

## 사례 조사를 통한 산불 방향 및 확산 특성 Forest Fire Direction and Spread Characteristics by Field Investigations

이병두<sup>†</sup> · 구교상 · 이명보

Byung-Do Lee<sup>†</sup> · Kyo-Sang Koo · Myung-Bo Lee

국립산림과학원 산림방재연구과  
(2009. 8. 17. 접수/2009. 10. 9. 채택)

### 요 약

산불 발생 및 확산특성은 산불 관리에 있어서 기초로 요구되는 자료이다. 본 연구에서는 2007년부터 2009년 봄철까지 발생한 101개의 산불을 대상으로 발화지의 사면향, 확산방향, 바람방향을 분석하였다. 또한 발화 후 경과 시간을 이용하여 확산면적, 화선길이, 화두속도, 측면속도를 추정할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 분석결과 57%의 산불이 남향계열의 방위에서 발생하여, 서풍계열(66%)의 영향을 받아, 68%의 산불이 동향으로 확산되었다. 산불 발생 후 시간당 약 11.8ha의 산림이 연소되면서 화선의 길이는 0.5km 가 증가하였다. 화두 방향에서는 시간당 약 0.13km 속도로, 산불의 측면에서는 시간당 약 0.05km 속도로 확산되었다.

### ABSTRACT

Forest fire ignition and spread characteristics are needed as basic data in fire management. Slope aspect of ignition point, spread direction, and wind direction at that time were analyzed and regression equations were proposed for predicting burned area, fire perimeter, head spread rate, and flank spread rate using combustion time using 101 forest fires broken out between 2007 and 2009 spring. 57% forest fires of investigated numbers were ignited in south, southwest, and southeast aspects and 68% of forest fires were spreaded to east, southeast, and northeast influenced by westerly wind. About 11.8ha forest was burned and 0.5km fire perimeter increase was predicted per hour. Head and flank spread rate were calculated 0.13km and 0.05km, respectively.

**Key words :** Forest fire, Ignition, Spread, Wind, Direction, Rate of spread

## 1. 서 론

산불로 인한 피해를 최소화한다는 관점에서 산불에 효율적으로 대응하기 위해서는 사전예방이 중요하고, 이미 발생한 산불에 대해서는 빠른 시기에 진화하여 대형화를 차단하는 것이 중요하다. 이러한 측면에서 산불 발생 및 확산에 대한 특성을 구명하는 것은 예방 및 진화 정책 수립에 기본적으로 요구되는 사항이다. 즉 산불발생에 대한 정확한 이해를 기반으로 올바른 예방과 감시활동이 전개될 수 있으며, 확산특성이 파악된다면 이를 바탕으로 효과적인 진화활동이 수반될

수 있다.

이러한 이유로 산불 발생과 확산 패턴에 대한 다양한 연구들이 수행되었다. Podur 등(2003)은 캐나다 온타리오 한대림에서 번개로 인한 산불 발생 패턴을 K-함수를 이용하여 불규칙성을 파악했으며,<sup>1)</sup> Wotton과 Martell(2005)는 번개로 인한 산불 발생을 기상인자와 연료수분지수 등을 독립변수로 하는 로지스틱 회귀모형을 개발한 바 있다.<sup>2)</sup> 이러한 공간상의 분포 뿐만 아니라 Preisler 등(2004)은 시간과 공간을 결합하여 1일 × 1 × 1km 단위로 기상인자와 산불위험지를 결합한 산불발생 확률모형을 제시하였다.<sup>3)</sup>

Cunningham과 Martell(1973)은 번개 등 자연적인 원인이 아니라 사람에 의한 산불모형을 발표하였으나,<sup>4)</sup>

<sup>†</sup>E-mail: byungdoo@forest.go.kr

공간적 분포를 고려하지 않았는데 반해, Chen과 McAneney(2004)은 공간상에서 산불로 인해 파괴된 주거지의 분포를 추정할 수 있는 모형을 K-함수를 이용하여 제시하였다.<sup>5)</sup>

산불발생의 공간적, 시간적 분포 특성 분석과 더불어 Kasischke 등(2002)는 알래스카 지역의 생태지역(Ecoregion) 별로 온도, 강수량, 번개빈도, 고도, 사면향, 산림피복도가 복합적으로 작용하여 확산 방향 또한 특정한 형태 혹은 방향성이 있음을 밝혔다.<sup>6)</sup> 아울러 방향성 자료는 산불발생시 진화활동과 대피 전략 수립에 이용될 수 있다고 하였다.

