

## 경북 봉화 지역 소나무림에 대한 수관연료 특성과 연료량 추정

장미나<sup>1</sup> · 이병두<sup>2</sup> · 서연옥<sup>1</sup> · 김성용<sup>1</sup> · 이영진<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교, <sup>2</sup>국립산림과학원

## Crown Fuel Characteristics and Fuel Load Estimation of *Pinus densiflora* S. et Z. in Bonghwa, Gyeongbuk

Mina Jang<sup>1</sup>, Byungdoo Lee<sup>2</sup>, Yeonok Seo<sup>1</sup> and Sungyong Kim<sup>1</sup> and Young Jin Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Resources, Kongju National University, Yesan 340-802, Korea

<sup>2</sup>Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

**요약:** 본 연구의 목적은 경북 봉화 지역에 분포하는 소나무림을 대상으로 수관의 수직적 구조, 수관연료밀도, 수관특성을 분석하고, 수관연료량 추정을 위한 회귀모형을 개발하는 것이다. 소나무림에 대한 수관의 수직적 구조에서 연료량 비율은 수관의 중간부분이 가장 높은 것으로 나타났으며, 수관연료량에서 잎과 가지가 차지하는 비율은 잎 25%, 직경 1 cm이하 가지 33%로 수관화 확산 시 이용 가능한 수관연료량은 총 58%를 차지하는 것으로 나타났다. 봉화 지역 소나무림에 대한 평균 수관연료밀도는 0.45 kg/m<sup>3</sup>으로 매우 높게 나타났고, 잎과 1 cm이하의 이용 가능한 연료밀도는 0.27 kg/m<sup>3</sup>으로 나타났다. 선형회귀식과 비선형회귀식을 이용하여 이용 가능한 수관연료량과 전체 수관연료량을 추정한 결과, 선형회귀식의 경우 결정계수(R<sup>2</sup>)가 각각 84%, 88%로 나타난 반면에, 비선형회귀식의 경우 결정계수가 각각 90%, 95%로 더 높게 나타났다. 본 연구에서 제시된 상대생장식은 봉화 지역 소나무림의 산불관리와 수관화모델에 대한 정량적인 연료량 정보를 제공해 줄 수 있다.

**Abstract:** The objectives of this study were to analyze the crown vertical structure, crown bulk density, and to develop regression models for predicting crown fuel load using the data from 10 destructively sampled *Pinus densiflora* trees in Bonghwa, Gyeongbuk. The fuel loads were observed higher in the middle portion of the vertical distribution of crown followed by the lower portion and upper portion of *Pinus densiflora*, respectively. Approximately 25% crown fuel load was found in the needle while 33% was observed in the branches with <1 cm diameter with a total of 58% available fuel loads. The average crown bulk density was 0.45 kg/m<sup>3</sup>, and 0.27 kg/m<sup>3</sup> of this was available in the needles and branches with <1 cm diameters. The resulting models in linear equations were able to account for 84% and 88% of the observed variation, while the allometric equations with diameter at breast height as the single predictor showed better results to account for 90% and 95% of the observed variation in the available crown fuel loads and total crown fuel loads, respectively. The suggested equations in this study could provide quantitative fuel load attributes for crown fire behavior models and fire management of red pine stands in Bonghwa areas.

**Key words :** *Pinus densiflora*, forest fire, crown fuel, crown bulk density, crown fuel characteristics

### 서론

산불은 피해를 받는 부분에 따라 땅속의 부식층을 태우는 지중화(Underground fire), 지표에 있는 초본류·관목·낙엽 등을 태우는 지표화(Surface fire), 임목의 줄기를 태우는 수간화(Stem fire), 임목의 가지와 잎을 태우는 수관화(Crown fire)로 구분하고 있다(산림청, 2011). 지표화는

임상에 축적된 낙엽이 연소되면서 불이 신속히 진행되기 때문에 발생하는 열이 적은 반면, 수관화의 경우 임상의 낙엽과 함께 수관층을 구성하는 교목이 연소되는 것으로, 발생하는 열이 지표화에 비해 훨씬 높아진다. 따라서 대형화 산불의 대부분은 수관화에 의해 발생된다고 볼 수 있다. 2005년에 발생한 양양지역의 산불이 바로 그 예이며, 이 때 발생한 수관화는 낙산사를 전소시키고, 약 180 ha의 산림을 태웠으며, 가옥 161채를 소실시키는 등 큰 피해를 야기시켰다(산림청, 2010).

