광릉 활엽수림의 낙엽층 차단저류능 추정에 관하여

강민석¹ · 홍제우² · 봉하영¹ · 장혜미¹ · 최명제¹ · 장유희³ · 천정화⁴ · 김 준^{2*}

¹연세대학교 대기과학과/지구환경연구소, ²서울대학교 조경 · 지역시스템공학부,

³연세대학교 의예과, ⁴국립산림과학원 산림보전부

(2011년 3월 11일 접수; 2011년 6월 20일 수정; 2011년 6월 23일 수락)

On Estimating Interception Storage Capacity of Litter Layer at Gwangneung Deciduous Forest

Minseok Kang¹, Je-woo Hong², Hayoung Bong¹, Hye Mi Jang¹, Myung Je Choi¹,
Yoo Hee Jang³, Jeong Hwa Cheon⁴ and Joon Kim^{2*}

¹Global Environment Laboratory & Department of Atmospheric Sciences,
Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering,
Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

³Department of Premedicine, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

⁴Division of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

(Received March 11, 2011; Revised June 20, 2011; Accepted June 23, 2011)

ABSTRACT

In order to better understand the role of litter layer on hydrological cycle in forest, we estimated the interception storage capacity of the litter layer at Gwangneung deciduous forest. We first made a thickness map of the litter layer at the study site based on field survey and then collected representative litter samples for the laboratory experiment. We constructed a measurement device consisting of sample tray, drain collector, tipping bucket, and a data logger. Using this device, we examined the relationship between the interception storage capacity (C_i) and the thickness (d) of the litter layer. For the range of d from 25 to 100 mm, there was a simple linear relationship between C_i and d , which changed with the intensity of the simulated rain. The results were extrapolated to d smaller than 25 mm by considering that no interception occurs without litter layer. Overall, C_i increased rapidly when d was low (< 25 mm) but the rate of increase decreased as d increased due to clumping. With an average thickness of 59 mm, the estimated C_i at the site was $0.94 (\pm 0.39)$ mm. Such an interception storage capacity of the litter layer is comparable to that of the forest canopy, suggesting that the litter layer can play an important role in the forest water cycle.

Key words: Interception storage capacity, Litter layer, Thickness map, Laboratory experiment, Deciduous forest

I. 서 론

산림 유역에서 낙엽층은 토양 표면 위에서 발달되며, 표면의 낙엽낙지는 강우 발생 시 임분의 통과우와 수간류가 토양으로 흘러 들어가는 것을 차단한다. 낙엽층에

의한 강우 차단 과정은 군락에서의 강우 차단 과정과 유사하다. 일반적으로 군락에서 차단강우량의 경우, 임의 강우량, 수관통과우량, 수간유하량을 관측하여 물수지 방법(차단강우량 = 임의강우량 - 수관통과우량 - 수간유하량)을 이용해 산정한다(예, Kim *et al.*, 2005). 이와

* Corresponding Author : Joon Kim
(joon@snu.ac.kr)

달리 낙엽층의 차단강우량의 경우, 낙엽층과 토양층 사이 공간이 거의 없어 통과수와 수간류를 관측하기 어렵고, 낙엽층의 공간 변이(예, 낙엽층의 두께, 구성 성분 등)가 크기 때문에 물수지 방법을 이용하기가 어렵다.

차단강우량은 차단된 강우가 강우 종료까지 증발된 양과, 강우 종료 후 남아있는 것이 증발한 양으로 나눌 수 있는데, 임상(forest floor)에서는 바람이 매우 약하기 때문에 전자가 차지하는 비중은 후자에 비해 매우 작다는 것을 유추할 수 있다. 후자의 경우, 낙엽층이 최대로 차단할 수 있는 강수량인 차단저류능(즉, 식생이나 낙엽의 투영 면적에 대해 최대로 저장될 수 있는 물의 부피)에 의해 결정되며, 따라서 산림 유역의 물순환에서 낙엽층의 역할을 평가할 때, 낙엽층의 차단강우량을 직접 산정하는 대신에 차단저류능을 산정하는 방법이 보다 유효하다.

