

An Experimental Study on the Fire Behavior Characteristics of *Pinus koraiensis* Litter by Slope Conditions

Ye-Eun Lee^{1,2#}, Qi Wen Li², Sung Yong Kim¹, Song Eu², Sang Jun Im^{2,3*}

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

² Department of Forest Science, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

³ Research Institute of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

Abstract

In this study, a laboratory burning experiment was conducted to experimentally examine the combustion characteristics of *Pinus koraiensis* litter with different slopes. Using several slope conditions, we observed how forest fire behavior changed after igniting the upper and lower sections of fuel bed. The results showed that the rate of fire spread on uphill slopes increased with slope gradient, but that on downhill decreased. The measures of fire intensities on uphill ranged from 21 to 37kW and those on downhill are 21 to 29kW, indicating that fire intensities on uphill slopes were larger than on downhill. As the slope increased, the flame length increased but the flame tilt angle decreased. This meant that the flame can accelerate heat transfer to unburned fuels and increase fire spread rate. The results of this study can be used as basic data to accurately predict fire behavior under different slope conditions.

Key words: forest fire, fire behavior, fire intensity, slope, downhill

1. 서론

최근 기후변화의 영향으로 건조일수가 증가하고 강수량과 강수일수가 감소하고 있다. 이로 인해 세계 곳곳에서 초대형 산불이 자주 발생하여 산불예방과 관리가 국제적 이슈로 부각되고 있다(Korea Forest Service, 2019).

산불은 대부분 인간에 의해 발생하므로 완전히 예방하는 것은 불가능에 가깝다. 그러므로 산불이 발생했을

때 그 피해를 최소화하기 위한 대처방법을 수립하는 것이 중요하다. 산불피해를 최소화하기 위해서는 산불이 어디로 확산될 것인지를 예측하여 진화자원을 배치해야 한다. 이를 위해서는 산불확산에 영향을 주는 인자를 파악하여 산불행동을 예측해야 한다. 산불확산의 3 요소는 연료, 지형, 기상이며 이들 요소에 의해 속도, 강도 등이 결정된다(Van Wagner, 1988). 산불확산에 관여하는 인자를 파악하기 위한 연구는 전 세계적으로 약 50여 년 전부터 진행되어 왔다. 다양한 연구를 통해 얻

The 1st author: Ye-Eun Lee, Tel. +82-2-961-2949, Fax. +82-2-961-2699, e-mail. dldpdms109@snu.ac.kr

* Corresponding author: Sang Jun Im, Tel. +82-2-880-4759, e-mail. junie@snu.ac.kr

게 된 이론적인 배경과 경험적인 연구결과들은 현재에도 새로운 방법론적 대안들을 제시해주는 근거로 활용되고 있다(Kemp, 1981; Kim & Lee, 2009).

산불 발달 특성은 산림수종에 따라 다르게 나타난다. 일반적으로 침엽수종이 활엽수종에 비해 산불에 취약하다고 알려져 있는데(Park, *et. al.*, 2007; Kim, 2009; Seo, 2010; Kim, *et. al.*, 2011), 이는 침엽수 잎에 함유된 테르펜(Terpenes)이라는 정유물질 때문이며 우리나라에서는 주로 소나무와 잣나무에 많이 함유되어 있다(Ji, *et. al.*, 2002).

우리나라 산림은 굴곡이 많은 지형적 특성을 가지고 있으며 전체 산림의 약 60%가 26°이상의 경사로 이루어져 있기 때문에 지형조건이 산불행동에 미치는 영향이 크다(An & Shin, 2008). Hong(2011)에 의하면 0°에서 35°까지는 경사도가 10° 증가할 때마다 수평 및 수직으로의 확산속도가 2배 증가하며, 35°이상에서는 10배 이상 증가한다고 제시한 바 있다. 이에 대해 Kim, *et. al.*(2009)은 경사도가 급할수록 화염과 지표면과의 사이 각이 줄어들고 열전달이 증가되어 표면 온도를 빨리 상승시키기 때문에 확산속도가 빨라진다고 하였다.

산불확산행동은 경사에 따라 상·하·측면으로 각각 전파되는 특성이 있다. 지형경사를 따라 산림의 하단에서 상부로 확산하는 산불행동 특성은 이미 많은 연구를 통해 증명되었다. 그러나 현실에서는 굴곡진 지형에 따라 상향과 하향으로 모두 확산된다.