\*Corresponding author  
E-mail: leeyj@kongju.ac.kr

수관화 발생과 행태(Fire behavior)는 기상, 지형 및 연료특성과 수관연료량의 복합적인 상호작용 결과에 기인하고 있다. 특히 이들 중에서 수관연료량(Crown fuel loadings)은 수관화의 강도에 직접적 또는 간접적으로 큰 영향을 미치기 때문에 산림경영자들에게 매우 중요한 요소이다(Cruz *et al.*, 2003; Gray and Reinhardt, 2003; Bilgili and Kucuk, 2009).

수관화와 관련된 국외 연구에 의하면, 산불 관리 계획에 가장 중요한 인자들은 지표층에서 수관층까지의 높이(Crown base height), 수관연료의 양(Crown fuel load), 수관연료밀도(Crown bulk density)로 제시하였으며, 이외에도 수관의 높이(Crown height), 이용 가능한 수관연료량(Available crown fuel load), 잎의 수분함량(Foliar moisture contents) 등을 중요한 수관 연료요소라 보고된 바 있다(Reinhardt *et al.*, 2006; Kucuk *et al.*, 2007; Todd and Moskal, 2010). 또한 수관연료 특성은 수관화 발생 후의 상태와 발생 범위까지 영향을 미칠 뿐만 아니라 임관 피복, 임목의 수고, 바람의 감소, 고사한 연료의 수분함량과 같은 간접적인 인자들 또한 표면적인 산불의 반응에서부터 부차적인 수관화 발생 범위까지 영향을 준다고 하였다(Reinhardt *et al.*, 2006). 이외에도 가지의 직경과 수관의 연료량은 수관화 확산을 관리하기 위한 가장 일반적인 수관연료 특성이라고 보고된 바 있다(Cruz *et al.*, 2003; Kucuk *et al.*, 2007). 이러한 산불 관점의 연구들은 상대생장식을 잎과 가지 굵기 별로 또는 고사여부의 관점에서 분류하여 추정할 경우가 많다(Kucuk *et al.*, 2007; Mitsopoulos and Dimitrakopoulos, 2007).

반면, 국내 대부분의 생장 및 수확예측모형에 관한 연구에서는 흉고직경이 6 cm 이상인 개체목에 대한 전형적인 바이오매스 추정, 생장 및 수확예측모형 등의 다양한 정보를 제공해 주지만, 산불이 발생하기 쉬운 산림의 산불 예측을 위한 세부적인 연료량 측면에서는 거의 정보를 제공해 주지 못하고 있는 실정이다(박인협과 김준선, 1989; 박인협과 이석면, 1990; 이경학 등, 2002).

따라서 본 연구는 수관화에 취약한 소나무림을 대상으로 수관연료밀도의 특성을 분석하고, 소나무의 잎과 가지 굵기 별로 부위별 연료량을 추정하기 위한 회귀식을 개발하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 자료 수집

본 연구는 경북 봉화 지역의 소나무림을 대상으로 20 × 20 m의 정방형구 표준지를 선정하여 매목조사를 실시한 후 직경급 별로 고르게 분포하도록 10본의 표본목을 선정하였다. 표본목은 기계톱을 이용하여 지표면에서 최대한

가깝게 벌채하였으며, 벌채하기 전 수고(Height), 흉고직경(DBH), 수관 폭(Crown width), 수관 길이(Crown length) 등을 측정하였다. 수관연료량의 수직적 분포를 측정하고자 1 m 간격으로 표본목을 절단하고, 수간, 잎, 가지로 구분하여 생중량을 측정하였다. 각 부위별로 20% 이상의 시료를 채취하여, 건조기에서 100°C의 온도로 향량에 도달할 때 까지 건조시킨 후 연료량을 산출하였다(구교상 등, 2010).

