해안형과 내륙 곰솔림의 산불 연료특성 비교

Comparison of Fuel Characteristics Between Coastal and Inland Type of *Pinus thunbergii* Stands

김성용* · 장미나** · 이선주*** · 이영진**** · 이병두*****

Kim, Sungyong* · Jang, Mina** · Lee, Sunju*** · Lee, Youngjin**** · and Lee, Byungdoo*****

Abstract

The objective of this study were to analyze the characteristics of surface and crown fuel and to compare the hazard of crown fire transition and spread in the Coastal type *Pinus thunbergii* and Inland type *Pinus thunbergii*. 25 surface fuel of each type were sampled and 10 trees of each type were destructively sampled to analyze crown fuel characteristic. The results of this study showed that the Inland type has higher surface moisture content due to the difference in crown cover, although the two types showed similar crown moisture content. Inland type (42.7%) has more crown needles than Coastal type (33.8%). The ratio of available crown fuel was 59.2% of Inland type and 57.2% of Coastal type. The adjusted coefficients of determination (R_{adj}^2) values were high (more than 0.850) or more except for thick branches of more than 1cm. The available canopy bulk density of Inland type was 1.29 times higher despite the smaller canopy volume.

Key words : Forest Fire, Coastal Type, Inland Type, *Pinus thunbergii*, Fuel

요 지

본 연구에서는 곰솔을 해안형과 내륙형으로 구분하여 지표층 및 수관층 연료의 특성을 파악하고, 수관화 전이 및 확산 위험성을 비교하였다. 분석을 위하여 해안형, 내륙형별로 지표층 연료를 각 25 Sample씩 채취하였으며, 수관층 연료는 각 10본씩 표본목을 벌채하여 분석하였다. 본 연구 결과에 의하면, 지표층 수분함량은 내륙형 곰솔이 다소 높게 나타났으나, 수관층 수분함량은 두 유형간 유사하였다. 전체 수관층 연료에서 잎이 차지하는 비율은 내륙형 곰솔(42.7%)이 해안형 곰솔(33.8%)에 비해 높았으며, 수관화 발생 시 연소가능한 연료의 비율은 내륙형 곰솔이 59.2%로 해안형 곰솔의 57.2%에 비해 다소 높게 나타났다. 수관층에 대한 연료량 추정식의 조정결정계수는 1 cm 이상의 굵은 가지를 제외하고 모두 0.800 이상이였다. 임분단위 연소가능한 수관연료밀도를 분석한 결과, 내륙형 곰솔이 수관체적 공간이 협소함에도 그 안에 포함된 연료량이 많아 해안형에 비해 1.29배 높은 수치를 보였다.

핵심용어 : 산불, 해안형, 내륙형, 곰솔, 연료

1. 서 론

산불학적으로 산림 내에 분포하고 있는 가연물질을 산불

연료라 하며, 위치에 따라 지표연료, 수관연료로 구분한다. 지표연료는 낙엽, 낙지, 관목, 초본으로 구성된 일반적으로 지상 1.2 m 아래 분포하고 있는 연료를 의미하며, 수관화

*정회원, 국립산림과학원 산림방재연구과 박사(E-mail: kitaco1@korea.kr)

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

**정회원, 한국산불방지기술협회 교육사업부 연구원

Member, Researcher, Korea Forest Fire Management Service Association

***공주대학교 산림자원학과 석사과정

Master Candidate, Department of Forest Resources, Kongju National University

****정회원, 공주대학교 산림자원학과 정교수

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

*****교신저자, 정회원, 국립산림과학원 산림방재연구과 박사(Tel: +82-2-961-2687, Fax: +82-2-961-2699, E-mail: byungdoo@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D. Senior Researcher, Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

전이과정(지표화가 수관화로 전환되는 과정)에서 가연물질로 영향을 미친다(Fernandes, 2001; Sandberg et al., 2001; Fernandes et al., 2006). 수관연료는 수관층의 잎과 가지로 구성된 공중에 떠있는 연료이며, 수관화 확산과정(수관화가 주변 임목으로 불이 옮겨붙는 과정)에 영향을 주는 인자이다(Sando and Wick, 1972; Scott, 1998). 지표연료를 분석할 수 있는 항목은 연료량, 수분함량, 발열량 등이며, 수관연료는 잎과 가지의 수분함량, 수관의 단면적 당 연료밀도, 지표층과 수관층의 거리 등의 항목이 일반적으로 측정된다. 이러한 지표층 및 수관층 연료의 특성은 산불의 화염길이, 화염높이, 확산속도, 확산강도 등을 예측하는데 주요 변수로 활용된다.

산림은 임분특성(수종, 임령, 지형, 기상, 생육조건)에 따라 연료의 양과 구조가 다르기 때문에 산불의 행동과 강도가 차이를 보이게 된다(Fernandes, 2001). 따라서 산림 내 연료의 특성을 파악하는 것은 산불 확산의 잠재적 능력을 추정하는데 필수적이다(Kucuk et al., 2007). 또한 인위적인 관리가 가능한 요소이기 때문에 산불예측을 고려한 산림관리 방법 및 기준을 제시하는데 중요한 자료로 활용될 수 있다(Lee et al., 2010).

