

Comparison of Fuel Characteristics between *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis* in Gangwon Province

Sung Yong Kim^{1#}, Young Jin Lee², Mi Na Jang³, Chun Geun Kwon¹, Byung Doo Lee¹, He Young Ahn¹⁺

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

² Department of Forest Resources, Kongju National University, 54, Daehak-ro, Daehoe-ri, Yesan-eup, Yesan-gun, Chungcheongnam-do, Korea

³ Korea Forest Fire Management Service Association, 30 Gyeryong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

Abstract

This study identified fuel characteristics of surface and crown and analyzed crown fires on *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis* stands in Gangwon Province in Korea. Fifteen surface fuels of each tree type were sampled and 16 trees of each species were destructively sampled to identify crown fuel characteristics. *Pinus koraiensis* has higher surface fuel moisture content due to the difference in crown cover, although the two types show similar crown fuel moisture content. *Pinus koraiensis* (34.4%) has more crown needles than *Pinus densiflora* (25.7%), but two species have similar combustibility of available fuel, 55.8% and 55.6%, respectively. The adjusted coefficients of determination (R^2_{adj}) values were high (more than 0.850) in all crown fuel classes. The canopy bulk density of *Pinus koraiensis* was 1.56 times higher than that of *Pinus densiflora*, whereas the available canopy bulk density of *Pinus koraiensis* was 1.68 times higher despite the smaller canopy volume.

Key words: Forest fire, *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, Fuel

1. 서론

지표화, 수관화 등의 산불확산 유형은 기상, 지형과 더불어 연료의 복합적인 작용에 의해 결정된다(Byram, 1959). 산불행동에 영향을 미치는 인자 중에서 연료는 산림시업이라는 행위를 통해 조절이 가능한 유일한 인자이다(Lee, et. al., 2010). 이에 따라 국외에서는 1950년대부터 산불의 확산에 가연물질로 작용하는 연료에 대한 중요성을 인식하여 정량적으로 평가할 수 있

는 조사체계를 마련해 왔으며(Byram, 1959), Rothemel(1972)에 의해 연료배열, 면적, 연료습도, 연료깊이, 발열량 등을 추정한 제 1세대 산불연료모델이 개발되었다. 이 연료모델은 물리적인 산불확산 실험 결과와 통계모델이 결합되어 산불행동모델로 발전하였으며, 최종적으로 산불위험지수시스템, FASITE시스템 등 다양한 산불 예측이 가능한 모델의 이론적 근거로 활용되었다(Bradshaw, et. al., 1983; Hirsch, 1996). 최근에도 임내 연료에 대한 특성 연구는 지속적으로 이

The 1st author: Sung Yong Kim, Tel. +82-2-961-2986, Fax, +82-2-961-2699, e-mail, kitaco1@korea.kr

+ Corresponding author: Hee Young Ahn, Tel. +82-2-961-2960, e-mail, ahnhy@korea.kr

루어지고 있으며, 특히 지표층 연료에 대한 물리적 실험과 더불어 수관층 연료와 산불확산 강도 및 속도 특성에 대한 연구가 수행되고 있다(Andrews, *et. al.*, 2005; Mason, *et. al.*, 2007; Saglam, *et. al.*, 2008). 국내의 경우, 2000년대 초반 국가산불위험예보시스템, 산불확산예측시스템이 개발되었다(Lee, *et. al.*, 2004; Lee, 2005). 이 두 시스템은 연료, 지형정보와 실시간으로 들어오는 기상정보가 결합되어 산불의 발생가능성과 확산방향, 속도 등을 예측하고 있다. 그러나 연료인자의 경우 우리나라 산림 실정에 맞는 정량적 수치가 반영되지 못하고, 임상, 수종 등으로 단순하게 분류한 수치가 포함되었다. 따라서 현장 조사에 기반을 둔 임상, 수종, 임분 형태별 연료의 특성을 파악할 수 있는 모델이 개발되어 국내 시스템의 정확도를 개선할 필요가 있다.

연료특성 측정항목에는 지표층 연료량, 연료의 배열 및 구조, 수분함량, 수관연료특성(수관층 연료량, 지면에서 수관층까지 거리, 수관연료밀도) 등이 있으며, 이들은 상호 복합적인 작용을 통해 산불 초기 발화, 수관화 전이, 수관화 확산 과정에 영향을 미친다. 지표층 연료는 관목, 초본, 낙엽, 낙지로 구분되며, 연료의 양과 더불어 배열 및 구조에 따라 확산속도와 화염의 특성이 달라진다(Fernandes, 2001). 수분함량은 지표층 내 연료와 수관층에 분포하는 잎과 가지에 함유된 수분의 양을 의미하는 것으로 화염이 연료에 옮겨 붙을 수 있는 시간을 결정한다(Reinhardt, *et. al.*, 2000). 수관연료 특성은 수관화로의 전이와 확산 여부를 결정짓는 평가인자로 작용하며, 수관화에서 질량 유속을 결정하는 중요한 변수이다(Van Wagner, 1977; Xanthopoulos, 1990; Mercer & Weber, 1994; Weber, *et. al.*, 1995; Alexander, 1998).

강원지방의 산림은 1,365,907ha로 우리나라 전체 산림 면적(6,347,783ha)의 21.5%에 해당하며, 강원도 전체 산림면적에서 소나무 임분(249,402ha)과 잣나무 임분(71,339ha)이 23.4%를 차지하고 있다(Korea Forest Service, 2017). 두 수종은 우리나라 대표 수종

으로 경관적 가치는 물론이고, 임산물생산(송이버섯, 잣) 등 임내 소득원이 높은 중요한 산림자원으로 평가된다. 그러나 이 두 수종이 많이 분포한다는 것은 산불학적 관점에서는 수관화에 취약하다는 것을 의미한다. 따라서 산불 방지를 위한 산림 관리가 제대로 이루어지지 않으면, 대형산불의 가능성이 높아질 수 있다.

