

간벌강도별 지표연료량에 따른 소나무 화염특성 분석

이예은¹ · 송재학² · 임상준³ · 권경남⁴ · 권춘근^{5*}

¹강원특별자치도 산불방지센터, ²국립안동대학교 산림과학과, ³서울대학교 농업생명과학연구원,
⁴고려대학교 기계공학과, ⁵국립산림과학원 산불연구과

An Examination of the Fire Behavior of *Pinus densiflora* Fuel Beds with Thinning Intensity

Ye-Eun Lee¹, Jae Hak Song², Sangjun Im³,
Kyung Nam Kwon⁴ and Chun Geun Kwon^{5*}

¹Forest Fire Center of Kangwon State, Gangneung 25428, Korea

²Forest Sciences, Andong National University, Andong 36729, Korea

³Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

⁴Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

⁵Forest Fire Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 최근 동시다발화·대형화되고 있는 산불에 대비하기 위해 산불연료관리의 중요성이 부각되고 있다. 본 연구에서는 실내실험 및 Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator(WFDS)를 활용한 지표화 확산모의를 통해 연료관리가 산불위험성 저감에 미치는 영향을 평가하였다. 소나무 낙엽을 대상으로 강원 고성군에 위치한 국립산림과학원 ‘대형산불방지 소나무 숲 연료관리’ 시험지의 현장조사를 통해 대조구, 간벌강도 20%, 간벌강도 40% 구역의 지표연료량을 적용하였다. 본 연구결과에서 화염높이, 수직온도분포 및 최대열방출량은 간벌강도가 높아질수록 감소하는 경향을 나타내면서 산불위험성이 낮아지는 것으로 나타났다. 전반적으로 WFDS가 실내실험에 비해 수치가 높게 모의되는 현상이 있었으나, 경향성은 유사하게 나타났기 때문에 국내 소나무 지표화에 대한 WFDS의 적용가능성을 확인할 수 있었다. 본 연구결과는 숲가꾸기 강도에 따른 산불위험성을 평가하여 산불예방을 위한 연구 기반을 구축하는 데 있어 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

Abstract: Forest fuel management plays a crucial role in the proper management of frequent and large-scale forest fires worldwide. This study evaluated the impact of fuel management on reducing forest fire risk by through surface fire behavior through laboratory experiments and simulations using the Wildland Fire Dynamics Simulator. For *Pinus densiflora* litter, fuel conditions were established based on field surveys in Goseong-gun, Gangwon-do, focusing on control, 20% thinning, and 40% thinning sites. Results indicated that visible flame height, vertical temperature distribution, and maximum heat release rate tended to decrease with higher thinning intensity, implying a lower forest fire risk. Overall, the WFDS simulations produced higher values compared to the laboratory experiments, but the trends were similar. The results of this study can serve as fundamental data for evaluating forest fire risk based on thinning intensity and establishing a research foundation for fire prevention.

Key words: fuel management, forest fire, WFDS, laboratory experiment, heat release rate

서론


우리나라는 1973년부터 시행된 치산녹화사업으로 울창한

산림을 보유하게 되었으나 산림 내 탈 수 있는 연료가 축적되어 산불위험성이 크게 증가하였다(Lee et al., 2022). 특히 동해안 지역은 휘발성 물질을 함유한 소나무림 비율이 높고, 지역적 특성인 양간지풍으로 인해 대형산불 발생 위험이 높다. 그리고 지역주민의 생활권인 해안가 주변에는 소나무가 주로 분포하고 있어 산불로 인한 인명 및 시설물 피해가 함께 우려된다(KFS, 2024). 실제로 2018년 고성산

* Corresponding author

E-mail: chunggeun@korea.kr

ORCID

Kwon Chun Geun  https://orcid.org/0000-0002-7392-9246

불, 2019년 고성·속초산불, 강릉·옥계산불 피해지 중 80% 이상이 소나무림으로 이루어져 있었으며, 강풍에 따른 수관화(crown fire)·비화(spot fire)로 인한 주택이나 시설물 피해가 컸다. 반면, 시설물 주변 산림이 내화수림대로 이루어져 있거나, 숲가꾸기 등 연료관리가 시행된 지역은 상대적으로 산불로 인한 피해가 적었다(Lee et al., 2019).

미국, 유럽 등 주요 산불선진국은 기후위기에 따른 대형산불에 대응하기 위하여 산림 연료관리를 적극 추진하고 있다. 2022년 미국 산림청(USFS)은 산불연료 저감, 산림 회복력 강화 등 산불예방에 초점을 맞춘 ‘산림 연료관리 10년 전략’을 발표하였다(USFS, 2022). 숲가꾸기를 시행한 산림은 산불연료가 줄어들어 수관화 전이·확산이 억제되고, 결과적으로 산불의 규모 및 강도를 줄이는 효과를 가져온다(UNEP, 2022). 이처럼 이상기후에 따라 동시다발화·대형화되는 산불발생 패턴에 대비하고 피해를 저감시키기 위한 산불연료관리 중요성이 최근 부각되고 있다.

한편, 지표화(surface fire)는 가장 흔하게 발생하는 산불의 형태이며 수관화 발생의 주요원인을 제공하기 때문에 산불행동기작 구명에 있어 기본적으로 필수적인 연구 대상이다(Kwon et al., 2021; Guo et al., 2023). 산불 연소(combustion)는 서로 밀접하게 연관된 여러 인자들이 복합적으로 작용하기 때문에 물리·화학적 해석에 기반을 둔 이론적인 모델링 결과는 현장에서 발생하는 산불행동을 해석하는 데 제한적이다(Wotton et al., 2012). 이러한 이유로 산불예방을 위한 산불행동기작을 구명하기 위해 실험 연구와 산불행동의 수치해석적 모사를 보완적으로 수행하기도 한다(Madrigal et al., 2010, Kwon et al., 2021).

따라서 산불피해 저감을 위한 효율적인 산림연료관리 계획을 수립하기 위해서는 지표화에 대한 산불현장의 환경요인이 반영된 산불행동 모의가 필요하다. 더불어 지표화 확산 영향인자에 따른 산불행동을 실험과 수치해석 모델링을 통해 분석하고, 이를 통해 산불행동기작을 명확하게 규명함으로써 연료관리가 산불위험성 저감에 미치는 효과를 검증해야 한다.