수관화 전이과정을 규명하기 위한 선행연구는 1950년대부터 진행되어 왔다. Byram(1959)과 Rothmel(1972)은 가연물질로 작용하는 연료를 직접 연소하는 실험 과정을 거쳐 산불수확식을 도출한 바 있으며, 이를 토대로 연료배열, 면적, 연료습도, 연료깊이, 발열량 등을 추정할 수 있는 체계를 마련하였다. 이러한 자료와 추정 체계는 다양한 연료유형을 구분하는 기준 마련에 기여하였으며, Andrews와 Rothmel에 의해 미국 산림의 표준이 되는 연료모델을 개발하는 근간이 되었다(Andrews and Rothmel, 1982; Andrews, 1986; Andrews et al., 2005). 또한 Van Wagner(1977)는 현장 연료조사 자료와 열확산 원리를 이용하여 지표화 강도모델을 개발하였으며, 이 모델은 전 세계에서 널리 사용되고 있는 수관화 모델 식으로 FARSITE를 개발하는 토대가 되었다(Finney, 1998). 최근에는 수관화 확산과정을 규명하기 위한 연구로써 임목을 직접 벌채하여 수관층의 연료 분포 유형을 분류하고, 연료량 추정식을 개체목, 임분단위로 개발하여 수관화 확산 위험성을 평가하는 연구가 주로 수행되고 있다(Reinhardt et al., 2000; Kucuk et al., 2007; Mitsopoulos and Intrakopoulos, 2007). 최근에는 측정이 까다로운 수관연료밀도를 위성영상, LiDAR 기술을 접목하여 추정할 수 있는 체계를 마련해 나가고 있다(Mason et al., 2007). 이러한 연구들은 산불을 좀 더 정확히 예측할 수 있는 알고리즘 개발은 물론이고, 대형산불 방지를 위한 산림관리 기준을 제시하는데 기여하고 있다(Graham et al., 1999).

국내에서도 2000년대 이후 산림 내 연료의 특성을 파악하기 위한 연구를 진행하기 시작하였다. 2009년 우리나라 소나무림에 대해 영급별 지표층 연료량을 파악하여 산불연료공간도를 제작하였고, 대구 팔공산 지역을 시작으로 경북 영주,

봉화, 서산, 양양지역에 대단위로 분포하고 있는 소나무의 수관층 연료특성과 관련된 연구가 수행되었다(Kim et al., 2011; Jang et al., 2011; Kim et al., 2012). 이러한 연구를 통해 산불이 수관화로 전이되는 것을 예방할 수 있는 산림관리 기준을 마련하였으며, 2000년대 초에 개발하여 운영되고 있는 산불확산예측시스템의 알고리즘을 개선하는데 활용되었다(Lee, 2005; Kim, 2015). 그러나 소나무수종에 국한하여 연구가 진행되어 우리나라에 고르게 분포하고 있는 다양한 침엽수림의 연료특성을 파악하는데 한계가 있다.

곰솔은 임업통계 산출 시 소나무림으로 분류되어 정확한 분포 면적 산출이 어렵지만, 전국에 약 35만 ha 이상이 분포하는 것으로 추정된다. 곰솔은 대부분 해안가에 위치하고 있기 때문에 문화, 보건, 휴양, 경관 형성에 크게 이바지하고 있는 수종이며, 자연재해 방지 등 다양한 기능을 수행하고 있다. 그러나 산불학 관점에서 곰솔이 해안가 주변에 분포한다는 것은 바람의 영향을 많이 받아 산불확산에 취약하고, 송진의 양이 많기 때문에 단면적당 소모되는 많은 에너지량에 의해 높은 산불강도를 보일 것으로 판단된다. 실제로 그리스에서는 곰솔과 생리적으로 유사한 Aleppo pine에서 대형산불이 발생하여 270,000ha의 산림이 전소된 사례가 이를 증명하고 있다(Mitsopoulos and Dimitrakopoulos, 2007). 따라서 우리나라에서도 곰솔에 대한 산림 내 연료의 특성을 분석하여 산불 위험성을 파악할 필요가 있으며, 산불의 피해를 줄일 수 있는 연료관리 방안 마련이 절실하다. 본 연구에서는 임분의 생육환경에 따라 변화하는 산불 연료의 특성파악을 위하여 해안가에 분포하고 있는 곰솔과 내륙 산지에 분포하고 있는 곰솔을 대상으로 지표층과 수관층 연료의 특성을 비교 분석하고, 수관화 전이 및 확산위험성을 연료적 관점에서 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상지

2.1.1 연구대상지 선정

연구대상지를 선정하기 위하여 수치지형도(1:1,000), 제5차 수치임상도(1:5,000), 토양입지도(1:5,000)를 사전 분석하여 곰솔림이 많이 분포하는 곳을 조사 대상지역으로 선별하였다. 대표적인 해안형 곰솔 임분과 내륙형 곰솔 임분에서 조사를 수행하기 위하여 위치적으로 대표성을 띠고, 생육환경이 우수한 임분을 고려하였고, 조림된 시기가 유사한 임분으로 선정하였다. 최종 연구대상지는 해안형의 경우 충남 서천군 비인면 다사리 일대 해안에 위치하는 1976년 조림된 V영급 곰솔 조림지로 선정하였고, 내륙형의 경우 충남 서천군 중천면 산천리 내 내륙형 산림에 위치한 1974년 조림된 곰솔림으로 선정하였다(Fig. 1).

