

서울대도시지역 도시성장 예측에 관한 연구*

강영옥** · 박수홍***

A Study on the Urban Growth Forecasting for the Seoul Metropolitan Area*

Youngok Kang** · Soohong Park***

요약 : 도시는 산업혁명 이후 급속히 발달하기 시작한 인간의 대표적인 정주공간으로, 산업활동의 집중, 도시로의 인구유입으로 공간적인 범위가 확대되어 가고 있다. 급속한 도시성장은 환경을 악화시키고 있으며, 이에 따른 온실효과, 대기오염의 증가 등은 심각한 도시문제로 떠오르고 있다. 지속 가능한 도시성장을 위해 도시가 어떻게 성장해 왔는가를 분석하고, 향후의 도시성장을 예측하며, 이에 대한 적절한 대안을 모색하는 것은 도시관리를 위해 매우 중요한 문제이다. 본 연구에서는 서울대도시지역을 대상으로 1957년부터 1997년까지의 도시성장에 관한 자료를 구축하고, 셀룰라 오토마타(Cellular Automata) 개념에 기초하고 있는 도시성장모델(UGM)을 이용하여 1998년부터 2050년까지의 서울대도시지역의 도시성장을 예측하였다.

주요어 : 도시성장예측, 셀룰라 오토마타(Cellular Automata), 시뮬레이션, 도시성장모델(Urban Growth Model), 서울대도시지역

Abstract : The conversion from natural land to artificial land is known as urbanization. At the global scale, urbanization continues to expand rapidly through the migration of people from rural to urban areas. Since these global developments threaten to change our ecosystems and the well being of humans and wildlife, forecasting change with urban growth models is necessary and an important part for proper land use management. In this Study, time-series spatial data on urban land use, transportation network, slope and Green belt areas have constructed from year 1957 to year 1997 for the Seoul metropolitan area. The urban growth pattern has been forecasted from year 1998 to year 2050 using the Urban Growth Model which is based on the concept of Cellular Automata.

Key Words : Urban growth forecasting, Cellular Automata, Simulation, Urban Growth Model, Seoul Metropolitan Area

1. 서론

도시는 산업혁명 이후 급속히 발달하기 시작한 인간의 대표적인 정주공간으로 산업활동의 고도화와 집중적인 인구유입 등 여러 가지 사회경제적 변화에 따라 공간적인 범위가 전 세계적으로 확대되어 가고 있다. 급속한 도시성장은 환경을 악화시키고 있으며, 이에 따른 온실효과, 대기오염의 증가 등은 심각한 도시문제로 떠오르고 있다. 도시화가 환경에 미치는 영향을 고려해 볼 때, 지속 가능한 도시성장을 위해 도시가 어떻게 성장해 왔는가를 분석하고, 도시성장을 예측하며, 이에

대한 적절한 대안을 모색하는 것은 도시관리를 위해 매우 중요한 문제이다. 도시가 어떻게 성장해 왔는가에 대한 분석은 도시를 다루는 많은 학자들에 의해 논의되어 왔으나, 이들 대부분의 연구는 총량적인 개념을 적용하여, 시계열적이면서 공간적인 변화를 다루는데는 한계가 있었다. 최근 도시성장 모델링의 연구는 셀룰라 오토마타(Cellular Automata, CA)의 개념을 바탕으로 한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 가장 대표적인 도시성장모델 가운데 하나가 미국 USGS에서 지구변화탐지 프로그램의 일환으로 UC Santa Barbara 대학의 Keith C. Clarke 교수에 의해 개발

* 본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단 인문사회중점영역연구비 지원에 의한 것임.

** 서울시정개발연구원 지리정보연구센터 연구위원(Director, Center for GIS/UIS, Seoul Development Institute)

*** 인하대학교 공과대학 지리정보공학과 전임강사(Full-Time Lecturer, Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University)

된 UGM모델(Urban Growth Model: Clarke and Gaydos, 1997)이다.

본 연구는 셀룰라 오토마타에 개념적 기반을 둔 UGM모델을 이용하여 서울대도시지역의 과거 도시성장을 분석하고, 이를 바탕으로 1997년부터 2050년까지의 도시성장을 예측해 보고자 한다. UGM모델 수행을 위해 1957년부터 1997년까지의 도시지역, 교통로, 개발제한구역, 수계, 경사자료 등이 구축되었으며, 자료구축을 위해 ArcInfo 8.0, AutoCAD2000, ERMMapper 6.0등이 사용되었으며, 모델은 UNIX운영체제에서 수행되었다.

본 논문의 제 2장에서는 도시성장 모델링에 대한 연구동향을 살펴보고, 최근 모델링에 대한 접근법으로 주목을 받고 있는 셀룰라 오토마타의 개념과 연구동향을 소개하였다. 제 3장에서는 셀룰라 오토마타와 도시성장 예측을 접목한 UGM모델의 개념과 모델의 보정과정에 대한 개념을 소개하였다. UGM모델에 기초한 서울대도시지역 도시성장 분석 및 예측결과는 제 4장에서 분석되었다. 마지막으로 제 5장에서는 이 논문의 시사점과 한계점, 그리고 앞으로의 연구방향을 제시하였다.

2. 도시성장 예측 모델링의 이론적 배경

1) 도시성장 예측 모델링의 연구동향

도시성장이 급속히 빨라지면서, 향후 도시의 물리적 구조와 도시권역의 형태, 도시성장의 패턴에 대한 예측은 교통계획이나 도시계획, 환경을 연구하는 사람들에게 매우 중대한 문제이다. 이러한 이유로 도시성장에 대한 시뮬레이션 모델은 1950년대 이후 많은 관심을 받아 왔다(Harris, 1985). 이러한 도시성장을 예측하는 모형들은 크게 도시내 토지이용에 초점을 두어 설명하고 있는 모형들, 둘째 도시성장의 공간적 패턴에 초점을 둔 모형들, 셋째 1970년대 이후 복잡계(complex system) 접근방법에 초점을 둔 모형 등으로 나뉘볼 수 있다.

도시내 토지이용에 초점을 두고 도시성장을 모형화하는 연구들은 제 1차 세계대전 직후부터 있어 왔다. 도시계획을 연구하는 프로그램이 미국의 노스캐롤라이나, 시카고, 버클리, 펜실베이니아 등지

에서 시작되면서 도시성장을 예측하려는 연구들이 시작되었으며, 1940년대 초반부터 시작된 이들 연구는 1950년대 대도시권 교통에 대한 예측을 위해 활발한 연구가 진행되었다. 도시 토지이용 유형의 모델은 Lowry 유형, 경제 균형 결정론에 입각한 유형, 경제 균형 외에 다른 요인까지 포함된 유형 등으로 나뉘볼 수 있다.

토지이용모델 가운데 가장 잘 알려져 있는 것이 Lowry(1964)의 모델이다. Lowry는 피츠버그의 주거지와 서비스지역(상업지역)의 공간적 패턴을 시뮬레이션하기 위해 모델을 개발하였다. Lowry 모형은 모델의 작동성(operationality)에 초점을 둔 것이며, 토지이용 활동의 공간적 패턴과 이에 따른 주요 지역의 변화를 분석 및 예측하는데 성공적이었다. Lowry모델은 많은 데이터를 필요로 하지 않으며, 단순하고, 도시활동을 기반과 비기반으로 나눈 근간 위에 부가적으로 활동을 세분화할 수도 있도록 되어 있는 확장성 있는 모델이다. 그러나 Lowry모델은 경제학적이거나, 행태학적 이론적 배경이 빈약하다는 단점을 갖고 있다. Lowry모델은 여러 측면에서 수정 발전되었으며, 많은 다른 도시들에서 적용되었다. Goldner와 Graybeal(1965), Goldner(1968), Garlin(1966), Putman(1973, 1974), Anas(1984)의 모델 등이 Lowry모델에 기초를 두고 확장된 것이다. 이 가운데 Goldner와 Graybeal(1965)의 Bay Area Simulation Study(BASS)에서는 격자형 대신에 센서스 트랙이 분석의 단위로 사용되었으며, Lowry 모델에서 사용된 많은 파라미터들이 개개 센서스 트랙 단위의 파라미터로 세분화되었다. Goldner(1968)의 Projective Land Use Model (PLUM)에서는 Lowry의 중력모형이 기회간섭 함수(intervening-opportunity function)로 대체되었다.

경제균형 결정론 모형에 포함되는 모델로서는 Herbert-Stevens 모델(1960)을 들 수 있다. 현대의 도시토지이용에 대한 이론적 배경은 Wingo(1961)와 Alonso(1964)의 입지이론에 기초하고 있으며, 이들의 이론은 도시내 토지이용의 입지와 구조를 설명하는데 많은 기여를 하였다. Herbert-Stevens(1960)의 필라델피아 대도시권역의 Penn-Jersey Transportation 연구는 경제이론에 입각하여, 실제 대도시지역의 자료를 이용하여 분석한 최초

의 모델이다. 이 모델의 강점은 경제적 이론에 배경을 두고 있으며, 주거지역 지가 결정을 설명하는데 성공적이었다는 점이다. 그러나 주거지역 지가만이 설명되었으며, 주거지역 토지시장을 선형으로 설명하며, 공간적인 특성이나 다른 외부요인들을 설명하지 못하고 있다는 점, 토지의 공급이 비탄력적이며, 모델에서 요구되는 데이터를 구하기가 어렵다는 점 등의 단점을 갖고 있다. Herbert-Stevens의 모델은 National Bureau of Economic Research Model(NBER)로 발전되었다(Ingan et al., 1972). 이 모델은 주택의 공급과 함께 고용자들의 입지를 다루고 있기는 하나, 궁극적으로는 주거지 선택에 초점을 두고 있으며, 입지지대이론에 최초로 가구의 선호문제가 포함되었다는 특성을 갖고 있다.

