잣나무림의 산불연료량 예측을 위한 동적성장모델 개발

A Dynamic Growth Model for Predicting Forest Fire Fuel Loads for *Pinus Koraiensis* Stands in South Korea

이선주* · 김성용** · 이병두*** · 이영진****

Lee, Sunjuo*, Kim, Sungyong**, Lee, Byungdoo***, and Lee, Young Jin****

Abstract

The objective of this study is to predict the effects of forest management activities on canopy fuel characteristics for *Pinus koraiensis* stands. We used data from 136 managed stands and 23 unmanaged stands of the National Forest Inventory for this study. Weibull function and mortality models were developed. A dynamic growth model in which models were interactively linked was prepared to predict stand growth and forest fuel loads after considering the mortality rate. As a result, after 20 years of managed stand data, the increase in available canopy fuel load was predicted to be about 12.8 ton/ha and increase in available canopy bulk density was predicted to be about 0.2kg/m³. However, the increase in available canopy fuel load for unmanaged stands was about 15.2 ton/ha and the increase in available canopy bulk density was about 0.3 kg/m³. These results showed that there were higher forest fuel loads in unmanaged stands than in managed stands. The risk of crown fire hazard is higher, and the forest fire hazard of unmanaged stands is judged to be higher than that of managed stands of *Pinus koraiensis* species in South Korea.

Key words : Canopy Fuel Characteristics, Diameter Distribution, Mortality Models, Forest Management, *Pinus Koraiensis*

요 지

본 연구는 산불에 취약한 대표 침엽수종인 잣나무 임분을 대상으로 산림사업이 수관연료특성 변화에 미치는 영향을 예측하고자 하였다. 이를 위해 국가산림자원조사 자료 중 산림사업지 잣나무림 136 plots, 비사업지 잣나무림 23 plots를 분석자료로 활용하였다. 시간이 경과됨에 따라 고사되는 임목의 특성을 고려하기 위해 Weibull 함수에 고사모형을 적용하여 임분특성별 산불연료량을 추정할 수 있는 동적성장 모델을 구축하였다. 그 결과, 사업지 임분의 20년 후 연소가능한 수관연료량 증가량은 약 12.8 ton/ha, 연소가능한 수관연료밀도는 약 0.2 kg/m³로 예측된 반면, 비사업지 임분의 20년 후 연소가능한 수관연료량 증가량은 15.2 ton/ha, 연소가능한 수관연료밀도는 약 0.3 kg/m³로 사업지 임분에 비해 비사업지 임분의 산불연료의 증가량이 높게 예측되었다. 따라서 비사업지 임분에서 산불확산 요소로 작용할 수 있는 산불 연료량 축적량이 더 높게 예측됨에 따라 수관화 확산 위험성이 더 높을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수관연료특성, 직경분포, 고사모형, 산림사업, 잣나무

1. 서 론

우리나라는 1973년부터 시작된 치산녹화 사업의 성공으

로 전체 국토 면적의 약 64%에 해당하는 산림을 보유하게 되었다. 그러나 치산녹화 성공 이후 적절한 육림과 기술적 관리를 시행하지 못하고, 산림이 그대로 방치되어 적절한

*정회원, 공주대학교 산림자원학과 박사과정(E-mail: sunju412@naver.com)

Member, Ph.D. Student, Department of Forest Resources, Kongju National University

**정회원, 국립산림과학원 산림방재연구과 박사

Member, Ph.D., Junior Researcher, Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

***정회원, 국립산림과학원 산림방재연구과 과장

Member, Ph.D., Division Director, Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

****교신저자, 정회원, 공주대학교 산림자원학과 교수(Tel: +82-42-330-1313, Fax: +82-42-330-1308, E-mail: leeyj@kongju.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Forest Resources, Kongju National University

시기에 산림경영 관리를 실행하지 못하였다(Woo, 2003). 이에 따라 산림이 울창해지고 낙엽이 퇴적되는 등 산림 내 구성물의 밀도가 높아져 산불이 발생하면 대형화 될 위험성이 큰 산림구조로 변화하였다(Lee et al., 2009).

산불은 연료부위의 연소형태에 따라 지중화(Underground fire), 지표화(Surface fire), 수간화(Stem fire), 수관화(Crown fire)로 구분되며, 오늘날 대형산불의 대부분은 나무의 상층부를 태우는 수관화 형태로 발생되고 있다(Arno and Brown, 1991). 수관화는 지표층 연료, 사다리형 연료, 수관층 연료와 환경 조건에 따라 서로 복합적인 작용에 의해 발생된다(Graham et al., 2004; Peterson et al., 2005). 산불확산에 관여하는 여러 인자들 중 지형과 기상인자는 산불행동특성을 결정하는데 중요한 역할을 하지만, 인위적인 관리가 불가능하다(Bessie and Johnson, 1995; Pollet and Oni, 2002). 반면, 연료는 숲가꾸기, 숲아베기 등 산림사업이 가능하기 때문에 인간의 노력을 통해 대형산불을 막을 수 있는 유일한 인자이다. 따라서 연료의 구조와 특징을 분석하여 관리하는 것이 중요하다.

