

간벌 강도가 소나무림의 토양, 낙엽층 및 고사목 탄소 저장량에 미치는 영향

고수인¹ · 윤태경² · 김성준² · 김춘식³ · 이상태⁴ · 서경원⁴ · 손요환^{2*}

¹한국환경정책·평가연구원 정책연구본부, ²고려대학교 대학원 환경생태공학과,

³경남과학기술대학교 산림자원학과, ⁴국립산림과학원 산림생산기술연구소

Thinning Intensity Effects on Carbon Storage of Soil, Forest Floor and Coarse Woody Debris in *Pinus densiflora* Stands

Suin Ko¹, Tae Kyung Yoon², Seongjun Kim², Choonsig Kim³, Sang-Tae Lee⁴,
Kyung Won Seo⁴ and Yowhan Son^{2*}

¹Environmental Policy Research Group, Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea

²Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School,
Korea University, Seoul 136-713, Korea

³Department of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology,
Jinju 660-758, Korea

⁴Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 487-821, Korea

요약: 본 연구의 목적은 소나무림을 대상으로 간벌 시행 4년 후, 간벌 강도에 따른 토양, 낙엽층, 고사목의 탄소 저장량 변화를 분석하는 것이다. 이를 위하여 강원도 정선군 소재의 소나무림 연구지 1과 경기도 광릉 시험림 내 소나무림 연구지 2를 대상으로 연구를 수행하였다. 2008년에 임분 밀도를 기준으로 간벌 강도를 달리한 3개의 처리구를 각 연구지에 설치하였다. 연구지 1은 대조구(0%), T20 처리구(20%), T30 처리구(30%)로 설계하였으며, 연구지 2는 대조구(0%), T39 처리구(39%), T74 처리구(74%)로 설계하였다. 그리고 2012년에 0-50 cm 깊이의 토양, 낙엽층, 고사목의 탄소 저장량을 측정하였다. 연구지 1에서 토양, 낙엽층, 고사목의 총 탄소 저장량은 T30 처리구(109.80 tC·ha⁻¹)가 대조구(86.69 tC·ha⁻¹)에 비해 통계적으로 유의하게 높았으며, 연구지 2의 총 탄소 저장량은 T74 처리구(97.02 tC·ha⁻¹)가 대조구(72.04 tC·ha⁻¹)와 T39 처리구(63.25 tC·ha⁻¹)에 비해 통계적으로 유의하게 높았다. 연구지 1과 연구지 2에서 간벌 강도가 가장 강한 처리구의 총 탄소 저장량이 각각 가장 높게 나타났다. 본 연구는 간벌이 토양, 낙엽층, 고사목 탄소 저장량에 미치는 단기간의 영향을 분석한 것이므로 보다 장기적인 영향을 평가할 수 있는 추가 연구가 필요하다.

Abstract: This study examined the change in carbon (C) storage of soil, forest floor and coarse woody debris (CWD) for different thinning intensities in *Pinus densiflora* stands 4 years after the treatment. Two study stands were located in Jeongseon (Stand 1) and Gwangneung Experiment Forest (Stand 2). Three plots for different thinning intensities based on stand density were established at each stand in 2008; control plot (0%), T20 plot (20%) and T30 plot (30%) in Stand 1 and control plot (0%), T39 plot (39%) and T74 plot (74%) in Stand 2, respectively. The C storage of soil (0-50 cm), forest floor and CWD was measured in 2012. Total C storage of T30 plot (109.80 tC ha⁻¹) was significantly higher than that of control plot (86.69 tC·ha⁻¹) in Stand 1. In stand 2, total C storage of T74 plot (97.02 tC·ha⁻¹) was significantly higher than that of control plot (72.04 tC·ha⁻¹) and T39 plot (63.25 tC·ha⁻¹). Total C storage of the heaviest thinned plot was the highest in each study stand. Since this study examined initial effects of thinning on C storage of soil, forest floor and CWD, further studies would be necessary to evaluate the long-term effects.

