

An Experimental Study on the Combustion Characteristics of *Pinus densiflora* Surface Layer by Slope Condition

Ye Eun Lee[#], Jeong Ki Kim, Cheol An Bang, Song Hee Han, Chun Geun Kwon, Sung Yong Kim⁺

Division of Forest Management, National Institute of Forest Science, 57 Heogi-ro, Dongdamun-gu, Seoul, Korea

Abstract

In this study, a laboratory burning experiment was conducted to examine the combustion characteristics of *Pinus densiflora* surface fuel by different slope conditions such as 0°, 10°, 20°, 30°. We observed the changes in forest fire behavior after fuel-bed ignition. According to the results of this study, the rate of fire spread increased as the slope angle increased; it was 14 times faster at slope angle of 30° than at 0°. The fire intensity also increased as the slope angle increased, ranging from 246.73 kW/m to 2,602.96 kW/m. The flame height and tilt decreased but the length of flame increased, when the slope angle increased. The total combustion rate also decreased as the slope angle increased. Since the moisture content of canopy fuel was measured higher with the increase of the crown base height under the same slope conditions, the risk of forest fire ignition was found to be low. The findings can be used as a basic data for understanding of fire behavior by slope condition.

Key words: forest fire, slope, crown base height, fire intensity, combustion rate

1. 서론

산불의 확산속도(Rate of spread)와 강도(Fire intensity)를 정확하게 예측하기 위해서는 연료유형(Fuel type), 수분함량(Fuel moisture content), 풍속(Wind), 경사(Slope) 등 각각의 인자에 대한 특징을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다(Chandler, *et al.*, 1983; Hyun, *et al.*, 1997; Chae & Lee, 2003; Kim, 2009; Kim, *et al.*, 2014). 우리나라는 국토의 약 63.5%가 산림으로 구성되어 있으며(KFS, 2019) 이중 26°이상의 급경사지는 약 60%

를 차지하고 있어 산불이 발생했을 때 진행속도가 빠르다. 일반적으로 경사면에서 산불이 발생하면 화염과 지표면과의 사이 각이 줄어들면서 미연소 연료로 열전달이 빠르게 이루어지기 때문에 평지에 비해 확산속도가 빨라진다(Kim, 2009; Morandini, *et al.*, 2018). 국외에서는 많은 실험연구를 통해 지형경사가 산불행동에 영향을 미치는 주요한 인자 중 하나라고 제시하였다(Wagner, 1988; Sharples, 2008; Dupuy, *et al.*, 2011). Chandler, *et al.*(1983)은 경사 0°에서 35°까지는 경사도가 약 10°씩 증가할 때, 확산속도가 2배

[#] The 1st author: Ye Eun Lee, Tel. +82-2-961-2949, Fax. +82-2-961-2699, e-mail. dldpms109@korea.kr

⁺ Corresponding author: Sung Yong Kim, Tel. +82-2-961-2686, Fax. +82-2-961-2699, e-mail. kitaco1@korea.kr

증가하고 경사 35°이상의 조건에서는 최대 10배 이상 증가한다고 제시한 바 있다(Chae & Lee, 2003; Kim, *et. al.*, 2017; Lee, 2019). Dupuy, *et. al.*(1995)는 실내실험을 통해 미연소 연료로 전달되는 복사열의 강도가 경사 30°에서 가장 높다고 제시한 바 있다. Marechal, *et. al.*(2011)은 산불확산속도는 평지와 비교했을 때 경사 30°에서 최대 약 19배 빨라지며, 경사조건은 산불확산속도 뿐만 아니라 지표연료의 연소율(Combustion rate), 화염 저류시간(Flame residence time), 화염온도(Flame temperature) 및 화염강도에 영향을 미친다고 제시하였다.

국내의 경우, Chae & Lee(2003)는 경사가 증가할수록 산불확산속도는 빨라지며, 경사 50°에서의 산불확산속도는 경사 15°에 비해 최대 약 13.7배 빨라진다고 제시하였다. Kim(2009)은 경사 30°까지 경사가 증가할수록 산불확산속도 및 화염각의 기울기는 비례적으로 증가한다고 제시하였다. 하지만 국내 연구들은 실제 산림환경(지표연료량, 연료습도 등)을 고려한 조건을 세밀하게 반영하지 못하였으며(Kim, *et. al.*, 2017) 정확한 비율에 맞춰 축소하지 않고 실험을 진행한 한계가 있었다. 본 연구에서는 우리나라에 가장 많이 분포하는 침엽수종인 소나무를 대상으로 경사조건이 소나무 지표층 연료의 연소특성에 미치는 영향을 관찰하고자 실제 산림환경을 정확한 비율에 맞춰 축소하여 연소실험을 진행하였다. 이를 통해 확산속도, 화염강도, 연소율 등의 항목을 이용하여 지표화 연소특성을

종합적으로 관찰함으로써 산불확산행동과 관련된 연구에 기여할 수 있는 기초자료를 구축하고자 하였다.

