

메트로나미카 모형을 활용한 수도권 지역의 도시성장 시뮬레이션

Simulating Urban Growth with the Metronamica Model
: A Case Study on the Seoul Metropolitan Area, Korea

김동한 국토연구원 책임연구원
Kim Donghan Associate Research Fellow, Korea Research Institute
 for Human Settlements
 (dhkim@krihs.re.kr)

목 차

I. 서론

II. 셀룰라 오토마타와 도시모형

1. 셀룰라 오토마타 모형의 개념 및 특성
2. 셀룰라 오토마타 도시모형의 연구동향

III. 메트로나미카 모형

1. 모형의 개요
2. 모형의 구조 및 특성

IV. 모형 적용 및 결과 분석

1. 대상지 및 분석 자료
2. 모형의 보정
3. 도시성장 시나리오
4. 결과 분석

V. 결론 및 시사점

I. 서론

지난 세기 동안 세계 각국은 급속한 도시화를 경험하였다. 도시화는 집적의 이익(economy of concentration) 등 긍정적인 효과가 있으나, 과밀에 따른 혼잡 비용 발생, 자연환경 훼손 등과 같은 부정적인 측면도 동시에 가지고 있다. 따라서 도시의 성장을 적정하게 관리 또는 유도하기 위해 토지이용규제, 교통망 확충 등과 같은 다양한 공간 정책들이 개발되고 집행되어 왔다. 그리고 공간정책이 도시의 성장에 어떠한 영향을 미치고 미래의 도시성장과 공간구조가 어떻게 나타나게 될지 사전에 예측하기 위한 노력의 일환으로 다양한 도시모형이 개발되고 활용되어 왔다.

개별 모형의 특성과 성격에 따라 도시모형의 역할은 다르게 정의될 수 있을 것이나 종합적으로 보면 주로 두 가지 대표적인 활용성을 가지고 있다고 할 수 있다. 첫째, 도시모형은 복잡한 도시 시스템을 체계적으로 이해할 수 있는 논리적 수단을 제공한다. 이를 위해서 도시모형은 모형을 통해 이해하고자 하는 현상을 파악하는데 적합한 이론체계를 선택하여 구성하게 된다. 이때 대상이 되는 현상의 정수(essence)를 표현하기 위해서 이론적 단순화(theoretical simplification) 또는 논리적 가정(logical assumption)이 수반되며, 실제 현실을 있는 그대로 재현하는 것을 목적으로 하지 않는다.

둘째, 도시모형은 다양한 정책옵션과 대안적 미래를 탐색할 수 있게 하는 컴퓨터 기반의 가상 실험실(virtual laboratory)을 제공한다. 많은 데이터 분석과 계산 과정을 수반하는 도시모형은 본질적으로 컴퓨터 환경에서 구현되고 실행된다. 이때 다양한 논리적 가정, 관련 자료 등과 결합하여 다양한 조건에서의 시뮬레이션과 결과 분석을 가능하게 한다.

도시모형은 시대의 변화와 더불어 주요 동향이 변화하고 있는데, 과거에는 뉴턴(Newton)의 중력이론

(gravity theory)에 착안하여 설계된 토지이용·교통모형 등과 같이 정태적(static)이고 집합적(aggregate)인 도시모형이 주로 개발·활용되었으나, 1990년대 이후에는 복잡계 이론(complexity theory) 등과 연계된 셀룰라 오토마타 등의 동태적(dynamic)이고 미시적(disaggregate)인 방법론을 적용한 도시모형의 개발과 활용이 증가하고 있다(Benenson and Torrens, 2004).

기존의 토지이용·교통모형은 교통수요와 토지변화의 상호관계를 기반으로 행정구역 단위의 사회경제적 속성 변화 파악에 장점이 있는 데 반해, 셀룰라 오토마타 도시모형은 난개발의 확산 등과 같이 도시의 형태가 변화하는 과정과 특징을 연구하는 데 그 강점을 가지고 있다. 따라서 토지이용·교통모형은 신도시 건설 등에 따른 적정 도로 공급량 등을 산정하기 위한 목적으로 활용될 수 있으며, 셀룰라 오토마타 도시모형은 도시성장의 결과로 나타나게 되는 공간적 패턴과 구조를 예측하기 위한 목적으로 활용될 수 있다.

현재 셀룰라 오토마타(Celluar Automata) 기법을 적용한 다양한 범용 도시모형이 개발되어 활용되고 있는데, 일반적인 셀룰라 오토마타 도시모형의 경우 지역적(local) 차원에서 개별 셀 간의 상호작용에 의하여 상태변화가 발생함으로써 전역적(global) 차원에서의 합리적인 공간변화 총량과 이에 영향을 미치는 사회경제적 변수를 고려할 수 없는 구조적 한계를 지니고 있다.

메트로나미카(Metronamica) 모형은 셀룰라 오토마타 도시모형의 이와 같은 한계를 극복하기 위해 고안된 모형으로 본 논문은 메트로나미카 모형을 수도권에 적용하고 다양한 정책 시나리오별로 시뮬레이션을 수행하여 미래의 도시성장 패턴을 분석하고 시사점을 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 셀룰라 오토마타의 기본 개념을 소개하고 셀룰라 오토마타 도

시모형의 특징을 제시한 후, 메트로나미카 모형의 구조와 특징을 분석하였다. 그 후 모형을 수도권 지역에 적용하여 2030년까지 시물레이션을 수행하고 그 결과를 분석한 후 시사점을 제시하였다.

II. 셀룰라 오토마타와 도시모형

1. 셀룰라 오토마타 모형의 개념 및 특성

셀룰라 오토마타 모형은 수학자인 Stanislaw Ulam과 Jhon von Neumann에 의해 자연계에 존재하는 자기복제(self-reproduction) 현상을 연구하기 위한 이론적 도구로 1940년대 후반과 1950년대 초반에 그 개념적 기반이 최초로 마련되었다. 그러나 셀룰라 오토마타 모형이 학계의 본격적인 관심을 받기 시작한 것은 1970년대 중반 수학자 John Conway가 구현한 ‘Game of Life’ 모형을 통해서인데(Gardner, 1972), 이 모형을 통해 복잡하고 다양한 시스템적 변화가 단순한 규칙을 기반으로 구성되는 셀룰라 오토마타 모형을 통해 연구될 수 있다는 사실이 본격적으로 알려지게 되었다. 이후 1980년대에 이르러 수학자 Stephen Wolfram에 의해 1차원 및 2차원의 이론적 셀룰라 오토마타 모형이 더욱 심도 있게 제안되었으며(Wolfram, 1984), 공간 연구 분야를 비롯한 다양한 분야에서의 활용이 가속화되기 시작하였다(Wolfram, 2002).

