

지형구조와 나무밀도가 산불패턴에 미치는 영향

송학수 · 권오성 · 이상희*

국가수리과학연구소

(2014년 2월 28일 접수; 2014년 5월 14일 수정; 2014년 6월 2일 수락)

Effects of Geological Structure and Tree Density on the Forest Fire Patterns

Hark-soo Song, Oh Sung Kwon and Sang-hee Lee*

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

(Received February 28, 2014; Revised May 14, 2014; Accepted June 2, 2014)

ABSTRACT

Understanding the forest fire patterns is necessary to comprehend the stability of the forest ecosystems. Thus, researchers have suggested the simulation models to mimic the forest fire spread dynamics, which enables us to predict the forest damage in the scenarios that are difficult to be experimentally tested in laboratory scale. However, many of the models have the limitation that many of them did not consider the complicated environmental factors, such as fuel types, wind, and moisture. In this study, we suggested a simple model with the factors, especially, the geomorphological structure of the forest and two types of fuel. The two fuels correspond to susceptible tree and resistant tree with different probabilities of transferring fire. The trees were randomly distributed in simulation space at densities ranging from 0.5 (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 the structure and tree density. 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

최근 지구온난화로 인한 평균 습도 감소 및 기온 상승, 가뭄 등과(Pinol *et al.*, 1998; Flannigan *et al.*, 2000; McCoy and Burn, 2005) 이상기후 발생은 산림 생태계에 많은 영향을 미치며, 또한 산불 발생 빈도수 증가와 산불의 광범위하고 빠른 확산에 큰 영향을 미치고 있다(Malamud *et al.*, 1998). 이러한, 지구온난화로 인한 산불 발생은 이산화 탄소와 에어로졸을 발생시켜 온실가스 효과를 일으키고 태양빛의 지표

반사 정도를 변화시켜 다시 기후변화에 영향을 미침으로써 악순환을 되풀이 하게 된다(Clark *et al.*, 1996). 또한, 산불발생은 산림자원소실과 산림생물을 감소시키고 산림생태계의 불균형 및 산림 구조의 변화 등과 같은 다양한 형태의 악영향을 수반한다. 따라서 산불 발생으로 인한 생태적, 경제적, 사회적 피해를 최소화하고 미연에 방지하기 위해서는 산불에 대한 보다 많은 연구가 필요하다. 산불확산에 영향을 주는 중요한 요소들로는 풍향, 풍속, 산림의 경사 및 연료의 종류, 연료의 두께, 습도, 연료의 수분함량 정도 등 다양하



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

다(Ioannis and Adonios, 1997). 산불확산을 예측하고 그 동역학적 특성을 이해하기 위해서는 이러한 요소들간의 상관관계를 규명해야 하는데 많은 비용부담과 환경적 제약, 그리고, 요소들 간의 복잡한 상호작용 때문에 어려움이 있다(Alexandridis *et al.*, 2008). 이러한 이유로, 기존에 제안된 산불모델에서는 지형을 전혀 고려하지 않거나(Ratz, 1995) 혹은, 분석을 용이하게 하기 위해서 산림구조를 단순히 하나의 동일한 나무로 이루어진 것으로 가정하고 있다(Grassberger, 2002; Malamud *et al.*, 2005).

산불확산 모델을 구현하는 일반적인 시뮬레이션 모델은 크게 확률적 시뮬레이션과 물리적 시뮬레이션으로 나뉜다(Pitts, 1991; Beer, 1991; Halada *et al.*, 2005). 확률적 시뮬레이션 모델은 연료의 밀도와 연료의 종류 및 지형 등 실제 야외에서 획득한 자료를 기반으로 확률 통계적으로 접근하는 특징을 가지며, 모델내의 모든 변수 값이 실험 자료를 토대로 하여 결정되기 때문에 실제 산림에서 산불 발생지점으로부터 산불의 확산과정 및 산불확산 패턴을 보다 정확하게 예측할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 확률적 특성상 같은 초기 조건에 따라 서로 다른 결과를 만들 수 있다는 단점을 가지고 있다. 아울러, 산불확산 요소간의 상호작용에 관한 방대한 데이터를 요구한다는 단점도 가지고 있다.

반면에 물리적 시뮬레이션 모델은 주로 야외에서 또는 실험실에서 획득한 자료 자료를 이용하여 미분방정식 형태의 구조를 가지고 있으며(Andre and Viegas, 1994; Dupuy, 1999), 변수간 상호작용에 대한 분석을 용이하게 해 주는 장점을 가지고 있다. 아울러, 이들 모델에서는 많은 경우 연소 지역에서부터 비 연소 지역으로 하나 또는 여러 개의 에너지 전이과정을 고려하기 때문에 산불확산의 동역학적 특성을 이해하는데 큰 이점이 있다. 하지만 방정식 형태로 다양한 환경적 요인들을 고려하고 구현하기 위해서는 알고리즘이 복잡하며 많은 시간이 소요되는 수치계산 능력과 고성능 계산 환경을 필요로 한다는 것은 단점이 된다고 하겠다.

