

단 신

지면 굴곡에 따른 산림 토양의 물 침투와 저류능력 비교

조유리 · 김종호 · 이도원^{ID*}

서울대학교 환경계획학과

Comparison of Water Infiltration and Retention Capacity in a Forest Soil of Different Surface Depression Patterns

Yoori Cho, Jongho Kim and Downon Lee^{ID*}

Department of Environmental Planning, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

요약: 토양 표면에 요면(굴곡)을 형성하는 것은 토양의 거칠기를 증가시켜 강우의 침투와 토양의 저류능력을 향상시키고 지표수 및 토사의 유실량을 감소시키는 효과적 방법이 될 수 있다. 이 연구에서 토양 표면에 형성된 요면의 모양이 지표수의 흐름에 반구형일 때 수평 및 수직형일 때보다 침투량이 많았고, 토양의 저류능력은 수직형 요면에서 높았다. 흙 파기, 또는 토양 표면의 요면 형성은 산림 토양에서 산불 발생 후 대책으로, 또 건기 때 가뭄 스트레스를 해소하는 실용적인 방법으로 활용될 수 있다.

Abstract: Increasing soil surface roughness can be effective in enhancing infiltration of rainfall and depression storage capacity of forest soil and reducing surface run-off. In this study, a forest slope with hemispherical depressions shows greater infiltration of water, whereas depression storage capacity is higher in soil with depressions perpendicular to a water flow pathway. Soil pitting or forming surface depressions can be used as a countermeasure after forest fires and a practical way to reduce drought stress of forest soil.

Key words: soil pitting, infiltration, depression storage capacity, surface run-off

서 론

토양 표면 거칠기는 지표면의 유속을 감소시켜 우수 침투(이하 침투)를 향상시킨다. 특히 경사가 가파른 산지 지형, 또는 대규모 산불 후 많은 침투가 필요한 산림 토양의 경우 토양 표면을 거칠게 해줌으로써 지표면 유출을 감소시켜 토양 내 침투량과 수분 보유량을 증대시킬 수 있다. 거칠기 조절에 있어 토양 표면 파기(pitting)는 지표면 유출의 감소와 침투량 증가에 있어 실용적이고 증명된 방법이다(Darboux et al., 2002). 일반적으로 강우의 침투 전 토양 표면의 요면저류능력(depression storage capacity)은 고른 표면의 토양보다 요면이 많이 형성된 거친 표면의 토양에서 더 높다. 하지만 산림 토양에 있

어 요면 형태 간 수분 보유량의 차이를 비교하는 선행연구는 수행된 적이 없다. 이 연구는 산림 토양의 침투와 요면저류능력 향상을 위한 요면 형성(흙 파기) 시 노동력 대비 가장 효율적인 요면의 형태를 제안하는 것을 목표로 한다. 이 연구에서는 산림 토양의 표면에 형성된 요면 모양이 반구형일 때 물의 흐름에 수직으로, 또는 평행한 표면 요면을 갖고 있는 토양보다 침투량과 요면저류능력이 높고, 지표수 및 토사 유실량(run-off)이 적을 것이라 가정하였다.

재료 및 방법

1. 실험 설계

실험은 토양 실험 상자를 제작하여 진행되었다(Figure 1). 실험 상자의 제작과 실험의 수행에 앞서 연구의 재료가 될 토양 시료를 채취하였다. 서울특별시 관악구 서울대학교 내에서 답압과 같은 인간 영향이 적은 관목 아래

* Corresponding author
E-mail: leedw@snu.ac.kr

ORCID

Downon Lee ^{ID} http://orcid.org/0000-0001-6337-530X

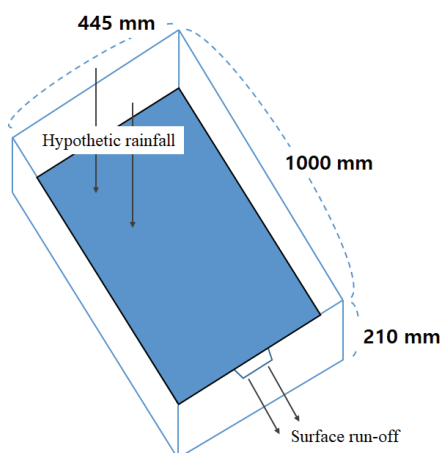


Figure 1. Design of the experimental soil box.