셀룰라 오토마타 모형에서 개별 오토마톤(automaton)은 수학적 또는 논리적 연산을 수행하는 기초 단위이며 이를 토대로 스스로의 상태를 변화시킬 수 있는 개체다. 이러한 오토마톤을 주로 이차원의 격자 공간¹⁾에 배열하고 분석 목적에 부합하는 전

이규칙을 부여하여 모형을 구성하게 되는데, 셀룰라 오토마타 모형은 일반적으로 다음과 같은 요소로 구성된다. ① 셀(cell): 셀은 셀룰라 오토마타 모형에서 각종 연산을 수행하고 상태 변화의 기초 단위가 되는 오토마타톤을 의미한다. 다양한 형태가 가능하나 분석의 효율성 등을 고려하여 정방형 격자 형태가 가장 많이 활용된다. ② 상태(state): 개별 셀은 고유의 상태 속성을 가지며, 이는 모형에서 정의된 규칙에 따라 변화할 수 있다. ③ 네이버후드(neighbourhood): 각 셀이 연산을 수행할 때 자신과 인접한 셀의 상태를 참조하게 되는데, 이에 대한 공간적 범위를 의미한다. 다양한 범위의 네이버후드 정의가 가능한데, 대표적인 사례로는 자신으로부터 동서남북으로 인접한 4개의 셀만 참조하는 폰노이만(von Neumann) 네이버후드와, 대각선 방향으로 인접한 셀까지 모두 포함한 8개의 셀을 고려하는 무어(Moore) 네이버후드 등이 있다. ④ 전이규칙(transition rule): 개별 셀이 자신과 네이버후드의 상태를 참조하여 어떻게 변화할지를 규정한다. 다양한 수학적 연산방법이 활용될 수 있으며, 서로 다른 셀룰라 오토마타 모형의 특징을 규정하는 핵심적인 부분이다. ⑤ 시간(time): 셀룰라 오토마타 모형은 동태적(dynamic) 시스템으로서 불연속적(discrete) 시간의 흐름에 기반하여 셀의 상태가 변화된다. 즉, 하나의 단위 시간에 특정한 연산이 수행되며, 이에 따라 다음의 단위 시간에 셀의 상태 변화가 촉발된다.

2. 셀룰라 오토마타 도시모형의 연구동향

셀룰라 오토마타가 공간연구 분야에 최초로 제안된 것은 1970년대에 ‘지리학의 제1법칙’²⁾ 등으로 유명

1) 셀룰라 오토마타 모형에서 각 셀은 다각형, 부정형 도형 등 다양한 형태로 구성 가능하며, 1차원 또는 3차원 등 다양한 공간 차원에서도 구현 가능하나, 일반적으로는 2차원의 정방형 격자 공간에서 주로 구현됨.

한 지리학자 Tobler에 의해서다(Tobler, 1970, 1979). Tobler는 토지이용 변화와 같은 공간적 현상이 셀룰라 오토마타 방법론을 활용하여 연구될 수 있음을 제안하고 개념적 모형을 제시하였다.

한편 도시 및 도시모형 분야 셀룰라 오토마타가 최초로 소개된 것은 1980년대 Couclelis에 의해서인데, 비선형적(non-linear)이고 자율적(self-organising)인 특성을 가지는 도시공간 변화 연구에 셀룰라 오토마타가 유용하게 활용될 수 있으나, 도시공간의 변화는 자연계의 현상과는 차별화되는 성격을 가지므로 이를 고려한 방법론이 개발되어야 한다고 주장하였다(Couclelis, 1985).

이후 1990년대에 이르러 셀룰라 오토마타 방법을 적용한 다양한 도시모형이 개발되어 여러 지역의 토지이용 변화 사례연구에 활용되며 실효성과 타당성이 검증되었다. 이러한 셀룰라 오토마타 도시모형의 대표적인 개발 사례로는 DUEM(Batty et al. 1999), SLEUTH(Clarke et al. 1997), Metronamica(White and Engelen, 1993) 등과 같은 모형이 있다. 이들 모형은 셀룰라 오토마타의 핵심적인 특성을 활용하여 토지이용 변화를 동태적으로 시뮬레이션할 수 있도록 설계되었으며, 도시공간 연구에 적합하도록 여러 가지 독창적인 방법론들을 추가로 도입하여 활용하고 있다.

국내의 경우에는 정재준 외(2001), 정재준 외(2002) 등의 연구에서 셀룰라 오토마타 모형을 활용하여 수도권의 도시성장을 시뮬레이션한 바 있다. 이들 연구는 SLEUTH 등과 같은 기존의 셀룰라 오토마타 모형에서 제시하고 있는 도시성장 패턴을 기초적인 모형 특성으로 활용하였으나, 도시변화 면적에 인구성장이 미치는 영향 등을 고려하여 모형에 반영하

고 시뮬레이션을 수행하였다.

한편, 셀룰라 오토마타 도시모형은 그 이전 세대의 도시모형이라고 할 수 있는 중력이론(gravity theory) 및 공간상호작용이론(spatial interaction theory)에 기반한 토지이용교통모형(land use transportation model)과는 차별화되는 특성이 있다. 토지이용교통 모형은 일반적으로 존(zone) 단위를 기반으로 하여 교통접근성의 변화와 토지이용의 변화를 연계하여 파악하고자 하며, 이때 인구, 고용 등의 영향도 통합적으로 고려하는 종합모형(comprehensive model)을 지향하고 있다. 그리고 일련의 연산과정을 통해 산출한 토지이용의 변화 등을 해당 존에 할당하여 결과를 산출하는 하향식(top-down) 접근방법을 취하고 있다. 반면 셀룰라 오토마타 모형은 셀(cell) 단위를 기반으로 하여 토지이용 변화를 도시형태론(urban morphology)적 관점에서 파악하고자 하며, 이때 교통접근성, 인구, 고용 등은 고려하지 않거나 외생적으로 산출하여 반영하는 부문모형(partial model)을 지향하고 있다. 그리고 토지이용의 변화 등은 개별 셀을 중심으로 진행되고 이의 동시적 연산을 통해 결과가 산출되는 상향식(bottom-up) 접근방법을 취하고 있다.

이러한 특징을 갖는 셀룰라 오토마타 도시모형 중 본 논문에서는 메트로나미카 모형을 수도권 지역의 도시성장 시뮬레이션에 적용하고자 하며, 해당 모형에 대한 구체적인 내용은 다음 절에서 설명하도록 한다.

III. 메트로나미카 모형

1. 모형의 개요

메트로나미카 모형은 White and Engelen(1993,

2) “모든 것은 서로 연관되어 있다. 그러나 근거리에서 있는 것이 원거리에서 있는 것보다 더 밀접한 관련이 있다(Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things).”

1997)의 연구에 의해 최초 제안된 후 범용 모형(generic model)으로 개발된 셀룰라 오토마타 기반의 토지이용 변화 모형이다. 미국의 신시내티(Cincinnati) 지역에 최초 적용된 이후, 아일랜드의 더블린(Dublin), 이탈리아의 밀란(Milan), 중국의 우한(Wuhan) 등 세계 각국의 다양한 지역의 토지이용 변화 연구에 활용되었다(RIKS, 2011). 이 모형은 셀룰라 오토마타 방법론을 적용한 대표적인 도시모형의 하나로 현재는 네덜란드의 RIKS(Research Institutes for Knowledge Systems)에 의해 지속적으로 연구·개발되고 있다.

메트로나미카 모형은 지속적인 연구·개발로 인구 모형, 경제모형, 교통모형 등과 같은 추가적인 확장모형(extensions)과 결합할 수 있도록 개선되었으며, 시물레이션 결과의 분석을 용이하도록 하기 위한 GIS기반의 분석도구 등도 결합되어 있어, 단순한 도시모형의 차원을 넘어 종합적인 의사결정지원을 위한 계획지원 체계(Planning Support Systems)로의 발전을 도모하고 있다. 그러나 본 논문에서는 메트로나미카의 핵심 부분이라고 할 수 있는 토지이용 변화 모형을 활용하여 시물레이션을 수행하였으며, 이 모형에 대한 특징은 다음 절에서 자세히 제시하고자 한다.