본 연구에서는 환경요소를 고려하기 용이한 격자기반의 확률적 모델을 제안하였다. 격자기반 방식의 확산 기법은 단순하고 응용 가능 범위가 넓어서(Ball and Gurtin, 1992; Vasconcelos and Geurtin, 1992; Feunekes, 1991), 무질서한 자연현상을 연구하는데 유용하다(Wolfram, 1994). 이러한 이유로 많은 연구자

들은 생태학적 모델링을 함에 있어 격자기반 방식, 그 중에서도 셀룰라오토마타(Cellular Automata, CA)방식을 사용해 오고 있다(Spencer, 1997; Dunkerley, 1999; Sirakoulis *et al.*, 2000). 본 연구에서 제안한 모델도 CA 방식을 사용하였다. 그리고 제안한 모델은 기존의 모델들에서는 고려하지 않은 두 종의 나무로 구성된 산림 구조와 기존의 확립화된 경사(Pimont *et al.*, 2012; Bulter *et al.*, 2007; David *et al.*, 1997)가 아니라 좀더 실제적이고 자연스러운 지형을 기반으로 환경의 영향을 고려하였다. 본 연구에서 사용된 모델을 이용하여 산림에서 산불확산의 패턴 분석과 산불확산 속도 및 산불 후 나무의 생존밀도에 대해서 시뮬레이션 하였으며, 결과에 대해 민감도 분석을 수행하였다.

II. 시뮬레이션 모델과 분석방법

2.1. 지형과 산불확산 모델

본 연구에서 제안한 모델은 200×200 크기의 격자 공간상에 나무와 산불의 상호작용을 표현하였다. 임의의 한 격자 상태(예, 불탄 나무, 타고 있는 나무, 또는 타지 않은 나무)는 이웃하는 격자 상태의 조건에 의해 결정되도록 하는 셀룰라오토마타(Cellular Automata, CA)방식을 사용하였다. 숲은 산불로 부터 전이확률이 높은 나무(Susceptible tree)와 상대적으로 산불 전이 확률이 낮은 나무(Resistant tree)로 구성되어 있으며, 산불의 전이 확률은 각각 1.0과 0.5로 주어졌다(Fig. 1A). 주변에 연소중인 나무가 있다고 하더라도, 확률

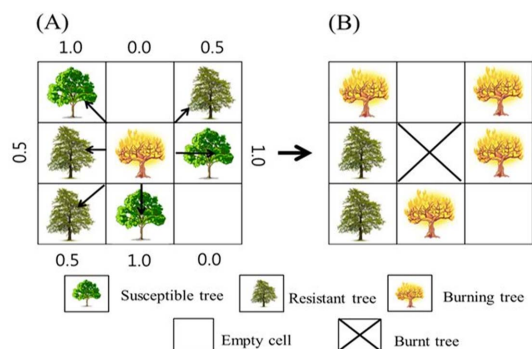


Fig. 1. This figure shows the fire spread from the burning tree in a central cell to the neighboring cells. (A): The fire spreading probability of the neighboring cell is determined by the species of the tree. (B): According the probability ignition of tree is determined at the next step.

에 따라서 산불이 옮겨 붙을 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다(Fig. 1B).

시뮬레이션 초기에 주어지는 전체 나무 밀도(D)는 0.5에서 1.0까지 값을 가지도록 하였다. 이는, D 의 값이 0.4 이하인 경우 산불 확산이 전혀 이루어지지 않았고, 0.4-0.5사이의 값에서는 확산이 조금 일어나다가 멈추는 현상을 보여 주었기 때문이다(Song *et al.*, 2013). D 의 값은 전체공간 격자 갯수(=40,000)에 대한 나무가 있는 격자의 개수 비를 나타낸다. 시뮬레이션 격자공간상에 이러한 밀도의 나무 분포를 만들기 위해서, 각각의 공간 셀에 0과 1사이의 값을 가지는 랜덤수(R_D)를 발생시켜서 D 의 값과 비교하였다. R_D 값이 D 의 값보다 작으면 그 해당 격자에는 나무가 위치하도록 하였다. 주어진 격자에 나무가 위치한다는 의미를 $E_x=1$ 으로 표현 하였으며, 격자의 상태가 빈 공간일 경우 $E_x=0$ 으로 나타내었다.