Fig. 1. Location of Study Site and Seasonal Average Precipitation and Temperature in Seocheon Region

2.1.2 연구대상지 현황

선정된 대상지의 임분 특성을 보면, 해안형 곰솔림의 평균 흉고직경은 21.0 cm, 평균수고는 15.9 m, 평균지하고는 9.2 m, 임분밀도는 ha당 1,025본 이었다. 내륙형 곰솔림의 평균흉고 직경은 19.2 cm, 평균수고는 14.5 m, 평균지하고는 8.3 m, 임분밀도는 ha 당 925본 이었다. 해안형과 내륙형의 임분은 1차 숲가꾸기가 사업이 완료된 지역으로 임분의 특성이 유사 하였고, 다른 침엽수림에 비해 수고와 지하고가 높은 특징이 있었다. 하층식생은 해안형의 경우 해안가 주변의 특수성으로 인해 염분에 강한 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*)가 주로 분포하고, 내륙형은 진달래(*Rhododendron mucronulatum*)와 졸참나무(*Quercus serrata*)가 많이 분포하고 있었다(Table 1).

2.2 자료수집 방법

2.2.1 지표층 연료수집

지표층 연료수집은 산불에 취약한 시기인 2월 1일부터 5월 15일 사이에 진행하였다. 날씨 환경에 따라 연료의 수분 상태 등이 달라질 것을 감안하여 강수가 있을 경우 3일 동안은 조사를 수행하지 않았다. 해안형과 내륙형 임분별로 1 × 1m 크기로 총 25개 지표층 표본구를 선정하여, 조사를 수행하였고, 표본구 내 모든 지표층 연료를 채취하여 생중량을 측정 후 20% 이상의 시료를 실험실로 운반하여 분석하였다.

2.2.2 수관층 연료수집

수관층 연료는 3월 말부터 4월 초까지 봄철 중에서도

가장 건조한 시기에 집약적으로 수집하였다. 해안형과 내륙형 임분별로 5개 Plot씩 20 × 20m (0.04 ha) 크기의 조사 표본구를 선정하여 임분특성 파악을 위한 매목조사를 실시

Table 1. Descriptive Statistics for Coastal Type *Pinus thunbergii* and Inland Type *Pinus thunbergii*

Tree types	Variables	Mean	S.D.
Coastal type	Stand age (years)	44	5.1
	DBH (cm)	21.0	4.6
	Tree height (m)	15.9	1.9
	Crown height (m)	9.2	1.3
	Stand density (trees/ha)	1,025	262.3
Inland type	Stand age (years)	46	3.6
	DBH (cm)	19.2	4.2
	Tree height (m)	14.5	1.8
	Crown height (m)	8.3	1.6
	Stand density (trees/ha)	925	213.6

Note: S.D. is the Standard deviations

하였다. 그 후 각 10본의 표본목을 벌채하였고, Smalian식 구분구적법에 따라 수관층을 층위별로 나누어 분류하였다. 수관층의 잎과 가지의 경우 화학적 구성성분이 달라 연소물질로 작용하는 역할이 구분되기 때문에 각각 따로 분류하였다. 가지의 경우 수관화 발생 시 1 cm 이하 가지가 주로 타는 것을 감안하여 cm 단위로 가지 직경(≤ 0.5 cm, $0.5 \sim 1$, $1 \sim 2$, $2 \sim 4$, > 4 cm)을 크기에 따라 분류하여 수집하였다.

2.2.3 건조방법 및 수분함량 추정

각 부위별로 채취한 시료는 건조봉투에 담아 수분을 완전히 제거한 뒤 무게를 측정하였고, 건조 전 중량과 건조 후 중량을 비교하여 수분함량을 추정하였다. 수분함량 추정방법은 건조중량을 분모로하여 백분율을 산출하는 Oven dry method를 사용하였다(Lee and han, 1968; Lee et al., 2010; Kim et al., 2011).

Oven dry Method 분석 방법은 Eq. (1)과 같다.

$$FMC(\%) = \frac{FWW - FDW}{FDW} \times 100 \quad (1)$$

위 식에서 FMC = Fuel moisture content (%), FWW = Fuel wet weight (g), FDW = Fuel dry weight (g).

2.3 분석방법

지표층 연료는 낙엽, 낙지, 초본, 관목으로 나누어 단위면적 당 분포하고 있는 연료량을 추정하였다. 최근 연구에서 개체목단위 수관연료는 Crown이라는 용어로 정의하고, 임분단위 수관연료는 Canopy 용어를 쓰면서 용어 구분에 따른 분석방법을 표준화 하였다(Cruz et al., 2003).

