

The Effect of the Changes in Wind Velocity and Slope on Forest Fire Behavior in *Pinus densiflora* Stands

Sung Yong Kim[#], Hee Young Ahn, Chun Guen Kwon, Byung Doo Lee⁺

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

Abstract

The objective of this study is to find out what effects the changes in slope and wind velocity has on characteristic changes in fire behavior through a simple burning experiment. Both upslope and downslope were considered for slope factor and the conditions of 0m/s, 2m/s, 4m/s and 6m/s were applied for wind velocity factor. The result of this study shows that, with the higher upslope and wind velocity, the flame temperature continues to increase up to 1,353.3°C. The rate of spread was also found to be as fast as 15m/min in the condition of 30° slope and 6m/s wind velocity. The conditional fire intensity was estimated to range from 78.11 kW/m to 5,982.23 kW/m and also increased with the higher slope and wind velocity, which was similar to findings in the literature for other countries. The result of this study will help to predict accurately the spread and intensity of forest fire.

Key words: forest fire, slope, wind velocity, spread, surface fuel

1. 서론

산불행동은 연료의 구조, 유형, 공간의 형태 등에 따라 변이가 다양해지는 특성으로 수학적 경험 이론만을 바탕에 두게 되면, 현실적인 정보를 취득하기 어렵다 (Grishin, 1997; Linn, *et. al.*, 2002; Mell, *et. al.*, 2007; Sullivan, 2009; Gould, *et. al.*, 2011). 따라서 다양한 변수 조건을 부여한 물리적 실험 결과가 바탕이 되어야만 통계적으로 검증된 정확성 높은 산불행동 특성 결과를 얻을 수 있다(Cheney, *et. al.*, 2012).

미국에서의 산불행동에 관한 연구는 1950년 이전부

터 진행되어 왔다. Fons(1946)는 산림 내 연료의 의한 산불확산 특성을 물리적 실험으로 분석하여 연료가 화염으로부터 열이 전달되는 과정을 규명한 바 있다. Emmons(1963)는 이러한 물리적 실험을 기반으로 산불확산 모델을 개발하였고, Hottel, *et. al.*(1965)은 열이 전달되는 과정에서의 연료손실률을 포함하는 이론을 제시하여 물리적 산불행동 모델 발전에 이바지 하였다. 경험적 모델의 경우에는 1966년에 침엽수 잎이 풍속, 수분함량 변화에 따라 화염전파 속도에 어떠한 영향을 미치는지를 파악한 이론을 제시하여 최종적으로 1972년 경험적 이론 모델을 완성하였다(Rothermel &

[#] The 1st author: Sung Yong Kim, Tel. +82-2-961-2686, Fax, +82-2-961-2699, e-mail, kitaco1@korea.kr

⁺ Corresponding author: Byung Doo Lee, Tel. +82-2-961-2696, Fax, +82-2-961-2699, e-mail, byungdoo@korea.kr

Anderson, 1966; Rothermel, 1972). 이렇듯 미국에서는 물리적 실험과 경험적 이론을 근간으로 하여 산불행동에 대한 전반적인 특성을 파악하였으며, 이는 국가산불위험지수시스템(NFDRS), FASITE시스템을 개발하는데 이론적 근거로 활용되었다(Bradshaw, *et. al.*, 1983; Hirsch, 1996).

지형, 기상 특성에 따라 화염의 행동이 변화하는 원인은 경사가 급해지고 풍속이 빨라질수록 화염과 지표면의 사이 각이 줄어드는 형상계수(View factor) 증가로 인해 지표면 온도 상승이 빨라지는 효과가 발생하기 때문이다(Kim & Lee, 2009). 물리적 실험을 통한 구체적인 결과 사례를 보면, Chandler, *et. al.*(1983)은 산불확산에서 경사는 지피물층의 밀집 비율에 영향을 받으며, 경사 0°에서 35°까지는 10° 증가할 때마다 확산속도가 2배 증가하고, 경사 35° 이상에서는 10배 이상 증가한다고 제시하였다. 또한, Nelson, *et. al.*(1988)은 바람에 의해 유도된 산불의 확산속도를 평가하기 위한 실내 실험을 진행하여 산불의 강도를 40~4,600 kw/m의 범위로 밝힌 바 있으며, 산불의 확산속도와 풍속의 관계는 연료소비, 대기온도, 불꽃의 잔존시간 등과 상당히 밀접한 관계가 있다고 하였다. 그 밖에도 경사와 풍속에 따른 화염의 유동을 평가하여 두 인자는 모두 양의 상관관계가 있음을 밝혔으며, 이를 토대로 열전달 확산속도 추정식을 개발하였다(Fang, 1969; Burgan, 1979; Nelson, 1980).

