

산불확산모델링에 적합한 경사계산 알고리즘 개발

안상현¹ · 강용석¹ · 손영기¹ · 이시영² · 신영철^{1*}

Developing of Slope Calculation Algorithm for Forest Fire Spread Modeling

Sang-Hyun AN¹ · Yong-Seok KANG¹ · Young-Gi SON¹
Si-Young LEE² · Young-Chul SHIN^{1*}

요 약

효율적인 산불관리 및 예측을 위하여 GIS를 이용한 많은 연구가 이루어지고 있으며 특히 경사는 산불의 확산에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 지형 중 경사를 분석하기 위해 일반적으로 DEM(Digital elevation model)을 이용하여 다양한 알고리즘들이 사용되고 있다. 하지만 산불의 확산속도가 상향사면과 하향사면에 따라 다르기 때문에 새로운 경사계산 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 상향사면과 하향사면의 산불 확산속도를 반영할 수 있는 경사 계산 알고리즘을 개발하였다.

주요어 : 산불, 경사계산, 알고리즘, 지리정보시스템

ABSTRACT

GIS is used much research for efficient forest fire management and forecasting and slope has been known as high-leverage thing in spread of forest fire specially. Various algorithms are used usually to calculate slope angle of topography from DEM(Digital elevation model). However, because spread speed of forest fire is different according to uphill slope and downhill slope, it need new slope calculation algorithm. Therefore, developed slope calculation algorithm can reflect uphill slope and forest fire spread speed of looking downhill slope.

KEYWORDS : Forest Fire, Slope calculation, Algorithm, GIS

2007년 5월 22일 접수 Received on May 22, 2007 / 2007년 6월 21일 심사완료 Accepted on June 21, 2007

* 본 연구는 2006년 충북대학교 학술연구비 지원사업으로 수행되었음.

1 충북대학교 정보산업공학과 Dept. of Information Industrial Engineering, Chungbuk National University

2 강원대학교 방재기술전문대학원 The Professional Graduate School of Disaster Prevention Technology, Kangwon National University

※ 연락처 E-mail : ycshin@trut.chungbuk.ac.kr

서론

기술적인 발전을 토대로 정보의 요구수준이 상당부분 증대되었으며 GIS(Geographic Information System)분야 또한 더 많은 정보를 보다 신속하고 정확하게 처리되어지고 있다. 특히 산불에 있어서는 산불발생시 공간적으로 넓은 지역을 신속히 분석하여 진화의 기초자료로 활용함으로써 환경적, 경제적, 인명적 피해를 최소화하고 대피경로, 진화경로 및 진화재원의 효율적 배치를 결정하는데 필수적이다. 한편, 우리나라 산불은 대부분 인위적인 원인에 의한 발화로 최근 5년간('99~'04) 연평균 586건이 발생하여 6,621ha의 면적이 소실되었으며 160억원의 피해가 발생하였다(산림청 2005). 이러한 피해를 최소화하기 위하여 기상, 임상, 지형적 요인을 분석하여 체계적이고 효율적인 산불예방체계의 구축이 필요하다. 산불을 효과적으로 관리하고 산불발생시 신속한 진화를 위하여 여러 나라에서 기상, 지형, 임상 등 산불관련 인자들을 GIS와 연계하여 많은 연구가 진행되고 있으며(Rothermel, 1972; Albini, 1976; Andrews et al., 2001) 미국의 경우 1972년 국가산불위험지수시스템(NFDRS)을 개발하여 1978년부터 실용화하였으며(Bradshaw et al., 1983), 캐나다에서도 1968년 캐나다산불위험지수시스템(CFFDRS)을 개발하여 실용화하고 있다(Hirsch, 1996). 우리나라에서는 1986년부터 산불관련연구를 시작하였으며, 산불발생위험예측에 대한 연구(정연하 등, 1989; 이시영, 1995), GIS를 이용한 산불의 확산예측에 관한 연구(정주상 등, 2001; 이병두 등, 2002), 시공간 분석에 의한 산불위험예측모형 개발 및 산불위험지역 구분(안상현, 2006)과 같은 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 산불확산에 영향을 미치는 인자 중에서 경사를 중심으로 선행 알고리즘을 고찰해보고 새로운 알고리즘을 제시함으로써 보다 정확한 산불확산예측모델 개발을 위한 기초를 마련하는데 그 목적이 있다.