본 연구에서는 수분함량, 수관연료량은 개체목단위의 분석으로 결과를 도출하였고, 수관연료밀도는 개체목단위와 임분 단위로 구별하여 분석한 후 결과를 제시하였다. 수관연료밀도를 추정하기 위해서 수관이 가지고 있는 체적을 산출해야 하므로 개체목단위의 수관체적(Crown volume)은 수관의 형태를 추정하는 기법을 이용하였고, 임분단위 수관체적(Canopy volume)은 임분의 평균 지하고와 수고의 편차 즉, 수관길이(Canopy length)법을 이용하였다(Cruz et al., 2003).

개체목단위별 수관체적 산출식은 Eq. (2)와 같다.

$$RH = \frac{LCW - SCW}{SCW}$$

$$CV = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\pi \times LCW^2 (1 + RH)}{3} - \frac{\pi \times SCW^2 (1 + RH)}{3} \right\} \quad (2)$$

위 식에서 CV = Crown volume (m^3), RH = Ratio height (m), LCW = Long crown width (m), SCW = Short crown width (m), π = The ratio of the circumference of a circle

to its diameter.

임분단위 수관체적 산출식은 Eq. (3)과 같다.

$$CAV = \frac{\sum_{i=1}^n (CL_i \times TEF_i)}{\sum_{i=1}^n TEF_i} \times 10,000 \quad (3)$$

위 산출식에서 CAV = Canopy volume (m^3), CL = Canopy length (m), of i th individual trees, TEF_i = Tree expansion factor corrected to a per hectare basis for the i th trees.

최종적인 개체목과 임분단위의 수관연료밀도는 Eqs. (4)와 (5)의 식에 의해 산출하였다.

$$Crown bulk density (kg/m^3) = \frac{CFL_i}{CV} \quad (4)$$

$$Canopy bulk density (kg/m^3) = \frac{\sum_{i=1}^n (CFL_i \times TEF_i)}{CAV} \quad (5)$$

위 산출식에서 CFL_i = Crown fuel load (kg) of i th individual trees.

수관의 부위별 연료량 추정식 개발은 해안형과 내륙형별로 분석된 연료량 측정치를 이용하여 추정하였다. 일반적으로 많이 활용되는 흉고직경(D)을 독립변수로 하고 연료량(W)을 종속변수로 하는 대수회귀식($\ln W = \beta_0 + \beta_1 \ln D$)을 이용하여 연료량을 추정하도록 유도하였다. 추정된 상대생장식의 적합성은 조정결정계수(R^2_{adj})와 표준추정오차(S.E.E)를 통해 파악하였으며, 대수회귀식을 통해 추정된 모수 β_0 과 β_1 값을 조사된 매목조사 자료에 대입하여 각 부위별 연료량 추정치를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 지표층 연료특성 비교

해안형 곰솔과 내륙형 곰솔의 지표층 내 수분함량을 분석한 결과, 해안형은 낙엽 18.6%, 낙지 18.1%, 지표층 평균 18.4%이었으며, 내륙형은 낙엽 21.2%, 낙지 20.4%, 지표층 평균 20.7%으로 내륙형이 약 2% 가량 높은 것으로 분석되었다(Table 2). 국외 연구결과를 보면 바람세기가 강할수록 지표수분 건조율을 빨라져 수분이 평형을 나타내는 시간이 단축된다는 연구결과가 있다(Van wagner, 1974). 따라서 해안형의 경우 바닷바람이 많이 불어오는 특징으로 인해 지표층 연료에 함유되어 있는 수분을 빠르게 빼앗아 나타난 현상으로 보인다. 산불 초기 발화에 연소물질 수분함량이 절대적으로 영향을 미친다고 감안했을 때 해안형 곰솔이 내륙형 곰솔에 비해 발화 가능성이 높을 수 있음을 보여준다(Kwon, 2014).

Table 2. Comparison of Surface Fuel Characteristics for Coastal Type and Inland Type *Pinus thunbergii*

Components	Coastal type <i>Pinus thunbergii</i> (n= 25)			Inland type <i>Pinus thunbergii</i> (n= 25)		
	Dead leaves	Snags	Mean	Dead leaves	Snags	Mean
Moisture contents (%)	18.6 (± 1.6)	18.1 (± 1.7)	18.4 (± 1.7)	21.2 (± 2.2)	20.4 (± 2.5)	20.7 (± 2.3)
Surface fuel load (kg/m ²)	1.029 (± 0.226)	0.311 (± 0.051)	1.340 (± 0.131)	1.526 (± 0.245)	0.459 (± 0.101)	1.985 (± 0.163)

Note: standard deviation of the mean in parenthesis

지표층 연료량은 해안형 곰솔(낙엽 1.029 kg/m², 낙지 0.311 kg/m²)이 내륙형 곰솔(낙엽 1.526 kg/m², 낙지 0.459 kg/m²)에 비해 적게 분포하고 있었다. 이는 해안형 곰솔림은 강한 바닷바람이 불어 떨어지는 잎의 양이 많기 때문이다.

