II, rainfall with EI₃₀>1,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹.

**Fig. 3. Relationship between 100×canopy cover subfactor (%) and soil loss ratio (%) according to soil texture under rainfall over 100 mm.**

- [†], *, *** Significant at the 0.10, 0.05 and 0.001 probability level, respectively.

편의상 백분율로 나타내었다. 유실토양발생은 토성별로 분석하였을 때 수관피복인자가 커짐에 따라 토양유실률이 커지는 관계가 뚜렷하게 나타났다 (식양토, $R^2=0.83$, $p<0.001$; 양토, $R^2=0.43$, $p<0.1$; 사양토, $R^2=0.48$, $p<0.05$). 이는 토양침식이 토성에 따라 영향을 많이 받는다 (Bouyoucos, 1935)는 것을 반영하는 결과였다. 수관피복인자에 따른 토양유실률을 나타내는 회귀 직선의 기울기는 식양토 (2.6)와 사양토 (2.3)에서 양토 (0.6)보다 컸다. 따라서 고추의 정식시기를 20일 조절함에 따라 100 mm 이상의 강우 시 토양 유실감소효과가 식양토와 사양토에서 크게 나타났음을 예상할 수 있었다. 100 mm 이상 강우조건에서 나지에 대한 토양유실 저감효과가 식양토와 사양토에서 약 50~60% 정도였고, 양토에서는 그 효과가 미약하여 양토는 20일 정도의 정식시기 조절로 토양유실 정도가 크게 달라지지 않을 것으로 판단되었다.

한편 EI₃₀<1,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹인 강우를 I, EI₃₀>1,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹인 강우를 II로 강우유형을 나누었을 때 유출수율과 수관피복인자의 선형관계는 강우유형 I에서 수관피복인자가 클수록 (식생피복도가 작을수록) 유출수율이 커지는 선형관계가 분명하게 나타났다. 전체강우에 대해서는 10% 유의수준에서 결정계수가 0.09로 유출수율에 대한 식생피복효과의 설명력이 낮았으나, I의 강우유형일 때 선형관계의 결정계수가 0.34이고 이 때 유의수준은 5%로 유출수율에 대한 식생피복효과를 비교적 높게 나타냈다 (Table 8, Fig. 4). 이는 100 mm 이상의 강우 시 강우강도가 약할 때 식생피복에 의한 유출수 발생 저감효과가 있다는 것을 의미한다.

한편 앞의 결과에서 토양유실은 강우강도에 관계없이 수관피복인자와 토양유실률의 상관관계가 높은 반면, 유출수는 EI_{30} ($1,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 의 강우에서 수관피복인자와 유출수율의 상관관계가 높았다. 토양유실과 유출수 발생이 강우유형에 따라 식생피복효과가 다르게 나타나는 것은 토양유실발생이 일어나는 임계 강우에너지, 식생뿌리 등의 식물체 잔여물 영향, 토양의 수분침투 속도 때문이라고 생각되어진다. Ward and Elliot (1995)에 의하면 토양유실은 강우가 지면에 도달 시 토양표면에 대한 타격으로 발생하는데, 이 힘에 대한 토양입자의 저항력 이상의 힘이 가해지면 표면으로부터 분리되어 나가게 된다고 한다. 토양유실은 토양입자에 가해지는 유출수의 운동에너지가 표면으로부터 탈립될 수 있는 임계값 이상일 때 발생하게 되는데, 고추의 뿌리에 의해 탈립에 대한 저항이 커져서 유출수의 영향이 상쇄되고 식생피복효과가 나타난 것으로 판단된다. 한편 유출수는 강우강도가 토양침투속도 이상일 때 발생하는데 강우유형 II의 평균 강우강도는 $11.0\text{--}14.0 \text{ mm hr}^{-1}$ 로 토양유실 시험포장의 수분침투속도 $0.04\text{--}0.8 \text{ mm hr}^{-1}$ (Table 2)를 훨씬 초과하기 때문에 작물피복효과가 나

타나지 못하고 많은 유출수가 발생한 것으로 생각되어진다. 이상의 결과에서 100 mm 이상의 강우에서 정식 시기에 따른 식생피복효과는 강우인자에 따라 유출수와 토양유실에서 유효성이 다르게 나타났고 이 때 강우는 강우강도 EI_{30} 을 $1,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 기준으로 나누었지만 작물피복의 유출수 저감효과에 대한 유효성을 결정하는 강우강도의 기준을 설정하기 위해서는 더 많은 데이터의 축적을 토대로 한 비교 연구가 필요하다고 생각된다. 또한 식생의 지하부 뿌리분포에 대한 정량화를 통한 토양유실 평가가 보완될 필요가 있다.

