

수관연료 수직분포모델 개발을 통한 산불연료구조 분석: 경북지역의 소나무림 산림사업지와 비사업지를 대상으로

이선주, 권춘근, 김성용*

국립산림과학원 산림방재연구과

(2020년 9월 15일 접수; 2021년 1월 14일 수정; 2021년 1월 20일 수락)

The Analysis of Forest Fire Fuel Structure Through the Development of Crown Fuel Vertical Distribution Model: A Case Study on Managed and Unmanaged Stands of *Pinus densiflora* in the Gyeongbuk Province

Sun Joo Lee, Chun Geun Kwon, and Sung Yong Kim*

¹Div. of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, Seoul (02455)

(Received September 15, 2020; Revised January 14, 2021; Accepted January 20, 2021)

ABSTRACT

This study compared and analyzed the effects of forest tending works on the vertical distribution of wildfire fuel loads on *Pinus densiflora* stands in Gyeongbuk province. The study sites were located in Youngju and Bonghwa in *Pinus densiflora* stands. A total of 10 sample trees were collected for the development of the crown fuel vertical distribution model. The 6th NFI (National Forest Inventory) selected a sample point that only extracted from managed and unmanaged stands of *Pinus densiflora* in the Gyeongbuk province. The fitness index (F.I.) of the two models developed was 0.984 to 0.989, with the estimated parameter showing statistical significance ($P < 0.05$). As a results, the vertical distribution of wildfire fuel loads range of unmanaged stands was from 1m to 11m with the largest distribution at point 5m at the tree height. On the other hand, the vertical distribution of wildfire fuel loads range of the managed stands was from 1m to 15m with the largest distribution at the point of 8m at the tree height. The canopy bulk density was 0.16kg/m^3 for the managed stands and 0.25kg/m^3 for the unmanaged stands, unmanaged stands were about 1.6 times more than managed stands. This result is expected to be available for simulation through the implementation of the 3D model as crown fuel was analyzed in three dimensions.

Key words: Crown fuel, Forest tending works, *Pinus densiflora*, Vertical distribution



* Corresponding Author : Sung Yong Kim
(kitaco1@korea.kr)

I. 서 론

기후변화에 의한 극심한 건조현상은 대형산불을 유발하고 있으며, 산림내 연료가 연소되면서 배출되는 온실가스는 기후변화를 촉진시킨다(Jeon, 2016; Lee, et al., 2012). 최근에는 시기와 장소를 불문하고 초대형 산불이 발생하면서 산불은 더 이상 한 국가만의 문제가 아닌, 범 지구적인 문제로 인식되고 있다. 2019년에 발생한 시베리아 산불은 6개월 이상 지속되어 남한면적의 3.5배에 달하는 산림 피해가 발생하였고, 2020년 6월에는 때 이른 산불이 미국 캘리포니아를 덮쳐 최소 153억달러 이상의 경제적 피해를 입혔다(USDA, 2020).

현재 우리나라도 지금까지 경험해 보지 못한 초대형산불이 발생할 수 있는 환경이 조성되고 있다. 산불에 취약한 수종으로 알려진 침엽수림의 최근 5년간 임목축적 추이는 2011년에 130.3m³/ha에서 2015년에 172.7m³/ha로 증가하는 경향을 보이고 있다(KFS, 2019). 이는 경제적 관점에서 산림자원으로서의 가치 증진으로 볼 수 있으나, 산불 관점에서는 가연연료가 증가함을 의미한다(Lee et al., 2005). 따라서 산불을 효과적으로 관리하기 위한 대응책 마련이 절실하다.

미국에서는 2014년 발생한 Carlton complex 산불을 대상으로 산림관리 유무에 따른 산불확산특성을 분석한 결과, 산림관리 미시행지역은 임목피해율이 높았던 반면, 산림관리 시행지역은 임목피해율이 상대적으로 낮으며, 특히 일부 산림관리 시행지역은 강한 풍속, 급경사지임에도 불구하고 산불의 영향을 낮게 받았다고 보고하였다(Susan et al., 2020).

산불확산의 위험성을 낮출 수 있는 방법은 산불취약지역을 중심으로 산불에 잘 견디는 활엽수림대를 조성하거나, 숲가꾸기 사업을 통해 임내 연료량을 줄이고, 수직적 배열구조로 바꾸는 방법 등이 필요하다(Lee et al., 2020). 관련 연구사례를 살펴보면, 숲가꾸기 사업은 수직적 연료구조로 변화시켜 산불강도를 줄일 수 있으며(Joseph, 2001), 수관연료밀도가 조절됨에 따라 수관화 확산을 억제시킨다고 보고하였다(Ane-Claude Pepin and Mike Wotton, 2020; Graham et al., 1999; Jain et al., 2012). 숲가꾸기 사업을 통한 효과적인 산불연료관리를 위해서는 벌채목을 과학적으로 선별할 수 있는 체계가 마련되어야 하며 이를 위해서는 개체목별로 3차원적은 연료 구조를 파악할 수 있는 정량적 자료가 필요하다.