국내에서는 기초 자치단체 시·군·구별로 산불통계 자료를 이용하여 연소면적, 확산속도, 건당 면적 자료를 이용하여 산불특성에 따라 군집을 분류하고, 이 결과를 GIS를 이용해 표출한 연구 결과<sup>7)</sup> 산불위험예보지수를 개발하기 위해 지역별 산불통계 자료와 관련 인자를 분석한 결과,<sup>8)</sup> 의성군 일대를 대상으로 산불피해 지역과 임상, 지형 인자와의 관계를 분석한 연구<sup>9)</sup> 외에 실제 산불 발생 좌표와 경계를 이용하여 발생과 확산에 대한 분석을 시도한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2007년부터 2009년 봄철 산불기간에 발생한 산불을 대상으로 발화지를 추적하여 발화지의 지형 특성을 파악하고, 산불의 확산에 영향을 미치는 인자 중 지형과 기상인자의 방향성과 산불 자체의 확산 방향을 분석하고자 하였다. 또한 이러한 자료들이 산불 진화 현장에서 응용될 수 있도록 발생 후 시간 경과에 따른 피해면적, 화선길이를 추정할 수 있는 추정식을 제시하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 산불 사례 조사

2007년부터 2009년 봄철 산불기간까지 발생한 산불을 대상으로 발생지점 방향과 산불 확산방향, 이때의 바람 방향을 조사하였다. 이를 위해서는 우선 정확한 발생 위치(좌표)를 획득하는 것이 중요하다. 이를 위해, 산불의 확산 방향을 알려주는 여러 감식 지표를 활용하고, 지역 주민 탐문 및 지방자치단체의 산불상황일지와 담당자 면담을 통해 최초 발화지를 파악하였다. 이렇게 파악된 발화지에 대해서는 발화원인과 더불어 사면향과 사면길이, 경사, 고도 등 지형인자를 조사하였다.

산불 확산방향을 산출하기 위해서는 피해지 경계선이 요구되므로, Figure 1과 같이 GPS를 활용하여 경계 좌표를 취득하고 GIS를 이용해 산불경계도를 작성하였다. 조사시 산불 피해 여부는 산불관리통합규정<sup>10)</sup>에

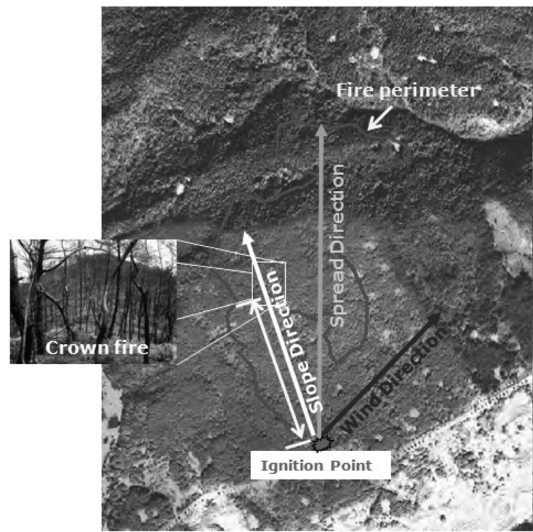


Figure 1. Field survey method of forest fire ignition and spread characteristics.

따라 ‘산불이 발생되어 지상입목, 관목, 시초 등을 연소시키면서 실제로 산불이 지나간 면적’으로 정의하였다.

### 2.2 산불 방향 및 확산 특성

본 연구에서 산불 방향이라 함은 산불이 발생한 지점의 방향, 산불의 확산방향, 이 때의 바람 방향 등 세 가지로 구분하였다. 발화지점의 방향은 산지 사면이 향하는 방향, 즉 사면향(Slope aspect)으로 정의하였으며, 해당 사면의 길이(Slope distance)는 수직방향으로 그은 선이 계곡과 능선을 만났을 때의 길이로 정의하였다.