우리나라에서는 군락에서의 차단 강우에 대한 연구에 비해 낙엽층에서의 차단 강우에 대한 연구는 크게 관심을 받지 못했다. 실제 야외에서 해당지역의 식생 밀도, 식생구조, 지형, 미생물에 의한 분해 정도에 따라 낙엽층의 두께나 구조 등이 다를 수 있기 때문에, 낙엽층 차단저류능의 공간변이성은 일반적으로 매우 크다. 따라서 해당지역의 차단저류능을 평가하고자 할 때, 낙엽층의 차단저류능과 관계 있는 물리적 특성(예, 낙엽의 두께)을 조사한 후, 실내에서 실험을 통해 낙엽층의 물리적 특성과 차단저류능 간의 관계를 도출한 뒤, 두 결과를 종합하는 방법이 사용된다. 이와 같은 방법으로 수행된 외국의 선행연구결과에 따르면 낙엽층의 차단저류능은 유칼립투스(*Eucalyptus rossii* and *Eucalyptus mannifera*) 숲에서 0.91~1.30mm, 라디아타 소나무(*Pinus radiata*) 숲에서 0.54~1.54mm로서, 물순환 과정에서 낙엽층 역할의 중요성을 강조하고 있다(Putuhena and Cordery, 1996; Crockford and Richardson, 2000). 우리 나라의 경우, 인공조림 이후 산림의 관리가 제대로 이뤄지지 못한 것을 주 원인으로 하여 낙엽층 두께가 증가하고 있는 상황을 고려하면, 물 순환에 미치는 낙엽층의 역할 규명이 필요하다.

본 연구에서는 광릉 활엽수림의 물 순환 과정에서 낙엽층의 역할을 이해하기 위한 예비 실험으로 활엽수림 일부 지역에 대해, (1) 낙엽층 두께의 공간 분포를 조사하여 낙엽층 두께 지도를 작성하였고, (2) 낙엽층을 채집한 뒤, 실험실에서 강우 모의를 통해 차단저류능을 평가하고, (3) 두 결과를 종합하여 해당지역 낙

엽층의 차단저류능을 산정하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구지역

연구지역인 광릉 활엽수림은 경기도 포천시 소흘읍 소재 국립 수목원의 광릉 소유역(37°45'N, 127°10'E)에 위치한다(Fig. 1). 복잡 지형에 위치한 다양한 식생이 혼재 되어 있는 자연림으로 우세목은 졸참나무(*Quercus serrata*)와 서어나무(*Carpinus laxiflora*)이고, 평균입령은 80~200년, 임분평균수고는 약 18m, 최대 식생면적지수(plant area index, PAI)는 여름에 약 6이다. 연구지역의 입목밀도는 1,473trees ha⁻¹, 흉고단면적합은 28m² ha⁻¹이며, 평년 기온은 11.3°C, 평년 강수량은 1,365mm이다(Lim *et al.*, 2003). 광릉 활엽수림의 연간 낙엽낙지량은 5,627kg ha⁻¹ yr⁻¹으로 이중 순수한 엽량은 총 낙엽낙지량의 61%를 차지하고, 졸참나무 엽량이 전체 엽량의 73%, 서어나무가 15%를 차지한다(Kim *et al.*, 2003). 연구지역의 토양 깊이는 0.4~0.8m이며, 주 토성은 미사질양토이다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 낙엽층 두께 조사와 지도 작성

산림 토양 위의 유기물층은 그 분해 정도에 따라 낙엽층(litter layer), 낙엽분해층(fermented layer), 부식층(humus layer)으로 나뉘는데, 본 연구에서는 거의 분해되지 않은 낙엽·낙지와 초본의 유체로 구성되어

Fig. 1. Location of the experimental site.

있는 낙엽층만을 대상으로 하였다. 낙엽층 두께 조사는 활엽수림 내에 150×50m의 조사지역을 설정하여 2010년 12월 11일에 실시하였다. 조사 지역에는 탐방로와 계류가 포함되어 있다. 낙엽층 두께는 5m 간격으로 총 341개 지점에서 측정하였다. 낙엽층 표면이 고르지 못하기 때문에 육안으로 식별 가능한 두께 차이를 10mm로 보고, 이를 최소 단위로 하여 측정하였다. 각 지점에서 측정한 낙엽층 두께는 인접한 지점 사이의 낙엽층 두께의 차이가 선형적으로 변화함을 가정하여, 등고지도(contour map)로 나타내었다.

2.2.2. 차단저류능 평가

차단저류능 평가 실험은 조사 대상 지역에서 채집해 온 낙엽과 낙지를 이용하여, 실험실에서 0.5×0.5m 크

Fig. 2. Experimental set-up for estimating the interception storage capacity of the litter sample.

