

산불 확산에 영향을 미치는 임지내 산림연료와 경사도에 관한 연구

채희문 · 이찬용

강원대학교 산림과학대학 산림자원보호학과

(2003년 5월 7일 접수; 2003년 8월 18일 수락)

Slope and Forest Fuel Effect on Spreading of Forest Fire

Hee Mun Chae and Chan Yong Lee

Dept. Forest Resources Protection, College of Forest Sciences, Kangwon National University,
Chuncheon 200-701, Korea

(Received May 7, 2003; Accepted August 18, 2003)

ABSTRACT

This study investigated the relationship of fuel weight and depth together with slope on the spread of forest fire. Fire spread was faster on the greater slope in forested land. Fire had a greater spread rate with lighter fuel weight. The thickness of the fuel bed and forest fire spread rate were not related. The fire spread rate was closely related to the slope and weight of the fuel bed (significant at 0.01, 0.05, respectively). The thickness of the fuel bed was not significant (0.05).

Key words : forest fuel, slope, forest fire spread, fuel bed

I. 서 론

산불은 인류가 불을 사용하기 이전부터 지구상에 끊임없이 일어나는 자연 현상 중의 하나로서 산림내에 존재하는 가연물들 즉, 낙엽, 고사목, 초본류, 임목 등이 연소되는 현상이라고 할 수 있다. 우리 나라의 경우 산불은 대부분 인위적인 현상에 의해서 발발하며, 최근 10년간(1991~2000년) 산불 발생건수는 4,020건이며, 피해면적은 39,410 ha 이었다(산림청, 2001).

산불의 확산에 영향을 미치는 인자들은 풍속, 지형, 경사, 산림연료의 수분함량, 산림연료의 무게, 연료의 종류, 상대습도 등 다양하다. 산불의 확산은 습도의 변화와 풍속의 변화에 따라서 다르게 나타나고 있으며(현신규 등, 1997), 또한 기후조건이 유사한 지역에서 연료의 수분함량 차이에 따라 불의 확산속도와 불꽃의 길이가 다르게 나타난다고 하였다(Van Wanger, 1968).

산불발생시 임지내 지표층의 두께(fuel bed)와 수분 사이의 관계에서 수분함량이 0일 때 산불의 속도(flame spread rate)를 ponderosa pine needle을 이용하여 조사한 결과 0.32 cm/s로 나타났으며, 지표물의 수분함량이 9.3%일 때 깊이 3 cm와 0.33 kg/m²의 ponderosa pine needle에서 산불의 확산속도는 0.2~0.3 cm/s 였으며, 12 cm 깊이, 1.39 kg/m²에서는 0.5 cm/s로 나타났다(Weber, 1990).

미성숙 jack pine(*Pinus banksiana* Lamb.) 임분에서 산불의 행동(fire behavior)은 불의 확산 속도, 불꽃의 깊이, 연료의 소비량, 화두(head fire)의 강도와 상당한 관련이 있다는 것을 밝혔으며(Stocks, 1987), 성숙한 jack pine 임분에서 산불의 행동은 미성숙 jack pine에서와 마찬가지로 불의 확산 속도, 불꽃의 깊이, 연료의 소비량, 화두의 강도와 상당한 관련이 있다. 중간 정도의 산불 속도를 가진 지표화(surface fire)는 불꽃의 높이가 0.1~1 m이고, 화두의 강도는

500 kw/m 보다 작으며, 빠른 산불의 속도를 가진 지표화는 불꽃의 높이가 약 2 m, 화두의 강도는 500~300 kw/m로 나타났고, 보다 강한 산불의 속도를 가지고 있는 산불(10 m/min)은 강한 수관화(>400 kw/m)로 나타나는 경우가 있었다(Stocks, 1989).

