

The Effects of Thinning Intensity on Vertical Distribution of Wildfire Fuel in *Pinus rigida* Stands

- Focused on the Crown Fuel Characteristics -

Sun Joo Lee^{1#}, Mi Na Jang², Young Jin Lee³, Chun Geun Kwon¹, Byung doo Lee¹, Sung Yong Kim^{1*}

¹ Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea

² Korea Forest Fire Management Service Association, 30 Gyeryong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

³ Department of Forest Resources, Kongju National University, 54 Daehak-ro, Yesan-gun, Chungman, Korea

Abstract

The objective of this study was to analyze the effects of thinning intensity on vertical distribution of crown fuel for wildfire in *Pinus rigida* stands. A total of 20 sample trees were harvested and used for development of a crown fuel vertical distribution model. The model developed in this study was used to analyze the crown fuel vertical distribution by thinning intensity. The results of this study showed that the coefficient of determination (R^2) for the suggested vertical distribution model ranged from 0.961 to 0.981 and the estimated parameters were statistically significant ($P < 0.05$). Canopy base height was 3.7m at the control site (non-thinning) while those of 20%-thinning and 40%-thinning intensity sites were 4.9m and 5.7m, respectively. The needles and twigs with less than 1cm diameter accounted for 0.22 kg/m³ of the canopy bulk density at the control site, but 0.18 kg/m³ in 20%-thinning intensity site and 0.16 kg/m³ in 40%-thinning intensity site.

Key words: wildfire, crown fuel load, vertical distribution, thinning

1. 서론

수관화¹⁾(Crown fire)는 지표화²⁾(Surface fire)에 비해 다양한 인자가 복합적으로 관여하는 3차원적 연소 현상으로 극한 기상조건에 영향을 받기 때문에 산불의

속도와 강도를 증가시킬 뿐 만 아니라 비화³⁾(飛火)를 일으켜 대규모의 피해를 양산한다(Alexander, 1998; Mitsopoulos & Dimitrakopoulos, 2007). 침엽수는 활엽수와 달리 잎과 가지에 테르핀(Terpin) 등과 같은 정유 물질을 함유하고 있어 산불 발생 시 높은 열에너지를

The 1st author: Sun Joo Lee, Tel. +82-2-961-2924, Fax. +82-2-961-2699, e-mail. lsj419@korea.kr

* Corresponding author: Sung Yong Kim, Tel. +82-2-961-2686, e-mail. kitacol@korea.kr

1) 수관화(Crown fire): 나무나 관목의 윗부분에서 윗부분으로 확산되는 산불

2) 지표화(Surface fire): 죽은 나뭇가지, 잎, 낮은 식생 등 지표면의 성긴 잔해를 태우는 불

3) 비화(Spot fire): 주불 외곽선 바깥에서 열원에 의해 착화된 산불

방출하여 수관화를 일으킨다. 실제로 2017년과 2018년에 발생한 강원도 강릉 성산, 삼척 도계 산불의 경우 대부분 침엽수 단순림 내에 수관화가 발생하여 산불의 확산 속도와 강도를 증가시켰고, 결국 약 1,100여 ha의 산림피해와 33채의 시설물이 전소되는 재난으로 이어졌다(Korea Forest Service, 2018).

수관화의 근본적 차단을 위해서는 숲아베기, 가지치기 등 숲가꾸기 사업을 통해 임내 연료량을 줄이고, 수직적 배열 구조를 바꿔야 한다. 과거부터 미국에서는 간벌(Thinning)이 산불로부터 피해를 줄이기 위한 방법 중 하나라는 것을 인지하였고, 「Healthy Forests Initiative」(HFI) 프로그램을 통해 기존의 목재가치 향상 목적의 사업 개념을 넘어선 공공안전관리 개념의 산불피해 방지 연료관리 사업을 진행하였다(Fule, *et al.*, 2002; Keyes & Ohara, 2002; Scott & Reinhardt, 2001; Stephens, 1998). 또한 호주 Rural Fire Service에서도 처방화입, 숲아베기, 숲가꾸기 산물 제거 등을 통해 산불 위험도를 줄이는 사업을 진행하였고, 관련 기술을 개발하기 위한 노력이 지속적으로 진행되고 있다(Finney, 2007).

국내 사례를 살펴보면, 숲가꾸기 관련 사업이 임분생장과 임분형질의 개선, 직경생장 촉진, 토양 및 식생에 미치는 영향, 산사태 방지 효과 등 산림과 인간에게 주는 이로운 점을 파악하는 연구를 활발히 진행하였으며, 양질의 목재 생산을 위한 임내 평균 경급별 잔분본수 기준 등의 결과를 도출한 바 있다(Kim, *et al.*, 2012; Choi, *et al.*, 2014). 그러나 산불 피해 예방을 위한 연료관리 측면에서의 숲가꾸기 관련 연구는 전무하며, 해당 관련 법령 및 기준 조차 마련되지 못한 실정이다. 또한 우리나라 산림 내 지표, 수관층 연료의 양을 파악하기 위한 연구는 간헐적으로 이루어졌으나, 이를 연료관리 기준 정립에 활용하지 못하였고, 숲가꾸기가 산불확산에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 효과 검증도 이루어지지 않았다.