$$E_x(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{when } R_D(i,j) < D(\text{for total trees}) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$E_x=1$ 로 부여된 격자들(나무가 위치한 격자) 가운데, 임의의 수를 발생시키고 이 수를 0.4와 비교하였다. 발생한 수가 0.4보다 작으면 1을 부여하고 그 위치에는 산불전이확률이 높은 나무종을 위치시키고 그 반대의 경우는 산불전이확률이 낮은 나무종을 위치시켰다. 다시 말해, 시뮬레이션 초기조건으로 산불 전이 확률이 높은 나무의 밀도는 전체 나무밀도의 40%로 주어졌고, 산불전이확률이 낮은 나무의 밀도는 60%로 주어졌다. 나무종의 밀도변화와 산불확산정도와의 상관관계가 있을수 있으나, 본 연구에서는 이에 대한 분석은 하지 않았으며 추후 연구로 남겨두기로 하였다. 지형의 공간구조를 나타내기 위해서 우리는 Neutral landscape 방법을 사용하였다(Gardner *et al.*, 1987). (i, j) 격자로 구성된 공간상에 다음과 같은 함수를 만든다. 200×200 의 $[i, j]$ 메쉬를 구성한다. 이를 이용하여 다음과 같은 함수를 만든다.

$$\text{amp}(i,j) = (i^2 + j^2)^{-(H+1)/2}$$

그러면 $H = -1$ 일 경우 amp는 1인 상수가 되고 H 가 커질수록 amp의 지수는 작아지게 된다. 즉 H 가 커질수록 $(0, 0)$ 근처의 값들이 커지게 된다. 여기에 0~1사이의 랜덤 숫자 N 을 이용하여 $\text{amp}(i,j)e^{2\pi iN}$ 을 200×200 격자의 원소에 대응 시킨다. 격자의 이들 원

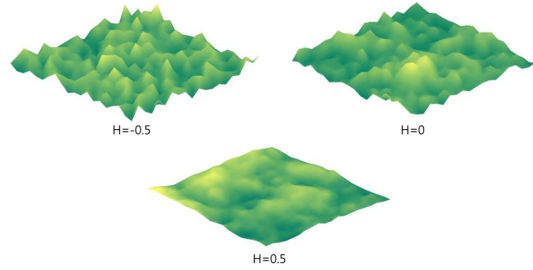


Fig. 2. The parameter H decides the landscape structure. In particular, as H is increasing, the difference of altitude is decreasing.

소값들은 하나의 행렬로 표현 되어질 수 있는데, 이 행렬을 역푸리에 변환하여 절대값을 취하면 H 값에 따라서 경사의 기울기가 변하는 공간함수를 구할 수 있다. 즉, 지형의 형태는 H 변수 값에 의해 정량화 되어진다. H 값이 높을수록 완만한 경사의 지형이 되고 낮을수록 급경사의 지형을 의미한다. 본 연구에서는 $-0.5 \leq H \leq 0.5$ 범위의 지형에 대해서 분석하였다. 이 범위 밖의 값에 대해서는 시뮬레이션 결과값이 거의 변하지 않았다. Fig. 2는 특정한 H 값에 대한 대표적 지형구조를 보여준다.

생성된 지형을 토대로 각 격자에 대한 경사를 계산하였다. 계산 영역 내 임의의 n 번째 셀을 C_n 이라고 하고 그 주변의 8셀을 $C_{n,j}(j \leq 8)$ 이라 하였다. 만일, $C_{n,j}$ 가 발화 중이라면 C_n 으로 산불이 전이될 확률이 생기는데 이 중에서 두 셀 사이의 경사가 전이에 미치는 영향을 $P_{s,j}^n$ 라 하면 $P_{s,j}^n$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_{s,j}^n = \begin{cases} \frac{4 \tan^{-1}(h_n - h_{n,j})}{\pi}, & \text{for } h_n - h_{n,j} \geq 0 \\ 0, & \text{for } h_n - h_{n,j} < 0 \end{cases}$$

여기서 $h_n, h_{n,j}$ 는 각 셀 $C_n, C_{n,j}$ 에서의 높이이므로 $\tan^{-1}(h_n - h_{n,j})$ 는 두 셀 사이의 경사도가 된다. 현재 지형은 높이가 0에서 1사이의 값을 가지도록 되어 있으므로 최대 경사도는 $\pi/4$ 가 되고 이때 $P_{s,j}^n = 1$ 이 된다. 경사도가 음수인 경우, $h_n - h_{n,j} < 0$ 으로 정의 하였으며 경사가 산불확산에 미치는 영향은 없는 것으로 가정하였다. 이는 Butler *et al.*(2007)와 Pimont, *et al.*(2012) 그리고 David *et al.*(1997)에서 보고된 연구결과를 반영한 것이다. 즉 두 셀 사이의 경사가 산불의 전이에 미치는 영향 $P_{s,j}^n$ 는 0과 1사이의 값

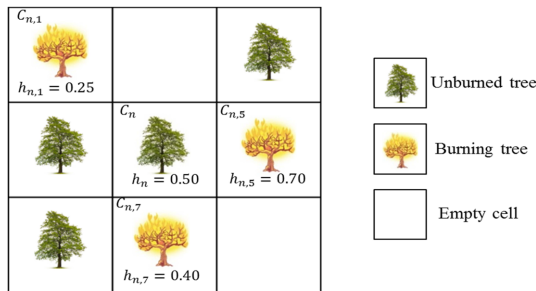


Fig. 3. The probability of the slop is determined by the height of burning trees.