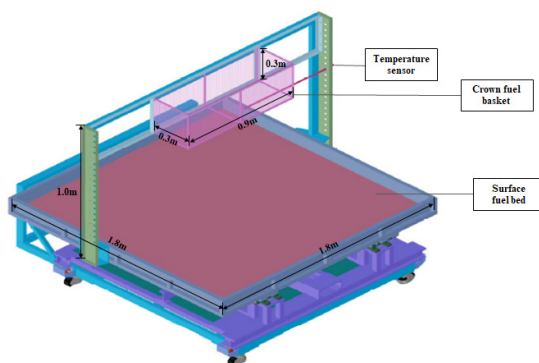
II. 재료 및 방법

1. 실험 장비

경사조건에 따른 소나무 지표층의 연소특성을 파악하기 위해서 ‘수관화 전이 실험장비’를 활용하였다(<Figure 1>). 이 장비는 경사를 다양하게 조절할 수 있으며, 지표연료판(Fuel bed)과 수관연료망(Crown fuel basket)이 부착되어 있어 지표연료의 화염이 수관연료로 옮겨 붙는 수관화 전이 현상을 모의할 수 있는 장비이다. 경사조건은 최대 30°까지 조절할 수 있으며 지표연료판의 규격은 길이 및 폭이 1.8m, 수관연료망의 규격은 길이 0.9m, 폭과 높이는 0.3m 이다.

2. 실험 재료

실험대상 재료는 침엽수종 중에서도 산불에 취약하다고 알려져 있는 소나무 낙엽으로 선정하였다. 연료는 경기도 포천시 내촌면 인근 소나무림에서 채집하여 약 일주일 간 자연건조과정을 거친 후 실험에 이용하였다. 실험을 수행할 때 수관층 연료는 현장조건과 최대한 유사한 수분함량을 유지시키기 위해 실험 당일에 채집하였고 가지와 잎을 분류하는 과정을 거친 후 수관연료의 잎만 실험에 이용하였다. 실험과정에서 Anderson(1978)이 제시한 수분함량 분석방법을 적용하



(a) The experiment equipment diagram



(b) The experimental equipment view with slope 30°

Figure 1. The equipment for laboratory combustion experiment

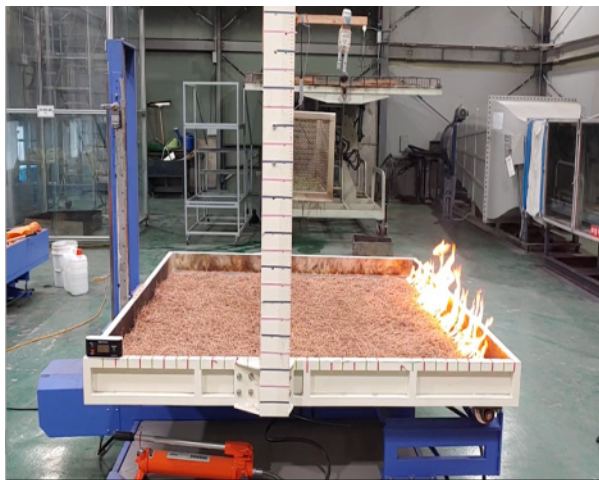
여 지표연료는 약 $12.8 \pm 1.2\%$, 수관연료는 $110.6 \pm 12.3\%$ 의 수분함량을 유지시켰으며 이는 선행연구에서 제시된 우리나라 봄철 평균 수분함량(Kwon, 2014)과 유사한 조건이었다.

3. 실험 방법

본 연구의 실험은 실제 산림을 1/9로 일정하게 축소하여 진행하였다. 이에 따라 1회 실험 당 연료조건은 기존 연구(Kim, 2015; Kim, *et. al.*, 2017)에서 제시된 바 있는 소나무 V영급 임분의 연료량 수치량 1.282 kg/m^2 , 수관연료량 2.03 kg/m^2 를 (지표연료 기준으로 Fuel bed(2.88 m^2))의 면적과 실험 축소비율을 반영하여 재계산하였다. 경사는 우리나라 지형을 고려하여 0° ,

10° , 20° , 30° 의 조건을 부여하였다(KFS, 2016; Kim, *et. al.*, 2017). 실험과정에서 연료를 배열할 때 우리나라 4영급 소나무림의 평균 연료층 두께인 약 $4.8 \pm 0.3 \text{ cm}$ 로 조절하여 연료를 최대한 균일하게 배열하고자 하였으며 임목의 지하고에 미치는 경사의 영향을 관찰하기 위해 0.35m(실제 산림 지하고 3.15m), 0.55m(4.95m), 0.75m(6.75m)의 높이에 수관연료를 위치시킨 후 흡수율 변화를 관찰하였다.

발화원(Firebrand)은 부탄가스를 장착한 토치를 사용하였으며 연소판의 최하단부에 불씨를 지핀 후 최초 30cm는 화염을 안정시키기 위한 구간으로 설정하였다. 최대한 동일한 환경에서 반복실험하기 위해서 습도 및 바람의 영향이 최소화된 밀폐된 실내에서 순



(a) Slope angle 0°



(b) Slope angle 10°



(c) Slope angle 20°



(d) Slope angle 30°

Figure 2. The experimental equipment view with the slope conditions

차적으로 실험을 실시하고 경사조건별 3회 반복한 후 평균값을 활용하였다.

