

## 셀룰라 오토마타를 이용한 수도권의 도시성장 예측

정재준\* · 한동엽\* · 김용일\*\* · 이재원\*\*\*

### Cellular Automata Based Urban Growth Prediction for Seoul Metropolitan Area

Jae-Joon Jeong\* · Dong-Yub Han\* · Yong-Il Kim\*\* · Jae-Won Lee\*\*\*

#### 요 약

도시의 물리적 성장은 정책입안자나 지역계획가의 의도와는 다른 추세로 진행되는 경우가 흔히 존재한다. 따라서 장래 도시로 성장할 지역을 예측하는 것은 계획 단계에서 반드시 필요한 과정이다. 본 논문은 사물의 동적 형태를 모델링하는 한 방법인 셀룰라 오토마타 이론을 적용하여 도시성장을 예측하는 것을 주제로 하고 있다. 급속한 산업화에 더불어 지난 40여 년 동안 급속히 성장한 수도권을 대상으로 1972년 이후 2000년까지의 도시성장을 분석하고 이를 토대로 2050년까지의 도시성장을 예측하였다. 본 연구에서 산출된 도시성장 예측 결과는 현재까지의 도시성장 추세와 물리적 요소를 고려하여 도시성장을 예측한 것이며, 사회·경제·정치적 측면까지를 모두 고려하여 도시성장을 분석하고 예측해야 할 실제 도시성장 예측 시스템에서 기초데이터로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

**ABSTRACT** : Urban growth patterns have occasionally not coincided with planning of the policy makers or urban planners. So it is necessary in the planning step to predict the area to change to urban from rural. In this study, we aim to predict urban growth with cellular automata, a system modeling a dynamic phenomenon. Seoul metropolitan area (SMA) is selected as research area, and urbanized area of SMA has grown rapidly during last 4 decades. Applying the model, urban growth characteristics to date from 1972 are analyzed, and urbanized area maps to the year 2050 are predicted. In this study, the map of

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수

\*\*\* 대한측량협회 연구부장

urban growth prediction is produced considering urban growth trends to date and some physical factors. And it is considered that the results of the developed model will be used as input data in urban growth prediction systems, which should include more data of socioeconomic and political sides in addition to physical sides.

## 1. 서론

도시화는 경제발전의 필수 불가결한 요소로 인식되고 있지만, 과도한 도시화에 의한 사회·경제적인 문제 또한 간과될 수 없는 부분이다. 이와 더불어 문제가 되는 것 중 하나가 도시의 물리적 발전형태의 왜곡이다. 도시의 물리적 성장은 정책입안자나 지역계획가의 의도와는 다른 추세로 진행되는 경우가 흔히 존재한다. 최근 사회문제화 되고있는 '난개발'은 그 단적인 예라 할 수 있다.

1980년대 이후 공간정보를 다루는 분야에서 널리 활용되고 있는 지리정보시스템을 도시성장 연구 분야에 이용하려는 많은 연구가 있었으나, 계획단계에서 중요한 최적화 문제를 해결하는 능력이 부족한 것이 가장 큰 단점으로 지적되어왔다(Jankowski and Richard, 1994). 즉 현재까지 지리정보시스템에서의 분석은 중첩분석, 인접성분석, 버퍼링 등 단순한 공간연산을 주로 하고 있기 때문에 최적화와 시뮬레이션 부분에 있어 지리정보시스템의 적용이 제약을 받아왔다(Park and Wagner, 1997).

이러한 문제를 해결할 수 있는 방법으로 1990년대 중반 이후 도시성장과 관련한 연구에 셀룰라 오토마타(CA: Cellular

Automata) 이론을 적용한 다양한 연구결과가 발표되고 있다(Batty et al, 1999; White and Engelen, 2000; Clarke et al, 1997; 강영욱과 박수홍, 2000; 정재준과 김용일, 2000). 도시성장 연구에서 도시를 하나의 유기체로 보는 시각과 사물의 동적 형태를 모델링하는 한 방법인 셀룰라 오토마타 이론의 결합은 자연스러운 것이었다.

기존의 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장 모델에 대한 연구는 계수설정에 의해 도시성장을 분석·예측하고 있다. 따라서 도시로 성장할 지역의 총량을 가장 유사하게 나타내는 계수를 찾아내는 과정에 치중하고 있어, 상대적으로 도시성장 총량의 공간적 분포에 관한 모델 개발은 미흡한 실정이다. 본 논문은 이러한 맥락에서 추계인구로부터 도시로 성장할 지역의 총량을 예측한 뒤, 총량의 공간적 분포에 관한 측면에 중점을 둔 도시성장 분석 및 예측을 위한 셀룰라 오토마타 모델을 개발하는 것을 연구 목적으로 하고 있다.

## 2. 셀룰라 오토마타와

### 도시성장모델로의 적용

1970년대 이후 복잡계(complex system)

접근방식으로 도시구조를 모델링하려는 연구가 많이 진행되었는데 격변론, 두갈래치기 이론 그리고 셀룰라 오토마타 이론 등이 그것이다. 특히, Tobler에 의해 도시연구 분야에 소개된 셀룰라 오토마타 이론은 동적인 모델링, 시공간 모델링, 프로세스 모델링 등의 장점을 지니고 있으며, 특히 래스터 지리정보시스템과의 개념적 유사성으로 인해 현재 활발히 연구되고 있는 분야이다(박수홍, 2001).

## 2.1 셀룰라 오토마타

셀룰라 오토마타의 태동은 1930년대 Turing으로부터 기원한다고 할 수 있다. 그는 '계산한다는 것은 무엇인가'에 대하여 연구하며 일종의 수학적 모델인 튜링 머신이라는 가상의 기계를 제시하였다. 이는 순차적 접근 방식을 이용한 계산기의 모태가 되었으며, Neumann은 자신을 복제하는 생명체와 같이 행위(연산)를 반복하는 계산절차에 관한 연구를 진행하였는데 이것이 바로 Neumann의 오토마타 이론이다.

셀룰라 오토마타는 복잡한 자연계의 현상을 모델링하기 위한 수학적 방법론 중 하나로(Wolfram, 1984), 이산적인 시공(discrete time and space)에 기초한 비선형 동적 모델로 정의될 수 있다(Park, 1996). 셀룰라 오토마타는 임의의 시점(time)에서 임의의 개체(통상 cell)가 셀 공간(cell-space)에서 주변(neighborhood)의 상태(state) 그리고 정해진 규칙(transition rule)에 따라 다음 시점의 상태로 변화하는 연산을 반복적으로 수행하는 원리를 통

해 현상을 모델링한다. 통상 변화는 임의의 개체 주변 국지적 차원에서 일어나고, 이러한 과정이 수없이 반복되면 전체적 차원에서의 모습을 알 수 있게 된다.

