

사회경제 경로 시나리오에 따른 토지이용 변화 시뮬레이션*

김호용^{1*}

Simulation of Land Use Change by Storylines of Shared Socio-Economic Reference Pathways*

Ho-Yong KIM^{1*}

요 약

본 연구는 저탄소 기후변화 적응 대책 수립에 활용되는 기후변화 취약성 평가에 적용하기 위하여 사회경제 발전 경로(SSP)에 대한 스토리라인을 개발하고 시나리오별 토지이용변화를 시뮬레이션 하였다. 연구는 크게 3단계로 진행하였다. 첫째, 과거 데이터를 이용하여 셀룰라 오토마타(CA) 모델링을 수행한 후 기준년과 시뮬레이션 결과를 비교하여 지역별 특성에 맞는 전이규칙을 도출하였다. 둘째, SSP에 대한 토지이용 변화 가정을 수립하여 세 가지의 시나리오를 설정하였다. SSP1은 지속가능성에 대한 시나리오로 압축도시로의 발전을, SSP2는 현재 상황을 유지하는 중도의 발전을, SSP3는 분열된 사회로 난개발을 가정하였다. 마지막으로, CA 모델링에 SSP 시나리오를 결합하여 권역별 토지이용 변화를 예측하였다. 분석결과를 SSP 시나리오별로 살펴보면 SSP1은 2020년, SSP2는 2030년까지 도시 면적 비율이 소폭 증가하다가 더 이상의 변화가 나타나지 않았으나, 낮은 수준의 도시계획을 가정한 SSP3에서는 도시 면적 비율이 2050년까지 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 토지이용 변화에 대한 결과는 합리적 기후정책의 의사결정에 기여할 수 있을 것이며, 공간적 상세화로 도출된 시뮬레이션 결과는 취약성 평가에 일괄 적용함으로써 기후변화 적응 정책 우선순위 선정에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 기후변화, 사회경제 발전 경로, 셀룰라 오토마타, 토지이용, 시뮬레이션

ABSTRACT

In an effort to establish adaptive measures for low carbon use and climate change, this study developed storylines for shared socio-economic reference pathways(SSP) and simulated change in land use for each storyline. First, cellular automata modeling was performed using past data, and a transition rule for the local characteristics of each

2015년 7월 16일 접수 Received on July 16, 2015 / 2015년 9월 1일 수정 Revised on September 1, 2015 / 2016년 3월 30일 심사완료 Accepted on March 30, 2016

* 본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임(2013001310002).
1 동아대학교 도시계획공학과 Dept. of Urban Planning and Engineering, Dong-A University
※ Corresponding Author E-mail : hykim@dau.ac.kr

planning area under study was derived by comparing with the results of the base year. Second, three storylines were formulated based on the hypothesized change in land use for the SSP. SSP1, the scenario for sustainability, assumed that the land was developed into a compact city, SSP2 assumed the development of a road through the middle of the land while maintaining the current situation, and SSP3 assumed unsustainable development into a fragmented world. Third, change in land use depending on planning area was predicted by integrating the SSP scenarios with cellular automata(CA) modeling. According to the results of analysis using the SSP scenarios, the urban area ratio increased slightly up to 2020 in SSP1 and up to 2030 in SSP2 and did not change any more subsequently, but it increased continuously until 2050 in SSP3 that assumed low level urban planning. These results on change in land use are expected to contribute towards making reasonable decisions and policies on climate change, and the outcomes of simulation derived from spatial downscaling, if applied to vulnerability assessment, will be useful to set the priority of policies on climate change adaptation.

KEYWORDS : *Climate Change, Shared Socio-Economic Path, Cellular Automata, Land Use, Simulation*

서론

최근 온실효과에 의한 기후의 이상 현상인 기후변화로 인하여 서울 우면산 산사태와 강남 침수피해 등 자연 재해가 점차 대형화·다양화되고 있으며, 전 세계적으로도 과거에 유례가 드문 초대형 홍수와 같은 재해가 발생하고 있다(KRIHS, 2013). 이에 세계적으로 기후변화의 영향과 피해를 줄이기 위한 대응노력이 활발히 진행되고 있으며, 기후 변화와 관련된 전 지구적 위험을 평가하고 국제적 대책을 마련하기 위해 유엔 산하에 기후변화에 관한 정부 간 위원회(IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change)가 설립되었다.

장기간에 걸친 기후변화의 대응방안으로 과거에는 기후변화 완화(mitigation)에 집중되다가 2000년대 이후 적응(adaptation)으로 변화되고 있으며, 미래의 기후변화 적응대책 수립을 위해서는 시나리오의 적용이 요구된다. IPCC 5차 평가 보고서(2014)에 의하면 21세기말 지구의 평균기온과 해수면은 더 상승할 것으로 전망하고 있으며, 기존의 시나리오를 대신하여 대표농도경로(RCP, Representative Concentration

Pathways)를 새로운 시나리오로 사용하고 있다. 이에 우리나라에서도 2011년부터 온실가스 감축 정책에 따라 RCP 시나리오를 도입하고 있다.

이와 같이 저탄소 정책개발이 진행되는 가운데 전 세계적으로 온실가스 감축 시나리오와 연계한 사회경제 변화 시나리오 개발이 매우 활발하게 진행되고 있다. 대표적으로 기후변화 통합 취약성 평가에 적용할 수 있는 사회경제 시나리오의 개발을 위한 분석요소인 공통 사회경제 경로(SSP, Shared Socio-economic reference Pathways) 및 각기 다른 지역의 적응 및 감축 정책의 전략적 비교를 가능하게 하는 정책 가정(SPA, Shared climate Policy Assumption)을 연구 중에 있다.