4. 분석 방법

경사가 급해질수록 산불확산속도를 육안으로 확인하기 어렵기 때문에 모든 실험에 대해서 영상 촬영을 실시하여 확산속도를 측정하였다. 영상분석을 위해 색테이프를 이용하여 장비의 수평·수직 구간에 5cm 간격으로 표시한 후 디지털 카메라 및 액션캠을 이용하여 실험장비의 정면, 측면, 상부의 위치에서 화염의 이동하는 모습을 촬영하였다. 또한 Fuel bed의 길이를 두 구간으로 구분하고 각 구간별 거리를 화염의 도달 시간으로 나누어 평균 확산속도를 산출하였다. 산불강도는 연료무게와 확산속도 항목을 이용하여 측정하였으며 이때 Byram(1959)이 제시한 식(1)을 사용하였다. 열량(H)의 경우, 기존에는 Surface fire는 1800, Crown fire는 1700과 같이 국외에서 제시된 수치를 주로 이용하였으나(Stocks, 1987), 본 연구에서는 콘 칼로리미터(Cone calorimeter)를 이용하여 측정한 수종별 지표층 연료의 실제 발열량 수치를 활용하여 국내 실정에 적합한 산불강도를 계산하였다(<Table 1>).

$$I = HWR \quad (1)$$

I = 산불의 강도 (kW/m),

H = 소비된 연료의 열량 (kJ/kg),

W = 단위면적당 소비된 연료의 무게 (kg/m²),

R = 산불확산속도 (m/s).

화염특성은 산불확산예측 등 산불의 위험성을 평가하는데 중요한 항목이다. 본 연구에서는 선행연구

(Kim, 2009; Kim, 2011)에서 제시된 영상분석방법을 이용하여 화염높이(Flame height), 화염길이(Flame length), 화염각(Flame tilt)을 측정하였다(<Figure 3>). 경사에 따른 지표연료의 연소율을 측정하기 위해서 지표연료층의 연소가 종료된 후 저울을 이용하여 남은 재의 무게를 측정하였다. 그리고 측정된 재의 무게를 Fuel bed의 면적으로 나누어 단위면적당 연소율을 계산하였다. 이때 연소종료시간은 선행연구(Kim, 2011)에 따라 육안으로 보았을 때 화염이 사라진 시점으로 정의하였다. 한편, 실험 전과 후의 수관연료 무게 및 함수율을 측정하여 경사조건 및 지하고에 따라 변화하는 수관연료의 함수율을 관찰하였다.

III. 실험 결과

1. 경사에 따른 산불확산속도

경사조건에 따른 산불확산속도 변화를 관찰한 결과는 <Figure 4>와 같다. 연구결과에서, 경사 0°조건에서는 0.30 cm/s를 이동하였으며 경사 10°는 0.45 cm/s, 경사 20°는 0.86 cm/s, 경사 30°는 3.30 cm/s를 각각 이동하였다. 이때, 확산속도는 경사 0°에서 10°까지는 약 1.5배, 경사 10°에서 20°까지는 약 1.9배, 경사 20°에서 경사 30°까지는 약 3.9배 증가하였고 경사 30°의 확산속도는 평지에 비해 약 14배 빨랐다. 기존 연구결과를 보면, Dupuy, et. al.(2011)는 실내연소실험을 통해 경사 0°는 0.40 cm/s, 경사 10°는 0.67 cm/s, 경사 20°는 1.31 cm/s, 경사 30°는 3.36 cm/s의 산불확산속도 결과를 얻은 바 있어 본 연구에서 제시된 수치와 유사하였다. 점화 후 불의 시작지점부터 끝 지점까지의 거리인 1.8m에 도달하는 시간을 분석한 결과, 경사 0°는 450초, 경사 10°는 330초, 경사 20°는 180초, 경사 30°는 50초가 소요되면서 경사가 급해질수록 일정한 거리(1.8m)에 도달하는 시간이 짧아지는 경향을 보였다.

2. 경사에 따른 화염강도

경사에 따른 화염의 강도를 측정한 결과, 전체적으

Table 1. Heating value of *Pinus densiflora* species

Species	No. of samples	Heating value (KJ/kg)	Heating value (Kcal/kg)
Pinus densiflora	6	19,335.77 (S.D± 316.10)	4,619.70 (S.D± 75.49)

※ Note: S.D is Standard deviations.

※ Source: Kim(2015).

