

Allometric Equations for Crown Fuel Load of *Pinus rigida* Stands in South Korea

Sung Yong Kim^{1#}, Chun Geun Kwon¹, He Young Ahn¹, Byung Doo Lee¹, Mi Na Jang²⁺

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

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

Abstract

The objective of this study was to develop an allometric equation to estimate crown fuel load of *Pinus rigida* in South Korea. Twenty representative trees were cut down for samples, and crown fuel were classified according to its component (needle or branch), life (alive or dead), and diameter (<0.5cm, 0.5-1cm, 1-2cm, 2-4cm, >4cm). A fuel load allometric equation was developed with diameter at breast height (DBH) and tree height as independent variables. The result of this study showed that the > 4cm branches recorded the largest fuel load (9.521kg), followed by needles fuel (8.852kg), live branches with size ranging from 2 to 4cm (7.226kg), 1-2cm (3.920kg), <0.5cm (2.890kg), 0.5-1cm (2.711kg) and dead branches (1.387kg) as the lowest. On average, the adjusted coefficient of determination was high ($R^2_{adj} = 0.9870-0.8596$) and standard error of estimate was high (S.E.E. = 0.1670-0.6859) in allometric equation, $\ln W_t = \beta_0 + \beta_1 \ln D$. However, the differences in R^2_{adj} and S.E.E. between the equations were not significant.

Key words: forest fire, *Pinus rigida*, crown fuel, allometric equations

1. 서론

침엽수림에서 산불이 수관화(Crown fire)로 확산되면, 테르핀 성분 등 정유물질이 연소되면서 화염의 강도는 강해지고, 확산속도는 빨라져 대형산불의 원인이 된다(Kwon, 2008). 따라서 대형산불을 예방하기 위해서는 침엽수림의 수관화의 유발 요인을 명확하게 규명할 필요가 있다. 특히, 수관화에 직접적으로 연소작용을 일으키는 수관층 연료에 대한 체계적인 자료구축과 더불어 다양한 분석이 요구된다.

미국과 캐나다의 경우 8개 주요 침엽수종의 임목을 별채하여 임목의 특성별로 수관층의 연료량, 수직적 배열, 밀도 등을 분석한 바 있으며, 많은 비용과 시간을 투자하여 임목의 탄소흡수량 산정 연구를 위한 수관층 연료 자료를 수집하였다(Cruz, et al., 2003). 이러한 자료들은 현재 미국 국가산림자원조사(Forest Inventory and Analysis) 자료와 연계하여 산림 내 수관 연료량을 추정하는 연구와 더불어 LiDAR 기술을 접목한 산불피해방지 산림 관리기술을 개발하는 데 활용되고 있다(Kramer, et al., 2014). 유럽에서도 2003년 그리스

The 1st author: Sung Yong Kim, +82-2-961-2686, e-mail, kitaco1@korea.kr

+ Corresponding author: Mi Na Jang, +82-41-822-9415, e-mail, jmn1607@naver.com

대형산불을 계기로 고온 건조한 지중해 연안에 자생하는 침엽수림을 대상으로 수관 연료특성을 파악하기 위한 연구를 진행하였으며, 유령목과 대경목까지 수관연료량을 정확하게 추정할 수 있는 수식을 개발하여 산불 확산 메커니즘 추정 체계를 마련하였다(Mitsopoulos & Dimitrakopoulos, 2007).

수관연료특성 연구는 수관연료량(Crown Fuel Load), 수관연료밀도(Crown bulk density), 수관층 수분함량(Crown moisture content), 지표면에서 수관층까지의 높이(Crown base height)를 추정하는 연구가 주로 이루어지고 있으며(Sando & Wick, 1972; Reinhardt, *et. al.*, 2000; Mitsopoulos & Dimitrakopoulos, 2007; Kucuk, *et. al.*, 2008), 수관층을 세밀하게(Needles, <1/4 inch 가지, 1/4 inch-1 inch 가지, 1 inch-3 inch 가지, >3 inch 가지) 분류하기 위하여 주로 표본목의 직접 별채를 통해 연구를 수행하고 있다(Mitsopoulos & Dimitrakopoulos, 2007; Kucuk, *et. al.*, 2007).

국내에서는 2000년대 이후 흉고직경과 수고를 이용해 산림 내 분포하고 있는 바이오매스를 추정하는 연구를 수행하였으며, 이를 통해 주요 13개 수종에 대한 추정식을 개발하였다. 특히 소나무, 잣나무, 리기다소나무, 곰솔, 낙엽송 등 우리나라 주요 침엽수종의 연료량 추정모형을 개발하는 성과를 보였다(Kim, 2015). 그러나 수관층 바이오매스 분석에서 잎과 가지를 단순하게 분류한 연구의 한계점으로 인하여 수관화 발생 시 연소 가능한 연료(잎-1cm 이하 가지)의 특성을 파악하는 데 어려움이 있었다. 이에 2009년부터 산불학 관점에서 수관층의 잎과 가지를 세밀하게 분류하여 연료의 특성을 파악할 수 있는 연구를 수행하게 되었다(Koo, *et. al.*, 2009; Lee, *et. al.*, 2010). 대구 팔공산 지역을 시작으로 경북 영주, 봉화, 충남 서산, 강원도 양양지역에 대단위로 분포하고 있는 소나무를 대상으로 수관층 연료특성을 분석하였으며(Kim, *et. al.*, 2011; Jang, *et. al.*, 2011; Kim, *et. al.*, 2012), 이러한 결과물은 2005년에 개발하여 운영되고 있는 산불확산예측시스템 내 연료인자 알고리즘을 개선하는 데 활용되었다

(Kim, 2015). 그러나 소나무 수종에 국한하여 연구가 진행되다 보니 잣나무, 리기다소나무 등 우리나라에 고르게 분포하고 있는 주요 침엽수종에 대한 수관연료특성을 파악하는 데 한계가 있는 것이 현실이다.