2. 모형의 구조 및 특성

메트로나미카 모형은 셀룰라 오토마타 방법론을 기초로 하고 있으나 여러 가지 부가적인 방법론을 도입하여 토지이용 변화 시물레이션을 수행한다. 일반적인 셀룰라 오토마타 모형은 인접한 주변 셀과의 관계를 주요한 설명 변수로 하여 시스템의 변화를 모델링하게 된다. 그리고 개별 셀 간의 관계를 규정하는 단순한 전이규칙으로부터 발생하는 시스템 차원의 복잡한 패턴 발견과 이해를 주요 목적으로 한다. 그러나 메트로나미카 모형은 셀룰라 오토마타의 고유한 방법만으로는

토지이용 변화에 영향을 미치는 요소를 고려하기에는 부족하다는 인식하에, 셀룰라 오토마타 방법론의 공간 변화 연구 적용에의 한계를 극복하고 토지이용 변화를 현실적으로 고려하기 위해 다양한 기법들을 추가로 도입하고 있는데 이는 크게 세 가지 측면으로 요약될 수 있다. ① 거리 효과(distance effect): 일반적인 셀룰라 오토마타 모형이 자신과 바로 인접한 주변 셀과의 관계만 고려하는 데 반해 메트로나미카 모형에서는 반경 8개 셀을 기준으로 한 원형의 네이버후드를 채택하여 더욱 넓은 범위에 있는 셀까지 고려하고 있다. 이는 토지이용 변화의 경우 바로 인접한 토지의 영향만 받는 것이 아니라 더욱 넓은 범위에 있는 주변 토지이용에도 영향을 받는 것을 고려하기 위함이다. 그리고 주변 셀들과의 관계는 물리적인 거리에 의한 영향을 고려할 수 있도록 설계되었는데, 이는 Waldo Tobler가 지리학의 제1법칙으로 주창한 바와 같이 거리에 따른 상호 관계를 반영하기 위함이다. ② 다변량 분석(multivariate analysis): 메트로나미카 모형은 GIS 자료 및 분석과의 결합을 통해 공간 변화에 보다 영향을 미치는 다양한 변수들을 셀룰라 오토마타 모형 프레임워크에 도입하였다. 래스터(raster) 중첩(overlay)의 개념을 적용하여, 해당 셀에 대한 토지이용 규제, 토지이용 적합성, 교통 접근성 등 다양한 영향 요소를 고려한 다변량 분석이 가능하도록 설계하였다. ③ 제한적 셀변화(constrained cell transition): 일반적인 셀룰라 오토마타 모형에서 전이규칙에 부합하는 모든 개별 셀은 자율적으로 상태변화가 수행되도록 설계된다. 이는 시스템 전체 차원에서 변화량에 대한 관심보다는 개별 셀의 변화를 통한 전체 시스템 변화 패턴의 발견에 더 관심을 두기 때문이다. 그러나 토지이용 변화의 경우 인구 및 경제 성장 등에 의해 영향을 받게 되며, 시물레이션의 목적에 따라 적절한 변화 총량이 고려될 필요가 있다. 이를 위해 메트로나미카 모형은 전역적 제약 변수(global constraint)의 개념을 도입하여 토지이용 변화 총량을

정의하고 시뮬레이션에 반영할 수 있도록 하고 있다.

메트로나미카 모형은 이상과 같은 원리에 기반하여 각 셀의 상태변화를 결정하기 위해 전이잠재력 함수를 통해 모든 셀의 전이 잠재력을 산출한 후 제약 변수에 의해 정의된 총량의 범위 내에서 셀의 상태 변화를 수행한다. 모형은 1회의 상태 변화를 1년으로 설정하고 있는데, 모형에서 정의하고 있는 전이 잠재력 산출 함수는 <식 1, 2>와 같다.

$$\hat{N}_{ij} = \begin{cases} N_{ij}(1+e), & \text{if } \alpha \geq 0 \\ N_{ij}, & \text{else} \end{cases} \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

$$T_{ij} = \begin{cases} \hat{N}_{ij} S_{ij} Z_{ij} A_{ij}, & \text{if } \hat{N}_{ij} \geq 0 \\ \hat{N}_{ij} (2 - S_{ij} Z_{ij} A_{ij}), & \text{else} \end{cases} \quad \langle \text{식 2} \rangle$$

여기서 N_{ij} 는 난수효과를 고려하지 않은 상태에서 셀 i 의 토지이용 분류 j 에 대한 네이버후드 잠재력을 의미하고, α 는 확률적 간섭(0, 1)의 유무를 결정하는 계수이며, e 는 와이블 분포($1/\alpha, 1$)로부터 선택된 난수다. \hat{N}_{ij} 는 난수발생효과를 고려한 네이버후드 잠재력이다. 마찬가지로 각 셀 i 의 토지이용 j 에 대해 S_{ij} 는 적합성, Z_{ij} 는 토지이용규제, A_{ij} 는 접근성을 의미하며, T_{ij} 는 상기와 같은 요소들을 통해 도출된 전이잠재력을 의미한다.

그리고 위의 전이잠재력 함수를 구성하고 있는 요소 중 네이버후드 잠재력(N_{ij} 또는 \hat{N}_{ij})은 셀룰라 오토마타 방법론에 기반하여 토지이용 변화를 규정하는 핵심적인 요소이며 이는 다시 별도의 함수로 구성된다. 그 외의 토지이용 적합성(S_{ij}), 토지이용규제(Z_{ij}), 교통 접근성(A_{ij})의 세 가지 요소는 다변량 분석의 개념에 기반하여 네이버후드 효과를 보장하는 요소들이라고 할 수 있으며 사용자 정의에 의한 종합 점수(composite score) 형태로 구성된다.

이 중 네이버후드 효과에 대한 함수를 자세히 살

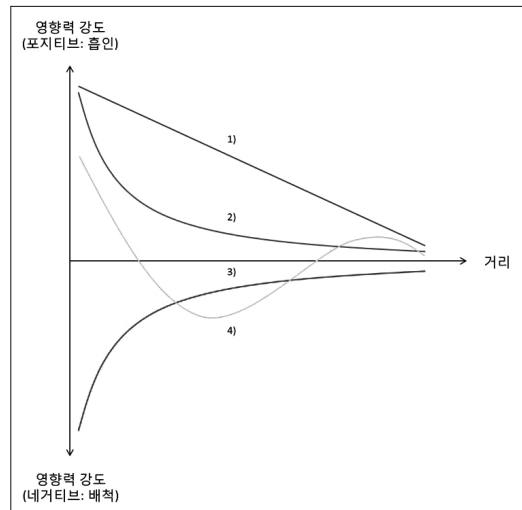
펴보면 <식 3>과 같다.

$$N_{ij} = \sum_{b \in S(a)} I(a, b, d) D(a, b) \quad \langle \text{식 3} \rangle$$

여기서 $S(a)$ 는 셀 a 의 네이버후드를 의미하고, b 는 $S(a)$ 의 개별 멤버 셀이며, $D(a, b)$ 는 셀 a 와 b 사이의 유클리디언 거리다. $I(a, b, d)$ 는 셀 a 와 b 의 토지이용 유형과 거리 d 에 의해 다양하게 나타날 수 있는 영향력 함수를 의미한다.