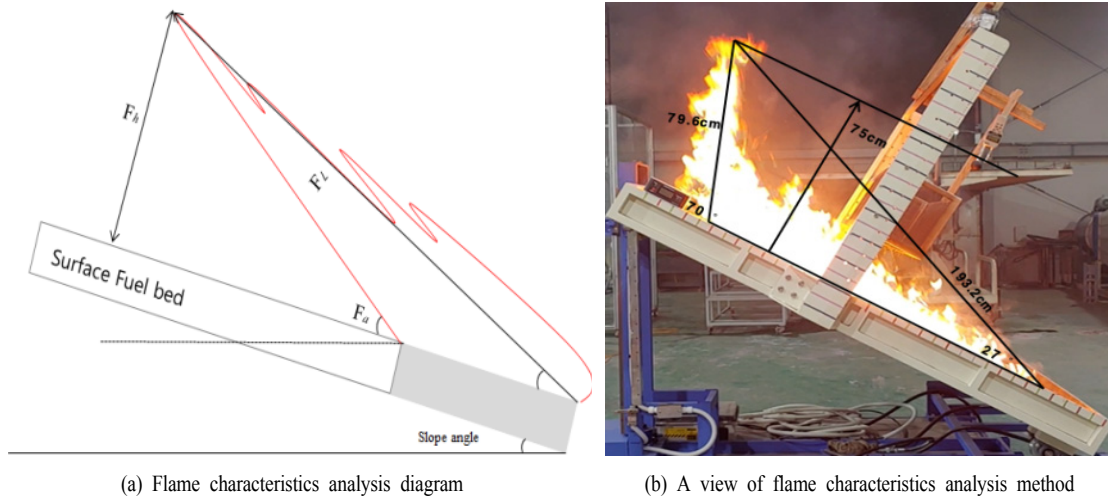


Figure 3. An analysis method of flame characteristics

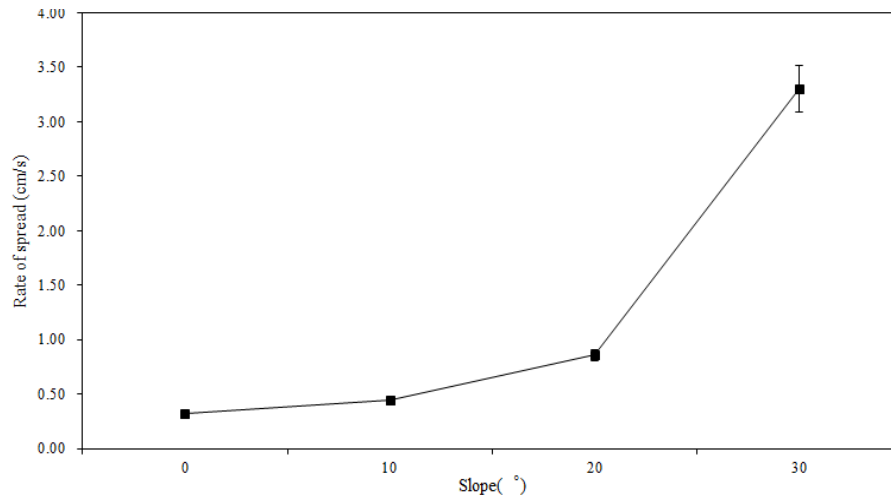


Figure 4. Rate of forest fire spread changes by the slope conditions (The bar is standard deviation)

로 246.7 kW/m ~ 2,603.0 kW/m의 범위를 보였으며 경사가 급해질수록 화염강도 또한 증가하는 경향을 보였다(<Figure 5>). 이때, 경사 30°의 화염강도는 평지와 비교했을 때 최대 약 11배 높았다.

기존 연구결과를 보면, Kim, *et. al.*(2017)이 무풍조건에서의 경사에 따른 산불강도 범위를 75.8 kW/m ~ 227.4 kW/m의 범위로 제시한 바 있어 본 연구와 비교하였을 때 다소 상이한 결과를 보였다(<Table 2>). 이는 첫 번째로, 확산속도 및 강도에 영향을 미치는 인자인 Fuel bed 폭이 기존연구에 비해 약 2배 이상 넓어 확산하는 화염이 상호 영향을 주면서 강도를 높이는 현상이 있었을 것으로 보인다(Dupuy, 1995). 이에 따

라 본 연구에서 실험에 적용된 연료량 및 Fuel bed의 면적이 기존연구와 비교하였을 때 약 2배 차이가 있었고, 확산속도는 3배 이상 차이가 있는 것으로 확인되었다. 화염강도에서 차이가 발생한 가장 큰 이유는, 기존연구와는 달리 본 연구에서는 현장과의 축소비율을 1/9로 설정하였기 때문에 실험에서 측정된 화염강도 값에 9를 곱하여 최종 화염강도를 산출하였다. 기존연구는 축소실험을 하지 않았기 때문에 실험에서 측정된 값을 그대로 제시한 것에서 차이가 발생한 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서는 사면이 개방된 넓은 장비를 사용하여 화염이 발달하는 형태가 실제 산불이 확산하는 패턴(타원형을 그리며 화두가 전진하는 형

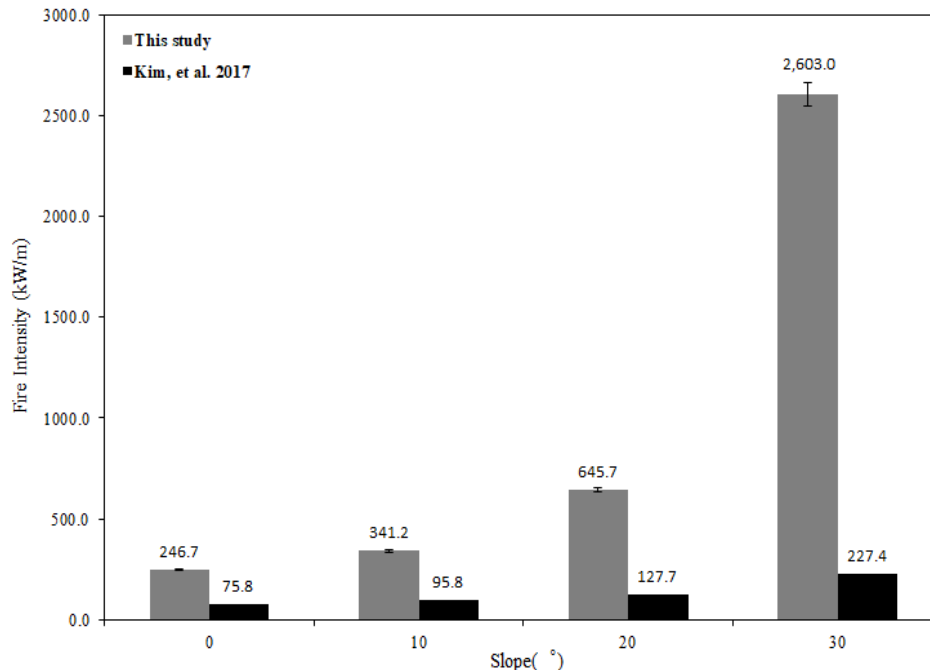


Figure 5. The comparison of fire intensity between the previous study and this study (The bar is standard deviation)

Table 2. Effects of fire intensity

Slope(°) Component	0°	10°	20°	30°
	Fire intensity(kW/m)			
This study	246.7±6.9	341.2±6.2	645.7±11.8	2,603.0±87.9
Kim, <i>et al.</i> , 2017	75.8	95.8	127.7	227.4

※ Note: S.D is Standard deviations.