리기다소나무는 우리나라 치산녹화기에 약 48만 ha 이상 식재된 3대 조림수종으로서, 현재 우리나라 침엽수림 면적의 약 11%(259,355 ha)를 차지하고 있다(Korea Forest Service, 2017). 리기다소나무는 잎이 3개씩 모여나는 3엽송의 특징을 가지고 있으며, 척박한 환경에서 잘 견디는 수종이다(National Institute of Forest Science, 2007). 그러나 치산녹화 이후 적절한 산림 관리를 이행하지 않아 임령에 비해 높은 임분밀도를 보이고 있다. 이에 따라 산림 내 낙엽 퇴적량이 증가하여 산불 발생 시 수관화로 확산될 가능성이 점차 높아지고 있다. 실제로 2002년에 발생한 청양, 예산 산불은 대부분 리기다소나무림에서 수관화로 확산되었으며, 전체 3,095 ha의 산림을 태웠다(Lee, *et. al.*, 2003). 이러한 대형산불은 발생시기와 기상조건에 의해 유사한 형태로 발생할 가능성이 크기 때문에 산림 내 연료의 특성을 파악하여 산불의 위험성을 연료적 관점에서 평가할 필요가 있으며, 이를 토대로 산불로부터 피해를 줄일 수 있는 산림관리 기술의 정립이 절실하다.

본 연구에서는 충청남도 예산군 지역에 분포하는 리기다소나무림을 대상으로 수관화 확산 예측모델의 개선과 더불어 실효적인 산불피해 방지 산림관리 기술 정립을 위한 기초 자료를 마련하기 위해 수관층 연료의 특성을 파악하고, 수관층 연료량 추정식을 개발하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상지 선정

연구 대상지는 충남 예산군 예산읍 주교리(N 36°40'10.58", E 126°50'16.33)와 대흥면 갈신리(N 36°39'55.51", E 126°51'53.97)일대 국유림 리기다소나무 조림지로 선정하였다(〈Table 1〉). 리기다소나무림의

임분밀도는 평균 1,250 tree/ha이었으며, 임령은 44년생 V영급 임분이었다. 평균 흉고직경은 18.6cm, 평균 수고는 12.2m 이었으며, 평균 지하고 5.3m, 평균 수관길이는 6.2m이었다. 숲가꾸기가 이루어지지 않아 전체적으로 임분밀도가 다소 높은 특징을 보였으며, 흉고직경과 수고의 성장 관계를 고려할 때 우리나라에 전형적으로 분포하는 리기다소나무의 임분 특성을 보이고 있었다.

2. 자료수집 및 분석방법

1) 지표층 및 수관층 연료수집

별채할 표본목을 선별하기 위하여 20m × 20m 크기로 표준지를 선정하여 조사하였다. 조사항목은 평균임령, 흉고직경, 수고, 지하고 등이며, 흉고직경은 조사지 내 6cm 이상의 개체목을 모두 조사하였고, 수고와 지하고는 Vertex V(Suunto) 측고기를 이용하여 10cm 단위로 측정하였다. 표본목 별채는 3월 20일부터 4월 30일까지 진행하였으며, 총 20분의 임목을 별채하였다. 지표면에서 0.2 m 높이를 기준으로 임목을 별채한 후, Smalian식 구분구적법을 적용하여 수관층을 1m 높이별로 구분하였다. 수관층에서 잎과 가지는 화학적 구성이 상이하고, 산불에 있어 연료의 역할이 다름을 감안하여 따로 분류하였고, 가지는 정해진 직경에 따라 분류하였다. 국외의 경우 가지를 <1/4 inch, 1/4 inch ~1 inch, 1 inch~3 inch, >3 inch 로 분류하고 있으나(Brown & Bradshaw, 1994; Mitsopoulos & Dimitrakopoulos, 2007; Kucuk, *et. al.*, 2007), 국내의 경우 미영식 (Inch) 단위보다는 m 단위를 많이 활용하므로 실정에 맞게 분류기준을 재정립하여 사용하였다(Needles, <0.5 cm, 0.5-1 cm, 1-2 cm, 2-4 cm, >4 cm). 국외 문헌을 보면 잎과 1/4 inch 이하 가지는

수관화 발생 시 80% 이상 연소된다고 하였다(Sando & Wick, 1972). 이에 본 연구에서도 유사한 방법을 적용하여 잎과 1cm 이하 가지를 수관화 발생 시 연소가능한 연료로 가정하여 연구를 진행하였다. 부위별로 분류한 잎, 가지에 대하여 모두 생중량을 측정하였으며, 일부 시료를 채취하여 항량에 도달하도록 105°C에서 최소 120시간 건조한 후 연료량을 재 측정하였다.

