대한지리학회지 제43권 제1호 2008(117~133)

개발밀도를 고려한 셀룰러 오토마타 기반의 도시 토지이용 변화 모델링

조대헌*

Cellular Automata Based Urban Landuse Change Modeling Considering Development Density

Daeheon Cho*

요약 : 개발밀도는 현대 도시 관리의 주요 관심사임에도 불구하고 이를 실증적으로 분석할 수 있는 지원 체계가 미비하다. 본 연구에서는 셀룰러 오토마타 기반의 도시 모델링 방법론을 확장하여 개발밀도를 고려한 도시 토지이용 변화 모델을 개발하고 그 타당성을 평가하고자 한다. 제안된 모델은 구조적인 측면에서 개발밀도를 명시적으로 고려할 뿐만 아니라 국지적인 밀도 변화를 직접적으로 추정한다. 개발된 모델을 1980년대 초~2000년대 초의 서울 도심부 토지이용 변화에 적용하였으며, 그 결과를 다양한 방법을 통해 검토하였다. 검토 결과 제안된 모델은 토지의 용도 변화 뿐만 아니라 밀도 변화에도 유의미하게 적용될 수 있는 것으로 평가되었다. 하지만 제안된 모델은 데이터 구득의 한계로 인해 공간적, 시간적 제약을 가지게 되었다. 더불어 모델의 보정 및 타당성 검토 방법론은 본 연구에서 충분히 검토되지 못하였으며, 향후 지속적으로 연구될 필요가 있다.

주요어 : 개발밀도, 셀룰러 오토마타, 토지이용 변화, 도시 모델링

Abstract : Although development density control has received much attention in urban planning, there has been little research on empirical methods that can examine local changes in development density. Recently, attempts have been made to develop cellular automata (CA) models that can be applied to urban landuse change. This paper aims to develop an extended landuse change model based on urban CA considering development density. The proposed model not only includes density control component in a model framework, but also directly estimates local density changes in land use. The developed model was applied to the study area, which was a part of central Seoul. The calibration of the model was carried out over the period 1980s~2000s using parcel-based land use data and related variables. The results of the calibrated model have been tested by comparison with actual landuse data, and have demonstrated that the developed model can produce realistic simulations of urban landuse changes. But model output is dependent on the spacio-temporal resolution of input data. Further research is necessary to improve the calibration procedure and methods for evaluating model validity.

Key Words : development density, cellular automata, landuse change, urban modeling

* 국토연구원 국토정보연구센터 책임연구원(Associate Research Fellow, Geospatial Information Research Center, Korea Research Institute for Human Settlements), daeheon2@snu.ac.kr

1. 서 론

산업화의 시기 동안 급속한 팽창을 경험한 현대 도시는 이제 도시화의 성숙기를 맞고 있다. 도시의 고도화가 진행되면서 도시 정책의 주요 초점은 성장 관리로 모아졌다. 서구는 물론 국내에서도 최근 10년 동안 도시 성장 관리에 대한 많은 논의들이 진행되면서, 스마트 성장(이왕건, 2003, 2006; 최현선 · 권영섭, 2006; 이동우, 2006)이나 압축 도시(김영환, 2003; 임은선 외, 2006) 등의 개념이 일반화 되었다. 이러한 논의들은 그 형태가 다양하지만 이들이 다루는 핵심 주제 중의 하나는 토지의 효율적 이용을 위해 도시를 어떤 형태로, 어느 만큼의 용량으로 개발할 것인가라는 개발밀도와 관련된 것이다. 개발밀도에 대한 접근 방식이 서구, 특히 미국과는 다른 양상으로 나타나고 있지만(박재길 외, 2001), 개발밀도는 도시 성장 관리를 위한 핵심 수단으로 많은 사람들의 관심이 되어 왔다(박재길 외, 2001; 전유신 · 문태훈, 2003).

또한 도시 성장 관리라는 표현을 직접적으로 하지는 않았으나 아주 밀접한 관련을 맺고 있는 연구들도 많은데, 도시의 한계 용량을 고려한 적정 개발밀도 혹은 적정 도시 규모에 대한 연구가 그것이다(최막중 · 김진유, 1999; 문태훈, 2002; 전유신 · 문태훈, 2003; 김황배 · 김동문, 2005; 신상영, 2005). 이들 연구는 주어진 여건하에서 유지되어야 할 적정 개발밀도의 수준을 산출하거나 개발의 수준을 적정하게 유지하기 위해 취해야 할 조치의 수준을 산출하는 모형을 제시하고자 하였다. 한편 이들의 연구와는 조금 달리 제도적 차원에서 국내의 개발밀도 관리 정책의 운영에 대한 연구들도 진행되었다(박재길 외, 2001; 이왕기, 2002).

하지만 이러한 관심과 연구성과에도 불구하고 기존 연구는 기본적인 한계를 지니고 있다. 즉, 개발밀도 관리를 위해서는 도시 내에서 개발밀도가 어떻게 분포하고 있으며, 어떤 과정으로 변화되어 왔고, 향후 어떻게 변화되어갈지에 대한 실증적인 분석이 필수적으로 요구되고 있다. 특히 개발밀도는 도시 내에서 위치에 따라 상당히 이질적인 분포 특성을 가지므로 국지적인 변화의 패턴을 살펴볼 수 있어야 하나 현재까지 이에 대한 충분한 연구 개발이 이루어지지 못하고 있다. 그것은 도시 개발밀도의 변화를 살펴볼 수 있는 적절한 데이터와 분석 방법의 불충분성에 기인한 것으로 판단된다.

그러나 최근 이러한 한계를 어느 정도 극복할 수 있는 방안을 제시하는 연구들이 지속되고 있어 주목을 끌고 있다. 즉, 최근 지리학을 중심으로 한 도시 연구 분야에서는 도시 모델링이 새로운 관심을 받고 있는데, 그 방법론으로는 셀룰러 오토마타(cellular automata, CA) 가 활발히 이용되기 시작하였다. CA는 일반적으로 2차원 격자 공간 상에서 어느 한 지점(셀)의 값이 다음 시기에 어떻게 변화할지를 추정하는 모델링 방법이다. CA는 특히 개인 혹은 개체 수준의 공간 단위를 사용함으로써 이전의 도시 모델링 방법과는 차별화를 이루면서 공간의 변화를 모델링하기 위한 주요 방법론으로 발전해왔다.

CA가 지리학에 도입된 후 지난 20여 년간 CA 기반의 모델링에 대한 다양한 연구가 시도되어 왔다. 1980년대를 거치며 이론적 논의를 중심으로 CA를 도시에 적용하기 위한 시도들이 이루어졌으며(Tobler, 1979; Allen *et al.*, 1985; Couclelis, 1985), 1990년대 이후부터는 CA 기법을 실세계의 도시 변화에 적용하려는 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그간의 경험 연구는 토지개발, 도시 성장, 토지이용 변화 등에 적용되어 왔는데(Torrens, 2003), 대부분 토지 용도와 같이 명목 상의 변화에 중점을 두어 본 연구의 관심 대상인 밀도 변화를 간과하는 등 일정한 과제를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 CA 기반의 도시 변화 모델링 기법이 개발밀도와도 밀접하게 관련될 수 있을 것으로 보고, CA 모델의 틀을 확장하여 개발밀도의 관리를 지원할 수 있는 도구의 개발을 시도하였다. 구체적으로 본 연구의 목적은 개발밀도를 고려한 CA 기반의 도시 토지이용 변화 모델을 개발하고, 그 타당성을 검토하는 것이다. 이를 위해 우선 CA 기반의 도시 토지이용 변화 모델의 연구 동향을 살펴보고, 그 의미를 비판적으로 논의하였다. 이어 개발밀도를 고려한 CA기반의 토지이용 변화 모델을 설계하고, 이를 사례 지역에 적용하였다. 끝으로 모델링의 결과를 분석함으로써 모델의 타당성을 검토한 후 결론을 제시하였다.

2. 선행 연구 검토

개체 수준의 국지적 상호작용을 통해서 거시적인 패턴이 형성되고 변화되는 과정을 모델링할 수 있는 CA는 1940~1950년대 동안 컴퓨터 과학 분야에서 처음 시작되었다. 컴퓨터 과학을 중심으로 발전해 온 표준 CA에 대한 정의는 이를 구성하는 4개의 주요 요소를 통해 살펴볼 수 있다. 일반적으로 표준 CA 모델은 셀 공간 (cellular space), 상태 (states), 이웃 (neighborhood), 전이규칙(transition rule) 등으로 구성된다. 셀 공간은 모델링 하고자 하는 대상이 속해있는 공간 프레임웍으로, 통상 정규 격자형의 셀들로 이루어진 2차원의 평면 구조가 이용된다. 셀의 상태는 셀이 가질 수 있는 값들의 집합으로, 토지 용도와 같은 이산적인 변수가 그 대상이 된다. 이웃은 한 셀의 값에 영향을 미치는 셀들의 집합으로 보통 중심 셀과 바로 인접한 셀들로 구성된다. 전이규칙은 자기 자신의 값과 인접 셀들의 값들에 기초하여 그 셀이 다음 단계에서 가지게 될 값을 결정하는 규칙으로, 이는 모든 셀에 대해 동시적 혹은 병렬적으로 적용된다.

