

## 산불확산예측모델의 개발

이병두<sup>1</sup>, 정주상<sup>1</sup>, 이명보<sup>2\*</sup>, 김동현<sup>2\*</sup>

서울대학교 산림과학부 1, 국립산림과학원 산불연구과 2\*

### Development of forest fire growth prediction model

Byung-doo Lee 1, Joo-sang Chung 1, Myung-bo Lee 2\*, Dong-hyun Kim 2\*

Seoul National University 1, Korea Forest Research Institute 2\*

#### 1. 서론

2000년 4월 강원도 동해안에서 발생하여 건국이후 최대의 산불로 기록된 동해안 산불은 진화당일인 15일까지 총 피해면적 23,794ha, 최대 산불확산속도가 약 1.6km/hr로써 빠른 확산속도를 보여줬다. 이와 유사하게 2002년 충청남도 청양에서 발생한 산불은 산불 발생 3시간 30분 만에 15.6Km 떨어진 지점까지 연소하여 동해안의 산불확산속도보다 약 3배 빠른 확산속도를 기록하였다. 이렇듯 산불이 건조한 기후와 빠른 바람의 영향으로 대형화되고 있는데, 이는 지금까지의 산불확산형태와는 달리 비화(spottling)가 주요한 산불확산형태로 자리 잡고 있음을 증명해 준다. 실제로, 동해안 산불에서는 비화에 의해 산불대책본부가 최후 저지선으로 설정한 약 1km의 하천을 뛰어넘어 경상북도 지역으로 확산되었으며, 청양산불에서는 낮은 야산으로 구성된 저지대임에도 불구하고 빠른 바람으로 비화가 연속적으로 발생하여 많은 피해를 야기하였다.

이처럼, 대형화된 산불에 있어서 주요한 확산형태가 비화로 판명되면서 비화에 대한 체계적인 연구와 대응책이 요구되고 있다. 이러한 관점에서 미국<sup>1)</sup>과 캐나다<sup>2)</sup>와 같은 산불관련 연구의 선진국에서는 비화에 대한 체계적인 분석과 다양한 환경에서의 연소 실험이 이루어지고 있다. 또한, 산불재해에 대한 주민대피, 진화자원 배치 등의 문제에 있어서 효과적인 대응책으로 여겨지는 산불확산예측시스템에 비화를 예측하기 위한 모듈을 개발하였거나, 개발 중에 있다. 하지만 국내에서는 1996년 고성산불과 위에서 언급한 2000년 동해안산불, 2002년 청양산불 등 대형화된 산불에 대한 비화사실과 같은 개별연구만이 보고되고 있다.

한편, 2000년 동해안 산불이후 산불재해에 대한 효율적인 방재능력이 국가적인 문제로 부각되면서, 과학기술부와 산림청 국립산림과학원을 중심으로 산불에 대한 체계적인 이해와 선진화된 종합적 산불방재관리시스템 구축을 목표로 연구가 진행되었다. 그 결과 국내 산불 확산특성에 대한 연구를 바탕으로 GIS 환경에서 운영되는 지표화 예측 중심의 산불확산예측프로그램이 개발<sup>3), 4)</sup>되었는데, 이 프로그램에 비화의 확산을 예측할 수 있는 모듈을 개발하여 통합한다면 대규모의 산불재해에 효과적으로 응용이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기 개발된 산불확산예측프로그램을 바탕으로, 수관화와 비화를 예측할 수 있는 모듈을 개발하여 GIS와 통합된 환경에서 운용 가능한 산불확산예측모델을 개발하고자 하였다.

## 2. 산불확산 예측 알고리즘

산불은 연소되는 연료의 위치에 따라, 지표화, 수관화, 비화로 구분하며, 수관화는 다시 지표화가 존재해야만 연소되는 지표화 종속수관화와 지표화 열량에 의존하지 않고 자체 발생 열량만으로 확산이 이루어지는 지표화 독립수관화로 구분할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 산불의 발전정도(대형화 정도)에 따라 산불의 단계를 지표화 → 지표화 종속수관화 → 지표화 독립수관화 → 비화로 설정하였다.

