

소나무 유령림의 임목밀도 조절이 탄소 동태에 미치는 영향

송수진 · 장경수 · 황인채 · 안기완 · 이계한*

전남대학교 임학과

Effects of Tree Density Control on Carbon Dynamics in Young *Pinus densiflora* stands

Su-Jin Song, Kyoung-Soo Jang, In-Chae Hwang, Ki-Wan An and Kye-Han Lee*

Department of Forestry, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

요약: 본 연구는 소나무림의 간벌에 따른 임분의 바이오매스 변화, 토양 CO₂ 발생량, 낙엽 및 뿌리의 분해율을 조사하여 연간 탄소 동태를 파악하고자 수행되었다. 8년생 소나무 묘포장에 대조구, 간벌지(50%), 개벌지를 각 3 방형구씩 조성하였고, 나지는 한 방형구를 조성하였다. 측정은 2012년 3월부터 2014년 2월까지 이뤄졌다. 연평균 근원직경 증가는 대조구 0.89 cm, 간벌지 1.48 cm로 대조구보다 간벌지에서 컸다($p < 0.05$). 연평균 순생산량은 대조구 5.17 kg C m⁻² yr⁻¹, 간벌지 4.85 kg C m⁻² yr⁻¹로 나타났다. 연간 토양 CO₂ 발생량은 대조구, 간벌지, 개벌지, 나지에서 각각 3.71, 3.90, 4.17, 4.56 kg CO₂ m⁻² yr⁻¹으로 식생의 제거는 토양 CO₂ 발생을 증가시켰다($P < 0.05$). 토양 CO₂ 발생은 토양온도와 양의 상관관계가 있으나 토양수분과는 뚜렷한 관계가 나타나지 않았다. 순생태계생산량(NEP)은 대조구 1.57 kg C m⁻² yr⁻¹, 간벌지 1.36 kg C m⁻² yr⁻¹, 개벌지 -0.67 kg C m⁻² yr⁻¹, 나지 -1.25 kg C m⁻² yr⁻¹으로, 식생 유무에 따른 차이를 나타냈다($P < 0.05$). 간벌은 임분 내 개체목의 근원직경과 탄소량을 증가시켰고, 1년 후 간벌재로 반출된 탄소량의 86%를 회복했다. 또한 토양 CO₂ 발생량을 증가시켰고, 순생태계생산량을 증가시켰다. 소규모의 연구임에도 불구하고, 본 연구의 결과는 간벌에 의한 임분 밀도 조절이 소나무 유령림의 탄소저장량 증대와 생장에 있어 효과적임을 보여 주었다. 이는 우리나라에서 기후변화 완화를 위한 적극적인 소나무림의 경영이 필요함을 시사한다. 추후 실제 소나무림에서 영급별, 간벌 강도별, 지위별 등 다양한 변수를 고려한 장기적 연구가 수행되어야 할 것이다.

Abstract: The objective of this study was to examine carbon dynamics with biomass, soil CO₂ efflux, litter and root decomposition after tree density control in young *Pinus densiflora* stands. The stands were established with 50% thinning, clear-cut, and control stands with three pseudo-replicated plots and a bare soil plot in 8-year-old *Pinus densiflora* nursery field. Monthly measurements were conducted from March 2012 to February 2014 and aboveground biomass and coarse-roots were estimated by derived allometric equations. Average diameter growth at root collar in control and thinned was 0.89 cm and 1.48 cm per year, respectively, and the diameter growth of control stand was significantly higher than that of thinned stands ($p < 0.05$). Total biomass was estimated to 5.17, 4.85 kg C m⁻² per year in control and thinned, respectively. Annual soil CO₂ efflux in control, thinned, clear cut, and bare soil was 3.71, 3.90, 4.17, 4.56 kg CO₂ m⁻² yr⁻¹, respectively and removing trees significantly increased soil CO₂ efflux ($p < 0.05$). Net Ecosystem Production (NEP) was 1.57, 1.36, -0.67, -1.25 kg C m⁻² yr⁻¹ in control, thinned, clear cut and bare soil in the young *Pinus densiflora* stands. NEP was significantly decreased by removing trees. Thinning increased diameter at root collar and carbon of individual tree and recovered 86% of carbon removed by thinning after one-year. In addition, soil CO₂ efflux increased and NEP increased by thinning. Results of this study, tree density control such as thinning increased the carbon storage and growth of the young *Pinus densiflora* stands.

Key word: *Pinus densiflora*, biomass, carbon dynamics, thinning, tree density

*Corresponding author
E-mail: khL@jnu.ac.kr

서 론

산림과 대기 사이의 탄소 동태를 파악하기 위해서는 산림생태계의 유기탄소량 파악이 필수적이다(Pregitzer, 2003). 기후변화와 관련하여 산림생태계의 탄소 순환 기작의 규명은 매우 중요한 과제로 인식되고 있으며, 그 중 대기 중의 CO₂를 흡수시키는 방안으로 임목 생장에 관심이 집중되고 있다(Kimble et al., 2003). 특히, 산림은 탄소 흡수원으로서 이의 가치증진을 위한 산림관리 방법에 대한 중요성이 커지고 있다(Powers et al., 2011). 간벌에 의한 임분 밀도 조절은 임목의 생육조건을 개선시키고, 산림의 탄소 흡수 기능을 지속시킨다(Nishizono, 2010). 간벌 후 개체목의 직경 성장량 증가로 대경목을 생산하고 최종수확 전에 중간 수익을 창출하나(Lu and Gong, 2005) 벌채된 임목으로 인해 간벌 직후 산림탄소저장량이 감소한다. 즉, 간벌에 의한 목재 생산량과 산림탄소 저장량 간에 상충관계가 존재한다(David et al., 2016). 따라서 최적의 산림관리를 위하여 간벌에 따른 탄소 동태의 이해가 필요하다.

토양은 지구생태계에 축적된 총 탄소량의 50% 이상을 차지하고 있으며(Vitousek, 1991), 토양에서 대기로 방출되는 탄소는 화석연료 방출량의 11~20배로 약 75~120 Gt CO₂ yr⁻¹이다(Schimel et al., 1996). 이는 대기 중 탄소 농도 변화와 기후변화에 직접적인 영향을 주기 때문에 토양에서 대기로의 탄소 방출을 정량화하는 것은 매우 중요하다(Lee and Mun, 2010).

