

직경분포모형을 이용한 소나무림의 수관연료특성 예측: 산림사업지 임분과 비사업지 임분에서

이선주¹ · 김성용² · 이병두² · 이영진^{1*}

¹공주대학교 산림자원학과, ²국립산림과학원 산림방재연구과

Estimation of Canopy Fuel Characteristics for *Pinus densiflora* Stands Using Diameter Distribution Models: Forest Managed Stands and Unmanaged Stands

Sun Joo Lee¹, Sung Yong Kim², Byung Doo Lee² and Young Jin Lee^{1*}

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

²Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 본 연구는 산림사업이 소나무임분의 수관연료특성 변화에 미치는 영향을 예측하고자 하였다. 본 연구에서는 국가산림자원자료 중 사업지 1,085 stands, 비사업지 349 stands의 표본점 자료를 분석에 이용하였으며, Weibull 함수를 사용하여 시간에 따른 임분생장과 수관연료특성에 대해 예측하였다. 산림사업유무에 따른 수관연료특성을 비교해본 결과 비사업지 임분이 사업지 임분에 비해 평균 수관연료량은 약 14% 높게 나타났으며, 연소가능한 수관연료밀도 또한 약 16% 높게 나타났다. Weibull 함수를 사용하여 임령 40년, 50년, 60년의 생장 예측과 수관연료특성 변화를 비교해본 결과, 사업지 임분은 시간이 지남에 따라 중경목, 대경목에 최대임목본수의 증가가 예측된 반면, 비사업지 임분은 소경목, 중경목에서 최대임목본수가 예측되었다. 비사업지 임분이 사업지 임분에 비해 수관연료량, 수관연료밀도의 증가량이 높게 나타나 수관화로의 확산 가능성이 높은 것으로 사료되었다.

Abstract: The objective of this study was to analyze the effects of forest management activities on canopy fuel characteristics for *Pinus densiflora* stands in South Korea. We used 1,085 managed stands data and 349 unmanaged stands data of the National Forest Inventory for this study, and it was estimated by using the Weibull function for the growth of stand and canopy fuel characteristics. Comparing the canopy fuel characteristics for the managed stands and unmanaged stands shows that the average canopy fuel load is about 14% higher than that of managed stands, and the canopy bulk density is also approximately 16% higher. The results of comparing growth projections for 40 years, 50 years and 60 years with the Weibull function are as follows: Over time, managed stands was predicted the maximum number of medium and large class diameter, while unmanaged stands was predicted maximum number of small and medium class diameter. From a fire fuel perspective, unmanaged stands are predicted to be of the type small class diameter and high density, which is a good condition for crown fire. In addition, Canopy fuel load, Canopy bulk density is relatively higher than managed stands, indicating that the possibility of high crown fire hazard.

Key words: crown fuel characteristics, crown fire, diameter distribution models, forest management activity

서론

현재 우리나라에 분포하고 있는 침엽수 단순림의

면적은 우리나라 전체 산림면적에 약 36.9%를 차지하고 있으며, 최근 5년(2011~2015년)간 침엽수림의 ha당 임목축적 변동 추이를 보면 임목축적은 130.3 m³/ha에서 172.7 m³/ha로 점점 증가하고 있는 추세이다(KFS, 2018). 이는 경제적 관점에서 산림자원으로서의 가치 증진에 큰 역할을 담당하였으나, 산불관점에서는 연료가 증가한 것으로 의미되므로 대형 산불의 가능성

* Corresponding author

E-mail: leeyj@kongju.ac.kr

ORCID

Young Jin Lee  https://orcid.org/0000-0002-9319-1533

이 높아졌다고 할 수 있다(Lee, 2005).

특히, 대표 침엽수종인 소나무림이 분포하고 있는 면적은 1,562천ha로 전체 침엽수림 면적의 23.1%를 차지하고 있는 수종이다(KFS, 2018). 소나무의 특징은 잎과 가지에 테르펜 등의 정유 성분을 함유하고 있어 수관화로 전이 및 확산 위험성이 높은 수종이라고 알려져 있다(Kwon et al., 2008). 실제로 동해안 지역에 발생한 대형산불의 주요 원인으로는 건조하고 빠른 바람 외에 산불기간 중 수관층의 연료가 많이 축적된 소나무림을 지적하고 있다(Lee et al., 2008; Lee et al., 2012). 이를 예방하기 위해서는 기존의 목재가치를 향상시키기 위한 산림사업에서 더 나아가 산림재해 예방차원의 연료관리 사업이 필요하다.

국외에서는 숲아베기가 대형산불의 원인이 되는 수관화 확산을 방지할 수 있는 하나의 방법이라고 제시하며 산불연료관리 사업을 실시하고 있다. 특히, 미국은 대형산불 피해방지를 위한 간벌촉진사업으로 건강한 산림정책(Healthy forests initiative)을 추진하여 산림의 건강성을 회복하는데 주요 목적을 두고 있으며, 미국 북서부 지역에서는 지상의 연소물질을 벌채 한 후 연료를 미리 연소시켜 수관화를 예방하는 사업을 하고 있다(Jain et al., 2012).

이러한 연료관리사업은 임내의 수직적, 수평적인 연료를 제거하여 사다리형 연료(Ladder fuel)를 줄이고 산불 발생의 위험성을 저감시킴으로써 수관화로의 확산 가능성을 줄일 수 있다(Lee et al., 2008). 이와 관련된 숲아베기 연구사례를 보면 연구 결과들의 공통점은 숲아베기를 시행된 임분에서는 평균 흉고직경, 지하고가 높아지는 반면 수관연료밀도는 낮아져 숲아베기 미시행지 임분에 비해 수관화로 확산 가능성이 낮게 보고가 되고 있다(Agee et al., 2006; Graham et al., 1999; Harrod et al., 2009). 국내연구에서도 소나무임분에서의 숲아베기 시행여부에 따른 연료량을 비교한 결과, 시행지 임분이 미시행지 임분에 비해 평균 0.11 kg/m³ 낮게 나타나 수관화 확산 가능성이 낮게 분석된 바가 있다(Kim et al., 2011).