지표화, 수관화, 비화 등 단계별 산불을 통합하고, 새로운 '산불확산예측모델'에 맞는 산불확산예측 알고리즘을 설계하기 위하여 Fig. 1과 같이 변화하는 산불환경(기상, 연료, 지형)에 따른 산불예측단계를 구성하였다. 이를 세부적으로 살펴보면, 첫 번째, 임상조건을 고려하여 산불의 발전여부를 판단한다. 이는 일반적으로 활엽수림이면 수관화와 비화로 발전되지 않고, 발전되더라도 그 지속시간이 짧아 대형산불의 우려가 적은 반면, 침엽수림에서는 적절한 환경이 조성되면 수관화와 비화로 발전되기 때문이다. 두 번째, 산불의 강도와 화염길이를 고려하여 산불의 화염길이가 지하고, 즉 수관화 연료 높이보다 높고, 산불강도가 수관층의 연료를 연소시킬 만큼 강하면 수관화로 발전하게 된다. 수관화로 확산되면서 산불강도가 임계치 이상으로 높으면 지표화 독립 수관화로 확산되게 되며, 최종적으로 풍속과 지형조건을 고려하여 비화발생조건에 합당하면 비화가 발생한다.

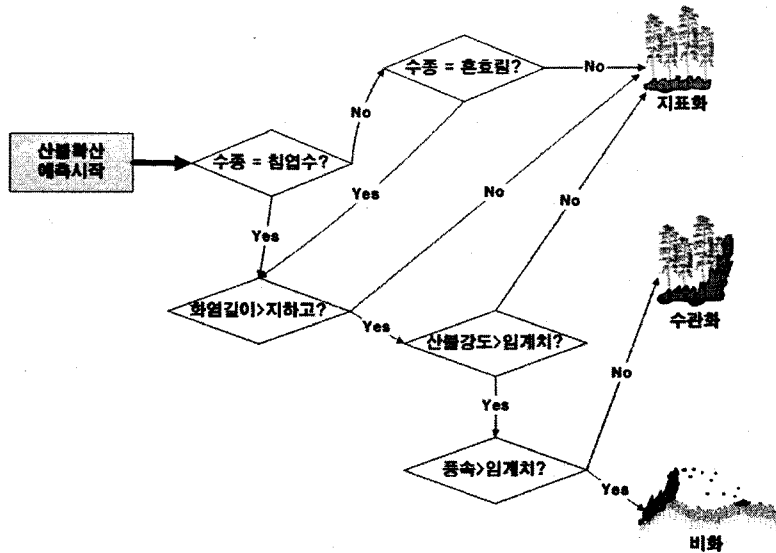


Fig. 1. 산불연소환경에 따른 산불의 발전 단계

산불이 대형화되어 새로운 비화가 생성되기까지의 과정을 Fig. 2에서와 같이 첫 번째, 화염 및 열기둥의 생성, 두 번째, 열기둥의 에너지에 의한 불뚱의 상승(불뚱의 수직 이동), 세 번째 상승된 불뚱이 바람의 영향으로 산불의 전면부로 비산(불뚱의 수평 이동), 마지막으로 화선의 전면부에 착지된 불뚱의 재발화되는 과정으로 분석하였다. 이러한 비화발생 과정에 따라 비화예측 모델을 ① 화염 및 열기둥 예측모델, ② 불뚱상승 높이가 예측모델, ③ 불뚱비산거리 예측모델, ④ 재발화 예측모델로 총 4개의 세부모델로 구성하였다.

현실에서는 독립수관화는 거의 존재하지 않으므로<sup>5)</sup>, 본 연구에서는 독립수관화를 예측하는 수식을 제외하였으며, 지표화의 영향으로 확산되는 중속수관화는 지표화의 확산 속도와 같기 때문에 기존 지표화 알고리즘을 적용<sup>3)</sup>하였다. 비화확산에 대한 국내 연구가 전무하고 전 세계적으로도 비화를 예측하기 위한 모델이 거의 없는 형편이므로 본 연구에서는 Albini(1979)<sup>6)</sup>가 제안한 비화예측모델을 적용하여 그 타당성을 검토하였다. 따라서 비화확산알고리즘은 Albini의 비화확산예측모델을 기반으로 Fig. 3과 같이 구성하였다. 이를 자세히 살펴보면 산불발전알고리즘에 따라 비화가 발생하는 환경으로 판단되면, 연료원이 되는 수종의 수고와 수관밀도를 이용하여 수관층의 화염길이를 계산하고 이를 바탕으로 비화물질의 상승높이를 계산한다. 이후 비화물질의 수평적 이동력으로 작용하는 풍향과 풍속인자를 고려하여 비화물질의 궤적을 계산하고 착지점의 좌표를 추정하게 된다. 비화물질이 착지한 지점의 환경이 산불이 확산될 수 있는 연료로 구성되어 있으면 재발화되어 새로운 산불로 확산된다.