태)을 보였기 때문에 기존 연구결과에 비해 실제 산림의 현실을 더 잘 반영한 수치라고 판단된다(Dupuy, *et al.*, 2011).

3. 경사에 따른 화염특성

경사조건에 따른 화염특성을 분석한 결과, 화염높이는 경사 20°까지 경사가 급해질수록 화염높이가 감소하다가 경사 30°에서 증가하였으며 경사 0°에서 49.9cm, 경사 10°는 42.7cm, 경사 20°는 39.8cm, 경사 30°는 53.2cm로 측정되었다(Figure 6>, a). 선행연구(Kim, *et al.*, 2014)에서는 무풍조건에서 경사가 급해질수록 화염의 각도가 지표면과 평행하는 방향으로 줄어들기 때문에 화염길이는 증가하고 화염각은 줄어든다고 제시한 바 있다. 본 연구결과에서 화염길이는

경사 0°조건에서 52.9cm, 경사 10°는 61.1cm, 경사 20°는 79.1cm, 경사 30°는 142.0cm로 경사가 급해질수록 화염길이가 증가하였다(Figure 6>, b). 화염각은 경사 0°는 82.3°, 경사 10°는 50.2°, 경사 20°는 35.0°, 경사 30°는 28.2°로 측정되어 경사가 급해질수록 화염각이 감소하는 것을 확인하였다(Figure 6>, c).

4. 경사에 따른 연소율

경사에 따른 연소율 변화를 분석한 결과, 경사 0°조건에서는 90.4%, 경사 10°는 83.3%, 경사 20°는 82.1%, 경사 30°는 81.6%로 경사가 증가할수록 연료의 연소율은 낮아지는 경향을 보였다(Figure 7>). Gollner, *et al.*(2013)는 지표연료의 연소율은 확산속도와 반비례하며, 경사 -60°~ 0°까지는 연소율이 서서히 증가하다

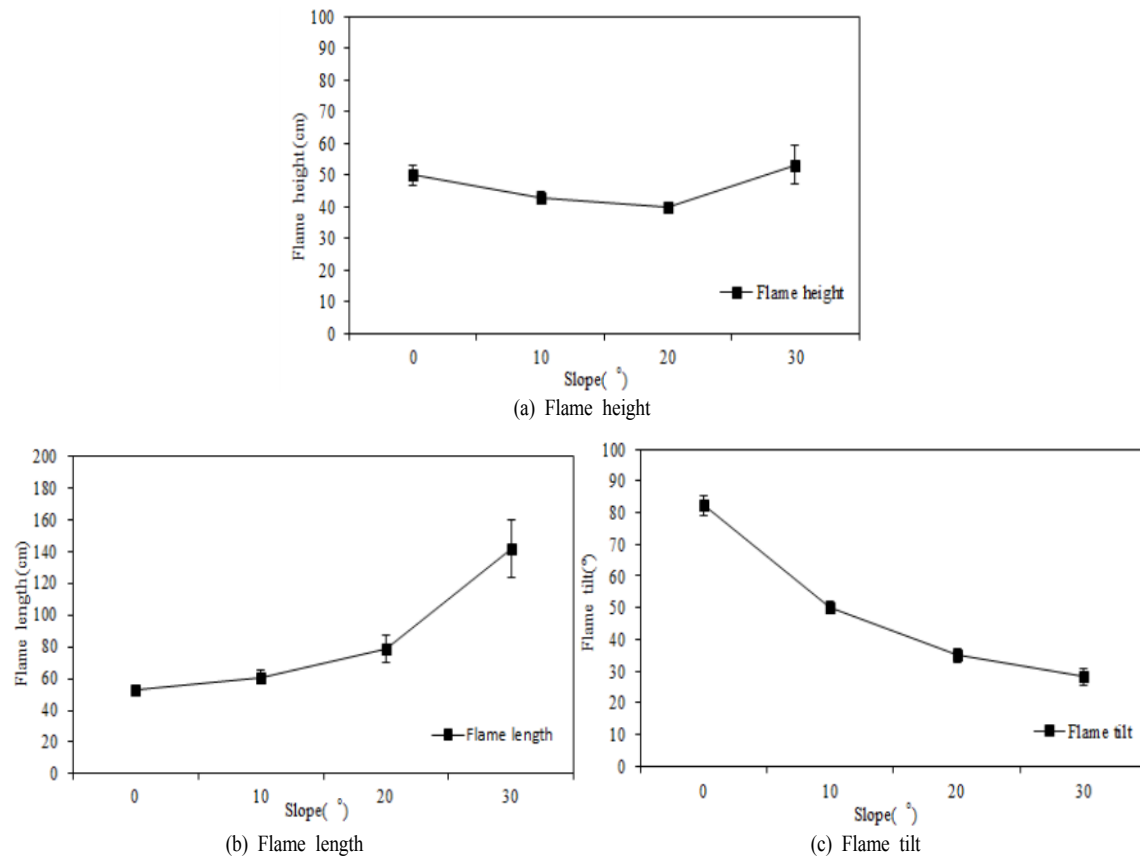


Figure 6. Flame characteristics changes by the slope conditions (The bar is standard deviation)