우리나라에서도 국가 기후변화 적응 대책으로 광역지방자치단체에서 취약계층, 취약지역 등 지역적 특성을 고려하여 기후변화적응 세부 시행계획의 작성이 요구되고 있으며, 이를 위하여 기후변화 취약성 평가를 실시하여 그에 적합한 적응대책을 수립하고 있다. 하지만 국내 기후변화와 관련된 대부분의 연구는 기후 요소에 집중되어 있으며, 광역시도별 기후변화 자료는 통계적 기법에 의해 1km 격자 단위로 공간이 상세화되어 있으나 기후변화와 함께 사용

가능한 공간 해상도의 SSP 시나리오는 존재하지 않는 실정이다. 이러한 실정으로 인해 기후 변화 취약성 평가에 있어 기후 시나리오는 일괄적으로 적용되는 반면 사회경제 변수는 현재의 값을 그대로 사용하거나 연구자가 임의로 적용하는 문제점을 야기하고 있다(KEI, 2014).

저탄소 기후변화 적응을 위해서는 기후변화 시나리오와 연계할 수 있는 사회경제 경로 시나리오에 따른 사회경제 변수의 예측 자료가 필요하다. 특히, 토지이용은 인구, 경제와 함께 사회경제적 시나리오에서 주요한 요소 중 하나이며, 기후변화와 함께 환경 변화에 영향을 주는 대표적인 인자이다. 따라서 본 연구는 저탄소 기후변화 적응 대책 수립에 활용되는 기후변화 취약성 평가에 체계적으로 적용하기 위하여 SSP 시나리오에 따른 토지이용변화를 예측하고자 한다.

기후변화 취약성 평가에서 기후자료는 공간이 상세화되어 있으므로, 같이 사용되는 SSP 시나리오의 자료도 같은 집계단위로 구축되어져야 한다. 따라서 토지이용 변화의 예측 값을 도출하기 위해서는 시간과 공간에 대한 통합적 접근방법이 필요하다. 토지이용의 변화는 도시 성장과 밀접한 관련이 있으며, 산업화와 함께 급속한 도시성장이 진행된 1950년대 이후 많은 학자들이 토지이용의 특성분석 및 시뮬레이션 모델 개발을 위한 다양한 시도와 노력들이 있어왔다.

토지이용 변화 예측과 관련한 연구는 크게 세 가지 모델을 바탕으로 이루어졌다. 첫 번째는 도시 내 토지이용에 초점을 맞추는 라우리 모형(Lowry model)으로 주거인구 및 고용인구의 공간분포 변화를 중심으로 사용된다. 두 번째는 라우리 모형과 접근방식과는 대별되는 EMPIRIC 모형으로 과거의 도시발전양상과 외부적으로 추정된 지역성장 등을 토대로 발전패턴을 예측하는데 사용된다(Yun, 2002). 마지막으로 본 연구에서 사용하고자 하는 Cellular Automata(이하 CA)는 공간 변화 예측을 위한 대표적인 GIS 모델링 기법으로 1940년대 미국 로스앨러모스 국립연구소에서 John Von Newman과

Stanislaw Ulman에 의해 고안된 후, 다양한 동적 현상을 연구하는 데 활용되어 왔다. 특히, 본 연구의 목적과 같이 연구자가 원하는 공간 해상도의 값으로 토지이용의 변화를 예측하는데 유용하다.

토지이용 분야에 CA를 적용한 연구로 White and Engelen(1993)의 연구를 들 수 있는데, 이 연구에서는 셀 상태를 공터, 주택지, 공업지, 상업지의 4개로 정의하여 도시적 토지이용간의 변화를 시뮬레이션 하였다. 이들의 1997년 연구에서는 지역 경제와 인구에 대한 비공간적 모델로 구성된 CA를 기초로 모델을 구축하여 CA가 토지이용 패턴 예측에만 유용한 것이 아니라 지역적 환경인자 영향의 모델링에도 유용하다고 주장하였다. Batty and Xie(1994)는 처음으로 도시성장 모델링에 CA개념을 도입하여, 도시 시뮬레이션을 위한 CA모델을 제시하였다. 이 연구에서 프랙탈 이론에 근거하여 도시 성장에 따른 도시형태의 기하학적 특성을 밝히려 하였다.

지역들은 저마다 다른 토지이용과 지역특성으로 인해 지역적 조건이나 성장의 형태와 패턴이 다르다. 따라서 각 지역에 적합한 네이버후드 및 전이규칙을 설정함으로써 보다 지역별로 적합하고 정확한 토지이용 변화 예측이 필요하다. 우리나라에서는 서울·부산과 같은 대도시를 대상으로 CA기법을 이용하여 도시 성장에 관한 연구를 수행하였다(Jung, 2001; Yun, 2002). 하지만 우리나라 전체를 대상으로 한 연구는 미미한 실정이며, 특히 SSP 시나리오를 적용한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기후변화에 대응하기 위하여 사회경제 경로에 대한 시나리오를 개발하고 지역적 특성을 고려하여 SSP 시나리오에 따른 토지이용변화를 시뮬레이션 하고자 한다.

이론적 고찰

1. 셀룰라 오토마타(CA)

도시계획분야에서 Tobler(1979)에 의해 최

초로 지리학적 모델링에 적용된 CA는 격자 공간상의 cell들이 일정한 전이규칙(transition rule)을 따라 다음 상태로 변환되며, 이 과정이 지속적으로 반복되면서 일종의 자기조직화(self-organization)를 이룬다는 개념이다. CA 모델은 셀룰라 공간(cellular space), 상태, 네이버후드, 전이규칙 그리고 시간으로 구성되고 2차원 그리드 셀을 기본으로 하고 있다. 시간 t 에서의 셀의 상태와 네이버후드의 상태 함수, 그리고 전이규칙에 따라서 $t+1$ 시점의 셀 상태로 되는 셀룰라 오토마타 기본구조는 다음 식 (1)과 같은 함수 형태로 표현할 수 있다(Yun, 2002).

$$S_{ij}^{t+1} = f(S_{ij}^t, \Omega_{ij}^t, T^t) \quad (1)$$

여기서

S_{ij}^{t+1} : 시간 $t+1$ 에 대한 ij 의 상태

S_{ij}^t : 시간 t 에 대한 ij 의 상태

Ω_{ij}^t : ij 의 네이버후드에 대한 상태

T^t : 전이규칙을 정의한 함수

이러한 간단한 규칙을 기반으로 하는 기본적인 CA 정의를 살펴보면 식 (2)와 같으며 (Batty and Xie, 1997), IF, THEN, ELSE와 같은 논리적 선언(statement)과 AND, OR 등의 논리적 연산(logical operation)등을 이용해 이루어짐을 알 수 있다(Takeyama, 1996).