이와 같은 표준 CA가 컴퓨터 과학을 중심으로 시작되었음에도 불구하고 지리학 등 공간 연구 분야에 널리 적용될 수 있었던 기본적인 이유는 그것이 공간적인 속성을 내재하고 있었기 때문이다. 특히 평면 격자 구조의 사용과 국지적 상호작용에 대한 강조는 CA가 공간 연구에 빠르게 확산되는데 가장 중요한 요건이었던 것으로 판단된다. 평면 격자 구조의 사용은 본질적으로 공간적이어서 시각화에 매우 유리할 뿐만 아니라 GIS와의 결합도 자연스럽게 진행되도록 하였다. 국지적 상호작용에 대한 강조는 공간적 외부효과 혹은 근린 효과, 공간적 자기상관 등의 개념과 자연스럽게 맞물릴 수 있었다. 하지만 컴퓨터 과학을 중심으로 발전되어 온 표준 CA가 도시 모델에 그대로 적용되기에는 많은 한계가 있었으며, 따라서 4가지 요소 각각에 대해 일련의 일반화 과정을 거치게 된다.

지난 20여 년간 도시 시스템에 적용되어 온 CA 모델을 한 마디로 정리하기란 쉽지 않다. Torrens(2000)는 CA 기반의 도시 모델이 대체로 세 가지 범주에 속하는 것으로 보고 있다. 그것은 공간적 복잡성의 탐구를 위한 것, 도시에 관한 이론이나 아이디어를 테스트하는 것, 도시 계획 지원 시스템에 사용되는 것 등이지만 서로 배타적인 것은 아니다. 주요 응용 분야는 토지이용 및 변화, 지역 차원의 도시화, 사회 공간적 격리, 입지 분석, 도시 성장과 스프롤(sprawl) 등이다(O'Sullivan and Torrens, 2000).

주요 응용 분야 중 본 연구와 가장 관계가 깊은 것은 토지이용 변화 분야로 최근 10여 년 동안 지속적인 연구가 시도되고 있다. 토지이용 변화에 대한 모델링은 White와 그의 동료 및 RIKS(Research Institute for Knowledge Systems)를 중심으로 한 일련의 연구(White and Engelen, 1993, 1997, 2000; White *et al.*, 1997)를 통해 제시한 모델이 비교적 살펴볼 만한 가치가 있다. 이들은 표준 CA가 토지이용 변화와 관련하여 가지는 한계를 비판하며 확장 방안을 제시하였다. 이들의 연구는 거시적 수요가 국지적 토지이용 변화를 제어하는 구조를 제시하였을 뿐만 아니라, 모든 셀이 등질적이며 셀의 상태는 최근린 셀들에 의존적이라는 가정을 일반화하였다. 즉, 모든 셀은 경사도나 고도 등 셀 자체의 특성 뿐만 아니라 토지이용규제 사항, 교통망에 대한 접근성 등이 서로 상이함을 고려하였다. 근린 효과의 경우는 인접한 196개의 셀을 이용하여 긍정적, 부정적 영향을 반영하고자 하였다.

Barredo *et al.*(2003; 2004)는 이들의 연구를 확장하여 유사한 모델을 제시하였다. 이들은 토지이용의 수요와 함께 토지이용의 입지배분을 위한 5가지 그룹의 요인을 사용하였다. 첫 번째 그룹에는 경사도나 재해 위험과 같은 자연 환경적 요인이, 두 번째 그룹에는 국지적 규모에서의 근린 효과가, 세 번째 그룹에는 도심까지의 거리나 접근성과 같은 도시의 공간적 특성이, 네 번째 그룹에는 도시 및 지역 계획이, 다섯 번째 그룹에는 개인의 선호 등이 포함된다.

한편 국내에서 연구된 토지이용 관련 모델은 크게 두 가지 형태로 정리될 수 있다. 하나는 특정 시점을 대상으로 토지이용의 입지 결정을 설명하는 모델로(이경춘, 1995; 이소영, 1997), 이는 입찰지대론(bid-rent theory)과 같은 이론에 의거하여 도시 내부에서의 토지이용의 입지 패턴을 설명하고 있다. 다른 하나는 CA

를 사용하여 토지이용의 변화를 다룬 연구로, 이들은 대부분 토지의 용도변화 보다는 도시 성장이나 시가지 확장 과정에 치중하고 있다(강영옥 · 박수홍, 2000; 정재준, 2004; 최대식 · 임창수, 2004; 이성호 외, 2004; 윤정미 · 이성호, 2006).

지금까지 언급한 이들의 연구는 대부분은 경험 데이터를 활용하여 현실의 토지이용 변화를 모델링 하고자 하였다. 이들의 연구 성과는 CA에 기반한 모델링이 개별적인 위치에서의 혹은 국지적인 토지이용 변화에 효과적으로 적용될 수 있음을 보여주고 있다. 특히 이들이 연구에서 사용한 모델은 거시적인 수요의 변화와 미시적인 토지이용(용도) 변화를 연계하는 구조를 취하였다. 즉, 개별 공간 단위의 토지는 여러 조건에 의해 각 용도별로의 변화 잠재력을 가지며 잠재력이 최대인 용도로 변화하는데, 그 양은 전역적 수요에 의해 제어되도록 하여 모델링 결과의 현실성을 상당히 높이고 있다[1]. 또한 이들 모델에서는 등질적인 단위들간의 국지적 상호작용이 시스템의 진화, 발전에 가장 중요한 요인이라는 표준 CA의 가정을 확장하여 토지이용 변화에 관여하는 다양한 요인들을 고려하고 있다.

하지만 이상의 기존 연구에도 여러 측면의 한계가 존재하고 있다. 본 연구와 관련하여서는 무엇보다도 기존 모델이 토지의 용도 변화에 초점을 두고 있어 밀도 변화에 대한 고려가 부족함을 지적할 수 있다. 전술한 바와 이들의 모델은 전역적인 토지수요를 통해 국지적 용도 변화를 제어하는 구조를 지니고 있다. 하지만 여기서의 토지수요는 평면 상의 토지수요이므로 평면 상의 용도 변화에만 관계하며, 따라서 개발밀도의 변화는 다루지 못하고 있다. 물론 평면 상의 토지수요 산출 과정에서 인구밀도와 같은 개념이 반영되고는 있으나 이는 토지이용에서의 밀도, 즉 단위 토지에서의 개발밀도와는 다르다.

이렇게 전역적 수요 차원에서 개발밀도가 명시적으로 고려되지 못할 뿐 아니라 개별 위치에서 이루어지는 개발밀도의 변화 또한 간과되어 왔다. 도시화가 급속도로 진행되는 과정에 있는 도시의 경우는 수요 변화가 평면 상의 용도변화(특히 평면 상의 팽창)와 보다 직접적으로 연결될 수 있으나 이미 도시화가 진행된 기성 시가지의 경우 수요 변화는 국지적인 밀도의 변화로 이어질 가능성이 매우 높다. 따라서 도시 내에서의 밀도 관리가 점점 중요한 정책 과제로 대두되는 상황에서 이처럼 밀도변화를 간과하는 것은 중요한 한계라고 할 수 있다.

덧붙여 지금까지의 연구는 현실에 잘 들어 맞는 모델의 개발에 초점이 있어 모델을 어떻게 활용할 것인지에 대한 논의가 부족하며, 결과적으로 미래를 위한 계획적 고려가 불충분하다. 이는 모델의 기본 구조에 반영되어 있는데, 대부분의 모델은 전역적인 수요와 개별 위치에서의 토지이용을 직접적으로 연계하고 있어 계획 혹은 정책이 개입될 여지를 충분히 고려하지 못하고 있다. 현대 도시의 경우 도시 성장 관리 혹은 수요 관리가 상당히 중요한 과제가 되고 있으므로 모델에서 수요에 대한 계획적 접근이 가능하도록 고려할 필요가 있다.

3. 토지이용 변화 모델의 설계

CA 모델은 국지적인 도시 변화를 효과적으로 다룰 수 있어 기본 구조는 개발밀도의 국지적 분포 및 이의 변화 양상에도 적용 가능할 것으로 판단된다. 하지만 CA 기반의 토지이용 변화 모델은 전술한 바와 같이 개발밀도를 명시적으로 고려하지 않고 있어 그 틀을 확장할 필요가 있다. 구체적으로 CA 기반의 모델에서 개발밀도의 고려는 거시적인 측면의 전역적 수요와 미시적 측면의 국지적 변화 두 부문 모두에서 이루어져야 한다.