### 2. 분석 방법

#### 1) 수관층 연료 구분

주요 침엽수림에 대한 수관층 연료 구분 기준은 각 나라에 따라 달리 구분하고 있다. 그리스에 분포하는 Aleppo 소나무림의 수관연료량의 경우에는 수관을 잎, 살아있는 가지 0.63 cm이하, 0.64~2.5 cm, 2.51~7.5 cm, 7.5 cm이상, 죽은 가지 2.5 cm이하로 구분하여 연료량을 분석한 바 있고(Mitsopoulos and Dimitrakopoulos, 2007), 미국의 Sand소나무림의 대한 수관연료량은 생, 사에 따라 잎, 0.64 cm이하, 0.64~2.54 cm 가지로 총 6개 부위로 구분한 바 있으며(Hough, 1973), 터키의 Calabrian소나무림의 경우에는 잎, 0.6 cm이하, 0.6~1 cm, 1~2.5 cm, 2.5 cm이상으로 구분한 바 있다(Kucuk *et al.*, 2007). 국내에서는 소나무림을 대상으로 하여, 잎과 가지, 솔방울로 크게 구분하고, 각 부위의 생, 사를 구분한 후 가지는 다시 0.5 cm이하, 0.5~1 cm, 1~2 cm, 2~4 cm, 4 cm이상으로 구분한 사례를 볼 수 있다(구교상 등, 2010; 이병두 등, 2010). 따라서 본 연구에서는 국내의 연구사례 기준을 그대로 적용하였으며, 수관화가 발생하였을 때 사실상 연소된다고 볼 수 있는 잎과 직경 1 cm이하의 가지를 수관화 확산 시 이용 가능한 수관연료량으로 정의하였다(Shinozaki *et al.*, 1964; Call and Albini, 1997; Kucuk *et al.*, 2007).

#### 2) 수관연료밀도

수관연료밀도는 수관단위체적 당 수관층 연료의 양을 의미하며, 다양한 방법에 의하여 수관연료 밀도를 산출할 수 있다(Sando and Wick, 1972; Peter *et al.*, 2004). 본 연구에서 적용된 방법은 1 m 단위로 측정된 수관 폭의 장축과 단축 자료를 이용하여 1 m 단위로 체적을 산출한 후, 수관층 연료량을 이 수치로 나누어 kg/m<sup>3</sup> 단위로 산출하였다(신만용 등, 1999).

#### 3) 통계적 분석

두 변수간의 관계를 규명하고자 할 때 가장 자주 이용되는 통계적인 방법으로는 변수간의 관련성을 설명하기 위한 상관분석과 독립변수로부터 다른 종속변수의 변화를 예측하기 위한 회귀분석이 있다(박정식과 윤선영, 2009). 본 연구에서 수관의 특성과 전체 수관연료와의 관련성을

설명하기 위해 사용된 상관분석은 흉고직경, 지하고, 수고, 잎의 연료량, 이용 가능한 수관연료량, 전체 가지연료량, 전체 수관연료량, 수관연료밀도의 인자를 분석하였다. 또한 회귀분석은 수관의 특성 중 흉고직경에 따라 변화하는 부위별 연료량을 추정하기 위하여, 독립변수로는 흉고직경을 이용하였으며, 잎의 연료량, 이용 가능한 수관연료량, 전체 가지연료량, 전체 수관연료량을 추정하기 위하여 선형 및 비선형 회귀식을 개발하고자 하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 수관연료의 특성과 수직적 분포

경북 봉화 지역의 소나무림을 대상으로 표준지를 조사한 결과, 평균임령은 36년생이며 임분밀도는 2,400본/ha으로 매우 높게 나타났다. Table 1은 벌채된 소나무의 기술 통계량을 나타낸 것으로 평균흉고직경은 14.0 cm, 평

