

# 객체기반 셀룰러오토마타 모형을 이용한 하남시 토지이용변화 모의\*

김일권<sup>1</sup>·권혁수<sup>1\*</sup>

## Simulation of land use changes in Hanam city using an object-based cellular automata model\*

Il-Kwon KIM<sup>1</sup>·Hyuk-Soo KWON<sup>1\*</sup>

### 요 약

인간 활동에 의한 도시의 토지이용변화는 도시의 공간구조와 생태계에 영향을 미친다. 토지이용변화 패턴을 파악하고 미래의 토지이용변화를 모의하는 것은 지속가능한 도시 관리를 위해 필요하지만, 토지이용변화의 불확실성과 복잡성으로 인해서 이를 효과적으로 모의하기 어렵다. 셀룰러오토마타 모형은 도시토지이용변화에 널리 사용되는 모형으로, 격자기반의 변화를 모의한다. 하지만, 격자기반의 모의는 실제 토지이용변화 특성을 반영하기 어렵고, 토지이용의 파편화가 나타나는 한계가 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해 제작된 객체기반 셀룰러오토마타모형은 토지패치 객체별 변화를 모의한다. 본 연구는 하남시를 대상으로 객체기반 토지이용변화 모형을 제작하여 미래의 토지이용변화를 모의하였다. 제작된 모형의 정확도를 평가하는 성능지수는 24.1%로 평가되었다. 기준시나리오를 적용한 2038년의 토지이용변화 모의결과, 시가지는 16.4% 감소한 반면, 농경지는 9.0% 증가하였고, 초지는 19.3% 증가하였다. 개발시나리오의 경우 시가지는 22.4% 증가하였고, 농경지는 26.1% 감소한 반면, 산림과 초지는 큰 변화가 나타나지 않았다. 보전시나리오의 경우 시가지는 29.5%, 농경지는 8.8%감소하였고, 산림과 초지는 각각 6%, 42.8% 증가하였다. 본 모형은 실제 도시 토지이용변화를 효과적으로 모의하여 공간계획을 위한 의사결정지원도로 사용될 수 있다.

주요어 : 도시화, 토지이용변화, 객체기반모형, 셀룰러오토마타, 시나리오

### ABSTRACT

Urban land use changes by human activities affect spatial configuration of urban areas

2018년 12월 03일 접수 Received on December 03, 2018 / 2018년 12월 20일 수정 Revised on December 20, 2018 / 2018년 12월 21일 심사완료 Accepted on December 21, 2018

\* 본 연구는 국립생태원의 전략과제로 수행된 지역의 생태가치 평가 및 인식증진방안 연구사업(NIE-전략연구-2018-07)의 지원을 받아 수행되었음.

1 국립생태원 융합연구실 Bureau of Ecological Research, National Institute of Ecology

\* Corresponding Author E-mail : ulmus@nie.re.kr

and their surrounding ecosystems. Although it is necessary to identify patterns of urban land use changes and to simulate future changes for sustainable urban management, simulation of land use changes is still challenging due to their uncertainty and complexity. Cellular automata model is widely used to simulate urban land use changes based on cell-based approaches. However, cell-based models can not reflect features of actual land use changes and tend to simulate fragmented patterns. To solve these problems, object-based cellular automata models are developed, which simulate land use changes by land patches. This study simulate future land use changes in Hanam city using an object-based cellular automata model. Figure of merit of the model is 24.1%, which assess accuracy of the simulation results. When a baseline scenario was applied, urban decreased by 16.4% while agriculture land increased by 9.0% and grass increased by 19.3% in a simulation result of 2038 years. In an urban development scenario, urban increased by 22.4% and agriculture land decreased by 26.1% while forest and grass did not have significant changes. In a natural conservation scenario, urban decreased by 29.5% and agriculture land decreased by 8.8% while each forest and grass increased by 6% and 42.8%. The model can be useful to simulate realistic urban land use change effectively, and then, applied as a decision support tool for spatial planning.

*KEYWORDS* : Urbanization, Land use change, Object-based model, Cellular automata, Scenarios

## 서 론

토지이용변화는 자연생태계의 상태를 직접적으로 변화시켜 생태계가 제공하는 혜택의 공급에 영향을 주는 중요한 요인이다(Lawler *et al.*, 2014). 특히 도시화 현상은 도시 및 주변부의 토지이용변화를 발생시켜 자연생태계를 도시생태계로 변화시키고 주변생태계에 영향을 미친다. 도시지역의 토지이용변화패턴을 파악하고 이를 기반으로 미래의 토지이용변화를 모의하는 것은 환경 및 공간정책의 수립과정에서 보호 및 개발지역의 설정을 위한 중요한 의사결정지원 도구로 활용될 수 있다. 하지만, 도시지역의 토지이용변화현상의 불확실성과 복잡성으로 인해서 이를 효과적으로 모의하는데 한계가 있다.

공간모형에 기반한 토지이용변화모형은 토지이용변화의 시공간적인 변화를 파악하는데 용이하기 때문에 다양한 방법론을 적용한 토지이용변화모형들이 개발되고 적용되어 왔다. 셀룰러오토마타(Cellular Automata: CA), 행위자기반

모형(Agent-based model), 마르코프체인(Markov-chain) 모형, 시스템 다이내믹스 모형 등이 대표적인 토지이용변화모형으로 개발되어 왔다. 특히, 셀룰러오토마타모형은 대표적인 공간변화모형으로서 공간변화를 개체기반의 격자단위로 추정하여, 도시성장과 토지이용변화를 모의하는데 널리 사용되고 있다(Cho, 2008; Santé *et al.*, 2010). 특히 셀룰러오토마타모형을 이용한 도시토지이용변화는 모형의 투명성과 명료성을 가지고 있으며, GIS와 쉽게 통합될 수 있기에 고해상도 공간자료를 효율적으로 이용할 수 있다(Santé *et al.*, 2010). 그중에서도 로지스틱회귀분석을 이용한 셀룰러오토마타모형은 격자기반의 토지이용변화에 대한 변화요인들과 인접격자들의 상태들을 고려하여 미래의 토지이용변화를 예측하는데 널리 사용되어 왔다. 하지만, 셀룰러오토마타모형은 토지이용변화의 정책 혹은 사회경제적인 요인들을 반영하기 어렵기 때문에, 이를 보완하기 위해서 마르코프체인과 결합된 셀룰러오토마타모형(Verburg *et al.*, 2002), 그리고 시스템 다이내믹스 모형과 결합된 통합

모형(Han *et al.*, 2009)이 개발되어 토지이용 변화의 공간패턴을 반영하는 동시에 사회경제적인 요인들도 반영하고 있다.

국내에서는 셀룰러오토마타 모형을 이용하여 도시지역의 토지이용변화를 모의하는 연구들이 진행되었다. Lee *et al.*(2004)은 fuzzy함수에 기반한 전이규칙을 설정하여 김해시의 도시성장 과정에서 나타나는 토지이용변화를 모의하였다. Choi and Yim(2004)은 개발밀도를 고려하는 도시성장모형을 반영하는 셀룰러오토마타 모형을 개발하여 서울대도시권의 토지이용변화를 모의하였다. Cho(2008)는 도시지역의 개발밀도를 고려하여 토지이용에 대한 수요를 파악하고, 이를 반영한 셀룰러오토마타 모형을 개발하였다. 일부 연구들은 CLUE와 SLEUTH모형과 같은 범용 셀룰러오토마타 모형을 이용하여 시나리오별 미래의 토지이용변화를 모의하였다. Park and Ha(2013)는 기후변화 RCP 8.5시나리오를 SLEUTH모형에 적용하여 청주시의 토지이용변화를 모의하였다. Kim *et al.*(2015)은 IPCC의 기후변화시나리오를 이용하여 토지이용변화 시나리오를 개발하고, CLUE 모형을 이용하여 미래의 토지이용변화를 모의하였다. Lee *et al.*(2016)은 도시성장 시나리오를 적용하여 우리나라 전체의 토지이용변화를 모의하였다.

