

ARTICLE

산불예방 숲가꾸기 사업 시행지에 대한 연료 특성 분석: 국립대전숲체원 일대 산림을 대상으로

윤나경^{1†} · 이상인^{2†} · 장미나³ · 이영진¹ · 권병석^{4*}

¹국립공주대학교 산림과학과, ²국립공주대학교 생태복원연구소,
³국립산림과학원 산림재난예측분석과, ⁴한국산림복지진흥원 국립대전숲체원

Analysis of Fuel Properties in Silvicultural Treatment Sites for Wildfire Prevention: A Case Study of Forests in the National Daejeon Forest Welfare Institute

Nakyung Yoon^{1†}, Sangin Lee^{2†}, Mina Jang³,
Youngjin Lee¹, Byungseok Kwon^{4*}

¹Department of Forest Sciences, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

²Institute of Ecological Restoration, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

³Forest Disaster Prediction and Analysis Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

⁴National Daejeon Sloopchewon, Korea Forest Welfare Institute, Daejeon 34205, Korea

Received: August 06, 2026

Revised: August 21, 2026

Accepted: August 24, 2026

† These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author :
Byungseok Kwon
National Daejeon Sloopchewon, Korea
Forest Welfare Institute, Daejeon 34205,
Korea
Tel : +82-42-718-1511
E-mail : kbs445@fowi.or.kr

Copyright © 2026 Resources Science
Research Institute, Kongju National University.
This is an Open Access article distributed
under the terms of the Creative Commons
Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)
which permits unrestricted non-commercial
use, distribution, and reproduction in any
medium, provided the original work is
properly cited.

ORCID

Nakyung Yoon
<https://orcid.org/0009-0008-4604-0821>
Sangin Lee
<https://orcid.org/0000-0002-6604-1441>
Mina Jang
<https://orcid.org/0000-0001-6839-258X>
Youngjin Lee
<https://orcid.org/0000-0002-9319-1533>
Byungseok Kwon
<https://orcid.org/0009-0000-1948-0065>

Abstract

This study quantitatively compared fuel properties among core areas, general areas, and untreated control areas in forests of the National Daejeon Forest Welfare Institute, where silvicultural treatments for wildfire prevention were conducted in 2024. Three 20 × 20 m plots were established in each area for tree censuses, and surface fuel loads and moisture contents were measured in nested quadrats by component (shrub, fallen leaves, branch, and cone). Crown fuel loads of *Pinus* spp. were estimated using diameter-based allometric equations. The core areas showed a significantly larger mean diameter at breast height (23.54 cm) than the control (18.09 cm) but lower basal area and stand density, indicating preferential removal of suppressed and inferior trees. Surface fuel loads were 8.59, 15.06, and 18.22 ton/ha in the core, general, and control areas, with the core and general areas 52.9% and 17.3% lower than the control, and shrub and cone components significantly lower in the core areas. Surface fuel moisture contents were also lower in the treated areas (160% and 130%) than in the control (261%), indicating that treated stands may become more susceptible to initial ignition. Total available fuel loads were 48.52 ton/ha in both treated areas and 71.78 ton/ha in the control, approximately 32.4% lower in the treated areas. Although both treated areas reached the same total, the core area showed a larger difference in surface fuels but a smaller difference in crown fuels than the general area, suggesting that the contribution of crown fuel reduction in core areas warrants further examination across a wider range of stand types and regions.

Keywords

Forest fire prevention, Fuel load, Thinning, Crown fuel, Surface fuel

I. 서론

기후변화로 인해 극한 기상조건이 동반된 산불의 발생 확률은 산업화 이전 시기와 비교하여 88~152% 증가한 것으로 보고되었으며, 이러한 추세는 온대·열대 산림 전반에서 관측되고 있다 (Cunningham *et al.*, 2024; Jain *et al.*, 2025). 우리나라 또한 이러한 경향에서 예외가 아니며, 2025년 3월 경상북도 의성군 및 안동시 일대에서 발생한 동시다발적 대형산불은 단일 산불사건의 피해 면적

이 99,000 ha를 초과하여 정부 수립 이후 최대 규모로 기록되었다(KFS, 2025a).

제7차 국가산림자원조사 보고서에 따르면 우리나라 국토 면적의 약 62.7%가 산림이며, 산불에 취약한 것으로 알려진 침엽수림이 약 37%로 활엽수림(32%)보다 많은 면적을 차지한다(KFS, 2020). 또한 41년생 이상의 장령림이 전체 산림 면적의 40% 이상을 점유하고 있으며, 산림 내 잡관목 비중이 높아 대형 산불로 이어지기 쉬운 구조적 특성을 가진다(KFS, 2020; Lee and Lee, 2007). 이는 1970년대 산림녹화 사업 이후 적절한 후속 관리가 시행되지 못하면서 가연성 물질의 밀도가 높아진 결과이며, 최근 기후변화로 인한 낙엽층의 건조 현상 심화가 산불의 발생과 확산을 더욱 용이하게 만들고 있다(Lee et al., 2023).

산불은 습도·기온·풍속 등의 기상인자, 연료의 형태·종류·밀도 등의 산림특성인자, 그리고 입지·방위·경사도 등의 지형인자에 의해 복합적으로 영향을 받으며, 이들 인자의 조합에 따라 산불의 범위와 강도가 매우 다양하게 나타난다(Kang et al., 2016; Kwak et al., 2008). 이 가운데 인간이 직접적으로 관리할 수 있는 인자는 산림 내 연료에 한정되며, 특히 지표층 연료와 수관층 연료를 수직적으로 연결하는 사다리연료의 축적은 지표화에서 수관화로 전이되는 핵심 메커니즘으로 작용하기 때문에 그 관리가 중요하게 여겨진다(Scott and Reinhardt, 2001; Van Wagner, 1977).

미국과 캐나다 등 대형 산불이 빈번한 국가에서는 숲아베기와 처방화입을 통한 산림 연료 저감을 대형산불 확산을 늦출 수 있는 효과적인 방법으로 인식해 왔다. 미국 서부 침엽수림 65개 연구를 종합한 메타분석에서는 기계적 숲아베기와 처방화입의 병행이 후속 산불의 피해 강도를 미치리 임분 대비 62~72% 감소시키는 효과를 보였으며, 숲아베기 단독 처리는 효과가 상대적으로 낮아 지표층 연료 처리의 병행이 필수적임이 강조되었다(Davis et al., 2024). 또한 호주의 사례 연구에서는 연료저감 처방화입이 극한 기상조건 하에서도 산불 피해 강도를 유의하게 완화하는 것으로 보고된 바 있다(Furlaud et al., 2023).

이러한 배경에서 산림청은 2021년부터 산불 취약지역의 산림관리와 국민 안전 강화를 목적으로 산불예방 숲가꾸기 사업을 시행하고 있다(KFS, 2023). 산불예방 숲가꾸기는 우량 목재 생산을 주된 목적으로 하여 우세목의 생육을 저해하는 임목을 숲아베고 작업산물을 임내에 존치시키는 일반 숲가꾸기와는 사업목적·대상지·작업방법에서 뚜렷한 차이를 보인다. 일반 숲가꾸기가 경제림육성단지 등 목재생산에 주로 하는 산림을 대상으로 형질이 우량한 우세목의 생장에 방해가 되지 않는 범위에서 중층목과 하층식생을 존치시키는 방식으로 시행되는 반면, 산불예방 숲가꾸기는 임목밀도가 높은 소나무류 침엽수림과 혼효림(소나무류 25% 이상) 가운데 인명·재산 피해 우려지역을 대상으로 산불 위험요소 제거에 초점을 둔 차별화된 작업방식을 적용한다(KFS, 2023). 구체적으로 상층의 숲아베기는 산불 확산 방지를 위해 적정 밀도까지 소나무류 등을 제거하되 내화력이 강한 활엽수는 존치시키고, 중·하층의 소나무류는 전량 제거하여 사다리연료를 차단하며, 가지치기는 핵심구역 내 소나무류를 대상으로 지상 5m 범위까지 형질 구분 없이 전량 실행한다. 또한 산불 위험성이 높은 핵심구역의 수집산물은 전량 임외로 반출하여 지표층의 연료 축적을 차단하는 것이 특징이다(KFS, 2023).

