

영주 산불지역 소나무림의 수관층 연료 특성 및 연소율 추정

Crown Fuel Characteristics and Estimation of Burning Rate of *Pinus densiflora* Stands in Youngju Forest Fire

김성용¹ · 이영진¹ · 서연옥¹ · 박상문¹ · 장미나¹ · 이병두² · 구교상² · 이명보²

¹공주대학교 산림자원학과, ²국립산림과학원 산림방재연구과

서 론

산불은 우리나라 산림의 주요 교란요소 중 하나이며 연소 과정에 의하여 장기적인 산림생태계의 구조적 변화를 일으키고 산불지역에 사회·경제적으로 피해를 발생 시키므로 지자체는 물론, 정부에서도 많은 관심을 가지고 있다. 산불의 종류는 크게 지표화, 수간화, 수관화, 지중화로 분류할 수 있으며 그 중 수관화는 확산 속도가 매우 빠르므로 대형 산불로 이어질 가능성이 높다(Mitsopoulos and Dimitrakopoulos, 2007). 수관화는 지표화를 거쳐 발생하며 바람의 영향을 많이 받기 때문에 산불 확산 속도는 3배에서 크게는 20배 까지 증가한다(Call and Albin, 1997). 우리나라의 대표적인 대형 산불은 1996년 고성산불(피해면적: 3,762ha), 2005년 양양산불(피해면적: 974ha)이 있으며 두 산불 모두 수관화로써 동해안 바닷바람(최대풍속 30m/sec)의 영향으로 확산속도가 매우 빨라 진화하기 어려운 산불이었다. 수관화는 산불 자체의 특성과 더불어 진화 전략에도 매우 중요한 요소이므로 이에 관련된 인자와 기작에 대한 연구가 요구된다(구교상 등, 2010).

소나무는 수관화에 매우 취약한 것으로 알려져 있다. 그 이유는 테르펜 등 정유 물질이 많고 절간이 뚜렷한 것이 특징이며, 수관층이 하나뿐인 단층으로 이루어져 불의 통로가 쉽게 생겨 수관화 확산 속도가 매우 빠르기 때문이다(권성민 등, 2008).

Omer and Ertugrul(2007)은 수관화의 중요인자는 날씨와 지형도 중요하지만 수관연료특성 또한 매우 중요하므로 이에 대한 정확한 추정과 예측이 필요하다고 하였다. Reinhardt et al.,(2000)은 수관층 연료특성을 수관연료밀도(Crown bulk density), 수관높이(Crown base height), 수분

함량(Fuel moisture content) 3가지로 제시하였고, 수관층 연료특성 중 수관 연료밀도는 수관 단위 체적당 이용 가능한 수관층 연료의 양을 의미하며 수관높이는 지표층에서 수관화가 일어날 수 있는 충분한 수관연료밀도가 있는 곳까지의 거리를 의미한다고 하였다(Sando and Wick, 1972).

국내에서 수관층 연료특성에 대한 연구는 구교상 등(2010)외에 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 산불이 발생한 경상북도 지역 소나무림에 대하여 수관층 연료 특성을 분석하고, 연소율과 연소량을 추정, 산불의 강도와 특성을 분석하여 소나무림에 대한 수관화 발전 예측모델을 개발하도록 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 표준지 선정 및 수관층 부위별 구분

연구 대상지의 주요 수종은 소나무림으로 최근 숲가꾸기를 한 지역으로 재해 저감을 하지 않아 벌도목이 그대로 방치되어 있었다. 연구대상지 내 피해목 9그루와 인근에 피해를 입지 않은 미피해목 10그루를 선정, 기계톱을 이용하여 지표면에서 0.2m 부근을 벌채하였다. 벌채목은 피해목과 미피해목이 상응할 수 있게 직경급 별로 고르게 분포하도록 선정하였고, 수형과 수관이 바르며 수간이 썩지 않고 흠이 없는 임목을 표준목으로 선정하였다. 수고와 흉고직경을 측정 후 나무를 1m 단위로 절동 하였으며, 가지가 있는 부위부터 수관폭을 측정하여 체적을 산출하였고, 각 층별 잎과 가지를 분류하여 무게를 측정하였다.