3. 분석방법

연료를 이용하여 산불관점의 잠재 위험성을 평가하는 것은 대표적으로 수관층 수분함량(Moisture contents)과 연료량(Fuel load) 등이다(Mutch, *et. al.*, 1993). 수분함량의 경우 Oven drying method를 이용하여 추정하였으며(Lee & Han, 1968), 연료의 분포는 잎과 부위별 가지를 개체목 당 평균 연료량과 연료의 비율로 표현하였다.

각 수관층 부위별 연료량 추정식은 임목의 흉고직경 (D)과 총 수고 (H)를 독립변수로 하고 연료량 (Wt)을 종속변수로 하는 세 가지 대수회귀식을 이용하였으며 ($\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D$, $\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D^2 H$, $\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \beta_2 \ln H$), 수관층 전체 연료량, 연소가능한 연료량, 잎 연료량, 굵기별 가지연료량 등으로 항목을 세분화하여 추정식을 도출하였다. 적합도는 조정결정계수(R_{adj}^2)와 표준추정오차(S.E.E.)를 이용하였다. 표준추정오차 추정식은 식(1)과 같다.

$$S.E.E. = \left[\sum (\ln Y_1 - \ln Y_2)^2 / (N-2) \right]^{1/2} \quad (1)$$

위 식에서 N 은 샘플 개수, Y_1 은 관측값, Y_2 는 예측된 값을 의미한다.

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

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

II. 결과 및 고찰

1. 수관층 수분함량

리기다소나무의 수관층 부위별 수분함량은 <Figure 1>과 같다. 리기다소나무 잎의 수분함량은 119.1%로 기존 연구에서 제시된 바 있는 영주지역소나무 115.3%, 봉화지역소나무 109.6% 강원지방 잣나무 117.2%에 비해 높은 것으로 분석되었다. 그러나 가지 부위의 수분함량은 <0.5cm 가지 97.6%, 0.5-1cm 96.4%, 1-2cm 98.5%, 2-4cm 101.5%, >4cm 가지 100.1%로 소나무, 잣나무, 곰솔(105.6%~110.3%)의 수분함량 범위에 비해 다소 낮게 나타났다(Kim, et al., 2011; Jang, et al., 2011; Kim, 2015). 기존 연구의 결과와 비교하였을 시 수종 간 수분함량의 차이가 있었으나, 수종에 따른 잎, 가지의 수분함량의 차이가 10% 미만으로 나타났기 때문에 당일 기상조건, 지형적 위치, 입지조건, 실험 방법의 미세한 오차에 의해 나타난 현상으로 판단된다(Kim, 2015).

2. 수관연료의 분포

총 20본의 표본목 분석을 통해 나타난 리기다소나무림의 각 부위별 수관층 연료량을 보면, 가장 높은 비율을 차지하는 부위는 직경 4cm 이상의 가지 (9.521kg, 26.08%)이며, 잎 (8.852kg, 24.25%), 2-4cm 가지 (7.226kg, 19.79%), 1-2cm 가지 (3.920kg, 10.74%), 0.5cm 이하 가지 (2.890kg, 7.92%), 0.5-1cm 가지 (2.711kg, 7.42%), 죽은가지 (1.387kg, 3.80%) 순이었다(<Table 2>). 잎 연료량의 경우 탄소배출량 관련 바이오매스 연구에서 제시된 무주지역 리기다소나무의 평균 잎의 무게 8.90kg의 연구결과와 유사하였다(Seo, et al., 2011a). 그러나 각 부위별 연료량 비율 순을 보면, 본 연구는 직경 4cm 이상 가지의 연료량이 가장 많은 비율을 차지한데 반해 강원지방 잣나무, 대구지역 소나무의 부위별 비율에서는 잎이 가장 많은 비율을 차지하여 다소 상이한 결과를 보였다(Koo, et al., 2010; Kim, et al., 2015).

Table 2. Crown fuel load distribution by fuel component of *Pinus rigida*

Crown fuel category	Fuel load (kg)	Fuel component (%)
Needles	8,852	24.25
Branches <0.5cm	2,890	7.92
Branches 0.5-1cm	2,711	7.42
Branches 1-2cm	3,920	10.74
Branches 2-4cm	7,226	19.79
Branches >4cm	9,521	26.08
Dead branches	1,387	3.80
Live crown	35,120	96.20
Available crown	14,453	39.59
Total crown	36,506	100.00

한편 리기다소나무림의 연소가능한 연료의 비율은 39.59%로 영주지역 소나무 53.60%, 대구지역 소나무 55.00%에 비해 낮았지만, Aleppo pine(*Pinus halepensis* Mill.)의 29.30% 보다 높은 것으로 나타났다(Mitsopoulos & Dimitrakopoulos, 2007). 기존 연구에서 보면, 리기다소나무는 다른 침엽수종과 다르게 잎 연료량에 비해 굵은 가지의 비율이 높다는 연구결과가 제시되어 있다(Seo, et al., 2011b). 따라서 리기다소나무는 다른 침엽수종에 비해 낮은 임령에서도 굵은 가지를 많이 생성하는 수종 고유의 특성과 더불어 대체적으로 산림관리 미흡으로 잎의 생육상태가 좋지 못한 현상에 의해 연소가능한 연료의 비율이 낮은 것으로 판단된다.

