

산불확산에 영향을 미치는 생태학적 요소들간의 민감도 분석: 시뮬레이션 연구

송학수 · 이상희*

국가수리과학연구소

(2013년 8월 28일 접수; 2013년 9월 18일 수정; 2013년 9월 23일 수락)

Sensitivity Analysis on Ecological Factors Affecting Forest Fire Spreading: Simulation Study

Hark-soo Song and Sang-hee Lee*

KT Daeduk 2 Research Center, 70 Yuseong-daero 1689-gil, Yuseong-gu, Daejeon 305-811, Korea

(Received August 28, 2013; Revised September 18, 2013; Accepted September 23, 2013)

ABSTRACT

Forest fires are expected to increase in severity and frequency under global climate change and thus better understanding of fire dynamics is critical for mitigation and adaptation. Researchers with different background, such as ecologists, physicists, and mathematical biologists, have developed various simulation models to reproduce forest fire spread dynamics. However, these models have limitations in the fire spreading because of the complicated factors such as fuel types, wind, and moisture. In this study, we suggested a simple model considering the wind effect and two different fuel types. The two fuels correspond to susceptible tree and resistant tree with different probabilities of transferring fire. The trees were randomly distributed in simulation space with a density ranging from 0.0 (low) to 1.0 (high). The susceptible tree had higher value of the probability than the resistant tree. Based on the number of burnt trees, we then carried out the sensitivity analysis to quantify how the forest fire patterns are affected by wind and tree density. The statistical analysis showed that the total tree density had greatest effect on the forest fire spreading and wind had the next greatest effect. The density of the susceptible tree was relatively lower factor affecting the forest fire. We believe that our model can be a useful tool to explore forest fire spreading patterns.

Key words: Forest fire model, Fire spreading dynamics, Forest ecosystem, Sensitivity analysis

I. 서 론

산불은 자연생태계의 주요한 교란 요인 중 하나로 산림 내 존재하는 가연성 물질들을 연소시킴으로써 생물량의 급격한 감소와 군집구조의 변화를 일으킨다(Díaz-Delgado *et al.*, 2002). 아울러 산불은 대표적인 산림 재해 중 하나로 광범위한 지역에 빠른 속도로 피해를 입히는 특성을 가지고 있으며(Malamud *et al.*, 1998), 생물의 다양성 감소 및 목재 등 임산물의 손실, 관광객의 감소 등 생태학적, 경제학적, 사회적 측면에 다양한 영향을 미치며, 지속 가능한 산림경영을 불가능하게 한다(Ratz, 1995). 또한 최근의 연구결과에 따르면, 지구온난화와 동반된 평균 기온 상승은 습도 감소 및 강수일수 감소 등에 의해 산불 발생률

로 피해를 입히는 특성을 가지고 있으며(Malamud *et al.*, 1998), 생물의 다양성 감소 및 목재 등 임산물의 손실, 관광객의 감소 등 생태학적, 경제학적, 사회적 측면에 다양한 영향을 미치며, 지속 가능한 산림경영을 불가능하게 한다(Ratz, 1995). 또한 최근의 연구결과에 따르면, 지구온난화와 동반된 평균 기온 상승은 습도 감소 및 강수일수 감소 등에 의해 산불 발생률



* Corresponding Author : Sang-hee Lee
(sunchaos@nims.re.kr)

과 대형 산불 발생 위험성이 증가하고 있다(Piñol *et al.*, 1998; Flannigan *et al.*, 2000; McCoy and Burn, 2005). 반면에 산불 발생으로 인한 온실가스과 에어로솔의 증가 및 지표반사도 변화가 다시 기후변화에 영향을 미치게 된다(Clark *et al.*, 1996). 산불의 확산에 있어 중요한 요소들로는 풍속, 지형, 경사, 산림 연료의 수분함량, 산림연료의 무게, 연료의 종류, 상대 습도 등 다양하다(Karafyllidis and Thanailakis, 1997). 아울러 산불의 확산은 기후, 발화, 식생의 종류, 수분의 함량 및 지형 등 복잡한 상관관계를 가지고 있다(Hargrove *et al.*, 2000). 이러한 이유와 더불어 야외에서의 실험을 통한 산불 확산 관찰 및 분석에는 환경적인 제약과 많은 비용이 소비되기 때문에 산불에 관련된 각 생태학적 요인들 간의 독립적인 효과를 분석하고 이해하는 것은 쉽지 않다. 최근 컴퓨터 성능의 향상에 힘입어 시뮬레이션 연구는 산불 확산 패턴을 분석하고 그 동역학을 이해하는데 대안적인 방법으로 각광받고 있다. 이러한 시뮬레이션 모델들은 일반적으로 확률적 시뮬레이션과 결정론적 시뮬레이션으로 구분할 수 있다(Pitts, 1991; Beer, 1991; Halada and Weisenpacher, 2005). 확률적 시뮬레이션 모델은 일반적으로 연소 파라메타인 연료의 종류와 연료의 습도 정도 그리고 바람의 영향 등의 실제 야외에서 얻어지는 자료를 토대로 확률 통계적 방법론으로 표현하는 접근법을 가진다. 이러한 모델들은 모든 변수에 대해 실험 자료가 반영된 확률개념을 사용하기 때문에 실제 산림에서 산불이 발생지점으로부터 어떻게 진행될 수 있는지에 대해 예측할 수 있다. 하지만 실험으로부터 얻어진 산불에 대한 변수간 상호작용에 관한 방대한 데이터를 요구하는 단점을 가지고 있다. 반면에 결정론적 시뮬레이션 모델은 전 역적 에너지 밸런스 방정식을 사용하며, 비연소 연료로 전이되는 에너지가 연료 연소에 의해 방출되는 에너지에 비례한다는 가정에 기초한다. 이러한 모델들은 연소 지역으로부터 비연소 연료로의 하나 혹은 몇 가지의 에너지 전이 과정을 고려한 것들로서, 그러한 에너지 전이 과정의 고려는 산불 확산 동역학을 이해하는 데에 도움이 된다. 게다가 이러한 접근방식은 실제 조건하의 산불 시뮬레이션 모델을 위한 효과적인 모델의 개발을 가능하게 한다. 그러나 이러한 모델은 복잡하고 시간이 많이 소요되는 수치 계산과 고성능 계산 환경을 필요로 하는 미분방정식 시스템으로 귀결되는 경우가 많고(Boychuk *et al.*, 2009), 더