산불예방 숲가꾸기 사업대상지는 관리 강도에 따라 핵심구역과 일반구역으로 구분된다. 핵심구역은 도로·주택·농경지 등 연접지로부터 폭 50~100m 범위 내의 산림으로 산불 위험요소 제거를 위한 숲아베기·가지치기·산물수집 등을 집중적으로 시행하며, 일반구역은 사업대상지 중 핵심구역을 제외한 산림으로 기존의 숲가꾸기 방법을 적용하되 산림 기능을 고려한 작업이 이루어진다(KFS, 2023). 이러한 공간 구분은 산불 발생 시 인명·재산 피해 우려가 큰 연접지부터 우선적으로 위험요소를 제거하는 한편, 그 후방의 산림에 대해서도 단계적 연료 저감 효과를 확보하기 위한 전략적 설계이다.

국내에서도 강원도 고성군 일대의 소나무림을 대상으로 한 시험연구에서 숲아베기 강도(20%, 40%)에 따른 수관연료밀도의 감소와 가연연료량의 최대 53% 저감 효과가 보고되었으며(Lee et al., 2023), 국립산림과학원의 한국형 산불행동 시뮬레이션에서도 숲가꾸기 시행지의 수관화 발생률이 미시행지(61%)의 절반 수준(30%)으로 감소하고 확산 속도가 약 30% 둔화되는 것으로 확인되었다(KFS,

2025b). 그러나 이러한 연구들은 일반적 숲가꾸기 또는 시험 처리구를 대상으로 한 것으로, 산림청이 정책적으로 도입한 산불예방 숲가꾸기 사업의 실제 시행지를 대상으로 핵심구역과 일반구역의 연료특성을 정량적으로 비교·평가한 연구는 매우 제한적이다.

따라서 이 연구는 국립대전숲체원 일대의 산불예방 숲가꾸기 사업대상지를 대상으로 현장조사를 실시하여 산림 내 연료특성을 분석하고, 사업 강도가 상이한 핵심구역·일반구역과 미시행 대조구역의 지표층 및 수관층 연료량을 비교함으로써 산불예방 숲가꾸기 시행 강도에 따른 구역 간 연료 특성의 차이를 정량적으로 검증하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

이 연구에서는 산불예방 숲가꾸기 시행지에서의 구역별(핵심구역·일반구역·대조구역) 연료 특성을 분석하고자 대전광역시 유성구 성북동 산1-13 일대 산림(북위 36°19'29''~36°19'46'', 동경 127°17'19''~127°17'30'')을 연구대상지로 선정하였다. 해당 연구대상지에서는 2024년 산불예방 숲가꾸기 사업이 완료되어 구역 구분과 작업 사양 등 시행 이력을 관리기관을 통해 명확히 확인할 수 있으며, 핵심구역·일반구역과 미시행 임분이 동일 산림 내에 인접하여 분포하므로, 기상 및 지형 조건의 차이를 최소화한 상태에서 시행강도에 따른 비교가 가능하다. 또한, 임상이 소나무류가 우점하는 침엽수 우점 혼효림이고 평균 임령이 IV~V영급에 해당하여, 임목밀도가 높은 소나무류 침엽수림과 혼효림을 대상으로 하는 산불예방 숲가꾸기 사업 대상지의 일반적 임분 조건에 부합한다. 마지막으로 산림교육시설과 도로·주택 등 연접지가 인접하여 산불 발생 시 인명·재산 피해 우려가 있는 지역이라는 사업대상지 선정 기준에 해당한다.

사업 총 면적은 34.0 ha로, 핵심구역이 1.0 ha, 일반구역이 32.0 ha(잣나무 임분 1 ha)이며, 일반구역 중 12.4 ha에서는 산물수집이 병행 실시되었다(Fig. 1). 대조구역은 사업 대상지와 동일

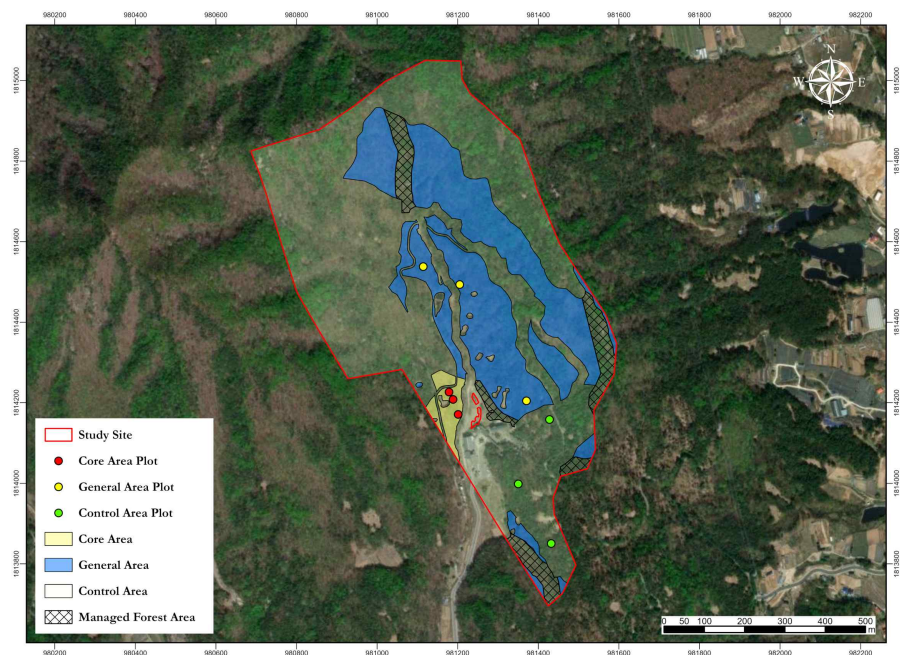


Fig. 1. Forests in the National Daejeon Forest Welfare Institute.

산림 내에서 산불예방 숲가꾸기가 시행되지 않은 임분 가운데, 해발고도·경사·방위 등 지형 조건과 임상 및 우점 수종이 시행구역과 가장 유사한 지점을 선정하였다.

연구대상지의 지형적 요소인 평균 해발고도와 경사는 각각 261.5 ± 48.3 m ($179.9 \sim 416.1$ m)와 $20.3 \pm 8.0^\circ$ ($0.4 \sim 43.2^\circ$)로 나타났으며, 임상은 활엽수림 42.5%, 침엽수림 35.5%, 혼효림 16.1%로 침엽수 우점 혼효 임분에 해당한다. 구체적인 수종의 분포는 소나무(*Pinus densiflora*) 33.3%, 굴참나무(*Quercus variabilis*) 16.2%, 리기다소나무(*Pinus rigida*) 7.6%이며, 이들의 임분밀도는 92.5%가 ‘밀’ 등급으로 조밀한 임분 구조를 이루고 있다. 또한, 평균 임령은 핵심구역과 일반구역이 43년으로 V영급, 대조구역이 37년으로 IV영급에 해당하여 6년의 차이가 있다.

이 연구의 현장조사 및 시료채취는 연구대상지의 관리기관인 한국산림복지진흥원 국립대전숲체원의 사전 승인을 받아 수행되었으며, 표본구 설치 위치와 시료채취 범위는 산림교육시설의 운영에 지장을 주지 않는 범위에서 관리기관과 사전 협의하여 결정하였다.

2. 매목조사

산불예방 숲가꾸기 사업 시행에 따른 구역별(핵심구역·일반구역·대조구역) 임분 구조의 차이를 파악하고자, 각 구역에 20×20 m의 표본구를 3개씩 총 9개 설치하였으며, 표본구 내 모든 임목을 대상으로 매목조사를 실시하였다.

매목조사의 항목으로는 개체목의 흉고직경(diameter at breast height, DBH)과 수고(height)를 측정하였으며, 이를 바탕으로 흉고단면적과 임분밀도를 산출하였다. 흉고직경의 경우 직경테이프를 사용하여 지표면으로부터 1.2 m 지점의 임목의 둘레를 측정하였으며, 수고는 Vertex(5-BT-360, Haglof, Sweden)와 Clinometer(PM-5/360 PC, Suunto, Finland)를 이용하여 측정하였다.