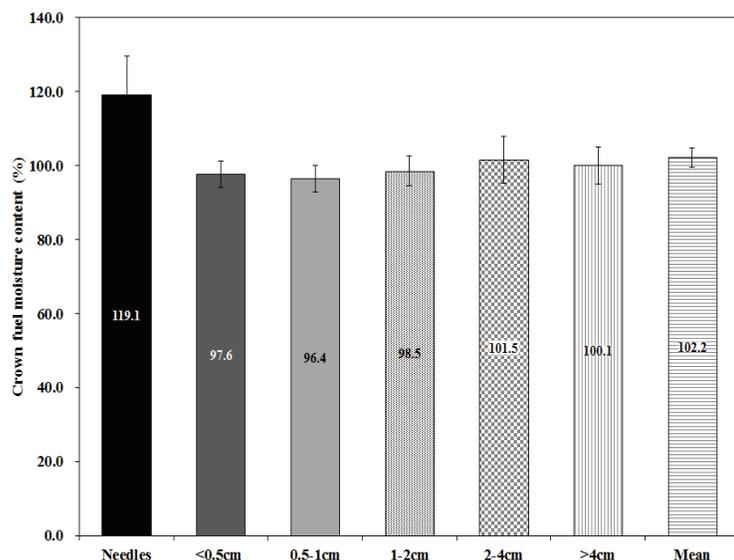


Figure 1. Crown fuel moisture contents of *Pinus rigida* stands

3. 수관층 부위별 연료량 추정식 개발

흉고직경에 따른 수관 부위별 연료량 변화를 분석한 결과, 관측치가 적은 직경 4cm 이상의 가지(8본)를 제외하고 대부분이 예측치의 95% 신뢰구간에 포함되는 것으로 나타났다. 각 수관 부위별 연료량은 흉고직경이 커질수록 점차 증가하는 것으로 나타났으며, 증가의 폭

은 부위별로 다르게 나타났다(〈Figure 2〉). 잎과 잔가지는 흉고직경이 증가함에 따라 연료량 증가폭이 상호 유사하였으나, 굵은 가지의 경우 우세목의 성장영역을 지키기 위해 가지 생장에 주력하는 특징으로 연료량 증가폭이 크게 나타났다.

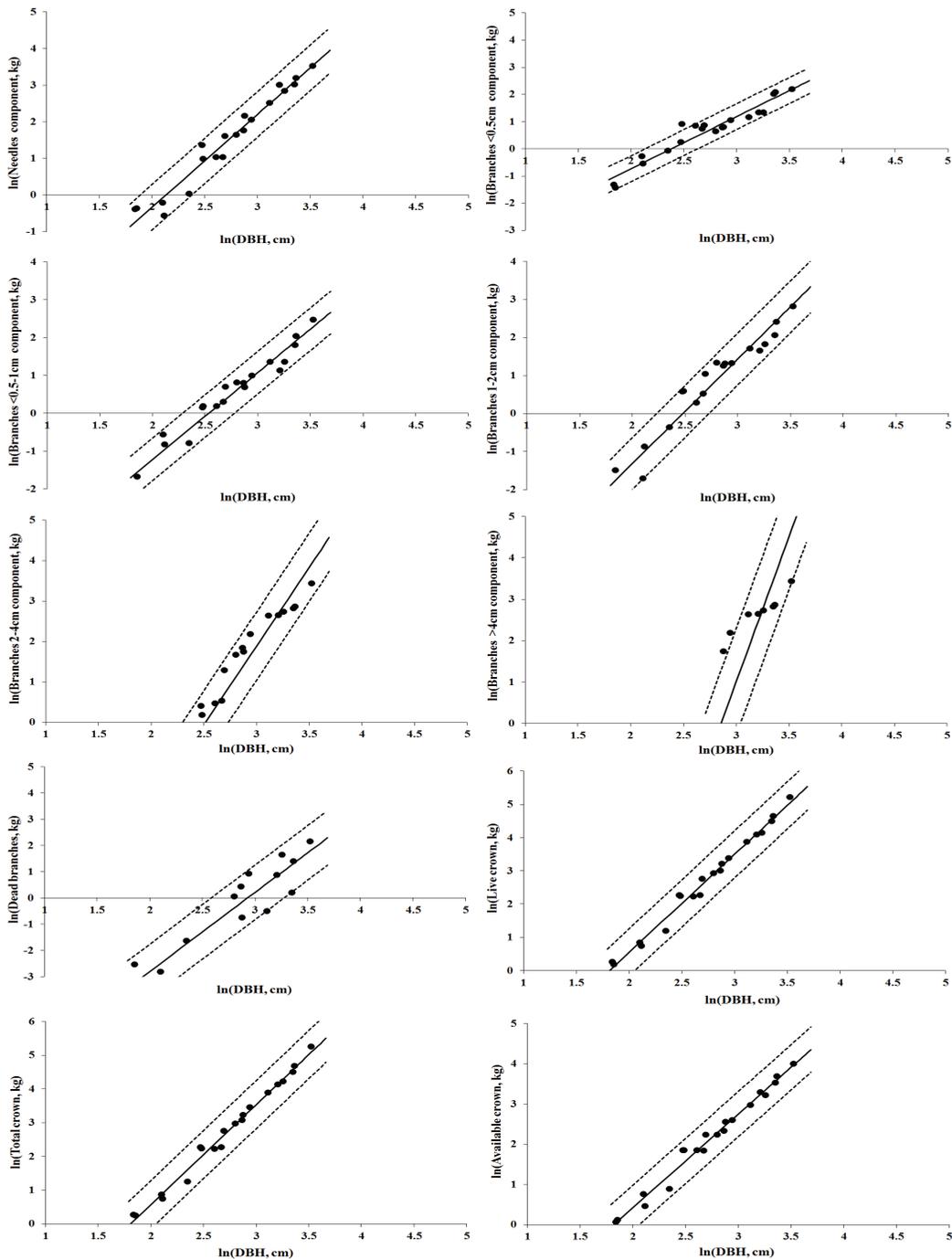


Figure 2. Regressions of various crown fuel components and the diameter at breast height (Solid line is the regression; dashed line represents 95% confidence intervals)

