

셀룰라 오토마타를 이용한 김해시의 도시성장모형에 관한 연구*

- 1987~2001년을 중심으로 -

이성호¹ · 윤정미^{2*} · 서경천³ · 남광우⁴ · 박상철⁵

A study on the Urban Growth Model of Gimhae City Using Cellular Automata

Sung Ho LEE¹ · Jeong Mi YUN^{2*} · Kyung Chon SEO³ · Kwang Woo NAM⁴ · Sang Chul PARK⁵

요 약

본 논문은 향후 도시의 물리적 성장형태를 예측하고자 하는 일련의 연구로서 김해의 과거 도시 성장과정을 분석함으로써 김해지역에 적합한 셀룰라 오토마타의 네이버후드 및 전이규칙을 결정하는 것을 목적으로 한다. 동적모델과 시간에 따른 변화를 다룰 수 있는 셀룰라 오토마타를 도입하여 1987년부터 2001년까지 김해지역의 도시성장을 분석하였으며, 다양한 네이버후드와 전이규칙의 시뮬레이션을 통해 김해지역에 적합한 네이버후드와 전이규칙을 정립하였다. 결론으로 김해지역은 네이버후드의 행렬이 작을수록, 또한 동일한 거리를 가진 circle 형태보다 정사각형의 네이버후드가 적합하였고, 도시성장속도를 조절하는 α 값이 작을수록, 그리고 전환가능성 (P_{ij})이 클수록 적합한 것으로 나타났다.

주요어: 셀룰라 오토마타, 퍼지집합, AHP, 지리정보시스템, 네이버후드, 전이규칙

ABSTRACT

The purpose of this study is to decide an appropriate neighborhood and a transition rule of cellular automata by analyzing the past growth process of urban areas in Gimhae. With cellular automata which can manage the change based on the dynamic model and time, this study analyzes the urban growth of Gimhae from 1987 to 2001. Also, through the simulation of different types for neighborhood

2004년 8월 15일 접수 Recieved on August 15, 2004 / 2004년 9월 23일 심사완료 Accepted on September 23, 2004

* 이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-002 B00366).

1 부산대학교 도시공학과 Department of Urban Engineering Busan University

2 동아대학교 도시공학과 Department of Urban Engineering Donga University

3 부산디지털대학교 사회경영학부 Department of Social & Business Administration Busan Digital University

4 경성대학교 도시공학과 Department of Urban Engineering kyungsung University

5 부산·진해경제자유구역청 Busan·Jinhae Free Economic Zone Authority

* 연락처 E-mail : coco@pusan.ac.kr

and transition rules, we can find the appropriate neighborhood and the transition rule for Gimhae. In conclusion, the forecast of physical urban growth pattern is more accurate under conditions when the number of matrixes for the neighborhood is small, the shape of the neighborhood is rectangular, " α " value, which control the pace of urban growth, is low and the transition possibility (P_{ij}) is high.

Keywords: Cellular Automata, Fuzzy Set, AHP, GIS, Neighborhood, Transition Rule

서론

급속한 산업화와 도시화는 도시관리 및 계획 측면에서 많은 도시문제를 유발하였다. 도시문제는 도시의 규모가 커질수록 다양화되고 복잡해져서 어떤 문제의 부분적인 해결만으로는 도시기능의 회복을 기대할 수는 없으며 보다 본질적인 부분의 해결을 위해 지속적으로 노력해야 할 것이다. 이러한 점에서 도시가 어떻게 성장해왔는지를 분석 및 예측하는 것은 매우 중요한 것이며, 미래 환경보존이나 평가를 위한 기초적인 것이라 할 수 있다. 또한 지속가능한 도시성장을 생각할 때, 도시의 성장과정을 정확하게 예측할 수 있는 방법이 요구되어진다.

이 연구는 기존 공간분석의 한계인 시간에 따른 변화를 모델링하고 동적 공간 모델을 다룰 수 있어 도시성장 모델에 활발히 사용되고 있는 셀룰라 오토마타(cellular automata; CA)를 도입하였다. 셀룰라 오토마타는 이웃하는 네이버후드의 상태에 따라서 그 셀의 상태가 변화하며, 전이규칙에 따라 새로운 상태로 변하게 되는 것이다. 그러므로 셀룰라 오토마타의 네이버후드와 전이규칙에 대한 정립을 통하여 각 지역의 성장 패턴 및 형태에 따른 보다 정확한 예측을 시뮬레이션 하고자 한다. 또한 퍼지집합 개념과 계층분석과정을 적용하여 데이터의 손실을 최소화하고, 각 인자간의 상대적 중요도를 고려하여 객관성 있는 가중치를 부여하여 보다 유연한 공간분석을 하였다.