우선 거시적 측면의 경우 거시 환경 변화에 따른 용도별 토지수요에는 개발밀도가 고려된 총수요[2]와 평면수요가 동시에 고려되어야 한다. 덧붙여 수요가 변화함에 따라 개발밀도가 변화되는 경우 밀도 변화가 이루어져야 하는 평면 상의 토지 수요도 고려되어야 한다. 이와 같은 수요 차원에서의 개발밀도는 과거로부터 현재까지의 변화뿐만 아니라 향후의 변화 혹은 관리 계획의 수립을 위해 반드시 고려되어야 할 요소이다. 한편 미시적 측면에서는 개발밀도의 국지적 변화를 추정할 수 있도록 전이규칙이 지정되어야 한다.

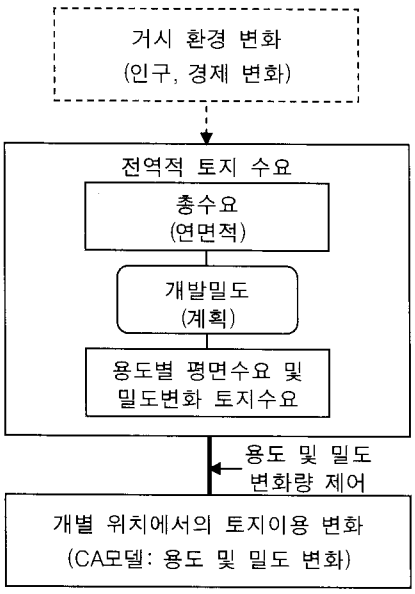

그림 1. 개발밀도를 고려한 토지이용 변화 모델의 구조

즉, 용도변화에 대한 전이규칙뿐만 아니라 개발밀도의 변화에 대한 전이규칙도 지정되어야 한다.

이상의 논의를 바탕으로 본 연구에서 제시하는 모델의 명세를 정리하자면 다음과 같다. 우선 본 모델에서의 토지이용은 용도변화와 함께 밀도변화를 동시에 고려한다. 용도의 경우는 각 단위 토지를 점하는 주기능(건축물의 주용도)을 의미하며, 개발밀도의 경우는 각 단위 토지를 점하는 주기능의 양(건축물의 연면적 혹은 용적률)을 의미한다. 구조적인 측면에서는 거시적인 용도별 수요(총수요, 평면수요)가 전체 변화량(평면상의 용도변화 및 밀도변화)을 제어하는 제약 모델의 형태를 취하였다(그림 1).

개별 위치에서의 토지이용 변화는 CA 모델로 추정되도록 하였다. 토지이용 변화는 2차원 평면 구조 상에서의 공간 단위(셀) 별로 이루어지는데, 이 셀들은 기본적으로 특정 용도와 밀도 값을 갖는다. CA 모델에서는 이 상태 값이 변화하는 규칙을 지정해야 하는데, 이를 위해선 우선 토지이용 변화에 관계하는 요인에 대한 검토가 필요하다. 표준 CA를 따른다면 토지이용에서의 근린 효과만을 고려해야 하나 현실의 토지이용 변화에는 다양한 요인이 복합적으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구의 성과를 종합하여 자체 특성, 국지적 토지이용, 접근성, 토지이용제도, 기타 랜덤 확률 등 5개 범주에 해당하는 요인을 고려하였다. 개체 수준의 특성은 지형 특성이나 해당 토지의 건축물 노후도 등 개별 위치의 고유 특성을, 국지적 토지이용은 근린 수준에서의 토지 용도 및 밀도 분포를 나타낸다. 접근성은 도로 등 주요 교통망이나 중심지와의 거리관계를, 토지이용제도는 용도지역지구와 같은 규제나 재개발구역 등 계획적 개발 사항을 나타낸다. 끝으로 랜덤 확률은 미처 변수에 포함되지 않았거나 측정되기 어려운 변수의 영향을 고려한다.

이러한 요인들을 이용해 상태 값의 변화를 결정짓는 전이규칙의 구체적인 형태를 지정하였다. If-Then-Else의 구조를 갖는 표준 CA의 결정론적 전이규칙이 토지이용 변화에 적용되기에는 매우 제한적이므로, 본 연구에서는 선행 연구의 성과를 수용하여 잠재력 기반의 전이규칙을 설정하였다. 즉, 본 연구에서의 전이규칙은 개별 위치의 토지용도 및 밀도가 변화할 잠재력 값을 산출하는 함수식이다. 우선 용도변화를 위한 전이규칙의 구체적인 형태는 다음과 같다.

$$P^t_{K,x,y}=f(W^t_{z,k}\times Z^t_{K,x,y},\ W^t_{a,k}\times A^t_{K,x,y},\ W^t_{n,k}\times N^t_{K,x,y},\ W^t_{s,k}\times S^t_{K,x,y},\ \nu^t)$$

위 수식에서 $P^t_{K,x,y}$는 t시기 x,y에 위치한 토지의 상태가 다음 시기에 K 용도로 변화할 잠재력을 의미하는데, 이를 결정하는 수식의 구체적인 명세는 시점과 대상 용도에 다를 수 있다. Z는 토지이용제도 요인을, A는 접근성 요인을, N은 국지적 토지이용의 요인을, S는 적합도 요인을, ν는 랜덤확률 요인을, W는 각 요인의 가중치를 나타낸다. 이를 통해 용도별 변화 잠재력 값을 구하면, 개별 위치에서는 용도 각각으로의 변화 잠재력 값이 추정되고 이 값들 중 가장 큰 값을 갖는 용도로 변화하게 된다.

용도변화에 대한 전이규칙과 함께 개발밀도의 변화에 대한 전이규칙도 지정되어야 한다. 밀도변화의 경우는 용도변화와는 달리 해당 위치에서 밀도가 변화할 가능성이 어느 정도인지, 밀도가 변화할 경우 그 크기는 어느 정도일지를 동시에 추정할 필요가 있다. 밀도

변화는 재개발 혹은 재건축과 밀접하게 관련되어 있으므로 밀도가 변화할 가능성이 높은 지점을 우선적으로 선택할 필요가 있는데, 밀도 변화가 발생하는 전체 면적은 연평균 재개발(재건축) 발생 비율과 같은 경험 데이터를 통해 추정하여 사용할 수 있다. 밀도변화 잠재력을 추정한 후에는 해당 위치의 밀도 크기가 얼마나 될지를 의미하는 밀도크기 잠재력을 추정해야 한다. 아래 수식에서 P^t_{Dch}는 t시기 해당 위치에서의 밀도변화 잠재력을, P^t_D는 밀도크기 잠재력을 나타내는데, 본 연구에서 사용하는 밀도변화 및 밀도크기 잠재력은 현대 도시의 고도화 추세가 당분간 안정적일 것이라는 가정하에 현 위치에서 밀도가 더 높아지게 될 잠재력을 의미한다. 잠재력 값을 구하기 위해 고려되는 요인의 범주는 용도변화의 경우와 동일하다. 개발밀도의 변화는 밀도가 변화할 셀을 우선 선택한 후 이들을 대상으로 총수요의 변화량 범위 내에서 밀도크기 잠재력 값에 비례하도록 하였다.

$$P^t_{Dch,x,y}=f(W^t_z\times Z^t_{x,y}, W^t_a\times A^t_{x,y}, W^t_n\times N^t_{x,y}, W^t_s\times S^t_{x,y}, \nu^t)$$

$$P^t_{D,x,y}=f(W^t_z\times Z^t_{x,y}, W^t_a\times A^t_{x,y}, W^t_n\times N^t_{x,y}, W^t_s\times S^t_{x,y}, \nu^t)$$

전이규칙의 전체적인 형태가 지정되었다면 관찰데이터에 적합하도록 모델의 보정 절차를 거쳐야 한다. 모델의 보정은 초기 시점의 토지이용상태 및 요인들의 측정 값을 사용하여 종점의 토지이용상태에 최대한 적합한 결과를 산출할 수 있도록 각종 매개변수를 추정하는 과정이다. 전이규칙 및 이의 보정은 모델의 결과에 크게 영향을 미치는 중요한 과정이지만 그리 간단한 문제가 아니며 앞으로도 많은 연구가 지속될 필요가 있는 과제 중의 하나이므로(Straatman *et al.*, 2004), 이에 대한 자세한 논의는 별도의 연구 과제로 남겨둔다.