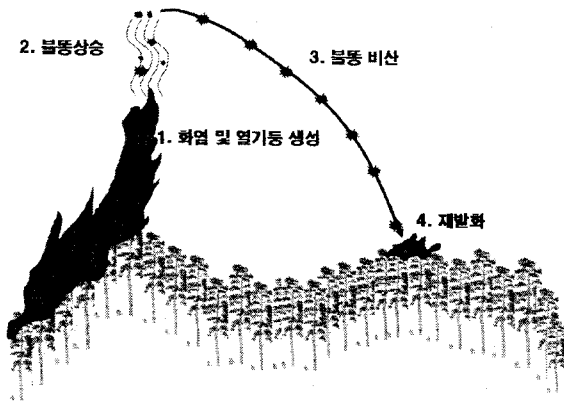


Fig. 2. 비화 발생의 단계적 과정

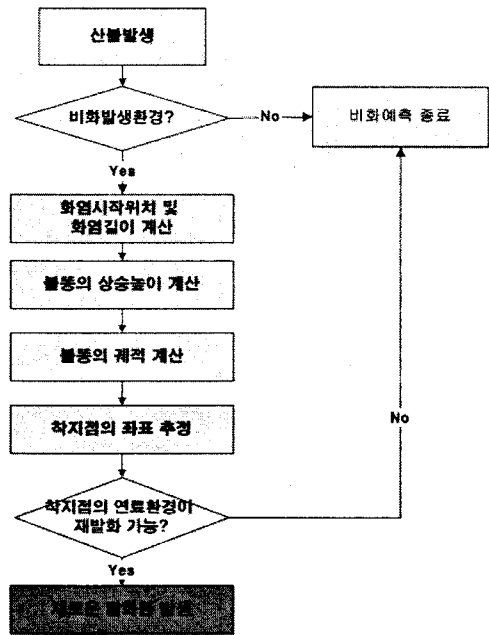


Fig. 3. 비화 확산예측 알고리즘

### 3. 산불확산예측 모델

#### 가. 개발환경

‘산불확산예측모델’은 Microsoft 사의 Visual Basic 6.0 Professional 버전을 이용하여 개발되었으며, 개인용 PC에서 범용적으로 사용하고 있는 Windows NT (2000, XP) 계열에서 운영될 수 있도록 하였다. 확산예측결과의 저장형태로 선정된 ESRI사의 Shape file을 관리하기 위해서 Ross Pickard가 개발한 ArcView Shapefile OCX (버전 1.4.13)을 이용하였다. 마지막으로 개발된 ‘산불확산예측모델’과 GIS 프로그램과의 연계성을 위해 ESRI 사의 Arcview(Version 3.2)를 이용하여 예측결과물이 사용자에게 제시될 수 있도록 하였다.

### 나. 모델의 구조와 운용체계

모델은 Fig. 4와 같이 산불행동예측모델과 산불정보관리모델로 크게 구분되며, 산불행동예측모델은 다시 산불인자분석 모듈, 산불행동예측 모듈, 산불행동표현 모듈로 구성된다. 산불인자분석 모듈은 산불확산 예측과정에 필요한 인자들을 입력받아 모델에서 필요한 자료 형태로 변환하는 역할을 담당하며, 입력된 지형, 기상, 연료인자를 이용하여 화선에서의 확산속도, 강도를 예측하는 것은 산불행동예측 모듈에서 수행한다. 마지막으로 산불행동표현 모듈은 예측결과를 그림이나 보고서로 출력한다. 산불정보관리모델은 산불발생과 확산에 대한 정보를 관리하는 기능을 수행한다.

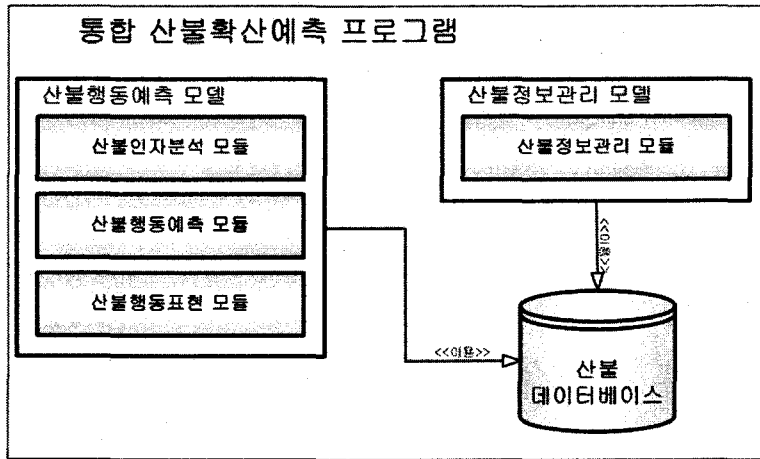


Fig. 4. '산불확산예측 모델'의 구성도

### 다. 공간자료 입력

기상을 제외한 지형과 입상인자는 GIS에서 이용이 가능하도록 수치지도 형태로 입력된다. Fig. 5에서는 수치지도의 입력창을 보여주고 있는데, 등고선도, 고도도(DEM), 경사도, 방위도, 입상도는 필수적으로 입력해야 하며 수계도, 도로도, 건물위치도, 산불취약지, 주요시설물, 담수지 정보 등은 추가로 입력할 수 있는 형태로 개발되었다.

