Korean Journal of Environmental Biology

Original article

https://doi.org/10.11626/KJEB.2023.41.4.447

Korean J. Environ. Biol.
41(4) : 447-454 (2023)
ISSN 1226-9999 (print)
ISSN 2287-7851 (online)

편백림 임분밀도 조절에 따른 유기물층의 산불 연료량 변화

이두희, 이정관, 신한두, 이슬기[1], 박우진[2], 김현준*

전남대학교 산림자원학과, [1]상지대학교 조경산림학과, [2]전북대학교 산림환경과학과

Changes in forest fire fuel amount in a *Chamaecyparis obtusa* forest according to stand density control

Du-Hee Lee, Jeong-Gwan Lee, Han Doo Shin, Sle-Gee Lee[1], Woo Jin Park[2] and Hyun-Jun Kim*

Department of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea
[1]Department of Forest Landscape Architecture, Sangji University, Gangwon 26339, Republic of Korea
[2]Department of Forest Environmental Science, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

Contribution to Environmental Biology

- Controlled stand density can protect forest ecosystems by preventing forest fires and reducing large forest fires.

***Corresponding author**
Hyun-Jun Kim
Tel. 062-530-2082
E-mail. hjkim0837@jnu.ac.kr

Received: 28 August 2023
First revised: 13 November 2023
Second revised: 15 November 2023
Revision accepted: 27 November 2023

Abstract: This study was conducted to analyze the effects of stand density on fire fuel (FF) changes in a *Chamaecyparis obtusa* forest. The study site was located in Mt. Munsu in Jeollabuk-do and consisted of a control, 30% thinning treatment (LT), and 50% thinning treatment (HT). Three-year-old seedlings were planted at a density of 3,000 trees ha^{-1} in 1976, and thinning was carried out in 2000. FF production was measured every 2 months by installing 3 circular litter traps 1.2 m above the ground. Litter bags containing 5 g of each leaf and branch were made and buried in the organic layer to investigate the FF decomposition rate. The decay constant was calculated after 18 months. FF accumulation was measured by collecting dry-weight organic matter from each plot using a square frame (0.09 m^2) in September 2018. The FF production in LT and HT was significantly lower than that of the control ($P<0.001$). The leaf decay constant for HT was significantly lower than that of the control ($P<0.05$). The FF accumulation in HT was significantly lower than that of the control ($P<0.01$), but LT was not significantly different from the control. The results of this study showed that thinning decreased FF production.

Keywords: accumulation, decomposition, fire fuel, litterfall, thinning

1. 서 론

산불은 토양, 수자원, 대기에 악영향을 미쳐 산림생태계의 기능을 파괴할 뿐만 아니라 인간의 생명을 위협하기도 한다(Reid *et al.* 2016; Ambrey *et al.* 2017). 우리나라는 2013년부터 2022년까지 10년간 연평균 537건의 산불이 발생하였고, 연평균 3,560 ha의 산림이 소실되었다(Korea Forest Service 2022). 산불의 원인으로는 입산자 실화, 논밭두렁 소각, 쓰레기 소각, 담뱃불 실화, 성묘객 실화, 어린이 불장난 등 70% 이상이 인위적인 요인이었다(Korea

Forest Service 2022). 인위적으로 발생하는 산불은 수종, 지형에 상관없이 발생하므로 산불의 인위적인 통제 및 제어가 불가능하다. 그러므로 산불이 발생했을 때 산불 확산의 위험성을 완화해 피해를 최소화하는 것이 산불 예방 및 산림생태계 보호 측면에서 중요하다.

인위적 요인으로 인해 발생하는 산불은 대부분 지표화(surface fire)부터 시작된다. 지표화가 지속되면 불길이 강해져 비교적 쉽게 연소되는 수관의 잎에 불이 옮겨붙어 수관화(crown fire)로 이어지게 된다(Rothermel 1991). 수관화는 지형 및 바람에 의해 빠른 속도로 이동하며 대형산불로 이어지는 경우가 많다. 따라서 산불의 피해를 최소화하기 위해서는 지표화의 강도를 낮춰 수관화로 옮겨지는 과정을 차단하는 것이 효율적이다. 선행 연구에서 간벌을 실시한 처리구가 대조구 및 처방화입(prescribed fire)을 실시한 처리구보다 산불의 심각도가 더 낮게 나타났다(Pollet and Omi 2002). 그리고 간벌이 산불의 확산속도와 강도를 억제하는 효과가 있다고 보고된 바 있다(Finney *et al.* 2007). 이처럼 간벌은 산불의 강도를 낮추고 확산속도는 늦추는 데 매우 효과적이다. 국내에서도 숲가꾸기 실행 유무에 따른 산불위험도 비교분석과 숲가꾸기 사업이 소나무림의 수관연료의 수분함량, 연소 가능성 연료 등에 미치는 영향 등 간벌과 산불의 관계에 대한 연구가 수행되었다(Lee and Lee 2007; Kim *et al.* 2011). 또한 산림 내 연료량을 분석하여 산불강도를 예측하고, 산불 행동 패턴 분석 등의 연구도 수행되었다(Lim and Chae 2022). 그러나 임분밀도 조절을 통해 지표면에 쌓인 산불의 연료량에 어떻게 변화하는지에 관한 직접적인 연구는 미미한 실정이다.