을 가지고 0인 경우 영향이 없고, 1인 경우 최대의 영향을 받게 된다. 이 $P''_{s,j}$ 를 이용하여 셀 C_n 이 주변의 셀들과의 지형 관계에 의해 받는 영향, P''_s 을 정의할 수 있게 된다. N 을 셀 C_n 주위에 있는 셀들 중 현재 발화중인 셀들의 수라고 하면, P''_s 는 아래의 식을 만족한다.

$$P''_s = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P''_{s,j})$$

다음과 같은 예시를 통하여 P''_s 을 실제로 구해 보면, Fig. 3의 현재 C_n 주위에는 3개의 불타는 나무가 있으므로 먼저 3개의 $P''_{s,j}$ 를 구한다. $C_{n,1}$ 과 C_n 의 높이 차이가 0.25이므로 위의 수식을 이용하면 $P''_{s,1} = 0.312$ 가 된다. 같은 방식으로 $P''_{s,5} = 0$, $P''_{s,7} = 0.127$ 이 됨을 알 수 있다. 그러므로 $P''_s = 1 - (1 - 0.312)(1 - 0.127) = 0.399$ 을 얻을 수 있다.

최종적으로, 나무가 위치하고 있는 격자와 그 주변에 하나 이상의 불이 붙은 나무가 위치할 때, 나무가 있는 격자에 대한 산불 전이 확률(P_n)는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$P_n = P_i + (1 - P_i)P''_s$$

여기서 P_i 는 아무런 외부조건이 없는 경우 대상 나무가 탈 확률로 가연성이 높은 나무의 경우 1의 값을 그리고 가연성이 낮은 나무의 경우 0.5의 값을 가진다.

시뮬레이션 초기에 격자공간의 중심점(100, 100)에서 산불이 시작되도록 하였다. 이를 위해, 중심점에는 하나의 가연성이 높은 나무를 위치시켰다. 각각의 경우에 대해, 40번의 반복 시뮬레이션을 수행하였으며, 결과로는, 그 평균값과 편차를 계산하였다.

2.2. 산불 패턴 분석방법

2.2.1. 산불의 확산 정도

산불의 확산을 나타내는 가장 중요한 지표 중 하나가 얼마나 빨리 산불이 확산되어 가는가 하는 것이다. 우리는 이를 확산속도(Rate of fire spreading, ROFS)라는 변수로 표현하였다. 시뮬레이션이 종료되는 마지막 시점(iteration time, T)에서 산불 패턴의 경계 좌표들을 추출하여 각각을(X_j, Y_j)라 하면 발화점($X_s, Y_s = (100, 100)$)을 기준으로 동(E), 서(W), 남(S), 북(N) 4방향에 대한 아래와 같은 좌표 그룹을 만들 수 있다. 아래와 같은 4개의 방향을 고려한 이유는, 초기의 나무 분포에 따라서 산불의 확산이 방향 별로 균일하지 않는 경우가 있기 때문이며, 아울러 추후 연구에서 바람 등과 같은 환경요소들을 고려하게 되면 방향성별 분석이 필수적이기 때문이다.

$$E = \{(X_j, Y_j) : X_j \geq X_s\}, W = \{(X_j, Y_j) : X_j \leq X_s\}$$

$$S = \{(X_j, Y_j) : Y_j \leq Y_s\}, N = \{(X_j, Y_j) : Y_j \geq Y_s\}$$

위 4개의 그룹을 사용하여 각 방향의 ROFS를 계산해 보면, 북쪽으로의 ROFS를 $ROFS_N$ 라 칭하고 그룹 N 의 원소의 개수를 n 개라 하면, 그룹 N 의 원소들의 북쪽으로의 평균 이동거리 L_N 는 아래와 같다.

$$L_N = \frac{1}{n} \sum_{(X_j, Y_j) \in N} (Y_j - Y_s)$$

따라서 $ROFS_N = L_N/k$ 를 얻을 수 있고 다른 방향의 ROFS역시 같은 방식으로 계산이 가능하다. 본 논문에서는 위에서 구한 4개의 ROFS의 평균을 각 시뮬레이션의 대표 ROFS로 취하였다.