국외에서는 Fernandes et al(2000)가 BEHAVE 산불확산 예측시스템을 활용하여 낙엽, 유기물, 관목 등 하층식생의 제거를 통한 연료관리가 산불강도에 미치는 효과를 모의하였다. Campbell-Lochrie et al.(2023)는 실내실험을 통해 연료 종류, 연료량, 연료 밀도, 연료 깊이 등 연료 구조에 따라 화염높이, 열방출률(heat release rate), 연소율 등 열 전달 기작이 달라진다고 제시하였다. Guo et al.(2023)은 실험을 통해 방화선(fire break)의 너비가 넓어질수록 산불강도는 감소하지만, 연료가 화염으로부터 열을 전달받는 과정에서 풍속으로 인해 일정 수준의 임계치(253°C,

43kW/m²)를 초과하면 방화선의 너비와 무관하게 산불확산이 진행된다고 제시하였다.

국내에는 Lee and Lee(2007)가 현장조사를 통해 간벌시행지는 미시행지에 비해 수고, 흉고직경, 지하고 등이 증가하고 임목 밀도가 낮아져 지표화에 의한 산불 위험성이 감소한다고 제시하였다. Kim et al.(2010)은 연소실험을 통해 소나무 낙엽의 밀도가 증가함에 따라 연소시간, 화염높이 등이 지속적으로 증가하여 산불 위험성이 높아진다고 제시하였다. Lee et al.(2023)은 WFDS(Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator)를 활용한 산불확산 모의를 수행하여 간벌강도가 높을수록 산림 내 가연 연료량이 줄어들어 산불위험도 감소할 것으로 예측하였다.

국내사례는 주로 현장조사나 컴퓨터를 활용한 수치모의를 통해 산불행동을 예측하여 연료관리 효과를 평가한 연구가 대부분이고 실증실험은 기초적인 연구에서만 일부 진행되었다. 산불 현장과 수치 모의 결과를 결합하여 지표화 확산의 주요 기작을 규명하고 이에 따른 연료관리 효과를 효율적으로 평가할 수 있는 통합 연구체계 구축은 아직 부족한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 간벌 시행지 강도별 연료조건을 반영한 지표화 실증실험과 WFDS 확산 모의를 수행하고, 이를 통해 간벌강도별 지표연료량에 따른 화염특성을 분석하여 연료관리가 산불위험성 저감에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

재료 및 방법

1. 실험설계

간벌강도별 연료량에 따른 지표화 실험을 수행하기 위해 경기 포천시에 위치한 국립산림과학원 국가산불실험센터의 수평풍동장비를 활용하였다(Figure 1). 이 장비는 길이 6 m, 폭 1.5 m, 높이 1.5 m의 제원을 가지며, 지형경사, 풍속, 연료조건과 같은 다양한 실험조건에서 산불행동을 모의할 수 있다. 실험과정을 통해 산소가 원활하게 공급될 수 있도록 천장 부분이 개방되어 있는 형태로 설계되었으며, 장비의 한쪽 측면은 화염 진행을 살펴볼 수 있도록 투명한 내화유리로 설계되었다.

간벌강도에 따른 지표화의 온도 분포와 화염전파속도를 파악하기 위해 약 1,400°C까지 측정 가능한 온도센서(K-traffic, K-type thermocouple wire 0.32mm)를 설치하였다. 온도센서는 수평간격 0.6 m로 길이 4.5m까지, 수직간격 0.2 m로 높이 1.0m까지 총 56개를 배열하였으며, 연료층이 위치한 하단부는 화염전파속도 측정을 위해 수평 0.3 m 간격으로 온도센서를 배열하였다.

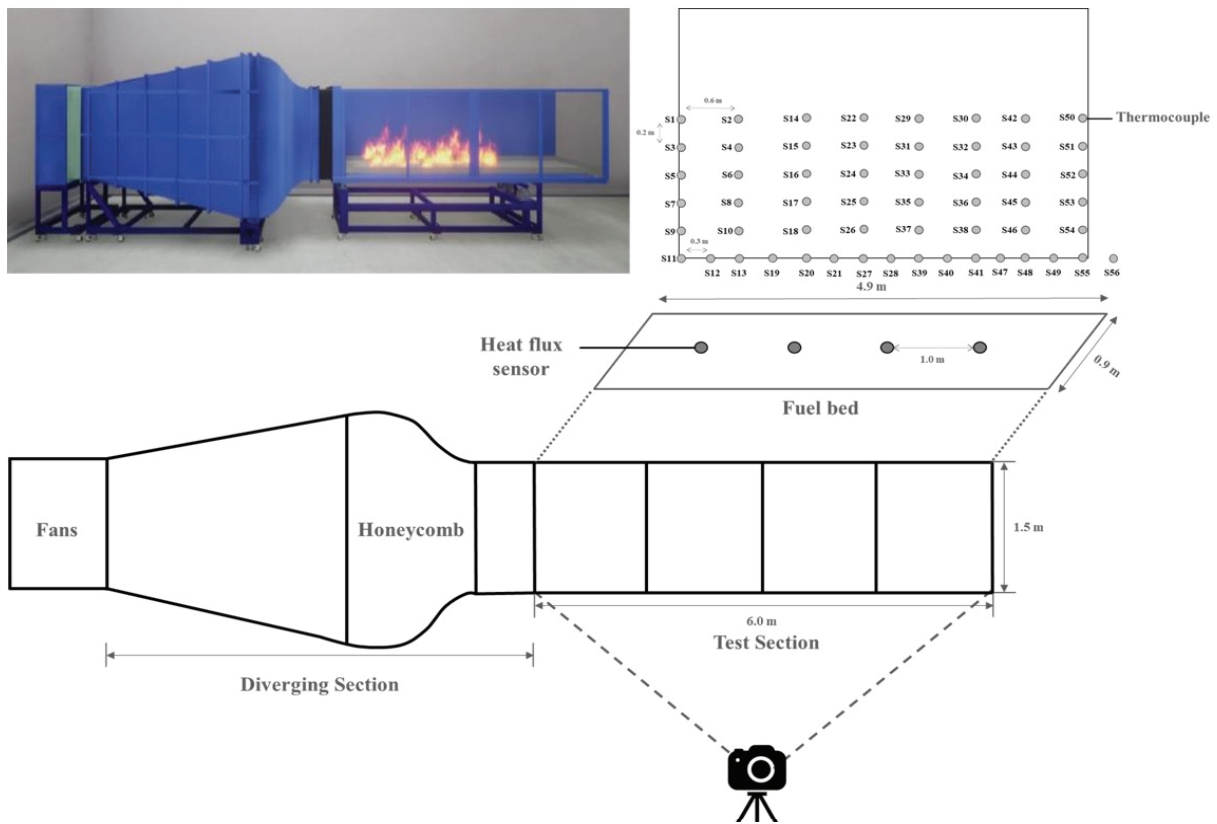


Figure 1. Schematic layout of experimental design.