본 연구에서는 강원지방 소나무와 잣나무를 대상으로 지표층과 수관층의 연료특성을 비교 분석하여 연료적 관점에서의 수관화 전이와 확산의 위험성을 평가해 보고자 하였다. 이를 통해 산림 관리의 필요성을 제시하고 수관화를 방지할 수 있는 숲가꾸기 기준을 마련하는데 유용한 정보로 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지 선정

연구 대상지를 선정하기 위하여 수치지형도, 임상도, 입지도를 이용해 사면향, 고도, 임분 특성 등을 고려한 후보지를 선별하였으며, 현장 조사를 통해 대상지를 최종적으로 선정하였다. 최종적으로 선정된 연구대상지는 강원도 양양군 현남면에 위치한 소나무 임분과 강원도 홍천군 화촌면에 위치한 잣나무 임분이다. 선정된 대상지의 임분 특성을 보면, 소나무 임분의 평균 임령은 43년, 잣나무 임분은 평균 41년으로 동일한 V영급이었고, 흉고직경, 수고 모두 유사하였다. 두 대상지 모두 2차 숲가꾸기 사업까지 완료된 지역으로 임분밀도는 소나무 임분 675 본/ha, 잣나무 임분 750 본/ha이었다(〈Table 1〉).

2. 자료수집 및 분석방법

1) 지표층 및 수관층 연료수집

연료수집은 산불이 자주 발생하는 봄철산불대책기간(2월 1일~5월 15일) 중 가장 건조한 3월 중순부터 4월 말 기간 내에 이루어졌다. 수종별로 5 Plot 씩 20 × 20m(0.04ha) 크기로 조사 표본구를 선정하였고, 매 목조사를 통해 임목의 흉고직경, 수고 등을 측정하여

Table 1. Descriptive statistics for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*

Components	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Pinus koraiensis</i>
Aspect	SE	SE
Elevation (m)	485	514
Stand age (years)	43 37-49	41 35-46
Stand density (tree/ha)	675 500-950	750 600-1,050
Diameter at breast height (cm)	23.6 12.6-35.3	22.8 6.1-36.7
Tree height (m)	15.6 7.4-16.7	15.3 8.9-17.2

임분을 대표할 수 있는 벌채 대상목을 선별하였다. 각 표본구 내에서 추가적으로 3개 구역에 지표층 표본구를 $2 \times 2\text{m}$ 크기로 선정하였고, 이 안에 모든 지표층 연료의 생중량을 측정하고, 각 부분별 20% 이상을 시료로 채취하였다. 수관층 연료 수집을 위해 선별된 표본목은 지표면에서 0.2m 높이로 벌채하여 Smalian식 구분구 적법에 따라 수관층을 층위별로 나누어 연료를 분류하였다. 수관층의 잎과 가지는 화학적 구성이 다르고, 연소물질로 작용 시 역할이 구분되기 때문에 따로 분류하였다. 국외 연구에서는 가지를 미영식 단위로 분류하고 있으나(Brown & Bradshaw, 1994; Mitsopoulos & Dimitrakopoulos, 2007; Kucuk, *et. al.*, 2007), 국내에서는 미터법을 주로 사용하고 있는 점을 감안하여 cm 단위로 정해진 가지 직경($\leq 0.5\text{cm}$, $0.5\sim 1$, $1\sim 2$, $2\sim 4$, $>4\text{cm}$)크기에 따라 분류하였다.

2) 분석방법

채취한 시료는 건조기를 이용해 수분을 완전 제거한 뒤 무게를 측정하였고, 이를 통해 건조 전 중량과 건조 후 중량을 비교하여 순수 연료량을 추정하였다. 연료적 관점에서 산불의 잠재 위험성을 평가하는 것은 대표적으로 수분함량(Moisture contents), 연료량(Fuel load)이 있으며, 수관층 연료의 경우에는 연료밀도(Bulk density) 항목이 있다(Mutch, *et. al.*, 1993). 수분함량의 경우 Oven drying method를 이용한 방법이 많이 활용하며(Lee & Han, 1968), 이는 수분함량이 100%일 때 임목의 건조량과 수분의 중량이 1:1임을 의

미한다(Kim, *et. al.*, 2011a).

연료량 항목에서 지표층 연료는 단위면적 당 연료량으로 분석하였고, 수관층 연료는 개체목 혹은 임분 단위의 연료량의 합을 산출하였다.

수관층 연료는 개체목별로 연료량을 산출해야만 임분에 대한 평균 연료량 추정이 가능하므로 본 연구에서는 흉고직경을 독립변수로 하는 대수회귀식($\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D$)을 이용하여 수관연료량을 추정하는 모델을 개발하였다.

기존까지는 수관이라는 용어가 구분이 모호할 뿐 만 아니라 연구의 분석방법이 서로 상이하여 추정값이 절대적이지 않고, 상대적일 수 밖에 없었다(Peter, *et. al.*, 2004). 그러나 최근 연구에서 Crown은 개체목 단위를 나타내는 용어로, Canopy는 임분 단위를 나타내는 용어로 정의되기 시작하였다(Cruz, *et. al.*, 2003). 이에 본 연구에서도 개체목 단위와 임분 단위의 용어를 명확하게 구분하여 연구를 진행하였다. 수분함량, 수관 연료량은 개체목 단위의 분석으로 결과를 도출하였고, 수관연료밀도는 개체목 단위와 임분 단위로 구분하여 산출방법을 제시하였다. 수관연료밀도를 추정하기 위해선 수관체적을 산출해야 하는데, 개체목 단위의 수관체적(Crown volume)은 독립 임목에 대한 체적을 산출해야 하므로 수관의 형태를 추정하는 방법을 이용하였고, 임분 단위 수관체적(Canopy volume)은 임분의 평균지하고와 수고의 편차를 계산하는 수관길이(Canopy length)법을 이용하였다(Cruz, *et. al.*, 2003).

