

인공강우실험에 의한 임도노면의 지표유출량 및 토양유실량 평가*

유 송¹⁾ · Li, Qiwen¹⁾ · 이은재¹⁾ · 임상준¹⁾²⁾

¹⁾ 서울대학교 산림과학부 · ²⁾ 서울대학교 농업생명과학연구원

Predicting Surface Runoff and Soil Erosion from an Unpaved Forest Road Using Rainfall Simulation*

Eu, Song¹⁾ · Li, Qiwen¹⁾ · Lee, Eun Jai¹⁾ and Im, Sangjun¹⁾²⁾

¹⁾ Department of Forest Science, Seoul National University,

²⁾ Research Institute of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University.

ABSTRACT

Unpaved forest roads are common accessways in mountain areas being used for forestry purposes. The presence of forest roads produces large volumes of surface runoff and sediment yield due to changes in soil properties and hillslope profile. Rainfall simulation experiments were conducted to estimate the impacts of above-ground vegetation and antecedent soil water condition on hydrology and sediment processes. A total of 9 small plots(1m×0.5m) were installed to represent different road surface conditions: no-vegetation(3 plots), vegetated surface(3 plots), and cleared vegetation surface(3 plots). Experiments were carried out on dry, wet, and very wet soil moisture conditions for each plot. Above ground parts of vegetation on road surface influenced significantly on surface runoff. Runoff from no-vegetation roads(39.24L) was greater than that from vegetated(25.05L), while cleared-vegetation condition is similar to no-vegetation roads(39.72L). Runoff rate responded in a similar way to runoff volume. Soil erosion was also controlled by land cover, but the magnitude is little than that of surface

* 본 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호 : S111214L150110)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

First author : Eu, Song, Department of Forest Science, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea,

Tel : +82-2-880-4768, E-mail : dkarj@snu.ac.kr

Corresponding author : Im, Sangjun, Department of Forest Science, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea.

Tel : +82-2-880-4759, E-mail : junie@snu.ac.kr

Received : 2 March, 2015. **Revised** : 21 April, 2015. **Accepted** : 3 May, 2015.

runoff. Even though slight differences among antecedent soil moisture conditions were found on both runoff and soil erosion, runoff rate and soil losses were increased in very wet condition, followed by wet condition. The experiments suggest that vegetation cover on forest road surface seems most effective way to reduce surface runoff and soil erosion during storm periods.

Key Words : *Forest road, Soil erosion, Runoff, Vegetation cover, Rainfall simulation.*

I. 서 론

최근 산림토사재해에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 우리나라는 여름철에 강우가 집중되는 기후특성을 보이는데, 산사태와 같은 산림토사재해는 연속강우에 의해 지지력이 약화된 산지사면에 집중호우가 내리는 경우에 주로 발생하며, 훼손된 산지나 지표식생이 불량한 경사면에 강우가 내리면 많은 양의 토양침식이 발생하기도 한다(Pradhan et al., 2012).

산림에서 발생하는 토양침식은 임도 노면을 따라 주로 발생한다(Reid and Dunne 1984; Wemple et al., 1996; Connolly et al., 1999). 특히, 임도의 노면침식은 피복되지 않고 노출된 토사도나 관리되지 않고 방치되어 있는 임도에서 주로 발생한다(Ziegler and Giambelluca 1997). 우리나라에서는 산림의 훼손을 최소화하고 임업경영을 촉진하기 위하여 작업임도를 국유림을 대상으로 시공하고 있다. 산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 시행규칙 5조 1항에 따르면, 작업임도는 간선임도와 달리 옆도랑을 설치하지 않고 횡단물매를 통해서 노면유수를 배수하며, 일부 급경사 구간에만 노면포장을 의무화하고 있어 토양침식에 취약한 구조를 가지고 있다.