경제 균형 외에 다른 요인까지 포함된 유형의 모델로는 Anas(1984)모델을 들 수 있다. Anas의 모델은 토지이용, 빌딩 유형, 주거지와 고용중심지의 입지, 그리고 고속도로 통행량에 이르기까지의 포괄적인 균형모형에 기초하고 있다. Anas의 모델은 이론적으로 가장 완벽한 모델이라고 볼 수 있으나, 지나치게 많은 변수와 수식이 포함되어 있으며, 이에 따른 데이터를 구하기가 어렵다는 단점을 갖고 있다. Anas는 일반적인 균형이론의 몇 가지만을 적용한 실질적으로 적용할 수 있는 모델을 개발하였으며, 이를 Chicago Area Transportation and Land-use Analysis System(CATLAS)에 적용하였다. 이 지역에서는 교통특성과 고용중심지는 주어진 것으로 고려하고, 주택의 수요와 공급에 모델의 초점을 두었다. CATLAS모델은 대규모의 데이터를 사용하여 실제 도시에 적용한 가장 이론적으로 만족할 만한 모델이다. 그러나 주거지역의 특성만을 설명하고 있으며, 인종적 구성이나 어메니티와 같은 환경적인 외부요소가 작용함에도 불구하고 주택시장이 완전히 경쟁적이라고 가정한 점등의 단점을 갖고 있다.

도시성장을 예측하는 두 번째 모델군은 도시성장의 공간적 특성 설명에 초점을 둔 모델들을 들 수 있다. Chapin과 Weiss(1962)는 대도시 지역에서의 지역개발에 영향을 미치는 요인들을 분석하고, 이를 향후의 지역개발을 예측하는데 사용하고자

하였다. 분석을 위해 연구지역을 한 변이 1,000 피트인 정사각형으로 나누고, 각 격자 셀 마다 자료를 입력하였다. 토지개발 요인을 확인하기 위해 일차원의 다변량 회귀분석 방법을 사용하였으며, Lexington, Winston-Salem, Greensboro의 3지역에 모델이 적용되었다. Greensboro의 경우 지역개발이 일어나는 주요 요인으로 근무지까지의 접근성, 주도로까지의 통행거리, 가장 가까운 초등학교까지의 거리, 하수시설의 사용 가능성 등이 선택되었다. 이들 주요요인이 확인된 후, 향후 개발을 예측하는 분석이 행해졌다. 이 접근법은 도시개발에 영향을 미치는 주요요인을 밝혀내고, 주요요인이 동적이며, 스토캐스틱(stochastic)한 특성에 관심을 기울였다는 측면에서는 장점이 있으나, 행태적이거나, 경제적 이론에 토대를 두지는 않았다. Tobler(1970)는 컴퓨터 무비를 이용하여 디트로이트 지역의 도시성장을 시물레이션 하였다. Tobler는 도시성장을 시물레이션하기 위해 디트로이트 지역을 격자형의 셀로 나누었으며, 인구성장의 지리적 공간패턴에 초점을 두고 시물레이션하였다. 이 모델은 인구라는 변수만을 고려한 단순한 모델이었으나, 도시성장을 공간적으로 설명하고, 이를 시각화하였다는 특징을 갖고 있다. Meaille와 Wald(1990)는 프랑스 남동부 지역의 도시성장을 1975년부터 2025년까지 시물레이션 하였다. 연구지역은 인공위성 영상자료를 사용하여 분석되었으며, 공간단위는 80m의 격자단위로 구획되었고, 토지이용형태, 격자별 인구밀도, 행정경계, 산불관리기관, 도로와 철도망 등의 자료가 입력되었다. 1976년부터 1985년까지의 시물레이션이 행해진 후 2025년까지의 시물레이션을 실행하여 도시성장의 공간적 패턴을 분석하였는데, 도시지역의 성장은 도로와 도시간을 잇는 통로를 따라 일어나는 것으로 분석되었다.

1970년대 이후 도시변화 혹은 성장 모델링은 복잡계(complex system) 접근방법이 주류를 이루어 왔다. 복잡계 접근방법은 비선형(non-linearity), 자기조직(self-organization & reproduction)과 같은 무질서이론(chaos theory)과 인공생명이론(artificial life theory) 등의 기본적인 개념과 원리를 원용하고 있다. 복잡계 접근방법을 바탕으로 한 도시성장 모델링 연구는 크게 세 가지의 연구방향으로

요약될 수 있는데, 첫 번째가 격변론(catastrophe theory)에 바탕을 둔 도시지역 변화(성장) 연구들이다. 여기에서는 도시지역의 변화를 야기하는 특정한 파라미터의 점진적인 변화속에서 갑작스런 도시시설물 혹은 현상(예를 들면 쇼핑센터 등)의 발생과 소멸을 격변론에 입각하여 설명하고자 하였다(Wilson, 1976). 두 번째 연구유형으로는 물리화학자인 Prigogine과 그의 동료들에 의해 제안된 두 갈래치기 이론(bifurcation theory)을 도시현상에 적용한 연구들로서, 이러한 유형의 연구들은 도시의 다양한 동적인 현상들이 설명하고자 하는 특정한 파라미터들의 무작위적 변동(random fluctuation)의 결과로 이따금씩 그 진행방향 혹은 궤도를 변경한다는데 착안하고 이를 설명하고 분석하고자 하는 것이 주요한 목적이었다(Prigogine, 1980; Prigogine and Stengers, 1984; Allen and Sanglier, 1978; Allen, 1981, 1982). 세 번째의 연구유형은 도시성장 및 현상의 프로세스를 셀룰라 오토마타(CA)의 이론과 기법을 이용하여 모형화하고 예측하고자 하는 연구들이다. 셀룰라 오토마타에 기반을 둔 도시성장 및 관련 연구들은 70년대 후반 Waldo Tobler(1979)에 의해 CA가 지리학계에 소개되면서부터 연구되기 시작하였으며, 1980년대 후반부터 현재까지 다양한 연구결과가 발표되고 있다. 이러한 CA에 바탕을 둔 도시성장 및 관련 연구는 CA가 가지고 있는 동적 모델링(dynamic modelling)과 명확한 시공간 모델링(explicit spatio-temporal modelling), 그리고 프로세스에 기반 둔 프로세스 모델링(process modelling)의 장점에 착안하고 있으며, 또한 래스터 GIS와의 개념적 유사성으로 인해 현재 활발히 연구되고 있는 분야이다.

2) 셀룰라 오토마타의 원리

셀룰라 오토마타는 1950년대 초 John von Neuman과 그의 동료 Stanislaw Ulman에 의해 발표된 이론 및 기법으로(von Neuman, 1966) 물리학, 화학, 생물학, 수학, 컴퓨터 공학 등을 포함한 여러 자연과학 및 공학 분야에서 다양한 동적 현상들을 연구하는데 사용되어 왔다. CA의 원리 및 일반적인 특성은 무질서 시스템(chaotic system)과

인공생명(artificial life)을 연구하는데 있어 주요한 수단으로 간주되고 있으며 동적이고 복잡한 자연 현상들을 시뮬레이션 하는데 유용한 도구로 사용되어 왔다.

셀룰라 오토마타 모델은 크게 네 가지의 기본 요소로 구성된다. 첫 번째 요소는 셀룰라 공간(cellular space)으로 무한한 다차원의 공간을 동일한 크기의 셀로 분할한 공간을 의미하며, 여러 가지의 정규 다각형으로 분할이 가능하다. 보통 삼각형, 사각형, 육각형이 많이 사용된다. 두 번째 구성요소는 지역 상태(local states)로 이는 주어진 시간에서 각 셀의 상태, 구체적으로는 셀이 가지는 값(주로 숫자로 표현)이다. 세 번째 구성요소는 주변셀(neighborhood)이다. 주변셀은 중심셀(focus cell) 주위에 인접하고 있는 셀들의 집합을 말하는데 보통 거리, 방향, 혹은 각도에 의해 결정된다. 셀룰라 오토마타의 주변셀은 영상처리나 공간필터(spatial filter)의 마스크나 윈도우와 개념적으로 매우 유사하다. 셀룰라 오토마타에서 주변셀의 구성은 매우 자유롭기 때문에 다양한 형태나 크기의 구성이 가능하며 다차원 혹은 매 시기별 다른 주변셀을 구성할 수 있다. 셀룰라 오토마타의 마지막 구성요소는 변화규칙(transition rule)이다. 변화규칙은 각 셀이 매 시간별로 어떻게 변화할지를 규정하는데 여기에는 주변셀들의 구성과 위치가 정의되어 있다. 변화규칙은 모든 셀룰라 공간에 동일하게 적용되는 공통규칙(universal rule)으로 지역적인 특성을 지니고 있다. 보통 변화규칙은 특정한 컴퓨터 언어로 기술되거나 아니면 셀룰라 오토마타 패키지에서 제공되는 언어로 기술된다.

셀룰라 오토마타 모델은 위에서 설명된 네 가지의 기본적인 구성요소를 사용하여 구성되는 모델이며, 원리상 이산적인 셀룰라 공간에 기반을 둔 시공간 동적 모델이라 할 수 있다. Tobler(1979)는 이러한 셀룰라 오토마타 모델의 특성을 일반적인 공간 모델(토지이용변화 모델을 예로)과의 비교에 의해 그 특성과 원리를 설명하였다(그림 1).

그림 1에서 모델 I의 유형은 이전 시기와 다음번 시기의 토지이용 변화가 서로 연결되지 않는 독립적인 모델을 의미한다. 모델 II는 다음번 시기의 토지이용 결과는 이전 시기의 토지이용의

함수적 관계에 근거한 모델로 주로 마르코프 체인(Markov chain) 모델들이 여기에 해당된다. 모델 III은 역사적인 모델이라 Tobler는 명명하였으며 이는 여러 시기의 변화를 종합하여 그 결과를 예측하는 일반적인 시계열 모델을 의미하고 있다. 모델 IV는 보통 다변량 모델(multivariate model)을 말하는데 이전 시기의 여러 변수를 사용하여 다음번 시기의 결과를 분석하는 모델이다. 마지막인 모델 V는 이전 시기의 각 셀의 값 주위에 있는 주변셀들의 상태에 따라 다음번 시기의 셀값을 결정하는 셀룰라 오토마타의 모델들을 표현하고

있다. 여기에서 Tobler는 기존의 다른 모델과는 달리 셀룰라 오토마타는 시공간에 기초하고 있는 모델이라는 점을 시각적으로 강조하고 있다.