Brown and Bradshaw(1994)는 수관화가 강하게 발생된 지역이라 할지라도 수간과 굵은 가지는 연소되지 않고 남아 있게 된다고 하였다. 따라서, 구교상 등(2010)의 연구방법



그림 1. 조사 대상지

을 인용하여 잎을 먼저 분류하고 가지를 0.5cm이하, 0.5~1cm이하, 1~2cm이하, 2~4cm이하, 4cm 이상으로 분류한 후 잎과 1cm 이하 가지를 연소 가능한 인자라 가정하였다.

2. 수분함량 측정

수간과 잎, 가지를 채취한 시료는 완전히 건조되어 무게 변화가 없는 상태에 도달할 때 까지 건조하고 함량에 도달했을 때 시료를 꺼내 건조된 무게를 측정, 건조 전과 건조 후의 무게를 다음과 같은 식에 의해 비교하여 수분함량을 산출하였다.

$$\text{수분함량}(\%) = \frac{\text{생중량} - \text{건중량}}{\text{건중량}} \times 100 \dots (1)$$

3. 각 부위별 연료량 비율 및 수관밀도

각 부위별 연료량은 1m씩 나누어진 층위별로 각각의 부위에 대하여 채취해 온 시료를 이용하여 수분함량을 산출한 후 연료량을 추정하였다. 연료밀도는 신만용 등(1999)의 수관 형태식 연구 결과를 기반으로 수관의 장축과 단축 평균값을 이용하여 비율높이를 산출한 후 큰 원추체에서 바로 위의 원추체를 빼 1m 단위의 수관층 체적을 구하였다.

$$\text{수관연료밀도} (m^3/ha) = \frac{\text{수관연료량}}{\text{수관재적}} \dots (2)$$

4. 연소율과 연소량

10그루의 미피해목의 연료량을 분석한 후, 박인협과 김

준선(1989)의 3가지 상대생장식 연구방법을 기반으로 회귀 분석을 실시하였으며 피해목의 연소율과 연소량을 추정하였다.

결과 및 고찰

1. 조사대상목 특성

표준목으로 선택된 미피해목 10본과 이에 상응하는 피해목 9본에 대한 기술 통계값은 미피해목에 대한 평균 흉고직경이 17.3cm, 피해목에 대한 평균 흉고직경은 15.5cm를 나타냈으며, 평균 수고는 미피해목 9.7m, 피해목 9.1m를 나타냈다.

표 1. 피해 대상목 기술 통계량

| No. of trees | Age(years) | Diameter(cm) | Height(m) | Crown Base Height(m) |
|--------------|------------|--------------|-----------|----------------------|
| 9 | 43 | 15.5 | 9.1 | 4.0 |
| | 25-61 | 7-24.5 | 7.4-12.7 | 2.8-6.5 |

표 2. 미피해 대상목 기술통계량

| No. of trees | Age(years) | Diameter(cm) | Height(m) | Crown Base Height(m) |
|--------------|------------|--------------|-----------|----------------------|
| 10 | 40 | 17.3 | 9.7 | 5.1 |
| | 27-62 | 9-23 | 7.4-12.2 | 4.4-5.8 |

2. 수분함량

미피해목의 살아있는 수관 부위의 평균 수분함량은 105.3%로 나타났으며 각 부위별 수분함량에서 생엽이 119%로 가장 높았다. 기존 연구와 비교해 보면 구교상 등(2010)의 대구 팔공산 지역 살아있는 소나무 수관부위 평균 수분함량의 112.7%, 생엽 127%와 비슷한 수치를 나타냈다. 죽은 수관부위의 평균 수분함량은 20.8%로 나타났으며 굵은 가지일수록 수분함량이 작아지는 패턴을 나타냈다.

표 3. 수관층 각 부위별 수분함량(%)

| Category | Needle | Branch(cm) | | | | | Mean |
|----------|--------|------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | | Under 0.5 | 0.5-1 | 1-2 | 2-4 | Over 4 | |
| Live | 119.0 | 99.0 | 92.7 | 105.2 | 105.9 | 109.8 | 105.3 |
| Dead | | 27.9 | 32.8 | 24.3 | 20.7 | 16.0 | 20.8 |

3. 각 부위별 연료량 비율

영주지역 소나무의 부위별 연료량 비율은 그림 2에서 보는 바와 같이 평균 수간 70.3%, 가지 23.2%, 생엽 6.5%로 나타났으며 직경급이 커질수록 수간의 연료량 비율이 낮아지고 가지와 생엽의 비율이 높아지는 패턴으로 나타났다. 수관에 대한 합계에서 생엽의 비율은 그림 3에서 보는 바와 같이 22.1%를 나타내어 구교상 등(2010)의 팔공산지역 소나무 생엽 26.7%보다 낮고, *Pinus brutiaten*(Omer and Ertugrul, 2007)의 생엽 약 16%보다는 높은 수치를 나타냈다. 수관 합계에 대한 앞과 1cm이하 가지의 연료량(available fuel load) 비율은 수관전체의 50.3%를 차지해 수관화가 발생하였을 때 연소될 수 있는 이용 가능한 연료량이 50% 이상 인 것으로 분석 되었다.

