

광릉숲, 태화산, 가리왕산 활엽수림에서 낙엽에 의한 수종별 엽면적지수 추정

권보람¹ · 전지현¹ · 김현석^{2,3,4,5} · 이명종^{1*}

¹강원대학교 산림자원학과, ²서울대학교 산림과학부, ³서울대학교 농업생명연구원,
⁴서울대학교 협동과정 농림기상학전공, ⁵국가농림기상센터
(2016년 1월 19일 접수; 2016년 2월 23일 수정; 2016년 3월 16일 수락)

Estimation of Specific Leaf Area Index Using Direct Method by Leaf Litter in Gwangneung, Mt. Taewha and Mt. Gariwang

Boram Kwon¹, Jihyeon Jeon¹, Hyun Seok Kim^{2,3,4,5} and Myong Jong Yi^{1*}

¹Department of Forest Resources, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea,

²Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea,

³Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea,

⁴Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea,

⁵National Center for Agro Meteorology, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received January 19, 2016; Revised February 23, 2016; Accepted March 16, 2016)

ABSTRACT

Annual litterfall production and leaf area index (LAI, m^2/m^2) were estimated using litter traps in Gwangneung, Mt. Taewha and Mt. Gariwang. Annual total litter fall production including branch, bark, others was the highest in Gwangneung(7497.3±326.5 kg/ha/yr), which had the highest basal area at late successional stage, and followed by Mt. Taewha(5929.1±225.8 kg/ha/yr) and Mt. Gariwang(3,210.1±220.1 kg/ha/yr). Mt. Gariwang had the lowest litterfall production due to high elevation and short growing season even with the higher stand density and basal area than Mt. Taewha. Similarly, LAI, which was calculated by multiplying the mass of leaf litter with specific leaf area, was the highest in Gwangneung(5.99±0.69) and followed by Mt. Taewha(5.20±0.24) and Mt. Gariwang(4.06±0.42) and the upper canopy species had the highest leaf area index in every sites (Gwangneung : 4.72, Mt. Taewha : 3.08, Mt. Gariwang : 2.19). However, species specific LAI estimation based on the relationship between basal area and leaf area was limited due to upper canopy species non-proportionality of basal area with LAI. In addition, the comparison between direct and indirect LAI measurement showed the importance of canopy clumping, especially at high density. Our study emphasized the necessity of direct LAI measurement using litter fall traps especially at temperate deciduous forest with diverse species.

Key words: Canopy clumping, Leaf area index(LAI), Litter fall production, Temperate deciduous forest



* Corresponding Author : Myong Jong Yi
(mjyi@kangwon.ac.kr)

I. 서론

엽면적지수(LAI: Leaf Area Index)는 산림의 광합성량, 호흡량, 증발산량 등에 직접적으로 영향을 미칠 뿐만 아니라, 강우나 태양에너지의 차단, 식물과 대기 사이의 에너지 교환 등에도 영향을 미치게 된다(Le Dantec *et al.*, 2000; Osada *et al.*, 2003; Eriksson *et al.*, 2005). 따라서 엽면적지수의 정확한 측정 혹은 예측은 산림생태계의 탄소, 물, 에너지 순환 모델의 정확도를 높이고, 기후변화로 인한 산림 생태계의 변화와 적응·저감 능력을 평가·예측하는데 필수적이다(Watanabe *et al.*, 2004; Walcroft *et al.*, 2005).

엽면적지수를 추정하는 방법은 수확법이나 낙엽수거망법과 같이 잎의 면적을 직접 측정하는 직접방법과 광학적 측정기기를 사용하여 잎의 면적을 측정하지 않고 추정하는 간접방법이 있다. 직접방법은 가장 정확도가 높지만, 시간과 노동의 소모가 크며(Chason *et al.*, 1991; Gower *et al.*, 1999), 간접방법은 정확도는 떨어지지만, 편리하고 넓은 지역을 대상으로 적용할 수 있다(Chen, 1996; Jonckheere *et al.*, 2004). 하지만 국내에서 엽면적지수 추정에 관한 연구는 직접 방법보다 비교적 쉽고 빠르게 측정할 수 있는 간접적인 방법에 편중되어, 디지털 카메라(Choi, 2011), 발광다이오드(Light Emitting Diode, LED) 센서(Ryu *et al.*, 2014b), 이동식 임관분석기(Canopy analyzer)인 LAI-2000 혹은 2200C(Koo *et al.*, 2007; Song and Ryu, 2015) 등을 이용한 연구가 대부분이다. 또한 광범위한 지역의 엽면적지수 예측을 위해서 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 등의 위성영상자료로부터 다양한 식생지수를 이용하여 도출하거나(Ha *et al.*, 2001; Kim and Kim, 2005; Lee *et al.*, 2006), 도출된 엽면적지수를 간접적인 방법에 의해 측정한 실측 자료와 비교·분석하는 연구가 주로 이루어 졌다(Lee *et al.*, 2003; Ha *et al.*, 2008). 그러나 간접적으로 측정된 엽면적지수는 복잡한 수관구조와 구름, 안개 등 기상환경에 적지 않은 영향을 받으며(Jonckheere *et al.*, 2004), 특히 현장에서의 실측 자료로 사용되는 임관분석기(Canopy Analyzer LAI 2200C)는 빛의 산란(diffuse light)과 잎의 분포가 밀집되는 현상(clumping effect) 등에 의하여 측정치에 오류가 발생할 수 있다(Chason *et al.*, 1991). 결과적으로, 직접측정에 의한 평가 없이 간접적인 방법으로 추정된 엽면적지수는 산림의 생산

성 예측에 오차를 야기하는 근본적인 원인이 된다(Bondeau *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2003; Kim and Kim, 2005; Wang *et al.*, 2007).

이에 반해 엽면적지수 추정의 직접적인 방법의 경우, 모든 나무를 베어 추정하는 수확법은 파괴적이고, 반복이 불가능하기 때문에, 낙엽수거망(litter trap)을 이용하여 낙엽을 수집하는 방법이 유용하게 사용된다(Chason *et al.*, 1991; Dufrière and Bréda, 1995; Eriksson *et al.*, 2005). 낙엽수거망을 사용하는 방법으로 측정된 연간 낙엽·낙지 생산량과 계절적 변화는 각 임분의 생산성과 발달단계를 평가할 수 있고, 각 수종의 낙엽 특성(엽면적비, 무게, 탈락시기 등)을 고려하여 엽면적지수를 정확하고 반복적으로 추정할 수 있다. 하지만 많은 반복수가 필요하고, 주기적인 수거와 측정에 많은 노동력을 필요로 하기 때문에 정확한 추정으로 인한 그 중요성에도 불구하고 우리나라에서는 그 예를 찾아볼 수 없었다. 최근 우리나라에서는 다양한 수종의 존재로 임분 구조가 복잡한 천연활엽수림에 대한 환경·경제적 가치가 급증하고 있으며, 조림·생태적 정보의 중요성이 강조되고 있다(Kim *et al.*, 1999). 따라서 천연활엽수림에서 임분 생산성의 척도인 낙엽·낙지의 생산량과 산림의 생산량을 제한하는 요인인 엽면적지수를 측정하는 것이 중요하며, 이를 이용해 보다 효과적인 산림자원 관리를 기대할 수 있다(Raich and Nadelhoffer, 1989; McCarthy *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007).

따라서 임분의 구조가 복잡한 우리나라 온대 활엽수림에서 다양한 밀도와 수종 등에 따라 낙엽량을 측정하고, 직접적인 방법을 통해 수종별 엽면적지수와 변화를 간접방법의 측정결과와 비교하고자 하였다. 본 연구에서는 (1) 연간 낙엽·낙지 생산량과 계절적 탈락 특성을 파악하고, (2) 가을철 수집된 낙엽을 수종별로 분류함으로써, 수종별 엽면적지수를 추정하여 식생구조와의 관계를 분석하였다. 또한 (3) 동시에 간접방법으로 측정된 엽면적지수와 비교함으로써 낙엽수집망에 의한 직접방법의 필요성을 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지

경기도 포천시의 광릉숲 내 소리봉(533m) 인근의 낙엽활엽수림(37°44'N, 127°90'E, 256m)과 광주시의

태화산 서울대학교 학술림(37°18'N, 127°18'E, 242m), 강원도 평창군의 가리왕산(37°28'N, 128°30'E, 1,199m)에서 다수종이 공존하는 낙엽활엽수림을 연구 대상으로 선정하였다. 조선시대의 왕릉이 위치한 광릉숲과 높은 고도에 위치한 가리왕산은 수백 년간 인위적 교란을 받지 않아 비교적 잘 보전되어 있으며(Korea National Arboretum, 2016; Baek *et al.*, 1998), 1979년에 서울대학교 학술림이 설립된 태화산의 경우, 두 조사지역에 비하여 비교적 최근에 형성된 낙엽활엽수림이며 택벌 등의 보육작업이 실시되었다(Chung *et al.*, 1999). 광릉숲과 태화산의 경우, 산복에 위치하여 바람으로부터 보호되어 있지만, 가리왕산은 산정에 위치하여 바람에 노출되어 있었다. 또한, 모든 조사 임분에 생태타워(Flux Tower)가 설치되어 산림 생태계의 물, 탄소, 에너지 순환에 관한 연구가 활발히 축적되고 있으며(Kang *et al.*, 2009; Ryu *et al.*, 2014b; Kim *et al.*, 2015; Song and Ryu, 2015), 생태타워에서 측정된 기상관측자료에 의하면 수목 생육 기간(2014년 5월 16일 - 11월 20일)의 평균 기온이 13°C로 광릉숲 17.7°C(2014년 연평균 기온: 11.1°C)와 태화산 18.1°C(2014년 연평균 기온: 11.4°C) 보다 더 낮았다. 또한 같은 기간 동안 강우량은 광릉숲에서 573.0mm(2014년 연간 763.0mm), 태화산에서 531.1mm(2014년 연간 791.5mm), 가리왕산에서 871.57mm로 나타났다.