이와 관련된 연구사례를 보면, 숲아베기가 이루어진 임분에서는 수평적, 수직적 연료구조가 변화하여 산불강도를 감소되었다는 연구결과가 있으며(Lowe, 2000), Harrod et al. (2009)는 숲아베기를 수행할 경우 해당 공간에 차지하는 수관연료의 양을 줄여 화염으로부터 연료의 공급을 차단하는 역할을 한다고 제시하였다. 이처럼 과거에서부터 많은 학자들은 임분의 수직적 구조변화와 수관화간에는 긴밀한 연관성을 주장하고 있다(Biswell, 1960; Biswell et al., 1968; Fiedler et al., 1996). 이와 같이 산불확산방지에 효과가 있는 산림사업을 효율적으로 관리하기 위해서는 해당 임분의 성장특성을 파악하고, 시간이 경과함에 따른 산불연료 변화량 예측이 선행되어야 하며, 이를 기반으로 한 산림사업 관리방안수립이 필요하다.

한편, 현재 임학분야에서는 산림의 동태를 예측하기 위해

산림생장모형을 이용하고 있다. 특히 다양한 조건에 따른 임분변화 예측이 가능한 동적임분생장모형(Dynamic stand growth model)은 널리 사용되어지고 있다(Seo et al., 2005). 그 중 직경분포모델인 Weibull 함수는 임분특성에 따른 직경급별 분수의 추정이 가능하기 때문에 산불분야에도 활용이 가능하다.

본 연구에서는 국가산림자원조사를 활용하여 산불에 취약한 대표 침엽수종인 잣나무 임분에 대해 동적생장모델인 Weibull 함수와 이 모델의 한계점을 보완하고자 고사모델을 개발하여 함수에 적용하였다. 이를 통해 고사율을 고려한 직경급별 임분생장과 산불연료량을 산출하여 산림사업지와 비사업지 임분의 시간경과에 따른 수관연료특성 변화를 예측하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구자료 수집

국가산림자원조사자료(National Forest Inventory)는 계통적 집락표본추출법(Systematic cluster sampling)에 의해 전국 산림을 4 km × 4 km 격자로 배치한 약 4,000개의 고정표본점 자료이다. 고정표본점은 집락표본점(Cluster plot)이며, 부표본점(Subplot)은 원점을 중심으로 0°, 120°, 240°의 3방향에 대한 4개의 부표본점(S₁, S₂, S₃, S₄)으로 구성된다(Kim, 2016).

본 연구에서는 2006~2015년까지 10년 동안 고정 표준지 내 잣나무에 대한 임목본수 비율이 75%이상인 순림 중 목재생산을 주목적으로 하는 사업지 임분과 목재생산에 법적으로 심각한 제약을 받는 비사업지(사업제한지) 임분을 구분하여 분석에 이용하였다(KFS, 2012; Fig. 1). 잣나무임분 내 고사율을 추정하기 위해 국가산림자원조사 자료 중 중심으로부터 반경 11.3 m S₁조사원(0.04 ha)에서 구축된 잣나무림의 고사목조사자료(2011~2015년)를 이용하였다.

Fig. 1. The Geographical Distribution of Study Sites for *Pinus Koraiensis* Stands in South Korea

Table 1. Summary of Observed Statistics for *Pinus Koraiensis* Stands in South Korea

Managed stands (n= 3,481 observations from 136 plots)						Unmanaged stands (n=786 observations from 23plots)				
Variables	Mean	Median	S.E.	Min.	Max.	Mean	Median	S.E.	Min.	Max.
Age (years)	31.0	32.0	0.6	14.0	54.0	28.7	26.0	1.5	20.0	45.0
DBH (cm)	23.6	24.0	0.7	7.0	42.0	21.7	19.0	1.7	14.0	49.0
Height (m)	15.5	16.0	0.4	5.0	23.0	12.6	12.0	0.7	9.0	21.0
SI	15.9	16.0	0.3	6.0	26.0	13.3	13.0	0.4	10.0	17.0
D ₀	15.2	14.5	0.6	6.0	32.0	13.4	11.0	1.9	6.0	47.0
D ₂₅	20.2	20.0	0.7	6.0	39.0	18.3	16.0	1.7	12.0	47.0
D ₅₀	23.4	23.0	0.7	6.0	45.0	21.8	19.0	1.8	14.0	49.0
D ₉₅	31.9	32.0	0.9	8.0	59.0	29.3	26.0	2.0	17.0	51.0
D _q	24.1	24.0	0.7	7.0	43.0	22.3	20.0	1.8	14.0	49.0
Mortality (%)	6.1	4.5	0.8	1.8	16.5	7.02	5.16	0.97	1.93	19.49
TPH	639.9	575.0	22.3	50.0	1175.0	854.3	925.0	79.2	50.0	1475.0

산림사업에 따른 잣나무림의 성장특성 및 수관연료특성 분석을 위해 필요한 인자인 임목본수, 임령, 지위지수, 수고 및 흉고직경, 재적 등을 이용하였으며, 사업지 임분 총 136 plots, 비사업지 임분 23 plots로 이상치는 제거하여 분석에 이용하였다(Table 1).

