

도시성장모형의 시뮬레이션 자동화에 관한 연구

윤정미^{1*} · 박정우²

Research about Urban Growth Model's Automation

Jeong-Mi YUN^{1*} · Jeong-Wo PARK²

요 약

최근 토지이용 변화에 관한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 그 중에서 셀룰라 오토마타(Cellular Automata, CA)를 이용한 연구방법이 도시성장에 많이 활용되고 있다. CA는 셀 상태가 전이규칙에 따라 새로운 시점의 상태로 변하는 연산을 반복한다. 또한 퍼지-AHP를 이용하여 정보 손실을 최소화하고, 유연한 도시성장 모델링을 유도할 수 있다. 그러나 AHP의 경우 가중치 도출까지의 사수렴 작업이 반복되어야 하는 어려움이 있다. 그리고 셀룰라 오토마타를 이용한 시뮬레이션은 많은 연산 모델링이 필요하고, 도출된 데이터 관리 및 일정 기준 시점마다 일치성을 검증하여야 한다. 이에 본 연구는 변수에 상대적 가중치를 부여하는 AHP 단계부터 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장 및 검증과정을 자동화하여 부산시 도시성장을 분석하고 예측하였다. 이를 통하여 도시성장 모델링의 복잡성과 반복성 문제를 개선할 수 있다. 또한 검증과정 부분을 통해 유용성 높은 모델링을 할 수 있으며, 작성된 모듈을 사용하여 이와 유사한 사례 연구에 적용할 수 있다.

주요어 : 자동화 모듈, AHP, 셀룰라 오토마타, 도시성장모델, ArcGIS

ABSTRACT

Recently, various researches have been studied on the predict method of land change according to its development. The Cellular Automata(CA) is one of the most popular methods in the urban growth modeling. The basis principle of CA is to repeat operations, which convert the current cell into new cell state by the transaction rule. It will minimize the loss of data by using Fuzzy-AHP and it can lead the flexible urban growth modeling. However, AHP would have a disadvantage to repeat the procedure of the collecting intentions until it derives the weight. Also, it is necessary for the simulation of CA to repeat the operations and the test of data accuracy should be accompanied. The purpose of this study is to predict the Busan city growth model and analyze it according to the automated test method by applying CA as well as Fuzzy-AHP. This study shall improve the difficulties caused by complexity and repetitiveness in the urban grow modeling. The practical modeling could be derived from the verification, and the derived modules could be applied to the similar case studies.

KEYWORDS : *Automation Module, AHP, Cellular Automata, Urban Growth Model, ArcGIS*

2007년 5월 8일 접수 Received on May 8, 2007 / 2008년 2월 21일 심사완료 Accepted on February 21, 2008

1 충남발전연구원 지역정책연구팀 Senior Researcher, Chungnam Development Institute

2 부산대학교 대학원 지형정보협동과정 Department of GIS, Graduate schools, Busan University

* 연락처 E-mail : coco@cdi.re.kr

서론

1. 연구배경 및 목적

도시문제는 도시 규모가 커질수록 다양해져 문제의 부분적 해결만으로는 기능 회복을 기대할 수는 없으며 보다 본질적인 해결을 위해 지속적인 노력이 필요하다(이강제, 1999). 이에 지속가능한 도시성장을 위해 도시성장 과정을 분석하고 예측하는 방법이 요구된다(강영욱과 박수홍, 2000). 이전의 도시성장모형은 GIS 중첩분석, 인접성분석, 버퍼링 등 단순한 공간연산을 하고 있기에 최적화와 시뮬레이션 부분에 있어서 GIS 시스템 제한을 받고 있었다(Park and Wagner, 1997). 이를 해결하기 위해 시간에 따른 변화를 모델링할 수 있고 동적 공간을 보다 현실적으로 모델링할 수 있는 셀룰라 오토마타를 적용하여 도시성장을 시뮬레이션한다. 또한 Fuzzy 이론을 적용하여 기존 흑백의 이분법적 분석으로 인한 정보 손실을 최소화하고, 계층적 분석법(Analytic Hierarchy Process: AHP) 즉, 동일 가중치가 아닌 상대적 가중치를 부여함으로써 주관적 판단을 최소화하고, 도시의 복합적 성격을 분석하고자 한다. 도시성장 모델링 구축을 위해 GIS 응용프로그램에서 제공하는 GRID 연산기능을 이용하거나 셀 연산을 위한 프로그램을 작성하여 연구를 수행하여야 하며, AHP의 경우 가중치 도출까지 의사결정이 반복되어야 하는 어려움이 있다. 이에 본 연구는 변수에 상대적 가중치를 부여하는 AHP 단계부터 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장 및 검증과정을 자동화하여 부산시 도시성장을 분석하고 예측하였다. 이 자동화 모델을 통하여 도시성장 모델에 관한 다양한 파라메타 설정 및 모델링 반복 작업을 개선할 수 있다. 또한 검증과정을 포함하여 보다 유용성 높은 모델링을 할 수 있으며, 다른 도시지역모델링에도 적용할 수 있다.