Key words : carbon storage, silvicultural treatment, soil carbon, thinning

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

서론

증가하는 대기 중의 이산화탄소 농도에 대한 우려와 함께 산림이 전지구적인 탄소 흡수원이라는 인식은 탄소 저장을 최대화 할 수 있는 산림관리 방법에 대한 관심을 불러 일으키고있다(Powers et al., 2011). 이에 따라 기후변화 저감을 위한 자연적 탄소 흡수와 관련한 산림토양 탄소 동태의 기작을 이해하는 것이 중요하다(Lal, 2005). 간벌은 광선 및 양분유효도를 증가시킴으로써 목재 생산성을 향상시키는 대표적 산림사업의 하나로 행해져 왔으며(Tang et al., 2005; Campbell et al., 2009), 산림토양 탄소의 흐름과 저장에 미치는 영향으로 관심을 받고 있다(Jandl et al., 2007; Jurgensen et al., 2012). 한편 낙엽층은 산림생태계의 또 다른 탄소 저장고이며, 낙엽층 탄소 저장량도 간벌의 영향을 받는다. 그런데 간벌은 낙엽의 유입과 분해에 변화를 일으키고, 벌채작업으로 인한 교란으로 낙엽층의 유기물 축적에 영향을 미칠 수 있다(Jonard et al., 2006). 또한 낙엽층 탄소 저장량은 토양 탄소 저장량에 비하여 벌채에 따른 변화가 쉽게 일어난다고 보고되었다(Nave et al., 2010). 그리고 서있거나 쓰러져 죽은 나무인 고사목(Coarse Woody Debris; CWD)은 산림의 중요한 생태적 역할을 하는데, 임상, 천이단계, 산림사업에 따라 상당한 양의 탄소를 저장한다(Harmon and Sexton, 1996; Clark et al., 2002). 고사목의 분포는 유입과 유출의 균형에 의하여 결정되며, 간벌은 개별 임분의 중요한 고사목 공급원으로서 고사목 발생에 직·간접적인 영향을 미친다(Duvall and Grigal, 1999; Olajuyigbe et al., 2011).

소나무는 우리나라의 대표적 수종으로 145만 ha에 걸쳐 분포하여 총 산림면적의 22.7%, 침엽수 산림면적의 56.1%를 차지하고 있다(Korea Forest Service, 2012). 소나무가 산림생태계 연구에서 매우 중요하기 때문에 소나무림을 대상으로 지상부와 지하부를 포함한 임령에 따른 탄소 저장량 비교, 다른 산림과의 탄소 저장량 비교 등이 보고되었다(Lee et al., 2009; Noh et al., 2010). 또한 숲가꾸기

와 같은 산림사업이 소나무림의 탄소 순환에 미치는 영향을 연구한 결과도 있다(Kim et al., 2009). 그러나 간벌 처리 14년 후의 토양 탄소 저장량 및 토양 호흡 연구(Selig et al., 2008)나 간벌 처리 33년 후의 탄소 및 질소 저장량 연구(Nilsen and Strand, 2008)와 같이 간벌에 의한 장기적 영향을 보고한 연구 사례는 국내의를 막론하고 부족한 상황이다. 따라서 본 연구의 목적은 소나무림을 대상으로 간벌 강도에 따른 토양, 낙엽층, 고사목 탄소 저장량 차이를 분석하는 것으로, 간벌이 산림의 탄소 저장량에 미치는 장기적인 영향을 평가하여 이를 극대화 할 수 있는 사업체계를 개발하는데 기여하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

강원도 정선군 임계면 소재의 소나무림 연구지 1(Stand 1)과 국립산림과학원 산림생산기술연구소의 관할 광릉 시험림 내 소나무림 연구지 2(Stand 2)를 대상으로 본 연구를 수행하였다. 2008년에 임분 밀도(잔존 임목 본수)를 기준으로 간벌 강도를 달리한 3개의 처리구를 각 연구지에 설치하였다. 연구지 1은 해발고도 700 m 정도에 위치하며, 사면경사는 3-24°이고, 임령은 VI영급이다(Table 1). 간벌 강도에 따라 대조구(Control; 0%), T20 처리구(20%), T30 처리구(30%) 등으로 구분하였으며, 각 처리구의 면적은 약 200 m²(반경 8 m)이다. 대조구의 하층식생으로는 참나무류(*Quercus* spp.)의 치수가 많이 분포하고 쪽동백나무(*Styrax obassia*), 노린재나무(*Symplocos chinensis*), 생강나무(*Lindera obtusiloba*) 등이 있으며, T20 처리구에는 졸참나무(*Quercus serrata*) 및 신갈나무(*Quercus mongolica*)의 맹아와 치수가 우점하고 개웃나무(*Rhus trichocarpa*), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*) 등이 출현한다. T30 처리구의 하층은 신갈나무 맹아와 치수가 우점하고 개웃나무, 생강나무 등이 출현한다. 연구지 2는 해발고도 500 m 정도에 위치하며, 사면경사는 23-30°이고, 임령은 연구

Table 1. Characteristics of two *Pinus densiflora* study stands in 2012, four years after thinning.