2.2 분석 항목

임령과 우세목 수고의 관계를 파악하기 위해 Chapman-Richards (이하 C-R) 수고성장모델을 이용하여 분석하였고, 추정된 모수를 이용하여 기준 임령(Index age)인 30년을 기준으로 사업지, 비사업지 임분 내 잣나무림의 지위지수식을 개발하였다. 직경분포모델은 Weibull 함수로 Lee and Coble (2006)의 연구방법인 백분위(Percentile)에 근거한 직경추정, 모수복구 방법을 사용하였고, 개체목에 해당하는 수고 및 지하고의 성장을 추정하기 위해 C-R 성장모델을 사용하였다. 고사모델은 Hamilton (1974)이 개발한 모델을 변형한 4가지 모델 중 통계적 검증을 통해 최적의 고사모델을 선정하는 과정을 거쳤다.

산림사업지, 비사업지 잣나무림의 산불연료량 예측 모델의 정확도를 평가하기 위해 적합도지수(Fitness Index, F.I.), 오차제곱근(Root Mean Square Error, RMSE), 추정치 표준오차의 백분율(Standard Error of Estimate, SEE%), 변이계수(Coefficient of Variation, C.V.)를 검정통계량으로 사용하였다(Table 2).

분석의 흐름도는 다음과 같다(Fig. 2).

2.2.1 지위지수와 개체목 수고 추정

Weibull 함수의 경우, 산림사업 유무에 따른 해당 함수를 추정하는데 임지의 지위지수 정보가 중요한 인자로 활용된다. 지위지수(Site index)는 임령과 조건이 각기 다른 임분의 비교

Table 2. Fit Statistics Used to Evaluate the Performance of Several Models

Fit statistics	Equation
Fitness Index	$F.I. = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$
Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \hat{Y}_i ^2}{n}}$
Standard Error of the Estimate	$SEE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \hat{Y}_i ^2}{n-2}}$
Coefficient of Variation	$C.V. = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i - \bar{Y} ^2}}{\bar{X}}$

Fig. 2. Research Flow Diagram

에 직접적으로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 효과적인 산림경영을 위한 가장 중요한 수단으로 작용하고 있다(Clutter et al., 1983; Skovsgaard and Vancly, 2008).

지위지수의 추정에는 산림사업지, 비사업지 잣나무림의 임령별 수고 자료가 이용되었으며, 지위지수추정모델은 임학분야에서 전형적인 누적생장을 표현하는 곡선(Sigmoid curve)으로 임령에 따른 생장을 예측하는 모형으로 많이 사용되고 있는 C-R 수고생장모델을 사용하였다(Son, 2006; Pyo et al., 2009). 우세목 수고(HD)와 임령(Age)을 적용하여 기준 임령 30년인 잣나무림의 지위지수(SI)를 추정하였다(Eqs. (1), (2)). 개발한 모수결과는 다음과 같다(Table 3).

$$HD = b_0 (1 - \exp(-b_1 \text{Age}))^{b_2} \quad (1)$$

$$SI = HD \frac{1 - \exp(-b_1 IA)}{1 - \exp(-b_1 \text{Age})} \quad (2)$$

산림사업 유무에 따른 직경급별 개체목 수고 추정 및 지하고 추정은 수고생장모델(Eq. (3))을 사용하였다(Table 3).

$$HT = 1.2 + b_0 (1 - \exp^{-b_1 DBH})^{b_2} \quad (3)$$

2.2.2 임분단위 직경분포모델 개발

본 연구에서는 Weibull 함수(Eq. (4))를 사용하여 예측된 직경급별 본수에 해당하는 수관연료량을 예측하였다.

$$F(x) = 1 - \exp[-(\frac{x-a}{b})^c] \quad (4)$$

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

Weibull 함수 모수추정에 도입한 모수 복구방법을 사용하기 위해 해당 임분 내 직경을 최소 직경(D_0), 25번째 직경

Table 3. Parameter Estimates and Fit Statistics for Guide Curve (HD), Individual Tree Height (HT), Crown Height (CH), Quadratic Mean Diameter (D_q), and Percentiles of the Diameter Distribution (D_0 , D_{25} , D_{50} , D_{95}) Models

Equation	Parameter	Managed stands					Unmanaged stands				
		Parameter estimate	F.I.	RMSE	C.V.	SEE	Parameter estimate	F.I.	RMSE	C.V.	SEE
1 (HD)	b_0	18.13	0.96	3.12	1.25	3.12	17.20	0.99	1.81	4.35	1.81
	b_1	0.12					0.05				
	b_2	5.85					1.68				
3 (HT)	b_0	18.75	0.98	1.61	2.17	3.04	17.57	0.95	3.04	3.15	1.62
	b_1	0.06					0.08				
	b_2	1.65					1.66				
3 (CH)	b_0	5.78	0.86	2.19	4.32	2.21	4.64	0.90	1.19	2.48	2.10
	b_1	0.17					0.31				
	b_2	13.96					10.96				
5 (D_q)	β_0	3.56	0.84	0.17	5.35	7.95	4.74	0.96	0.09	2.88	0.12
	β_1	-8.97					-13.12				
	β_2	0.51					0.22				
	β_3	-0.16					-0.13				
5 (D_0)	β_0	-2.81	0.71	3.59	24.06	3.65	-10.89	0.79	6.13	42.44	7.08
	β_1	0.64					0.94				
	β_2	0.07					0.08				
5 (D_{25})	β_0	-0.89	0.93	1.98	9.90	2.01	-3.92	0.94	2.88	14.45	3.32
	β_1	0.92					0.93				
	β_2	-0.04					0.04				
5 (D_{50})	β_0	-0.52	0.97	1.50	4.67	1.53	-2.86	0.99	1.19	4.98	1.37
	β_1	1.02					0.98				
	β_2	-0.03					0.09				
5 (D_{95})	β_0	1.56	0.87	3.95	12.19	4.02	4.03	0.87	4.73	15.00	5.46
	β_1	1.19					0.91				
	β_2	0.07					0.18				