2.2. 임분 조사

각 조사지역에 20m × 20m (0.04ha)의 조사구를 설치하고, 임분의 식생구조를 파악하기 위해 임분 조사를 실시하였다. 각 조사구 내의 초본을 제외한 모든 입목에 대해 수종명과 흉고직경을 측정하고, 각 입목의 위치(X-Y 좌표)를 기록하였다. 임분 조사 자료에 근거하여 각 임분의 ha당 본수, 평균 흉고직경, ha당 흉고단면적과 상대밀도와 상대빈도, 상대피도의 합으로 각 수종의 중요치를 산출하였다.

2.3. 낙엽의 수집과 엽면적비(SLA)

각 임분의 조사구에서 지형의 변화가 심한 곳이나 대경목과 인접한 곳을 피하여 원형 낙엽수거망(입구 넓이 2826cm², 높이 60cm)을 5개씩 무작위로 설치하여 낙엽을 수집하였다. 낙엽수집기간은 2013년 12월부터 2014년 11월말까지이며, 전년도의 낙엽이 탈락하는 동절기(2014년 1월부터 3월말)를 제외하고, 4월부터 8월까지는 매월 말에, 낙엽기인 9월부터 11월 말까지는

2주 간격으로 총 12회 수거하였다. 회수한 낙엽·낙지는 기관별(잎, 가지, 수피, 생식기관, 기타)로 분류한 후, 잎을 제외한 나머지 기관은 65°C 건조기에서 이를 이상 건조하여 무게를 측정하였다.

낙엽의 경우, Table 2에 나타난 수종에 따라 낙엽을 분류하였다. 분류된 낙엽 중 찢어지거나 훼손된 낙엽을 제외하고, 수집시기마다 수종별로 엽량에 따라 최대 10개까지 표본 낙엽을 선정하여 LIA 3.2 program (version 0.377e, copy. Kazukiyo Yamamoto)을 이용하여 엽면적을 측정하였다. 엽면적을 측정한 시료는 건조기에서 65°C로 이를 이상 건조한 후 건조량(g)을 측정하고, 엽면적을 건조량으로 나누어 엽면적비(Specific Leaf Area, SLA, m² g⁻¹)를 산출하였다. 표본 낙엽을 제외한 나머지 낙엽은 분류 후 바로 앞의 방법과 동일하게 건조한 후 수종별 건조량을 측정하였다.

2.4. 엽면적지수 추정

엽면적지수는(m²/m²)는 지표면적에 대한 임관층 총 엽면적(잎의 앞면과 뒷면을 합한 면적)의 절반이므로, 낙엽에 의한 직접적인 방법의 엽면적지수는 낙엽의 엽면적비(cm² g⁻¹)와 건조량(g)의 곱을 트랩면적(cm²)으로 나누어 계산하였다. 각 수종의 엽면적지수는 수집 시기마다 표본 낙엽의 엽면적비와 수종별 낙엽 건조량으로 계산하였고, 시기별 엽면적지수는 낙엽이 모두 떨어진 시점부터 각 수집 시기까지의 역누적으로 계산하였다. 예를 들어, 광릉숲에서 DOY 300일의 줄참나무 엽면적지수는 낙엽이 모두 떨어진 시점부터 DOY 300일까지 역으로 누적한 낙엽량으로 산출한 엽면적지수이다.

간접적인 방법의 엽면적지수는 1개의 본체와 2개의 센서부로 구성되어 있는 이동식 임관분석기 LAI-2200C (LI-COR, Nebraska, USA)를 이용하였다. 정사각형 연구대상지의 4 모서리와 중앙에서 270° 덮개(view cap)를 이용하여 측정하였으며, 5개의 천정각으로 측정된 데이터 중 낮은 천정각에서 발생하는 오차를 제거하기 위해 7°- 53°의 천정각에서 측정한 값만을 Fv2200 software (version 2.0)로 분석하여 엽면적지수를 추정하였다. 임분의 엽면적지수가 감소하기 시작하는 2014년 9월 초에 측정을 시작하여, 낙엽이 시들어 있는 상태로 떨어지지 않고 겨울을 보내는 조위성(凋萎性, marcescent) 수종을 제외한 모든 나무의 잎이 떨어진 12월 초까지 2주 간격으로 측정을 시도하였으나, 강우와 데이터 손실 등으로 인해, 광릉숲, 태화산, 가리왕

산에서 각각 8, 5, 6회 측정치만을 본 연구에 사용하였다. 또한 12월 초 마지막 측정치를 수간과 가지 등 목질부 면적으로 간주하여 다른 모든 측정치에서 차감한 후 엽면적지수로 사용하였다.

2.5. 통계분석

임분 내 수종별 엽면적비 평균의 차이는 분산분석을 실시하여, 유의차가 나타날 경우 사후분석(Duncan)하였으며, 흉고단면적에 따른 엽면적지수의 경향을 보기 위하여 선형회귀분석(linear regression analysis)을 실시하여 유의성 검증을 실시하였다. 모든 통계분석은 SPSS Version 21 (IBM, 2012)사용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 식생 구조

광릉숲과 태화산에서 중요도가 가장 높은 수종은 졸참나무(*Quercus serrata*)이며, 가리왕산의 경우, 물

푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*)로 나타났다. 광릉숲의 경우, 총 임분밀도는 ha당 1,664본, 평균 흉고직경은 9.0 ± 14.8 cm, 흉고단면적은 37.41cm^2 이며, 평균 흉고직경 52.3 ± 11.5 cm의 졸참나무와 24.1 ± 15.7 cm의 서어나무(*Carpinus laxiflora*)가 상층을 이루어 분포하고 있었다. 태화산의 경우, 총 임분밀도와 흉고단면적이 모든 조사구 중에서 가장 작게 나타났으며, 졸참나무와 갈참나무(*Quercus aliena*)의 흉고단면적이 전체의 83.1%로 우점하고 있었다. 가리왕산의 경우, 음나무(*Kalopanax septemlobus*), 물푸레나무, 팔배나무(*Sorbus alnifolia*)의 평균 흉고직경이 34.6 ± 13.8 cm, 22.2 ± 6.3 cm, 21.7 ± 14.9 cm순의 대경목들이 상층 임관을 구성하고 있지만, 흉고단면적은 물푸레나무가 전체의 47.09%, 음나무와 팔배나무가 11.25%를 차지하고 있다. 한편, 중요치의 50% 이상을 차지하는 하층 수종들은 모두 흉고직경은 작지만, 많은 개체수가 생육하고 있었다. 특히, 사회적·지형적 영향으로 오랫동안 보존이 이루어져있는 광릉숲과 가리왕산의 경우, 우리나라 극상림

Table 1. Species composition for major species in the broadleaved forests in three experiment sites

Site	Species	Density (trees ha ⁻¹)	Mean DBH (cm)	Basal area (m ² ha ⁻¹)	Importance value (%)
Gwang- neung	<i>Quercus serrata</i>	128	52.3 (±11.5)	28.68	31.82
	<i>Carpinus laxiflora</i>	96	24.1 (±15.7)	5.09	10.16
	<i>Carpinus cordata</i>	320	8.5 (±5.5)	2.51	12.35
	<i>Acer pseudosieboldianum</i>	416	2.4 (±2.0)	0.29	12.30
	<i>Sorbus alnifolia</i>	416	1.9 (±1.7)	0.20	12.22
	Others*	288	4.3 (±3.1)	0.64	21.16
	Total	1,664	9.0 (±14.8)	37.41	100.00
Mt. Tae- wha	<i>Quercus serrata</i>	550	17.8 (±10.3)	18.08	42.74
	<i>Quercus aliena</i>	75	21.3 (±3.8)	2.73	11.93
	<i>Styrax obassia</i>	500	5.4 (±1.7)	1.25	19.26
	<i>Prunus sargentii</i>	275	8.2 (±6.7)	2.32	15.76
	Others†	125	6.6 (±5.6)	0.68	10.30
Total	1,525	11.1 (±9.3)	25.06	100.00	
Mt. Gari- wang	<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	320	22.2 (±6.3)	13.38	26.01
	<i>Carpinus cordata</i>	288	9.2 (±5.9)	2.64	12.29
	<i>Acer pseudosieboldianum</i>	640	3.2 (±2.8)	0.88	16.09
	<i>Acer mono</i>	240	8.8 (±5.1)	4.99	10.61
	<i>Kalopanax septemlobus</i>	64	34.6 (±13.8)	3.20	11.38
	<i>Sorbus alnifolia</i>	64	21.7 (±14.9)	3.20	9.17
	Othres‡	352	1.8 (±1.1)	0.12	14.45
Total	1,968	9.0 (±9.8)	28.42	100.00	

The numbers in parentheses represent the standard errors.

* : *Styrax japonica*, *Euonymus sachalinensis*, *Symplocos chinensis*, *Styrax obassia*

† : *Rhododendron mucronulatum*, *Rhododendron yedoense*, *Symplocos chinensis*

‡ : *Acer mandshuricum*, *Tilia amurensis*

의 지표수종이며 내음성이 강한 서어나무나 까치박달, 팔배나무가 생육하는 산림 천이의 후기단계에 도달한 안정적인 임분이며(Kikuzawa, 1983; Koike, 1990; Kim, 2004; Kwon *et al.*, 2014), 태화산의 경우, 인간의 간섭 등의 교란에 의해 발달한 이차림(secondary forest)으로써, 천이 중기단계에 출현하는 참나무 우점림이다(Kim, 2004).