	Stand 1			Stand 2		
	Control	T20	T30	Control	T39	T74
Location	37°30'N, 128° 56'E			37°46'N, 127°10'E		
Altitude (m)	700			500		
Stand age (year)	51-60			51-60		
Slope (°)	3-24			23-30		
Thinning intensity (%)	0	20	30	0	39	74
Stand density (tree ha ⁻¹)	580	473	338	1,100	700	313
Mean DBH (cm)	34.6	36.3	38.5	26.3	31.1	43.7
Mean height (m)	21.8	22.5	23.2	14.2	20.7	19.9
Basal area (m ² ha ⁻¹)	53.4	48.9	45.4	59.7	53.3	47.1
Volume (m ³ ha ⁻¹)	419.1	396.1	379.1	305.1	397.2	337.4

지 1과 같은 VI영급이다(Table 1). 간벌 강도에 따라 대조구(Control; 0%), T39 처리구(39%), T74 처리구(74%) 등으로 구분하였으며, 대조구와 T74 처리구의 면적은 약 314 m²(반경 10 m), T39 처리구는 약 499 m²(반경 12.6 m)이다. 대조구의 하층식생으로는 당단풍나무(*Acer pseudosieboldianum*), 개웃나무, 청시닥나무(*Acer barbinerve*) 등이 있으며, T39 처리구에는 쪽동백나무, 당단풍나무 등이 출현한다. T74 처리구의 하층은 신갈나무 및 졸참나무의 맹아가 우점하고 생강나무, 청미래덩굴(*Smilax china*) 등이 출현하며, 임관이 열려 초본류가 많이 발생하였다.

2. 시료 채취 및 분석

간벌 처리 후, 4년이 경과한 2012년에 각 연구지에서 토양, 낙엽층, 고사목 시료를 채취하였다. 토양 시료는 간이 토양시료채취기(407 cm³)를 이용하여 각 처리구마다 9반복으로 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-50 cm 깊이별로 채취하였다(Korea Forest Research Institute, 2010). 채취된 토양 시료를 풍건 후 2 mm 체(US standard No. 10)를 이용하여 세토와 석력으로 분리하였고, 세토의 일부는 탄소 농도 측정을 위하여 분쇄하였으며, 세토를 105°C에서 항량에 도달할 때까지 건조한 후 용적 밀도 산출에 필요한 무게를 측정하였다. 낙엽층 시료는 토양 시료를 채취한 지점과 인접한 곳에서 30 cm × 30 cm 정방형구를 이용하여 각 처리구마다 9반복으로 채취하였다(Korea Forest Research Institute, 2010). 또한 각각의 처리구에 10 m × 10 m 크기의 보조 조사구를 3반복으로 설치하여 직경이 10 cm 이상이며 길이가 1 m 이상인 모든 고사목의 생중량을 측정하였다. 생중량의 측정이 불가능한 고사목은 건조량을 추정하는데 필요한 직경과 길이를 측정하고 단판 시료를 채취하였다(Korea Forest Research Institute, 2010). 낙엽층과 고사목 시료는 85°C에서 항량에 도달할 때까지 건조한 후 무게를 측정하였고, 고사목 시료의 건조량과 생중량의 비율을 이용하여 보조 조사구의 고사목 건조량을 산출하였다. 토양, 낙엽층, 고사목 시료의 탄소 농도 측정에는 원소분석기(Vario macro Elemental Analyzer, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany)를 사용하였다. 토양 탄소 저장량은 토양 탄소 농도에 석력 함량을 제외한 용적 밀도와 토양 깊이를 곱하여 산출하였으며, 낙엽층과 고사목 탄소 저장량은 낙엽층 및 고사목 탄소 농도에 건조량을 곱하여 산출하였다.

3. 통계 분석

간벌 강도를 달리한 각 처리구의 토양 용적 밀도와 토양, 낙엽층 및 고사목 탄소 농도, 탄소 저장량 차이의 유의성 검정에 일반선형모형(General Linear Model; GLM)을 이용하였고, Duncan의 다중검정법을 이용하여 각 처리

간의 평균을 비교하였다($P < 0.05$). 모든 분석에 SAS 9.2 프로그램을 사용하였다(SAS Institute Inc., USA).

결과 및 고찰

1. 토양 탄소 저장량

연구지 1의 0-50 cm 깊이에서 토양 탄소 농도(%)는 깊이별로 대조구 0.65-3.78, T20 처리구 1.05-4.29, T30 처리구 1.19-4.30 등의 범위로 나타났으며, 연구지 2의 경우 대조구 0.98-3.27, T39 처리구 0.89-2.37, T74 처리구 1.59-4.04 등의 범위로 나타났다(Figure 1). 연구지 1의 10-20, 20-30 cm 깊이에서 토양 탄소 농도는 T30 처리구가 대조구에 비해 통계적으로 유의하게 높았다. 연구지 2의 0-10, 30-50 cm 깊이에서 토양 탄소 농도는 T74 처리구가 T39 처리구에 비해 통계적으로 유의하게 높았고 10-20, 20-30 cm 깊이에서 토양 탄소 농도는 T74 처리구가 대조구와 T39 처리구에 비해 통계적으로 유의하게 높았다. 또