결국 셀룰라 오토마타는 이산적인 시공간에 기초한 동적인 공간 모델로 간주되며 또한 특성상 반복적인 계산에 의해 변화양상을 시뮬레이션할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 국지적인 프로세스(local process)는 잘 알려져 있으나 전체 시스템의 행태(behavior)가 알려져 있지 않은 다양한 시스템의 특성을 파악하는데 셀룰라 오토마타의 기법들이 널리 활용되어 온 것도 이러한 독립된

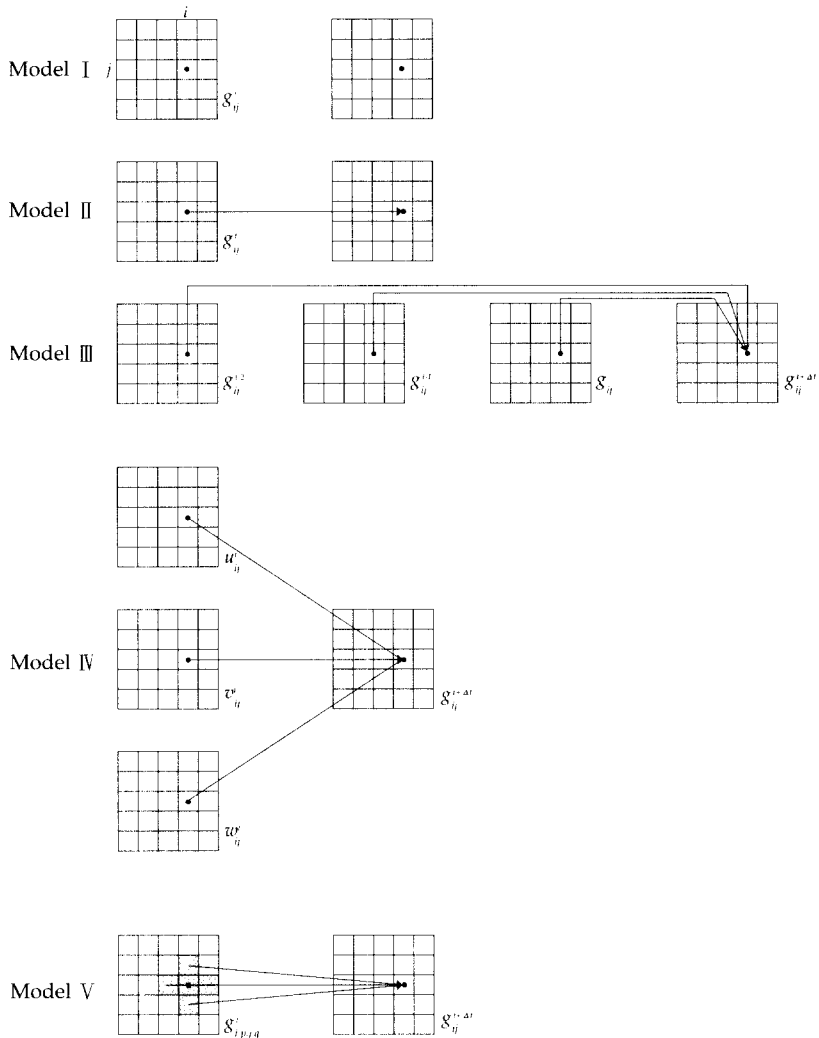


그림 1. 주요 공간 모델의 유형 (Tobler, 1979)

셀들의 매 시기별 변화양상을 시뮬레이션할 수 있는 장점 때문이라고 생각된다.

3) 셀룰라 오토마타 적용사례와 연구동향

셀룰라 오토마타는 물리학, 화학, 생물학, 생태학, 수학, 컴퓨터 공학, 전기공학 등 다양한 자연과학 및 공학분야에서 연구되어 왔다. 셀룰라 오토마타의 이론이 정립될 무렵에는 주로 셀룰라 오토마타가 하나의 무질서 시스템으로서의 일반적인 특성이 연구되어 왔으며 이러한 전통은 아직까지도 이어지고 있다. 또한 이와 아울러 셀룰라 오토마타는 다양한 현상의 본질을 파악하기 위해 복잡한 동적인 프로세스를 시뮬레이션하는 주요한 도구로 사용되어 왔다.

분야별 주요 연구사례를 살펴보면 물리학 분야에서는 유체흐름, 가스확산, 결정체의 형성 등 자연적인 현상의 시뮬레이션에 활용되어 왔는데 이러한 복잡한 자연현상들은 연속적인 시공간에서의 미분방정식(differential equations)에 의해 정의되는 것이 일반적인 방법이었다. 셀룰라 오토마타 이론의 등장으로 이러한 모델들의 시뮬레이션이 활발히 진행되고 있다. 또한 확산분야 중 입자확산모델, diffusion-limited aggregation(DLA) 등의 분야와 유체역학분야 중 음파, 액체의 흐름, 가스의 흐름 등에 적용되어 연구되어 왔다(Toffoli and Margolus, 1987). 생물학 분야에서는 신경, 근육, 심장의 기능과 반응 등의 행태를 연구하는데 사용되어 왔으며, 먹이사슬, 곰팡이균의 분기, 박테리아의 번식 등 다양한 분야에 적용되고 있다(Ermentrout and Edelstein-Keshet, 1993). 생태학의 분야에서는 식물종의 침입과 성장, 경쟁 등 천이 과정을 모델링 하는데 사용되어 왔다(Silvertown, et. al., 1992). 마지막으로 컴퓨터 공학과 전기공학 분야에서는 주로 계산이론(computational theory)과 디지털 회로와 대규모 집적회로(VLSI)에서의 디지털 로직 시뮬레이션 등에 활용되어 왔다(Culik, et. al., 1991; Codd, 1968).

지리학 분야에서의 셀룰라 오토마타 관련 연구는 1980년대 후반까지 소수의 연구자들에 의해서 이루어져 왔다(Couclelis, 1985, 1987, 1988). 대부분의 연구들은 주로 셀룰라 오토마타의 기법을 이

용한 공간 모델의 개발과 적용에 주안점을 두고 있다. 연구의 주요내용은 산불확산(Green, 1982; Clarke et al., 1995), 토지이용변화(White and Engelen, 1993, 1994), 기후변화(White and Engelen, 1994), 촌락주거지 변화(Deadman et al., 1993), 도시성장(Batty et al., 1989; Batty and Xie, 1994; Kirtland et. al., 1994)과 식생변화 모델링(Green et. al., 1985; Silvertown et. al., 1992) 등이다. 이와 아울러 현재 GIS가 갖고 있는 동적 모델링 기능을 향상하기 위해 일부 연구자들은 두 시스템의 통합가능성을 논의해 왔다(Itami, 1988; Itami and Clark, 1992; White and Engelen, 1994; Wagner, 1997). 그들은 통합시스템이 현재 GIS에 미약한 동적 모델링 기능을 추가하고 연산의 성능을 향상하며 보다 효율적인 시공연산(spatio-temporal operations)의 개발에 기여할 것이라고 주장해 왔다. 최근에 들어서는 셀룰라 오토마타를 GIS의 분석도구로 통합하여 다양한 동적 모델링을 지원할 수 있는 CA-GIS 모형시스템의 개발이 연구되었다(Park and Wagner, 1997).

도시성장 모델링 연구에서의 셀룰라 오토마타의 적용은 Batty and Xie(1994)의 연구에서 처음 논의되기 시작하였다. 이 연구는 프랙탈 이론에 근거하여 도시성장에 따른 도시형태의 기하학적 특성을 밝히고 도시성장을 물리학에서 적용되어 온 diffusion-limited aggregation(DLA) 개념을 적용하여 시뮬레이션한 일련의 선행 연구에 이은 후속연구이다. DLA는 원래 물리학 분야에서 작은 입자들이 각기 무작위적으로 이동(확산)되면서 집적되어 방사상의 형태로 군집을 이루어 가는 과정을 설명하기 위해 개발된 이론으로 Batty는 이를 도시성장 프로세스에 적용하여 도시성장의 결과로 나타나는 도시형태의 특성을 밝히고자 하였다. Batty and Xie(1994)는 셀룰라 오토마타를 도시성장 및 예측 모델링의 유용한 도구로 소개하고 잠재적인 활용가능성을 제시하였다.

실질적으로 도시성장과 관련된 셀룰라 오토마타 모델링은 샌프란시스코/세크라멘토 지역의 도시성장 예측에 의해 본격적으로 연구되기 시작하였다(Kirtland et. al., 1994). 이 연구에서 제안된 도시성장 예측모델은 Clarke et. al.(1995)에서 구현된 산불확산 모델에 기초를 두고 있으며, 도시지역의

확산(urban sprawl) 현상은 1850년대부터 1990년 사이에 제작된 각종 지도, 항공사진, 인공위성영상 등에서 추출된 데이터를 사용하여 향후 100년간의 시기별 성장과정을 시뮬레이션하여 시각적으로 표현하고 있다. 또한 이 연구에서는 수집된 실제 데이터를 사용하여 모델이 현실에 적합하도록 보정(calibration)한 다음 이를 바탕으로 향후 이 지역의 도시성장 과정을 예측하였다. Clarke의 도시성장 예측 모델은 현재 USGS(United States of Geological Survey)와 미국 캘리포니아 주립대학 지리학과(Dept. of Geography, University of California at Santa Barbra)의 공동 프로젝트인 Gigalopolis에 의해 미국의 여러 대도시에 적용되고 있으며 궁극적으로는 미국 전역에 대해 이 모델을 적용하여 향후의 도시성장을 예측하는데 그 목표를 두고 있다.