4. 토지이용 변화 모델의 타당성 검토

1) 사례 지역의 토지이용 변화 모델링

본 연구의 사례지역은 그림과 같이 서울특별시 종로구 종로1234가동의 시가지 부분에 해당하는데, 창덕궁이 위치한 지역은 사례 지역에서 제외하여 대상 면적은 약 0.87km²에 달한다. 본 사례지역은 서울시 도심

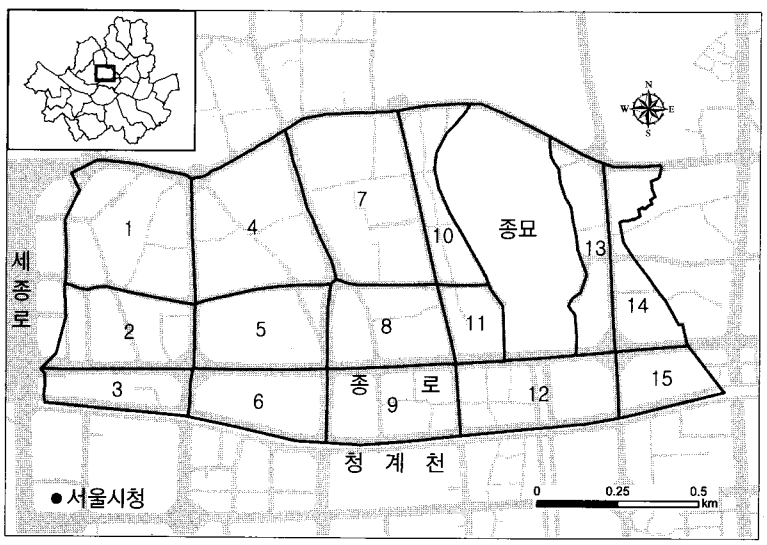

그림 2. 사례지역

주: 그림에서 굵은 실선은 블록별로 용도와 밀도를 살펴보기 위한 경계선임(숫자는 블록의 번호를 나타냄).

표 1. 사례지역에 적용된 개별 위치에서의 토지이용 변화 요인

요인 범주	주요 변수
토지이용제도	용도지역 재개발구역
접근성	교차로까지의 거리 대로(8차선이상)까지의 거리 중로(4차선~8차선)까지의 거리
국지적 토지이용	근린의 토지이용(용도 구성 및 밀도 구성) 관성효과
적합도(자체특성)	노후도 용도(밀도변화의 경우) 및 밀도(용도변화의 경우)
랜덤 확률	$\nu=1+[\ln(rand)]^{\alpha}$

부의 중심에 위치하여 기능간 입지 경쟁이 활발한 지역으로, 이를 대상으로 1984년과 2004년의 토지이용 변화를 모델링하였다[3].

모델의 기본 공간구조는 통상적인 CA 모델과 마찬가지로 2차원 정규 격자 구조를 사용하였다. 2차원 정규 격자 구조를 사용한 것은 구득한 토지이용 원자료에서 1984년과 2004년 두 시점 사이에 공간 단위가 상당히 달라져 어느 하나로 단위를 통일하기가 곤란하였으며, 향후에도 공간 단위가 변할 가능성이 높아 고정적인 단위가 필요하였기 때문이다. 각 셀은 토지이용 변화의 기본 단위로 고해상도를 유지하고자 하였는데, 여기에서는 사례지역의 평균적인 필지 크기를 고려하여 10m×10m 크기로 하였다[4].

모델링에 사용되는 토지용도는 업무용, 상업용, 제조용, 주거용, 공공용으로 구분하였으나, 변화의 방향을 고려하여 두 가지 유형으로 나누었다. 즉, 주거용, 제조용, 상업용, 업무용은 상호간에 변화 가능하도록 하였으나, 기타 및 공공용은 앞의 네 용도로는 변화될 수 있으나 다른 용도로부터 기타 및 공공용으로는 변화할 수 없도록 하였다. 특히 공공용 토지의 변화는 도시 계획에 의해 외부에서 주어지는 것으로 가정하였다. 밀도변화의 경우는 연면적을 상태 값으로 하여 연면적 값 자체가 변화하도록 하였다. 한편, 건물 혹은 필지 단위가 아니라 각 셀 단위로 토지이용이 변화한다는 가정을 완화하기 위해서 본 모델링에서는 각 셀에 목표 년도의 필지 혹은 건물의 ID를 부여하여 동일한 ID 값을 갖는 셀은 동일한 용도 및 밀도로 변화될 수 있도록 하였다.

본 모델에서 각 셀의 토지이용 변화는 토지이용 변화 요인에 의해서 결정되지만 전역적인 목표 수요량을 충족하도록 구조화하였는데, 여기에서는 2004년의 용도별 토지량(연면적 및 평면 면적)과 개발밀도를 전역적인 목표 수요로 하였다. 밀도변화와 관련하여서는 밀도변화가 모든 지역에서 발생하는 것은 아니기 때문에 용도별로 밀도에 변화가 발생할 평면 면적을 수요로 지정할 필요가 있다. 따라서 용도별로 밀도에 변화가 발생하는 평면 면적을 관찰데이터로부터 산출하여 사용하였는데, 사례지역의 경우 전체 토지면적의 약 30%가 지난 20년간 재개발 혹은 재건축을 통해 밀도가 변화한 것으로 나타났다.

전술한 바와 같이 개별 위치에서의 토지이용 변화는 전이규칙을 통해 결정된다. 본 연구에서 사용한 요인은 3장에서 기술한 바와 같이 토지이용제도, 접근성, 국지적 토지이용, 적합도, 랜덤 확률의 5개 범주를 사용하였는데, 각 범주에는 하위 변수들이 포함되어있다. 본 사례연구에서는 모델의 보정 절차를 거쳐 주요 변수만을 선별하여 사용하였다(표 1).

이상의 요인 및 하위 변수를 사용하여 개별 위치에서의 토지이용 변화를 추정하였다. 개별 위치에서의 토지이용 변화는 전이규칙의 종합 잠재력 점수에 근거

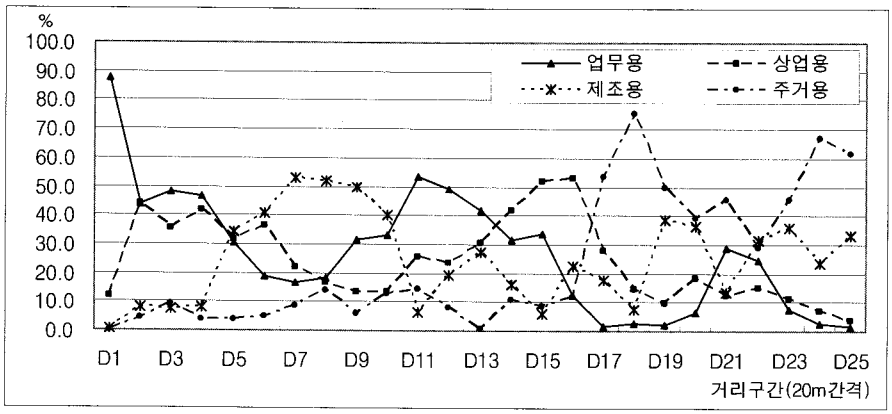

그림 3. 대로까지의 거리구간별 용도간 비중 분포

하는데, 본 연구에서는 잠재력 점수를 구하기 위해 개별 변수의 측정 값을 그대로 사용하기 보다는 측정 값에 해당하는 가중치 점수를 바탕으로 하였다. 이 잠재력 점수는 정규화를 위해 최소값이 0, 최대값이 100이 되도록 산출하여 측정 단위의 차이가 미치는 영향을 배제하고자 하였다.

이상의 방식으로 전이규칙의 형태를 설정한 후 관찰 데이터를 통해 모델을 보정하였다. 모델의 보정은 전이규칙에 사용되는 각종 매개변수를 추정하는 과정으로, 본 연구의 경우 각 요인(변수)별 가중치 및 요인간 가중치가 그 대상이다. 우선 각 변수의 측정 값에 해당하는 가중치의 경우 통계 분석이 가능하면 그 결과를, 그것이 불가하면 연구자의 가설을 초기 값으로 한 후 시행착오 방식을 통해 보정하였다. 즉, 예를 들어 접근성이나 근린효과 등은 관찰 데이터에 대한 통계 요약을 우선 시도하였는데, 용도변화에 적용되는 가중치의 경우 용도별로 교통망에 대한 거리 구간별 점유비 혹은 근린 거리 구간별 점유비를 산출하여 이를 기초로 하였다.

그림 3은 용도변화에 적용하기 위한 접근성의 초기 가중치 설정에 사용된 통계 요약 중 대로까지의 거리 변수에 해당하는 결과이다. 가중치를 부여하기 위해 각 용도별로 대로까지의 각 거리 구간별 분포 비중을 구한 후, 개별 거리 구간별로 이 값들의 합을 100으로 하여 각 용도가 차지하는 비중을 구하였다. 즉, 사례지역 전체의 용도별 토지 면적이 모두 동일한 것으로 표준화 한 후, 각 거리 구간별로 용도별 점유비를 산출하여 사용하였다.