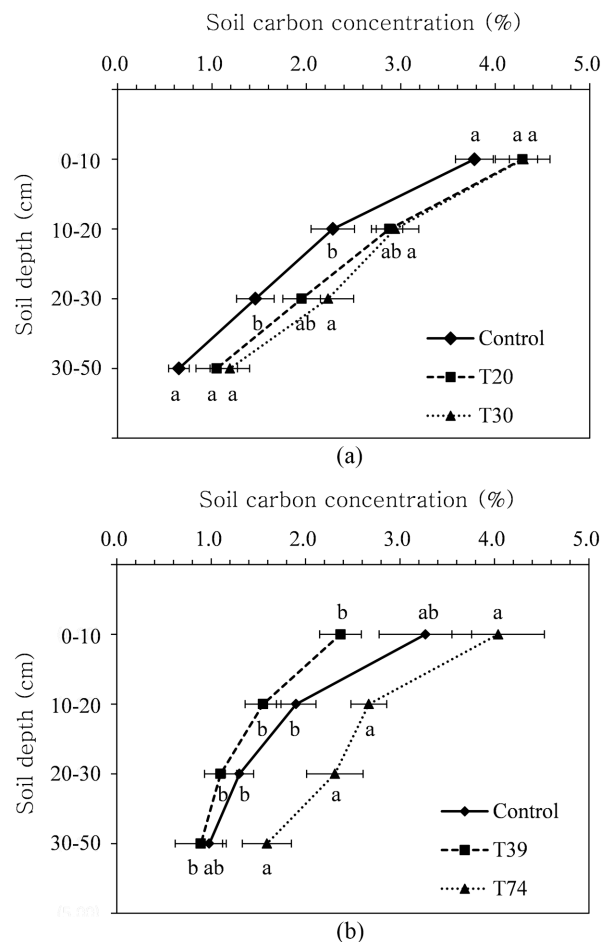


Figure 1. Soil carbon concentration in Stand 1 (a) and Stand 2 (b) of *Pinus densiflora* with different thinning intensities. Different letters indicate significant differences among treatments within each study stand ($P < 0.05$). The horizontal bars represent standard errors.

한 연구지 2개소 모두에서 토양 0-10 cm 깊이의 토양 탄소 농도가 가장 높았으며, 토양 깊이가 깊어질수록 토양 탄소 농도는 감소하였다. 한편 연구지 1의 토양 탄소 농도는 토양 깊이에 따라 부분적으로 통계적인 차이를 나타냈지만, 모든 토양 깊이에서 간벌 강도가 증가할수록 토양 탄소 농도도 증가하는 경향을 보였다. 연구지 2의 경우에도 가장 강도가 높은 간벌이 이루어진 T74 처리구의 토양 탄소 농도가 모든 토양 깊이에서 대조구와 T39 처리구보다 높은 값을 보였다. 간벌 강도가 가장 높은 처리구의 토양 탄소 농도가 가장 높은 값을 나타낸 것은 간벌 이후 남겨진 뿌리의 분해와 새롭게 발생한 하층식생의 고사 및 분해로부터 많은 양의 유기물이 유입되었기 때문으로 추정된다(Selig et al., 2008). 한편 본 연구 결과와 달리 간벌이 토양 탄소 농도에 미치는 영향이 거의 없다는 보고도 있다(Nobles et al., 2009; Hoover, 2011).

연구지 1의 0-50 cm 깊이에서 토양 용적 밀도($g\cdot cm^{-3}$)는 깊이별로 대조구 0.76-1.10, T20 처리구 0.72-1.01, T30 처리구 0.74-1.04 등의 범위로 나타났으며, 연구지 2의 경우 대조구 0.68-0.87, T39 처리구 0.76-0.92, T74 처리구 0.68-0.74 등의 범위로 나타났다(Table 2). 연구지 1에서 간벌 강도별로 토양 용적 밀도의 통계적인 차이는 나타나지 않았다. 연구지 2의 20-30 cm 깊이에서 토양 용적 밀도는 대조구와 T39 처리구가 T74 처리구에 비해 통계적으로 유의하게 높았고, 30-50 cm 깊이에서 토양 용적 밀도는 T39 처리구가 T74 처리구에 비해 통계적으로 유의하게 높았다. 여러 연구에서 간벌이나 목재 수확 작업 과정에서 흩다짐으로 용적 밀도가 증가하는 것으로 보고되었으나(Shaw and Carter, 2002; Landsberg et al., 2003; Grace et al., 2006), 본 연구에서는 간벌 처리구의 토양 용적 밀도가 대조구보다 높은 경향을 보이지 않았다. 이는 간벌 작업으로 인하여 발생하는 흩다짐의 공간적인 변이와 세기 차이로 인하여 뚜렷한 효과가

나타나지 않은 것으로 판단된다(Grace et al., 2006).