IF any cell $\{x \pm 1, y \pm 1\}$ is already developed

THEN

$$P_d\{x,y\} = \sum_{\{i,j\} \in \Omega} P_d\{i,j\} / 8 \quad \& \quad (2)$$

IF $P_d\{x,y\} >$ some threshold value

THEN cell $\{x,y\}$ is developed with some other probability $\rho\{x,y\}$

$P_d\{x,y\}$: 셀 $\{x,y\}$ 에 대한 개발 가능성

$\{i,j\}$: 자신을 포함한 네이버후드 내의 모든 셀

구성요소를 바탕으로 CA 모델은 임의의 시점에서 임의 셀의 상태가 이웃하는 네이버후드 상태에 따라서 변화하며, 정해진 전이규칙에 따라 새로운 시점의 상태로 변하게 되는 연산을 반복적으로 실행하는 원리를 통해 현상을 모델링하게 된다(Jung, 2001). 이러한 CA는 본질적으로 공간을 다룬다는 것과 간단한 규칙으로 복잡한 형태를 만들어 낼 수 있다는 점에서 동적이고 복잡한 토지이용 변화를 시뮬레이션 하는데 유용하다.

2. 사회경제 발전 경로(SSP)

기후변화 정책은 크게 완화와 적응으로 구분된다. 기후변화 완화는 온실가스 흡수원을 확충하거나 온실가스 발생원을 줄이기 위한 인위적인 개입을 의미하며, 적응은 현재 나타나고 있거나 미래에 나타날 기후변화의 영향에 대해 자연적, 인위적 시스템이 조절을 통해 피해를 줄이고 나아가 유익한 기회로 활용하는 것이다(Koh and Kim, 2013). RCP와 함께 미래 시나리오를 구성하는 하나의 축인 사회경제 발전 경로(SSP) 시나리오는 국가별 사회경제의 변화와 정책기술을 조합하여 변화를 전망한 사회경제 시나리오로, 기후변화 정책을 포함해서는 안 되고 기후변화가 사회에 미치는 영향은 고려되지 않는 것으로 가정한다. SSP 시나리오를 구축하기 위해서는 기후정책이 포함되지 않는다는 가정 하에서 SSP를 바탕으로 한 기준 시나리오(reference scenario)와 주어진 RCP 수준에 도달하기 위해 요구되는 기후 정책들을 함께 고려한 시나리오를 폭 넓게 검토하는 것이 바람직하다(KEI, 2014).

공간적으로 구분된 SSP 시나리오의 범위를 도식화하면 그림 1과 같다. 그림에서 x축은 적응에 대한 사회경제적 부담을 의미하고, y축은 완화에 대한 사회경제적 부담을 의미한다. 가장

연구방법

1. 분석방법 설정

SSP 시나리오에 따른 토지이용 변화를 시뮬레이션하기 위해 본 연구에서는 시간 및 공간 변화 모델링이 가능한 CA 모델을 적용하였다. 분석은 크게 세 단계로 진행하였다.

첫 번째 단계는 토지이용변화를 예측하기 위하여 지역별 토지이용 변화특성을 도출하는 단계로 과거 데이터를 이용하여 여러 가지 대안으로 CA 모델링을 수행한 이후 지역별 특성에 맞는 전이규칙을 선정하였다. 두 번째 단계는 SSP 시나리오를 개발하는 단계로 SSP에 대한 토지이용 변화 가정을 수립하여 세 가지의 시나리오를 설정하였다. 마지막 단계는 SSP 시나리오에 따라 지역별 특성에 맞는 전이규칙을 조정·적용함으로써 미래 토지이용 변화를 예측하였다.

연구의 시간적 범위는 지역별 토지이용 변화 특성 도출을 위한 시뮬레이션의 시간적 범위와 사회경제적 시나리오를 적용하여 미래의 토지이용 변화 예측을 위한 시간적 범위를 다르게 설정하였다. 먼저, 토지이용 변화 특성을 도출하기 위한 시뮬레이션의 시간적 범위는 데이터의 획득 및 분석 결과의 비교검토 가능성을 고려하여 2000년과 2010년 데이터를 활용하였다. 시뮬레이션은 2000년 데이터를 기준 연도로 설정하여 여러 가지 대안으로 CA 시뮬레이션을 수행한 후, 2010년 데이터와의 민감도 분석을 통하여 지역별로 가장 적합한 변화 패턴을 도출하였다. 두 번째, 사회경제적 시나리오를 적용하여 미래의 토지이용 변화 예측을 위한 시간적 범위는 2010년 데이터를 기준 연도로 설정하고 지역적 특성에 맞는 전이규칙을 SSP 시나리오에 따라 조정 적용함으로써 2050년까지 10년 단위 변화를 예측하였다.