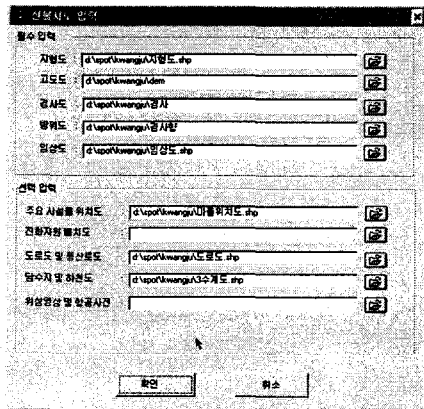


Fig. 5. 공간자료 입력창

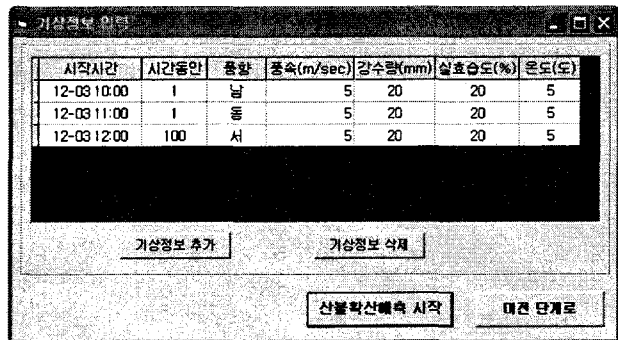


Fig. 6. 기상정보 입력창

#### 라. 기상자료 입력

기상인자는 산불행동에 큰 영향을 미칠 수 있는 중요한 요소이다. 온도, 상대 습도, 강수량은 연료의 습도에 영향을 미치며, 바람은 산불의 행동을 결정하는 직접적인 요소이다<sup>7)</sup>. 따라서 산불확산예측에 대한 정확도는 기상인자의 정확한 측정과 입력에 의해 좌우될 수 있다. 기상자료는 시간에 따라 기상환경이 바뀌는 것을 고려하여 Fig. 6과 같이 시간대별로 풍향, 풍속, 강수량, 실효습도, 온도를 입력할 수 있도록 하였다. 연료습도의 추정치는 이시영 등(1997)<sup>8)</sup>이 제시한 연료습도 모형식을 이용하였다. 이 모형은 100g의 완전 건조된 연료봉을 이용하여 강수량, 일적산량, 실효습도, 온도를 설명변수로 하여 연료습도를 산출하는 것으로써, 연료습도를 산출하는데 필요한 설명변수들이 기상청 AWS를 통해 획득이 가능하므로, 실용성이 높다고 판단되었다.

#### 마. 발화지역 입력

'산불확산예측모델'에서 발화원이 어떻게 입력되는지를 Fig. 7에서 보여주고 있다. 발화원은 Fig. 7의 (좌)처럼 점형태로 입력될 수도 있고, (우)처럼 폴리곤의 형태로 입력할 수도 있다. 산불이 발생하고 접수될 때에는 어느 정도 확산된 상태이기 때문에 폴리곤형태도 입력할 수 있도록 하였다.