토양호흡은 산림과 대기 사이의 CO₂ 변화에 산림이 탄소 저장고인지 아닌지를 알아내기 위한 중요한 요소 중 하나이다(Kominami et al., 2008). 토양호흡은 식물의 뿌리호흡과 미생물호흡을 말하며 토양호흡 중 미생물호흡과 뿌리호흡을 추정하기 위한 연구 방법은 토양호흡의 구성요소를 직접 측정하는 방법, 뿌리를 제거하는 방법, 동위원소를 이용하는 방법 등으로 구분된다(Hanson et al., 2000; Bond-lamberty et al., 2004). 이전의 연구에서 보고된 토양 이산화탄소 발생량에 대한 뿌리호흡의 비는 10~90%로 다양하다(Hanson et al., 2000). 토양호흡에 영향을 줄 수 있는 요인들로는 토양온도(Lee et al., 2012), 토양수분(Tamai, 2009), 뿌리의 질소 함량, 토성, 기질의 질과 양(Buchman, 2000), 산림 관리방식(Wiseman and Seiler, 2004), 토양에 포함된 탄소 농도 등이 있다. 지상부 임목으로부터 토양 표면으로 이동되는 영양염류와 에너지의 주된 경로인 낙엽은 떨어지는 시기에 따라 영양염류의 함량이 다르며, 떨어진 낙엽은 토양 미생물에 의해 분해되는 과정에서 탄소는 CO₂로 방출된다(Fang et al., 1998). 세근의 순환시간은 뿌리의 크기나 종, 균근의 상태에 따라 짧게는 1년보다 짧고, 길게는 8년 이상인 경우도 있다(Ronald et al., 1992).

간벌이나 가지치기 등의 산림 시업이 생체량에 미치는 영향에 관한 연구로 Kim et al.(2012b)이 임분 수확예측 모델을 이용한 간벌 시나리오별 목재수확량 예측, Lee et al.(2015)이 간벌에 따른 직경 성장량 및 탄소 저장량 변화에 관한 메타 분석을 보고한 바 있다. 또한, Ko et al.(2014)이 간벌 강도가 소나무림의 토양, 낙엽층 및 고사목 탄소 저장량에 미치는 영향을 보고한 바 있으나, 간벌 관련 연구 대상 수종은 대부분 잣나무이며(Lee et al., 2015) 유령림 단계부터 성숙림까지 간벌이 탄소 동태에 미치는 영향을 구명하는 연구가 매우 부족한 실정이다.

본 연구는 전남대학교 수목원 내 위치한 소나무 유령림을 대상으로 임목밀도 조절에 따른 임분의 바이오매스 변화, 토양 이산화탄소 발생, 낙엽 및 뿌리의 분해율 등을 파악하여 간벌이 소나무 유령림의 탄소 동태에 미치는 영향과 탄소고정 효과를 파악하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

본 실험은 2012년 3월부터 2014년 2월까지 광주광역시 북구 용봉동에 위치한 전남대학교 수목원에 조성된 8년생 소나무 유령림(35°10' 21.43", 126°53' 58.76")에서 실시되었다. 토양은 pH 6.7, 교환산도 4.4, EC 77.5 μs cm⁻¹, CEC 7.8 mg kg⁻¹, N 0.57 mg kg⁻¹, C 6.9 mg kg⁻¹, NH₄⁺-N 2.9 mg kg⁻¹, Na⁺ 23.5 mg kg⁻¹, Mg²⁺ 365.2 mg kg⁻¹, Ca²⁺ 1374.1 mg kg⁻¹, Al³⁺ 0.005 mg kg⁻¹, 토색은 10YR 6/4 였다. 수목원 내 기상 관측계에 따르면 연평균기온은 14.3°C, 최고평균기온은 15.0°C, 최저평균기온은 13.6°C, 연평균강수량은 1392.2 mm 였다.

실험구의 크기는 2 m × 20 m로 146본의 소나무가 식재되어 있는 곳이다. 실험구는 2011년 8월 25일에 2 m × 2 m 크기를 한 plot으로 대조구, 간벌지, 개벌지를 조성하였다. 대조구는 식재된 소나무 14~15본/plot으로 하였고, 간벌은 대조구 본수의 50% 강도로 실시하여 7~9본/plot으로 하였다. 개벌지는 14~15본/plot의 소나무를 벌채하여 그루터기를 남겨두었고, 나지는 벌채 후 뿌리까지 굴취하였다. 나지에 자라는 초본류는 토양이 교란되지 않도록 주의하며 계속 뽑아주었다. 토양 CO₂ 발생량을 측정하기 위하여 각 plot 당 3개씩의 soil chamber를 설치하였으며, 토양온도 및 수분변화를 파악하기 위하여 토양 온·습도계(WatchDog 1650 Data Logger)로 토심 10 cm 깊이에서 30분 간격으로 측정하였다.

2. 생체량

간벌 실시 후 매년 11월에 근원직경과 수고를 측정하였다. 근원직경은 직경테이프를 이용하여 지표면 위 5 cm

부근에서 0.1 cm 단위까지 측정하였으며, 수고는 수고봉을 이용하여 1 cm 단위까지 측정하였다. 실험구 조성 이전의 근원직경은 실험 종료 후인 2014년 3월에 채취한 원판을 이용하여 수피 두께와 나이테 폭을 vernier calipers로 0.01 mm 단위까지 심각등분법을 이용하여 측정하였다.

바이오매스 회귀식을 도출하기 위해 실험 종료 후인 2014년 3월에 전수 벌채 및 굴취하였다. 지상부인 잎과 가지는 각각 1년생, 2년생, 3년생 이상으로 구분하였고, 줄기는 마디로 구분하여 생중량을 0.01 g 단위까지 측정하였다. 지하부인 뿌리는 굴삭기로 굴취하여 뿌리에 묻은 토양을 깨끗이 제거한 후 생중량을 측정하였다. 생중량 대 건조량 비를 구하여 수목의 총 건조량을 추정하기 위해 잎과 가지를 대조구와 간벌지에서 각각 1,000 g 이상 채취하였고, 3년생 가지는 전수 채취하였다. 줄기는 지표면 5 cm 높이에서 원판 하나와 각각의 마디에서 가장 두꺼운 아랫부분을 5 cm 두께로 채취하여 총 5개의 원판을 전수 채취하였으며, 뿌리는 생중량에 따라 3개의 등급으로 나눠 대조구와 간벌지에서 각각 3개씩 채취하였다. 채취된 시료는 건조기에서 60°C에 72시간 이상 향량이 될 때까지 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 낙엽량은 2011년 8월에 벌채하여 구한 2년생 잎의 건조량을 2012년도 낙엽량, 1년생 잎의 건조량을 2013년도 낙엽량으로 추정하여 구하였다.