경사계산 알고리즘

본 연구에서는 지형 특성 중 경사를 대상으로 산불확산모델에 적합한 경사계산 알고리즘을 개발하기 위하여 우선 기존 알고리즘을 살펴보았다. 경사계산을 위해 사용되는 알고리즘으로 Neighborhood 알고리즘, Quadratic Surface 알고리즘, Maximum slope(최대경사) 알고리즘, Maximum downhill slope(최대하향경사) 알고리즘이 사용되고 있으며, 최근 산불에 적합한 알고리즘으로 안상현(2006)에 의해 개발된 Maximum uphill slope(최대상향경사) 알고리즘이 있다. 각각의 알고리즘을 살펴보기 위하여 그림 1과 같이 셀 번호를 부여하여 사용하였다.

1	2	3
8	9	4
7	6	5

FIGURE 1. 3×3 알고리즘에 사용된 기본도.

1. Neighborhood 알고리즘

Arc/Info GRID(ESRI, 1995)와 GRASS(Geographical Resources Analysis Support System)(CERL, 1988)에 의해 제안된 Neighborhood 알고리즘은 인접한 셀 8개의 속성값을 이용하여 경사를 구하는 방식으로 3개의 셀이 MASK형태로 이동하며 차이를 구하기 때문에 중간에 위치하는 셀의 값은 무시되며 이로 인해 미세한 돌출부나 함몰되는 셀의 값은 무시되는 경향이 있다. 알고리즘은 식(1)과 같다.

$$S = \text{ATAN}(\sqrt{((dz/dx)^2 + (dz/dy)^2)}) \times 57.29578 \quad (1)$$

$$dz/dx = \frac{(z_3 + 2z_4 + z_5) - (z_1 + 2z_8 + z_7)}{8 \times d}$$

$$dz/dy = \frac{(z_1 + 2z_2 + z_3) - (z_7 + 2z_6 + z_5)}{8 \times d}$$

S : 경사값(Slope degree)

$z_1 - z_8$: 1-8번 셀 고도값

d : 셀 해상도

2. Quadratic Surface 알고리즘

Zevenbergen과 Thorne(1987)에 의해 제안된 Quadratic Surface 알고리즘은 중심셀에 직교하는 인접셀만을 대상으로 경사를 계산하는 방식으로 태생적으로 Neighborhood 알고리즘과 비슷하여 동일한 문제점이 존재한다. 경사를 구하는 알고리즘은 식(2)와 같다.

$$S = \text{ATAN}(\sqrt{(G^2 + H^2)}) \times 57.29578 \quad (2)$$

$$G = \frac{z_4 - z_8}{2 \times d}$$

$$H = \frac{z_2 - z_6}{2 \times d}$$

S : 경사값(Slope degree)

z_2, z_4, z_6, z_8 : 2, 4, 6, 8번 셀 고도값

d : 셀 해상도

3. Maximum Slope 알고리즘

Shanholtz 등(1990)에 의해 제안된 Maximum Slope 알고리즘은 중심셀과 인접한 8개 셀중에서 가장 차이가 큰 셀값의 절대값을 취하는 방식으로 알고리즘은 식(3)과 같다.

$$S = \text{ATAN}(\max|\frac{z_9 - z_i}{L_c}|) \times 57.29578 \quad (3)$$

S : 경사값(Slope degree)

i : 1, 2, 3, ... 8

L_c : 중심셀에서 인접셀까지의 거리

(z_1, z_3, z_5, z_7 셀은 셀 해상도 $\times \sqrt{2}$)