본 논문은 각 지역의 지역적 조건이나 성장의 형태와 패턴이 다르다는 것을 고려한 연구로서, 기존의 도시성장 분석 및 예측을 위해 도입

되어진 셀룰라 오토마타와 퍼지집합 개념 및 AHP를 사용하여 김해시의 과거 도시성장 과정을 분석하고 이 분석을 통하여 김해시에 적합한 셀룰라 오토마타의 네이버후드 및 전이규칙을 결정하는 즉, 도시성장 패턴을 정립하는 것을 목적으로 한다.

연구방법

1. 연구동향

1950년대 이후 공간분석을 위한 다양한 시도와 노력들이 진행되었다. 1979년 Tobler가 Cellular Automata를 소개하면서 도시성장의 변천 및 예측에 대한 다양한 연구들이 진행되었다. CA의 연구를 살펴보면 Batty and Xie (1994)는 처음으로 도시성장모델링에 CA개념을 도입하였다. Clarke은 도시성장을 유형별로 구분하여 도시성장을 모델링한 UGM을 개발하였으며, Xia and Anthony는 GRID-GIS 시스템에서 셀룰라오토마타를 구현하였다. 국내연구로 김승태는 공간적인 상충관계 모형을 위해 셀룰라오토마타 개념을 도입하였으며, 강영욱, 박수홍은 서울시 도시성장을 예측하였다. 배지은, 최창영은 셀룰라오토마타를 이용한 도시적 토지이용의 확산 예측을 시도하였으며, 정재준은 추계연구로부터 도시성장 총량을 예측하여 도시성장모델을 개발하였다. 셀룰라오토마타의 네이버후드 및 전이규칙에 관한 연구를 살펴보면 Wu는 전이규칙에 AHP를 도입하여 보다 현실적인 토지전환을 구현하려고 시도하였다. 네이버후드(neighborhood)에 관한 연구로 Von Neuman은

셀과 변을 접하고 있는 4개의 셀을, Moore는 Neumann의 이웃뿐만 아니라 꼭지점을 공유하는 대각선상의 셀까지 포함하는 8개 셀을 네이버후드로 사용, White와 Engelen은 반경 6개 이내(총113셀)를, Batty와 Xie는 인접(local)과 영역(focal)과 지역(zonal)으로 나누어 네이버후드를 다양하게 정의하고 있다.

2. 연구대상지와 데이터구축

본 연구는 김해시 1987년부터 2001년까지를 대상으로 하였으며, 김해시 행정구역 면적인 463.29km²에서 도시확산이 활발히 진행되어진 9개 동 64.07km²를 중심 대상으로 선정하였다.



FIGURE 1. Site map

연구를 위해 표고에 대한 자연환경인자 및 인구밀도와 도로 접근성, 용도지역, 공공시설로부터의 접근성, 도시지역 등 인문환경인자 데이터가 구축되었으며, 본 연구에서 구축된 도시성장요소는 기존 문헌고찰 및 전문가 델파이기법을 통하여 추출하였다.

도시지역 데이터 구축을 위해 1987년 1997년 그리고 2001년 위성 영상을 이용하여 기하보정(Geometric Correction)을 실시하였다. 1997년 영상을 image to map으로 1:25,000 수치지도를 사용하여 GCP를 선정하였고, 1987년, 2001년은 기하보정된 1997년 위성영상을 가지고 image to image 방법으로 기하보정 하였으며, 화상을 보정하기 위하여 affine 변환식을 사용하였다. 감독분류의 최대우도법(maximum likelihood classification)을 사용하여 영상을 분류하였다. 모든 데이터는 30m×30m의 GRID 데이터로 구축하였고, 인자 중 용도지역과 도시지역은 불린함수를 적용하였고 표고, 인구밀도, 도로 접근성, 공공시설로부터의 접근성에 대해서 퍼지집합 함수를 적용하였다(TABLE 2).

