

## GIS를 이용한 지표화 확산예측모델의 개발

李丙斗<sup>1\*</sup> · 鄭主相<sup>1</sup> · 李明甫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 산림과학부, <sup>2</sup>국립산림과학원

## Development of the Surface Forest Fire Behavior Prediction Model Using GIS

Byungdoo Lee<sup>1\*</sup>, Joosang Chung<sup>1</sup> and Myung-Bo Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

<sup>2</sup>Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

**요약:** 이 연구에서는 지표화 중심의 산불확산예측 알고리즘을 기반으로 GIS 환경에서 운용이 가능한 지표화 확산예측모델을 개발하였다. 이 모델은 지형, 연료, 기상 등 산불환경인자를 분석하고 입력하는 부분과 시간에 따라 확산속도, 화선에서의 산불강도, 연소면적을 예측하는 지표화 확산예측 부분, 마지막으로 예측결과를 사용자에게 제시하는 출력 부분으로 구성되었다. 산불확산속도를 계산하기 위해서 산불행동에 영향을 미치는 산불환경인자중에서 지형인자는 경사, 기상인자는 풍속, 풍향, 실효습도를 고려하였다. 또한 연료인자는 수치임상도를 이용하여 연료깊이, 연료량, 소화습도를 계산할 수 있는 연료모듈을 개발하여 입력되도록 하였다. 연료습도는 실효습도, 최고온도, 강수량, 일일 적산량의 함수관계로 추정하였다. 모델을 2002년 청양에서 발생한 산불에 적용한 결과 확산속도에 대해 61%의 일치도를 보였다.

**Abstract:** In this study, a GIS model to simulate the behavior of surface forest fires was developed on the basis of forest fire growth prediction algorithm. This model consists of three modules for data-handling, simulation and report writing. The data-handling module was designed to interpret such forest fire environment factors as terrain, fuel and weather and provide sets of data required in analyzing fire behavior. The simulation module simulates the fire and determines spread velocity, fire intensity and burnt area over time associated with terrain slope, wind, effective humidity and such fuel condition factors as fuel depth, fuel loading and moisture content for fire extinction. The module is equipped with the functions to infer the fuel condition factors from the information extracted from digital vegetation maps and the fuel moisture from the weather conditions including effective humidity, maximum temperature, precipitation and hourly irradiation. The report writer has the function to provide results of a series of analyses for fire prediction. A performance test of the model with the 2002 Chungyang forest fire showed the predictive accuracy of 61% in spread rate.

**Key words :** surface forest fire, GIS, fire behavior prediction, rate of spread, intensity

### 서 론

최근 산불이 빈번해지고 피해 규모가 대형화되면서, 산림생태계의 급격한 변화 및 인명·재산상의 피해가 증가하고 있다. 특히, 우리나라에는 산림과 주거지가 인접해 있고, 산불이 대부분 인위적인 원인으로 발생되어 확산됨으

로써 인명과 재산피해가 많다. 이러한 피해를 최소화하기 위해서는 초동진화에 대한 노력이 절실하고, 이를 효과적으로 수행하기 위해서는 발화, 확산 및 진화 등에 관한 체계적 이해가 우선적으로 요구된다. 하지만 산불은 지형, 기상, 임상구조 및 지피 조건 등 많은 인자들의 상호작용으로 연소 속도와 연소 방향 등이 복잡한 양상으로 나타난다(Stephen *et al.*, 1996). 또한, 혐준하고 복잡한 지형 및 다양한 임상분포 특성상 산악지형에 발생하는 산불을 해석한다는 것은 쉽지 않은 일이다(정주상 등, 2002).

이러한 관점에서 미국, 캐나다, 호주 등의 나라에서는

\*Corresponding author

E-mail: rubus@chol.com

본 연구는 과학기술부 지원 자연재해방재기술개발사업의 일환인 '산불피해저감을 위한 진화기술 개발'의 연구 성과임.

산불 재해에 적극 대처하기 위한 노력의 일환으로 종합적인 산불관리시스템이 개발되고 있다. 그 예로 미국에서는 산림청 산하 Rocky Mountain Research Station에서 산불 확산에 영향을 미치는 8개의 인자를 입력 자료로 하여 산불의 크기, 강도, 확산 형태를 예측할 수 있는 모델을 개발하여 산불 진화 현장에서 이용하고 있다(Finney, 1998). 캐나다에서는 산불관리시스템(Spatial Fire Management System)의 하위 시스템으로 산불확산예측시스템(Canadian Forest Fire Behavior Prediction System)을 구축하여 (Stocks *et al.*, 1989) 산불 진화에 이용하고 있다.