백분위수(D_{25}), 50번째 직경 백분위수(D_{50}) 및 95번째 직경 백분위수(D_{95})로 나열하여 특정 백분위수를 예상하는 회귀식(Eq. (5))을 사용하였으며, 백분위수에 의한 모수복구방법을 사용하기 위한 모수복구식은 다음과 같다(Eqs. (6), (7), (8)).

$$D_i = \beta_0 + \beta_1 D_q + \beta_2 Age \quad (5)$$

Note: D_q = quadratic mean diameter (cm),

$i = 0, 25, 50, 95^{th}$ percentiles

$$a = \frac{n^{1/3}(D_0 - D_{50})}{n^{1/3} - 1}, \text{ if } a < 0, \text{ then } a = 0 \quad (6)$$

$$c = \frac{\ln \left[\frac{\ln(1 - 0.95)}{\ln(1 - 0.25)} \right]}{\ln \left[\frac{D_{95} - a}{D_{25} - a} \right]} \quad (7)$$

$$b = -\frac{a\Gamma_1}{\Gamma_2} + \sqrt{\left(\frac{a}{\Gamma_2}\right)^2 (\Gamma_1^2 - \Gamma_2^2) + \frac{Dq^2}{\Gamma_2}} \quad (8)$$

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

2.2.3 고사모델 개발 및 고사율 추정

고사율을 예측하기 위해 사용되는 고사모델은 일반적으로 회귀분석 기법을 적용한다. 회귀분석에 있어서는 로지스틱 모델(Logistic regression model)이 적합성이 가장 높은 것으로 알려져 있으며, 특히 Hamilton (1974)에 의해 개발된 고사모델을 많이 사용되고 있다(Lee, 2002). 고사모델에 이용되는 인자들은 임목의 흉고직경, 임분밀도, 지위지수 등의 인자들에 의해 고사가 영향을 미친다고 알려져 있다(Jack and Long, 1996).

본 연구에서는 Hamilton (1974)이 개발한 모델을 변형한 4가지 모델 중 통계적 검증 후 최적의 모델을 선정하기 위해 독립변수로는 흉고직경, 흉고단면적, 수고, 임령, 지위지수, 임분밀도, 수관밀도를 변수로 이용하였다(Table 4). 종속변수는 고사율을 구하기 위해 동일한 표본점에서 전체 임목에 대한 ha 당 총 재적(A)과 5년 동안 고사된 임목의 ha 당 총 재적(B)을 계산하고, 이를 다시 $B/A \times 100$ 을 구하여 고사율로 이용하였다(Son et al., 2017).

Table 4. Mortality Model Forms Used in this Study

Models	Model Form
Model 1	$P = (1 + \exp^{(a + bDBH + cSI + d(HT/AGE))})^{-1}$
Model 2	$P = (1 + \exp^{(a + bDBH + cSI + d(DBH/AGE))})^{-1}$
Model 3	$P = (1 + \exp^{(a + bDBH + cBA + dTPH + eDensity)})^{-1}$
Model 4	$P = (a + bSI)(BA^c \exp^{(dTPH)})^{-1}$

2.2.4 수관연료량 추정 및 예측

산림사업에 따른 수관연료량을 추정하기 위해 Kim (2015)가 연구를 통해 산불관점에서 개발한 잣나무림의 상대생장식을 사용하였다. 잣나무림의 수관연료량(Canopy fuel load)과 연소가능한 수관연료량(Available Canopy fuel load)을 추정하기 위해 개발된 Eq. (9)을 이용하여 산림사업지, 비사업지 잣나무림의 흉고직경을 대입하여 산출하였다. 수관층 연료특성에 대한 연구에서 일반적인 지표로 분석되고 있는 수관연료밀도(Canopy bulk density)를 산출하기 위해 먼저 임분의 수관체적(Canopy volume)은 임분의 수관길이(Canopy length)법을 이용하여 ha 단위로 계산식(Eq. (10))을 이용하였다. 추정된 임분단위 수관체적과 수관연료량을 이용하여 Eq. (11)을 통해 수관연료밀도를 추정하였으며, 연소가능한 수관연료밀도(Available Canopy bulk density) 또한 같은 방법으로 Eq. (12)을 통해 추정하였다(Cruz et al., 2003).