기의 표본을 만들어 실시하였다(Fig. 2). 쇠팅으로 제작된 표본 상자 자체의 저류능은 무시할만한 수준이었다. 낙엽층 표본의 두께는 현장 조사 결과를 고려하여, 25mm에서 100mm까지 25mm 간격으로 총 4개 두께에 대하여, 각 두께당 3번씩 실험을 실시하였으며, 매 실험마다 낙엽층 표본을 교체하였다. 낙엽과 낙지의 배치는 조사지역에서 찍은 사진을 참고하여 표본 상자에 현장과 최대한 동일하게 구성하였다. 실험 전 표본의 무게를 측정하고, 물조리개를 사용하여 충분히 낙엽이 젖을 정도로 물 1L(강우로 환산 시 4mm)를 뿌려준 뒤 더 이상 표본 상자로부터 물이 떨어지지 않을 때(약 3분)까지 기다린 후 표본의 무게를 측정하고, 그 차이를 이용해서 차단저류능을 산정하였다. 또한, 강우 강도 변화에 따른 차단저류능 변화를 알아보기 위해 같은 양(1L)의 물을 분무기로 뿌려 이슬비가 내리는 것과 유사한 상황을 모의하여 총 4개의 두께에 대해 1회씩 실험을 수행하였다. 각 실험의 강우 강도는 물조리개 실험이 약 8mm min⁻¹, 분무기 실험이 약 0.8mm min⁻¹였다. 표본을 빠져 나온 물의 양은 전도식 강수계(TE525, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)를 이용하여 관측하였으며, 자료 집록기(CR5000, Campbell Scientific Inc.)를 이용하여 자료를 자동 저장하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 낙엽층 공간분포 현황

연구지역의 낙엽층 두께는 0~150mm의 범위에서

Fig. 3. Thickness of the litter layer at the study area.

관측되었다(Fig. 3). 평균두께는 약 $59 \pm 32 \text{ mm}$ 이며, 낙엽층이 존재하지 않는 탐방로와 계류를 제외할 경우 평균 두께는 약 $64 \pm 28 \text{ mm}$ 이었다. 낙엽층 두께의 변이계수(coefficient of variation)는 약 50%로 낙엽층 두께의 공간변이성이 매우 컸다. 낙엽층의 밀도는 약 16 kg m^{-3} 이었으며, 조사된 낙엽층의 두께와 밀도로 환산한 연구지역의 낙엽층의 무게는 $944 \pm 512 \text{ g m}^{-2}$ 이었다. Lim *et al.*(2003)에서 밝혀진 광릉 활엽수림에서 낙엽층의 탄소저장량이 560 g C m^{-2} 이고, 일반적으로 낙엽의 탄소함량이 낙엽 전체 무게의 절반 정도임을 생각해볼 때, 위 결과는 선행 연구 결과와 대략적으로 일치한다.

3.2. 낙엽 표본의 차단저류능

실험을 통해 알아낸 낙엽 표본의 차단저류능은 낙엽

표본의 두께가 25mm일 때, $0.63 \pm 0.03 \text{ mm}$, 50mm일 때, $0.87 \pm 0.04 \text{ mm}$, 75mm일 때, $1.19 \pm 0.04 \text{ mm}$, 100mm일 때, $1.37 \pm 0.07 \text{ mm}$ 이었다. 다른 선행 연구 결과(예, Putuhen and Cordery, 1996)와 마찬가지로 낙엽 표본의 두께가 증가할수록 차단저류능은 선형적으로 증가하였다(Fig. 4a). 낙엽 표본의 두께가 1mm(혹은 낙엽층의 무게가 16 g m^{-2}) 증가할 때마다 차단저류능은 약 0.01mm가 증가하였다. 본 실험에서는 표본 두께가 25mm 보다 얇은 조건에 대해서는 표본 배치가 쉽지 않아 수행되지 않았다. 그러나 낙엽이 존재하지 않을 때의 차단저류능은 0mm이므로, 낙엽층 두께가 25mm 보다 더 얇은 조건에 대해서는 위의 선형 관계가 성립하지 않음을 알 수 있다. 따라서 낙엽층의 응집이 상대적으로 적은 0~25mm 구간에서는, 낙엽층 두께의 증가에 따라 더 급격한 차단저류능의 증가가

Fig. 4. Relationship between interception storage capacity and thickness of the litter sample for rain (8 mm min^{-1}) (a) and drizzle (0.8 mm min^{-1}) (b).

Fig. 5. Interception storage capacity of the litter layer at the study site.