개체목 단위별 수관체적 산출식은 다음과 같다.

$$RH = \frac{LCW - SCW}{SCW} \quad (1)$$

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

위 산출식에서 CV= Crown volume (m³), 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.

임분 단위의 수관체적 산출식은 다음과 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 (m³), 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 임분 단위의 수관연료밀도는 다음과 같은 계산 방법에 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.

능동형 수관화가 진행되면 잎 수분함량이 100% 이상인 임분에서 1/4인치 이하 가지가 80% 이상 연소되고, 1cm 이상 가지는 13.6%만 연소된다는 연구 결과를 참고하여 수관층에서 분류된 잎과 >1cm 가지를 수관화 확산 시 연소가능한 연료(Available fuel)라 가정하였다(Call & Albini, 1997; Kim, *et. al.*, 2011b).

II. 결과 및 고찰

1. 지표층 연료특성 비교

소나무와 잣나무의 지표층 내 수분함량을 분석한 결과, 소나무 임분(낙엽 19.0%, 낙지 17.6%, 지표층 평균 18.7%)보다 잣나무 임분(낙엽 23.6%, 낙지 20.9%, 지표층 평균 22.7%)이 약 3~4% 가량 높은 것으로 분석되었다. 원인은 잣나무의 특성상 타 침엽수종에 비해 수관 율폐도가 빠르게 높아지면서 임내에 투과되는 광량이 낮아 수분증발에 영향을 미쳤을 가능성이 있고(Lee, *et. al.*, 2009), 산불의 초기 발화에 연소물질 수분함량이 절대적 영향력을 미침을 감안할 때 소나무 임분에서 산불 발화 확률이 높을 수 있음을 보여준다(Kwon, 2014). 지표층 연료량은 소나무 임분(낙엽 1,262 kg/m², 낙지 0,319 kg/m²)이 잣나무 임분(낙엽 1,351 kg/m², 낙지 0.453 kg/m²)에 비해 약 0.223 kg/m² 가량 연료량이 적었다(〈Table 2〉). 이는 소나무의 경우 2엽송의 특성을 가지고 있는데 반해 잣나무는 5엽송이고, 잎이 소나무에 비해 굵은 가죽질 형태를 보이기 때문에 나타난 현상으로 사료된다. 수분함량과 연료량 분석 결과를 종합해 보면, 소나무 임분이 잣나무 임분에 비해 산불 초기 발화 위험성은 다소 높지만, 산불 초기

Table 2. Comparison of surface fuel characteristics for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*

Components	<i>Pinus densiflora</i> (n= 15)			<i>Pinus koraiensis</i> (n= 15)		
	Dead leaves	Snags	Mean	Dead leaves	Snags	Mean
Moisture Contents (%)	19,0 (±1,4)	17,6 (±1,7)	18,7 (±1,5)	23,6 (±2,8)	20,9 (±2,5)	22,7 (±2,7)
Surface fuel load (kg/m ²)	1,262 (±0,215)	0,319 (±0,053)	1,581 (±0,134)	1,351 (±0,211)	0,453 (±0,098)	1,804 (±0,155)

Note: Standard deviation of the mean in parenthesis.

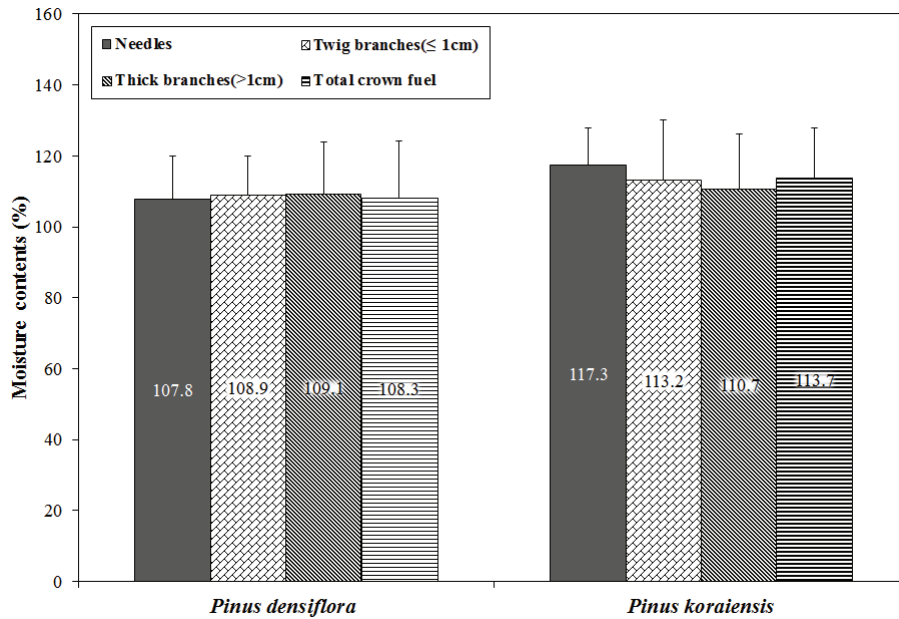


Figure 1. Crown fuel moisture contents of *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis* (Bars represent ± Standard Deviation of the means)

단계를 지나게 되면 잣나무 임분이 단면적 당 연료량이 많이 분포하기 때문에 높은 화염 강도로 확산될 가능성이 있음을 시사한다.