최근 국내외적으로 산림과 인접한 도시 주변에서 산불이 발생하여 인명, 재산적 피해가 속출하였다. 이

에 따라 산림인접지 주변을 대상으로 하는 집중적 연료 관리의 필요성이 큰 화두로 자리 잡았다(Hussam & Akshat, 2018). 이러한 현상은 지표화 행동모델에 기반한 대규모 임분단위의 분석 체계보다는 수관화 예방을 위해 제거해야 될 임목을 개체별로 선별할 수 있는 소규모 연료관리체계 마련의 필요성을 점차 증가시키는 계기가 되었다(Cruz, 2004; Cruz, *et al.*, 2005). 소규모 연료관리체계를 구축하기 위해서는 3차원적인 연료의 구조를 파악할 수 있는 인벤토리 개념의 정량적 자료가 필요하며, 이를 활용한 물리적 수치해석 기반의 수관화 행동예측 모델 개발이 절실하다. 또한 어떠한 기준으로 연료관리를 수행해야 수관화 전이와 확산을 방지할 수 있을지에 대한 기준 정량화도 시급한 실정이다(Finney, 1998; Scott & Reinhardt, 2001; Van Wagner, 1977; Van Wagner, 1993).

본 연구에서는 리기다소나무림을 대상으로 수관층의 잎과 가지가 수직적으로 어떠한 형태로 분포하고 있는지를 파악하기 위해 산불 수관연료 수직분포 모델을 개발하고자 하였다. 또한 이 모델을 이용하여 숲아베기 강도에 따라 변화하는 수관연료의 수직적 분포 특성을 비교·분석하고, 산불관점에서의 숲가꾸기 효과 검증과 더불어 수관화 전이 및 확산 위험성을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 관련 연구동향

산불확산에 영향을 미치는 요소는 기상, 지형, 연료가 있으며, 특히 연료는 인위적인 관리가 가능한 유일한 인자이다(Pyne, *et al.*, 1996). 연료는 산불이 확산될 시 연소물질을 제공한다는 관점에서 중요한 산불환경 인자로 여겨졌고, 주로 연료의 종류와 배열이 산불 확산에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구가 진행되어 왔다(Kim, 2015). 수관화 전이와 확산에 영향을 미치는 수관층 연료특성 요소로는 수관연료밀도, 각 부위별(잎, 가지(<0.5 cm, 0.5-1 cm)) 연료량 비율 등이 있

다. 수관연료밀도는 해당 부피 안에 포함되는 연료의 양을 의미하는 것으로, Agee(1996)는 산불 피해지 내 방치된 임목의 자료를 분석하여 수관화 확산의 최소 수관연료밀도를 0.10kg/m³으로 제시한 바 있으며, 이 기준치는 Alexander(1998)와 Cruz, et. al.(2005) 연구에 활용되었다. 또한 Johnson(1992)은 0.05kg/m³를 수관화가 발생할 수 있는 최소 수관연료밀도라 하였다. 산림 내 수관연료밀도 추정 은 대부분 수관길이를 이용해 간단히 연료밀도를 추정할 수 있는 방법론(Cruz, 2004; Fule, et. al., 2002)을 사용하고 있다. 그러나 유령림 내 수관연료밀도 추정 외 임내 환경이 복잡해지는 성숙림 단계부터는 정확한 추정이 어려워지는 단점이 있다(Riano, et. al., 2004). 따라서 물리적 수치해석에 기반한 수관화 행동예측 체계 마련을 위해서는 수관층을 세밀하게 분할하고 수직적 배열을 표준화하여 3차원 연료배열을 정밀하게 추정할 수 있는 방법론이 필요하다.

2. 연구대상지 선정

연구대상지는 충남 예산군 예산읍 일대(N 36°40'10.58", E 126°50'16.33")와 대흥면 일대(N 36°39'55.51", E 126°51'53.97") 국유림 내에 위치한 리기다소나무림이다. 임령은 44년생 V영급 임분으로 평균 흉고직경은 18.6cm, 평균 수고는 12.2m, 평균 지하고는 5.3m의 조건이었다(<Table 1>).

숙아베기 강도별 처리 대상지는 총 3개의 강도(재적대비 40%, 20%, 대조구)를 3반복으로 설치한 시험구로서 2009년 9월에 숙아베기를 진행하여 9년이 경과한 처리구이다. 시업 시행 시 3개의 강도처리구는 모두 36년생 IV영급 임분으로 흉고직경, 수고 등 여러 성장조건이 유사한 산림이었다.

3. 자료수집 및 분석방법

1) 수관층 연료수집

20m × 20m 크기의 표준지를 총 4개 시험구로 선정하여 임령, 흉고직경, 수고, 지하고 등을 측정하고, 임분의 생육조건을 파악하였다. 이를 통해 나무의 생육상태와 표준수형을 고려하고, 나무의 크기가 고르게 분포되도록 표준지 별 5본씩 총 20본의 표본목을 선정하였다. 선정된 표본목은 산불이 많이 발생하는 시기의 생태 특성을 반영하기 위하여 3월에서 4월 사이에 집중적으로 벌채하였다. 벌채는 지표면으로부터 0.2m 높이에서 수행하였으며, 총 수고, 지하고, 수관길이 등을 권적을 이용해 측정하였다. 높이별 연료의 수직적 분포를 파악하기 위해 표본목을 1m 단위로 구분할 수 있는 Smalian식 구분구적법을 이용하였다. 수관층은 잎과 가지로 분류하고, 가지의 경우 다시 굵기 별(Needles, <0.5cm, 0.5-1cm, 1-2cm, 2-4cm, >4cm)로 구분하였으며, 국외에서 제시한 연료구분 기준에 따라 잎과 1cm 미만 가지를 수관화 발생 시 연소가능한 연료(Available fuel)로 정의하였다(Call & Albin, 1997). 부위별로 분류한 잎, 가지에 대하여 모두 무게를 측정하였고, 이 중 일부를 향량에 도달할 때 까지 건조시켜 순수한 연료의 양을 추정하였다.