산불 발생시 경사는 산불의 확산 속도에 영향을 미치며 경사가 매 10° 증가할 때 확산은 두 배 증가하며, 경사 15~35° 까지 10° 씩 증가할 때 확산은 두 배 이상 증가하며, 경사 35° 이상에서의 확산은 10배 증가하며(Chandler *et al.*, 1983), 실제에 있어서 산불 확산에 관한 경사의 영향은 지피물 층의 밀집비율(packing rate)에 영향을 받을 것이다.

초분류 같은 느슨하게 밀집된 연료(loosely packed fuel)는 밀하게 밀집된 지피물보다 더 많은 영향을 받는다고 하였으며(Chandler *et al.*, 1983), 소나무의 낙엽층은 경사가 22° 올라가면 불의 확산속도는 65% 감소한다고 하였다(Van Wanger, 1988).

산불의 확산속도와 풍속의 관계는 연료소비, 대기 온도, 불꽃의 잔존시간 등과 상당히 밀접한 관계가 있다고 하였다(Nelson and Adkins, 1988).

따라서 본 연구에서는 임지내의 산림연료의 무게, 산림연료의 두께(지피물의 두께), 임지의 경사도와 산불 확산과의 관계를 다루고자 하며 이러한 연구를 통하여 이들 인자들이 산불의 확산에 미치는 영향을 분

석하며, 산불의 확산속도, 산불의 강도 등을 파악하여 산불 확산 모델 개발의 기본적인 자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 야외조사

산불 확산을 추정하기 위하여 실시된 야외조사는 임지내의 환경분석을 통하여 임지내에서 산불이 발생할 경우, 정밀한 산불의 확산속도를 분석하기 위해서 실시하였다.

임지내의 경사도와 지피물에 따른 산불의 확산 속도를 추정하기 위하여 강원대학교 연습림에서 시험지를 설정하였으며 2002년 4월에 조사하였다.

시험지 하부지점에서 연엽산 정상까지 23개 조사구(10×10 m)를 설정하였으며, 조사구내 지피물의 두께를 5지점(변두리 4개 지점과 중앙부분의 1지점)에서 조사한 후 10×10 cm의 지피물을 각 조사구에서 수거하였으며, 조사구의 경사와 사면 방향을 조사하였다.

본 연구에서는 조사구의 위치관계를 명확히 하기 위해 범지구측위 시스템(GPS: Global Positioning System)의 hand-held type 수신기를 사용하여 조사구의 간격을 45 m 간격으로 설정하였다. 얻어진 좌표값을 이용하여 수치지형도 상에 도시하였다(Fig. 1). 좌

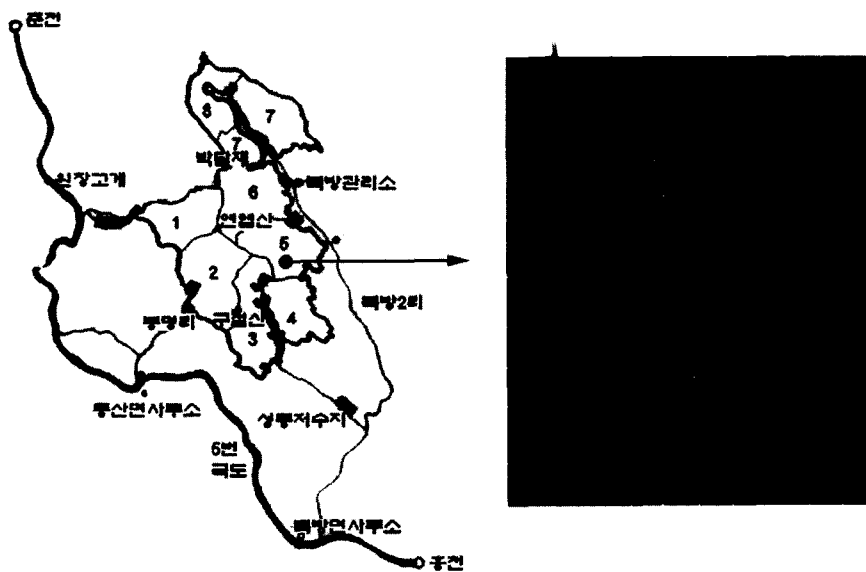


Fig. 1. Location map and research site on map in Yeonyeob mountain.

