

## 횡성지역 천연 소나무와 참나무류 순림 및 혼효임분의 탄소 저장량 추정

이수경<sup>1</sup> · 손요환<sup>1\*</sup> · 노남진<sup>1</sup> · 허수진<sup>1</sup> · 윤태경<sup>1</sup> · 이아름<sup>2</sup>  
· Abdul Razak Sarah<sup>1</sup> · 이우균<sup>1</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 환경생태공학부, <sup>2</sup>고려대학교 기후환경학과

## Carbon Storage of Natural Pine and Oak Pure and Mixed Forests in Hoengseong, Kangwon

Sue Kyoung Lee<sup>1</sup>, Yowhan Son<sup>1\*</sup>, Nam Jin Noh<sup>1</sup>, Su Jin Heo<sup>1</sup>, Tae Kyung Yoon<sup>1</sup>,  
Ah Reum Lee<sup>2</sup>, Sarah Abdul Razak<sup>1</sup> and Woo Kyun Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

<sup>2</sup>Department of Climate Environment, Graduate School of Life and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-713, Korea

**요약:** 산림 생태계 내 탄소 수지에 관한 기초자료를 확보하기 위해 소나무와 참나무류의 순림 및 이들의 혼효임분에 대한 탄소 저장량을 추정하였다. 연구대상지는 강원도 횡성군 둔내면 일대로 임분별로 흉고직경 5 cm 이상 임목에 대한 흉고단면적(m<sup>2</sup>/ha)을 기준으로 소나무:참나무류의 비율이 95:5인 소나무 순림과 0:100인 참나무류 순림, 그리고 20:80-70:30인 혼효림을 선정하였다. 각각의 임분 내 식생, 낙엽층, 고사목의 생체량과 탄소 농도를 분석하고, 0-30 cm 깊이까지의 토양 탄소 농도를 분석하였다. 식생(상층 임목과 하층 식생)의 탄소 저장량은 참나무류 순림에서 147.6 Mg C/ha, 소나무 순림에서 141.4 Mg C/ha, 혼효림에서 115.8 Mg C/ha 등으로 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 낙엽층 내 탄소 저장량은 소나무 순림에서 12.7 Mg C/ha, 참나무류 순림에서 9.9 Mg C/ha와 혼효림에서 8.4 Mg C/ha 등이었으며, 고사목 내 탄소 저장량은 혼효림에서 2.2 Mg/ha, 참나무류 순림에서 1.7 Mg/ha 와 소나무 순림에서 1.1 Mg/ha 등으로 낙엽층의 탄소량은 임분간 유의한 차이가 있었으나( $p < 0.05$ ), 고사목의 탄소 저장량은 임분간 유의한 차이가 없었다( $p > 0.05$ ). 지표로부터 30 cm 깊이까지의 토양 탄소 저장량은 소나무 순림에서 44.4 Mg C/ha 이고, 혼효림에서 41.6 Mg C/ha와 참나무류 순림에서 33.3 Mg C/ha 등의 분포를 보였으나 임분간 유의한 차이는 없었다. 생태계 내 총 탄소 저장량은 소나무 순림에서 199.6 Mg C/ha, 참나무류 순림에서 192.5 Mg C/ha, 혼효림에서 169.1 Mg C/ha 등으로 임분별로 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 탄소 저장량이 혼효림에서 순림보다 낮은 것은 탄소 저장량의 대부분을 차지하는 식생의 탄소 저장량이 혼효림에서 더 낮기 때문이었다. 혼효림의 식생은 소나무와 참나무류의 중간경쟁으로 참나무류의 직경생장이 둔화되고 임분 밀도가 높아 참나무류 임목간의 경쟁이 심하게 되어 순림보다 낮은 생체량을 보이는 것으로 추정된다. 혼효임분에서 탄소 저장량을 증가시키기 위해서는 간벌과 같은 적절한 임분관리를 통한 임분의 종내 및 종간경쟁을 완화시킬 필요가 있는 것으로 사료된다.

**Abstract:** This study was conducted to estimate the carbon (C) contents in pure and mixed stands of pine (*Pinus densiflora*) and oak (*Quercus* spp.) trees for establishing the C inventory of forest ecosystems. A total of fifteen 20 m×20 m pure and mixed stands of pine and oak trees were chosen in natural forests in Hoengseong, Kangwon based on the basal area of all trees ≥ 5 cm DBH: three of 95% of pine and 5% oak trees [pine stand], three of 100% of oak trees [oak stand], and nine of 20 to 70% of pine and 80 to 30% of oak trees [mixed stand]. To estimate C contents in the study stands, biomass in vegetation, forest floor and coarse woody debris (CWD) were calculated and C concentrations in vegetation, forest floor, CWD and soil (0-30 cm) were analyzed. There was no significant difference in vegetation C contents among the stands; 147.6 Mg C/ha for the oak stand, 141.4 Mg C/ha for the pine stand and 115.8 Mg C/ha for the mixed stand. Forest floor C contents were significantly different among the stands ( $p < 0.05$ ); 12.7 Mg/ha for the pine stand, 9.9 Mg/ha for the oak stand, and 8.4 Mg/ha for the mixed stand. However, CWD C contents were not significantly different among the stands ( $p > 0.05$ ); 2.2 Mg/ha for the mixed stand, 1.7 Mg/ha for the oak stand, and 1.1 Mg/ha for

\*Corresponding author  
E-mail: yson@korea.ac.kr

the pine stand. Soil C contents up to 30 cm depth were not significantly different among the study stands; 44.4 Mg C/ha for the pine stand, 41.6 Mg C/ha for the mixed stand, and 33.3 Mg C/ha for the oak stand. Total ecosystem C contents were lower in the mixed stand than those in the pure stands, because vegetation C contents which occupied almost total ecosystem C contents were lower in the mixed stand than those in the pure stands; 199.6 Mg C/ha for the pine stand, 192.5 Mg C/ha for the oak stand and 169.1 Mg C/ha for the mixed stand. Lower vegetation C contents in the mixed stand might be influenced by interspecific competition between pine and oak trees and intraspecific competition among the oak trees resulted from high stand density. We suggest that forest management such as thinning to enhance C storage is indispensable for minimizing the competition in forest ecosystems.