국외에서는 벌채목 선정을 통해 개체목 단위로 연료관리를 수행할 수 있는 기술 개발 및 3D 모델 구현 연구가 활발하게 진행된 바 있다(Contreras et al., 2012; David et al., 2008; Helen et al., 2004). 그러나 국내에서는 수관층에 분포하는 가연연료의 양을 파악하고, 수종 및 부위에 따라 수관연료량을 추정하는 모델개발 연구는 수행한 바 있으나(Jang et al., 2011; Kim et al., 2017; Kim et al., 2018), 연료의 수직배열 등 연료의 상태와 형태를 3차원적으로 파악할 수 있는 방법론과 정량적 자료구축에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 소나무림을 대상으로 산불확산에 영향을 미치는 수관층 연료가 수직적으로 어떤 형태로 분포하고 있는지 파악하기 위해 산불 수관연료에 대한 수직분포모형을 개발하고자 하였다. 또한 개발한 모형을 활용하여 산림사업 유무별 수관연료의 수직적 분포 특성을 비교하고, 예방관리 차원에서의 산림사업 효과를 정량적으로 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구자료 수집

연구대상지는 경상북도 영주시, 봉화군 일대의 소나무림으로 선정하였다. 영주지역(산림사업지)과 봉화지역(산림비사업지)에 각각 표준지를 선정하여 매목조사를 진행하였으며, 매목조사 결과를 바탕으로 대상지를 대표하는 표본목을 지역별로 각각 10본씩 선정하였다(Table 1). 선정된 표본목은 지표면으로부터 0.2m 높이에서 벌채하였으며, 높이별 연료의 분포형태를 파악하기 위해 Smalian식 구분구적법을 적용하여 수간과 수관을 1m 단위로 절단하였다. 또한, 수관층을 잎과 가지로 분류하고, 가지를 굵기별(<0.5cm, 0.5-1cm, 1-2cm, 2-4cm, >4cm)로 구분하였다(Koo et al., 2010). 수관화 발생시 연소가능한 연료(Available fuel)는 잎과 1cm 미만 가지로 정의되고 있다(Call and Albin, 1997). 이에 본 연구에서는 잎, 가지(<0.5cm, 0.5-1cm) 자료만을 선별하였다.

2.2. 수관연료 수직분포모형 개발

연소가능한 수관층 연료의 수직적 형태를 파악하기 위해 연료량 누적 비율은 벌채목의 수관 최상단부에서 최하단부까지의 연료를 1m 구간별로 나누고, 표본목의 전체 수고에 대한 각 높이 구간의 상대높이를 비율로 산출하였다(Alexander et al., 2004). 로짓모형

Table 1. Summary of the observed statistics for Research data and 6th NFI *Pinus densiflora* stands

Classify	Forest activity	Variables			
		Age (years)	Stand density (trees/ha)	DBH (cm)	Total height (m)
Research data	Managed stands	41.0±0.6	754.0±22.3	18.3±0.7	9.9±0.4
	Unmanaged stands	36.0±0.4	2,400±79.2	11.3±1.7	8.3±0.7
6 th NFI	Managed stands	40.0±0.7	919.2±18.3	19.9±0.8	14.4±0.9
	Unmanaged stands	41.0±1.5	1,775.0±25.6	11.8±1.6	10.2±1.1

Note: Mean ± Standard error

(Logistic model)에 의해 0부터 1사이의 값을 가진 두 변수(연료누적비율, 상대높이비율)는 수관연료 수직분포 추정 함수식(Eq. 1)에 의해 모델화하였다(Mitsopoulos and Dimitrakopoulos, 2007).

$$RW = a / \{1 + EXP [b - c(RH)]\} \quad (Eq. 1)$$

Note: RW=Ratio of weight, RH=Relative height

산림 내에서 시업이 이루어지면 임목의 생장이 변화함에 따라 수관층 연료구조에 영향을 미친다. 본 연구에서는 산림관리에 따른 수관층 연료구조를 명확하게 파악하기 위해 산림시업지와 비시업지 임분을 구분하여 수관연료 수직분포모델을 개발하였다. 개발한 모델의 정확도평가는 적합도 지수(Fitness Index; F.I.), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error; RMSE), 변이계수(Coefficient of Variation; C.V.)로 검증하였다.

2.3. 산림시업에 따른 산불수관연료의 수직적 분포 특성 비교

2.3.1. 국가산림자원조사자료 분류

산불수관연료의 수직적 분포특성을 비교하기 위해 제 6차 국가산림자원조사자료(2011~2015년) 중 소나무에 대한 임목본수 비율이 75% 이상인 표본점을 추출하였다. 추출된 표본점에서 경상복도에 해당하는 소나무임분만을 선별하였으며, 목재생산을 주목적으로 하는 시업지 임분과 목재생산에 법적으로 심각한 제약을 받는 비시업지(시업제한지) 임분을 구분하였다(KFS, 2012). 그 중 모델 개발에 적용된 연구대상지와 임분생장특성이 유사한 시업지 임분 11개, 비시업지 임분 6개의 표본점을 선정하여 분석에 이용하였다(Table 1).