공간적 범위는 데이터의 왜곡이 발생하는 군사분계선 인근 일부 지역을 제외한 전국을 대상으로 하였다. 공간적 범위 전체를 대상으로 CA 시뮬레이션 하는 것은 데이터의 용량 및

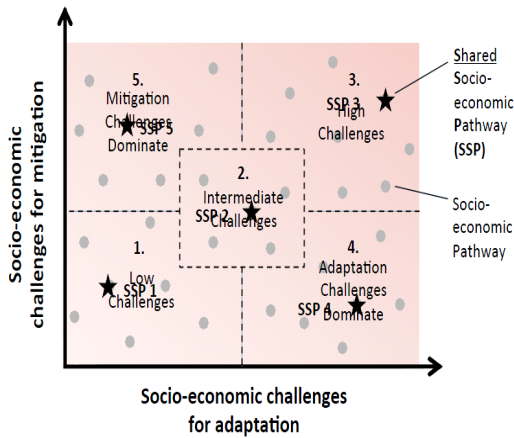


FIGURE 1. Logic of shared socio-economic reference pathway (Source: O'Neill *et al.*, 2014)

왼쪽 아래에 있는 SSP1은 적응과 완화의 부담이 모두 낮은 미래를 우측 상단의 SSP3는 적응과 완화의 부담이 모두 높은 미래상을 설명한다.

SSP 시나리오(SSPs)에서 ‘s’ 는 시나리오의 수로서 시나리오를 적용하는 기관이나 국가에서 가장 적절한 숫자와 특징이 과학자 집단에 의해 결정되도록 남겨두기 위한 목적으로 만들어진 것이다. Kriegler *et al.*(2010)은 전문가들의 발표와 토론을 통하여 도출한 인구, 인적자원, 경제, 기술 등의 주요요소를 바탕으로 기본 SSPs를 정리하였으며, 작성된 5개의 SSPs는 다음과 같다. SP1은 지속가능성(Sustainability), SSP2는 중도(Middle of the road) 또는 현재 체제 유지, SSP3는 난개발과 같은 분열된 세계(Fragmented World), SSP4는 불균등(Inequality) 또는 불공평한 세계, 마지막 SSP5는 관례적인 발전(Conventional development)으로 정의하였다. 본 연구에서는 미래의 극단적인 사회상에 대한 비교가 가능하도록 SSP1, SSP2, SSP3에 대한 시나리오를 적용하였다.

컴퓨터 처리능력 상에 한계가 있다. 따라서 연구 범위를 통계청에서 작성한 생활권 기준인 37개 권역으로 분류하여 권역별 토지이용 변화를 시뮬레이션 하였다. 37개로 분류된 공간 상세화 권역은 표 1과 같으며, 권역별 경계는 그림 2와 같다.

TABLE 1. Zone number and name of region

	Zone no.	Region
Gangwon-do	1	Southern
	2	Inland
	3	Daegwanryeong
	4	Seorak
	5	Lakeside
Kyonggi-do	6	Eastern
	37	Pyeongtaek
Gyeongsangnam-do	7	Eastern
	8	Northeast
	9	Western
	10	Northwest
Gyeongsangbuk-do	11	East-Coast
	12	North-Resources
Gwangju	13	West-Industry
	14	Gwangju Metropolitan
	15	Daegu Metropolitan
	16	Deajeon Metropolitan
	17	Busan Metropolitan
	18	Seoul Metropolitan
	19	Sejong
	20	Ulsan Metropolitan
	21	Incheon Metropolitan
	Jeollanam-do	22
23		Southwest
24		South Central
Jeollabuk-do	25	Region1
	26	Region2
Jeju-do	27	Region1
	28	Region2
Chungcheongnam-do	29	Geumgang
	30	Inland
	31	Northern
	32	South-Coast
	33	Southern
	34	Northern
Chungcheongbuk-do	35	Central
	36	Cheongju



FIGURE 2. Region map

2. 토지이용변화 결정 인자 설정

CA 모델에서 지역별 공간 특성을 반영하기 위해서는 정확한 결정 인자의 선정 및 인자 값의 설정이 중요하다. 하지만 토지이용 변화를 반영하는 인자를 전부 적용하기에는 어려움이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 결정인자에 대한 데이터를 구축할 때 퍼지집합 개념을 적용함으로써 데이터의 손실 및 왜곡을 최소화 하였다.

토지이용변화 시뮬레이션을 위한 결정 인자는 문헌조사와 전문가 의견 조사 및 전국 데이터의 구축여부를 고려하여 설정하였으며(Lee *et al.*, 2004; Yun 2002), 공간상세화에 의한 지역적 특성과 미래 토지이용 변화 시의 적용 가능성을 검토하여 최종적인 토지이용변화 결정 인자를 선정하였다. 인자는 크게 자연환경 인자와 인문환경 인자로 구분하였다. 자연환경 인자에는 표고 데이터와 경사 데이터를 설정하였고, 토지이용을 바탕으로 도시지역, 농지지역,

산지지역, 기타지역으로 설정하였다. 인문환경 인자는 시계열 현황을 고려하여 도로와 용도지역을 설정하였다.

인자는 CA의 적용이 가능하도록 셀 기반인 레스터 데이터로 구축하였다. 도시지역 등 토지이용 현황은 불린(boolean)의 개념을 적용하였으며, 나머지 인자는 퍼지집합의 개념을 적용하여 도시 확장 영향력을 차등적으로 적용하였다. 즉, 표고와 경사는 낮을수록, 도로는 폭이 클수록 1에 가깝게 선형퍼지(fuzzy linear) 값을 부여하였다.