2. 연구동향

Cellular Automate(CA)는 공학 분야에서 동적 현상들을 연구하는데 사용되었다. 그러나 이것은 응용프로그램 상에서 고도의 모델링 기법을 요구하고 있었다. Tobler(1979)는 최초로 지리적인 문제에 CA를 제안하였으며 Couclelis(1985, 1988)는 동적공간모델로써 CA의 개념을 소개, Phipps(1989, 1992)와 Cecchini와 Viola(1990)는 다양한 지리적 변화 모형으로 CA모델을 제안하였다. GIS의 발달로 지리정보의 정확도 및 처리과정의 모델링을 할 수 있는 보다 현실적인 지리시스템의 표현방법을 가질 수 있었다(Couclelis, 1997; Engelen et al., 1993, 1996, 1997). 몇몇 연구자들은 CA기능을 GIS에 결합하거나 변환 또는 CA에 GIS기능을 결합하는 연구를 하였다(Itami, 1994; Takayama, 1996; Wagner, 1997; Wu, 1998). 이 중 Wu(1998)의 Simland는 ESRI Arc/INFO의 AML과 C 언어를 이용하여 GIS에 CA기능을 결합한 연구로, 다기준의사결정법(MCE)중 AHP를 사용하여 CA를 통한 성장 및 GIS를 통한 분석 및 결과를 표현하는 시스템을 구축하였다. 그러나 도시성장 여건의 변화 및 도시성장단계에 따른 성장속도의 차이를 고려하지 않는 단점을 가지고 있다. 또한 각 성장 조건 중요도에 따라 도시성장 모습의 변화 양상이 달라질 수 있으나, 중간 단계에서 적합성 여부를 확인하는 검증단계는 제외되어 있는 문제점도 가지고 있다. 이러한 것은 과거단계에서부터 검증을 통한 향후 도시성장분석에는 적합하지 않으며, 연구자가 준 데이터를 통한 도시 확산의 모습을 보는 것만 가능하다.

연구방법

1. 이론적 고찰

셀룰라 오토마타는 2차원 grid 기반으로 셀룰라 공간(cellular space), 셀 상태(states), 네이버후드(neighborhood), 전이규칙(transition rule),

시간(time)으로 구성된다. 네이버후드는 셀 주위를 둘러싼 이웃 셀을 의미하고 주로 원형과 정사각형 형태로 정의된다. 전이규칙은 셀이 어떻게 변화되는지 정의한 규칙으로, 이 규칙에 의해 반복적으로 모델링되어진다. 즉, 셀룰라 오토마타는 어느 시점에서 셀의 상태와 네이버후드, 그리고 전이규칙에 의해 새로운 셀의 상태로 변화되어지는 것이다.

본 연구에서는 Wu의 전이규칙을 사용하였으며, 전환가능성 점수를 통하여 도시성장을 모델링하였다. 이 식에서 r_{ij} 는 셀 점수로 퍼지함수를 적용한 인자에 상대적 가중치(AHP)를 적용할 수 있으며, α 값을 통하여 도시성장 속도 조절이 가능하도록 설계하였다.

$$P_{ij} = \begin{cases} \text{Exp} \left[\alpha \left(\frac{r_{ij}}{r^{\max}} - 1 \right) \right] & r_{ij} \neq 0 \\ 0 & r_{ij} = 0 \end{cases}$$

- P_{ij} : 전환가능성(셀의 도시화 전환 가능성)
- r_{ij} : i, j의 셀이 갖고 있는 점수
- r^{\max} : 셀의 가장 높은 적합도 점수
- α : 도시성장조절계수

모델에서 P_{ij} 와 α 값을 조절하여 시뮬레이션 함으로써 적합한 도시성장패턴을 찾아 도출된

도시성장 패턴을 이용하여 향후 도시성장을 예측할 수 있도록 하였다.