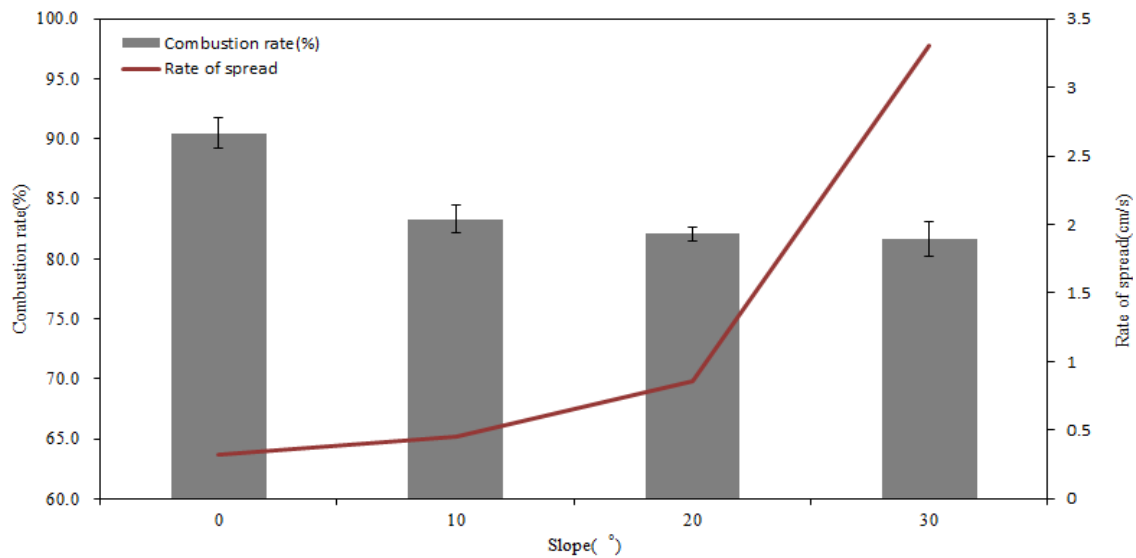


Figure 7. The comparison of combustion rate and rate of spread (The bar is standard deviation)

가 경사 0°를 기점으로 경사 60°까지 경사도가 증가할수록 지표연료의 연소율이 지속적으로 감소한다고 제시한 바 있어 본 연구결과는 선행연구와 유사하였다.

5. 수관연료 함수율

선행연구(Jang, *et. al.*, 2016)에서는 지하고 및 수관연료의 함수율이 높을수록 지표화로부터 수관화로 전이될 때 필요한 열 소비량이 증가하기 때문에 수관화

발생 위험성이 낮아진다고 제시한 바 있다.

본 연구에서는 경사조건에 따른 수관연료 함수율 변화를 분석한 결과, 화염이 수관연료에 직접 닿은 0.35m 조건을 제외한 나머지 지하고 조건에서는 경사 20°까지 경사가 증가할수록 수관연료의 함수율이 감소하였고 경사 30°에서 다시 증가하였다. 지하고 0.55m에서는 경사가 10°증가했을 때 수관연료 함수율은 약 9.2% 감소하고 경사가 20°증가했을 때 15.6% 감소하였다. 지하고 0.75m에서는 경사가 10°증가했을 때 수관연료 함수율은 약 20.1% 감소하였고 경사가 20°증가하였을 때 26.9% 감소하였다(<Figure 8>). 선행연구(Jang, *et. al.*, 2016)에서 임분의 지하고가 높아질수록 지표화에서 수관화로 전이될 때 요구되는 지표화 강도 및 화염길이의 도달기준이 높아진다고 제시하였다. 본 연구에서 지하고가 높아질수록 수관연료의 함수율이 감소한 것은, 먼저 반복되는 실험에서의 지표연료량은 고정되어 있었기 때문에 수평 및 수직으로 방출되는 지표화강도는 일정하였다. 하지만

임목의 지하고는 높아졌기 때문에 지표화로부터 발생하는 열방출이 수관연료에 도달하는 데 있어 차이가 발생한 것으로 판단하였다.

IV. 결론

본 연구에서는 경사조건을 부여한 실내산불연소실험을 수행하여 연소특성변화를 관찰하였다. 연구결과에 의하면, 경사가 급해질수록 확산속도는 최대 3.293 cm/s까지 빨라졌으며 화염강도는 최소 246.73 kW/m ~ 최대 2,602.96 kW/m의 범위를 보이면서 경사가 급해질수록 확산속도 및 화염강도가 증가하였다. 또한 동일한 경사조건에서 지하고가 높아질수록 수관연료의 함수율은 높게 측정되었다.

현재까지 진행된 국내 산불연구는 우리나라 산림의 산악지형 등을 고려하여 설계된 실험적 연구가 부족하며 국외에서 제시된 상수를 이용하여 산불강도를 산출하는 등 국내 현실과 맞지 않는 부분이 많았다.

