

모형실험에 의한 풍속변화에 따른 산불의 확산속도와 강도 분석

채희문 · 이찬용

강원대학교 산림과학대학 산림자원보호학과
(2003년 7월 6일 접수; 수락 2003년 8월 18일 수락)

Analysis of Forest Fire Spread Rate and Fire Intensity by a Wind Model

Hee-Mun, Chae and Chan-Yong, Lee

Dept. of Forest Resources Protection, College of Forest Science, Kangwon National University, Hyoja 2 Dong, Chuncheon, 200-701, Korea

(Received July 6, 2003; Accepted August 18, 2003)

ABSTRACT

Forest fire spread and intensity were modeled as a function of wind and fuel. Spread rate and intensity of forest fire were related to weight and thickness of forest fuel beds and to wind speed. Forest fire spread rate and fire intensity were differentiated according to wind speed. Rapid wind speed causes a faster forest fire spread rate and greater fire intensity than does slow wind speed. Relative burning time of the fire from beginning to end in the model was 161 sec at a wind speed of 0.5 m/sec and 146 sec at 1 m/sec on the model. Average forest fire spread rate was 0.014 m/sec at a wind speed of 0.5 m/sec and 0.020 m/sec at 1 m/sec. Average fire intensity was 0.183 kW/m at a wind speed of 0.5 m/sec, 0.259 kW/m at 1 m/sec. Fire intensity was greater when forest fire spread rate was rapid.

Key words : forest fire spread rate, fire intensity, wind speed, forest fuel bed.

I. 서 론

우리 나라는 산림이 울창하고 가연성 낙엽 등의 가연성 물질들이 많이 쌓여 있으며, 경사가 급하고 기복이 많은 산지로서 연소진행 속도가 빨라 급속히 확산시키는 산악형 산림으로서 산불 발생시 진화가 어려워 산불의 확산 속도와 강도를 추정하기 어려운 실정이다.

산불에 대한 연구는 실내실험과 야외실험의 병행에 의해 보다 정밀한 산불확산을 추정하여 함에도 불구하고 현재 우리나라에서는 모형에 의한 산불확산 실험은 거의 이루어지지 않는 실정이다. 실험실내의 모형에 의한 산불확산 실험은 산불발생 시 정밀한 산불 확산속도를 예측할 수 있는 중요한 수단으로 일부부분으로 간주되어 오고 있다.

Chandler et al(1983)에 의하면 풍속은 산불에 영향을 미치는 중요한 인자들 중의 하나라고 하였으며, 연료의 수분을 건조시키고, 공기의 지속적인 공급에 의해 연소를 증가시키고, 풍향과 풍속의 차이는 산불의 행동에 중요하다고 밝힌 바 있다. 또한 Chandler et al(1983)는 실제에 있어서 산불 확산은 지피물 층(fuel bed)의 밀집비율(packing rate)에 영향을 받을 것이고 초본류(grass) 같은 느슨하게 밀집된 연료(loosely packed fuel)는 밀하게 밀집된 지피물보다 더 많은 영향을 받는다고 하였다. Van Wanger(1988)는 실험실내에서 산불의 확산속도에 관한 경사(slope)의 영향을 분석하기 위하여 실험을 수행하여 소나무 침엽의 litter 층은 경사가 22°올라가면 불의 확산속도는 65% 감소한다고 하였다.

Nelson et al(1988)에 의하면 바람에 의해 유도된 산불의 확산속도를 평가하기 위하여 실험실내에서 초 분류, 수목의 가치와 같은 연료들을 이용하여 실험을 실시한 결과 산불의 강도는 40~4600 kW/m의 범위로 나타났으며, 산불의 확산속도와 풍속의 관계는 연료소비, 대기 온도, 불꽃의 잔존시간 등과 상당히 밀접한 관계가 있다고 하였다. Mcalpine(1989)은 산불은 일반적으로 풍속의 변화에 의해서 타원형으로 확산되는데, 이러한 타원적인 불의 확산모델은 풍속과 타원의 폭에 대한 길이의 비율에 의존하며, 산림 연료층 0.093 m 높이는 1.6 km/h이상의 풍속에서 폭에 대한 길이의 비율로 안정화된다는 보고하였다.

