

산불확산패턴 연구를 위한 시뮬레이션 모델

송학수¹ · 전원주¹ · 이상희^{1†}

A Simulation Model for the Study on the Forest Fire Pattern

Hark-Soo Song · Wonju Jeon · Sang-Hee Lee

ABSTRACT

Because forest fires are predicted to increase in severity and frequency under global climate change with important environmental implications, an understanding of fire dynamics is critical for mitigation of these negative effects. For the reason, researchers with different background, such as ecologists, physicists, and mathematical biologists, have developed the simulation models to mimic the forest fire spread patterns. In this study, we suggested a novel model considering the wind effect. Our theoretical forest was comprised of two different tree species with varying probabilities of transferring fire that were randomly distributed in space at densities ranging from 0.0 (low) to 1.0 (high). We then studied the distributional patterns of burnt trees using a two-dimensional stochastic cellular automata model with minimized local rules. We investigated the time, T , that the number of burnt trees reaches 25% of the whole trees for different values of the initial tree density, fire transition probability, and the degree of wind strength. Simulation results showed that the values of T decreased with the increase of tree density, and the wind effect decreased in the case of too high or low tree density. We believe that our model can be a useful tool to explore forest fire spreading patterns.

Key words : Forest fire spreading speed, cellular automata, forest ecosystem.

요약

최근 지구 온난화 현상으로 이상기후가 세계 곳곳에서 발생하고 있으며, 이는 빈번한 산불 발생 및 산불의 대형화에 많은 기여를 하고 있다는 것이 보고되고 있다. 산불은 재산피해, 인명피해 뿐만 아니라 특히, 생태계 파괴를 촉진시키는 매우 심각한 요인 중의 하나이다. 산불로 인한 생태계 파괴 문제를 해결하기 위한 방안으로, 다양한 산불확산 및 패턴 수리모델이 개발되어져 왔다. 본 연구에서는, 바람 요인이 고려된 산불패턴을 시뮬레이션 할 수 있는 수리 모델을 제안하였다. 모델은 격자기반위에서 구성되었으며 셀룰라오토마타 방법을 사용하였다. 모델에서, 숲은 불이 쉽게 옮겨 붙는 나무와 그렇지 않은 나무 두 종류로 구성되었다. 산불이 확산되는 과정에서 연소된 나무의 개수가 전체 시뮬레이션 격자개수의 25% (= 10,000) 되는 시점(T)을 세 개의 독립변수인, 전체 나무밀도, 불 전이 확률이 큰 나무 밀도, 그리고 바람의 세기에 대해 어떤 영향을 받는지를 조사하였다. 나무 밀도가 커질수록, T 의 값은 줄어들었고, 바람의 세기가 커질수록 T 의 값이 줄어들었다. 나무밀도가 너무 크거나 작은 경우, 바람의 효과가 감소하였다. 본 연구에서, 제안한 산불확산모델은 실제 산불 문제에 적용되어 효과적 대응방안 마련에 많은 도움이 될 것으로 예상된다.

주요어 : 산불확산속도, 셀룰라오토마타, 산불패턴, 산림생태계

1. 서론

산불은 대표적인 산림 재해중 하나로 일반적으로 광범위한 지역에 신속하게 피해를 입히는 특성을 가지고 있으며^[1], 생물의 다양성 감소, 목재 등 임산물의 손실, 관광객 감소 등 생태학적, 경제적, 사회적 측면에 다양한 영향을 미치며 지속가능한 산림경영을 불가능하게 한다^[2]. 뿐만

접수일(2012년 12월 20일), 심사일(2013년 6월 21일),
게재 확정일(2013년 6월 21일)

¹⁾ 국가수리과학 연구소 융복합수리과학부

주 저 자: 송학수

교신저자: 이상희

E-mail: sunchaos@nims.re.kr

아니라 산불은 자연생태계의 주요한 교란요인중 하나로 산림 내 존재하는 가연성 물질들을 연소시킴으로써 생물량의 급격한 감소와 군집구조의 변화를 일으킨다³⁾. 또한 최근의 연구결과에 따르면 지구온난화와 동반된 평균 기온증가에 따른 습도감소, 강수일수 감소 등에 의해 산불 발생과 대형 산불 발생 위험성이 증가하고 있다고 보고되고 있다^{4,6)}. 반대로 산불 발생으로 인한 온실가스와 에어로솔의 증가 및 지표반사도 변화가 다시 기후변화에 영향을 미치게 되는 것이다⁷⁾.