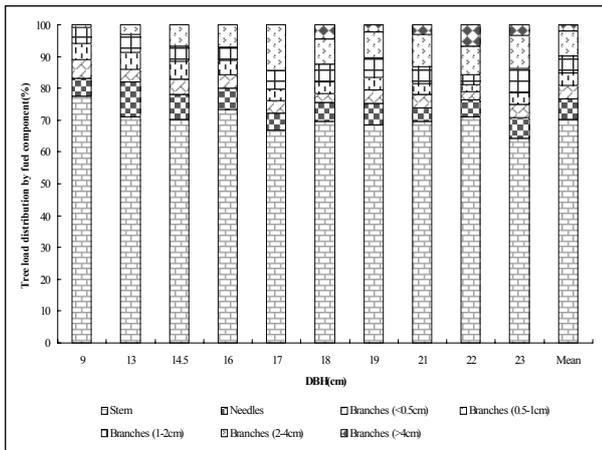


그림 2. 임목 전체 연료량에 대한 각 부위별 비율

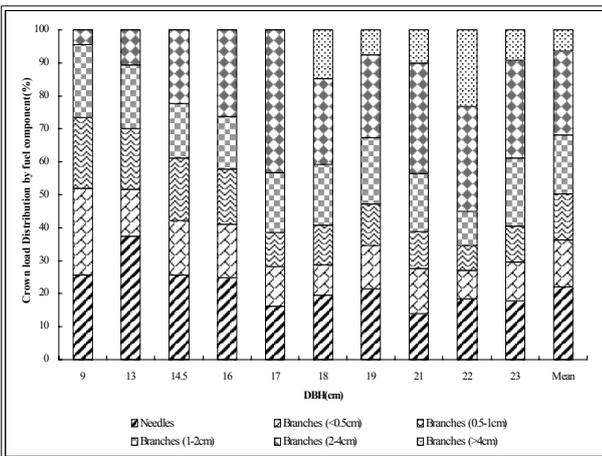


그림 3. 수관 전체 연료량에 대한 각 부위별 비율

4. 수관연료밀도(Crown bulk density)

영주지역 소나무의 수관 연료밀도는 평균 0.45kg/m³로써 *Pinus halepensis*(Mitsopoulos and Dimitracopoulos, 2007)의 수관연료밀도 0.18kg/m³ 보다 매우 높게 나타났으며 그 중에서 이용 가능한 연료량(available fuel load)의 수관연료 밀도는 0.2240kg/m³으로 Sando and Wick(1972)의 수관화전이 최소기준 0.037kg/m³ 보다 약 6배, Beukema *et al.*,(1978)이 제시한 0.011kg/m³ 보다 약 20배 많은 수치를 나타내어 수관화로의 확산이 가능한 임상 상태를 보였다.

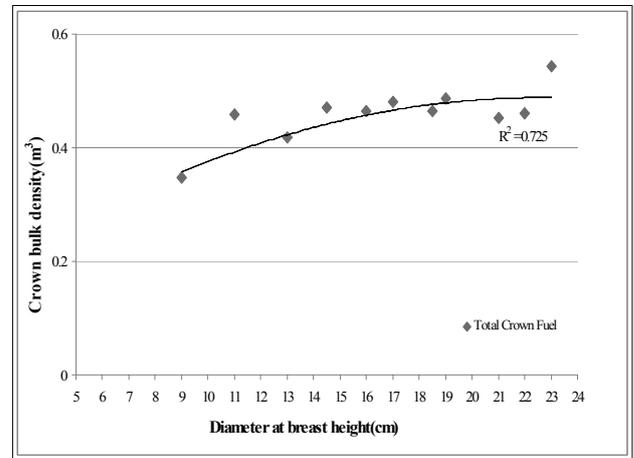


그림 4. 수관합계에 대한 연료 밀도

5. 연소율과 연소량 추정

미피해 표준목에 대한 피해목의 연소율을 추정된 결과 $\log W_t = A + B \log D$ 상대성장식에서 수관전체 연소율은 39%를 나타냈고 $\log W_t = A + B \log D^2 H$ 와 $\log W_t = A + B \log D + C \log H$ 의 상대성장식 수관전체 연소율은 51%를 나타냈다. 1cm이하 가지에서는 50% 이상의 연소율을 보였으며 2cm 이상의 가지에서는 보편적으로 연소율 값을 측정하기 곤란하였다. 3개의 상대성장식을 이용하여 연소율을 추

