



Scenario Generator를 활용한 사회경제경로 시나리오 반영 미래 토지피복 추정

송철호* · 유소민* · 김문일** · 임철희*** · 김지원**** · 김세진* · 김강선***** · 이우균*****†

*고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생, **고려대학교 환경 GIS/RS 센터 연구교수, ***고려대학교 생명자원연구소 연구교수,
****고려대학교 기후환경학과 석사과정학생, *****한국환경정책·평가연구원 위촉연구원, *****고려대학교 환경생태공학부 교수

Estimation of Future Land Cover Considering Shared Socioeconomic Pathways using Scenario Generators

Song, Cholho*, Yoo, Somin*, Kim, Moonil**, Lim, Chul-Hee***, Kim, Jiwon****,
Kim, Sea Jin*, Kim, Gang Sun***** and Lee, Woo-Kyun*****†

*Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

**Research Professor, Environmental GIS/RS Center, Korea University, Seoul, Korea

***Research Professor, Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University

****Master Student, Dept. of Climatic Environment, Korea University, Seoul, Korea

*****Researcher, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

*****†Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Estimation of future land cover based on climate change scenarios is an important factor in climate change impact assessment and adaptation policy. This study estimated future land cover considering Shared Socioeconomic Pathways (SSP) using Scenario Generators. Based on the storylines of SSP1-3, future population and estimated urban area were adopted for the transition matrix, which contains land cover change trends of each land cover class. In addition, limits of land cover change and proximity were applied as spatial data. According to the estimated land cover maps from SSP1-3 in 2030, 2050, and 2100, respectively, urban areas near a road were expanded, but agricultural areas and forests were gradually decreased. More drastic urban expansion was seen in SSP3 compared to SSP1 and SSP2. These trends are similar with previous research with regard to storyline, but the spatial results were different. Future land cover can be easily adjusted based on this approach, if econometric forecasts for each land cover class added. However, this requires determination of econometric forecasts for each land cover class.

Key words: Shared Socioeconomic Pathways (SSP), Scenario Generator, Land Cover Change, Future Land Cover

1. 서 론

다양한 미래 상황에 대한 시나리오 설정과 이에 따른 변화 분석은 기후변화에 따른 단기 및 중장기 미래 불확실성의 파악을 용이하게 한다 (O'Neill, et al., 2014; Riahi et al., 2017). 특히, 시나리오 설정 과정에서 작성되는 타당한 스토리라인과 이에 따른 분석 및 예측 결과는 정책 수립 및 의사결정에 있어 중요한 역할을 한다 (Morgan and Keith, 2008). 그리고

최근 기존의 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 시나리오를 대체하여 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제5차 평가보고서 (The Fifth Assessment Report, AR5)에 따른 기후변화 시나리오 체계로 전환이 이루어짐에 따라 이에 부합하는 타당한 스토리라인 설정 및 분석이 중요하게 여겨지고 있다.

현재 미래 시나리오는 크게 두 가지 축으로 구분된다. 첫째는 대기 중 온실가스 농도 변화에 따라 미래 기온 및 강

† **Corresponding author:** leewk@korea.ac.kr (Room No. 319, East Bldg., College of Life Science, 145 Anam-ro, Seoungbuk-gu, Seoul 02855, Korea)

Received June 28, 2018 / Revised August 20, 2018 / Accepted August 29, 2018

수를 추정된 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오이며, 둘째는 기후변화 적응 및 온실가스 감축에 대한 사회적 역량 및 부담과 연계하여 미래의 타당한 사회경제 상태를 추정된 사회경제경로 (Shared Socio-economic Pathways, SSP) 시나리오이다 (Moss et al., 2010; Kriegler et al., 2014). 이러한 시나리오들은 기후변화 영향 및 취약성 평가, 온실가스 저감 및 기후변화 적응 정책 수립 시 반영되는데, RCP 시나리오의 개발 및 활용이 SSP 시나리오에 선행하였기 때문에 기존에는 미래 사회경제적 요인을 고려하지 않고 미래 기후 인자들이 주로 활용되어왔다 (Moss et al., 2010; van Vuuren and Carter, 2014). 그러나 최근 SSP 시나리오에 따라 전지구 차원에서 인구, 경제, 도시화 및 이산화탄소 배출량 등 사회경제적 요인의 미래 추정이 이뤄짐에 따라서 SSP 시나리오 활용을 위한 검토가 다양하게 이루어지고 있다.