2) 분석방법

(1) 수관 연료 수직분포 모델 개발

연소가능한 연료가 수관층에 어떠한 형태로 분포하는지 파악하기 위해 Alexander, et. al.(2004)가 고안한 방법을 적용하여 벌채목의 수관 최상단부에서 최하단부까지의 연료를 1m 구간별로 나누어 연료량의 누적 비율을 산출하였다. 이를 위하여 먼저, 표본목의 전체 수고에 대한 각 높이 구간의 상대 높이를 비율로 산출하였고, 0에서 1사이의 값을 가진 두 변수(연료누

Table 1. Summary of descriptive statistics for *Pinus rigida* stands

Variables	Stand density (tree/ha)	Age (year)	DBH (cm)	Total height (m)	Crown height (m)	Crown length (m)
Mean	1,250	44	18.6	12.2	5.3	6.2
(Range)	(750-1,400)	(37-51)	(6.1-34.0)	(6.9-17.8)	(4.9-6.2)	(2.0-10.1)

적비율, 상대높이비율)는 Mitsopoulos & Dimitrakopoulos (2007)이 제시한 수관연료 수직분포 추정 함수식 (1)에 의해 모델화 하였다. 적합도는 결정계수(R^2), 평균제곱근오차(RMSE), 변동계수(C.V.)를 이용하여 검증하였다.

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

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

(2) 숲아베기 강도별 산불 수관연료의 수직적 분포 특성 비교

본 연구에서 개발된 수직분포 모델을 이용하여 충남 예산군 지역에 설치한 숲아베기 처리구별 수관층 연료의 수직적 분포 패턴을 비교하였다. 분석 방법은 처리구 내에 산림조사를 통해 얻어진 흉고 직경 정보를 이용하여 개체목별로 수관층 연료의 총 무게를 추정하였고, 그 후 수직적 분포 함수를 활용하여 개체목별 높이에 따른 연료량을 추정한다. 합산 시 각 높이 별 임분의 폭을 이용하여 연료를 단면적당 연료량으로 환산하였다. 수관연료 밀도는 Scott & Reinhardt(2001)이 고안한 수관길이법을 적용하여 추정하였고, 지표층에서 수관층까지의 높이 기준은 수관연료밀도 0.04 kg/m³에 도달하

는 높이를 기준으로 정의하였다(Cruz, 2004).

III. 결 과

1. 산불 수관연료 수직적 분포 추정모델 개발

수관연료 수직적 분포 추정모델을 개발한 결과, 잎과 0.5cm 미만 가지에 대한 결정계수(R^2)는 0.981, <0.5-1cm 가지는 0.964, 연소가능한 수관연료는 0.980의 설명력을 보였으며, 추정된 모수는 통계적인 유의성을 보였다($P < 0.05$). 변이계수는 잎이 10.9%, 0.5cm 미만 가지 12.3%, 0.5-1cm 미만 가지 16.3%, 연소가능한 수관연료 11.7% 이었으며, 평균제곱근오차는 모든 부위에서 0.09kg 이하이었다(<Table 2>). 상대높이비율에 따른 각 부위 별 연료누적비율의 관측치와 추정곡선의 관계를 분석한 결과, 대부분의 연료누적이 상대높이비율 0.3 지점에서 시작하여 0.6-0.8 지점에서 누적이 빠르게 진행되었다(<Figure 1>). 상대높이비율에 따라 연료가 가장 빠르게 누적되는 부위는 0.5cm 미만 가지였으며, 연료가 가장 느리게 누적되는 부위는 잎이었다(<Figure 2>). 수직적 분포 추정모델을 이용하여 구현한 개체목의 연소가능한 수관연료 분포 형태는 <Figure 3>과 같다.

Table 2. Regression models of the vertical crown fuel distribution of *Pinus rigida* species

Crown fuel category	$RW = a / \{1 + \text{EXP}[b - c(RH)]\}$					
	a (S.E.)	b (S.E.)	c (S.E.)	R^2	RMSE(kg)	C.V.(%)
Needles	1.0606 (0.0197)	6.6807 (0.2931)	9.9201 (0.4869)	0.981	0.0825	10.9
Branches(<0.5cm)	1.0289 (0.0161)	6.1218 (0.2791)	10.0838 (0.5015)	0.981	0.0883	12.3
Branches(0.5-1cm)	1.0363 (0.0178)	6.2134 (0.2872)	9.8874 (0.5042)	0.964	0.0891	16.3
Available fuel	1.0503 (0.0187)	6.2373 (0.2749)	9.6367 (0.4746)	0.980	0.0803	11.7

※ Note: S.E. is standard error, R^2 is coefficient of determination, RMSE is root mean square error, C.V. is coefficient of variation.