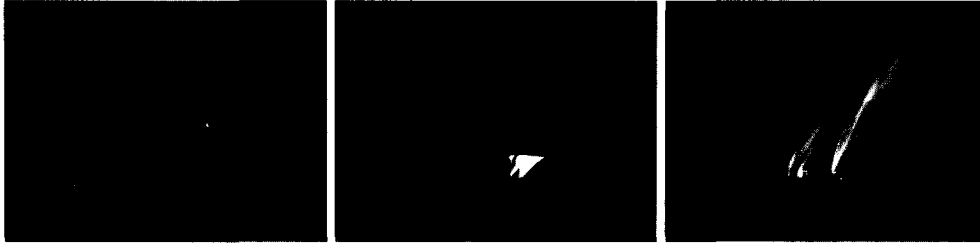


Fig. 2. The burning test of collected fuel bed according to aspect and width of fuel bed in laboratory.

표값은 직각좌표계 중부원점(127:00:00, 38:00:00)을 기준 정수자리까지만 기재하였다.

2.2. 실내실험

수거한 지피물은 생중량을 계량하고 105°C에서 건조기로 24시간 건조한 후 건조량을 계측하여 함수율을 구하였다. 건조된 지피물은 일정한 함수율(30%)을 유지시키기 위하여 생장상(growth chamber)에 48시간 이상 보관한 후, 야외조사에서 분석된 각 지형의 경사도, 지피물의 두께와 일치시켜 0.5 m/s의 풍속을 주고 산화실험을 실시하였다.

연소실험을 통하여 각 조사구 경사, 지피물 두께, 지피물 무게에 따른 발화시간대를 분석하였으며, 발화 시간대를 이용하여 산불의 확산속도(Rate of Spread-ROS)를 예측하였다.

실내 실험의 발화시간대와 연료무게를 이용하여 산불의 강도를 측정하였으며, 산불의 강도는 Byram (1959, 1963)과 Stock(1987, 1988)이 사용했던 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$I = HWR$$

여기에서 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, 1987, 1988))

W = 면적당 소비된 연료의 무게 kg/m²

R = 산불의 확산 속도 m/s

위의 공식을 사용하여 각 조사구가 0.5 m/s 풍속이 일 때 산불이 번지는 속도, 산불이 확산되는 시간, 완전히 소멸되는 시간을 이용하여 산불의 강도를 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 산불의 초기 확산 속도 추정

Table 1은 각 조사지역의 GPS에 의한 위치 분석, 실험실에서 분석된 산불의 강도(I, kw/m), 및 산불의

Table 1. Fire spread and fire intensity of each plot in field (0.5 m/sec).