**Table 1. Crown characteristics and crown fuel load of *Pinus densiflora* in Bonghwa, Gyeongbuk.**

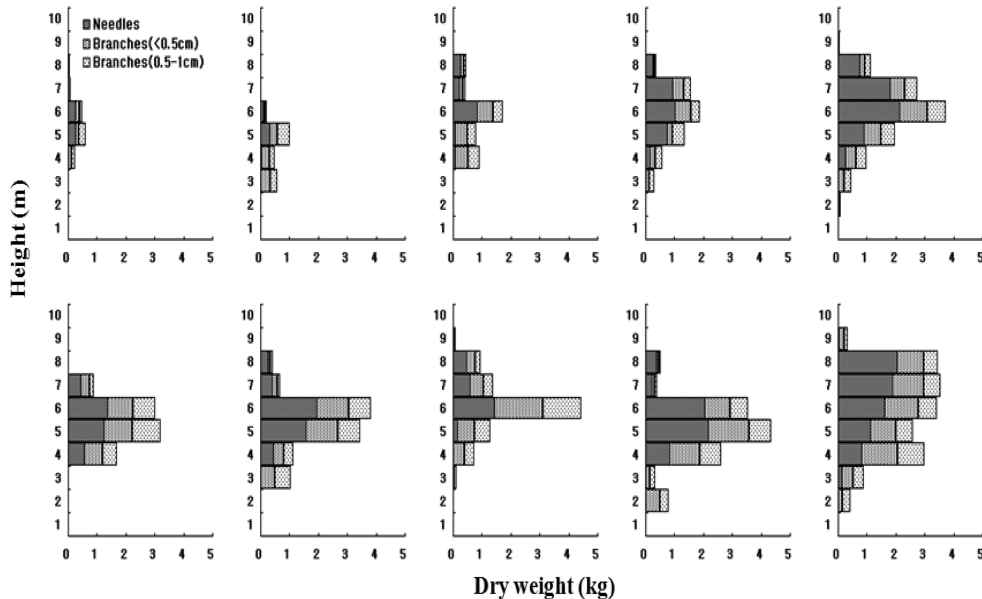
| Variable | Minimum | Maximum | Mean | S.E.  | S.D.   |
|----------|---------|---------|------|-------|--------|
| DBH      | 7.0     | 21.0    | 14.0 | 1.506 | 4.761  |
| CBH      | 2.6     | 4.5     | 3.5  | 0.194 | 0.612  |
| HT       | 6.3     | 8.9     | 8.0  | 0.276 | 0.872  |
| FOL      | 0.6     | 7.6     | 3.6  | 0.744 | 2.353  |
| ACFL     | 1.5     | 17.7    | 8.4  | 1.562 | 4.938  |
| TBR      | 1.4     | 30.5    | 11.3 | 2.722 | 8.609  |
| TCFL     | 11.2    | 85.5    | 37.7 | 7.146 | 22.597 |

Note: DBH is diameter at breast height(cm), CBH is crown base height(m), HT is tree height(m), FOL is foliage(kg), ACFL is available crown fuel load(kg), TBR is total branch(kg), TCFL is total crown fuel load(kg).

균지하고는 3.5 m, 평균수고는 8.0 m, 이용 가능한 평균 수관연료량은 8.4 kg으로 나타났다. Figure 1에서 나타난 바와 같이, 수관연료 중 이용 가능한 수관연료량의 수직적 분포는 수관을 3부분으로 구분하였을 때 중간부분에 가장 많은 연료가 분포하는 것으로 나타났다. 이는 수직적 구조상 수관의 중간부분이 다른 부분에 비해 충분한 광량을 받았기 때문으로 사료된다. 반면에 수관의 아랫부분과 수관내부는 광량의 부족으로 인해 잎이 없거나 적은 것으로 나타났다. 국외 연구와 비교한 결과, 13년생 흑송의 경우 연료량이 가장 많은 부분은 충분한 광량을 받는 수관중간부분(middle portion)으로 나타났으며, 수관의 상위부분(upper portion)은 가장 낮은 연료량을 수관의 아랫부분(lower portion)은 보통의 연료량으로 나타났다(Kucuk *et al.*, 2007). 전체 수관연료량에서 잎과 가지들의 상대적인 비율은 잎과 직경 0.5 cm이하, 0.5~1 cm, 1~2 cm, 2~4 cm, 4 cm이상 가지가 각각 25%, 19%, 14%, 20%, 20%, 3%로 나타났으며, 이용 가능한 수관연료량은 총 58%로 나타났다(Figure 2).