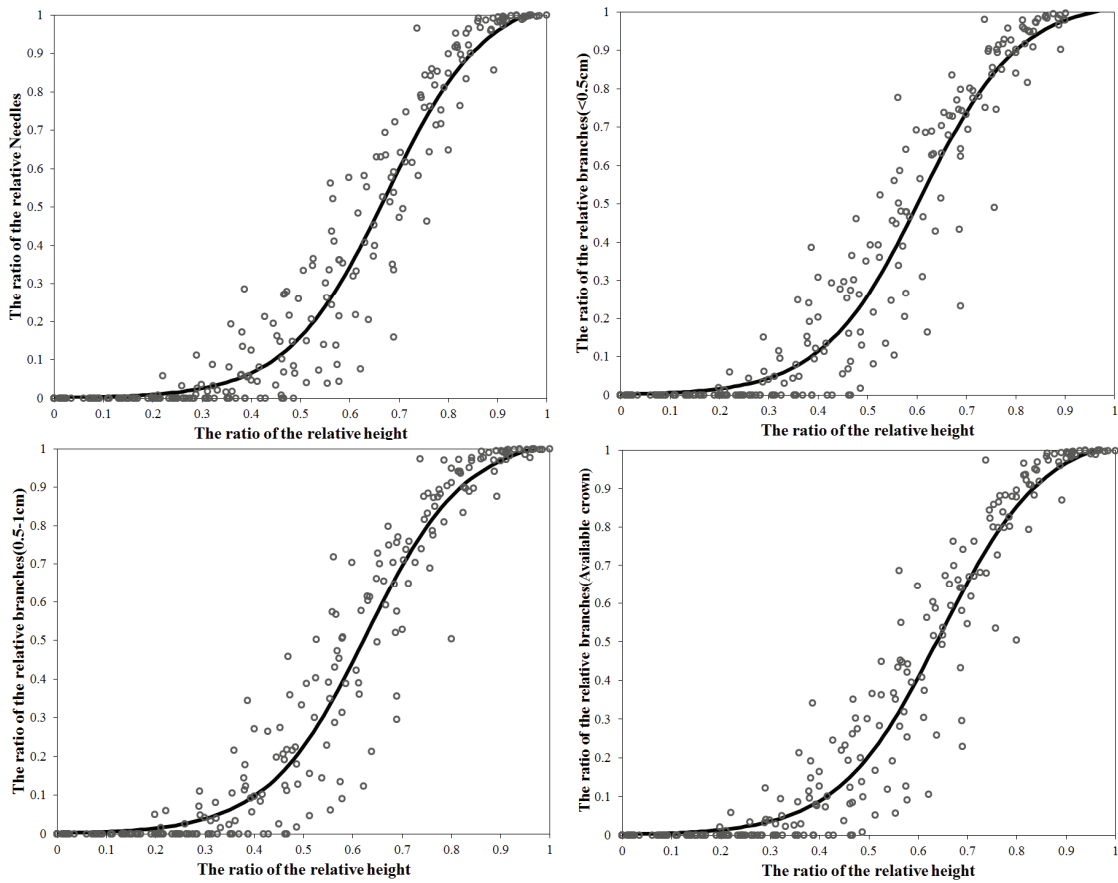


Figure 1. Graphical representation of the models for cumulative fuel estimation of needles, branches and available crown fuel in relation to relative height

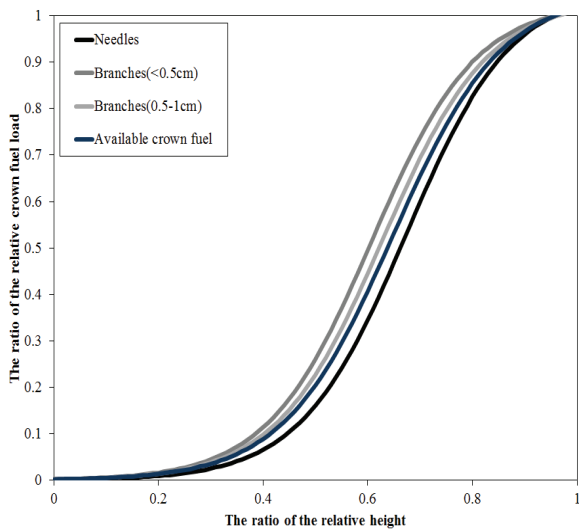


Figure 2. Comparison of crown fuel vertical profile estimation by fuel component in *Pinus rigida* species

