

## 流動場 解析을 통한 산불擴散豫測 프로그램의 開發\*

金應植<sup>1</sup> · 李時泳<sup>2</sup> · 任孝淳<sup>3</sup> · 金 鴻<sup>1</sup> · 宋鍾薰<sup>1</sup> · 金秀泳<sup>1</sup>

### A Study on Fire Spreading Prediction Program by Flow Field Analysis\*

Eng-Sik Kim<sup>1</sup>, Si-Young Lee<sup>2</sup>, Hoe-Jie Lim<sup>3</sup>, Hong Kim<sup>1</sup>,  
Jong-Hun Song<sup>1</sup> and Soo-Young Kim<sup>1</sup>

#### 要 約

산불 확산의 인자 중에 바람과 경사면은 가장 중요한 인자들로 고려된다. 일반적으로 복잡한 산악 지형에서는 동일한 경사면이라도 서로 다른 분포의 바람을 갖는다. 본 논문에서는 지형데이터를 이용한 산림내 각 지역에서의 풍향·풍속의 유동장을 계산하여 산불확산을 예측하였으며 그 결과 값을 사용하여 ROS(Rate Of Spread)실험식이 적용된 산불 확산 알고리즘을 개발하였다. 이를 실제 산불확산에 적용하여 90%이상의 일치성을 확인하였다.

#### ABSTRACT

There are many parameters in prediction of forest fire spread. Among others wind and slope factors are considered to be the important parameters in spread of forest fire. Generally, all the inclined planes with same slopes can not have the same wind velocity in complex mountain area. But this effect has been disregarded in complex geometry. In this paper, wind values which have velocity and direction is calculated by applying computational fluid dynamics to the forest geometry. These results are applied for forest fire spreading algorithm with experimental Korean ROS(Rate Of Spread). Finally, the comparison between the simulation and the real forest fire has correspondence about 90%.

*Key word* : ROS, simulation, spreading algorithm, forest fire

#### 서 론

산불의 燃燒狀況은 氣象條件(溫度, 濕度, 風速), 樹種, 樹冠密度, 地形物의 상태(樹種, 量, 含水率) 등 많은 環境因子的 영향을 받게 되어 매우 복잡하게 변화된다. 특히, 우리 나라의 산불은 미국, 캐나다와의 산불확산과 달리 복잡한 산악 지형으로 인하여 산불확산의 예측이 매우 어렵

다. 그러나 산불진화를 위한 인력과 장비 동원시 시간의 절약과 산불진화대원의 안전 및 산불피해를 최소화시키기 위해서는 발화 초기단계에 조속히 그 산불의 크기와 영향을 어느 정도 정확히 예측할 수 있어야 한다.山下(1990)는 컴퓨터를 사용하여 산불확대를 예측하는 기법을 검토한 결과 대상지역 전역에 걸쳐 많은 분석자료가 필요하다고 하였으며, 복잡한 지형주변에 발생한 산불사태에 대하여 국지풍, 수증, 수관 소밀도 및

\* 接受 1998年 5月 20日 Received on May 20, 1998.

<sup>1</sup> 호서대학교 공대 산업안전공학과 Dept. of Safety Engineering, Hoseo Univ. San 29-1, Sechul-Ri, BaeBang-Myun, Chung Nam, Korea.

<sup>2</sup> 산림청 임업연구원 Forestry Research Institute, Cheongryangri-2dong, Seoul 130-012, Korea.

<sup>3</sup> 호서대 공대 기계공학과 Dept. of Mechanical Engineering, Hoseo Univ. San 29-1, Sechul-Ri, BaeBang-Myun, Chang-Nam, Korea.

비확률 고려한 산불확대 예측모델을 작성한바 있다. 李時泳 등(1996)은 우리나라 산불 피해를 Auto cad와 Land cad 등 전산프로그램을 이용, 立體的으로 표시하여 연소유형 및 연소특성을 분석한 바 있다.