**Key words :** biomass, carbon storage, coarse woody debris, forest floor, *Pinus densiflora*, *Quercus species*, soil, vegetation

## 서론

전 세계적으로 온실효과로 인한 기후변화에 대처하기 위하여 이산화탄소 흡수원과 방출원 및 주요 생태계의 탄소 축적량 평가에 관한 연구가 중요하게 다루어지고 있다. 특히 산림생태계는 육상생태계에서 가장 큰 탄소 저장고이기 때문에 생태계 탄소 저장량 연구에서 주목을 받고 있다(McCarl and Schneider, 2001). 따라서 산림생태계의 탄소 저장량을 이해하고 파악하는 것이 매우 중요하며, 여기서 얻은 자료는 국가 전체 탄소 수지 통계 구축 및 대기 중의 이산화탄소 저감 대책을 세우기 위한 기초 자료로도 사용될 수 있다.

우리나라 산림에서 주요 임상별 면적과 비율은 소나무림이 약 160만 ha로 26.4%, 참나무류는 약 151만 ha로 24.9%, 혼효림은 약 161만 ha로 26.5%를 각각 차지하고 있어 전체 산림면적의 약 78%가 소나무, 참나무류, 혼효림 등으로 구성되어 있다(산림청, 2008). 특히 근래 침엽수와 활엽수림은 점차 감소되는 반면 혼효림은 증가되는 추세를 보이고 있으며(산림청, 2008), 침엽수와 활엽수 중 가장 많은 분포를 차지하는 소나무와 참나무류의 혼효림 면적이 증가되는 경향을 보인다(박인협과 문광선, 1999).

현재까지 산림생태계의 탄소 저장량을 파악하기 위한 연구는 소나무림과 참나무류의 단일수종으로 구성된 임분에 주로 집중되었고(박인협과 김준선, 1989; 박인협과 이석면, 1990; 손요환 등, 2007), 두 수종의 혼효임분에 대하여는 매우 미흡한 실정이다(박인협과 문광선, 1999). 혼

효된 임분의 경우 경쟁하는 수종들의 상호작용으로 순림 생태계를 구성하는 수종들의 비율별 탄소량을 합한 것과는 다르므로(Kelty, 2006), 혼효림에 대한 별도의 탄소 저장량 연구가 필요하다.

본 연구는 우리나라의 대표적인 자생수종이며 산림 구성 비율이 단일 수종으로 가장 높은 소나무와, 넓은 분포 면적과 더불어 소나무와 경쟁관계에 있는 참나무류를 대상으로 각각의 순림과 혼효림에서 식생의 지상부와 지하부, 낙엽층, 고사목 및 토양 등 생태계 구성 모든 부위에 포함된 탄소 저장량을 추정하고 임분 특성과의 관계를 알아보고자 하는 목적으로 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구대상지

본 연구는 강원도 횡성군 둔내면 일대(북위 37° 33', 동경 128° 18')의 산림을 대상으로 하였으며, 대상지의 해발고도는 719-833 m, 경사는 20-34°이다(Table 1). 이 지역의 1971년부터 2000년까지 30년 동안 연평균기온은 11.0°C이고, 연평균강수량은 1479 mm이다(기상청, 2009). 연구대상 산림 내 소나무와 참나무류의 수령 및 흉고직경 분포를 바탕으로 이 산림은 소나무 천연림에 점차 참나무류가 침입하여 혼효림으로 변하고 있는 것으로 추정되었다. 대부분 임분의 상층은 소나무가 우점하고 있으며, 참나무류는 소나무보다 하층에 분포하고 있다. 또한 능선에는 주로 60-70년생의 소나무가 순림 상태로 분포하고, 계

**Table 1. Characteristics of study stands. Numbers in parentheses denote the standard error of mean.**

Stand type	Dominant species	Altitude (m)	Slope (°)	Mean age (years)	Mean DBH (cm)	Basal area (m <sup>2</sup> /ha)	Density (tree/ha)
Pine stand	<i>P. densiflora</i>	720	23	66	33.4(4.10)	53.4	533
	<i>Q. mongolica</i>			44	8.7(0.64)	3.6	575
Oak stand	<i>Q. mongolica</i>	833	34	45	13.7(1.20)	21.8	1000
Mixed stand	<i>P. densiflora</i>	719-723	20-23	64	35.6(2.22)	15.2	139
	<i>Q. mongolica</i>			44	11.5(0.87)	14.2	1128

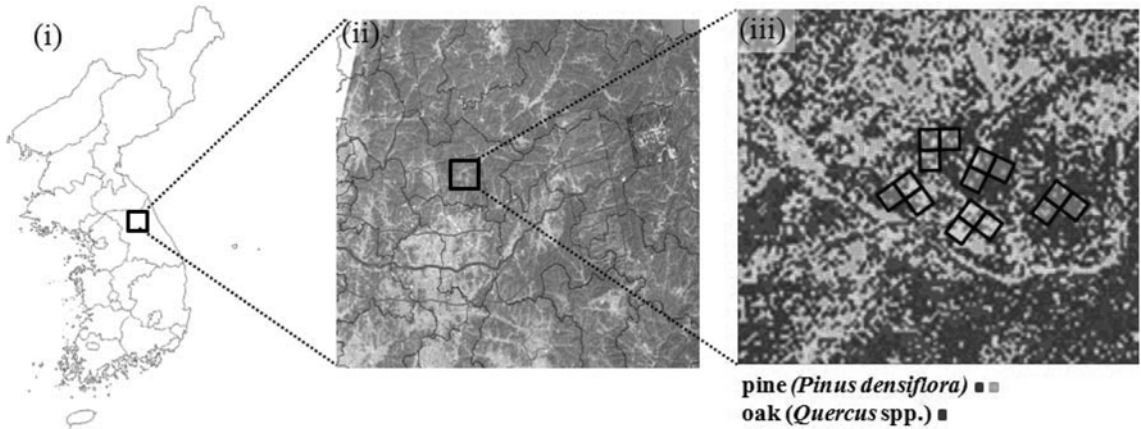


Figure 1. Study site in Hoengseong, Kangwon; a map of Korea (i), a satellite imagery around the study area (ii), and an image of the canopy species composition based on the supervised classification using ERDAS Imagine 9.0 and the fifteen squares of the study stands (iii).