3. 도시성장모델의 개요

1) 도시성장모델(Urban Growth Model)에 대한 이해

Gigalopolis프로젝트의 핵심이 되는 도시성장모델(Urban Growth Model)은 UC Santa Barbara의 지리학과에 있는 Keith C. Clarke 교수에 의해 개발되었다. UGM모델은 과거로부터 데이터를 입력한 시점까지의 도시지역의 성장을 규칙화하고, 이를 토대로 향후 도시지역의 확대를 공간적으로 예측하는 모델로서, 래스터 형태의 데이터를 사용하며, 셀룰라 오토마타에 기초를 둔 모델이다(Cl Clarke, K.C., Hoppen, S., and Gaydos, L.J., 1996). 도시성장은 시뮬레이션하려는 지역을 격자단위의 셀로 나누며, 도시가 성장하는 규칙은 셀 단위의 지리적 공간에 동질적으로 적용된다. 도시성장을 예측하기 위해, 즉 이 모델을 수행하기 위해 필요한 데이터는 표 1에 나타난 바와 같으며, 기본적으로 미래의 도시성장에 대한 예측은 과거에서 현재까지의 도시성장이 이루어진 자료와 모델수행에 입력된 자료를 비교하여 모델 수행에 필요한 입력계수들의 값을 정한 후, 이 값을 계수로서 입력하여 수행된다.

표 1. UGM모델 수행에 필요한 데이터

| 필요데이터 | 설명 | 최소소요 |
|----------------------|---|-----------------|
| 도로 | 등급에 따라 점수부여 가능 | 적어도 2시기의 데이터 필요 |
| 도시역 (seed) | 0=도시아닌 지역, 1-254 = 도시 | 적어도 4개 시기 필요 |
| 토지이용 | Anderson Level I 분류 | 선택사항 |
| 경사 | slope (0-100) | |
| 제외지역 (excluded area) | 도시화가 일어날 수 없는 지역(수계, 개발제한 구역 등: 0=제외아님, 100:제외) | |

UGM모델에서는 다섯 가지 요인이 시스템 수행을 통제한다. 첫째는 확산요인(diffusion factor)으로 전체적으로 도시지역 셀들의 분포가 바깥으로 확산되는 것을 결정한다. 둘째는 번식계수(breed coefficient)로서 새로이 발생된 독립된 취락이 그 자체의 성장사이클을 갖게될 가능성을 나타낸다. 셋째는 확산계수(spread coefficient)로서 기존 도시지역으로부터 얼마나 유기적 확산이 일어날 것인가를 통제한다. 넷째는 경사 저항 계수(slope resistance factor)로서 취락이 가파른 경사지역으로 확대될 가능성에 영향을 미친다. 다섯째 도로요인(road gravity factor)은 새로운 도시지역이 도로를 따라 성장하려는 성향을 통제한다.

UGM모델에서는 도시성장을 자연적인 성장(spontaneous growth), 확산형 성장(diffusive growth), 유기적인 성장(organic growth), 그리고 도로에 영향을 받는 성장(road influenced growth)의 4 가지 유형으로 구분하여 모델화하였다. 자연적인 성장은 무작위로 추출된 셀이 도시화되는 경우를 시뮬레이션한 것으로, 그 셀이 도시화되지 않았더라면 그대로 미개발된 상태로 남아있을 경우를 유형화한 것이다. 확산형 성장은 비록 기상 시가지에 인접해 있지는 않더라도 경사가 없어 개발이 일어나기에 적당한 지역으로서 새로운 도시성장의 중심지역화되는 성향을 유형화한 것이다. 유기적 성장은 기존 도시중심으로부터 외곽으로 성장하는 성향을 나타낸 것으로 도시들이 팽창하려는 성향을 나타내는 것이다. 도로에 영향을 받는 성장은 도시화된 셀들이 접근성이 높은 교통로를 따라 성장하게 되는 성향을 나타낸다(그림 2).

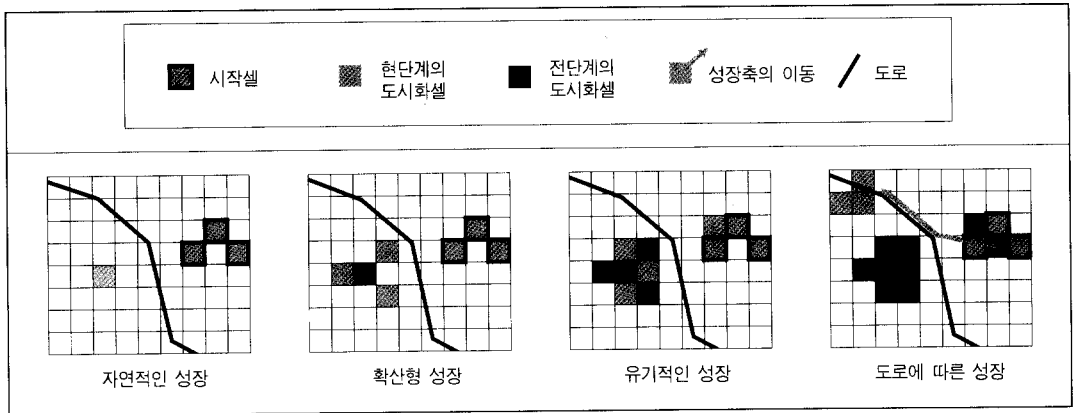


그림 2. UGM모델에서 도시성장 유형

UGM 모델의 도시성장은 위에서 언급한 4가지 유형의 도시성장 규칙 외에 자기수정(self-modification)이라는 단계를 거치는데 이는 도시성장이 지나치게 높거나, 낮게 되는 경우를 제외시키기 위한 것이다. 성장율은 모델이 수행되는 단계, 즉 각 해마다 모델에 의해 규정된 4가지 유형의 성장의 합으로 계산되는데 도시성장의 상한값(critical high)과 하한값(critical low)을 부여함으로써(실제적으로는 성장을 통제하는 확산요인, 번식계수, 확산계수의 상한값과 하한값을 부여하는 것임) 지나치게 높은 성장율이나 감소율을 제외시키도록 한다. 성장계수의 증가율이 1보다 큰 경우는 팽창 boom)의 시기를 나타내며, 이는 다른 때보다 시스템의 성장속도가 훨씬 빠르게 나타나는 경향을 나타내는 것이며, 반대로 성장계수의 감소율이 1보다 작을 때는 공황 bust)의 시기로서 시스템의 성장속도가 침체된 시기를 나타낸다. 그러나 시스템이 통제되지 않을 만큼 기하급수적으로 성장하는 것을 막기 위해 각 요인들에 적용되는 성장계수는 시간이 경과함에 따라 매해마다 약간씩 감소하도록 모델화하였다.

자기수정(self-modification)의 또 다른 효과는 도로망이 확장되면서 도로에 의해 영향을 받는 성장을 증가시키고, 개발가능지가 감소함에 따라 경사가 급한 지역에도 도시화가 일어날 수 있도록 경사 저항요인의 계수를 감소시키도록 한 것이다. 자기수정(self-modification)이 작용하도록 모델이 수행되는 경우에는 도시화될 셀들이 많이 남아있

는 성장의 초기에는 계수들의 값이 빠르게 증가하며, 지역의 도시화율이 증가함에 따라 계수들의 값은 감소하게 되는 성향, 즉 일반적인 도시팽창의 속도가 S자형을 띠는 것을 모델링한 것이다. 자기수정(self-modification)의 과정이 포함되지 않는다면, 모델은 직선상의 혹은 기하급수적인 성장을 하게 되기 때문에 비현실적인 모델이 되었을 것이다.

2) 모델의 보정

모델이 미래를 얼마나 잘 예측하는가는 모델의 보정(calibration)이 얼마나 잘 되었는가에 달려 있다. 미래의 변화에 대해 알 수 있는 방법이 없기 때문에, 모델의 보정이 잘 되었는가를 판단하는 유일한 방법은 이미 알려진 현재를 예측하기 위해 과거의 공간자료 및 통계치를 사용하는 것이다. 모델의 보정 방법은 통계치를 비교하는 방법과 공간적으로 변화된 양상을 비교하는 방법이 있을 수 있는데, UGM 모델링에서는 보정방법으로 2가지 방법을 모두 사용하고 있다.

보정의 기본적인 방법은 UGM모델의 핵심변수인 도시화 지역에 대한 모델의 예측치와 입력된 역사상의 데이터를 비교하는 것으로, 모델에서 산출된 계량적 측정치와 과거 실제 데이터의 공간값과의 상관도는 피어슨(Pearson) 상관계수(r^2)를 이용하여 계산하도록 하였다. 모델의 계수조정은 시각적 조정과 배치방법을 이용한 조정의 2가지

방법을 사용한다. 시각적 조정은 개략적인 파라미터 정의와 디버깅에 매우 유용하며, 배치방법을 이용한 조정은 엄청나게 많은 반복계산을 효율적으로 수행하도록 만든 것이다.

먼저 시각적 조정단계에서는 애니메이션을 통해 파라미터 값의 변화에 따른 영향을 분석하고, 의미있는 값의 범위를 정한다. 대부분의 파라미터들은 0 - 100 사이의 값을 가지며, 파라미터 값은 입력하는 수치 만큼씩 증가하는데, 최종 결과 하나 하나는 애니메이션에서 하나의 프레임이 된다. 그래픽으로 보여지는 모델의 결과값들은 예측치와 과거자료의 비교를 가능하게 하며, 파라미터들간의 상호작용과 자기수정(self-modification)법칙의 오류를 수정하게 한다.

두 번째로 배치버전의 조정단계에서는 4가지 변수와 변수들간의 상관관계를 계산한다. 4가지 측정값들은 도시로 전환된 총 면적, 도시지역의 가장자리 픽셀 수, 독립된 성장중심지의 수, 그리고 모델에서 예측된 결과와 과거 자료로 입력된 연도의 도시영역간의 공간적 적합도를 측정하는 Lee-Sallee shape index이다(Lee and Sallee, 1970). Lee-Sallee shape index는 과거자료로 입력된 도시지역과 모델에서 예측한 도시지역의 지도를 중첩하고, 도시지역의 합집합과 교집합을 셀단위로 계산하여, 그 합을 교집합으로 나누어 계산한다. 과거자료로 입력된 값과 모델에서 예측된 값이 완전히 일치되기 위해서는 Lee-Sallee 측정값이 1.0이어야 하며, 값이 작을수록 입력된 값과 예측치 간의 일치도가 낮음을 나타낸다. 이들 4가지 값들은 처음 3가지 값들을 더한 다음 Lee-Sallee index를 곱하여 하나의 값을 갖게 된다. 배치버전의 프로그램에서는 도시화지역의 면적, 도시지역의 가장자리 수, 독립된 성장중심지 수, 그리고 Lee-Sallee Index를 계산하며, 예측치와 관찰치간의 상관관계도 계산한다.