시간경과에 따른 경급, 임목본수별 수관연료량은 대수회귀식(Eq. (9))을 이용하여 예측하였다. 또한, C-R모델을 이용하여 추정된 수고식(Eq. (1))과 지하고 추정식(Eq. (3))을 이용하여 임령에 따른 수관길이를 추정하고, 수관연료밀도 산출을 위해 추정된 수관길이와 ha 당 수관체적 Eq. (10)을 이용하여 임분단위 수관연료밀도(Eq. (11), (12))를 예측하였다.

$$\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D \quad (9)$$

Note: $\beta_i (i = 0, 1)$ = estimated parameters,

D = diameter at breast height (cm)

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

$$CBD = \frac{\sum_{i=1}^n (CFL_i \times TEF_i)}{CAV} \quad (11)$$

$$ACBD = \frac{\sum_{i=1}^n (ACFL_i \times TEF_i)}{CAV} \quad (12)$$

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.

3. 연구결과

3.1 임분단위 직경분포모델 및 고사모델 모수 도출

Weibull 함수의 개발된 모수의 적합도 검정은 Table 3과

같이 적합도지수, 변동계수 등으로 검토하였다. 시업지 임분의 D_q , D_0 , D_{25} , D_{50} , D_{95} 의 적합도지수는 0.58 (D_0)~0.96 (D_{50})으로 나타났으며, 비시업지 임분은 0.58 (D_0)~0.96 (D_{50})로 기존 연구에서 제시한 모델의 모수 적합도지수와 유사하게 나타났다(Lumbres and Lee, 2014; Abino et al., 2016; Lee et al., 2018).

고사율에 영향을 미치는 인자들의 조합을 고려하여 총 4개의 모델 중 변수에 관계없이 절대치가 작은 순서로 순위를 산출한 결과, Model 1, 3, 2, 4 순으로 나타났다. 가장 높은 순위의 고사모델 1은 흉고직경, 지위지수, 수고에 대한 임령의 비를 독립변수로 사용한 모델이다(Table 5).

3.2 산림시업에 따른 생장예측 및 고사율 적용

고사율을 반영한 Weibull 함수를 이용하여 지위지수(13 m), 임분밀도(900/ha)인 동일한 임분조건에서 임령 30년을 기준으로 향후 10년, 20년 후 생장예측을 비교분석한 결과는 다음과 같다(Fig. 3). 시업지 임분의 고사율은 시간이 경과함에 따라 현재 임령 30년 일 때 2.8%에서 향후 20년 후 1.6%로 나타났으며, 비시업지 임분의 고사율은 임령 30년 일 때 3.4%에서 향후 20년 후 1.7%로 두 임분 모두 시간이 경과할수록 고사율이 낮아지는 경향을 보였다. 기존 선행연구에서 임령 50~80년 사이의 침엽수 평균 고사율은 0.9%~1.2%를 제시하고 있어 본 연구결과와 유사하게 나타났다(McArdle et al., 1949; Harcombe and Marks,

1983; Harcombe, 1986).

시간이 지남에 따른 고사율을 포함하여 시업지 임분의 생장예측을 한 결과, 최대임목본수에 해당하는 흉고직경이 증가함을 알 수 있었다(30 yr: 20 cm → 40 yr: 24 cm → 50 yr: 28 cm). 비시업지 임분 또한 전체적으로 최대 임목본수에 해당하는 직경급의 평균값이 상향 이동하였으나(30 yr: 26 cm → 40 yr: 26 cm → 50 yr: 28 cm), 시업지 임분에 비해 이동량이 상대적으로 낮게 이동하였다. 이와 같은 연구결과는 숲아베기를 실시한 임분의 경우 임목상호간의 경쟁을 완화시켜 직경생장의 향상을 가져온다는 기존연구 결과와 일치하였다(Peltola et al., 2002; Mäkinen and Isomäki, 2004).

3.3 산림시업에 따른 수관연료특성 추정 및 예측

3.3.1 수관연료특성 추정결과 비교

시업지, 비시업지 잣나무림의 수관연료특성을 비교한 결과 Table 6과 같다. 시업지 임분의 평균 수관길이는 9.2 m로 비시업지 임분의 수관길이 5.8 m에 비해 더 높은 생장을 보였으며, 지하고(Canopy base height)의 높이는 시업지 임분 6.2 m, 비시업지 임분 5.8 m로 나타났다. 연소가능한 수관연료량은 시업지 임분이 20.0 ton/ha로 비시업지 임분 23.3 ton/ha보다 상대적으로 낮게 나타났다. 수관연료밀도는 시업지 임분 0.6 kg/m³로 비시업지 임분 수관연료밀도인 0.8 kg/m³보다 낮은 수치로 나타났고, 연소가능한 수관연료밀도

Table 5. Parameter Estimates and Fit Statistics for Mortality Models in *Pinus Koraiensis* Stands

Model	Parameter estimate					F.I.	RMSE	C.V.	Rank
	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4				
1	-5.338	-0.002	0.273	4.320	-	0.64	9.84	7.54	1
2	-2.096	0.001	0.115	1.457	-	0.60	9.92	6.50	3
3	-4.774	0.099	-0.027	0.002	0.015	0.62	10.13	8.54	2
4	0.320	-0.007	0.030	-0.001	-	0.54	9.86	9.23	4

Fig. 3. Predicted Tree Density (a) managed stands, (b) unmanaged stands in each dbh class with 700 tree density and SI of 14 m at each of the following stands age: 30 years, 40 years and 50 years

Table 6. Summary of Canopy Fuel Characteristics Statistics for *Pinus Koraiensis* Stands

