

## 지표면 변화 탐색 및 예측 시스템을 위한 공간 모형

정명희\* · 윤의중\*\*

## Spatial Analyses and Modeling of Landscape Dynamics

Myunghee Jung\* · Eui-Jung Yun\*\*

### 요 약

본 연구는 2D 기반의 동적 공간모형(dynamic spatial landscape models)을 통해 지표 변화 과정을 이해하고 예측할 수 있는 방법론을 제시하는데 그 초점을 두고 있다. 동적 공간모형에 기반한 연구는 크게 지표의 공간 패턴에 대한 모형화와 변화 과정에 관한 모형화 및 모의로 구성되어 있는데 지표 변화와 관련된 규칙은 변화 원인과 그 과정에 따라 다르게 정의될 수 있다. 이때 지표 패턴의 이질성은 변화와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 연구 지역의 GIS 맵으로부터 공간 패턴의 특성을 모형화 하여 이를 기반으로 변화에 관한 동적 공간 모형이 적용되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위한 모형기반 접근법이 설명되어 있고 자연 화재로 인한 지표 변화 과정에 적용되어 동적 공간 모형이 개발되었다.

**주요어** : 동적 공간모형, 마코프 프로세스, 마코프 랜덤필드, 비등성 포아송분포, 시뮬레이션

**ABSTRACT** : The primary focus of this study is to provide a general methodology which can be utilized to understand and analyze environmental issues such as long term ecosystem dynamics and land use/cover change by development of 2D dynamic landscape models and model-based simulation. Change processes in land cover and ecosystem function can be understood in terms of the spatial and temporal distribution of land cover resources. In development of a system to understand major processes of change and obtain predictive information, first of all, spatial heterogeneity is to be taken into account because landscape spatial pattern affects on land cover change and interaction between different land cover types.

\* 안양대학교 디지털미디어학부

\*\* 호서대학교 정보제어공학과

Therefore, the relationship between pattern and processes is to be included in the research. Landscape modeling requires different approach depending on the definition, assumption, and rules employed for mechanism behind the processes such as spatial event process, land degradation, deforestation, desertification, and change in an urban environment. The rule-based models are described in the paper for land cover change by natural fires. Finally, a case study is presented as an example using spatial modeling and simulation to study and synthesize patterns and processes at different scales ranging from fine-scale to global scale.

**Keywords** : Dynamic landscape modeling, Markov Process, Markov Random Field, Nonhomogeneous Poisson Process

## 1. 서 론

최근 환경의 중요성에 대한 인식의 증가와 더불어 지표면 변화에 대한 이해와 관리 차원의 연구가 활발히 진행되고 있는데 이를 위해 GIS 자료와 더불어 원격탐사 영상이 효율적으로 사용되고 있다. 원격탐사 영상은 광범위한 지역에 대해 한번에 다양한 정보를 수집할 수 있기 때문에 식물군의 타입이나 성장속도에 기반한 생태계 변화탐지, 도시지역의 성장, 대양의 순환과 같은 다양한 범위의 관심 현상을 추적하는데 중요한 도구로 자리 잡아 가고 있고 지난 몇 십 년간 원격탐사 자료를 이용해 비교적 적은 비용으로 장기간에 걸친 거시적 환경관리가 가능하게 되었다.

효율적인 지표면 현상에 관한 연구를 위해서는 원격탐사자료 분석 전문가와 사회적, 생태적 변화 과정에 관한 전문 지식을 가진 관련 전문가의 긴밀한 협동이 있어야만 한다. 원격 탐사 전문가는 지표

면의 변화 유형을 찾아내고 GIS를 이용하여 관찰된 변화유형을 자연적, 문화적인 속성과 연관시켜주는 작업을 담당하고 관련 생태학자들은 이러한 정보를 바탕으로 변화과정을 보다 깊이 인지하여 변화에 대한 원인을 규명하고 여러 요인들의 복잡한 상호작용을 분석한다. 이러한 연구에서는 보다 거시적인 공간 차원에서 문제에 접근할 필요가 있는데 이를 위해 본 연구에서는 현상을 이해하고 변화와 관계 있는 요인을 분석하기 위해 2D 기반의 동적 공간모형(dynamic spatial landscape models)을 활용하는 연구 방법론이 제시 되어 있다.

일반적으로 공간 모형 및 모의를 이용한 연구는 지표의 공간적 특성에 대한 모형화와 지표변화 과정에 관한 모형화 및 모의 단계로 구성되어 진다. 공간적 이질성(spatial heterogeneity)은 지표면에서 일어나는 변화 과정과 밀접한 관계를 가지고 있어 이러한 특성을 이해하고 모의하는 것은 이차원 동적 모형을 통한 연구의 경우 가장 중요하고 기초적인 단계에 해당

한다. 공간적 이질성에 대해 포괄적인 정의를 내리기는 쉽지 않지만 실험 결과의 정량적인 비교분석을 위해서는 몇 가지 기초적인 특성에 의해 지표의 복잡도나 다양성을 정의할 수 있다. 이를 위해 영역(patch) 타입, 각 타입의 비율, 영역들의 공간적 분포와 모양, 이웃하는 영역들 간의 관계 등의 특성이 고려될 수 있고 또한 통계적인 방법에 의해 공간적 이질성의 특징을 모형화 할 수도 있다[Li and Reynolds, 1994]. 본 연구에서는 공간적인 상호작용을 통해 전체 공간패턴을 모형화할 수 있는 2D MRF( Markov Random Field)를 이용하여 지표 영역 간의 상호관계와 영역 모양, 크기 등의 특징을 고려하여 패턴 맵을 형성하는 방법이 제시되어 있다.