산불 발생 조건은 연료(나무 등), 산소, 열 3가지 요소가 필요하며, 발생한 산불은 연료의 종류, 기상, 지형요인의 영향을 받아 연소형태와 강도가 달라진다⁸⁾. 산불의 확산에 있어 중요한 인자들은 풍속, 지형, 경사, 산림연료의 수분함량, 산림연료의 무게, 연료의 종류, 상대습도 등 다양하다. 풍향과 풍속은 산불확산에 있어 중요한 인자 중 하나 이다⁹⁾. 산불의 확산은 기후, 발화, 식생의 종류, 수분의 함량 및 지형 등 복잡한 상호작용을 가지고 있으므로¹⁰⁾ 산불의 패턴을 분석하여 어떤 환경요인이 패턴 형성에 어느 정도의 영향을 주었는지를 이해하기는 어렵다. 이러한 이유로, 시뮬레이션 연구는 산불의 확산 패턴을 분석하고 이해하는데 대안적인 접근법으로 사용되어 오고 있다. 이러한 시뮬레이션 모델들은 일반적으로 확률적 시뮬레이션과 결정론적 시뮬레이션으로 구분 될 수 있다¹¹⁻¹³⁾. 확률적 시뮬레이션 모델은 일반적으로 연소 파라메타인 연료의 종류와 연료의 습도정도 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 진행 될 수 있는지에 대해 예측 할 수 있다. 하지만 실험으로부터 얻어진 산불의 파라메타간 상호작용에 관한 방대한 데이터를 요구 하는 단점을 가지고 있다. 반면에 결정론적 시뮬레이션 모델은 전 역적 에너지 밸런스 방정식을 사용하며, 비 연소 연료로 전이되는 에너지가 연료 연소에 의해 방출되는 에너지에 비례한다는 가정에 기초한다. 이러한 모델들은 연소 지역으로부터 비 연소 연료의 하나 혹은 몇 가지의 에너지 전이 과정을 고려한 것들로서, 그러한 에너지 전이 과정의 고려는 산불 확산 동역학을 이해하는 데에 도움이 된다. 게다가 이러한 접근 방식은 실제조건하의 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 귀결 되

는 경우가 많고¹⁴⁾ 더 정확한 산불 확산 예측을 위해서는 많은 환경적 요인들을 고려되어야 하는 경우에 구현 알고리즘이 매우 복잡해 질수 있다. 본 연구에서 제안하는 모델은 확률적 시뮬레이션 모델로서 셀룰라오토마타 방식을 사용하여 모델링 되었다. 셀룰라오토마타는 Von Neumann에 의해 처음 도입된 레스터 방식의 확산 기법으로 단순성과 응용가능성이 높아 현재까지 널리 이용되고 있다^{15,16,17)}. 처음 셀룰라오토마타 방법은 1950년대 초 물리학, 화학, 생물학, 수학, 컴퓨터공학 분야에서 다양한 동적 현상을 연구하는데 사용되었다. 셀룰라오토마타의 원리 및 특성은 무질서 시스템과 인공생명을 연구하는데 있어 중요한 수단으로 복잡한 자연현상을 시뮬레이션을 통한 간단한 계산방식을 사용 할 수 있다^{18,19)}. 게다가 생태학적 모델링에 있어 응용범위가 넓다^{20,21)}. 셀룰라오토마타는 셀의 상태가 자기 자신 및 인접한 셀 상태의 국소적인 상호작용에 의해 결정되게 된다.