연구지 1의 0-50 cm 깊이에서 토양 탄소 저장량($t\cdot C\cdot ha^{-1}$)은 깊이별로 대조구 13.05-28.39, T20 처리구 16.82-30.60, T30 처리구 18.75-31.76 등의 범위로 나타났으며, 연구지 2의 경우 대조구 11.16-21.44, T39 처리구 8.98-17.33, T74 처리구 15.84-26.61 등의 범위로 나타났다(Table 2). 0-50 cm 깊이까지 토양 탄소 저장량의 합으로는 연구지 1에서는 대조구 74.31, T20 처리구 90.41, T30 처리구 99.68 등으로 나타났으며, 연구지 2의 경우 대조구 62.92, T39 처리구 51.85, T74 처리구 82.80 등으로 나타났다. 연구지 1의 토양 탄소 저장량은 T30 처리구가 대조구에 비해 통계적으로 유의하게 높았으며, 연구지 2의 토양 탄소 저장량은 T74 처리구가 대조구와 T39 처리구에 비해 통계적으로 유의하게 높았다. Kim et al.(2009)은 본 연구와 동일하게 소나무림을 대상으로 수행한 연구에서 간벌 처리구의 토양 표면(0-10 cm) 탄소 저장량이 대조구보다 높았다고 보고하였으며, 간벌 처리구 토양 표면의 높은 용적 밀도를 그 원인으로 분석하였다. 그런데 본 연구의 경우, 연구지 2개소의 대부분의 토양 깊이에서 간벌 강도에 따른 토양 용적 밀도의 차이가 나타나지 않았기 때문에 토양 탄소 농도의 차이가 토양 탄소 저장량의 차이를 일으키는 주된 요인으로 판단된다. 반면에 벌채, 간벌과 같은 시업활동이 토양 탄소 저장량을 감소시키거나(Nave et al., 2010), 토양 탄소 저장량에 미치는 영향이 거의 없다는 보고도 있다(Nilsen and Strand, 2008; Chatterjee et al., 2009).

2. 낙엽층 및 고사목 탄소 저장량

연구지 1의 낙엽층 탄소 농도(%)와 탄소 저장량($t\cdot C\cdot ha^{-1}$)은 각각 대조구 47.84와 9.57, T20 처리구 46.71과 6.36, T30 처리구 47.85와 7.06 등으로 나타났으며, 연구지 2의 경우 대조구 49.51과 7.81, T39 처리구 50.70과 8.32, T74 처리구 51.37과 6.95 등으로 나타났다(Table 3). 연구

Table 2. Soil bulk density and soil carbon storage for *Pinus densiflora* stands with different thinning intensities.

	Stand 1			Stand 2			
	Depth (cm)	Control	T20	T30	Control	T39	T74
Soil bulk density ($g\cdot cm^{-3}$)	0-10	0.76 (0.02)a	0.72 (0.03)a	0.74 (0.02)a	0.68 (0.04)a	0.76 (0.04)a	0.68 (0.02)a
	10-20	0.88 (0.04)a	0.83 (0.03)a	0.85 (0.03)a	0.79 (0.02)a	0.82 (0.03)a	0.74 (0.04)a
	20-30	0.96 (0.07)a	0.89 (0.05)a	0.86 (0.04)a	0.86 (0.03)a	0.87 (0.05)a	0.72 (0.04)b
	30-50	1.10 (0.06)a	1.01 (0.06)a	1.04 (0.06)a	0.87 (0.05)ab	0.92 (0.07)a	0.73 (0.05)b
Soil C storage ($t\cdot C\cdot ha^{-1}$)	0-10	28.39 (1.06)a	30.60 (1.59)a	31.76 (1.17)a	21.44 (2.80)ab	17.33 (1.08)b	26.61 (2.47)a
	10-20	19.45 (1.34)b	23.71 (0.65)a	24.85 (2.05)a	14.89 (1.37)b	12.26 (0.99)b	19.30 (1.41)a
	20-30	13.05 (1.31)b	16.82 (1.07)ab	18.75 (2.05)a	11.16 (1.27)b	8.98 (0.83)b	15.84 (1.28)a
	30-50	13.43 (1.61)b	19.28 (3.10)ab	24.32 (4.49)a	15.43 (1.85)ab	13.28 (2.53)b	21.05 (1.92)a
	Total	74.31 (4.64)b	90.41 (4.63)ab	99.68 (9.16)a	62.92 (4.54)b	51.85 (3.97)b	82.80 (5.36)a

Values with different letters indicate significant differences among three thinning intensities at $P < 0.05$. The values in parentheses are standard errors.

Table 3. Dry weight, carbon concentration and storage of forest floor and coarse woody debris for *Pinus densiflora* stands with different thinning intensities.