국내의 경우 Lee(2005)에 의해 풍속, 습도, 연료 인자를 변수로 하는 산불확산예측시스템을 개발하여 산

불 발생 시 확산 방향 및 속도를 예측하는 데 활용되고 있다. 그러나 실제 물리적 실험을 토대로 얻어진 결과가 반영되지 못하고, Rothermel(1972)이 제시한 경험적 이론을 바탕으로 개발된 GIS 기반의 모델이다. 또한, 경사와 풍속에 따른 물리적 실험을 일부 진행하였으나, 연료, 기상, 지형 중 한 가지 변수 인자에 국한하여 실험을 진행한 경우가 대부분이고, 다양한 환경변수에 노출될 수 있는 실험 설계로 인해 산불확산 특성을 명확하게 파악한 결과는 제시되지 못하였다(An & Shin, 2008). 따라서 우리나라 산림 특성에 적합한 정확도 높은 산불행동 모델 개발이 실현되기 위해서는 연료, 기상, 지형적 조건을 모두 고려한 물리적인 실험이 지속적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 환경변수 노출을 최소화한 물리적인 모형실험을 통해 산불의 확산속도에 영향을 주는 인자 중에서 지형에 해당하는 경사와 기상에 해당하는 풍속이 산불행동에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 장비

경사와 풍속에 따른 산불행동 특성을 파악하기 위해 <Figure 1>과 같이 수평 풍속과 경사 조절이 가능한 “수평풍동실험장치”를 활용하였다. 본 실험 장비는 풍속 최대 10m/s, 경사 최대 40°까지 조절하도록 설계되어 있고, 실험 장비 내 연소공간은 길이 2.5m, 폭 1m, 높

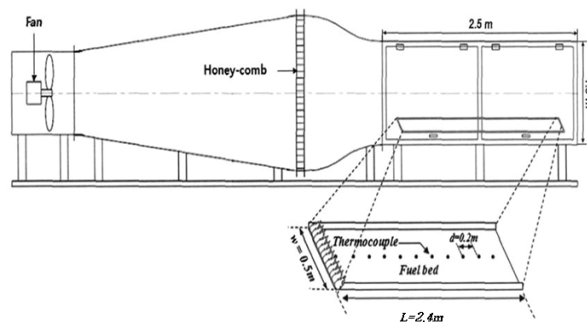


Figure 1. Wind tunnel device for measure flame spread rate

이 1m이며, 연소공간 내 연소판은 폭 50cm, 길이 2.4m이다.

2. 실험 방법

실내 연소실험은 공기유동, 연료량, 연료습도 등의 변이를 최소화하도록 설계하였다. 시험대상 연료는 산불발생 시 정유물질로 인해 대형 산불로 확산될 가능성이 높은 침엽수림을 가정하여 소나무의 낙엽으로 선정하였고, 우리나라 산림의 대부분을 차지하는 IV영급(31~40년생) 임분임을 가정하여 IV영급 소나무림 평균 지표층 연료량 1.238kg/m²을 기준으로 하여 실험을 진행하였다(Kim, 2015). 연소판의 총면적이 1.25m²이므로 1회 실험 당 1.545kg/m²의 연료를 사용하였으며, 연료를 동일하게 배열하기 위하여 연소판을 4개의 그룹으로 나누어 각 0.385kg씩 연료를 분배하였다. 실험 변이의 최소화를 위해 연료층 두께는 기존 연구 결과를 바탕으로 우리나라 소나무림의 평균 연료층 두께 4.8±0.3cm로 내외로 조절하였으며(Kwon, 2014), 연료의 수분함량(FMC: Fuel Moisture Contents, %)은 우리나라 봄철 평균 임내 수분함량(Kwon, 2014)과 유사한 10~13% 내외로 조절하였다(Figure 2). 수분함량은 연료 수분측정기(ME 2000)를 이용, 3회 반복으로 측정하여 수분함량이 조절된 연료를 선별하였다. 연소실험 시 연소판 최초 40cm 구간은 불씨를 지핀 후 화염을 최대한 균일하게 조절하기 위한 구간으로 지정하였으며, 연소 후 40cm 이후 지점에서부터 시작 표식을 부착하여 정확하게 확산속도를 측정하였다. 총 연소대의 길이는

