

중부지역 일본잎갈나무림의 친환경벌채가 산림 내 유기물 변화에 미치는 초기 영향

왕예가¹ · 김동엽^{2*}

¹성균관대학교 조경학과, ²성균관대학교 건설환경공학부

Early Effect of Environment-friendly Harvesting on the Dynamics of Organic Matter in a Japanese Larch (*Larix leptolepis*) Forest in Central Korea

Wang Rui Jia¹ and Kim Dong Yeob^{2*}

¹Department of Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

²School of Civil, Architectural Engineering and Landscape Architecture,
Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

요약: 우리나라의 친환경벌채는 생태계, 경관 및 산림재해 방지 기능을 유지하도록 실행되고 있으며, 벌채 시 임목 중 일부를 남겨 임지가 일시에 드러나는 것을 방지하고 있다. 경기도 포천시 신북면 심곡리에 위치하고 있는 연구대상지에서 벌기령에 이른 41~50년생 일본잎갈나무림이 2017~2019년에 걸쳐 2년간 벌채되었다. 벌채 3년 후 산림 내 유기물 분포 및 변화를 측정하여 벌채에 따른 산림 내 유기물의 동태를 규명하는 것을 목적으로 하였다. 2020년 6월부터 2021년 1월까지 지상부 바이오매스, 낙엽층, 낙엽생산량 및 토양(0-30m 깊이)의 유기물 함량을 측정하였다. 친환경벌채가 이루어진 일본잎갈나무림의 지상부 바이오매스는 142.22 t ha⁻¹에서 44.20 t ha⁻¹로 감소하였다. 낙엽층의 유기물 함량은 미벌채구에서 32.87 t ha⁻¹였으며, 친환경벌채구에서 23.34 t ha⁻¹로 감소하였다. 연간 낙엽생산량은 미벌채구에서 4.43t ha⁻¹yr⁻¹였으며, 친환경벌채구에서 1.16t ha⁻¹ yr⁻¹로 감소하였다. 토양용적밀도는 미벌채구 토양 B층이 0.97 g cm⁻³였으며 친환경벌채 후 1.06 g cm⁻³로 증가하였다. 토양유기물 함량은 미벌채구 토양 A층에서 11.5%였으며 벌채 후 12.8%로 증가하였다. 토양유기물 총량은 대조구와 친환경벌채구에서 각각 245.21 t ha⁻¹과 263.92 t ha⁻¹로 유의성 있는 변화를 보이지 않았으나, 전체적으로 벌채 후 증가하는 경향을 보였다. 일본잎갈나무림 내 유기물 총량은 406.48 t ha⁻¹였으며 친환경벌채로 인하여 338.21 t ha⁻¹로 감소하였다. 벌채 후 산림 내 지상부 유기물 비율은 13.1%로 감소하였으며, 토양유기물은 78.0%로 증가하여 산림 내 유기물 분포가 변화한 것으로 나타났다. 본 연구의 결과 친환경벌채는 지상부에 축적된 탄소가 크게 소실된 반면 토양 내에 저장된 탄소량의 증가로 전체적으로 산림 내 탄소 저장량의 감소 규모가 완화된 것을 보여주고 있다. 이 결과는 기후 변화에 대응할 수 있는 산림 관리 방안의 마련을 위한 기초가 될 것으로 생각된다. 본 연구는 친환경벌채 후 3년이 지난 시점에서 얻은 결과를 보여 주었으며, 이후의 산림 변화를 파악하기 위하여 산림 유기물의 변화와 수목 생장에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 보인다.

Abstract: Environment-friendly harvesting is practiced to maintain ecosystem, landscape, and forest protection functions. The present study was conducted at Simgok-ri, Sinbuk-myeon, Pocheon, Gyeonggi-do, where a 41–50-year-old Japanese larch forest was harvested in an environment-friendly manner from 2017 to 2019. The dynamics of organic matter in this forest were investigated at three years after the harvest. Specifically, organic matter content was measured on the forest floor and in overstory biomass, litterfall, and soil up to 30 cm in depth from June 2020 to January 2021. Owing to the harvest, the amount of overstory biomass of the Japanese larch stands decreased from 142.22 to 44.20 t ha⁻¹. On the forest floor, the amount of organic matter was 32.87 t ha⁻¹ in the control plots and

* Corresponding author
E-mail: ydkim@skku.ac.kr

ORCID

Kim Dong Yeob  https://orcid.org/0000-0003-4923-795X

23.34 t ha⁻¹ in the harvest plots. Annual litterfall was 4.43 t ha⁻¹ yr⁻¹ in the control plots and 1.16 t ha⁻¹ yr⁻¹ in the harvest plots. Soil bulk density in the B horizon was 0.97 g cm⁻³ in the control plots and 1.06 g cm⁻³ in the harvest plots. Soil organic matter content was 11.5% in the control plots and 12.8% in the harvest plots. The total amount of soil organic matter did not differ significantly between the control plots (245.21 t ha⁻¹) and harvest plots (263.92 t ha⁻¹), although the amount of soil organic matter tended to be higher in the harvest plots. The total amount of organic matter in the forest was estimated to be 406.48 t ha⁻¹ in the control plots and 338.21 t ha⁻¹ in the harvest plots. In the harvest plots, the ratio of aboveground organic matter decreased to 13.1% and soil organic matter increased to 78.0%, indicating that the distribution of organic matter changed significantly in these plots. Overall, the carbon accumulated in aboveground biomass was substantially reduced by environment-friendly harvesting, whereas the soil carbon level increased, which played a role in mitigating the reduction of system carbon in the forest. These results highlight one possible resolution for forest management in terms of coping with climate change. However, given that only three years of environment-friendly harvesting data were analyzed, further research on the dynamics of organic matter and tree growth is needed.