셀룰라오토마타는 Von Neumann neighborhood 방식과 Moore neighborhood 방식으로 대표되며 Von Neumann neighborhood 방식은 임의의 (i, j)셀에 대해서 대각선 셀의 상태는 고려하지 않고 상하좌우에 위치한 (i-1, j), (i, j-1), (i, j+1), (i+1, j)의 셀의 상태를 확인하고 확산 여부를 결정하는 방식이다. 반면에 Moore neighborhood 방식은 (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 셀의 상태에 따라 매 스텝마다 결정되게 하는 방식을 말한다(Fig. 1 참조). 본 연구에서, 우리는 산불의 좀 더 세부적인 행동을 표현하기 위해서 Moore 방식을 선택하였다. 기존에 제안된 대부분의 기존 산불모델에서는 하나의 나무 종을 고려하고 바람의 효과를 고려하지 않거나 혹은 단순한 바람을 묘사하는 행렬만을 고려하

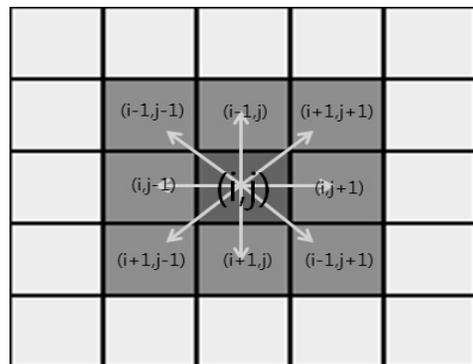


Fig. 1. Moore's neighborhood

였다^[22]. 본 모델에서는 바람의 효과와 두 종의 나무를 고려하여 보다 현실적인 산불확산의 동역학을 확인하고자 하였다. 본 모델을 통하여 바람이 산불확산에 어떠한 영향을 가져오는지 확인하였고 서로 다른 연소 확률을 가지는 두 종의 나무 밀도 변화를 통해 산불 확산 패턴이 어떻게 변하는지를 조사하였다.

2. 모의실험 모델

2.1 모의 실험모델에 사용되는 확산 방법

본 모델에서는, $L \times L$ 크기의 $L(=200)$ 격자 공간에 두 종의 나무를 랜덤하게 분포시켰다. 한 종은 불이 옮겨 붙기 쉬운 나무(susceptible tree)이고 다른 한 종은 상대적으로 불이 옮겨 붙기 어려운 나무(resistant tree)이다. 두 서로 다른 나무 종은 불이 옮겨 붙을 확률은 P_t 로 기술되었다. 불이 전이될 가능성이 큰 나무의 확률과 작은 나무의 확률은 각각 1.0 과 0.5 으로 가정하였다. 예를 들

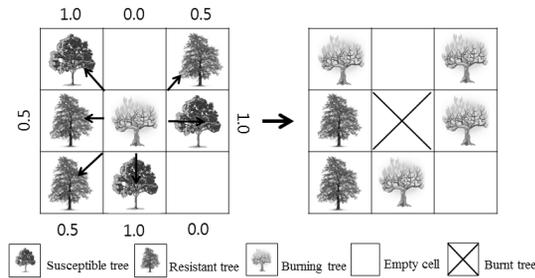


Fig. 2. Graphical representation of the manner in which forest fire can spread from a burning tree in a central landscape cell(left) to trees in neighboring cells(right) according to our cellular automat model

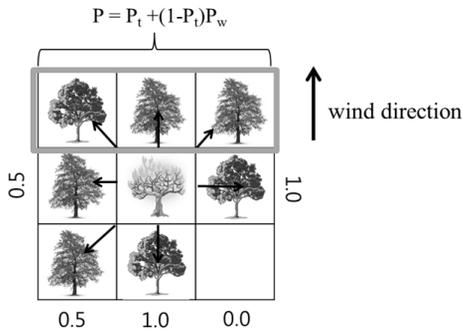


Fig. 3. The probability of forest fire transfer increases for both tree species when winds blow from south to north with strength P_w