이와 같이 기존의 셀룰러오토마타 모형에서 격자기반의 모의과정을 통해서 실제의 토지이용변화를 반영할 수 있도록 모형개발과 시나리오적용을 시도해 왔다(Meentemeyer *et al.*, 2013). 하지만, 셀룰러오토마타 모형들은 격자기반의 변화를 반영하기 때문에 토지이용변화가 함께 진행되는 동일한 격자들로 이뤄진 패치(patch) 혹은 객체(object)기반의 토지피복변화를 반영하기 어렵고(Li *et al.*, 2014), 그로 인해 패치별로 제작된 국내의 토지피복도를 이용하여 토지이용을 모의하는 과정에서 한계가 나타난다. 특히, 도시지역의 경우 다양한 형태로 나타나는 토지이용 변화의 공간구조적인 특성을 반영하기 어려우며(Moghadam *et al.*, 2018), 자료의 해상도가 높고 공간적 범위가 작을 경우에 토지이용이 과편화되는 현상이 강하게 나타난다(Wang

and Marceau, 2013).

전통적인 셀룰러오토마타 모형이 현실적인 토지이용을 모의하는데 나타나는 한계를 보완하기 위해 객체기반의 모형을 개발하여 토지패치 혹은 필지별 토지이용변화를 모의하는 연구들이 진행되었다(Wang and Marceau, 2013). Landis(1994)는 환경, 시장, 정책요소들을 통합하여 구분된 폴리곤 단위별로 토지이용 변화를 모의하는 모형을 개발하였다. Torrens and Benson(2005)은 셀룰러오토마타와 행위자기반모형을 통합하여 빌딩, 도로, 공원과 같은 다양한 객체 단위에서 토지이용변화를 모의하는 모형을 개발하였다. Stevens *et al.*(2007)은 지적도상의 필지단위별로 전이확률과 규칙을 적용하여 토지이용변화를 모의하는 객체기반모형을 개발하였다. 최근에는 모의단위가 되는 객체들의 크기들을 변화시키고, 이들을 분할 및 통합하여 새로운 객체로 만들어 토지이용의 복잡성과 현실적인 측면을 강조하는 모형들도 개발되고 있다. Wang and Marceau(2013)은 고해상도자료를 이용하여 토지이용을 모의할 수 있는 객체기반 셀룰러오토마타 모형을 개발하였다. Meentemeyer *et al.*(2013)은 패치성장알고리즘을 이용하여 도시토지이용변화를 모의하는 셀룰러오토마타 모형을 개발하였다. Chen *et al.*(2014)은 도시패치의 변화를 반영하여 새롭게 도시화가 나타나는 지역들을 토지이용변화를 다양하게 모의할 수 있는 객체기반모형을 개발하였다. Moghadam *et al.*(2018)은 도시모형의 불확실성을 감소시키기 위해 도시패치의 성장을 반영하는 공간제한 요인들을 포함하는 객체기반모형을 개발하였다.

해외에서 객체기반 토지이용변화를 모의하려는 다양한 시도들이 존재하였지만, 국내에서 이를 적용한 연구는 제한적인 상황이다. 특히 고해상도영상자료에 통해서 패치단위로 제작되는 토지피복도와 다양한 공간정보들을 활용하여 미래의 토지이용변화를 모의하기 위해서는 객체기반의 토지이용변화모형의 개발과 적용이 필요하다. 본 연구는 도시토지이용변화를 모의하기 위해서 객체기반 셀룰러오토마타 모형을 개발하고, 이를 검증하고자 한다. 또한 경기도 하남시

를 대상으로 도시 토지이용변화에 영향을 줄 수 있는 시나리오를 개발하고, 이를 반영하는 미래의 토지이용변화를 모의하여 정책방향별 효과를 평가하고자 한다.

## 연구방법

### 1. 연구지역

1989년에 시로 승격된 하남시는 서울이 인접한 지리적 접근성과 교통의 편리함으로 성장의 잠재력이 높지만, 개발제한구역을 포함한 다양한 환경규제로 인해서 도시성장이 더디게 진행되었다. 하남시 대부분이 개발제한구역으로 묶여있기 때문에 하남시의 도시성장은 기존시가지를 중심으로 진행되었다. 하남시는 이러한 특징으로 인하여 인구증가와 도시성장이 급격하게 나타나지 않았다. 최근에는 서울 위성도시의 장점을 이용하여 대규모 주택단지를 건설하고, 스마트시티를 조성하는 등의 지속가능한 발전을 시도하고 있다. 그러므로 이 지역은 개발제한구역과 관련된 이슈들을 반영하여 토지이용변화를 모의하는 것은 지역의 개발 및 보전정책을 수립하는데 기여할 수 있기에 연구지역으로 선정하였다.

### 2. 토지이용변화 시나리오

시나리오의 개발과 적용은 토지이용변화모형에서 미래의 토지이용변화를 모의하는데 널리 사용되는데, 시나리오는 미래의 환경변화에 대한 대안의 효과를 제시하고, 불확실성을 파악하

여 의사결정과정에 기여한다(Verburg *et al.*, 2006). 토지이용변화 시나리오는 실제의 정책의 방향성을 반영하고, 현실적으로 실현가능한 미래의 변화를 모의할 수 있는 방향으로 설계되어야 한다. 하남시는 전체면적의 77% 이상이 개발제한구역으로 설정된 지역으로, 토지이용과 개발제한구역의 조정에 대한 수요가 높다(Byun *et al.*, 2013). 본 연구에서는 도시지역 성장과 녹지증대시나리오를 고려한 개발 및 보전시나리오를 설정하고 이를 기존의 토지이용변화모형결과와 비교하여 정책시나리오에 의한 토지이용변화를 비교하여 평가하였다.

토지이용 변화시나리오는 미래의 행동이 수행되거나 제약되는 조건을 규칙화하는 If-then 규칙을 이용하여 구현된다(Alcamo *et al.*, 2008). 도시개발 시나리오는 하남시의 도시개발이 계속되면서 도시지역이 성장하는 시나리오를 반영하였다. 개발 시나리오에서는 시가지가 식생피복(초지, 산림, 농경지)으로 변화되지 않는 규칙을 적용하여 시가지는 유지, 나대지로의 변화만 나타나는 것으로 가정하였다. 반면 개발제한 시나리오는 도시의 성장을 억제하고 녹지 확충을 위한 노력을 반영하는 시나리오를 설정하여 개발제한구역내의 산림을 훼손하지 않고, 기존의 나대지를 녹지로 변화시키는 도시녹지화 정책을 설정하였다. 그러므로 산림이 다른 피복으로 변하는 현상이 나타나지 않고, 새로운 나대지는 다음 모의과정에서 산림이나 초지 중에서 변화확률이 높은 피복으로 바뀌는 것을 규칙으로 설정하였다(표 1).