결론

물에 의한 유실은 강우, 식생, 지형, 토양관리, 토양 특성 요인의 조합에 따라 달라지는데 본 연구에서는 15% 경사지 토양유실 시험포장에서 토양 특성별로 고추의 식생피복도와 토양 유실량, 유출수량과의 관계, 그리고 100 mm 이상의 개별 강우에서 수관피복인자와 토양유실률, 유출수율과의 관계를 살펴보았다. 연구기간은 2009년 5월부터 9월까지 이었으며, 식생 피복도는 고추의 정식시기를 각각 5월 4일, 5월 15일, 5월 25일로 하여 3처리 하였다. 조사는 토성별로 강우사상마다 발생하는 토양유실량과 유출수량을 측정하였고, 생육단계별로 고추의 식생피복도를 측정하여 수관피복인자를 구하였다. '토양유실률'은 나지구에서 발생한 토양유실량에 대한 고추정식 처리구에서 발생한 토양유실량의 백분율이며, '유출수율'은 나지구에서 발생한 유출수량에 대한 고추정식 처리구에서 발생한 유출수량의 백분율이다.

토양유실은 나지구에서는 양토에서 $205.8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 식양토에서 $143.8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 사양토에서 $103.4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 양토>식양토>사양토 순으로 발생하였으며, 고추정식 처리구의 토양유실은 나지구에서의 토양유실량과 비교했을 때 정식시기에 따라 식양토에서는 33–72%, 양토에서는 29–44%, 사양토에서는 24–57%인 것으로 나타났다. 또한 고추정식 처리구에서 유실된 토양은 고추 정식 전의 토성과 비교했을 때 미사의 함량이 6.8–8.9% 더 많았다. 유출수는 나지구 양토에서 $8,142 \text{ L ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 식양토 $6,793 \text{ L ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 사양토 $5,287 \text{ L ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 토양유실의 토성 간 발생한 정도가 같은 경향을 보였고, 나지구에서의 유출수량과 비교했을 때 정식시기에 따라 식양토에서는 82–105%, 양토에서는 74–81%, 사양토에서는 63–101%인 것으로 나타났다.

100 mm 이상의 강우조건에서 강우사상별 유실발생을 관찰한 결과 수관피복인자가 커질 때 (식생피복도

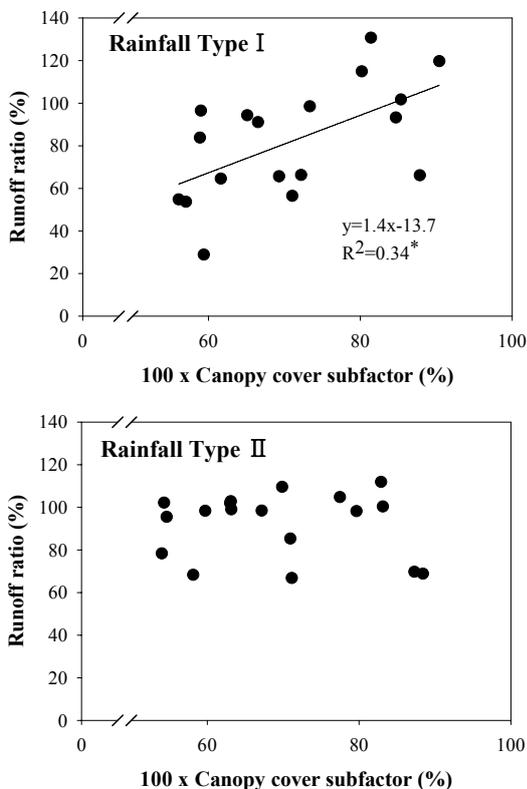


Fig. 4. Relationship between 100×canopy cover subfactor (%) and runoff ratio (%) according to EI_{30} under rainfall over 100 mm. (upper) Rainfall type I, rainfall with $EI_{30} < 1,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$; (lower) Rainfall type II, rainfall with $EI_{30} > 1,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$.