Key words: environment-friendly harvesting, organic matter content, aboveground biomass, litterfall, soil organic matter

서 론

기후변화에 대한 관심이 높아지고 있는 상황에서 지구의 대기 중 이산화탄소를 줄여주는 산림의 역할은 더욱 중요하게 여겨지고 있다. 산림은 탄소를 흡수하여 유기물 형태로 저장함으로써 대기 중 탄소 변화의 균형을 유지하는 역할을 한다. 산림의 목재 자원을 이용하기 위한 벌채는 산림 관리의 기초 작업이며 지속적인 산림경영을 위하여 중요한 과정으로서, 지금까지는 주로 목재 생산 이후 갱신 과정을 거쳐 진행되고 있다. 벌기령에 이른 산림은 벌채를 통하여 자원을 활용하고 갱신 후 산림의 탄소 흡수 원으로서의 역할을 유지해야 한다. 전통적인 방식의 산림 벌채인 모두베기는 여러 가지 문제를 초래할 수 있다. 벌채 후 쉽게 임지가 황폐되고 해로운 식생이 침입하며 기후변동의 피해를 심하게 입을 수 있다.

따라서 산림을 벌채하면서 환경에 미치는 영향을 최소화하려는 목적으로 친환경벌채가 제시되었다. 친환경벌채는 산림의 지속가능성을 증진하고 개선된 벌채 방식을 통해 환경 친화적인 생태계 경영을 가능하게 한다(Tak, 2000; Park et al., 2012). 이 벌채 방식은 벌채 면적이 5 ha 이상인 모두베기에 적용하고 있으며 산림 벌채 구역의 10% 이상의 면적을 벌채하지 않고 유지함으로써 탄소 흡수 기능 유지, 수계 보호, 토사 유출 방지, 야생동물 서식지 보존 등을 꾀한다. 이는 군상 잔존구와 수림대를 적절히 배치하여 산림 영향권을 확보하는 자연친화적 임목베기이다. 친환경벌채는 모두베기와 다르게 급격한 환경 변화를 초래하지 않고 효율적인 조림이 가능한 산림 벌채 방식이다. 이를 통해 벌채 후에도 산림 내 생물종다양성 확보 등 산림생태계 기능의 안정적인 유지를 꾀하는 방식이다.

친환경벌채에 따른 산림의 식생, 곤충 변화 및 식생 회복에 대한 연구가 진행된 바 있다(Oh et al., 2004; Chung

and Kim, 2020). 친환경벌채는 산림 내 유기물의 양에 변동을 가져오며, 유기물의 분포에 많은 변화를 초래할 것으로 예상된다. 그러므로 선행 연구에 더하여 산림 생태 환경의 변화를 살피기 위하여 친환경벌채 후 산림 내 유기물 및 탄소저장량 변화가 기존의 벌채 방식과 어떠한 차이가 있는지에 대해서도 알아볼 필요가 있다. 산림의 임목과 토양은 대기 중 이산화탄소 농도 저감을 위한 중요한 탄소 저장고이다. 교토의정서에 따라 국가 차원의 통계를 구축하기 위해서 고유의 탄소배출계수 개발과 탄소저장량 측정의 필요성을 제시하고 있다.

일본잎갈나무는 산림청이 추진하고 있는 경제림 조성용 중점 조림수종으로서 소나무, 잣나무, 참나무류와 함께 강원, 경북지방에 추천되고 있는 수종이다. 일본잎갈나무는 1970년을 전후해서 주요 조림수종으로 식재되었기 때문에 현재 벌기령에 이른 산림이 많이 있다. 본 연구에서는 경기도 포천시에 위치한 임령 40~50년의 일본잎갈나무림에서 친환경벌채 작업이 진행 된 후 3년이 경과한 시점에서 산림 내 유기물의 변화를 지상부, 낙엽층, 토양층으로 구분하여 살펴보고, 이를 바탕으로 산림의 유기물 변동과 탄소저장 능력의 변화에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 친환경벌채는 산림 내 유기물의 양에 변동을 가져오며, 유기물의 분포에 많은 변화를 초래할 것으로 예상된다. 그 변화는 간별로 인하여 초래되는 산림의 변화에 비하여 훨씬 클 것으로 예측된다. 기존 연구에 보고된 간벌의 영향과 비교하여 산림 내 유기물의 변화에 어떠한 차이가 있는지 살피고자 하였다.