이 연구에서는 실내실험을 통해 산불이 확산되는 방향에 따라 상향과 하향으로 구분하고 경사도를 조건별로 부여하였다. 그리고 연료의 연소특성 분석 및 강도를 산출하고 국외에서 제시된 화염강도식과 비교하여 경사조건에 따라 변화하는 화염의 연소특성을 파악하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험재료

연구대상 수종으로 선정된 잣나무 낙엽은 경기도 광주시 일대에 위치하고 있는 서울대학교 태화산 학술림 내 잣나무 조림지에서 채집되었다. 통풍이 잘되는 장소에서 자연건조과정을 거친 후, 실험을 진행할 때 연료의 함수율이 약 12.6%(±2.4%)로 유지될 수 있도록 밀폐된 챔버에 보관하였다.

2. 실험장비

실내실험은 경기도 포천시에 위치한 국립산림과학원 산불실험연구동에 있는 경사조절 풍동설비를 이용하였다(<Figure 1>). 이 장비는 경사면을 최대 27°까지 조절할 수 있다. 총 규격은 길이 1.0m, 너비 2.2m, 높이 1.0m이며, 길이 2.2m, 폭 0.8m의 연소판을 가지고 있다. 확산속도 및 수평·수직의 화염온도를 측정하기 위해 약 1,300°C까지 측정이 가능한 K-type Thermocouple을

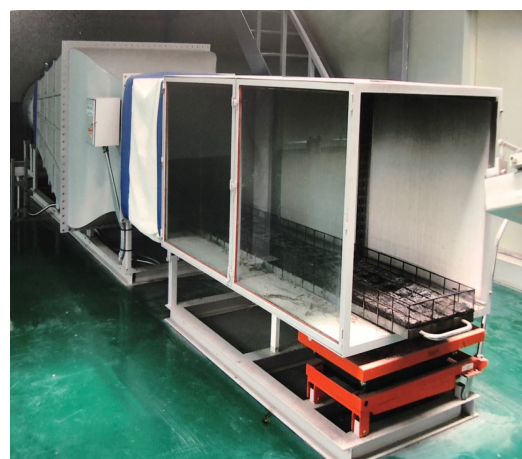
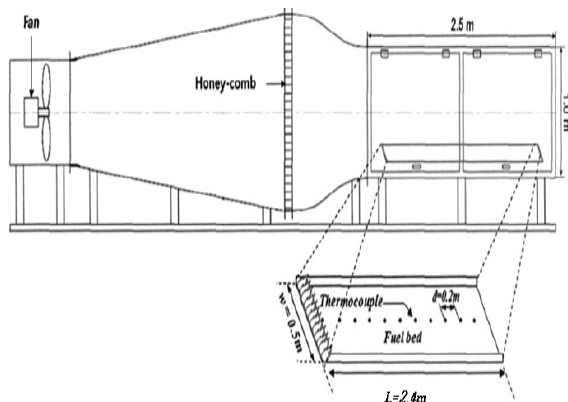