이 두 조건으로 보면, 해안형 곰솔은 수분함량이 낮아 발화가능성의 조건이 좋으나, 단면적 당 분포하고 있는 연료량이 적어 산발 확산 가능성은 낮은 것으로 추측된다.

3.2 수관층 수분함량 비교

해안형과 내륙형 곰솔의 수관층 수분함량을 분석한 결과, 해안형은 잎 117.1%, 작은 가지(≤ 1 cm) 116.2%, 큰 가지(>1 cm) 100.3%로 수관층 평균 111.2%의 수분함량을 보였다. 내륙형은 잎 115.2%, 작은 가지(≤ 1 cm) 110.1%, 큰 가지(>1 cm) 108.5%로 잎과 작은가지는 해안형에 비해 낮은 수분함량이었으나, 굵은 가지는 오히려 수분함량이 높았다 (Fig. 2).

Fig. 2. Crown Fuel Moisture Contents of Coastal Type and Inland Type *Pinus thunbergii*

수분함량 산출에 사용된 Oven dry method의 결과는 수분함량이 높은 수치일수록 백분율 차이가 크더라도 실제 수분함량의 차이는 적은 특징을 갖는다. 따라서 두 형간 지형적 특색이 다르지만 실제적인 수분함량의 차이는 크지 않은 것으로 추측된다. 또한 기존 연구에서 제시된 소나무림 수관층 수분함량 팔공산 소나무 113.2%, 강원지방 소나무

107.8%, 영주지역 소나무 105.3%로 보더라도 수종간의 차이는 크지 않은 것으로 보인다(Koo et al., 2010; Kim et al., 2011; Kim et al., 2012).

3.3 수관층(Crown) 부위별 연료량 비율

해안형과 내륙형 곰솔의 수관층 부위별 연료량 비율을 분석한 결과는 Fig. 3과 같다. 해안형 곰솔의 경우 수관층 전체에서 잎이 차지하는 비율이 33.8%, ≤ 0.5 cm 가지 11.8%, $>0.5 \leq 1$ cm 가지 11.6%로 수관화 발생 시 연소가 가능한 연료(잎, 직경 1 cm 이하의 작은가지)의 비율이 57.2%를 차지하였지만, 내륙형 곰솔의 경우에는 잎 42.7%, ≤ 0.5 cm 가지 8.8%, $>0.5 \leq 1$ cm 가지 7.7%로 연소가 가능한 연료의 비율이 59.2%를 차지하여 해안형에 비해 수관화로 탈 수 있는 물질이 많은 것으로 분석되었다. 두 유형 간 수관연료 비율에서 특히 잎 부위에 큰 차이를 보이는 원인은 해안형의 경우 바다에서 불어오는 바람이 수관층에 주는 영향이 크므로 잎이 많이 소실되어서 나타난 현상으로 사료된다.

Fig. 3. Crown Fuel Load Distribution by Tree Component of Coastal Type and Inland Type *Pinus thunbergii*

한편 기존 국외 연구에서는 그리스 Aleppo pine의 연소가 가능한 연료 비율을 34.6%로 보고한 바 있으며(Mitsopoulos and Dimitrakopoulos, 2007), 미국과 캐나다 주요 침엽수종 또한 40%를 넘지 않는다고 보고된 바 있다(Brown, 1978; Cruz et al., 2003). 이러한 결과로 보아 우리나라 곰솔 임분

내 수관화에 직접적인 영향을 미치는 연료량이 국외의 유사한 침엽수종에 비해 많다고 할 수 있으며, 이는 우리나라 산림이 국외에 비해 임목의 직경이 다소 작고 밀도가 높아 상대적으로 수고생장이 더 활발하게 일어난 현상으로 판단된다.

3.4 개체목단위 수관연료밀도(Crown bulk density) 비교

개체목단위의 평균 수관연료밀도를 분석한 결과, 내륙형이 평균 0.327 kg/m^3 로 해안형 0.238 kg/m^3 에 비해 전체적으로 높은 수관연료밀도를 보였다. 두 유형 모두 흉고직경이 증가함에 따라 수관연료밀도가 줄어드는 현상을 보였으며, 내륙형이 해안형에 비해 수관연료밀도 감소폭이 큰 것으로 나타나면서 흉고직경 25 cm 이상에서는 두 형간 유사한 수치를 보였다(Fig. 4). 기존 연구된 소나무 수종과 잣나무 수종의 수관연료밀도 비교 결과를 보면, 흉고직경이 증가할수록 연소가능한 연료의 밀도는 점차 낮아지는 현상을 보여 본 연구 결과와 유사하였다(Kim, 2015).

흉고직경이 증가할수록 연료밀도가 낮아지는 것은 임목의 크기가 커질수록 수관화 확산 가능성이 점차 낮아지는 것으로 해석이 가능하다(Kim et al., 2017).