전문가 델파이기법을 통하여 얻어진 값들을 이용하여 Satty의 쌍대비교를 위한 구간척도로 나타내었고 각 인자의 가중치는 표고 0.0392, 인구밀도 0.2940, 용도지역 0.1144, 도로 접근성

TABLE 1. Factor and data set method

구 분		데이터 구축방법
자연환경 인자	표고	1:25,000 수치지도 사용 ARC/INFO TIN 모듈을 사용하여 데이터 구축
	도시지역	1987년, 1997년, 2001년 Landsat TM 감독분류법중 최대우도법을 사용하여 도시지역, 수지역, 산림, 기타로 추출하여 도시지역과 비도시지역의 2가지로 재분류
인문환경 인자	인구밀도	1987년, 1997년, 2001년 인구밀도
	용도지역	1:25,000 도시계획도를 이용하여 용도지역을 구축 주거, 상업, 공업지역을 1값으로 그 외의 값은 0으로 설정
	도로 공공시설	1:25,000 수치지도 광로, 대로 중앙선 구축 1:5,000 수치지도 관공서와 학교 문화체육시설 구축

* 본 연구의 도시지역은 토지표면의 상태를 나타내는 것으로 1999년 환경부가 제시하고 있는 토지피복분류체계를 기본으로 하여 도시지역, 수지역, 산림지역 그리고 기타로 구분하였다.

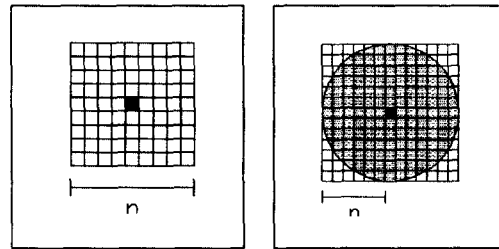
0.1691, 공공시설로부터의 접근성 0.0830, 도시지역 0.3003이며, 일관성 비율값은 유의수준 0.1보다 작은 0.04로 인자별가중치는 일관성을 가지고 있는 것으로 판단되었다.

3. 분석방법

셀룰라 오토마타는 기본단위인 동일한 셀(cell)에 의해 구성되는 시뮬레이션이 일어나는 셀룰라 공간(cellular space)과 임의의 셀이 가지고 있는 셀의 값인 상태(states), 중심 셀 주위를 둘러싸고 있는 인근셀인 네이버후드(neighborhood) 그리고 주위셀의 상태에 의하여 해당 셀이 어떻게 변화하는지를 정의한 전이규칙(transition rule)으로 구성되어지고 2차원 GRID 셀을 기본으로 하고 있다. 셀룰라 오토마타의 핵심요소인 네이버후드는 중심 셀 주변을 둘러싸고 있는 주위셀을 의미하며 정사각형 및 circle의 다양한 형태로 사용되고 있다.

전이규칙은 가장 중요한 요소로서 주변셀의 상태에 의하여 해당 셀이 어떻게 변화하는지를 정의한 규칙이다. 본 연구에는 셀의 '전환 가능성'으로 셀의 전이가 이루어지도록 정의한 Wu

의 전이규칙을 사용하였다. 전환 가능성은 (1)과 같으며 계수값에 따라 전환가능성의 최대값이 달라지는 것을 조절하기 위해 지수함수를 적용하여 비선형 형태로 변화되는 (2)를 적용하기로 한다. 여기서 α 값이 커질수록 전환가능성이 작아지기 때문에 개발 속도를 조절하는 것이 가능하다.



a. 정사각형 $n \times n$

b. circle n

FIGURE 2. Concept of neighborhood

한 셀의 상태는 이웃셀 전이규칙의 영향을 받아 새로운 상태로 변하게 되고, 이 상태는 다시 그 다음 단계의 초기상태로 입력되어 반복적으로 연산이 진행된다.