Forest Activity	CL (m)	CBH (m)	ACFL (ton/ha)	CBD (kg/m ³)	ACBD (kg/m ³)
Managed stands	9.2 ± 0.2 3.2–15.2	6.2 ± 0.2 0.5–15.7	20.0 ± 2.1 8.1–43.6	0.6 ± 0.0 0.0–1.9	0.2 ± 0.0 0.0–0.7
Unmanaged stands	5.8 ± 0.5 2.4–12.4	5.8 ± 0.5 3.1–13.6	23.3 ± 1.4 0.8–97.9	0.8 ± 0.1 0.2–1.6	0.4 ± 0.0 0.1–0.7

Note: $\frac{\text{Mean} \pm \text{S.E.}}{\text{Min.} - \text{Max.}}$, CL is Canopy length (m), CBH is Canopy base height (m), ACFL is Available canopy fuel load (ton/ha)

또한 시업지 임분 0.2 kg/m³로 비시업지 임분 0.4 kg/m³보다 낮게 나타났다. 이러한 연구 결과는 산림시업이 실시된 경우 지하고는 높아지고, 수관연료밀도가 낮아진다는 기존 연구와 유사한 결과를 보였다(Sando and Wick, 1972; Mutch et al., 1993).

3.3.2 시계열적 변화에 따른 수관연료특성 추정

5차(2006~2010년), 6차(2011~2015년)의 동일한 표본점 내 시계열적 변화에 따른 시업지, 비시업지 임분의 수관연료특성을 비교한 결과는 다음과 같다(Fig. 4). 시업지 임분의 지하고 연년생장량은 0.4 m/yr로 비시업지 임분의 지하고 연년생장량인 0.2 m/yr에 비해 높게 나타났으며, 연소가능한 연료량의 연간증가량은 시업지 임분 0.6 ton/ha/yr, 비시업지 임분 2.9 ton/ha/yr로 나타났다.

수관연료밀도 연간증가량은 시업지 임분 0.04 kg/m³/yr, 비시업지 임분 0.05 kg/m³/yr으로 시업지 임분에 비해 비시업지 임분의 연간증가량이 상대적으로 높게 나타났다. 연소가능한 수관연료밀도 연간증가량 또한 시업지 임분 0.02 kg/m³/yr, 비시업지 임분 0.04 kg/m³/yr로 비시업지 임분에서 더 높은 연간증가량을 보였다.

산불 확산 시 가연연료로 활용되어 실질적으로 위험한 수관연료밀도인 연소가능한 수관연료밀도를 증가율로 비교해본 결과 비시업지 임분은 53.9%로 시업지 임분 40.5%에 비해 높은 증가율을 보였다. 이는 수관연료밀도가 높을수록 수관화 확산 강도가 급격히 높아진다는 기존 연구결과로 보아(Harrod et al., 2009), 시간이 지남에 따라 퇴적되는 산불연료가 많아지는 비시업지 임분에서 수관화 확산을 방지하기 위해서는 임분밀도 조절 등 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 4. Estimation of Canopy Fuel Characteristics (a): Canopy base height, (b): Available canopy fuel load (ton/ha), (c): Canopy bulk density (kg/m³), (d): Available canopy bulk density (kg/m³) between 5th and 6th NFI periods over times

3.3.3 임분조건에 따른 산불연료량 변화 예측

고사율을 반영한 Weibull 함수를 이용하여 국가산림자원 자료를 근거로 시업지 임분의 조건을 임령 40년, 지위지수 16 m, 임분밀도 600본, 비시업지 임분의 조건 임령 40년, 지위지수 13 m, 임분밀도 900본으로 시간이 지남에 따른 수관연료특성을 예측한 결과는 다음과 같다(Table 7).

먼저 시업지 임분의 수고는 임령 30년 일 때 15.1 m, 40년 16.4 m, 50년 17.1 m로 예측되었으며, 비시업지 임분의 수고는 30년 14.4 m, 40년 15.6 m, 50년 16.9 m로 예측되었다. 시업지 임분의 수관연료량은 임령 30년 일 때 44.4 ton/ha, 40년 68.8 ton/ha, 50년 85.0 ton/ha로 예측되었고, 연소가능한 수관연료량은 30년 20.0 ton/ha, 40년 29.2 ton/ha, 50년 32.8 ton/ha로 예측되었다. 비시업지 임분의 수관연료량은 임령 30년 일 때 63.6 ton/ha, 40년 90.8 ton/ha, 50년 103.8 ton/ha로 예측되었고, 연소가능한 수관연료량은 30년 29.2 ton/ha, 40년 39.6 ton/ha, 50년 44.4 ton/ha로 비시업지 임분의 예측값은 시업지 임분에 비해 상대적으로 높은 수치를 보였다.

수관연료밀도를 예측한 결과 시업지 임분의 수관연료밀도 증가량은 약 0.4 kg/m³, 연소가능한 수관연료밀도는 약 0.2 kg/m³로 예측되었다. 반면, 비시업지 임분의 수관연료밀도 증가량은 0.5 kg/m³, 연소가능한 수관연료밀도 증가량은 약 0.3 kg/m³로 시업지 임분에 비해 비시업지 임분의 수관연료밀도의 증가량이 높게 예측되었는데, 이와 같은 연구결과는 시간이 지날수록 비시업지 임분 내 산불확산 요소로 작용할 수 있는 산불 연료량이 축적되고 있어 수관화 확산 위험성이 높아지고 있는 것으로 판단된다.