UGM모델을 돌리기 전에 5개의 도시성장 파라미터 및 4개의 성장 상수 값을 입력하여야 하는데, 이들 9개의 값들이 보정을 하는 동안 9개의 변수가 된다. 보정은 첫 번째는 도시성장 유형의 본질과 속도를 통제하는 5가지의 성장 파라미터들(diffusion, spread, breed, slope resistance, and road gravity)의 최적 조합을 찾는 과정이다. 두 번

째는 자기수정(self-modification)에 영향을 미치는 4 가지 성장 상수들(critical high, critical low, boom, and bust)의 값을 정의하는 것이다. 이들 4 가지 성장 상수들은 모델을 돌리고 난 뒤에 항상 같은 값을 갖는 반면, 성장 파라미터들은 성장율이 임계 상한치(critical high)나 임계 하한치(critical low)를 초과한다면 초기에 세팅한 값과 다를 수도 있다. 계수조정 전략은 9가지의 성장변수들을 가능하면 조금씩 바꾸고 2값의 변동을 비교하는 것이다. 이들 계수값들의 모든 조합을 계산하기는 너무 많은 반복계산이 필요하므로, 계수조정 단계에서는 5개 파라미터의 최적 범위에 있는 처음 값을 토대로 증가치를 25정도로 사용하고, 최적범위를 찾아낸 후 증가치를 줄여가면서 파라미터 세팅의 모든 가능한 조합을 검토한 다음 파라미터 값의 보다 좁은 범위에서 증가치를 1씩 변화시키면서 최적의 값을 찾게 된다.

모델이 과거 도시의 확장을 성공적으로 나타냈다면, 그 모델은 도시 성장의 미래 시나리오를 예측하기 위해 사용될 수 있다. 미래 성장에 대한 예측은 단기간 내에 증명될 수 없기 때문에, 예측된 결과들은 확률로서 이해되어야만 할 것이다. 미래의 도시성장에 대한 예측은 한 세트의 Monte Carlo 이미지, 즉 도시화 확률이 각 셀에 부여된 결과치로 보는 것이 맞을 것이다. 미래의 예측은 현재의 실측값을 가지고 시작되며, 모델의 예측치와 과거 실측치간 비교를 통해 얻어진 최적의 파라미터들을 사용하여 얻게 된다(Clarke, K.C., Hoppen, S., and Gaydos, L.J., 1996).

4. 도시성장 예측

1) 구축된 데이터

(1) 연구지역 개요

서울대도시지역의 도시성장을 예측하는 모델 수행에 포함된 공간적 범위는 서울시의 행정경계와 경기도 일부를 포함하는 43.05km × 37.8km에 해당하는 약 1,627km²의 면적을 대상으로 하였다(그림 3). 서울은 조선시대부터 도읍으로 정해져 일찍이 도시지역으로 발달해 왔으며, 특히 1945년

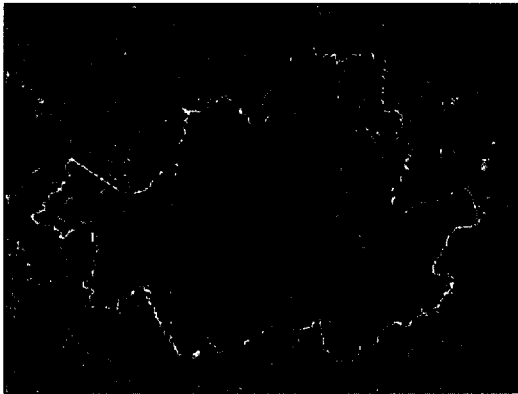


그림 3. 연구 대상 지역

광복과 1950년 한국전쟁 이후 급격한 인구증가를 겪으며, 현재 1,000만이 넘는 인구가 서울시 경계 내에 거주하고 있다. 행정경계상의 서울도 1944년 136km²에서, 1949년 268km², 1963년 613km², 1973년 627km²로 급격하게 확대되었으며, 서울로의 통근, 통학인구 등 생활권을 기준으로 볼 때 서울시는 현재 그 행정경계를 넘어 광역도시로서 외곽의 도시들에서 성장을 계속하고 있다.

(2) 도시성장 모형 수행을 위해 구축된 데이터

UGM모델 수행을 위해서는 앞의 표 1에 설명한 바와 같은 데이터가 필요하며, 본 연구에서 구축된 데이터는 표 2에 정리된 바와 같다.

① 도시지역 자료 구축

도시지역에 대한 자료는 1957년의 경우 1:50,000 지형도를 구하여 지형도에서 밀집시가지로 빨간색으로 표시된 지역을 도시지역 경계로 구획하였다.

시가지역을 벡터로 구축한 후 이를 ARCGRID를 사용하여 래스터 데이터로 구축하였으며, 셀 단위는 100m 격자 간격으로 구축하였다. 1972년과 1985년, 1997년 도시화지역을 구분하는 데는 인공위성 영상 자료를 사용하였다. 사용된 자료는 1972년은 Landsat MSS 자료를 사용하였으며, 1985년과 1997년은 Landsat TM 자료를 사용하였다(그림 4, 표 3).

위성영상을 이용하여 토지이용을 분류하는 방법은 이미지 자체의 오류를 수정하는 전처리단계, 토지이용분류를 위해 위성이미지에 분류기준을 입력해 주는 훈련지역 설정단계, 이미지 분류단계, 분류결과 평가단계 등으로 구분될 수 있다. 전처리과정은 전자기적 보정과 지형보정으로 구분되는데 현재 위성 이미지는 전자기적 보정이 1차적으로 완료된 상태에서 사용자에게 보급되므로 본 연구에서는 구체적인 절차를 생략하였다. 지형 보정방법은 1985년과 1997년의 영상에 대해서는 Polynomial Rectification의 방법을 사용하였으며, GCP(Global Control Point)는 서울시의 1:5,000 수치지형도의 자료를 이용하여 1985년과 1997년 영상에 대해 각각 24개와 30개를 선정하였으며, RMS 오차는 0.52 화소였다. 1972년의 영상에 대해서는 위치 보정된 1985년 Landsat TM자료를 이용하여 Map to Map Transformation을 적용하였으며, GCP의 갯수는 20개이며, RMS오차는 3.3화소이다. GCP 선정 이후 변환방정식은 2차변환 방정식을 사용하였으며, 산악이 포함되거나, 지형기복이 있는 지역에 대해서는 2차변환 방정식이 RMSE를 줄일수 있는 것으로 연구된 바 있다(강영욱, 1998). 영상 재배열은 Bilinear interpolation 방법을 사용하였는데 이는 픽셀의 값을 변환된 좌

표 2. 구축된 데이터

| 주제 | 데이터 레이어 | 원시자료 | 셀값 |
|-------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------|
| 도시지역 | 1957년 시가지화지역 | 1957년 지형도 (1:50,000) | 0=도시아닌 지역 1=도시 |
| | 1972년 시가지화지역 | 1972년 Landsat MSS | |
| | 1985년 시가지화지역 | 1985년 Landsat TM | |
| | 1997년 시가지화지역 | 1997년 Landsat TM | |
| 도로 | 1964년 도로 | 1964년 도시계획 도로망도 | 0=도로가 아닌 지역 |
| | 1998년 도로 | 1998년 도로망도 | 1=도로 |
| 경사 | 경사도 | 1:5,000 수치지형도의 표고데이터 이용 | 경사도에 따라 0에서 100까지의 값을 가짐 |
| 제외지역 (excluded area) | 수계 | 연구지역 수계 (1997년 Landsat TM) | 0=도시화에서 제외되지 않음. |
| | 개발제한 구역 | 수도권 개발제한구역도(1:100,000) | 100=도시화에서 제외됨 |

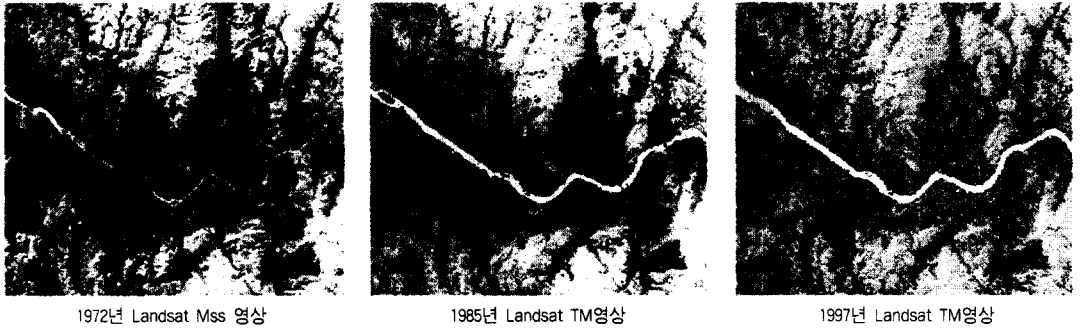


그림 4. 서울지역 인공위성 영상자료

표 3. 도시지역 분석을 위해 사용된 영상 자료

| 연도 | Sensor Type | 밴드수 | 촬영시기 | 공간 해상력 | Path | Row |
|-------|-----------------------------|-----|--------|---------|------|-----|
| 1972년 | MSS (MultiSpectral Scanner) | 4 | 72. 10 | 80m×80m | 125 | 34 |
| 1985년 | TM(Thematic Mapper) | 7 | 85. 10 | 30m×30m | 116 | 34 |
| 1997년 | TM | 7 | 97. 10 | 30m×30m | 116 | 34 |

표 4. 연구지역의 영상분류 기준

| 구분 | 내용 |
|----|---------------------------------|
| 도시 | 시가화 지역과 도로를 포함하는 도시화 지역 |
| 수역 | 강, 호수, 저수지(폭 70m 이상)를 포함하는 수계지역 |
| 산림 | 산림지역 |
| 기타 | 초지, 경작지, 나지를 포함하는 지역 |

표로 재배열하는 방법 중 인접 4개 화소값의 가중 평균값을 계산하는 가장 보편적인 방법이다.