네이버후드 효과에 대한 함수의 실제 형태는 자신으로부터의 거리(X축)와 흡인(attraction) 또는 배척(repulsion)으로 나타날 수 있는 영향력 강도(Y축) 값의 조합에 따라 다양한 형태의 함수로 나타날 수 있는데, 이와 같은 네이버후드 효과의 형태와 특성은 토지이용 유형과 사례 지역에 따라 다르게 나타날 수 있다. 네이버후드 효과 함수의 유형을 예를 들어 설명하면 <그림 1>과 같은 유형들이 있다.

그림 1 _ 네이버후드 효과 함수 예시



주: 그래프에 표시된 각 번호의 의미는 다음과 같음.

- 1) 일반적인 거리감소 효과: 긍정적인 효과가 거리의 증가에 따라 감소함.
- 2) 유인: 가까운 거리에 관련 토지이용을 유인.
- 3) 배척: 가까운 거리에 관련 토지이용을 배척.
- 4) 변동: 가까운 거리에 유인, 중간 거리에서 배척, 먼 거리에서 다시 유인.

IV. 모형 적용 및 결과 분석

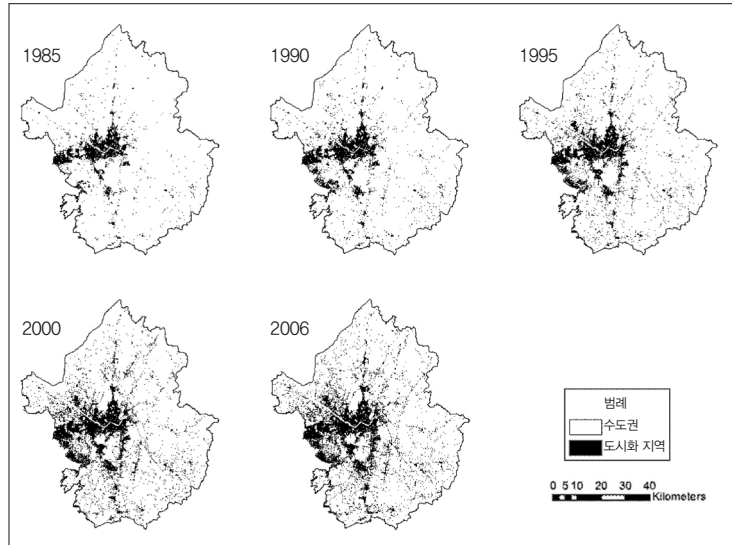
그림 3_수도권 도시화 변화 추이

1. 대상지 및 분석 자료

모형 적용의 대상지는 서울, 인천, 경기도 전역을 포함하는 수도권 전체이며, 분석의 효율성을 위하여 강화도 외의 서해안 도서 지역은 제외하였다. 사례연구 대상지의 공간적 범위는 <그림 2>와 같다.

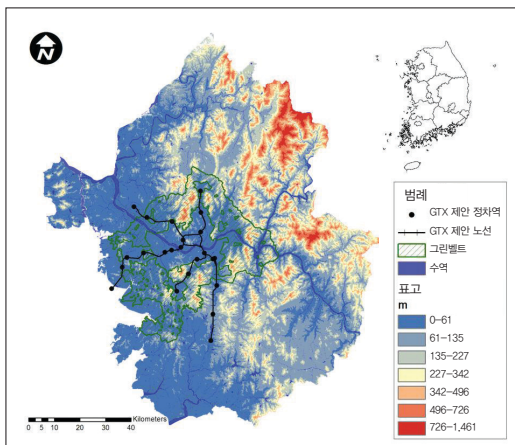
주지하는 바와 같이 수도권 지역은 경제와 사회문화의 중심지로서 지난 수십 년간 우리나라에서 가장 급속한 도시화를 경험한 지역이다. 2000년대 이후 그 성장세가 완화되고는 있으나, 향후에도 도시성장이 지속될 것으로 전망된다. 그러나 그 규모와 형태 등에 있어서는 변화가 있을 것으로 예상된다.

과거 수도권의 도시성장은 공공부문이 주도하는 신도시 건설과 대규모 택지개발 사업 등에 크게 영향을 받아 왔다. 그러나 2000년대 접어들면서 대규모 개발 가용지가 고갈되는 등으로 인해 이와 같은 방식



의 도시성장은 크지 않을 것으로 예상되며, 이보다는 소규모 자발적(spontaneous) 개발로 인해 더욱 영향을 받을 것으로 판단된다. 이와 같은 경향은 토지피복도로부터 추출한 도시화 지역의 분포를 통해 과거의 도시성장변화 패턴을 분석한 <그림 3>에서도 볼 수 있는데, 2000년대 이후부터는 수도권 외곽지역의 소규모 개발 증가에 따른 도시 확산이 진행되고 있음을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 도시성장 패턴의 미래 방향을 예측하기 위해서는 셀룰라 오토마타 방법을 활용한 시뮬레이션이 유효하다고 할 수 있다.

그림 2_사례연구 대상지



한편 시뮬레이션에 사용된 자료는 다음과 같다. 시뮬레이션의 기초자료가 되는 토지피복도는 환경부에서 제공하는 2001년과 2009년의 중분류 피복 자료를 활용하였다. 2001년부터 2009년까지 모형의 보정(calibration)을 실시하여 도출된 계수(parameter)를 2009년 자료에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 모형의 보정과 시뮬레이션을 위해 해당 토지피복도를 농지, 산지, 초지, 나지, 습지, 수역, 공원, 도로, 도시화 지역 등 9개의 유형으로 재분류하였으며, 셀의 공간 해상도는 50×50m로 설정하였다. 메트로

나미카는 근본적으로 다양한 토지이용의 변화를 시물레이션할 수 있게 설계된 모형이나, 본 논문에서는 도시성장 시물레이션이라는 연구의 목적에 적합하도록 도시화 지역의 변화만 시물레이션하도록 설정하였다.

한편 도시화 지역의 변화에 영향을 미치는 기타 변인과 시나리오별 정책 변인 등을 고려하기 위해 추가로 활용한 자료는 행정구역경계, 수치표고자료(DEM), 도로망, 개발제한구역, 수도권광역급행철도(GTX) 제안 노선도 등이다.

2. 모형의 보정

도시모형에서 모형의 보정(calibration)이란 모형의 계수(parameter)값을 조정하여 해당 모형의 행태(behaviour)가 모형을 적용하는 지역의 특성에 적합하도록 작동하여 결과적으로 타당한 시물레이션 결과물을 산출하기 위해 행하는 일련의 과정을 의미한다. 모형의 보정은 모형의 목적과 특징 등에 따라 다양하게 수행되는데 궁극적으로는 이를 통해 해당 지역에 적합한 최적의 계수값(best fit parameter set)을 결정하는 것을 목적으로 한다.

메트로나미카 모형의 보정은 크게 네 가지 과정으로 구분하여 설명할 수 있다.