山下(1990)와 같이 산불 확산에 영향을 주는 많은 분석 자료들을 정확히 실측하여 수집한다는 것은 우리나라 상황에는 많은 인력과 설비와 시간이 필요하기 때문에 현실적으로 곤란하며, 정확한 확산 알고리즘이 구명되지 않는 현 상황에서 많은 인자들의 데이터 값들을 고려한다는 것은 비효율적인 면이 존재한다. 이에 대응방안으로 본 논문에서는 가장 주요한 산불 확산인자 중 풍향·풍속의 자료를 유동장 계산을 통하여 얻고 이를 한국형 ROS(Rate Of Spread)식에 적용하여 확산 알고리즘을 완성하였다. 또한 온도, 습도(최소 습도)는 기상청의 실측 데이터를 적용하였다.

**이론 및 방법**

**1. 산불에 영향을 미치는 인자**

본 논문에서는 산불의 확산에 있어서 주요한 인자로 풍속, 풍향, 온도, 습도를 고려하였다. Fig. 1은 동일한 경사각을 갖는 산악지형의 단면도로서 앞 뒤 경사각은 같지만 바람의 크기는 다르다.

특히 우리나라의 경우는 林地가 매우 복잡하여 지형 인자는 매우 중요한 요소가 된다. 산불 확산 모델링에서 경사각이 동일한 서로 다른 계곡의 바람분포에 대하여 차이점을 고려한 모델은 아직 보고된 바 없고 보통 그날의 평균 풍속과 경사도를 인자로 사용하여 왔다. 따라서 본 논문에서는 사면과 시간에 따라 달라지는 풍속·풍향에 초점을 맞추어 이를 산불 확산 알고리즘에 적용시키고자 한다.

**2. 산불확산 실험식**

산불의 확산 형태를 수치적으로 나타낸 ROS식의 정의는 "바람이 평형상태나 정상상태에 도달한 후에 기복이 있는 지형 상에서 바람에 따라 앞으로 확산되는 비율, 또는 바람 없이 방사상으로 확산되는 비율"이다(Alexander, 1987). ROS식은 산불의 모델링에 있어서 연료습도, 경사, 풍속, 연료유형의 관계식을 도출한 Rothermel

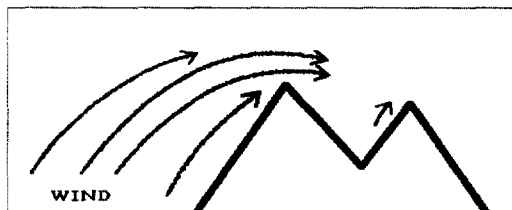


Fig. 1. Different wind values in same slope.

(1972)과 Albin(1976)에 의해 발전되었으며, 한국에서도 정연하(1990)는 한국적 특성에 맞는 침·활엽수 낙엽을 사용한 연소실험에서 진행속도를 측정하여 다음을 구하였다.

$$ROS(4cm, R=0.91) = -0.21H + 0.20S + 1.07W - 0.59F - 1.56 \dots\dots\dots(1)$$

$$ROS(6cm, R=0.85) = -0.43H + 0.24S + 1.16W - 0.02F - 1.08 \dots\dots\dots(2)$$

H : 연료습도    S : 경사도  
W : 풍속        F : 연료의 종류

식(1)과 (2)의 4cm와 6cm는 연료의 두께이고 R은 분산을 나타낸다. 식(1)과 (2)는 상향 사면에 적용되는 식이지만 산불 발생 주위에 기상청의 풍속, 풍향을 일률적으로 적용하기에는 무리가 간다. 이를 해결하기 위하여 3차원 유체역학해석 프로그램을 이용하여 세분화된 면적에서의 각각 바람 분포를 해석함으로써 더욱 정확한 값을 ROS식에 적용할 수 있어 실제에 가까운 산불확산 예측이 가능해진다. 본 논문에서 적용한 실제 산불이 일어난 산은 침 활엽이 섞인 혼효림으로서 퇴적물은 약 4cm 정도이다. 따라서 산불확산 알고리즘에 적용할 ROS식 중 식(1)을 선택하였다.

**3. 연구지역의 유동장 해석**

**1) 적용지형**

본 연구의 적용지형으로서 실제 산불이 발생했던 지역으로서 산불 확산에 있어서 기본이 되는 단순사면형 지역인 충남 아산시 배방면 수철일리(水鐵一里) 태화산 지형을 적용하였다.