#### 2. 수관연료밀도

Table 2는 경북 봉화 지역 소나무림에 대한 수관 부위별로 표본목들의 수관연료밀도를 나타낸 것으로 조사 대상지의 수관연료밀도는 0.45 kg/m<sup>3</sup>으로 분석되었다. 기존의 연구 결과와 비교했을 때, 대구 팔공산 지역 소나무림의 수관연료밀도는 0.25 kg/m<sup>3</sup>(구교상 등, 2010)으로 본 연구 결과가 높게 나타났다. 이는 본 연구 대상지의 소나무 임분이 송이생산임지로서 숲가꾸기 사업이 전혀 실시되지 않은 천연림 상태의 임분으로 수관층이 매우 울폐되었기



**Figure 1. Vertical profile of available crown fuel load of *Pinus densiflora* in Bonghwa, Gyeongbuk.**

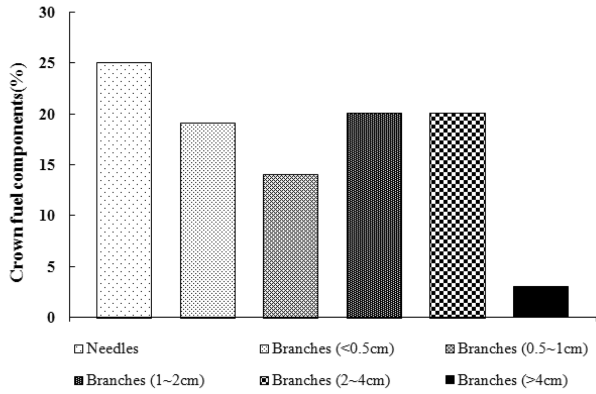


Figure 2. Percentages of crown fuel components for *Pinus densiflora* in Bonghwa, Gyeongbuk.

때문에 사료된다. 또한, 수관화 연소 시 이용 가능한 수관연료량인 잎, 1 cm이하 가지의 수관연료밀도는 0.27 kg/

m<sup>3</sup>으로 수관연료밀도 중에서 약 59.8%를 차지하고 있었다(Table 2). 본 연구 결과에 의하면, 산불 발생 시 수관화의 발생 위험성이 매우 높은 지역으로 나타났다.

### 3. 수관연료량 특성과 추정식

Table 3은 수관의 특성과 수관연료와의 관련성을 설명하기 위해 사용된 상관분석 결과를 나타낸 것으로, 흉고 직경은 잎의 연료량( $r = 0.820, P < 0.01$ ), 이용 가능한 수관연료량( $r = 0.917, P < 0.01$ ), 전체 가지연료량( $r = 0.920, P < 0.01$ ), 전체 수관연료량( $r = 0.938, P < 0.01$ ), 수관연료밀도( $r = 0.638, P < 0.05$ )가 모두 높은 양(+)의 상관관계를 나타낸 반면에, 지하고는 잎의 연료량( $r = -0.756, P < 0.05$ )과 이용 가능한 수관연료량( $r = -0.675, P < 0.05$ )에서 음(-)의 상관관계로 나타났다. 반면 수고의 경우, 모든 연료량과 상관관계가 거의 없거나 매우 낮은 것으로

Table 2. Crown bulk density (kg/m<sup>3</sup>) and percentage(%) for each fuel component of *Pinus densiflora* sampled trees in Bonghwa, Gyeongbuk.

| Needles          | Branches (cm)    |                  |                  |                  |                 | Total           |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
|                  | Under 0.5        | 0.5~1            | 1~2              | 2~4              | Over 4          |                 |
| 0.1072<br>(24.0) | 0.0871<br>(19.5) | 0.0731<br>(16.3) | 0.0946<br>(21.1) | 0.0770<br>(17.2) | 0.0083<br>(1.9) | 0.4474<br>(100) |

Note: Values in parentheses are percentages of crown bulk density.