Plot	P	S (%)	F.B. (cm)	W (kg/m ²)	ROS (m/min)	I (kw/m)
1	X:272666 Y:476623	30	4.2	0.219	6.0	39.52
2	X:272667 Y:476668	22	3.4	0.219	3.0	19.77
3	X:272680 Y:476710	20	5.9	0.204	6.6	40.47
4	X:272699 Y:476751	25	3.7	0.150	2.2	9.94
5	X:272717 Y:476792	20	2.5	0.094	6.3	17.80
6	X:272736 Y:476833	15	3.4	0.105	8.0	25.39
7	X:272759 Y:476872	25	3.8	0.176	5.4	28.56
8	X:272782 Y:476911	20	6.5	0.153	6.0	27.70
9	X:272787 Y:466953	20	2.8	0.107	5.2	16.78
10	X:272770 Y:476995	15	3.8	0.085	8.5	21.70
11	X:272750 Y:477035	15	4.1	0.177	2.7	14.38
12	X:272735 Y:477077	20	5.3	0.146	7.0	30.78
13	X:272718 Y:477119	25	4.6	0.155	4.8	22.33
14	X:272667 Y:476623	25	4.6	0.125	6.6	24.85
15	X:272681 Y:477201	28	3.2	0.088	8.0	21.12
16	X:3272663 Y:477242	35	4.4	0.181	12.0	65.23
17	X:272644 Y:477283	20	5.0	0.142	4.8	20.54
18	X:272620 Y:477324	30	6.8	0.190	9.3	53.21
19	X:272607 Y:477365	45	2.3	0.112	40.0	135.15
20	X:272589 Y:477460	50	2.0	0.085	80.0	204.30
21	X:272570 Y:477447	15	2.9	0.133	4.0	16.04
22	X:272522 Y:477488	37	5.2	0.133	24.0	96.26
23	X:272534 Y:477529	45	3.5	0.073	4.0	8.81

P: Position of each plot by GPS. S: Slope of each plot(%), F.B.: Average Fuel Bed in each plot(cm), W: Average Weight of fuel bed in each plot(kg/m²), ROS: Rate of fire Spread from burning test(m/min), I: Fire Intensity of each plot from burning test(kw/m).

속도(ROS, m/min), 각 조사구의 경사도(s, %), 지피물의 무게(W, kg/m²)와 두께(F.B. cm)를 나타낸 것이다.

조사구의 식생분포는 산불의 확산속도에 관여하는 중요한 인자들이며, 식생에 따라 지피물의 양과 질이 달라지며, 수분함량 또한 달라지게 된다. 이러한 식생과 산불확산에 관한 연구들은 식생을 구성하고 있는 각 수종들의 열에 대한 반응 특장을 알아야 하며, 이들은 차후의 연구에서 다루어져야만 할 것이다.

3.2. 산불확산속도와 경사도의 관계

Fig. 3은 산불확산속도와 경사도의 관계를 나타낸 것으로 경사가 심하면 할수록 산불의 확산속도는 증가하는 결과로 나타나고 있다.

경사도 15%일 때 산불의 평균 확산 속도는 5.8 m/min 이었으며, 경사가 20%일 때 산불의 평균 확산 속도는 6.0 m/min 이었으며, 경사 25%일 때 산불의 평균 확산속도는 5 m/min으로 나타났고, 경사가 30%일 때 산불의 평균 확산 속도는 8 m/min 이었으며, 경사가 35%일 때 산불의 확산속도는 13 m/min, 경사 45%일 때 산불의 평균 확산 속도는 40 m/min 이고 경사가 50%일 때 산불의 확산 속도는 80 m/min으로 나타났다.

경사가 높아지면 질수록 산불의 확산 속도는 빠르게 나타나고 있으며, 경사 15%와 비교하여 30%, 45%, 50%의 경사는 30%일 때 약 1.5배 증가 추세를 보이고, 45%일 때는 6.8배 정도의 산불확산 속도가 증가,

경사 50%일 때는 13.7배 증가하는 것으로 나타났다.

Chandler *et al.*(1983)의 연구에 따르면, 산불 발생 시 경사가 매 10% 증가할 때 확산은 2배 증가하며, 경사 15~35%까지 10%씩 증가할 때 확산은 2배 이상 증가하며, 경사 35% 이상에서 확산은 10배 증가한다고 하였다.

본 연구에서 조사된 경사도와 산불의 확산 속도와의 관계는 Chandler *et al.*의 연구결과와 일치하고 있다.

3.3. 산불확산속도와 지피물 두께와의 관계

Fig. 4는 산불의 확산 속도와 지피물 두께와의 관계를 설명한 것으로 지피물이 두꺼우면 산불의 확산속도 또한 늦어지는 경향이 있으나 대부분의 경우에는 지피물의 두께와 상관없이 산불의 확산속도의 차이는 크지 않았다.