연구 방법

1. 연구조사지

연구대상지는 경기도 포천시 신북면 심곡리에 위치하고

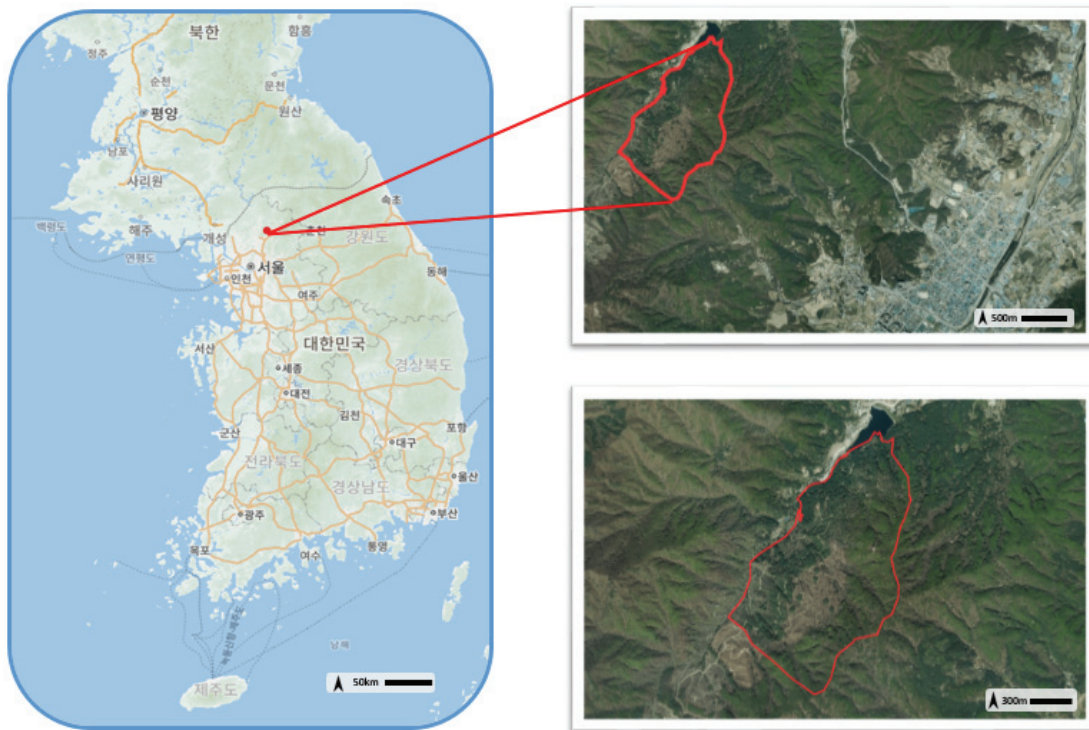


Figure 1. The location of the study site in Pocheon, Gyeonggi-do.

있으며, 총 면적은 1,195,125 m², 고도는 552 m이다 (Figure 1). 포천시의 30년간 기후는 연평균기온 11.74°C이며 연평균최고기온 35.06°C, 연평균최저기온 16.59°C, 1월 평균기온은 -3.6°C, 8월 평균기온은 24.6°C이다. 연평균 강수량은 1,441 mm로서 하계에 강우가 집중되는 내륙성 기후의 특성을 나타내는 지역이다(Korea Meteorological Administration, 2021). 연구대상지의 토양은 대부분 갈색 토양 위주이며 모암은 화강암 또는 화강편암이다. 모래의 함량이 상대적으로 높고 대부분 배수 능력이 양호한 토양이다. 대부분 토양은 사양질 내지 식양질이다. 이 지역은 식생이 발달하여 토양 침식 위험이 적지만 급경사지에는 침식 흔적이 많이 보인다.

식생은 주로 네 개의 군락으로 구성되어 있다. 고도가 낮은 곳으로부터 잣나무군락, 일본잎갈나무군락, 신갈나무군락, 소나무군락의 순서로 분포하고 있다(Lee et al., 2008). 일본잎갈나무군락은 해발고 250~452 m 사이에 분포한다. 경사는 7-32°로 비교적 완만한 편이며, 교목층의 평균 수고는 15 m이다. 주요 출현종은 일본잎갈나무, 팔배나무이며 평균 출현종 수는 29종이다. 평균 피도는 교목층이 89%, 아교목층이 57%, 관목층이 44%이고 아교목층이 다른 군락에 비해 높은 값을 보였다.

일본잎갈나무는 1970년 이후 산림의 중간 고도 지역에 조림되었다. 일본잎갈나무림은 임령 40~50년으로 벌기

령에 도달하였으며, 학술림 관리 목적을 위하여 2017~2019년에 걸쳐 친환경벌채가 이루어졌다. 1차 시업지는 능선 및 배사면 도로에 연결한 가시권 골짜기를 중심으로 골라베기가 시행되었다. 작업 면적은 23.4 ha였으며 생산 재적은 15%였다. 2차 시업지는 친환경벌채 요령에 따른 수확벌채를 하였다. 작업 면적은 23.6 ha이며 생산 재적은 50-90%였다. 벌채 총면적은 47 ha였다. 벌채 이후 산림의 임목 축적은 감소하였으며 임상에도 많은 변화가 나타났다. 연구 대상지는 2018년에 벌채 작업이 진행된 지역에서 선정되었다.

2. 산림 내 유기물 측정

1) 지상부 유기물

연구조사지에 친환경벌채구(H1~H4)와 미벌채 지역의 대조구(C1~C4)를 선정하고 20×20 m 크기의 조사구를 각 4개씩 총 8개소에 설치하였다(Table 1). 조사구에서 2020년 7월부터 2021년 1월까지 7차례에 걸쳐 상층목의 수고, 흉고직경(DBH), 수령, 임분밀도를 측정하였다. 식생은 임분 내 각 층별로 주요 우세종의 높이, DBH 및 피도를 조사하였다.

산림의 지상부 생물량을 추산하기 위한 상대생장식에는 일반적으로 수고와 DBH가 사용된다. 본 연구에서는 산림의 지세가 복잡하여 수고를 측정하기 어려운 점을 고려해

Table 1. Stand characteristics of the experimental plots in Pocheon, Gyeonggi-do.