근린 효과에 대해서도 동일한 방식을 적용하였다. 그림 4는 근린 효과의 초기 가중치 설정을 위한 통계 요약의 결과인데, 중심 셀로부터 일정 거리 구간 별로 근린 내에 어떤 용도가 많은 비중을 차지하는지를 분석한 것이다. 즉, 중심 셀로부터 각 근린 구간 내에 속하는 용도별 면적을 연구지역 전체의 용도별 총면적으로 표준화한 다음, 용도 상호 간의 비중을 표현한 것이다. 예를 들어 업무용 토지의 20m 근린 구간의 경우, 평균적으로 업무용 토지가 약 85%를 차지하고 있는데, 그 만큼 중심 셀에 큰 가중치를 갖는 것으로 설정하였다. 한편 용도지역의 영향과 같이 통계 요약이 어려운 경우 용도지역별 행위 규제와 같은 근거를 바탕으로 연구자의 가설을 적용하였으며, 랜덤 효과의 크기에 관계하는 매개변수 α는 1에서 시작하여 보정 과정을 통해 조정하였다.

밀도 변화에 대해서도 유사한 방식으로 가중치를 부여하였는데, 가중치 설정을 위한 통계 요약을 살펴보면 표 2와 같다. 표에서 확인할 수 있듯이 재개발사업이 진행되고 도로에 인접해 있으며, 근린이 고밀도이고 자신의 노후도가 심한 위치일수록 밀도변화 및 밀도크기 잠재력이 커지도록 하였다.

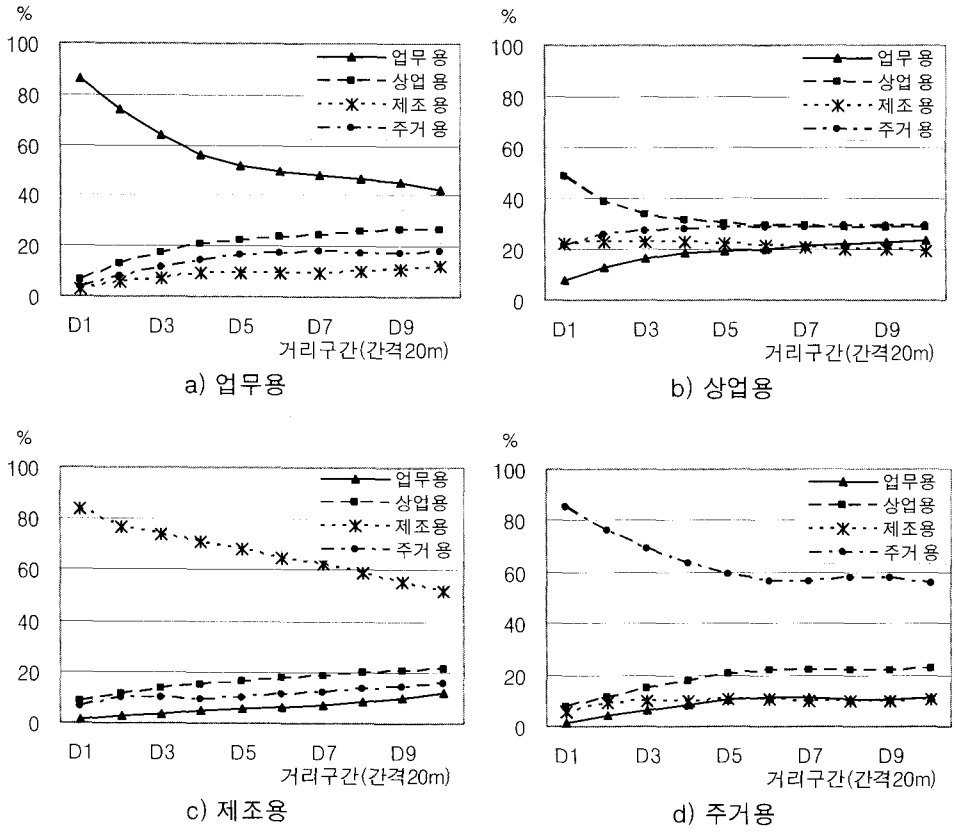

그림 4. 근린 거리구간별 용도간 비중 분포

표 2. 개발밀도 구간별 토지이용 분포 특성

구분 \ 용적률		전체	200% 이하	200~400%	400~600%	600~800%	800~1000%	1000% 이상
재개발구역내 분포(%)		100	4.2	3.7	4.7	23.2	17.0	47.2
교차로까지 평균거리(m)		196	198	194	205	188	186	167
대로까지 평균거리(m)		222	234	210	239	147	176	111
중로까지 평균거리(m)		96	93	101	102	109	118	78
평균 노후도(년)		26	28	24	23	20	10	13
근린 용적률(%)	0~20m	306	154	262	400	552	721	1,060
	20~60m	302	220	266	336	441	569	634
	60~100m	305	252	278	317	394	473	494

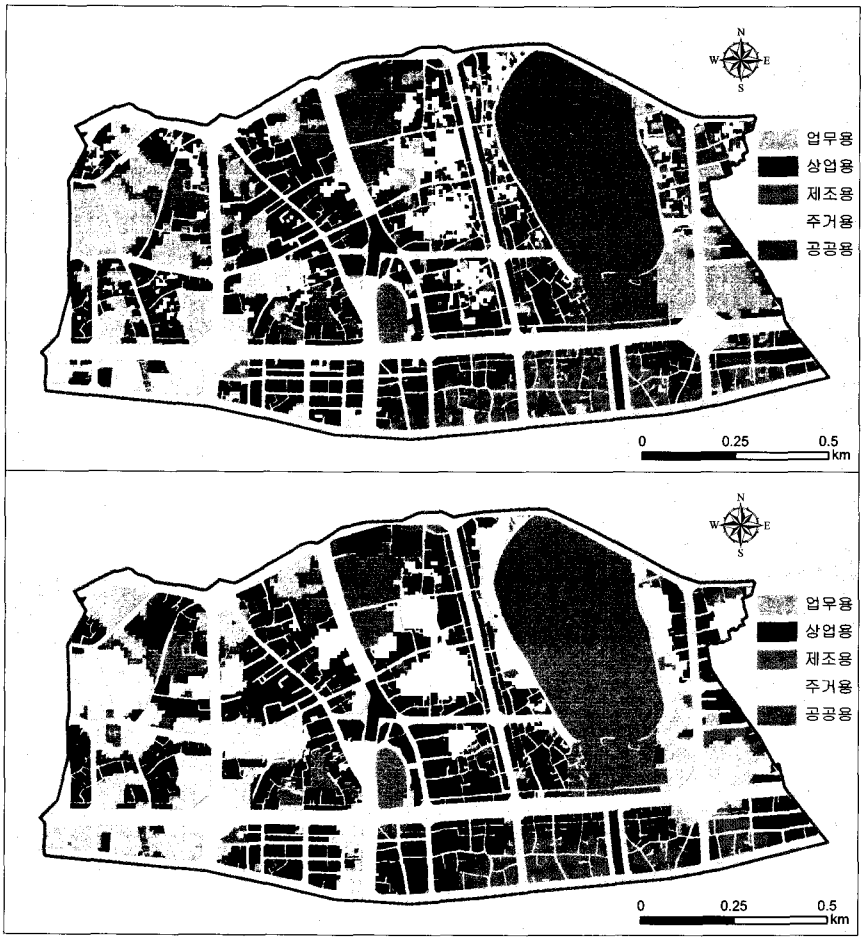

그림 5. 용도변화에 대한 관찰데이터(위)와 모델추정치(아래)의 시각적 비교

이상의 방식으로 지정된 각 요인별 가중치 및 요인간의 가중치 비중은 모델의 보정과정을 통해 조정하였다. 전술한 바와 같이 모델의 보정 과정은 그 자체로 하나의 연구 과제가 될 만큼 중요하나, 아직 합의된 방법론이 제시되지 못하고 있으며 지속적인 연구가 수행되어 가는 과정에 있다. 지금까지는 연구자의 지식 혹은 통찰력에 의한 방법(Wu, 1998), 회귀모형이나 다항로짓모형과 같은 통계학적 방법(Cheng and Masser, 2003; Arai and Akiyama, 2004), geocomputation과 같은 계산 집중적(computation intensive) 방법(Li and Yeh, 2002), 시행착오에 의한 반복적 방법(White and Engelen, 2000; Barredo *et al.*, 2004) 등이 사용되고 있다.