꼭으로 갈수록 40-50년생의 참나무류와 다른 활엽수의 분포가 늘어나는 경향을 보이고 있다. 참나무류로는 신갈나무와 졸참나무가 우세하고 기타 활엽수로는 당단풍, 오리나무, 은나무, 피나무, 쪽동백, 물박달나무, 물푸레나무 등이 분포하지만, 소나무와 참나무류를 제외한 다른 수종의 흉고단면적 비율은 임분 전체의 5% 미만이다.

소나무와 참나무류의 순림 및 혼효 연구대상 임분을 선정하기 위하여 2007년 4월에 촬영된 고해상도 위성영상(KOMSAT-2)을 감독분류 방법(ERDAS Imagine 9.0)으로 구분하고 수관면적을 계산하여 20여개의 예비 임분을 정하였다(Figure 1). 이들 임분에 대해 2008년 4월 매목조사를 실시하여 흉고직경 5 cm 이상 임목의 흉고단면적을 계산하여 소나무:참나무류 비율이 95:5인 소나무 순림, 0:100인 참나무류 순림, 그리고 20:80-70:30의 분포를 갖는 혼효림의 임분을 최종 선정하였다. 소나무 순림과 참나무류 순림에는 각각 3개씩의 20 m×20 m 방형구를, 그리고 혼효림에는 9개의 동일한 크기의 방형구를 설치하였다.

## 2. 생태계 구성 부위별 탄소 저장량 추정

2008년 8월 연구대상 임분에서 식생 조사를 실시하고, 생태계 구성부위별(식생, 낙엽층, 고사목, 토양)로 시료를 채취하였다. 상층 임목은 매목조사를 바탕으로 흉고직경별 분포를 고려하여 수종별로 가지와 잎 시료를 채취하였으나, 임목줄기와 수피, 뿌리는 별채 작업을 수행하지 않았기 때문에 시료를 채취하지 못하였다. 하층 식생의 경우 임분별로 조사구 내에 5개의 1 m×1 m 방형구를 설치하고 그 안에 포함된 모든 관목류와 초본류의 지상부와 지하부를 채취하였다. 낙엽층 내 유기물은 임분별 조사구 내 임목의 5개소에서 30 cm×30 cm의 유기물 채취틀을 이용하여 시료를 채취하였다. 또한 고사목의 경우 2008년 11월에 조사구 내 흉고직경 5 cm 이상, 길이 1 m 이상 모

든 고사목의 길이와 직경을 조사하여 부피를 측정하고(국립산림과학원, 2007), 분해 정도에 따라 고사목의 등급을 구분하여 시료를 채취하였다(Lee *et al.*, 1997). 토양 내 탄소 저장량을 추정하기 위하여 조사구 내 5개 지점에서 개량토양시료 채취기(직경 5 cm, 길이 50 cm)를 이용하여 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm의 깊이별 시료를 채취하였다(황재홍 등, 2001).

상층 임목의 지상부 생체량은 소나무의 경우 박인협과 김준선(1989)의 강원지역형 소나무 건중량 추정 회귀식을, 참나무류의 경우 손요환 등(2007)의 강원지역형 신갈나무 건중량 추정 회귀식을 이용하여 추정하였다. 그러나 기타 활엽수의 경우 입지환경과 식생분류단위가 유사한 지역의 활엽수 건중량 추정 회귀식을 적용하였다(Siccama *et al.*, 1994; Wang, 2005). 또한 상층 임목의 지하부 생체량은 소나무는 박인협과 김준선(1989)의 소나무 건중량 추정 회귀식을 이용하여 추정하였으나, 참나무류와 기타 활엽수는 국립산림과학원(2008)과 손요환 등(미발표 자료)의 자료를 이용하여 추정하였다.

모든 식물체 시료는 건조 후 분쇄하고, 토양 시료는 48 시간 이상 풍건 후 2 mm체(US standard No. 10)로 거른 다음 분석에 사용하였다. 식생, 낙엽층, 고사목, 토양 내 탄소 농도 분석은 원소분석기(vario Macro Elemental Analyzer, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany)를 이용하였다. 식생, 낙엽층, 고사목의 탄소 저장량은 탄소 농도에 건중량을 곱하여 추정하였고, 상층 임목의 줄기, 수피, 뿌리의 탄소 저장량은 건중량에 0.5를 곱하여 추정하였다(IPCC, 2001). 또한 토양 탄소 저장량은 각 층위별 탄소 농도와 석력함량, 부피를 곱하여 추정하였다.

## 3. 통계분석

상층 임목의 수종별 잎과 줄기, 하층 식생의 초본류와

목본류, 낙엽층과 고사목의 수종과 부후등급별 탄소 농도와 생체량 차이를 GLM(General Linear Model)을 이용하여 검증하였고, 통계적으로 유의성이 인정된 평균치 간의 차이는 Duncan multiple range test( $p < 0.05$ )로 분석하였다. 또한 토양 탄소 농도의 임분과 깊이별 차이를 GLM을 이용하여 분석하였다. 또한 두 수종간 혼효비율에 따라 임분을 구분하고 혼효비율과 임분 특성(평균 흉고직경, 흉고단면적, 임분밀도)과의 관계를 Pearson의 상관분석을 통하여 분석하고, 상관관계가 유의성을 보이는 요소 간 회귀분석을 시행하였다. 모든 통계분석에 SAS 9.1 프로그램(SAS Institute Inc., 2002)을 이용하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 식생의 생체량 및 탄소 저장량

상층 임목 생체량은 참나무류 순림에서 294.9 Mg/ha, 소

**Table 2. Biomass (Mg/ha) of vegetation (over- and understory), forest floor and CWD in the study stands. Numbers in parentheses denote the standard error of mean. Means followed by the different letters are significantly different among the study stands at the  $p = 0.05$  level.**