편백(*Chamaecyparis obtusa* (Siebold & Zucc.) Endl.)은 대한민국 대표 조림수종으로 최근 기후변화 대응수종, 미래 산림자원 조림권장수종으로 선정되었다(Korea Forest Service 2022). 또한 편백은 과거에 주로 남부지방에서만 조림되었지만 최근 조림 가능 지역이 북상하여 전국적으로 조림면적이 점차 확대되고 있다. 편백의 조림비율은 전체 조림면적의 20%를 넘는 수준으로 침엽수 중 가장 많은 면적이 조림되고 있다(Korea Forest Service 2021). 편백은 일본에서 예로부터 “wood that makes fire”로 불리며 불을 피울 때 불쏘시개 역할을 할만큼 불에 잘 타는 수종이다(Wehmeyer 1999). 불이 잘 붙는 편백림에서 산불이 발생한다면 산불이 빠르게 번져 큰 피해를 줄 것이고, 조림면적이 증가하는 만큼 기존에 비해 산불 위험도도 증가할 것이다. 하지만 이러한 상황에도 불구하고 현재 우리나라에서 편백림의 산불 관련 연구는 전무한 실정이다.

산불이 발생하기 위한 3가지 영향인자는 발화 가능성, 연료 축적량, 연료 수분함량이 있다(Miller and Urban 2000). 인위적으로 발생하는 산불의 발화 가능성을 예측하는 일은 쉽지 않고, 기상조건(기온, 상대습도, 풍속 등)과 상관관계를 가지는 연료수분함량을 통제하기는 어렵다(Lee *et al.* 2021). 이 중 연료 축적량은 인위적인 관리가 가능한 유일한 인자이다(Pyne *et al.* 1996). 따라서 본 연구에서는 편백림에서 산불의 3요소 중 인위적인 관리가 가능한 연료를 통제하는 방법으로 임분밀도를 조절하여 산불연료 축적량의 변화를 알아보기 위해 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지

본 연구는 전라북도 고창군 문수산에서 수행되었다. 문수산 내 편백 조림지는 35°24′17.64″N, 126°43′15.03″E에 위치해 있고, 방위는 북동사면, 경사는 20°~25°이다. 능선 지형으로, 온대 기후대이며, 모암은 변성암이다. 대상지가 속해 있는 고창군의 평균기온은 13.2°C, 연평균최고기온 18.6°C, 연평균최저기온 8.6°C, 그리고 연평균 강수량은 1,225.5 mm이다(Korea Meterological Association 2022).

대상지 전체 크기는 2.5 ha이고, 처리구의 크기는 각각 0.5 ha이다. 처리구는 대조구(non-thinning, Control), 약도간벌구(light thinning, LT), 강도간벌구(heavy thinning, HT)로 처리하여 연구를 진행하였다. 1976년에 3년생 편백 묘목을 각 처리구별로 3,000본 ha^{-1}을 식재하였다. 간벌은 임령 27년인 2000년에 무처리구의 임목본수를 기준으로 약도간벌구는 30%, 강도간벌구는 50%를 실시하였다. 20 m×20 m 크기의 조사구를 대조구에는 2개소, LT와 HT에는 각각 3개소씩 설치하였다. 각 처리구의 임목본수, 광도, 평균 흉고직경(diameter at breast height, DBH)와 평균 흉고단면적은 Table 1과 같다.

2.2. 연구 방법

2.2.1. 광도

광도는 각 처리구에서 휴대용 광합성 시스템(Type LCA4;

 ©2023. Korean Society of Environmental Biology.