본 연구에서는 개별 요인에서의 가중치는 시행착오에 의한 방법을, 요인간의 가중치는 계산 집중적 방법을 사용하였다. 시행착오에 의한 방식은 셀대셀 비교에 의한 오차를 계산하여 오차의 감소폭이 미미해지는 시점까지 가중치를 반복 조정하는 방법을 사용하였다. 가중치를 조정함에 있어서는 단순히 오류가 발생한 셀의 전체 개수 혹은 면적에 초점을 두기 보다는 오차의 공간적인 군집을 고려하였다. 즉, 오류가 공간적으로 집중하는 국지적인 군집을 우선적으로 탐색하여, 해당 위치에서의 오차 발생에 기인여하는 변수들의 가중치를 조정한 후 모델링을 반복하였다. 한편 요인간 가중치의 경우 각 요인이 가질 수 있는 가중치 값의 범위를 미리 정의해두고, 각 요인간 가중치를 조합해가며 셀

그림 6. 밀도변화에 대한 관찰데이터(위)와 모델추정치(아래)의 시각적 비교

대셀 기반의 오차를 반복적으로 계산하는 방법을 사용하였다. 하지만 모델링 결과 분석을 셀대셀 비교에만 의존하는 방법은 한계가 있을 뿐 아니라(White, 2006), 위에서 기술한 다양한 방법론의 적용도 고려해야 하지만 본 논문에서는 이를 검토하지 못하였다.

2) 모델링 결과의 타당성 검토

이상의 모델링 방식을 통해 추정된 결과를 2004년의 관찰데이터와 비교함으로써 제안된 모델의 타당성을 검토하였다. 모델의 타당성을 검토하기 위해서는 시각적 비교, 셀대셀 비교, 블록대블록 비교를 사용하였다. 셀대셀 비교는 2004년의 셀들 중 모델을 통해 추정된 결과와 일치하는 셀의 비율 값 및 이와 관련된 Kappa 지수[5]를 사용하였다. 블록대블록 비교는 사례지역을 블록으로 구분하고 블록 단위로 추정치와 실제 값을 비교하였다. 용도의 경우 개별 블록의 용도별 구성비가 얼마나 유사한지, 밀도의 경우 블록별 개발밀도(용적률)가 얼마나 유사한지 비교하였다. 이는 셀 수준에서는 모델과 관찰데이터가 서로 일치하지 않더라도 블록 수준에서 서로 유사하다면 패턴에는 큰 차이가 없다는 가정을 근거로 하고 있다.

모델의 타당성을 검토하기 위해 먼저 시각적 비교를 수행하였다(그림 5, 그림 6). 우선 용도변화의 경우 그림 5에서 보듯이 경우 업무용과 상업용은 모델의 추정치와 관찰데이터가 시각적으로 상당히 유사함을 알 수

표 3. 용도변화 셀대셀 비교

(단위 : 개, %)

구분	업무용	상업용	제조용	주거용	관찰데이터 계
업무용	1,443 (67.5)	484 (22.6)	169 (7.9)	41 (1.9)	2,138 (100.0)
상업용	660 (13.3)	3,864 (77.6)	180 (3.6)	277 (5.6)	4,981 (100.0)
제조용	27 (3.5)	361 (47.4)	363 (47.6)	11 (1.4)	762 (100.0)
주거용	8 (1.0)	272 (34.4)	49 (6.2)	462 (58.4)	791 (100.0)
모델추정치 계	2,138	4,981	762	791	8,673

주 : 전체 일치율은 71%, Kappa 지수는 0.5를 나타냄.

있다. 반면 주거용 토지와 제조용 토지의 경우 관찰데이터 보다는 모델링 결과에 있어서 공간적 군집성이 다소 강하게 나타나고 있다. 즉, 모델추정치의 경우 작은 패치는 거의 사라지는 대신 큰 패치는 더욱 두드러져 보인다. 이는 모델이 데이터에 대한 일종의 평활(smoothing) 작용을 하기 때문으로 판단된다.

밀도변화의 경우는 그림 6에 제시되어 있는데, 상대적으로 밀도가 높은 지역은 모델에서도 밀도가 높게 나타나고 밀도가 낮은 지역은 모델에서도 밀도가 낮게 나타나 시각적 패턴에 있어서는 유사하지만 밀도의 크기에 있어서는 다소 차이가 있어 보인다. 값이 이산적일 뿐만 아니라 범위가 정해져 있는 용도변화와 달리 값이 연속적이며, 범위도 특정하기 어려운 양적인 수치 값을 직접적으로 추정해야 하는 밀도변화의 성격상 이러한 차이는 불가피할 것으로 판단된다. 또한 밀도와 같이 양과 관련된 지도의 경우 계급을 구분하는 방법과 계급의 수 등이 시각적 판단에 큰 영향을 미칠 수 있어 시각적 비교 보다는 패턴 비교가 더욱 필요하다.

시각적 비교에 이어 셀대셀 비교를 시도하였다. 용도변화에 대한 셀대셀 비교 결과는 표 3과 같다. 우선 전체적인 경향을 살펴보면, 공공용 토지를 제외한 전체 셀 중에서 관찰데이터와 모델추정치가 서로 일치한 비율을 나타내는 전체 일치율은 71%로 비교적 양호한 결과를 나타내었다. 이러한 일치율은 100m에 가까운 셀을 다루는 선행 연구들의 결과 보다 더 높은 값은 아니지만 선행 연구들의 경우 단위 셀이 상당히 커서 특수적인 혹은 이례적인 특성이 상당히 제거될 수 있는 상태에서 추정된 결과라는 점을 고려하면 상당히 유효한 수준이라고 할 수 있다. 셀대셀 일치율보다 엄격한 셀대셀 비교를 하는 Kappa 지수도 0.5로 비교적 양호한 값을 나타내고 있어 전반적으로 제안된 모델이 미시 수준의 토지이용 변화에 유효하게 적용될 수 있는 것으로 판단된다.

용도별로 추정 결과를 살펴보면, 상업용의 일치율(77.6%)이 가장 높게 나타나면서도 모든 용도에서 오차가 가장 높게 발생하는 용도 또한 상업용으로 나타났다. 관찰데이터를 기준으로 할 경우 업무용의 22.6%, 제조용의 47.4%, 주거용의 34.4%가 상업용도로 잘못 추정되었다. 상업용도를 기준으로 할 경우도 나머지 세 용도로 잘못 추정되는 경우가 골고루 나타나고 있어 상업용도를 보다 명확히 구분해줄 변수가 필요할 것으로 보인다. 하지만 이런 결과에는 상업용의 면적이 가장 넓고, 특정 위치에 집중하기 보다는 지역 내에 골고루 분산되는 특성을 보인다는 점도 밀접하게 관련되어 있을 것으로 생각된다.

밀도변화에 대해서도 셀대셀 비교를 시도하였으나 밀도 값 자체를 상호 비교하기 보다는 밀도변화가 일어난 셀의 위치 일치율을 살펴보았다. 관찰데이터에서 밀도 변화가 일어난 셀을 대상으로 모델추정치에서도 그 위치에서 밀도변화가 발생하였는지를 나타내는 밀도변화 위치 일치율을 계산해보면 58%로 상당히 양호한 결과를 보이고 있다. 하지만 용도에 따라 차이가 있

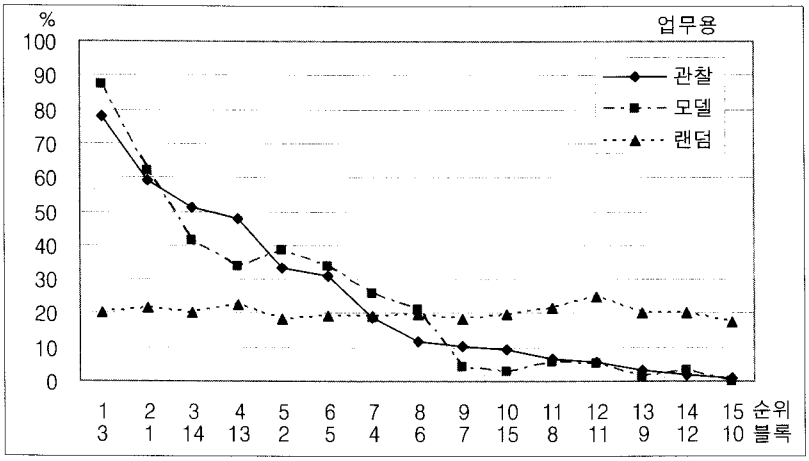

그림 7. 용도별 토지의 블록별 구성비 비교: 업무용의 예

주 : 관찰 값의 크기에 따라 블록을 순서대로 정렬하였음.

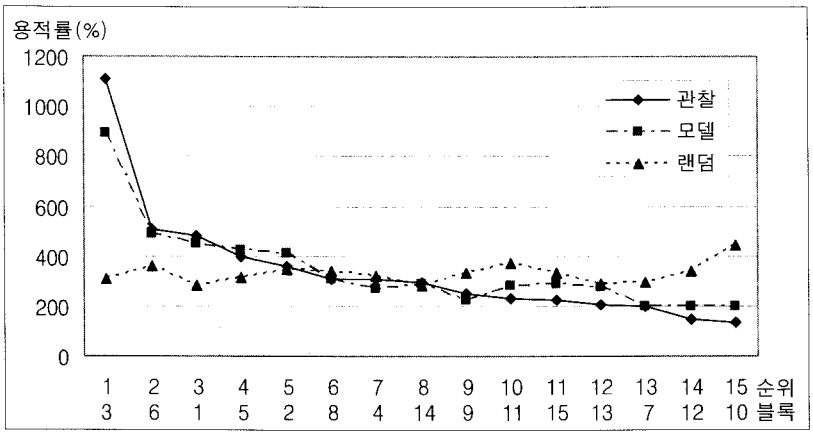

그림 8. 개발밀도(용적률)의 블록대블록 비교

주 : 관찰 값의 크기에 따라 블록을 순서대로 정렬하였음.