열방출율은 산불 연소, 화염 및 확산에 영향을 미치는 중요한 변수이다(Madrigal et al., 2010). 이 실험에서는 지표화의 열방출량 측정을 위해 약 100kW/m²까지 측정이 가능한 열유속센서(Hukseflux, SBG01)를 활용하였다. 열유속센서는 선행연구(Di Cristina et al., 2022)를 참고하여 연소판 바닥에 부착하였으며, 연료층의 점화지점부터 1 m 간격으로 총 4개의 센서를 배열하였다. 화염높이를 분석하기 위해 가시광선·NIR 촬영이 가능한 광학카메라(JAI, Fusion camera)를 실험장비의 측면에 배열하였으며, 열화상카메라(FLIR, T1040, T506)를 연료층의 시작과 끝 지점에 각각 설치하여 화염온도를 측정하였다.

실험에 반영된 연료조건은 국립산림과학원에서 운영관리하는 ‘대형산불 방지 소나무 숲 연료관리 시험지’의 실측값을 기준으로 설정하였다(Figure 2). 해당 임분은 2000년 동해안 산불피해 후 소나무가 조림된 곳으로 2020년 국립산림과학원에서 영동지역 대형산불 방지를 위한 소나무 숲 관리방안을 제시하기 위해 조성되었다. 2020년 6월 숲가꾸기를 시행할 때 해당 시험지는 III영급(23년) 소나무림에 해당했으며, 임목 본수를 기준으로 간벌 미시행지, 간벌강도 20%, 간벌강도 40%의 3구역으로 구분하여 약 2.8 ha 면적의 숲가꾸기를 시행하였다(Figure 3). 시험

지의 ha당 평균 축적은 177.4 m³/ha이었고, 숲가꾸기 직후 측정된 초기 지표연료량과 연간 퇴적량을 합산하여 최종적으로 간벌 미시행지 2.10 kg/m², 간벌강도 20% 1.62 kg/m², 간벌강도 40% 1.29 kg/m²를 실험조건으로 적용하였다. 연료층은 길이 4.9 m, 폭 0.9 m로 설치하였으며 실험조건당 3반복으로 실험을 수행하였다.

2. 분석방법

간벌강도별 지표연료량에 따른 화염전파속도는 연료층 길이를 화염도달시간으로 나누어 산출하였다. 화염이 도달하는 기준 온도는 국립산림과학원에서 제시한 소나무 낙엽의 발화온도인 285 °C로 설정하였다. 산불위험을 평가하는 중요한 지표인 화염특성은 화염높이, 화염길이, 화염각으로 나타낼 수 있는데, 일반적으로 바람이나 경사조건이 없는 조건에서 화염이 확산하게 되면 화염높이와 화염길이는 같은 값을 나타내고 직각형태의 화염각이 생성된다(Kim and Lee, 2009; Lee et al., 2020). 이 연구에서는 바람과 경사조건을 적용하지 않았기 때문에 화염특성 중 화염높이 항목만 분석하였으며, 영상을 통해 육안으로 확인되는 화염을 기준으로 분석하였다. 간벌강도에 따른 온도특성은 온도센서를 통해 2초당 1회 측정된 데이터를 활

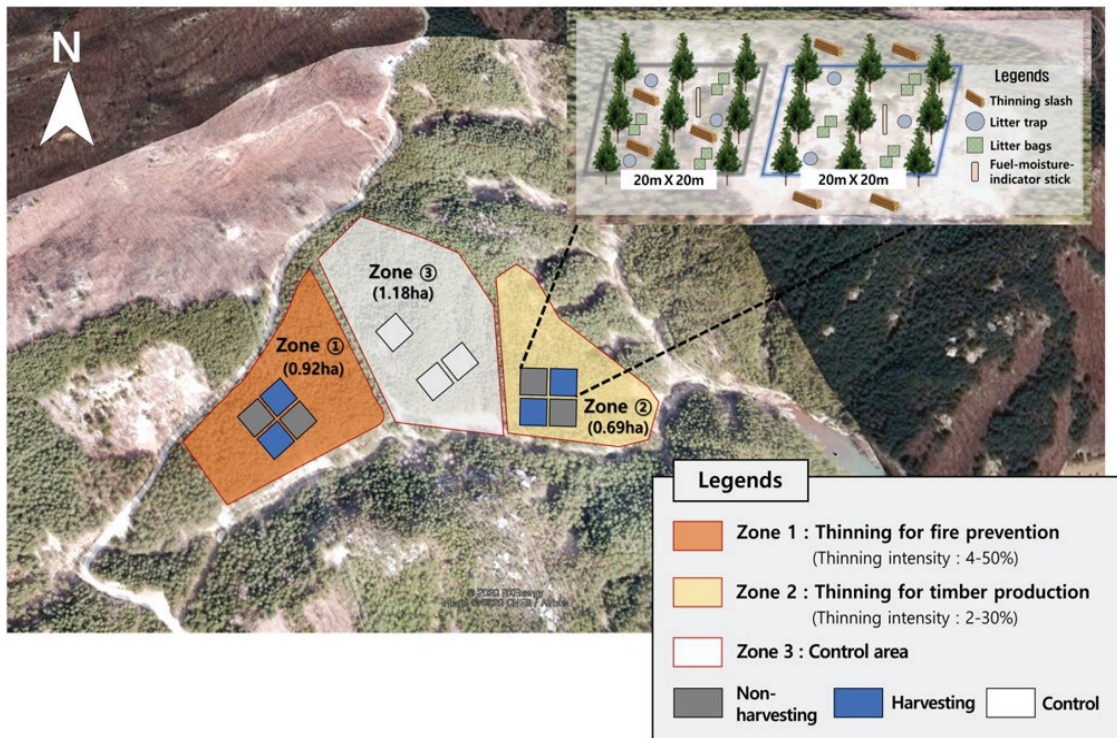


Figure 2. Location and layout of field observation for fuel data.