Components	Pine stand	Oak stand	Mixed stand
<b>Vegetation</b>			
<b>Overstory</b>			
Pine ( <i>P. densiflora</i> )			
Stemwood	138.1(36.2)	-	40.0(7.3)
Stembark	15.3(4.1)	-	4.3(0.8)
Branch	44.3(11.4)	-	13.1(2.4)
Foliage	14.1(3.8)	-	4.0(0.7)
Root	43.3(11.7)	-	12.5(2.3)
Subtotal biomass	239.8(67.1)	-	73.9(13.5)
Oak ( <i>Quercus</i> spp.)			
Stemwood	14.4(7.1)	149.8(19.8)	71.9(11.1)
Stembark	3.9(1.7)	24.6(3.2)	14.8(1.9)
Branch	4.8(1.9)	48.4(5.8)	12.2(3.2)
Foliage	0.2(0.1)	2.7(0.5)	1.2(0.2)
Root	6.5(2.6)	69.4(8.4)	30.8(5.0)
Subtotal biomass	29.8(9.8)	294.9(36.5)	130.9(21.2)
<b>Understory</b>			
<b>Shrub</b>			
Aboveground	0.01(0.00)	0.00(0.00)	0.80(0.01)
Belowground	0.22(0.09)	0.21(0.12)	0.29(0.09)
<b>Herb</b>			
Aboveground	0.01(0.01)	0.06(0.03)	0.14(0.06)
Belowground	0.01(0.01)	0.17(0.03)	0.12(0.05)
Understory total biomass	0.25	0.44	1.35
Vegetation total biomass	269.9	295.3	206.2
Forest floor	26.3(0.4)a	24.6(3.0)ab	17.4(0.7)b
CWD	2.2(0.9)	3.5(0.0)	4.3(2.2)
Ecosystem total biomass	298.1	323.4	227.9

나무 순림에서 269.6 Mg/ha, 혼효림에서 204.8 Mg/ha 등으로 나타났다(Table 2). 소나무 순림 상층 임목의 생체량은 연구 대상지와 임분 밀도가 비슷한 광릉지역 70-80년생 소나무 순림의 임목 생체량인 194.6 Mg/ha(노남진 등, 미발표 자료)과 남부지방의 40년생 천연 소나무림의 임목 생체량인 123.4 Mg/ha(Kim *et al.*, 2009)와 비교하여 더 높은 수치를 보였다. 소나무 순림 상층 임목 생체량이 다른 두 지역의 소나무 순림보다 높은 이유는 임분 밀도는 모두 비슷하지만, 평균 흉고직경이 광릉지역은 22.8 cm이고 남부지방은 17.3 cm로 연구 대상지의 33.4 cm보다 작기 때문인 것으로 추정된다. 연구 대상지의 참나무류 순림의 생체량은 강원지역 50년생 신갈나무림(438.0 Mg/ha)의 생체량보다 낮았다(박인협 등, 2003). 유사한 임령에도 불구하고 연구 대상지와 다른 참나무류 순림의 생체량 차이가 보이는 이유는 임분 밀도에 따른 수목의 직경생장 차이 때문으로 추정된다. 즉 박인협 등(2003)이 발표한 강원지역 50년생 신갈나무 순림의 임분 밀도와 평균 흉고직경은 각각 650본/ha와 26.9 cm로 연구대상지 임분과 비교하여 임분 밀도는 낮고 평균 흉고직경은 높다. 그러나 참나무류 순림의 생체량은 강원지역 49년생 굴참나무림(279.9 Mg/ha)(박인협 등, 2003), 경북지역 45년생 굴참나무림(207.6 Mg/ha)과 충청지역 41년생 굴참나무림(91.3 Mg/ha)(박관수와 이승우, 2001)과 비교하여 더 높았는데, 이는 지역별 참나무류 순림의 생산성 차이에 기인한 것으로 보인다(Brown, 1992).

혼효림의 상층 임목 생체량은 순림에 비해 낮지만 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 혼효림의 생체량이 순림에 비하여 낮은 이유는 임분 구성 식생 종의 흉고직경 차이에 의한 것으로 볼 수 있다. 즉 소나무와 참나무류가 섞여 있는 혼효림의 경우 소나무의 흉고직경이 참나무류에 비하여 매우 크기 때문에, 소나무가 전체 임분의 생체량에 기여하는 비중이 매우 높다. 그런데 소나무 순림과 혼효림의 임분밀도는 비슷하지만 혼효림에서는 흉고직경이 큰 소나무의 본수가 줄어들고 흉고직경이 작은 참나무류의 본수가 많아 혼효림의 생체량은 소나무 순림보다 낮아진다. 한편 참나무류 순림과 혼효림의 임목 생체량을 비교하면 임분 구성의 대부분을 차지하는 참나무류의 임분밀도는 비슷하지만 평균 흉고직경이 혼효림에서 더 작기 때문에 상층임목의 생체량이 더 적다. 특히 연구 대상지의 혼효림과 참나무류 순림을 두 수종간 혼효비율이 유사한 임분으로 분류하여 임분별 밀도와 평균 흉고직경과의 관계를 분석한 결과 강한 음의 상관관계를 보였다( $r = -0.72$ ; Figure 2). 이는 높은 임분밀도로 인하여 개체간 거리가 가까워짐에 따라 이용 자원의 한계와 수분 이용의 악화 등 경쟁효과의 증가로(Jose *et al.*, 2006; Yoshida and Kamitani, 2000) 참나무류의 직경 생장이 둔화된 것으로 추정된다.

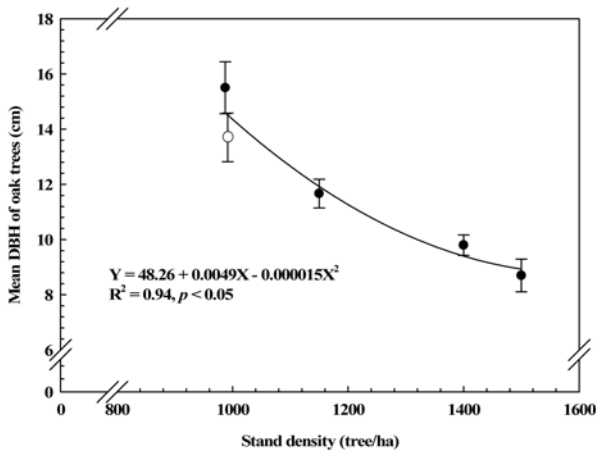


Figure 2. Relationships between the mean DBH of oak trees (cm) and stand density (tree/ha) of the study stands (white dot: oak stand, black dot: mixed stand). Vertical bars indicate the standard error.