① 전체 토지이용 변화량을 규정하는 전역적 외생 변수의 정의: 메트로나미카 모형의 보정은 외생적 제약조건을 정의하는 것으로부터 출발하는데, 이와 같은 외생변수의 정의를 통해 토지이용에 영향을 미치는 사회경제적인 지표를 반영할 수 있게 한다. 기술적인 측면에서는 이를 통해 시물레이션이 종료되는 시점에서의 토지이용 변화 총량을 정의하는 것인데, 이를 적절하게 산정하지 못하면 토지이용 변화가 과대 또는 과소하게 발생하는 문제가 나타나게 된다. 미래 토지이용 변화의 총량을 정의하기 위한 방법으

로는 과거와 현재의 토지이용을 비교하여 미래의 변화량을 선형적으로 정의하는 비교적 단순한 방법에서부터 별도의 사회경제모형을 활용하는 것까지 다양하게 있다.

② 지역적 차원에서 토지이용 변화를 결정하는 네이버후드 효과의 정의: 네이버후드 효과는 주변에 인접한 토지이용 형태의 영향관계를 정의하기 위한 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 이는 토지이용의 유형에 따라 사례 대상지의 특성에 따라 다양하게 나타날 수 있는데, 모형의 보정을 위해서는 사례 지역에 적합한 네이버후드 효과를 정의하여야 한다. 메트로나미카는 네이버후드 효과의 보정을 보다 용이하게 하기 위하여 스플라인 보간법(spline interpolation)을 도입하고 있다. 즉, 사용자가 직접 함수를 정의하는 대신 네 개의 통제점(control point)에 대한 적정값을 정의하면 이를 통해 <그림 1>에서 설명한 것과 같은 네이버후드 함수를 정의하는 것이다. 네 개의 통제점은 각각 거리와 영향력을 의미하는 X와 Y의 값으로 구성되어 있다. 첫 번째 포인트는 $X=0, Y=$ '네이버후드 계수 1'의 값을 가진다. 0의 값을 가지는 X는 네이버후드 안에서 중심이 되는 자기 자신을 의미하는 것이며, 여기서 Y의 값은 현재의 토지이용 상태로 남아 있으려는 관성력을 의미한다. 두 번째 포인트는 $X=1, Y=$ '네이버후드 계수 2'의 값을 가진다. 여기서 X의 값은 모형에 의해 정의된 고정값이며 Y는 사용자가 결정해야 하는 계수값이다. 세 번째 포인트는 $X=$ '네이버후드 계수 3', $Y=$ '네이버후드 계수 4'의 값을 가지며, 사용자가 자유롭게 그 값을 결정할 수 있다. 네 번째 포인트는 $X=$ 네이버후드 효과의 최대영향거리, $Y=0$ 의 값을 가지며, 이때 X의 값을 통해 네이버후드 효과가 미치는 공간적 범위를 정의하게 되며 Y의 값이 0이라는 것은 이 범위 이상에서는 네이버후드 효과가 존재하지 않는다는 것을 의미한다. 이와 같은 네 가지 포인트의 계수값을 결정함으로써 사

용자는 네이버후드 효과 함수를 정의하게 되는데, 이를 통해 나타나는 커브의 형태에 따라 셀 변화의 특징이 다르게 된다.

③ 토지이용 변화의 확률적 변이를 결정하는 난수 발생 파라미터 정의: 모형 보정의 다음 단계는 난수 발생 계수의 결정이다. 이는 토지이용 패턴의 세 가지 특징을 규정하게 되는데 이는 각각 토지이용 변화의 밀도, 새로운 토지이용 클러스터의 생성, 토지이용 클러스터 형태의 불규칙성 등이다(White and Engelen, 2003). 종합하면 이러한 난수 발생 계수의 조정을 통해 토지이용 패턴의 산포 정도와 개별 토지이용 클러스터 형태의 불규칙성 정도를 결정한다. 현실의 토지이용 분포패턴은 어느 정도 불규칙적인 형태를 보이고 있으므로, 적절한 난수 발생 효과의 정의를 통해 토지이용 패턴의 현실성을 제고할 수 있으나, 지나치게 적거나 많은 난수 발생은 비현실적인 대칭 형태나 비대칭 형태의 토지이용 패턴을 초래할 수 있다.

④ 토지이용 적합성, 토지이용규제, 교통접근성 등 지리적 특성을 반영하기 위한 파라미터의 정의: 마지막 단계는 토지이용 적합성, 토지이용규제, 도로 접근성 등을 정의하는 단계다. 이들을 통해 대상지의 물리적 및 제도적 여건, 그리고 도로교통망이 토지이용에 영향을 미치는 정도를 정의할 수 있다.

〈표 1〉은 이상과 같은 내용에 대해 사례지역인 수도권 지역에 대해 2001년과 2009년의 토지피복도를 활용하여 모형의 보정을 실시한 결과다. 2001년도의 토지피복도를 기준으로 2009년까지 시뮬레이션을 실시하여 도출된 결과를 실제 2009년 토지피복도와

비교하여 사례지역에 적합한 계수값을 도출하였다.

3. 도시성장 시나리오

컴퓨터 환경에서 구동되는 도시모형의 장점은 서로 다른 영향 요인에 의한 시나리오를 상정하고 서로 다른 대안적 미래를 비교할 수 있다는 것이다. 본 논문에서는 수도권의 미래 도시성장과 관련하여 세 개의 시나리오를 고려하였다.

① 시나리오 1: 2001년에서 2009년까지의 토지이용 변화 추세가 2030년까지 연장되는 경우를 가정

② 시나리오 2: 수도권에 지정된 개발제한구역을 해제하는 경우를 가정

③ 시나리오 3: 수도권광역급행철도(GTX)의 설치에 따라 수도권 전역에 주요 교통결절점이 추가되는 경우를 가정

이들 세 개의 시나리오는 도시성장에 있어 서로 다른 요인들을 특징화하여 시뮬레이션에 반영한 것이다. 시나리오 1은 현재의 상태에서 특별한 정부 정책의 개입이 없는 미래 전망치 즉 현 추세 연장(business as usual) 시나리오를 의미하는 것이다. 시나리오 2와 3은 이에 대비하여 특정한 공간정책이 개입하였을 경우를 상정한 것인데, 시나리오 2는 토지이용규제 완화정책(deregulation of zoning)을, 시나리오 3은 초고속 광역교통망 개선정책(introduction of high-speed rail system)을 상정한 것이다. 이를 통해 자발적 성장(spontaneous growth)이 주도하는 경우와 서로 다른 정책 개입(policy intervention)하에서의 도시성장 패

표 1_ 모형 보정에 따른 계수 선정 결과

구분	전역적 제약조건		네이버후드 효과		난수 발생 계수	접근성 계수	
값	2001년	590,275	포인트 1	0, 10,000	0.6	고속도로	10, 0.25
			포인트 2	1, 40		국도	10, 1
	2009년	670,309	포인트 3	2, 12		지방도	10, 1
			포인트 4	8, 0		시군도	10, 0.5

턴을 파악하고자 한 것이다.