정확한 산불 확산 예측을 위해서는 많은 환경적 요인들을 고려되어야 하는 경우에 구현 알고리즘이 매우 복잡해 질 수 있다. 본 연구에서 제안하는 모델은 확률적 시뮬레이션 모델로서 CA (Cellular Automata)를 사용하여 모델링 되었다. CA는 Von Neumann에 의해 처음 도입된 레스터 방식의 확산 기법으로 단순성과 응용가능성이 높아 현재까지 널리 이용되고 있다(Ball and Guertin, 1992; Vasconcelos and Guertin, 1992; Feunekes, 1991). 처음 CA 방법은 1950년대 초 물리학, 화학, 생물학, 수학, 컴퓨터공학 분야에서 다양한 동적 현상을 연구하는데 사용되었다. CA의 원리 및 특성은 무질서 시스템과 인공생명을 연구하는데 있어 중요한 수단으로 활용되고 있다(Eastman, 2003; Berjak and Hearne, 2002). 아울러 생태학적 모델링 연구에 있어서도 그 활용범위가 넓다(Matsinos and Troumbis, 2002; Loibl and Toetzer, 2003).

본 연구에서, 우리는 산불의 좀 더 세부적인 행동을 표현하기 위해서 무어 방식을 선택하였다. 또한, 기존에 제안된 산불모델에서는, 산림을 하나의 동일한 나무로 이루어진 것으로 가정하고 있는 경우가 많이 있다(Grassberger, 2002; Malamud *et al.*, 2005). 바람의 효과를 고려하지 않거나(Karafyllidis and Thanailakis, 1997) 혹은 단순한 바람 형태를 고려하는 모델이 대부분이다(Encinas *et al.*, 2007). 본 연구에서 제안한 모델에서는 다양한 바람 세기에 따른 효과와 두 종의 나무를 고려하였으며, 시뮬레이션을 통해 이러한 생태학적 요소들이 산불확산에 미치는 영향이 어느 정도인지 민감도 분석을 통해 분석하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 산불 패턴 확산 모델

본 연구에서 제안한 모델은 셀룰라오토마타(Cellular Automata, CA) 방식으로 구현 되었다. CA는 임의의 한 격자 상태가 자기 자신 및 인접한 격자 상태의 국소적인 상호작용에 의해 결정되게 된다. 기본적으로 CA는 폰노이만(Von Neumann neighborhood) 방식과 무어(Moore neighborhood) 방식이 대표적이며, 폰노이만 방식은 임의의 (i, j) 격자에 대해서 대각선 격자의 상태는 고려하지 않고 상하좌우에 위치한 $(i-1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$, $(i+1, j)$ 의 격자 상태를 확인하고 확산 여부를 결정하는 방식이다. 반면에 무어 방식은

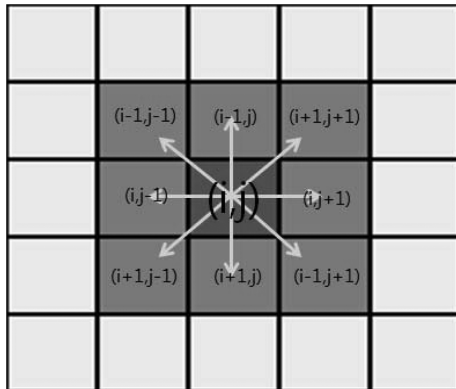


Fig. 1. The Moore neighborhood consisting of the eight cells surrounding a central cell on a two-dimensional square lattice.

(i, j)의 상태가 이웃하는(i-1, j-1), (i-1, j), (i+1, j+1), (i, j-1), (i, j+1), (i+1, j-1), (i+1, j), (i-1, j+1)의 8개 격자의 상태에 따라 매 스텝마다 결정되게 하는 방식을 말한다(Fig. 1).