Plot	Location	Altitude (m)	Stand age (year)	Harvest intensity (%)	Slope (°)	Stand density (# ha ⁻¹)	Mean DBH (cm)	Mean tree height (m)
C1	37°55'129"N 127°10'033"E	260	39	0	2	475	34.9	22.6
C2	37°54'816"N 127°09'961"E	320	45	0	20	450	25.7	22.3
C3	37°54'805"N 127°09'9.9"E	320	44	0	20	475	25.8	21.6
C4	37°54'794"N 127°09'985"E	340	36	0	25	525	24.3	20.0
H1	37°54'879"N 127°10'061"E	320	39	90	18	100	35.2	26.2
H2	37°54'877"N 127°10'077"E	325	38	90	18	50	29.5	23.1
H3	37°55'797"N 127°10'000"E	330	48	90	36	75	43.8	23.7
H4	37°54'799"N 127°09'981"E	330	40	90	31	75	36.8	25.8

서 DBH를 독립변수로 하는 추정식($Y=aD^b$)을 적용하였다. 조사구 내 DBH 0.5 m 이상인 임목에 대하여 측정된 값을 일본잎갈나무의 건중량 추정 회귀식에 적용하였으며, 수목의 지상부와 지하부에 저장된 바이오매스량을 계산하였다(Son et al., 2014). 그리고 수목의 목질부 탄소 함량은 바이오매스량을 탄소로 전환하여 추정하였다. 한국의 주요 수종 목질부 탄소 함량은 47%~51%이며(National Institute of Forest Science, 2010), 이 값은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)가 제공한 탄소전환 계수인 0.5와 거의 비슷하다. 본 연구에서는 측정된 값에 일본잎갈나무 목질부 탄소 함량인 50.1%를 적용하였다.

2) 낙엽층 유기물

낙엽층 유기물 함량 측정을 위하여 각 조사구 내에서 훼손되지 않은 곳 5지점을 선정하였다. 2020년 9월 초에 30×30 cm의 방형구 틀을 이용하여 낙엽층 시료를 채취하고 실험실로 운반하였다. 낙엽층 시료를 건조기에 65°C에서 48시간 이상 건조 후 무게를 측정하였다. 낙엽층의 탄소 저장량은 낙엽층 건중량에 탄소계수를 곱하여 산출하였다. 우리나라 수종의 낙엽층 탄소 함량은 32.03~47.79%이며(National Institute of Forest Science, 2010), 이 중에서 일본잎갈나무의 낙엽층 탄소 함량은 37.43%였다. 이는 IPCC에서 제시한 유기물층의 탄소전환계수인 0.37과 비슷하였다. 본 연구에서는 낙엽층탄소전환계수 0.37을 적용하여 계산하였다.

연간 낙엽 생산량 측정을 위하여 낙엽층 시료를 채취한

후 바로 30×30 cm보다 조금 크게 제작한 그물망을 설치하였다. 낙엽 시기가 지난 2021년 1월 이후 낙엽을 채취하여 건조기에 넣고 65°C에서 48시간 이상 건조 시킨 후 건중량을 측정하였다. 일본잎갈나무의 경우 10~12월에 일 년 중 낙엽 총량의 93%가 축적되는 것으로 나타났다(Lee and Son, 2006). 본 연구에서 이 시기에 채취한 낙엽은 한 해 낙엽의 총 생산량에 해당되는 것으로 간주하였다.

3) 토양 유기물

토양 시료는 각 조사구의 낙엽층 시료 채취 후 같은 장소에서 채취하였다. 시료는 지표면에서 30 cm 깊이까지 채취하였고, 이를 A층과 B층으로 분리하였다. A층의 깊이가 30 cm를 초과한 경우 A층 시료만 채취하였다. 채취한 토양은 실험실로 운반하여 실내에서 풍건하고 2 mm 체(US standard No. 10)를 이용하여 고른 후 보관하였다. 토양유기물 함량은 연소법과 습식법으로 측정하였고 두 값의 평균값을 계산하였다. 연소법은 채취된 토양 시료를 전기로에서 연소시킨 후 중량을 측정하였다. 습식법은 Walkley-Black wet oxidization procedure를 이용하였다. 자체열을 이용하여 Chromic acid로 산화시켜 생성되는 물질을 측정하여 탄소 함량을 산출하였고, 계산식을 이용하여 단위 토양 내 유기물 함량을 계산하였다(Agricultural Technology Research Institute, 1988). 그리고 토양탄소환산계수 1.724를 적용하여 토양탄소 함량을 계산하였다.

토양유기물도를 측정하기 위하여 토양시료 채취용 코어를 이용하여 A층과 B층의 시료를 채취하고 각 층의 깊이

를 측정하였다. 채취한 토양 시료를 전기로에서 105°C에 24시간 연소시킨 후 건중량을 측정하였다.

4) 통계분석

일본잎갈나무림의 지상부 바이오매스, 낙엽층, 토양유기물의 친환경벌채에 따른 변화를 ANOVA를 이용하여 0.05% 유의수준에서 유의성 검정을 하였으며, 평균값의 사후 검정은 LSD를 이용하였고, 분석에 SPSS Ver. 25 프로그램을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 산림 식생

대조구에서는 교목층에 일본잎갈나무, 아교목층에 가중나무, 생강나무, 쪽동백나무가 우점하였으며 초본층에 주름잎조개풀이 우점하였다(Table 2). 평균 식피율은 교목층 30%, 아교목층 30%, 관목층 25%, 초본층 20%였다. 대조구 식생의 평균 높이는 교목층 21.6 m, 아교목층 5-6 m, 관목층 2-3 m, 초본층 10 cm였다. 평균 흉고직경은 교목층 27.7 cm, 아교목층 4-5 cm, 관목층 2-3 cm였다.