4. Maximum Downhill Slope 알고리즘

Maximum slope 알고리즘과 유사한 이 방식은 Hickey 등(1994)에 의해 제안되었으며 중심셀에 인접한 8개의 셀 값을 뺀 다음 절대값을 취하지 않고 최대값을 선택하는 알고리즘이다. 최대하향경사를 구하기 위한 알고리즘으로 주로 토양 침식량을 계산하기 위하여 사용되어지며 알고리즘은 식(4)와 같다.

$$S = \text{ATAN}(\max\frac{(z_9 - z_i)}{L_c}) \times 57.29578 \quad (4)$$

S : 경사값(Slope degree)

i : 1, 2, 3, ... 8

L_c : 중심셀에서 인접셀까지의 거리

(z_1, z_3, z_5, z_7 셀은 셀 해상도 $\times \sqrt{2}$)

5. Maximum Uphill Slope 알고리즘

안상현 등(2006)이 제안한 이 방식은 산불 확산예측을 위하여 고안된 방식으로 임상과 기상요건이 동일할 경우 산불의 특성상 화두 방향이 최고 상향방향으로 확산된다는 점에 착안하여 고안된 알고리즘이다. Maximum Downhill Slope 방식과 유사하지만 인접셀의 값에서 중심셀의 값을 뺀 최고 상향경사를 선택한다. 알고리즘은 식(5)와 같다.

$$S = \text{ATAN}(\max\frac{(z_i - z_9)}{L_c}) \times 57.29578 \quad (5)$$

S : 경사값(Slope degree)

i : 1, 2, 3, ... 8

L_c : 중심셀에서 인접셀까지의 거리

(z_1, z_3, z_5, z_7 셀은 셀 해상도 $\times \sqrt{2}$)

산불확산에 적합한 경사계산 알고리즘

기존의 경사계산 알고리즘은 각각의 특성을 지니고 있지만 단순히 경사 계산을 목적으로 하고 있기 때문에 산불이라는 특수한 목적을 위하여 사용할 경우 상향사면과 하향사면에 의해 확산속도가 뚜렷이 구별되는 산불의 특성을 정확히 반영하기에는 문제점이 발생한다. 일반적으로 산불의 확산속도는 상향사면의 경우 경사가 급할수록 빨라지는 반면 하향사면은 경사가 급할수록 느려지는 경향이 있다(이시영 1995, Pyne et al. 1996, Santoni et al. 1999). 이러한 문제점을 보완하기 위하여 이시영 등(2002)은 발화점을 기준으로 사면향 그리드를 이용하여 상향사면과 하향사면으로 구분하는 방식을 시도하였으며, 이병두 등(2002)은 Rothermel의 ROS 값에 경사에 따른 조정계수를 적용하여 하향경사 지역에서의 왜곡현상을 보완하였다.

이러한 방법들은 실제 산불이 발생하였을 때 상향사면과 하향사면에 대한 경사를 자동으로 구분하기 어려울 뿐만 아니라 산불이 진행되는 방향에 대한 경사를 구할 수 없다. 이러한 내용을 살펴보기 위하여 단순사면을 대상으로 하여 각각의 경사계산 알고리즘을 적용하였다. 기존의 경사알고리즘을 이용하여 경사계산 결과값을 알아보기 위하여 7×7 DEM자료를 사용하였으며, 알고리즘 특성상 실제 경사값은 가운데 5×5에 대하여 사용하였다. 계산의 편의를 위해 셀의 크기는 10m로 가정하였다. 그림 2(a)는 사면을 단순화하여 분석하기 위한 가상의 DEM자료를 나타낸 것이고 그림 2(b)는 DEM 자료를 사용하여 앞에서 서술한 5가지 경사계산 알고리즘을 각각 적용 계산한 결과값을 나타낸 경사그리드이다. 계산된 결과값은 45°로 모두 동일한 값을 나타내었다.