2.2.2. 산불패턴의 경계면 구조

산불의 확산 속도와 더불어 산불에 의해 탄 영역의 가장자리 모습에 대한 정보도 산불확산을 이해하는데 매우 중요하다. 이는 산림의 구성과 다양한 환경요소들에 대한 영향이 복합적으로 반영되어 있기 때문이다. 여기서는, 경계면 균일성정도(Surface Roughness, SR)로 정의 하였으며, 그 계산 과정은 아래와 같다.

$$RL_j = \max\{|X_j - X_s|, |Y_j - Y_s|\}$$

여기서 RL_j 는 경계면 상의 임의의 한 점(X_j, Y_j)와 발화점(X_s, Y_s)사이의 거리이다. 이를 이용하여 경계면 위의 N 개의 점의 평균 $\bar{L} = \sum_{j=1}^N RL_j / N$ 을 구하고 SR은 다음과 같이 정의하였다.

$$SR = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |RL_j - \bar{L}|$$

산불패턴의 경계면이 들쭉날쭉한 복잡한 구조를 가질수록 SR값은 증가한다. 본 시뮬레이션 연구에서는 $T(\text{iteration time})=50$ 시점에서의 SR을 계산하였다.

2.2.3. 나무의 생존밀도 (ROUT)

산불이 지나간 영역 내에서 타지 않고 살아남은 나무의 개수와 해당 영역 내에서 초기에 주어진 나무의 생존밀도(Rate of unburned trees, *ROUT*)를 계산하였다. 이 변수는 숲의 나무 분포와 나무의 가연성 정도에 깊은 관련성이 있다. 예로, 가연성이 낮은 나무로만 구성된 숲이라면, 나무의 생존밀도도 높아질 것이다. 기준이 되는 시점은 시뮬레이션이 끝나는 마지막 스텝으로 다음과 같이 계산하였다.

$$ROUT(\%) = \frac{\text{산불패턴내에서 타지 않은 나무의 개수}}{\text{산불패턴내에서 초기에 배치된 나무의 개수}} \times 100$$

*ROUT*은 산불이 지나간 자리에 생존한 나무가 전혀 없을 경우 0의 값이 된다.

2.2.4. 민감도분석

본 연구에서는 H 와 D 값을 변화시키면서 산불의 패턴을 분석하였다. 우리는 H 와 D 가 *SR*, *ROFS*, 그리고 *ROUT*의 결과에 얼마나 영향을 미치는지를 알기 위해서, 민감도(Sensitivity) 분석을 아래와 같이 하였다(Cacuci *et al.*, 2005; Grievank and Walther, 2008).

$$\gamma = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \left[\frac{\partial}{\partial X} N(H, D) \right]_{H(j), D(k)}}{J \cdot K}$$

여기에서 γ 는 X 에 대한 N 의 민감도이며 여기서 N 은 *SR*, *ROFS*, *ROUT*에 대응하는 값이고 $X=H, D$ 이다. 그리고 $H(j)=-0.75+0.25j(j=1, 2, \dots, 5)$, $D(k)=0.4+0.1k(k=1, 2, \dots, 6)$ 로 계산된다. 구체적으로 위의 식을 이용하여 계산하면, H 에 대한 민감도는 다음과 같다.

$$\gamma = \left| \frac{1}{30} \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^5 \partial_H N(D_k, H_j) \right| \sim \sum_{k=1}^6 \frac{-3N(D_k, -0.5) + N(D_k, -0.25) - N(D_k, 0.25) + 3N(D_k, 0.5)}{15}$$

D 에 대한 민감도 역시 같은 방식으로 계산 가능하다.

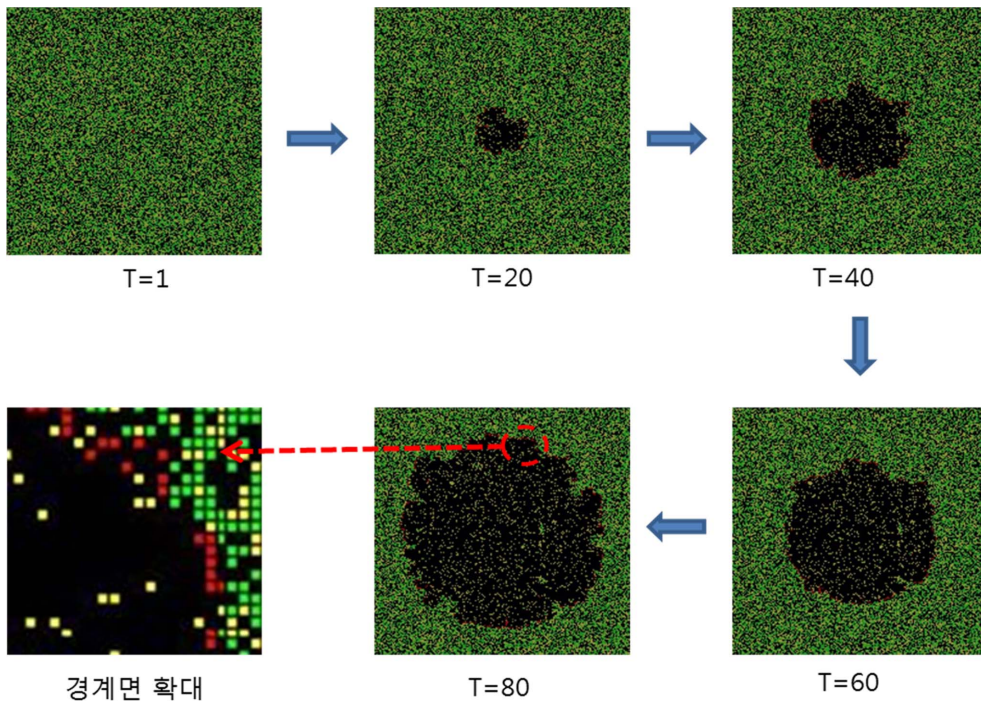


Fig. 4. Snap shots of fire spreading according to time $T(=1, 20, \dots, 80)$.