친환경벌채 후 산림의 임상은 큰 교란을 받았으며, 관목층과 지피층에서도 그 정도가 심하였다. 교목층은 10% 정도의 임목에 식피율은 12%였으며, 아교목층 수목은 거의 제거되었다. 관목층도 많이 감소되었지만, 지피층의 식피율이 특히 높았다. 산림 간벌과 비교했을 때 간벌지의 식

생은 간벌 강도에 따라 차이를 보이지만, 대부분은 간벌지에서 식생의 변화가 크지 않았다. 경남 함양군 서하면의 참나무 임분 간벌 구역에서 교목층, 아교목층, 관목층의 식생에 큰 변화는 없었다(Park et al., 2013). 오대산 일본잎갈나무 인공림 간벌지에서는 새로 유입된 흉고직경 2 cm 이상의 수목은 없었으며 하층에 상당히 많은 양의 초본이 유입되었다(Um, 2015). 간벌 구역에서 흉고직경은 높았지만, 수고는 대조구에서 더 높았다(Park et al., 2013). 본 연구의 결과 친환경벌채로 교목층 수목이 상당히 감소하였고, 아교목층과 관목층 수목도 간벌에 비하여 크게 감소한 것으로 나타났다.

2. 산림 내 유기물 변화

1) 지상부 유기물

일본잎갈나무의 지상부 바이오매스는 대조구에서 142.22 t ha⁻¹였다. 이 값은 20년생 편백림 114.14 t ha⁻¹(Park et al., 2000), 26-33년생 곶솔림 113.12 t ha⁻¹(Park and Kim, 2018) 보다 높았다. 41년생 소나무림 143.27 t ha⁻¹과는 비슷한 결과를 보였다(Seo et al., 2010). 본 연구에서 일본잎갈나무림의 바이오매스는 친환경벌채로 44.20 t ha⁻¹가 남게 되었다(Table 3). 탄소환산계수 50.1%를 적용한 일본잎갈나무림의 탄소 저장량은 대조구에서 71.11 t C ha⁻¹였으며, 친환경벌채구에서 22.13 t C ha⁻¹였다. 간벌의 경우와 비교했을 때 강원도 지역의 64년생 굴참나무림에서는 10% 강도의 간벌 3년 후 9.9 t C ha⁻¹의 탄소가 감소하였고,

Table 2. Characteristics of the vegetation in the study site.

Treatment	Vegetation layer	Height (m)	DBH (cm)	Coverage (%)	Dominant species
Control	Overstory	21.6	27.7	70	<i>Larix leptolepis</i>
	Understory	5~6	4~5	30	<i>Styrax obassia</i>
	Shrub	2~3	2~3	25	<i>Lindera obtusiloba</i>
	Herbaceous	0.1	-	20	<i>Oplismenus undulatifolius</i>
Harvest	Overstory	24.7	36.3	12	<i>Larix leptolepis</i>
	Understory	-	-	-	-
	Shrub	2~3	2~3	10	<i>Linderao obtusiloba</i>
	Herbaceous	0.3	-	80	<i>Rubus crataegifolius</i>

Table 3. Average biomass in control and harvest stands in the study site.

Treatment	Aboveground biomass	Aboveground C storage
	t ha ⁻¹	
Control	142.22±2.37	71.12±1.18
Harvest	44.20±1.25***	22.14±0.63***

***P<0.001 with t-test.

Table 4. Average litter biomass and annual litterfall in the study site.

	Litter biomass	Litter C accumulation	Annual litterfall	Annual C accumulation in litterfall	Litterfall accumulation ratio (F/B)
	t ha ⁻¹		t ha ⁻¹ yr ⁻¹		%
Control	32.87±0.26**	12.16±0.09**	4.43±0.36***	1.64±0.13***	13
Harvest	23.34±0.18	8.64±0.07	1.16±0.20	0.43±0.05	5

** P<0.01 with t-test.

*** P<0.001 with t-test.

20% 강도의 간벌구에서는 23.4 t C ha⁻¹의 탄소가 감소한 것으로 나타났다. 간벌 또는 벌채 후 지상부 탄소저장량은 계속 상승하고 중수도 증가하는 추세를 보였다(Kim et al., 2017; Oh et al., 2004). 친환경벌채지에서 일본잎갈나무림의 성장과 함께 식생이 회복되면 지상부 바이오매스 및 산림 내 탄소저장량은 빠르게 증가할 것으로 예상된다.

2) 낙엽층 유기물

낙엽층의 유기물 총량은 평균 32.87 t ha⁻¹였으며, 친환경벌채구에서 평균 23.34 t ha⁻¹로 감소하였다(Table 4). 낙엽층의 탄소환산계수 37%를 적용하면 일본잎갈나무림의 탄소 저장량은 평균 12.16 t C ha⁻¹을 보였다. 한국 일본잎갈나무림 낙엽층 평균 탄소 저장량이 9.49 t C ha⁻¹인 것에 비하여(Son et al., 2014) 본 연구지에서 낙엽층의 탄소 저장량이 높은 것으로 나타났다. 그러나 한국의 일본잎갈나무림 낙엽층의 탄소 저장량은 지역, 임령에 따라 차이가 많으며, 전체적으로는 본 연구의 결과와 비슷한 수준인 것으로 보인다. 본 연구에서 친환경벌채로 낙엽층의 탄소 저장량은 2.67 t C ha⁻¹ 감소했다.

연간 낙엽생산량은 평균 4.43 t ha⁻¹ yr⁻¹였다. 이 값은 경기도의 41년생 일본잎갈나무림에서 4.24 t ha⁻¹ yr⁻¹(Lee and Son, 2006), 경기도의 37년생 일본잎갈나무림에서 4.19 t ha⁻¹ yr⁻¹(Kim et al., 1996)를 보인 것과 비슷한 결과를 나타냈다. 친환경벌채 후 연간 낙엽 생산량은 1.16 t ha⁻¹ yr⁻¹로 감소하였다. 이는 상층 및 중간층 식생의 감소 때문으로 보인다. 매년 축적되는 낙엽은 산림의 환경이 큰 변화가 없을 때 매년 일정량을 유지한다(Sharma and Ambasht, 1987). 본 연구의 일본잎갈나무림의 낙엽 생산량은 낙엽층 유기물의 13%에 해당하며, 이 값은 친환경벌채구에서 5%로 감소하였다. 간벌과 비교했을 때 간벌 후에도 낙엽 생산량이 감소하는 것이 일반적이며, 강도가 높을수록 낙엽생산량이 더 많이 감소하는 것으로 알려져 있다(Roig et al., 2005). 친환경벌채의 경우 간벌보다 교란이 심하여 연간 낙엽 생산량 감소 폭이 큰 것으로 생각된다. 본 연구의 결과는 벌채 후 초기 3년간의 변화에 해당되는 것으로

서 향후의 낙엽 생산량 및 낙엽층 회복에 대한 검토가 필요한 것으로 생각된다.