이처럼 숲아베기를 통해 가연연료를 인위적으로 관리할 수 있으며 산불예측을 고려한 임분밀도 조절과 그 시기를 파악하는 것은 매우 중요하다. 이는 산림생장모델을 통해 현재 임분상태를 파악하고 미래 상태를 예측하여 현재 조건에 맞는 관리방안을 수립할 수 있다. 특히, 산림생장모델 중 동적임분생장모델(Dynamic stand growth model)은 임분의 지위지수, 임령, 임분밀도 등의 자료를 이용하여 다양한 조건에 따른 임분의 변화를 예측할 수 있어 널리 사용되어지고 있다(Seo

et al., 2005).

따라서, 본 연구의 목적은 산불에 취약한 대표 침엽수종인 소나무 임분을 대상으로 산림사업유무에 따른 수관연료특성을 비교하고, 임분변화를 예측할 수 있는 동적생장모델인 Weibull 직경분포모형을 이용하여 생장예측값의 비교분석 및 시간이 지남에 따른 수관연료특성을 예측하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지 및 자료 수집

본 연구의 대상지는 전국 산림을 4 km × 4 km 간격의 격자점을 기준으로 고정표본점 4,000개를 계통적으로 배치하여 구축된 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI) 자료 중 소나무임분의 산림생장관련 자료(2006~2015)를 이용하였다(Figure 1). 그 중 국가산림자원조사 자료에서 정의한 목재생산을 주목적으로 하는 임지인 사업지 임분과 보안림, 보호법 등에 의해 사업을 제한하는 비사업지(사업제한지) 임분을 구분하여 소나무임분의 수관연료특성을 추정·예측을 하고자 하였다(KFS, 2012). 고정표준지 내 소나무에 대한 임목본수 비율이 75%이상인 임분의 임상만을 추출한 사업지 임분은 총 1,085 stands이었으며, 비사업지 임분은 349 stands으로 분석에 이용된 소나무임분 생장특성은 Table 1과 같다. 분석된 자료는 추출 자료에서 이상치를 제거 후 활용하였다.

2. 분석방법

수관연료특성에 관한 분석에는 크게 수분함량(Moisture contents), 지하고(Crown base height), 수관연료밀도(Crown bulk density)로 구분할 수 있다. 특히, 수관연료밀도는 수관체적 당 수관층 연료량을 의미하며, 수관화로 전이되었을 경우 개체목간의 확산에 크게 영향을 미쳐 수관층 연료특성에 대한 연구에서 일반적인 지표로 분석되고 있다(Mutch et al., 1993; Kim, 2014).

따라서, 본 연구는 국가산림자원조사 자료 중 추출된 산림사업유무에 따른 소나무임분의 수관연료특성을 추정하기 위해 개발된 대수회귀식을 적용하여 수관연료량을 추정하였으며, 임분단위 수관연료밀도 산출에 사용되는 인자인 수관체적을 추정하기 위해 임분의 수관길이(Canopy length)법을 이용한 임분단위 수관체적(Canopy volume)을 구하여 수관체적 당 수관층 연료량을 산출하였다(Cruz et al., 2003).

또한 추출된 각각의 소나무임분 자료를 이용하여 직경분포모형을 개발해 산림사업유무에 따른 수관연료특성

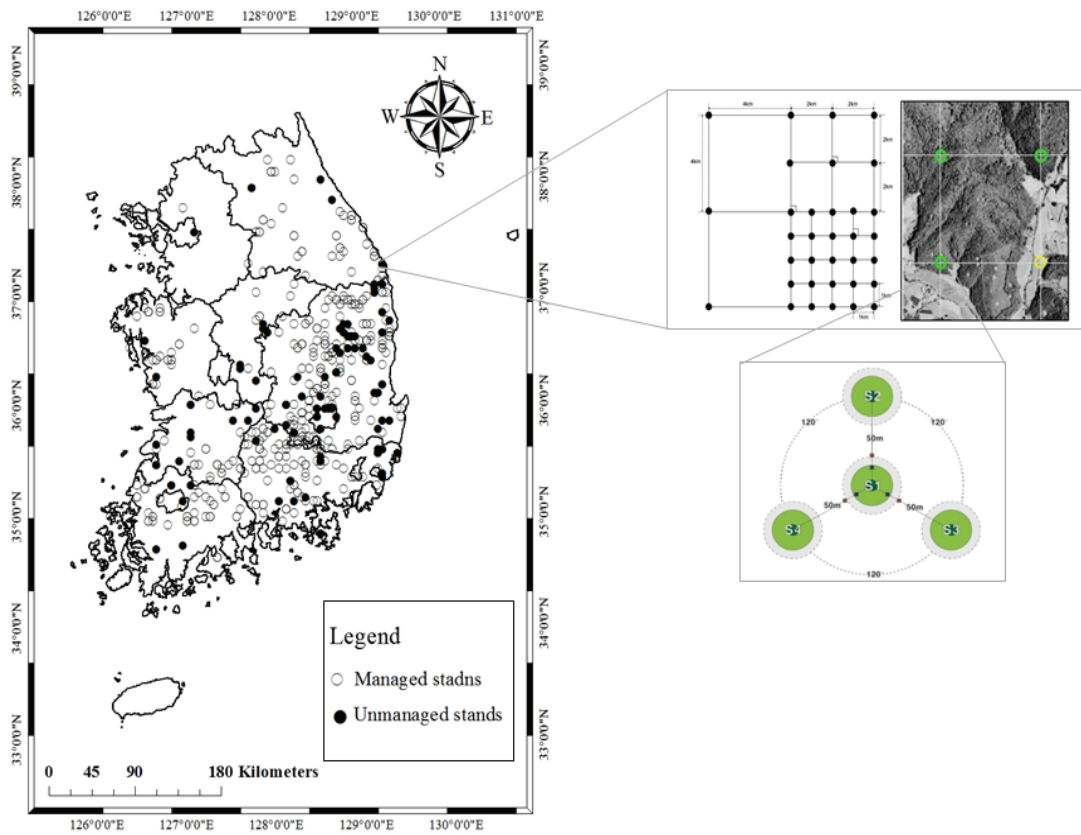


Figure 1. The location of study sites.