2. 도시성장 자동화 모델

1) 도시성장 자동화 모델 기본 알고리즘

자동화모델에 대한 개발의 현재 추세는 추가(Addon)형식의 강력한 결합(Tight Coupling)으로 진행되어지고 있다. 따라서 본 연구에서 제시할 시스템은 기존 GIS시스템으로 많이 사용되어지는 ArcGIS에 도시성장모형을 자동화할 수 있는 확장형 시스템을 구축하고자 한다. 연구에서 개발한 자동화 모델은 ArcGIS 9.0을 기반으로, ArcODE와 ArcObject를 VB에 연결하여 구성하였으며, 목적은 CA를 통한 도시성장패턴을 연구 및 검증을 실행하기 위한 모델이다. 도시성장 자동화 모델은 ESRI에서 제공하는 GRID 데이터 형식과 호환되는 모든 데이터 형식이 사용 가능하고, AHP 모듈과 셀룰라 오토마타 모듈 두 개 부분으로 나뉜다.(그림 1)

AHP 모듈은 기존의 도시성장모델의 한계였던 데이터 손실 및 유연한 파라메타 설정을 위하여 구축된 모듈로써, 쌍별비교행렬을 통하여 도시지역 가중치를 생성하고, 셀룰라 오토마타에 사용되는 Factor에 가중치를 부여한다.

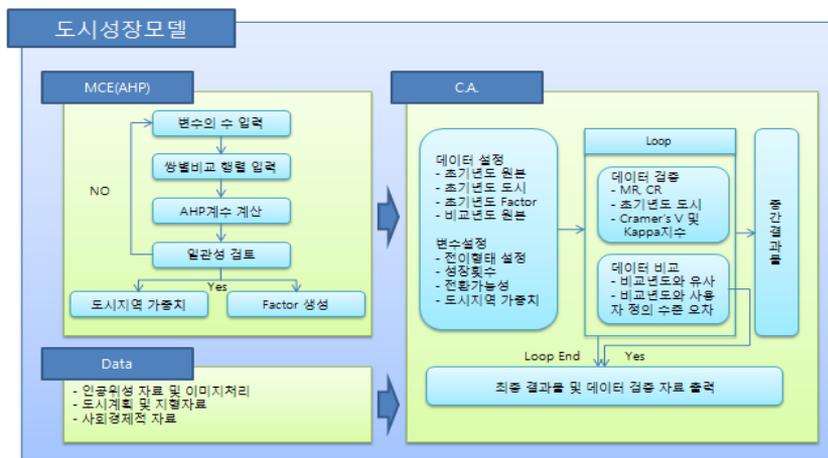


FIGURE 1. 도시성장 자동화 모델의 기본 알고리즘

셀룰라 오토마타 모듈(CA)은 가중치가 부여된 Factor를 이용하여 사용자가 지정한 조건에 따라 도시성장을 반복하여 시뮬레이션하는 구조로 되어있다. 기존 범용 GIS소프트웨어 중에는 AHP기능과 CA기능을 동시에 지원하는 것이 없으며, 이에 따른 통계적인 검증의 방법 또한 제공하고 있는 것은 없다. 따라서 본 연구에서 제공하는 시스템은 범용GIS시스템에 기능의 추가 형식이며, AHP와 CA기능간의 상호 데이터 관계성을 유지 및 데이터 값에 대한 통계적 유의성을 검증 할 수 있는 알고리즘을 수행할 수 있도록 주안점을 두었다.

2) GUI의 구성 및 모듈 설명

그림 2는 ArcGIS 9.0에서 실행되는 도시성장 자동화 모델로, 툴바에 추가된 AHP_CA 단축 아이콘을 통하여 모델이 실행된다. 도시성장 자동화 모델 중 AHP 모듈은 AHP 계수 입력 부분과 변수 파일 설정 부분으로 구성된다.

‘AHP 계수 입력’은 Matrix구조로 기존 AHP 모듈에서 슬라이드 방식으로 입력하는 불편함을 해소하였으며, Matrix 크기는 사용자가 입력한 변수 개수에 따라 자동 변동이 가능하다. 또한 이 부분을 AHP 계수 연산 부분과 Factor 생성 부분으로 분리하여 AHP 계수 일관성 검증 값(C.R값)을 확인 후 Factor에 가중치가 적용되며, AHP 모듈에서 생성된 가중치가 CA Model로 바로 연결되도록 설계하였다.(그림 3)