TABLE 2. Membership function of fuzzy set

구분	퍼지귀속도함수	기준설정
자연환경인자 표고		S-shaped (monotonically decreasing) $a=0m, b=150m$
인구밀도		User-defined 1987, 1997, 2001년 인구밀도를 z-score로 표준화하여 변곡점(a,b,c,d)을 설정
인문환경인자 도로		S-shaped (monotonically decreasing) $a=0m, b=375m$
공공시설		S-shaped (monotonically decreasing) $a=0m, b=500m$

* 김해시 도시기본계획에서는 200m를 개발 불능지역으로 설정하고 있으나, 전체 69.9%가 표고 100m 미만 이기에 150m로 하향조정하였으며, 다른 인자의 퍼지귀속도 함수값은 문헌 고찰을 통하여 설정하였다.

$$P_{ij} = a \frac{r_{ij}}{r_{max}} \quad (0 < a < 1) \quad (1)$$

$$P_{ij} = \begin{cases} \text{Exp} [a (\frac{r_{ij}}{r_{max}} - 1)] & r_{ij} \neq 0 \\ 0 & r_{ij} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

P_{ij} : 전환가능성
 r_{ij} : i, j의 셀이 갖고 있는 점수
 r_{max} : 셀의 가장 높은 적합도 점수
 a : 도시성장조절계수

본 연구에서는 김해시의 성장패턴을 정립하기 위하여 셀룰라 오토마타의 전이규칙 및 도시개발 속도를 조절하는 a 값, 그리고 주변셀인 네이버후드의 다양한 대안을 가지고 시뮬레이션하였다. CASE1, CASE2, CASE3은 네이버후드의 형태 및 크기를 결정하기 위한 대안이며, CASE4, CASE5는 개발의 속도를 조절하는 값을 결정하기 위한 대안이다. 셀룰라 오토마타의 모델정의는 TABLE 3과 같으며, 성장패턴을 결정하기 위한 네이버후드와 전이규칙에 대한 정의는 TABLE 4와 같다.

TABLE 3. Model of cellular automata

구분	설명
셀룰라공간	김해시 9개동 30m×30m 정사각형 격자셀
상태	인자에 퍼지집합개념과 AHP 가중치를 적용
네이버후드	3×3, 5×5, circle2
전이규칙	Wu의 전이규칙

TABLE 4. Case of neighborhoods and transition rules

구분	네이버후드	a 값	전환가능성
CASE1	3×3	1	≥0.7
CASE2	5×5	1	≥0.7
CASE3	circle2	1	≥0.7
CASE4	3×3	2	≥0.5
CASE5	3×3	3	≥0.35

4. 검증방법

각 시뮬레이션 결과의 정확도를 파악하기 위하여 민감도분석(Sensitive Analysis)을 실시한다. 민감도분석이란 시뮬레이션 결과와 실제 데이터 비교를 통하여 분석하는 방법으로 셀 수를 단순하게 비교하는 방법(MR)과 셀들간의 일관성을 계산하는 방법(CR)을 사용한다.

$$MR = \frac{\text{시뮬레이션결과의 도시 셀 수}}{\text{실제도시의 셀 수}}$$

$$CR = \frac{\text{실제도시와 시뮬레이션결과의 일치 셀}}{\text{실제도시의 셀 수}}$$

또한 두 개 이상의 변수에 대한 결합분포(결합빈도)를 나타내는 즉, 변수에 대한 독립성, 상관성이 있는지를 판단하는 Cramer's V와 Kappa계수에 의한 검증을 실시하였다.

결과 및 고찰

연구 대상지인 9개동의 위성 데이터에서 추출된 도시지역은 1987년 3,964셀(3.57km²), 1997년 10,191셀(9.17km²) 그리고 2001년 14,924셀(13.43km²)로서 15년간 10,960셀(9.86km²)의 도시성장 패턴이 있었다. TABLE5는 김해시에 적합한 도시성장 패턴을 정립하고자 CASE1부터 CASE5까지 5가지 대안을 설정하여 영상에서 추출된 도시지역의 셀 값과 비슷한 성장 결과를 갖게 될 때까지 시뮬레이션 한 결과이다.

CASE별 일치 셀을 살펴보면, CASE1의 경우 1997년 8,079셀, 2001년 12,466셀로 시뮬레이션 되었으나, CASE2의 경우 1997년 7,918셀, 2001년 11,528셀로 분석되어, 대안들로 인해 도시의 물리적 성장 차이가 나타남을 볼 수 있다.

분석결과를 통해 민감도 분석을 한 결과 1997년의 경우 현저한 차이를 보이지는 않았지만, 2001년의 경우 CASE1과 CASE2의 일관성 값인 CR을 살펴보면 0.835와 0.772로 CASE1의 결과가 보다 김해시에 적합한 것으로 분석되었다.