는데, 2000년대 초반의 용도를 기준으로 업무용의 경우는 전체 면적 중 70% 정도가 일치되고 있으나 주거용의 경우는 일치율이 30%에도 못 미쳐 상당히 낮게 나타나고 있어 보다 세밀한 검토가 필요한 것으로 보인다. 참고로 관찰데이터와 모델추정치에서 밀도 변화가 일어난 셀의 전체 면적은 동일하게 하였다.

셀대셀 비교에 이어 블록대블록 비교에서는 도로망을 기준으로 사례지역을 15개의 블록으로 구분하고 각 블록별로 모델추정치와 관찰데이터를 비교하였다. 블록대블록 비교의 경우 셀대셀 비교에서처럼 관찰데이터와 모델의 결과를 직접적으로 비교하는 것이 쉽지 않아 랜덤한 패턴을 임의로 만든 후 3자간의 비교를 통해 관찰데이터와 모델의 유사성을 간접적으로 비교하였다. 이 랜덤 패턴은 용도 및 밀도의 속성 값은 관찰데이터와 동일하지만 위치를 임의로 변화시킨 패턴이다.

우선 용도변화의 경우는 블록별로 용도별 구성비가 얼마나 유사한지를 비교하였다. 다시 말해 모든 블록

에 대해서 특정 용도가 차지하는 비중이 모델추정치와 관찰데이터에 간에 얼마나 유사한지를 비교하였다. 각 용도에 대해 블록별로 구성비를 비교한 결과 전체적으로 관찰데이터와 모델추정치가 상당히 유사한 것으로 나타났다(그림 7). 용도변화의 경우 관찰데이터에 비해 모델추정치에서 블록 간에 다소 편중 현상이 나타나고 있는데, 이는 전술한 바와 같이 모델링 과정에서의 평활 현상으로 공간적 군집성이 다소 강화되면서 특정 용도가 특정 블록에 실제 보다 더 많이 배분되었기 때문으로 판단된다.

밀도변화에 대해서도 15개 블록에 대해 상호비교를 시도하였으며, 그 결과는 용도 변화와 마찬가지로 관찰데이터와 모델추정치 간에 유사한 결과를 보였다(그림 8). 밀도 변화의 경우도 용도 변화와 마찬가지로 평활의 효과가 반영되어 보이는데, 그 현상은 용도와는 다르게 나타나고 있다. 즉, 밀도 변화의 경우 매우 높거나 낮은 값들이 주변으로 분산되는 효과를 가지면서 블록 수준에서도 밀도가 매우 높은 블록은 상대적으로 낮게, 밀도가 매우 낮은 지역은 상대적으로 높은 결과를 보였다.

5. 결론 및 토의

지금까지의 논의를 요약하면 다음과 같다. 본 연구에서는 현대 도시 관리의 주요 관심사인 개발밀도의 관리를 실증적 분석을 통해 지원할 수 있는 도구가 필요하며, 이를 CA 기반 도시 모델링 방법의 확장을 통해 개발하고자 하였다. 우선 CA 기반 도시모델링에 대한 선행연구에 대한 리뷰를 통해 그간의 모델이 국지적 변화를 유용하게 모델링함에도 불구하고 용도변화에 치중함으로써 국지적 밀도변화를 살펴볼 수 있도록 확장될 필요가 있음을 지적하였다. 이어 개발밀도를 고려한 CA 기반의 토지이용 변화 모델을 제안하였다.

제안된 모델은 거시적 측면과 미시적 측면에서 개발밀도를 명시적으로 고려하고자 하였는데, 구조적인 측면에서는 개발밀도를 고려한 총수요 및 평면 수요가 국지적 토지이용 변화를 제어하도록 하여 모델의 현실성을 높이고자 하였다. 개별 위치에서의 토지이용 변화는 토지이용제도, 접근성, 국지적 토지이용, 자체 특성, 랜덤 확률 등의 요인을 고려하여 추정하도록 하였는데, 용도변화는 물론 현대 도시에서 더욱 중요한 의미를 갖는 밀도변화를 동시에 살펴볼 수 있도록 개발하였다.

개발된 모델은 실제 사례지역인 서울시 도심부 일부 지역에 적용하여 모델을 보정하였고, 그 결과를 분석하여 모델의 타당성을 검토하였다. 그 결과 용도변화의 경우 모델의 추정치와 관찰데이터의 셀대셀 일치율이 71%에 달하며, 밀도 변화의 경우도 위치 일치율이 60%에 가깝게 나타났다. 또한 블록대블록 비교에서도 용도 변화 및 밀도 변화 모두 관찰데이터와 모델의 추정치가 상당히 유사하게 나타났다. 이상의 결과를 통해 본 연구를 통해 제안된 CA 기반의 토지이용 변화 모델이 개발밀도의 분포 및 변화를 유효하게 다룰 수 있는 도구가 될 수 있음을 확인하였다. 특히 개별 셀 단위의 밀도변화에 기초한 블록수준에서의 밀도변화 양상에 대한 탐색은 점점 고도화 되어 가는 현대 도시에서의 밀도 관리 정책에 유용한 시사를 제공할 것으로 판단된다.

하지만 본 연구의 한계 및 추후 연구 과제도 발견되었다. 우선 사용된 데이터의 공간적, 시간적 제약을 들 수 있다. 데이터 구득의 한계로 인해 모델이 적용된 공간적 범위가 도심의 일부 지역으로 제한되었으며, 시간적으로도 1984년과 2004년 두 시점의 데이터만 이용 가능해 모델의 일반화 가능성에 한계를 지니게 되었다. 특히 시간적 제약으로 인해 시기별로 토지이용 변화의 양상이 달라져가는 추세를 고려하기 어려운 형태로 설계되었다. 따라서 본 연구의 모델은 시점과 종점이 몇 개의 간격으로 구분될 수 있는 경우에도 적용될 수 있도록 확장될 필요가 있다. 토지이용 변화의 요인으로 고려한 변수의 한계도 지적할 수 있다. 이는 위에서 지적한 것과 한계와 매우 밀접하게 관련되어 있는 것으로서 토지이용 변화를 설명할 수 있는 변수들에 해당하는 데이터를 충분히 구득하지 못하여 모델에서 고려한 요인에도 일정한 한계를 지니게 되었다. 특히 미시적인 토지이용 변화를 위해서는 개별 건물이나 필지 수준의 데이터를 보다 충분히 구득하여 사용할

필요가 있을 것으로 생각된다.

그리고 토지이용 변화와 관련하여 본 연구에서 사용한 토지용도의 구분과 관련한 한계를 지적할 수 있다. 본 연구에서는 건축물의 주용도에 근거하여 토지용도를 구분하였으며, 한 공간 단위는 하나의 토지용도만을 갖도록 설계되었다. 하지만 실제의 토지이용은 한 단위 셀에 여러 기능이 혼합될 수 있으므로 혼합용도 혹은 복합용도에 대한 고려가 미비하다. 나아가 본 연구에서는 토지이용의 밀도를 고려하였으나, 이는 한 셀을 차지하는 단일 용도의 밀도 변화를 살펴본 것으로 한 셀이 수직적인 측면에서 용도가 분화될 수 있음을 고려하지 못하였다.

다음으로는 모델의 보정 절차와 관련된 연구의 필요성을 지적할 수 있다. 본 연구에서는 예비통계 분석 및 연구자의 판단과 시행착오를 통한 보정 절차를 주로 사용하였다. 하지만 이런 방식을 사용하게 되면 비교적 많은 시간이 소요되고 연구자의 주관적 판단이 개입된다는 한계를 지녀 보다 효과적이고 효율적인 보정 절차에 대한 지속적인 연구가 필요한데, 특히 최근의 신경망 이론이나 유전자 알고리즘 등의 연구와의 결합에 주목할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이에 덧붙여 모델의 타당성을 검토하는 방법의 경우 본 연구에서는 기존에 알려진 방법을 사용하였는데, 향후 모델의 타당성을 검토하는 방법 자체에 대한 부가적인 연구도 필요할 것으로 생각된다.