3.2. 연간 낙엽·낙지생산량

연간 총 낙엽·낙지 생산량은 광릉숲 7,397(±326.5) kg/ha/yr, 태화산 5,929(±225.8)kg/ha/yr, 가리왕산 3,210(±1220.1)kg/ha/yr 순으로 높게 나타났다($p < 0.001$, Table 2). 모든 임분에서 활엽수 낙엽의 생산량이 최고 많았으나, 전체 낙엽·낙지의 생산량이 적을수록 활엽수 낙엽이 차지하는 비율이 더 높아 가리왕산에서는 78.8%를 차지했고, 태화산과 광릉숲에서는 각각 61.0%, 45.9%의 비율을 차지하였다. 모든 임분이 활엽수림이어서 침엽수 낙엽의 유입이 적었지만, 태화산의 경우 183.9(±122.2)kg/ha/yr로 3.1%를 차지하였다. 또한 우점 수종이 졸참나무인 광릉숲과 태화산의 종자 생산량은 각각 1755.7(±485.0)kg/ha/yr (24.1%), 803.4(±163.3) kg/ha/yr (13.6%)이었지만, 물푸레나무와 음나무가 우점하는 가리왕산은 12.7(±3.2)kg/ha/yr로 매우 적은 양의 종자가 생산되었다. 수피와 가지가 차지하는 비율은 광릉숲, 가리왕산, 태화산 순으로 각각 17.8%, 12.4%, 12.7%을 차지하였으며, 모든 임분에서 꽃의 비율이 가장 낮았다.

연간 낙엽·낙지 생산량의 월별 생산량은 Fig. 1에

나타내었다. 전반적으로 낙엽·낙지 생산량의 패턴은 유사하였으나, 가리왕산은 광릉숲과 태화산에 비하여 1개월 빠른 10월에 모든 낙엽·낙지가 종료되었다. 더불어 가리왕산의 경우, 전체 낙엽·낙지량의 65.4%가 10월에 편중되어 21.1%의 높은 시기별 변이계수(coefficient variation)를 보이는 반면, 광릉숲(C.V : 9.4%)은 가장 고르게 분포하고, 태화산(C.V : 13.5%)은 그 중간 경향을 보였다. 전체 생산량에서 가장 많은 비율을 차지하는 활엽수 낙엽은 광릉숲과 태화산은 가을철(10-11월)에 각각 86.9%, 85.9%이고, 가리왕산은 9-10월에 88.0%가 집중되어 떨어졌다. 광릉숲과 태화산의 경우, 낙엽이 본격적으로 떨어지기 시작하기 전인 9월에는 종자의 생산량이 많아 각각 1,198(±350.0) kg/ha, 554(±162.5)kg/ha로 9월 전체 낙엽·낙지 생산량의 82.0%와 71.6%를 차지하였으나, 가리왕산의 경우에는 그 양이 적어 특별한 경향을 보이지 않았다. 또한 강우가 집중되는 7월과 8월에 광릉숲, 가리왕산의 가지와 수피 생산량의 합은 각각 583.34kg/ha, 217.3kg/ha로 연간 가지, 수피 생산량의 44.9%, 53.4%로 여름철에 집중된 반면, 태화산에서는 2013년 12월부터 2014년 4월 말까지 223.34kg/ha, 2014년 5월부터 9월까지 119.6kg/ha, 2014년 10월부터 11월 말까지 392.4 kg/h로 여름 보다는 10월 이후 동절기에 목질부의 탈락이 많았다.

연간 낙엽·낙지 생산량은 수종과 고도, 입지 등의 차이로 직접적인 비교는 어렵지만, 우리나라 참나무림의 낙엽·낙지 생산량 2,480 - 8,760kg/ha/yr (Son *et al.*, 2004)과 온대 낙엽활엽수림의 낙엽·낙지 생산량

Table 2. Annual litter-fall inputs (kg/ha) at the three experiment sites

Site	Needle litter	Leaf litter	Other tree component					Total
			Bark	Branch	Seed	Flower	Etc.	
Gwangneung	25.5 (±16.5)	3,443.0b (±339.7)	354.3 (±191.9)	945.7b (±165.1)	1755.7b (±485.0)	2.4 (±1.3)	970.6b (±144.1)	7,497.3c (±326.5)
Mt. Taewha	183.9 (±122.2)	3,605.8b (±116.5)	174.6 (±47.7)	560.7a (±98.6)	803.4a (±163.3)	26.8 (±16.8)	563.5a (±75.63)	5,929.1b (±225.8)
Mt. Gariwang	4.7 (±1.4)	2,529.2a (±194.9)	15.1 (±2.4)	388.3a (±57.5)	12.7a (±3.2)	1.2 (±0.5)	255.4a (±20.7)	3,210.1a (±220.1)
Differences among sites (p-value)	0.193	0.021	0.152	0.028	0.005	0.147	0.001	0.000

The numbers in parentheses represent standard errors among litter traps.

Different alphabet letters indicate the statistically different group among sites with Duncan multiple comparison in the each component ($p < 0.05$).

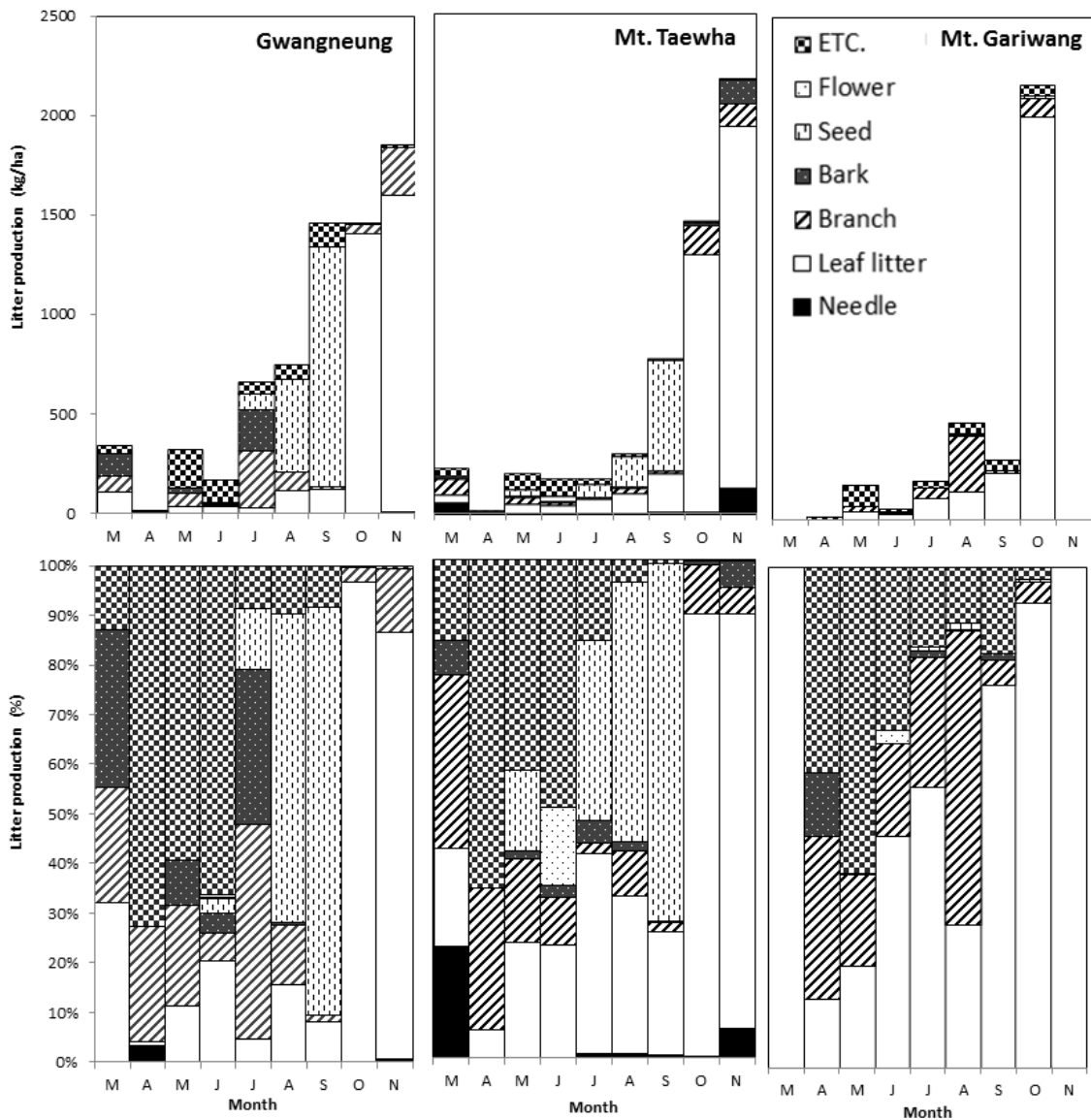


Fig. 1. Monthly patterns of litterfall inputs (kg/ha) at the three experiment sites

2,300-7,100kg/ha/yr (Raich and Nadelhoffer, 1989)과 유사한 수준이었다. 낙엽·낙지 생산량은 임분의 천이 단계 증가에 따른 바이오매스 축적량 등과 양의 상관 관계를 가지지만(Zhou *et al.*, 2007), 본 연구에서는 바이오매스 축적량의 척도인 흉고단면적의 증가에 따라 연간 낙엽·낙지 생산량이 증가하지는 않았는데, 이는 세 조사지의 해발고 등의 입지 환경차이에 기인한 것으로 생각된다. 하지만 임분 생산성의 척도인 낙엽생산량은 흉고단면적이 가장 작고, 우점종의 직

경생장분포로 보아 가장 어린 임분인 태화산에서 인근의 잣나무림에서 침입한 잣나무의 낙엽을 포함한 낙엽량이 3,800kg/ha/yr로 가장 높게 나타났으나, 광릉숲(3,469kg/ha/yr)과 유의한 차이가 없었다($p = 0.662$). 가리왕산은 2,534kg/ha/yr로 세 임분 중 가장 낮았다($p = 0.001$). 따라서 광릉숲과 태화산은 낙엽생산량이 유사한 수준임에도 불구하고, 천이단계의 증가에 따라 바이오매스 축적량이 높은 광릉숲에서 가지, 종자, 수피 등 잎 이외 인자들의 비율이 높게 나타나(Gholz *et*

al., 1985), 전체 낙엽·낙지 생산량이 최대로 나타났다. 태화산의 경우, 다른 두 지역에 비하여 상대적으로 어린 임분이기 때문에, 바이오매스의 축적량이 작고, 고사되어 떨어지는 목질부 등의 탈락이 적게 나타난 것으로 생각된다. 한편 가리왕산의 경우, 태화산에 비해 높은 임목밀도와 흉고단면적에도 불구하고 위도와 고도의 증가에 음의 상관관계를 가지는 수고와 임분의 생산성 때문에 낙엽량과 전체 낙엽·낙지량이 가장 낮게 나타났다(Bray and Gorham, 1964; Vogt *et al.*, 1986; Son *et al.*, 2004).