70	70	70	70	70	70	70
60	60	60	60	60	60	60
50	50	50	50	50	50	50
40	40	40	40	40	40	40
30	30	30	30	30	30	30
20	20	20	20	20	20	20
10	10	10	10	10	10	10

(a) 샘플 DEM

45°	45°	45°	45°	45°
45°	45°	45°	45°	45°
45°	45°	45°	45°	45°
45°	45°	45°	45°	45°
45°	45°	45°	45°	45°

(b) 경사

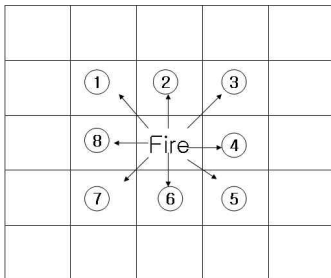
FIGURE 2. 기존 알고리즘을 사용한 경사계산 결과

이 경우 그림 3과 같이 사면 가운데에서 산불이 발화하였다면 산불의 진행방향은 발화점에서 그림 3(b)와 같이 ①-⑧방향으로 확산된다. 여기에서 ②방향은 상향사면으로 산불확산 알고리즘에 경사를 적용하면 정확한 결과값을 산출할 수 있다. 그러나 ①, ③은 산불이 확산되는 경로로 보면 상향사면이지만 실질적인 경사값은 35°로 앞에서 언급된 경사계산 알고리즘으로 계산된 경사값과는 차이가 존재한다. ④, ⑧의 경우 경사는 0°로 나타나며, ⑤, ⑦의 경우는 경사값은 35°로 ①, ③과 경사값이 같지만 하향사면이다. 또한 ⑥은 경사값이 동일한 45°을 나타내지만 사면방향이 정반대인 하향사면을 나타내었다. 이시영(1995)은 산불확산속도와 관련된 인자로 경사, 풍속, 연료습도 등을 선정하였으며, 실험을 통해 각각의 조

건을 달리하며 확산속도를 측정하였다. 그 결과 산불의 확산속도가 상향사면의 경우 하향사면보다 평균 3배가 빨랐으며 경사가 45°에서는 9.4~16배 정도 빠르다고 하였다. 따라서 이러한 결과를 ①과 ⑥의 경우에 적용하면 9.4~16배 정도의 산불확산속도 차이가 나타난다고 할 수 있다.

60	60	60	60	60
50	50	50	50	50
40	40	40	40	40
30	30	30	30	30
20	20	20	20	20

(a) 샘플 DEM



(b) 산불확산방향

FIGURE 3. 산불확산방향

본 연구에서는 산불이 발화되어 확산될 때 확산속도에 중대한 영향을 주는 경사에 대하여 산불진행 경로에 따라 경사를 구하는 방식을 제안하고자 한다.

$$S = \text{ATAN}\left(\frac{z_i - z_9}{L_c}\right) \times 57.29578 \quad (6)$$

S : 경사값(Slope degree)

Zi : 1, 2, 3, ... 8 중 산불이 진행되는 지점

Lc : 중심셀에서 인접셀까지의 거리

(z1, z3, z5, z7 셀은 셀 해상도 × √2)

Z9 : 발화점 또는 직전 산불확산지점

제안된 알고리즘을 이용하여 그림 3(b)에 있는 ①-⑧까지의 경사를 구하였다. 이러한 경사 값을 기존의 경사계산 알고리즘을 이용하여 계산된 경사 값과 비교 분석한 결과 다음과 같이 차이가 나타났다.

TABLE 1. 경사계산 알고리즘 결과 값 비교분석

구분	기존 경사계산 알고리즘	제안한 경사계산 알고리즘
①	45°	35°
②	45°	45°
③	45°	35°
④	45°	0°
⑤	45°	-35°
⑥	45°	-45°
⑦	45°	-35°
⑧	45°	0°

이러한 경사 값의 차이가 실제 산불확산모델링에 영향을 주는 정도를 파악하기 위하여 단일사면 상에서 시간별로 확산이 진행되는 시뮬레이션을 실시하였다. 우선 시뮬레이션을 수행하기 위하여 필요한 산불확산식을 구하였다. 산불확산식은 실제 실험을 통해 얻어진 이시영(1995)의 임상별 경사에 따른 확산시간 결과를 이용하여 도출하였다. 표 2에서 U(upslope)는 산불이 확산되는 방향이 상향사면일 경우이며, D(downslope)는 확산되는 방향이 하향사면일 경우를 나타낸 것이다.