Table 1. Summary of observed statistics for Managed and Unmanaged *Pinus densiflora* stands in South Korea.

Variables	Managed stands (n= 84,871 observations from 1,085 stands)						Unmanaged stands (n=22,966 observations from 349 stands)					
	Mean	StdDev.	Median	Min.	Max.	C.V.	Mean	StdDev.	Median	Min.	Max.	C.V.
Age (years)	37.5	8.9	36.2	10.0	91.5	4.2	38.2	11.2	35.8	20.0	89.2	3.4
DBH (cm)	19.1	5.9	18.4	6.3	41.7	3.2	16.6	5.9	15.5	8.2	47.3	2.8
Height (m)	14.3	3.3	14.0	5.4	29.4	4.4	13.5	2.9	13.2	7.3	24.5	4.7
Crown height (m)	6.2	2.3	6.0	1.1	15.1	2.7	5.5	2.0	5.3	1.6	13.3	2.7
SI	12.9	2.7	12.4	6.6	26.1	4.8	12.1	2.3	11.9	7.1	19.3	5.3
D0	9.3	4.0	8.0	6.0	33.0	2.3	7.7	3.0	6.0	6.0	27.0	2.6
D25	14.7	5.5	14.0	6.0	37.0	2.7	12.0	5.2	11.0	6.0	41.0	2.3
D50	18.5	6.3	18.0	6.0	43.0	2.9	15.9	6.3	15.0	7.0	49.5	2.5
D95	29.7	7.6	30.0	7.0	66.0	3.9	27.4	8.8	26.0	12.0	66.0	3.1
Dq	20.0	5.9	19.4	6.3	42.7	3.4	17.7	6.2	16.4	8.6	48.5	2.9
TPH	961.7	318.4	975.0	200.0	1500.0	3.0	1645.1	1027.2	1375.0	225.0	6950.0	1.6

변화를 예측하고자 하였다. 먼저 Chapman-Richards 수고성장모델을 사용하여 임령 및 우세목 수고의 관계를 분석하였으며, 추정된 값을 이용하여 기준임령 (Index age) 30년의 시업지, 비시업지 임분 내 성장하고 있는 소나무 임분의 지위지수를 개발하였다. 직경 분포모델은 Weibull 함수를 이용하였으며, 백분위

(Percentile)에 근거한 직경추정, 백분위에 대한 모수복구 방법을 사용하였다(Lee and Coble, 2006). 개체목별 수고와 지하고를 추정하기 위하여 Chapman-Richards의 수고 추정식을 사용하였다. 추정된 모수 및 추정량은 검정통계량을 통해 모델의 적합성을 평가하였다. 개발한 직경분포모델을 통해 추정된 임분의 직경급

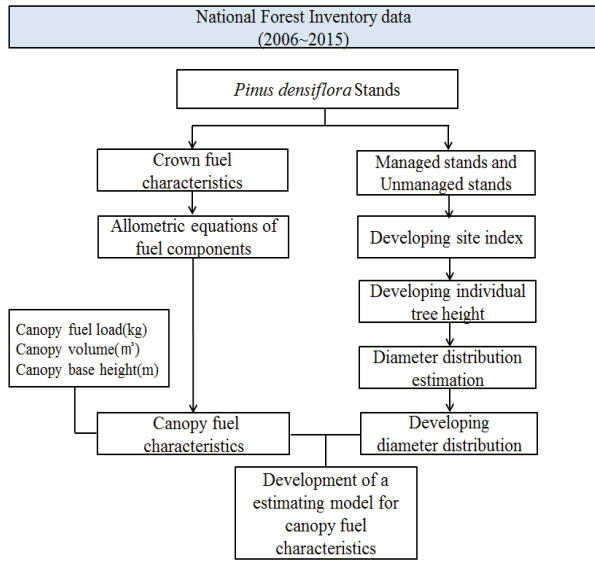


Figure 2. Study schemes in the prediction of the canopy fuel characteristics for *Pinus densiflora* stands by forest management activity.

별 분수에 임분단위의 수관체적과 수관연료량을 적용하여 시간의 지남에 따른 산림사업유무에 따른 수관연료특성 변화를 예측하였다. 분석의 흐름도는 다음과 같다(Figure 2).

1) 산림사업유무에 따른 수관연료특성 추정

산림사업유무에 따른 수관연료특성을 추정하기 위해 본 연구에서는 산림사업유무에 따른 소나무임분의 흉고직경 정보를 이용하였다. 수관연료량 추정은 Kim(2015)가 연구를 통해 개발한 소나무 수관연료량 대수회귀식(식 1)에서 $\beta_0 = -3.141$, $\beta_1 = 2.133$ 을 적용하였으며, 연소가능한 수관연료량 추정은 $\beta_0 = -2.380$, $\beta_1 = 1.637$ 을 대입하여 산출하였다. 두 추정식은 결정 계수(R^2)가 0.88~0.96으로 모두 높은 설명력을 보였다. 수관체적은 수관의 길이를 이용하여 ha 단위로 추정한 식 2와 임분단위 수관연료밀도는 식 3, 연소가능한 수관연료밀도는 식 4를 적용하였다.

$$\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D \tag{1}$$

Note: $\beta_i (i = 0, 1)$ =estimated parameters, D=diameter at breast height(cm)

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

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

$$ACBD = \frac{\sum_{i=1}^n (ACFL_i \times TEF_i)}{CAV} \tag{4}$$

Note: CAV= Canopy volume(m^3), CBD=Canopy bulk density(ton/m^3), ACBD=Available canopy bulk density(ton/m^3), CL_i = Crown length(m) of i th individual trees, TEF_i = Tree expansion factor corrected to a per ha basis for the i th trees.