본 모델에서는 200×200크기의 격자 공간상에 불이 옮겨 불기 쉬운 나무(susceptible tree)와 상대적으로 불이 옮겨 불기 어려운 나무(resistant tree)를 랜덤하게 위치하도록 설정하였다. 이를 위해, 매트랩(Matlab™, Mathworks Inc., Natick, MA)에서 제공하는 랜덤함수를 사용하였다. 서로 다른 두 종의 나무에 대한 불의 전이 확률을 P_i 로 기술 하였다. 산불이 전이될 가능성이 큰 나무의 확률은 1.0으로 고정하였으며, 상대적으로 불이 불기 어려운 나무의 확률은 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 그리고 0.9로 다양한 값을 취하는 것으로 설정하였다. 이는 나무의 종류 및 숲의 바닥에 깔려 있는 마른 나뭇가지들 또는 나무의 잎이 얼마나 무성한가에 따라서 불전이 확률이 달라 질 수 있기 때문이다. 다시 말해서, 불전이 확률이 큰 나무가 이웃격자에 불타는 나무를 가지고 있다면 무조건 불이 옮겨 불게 되며, 반대로 불 전이 확률이 작은 나무의 이웃하는 격자에 불타는 나무가 있다면(Fig. 2(a)), 확률에 따라서 불이 옮겨 불을 수도 있고 불지 않을 수도 있다(Fig. 2(b)). 시뮬레이션 공간에는 나무가 없는 격자 공간도 있으며, 이러한 빈 공간의 격자에는 불이 전이 될 수 없다. 또한 일단 불이 붙은 나무는 곧 바로 연소된 나무(burnt tree)로 변하게 된다. 연소된 나무와 빈 공간은 서로 구분되며, 본 연구에서 고려하고 있는 산불패턴은 연소된 나무의 분포만을 고려한다.

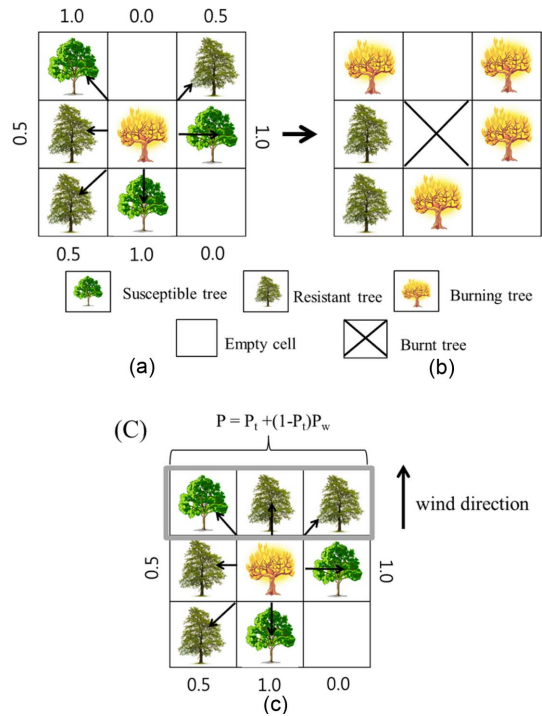


Fig. 2. Graphical representation of the manner in which fire can spread from a burning tree in a central landscape cell (a) to trees in neighboring cells (b) according to our cellular automata model. The probability that fire will spread to a given tree (P_i) is based on the tree “species” where one species is resistant to the transfer of fire ($P_r = 0.5-0.9$) and the other is susceptible to the transfer of fire ($P_s = 1.0$). The probability of fire transfer increases for both tree species when winds blow from south to north with strength P_w (c).

시뮬레이션 초기에 가연성이 높은 나무와 낮은 나무의 공간 밀도는 각각 C_s 와 C_r 로 나타내었다. 그리고 전체 나무의 초기밀도는 C_{tot} 로 표기하였다.

시뮬레이션 격자공간상에 이러한 밀도의 나무 분포를 만들기 위해서, 각각의 공간 셀에 0과 1사이의 값을 가지는 임의의 수를 발생시켰다. 이 값이 C_{tot} 의 값보다 작으면 그 해당 격자에는 1을 부여하고 그렇지 않으면 0의 값을 부여하였다. 1이 부여된 격자는 나무가 있는 것으로 해석하였다.

$$n(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{when } r(i,j) < C_{tot} \text{ (for total tress)} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

1이 부여된 격자들 (나무가 위치한 격자들) 가운데 마찬가지로 방법으로, 새로운 0과 1사이의 임의 값을 발생시키고 C_s 의 값보다 작으면 가연성이 높은 나무로

크면 가연성이 낮은 나무로 해석하였다. 가연성이 높은 나무가 있는 격자에는 2의 값을 할당하였다. 즉, 시뮬레이션 공간을 이루는 격자들에서 0의 값을 가지는 격자는 빈 공간이 되고, 1의 값을 가진 곳은 가연성이 낮은 나무가 있는 곳이 되며, 2의 값을 가진 곳은 가연성이 높은 나무가 있는 장소가 된다. C_s , C_r , 그리고 C_{tot} 는 0.0에서 1.0 사이의 값을 가지고 있다. $C_r=1-C_s$ 의 관계가 있기 때문에 본 연구에서는 나무 밀도의 독립변수로서, C_s 와 C_{tot} 만을 고려하였다.