III. 분석결과

Fig. 4는 $H=0$ 의 값을 가지는 지형에 대한 산불의 초기 시작 시점($T=1$)으로부터 끝나는 시점($T=80$)까지의 산불 확산 과정을 보여준다. 초기조건으로 가연성이 높은 나무는 전체나무 밀도의 40%, 그리고 가연성이 낮은 나무밀도 60%로 주어졌다. 그림에서 가연성이 높은 나무는 녹색 점으로 표시되고 가연성이 낮은 나무는 노란색 점으로 나타내었다. 연소된 나무와 빈 공간은 검정색, 연소중인 나무는 붉은색으로 표시되었다(확대된 그림 참조). 산불이 지나간 영역 안에 연소

Table 1. The 40 times averages of SR, ROFS and ROUT for different values of H (-0.5, -0.25, 0.0, 0.25, 0.5) and D (=0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0). The SD is significant difference which variance of H values (-0.5, -0.25, 0.0, 0.25, 0.5)

D	H	ROFS	SR	ROUT (%)
0.5	-0.5	0.16507 a	6.29768 a	4.85998 ab
	-0.25	0.14195 b	6.19590 a	5.15612 ab
	0	0.15875 ab	6.07807 a	4.73022 a
	0.25	0.13974 b	6.82196 a	5.46887 b
	0.5	0.14066 b	6.71960 a	4.90284 b
0.6	-0.5	0.23650 a	5.61034 a	9.45552 a
	-0.25	0.22081 a	5.69217 a	9.19557 a
	0	0.21770 a	6.11240 ab	9.79712 ab
	0.25	0.19047 b	6.19340 ab	10.34895 b
	0.5	0.15740 c	6.54625 b	10.52715 b
0.7	-0.5	0.52947 a	3.50421 ab	10.55328 a
	-0.25	0.52276 a	3.45256 a	10.76333 b
	0	0.49568 b	3.54526 ab	11.22197
	0.25	0.46578	3.68560 bc	11.97570
	0.5	0.44775	3.82245	12.58348
0.8	-0.5	0.63661 a	2.20845 a	11.80304 a
	-0.25	0.63398 a	2.25849 ab	12.09677 b
	0	0.62716 b	2.31218 abc	12.68935
	0.25	0.60770	2.36564 bc	13.57167
	0.5	0.61237	2.43046 c	14.28461
0.9	-0.5	0.67972 a	1.37794 a	13.12057 a
	-0.25	0.67660 ab	1.39115 a	13.44349 b
	0	0.67519 bc	1.41095 a	14.09386 c
	0.25	0.67281	1.48632 b	15.06644 d
	0.5	0.66758	1.55558	16.04759 e
1.0	-0.5	0.70240 a	0.80848 a	14.28708 a
	-0.25	0.70219 a	0.82867 a	14.73727 b
	0	0.69949 b	0.82426 a	15.59321 c
	0.25	0.69750 c	0.87022 b	16.68778 d
	0.5	0.69476 d	0.90534 b	17.82140 e

되지 않고 남는 나무(검은색 영영안의 녹색과 노란색 점들)가 있음을 볼 수 있다.

Table 1은 다양한 지형구조(H)와 전체나무밀도(D)에 대한 시뮬레이션 결과값을 보여준다. 전체 나무밀도가 낮으면 연소중인 나무로부터 이웃하는 주변의 나무가 많지 않아서 산불패턴의 경계면(불탄 나무의 가장자리에 위치한 나무위치들)의 불균일성(SR)이 높아졌다. 나무 밀도(D)가 높아질수록 이웃하는 나무가 많아져서 산불이 공간적으로 골고루 잘 확산 되어지고 이는 산불패턴 경계면의 불균일성을 줄여주었다. 반면에, 지형구조의 증가에 따라서 산불패턴 경계면 모양의 불균일성이 증가하는 경향을 보여주지만, 그 증가경향은 상대적으로 매우 작았다. 산불확산속도(ROFS)의 경우, 전체나무밀도가 증가할수록 커지는 경향을 보였다. 이는 이웃한 나무들이 서로 밀집하게 위치해 있기 때문에 산불이 옮겨 불기 쉽기 때문이다. 아울러, 전체나무 밀도 값이 0.6과 0.7일 때는 지형이 완경사 일수록 감소하는 경향을 보였으며, 전체나무밀도가 높아질수록 경사의 영향을 거의 받지 않았다. 높은 나무밀도로 인해 경사 효과가 희석되었기 때문이다. 생존나무의 밀도(ROUT)는 전체나무밀도와 지형의 경사도가 증가함에 따라 같이 증가하는 추세를 보여 주었다. 하지만 전체나무밀도가 0.5일 경우는 산불의 확산이 잘 이루어지지 않기 때문에 생존나무밀도 증가 경향성이 거의 나타나지 않았다.