2) 지위지수와 개체목 수고 추정

임분단위 정보를 이용하여 직경급 별 임분재적을 추정하기 위해서는 각 임분의 지위를 평가하고, 직경급 별 분수 정보가 필요하다. 지위지수 추정방법에는 다양한 방법이 있지만, 본 연구에서는 Chapman-Richards (이하 C-R)의 수고성장모형을 이용하였다(식 5). 본 모델은 b_0 가 점근값(Asymptotic value)으로서 우세목의 수고가 도달할 수 있는 최댓값을 나타내주며 전형적인 성장형태를 표현하는 S자 곡선(Sigmoid curve)로 임령에 따른 성장 및 수확을 예측하는 모형으로 널리 사용되고 있다(Pyo, 2009). 추정된 C-R 식을 Guide curve로 이용하여 산림사업유무에 따른 소나무임분의 지위지수를 개발하였다(식 6). b_1 는 시간(t)축의 크기를 결정하고, b_2 는 성장곡선의 모양에 관계되는 모수이다(Clutter et al., 1983). 지위지수의 기준임령은 30년을 기준으로 하였으며 개발한 계수는 다음과 같다(Table 2).

$$Hd = b_0 (1 - \exp(-b_1 Age))^{b_2} \tag{5}$$

$$SL_{30} = Domh \left(\frac{1 - \exp(-b_1(30))}{1 - \exp(-b_1(Age))} \right)^{b_2} \tag{6}$$

Note: Domh= height of dominant trees, Age= stand age, b_i = parameters

직경급 별 수고의 추정은 임분단위 재적 추정에 중요한 변수이며 임분단위의 직경급 별 재적을 추정하기 위하여 수고식(식 7)을 적용하여 개체목 수고식을 개발하였다(Table 2).

$$HT = 1.2 + b_0 (1 - \exp^{-b_1 DBH})^{b_2} \tag{7}$$

Table 2. Parameter estimates and fit statistics of managed stands, unmanaged stands predictive equations for guide curve (H_d), and individual tree height (HT), quadratic mean diameter (D_q), percentiles of the diameter distribution (D_0 , D_{25} , D_{50} , D_{95}).

Equation	Parameter	Managed stands				Unmanaged stands			
		Parameter estimate	F.I.	RMSE	C.V.	Parameter estimate	F.I.	RMSE	C.V.
5 (H_d)	b_0	14.87				12.17			
	b_1	0.04	0.97	1.87	7.48	0.02	0.95	1.04	6.22
	b_2	1.34				0.77			
7 (HT)	b_0	20.43				19.97			
	b_1	0.05	0.97	2.29	8.21	0.05	0.97	2.03	7.20
	b_2	1.13				0.92			
9 (D_q)	β_0	3.97				2.52			
	β_1	-10.24	0.76	0.15	4.98	-11.59	0.66	0.18	6.24
	β_2	0.65				0.68			
	β_3	-0.25				-0.24			
9 (D_0)	β_0	0.66				1.13			
	β_1	0.59	0.58	2.55	27.96	0.97	0.63	1.64	21.70
	β_2	-0.09				-0.01			
9 (D_{25})	β_0	-2.38				-0.43			
	β_1	0.92	0.90	1.76	12.06	0.78	0.82	2.07	16.92
	β_2	-0.03				-0.03			
9 (D_{50})	β_0	-1.86				-1.47			
	β_1	1.05	0.96	1.32	7.15	0.99	0.95	1.38	8.45
	β_2	-0.02				0.01			
9 (D_{95})	β_0	5.23				2.31			
	β_1	1.16	0.86	2.84	9.60	1.31	0.88	2.89	10.47
	β_2	0.04				0.05			

3) 임분단위 직경분포모델 개발

직경분포를 이용한 성장모형의 연구에서 직경급별 분수의 추정은 가장 중요하며 Weibull 함수는 유연성과 정도에 의해 널리 사용되고 있다(Son et al., 2012). 특히 다른 직경분포모델과의 비교에서 Weibull 함수는 각각의 다른 수종에 관한 임분특성분석에서 우월한 정확성과 적합성을 나타냈다(Abino, 2016; Coble and Lee, 2008; Nord-Larsen and Cao, 2006; Lumbres and Lee, 2014; Zhang et al., 2003). 따라서, 다양한 직경분포모델 중 본 연구에서는 Weibull 함수(식 8)를 사용하여, 예측된 직경급별 분수의 추정을 통해 수관연료량을 예측하고자 하였다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] \tag{8}$$

Note: a= location parameter, b= scale parameter,
 c= shape parameter,
 $x \geq a > 0, b > 0, c > 0$

본 연구는 Lee and Coble(2006)이 제시한 백분위수에 의한 모수복구방법을 사용하였다. Weibull 함수 모수추정에 도입한 모수 복구방법을 사용하기 위해 해당 임분 내 직경을 최소 직경(D_0), 25번째 직경 백분위수(D_{25}), 50번째 직경 백분위수(D_{50}) 및 95번째 직경 백분위수(D_{95})로 나열하여 특정 백분위수를 예상하는 회귀식(식 9)을 사용하였으며, 백분위수에 의한 모수복구방법을 사용하기 위한 모수복구식은 다음과 같다(식 10, 11, 12).

$$D_i = \beta_0 + \beta_1 D_q + \beta_2 Age \tag{9}$$

Note: D_q = quadratic mean diameter(cm),
 $i = 0, 25, 50, 95$

$$a = \frac{n^{1/3}(D_0 - D_{50})}{n^{1/3} - 1}, \text{ if } a < 0, \text{ then } a = 0 \tag{10}$$

$$c = \frac{\ln \left[\frac{\ln(1-0.95)}{\ln(1-0.25)} \right]}{\ln \left[\frac{D_{95}-a}{D_{25}-a} \right]} \quad (11)$$

$$b = -\frac{a\Gamma^4}{\Gamma_2} + \sqrt{\left(\frac{a}{\Gamma_2}\right) * (\Gamma_1^2 - \Gamma_2) + \frac{Dq^2}{\Gamma_2}} \quad (12)$$

Note: $\gamma_1 = \gamma \left[1 + \frac{1}{c} \right]$, $\gamma_2 = \gamma \left[1 + \frac{2}{c} \right]$

4) 산림시업유무에 따른 수관연료량 예측

소나무임분의 산림시업 유무에 따른 Weibull 함수를 이용하여 직경급별 수관연료량을 예측하기 위해서는 경급별 본수와 수관고의 정보가 필요하다. 경급별 본수는 개발된 직경분포모형을 통해 추정된 모수를 구한 후 임분밀도(ha 당 본수)를 곱하여 얻게 되며, 수관의 길이 정보는 C-R모형을 이용한 추정된 수고식(식 5)과 지하고식을 이용하여 수관의 길이 정보를 추정하였다. 이를 이용하여 기존의 개발된 수관연료량 추정식을 사용하였으며, 수관연료밀도 산출을 위해 수관의 길이를 이용하여 ha 단위로 추정한 수관체적(식 2)과 임분단위 수관연료밀도(식 3, 4)을 사용하였다.