토지이용 분류를 위해서는 객관적인 분류기준이 필요한데, 미국의 USGS(United States Geological Survey)에서 토지이용 분류기준을 설정하여 분류표준으로 이용하고 있는 것을 근간으로 하였다.¹⁾ Landsat TM과 MSS 영상을 사용하는

경우 USGS에서 규정하는 분류등급 가운데 1단계까지의 해석이 가능하다.²⁾ 1등급의 분류체계에는 Urban or Built-up Land, Agricultural Land, Rangeland, Forest Land, Water, Wetland, Barren Land, Tundra, Perennial Snow or Ice 등 9개 항목이 있는데 본 연구에서는 level 1에 해당하는 분류 중 연구목적에 적합한 최소의 항목인 4종류로 구분하였으며, 구분 내용은 표 4와 같다.

훈련지역은 1985년과 1997년의 영상에 대해서는 1999년 서울시정개발연구원에서 현장조사하여 구축한 비오톱 자료³⁾ 가운데 토지이용 데이터를 사용하여 4가지의 분류항목에 해당되는 지역의 폴리곤을 영상에 중첩 후 선정하였다(그림 5). 1972년의 경우에는 국립지리원에서 발행한 1975년의 1:50,000 지형도를 이용하여 훈련지역을 설정하였

표 5. 영상분석 결과

| | 1972. 10 | | | 1985. 10 | | | 1997. 10 | | |
|------|----------|----------------------|-------|-----------|----------------------|-------|-----------|----------------------|-------|
| | 픽셀 수 | 면적(km ²) | 비율(%) | 픽셀 수 | 면적(km ²) | 비율(%) | 픽셀 수 | 면적(km ²) | 비율(%) |
| 도시지역 | 39,547 | 198,651 | 12.2 | 488,939 | 410,862 | 25.3 | 746,617 | 671,955 | 41.3 |
| 수역 | 4,704 | 23,629 | 1.5 | 49,474 | 41,574 | 2.6 | 48,766 | 43,889 | 2.7 |
| 산림 | 188,650 | 947,619 | 58.3 | 880,991 | 740,308 | 45.5 | 706,885 | 636,197 | 39.1 |
| 기타 | 90,630 | 455,249 | 28.0 | 515,551 | 433,224 | 26.6 | 303,954 | 273,559 | 16.8 |
| 합계 | 323,531 | 1,625,147 | 100.0 | 1,934,955 | 1,625,967 | 100.0 | 1,806,665 | 1,625,998 | 100.0 |

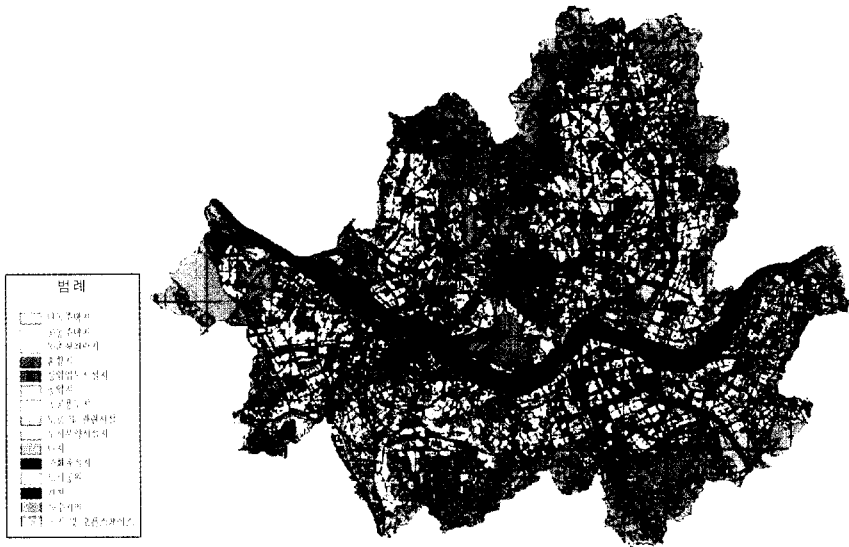


그림 5. 서울시 토지이용현황도



그림 6. 영상분석 결과

red: 도시지역, blue: 수역, dark green: 산림, light green: 기타

다. 영상분류는 Landsat TM 데이터의 경우 1, 4, 5번 밴드를 사용하였으며, MSS 데이터는 4개의 밴드를 모두 사용하였다. 영상분류방법은 감독분류(Supervised Classification) 방법 가운데 최대우도법(Maximum likelihood classifier)을 사용하였는데, 이는 화소가 각 분류항목에 속할 확률을 구하여 확률이 보다 높은 쪽으로 분류되도록 하는 방법이다. 최종영상의 분류결과는 표 5 및 그림 6과 같다.

② 도로망 자료

서울시 도로망 자료는 1964년 국립지리원에서 발행된 도시계획 도로망도와 1998년 서울시정개발

연구원에서 제작된 도로망 데이터를 이용하였다(그림 7). 도로의 종류 및 등급의 구분은 고속국도, 일반국도, 특별시도·지방도·시도·군도 등으로 구분하는 「도로법」에 의한 구분, 광로·대로·중로·소로 등으로 구분하는 「도시계획시설 기준」에 의한 구분, 그리고 도시고속도로·주간선도로·보조간선도로·집산도로·국지도로 등으로 구분하는 도로의 기능에 의한 구분 등이 있는데, 본 연구에서는 도로의 기능별 구분에 따라 통과교통이 주를 이루는 보조간선도로 이상의 도로를 도로망 데이터에 포함하였다. 1998년의 도로망 데이터는 서울시 도로망 가운데 도시고속도로 및

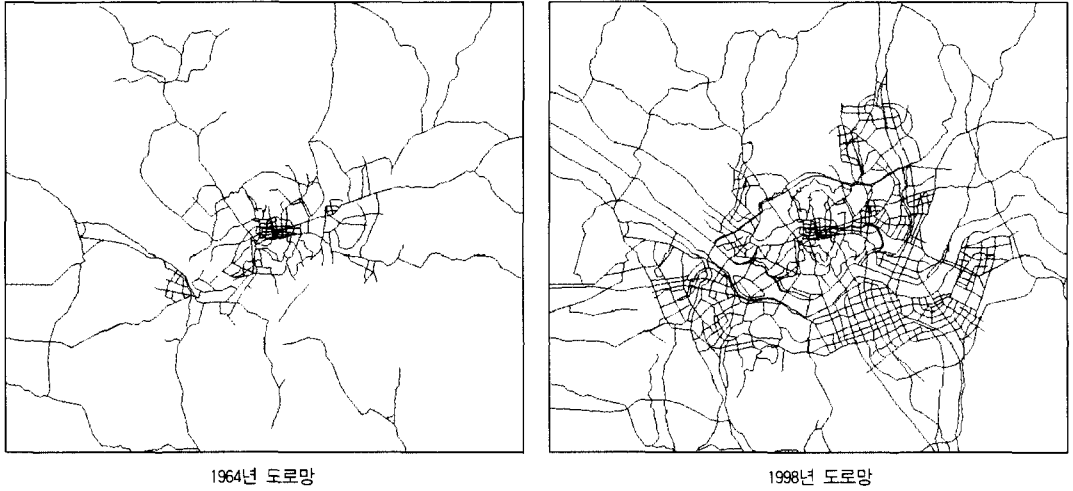


그림 7. 도로망 자료

주 보조간선도로에 해당되는 도로를 추출하여 구축하였으며, 1964년의 도로데이터는 1998년 도로 데이터를 근간으로 1964년에 없는 도로망을 삭제하거나, 일부 노선변경이 있는 자료를 변경하여 구축하였다.

③ 경사자료

경사자료는 1:5,000 수치지형도의 등고 데이터를 이용하여 구축하였다. 1:5,000 수치지형도에는 등고선이 5m 간격으로 표시되어 있는데, 이를 GRID형태로 전환하였으며, 한 pixel의 크기는 UGM모델의 분석을 고려하여 100m×100m단위로 구축하였다(그림 8).

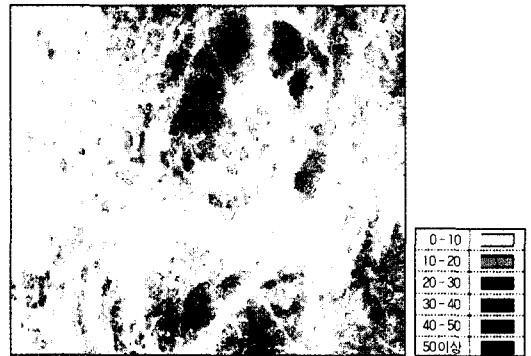


그림 8. 연구지역의 경사도

④ 제외지역 (수계, 개발제한구역)

UGM모델에 사용되는 제외지역은 도시성장이 불가능한 지역을 나타내는 것으로, 수계와 같은 정보가 대표적인 예가 될 수 있다. 서울대도시지역의 경우, 개발제한구역내에 무허가 건물 등이 일부 있으나, 기본적으로 도시성장의 제외지역으로 규정될 수 있다. 수계에 대한 정보는 앞의 1997년 Landsat TM자료의 인공위성 영상분류에서 수역으로 분류된 지역을 사용하였다. 개발제한구역은 1:100,000 축척의 개발제한구역도(1988)를 스캐닝한 후 벡터화하여 사용하였다(그림 9).