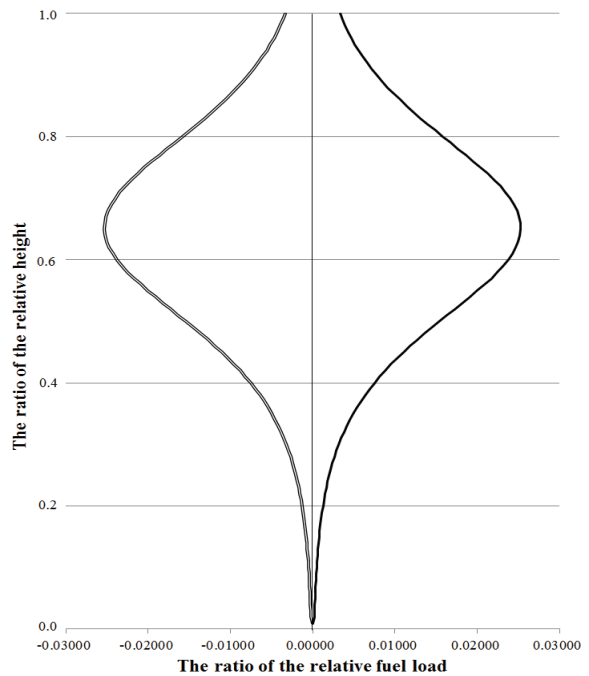


Figure 3. Tree-level crown fuel vertical profile using regression model

2. 숲아베기 강도 처리구별 산불 수관연료 수직적 분포 패턴 비교 결과

1) 숲아베기 강도 처리구별 지표층에서 수관층까지의 높이 비교

수관연료 수직적 분포 추정모델을 이용하여 리기다 소나무림의 숲아베기 강도 처리구별 수관연료 분포 패턴을 분석하였다. 그 결과, 모든 강도 처리구에서 수관층 연료 분포 형태가 수직적 정규분포를 보였으며, 약 상대수고가 0.7m(70%)지점에서 수관연료가 가장 많이 분포하였다. 처리구별 차이점은 Cruz, et. al.(2004)가 제시한 수관연료밀도 0.04kg/m³을 임계치 기준으로 보았을때 숲아베기 강도가 높을수록 지표층에서 수관층까지의 거리차가 커지는 특성이 있었다(대조구 3.70m < 숲아베기 20% 처리구 4.93m < 숲아베기 40% 처리구 5.57m). 위의 경우 대조구와 숲아베기 20% 처리구는 임분높이 8m 지점에 많이 분포하고 있는 반면, 숲

아베기 40% 처리구는 임분높이 9~10m 지점에 많이 분포하고 있었고, 숲아베기 강도가 높을수록 수직적으로 수관연료량이 넓게 분산하는 형태를 보였다(<Figure 4>). 이러한 결과는 숲아베기의 시행 유무가 연료의 수직적 분포 밀도에 영향을 미침을 보여준다. 국외 연구 결과에서도 이러한 내용이 언급이 되는데, Cruz, et. al.(2003)는 임분의 구조와 특성에 따라 정도의 차이는 존재하나, 인위적인 임분밀도에 조절에 의해 임분구조가 개방되면, 지표층에서 수관층까지의 간격이 넓어진다고 하였다. 물론 밀도조절을 위한 산림시업이 같은 침엽수종을 관목층에서 급격히 성장시키기 때문에 사다리 연료 역할에 의한 전이 위험성을 증가시킬 수 있음을 언급하고 있지만(Mitsopoulos & Dimitrakopoulos, 2007), 우리나라의 경우 잣나무를 제외한 대부분의 침엽수종이 양수이므로 산불에 상대적으로 강한 활엽수종이 관목층으로 우점할 가능성이