‘CA Model’은 기초데이터 설정, 결과데이터 설정, 네이버후드 전이형태 정의, 성장 횟수 정의, 전환가능성 및 도시지역 가중치 정의, 분석 및 검증 조건 설정으로 크게 6개 입력부분으로 나누어진다.(그림 4)

이 중 ‘네이버후드 전이형태 정의’ 부분은 사각형과 원형으로 정의할 수 있으며, 셀 크기 또한 다양하게 정의할 수 있다. ‘성장 반복 횟수 정의’ 부분은 전이규칙에 따라 주어진 횟수만큼 도시성장 시뮬레이션을 반복하는 기능이다. 기본적으로 CA 모듈은 도시성장 횟수만큼

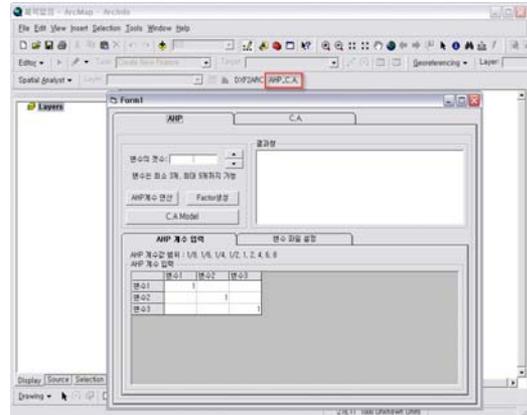


FIGURE 2. 도시성장 자동화모듈 실행

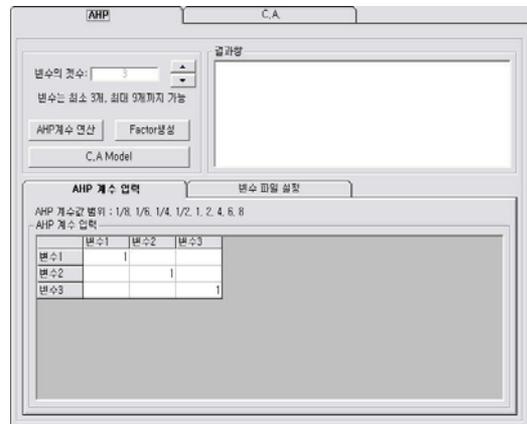


FIGURE 3. AHP 모듈

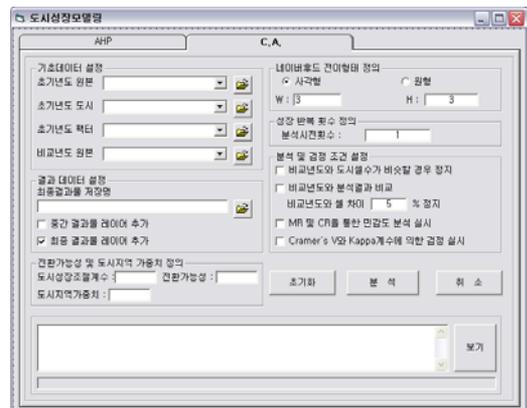


FIGURE 4. 도시성장 자동화모듈 중 CA 부분

반복하여 성장되나, 비교년도와 도시성장 형태가 비슷할 경우 성장을 중지시키도록 설계되었다. 즉, 도시성장 반복 횟수를 최대로 지정하더라도, 분석 및 검증조건에 있는 비교년도와 도시 셀 수가 유사할 경우 또는 사용자가 지정한 비교년도와 셀 오차 범위내일 경우 성장횟수가 남았더라도 성장을 중지하도록 설계하였다. 모델링이 정지한 후 비교년도 도시 셀 수와 모델링 결과의 도시셀 수(도시화된 셀 수)를 비교할 수 있다. MR(시뮬레이션 결과의 도시셀/실제 도시셀 비교)과 CR(실제도시와 시뮬레이션결과 일치셀/실제 도시셀의 일관성을 계산하는 방법)을 이용한 민감도 분석과 Cramer's V와 Kappa 계수(변수에 대한 독립성, 상관성 분석)를 이용하여 비교년도와 성장모델에 의한 도시지역을 검증하였다. 도시성장을 시뮬레이션 매 횟수마다 계산·저장하여 성장이 멈추었을 때 일괄적으로 보여주도록 되어있다. 결과물은 사용자 정의에 따라 중간결과물과 최종결과물을 지도화하는 기능이 있어 도시성장 모습을 시각적으로 확인할 수 있다.