Fig. 4. Graphical Comparison of Available Crown Bulk Density for Coastal Type and Inland Type *Piuns thunbergii*

3.5 수관층 부위별 연료량 추정식 개발

해안형과 내륙형 곰솔의 연료량 추정식은 표준지 매목조사 시 손쉽고 정확하게 측정이 가능한 흉고직경 항목을 변수로 하여 개발하였다. 개발된 추정식의 모수 추정 결과를 보면, 흉고직경에 대한 모수 β_1 이 모두 양(+)의 값을 보이므로 흉고직경 증가에 따라 각 부위별 연료량도 점차 증가하는 패턴을 보였다. 또한 연료량 추정식 모수들은 모든 부위에서 유의성이 인정되었다($P < 0.05$). 전체 수관층, 연소가능한 연료, 잎 연료량에 대한 설명력은 두 유형간의 모두 90% 이상을 보였으나, 굵기별 가지 부위는 설명력에 대한 편차가 존재하였다. 해안형과 내륙형 모두 1~2 cm 가지 부위에서 가장

낮은 설명력을 보였으며, 해안형의 경우에는 $> 4 \text{ cm}$ 이상 가지는 관측되지 않았다.

연료량 추정식을 이용하여 해안형과 내륙형 곰솔의 연소가능한 수관연료량을 비교한 결과, 작은 직경급에서는 내륙형 곰솔의 연료량이 더 많이 분포하는 것으로 나타났으며, 흉고직경 변화에 따라 해안형 곰솔의 수관층 연료량이 내륙형에 비해 큰 폭으로 증가하다가 흉고직경 28cm를 변곡점으로 연료량이 역전하는 현상을 보였다(Fig. 5).

Fig. 5. Graphical Comparison of Available Crown Fuel Load for Coastal Type and Inland Type *Piuns thunbergii*

3.6 임분단위 수관연료특성 비교

현장에서 조사된 표준지 자료를 연료량 추정식에 대입하여 해안형과 내륙형 곰솔의 임분단위 수관연료특성을 비교하였다(Table 4). 그 결과, 임분단위의 수관체적은 해안형이 $67,236 \text{ m}^3/\text{ha}$ 로 내륙형 $63,137 \text{ m}^3/\text{ha}$ 에 비해 넓은 면적을 차지하였다. 총 수관연료량(Total canopy fuel load)은 해안형 27.360 ton/ha , 내륙형 28.920 ton/ha 로 유사하였으나, 연소가능한 수관연료량(Available canopy fuel load)은 해안형 16.340 ton/ha , 내륙형 19.760 ton/ha 로 내륙형이 많았다. 내륙형 곰솔은 수관체적 공간이 협소함에도 불구하고 그 안에 포함된 연료량이 많아 총 수관연료밀도는 해안형과 비교하여 1.13배, 연소가능한 수관연료밀도는 1.29배 높았다. 수관연료밀도가 높을수록 확산강도가 높고 확산속도가 급격히 빨라진다는 기존 연구결과로 유추해 볼 때, 연료적 측면에서는 해안형에 비해 내륙형 곰솔이 수관화의 위험성이 높을 것으로 추정된다(Harrod et al., 2009).

한편, 기존 연구에서는 소나무의 연소가능한 수관연료밀도는 $0.196 \text{ kg/m}^3\text{m}$, 잣나무는 0.300 kg/m^3 로 제시한 바 있다. 본 연구와 비교하여 해안형 곰솔은 소나무 보다는 연료밀도가 높고, 잣나무 보다 낮은 수치를 보였으며, 내륙형은 이 두 수종보다 모두 높은 수치를 보였다.

Table 3. Allometric Equations of Crown Fuel Load on Diameter at Breast Height for Coastal Type and Inland Type *Pinus thunbergii*

Fuel category	Coastal type <i>Pinus thunbergii</i>					Inland type <i>Pinus thunbergii</i>				
	$\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D$					$\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D$				
	n	β_0 (S.E.)	β_1 (S.E.)	R^2_{adj}	S.E.E. (P-value)	n	β_0 (S.E.)	β_1 (S.E.)	R^2_{adj}	S.E.E. (P-value)
Total crown	10	-1.463 (0.241)	2.168 (0.094)	0.990	0.068 (<0.0001)	10	-2.080 (0.509)	1.889 (0.176)	0.909	0.294 (<0.0001)
Available crown	10	-5.095 (0.718)	2.530 (0.241)	0.923	0.232 (<0.0001)	10	-1.486 (0.518)	1.453 (0.179)	0.922	0.209 (<0.0001)
Needles	10	-6.363 (0.311)	2.785 (0.118)	0.936	0.138 (<0.0001)	10	-1.469 (0.356)	1.313 (0.172)	0.908	0.193 (<0.0001)
Branches ≤ 0.5 cm	10	-6.168 (0.331)	2.394 (0.195)	0.827	0.345 (<0.0001)	10	-5.359 (0.259)	2.167 (0.217)	0.943	0.262 (<0.0001)
Branches 0.51 ~ <1 cm	10	-5.755 (0.452)	2.222 (0.239)	0.851	0.294 (<0.0001)	10	-3.333 (0.666)	1.416 (0.177)	0.845	0.298 (<0.0001)
Branches 1 ~ <2 cm	10	-2.948 (1.045)	1.415 (0.348)	0.710	0.341 (<0.0001)	10	-2.295 (0.750)	1.187 (0.245)	0.679	0.394 (<0.0001)
Branches 2 ~ <4 cm	10	-9.752 (0.954)	3.767 (0.521)	0.919	0.356 (<0.0001)	10	-5.752 (0.910)	2.455 (0.299)	0.919	0.358 (<0.0001)
Branches >4 cm	-	-	-	-	-	7	-11.362 (1.269)	4.322 (0.745)	0.928	0.421 (<0.0001)