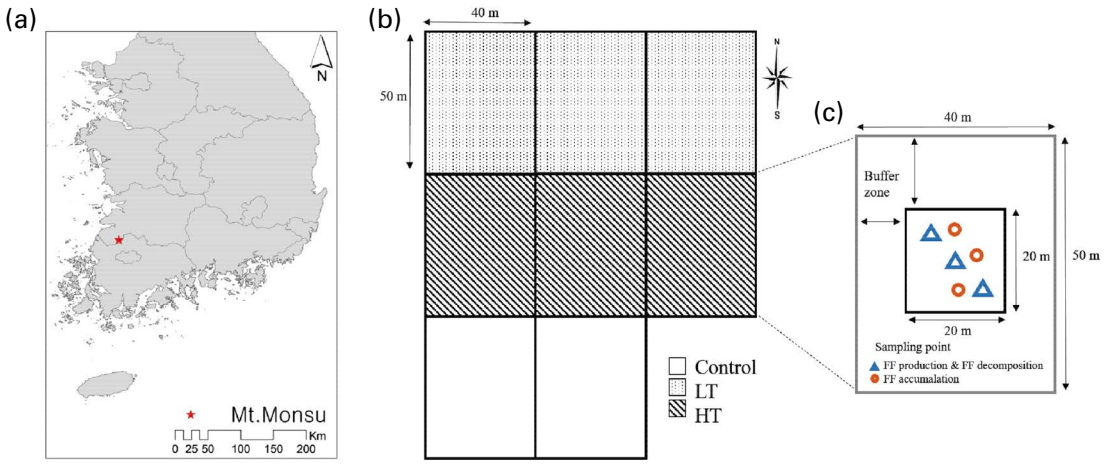

Fig. 1. (a) Location of the study site, (b) location and size of the control, light thinning (LH), and heavy thinning (HT) treatments, and (c) collection location of fire fuel (FF) production, decomposition, and FF accumulation in the treatment area.

Table 1. Characteristics of the control, light thinning (LT), and heavy thinning (HT) treatments in the *Chamaecyparis obtusa* stand in 2018

	Control (0%)	LT (30%)	HT (50%)
Trees per ha (N ha^{-1})	2900 ± 43	1858 ± 134	1458 ± 42
Light intensity (μmol m^2 s^{-1})	205 ± 80^c	355 ± 34^b	649 ± 43^a
Mean DBH (cm)	18.65 ± 0.28^c	20.42 ± 0.14^b	23.11 ± 0.459
Mean BA (m^2 ha^{-1})	66.91 ± 1.50^a	61.14 ± 1.42^{ab}	56.69 ± 3.26^b

DBH: diameter at breast height, BA: basal area
Values with different letters indicate significant differences among the three thinning intensities ($P < 0.05$).

ADC, Hoddesdon, UK)을 사용하여 측정하였다. 2018년 1월부터 12월까지 매월 첫째 주의 맑은 날 하루를 선택하여 오전 8시부터 오후 6시까지 10분 간격으로 측정하였다.

2.2.2. 산불연료 생산량

본 연구에서는 낙엽, 가지, 종자를 산불연료 성분으로 간주하여 산불연료 생산량을 분석하기 위해 각 처리구별 낙엽낙지 생산량을 측정하였다. 각 조사구별 3개씩 정삼각형 지점에 수집면적 0.25 m^2와 높이 1.2 m의 원형 littter trap을 설치하여 2019년 4월부터 2020년 12월까지 2개월 간격으로 낙엽낙지를 채집하였다. 채집된 시료는 실험실로 운반하여 낙엽, 가지, 종자로 분류한 다음, 건조기에서 65°C로 72시간 건조 후 무게를 측정하였다.

2.2.3. 산불연료 분해량

산불연료의 분해량을 분석하기 위해 현장에서 시료를 채집한 생엽과 1년생 가지를 1개월간 풍건한 후 각각 5 g씩 그물망에 넣어 낙엽망를 제작하였다. 낙엽망는 시험구별 3개씩 2019년 2월에 유기물층에 매립하였다. 매립한 시료는 2020년 8월에 수거하여 건조기에서 65°C로 72시간 건조한 후 잎과 가지 각각 건중량을 측정하였다. 최종적으로 수거된 시료의 건중량을 기준으로 다음의 Eq. 1을 이용하여 잎과 가지의 분해상수(decay constant)를 산출하였다 (Olson 1963). 분해상수는 단위 시간에 분해되는 빠르기를 나타내는 상수이다.

$$Decay\ constant\ (k) = -\ln(R_t / R_0) \quad \text{(Eq. 1)}$$

이때, R_0는 최초의 낙엽무게, R_t는 t라는 시간이 흐른 뒤 낙엽무게, t는 분해 시간을 나타낸다.

2.2.4. 산불연료 축적량

산불연료의 축적량을 분석하기 위해서 각 처리구별 낙엽층부터 부식층까지의 유기물층을 2018년 9월에 조사하였다. 각 조사구별 3개의 지점에서 0.09 m^2 (30 cm × 30 cm)