산불의 확산방향은 해당 산불의 경계를 가장 잘 설명할 수 있는 타원을 응용하여 분석하였다. 대부분의 산불을 예측하고자 하는 모델링 기법에서 타원을 응용<sup>11-13)</sup>하므로, 본 연구에서도 연소면적과 동일한 면적

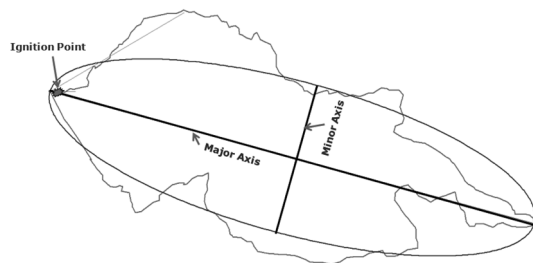


Figure 2. Fire ellipse derived fire perimeter and ignition point.

을 갖는 타원을 Figure 2와 같은 방법으로 작성하였다. 이 때 장축(Major axis)은 발화지를 통과하여 가장 먼 경계선까지를 잇는 선이며, 이 장축의 가운데 점에서 수직으로 내린 선을 단축(Minor axis)로 설정하고, 단축의 길이는 피해지의 면적과 타원의 면적이 동일하도록 결정하였다. 장축이 결정되면 발화지점에 가까운 장축의 끝을 중심축으로 회전율을 360도 단위로 분석하고, 이 각도를 산불의 확산방향으로 설정하였다. 이러한 일련의 작업들은 Arcview 3.1<sup>14)</sup> GIS 프로그램을 바탕으로 Quantitative Decisions(2000)<sup>15)</sup>사에서 제작한 Diameter Model를 이용하였다. 이러한 타원이 만들어지면 폭대길이비율(Length-to-width ratio)과 풍속과의 관계<sup>16)</sup>를 고찰하였다. 이 때 폭은 단축을 길이는 장축을 각각 의미한다.

바람 방향은 각 산불로부터 가장 가까운 자동기상장치(AWS: Automated Weather Station) 혹은 기상대 자료로부터 산불 발생부터 진화 완료시 까지 한 시간 단위의 평균 속도와 바람 방향 자료를 추출하여 이용하였다. 속도는 시간단위 평균 풍속 자료를 산출 평균하여 산출하였으며, 바람 방향은 산불 확산 기간 동안 가장 빈도가 높은 방향으로 결정하였는데, 빈도가 같은 바람 방향이 2개 이상 존재하는 경우 초기 발화시의 방향을 대푯값으로 이용하였다.

산불을 진화할 때 개략적인 산불 연소면적과 이에 따른 화선길이 도출은 진화자원 투입량 결정에 도움을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 산불이 발생한 시간부터 진화시간까지 소요된 시간과 연소면적, 화선길이와의 상관관계를 추가적으로 도출하고자 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 산불 사례 조사 결과

2007년부터 2009년 봄철 산불기간(2009년 5월 30일 현재)까지 총 101건을 조사하였는데, 이 기간 동안 발생한 전체 산불건수 1,275건의 약 8%에 해당되는 양이다.

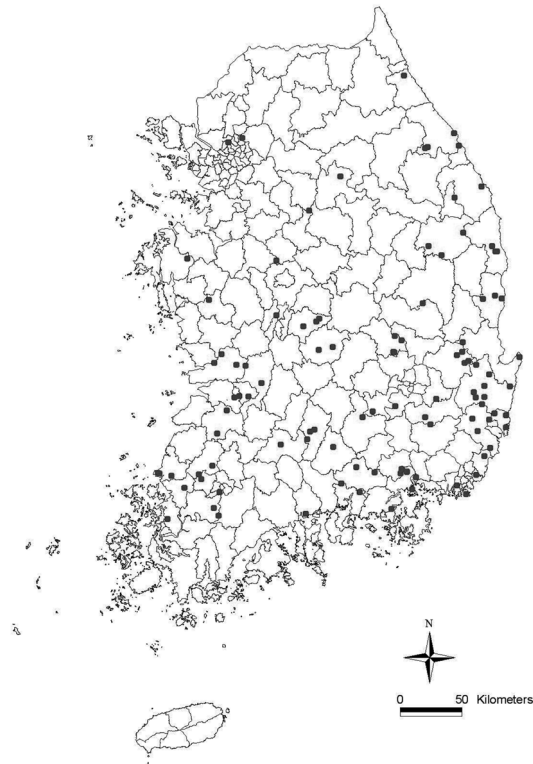


Figure 3. Forest fires investigated for ignition and spread pattern analysis.