임도노면의 지표유출과 토양침식 과정을 실험적으로 살펴보기 위하여 인공강우실험을 많이 실시한다(Bowyer-Bower and Burt 1989; Connolly et al., 1999; Loch 2000; Ziegler et al., 2000; Arnaez et al., 2004; Lee and Joo 2006; Foltz et al., 2009). 인공강우실험은 토양유실에 영향을 미치

는 인자들과 그들의 상호연관성을 파악하기 위해서 실험실 혹은 산림에 소형 조사구를 설치하고 인위적으로 강우를 발생시켜 유출량과 토양 침식량을 조사하는 방법이다(Bowyer-Bower and Burt 1989; Nam et al., 2014). 인공강우실험은 실제 강우와 완전히 동일하지는 않으나, 강우 강도, 지속시간 등을 통제할 수 있고, 반복이 가능하기 때문에 자료의 획득과 분석이 용이하다는 장점으로 인해 토양침식연구 등에 많이 사용되어 왔다(Thomas and El Swaify 1989; Navas et al., 1990; Humphry et al., 2002; Marques et al. 2007). 강우에 의한 노면침식은 주로 강우의 타격에너지와 지표유출수에 의해 발생하고, 강우강도, 임도의 종 · 횡단경사, 토성, 지표식생 등도 노면침식에 많은 영향을 미친다(Bryan 2000; Hartanto et al., 2003; Arnaez et al., 2004; Foltz et al., 2009; Lee et al., 2012; Nam et al., 2014).

임도의 노면침식을 줄이기 위한 다양한 연구가 이루어져 왔다(Luce 1997; Kolka and Smidt 2004; Foltz 2012). 강우에 의한 노면침식을 방지하기 위하여 토양표면을 피복하거나 토양의 투수능력 향상을 위한 경운, 성토작업을 통한 경사를 완화하는 방법 등이 적용되어 왔다. 노면을 인위적으로 멀칭하는 방법은 퇴역 임도면의 식생 천이를 유도하기 위해 많이 적용하지만 임도를 재활용할 수 없다는 단점이 있다(Kolka and Smidt 2004; Foltz 2012). 또한 경운 등의 방법은 우리나라의 산악지형에는 쉽게 적용하기 어렵다. 임도노면의 식생피복은 토양 내의 공극을 증가시키고, 지표흐름의 유속을 느리게

하여 강우의 토양침투를 용이하게 하여 지표유출과 토양침식을 저감시키는데 효과적이다(Dunne et al., 1991; Woo and Fang 1997).

본 연구에서는 임도노면의 식생피복이 지표유출 및 토양침식에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 이를 위하여 인공강우실험장치를 개발하여 현장실험을 실시하였으며, 지표유출량과 토양유실량의 시간별 변화정도를 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험대상지 개황

강우로 인해 임도노면에서 발생하는 토양침식량을 조사하기 위하여 서울대학교 부속 중부학술림(경기도 광주시 도척면 상림리 69-1)에 위치한 작업임도를 선정하였다. 대상임도는 2011년 완공된 이후 풀베기 작업 이외의 임도관리 내역이 없으며, 2013년부터 방치되어 자연적으로 임도노면에 지표식생이 자라고 있고, 일부에는 관목이 자라고 있었다.

2. 인공강우실험

토양유실량 실험은 3종류의 지표식생 조건(나지, 식생, 식생 지상부 제거)과 3종류의 강우 전 토양 조건(건조, 습윤, 포화)으로 설계하였다. 지표식생이 지표유출 및 토양 유실에 미치는 영향을 알아보기 위해 지표면에 식생이 있는 3개의 식생조사구와 3개의 나지조사구를 각각 설치하였다. 한편, 식생조사구에서는 실험 이후에 지상부의 식생을 모두 제거하여 2주간 방치한 후에 다시 인공강우실험을 실시하여 식생의 지상부가 지표유출과 토양유실에 미치는 영향을 분석하였다.(Figure 1). 이들 조사구의 개황은 Table 1과 같다.

강우 전 토양 수분 조건은 실험 전 3일 이상 강우가 발생하지 않은 건조조건, 건조조건 실험 하루 뒤에 수행된 습윤조건, 습윤조건에서의 실험 후 30분 이내에 실시된 포화조건으로 설정하였다. 이는 각각 장기간 강우의 영향을 받지 않은 토양의 선행수분조건, 주기적인 강우의 영향을 받는 토양의 선행수분조건, 그리고 연속적