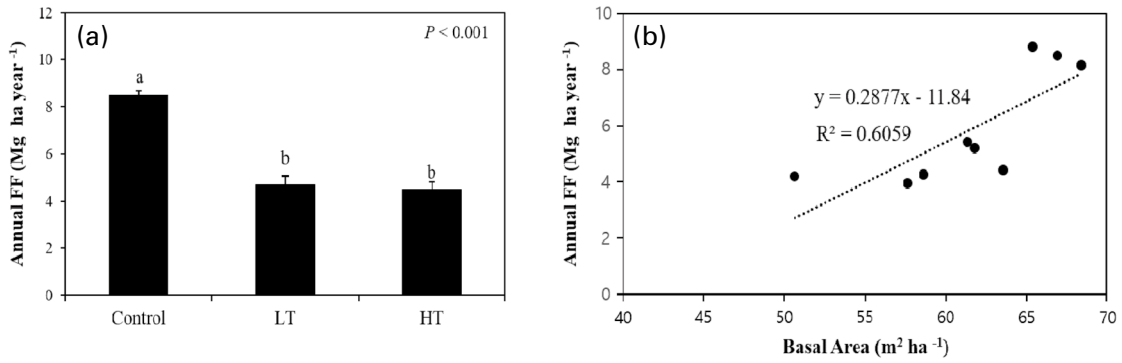

Fig. 2. (a) The annual fire fuel (FF) production in control, light thinning (LT), and heavy thinning (HT) treatments and (b) the relationship between the basal area and annual FF production in the *Chamaecyparis obtusa* forest. Values with different letters indicate significant differences among the three thinning intensities ($P<0.05$).

의 정방형틀을 이용하여 유기물을 채집하였다. 채집된 유기물은 실험실로 운반하여 건조기에서 65°C로 72시간 건조한 후 무게를 측정하였다.

2.3. 통계분석

연간 산불연료 생산량 중 잎·가지·종자의 비율, 월별 산불연료 생산량, 분해상수, 산불연료 축적량 등의 처리구간 차이를 분석하기 위해 one-way ANOVA (analysis of variance)를 실시하였다. 또한, 유의성이 있다고 판단되는 인자들을 유의수준 $\alpha=0.05$에서 Duncan's multiple range test를 수행하여 각 처리간의 평균을 비교하였다($P<0.05$). ha당 흉고단면적과 산불연료 생산량의 관계를 보기 위해서 Pearson 상관계수분석을 실시하여 R 값을 산출하였다. 모든 데이터는 Levene's test를 실시하여 Control (2반복)과 LT, HT (3반복)의 비교가 $P>0.05$인 것으로 확인되어 동일성을 확인하였다. 모든 분석에는 SAS 9.4 software를 사용하였다(SAS Institute Inc., USA).

3. 결과 및 고찰

3.1. 간벌에 의한 산불연료 생산량의 변화

산불연료의 연간 생산량은 대조구(8.49 Mg ha^{-1} year^{-1})보다 LT (light thinning) (4.70 Mg ha^{-1} year^{-1})와 HT (heavy thinning) (4.46 Mg ha^{-1} year^{-1}) 처리구에서 유의하게 낮았다(Fig. 2a; $P<0.001$). 42년생인 편백림에서 간벌에 따라 낙엽낙지 생산량, 잎의 질소 농도를 비교한 논문에서 본 연구와 동일하게 간벌강도에 따라 낙엽낙지 생산량이 감소하였다(Inagaki *et al.* 2008). 간벌이 토양 탄소저장 및 동태에 미치는 영향에 대해 메타분석한 연구에서도 간벌에 따라 낙엽생산량이 감소하는 결과가 보고되었다(Zhang *et al.* 2018). 또한 간벌에 의해 ha당 흉고단면적이 감소할 때, 산불연료 생산량도 비례하게 감소하였다($R^2=0.6059$; Fig. 2b). 이는 온대침엽수림의 연간 낙엽낙지량은 ha당 흉고단면적과 밀접한 관련이 있는 결과와 일치하였다(Turnbull and Madden 1983; Hennessey *et al.* 1992; Berg and Meentemeyer 2001). 간벌을 통해 임분밀도가 감소되어 수목 간의 거리가 증가하여 임목 간의 경쟁이 줄어들면서 잎과 가지의 수명이 증가해 산불연료 생산량이 감소했다고 판단된다(Lee *et al.* 2023). 따라서 간벌은 임분밀도를 감소시켜 산불연료의 생산량을 효과적으로 억제할 수 있다.

Table 2. The proportion of leaves, branches, and seeds in the fire fuel of control, light thinning (LT), and heavy thinning (HT) treatments in the *Chamaecyparis obtusa* forest. Values with different letters indicate significant differences among the three thinning intensities ($P<0.05$)

	Control	LT	HT
Leaf	69.78%^{a}	70.42%^{a}	73.34%^{a}
Branch	13.00%^{a}	9.33%^{b}	6.58%^{c}
Seed	17.21%^{a}	20.24%^{a}	20.06%^{a}

연간 산불연료 중 잎과 종자의 비율은 간벌률에 따라 유의한 차이가 없었지만, 간벌강도가 증가할수록 가지의 구성비율은 감소하였다(Table 2). 간벌은 가지의 직경생장을 증가시키고 수관폭의 비율을 높이는 효과가 있다(Siemon *et al.* 1976). 임분 밀도가 높으면 수관 하부 가지는 빛을 많

 ©2023. Korean Society of Environmental Biology.