**2) 적용지형공간의 세분화**

산화지역의 모델링 준비작업으로 1 : 5000 지형도(1994년 12월 23일 수정)를 1×1cm<sup>2</sup>(실제 면적 50×50m<sup>2</sup>)로 총 2,080개의 세분화된 단위 격자로 나누고 격자 점의 x, y, z좌표를 입력하여 3차

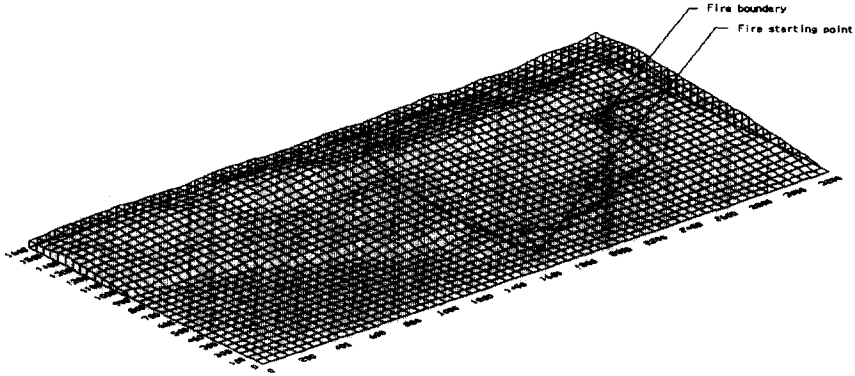


Fig. 2. Tea-Hoa Mountain geometry the three dimensions.

Table 1. Daily Meteorological Data in investigated area (March, 1997)

Date	Air Temperature			Relative Humidity.		Wind		
	Mean	Max	Min	Mean(%)	Min(%)	Mean WS (m/s)	Max. Speed(m/s)	Dir(16)
27	7.3	17.7	-1.8	58	32	0.9	4.6	W
28	9.9	20.7	0.9	51	21	1.4	4.0	WSW
29	8.1	2.8	2.8	60	29	2.5	6.3	WSW
30	2.4	-1.4	-1.4	41	30	3.6	6.3	WNW

Note : WS : wind speed ; W : west ; WSW : west-southwest ; WNW : west-northwest

원 지형 데이터를 구축하였다. Fig. 2는 화재지역의 지형을 3차원으로 표현한 입체도이다. 또한 총 520ha에 해당하는 2,080개의 격자 중 전소지역은 72ha에 해당하는 288개의 격자로 구성되어 전체 분할 지역 중 13.8%에 해당된다. 이와 같이 화재지역 보다 넓은 지역을 모델로 설정한 이유는 산불발생 지역의 유속 분포가 되도록 경계 조건의 영향을 적게 받게 하기 위한 조치이다.

### 3) 해석범위의 경계조건 및 초기조건

산불발생의 주요 원인인 풍속·풍향을 계산하기 위하여 그날의 평균풍속 및 풍향의 데이터, 평균온도와 최소습도를 입력조건으로 부여하였다. Table 1은 산불 화재 연구지역의 당일 기상 데이터(3월 28일)를 보여준다.

계산을 위한 전체 영역의 크기는 Fig. 3의 (a)와 같이 길이 3,300m×폭 1,650m×높이 1,000m이고 이에 따른 격자의 분할은 50×25×10으로 총 12,500개의 입체 격자로 나뉘어진다.

Fig. 3의 (a)에서 각 면에 대한 경계조건은 다음과 같다. ⑤면은 산의 표면이다. ①면과 ⑥면에서는 산화지역의 기상 관측 데이터인 Table 1을 참조하여 Fig. 3의 (b)와 같이 속도를 x성분