바이오매스 회귀식은 독립변수를 근원직경(X)으로 하고 종속변수를 건조량(Y)으로 하는 대수회귀식($\ln Y = A + B \ln X$)으로 구하였다. 도출된 바이오매스 추정 회귀식을 적용하여 현존량 구하였으며, 연간 순생산량은 다음해 현존량에서 당해 현존량을 빼 값으로 구하였다. 유기탄소량은 현존량의 50%를 유기탄소량으로 추정하였다(Alban and Peralam, 1992).

3. 토양 이산화탄소 발생

토양 CO₂ 발생량 측정을 위해 대조구, 간벌지, 개벌지, 나지 각각의 토양에 직경 11 cm, 높이 15 cm인 원통형 soil chamber를 5 cm 깊이로 3반복 설치하였으며, 오차를 최소화하기 위해 5개월 간 토양을 안정화 시킨 후 2012년 3월부터 2014년 2월까지 매월 1회 LCpro+(Portable Photosynthesis System, ADC, UK)를 이용하여 측정하였다. 장비에 부착된 직경 10.5 cm, 높이 6.5 cm인 원통형 chamber를 soil chamber에 부착시킨 후 토양에서 방출되는 CO₂를 측정하였다. 측정은 10:00부터 16:00 사이에 실시하였으며, 측정 시 마다 온도기록계(T&D Thermo Recorder)를 이용하여 soil chamber에 근접한 7 cm 깊이의 토양온도를 동시에 측정하였다.

4. 낙엽 및 뿌리의 분해

낙엽과 뿌리의 분해율 측정을 위해 2011년 8월에 벌채

한 소나무의 생엽과 굴취한 뿌리 중 2 mm 이하의 뿌리를 건조기에서 60°C에 72시간 이상 향량이 될 때까지 건조시킨 후 사용하였다. 낙엽 주머니는 1 mm 이하의 나일론 망을 25 cm × 25 cm 크기로 제작하였으며, 뿌리 주머니는 20 cm × 20 cm 크기로 각각 120개(4종×3반복×10회수시기)를 제작하였다. 낙엽은 5 g, 뿌리는 3 g을 0.01 g 단위까지 칭량하여 제작한 주머니에 넣은 뒤 각각의 주머니에 고유번호와 정확한 낙엽 무게를 기록한 aluminum tag를 넣고 내용물이 유출되지 않도록 잘 봉합하였다. 제작된 주머니는 2012년 2월 실험구에 낙엽 주머니는 유실되지 않도록 지면에 못을 이용하여 고정시켜 놓았고, 뿌리 주머니는 땅 10 cm 정도의 깊이에 서로 겹치지 않도록 매설하였다.

낙엽과 뿌리 주머니의 회수는 2012년 3월부터 5개월 동안 매월 회수하였고, 그 이후로는 3개월 간격으로 2013년 10월까지 회수하였다. 회수한 낙엽주머니에 묻은 흙과 균사, 식물체 잔뿌리, 이물질 등을 증류수로 조심히 씻어내고 60°C 건조기에서 향량이 될 때까지 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 분해율은 회수 후 측정된 무게를 초기 무게에 대한 백분율(%)로 계산하였다. 낙엽과 뿌리의 분해 속도는 Brinson et al.(1981)의 다음과 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$-k = \ln(X/X_0)/t$$

X₀: 주머니에 넣은 처음 시료 무게,

X : 수거한 주머니에 남아있는 시료 무게,

t : 시간(년)

5. 통계분석

모든 통계분석에는 IBM SPSS Statistics 19를 사용하였다. 대조구와 간벌지의 각 부위별 바이오매스 추정 회귀식은 결정계수(R²)와 평균제곱근오차(RMSE)의 값을 이용하여 설명력과 적합도 검정을 실시하였다. 대조구, 간벌지, 개벌지, 나지의 요인들의 평균 차이는 일원배치 분산분석(One - Way ANOVA) 후 사후분석을 실시하였고, 각 처리구에서 토양호흡에 영향을 미치는 요인과의 상관관계는 상관분석한 후 회귀분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 토양온도 및 수분장력

계절별 토양온도는 Figure 1과 같다. 처리에 따른 평균 토양온도는 대조구 15.3°C, 간벌지 16.1°C, 개벌지 16.8°C, 나지 18.8°C로 대조구와 나지의 토양온도 간에 유의한 차이가 나타났고(p<0.05), 겨울철(12월~1월)에 대조구와 간벌지의 토양온도가 개벌지와 나지의 토양온도보다 높았다(p<0.05). 이것은 식생의 유무에 의한 차이로 대조구와

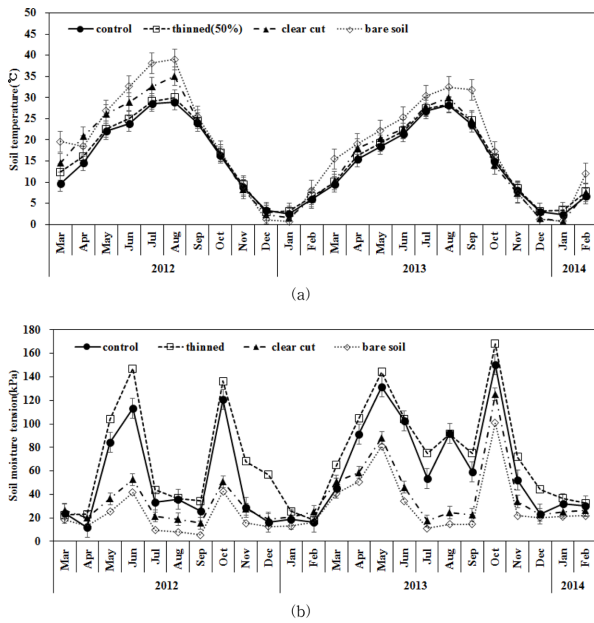


Figure 1. Monthly variation of soil temperature(a) and soil moisture tension(b) in control stands, thinned-50% stands, clear cut and bare soil for *Pinus densiflora* stands.