Figure 1. The equipment dimension of laboratory burning experiment

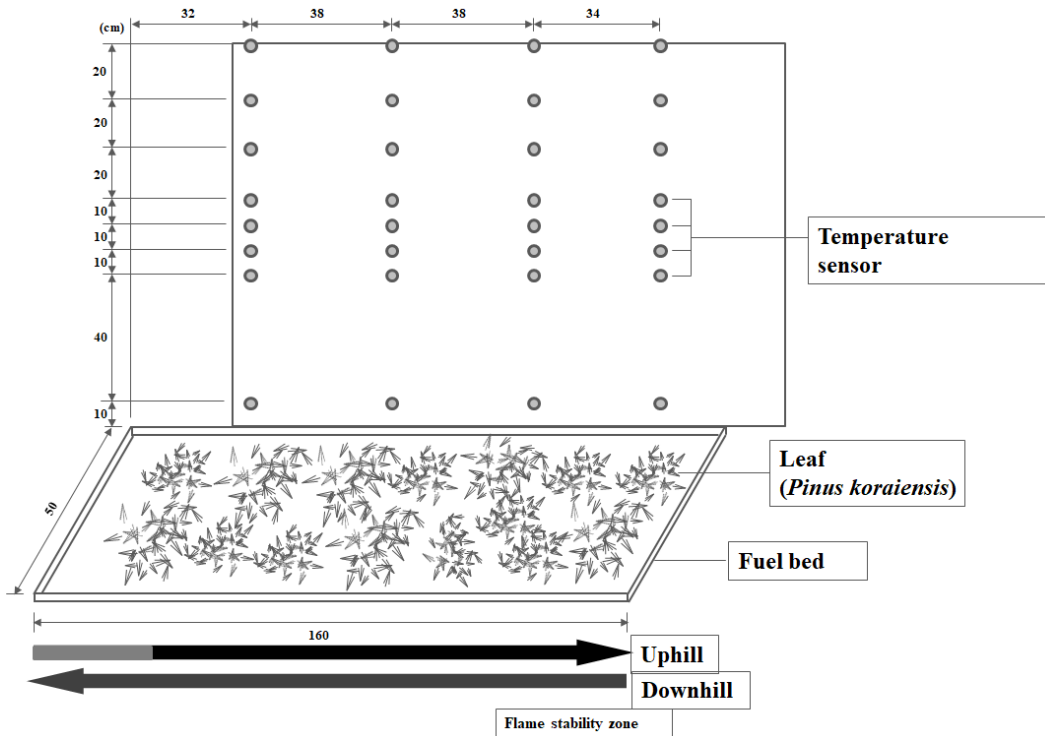


Figure 2. Laboratory burning experiment diagram

설치하였다(Figure 2). Thermocouple의 위치를 설정하기 위해 예비실험을 진행하였으며, 그 결과 수평구간 1.1m, 수직구간 1.4m에 총 32개의 센서를 설치하였다. 그리고 DAQ(Data Acquisition, 34970A) 모델을 이용하여 약 2초 간격으로 온도를 측정하였다. 영상분석을 위해 카메라를 이용하였다.

3. 실험방법

실험조건 당 반복수는 3회로 설정하였고 경사도는 $0^\circ \cdot 10^\circ \cdot 15^\circ \cdot 20^\circ \cdot 25^\circ$ 조건을 부여하였다. 그리고 화염이 진행되는 방향에 따라 상향과 하향으로 구분하였다(Figure 3). 연소구간(Fuel bed)은 실내실험을 할 때 자연적인 연료구성을 위해 연료의 깊이, 길이 및 입자의 크기 등을 구체적으로 설정하여 배열한 것이라고 정의하고 있다(USDA, 2019). 이 연구에서는 연소구간의 규격을 선정하기 위한 예비실험을 진행하여 길이는 약 1.6m, 폭은 0.5m로 결정하였다. 앵글을 조립하여 연소구간의 크기(1.6m x 0.5m)로 틀을 만들고 그 안에 연료를 배열하였다. 연료를 최대한 고르게

분포시키기 위해 연료층의 두께를 약 5cm로 설정하였다. 연료량은 기존의 연구 결과(Kim, 2015)에 따라 침엽수림 평균 지표층 연료량인 약 1.238 kg/m^2 를 기준으로 하였다.

부탄가스를 장착한 토치를 사용하여 연료판에 직접 점화하였다. 이 때 점화된 부분으로부터 약 32cm의 안정구간을 설정하여 화염이 최대한 균일하게 진행될 수 있도록 하였다.

4. 분석방법

1) 연소속도 (Rate of spread)

영상촬영을 통해 화두가 온도센서의 처음과 끝 지점에 도달하는 시간과 이 때의 화염 온도를 측정하였다. 그리고 측정된 최고 화염온도를 기준으로 재차 화염의 도달시간을 추정하여 평균 산불확산속도를 산출하였다.

2) 연소율 (Combustion rate)

연료의 연소율을 측정하기 위해 연소가 완전히 종료된 후 남은 재의 무게를 측정하였고 측정된 재의 무



Figure 3. The burning experiment with different slopes

계를 총 연소시간으로 나누어 단위시간당 평균 중량 감소율을 계산하였다. 이때, 연소종료시간은 기존연구(Kim, 2011)의 방법에 따라 육안으로 관찰하였을 때 화염이 완전히 사라진 시점으로 정의하였다.

3) 화염 강도 (Fire intensity)

연료무게와 확산속도를 이용하여 강도를 측정하였으며, Byram(1959)이 제시한 식을 이용하였다. 화염의 강도는 (1)과 같다.

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

여기서,

I = 산불의 강도 (kW/m),

H = 소비된 연료의 열량 (kJ/kg) : 일반적으로 H 의 수치는 Crown fire에서는 1,700, Surface fire에서는 1,800을 사용(Stocks, 1987).