2.3.2. 산불수관연료의 수직적 분포 특성 비교

국가산림자원조사 자료에서 추출한 흉고직경 정보를 이용하여 개체목별 수관층 연료의 총 무게를 추정하

고, 개발한 수직분포모델을 활용하여 높이별 개체목 연료량을 추정하였다. 표본점 내 추정된 모든 개체목의 연료량을 높이별로 합산하였으며, 각 높이 별 임분의 폭을 이용하여 단면적(m²)당 연료량으로 환산하였다.

임분의 수관체적(Canopy volume)은 Scott and Reinhardt(2001)가 제시한 임분수관길이(Canopy length) 법을 이용하여 ha 단위로 추정하였다(Eq. 2). 수관연료 밀도(Canopy bulk density) 추정식은 Eq. 3과 같다(Cruz *et al.*, 2003).

$$CAV = \frac{\sum_{i=1}^n (CL_i \times TEF_i)}{\sum_{i=1}^n TEF_i} \times 10,000 \quad (Eq. 2)$$

$$CBD = \frac{\sum_{i=1}^n (CFL_i \times TEF_i)}{CAV} \quad (Eq. 3)$$

Note: CAV= Canopy volume(m³), CBD=Canopy bulk density(kg/m³), CL_i = Canopy length (m) of *i*th individual trees, TEF_i = Tree expansion factor corrected to a per ha basis

III. 연구결과 및 고찰

3.1. 산림시업에 따른 산불수관연료 수직적 분포 추정모델 개발 결과

3.1.1. 산불수관연료 수직적 분포 추정모델 개발

산림시업에 따른 산불수관연료 수직분포 추정모델 개발 결과는 Table 2와 같다. 수관층 연료부위(잎, 가지 (<0.5cm, 0.5-1cm), 연소가능한 연료량)별 적합도지수는 산림시업지 임분에서 0.984~0.989, 비시업지 임분에서 0.973~0.983 범위의 설명력을 보였다. 모든 부위에서 변이계수는 13.5%, 평균제곱근오차는 0.095kg 이하로 나타났다. Q-Q plot(Quantile-quantile plot)을 통해 관측치와 추정치의 정규성(Normality)을 분석한 결과, 부위별 관측치는 1대 1 직선에 가깝게 분포하였다(Fig. 1).

Table 2. Regression models of the vertical crown fuel distribution of FTW stands and control stands

Forest activity	Crown fuel category	$RW = a/\{1 + EXP[b - c(RH)]\}$			F.I.	RMSE(kg)	C.V.(%)
		a (S.E.)	b (S.E.)	c (S.E.)			
FTW	Needles	1.009 (0.026)	9.072 (0.864)	13.987 (1.392)	0.973	0.095	10.2
	Branches (<0.5cm)	1.004 (0.021)	9.688 (0.864)	15.431 (1.421)	0.979	0.087	13.1
	Branches (<0.5-1cm)	1.010 (0.020)	9.172 (0.701)	14.354 (1.141)	0.983	0.076	11.0
	Available fuel	1.008 (0.022)	9.272 (0.796)	14.485 (1.292)	0.979	0.085	13.1
Control	Needles	0.993 (0.018)	8.481 (0.632)	14.058 (1.086)	0.987	0.070	9.7
	Branches (<0.5cm)	0.994 (0.019)	8.112 (0.667)	13.849 (1.181)	0.984	0.079	11.5
	Branches (<0.5-1cm)	0.990 (0.015)	8.345 (0.603)	14.764 (1.099)	0.989	0.068	12.4
	Available fuel	0.993 (0.016)	8.233 (0.580)	13.973 (1.020)	0.988	0.067	13.5