한편, 산불예방 숲가꾸기 사업시행 기준(KFS, 2026)에서 핵심구역의 우선 제거 대상으로 규정하고 있는 소나무류의 시행 강도에 따른 분포와 수관층 연료량을 분석하고자 연구대상지 내에 소나무속(*Pinus* spp.)에 해당하는 소나무(*Pinus densiflora*), 리기다소나무(*Pinus rigida*), 곰솔(*Pinus thunbergii*) 개체만을 별도로 추출하여 분석하였다.

3. 지표층 연료량 조사

산림 내 지표층 연료는 산불행동의 잠재력을 결정짓는 핵심 인자로서(Lee et al., 2005; Riaño et al., 2002), 관목·낙엽·낙지로 구성되며, 부위별로 산불 발생 시 연소 양상이 상이하게 나타난다(Kim, 2015; Scott and Reinhardt, 2001). 특히, 침엽수림에서는 임상에 축적된 구과도 지표층 가연물질의 일부로 작용할 수 있으므로, 이 연구에서는 관목·낙엽·낙지와 함께 구과를 별도의 연료 부위로 구분하여 측정하였다.

현장조사는 2025년 5월 15일부터 17일까지 실시하였으며, 구역 간 기상조건의 차이가 수분함량 비교에 미치는 영향을 최소화하기 위해 세 구역의 조사를 동일 기간 내에 수행하였다. 조사 기간 중 인근 기상관측소(기상청 대전관측소) 자료를 기준으로 조사 직전 강우는 조사 5일 전 4.4 mm였으며, 조사 기간의 평균기온과 평균 상대습도는 각각 20.5°C , 75%였다. 지표층 연료량을 측정하기 위해서 각 구역별(핵심구역·일반구역·대조구역)에 위치한 3개 표본구 내에 1×1 m 크기의 방형구를 3곳에 설치하였다(Fig. 2).

관목의 경우 지상부를 지제부에서 채취하되 산불 초기 착화와 지표화 단계의 확산에 실질적으로 기여하는 세립 연료만을 산정하기 위해 직경 7.6 cm 이하의 임목만의 생중량을 측정하였다(Brown, 1974; Scott and Reinhardt, 2001). 또한, 관목 방형구 내부에 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 크기의 소방형구를 설치하여 지표면에 축적된 낙엽, 낙지, 구과를 광물질 토양층에 도달하는 깊이까지 수거하였으며, 수거한 시료를 부위별로 구분하여 생중량을 측정하였다.

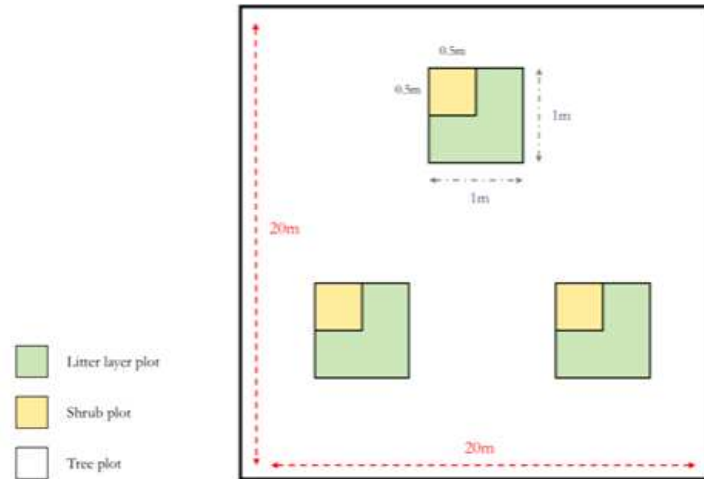


Fig. 2. Method of plot design.

생중량을 측정된 이후에는 부위별 전체 시료 가운데 25% 이상을 무작위로 선별하여 90℃ 이상의 건조기에서 항량에 도달할 때까지 건조시킨 후 건중량을 측정하였으며, 시료의 건중량과 생중량 비율을 부위별 전체 생중량에 적용하여 부위별 전체 건중량을 산출하였다. 산정된 부위별 건중량은 각각 1 × 1 m(관목) 또는 0.5 m × 0.5 m(낙엽·낙지·구과) 면적을 기준으로 ha 단위(ton/ha)로 환산하였다.

또한, 산불의 발생 가능성과 전파 양상에 결정적으로 영향을 미치는 지표층 연료의 수분 상태를 파악하고자 동일한 분취 시료를 대상으로 중량법을 적용하여 수분함량을 산정하였는데(Kane and Prat-Guitart, 2018; Kreye *et al.*, 2013), 이때 수분함량은 건중량을 기준으로 한 산출식(dry basis)을 적용하였으며, Anderson *et al.*(1978)이 제시한 식 (1)에 따라 산정하였다.

$$SFMC(\%) = ((W_w - W_d) / W_d) \times 100 \quad (1)$$

여기서 *SFMC*: Surface fuel moisture content (%),

W_w : Weight of sample before dry-oven,

W_d : Weight of sample after dry-oven

이때, 수분함량은 시료가 함유한 수분의 무게를 건중량으로 나눈 값이므로 100%를 초과하는 값이 산출될 수 있으며, 100%는 시료에 포함된 수분의 무게가 건중량과 동일한 상태를, 200%는 건중량의 2배에 해당하는 수분을 함유한 상태를 의미한다. 생중량을 분모로 하는 생중량 기준 수분함량이 0~100% 범위로 제한되는 것과 달리, 건중량 기준 수분함량은 연료가 착화·연소되기 위해 증발시켜야 하는 수분량을 연료 건중량에 대한 비율로 직접 나타내므로 산불 연구에서 표준적으로 사용된다 (Anderson *et al.*, 1978; Kane and Prat-Guitart, 2018).

4. 수관층 연료량 조사

수관층 연료량은 수관화의 발달과 확산에 관여하는 핵심 인자이며, 우리나라의 대표적인 대형산불은 주로 침엽수림에서 수관화 형태로 확산하여 큰 피해를 발생시킨 것으로 보고되었다(Kim, 2015; Reinhardt *et al.*, 2006). 산불예방 숲가꾸기에서는 산불 위험성이 높은 소나무류를 주요 밀도조절 대상으로 설정하고 있으므로, 이 연구에서는 이러한 관리가 소나무류의 수관층 연료 특성에 어떻게 반영되었는지를 평가하고자 하였다. 이에 연구대상지 내의 소나무속인 소나무, 리기다소나무 및 곰솔을 분석

대상으로 선정하여 핵심구역, 일반구역 및 대조구역의 수관층 연료량을 추정하였다.

각 표본구 내 소나무속(*Pinus* spp.) 3종에 해당하는 개체목의 흉고직경을 측정한 후, Kim(2015)이 우리나라 침엽수종을 대상으로 개발한 부위별 연료량 추정식 가운데 조정결정계수(adjusted R^2)가 가장 높은 흉고직경 단일변수 형태의 식 (2)를 적용하여 개체목별 수관층 연료량을 추정하였다 (Table 1). 추정한 구역별 개체목의 수관층 연료량은 합산한 뒤, 표본구 면적(400 m²)을 ha 단위 (ton/ha)로 환산하여 구역별 평균값을 산정하였다.

$$\ln W_t = \beta_0 + \beta_1 \ln D \quad (2)$$

여기서 W_t : 개체목의 수관층 연료량(kg)

D : 흉고직경(cm)

β_0, β_1 : 수종별 회귀계수

5. 총 이용 가능한 연료량 산정

앞서 조사한 지표층 연료량과 수관층 연료량은 모두 산불에 이용 가능한 연료량으로 볼 수 없다. 먼저, 지표층의 연료량은 관목·낙엽·낙지·구과로 구성되어 모두 이용 가능한 연료로 볼 수 있으나, 수관층 연료량의 경우 잎과 1 cm 이하의 가지는 수관화 발생 시 80% 이상 연소되는 부위로 볼 수 있다(Call and Albini, 1997; Kim, 2015). 이에 따라 각 구역별로 산정된 지표층 연료량과 소나무류(소나무, 리기다소나무, 곰솔)의 이용 가능 수관 연료량을 합산하여 총 이용 가능한 연료량을 산정하였다 (식 3).

$$TAFL = SFL + ACFL \quad (3)$$

여기서 $TAFL$: 총 이용 가능한 연료량(ton/ha)

SFL : 지표층 연료량(ton/ha)

$ACFL$: 이용 가능한 수관연료량(ton/ha)

6. 통계 분석

이 연구에서는 산불예방 숲가꾸기 시행지에서의 구역별(핵심구역·일반구역·대조구역) 흉고직경과 수고, 부위별 지표층 연료량 및 수분함량의 차이를 검정하였다. 구역당 표본구 수가 3개로 적어 자료의 정규성을 가정하기 어렵고, Shapiro-Wilk 검정에서도 일부 항목이 정규성을 충족하지 못하였으므로 비모수 검정을 적용하였다(p -value<0.05). 구역 간 차이는 Kruskal-Wallis 검정으로 검정하였으며, 유의한 차이가 확인된 항목에 대해서는 Bonferroni 보정을 적용한 Dunn 검정으로 사후검정을 수행하였다(p -value<0.05). 모든 검정의 유의수준은 $\alpha=0.05$ 로 설정하였고, 그림에 표기된 서로 다른 알파벳은 사후검정 결과 구역 간 통계적으로 유의한 차이가 있음을 의미한다. 모든 통계 분석은 R version 4.5.2 (R Core Team, 2026)를 이용하여 수행하였다.