연료두께 2 cm일 때 산불의 평균확산속도는 42 m/min, 3 cm는 11 m/min, 4 cm는 6 m/min, 5 cm는 9 m/min, 6 cm는 6.6 m/min로 나타났다.

이러한 결과들은 지피물의 두께가 조사구내의 식생의 차이로 인하여 각 수종간에 일정하지 않기 때문이다. 예를 든다면 소나무림이 우점을 차지하고 있는 조사지역과 참나무림이 우점을 차지하고 있는 조사지역 간에는 소나무림의 경우 지피물의 두께가 얇게 나타나지만 공기층의 차이로 인하여 소나무림에서는 낮은 발화시간대를 보이고 있으므로 산불의 확산속도는 지피물의 두께와 관련이 없는 것으로 판단된다.

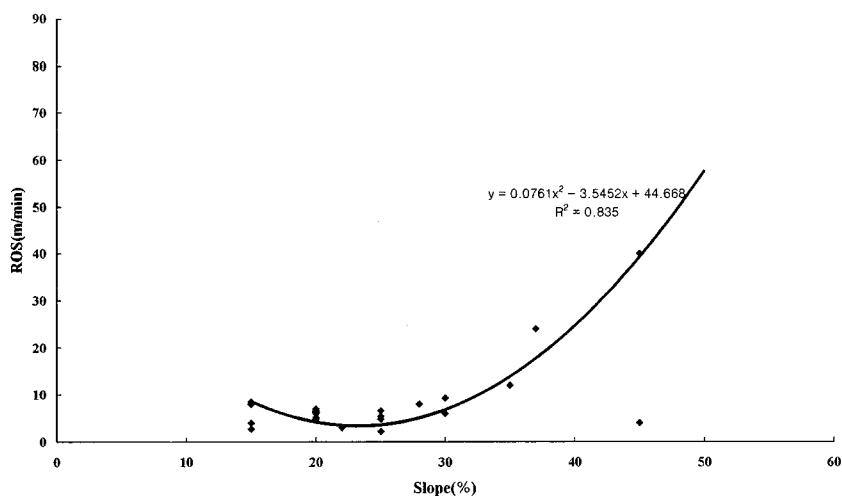


Fig. 3. Relationship of slope and fire spread rate.

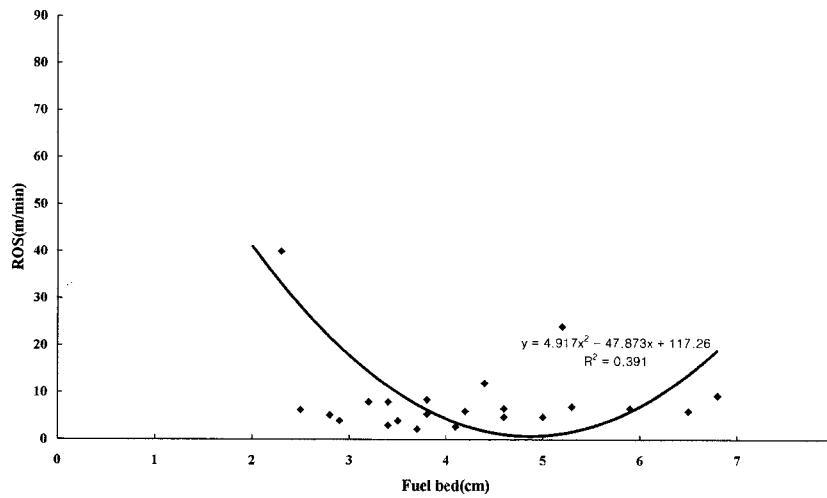


Fig. 4. Relationship of fuel bed thickness and fire spread rate.