## 2.2 도시성장모델로의 적용

셀룰라 오토마타가 도시성장을 모델링하는데 널리 사용되고 있는 이유는 셀, 셀공간, 이웃, 변화규칙 등 셀룰라 오토마타의 구성요소들이 지리적 사상을 묘사하기에 적합하다는 직관적인 이유 말고도 도시가 복잡성(complexity)의 전형적인 특징을 나타내고 있기 때문이다. 복잡성의 특징인 self organization은 시스템이 일정한 형태를 띤다는 것인데, 도시의 경우 중심지(CBD: Central Business District)형성이 그 좋은 예가 될 수 있다. 복잡성의 또 다른 특징으로는 축척에 따른 자기 유사성을 들 수 있다. 형태의 축척에 따른 자기 유사성은 형태가 고유한 프랙탈 차원을 가짐을 의미한다. 도시 역시 도시 고유의 프랙탈 차원을 가지고 있음이 기존의 연구에서 밝혀진바 있다(Batty and Longley, 1994; White and Engelen, 1993). 또한 복잡계에서는 규모(size)가 큰 개체가 나타나는 빈도는 규모가 작은 개체가 나타나는 빈도보다 작다. 개체의 규모와 빈도에 모두 대수를 취하여 2차원 평면상에 나타내면 일반적으로 양자 사이에는 음의 비례관계가 성립한다. 도시의 경우 Zipf의 순위규모법칙은 도시의 규모와 순위를 이용하여 이와 같은 관계를 모험화한 것이다.

또한 도시의 변화를 설명하는 인자의

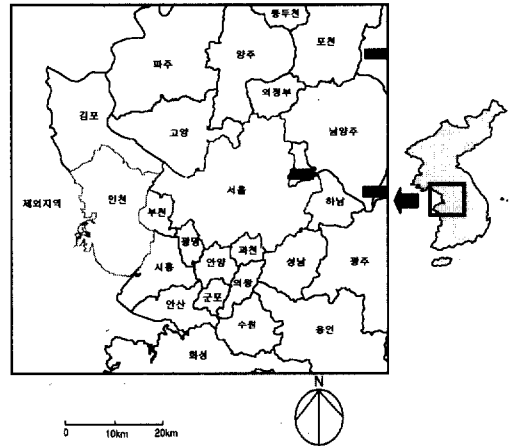
수가 너무 많기 때문에, 모델 형성에 인자를 모두 고려하는 것이 불가능하고 (Clarke and Gaydos, 1998), 따라서, 통계적 분석 방법의 예를 들자면 시계열적 분석이 필요하는 점을 들 수 있다. 즉 공간상에서의 시계열적 분석이 필요하다. 이는 Tobler의 연구에서도 나타나고 있는 바, Tobler(1979)는 지리적 사상을 모델링하는 방법을 독립적(independent), 기능적으로 종속적(functionally dependent), 시계열 또는 역사적(historical), 다변량분석적(multivariate) 그리고 지리적(geographical) 모델링으로 구분하며 지리적 모델인 셀룰라 오토마타가 시간과 공간을 모두 고려한 모델이라 강조하였다.

실제로 도시성장 모델링을 위하여 셀룰라 오토마타를 사용했을 때 얻을 수 있는 장점은 다양하다. 셀룰라 오토마타는 시간에 따른 반복적인 연산을 하는 특징이 있어 시계열적 프로세싱이 가능할 뿐만 아니라 전통적인 도시모델이 공간을 지나치게 단순화하는데 반해, 셀룰라 오토마타는 공간을 단순화하지 않고 모델링이 가능하므로 공간성(spatiality)을 유지할 수 있다. 또한 래스터 지리정보시스템, 원격탐사 등과의 호환성이 뛰어나고(Wagner, 1997), 대축척의 동적 대상물을 처리할 수 있을 뿐만 아니라, 데이터를 시계열적으로 분석할 수 있다. 이와 더불어 시나리오를 가정하여 모델링을 할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 연구대상지역 및 모델의 설계

#### 3.1 연구대상지역

연구대상지역은 서울을 포함한 80km×80km지역으로 설정하여 실제적인 하나의 대도시권이 될 수 있도록 설정하였으며 (그림 1), 이 지역은 강승일(1999)이 실시한 수도권 지역구분 중, 중심시가화지역(core)과 내측주변지역(inner fringe) 영역과 거의 일치한다.



[그림 1] 연구대상지역의 범위

수도권 도시성장 특성을 본 연구주제와 관련된 면을 중심으로 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 인구가 급속도로 증가함에 따른 도시성장이 진행되었다는 것이다. 전국면적의 12%를 차지하는 수도권의 인구는 1970년부터 1995년까지 2.3배 증가하여 전국인구 증가율 1.4배를 훨씬 넘고 있다. 둘째, 서울 주변지역의 활발한 도시화이다. 거대(巨大)도시 서울은 외곽부의 확대와 주변도시의 확대가 진전되면서 연담도시화(conurbation)되었고, 교통수단의 발달에 힘입어 경인, 경수 축을 중심으로 거대(巨帶)도시화 되었다. 셋째, 개발제한구역에 의해 도시성장을 억제하

고 있다. 정부는 1971년 도시계획법 개정 시 '개발을 제한하는 구역'을 지정할 수 있는 근거를 마련하고, 수도권에 대해서는 서울을 중심으로 서울시 행정구역 외곽에 대체로 20-30 km를 크게 벗어나지 않는 범위 내에서 일정 폭을 유지하는 환상형의 개발제한구역을 설정하였다. 개발제한구역은 폐지와 존속의 논란이 있으나, 단순히 형태적 측면에서 볼 때, 수도권의 도시성장을 억제하고 있다.