TABLE 1. Spatial allocation of scenario using IF-THEN rules

Scenario	Feature	IF-THEN rule
Current change (Baseline)	- Follow current land use change patterns	No rules
Urban development (Scenario 1)	- Urban growth due to development plans - Conversion of urban green spaces is not occurred in urban areas	① (IF) Urban → (THEN) No change to agriculture, forest, grass
Natural conservation (Scenario 2)	- Natural land covers within greenbelt are not converted to other covers - Barren areas are converted to natural land covers	① (IF) Forest and grass in greenbelt → (THEN) No change ② (IF) New barren → (THEN) Change to forest and grass

### 3. 토지이용변화모형

환경부 토지피복도는 위성영상자료와 함께 기존의 공간자료의 적용 및 현지조사를 통해서 객체기반의 토지이용현황을 제공한다. 2000년부터 제작된 중분류 토지피복도는 2007년, 2009년, 2013년에 갱신되면서 시계열적인 토지이용변화를 파악하기 용이하여 토지이용변화모형 개발에 활용하기 적절하다. 본 연구는 위성영상의 촬영 및 피복도 제작주기의 시간적 간격을 고려하여 2007년과 2013년을 기준으로 제작된 환경부 중분류 토지피복도를 이용하여 객체기반 토지이용변화모형을 개발하였다. 모형구동을 용이하게 하기 위하여 중분류로 제작된 피복유형을 대분류로 전환하여, 주요 5개 토지이용형태(시가지, 농경지, 산림, 초지, 나지)의 변화를 모의하는 객체기반 셀룰러오토마타모형을 개발하였다.

모형을 개발하기에 앞서 토지피복을 동일한 기준에 맞추기 위해 도시공원 지역들을 재분류하는 작업을 수행하였다. 대부분의 도시공원은 2007년 토지피복도에서는 문화, 체육, 휴양지역으로 구분되어 시가지·건조지역에 포함되지만, 2013년 토지피복도에서는 초지와 산림으로 분류된다. 이는 현재의 토지이용변화 패턴을 기반으로 미래의 토지이용변화를 모의하는 과정에서 시가지가 초지와 산림으로 변하는 확률을 과대 추정하는 문제를 발생시킨다. 이를 해결하기 위해 용도구역도를 이용하여 추출된 도시공원지역들을 초지로 변환시켜 2007년 토지피복도를 수정하였다.

셀룰러오토마타 기반의 토지이용변화모형은 해당 격자 고유의 변화확률, 주변부 토지이용밀도, 토지이용 제한요인을 종합하여 토지이용변화확률을 계산하고, 이를 기반으로 미래의 변화를 모의한다. 셀룰러오토마타 모형에서는 개별 격자들이 특정시점(t)의 토지피복 i가 j로 변화될 확률( $P_{ij}^t$ )을 계산하기 위해서 다음의 식이 이용된다(White and Engelen, 1993; Wu, 2002; Feng *et al.*, 2011).

$$P_{ij}^t = (P_I)_{ij} \times (P_\Omega)_{ij} \times con(\cdot) \times P_r \quad (1)$$

$(P_I)_{ij}$ 는 격자 고유의 변화확률로 토지피복변화가 해당지점의 환경변수들의 영향에 의해서 나타날 확률을 의미한다. 본 연구에서는 다중로지스틱회귀분석을 이용하여 하남시의 자연환경요인, 거리요인, 사회경제요인으로 구분된 환경변수들의 영향력을 평가하고, 이를 기반으로 격자 고유의 변화확률을 산정하였다. 자연환경요인인 고도와 경사는 기존의 연구에서 고려되는 변화요인으로 연구지역의 지형적인 특성을 반영한다. 고도와 경사는 30m격자크기의 DEM(Digital Elevation Model)에서 추출된 값을 이용하였다. 거리요인은 도로부터의 거리, 하천으로부터의 거리, 서울로부터의 거리로서, 특정요인들에 대한 물리적인 거리를 반영하였다. 이들은 ArcGIS의 spatial analyst 툴을 이용하여 해당지점으로부터의 거리를 산정하는 방법으로 추출되었다. 사회경제요인으로 인구요인을 설정하여, 하남시 인구의 공간분포를 100m 격자로 변환한 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 환경변수들을 정리하면 다음과 같다(표 2).

TABLE 2. Input variables to calculate local transitional probability

Type	Variable	Range
Topographic	Elevation	0 ~ 651 (m)
	Slope	0 ~ 46.37 (°)
	Distance to road	0 ~ 2296 (m)
Distance	Distance to stream	0 ~ 3565 (m)
	Distance to Seoul	0 ~ 9666 (m)
Social	Population	0 ~ 5977 (명)

$(P_\Omega)_{ij}$ 는 인접격자들의 토지이용변화를 반영한 값으로 해당피복단위의 주변지역의 토지이용현황 및 특정피복의 집중도를 반영하여 산정하였다. 특정한 토지이용의 집중도는 누적인자(enrichment factor)의 값을 적용하여, 해당객체의 주변부에 특정피복이 연구대상지역전체의 분포와 비교하여 집중된 수준을 정량적으로 평가한다(Verburg *et al.*, 2004). 누적인자를 구

하기 위해서 Verburg *et al.*(2004)이 제안한 다음의 식을 이용하였다.

$$F_{k,d,i} = \frac{n_{k,d,i}/n_{d,i}}{N_k/N} \quad (2)$$

$F_{k,d,i}$ 는 격자크기( $d$ )를 반영한 셀( $i$ )의 특정 피복( $k$ )에 대한 누적인자를 의미하는데, 이는 격자크기내의 특정격자( $n$ )의 전체 이웃격자 수( $n_{d,i}$ ) 대비 토지피복( $k$ )의 격자수( $n_{k,d,i}$ )의 값을 전체격자의 수( $N$ ) 대비 특정피복전체의 격자수( $N_k$ )의 비율로 나눈 값이다. 이는 간략히 전체 토지피복분포를 기준으로 일정격자 범위 안에서 나타나는 특정피복도의 상대적집중도를 의미한다. 많은 모형들이 주변부의 범위를 설정하기 위해서 Moore Neighborhood범위를 주변범위로 설정하고 있다(Liu *et al.*, 2008; Feng *et al.*, 2011; Liao *et al.*, 2016). 하지만, 본 연구에서는 모형의 편의성과 구동시간을 조절하기 위해서 Liu *et al.*(2008)에서 설정한 Circular Neighborhood의 값을 이용하여 토지집중도를 계산하였다.

$Con(.)$ 은 토지이용변화 제한요인으로서 특정 조건 혹은 임계점을 값을 이용하여 토지이용변화여부를 결정한다. 일반적으로 보존지역에서 시가지로의 변화 억제와 같은 제약요건으로 설정되며 특정한 피복변화가 불가능한 경우에 0으로, 가능한 경우에 1의 값을 가진다(Feng *et al.*, 2011; Liao *et al.*, 2016). 본 연구에서는 생태자연도 1등급지역을  $Con$ 으로 설정하여, 생태자연도 1등급지역 격자가 30% 이상을 차지하는 경우에는 토지이용변화가 나타나지 않는 것으로 가정하였다. 또한 중분류 상 도로와 교통시설로 분류되는 셀들은 다른 피복으로 변하지 않고 피복이 유지되는 것으로 제한하였다.

$P_r$ 은 확률교란(stochastic disturbance)을 의미하는 랜덤확률로서 모형내부의 변수에 포함되지 않기 때문에 측정이 어려운 변수들의 영향을 반영한다(Cho, 2008). 이 과정에서는 와이블분포(Weibull distribution)를 반영하는 합

수식으로 산정된 값을 모형의 교정과정에서 토지이용변화가 발생하는 임계점의 값을 설정하여 확률교란을 평가한다(Feng *et al.*, 2011). 본 연구에서도 모형의 교정과정에서 각 토지피복별 확률교란 값을 적용하여 각 피복 별 변화확률의 최댓값이 1이 되도록 설정하였다.