월별 생산량에서 졸참나무와 갈참나무와 같이 조위성 수종들이 생육하는 광릉숲과 태화산에 비하여, 그러한 수종이 없는 가리왕산의 경우, 겨울철 잎의 탈락이 없어 3월의 낙엽·낙지 생산량이 거의 나타나지 않았으며, 높은 고도에 따른 낮은 기온으로 다른 두 임분 보다 생장기간이 짧아 낙엽의 생산량이 10월에 집중되었다. 광릉숲과 태화산의 경우 낙엽의 생산량과 패턴은 서로 유사하였으나, 바이오매스의 축적량이 많은 광릉숲에서 종자, 가지, 수피의 생산량이 높아 전체 낙엽·낙지 생산량의 월별 변이가 가장 작게 나타났다. 특히 가지와 수피의 경우, 모든 임분에서 가을 이후 동절기의 눈으로 인한 탈락이 발생되어 2014년 3월에 수집되었지만, 높은 임령으로 인해 크고 노쇠한 가지가 많은 광릉숲에서 폭풍과 장마와 같이 강우와 바람이 심한 여름철에 다른 지역보다 생산량이 많은 반면에 생생한 가지가 많은 비교적 어린 태화산에서는 여름철 낙지의 양이 다른 임분에 비하여 현저히 낮았다(Fig. 1; e.g., Son *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2003). 하지만 동일 연구지에서 여름철(7월-8월) 강우량이 2.1배(317.2 mm vs. 668.7mm) 많았던 2013년 여름철의 가지와 수피 생산량은 2014년에 비해 약 2배 많았고, 연간 가지와 수피량의 48.9% 차지했기 때문에 계절적 경향을 정확히 파악하기 위해서는 장기적인 관찰이 필요하다(Korea Forest Service, 2014).

3.3. 수종별 낙엽량과 엽면적비(SLA)

각 임분 활엽수의 수종별 낙엽량과 엽면적비는 Table 3에 나타내었다. 각 임분의 낙엽량은 광릉숲의 경우, 졸참나무 2026.6(±399.2)kg/ha, 서어나무 749.6(±473.4)kg/ha, 까치박달84.1(±142.5)kg/ha 순으로 나타났고, 태화산에서는 졸참나무 2081.8(±172.4)kg/ha, 쪽동백나무 366.0(±110.6)kg/ha 순이며, 가리왕산에서는 물푸레나무 1320.5(±331.7)kg/ha, 팔배나무 237.5(±110.9)

kg/ha였다. 가리왕산의 상층수종인 음나무를 제외하고, 모든 임분에서 상층을 구성하는 수종의 낙엽량이 높게 나타났고, 흉고직경과 수고가 작아 기타수종으로 분류된 낙엽량이 전체 낙엽량의 9 - 16% 범위로 모든 임분에서 높게 나타났다.

수종별 낙엽의 엽면적비는 모든 임분에서 상층 수종들이 하층 수종들 보다 더 낮은 경향을 보였다. 광릉숲과 태화산의 상층수종인 졸참나무 엽면적비가 각각 145.5(±11.2)cm²g⁻¹, 142.9(±17.6)cm²g⁻¹, 가리왕산 상층의 물푸레나무 엽면적비가 180.0(±19.1)cm²g⁻¹, 음나무 엽면적비가 166.5(±34.3)cm²g⁻¹인 것에 비하여, 태화산과 가리왕산의 하층에 위치한 쪽동백나무(*Styrax obassia*)와 까치박달은 각각 287.5(±14.4)cm²g⁻¹, 279.7(±30.8)cm²g⁻¹로 상층보다 높게 나타났다. 또한 졸참나무($p = 0.941$)와 까치박달($p = 0.893$)의 엽면적비는 임분간 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 팔배나무의 경우, 광릉숲과 가리왕산에서 각각 288.1(±41.9) cm²g⁻¹, 205.0(±38.1)cm²g⁻¹으로 유의한 차이가 나타났다($p < 0.001$).

흉고단면적의 차이에도 불구하고 광릉숲과 태화산의 낙엽량은 큰 차이를 보이지 않았다. 흉고단면적이 가지, 수피를 포함한 목질부와 종자 등의 바이오매스 축적량 증가에 중요한 기준이 될 수는 있지만(Chiba, 1998), 흉고단면적의 증가에 따라 잎의 생체량이 반드시 증가하지는 않으며, 입지환경에 대한 적응이나 변태 단면적의 비율 등에 따라 임분의 낙엽생산량이 달라질 수 있다(Binkley, 1983; Albrektson, 1984). 또한, 본 연구에서 흉고직경이 각각 24.1(±15.7)cm, 21.3(±3.8)cm, 22.2(±6.3)cm로 비슷한 서어나무, 갈참나무, 물푸레나무의 경우, 개체수가 다른 것을 고려한다 해도 낙엽생산량은 매우 큰 차이가 나타났으며($p < 0.001$), 광릉숲과 가리왕산의 까치박달은 흉고직경과 개체수가 비슷하지만, 낙엽의 생산량이 약 2배 정도 차이가 났다. 이와 같이 흉고단면적과 개체수에 비례하여 낙엽량이 결정되지 않으며, 수종과 지역에 따라 낙엽의 생산량이 다르게 나타나기 때문에, 낙엽량을 포함한 다양한 생체 부위 혹은 바이오매스 추정에는 다양한 입지환경과 생장조건을 반영하는 수종별 상대성장식이 필요함에도 불구하고(Bartelink, 1997; Li *et al.*, 2011; Ryu *et al.*, 2014a), 현재 국내에서는 제한된 수종의 상대성장식을 흉고직경 단독 혹은 수고와의 조합으로 개발된 경우가 대부분이다(Son *et al.*, 2007; Korea forest service, 2009).

수종별 엽면적비 특성에서, 까치박달과 같이 하층에 위치하는 수종들은 상층의 피복으로 인하여 광량이 부족한 환경에 적응하여 생육하며, 무계에 대한 엽면적의 비율을 높여 광량을 효율적으로 이용한다(Anten and Hirose, 1999; Niinemets, 2007). 또한 각 수종의 생물학적 차이에 따른 고유의 잎 특성(잎의 크기, 면적 등)으로 수종마다 엽면적비가 각각 다르게 나타났지만, 팔배나무의 경우, 동일 수종임에도 불구하고 각 임분 내의 수직적 위치에 따른 광량의 차이로 하층에 위치한 광릉숲에서의 엽면적비는 $288.1(\pm 41.9)\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ 로 상층에 위치한 가리왕산의 엽면적비 $205.0(\pm 30.8)\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ 에 비하여 40%에서 더 높아 광릉숲에서는 음엽, 가리왕산에서는 양엽의 특성을 보였다(Lichtenthaler *et al.*, 2007). 한편, 이 연구에서 비교적 양이 많은 기타수종 엽면적비의 평균은 광릉숲이 다른 두 임분 보다 크게

나타났고, 태화산과 가리왕산은 비교적 비슷했으며, 모든 임분에서 엽면적비 편차가 다른 수종에 비하여 크게 나타났다(Table 3). 임분이 성숙하여 복잡한 구조의 임관 상층 하에 생육하는 광릉숲의 때죽나무(*Styrax japonica*), 노린재나무(*Symplocos chinensis*) 등의 기타 수종들은 보다 많은 광의 흡수를 위하여 엽면적의 비율을 높인 반면, 태화산의 기타 수종은 진달래(*Rhododendron mucronulatum*)와 철쭉(*Rhododendron yedoense*) 등으로 관목이면서 그늘에서도 잘 자라는 음수 수종이기 때문에 엽면적비가 낮은 것으로 생각된다. 또한 전체 낙엽량의 16.3%가 기타수종인 가리왕산의 경우, 물푸레나무와 같은 복엽이 단엽으로 탈락되어 수종의 구별이 명확하지 않거나 음나무, 고로쇠나무(*Acer mono*) 등 잎 결각의 일부가 찢어져서 유입된 낙엽이 기타로 포함되었기 때문에 상대적으로 기타