Note: FTW is forest tending work, S.E. is standard error

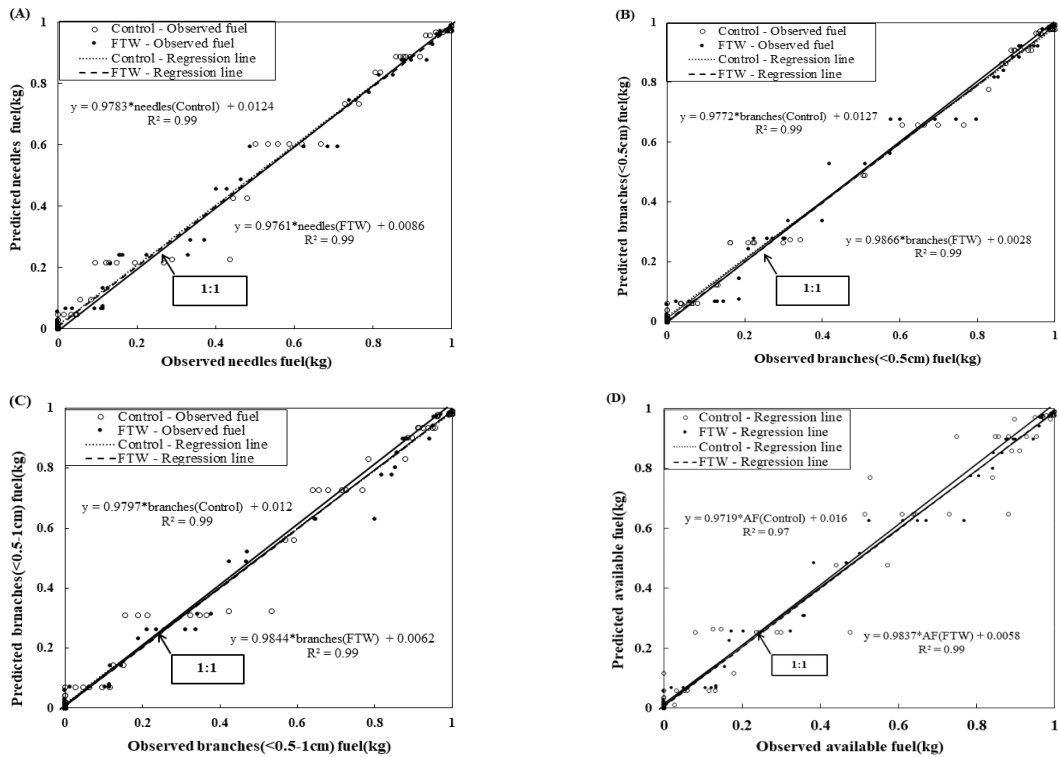


Fig. 1. Quantile-quantile plot analysis by crown fuel vertical profile. ((A) Needles, (B) Branches(<0.5cm), (C) Branches(<0.5-1cm), (D) Available fuel).

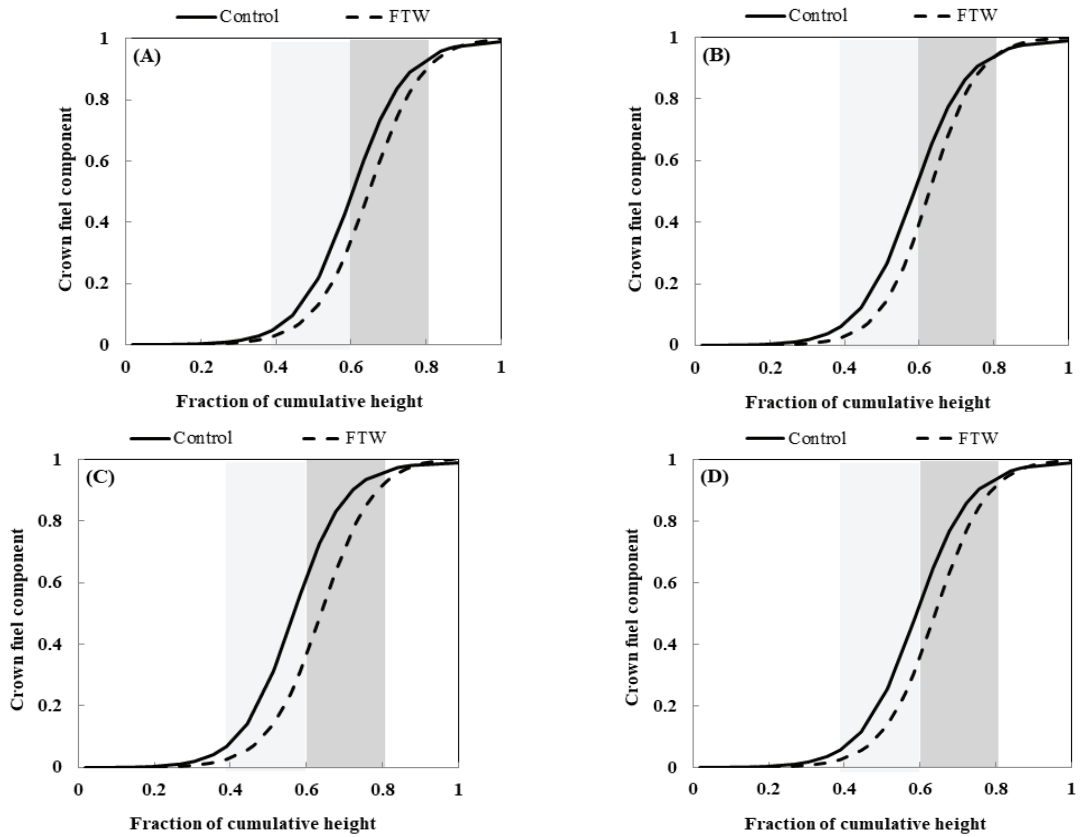


Fig. 2. Comparison of accumulated crown fuel vertical profile. ((A) Needles, (B) Branches(<0.5cm), (C) Branches(<0.5-1cm), (D) Available fuel).

3.1.2. 상대높이비율에 따른 산불누적연료량 비교

상대높이비율에 따른 각 부위별 누적연료비율의 관측치와 추정곡선의 관계를 분석한 결과, 잎과 가지(<0.5cm, 0.5-1cm), 연소가능한 연료량 모두 상대높이 0.4지점에서 연료 누적이 시작되어 0.6~0.8지점에서 급격하게 증가하는 추세를 보였다. 상대높이에 따른 부위별 연료량은 가지부위가 빠르게 누적되었지만 잎은 연료누적 속도가 다소 느린 경향을 보였다. 산림사업 유무에 따라 변화하는 연료누적량을 비교한 결과, 비사업지 임분이 사업지 임분에 비해 연료누적량이 높게 나타났다(Fig. 2). 이는 사업지 임분에서는 연료를 인위적으로 관리하는 반면, 비사업지 임분은 연료관리하지 않기 때문에 사업지 임분에 비해 높은 연료누적량이 보인 것으로 판단된다.