3.4. 산불의 확산속도와 연료무게와의 관계

Fig. 5는 연료층의 무게와 확산속도와의 관계를 나타낸 것으로 연료층의 무게가 무거우면 확산속도는 작아지고, 무게가 가벼우면 상대적으로 확산 속도가 높아지는 경향이 있으나 경사도에 비하여 이들의 관계가 강하지 않은 것으로 나타났다.

연료의 무게 0.1 kg/m²의 경우 산불의 평균 확산속도는 22.4 m/min, 0.15 kg/m²의 경우 9.4 m/min, 0.2 kg/m²의 경우 6.5 m/min로 나타났다.

연료 무게의 경우는 경사도와 유사하게 무게의 크기에 따라 산불의 확산 속도가 좌우된다고 볼 수 있

며, Chandler *et al.*(1983)에 따르면, 연료의 무게는 수분함량과 밀접한 관련이 있으며, Lawson *et al.* (1997)에 의하면 수분함량은 산림연료의 점화 능력과 연소유지 등과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타나고 있다.

본 연구에서 조사된 연료의 무게와 산불의 확산속도와의 관계는 연료의 수분 함량의 크기와 관련이 있는 것으로 판단되며, 산림미세연료의 수분반응 시간과도 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

산불의 확산 속도와 이들 3가지 인자들간의 관계는 경사도가 가장 영향을 미치며(P; 0.000) 다음으로 연료의 무게이며(P:0.061), 지피물의 두께(P; 0.028)는 뚜렷

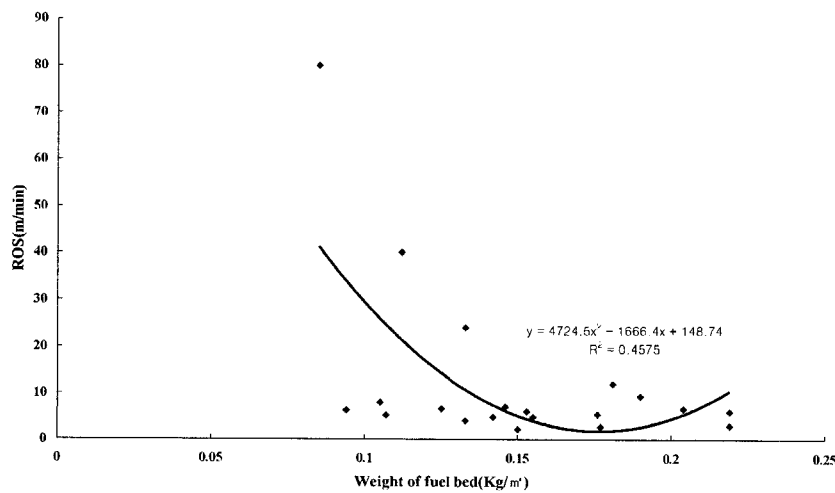


Fig. 5. Relationship of weight of fuel bed and fire spread rate.

한 상관관계가 형성되지 않는 것으로 나타나고 있다.

낙엽층의 연소시간과 수목의 낙엽층과의 관계는 낙엽층의 밀도와 부피에 상당한 관련이 있으며, 잘 연소 되려면 낙엽과 낙엽사이에 충분한 공간이 조성되어 연소 시 충분한 공기가 공급되어야 하고(Robert, 1995; Chalnder *et al.*, 1883) 따라서 수목의 낙엽들은 그 크기와 부피가 서로 다르며, 이들의 형태에 따라서 수목의 잎들이 지표에 쌓일 경우 공기층의 유입속도가 현저하게 달라지게 되므로 본 연구에서 조사된 것과 같이 지피물의 두께는 확산속도와 별다른 차이를 보이지 않는 것으로 사료된다.