2m로 하였으며, 화염의 중심부가 연료가 배열되어 있는 끝부분에 도달하는 시간을 정밀하게 측정하였다. 풍속은 0m/s, 2m/s, 4m/s, 6m/s의 조건을 부여하였으며, 경사는 우리나라 지형의 70% 이상이 30° 미만임을 고려하여 0°, 10°, 20°, 30°의 경사 조건을 부여하였다(KFS, 2016). 풍속 측정은 풍속계(Kasier 3000)를 이용하여 모형의 지상 5cm 높이에서 측정하였으며, 경사는 실험장비에 경사계를 설치하여 조절하였다. 최대한 동일조건에서 실험을 수행하기 위하여 습도와 바람의 영향이 없는 밀폐된 실내에서 순차적으로 조건을 달리하여 실험을 실시하였으며, 각 경사와 풍속 조건별 3회 반복한 후 평균 수치를 활용하였다. 또한, 상향경사와 하향경사에 따라 산불확산특성이 다른 점을 고려하여 하향경사 실험을 일부 진행하였다. 하향경사의 경우 풍속 조건을 실행하기 어려운 상황을 고려하여, 무풍 조건에서의 경사에 따른 산불확산 특성 실험을 별도로 진행하였다.

3. 분석방법

경사가 높고, 풍속이 빨라지게 되면 산불확산 속도를 육안으로 확인하기 어렵게 때문에 모든 실험에 대해서 Digital Camera(Model: Canon 5D)로 촬영한 후, 실내 영상분석을 통해 확산속도를 측정하였다. 또한, 경사와 풍속 변화에 따른 화염의 온도를 측정하기 위해 열화상 카메라를 촬영하여 분석을 이용하였다.

산불의 앞불강도(I)는 발화시간대와 연료무게 등을 이용하여 측정하였으며, Byram(1959)과 Stock(1987)



Figure 2. Measurement of fuel moisture content

Table 1. Heating value of *Pinus densiflora* species

Species	No. of Samples	Heating Value (KJ/kg)	Heating Value (Kcal/kg)
<i>Pinus densiflora</i>	6	19,335.77 (S,D± 316,10)	4,619.70 (S,D± 75,49)

* Note : S,D is Standard deviations

이 제시하였던 식(1)을 이용하여 최종 결과물을 산출하였다. 열량(H)의 경우 기존에는 국외에서 제시된 상수화된 수치를 사용하였으나(Stock, 1989), 본 연구에서는 채취한 지표층 연료를 성분분석 기관에 의뢰한 결과 수치(Kim, 2015)를 활용하여 산출하였다(〈Table 1〉).

$$I = \frac{HWR}{60} \quad (1)$$

여기서

I = Fireline intensity(kW/m),

H = Heating value(kJ/kg),

W = Fuel weight(kg/m²),

R = Surface spread rate(m/min)

III. 연구결과

1. 상향경사와 풍속에 따른 산불 화염온도 분석 결과
상향경사와 풍속에 따른 화염의 온도 변화를 분석한

결과는 〈Figure 3〉과 같다. 무풍조건, 평지의 조건에서는 최대 화염의 온도가 514.7°C 가량으로 분석되었으나, 경사가 급해질수록 화염의 온도는 지속적으로 높아졌다. 또한, 강한 풍속 조건이 부여될수록 화염의 온도는 지속적으로 높아짐에 따라 전체적으로 풍속이 강하고 경사가 급해질수록 화염의 온도가 상승하여 풍속 6m/s, 상향경사 30°의 조건에서는 화염온도가 1,353.3°C까지 올라가 기존연구 결과와 유사한 패턴을 보였다(Anderson, 1983).

2. 상향경사와 풍속 조건에 따른 산불확산 속도 분석
상향경사와 풍속 조건에 따른 산불확산 속도를 분석한 결과는 〈Figure 4〉와 같다. 무풍 조건에서의 시간대별 산불확산 거리를 분석한 결과, 상향경사 0°에서는 0.329 cm/s를 이동하였으며, 상향경사 10°에서 0.369cm/s, 20°에서 0.555cm/s, 30°에서 1.022cm/s 이동하였다. An & Shin(2008)이 제시한 확산 이동거리를 검토한 결과, 상향경사 10°에서 0.270cm/sec, 20°에서 0.410cm/sec, 30°에서 0.610cm/sec를 제시한바, 본 연구와 다소 상이