조사 대상 산불의 공간적 분포는 Figure 3과 같이 경상도와 전라도가 각각 46%(46건), 16%(16건)의 비중을 차지하였는데, 이는 이 기간 동안 경상도와 전라도에서 산불이 각각 31%, 20%로 많이 발생<sup>17)</sup>했기 때문이다.

Table 1에는 조사 대상 산불의 기술 통계 값이 제시되어 있다. 산불 한 건당 평균 연소면적은 43.5ha 이었으며, 화선 길이 즉, 산불 둘레길이는 2.79km이었다. 평균 연소시간은 4.9시간으로, 산불 발생 후 5시간 이내에 대부분 진화되었음을 알 수 있었다. 피해면적을

Table 1. Descriptive Statistics of Forest Fires Investigated

Statistics	Burned Area (ha)	Fire Perimeter (km)	Combustion Time (hr)	Fire Spread Rate (ha/hr)
Mean	43.5	2.79	4.85	6.75
Standard Error	14.1	0.37	0.55	1.40
Standard Deviation	141.5	3.74	5.42	13.71
Variance	20,028.4	13.96	29.40	187.98
Minimum Number	0.1	0.13	0.30	0.06
Maximum Number	1,306.9	20.05	21.62	107.05

연소시간으로 나눈, 즉 면적 개념의 확산속도<sup>18)</sup>는 6.75ha/hr로 한 시간당 평균 약 6.8ha의 산림이 연소된 것으로 분석되었다.

**3.2 산불 방향 특성**

101개의 산불 중 57%(57건)가 남, 남서 사면에서 발생하여 북향 계열(북, 북동, 북서) 사면에서 발생한 21%(20건)에 비해 약 2.7배가 많아, Figure 4에서 보는 바와 같이 산불 발생 비율이 사면향에 따라 다름을 알 수 있었다. 이는 기존 연구결과<sup>19,20)</sup>와도 부합한 내용으로 남향일수록 일사량이 많아 낙엽 등 가연물질이 더욱 건조하여 산불 발생에 용이하기 때문이다.

산불 확산 방향을 결정하는데 주요한 영향을 미치는 바람의 방향은 서풍이 24건(25%)으로 가장 많았으며, 그 뒤를 이어 북서풍, 남서풍이 각각 22건(22%), 19건(19%)으로 서풍계열의 바람이 총 65건으로 66%를 차

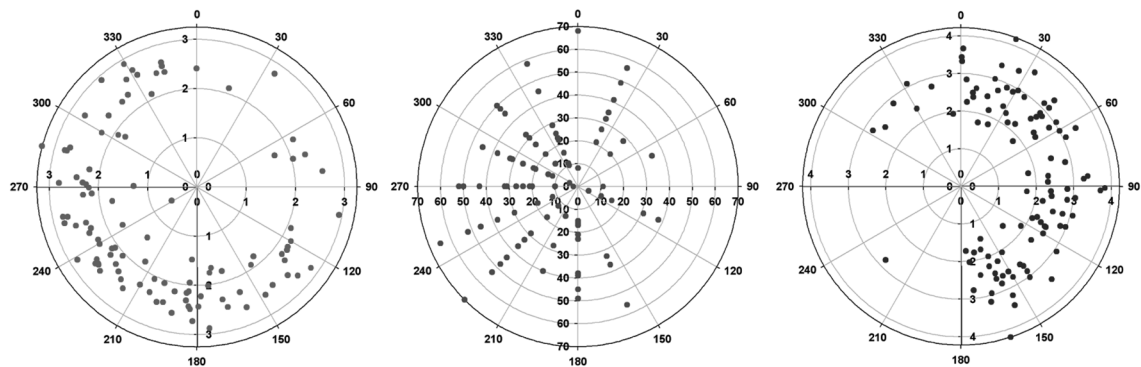
지하여 주풍향임을 알 수 있었다. 이는 조사 대상 산불의 51건(50%)이 3월부터 5월까지 봄에 발생했고, 북반구 중위도에 속한 우리나라의 경우 계절풍의 영향으로 봄철에 편서풍이 부는 사실<sup>21)</sup>과 일치한다.

남향에서 발생한 산불은 주로 동쪽으로 확산되었는데, 이를 세부적으로 살펴보면 북동방향으로 25건(25%), 남동쪽으로 22건(22%), 동쪽으로 21건(21%) 순이었으며, 서쪽으로는 단 한건도 확산되지 않았다.