개발한 수관연료 수직분포모델을 이용하여 개체목의 연소가능한 수관연료 분포형태를 구현한 결과, 사업지 임분 상대높이 0.7, 비사업지 임분 상대높이 0.6

에서 가장 높은 연료량 분포를 보였다(Fig. 3).

3.2. 산림사업에 따른 산불수관연료 수직적 분포 패턴 비교 결과

3.2.1. 지표층에서 수관층까지의 높이 비교

본 연구에서 개발한 수관연료 수직분포모델을 국가 산림자원조사 자료에 적용한 결과는 Fig. 4와 같다. 사업지 임분의 수직적 연료는 최대 15m까지 분포하는 반면, 비사업지 임분은 최대 10m까지 분포하는 수직적 정규분포를 보였다. Cruz *et al.*(2004)이 제시한 수관연료밀도가 0.04kg/m³까지 도달하는 기준으로 지표층에서 수관층까지의 높이를 비교한 결과, 사업지 임분은 3.4m로 비사업지 임분 2.6m보다 높게 나타났으며, 가장 많은 수관연료량을 분포하고 있는 상대높이 또한 사업지 임분은 7~9m로 비사업지 임분 4~6m보다 높게 나타났다. 또한 사업지 임분은 수관연료량이 수직적으로 넓게 분산되고, 지표층으로부터 높게

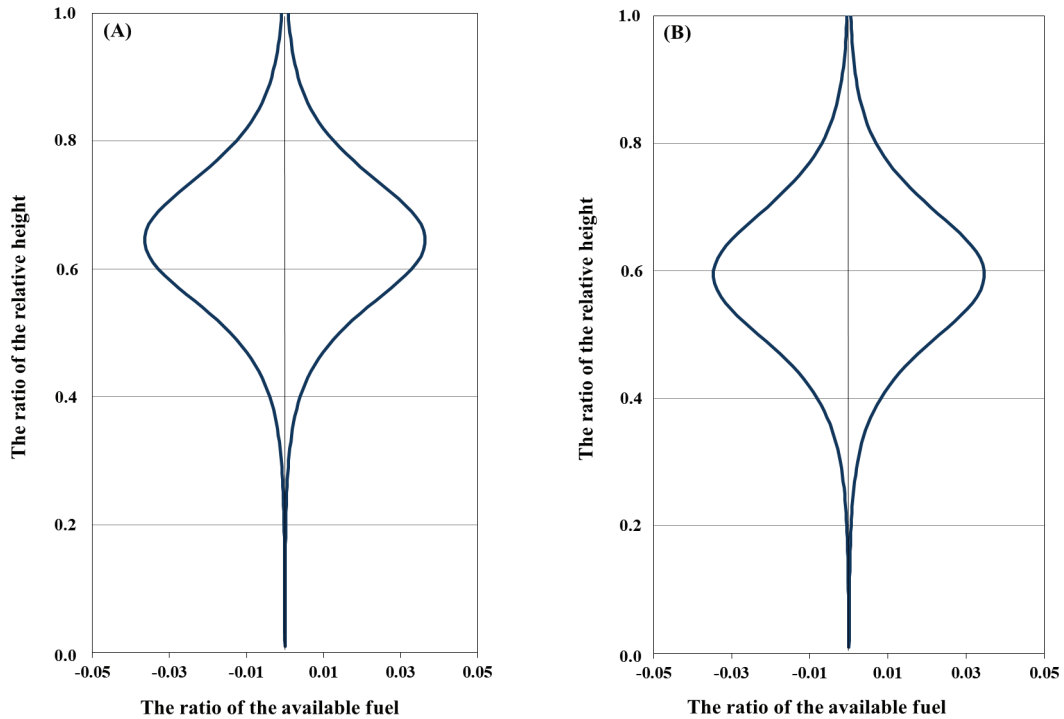


Fig. 3. Tree-level crown fuel vertical profile using regression model. ((A)Managed stands (B)Unmanaged stands).