Table 1. Estimated parameters for allometric equations of crown fuel load by *Pinus* species

Components of fuels	<i>Pinus densiflora</i>		<i>Pinus rigida</i>		<i>Pinus thunbergii</i>	
	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1
Crown	-3.472	2.267	-5.379	2.970	-5.379	2.970
Available crown	-2.785	1.796	-4.271	2.339	-4.271	2.339

III. 결과 및 고찰

1. 매목조사 결과

임분 특성을 살펴보기 위해 매목조사를 실시한 결과(Table 2, Fig. 3), 전체 임목에서의 각 구역별 평균 흉고직경은 핵심구역 23.54 ± 11.54 cm, 일반구역 20.32 ± 8.74 cm, 대조구역 18.09 ± 9.41 cm로 나타나 각 구역별로 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다. 또한, 각 구역별 평균 수고는 핵심구역 11.56 ± 3.23 m, 일반구역 11.85 ± 2.59 m, 대조구역 10.62 ± 2.84 m로 나타나 대조구역에서의 평균 수고가 핵심구역 및 일반구역에 비해 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. 이와 같이 핵심구역에서 평균 흉고직경과 수고가 높게 나타난 이유에는 산림청이 실시하는 숲가꾸기 사업 중 솎아베기(간벌)의 대상지 선정 방식과도 매우 관련이 있다(KFS, 2026). 솎아베기의 목적은 흉고직경이 크고, 수고가 높아 재적이 우수함과 동시에 수간이 곧게 뻗은 임목을 남겨 우량재 생산을 위함이다. 따라서, 비교적 우수한 형질의 임목이 위치한 핵심구역에서의 개체목의 흉고직경과 수고가 높게 나타난 것으로 볼 수 있다.

하지만, 핵심구역에서 각 개체목이 가지는 평균 흉고직경과 평균 수고의 값이 다른 두 구역에 비해

Table 2. Summary statistics of stand characteristics by study area

Area	No. of plots	Diameter (cm)	Height (m)	BA (m^2/ha)	Stand density (tree/ha)
Core	3	$\frac{23.5}{6.0 - 54.0}$	$\frac{11.6}{5.0 - 17.0}$	$\frac{35.0}{32.8 - 36.3}$	$\frac{650}{475 - 775}$
General	3	$\frac{20.3}{6.0 - 44.0}$	$\frac{11.9}{5.0 - 17.0}$	$\frac{38.0}{32.8 - 46.6}$	$\frac{992}{825 - 1100}$
Control	3	$\frac{18.1}{6.0 - 56.0}$	$\frac{10.6}{5.0 - 16.0}$	$\frac{54.4}{44.2 - 62.1}$	$\frac{1667}{1450 - 1925}$

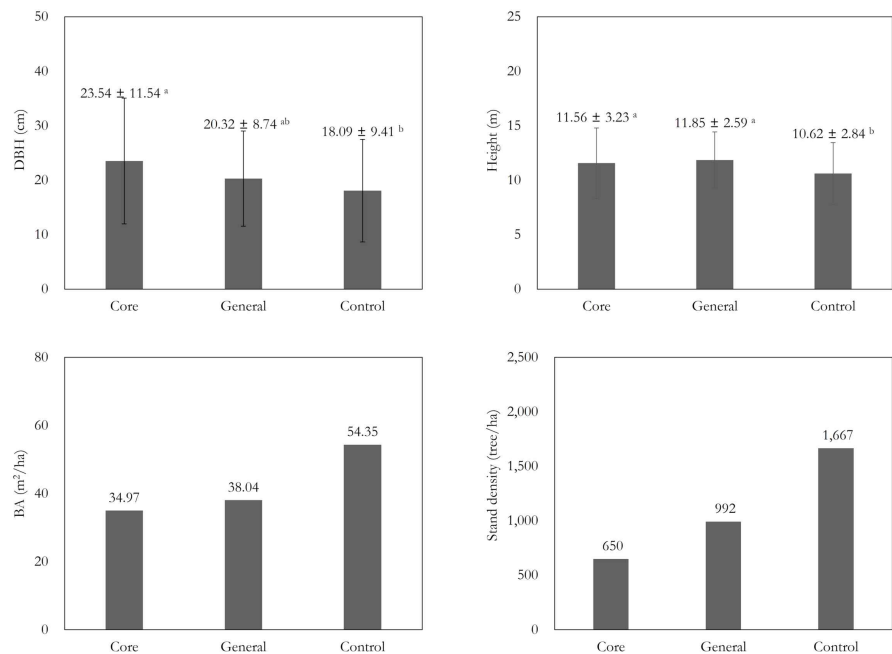


Fig. 3. Stand characteristics by study area (mean±SD).

상대적으로 크게 나타난 것이 산불예방 숲가꾸기의 효과가 반영되지 않은 것으로 볼 수는 없다. 핵심 구역에서의 흉고단면적과 임분밀도를 살펴보면, 각각 34.97 m²/ha와 650본/ha로 일반구역과 대조구역에 비해 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있으며, 이를 종합해보면 산불예방 숲가꾸기의 대상지에 있어 구역(핵심구역·일반구역) 선정은 물론, 그 효과도 잘 나타났다고 볼 수 있다. 이러한 경향은 선행연구에서도 나타났는데, 국내 소나무림의 모니터링 연구에서도 숲가꾸기 강도가 높을수록 임분밀도가 감소하는 경향이 보고되었으며(Lee et al., 2023), 국외 소나무림에서도 강도 높은 숲가꾸기 이후 임분밀도와 흉고단면적은 감소하고 잔존목의 평균 직경은 증가하는 유사한 양상이 확인되었다(del Río et al., 2008; Mäkinen and Isomäki, 2004).

한편, 산불예방 숲가꾸기의 주요 관리 대상인 소나무림의 구조적 특성을 구역별로 살펴본 결과(Table 3, Fig. 4), 소나무속 임분의 평균 흉고직경은 핵심구역 30.16±6.95 cm, 일반구역 25.37±6.41 cm, 대조구역 23.90±7.65 cm로 나타나, 핵심구역에서의 평균 흉고직경이 다른 두 구역(일반구역·대조구역)에 비해 통계적으로 유의하게 큰 값을 나타냈다. 또한, 각 구역별 평균 수고는 핵심구역 13.68±1.06 m, 일반구역 13.07±1.65 m, 대조구역 12.13±2.34 m로 나타나 모든 구역에서 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다. 이와 같은 결과는 전체 임목을 대상으로 평균 흉고직경과 평균 수고의 값의 경향과 동일

Table 3. Summary statistics of stand characteristics of *Pinus* spp. by study area

Area	No. of plots	Diameter (cm)	Height (m)	BA (m ² /ha)	Stand density (tree/ha)
Core	3	30.2 20.0 – 44.0	13.7 11.0 – 17.0	23.2 17.4 – 33.5	308 200 – 450
General	3	25.4 14.0 – 44.0	13.1 8.0 – 17.0	26.9 17.3 – 34.1	500 325 – 600
Control	3	23.9 10.0 – 56.0	12.1 5.0 – 16.0	41.2 34.4 – 47.8	833 650 – 1100