3) 토양유기물

토양용적밀도는 대조구에서 A층 0.79 g cm⁻³, B층 0.97 g cm⁻³였다. 친환경벌채구에서는 A층 0.78 g cm⁻³였다, B층 1.06 g cm⁻³였다(Table 5). 토양용적밀도는 B층에서 친환경벌채의 영향이 남아 있는 것으로 생각된다. A층 토양은 벌채로 인한 답압에서 3년 동안 빠르게 회복한 것으로 보인다. 한국 산림의 III영급과 IV영급 지역에서 토양 용적밀도 평균은 A층 0.88 g cm⁻³, B층 1.01 g cm⁻³였으며(Chung et al., 2002), 산림토양의 평균 용적밀도는 A층 0.8 g cm⁻³, B층 1.0 g cm⁻³ 내외를 보였다(Korea Forest Service, 2010). 친환경벌채구의 B층 토양 용적밀도의 증가는 산림작업 시 산림기계 사용 때문으로 보인다. 산림에서 표층 토양은 심토에 비하여 벌채 시업 후 회복 속도가 더 빠른 것으로 나타났다(Park, 2002).

토양유기물 함량은 대조구 A층에서 평균 11.50%였고, B층에서 5.75%였다(Table 6). 친환경벌채구에서는 A층 평균 12.75%, B층 평균 5.49%였다. 친환경벌채에 의해 유기물 유입이 표토에 집중되어 A층의 토양유기물 함량이

Table 5. Average soil bulk density in the study site.

	Soil bulk density (g/cm ³)	
	A horizon	B horizon
Control	0.79 ± 0.02	0.97 ± 0.11
Harvest	0.78 ± 0.09	1.06* ± 0.11

* P<0.05 with t-test.

Table 6. Average soil organic matter content in the study site.

	Soil organic matter content (%)	
	A horizon	B horizon
Control	11.5 ± 0.45	5.75 ± 0.61
Harvest	12.75* ± 0.25	5.49 ± 0.78

* P<0.05 with t-test.

Table 7. Total amount of soil organic matter of the study site (30 cm depth).

	A horizon		B horizon		Total	
	Soil O.M.	Soil C	Soil O.M.	Soil C	Soil O.M.	Soil C
	t ha ⁻¹					
Control	189.95±5.67	110.18±3.29	55.26±0.98	32.05±0.57	245.21±4.61	148.03±2.59
Harvest	199.40±6.29	115.92±3.65	64.52±8.69	37.42±4.92	263.92±6.87	153.34±3.99

증가한 것으로 보인다. 한국의 침엽수림 A층 토양의 유기물 함량은 최고 17.90%, 최저 0.29%였으며, 평균 4.25%를 보였다(Lee and Koo, 2020). 벌채와 같은 산림 시업 후 낙엽, 낙지의 유입과 분해 증가로 토양 내 유기물 유입이 증가하게 된다.

대조구에서 A층 토양의 유기물 총량은 189.95 t ha⁻¹였으며, 친환경벌채구에서는 199.40 t ha⁻¹였다. B층 토양(30 cm 깊이)의 유기물 총량은 대조구에서 55.26 t ha⁻¹였으며, 친환경벌채구에서 64.52 t ha⁻¹였다(Table 7). 깊이 0~30 cm의 토양유기물 총량은 대조구에서 245.21 t ha⁻¹였으며, 친환경벌채구에서 263.92 t ha⁻¹인 것으로 나타났다. 친환경벌채에 의한 토양유기물 총량은 유의한 차이를 보이지 않았으나 A, B층 모두 벌채로 인해 증가하는 경향을 보였다.

토양탄소환산계수를 적용한 토양 A층의 탄소 저장량 평균값은 대조구에서 110.19 t C ha⁻¹였으며, 친환경벌채구에서 115.68 t C ha⁻¹였다. 토양 B층 탄소 저장량 평균값은 대조구에서 32.04 t C ha⁻¹였으며, 친환경벌채구에서 37.19 t C ha⁻¹였다. 토양 0~30 cm 깊이의 토양 총 탄소 저장량 평균값은 대조구에서 142.23 t C ha⁻¹였으며, 친환경벌채

구에서는 152.87 t C ha⁻¹로 나타났다. 친환경벌채지에서 토양 탄소 저장량이 증가하는 현상은 간벌에서도 비슷하게 나타난 바 있다. 강원도 지역 53년생 잣나무림에서 간벌 6년 후 토양 탄소 저장량은 대조구 93.4 t C ha⁻¹, 10% 간벌구 111.2 t C ha⁻¹로 대조구와 간벌구 간에 유의한 차이가 없었으나 간벌구에서 토양 탄소 저장량이 증가하는 경향을 보였다(Lee, 2019). 소나무림 간벌 시행 4년 후 30% 및 74% 강도의 간벌지에서 토양 탄소 저장량이 증가하였으며 간벌 강도가 높은 경우 토양 탄소 저장량이 증가하는 경향을 보였다(Yoon et al., 2014). 잣나무림에서 30~40% 강도의 간벌 시행 3~5년 후 12.8%의 토양 탄소 저장량 증가를 보였다(Lee et al., 2015). 본 연구에서 토양 유기물 총량에 미친 친환경벌채의 영향은 벌채 후 초기의 결과로서 이후 장기적인 관찰이 필요한 것으로 생각된다.