이와 같이 선진화된 산불확산예측시스템을 구축하기 위해서는 우선 산불 확산에 영향을 미치는 주요 인자들을 선정하여 조사하고, 이러한 인자들이 산불의 확산에 미치는 영향을 체계적으로 분석하여 산불확산을 예측할 수 있는 함수의 개발이 요구된다(이병우 등, 2001). 또한 개발된 함수들의 실무적 활용을 위한 방안으로 GIS 등 산불확산예측을 위한 자동화 전산체계의 개발이 필히 요구된다(Andrews and Queen, 2001).

따라서 본 연구에서는 산불의 효과적인 진화 전략 수립 및 산불진화자원 최적 분배, 지역주민의 대피 등의 문제 해결에 의사결정지원시스템(Decision-making supporting system)으로 이용될 수 있는 산불확산예측모델을 개발하고자 하였으며, 그 첫 번째 연구로써 지표화(Surface fire), 수관화(Crown fire), 비화(Spot fire) 중 지표화를 예측할 수 있는 모델을 개발하고자 하였다.

## 지표화 확산예측 알고리즘

산불행동 모델에서 산불의 확산속도와 화선(fire front)에서의 산불강도를 예측하는 부분을 확산예측 알고리즘이라 할 때, 현재 국내외적으로 개발되어 이용되고 있는 확산예측 알고리즘들은 사용된 공간 분석 기법에 크게 래스터 방식(von Neumann, 1966; Feunekes, 1991; Ball and Geurtin, 1992; Vasconcelos and Geurtin, 1992; 김옹식 등, 1998)과 벡터 방식(Anderson *et al.*, 1982; Richards, 1990, 1995, 2000; Finney, 1998)으로 구분된다. 래스터 방식의 확산예측 기법은 공간자료를 동일한 속성을 갖는 작은 셀 형식으로 표현하여 연산하는 기법이다. 이에 반해, 벡터방식은 산불이 확산되는 공간을 연속적인 공간으로 정의하며, 점과 평면선을 사용하여 산불의 확산을 표현한다.

French(1992)가 다양한 산불 확산 환경에서 래스터 방식과 벡터 방식을 비교한 결과, 계산 속도와 지리적 정확도에 있어서 모두 벡터 방식이 우세한 것으로 나타났다. 이러한 연구결과에 따라 이병우 등(2002)은 Huygen의 확산원리와 편미분방정식을 도입한 Richards(1990, 1995,

2000)의 기법을 이용하여 GIS 환경에서 응용 가능한 지표화 확산예측 알고리즘을 개발하고, 지형, 연료 및 바람과 같은 산불환경인자의 변화에 따른 적용성을 검토하였다. Richards(1990)에 의해 처음 제시된 편미분방정식 기법은, 지형과 연료조건이 동일할 때 산불은 바람의 영향을 받아 타원형으로 확산한다는 가정아래(Anderson, 1983), 산불을 구성하고 있는 경계선상의 점의 위치를 시간과 각도 두 가지 변수에 대한 편미분을 통해 산불확산을 계산하는 방식이다.

즉, 산불이 발생한 다음, 일정 시간이 지난 후 형성된 산불경계는 점들의 집합으로 표현될 수 있다. 여기서 시간의 함수  $t$ 를 일정한 시간간격( $\Delta t$ )의 반복되는 횟수( $j$ )로 정의할 때  $t$ 는  $j \cdot \Delta t (j=0, 1, 2, \dots)$ 로 표현된다. 또한 일정한 시점의 산불경계를 이루는 타원 위의 한 점이 바람의 방향과 이루는 각을  $\alpha$ 라 할 때 시간과 마찬가지로 각도간격( $\Delta s$ )과 반복되는 횟수( $i$ )를 이용하여  $\alpha$ 는  $j \cdot \Delta s (\Delta s = 2\pi/n, i=0, 1, 2, \dots n)$ 로 표현될 수 있다. 결국 산불경계는 바람의 영향을 받으면서 시간의 흐름에 따라 점차 확대되는 타원으로 나타나므로 타원 위의 점( $x^{ij}$ )은  $t$ 와  $\alpha$ 의 함수관계로 표현될 수 있고 이를 통해 산불의 확산을 설명할 수 있는 것이다.