어, 불전이 확률이 큰 나무가 이웃격자에 불타는 나무를 가지고 있다면 무조건 불이 옮겨 붙게 되며, 반대로 불 전이 확률이 작은 나무의 이웃격자에 불타는 나무가 있다면, 불이 옮겨 붙을 수도 있고 붙지 않을 수도 있다 (Fig. 2 참조). 시뮬레이션 공간에는 나무가 없는 격자 공간도 있으며, 불은 이 격자로 옮겨 갈수 없다. 일단 불이 붙은 나무는 곧 바로 연소된 나무(burnt tree)로 변하게 된다. 연소된 나무와 빈 공간은 서로 구분되어 지며, 본 연구에서 고려하고 있는 산불패턴은 연소된 나무의 분포만을 고려한다. 시뮬레이션 초기에 불전이 확률이 큰 나무와 작은 나무의 초기 공간 밀도는 각각 C_s 와 C_r 로 나타내었다. 그리고 전체 나무의 초기밀도는 C_{tot} 로 표기하였다. 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. 3에서 보여 지는 바와 같이, 연소중인 나무주위로 저항성이 큰 나무와 적은 나무가 분포해있을 때, 바람이 아래에서 위쪽으로 분다고 가정하면 연소중인 나무의 위쪽에 위치하고 있는 3개의 나무에만 바람의 영향이 미친다고 가정하였다^[22].

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

$$P = P_t + P_w(1 - P_t) \tag{1}$$

P_t 와 P_w 가 어떠한 값을 가지더라도 P 의 값은 0.0에서 1.0 범위를 초과하지 않는다. 예를 들어, P_t 의 값이 1.0 이고 P_w 의 값이 1.0의 값을 가지더라도 각 셀에 주어지는 확률 값 P 는 1.0 이 된다.

2.2 시뮬레이션 모델 동작

본 모델은 바람 세기의 변화와 나무 밀도의 변화에 따라 산불패턴이 확률적으로 변화하게 한다. 기본적으로, 셀룰라오토마타 방식에 의해 이웃하는 8개의 셀들의 상태에 따라 전이 여부를 Fig. 4와 같은 방법에 의해 모델링 하였다. 시뮬레이션 시작과 함께, 각 나무종의 고유 확률 값 (P_t)과 전체 나무의 밀도($C_{tot}=0.45$) 뿐만 아니라 불이 옮겨 붙기 쉬운 나무종의 밀도 (C_s)와 바람세기(P_w)가 주어지게 된다. C_{tot} 는 0.45 부터 1.0 까지의 값을 가지도록