Burgan(1979)은 산불의 확산속도와 강도를 예측하기 위해서 연료의 종류, 연료층의 깊이(depth of fuel bed), 연료입자의 체적대 표면적 비율(surface/volume rate), 연료입자의 밀도, 연료의 수분함량, 풍속, 경사 등에 대한 모든 자료들의 유기적인 분석에 의해서 이루어져야 한다고 밝힌 바 있다.

본 연구는 풍속의 변화에 따른 산불의 확산속도와 강도를 추정하기 위해 모형에 의한 산불 실험을 통하여 산불 확산 모델 수립의 기본 자료를 제공하고, 풍속의 변화에 따른 산불 확산의 변화추정에 의하여 차후의 산불 발생시 보다 정밀한 확산 예측을 통하여 산불 방제 방법 수립의 기본 자료를 제공하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

2.1. 모형제작

모형제작은 강원대학교 연습림내 도면상의 E 127°48' 00"-E 127°51' 00", N 37°46' 30"-N 37°48' 00"지점의 연엽산을 중심으로 하였으며 가로 75 cm, 세로 45 cm, 높이 25 cm의 실측 모형을 제작하였다.

모형의 축척은 1/50,000로서 재료는 석고를 이용하여 만들었으며, 모형에 의한 확산속도와 산불의 강도를 추정하기 위하여 연료는 Johnson(2001)이 사용한 방법과 유사한 방법으로 자작나무 toothpick을 이용하였다. 연료로 사용된 자작나무 toothpick은 실측 모형에 1 cm 간격으로 설치하였으며, 지표에서 상층부까지의 높이는 6 cm로 통일하였다.

자작나무 toothpick의 무게는 dryoven(JISICO, J-nds1)으로 105°C조건에서 24시간동안 건조시킨 후 건조전과 건조후의 무게를 측정하여 수분 함량을 구하였

으며 산불의 강도는 식 1)를 이용하여 구하였다.

풍속 변화에 따라 산불의 확산속도와 강도를 구하기 위하여 풍속을 0.5 m/sec와 1.0 m/sec로 구분하였으며, electronic fan을 이용하여 모형에 풍속을 주었다. 풍속의 측정은 풍속계(kasier 3000)를 이용하여 모형의 지상 2 cm높이에서 측정하였다.

Fig.1은 모형을 제작하기 위한 도면상의 위치와 제작된 실제 모형을 나타낸 것이다.

2.2. 산림 모형에 의한 산불의 확산속도 및 산불의 강도 분석

산불 확산속도의 예측은 화두의 속도(head fire rate)로서 계산되어지며, 일반적으로 확산속도는 연소로부터 열의 이동/연료를 점화시키기 위해 요구된 열로 정의된다. 연소실험을 통하여 연소가 시작되는 시간과 연소가 끝날 때까지의 시간을 이용하여 발화시간대를 분석하였으며, 이것을 이용하여 산불의 확산속도(Rate of Spread-ROS, sec/cm)를 계측하였다.

산불의 강도(I)는 발화시간대와 연료무게 등을 이용하여 측정하였으며, 식 1)은 Byram(1959)과 Stock(1987, 1988)이 사용했던 공식을 이용하였다.

$$I = HWR \quad 1)$$

I = 산불의 강도 kW/m

H = 소비된 연료의 열량, kJ/kg(일반적으로 H의 수치는 crown fire에서는 1,700, Surface fire에서는 1,800으로 상수화 시킨다(Stocks. 1986, 1989)- 본 연구에서는 1,800으로 상수화 시켜 사용하였다.)

W = 면적당 소비된 연료의 무게 kg/m²

R = 산불의 확산속도 m/s

식 1)의 공식을 사용하여 0.5 m/s와 1 m/sec로 풍속이 변화할 때 산불이 번지는 속도, 산불이 확산되는

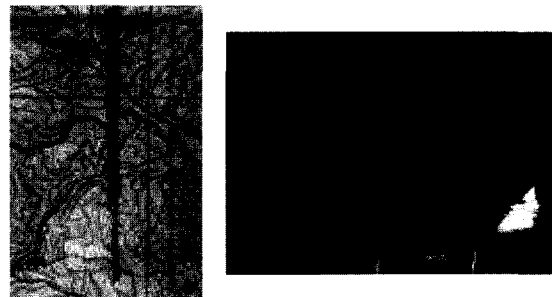


Fig. 1. The manufactured model for predicting of fire spread according to wind-speed change.