이 알고리즘에서 산불확산속도는 Rothermel(1972)의 확산예측식을 이용하였다. Rothermel은 실내 연소실험을 통하여 경사와 풍속 그리고 습도, 깊이, 밀도, 체적대 표면적 비율 등으로 표현되는 연료특성에 따라 산불이 확산되는 속도를 예측할 수 있는 식을 제안한 바 있다.

## 지표화 확산예측모델

### 1. 개발환경

산불의 확산은 산림에서 발생하는 공간적 현상이므로, 공간문제를 해결하는데 있어서 강력한 도구로 인식되는 GIS를 이용하여 자동화 모델로 개발하였다. 공간해석을 위한 GIS 엔진으로는 객체 기반 컴포넌트로 구성되어 COM 기반 언어를 사용하여 손쉽게 사용자 정의 애플리케이션 개발이 가능한 ESRI 사의 ArcObjects 8.1.2를 이용하였다. 또한 사용자 인터페이스와 모델은 Microsoft 사의 Visual Basic 6.0을 이용하여 개발하였다. 개발된 모델의 운영환경으로는 보급성을 고려하여, Microsoft 사의 Windows NT(2000, XP) 계열에서 운영될 수 있도록 하였다.

### 2. 모델의 구조와 운용체계

지표화 확산예측모델의 기본구조는 Figure 1과 같이 산불환경인자 및 발화점을 입력하는 입력부분과 입력된 자료를 이용하여 산불행동을 예측하는 지표화 확산예측 부분, 그리고 마지막으로 예측된 결과물을 다양한 형태로 표

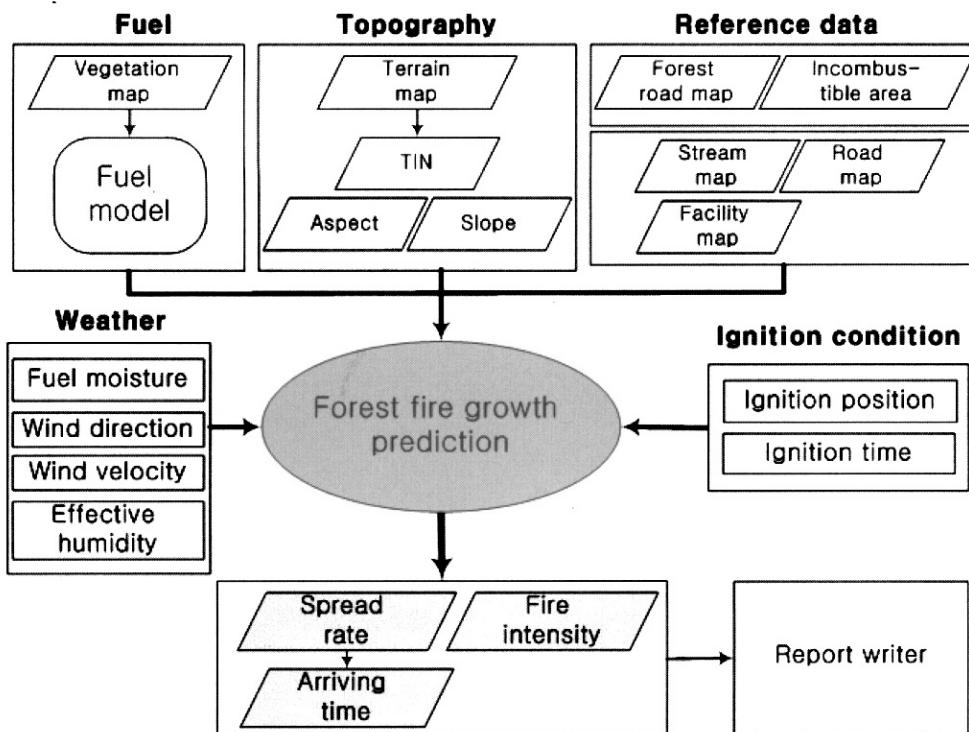


Figure 1. The framework of the surface forest fire behavior prediction model.

Table 1. The menu system of the surface forest fire behavior prediction model.