개별적으로 계산된 셀 단위의 전이확률은 객체별 토지이용변화를 모의하기 위해 객체 단위별 전이확률로 전환된다. 객체별 전이확률은 객체 패치 내부의 중심 셀의 전이확률을 객체의 전이확률로 이용하거나(Lu *et al.*, 2015), 개별 셀들의 전이확률의 평균값을 이용하여 산정된다(Li *et al.*, 2017). 또는 앞서 기술한 셀의 전이확률을 계산하는 과정을 객체단위로 동일하게 수행하여 객체별 전이확률이 계산되기도 한다(Yao *et al.*, 2017). 본 연구에서는 하나의 객체패치를 구성하는 개별 격자들의 전이확률 평균값을 해당 객체의 전이확률 평균값으로 산정하고, 이를 이용하여 미래의 토지이용변화를 모의하였다.

계산된 피복변화확률계산식을 바탕으로 객체기반 토지이용 변화를 모의하기 위해 NetLogo 5.3.1 소프트웨어(Wilensky, 1999)를 이용하여 격자기반의 셀룰러오토마타모형을 구현하였다. NetLogo는 자체 그래픽인터페이스를 통해서 모형의 결과물의 공간분포를 시각적으로 구현할 수 있고, 모형의 구축이 용이하기 때문에 셀룰러오토마타와 행위자기반의 토지이용변화모형 제작도구로 활용되고 있다. 본 연구에서 수행된 모형개발의 절차를 정리하면 다음과 같다(그림 1).

#### 4. 모형의 검증

모형의 결과물은 토지이용변화현상이 가지는 불확실성과 복잡성으로 인하여 현실세계의 토지이용변화를 평가하기 전에 모형결과물에 대한 검증이 요구된다(van Vilet *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017). 대부분의 토지이용변화모형의 검증은 모의된 토지피복도를 동일한 시기의 실제의 토지피복도와 비교하여 제안된 모형의 공간

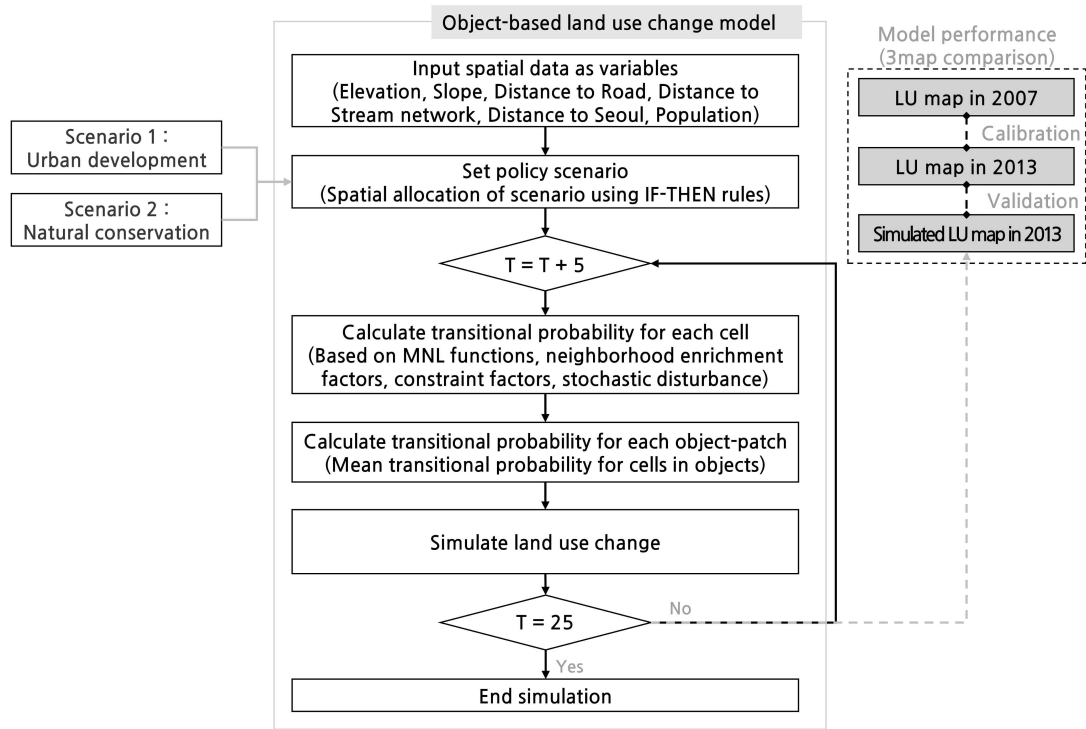


FIGURE 1. Framework of an object-based cellular automata land use change model developed in the study

상의 예측정확도를 통해서 실제의 토피복도와 유사한 정도를 평가한다. 이를 위해 2007년의 토지피복도를 이용하여 2013년의 토지피복변화를 모의한 후 2013년 실제토지피복도와 비교하였다. 앞서 기술한 바와 같이 2007년의 토지피복도는 토지피복분류 기준을 2013년에 맞게 재분류하였기 때문에 모형의 정확도를 검증하기에 적절하다. 3지도 비교법(three map comparison)은 두시기의 지도를 중첩시켜서 모형의 정확도를 평가하는 방법으로 레퍼런스1로 사용되는 두 시기(모형구동시점과 예측시점)의 실제 토지피복도와 예측된 토지피복도를 비교하고, 2가지의 모형일치 항목과 3가지의 오류항목을 구분하여 모형의 정확도를 평가한다(Pontius *et al.*, 2008). 모형일치항목은 변화가 없는 지점들(일치1)과 변화가 발생하는 지점(일치2)들이 정확하게 모의되었는지를 평가한다. 오류항목은 실제토지와

모의결과가 불일치하는 항목들로 변화가 없는 지점을 변화로 모의하거나(오류1), 변화가 발생한 지점을 변화가 없는 지역으로 모의하거나(오류2), 변화가 발생하였지만 잘못된 피복유형으로 모의된(오류3) 경우로 구분된다. 본 연구는 레퍼런스1은 2007년, 레퍼런스2는 2013년도의 토지피복도로 설정한 후, 2007년과 2013년의 토지이용변화양상을 2013년 모의피복도와 비교하여 실제변화지역과 모형의 예측변화지역의 일치여부를 비교하였다.

토지이용변화모형의 정확도는 성능지수(Figure of merit)를 이용하여 정량적으로 평가가 가능하다. 성능지수는 예측된 토지피복도와 실제의 토지피복도를 비교하여 토지이용변화모형의 예측정확도를 평가하는 지수로 0%~100% 사이의 값을 가지며, 성능지수가 높을수록 모형의 정확도도 높아진다(Pontius *et al.*, 2008). 성능지

수는 다음의 식을 이용하여 계산된다.

$$\text{성능지수} = B / (A + B + C + D) \quad (3)$$

B는 3지도 비교법에서 변화가 발생한 지점이 정확하게 모의된 “일치1”을 의미한다. A, C, D는 토지이용변화모형이 모의하는 변화와 실제의 토지이용을 비교하여 나타나는 오류들을 의미한다. A는 피복변화가 발생한 셀이 변화가 없는 셀로 모의된 “오류1”이며, C는 모형에서 변화된 피복의 유형이 다르게 모의되는 “오류3”이며, D는 피복변화가 없는 셀이 변화된 것으로 모의된 경우에 나타나는 “오류2”를 의미한다 (Pontius *et al.*, 2008). 3지도 비교법을 이용하여 토지이용변화모형의 모의결과들을 피복별로 비교된 결과를 가지고 성능지수 값을 계산하여 모형의 정확도를 정량적으로 평가하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 모형 검증과 성능평가

3지도 비교법을 이용하여 2013년 토지피복도와 모형의 모의결과를 검정하고, 성능지수를 다음과 같이 계산하였다(표 3). 모형과 실제의 토지피복에서 모두 변화가 없는 지점들은 전체 피복의 72.3%를 차지하며, 변화가 정확하게 모의된 지점들은 전체피복의 6.7%를 차지하였다. 변화가 없는 지점을 변화로 모의한 오류1은 8.1%, 변화가 있는 지점들을 변화가 없는 지점으로 모의한 오류2는 10.4%, 모의지역이 실제

와 다른 피복으로 모의된 오류3은 2.6%로 나타났다. 모형전체의 정확도를 평가하는 성능지수는 24.1%로 계산되었다. 전체적으로 오류2의 값이 가장 크게 나타나면서 실제의 토지이용변화보다 과소 모의되는 경향이 나타났다.