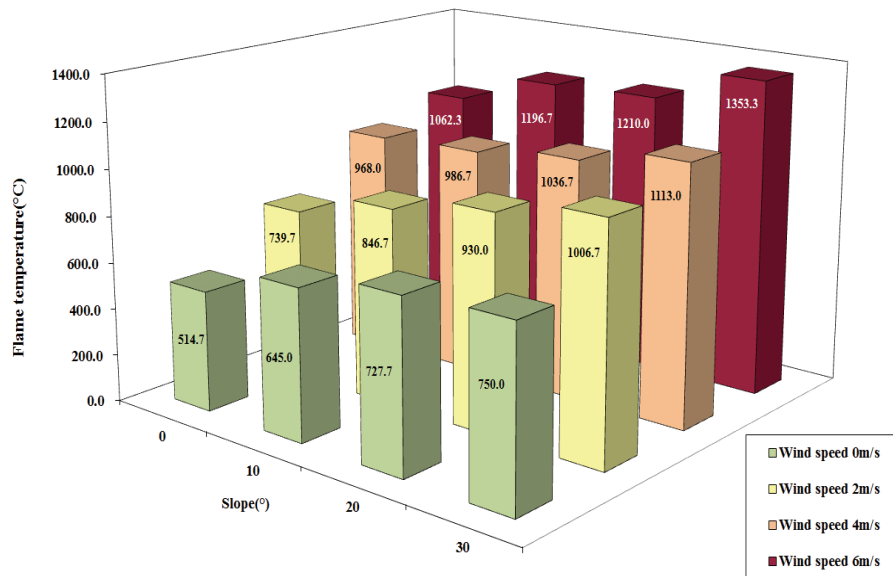


Figure 3. Flame temperature changes by slope and wind speed

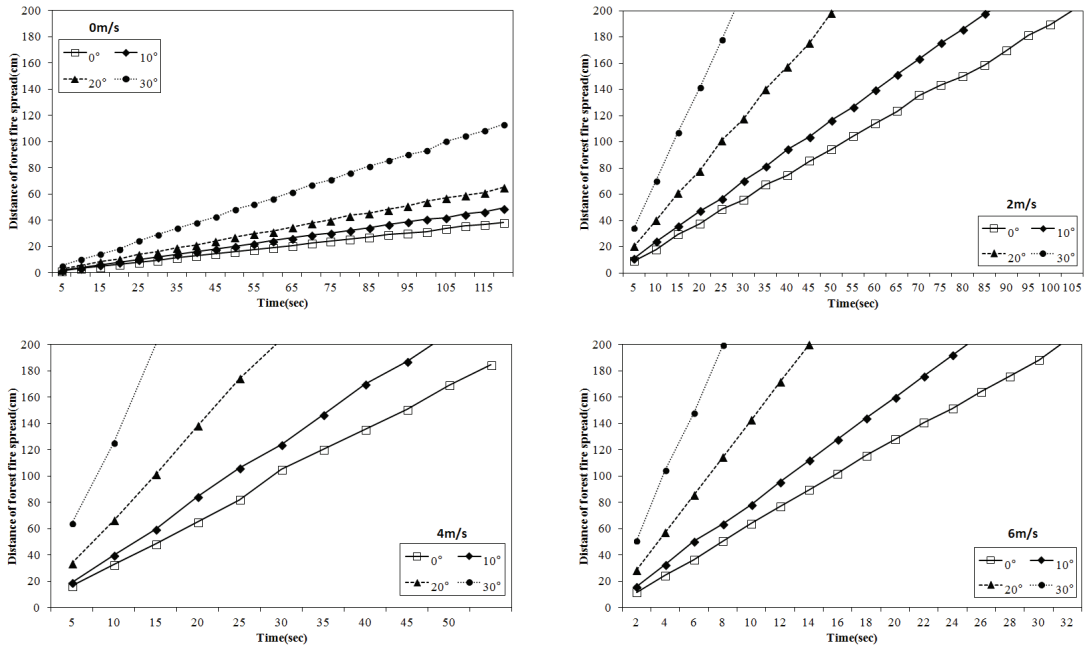


Figure 4. Forest fire spread rate according to the time changes

한 결과를 보였다. 원인은 기존 연구에서는 연료의 양을 조절하지 않고 단순히 연료의 두께만을 조절하여 실험을 진행하였으나, 본 연구는 연료의 두께와 연료량을 표준화하여 얻은 결과이므로 연료량, 배열에 따라 산불확산 특성이 변화하는 특성에 의해 차이가 발생한 것으로 추측된다. 2m/s 풍속 조건에서 산불확산 총 거리 2m에 도달하는 시간을 분석한 결과, 상향경사 0°에서는 측정 후 1분 40초가 경과되었을 때 확산거리 2m에 도달하였고, 상향경사 10°에서는 83.0초, 20°에서는 50.0초, 30°에서는 27.0초가 소요되었다. 4m/s 풍속 조건에서는 상향경사 0°에서 측정 후, 57.0초가 경과되었을 때 확산거리 2m에 도달하였고, 상향경사 10°에서는 47.0초, 20°에서는 29.0초, 30°에서는 15.0초가 소요되었다. 6m/s 풍속 조건에서는 상향경사 0°에서 측정 후, 31.0초가 경과되었을 때 확산거리 2m에 도달하였고, 상향경사 10°에서는 25.0초, 20°에서는 13.0초, 30°에서는 9.0초가 소

요되었다. 모든 실험에서 시간대별 확산속도는 대체적으로 균일하였으며, 풍속이 강할수록 상향경사별 확산속도 차이가 점차 커지는 것으로 나타났다.