시간 등을 이용하여 산불의 강도를 추정하였다.

2.3. 실험 방법

산불의 확산속도 및 강도를 분석하기 위하여 모형틀을 3등분하여 3개의 측정점(1, 2, 3 position)을 두었으며, 각 측정점의 거리는 모형상의 1/3이 되는 지점을 첫 번째, 2/3이 되는 지점을 두번째, 마지막 지점을 3번째로 구분하였다. 불이 시작되어서 끝날 때까지의 시간을 풍속별로 측정하였으며 각 측정점에 도달하는 화두(head of fire)의 시간을 이용하여 측정에서의 풍속변화에 따른 불의 강도와 확산속도를 분석하였으며, 모형에서의 점화는 토치를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

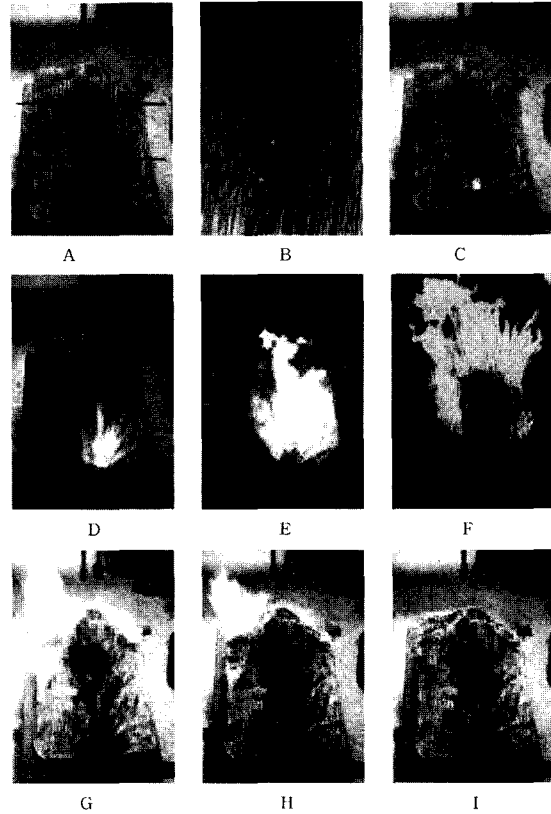
3.1. 산불의 확산 속도와 강도

Table 1은 모형에 의한 산불의 확산속도와 강도를 나타낸 것으로 연료층의 두께는 6 cm이고 무게는 0.0071 kg/m²이며 연료의 수분함량은 25~35% 일 때 풍속의 변화를 0.5 m/sec, 1 m/sec로 주었을 때 각 측정점에서 시간과의 관계를 밝힌 것이다.

풍속의 변화에 따라 산불의 확산속도와 강도가 다르게 나타나고 있으며, 발화가 시작되어서 끝날 때까지의 시간은 풍속 0.5 m/sec에서는 161초, 1 m/sec에서는 146초 정도 경과되는 것으로 나타났다.

산불의 확산속도는 0.5 m/sec에서는 평균 0.014 m/sec, 1 m/sec에서 0.020 m/sec로 0.5 m/sec에 비하여 약 1.4배정도 빠르게 나타났다.

산불의 강도는 0.5 m/sec에서는 0.183 kW/m, 1 m/sec에서는 0.259 kW/m로 0.5 m/sec에 비하여 약 1.4배정도 차이가 났으며, 확산속도가 빠르면 산불의 강도 또한 큰 것으로 나타났다.



A: 3 position for measurement of forest fire spread rate and fire intensity on model, B: measurement of fire spread rate at wind speed 0.5 m/sec. C: Ignition point, D-I: burning test on the model.

Fig. 2. Experiment of burning for forest fire spread rate and fire intensity by birch toothpick on the model.

산불의 강도와 확산속도는 풍속이 작은 경우와 비교하여 풍속이 큰 경우에 모든 측정점에서 빠르고 강하게 나타나고 있다.