이를 피복별로 비교하면 54.0%의 성능지수 값을 가지는 나지의 모의정확도가 가장 높게 나타났다. 나지의 경우 토지이용변화가 나타나지 않는 일치1의 비율은 1.9%인 반면, 다른 피복으로 변하는 일치2의 값이 53.0%로 다른 피복으로의 모의결과에서 높은 정확도를 보였다. 시가지, 초지, 농지는 전체모형의 정확도는 비슷한 수준이지만, 모형의 오류특성은 각각 다르게 나타났다. 시가지는 변화가 없는 지역을 변화로 모의하는 오류1이 19.7%로 높은 반면, 농경지와 산림은 변화지역을 과소 추정하는 오류2가 각각 13.4%와 19.2%로 높게 나타났다. 산림은 일치1이 91.3%로 가장 변화가 적게 나타나는 피복이지만, 모형에서 일치2가 1.1%에 불과하여 성능지수가 12.2%로 가장 낮았다. 산림도 다른 피복들과 마찬가지로 변화지역을 과소 추정하는 오류2가 4.5%로 높게 나타났다.

또한 객체기반의 토지이용변화 모형과 비교한 결과, 객체기반 모형에서는 현재 토지객체 단위의 모의과정을 통해서 실제 구역단위의 토지이용모의가 가능하면서 토지이용이 파편화되는 문제가 감소하였다(그림 2). 기존의 셀룰러오토마타 모형을 이용하여 모의한 2023년의 토지이용(그림 2(B)) 결과에서는 시가지가 주로 위치한 지역에서 나지가 증가하는 현상이 파편화되면서

TABLE 3. Validation results of land use change simulation using three map comparison and figure of merit (A=Actual land use in 2007year, B=Actual land use in 2013year, C=Simulated land use in 2013year)

Land cover	Agree 1 (A=B=C)	Agree 2 (A±B=C)	Error 1 (A=B±C)	Error 2 (A=C±B)	Error 3 (A±B±C)	Figure of merit (%)
Urban	48.6%	11.6%	19.7%	15.3%	4.8%	22.6
Agriculture	56.9%	8.7%	2.4%	13.4%	0.5%	20.2
Forest	91.3%	1.1%	2.5%	4.5%	0.6%	12.2
Grass	57.9%	10.9%	5.7%	19.2%	6.3%	25.9
Barren	1.9%	53.0%	7.3%	26.2%	11.6%	54.0
Total	72.3%	6.7%	8.1%	10.4%	2.6%	24.1



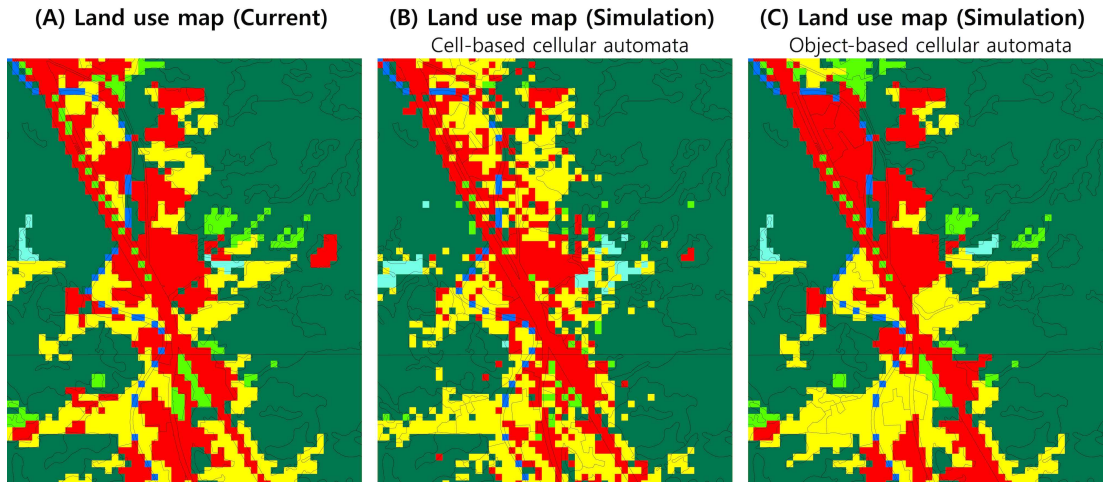


FIGURE 2. Comparison of current land use maps on 2013 years (A) with simulated results of cell-based (B) and object-based (C) cellular automata model

나타난다. 또한 일부 시가지의 격자사이에서 농업피복이 나타나기도 한다. 이와 달리 객체기반 모형을 이용한 2023년의 토지이용(그림 2(C))에서는 토지이용변화 파편화가 나타나지 않고, 객체 단위를 기준으로 토지이용변화가 모의되었다.

## 2. 하남시 토지이용변화 모의결과

검증과 보정을 완료한 객체기반 모형을 이용하여 2038년까지의 하남시의 토지이용변화를 100차례 모의한 결과들의 평균값을 미래의 가능한 토지이용변화로 파악하였다(표 4, 그림 3). 현재의 토지이용변화패턴을 반영하는 기준 시나리오에서 하남시의 시가지와 산림은 지속적으로 감소하였으며, 농지, 초지, 나지는 증가하였다. 하남시의 시가지는 2013년 대비 16.4% 감소하는데, 모의초기에는 감소폭이 크다가 시

간이 지날수록 감소폭이 점차 줄어들었다. 산림은 2%가 감소한 반면, 농경지는 9%가 증가하였다. 초지와 나지는 지속적으로 증가하였다. 모든 토지피복변화에서 시간이 지날수록 변화폭이 줄어드는 현상이 공통적으로 나타났다.

개발과 보전시나리오를 반영한 토지이용변화 모의결과는 기준시나리오와 다른 결과를 보여준다(그림 3). 개발시나리오를 반영할 경우, 기준 시나리오와 반대의 결과가 나타났다. 시가지는 22.4%만큼 증가하는 반면 농경지는 26.1%가 감소하였다. 산림의 감소폭은 기준시나리오와 유사한 수준으로 나타났다. 초지는 큰 변화가 나타나지 않았으며 나지는 기준시나리오와 유사하게 75%만큼 증가하였다. 보전시나리오의 경우 2038년 시가지는 29.5%가 감소하여 기준시나리오보다 감소폭이 크게 나타났다. 기준시나

TABLE 4. Mean simulation results of land use changes according to scenario types (unit: km<sup>2</sup>)

Land cover	2007year	2013year	2038year (Baseline)	2038year (Development)	2038year (Conservation)
Urban	18.59	16.08	13.44	19.70	11.34
Agriculture	12.60	15.02	16.37	11.09	13.70
Forest	46.44	46.03	45.13	44.92	48.81
Grass	4.29	6.32	7.55	6.74	9.03
Barren	2.71	1.33	2.30	2.34	1.92