세 가지 연료량 추정식에 대한 모수 추정 결과를 보면, 흉고직경에 대한 모수 β_1 이 모두 양(+)의 값으로 분석되어 흉고직경이 클수록 각 부위별 연료량은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 $\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \beta_2 \ln H$ 식에서 수고에 대한 모수 β_2 는 양(+)의 값과 음(-)의 값이 혼재되어 나타나므로 수고는 흉고직경에 비해 수관연료량의 상관관계가 다소 낮은 것으로 분석되었다. 따라서 흉고직경에 의해 증가하는 수관연료량은 수고에 의해 조정되는 것을 알 수 있으며, 이는 흉고직경만을 이용하여 수관연료량을 추정했을 시 설명력 높은 추정값이 도출될 수 있음을 의미한다(〈Table 3〉). 세 가지 연료량 추정식에 대한 모수들은 95% 수준에서 통계적 유의성을 보였으며, 조정결정계수 (R^2_{adj})의 값은 고사지와 관측치가 적은 2cm 이상 가지 부위를 제외하고 90% 이상의 높은 설명력을 보였다. 세 가지 연료량 추정식의 적합도를 각 부위별로 비교한 결과, <0.5cm 가지, 1-2cm 가지, 4cm 이상 가지, 고사지

를 제외한 부위에서 흉고직경만을 이용한 연료량 추정식에서 조정결정계수는 높고, 표준추정오차는 낮은 것으로 나타났다(〈Table 4〉).

본 연구에서 제시된 잎과 연소가능한 연료의 추정식 ($\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D$)을 기존에 제시된 주요 침엽수종(소나무, 잣나무, 곰솔)의 연료량 추정식과 비교하였다(Lee, et. al., 2010; Jang, et. al., 2011; Kim, et. al., 2014; Kim, et. al., 2015). 먼저 잎의 연료량은 곰솔(Kim, et. al., 2014), 봉화지역 소나무(Jang, et. al., 2011), 대구팔공산 소나무(Lee, et. al., 2010)에 비해 많았으나, 하나의 엽에서 잎이 5개가 자라는 잣나무보다는 작았다(Figure 3). 연소가능한 연료량은 잣나무가 가장 많았으며, 리기다소나무, 곰솔, 봉화지역 소나무, 대구팔공산 소나무 순이었다(Figure 4). 연소가능한 연료량이 많다는 의미는 연료적 관점에서 수관화로 확산될 때 탈 물질이 많다는 것을 의미한다. 따라서 잣나무가 수관화 확산 위험성이 가장 높고, 그 다

Table 3. Parameter estimates for allometric equations of crown fuel component for *Pinus rigida*

Crown fuel category	n	$\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D$		$\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D^2 H$		$\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D + \beta_2 \ln H$			
		β_0 (S.E.)	β_1 (S.E.)	β_0 (S.E.)	β_1 (S.E.)	β_0 (S.E.)	β_1 (S.E.)	β_2 (S.E.)	
Total crown	20	-5.3542 (0.2162)	2.9627 (0.0780)	-6.3337 (0.3459)	1.1406 (0.0430)	-5.1371 (0.3718)	3.0947 (0.1989)	-0.2319 (0.3208)	
Available crown	20	-4.2355 (0.2114)	2.3288 (0.0763)	-5.0062 (0.3054)	0.8967 (0.0380)	-4.0750 (0.3659)	2.4263 (0.1958)	-0.1714 (0.3157)	
Live crown	20	-5.3476 (0.2223)	2.9490 (0.0802)	-6.3218 (0.3509)	1.1353 (0.0436)	-5.1229 (0.3822)	3.0856 (0.2045)	-0.2400 (0.3298)	
Dead branches	14	-8.8486 (0.9661)	3.0190 (0.3364)	-9.8976 (1.0556)	1.1699 (0.1273)	-9.8636 (1.7791)	2.3636 (1.0153)	1.1299 (1.6469)	
Needles	20	-5.4258 (0.3541)	2.5439 (0.1278)	-6.2277 (0.4877)	0.9744 (0.0606)	-4.7332 (0.5823)	2.9648 (0.3116)	-0.7398 (0.5025)	
Branches	<0.5cm	20	-4.5582 (0.3623)	1.9165 (0.1308)	-5.2264 (0.4102)	0.7422 (0.0510)	-4.8646 (0.6260)	1.7304 (0.3349)	0.3272 (0.5401)
	0.5-1cm	20	-5.8198 (0.3364)	2.2993 (0.1214)	-6.6539 (0.3465)	0.8945 (0.0431)	-6.6081 (0.5377)	1.8202 (0.2877)	0.8419 (0.4640)
	1-2cm	20	-6.8222 (0.4978)	2.7529 (0.1797)	-7.7228 (0.6123)	1.0586 (0.0761)	-6.4980 (0.8639)	2.9499 (0.4622)	-0.3462 (0.7454)
	2-4cm	17	-9.8097 (0.9795)	3.8986 (0.3386)	-11.3745 (1.1175)	1.5338 (0.1336)	-10.5979 (1.6161)	3.5126 (0.7113)	0.7364 (1.1859)
	>4cm	9	-20.0313 (2.7895)	7.0122 (0.8798)	-24.0627 (4.2210)	2.8903 (0.4647)	-17.0769 (4.9199)	7.5553 (1.1680)	-1.7036 (2.2985)