Stand	Treatment	Forest floor			Coarse woody debris		
		Dry weight (t·ha ⁻¹)	C concentration (%)	C storage (t·C·ha ⁻¹)	Dry weight (t·ha ⁻¹)	C concentration (%)	C storage (t·C·ha ⁻¹)
Stand 1	Control	19.97(1.98)a	47.84(0.45)a	9.57(0.96)a	5.78	48.79	2.80
	T20	13.54(1.15)b	46.71(0.82)a	6.36(0.60)b	2.99	47.32	1.40
	T30	14.72(1.11)b	47.85(0.87)a	7.06(0.58)b	6.49	47.12	3.06
Stand 2	Control	16.04(1.95)a	49.51(1.36)a	7.81(0.83)a	2.66	49.13	1.31
	T39	16.42(1.22)a	50.70(1.49)a	8.32(0.67)a	6.32	49.02	3.08
	T74	13.53(1.21)a	51.37(1.55)a	6.95(0.68)a	15.07	48.82	7.27

Values with different letters indicate significant differences among three thinning intensities at $P < 0.05$. The values in parentheses are standard errors.

지 1의 낙엽층 탄소 농도는 간벌 강도별로 통계적인 차이를 보이지 않았으며, 낙엽층 탄소 저장량은 대조구가 T20 처리구와 T30 처리구에 비해 통계적으로 유의하게 높았다. 연구지 2에서는 간벌 처리에 의한 낙엽층 탄소 농도와 탄소 저장량의 통계적인 차이를 보이지 않았다. 연구지 1의 낙엽층 탄소 농도가 간벌 처리에 따른 통계적인 차이를 보이지 않았으나, 대조구 낙엽층 탄소 저장량이 간벌 처리구에 비해 통계적으로 유의하게 높은 결과를 보인 이유는 대상지에 존재하는 낙엽층 건중량의 차이 때문으로 판단된다(Table 3). Jonard et al.(2006)의 연구에 의하면 간벌 강도가 증가할수록 낙엽층 탄소 저장량이 통계적으로 유의하게 낮아졌는데, 이는 간벌 처리구의 낙엽낙지 감소, 낙엽낙지의 CO₂ 방출, 토양으로의 유기물 손실로 인한 낙엽층 질량 감소가 그 원인인 것으로 분석하였다. 간벌 처리구의 낙엽층 분해율이 높아져서 대조구보다 낮은 낙엽층 건중량이 관찰되었다는 연구결과도 있다(Novák et al., 2013). 처리에 따라 통계적인 차이를 보이지는 않았지만 간벌 강도가 증가함에 따라 낙엽층의 탄소 저장량이 감소하는 경향을 보인 Ruiz-Peinado et al.(2013)의 보고에서도 간벌 강도의 증가로 인한 낙엽층 탄소 저장량 감소 경향에 대하여 간벌 이후의 낙엽 유입량 감소가 원인일 것으로 추정하였다.

연구지 1의 고사목 탄소 농도(%)와 탄소 저장량(t·C·ha⁻¹)은 각각 대조구 48.79와 2.80, T20 처리구 47.32와 1.40, T30 처리구 47.12와 3.06 등으로 나타났으며, 연구지 2의 경우 대조구 49.13과 1.31, T39 처리구 49.02와 3.08, T74 처리구 48.82와 7.27 등으로 나타났다(Table 3). 연구지 1의 고사목 탄소 저장량은 간벌 처리에 따른 특별한 경향을 보이지 않았으며, 연구지 2의 고사목 탄소 저장량은 간벌 강도가 강해질수록 높아지는 경향을 보였다. 낙엽층에서와 마찬가지로 고사목 건중량의 차이가 고사목 탄소 저장량의 차이를 가져오는 요인으로 작용하였다. 벌채와 간벌과 같은 시업활동은 남겨진 수목의 생육공간을 확보

하여 경쟁을 완화시킴으로써 시업활동이 이루어진 처리구는 대조구보다 고사목이 적게 발생하였다고 보고한 연구(Duvall and Grigal, 1999)와 시업 처리구의 고사목 탄소 저장량이 대조구보다 낮게 나타난 연구가 있다(Chatterjee et al., 2009; Powers et al., 2011; Ruiz-Peinado et al., 2013). 기존의 연구사례와 다르게 본 연구의 연구지 2에서 간벌 강도가 강해질수록 고사목 탄소 저장량이 높게 나타났는데, 이는 간벌 강도가 강해질수록 간벌작업 중에 유입되는 고사목의 양이 증가하였기 때문으로 판단된다. Olajuyigbe et al.(2011)의 연구에서는 간벌시행 횟수가 증가할수록 고사목 탄소 저장량이 증가하였으며, 간벌작업 중에 유입되는 고사목의 양을 중요한 원인으로 분석하였다.