Basic function	Menu	Main function
Program management	File	Program initiation and termination, file management
Simulation condition setup	Setup	Time resolution, spatial resolution, and simulation duration setup, ignition information input
Data registration and Conversion	Data management Map display	Digital map registration, fuel model generation and weather data input General GIS display functions
Surface fire prediction	Forest fire growth prediction	Ignition location, Rate of spread and fire intensity prediction
View and output	View Output Help	Prediction results view, 3-D display Printing and export Introduction and manual

현하여 사용자에게 제시하는 출력부분으로 구성되어 있다. 입력부분은 지표화 확산에 있어서 기초 자료로 이용되는 연료 및 지형과 관련된 수치지도를 입력하는 기능과 예측하고자 하는 산불의 발화점 좌표와 발화일시 등을 입력하는 발화환경 입력기능, AWS 기상데이터를 이용하여 풍속과 풍향 및 연료습도를 입력하는 기상데이터 입력기능 등 크게 3가지 기능으로 구성된다.

지표화 확산예측 부분에서는 입력된 인자들을 모델에서 처리할 수 있는 형식으로 데이터를 변환한 다음, 지표화를 실제적으로 예측하는 기능을 담당한다. 지표화 행동의 예측정밀도와 소요되는 시간은 사용자가 입력한 데이터의 수준과 환경설정에서 입력한 시간 및 공간해상력에 의해 좌우된다. 마지막으로 출력부분은 산불확산예측 부분을 통하여 분석된 예측결과를 사용자에게 제시하는 부

분으로서 시간별 산불확산에 따른 주요지점 도달시간, 확산속도, 화선에서의 산불강도, 연소 면적 등을 사용자에게 제공하는 기능을 가진다.

이러한 모델 운영체계에 의한 사용자 인터페이스 메뉴 체계가 Table 1에 제시되어 있다. 메뉴 체계는 지표화 확산예측 과정에 맞추어 크게 6단계로 구성하였으며, 각 단계마다 하위메뉴를 구성하여 사용자의 편의성을 고려하였다.

### 3. 공간자료 입력

지표화 확산예측모델에서 요구되는 공간자료는 지형도, 임상도, 경사도, 경사향도, TIN(Triangulated Irregular Network), 임도망도, 도로도, 수계도, 마을위치도, 비연소지역 위치도 등 총 10가지이다. 이중 지형도, 임상도, 경사도, 경사향도, TIN은 필수적으로 입력해야 하는 부분이며, 나

며지 5개의 지도는 선택사항으로, 각 지역의 데이터베이스 구축 실정에 맞게 선택할 수 있다. 지형도, 도로도, 마을위치도, 수계도는 국립지리원에서 발행한 수치지형도를 이용하여 생성이 가능하며, TIN과 경사도, 경사향도는 GIS의 표면분석을 통해 분석이 가능하다. 임상도와 임도망도는 FGIS 사업의 일환으로 구축된 수치임상도와 수치임도도를 통해 자료 획득이 이루어지며, 마지막으로 비연소지역 즉, 산불이 확산되지 못하는 지역은 사용자가 직접 입력할 수 있도록 하였다. GIS 분석과정상, TIN을 입력하면 경사와 등고선을 추출할 수 있지만, 재해관련 모델의 특성상 빠른 계산결과가 요구되므로 사전에 표면분석을 이용하여 분석과정에서 요구되는 자료를 구축하여 이용할 수 있도록 하였다.

#### 4. 연료모델 작성모듈

산불의 구성요소 중 하나인 연료인자는 수치임상도를 이용할 수 있도록, 연료모델 변환 모듈을 개발하였다. 이 변환모듈을 이용하면 정연하 등(1989)이 산화위험율 예측에 관한 연구에서 제시한 산불연료구분도와 이시영(1990)이 연료특성을 밝히기 위하여 실시한 연구결과를 이용하여 수치임상도에 표시되어 있는 수종, 영급, 경급, 소밀도 별로 연료량(연료깊이, 연료무게)을 분석할 수 있다.