Note: β_i ($i = 0, 1, 2$) is the estimated parameters, ln is the natural logarithm, Wt is the each fuel load (kg), D is the diameter at breast height (cm), H is the tree height (m), S.E. is standard error, n is number of samples.

Table 4. Adjusted coefficient of determination and standard error of estimate for allometric equations in *Pinus rigida*

Crown fuel category	n	lnWt= $\beta_0 + \beta_1 \ln D$		lnWt= $\beta_0 + \beta_1 \ln D^2 H$		lnWt= $\beta_0 + \beta_1 \ln D + \beta_2 \ln H$		
		R^2_{adj}	S.E.E.	R^2_{adj}	S.E.E.	R^2_{adj}	S.E.E.	
Total crown	20	0.9870	0.1708	0.9737	0.2430	0.9866	0.1731	
Available crown	20	0.9800	0.1670	0.9670	0.2145	0.9792	0.1704	
Live crown	20	0.9861	0.1756	0.9727	0.2465	0.9858	0.1780	
Dead branches	14	0.8596	0.6859	0.8653	0.6717	0.8531	0.7015	
Needles	20	0.9541	0.2798	0.9312	0.3426	0.9569	0.2711	
Branches	<0.5cm	20	0.9184	0.2863	0.9173	0.2881	0.9154	0.2914
	0.5-1cm	20	0.9495	0.2658	0.9577	0.2434	0.9552	0.2504
	1-2cm	20	0.9248	0.3933	0.9101	0.4301	0.9214	0.4022
	2-4cm	17	0.8916	0.5383	0.8910	0.5396	0.8869	0.5496
	>4cm	9	0.8866	0.6102	0.8249	0.7581	0.8788	0.6308

Note: R^2_{adj} is the adjusted multiple coefficient of determination, S.E.E. is the standard error of estimate = $[\sum(s.s.e.)/(n - 2)]^{1/2}$.

음으로 리기다소나무, 곰솔, 소나무 순으로 판단된다 (Sando & Wick, 1972). 조사 대상지의 지형특성(고도, 사면향, 경사)과 지위 및 환경 인자 등은 임목의 성장(연료량 분포) 특성에 민감하게 반응하므로 흉고직경에 따른 연료량을 단순 비교하는 것은 무리가 있다. 그러나 본 연구에서 제시된 대상수종은 대부분 같은 시기에

조림되어 임령이 유사하며, 매목조사 후 표준이 될 수 있는 임목을 표본목으로 선정하여 동일한 방법으로 분석하였으므로 각 수종을 대표할 만한 자료라 할 수 있다. 따라서 본 연구의 분석결과는 각 수종별 연료특성의 분포를 표준화 할 수 있는 자료로써 가치가 있다고 판단된다.

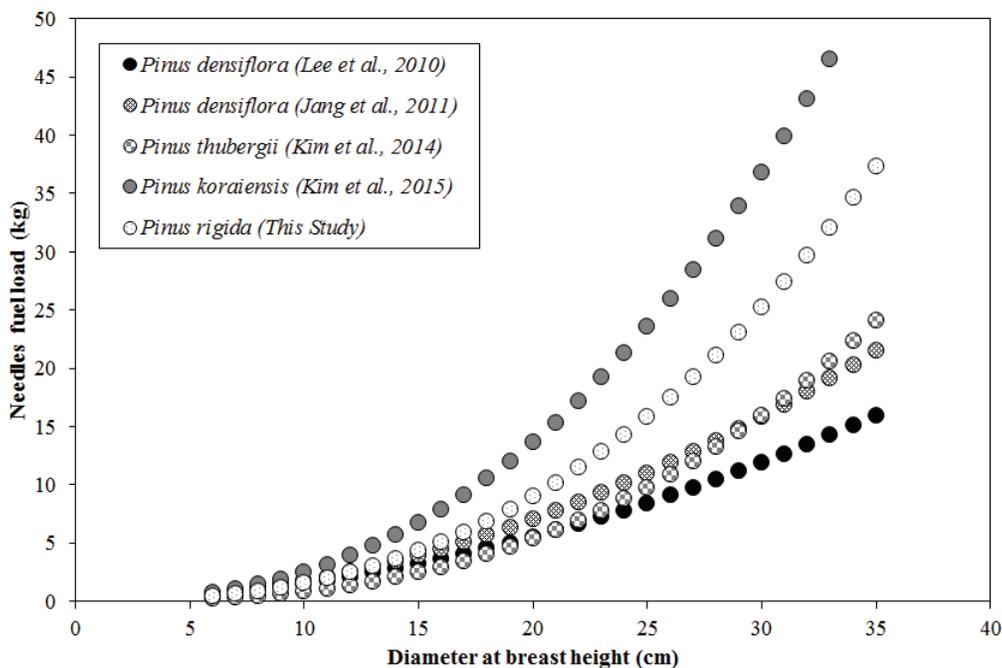


Figure 3. Graphical comparison of the result of this study and previous studies on the needles fuel load of major conifer species