확산속도의 변화는 풍속이 0.5 m/sec보다 1 m/sec에서 첫번째 측정점에서는 1.6배, 두번째 측정점에는 1.5배,

Table 1. The comparison of fire spread rate in this study and fires spread rate by Johnson(2001).

	0.5 m/sec		1 m/sec		Johnson		
	Time(sec)	ROS(m/sec)	Intensity(kW/m)	Time(sec)	ROS(m/sec)	Intensity(kW/m)	ROS (m/sec)
1position	36	0.008	0.102	24	0.013	0.166	
2position	54	0.013	0.166	36	0.020	0.255	
3position	78	0.022	0.281	60	0.028	0.357	
Finished	161		146				
Mean		0.014	0.183		0.020	0.259	0.023~0.040

Time : Time of fire start and end. ROS : Rate of forest fire spread. Intensity : Fire intensity. Johnson: Result of ROS test by Johnson(2001)

세번째 측정에서는 1.2배로 나타났다. 강도의 경우 첫 번째 측정에서는 1.5배, 두번째 측정에서는 1.5배, 세번째 측정에서는 1.2배로 풍속이 1 m/sec일 때 크게 나타나고 있다.

Johnson(2001)은 white pine toothpick을 사용하여 연료의 무게가 0.002 kg/m^2 이고, 풍속이 2.5 m/sec, 연료층의 두께 0.55 m일 경우 산불의 확산 속도를 추정 한 결과 0.023 m/sec~0.049 m/sec의 범위로 나타났다고 보고하였다.

본 연구의 결과가 Johnson(2001)의 실험결과와 다소 차이를 보이는 것은 풍속의 차이, 연료량과 연료층의 두께의 차이인 것으로 판단되며, 또한 본 연구에서는 산악형의 모델이 사용되었지만 Johnson(2001)은 평지형의 모델을 사용한 차이점이라고 추측된다.

Fig. 3은 산불의 확산속도와 산불의 강도와와의 관계를 나타낸 것으로 확산속도가 증가하면 산불의 강도 또한 증가하는 것으로 나타났다. 0.5 m/sec와 1 m/sec를 비교하면 풍속의 변화에 관계없이 확산속도가 증가하면 산불의 강도가 증가하며, 두 변화간에는 높은 상관계수를 갖는 것으로 나타났다.

산불의 강도와 확산속도는 연료의 상태, 연료의 종류, 연료층의 깊이, 기후조건, 강우와 습도, 풍속, 지형 등에 따라 다양하게 나타난다고 하였다(Robert, 1995). 본 연구에서 사용된 방법들은 다만 풍속의 변화만을 이용하여 확산속도와 강도를 분석하였는데 차후의 연구에서는 산불의 확산속도에 영향을 주는 다양한 인자의 분석이 필요할 것이며, 이에 대한 연구를 위하여 우리 나라 산악형 지형에 알맞은 모형 제작이 필요할 것으로 판단된다.

IV. 적 요

모형에 의한 산불의 확산 속도와 강도의 분석은 0.5 m/sec와 1 m/sec로 변화를 준 후 이러한 풍속의 변화에 따라 산불의 강도와 확산속도를 분석한 결과 풍속의 변화에 따라 산불의 확산속도와 강도가 다르게 나타나고 있으며, 불이 시작되어서 끝날 때까지의 시간은 0.5 m/sec에서는 161초, 1 m/sec에서는 146초 정도 소요되는 것으로 나타났다.

산불의 확산속도는 0.5 m/sec에서는 평균 0.014 m/sec, 1 m/sec에서는 0.020 m/sec로 0.5 m/sec에 비하여 약 1.4배정도 빠르게 나타났다.

산불의 강도는 풍속 0.5 m/sec에서는 0.183 kW/m, 1 m/sec에서는 0.259 kW/m로 0.5 m/sec에 비하여 약 1.4배정도 차이가 났으며, 속도가 빠르면 산불의 강도 또한 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 사용된 모형에 의한 산불확산 속도와 강도의 분석은 산불 실험을 실험실내에서 실시한 외국의 사례가 다소 있으나 외국 사례에서는 본 실험에서 제작된 것과 같은 산악형이 아니라 평지형의 모델을 이용하여 실험을 실시 한 것들이다. 본 연구에서는 우리의 실정에 맞는 산악형의 모델을 사용하고자 도면상의 실측모양으로 모형을 제작하였으나 모델의 크기가 너무 작아 임지내의 지피물을 이용한 실험을 할 수 없게 되어 외국의 사례에도 있었던 toothpick을 이용하여 실험을 실시하였다.