Table 3. Correlation matrix between the variables for *Pinus densiflora* in Bonghwa, Gyeongbuk.

|      | DBH                  | CBH                  | HT                  | FOL     | ACFL    | TBL     | TCFL    | CBD   |
|------|----------------------|----------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|-------|
| DBH  | 1.000                |                      |                     |         |         |         |         |       |
| CBH  | -0.412 <sup>ns</sup> | 1.000                |                     |         |         |         |         |       |
| HT   | 0.524 <sup>ns</sup>  | 0.054 <sup>ns</sup>  | 1.000               |         |         |         |         |       |
| FOL  | 0.820**              | -0.756*              | 0.417 <sup>ns</sup> | 1.000   |         |         |         |       |
| ACFL | 0.917**              | -0.675*              | 0.472 <sup>ns</sup> | 0.970** | 1.000   |         |         |       |
| TBL  | 0.920**              | -0.512 <sup>ns</sup> | 0.454 <sup>ns</sup> | 0.870** | 0.954** | 1.000   |         |       |
| TCFL | 0.938**              | -0.506 <sup>ns</sup> | 0.513 <sup>ns</sup> | 0.896** | 0.968** | 0.993** | 1.000   |       |
| CBD  | 0.638*               | -0.465 <sup>ns</sup> | 0.063 <sup>ns</sup> | 0.671*  | 0.740*  | 0.849** | 0.792** | 1.000 |

Note: \*\*Correlation is significant at 1% significance level, \*Correlation is significant at 5% significance level, ns is nonsignificant( $p > 0.05$ ).

Table 4. Regression equations for predicting crown fuel load of *Pinus densiflora* in Bonghwa, Gyeongbuk.

| Dependent variables | Model form   | Coefficients   |              | F-value | R <sup>2</sup> | S.E.  | P-value |
|---------------------|--------------|----------------|--------------|---------|----------------|-------|---------|
|                     |              | a(S.E.)        | b(S.E.)      |         |                |       |         |
| FOL                 | $Y = a + bD$ | -2.123(1.471)  | 0.405(0.100) | 16.425  | 0.672          | 1.429 | 0.004   |
|                     | $Y = aD^b$   | -2.058(0.446)  | 2.213(0.394) | 31.511  | 0.798          | 0.189 | 0.000   |
| ACFL                | $Y = a + bD$ | -4.922(2.154)  | 0.951(0.146) | 42.169  | 0.841          | 2.092 | 0.000   |
|                     | $Y = aD^b$   | -1.384(0.260)  | 1.975(0.230) | 73.827  | 0.902          | 0.110 | 0.000   |
| TBR                 | $Y = a + bD$ | -12.029(3.685) | 1.664(0.250) | 44.115  | 0.846          | 3.577 | 0.000   |
|                     | $Y = aD^b$   | -1.761(0.231)  | 2.389(0.204) | 137.482 | 0.945          | 0.098 | 0.000   |
| TCFL                | $Y = a + bD$ | -14.152(4.618) | 2.069(0.314) | 43.438  | 0.844          | 4.484 | 0.000   |
|                     | $Y = aD^b$   | -0.472(0.168)  | 1.757(0.149) | 116.272 | 0.946          | 0.104 | 0.000   |

Note: D is diameter at breast height(cm), FOL is foliage(kg), ACFL is available crown fuel load(kg), TBR is total branch(kg), TCFL is total crown fuel load(kg), S.E. is standard error.