‘전환가능성 및 도시지역 가중치 정의’ 부분은 앞에서 정의된 셀룰라 오토마타 전이규칙 부분으로써 도시성장조절계수(α)와 전환 가능성(P_{ij})을 통하여 다양한 도시성장을 모델링할 수 있다. 또한 모든 연산결과 및 중간결과, 최종결과(파일명에 접미사“_re”를 붙여 구분 가능)는 파일로 저장이 되어 차후에 확인할 수 있도록 설계하였다.

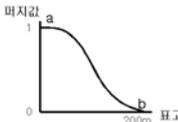
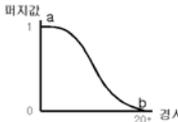
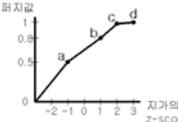
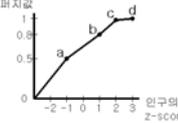
결과 및 고찰

1. 데이터 구축 및 시뮬레이션 설정

부산시 도시성장을 위한 인자는 표고, 경사, 도시지역, 지가, 인구밀도, 용도지역을 사용하였다. 이중 표고와 경사, 지가, 인구밀도는 Fuzzy 귀속도 함수를 적용하여 데이터를 구축하였으며, 도시지역과 용도지역은 0과 1로 설정하여 구축하였기에 Boolean 함수를 적용하

여 구축하였다. 도시지역 인자는 도시지역과 비도시지역으로 구분하여 도시지역은 1값 그 외 값은 0으로 설정하여 구축하였고, 지가는 1989년 전국도시지역 토지지가조사표와 1995년 전국공시지가를 이용하여 동별로 구축하였다. 인구밀도는 1987년 1997년 2001년 각 동별 인구밀도 데이터를 사용하였고, 용도지역은 1996년 도시계획도를 이용하여 주·상·공업지역을 1값으로 그 외 값은 0으로 설정하여 구축하였다. 구축된 표고, 경사, 지가, 인구밀도 Factor에 퍼지귀속도 함수를 설정하여 데이터 손실을 방지하고 유연한 도시성장모델을 유도하였다.(표 1)

TABLE 1. 퍼지귀속도 함수와 기준설정

구분	퍼지귀속도 함수	기준 설정
표고		S-shaped (monotonically decreasing) a=0m, b=200m
경사		S-shaped (monotonically decreasing) a=0°, b=20°
지가		User-defined z-score 표준화 변곡점(a,b,c,d)을 설정
인구 밀도		User-defined z-score 표준화 변곡점(a,b,c,d)을 설정

※ 표고, 경사, 지가, 인구밀도인자에 퍼지귀속도함수를 적용하였고, 도시지역인자는 도시지역은 1로 비도시지역은 0으로 설정, 용도지역은 주·상·공업은 1로 그 이외는 0으로 설정

연구에서 구축한 도시성장 자동화 모델은 다양한 파라메타를 설정하여 모델링이 가능하다. 그러나 본 논문은 부산시에 적합한 도시성장패턴을 정립하는 연구가 아니라, 도시성장

모델 자동화 연구이기에 시뮬레이션을 위한 쌍별비교행렬, 도시성장조절계수, 전이규칙, 전환가능성 설정값은 윤정미(2002. 8)의 연구에서 정립된 부산시의 도시성장패턴을 사용하였다. 윤정미(2002. 8)는 각 도시는 지역마다 고유한 도시성장패턴을 가지고 성장한다는 가정하에 CASE 1~CASE 8의 다양한 도시성장 시뮬레이션을 통하여 부산시에 적합한 도시성장패턴을 도출하였다.(표 2)

TABLE 2. 셀룰라 오토마타의 전이규칙과 네이버후드

구분	네이버후드	α 값	전환가능성
CASE 1	3×3	1	≥ 0.7
CASE 2	7×7	1	≥ 0.7
CASE 3	circle2	1	≥ 0.7
CASE 4	circle5	1	≥ 0.7
CASE 5	3×3	2	≥ 0.5
CASE 6	circle2	2	≥ 0.5
CASE 7	3×3	3	≥ 0.35
CASE 8	circle2	3	≥ 0.35

※ 윤정미(2002.8) 논문에서 부산시에 적합한 전이규칙과 네이버후드는 CASE8로 정립되어 본 연구는 CASE8을 사용하여 시스템 구축

도시성장 패턴 도출시 데이터 속성을 이진 분류함으로써 발생하는 정보 손실을 극복하기 위하여 퍼지집합개념을 적용하였고, AHP의 상대적 가중치를 도입하여 의사결정자의 주관적 판단에 따른 오류를 최소화하였다.