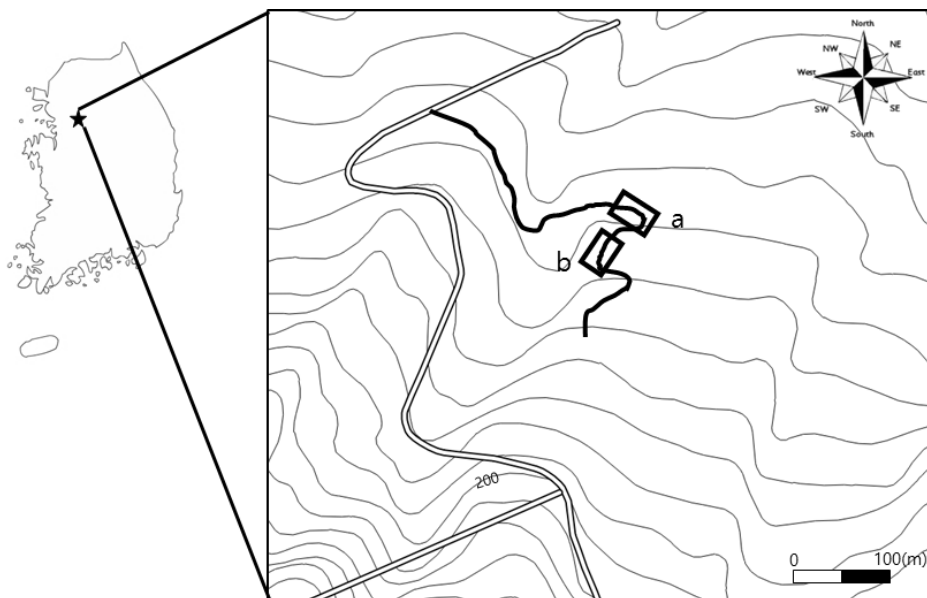
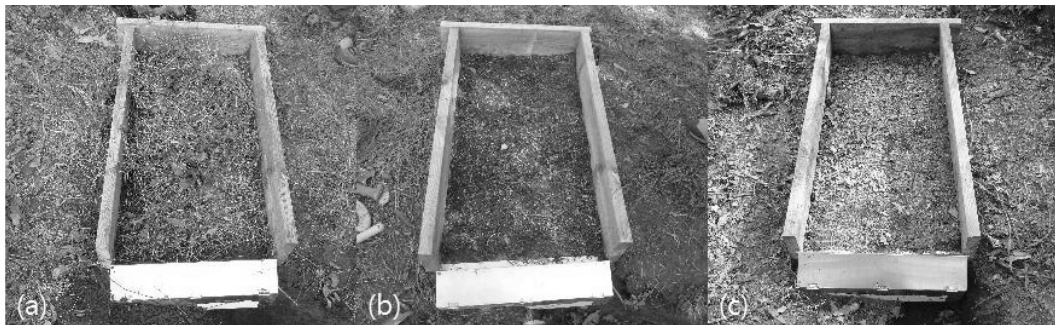


Figure 1. Location of rainfall simulation in this study.
(a: vegetation and cleared-vegetation plot, b: no-vegetation plot.)

Table 1. Physical characteristics of experimental plots used in the study.

Plot	Coverage (%)	Slope (%)	Soil texture			
			Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Texture
Vegetation	60-90	4.3-14.5	55.25	33.93	10.81	Sandy Loam
Cleared Vegetation	0-5	4.3-14.5	55.25	33.93	10.81	Sandy Loam
No Vegetation	0-2	9.8-21.2	31.03	48.67	20.31	Loam

**Figure 2.** Rainfall simulation plots (0.5×1.0m) installed in vegetation (a), cleared-vegetation (b), and no-vegetation plot (c).

인 강우의 영향을 받는 토양의 선행수분조건을 각각 모사하기 위함이다(Ziegler et al., 2000). 이와 같이 초기 토양수분조건을 변화시키며 실험을 수행하는 것은 연속적인 강우 조건에 대한 지표유출과 토양유실의 동적인 거동을 살펴보기 위한 것이다. 이는 연속적인 강우에 따른 토양수분의 변화를 고려함으로써 지표유출 및 토양유실의 과소 혹은 과대추정을 최소화 할 수 있기 때문이다(Foltz et al., 2009).

인공강우실험은 작업임도에 설치된 0.5m×1.0m 조사구마다 Figure 2와 같이 소형 강우장치(rainfall simulator)를 통해 실시하였다. Figure 2에서와 같이 1.4m 높이의 삼각대에 설치된 노즐로 물방울을 분사하였고, 조사구 안에서 발생한 지표유출은 경사면 아래 방향의 집수장치를 통해서 수집하였다. 사용된 노즐은 국제노즐의 #R10W, 분사각도는 120°로, 인공강우장치의 이동성을 고려하여 노즐 높이를 1.4m로 설정하여 해당 분

사각도에서 조사구 내에 강우가 고르게 분사되도록 하였다. 강우강도는 실험에서 사용한 펌프의 안정적인 분사강도를 고려하여 220mm hr⁻¹로 설정하여 30분 동안 강우실험을 실시하였다.