과 y성분으로 나누어 경계조건으로 택하였다. ②와 ④면의 압력은 대기압을 적용하였고, ③면 물리적인 성질의 변화량들이 없다고 가정하여  $\partial \Phi / \partial x = \partial \Phi / \partial y = \partial \Phi / \partial z = 0$  ( $\Phi$  : air flow)의 조건을 적용하였다. 전체적으로 ①면과 ⑥면은 공기의 유입면이고 ②면과 ④면은 공기의 유출면이 된다. 따라서 Fig. 4는 유동장 해석의 결과로 산화지역의 유선의 분포를 보여준다. 속도장은 정상 비압축성으로 가정하였으며 일반적으로 공기의 난류모델을 해석하는데 사용하는 표준 k- $\epsilon$  모델( $C_\mu$ (점성)=0.09,  $\sigma_k$ (전단응력)=1.0)을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 유체역학 해석 코드는 FVM(Finite Volume Method)을 기반으로 한 상용코드로서 영국의 AEA사에서 개발한 CFX 4.1c이다. 이 코드를 사용하여 실제 지형의 산에서 유동장을 계산하였으며 이를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 6은 시작된 격자를 발화점으로 산불이 전파할 때 영향을 끼치는 주위의 8개의 격자를 나타낸다. 각각 격자에서의 화염은 지연시간이 지나면 바로 옆 격자들로 옮겨진다. 이러한 화염 전파 과정은 반복적으로 계속되어진다.

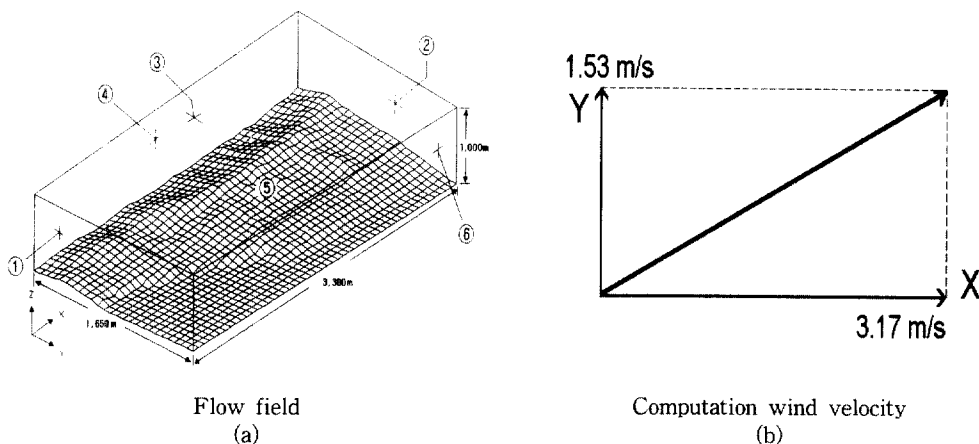


Fig. 3. Tae-Hoa Mountain's flow field (a) Computational geometry and Boundary Condition (b) Inlet wind velocity in surface ①.

Table 2. Tae-Hoa Mountain's flow field explanation of Fig. 3 (a).

direction	direction explanation
①	wind inlet
②	wind outlet
③	atmosphere
④	wind outlet
⑤	mountain surface
⑥	wind inlet

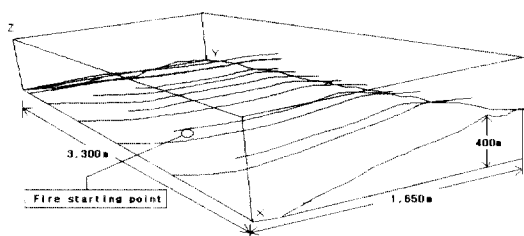


Fig. 4. The distribution of flow streamline.

4. 확산 알고리즘 개발

본 연구에서 제시하는 확산 알고리즘은 Fig. 5 와 같다. 사용된 언어는 C이고 확산속도는 세분화된 격자를 기준으로 주변 8개의 격자에서 ROS 값을 고려하여 결정한다. 알고리즘에 처리되는 입력 데이터 값들은 풍속, 풍향, 습도(기상청의 데이터 중 최소 습도), 경사도이다. 시작 격자를 발화점으로 하여 이 격자의 전체면적이 화염에 쌓여 주변 격자에게 화염을 전달하기까지의 시간