또한 혼효임분 내 두 수종의 임관 구조가 서로 다르게 구성되어 있어 상층의 소나무에 의해 참나무류가 피압을 받게 되므로 중간 경쟁이 혼효림 내 참나무류 성장을 저하시킨 것으로 추정된다.

하층식생의 생체량은 혼효림에서 0.6 Mg/ha, 참나무류 순림에서 0.4 Mg/ha, 소나무 순림에서 0.3 Mg/ha 등의 값을 보였으며 임분별로 통계적으로 유의한 차이는 없었다 (Table 2). 연구대상지의 하층식생 생체량은 소나무 순림 내 하층식생의 지상부 생체량(3.15 Mg/ha)(Jeon *et al.*, 2007)과 중부지역 참나무류 순림의 하층 식생 생체량(2.16-2.39 Mg/ha)(Son *et al.*, 2004)보다 낮았다. 연구대상지의 임분과 Jeon *et al.*(2007)과 Son *et al.*(2004)의 임분은 밀도가 비슷하지만, 연구대상지의 암목이 더 큰 흉고직경 분포를 갖고 있어 상층 임목의 크기가 하층식생의 생체량에 영향을 미친 것으로 추정된다(Alaback, 1982). 일반적으로 임목의 흉고직경이 클수록 임관을 구성하는 가지와 잎의 양이 많아져서 수관 유효율이 높아지고(Spies, 1997), 이로 인하여 유입 광선량이 감소되어 하층식생의 생체량이 낮아지기 때문이다.

상층 임목의 수종별 가지와 잎의 탄소 농도는 임분간에 유의한 차이를 보이지 않았다. 또한 소나무 가지와 잎의 탄소 농도가 참나무류와 기타 활엽수에 비해 약간 높았으나 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 평균 탄소 농도는 소나무에서 가지 49.9-50.7%, 잎 51.6-53.2%의 분포를 보였으며, 신갈나무에서 가지 48.9-50.2%, 잎 48.4-50.3%, 졸참나무에서 가지 49.0-49.2%, 잎 49.0-49.7%, 기타 활엽수 중 당단풍에서 가지 49.0%, 잎 49.1%, 피나무에서 가지 48.4-48.9%, 잎 49.7% 등의 분포를 보였다. 35년생 남부지방 소나무림의 가지와 잎의 평균 탄소 농도가 56.0%와 55.7%(Park *et al.*, 2009)인 것에 비교하면 연구

Table 3. C concentrations (%) of understory vegetation and litter in the study stands. Numbers in parentheses denote the standard error of mean. Means followed by the different letters are significantly different among the study stands at the  $p = 0.05$  level.

	Pine stand	Oak stand	Mixed stand
Understory			
Shrub			
Aboveground	41.82(2.94)	41.18(0.00)	44.12(0.78)
Belowground	45.37(1.86)	47.66(1.68)	48.48(0.46)
Herb			
Aboveground	39.70(1.98)	42.30(1.15)	38.89(1.33)
Belowground	46.12(0.58)	48.45(0.68)	47.54(0.46)
Forest floor	48.40(0.44)a	38.19(1.20)b	47.83(0.37)a

대상지의 소나무 가지와 잎의 평균 탄소 농도가 약간 낮았으나, 본 연구 결과 값은 IPCC(2001)에서 제시한 임목의 평균 탄소 농도 50%와 유사하였다. 하층식생 관목과 초본류의 지상부 및 지하부 평균 탄소 농도는 임분간에 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Table 3). 이는 임분별 하층식생의 종 구성이 비슷하였기 때문으로 볼 수 있다.

상층 임목과 하층의 관목류와 초본류를 포함한 임분별 식생의 탄소 저장량은 참나무류 순림에서 147.6 Mg C/ha, 소나무 순림에서 141.4 Mg C/ha, 혼효림에서 115.8 Mg C/ha 등으로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 본 연구결과로 미루어 이 지역 산림이 지속적으로 혼효임분으로 변화할 경우 탄소 저장량이 감소될 수 있어 필요한 경우 임분의 종 구성을 조절하는 산림 관리가 필요한 것으로 보인다(Yoshida and Kamitani, 2000).

## 2. 낙엽층, 고사목과 토양 내 탄소 저장량

낙엽층의 건중량은 소나무 순림(26.3 Mg/ha)이 가장 높고, 참나무류 순림(24.6 Mg/ha)과 혼효림(17.4 Mg/ha)의 순으로 낮으며 임분별로 유의한 차이를 보였다(Table 2). 참나무류 순림의 낙엽층 건중량은 강원지역 참나무류 임분의 15.9 Mg/ha(손요환 등, 2007)와 비교하여 높은 값을 보였다. 낙엽층의 건중량이 임분별로 차이를 보이는 것은 낙엽층을 구성하는 유기물의 질적 차이에 따라 미생물 반응이 다르게 나타남으로써, 분해되고 남아있는 유기물의 양이 다르기 때문으로 추정된다(Son *et al.*, 2004). 특히 혼효림의 낙엽층 유기물량이 순림에 비하여 유의하게 낮은 값을 가졌는데, 이것은 낙엽층 건중량이 침엽수와 활엽수 낙엽이 섞인 혼효림에서보다 낮은 값을 보이는 다른 연구결과와 같은 것이다(Li and Han, 2008; Simard *et al.*, 2004). 고사목의 건중량은 임분간에 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 2). 낙엽층 내 탄소 저장량은 소나무 순림에서 12.7 Mg C/ha, 참나무류 순림에서 9.9 Mg C/ha와 혼효림에서 8.4 Mg C/ha 등이었으며, 고사목 내 탄소 저

장량은 혼효림에서 2.2 Mg/ha, 참나무류 순림에서 1.7 Mg/ha와 소나무 순림에서 1.1 Mg/ha 등으로 낙엽층의 탄소량은 임분간 유의한 차이가 있었으나( $p < 0.05$ ), 고사목의 탄소 저장량은 임분간 유의한 차이가 없었다( $p > 0.05$ ).