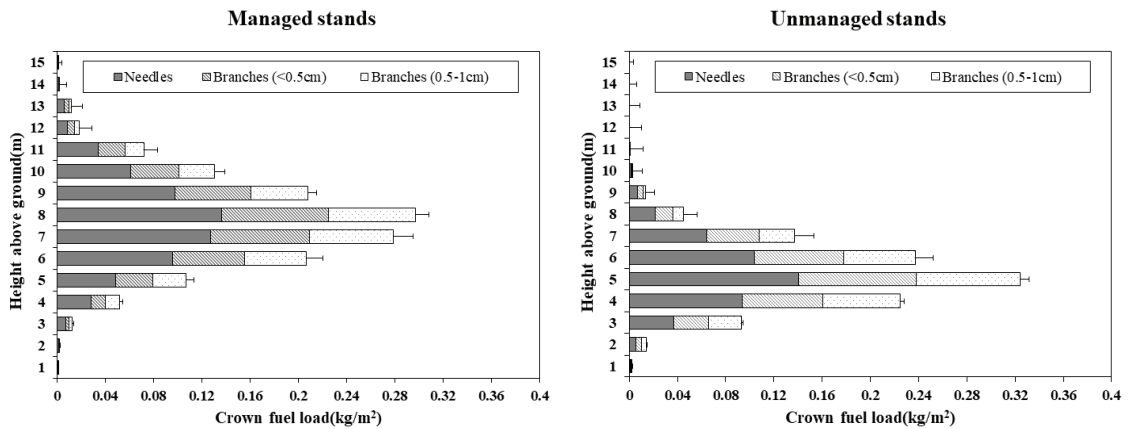


Fig. 4. Effects of forest management on the canopy fuel load distribution in the managed stands and unmanaged stands (Bar represent \pm Standard error of the mean).

분포되는 형태를 보였다. 이러한 연구결과는 인위적으로 임분밀도를 조절한 임분에서 지표층에서 수관층까지의 간격이 넓어진다는 기존 선행연구결과와 유사하였다(Cruz *et al.*, 2003).

한편, 기존 선행 연구 결과에 의하면 수직적 연료 배열 특성에 의해 결정되는 수관연료 분포의 높이, 배열

의 조밀성은 수관화 전이와 확산속도를 결정하는 가장 중요한 요소라고 밝힌 바 있다(Jennifer *et al.*, 2020; Sharon *et al.*, 2020). 이로 유추하였을 때 비시업지 임분은 수직적 연료배열이 낮고, 높은 연료량을 분포하고 있어 수관화 전이 및 확산에 취약한 임분구조를 보인다.

3.2.2. 산불수관연료특성 비교

산림시업에 따른 소나무림의 수관연료특성을 비교한 결과는 Table 3과 같다. 평균 수관길이는 시업지 임분 9.2m, 비시업지 임분 5.8m로 나타났다. 평균 지하고(Canopy base height)는 시업지 임분 3.6m, 비시업지 임분 3.4m로 나타났으며, 수관연료밀도는 시업지 임분 0.16kg/m³, 비시업지 임분 0.25kg/m³로 나타났다. 이러한 연구결과는 산림시업이 실시된 임분의 경우에 지하고는 높아지고, 수관연료밀도가 낮아진다는 기존 연구와 유사한 결과로 나타났다(Mutch *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 2018; Sharon *et al.*, 2020). 단면적당 수관연료량의 경우, 시업지 임분 1.79kg/m², 비시업지 임분 2.01kg/m²로 임분 내 탈 수 있는 물질의 양이 시업지 임분이 비시업지 임분에 비해 상대적으로 적게 분포하고 있다. 국외 연구결과에서도 유사한 연구결과가 제시되었으며 Harrod *et al.*(2009)는 산림시업을 시행할 경우 해당 공간에 차지하는 수관연료의 양을 줄임으로서 화염으로부터 연료공급이 차단된다고 보고한 바 있다. 이러한 연구결과로 보아 비시업지 임분은 수관화 확산을 방지하기 위한 산불연료 저감 차원에서의 임분관리가 필요할 것으로 사료된다.

Table 3. Summary of canopy fuel characteristics statistics for Managed stands and Unmanaged stands

Forest activity	CL (m)	CBH (m)	CFL (kg/m ²)	CBD (kg/m ³)
Managed stands	9.20 ± 0.21	6.20 ± 0.24	1.79 ± 0.07	0.16 ± 0.03
	3.20 - 15.20	0.50 - 15.70	0.85 - 2.85	0.01 - 0.31
Unmanaged stands	5.80 ± 0.52	5.80 ± 0.55	2.01 ± 0.33	0.25 ± 0.10
	2.40 - 12.40	3.10 - 13.60	0.92 - 3.14	0.08 - 0.41

Note: $\frac{\text{Mean} \pm \text{S.E.}}{\text{Min.} - \text{Max.}}$, CL is Canopy length(m), CBH is Canopy base height(m), CFL is Canopy fuel load (kg/m²), CBD is Canopy bulk density (kg/m³)

IV. 결 론

본 연구는 경상북도 소나무림을 대상으로 산림시업이 산불수관층 연료의 수직적 분포형태에 미치는 영향에 대해서 비교 및 분석하였다. 경상북도 영주지역 시업지 소나무림과 경상북도 봉화지역 비시업지 소나무림을 대상으로 각 지역마다 10분의 표본목을 벌채한 자료를 이용하여 수관연료 수직분포모형을 개발하였