위의 조사 결과를 일반화하면 산불은 주로 산지의 남향에서 발생하여 서풍의 영향을 받아, 북동쪽으로 확산됨을 의미하므로, 북쪽과 동쪽에 위치한 주민은 신속하게 대피해야 하고, 이 방향에 위치한 주요 시설에 대해서는 사전 조치가 요구된다.

**3.2 시간대별 산불 확산**

조사 대상 산불의 연소면적과 화선길이, 타원추정체



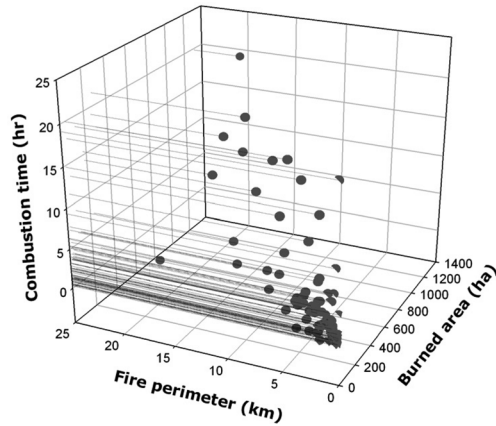
**Figure 4.** Left: slope aspect (degree) and slope distance (log(distance, m)) of the ignition points, Middle: wind direction (degree) and wind speed (m/sec × 10), Right : spread direction (degree) and distance (log(distance, m)) of each fire.

**Table 2.** Terrain Slope, Wind, and Fire Spread Direction and Proportion

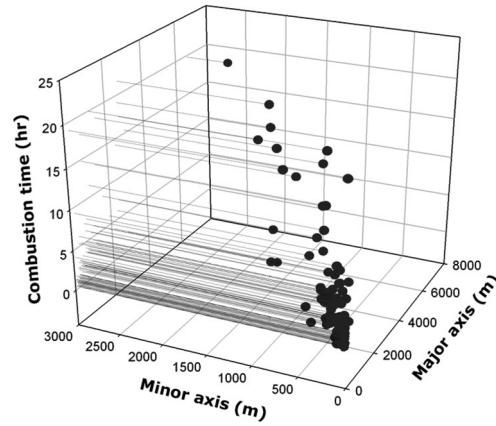
Aspect	Terrain Slope Direction		Wind Direction		Fire Spread Direction	
	Fires	Proportion (%)	Fires	Proportion (%)	Fires	Proportion (%)
N	6	5.9	9	9.2	14	13.9
NE	2	2.0	3	3.1	25	24.8
E	6	5.9	6	6.1	21	20.8
SE	12	11.9	3	3.1	22	21.8
S	22	21.8	12	12.2	13	12.9
SW	23	22.8	19	19.4	1	1.0
W	18	17.8	24	24.5	0	0.0
NW	12	11.9	22	22.4	5	5.0
Total	101	100.0	98	100.0	101	100.0

**Table 3.** Correlation Statistics between Combustion Time (hr) and Burned Area (ha), Fire Perimeter (km), Major Axis (m), and Minor Axis

	Burned Area (ha)	Fire Perimeter (km)	Major Axis (m)	Minor Axis (m)
Combustion Time (hr)	0.51251 (<0.0001)	0.60972 (<0.0001)	0.63285 (<0.0001)	0.68557 (<0.0001)



**Figure 5.** 3-D scatter diagram of combustion time (hr), fire perimeter (km), and burned area (ha).



**Figure 6.** 3-D scatter diagram of combustion time (hr), fire ellipse major axis (m), and minor axis (m).

의 단축과 장축은 Table 3과 Figure 5~6에서와 같이 연소시간과 양의 상관관계가 존재하였다. 이 상관관계를 바탕으로 연소시간 인자를 독립변수로 연소면적, 화선 길이, 타원의 장축, 단축 길이를 추정할 수 있는 회귀식을 Table 4와 같이 도출하였다. 이 결과를 해석해 보면 산불이 발생한 다음 한 시간이 지날 때마다 평균 약 11.8ha의 산림이 연소되며, 화선길이는 0.5km씩 증가한다. 장축은 1시간에 0.13km씩 증가하고, 단축은 0.05km씩 증가하므로, 조사대상 산불의 화두 확산속도 (Head spread rate)는 시간당 약 130m이며, 측면 확산속도(flank spread rate)는 약 50m이다.