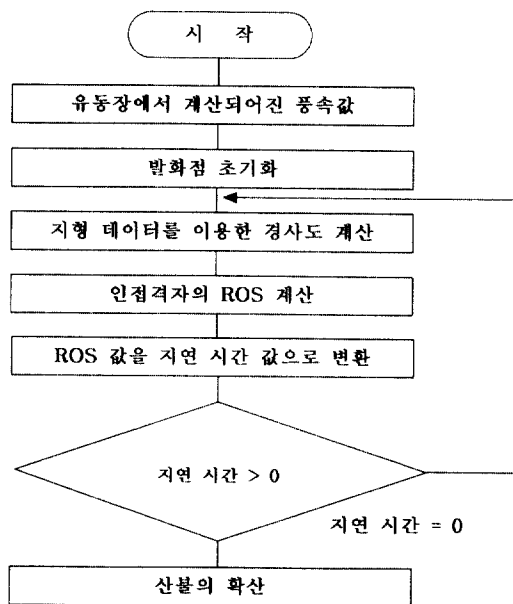


Fig. 5. Flow chart of spreading algorithm.

을 지연시간이라고 정의하였다. 지연시간은 ROS 의 값의 역수이다. 이는 즉, ROS값이 크면 클수록 더욱 빠르게 연소된다는 것을 의미한다. 경사도는 격자를 이루고 있는 4점으로부터 얻어진다.

Fig. 7는 각각 대각방향과 수직방향에 풍향에 따른 가중치를 보여주는 그림이다.

풍향은 각각의 대각방향, 수직방향 풍향을 고려하여 Fig. 7은 같은 남서풍, 남풍일 경우를 선택하여 각 성분마다의 데이터에 8방향의 가중

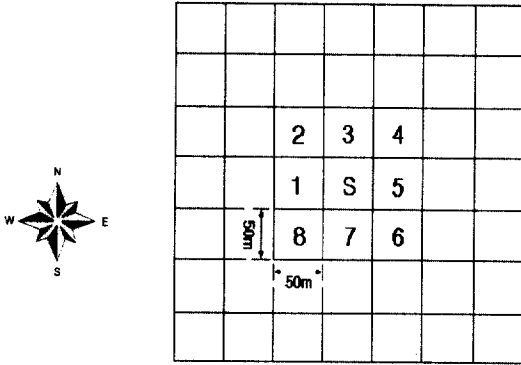
치를 부여한 방식을 선택하였다. 즉, 남풍의 가중치는 북풍, 서풍, 동풍의 풍향 가중치 값을 알

수 있는 지표가 되는 것이고 남서풍의 가중치는 남동풍, 북서풍, 북동풍의 풍향 가중치의 지표가 되는 것이다.

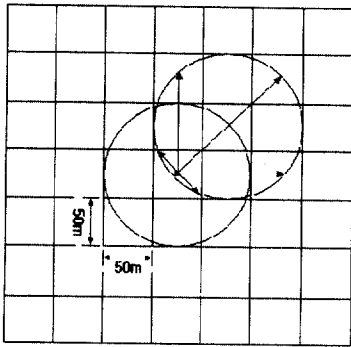
**결과 및 고찰**

**1. 산불확산 모델의 검증**

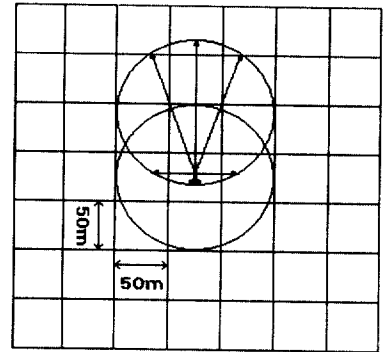
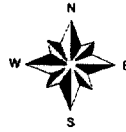
본 알고리즘을 충남 아산시 배방면 수철일리(水鐵一里) 태화산에서 97년 3월 28일 발생한 산불에 적용하였다. Fig. 8은 실제산불 지역의 지형도로서 목격한 마을 사람들의 증언을 통하여 시간에 따른 산불의 대략적인 횡적 진행 상황을 나타내었다. 이 지역은 산불 확산에 있어서 기본이 되는 단순사면형인 지역이며, 발생 산불의 규모와 크기는 봄·가을에 발생하는 일반적인 형태