이 연구에서 도출된 쌍별비교행렬은 표 3과 같으며, 셀룰라 오토마타 네이버후드는 circle 형태의 반지름 2, 도시성장조절계수(α)는 3, 전환가능성은 0.35인 CASE8을 사용하여 도시성장모형을 구축하였다.

2. 도시성장 자동화 모델을 이용한 시뮬레이션 및 검증

이를 바탕으로 CASE8을 이용한 도시성장 자동화 모델은 그림 5와 같이 도시성장 자동

TABLE 3. 쌍별비교행렬표

구분	지가	인구밀도	용도지역	표고	경사	도시
지가	1	—	—	—	—	—
인구밀도	2	1	—	—	—	—
용도지역	3	2	1	—	—	—
표고	2	2	1/2	1	—	—
경사	2	3	1/2	1	1	—
도시지역	3	2	2	3	2	1

※ 윤정미(2002. 8) 연구에서 델파이기법을 통해 획득한 쌍별비교행렬이며, C.R값 0.039, 가중치는 지가 0.072, 인구밀도 0.104, 용도지역, 0.221, 표고 0.137, 경사도 0.162, 도시지역 0.303

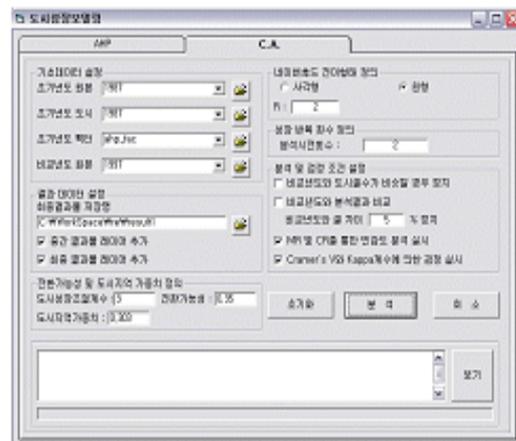
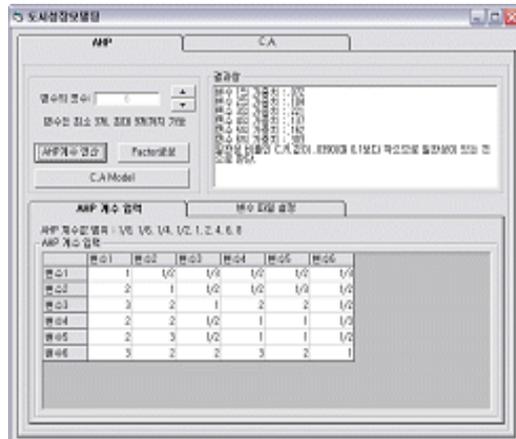


FIGURE 5. AHP 및 CA 연산모습

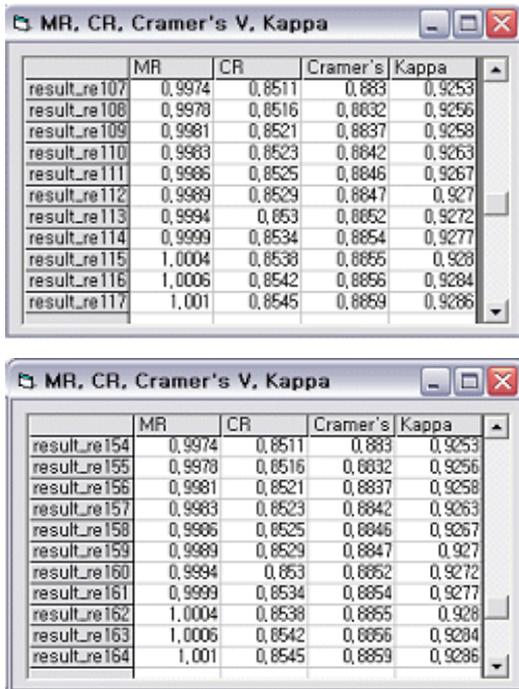


FIGURE 6. 시뮬레이션 검증결과 화면

화모델 중 AHP 모듈에 대입하여 연산한 결과 일관성 비율인 C.R값이 0.039로 일관성 있게 도출되었고, Factor 가중치는 지가 0.072, 일구 밀도 0.104, 용도지역, 0.221, 표고 0.137, 경사 0.162, 도시지역 0.303이었다. 이중 도시지역 가중치 0.303은 CA 모듈 연산시 자동으로 반

영되도록 설정되었다.