본 모델에서는, 바람의 효과를 고려하기 위해서, 바람의 세기를 나타내는 확률변수 P_w 를 도입하였다. Fig. 2(c)와 같이, 연소 중인 나무 주위로 저항성이 큰 나무와 적은 나무가 분포해 있을 때, 바람이 아래에서 위쪽으로 분다고 가정하면, 연소 중인 나무의 위쪽에 위치하고 있는 3개의 나무에만 바람의 영향이

미친다고 가정하였다.

바람의 영향은 각 나무가 가지는 P_i 의 값에 P_w 의 값을 곱해 주는 방식으로 아래의 식과 같이 나타내었다.

$$P = P_i + (1 - P_i)P_w$$

P 는 P_i 의 값을 가지는 나무가 바람의 영향을 받아 불 전이 확률이 높아졌을 때의 확률 값을 나타낸다. 우변의 두 항의 합이 1의 값을 유지해야 하므로, 상대적으로 높은 P_i 값을 가지는 나무는 바람의 영향에 대해 상대적으로 작은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

본 모델에서는 경계면 효과를 최소화하기 위해서 주기적 경계조건(Periodic Boundary Condition)을 적용하였다. 시뮬레이션은 초기에 주어진 나무가 모두 불

Table 1. The average number of the burnt trees, N , for different values of C_s ($= 0.6, 0.7, \dots, 1.0$) and P_w ($=0.6, 0.7, \dots, 1.0$) where $C_{tot} = 0.6, 0.7, \dots, 1.0$.

		N				
P_w	C_s	C_{tot}				
		0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.6	0.6	17811.0	24804.9	29177.5	33323.6	37335.4
	0.7	18214.9	24987.9	29376.8	33517.6	37525.3
	0.8	18795.8	25230.2	29601.8	33714.0	37715.4
	0.9	19657.6	25495.2	29811.4	33907.8	37906.9
	1	20720.3	25776.4	30003.7	34101.6	38094.6
0.7	0.6	19303.4	25355.6	29703.2	33813.3	37819.2
	0.7	19617.0	25583.0	29901.3	33992.1	38008.4
	0.8	20117.4	25815.4	30084.8	34186.1	38197.9
	0.9	20612.5	26034.2	30284.3	34378.9	38386.9
	1	21308.7	26304.8	30506.5	34571.7	38574.4
0.8	0.6	20415.7	25861.7	30207.1	34290.0	38294.9
	0.7	20770.2	26077.0	30405.5	34483.7	38483.9
	0.8	21154.7	26311.2	30603.7	34661.7	38672.4
	0.9	21614.5	26546.2	30803.3	34838.4	38860.5
	1	22147.3	26796.4	31016.3	35030.7	39046.0
0.9	0.6	21229.9	26364.1	30636.8	34744.7	38764.3
	0.7	21530.4	26595.2	30835.7	34937.7	38953.3
	0.8	21877.7	26831.3	31034.0	35130.1	39141.8
	0.9	22308.7	27031.5	31219.8	35339.6	39329.8
	1	22665.1	27258.3	31447.8	35531.1	39517.1
1.0	0.6	21882.5	26839.2	31118.0	35217.3	39237.3
	0.7	22173.5	27047.3	31315.8	35409.8	39427.9
	0.8	22533.3	27270.5	31501.2	35603.2	39618.7
	0.9	22876.9	27520.8	31702.7	35796.1	39809.2
	1	23200.3	27738.7	31903.7	35990.1	40000.0

타 없어지거나 불의 확산이 멈춘 시점까지 진행되었다. 시뮬레이션 시작 전에, 각 나무 종의 고유 확률 값 (P_i)과 전체 나무의 밀도(C_{tot})뿐만 아니라 불이 옮겨 붙기 쉬운 나무 종의 밀도 (C_s)와 바람의 세기(P_w)가 주어졌다. C_{tot} 는 0.6부터 1.0까지의 값을 가지도록 하였다. 시뮬레이션 초기에 격자공간의 중심점에서 산 불이 시작되도록 하였다. 이를 위해, 중심점에는 하나의 가연성이 높은 나무를 위치시켰다. C_{tot} 과 C_s , 그리고 P_w 등이 산불패턴에 미치는 영향을 정량화하고, 세 가지의 독립 변수들간의 상관관계를 이해하기 위해서, P_w 는 0.1 단위로 0.6에서 1.0까지 증가시켰고, C_s 또한 0.1 단위로 0.6에서 1.0까지 증가시켰으며, C_{tot} 역시 0.1 단위로 0.6에서 1.0까지 증가시켰다. 각각의 경우에 대해, 20번의 반복 시뮬레이션을 수행하였으며, 얻어진 결과의 평균치를 가지고 민감도 분석을 수행하였다.