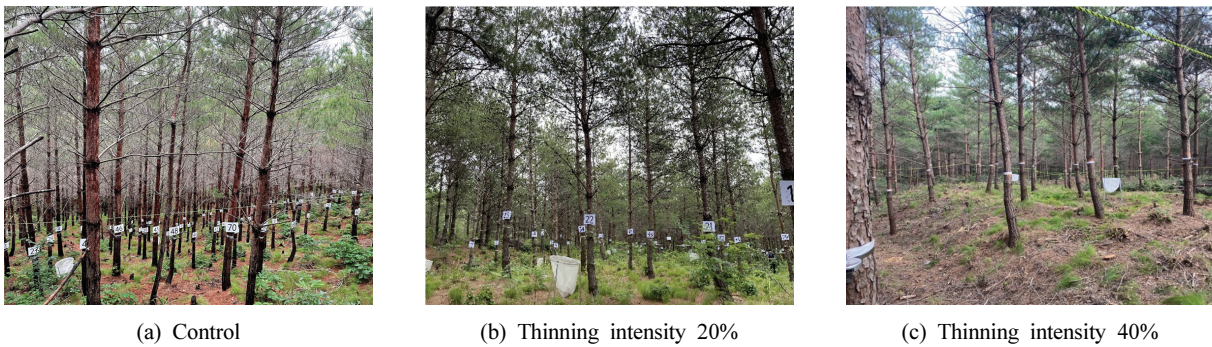


Figure 3. Study sites classification based on thinning intensity.

용했으며, 열방출율은 heat flux sensor를 통해 1초당 1회 측정된 데이터를 활용하여 분석하였다. 온도데이터와 열 유속데이터는 이동평균기법(moving average)을 적용하였으며, 모든 데이터에 대해 각 변수별로 통계적으로 유의한 차이가 있는지 확인하기 위해 R-statistical package (4.3.0) 프로그램을 활용하여 일원분산분석을 실시하였다.

WFDS는 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 화재역학시뮬레이터(Fire Dynamics Simulator, FDS)의 확장판으로 전산유체역학을 이용하여 연료의 열전달, 연소 및 열분해 등을 해석하는 프로그램이다. WFDS는 실내실험 규모부터 경관(landscape)단위의 대규모까지 다양한 공간에서 산불확산을 모의할 수

있으며, 연료 유형(잎, 가지, 임목 등), 수분 함량, 연료 분포 등 다양한 연료 조건에 대해 모의할 수 있다(USFS, 2013). WFDS는 다양한 환경·연료조건에 따른 산불위험성을 평가하고, 효율적인 산불대응 전략을 수립하는 등 산불 예방 및 대응에 있어 중요하게 활용될 수 있다. 국내에서는 Kwon et al.(2021)이 소나무 수종을 대상으로 수관화 전이 및 화염전파특성을 모사하여 국내 수종에 대한 WFDS의 전반적인 적용가능성을 확인한 바 있다. 이 연구에서는 WFDS를 활용하여 지표화 실험과 동일한 환경에서의 산불확산을 모의하고, 이를 실험 결과와 종합하여 간벌강도별 연료량에 따른 산불위험성을 평가하였다.

Table 1. Simulation parameter of surface fire with thinning intensity from WFDS.

Computational domain (L×D×H, m)	6.0×1.5×1.6
Grid size (m)	0.02
Execution time (s)	1200
Time step interval (s)	CFL < 1
Fuel load (kg/m ²)	Control 2.10, Thinning intensity 20% 1.62 Thinning intensity 40% 1.29

결과 및 고찰

1. 화염전파속도

지표화 실험과 WFDS 확산 모의를 통해 간벌강도별 지표 연료량에 따른 화염전파속도를 분석한 결과는 Figure 4, 5와 같다. 실험에서 화염전파속도는 대조구 1.97(±0.06) mm/s, 간벌강도 20% 2.04(±0.11) mm/s, 간벌강도 40% 1.77(±0.28) mm/s로 분석되었으며, 통계적으로 유의한 차이는 없었다 (Table 2). WFDS 모의결과는 실험과 유사하게 연료량이 많은 대조구에서 화염전파속도가 상대적으로 빠르게 나타났다(Figure 5). 이러한 결과는 화염전파속도가 풍속과 연료 수분함량에 영향을 받으며, 연료량은 화염강도 등 다른 산물행동 특성에 영향을 주지만 화염전파속도에는 영향을 미치지 않는다는 선행연구(Cheney et al., 1993) 결과와 유사하다. 일반적으로 화염 확산은 바람에 의한 열전달의 영향으로 화염이 미연소 연료쪽으로 기울어져 미연소 연료가 예열과정(preheating)을 거쳐 연소되면서 발생한다(Guo et al., 2023). 이 연구에서는 연료량이 많은 대조구에서 화염강도가 강했지만, 바람이나 경사의 영향이 없어 화염이 수직으로 올라가면서 복사열이 연료에 전달되는 범위가 제한되었다(Xavier, 1998). 이에 따라 화염이 확산되는 방향으로는 복사열, 대류열 등의 열 전달이 유의하게 작용하지 않아 모든 연료조건에서 화염전파속도가 큰 차이를 보이지 않았다.

2. 화염높이

간벌강도별 지표연료량에 따른 화염높이는 실내실험에서 대조구 1.03(±0.13) m, 간벌강도 20% 0.85(±0.11) m,

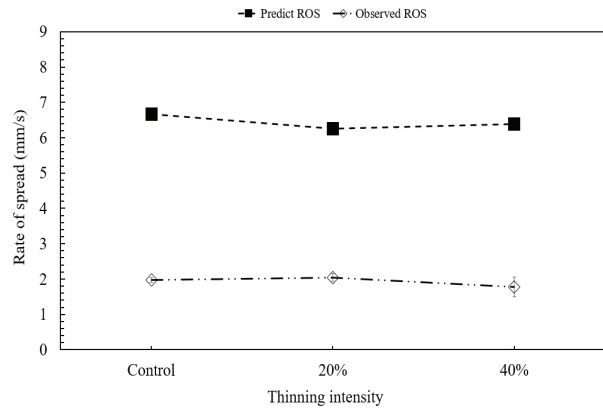


Figure 4. Variations in rate of spread (ROS) with fuel data.