이러한 조건으로 도시성장자동화 모듈을 이용하여 1987년부터 1997년까지, 1997년부터 2001년까지 분석하였으며, 1997년부터 2001년까지 4년간 도시성장을 만큼 2005년과 2009년까지 동일한 성장속도로 시뮬레이션하여 도시성장을 예측하였다.

구축한 도시성장 모델을 통하여 시뮬레이션한 결과, 도시성장 실행 소요시간은 평균 13초 내외로 나타났다. 1997년부터 2001년까지 도시 성장에 걸린 시간은 약 35분이었으며, 2001년부터 2005년까지 59분, 2005년부터 2009년까지 94분 정도인 것으로 나타났다. 각년도의 분석 시간은 분석의 횟수로 1997-2001년까지는 164회, 2005년까지는 273회, 2009년까지는 438회의 반복 작업이 이루어진 후에 도달한 결과이다. 이는 부산의 경우 도시 성장이 어느 정도 도달하면 개발 용지 부족으로 추가적 성장에 필요한 분석횟수가 대폭 증가함을 알 수 있다. 또한 상당한 량의 반복된 중간결과물의 관리 및 중간단계의 검증이 자동화되어 관리가 되는 장점을 가지고 있다. 중간단계의 검증이라 함은 각 단계별 오차값에 대하여 검증도 이루어지며, 과거의 데이터를 통한 확산모형의 해당도시의 성장패턴을 결정시에 잘못된 성장이 이루어지는 것을 막을 수 있는 기능 또한 포함되어 있어 해당 도시의 올바른 도시성장

TABLE 4. 각 시기의 검증결과 및 성장셀 수, 성장횟수, 분석시간

구 분	1987-1997	1997-2001	2001-2005	2005-2009
MR	1.001	1.001	-	-
CR	0.8589	0.8545	-	-
Cramer's V	0.8939	0.8859	-	-
Kappa계수	0.9356	0.9286	-	-
성장셀수	12326	3967	3967	3967
성장횟수	117	164	273	438
분석시간	25분 38초	35분 08초	59분 24초	94분 52초

※ 2001-2005, 2005-2009년은 예측 부분이기때 검증 부분이 없음

패턴의 구현하는데 도움을 주고 있다. 이에 부산과 같이 도시확산이 많이 이루어진 경우 셀룰라 오토마타를 이용하여 도시성장을 시뮬레이션 할 때 많은 시간과 노력이 소요되며 이를 위한 자동화 모델이 반드시 요구되어진다.

그림 7은 도시성장자동화모델을 이용하여 시뮬레이션한 부산시 2005년과 2009년 도시의 물리적 성장형태이다. 부산시는 가용지 부족으로 도시의 수평적 확산이 어려운 것으로 도출되었고, 물리적 성장형태도 2005년 2009년 유사하게 나타났다.

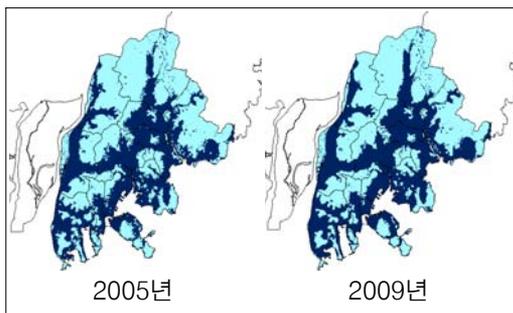


FIGURE 7. 2005년 시뮬레이션 결과(좌), 2009년 시뮬레이션 결과(우)

결론

2000년 초반부터 국내에서 많은 사람들이 도시성장모형으로 사용하고 있는 AHP와 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장 시뮬레이션으로 사용하고 있다. 본 연구는 AHP와 CA를 이용한 도시성장모델의 연산 및 분석, 검증하는 과정을 자동화하였다. GIS에서 제공되는 기본적인 공간연산에서 벗어나 연속적인 변화를 볼 수 있는 좋은 모형이다. 도시성장 초기의 경우는 많은 연산과정이 필요하지 않았으나, 성장이 완성되어질수록 도시성장을 위한 셀룰라 오토마타의 연산이 기하급수적으로 늘어남을 알 수 있었다. 또한 연산과정마다 기준년도와의 비교를 위한 검증과정이 필요하므로 검증의 종류를 늘일 때 마다 부가적인 연산의

횟수 또한 늘어나게 되었다. 그러나 본 연구에서 구축된 도시성장 모델을 이용할 경우 AHP를 이용한 상대적 가중치 계산과 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장 및 검증과정을 자동적으로 처리하기에 다양한 전이규칙과 도시성장 속도를 조절하는 등 다양한 파라메타 설정을 통하여 각 도시의 지역적 조건에 따른 도시성장패턴을 선정할 수 있는 장점을 제공하였다.