3. 총 탄소 저장량

토양, 낙엽층, 고사목의 총 탄소 저장량(t·C·ha⁻¹)은 각각

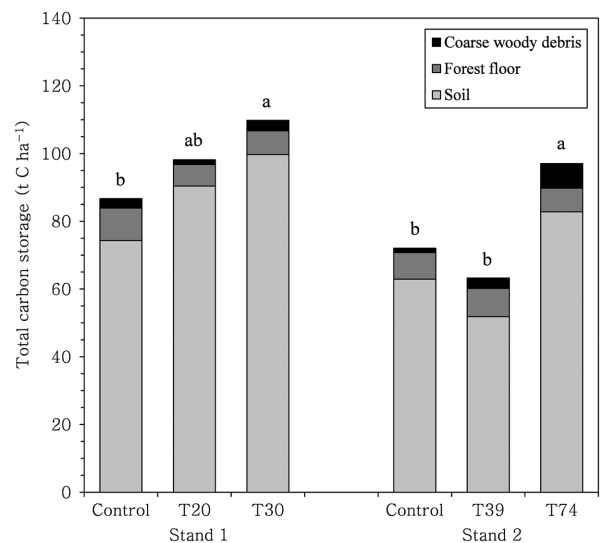


Figure 2. Total carbon storage of soil, forest floor and coarse woody debris for *Pinus densiflora* stands with different thinning intensities. Different letters indicate significant differences among treatments within each study stand ($P < 0.05$).

연구지 1에서 대조구 86.69, T20 처리구 98.17, T30 처리구 109.80 등으로 나타났으며, 연구지 2의 경우 대조구 72.04, T39 처리구 63.25, T74 처리구 97.02 등으로 나타났(Figure 2). 연구지 1의 총 탄소 저장량은 T30 처리구가 대조구에 비해 통계적으로 유의하게 높았으며, 연구지 2의 총 탄소 저장량은 T74 처리구가 대조구와 T39 처리구에 비해 통계적으로 유의하게 높았다. 총 탄소 저장량 중 토양 탄소 저장량은 연구지 1에서 85.7-92.1%, 연구지 2에서 82.0-87.3% 등의 범위로 가장 높은 비율을 차지하였다. 연구지 2개소에서 낙엽층 탄소 저장량은 총 탄소 저장량 대비 6.4-13.2%의 비율을, 고사목 탄소 저장량은 총 탄소 저장량 대비 1.4-7.5%의 비율을 각각 차지하였다. 총 탄소 저장량 중 토양 탄소 저장량이 차지하는 비율이 가장 높은 만큼 간벌 처리로 인한 토양 탄소 저장량의 차이가 처리 간의 총 탄소 저장량 차이에 크게 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. Jurgensen et al.(2012)은 *Pinus resinosa* 임분에서의 간벌 처리가 낙엽층과 토양의 탄소 저장량에 영향을 미치지 않았다고 보고했다. 토양 탄소 저장량은 토양 교란의 정도, 간벌 잔재물의 유입, 낙엽낙지 비율에 따라 달라질 수 있으며(Jandl et al., 2007), 수확 잔재물을 존치하고 낙엽층의 교란이나 제거를 피함으로써 토양의 탄소 흡수와 양분 유지를 증진시킬 수 있다(Jones et al., 2008). 산림사업이 토양의 탄소와 질소 저장량에 미치는 영향에 관하여 메타분석을 수행한 Johnson and Curtis(2001)에 의하면 잔재물 제거가 토양 A층의 탄소를 감소시킨 반면, 잔재물의 존치가 침엽수에 한하여 토양 탄소를 증가시켰다. 수확 잔재물 뿐만 아니라 수확 후 남겨진 근주가 토양 탄소 저장량에 미치는 영향을 분석한 연구에서 잔재물과 근주를 모두 수확한 경우 수간만을 수확하는 전통적인 방식보다 토양 탄소 저장량이 낮게 나타났다고 보고하였는데(Strömgren et al., 2013), 본 연구에서도 간벌 잔재물이 연구지에 존치됨으로써 총 탄소 저장량에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2012년 국립산림과학원 산림생산기술연구소의 지원을 받아 수행된 '수종별 산림사업에 따른 지하부 탄소 저장량 동태분석' 연구결과의 일부입니다.