지표유출은 집수장치에서 500mL 샘플통을 이용하여 수집하였고, 최초 유출이 발생한 시점과 각 샘플통을 수집한 시간을 각각 기록하여 실험이 진행되는 동안 발생한 총유출량을 측정하였으며, 인공강우실험이 진행되는 동안 최대 유출속도를 보이는 시점인 강우 종료시점에서 유출속도를 계산하였다. 토양유실량은 수집한 지표유출을 최초 유출 발생시간을 기준으로 5분 간격 사이에 수집한 샘플통을 혼합하여 1개 실험 당 총 6개의 혼합샘플을 획득하고, 각 혼합샘플 100mL 내의 유실토양의 전건무게를 측정하여 유실된 토양을 계산하였다.

실험을 통해 측정된 지표유출, 유출속도, 토양유실량은 지표식생의 피복과 선행토양수분조

건에 대해 Two-way mixed model ANOVA 및 Tukey 사후검정($\alpha=0.05$)를 통해서 유의성을 검정하였다. 통계패키지는 R 3.0.1를 사용하였고 이때 모든 자료가 ANOVA의 가정인 등분산성, 선형성 및 정규성을 만족하는 것을 확인하였다.

III. 결 과

인공강우실험을 통해서 나타난 지표유출 및 토양유실에 대한 실험결과는 Table 2와 같다. 최초유출시간은 식생의 지상부가 존재하고 토양이 포화될수록 빠르게 발생하는 경향을 보였으며, 식생조사구의 건조조건에서 가장 늦게 나타났으며(78.67sec.), 나지조사구의 포화조건에서 17sec.로 가장 빠르게 나타났다. 총유출량은 식생조사구가 21.71-27.96L의 범위로, 나지 및 지상부 제거 조사구 37.51-42.10L의 범위에 비해 상당히 적게 나타났다. 토양수분조건에 대해서는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 최대 유출속도는 식생조사구와 지상부 제거 조사구의 경우는 토양이 포화될수록 유출속도가 증가하여 식생조사구의 건조조건에서 14.04ml s^{-1} 로 가장 작게 나타났다. 그러나 나지조건에서는 건조한 토양조건에서 27.66ml s^{-1} 로 가장 빠르

게 나타나 앞선 두 식생조건과는 반대 경향을 보였다. 토양유실량은 토양이 포화될수록 더 적게 나타났고, 나지 조사구에서 62.97-76.54g의 토양유실을 보인 반면, 식생 조사구는 4.85-9.94g, 지상부 제거 조사구에서는 9.75-21.53g의 범위를 보여 나지에서 상당히 많은 토양이 유실되었음을 알 수 있다.

이를 바탕으로 인공강우 지속시간에 따른 지표유출과 토양유실의 변화는 Figure 3, 4와 같다. Figure 3, 4와 같이 지표유출은 전반적으로 강우가 시작되고 수 분 이내에 발생하며, 점차 유출량이 증가하여 비교적 일정한 유출속도를

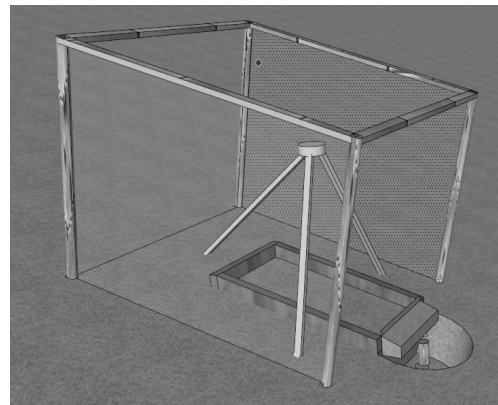


Figure 3. Rainfall simulation experiment.

Table 2. Runoff and sediments characteristics by different land covers and soil moisture treatments.

- V: vegetation, VC: cleared-vegetation, N: no-vegetation.