표 2의 임상별 경사에 따른 확산시간을 이용하여 연료임상별 확산시간에 대한 식을 표 3과 같이 산출하였다.

경사계산 알고리즘과 도출된 경사별 산불확산식을 이용하여 산불이 확산되는 것을 비교하기 위하여 표 3에서 제시된 연료임상별 평균 산불확산시간을 적용하여 단일사면을 대상으로 산불확산을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 대상은 그림 4(a)와 같이 단일사면에 대하여 실시하였으며, DEM 자료는 우리나라 산림

TABLE 2. 임상별 경사에 따른 확산시간

연료임상	경 사			평균 U:D
	15° U:D	30° U:D	45° U:D	
침엽수(분/10m)	19.0:28.2	15.4:40.0	2.5:40.0	12.3:36.0
활엽수(분/10m)	15.9:35.5	13.0:30.5	2.4:25.5	10.4:30.5
혼효림(분/10m)	14.7:30.0	9.0:40.0	3.1:29.1	8.9:33.0
평균(분/10m)	16.5:31.2	12.5:36.8	2.7:31.5	10.5:33.2

※ U : upslope, D : downslope (이시영, 1994) 박사학위논문 p.68.

TABLE 3. 임상별 경사에 따른 산불확산시간 계산식

연료임상	산불확산시간 (y: 시간, x: 경사)	
침엽수(s/m)	$y = 15.584e^{-0.0248x}$	$R^2 = 0.8385$
활엽수(s/m)	$y = 17.941e^{-0.0253x}$	$R^2 = 0.7444$
혼효림(s/m)	$y = 15.468e^{-0.0229x}$	$R^2 = 0.6710$
평균(s/m)	$y = 16.495e^{-0.0242x}$	$R^2 = 0.7657$

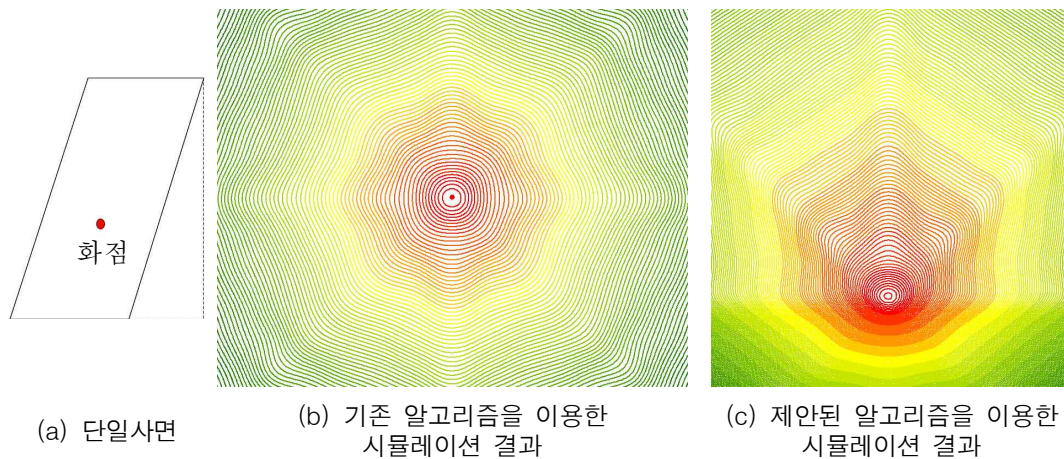


FIGURE 4. 각 경사계산 알고리즘을 이용한 시간에 따른 산불확산범위 시뮬레이션


의 경사가 대부분이 30° 이하이기 때문에 셀의 크기를 20m로 하고 높이는 순차적으로 10m 간격으로 하여 계산하였다. 기존의 경사계산 알고리즘을 이용한 결과값은 표 1에서 볼 수