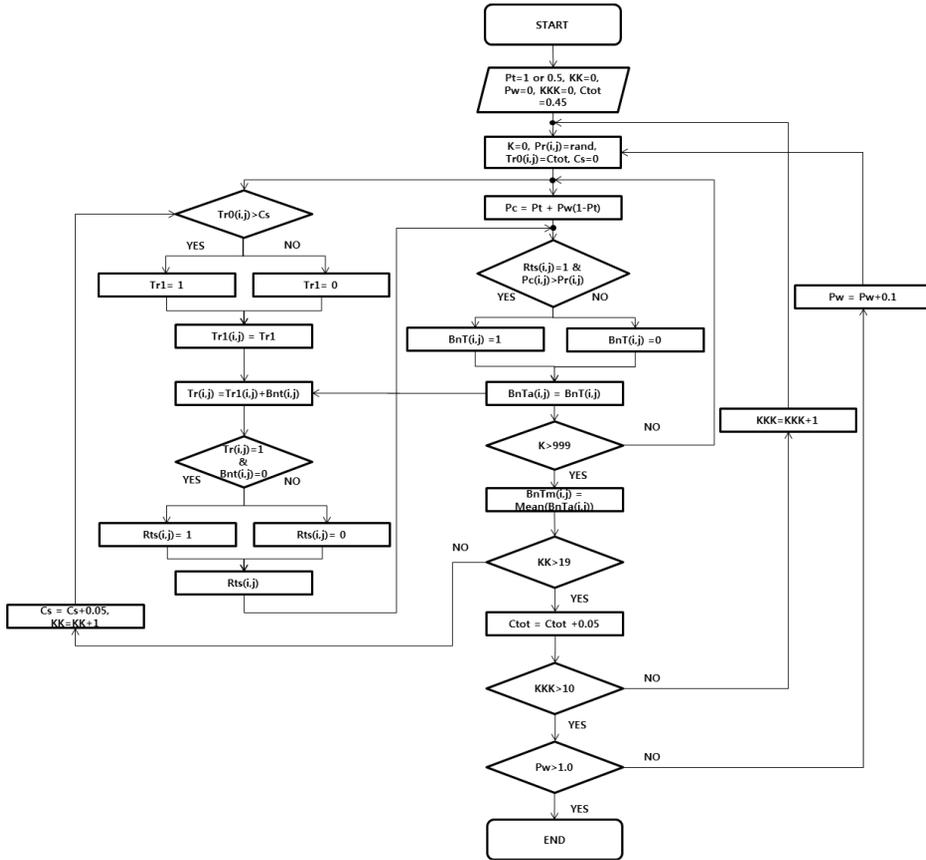


Fig. 4. Flow-chart of the simulation procedure in forest fire model

하였다. 왜냐하면 C_{tot} 의 값이 0.45 보다 작을 경우에는, 산불이 확산되지 못하기 때문이다. 나무와 나무 간들이 서로 떨어져 있기 때문에 산불이 확산 되어질 수 없다. C_{tot} 값이 0.45 이거나 클 경우에는 산불의 전이가 이루어져 산불의 전이에 의한 패턴을 가진다. 다시 말해, 0.45의 나무밀도는 산불의 전이가 일어나지 않는 상태에서 산불의 전이가 일어나는 상태로 변하는 경계 값 이라고 할 수 있다. 시뮬레이션 초기에 격자공간의 중앙점(100,100)에 연소중인 나무를 두었다. 식 (1)에 의해 계산되어진 확률 값을 각 격자 마다 입력 되게 되며 200×200 크기의 행렬구조로 표현되었다.

바람이 산불패턴에 미치는 영향을 정량화 하기 위해서, 산불이 확산되는 과정에서 연소된 나무의 개수가 숲 전체를 이루는 격자 총 개수의 25%(= 10,000) 되는 시점(T)의 값을 측정하였다. C_{tot} 과 C_s , 그리고 P_w 의 값들이 0.0 과 1.0 사이에서 변할 때 T의 값이 어떻게 바뀌는지를 조

사하였다. P_w 는 0.1 단위로 0.0에서 1.0 까지 증가시켰고, C_s 는 0.05 단위로 0.0에서 1.0까지 증가 시켰으며, C_{tot} 는 0.05 단위로 0.45에서 1.0까지 증가시켰다. P_w 변화에 의한 11회 반복과 C_s 의 변화에 의한 22회 반복, C_{tot} 의 변화에 의한 12회 반복을 계산을 하였다. 결과의 신뢰성을 위하여 위와 같은 과정을 20회 반복 수행하여 얻어진 결과를 통계처리 하여 최종 결과를 만들었다.

3. 시뮬레이션 결과

Fig. 5는 $P_w = 0.5$, $C_{tot} = 0.7$, $C_s = 0.5$ 라는 고정된 조건하에서의 모델의 동작 시간 변화에 따라 산불의 시작 지점으로부터 산불이 어떻게 확산되어 지는지를 보여준다. 불전이 확률이 큰 나무는 녹색점으로 전이 확률이 낮은 나무는 노란색 점으로 표시되었다. 연소된 나무는 검정색, 연소중인 나무는 빨강색으로 나타내었다. 불의 점화

는 공간의 중심점에 있는 한 격자에서 시작하였다. 시간이 지남에 따라 나무들이 연소되면서 산불이 확산되는 것이 잘 나타나고 있다. 산불의 확산은 검은색 영역의 경계면에서 이루어지고 있음을 알 수 있다. 시간이 충분히 지나게 되면 거의 모든 공간을 연소된 나무들이 차지하게 되었다. 연소되지 않고 남아 있는 나무들도 공간에 거의 랜덤한 구조로 분포하였다. 위에서 언급된 세가지 독립 변수의 값들이 바뀔 때 산불 확산의 동역학을 정량화 하기 위해서 연소된 나무의 개수가 총 40,000개중 10,000개에 이를 때의 시간(T)를 측정하였다(Fig. 6). Fig. 6은 바람의 세기 P_w 를 0.0에서 1.0 까지 0.2의 증가폭으로 시뮬레이션 한 결과이다. 붉은 색으로 갈수록 높은 T의 값을 나타내고, 푸른색으로 갈수록 낮은 T의 값을 나타낸다. 바람이 없을 때($P_w=0.0$), T의 값은 전체나무밀도 C_{tot} 값 변화에 대해 급격하게 변하는 것을 알 수 있다. $C_{tot}=0.6$ 근처에서부터 T의 급격한 감소가 일어났다. 그리고 C_s 에