### 3.2 모델의 특성

셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장 모델은 과거부터 현재까지의 도시성장 추세에서 찾아낸 뒤 이를 이용해 도시성장을 분석·예측하고 있다. 이 과정에서 기준영상과 시뮬레이션 영상간의 도시셀 수 일치도가 최적 요인계수 설정에 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 지역의 도시성장이 급속하게 일어나는 경우라면,

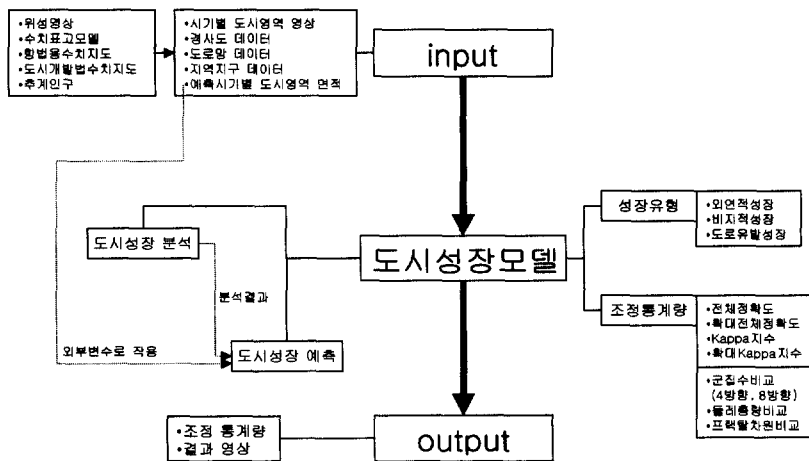
이 추세를 미래 도시성장 예측까지 그대로 반영하게 되어 미래 도시로 성장할 지역을 과대 추정하게 된다.

따라서 본 연구에서는 인구와 도시면적이 상관관계가 있음을 감안하여 인구와 도시면적의 관계에 대한 회귀분석을 실시하여 회귀식을 결정하고, 추계인구를 결정된 회귀식에 대입하여 도시로 성장할 지역의 총량을 결정하였다. 즉, 기준영상과 시뮬레이션된 영상의 도시면적을 같게 함으로써 양자간의 총량의 일치정도를 나타내는 통계량은 배제하고, 도시영역의 일치도와 형태 일치도를 나타내는 통계량을 사용하여 도시지역 총량의 공간적 분포에 중점을 둔 모델을 개발하고자 하였다(그림 2).

### 3.3 도시성장 모델의 설계

#### 1) 성장유형 및 변화규칙의 설정

학자들은 도시역의 확대 측면에서 도



[그림 2] 도시성장 모델의 구성

시성장을 대체로 외연적 성장(spillover expansion), 비지적(飛地的) 성장(leapfrogging expansion), 방사형 성장(radial expansion)으로 구분하고 있다(Cadwallader, 1985; 권용우 등, 1998).

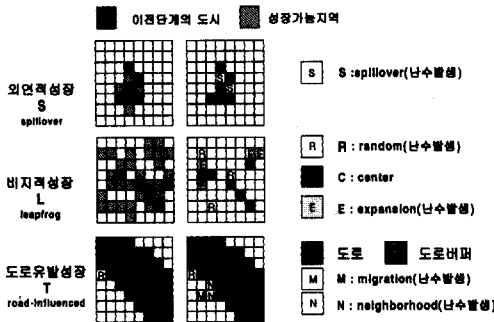
모델의 설계과정에서 도시성장을 위에서 살펴본 성장유형에 따라 정의하고, 각 성장유형에 따라 도시가 성장하는 변화 규칙을 설정하였다(그림 3). 본 연구에서 도시성장은 먼저 성장 가능성이 있는 지역을 선택하고, 선택된 지역중에서 난수를

중에서 정해진 셀 수만큼의 외연적 성장 셀을 난수를 이용해 선택하는 과정을 거치게 된다.

### (2) 비지적 성장(leapfrogging growth)

비지적 성장은 비도시가 임의적으로 도시가 되는 것을 의미하며, 그 유형에 따라 난수발생적 도시(R), 성장의 중심이 되는 도시(C), 성장중심도시의 확장(E)에 의한 도시로 구분하였다.

비지적 성장은 다음과 같은 과정에 의해 이루어지도록 설계하였다. 먼저 기존의 도시 바로 옆 또는 경사도가 기준 경사도 이하인 비도시 지역을 난수발생적 도시가 성장할 가능성이 있는 대상지로 선택하고, 이중 정해진 셀 수만큼의 난수발생적 성장 셀을 난수를 이용해 선택하는 과정을 거친다. 이렇게 선택된 난수발생적 도시 중, 4셀 이상의 이웃 셀이 도시로 성장 가능한 경우 난수발생적 도시를 성장중심도시로 할당한다. 그리고 성장중심도시의 이웃 중 2셀만을 난수발생에 의해 성장중심도시의 확장에 의한 도시로 선정한다.



[그림 3] 성장유형의 설정

발생하여 비도시를 도시로 변하게 하는 방법을 사용하였다. 각 성장 유형별 성장의 조건은 다음과 같다.

### (1) 외연적 성장(spillover growth)

외연적 성장은 비도시가 이미 도시화된 주변의 영향에 의해 도시로 변하는 것을 의미하며, 주변 Moore의 이웃 중 3셀 이상이 이미 도시이며, 해당 셀의 경사도가 기준경사도 이하인 지역을 외연적 성장이 가능한 대상지로 선택하고, 이

### (3) 도로유발 성장(road-influenced growth)

도로유발 성장은 위의 난수발생적 도시가 교통로 주변에 존재할 때, 이 도시 셀이 도로를 따라 성장한다는 것을 의미하여, 그 유형에 따라 난수발생적 도시의 이동에 의해 발생된 도시와 이동된 도시의 주변성장에 의한 도시로 구분하였다.

## 2) 입력데이터 구축

성장유형의 정의에 따라 성장모델을 적용하기 위해서는 입력데이터가 필요하다. 본 연구에서 필요한 입력데이터는 시기별 도시영역 영상, 경사도, 도로망, 지역적으로 상이한 확률로 난수발생이 되도록 하기 위한 지역지구 데이터 그리고 마지막으로 예측시기별 예상 도시 셀 수이다. 본 연구에서 위성영상은 Landsat MSS(Multi Spectral Scanner)와 Landsat TM(Thematic Mapper) 센서를 이용한 영상이 사용되었는데, 각 센서의 IFOV (Instantaneous Field of View)는 지상에서 79m×79m와 30m×30m이다. 따라서 모든 위성영상을 기하보정 과정에서 80m×80m로 재배열하였다. 경사도, 도로망, 지역지구 데이터 역시 도시영역 영상의 공간해상도와 같이 80m×80m 격자 형태로 구성하였다. 따라서 대상지역에 대한 모든 데이

터는 1000×1000셀 크기로 구성되었다. 필요 입력데이터의 구축방법은 표 1과 같다.