W = 단위면적당 소비된 연료의 무게 (kg/m²)

R = 산불확산속도 (m/s)

4) 화염특성 (Flame characteristics)

화염특성은 산불확산예측 등 산불의 위험성을 평가하는데 중요하다. 이 연구에서는 화염특성을 파악하기 위하여 영상분석을 통해 화염높이, 화염길이, 화염각을 측정하였다. 실험과정에서 Thermocouple를 설치한 타공판에 10cm 간격으로 각 경사마다 높이 표시를 하여 영상에서 화염길이와 높이를 쉽게 알 수 있도록 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 연소속도

<Figure 4>는 경사도에 따른 연소속도를 분석한 결과이다. 상향확산에서는 경사도가 커질수록 속도도 점차 증가하여 경사 25°에서는 평지와 비교했을 때 약 1.51배 빨랐다. 하향확산에서는 경사 20°까지 속도가 서서히 감소하다가 경사 25°에서 다시 속도가 증가하는 경향을 보였다. 결과적으로 상향과 하향의 확산속도를 비교하였을 때, 최대 약 1.71배의 차이가 있었다. 선행연구에 따르면 상향확산의 경사가 15~35°일 때

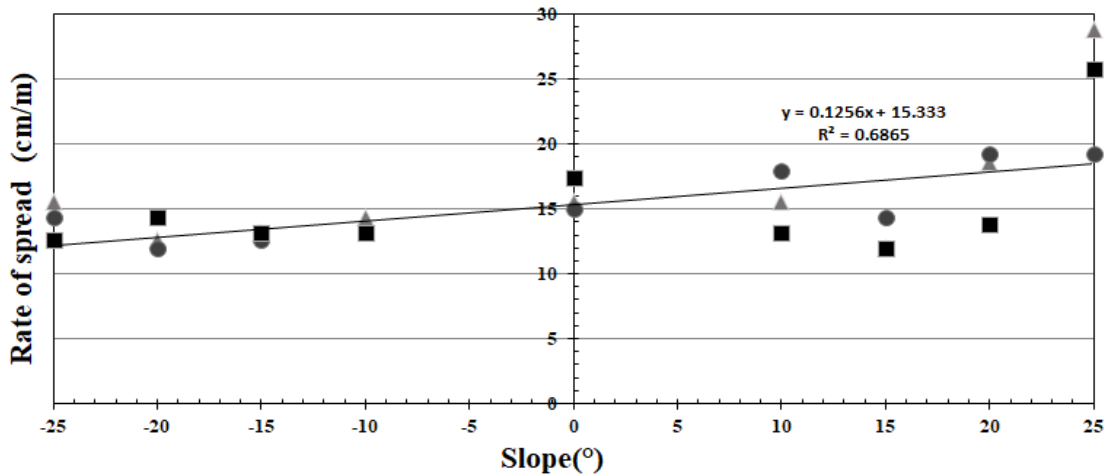


Figure 4. The rate of spread with slopes

10°씩 경사도가 증가할 때마다 확산속도는 약 2배 증가한다고 제시한 바 있으며 하향확산에서의 확산속도는 경사도 20°까지 감소하였다가 25°부터 다시 속도가 증가한다고 제시한 바 있어(Chandler, 1983; Van Wagner, 1988) 이 연구의 결과와 유사한 경향을 보였다.

2. 중량감소특성

<Figure 5>는 경사도에 따른 연료의 중량감소율을 측정된 후 연소율로 나타낸 것이다. 상향확산에서는 경사도가 커질수록 연소율이 점차 감소하였으며 하향 확산에서는 경사도 15°부터 연소율이 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 이 때, 상향확산에서 연소율은 하향확산에 비해 낮았으며 특히 경사도 25°에서는 상향확산의 연소율이 하향확산의 약 80% 수준이었다

(<Figure 5>). 연소율이 낮음은 불완전연소가 진행되어 가연물질이 남아있다는 의미이므로 상향확산의 잔 불 재발화 위험성이 하향확산에 비해 높을 것으로 판단된다. 선행연구(Kim, et. al., 2016)에서는 화염온도가 증가할수록 연소율은 높아진다고 제시하였다. 하지만 본 연구에서는 모든 경사조건에 있어 온도분포 범위가 약 600°C 내외로 측정되어, 연료의 연소율이 화염온도보다는 경사의 영향을 더 많이 받았을 것이라고 판단하였다.

3. 화염강도

<Figure 6>과 같이 경사도에 따른 화염강도를 분석한 결과 상향확산의 화염강도는 21~37kW/m의 범위로 하향확산의 21~29kW/m에 비해 높았다. 화염강도는