결 과

1. 산림시업유무에 따른 수관연료특성 비교

시업지 임분과 비시업지 임분의 수관연료특성을 비교해본 결과는 다음과 같다(Table 3). 시업지 임분의 평균 수관길이는 6.9 m, 비시업지 임분은 8.2 m로 분석되었다. 개발된 연료량 추정식(식 1)을 이용하여 수관연료량(Canopy fuel load)과 연소가능한 수관연료량(Available canopy fuel load)을 비교해본 결과, 비시업지 임분의 평균 수관연료량은 22.7 ton/ha로 시업지 임분 19.9 ton/ha에 비해 약 14% 높게 나타났으며, 평균 연소가능한 수관연료량 또한 비시업지 임분이 17.7 ton/ha

로 시업지 임분 15.2 ton/ha에 비해 약 16% 높게 나타났다. 수관연료밀도를 식 3을 이용하여 비교해본 결과, 시업지 임분은 0.4 kg/m³로 비시업지 임분 0.7 kg/m³에 비해 약 43% 낮게 나타났으며, 연소가능한 수관연료밀도를 식 4로 이용하여 비교해 본 결과 또한 시업지 임분은 0.3 kg/m³로 비시업지 임분 0.6 kg/m³에 비해 약 50% 낮게 나타났다.

지하고가 높거나 연료밀도가 낮을수록 수관화 가능성이 낮아진다는 기존 연구결과(Mutch et al., 1993; Sando and Wick, 1972; Scott and Reinhardt, 2001)와 연소가능한 연료량이 많다는 것은 산불이 수관화로 전이되었을 경우 연소될 물질이 많다는 기존 연구결과(Jang et al., 2011)를 보았을 때 이는 비시업지 임분이 시업지 임분에 비해 상대적으로 수관화 발생 가능성이 높은 것으로 판단된다.

2. 임분단위 직경분포모형 개발 및 생장예측비교 분석

소나무임분의 직경분포모형의 시업지, 비시업지 임분의 D_q, D₀, D₂₅, D₅₀, D₉₅의 추정된 모수의 적합도 평가는 Table 2와 같다. Fit Index(F.I.)는 0.58(D₀)~0.96(D₉₅)으로 나타났으며, Root Mean Square Error(RMSE)은 0.15(D_q)~2.89(D₉₅), Coefficient of Variation(C.V.)은 5.0(D_q)~27.7(D₀)로 나타났다.

소나무임분의 직경분포모형을 이용하여 시간이 지남에 따른 시업지 임분과 비시업지 임분의 생장예측을 비교분석한 결과는 다음과 같다(Figure 3). 수집한 자료를 근거로 현재 시업지 임분의 조건을 임분밀도 900, 지위지수 13, 임령 40을 기준으로 하여 임령 40년, 50년, 60년의 생장예측을 한 결과, 최대임목본수에 해당하는 경급의 이동이 우측으로 이동함을 알 수 있었다(40년: 18 cm → 50년: 22 cm → 60년: 26 cm). 비시업지 임분 또한 현재 조건인 임분밀도 1,600, 지위지수 12, 임령 40을 기준으로 10년, 20년 후 생장예측을 한 결과, 전체적으로 최대임목본수에 해당하는 직경급의 평균값이 상향 이동하였으나(40년: 14 cm →

Table 3. Descriptive statistics for canopy fuel characteristics for *Pinus densiflora* stands.

Forest Activity	CL (m)	CFL (ton/ha)	ACFL (ton/ha)	CBD (kg/m ³)	ACBD (kg/m ³)
Managed stands	6.9 ± 2.3	19.9 ± 11.0	15.2 ± 7.9	0.4 ± 0.6	0.3 ± 0.4
	2.3 - 13.9	0.7 - 67.2	0.6 - 49.1	0.0 - 7.7	0.0 - 5.9
Unmanaged stands	8.2 ± 2.1	22.7 ± 13.5	17.7 ± 10.1	0.7 ± 1.4	0.6 ± 1.1
	3.4 - 17.8	2.0 - 89.8	1.7 - 65.6	0.1 - 22.8	0.0 - 18.1

Note: $\frac{\text{Mean} \pm \text{StDev}}{\text{Min} - \text{Max}}$, CL is canopy length(m), CFL is canopy fuel load (ton/ha), ACFL is available canopy fuel load (ton/ha), CBD is canopy bulk density (kg/m³), ACBD is available canopy bulk density (kg/m³).

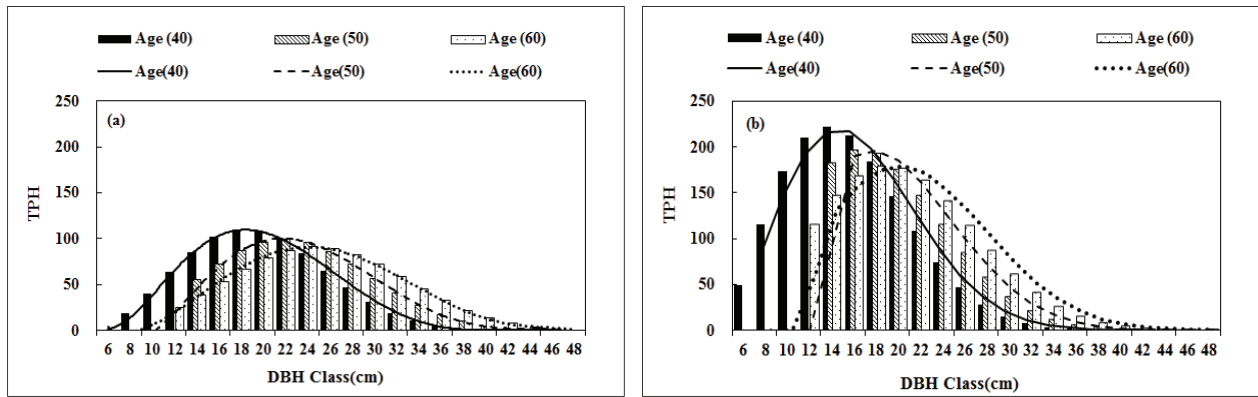


Figure 3. Predicted (a) managed stands mean trees per hectare and (b) unmanaged stands mean trees per hectare in each DBH class with (a) 900 TPH and SI of 13 m, (b) 1,600 TPH and SI of 12 m at each of the following stand ages: 40 years, 50 years and 60 years.