의 토양을 채취하였다. 시료는 야외의 평지에서 3일 동안 풍건되었고 토양의 용적수분함량(volumetric water content)을 시료 전체적으로 임의 측정하였을 때 그 값이 동일하게 분포함을 확인한 후 실험에 사용하였다. 시료의 토성(soil texture)은 양질사토(loamy sand, sand: 83.26%, silt: 11.56%, clay: 5.18%)로 같은 지역구 내 산림인 관악산에서 채취한 토양 시료의 토성과 일치하므로 산림 토양을 대표할 수 있음을 확인하였다. 토양 실험 상자는 유약 처리된 나무 합판으로 만들어졌으며 크기는 1000*445*210 mm이다. 상자는 풍건된 토양 시료로 15 mm 높이로 채워졌으며 상자 바닥의 외부를 철망으로 포장 후 그 안쪽 밑면을 50 mm 높이의 자갈로 채웠다. 표면으로부터 파내어진 흙의 깊이와 부피는 동일하지만 각기 다른 표면 요면 모양(수직, 수평, 반구형)을 갖고 있는 토양의 침투량과 요면저류능력, 지표수 및 토양 유실량을 동시에 실험하기 위해 각 요면 모양별 3개의 상자가 준비되었다. 침투량 측정을 위해 상자 밑에 트레이를 받쳐주었다. 표면 유실되는 지표수 및 토양의 양을 측정하기 위해 상자 내리막 윗면에 높이 10 mm의 사다리꼴 모양의 홈을 동일하게 패어주었다. 이후 이 홈을 통해 유출되는 물과 토양의 양을 측정하였다. 상자는 평지에 위치시키되 우리나라 산림 지형을 모방할 수 있도록 20° 경사의 오르막을 갖도록 높이를 조절하였다. 4 L 부피의 가상의 우수를 토양 사면 위에서 아래로 2분 동안(2 L/min) 실험상자 가로 너비에 맞는 물뿌리개로 흘려주면 후 표면 유실량은 즉시, 침투량은 40분 후 측정하였다. 침투량은 토양 내 다양한 부분에서 임의 측정된 용적수분함량으로 측정되었다. 3반복 실험 후 침투량은 용적수분함량의 비율(%)로, 표면 유실량은 평균 무게(g)로 측정되었다. 토양의 요면저류능력은 Hansen et al.(1999)의 Mean Upslope Depressions (MUD) 지수로 계산하였다. 이하 지표수 흐름에 수직으로 형

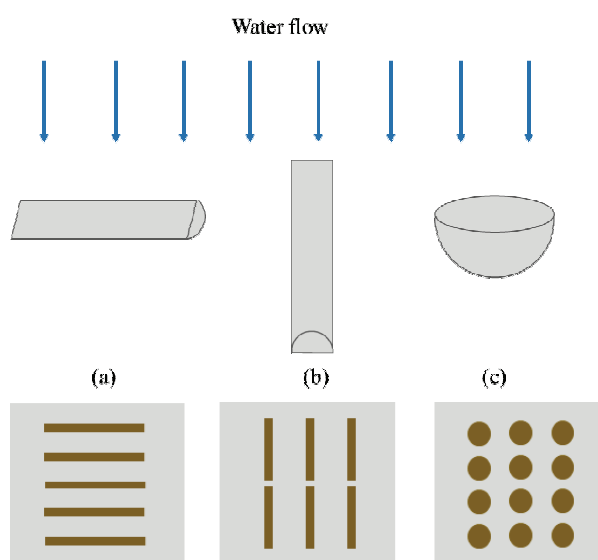


Figure 2. Different soil surface depression patterns and their arrangement on soil surface in each experimental box, (a) perpendicular to water flow, (b) parallel to water flow, (c) hemispherical pattern.

성된 요면(depression)의 형태를 수직형 패턴(perpendicular pattern, 반원기둥 형태, 5개), 수평으로 형성된 요면의 경우 수평형 패턴(parallel pattern, 반원기둥 형태, 6개), 지표수 흐름과 관계없이 웅덩이 모양으로 형성된 요면의 형태를 반구형 패턴(hemispherical pattern, 12개)으로 지정한다(Figure 2). 요면 형성에 같은 노동력이 투입된다고 가정하였으므로 파내어진 전체 흙의 부피는 한 실험 상자 당 3,600 cm³으로 제한하였다.