이 받지 못해 광합성 효율이 감소하여 결국 탈락하게 된다(Siemon *et al.* 1976). 따라서 대조구에서는 탈락하는 가지의 양이 많아 산불연료 생산량의 구성비율에서 가지의 비율이 다른 처리구들에 비해 유의하게 높았다고 판단된다. 지표면에 떨어진 가지는 산불 확산에 크게 기여하기 때문에 산불의 확산을 예측하는 데 중요한 역할을 한다(Rothermel 1972). 따라서 간벌을 통해 지표면에 낙지 생산량을 줄이는 것은 산불이 발생했을 때 연소물질을 줄임으로써 산불 확산을 방지할 수 있다고 판단할 수 있다.

2012년부터 2021년까지 10년간 산불의 계절별 현황을 살펴보면 봄에 일어난 산불이 평균 278건으로 58%를 차지한다(Korea Forest Service 2022). 봄은 건조한 날씨와 겨울부터 축적된 낙엽낙지가 산불연료로 작용하기 때문에 일년 중 절반 이상의 산불이 발생한다(Korea Forest Service 2022). 산불연료의 월별 생산량은 모든 처리구에서 12월에 가장 높게 나타났으며, 이는 봄철 산불에 영향을 미친다(Fig. 3). 특히, 12월의 산불연료 생산량은 LT와 HT 처리구 모두 대조구 대비 50% 이하로 감소하였다(Table 3). 이처럼 간벌은 산불연료가 가장 많이 생산되는 12월의 산불연료를 감소시켜 봄철 발생하는 산불의 강도를 줄이는 효과를 기대할 수 있다.

3.2. 간벌에 따른 산불연료 분해량의 변화

시료 매립 후 18개월 시점에서 잎의 분해상수는 HT에서는 1.35로 대조구(0.93) 대비 유의하게 높게 나타났지만 LT는 1.07로 대조구와 유의한 차이가 없었다(Fig. 4). 간벌은 임내 광량을 증가시켜 토양 온도를 상승시키고 상대습도를 감소시켜 미세기후 및 지면의 조건을 변화시킨다(Kunhamu *et al.* 2009; Bravo-Oviedo *et al.* 2017). 본 연구에서도 임분밀도가 감소할수록 임내 광량이 증가하였다(Table 1). 간벌로 인한 광량의 증가와 그로 인한 토양 온도의 상승은 오히려 토양 미생물의 활동을 촉진시킨다(Castin-Buchet and Andre 1998). 따라서 간벌에 의한 환경인자의 변화는 토양 미생물의 활동을 촉진시켜 잎의 분해속도가 빨라지는 주된 원인으로 작용한다.

한편, 가지의 분해상수는 대조구에서 0.33, LT에서 0.31, HT에서 0.36으로 처리구별 유의한 차이가 없었다(Fig. 4). 낙엽낙지의 분해 속도는 쉽게 분해되지 않고 오래 지속되는 리그닌 함량에 의해 결정된다(Berg 2000; Bravo-Oviedo *et al.* 2017). 가지의 경우 잎보다 수분함량은 낮고, 리그닌의 함량은 높기 때문에 분해속도가 느려 처리구별 유의한 차이가 없는 것으로 판단된다. 따라서 가지는 비교적 분해속도가 느리므로 처리구별 유의한 차이를 보기 위

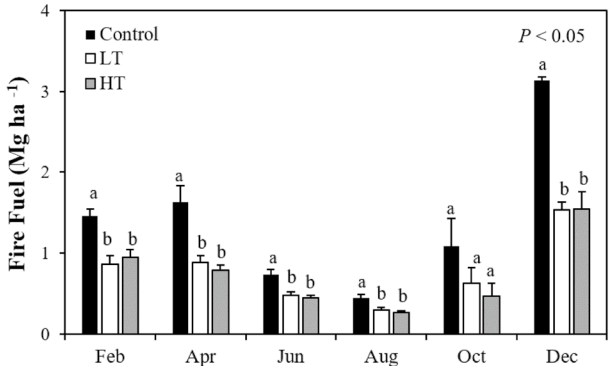

Fig. 3. Monthly fire fuel (FF) production in control, light thinning (LT), and heavy thinning (HT) treatments in the *Chamaecyparis obtusa* forest. Values with different letters indicate significant differences among three thinning intensities ($P < 0.05$).