본 연구의 결과로 제시된 시업지 잣나무림 연소가능한

수관연료밀도 0.3 kg/m³, 비시업지 잣나무림의 연소가능한 수관연료밀도 0.4 kg/m³는 기존의 소나무임분의 연구결과 (Lee et al., 2018)와 비교 시에 2~3배 더 많은 연소가능한 수관연료밀도를 보였다. 이는 잣나무 임분이 소나무 임분에 비해 단면적 당 수관층 연료량이 많이 분포하고 있으며, 능동형 수관화로 발전될 가능성이 높을 것이라는 기존 연구결과와 유추해 볼 때(Kim et al., 2017), 현재 비시업지 잣나무림 뿐만 아니라 시업지 잣나무림 또한 지속적으로 산불연료 예방관리 차원에서의 관리가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국가산림자원조사 자료를 이용하여 산불에 취약한 대표 수종인 잣나무 임분의 산림시업지 임분과 비시업지 임분을 대상으로 임분생장과 수관연료특성을 예측하였다. 결과를 종합해 보면, 시업지 임분에서 직경생장량은 더 높게 예측된 반면, 낮은 고사율이 예측되어 산림시업이 임분생장에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 해석되었다. 이를 산불 연료량관점에서 분석한 결과, 현재 비시업지 임분의 연소가능한 수관연료밀도는 시업지 임분에 비해 약 2배 정도 높으며, 20년 후 예측한 연소가능한 수관연료밀도 증가량은 비시업지 임분이 약 0.3 kg/m³으로 시업지 임분에 비해 높은 증가량을 보여 이는 비시업지 임분에서의 수관화 확산 위험성이 상대적으로 더 높은 것으로 판단된다. 그러나, 향후 10년 후 시업지 임분의 연소가능한 수관연료밀도는 약 0.4 kg/m³로 현재 비시업지 임분의 연소가능한 수관연료 밀도인 약 0.4 kg/m³와 비슷한 수치를 보여 시업지 임분

Table 7. Estimation of Canopy Fuel Loads by Scenarios of Managed Stands (TPH = 600, SI = 16) and Unmanaged Stands (TPH = 900, SI = 13)

Classification	Forest type	Stand age		
		30 (Present)	40 (After 10 years)	50 (After 20 years)
Tree density (trees/ha)	Managed	578.3	549.7	514.9
	Unmanaged	880.3	863.8	854.9
Height (m)	Managed	15.1	16.4	17.1
	Unmanaged	14.4	15.6	16.9
CL (m)	Managed	9.8	10.7	11.3
	Unmanaged	8.6	10.5	11.0
CFL (ton/ha)	Managed	44.4	68.8	85.0
	Unmanaged	63.6	90.8	103.9
ACFL (ton/ha)	Managed	20.0	29.2	32.8
	Unmanaged	29.2	39.6	44.4
CBD (kg/m ³)	Managed	0.5	0.7	0.9
	Unmanaged	0.7	1.1	1.2
ACBD (kg/m ³)	Managed	0.3	0.4	0.5
	Unmanaged	0.4	0.5	0.7

또한 지속적인 임분관리가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 임분조건에 따른 임분생장 뿐만 아니라 산불연료량을 예측할 수 있는 정량적인 수치자료를 제공할 수 있으며, 더 나아가 산불확산 방지를 위한 산림사업체계를 마련하는데 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국립산림과학원 산림방재연구과 위탁연구과제인 ‘산림사업 등 임분구조 변화에 따른 산불행동 예측’에 대한 연구에 의해 수행되었습니다.