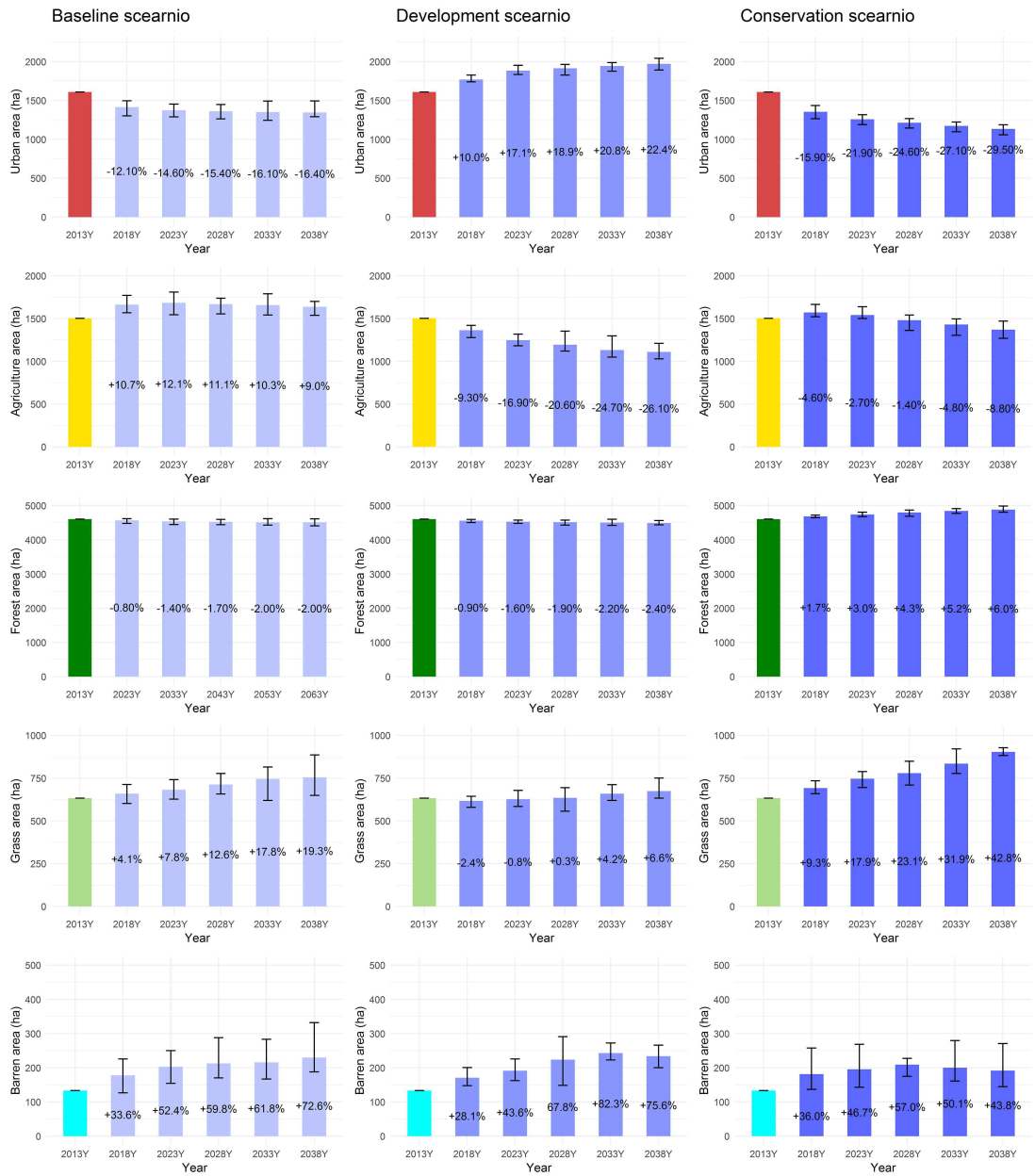


FIGURE 3. Mean simulation results of land use changes by scenario types (error bars indicate gaps between maximum and minimum values of simulation results)

리오와 개발시나리오에서 반대의 경향이 나타났던 농경지는 시가지와 마찬가지로 감소하였으나 (8.8%), 감소폭은 시가지보다 낮은 수준으로

나타났다. 녹지증대 및 보전정책의 효과로 인하여 산림은 6% 증가하고, 초지는 42.8%로 증가하였다. 반면 나지는 기준 및 개발시나리오보다

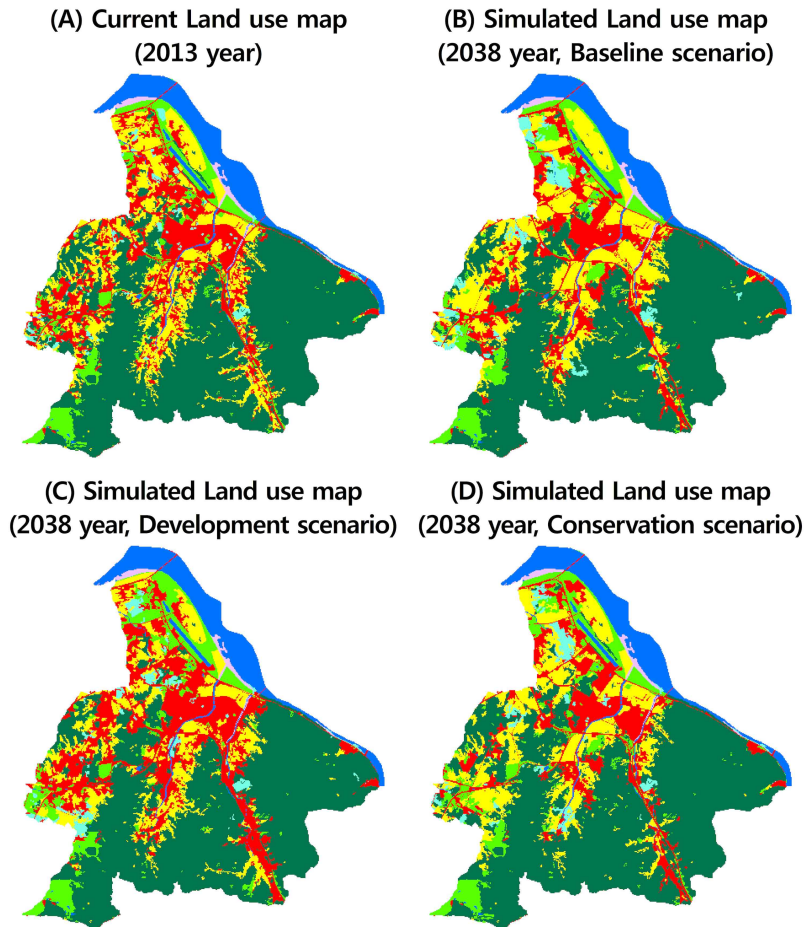


FIGURE 4. Simulation result of land use change using an object-based cellular automata model

낮은 수준에서 증가하였다.

또한 토지이용변화 모의시뮬레이션 결과 중에서 평균값에 가까운 결과들의 지도의 비교에서 2038년의 토지이용변화 모의결과에서는 토지피복들이 공간적으로 집적되는 형태로 변화가 나타났다(그림 4). 시가지의 확장은 도로축을 따라서 진행되는데, 개발시나리오(4(C))에서는 기존의 시가지들이 유지되면서 도로망을 따라서 시가지가 확장되었다. 보전시나리오의 경우 서울과 인접하지만 개발제한구역에 포함된 하남시 남서부지역에서 산림이 증가하고 시가지와 농경지가 감소하는 반면, 북부지역은 기준시나리오

와 유사하게 시가지, 나대지, 초지와 농경지가 혼합되어 나타난다.