지표 변화와 관련된 규칙은 사건 발생

에 의해 급격한 변화가 일어나는 경우와 여러 환경적 요인에 의해 서서히 변화가 일어나는 경우처럼 변화 원인과 그 과정에 따라 다른 모형을 적용해 분석해야 한다. 예를 들어 자연재해에 의한 변화에서는 먼저 사건발생(event arrival) 모형을 통해 공간적인 발생분포를 이해하고 각 발생 지점을 중심으로 지표 변화과정을 모형화하는 반면 도심주변의 변화과정, 사막화와 같이 상호작용에 의한 지역적인 변화를 통해 전체적인 변화과정을 유도해야하는 경우에는 Markov-Cellular Automation 모형과 같이 2차원 스토캐스틱 모형이나 공간 통계 모형들을 이용해 변화 규칙을 정의하고 변화과정을 이해할 수 있다. [Figure 1]에서는 지표면 변화 추적 예측 시스템을 구성하는 모형들이 나열되어 있다.

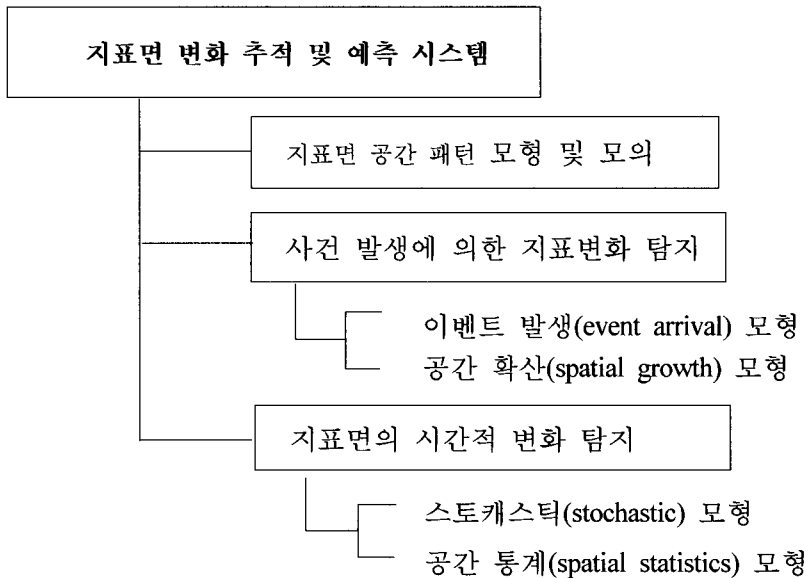


Figure 1. Spatial stochastic models for land cover change detection

여기에서는 자연화재에 의한 변화의 예를 중심으로 사건 발생 지점을 중심으로 변화지역을 탐지하고 변화되는 과정을 모형화하는 방법을 설명하였다. 먼저 2장에서는 공간적 이질성을 모형화하여 동적 공간모형을 실험하기 위한 초기 GIS 맵 형성 방법과 함께 사건 발생 패턴과 변화과정에 대한 모형화가 설명되어 있다. 이러한 모형은 3장에서 자연화재의 경우에 적용되어 모의실험 되었고 마지막 장에는 결론과 향후 연구 방향이 언급되어 있다.

## 2. 지표 변화 탐지 및 예측을 위한 공간 모형

### 2.1 공간패턴 모형 및 모의 시스템

현재의 지표면은 기후와 지형, 지리, 생물군의 상호작용뿐 아니라 자연재해, 인간 활동-도시화, 농경화, 산림화, 등-의 영향을 받은 결과로 거시적으로 보면 여러 가지 모양의 크고 작은 영역들로 구성되어 있고 이러한 영역들은 생태 역학 및 변화 메카니즘과 밀접한 관계를 갖고 끊임없는 상호 작용을 통해 서서히 새로운 지표면을 형성해 가는 과정에 있다. 실제 현상을 설명하고 시·공간적인 변화과정을 규명하는 모형들은 지표면을 극히 단순화시켜 모형을 개발하여 왔다. 예를 들어 특정 지역의 생물 종의 다양성에 대한 자연 재해의 영향에 관련된 연구에서는 보통  $p\%$  재해의 확률을 가지고 모의된 무작위적 패턴 맵(random pattern map)에

기반하여 시간에 따른 동적 이차원 모형을 개발하였는데 이러한 초기 패턴 맵은 실제적인 자연환경과는 다소 거리가 먼 인위적인 패턴의 부정확한 상태에 기반을 두고 있어 결과의 타당성을 입증하는데 문제가 있었다.

지표면은 이질적이고 복잡한 요소로 구성되어 있어 단순한 통계적 모형으로는 설명하기 어렵다. 실제 지표면의 공간적 패턴은 환경의 변화를 일으키는 여러 요인들의 발생 및 진행 과정에 영향을 끼치므로 매우 중요한 요소이기 때문에 최근 생태학 관련 연구에서는 생태계의 변환과정이 지표면 공간패턴과 밀접하게 연관되어 있음을 인식하게 되었다(Cressie, 1993; Sklar and Costanza, 1991). 공간적 이질성이란 일반적으로 공간상 특성의 복잡성과 다양성으로 인식되고 있는데 이질성을 측정하기 위해 사용하는 방법과 다루는 기본 특성에 따라 세부 정의가 다를 수 있지만 정량적 패턴 분석의 필요성에 의해 영역(patch) 타입의 수, 타입의 비율, 영역들의 공간적 배열, 모양 등의 구성요소에 의해 이질성을 구분하고 이러한 특성을 고려하여 공간패턴을 모형화 한다(Derin and Elliot, 1984).