2.2. 분석 방법

본 연구에서는 바람의 세기 P_w 와 전체 나무의 밀도 C_{tot} 그리고 불에 저항력이 강한 나무의 밀도 C_s 를 각각 0.6, 0.7, ..., 1.0과 같이 다섯 단계로 변화시키면서, 연소된 나무의 평균 개수(N)를 측정하였다(Table 1). 얻어진 N 값을 활용하여, 세개의 각각 변수들에

대해 연소된 나무의 개수가 얼마나 영향을 받는지를 아래와 같이 계산하였다. 이 계산값을 각 변수에 대한 민감도(sensitivity)라 한다(Cacuci *et al.*, 2005; Grievank and Walther, 2008).

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\frac{\partial}{\partial X} N(C_{tot}, P_w, C_s) \right] C_{tot}(i), P_w(j), C_s(k)}{I \cdot J \cdot K}$$

여기에서 γ 는 각 요소에 대한 민감도 값이다. $X = P_w, C_{tot}$ 또는 C_s 이며, $P_w(i) = 0.1(i + 5)$ ($i = 1, 2, \dots, I$), $C_{tot}(j) = 0.1(j + 5)$ ($j = 1, 2, \dots, J$), $C_s(k) = 0.1(k + 5)$ ($k = 1, 2, \dots, K$)로 계산된다.

III. 결 과

Fig. 3은 시간 변화에 따라 산불의 시작 지점으로부터 산불이 어떻게 확산 되는지를 보여준다. 가연성이 높은 나무는 녹색 점으로 가연성이 낮은 나무는 노란색 점으로 표시되었다. 연소된 나무와 빈 공간은 검정색, 연소 중인 나무는 빨강색으로 나타내었다. 산불확산 조건은 $P_w = 0.6$ 일때, $C_{tot} = 0.8$ 이며, $C_s = 0.5$ 로 주어졌다. 그리고, 가연성이 낮은 나무의 P_i 값은 0.5로 주었다. 바람이 아래에서 위쪽 방향으로 부는 것으로 가정하고

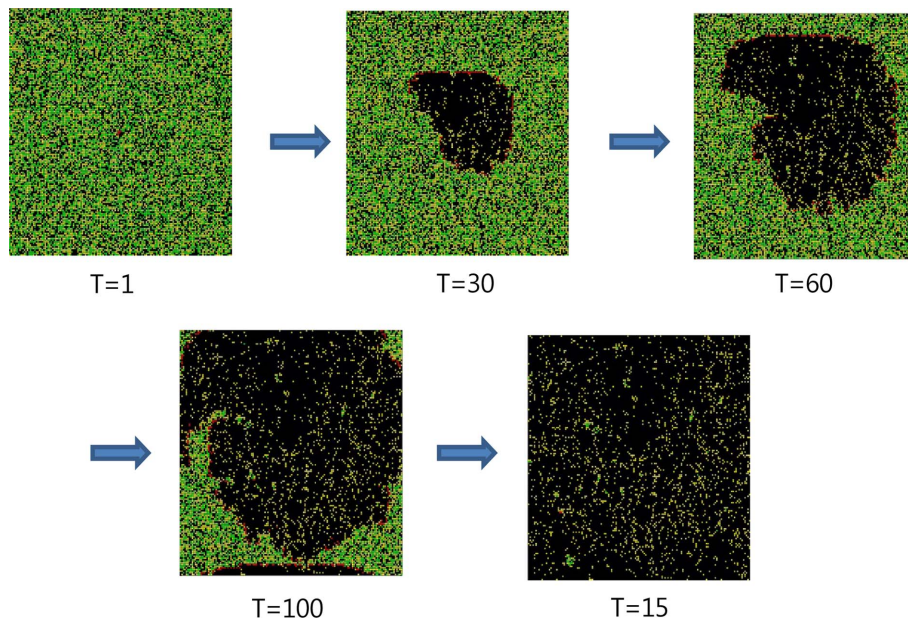


Fig. 3. Snap shots for the forest fire spreading according to time for $P_i = 0.5$ for the resistant tree and $P_w = 0.6$, where $C_{tot} = 0.8$ and $C_s = 0.5$.

있기 때문에, 산불의 확산이 윗 방향으로 치우치고 있을 을 알 수 있다. 시뮬레이션 시간 $T = 100$ 에서, 아래쪽에 나무의 연소가 일어나는 것처럼 보이는 것은 모델에서 우리가 경계면 효과를 최소화하기 위해 주기경계 조건을 사용하고 있기 때문에 생기는 현상이다.

검은색 공간 안에는 노란색 나무가 다소 타지 않고 남아 있는 것을 알 수 있다. 이는 산불이 옮겨 붙지 않을 확률 때문이다. 아울러 노란색 점들 뒤편에는 녹색 점들이 약간 분포함을 알 수 있다. 이는 가연성이 낮은 나무들이 불 확산을 막는 방어막의 역할을 했기 때문이다. 이는 가연성이 낮은 나무가 클러스터(cluster)를 만들고 그 내부에 가연성이 높은 나무가 분포하게 된다면 공간 전체적으로 같은 나무 밀도라 할 지라도 산불 확산에 대한 억제 효과를 만들 수 있을 가능성을 보여준다고 할 수 있다. 추후 이에 대한 효과를 연구해 보는 것이 필요할 것으로 생각된다.