2. 수관층(Crown) 수분함량 비교

소나무와 잣나무의 수관층 부위별 수분함량을 비교한 결과는 <Figure 1>과 같다. 소나무 잎의 수분함량은 107.8%이었으며, 잣나무는 117.3% 이었다. 소나무의 수관층 평균 수분함량은 108.3%, 잣나무는 113.7%로 약 5.4% 잣나무가 높았다. 수분함량 산출에 사용된 Oven dry Method의 결과는 수분함량이 높은 수치일수록 백분율 차이가 크더라도 실제 수분함량의 차이는 적은 특징을 갖기 때문에 실제적인 수분함량의 차이는 크지 않다. 또한 기존 연구결과를 보면, 팔공산 일대 소나무의 수분함량이 113.2%를 제시한 바 있으므로 수종 간 수분함량의 차이보다는 당일 기상조건, 지형적 특색, 실험 방법의 미세한 차이로 인해 발생한 현상으로 보인다(Koo, *et. al.*, 2009; Kim, *et. al.*, 2011a; Jang, *et. al.*, 2011).

3. 각 부위별 수관층(Crown) 연료량 비율 비교

소나무와 잣나무의 각 부위별 수관층 연료량 비율

을 분석한 결과, 연소가능한 연료(잎과 1cm 이하의 가지)의 비율은 소나무 55.8%와 잣나무 55.6%가 유사하였다. 하지만 잎의 경우 잣나무가 34.4%로 소나무 25.7%와 큰 차이가 있었다(<Figure 2>). 기존 연구 결과에서는 그리스 Aleppo pine의 연소가능한 연료 비율을 34.6%로 제시하였고, 미국과 캐나다 주요 침엽수종 또한 40%를 넘지 않는다고 보고하였다(Brown,

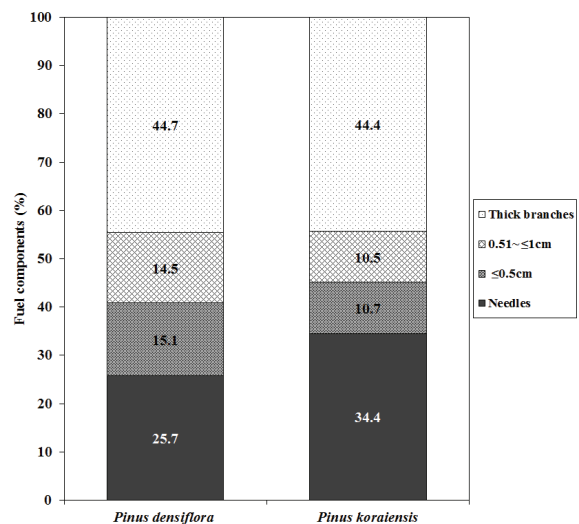


Figure 2. Crown fuel load distribution by each fuel component of *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*

1978; Cruz, *et. al.*, 2003). 이러한 연구 결과의 원인은 국외 자료에 비해 본 연구 대상 표본목이 작은 직경급을 형성하기 때문에 비대생장 보다는 광합성 경쟁에 의한 수고생장에 주력하면서 잎과 잔가지가 많이 발생했을 가능성이 있으므로 국외 표본목에 비해 상대적으로 연소가능한 연료의 양이 높았을 가능성이 있다. 추후 다양한 연구 수행을 통해 좀 더 명확한 원인 규명이 필요하다.

4. 개체목 단위 수관연료밀도(Crown bulk density) 비교

흉고직경 증가함에 따른 개체목 단위의 총 수관연료 밀도(Total crown bulk density)를 분석한 결과, 흉고

직경 10~20cm 크기에서 소나무의 수관연료밀도가 잣나무에 비해 높았으나, 흉고직경 20cm 이상을 기점으로 잣나무의 수관연료밀도의 증가폭이 커지는 것으로 분석되었다. 반면 연소가능한 수관연료밀도(Available crown bulk density) 분석 결과에서는 잣나무가 소나무에 비해 전체적으로 높았으며, 두 수종 모두 흉고직경이 증가함에 따라 지속적으로 높아지다가 흉고직경 20~25cm 기점으로 연료밀도가 점차 감소하는 현상을 보였다(〈Figure 3〉). 이는 앞서 각 부위별 수관층 연료량 비율 비교에서 언급한 바와 같이 흉고직경이 증가하면서 연소가능한 연료의 비율이 줄어든다는 연구결과와 유사하다.

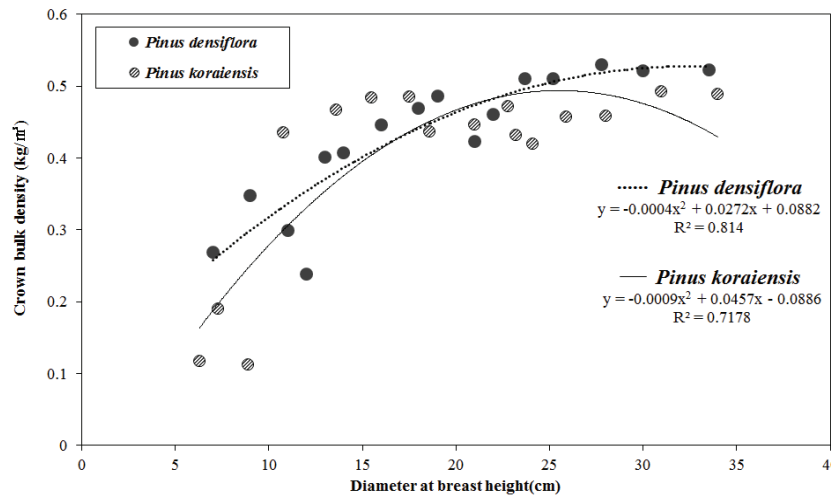


Figure 3. Graphical comparison of total crown bulk density for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*