3.5. 산불의 확산 속도와 산불의 강도와의 관계

산불의 확산속도와 산불의 강도와의 관계는 Table 1에 표시하였다. 일반적으로 확산속도가 느리면 산불의 강도 또한 약하게 나타났으며, 이는 산불이 빠르게 확산되기 위하여는 보다 많은 지피물들을 연소시키는 결과라고 생각되며, Stocks(1987)는 불의 확산속도와 산불의 강도는 밀접하게 관련이 있으며, 속도는 강도를 결정짓는 중요한 요인들 중의 하나라고 언급하였다.

IV. 직 요

산불 확산에 미치는 인자들 중 임지내의 삼림연료의 무게와 두께, 임지의 경사도의 관계에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

임지내의 경사도와 산불의 확산과의 관계는 경사가 높아지면 질수록 산불의 확산 속도는 빠르게 나타나고 있으며, 경사 15%와 비교하여 30%, 45%, 50%의 경사는 30%일 때 약 1.5배 증가 추세를 보이고, 45%일 때는 6.8배 정도의 산불확산 속도가 증가, 경사 50%일 때는 13.7배 증가하는 것으로 나타났다.

산림연료의 두께와 산불의 확산과의 관계는 연료두께 2 cm일 때 산불의 평균확산속도는 42 m/min, 3 cm는 11 m/min, 4 cm는 6 m/min, 5 cm는 9 m/min, 6 cm는 6.6 m/min로 나타났다.

산림연료의 두께와 산불의 확산과의 관계는 연료의 무게 0.1 kg/m²의 경우 산불의 평균 확산속도는 22.4 m/min, 0.15 kg/m²의 경우 9.4 m/min, 0.2 kg/m²의 경우 6.5 m/min로 나타났다.

연료 무게의 경우는 경사도와 유사하게 무게의 크기에 따라 산불의 확산 속도가 좌우된다고 볼 수 있으

며 이들 3가지 인자와 산불의 확산과의 관계를 상관 분석을 실시한 결과 경사도가 가장 영향을 미치며, 다음으로 연료의 무게이며, 지피물의 두께는 뚜렷한 상관관계가 형성되지 않는 것으로 나타났다.

본 논문에서 연구된 산불 확산 속도는 산림미세연료(임지에 있어서 지피물)에 중점을 두었기 때문에 식생 분포와 산불의 확산속도와의 관계를 제외하였다.

보다 정밀한 확산속도를 예측하기 위하여 우리 나라 실정에 알맞은 지형조건과 풍향조건의 인자들을 분석하여 산불의 확산속도를 예측하는 model을 구성할 필요가 있다.

인용문헌

- 산림청. 2001: 동해안 산불백서. 산림청, 871pp.
 현신규, 현재선, 나용준, 1997: 산림보호학. 향문사, 264pp.
 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, May 20-23. 1-5.
 Chandler, C., P. Cherey, P. Thomas, L. Traland and D. Williams, 1983: Fire in Forestry Volume II. -Forest fire management and organization-. A Willey-Interscience Publication. 298pp.
 Lawson, B. D., G. N. Dalrymple and B. C. Hawkes, 1997: Predicting Forest Floor Moisture Contents from Duff Moisture Code Values. Technology Transfer Notes. Forestry Research Applications Pacific Forestry Center, No. 6. 25pp.
 Nelson, R. M., Jr. and C. W. Adkins, 1988: A dimensionless correlation for spread of wind-driven fires. *Canadian Journal of Forest Research*, **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. *Canadian Journal of Forest Research*, **17**, 80-86.
 Stocks, B. J., 1989: Fire behavior in mature jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, **19**, 783-790.
 Van Wanger C. E., 1968: Season variation in moisture content of eastern canadian tree foliage and possible effect on crown fire, Canada Forest. Branch, Department. Publication. No. 1204. 15pp.
 Van Wagner, C. E., 1988: Effect of slope on fires spreading downhill. *Canadian Journal of Forest Research*, **18**, 818-820.
 Weber, R. O., 1990: The moist strand and the burning bed. *Canadian Journal of Forest Research*, **20**, 845-848.