산불행동예측 모델에서 광범위하게 이용되고 있는 (Andrews and Queen, 2001) Rothermel(1972)의 산불확산모델에서 연료와 관련된 인자로 제시된 불연습도, 건중연료량, 열함유량, 총광물함유량, 유효광물함유량, 연료의 건중밀도, 재적 대 표면적 비율, 연료층의 평균깊이 중에서, 몇 가지의 연료 특성은 산불 행동에 미미한 영향을 미치거나 혹은 영향을 정확히 규명하기 어려운 것이 사실이다 (Burgan and Rothermel, 1984). 따라서 본 연구에서는 연료의 건중밀도, 총광물함유량, 유효광물함유량은 각각 512.4 kg/m<sup>3</sup>, 0.555, 0.010으로 모든 수종이 동일하다고 가정하였다.

지표화 확산에 있어서 연료습도의 추정은 이시영 등(1997)이 제시한 연료습도 모형식을 이용하였다. 이 모형은 100 g의 완전 건조된 연료봉을 이용하여 강수량, 일적 산량, 실습습도, 최고온도를 설명변수로 하여 연료습도를 산출하는 것으로써, 연료습도를 산출하는데 필요한 설명변수들이 기상청 AWS를 통해 획득이 가능하므로, 실용성이 높다고 판단된다.

#### 5. 기상인자 입력 모듈

기상인자는 산불행동에 큰 영향을 미칠 수 있는 중요한 요소이다. 온도, 상대 습도, 강수량은 연료의 습도에 영향을 미치며, 바람은 산불의 행동을 결정하는 중요한 요소이다(Stephen *et al.*, 1996). 따라서 산불확산예측에 대한

정확도는 기상인자의 정확한 측정과 입력에 의해 좌우될 수 있다.

본 연구에서는 기상인자와 관련해서 실효습도, 풍속, 풍향 등 세 가지 인자를 모델링에 이용하였는데, 이러한 기상인자를 모델에 입력하는 방식은 상황에 따라 두 가지 방법 중에서 선택할 수 있도록 설계하였다. 첫 번째 방법은 지금까지 개발된 대부분의 산불모델에서 이용된 방식으로 기상인자를 상수화하여 산불확산예측 기간 동안 동일하게 적용하는 방법이다. 이는 산불의 규모가 작거나, 축적된 기상자료가 존재하지 않아 기상의 변화를 예측할 수 없는 경우에 적용할 수 있다. 두 번째 방법으로는 장기간의 기상자료가 존재하고 산불확산 지역의 기상예측이 가능한 경우에 적용할 수 있는 방법으로서 산불예측기간을 여러 단위로 나누어 시계열로 입력하는 방법이다.

#### 6. 발화점 입력

지표화 확산예측을 위한 제반인자들의 입력이 완료되면 마지막으로 산불의 발화점을 입력해야 한다. 발화점의 입력은 사용자가 수치지형도 위에서 점(point)형태로 직접 입력할 수 있으며, 또한, 현재 산불관리 체계에 있어서 발화점의 위치가 경·위도 좌표체계로 통용되고 있으므로 사용자가 경위도 좌표를 이용하여 입력할 수 있도록 하였다.

### 확산예측모델의 응용

#### 1. 연구대상지

개발된 지표화 확산예측모델의 적용성을 검토하기 위해 청양산불을 대상으로 모델을 운영하였다. 청양산불은 2002년 4월 14일 14시 10분경 충청남도 청양군 비봉면 중북리에서 성묘객의 실수로 발화되었으며, 진화가 완료된 4월 15일 08시까지 총 17시간 50분 동안 3,095 ha의 산림이 연소되었다. 청양산불은 Figure 2에서 보는 바와 같이 발화지점으로부터 장축방향으로의 확산길이 15.6 km를 3시간 30분 만에 확산되어 시간당 4.4 km의 확산속도를 보였다. 이러한 연소속도는 2000년 삼척산불 최대 연소속도 1.6 km/hr(이병우 등, 2001), 1996년 고성산불 최대 연소속도 1.0 km/hr(Lee *et al.*, 1999) 보다 빠른 결과이다. 연소된 지역의 최대폭 즉 단축방향으로의 길이는 3.3 km로 보고되었다.