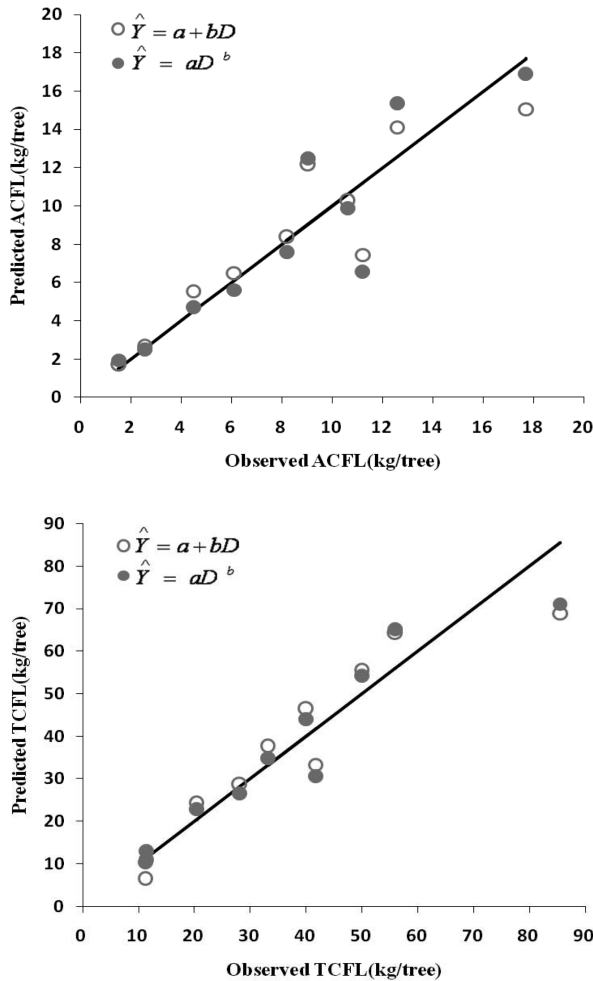


Figure 3. Relationship between predicted and observed values of available and total crown fuel loads using linear and allometric equations.

나타났다.

Table 4는 수관연료량을 추정하기 위하여, 독립변수로 흉고직경을 이용하였으며 잎의 연료량, 이용 가능한 수관 연료량, 전체 가지연료량, 전체 수관연료량을 추정하기 위해 선형 및 비선형 회귀모형식에 대한 모수추정 결과를 나타낸 것이다. 회귀분석 결과, 선형회귀식의 결정계수(R<sup>2</sup>) 값은 잎의 연료량 67%, 이용 가능한 수관연료량 84%, 전체 가지연료량 85%, 전체 수관연료량 88%로 나타났으며, 비선형 회귀식의 결정계수(R<sup>2</sup>) 값은 잎을 제외하고 모든 부위에서 90% 이상으로 나타나 상대적으로 선형회귀식에 비해 높은 설명력을 보였다. 또한 회귀식으로 이용 가능한 수관연료량과 전체 수관연료량을 추정할 결과, 비선형회귀식이 선형회귀식에 비하여 수관연료량 추정 시 더 적합한 것으로 나타났다(Figure 3).

### 결론

본 연구에서는 경북 봉화 지역의 소나무 임분을 대상으

로 수관연료밀도의 특성을 분석하고, 수관부위별 연료량 추정을 위한 회귀식을 개발하고자 하였다. 소나무림에 대한 수관의 수직적 구조에서 연료량 비율은 수관의 중간부분이 가장 높은 것으로 나타났으며, 수관연료량에서 잎과 가지가 차지하는 비율은 잎 25%, 직경 1 cm이하 가지 33%로 이용 가능한 연료량은 58%를 차지하는 것으로 나타났다. 봉화 지역 소나무림에 대한 수관연료밀도는 0.45 kg/m<sup>3</sup>로 매우 높게 나타났고, 잎과 1 cm이하의 수관화 확산 시 이용 가능한 수관연료밀도는 0.27 kg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 본 연구에서 제시된 회귀추정식은 봉화 지역 소나무림에서의 산불관리와 수관화모델에 대한 정량적인 연료량 정보를 제공해 줄 수 있다. 또한, 향후 소나무림의 수관화 행동 예측, 수관화 위험성 평가 등을 위해서 다양한 임령, 임분밀도, 지위 및 전국적인 범위로 소나무림에 대한 수관연료특성과 부위별 연소량 추정에 관한 지속적인 연구가 요구된다.