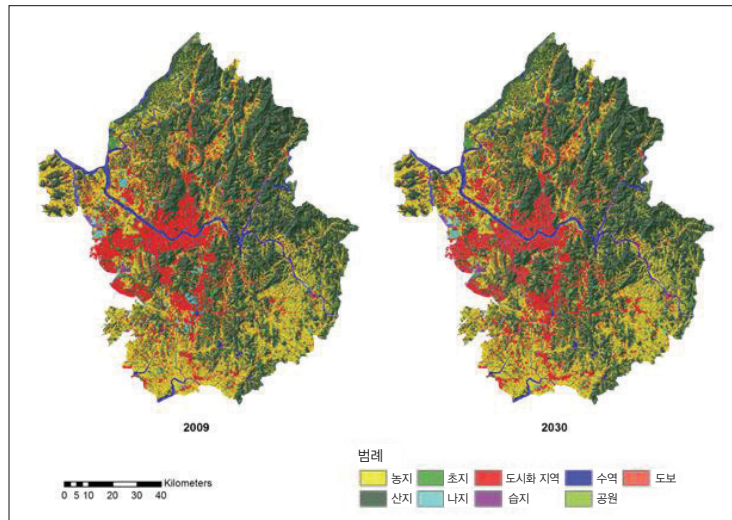
한편, 메트로나미카 모형의 구조적 특성상 목표연도에 대한 도시성장량이 외생적으로 정의되어야 하는데, 2030년의 도시성장량은 모형의 보정에 사용된 토지피복도를 기준으로 추세외삽법(trend extrapolation)을 통해 정의하였으며, 수도권의 17.5%가 2030년까지 도시화 용지로 전환되는 것으로 가정하였다. 시나리오별로 서로 다른 성장량을 산출하고 적용

하는 것도 가능하나, 분석의 효율성을 위하여 단일의 성장량을 세 개의 시나리오에 동일하게 적용하였다. 다음 절에서 보다 자세히 검토할 것이나 동일한 성장량하에서 나타나는 상이한 공간적 분포를 비교 분석하는 것도 중요한 시사점을 제공한다.

4. 결과 분석

시뮬레이션 결과 나타난 미래의 전체 도시화 용지는 셀 개수로는 약 79만 6천 개이며, 면적으로는 약 1,990km²에 해당한다. 동일하게 적용된 외생적 전역 변수로 인해 이는 세 개의 시나리오에 동일하다. 따라서 도시성장 변화량에 따른 시나리오별 차별성은 없으나, 공간적 분포는 차별성을 가지고 있어 이를 기반으로 결과 분석 내용을 제시하고자 한다. 이는 도시성장의 총량에 보다 큰 영향을 미치는 거시적인 사회경제적 요인은 동일하나 지역적인 공간정책 등에 의해서도 다르게 나타날 수 있는 도시성장 분포 변화를 비교하는 데 유용하게 활용될 수 있다고 할 수 있다. 각각에 대한 결과는 다음과 같다.

그림 4_ 시나리오 1 도시성장 시뮬레이션 결과



1) 시나리오별 결과

① 시나리오 1: 수도권 외곽 지역에 소규모 개발의 외연적 확산 심화. 전술한 바와 같이 이 시나리오는 현재와 같은 도시성장 패턴이 향후에도 지속되는 것을 전제로 한다. 즉 수도권에 과거 수십 년간 존재하였던 그린벨트가 그대로 유지되며, 현재와 같은 수준의 교통망이 유지될 경우 신규 도시화는 어떻게 분포될 것인지를 살펴보기 위한 시나리오다. 이와 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행한 결과 수도권의 도시성장은 특정한 클러스터의 형성 없이 그린벨트 외곽의 농업지역으로 외연적 확산이 심화되는 것으로 나타났다. 주로 영향을 받는 지역은 안성, 화성, 오산, 파주, 평택, 포천 등의 지역이며 이들 지역을 중심으로 산발적인 신규 도시화가 나타났다.

② 시나리오 2: 서울 근교 지역에 소규모 개발이 주로 발생. 그린벨트는 도시의 무분별한 확산을 막고 자연환경을 보전하기 위한 효과적인 정책수단으로 역할을 해왔다. 반면 토지의 공급부족을 초래하여 그린벨트 내부에는 지가 상승을 야기하고 그린벨트 외부에는 비지적 성장(leap-frog development)을 초래하는 부

그림 5_ 시나리오 2 도시성장 시뮬레이션 결과

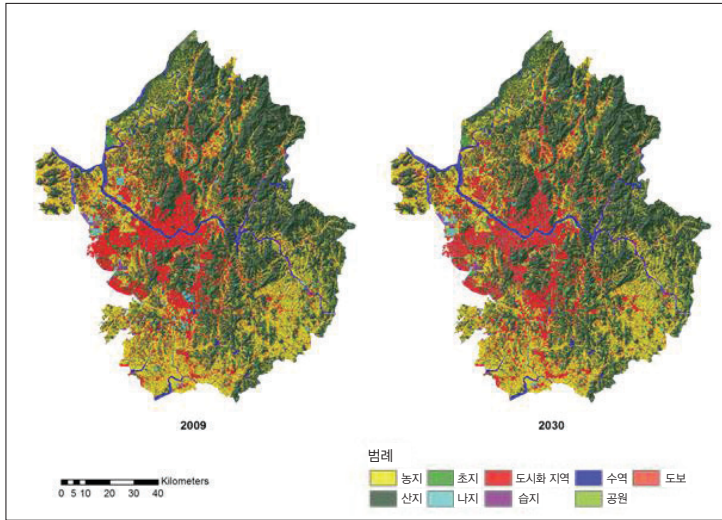
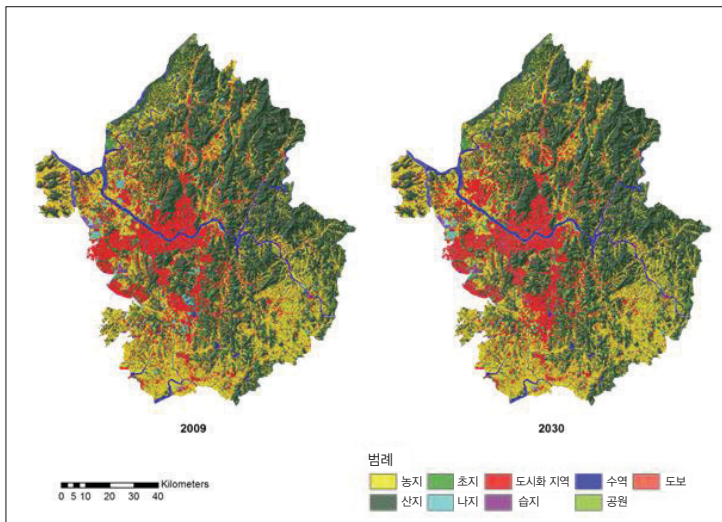