#### 2. 청양산불 시뮬레이션 체계

청양산불지역에 대한 지형인자는 국립지리원 발행 1/5,000 수치지형도를 이용하였다. 수치지형도에서 등고선과 표고점을 추출하여 GIS를 이용하여 TIN을 구성한 다음 25×25M 격자 크기로 경사향과 경사를 추출하였다. 연료인자는 국립산림과학원 발행 1/25,000 수치임상도를 개

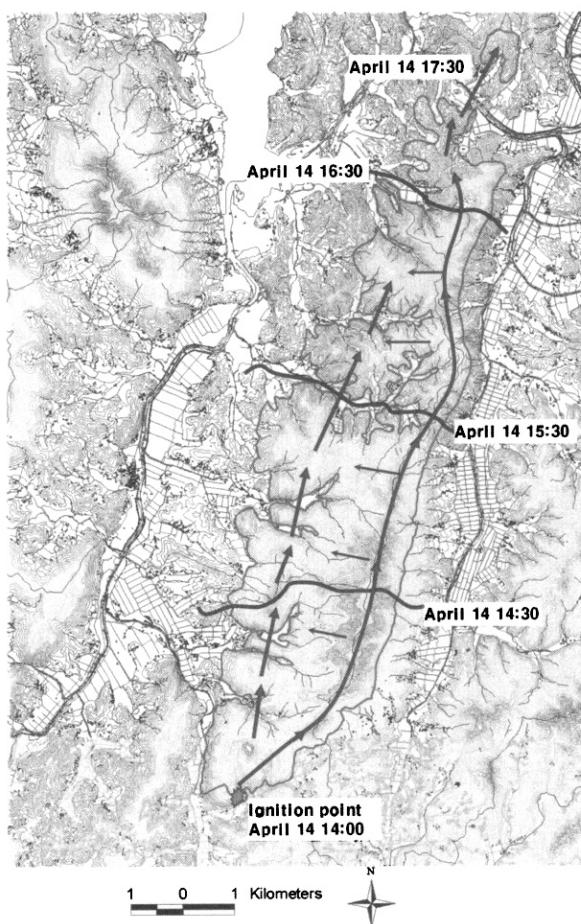


Figure 2. The forest fire spread pattern of the Cheongyang forest fire (April 14, 2002).

발된 연료모델에 입력하여 연료깊이, 연료량 등을 산출하여 이용하였으며, 현지 임상조사를 통해 자료를 보완하였다. 기상인자는 청양지역의 AWS 자료를 이용하여 발생 당시의 풍속, 풍향을 입력하였으며, 강수량, 일적산량, 실효율, 최고온도 자료를 이용하여 연료습도를 산출하여 입력하였다. 청양산불에 대한 지표화 확산예측모델의 예측시간은 운영되는 컴퓨터의 사양을 고려하여 2시간으로 설정하였으며, 시간해상력과 공간해상력은 각각 6분과 25M로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

산불의 예측시간을 2시간으로 설정하여 시뮬레이션한 결과 3.4 GHz의 단일 중앙처리장치와 400 MHz의 2GB 메모리를 갖는 컴퓨터에서 127초가 계산과정에 소요되었다. 확산속도는 2.7 km/hr로 분석되었으며, 2시간 동안의 확산 길이는 5.4 km, 폭은 2.1 km로 나타났다(Figure 3). 청양산불의 실제 확산과 예측치를 비교한 결과 확산길이에 대해서는 55%, 폭에 대해서는 64%의 일치도를 보였다. 이러한 예측속도 2.7 km/hr는 실제 확산속도(4.4 km/hr)에 비해

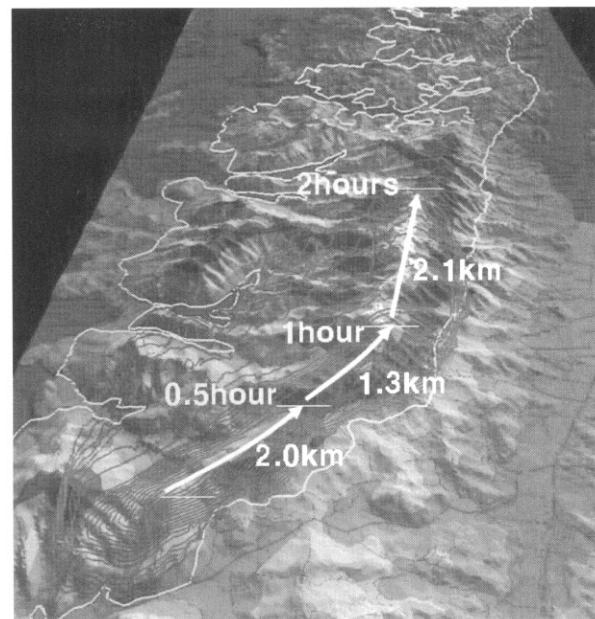


Figure 3. The simulation result of fire spread on the Cheongyang forest fire.