3. 상향경사와 하향경사의 산불 확산속도 비교 결과 산불확산 시 낮은 지점에서 높은 지점으로 화염이 올라가는 상향 확산과 높은 지점에서 낮은 지점으로 내려오는 하향 확산의 속도를 분석한 결과, 상향 확산의 경우 1m를 이동하는데 소요되는 시간이 0° 296.5초, 10° 246.8초, 20° 187.9초, 30° 106.0초로 확산이 점차 빨라졌으나, 이와 반대로 하향 확산의 경우 10° 295.8초, 20° 311.2초, 30° 328.2초로 확산이 점차 느려지는 현상을 보였다(Table 2)). 이를 확산 배수로 환산했을 시 0°에 비해 30° 상향 확산은 2.8배 빨라지며, 30° 하향 확산은 0.9배 느려지는 수치이다.

Table 2. Effects of forest fire spread rate of the up slope and down slope

(Unit : sec/m)				
Type	0°	10°	20°	30°
Up slope	296.5 (S,D±9.2)	246.8	187.0	106.0
		(S,D± 7.9)	(S,D± 5.6)	(S,D± 9.1)
Down slope		295.8	311.2	328.2
		(S,D± 7.3)	(S,D± 6.5)	(S,D± 5.8)

* Note : S,D is Standard deviations

Table 3. Rate of forest fire spread by slope and wind speed

Slope(°)		Rate of Spread(m/min)				
		Wind Speed (m/s)	0	2	4	6
Up slope	0	0	0.19	1.13	2.02	3.79
	10	0	0.24	1.46	2.51	4.80
	20	0	0.32	2.50	4.14	8.57
	30	0	0.57	4.28	7.83	15.00
Down slope	10	0	0.18	-	-	-
	20	0	0.17	-	-	-
	30	0	0.16	-	-	-

4. 경사와 풍속에 따른 산불확산 속도 표 제작

연소실험 결과를 바탕으로 하여 경사와 풍속에 따른 산불확산 속도 표를 제작하였다(〈Table 3〉). 상향경사의 경우는 실제 실험 결과를 토대로 작성하였으나, 하향경사의 경우 풍속 효과를 복합적으로 적용할 수 없어 무풍조건에서 분석된 자료만을 적용하여 작성하였다. 그 결과, 무풍, 무경사 조건에 비해 풍속 6m/s, 경사 30°의 조건에서 약 27배가량 확산속도가 빨라지는 것으로 분석되었다. 기존 연구결과를 보면, Johnson(2001)은 풍속 2.5m/sec 조건에서 확산속도를 실험하여 경사에 따라 1.38~4.90m/min의 범위의 결과를 얻은 바, 본 연구에서 제시된 풍속 2m/s 조건에서의 1.13~4.28m/min의 수치와 유사한 것으로 나타났다.

5. 경사와 풍속에 따른 산불 확산강도 분석

Byram(1959)과 Stock(1987)이 사용했던 발열량 계산식(1)을 이용하여 경사와 풍속 변화에 따른 산불 확산강도를 분석한 결과, 최소 78.11kW/m~최대 5,982.23 kW/m의 범위를 보였으며, 경사가 높아지고 풍속이 강해질수록 확산강도가 점차 높아지는 패턴을 보였다(〈Figure 5〉). Nelson, *et. al.*(1988)은 바람에 의해 유도된 산불의 확산속도를 평가하기 위한 실험에서 산불의 강도를 40~4,600kW/m의 범위로 제시, 기존 연구 결과의 수치와 본 연구의 결과는 유사하였다. 그러나 국내 연구 결과를 검토해 보면, 실제 지형을 모형으로 만들어 풍속조건에 따른 산불 확산강도 분석을 수행한 연구에서 무풍조건에서의 산불에 대한 확산강도는 6.12~14.68kW/m로 제시한 바, 본 연구결과 수치와