Note: $\beta_i(i=0,1)$ is the estimated parameters, $\ln$ is the natural logarithm, D is the diameter at breast height(cm), S.E. is standard error R^2_{adj} is the adjusted multiple coefficient of determination, S.E.E. is the standard error of estimate= $[\sum(s.s.e.)/(n-2)]^{1/2}$

Table 4. Comparison of Canopy Fuel Characteristics for Coastal Type and Inland Type *Pinus thunbergii*

Category	Types	
	Costal type <i>Pinus thunbergii</i>	Inland type <i>Pinus thunbergii</i>
CV (m ³ /ha)	67,236	63,137
TCFL (ton/ha)	27.360	28.920
ACFL (ton/ha)	16.340	19.760
TCBD (kg/m ³)	0.407	0.458
ACBD (kg/m ³)	0.243	0.313

Note: CV is the canopy volume, TCFL is the total canopy fuel load, ACFL is the available canopy fuel load, TCBD is the total canopy bulk density, ACBD is the available canopy bulk density

4. 결 론

본 연구에서는 해안형 곰솔과 내륙형 곰솔을 대상으로 지표층 및 수관층 연료의 특성을 파악하여 연료적 관점에서의 수관화 전이 및 확산 위험성을 비교 분석하였다. 이를 위하여 해안형과 내륙형 별로 지표층 연료를 각 25개씩 채취하여 분석에 이용하였으며, 직경급별로 표본목을 각 유형별 10본씩 벌채하여 수관연료의 특성을 파악하였다. 본 연구 결과에 의하면, 지표층 수분함량은 내륙형 곰솔이 다소 높게 나타났으나, 수관층 수분함량은 두 유형간 유사하였다. 수관층 전체 연료에서 잎이 차지하는 비율은 내륙형

곰솔 (42.7%)이 해안형 곰솔 (33.8%)에 비해 높았으며, 이로 인해 수관화 발생 시 연소가능한 연료의 비율은 내륙형 곰솔이 59.2%로 해안형 곰솔의 57.2%에 비해 다소 높게 나타났다. 수관층에 대한 연료량 추정식을 손쉽게 정확하게 측정가능한 흉고직경을 변수로 개발하였다. 추정식의 조정 결정계수는 1 cm 이상의 굵은 가지를 제외하고 모두 0.800 이상이었다. 임분단위 연소가능한 수관연료밀도를 분석한 결과, 내륙형 곰솔이 수관체적 공간이 협소함에도 그 안에 포함된 연료량이 많아 해안형에 비해 1.29배 높은 수치를 보였다.

본 연구의 결과를 종합해 보면, 해안형 곰솔의 지표층

연료는 내륙형 곰솔에 비해 수분함량이 낮아 착화 가능성은 높으나, 단위면적당 연료량이 적기 때문에 수관화 위험성은 낮은 것으로 판단되었다. 또한 내륙형 곰솔의 수관층의 연료량과 밀도가 해안형 곰솔에 비해 높기 때문에 수관화 확산 위험성이 높을 것으로 추측되었다. 즉, 같은 수종이지만 생육의 환경 조건에 따라 연료의 분포가 현저히 다른 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 향후 지리적 위치에 따른 곰솔 임분의 수관화 행동 예측과 위험성을 평가하는데 기초자료를 제공하고, 산불확산 방지를 위한 숲가꾸기 대상 지 및 기준을 마련하는데 유용한 정보로 활용될 수 있을 것이다.