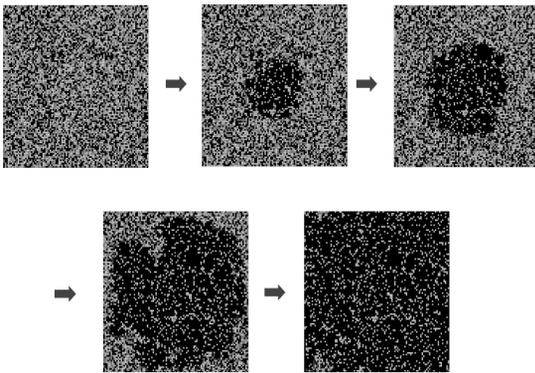


Fig. 5. Simulation execution process in forest fire spreading model

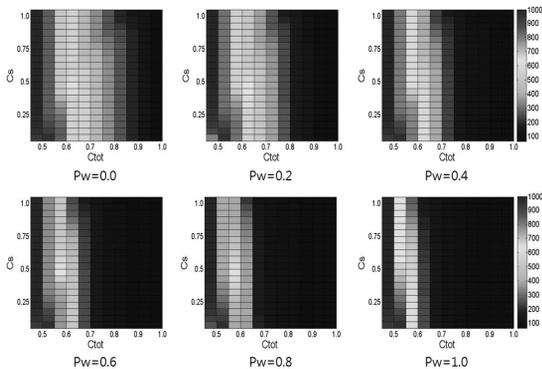


Fig. 6. Simulation result by wind and tree density

따라서도 T변화가 생겼는데 그 정도는 C_{tot} 변화에 대한 그것보다는 작았다.

바람이 불수록 T는 전체적으로 줄어드는 경향을 보여 주었다. $P_w=1.0$ 에서는 C_{tot} 가 0.55 정도에서 T의 급격한 변화가 발생하였다. 다시 말해, 바람의 세기가 클수록 산불의 확산이 더 빨리 일어 난다는 것을 의미한다. 그러나, C_{tot} 의 값이 너무 커지거나 낮아지면, 바람의 효과는 줄어들었다. 나무의 밀도가 너무 낮으면 나무와 나무가 연결되어 있지 않을 가능성이 커지게 된다. 나무들이 서로 떨어져 있게 되면 바람이 많이 불어도 불이 확산되기 어렵다. 아울러, C_{tot} 의 값이 너무 커지면 모든 나무가 서로 접하기 때문에 바람의 세기에 따라 영향을 받지 않고 산불이 잘 확산된다.