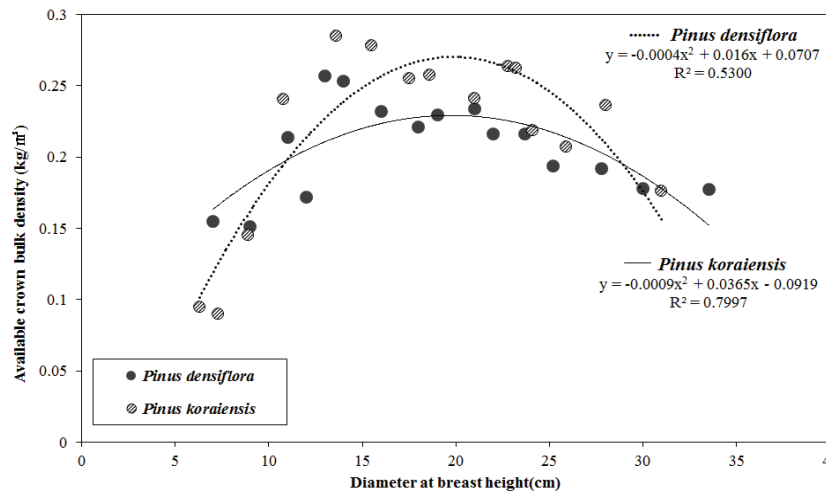


Figure 4. Graphical comparison of available crown bulk density for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*

Table 3. Allometric equations of crown fuel load on diameter at breast height for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*

Fuel category	<i>Pinus densiflora</i>					<i>Pinus koraiensis</i>				
	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	16	-3.479 (0.279)	2.235 (0.097)	0.972	0.168 (<0.0001)	16	-5.108 (0.509)	2.927 (0.176)	0.948	0.352 (<0.0001)
Available crown	16	-2.445 (0.281)	1.642 (0.097)	0.950	0.169 (<0.0001)	16	-4.670 (0.518)	2.582 (0.179)	0.932	0.358 (<0.0001)
Needles	16	-3.608 (0.341)	1.776 (0.118)	0.937	0.206 (<0.0001)	16	-5.182 (0.497)	2.600 (0.172)	0.938	0.344 (<0.0001)
Branches ≤ 0.5 cm	16	-3.422 (0.441)	1.566 (0.153)	0.882	0.266 (<0.0001)	16	-6.904 (0.725)	2.765 (0.251)	0.889	0.502 (<0.0001)
Branches 0.51~1cm	16	-3.446 (0.338)	1.518 (0.117)	0.923	0.204 (<0.0001)	16	-5.742 (0.455)	2.344 (0.157)	0.936	0.314 (<0.0001)
Branches 1~2cm	16	-3.518 (0.498)	1.631 (0.173)	0.864	0.301 (<0.0001)	16	-5.163 (0.650)	2.265 (0.225)	0.870	0.449 (<0.0001)
Branches 2~4cm	15	-9.538 (1.077)	3.692 (0.367)	0.877	0.538 (<0.0001)	13	-7.699 (0.910)	3.291 (0.297)	0.910	0.341 (<0.0001)
Branches >4cm	7	-11.296 (1.736)	4.128 (0.539)	0.892	0.272 (<0.0001)	12	-18.246 (2.355)	6.274 (0.757)	0.860	0.694 (<0.0001)

Note: β_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= $[\sum(s.s.e.)/(n-2)]^{1/2}$.

5. 수관층 부위별 연료량 추정식 개발

소나무와 잣나무의 연료량 추정식은 표준지조사에서 정확한 측정이 가능한 항목인 흉고직경을 변수로 하여 개발하였다. 이에 따른 모수 추정 결과를 보면, 흉고직경에 대한 모수 β_1 이 모두 양(+)의 값을 나타내므로 흉고직경 증가에 따라 각 부위별 연료량도 점차 증가할 것으로 판단되었다. 연료량 추정식 모수들은 모든 부위

에서 유의성이 인정되었다($P<0.05$). 조정결정계수 (R^2_{adj})는 모든 부위에서 85% 이상의 높은 설명력을 보였으며, 특히 총 수관연료량, 연소가능한 연료량, 잎 연료량의 설명력은 93% 이상이었다. 4cm보다 굵은 가지는 소나무에서 7본, 잣나무에서 12본만이 관측되었지만, 추정식에 대한 설명력이 85% 이상으로 높게 나타났다(\langle Table 3 \rangle). 연료량 추정식을 이용하여 소나무와 잣

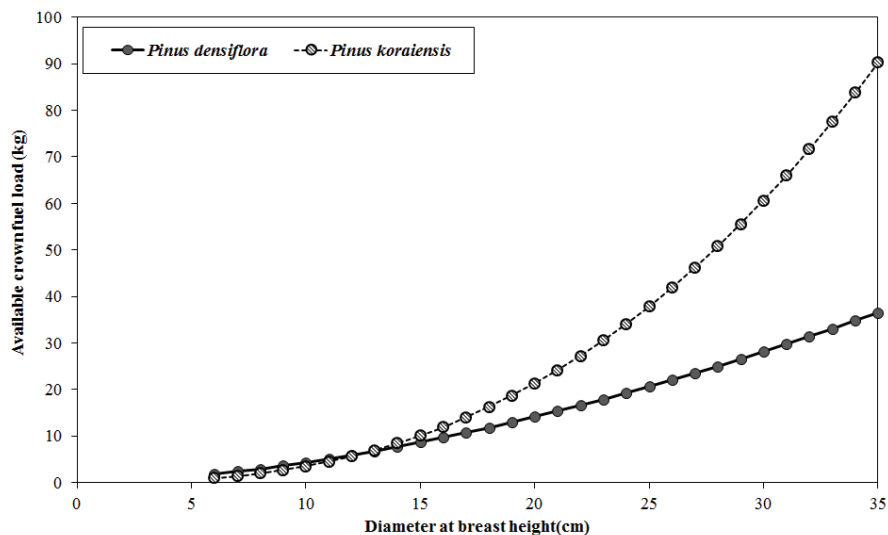


Figure 5. Graphical comparison of available crown fuel load for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*