TABLE 5. Result of each simulation

구	분	도 시 셀 수 (A)			시뮬레이션 셀 수 (B)		일 치 셀 (A∩B)	
		1987년	1997년	2001년	1997년	2001년	1997년	2001년
CASE1	3×3 α=1 ≥0.7				10162	14928	8079	12466
CASE2	5×5 α=1 ≥0.7				10196	14933	7918	11528
CASE3	circle2 α=1 ≥0.7	3964	10191	14924	10197	14934	8043	12192
CASE4	3×3 α=2 ≥0.5				10199	14926	8092	12337
CASE5	3×3 α=3 ≥0.35				10180	14925	7975	11952

TABLE 6. Sensitive analysis

구 분	1997년		2001년	
	MR	CR	MR	CR
CASE1	0.997	0.792	1.001	0.835
CASE2	1.001	0.777	1.001	0.772
CASE3	1.001	0.789	1.001	0.817
CASE4	1.001	0.794	1.000	0.827
CASE5	0.999	0.783	1.000	0.801

TABLE 7. Cramer's V and Kappa calculation

또한 두 개 이상의 변수에 대한 결합분포를 나타내는 Cramer's V와 Kappa계수에 의한 검정 부분도 민감도 분석과 비슷한 결과를 볼 수 있다.(TABLE 7)

CASE1, CASE2 그리고 CASE3의 분석결과를 살펴보면 CASE1>CASE3>CASE2의 순으로 나타나 김해시는 네이버후드 행렬이 작을수록 더 적합도가 높은 것으로 분석되었으며, 동일한 거리를 갖는 circle 형태의 네이버후드보다는 직사각형 형태의 네이버후드가 더 적합한 것으로 나타났다. 네이버후드 행렬이 작고, 형태가 직사각형인 대안들 가운데 CASE1, CASE4, CASE5를 살펴보면 CASE1>CASE4>CASE5의 순으로 나타나 도시의 성장속도를 조절하는 α값이 작을수록 또한 전환 가능성이 클수록 1에 가까운

FIGURE 3. Classification of urban areas from landsat TM

값이 도출되었다. 즉 김해시에 적합한 도시성장 패턴은 네이버후드 행렬이 작을수록, circle 형태보다는 직사각형 형태, 도시성장속도를 조절하는 α 값이 작고, 전환 가능성이 클수록 더 적합도가 높은 것으로 분석되었다.

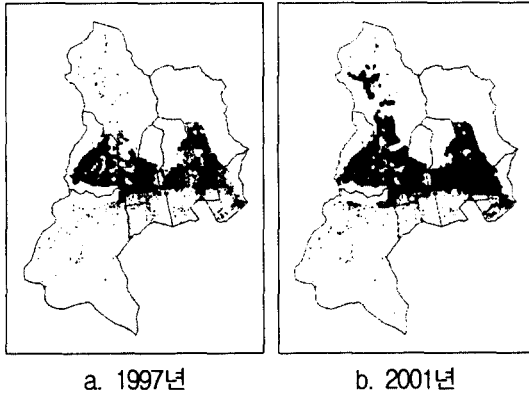


FIGURE 4. Results of simulation(CASE1)

민감도 분석과 Cramer's V 및 Kappa 계수

에 의한 고찰 결과 가장 높은 값을 보인 CASE1 시뮬레이션 결과를 위성사진에서 추출된 도시지역과 비교해 보면(FIGURE 2, FIGURE 3) 퍼지-AHP 및 셀룰라 오토마타를 적용하여 시뮬레이션 한 결과 실제 도시지역과 비슷한 형태의 도시성장이 일어났음을 볼 수 있다. 이러한 결과를 종합해 본 결과 CASE1이 김해시의 도시성장패턴에 가장 적합한 것으로 나타났다.

CASE1의 모델링 결과와 영상에서 추출된 연도별 동 면적을 살펴보면 1997년의 경우 내외동과 북부동의 경우를 제외한 모든 동이 실제 도시지역과 비슷한 도시성장을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 데이터 구축시 각 분석 연도 데이터가 구축하여야 하지만 데이터 획득의 어려움으로 해당연도의 데이터를 인자로 설정되지 않아 나타난 결과로 사료되어진다. 2001년 도시지역을 살펴보면 내외동 389셀(km²), 북부동 854셀(km²)이 실제 도시지역보다 증가하여 개발에 적합한 셀이 있는 것으로 나타났다.