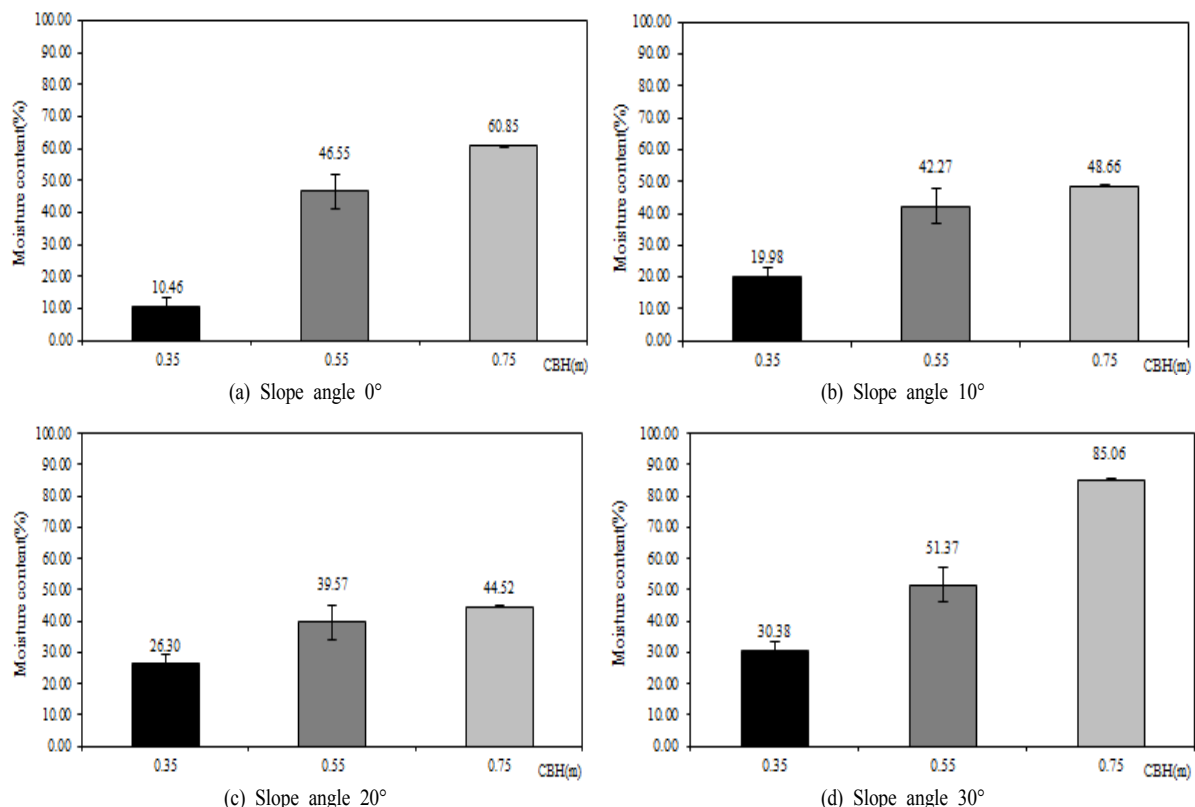


Figure 8. Moisture content of crown fuel changes by the slope conditions (The bar is standard error)

본 연구는 국내에서 수행된 기존 실험연구들과 비교하였을 때, 가장 큰 실험규모로 수행되었으며, 우리나라 산림과의 1/9 축소비율을 적용함으로써 산불행동에 미치는 경사조건의 영향을 더 정확성 높게 정량적으로 제시하였다는 데 가장 큰 의의가 있다. 하지만 우리나라에서 산불의 확산은 경사, 풍속, 연료의 3요소에 의해서 이루어지기 때문에 향후 풍속조건을 적용한 지표화-수관화 전이실험을 수행하여 수관화 전이 및 확산이 발생하지 않는 지하고, 지표 및 수관연료량, 수관연료밀도 등을 제시함으로써 숲가꾸기의 지표를 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Chae, Hee Mun and Chan Young Lee. 2003. Slope and Forest Fuel Effect on Spreading of Forest Fire. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 5(3): 179-184.
- Dupuy, J. L., J. Marechal, D. Portier, and J. C. Valette. 2011. The Effects of Slope and Fuel Bed Width on Laboratory Fire Behaviour. *International Journal of Wildland Fire*. 20(2): 272-288.
- Gollner, M. J., X. Huang, J. Cobian, A. S. Rangwala, and F. A. Williams. 2013. Experimental Study of Upward Flame Spread of an Inclined Fuel Surface. *International Journal of Proceedings of the Combustion Institute*. 34(2): 2531-2538.
- Jang, Mi Na, Sung Yong Kim, and Young Jin Lee. 2016. Nomographs for Predicting Crown Fire Transition of Pinus Densiflora Stands in Central Regions of Korea. *Journal of Disaster Management*. 16(5): 135-1413.
- Kim, Dong Hyun. 2009. A Study on the Flame Tilt and Flame Spread due to Up-slope on the Surface Fuel Bed: No Wind Condition. *Journal of Disaster Management*. 9(5): 57-62.
- Kim, Hyung Sik, Young Jin Kang, Jang Hwan Kim, Kyeong Ha Kim, Byung Doo Lee, and Jung Hoon Kim. 2014. Comparison of Experimental and FDS Data for Calculating Heat-affected Range in Forest Fires. *Journal of the Korean Society of Safety*. 29(4): 91-96.
- Kim, Jeong Hun, Eung Sik Kim, Dong Hyun Kim, and Jang Whan Kim. 2014. The Study on Surface Fire Spread in Fuel Bed. *T. of Korean Institute of Fire Science and Engineering*. 28(6): 22-27.
- Kim, Sung Yong, Mi Na Jang, Byung Doo Lee, and Young Jin Lee. 2013. Assessment of Canopy Fuel Characteristics for Five Major Coniferous Species in Korea. *Journal of Korean Forest Society*. 102(2): 247-254.
- Koo, Won Hoi and Min Ho Baek. 2019. A Study of Status Investigation to Reinforce the Capability of Field Responders in Forest Fires. *Journal of Disaster Management*. 19(3): 113-120.
- Korea Forest Service. 2019. *Statistical Yearbook of Forestry*.
- Korea Forest Service. 2020. *Statistical Yearbook of Wildfire*.
- Lee, Hae Pyeong, Si Young Lee, and Young Ju Park. 2009. A Study on Combustion of Living Leaves for Various Coniferous Trees and Broadleaf Trees. *Journal of the Korean Society of Safety*. 24(4): 96-103.
- Morandini, F., X. Silvani, J. L. Dupuy, and A. Susset. 2018. Fire Spread Across a Sloping Fuel Bed: Flame Dynamics and Heat Transfers. *International Journal of Combustion and Flame* 190(1): 158-170.
- Park, Joo Won, Ho Jung Youn, Byung Doo Lee, Choong Shik Woo, Young Been Kim, and Bok Nam Lee. 2016. Review of Wildland Fire Smoke Dispersion Models and Suggestion for Korean Forest-fire Smoke Impact Forecast System. *Journal of Disaster Management*. 16(6): 197-208.
- Sharples, J. 2008. Review of Formal Methodologies for Wind-slope Correction of Wildfire Rate of Spread. *International Journal of Wildland Fire*. 17(2): 179-193.
- Viegas, D. 2004. Slope and Wind Effects on Fire Propagation. *International Journal of Wildland Fire*. 13(2): 143-156.
- Wagner, V. 1988. Effect of Slope on Fires Spreading Downhill. *Canadian Journal of Forest Research*. 18(6): 820-822.
- Korean References Translated from the English*
- 구원희, 백민호. 2019. 산불현장 대응인력 역량강화를 위한 실태조사 연구. 한국방재학회논문집. 19(3): 113-120.
- 김동현. 2009. 경사에 따른 화염각 변화와 지표 화염 확산에 대한 연구: 무풍조건기반. 한국방재학회논문집. 9(5):