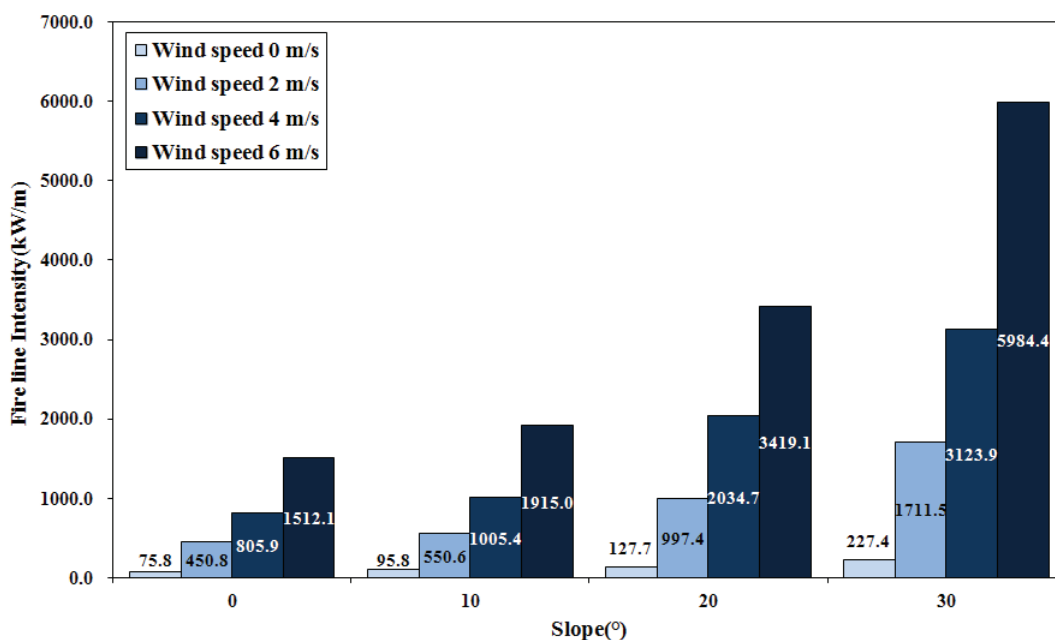


Figure 5. Increase of flame intensity according to the slope and wind speed changes

큰 차이를 보인다(Chae & Lee, 2003). 이러한 원인은 기존 연구에서는 낙엽층의 발열량을 국내 실정에 맞지 않는 국외 자료를 분석인자로 사용하여 나타난 현상으로 판단된다(Stock, 1989). 본 연구에서 제시된 낙엽의 발열량은 낙엽층의 성분분석을 통해 얻어진 결과로써, 기존 KFRI(2007)에서 제시한 목재에 대한 발열량 수치와 유사하며, IPCC(2003) 기준에도 부합된다. 따라서 기존 연구에서 제시된 발열량 결과치에 비해 본 연구에서의 발열량 수치는 현실적인 자료라 추측된다.

IV. 결론 및 제언

본 연구에서는 산불의 확산을 효과적으로 예측하는데 도움을 주고자 확산에 직접적으로 영향을 미치는 경사와 풍속 조건을 부여하여 확산특성 실험을 진행하였다. 경사는 상향경사와 하향경사 조건을 모두 고려하였고, 풍속은 0m/s, 2m/s, 4m/s, 6m/s의 조건을 부여하여 실내 모형실험을 진행하였다. 본 연구 결과에 의하면, 상향경사가 크고 풍속이 빠를수록 화염의 온도가 높아져 최대 1,353.3°C까지 치솟는 것으로 나타났으며, 확산속도 또한 경사 30°, 6m/s의 풍속에서 최대 15m/min까지 빨라지는 현상을 관찰하였다. 그러나 하향경사의 조건에서는 경사가 커질수록 확산속도가 느려지는 반대 현상을 보였다. 조건별 화염강도 측정에서는 최소 78.11kW/m ~ 최대 5,982.23kW/m의 범위를 보였으며, 풍속이 강해질수록 확산강도 또한 높아지는 패턴을 보였다.

기존 국내 연구에서는 경사에 따른 산불확산, 풍속에 따른 산불확산 등 산불확산에 영향을 주는 인자 중 하나의 인자만을 고려한 연구가 대부분이었다. 또한, 국외에서는 산불확산 실내 모형실험이 다수 이루어졌으나, 산악지형을 고려한 연구가 부족하기 때문에 국내 현실과 맞지 않은 부분이 많았다. 그러나 본 연구에서는 경사와 풍속인자를 다양하게 조절하여 실험을 진행, 국내 실정에 맞는 확산특성 자료를 구축하였다는 데 큰 의미가 있다. 본 연구의 결과는 추후 산불행동 및 강도를

정확하게 예측하는데 유용한 정보로 활용될 것이다.