Table 3. Leaf-litter characteristics at the three experiment sites

Site	Species	Weight (kg ha ⁻¹)	SLA (cm ² g ⁻¹)
Gwang-neung	<i>Quercus serrata</i>	2026.6 (±399.2)	143.5 (±11.2)a
	<i>Carpinus laxiflora</i>	749.6 (±473.4)	262.6 (±42.6)b
	<i>Carpinus cordata</i>	84.1 (±142.5)	275.6 (±60.2)c
	<i>Acer pseudosieboldianum</i>	73.2 (±145.2)	281.1 (±26.0)c
	<i>Sorbus alnifolia</i>	19.8 (±24.8)	288.1 (±41.9)d
	Others*	299.1 (±158.4)	249.1 (±70.8)bc
	Total	3252.5 (±684.5)	242.8 (±68.4)
Mt. Taewha	<i>Quercus serrata</i>	2081.8 (±172.4)	142.9 (±17.6)a
	<i>Quercus aliena</i>	319.3 (±192.4)	136.8 (±34.2)a
	<i>Styrax obassia</i>	366.0 (±110.6)	207.1 (±49.8)b
	<i>Prunus sargentii</i>	74.2 (±42.4)	287.5 (±14.4)c
	Others†	552.5 (±173.8)	181.2 (±58.9)b
Total	3394.6 (±216.0)	175.0 (±57.2)	
Mt. Gariwang	<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	1320.5 (±331.7)	180.0 (±19.1)ab
	<i>Carpinus cordata</i>	152.2 (±35.0)	279.7 (±30.8)d
	<i>Acer pseudosieboldianum</i>	25.9 (±19.4)	257.8 (±34.4)c
	<i>Acer mono</i>	153.4 (±59.0)	196.9 (±40.9)bc
	<i>Kalopanax septemlobus</i>	78.2 (±64.3)	166.5 (±34.3)a
	<i>Sorbus alnifolia</i>	237.5 (±110.9)	205.0 (±38.1)b
	Othres‡	381.9 (±121.6)	167.6 (±46.4)b
Total	2349.6 (±406.5)	207.9 (±52.4)	

The numbers in parentheses represent standard errors.

Different alphabet letters indicate the statistically different group among species with Duncan multiple comparison in the each site ($p < 0.05$).

* : *Styrax japonica*, *Euonymus sachalinensis*, *Symplocos chinensis*, *Styrax obassia*

† : *Rhododendron mucronulatum*, *Rhododendron yedoense*, *Symplocos chinensis*

‡ : *Acer mandshuricum*, *Tilia amurensis*

수종의 엽면적비는 낮고, 낙엽량은 높게 나타났다.

3.4. 수종별 엽면적지수 변화

수종별 엽면적지수는 각 수종의 낙엽 엽면적비와 건중량의 곱으로 계산하였다. 본 연구에서는 낙엽의 엽면적비를 수종의 차이뿐만 아니라 수집시기에 따라 엽면적비의 계절적 변화를 반영하여 엽면적지수의 변화를 추정하였으며, 자세한 자료와 방법은 Kwon *et al.*(2016)에 서술하였다. 수종별 최대 엽면적지수는 광릉숲에서 졸참나무 2.95(± 0.21), 서어나무 1.77(± 0.61)순으로 높았고($P < 0.001$), 전체 엽면적지수는 5.99(± 0.69)로 나타났다(Fig. 2). 태화산의 경우, 졸참나무 엽면적지수가 3.08(± 0.21)로 임관층 전체 엽면적 5.2(± 0.24)의 59%를 차지하였고, 가리왕산의 경우, 물푸레나무의 엽면적지수가 2.19(± 0.30)로 가장 높았고($P < 0.001$), 전체 엽면적지수(4.06(± 0.42))가 모든 임분 중에 가장 낮게 나타났다.

낙엽기의 엽면적지수 변화는 수종과 임분에 따라 다르게 나타났다(Fig. 2). 광릉숲의 우점종인 졸참나무는 321일까지 최대 엽면적지수의 91%를 유지했고, 태화산의 졸참나무는 315일까지 93%를 유지하였다. 반면에 광릉숲과 가리왕산에 공통으로 생육하는 까치박달의 경우, 엽면적지수가 90% 감소하는 시점이 광릉숲에서는 308일 이후인 반면 가리왕산에서는 266일 이후로 더 빠르게 나타났다. 이와 유사하게 가리왕산의 우점종인 물푸레나무는 287일에 92%가 유지된 후 급격히 감소하였으며, 전체 엽면적지수는 287일부터 약 2주간 전체 엽면적지수가 3.4에서 0.4로 급격하게 감소하여, 가리왕산의 경우, 광릉숲과 태화산에 비하여 낙엽기가 한 달 정도 빠르고 급격하게 종료되는 것으로 나타났다. 또한 각 임분 내에서 엽면적지수가 감소되는 순서는 광릉숲의 경우, 서어나무가 가장 빠르게 떨어졌고, 팔배나무, 기타수종, 당단풍나무(*Acer pseudosieboldianum*), 까치박달 순이었으며, 졸참나무 엽면적지수가 가장 오래 유지되었다. 또한 태화산의 경우, 산벚나무, 기타수종, 쪽동백나무의 낙엽이 탈락된 이후 10월이 지나서야 갈참나무와 졸참나무의 낙엽이 떨어졌고, 가리왕산의 경우, 상층수종인 팔배나무, 물푸레나무, 음나무와 고로쇠나무의 엽면적지수 감소 후 하층을 구성하고 있는 까치박달, 기타수종, 당단풍나무 순으로 낙엽이 탈락했다.

전체 엽면적에 대한 각 수종의 기여도와 흉고단면적의 비율과 상관관계를 알아보기 위해 흉고단면적의

비율과 수종별 최대 엽면적지수의 비율을 Fig. 3에 나타내었다. 다양한 불확실성이 존재하는 기타수종을 제외한 나머지 수종들의 경우, 대부분의 수종들은 흉고단면적과 엽면적지수의 증가가 1:1의 비율로 이루어졌다($R^2 = 0.807$ (광릉숲), 0.935 (태화산), 0.777 (가리왕산)). 하지만 예외적으로 음나무와 고로쇠나무와 같이 가지마다 잎의 양이 적고 단엽인 경우와 광릉숲과 태화산의 졸참나무와 같이 대경목의 경우에는 흉고단면적에 비하여 엽면적지수가 작게 나타났으며, 이들 수종은 비교적 엽면적비가 낮은 두꺼운 잎을 가졌다. 이와는 반대로 1:1 선의 위쪽에 분포한 우리나라의 대표적인 천이 후기계열 수종인 서어나무의 경우, 상층 수종임에도 불구하고 1:1 선의 아래쪽에 위치한 다른 상층 수종들보다 현저히 높은 엽면적비(262.6 VS 162.5(= 졸참나무, 음나무, 고로쇠나무의 평균)), 즉 얇고 넓은 잎을 많이 가지고 있는 특성을 보였으며, 동일 임분의 졸참나무와 까치박달의 2014년 직경생장률 0.93%와 0.92%에 비하여 현저히 낮은 0.68%의 직경생장률을 보였다(Korea Forest Service, 2015). 본 연구에서 서어나무의 광합성 특성을 직접적으로 분석하지는 않았지만, 직경생장률이 낮게 나타난 것은 광합성 효율이 낮은 것을 간접적으로 나타내며, 많은 엽량과 상층의 충분한 광량에도 불구하고 수목의 생산성이 낮아 흉고단면적의 증가로 이어지지 않은 것으로 이해된다. 이와 같이 모든 수종들이 흉고단면적에 따라 일정하게 엽면적지수가 증가하는 것이 아니기 때문에, 수종별 분류를 생각하여 엽면적지수를 추정하는 것은 과소치 혹은 과대치가 나타날 것이다(Liu *et al.*, 2015; Kwon *et al.*, 2016). 그러므로 수관의 전체 엽면적지수가 측정되는 간접적 방법의 경우, 수종별 엽면적지수를 추정하기 위하여 전체 엽면적지수에 각 수종의 흉고단면적 비율을 곱하는 것은 한계가 있을 것으로 생각된다.

전체 엽면적지수는 가리왕산이 약 한달 정도 빠르게 감소를 시작하여, 더 빠르게 모든 잎이 떨어졌으며, 까치박달, 당단풍나무, 팔배나무의 경우, 광릉숲에 비하여 가리왕산에서 더 빠르고 급격하게 감소하였다. 동일 수종임에도 임분에 따라 낙엽의 탈락시기와 패턴이 다르게 나타났는데, 이는 높은 표고로 인한 낮은 연평균 기온과 강한 바람 등의 입지환경의 차이로 수목의 생리활동이 빠르게 중단된 결과이다. 또한 조위성 수종인 참나무를 제외하고 모든 임분에서 상층 수종의 낙엽이 떨어진 후 하층 수종의 엽면적지수가 감소하였다. 특히 팔배나무의 경우, 상층을 구성하는 가