본 연구의 결과를 토대로 차후의 연구에서는 다양한 (풍속의 변이를 다양하게 주거나 임지내의 다양한

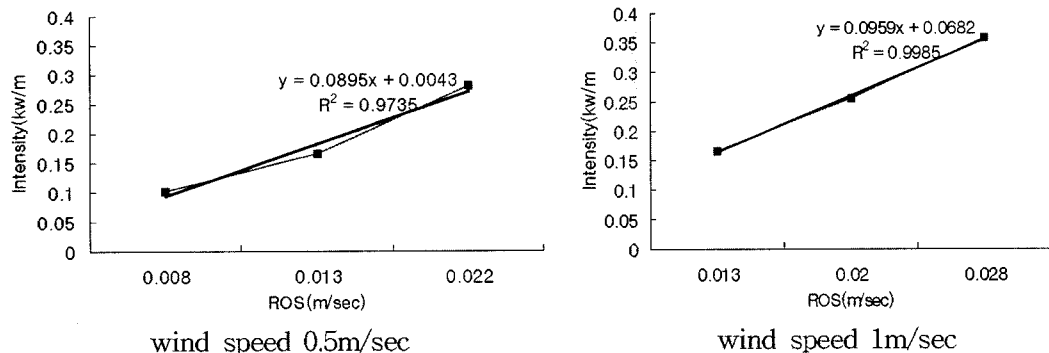


Fig. 3. The relationship of forest fire rate and fire intensity at each wind speed.

연료를 이용한 각 연료 특성에 따른 산불의 확산 형태 및 강도 분석, 연료의 수분함량 차이에 대한 분석 등) 대규모의 모형을 이용한 실험을 유도한다면 본 실험에서 얻어진 결과 보다 좀더 정밀한 산불의 확산 속도와 강도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 실험실내의 산불의 확산속도와 강도의 분석은 산불확산 모델을 수립하기 위한 기본적인 자료를 구축하고 정밀한 예측자료에 의한 산불 발생시 진화방법의 개발 등에 대한 기본data로서의 역할을 충분히 할 수 있을 것으로 사료된다.

인용문헌

- Burgan, R. E., 1979: The effect of latitude and season on index values in the 1977 NFDRS system. U. S. For. Serv. Paper INT-276. 6pp.
- Byram, G. M., 1959: Combustion of Forest Fuel, in K. P. Davis, E. D. Forest Fire control and use. McGraw-Hill book company. 595pp.
- Byram, G. M., 1963: An analysis of the drying process in forest fuel material. Paper presented at 1963 International Symposium on Humidity and Moisture. 23pp.
- Chandler, C. C., 1963: Prediction of fire spread following unclar explosions. U. S. For. Serv. Paper PSW-5. 110pp.
- Chandler, C. C., C. Phillip, P. Thomas, T. Louis and W. Dave, 1983: Fire in Forestry Volume I. -Forest fire behavior and effects-. A Willey-Interscience publication. 450pp.
- Johnson, E. A. and K. Miyanishi, 2001: Forest Fires-Behavior and ecological effect. Academic press. 594pp.
- Mcalpine, R. S., 1989: Temporal variations in elliptical forest fire shapes. Can. J. For. Res. **19**, 1496-1500.
- Nelson, R. M. Jr. and C. W. Adkins, 1988: A dimensionless correlation for spread of wind-driven fires. Can. J. For. Res. **18**, 391-397.
- Robert, J. W., 1995: The Ecology of Fire. Cambridge University Press. 343pp.
- Stocks, B. J., 1987: Fire behavior in immature jack pine. Can. J. For. Res. **17**, 80-86.
- Stocks, B. J., 1989: Fire behavior in mature jack pine. Can. J. For. Res. **19**, 783-790.
- Van Wagner, C. E., 1988: Effect of slope on fires spreading downhill. Can. J. For. Res. **18**, 818-820.