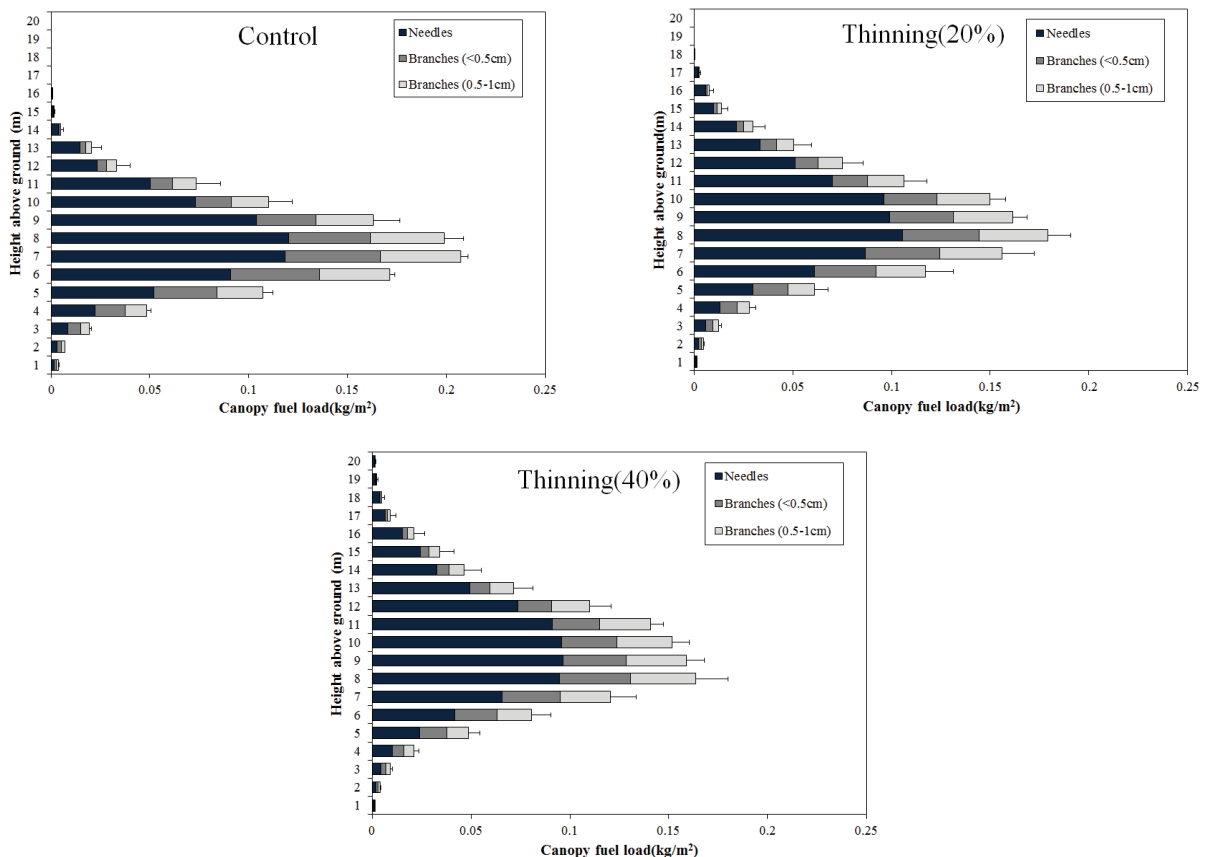


Figure 4. Effects of thinning intensity on the canopy fuel load distribution in the *Pinus rigida* stands (Bar represent ± Standard error of the mean)

높다(Byeon & Yun, 2018). 따라서 숲아베기에 의해 관목층이 빠르게 성장하여도 수관화 전이 위험성을 높이는 어려울 것으로 판단된다.

2) 숲아베기 강도 처리구별 산불 수관연료 분포 패턴 비교
처리구별 단면적 당 수관연료량을 분석한 결과, 대조구는 평균 1.25kg/m², 숲아베기 20% 강도 처리구는 평균 1.17kg/m², 숲아베기 40% 강도 처리구는 평균 1.21kg/m²로 처리구별 차이가 적었다. 그러나 수관연료밀도는 대조구 0.22kg/m³ > 숲아베기 20% 강도 처리구 0.18kg/m³ > 숲아베기 40% 강도 처리구 0.16 kg/m³로 숲아베기 강도가 클수록 점차 낮아지는 것으로 분석되었다(<Table 3>). 이러한 연구결과는 숲아베기를 시행할 경우 전체 탈 수 있는 물질의 양은 유사하게 유지되나, 연료가 분포할 수 있는 공간이 넓어지면서 연료의 분산이 진행됨을 의미한다. 이에 따라 산불이 발생했을 시 부피 당 소모되는 열에너지가 감소되는 현상이 나타나므로 화염 전도에 필요한 연료의 조밀성이 현저히 낮아져 수관화 확산을 효과적으로 억제시킬 것으로 판단된다. 한편, 국외에서 제시된 연구 결과를 보면, Mix conifers type의 수관연료량을 1.40kg/m², *Pinus contorta* 1.00kg/m², *Pseudotsuga menziesii* 1.00kg/m², *Pinus ponderosa* 0.61kg/m²로 제시한 바 있으며(Cruz, et. al., 2003), Alexander, et. al.(2004)는 수관화 실험 모델링을 통해 수관층의 연료량은 0.60kg/m²에서 1.50kg/m² 범위라고 언급하였다. 또한 Mitsopoulos & Dimitrakopoulos(2007)은 0.96kg/m²에서 1.80kg/m² 범위를 결과로 제시한 바 있으므로 본 연구결과에서 제시한 수치와 대부분 유사하였다. 수관연료밀도의 경우 Alexander, et. al.(2004)

0.16kg/m³, Cruz, et. al.(2003) 0.18kg/m³로 제시하였으며, 유사한 결과는 Agee(1996)와 Scott & Reinhardt (2002) 연구에서도 제시된 바 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 숲아베기 강도가 리기다소나무림의 산불 수관연료 수직적 분포에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 이를 위하여 숲아베기가 실시된 충남 예산 지역 리기다소나무림을 대상으로 총 20본의 임목을 별채하여 수관연료의 수직분포 모델을 개발하였으며, 개발된 모델은 숲아베기 대상지 산림조사 자료에 대입하여 숲아베기 강도에 따른 수관연료의 수직적 분포 특성을 비교하였다. 연구결과에 의하면, 수직적 연료분포 모형은 부위별로 결정계수 0.96-0.98(R^2)의 범위였으며, 추정된 모수는 통계적인 유의성을 보였다($P < 0.05$). 숲아베기 처리구별 수관연료 수직적 분포 특성을 분석한 결과, 지표층에서 수관층까지의 거리는 대조구 3.7m, 숲아베기(20% 강도) 4.9m, 숲아베기(40% 강도) 5.7m로 나타났으며, 수관연료밀도는 대조구 0.22kg/m³, 숲아베기(20% 강도) 0.18kg/m³, 숲아베기(40% 강도) 0.16kg/m³로 나타났다. 본 연구는 충남 예산지역에 분포하는 리기다소나무림으로 한정되어 산불 수관연료의 수직적 분포 모델을 개발하였으므로 우리나라 리기다소나무림을 대표하기에는 다소 무리가 있다. 추후 더 많은 자료 수집을 통해 전국 모델로 확대할 수 있는 방안 모색이 필요하다. 한편, 숲아베기 강도가 산림의 산불 수관연료 수직적 분포에 미치는 영향을 분석한 결과는 산림 내 산불 연료의 양을 3차원으로 해석함에 있어 유용한