C_{tot} 의 값이 0.45 보다 크고 0.6 미만일 경우, 산불이 공간 전반적으로 확산되지 못했다. C_{tot} 의 밀도 값이 0.45미만일때, 전혀 불이 확산되지 못했다. C_{tot} 0.6 이상에서는 산불이 빠르게 공간 전체로 확산되었다. 다시 말해, 0.45의 나무밀도는 산불의 전이가 일어나지 않는 상태에서 산불의 전이가 일어나는 상태로 변하는 상전이(phase transition) 경계 값이라 할 수 있다. 이러한 상전이 값이 다른 조건들에 따라서 어떻게 변화하는지에 대한 연구는 흥미롭다. 그러나 본 연구의 목적에서 벗어나므로 추후연구에서 좀 더 분석해 보려 한다.

산불 확산 시뮬레이션을 통해, 각각의 변수 값이 바뀔 때 연소한 나무의 수를 계산하였으며, 이를 토대로 민감도 분석을 하였다. 산불확산에 있어 세 가지의 산

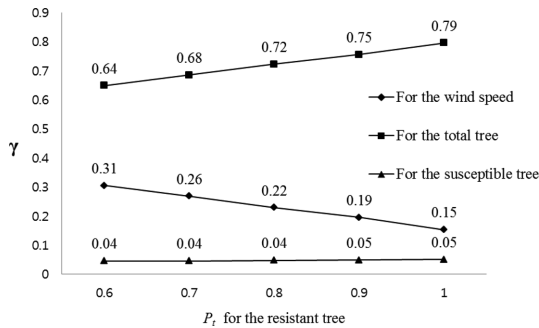


Fig. 4. Sensitivity, γ , of the burnt trees against the ecological variables: wind, the total tree density, and the susceptible tree density.

불확산 요소(바람, 전체나무밀도, 그리고 가연성이 높은 나무밀도) 중 어떠한 것이 산불확산에 더 많은 영향을 미치는지에 대해 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. 먼저 나무의 전체 밀도인 C_{tot} 은 세 가지의 중 가장 높은 상관관계를 보여 주었다. C_s 의 값이 증가할수록 그 민감도도 선형적으로 증가하였다. 바람의 세기인 P_w 는 세 가지 요소 중 두 번째로 큰 영향을 미쳤다. 바람에 의한 효과는 C_s 가 증가할수록 줄어들었다. 그에 반해 가연성이 높은 나무의 밀도에 따른 산불확산 효과는 매우 작았다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 CA 방식으로 구현된 산불모델을 제시하였다. 기존의 방정식 기반 모델에 비해 훨씬 단순한 알고리즘을 가지고 있으나, 비선형성이 강한 복잡한 산불확산 현상에 있어 개략적인 특성을 잘 보여 주었다. 본 연구를 통해서, 바람의 효과가 산불확산에 매우 중요한 요인이 된다는 것을 알 수 있었으며, 서로 다른 수종이 섞여 있는 비율은 상대적으로 산불확산에 기여하는 정도가 작다는 것을 알 수 있었다. 산불확산에 있어 가장 큰 기여 요소는 전체 나무 밀도였다. 본 연구에서 제시한 모델이 산불의 확산 특성을 잘 반영하고 있고, 또한 시뮬레이션 분석 결과가 타당성을 가지는지에 대해 조사하기 위해 몇 가지 타 연구결과와 비교하여 보았다. Babak *et al.*(2009)은 반응확산 모델(reaction-diffusion model)을 사용하여 모든 나무가 동일한 특성을 가지고 공간적으로 균일하다

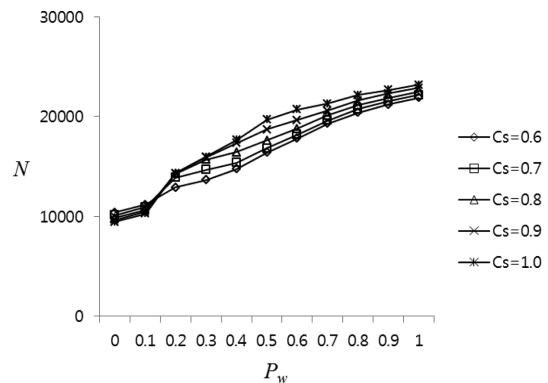


Fig. 5. The plot of the number of burnt trees, N , against the wind intensity, P_w , for different values of the susceptible tree density, C_s .

는 가정하에 바람의 세기와 산불의 전파 속도가 서로 선형적으로 비례한다는 것을 보여 주었다. 본 연구에서 제안한 모델을 활용하여 바람의 세기와 연소된 나무의 관계를 계산해 본 결과, Babak *et al.*(2009)에서 보여준 결과와 잘 일치함을 확인하였다(Fig. 5).