- 57-62.
- 김성용, 장미나, 이병두, 이영진. 2013. 우리나라 주요 침엽수종의 수관층 연료특성 평가. 한국임학회지. 102(2): 247-254.
- 김정훈, 김응식, 김동현, 김장환. 2014. Fuel bed에서의 지표화 확산에 관한 연구. 한국화재소방학회 논문지 28(6): 22-27.
- 김형식, 강영진, 김장환, 김경하, 이병두, 김정훈. 2014. 산불 열영향 범위 산정을 위한 실험 및 FDS 데이터 비교 한국안전학회지. 29(4): 91-96.
- 박주원, 윤호중, 이병두, 우충식, 김영빈, 이복남. 2016. 우리나라 산불연무영향 예보체계 개발을 위한 산불연무확산모델 고찰 및 제언. 한국방재학회논문집. 16(6): 197-280.
- 산림청. 2019. 임업통계연보.
- 산림청. 2020. 산불통계연보.
- 이해평, 이시영, 박영주. 2009. 영동지역 주요 침엽수종 및 활엽수종 생엽의 연소특성에 관한 연구. 한국안전학회지. 24(4): 96-103.
- 장미나, 김성용, 이영진. 2016. 노모그래프를 이용한 중부지방 소나무 임분의 수관화 전이 예측. 한국방재학회논문집. 16(5): 135-141.
- 채희문, 이찬용. 2003. 산불 확산에 영향을 미치는 임지 내 산림연료와 경사도에 관한 연구. 한국농림기상학회지. 5(3): 179-184.

Received: May 19, 2020 / Revised: Jun. 22, 2020 / Accepted: Jun. 22, 2020

경사조건에 따른 소나무 지표층의 연소특성에 관한 실험적 연구

국문초록 본 연구에서는 실내연소실험을 통하여 경사조건이 소나무 지표층 연료의 연소특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 경사조건은 0°, 10°, 20°, 30°의 조건을 부여하여 실험하였다. 본 연구결과에 의하면 경사가 급해질수록 확산속도가 증가하여 경사 30°에서의 확산속도는 평지에 비해 최대 약 14배 빠른 것으로 나타났다. 산불강도 분석결과에서는 최소 246.73 kW/m ~ 최대 2,602.96 kW/m의 범위로 나타났으며 경사가 급해질수록 산불강도가 높아지는 경향을 보였다. 연소율 분석결과에서는 경사가 급해질수록 총 연소율이 낮아져 불완전 연소가 진행되었으며, 동일한 경사조건에서 수관연료의 함수율은 지하고가 높아질수록 높게 측정되어 수관연료 발화위험성이 낮을 것으로 판단하였다. 본 연구 결과는 추후 경사에 따른 산불행동특성을 규명하는 데 기여할 수 있는 기초자료로 활용될 것이다.

주제어 : 산불, 경사, 지하고, 산불강도, 연소

Profiles **Ye Eun Lee** : She received her master's degree in Agriculture from Seoul National University in February 2019 with her master's paper titled "An Experimental Study on the Effect of Slope on the Combustion of Pinus Koraiensis leaves". She is currently working for Forest Disaster Management Division of the National institute of Forest Science as a researcher(dldpms109@korea.kr).

Jeong Ki Kim : He is currently working for Forest Disaster Management Division of the National institute of Forest Science as a researcher(wjdr1609@naver.com).

Cheol An Bang : He is currently working for Forest Disaster Management Division of the National institute of Forest Science as a researcher(cheolan@korea.kr).

Song Hee Han : She is currently working for Forest Disaster Management Division of the National institute of Forest Science as a researcher(hsh3273@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).

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