Soil Moisture	Land Cover	Time to runoff (sec.)	Total Runoff (L)	Max. runoff rate (mL s^{-1})	Soil loss (g)
Dry	V	78.67	21.71	14.04	9.38
	VC	78.67	38.43	22.80	21.53
	N	38.67	40.78	27.66	76.54
Wet	V	58.00	25.47	15.94	9.94
	VC	60.67	42.10	26.37	15.21
	N	25.67	41.88	25.71	71.97
Very Wet	V	50.67	27.96	20.28	4.85
	VC	46.00	37.51	26.61	9.75
	N	17.00	36.49	25.62	62.97

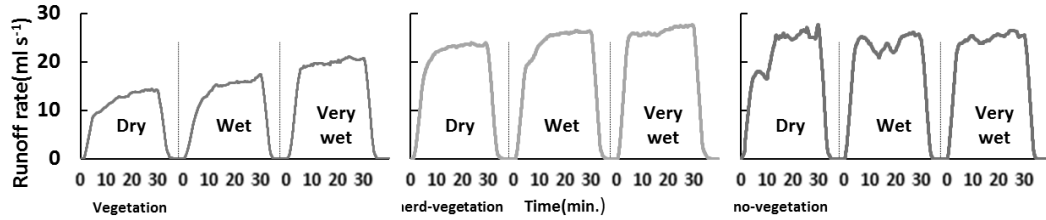


Figure 4. Surface runoff measured from a 30-min rainfall on vegetation (n=3), cleared-vegetation (n=3), and no-vegetation plots (n=3).

보이다가 강우가 종료됨에 따라 급격히 유출이 감소하는 양상을 보인다. 지표유출량과 유출속도는 식생이 있는 경우에서 가장 낮은 결과를 보였고, 강우조건에 따라서는 차이가 없었다. 지상부 식생을 제거한 경우는 나지에서의 경우와 거의 유사하게 나타났다.

토양유실에 대해서는 강우 초기에 상당히 많은 양의 토양이 유실되고, 강우가 진행됨에 따라 토사유실이 줄어드는 양상을 보인다. 토양유실은 나지의 식생조건에서 선행 토양수분조건이 건조의 경우가 가장 높은 결과를 보였다.

IV. 고 찰

1. 지상부 식생의 영향

지상부 식생이 존재하는 경우, 평균 총유출량은 25.05L로 조사되었으며, 이는 나지(39.35L) 및 지상부를 제거한 실험조건(39.72L)보다 낮게 나타났다(Figure 5). 최종 유출속도 또한 지상부 식생이 존재할 때는 16.75ml s⁻¹로 가장 낮은 값

으로 나타났다, 나지와 지상부를 제거한 실험조건에서는 각각 26.33ml s⁻¹, 25.26ml s⁻¹로 나타나 총 유출량과 유사한 경향을 보인다. 특히, 지상부 식생이 제거된 경우와 나지의 경우가 상당히 유사한 경향을 보였는데, 이로부터 지표유출량과 유출속도는 지표식생 피복에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 이는 기존의 연구결과와 일치하는 경향을 보인다(Loch 2000; Ziegler et al., 2000; Nearing et al., 2005). 지표식생 피복과 지표유출과의 관계를 분석한 선행연구에 따르면, 식생의 지상부는 강우로부터 토양표면을 보호하여 강우에너지가 직접 토양으로 전달되는 것을 줄인다(Mohammad and Adam 2010). 이 과정에서 토양 표면의 물질이 다시 배치되어 발생하는 공극 폐쇄 현상을 억제하여 토양 표면의 투수성을 증가시키는 역할을 한다(Bryan 2000; Ziegler et al., 2000). 또한 토양 표면의 공극 폐쇄 현상은 대체로 강우 시작 이후 5-10분 이내에 발생하는데 (Bryan 2000), 본 실험의 결과에서도 이와 잘 일치하여 선행연구에서 정의

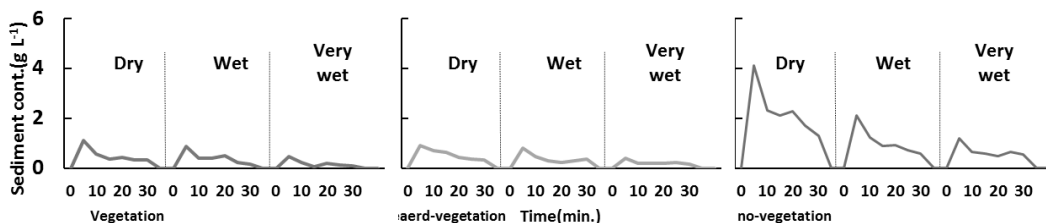


Figure 5. Soil loss measured from a 30-min rainfall on vegetation (n=3), cleared-vegetation (n=3), and no-vegetation plots (n=3).