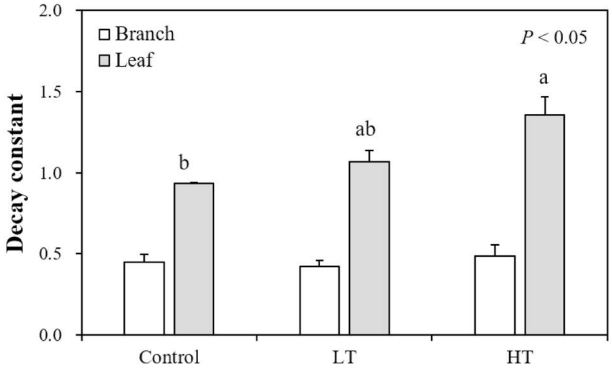

Fig. 4. Decay constant of control, light thinning (LT), and heavy thinning (HT) in the *Chamaecyparis obtusa* forest. Values with different letters indicate significant differences among the three thinning intensities ($P < 0.05$).

Table 3. Fire fuel (FF) rates in light thinning (LT) and heavy thinning (HT) compared to the control

	Fed.	Apr.	Jun.	Aug.	Oct.	Dec.
LT	59.36%	54.31%	65.75%	66.57%	58.41%	49.03%
HT	65.09%	47.96%	60.85%	59.61%	43.13%	49.35%

해서는 장기적인 관찰이 필요하다.

3.3. 간벌에 따른 산불연료 축적량의 변화

유기물 축적량은 산불 발생 시 연료로 작용해 연소물질을 제공하기 때문에 산불환경에 중요한 역할을 한다(Lee *et al.* 2020). 산림의 산불연료 축적량은 낙엽, 낙지, 종자, 부식물 등으로 이루어져 있다(Xu and Hirata 2002). 간벌강도에 따른 산불연료 축적량은 대조구에서 17.9 Mg ha^{-1}, LT에서 15.7 Mg ha^{-1}, HT에서 9.9 Mg ha^{-1}로 나타났다(Fig. 5). HT는 다른 처리구보다 통계적으로 유의하게 낮았다($P<0.01$). 산불연료 축적량은 매년 공급되는 생산량에서 분해량이 빠져 현존하고 있는 유기물층의 값이다(Keane 2008). 본 연구에서 생산량은 LT와 HT가 대조구보다 유의하게 낮았지만, 낙엽의 분해속도는 HT가 대조구보다 유의하게 빨랐다(Figs. 2a, 4). 그리고 LT와 HT 처리구 모두 낙엽낙지 내 가지 비율은 대조구에 비해 유의하게 낮았다(Table 2). 따라서 HT는 다른 처리구들과 비교해 가장 적은 산불연료 생산량과 분해가 느린 가지의 비율(Control: 13%, LT: 9.33%, HT: 6.58%)이 적고, 가장 빠른 잎의 분해속도로 인해 분해되어 빠져나가는 유실량이 가장 많은 것으로 판단된다. 또한 분해가 빠르게 진행되면서 지표면의 양분 공급 및 물질 순환이 빠르게 일어나 토양 미생물의 활동을 촉진시킨 것으로 판단된다(Kunhamu *et al.* 2009).

선행 연구에서도 50% 이상 간벌한 처리구에서 산불 연료가 시간이 흐름에 따라 가장 많이 줄어드는 결과가 나타났다(Johnston *et al.* 2021). 이는 본 연구에서 50% 간벌을 실시하였을 때 축적량이 줄어드는 결과와 유사하다. Johnston *et al.* (2021)은 낙엽낙지량과 낙엽 분해율의 증가로 인한 지표면 부식물의 감소가 산불연료의 축적량이 감소된 원인이라고 보고했다. 본 연구도 이와 마찬가지로 낙엽낙지 생산량의 감소와 낙엽 분해율의 증가로 인한 산불연료 축적량이 감소하였다. 표면의 산불연료 축적량이 줄어드는 것은 산불 행동을 완화시키는 효과가 있다(Johnston *et al.* 2021). 또한 산불 연료량이 감소하여 지표화의 크기가 감소해 수관화 발생율이 줄어든다는 연구 결과도 보고되었다(Agee and Skinner 2005; Crecente-Campo *et al.* 2009). 따라서 간벌을 통한 산불연료 축적량의 감소는 산불강도의 억제 효과를 기대할 수 있으며, 결과적으로 대형 산불로 번지는 것을 방지해 더 큰 피해를 줄일 수 있다.

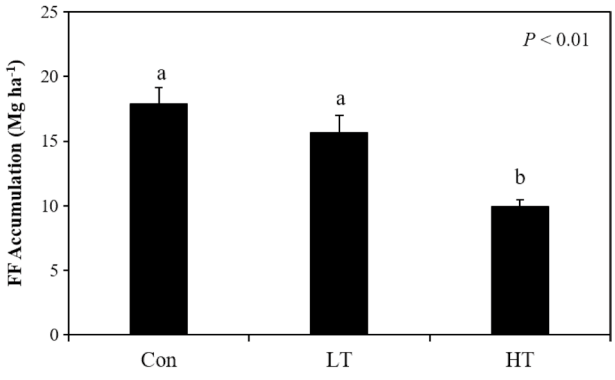

Fig. 5. Fire fuel (FF) accumulation in control, light thinning (LT), and heavy thinning (HT) treatments in the *Chamaecyparis obtusa* forest. Values with different letters indicate significant differences among the three thinning intensities ($P<0.05$).