61%의 수치였다. Figure 2에서 보는 바와 같이 청양산불은 초기 확산속도가 빠르다는 사실에 착안하여 초기 30분간의 예측 값을 따로 분석한 결과 확산속도가 4.0 km/hr로 분석되어 실측치 6.2 km/hr의 64%의 수치를 보였다. 이후 초기 1시간 동안의 예측에서도 3.3 km/hr로 나타나 실측치 5.4 km/hr의 61%에 해당되어 전 단계에서 실측치보다 예측속도가 높았다.

이러한 이유는 초기 30분 동안의 산불은 발화지점으로부터 평균경사 약  $7^{\circ}$ 의 상향사면으로 확산되어 풍속과 더불어 경사의 영향을 받았기 때문으로 판단된다. 이 초기 단계가 지난 다음에는 경사가 거의 존재하지 않은 하향경사  $1^{\circ}$ 의 평지와 같은 능선으로 확산되었기 때문에 경사의 요인은 크게 작용하지 않고 풍속만이 주된 작용을 한 것으로 판단된다.

실제 청양산불의 확산속도보다 지표화 확산예측모델을 이용하여 예측한 확산속도가 낮은 이유로는 모델에서는 지표화의 확산처럼 산불을 연속적인 과정으로 예측하였으나, 청양산불은 비화(spot fire)가 다수 발생하여 불연속적이고 빠른 속도로 확산되었기 때문으로 판단된다. 따라서 이후 과제에는 지표화 중심의 확산예측을 넘어 일반적으로 확산속도가 지표화에 비해 빠르고 복잡하다고(Stephen et al., 1996, Perry 1998) 알려진 수관화와 비화에 대한 예측알고리즘을 개발하여 통합된 형태의 산불확산예측모델을 개발하여야 할 것이다. 한편 대상지역의 산림이 대부분 소나무림에도 활엽수림으로 분류되어 있는 임상도의 부정확성과 산불로 인해 데워진 대기가 확산속도에 미치는 영향(Linn et al., 2005)을 고려하지 못한 점도 이러한

결과의 한 요인이라 판단된다.

## 결 론

본 연구에서는 국내 산악지형에서 발생하는 산불의 특성을 지형, 기상, 임상 등 제반 산불관련 인자들을 유기적으로 연계하여 해석할 수 있는 지표화 확산예측모델을 GIS와 통합된 체계로 개발하였다. 본 연구에서 개발된 모델을 산불방재에 활용하면 산불발생시 산불의 확산 경로를 예측하여 초동진화와 산불 진화를 위한 기초 자료로 이용될 수 있으리라 판단된다. 또한, 산불행동 예측의 중요성에도 불구하고, 국내 연구 실정이 미비한 상태에서 산불 행동에 대한 이해를 전작하는데 기여할 수 있다고 판단된다.

다만 지표화 확산예측에 있어서 기초 자료로 활용될 수 있는 확산 속도 및 강도에 대한 국내 자료와 연구가 미흡한 실정에서 본 모델이 개발되었다. 따라서 이후 국내 산불에 대한 자료와 연구결과가 축적되는 경우 그 정확도를 증진하기 위한 수정이 필요하다. 특히 연료모델에 있어서는 국내 임상현황에 맞는 연료 분류체계를 개발하고 이에 따른 연료모델을 작성하는 것이 무엇보다도 우선시되고 있다. 따라서 보다 근본적인 산불관리 대책으로 산불에 관한 특성을 파악하기 위한 연구를 통해 기초 자료를 축적해 갈 필요가 있으며, 특히 이러한 자료들을 근간으로 본 모델의 끊임없는 재개발이 수행되어야 할 것이다. 또한, 본 연구에서 제시한 지표화 확산예측 외에 산불재해의 대형화에 있어서 밀접한 연관을 갖는 수관화, 비화에 대한 모델도 개발되어야 할 것이다.