된 유출기작이 나타난 것으로 추정된다.

토양유실의 경우, 토양유실량은 나지에서 70.49g으로 매우 높게 나타났다(Figure 5). 지표식생이 있는 임도노면의 토양유실량은 각각 8.06g, 유실 토양농도는 0.3g L⁻¹이었으며, 지상부 식생이 제거된 경우에 토양유실이 증가하였으나 상대적으로 지표유출에 비해서는 적은 증가폭을 보였다.

지상부 식생을 제거한 경우에 토양유실이 증가하는 경향을 보였다. 지표식생은 강우에너지의 차단 뿐만 아니라 지표흐름의 유속을 느리게 하는 효과를 보인다(Woo and Fang 1997). 따라서 식생의 지상부가 제거되어 이전에 운송되지 않은 토사까지 운반했기 때문에 토양유실량이 증가한 것으로 보인다. 그러나 지표유출의 증가에 비해서 토양유실의 증가량이 적게 나타났다. 토양표면의 침식에 있어서 강우에 의해 침식되기까지의 준비기간이 길수록 더 많은 양의 토양 입자가 토양표면으로부터 분리되어 더 많이 유실되는 경향을 보인다(Ziegler et al., 2000). 따

라서 식생의 지상부를 제거한 이후 충분한 토양 입자가 분리되지 않았기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 보인다.

2. 토양 수분 조건에 따른 영향

본 연구에서는 토양수분조건을 건조, 습윤, 포화의 3단계로 구분하여 실험을 진행하였다. 이는 강우 형태의 유형을 모사한 것으로, 건조 조건은 집중적인 강우가 내리기 전의 건조한 환경에서의 강우조건이며, 습윤조건은 연속적인 강우가 발생하는 과정의 강우조건을 나타내며, 연속적인 강우에 의해 토양이 포화된 상태에서 내리는 강우조건은 포화조건으로 가정할 수 있다(Ziegler et al., 2000; Foltz et al., 2009).

인공강우실험 결과, 총 지표유출량과 최대 유출속도는 강우 전 토양수분조건에 대해서는 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 토양수분의 영향보다는 식생의 지상부에 의한 영향이 더 크게 나타났기 때문인 것으로 보인다. 그러나 최

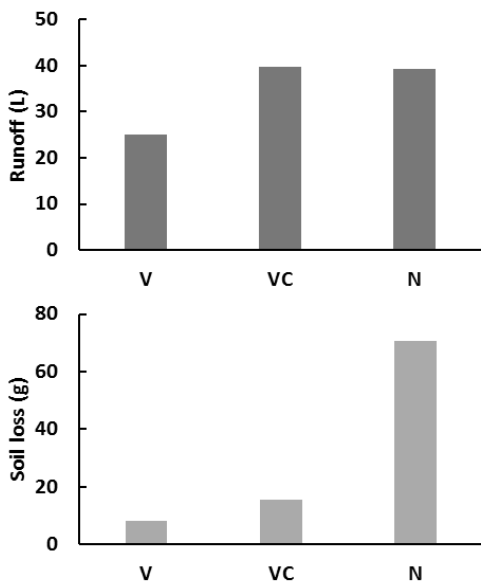


Figure 6. Runoff volume and soil loss with different land cover. (V: vegetation, VC: cleared-vegetation, N: no-vegetation.)

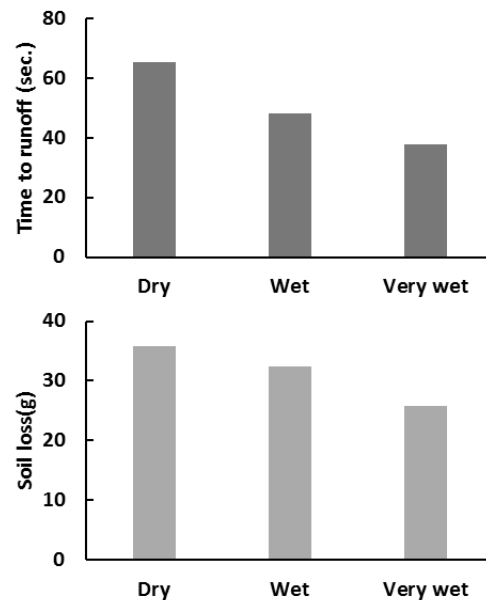


Figure 7. Elapsed time for producing runoff and soil loss with different soil moisture conditions.