적 요

본 연구는 편백림에서 임분밀도 조절이 산불 연료량에 미치는 효과를 분석하고자 수행하였다. 본 연구의 대상지는 전북 고창군 문수산에 위치해 있으며, 대조구, 30% 간벌처리구(light thinning, LT), 50% 간벌처리구(heavy thinning, HT)로 이루어져 있다. 1976년에 3년생 묘목을 3,000본 ha^{-1} 기준으로 식재하였으며, 2000년에 간벌을 실시하였다. 산불연료 생산량은 지면으로부터 1.2 m 높이의 원형 littertrap을 시험구별 3개씩 설치하여 2019년 4월부터 2020년 12월까지 2개월 간격으로 낙엽낙지량을 측정하였다. 산불연료 분해량을 알아보기 위해서 낙엽과 낙지를 5 g씩 넣은 낙엽망을 제작하여 유기물층에 묻은 후 18개월 후에 수거하여 분해상수를 구하였다. 산불연료 축적량은 정방향틀(0.09 m^2)을 이용하여 2018년 9월에 시험구별 3반복으로 채취한 유기물의 건중량을 측정하였다. 산불연료 생산량은 LT와 HT 처리구 모두 대조구보다 통계적으로 유의한 수준으로 감소하였다($P<0.001$). HT의 잎 분해상수는 대조구보다 유의하게 낮게 나타났다($P<0.05$). LT의 산불연료 축적량은 대조구와 유의한 차이를 보이지 않았지만, HT의 산불연료 축적량은 대조구보다 유의하게 낮았다($P<0.01$). 본 연구의 결과를 종합적으로 살펴보면 산불연료량은 간벌에 의해 감소하였다. 따라서 간벌을 통한 산림관리를 통해 연소물질이 감소되면 산불의 강도가 억

 ©2023. Korean Society of Environmental Biology.

제되어 산불을 빨리 진압해 대형산불의 저감효과를 기대할 수 있다.

CRediT authorship contribution statement

DH Lee: Conceptualization, Methodology. Formal analysis, Investigation, Writing - Original draft, Writing - Review & editing. **JG Lee:** Investigation, Writing - Review & editing. **H Shin:** Investigation, Writing - Review & editing. **SG Lee:** Formal analysis, Writing - Review & editing. **WJ Park:** Writing - Review & editing. **HJ Kim:** Conceptualization, Investigation, Writing - Review & editing, Supervision.

Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflicts of interest.

사 사

본 연구는 한국연구재단(NRF-2018RIDIAIB07042483) 및 산림청(2022464B10-2224-0201)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

Agee JK and CN Skinner. 2005. Basic principles of forest fuel reduction treatments. For. Ecol. Manage. 211:83–96. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.01.034

Ambrey CL, CM Fleming and M Manning. 2017. Forest fire danger, life satisfaction and feelings of safety: evidence from Australia. Int. J. Wildland Fire. 26:240–248. https://doi.org/10.1071/WF16195

Berg B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. For. Ecol. Manage. 133:13–22. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00294-7

Berg B and V Meentemeyer. 2001. Litter fall in some European coniferous forests as dependent on climate: a synthesis. Can. J. For. Res. 31:292–301. https://doi.org/10.1139/x00-172

Bravo-Oviedo A, R Ruiz-Peinado, R Onrubia and M del Río. 2017. Thinning alters the early-decomposition rate and nutrient immobilization-release pattern of foliar litter in Mediterranean oak-pine mixed stands. For. Ecol. Manage. 391:309–320. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.032

Castin-Buchet V and P Andre. 1998. The influence of intensive thinning on earthworm populations in the litters of Norway spruce and Douglas fir. Pedobiologia 42:63.

Crecente-Campo F, A Pommerening and R Rodríguez-Soalleiro. 2009. Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown fire in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain. For. Ecol. Manage. 257:1945–1954. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.009

Finney MA, RC Seli, CW McHugh, AA Ager, B Bahro and JK Age. 2007. Simulation of long-term landscape-level fuel treatment effects on large wildfires. Int. J. Wildland Fire. 16:712–727. https://doi.org/10.1071/WF06064

Hennessey TC, PM Dougherty, BM Cregg and RF Wittwer. 1992. Annual variation in needle fall of a loblolly pine stand in relation to climate and stand density. For. Ecol. Manage. 51:329–338. https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90332-4

Inagaki Y, S Kuramoto, A Torii, Y Shinomiya and H Fukata. 2008. Effects of thinning on leaf-fall and leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) plantation stands in Japan. For. Ecol. Manage. 255:1859–1867. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.007