Table 4. Comparison of canopy fuel characteristics for *Pinus densiflora* and *Pinus koraiensis*

Species	CV (m ³ /ha)	TCFL (ton/ha)	ACFL (ton/ha)	TCBD (kg/m ³)	ACBD (kg/m ³)
<i>Pinus densiflora</i>	61,254	23.83	7.15	0.389	0.196
<i>Pinus koraiensis</i>	57,623	34.98	10.49	0.607	0.300

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.

나무의 연소가능한 수관연료량을 비교한 결과, 흉고직경 15cm 이하 까지는 연료량 증가폭이 유사하였으나, 이후부터 잣나무 연료량의 증가폭이 상대적으로 커지는 것으로 나타났다. 최종적으로 흉고직경 35cm 임분에서 잣나무가 소나무에 비해 연소가능한 수관연료량이 약 54kg 많은 것으로 분석되었다(Figure 4).

6. 임분단위 수관연료특성 비교

연료량 추정식과 표준지조사 자료를 이용하여 소나무와 잣나무의 수관연료특성을 임분 단위로 확장하여 비교하였다(Table 4). 그 결과, 임분 단위 수관체적은 소나무 임분이 ha 당 평균 61,254m³인 반면 잣나무 임분은 평균 57,623m³이었다. 총 수관연료량(Total canopy fuel load)은 소나무 임분 23.83 ton/ha, 잣나무 임분 34.98 ton/ha로 나타났으며, 연소가능한 수관연료량(Available canopy fuel load)은 소나무 임분 7.15 ton/ha, 잣나무 임분 10.49 ton/ha으로 나타났다. 잣나무 임분은 수관체적 공간이 협소함에도 불구하고, 그 안에 포함된 연료량이 많아 소나무 임분에 비해 총 수관연료밀도는 약 1.56배, 연소가능한 수관연료밀도는 약 1.68배 높았다. 수관연료밀도가 높을수록 수관화 확산 강도가 급격히 증가한다는 기존 연구결과로 유추해 볼 때(Harrod, *et. al.*, 2009), 산불이 수관화로 확산되면, 잣나무 임분이 소나무 임분에 비해 능동형 수관화로 발전될 가능성이 높을 것으로 판단되었다.

III. 결론

본 연구에서는 강원지방 소나무와 잣나무를 대상으로 지표층 및 수관층 연료의 특성을 파악하여 연료적 관점에서의 수관화 전이 및 확산 위험성을 비교 분석하

였다. 이를 위해 각 수종별로 임분특성이 유사한 대상을 선정하여 지표층 연료를 15개씩 채취하여 분석에 이용하였으며, 표본목을 각 수종별 16본씩 별채하여 수관층 연료특성을 파악하였다. 본 연구결과에 의하면, 지표층 연료량은 잣나무가 소나무에 비해 많았으며, 지표층 수분함량은 잣나무가 22.7%로 소나무 18.7%에 비해 높았다. 수관층 수분함량은 두 수종 간 유사하였으나, 차이는 미미하였다. 수관층 잎의 비율은 잣나무(34.4%)가 소나무(25.7%)에 비해 많이 분포하였으나, 산불 발생 시 연소가능한 연료는 소나무 55.8%, 잣나무 55.6%로 수관화 발생 시 연소되는 연료의 양은 유사할 것으로 판단되었다. 본 연구에서 제시된 수관층 연료 추정에 대한 조정결정계수(R²adj)는 모든 수관 부위에서 0.850 이상이었다. 임분 단위 수관연료특성에서는 잣나무 임분의 수관체적 공간이 소나무 임분보다 협소하였지만, 그 안에 포함된 연료량이 많아 총 수관연료 밀도는 약 1.56배, 연소가능한 수관연료밀도는 약 1.68배 높았다.

본 연구의 결과를 종합해 보면, 지표층 연료특성에 영향을 받는 수관화 전이 위험성은 소나무가 잣나무에 비해 높을 것으로 판단되었고, 이와 반대로 수관층 연료특성에 영향을 받는 수관화 확산 위험성은 잣나무가 좀 더 위험할 것으로 추측되었다. 본 연구의 결과는 향후 침엽수 임분에 대한 수관화 행동 예측과 위험성을 평가하고, 산불확산 방지를 위한 숲가꾸기 기준 및 대상을 마련하는데 유용한 정보로 활용될 것이다.