50년: 16 cm → 60년: 18 cm), 시업지 임분에 비해 이동량이 상대적으로 낮게 예측되었다. 이 같은 연구 결과는 산림시업을 실시하게 되면 임목간의 경쟁이 감소하면서 직경생장이 비시업지 임분에 비해 상대적으로 증가한다는 기존 연구결과와 유사한 결과를 나타냈다 (Juodvalkis et al., 2005; Kim, 2012; Makinen et al., 2004).

3. 산림시업유무에 따른 시나리오별 수관연료특성 예측

소나무임분의 산림시업 유무에 따른 Weibull 함수를 사용하여 시업지 임분(임령 40년, 임분밀도 900본, 지위지수 13), 비시업지 임분(임령 40년, 임분밀도 1,600본, 지위지수 12)의 현재 임령을 기준으로 임령 40년, 50년, 60년의 수관연료특성을 예측한 결과는 Table 4와 같다. 시업지 임분의 수관연료증가량은 약 11.9 ton/ha 증가하였으며, 연소가능한 수관연료증가량은 약 8.4 ton/ha을 보였다. 이에 비해 비시업지 임분의 수관연료증가량은 약 13.1 ton/ha이며, 연소가능한 수관연료증가량은 약 9.4 ton/ha으로 예측되어 시업지 임분에 비해 수관연료증가량이 상대적으로 높게 나타났다.

수관연료밀도를 예측해본 결과 시업지 임분은 임령

40년일 때 0.16 kg/m³, 50년 0.19 kg/m³, 60년 0.22 kg/m³으로 예측되었으며, 비시업지 임분의 수관연료밀도는 임령 40년 0.19 kg/m³, 50년 0.22 kg/m³, 60년 0.28 kg/m³로 예측되었다. 기존 연구결과를 보면, 영주지역 소나무림(숙아베기 실시)의 수관연료밀도는 0.19 kg/m³, 봉화지역(천연림) 수관연료밀도는 0.3 kg/m³로 제시한 바 있으며(Kim et al., 2011), 본 연구에서 예측된 수관연료밀도는 그 범위에 속하였다. 하지만 기존 연구에서 제시된 수관연료밀도는 특정지역에 국한된 결과값으로서, 본 연구의 수관연료밀도는 전국 자료를 활용하였기 때문에 다소 낮게 나타났다고 판단되었다.

산불 확산 시 가연연료로 활용되어 실질적으로 위험한 수관연료밀도인 연소가능한 수관연료밀도를 예측해본 결과 시업지 임분은 임령 40년일 때 0.12 kg/m³, 50년 0.14 kg/m³, 60년 0.17 kg/m³으로 예측되었으며, 비시업지 임분의 연소가능한 수관연료밀도는 임령 40년 0.15 kg/m³, 50년 0.17 kg/m³, 60년 0.21 kg/m³로 예측되었다. 이와 같은 결과는 시업지 임분에 비해 비시업지 임분의 연료밀도 증가량이 상대적으로 높게 나타났는데, 이는 시간이 지남에 따라 비시업지 임분 내

Table 4. Illustrations of predicted canopy fuel characteristics for a 40, 50, 60 years managed and unmanaged stands.

Variables	Managed stands (Tree per hectare = 900, Site Index = 13)			Unmanaged stands (Tree per hectare = 1,600, Site Index = 12)		
	Age (40)	Age (50)	Age (60)	Age (40)	Age (50)	Age (60)
Tree per hectare	896	880	830	1,598	1,456	1,239
Height (m)	17.7	18.8	19.5	17.0	17.9	18.5
CFL (ton/ha)	19.7	25.6	31.7	22.4	27.6	35.5
ACFL (ton/ha)	15.1	19.2	23.5	17.7	21.3	27.1
CBD (kg/m ³)	0.16	0.19	0.22	0.19	0.22	0.28
ACBD (kg/m ³)	0.12	0.14	0.17	0.15	0.17	0.21

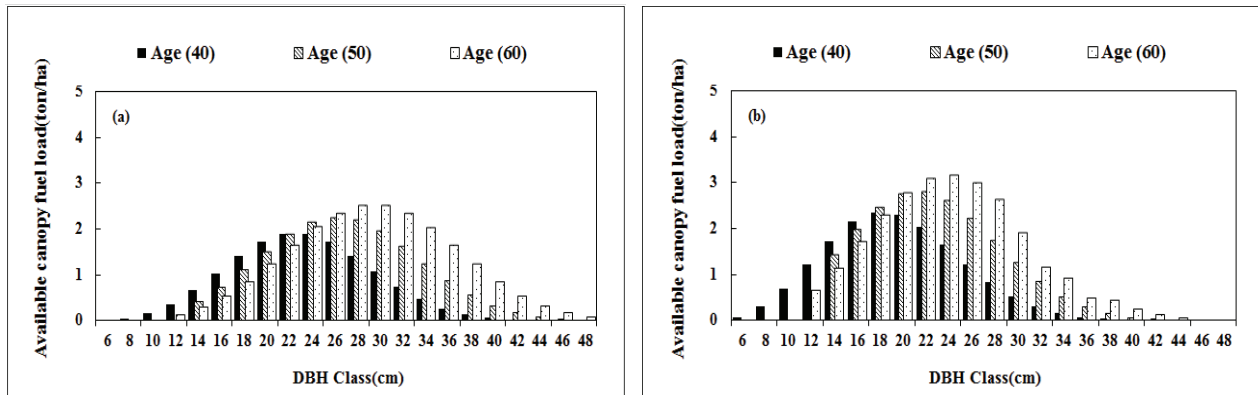


Figure 4. Predicted (a) managed stands mean trees per hectare and (b) unmanaged stands mean trees per hectare in each DBH class (small class diameter (6~16 cm), midium class diameter (18~28 cm), large class diameter (≥30 cm) with (a) 900 TPH and SI of 13 m, (b) 1,600 TPH and SI of 12 m at each of the following stand ages: 40years, 50years and 60years.