격자기반 모델 가운데 산불확산 예측 연구에 많이 활용되고 있는 모델인 DEVS(Discrete Event System)을 사용하여, Ntairo *et al.*(2004)는 숲을 이루는 식생의 종류에 따라서 바람이 산불확산에 미치는 영향을 연구하였다. 바람의 세기와 확산 정도는 식생의 종류에 상관없이 선형적인 관계를 보여 주었다. 식생으로 가벼운 통나무 관목 숲(logging slash), 덩불이 뒤덮인 숲(chaparral), 그리고 지형이 험한 숲(southern rough)을 서로 비교하였을 때, 덩불 숲에서 가장 빨리 확산되었고, 다음으로 지형이 험한 숲, 그리고 마지막으로 관목 숲의 순서였다. 이러한 관계는 본 모델에서 본다면 P_i 의 값이 서로 다른 경우에 산불 확산 정도가 어떻게 달라지는지에 해당한다고 볼 수 있다. 또한 Ntairo *et al.*(2009)에서는 식생의 종류에 상관없이 바람의 세기가 작을 때는 산불의 확산 정도가 거의 같음을 보여 주었다. 다시 말해, 바람의 세기가 식생의 종류보다 산불확산에 훨씬 더 큰 영향을 주는 요소임을 보여 주는 것이다. 이는, 우리 연구결과에서 보여주는 바와 같이, C_s (식생의 종류로 해석할 수 있음)가 바람의 영향보다 산불확산에 미치는 영향이 3-7.5배 정도 작다는 결과와 잘 일치한다(Fig. 4). 추후 실험연구를 통해, P_i 에 주어진 값이 실제 어떤 나무의 종류에 해당하는지를 결정한다면, Ntairo *et al.*(2004)의 연구 결과와 직접 비교해 볼 수 있을 것이라 여겨진다.

본 모델은 평지의 공간을 가정하고 있다. 그러나 실제 지형 변수는 산불의 확산에 매우 큰 영향을 준다는 것이 많은 실험결과와 야외 관측 자료들이 보여 주고 있다. 본 모델에서는 불 전이 함수를 적절히 조절하여 이러한 지형의 효과를 만들어 줄 수 있다. 이 연구에서 사용한 모델은 확장 가능성이 매우 크다. 왜냐하면 모든 변수의 값들을 확률적으로 사용하기 때문이다. 예를 들면, 다양한 나무 종으로 이루어진 산림을 모델링하고 싶으면, 단순히 P_i 값을 다양하게 가지는 격자를 만들기만 하면 된다. 바람의 효과도 이 논문에서는 한 방향으로 부는 바람만을 가정하고 있으나, 사실상 다양한 방향으로 불거나 또는 시간적으로 방향

이 바뀌는 바람도 쉽게 고려할 수 있다. 그러나 이러한 장점 외에도 단점도 가지고 있다. 그 중에 하나가 공간 스케일과 시간 스케일이 실제 산불이 발생할 때의 상황과 일치하지 않는다는 것이다. 예를 들면, 한 지역에서 산불이 일어났을 때, 내일 이 시간에 이 불이 어떤 지역까지 그리고 어떤 모습으로 확산되어 있는지를 예측하고자 할 때, 제안된 본 모델은 직접 적용하기가 곤란하다. 우리는 이런 문제를 극복하기 위해 실제 실험 자료와 모델의 값들을 비교하는 연구를 진행할 계획을 가지고 있다. 이 연구 결과와 사용한 산불모델이 비록 단순한 가정들 위에 이루어졌음에도 불구하고 복잡한 산불패턴을 잘 기술하였다. 우리는 본 연구에서 제안한 모델이 향후 수정 보완되거나 발전될 다양한 가능성을 가지고 있다고 믿는다.