References

- Alexander, M. E. 1998. Crown Fire Thresholds in Exotic Pine Plantation of Australasia. Ph. D. Dissertation. Australian

- National University, Canberra.
- Andrews, P. L., C. P. Bevins, and R. C. Seli. 2005. BehavePlus Fire Modeling System Version 3.0 User's Guide. *USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report*. INT-106.
- Bradshaw, L. S., J. E. Deeming, R. E. Burgan, and J. D. Cohen. 1983. The 1978 National Fire Danger Rating System: A Technical Documentation. *USDA Forest Service General Technical Report*. INT-169. 44.
- Brown, J. K. 1978. Weight and Density of Crown of Rocky Mountain Conifers. *USDA Forest Service Research Paper*. 56.
- Brown, J. K. and L. S. Bradshaw. 1994. Comparisons of Particulate Emissions and Smoke Impacts from Presettlement, Full Suppression and Prescribed Natural Fire Periods in the Selway-bitterroot Wilderness. *International Journal of Wildland Fire*. 4(3): 143-155.
- Byram, G. M. 1959. Combustion of Forest Fuels. In *Forest Fire: Control and Use*. New York: McGraw-Hill. 61-89.
- Call, P. T. and F. A. Albin. 1997. Aerial and Surface Fuel Consumption in Crown Fires. *International Journal of Wildland Fire*. 7(3): 259-264.
- 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: 39-150.
- Fernandes, P. M. 2001. Fire Spread Prediction in Shrub Fuel in Portugal. *Forest Ecology and Management* 144: 67-74.
- Harrod, R. J., D. W. Peterson., N. A., Povak, and E. K. Dodson. 2009. Thinning an Prescribed Fire Effects on Overstory Tree and Snag Structure in Dry Coniferous Forests of the Interior Pacific Northwest. *Forest Ecology and Management*. 258: 712-721.
- Hirsch, K. G. 1996. Canadian Forest Fire Behavior Prediction(FBP) System User Guide. Natural Research Canada. *Canadian Forest Service Northwest Region Northern Forestry Centre Edmonton*. AB. Special Report. 7.
- Jang, Mi Na, Byung Doo Lee, Youn Ok Seo, Sung Yong Kim, and Young Jin Lee. 2011. Crown Fuel Characteristics and Fuel Load Estimation of *Pinus densiflora* S. et Z. in Bonghwa, Gyeongbuk. *Journal of Korean Forest Society*. 100(3): 402-407.
- Kim, Sung Yong, Byung Doo Lee, Youn Ok Seo, and Young Jin Lee. 2011a. Crown Fuel Characteristics and Allometric Equations of *Pinus densiflora* Stands in Youngju Region. *Journal of Korean Forest Society*. 100(2): 266-272.
- Kim, Sung Yong, Byung Doo Lee, Youn Ok Seo, Mi Na Jang, and Young Jin Lee. 2011b. Effect 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.
- Koo, Kyo Sang, Byung Doo Lee, Myung Soo Won, and Myung Bo Lee. 2010. Crown Fuel Characteristics of Japanese Red Pine (*Pinus densiflora*) in Mt. Palgong, Daegu. *Journal of Korean Forest Society*. 100(1): 52-56.
- Korea Forest Service. 2017. <http://www.forest.go.kr>.
- Kucuk, O., B. Saglam, and E. Bilgili. 2007. Canopy Fuel Characteristics and Fuel Load in Young Black Pine Trees. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 21(2): 235-240.
- Kwon, Chun Geun. 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, Byung Doo, Myung Soo Won, Sun Young Kim, Suk Hee Youn, and Myung Bo Lee. 2010. Crown Fuel Characteristics of Japanese Red Pine(*Pinus densiflora*) in Mt. Palgong, Daegu. *Journal of Korean Forest Society*. 99(1): 52-56.
- Lee, Byung Doo. 2005. Analyzing Spread Rate of Samcheok Forest Fire Broken in 2000 Using GIS. Ph.D. Dissertation. Seoul National University.
- Lee, Pil Woo and Kwan Suk Han. 1968. The Moisture Distribution in Standing Pitch Pine Trees. *Journal of Korean Forest Society*. 7: 45-48.
- Lee, Si Young, Sang Hyun Ahn, Myung Soo Won, Myung Bo Lee, Tae Kyu Lim, and Young Chul Shin. 2004. Classification of Forest Fire Occurrence Risk Regions Using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 7(2): 37-46.
- Lee, Young Jin, Youn Ok Seo, Sang Moon Park, Jung Kee Pyo,

- Rae Hyun Kim, Young Mo Son, Kyung Hak Lee, and Hyung Ho Kim. 2009. Estimation of Biomass for 27 Years Old Korea Pine(*Pinus Koraiensis*) Plantation in Gangneung, Gangwon-Province. *Journal of Agriculture and Life Science*. 43(1): 1-8.
- Mason, G. J., T. T. Baker., D. S. Cram., J. C. Boren., A. G. Femald, and D. M. Vanleeuwen. 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*. 251: 195-204.
- Mercer, G. N. and R. O. Weber. 1994. Plumes above Line Fires in a Crows Wind. *International Journal of Wildland Fire*. 4: 201-207.
- 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: 642-647.
- Mutch, R. W., S. F. Aemo, J. K Brown, C. E. Carlson, R. D. Ottmar, and J. L. Peterson. 1993. Forest Health in the Bule Mountains: A Management Strategy for Fire-adapted Ecosystems. *USDA Forest Service Pacific Northwest Research Station General Technical Report PNW-GTR-310*. 14.
- Peter, Z. F., E. C. Joseph, E. C. Allison, M. M. Margaret, and W. W. Covington. 2004. Changes in Canopy Fuels and Potential Fire Behavior. *Ecological Modelling*. 175: 231-248.
- Reinhardt, E. D., R. E. Keane, J. H. Scott, and J. K. Brown. 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
- Rothermel, R. C. 1972. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. *USDA Forest Service Research Paper*. INT-115. Ogden, UT.
- Saglam, B., O. Kukuk, E. Bilgili, D. Durmaz, and I. Nasal. 2008. Estimating Fuel Biomass of Some Shrub Species(Maquis) in Turkey. *Turkey Journal of Agriculture and Forestry*. 32: 349-356.
- Van Wagner, C. E. 1977. Conditions of the Start and Spread of Crown Fires. *Canadian Journal of Forest Research*. 7: 23-34.
- Weber, R. O., A. M. Gill, P. A. Lyons, P. R. Moore, R. A. Bradstock, and G. N. Mercer. 1995. Modelling Wildland Fire Temperatures. *CALMScience Supplement*. 4: 23-26.
- Xanthopoulos, G. 1990. Development of a Wildland Crown Fire Initiation Model. Ph.D. Dissertation. University of Montana, Nissoula.