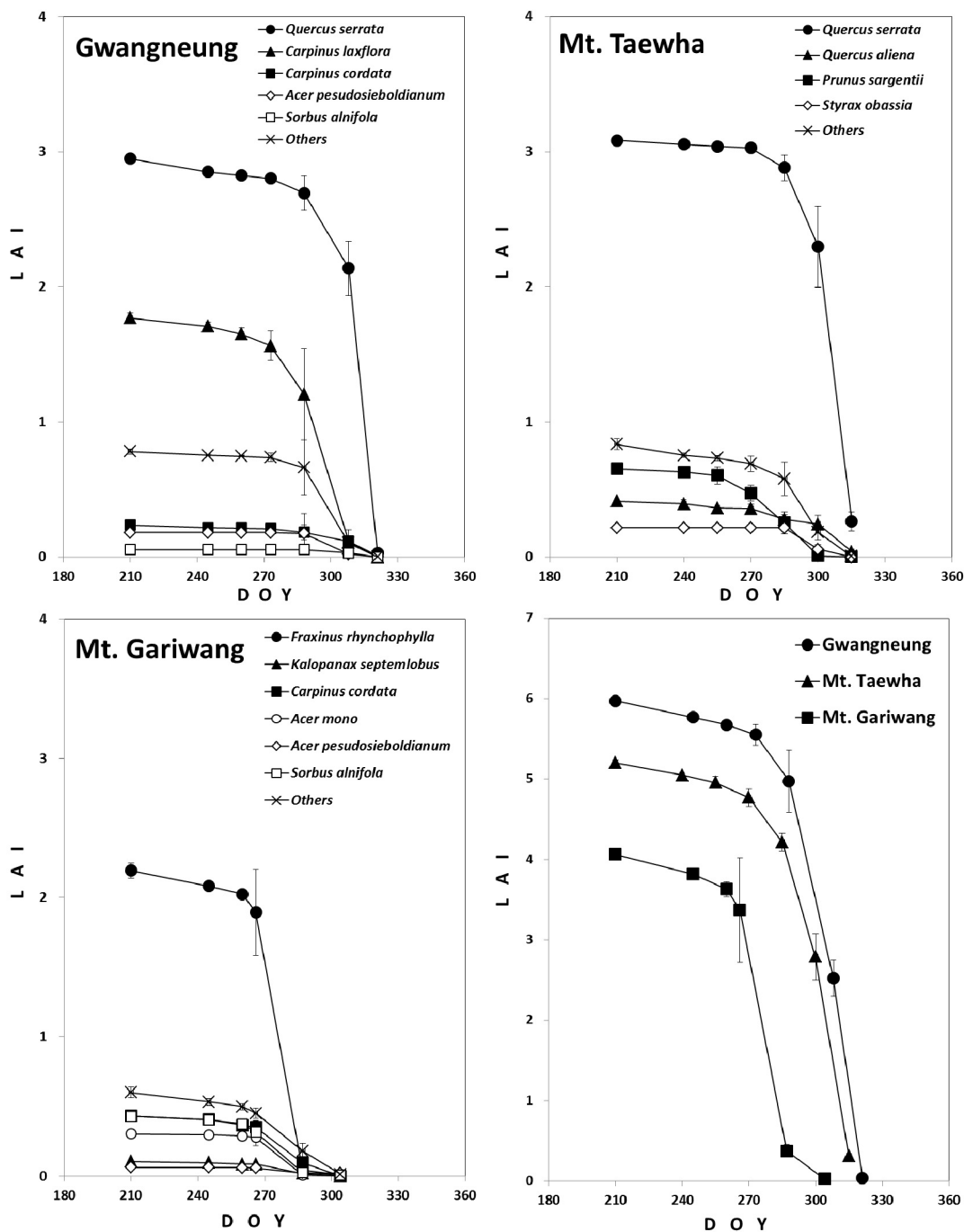


Fig. 2. LAI estimates from litterfall collection at the three experiment site for autumn, 2014 (Vertical lines indicate standard errors)

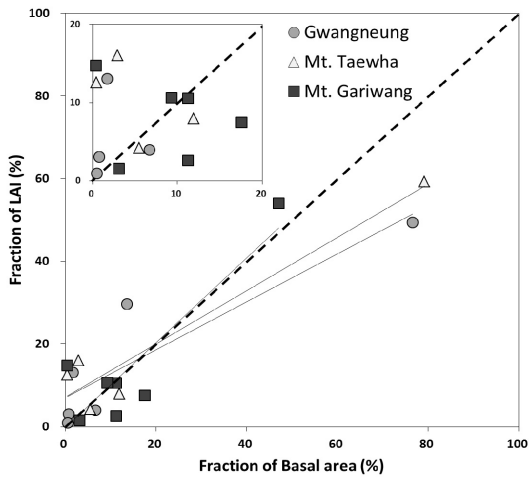


Fig. 3. Fraction of total LAI for each species versus the corresponding fraction of total basal area in each experiment site (The dotted line indicates the 1:1 relationship). The coefficient for the linear regression $LAI = a * Basal\ area + b$ are : Gwnagneung (a:0.5787, b:7.0219), Mt. Taewha(a:0.6434, b:7.1313), Mt. Gariwang (a:1.023, b:-0.1113)

리왕산에서는 가장 빠르게 엽면적지수가 감소한 반면, 하층에 위치하는 광릉숲에서는 상층의 서어나무의 엽면적이 감소한 이후 낙엽이 떨어졌다. 낮은 광도에 생육하던 하층수종들에게 늦은 가을에 상층목의 낙엽이 떨어지면서 임내로 유입되는 빛은 광합성과 질소의 이용효율을 높일 수 있는 좋은 기회를 제공하며, 이 짧은 기간에 대한 적응으로 상층 수종들보다 낙엽의 시작이 늦으며 단기간에 탈락하는 것으로 나타났다 (Koike, 1988; Ellsworth and Reich, 1996; Kitaoka and Koike, 2005).

3.5. 직접적인 방법과 간접적인 방법에 의한 엽면적지수 비교

본 연구에서 잎의 밀집도(Clumping index) 0.5를 사용하여 LAI-2200C로 측정된 간접적 방법의 최대 엽면적지수는 광릉숲, 태화산, 가리왕산에서 각각 4.93, 4.03, 3.72로 나타났으며(Fig. 4), 전반적으로 낙엽에 의한 엽면적지수 보다 낮은 경향을 나타냈다($R^2 = 0.7725$, Fig. 5). 또한 간접적인 엽면적지수가 직접적인 엽면적지수보다 높아지는 엽면적지수 값은 광릉숲은 1 - 2 사이로 나타났고, 태화산과 가리왕산은 약 3 정도에서 나타났다(Fig. 4). 또한 모든 임분의 엽면적지수 값을 취합한 방법 간 비교에서도 직접방법에 의한 엽면적지수가 3이하일 때부터 간접방법이 더 크게 나타나는 것으로 나타났다(Fig. 5).

광릉숲의 동일 임분에 위치한 생태타워에서 LED sensor, LAI-2200, 카메라를 이용하여 측정한 엽면적지수는 각각 3.6, 4.0, 4.0으로 본 연구에서 낙엽으로 측정한 값보다 낮았고, 최대값에 이르는 시기가 빠르게 나타났다(Ryu *et al.*, 2014b). 일반적으로 잎의 공간적 분포가 무작위로 나타나지 않으며, 엽면적지수 3 - 5이상의 울폐된 임관에서는 식생지수의 증가를 반영하지 못하는 문제점 때문에(Chen, 1996; Gower *et al.*, 1999), 간접방법의 엽면적지수는 낙엽에 의하여 정확하게 추정된 엽면적지수 보다 과소평가 되는 것으로 보고된다. 결과적으로 간접방법을 이용한 엽면적지수의 추정은 잎의 밀집 효과(Clumping effect)와 빛의 산란(Scattering effects) 등에 의하여 정확도가 낮아지며 (Stenberg *et al.*, 1994; Ryu *et al.*, 2010; Kobayashi *et al.*, 2013), 특히 임관층 상부 잎의 밀도가 높을수록 과소평가되는 경향이 있다고 보고되었다(Chen,

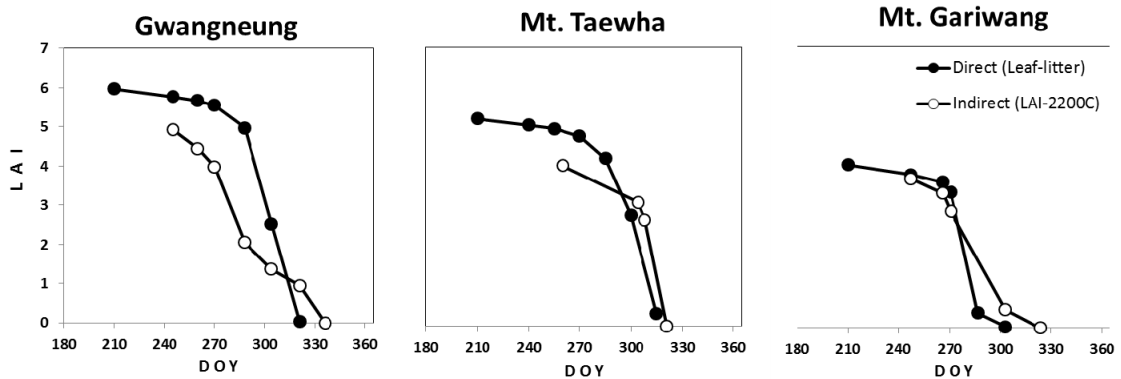


Fig. 4. LAI of the canopy estimated by direct and indirect methods

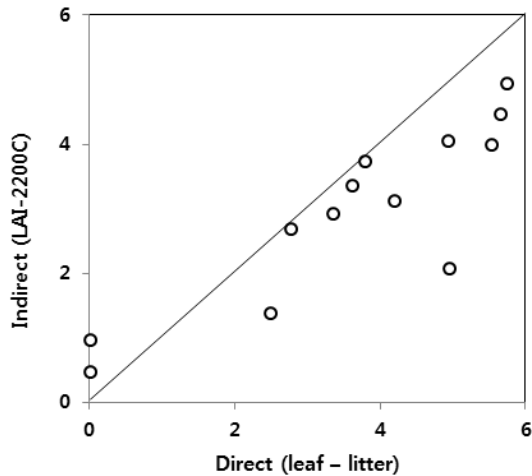


Fig. 5. Comparison of direct LAI based on leaf litter collection and indirect LAI measured using LAI-2200C (The line indicates the 1:1 relationship)

1996; Eriksson *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2015).