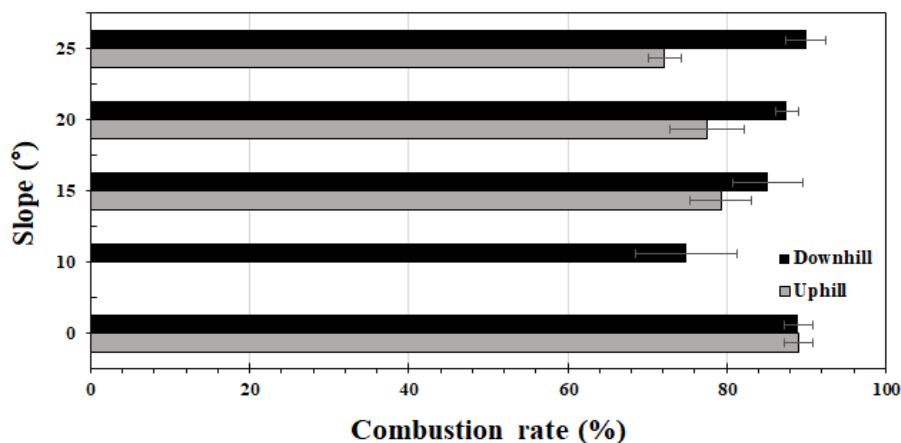


Figure 5. Rate of combustion with different slope (The bar is standard deviation)

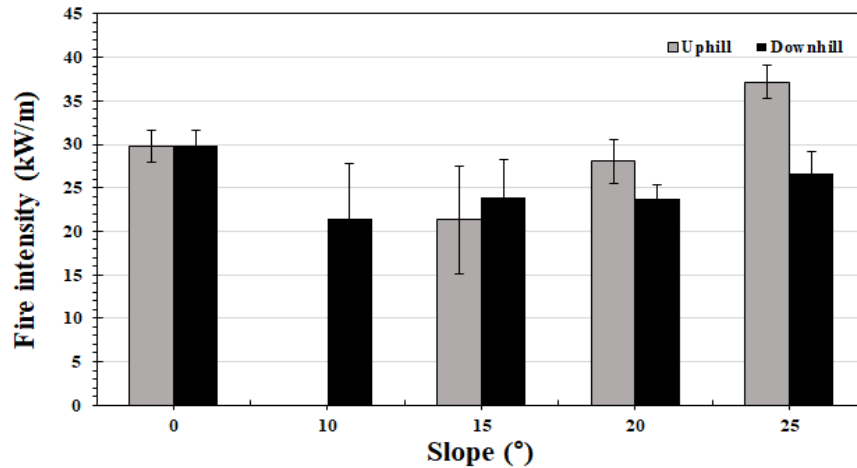


Figure 6. Fire intensity variations with different slope (The bar is standard deviation)

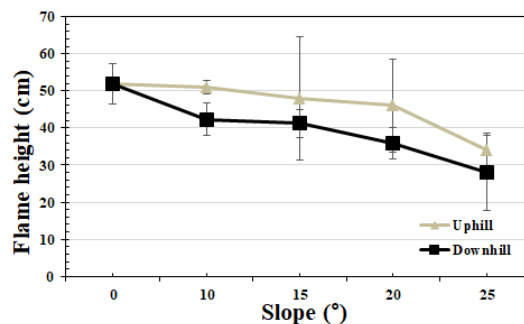
연소속도와 밀접하게 연관이 있다고 하였다(Stocks, 1987; Chae, 2003).

4. 화염특성

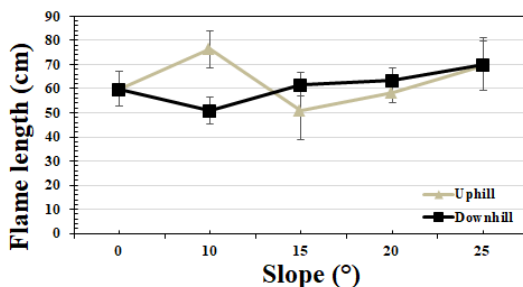
<Figure 7>은 경사도에 따른 화염특성을 분석한 결과이다. 경사도가 커질수록 상향확산과 하향확산에서 최대화염높이는 낮아졌으나 최대화염길이는 증가하였다. 이 때, 상향확산과 하향확산에서의 최대화염길

이는 서로 다른 값을 나타내다가 일정한 경사한계점(25°)에서 일치하였다. 경사도에 따른 상향확산과 하향확산의 화염각은 모두 경사도가 커질수록 감소하였으며 이때 상향확산에 비해 하향확산에서의 화염각이 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였다.

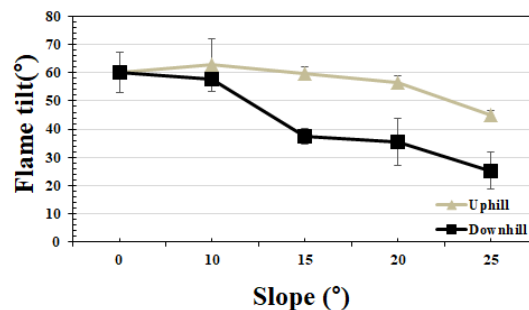
이 연구결과에서는 상향확산과 하향확산에서 경사도가 증가할수록 최대화염높이 및 화염각은 줄어들고 최대화염길이는 증가하는 경향을 나타냈다.