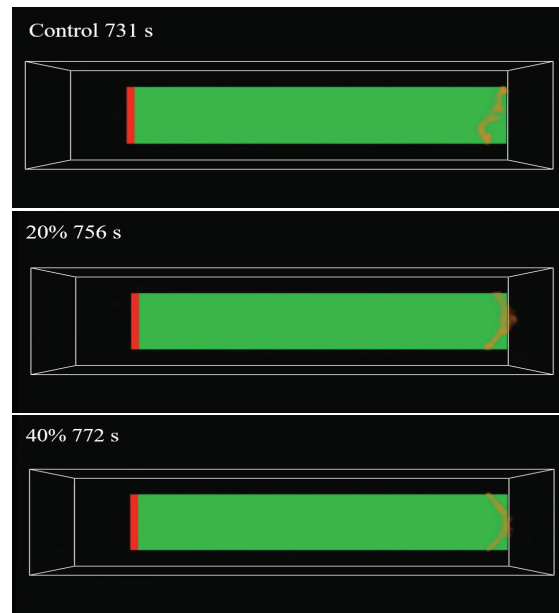


Figure 5. Examples of ROS simulation WFDS.

간벌강도 40% 0.68(±0.08) m로 나타났으며, WFDS 모의에서는 대조구 2.10(±0.27) m, 간벌강도 20% 1.78(±0.33) m, 간벌강도 40% 1.25(±0.16) m로 분석되었다(Table 3). WFDS 수치모의와 실험결과에서 모두 간벌강도가 높아짐에 따라, 그리고 연료량이 감소할수록 화염높이가 감소하는 경향을 보였으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다

Table 2. Rate of spread results of the one-way ANOVA by thinning intensity

Thinning intensity	Rate of spread (mm/s)			p-value
	Mean	S.D.		
Laboratory experiment	Control	1.97	0.06	0.235
	20%	2.04	0.11	
	40%	1.77	0.28	

Table 3. The statistical results of visible flame height by thinning intensity.

Thinning intensity	Visible flame height (m)							scheffe	p-value
	Average	Min	Q1	Median	Q3	Max			
Laboratory experiment	Control	1.03 ± 0.13	0.84	0.97	1.06	1.08	1.22	Control - 20%	0.075
	20%	0.85 ± 0.11	0.76	0.81	0.81	0.85	1.03	20% - 40%	0.081
	40%	0.68 ± 0.08	0.54	0.64	0.70	0.71	0.79	40% - control	< 0.001***
WFDS	Control	2.16 ± 0.24	1.80	2.10	2.16	2.34	2.40	Control - 20%	0.065
	20%	1.73 ± 0.33	1.42	1.53	1.53	2.06	2.13	20% - 40%	0.037*
	40%	1.25 ± 0.17	1.04	1.14	1.23	1.41	1.45	40% - control	< 0.001***

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

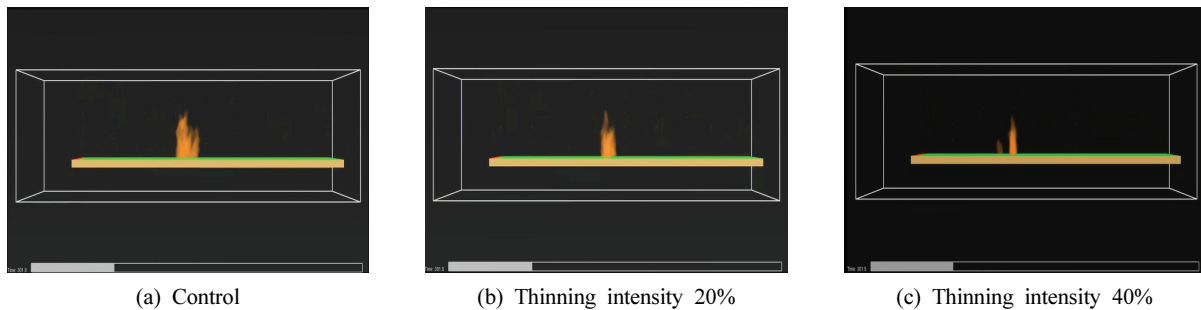


Figure 6. Simulated results of visible flame height using WFDS (300s after ignition).

(Figure 6). Cole et al.(2011)은 풍속과 연료수분함량이 높을수록 화염길이와 화염높이가 감소하고, 연료량과 연료층 두께가 증가할수록 화염길이와 높이가 증가한다고 제시한 바 있으며, 본 연구의 결과는 이와 유사했다. 화염의 크기, 모양, 온도 등에 따라 주변으로 전달되는 복사열 및 대류열의 양이 달라지기 때문에 화염특성은 산불확산예측, 산불강도 등 산불행동을 평가하기 위한 중요한 항목이며, 이 중 화염높이는 열방출속도, 화염강도와 밀접한 관련이 있다(Wotton et al., 2012; Lee et al., 2020). 본 연구는 간벌강도가 높아질수록 화염높이가 감소하여 산불강도가 줄어들면서 산불위험이 낮아지는 것으로 나타났다.

3. 수직온도분포

간벌강도별 지표연료량에 따른 수직온도분포를 분석한 결과는 Table 4와 5와 같다. 모든 연료조건에서 지면으로부터 수직거리가 증가할수록 열전달이 비선형적으로 감소하여 온도가 낮아지는 경향을 보였으며, 결정계수 값은 실내실험에서 0.96-0.99, WFDS 수치모의에서 0.83-0.90 수준이었다(Figure 7). 수직으로의 열전달이 감소하는 비율은 실험에서 대조구 < 간벌강도 20% < 간벌강도 40% 순으로 나타나면서 상대적으로 연료량이 적은 간벌강도 40% 조건에서 열전달이 가장 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. WFDS 모의결과에서는 간벌강도 20% 조건에서 수직으로의 열전달이 가장 크게 감소하는 것으로 나타

났다. 수관화 전이(crown fire transition)는 지표화로부터 발생한 열에너지가 강해질 때 수관연료가 가열되면서 발화하는 현상을 의미하며, 수직으로의 열전달이 높을수록 수관화 전이가 발생할 위험성이 높다(Lee et al., 2020). 본 연구는 간벌강도가 높아질수록 수직으로의 열전달이 감소하면서 산불위험이 낮아지는 것으로 나타났다.