일어남을 유추할 수 있다. 선행 연구에서는 이러한 선형 관계가 약 10mm 두께에서도 나타났음을 확인할 수 있다(Putuhena and Cordery, 1996). 분무기를 이용하여 이슬비가 내리는 상황을 모의한 실험 결과의 경우, 선형 회귀 방법을 사용했을 때 r^2 가 0.71로 이전 실험보다 선형관계가 낮은 것으로 나타났다(Fig. 4b). 군락 차단저류능의 경우, 강우 강도에 따라 달라질 수 있다(예, Massman, 1983; Eagleson, 1980). 적은 실험 횟수로 인해 비와 이슬비 실험 간 r^2 차이의 통계적 유의성을 검증하는 것은 쉽지 않았지만, 낙엽의 차단저류능 역시 군락의 차단저류능과 유사하게 강우 강도에 따라 달라질 수 있음을 확인할 수 있었다. 결론적으로 낙엽층 두께와 차단저류능은 일반적으로 선형관계를 보이지만, 낙엽층 두께가 얇은 상황(예, 숲의 생장 초기 단계, 낙엽이 적은 상록수림)이나, 강우 강도가 매우 약한 상황에서는 비선형 관계를 보일 수 있다. 보다 정확한 관계식을 도출하기 위해서는 25mm 보다 낮은 두께에 대한 추가 실험과 강우 강도 별 차단저류능에 대한 체계적인 실험이 필요하다. 연구지역인 광릉 활엽수림의 경우, 낙엽층의 두께가 10mm 이하인 지점은 거의 존재하지 않기 때문에 얇은 낙엽층에서의 차단저류능에 대한 비선형적 관계는 연구대상지의 차단저류능 추정에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 사료된다.

3.3. 조사 지역에서 낙엽층의 차단저류능

앞서 보인 낙엽층 두께 지도와 실험실의 차단저류능 평가 결과(물조리게 실험에서 얻어진 선형 관계식)를 통해서 산정된 연구지역 낙엽층의 평균 차단저류능은 약 0.94mm이며, 표준편차는 약 0.39mm로 나타났다(Fig. 5). 선행 연구 결과로는 Putuhena and Cordery(1996)가 유칼립투스 숲(입목밀도는 960trees ha⁻¹, 흉고단면적합은 21.1m² ha⁻¹, 낙엽층의 무게는 898g m⁻²)에서 낙엽층의 차단저류능이 0.91mm, 라디아타 소나무 숲(입목밀도는 1,024trees ha⁻¹, 흉고단면적합은 27.4m² ha⁻¹, 낙엽층의 무게는 2,053g m⁻²)에서 1.54mm로 보고하였고, Crockford and Richardson(2000)은 유칼립투스 숲(입목밀도는 1,525trees ha⁻¹, 흉고단면적합은 34.1m² ha⁻¹, 낙엽층의 무게는 1,055g m⁻²)에서 1.3mm, 라디아타 소나무 숲(입목밀도는 1,708trees ha⁻¹, 흉고단면적합은 35.1m² ha⁻¹, 낙엽층의 무게는 400g m⁻²)에서 0.54mm로 보고하였다.

IV. 요약 및 제언

본 연구에서는 졸참나무와 서어나무가 주 식생인 광릉 활엽수림에서 낙엽층이 물 순환에 미치는 영향을 이해하기 위해 낙엽층의 차단저류능을 산정하였다. 조사대상인 광릉 활엽수림의 낙엽층의 두께는 평균 59±32mm이며, 낙엽층 두께와 차단저류능 사이의 선형 관계는 낙엽의 응집 정도와 강우 강도에 따라 다르게 나타났다. 제작된 낙엽층 두께 지도와 낙엽층 두께와 차단저류능 사이의 관계식을 통하여 산정한 낙엽층의 차단저류능은 약 0.94±0.39mm이었다.

낙엽층의 차단저류능이 낙엽층의 두께와 비례하는 것처럼 군락의 차단저류능은 식생면적지수(PAI)와 비례한다. 일반적으로 군락의 차단저류능(mm)을 0.2×PAI로(Dickinson, 1984) 산정함을 고려하면, 광릉 활엽수림의 경우 낙엽층(평균 두께 59±32mm)의 차단저류능은 군락의 차단저류능에 상당함을 알 수 있다. 선행 연구 결과에 따르면, 약한 강우 강도의 20mm 정도 비가 내리는 상황에서 낙엽층은 포화된다고 보고되어 있다(Crockford and Richardson, 2000). 만약 광릉의 활엽수림에서 군락에 의해 발생하는 차단 강수량이 전체 강수량의 약 10%(2mm) 정도라고 한다면, 낙엽층에 의해 발생하는 차단 강수량인 4.5%인 0.9mm를 더하면 총 차단량은 총 강수량의 14.5%로 예상해볼 수 있다. 실제로 광릉 활엽수림과 비슷한 낙엽의 차단저류능을 갖는 유칼립투스 숲(낙엽층의 무게는 898g m⁻²이며 차단저류능은 0.91mm)에서 다년간 추정한 낙엽층의 차단강수량(총 강수량의 약 7%)은 군락의 차단강수량(총 강수량의 약 15%)의 절반 정도 였다(Putuhena and Cordery, 2000). 추후에 차단 강수 산출 모형(예, de Groen and Savenije, 2006)을 활용하여, 본 연구에서 얻어진 차단강수능을 입력자료로 넣어 광릉 활엽수림의 낙엽층에 의한 실제 차단강수량을 산정해 볼 필요가 있다. 후속 연구로서, 본 논문에서 수행하지 못한 25mm 이하의 낙엽층 두께에서의 실험뿐만 아니라 모형을 활용하여 낙엽층의 생태수문순환에 미치는 영향과 낙엽층의 역할을 적절히 고려함으로써 개선된 생태수문순환과정이 생지화학적 순환에 미치는 영향에 대한 연구가 이뤄져야 할 것이다.