퇴적되는 산불연료가 많아진다는 뜻으로 즉, 산불확산위험성이 높아지고 있다고 해석된다. 하지만 사업지 임분 또한 10년 후 예측한 연소가능한 수관연료밀도는 현재 비사업지 임분의 연소가능한 수관연료밀도와 비슷해지는 수치를 보여 향후 10년 후에는 산불재해 예방관점에서 관리가 필요하다고 사료되어진다.

한편, 예측한 총 연소가능한 연료량을 우리나라 영림계획에 의거한 경급구분 기준인(KFS, 2012) 소경목(6~16 cm), 중경목(18~28 cm), 대경목(≥30 cm)으로 비교해본 결과는 다음과 같다(Figure 4). 사업지 임분에서 차지하는 소경목의 비율은 임령 40년일때 8%(1.5 ton/ha), 50년 2%(0.5 ton/ha), 60년은 4%(1.2 ton/ha)이며, 중경목의 경우 임령 40년 73%(14.3 ton/ha), 50년 60%(15.5 ton/ha), 60년 55%(17.4 ton/ha), 대경목은 임령 40년 20%(3.9 ton/ha), 50년은 38%(9.6 ton/ha), 60년은 41%(13.0 ton/ha)로 사업지 임분에서는 시간이 지날수록 중경목, 대경목에 해당하는 연료량의 비율이 높아졌다. 비사업지 임분 또한 같은 방법으로 비교해본 결과, 소경목의 비율은 임령 40년 일 때 21%(4.8 ton/ha), 50년 6%(1.7 ton/ha), 60년 12%(4.3 ton/ha)이며, 중경목의 경우 임령 40년 72%(16.1 ton/ha), 50년 78%(21.4 ton/ha), 60년 71%(25.0 ton/ha), 대경목은 임령 40년 7%(1.5 ton/ha), 50년 16%(4.5 ton/ha), 60년 17%(6.1 ton/ha)로 비사업지 임분에서는 소경목, 중경목에서 총 연료량이 대부분을 차지하였다.

이러한 연구 결과들은 비사업지 임분에서 수관화가 관찰된 산불을 대상으로 수관화가 발생하는 3가지 유형중 하나인 소경목·고밀도형의 모습(KFS, 2010)으로 예측되어지는데, 이는 지표화가 수관화로 전이되는 위험성이 비사업지 임분에서 높게 나타난다고 해석되어진다.

결론

본 연구에서는 산불에 취약한 대표 침엽수종인 소나무임분을 대상으로 산림사업유무에 따른 수관연료특성 변화를 예측하고자 실시하였다. 이를 위해 국가산림자원조사 자료 중 산림사업지 임분과 비사업지 임분 내 분포하고 있는 소나무 단순림 임분을 추출하여 수관연료특성을 비교분석하였다. 또한, Weibull 함수를 통해 산림사업유무에 따른 직경분포모형을 개발을 통한 성장예측값의 비교분석으로 시간이 지남에 따른 수관연료특성 변화를 예측하였다.

본 연구결과는 다음과 같다. 먼저 사업지 임분과 비사업지 임분의 수관연료특성을 비교해본 결과 비사업지 임분이 사업지 임분에 비해 평균 수관연료량은 약 14% 높게 나타났으며, 연소가능한 수관연료밀도 또한 약 16% 높게 나타나 수관화로의 전이 가능성이 높은 것으로 사료되었다. 직경분포모형을 개발하여 현재 임령인 40년, 50년, 60년의 성장 예측과 수관연료특성 변화를 비교해본 결과, 사업지 임분은 시간이 지남에 따라 중경목, 대경목에 최대임목본수가 예측된 반면, 비사업지 임분은 소경목, 중경목에 최대임목본수가 예측되었다. 이를 산불 연료적 관점에서 보았을 때 비사업지 임분은 수관화가 발생하기 좋은 조건인 소경목·고밀도형으로 예측이 되었다. 또한, 비사업지 임분의 연소가능한 수관연료증가량은 사업지 임분에 비해 상대적으로 높게 나타나 수관화 위험성이 높은 것으로 판단되었으며, 비사업지 임분의 이용가능한 수관연료밀도 역시 사업지 임분에 비해 높기 때문에 수관화 확산 위험성이 높을 것으로 추측되었다. 즉, 임분밀도에 따라 연료량과 산불위험도가 다른 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 향후 10년 후 예측한 사업지

임분의 연료량은 현재 비시업지 임분의 연료량과 비슷해지는 수치를 보여 관리가 필요하다고 판단된다. 본 연구는 산림생장모델을 이용해 현재 임분 조건에 따른 산불연료량을 예측하는 자료를 제공하며, 산림시업이 경제적·자원조성사업 뿐만아니라 산불재해 예방 연료관리 사업으로써 필요하다는 타당성을 줄 수 있을 것이라고 사료되어진다.

감사의 글

본 논문은 국립산림과학원 산림방재연구과 위탁연구과제인 ‘숲가꾸기 산물처리 효과 모니터링구 선정 및 조사’에 대한 연구결과의 일부임.