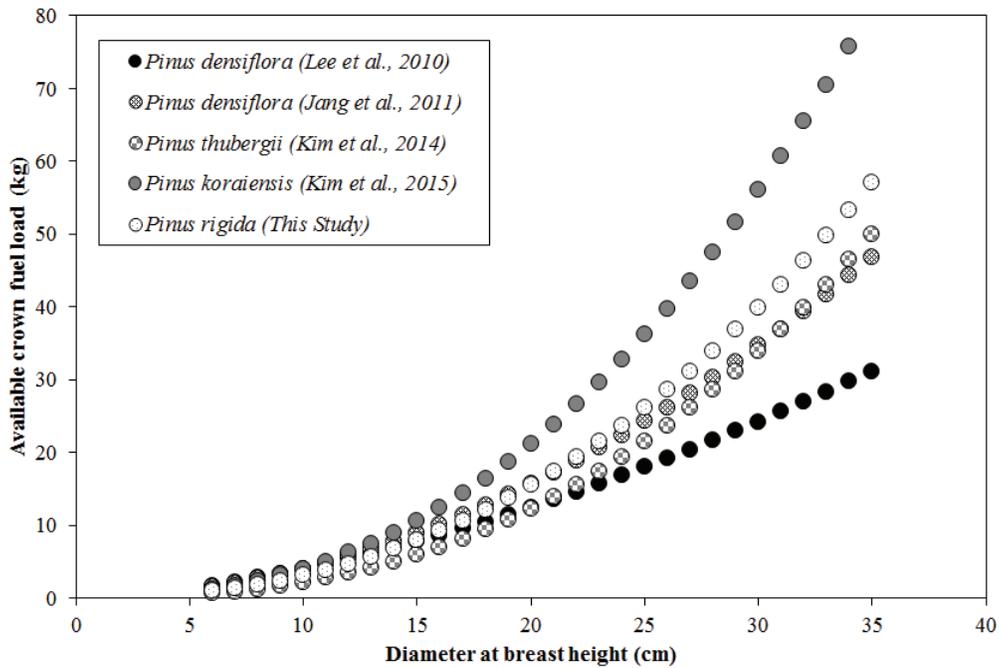


Figure 4. Graphical comparison of the result of this study and previous studies on the available fuel load of major conifer species

III. 결론

본 연구에서는 리기다소나무림을 대상으로 산불 위험성 평가에 필요한 수관층 연료량 추정식을 개발하였다. 각 부위별 수관층 연료량을 보면 가장 높은 비율을 차지하는 부위는 직경 4cm 이상 가지 (9,521kg, 26.08%)로 나타났다으며, 잎 (8,852kg, 24.25%), 2-4cm 가지 (7,226kg, 19.79%), 1-2cm 가지 (3,920kg, 10.74%), 0.5cm 이하 가지 (2,890kg, 7.92%), 0.5-1cm 가지 (2,711kg, 7.42%), 죽은가지 (1,387kg, 3.80%) 순으로 나타났다. 평균적으로 $\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D$ 식에서 조정결정계수 ($R^2_{adj} = 0.9870-0.8596$)는 높고, 표준추정오차 (S.E.E. = 0.1670-0.6859)는 낮았으나, 추정식 간의 차이는 적었다. 한편 리기다소나무림의 연소가능한 수관연료(잎~1cm 이하 가지)의 비율은 39.59%로 나타나 영주지역 소나무 53.60%, 대구지역 소나무 55.00%에 비해 낮았지만, Aleppo pine(*Pinus halepensis* Mill.)의 29.30% 보다 높은 것으로 나타났다.

수관화 행동 예측과 위험성을 정량적으로 평가하기

위해서는 수관층 연료를 세밀하게 구분한 연료량 추정식이 수종별로 지속적으로 개발되어야 하며, 본 연구에서 제시된 연료량 추정식은 산림 내 산불 연료의 양을 산출함은 물론이고, 수관화 위험성을 연료 관점에서 평가하는 데 유용하게 활용될 수 있다.