TABLE 8. Comparison of CASE1 with urban areas

구 분	CASE1 시뮬레이션 결과(셀 수, 면적,)				영상에서 추출되어진 도시(셀 수, 면적)			
	1997년		2001년		1997년		2001년	
	셀수	면적	셀수	면적	셀수	면적	셀수	면적
내외동	2675	2.408	3080	2.772	1744	1.570	2691	2.422
동상동	409	0.368	444	0.400	336	0.302	391	0.352
부원동	860	0.774	984	0.886	918	0.826	1061	0.955
북부동	475	0.428	2461	2.215	847	0.762	1607	1.446
불암동	610	0.549	1228	1.105	770	0.69	1358	1.222
삼안동	2080	1.872	2532	2.279	2031	1.828	2638	2.374
칠산서부동	320	0.288	607	0.546	800	0.720	1385	1.247
활천동	1855	1.670	2625	2.363	1905	1.715	2880	2.592
회현동	878	0.790	972	0.875	840	0.756	913	0.822
합계	10162	9.146	14933	13.440	10191	9.172	14924	13.432

결 론

본 논문은 각 지역의 지역적 조건이나 성장의 형태와 패턴이 다르다는 것을 고려한 연구로서, 기존의 도시성장 분석 및 예측을 위해 도입되어진 셀룰라 오토마타를 도입하여 김해시 과거 도시성장 과정을 분석하고 이 분석을 통하여 김해시에 적합한 도시성장 패턴을 정립하였다.

연구를 위해 도시성장이 활발히 진행되어진 1987년부터 2001년 김해시 9개 동을 분석대상으로 하였으며, 공간분석의 효율성을 위해 퍼지 집합개념과 AHP를 적용하였고, 보다 정확한 시뮬레이션을 위해 자연환경인자 뿐만 아니라 인문환경인자를 사용하였다.

본 연구대상지의 도시성장을 보면 시뮬레이션에서 도출된 결과와 영상에서 추출된 도시지역은 비슷한 도시성장이 일어난 것으로 나타났다. 도시성장 과정을 모델링 한 결과 김해시의 도시성장 패턴으로 네이버후드는 Circle형태의 네이버후드보다 정사각형 형태가 더 적합하였으며, 행렬이 큰 네이버후드 보다 작은 행렬 값의 네이버후드가 더 적합한 것으로 분석되었다. 그리고 도시성장 속도를 조절하는 α 값이 작을수록 즉, 빠른 성장을 할수록, 전환가능성 (P_{ij}) 이 클수록 더 적합한 것으로 도출되었다.

이 연구는 도시환경 평가 및 도시의 물리적 성장 형태 예측 등 의사결정자들에게 공간계획 시 활용할 수 있도록 하는데 의의가 있으며, 향후 연구에서는 초기 파라메타 설정에 따라 많은 다른 결과를 유발할 수 있기에 도시성장인자에 대한 연구가 되어진다면 보다 정확한 도시성장을 구현할 수 있을 것이다. 또한 문헌 고찰을 통하여 결정되어진 공공시설 및 도로로부터의 접근성 퍼지귀속도 함수 설정에 관한 연구가 진행되어져야 할 것이다. **KASIS**

참고문헌

- 강영옥, 박수홍. 2000. 서울대도시지역 도시성장 예측에 관한 연구. 대한지리학회지 35(4): 621-639.
- 남광우. 1998. 퍼지집합개념과 AHP를 이용한 GIS환경에서의 공간의사결정에관한 연구. 부산대 석사학위논문. 36쪽
- 박수홍. 1997. CA-GIS 통합 시스템을 이용한 GIS 연산의 구현. 한국GIS학회 5(1):100-113.
- 윤정미. 2002. 퍼지-AHP와 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장예 관한 연구. 부산대학교 박사학위논문. 39쪽
- 최창영. 2001. 셀룰러 오토메타를 이용한 도시 성장모델링, 경상대학교 석사학위논문. 52쪽
- F. Wu, C. J. Webster. 1998. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. Environment and Planning B: Planning and Design(25): 103-126.
- R. White, G. Engelen. 1997. Cellular automata and fractal urban form. Environment and Planning B 25(8): 1175-1199.
- Xia. Li, Anthony. Gar-on Yeh. 2000. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. IJGIS 14(2):131-152. **KASIS**