Table 3. Summary statistics and canopy fuel characteristics for *Pinus rigida* stands by thinning intensity

Thinning intensity	Canopy closure (%)	Stand density (tree/ha)	Stand height (m)	Basal area (m ² /ha)	Canopy fuel load (kg/m ²)	Canopy bulk density (kg/m ³)	Canopy base height (m)
Control	86.70 (±2.89)	1,233.33 (±144.34)	8.93 (±0.25)	27.49 (±1.91)	1.25 (±0.21)	0.22 (±0.06)	3.67
Thinning (20%)	73.33 (±2.89)	833.33 (±28.87)	11.67 (±1.39)	24.24 (±2.16)	1.17 (±0.10)	0.18 (±0.03)	4.93
Thinning (40%)	60.0 (±5.00)	600.00 (±129.90)	13.20 (±2.00)	22.73 (±2.10)	1.21 (±0.05)	0.16 (±0.03)	5.57

정보를 제공할 것으로 보인다. 또한 수관연료의 수직적 분포 변화가 화염에 노출되어 연소되는 메커니즘을 파악하고, 수관화 위험성을 연료 관점에서 평가하는 데 유용하게 활용될 수 있다.

References

- Agee, J. 1996. The Influence of Forest Structure on Fire Behavior. Proceedings of the 17th Annual Forest Vegetation Management Conference, January 16-18, Redding, California. 52-68.
- Alexander, M. E. 1998. Crown Fire Thresholds in Exotic Pine Plantation of Australasia. Ph. D. Thesis. Australian National University, Canberra.
- Alexander, M. E., C. N. Steffner, 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. 49.
- Brown, J. K. 1978. Weight and Density of Crowns of Rocky Mountains Conifers. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-197.
- Byeon, S. Y. and C. W. Yun. 2018. Understory Species Composition and *Pinus densiflora* Natural Regeneration In *Pinus densiflora* Stands Regenerated by Seed-tree Method. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 107(1): 25-34.
- 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.
- Choi, J. K., B. K. Lee, D. S. Lee, and I. W. Choi. 2014. Growth Monitoring of Korean White Pine(*Pinus koraiensis*) Plantation by Thinning Intensity. *Journal of Korean Forest Society*. 103(3): 422-430.
- Cruz, M. G., M. E. Alexander, and R. H. Wakimoto. 2003. Assessing Canopy Fuel Stratum Characteristic in Crown Fire Prone Fuel Types of Western North America. *International Journal of Wildland Fire*. 12(1): 39-150.
- Cruz, M. G., M. E. Alexander, and R. H. Wakimoto. 2004. Modeling the Likelihood of Crown Fire Pccurrence in Conifer Forest Stands. *Forest Science*. 50(5): 640-658.
- Cruz, M. G., M. E. Alexander, and R. H. Wakimoto. 2005. Development and Testing of Models for Predicting Crown Fire Rate of Spread in Conifer Forest Stands. *Canadian Journal of Forest Research*. 35(7): 1626-1639.
- Finney, M. A. 1998. Farsite: Fire Area Simulator Model Development and Evaluation. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Stantion, Research Paper, RMRS-RP-4, Ogden, Utah. 47.
- Finney, M. A. 2007. A Computational Method for Optimising Fuel Treatment Locations. *International Journal of Wildland Fire*. 16(6): 702-711.
- Fule, P. Z., W. W. Covington, H. B. Smith, J. D. Springer, T. A. Heinlein, K. D. Husinga, and M. M. Moore. 2002. Comparing Ecological Restoration Alternatives: Grand Canyon, Arizona. *Forest Ecology and Management*. 170(1-3): 19-41.
- Hussam, M. and C. Akshat. 2018. Unraveling the Complexity of Wildland Urban Interface Fires. *Scientiflc Reports*. 8(1): 9315-9327.
- Johnson, A., P. Woodard, and S. Titus. 1989. Lodgepole Pine and White Spruce Fuel Weights Predicted From Height and Crown Width. *Canadian Journal of Forest Research*. 19(4): 527-530.
- Johnson, E. A. 1992. *Fire and Vergetation Dynamics: Studies From the North American Boreal Forest*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Keyes, C. R. and K. L. Ohara. 2002. Quantifying Stand Targets for Silviculture Prevention of Crown Fires. *West Journal of Applied Forestry*. 17(2): 101-109.
- Kim, S. Y. 2015. A Study on the Analysis of Fuel Characteristics of Forest Fire Hazard Assessment. Ph. D. Thesis. Kongju National University.
- Kim, Y. H., T. W. Kim, H. K. Won, and K. H. Lee. 2012. Estimation of Timber Production by Thinning Scenarios Using a Forest Stand Yield Model. *Journal of Korean Forest Society*. 101(4): 592-598.
- Korea Forest Service. 2018. <http://www.forest.go.kr>.
- 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.
- Pyne, S. J., P. L. Andrews, and R. D. Laven. 1996. *Introduction to Wildland Fire*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- Riano, D., E. Meier, B. Allgower, E. Chuevico, and S. Ustin. 2003. Modeling Airborne Laser Scanning Data for the Spatial Generation of Critical Forest Parameters in Fire Behavior Modeling. *Remote Sensing Environment*. 86(2): 177-186.
- Scott, J. H. and E. D. Reinhardt. 2001. Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Potential. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, USA. 59.
- Scott, J. H. and E. D. Reinhardt. 2002. Estimating Canopy Fuels in Conifer Forests. *Fire Management Today*. 62(4): 45-50.
- Stephens, S. L. 1998. Evaluation of the Effects of Silvicultural and Fuels Treatments on Potential Fire Behavior in Sierra Nevada Mixed Conifer Forest. *Forest Ecology and Management*. 105(1-3): 21-35.
- Stocks, B. J. 1980. Black Spruce Fuel Weights in Northern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*. 10(4): 498-501.
- Van Wagner, C. E. 1977. Conditions of the Start and Spread of Crown Fires. *Canadian Journal of Forest Research*. 7(4): 23-34.
- Van Wagner, C. E. 1993. Prediction of Crown Fire Behavior in Two Stands of Jack Pine. *Canadian Journal of Forest Research*. 23(3): 442-449.
- Korean References Translated from the English*
- 김성용. 2015. 산불위험성 평가를 위한 주요 침엽수종의 연료특성 분석에 관한 연구. 박사학위논문. 공주대학교.
- 김영환, 신만용, 김태욱, 원현규, 이경학. 2012. 임분 수확예측 모델을 이용한 간벌 시나리오별 목재수확량 예측. 한국산림과학회지. 101(4): 592-598.
- 변성엽, 윤충원. 2018. 소나무 모수림 시업지의 하층식생 종 조성과 소나무 천연갱신양상. 한국산림과학회지. 107(1): 25-34.
- 최정기, 이병기, 이대성, 최인화. 2014. 간벌강도에 따른 잣나무 인공림의 생장변화 모니터링. 한국산림과학회지. 103(3): 422-430.