- * Significant at the 0.05 probability level.

가 작아질 때) 토양유실률이 커지는 관계 ($R^2=0.35$, $p<0.01$)를 보였고, 토성별로 분석하였을 때 식양토에서 가장 뚜렷하게 나타났고 ($R^2=0.83$, $p<0.001$) 수관피복 인자에 따른 토양유실률을 나타내는 회귀 직선의 기울기는 식양토 (2.6)와 사양토 (2.3)에서 양토 (0.6)보다 컸다. 나지에 대한 토양유실 저감효과가 식양토와 사양토에서 약 50-60% 정도였고 양토에서는 그 효과가 적어 정식시기 조절에 따른 토양유실정도의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 한편 강우인자 EI_{30} 을 $1,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 를 기준으로 강우유형을 나누었을 때, 유출수는 $1,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 이하의 강우강도를 가진 강우 시 작물피복효과가 있는 것으로 나타났다 ($R^2=0.34$, $p<0.05$).

따라서 100 mm 이상의 강우 시 고추의 정식시기를 20일 늦추어도 양토에서는 토양유실 피해가 사양토와 식양토에 비해 미약할 것으로 판단되었다. 100 mm 이상의 강우에서 유출수에 대한 작물피복효과가 강우인자 EI_{30} 에 따라 달라졌고 유효한 범위를 $1,000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ 을 기준으로 나누었지만 유출수 저감에 대한 작물피복효과의 유효성을 결정하는 기준을 설정하기 위해서는 유실에 대한 더 많은 데이터 축적이 필요하다고 생각된다.

인용문헌

- America Society of Civil Engineers (ASCE). 1975. Sedimentation engineering. New York. p 745.
- Bouyoucos, G.J., 1935. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. *Agro. Soc. Am. J.* 27:738-751.
- Hur, S.O., K.H. Jung, S.K. Ha, H.K. Kwak, and J.G. Kim. 2005. Mathematical Description of Soil Loss by Runoff at Inclined Upland of Maize Cultivation. *J. Korean Soil Sci. Fert.* 38:66-71.
- Jackson, R.D. and A.R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices, *Prev. Vet. Med. J* 11:185-200.
- 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. *J. Korean Soil Sci. Fert.* 37:199-206.
- Jung, P.K., M.H. Ko, and K.T. Um. 1985. Discussion of Cropping Management Factor for Estimating Soil Loss. *J. Korean Soil Sci. Fert.* 18:7-13.
- Lee, H.H., S.K. Ha, S.O. Hur, K.H. Jung, C.W. Park, and K.H. Kim. 2007. Characteristics of Soil Water Runoff and Canopy Cover Subfactor in Sloped Land with Different Soil Texture. *J. Korean Soil Sci. Fert.* 40:131-135.
- Morgan, R.P.C. 1988. Soil erosion and conservation .Longman Group Ltd. p 198.
- NAAS. 2000. Analytical methods of soil and plant. p 35-54.
- Osborn, B. 1954. Effectiveness of cover in reducing soil splash by raindrop impact. *J. Soil and Water Conser.* 9:70-76.
- Park, M.J. and G.I. Son. 1998. Study on the sediment yield estimation due to land development. National institute of disaster prevention. Seoul, Korea.
- Penuelas, J. and I. Filella. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends. in Plant. Sci.* 3:151-156.
- 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.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation (Type III Final Report), NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.
- Tucker, C.J., C.L. Vanpraet, M.J. Sharman, and G. Van Ittersum. 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984. *Remote Sensing Environ.* 17:233-249.
- Ward, A.D. and W.J. Elliot 1995. *Environmental Hydrology.* CRC Press. Florida. USA. p. 178-179.
- Wiegand, C.L., A.J. Richardson, D.E. Escobar, and A.H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing Environ.* 35:105-119.
- 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 D.C., USA.
- Yun, B.K., P.K. Jung, S.J. Oh, S.K. Kim, and I.S. Ryu. 1996. Effects of Compost Application on Soil Loss and Physico-Chemical Properties in Lysimeters. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29:336-341.