CA를 적용한 도시성장 시뮬레이션은 물리적 성장에 한정되어있다. 하지만 도시의 성장은 정책적 요인이 작용되므로, 무분별한 도시의 확산을 방지하기 위하여 도입된 개발제한구역이 선행연구에서 적용된 바 있다. 하지만 개발제한구역의 효과에 관한 연구(Lee and Oh, 2010)에서 개발제한구역이 없을 시에도 구역 내의 개발이 폭발적으로 일어나지 않는 것으로 예측되었으며, 이는 다른 법규에서 제시하는 규제에 따라 개발을 할 수 있는 공간이 한정되기 때문인 것으로 분석되었다. 이에 본 연구에서는 급속한 도시의 확산을 방지하는 규제를 적용하여 도시화가 진전되지 못하도록 하는 임계지역(threshold region)을 설정하였다.¹⁾

3. 셀룰라 오토마타 설정

CA 설정은 토지이용의 변화 패턴을 파악하기 위하여 대상지역의 전이규칙을 도출하는 것으로, CA 구성요소에 따라 앞선 도시성장모델 관련 선행연구(Lee *et al.*, 2004; Yun 2002)에서 사용한 인자 값을 기준으로 다양한 대안으로 설정하였다. 셀룰라 공간은 CA의 기본단위인 동일한 크기의 셀에 의해 구성되는 시뮬레이션이 일어나는 기본적인 물리적 공간이다. 본 연구에서는 정사각형 격자 셀로 구성하였으며, 30m×30m 그리드 셀로 약 1억 690만개의 셀을 대상으로 분석하였다. 그리드 셀의 크기는 토지이용 현황자료의 기본이 되는 Landsat TM 영상의 공간해상도를 적용한 것

이며, 일부 위성영상의 획득에 제한이 있는 군사분계선 인근 지역은 제외하였다. 상태는 셀의 특성을 나타내는 것으로 토지이용변화 결정인자에서 설정한 4가지 토지이용 현황(도시, 농지, 산지, 기타)을 설정하였다. 네이버후드는 중심 셀 주위를 둘러싸고 있는 주위 셀을 의미하며, 본 연구에서는 rectangle 3×3, rectangle 7×7, circle2, circle5의 대안들을 가지고 시뮬레이션 하였다. 전이규칙은 셀의 전환 가능성을 통해 셀의 전이가 이루어지도록 Wu의 전이규칙(Wu and Webster, 1998)을 사용하였다. 전환가능성을 식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$P_{ij} = \begin{cases} \text{Exp}[a(\frac{r_{ij}}{r_{\max}} - 1)] & r_{ij} \neq 0 \\ 0 & r_{ij} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

P_{ij} : 전환 가능성

r_{ij} : i, j 의 셀이 갖고 있는 점수

r_{\max} : 셀의 가장 높은 적합도 점수

a : 도시성장 조절계수

여기서 a 값이 커질수록 전환가능성이 작아지기 때문에 속도를 조절하는 것이 가능하다. r_{ij} 는 각 셀이 가지고 있는 점수로서 퍼지 및 불린함수를 적용한 인자 값이다. a 값을 2인 경우와 3인 경우를 설정하였으며, 전환가능성인 P_{ij} 는 0.25~0.40까지 0.05 간격으로 4가지를 설정하여 시뮬레이션 하였다. 이처럼 본 연구에서는 P_{ij} 와 a 값을 조절하여 시뮬레이션 함으로서 대상지역에 적합한 전이규칙을 찾아냈으며, 전환가능성 값을 통하여 SSP1~SSP3 시나리오에 따른 토지이용변환 속도를 조절하였다. 마지막 시간은 2000년 기점의 토지이용상태를 시뮬레이션 하여 2010년의 토지이용현황과 비교 검토하였다. 미래의 토지이용변화는 권역별로 다르게 나타나는 토지이용변화 특성을 바탕으로 권역별·시나리오별로 다르게 적용하여 예측하였다.

4. SSP 시나리오 설정

토지이용과 관련하여 사회경제적 시나리오는 SSP1, SSP2, SSP3 세 가지를 설정하였다. SSP1 시나리오는 지속가능성에 대한 시나리오로, 지속가능한 도시계획과 적정 기반시설 도입으로 도시에 대한 선호가 높아져 역세권 도시로 유입되는 인구가 증가한다. 또한, 도시의 확산이 수평적 확산보다는 기 개발지를 활용하는 형태로의 토지이용 변화가 발생하고, 효율적 도시의 관리를 위한 압축도시 형태의 성장이 이루어지는 것으로 가정하였다. 따라서 면적 측면에서의 도시화는 거의 이루어지지 않는 것으로 가정하였다.

SSP2 시나리오는 현상유지 시나리오로 도시화 형태가 현재의 상태로 지속되면서 토지이용의 변화가 발생하는 것으로 설정하였다. 따라서 CA 시나리오를 통하여 도출된 권역별 성장패턴을 그대로 적용하는 것으로 가정하였다.

SSP3 시나리오는 난개발에 대한 시나리오로 낮은 수준의 도시계획과 비효과적인 기반시설 도입으로 도시에 대한 선호가 줄어들어 산발적인 도시성장 형태를 보인다. 또한 토지이용에 관한 규제가 완화되면서 무분별한 개발행위로 인한 토지이용의 변화 발생하는 것으로 가정하였다. 따라서 난개발로 인한 도시지역의 확산이 급속히 진행되는 것으로 설정하였다.

토지이용변화 시뮬레이션

1. 토지이용변화 패턴분석

토지이용변화 패턴은 앞서 설정한 다섯 가지 CA 구성요소를 바탕으로 성장계수 2가지, 전환가능성 4가지, 전이형태 4가지를 각각 적용하여 총 32가지 대안으로 전이규칙을 도출함으로써 토지이용변화 패턴을 파악하였다. 전이규칙은 2000년 데이터를 바탕으로 각 권역별로 32가지 대안을 모두 시뮬레이션 하였으며, 최종적인 전이규칙은 2010년 데이터와의 민감도분석을 통하여 가장 적합한 대안을 선정하였다. CA 시뮬레이션은 ArcGIS10.1 소프트웨어에서 Arc

Object를 이용하여 프로그래밍함으로써 반복되는 연산을 자동화하였다.