끝으로는 미래의 토지이용 변화에 대한 시뮬레이션의 필요성을 지적할 수 있다. 실제 도시를 대상으로 하는 경험 모델은 장래의 변화에 대응하기 위한 계획 수립을 지원할 수 있을 때 그 유용성이 극대화 될 수 있다. 계획 수립의 지원을 위해서는 미래의 여건 변화나 특정한 도시 정책을 적용함에 따라 나타나는 토지이용 변화를 시뮬레이션 할 필요가 있다. 이러한 연구는 미래에 대한 다양한 시나리오를 상정하게 되겠지만, 과거에서 현재까지의 변화를 다루는 모델에 근거하기 때문에 모델의 시계열적 타당성에 대한 검토가 함께 이루어져야 할 것이다.

註

1) 이런 류의 모델은 제약(constrained) 모델이라 불린다(White *et al.*, 1997).

2) 본 논문에서 총수요는 평면 상의 토지수요에 대비하여 개발밀도 혹은 건물의 연면적을 고려한 수요를 일컫는다.

3) 두 시점의 데이터 모두 단일 연도에 조사된 것은 아니지만 조사의 종점을 기준 연도로 사용하였다. 시계열 변화 모델의 매개변수 보정이나 타당성 검토, 미래 시뮬레이션 등을 수행하기 위해서는 가능한 한 많은 시점의 데이터가 필요하나 데이터 구득의 한계로 인해 두 시점 만의 데이터를 사용하였다.

4) 본 사례지역의 토지이용 데이터 원자료는 서울특별시(2004)에서 구축한 수치지도의 일부를 협조받은 것으로, 개별 건물 단위로 주 용도 정보를 기록하고 있다. 본 연구에서는 이를 토대로 10m×10m의 셀 단위로 토지이용 상태를 할당하였기 때문에 토지이용도가 원자료와 다소 차이가 있다. 또한 개발밀도는 건물의 연면적을 사용하였으며, 연면적 및 기타 속성 정보는 사례지역의 건축물 대장 데이터를 통해 구축하였다. 건축물 대장 데이터와 토지이용 원자료에 기록된 건축물이 상호 완벽하게 일치하지는 않는 문제가 있었으나 오류의 정도가 큰 영향을 미치지 않는다는 판단하에 사용하였다.

5) Cohen의 카파 지수(κ)를 사용하였다. 위성영상 분석 평가 등에 많이 활용되는 카파 지수는 전체 일치율 중에서 우연이 일치되는 경우를 배제하기 때문에 일반적인 셀대셀 일치율보다는 엄격하다. 카파 지수는 (관찰빈도-기대빈도)/(총빈도-기대빈도)로 계산되는데, 자세한 내용은 범주형 데이터 분석에 관련된 텍스트를 참조할 수 있다.

文獻

강영옥 · 박수홍, 2000, "서울대도시지역 도시성장 예측에 관한 연구," 대한지리학회, 35(4), 621-639.

김영환, 2003, "지속가능한 도시형태의 물리적 모형에 관한 연구," 국토연구, 38, 143-160.

문태훈, 2002, "도시동태모형을 이용한 도시성장관리정책의 평가," 한국시스템다이내믹스연구, 3(2), 5-27.

김황배 · 김동문, 2005, "GIS를 활용한 도시의 한계교통용량과 개발밀도 평가," 대한토목학회논문집, 25(3D-D), 395-402.

박재길 · 김의식 · 김상조 · 문홍길, 2001, 도시성장관리를 위한 개발밀도에 관한 연구, 국토연구원.

서울특별시, 2004, 서울 도심부 발전계획 부록3: 도심부 토지이용 및 경관변화.

신상영, 2005, 교통시설용량을 고려한 개발밀도 관리방안 연구, 서울시정개발연구원.

윤정미 · 이성호, 2006, "지역적 특성을 고려한 도시 성장 패턴에 관한 연구," 한국지리정보학회지, 9(1), 116-126.

이경춘, 1995, 도심상업지역의 입체적 입지특성 분석을 통한 용도결정에 관한 연구: 서울특별시 간선가로변 상업시설을 중심으로, 서울대학교 박사학위논문.

이동우, 2006, "스마트 성장 패러다임과 국토발전 1: 수도권의 계획적 관리와 스마트 성장," 국토, 299, 15-23.

이성호 · 윤정미 · 서경천 · 남광우 · 박상철, 2004, "셀룰라 오토마타를 이용한 김해시의 도시성장모형에 관한 연구: 1987~2001년을 중심으로," 한국지리정보학회지, 7(3), 118-125.

이소영, 1997, 도심상업활동의 입지 선택에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.

이왕건, 2003, "도시 성장 관리의 새로운 패러다임: 스마트 성장," 국토, 256, 81-89.

이왕건, 2006, "스마트 성장 패러다임과 국토발전 1: 스마트 성장을 위한 도시 개발의 방향," 국토, 299, 6-14.

이왕기, 2002, 도시밀도 관리정책의 실현성에 관한 연구: 일반주거지역을 중심으로, 인천발전연구원.

임은선 · 이종열 · 이희연, 2006, "도시성장관리를 위한 공간구조의 확산-압축 패턴 측정," 국토연구, 51, 223-247.

전유신 · 문태훈, 2003, "도시성장관리를 위한 개발밀도관리모델 수립에 관한 연구," 국토연구, 38, 41-61.

정재준, 2004, "상대생장과 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성장 예측 모델링: 대전광역시를 사례로," 한국지역개발학회지, 16(2), 1-14.

최대식 · 임창수, 2004, "밀도결합형 셀룰라 오토마타 모형의 개발: 서울대도시권 도시성장 시뮬레이션, 1972~2000," 국토계획, 39(5), 7-24.

최막중 · 김진유, 1999, "기반시설 제약조건하에서의 도시개발용량과 토지이용밀도," 국토계획, 34(3), 61-72.

최현선 · 권영섭, 2006, 스마트 성장과 비전 수립 과정: 플로리다 주 잭슨빌 시 사례, 국토연구원.

Allen, P.M., Sanglier, M., Engelen, G., and Boon, F., 1985, Towards a new synthesis in the modeling of evolving complex systems, *Environment and Planning B*, 12, 65-84.

Arai, T. and Akiyama, T., 2004, Empirical analysis for estimating land use transition potential functions: case in the Tokyo metropolitan region, *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, 65-84.

Barredo, J.I., Kasanko, M., McCormick, N., and Lavalle, C., 2003, Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata, *Landscape and Urban Planning*, 64, 145-160.

Barredo, J.I., Demicheli, L., Lavalle, C., Kasanko, M., and McCormick, N., 2004, Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria, *Environment and Planning B*, 32, 65-84.

Cheng, J. and Masser, I., 2003, Modelling urban growth patterns: a multiscale perspective, *Environment and Planning A*, 35, 679-704.

Couclelis, H., 1985, Cellular worlds, a framework for modelling micro-macro dynamics, *Environment and Planning A*, 17, 585-596.

Li, X. and Yeh, A.G., 2002, Neural-network-based cellular automata for simulating multiple landuse changes using GIS, *International Journal of Geographical Information Science*, 16(4), 323-343.

O'Sullivan, D. and Torrens, P. M., 2000, Cellular models of urban systems, *CASA Working Papers*, 22, Centre for Advanced Spatial Analysis, London, UK.

Straatman, B., White, R., and Engelen, G., 2004, Towards an automatic calibration procedure for constrained cellular automata, *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, 149-170.

Tobler, W. R., 1979, Cellular Geography, in Gale, S. and Olsson, G. (eds.), *Philosophy in Geography*, Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 379-386. (http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/

publications/pdf_docs/geog_analysis/CellularGeog.pdf)

Torrens, P. M., 2000, How cellular models of urban systems work, *CASA Working Papers*, 28, Centre for Advanced Spatial Analysis, London, UK.

Torrens, P. M., 2003, Cellular automata and multi-agent systems as planning support tools, in Geertman, S. and Stillwell, J.(eds.), *Planning Support Systems in Practice*, Berlin: Springer-Verlag, 205-222.

White, R., 2006, Pattern base map comparisons, *Journal of Geographical Systems*, 8, 145-164.

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*, 25, 1175-1199.

White, R. and Engelen, G., 1997, Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling, *Environment and Planning B*, 24, 235-246.

White, R. and Engelen, G., 2000, High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems, *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, 383-400.

White, R., Engelen, G., and Uijee, I., 1997, The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics, *Environment and Planning B*, 24, 323-343.

Wu, F., 1998, SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rule, *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 63-82.

교신: 조대헌, 431-712, 경기도 안양시 동안구 관양동 1591-6, 국토연구원 국토정보연구센터 (이메일: daeheon2@snu.ac.kr, 전화: 031-380-0648)

Correspondence: Daeheon Cho, 1591-6 Gwanyang-dong, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 431-712, Korea(e-mail: daeheon2@snu.ac.kr, phone: 82-31-380-0648)

최초투고일 08. 02. 26.
최종접수일 08. 03. 19.