인용문헌

- Campbell, J., Alberti, G., Martin, J., and Law, B.E. 2009. Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada. *Forest Ecology and Management* 257: 453-463.
- Chatterjee, A., Vance, G.F., and Tinker, D.B. 2009. Carbon pools of managed and unmanaged stands of ponderosa and lodgepole pine forests in Wyoming. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 1893-1900.
- Clark, D.B., Clark, D.A., Brown, S., Oberbauer, S.F., and Veldkamp, E. 2002. Stocks and flows of coarse woody debris across a tropical rain forest nutrient and topography gradient. *Forest Ecology and Management* 164: 237-248.
- Duvall, M.D. and Grigal, D.F. 1999. Effects of timber harvesting on coarse woody debris in red pine forests across the Great Lakes states, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1926-1934.
- Grace, J.M., III, Skaggs, R.W., and Cassel, D.K. 2006. Soil physical changes associated with forest harvesting operations on an organic soil. *Soil Science Society of America Journal* 70: 503-509.
- Harmon, M.E. and Sexton, J. 1996. Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems. US LTER Network Office. Seattle, WA, U.S.A. pp. 73.
- Hoover, C.M. 2011. Management impacts on forest floor and soil organic carbon in northern temperate forests of the US. *Carbon Balance and Management* 6: 17.
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D.W., Minkinen, K., and Byrne, K.A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137: 253-268.
- Johnson, D.W. and Curtis, P.S. 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management* 140: 227-238.
- Jonard, M., Misson, L., and Ponette, Q. 2006. Long-term thinning effects on the forest floor and the foliar nutrient status of Norway spruce stands in the Belgian Ardennes. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 2684-2695.
- Jones, H.S., Garrett, L.G., Beets, P.N., Kimberley, M.O., and Oliver, G.R. 2008. Impacts of harvest residue management on soil carbon stocks in a plantation forest. *Soil Science Society of America Journal* 72: 1621-1627.
- Jurgensen, M., Tarpey, R., Pickens, J., Kolka, R., and Palik, B. 2012. Long-term effect of silvicultural thinnings on soil carbon and nitrogen pools. *Soil Science Society of America Journal* 76: 1418-1425.
- 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.
- Korea Forest Research Institute. 2010. Survey manual for biomass and soil carbon. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. pp. 60.
- Korea Forest Service. 2012. Statistical yearbook of forestry. Korea Forest Service. Daejeon, Korea. pp. 488.
- Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220: 242-258.
- Landsberg, J.D., Miller, R.E., Anderson, H.W., and Tepp, J.S. 2003. Bulk density and soil resistance to penetration as

- affected by commercial thinning in northeastern Washington. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Research Paper PNW-RP-551.
- Lee, S.K., Son, Y., Noh, N.J., Heo, S.J., Yoon, T.K., Lee, A.R., Razak, S.A., and Lee, W.K. 2009. Carbon storage of natural pine and oak pure and mixed forests in Hoengseong, Kangwon. *Journal of Korean Forest Society* 98: 772-779.
- Nave, L.E., Vance, E.D., Swanston, C.W., and Curtis, P.S. 2010. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management* 259: 857-866.
- Nilsen, P. and Strand, L.T. 2008. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand after 33 years. *Forest Ecology and Management* 256: 201-208.
- Nobles, M.M., Dillon Jr., W., and Mbila, M. 2009. Initial response of soil nutrient pools to prescribed burning and thinning in a managed forest ecosystem of northern Alabama. *Soil Science Society of America Journal* 73: 285-292.
- Noh, N.J., Son, Y., Lee, S.K., Seo, K.W., Heo, S.J., Yi, M.J., Park, P.S., Kim, R.H., Son, Y.M., and Lee, K.H. 2010. Carbon and nitrogen storage in an age-sequence of *Pinus densiflora* stands in Korea. *Science China Life Sciences* 53: 822-830.
- Novák, J., Slodičák, M., Dušek, D., and Kacálek, D. 2013. Norway spruce litterfall and forest floor in the IUFRO thinning experiment CZ 13-Vitkov. *Journal of Forest Science* 59: 107-116.
- Olajuyigbe, S.O., Tobin, B., Gardiner, P., and Nieuwenhuis, M. 2011. Stocks and decay dynamics of above- and below-ground coarse woody debris in managed Sitka spruce forests in Ireland. *Forest Ecology and Management* 262: 1109-1118.
- 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.
- Ruiz-Peinado, R., Bravo-Oviedo, A., López-Senespleda, E., Montero, G., and Río, M. 2013. Do thinnings influence biomass and soil carbon stocks in Mediterranean maritime pine woods? *European Journal of Forest Research* 132: 253-262.
- Selig, M.F., Seiler, J.R., and Tyree, M.C. 2008. Soil carbon and CO₂ efflux as influenced by the thinning of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations on the Piedmont of Virginia. *Forest Science* 54: 58-66.
- Shaw, J.N. and Carter, E.A. 2002. Timber harvesting effects on spatial variability of southeastern U.S. Piedmont soil properties. *Soil Science* 167: 288-302.
- Strömgren, M., Egnell, G., and Olsson, B.A. 2013. Carbon stocks in four forest stands in Sweden 25 years after harvesting of slash and stumps. *Forest Ecology and Management* 290: 59-66.
- Tang, J., Qi, Y., Xu, M., Misson, L., and Goldstein, A.H. 2005. Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada. *Tree Physiology* 25: 57-66.

(2013년 12월 4일 접수, 2014년 1월 6일 채택)