민감도분석은 시뮬레이션 결과로 나온 예측치와 실제 데이터(2010년)를 이용하여 셀 수를 단순하게 비교하는 방법(MR)과 셀들 간의 일관성을 계산하는 방법(CR)을 사용하였다. MR은 시뮬레이션 셀 수가 실제 셀 수보다 많을 때 1을 초과할 경우가 있지만, CR은 시뮬레이션 셀 수와 시뮬레이션 결과의 상태 셀이 일치하는 셀 수를 실제 상태 셀로 나눈 것으로 1에 가까울수록 정확도가 높은 것으로 분석된다(Lee *et al.*, 2004). 본 연구에서는 32가지 대안 시뮬레이션 중에서 1순위 CR 값, 2순위 MR 값이 1에 가까울수록 가장 적합한 대안으로 보고, 대안에 사용된 전이규칙을 권역별 토지이용변화 패턴으로 선정하였다.

권역별로 최종적으로 선정된 전이규칙을 살펴보면 zone 6과 zone 35를 제외하고 모두 도시성장 계수는 “2”가 적합하게 나타났으며, 전환가능성은 0.30과 0.35에서 적합하게 나타났으며, 전이형태는 모든 유형에서 고르게 나타났으며, 시뮬레이션 횟수는 최소 12회(zone 35)에서 최대 97회(zone 14, zone 21)로 나타났다(표 2 참조).

2. 스토리라인별 토지이용 변화분석

스토리라인 별 토지이용 변화는 지역적 특성을 고려하여 최종적으로 도출된 전이규칙을 바탕으로 SSP 시나리오를 적용하였다. SSP2 시나리오는 현재의 토지이용 변화패턴이므로 토지이용변화 패턴분석에 도출된 권역별로 최종적으로 도출된 전이규칙을 그대로 적용하였다. SSP1 시나리오는 지속가능한 사회의 시나리오로 효율적 도시관리를 위하여 수평적 확산을 억제하고 압축도시로의 개발 개념을 적용하였기 때문에, 도시지역으로의 전환가능성을 강화하여 대상지역 전이규칙의 전환가능성에 0.05를 더한 값을 적용하여 시뮬레이션 하였다. SSP3 시나리오는 분열된 사회의 시나리오로 도시 관리가 이루어지지 않아 난개발로 인한

TABLE 2. Finally selected a transition rules through cellular automata simulation

	Zone no.	Growth Factor	Transition Possibility			Transition Rule	Number of Simulations
			SSP1	SSP2	SSP3		
Gangwon-do	1	2	0.35	0.3	0.25	Circle 3	28
	2	2	0.3	0.35	0.3	Rectangle 7×7	24
	3	2	0.35	0.3	0.25	Circle 7	29
	4	2	0.4	0.35	0.3	Circle 5	27
	5	2	0.4	0.35	0.3	Circle 5	24
Kyonggi-do	6	3	0.4	0.35	0.3	Circle 3	17
	37	2	0.4	0.35	0.3	Circle 3	31
Gyeongsangnam-do	7	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	20
	8	2	0.35	0.3	0.25	Rectangle 7×7	49
	9	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	52
	10	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	52
Gyeongsangbuk-do	11	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	56
	12	2	0.35	0.3	0.25	Circle 2	22
	13	2	0.4	0.35	0.3	Rectangle 7×7	28
Gwangju	14	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	97
Daegu	15	2	0.4	0.35	0.3	Circle 3	36
Deajeon	16	2	0.4	0.35	0.3	Rectangle 3×3	19
Busan	17	2	0.35	0.3	0.25	Rectangle 3×3	28
Seoul	18	2	0.35	0.3	0.25	Circle 2	54
Sejong	19	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	64
Ulsan	20	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	89
Incheon	21	2	0.35	0.3	0.25	Circle 3	97
	22	2	0.35	0.3	0.25	Rectangle 7×7	57
Jeollanam-do	23	2	0.4	0.35	0.3	Circle 5	32
	24	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	73
Jeollabuk-do	25	2	0.4	0.35	0.3	Circle 5	46
	26	2	0.35	0.3	0.25	Rectangle 7×7	66
Jeju-do	27	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	67
	28	2	0.35	0.3	0.25	Circle 5	63
Chungcheongnam-do	29	2	0.4	0.35	0.3	Rectangle 7×7	25
	30	2	0.4	0.35	0.3	Circle 5	25
	31	2	0.35	0.3	0.25	Rectangle 7×7	71
	32	2	0.35	0.3	0.25	Rectangle 7×7	51
Chungcheongbuk-do	33	2	0.4	0.35	0.3	Rectangle 5×5	23
	34	2	0.4	0.35	0.3	Rectangle 5×5	16
	35	3	0.35	0.3	0.25	Rectangle 7×7	12
	36	2	0.4	0.35	0.3	Circle 5	28

수평적 확산이 급속히 진행되는 개념을 적용하였기 때문에 도시로의 전환가능성을 완화하여 최종적으로 도출된 전환가능성에 0.05를 뺀 값을 적용하였다. 사회경제 경로에 대한 스토리라인별 토지이용변화 시뮬레이션에 최종적으로 적용한 전이규칙은 표 2와 같다.