**Fig. 6.** Cell modelling of mountain area  
(Note : S ; fire start point)

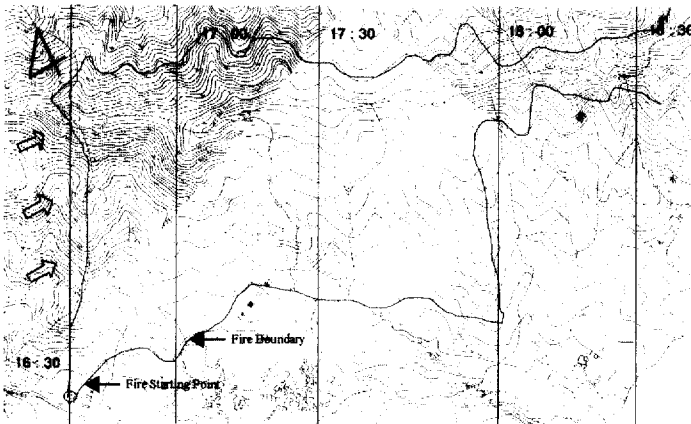


The south-west wind  
(a)



The south wind  
(b)

**Fig. 7.** Weighting values of the spreading speed.



**Fig. 8.** A map of real forest fire on model mountain(Scale 1 : 5000)  
Note : arrow direction : wind direction(WSW : west-southwest).

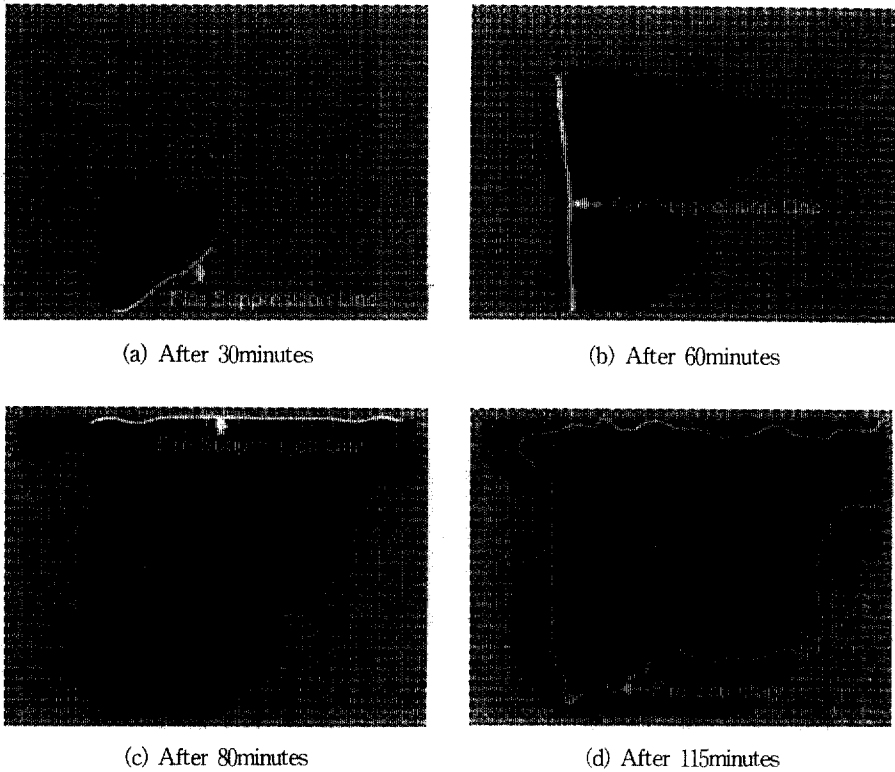


Fig. 9. Changes of forest fire progression of by time ((a)After 30minutes, (b)After 60minutes, (c)After 80minutes, (d)After 115minutes)

의 산불이다.

시뮬레이션한 결과 시간에 따른 진행형태를 Fig. 9에 나타내었다.