Received: Jun. 1, 2020 / Revised: Jul. 29, 2020 / Accepted: Jul. 29, 2020

숙아베기 강도가 리기다소나무림의 산불연료 수직적 분포에 미치는 영향

- 수관층 연료를 중심으로 -

국문초록 본 연구에서는 숙아베기 강도가 리기다소나무림의 산불 수관연료 수직적 분포에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위하여 숙아베기가 실시된 충남 예산지역 리기다소나무림을 대상으로 총 20본의 임목을 별채하여 수관연료의 수직분포 모델을 개발하였으며, 개발된 모델을 이용하여 숙아베기 강도에 따른 수관연료의 수직적 분포 특성을 비교하였다. 연구결과에 의하면, 수직적 연료분포 모형은 부위별로 결정계수 0.96-0.98(R^2)의 범위였으며, 추정된 모수는 통계적인 유의성을 보였다($P < 0.05$). 지표층에서 수관층까지의 거리는 대조구가 3.7m, 숙아베기(20% 강도) 처리구 4.9m, 숙아베기(40% 강도) 처리구 5.7m로 나타났으며, 수관연료밀도는 대조구 0.22kg/m³, 숙아베기(20% 강도) 처리구 0.18kg/m³, 숙아베기(40% 강도) 처리구 0.16kg/m³로 나타났다.

주제어 : 산불, 수관연료량, 수직적 분포, 숙아베기

Profiles **Sun Joo Lee** : She received her master's Agriculture from Kongju National University in February 2018 with her master's paper title "Development of Growth and Diameter Distribution Models for Larix leptolepis Stands in South Korea". She is currently working for Forest Disaster Management Division of the National Institute of Forest Science as a researcher(lsj419@korea.kr).

Mi Na Jang : She received his Ph.D. in Agriculture from Kongju National University in February 2020 with his Ph.D. paper titled "Development of Forest Fire Vulnerability Assessment Methodology Using GIS". She is currently working for Korea Forest Fire Management Service Association(jmn1607@naver.com).

Young Jin Lee : He received his Ph.D. in Forestry and Agriculture from Stephen F. Austin State University, U.S.A in 1998. He is a Professor of the Department of Forest Resources, Kongju National University, in which he has taught since 2002(leeyj@kongju.ac.kr).

Chun Geun Kwon : He received his Ph.D. in Agriculture Seoul National University in August 2005 with his Ph.D. paper titled "Analysis of Behavior Characteristics of the 2000 Samcheok Forest Fire Using GIS/RS and Development of a Forest Fire Growth Prediction Model". He is currently working for Forest Disaster Management Division of the National Institute of Forest Science as a senior researcher(byungdoo@korea.kr).

Byung doo Lee : He received his Ph.D. in Agriculture Seoul National University in August 2005 with his Ph.D. paper titled "Analysis of Behavior Characteristics of the 2000 Samcheok Forest Fire Using GIS/RS and Development of a Forest Fire Growth Prediction Model". He is currently working for Forest Disaster Management Division of the National Institute of Forest Science as a senior researcher(byungdoo@korea.kr).

Sung Yong Kim : He received his Ph.D. in Agriculture from Kongju National University in August 2015 with his Ph.D. paper titled "A Study on the Analysis of Fuel Characteristics for Forest Fire Hazard Assessment". He is currently working for Forest Disaster Management Division of the National Institute of Forest Science as a junior researcher. His current research interest includes forest fire prediction and forest fire fuel model and fire danger assessment(kitacol@korea.kr).