Liu *et al.*(2015)의 경우, LAI-2000로 측정된 자료가 낙엽 수집에 의한 엽면적지수의 차이가 32% 정도 과소측정 되었지만, 잎의 밀집도를 보정하여 엽면적지수를 추정된 결과 6% 이하로 차이를 보정하였다. 따라서 본 연구의 최대 엽면적지수를 기준으로 간접적인 방법의 엽면적지수가 낙엽수집에 의한 엽면적지수와 같아지는 잎의 밀집도를 계산한 결과 광릉숲 0.58, 태화산 0.65, 가리왕산 0.51로 나타났다(Fig. 6). 이와 같이 잎의 밀집도는 각 임분의 임분밀도 증가와 음의 상관관계가 나타났으며, 침엽수림과 달리 잎의 밀집도를 고려할 필요가 적은 활엽수림의 경우, 임분 밀도와 밀집도 간의 음의 상관관계를 고려하는 것이 정확한 엽면적지수의 추정을 위해 중요함을 보여준다(Kim *et al.*, 2011).

IV. 결론

광릉숲, 태화산 서울대 학술림, 가리왕산의 낙엽활엽수림에서 연간 낙엽·낙지 생산량과 가을철 낙엽에 의한 수종별 엽면적지수를 산출하고, 간접적인 방법의 것과 비교하였다. 연간 낙엽·낙지 생산량은 천이 단계 증가에 따른 임분의 바이오매스 축적량이나 수종 구성 등에 따라 그 양과 비율이 다르게 나타났으며 (Table 2), 특히 수종마다 낙엽의 양에 차이는 있지만 모든 임분에서 여름철 이후에 집중되는 경향을 보여

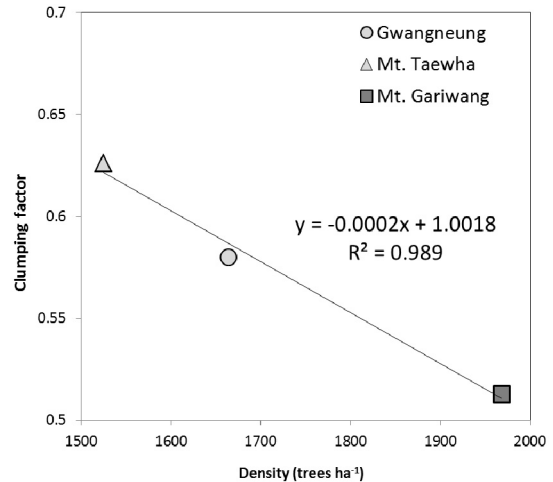


Fig. 6. Relationship between stand density and clumping factor after correcting with direct leaf area index

(Fig. 1), 가을철의 한시적인 낙엽 수집만으로도 최대 엽면적지수의 추정은 유효한 것으로 나타났다. 더욱이, 이러한 낙엽의 수집으로 낙엽의 양 뿐만 아니라 수종마다 엽면적비와 탈락시기를 정확하게 추정할 수 있었고(Table 3), 간접방법으로는 불가능하기 때문에 국내에서는 시도되지 않았던 각 수종별 엽면적지수를 국내 최초로 산출 할 수 있었다(Fig. 2). 본 연구를 통하여 수종별 낙엽량과 엽면적지수는 각 수종의 흉고단면적과 유의한 상관관계를 보였으나, 간접방법에 의한 전체 엽면적지수를 흉고단면적의 비율을 곱하여 수종별 엽면적지수로 추정하는 것은 상당한 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있었다(Fig. 3). 또한 간접방법에 의한 엽면적지수는 잎의 양이 늘고 밀집도가 높아질수록 과소평가되는 오류가 발생하기 쉽기 때문에(Fig. 4, 5), 직접방법에 의한 엽면적지수와 의 평가는 필수적임을 확인할 수 있었다. 따라서, 낙엽에 의한 직접적인 엽면적지수의 측정을 시도함으로써 다양한 수종이 공존하는 우리나라 온대 활엽수림에서 임분의 수종 구성과 밀도, 천이단계, 입지환경 등에 따른 낙엽량과 수종별 엽면적지수의 변화 양상을 정량적으로 확인 할 수 있었다.

적 요

광릉숲, 태화산 서울대 학술림, 가리왕산의 낙엽활엽수림에서 연간 낙엽·낙지 생산량과 가을철 낙엽에

의한 수종별 엽면적지수를 산출하고, 간접적인 방법의 것과 비교하였다. 연간 낙엽·낙지 생산량은 천이 단계 증가에 따른 임분의 바이오매스 축적량이나 수종 구성 등에 따라 그 양과 비율이 다르게 나타났으며 (Table 2), 특히 수종마다 낙엽의 양에 차이는 있지만 모든 임분에서 여름철 이후에 집중되는 경향을 보여 (Fig. 1), 가을철의 한시적인 낙엽 수집만으로도 최대 엽면적지수의 추정은 유효한 것으로 나타났다. 더욱이, 이러한 낙엽의 수집으로 낙엽의 양 뿐만 아니라 수종마다 SLA와 탈락시기를 정확하게 추정할 수 있었고 (Table 3), 간접방법으로는 불가능하기 때문에 국내에서는 시도되지 않았던 각 수종별 엽면적지수를 국내 최초로 산출 할 수 있었다(Fig. 2). 본 연구를 통하여 수종별 낙엽량과 엽면적지수는 각 수종의 흉고단면적과 유의한 상관관계를 보였으나, 간접방법에 의한 전체 엽면적지수를 흉고단면적의 비율을 곱하여 수종별 엽면적지수로 추정하는 것은 상당한 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있었다(Fig. 3). 또한 간접방법에 의한 엽면적지수는 잎의 양이 늘고 밀집도가 높아질수록 과소평가되는 오류가 발생하기 쉽기 때문에(Fig. 4, 5), 직접방법에 의한 엽면적지수와와의 평가는 필수적임을 확인할 수 있었다. 따라서, 낙엽에 의한 직접적인 엽면적지수의 측정을 시도함으로써 다양한 수종이 공존하는 우리나라 온대 활엽수림에서 임분의 수종 구성과 밀도, 천이단계, 입지환경 등에 따른 낙엽량과 수종별 엽면적지수의 변화 양상을 정량적으로 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산림청 연구과제 ‘온대북부 산림의 시계열 특성 분석 및 기후변화적응 관리기법 연구(과제번호: S111212L120110)’와 강원대학교(C1009687-01-01)의 지원에 의한 연구 결과의 일부입니다.

REFERENCES

- Albrekton, A., 1984: Sapwood basal area and needle mass of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees in central Sweden. *Forestry* **57**(1), 35-43.
- Anten, N. P. R., and T. Hirose, 1999: Interspecific differences in above-ground growth patterns result in spatial and temporal partitioning of light among species in a tall-grass meadow. *Journal of Ecology* **87**(4), 583-597.
- Bartelink, H., 1997: Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L). *Annales des sciences forestieres*, EDP Sciences, 39-50.
- Binkley, D., 1983: Ecosystem production in douglas-fir plantations: Interaction of red alder and site fertility. *Forest Ecology and Management* **5**(3), 215-227.
- Bondeau, A., D. W. Kicklighter, J. Kaduk, and The P. Intercomparison, 1999: Comparing global models of terrestrial net primary productivity(NPP): Importance of vegetation structure on seasonal NPP estimates. *Global Change Biology* **5**(S1), 35-45.
- Bray, J. R., and E. Gorham, 1964: Litter production in forests of the world. *Advances in Ecological Research* **2**, 101-157.
- Chason, J. W., D. D. Baldocchi, and M. A. Huston, 1991: A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology* **57**(1), 107-128.
- Chen, J. M., 1996: Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology* **80**(2), 135-163.
- Chen, J. M., W. Ju, J. Cihlar, D. Price, J. Liu, W. Chen, J. Pan, A. Black, and A. Barr, 2003: Spatial distribution of carbon sources and sinks in canada's forests. *Tellus B* **55**(2), 622-641.
- Chung, J. S., S. D. Kwon, M. W. Park, W. J. Kim and S. W. Kang, 1999: Forest inventory in chungbu experimental forest of Seoul national university. *Research Bulletin of the Seoul University Forests* **35**, 80-87.
- Chiba, Y., 1998: Architectural analysis of relationship between biomass and basal area based on pipe model theory. *Ecological Modelling* **108**(1), 219-225.
- Choi, j., 2011: Estimation of leaf area index using upward and downward looking automatic digital fisheye cameras in a deciduous broadleaf forest. *Kangwon National University Master's Degree* 1-61. (in Korean with English abstract)
- Dufrêne, E., and N. Bréda, 1995: Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods. *Oecologia* **104**(2), 156-162.
- Ellsworth, D. S., and P. B. Reich, 1996: Photosynthesis and leaf nitrogen of amazonian rain forest trees along a secondary succession. *Ecology* **77**, 581-594.
- Eriksson, H., L. Eklundh, K. Hall, and A. Lindroth, 2005: Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* **129**(1), 27-37.
- Gholz, H. L., C. S. Perry, W. P. Cropper, and L. C. Hendry, 1985: Litterfall, decomposition, and nitrogen and phosphorus dynamics in a chronosequence of slash pine (*Pinus elliotii*) plantations. *Forest Science* **31**(2), 463-478.
- Gower, S. T., C. J. Kucharik, and J. M. Norman, 1999: Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* **70**(1), 29-51.
- Ha, K. J., H. M. Oh, and K. Y. Kim, 2001: Inter-Annual