실제 획득된 영상에서 관측되는 지표면의 특징이란 통계적 측면에서 볼 때 제시된 모형으로 설명되는 지표면 현상의 하나의 표본으로 볼 수 있다. 이러한 관점을 기반으로 하여 주어진 지역의 GIS 맵으로부터 지표면 패턴을 설명하기 위한 모형에 필요한 변수들을 추출해 낼 수 있고 제안된 모형을 바탕으로 같은 통계적 특징을 가지고 있는 표본들을 다시 생성

해낼 수 있다. 이러한 방법으로 2D 동적 공간 모형의 모의실험을 위해 다양한 초기 패턴 맵이 모의될 수 있어 지표면 현상 추적을 위한 모형을 평가하고 결과의 신뢰성을 입증하는데 사용될 수 있다. 이것은 연구자들이 개발한 모형을 테스트하고 평가하기 위해 과거 GIS 맵에 적용하여 얻어진 결과를 현재의 GIS 맵과 비교하여 검증하는 것과는 달리 모의영상을 이용하여 알고리즘을 보다 정량적으로 평가할 수 있고 모형의 여러 요소들을 변화시켜 다양한 가상 시나리오 환경을 만들어냄으로써 가상적인 현상에 대한 추측이나 가설을 세우고 입증하는 과정이 가능해진다.

본 연구에서는 영역과 영역의 상호형성관계를 통해 다양한 모양과 크기의 영역들이 분포된 공간 패턴을 모형화하였다. 이웃하는 영역들은 모양과 위치 측면에서 서로 상관관계를 가지고 있으므로 모형에는 이러한 영역의 크기, 모양, 방향, 빈도수와 같은 통계적 정보가 파라미터에 반영되어 포함될 수 있어야 한다. Markov Random Field(MRF)는 공간적으로 이웃하는 단위영역 간의 상호작용을 통해 전체 공간패턴을 모형화할 수 있어 본 연구에서 사용하였다(Derin and Elliot, 1987; Geman and Geman, 1984). 단위영역이 공간적으로 의미 있는 그룹으로 결합하여 영역을 형성할 수 있도록 하기 위해서는 MRF모형의 clique function을 적절히 선택해야 한다. 여기서는 각 클래스의 빈도, 크기, 방향 등을 고려하기 위해 클래스 별로 clique에 따라 다른 변수를 가질 수 있는 다음과 같은 clique function을 이

용하였다.

$$P(x=\omega) = \frac{1}{Z} e^{-U(\omega)/T}$$

$$U(\omega) = \sum_{c \in Q} V_c(\omega)$$

where (1)

(1) single-pixel clique function

$$V_c(\omega) = \alpha_k \text{ if } x_i \text{ is equal to class } k \quad (2)$$

(2) pairwise clique function

$$V_c(\omega) = \begin{cases} -\beta_{dir,k} & \text{if all } x_i \text{ is equal to class } k \text{ and in "dir" type clique} \\ \beta_{dir,k} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

clique function에서 dir은 "hor", "ver", "ne", "nw" 중 하나로 각 수평, 수직, 양쪽 대각선, 네 방향의 상호작용을 나타낸다. 즉, 2D MRF는 클래스간의 상호작용에 의해 클래스 맵의 공간적 패턴을 설명하고 있다.

개발된 모형을 이용해 2D 동적 공간모형에서 사용될 초기 공간 패턴 맵을 모의할 수 있는데 이렇게 모의된 공간 패턴은 원래의 주어진 영상으로부터 얻어진 클래스 맵이나 대응되는 GIS 맵의 공간 패턴과 모형에 기반하여 통계적으로 같은 특성을 가지고 있다. 패턴 맵의 모의 과정을 위해서는 simulated annealing에 의한 Gibbs Sampler를 이용하거나(Geman and Geman, 1984) 각 클래스에 따라 비율이 제한되어 있다면 전통적인 Metropolis 알고리즘에 기초한 exchange 알고리즘이 이용될 수 있고 알고리즘의 convergence를 위해 여러 가지 stopping rule을 함께 적용하여 공간 패턴을 모의할 수 있다.

계층적 접근법을 사용하면 관찰되는 여

러 통계적 특성을 포괄적으로 다룰 수 있다. 지표면 특성을 단계별로 살펴보면 거시적으로는 호수, 산림지역, 토지와 같이 여러 크기와 모양의 영역들(regions)로 구성되어 있고 각각의 영역들은 다시 세부 영역이나 영역 고유의 특성을 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성은 계층적 모형을 통해 복잡한 통계적 특성을 단계별로 모형화하여 통합해갈 수 있는데 상위 레벨에서는 영역과 영역의 상호 형성(region formation)관계를 모형화하여 공간패턴을 형성할 수 있고 하위 단계에서는 관심분야에 따라 여러 영역별 특성을 모형화할 수 있다. 이렇게 지역 환경의 공간적 특성을 모형화하여 모의된 영상들은 지표면에서 일어나고 있는 각종 현상을 분석하고 모델링 할 수 있는 기초 수단을 제공함으로써 2D 기반의 동적 모형을 위한 일반적인 방법론을 제공하게 된다.

## 2.2 사건 발생에 의한 지표변화 탐지 모형

### 2.2.1 사건 발생(event arrival) 모형

지표면은 산불이나 홍수와 같은 자연적인 재해의 발생이나 도시화 같은 인위적인 요인에 의해 끊임없이 변화해 가고 이러한 지표면의 물리적 환경 변화는 생태계에 많은 영향을 끼친다. 지표 변화를 일으키는 사건 발생은 공간적 분포에 대한 스토캐스틱(stochastic) 모형을 통해 분석을 할 수 있는데 이때 관심 지역을 이차원 평면으로 가정하고 이 지역에서 발생하는 사건이나 현상은 불규칙적으로 분

포된 포인트 패턴(point pattern)으로 분석할 수 있다(Diggle, 1983).

모형화하기 전에는 먼저 다양한 테스트를 통해 발생 사건의 공간적 무작위성(randomness)을 검증해야 하는데 최근접 이웃거리에 기반한 CSR(Complete Spatial Randomness) test나 Monte Carlo test 등을 사용할 수 있고, 이 외에도 homogeneous Poisson process도 대표적인 무작위성 검증 방법 중의 하나로 이용되고 있다(Daring, 1984; Cox and Lewis, 1966).