4) 산림 내 유기물 총량

일본잎갈나무림 내 유기물 총량은 대조구에서 420.30 t ha⁻¹였으며, 친환경벌채지에서 331.46 t ha⁻¹로 88.84 t ha⁻¹ 감소하였다(Figure 2). 친환경벌채 후 초기의 유기물 총량(바이오매스, 낙엽층, 토양) 중 지상부 바이오매스의 감소

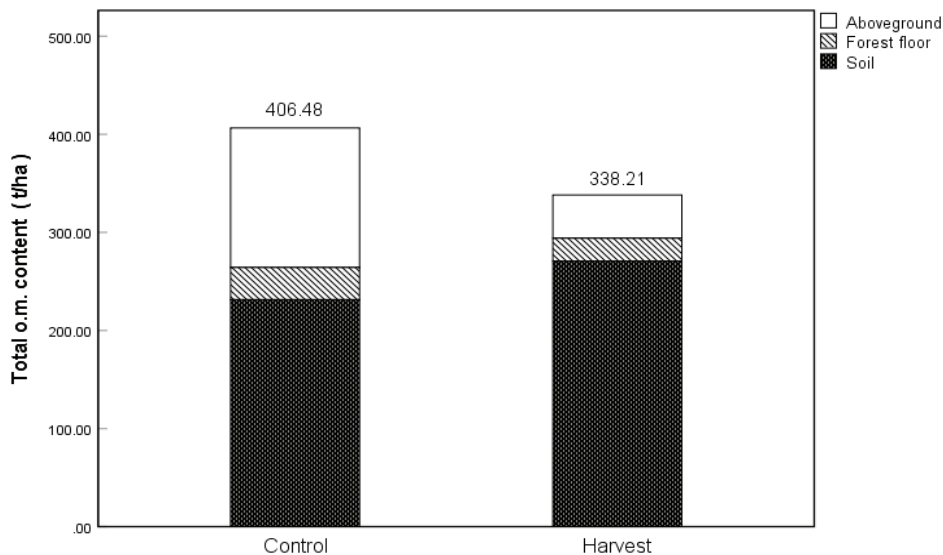


Figure 2. Total amount of organic matter in above ground vegetation, forest floor and soil layers for *Larix leptolepis* stands in comparison with environment-friendly harvesting.

가 대부분을 차지하였다. 벌채 후 지상부 유기물은 98.02 t ha^{-1} 감소하였고, 그 영향으로 낙엽층 유기물은 9.53 t ha^{-1} 감소하였다. 토양유기물은 유의성 있는 변화를 보이지는 않았지만 친환경벌채지에서 18.71 t ha^{-1} 증가하였다. 전체적으로 친환경벌채 후 산림 내 유기물의 분포가 변화하였으며, 산림 내 총 유기물 중에서 토양유기물의 비율이 크게 증가하는 양상을 보였다.

간벌의 경우 산림 내 유기물 총량은 감소하였다가 점차 증가하는 경향을 보인다(Lee et al., 2015). 친환경벌채는 간벌에 비하여 전체적으로 유기물 변화와 산림환경에 미치는 영향이 더 클 것으로 예측된다. 본 연구에서 친환경벌채 후 지상부 유기물은 대폭 감소하였으며, 낙엽층과 연간 낙엽생산량도 감소하였다. 친환경벌채가 토양 내 유기물 총량에 미치는 영향은 유의성이 없었으며 다른 간벌의 경우에도 비슷한 결과를 보였다. 전체적으로 산림 내 유기물 총량은 다양한 강도로 시행된 간벌의 경우보다 더 많이 감소한 것으로 나타났다. 본 연구의 결과 친환경벌채는 지상부에 축적된 탄소가 크게 소실된 반면 토양 내에 저장된 탄소량에 의해 산림 내 탄소 저장량의 감소 폭이 완화된 것을 보여주고 있다. 이 결과는 친환경벌채에 따른 산림 내 유기물 변동을 이해하고 산림 유기물 관리를 통하여 기후 변화에 대응할 수 있는 산림 관리 방안을 마련하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

결론

본 연구에서 일본잎갈나무림의 친환경벌채가 산림 내 유기물의 변화에 대하여 미치는 영향을 살펴보았으며, 그 결과를 간벌의 경우와 비교하였다. 친환경벌채가 산림 내 유기물에 미치는 영향은 지상부 바이오매스와 낙엽층 및 토양용적밀도에 집중적으로 나타났으며, 토양유기물 총량은 간벌의 경우와 마찬가지로 유의성이 없었으나 증가한 값을 보여 주었다. 일본잎갈나무림의 친환경벌채로 인하여 지상부 유기물은 68.9%, 낙엽층 유기물은 29.0% 감소하였다. 토양유기물 총량은 유의성 있는 변화를 보이지 않았으나 벌채 후 증가하였다. 일본잎갈나무림 내 유기물 총량은 친환경 벌채 후 21.18% 감소하였다. 친환경벌채 후 산림 내 유기물 총량에서 지상부 유기물의 비율은 13.1%로 감소한 반면, 토양유기물의 비율은 78.0%로 증가하였다. 그 결과 산림 내 유기물의 분포가 벌채 전에 비하여 크게 변화하였고, 친환경벌채 후 토양유기물이 산림 내 총 유기물의 대부분을 차지하게 되었다. 친환경벌채 후 산림 내 유기물 총량은 지상부에 축적된 탄소량이 대폭 감소되었지만, 토양 내에 저장된 탄소량에 의해 산림 내 총