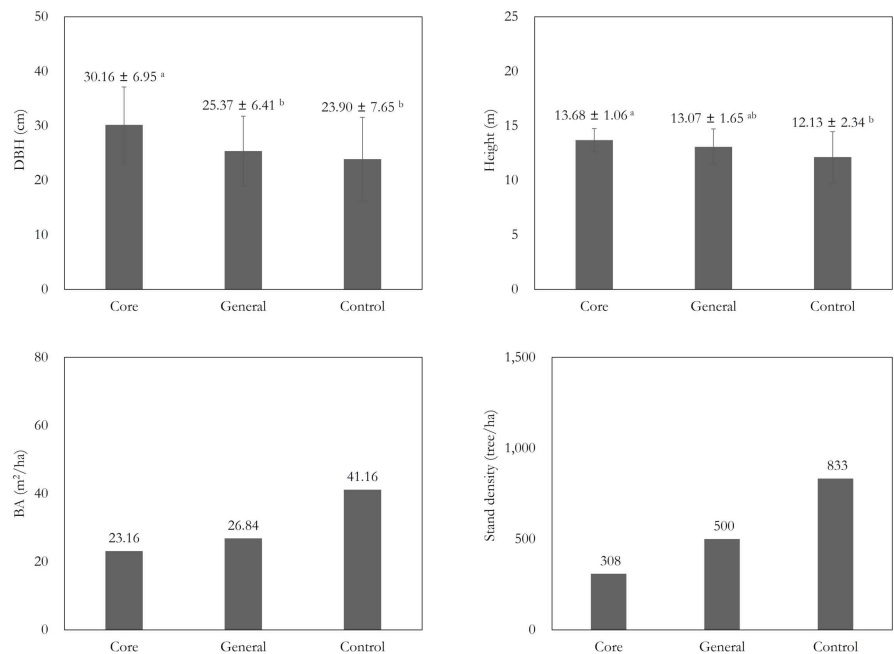


Fig. 4. Comparison of stand characteristics of *Pinus* spp. among study areas (mean±SD).

한 이유인 숲아베기의 대상지 선정과 관련이 있는 것으로 판단된다.

소나무속 임분의 산불예방 숲가꾸기 효과는 흉고단면적과 임분밀도에서도 확인할 수 있는데, 핵심 구역에서의 흉고단면적과 임분밀도는 각각 $23.16 \text{ m}^2/\text{ha}$ 와 $308\text{본}/\text{ha}$ 으로 나타나 일반구역 및 대조구역에 비해 상대적으로 낮은 값을 보였다. 산림청의 산불예방 숲가꾸기 사업시행 기준에 따르면 핵심구역에서는 상층 소나무류를 적정 밀도까지 솎아내고, 사다리 연료가 될 수 있는 중·하층 소나무류를 제거하도록 규정하고 있다(KFS, 2026). 이러한 작업 과정에서 피압목, 열세목 및 일부 소경목이 우선적으로 제거되면서 전체 임분밀도와 흉고단면적은 낮아지고, 잔존 임목은 상대적으로 대경목 중심으로 구성된 것으로 해석할 수 있다.

2. 지표층 연료량 분석 결과

지표층 연료량을 조사한 결과(Table 4, Fig. 5), 모든 부위에 있어서 핵심구역의 구역별 평균값이 가장 낮게 나타났으며, 특히 관목과 구과에서 통계적으로 유의하게 낮은 값이 확인되었다. 먼저, 관목은 핵심구역이 $0.37\pm0.25 \text{ ton/ha}$ 로 일반구역 $2.06\pm2.45 \text{ ton/ha}$ 와 대조구역 $2.08\pm2.48 \text{ ton/ha}$ 로, 구과는 $0.13\pm0.29 \text{ ton/ha}$, 일반구역 $0.27\pm0.30 \text{ ton/ha}$, 대조구역 $0.26\pm0.37 \text{ ton/ha}$ 로 나타났다. 이는

Table 4. Surface fuel loads by study area (mean $\pm$ SD)

Fuel type		Fuel loads (ton/ha)			
		Core area	General area	Control area	Total
Surface layer	Shrub	0.37 ± 0.25	2.06 ± 2.45	2.08 ± 2.48	4.50
	Fallen leaves	7.07 ± 3.07	10.85 ± 6.98	14.21 ± 2.57	32.13
	Branch	1.02 ± 0.59	1.89 ± 1.01	1.68 ± 0.73	4.59
	Cones	0.13 ± 0.29	0.27 ± 0.30	0.26 ± 0.37	0.66
Total fuel loads (ton/ha)		8.59	15.06	18.22	41.87

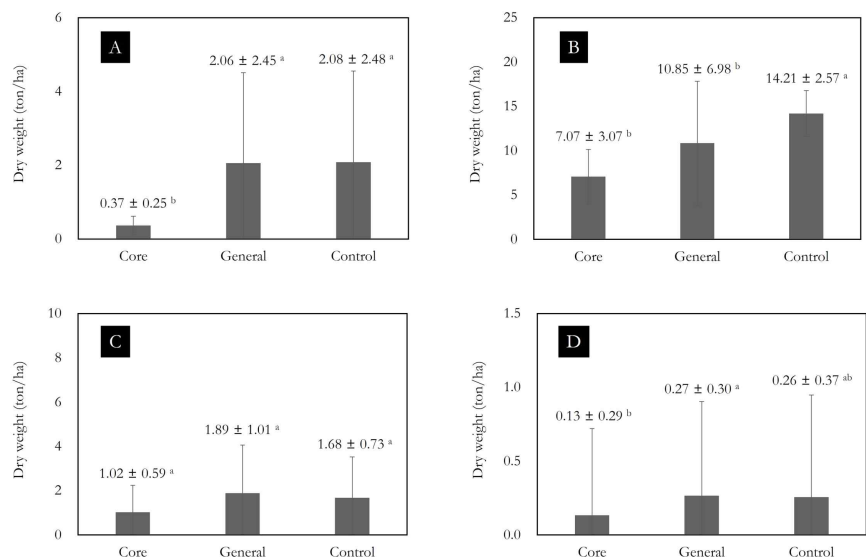


Fig. 5. Surface fuel loads by study area for (A) shrub, (B) fallen leaves, (C) branch, (D) cones (mean $\pm$ SD).

산림청의 산불예방 숲가꾸기 사업시행 기준(KFS, 2026)의 핵심구역에서 주요 작업 방법에서와 같이 상층은 소나무류는 적정 밀도로 솎아베기를 실시하되, 존치된 소나무류에 대해서는 가지 치기를 전량 실행한다. 또한, 중·하층은 소나무류는 전량 제거하는 것과도 매우 연관이 있다. 핵심구역은 소나무림으로서 소나무류가 대량 제거되면서 관목층의 연료량이 크게 줄고, 이에 따라 소나무의 열매인 구과 역시 감소한 것으로 볼 수 있다.

반면에 낙엽 연료량은 핵심구역 7.07 ± 3.07 ton/ha, 일반구역 10.85 ± 6.98 ton/ha, 대조구역 14.21 ± 2.57 ton/ha로 나타났다. 핵심구역과 일반구역 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 두 시행구역은 대조구역보다 유의하게 낮았다. 낙지 연료량은 핵심구역 1.02 ± 0.59 ton/ha, 일반구역 1.89 ± 1.01 ton/ha, 대조구역 1.68 ± 0.73 ton/ha였으며, 세 구역 간 유의한 차이는 확인되지 않았다. 낙엽과 낙지는 표본구 간 변이가 비교적 크게 나타났으며, 구역별 표본구 수가 3개로 제한된 점이 구역 간 차이를 통계적으로 명확하게 구분하는 데 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 또한 조사가 숲가꾸기 시행 후 1년 이상 경과한 시점에 이루어졌으므로, 조사된 연료량에는 작업 당시의 산물수집과 반출 결과뿐 아니라 이후 지속적으로 발생한 자연 낙엽과 낙지의 유입도 함께 반영되었을 것으로 판단된다(Keane, 2008).