4. 최대 열방출량

간벌강도별 지표연료량에 따른 최대 열방출량 분석 결과, 실내실험에서 대조구 > 간벌강도 20% > 간벌강도 40% 순으로 높게 나타났으며 강도 40%에 비해 약 2.1배 높았다. WFDS 모의에서도 지표화 실험과 마찬가지로 대조구 > 간벌강도 20% > 간벌강도 40% 순으로 최대 열방출량이 높게 나타났다(Table 6, Figure 8). 산불행동기작을 설명하는 항목 중 하나인 열량은 산불강도와 관련이 있으며, 산불강도가 강할수록 방출되는 열량은 높은 값을 나타낸다. 본 연구 결과에서는 간벌강도가 높아질수록 열방출량이 낮게 나타나면서 산불강도가 낮아지는 것으로 나타났다.

토 의

WFDS 수치모의 및 실내실험 측정 결과에서 간벌강도가 높아질수록 화염높이와 수직온도, 최대열방출량이 유의하게 감소하는 경향을 나타내면서 대형산불 발생 위험

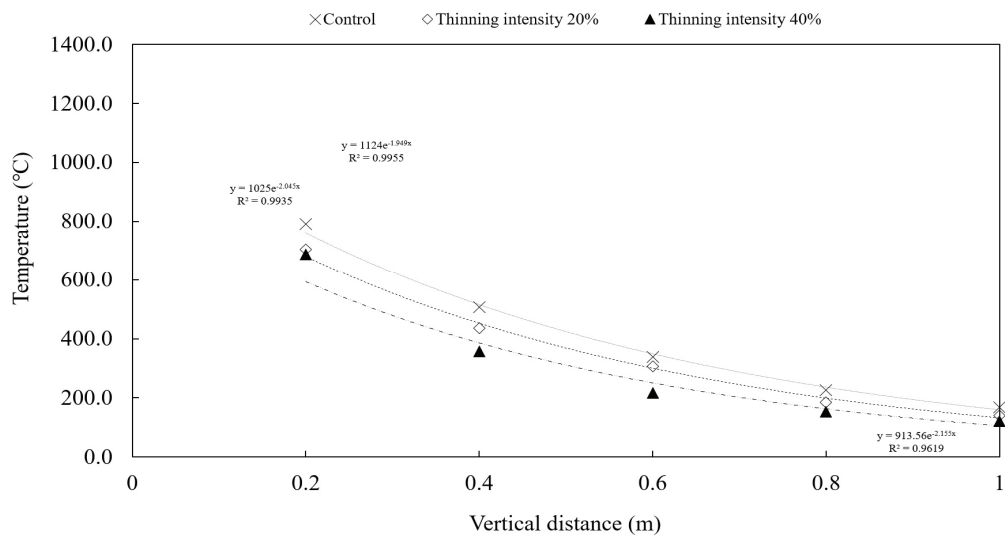
Table 4. Vertical temperature characteristics by thinning intensity from laboratory experiment and WFDS.

Thinning intensity	Vertical distance (m)	Vertical temperature profiles (°C)					
		Min	Q1	Median	Q3	Max	
Laboratory experiment	Control	0.2	460.2	692.1	765.0	813.1	1376.0
		0.4	256.9	438.3	491.1	595.5	764.9
		0.6	203.3	301.5	337.0	377.3	504.6
		0.8	128.9	210.6	226.9	253.2	307.5
		1.0	91.8	157.5	165.9	191.1	222.4
	20%	0.2	175.3	673.0	752.1	818.8	865.8
		0.4	282.2	351.1	425.4	505.9	698.7
		0.6	186.9	258.9	294.5	366.9	451.1
		0.8	106.8	142.8	187.9	217.0	272.7
		1.0	79.3	121.4	140.6	164.9	182.7
	40%	0.2	464.9	617.5	694.3	778.9	877.6
		0.4	206.5	254.4	355.5	423.6	565.6
		0.6	112.8	157.0	213.6	250.0	393.2
		0.8	91.2	120.9	150.4	176.0	249.2
		1.0	75.5	101.2	122.1	136.6	194.8
WFDS	Control	0.2	1181.8	1192.1	1212.7	1235.2	1250.8
		0.4	739.7	788.9	919.8	1036.8	1043.9
		0.6	200.1	293.6	441.8	583.3	717.6
		0.8	230.4	266.8	344.6	403.2	431.4
		1.0	223.8	266.7	293.7	334.6	574.1
	20%	0.2	1105.4	1141.2	1171.0	1197.8	1224.4
		0.4	522.4	599.9	734.2	909.9	1112.0
		0.6	186.2	237.7	368.2	503.0	710.6
		0.8	200.5	250.6	268.3	340.6	456.1
		1.0	199.8	202.9	256.4	345.5	545.9
	40%	0.2	1093.9	1103.3	1138.3	1175.9	1192.8
		0.4	486.0	516.2	540.0	628.0	850.8
		0.6	191.7	218.4	313.3	331.4	686.2
		0.8	195.9	207.1	232.6	246.1	505.5
		1.0	189.4	198.9	202.9	361.5	534.7

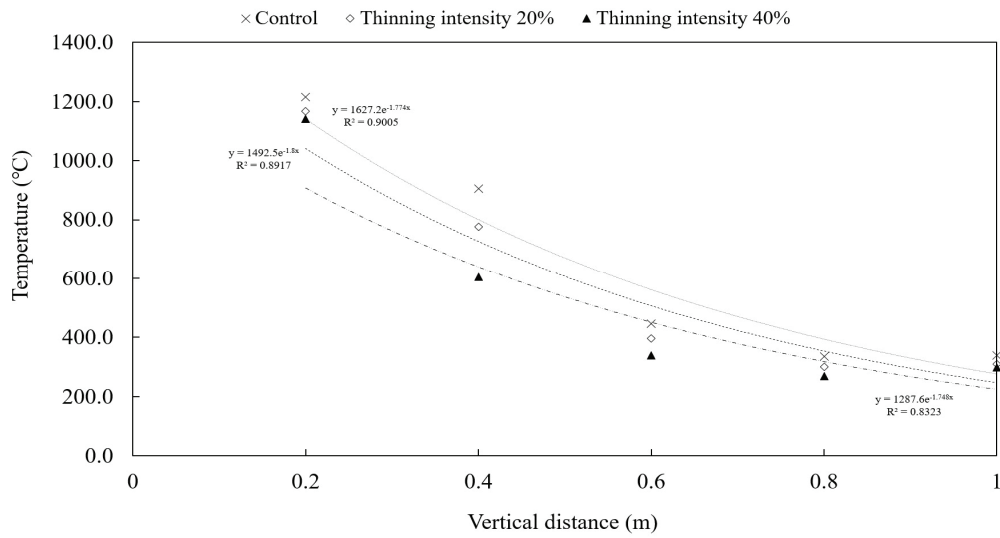
Table 5. Vertical temperature results of the one-way ANOVA by thinning intensity