다. 개발한 두 모델의 적합도지수의 범위는 0.984~0.989로 나타났으며, 추정된 모수는 통계적인 유의성을 보였다($P < 0.05$). 국가산림자원조사 자료 중 경상북도 내 산림시업지, 비시업지 소나무림만을 추출한 표본점을 선정하여 개발한 모델을 적용하였다. 본 연구 결과, 비시업지 임분의 수직적 수관연료량은 임분높이 5m 지점에서 연료가 가장 많이 분포하고 있는 반면, 시업지 임분의 수직적 수관연료량은 임분높이 8m 지점에서 가장 많이 분포하였다. 수관연료밀도는 시업지 임분이 0.16kg/m³, 비시업지 임분 0.25kg/m³로 비시업지 임분이 시업지 임분에 비해 약 1.6배 높게 나타남에 따라 비시업지 임분은 시업지 임분에 비해 수관화 확산 위험성이 높을 것으로 판단된다. 본 연구는 경상북도에 분포하는 소나무림으로 한정되어 산불 수관연료의 수직적 분포 모형을 개발하였으므로 우리나라 소나무림을 대표하기에는 다소 무리가 있다. 추후 더 많은 자료수집을 통해 전국 모델로 확대할 수 있는 방안 마련이 필요하다. 한편, 본 연구에서 개발한 수관연료 수직분포모형은 기존 개발된 모델과 달리 임분특성을 반영한 모델로서 추후 산림시업 유무에 따라 모델을 적용할 시 해당 임분구조에 대한 높은 정확도를 보일 것으로 판단된다. 또한 산림 내 산불 연료의 양을 3차원으로 해석함에 있어 3D모형 구현을 통한 시뮬레이션 등에 활용 가능할 것이다. 더불어 산림시업에 따른 산불연료저감 효과를 정량적 수치로 제시함에 따라 산림관리에 대한 인식 제고 및 산불예방체계 구축에 기여할 것으로 기대된다.

적 요

본 연구는 경상북도 내 소나무림을 대상으로 산림시업이 산불수관층 연료의 수직적 분포형태에 미치는 영향을 비교·분석하기 위해 수행하였다. 수관연료의 수직분포모형을 개발하기 위해 경상북도 영주지역에 시업지 소나무림과 경상북도 봉화지역에 비시업지 소나무림을 대상으로 각 지역마다 10분의 표본목을 벌채한 자료를 이용하여 수직분포모형을 개발하였다. 적용대상지는 제 6차 국가산림자원조사 자료 중 경북지역 내 산림시업지, 비시업지 소나무림만을 추출한 표본점을 선정하였다. 개발한 두 모델의 적합도지수의 범위는 0.984~0.989로 나타났으며, 추정된 모수는 통계적인 유의성을 보였다($P < 0.05$). 연구 결과, 비시업지 임분의 수직적 수관연료량 분포 범위는 약 1m~

11m으로 임분높이 5m 지점에서 연료가 가장 많이 분포하고 있는 반면, 시업지 임분의 수직적 수관연료량 분포범위는 약 1m~15m으로 임분높이 8m 지점에서 가장 많이 분포하고 있었다. 수관연료밀도는 시업지 임분이 0.16kg/m³, 비시업지 임분은 0.25kg/m³로 비시업지 임분이 시업지 임분에 비해 약 1.6배 높았다. 본 연구결과는 수관연료를 3차원적으로 해석함에 있어 3D모형 구현을 통한 시뮬레이션 등에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Agee, J., 1996: The influence of forest structure on fire behavior. Proceedings of the 17th Annual Forest Vegetation Management Conference, *California*, 52-68.
- Alexander, M. E., C. N. Stefner, J. A. Mason, B. J. Stocks, G. R. Hartley, M. E. Maffey, B. M. Wotton, S. W. Taylor, N. Lavoie, and G. N. Dalrymple, 2004: Characterizing the jack pine-black spruce fuel complex of the international crown fire modeling experiment(ICFME). Natural Resources Canada, Forestry Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-393. 49pp.
- Anne-Claude, P., and W. Mike, 2020: Fire behavior observation in shrublands in nova scotia, canada and assessment of aids to operational fire behavior prediction. *Fire* **3**(3), 34.
- Call, P. T., and F. A. Albini, 1997: Aerial and surface fuel consumption in crown fires. *International Journal of Wildland Fire* **7**(3), 259-264.
- Contreras, M. A., A. P. Russell, and W. D. Chung, 2012: Modeling tree-level fuel connectivity of evaluate the effectiveness of thinning treatments for reducing crown fire potential. *Forest Ecology and Management* **264**(2012), 134-149.
- Cruz, M. G., M. E. Alexande, and R. H. Wakimoto, 2003: Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of Western North America. *Journal of Wildland Fire* **12**(1), 39-50.
- Cruz, M. G., M. E. Alexander, and R. H. Wakimoto, 2004: Modelling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science* **50**, 640-658.
- David, A. S., A. H. Taylor, and C. N. Skinner, 2008: The influence of fuels treatment and landscape arrangement on simulated fire behavior, Southern Cascade range. *Forest Ecology and Management* **255**(8-9), 3170-3184
- Graham, R. T., A. E. Harvey, T. B. Jain, and J. R. Tonn, 1999: The effects of thinning and similar stand treatments on fire behavior in Western forests. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-463. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 27pp.
- Helen, H. M., A. W. Thomas, R. Sandra, J. P. Ross, and T. F. Charles, 2004: Effectiveness of fire and fire surrogate treatments for controlling wildfire behavior in piedmont forests: a simulation study.
- Harrod, R. J., W. P. David, A. P. Nicholas, and K. D. Erich, 2009: Thinning and prescribed fire effects on overstory tree and snag structure in dry coniferous forests of the interior Pacific Northwest. *Forest Ecology and Management* **258**(5), 712-721.
- Joseph, D. L., 2001: Wildland firefighting practice. Delmar Thomson Learning, 14-45.
- Jang, M. N., B. D. Lee, Y. O. Seo, S. Y. Kim, and Y. J. Lee, 2011: Crown Fuel Characteristics and Fuel Load Estimation of *Pinus densiflora* S. et Z. in Bonghwa, Gyeongbuk. *Journal of Korean Forest Society* **100**(3), 402-407.
- Jain, T. B., M. A. Battaglia, H. S. Han, R. T. Graham, C. R. Keyes, J. S. Fried, and J. E. Sandquist, 2012: A comprehensive guide to fuel management practices for dry mixed coniferorests in the northwestern united states. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 331pp.
- Jeon, B. R., 2016: The Study on Predictions of Forest Fire Occurrence Using Climate Scenario (RCP) in Korea. Graduate School, Kangwon National University, 90pp.
- Jennifer, L.B., E. R. L. Sonja, C. Hilary, and S. Dave, 2020: Stand-level fuel reduction treatments and fire behavior in Canadian Boreal Conifer Forests. *Fire* **3**(3), 1-23.
- Koo, K. S., B. D. Lee, M. S. Won, and M. B. Lee, 2010: Crown fuel characteristics of Japanese Red Pine in Mt. Palgong, Daegu. *Journal of Korean Forest Society* **99**(1), 52-56.
- Kim, S. Y., C. G., Kwon, H. Y., Ahn, B. D. Lee, and M. N. Jang, 2017: Allometric equations for crown fuel load of *Pinus rigida* stands in South Korea. *Crisionomy* **13**(12), 127-137.
- Kim, S. Y., M. N. Jang, S. J. Lee, and Y. J. Lee, 2018: Comparison of fuel characteristics between coastal and inland type of *Pinus thunbergii* stands.