초 유출시간은 토양이 포화됨에 따라서 더욱 이른 시기에 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 토양표면의 공극 폐쇄 현상과 토양 내 수분이 포화상태에 이르면서 초기 건조조건에서의 투수성이 상당 부분 감소되었기 때문으로 보인다(Figure 6). 토양유실의 경우, 통계적으로 유의한 결과를 보이지는 않았으나, 건조상태에서 포화상태로 갈수록 토양유실량이 감소하는 경향을 보인다(Figure 6). 이 결과에 대해서, 강우에 의해 토양이 포화됨에 따라 실질적인 토양유실은 감소하지만, 본 실험의 조건으로 발생한 토양유실에 비해 적은 감소폭을 보여 통계적인 유의성을 보이지 않은 것으로 추정된다.

기존의 선행연구들에 따르면, 건조한 토양에서는 강우에 의한 타격에너지가 토양의 수분함량이 높은 조건보다 높게 나타나며, 토양수분이 증가하면 토과 내부의 공기가 빠져나오며 부서지는 소화작용, 토양입자의 팽창현상 등이 감소하면서 전반적인 토양침식이 감소한다(Le Bissonnais et al., 1989; Bryan 2000). 또한, 강우가 지속됨에 따라 유송될 수 있는 토사는 점차 고갈되어 가기 때문에 토양침식이 감소한다(Foltz, 2009). 따라서 강우 기간 사이의 시간이 길수록 더 많은 양의 토양입자가 토양 표면으로부터 분리되어 초기의 토양침식에 중요한 영향을 미친다(Ziegler et al., 2000). 그러나 본 연구에서는 토양의 수분 조건에 의한 토양유실의 변화가 통계적으로 유의하지 않게 나타나 실질적으로 지표식생이 미치는 영향에 비해 토양 수분의 영향은 매우 미미한 것으로 보인다.

V. 결 론

산림 내의 토양침식은 산림토사재해를 야기하는 주요원인이고, 이는 산림 내 임도에서 주로 발생한다. 임도의 노면침식은 주로 강우에 의한 지표유출에 의해 발생하게 된다. 본 연구에서는 임도노면에 대한 지표식생의 피복효과

를 알아보고자 인공강우실험을 수행하였다.

인공강우실험의 결과, 지표식생이 발달되면 임도노면의 지표유출과 토양침식을 크게 감소하였다. 이는 기존의 인공강우실험에서 얻은 결과들과 잘 일치하는 것으로, 지표식생의 지상부는 강우에 의한 에너지가 지표면에 직접적으로 전달되는 것을 방지함으로써 지표면에서 발생하는 공극 폐쇄 현상을 차단하는 역할을 수행하여 더 많은 양의 물이 토양으로 흡수되도록 한다. 이는 지상부의 식생을 제거된 조사구의 실험결과에 잘 나타나고 있다. 토양유실은 지표식생의 지상부의 유무에 대해 지표유출과는 다른 거동을 보였는데, 이는 식생을 제거한 뒤 인공강우실험을 수행하기까지 나지와 같은 정도로 토양입자가 지표면에서 분리되지 않았기 때문이다. 강우 전 토양수분 조건은 지표유출이 보다 빠르게 발생하도록 하는 효과를 보였으나, 총 지표유출량과 최대 유출속도에 대해서는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 토양유실은 토양이 포화됨에 따라서 점차 감소하는 경향을 보였으나, 본 실험의 강우 조건에서는 유의한 수준의 효과는 나타나지 않았다.

본 연구에서는 임도노면에서 발생하는 토양유실과정을 인공강우실험을 통해 정량적으로 분석하였다. 이를 통해 노면의 식생에 의한 토양유실 저감 효과를 살펴보았다. 그러나 실험의 반복이 충분히 이루어지지 않아 통계적 해석에는 한계를 보였다. 향후 실험에 대한 보완을 통해 임도 노면관리를 위한 대안들의 효과를 비교하여 제시할 것으로 기대한다.