Fig. 6의 결과를 좀 더 정량적으로 이해하기 위해서,

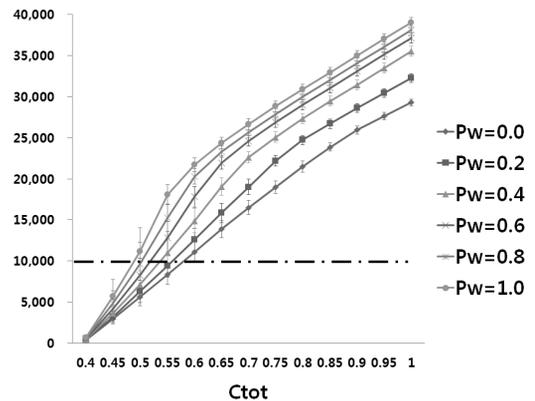


Fig. 7. Time of concentration at T by wind and tree density

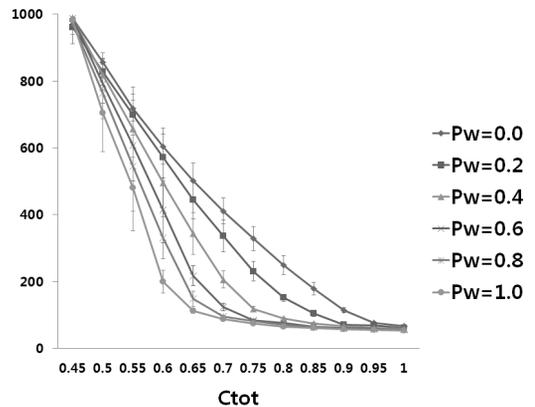


Fig. 8. Change of burnt tree by wind and tree density

Fig. 6의 열(column)부분 값들을 평균하였다. 평균하게 되면 C_s 에 대한 산불확산 효과에 대한 정보를 잃게 되지만, C_s 효과는 상대적으로 C_{tot} 의 효과에 비해 작기 때문에 평균값을 계산 하여 C_{tot} 의 영향만을 보는 것도 의미를 가진다. C_s 효과는 평균에 대한 편차로써 나타난다. 바람의 세기가 커질수록 T의 값이 줄어드는 것을 명확하게 알 수 있다(Fig. 7 참조). Fig. 8은 C_{tot} 의 값이 변할 때 T의 값이 어떻게 변하고 있는지를 보여주고 있다. C_{tot} 의 값이 커질수록 T의 값이 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 그 줄어드는 정도는 바람의 세기 P_w 가 커질수록 따라서 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 논의 및 결론

본 연구에서는, 셀룰라오토마타 방식으로 구현된 산불 모델에 제시하였다. 기존의 방정식 기반 모델에 비해 훨씬 단순한 규칙을 가지고 비선형성이 강한 복잡한 산불확산 과정을 잘 보여 주었다. 본 연구를 통해서, 바람의 효과가 산불확산에 매우 중요한 요인이 된다는 것을 알 수 있었으며, 서로 다른 나무종이 섞여 있는 비율은 상대적으로 산불확산에 기여하는 정도가 작았다. 대신에 나무전체의 밀도는 산불확산에 매우 큰 상관관계가 있음을 간접적으로 보여 주었다. 이것은 산불 확산 제어 전략기술 개발이라는 측면에서 잘 통제되어야 하는 변수가 될 수 있음을 간접적으로 보여 주는 것이다. 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 확률 값을 적절히 조절하여 이러한 지형의 효과를 만들어 줄 수 있다. 이 연구에서 사용되어진 모델은 확장 가능성이 매우 크다 왜냐하면 모든 변수의 값들을 확률적으로 사용하기 때문이다. 예를 들면, 다양한 나무 종으로 이루어진 산림을 모델링하고 싶으면, 단순히 P_t 값을 다양하게 가지는 격자를 만들기만 하면 된다. 바람의 효과도 이 논문에서는 한 방향으로 부는 바람만을 가정하고 있으나, 사실상 다양한 방향으로 불거나 또는 시간적으로 방향이 바뀌는 바람도 쉽게 고려할 수 있다. 그러나 이러한 장점 외에도 단점도 가지고 있다. 그 중에 하나가 공간스케일과 시간스케일이 실제 산불이 발생 할 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, 우리 모델

은 직접 적용하기가 곤란하다. 우리는 이런 문제를 극복하기 위해 실제 실험 자료와 모델의 값들을 비교하는 연구를 진행할 계획을 가지고 있다. 이 연구결과와 사용한 산불모델이 비록 단순한 가정들 위에 이루어졌음에도 불구하고 복잡한 산불패턴을 잘 기술하였다. 우리는 본 연구에서 제안한 모델이 향후 수정 보완 되거나 발전 될 다양한 가능성을 가지고 있다고 믿는다.