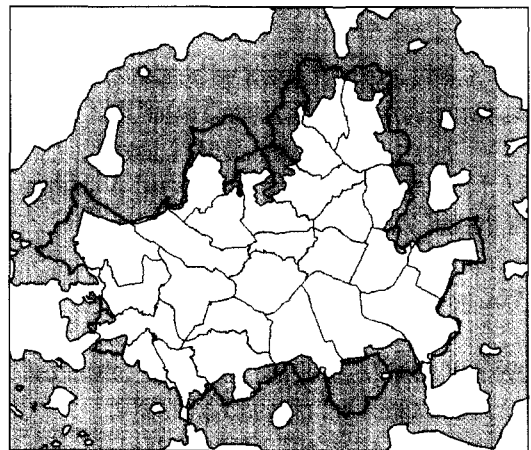


그림 9. 개발제한구역

⑤ 데이터 변환

모델 수행을 위해 구축된 도시지역, 도로, 경사 분석, 수계 및 개발제한구역 자료는 ArcGrid를 이용하여, 100m × 100m의 격자 형태의 데이터로 변환하였으며, UGM모델 수행을 위해 gif 형태로 변환하였다.

2) 모델의 보정

UGM모델의 보정작업은 4가지 유형의 도시성장 - 자연적인 성장 (spontaneous growth), 확산형 성장(diffusive growth), 유기적인 성장(organic growth), 그리고 도로에 영향을 받는 성장(road influenced growth)-을 통제하는 5가지 주요 파라미터(diffusion, breed, spread, slope resistance, road gravity)와 4개의 상수값을 찾는 과정이다. 보정 작업은 5가지의 파라미터가 가질 수 있는 값들의 범위를 좁혀가면서 궁극적으로는 1957년 입력된 데이터로 1997년을 예측한 것과, 자료로서 입력된 1957년, 1972년, 1985년, 1997년의 상관관계를 구하여 높은 r²값을 갖는 파라미터를 찾는다.

파라미터의 값을 범위를 좁혀가는 과정에서 처

음부터 작은 셀 단위로 모델을 수행하는 경우, 모델 수행에 많은 시간이 소요되므로 3단계를 거쳐 모델의 최적값을 찾게 하며, 단계별로 공간해상도도 세밀한 것을 사용하도록 하고 있다. 본 연구에서는 최종적으로 100m × 100m의 셀을 사용하는 것으로 하여, 첫 번째 단계에서는 400m, 두 번째 단계에서는 200m, 최종적으로는 100m 단위의 셀을 사용하였으며, 각 보정 단계별 입력된 파라미터들의 값과 셀의 수는 표 6과 같다.

미래에 대한 예측은 도시성장모델에서 과거 1957년 도시지역을 시작점(seed)으로 1997년의 도시성장을 예측한 자료와 입력된 1957년, 1972년, 1985년, 1997년 자료와의 일치성을 기준으로 평가할 수 있다. 입력된 자료와 예측치 간의 일치성은 이미지 파일과 통계치를 통해 비교할 수 있는데, 그림 10은 입력된 도시지역의 자료이며, 그림 11은 모델에서 1957년을 기준으로 예측된 결과이다.

3) 향후 도시성장 예측

1997년을 기준시점으로 하여 2050년까지 예측된 서울대도시지역의 시가지 확산패턴은 그림 12에

표 6. 모델보정 및 미래 예측을 위해 입력된 파라미터 값

| 보정단계 | | 1단계 (coarse calibration) | 2단계 (fine calibration) | 3단계 (final calibration) | 예측을 위해 입력된 값 |
|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------|
| Monte Carlo number of times | | 4 | 6 | 12 | 100 |
| 파 라 미 터 값 | initial diffusion coefficient | 0 | 0 | 1 | - |
| | diffusion coefficient increment | 25 | 10 | 1 | - |
| | final diffusion coefficient | 100 | 10 | 1 | 1 |
| | initial breed coefficient | 0 | 20 | 70 | - |
| | diffusion breed increment | 25 | 10 | 5 | - |
| | final breed coefficient | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | initial spread coefficient | 0 | 75 | 80 | - |
| | diffusion spread increment | 25 | 5 | 5 | - |
| | final spread coefficient | 100 | 100 | 90 | 100 |
| | initial slope resistance coefficient | 0 | 0 | 1 | - |
| | diffusion slope resistance increment | 25 | 10 | 1 | - |
| | final slope resistance coefficient | 100 | 10 | 1 | 69 |
| | initial road gravity | 0 | 50 | 60 | - |
| | diffusion road gravity increment | 25 | 10 | 5 | - |
| final slope resistance coefficient | 100 | 100 | 100 | 100 | |
| iteration 회수 | | 3125 | 1296 | 504 | 1 |
| 셀크기 | | 400m | 200m | 100m | 100m |
| 셀 수 (가로×세로) | | 108×95 | 215×189 | 431×378 | 431×378 |

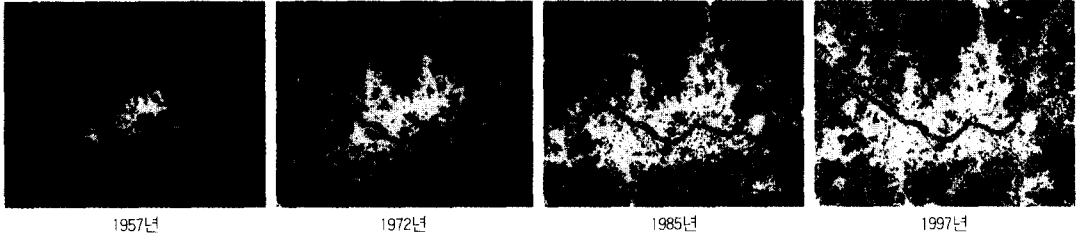


그림 10. 입력된 도시지역 자료

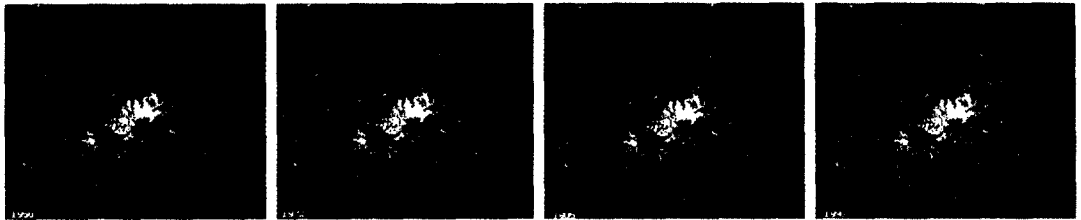


그림 11. 모델에서 예측된 도시성장(1958-1997)

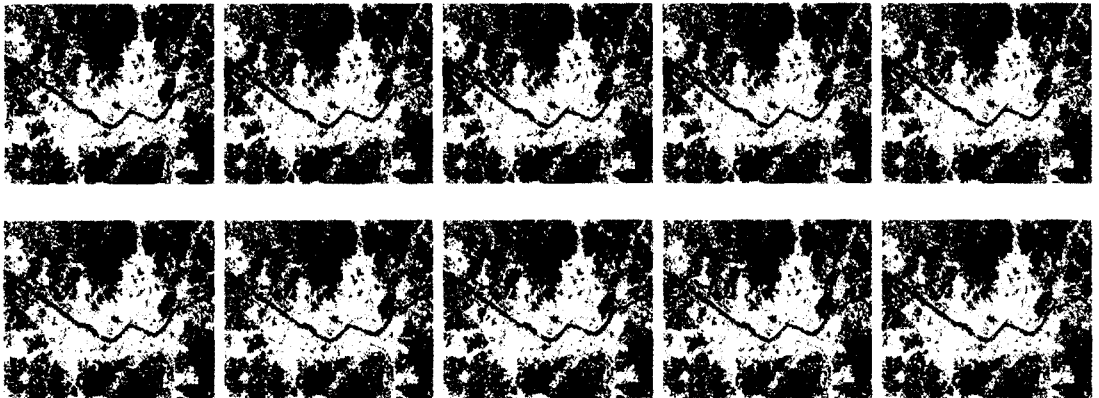


그림 12. 서울대도시지역의 예측된 도시성장(2005-2050)

나타난 바와 같다. 1997년의 도시지역은 도시성장의 출발지역(seed)이 노란색으로 표시되었으며, 모델에서 예측된 확산된 도시지역은 빨간색으로 표시되었다. 결과화일은 1998년부터 2050년까지 매해마다의 이미지를 gif 형태로 만들며, 이 가운데 2005년부터 5년 간격의 이미지 파일이 그림 12에 정리된 것이다.

서울대도시지역은 이미 도시화가 많이 진전된 상태로, 개발될 지역이 거의 남아 있지 않으며, 남아 있는 지역도 대개 개발제한구역으로 묶여 있기 때문에 도시확산은 그리 뚜렷하지 않은 것으로 예

측되었다. 이 가운데 도시화의 확산이 예측되는 지역은 일산과 북동쪽으로 연결되는 고양시, 파주시 지역이 가장 두드러지며, 서울의 북동부로는 경기도 진접읍 지역으로의 확산이 두드러지게 나타난다. 그리고, 남쪽으로는 분당지역의 남쪽으로 도시화가 계속 확산되어 가고 있는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

도시성장의 예측은 향후 도시관리를 위해 매우

중요한 문제이다. 본 연구에서는 미국 UC Santa Barbara대학의 Clarke 교수에 의해 개발된 도시성장모델(UGM)모델을 이용하여 서울대도시지역의 도시성장을 예측해 보았다. UGM 모델은 개념적으로 셀룰라 오토마타에 기반을 두고 있으며, UGM모델의 핵심이 되는 도시성장의 법칙은 5가지 유형의 도시성장을 파악하고, 이 규칙을 이끄는 파라미터들의 값을 찾아내어 향후 도시성장을 예측하는 것이라 볼 수 있다. 이를 위해 지형도, 인공위성영상, 서울시의 1:1,000 및 1:5,000 수치지형도, 서울시의 비오톱 자료 등을 이용하여 1957년부터 1997년까지의 시가지지역, 도로망, 수계, 개발제한구역 등의 자료가 구축되었다. UGM 모델을 이용한 서울대도시지역 도시성장분석은 도시확산의 시공간적 특성을 잘 나타냈으며, 도시지역의 확산을 매해마다 이미지자료를 만들기 때문에 확산과정을 이해하는데 도움이 되었다. 이러한 자료는 도시의 발전방향과 패턴을 이해하고, 도시를 관리하는데 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