References

- Andrews, P.L. (1986) *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System - BURN Subsystem, Part 1*. General Technical Report INT-194, Intermountain Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service.
- Andrews, P.L., Bevins, C.P., and Seli, R.C. (2005) *Behave Plus Fire Modeling System Version 3.0 User's Guide*. General Technical Report RMRS-GTR-106, Rocky Mountain Research Station, USDA Forest service.
- Andrews, P.L., and Rothermel, R.C. (1982) *Charts for Interpreting Wildland Fire Behavior Characteristics*. General Technical Report, INT-131, Intermountain Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service.
- Brown, J.K. (1978) *Weight and Density of Crown of Rocky Mountain Conifers*. General Technical Report, INT-197, Intermountain Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service.
- Byram, G.M. (1959) Combustion of Forest Fuels. *Forest Fire: Control and Use*, Edited by Davis, K.P., McGraw-Hill, New York, pp. 61-89.
- Cruz, M.G., Alexander, M.E., and Wakimoto, R.H. (2003) Assessing Canopy Fuel Stratum Characteristic in Crown Fire Prone Fuel Types of Western North America. *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 12, No. 1, pp. 39-150.
- Fernandes, P.M. (2001) Fire Spread Prediction in Shrub Fuels in Portugal. *Forest Ecology and Management*, Vol. 144, No. 1-3, pp. 67-74.
- Fernandes, P.M., Luz, A., Loureiro, C., Godinho-Ferreira, P., and Botelho, H. (2006) Fuel Modelling and Fire Hazard Assessment based on Data from the Portuguese National Forest Inventory. *Forest Ecology and Management*, Vol. 234, Suppl. 1, p. S229.
- Finney, M.A. (1998) *FARSITE: Fire Area Simulator - Model Development and Evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4, Rocky Mountain Research Station, USDA Forest service.
- Graham, R.T., Harver, A.E., Jain, T.B., and Tonn, J.R. (1999) *The Effects of Thinning and Sililar Stand Treatments on Fire Behavior in Western forests*, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. General Technical Report PNW-GTR-463, Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service.
- 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, No. 5, pp. 712-721.
- 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*, Vol. 100, No. 3, pp. 402-407.
- 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, B.D., Seo, Y.O., and Lee, Y.J. (2011) Crown Fuel Characteristics and Allometric Equations of *Pinus densiflora* Stands in Youngju Region. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 100, No. 2, pp. 266-272.
- 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.
- Kim, S.Y., Lee, Y.J., Jang, M.N., Seo, Y.O., Koo, K.S., Jung, S.C., and Kim, K.H. (2012) Above-ground Biomass and Crown Fuel Characteristics of *Pinus densiflora* in Yangyang, Gangwon Province. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 101, No. 2, pp. 244-250.
- Koo, K.S., Lee, B.D., Won, M.S., and Lee, M.B. (2010) Crown fuel Characteristics of Japanese Red Pine (*Pinus densiflora*) in Mt. Palgong, Daegu. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 99, No. 1, pp. 52-56.
- Kucuk, O., Saglam, B., and Bilgili, E. (2007) Canopy Fuel Characteristics and Fuel Load in Young Black Pine Trees. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*,

Vol. 21, No. 2, pp. 235-240.

- Kwon, C.G. (2014) *A Study on Estimations of Forest Surface Fuel Moisture Content Change on Affecting Forest Fires: Focus on the Gangwondo Yeongdong area-*, Ph.D. dissertation, Kangwon National University.
- 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*. Ph.D. dissertation, Seoul National University.
- Lee, B.D., Won, M.S., Kim, S.Y., Youn, S.H., and Lee, M.B. (2010) Allometric Equations of Crown Fuel Biomass and Analysis of Crown Bulk Density of *Pinus densiflora*. *Journal of Korea Forest Society*, Vol. 99, No. 3, pp. 391-396.
- Lee, P.W., and Han, K.S. (1968) The Moisture Distribution in Standing Pitch Pine Trees. *Journal of Korean Forest Society*, No. 7, pp. 45-48.
- Mason, G.J., Baker, T.T., Cram, D.S., Boren, J.C., Femald, A.G., and Vanleeuwen, D. M. (2007) Mechanical Fuel Treatment Effects on Fuel Loads and Indices of Crown Fire Potential in a South Central New Mexico Dry Mixed Conifer Forest. *Forest Ecology and Management*, Vol. 251, No. 3, pp. 195-204.
- Mitsopoulos, I.D., and Dimitrakopoulos, A.P. (2007) Allometric Equation for Crown Fuel Biomass of Aleppo Pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 16, No. 5, pp. 642-647.
- Reinhardt, E.D., Keane, R.E., Scott, J.H., and Brown, J.K. (2000) *Quantification of Canopy Fuel in Conifer Forests: Assessing Crown Fuel Characteristics using Destructive and Nondestructive Methods, Study Plan of Fire at, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station*. Fire Sciences Lab, Missoula, MT.
- Rothemel, R.C. (1972) *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*. Research Paper INT-115, Intermountain Forest and Range Experiment Station, USDA Forest service.
- Sandberg, D.V., Ottmar, R.D., and Cushon, G.H. (2001) Characterizing fuels in the 21st century. *International Journal of Wildland Fire*, Vol. 10, No. 4, pp. 381-387.
- Sando, R.W., and Wick, C.H. (1972) *A Method of Evaluating Crown Fuels in Forest Stands*. Research Paper NC-84, North Central Forest Experiment Station, USDA Forest Service, p. 10.
- Scott, J.H. (1998) Sensitivity Analysis of a Method for Assessing Crown Fire Hazard in the Northern Rocky Mountains. *International Conference in Forest Fire Research, 14th Conference on Fire and Forest Meteorology in USA*, pp. 2517-2532.
- Van Wagner, C.E. (1974) *Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index*. Publication No. 1333. Canadian Forestry Service, Environment Canada, Ottawa, ON, Canada.
- Van Wagner, C.E. (1977) Conditions of the Start and Spread of Crown Fires. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 7, No. 1, pp. 23-34.

Received	October 16, 2017
Revised	October 20, 2017
Accepted	November 8, 2017