간벌지의 수관층이 임내로 유입되는 광을 차단하는 반면 개벌지와 나지는 광이 토양층에 그대로 흡수되어 토양 온도를 증가시킨 것으로 판단된다. 토양온도는 간벌지와 대조구 간에 유의한 차이가 나타나지 않았지만 간벌지가 대조구보다 높은 것은 간벌로 인한 상층임관의 제거로 낙엽층 및 토양층에 유입되는 광량의 증가가 원인으로 판단되고, 간벌에 의해 일어난 토양 교란이 영향을 미쳤을 것(Son et al., 2004; Kim et al., 2009)으로 판단된다.

토양수분장력은 음의 값으로 토양이 건조할수록 값이 커진다. 계절별 토양수분장력은 늦봄과 가을인 5~6월과 10월에 높았고, 여름과 겨울에 낮았다(Figure 1). 대조구, 간벌지, 개벌지, 나지의 계절별 토양수분장력은 각각 58.1±40.1, 72.4±42.3, 33.7±19.1, 24.6±19.3 kPa로 대조구와 간벌지가 개벌지와 나지보다 높았으며 유의한 차이를 나타내었다(p<0.05). 산림 내 수분의 이동은 강우량, 차단량, 유출량 및 증발산량에 의해 이루어진다(Koo et al., 2007). 대조구와 간벌지의 토양수분이 낮은 것은 이와 같이 소나무 임분의 생육에 필요한 수분 흡수(증산)와 토양에서의 수분 증발로 토양 중 수분이 소모된 것으로 판단되며, 개벌지와 나지에서 토양수분이 높은 것은 토양 표면이 건조하여 토양수분의 모세관 상승이 저해되고 증발이 제한되어 충분한 양의 물을 보유하는 것으로 판단된다.

2. 근원직경 및 수고 성장

간벌 후 연평균 근원직경 생장은 대조구에서 0.89±0.06 cm, 간벌지에서 1.48±0.26 cm 성장하여 간벌지가 대조구에 비

해 근원직경 성장량이 높았다(p<0.05). 간벌 후 근원직경 생장은 간벌 전에 비해 대조구에서 14.3%, 간벌지에서 66.5% 증가율을 보였고, 유의한 차이를 나타냈다(p<0.05). 간벌 후 연평균 수고 생장은 대조구에서 66.95±0.56 cm, 간벌지에서 73.73±0.21 cm 성장하였으며, 유의한 차이는 나타나지 않았다(p>0.05). 간벌 후 연평균 수고 생장은 유의한 차이가 없었으나 근원직경 생장은 대조구에서 14.3%, 간벌지에서 66.5%의 증가율을 나타냈다.

본 연구의 연평균 근원직경 성장량은 강원 대기와 보광 지역의 I영급 금강소나무에서 각각 천연갱신지 0.35 cm와 0.56 cm, 인공조림지 0.36 cm와 0.37 cm보다 높았다(Na et al., 2010). 간벌 후 임내 광량의 증가는 토양 온도를 증가시키고, 질소의 무기화를 촉진시켜(Prescott, 1997) 임목 성장에 영향을 미치며, 기존의 많은 연구에서도 간벌이 직경 성장에 영향을 미친다(Kim et al., 2012a; Zhou et al., 2013)고 보고한 바 있다. 또한, 간벌 후 낮은 영급에서는 직경 생장이 확연히 증가한다(Thorpe et al., 2007)고 보고한 바 있다. 본 연구 결과 근원직경 성장과 수고 생장은 토양온도와 토양수분의 영향보다 임목 밀도의 영향이 큰 것으로 판단된다.

3. 생체량

바이오매스 회귀식은 대수회귀식(lnY=A+BlnX)으로 근원 직경에 대한 기관별 바이오매스를 추정한 결과, 대조구에서 lnY = -3.567+2.570 lnX, 간벌지에서 lnY = -2.615+2.154 lnX 로 나타났다. 바이오매스 추정회귀식의 결정계수(R²)는 모든 부위에서 0.80 이상으로 높은 설명력을 나타냈다.

벌채 전 생체량은 2011년 대조구 7.45 kg m⁻², 간벌지 8.26 kg m⁻² 이었으며 간벌지에서 임목 벌채로 2.18 kg m⁻² 를 반출하였다. 벌채 2년 후인 2013년 대조구 생체량은 17.95 kg m⁻², 간벌지 생체량은 반출량을 포함하여 총 19.02 kg m⁻²였다. 지상부 생체량에 대한 뿌리 생체량 비율(T/R률)은 대조구 2.88, 간벌지 2.62로 유의한 차이를 나타냈다(p<0.05). 대조구와 간벌지의 기관별 생체량 간에 년도별 유의한 차이는 나타나지 않았으며(p>0.05), 구성비는 대조구와 간벌지 모두 줄기>뿌리>가지>잎 순으로 나타났다. 대조구의 임분 밀도가 간벌지의 임분 밀도보다 2 배 이상 높음에도 불구하고 각 기관별 생체량이 2배 이상 높지 않은 이유는 간벌지의 근원직경이 대조구의 근원직경보다 높기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

간벌 후 대조구에서 2011년부터 2013년까지의 연간 순생산량은 각각 5.02, 4.65, 5.85 kg m⁻² yr⁻¹였고, 간벌지에서 각각 3.78, 4.76, 5.98 kg m⁻² yr⁻¹였다. 기관별 연평균 순생산량은 대조구에서 잎 0.87, 가지 1.13, 줄기 1.67, 뿌리 1.41 kg m⁻² yr⁻¹였으며, 간벌지에서 잎 0.85, 가지

1.18, 줄기 1.46, 뿌리 1.30 kg m⁻² yr⁻¹였다. 간벌 후 연평균 순생산량은 대조구에서 지상부 3.74, 임목전체 5.17 kg m⁻² yr⁻¹, 간벌지에서 지상부 3.54, 임목전체 4.85 kg m⁻² yr⁻¹로 나타났으며, 이것은 충남 청양지역과 보령지역 소나무림의 지상부 0.87, 1.60 kg m⁻² yr⁻¹, 임목 전체 1.00과 1.87 kg m⁻² yr⁻¹(Seo et al., 2010)보다 월등히 높았으며, 경기도 광주지역 36년생 리기다소나무림 줄기 17.1, 가지 5.2, 잎 3.8, 지상부 27.4 kg m⁻² yr⁻¹(Kwon and Lee, 2006)에 비해 높은 생산량을 보여준다. 이러한 결과는 기존의 연구 보다 본 연구의 임목밀도가 현저히 높고, 임령이 낮아 초기 생장이 빠르기 때문이라고 판단된다.