있듯이 모든 셀의 경사가 동일하게 산출되기 때문에 그림 4(b)와 같이 원형의 시뮬레이션 결과가 산출되었다. 이러한 결과는 실제로 실험을 통하여 확산되는 범위와 크게 차이가 난

다. 그러나 제안된 알고리즘을 이용한 경사계산 결과는 발화점을 기준으로 상향과 하향사면이 구분되어 계산되기 때문에 그림 4(c)와 같이 시뮬레이션 결과가 타원형으로 실제 산불이 확산되는 형태를 잘 반영하였다.

결 론

기존의 경사계산은 산불이 확산되는 방향에 따른 경사값을 반영하지 못했지만 본 연구에서 제안하는 경사계산 알고리즘은 산불이 진행되는 방향에 따라 실제 경사값을 반영하였으며, 산불확산에 영향을 주는 상향 및 하향 경사에 대한 값을 +(상향), -(하향)로 구분하는 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서 제안된 경사계산 알고리즘은 산불확산 연구 분야에서 산불이 진행되는 확산속도 분석 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 산불이 발생한 지점을 중심으로 경사를 계산하는 방법은 산불이 발생되었을 경우 산불발생지점을 알아야 분석을 할 수 있다는 단점과 산불이 확산되어 커질 경우 산불지점으로부터 경로 설정을 지정하는 것이 복잡하다는 단점이 존재하지만 추후에는 이러한 문제점을 해결하는 것이 중요할 것으로 사료된다. 

참고 문헌

- 신영철, 안상현. 2000. 지리정보시스템을 이용한 산불방재방안: 청주시 우암산 지역을 중심으로. 한국지리정보학회지 3(1):23-34.
- 안상현, 강용석, 신영철. 2005. 셀 기반 모델링을 이용한 경사계산 알고리즘 개발. 한국지리정보학회지 8(3):121-128.
- 안상현. 2006. 시공간 분석에 의한 산불위험예측 모형 개발 및 산불위험지역 구분. 충북대학교 박사학위논문. 148쪽.
- 이병두, 정주상, 이시영. 2002. GIS 응용을 위한 산불확산예측 알고리즘의 개발. 한국임학회지 91(6):812-819.
- 이시영. 1995. 산불발생 위험도 및 연소확대요인 분석에 관한 연구. 동국대학교 박사학위논문. 104쪽.
- 이시영, 강용석, 안상현, 오정수. 2002. GIS를 이용한 산불피해지역 특성분석. 한국지리정보학회지 5(1):20-26.
- 정주상, 이병두, 김형호, 이시영. 2001. GIS 응용에 의한 2000년 삼척 산불의 확산속도 분석. 한국임학회지 90(6):781-787.
- Albini, F.A. 1976. Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92pp.
- Andrews, P.L. and L.P. Queen. 2001. Fire modeling and information system technology, International Journal of Wildland Fire 10: 343-352.
- Finney, M.A. 1998. FARSITE : Fire Area Simulator - Model Development and Evaluation. Rocky Mountain Research Station. 47pp.
- Haines, D.A., W.A. Main, A.J. Simard. 1986. Fire-Danger Rating and Observed Wildfire Behavior in the Northeastern United States. Res. Pap. NC-274. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 23pp.
- Hirsch, K.G. 1996. Canadian Forest Fire Behavior Prediction(FBP) System: user's guide. Canadian Forest Service. 121pp.
- Hickey, R., A. Smith, P. Jankowski(1994). Slope Length Calculations from a DEM within Arc/Info GRID. Computing, Environment and Urban Systems 18(5):365-380.
- 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). 40pp.
- Shanoltz, V.O., C.J. Desai, N. Zhang, J.W. Kleene, C.D. Metz. 1990. Hydrological/Water Quality Modeling in a GIS Environment, ASAE Paper 90-3033.
- Zevenbergen, L.W., C.R. Thorne. 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surface Processes and Landforms 12:12-56. 