한편, 본 연구에서 실험을 진행한 수평풍동장치는 국외 장치의 규격에 비해 규모가 작아 다양한 환경 인자에 민감하게 반응할 수 있는 문제점이 있어 결과의 정확도 향상시키는데 제약이 있었다. 또한, 기상장비에서 측정된 풍속과 산림 내에서 측정하는 풍속은 큰 차이가 발생함을 감안했을 때 실제 기상장비에서 측정된 결과를 산불확산을 예측하는데 그대로 활용하는 것은 과대치를 양산할 가능성이 클 것으로 판단되었다. 따라서 실험장비의 대형화와 더불어 기상풍속과 산림 내 풍속관계를 규명하는 연구를 수행하여 정확한 산불확산을 예측할 수 있는 토대를 마련해야 할 것이다.

References

- Anderson, H. E. 1983. Predicting Wind-driven Wildland Fire Size and Shape. *USDA Forest Service. Research Paper. INT-305*. 26.
- An, Sang Hyun and Young Chul Shin. 2008. Spread Speed of Forest Fire Based on Slope. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. 8(4): 75-79.
- Bradshaw, L. S., J. E. Deeming, R. E. Burgan, and J. D. Cohen. 1983. The 1978 National Fire Danger Rating System: A Technical Documentation. *USDA Forest Service General Technical Report INT-169*. 44.
- Burgan, R. E. 1979. Estimating Live Fuel Moisture for the 1978 National Fire-Danger Rating System. *General Technical Report. INT-226*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. 17.
- Byram, G. M. 1959. Combustion of Forest Fuels. *In Forest Fire: Control and Use*. McGraw-Hill, New York. 61-89.
- Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud, and D. Williams. 1983. Fire in Forestry, Vol I. *Forest Fire Behaviour and Effects*. John Wiley, New York. 450.
- Chae, Hee Moon and Chan Yong Lee. 2003. Slope and Forest Fuel Effect on Spreading of Forest Fire. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 5(3): 179-184.

- Cheney, N. P., J. S. Gould, W. L. McCaw, and W. R. Anderson. 2012. Predicting Fire Behaviour in Dry Eucalypt Forest in Southern Australia. *Forest Ecology and Management*. 280: 120-131.
- Emmons, H. 1963. Fire in the Forest. *Fire Research Abstracts and Review*. 5: 163-178.
- Fang, J. B. 1969. An Investigation of the Effect of Controlled Wind on the Rate of Fire Spread. Ph.D. Dissertation. New Brunswick University in Canada.
- Fons, W. L. 1946. Analysis of Fire Spread in Light Forest Fuel. *Journal of Agricultural Research*. 72: 93-121.
- Gould, J. S., M. V. Lachlan, and N. P. Cheney. 2011. Quantifying Fine Fuel Dynamics and Structure in Dry Eucalyptus Forest(Eucalyptus Marginata) in Western Australia for Fire Management. *Forest Ecology*.
- Grishin, A. M. 1997. *Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods of Fighting Them*. Publishing House of Tomsk State University: Russia. 42.
- Hirsch, K. G. 1996. *Canadian Forest Fire Behavior Prediction(FBP) System User Guide*. Natural Research Canada, Canadian Forest Service, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, AB. Special Report 7.
- Hottel, H. C., G. C. Williams, and F. R. Steward. 1965. The Modeling of Firespread through a Fuel Bed. *Proceedings of Tenth International Symposium on Combustion*. The Combustion Institute. Pitts, PA. 1099-1107.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use. Land-Use Change and Forestry. *Intergovernmental Panel on Climate Change National Greenhouse Gas Inventories Programme*.
- Johnson, E. A. and K. Miyanishi. 2001. *Forest Fires Behavior and Ecological Effect Academic Press*. 594.
- 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. *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*. 23(5): 90-95.
- Kim, Sung Yong. 2015. A Study on the Analysis of Fuel Characteristics for Forest Fire Hazard Assessment. Ph.D. Dissertation. Kongju National University.
- Korea Forest Service. 2016. <http://www.forest.go.kr/>
- 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. Dissertation. Kangwon National University.
- Lee, Byung Doo. 2005. Analyzing Spread Rate of Samcheok Forest Fire Broken in 2000 Using GIS. Ph.D. Dissertation. Seoul National University.
- Linn, R. R., J. Reisner, J. J. Colman, and J. Winterkamp. 2002. Studying Wildfire Behavior Using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire*. 11: 233-246.
- Mell, W., M. A. Jenkins, J. Gould, and P. Cheney. 2007. A Physics-based Approach to Modelling Grassland Fires. *International Journal of Wildland Fire*. 16: 1-22.
- Nelson, R. M. 1980. Flame Characteristics for Fires in Southern Fuels. *USDA Forest Service Resource Paper SE-205*. Southeast. Forrest. Experiment Station. Asheville. NC. USA.
- Nelson, R. M. and C. W. Adkins. 1988. A Dimensionless Correlation for the Spread of Wind-driven Fires. *Canadian Journal of Forest Resource*. 18: 1-397.
- Putnam, A. A. 1986. A Model Study Wind-blown Free Burning Fires. *Proceedings of the 14th Symposium Combustion*. 1039-1107.
- Rothermel, R. C. and H. E. Anderson. 1966. Fire Spread Characteristics Determined in the Laboratory. *USDA Forest Service Research Paper INT-30*. Ogden. UT.
- Rothermel, R. C. 1972. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. *USDA Forest Service Research Paper INT-115*. Ogden. UT.
- Son, Young Mo, Jong Chan Kim, Kyung Hak Lee, and Rae Hyun Kim. 2007. Forest Biomass Assessment in Korea. Korea Forest Research Institute. *Research Paper*. 7(22): 26-27.
- Stock, B. J. 1987. Fire Behavior in Immature Jack Pine. *Canadian Journal of Forest Resource*. 17: 80-86.
- Stock, B. J. 1989. Fire Behavior in Mature Jack Pine. *Canadian Journal of Forest Resource*. 19: 783-790.
- Sullivan, A. L. 2009. Wildland Surface Fire Spread Modelling, 1990-2007. 2: Empirical and Quasiempirical Models. *International Journal of Wildland Fire*. 18: 369-386.