그림 6_ 시나리오 3 도시성장 시뮬레이션 결과



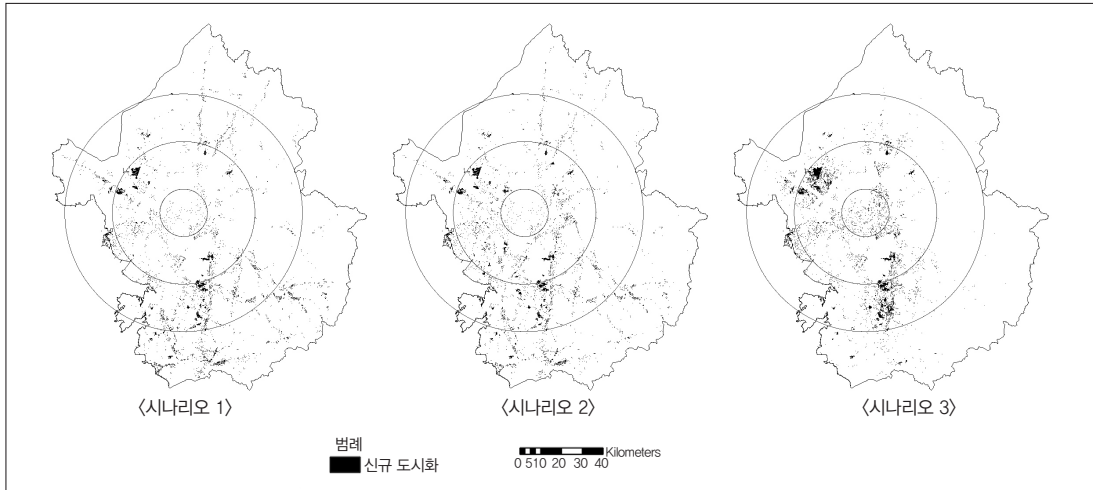
작용도 존재하는데, 우리나라의 수도권 지역도 이러한 영향을 받았다고 할 수 있다. 이 시나리오는 그린벨트가 존재하지 않을 경우 어떠한 도시성장 패턴이 나타날 수 있는지 살펴보기 위한 것이다. 시뮬레이션 결과 하남, 일산, 고양, 남양주, 시흥 등 그린벨트에 의해 보호되고 있던 지역들에 신규 도시성장이 발생하였다. 대신 시나리오 1의 결과와 달리 안성, 화성, 이천 등에 대한 개발 압력은 완화된 것으로 나타났다. 이러한

하는 동탄, 기흥, 일산 등의 지역을 중심으로 신규 도시화가 중점적으로 발생하였다. 반면 의정부, 금정 등은 GTX 제안 노선의 기점에 위치하기는 하나 기 도시화된 지역이므로 신규 도시화의 효과는 적은 것으로 나타났다. 한편 청량리, 신도림, 용산 등 지역의 내대지 등을 중심으로 신규 도시화가 진행되는 것으로 나타났으나, 가용지의 규모 제한 등으로 인하여 그 효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 이들 기존의 부도심 지역에는

결과는 그린벨트 해제의 양면성을 보여주는 결과라고 할 수 있다. 그린벨트의 해제로 인해 기존에 보호되던 지역에 신규 도시화가 발생하기는 하였으나, 이로 인해 그린벨트 존치 시 외곽에서 발생했던 신규 도시화는 감소됨으로 인해 해당 지역에 대한 훼손은 경감될 수 있기 때문이다.

③ 시나리오 3: 교통 결절점을 중심으로 소규모 군집화 경향 발생. 교통 네트워크와 도시성장은 밀접한 관계를 가지고 있는데, 특히 대도시권에 설치되는 고속철도망은 도시성장에 큰 영향을 미치게 된다. 이 시나리오는 수도권에 신설 예정인 광역급행철도가 도시성장에 어떠한 영향을 미치게 될지를 살펴보기 위한 시나리오이다. 시뮬레이션 결과 GTX 신설은 신규 도시성장에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났으나 이 같은 효과는 지역에 따라 다르다고 할 수 있다. GTX 예정 노선의 기점이면서 역사 주변 중기개발되지 않은 가용지가 다수 존재

그림 7_ 신규 도시화 결과 비교



신규 도시화보다는 도시재생과 유동인구 증가에 따른 지역 상권 활성화 등이 더 중요한 효과일 것이나 메트로나미카 모형은 이와 같은 변화를 시뮬레이션하기 위한 기능은 부재하다.

2) 종합 비교

위에서 살펴본 바와 같이 세 개의 시나리오는 동일한 신규 도시성장량을 기반으로 한 시뮬레이션 결과를 산출하고 있으나 서로 다르게 적용된 주요 동인에 따라 상이한 도시성장 패턴을 보여주고 있다. 이를 서울 중심지로부터의 거리³⁾를 단계적으로 구분하여 보면 보다 명확하게 그 특징을 알 수 있다.

시나리오 1의 경우 서울 중심지로부터 50km 반경 내에 발생한 신규 개발이 가장 적었다. 이는 수도권 외곽지역에 보다 더 많은 개발이 발생하였음을 의미한다. 시나리오 2의 경우 50km 반경 내에 보다 많은 개발이 발생하였으며, 이는 수도권 외곽으로 산포되었던 신규 개발이 그린벨트의 해제에 의하여 일부 흡수되었음을 의미한다. 시나리오 3의 경우 50km 반경 내에 가장 많은 신규 개발량이 분포하였는데, 신규 교통결절점이 도시화의 지역적 집중(local agglomeration)을 유도할 수 있음을 의미한다. 시나리오별 신규도시화 분포에 대한 비교는 <그림 7>과 <표 2>와 같다.

표 2_ 시나리오별 신규도시성장 비교 2009~2030

구분	10km 미만		10km 이상~30km 미만		30km 이상~50km 미만		합계	
	셀 갯수	면적(km ²)	셀 갯수	면적(km ²)	셀 갯수	면적(km ²)	셀 갯수	면적(km ²)
시나리오 1	1,947	4.9	28,900	72.3	36,322	90.8	67,169	167.9
시나리오 2	1,565	3.9	40,057	100.1	32,046	80.1	73,668	184.2
시나리오 3	5,966	14.9	44,489	111.2	35,215	88.0	85,670	214.2

주: 위의 면적은 개별 셀 크기(50×50m)를 합산하여 도출하였음.

3) 서울 시청을 중심으로 하여 측정된 거리.

V. 결론 및 시사점

본 논문에서는 셀룰라 오토마타 도시모형인 메트로나미카를 활용하여 수도권 지역의 2030년까지의 도시성장을 시뮬레이션하였다. 서로 다른 영향 요인하에서의 도시성장 패턴과 공간구조의 특성을 파악하기 위하여 3개의 시나리오를 디자인하여 시나리오별로 모형을 구동하고 결과를 비교하였다.

시뮬레이션 결과 시나리오별로 서로 다른 도시성장 패턴을 보여주었는데, 시나리오 1에서는 수도권 외곽으로의 소규모 개발이 심화되었고, 시나리오 2에서는 그러한 소규모 개발이 서울 인근 지역으로 수렴하는 패턴을 보였다. 시나리오 3에서는 미개발 지역에 새로 신설되는 GTX 역사 주변으로 신규 개발이 군집을 이루는 경향이 발생하였다.

경제가 성장하고 인구가 증가함에 따라 신규 도시화는 계속 진행된다고 할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통해 살펴본 바와 같이 개발제한구역제도 등과 같은 토지이용규제 정책은 해당 구역에 신규개발을 막을 수는 있을 것이나, 타 지역에서 신규 개발이 발생하는 것을 막을 수는 없으며 이를 바람직한 형태로 유도하는 효과는 미흡하다. 반면 초고속철도와 같은 교통망의 신설은 개발을 유도하는 효과가 있음을 살펴보았다.