- and Intra Annual Variabilities of NDVI, LAI and Ts Estimated by AVHRR in Korea. *Korean Journal of Remote Sensing* **17**(2), 111-119. (in Korean with English abstract)
- Ha, R., H. J. Shin, G. A. Park, and W. Y. Hong, 2008: The evaluation of application to MODIS LAI (leaf area index) product. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* **11**(2), 61-72. (in Korean with English abstract)
- Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss, and F. Baret, 2004: Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**(1), 19-35.
- Kang, M. S., H. J. Kwon, J. H. Lim, and J. Kim, 2009: Understory evapotranspiration measured by eddy-covariance in Gwangneung deciduous and coniferous forests. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(4), 233-246. (in Korean with English abstract)
- Kim, C. S., 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**(2), 87-93. (in Korean with English abstract)
- Kim, H. Y., M. H. Lee, S. W. Kim, A. B. Guenther, J. M. Park, G. N. Cho, and H. S. Kim, 2015: Measurements of isoprene and monoterpenes at Mt. Taewha and estimation of their emissions. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(3), 217-226. (in Korean with English abstract)
- Kim, J. H., H. M. Yang, and G. Z. Jin, 1999: The pattern of natural regeneration by three different silvicultural systems in a natural deciduous forest. *The Journal of Korean Forest Society* **88**(2), 169-178. (in Korean with English abstract)
- Kim, J. H., 2004: One hundred years of ecology in Korea. *Seoul National University Press*, 179pp.
- Kim, J. H., and K. T. Kim, 2005: Estimation of potential evapotranspiration using LAI. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* **8**(4), 1-13. (in Korean with English abstract)
- Kim, H. S., S. Palmroth, M. Thérézien, P. Stenberg, and R. Oren, 2011: Analysis of the sensitivity of absorbed light and incident light profile to various canopy architecture and stand conditions. *Tree Physiology* **31**(1), 30-47.
- Kitaoka, S., and T. Koike, 2005: Seasonal and yearly variations in light use and nitrogen use by seedlings of four deciduous broad-leaved tree species invading larch plantations. *Tree Physiology* **25**(4), 467-475.
- Kobayashi, H., Y. R. Ryu, D. D. Baldocchi, J. M. Welles, and J. M. Norman, 2013: On the correct estimation of gap fraction: How to remove scattered radiation in gap fraction measurements? *Agricultural and Forest Meteorology* **174**, 170-183.
- Koike, T., 1988: Leaf structure and photosynthetic performance as related to the forest succession of deciduous Broad-Leaved Trees. *Plant Species Biology* **3**(2), 77-87.
- Koo, C. D., K. H. Ka, W. C. Park, H. Park, S. R. Ryu, Y. W. Park, and T. H. Kim, 2007: Changes of leaf area index, physiological activities and soil water in *Tricholoma matsutake* producing pine forest ecosystem. *Journal of Korean Forest Society* **96**(4), 438-447. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Service, 2009: Standing biomass and stand yield table (Project number: 11-1400377-000530-01). *Korea forest research institute*, 271pp.
- Korea Forest Service, 2014: Time series analysis of northern temperate forest characteristics and the development of forest management for climate change adaptation. *Korea Forest Service*, 12-15.
- Korea Forest Service, 2015: Time series analysis of northern temperate forest characteristics and the development of forest management for climate change adaptation. *Korea Forest Service*, 23pp.
- Korea national arboretum, 2016; [http://www.forest.go.kr/newfswb/html/HtmlPage.do?pg=/kna/kna_0201.html&mn=KFS_15_05_02_01&orgId=kna/\(2016.02.19\)](http://www.forest.go.kr/newfswb/html/HtmlPage.do?pg=/kna/kna_0201.html&mn=KFS_15_05_02_01&orgId=kna/(2016.02.19))
- Kwon, B. R., N. J. Heo, H. Y. Shin, H. S. Kim, P. S. Park and M. J. Yi, 2014: Nutrient use strategy of *Carpinus cordata* saplings growing under different forest stand conditions. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(3), 188-196. (in Korean with English abstract)
- Kwon, B., J. Jeon, H. S. Kim, and M. J. Yi, 2016: Direct leaf area index estimation by classification of leaf litter in a mixed deciduous broad-leaved forest in central Korea (in press). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. (in Korean with English abstract)
- Le Dantec, V., E. Duffrène, and B. Saugier, 2000: Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperate deciduous stands. *Forest Ecology and Management* **134**(1), 71-81.
- Lee, K. S., S. H. Kim, Y. I. Park, and K. C. Jang, 2003: Generation of forest leaf area index(LAI) map using multispectral satellite data and field measurements. *Korean Journal of Remote Sensing* **19**(5), 371-380. (in Korean with English abstract)
- Lee, K. S., S. H. Kim, J. H. Park, T. G. Kim, Y. I. Park, and C. S. Woo, 2006: Estimation of forest LAI in close canopy situation using optical remote sensing data. *Korean Journal of Remote Sensing* **22**(5), 305-311. (in Korean with English abstract)
- Li, X., M. J. Yi, Y. Son, P. S. Park, K. H. Lee, Y. M. Son, R. H. Kim, and M. J. Jeong, 2011: Biomass and carbon storage in an age-sequence of Korean pine (*Pinus*

- koraiensis*) plantation forests in central Korea. *Journal of Plant Biology* **54**(1), 33-42.
- Lichtenthaler, H. K., F. Babani, and G. Langsdorf, 2007: Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity in sun and shade leaves of trees. *Photosynthesis Research* **93**(1-3), 235-244.
- Liu, Z., G. Jin, J. M. Chen, and Y. Qi, 2015: Evaluating optical measurements of leaf area index against litter collection in a mixed broadleaved-Korean pine forest in china. *Trees* **29**(1), 59-73.
- McCarthy, R., R. Oren, A.C. Finizi, D. S. Ellsworth, H. S. Kim, K. H. Johnsen, and B. Millar, 2007: Temporal dynamics and spatial variability in the enhancement of canopy leaf area under elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology* **13**(12), 2479-2497.
- Niinemets, U., 2007: Photosynthesis and resource distribution through plant canopies. *Plant, Cell & Environment* **30**(9), 1052-1071.
- Osada, N., H. Takeda, H. Kawaguchi, A. Furukawa, and M. Awang, 2003: Estimation of crown characters and leaf biomass from leaf litter in a Malaysian canopy species, *elateriospermum tapos* (euphorbiaceae). *Forest Ecology and Management* **177**(1), 379-386.
- Baek, W. G., W. G. Park, and U. C. Lee, 1998: Flora and vegetation of resources plants in the Mt. Kariwang (Kangwondo). *Korean Journal of Plant Resources* **11**(2), 217-243.
- Raich, J. W. and K. J. Nadelhoffer, 1989: Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends. *Ecology* **70**(5), 1346-1354.
- Ryu, D. U., M. K. Moon, J. H. Park, S. S. Cho, T. K. Kim, and H. S. Kim, 2014a: Development of allometric equations for V age-class *Pinus koraiensis* in Mt. Taewha plantation, Gyeonggi-do. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(1), 29-38. (in Korean with English abstract)
- Ryu, Y. R., G. L. Lee, S. H. Jeon, Y. K. Song, and H. S. Kim, 2014b: Monitoring multi-layer canopy spring phenology of temperate deciduous and evergreen forests using low-cost spectral sensors. *Remote Sensing of Environment* **149**, 227-238.
- Ryu, Y. R., T. Nilson, H. Kobayashi, O. Sonnentag, B.E. Law, and D. D. Baldocchi, 2010: On the correct estimation of effective leaf area index: Does it reveal information on clumping effects? *Agricultural and Forest Meteorology* **150**(3), 463-472.
- Son, S. Y., K. C. Kwon, and T. S. Jeong, 2002: Productive structure and net production of *Quercus mongolica* forest in Mt. Taehwa (Kwangju, Kyonggi-do). *Journal of Korean Forest Energy* **21**(1), 76-82. (in Korean with English abstract)
- Son, Y., I., D. Y. Kim, I. H. Park, M. J. Yi, H. O. Jin, 2007: Production and nutrient cycling of Oak forest in Korea: A case study of *Quercus mongolica* and *Q. variabilis* stand. *Kangwon National University press*, 51-61.
- Song, Y. K., and Y. R. Ryu, 2015: Seasonal changes in vertical canopy structure in a temperate broadleaved forest in Korea. *Ecological Research* **30**, 821-831.
- Stenberg, P., S. Linder, H. Smolander, and J. Flower-Ellis, 1994: Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some scots pine stands. *Tree Physiology* **14**(7-9), 981-995.
- Vogt, K. A., C. C. Grier, and D. J. Vogt, 1986: Production, turnover, and nutrient dynamics of above-and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research* **15**(3), 3-377.
- Walcroft, A. S., K. J. Brown, W. S. F. Schuster, D. T. Tissue, M. H. Turnbull, K. L. Griffin, and D. Whitehead, 2005: Radiative transfer and carbon assimilation in relation to canopy architecture, foliage area distribution and clumping in a mature temperate rainforest canopy in New Zealand. *Agricultural and Forest Meteorology* **135**(1), 326-339.
- Wang, P., R. Sun, J. Hu, Q. Zhu, Y. Zhou, L. Li, and J. Chen, 2007: Measurements and simulation of forest leaf area index and net primary productivity in northern China. *Journal of Environmental Management* **85**(3), 607-615.
- Watanabe, T., M. Yokozawa, S. Emori, K. Takata, A. Sumida, and T. Hara, 2004: Developing a multilayered integrated numerical model of surface physics-growing plants interaction (MINoSGI). *Global Change Biology* **10**(6), 963-982.
- Zhou, G., L. Guan, X. Wei, D. Zhang, Q. Zhang, J. Yan, D. Wen, J. Liu, S. Liu, Z. Huang, G. Kong, J. Mo, and Q. Yu, 2007: Litterfall production along successional and altitudinal gradients of subtropical monsoon evergreen broadleaved forests in Guangdong, China. *Plant Ecology* **188**(1), 77-89.