Korean References Translated from the English

- 권춘근. 2014. 산불에 영향을 미치는 산림지표연료 습도변화 추정에 관한 연구-강원도 영동 지역을 중심으로 강원대학교 방재전문 대학원 박사학위 논문.
- 김동현, 이명보. 2009. 산불 지표화에서의 바람에 의한 화염각 변화 산정식 도출에 관한 준-수치해석 연구. 한국화재소방학회지. 23(5): 90-95.
- 김성용. 2015. 산불위험성 평가를 위한 주요 침엽수종의 연료 특성 분석에 관한 연구. 공주대학교 일반대학원 박사학위 논문.
- 손영모, 김종찬, 이경학, 김래현. 2007. 우리나라 산림 바이오매스 자원 평가. 국립산림과학원 연구보고 7(22): 26-27.
- 안상현, 신영철. 2008. 경사에 따른 산불의 확산속도 한국방재학회논문집. 8(4): 75-79.
- 이병두. 2005. GIS 응용에 의한 2000년 삼척산불의 확산속도 분석. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
- 채희문, 이찬용. 2003. 산불 확산에 미치는 임지내 산림연료와 경사도에 관한 연구. 한국농림기상학회지. 5(3): 179-184.

Received: Oct. 12, 2016 / Revised: Nov. 14, 2016 / Accepted: Nov. 22, 2016

경사와 풍속 변화가 소나무림 내 산불행동에 미치는 영향

국문초록 본 연구에서는 단순 물리적 연소실험을 통하여 경사와 풍속 변화가 산불행동 특성 변화에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고자 하였다. 경사는 상향경사와 하향경사 조건을 모두 고려하였고, 풍속은 0m/s, 2m/s, 4m/s, 6m/s의 조건을 부여하여 실험하였다. 본 연구 결과에 의하면, 상향경사가 크고, 풍속이 빠를수록 화염의 온도가 지속적으로 증가하여 최대 1,353.3°C까지 높아지는 것으로 나타났다. 확산속도의 경우에는 경사 30°, 6m/s의 풍속에서 최대 분당 15m까지 빨라지는 현상을 관찰하였다. 조건에 따른 산불화염의 강도 추정에서는 최소 78.11kW/m~최대 5,982.23kW/m의 범위로 나타났으며, 경사가 크고, 풍속이 강해질수록 확산강도가 높아지는 패턴으로 수치의 범위가 국외에서 제시한 연구결과와 유사하였다. 본 연구의 결과는 추후 산불확산 및 강도를 정확하게 예측하는 데 유용한 정보로 활용될 것이다.

주제어 : 산불, 경사, 풍속, 확산, 지표

-
- 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).
- Hee Young Ahn** : She received her master’s degree in arts from Korea University in february 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).
- Chun Guen 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).
- 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).