4. 유기탄소량

임목 별체로 2011년에 간벌지에서 1.09 kg C m⁻², 개별지에서 2.59 kg C m⁻²이 반출되었고, 간벌 후 2011년부터 2013년까지의 임목 전체 유기탄소량은 대조구에서 각각 3.62, 5.89, 8.79 kg C m⁻², 간벌지에서 2.99, 5.33, 8.31 kg C m⁻²로 나타나 매년 증가하는 경향이 나타났다. 개별지에 남은 그루터기는 2011년 0.88 kg C m⁻², 2012년 0.66 kg C m⁻², 2013년 0.28 kg C m⁻²으로 매년 감소하였고, 식생의 유무에 따른 차이를 나타냈다(p<0.05)(Figure 2). 낙엽을 통해 토양으로 유입되는 연간 유기탄소량은 2012년에 대조구, 간벌지에서 각각 1.56, 0.88 kg C m⁻² yr⁻¹로 유의한 차이가 나타났으나(p<0.05), 2013년에 각각 2.17, 1.18 kg C m⁻² yr⁻¹로 유의한 차이가 나타나지 않았다(p>0.05).

임목 전체 유기탄소량은 대조구와 간벌지에서 매년 증가하였고, 개별지는 부식으로 인해 매년 감소하였다. 간벌로 인해 잎과 가지의 유기탄소 저장량을 증가시켰으며, 1년 후 간벌재로 반출된 탄소량의 86%를 회복하였다. 이것은 간벌과 같은 산림관리로 인한 임분 밀도와 기저면적의 변화가 지상부 유기탄소 저장량에 영향을 미치기 때문으로 판단되며(Son et al., 2004), 간벌은 일시적으로 임목

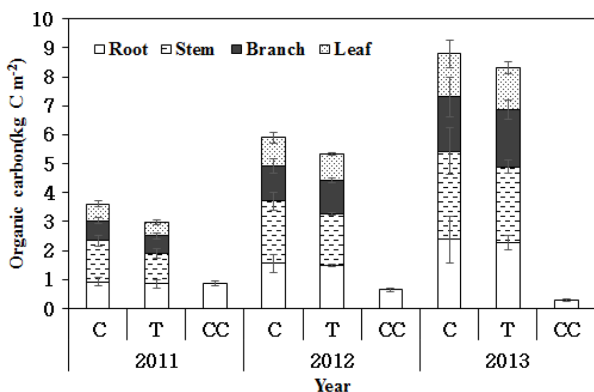


Figure 2. Organic carbon of each component for *Pinus densiflora* in control stands, thinned-50% stands and clear cut for *Pinus densiflora* stands. C : control stands, T : thinned-50% stands, CC : clear cut

탄소 저장량을 감소시키지만 장기적으로 탄소흡수 기능을 지속시킨다(Zhou et al., 2013).

5. 토양 이산화탄소 발생량

1) 토양 이산화탄소 발생량

계절별 토양 CO₂ 발생량은 모두 동절기에서 하절기로 갈수록 증가하는 경향을 보였고. 8~9월에 가장 높았으며, 1~2월에 가장 낮았다(Figure 3). 토양 CO₂ 발생량의 범위는 대조구 1.20~5.20 μmol m⁻² s⁻¹, 간벌지 1.20~5.18 μmol m⁻² s⁻¹, 개별지 1.10~6.08 μmol m⁻² s⁻¹, 나지 1.39~6.65 μmol m⁻² s⁻¹로 나타났다. 평균 토양 CO₂ 발생량은 각각 대조구 2.62, 간벌지 2.72, 개별지 2.91, 나지 3.19 μmol m⁻² s⁻¹로 대조구와 나지, 간벌지와 나지에서 유의한 차이가 나타났으나(p<0.05), 대조구와 간벌지 간에 유의한 차이가 나타나지 않았다(p>0.05).

연구 기간 동안(2012년 3월~2014년 2월) 매월 측정된 토양 CO₂ 발생량을 누적하여 연간 총 토양 CO₂ 발생량을 추정하였다. 연간 토양 CO₂ 발생량은 1년차 대조구에서 3.21, 간벌지 3.48, 개별지 3.69, 나지 3.30 kg C m⁻² yr⁻¹이며, 2년차 대조구에서 4.21, 간벌지 4.33, 개별지 4.66, 나지 5.81 kg C m⁻² yr⁻¹로 나타났다. 2년차 연간 토양 CO₂ 발생량이 1년차 연간 토양 CO₂ 발생량보다 높은 값을 나타냈다(p<0.05). 연평균 토양 CO₂ 발생량은 대조구 3.71, 간벌지 3.90, 개별지 4.17, 나지 4.56 kg C m⁻² yr⁻¹였으며, 유의적 차이는 나타나지 않았다(p>0.05).

토양 CO₂ 발생량은 임분 밀도가 증가할수록 증가한다(Litton et al., 2004; Noh et al., 2010)고 보고한 바 있으나 토양 교란으로 안정화가 되지 않은 토양은 토양 CO₂ 발생량이 높다(Son et al., 2004)는 보고한 바 있으며 대조구와 숲 가꾸기 된 소나무 임분 사이에 유의적인 차이가 없다(Kim et al., 2009)고 보고한 바 있다. 이와 같은 원인으로 본 연구의 나지 토양 CO₂ 발생량이 높게 나타난 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 세계 침엽수림에서 연간 발생하는 토양 CO₂ 발생량 1.0~4.6 kg m⁻² yr⁻¹의 범위(Raich and Nadelhoffer, 1989) 내에 있으나, 온대침엽수림

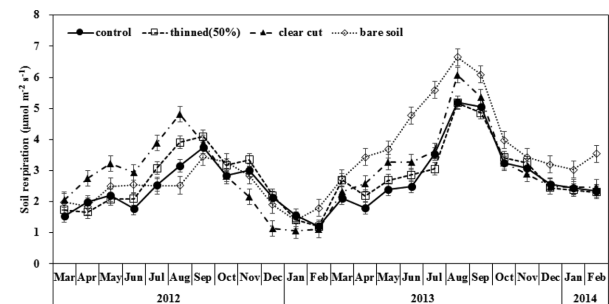


Figure 3. Monthly variation of soil CO₂ efflux in control stands, thinned-50% stands, clear cut and bare soil for *Pinus densiflora* stands.