## 인용문헌

1. 김용식, 이시영, 임효재, 김홍, 송종훈, 김수영. 1998. 유동장 해석을 통한 산불확산예측 프로그램의 개발. *한국임학회지* 87(4): 528-534.
2. 이병두, 정주상, 김형호, 이시영. 2001. GIS 응용에 의한 2000년 삼척 산불의 확산속도 분석. *한국임학회지* 90(6): 781-787.
3. 이병두, 정주상, 이시영. 2002. GIS 응용을 위한 산불화산예측 알고리즘의 개발. *한국임학회지* 91(6): 812-819.
4. 이시영. 1990. 환경인자가 산불의 온도 및 진행속도에 미치는 영향. *동국대학교 석사학위논문*. pp. 104.
5. 이시영, 이봉수, 임주훈. 1997. 습도측정봉을 이용한 산불 발생위험을 예측. *산림과학논문집* 55: 150-157.
6. 정연하, 이시영, 염육칠, 여운홍. 1989. 산화위험을 예측에 관한 연구. *임업연구원 연구보고* 38: 117-123.
7. 정주상, 이병두, 김형호. 2002. GIS 및 판별분석에 의한 삼척산불지역의 소나무임분 피해도 추정. *한국임학회지* 91(3): 355-361.
8. Andrews, P.L. and L.P. Queen. 2001. Fire modeling and information system technology. *International Journal of Wildland Fire* 2001(10): 343-352.

9. Anderson, D.H., E.A. Catchpole, N.J. de Mestre and T. Parks. 1982. Modelling the spread of grass fires. *Journal Australian Mathematical Society* 23: 451-466.
10. Anderson, H.E. 1983. Predicting wind-driven wildland fire size and shape. *USDA Forest Service. Research Paper. INT 305*.
11. Ball, G.L. and D.P. Guertin. 1992. Simulation of fire growth. *International Journal of Wildland Fire* 2: 47-54.
12. Burgan, R.E. and R.C. Rothermel. 1984. BEHAVE : Fire behavior prediction and fuel modeling system. *USDA Forest Service. General Technical Report. INT-167*.
13. Feunekes, U. 1991. Error analysis in fire simulation models. *Master degree thesis, University of New Brunswick, Canada*.
14. French, I.A. 1992. Visualization techniques for the computer simulation of bushfires in tow dimensions. *Master degree Thesis, University of New South Wales, Australia*.
15. Finney, M.A. 1998. FARSITE:Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation. *Rocky Mountain Research Station. pp. 47*.
16. Lee, S.Y., J.H. Lim and J.S. Oh. 1999. Analysis of Spread rate and Pattern of Forest Fire in Kosung, Korea. *Proceedings of the 3rd International Conference on Long-Term Ecological Research in the East Asia-Pacific Region*. 160-167.
17. Linn, R., J. Winterkamp, and J.J. Colman, 2005. Modeling interactions between fire and atmosphere in discrete element fuel beds. *International Journal of Wildland Fire* 14: 37-48.
18. Perry, G.L.W. 1998. Current approaches to modelling the spread of wildland fire: a review. *Progress in physical Geography* 22(2): 222-245.
19. Richards, G.D. 1990. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal Numerical Methods Engineering* 30: 1130-1149.
20. Richards, G.D. 1995. A general mathematical framework for modelling tow-dimensional wildland fire spread. *International Journal of Wildland Fire* 5(2): 63-72.
21. Richards, G.D. 2000. The mathematical modelling and computer simulation of wildland fire perimeter growth over a 3-dimensional surface. *International Journal of Wildland Fire* 9(3): 213-221.
22. Rothermel, R.C. 1972. A mathematical model for prediction fire spread in wildland fuels. *Research Paper INT-115 (Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Research Station). pp. 40*.
23. Stephen J.P., L.A. Patricia and D.L. Richard. 1996. *Introduction to wildland fire*. 2nd ed. John Wiley & Sons. New York, U.S.A. pp. 769.
24. Stocks, B.J., B.D. Lawson, M.E. Alexander, C.E. Van Wagner, R.S. McAlpine, T.J. Lynham and D.E. Dube. 1989. *The Canadian Forest Fire Danger Rating System*.

- The Forestry Chronicle 65(6): 450-457.
25. Vasconcelos, M.J. and D.P. Guertin. 1992. Simulation of fire growth. International Journal of Wildland Fire 2: 87-96.
26. von Neumann, J. 1966. Theory of self-reproducing Automata. University of Illinois. Urbana.

---

(2005년 9월 21일 접수; 2005년 11월 8일 채택)