스토리라인 별 토지이용 변화예측은 각 권역 별로 수행하다. 권역별 전이규칙 도출과정에서 수행된 시뮬레이션 횟수는 2000년에서 2010년까지 진행되는 데 사용된 횟수이므로, 시뮬레이션 횟수를 10년으로 보고 횟수의 배수만큼 시뮬레이션 함으로써 목표년도의 토지이용변화

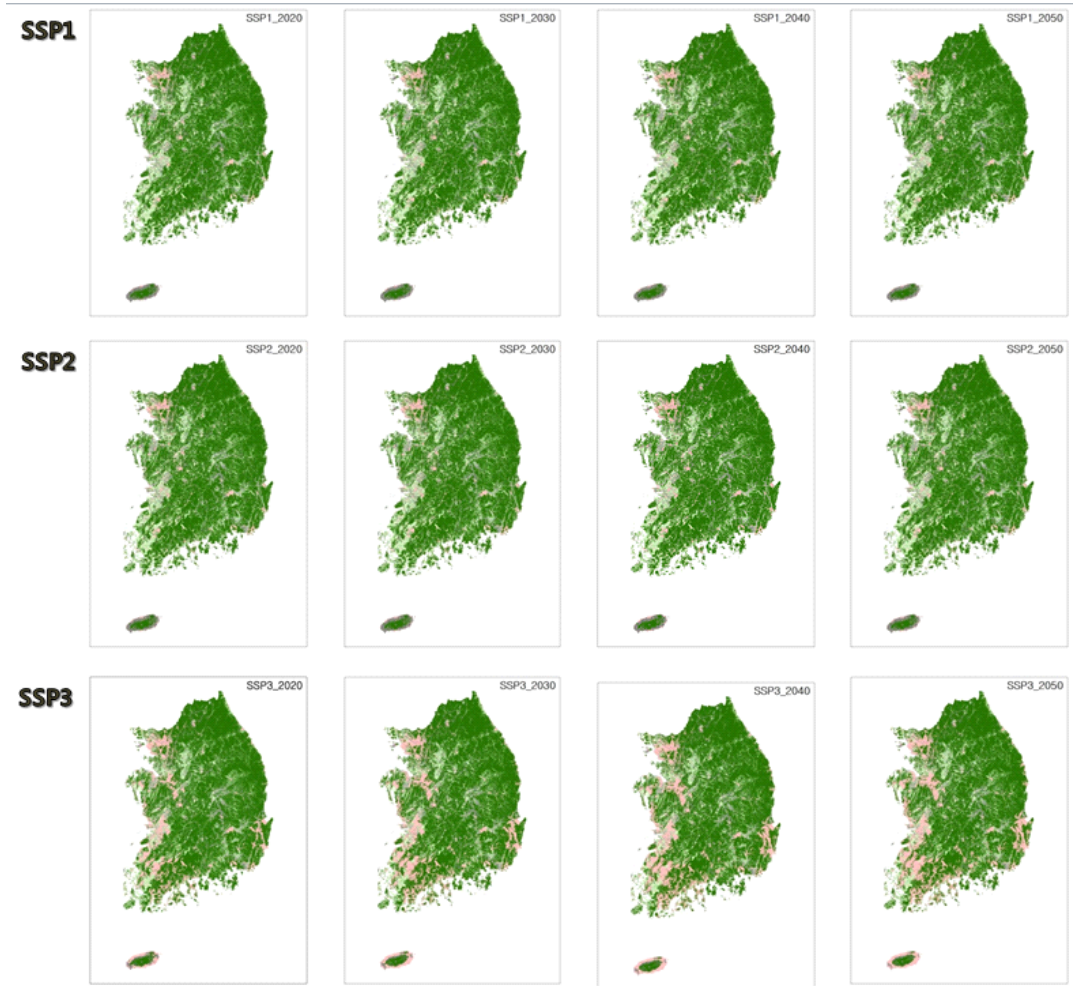


FIGURE 3. Land use change according to the SSP(case of urban area)

를 예측하였다. 그림 3은 SSP 시나리오에 따른 권역별 토지이용 변화 분석결과를 전국단위로 결합하여 지도화한 것으로 붉은 계열의 색상이 도시지역을 의미한다. 분석결과를 살펴보면 SSP1 및 SSP2와 비교하여 SSP3에서 도시지역으로의 변화가 활발하게 나타났다. 토지이용 인자별로 살펴보면 시간의 변화에 따라 기존의 산림과 농림, 기타지역이 침식당하면서 도시지역이 확장하는 패턴이 나타났다. 사회경제적 시나리오 별로 살펴보면 SSP1과 SSP2에서는 도시 면적 비율이 소폭 증가하다가 2030년부터

더 이상의 변화가 나타나지 않았으나, 낮은 수준의 도시계획을 가정한 SSP3에서는 도시 면적 비율이 2100년까지 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

결론

본 연구는 저탄소 기후변화 적응 수립에 활용되는 기후변화 취약성 평가에 적용하기 위하여 사회경제 경로(SSP)에 대한 스토리라인을 개발하고 2100년까지의 스토리라인별 토지이

용변화를 대리변수 별, 공간 상세화 구역별로 예측하였다. 대리변수는 도시 면적 비율, 농지 면적 비율, 산지 면적 비율, 기타 면적 비율 등 네 가지를 설정하였으며, 사회경제적 시나리오는 SSP1, SSP2, SSP3 세 가지를 설정하였다.

시물레이션은 30m×30m 셀 단위 데이터를 구축한 후 토지이용의 변화 및 도시구조의 변화 예측에 유용한 셀룰라 오토마타 기법을 적용하였다. 시물레이션은 공간 상세화 구역인 37개 권역별로 수행하였으며, 2000년 데이터를 기준 년도로 설정하여 시물레이션을 수행한 이후, 2010년 데이터와의 민감도 분석을 통하여 권역별로 가장 적합한 변화 패턴을 도출하였다. 2000년 이후의 토지이용 변화는 SSP1~SSP3 사회경제적 시나리오를 적용하여 2050년까지는 10년 단위로 토지이용 변화를 예측하였다.

분석결과를 대리변수 별로 살펴보면, 전반적으로 시간의 변화에 따라 기존 산림과 농림, 기타지역을 침식하면서 도시지역이 확장되는 토지이용의 변화가 나타났다. 사회경제적 시나리오에 따라 살펴보면, SSP1은 2020년, SSP2는 2030년까지 도시 면적 비율이 소폭 증가하다가 더 이상의 변화가 나타나지 않았으나, 낮은 수준의 도시계획을 가정한 SSP3에서는 도시 면적 비율이 2050년까지 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 공간 상세화 권역별 토지이용 변화를 살펴보면, SSP3 시나리오 상에서 대부분 지역의 도시 면적 비율이 증가하는 것으로 나타났으며, 상대적으로 지형이 완만한 서측의 전라남북도와 제주도, 경상남도 일부지역에서 도시 면적 비율의 증가가 급속히 일어나는 것으로 분석되었다.