에서 일반적으로 관찰되는 연간 발생량 $1.5\sim 2.3\text{ kg m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$ 보다는 높게 나타났다. 이러한 차이는 수종, 토양의 비옥도, 지형 등에 따른 차이(Ellert and Gregorich, 1995)이며 측정법, 식생형, 성장계절 기간, 임목밀도, 낙엽 생산량, 낙엽 분해율 차이 등의 원인으로 판단된다.

2) 토양 온도 및 수분과의 관계

토양 CO₂ 발생량과 토양온도는 유사한 경향을 나타냈으며, 네 실험구 모두 유의적 양의 상관관계를 나타내었다($p < 0.05$). 기존의 많은 연구에서 토양 CO₂ 발생량은 토양온도와 밀접한 관련이 있다고 보고된 바 있으며(Kim, 2008; Kim et al., 2009; Lee et al., 2012), 토양온도는 미생물 활동에 영향을 미치는 주된 요인으로 뿌리 호흡과 밀접한 관련이 있어(MacDonald et al., 1995), 토양온도의 변화가 대조구와 처리구의 토양 CO₂ 발생량 방출에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

토양 CO₂ 발생량과 토양수분 간의 직접적인 상관관계는 네 실험구 모두 매우 낮은 것으로 나타났다. 기존에 많은 연구에서 토양수분이 토양 CO₂ 발생량에 영향을 미치는 중요한 환경요인으로 보고된 바 있으나(Liu et al., 2006; Tamai, 2009), 본 연구와 같이 토양수분이 토양 CO₂ 발생량에 미치는 효과가 미흡하거나(Lee and Mun, 2001), 토양온도보다 상관관계가 낮다고 보고한 바 있다(Chapman, 1979).

6. 분해율과 분해상수

낙엽의 분해에 따른 무게 잔존률은 11개월 경과 후부터 차이를 나타냈다. 20개월 경과 후의 잔존률은 대조구 50.8%, 간벌지 44.5%, 개벌지 38.8%, 나지 39.2%로 개벌지와 나지의 낙엽 분해가 대조구와 간벌지보다 빨리 진행되었으나 유의한 차이는 없었다($p > 0.05$)[Figure 4(a)]. 분해상수(k)는 20개월째 대조구 0.42, 간벌지 0.49, 개벌지 0.57, 나지 0.56으로 나타났다.

뿌리의 분해에 따른 무게 잔존률은 8개월 경과 후부터 처리구별 차이를 나타냈고, 간벌지와 개벌지는 11개월 경과 후, 대조구와 개벌지는 14개월 경과 후 분해가 느려졌으며, 20개월 경과 후에는 대조구 28.0%, 간벌지 26.3%, 개벌지 32.5%, 나지 36.9%로 처리구별 유의한 차이는 없었다($p > 0.05$)[Figure 4(b)]. 분해상수(k)는 20개월째 대조구 0.79, 간벌지 0.75, 개벌지 0.58, 나지 0.60으로 나타났다.

낙엽의 분해율은 개벌지와 나지에서 높았다. 이것은 개벌지와 나지의 토양온도와 토양수분이 대조구와 간벌지보다 높기 때문으로 판단된다. 가을과 겨울 동안에 처리구별 토양온도는 차이가 거의 없지만 봄부터 여름 동안에 개벌지와 나지의 토양온도가 대조구와 간벌지의 토양온도보다 높아 이 기간에도 분해가 빠른 것으로 예상된다.

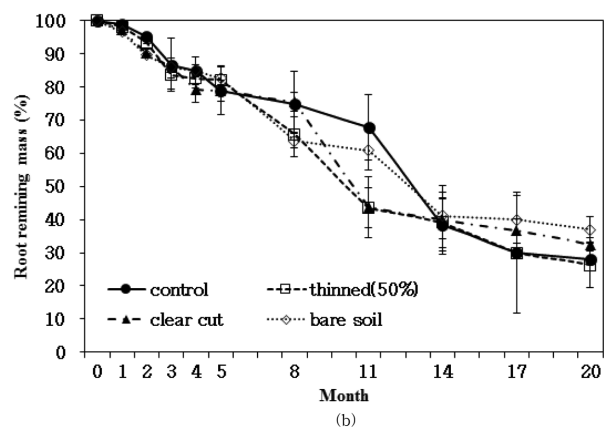
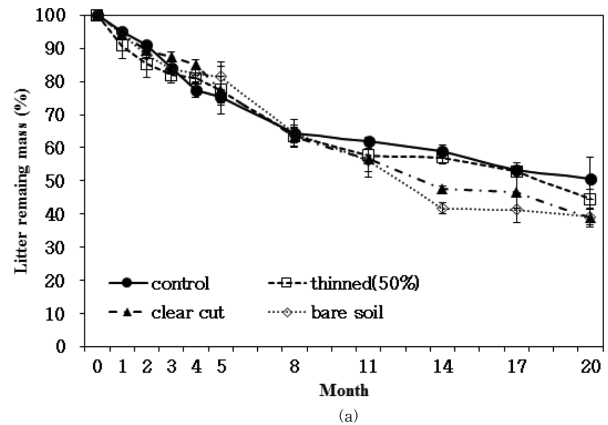


Figure 4. Monthly litter decomposition rates(a) and root decomposition rates(b) in control stands, thinned-50% stands, clear cut and bare soil for *Pinus densiflora* stands.

이는 하절기에 기온이 상승하고 강수량이 많아 분해자의 활성이 왕성하며, 습한 하절기에 더 많은 수용성 물질이 용출된다는 보고(Mun, 2009)와 같은 원인으로 판단된다.

낙엽 분해율의 차이는 질소, 탄소, 인, 리그닌 등의 초기 낙엽의 질에 의한 차이이며, 기온, 강수량, 고도, 방위 등의 외부 요인에 의한 영향(Namgung et al., 2008)에 의한 차이로 판단된다. 또한 뿌리의 질, 영양염류 함량, 분해자의 차이 때문인 것으로 판단된다.