Korean References Translated from the English

- 구교상, 이병두, 원명수, 이명보. 2010. 대구 팔공산 지역 소나무 수관층 연료특성. *한국임학회지*. 99(1): 52-56.
- 권춘근. 2014. 산불에 영향을 미치는 산림지표연료 습도변화 추정에 관한 연구. 강원도 영동 지역을 중심으로 강원대학교 방재전문대학원 박사학위논문.
- 김성용, 이병두, 서연옥, 이영진. 2011a. 영주지역 소나무림의 수관연료특성 및 수관연료량 추정. *한국임학회지*. 100(2): 266-272.
- 김성용, 이병두, 서연옥, 장미나, 이영진. 2011b. 숲가꾸기 사업이 소나무림의 수관연료특성에 미치는 영향. *한국임학회지*. 100(3): 359-366.
- 산림청. 2017. <http://www.forest.go.kr>.
- 이병두. 2005. GIS 응용에 의한 2000년 삼척산불의 확산속도 분석. 서울대학교 대학원. 박사학위논문.
- 이병두, 원명수, 김선영, 윤석희, 이명보. 2010. 소나무 수관 부위별 연료량 추정식 개발 및 수관연료밀도 분석. *한국임학회지*. 99(3): 391-396.
- 이시영, 안상현, 원명수, 이명보, 임태규, 신영철. 2004. GIS를 이용한 산불발생위험지역 구분. *한국지리정보학회지*. 7(2): 37-46.
- 이영진, 서연옥, 박상문, 표정기, 김래현, 손영모, 이경학, 김형호. 2009. 강릉지방 27년생 잣나무조림지의 바이오매스에 관한 연구. *농업생명과학연구*. 43(1): 1-8.
- 이필우, 한관석. 1968. 리기다소나무 임목의 수분분포에 관하여. *한국임학회지*. 7: 45-49.
- 장미나, 이병두, 서연옥, 김성용, 이영진. 2011. 경북 봉화 지역 소나무림에 대한 수관연료 특성과 연료량 추정. *한국임학회지*. 100(3): 402-407.

Received: Feb. 24, 2017 / Revised: Mar. 29, 2017 / Accepted: Apr. 7, 2017

강원지방 소나무와 잣나무의 산불 연료특성 비교

국문초록 본 연구에서는 강원지방에 분포하는 소나무와 잣나무를 대상으로 지표층 및 수관층 연료의 특성을 파악하고 수관화 전이 및 확산 위험성을 비교·분석 하였다. 지표층 연료를 수종별로 채취하였으며, 수종별 16개의 표본목을 별채하여 수관층 연료특성을 분석하였다. 본 연구결과에 의하면, 지표층 수분함량은 잣나무가 높았으나, 수관층 수분함량은 두 수종 간 유사하게 나타났다. 수관층 잎의 비율은 잣나무(34.4%)가 소나무(25.7%)에 비해 많이 분포하였고, 연소 가능한 연료는 소나무 55.8%, 잣나무 55.6%의 비율로 유사하였다. 수관층 연료 추정식의 조정결정계수(R^2_{adj})는 모든 수관 부위에서 0.850 이상으로 나타났다. 임분 단위 수관연료특성에서는 잣나무의 수관체적 공간이 소나무보다 적었지만, 그 안에 포함된 연료량이 많아 총 수관연료밀도는 약 1.56배, 연소가능한 수관연료밀도는 약 1.68배 높은 결과가 나타났다.

주제어 : 산불, 소나무, 잣나무, 연료

Profiles **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 researcher. His current research interest includes forest fire prediction and forest fire fuel model and fire danger assessment(kitaco1@korea.kr).

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(youngjinlee98@hanmail.net).

Mi Na Jang : She received her master's Agriculture from Kongju National University in february 2012 with her master's paper titled “Fuel Characteristics of the Different Forest Layers and Assessment of Potential Crown Fire Hazard”. She is currently working for Korea Forest Fire Management Service Association as a researcher. Her current research interest includes forest fire hazard assessment and fuel model techniques(jmn1607@naver.com).

Chun Geun Kwon : He received his Ph.D. in engineering from Kangwon National University in august 2014 with his Ph.D. paper titled “A Study on the Estimations of Forest Surface Fuel Moisture Content Change on Affecting Forest Fires- Focus on the Gangwondo Yeongdong area” He is Currently working for Forest Disaster Management Division of the National Institute of Forest Science as a junior researcher. He has conducted various research projects on forest fire and building on it, published many academic papers. His current research interest includes forest fire prediction and fuel moisture contents, and suppression techniques(chungeun@korea.kr).

Byung Doo Lee : He received his Ph.D. in agriculture from 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. He has conducted various research projects on forest fire and building on it, published many academic papers. His current research interest includes forest fire prediction and suppression techniques and forest danger assessment(byungdoo@korea.kr).

He Young Ahn : She received her master's degree in arts from Korea University in Feb. 2016 with her master's paper titled “Location of Royal Tombs of the Joseon Dynasty and its Ecological Interpretation”. She is currently working for Forest Disaster Management Division of the National Institute of Forest Science as a researcher. Her current research interest includes development of forest fire suppression techniques. In particular, she is now focusing on upgrading fire occurrence location map, fire danger map, and fire vulnerability map through GIS analysis on fire data(ahnhy@korea.kr).