사건은 공간적 위치, 토양의 차이, 식물타입, 등과 같은 다양한 원인, 혹은 여러 원인의 복합적인 작용에 의해 발생하게 되는데 2차원 NPPP(Nonhomogeneous Poisson Point Process) 모형은 이러한 요인을 파라미터화하여 발생원인을 규명하는데 효과적으로 활용될 수 있다(Diggle, 1983; Turner, 1990). NPPP는 다음과 같이 정의된다.

P1  $N(A)$ 는 다음과 같이  $\int_A \lambda(x, y) dx dy$ 를 평균으로 갖는 포아송 분포이다.

$$P(N(A) = n) = \frac{(\Lambda(A))^n \exp - \Lambda(A)}{n!}$$

$$\text{where } \Lambda(A) = \int_A \lambda(x, y) dx dy. \quad (4)$$

P2  $N(A) = n$ 일 때, 지역 A에서 일어나는 n개의 사건은  $\lambda(x, y)$ 에 비례하는 지역 A의 확률밀도함수로부터 얻어진 독립적인 표본들이다.

이때 관심 지역 A에서의 평균은 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda(X_A, Y_A) = \int^{X_A} \int^{Y_A} \lambda(x, y) dx dy \quad (5)$$

고려되는 발생 요인은 intensity 함수에 의해 조절되고 모형의 복잡도도 이에 의해 결정된다. intensity 함수는 다음과 같이 표현될 수 있는데,

$$\lambda(x, y) \equiv \lambda z_1(x, y), z_2(x, y), \dots z_n(x, y) \quad (6)$$

이때  $z_1(x, y)$ 는 연구지역의 위치  $(x, y)$ 에서의 식물타입이나 강수량과 같이 정성적이거나 정량적인 정보를 다루는 함수이다.

### 2.2.2 변화 영역 탐지를 위한 모형

지표면에서 발생한 사건은 발생 지점을 중심으로 물리적인 환경에 영향을 받으며 공간적으로 진행해 간다. 결과적으로 이러한 변화는 지표 패턴과 타입을 변화시키는데 사건의 공간적 확산이나 전파되는 진행과정 또한 주변 조건이나 외부 환경과 관련하여 모형화될 수 있다. 여기서는 자연화재의 경우를 예로 한 지점을 중심으로 주변지역이 변화해가는 과정을 모형화하는 방법을 설명하였다.

지표를 random field로 가정하여 Markov chain을 이용하면 한 지점에서 발생한 사건이 다른 주변 지역에 영향을 미치는 과정을 모형화 할 수 있다(Turner, 1990; Kessel, 1977). 확산되어 가는 과정을  $X_n$ 으로 나타내면  $n=\{0,1,2, \dots\}$ 은 임의의 시간 단위를 의미하고  $X_n$ 은 현재 상태와 주변 이웃의 상태를 함께 고려하여 얻어진 전

이확률을 갖는 이차원 markov chain으로 정의될 수 있다. 이때 이웃하는 주변 셀에 대한 정의는 가장 기본적인 4개의 최근접 이웃에서 고차원으로 확장될 수 있다. 일반적으로 확산 과정에서 지표의 한 지점을 나타내는 셀은 사건의 영향을 아직 받지 않은 셀(not affected cell), 현재 영향을 받고 있고 다른 셀에게 전이할 가능성이 있는 셀(affecting cell), 영향을 받았지만 다른 셀에게 전이할 가능성이 없는 셀(affected cell), 세 가지로 구분될 수 있는데 셀이 다른 상태로 전이할 확률은 다음과 같이 주어진 셀과 이웃 셀들의 상태를 고려하여 구할 수 있다.

$$P_{i,j,c} = P(X_k = j | X_k = i, c = (X_k, N_i) \in \Lambda) \quad (7)$$

$X_k$ 는 위치  $k$ 에서 셀의 현재 상태를 나타내고  $N_i$ 는  $X_k$ 의 모든 이웃 셀들의 집합이다. 따라서,  $c$ 는 주어진 셀과 주변 이웃 셀들의 현재 상태에 대한 정보를 의미한다. 전이확률  $P_{i,j,c}$ 는 현재 주어진 상태가  $c$ 일 때 상태  $i$ 에서 상태  $j$ 로 변화할 확률을 나타내고  $X_n$ 은 이러한  $P_{i,j,c}$ 로 구성된 전이 확률 행렬  $P_c$ 를 갖는 markov chain이 된다. 이때  $\Lambda$ 는 전이에서 고려되는 모든 현재 상태의 집합으로 4개의 최근접 이웃의 상태를 고려할 때 다음과 같이 18개 경우로 구성된다.

$$(X_k, N_i) \in \Lambda = \{(\text{not affected, neighbor N affecting}), (\text{not affected, neighbor S affecting}), (\text{not affected, neighbor E affecting}), (\text{not affected, neighbor W affecting}), (\text{not affected, neighbor NS affecting}), (\text{not affected, neighbor}$$

NE affecting), (not affected, neighbor NW affecting), (not affected, neighbor SE affecting), (not affected, neighbor SW affecting), (not affected, neighbor EW affecting), (not affected, neighbor NES affecting), (not affected, neighbor NWS affecting), (not affected, neighbor NEW affecting), (not affected, neighbor SEW affecting), (not affected, neighbor NSEW affecting), (not affected, all not affecting), (affecting), (affected)}

전이 확률  $P_{i,j,c}$  는 이웃하는 주변 셀의 상태뿐 아니라 현재 셀에서의 전이와 관련된 요인을 고려하여 결정할 수 있는데 이를 위해 원격탐사 자료와 대응되는 GIS 맵, 그 외 전이와 관련된 자료가 이용될 수 있다. 이러한 Markov chain에 기반한 모형을 이용하여 사건의 공간적인 진행 과정을 모의하면 궁극적으로 사건에 영향을 받는 지역의 형태 및 구조를 모의할 수 있게 된다.