References

- Arnaez, J. · Larrea, V. and Ortigosa, L. 2004. Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in northeastern Spain. *Catena*. 57(1): 1-14.
- Bowyer-Bower, T. and Burt, T. 1989. Rainfall

- simulators for investigating soil response to rainfall. *Soil Technology*. 2(1): 1-16.
- Bryan, R. B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*. 32(3): 385-415.
- Connolly, R. · Costantini, A. · Loch, R. and Garthe, R. 1999. Sediment generation from forest roads: bed and eroded sediment size distributions, and runoff management strategies. *Soil Research*. 37(5): 947-964.
- Dunne, T. · Zhang, W. and Aubry, B. F. 1991. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*. 27(9): 2271-2285.
- Foltz, R. 2012. A comparison of three erosion control mulches on decommissioned forest road corridors in the northern Rocky Mountains, United States. *Journal of Soil and Water Conservation*. 67(6): 536-544.
- Foltz, R. · Copeland, N. and Elliot, W. 2009. Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. *Journal of environmental management*. 90(8): 2542-2550.
- Hartanto, H. · Prabhu, R. · Widayat, A. S. and Asdak, C. 2003. Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *Forest Ecology and Management*. 180(1): 361-374.
- Humphry, J. · Daniel, T · Edwards, D and Sharpley, A. 2002. A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies. *Applied Engineering in Agriculture*. 18(2): 199-204.
- Kolka, R. K. and Smidt, M. F. 2004. Effects of forest road amelioration techniques on soil bulk density, surface runoff, sediment transport, soil moisture and seedling growth. *Forest Ecology and Management* 202(1): 313-323.
- Le Bissonnais, Y. · Bruand, A. and Jamagne, M. 1989. Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena*. 16(4): 377-392.
- Lee GJ · Lee JT · Ryu JS · Oh DS and Kim JS. 2012. Effects of Slope Gradient and Rainfall Intensity on Soil Losses with Rainfall Simulator Experiment. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 45(6): 877-881. (in Korean)
- Loch, R. 2000. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulated rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland. *Soil Research*. 38(2): 299-312.
- Luce, C. H. 1997. Effectiveness of road ripping in restoring infiltration capacity of forest roads. *Restoration Ecology*. 5(3): 265-270.
- Marques, M. J. · Bienes, R. · Jiménez, L and Pérez-Rodríguez, R. 2007. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. Rainfall simulation over USLE plots. *Science of The Total Environment*. 378(1-2): 161-165.
- Mohammad, A. G., and Adam, M. A. 2010. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena*. 81(2): 97-103.
- Nam KH · Lee DH · Chung SR and Jeong GC. 2014. Effect of Rainfall Intensity, Soil Slope and Geology on Soil Erosion. *The Journal of Engineering Geology*. 24(1): 69-79. (in Korean)
- Navas, A. · Alberto, F. · Machín, J. and Galán, A. 1990. Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil

- erosion. *Soil Technology*. 3(4): 385-397.
- Nearing, M. · Jetten, V. · Baffaut, C. · Cerdan, O. · Couturier, A · Hernandez, M. and Renschler, C. 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*. 61(2): 131-154.
- Pradhan, B. · Chaudhari, A. · Adinarayana, J. and Buchroithner, M. .F. 2012. Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: a case study at Penang Island, Malaysia. *Environmental monitoring and assessment*. 184(2): 715-727.
- Reid, L. M. and Dunne, T. 1984. Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources Research*. 20(11): 1753-1761.
- Thomas, N. and El Swaify, S. A. 1989. Construction and calibration of a rainfall simulator. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 43: 1-9.
- Wemple, B. C. · Jones, J. A. and Grant, G. E. 1996. Channel network extension by logging roads in two basins, Western Cascades, Oregon. *Journal of the American Water Resources Association*. 32(6): 1195-1207.
- Woo, M. and Fang, G. 1997. The role of vegetation in the retardation of rill erosion. *Catena*. 29(2): 145-159.
- Ziegler, A. D. and Giambelluca, T. W. 1997. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. *Journal of hydrology*. 196(1-4): 204-229.
- Ziegler, A. D. · Sutherland, R. A. and Giambelluca, T. W. 2000. Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. *Water Resources Research*. 36(9): 2787-2791.