검증방법은 실제 산불의 확산거동을 전소면적과 비교평가 하였으며 전소 면적에서는 90% 이상의 일치성을 보였다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9의 (d)를 비교하면 시간의 일치성을 알 수 있었다. Fig. 9의 (a)와 (b)와 (c)에서 흰 선은 산불세가 약한 부분으로 진화작업이 행해진 부분이다. 본 논문에 기재된 결과는 확산 알고리즘에서 이러한 인위적인 조건이 배제된 상태로 시뮬레이션을 행한 결과이다. 따라서 전소 면적이 방화선을 넘어가게 되었다. 이러한 문제는 알고리즘 상에서 각 격자의 지연시간을 크게 함으로서 인위적인 진화선을 구축한 것과 동일한 효과를 얻을 수 있으므로 이를 해결할 수 있다.

### 결 론

산불의 확산에 가장 주요한 요소인 풍속, 풍향

값의 정확한 예측을 위하여 3차원 유동장해석으로 값을 예측하였고 실제 기상조건인 온도와 습도 인자를 한국형 ROS식에 적용한 간결한 형태의 산불 확산알고리즘을 개발하였다. 이를 실제 산화 지역을 대상으로 시뮬레이션한 결과 실제 산불 전소면적과 90%이상의 일치성을 보여주었다. 또한 전소면적의 90% 이상을 태우는데 걸리는 시간은 2시간 정도로 실제 화재의 진행상황과 대략적으로 일치한다. 따라서 본 논문에서 제시한 알고리즘으로 어느 정도의 산불예측이 가능하리라 사료된다.

추후 연구 과제로는 실제 산화지역에서의 여러 회에 걸친 현장조사 및 시뮬레이션에 의한 결과를 비교 분석한 결과 아래와 같은 인자들이 고려 대상에 올라왔다.

- 1) 산림의 밀도 등의 임황에 관련된 인자에 관하여
- 2) 산림내 수목의 높낮이로 인한 바람과 관련된 인자들에 관하여
- 3) 열대류 인자에 관하여

위의 대상들에 대하여 계속적인 연구 중에 있으며 이중 주요한 몇 개의 인자를 알고리즘에 추가시킴으로 현재보다는 더욱 정확한 예측이 가능해질 것으로 생각된다.

### 인 용 문 헌

1. 김응식의 5명. 1995. GIS를 이용한 산불擴散 Simulation 알고리즘의 개발 '95 안전秋季 學術 논문발표회 논문 수록집. p.32-39
2. 김응식의 6명. 1997. 산불확산예측모델 Algorithm 및 Program개발. 호서대학교 산학협 동연구소. p.26-43
3. 박은경. 1996. GIS를 利用한 산불擴散 모델링, 서울대 碩士학위 논문. p.13-20
4. 송중훈외 5명. 1997. A study on forest fire spreading algorithm with calculated wind distribution. International symposium on Fire Science and Technology(Seoul Education & Culture Center Seoul, Korea. November 12, 1997.) p.305-310.
5. 이동한·이성덕·황강진. 1993. 시뮬레이션 이론과 실제. 敎學社. p.1-10
6. 이시영. 1990. 環境因子가 산불의 溫度 및 進行速度에 미치는 影響. 동국대 碩士학위 논문. p.3-7
7. 이시영. 1994. 산불發生 危險度 및 燃燒擴大 要因 分析에 關한 研究. 동국대 博士학위 논문. p.52-84
8. 山下邦博. 1987. 林內可燃物의 火災危險について. 日本火災學會論文集 37(1) : 21-32
9. 山下邦博. 1988. 林野火災의 飛火延燒에 關する 研究. 消防研究所研究資料 21 : 1-148
10. AEA Technology. 1995. CFX4.1 : User guide. p.1-10
11. Alexande, M.E. 1985. Predicting fire behavior in the black spruce-lichen woodland fuel type of western and northern and northern Canada. Canadian Forestry Service.
12. Brown, A.A. and Davis, K.P. 1995. Forest Fire Control and Use. p.185
13. Berlin, G.N. 1993. 防火技術을 위한 컴퓨터 시뮬레이션. 消防安全 1993. 7-8월호
14. Andrews, P.L. and C.H. Chase. 1989. Behave : fire behavior prediction and fuel modeling system-burn subsystem, part2, system-fuel subsystem. USDA Forest Service, General Technical Report INT-260. p.1-15
15. Cheong, Yeon Ha. 1992. Burning behavior of forest litter and forest fire danger rating in relation to weather conditions. 서울대 博士학위 논문. p.47-52