References

1. Malamud BD, Morein G, Turcotte DL., "Forest-fires: an example of self-organized critical behavior," Science. Vol. 281, pp. 1840-1842, 1998.
2. Ratz A., "Long-term spatial patterns created by fire: a model oriented towards boreal forests," International Journal of Wildland Fire. Vol. 5, pp. 25-34, 1995.
3. Diaz DR, Lloret F, Pons X, Terradas J., "Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires," Ecol. Vol. 83, pp. 2293-2303, 2002.
4. Pinol J, Terradas J, and Lloret F., "Climate Warming, Wildfire Hazard, and Wildfire Occurrence in Coastal Eastern Spain," Climatic Change. Vol. 38, pp. 345-357, 1998.
5. Flannigan MD, Stocks BJ, Wotton BM., "Climate change and forest fires," Science of the Total Environment. Vol. 262, pp. 221-230, 2000.
6. McCoy VM, and Burn CR., "Potential alteration by climate change of the forest fire regime in the boreal forest of central Yukon Territory," Arctic. Vol. 58, pp. 276-285, 2005.
7. Clark TL, Jenkins MA, Coen J and David P., "A Coupled Atmospheric Fire Model: Convective Feedback on Fire Line Dynamics," Journal of Applied Meteorology. Vol. 35, pp. 875-901, 1996.
8. Burgan RE, and Rothermel RC., "fire behavior prediction and fuel modeling system FUEL subsystem," General Technical Report INT-167. pp. 126, 1984.
9. Ioannis K, and Adonios T., "A model for predictiong forest fire spreading using cellular automata," Ecological Modelling Vol. 99, pp. 87-97, 1997.
10. Hargrove WW, Gardner RH, Turner MG, Romme WH, Despain DG., "Simulating fire patterns in heterogencous landscapes," Ecological Modelling. Vol. 135, pp. 243-263, 2000.
11. Pitts WM, "Wind Effects on Fires" Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 17, pp. 83-134, 1991.
12. Beer T., "Bushfire rate-of-spread forecasting: Deterministic

- and statistical approaches to fire modelling.” Journal of Forecasting. Vol. 10, pp. 301, 1991.
13. Halada L, Weisenpacher P., “Principles of forest fire spread models and their simulation”, Journal of the Applied Mathematics, Statistics and Informatics. Vol. 1, pp. 3-13, 2005.
 14. Boychuk D, Braun WJ, Kulperger RJ, Krougly ZL, Stanford DA., “A stochastic forest fire growth model”, Environmental and Ecological Statistics. Vol. 16, pp. 133-151, 2009.
 15. Ball GL and Guertin DP., “Improved re growth modelling”, International Journal of Wildland Fire. Vol. 2, pp. 47-54, 1992.
 16. Vasconcelos MJ, Geurtin GP., “Firemap simulation of fire growth with a geographic information system”, International Journal of Wildland Fire. Vol. 2, pp. 87-96, 1992.
 17. Feunekes U., “Error analysis in fire simulation models”, MS. Thesis, University of New Brunswick, Fredericton, NB, 1991.
 18. Eastman JR., “guide to GIS and image processing”, Clark Lab, Clark University, Worcester, MA, USA. Vol. 2, 1999.
 19. Berjak SG, Hearne JW., “An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system”, Ecological Modelling. Vol. 148, pp. 133-151, 2002.
 20. Matsinos YG, Troumbis AY., “Modelling spatiotemporal dynamics of a community of annual plant species: implications for management of biodiversity”, Ecological Modelling. Vol. 149, pp 71. 2002.
 21. Loibl W, Toetzer T, “Modeling growth and densification processes in suburban regions-simulation of landscape transition with spatial agents”, Environmental Modelling and Software. Vol. 18, pp. 553-563, 2003.
 22. Encinas AH, Encinas LH, White SH, del Rey AM, Sanchez GR., “Simulation of forest fire fronts using cellular automata”, Advances in Engineering Software. Vol. 38, pp. 372-378, 2007.



송 학 수 (hssong@nims.re.kr)

2012 우송대학교 정보통신공학과 석사
20012~현재 국가수리과학연구소 과제연구원

관심분야 : 패턴인식, 생태계 모델링



전 원 주 (wjeon@nims.re.kr)

2006 KAIST 항공우주공학과 박사
2006~2008 한국과학기술원 기계기술연구소 박사후 연구원
2008~현재 국가수리과학연구소 연구원

관심분야 : 생물소리분석, 생물 네트워크 분석 및 모델링, 항공기소음진동



이 상 희 (sunchaos@nims.re.kr)

2005 부산대학교 물리학과 박사
2008 국가수리과학연구소 가상생태계 모델 개발 팀장
2009~현재 한국수리생물학회 운영위원
2010~현재 국가수리과학연구소 융복합수리과학연구부 부장

관심분야 : 생물행동 모델링, 생태계 모델링, 최적화 이론, 비선형동역학