적 요

본 연구에서는 광릉 활엽수림의 수문순환과정에서

낙엽층의 역할을 이해하기 위해 낙엽층의 차단저류능을 산정하였다. 낙엽층 두께의 공간 분포를 조사하여 낙엽층 두께 지도를 작성하였으며, 낙엽층의 두께와 차단저류능 간의 관계를 확인하고자 낙엽 표본을 채집하여 실험을 수행하였다. 25~100mm 두께의 낙엽 표본에 대한 실험 결과, 둘 간에 선형 비례 관계가 존재함을 확인하였다. 낙엽층의 응집이 상대적으로 적은 0~25mm 두께에서는 낙엽층 두께의 증가에 따라 더 급격한 차단저류능 증가가 일어나는 비선형적인 관계를 보였다. 또한 강우 강도가 약한 경우에도 낙엽층 두께와 차단저류능 간의 비선형 관계가 더 크게 나타날 수 있음을 확인하였다. 제작된 낙엽층 두께 지도와 낙엽층 두께와 차단저류능 사이의 관계식을 통하여 산정한 낙엽층의 차단저류능은 평균 0.94 ± 0.39 mm 이었다. 산정된 낙엽층(평균 두께 59 ± 32 mm)의 차단저류능은 군락의 차단저류능과 비교할 때 그 크기가 비슷하였으며, 이는 낙엽층이 광릉 활엽수림의 수문순환에 중요한 역할을 할 수 있음을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호:1-8-3) 및 국립산림과학원 “지구환경변화에 대응한 장기생태연구”와 한국연구재단의 A3 Foresight 프로그램의 연구비지원을 받아 수행되었습니다. 중요한 지적과 제안을 통해 논문의 품위를 높여주신 세 심사위원들께 감사 드립니다.

REFERENCES

Crockford, R. H., and D. P. Richardson, 2000: Partitioning

- of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* **14**, 2903-2920.
- de Groen, M. M., and H. H. G. Savenije, 2006: A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall. *Water Resources Research* **42**, W12417, doi:10.1029/2006WR005013.
- Dickinson, R. E., 1984: Modelling evapotranspiration for three dimensional global climate models. *Climate Processes and Climate Sensitivity*, J. E. Hansen and T. Takahashi (Eds.), American Geophysical Union, 58-72.
- Eagleson, P. S., 1978: Climate, soil and vegetation. 2: The distribution of annual precipitation derived from observed storm sequences. *Water Resources Research* **14**, 713-721.
- Kim, C., J. H. Lim, and J. H. Shin, 2003: Nutrient dynamics in litterfall and decomposing leaf litter at the Kwangneung Deciduous Broad-Leaved Natural Forest. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 87-93.
- Kim, K., J. Jun, J. Yoo, and Y. Jeong, 2005: Troughfall, stemflow and interception loss of the natural old-growth deciduous and planted young coniferous in Gwangneung and the rehabilitated young mixed Forest in Yangju, Gyeonggi-do(I) –with a special reference on the results of measurement–. *Journal of Korean Forest Society* **94**, 488-495. (in Korean with English abstract)
- Lim, J. H., J. H. Shin, G. Z. Jin, J. H. Chun, and J. S. Oh, 2003: Forest Stand Structure, Site Characteristics and Carbon Budget of the Kwangneung Natural Forest in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 101-109.
- Massman, W. J., 1983: The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forests. *Agricultural Meteorology* **28**, 261-286.
- Putuhen, W. M., and I. Cordery, 1996: Estimation of interception capacity of the forest floor. *Journal of Hydrology* **180**, 283-299.
- Putuhen, W. M., and I. Cordery, 2000: Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to pinus radiata. *Agricultural and Forest Meteorology* **100**, 59-72.