References

- Brown, J. K. and L. S. Bradshaw. 1994. Comparisons of Particulate Emissions and Smoke Impacts from Pre Settlement, Full Suppression and Prescribed Natural Fire Periods in the Selway-Bitter Root Wilderness. *International Journal of Wildland Fire*. 4(3): 143-155.
- 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.
- 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. 2011. 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, Mi Na Jang, Byung Doo Lee, and Young Jin Lee. 2015. Allometric Equation for Crown Fuel Biomass of *Pinus koraiensis* Stands in Korea. *Journal of Korean Forest Society*. 104(1): 104-110.
- Kim, Sung Yong, Mi Na Jang, Ho Joong Youn, Byung Doo Lee, Ki Hyung Park, and Young Jin Lee. 2014. Biomass Expansion Factors and Allometric Equations in Age Class IV of *Pinus thunbergii* Coastal Disaster Prevention Forest in Seocheon, Choongnam. *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*. 14(6): 413-419.
- Kim, Sung Yong, Young Jin Lee, Mi Na Jang, Youn Ok Seo, Kyo Sang Koo, Sung Chul Jung, and Kyung Ha Kim. 2012. Above-ground Biomass and Crown Fuel Characteristics of *Pinus densiflora* in Yangyang, Gangwon Province. *Journal of Korean Forest Society*. 101(2): 244-250.
- Kim, Sung Yong. 2015. A Study on the Analysis of Fuel Characteristics for Forest Fire Hazard Assessment. Ph.D. Dissertation. Kongju National University.
- Koo, Kyo Sang, Byung Doo Lee, Myung Soo Won, and Myung Boo 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/>
- Kramer, H. A., B. M. Collins, M. K. Kelly, and S. L. Stephens. 2014. Quantifying Ladder Fuel: A New Approach Using LiDAR. *International Journal of Forests*. 5: 1432-1453.
- 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. Thesis. 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, 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, Dong Hyun Kim, Myung Soo Won, and Myung Bo Lee. 2003. Analysis of Forest Fire Spread Rate and Behaviour in Cheongyang, Yesan of Korea. *Proceeding of the 2003 Meeting of the Korea Forest Society*. 33-36.
- 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*. National Institute of Forest Science. 2007. *Pinus rigida* Stands Management Scheme.
- 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.
- Sando, R. W. and C. H. Wick. 1972. A Method of Evaluating Crown Fuels in Forest Stands. *Research Paper NC-84*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Seo, Youn Ok and Young Jin Lee. 2011a. Aboveground Biomass Estimation of *Pinus rigida* Stands in Muju Region. *Journal of Agriculture & Life Science*. 45(1): 15-20.
- Seo, Youn Ok and Young Jin Lee. 2011b. Estimation of Aboveground Biomass and Net Primary Production for *Pinus rigida* in Sancheong, Gyeongnam Province. *Journal of Agriculture & Life Science*. 45(2): 15-20.

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. 2011. 영주지역 소나무림의 수관연료특성 및 수관연료량 추정. 한국임학회지. 100(2): 266-272.
- 김성용, 이영진, 장미나, 서연옥, 구교상, 정성철, 김경하. 2012. 강원도 양양지역 소나무림의 지상부 바이오매스와 수관층 연료특성에 관한 연구. 한국임학회지. 101(2): 244-250.
- 김성용, 장미나, 윤호중, 이병두, 박기형, 이영진. 2014. IV영급 곰솔 해안방재림의 물질현존량 확장계수 및 상대생장식. 한국방재학회지. 14(6): 413-419.
- 김성용, 장미나, 이병두, 이영진. 2015. 잣나무림의 수관연료량 추정을 위한 상대생장식 개발. 한국임학회지. 104(1): 104-110.
- 김성용. 2015. 산불위험성 평가를 위한 주요 침엽수종의 연료 특성 분석에 관한 연구. 공주대학교 일반대학원 박사학위논문.
- 산림청. 2017. <http://www.forest.go.kr>.
- 서연옥, 이영진. 2011a. 무지지역 리기다소나무 임분의 지상부 바이오매스 추정. 농업생명과학연구지. 45(1): 15-20.
- 서연옥, 이영진. 2011b. 경남 산청지역 리기다소나무림의 지상부 바이오매스와 순생산량 추정. 농업생명과학연구지. 45(2): 15-20.
- 이병두, 원명수, 김선영, 윤석희, 이명보. 2010. 소나무 수관부위별 연료량 추정식 개발 및 수관연료밀도 분석. 한국임학회지. 99(3): 391-396.
- 이시영, 김동현, 원명수, 이명보. 2003. 청양, 예산 산불연소특성 분석. 한국임학회 정기학술발표논문집. 33-36.
- 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: Oct. 12, 2017 / Revised: Dec. 15, 2017 / Accepted: Dec. 19, 2017

리기다소나무림의 수관층 연료량 추정식 개발

국문초록 본 연구의 목적은 리기다소나무림의 수관층 연료량 추정식을 개발하는 것이다. 이를 위해 충남 예산군 소재에 분포하고 있는 리기다소나무를 흉고직경별로 20본 별채하였으며, 수관층에서 잎과 가지를 분류하고, 가지의 고사여부와 더불어 굵기별로 구분하여 무게를 측정하였다. 연료량 추정식은 흉고직경 또는 흉고직경과 수고를 독립변수로 이용하여 개발하였다. 각 부위별 수관층 연료량을 보면 가장 높은 비율을 차지하는 부위는 >4cm 가지 (9.521kg, 26.08%)로 나타났으며, 잎 (8.852kg, 24.25%), 2-4cm 가지 (7.226kg, 19.79%), 1-2cm 가지 (3.920kg, 10.74%), <0.5cm 가지 (2.890kg, 7.92%), 0.5-1cm 가지 (2.711kg, 7.42%), 죽은가지 (1.387kg, 3.80%) 순으로 나타났다. 평균적으로 $\ln W_t = \beta_0 + \beta_1 \ln D$ 식에서 조정결정계수 ($R^2_{adj} = 0.9870-0.8596$)는 높고, 표준추정오차 (S.E.E. = 0.1670-0.6859)는 낮았으나, 추정식 간의 차이는 적었다.

주제어 : 산불, 리기다소나무, 수관층 연료, 추정식

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).

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).

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).

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).

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 hadusrntlard assessment and fuel model techniques(jmn1607@naver.com).