## 3) 통계량 설계

시뮬레이션된 결과(도시영상) 중 가장 통계적으로 유의한 결과를 찾기 위해서는 각 시뮬레이션 결과의 정확도 또는 적합성을 평가하여야 한다. 이를 위해서는 기준시점의 도시영역 영상과 시뮬레이션된 도시영역 영상의 일치여부를 판단하여야 한다. 영상대 영상의 일치여부를 판단하는 방법 중 셀과 셀을 비교하는 방법으로는 원격탐사 기법에서 자주 사용되는 전체정확도, Kappa 계수, Lee-Sallee 계수를 사용하였고, 모양의 일치여부를 판단하는 방법으로는 들레(edge)와 군집(cluster)수의 일치도, 프랙탈 차원 일치도를 사용하였다. 전체정확도에 관한 통계량 중 한 가지를 새로이 설정하였는

<표 1> 입력데이터 처리 방법

입력데이터	사용목적	원천데이터	처리방법
시기별 도시영역 영상	-Seed 데이터 -정확도평가	-Landsat위성영상 (8시기영상)	-최대우도법에 의한 토지피복분류(5개 항목) 후 재분류(도시와 비도시)
경사도	-도시성장가능 후보지 선택	-수치표고모형	-각 셀의 경사도계산
도로망	-도로유발성장	-항법용 수치지도	-간선도로의 격자화 -도로망버퍼 제작
지역지구데이터	-지역/지구별로 난수발생확률 제어 (난수발생 가중치)	-국토이용계획법수치지도 -도시계획법 수치지도 -시기별 도시영역(영상분류 결과)	-지역지구별 개발비율계산 (도시지역면적/전체지역면적)
예측시기별 예상 도시 셀 수	-도시성장 예측 시 외부변수로 작용	-통계정인구조사데이터 (추계인구조합) -시기별 도시영역 면적 (분류된 영상에서 계산)	-인구와 면적사이의 상대생장이론에 근거 -통계적인구데이터를 회귀식에 대입하여 계산

데, 이것은 확대 전체정확도(extended overall accuracy)이다. 이것은 기준영상의 도시영역에 Neumann의 이웃에 해당하는 버퍼를 설정하여 새로운 기준영상을 만들어 전체정확도를 계산하는 방식으로 전체정확도가 낮을지라도 확대 전체정확도가 높다면 시물레이션된 영상에서 새롭게 도시로 된 지역의 위치가 공간적으로 멀리 떨어져 있지 않음을 의미하게 된다.

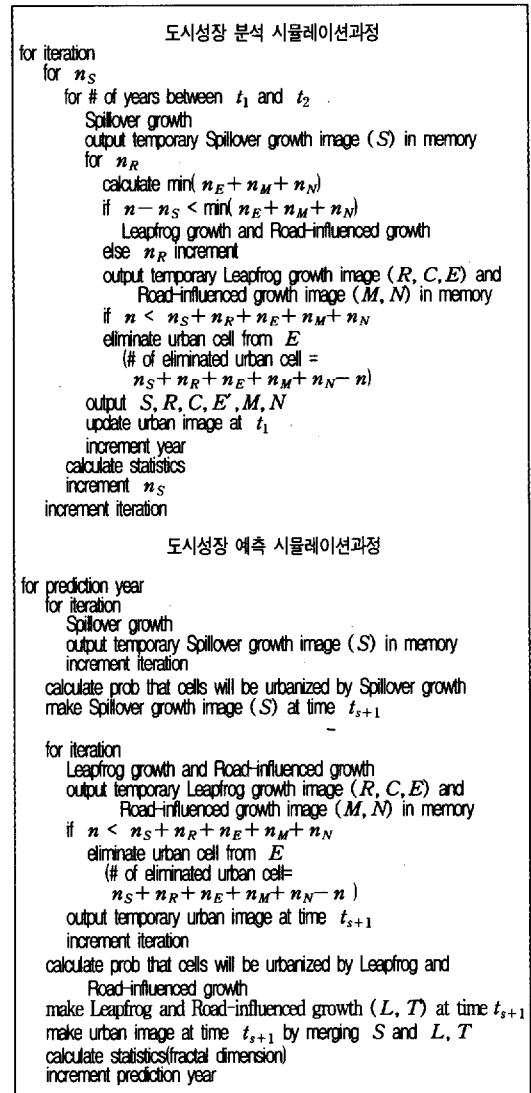
#### 4) 모듈의 설계 및 프로그래밍

구축된 입력데이터, 성장유형에 따른 변화규칙 그리고 통계량을 이용하여 도시성장 시물레이션을 위한 모듈을 설계하였다. 모듈은 도시성장 분석모듈과 도시성장 예측모듈로 구분하였는데, 도시성장 분석모듈은 과거의 데이터를 이용해 현재까지의 도시성장을 재현함으로써 도시성장을 분석하는 것을 목적으로 하며, 도시성장 예측모듈은 도시성장 분석모듈에서 도출된 결과를 이용하여 미래의 도시성장을 예측하는 것을 목적으로 하고 있다. 각 모듈에서 데이터처리 절차는 그림 4와 같다.

위에서 설계된 도시성장 분석 및 예측을 위한 모델을 토대로 실제 프로그램을 제작하였다. 프로그램은 Microsoft사의 Visual C++를 이용하여 코딩하였고, PentiumIII 1GHz CPU와 256MB의 RAM을 탑재한 PC를 이용하여 프로그램을 실행하였다. 통계량 계산은 상용 소프트웨어의 Macro 기능을 이용할 수도 있으나, 시물레이션마다 많은 영상이 만들어지는 관계로 처리속도가 느려지고, 데이터가 1000×1000인 경우 군집 수를 계산할 수 없는 경우가 발생할 뿐만 아니라,

프랙탈 차원 등은 계산할 수 있는 기능이 없어 모든 과정을 직접 프로그래밍하였다.

프로그램은 속도향상을 위해 RAM을 모두 이용할 수 있도록 하였고, 레지스터(register) 변수를 많이 사용하였다. 실제 프로그램을 실행 결과, 최대 1GB정도의 가상 메모리를 필요로 하였다.



[그림 4] 모듈별 시물레이션 과정



<표 2> 시기별 최적 외연적 성장률 및 통계량

기간	외연적 성장률	hit_per	ext_hit_per	kappa	ext_kappa	cluster4_p_er	cluster8_p_er	edge_per	FDper
1972-1979	85	43.40	77.00	41.46	76.22	89.27	100.99	80.93	98.99
1979-1981	75	35.67	78.00	33.97	77.41	93.09	100.85	85.53	99.14
1981-1984	50	20.68	63.81	18.34	62.74	95.38	85.88	94.74	99.22
1984-1988	70	21.39	75.67	19.34	75.03	99.91	99.89	95.69	99.63
1988-1992	65	30.53	73.54	25.67	71.70	102.04	99.49	94.04	99.74
1992-1996	50	13.05	64.18	8.79	62.42	97.69	96.20	96.35	99.95
1996-2000	55	12.48	68.35	7.18	66.43	100.56	99.43	96.40	99.86

·hit\_per: 전체정확도 ·ext\_hit\_per: 확대 전체정확도 ·kappa: kappa 계수 ·ext\_kappa: 확대 kappa 계수  
 ·cluster4\_per: 군집 수 일치도(Neumann이웃) ·cluster8\_per: 군집 수 일치도(Moore이웃)  
 ·edge\_per: 들레 총 길이의 일치도 ·FDper: 프랙탈차원 일치도

#### 4. 도시성장 모델의 적용

도시성장 모델의 적용은 도시성장 분석과 도시성장 예측으로 나누어 실시하였다. 도시성장 분석은 시기별 실험, 해상도별 실험, 시나리오를 설정한 실험으로 나누어 실시하였으며, 도시성장 예측은 도시성장 예측과정에서 도출된 결과를 토대로 실시하였다.