### 감사의 글

본 논문은 국립산림과학원 산림방재연구과 위탁연구과제 수관화 피해지 소나무 부위별 수관 연료량 추정에 대한 연구결과의 일부임.

### 인용문헌

1. 구교상, 이병두, 원명수, 이명보. 2010. 대구 팔공산 지역 소나무 수관층 연료 특성. 한국임학회지 99(1): 52-56.
2. 박인협, 김준선. 1989. 한국산 4개 지역별 소나무천연림의 물질 현존량 추정식에 관한 연구. 한국임학회지 78(3): 323-330.
3. 박인협, 이석면. 1990. 한국산 4개 지역별 소나무 천연림의 물질생산에 관한 연구. 한국임학회지 79(2): 196-204.
4. 박정식, 윤선영. 2009. 현대 통계학. 다산출판사 pp. 353.
5. 신만용, 정동준, 이태희. 1999. 우리나라 주요 수종별 수관형 형태식 개발의 관한 연구. 한국산림측정학회지 2(1): 3-11.
6. 산림청. 2011. 산림청홈페이지. <http://www.forest.go.kr/>
7. 산림청. 2010. 임업통계연보. 제40권 pp. 186-193.
8. 이경학, 손영모, 노대균, 권순덕. 2002. 우리나라 주요 6수종의 수간중량 추정식. 한국임학회지 91(2): 206-212.
9. 이병두, 원명수, 김선영, 윤석희, 이명보. 2010. 소나무 수관 부위별 연료량 추정식 개발 및 수관연료밀도 분석. 한국임학회지 99(3): 391-396.
10. Bilgili, E. and Kucuk, O. 2009. Estimating above-ground fuel biomass in young Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.). Energy & Fuels. 23: 1797-1800.
11. Call, P.T. and Albin, F.A. 1997. Aerial and surface fuel consumption in crown fires. International Journal of Wild-

- land Fire 4(3): 143-155.
12. 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* 12: 39-50.
  13. Gray, K.L. and Reinhardt, E.D. 2003. Analysis of algorithms for predicting canopy fuel. In *Proceedings of the Second International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress and Fifth Symposium on Fire and Forest Meteorology*, Orlando, FL, American Meteorological Society, Boston, MA, November 16-20. Paper pp. 58.
  14. Hough, W.A. 1973. Fuel and weather influence wildfires in sand pine forests. *USDA Forest Service Southeast Research Paper SE-RP-106*. pp. 6.
  15. Kucuk, O., Saglam, B. and Bilgili, E. 2007. Canopy fuel characteristics and fuel load in young black pine trees. *Biotechnology and Biotechnological Equipment* 21(2): 235-240.
  16. Mitsopoulos, I.D. and Dimitrakopoulos, A.P. 2007. Allometric equations for crown fuel biomass of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Greece. *International Journal of Wildland Fire* 16: 642-647.
  17. Peter, Z.F., Joseph, E.C., Allison, E.C., Margaret M.M. and W. Wallace Covington. 2004. *Ecological Modelling* 175: 231-248.
  18. Reinhardt, E.D., Scott, J.H., Gray, K. and Keane, R.E. 2006. Estimating canopy fuel characteristics in five conifer stands in the western United States using tree and stand measurements. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 2803-2814.
  19. Sando, R.W. and Wick, C.H. 1972. A method of evaluating crown fuels in forest stands. *USDA Forest Service Research paper NC-84*.
  20. Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. and Kira, T. 1964. A quantitative analysis of plant form-the pipe model theory. I. Basic analysis. *Japanese Journal of Ecology* 14: 97-105.
  21. Todd, L.E. and Moskal, L.M. 2010. Fusion of LiDAR and imagery for estimating forest canopy fuels. *Remote Sensing of Environment* 114: 725-737.

---

(2011년 4월 19일 접수; 2011년 5월 20일 채택)