지표층 연료의 건중량 기준 수분함량을 구역별 평균 값으로 비교한 결과, 대조구역 261%, 핵심구역 160%, 일반구역 130% 순으로 나타났다(Table 5, Fig. 6). 일반적으로 솎아베기 이후에는 임분의 통기

Table 5. Fuel moisture content (%) by fuel type and study area

Fuel type	Fuel moisture content (%)			Total average
	Core area	General area	Control area	
Shrub	278	208	296	261
Fallen leaves	108	104	154	122
Branch	118	96	119	111
Cones	135	112	475	240
Total average	160	130	261	184

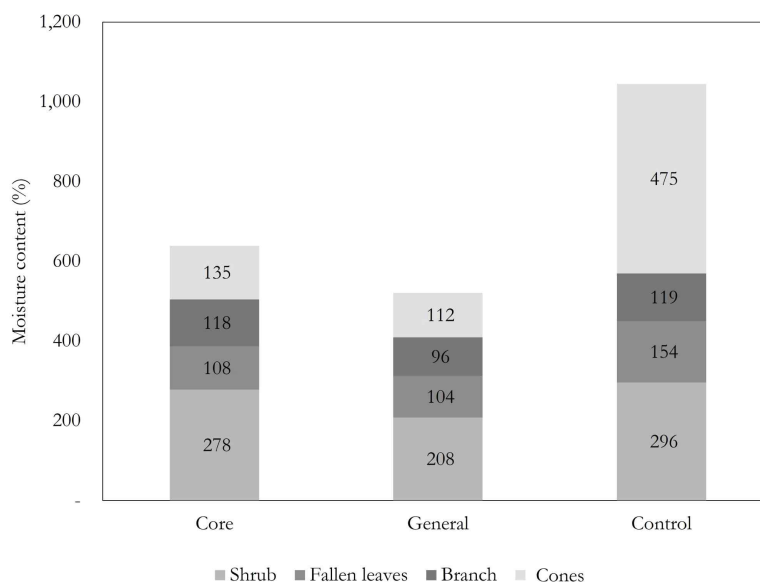


Fig. 6. Fuel moisture content of surface fuels by fuel type and study area (Moisture content is expressed on a dry-weight basis and therefore can exceed 100%).

성이 향상되고, 수관이 개방되어 지표층에 도달하는 일사량이 증가하면서 습도가 낮아지는 것으로 알려져 있다(Rambo and North, 2009). 이와 같은 과정에 의해 핵심구역·일반구역에서의 지표층 연료의 수분함량이 낮아진 것으로 판단된다. 한편, 지표층 연료의 수분함량이 낮을 경우에 산불의 착화와 연소가 상대적으로 용이할 수 있으나, 산불의 확산은 연료량과의 관련성이 매우 높은 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2021). 실제로 이 연구에서 지표층 연료량은 핵심구역과 일반구역에서 각각 8.59 ton/ha와 15.06 ton/ha로 대조구역의 18.22 ton/ha보다 낮은 것을 확인할 수 있었다. 즉, 산불예방 숲가꾸기가 시행된 구역에서는 연소와 확산 규모에 관여하는 연료량이 대조구역보다 낮게 나타난 반면, 지표층 연료의 수분함량 또한 함께 낮아져 초기 착화가 상대적으로 용이해질 수 있는 조건이 형성된 것으로 볼 수 있다.

이러한 점에서 시행구역의 연료량 감소를 곧바로 산불 위험의 전반적 감소로 해석하는 데에는 신중할 필요가 있다. 숲아베기 이후 수관이 개방되면 지표층에 도달하는 일사량과 임내 풍속이 증가하여 연료의 건조가 촉진되며(Rambo and North, 2009), 이는 낮은 강도의 발화원에 의해서도 착화가 이루어질 수 있는 조건을 형성한다. 특히 일반구역은 세 구역 가운데 지표층 연료의 수분함량이 가장 낮게 나타났음에도(130%) 지표층 연료량은 15.06 ton/ha로 대조구역(18.22 ton/ha)과 큰 차이를 보이지 않아, 착화 용이성과 가연물량이 동시에 확보되는 조건에 해당한다. 반면 핵심구역은 수집산물의 임의 반출과 지면 긁기가 전량 시행되어 지표층 연료량이 8.59 ton/ha로 크게 낮아졌으며, 이는 수분함량 감소에 따른 착화 위험 증가를 상당 부분 상쇄할 수 있는 조건으로 판단된다. 따라서 산불예방 숲가꾸기의 효과를 확보하기 위해서는 상층의 밀도조절과 함께 수집산물의 임의 반출, 지면 긁기 등 지표층 연료 처리가 반드시 병행되어야 하며, 특히 산물수집이 전면적으로 이루어지지 않는 일반구역에 대해서도 지표층 연료 처리 방안을 보완할 필요가 있다.

각 구역별 지표층 연료의 수분함량을 부위에 따라 살펴본 결과, 핵심구역에서는 관목(278%), 구과(135%), 낙지(118%), 낙엽(108%) 순으로, 일반구역에서는 관목(208%), 구과(112%), 낙엽(104%), 낙지(96%) 순으로 수분함량이 높은 것으로 나타났다. 반면에 대조구역에서는 구과(475%), 관목(296%), 낙엽(154%), 낙지(119%) 순으로 나타나 산불예방 숲가꾸기를 시행한 핵심구역·일반구역에 비해 구과의 수분함량이 매우 높은 것으로 확인되었다. 이 연구에서는 핵심구역 전체 면적과 일반구역의 상당 면적에서 지면 긁기를 통한 지표층 연료량을 제거하였으므로, 이후 수집된 구과는 대부분 조사 당해연도(2025년)에 낙하한 것으로 볼 수 있다. 반면 대조구역은 별도의 처리가 이루어지지 않아 수년간 낙하한 구과가 누적되어 있으며, 이에 따라 부후가 진행된 개체의 비율이 상대적으로 높았을 것으로 판단된다. 부후된 구과는 인편 조직의 공극이 발달하여 보수력이 증가하는 반면 건중량은 감소하기 때문에, 건중량 기준 수분함량이 상대적으로 높게 산출될 것으로 사료된다.

또한, 낙엽·낙지의 수분함량이 관목에 비해 낮게 나타났는데 이는 관목이 살아 있는 연료인 반면, 낙엽과 낙지는 식물체에서 분리된 고사 연료라는 특성과 관련될 수 있다. 살아 있는 연료의 수분함량은 뿌리를 통한 수분 흡수와 식물의 생리적 조절, 수종별 특성의 영향을 받지만, 낙엽과 낙지 같은 고사 연료는 대기와 직접 수분을 교환하므로 강수, 상대습도, 기온 및 일사 등의 변화에 따라 빠르게 건조되거나 습윤된다(Jolly and Johnson, 2018; Nelson, 2000). 따라서 이 연구에서 낙엽과 낙지의 수분함량이 관목보다 낮게 나타난 것은 생연료와 고사 연료의 수분 조절 방식 차이가 일부 반영된 결과로 해석할 수 있다.

3. 수관층 연료량 분석 결과

구역별 수관층 연료량을 살펴본 결과(Table 6, Fig. 7), 대조구역 136.75 ton/ha, 핵심구역 115.94 ton/ha, 일반구역 82.10 ton/ha 순으로 나타나, 비교적 수관층에 강한 강도의 간벌이 시행된 핵심구역에서의 수관층 연료량이 일반구역에 비해 높게 나타났다. 이는 핵심구역에 위치한 임목의 흉고직경과 관련이 있는데 수관층 연료량 산정을 위한 식을 살펴보면(식 2), 개체목별 흉고직경이 입력

Table 6. Crown fuel loads by study area

Fuel type	Crown fuel loads (ton/ha)			
	Core area	General area	Control area	Total
Crown fuel load	115.94	82.10	136.75	334.79
Available crown fuel load	39.93	33.46	53.56	126.95

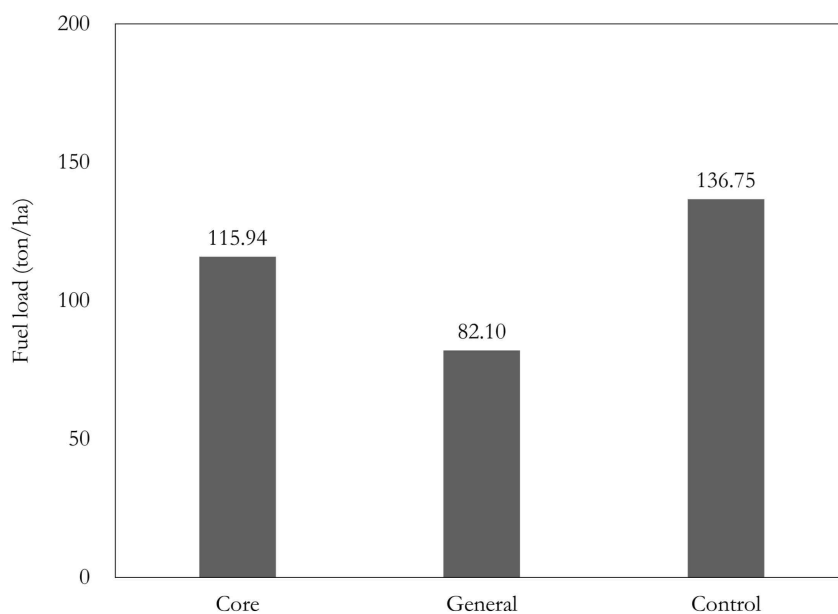


Fig. 7. Crown fuel loads by study zones.