일반적으로 타원을 적용한 산불확산모델에서 풍속이 강해질수록 타원의 폭대길이비율은 증가한다<sup>11), 22)</sup>. 즉 풍속이 강해질수록 화두의 확산속도 증가치가 측면보

다 빨라 길이가 길고, 폭이 좁은 타원 형태를 띠게 된다. 하지만 산불경계를 모방한 타원에서 추출한 폭대 길이비율은 Figure 7에서 보는 바와 같이 평균풍속과 명확한 관계를 보여주지 못했다(상관계수 0.13624, P-value 0.1810). 이는 Anderson 등<sup>11)</sup> 기존 연구와는 달리 편평한 초지를 대상으로 하지 않고, 지형적 요인과 임상적 요인이 복합적으로 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 향후 확산방향으로의 지형의 종단면 변화, 특히 상향과 하향을 변화 정도를 반영할 수 있는 인자를 개발하고, 조사 산불 사례를 더욱 늘려 임상요인별로 타원모델을 그룹화하여 작성하는 것이 필요하다고 판단된다. 또한, 산불의 주 확산 방향을 벡터로 표현<sup>13), 23)</sup>할 때 산불확산벡터는 같은 임상조건일 때 지형벡터와 바람벡터의 합으로 표현된다<sup>24)</sup>. 이 경우 지형벡터

**Table 4.** Regression Models between Combustion Time (hr) and Burned Area (ha), Fire Perimeter (km), Fire Ellipse Major Axis (km), and Minor Axis (km)

Dependent Variables	R-square	Adjusted R-square	F-value	Combustion Time (hr) Parameter
Burned Area (ha)	0.3192	0.3121	44.55 (<0.0001*)	11.779 (6.67**, <0.0001*)
Fire Perimeter (km)	0.5880	0.5836	135.57 (<0.0001*)	0.50398 (11.64**, <0.0001*)
Ellipse Major Axis (km)	0.6212	0.6172	155.77 (<0.0001*)	0.13209 (12.48**, <0.0001*)
Ellipse Minor Axis (km)	0.6743	0.6709	196.67 (<0.0001*)	0.05645 (14.02**, <0.0001*)

\*p-value, \*\*t statistics

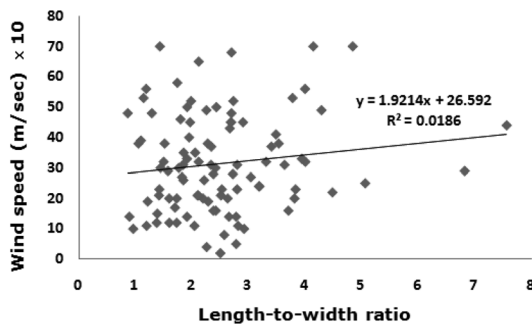


Figure 7. Scatter diagram between length-to-width ratio of fire ellipse and wind speed (m/sec) × 10.

와 바람벡터의 각 차이가 클수록 폭대길이비율은 작아 지므로 이 각도의 차이 또한 향후 고려해야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2007년부터 2009년 봄철까지 발생한 산불 중 총 101개를 대상으로 발화지의 좌표와 피해지 경계를 현장 조사한 다음, 발생지점의 방향, 즉 사면향, 확산방향, 바람방향 등 세 가지 방향특성을 분석하였다. 아울러 시간대별 연소면적, 화선길이, 산불 타원 모델을 활용하여 화두와 측면의 확산속도를 추정할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 분석결과 57%의 산불이 남향계열의 방위에서 발생하여, 주풍인 서풍계열(66%)의 바람의 영향을 받아, 68%의 산불이 동향으로 확산되었다. 산불 발생 후 시간당 약 11.8ha의 산림이 연소되면서 화선의 길이는 0.5km가 증가하였다. 화두 방향에서는 시간당 약 0.13km 속도로, 산불의 측면에서는 시간당 약 0.05km 속도로 확산되었다. 향후 정확한 확산 특성을 구명하고, 모델화하기 위해서는 지형과 임상, 기상인자에 대한 세부적인 추가 조사와 이를 바탕으로 한 분석이 요구된다.