낙엽층의 탄소 농도는 소나무 순림(48.4%)이 가장 높고, 혼효림(47.8%)과 참나무류 순림(38.2%)의 순으로 낮아지고 임분간에 유의한 차이를 보였다(Table 3). 이와 같은 결과는 월악산의 소나무림과 굴참나무림 임분의 낙엽층 탄소 농도(50.5%, 45.3%)(Jeong *et al.*, 2008)보다 약간 낮지만 침엽수림에서 더 높은 수치를 보이는 경향은 동일하였다. 그러나 소나무 순림의 경우 경북 봉화군 일대 60년생 이상 소나무림 낙엽층의 탄소 농도인 45.8%(손요환 등, 미발표자료)인 것과 비교하여 높은 값을 나타냈다. 고사목의 탄소 농도는 종간에 유의한 차이를 보이지 않았으며, 임분간에도 유의한 차이가 없었다. 또한 종 내 고사목의 부후등급별 탄소 농도에서도 통계적으로 유의한 차이가 없었으며, 소나무가 51.5%, 참나무류가 49.5% 등으로 IPCC(2001)에서 제시한 목질부의 탄소 농도 50%와 유사하였다.

토양 탄소 농도는 깊이별로 0-10 cm에서 3.44-6.11%, 10-20 cm에서 1.90-2.13%, 그리고 20-30 cm에서 1.04-1.40%의 분포를 보였다(Table 3). 참나무류 순림을 제외하고 임분 내에서 깊이별로 탄소 농도에 유의한 차이를 보였으나, 각 깊이에서 임분간에는 유의한 차이는 보이지 않았다. 소나무 순림의 깊이별 토양 탄소 농도는 경북 봉화군 일대의 60년생 이상 소나무 순림의 토양 탄소 농도(0-50 cm: 0.82-2.88%)(손요환 등, 미발표자료)의 값과 유사하였으나, 남부지방 40년생 소나무림의 토양 탄소 농도(0-30 cm: 4.35-6.99%)(Kim *et al.*, 2009)보다 낮았다. 이는 각 연구 대상지의 입지환경이 다르기 때문에 동일한 양의 낙엽이 유입되더라도 낙엽층의 분해속도가 다르기 때문인 것으로 추정된다.

낙엽층의 탄소 저장량은 소나무 순림(12.7 Mg C/ha)에서 가장 높고, 혼효림(9.9 Mg C/ha)과 참나무류 순림(8.4 Mg C/ha)의 순으로 낮아지며 임분간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Table 2). 소나무 순림의 낙엽층의 탄소 저장량은 월악산의 천연 소나무림(4.3 Mg C/ha)(Jeon *et al.*, 2007)과 지리산(7.62 Mg C/ha)과 한라산(7.88 Mg C/ha)(Park and Lee, 1981)의 값과 비교하여 높은 값을 보였다. 고사목의 탄소 저장량은 혼효림에서 2.2 Mg C/ha, 참나무류 순림에서 1.7 Mg C/ha, 소나무 순림에서 1.1 Mg C/ha 등의 수치를 보였으며 임분간에 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 토양 내 평균 탄소 저장량은 0-10 cm와 10-20 cm에서 각각 16.6 Mg C/ha, 20-30 cm에서 6.5 Mg C/ha의 분포를 보였다. 지표로부터 30 cm 깊이까지의 토양 내 탄소 저장량은 소나무 순림에서 44.4 Mg C/ha,

혼효림에서 41.6 Mg C/ha, 참나무류 순림에서 33.3 Mg C/ha 등의 분포를 보였으나 임분간에 유의한 차이는 없었다. 이 같은 결과는 42년생 소나무 식재림의 토양 내 탄소 저장량(0-30 cm; 102.6 Mg C/ha)(Kim, 2006), 월악산 천연 소나무림의 토양 내 탄소 저장량(0-50 cm; 84.6 Mg C/ha)(Jeon *et al.*, 2007), 강원지역 신갈나무림의 토양 내 탄소 저장량(0-50 cm; 61.4 Mg C/ha)(손요환 등, 2007)과 비교하여 낮은 값을 보였는데 이는 전체 토양의 깊이 및 낙엽층의 유기물 함량 차이에서 기인하는 것으로 볼 수 있다.

### 3. 생태계 총 탄소 저장량

생태계 내 총 탄소 저장량은 소나무 순림에서 199.6 Mg C/ha, 참나무류 순림에서 192.5 Mg C/ha, 혼효림에서 169.1 Mg C/ha 등으로 임분별로 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Figure 3a). 각 임분별 총 탄소 저장량에서 상층 임목이 차지하는 비율은 참나무류 순림에서 76.6%, 소나무 순림에서 70.8%, 혼효림에서 68.8% 등으로 참나무류 순림에서 가장 높게 나타났다. 이러한 분포는 우리나라 참나무류 순림의 총 탄소 저장량 중 식생이 차지하는 비율과 유사한 것이다(Son *et al.*, 2004). 두 번째로 큰 총 탄소 저장고인 토양은 참나무류 순림에서 24.5%, 소나무 순림에

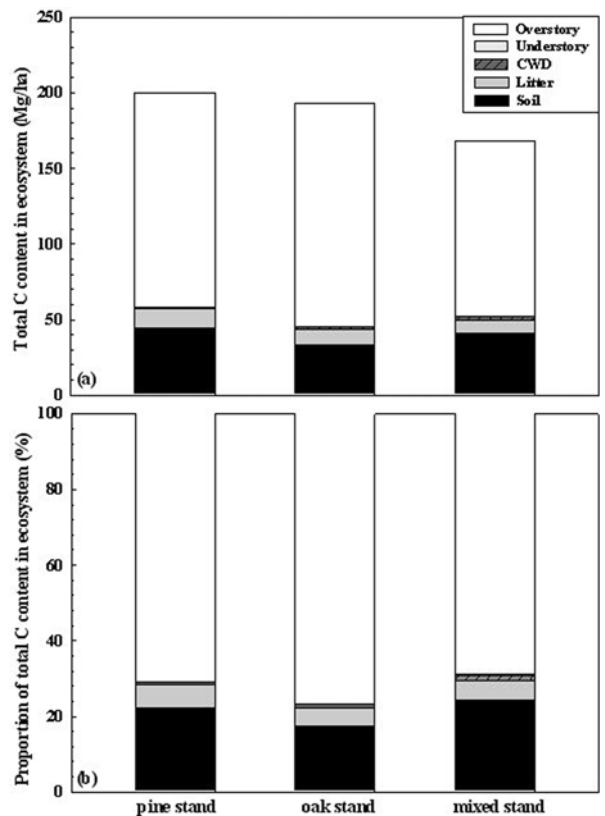


Figure 3. Total ecosystem C contents (Mg/ha) (a) and proportions of ecosystem components to total ecosystem C contents (b) in the study stands.