Fig. 5는 H 와 D 가 SR, ROFS, 그리고 ROUT에 어느 정도의 영향을 미쳤는지를 보여주는 민감도 계산 결과값이다. D 가 H 에 비해 상대적으로 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 상대적인 H 의 영향력은 $ROUT(7.65\%) > SR(3.14\%) > ROFS(1.30\%)$ 순서였다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 지형의 구조와 나무밀도가 산불확산 패턴에 어떤 영향을 주는지에 대해서 산불확산속도(ROFS), 산불패턴의 경계면 균일성정도(SR), 그리고 연소 후 살아남은 나무의 밀도(ROUT)의 관점에서 분석하였다. 시뮬레이션 결과는 전체 나무 밀도가 산불 확산에 있어 매우 큰 영향을 주고, 지형구조는 다소 상대적으로 적은 영향을 준다는 것을 보여 주었다. 그러나 실제로 이들 요소는 서로간에 밀접한 상관관계를 가지고 있다. 본 연구결과는 지형구조와 바람의 속도

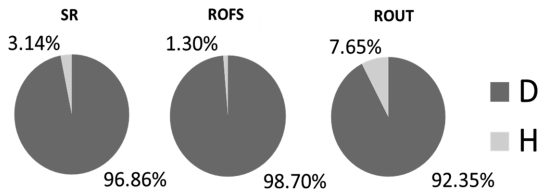


Fig. 5. The proportion of the sensitivities for D and H with respect to SR, ROFS and ROUT.

및 방향이 서로 독립인자라는 가정하에 나온 것이기 때문에, 비교하는 지형의 구조가 심하게 차이가 나지 않고 바람도 강하게 불지 않는 산에 대해서 적용이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안한 산불확산 모델은 지형의 경사 값에 따른 산불의 확산 정도를 확률 분포 값으로 전환하였다는 점에서 기존 모델들과의 차별성을 가진다. 특히, 경사 값과 전이확률간의 상관관계는 실험자료를 토대로 만들었기 때문에 본 모델을 이용하여 실제 상황에 적용할 때 어느 정도의 예측 타당성을 높여 줄 수 있다. 실험 자료는 Pimont *et al.*(2012)와 Bulter *et al.*(2007)에 의해 발표된 자료를 참조하였다. 추후 연구에서, 지형에 대한 전이확률식에 지형에 따른 복잡한 바람의 영향을 포함하고자 한다. 아마도, 지형에 따라서 변화하는 바람의 방향과 세기를 전이 확률식에 추가하는 과정을 통해 바람 효과를 포함 시킬 수가 있을 것으로 여겨진다. 바람의 방향과 세기는 유체의 흐름을 기술하는 Navier-Stokes 방정식을 지형 경계 면에 대해 수치 해석함으로써 얻을 수 있을 것이다. 이 방법을 통해서, Song and Lee(2013)에서 제안한 모델을 일반화 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

적 요

산불 확산 패턴 분석은 산림 생태계 안정화를 이해하는데 중요한 요소이다. 하지만 규모의 문제로 인해 실제적인 실험이 불가능하여 많은 학자들이 시뮬레이션 모델을 이용하여 산불 확산의 행동기작을 이해하고 산림 피해를 예측하였다. 그러나 많은 모델들이 연료의 종류, 바람, 습도 같은 여러 환경 요소들의 복잡한 관계를 표현하는데 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 지형의 구조와 두 종의 나무들로 구성된 산림에서 미치는 영향을 분석하는 간단한 모델을 제안하였다. 두 종의 나무는 가연성이 높은 나무와 가연성이 낮은

나무가 있으며, 서로 다른 산불 전이 확률을 가지고 있다. 전체 나무는 시뮬레이션 공간에 0.5에서 1.0까지의 비율로 무작위로 배치된다. 가연성이 높은 나무는 가연성이 낮은 나무 보다 높은 산불 전이 확률을 가진다. 전소한 나무의 수를 기준으로 지형의 구조와 전체 나무의 밀도가 산불 확산에 얼마나 영향을 미치는지 민감도를 분석하였다. 우리는, 본 논문에서 제시한 모델이 앞으로 산불 확산 패턴을 연구하는데 유용할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국가수리과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

Alexandridis, A., D. Vakalis, C. I. Siettos, and G. V. Bafas, 2008: A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. *Applied Mathematics and Computation* **204**, 191-201.