(a) Flame height of uphill and downhill with the slope



(b) Flame length of uphill and downhill with the slope



(c) Flame tilt of uphill and downhill with the slope

Figure 7. Comparisons of flame characteristics with different slopes (The bar is standard deviation)

IV. 결론

본 연구에서는 실내실험을 통해 경사조건에 따라 변화하는 연소특성을 분석하여 이와 같은 결과를 도출하였다.

경사가 커질수록 확산속도가 증가하는 경향을 보였으며 특히 경사도 25°에서 상향 확산의 확산속도가 하향 확산에 비해 최대 1.71배 빨랐다.

상향 확산에서는 모든 경사조건에서 경사가 커질수록 연소율이 지속적으로 감소하였고, 하향 확산에서는 경사도 10°부터 경사가 커질수록 연소율이 증가하였다. 연료의 연소율이 낮다는 것은 가연물질이 많이 남았다는 의미로, 상향 확산에서는 경사가 커질수록, 하향 확산에서는 경사가 작아질수록 잔불 재발위험성이 더 높을 것으로 판단하였다. 또한 모든 경사조건에서 상향 확산의 연소율이 하향 확산보다 낮았으며, 경사도 25°에서는 상향 확산의 연소율이 하향 확산의 약 80%에 그치는 것으로 나타나 상향 확산의 잔불 재발위험성이 더 높을 것으로 판단하였다.

경사도에 따른 화염강도를 측정된 결과 21~37kW/m의 범위를 보였으며 경사가 커질수록 화염강도가 증가하였다. 이때 경사도 25°에서 상향 확산의 화염강도가 하향 확산에 비해 약 1.37배 높게 나타났다.

상향 확산과 하향 확산에서 모두 경사가 커질수록 최대 화염높이 및 화염각은 감소하며 최대 화염길이는 증가하였다. 이에 따라 본 연구결과에서는 경사가 커질수록 산불 확산 위험성이 커질 것으로 판단하였다.

References

An, Sang Hyun and Young Chun Shin. 2008. Spread Speed of Forest Fire Based on Slope. *Journal of Disaster Management*. 8(4): 75-79.

Blackmarr, W. H. 1972. Moisture Content Influences Ignitability of Slash Pine Litter. *USDA Forest Service, Southeast. For. Res. Note SE-173*.

Bova, A. S. and M. B. Dickinson. 2004. Linking Surface-Fire

Behavior, Stem Heating, and Tissue Necrosis. *Canadian Journal of Forest Research*. 35(4): 814-822.

Chae, Hui Mun and Chan Yong Lee. 2003. Research Articles: Slope and Forest Effect on Spreading of Forest Fire. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 5(3): 179-184.

Chuvieco, E, I. Aguado, and P. Alexandros. 2004. Conversion of Fuel Moisture Content Values to Ignition Potential for Integrated Fire Danger Assessment. *Canadian Journal of Forest Research*. 34(11): 2284-2293.

Dupuy, J. L, J. Marechal, and D. Morvan. 2003. Fires from a Cylindrical Forest Fuel Burner: Combustion Dynamics and Flame Properties. *Journal of Combustion and Flame*. 135(1-2): 65-76.

Ganteaume, A., C. Lampin-Maillet, M. Guijarro, C. Hernando, M. Jappiot, T. Fonturbel, P. Perez-Gorostiaga and A. Josa. 2009. Spot Fires: Fuel Bed Flammability and Capability of Firebrands to Ignite Fuel Beds. *International Journal of Wildland Fire*. 18(8): 951-969.

Helbey, J. D. and Patric, J. H. 1965. Canopy and Litter Interception of Rainfall by Hardwoods of Eastern United States. *Journal of Water Resources Research*. 1(2): 193-206.

Ji, Dong Young, So Young Kim and Jin Seok Han. 2002. A Study on the Comparison to Source Profile of the Major Terpenes from Pine Tree and Korean Pine Tree. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 18(6): 515-525.

Joshua. J. M, A. L. Sullivan, G. J. Cary, and G. R. Bishop. 2016. Repeatability of Free-burning Fire Experiments Using Heterogeneous Forest Fuel Beds in a Combustion Wind Tunnel. *International Journal of Wildland Fire*. 25: 445-455.

Kang, Yong Suk. 2008. Development on Slope Analysis Algorithm for Forest Fire Spread Prediction. Ph. D. Dissertation. Chungbuk University.