지표면의 변화는 거시적인 영역단위와 세부 지역 단위로 나누어 이해할 수 있는데 전체 지표의 구조나 이러한 구조와 연관된 사건 발생은 영역 단위로 처리되고 발생 지점을 중심으로 사건이 진행되는 과정은 세부 지표단위로 처리된다. 따라서 사건 발생에 의한 지표 변화 탐지를 위한 동적 모형 및 모의 시스템을 개발할 때는 보통 영역단위 모형과 지역단위 모형으로 구성된 계층적 접근법을 사용할 수 있다.

자연화재에 의해 갑작스럽게 지표가 변화하는 것과는 달리 사막화나 도심주변 지역의 도시화 과정과 같이 지표상에서 여러 상호 작용에 의해 끊임없이 일어나

고 있는 변화를 분석할 때는 random field에 기반하여 시간에 따른 상태-전이 (state-and-transition) 비율이나 이웃하는 주변과 다른 환경적 조건을 고려하여 전이 비율을 결정하는 방법 등과 같은 2차원 스토캐스틱 모형을 이용하거나 지표 구성 요소의 공간적 분포와 지표 패턴 변화에 초점을 두고 변화과정을 분석하는 공간 통계 모형을 사용해야 한다(Li and Reynolds, 1997).

### 3. 지표 변화 과정에 대한 모의 실험

이 장에서는 예제를 통해 연속적으로 발생하는 자연 화재로 인해 지표가 변화해 가는 과정을 모형화하고 이를 모의하는 과정이 설명되어있다. 예제로 사용된 지역은 오스트리아 빅토리아 사막의 부분 지역으로 지구상에서 아직 인간의 영향을 받지 않고 남아있는 극히 일부 지역 중의 하나로 생태계 연구에 매우 중요한 곳이다. 연구의 궁극적인 목적은 이렇게 변화하는 환경 속에서 생태계가 어떻게 적응하고 변화해 가는지 그 과정을 이해하고 생태계를 보호 및 유지할 수 있는 관리 방안을 연구하는 것이다. 자연재해로 인한 지표 패턴의 변화 과정에 대한 모의 과정은 다음과 같이 간략히 요약될 수 있다.

1. 초기 패턴 맵 모의: 먼저 연구대상 지역의 관심 GIS 맵으로부터 지표 타입들의 공간적 분포나 크기, 모양 등의 패턴의 속성을 파라미터화하고 모형을 통해 초기 공간 패턴을 모의한다. 지표 타입과



공간적 구조가 사건 발생과 진행과정에 영향을 준다는 가정 하에 식물군의 비율, 영역의 모양, 등 초기 조건을 다르게 하여 지표면 패턴이 초기 조건에 따라 어떻게 달라지는지 모의할 수 있다.

2. 사건 발생 모의: 발생 과정에 대한 모형을 개발하고 초기 지표 패턴 위에 발생 지점을 모의한다.

3. 공간적 변화과정 모의: 발생지점을 중심으로 주변 지역이 변화되어 가는 과정을 모형화하여 변화지역을 모의한다.

### 3.1 지표 패턴 모의

지표면의 공간적 패턴은 환경의 변화를 일으키는 여러 요인들의 발생 및 진행 과정에 영향을 끼치므로 2D 기반의 지표

변화에 관한 동적 공간 모형 개발 및 모의실험을 위해서는 연구 지역의 지표 특성을 반영하고 있는 초기 지표 패턴 맵이 필요하다.

다음 [Figure 2]는 제시된 모형을 이용한 공간적 패턴 시뮬레이션 예들이다. 주어진 원격탐사 영상에서 영역 형성에 관련된 파라미터를 측정하여 이를 이용하여 원 영상과 통계적으로 특성이 같은 다양한 패턴 맵을 형성해 낼 수 있다. 파라미터 측정은 히스토그램 기법에 의한 LSQR(the Least Square Error method)을 이용하였고(Derin and Elliot, 1987) 제시된 알고리즘은 시각적으로나 수치적으로 평가될 수 있다.