Vertical distance (m)	Thinning intensity	Vertical temperature profiles (°C)					
		Mean	S.D.	scheffe	p-value		
Laboratory experiment	0.2	Control	790.4	240.8			
		20%	705.0	160.5	no significance	0.171	
		40%	688.5	116.4			
	0.4	Control	507.0	135.9	Control - 20%	0.107	
		20%	435.8	112.6	20% - 40%	< 0.001***	
		40%	356.7	105.6	40% - control	0.065	
	0.6	Control	338.9	65.0	Control - 20%	0.288	
		20%	307.1	74.4	20% - 40%	< 0.001***	
		40%	216.6	71.1	40% - control	< 0.001***	
	0.8	Control	226.7	43.3	Control - 20%	0.008**	
		20%	185.8	50.3	20% - 40%	< 0.001***	
		40%	152.9	39.1	40% - control	0.040*	
	1.0	Control	168.3	30.0	Control - 20%	0.004**	
		20%	139.7	30.4	20% - 40%	< 0.001***	
		40%	121.9	27.5	40% - control	0.1119	
	WFDS	0.2	Control	1214.5	31.6	Control - 20%	0.095
			20%	1168.0	50.9	20% - 40%	0.008**
			40%	1140.8	48.2	40% - control	0.415
0.4		Control	905.8	156.3			
		20%	775.7	260.9	no significance	0.158	
		40%	604.2	166.7			
0.6		Control	446.0	202.1			
		20%	395.9	201.9	no significance	0.642	
		40%	338.1	182.1			
0.8		Control	335.8	85.0			
		20%	300.4	92.9	no significance	0.526	
		40%	269.3	117.6			
1.0		Control	338.6	137.7			
		20%	310.1	144.4	no significance	0.9	
		40%	297.5	150.6			

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$



(a) laboratory experiment



(b) WFDS

Figure 7. Results of vertical temperature profiles: a) laboratory experiment, and b) WFDS.

Table 6. The statistical results of peak heat flux by thinning intensity.

Thinning intensity	Peak heat flux (kW/m ²)							scheffe	p-value
	Average	Min	Q1	Median	Q3	Max			
Laboratory experiment	Control	4.34 ± 2.21	3.00	3.21	3.36	4.50	7.64	Control - 20%	0.705
	20%	3.95 ± 1.33	2.34	3.06	3.65	4.57	6.56	20% - 40%	0.071
	40%	2.84 ± 0.92	1.73	2.41	2.57	3.02	5.16	40% - control	0.011*
WFDS	Control	145.63 ± 15.18	124.34	140.47	149.58	154.73	159.00	Control - 20%	0.196
	20%	128.11 ± 14.26	113.13	119.76	126.37	134.72	146.58	20% - 40%	0.333
	40%	114.17 ± 5.84	110.39	110.42	111.78	115.53	122.72	40% - control	0.019*

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

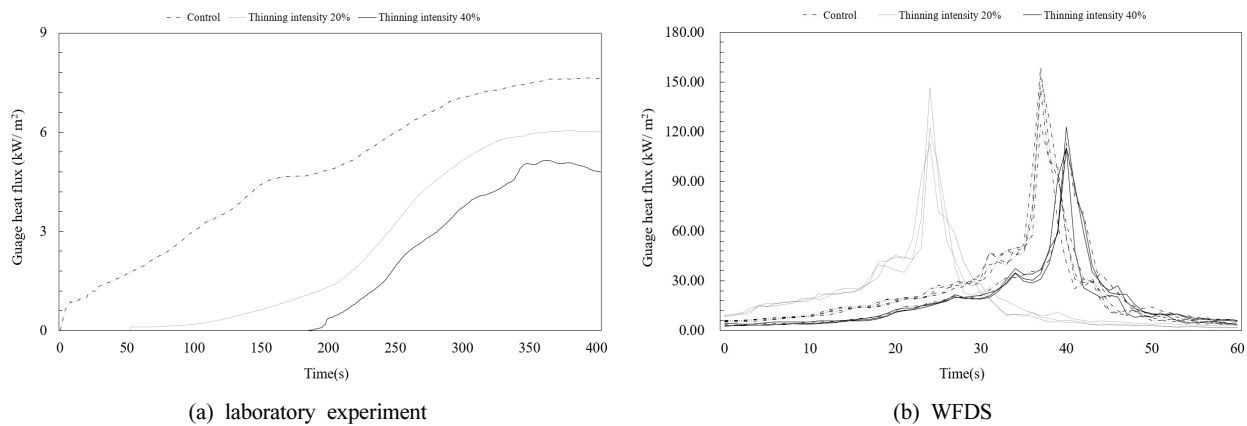


Figure 8. Peak heat flux results from laboratory experiment and WFDS.

이 낮아지는 것으로 나타났다. 다만, WFDS 결과가 실험 데이터에 비해 화염전파속도 및 화염높이에서는 약 2배, 열방출량은 최대 20배 가량 높게 모의되는 경향이 있었다. 이와 관련하여 먼저, WFDS와 실험의 서로 다른 초기 점화원이 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 실내실험은 토치를 사용하여 점(point)의 형태로 연료 점화가 이루어지는 반면에 WFDS에서는 선(line) 형태로 배열된 연료층의 너비가 동시에 점화된다. 이로 인해 본 연구의 WFDS 모의 결과에서는 초기 점화원에 의해 연료층의 중앙부에 고온 영역이 형성되고 뜨거워진 공기가 상승하면서 화염을 뒤로 잡아 이끄는 형태가 나타났으며, 중앙부의 화염 전파 시작이 지연되어 실제 실험과는 확산형태가 다르게 나타났다. 일반적인 수치모의에서는 실제 현장이나 실내실험과는 다르게 연료가 일시에 완전히 타는 상황을 모의하기 때문에 상대적으로 화염강도를 과대 예측하는 경향이 나타나 WFDS가 실험환경을 완벽하게 모사하지 못한다 (Terrei et al., 2019). 하지만 WFDS 모의결과가 실내실험과 유사한 경향성을 나타냈기 때문에 국내 소나무 수종의 지표화 연구에 있어 WFDS의 적용이 가능할 것으로 사료된다. 이 연구에서는 산불행동에 영향을 미치는 여러 인자 중 연료조건만 이용했기 때문에 추후 경사, 풍속조건 등을 고려한 보완 연구를 통해 지표화 기작을 보다 명확하게 구명해야 할 것이다.