2. 요면저류능력의 측정

Hansen et al.(1999)은 요면이 있는 토양 표면의 요면저류능력을 수치화할 수 있는 Mean Upslope Depressions 지수를 개발하였다(Figure 3). 이는 이전까지 사용되었던 Burwell et al.(1963)과 Allmaras et al.(1966)이 개발한 지수와는 산림 경사 및 토양 표면 거칠기를 통합하였다는 점에서 차이가 있다고 할 수 있다(Govers et al., 2000). 따라서 Hansen et al.(1999)의 MUD 지수는 경사가 없는 농경지 토양보다 산림 토양의 요면저류능력을 정량화하는데 더 적합하다고 할 수 있다. MUD 지수의 기본 원리는 요면이 있는 토양 표면에 가상의 소분절 선(Line sub-segment)과 참고점(Reference points)을 임의로 위치시킨 후 이 참고점 간 높이차를 이용하여 저류능력을 수치화하는 것이다. 지수는 다음의 식 1로 표현될 수 있다.

$$MUD = \sum_{i=1}^m (\sum_{j=1}^n \Delta Z/n) / m \quad (1)$$

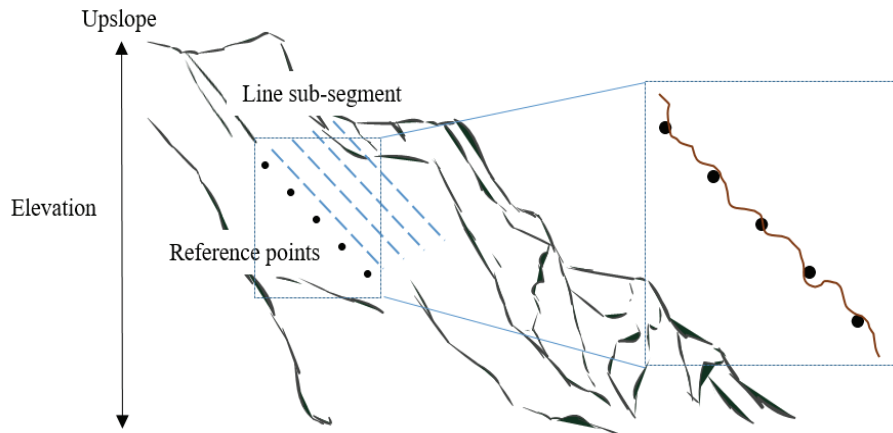


Figure 3. A simplified description for the principle of the MUD index.

참고점이 되는 X_r 과 X_a 간의 높이차(Z_r-Z_a)로 표현되는 ΔZ 는 Z_a 가 Z_r 보다 작을 때 계산될 수 있으며 그렇지 않은 경우는 0의 값을 갖는다. 이 식 1에서 m 은 소분절선의 개수이며, n 은 하나의 소분절 선이 갖는 참고점의 개수이다.

결과 및 고찰

1. 침투량(Infiltration)

요면 패턴 별 실험 상자의 토양 표면에서 요면이 존재하지 않는 고른 표면 부분과 요면 부분의 용적수분함량을 측정 후 분산분석(ANOVA)하였다. 평균 용적수분함량은 고른 표면, 요면이 있는 표면 모두에서 반구형, 수직형, 수평형의 순으로 높게 나타났다(Table 1). 요면이 존재하지 않는 부분에 대한 분산분석 결과 (Table 1) 세 집단 간 차이가 유의하게 나타났다($p=0.026$). 요면이 있는 부분의 용적수분함량의 집단 간 차이 또한 유의하게 나타났는데

($p<0.0001$), 어떤 집단 간 평균치에 차이가 있는지 검증하는 Tukey HSD 사후비교 결과(Table 2) 수평 패턴과 반구형 패턴 간 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p<0.0001$). 같은 토양 내 요면이 없는 표면의 경우에서도 수평 패턴과 반구형 패턴 간 차이만이 유의한 것으로 나타났다($p=0.022$). 반면 요면이 있는 표면을 비교해본 결과 용적수분함량은 수평 패턴과 반구형 패턴 집단 간($p<0.0001$), 또 수직 패턴과 반구형 패턴 집단 간 차이($p<0.001$)가 유의하였다.

2. 표면 유실량(Surface run-off)

지표수와 토양의 표면 유실량은 각각의 요면 패턴 별로 다르게 나타났는데 수평 패턴의 요면을 갖고 있는 토양 상자에서 평균 유실량이 가장 많았고(863.62 g), 그 다음 반구형(755.78 g), 수직형(460.92 g) 패턴으로 유실량이 적었다. 하지만 이러한 패턴 간 평균 유실량에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($p=0.208$).

Table 1. Average VWC of each depression pattern and group difference of the VWC between flat and pitted soil surface.