## 고 찰

본 연구에서는 객체기반의 셀룰러오토마타 모형을 개발하고 하남시를 대상으로 모형의 정확도를 평가하고, 미래의 토지이용변화를 모의하였다. 제작한 객체기반의 셀룰러오토마타 모형의 정확도를 평가하는 성능지수의 값은 24.1%로 나타났다. 이는 Pontius *et al.*(2008)의 검증한 토지이용 변화모형들의 중간 값인 20% 수

준보다 높다. 국내에서 성능지수를 적용한 연구에서 Kim(2015)은 적용되는 토지이용 변화모형과 연구대상 지역에 따라서 편차가 크게 나타남을 보여준다. GEOMOD 모형은 성능지수가 26.5%와 29.5%로 모형의 정확도가 높고 지역별 편차가 작은 반면, GEB모형은 성능지수가 30.16%와 9.68%로 모형의 정확도의 편차가 나타났다. GEOMOD 모형을 이용하여 토지이용변화를 모의한 Kim(2010)의 성능지수는 6.57~8.0%로 낮게 나타났다. 다른 객체기반 모형과 비교해보면, Chen *et al.*(2014)과 Moghadam *et al.*(2018)의 연구의 객체기반모형의 성능지수는 각각 16.8%와 23.4%로 나타났다. 본 모형의 정확도는 다른 객체기반모형들과 비슷하고, 실제토지이용변화보다 과소 추정되는 경향도 유사하게 나타났다.

토지이용변화를 살펴보면 시가지와 농경지에서 변화가 모의시점과 시나리오에 따라서 큰 차이를 보인다. 이는 하남시의 주된 토지이용의 변화가 시가지와 농경지 사이에서 나타남을 보여준다. 도로와 하천을 따라서 진행되는 토지이용변화에서 주된 피복인 시가지와 농경지에서 시기별로 큰 변화가 나타나는 것은 입력 자료의 특성에서 기인한다. 2007년 토지피복도에서 농경지와 시가지가 군집되어 분포하는 특성을 보이지만, 2013년에는 군집경향이 약해지고, 시가지와 농경지의 변화가 크게 나타난다. 이러한 특성으로 인해 본 모형에서도 이러한 변화특성이 반영되어 시가지와 농경지의 변화가 큰 폭으로 나타났다.

객체기반 모형을 이용하여 연구지역의 토지이용변화를 모의하는데 몇 가지 한계가 존재한다. 본 연구에서 사용된 모형은 현재의 토지객체 단위별로 모의가 되며 토지객체의 병합과 분할과정을 반영하지 못하는 문제가 발생한다. 도시가 확장되는 시점에는 토지이용이 복잡해지면서 기존 객체패치들이 분할되거나, moving window를 이용한 패치들이 통합되는 객체기반 토지이용변화모형에 반영되기도 한다(Antrop, 2004; Chen *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2017). 이는 향후 다양한 알고리즘과 객체별 전이규칙을 세

우는 과정에서 최적의 토지이용을 위한 패치 분할과 병합과정을 추가하는 방향으로 보완이 필요하다. 또한 시가지와 산림과 같이 토지이용계 획상에서 중요한 피복의 정확도가 전체모형에 비해 낮게 나타나는 부분도 개선이 필요하다. 하남시의 경우 토지피복도상에서 2007년과 2013년 사이에 시가지가 감소하면서, 전체 모형에서도 시가지가 감소하였다. 하남시의 경우 2010년도 이전에는 개발이 더디게 진행되었지만, 2012년도 이후에는 서울과 인접한 지역과 신도시개발로 도시지역이 확대되었다. 그러므로 최근의 토지이용변화 패턴을 반영하는 토지피복도를 제작하고, 이를 통해서 미래의 변화를 모의할 필요가 있다. 이처럼 향후 변수선택과 모형설계 과정이 모형의 정확도를 개선하는 방향으로 진행되어야 모형의 활용성이 증대할 수 있다.

## 결론

본 연구는 도시지역의 토지이용변화 시나리오와 격자기반의 셀룰러오토마타모형을 이용하여 하남시의 도시성장과 녹지변화패턴을 모의하였다. 미래의 토지이용변화를 모의하기 위한 모형을 개발하였고 이를 통해서 미래에 실현가능한 정책시나리오를 적용하여 정책방향별 토지이용변화를 모의하였다. 실제토지이용변화를 모의하기에 앞서 모형의 정확도를 평가한 결과, 나지변화의 모형정확도가 높게 나타나고, 시가지, 농경지, 초지에서도 모형정확도가 적절한 수준으로 평가된 반면 산림지역의 변화에 대한 모형정확도는 낮게 나타났다. 제작된 모형을 토지이용변화 시나리오에 적용한 결과, 도시 확장 시나리오에서는 시가지가 증대하는 반면 농경지가 감소하였다. 시가지 확장은 주로 하남시의 중부와 남부지역에 위치한 하천과 도로주변에서 나타났다. 보전시나리오에서는 시가지가 큰 폭으로 감소하고, 농경지도 소규모 감소하는 반면 산림과 초지가 증가하는데, 기존 산림의 주변지역들이 산림으로 바뀌면서 산림이 증가하는 형태로 나타났다.

본 연구모형과 결과는 기존의 격자기반 토지

이용변화모형을 보완하는 객체기반 모형을 개발하고, 그 정확도와 효율성을 검증하였다. 필지기반의 토지이용변화를 모의하기 때문에 기존 모형이 가지는 파편화되는 토지이용변화패턴이 줄어들고, 공간정책을 반영하기 용이하다. 비록 객체기반 모형에서 객체들의 분할과 병합이 반영되지 못해서 현재의 필지구분에 따른 토지이용변화가 나타나고, 사용되는 변수들이 제한적이기 때문에 연구지역의 사회-경제적인 요인들을 충분히 반영하지 못하는 부분은 개선이 필요하다. 이러한 한계점들이 개선된다면 본 연구는 지역의 토지이용변화를 모의하고, 이를 통해서 나타날 수 있는 자연환경의 영향을 파악하는 연구들로 확장될 수 있다. 이를 통해서 도시 공간정책의 효과를 모의하여 정책수립과정에 실제적으로 기여할 수 있는 의사결정지원도구로 사용될 수 있다. **KAGIS**

## REFERENCES

- Alcamo, J., K. Kok, G. Busch and J. Priess. 2008. Searching for the future of land scenarios from the local to global scale. In: Alcamo, J.(Ed.), *Environmental futures: The practice of environmental scenario analysis*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Antrop, M. 2004. Landscape changes and the urbanization process in Europe. *Landscape and Urban Planning* 67: 9-26.
- Byun, G.I., C.S. Lee and C.H. Kim. 2013. A study of the change of land price according to the adjustment of development restriction area-focused on Hanam in Korea. *Journal of Korea Planning Association* 48(7):181-199. (변국일, 이창수, 김찬호. 2013. 개발제한구역 조정에 따른 준치지역 지가 변화에 관한 연구-하남시를 대상으로. *국토계획* 48(7):181-199).
- Chen, G., G.J. Hay, L.M. Carvalho and M.A. Wulder. 2012. Object-based change detection. *International Journal of Remote Sensing* 33:4434-4457.
- Chen, Y., X. Li, X. Liu and B. Ai. 2014. Modeling urban land-use dynamics in a fast developing city using the modified logistic automaton with a patch-based simulation strategy. *International Journal of Geographical Information Science* 28(2):234-255.
- Cho, D. 2008. Cellular automata based urban landuse change modeling considering development density. *Journal of the Korean Geographical Society* 43(1):117-133 (조대현. 2008. 개발밀도를 고려한 셀룰러 오토마타 기반의 도시 토지이용 변화 모델링. *대한지리학회지* 43(1):117-133).
- Choi, D.S. and C.H. Yim. 2004. Density-incorporated cellular automata modelling: simulation of the urban growth for Seoul metropolitan area. *Journal of Korea Planning Association* 39(5):7-24 (최대석, 임창호. 2004. 밀도결합형 셀룰러 오토마타 모형의 개발-서울대도시권 도시성장 시뮬레이션, 1972-2000. *국토계획* 39(5):7-24).
- Feng, Y., Y. Liu, X. Tong, M. Liu and S. Deng. 2011. Modeling dynamic urban growth using cellular automata and particle swarm optimization rules. *Landscape and Urban Planning* 102:188-196.
- Han, J., Y. Hayashi, X. Cao and H. Imura. 2009. Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning* 91:133-141.