Andre, J. C. S., and D. X. Viegas, 1994: A strategy to model the average fireline movement of a light to medium intensity surface forest fire. *In: Proc. of the 2nd International Conference on Forest Fire Research*, 221-242.

Ball, G. L., and D. P. Guertin, 1992: Improved regrowth modeling. *International Journal Wildland Fire* **2**, 47-54.

Beer, T., 1991: Bushfire rate-of-spread forecasting: Deterministic and statistical approaches to fire modeling. *Journal of Forecasting* **10**, 301-317.

Butler, B. W., W. R. Anderson, and E. A. Catchpole, 2007: Influence of Slope on Fire Spread Rate. *Management and Policy*, 75-85.

Cacuci, D. G., M. Ionescu-Bujor, and M. Navon, 2005: Sensitivity and Uncertainty Analysis: Applications to Large-Scale Systems, vol 2, CRC Press, Boca Raton

Clark, T. L., M. A. Jenkins, J. Coen, and P. David, 1996: A Coupled Atmospheric Fire Model: Convective Feedback on Fire Line Dynamics. *Journal of Applied Meteorology* **35**, 875-901.

Dupuy, J. L., 1999: An analysis of semi-empirical and physical models for fire spread in wildland fuels. *In: G. Eftichidis, P. Balabanis, A. Ghazi, Proc. Of the Advanced Study Course on Wildfire management, Algosystem S, A., Athens*, 419-438.

Dunkerley, D. L., 1999: Banded chenopod shrublands of arid Australia: modeling responses to interannual rainfall variability with cellular automata. *Ecological Modelling*

- 121, 127-138.
- Gardner, R. H., B. T. Milne, M. G. Turner, and R. V. O'Neill, 1987: Neutral models for the analysis of broad-scale landscape pattern. *Landscape Ecology* **1**, 19-28.
- Grievank, A., and A. Walther, 2008: Evaluating derivatives, Principles and techniques of algorithmic differentiation. SIAM publisher. Philadelphia
- Feunekes, U., 1991: Error analysis in fire simulation models. MSc Thesis, University of New Brunswick.
- Flannigan, M. D., B. J. Stocks, and B. M. Wotton, 2000: Climate change and forest fires. *Science of the Total Environment* **262**, 221-229.
- Grassberger, P., 2002: Critical behavior of the Drossel-Schwabl forest fire model. *New Journal of Physics* **4**, 1-15.
- Halada, L., and P. Weisenpacher, 2005: Principles of forest fire spread models and their simulation. *Journal of the Applied Mathematics, Statistics and Informatics* **1**, 3-13.
- Ioannis, K., and T. Adonios, 1997: A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling* **99**, 87-97.
- Malamud, B. D., G. Morein, and D. L. Turcotte, 1998: Forest-fires: an example of self-organized critical behavior. *Science* **281**, 1840-1842.
- 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.
- 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**, 276.
- Pimont, F., J. L. Dupuy, and R. R., Linn, 2012: Coupled slope and wind effects on fire spread with influences of fire size: a numerical study using FIRETEC. *International journal of wildland fire* **21**, 828-842.
- Pinol, J., J. Terradas, and F. Lloret, 1998: Climate Warming, Wildfire Hazard, and Wildfire Occurrence in Coastal Eastern Spain. *Climatic Change* **38**, 345-357.
- Pitts, W. M., 1991: Wind Effects on Fires. *Progress in Energy and Combustion Science* **17**, 83-134.
- Ratz, A., 1995: Long-term spatial patterns created by fire: a model oriented towards boreal forests. *International Journal of Wildland Fire* **5**, 25-34.
- Spencer, M., 1997: The effects of habitat size and energy on food web structure: An individual-based cellular automata model. *Ecological Modelling* **94**, 299-316.
- Sirakoulis, G. C., I. Karafyllidis, and A. Thanailakis, 2000: A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation. *Ecological Modelling* **133**, 209-222.
- Song, H. S., and S. H. Lee, 2013: Sensitivity Analysis on Ecological Factors Affecting Forest Fire Spreading: Simulation Study. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**, 1-8.
- Song, H. S., W. Jeon, and S. H. Lee, 2013: A simulation model for the study on the forest fire pattern. *Journal of The Korea Society for Simulation* **22**, 101-107.
- Vasconcelos, M. J., and D. P. Guertin, 1992: Firemap: simulation of fire growth with a geographic information system. *International Journal Wildland Fire* **2**, 87-96.
- Weise, D. R., and G. S. Biging, 1997: A Qualitative Comparison of Fire Spread Models Incorporating Wind and Slope Effects. *Forest Science* **43**, 170-180.
- Wolfram, S., 1994: Cellular Automata and Complexity. Addison-Wesley Publishing Company.