##### 4.1 도시성장 분석

###### 1) 시기별 실험

시기별 도시성장 분석 실험은 대상지역의 시기별 도시영역 영상이 존재하는 시기를 기준으로 1972-79년, 1979-81년, 1981-84년, 1984-88년, 1988-92년, 1992-96년 그리고 1996-2000년으로 나누어 총 7회에 걸쳐 시행되었다.

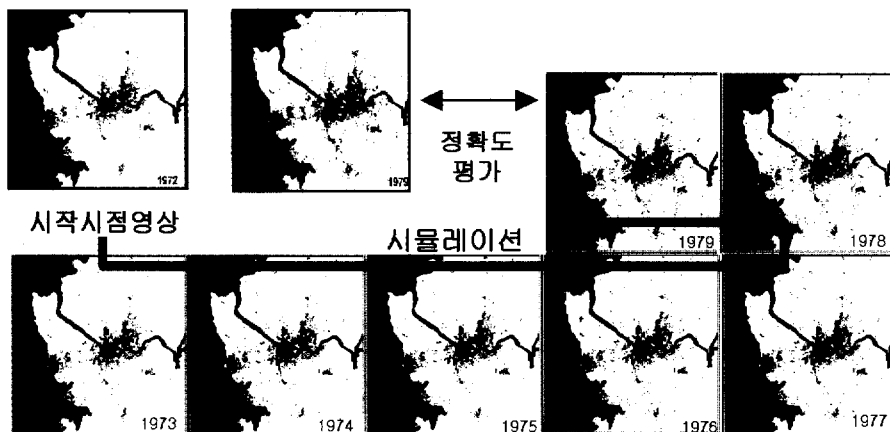
시뮬레이션은 외연적 성장률을 5%씩 증가시키며 실시하였으며 각 시뮬레이션 경우마다 기준영상과 시뮬레이션 영상간의 정확도 평가를 통해 최적 도시성장 시뮬레

이션 결과를 나타내는 외연적 성장률을 계산하였다(표 2, 그림 5). 그 과정은 먼저 전술한 8가지 통계량에 대해 각각 가장 좋지 않을 경우를 0점, 가장 좋은 경우를 100점으로 정규화시킨 후 정규화된 점수의 합을 계산하고 그 뒤 백분을 점수합이 가장 높은 외연적 성장률을 선택하는 방식으로 하였다. 표2에 의하면 대체적으로 외연적 성장이 50-85%정도에서 통계량이 가장 우수한 것으로 나타나 외연적 성장에 의한 도시 성장이 지배적인 요소임을 알 수 있다.

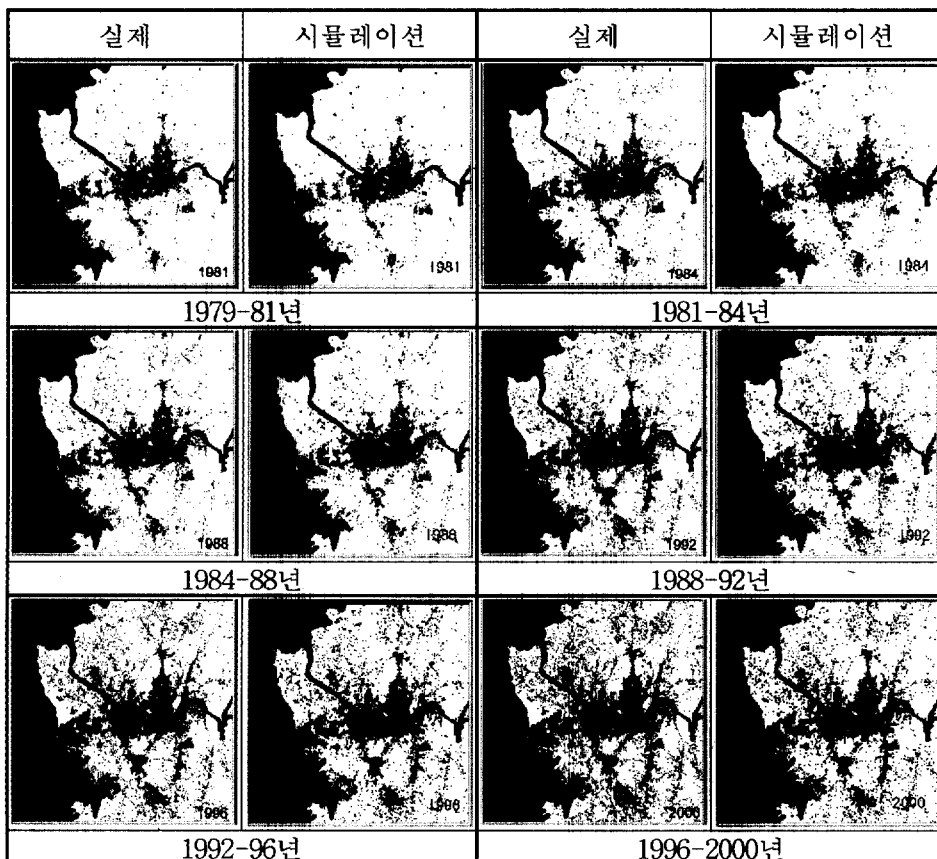
###### 2) 해상도 변화 실험

공간데이터는 데이터의 해상도에 따라 데이터를 적용한 결과가 달라지는 경우가 많다. 따라서, 여기에서는 공간해상도의 변화에 따른 결과의 변화를 살펴보기 위해 공간해상도를 2배씩 낮추어 실험을 실시하고 그 결과를 비교하였다.