본 연구는 기후변화 취약성 평가와 함께 사용 가능한 공간 해상도의 결과를 도출하기 위하여 시공간적 SSP 시나리오가 적용가능한 CA 모델을 적용하였다. 토지이용 변화에 대한 결과는 합리적 기후정책의 의사결정에 기여할 수 있을 것으로 사료되며, 공간적 상세화로 도출된 시물레이션 결과는 기초 자치단체 단위로 수행해야 되는 기후변화 취약성 평가에 일괄 적용

함으로써 기후변화 적응 정책 우선순위 선정에 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 추가적으로 기후변화와 관련된 미래예측 및 공간의사결정 과정에서 활용 가능할 것이다. 하지만 본 과제에서 적용한 토지이용 변화 예측 연구에서 한계도 존재한다. 먼저 전국 데이터 획득 과정에서 도시지역의 발달에 영향을 주는 규제에 관한 모든 데이터를 적용하지 못하였다. 또한 과거 신도시계획 및 간척 사업이 활발히 진행되었던 것과 달리 최근 토지이용의 변화가 급격히 일어나지 않는 것은 토지 이용에 있어 정책적인 영향이 가장 크기 때문인데, 본 연구에서는 정책적인 변화를 충분히 반영하지 못하였다. 이와 관련하여 세종시의 경우 50만 인구를 목표로 계획하였으나 현재 세종시는 초기 입주단계이며, 가까운 기간 내에 가장 급격한 변화가 발생할 것으로 예상되지만 이러한 변화는 반영하지 못하였다. 차후 이러한 특성과 연구의 한계점을 보완하여 분석이 이루어진다면 더욱 명확한 토지이용 변화를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. [KAGIS](#)

주

- 1) 임계지역은 급속한 도시화를 방지하기 위하여 규제에 관한 법규와 관련 연구를 참고하여 설정하였다. 본 연구에서 설정한 임계지역은 국토의 계획 및 이용에 관한 법률과 산지관리법등을 고려한 경사도 30%이상, 표고 250m이상, 자연공원법의 국립공원, 수도법의 상수원보호구역으로 설정하였다.

REFERENCES

Batty, M. and Y. Xie. 1994. From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and design* 21(7):S31-S48.

Batty, M. and Y. Xie. 1997. Possible urban automata. *Environment and Planning B: Planning and design* 24(2):

- 175-192.
- Chapin, F.S. and S.F. Weiss. 1966. Urban growth dynamics in a regional cluster of cities, John Wiley and Sons, Inc.
- Hägerstrand, T. 1965. A Monte Carlo approach to diffusion. *European Journal of Sociology* 6(01):43-67.
- Jung, J.J. 2001. Cellular automata modeling for analysis and prediction of urban growth in capital Area. Ph.D. Thesis, Seoul Nat'l Univ., Seoul, Korea. (정재준. 2001. 수도권 지역의 도시성장 분석 및 예측을 위한 셀룰라 오토마타 모델링. 서울대학교 대학원 박사학위논문).
- Koh, J.K. and H.S. Kim. 2013. A preliminary study integration climate change mitigation and adaptation. *Journal of Korea Environmental Policy and Administration Society* 21(1):29-59 (고재경, 김희선. 2013. 기후변화 완화와 적응 통합에 관한 시론적 연구. *환경정책* 21(1): 29-59).
- Korea Environment Institute(KEI). 2014. Development of socio-economic pathway scenario for climate change adaptation (환경정책평가연구원. 2014. 저탄소 기후변화 적응 사회를 위한 사회 경제 변화 시나리오 개발).
- Kriegler, E., B.C. O'Neill, S. Hallegatte, T. Kram, R. Lempert, R.H. Moss and T.J. Wilbank. 2010. Socio-economic scenario development for climate change analysis. CIRED Working paper DT/WP.
- KRIHS National Urban Disaster Management Research Center. 2013. The manual for vulnerability analysis of urban climate change disaster (Ver.3.0):1-24 (국토연구원 국가도시방재 연구센터. 2013. 도시 기후변화 재해취약성 분석 매뉴얼(Ver.3.0):1-24).
- 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. *한국지리정보학회지* 7(3):118-125).
- Lee, S.H. and K.S. Oh. 2010. Analyzing the effect of greenbelt on urban growth and environmental pollution by cellular automata method, *Journal of Korea Planners Association* 45(3):193-208 (이상현, 오규식. 2010. 셀룰라 오토마타를 이용한 개발제한구역의 효과분석-도시의 확산 및 인구증가, 환경오염을 중심으로. *국토계획* 45(3):193-208).
- O'Neill, B.C., E. Kriegler, K. Riahi, K.L. Ebi, S. Hallegatte, T.R. Carter, R. Mathur and D.P. van Vuuren. 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change* 122(3):387-400.
- Takeyama, M. 1996. Geo-algebra: a mathematical approach to integrating spatial modeling and GIS. Ph.D. Thesis, Univ. of California Santa Barbara, USA.
- Tobler, W.R. 1979. Cellular geography. *Philosophy in Geography*. 20:379-386.
- 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(8):1175
-1199.

Yun, J.M. 2002. A study on the urban
growth using fuzzy-AHP and cellular
automata. Ph.D. Thesis, Pusan Nat'l

Univ., Pusan, Korea (윤정미. 2002. 퍼지
-AHP와 셀룰라 오토마타를 이용한 도시성
장에 관한 연구. 부산대학교 대학원 박사학
위논문). [KAGIS](#)