References

- Abino, A.C., Kim, S.Y., Lumbres, R.I.C., Jang, M.N., Youn, H.J., Park K.H. and Lee, Y.J. 2016. Performance of Weibull function as a diameter distribution model for *Pinus thunbergii* stands in the Eastern coast of South Korea. *Journal of Mountain Science* 13(5): 822-830.
- Agee, J.K. and Lolley, M.R. 2006. Thinning and prescribed fire effects on fuels and potential fire behavior in an Eastern cascades forest, Washington, USA. *Fire Ecology* 2(2): 3-19.
- Bailey, R. and Dell, T.R. 1973. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *Forest Science* 19(2): 97-104.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H. and Bailey, R.L. 1983. *Timber management: A quantitative approach*. John Wiley & Sons pp. 333.
- Coble, D.W. and Lee, Y.J. 2008. A new diameter distribution model for unmanaged slash pine plantations in East Texas. *Southern Journal of Applied Forestry* 32(2): 89-94.
- Cruz, M.G., Alexander, M.E. and Wakimoto, R.H. 2003. Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of Western North America. *International Journal of Wildland Fire* 12(1): 39-50.
- Graham, R.T., Harvey, A.E., Jain, T.B. and Tonn, J.R. 1999. The effects of thinning and similar stand treatments on fire behavior in Western forests. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station pp. 27.
- Harrod, R.J., Peterson, D.W., Povak, N.A. and Dodson, E.K. 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.
- Jain, T.B., Battaglia, M.A., Han, H.S., Graham, R.T., Keyes, C.R., Fried, J.S. and Sandquist, J.E. 2012. A comprehensive guide to fuel management practices for dry mixed conifer forests in the northwestern United States. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station pp. 331.
- Jang, M.N., Lee, B.D., Seo, Y.O., Kim, S.Y. and Lee, Y.J. 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.
- Juodvalkis A., Kairiukstis L. and Vasiliauskas R. 2005. Effects of thinning on growth of six tree species in north temperate forests of Lithuania. *European Journal of Forest Research* 124: 187-192.
- KFS (Korea Forest Service). 2010. Development of suppression technique for forest fire damage reduction. pp. 221.
- KFS (Korea Forest Service). 2012. The 6th National forest inventory report. pp. 60.
- KFS (Korea Forest Service). 2018. Statistical Yearbook of Forestry. pp. 441.
- Kim, M.I., Lee, W.K., Park, T.J., Kwak, H.B., Byun, J.Y., Nam, K.J., Lee, K.H., Son, Y.M., Won, H.K. and Lee, S.M. 2012. Developing dynamic DBH growth prediction model by thinning intensity and cycle - based on yield table data-. *Journal of Korean Forest Society* 101(2): 266-278.
- Kim, S.Y. 2015. A study on the analysis of fuel characteristics for forest fire hazard assessment. Yesan. Kongju National University.
- Kim, S.Y., Jang, M.N., Youn, H.J., Lee, B.D., Park, K.H. and Lee, Y.J. 2014. Biomass expansion factors and allometric equations in age class IV of *Pinus thunbergii* Coastal Disaster Prevention Forest in Seocheon, Chungnam. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 14(6): 413-419.
- Kim, S.Y., Lee, B.D., Seo, Y.O., Jang, M.N. and Lee, Y.J. 2011. Effects of forest tending works on the crown fuel characteristics of *Pinus densiflora* S. et Z. stands in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 100(3): 359-366.
- Kwon, S.M., Chun, K.W. and Kim, N.H. 2008. Anatomical and physical characteristics of *Pinus densiflora* wood damaged by forest fire. *The Korean Society of Wood Science & Technology* 36(4): 84-92.
- Lee, B.D. 2005. Analysis of behavior characteristics of the 2000 Samcheok forest fire using GIS/RS and development of a forest fire growth prediction model. Seoul, Seoul National University.
- Lee, B.D., Won, M.S., Lee, Y.H. and Lee, M.B. 2012. Crown fuel characteristics and carbon emission from *Japanese red*

- pine* stands burned by crown fire in Mt. Palgong, South Korea. *Journal of Mountain Science* 9(5): 656-664.
- Lee, S.Y., Lee, M.W., Yeom, C.H. and Kwon, C.G. 2008. Comparative analysis of forest fire danger rating on the forest characteristics of thinning area and non-thinning area on forest fire burnt area. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 153-156.
- Lee, Y.J. and Coble, D.W. 2006. A new diameter distribution model for unmanaged loblolly pine plantations in East Texas. *Southern Journal of Applied Forestry* 30(1): 13-20.
- Lumbres, R.I.C. and Lee, Y.J. 2014. Percentile-based Weibull diameter distribution model for *Pinus kesiya* stands in Benguet province, Philippines. *Southern Forests: A Journal of Forest Science* 76(2): 117-123.
- Mäkinen, H. and Isomäki, A. 2004. Thinning intensity and growth of scots pine stands in Finland. *Forest Ecology and Management* 201: 311-325.
- Mutch, R.W., Arno, S.F., Brown, J.K., Carlson, C.E., Ottmar, R.D. and Peterson, J.L. 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 pp. 14.
- Nord-Larsen T., and Cao, Q.V. 2006. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark. *Forest Ecology and Management* 231: 218-225.
- Pyo, S.J. 2008. Estimations of site index and compatible taper equations for *Pinus densiflora* grown at Mt. Osu region, Chungnam. Yesan, Kongju National University.
- Sando, R.W. and Wick, C.H. 1972. A method of evaluating crown fuels in forest stands. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. pp. 10.
- Scott, J.H. and Reinhardt E.D. 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 pp. 59.
- Seo, J.H., Son, Y.M., Lee, K.H., Lee, W.K. and Son, Y.H. 2005. The Estimation of stand biomass and net carbon removals using dynamic stand growth model. *Forest Bioenergy* 24(2): 413-419.
- Son, Y.M., Pyo, J.K., Kim, S.W. and Lee, K.H. 2012. Prediction of stand volume and carbon stock for *quercus variabilis* using Weibull distribution model. *Journal of Korean Forest Society* 101(4): 599-605.
- Thomas, N.L. and Cao, Q.V. 2006. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark. *Forest Ecology and Management*. 231: 218-225.
- Zhang, L., Packard, K.C. and Liu, C. 2003. A comparison of estimation methods for fitting Weibull and johnson's SB distributions to mixed spruce fir stands in northeastern North America. *Canadian Journal of Forest Research* 33(7): 1340-1347.

Manuscript Received : September 19, 2018

First Revision : November 2, 2018

Accepted : November 5, 2018