**Table 4. Soil C concentration (%) and content (Mg/ha) in the study stands. Numbers in parentheses denote the standard error of mean. Means followed by the different letters are significantly different among soil depths within the same stand at the  $p = 0.05$  level.**

Depth	Pine stand		Oak stand		Mixed stand	
	Conc. (%)	Cont. (Mg/ha)	Conc. (%)	Cont. (Mg/ha)	Conc. (%)	Cont. (Mg/ha)
0-10cm	3.44a (0.39)	17.7a (1.46)	6.11a (1.38)	15.2a (4.03)	4.27a (0.29)	16.9a (0.66)
10-20cm	1.90b (0.21)	17.6a (1.92)	2.14a (0.62)	14.6a (4.30)	2.13b (0.25)	17.7a (2.41)
20-30cm	1.04b (0.42)	9.1b (4.05)	1.40a (0.17)	3.5a (0.79)	1.10c (0.23)	7.0b (1.83)
Total		44.4 (2.82)		33.3 (8.41)		41.6 (3.78)

서 22.2%, 혼효림에서 17.3% 등으로, 참나무류 순림에서 가장 높고, 혼효림에서 낮은 분포를 보였다. 또한 낙엽층과 고사목이 총 탄소 저장량에서 차지하는 비율은 소나무 순림에서 6.5%와 0.6%, 참나무류 순림에서 5.1%와 0.9%, 혼효림에서 5.0%와 1.3% 등으로 나타났다(Figure 3b).

소나무 순림의 총 탄소 저장량은 유사한 임분 밀도(1075 본/ha)를 갖는 70-80년생 광릉지역의 소나무 순림(147.6 Mg C/ha)(노남진 등, 미발표 자료)과 비교하여 더 높았다. 이러한 차이는 탄소 저장량의 대부분을 차지하는 상층 임목의 기여정도에 따른 결과로 광릉지역과 연구 대상지의 소나무 순림 평균 흉고직경이 각각 22.8 cm와 33.4 cm로 상층 임목의 평균 흉고직경의 차이에 따른 임목의 탄소 저장량이 다르기 때문이다. 또한 광릉 지역 60년생 소나무 순림의 총 탄소 저장량이 163.3 Mg C/ha(Lee *et al.*, in press)인 것에 비하여 연구 대상지의 소나무 순림의 총 탄소 저장량이 더 높았다. 이는 광릉 지역 60년생 소나무 순림과 연구 대상지의 소나무 순림의 평균 흉고직경은 유사하지만 임분 밀도가 연구 대상지에서 더 높기 때문인 것으로 추정된다.

소나무와 참나무류는 종별로 성장특성이 다르기 때문에, 우리나라 산림은 이들 수종의 혼효 상태 임분으로 지속적으로 변할 것으로 예상된다(박인협과 문광선, 1999; 이종락과 정동준, 1998). 또한 이러한 변화는 총 탄소 저장량에도 영향을 미칠 것으로 보인다. 연구대상지의 혼효 임분은 소나무 순림에 참나무류가 침입하여 소나무는 점차 감소하는 반면, 높은 밀도로 출현하는 참나무류는 개체간 경쟁이 심하여 생장이 낮아짐으로써 두 수종이 혼효된 임분의 탄소 저장량이 순림에 비하여 적었다. 임분 밀도가 높아짐에 따라 개체목간의 거리가 가까워지면 수종간 거리에 의존적인 경쟁효과가 증가하게 되고 이로 인한 개체목들의 직경성장 둔화는 임분의 탄소 저장량에 영향을 주게 된다(Jose *et al.*, 2006; Yoshida and Kamitani, 2000). 높은 임분 밀도로 인한 탄소량 감소 가능성을 추정하기 위하여 연구 대상지와 근접한 지역에 지위지수가 12-18인

소나무와 12-16인 신갈나무림의 임분 특성을 비교해 보았다(국립산림과학원, 2009). 수확표상 우리나라 강원지방 65년생 소나무림의 평균 흉고직경과 임분 밀도는 각각 29.6-38.5 cm와 495-699본/ha, 45년생 신갈나무림의 평균 흉고직경과 임분 밀도는 각각 21.3-23.4 cm와 828-886본/ha로, 본 연구대상 혼효임분과 비교하면 참나무류 임분 밀도는 높고(1128본/ha), 평균 흉고직경(11.0 cm)은 낮았다. 즉 연구 대상지의 혼효임분은 높은 임분 밀도로 인한 참나무류의 종내경쟁 결과 직경이 적고 따라서 혼효림이 순림에서보다 낮은 탄소 저장량을 갖는 것으로 볼 수 있다.

따라서 앞으로도 계속 증가할 것으로 예상되는 혼효임분의 총 탄소 저장량을 증가시키고자 할 경우 임목간의 경쟁을 완화시킬 필요가 있다. 경쟁은 수종간 위치한 거리에 의존적이며(Jose *et al.*, 2006), 거리가 감소될수록 개체목들간에 이용할 수 있는 자원이 줄어들게 되어 생산성에 영향을 미칠 수 있으므로, 간벌과 같은 적절한 임분관리를 통하여 임목간 적정 간격을 유지하여 주는 시업이 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2007년도 한국학술진흥재단의 기초연구지원(KRF-2007-313-F00034), 한국과학재단의 A3 Foresight Program(A307-K001)과 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(07첨단도시 A01)에 의한 결과의 일부임.