- Kim, I., S. Arnhold, S. Ahn, Q.B. Le, S.J. Kim, S.J. Park and T. Koellner. 2017. Land use change and ecosystem services in mountainous watersheds: Predicting the consequences of environmental policies with cellular automata and hydrological modeling. *Environmental Modelling and Software*(in press).
- Kim, J., J. Park, I. Song, J. Song, S.M. Jun and M.S. Kang. 2015. Analysis of land use change using RCP-based Dyna-CLUE model in the Hwangguji River Watershed. *Journal of Korean Society of Rural Planning* 21(2):33-49 (김지혜, 박지훈, 송인홍, 송정현, 전상민, 강문성. 2015. RCP 시나리오 기반 Dyna-CLUE 모형을 이용한 황구지천 유역의 토지이용변화 분석. *농촌계획* 21(2):33-49).
- Kim, O. 2015. Limitation of applying land-change models for REDD reference level setting. *Journal of the Korean Geographical Society* 50(3):277-287 (김오석. 2015. REDD 기준선 설정 시 토지이용변화 예측모형 적용의 한계: 중국 운남성 시창만나 열대림 사례를 중심으로, *대한지리학회* 50(3):277-287).
- Landis, J. 1994. The California urban future model: a new generation of metropolitan simulation models. *Environment and Planning B* 21:399-420.
- Lawler, J.J., D.J. Lewis, E. Nelson, A.J. Plantinga, S. Polasky, J.C. Withey, D.P. Helmers, S. Martinuzzi, D. Pennington and V.C. Radeloff. 2014. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. *Proceedings of the National Academy of Science* 201405557.
- Lee, Y.G., Y.H. Cho and S.J. Kim. 2016. Prediction of land-use change based on urban growth scenario in South Korea using CLUE-s model. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 19(3):75-88 (이용관, 조영현, 김성준. 2016. 도시성장 시나리오와 CLUE-s 모형을 이용한 우리나라의 토지이용 변화 예측. *한국지리정보학회지* 19(3):75-88).
- Lee, S.H., J.M. Yun, K.C. Seo, K.W. Nam and S.C. Park. 2004. A study on the urban growth model of Gimhae city using cellular automata. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 7(3):118-125 (이성호, 윤정미, 서경천, 남광우, 박상철. 2004. 셀룰라 오토마타를 이용한 김해시의 도시성장모형에 관한 연구-1987~2001년을 중심으로. *한국지리정보학회지* 7(3):118-125).
- Liao, J., L. Tang, G. Shao, X. Su, D. Chen and T. Xu. 2016. Incorporation of extended neighborhood mechanisms and its impact on urban land-use cellular automata simulations. *Environmental Modelling and Software* 75:163-175.
- Liu, X., X. Li, S. Wu and T. Liu. 2008. Simulating complex urban development using kernel-based non-linear cellular automata. *Ecological Modeling* 211(1):169-181.
- Li, X., P. Gong, L. Yu and T. Hu. 2017. A segment derived patch-based logistic cellular automata for urban growth modeling with heuristic rules. *Computers, Environment and Urban Systems* 65:140-149.
- Lu, Y., M. Cao and L. Zhang. 2015. A Vector

- based cellular automata model for simulating urban land use change. *Chinese Geographical Science* 25(1):74-84.
- Meentemeyer, R.K., W. Tang, M.A. Dorning, J.B. Vogler, N. Cunniffe and A. Schoemaker. 2013. FUTURES: Multilevel simulations of emerging urban-rural landscape structure using a stochastic patch-growing algorithm. *Annals of the Association of American Geographers* 103(4):785-807.
- Moghadam S.A., M. Karimi and K. Habibi. 2018. Simulating urban growth in a megalopolitan area using a patch-based cellular automata. *Transactions in GIS* 22(1):249-268.
- Park, I.H. and S.R. Ha. 2013. Land use change prediction of Cheongju using SLEUTH model. *Journal of Environmental Impact Assessment* 22(1):109-116 (박인혁, 하성룡. 2013. SLEUTH모형을 이용한 청주시 토지이용변화 예측. *환경영향평가* 22(1):109-116).
- Polemans, L. and A. Van Rompaey. 2010. Complexity and performance of urban expansion models. *Computers, Environment and Urban Systems* 34(1):17-27.
- Pontius, R.G., W. Boersma, J.C. Castella, K. Clarke, T. Nijs, C. Dietzel, Z. Duan, E. Fotsing, N. Goldstein, K. Kok, E. Koomen, C.D. Lippitt, W. McConnell, A. Mohd Sood, B. Pijanowski, S. Pithadis, S. Sweeney, T.N. Trung, A.T. Veldkamp and P.H. Verburg. 2008. Comparing the input, output and validation maps for several models of land change. *The Annals of Regional Science* 42:11-37.
- Santé, I., A.M. García, D. Miranda and R. Crecente. 2010. Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: a review and analysis. *Landscape and Urban Planning* 96(2):108-122.
- Stevens, D., S. Dragicevic and K. Rothley. 2007. iCity: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling and Software* 22(6):761-773.
- Torrens, P.M. and I. Benenson. 2005. Geographic automata systems. *International Journal of Geographical Information Science* 19(4):385-412.
- van Vliet, J., A.K. Bregt, D.G. Brown, H. van Delden, S. Heckbert and P.H. Verburg. 2016. A review of current calibration and validation practices in land-use change modelling. *Environmental Modeling and Software* 82:174-182.
- Verburg, P.H., W. Soepboer, A. Veldkamp, R. Limpiada, V. Espaldon and S.S. Mastura. 2002. Modeling the spatial dynamic of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental Management* 30(3):391-405.
- Verburg, P.H., J.R.R. van Eck, T.C.M. de Nijs, H. Visser and K. de Jong. 2004. A method to analyze neighborhood characteristics of land use patterns. *Computers, Environment and Urban Systems* 28(6):667-690.
- Verburg, P.H., A. Veldkamp and M.D.A. Rounsevell. 2006. Scenario-based studies of future land use in Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114:1-6.
- Wang, F. and D.J. Marceau. 2013. A patch

- based cellular automaton for simulating land-use changes at fine spatial resolution. *Transactions in GIS* 17(6): 828-846.
- White, R. and G. Engelen. 1993. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A* 25:1175-1199.
- Wilensky, U. 1999. NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for connected learning and computer-based modelling, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- Wu, F. 2002. Calibration of stochastic cellular automata: The application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science* 16(8):795-818.
- Yao, Y., X. Liu, X. Li, P. Liu, Y. Hong, Y. Zhang and K. Mai. 2017. Simulating urban land-use changes at a large scale by integrating dynamic land parcel subdivision and vector-based cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science* 31(12): 2452-2479. **KAGIS**