계층적 접근법을 사용하면 거시적인 면에서 세부적인 면까지 관찰되는 여러 통

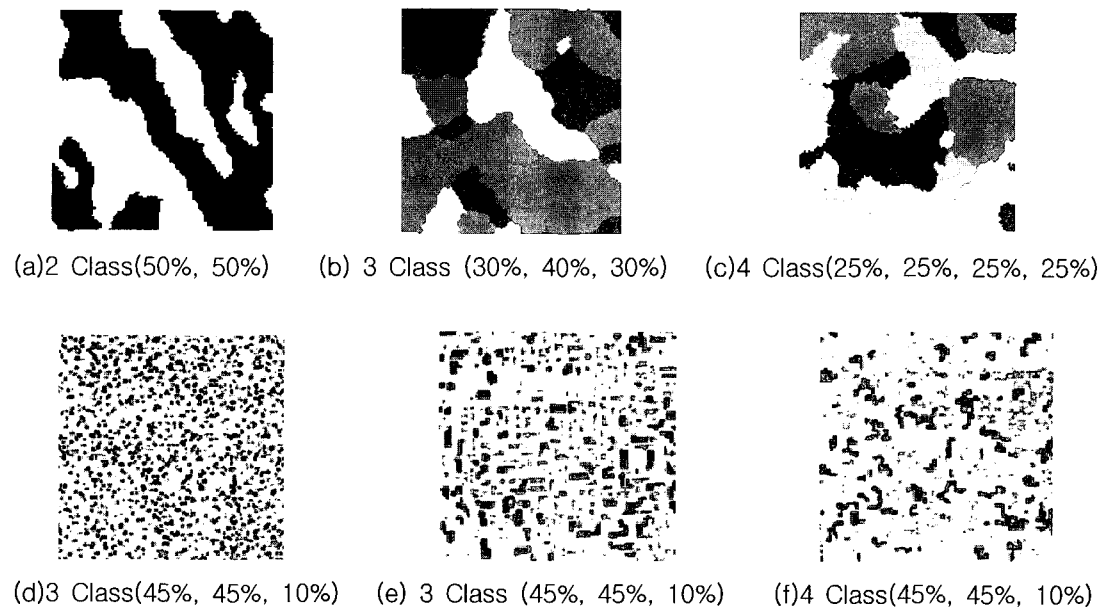


Figure 2. Examples of simulated spatial patterns: (a), (b), (c) – Regional pattern generated by MRF (d), (e), (f) – Small patch pattern generated by SHAPC

계적 특성을 포괄적으로 다룰 수 있다. 복잡한 통계적 특성은 단계별로 모형화할 수 있는데 상위 레벨에서는 영역들의 공간패턴 특성을 모형화하고 하위 단계에서는 영역내 특성을 모형화할 수 있다. 다음 [Figure 3]에서는 이러한 계층적 접근법의 한 예를 설명해 주고 있다.

이렇게 지역 환경의 공간적 특성을 모형화하여 모의된 영상들은 지표면에서 일어나고 있는 각종 현상을 분석하고 모델링 할 수 있는 기초 수단을 제공함으로써 2D 기반의 동적 모델링을 체계적이고 합리적으로 접근할 수 있는 방법론을 제공하게 된다.

### 3.2 사건 발생 및 변화과정 모의

연구 지역에서 해마다 발생하는 화재는 지역 생태계에 영향을 미치는 주된 요인으로 주로 번개에 의해 처음 발생되고 온도, 강수량, 풍향, 식물분포, 등에 영향을 받으며 수주간에 걸쳐 번져나간다. 화재

가 발생하면 식물군이 바뀌게 되어 서식지 변화에 따른 생태계 변화가 일어나고 다음 해 발생하는 화재도 다시 결과적으로 형성된 새로운 지표면 구성과 밀접한 관계를 가지고 발생하게 된다. 이 지역에서 서식지를 관리하고 종간의 균형 있는 구성을 유지시키기 위해 자연 화재에 의한 지표 변화과정을 이해하는 것은 중요하다(Pianka, 1992). 화재 발생 과정을 위해 NPPP (Nonhomogeneous Poisson Point Process)를 적용하였는데 다음과 같이 단순화시킨 intensity 함수를 발생 위치와 관련시켜 적용해 보았다.

$$\lambda(x, y) = \exp(\alpha + \beta x + \gamma y + \delta xy)$$

사용된 테스트 영상은 3000x1870(총 면적 - 35904 km<sup>2</sup>) 크기의 1972년과 1975년 MSS 영상으로 MLC(Maximum Likelihood Classification) 분류를 통해 1972년까지 발생한 화재와 1973년~1975년 사이에 발생한 화재로 구분되어 [Figure 4]에 화재발생 분포를 공간적으로 나타내었고 (임의

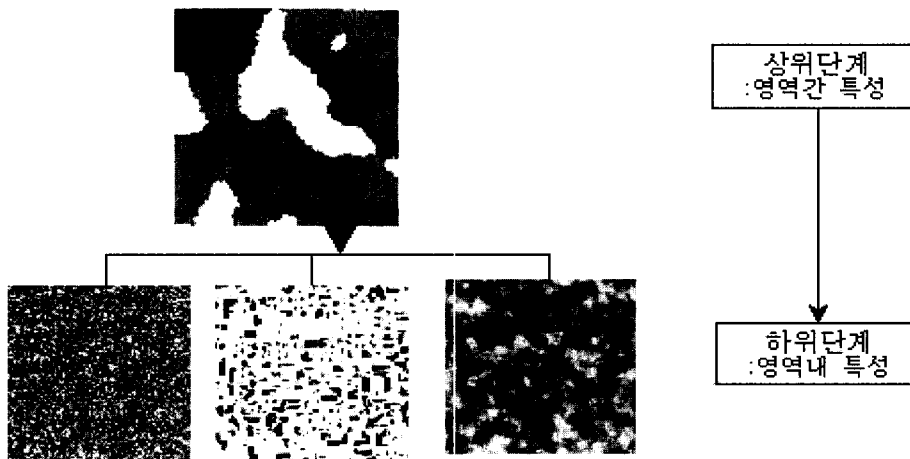


Figure 3. Hierarchical modeling of the characteristics observed in land cover

적으로 화재지역의 중앙점을 발화 시점으로 가정하였다.) 각각의 CSR테스트 결과를 통해 화재 발생은 무작위적으로 일어나는 사건이 아님을 확인하였다. 2차원 공간상에서의 NPPP는 rejection sampling에 의해 모의될 수 있는데 먼저  $\lambda^* = \max(\lambda(x, y); x, y \in A)$  intensity 함수를 갖는 포아송 프로세스를 이용하여 발생을 모의한 후  $\lambda(x, y)/\lambda^*(x, y)$ 에 따라 thinning시키면 된다(Lewis and G. Shedler, 1987). 모의된 결과가 [Figure 4]에서 실제 발생 결과와 비교하여 보여지고 있는데 매우 유사한 공간적 속성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

모형에 의한 모의 결과에 대한 Goodness of fit를 적용하였다. 이때 귀무가설은

$H_0$  : Nonhomogeneous Poisson Process

이고 최근접 이웃 거리의 EDF에 기초한 Monte Carlo test 결과 적용된 모형은 발생 과정을 잘 설명하고 있음을 확인할

수 있었다. 모형에 포함하여 파라미터화했던 발생 위치는 그 지점에서의 식물군과 매우 밀접한 관련을 가지고 있음을 유추해 볼 수 있고 더 많은 관련 자료를 이용하여 여러 가지 요인을 포함하여 모형을 확장시킬 수 있다. 이와 같이 스토캐스틱 모형 및 모의를 통해 공간적으로 발생하는 과정을 이해하고 앞으로의 변화를 예측하고 이를 관리 측면에서 이용할 수 있다.