다만 연구수행에 있어 몇 가지 보완사항은 향후 연구를 발전시키는데 도움이 될 것으로 판단되었다. 첫째, 도시화의 제외지역으로 수계와 개발제한구역이 포함되었는데, 현재 서울주변의 개발제한구역에는 이미 촌락이 들어선 지역이 존재한다. 현재 밀집취락이 들어선 곳은 개발제한구역에서 제외시킬 가능성이 있으며, 개발제한 구역내에 공공시설이 입지하는 점등을 고려할 때, 개발제한 구역은 도시화에서 완전히 배제되는 지역은 아니며 제외되는 정도를 정할 수 있다. 둘째, 연구대상 지역으로 선정된 범위가 거의 도시화가 완료된 지역이어서 도시확산의 특징이 두드러지게 분석되지 못하였으나, 향후 연구에서 대상지역의 범위를 수도권으로 확대하면 도시화의 확산과정이 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 보인다. 끝으로, 본 연구에 포함되지 않았으나, 도시성장에 영향을 미치는 여러 가지 요인들, 예를 들면 도시계획상의 용도지역, 지구 등의 특성, 도시내 공원지역, 계획된 도로망 정보 등은 도시성장 예측을 더욱 정교히 할 수 있을 것으로 판단된다.

註

- 1) Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W., 1994, *Remote Sensing and Image Interpretation*.
- 2) Jensen, J. R., 1996, *Introductory Digital Image Processing*.
- 3) 서울특별시, 2000, 서울시 비오톱 현황조사 및 생태도시 조성지침 수립, 서울시정개발연구원.
- 4) 강남구, 1998, 강남구 새주소부여체계에 관한 연구, 서울시정개발연구원.

文獻

- 강남구, 1998, 강남구 새주소부여체계에 관한 연구, 서울시정개발연구원.
- 강영욱, 1998, 서울시 수치정사사진 제작방안 연구, 서울시정개발연구원.
- 김광래 · 이종성, 1998, "원격탐사자료를 이용한 서울시 토지피복의 시계열 변화량 추출," *대한국토·도시계획학회지*, 33(3), 363-374.
- 김영표 · 김순희, 1994, "인공위성 자료를 이용한 수도권 토지이용 실태분석," *한국GIS 학회지*, 2(2), 135-145.
- 서울특별시, 2000, 서울시 비오톱 현황조사 및 생태도시 조성지침 수립, 서울시정개발연구원.
- Acevedo, W., Foresman, T.W., and Buchanan, J.T., 1996, *Origins and Philosophy of Building a Temporal Database to Examine Human Transformation Processes, Proceedings, ASPRS/ACSM Annual Convention and Exhibition,, April 22-24, Baltimore, MD, I*, 148-161.
- Allen, P. M., and Sanglier, M., 1978, *Dynamic Models of Urban Growth, Journal of Social Biological Structure*, 1, 265-280.
- Allen, P. M., 1981, *A dynamic model of a central place system III: The effects of trade barriers, Journal of Social Biological Structure*, 4, 263-275.
- _____, 1982, *Evolution, modelling, and design in a complex world, Environment and*

- Planning B*, 9, 95-111.
- Alonso, W., 1964, *Location and Land Use*, Harvard Univ. Press, Cambridge, MA.
- Anas, A., 1984, Discrete choice theory and the general equilibrium of employment, housing and travel networks in a Lowry-type model of the urban economy, *Environment and Planning A*, 16, 1489-1502.
- Batty, M., Longley P., and Fotheringham S., 1989, Urban growth and form: scaling, fractal geometry and diffusion-limited aggregation, *Environment and Planning A*, 21, 1447-1472.
- Batty, M. and Xie Y., 1994, From cells to cities, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21, s31-s48.
- Chapin, S. F., and Weiss, S. F., 1962, *Urban Growth Dynamics in a Regional Cluster of Cities*, John Wiley and Sons, Inc.
- , 1962, *Factors Influencing and Development: Evaluation of Inputs for a Forecast Model*, An urban studies monograph, Univ. of North Carolina, Chapel Hill.
- Clarke, K. C., Brass J. A., and Riggan P. J., 1995, A cellular automaton model of wild fire propagation and extinction, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, LX(11), 1355-1367.
- Clarke, K. C., Hoppen, S., and Gaydos, L. J., 1996, Methods and Techniques for Rigorous Calibration of a Cellular Automaton Model of Urban Growth, *Third International Conference/Workshop Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM, January, 21-25.
- Clarke, K. C. and Gaydos, L. J., 1997, Loose-coupling a cellular automata model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/ Baltimore, *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699-714.
- Codd, E. F., 1968, *Cellular Automata*, Academic Press, Inc., New York.
- Couclelis, H., 1985, Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics, *Environment and Planning A*, 17, 585-596.
- , 1987, Cellular dynamics: How individual decisions lead to global urban change, *European Journal of Operational Research*, 30, 344-346.
- , 1988, Of mice and men: what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics, *Environment and Planning A*, 20, 99-109.
- Culik, K., Hurd, L. P., and Yu, S., 1991, Computation Theoretic Aspects of Cellular Automata, in *Cellular Automata: Theory and Experiment*, Gutowitz (eds.), North-Holland, 357-378.
- Deadman, P., Brown, R. D. and Gimblett, H. R., 1993, Modeling rural residential settlement patterns with cellular automata, *Journal of Environmental Management*, 37, 147-160.
- Ermentrout, G. and Edelstein-Keshet, L., 1993, Cellular Automata Approaches to Biological Modeling, *Journal of Theoretical Biology*, 160, 97-133.
- Forrester, J. W., 1969, *Urban Dynamics*, MIT Press.
- Goldner, W., 1971, Technical Review: The Lowry Model Heritage, *Journal of American Institute of Planners*, 37, 100-110.
- Goldner, W. and Graybeal, R. S., 1965, *The Bay Area Simulation: Pilot Model of Santa Clara County and Some Application*, Center for Real Estate and Urban Economics, Univ. of California, Berkeley.
- Green, D. J., 1982, Simulated effects of fire, dispersal and spatial pattern on competition within forest mosaics, *Vegetation*, 82, 139-154.
- Green, D. G., House A. P. N. and House, S. M., 1985, Simulating spatial patterns in forest ecosystems, *Mathematical and Computers in*

- Simulation*, 27, 191-198.
- Gutowitz, H., 1991, *Cellular Automata: Theory and Experiment*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Harris, B., 1985, Urban Simulation models in regional science, *Journal of Regional Science*, 25, 545-567.
- Herbert, J. S. and Stevens, B. H., 1960, A model of the distribution of residential activity in urban areas, *Journal of Regional Science*, 2, 21-36.
- Ingran, G. K., Kain, J. F. and Ginn, R., 1972, *The Detroit Prototype of the NEBR Urban Simulation Model*, NY:National Bureau of Economic Research.
- Itami, R. M., 1988, Cellular automaton as a framework for dynamic simulations in geographic information systems, *GIS/LIS' 88 Proceedings*, 590-507.
- Itami, R. M. and Clark, J. D., 1992, Spatial dynamic simulations using discrete time and discrete event theory in cell based GIS systems, *The 5th International Symposium on Spatial Data Handling*, Charleston, South Carolina, 702-712.
- Jensen, J. R., 1996, *Introductory Digital Image Processing*.
- Kirtland, D., DeCola L., Gaydos L., Acevedo W., Clarke K., and Bell C., 1994, An analysis of human-induced land transformations in the San Francisco Bay/Sacramento area, *World Resource Review*, 6(2), 206-217.
- Lee, D. and Sallee, T., 1970, A method of measuring shape, *Geographical Review*, 60, 555-563.
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R. W., 1994, *Remote Sensing and Image Interpretation*.
- Lowry, I. S., 1964, *A Model of a Metropolis*, RM-4035-RC, The Rand Corporation, 1700 Main street, Santa Monica, CA90406.
- Meaille, R. and Wald, L., 1990, Using geographic information system and satellite imagery within a numerical simulation of regional urban growth, *International Journal of GIS*, 4(4), 445-456.
- Park, S. and Wagner, D. F., 1997, Incorporating cellular automata simulators as analytical engines in GIS, *Transactions in GIS*, 2, 213-231.
- Prigogine, I. (ed.), 1980, *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Prigogine, I. and Stegners, I., (eds.), 1984. *Order Out of Chaos*, Bantam Books, Inc., New York
- Richards, J. A., 1994, *Remote Sensing Digital Image Analysis*.
- Silvertown, J., Holtierm S., Johnson J., and Dale, P., 1992, Cellular automaton models of interspecific competition for space - the effect of pattern on process, *Journal of Ecology*, 80, 527-534.
- Tobler, W. R., 1970, A computer movie simulating urban growth in the Detroit Region, *Economic Geography*, 234-240
- , 1979, Cellular Geography, in Gale and Olsson (eds.), *Philosophy in Geography*, Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 379-386.
- Toffoli, T. and Margolus, N., 1987, *Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Von Neuman, J., 1966, *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press.
- Wagner, D. F., 1997, Cellular automata and geographic information systems, *Environment and Planning B*, 24, 219-234.
- White, R. and Engelen, G., 1993, Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns, *Environment and Planning A*, 25, 1175-1199.

- White, R. and Engelen G., 1994, Cellular dynamics and GIS: modeling spatial complexity, *Geographical Systems*, 1, 237-253.
- Wilson, A. G., 1976, Catastrophe theory and urban modelling: an application to modal choice, *Environment and Planning A*, 6(8), 351-357.
- Wingo, L., 1961, *Transportation and Urban Land Use*, The Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, MD.
- Wolfram, S., 1984, Preface, *Physica 10D*, vii-xii, Elsevier Science Publisher, North-Holland, Amsterdam.