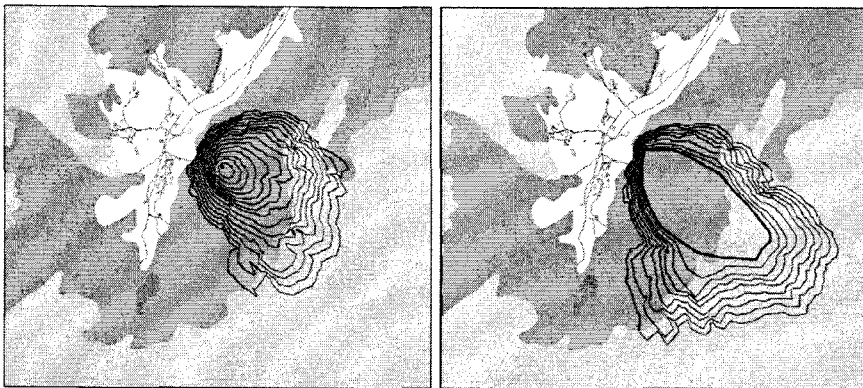


Fig. 7. 발화원이 점으로 입력된 경우(좌), 발화원이 폴리곤의 입력된 경우(우)의 확산

### 4. 산불확산예측 모델의 응용

#### 가. 연구 대상지

모델의 적용성을 검토하기 위해 청양산불을 대상으로 산불행동을 예측해 보았다. 청양산불은 2002년 4월 14일 14시 10분경 충청남도 청양군 비봉면 중목리에서 성묘객의 실수로 발화되었으며, 진화가 완료된 4월 15일 08시까지 총 17시간 50분 동안 3,095ha의 산림을 연소시켰다. 이 산불은 발화지점부터 장축방향으로 15.6km를 3시간 30분 만에 확산되어 시간당 4.4km의 확산속도를 보였다. 이러한 연소속도는 2000년 삼척산불 최대 연소속도 1.6km/hr<sup>9)</sup>, 1996년 고성산불 최대 연소속도 1.0km/hr<sup>10)</sup> 보다 빠른 결과이다. 연소된 지역의 최대폭 즉 단축방향으로의 길이는 3.3km로 보고되었다.

#### 나. 예측결과

예측된 최대 확산속도는 발화 뒤 1시간 동안의 5.7km/hr이었으며, 평균 확산속도는

3.7km/hr로 분석되었다(Fig. 8, Table 1). 하지만 입력된 지형자료의 경계선의 영향을 받지 않는 초기 3시간 동안의 확산속도를 살펴보면 4.37km/hr로 실제 확산속도와 거의 일치함을 알 수 있었다. 특히 예측과정에서는 1.7km 폭이 넘는 달천을 넘어 새로운 비화가 발생되어 실제 산불과 비슷한 확산형태를 보여주었다.



Fig. 8. 청양산불의 예측결과

Table 1. 예측된 청양산불의 확산속도

시간	최대길이 (km)	최대폭 (km)	속도 (km/hr)
1	5.7	0.77	5.7
2	8.8	2.0	4.4
3	8.9	2.7	3.0
4	11.2	3.1	2.8
5	13.3	3.6	2.6

## 5. 결론

본 연구에서는 산불의 발전단계에 따라 산불의 확산을 예측할 수 있는 모델을 GIS와 통합된 형태로 개발하였다. 지표화 확산속도는 이병두 등(2005)이 제시한 모델을 이용하였으며, 수관화와 비화는 각각 van Wagner(1977)와 Albini(1979) 모델을 이용하였다. 모델의 예측결과를 검토하기 위하여 2002년에 발생한 청양산불에 대해 적용한 결과 일정 정도 타당성이 인정되었다. 하지만 산불확산에 대한 지속적인 자료 수집을 통하여 모델의 예측 정확성을 개선시켜야 할 것이다.

## 참고문헌

1. Finney, M. A., "FARSITE: Fire Area Simulator - Model Development and Evaluation", Rocky Mountain Research Station, 47pp(1998).

2. Forestry Canada Fire Danger Group, "Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System", Inf Rep ST-X-3(1992).
3. 이병두, 정주상, 이시영, "GIS 응용을 위한 산불확산예측 알고리즘의 개발", 한국임학회지, 제91권, 제6호, pp.812-819(2002).
4. 이병두, 정주상, 이명보, "GIS를 이용한 지표화 확산예측모델의 개발", 한국임학회지, 제94권 제6호, pp.481-487(2005).
5. van Wagner, C. E., "Conditions for the start and spread of crownfire", Canadian Journal of Forest Research, Vol. 7, pp.23-34(1977).
6. Albini, F. A. and R. G. Baughman., "Estimating windspeeds for predicting wildland fire behavior", USDA Forest Service Research Paper, INT 221, 12pp(1979).
7. Pyne, S. J., P. L. Andrews and R. D. Laven, "Introduction to Wildland Fire", JOHN WILEY & SONS, INC. 769pp(1996).
8. 이시영, 이봉수, 임주훈, "습도측정봉을 이용한 산불 발생위험을 예측", 산림과학논문집, 제55권, pp.150-157(1997).
9. 이병두, 정주상, 김형호, 이시영, "GIS 응용에 의한 2000년 삼척산불의 확산속도 분석", 한국임학회지, 제90권, 제6호, pp.781-787(2001).
10. Lee, S. Y., J. H. Lim and J. S. Oh., "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, pp.160-167(1999).