다음은 자연 화재 발생으로 인한 지표면 변화 과정을 모의하여 화재에 영향을 받은 지역의 형태 및 구조를 모의할 수 있다. 여기서는 화재 발화점을 중심으로 주변 지역으로 확산되어 가는 과정을 Markov chain을 이용하여 모형화 하였고 주변 셀과 이웃하는 주변 셀(4개의 최근접 이웃)의 상태에 의해 전이 확률을 결정하였다(Caswell and Cohen, 1991; Kessel, 1977). 즉, 상태 간의 전이 확률  $p_{i,j,cd}$ 는 이웃 셀들의 상태가  $cd$ 일 때 상태  $i$ 에서  $j$ 로 전이할 확률로 주어진 셀과 주변 셀과의 관계를

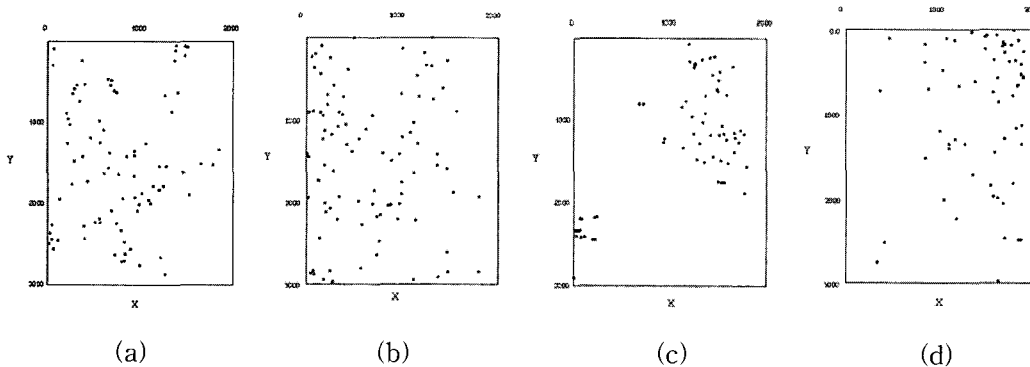


Figure 4. Comparison of spatial distribution of simulated fire arrival points and real fire arrival points : (a) ~1972 fires(N=81) (b) ~1972 simulated fires (c) 1973~1975 fires (N=62) (d) 1973~1975 simulated fires

설정하는 정도에 따라 모형은 매우 복잡하게 발전될 수 있다. 여기서는 전이확률 행렬을 다음과 같이 정의하였다.

$$P_{cd} = \begin{matrix} \text{not affected} \\ \text{affecting} \\ \text{affected} \end{matrix} \begin{pmatrix} p & 1-p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

이때 확률  $p$ 는 주변 이웃의 상태가  $cd$  일 때 not affected cell(not burned)에서 not affected cell이 될 확률을 나타내는데 다음과 같이 히스토그램 기법을 이용하여 구해질 수 있다.

$p$ (이웃 셀들의 상태가  $cd$ 인 not affected cell의 수)/(이웃 셀들의 상태가  $cd$ 인 셀의 수)

따라서 not affected cell에서 affecting cell

로 될 확률은  $(1-p)$ 이다. 또한 affecting cell(burning cell)에서 affected cell(burned cell)로 될 확률은 1이고, affected cell에서 affected cell이 될 확률도 1이 된다. 따라서 전체 전이확률은 다음과 같다.

$P=[P_{cd}], cd \in \{\text{set of all the configuration of neighbors}\}$

1980년~1988 사이의 원격탐사 자료로부터 얻어진 화재지역 GIS 맵으로부터 전이 확률을 구하였고 구해진 전이 확률을 가지고 진행과정을 모의하면 영향을 받은 지역의 형태 및 구조가 모의된다. 모의과정에서 사용된 affecting time(burning time)은 지수함수  $\exp(5.0)$ 을 사용하였다. [Figure 6]은 자연화재로 인한 지표 변화 모의과정의 한 예이다.

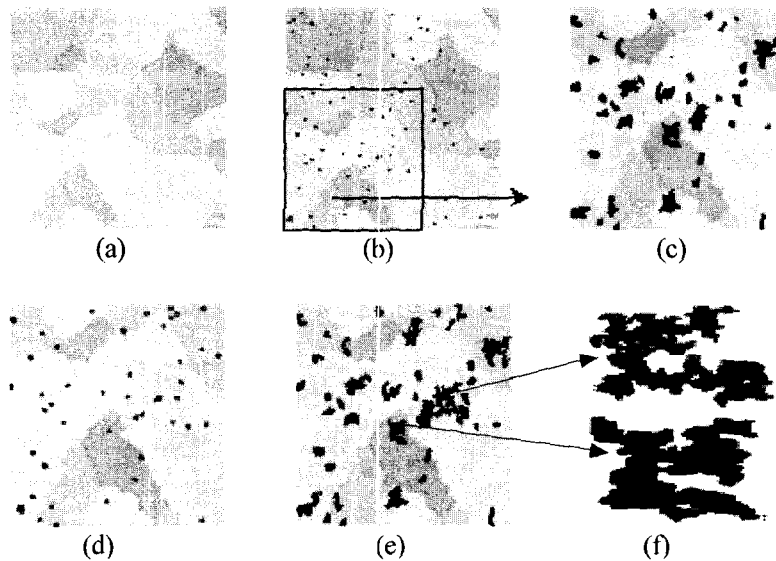


Figure 6. Simulation of land cover change process by natural fires:(a) simulated initial spatial pattern map (b) simulated fire arrival points at t=1 (c) simulated fire-affected areas t=1(d) simulated fire arrival points at t=2 (e) simulated fire-affected areas t=2 (f) examples of fire scar configuration