Johnston JD, JH Olszewski, BA Miller, MR Schmidt, MJ Vernon and LM Ellsworth. 2021. Mechanical thinning without prescribed fire moderates wildfire behavior in an Eastern Oregon, USA ponderosa pine forest. For. Ecol. Manage. 501:119674. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119674

Keane RE. 2008. Biophysical controls on surface fuel litterfall and decomposition in the northern Rocky Mountains, USA. Can. J. For. Res. 38:431–1445. https://doi.org/10.1139/X08-00

Kim S, B Lee, Y Seo, M Jang and YJ Lee. 2011. Effects of forest tending works on the crown fuel characteristics of *Pinus densiflora* S. et Z. stands in Korea. J. Korean Soc. For. Sci. 100:359–366. https://doi.org/10.14578/jkfs.2011.100.3.6

Korea Forest Service. 2021. Afforestation Business Performance Report. Korea Forest Service. Daejeon, Korea.

Korea Forest Service. 2022. 2021 Forest Fire Statistical Yearbook. Korea Forest Service. Daejeon, Korea. pp. 128–143.

Korea Meteorological Association. 2022. Climatological Normals of Korea. Korea Meteorological Association. www.kma.go.kr. Accessed September 29, 2022.

Kunhamu TK, BM Kumar and S Viswanath. 2009. Does thinning affect litterfall, litter decomposition, and associated nutrient release in *Acacia mangium* stands of Kerala in peninsular India. Can. J. For. Res. 39:792–801. https://doi.org/10.1139/X09-008

Lee JG, DH Lee, JY Jung, SG Lee, SH Han, S Kim and HJ Kim. 2023. The effects of stand density control on carbon cycle in *Chamaecyparis obtusa* (Siebold and Zucc.) Endl. Forests. Forests 14:217. https://doi.org/10.3390/f14020217

Lee SJ, SY Kim, SH Ha, YE Lee, KW Seo and CG Kwon. 2021. Ef-

fect of climate factors on fuel moisture contents in forest - A case study on *Pinus densiflora* stands in Hongreung Forest -. Crisisonomy 17:89–97. https://doi.org/10.14251/crisisonomy.2021.17.6.89

Lee SY and MW Lee. 2007. Comparative analysis of forest fire danger rating on the forest characteristic of thinning area and non-thinning area. Fire Sci. Eng. 21:52–58.

Lee YE, SJ Lee, CG Kwon, KW Seo, CA Bang and SY Kim. 2020. The effects of thinning slash on wildfire fuel type. Crisisonomy 16:61–69. https://doi.org/10.14251/crisisonomy.2020.16.10.61

Lim CJ and H Chae. 2022. Predicting forest fire danger using fuel characteristics of forest. J. Korean Soc. Hazard Mitig. 22:125–132. https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2022.22.6.125

Miller C and DL Urban. 2000. Connectivity of forest fuels and surface fire regimes. Landsc. Ecol. 15:145–154. https://doi.org/10.1023/A:1008181313360

Olson JS. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology 44:322–331. https://doi.org/10.2307/1932179

Pollet J and PN Omi. 2002. Effect of thinning and prescribed burning on crown fire severity in ponderosa pine forests. Int. J. Wildland Fire. 11:1–10. https://doi.org/10.1071/WF01045

Pyne SJ, PL Andrews and RD Laven. 1996. Introduction to Wildland Fire. John Wiley & Sons. New York.

Reid CE, M Brauer, FH Johnston, M Jerrett, JR Balmes and CT Elliott. 2016. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. Environ. Health Perspect. 124:1334–1343. https://doi.org/10.1289/ehp.1409277

Rothermel RC. 1972. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. Research Paper INT-115. Intermountain Forest and Range Experiment Station, United States Department of Agriculture. Ogden, Utah.

Rothermel RC. 1991. Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains. INT-438. Intermountain Forest and Range Experiment Station, United States Department of Agriculture. Ogden, Utah.

Siemon GR, GB Wood and WG Forrest. 1976. Effects of thinning on crown structure in radiata pine. N. Z. J. For. Sci. 6:57–66.

Turnbull CRA and JL Madden. 1983. Relationship of litterfall to basal area and climatic variables in cool temperate forests of southern Tasmania. Aust. J. Ecol. 8:425–431. https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1983.tb01339.x

Wehmeyer A. 1999. Records of wind and earth: A translation of Fudoki, with introduction and commentaries. Monum. Nippon. 54:138–140. https://doi.org/10.2307/2668282

Xu XN and E Hirata. 2002. Forest floor mass and litterfall in Pinus luchuensis plantations with and without broad-leaved trees. For. Ecol. Manage. 157:165–173. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00663-0

Zhang X, D Guan, W Li, D Sun, C Jin, F Yuan, A Wang and J Wu. 2018. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis. For. Ecol. Manage. 429:36–43. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.027

 ©2023. Korean Society of Environmental Biology.