## 인용문헌

1. 기상청. 2009. <http://www.kma.go.kr/>
2. 국립산림과학원. 2009. 재적·중량표 및 임분수확표. 산림청.
3. 국립산림과학원. 2007. 산림 바이오매스 및 토양탄소 조사·분석 표준. 국립산림과학원.
4. 박관수, 이승우. 2001. 공주, 포항, 그리고 양양 지역 굴참나무 천연림 생태계의 물질생산에 관한 연구. 한국임

- 학회지 90(6): 692-698.
5. 박인협, 김준선. 1989. 한국산 4개 지역형 소나무천연림의 물질 현존량 추정식에 관한 연구. 한국임학회지 78(3): 323-330.
  6. 박인협, 김동엽, 이명중, 진현오, 손요환, 서영권. 2003. 강원도 춘천지역 신갈나무 임분과 굴참나무 임분의 물질생산. 한국임학회지 92(1): 52-57.
  7. 박인협, 문광선. 1999. 전남 모후산지역 소나무-굴참나무 혼효림의 종간경쟁 및 물질생산. 한국임학회지 88(4): 462-468.
  8. 박인협, 이석면. 1990. 한국산 4개 지역형 소나무 천연림의 물질생산에 관한 연구. 한국임학회지 79(2): 196-204.
  9. 산림청. 2008. 임업통계연보.
  10. 손요환, 김동엽, 박인협, 이명중, 진현오. 2007. 한국 참나무림의 물질 생산과 양분 순환: 신갈나무림과 굴참나무림의 연구 사례. 강원대학교 출판부. p 240.
  11. 이종락, 정동준. 1998. 소나무-굴참나무 천연 혼효임분 구조에 관한 연구. 경희대학교 자연과학 논문집 4: 61-66.
  12. 황재홍, 손요환, 김종성. 2001. 개랑된 토양 코어 시료 채취기. 한국임학회지 90(6): 788-791.
  13. Alaback, P.B. 1982. Dynamics of understory biomass in sitka spruce-western hemlock forests of southeast Alaska. Ecology 63(6): 1932-1948.
  14. Brown, A.H.F. 1992. Functioning of mixed-species stands at Bisburn, N.W. England. pp. 125-150, In M.G.R., Connell, D.C., Malcolm and P.A., Robertson (eds). The Ecology of Mixed-Species Stands of Trees. Blackwell, London.
  15. IPCC. 2001. Climate Change 2001: Mitigation. [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg3/pdf/TAR-total.pdf](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/pdf/TAR-total.pdf)
  16. Jeon, I.Y., Shin, C.H., Kim, G.H. and Mun, H.T. 2007. Organic carbon distribution of the *Pinus densiflora* forest on Songgye valley at Mt. Worak national park. Journal of Ecology and Field Biology 31(1): 17-21.
  17. Jeong, N., Han, A.R. and Mun, H.T. 2008. Weight loss and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* at Mt. Worak national park. Journal of Ecology and Field Biology 31(4): 291-295.
  18. Jose, S., Williams, R. and Zamora, D. 2006. Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations. Forest Ecology and Management 233: 231-239.
  19. Kely, M.J. 2006. The role of species mixtures in plantation forestry. Forest Ecology and Management 233: 195-204.
  20. Kim, C. 2006. Soil carbon cycling and soil CO<sub>2</sub> efflux in a red pine (*Pinus densiflora*) stand. Journal of Ecology and Field Biology 29: 23-27.
  21. Kim, C., Son, Y., Lee, W.K., Jeong, J. and Noh, N.J. 2009. Influences of forest tending works on carbon distribution and cycling in a *Pinus densiflora* S. et Z. stand in Korea. Forest Ecology and Management 257: 1420-1426.
  22. Lee, P.C., Crites, S., Nietfield, M., Van Guyen, H. and Stelfox, J.B. 1997. Characteristics and origins of dead-wood material in aspen-dominated boreal forests. Ecological Applications 7: 691-701.
  23. Lee, S.K., Son, Y., Noh, N.J., Yoon, T.K., Lee, A.R., Seo, K.W., Hwang, J.H. and Bae, S.W. 2009. Carbon storage of pure and mixed pine-deciduous oak forests in Gwangneung, central Korea. Journal of Ecology and Field Biology (in press).
  24. Li, X. and Han, S. 2008. Preservation of broadleaf species in Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantations affects soil properties, carbon storage, biomass allocation, and available nitrogen storage. Canadian Journal of Forest Research 38: 2227-2235.
  25. McCarl, B.A. and Schneider, U.A. 2001. Greenhouse gas mitigation in U.S. agriculture and forestry. Science 294: 2481-2482.
  26. Park, B.K. and Lee, I.S. 1981. A model for litter decomposition of the forest ecosystem in South Korea. Korean Journal of Ecology 4: 38-51 (in Korean with English summary).
  27. Park, G.S., Choi, J., Lee, K.H., Son, Y.M., Kim, R.H., Lee, H.G. and Lee, S.J. 2009. Carbon storage in above-ground, root and soil of *Pinus densiflora* stand in six different sites, Korea. Journal of Korean Environmental Restoration Technology 12(2): 1-9.
  28. SAS Institute Inc. 2002. SAS/STAT User guide. Release 9.1. SAS Institute Inc. Cary, NC.
  29. Siccama, T.G., Hamburg, S.P., Arthur, M.A., Yanai, R.D., Bormann, F.H. and Likens, G.E. 1994. Corrections to allometric equations and plant tissue chemistry for Hubbard Brook Experimental Forest. Ecology 75(1): 246-248.
  30. Simard, S.W., Sachs, D.L., Vyse, A. and Blevins, L.L. 2004. Paperbirch competitive effects vary with conifer tree species and stand age in interior British Columbia forests: implications for reforestation policy and practice. Forest Ecology and Management 198: 55-74.
  31. Son, Y., Park, I.H., Yi, M.J., Jin, H.O., Kim, D.Y., Kim, R.H. and Hwang, J.O. 2004. Biomass, production and nutrient distribution of a natural oak forest in central Korea. Ecological Research 19: 21-28.
  32. Spies, T. 1997. Forest Stand Structure, Composition, and Function. pp.11-23. In: A.K. Jerry and J.F. Franklin., ed. Creating a Forestry for the 21st Century: The Science of Ecosystem Management. New York Chapman and Hall. USA.
  33. Wang, C.K. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. Forest Ecology and Management 22: 9-16.
  34. Yoshida, T. and Kamitani, T. 2000. Interspecific competition among three canopy-tree species in a mixed-species even-aged forest of central Japan. Forest Ecology and Management 137: 221-230.