7. 연간 탄소 동태

산림생태계의 탄소수지는 식물이 광합성을 통해 대기 중 흡수한 CO₂량(Net Primary Production)과 종속영양생물의 호흡에 의한 CO₂ 발생량(Heterotroph Respiration, HR)의 차이에 의해 결정되며, 이것을 순생태계생산량(Net Ecosystem Production, NEP)이라고 한다(Lee, 2003). 이를 통해 구한 연간 탄소 동태는 대조구에서 수목의 생체량으로 잎, 가지, 줄기에서 각각 0.43, 0.56, 0.84 kg C m⁻² yr⁻¹, 뿌리에서 0.70 kg C m⁻² yr⁻¹으로 총 2.53 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 고정하였다. 토양 CO₂ 발생량으로 1.01 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 대기로 방출했고, 순생태계생산량은

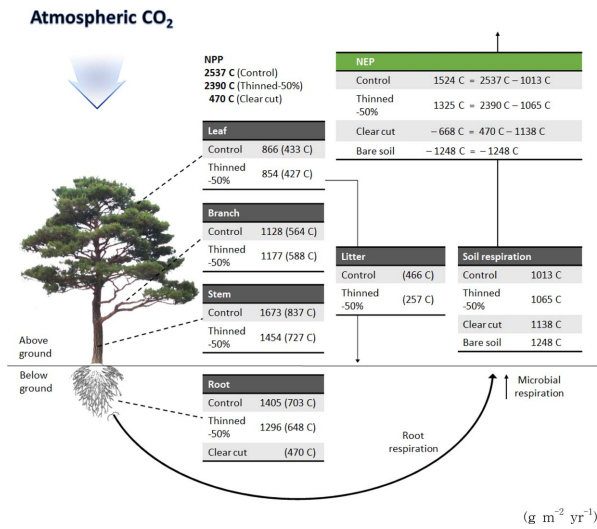


Figure 5. Compartment model showing the distribution and flow carbon of the *Pinus densiflora* stands in the study areas. Box indicate biomass, CO₂. C is carbon.

1.52 kg C m⁻² yr⁻¹였다. 간벌지에서 간벌목의 반출로 1.09 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 고정하였고, 수목의 생체량으로 잎, 가지, 줄기에서 각각 0.43, 0.59, 0.73 kg C m⁻² yr⁻¹, 뿌리에서는 0.65 kg C m⁻² yr⁻¹으로 총 2.39 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 고정하였다. 토양 CO₂ 발생량으로 1.07 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 방출하였으며, 순생태계생산량은 1.33 kg C m⁻² yr⁻¹였다. 개벌지에서 목재반출로 2.59 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 고정하였고, 남은 그루터기는 연간 59%씩 감소하여 0.47 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 고정하였다. 토양 CO₂ 발생량으로 1.14 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 방출하였고, 순생태계생산량은 -0.67 kg C m⁻² yr⁻¹으로 연간 0.67 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 방출했다. 나지에서 토양 CO₂ 발생량으로 1.25 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 방출하였고, 순생태계생산량은 -1.25 kg C m⁻² yr⁻¹으로 연간 1.25 kg C m⁻² yr⁻¹의 탄소를 방출했다(Figure 5).

결론

소나무 유령림에서 임목밀도 조절이 탄소 동태에 미치는 영향을 연구한 결과, 간벌에 의한 임분 밀도 조절은 임목의 생육환경을 개선시켜 임분 내 개체목의 근원직경과 유기탄소량을 증가시켰다. 간벌 직후 임목 탄소저장량이 감소하였지만 간벌 1년 후 간벌재로 반출된 탄소량의 86%를 회복하였고 순생태계생산량을 증가시켰다. 따라서, 간벌에 의한 임분 밀도 조절은 소나무 유령림의 탄소저장량 증대에 있어 효과적이며, 또한 개벌지와 나지의 토양호흡으로 인한 탄소방출 감소를 위한 지속적인 관리와 경영이 필요할 것으로 판단된다. 이러한 결과는, 소나무 유령림의 연간 탄소의 동태를 파악하고, 유령임분의 탄소고정량 분

석에 대한 산림경영의 기초자료로 활용될 수 있을 것이며 추후 산림 내 소나무림에서 영급별, 간벌 강도별, 지위별 등 다양한 변수를 고려하여 장기적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 전남대학교 학술연구비 지원사업에 의해 수행되었습니다.

References

Alban, D.H. and Perala, D. 1992. Carbon storage in lake states aspen ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 1107-1110.

Bond-Lamberty, B., Wang, C., and Gower, S.T. 2004. Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence. *Tree Physiology* 24: 1387-1395.

Brinson, M.M., Lugo, A.E., and Brown, S. 1981. Primary productivity, decomposition and consumer activity in freshwater wetlands. *Annual Review of Ecology and Systematics* 12: 123-161.

Buchmann, N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 1625-1635.

Chapman, S.B. 1979. Some interrelationships between soil and root respiration in lowland Calluna heathland in southern England. *The Journal of Ecology* 67: 1-20.

David, A.L., Elizabeth, A.B., Mackenzie, B.M., Mark, E.B., Mebecca, M.N. and Richard, B.H. 2016. Tradeoffs between three forest ecosystem services across the state of New Hampshire, USA: timber, carbon, and albedo. *Ecological Applications* 26(1): 146-161.

Ellert, B.H. and Gregorich, E.G. 1995. Management-induced changes in the actively cycling fraction of soil organic matter. In: Mcfee, W. and Kelly, J.M. (Eds.), *Carbon Forms and Functions in Forest Soil*. Soil Science Society American, Madison, WI. pp. 119-138.

Fang, C., Moncrieff, J.B., Gholz, H.L., and Clark, K.L. 1998. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil* 205: 135-146.

Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T., and Andrews, J.A. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48: 115-146.

Kim, C. 2008. Soil CO₂ efflux in clear-cut and uncut red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stands in Korea. *Forest ecology and management* 255: 3318-3321.