	Average VWC (%)			F-value	p-value
	Hemispherical	Perpendicular	Parallel		
Flat	11	10	9	3.744	0.026
Depression	11	10	8	20.628	<0.0001

Table 2. Result of Tukey HSD, multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level.

	Flat		Depression	
	Difference	p-value	Difference	p-value
Parallel-Hemispherical	-1.025	0.022	-2.50	<0.0001
Perpendicular-Hemispherical	-0.675	0.183	-0.825	0.098
Perpendicular-Parallel	0.350	0.629	1.675	<0.001

3. 요면저류능력(Depression storage capacity)

MUD 지수를 활용하여 각각의 요면 패턴이 존재하는 토양 간 요면저류능력을 수치화한 결과 그 값이 수직형(1.25), 수평형(1.11), 반구형(1.05) 패턴 순으로 나타났다.

연구가설처럼 표면에 반구형 모형의 요면을 갖는 토양이 수평형 모형의 요면을 갖는 토양보다 고른 표면에서, 또 요면이 있는 표면에서 침투량이 유의하게 더 많았다. 반면 수직형 요면과 반구형 요면 간 침투량에는 유의한 차이가 없었다. 요면이 있는 부분에서 반구형 요면 토양이 수직형 요면 토양보다 유의하게 많은 침투량을 보였다. 지표수 및 토사의 평균 유실량은 수직형 요면에서 다른 두 패턴의 요면보다 적었으나 패턴 간 차이는 유의하지 않았다. 요면저류능력은 수직형 패턴의 요면에서 가장 높았다. 이 연구 결과를 통해 토양 표면 거칠기, 즉 표면 요면을 형성할 때 반구형 요면이 침투량 증가에, 수직형 요면이 요면저류능력 향상에 효과적이나 지표수 및 토사 유실량에는 요면 패턴 간 유의한 차이가 있다고 볼 수 없다.

결 론

흙 파기(soil pitting)는 주로 농업 경관에서 다양한 고랑을 만들어 농수의 침투량을 증가시키고 가뭄 스트레스(drought stress)를 감소시키기 위한 방법으로 더 많이 연구되어 왔다. 토양 표면의 흙을 파내는 것은 산림 관리에도 적용될 수 있다. 농업 경관에서 흙 파기가 조밀한 표면 토양 분쇄를 통해 작물의 뿌리가 하층토 수분에 접근할 수 있게 도와주는 데 그 목적이 있다면 산림 경관에서는 토양 표면 거칠기의 증가를 통한 토양 수분의 유실 방지가 목적이라고 할 수 있다.

산불 후, 혹은 건기 때 물의 침투를 높일 수 있는 산림 관리 방법의 하나로 조도계수값의 증가, 즉 토양 표면 거

칠기의 조절이 시행되어 왔다. 산림 토양 표면 거칠기의 향상을 위해 국내에서는 토사가 많이 유실된 등산로에 흙 덮기, 마사토 뿌리기, 통나무 놓기 등 유량의 분산 및 유속의 지연을 위한 사업이 추진되기도 하였다. 하지만 이와 같은 방법은 시간, 비용, 동원되는 노동력의 측면에서 토양 표면에 요면을 형성하는 것보다 비효율적일 수 있다. 요면 형성을 위해 파내어진 흙은 흙더미를 이루어 흙 덮기의 효과도 가질 수 있다는 점에서도 더욱 효율적이다. 흙 파기, 또는 요면의 형성은 앞서 언급한 바와 같이 대규모 산불 발생 이후나 강우량이 적을 시에 특별 관리 대책으로, 또 산림을 찾는 방문객들도 쉽게 동참할 수 있는 일 상적 산림 수분 관리 대책으로 적합하다고 할 수 있다.

References

- Allmaras, R.R., Burwell, R.E., Larson, W.E. and Holt, R.F., 1966. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. USDA, Conservation Research Report no. 7: 22.
- Burwell, R.E., Allmaras, R.R. and Amemiya, M., 1963. A field measurements of total porosity and surface microrelief of soils. *Soil Science Society of America Journal* 27: 697-700.
- Darboux, F., Gascuel Odoux, C., and Davy, P. 2002. Effects of surface water storage by soil roughness on overland flow generation. *Earth Surface Processes and Landforms* 27(3): 223-233.
- Govers, G., Takken, I. and Helming, K. 2000. Soil roughness and overland flow. *Agronomie* 20(2): 131-146.
- Hansen, B., Schjønning, P. and Sibbesen, E. 1999. Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces. *Soil and Tillage Research* 52(1): 103-111.

(Received: August 4, 2017; Accepted: December 15, 2017)