또한 상대적 가중치를 변경하여, 변경된 가중치를 셀룰라 오토마타 모듈에 바로 적용할 수 있는 장점과 모델링 결과를 즉, 도시성장의 물리적 형태를 시각적으로 확인할 수 있는 점, 도시성장 모델링 결과를 검증할 수 있는 점 등의 장점을 가지고 있다. 부산시 뿐만 아니라 타지역의 도시성장 패턴을 위한 시뮬레이션시 유용하게 사용될 수 있다는 장점도 가지고 있다. 본 연구에서 사용된 시뮬레이션 자동화는 현재 국내에서 제공되는 AutoCAD사의 DXF 또는 ESRI사의 Shapefile 포맷을 사용하고, 각 지자체 및 연구소에서 주로 사용하는 ArcGIS시스템에 바로 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 이 연구는 현재 Wu의 셀룰라 오토마타의 공식을 사용하도록 고정되어 있어 다른 연산방식으로 분석이 불가능하게 되어있다. 따라서 사용자가 원하는 셀룰라 오토마타 연산을 가능하도록 유연한 연산체계를 가질 필요가 있을 것이다. **KAGIS**

참고 문헌

- 강영옥, 박수홍. 2000. 서울대도시지역 도시성장 예측에 관한 연구. *대한지리학회지* 35(4):621-624.
- 남광우. 1998. 퍼지집합개념과 AHP를 이용한 GIS환경에서의 공간의사결정에 관한 연구. 부산대 석사학위논문. 36쪽.
- 이강제. 1999. 도시 도시계획(38쪽). 보성각.

- 이성호, 윤정미, 서경천, 남광우, 박상철. 2004. 셀룰라 오토마타를 이용한 김해시의 도시성장모형에 관한 연구. 한국지리정보학회지 7(3):118-125.
- 윤정미. 2002. 퍼지-AHP와 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장예측에 관한 연구. 부산대학교 박사학위논문. 49-97쪽.
- 정재준. 2004. 상대생장과 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장예측 모델링. 한국지역개발학회지 16(2):1-14.
- 최대식, 임창호. 2004. 밀도결합형 셀룰라 오토마타 모형의 개발. 대한국토·도시계획학회지 39(5):7-24.
- Cecchini, A. and Viola, F. 1990. Eine Stadtbausimulation, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen 36:pp.159-162.
- Couclelis, H. 1985. Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics, Environment and Planning. 17:585-596.
- Couclelis, H. 1988. Of mice and men: what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. Environment and Planning A 20:99-109.
- Couclelis, H. 1997. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation, Environment and Planning B 24:165-174.
- Engelen, G., R. White and I. Uljee. 1993. Exploratory Modelling of Socio-Economic Impacts of Climate Change, in Maul, G. (ed), Climate Change in the Intra-Americas Sea, London: Edward Arnold
- Engelen, G., R. White, I. Uljee and S. Wargnies. 1996 "Numerical Modeling of Small Island Socio-Economics to Achieve Sustainable Islands. Marine Science and Sustainable Development, Coastal and Estuarine Studies, 51, Washington DC: American Geophysical Union 437-463
- Engelen, G., R. White and I. Uljee. 1997. Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban planning and policy-making. in Timmermans H. (ed.). Decision Support Systems in Urban Planning, London: E&FN Spon 125-155,
- Park, S. and D. Wagner, 1997 Cellular Automata as Analytical Engines in Geographic Information Systems. 1st International Conference on GeoComputation 670 - 688.
- Takayama, Y. 1996. Extraction of concurrent processes from higher-dimensional automata. In Proceedings of CAAP'96 72-85
- Tobler, W. 1979. Cellular geography, in Gale S. and Olsson G. (eds.), Philosophy in Geography, Dordrecht: Reidel 379-386.
- Wagner, D. 1997. Cellular automata and geographic information systems, Environment and Planning B 24:219-234.
- White R. and G. Engelen. 1997. Cellular automata and fractal urban form. Environment and Planning 25(8):1175-1199.
- Wu F. 1998. Simland: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. Geographical Information Science 12(1):63-82.
- Wu F. and C. J. Webster. 1998. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. Environment and Planning B: Planning and Design 25:03-126. **KAGIS**