그림 6은 해상도를 각각 80m×80m, 160m×160m 그리고 320m×320m로 설정한 뒤, 외연적 성장률을 5%씩 증가시키면서 시뮬레이션하였을 때, 8가지 통계량 항목

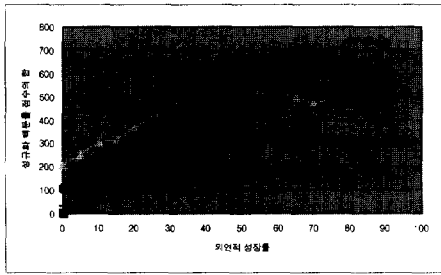


(a) 도시성장 시뮬레이션 절차 (1972-79년)

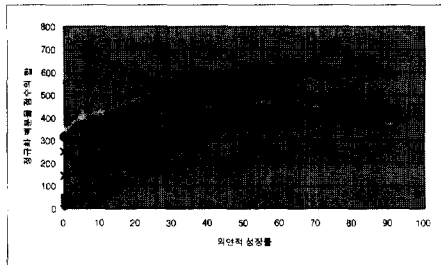


(b) 시기별 실제 도시영역과 시뮬레이션된 도시영역

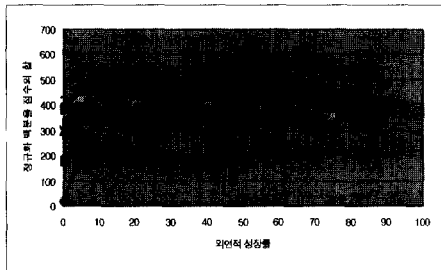
[그림 5] 도시성장 시뮬레이션



(a) 해상도 80m×80m



(b) 해상도 160m×160m



(c) 해상도 320m×320m



[그림 6] 해상도별 최적 외연적 성장률의 결정

의 값을 정규화시켜 최적의 외연적 성장률을 계산하는 과정을 나타내고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 공간해상도가 상대적으로 고해상도일수록 정규화 백분율 점수합의 증가와 감소의 경향이 뚜렷해 최적통계량을 나타내는 외연적 성장률을 구별하기가 용이했다.

해상도가 80m×80m인 경우와 160m×160m인 경우는 외연적 성장률의 변화에 대해 백분율 점수합의 증가와 감소 경향이 비슷하여 본 논문에서 개발된 도시성장 모델을 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 해상도를 320m×320m로 설정한 경우, 백분율 점수합의 증가와 감소 경향이 나타나지 않아 최적통계량을 나타내는 외연적 성장비율을 결정하기가 곤란해 해상도에 따라 모델을 다시 결정해야 하는 문제가 제기됨을 알 수 있었다. 그러나 해상도를 320m×320m로 감소시킨 경우 도시영역 한 셀의 크기가 10.24ha에 달해, 그만큼의 실제면적내의 토지이용을 모두 도시로 간주하기 어렵다고 판단하여 모델을 새롭게 제작하지는 않았다.

### 3) 시나리오 설정 실험

시나리오를 설정한 실험은 모두 3번에 걸쳐 실시하였다. 3번의 실험은 모두 시작 시기를 1972년으로 설정하여 2000년까지의 도시성장을 시뮬레이션하였다.

- 시나리오1: 2000년 지역지구 데이터 가중치 사용
- 시나리오2: 지역지구 데이터 미적용
- 시나리오3: 개발제한구역의 가중치(0.18)를 도시 계획법의 적용을 받는 지역의 평균 값(0.39)으로 설정

시나리오에 의한 도시성장 시뮬레이션은 초기영상에 도시성장모델에서 정한 변화규칙을 적용하여 도시성장을 시뮬레이션하므로 미래도시성장 예측과 일맥상통한다고 할 수 있다. 즉 장래에 구축될 도로망과

&lt;표 3&gt; 시나리오 설정 시뮬레이션의 결과통계량

시나리오	외연적 성장률	hit_per	ext_hit_per	kappa	ext_kappa	cluster4_per	cluster8_per	edge_per	FDper	백분율 점수값
1	65(최적)	52.53	72.00	36.63	62.62	94.42	102.12	93.78	100.17	691.21
2	70(최적)	44.62	64.84	26.07	53.06	88.65	102.43	94.99	100.58	681.01
3	65(최적)	50.33	69.73	33.70	59.59	95.12	97.40	96.53	100.26	679.69

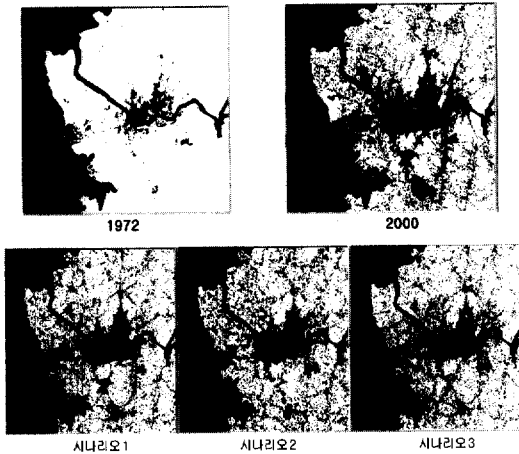
도시개발 계획 등을 도로망 데이터와 지역 지구 데이터에 의해 설정한 후 시뮬레이션을 실시한다면 바로 도시성장을 예측하는 것이 되기 때문이다.

표 3의 각 시나리오마다 도시 셀의 일치도를 나타내는 통계량을 살펴보면, 최적 외연적 성장률에서의 도시 셀의 일치도를 비교하여도 시나리오 1을 사용한 경우가 다른 경우에 비해 그 값이 높았다. 시나리오 1에 의해 시뮬레이션된 2000년 영상과 실제 2000년 영상간의 전체 일치 셀의 비율(hit\_per)은 약 53%로, 이는 1972년부터 2000년까지 도시로 성장한 지역 중 53%를 유추했다는 의미이다. 또한 확대 전체 일치 셀의 비율(ext\_hit\_per)은 약 72%로, 이는 1972년부터 2000년까지 도시로 성장한 지역과 공간적으로 80m(1셀) 이하로 떨어져 있는 시뮬레이션된 2000년 영상에서 도시지역이 72% 정도임을 의미한다.

또한 시기별 성장 분석에서 시뮬레이션 기간이 2-7년으로 비교적 짧아 성장 셀 수의 일치도가 비교적 낮았던 것도, 시뮬레이션 기간을 28년으로 설정한 이 실험을 통해 도시로 성장한 셀의 일치도가 50%를 상회하고 있음을 보임으로써 도시성장 모델의 적절성을 보완할 수 있었다.