인자임을 알 수 있다. 실제로, 이 연구에서 핵심구역의 평균 흉고직경은 23.54 cm로 일반구역과 대조구역에 비해 높은 것을 확인할 수 있었다.

4. 총 이용 가능 연료량 분석 결과

지표층 연료량과 이용 가능한 수관층 연료량을 합산하여 총 이용 가능 연료량을 산정한 결과, 대조 구역이 71.78 ton/ha로 가장 높았으며, 핵심구역과 일반구역은 각각 48.52 ton/ha로 동일하게 나타났다 (Table 7, Fig. 8). 핵심구역과 일반구역을 구성하는 지표층 연료량과 이용 가능한 수관층 연료량의 비율을 각각 살펴보면, 핵심구역의 경우 지표층 연료량이 8.59 ton/ha로 일반구역의 15.06 ton/ha에 비해 작은 수치를 나타내 핵심구역에서의 중·하층 소나무류는 전량 제거하고, 지표층 유기물을 전량 제거한 효과가 반영된 것을 확인할 수 있다. 반면에 이용 가능한 수관층 연료량의 경우 핵심구역에서 강도 높은 간벌과 가지치기가 이루어졌음에도 불구하고, 핵심구역 39.93 ton/ha로 일반구역 33.46 ton/ha에 비해 큰 것으로 나타났다. 따라서, 향후 산불예방 숲가꾸기에 있어 핵심구역에서의 수관층 간벌 강도는 일반구역에 비하여 상대적으로 강하게 실시할 필요가 있어 보인다.

IV. 요약

이 연구는 국립대전숲체원 일대의 산불예방 숲가꾸기 사업대상지를 대상으로 시행 강도가 다른

Table 7. Total available fuel loads by study area

Fuel type	Total available fuel loads (ton/ha)			
	Core area	General area	Control area	Total
Surface fuel load	8.59	15.06	18.22	41.87
Available crown fuel load	39.93	33.46	53.56	126.95
Total available fuel load	48.52	48.52	71.78	168.82

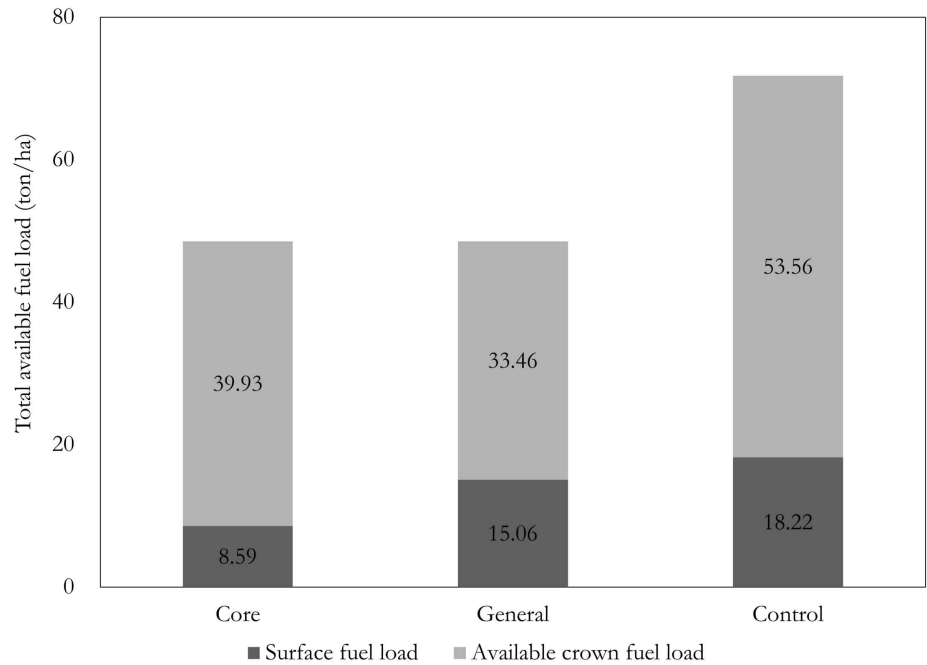


Fig. 8. Total available fuel loads by study area.

핵심구역·일반구역과 미시행 대조구역의 연료 특성을 비교함으로써, 사업의 연료 저감 효과를 정량적으로 검증하고자 하였다.

임분 특성을 분석한 결과, 핵심구역의 평균 흉고직경(23.54 cm)과 수고(11.56 m)는 대조구역(18.09 cm, 10.62 m)에 비해 통계적으로 유의하게 큰 값을 나타낸 반면, 흉고단면적과 임분밀도는 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 피압목과 열세목이 우선적으로 제거되고 형질이 우수한 잔존목 중심으로 임분이 재편된 것으로 판단되며, 산불예방 숲가꾸기 사업의 구역 선정과 작업 방식이 임분 구조에 반영된 결과로 볼 수 있다. 이러한 경향은 소나무속 임분만을 대상으로 한 분석에서도 동일하게 확인되었다.

지표층 연료량은 핵심구역 8.59 ton/ha, 일반구역 15.06 ton/ha, 대조구역 18.22 ton/ha로 나타나, 대조구역 대비 각각 약 52.9%와 17.3%의 낮은 값을 나타냈다. 특히 관목과 구과에서 핵심구역의 값이 통계적으로 유의하게 낮았는데, 이는 중·하층 소나무류의 전량 제거와 수집산물의 임외 반출이 지표층 연료 저감에 직접적으로 기여하였음을 보여준다. 한편 지표층 연료의 수분함량은 시행구역에서 상대적으로 낮게 나타났는데(핵심구역 160%, 일반구역 130%, 대조구역 261%), 이는 시행구역에서 초기 착화가 상대적으로 용이해질 수 있음을 의미하므로 연료량 감소만으로 산불 위험이 전반적으로 낮아졌다고 보기는 어렵다. 따라서 상층 밀도조절과 함께 수집산물의 임외 반출 등 지표층 연료 처리를 병행하는 것이 중요하며, 특히 지표층 연료량이 상대적으로 많이 잔존한 일반구역에 대한 보완이

필요한 것으로 판단된다.

수관층 연료량은 대조구역 136.75 ton/ha, 핵심구역 115.94 ton/ha, 일반구역 82.10 ton/ha 순으로 나타났으며, 이 가운데 산불 발생 시 실제 연소에 관여하는 이용 가능한 수관층 연료량은 각각 53.56 ton/ha, 39.93 ton/ha, 33.46 ton/ha였다. 핵심구역에서 강도 높은 솜아베기와 가지치기가 시행되었음에도 일반구역보다 높은 값을 보인 것은, 잔존 임목이 대경목 중심으로 구성되어 개체목당 수관 연료량이 크기 때문으로 해석된다.