## 4. 결 론

본 논문에서는 자연재해로 인한 지표면 변화의 예를 중심으로 지표면에서 일어나고 있는 현상 및 변화에 대한 요인을 분석하고 현상을 이해하기 위해 2D 기반의 동적 공간모형을 이용하는 방법론을 설명하였다. 모형에 기반한 모의는 모형의 유용성을 보이고 결과를 보다 정량적으로 평가할 수 있게 해 준다. 공간적 모형을 다룰 때에는 지표상에서 일어나고 있는 변화가 지표 패턴과 상당히 밀접한 관계를 가지고 있으므로 먼저 연구하고자 하는 지역의 공간적 패턴의 특성을 이해해야만 한다. 특히 생태계와 관련된 변화 과정에서는 공간적 이질성은 생태 시스템에서 매우 중요한 요소이기 때문에 관련 연구에서는 공간적 패턴으로부터 변화과정을 예측하는 이론을 개발할 필요가 있다. 공간적 이질성은 거시적인 특성과 세부적인 특성으로 나누어 고려할 수 있는데 연구 목적에 적합한 수준의 패턴 특성을 고려해야 한다.

개별적인 변화인가 주변 환경과 연관된 변화 과정인가에 따라 다루려고 하는 변화 규칙을 다르게 정의할 수 있고 이러한 규칙을 설명하기에 적합한 모형을 선택해야 한다. 자연재해와 같이 급작스러운 변화가 아니라 도시화나 사막화 같은 변화 과정은 주변 환경과 관련하여 변이과정을 고려해야 하는데 개별적인 유기체의 작은 변화로부터 전체적인 패턴 변화과정을 설명해야하는 경우처럼 모형을 개발할 때 다루는 스케일의 전이가 매우 중요한 경

우가 있다. 이러한 분야는 여러 수준에서의 변화과정과 관계를 단계적으로 이해하고 통합할 수 있는 계층적 모형으로 접근해야 하며 모형에서는 국부적인 공간 변화와 단기적 변화를 통해 장기적이고 전 지역에 걸친 변화 과정으로 유도되도록 연구해야 한다(Hobbs, 1994).

공간적 스토캐스틱 모형을 개발 및 모의하는데 있어 GIS 자료는 매우 중요한 자료이다. 먼저 GIS 자료를 이용해서 연구 지역의 공간 패턴 특성을 이해하고 초기 패턴 구성을 정의할 수 있고 식물군의 GIS 맵을 예측한 결과를 현재 GIS 맵과 비교함으로써 모형을 평가해 볼 수 있다. 또한, GIS 맵으로부터 모형에 필요한 전이확률 및 파라미터를 계산할 수 있다. 그러나 적당한 시간적 간격으로 획득되지 못하거나 공간적 단위가 큰 GIS 맵의 경우 시간적, 공간적 해상도가 연구에서 요구하는 수준을 제공하지 못하는 문제가 있는데 다양한 원격탐사 영상이 일반적으로 연구에 활용됨에 따라 이와 같은 해상도 문제는 해결될 수 있다.

## 참고문헌

- Caswell, H. and Cohen, J. E. 1991, "Disturbance, Interspecific Interaction and Diversity in Metapopulation," *Biological Journal of the Linnean Society*, vol. 42, pp. 193-218.
- Cox, D. R. and Lewis, P.A.W. 1966, *Statistical Analysis of Series of Events*, Methuen and Co., Ltd., London.
- Cressie, N. A. C. 1993, *Statistics for Spatial Data*, John Wiley & sons.

- Daring, D. A. 1984, The Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises Tests, *Ann. Math. Statist.*, Vol. 28, 823-838.
- Derin, H. and Elliot, H. 1987, "Modeling of segmentation of noisy and textured image using Gibbs random field," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-9, pp. 39-55.
- Diggle, P. J. 1983, *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns*, Academic Press,
- Geman, S. and Geman, D. 1984, "Stochastic Relaxation, Gibbs Distribution, and the Bayesian Restoration of Images," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, PAMI-6, pp. 721-741.
- Hobbs, R. J. 1994, "Dynamics of vegetation mosaics: can we predict responses to global change?" *Ecoscience*, vol. 1, pp. 134-145.
- Kessel, S. R. 1977, *Gradient Modeling, A New Approach to Fire Modeling and Resource Management*, *Ecosystem Modeling in Theory and Practice*, eds. C. A. S. Hall and J. W. Day, John Wiley and Sons, New Your.
- Lewis, P. A. and Shedler, G. 1987, "Simulation of Nonhomogeneous Poisson Process by Thinning," *Naval Research Logistics Quaterly*, Vol.26, pp. 465-482.
- Li, H. and Reynolds, James F. 1994, "A simulation experiment to Quantify spatial
- Pianka, E. R. 1992, *Fire ecology - Disturbance, Spatial Heterogeneity, and Biotic Diversity: Fire Succession in Arid Australia*, *National Geographic Research and Exploration*, vol. 8, No. 3, 352-371.
- Sklar, F. H. and Costanza, R. 1991, "The development of dynamic spatial models for landscape ecology: A review and prognosis", in *Quantitative Methods in Landscape Ecology: The Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity*, eds. M. G. Turner and R. H. Gardner, Springer-Verlag, New York.
- Turner, M. G. et al., 1990, "Predicting the spread of disturbance across heterogeneous landscapes," *OILOS* 55, pp. 121-129.