모형을 통해 사회경제적 현상을 정확하게 예측한다는 것은 현실적으로 불가능하며, 이는 어떠한 도시모형이나 토지이용 변화 모형의 경우에도 마찬가지다. 모형은 복잡한 현실을 보다 명확하게 이해하기 위하여 현실에 영향을 미치는 수많은 요소 중 일부를 고려하는 것이며 모형을 통해 도출된 결과는 정확한 예측이라기보다는 하나의 가능성을 가시화한 것이라고 할 수 있다. 그러나 과학적 지식을 기반으로 구성된 모형을 통한 시뮬레이션 결과를 살펴봄으로써 미래에 대

한 불확실성을 낮추고 발생 가능한 상황에 대한 대응성을 높여 합리적인 의사결정을 도모할 수 있다. 통계학자 George Box가 언급한 바와 같이 모든 모형은 현실을 반영하는 데 한계가 있으며 정도의 차이는 있으나 현실을 왜곡하여 설명하기도 한다(Box and Draper, 1987). 따라서 무엇보다 중요한 것은 모형의 성격과 특성을 잘 이해하고 유용하게 활용하는 것이다.

도시성장은 토지이용의 변화뿐만 아니라 많은 사회경제적 효과를 수반한다. 셀룰라 오토마타 도시모형은 대개 토지이용 변화와 관련된 복잡한 사회경제적 요인들은 크게 고려하지 않고 토지의 물리적 특성을 위주로 시뮬레이션을 수행한다. 따라서 셀룰라 오토마타 도시모형은 토지이용 변화의 공간적 패턴을 효율적으로 시뮬레이션할 수 있다는 장점은 있으나, 이와 관련된 사회경제적 파급효과 등을 파악하는 데는 한계를 노정하고 있다. 그러나 현재까지 개발되고 활용되는 도시모형 방법론 중 미시적이고 동태적인 관점에서 실제 토지이용의 변화를 설명하고 시뮬레이션할 수 있는 가장 효과적인 방법론이기도 하다. 셀룰라 오토마타 모형의 이러한 특성을 이해하고 활용한다면 도시정책 의사결정을 위한 유용한 도구로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 정재준 · 이창무 · 김용일. 2002. “도시성장 분석 및 예측을 위한 셀룰라 오토마타 모델 개발”. 국토계획 제37권 제1호, pp27-42.
- 정재준 · 한동엽 · 김용일 · 이재원. 2001. “셀룰라 오토마타를 이용한 수도권의 도시성장 예측”. 한국GIS학회지 제9권 제3호, pp397-412.
- Batty, M., Xie, Y. and Sun, Z. 1999. “Modeling Urban Dynamics through GIS-Based Cellular Automata”. *Computers,*

4) “본질적으로 모든 모형은 틀리다. 다만 일부 모형들은 유용하다(Essentially, all models are wrong, but some are useful).”

- Environment and Urban Systems* vol.23. pp205-233.
- Benenson, I., and Torrens, P. 2004. *Geosimulation: Automata-Based Modeling of Urban Phenomena*. Chichester, England : John Wiley & Sons.
- Box, G. E. P., and Draper, N. R. 1987. *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. New York : John Wiley & Sons.
- Clarke, K., Hoppen, S. and Gaydos, L. 1997. "A Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area". *Environment and Planning B* vol.24, no.2. pp247-261.
- Couclelis, H. 1985. "Cellular Worlds: A Framework for Modelling Micro-Macro Dynamics". *Environment and Planning A* vol.17, no.5. pp585-596.
- Gardner, M. 1972. "The Fantastic Combinations of John Conway's New Solitaire Game 'Life'". *Scientific American* vol.4. pp47-58.
- Tobler, W. 1970. "A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region". *Economic Geography* vol.46, no.2. pp234-240.
- _____. 1979. "Cellular Geography". eds. Gale, S. and G. Olssen. in *Philosophy in Geography*. Dordrecht, Netherlands : Reidel. pp379-386.
- White, R., and Engelen, G. 1993. "Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns". *Environment and Planning A* vol.25, no.8. pp1175-1199.
- _____. 1997. "Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modelling". *Environment and Planning B* vol.24, no.2. pp235-246.
- _____. 2003. Kalibratieprocedure: A Calibration Procedure for Constrained Large Neighbourhood Cellular Automata based Land Use Models. Research Institutes for Knowledge Systems. *13th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography*. Lucca, Italy.
- Wolfram, S. 1984. "Cellular Automata as Models of Complexity". *Nature* vol.311, no.4. pp419-424.
- _____. 2002. *A New Kind of Science*. Champaign : Wolfram Media Inc.
- RIKS. Metronamica, Research Institute for Knowledge Systems 2011. RIKS(<http://www.metronamica.nl>). [2011. 12. 5]

- 논문 접수일: 2013. 4. 5
- 심사 시작일: 2013. 4. 24
- 심사 완료일: 2013. 5. 7

Simulating Urban Growth with the Metronamica Model : A Case Study on the Seoul Metropolitan Area, Korea

Keywords: Cellular Automata Model, Metronamica, Urban Model,
Land Use Change, Urban Planning

Since the 1990's cellular automata urban models have been effective tools to study spontaneous land use change and urban growth and to understand various alternative spatial futures. This research uses the cellular automata urban model Metronamica to simulate urban growth of Seoul Metropolitan Area up until 2030. In order to consider diverse determinants of urban growth and to see alternative futures, it designs three scenarios such as business as usual, deregulation of greenbelts, and introduction of new high speed rail system GTX and then conducts simulation for each scenario. This study showed a way of understanding urban growth process and of planning support with a dynamic urban growth simulation model. Spontaneous growth without any further investment or regulation is likely to result in continuing leapfrog development. Deregulation of greenbelt could absorb spontaneous growth in further part of the SMA but it would harm previously protected areas near Seoul city. Introduction of GTX would promote polycentric urban structure and mitigates dispersed development pattern. Although the study considered a limited number of scenarios and factors, it brought meaningful implications for the future growth of the SMA.

메트로나미카 모형을 활용한 수도권 지역의 도시성장 시뮬레이션

주제어: 셀룰라 오토마타 모형, 메트로나미카, 도시모형, 토지이용 변화, 도시계획

1990년대 이후 본격적으로 개발되고 있는 셀룰라 오토마타 도시모형은 토지이용 변화와 분산적 도시성장 등과 같은 공간현상을 연구하고 미래에 발생 가능한 공간구조를 파악하기 위한 효과적 도구로 자리매김하고 있다. 본 논문은 셀룰라 오토마타 기반의 메트로나미카 도시모형을 수도권에 적용하여 2030년까지의 도시성장을 시뮬레이션하였다. 특히 상이한 조건과 정책동인하에서의 도시성장 패턴을 파악하기 위하여 현 추세 연장, 그린벨트 해제, GTX 신설 등과 같은 3개의 시나리오를 마련하고 시나리오별로 시뮬레이션을 수행하여 결과를 분석하였다. 시뮬레이션 결과 현 추세 연장 시나리오하에서는 수도권 외곽 지역으로 비지적 성장이 확산되었고, 그린벨트 해제 시나리오하에서는 서울 인근 지역으로 신규 도시화가 수렴되는 것으로 나타났으며, GTX 신설 시나리오하에서는 신규 역사 주변지역으로 신규 도시화가 집중되고 비지적 성장이 억제되는 경향을 보였다. 시뮬레이션 결과가 미래에 대한 정확한 예측이 될 수는 없으나, 도시성장에 영향을 미치는 주요 요인과 발생 가능한 결과를 가시화하고 수도권의 성장 관리와 합리적 정책 결정을 위한 시사점을 제시하였다.