결론

연료관리에 따른 대형산불 위험 저감효과를 평가하기 위해 간벌강도별 지표연료량에 따른 지표화 실증실험 및 WFDS 확산 모의를 통해 화염특성을 분석하였다. 본 연구의 결과에서 지표연료량은 화염높이, 수직온도, 최대 열방출량에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 간벌강도가

높아지면 연료량이 줄어들고, 이는 화염강도의 감소로 이어져 결과적으로 대형산불 발생 위험을 저감시킬 것으로 사료된다. 지표화 기작을 보다 명확하게 구명하기 위해 추후 경사, 풍속조건 등을 고려한 연구를 추가적으로 수행할 계획이다. 이 연구를 통해 실내규모의 지표화 실험에서의 WFDS 적용 가능성을 확인하였으며, 연구결과는 산불예방 및 대형산불 방지를 위한 연구 기반을 구축하는 데 있어 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Campbell-Lochrie, Z., Walker-Ravena, C., Gallagher, M., Skowronski, N., Mueller, E.V. and Hadden, R.M. 2023. Effects of fuel bed structure on heat transfer mechanisms within and above porous fuel beds in quiescent flame spread scenarios. *International Journal of Wildland Fire* 32: 913-926.
- Cheney, N.P., Gould, J.S. and Catchpole, W.R. 1993. The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire* 3: 31-44.
- Cole, W.J., Dennis, M.H., Fletcher, T.H., and Weise, D.R. 2011. The effects of wind on the flame characteristics of individual leaves. *International Journal of Wildland Fire* 20: 657-667.
- Di Cristina, G., Gallagher, M. R., Skowronski, N. S., Simeoni, A., Rangwala, A. and Im, S.K. 2022. Design and implementation of a portable, large-scale wind tunnel for wild-fire research. *Fire Safety Journal* 131: 103607.
- Fernandes, P., Botelho, H. and Loureiro, C. 2000. Fire hazard implications of alternative fuel management techniques—case studies from northern Portugal. In: Neuenschwander L.F. and Ryan, K.C. (Eds.), *Proceedings from the Joint*

- Fire Science Conference and Workshop 2: 268-270.
- Fuentes, A. and Consalvi, J.L. 2013. Experimental study of the burning rate of small-scale forest fuel layers. *International Journal of Thermal Sciences* 74: 119-125.
- Guo, H., Yang, Z., Ye, Z., Xiang, D., Gao, Y. and Zhang, Y. 2023. Experimental analysis on the behavior of a laboratory surface fire spreading across a firebreak with different winds. *Forests* 14: 2455.
- Guo, H., Xiang, D., Kong, L., Gao, Y. and Zhang, Y. 2023. Upslope fire spread and heat transfer mechanism over a pine needle fuel bed with different slopes and winds. *Applied Thermal Engineering* 229: 120605
- Kim, D.H. 2009. Semi-numerical study on the flame tilt equation due to wind on the surface fire in forest fire. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering* 23: 90-95.
- Kim, E.S., Kim, J.H., Kim, D.H., Park, H.J., and Kim, J.H.. 2010. A combustion analysis of surface fuel burning experiment according to density variation. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering* 24: 1-7
- KFS (Korea Forest Service). 2024. K-Intergrated forest fire management plan.
- Kwon, K.N., Kim, S.Y., Lee, S.J., Kwon, C.G., Seo, K.W. and Im, S.K. 2021. Analysis of crown fire transition and spread over various pine trees using wildland-urban interface fire dynamic simulator. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 21: 31-38.
- Lee, S.Y. and Lee, M.W. 2007. Comparative analysis of forest fire danger rating on the forest characteristics of thinning area and non-thinning area. 2007. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering* 21: 52-58
- Lee, Y.E., Kim, J.K. Bang, C.A., Han, S.H., Kwon, C.G. and Kim, S.Y. 2020. An experimental study on the combustion characteristics of *Pinus densiflora* surface layer by slope condition. *Crisisonomy* 6: 85-93
- Lee, Y.E., Lee, S.J., Kwon, C.G., Seo, K.Y., Bang, C.A. and Kim, S.Y. 2020. The effects of thinning slash on wildfire fuel type. *Crisisonomy* 16: 61-69.
- Lee, S.J., Kim, S.Y., Seo, K.Y., Kwon, C.G., Lee, Y.E. and Ryu, J.Y. 2022. Map of forest fire fuel load. National Institute of Forest Science Research Report, 1036.
- Lee, S.J., Kwon, C.G., Seo, K.W., Lee, Y.J. and Kim, S.Y. 2023. thinning effect on fuel load and crown fire hazard - A case study of *Pinus Densiflora* in Goseong, Gangwon Province. *Crisisonomy* 19: 27-37.
- Liu, N. 2023. Wildland surface fire spread: Mechanism transformation and behavior transition. *Fire Safety Journal* 141: 103974.
- Madrigal, J., Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C. and Marino, E. 2011. Estimation of peak heat release rate of a forest fuel bed in outdoor laboratory conditions. *Journal of Fire Sciences* 29: 53-70.
- Rein, G., Cleaver, N., Ashton, C., Pironi, P. and Torero, J.L. 2008. The severity of smouldering peat fires and damage to the forest soil. *Catena* 74: 304-309.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2022. Spreading like wildfire—The rising threat of extraordinary landscape fires. A UNEP Rapid Response Assessment, Nairobi, Kenya. pp. 127.
- Terrei, L., Lamorlette, A. and Ganteaume, A. 2019. Modelling the fire propagation from the fuel bed to the lower canopy of ornamental species used in wildland-urban interfaces. *International Journal of Wildland Fire* 28: 113-126.
- USFS (U.S. Forest Service). 2013. WFDS: Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator.
- USFS (U.S. Forest Service). 2022. Wildfire crisis strategy – confronting the wildfire Crisis.
- Wotton, B M., Gould, J.S., McCaw, W.L., Cheney, N.P. and Taylor, S.W. 2011. Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest. *International Journal of Wildland Fire* 21: 270-281.
- Xavier V.D. 1998. Forest fire propagation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 356: 2907-2928.

Manuscript Received : May 27, 2024

First Revision : July 1, 2024

Accepted : July 9, 2024