지표층 연료량과 이용 가능한 수관층 연료량을 합산한 총 이용 가능 연료량은 핵심구역과 일반구역이 각각 48.52 ton/ha, 대조구역이 71.78 ton/ha로 나타나, 두 시행구역 모두 대조구역 대비 약 32.4%의 저감 효과를 나타냈다. 다만 두 구역이 동일한 총량에 도달한 경로에는 차이가 있었다. 대조구역 대비 저감량을 구성 요소별로 살펴보면, 핵심구역은 지표층에서 9.63 ton/ha, 이용 가능한 수관층에서 13.63 ton/ha가 저감된 반면, 일반구역은 각각 3.16 ton/ha와 20.10 ton/ha로 나타나 수관층 저감의 비중이 훨씬 컸다. 즉, 핵심구역에서는 지표층 연료 제거가 사업 목표에 부합하게 이루어졌으나, 수관층 밀도 조절의 기여도는 일반구역에 미치지 못하였다. 이러한 결과는 핵심구역에서 지표층 연료 처리에 비해 수관층 밀도조절의 기여도가 상대적으로 낮게 나타날 수 있음을 보여준다. 다만 이 연구는 단일 대상지에서 1회 조사한 결과에 기초하므로, 핵심구역의 수관층 밀도조절 강도에 대한 판단은 다양한 임상과 지역을 대상으로 한 추가 연구를 통해 확인될 필요가 있다.

다만 이 연구는 사업 시행 이후의 구역 간 비교에 기초한 공간적 대체 설계로, 시행 이전의 임분 및 연료 자료가 확보되어 있지 않다. 세 구역은 동일 산림 내에서 지형과 임상 조건이 유사한 지점을 선정하였으나 평균 임령에 차이가 있었으므로, 관찰된 구역 간 차이에는 사업 시행의 영향과 함께 시행 이전부터 존재하였을 가능성이 있는 임분 간 고유한 차이가 일부 포함되어 있을 수 있다. 또한 단일 사업대상지를 대상으로 구역별 3개 표본구역에서 1회 조사를 수행한 결과이므로 결과의 일반화에도 한계가 있으며, 특히 낙엽과 낙지는 표본구 간 변이가 크게 나타나 구역 간 차이를 통계적으로 구분하기 어려웠다. 따라서 향후에는 사업 시행 전후를 동일 임분에서 비교하는 조사 설계를 적용하고, 다양한 임상과 지역의 사업대상지로 표본 수를 확대하여 시행 이후 경과 연수에 따른 연료 회복 양상을 추적하는 반복 조사가 이루어질 필요가 있다. 아울러 이 연구에서 산정된 구역별 연료량을 산불행동 시뮬레이션의 입력자료로 활용한다면, 산불예방 숲가꾸기의 효과를 확산 속도와 화염 강도 등 실질적인 산불행동 지표로 환산하여 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 감사의 글

이 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림산업 현장 맞춤형 인재양성 사업 ‘RS-2024-00402624’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

VI. 참고문헌

1. Anderson HE, Schuette RD, Mutch RW. 1978. Timelag and equilibrium moisture content of ponderosa pine needles. USDA Forest Service, Research Paper INT-202. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, USA.
2. Brown JK. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service, General Technical Report INT-16. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, USA.
3. Call PT, Albini FA. 1997. Aerial and surface fuel consumption in crown fires. Int J Wildland Fire 7:259-264.

4. Cunningham CX, Williamson GJ, Bowman DMJS. 2024. Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nat Ecol Evol* 8:1420-1425.
5. Davis KT, Peeler J, Fargione J, Haugo RD, Metlen KL, Robles MD, Woolley T. 2024. Tamm review: A meta-analysis of thinning, prescribed fire, and wildfire effects on subsequent wildfire severity in conifer-dominated forests of the Western US. *For Ecol Manage* 561:121885.
6. del Río M, Calama R, Cañellas I, Roig S, Montero G. 2008. Thinning intensity and growth response in SW-European Scots pine stands. *Ann For Sci* 65:308.
7. Furlaud JM, Prior LD, Williamson GJ, Bowman DMJS. 2023. Bioclimatic drivers of fire severity across the Australian geographical range of giant Eucalyptus forests. *J Ecol* 111:1369-1387.
8. Jain P, Barber QE, Taylor SW, Whitman E, Castellanos-Acuña D, Boulanger Y, Chavardès RD, Chen J, Englefield P, Flannigan M, et al. 2025. Anthropogenic climate change has increased the odds of extreme regional forest fire years globally. *Nat Commun* 16:5145.
9. Jolly WM, Johnson DM. 2018. Pyro-ecophysiology: Shifting the paradigm of live wildland fuel research. *Fire* 1:8. doi:10.3390/fire1010008.
10. Kane JM, Prat-Guitart N. 2018. Fuel moisture. In Manzello SL (ed). *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. pp 1-13.
11. Kang SC, Park JH, Lee SY. 2016. Prediction of large-scale forest fire risk in pine forests using changes in wind speed and effective humidity through case analysis. *J Korean Assoc Geogr Inf Stud* 19:146-156.
12. Keane RE. 2008. Biophysical controls on surface fuel litterfall and decomposition in the northern Rocky Mountains, USA. *Can J For Res* 38:1431-1445.
13. Kim SY. 2015. Study on fuel characteristics of major coniferous species for forest fire risk assessment. Ph.D. thesis, Kongju National University, Gongju, Korea.
14. Kim SY, Yoon SH, Kim YS, Lee BD, Lee YJ, Jang MN. 2015. Comparison of forest fire potential hazards for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis* stands. *Crisisonomy* 11:261-276.
15. Korea Forest Service. 2020. Forest resources of Korea (National Forest Inventory), revised ed. Korea Forest Service, Daejeon, Korea.
16. Korea Forest Service. 2023. Standards for forest fire prevention forest tending project. Korea Forest Service, Daejeon, Korea.
17. Korea Forest Service. 2025a. Estimated forest fire damage area in Gyeongbuk, Gyeongnam, and Ulsan reaches 104,000 ha; Korea Forest Service makes every effort toward restoration. Press release. Korea Forest Service, Daejeon, Korea. Available from: <http://www.forest.go.kr>
18. Korea Forest Service. 2025b. Forest road expansion and forest tending projects are essential to minimize wildfire damage. Press release, April 30, 2025. Korea Forest Service, Daejeon, Korea.

19. Korea Forest Service. n.d. Effects of forest tending. Available from: https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_000970&mn=AR01_03_03. Accessed August 6, 2026.
20. Kreye JK, Brewer NW, Morgan P, Varner JM, Smith AMS, Hoffman CM, Ottmar RD. 2013. Effects of fuel load and moisture content on fire behaviour and heating in masticated litter-dominated fuels. *Int J Wildland Fire* 22:440-445.
21. Kwak HB, Lee WK, Lee SY, Won MS, Lee MB, Koo KS. 2008. The analysis of relationship between forest fire distribution and topographic, geographic, and climatic factors. In: *Proceedings of the GIS 2008 Joint Spring Conference*. pp 465-470.
22. Lee BD, Lee SY, Lee MB. 2005. Development of a surface fire spread prediction model using GIS. *J Korean Soc For Sci* 94:481-487.
23. Lee SJ, Kim SY, Han SH, Lee YE, Seo KW, Kwon CG. 2021. Effect of climate factors on fuel moisture contents in forest: A case study on *Pinus densiflora* stands in Hongreung Forest. *Crisisonomy* 17:89-97.
24. Lee SJ, Kwon CG, Seo KW, Lee YJ, Kim SY. 2023. Thinning effect on fuel load and crown fire hazard: A case study of *Pinus densiflora* in Goseong, Gangwon Province. *Crisisonomy* 19:27-37.
25. Lee SY, Lee MU. 2007. Comparative analysis of forest fire risk according to stand characteristics between managed and unmanaged sites. *Fire Sci Eng* 21:52-58.
26. Mäkinen H, Isomäki A. 2004. Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. *For Ecol Manage* 201:311-325.
27. Nelson RM Jr. 2000. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Can J For Res* 30:1071-1087. doi:10.1139/x00-032.
28. R Core Team. 2026. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available from: <https://www.R-project.org/>
29. Rambo TR, North MP. 2009. Canopy microclimate response to pattern and density of thinning in a Sierra Nevada forest. *For Ecol Manage* 257:435-442.
30. Reinhardt ED, Scott J, Gray K, Keane R. 2006. Estimating canopy fuel characteristics in five conifer stands in the western United States using tree and stand measurements. *Can J For Res* 36:2803-2814.
31. Riaño D, Chuvieco E, Salas J, Palacios-Orueta A, Bastarrika A. 2002. Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in a Mediterranean ecosystem. *Can J For Res* 32:1301-1315.
32. Scott JH, Reinhardt ED. 2001. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Research Paper RMRS-RP-29. Fort Collins, CO, USA.
33. Van Wagner CE. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Can J For Res* 7:23-34.