탄소량의 감소폭이 완화된 것을 보여주고 있다. 친환경벌채에 따른 산림 내 유기물 변동에 관한 이해는 산림 유기물 관리를 통하여 기후 변화에 대응할 수 있는 산림 관리 방안을 찾아가는 데 도움을 줄 것으로 기대된다. 본 연구의 결과는 벌채 후 초기 결과로서 산림 내 유기물의 변동을 살펴본 것이며, 이후의 변화 양상을 파악하기 위해 중장기적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

References

- Agricultural Technology Research Institute. 1988. Analytical method of soil chemistry, soil, plant material, and soil microorganism. Rural Development Administration.
- Chung, J.H., Koo, K.S., Lee, C.H. and Kim, C.S. 2002. Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions. *Journal of Korean Forest Society* 91(6): 694-700.
- Chung, J. and Kim, H. 2020. Occurrence and growth characteristics of natural seedlings by harvest type in a *Larix kaempferi* forest. *Journal of Korean Forest Society* 109(4): 400-412.
- Kim, J.S., Cho, Y.C. and Bae, K.H. 2017. Recovery process of forest edge formed by clear-cutting harvest in Korean red pine (*Pinus densiflora*) Forest in Gangwondo, South Korea. *Journal of Korean Forest Society* 106(1): 1-9.
- Kim, J.S., Son, Y., Lim, J.H. and Kim, Z.S. 1996. Aboveground biomass, N and P distribution, and litterfall in *Pinus rigida* and *Larix leptolepis* plantations. *Journal of Korean Forest Society* 85(3): 416-425.
- Ko, S., Yoon, T.K., Kim, S., Kim, C., Lee, S.T., Seo, K.W. and Son, Y. 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.
- Korea Forest Service. 2010. Soil management, Technical report for specialized field.
- Korea Meteorological Administration. 2021. Weather report.
- Lee, A.L. and Koo, N. 2020. Comparison of soil physico-chemical properties according to the sensitivity of forest soil to acidification in the Republic of Korea. *Journal of Korean Forest Society* 109(2): 157-168.
- Lee, I.K. and Son, Y.H. 2006. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on nutrient dynamics and litterfall production of *Pinus rigida* and *Larix kaempferi*. *Journal of Ecology and Environment* 29(3): 205-212.
- Lee, J.S. 2019. Changes of the micro-environment and carbon cycle according to thinning of *Pinus koraiensis* forest. PH.D. dissertation. Konkuk University.

- Lee, J., Han, S.H., Kim, S., Lee, S., Son, Y.M. and Son, Y. 2015. A meta-analysis on the effect of forest thinning on diameter growth and carbon stocks. *Journal of Korean Forest Society* 104(4): 527-539.
- Lee, S.H., Lee, K.S. and Kim, J.C. 2008. Vegetation analysis at Sungkyunkwan University Forest. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 11(1): 85-95.
- National Institute of Forest Science. 2010. Carbon emission and biomass allometric equations by species in Korea. Seoul: Korea Forest Research Institute pp. 54.
- Oh, K.K., Choi, S.H., Park, S.K. and Shim, H.Y. 2004. Change of vegetation structure at the harvested forest area. *Journal of Ecology and Environment* 17(4): 337-354.
- Park, I.H. and Kim, S.D. 2018. Biomass expansion factors, allometric equations and stand biomass of *Pinus thunbergii* in southern Korea. *Korea Society of Environment and Ecology* 32(5): 507-512.
- Park, I.H., Lim, D.H. and Ryu, S.B. 2000. Biomass, net production and nutrient distribution related to age of young *Chamaecyparis obtusa* Plantations. *Journal of Korean Forest Society* 89(1): 85-92.
- Park, J.H. 2002. Restoration of soil physical properties in logging roads. *Journal of Korean Forest Society* 91(1): 88-95.
- Kim, H., Park, J., Kim, S.K., Lee, S.T. and Lee, K. 2013. Thinning effect on vegetation structure and stand characteristics of oak stands. *Journal of Agriculture & Life Science* 47(6): 81-89.
- Park, K.S., Lee, S.Y., Choi, I.H., Kim, H.S., Ahn, Y.S. and An, K.W. 2012. Improvement of a tree cutting permit system with respect to timber logger's consciousness. *Journal of Korean Forest Society* 101(4): 710-721.
- Roig, S., del Rio, M., Cañellas, I. and Montero, G. 2005. Litter fall in Mediterranean *Pinus pinaster* Ait. stands under different thinning regimes. *Forest Ecology and Management* 206(1-3): 179-190.
- 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.
- Sharma, E. and Ambast, R.S. 1987. Litterfall, decomposition and nutrient release in an age sequence of *Alnus nepalensis* plantation stands in the eastern Himalaya. *Journal of Ecology* 75: 997-1010.
- Son, Y.M., Kim, S.W., Lee, S.J. and Kim, J.S. 2014. Estimation of stand yield and carbon stock for *Robinia pseudoacacia* Stands in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 103(2): 264-269.
- Tak, G.I. 2000. Compromise between environmental conservation and logging. *Forest* 2000(3): 68-73.
- Um, T.W. 2015. Change of tree species and stand structure on the different thinning intensities of *Larix kaemferi* Plantation. *Korean Journal of Environment and Ecology* 29(4): 580-589.

Manuscript Received : July 25, 2022

First Revision : October 17, 2022

Second Revision : December 5, 2022

Accepted : December 5, 2022