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.
- Kim, M.I., Lee, W.K., Park, T.J., Kwak, H.B., Byun, J.Y., Nam, K.J., Lee, K.H., Son, Y.M., Won, H.K., and Lee, S.M. 2012. Developing dynamic DBH growth prediction model by thinning intensity and cycle -Based on yield table data-. *Journal of Korean Forest Society* 101(2): 266-278.
- Kim, Y.H., Kim, T.W., Won, H.K., Lee, K.H., and Shin, M.Y. 2012. Estimation of timber production by thinning scenarios using a forest stand yield model. *Journal of Korean Forest Society* 101(4): 592-598.
- Kimble, J.M., Heath, L.S., Birdsey, R.A., and Lal, R. 2003. The potential of U.S. forest soils to sequester carbon and mitigate the green house effect. CRC Press, New York. pp. 429.
- Ko, S.I., Yoon, T.K., Kim, S.J., Kim, C.S., Lee, S.T., Seo, K.W., and Son, Y.W. 2014. Thinning intensity effects on carbon storage of soil, forest floor and coarse woody debris in *Pinus densiflora* stands. *Journal of Korean Forest Society* 103(1): 30-36.
- Kominami, Y., Jomura, M., Dannoura, M., Goto, Y., Tamai, K., Miyama, T., Kanazawa, Y., Kaneko, S., Okumura, M., and Misawa, N. 2008. Biometric and eddy-covariance-based estimates of carbon balance for a warm-temperate mixed forest in Japan. *agricultural and forest meteorology* 148: 723-737.
- Koo, C.D., Ka, K.H., Park, W.C., Park, H. Ryu, S.R., Park, Y.W., and Kim, T.H. 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.
- Kwon, K.C. and Lee, D.K. 2006. Biomass and energy content of *Pinus rigida* stand in Gwangju, Gyeonggi province. *Journal Korean Forest Energy* 25(1): 39-45.
- Lee, J.Y., Han, S.H., Kim, S.J., Lee, S.H., Son, Y.M., and Son, Y.W. 2015. A meta-analysis on the effect of forest thinning on diameter growth and carbon stocks in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 104(4): 527-535.
- Lee, K.J. and Mun, H.T. 2010. A study on the soil respiration in cutting and uncutting areas of *Larix leptolepis* plantation. *Journal of Life Science* 20: 1353-1357.
- Lee, K.J., Won, H.Y., and Mun, H.T. 2012 Contribution of root respiration to soil respiration for *Quercus acutissima* forest. *Korean Journal of Ecology and Environment* 26(5): 780-786.
- Lee, M. 2003. Method for assessing forest carbon sinks by ecological process-based approach. *Korean Journal of Ecology and Environment* 26: 289-296.
- Lee, Y.Y. and Mun, H.T. 2001. A study on the soil respiration in a *Quercus acutissima* forest. *Journal of Ecology and Environment* 24(3): 141-147.
- Litton, C.M., Ryan, M.G., and Knight, D.H. 2004. Effects of tree density and stand age on carbon allocation patterns in postfire lodgepole pine. *Ecological applications* 14: 460-475.
- Liu, Q., Edwards, N.T., Post, W.M., Gu, L., Ledford, J., and Lenhart, S. 2006. Temperature-independent diel variation in soil respiration observed from a temperate deciduous forest. *Global Change Biology* 12: 2136-2145.
- Lu, F. and Gong, P. 2005. Adaptive thinning strategies for mixed-species stand management with stochastic prices. *Journal of Forest Economics* 11(1): 53-71.
- Macdonald, N.W., Zak, D.R., and Pregitzer, K.S. 1995. Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Science Society of America Journal* 59: 233-240.
- Mun, H.T. 2009. Weight loss and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Quercus mongolica* in Mt. Worak National Park. *Journal of Ecology and Environment* 32: 123-127.
- Na, S.J., Woo, K.S., Kim, C.S., Yoon, J.H., Lee, H.H., and Lee, D.H. 2010. Comparison of above-ground growth characteristics between naturally regenerated and planted stands of *Pinus densiflora* for. erecta Uyeki in Gangwon province. *Journal of Korean Forest Society* 99(3): 323-330.
- Namgung, J., 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 Environment* 31(4): 291-295.
- Nishizono, T. 2010. Effect of thinning level and site productivity on age-related changes in stand volume growth can be explained by a single rescaled growth curve. *Forest Ecology and Management* 259(12): 2276-2291.
- Noh, N.J., Son, Y., Lee, S.K., Yoon, T.K., Seo, K.W., Kim, C., Lee, W.K., Bae, S.W., and Hwang, J. 2010. Influence of stand density on soil CO₂ efflux for a *Pinus densiflora* forest in Korea. *Journal of Plant Research* 123: 411-419.
- Powers, M., Kolka, R., Palik, B., McDonald, R., and Jurgensen, M. 2011. Long-term management impacts on carbon storage in Lake States forests. *Forest Ecology and Management* 262: 424-431.
- Pregitzer, K.S. 2003. Carbon cycling in forest ecosystems with an emphasis on belowground processes. In: Kimble, J.M., L.S. Heath, R.A. Birdsey and R. Lal(ed.) The potential of U.S. forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. CRC Press, New York. pp. 93-107.
- Prescott, C. 1997. Effects of clearcutting and alternative silvicultural systems on rates of decomposition and nitrogen mineralization in a coastal montane coniferous forest. *Forest Ecology and Management* 95: 253-260.
- Raich, J.W. and Nadelhoffer, K.J. 1989. Belowground Car-

- bon Allocation in Forest Ecosystems: Global Trends. *Ecology* 70: 1346-1354.
- Ronald, L.H. and Kurt, S.P. 1992. The demography of fine roots in a Northern hardwood forest. *Ecology* 73: 1094-1104.
- Schimel, D.S., Braswell, B., Mckeown, R., Ojima, D., Parton, W., and Pulliam, W. 1996. Climate and nitrogen controls on the geography and timescales of terrestrial biogeochemical cycling. *Global Biogeochemical Cycles* 10: 677-692.
- Seo, Y.O., Lee, Y.J., Pyo, J.K., Kim, R.H., Son, Y.M., and Lee, K.H. 2010. Above-and belowground biomass and net primary production for *Pinus densiflora* stands of Cheongyang and Boryeong regions in Chungnam. *Journal of Korean Forest Society* 99(6): 914-921.
- Son, Y., Jun, Y.C., Lee, Y.Y., Kim, R.H., and Yang, S.Y. 2004. Soil carbon dioxide evolution, litter decomposition, and nitrogen availability four years after thinning in a Japanese larch plantation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35: 1111-1122.
- Tamai, K. 2009. Experimental estimation of the effect of rainfall interception on soil respiration in a broad-leaved deciduous forest in Western Japan. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11(4): 247-251.
- Thorpe, H., Thomas, S. and Caspersen, J. 2007. Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (*Picea mariana*) boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 1563-1571.
- Vitousek, P.M. 1991. Can planted forests counteract increasing atmospheric carbon dioxide? *Journal of Environmental Quality* 20: 348-354.
- Wiseman, P.E. and Seiler, J.R. 2004. Soil CO₂ efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. *Forest Ecology and Management* 192: 297-311.
- Zhou, D., Zhao, S.Q., Liu, S., and Oeding, J. 2013. A meta-analysis on the impacts of partial cutting on forest structure and carbon storage. *Biogeosciences* 10(6): 3691-3703.

(Received: March 30, 2016; Accepted: June 27, 2016)