Kim, Dong Hyun, Je Sun Ko, Se Whan Choi and Kwang Il Kim. 1999. A Study on Fire Investigation & Calorie Analysis of Main Trees in Go-sung Wildfire Land. *Korean Institute of Fire Science and Engineering*. 13(1): 31-36

Kim, Dong Hyun and Myung Bo Lee. 2009. Semi-numerical Study on the Flame Tilt Equation due to Wind on the Surface Fire in Forest Fire. *Korean Institute of Fire Science and*

- Engineering*. 23(5): 90-95.
- Kim, Jang Hwan. 2011. The Study on Combustion Characteristics of Forest Fire by *Pinus Densiflora* and *Quercus*. Ph. D. Dissertation. Hoseo University.
- Kim, Kwan Su, In Su Chang and Ki Don Park. 1995. Combustible Temperature Change of Fresh Branches and Leaves of *Pinus Densiflora Pinus Koraiensis*. Institute of Basic Science Taejon University. 6: 99-106
- Kim, Sung Yong. 2015. A Study on the Analysis of Fuel Characteristics for Forest Fire Hazard Assessment. Ph.D. Dissertation. Kongju National University.
- Kim, Sung Yong, Hee Young Ahn, Chun Geun Kwon, and Byung Doo Lee. 2016. The Effect of the Changes in Wind Velocity and Slope on Forest Fire Behavior in *Pinus Densiflora* Stands. *Journal of Crisisonomy*. 12(11): 27-36
- Koo, E, J. Partick, R. David, and P. Jhon. 2010. Firebrands and Spotting Ignition in Large-Scale Fires. *International Journal of Wildland Fire*. 19(7): 818-843.
- Korea Forest Service. 2019. 2018 Statistical Yearbook of Wildfire.
- Linn, R. R., J. L. Winterkamp, D. R. Weise, and C. Edminster. 2010. A Numerical Study of Slope and Fuel Structure Effects on Coupled Wildfire Behaviour. *International Journal of Wildland Fire*. 19: 179-201.
- Nelson, R. M. 1980. Flame Characteristics for Fires in Southern Fuels, *USDA Forest Service*. Southeast. For. Exp. Stn. Res. Pap. SE-205.
- Park, Hyung Ju, Eung Sik Kim, Jang Hwan Kim, and Dong Hyun Kim. 2007. A Combustion Characteristic Analysis of *Quercus Variabilis* and *Pinus densiflora* Fallen Leaves Using Radiation Heat Flux. *Korean Institute of Fire Science and Engineering*. 21(3): 41-46.
- Park, Young Ju. 2009. A Study on Forest Fire Risk in Youngdong Areas Through Combustional Characteristics of Forest Fuel, Ph.D. Dissertation. Kangwon University.
- Perry, G. L. W. 1998. Current Approaches to Modelling the Spread of Wildland Fire: A Review. *Progress in Physical Geography*. 22(2): 222-245.
- Seo, Hyung Soo. 2010. Comparison of Fire Vulnerability at *Pinus densiflora* and *Quercus Variabilis* Forest in East Coast of Korea. Master's Dissertation. Kangwon University.
- Stocks, B, J. 1987. Fire Behavior in Immature Jack Pine. *Canadian Journal of Forest Research*. 17: 80-86.
- Stocks, B. J, M. E. Alexander, B. M. Wotton, C. N. Steffner, M. D. Flannigan, S. W. Taylor, N. Lavoie, J. A. Mason, G. R. Hartley, M. E. Maffey, G. N. Dalrymple, T. W. Blake, M. G. Cruz, and R. A. Lanoville. 2004. Crown Fire Behaviour in a Northern Jack Pine – Black Spruce Forest. *Canadian Journal of Forest Research*. 4(8): 1548-1560.
- Taylor, S. W, B. M. Wotton, M. E. Alexander, and G. N. Dalrymple. 2004. Variation in Wind and Crown Fire Behaviour in a Northern Jack Pine – Black Spruce Forest. *Canadian Journal of Forest Research*. 34(8): 1561-1576.
- Van Wagner. 1988. Effect of Slope on Fires Spreading Downhill. *Petawawa National Forestry Institute. Chalk River. ont., Canada K0J 1J0*.
- Yoshinobu Sato, Tomoomi Kumagai, Atsushi Kume, Kyochi Otsuki and Shigeru Ogawa. 2004. Experimental Analysis of Moisture Dynamics of Litter Layers-The Effects of Rainfall Conditions and Leaf Shapes. *Journal of Hydrological Process*. 18: 3007-3018.