- Journal of Disaster Management* **18**(2), 175-183.
- KFS (Korea Forest Service), 2012: The 6th National Forest Inventory Report, 60pp.
- KFS (Korea Forest Service), 2019: Statistical Year-book of Forestry, 441pp.
- Lee, S. Y., M. S. Won, and S. Y. Han, 2005: Developing of forest fire occurrence danger index using fuel and topographical characteristics on the condition of ignition point in Korea. *Fire Science and Engineering* **19**(4), 75-79.
- Lee, B. D., H. J. Youn, K. S. Koo, and K. H. Kim, 2012: Estimation of biomass loss and greenhouse gases emissions form surface layer burned by forest fire. *Journal of Korean Forest Society* **101** (2), 286-290.
- Lee, S. J., S. Y. Kim, B. D. Lee, and Y. J. Lee, 2018: Estimation of canopy fuel characteristics for *Pinus densiflora* stands using diameter distribution models: Forest managed stands and unmanaged stands. *Journal of Korean Forest Society* **107**(4), 412-421.
- Lee, S. J., M. N. Jang, Y. J. Lee, C. G. Kwon, B. D. Lee, and S. Y. Kim, 2020: The effects of thinning intensity on vertical distribution of wildfire fuel in *Pinus rigida* stands - Focused on the crown fuel characteristics. *Crisionomy* **16**(7), 147-156.
- Mutch, R. W., S. F. Arno, J. K. Brown, C. E. Carlson, R. D. Ottmar, and J. L. Peterson, 1993: Forest health in the Blue mountains: A management strategy for fire-adapted ecosystems. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 14pp.
- Mitsopoulos, I. D., and A. P. Dimitrakopoulos, 2007: Allometric equation for crown fuel biomass of Aleppo pine(*Pinus halepensis* Mill) in Greece. *International Journal of Wildland Fire* **16**(5), 642-647.
- Scott, J. H., and E. D. Reinhardt, 2001: Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 59pp.
- Sharon, M. H., R. K. Christopher, J. B. Katelynn, C. L. Duncan, and S. Carl, 2020: Fuel treatment longevity in ponderosa pine-dominated forest 24 years after cutting and prescribed burning. *Frontiers in Forests and Global Change* **3**(78), 1-16.
- Susan, J. P., A. P. Nicholas, C. K. Maureen, and W. P. David, 2020: Fuel treatment effectiveness in the context of landform, vegetation, and large, wind-driven wildfires. *Ecological Applications* **30** (5), 1-20.
- Wendy, R. A., G. C. Miguel, M. F. Paulo, M. Lachlan, A. V. Jose, A. B. Ross, F. Liam, G. Jim, M. Greg, B. M. Jon, M. Stuart, M. Greg, and W. Brian, 2015: A generic, empirical-based model for predicting rate of fire spread in shrub lands. *International Journal of Wildland Fire* **24** (4), 443-460.