최적통계량을 나타내는 외연적 성장률에

서 형태의 일치도를 나타내는 통계량을 살펴보면 시나리오 1의 경우가 높다(형태의 일치도를 나타내는 통계량 수치는 100일 경우가 최적임). 그림 7에 나타난 시나리오에 따른 결과 영상에서도 시나리오 1을 적용한 시뮬레이션 결과영상이 실제 2000년 영상과 가장 유사한 것을 알 수 있다. 또한 통계량의 백분율 점수의 합을 살펴보면, 시나리오 1의 경우가 다른 경우보다 그 값이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 도시성장 모델링에 지역지구 데이터를 사용해야 하는 이유가 증명된다. 결과적으로 지역지구 데이터 없이 시뮬레이션을 할 경우 시뮬레이션 할 경우 시뮬레이션 결과에 대한 신빙성이 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한, 시나리오 2를 적용한 경우에는 지역지구 데이터를 사용하고 있지 않아, 임의의 외연적 성장비율에서 다른 시나리오를 적용한 경우보다 도시 셀의 산포 정도가 크다는 것을 알 수 있다(표 3의 cluster4\_per, cluster8\_per, edge\_per, FDper 참조). 즉, 토지이용에 대한 조치가 없는 경우 도시가 무분별하게 성장하는 경우가 많다는 것을 입증하고 있다.



[그림 7] 시나리오 설정 시뮬레이션의 결과 영상(2000년)

## 4.2 도시성장 예측

2001년부터 2050까지의 도시성장 예측 실험은 2000년 도시영역 영상을 기준으로 하여 실시하되, 지역지구 데이터는 2000년 지역지구 데이터를 이용하였고, 도로망 데이터는 1996년을 기준으로 하였다. 본 연구에서는 실시하지 않았으나, 계획 도로망이나 지역계획 데이터 등을 추가할 경우 그에 따른 도시성장 예측을 할 수도 있을 것이다.

외부변수로 입력하여 도시성장을 제어하기 도시 셀 수는 통계청 추계인구 데이터를 상대생장이론에 근거한 회귀식에 대입하여 계산하였다. 또한 도시성장 분석과정으로부터 계산해야 할 최적 외연적 성장률은 55%로 결정하였는데 그 이유는 다음과 같다. 시기별 최적 외연적 성장률의 변화를 살펴보면(표 2) 대체적으로 외연적 성장률이 감소하는 추세이나 기간의 수가 7에 지나지 않고 이중 2기간(1981-84년과 1992-96

년)에서는 그 추세를 선형으로 설정하기가 곤란하였다. 따라서 90년대의 평균 최적 외연적 성장률인 55%를 외연적 성장률로 설정하였다. 매년 외연적 도시성장예측을 100회 실시하여, 그 중 도시로 성장할 확률이 높은 비도시 셀을 도시 셀로 설정하였다. 도시로 성장해야할 나머지 45%는 외연적 성장 시뮬레이션이 끝난 후 비지적 성장과 도로유발 성장을 다시 100회 실시하여 그 중 도시로 성장할 확률이 높은 비도시 셀을 도시 셀로 설정하는 방식을 취했다. 이 과정을 2050년까지 총 50회에 걸쳐 시행하였다.

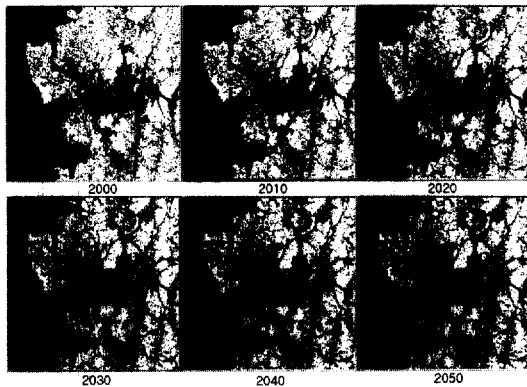
도시성장 예측 실험에서 통계량은 도시성장 분석 실험보다 단순하다. 표 4는 도시성장 예측 실험의 통계량을 나타내고 있는데 해당년도, 외부변수로 작용하는 증가될 도시 셀 수, 증가될 도시 셀 수에 도시성장 분석에서 산출된 외연적 성장률을 곱한 외연적 성장 셀 수 그리고 반복계산회수 등 도시성장 예측과정에서 입력해야할 내용을 포함하고 있으며, 도시성장 예측결과 영상에 대한 프랙탈 차원이 계산된다.

<표 4> 연도별 도시성장 예측 결과 통계량

연도	증가도시 셀수	외연적 성장셀수	기타성장 셀수	반복계산 회수	프랙탈 차원
2005	5709	3140	2569	100	1.7917
2010	4964	2730	2234	100	1.8034
2015	4031	2217	1814	100	1.8110
2020	3127	1720	1407	100	1.8161
2025	2712	1491	1221	100	1.8205
2030	2133	1173	960	100	1.8234
2035	2173	1195	978	100	1.8260
2040	2213	1217	996	100	1.8282
2045	2253	1239	1014	100	1.8300
2050	2294	1262	1032	100	1.8317

도시성장예측에 있어 연도가 증가할수록, 프랙탈차원 역시 증가하고 있어 프랙탈 차원에 의해 영상의 복잡성을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

시뮬레이션의 결과영상은 연도별로 5가지(외연적 성장 가능지, 비지적, 도로유발 성장 가능지, 외연적 성장지역, 비지적, 도로유발 성장지역 그리고 해당년도의 도시 성장 예측지역 영상)로 나누어 도출된다. 예를 들면 2001년 도시성장 예측지역 영상은 2000년 영상을 시작시점으로 하여 도시 성장 예측 시뮬레이션을 실시한 다음 성장 유형별 성장 가능지를 계산하고 이 지역 중 성장확률이 높은 지역(시뮬레이션이 100회이므로 100번의 시뮬레이션 중 도시로 성장할 것으로 예측된 회수가 많은 셀)을 선택하여 작성하게 된다.



[그림 8] 시기별 도시성장 예측결과

이 과정을 2050년까지 계속하여 그림 7과 같은 시기별 도시성장 예측영상을 제작하였다. 그림 8의 2050년까지 도시성장을 예측한 결과를 살펴보면 교통로를 따라 도시가 확장되는 경향과 상대적으로 경사가 심하지 않은 김포, 고양 등 수도권 서부

지역에 도시가 확장되는 경향이 두드러진다. 특히 시흥, 안산 등 서울의 남서부에 위치한 지역은 개발제한구역 면적이 많음에도 불구하고, 1990년대 중반이후 도로의 신설이 많았고, 경사가 완만한 지역이기 때문에 도시성장이 예측되었다.

## 5. 결론

본 연구는 추계인구로부터 도시로 성장할 지역의 총량을 예측하고 이를 외부변수로 이용하여 총량의 공간적 분포에 관한 측면에 중점을 둔 셀룰라 오토마타 모델하고 이를 수도권을 대상으로 적용하는 것을 목적으로 하였다.