Korean References Translated from the English

- 강용석. 2008. 산불확산예측을 위한 경사분석 알고리즘 개발. 충북대학교 박사학위논문.
- 김관수, 장인수, 박기돈. 1995. 가열 온도에 의한 소나무와 잣나무 생엽과 생지의 연소 온도변화. 대전대학교 기초과학연구소. 6: 99-106.
- 김동현, 고재선, 최세환, 김광일. 1999. 고성산불지역에서의 화재조사와 주요수목의 열량분석에 관한 연구. 한국화재소방학회 논문지. 13(1): 31-36.
- 김동현, 이명보. 2009. 산불 지표화에서의 바람에 의한 화염각 변화 산정식 도출에 관한 준-수치적해석 연구. 한국화재소방학회 논문지. 23(5): 90-95.
- 김성용. 2015. 산불위험성 평가를 위한 주요 침엽수종의 연료특성 분석에 관한 연구. 공주대학교 박사학위논문.
- 김성용, 안희영, 권춘근, 이병두. 2016. 경사와 풍속 변화가 소나무림 내 산불행동에 미치는 영향. *Crisisonomy*. 12(11): 27-36.
- 김장환. 2011. 소나무와 굴참나무 낙엽에 의한 산불의 연소특성

- 에 관한 연구. 호서대학교 박사학위논문.
- 박영주. 2009. 산림연료의 연소특성을 이용한 영동지역의 산불 위험성에 관한 연구. 강원대학교 박사학위논문.
- 박형주, 김응식, 김장환, 김동현. 2007. 복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석. 한국화재소방학회 논문지. 21(3): 41-46.
- 산림청. 2019. 2018년 산불통계연보.
- 서형수. 2010. 동해안지역에서 소나무림과 굴참나무림의 산불 취약성 비교. 강원대학교 석사학위논문.
- 안상현, 신영철. 2008. 경사에 따른 산불의 확산속도. 한국방재학회논문집. 8(4): 75-79.
- 지동영, 김소영, 한진석. 2002. 소나무와 잣나무에서 배출되는 주요 테르펜의 배출특성에 관한 비교 연구. 한국대기환경학회지. 18(6): 515-525.
- 채희문, 이찬용. 2003. 산불 확산에 영향을 미치는 임지 내 산림연료와 경사도에 관한 연구. 한국농림기상학회지. 5(3): 179-184.

Received: May. 23, 2019 / Revised: Jun. 21, 2019 / Accepted: Jun. 25, 2019

경사조건에 따른 잣나무 낙엽의 산불행동 특성에 관한 실험적 연구

국문초록 이 연구에서는 잣나무 낙엽을 대상으로 실내 연소실험을 진행하여 경사조건에 따라 변화하는 화염의 연소특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 경사조건을 $0^{\circ} \cdot 10^{\circ} \cdot 15^{\circ} \cdot 20^{\circ} \cdot 25^{\circ}$ 로 부여하여 연소연료관의 최하단부와 최상단부에 불을 놓은 후 실험조건에 따라 잣나무 낙엽의 연소특성이 어떻게 변화하는지를 관찰하였다. 상향확산의 경우 경사도가 커질수록 확산속도가 증가하였으나, 하향확산은 줄어들었다. 산불강도는 상향확산의 경우 21~37kW, 하향확산에서는 21~29kW로 상향확산이 다소 높았다. 경사도가 커질수록 최대화염길이는 증가하고, 화염각은 줄어들었는데 이는 화염이 미연소 연료로 열전달이 빨라져 산불확산속도를 증가시킬 수 있다. 이 연구의 결과는 지형조건에 따라 다양하게 변화하는 산불행동을 예측하는 데 기초자료로 활용이 가능하다.

주제어 : 연소특성, 경사, 잣나무 낙엽, 확산속도, 연소강도

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(dldpms110@snu.ac.kr)

Qi Wen Li : He received his master's degree in Agriculture from Seoul National University in August 2015 with his master's paper titled "Estimation of water holding capacity and interception storage capacity of forest litter in different tree species". He is in the doctors course in Seoul National University(gimunlee@snu.ac.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 researcher(kitacol@korea.kr)

Song Eu : He received his mater's degree in Agriculture from Seoul National University in August 2016 with his master's paper titled "Analysis of debris flow behavior with flume experiments". He is in the doctors course in Seoul National University(dkarj@snu.ac.kr).

Sang Jun Im : He received his Ph.D. in Engineering from Seoul National University in February 2000 with his Ph.D. paper titled "Modeling Irrigation Return Flow from Paddy Fields on Agricultural Watersheds". He is currently working for Seoul National University as a professor. He has conducted various research projects on forest fire and published many academic papers(junie@snu.ac.kr).