표 4. 상대성장식을 이용한 수관층 연소율(%)

| | Under 0.5cm | 0.5-1cm | 1-2cm | Crown (Total) |
|--------------------------------------|-------------|---------|-------|---------------|
| $\log W_t = A + B \log D$ | 69% | 48% | 41% | 39% |
| $\log W_t = A + B \log D^2 H$ | 75% | 57% | 35% | 51% |
| $\log W_t = A + B \log D + C \log H$ | 71% | 54% | 29% | 51% |

표 5. ha당 수관층 연소량(kg)

| | Needle | Under 0.5cm | 0.5-1 cm | 1-2 cm | Crown (Total) |
|---------------------------------|--------|----------------|-------------|-----------|------------------|
| $\log Wt = A+B \log D$ | 3,299 | 1,393 | 953 | 396 | 6,042 |
| $\log Wt = A+BI \log D^2H$ | 3,298 | 1,532 | 1,142 | 946 | 6,959 |
| $\log Wt = A+B \log D+C \log H$ | 3,300 | 1,475 | 1,068 | 814 | 6,656 |

정한 후 ha당 연소량을 분석해 본 결과 ha당 총 합계 연소량은 6,042~6,959kg/ha로 분석되었고, 잎은 약 3,300kg/ha, 0.5cm이하 가지 1,393~1,532kg/ha, 0.5~1cm이하 가지 953~1,142kg/ha로 분석되었다.

인용문헌

- 구교상, 이병두, 원명수, 이명보. 2010. 대구 팔공산 지역 소나무 수관층 연료 특성. 한국임학회지 99(1):52-56.
- 권성민, 전근우, 김남훈, 2008. 산불 피해 소나무 목재의 해부 및 물리적 특성 -피해 정도에 따른 차이-. 목재공학 36(4): 84~92.
- 박인협, 김준선. 1989. 한국산 4개 지역별 소나무 천연림의 물질 생산에 관한 연구. 한국임학회지 79(2): 196~204.
- 신만용, 정동준, 이태희, 1999. 우리나라 주요 수종별 수관형태식 개발에 관한 연구. 한국산림측정학회지 2(1): 3~11.
- Beukema, S.J., Greenough, D.C., Robinson, C.E., Kurtz, W.A., Reinhardt, E.D., Crookston, N.L., Brown, J.K., Hardy, C.C. and Stage, A.R. 1997. An introduction to the fire and fuel extension to FVS. in: Teck, R., Moues, M., Adams, J., eds. Proceedings of the Forest Vegetation Simulator conference, General Technique Report INT-373. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1: 91~195
- Brown, J.K. and Bradshaw, L.S. 1994. Comparisons of particulate emissions and smoke impacts from presettlement, full suppression and prescribed natural fire Periods in the Selway-Bitterroot Wildemess. International Journal of Wildland Fire 4(3): 143~155.
- Call, P.T. and Albin, F.A. 1997. Aerial and Surface fuel consumption in crown fires. International Journal of Wildland Fire 7(3): 259~264
- Mitsipoulos, 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.
- Omer, K. and Ertugrul, B. 2007. Crown Fiel Load Young Calabrian Pine (*Pinus Brutia* Ten.) Trees. Kasum. Cilt. 7: 2~10
- Reinhardt, E.D., Keane, R.E., Scott, J.H and Brown, J.K. 2000. Quantification of canopy Fuels in conifer forests: assessing crown fuel characteristics using destructive and nondestructive methods. Study plan on file at: U.S. Department of Agriculture, Forest Sevice, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Lab, Prescribed Fire and Fire Effects Research Work Unit, Missoula, MT. 1: 1~10
- Sando, R.W. and Wick, C.H. 1972. A method of evaluating crown fuels in forest stands. Research paper NC-84. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1: 10~17