적 요

산불은 대표적인 산림생태계의 재해 중 하나로 최근, 우리나라에서도 빈번하게 발생하고 있으며, 일반적으로 광범위한 지역에 빠른 속도로 확산되는 특징을 가지고 있다. 바람 및 나무의 종류, 다양한 지형 요소들이 산불 발생 시 급진적 확산에 영향을 주는 요소들이다. 산불의 빠른 확산은 생태계 교란 및 재산 피해, 인명 피해 등을 야기시킨다. 이러한 이유로, 최근 산불에 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 바람 요인이 고려된 산불 패턴 가상 시뮬레이션 단순 모델을 제안하였고, 셀룰라오토마타(Cellular Automata)의 격자 기반으로 구성되었다. 모델의 시뮬레이션을 통하여, 바람의 세기 변화, 주어진 공간에 분포해 있는 나무 전체의 밀도, 그리고, 나무들 가운데 가연성이 높은 나무의 밀도가 산불확산에 미치는 영향을 조사하였다. 민감도 분석 결과, 전체 나무 밀도가 세 가지 요소 중 산불확산에 가장 민감하게 기여하였으며, 그 다음으로는 바람의 영향, 마지막으로 가연성이 높은 나무의 밀도 순으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 산불확산 시뮬레이션 모델 및 분석 결과는 실제 산불 확산 및 억제 전략 수립에 활용되어 질 수 있을 것으로 여겨지며, 아울러 좀 더 현실적인 생태학적 요소들을 모델에 고려함으로써 산불 확산 예측 연구에도 이용되어 질 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국가수리과학연구소 기관고유사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ball, G. L., and D. P. Guertin, 1992: Improved fire growth modeling. *International Journal Wildland Fire* **2**(2), 47-54. doi: 10.1071/WF9920047
- Babak, P., A. Bourlioux, and T. Hillen, 2009: The effect of wind on the propagation of an idealized forest fire. *SIAM Journal of Applied Mathematics* **70**(4), 1364-1388.
- Beer, T., 1991: Bushfire rate-of-spread forecasting: Deterministic and statistical approaches to fire modeling. *Journal of Forecasting* **10**(3), 301-317. doi: 10.1002/for.3980100306
- Berjak, S. G., and J. W. Heame, 2002: An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system. *Ecological Modelling* **148**(2), 133-151.
- Boychuk, D., W. J. Braun, R. J. Kulperger, Z. L. Krougly, and D. A. Stanford, 2009: A stochastic forest fire growth model. *Environmental and Ecological Statistics* **16**(2), 133-151. doi: 10.1007/s10651-007-0079-z
- Cacuci, D. G., M. Ionescu-Bujor, and M. Navon, 2005: *Sensitivity and Uncertainty Analysis, Volume II: Applications to Large-Scale Systems*, Chapman & Hall/CRC Press. Boca Raton.
- Clark, T. L., M. A. Jenkins, J. Coen, and D. Packham, 1996: A coupled atmospheric fire model: convective feedback on fire-line dynamics. *Journal of Applied Meteorology* **35**(6), 875-901.
- Díaz-Delgado, R., F. Lloret, X. Pons, and J. Terradas, 2002: Satellite evidence of decreasing resilience in mediterranean plant communities after recurrent wildfires. *Ecology* **83**(8), 2293-2303.
- Grievank, A., and A. Walther, 2008: *Evaluating derivatives: Principles and techniques of algorithmic differentiation* (2nd ed.). SIAM publisher. Philadelphia. USA.
- Eastman, J. R., 2003: *IDRISI Kilimanjaro Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs Clark University, 13-19.
- Encinas, A. H., L. H. Encinas, S. H. White, A. M. del Rey, and G. R. Sánchez, 2007: Simulation of forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software* **38**(6), 372-378.
- Feunekes, U., 1991: Error analysis in fire simulation models. Master of Science Thesis, University of New Brunswick, Canada.
- Flannigan, M. D., B. J. Stocks, and B. M. Wotton, 2000: Climate change and forest fires. *Science of the Total Environment* **262**(3), 221-229.
- Grassberger, P., 2002: Critical behavior of the Drossel-Schwabl forest fire model. *New Journal of Physics* **4**(17), 1-15. doi: 10.1088/1367-2630/4/1/317
- Halada, L., and P. Weisenpacher, 2005: Principles of forest fire spread models and their simulation. *Journal of the Applied Mathematics, Statistics and Informatics* **1**(1), 3-13.
- Hargrove, W. W., R. H. Gardner, M. G. Turner, W. H. Romme, and D. G. Despain, 2000: Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecological Modelling* **135**(2-3), 243-263.
- Karafyllidis, I., A. Thanailakis, 1997: A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling* **99**(1), 87-97.
- Loibl, W., and T. Toetzer, 2003: Modeling growth and densification processes in suburban regions-simulation of landscape transition with spatial agents. *Ecological Modelling & Software* **18**(6), 553-563.
- Malamud, B. D., G. Morein, and D. L. Turcotte, 1998: Forest fires: an example of self-organized critical behavior. *Science* **281**(5384), 1840-1842. doi: 10.1126/science.281.5384.1840
- Malamud, B. D., G. Morein, and D. L. Turcotte, 2005: Log-periodic behavior in a forest-fire model. *Nonlinear Processes in Geophysics* **12**, 575-585. doi: 10.5194/npg-12-575-2005
- Matsinos, Y. G., and A. Y. Troumbis, 2002: Modelling spatio-temporal dynamics of a community of annual plant species: implications for management of biodiversity. *Ecological Modelling* **149**(2), 71-83.
- McCoy, V. M., and C. R. Burn, 2005: Potential alteration by climate change of the forest-fire regime in the boreal forest of central Yukon Territory. *Arctic* **58**(3), 276-285.
- Ntaimo, L., B. P. Zeigler, M. J. Vasconcelos, and B. Khargharia, 2004: Forest fire spread and suppression in DEVs. *Simulation* **80**(10), 479-500.
- Piñol, J., J. Terradas, and F. Lloret, 1998: Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climatic Change* **38**(3), 345-357.
- Pitts, W. M., 1991: Wind effects on fires. *Progress in Energy and Combustion Science* **17**(2), 83-134.
- Ratz, A., 1995: Long-term spatial patterns created by fire: a model oriented towards boreal forests. *International Journal of Wildland Fire* **5**(1), 25-34. doi: 10.1071/WF9950025
- Vasconcelos, M. J., and D. P. Guertin, 1992: Firemap - simulation of fire growth with a geographic information system. *International Journal Wildland Fire* **2**(2), 87-96. doi: 10.1071/WF9920087