References

- Abino, A.C., Kim, S.Y., Lumbres, R.I.C., Jang, M.N., Youn, H.J., Park, K.H., et al. (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*, Vol. 13, No. 5, pp. 822-830.
- Arno, S.F., and Brown, J.K. (1991). Overcoming the paradox in managing wildland fire. *Western Wildlands*, Vol. 17, No. 1, pp. 40-46.
- Bessie, W.C., and Johnson, E.A. (1995). The relative importance of fuels and weather on fire behavior in subalpine forests. *Ecology*, Vol. 76, No. 3, pp. 747-762.
- Biswell, H.H. (1960). Danger of wildfire reduced by prescribed burning in ponderosa pine. *California Agriculture*, Vol. 14, No. 10, pp. 5-6.
- Biswell, H.H., Gibbens, R.P., and Buchanan, H. (1968). Fuel conditions and fire hazard reduction costs in a giant sequoia forest. *National Parks Magazine*, pp. 17-19.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H., and Bailey R.L. (1983). *Timber management: A quantitative approach*. NY: John Wiley & Sons.
- Cruz, M.G., Alexande, 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*, Vol. 12, No. 1, pp. 39-50.
- Fiedler, C.E., Arno, S.F., and Harrington, M.G. (1996). *Flexible silviculture and prescribed burning approaches for improving health of Ponderosa pine forests*. RM-GTR-278, USDA Forest Service, pp. 69-74.
- Graham, R.T., McCaffrey, S., and Jain, T.B. (2004). *Science basis for changing forest structure to modify wildfire behavior and severity*. RMRS-GTR-120, USDA Forest Service.
- Hamilton, D.A. (1974). *Event probabilities estimated by regression*. INT-152, USDA Forest Service.
- Harcombe, P.A. (1986). Stand development in a 130-year-old spruce-hemlock forest based on age structure and 50 years of mortality data. *Forest Ecology and Management*, Vol. 14, pp. 41-58.
- Harcombe, P.A., and Marks, P.L. (1983). Five years of tree death in a *Fagus-Magnolia* forest, southeast Texas. *Oecologia*, Vol. 57, pp. 49-54.
- 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*, Vol. 258, pp. 712-721.
- Pollet, J., and Omi, P.N.. (2002). Effect of thinning and prescribed burning on crown fire severity in Ponderosa pine forests. *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-10.
- Lowe, J.D. (2000). *Wildland firefighting practice* (pp. 14-45). Delmar Thomson Learning.
- Korea Forest Service (KFS). (2012). *The 6th national forest inventory report*.
- Kim, D.H. (2016). *Accounting for forest resources using the national forest inventory data*. Ph.D. dissertation, Chonbuk National University.
- Kim, S.Y. (2015). *A study on the analysis of fuel characteristics for forest fire hazard assessment*. Ph.D. dissertation, Kongju National University.
- Kim, S.Y., Lee, Y.J., Jang, M.N., Kwon, C.G., Lee, B.D., and Ahn, H.Y. (2017). Comparison of fuel characteristics between *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis* in Gangwon province. *Crisisonomy*, Vol. 13, No. 4, pp. 105-115.
- Lee, M.J. (2002). *Development of individual tree growth model by forest types*. Master's thesis, Kookmin university.
- Lee, S.J., Kim, S.Y., Lee, B.D., and Lee, Y.J. (2018). Estimation of canopy fuel characteristics for *Pinus densiflora* stands using diameter distribution models: Forest managed stands and unmanaged stands. *Journal of Korean Society of Forest Science*, Vol. 107, No. 4, pp. 412-421.
- Lee, S.Y., Lee, M.W., Yeom, C.H., Kwon, C.G., and Lee, H.P. (2009). Comparative analysis of forest fire danger

- rating on forest characteristics of thinning and non-thinning. *Journal of Fire Science and Engineering*, Vol.23, No. 4, pp. 32-39.
- 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*, Vol. 30, No. 1, pp. 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: Journal of Forest Science*, Vol. 76, No. 2, pp. 117-123.
- Mäkinen, H., and Isomäki, A. (2004). Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. *Forest Ecology and Management*, Vol. 201, No. 2-3, pp. 311-325.
- McArdle, R.E., Meyer, W.H., and Bruce, D. (1949). *The yield of Douglas-fir in the Pacific Northwest*. Technical Bulletin No. 201, USDA Forest Service.
- 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*. PNW-GTR-310, USDA Forest Service.
- Peltola, H., Kilpeläinen, A., and Kellomäki, S. (2002). Diameter growth of Scots pine (*Pinus sylvestris*) trees grown at elevated temperature and carbon dioxide concentration under boreal conditions. *Tree Physiology*, Vol. 22, No. 14, pp. 963-972.
- Peterson, D.L., Johnson, M.C., Agee, J.K., Jain, T.B., McKenzie, D., and Reinhardt, E.D. (2005). *Forest structure and fire hazard in dry forests of the Western United States*. PNW-GTR-628, USDA Forest Service.
- Pyo, J.K., Lee, Y.J., Son, Y.M., Lee, K.H., and Moon, H.S. (2009). Estimation of site index equation for *Pinus densiflora* at Mt. Osu region using schnute growth function. *Journal of Agriculture & Life Science*, Vol. 43, No. 4, pp. 9-14.
- Sando, R.W., and Wick, C.H. (1972). *A method of evaluating crown fuels in forest stands*. Research Paper NC-84, USDA Forest Service.
- Seo, J.H., Son, Y.M., Lee, K.H., Lee, W.K., and Son, W.H. (2005). The estimation of stand biomass and net carbon removals using dynamic stand growth model. *Journal of Korea Forestry Energy*, Vol. 24, No. 2, pp. 37-45.
- Skovsgaard, J.P., and Vanclay, J.K. (2008). Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry: International Journal of Forest Research*, Vol. 81, No. 1, pp. 13-31.
- Son, Y.M., Jeon, J.H., Lee, S.J., Yim, J.S., and Kang, J.T. (2017). Development of estimated equation for mortality rates by forest type in Korea. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 106, No. 4, pp. 450-456.
- Son, Y.M., Lee, K.H., Kim, R.H., and Seo, J.H. (2006). Stand development estimate and carbon stocks/removals assesment using stand growth monitoring. *Journal of Korea Forestry Energy*, Vol. 25, No. 2, pp. 42-48.
- Jack, S.B., and Long, J.N. (1996). Linkages between silviculture and ecology: An analysis of density management diagrams. *Forest Ecology and Management*, Vol. 86, pp. 205-220.
- Woo, B.M. (2003). Achievements of the forest-tending works by national movement of the forest for life under the IMF structural adjustment program in Korea. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 92, No. 2, pp. 145-151.

Received	April 1, 2019
Revised	April 8, 2019
Accepted	May 7, 2019