#### 참고문헌

1. J. Podur, D.L. Martell and F. Csillag, "Spatial Patterns of Lightning-caused Forest Fires in Ontario, 1976-1998", *Ecological Modelling*, Vol.164, pp.1-20(2003).
2. B.M. Wotton and D.L. Martell, "A Lightning Fire Occurrence Model for Ontario", *Canadian Journal of Forest Research*, Vol.35, pp.1389-1401(2005).
3. H.K. Preisler, D.R. Brillinger, R.E. Burgan and J.W. Benoit, "Probability Based Models for Estimation of

- Wildfire Risk", *Journal of Wildland Fire*, Vol.13, pp.133-142(2004).
4. A.A. Cunningham and D.L. Martell, "A Stochastic Model for the Occurrence of Man-caused Forest Fires", *Canadian Journal of Forest Research*, Vol.3, pp.282-287(1973).
5. Chen, J. McAneney, "Quantifying Bushfire Penetration in Urban Areas in Australia", *Geophysical Research Letters*, Vol.31, p.4(2004).
6. E.S. Kasischke, D. Williams and D. Barry, "Analysis of the Patterns of Large Fires in the Boreal Forest Region of Alaska", *International Journal of Wildland Fire*, Vol.11, No.2, pp.131-144(2002).
7. 이병두, 이명보, "1991년부터 2007년까지 산불의 공간적 특성", *한국화재소방학회논문지*, 23권, 제1호, pp.15-20(2009).
8. 안상현, 이시영, 원명수, 이명보, 신영철, "공간분석에 의한 산불발생확률모형 개발 및 위험지도 작성", *한국지리정보학회*, 7권, 제4호, pp.57-64(2009).
9. 이시영, 안상현, 원명수, 이명보, 임태규, 신영철, "GIS를 이용한 산불발생위험지역 구분", *한국지리정보학회지*, 7권, 제2호, pp.37-46(2004).
10. 산림청, "산불관리통합규정(산림청 훈령 제864호, 2006.08.04. 개정)"(2006).
11. D.H. Anderson, E.A. Catchpole, N.J. de Mestre and T. Parks, "Modelling the Spread of Grass Fires", *Journal Australian Mathematical Society*, Vol.23, pp.451-466(1982).
12. M.A. Finney, "FARSITE: Fire Area Simulator - Model Development and Evaluation", *Rocky Mountain Research Station*(1998).
13. G.D. Richards, "The Mathematical Modelling and Computer Simulation of Wildland Fire Perimeter Growth over a 3-Dimensional Surface", *International Journal of Wildland Fire*, Vol.9, No.3, pp.213-221 (1999).
14. ESRI, "ArcView GIS Version 3.1. Environmental Systems Research Institute", Inc. Redlands, California, USA(1998).
15. Quantitative Decisions, "Diameter extension (<http://www.quantdec.com>).2009.08.06"(2000).
16. Andrews, L. Patricia and Lloyd P. Queen, "Fire Modeling and Information Systems Technology", *International Journal of Wildland Fire*, Vol.10, pp.343-352(2001).
17. 산림청, "산불통계정보 관리시스템 (<http://116.67.44.120/sanfire/main/index.asp>). 2009.08.06." (2009).
18. M.M. Kimothi and R.N. Jadhav, "Forest Fire in the Central Himalaya: An Extent, Direction and Spread using IRS LISS-I Data", *International Journal of Remote Sensing*, Vol.19, No.12, pp.2261-2274

- (1998).
19. 이시영, “산불발생 위험도 및 연소확대 요인 분석에 관한 연구”, 동국대학교 박사학위논문(1994).
  20. S.J. Pyne, P.L. Andrews and R.D. Laven, “Introduction to Wildland Fire”, John Wiley & Sons, INC(1996).
  21. 기상청, “기상연보”, 기상청(2008).
  22. R.C. Rothermel, “A Mathematical Model for Prediction Fire Spread in Wildland Fuels”, Res Paper INT 115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden(1972).
  23. G.D. Richards, “A General Mathematical Framework for Modelling Two-dimensional Wildland Fire Spread”, International Journal of Wildland Fire, Vol.5, No.2, pp.63-72(1995).
  24. 이병두, “GIS와 RS를 이용한 2000년 삼척산불 행동 특성 분석 및 산불확산예측모델 개발”, 서울대학교 박사학위 논문(2005).