연구에서 개발된 모델을 통해 인구를 외부변수로 작용하도록 하는 도시성장 모델을 구축할 수 있었으며, 지역지구 데이터를 사용하여 지역적으로 난수발생을 차등적으로 적용할 수 있었다. 또한, 도시성장 분석을 위한 모델의 조정과정에서 확대 전체확도와 프랙탈 차원을 비롯한 다양한 정확도 평가기법을 적용하여 기존 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장 모델의 정확도 평가기법과 차별화 되도록 하였다.

개발된 모델을 수도권에 적용하여 수도권의 도시성장 분석 및 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 시기별 분석을 도시영역 영상이 존재하는 시기를 기준으로 하여 총 7회로 나누어 실시하였으며, 각 시기별로 외연적 성장률이 50-85%일 때 최적 시뮬레이션 결과가 도출됨을 알 수 있었다. 이는 외연적 성장에 의해 도시성장이 주도되었음을

의미하는 것이다.

둘째, 해상도 변화 실험을 통해 개발된 모델과 데이터의 공간해상도 간의 관계를 어느 정도 규명할 수 있었다. 분석결과 80m×80m 공간해상도와 160m×160m 공간해상도의 데이터를 사용한 경우 본 연구에서 개발된 모델의 적용이 용이하였으나 공간해상도를 4배 낮춘 320m×320m 공간해상도의 데이터를 사용한 경우 최적통계량을 나타내는 외연적 성장률을 결정하기 곤란하였다. 향후 해상도에 따른 모델 개발 또는 모델에 따른 적정해상도의 결정에 관한 추가연구가 필요할 것으로 사료된다.

셋째, 시나리오 설정 실험을 통해 도시성장 모델링에 지역지구 데이터를 사용해야 하는 이유를 제시하였다. 지역지구 데이터를 사용하지 않고 도시성장을 시뮬레이션한 경우 지역지구 데이터를 사용하여 도시성장을 시뮬레이션한 경우보다 도시셀의 산포 정도가 심할 뿐만 아니라 통계량의 백분율 점수의 합 역시 낮아 지역지구 데이터를 사용해야 함을 알 수 있었다.

넷째, 도시성장 예측 실험에서는 인구를 고려한 도시성장 예측을 실시하였고 반복 계산 회수를 증가시켜 도시로 성장할 가능성이 높은 지역을 선택하는 방식을 택하여, 확률적으로 의미 있는 도시성장 예측 시뮬레이션이 될 수 있도록 하였다. 도시성장 예측 결과 서울의 서부와 남서부 지역으로의 도시성장이 예측되었다. 또한 본 연구에서 시도되지는 않았지만 장래의 계획 도로망이나 지역계획에 대한 데이터가 있을 경우 시나리오를 새롭게 설정한 후 개발된 모델에 입력데이터로 사용하여 시나리오에 따른 도시성장을 예측할 수 있을

것이다.

본 연구는 셀룰라 오토마타 이론을 적용하여 물리적 도시성장을 분석 및 예측하는 모델을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 모델에 입력되는 요소는 시기별 도시영역 영상, 경사도, 도로망, 지역지구 데이터 등 물리적 측면의 데이터 중 일부이며, 이에 인구데이터가 추가되었다.

실제 도시가 성장하는 과정은 본 연구에서 사용된 물리적 요소뿐만 아니라 기타 다른 물리적 요소 그리고 많은 사회·경제·정치적 요소와 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 개발된 모델은 물리적 요소 중 일부만을 고려하여 도시성장을 분석 및 예측한 것이므로 시뮬레이션된 도시성장과 실제 도시성장의 차이는 근본적으로 극복될 수 없는 부분일 것이다. 따라서 본 연구의 결과물 중 하나인 도시성장 예측 결과 역시 그 자체로 의미를 갖는다기보다는 물리적 측면과 기타 사회·경제·정치적 측면까지를 모두 고려하여 도시성장을 분석하고 예측해야 할 실제 도시성장 예측 시스템에서 사용될 많은 기초데이터 중 하나로 사용될 수 있을 것이다.

본 연구가 더욱 완성도를 가지기 위해서는 향후, 도로망의 위계를 고려한 모델링 그리고 평면뿐만 아니라 개발의 밀도를 고려한 3차원 모델링에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한, 지가나 토지이용과 같은 사회·경제적인 데이터를 고려한 도시성장모델에 관한 연구 역시 절실히 필요할 것이다.

## 참고문헌

- 1) 강영욱, 박수홍, 2000, 서울대도시지역 도시 성장 예측에 관한 연구, 대한지리학회지, 35(4), 621-639.
- 2) 강승일, 1999, 대도시주변지역 토지이용특성 연구-수도권 준농림지역 사례연구-, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문.
- 3) 권용우 외, 1998, 도시의 이해, 박영사, 서울, 366.
- 4) 박수홍, 2001, CA-GIS 통합시스템의 설계와 구현, 한국GIS학회지, 9(2), 185-206.
- 5) 정재준, 김용일, 2000, 셀룰라 오토마타를 적용한 도시성장 모델링, 2000년 토목학회 추계학술발표회 논문집(4), 785-788.
- 6) Batty, M. and Longley, P., 1994, Fractal Cities, Academic Press, London.
- 7) Batty, M., Xie, Y. and Sun, Z., 1999, Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata, Computers, Environments and Urban systems, 23, 205-233.
- 8) Cadwallader, M., 1985, Analytical Urban Geography, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- 9) Clarke, Keith C. and Gaydos, Leonard J., 1998, Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore, IJGIS, 12(7), 699-714.
- 10) Jankowski, P. and Richard, L., 1994, Integration of GIS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection, EPB, 21, 323-340.
- 11) Park, S., 1996, Integrating of cellular automata and geographic information systems for modeling spatial dynamics, Ph. D. dissertation, Dept. of Geography, University of South Carolina.
- 12) Park, S. and Wagner, D.F., 1997, Incorporating cellular automata simulators as analytical engines in GIS, Transactions in GIS, 2, 213-231.
- 13) Tobler, W.R., 1979, Cellular Geography, in Philosophy in geography(Gale and Olsson, eds), Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 379-386.
- 14) Wagner, D.F., 1997, Cellular automata and geographical information systems, EPB, 24, 219-234.
- 15) White, R. and Engelen, G., 1993, Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to evolution of urban land-use patterns, EPA, 25, 1175-1199.
- 16) White, R. and Engelen, G., 2000, High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems, Computers, Environments, and Urban systems, 24, 383-400.
- 17) Wolfram, S., 1984, Universality and Complexity in Cellular Automata, PhysicaD, 10, 1-35.