시공간 분석에 있어 SSP 시나리오에 근거한 토지피복 및 토지이용 변화를 추정하는 것은 중요하다. 일반적으로 토지피복 및 토지이용 자료는 사회경제적 상황을 대표하며, 정책 입안에 있어서 공간적 범위 설정에 활용된다 (Kashung et al., 2018). 특히, 기후변화에 따른 생태환경의 변화와 사회경제적 상태는 모델링 과정에서는 입력자료로 활용되어 정량적인 평가를 가능하게 한다 (Swetnam et al., 2011). 현재 토지이용이 미래에도 유지됨을 가정하고 RCP 시나리오를 통해 환경 변화를 모의하거나, 시나리오를 통해 토지이용을 변화를 반영하고 RCP 시나리오를 동시에 반영한 경우 (Kim and Choi, 2013), 그 외에 시나리오에 따라 기후변화에 따른 토지이용 변화를 바탕으로 주거지 변화 및 사회 안정성을 분석하는 등 토지이용 및 토지피복 변화 추정은 다양하게 활용된다 (Yoo et al., 2015). 따라서, 기후변화 영향 평가 및 대응전략에 필수적인 요소로 활용되는 미래 토지피복 및 토지이용에 대한 시나리오와 스토리라인은 SSP 시나리오에 기반하여 구성되어야 한다 (Oh et al., 2011; Jones and O'Neill, 2016).

전지구 차원의 미래 토지피복 및 토지이용 예측은 각 SSP 시나리오 및 스토리라인을 통해 추정된 인구, 경제, 도시화, 이산화탄소 배출 등의 지역별 예측 결과를 따르는 것이 일반적이다 (O'Neill et al., 2014; Riahi et al., 2017). 우선 각 SSP 시나리오 중 온실가스 감축과 기후변화 적응에 대한 사회적 부담이 적은 SSP1은 'Sustainability'로 명명되었으며, 중간 수준의 SSP2는 'Middle of the road', 각 부담이 큰 SSP3는 'Regional Rivalry'로 일컬어진다 (van Vuuren et al., 2017; Fricko et al., 2017; Fujimori et al., 2017). 반면, 온실가스 감축 부담은 적지만 기후변화 적응 부담이 큰 SSP4를

'Inequality'로 반대의 경우인 SSP5를 'Fossil-Fueled Development'로 서술된다 (Calvin et al., 2017; Kriegler et al., 2017). 특히, SSP 각 시나리오의 순서대로 전지구 차원의 통합 모형인 IMAGE, MESSAGE-GLOBIOM, AIM, GCAM, REMIND-MAGPIE의 분석 과정과 결과가 중점적으로 연동된다 (Riahi et al., 2017). 또한, 전지구 차원의 모델링 외에도 각 국가는 개별적으로 적합한 사회경제 시나리오를 수립하고 있으며, 우리나라 역시 한국환경정책·평가연구원에서 자체적으로 국내 SSP 시나리오를 수립하고 미래 사회경제 상황을 추정하고 있다 (Chae, 2016).

토지피복 및 토지이용 추정도 SSP 시나리오가 정립됨에 따라 기존 SERS 기반 모델링에서 SSP 시나리오 모델링 결과를 다양하게 연동하는 방향으로 나아가고 있다. SSP 시나리오에 기반한 전지구 수준 시공간 토지이용 추정 결과는 LUH2 (Land-Use Harmonization 2)가 대표적으로, 시나리오 정립과 각 통합모델의 결과가 도출됨에 따른 최근 글로벌 토지이용 예측 자료를 공개하고 있다 (Hurt et al., 2018). 국내에서는 국내 SSP 시나리오 정립 과정에서 스토리라인을 바탕으로 미래 토지피복 추정이 사회경제 예측과 동시에 이루어졌다 (Kim, 2016). 이 과정에서 토지이용에 대한 스토리라인은 적합하게 반영되었으나, SSP1의 경우에는 시계열 토지이용 변화가 없는 반면, SSP3에서는 인구 감소 시점에도 과도하게 시가지 면적이 확장되는 등 전지구 차원의 모델링과 상이한 부분이 발생하고 있다. 따라서, SSP 시나리오 이전 SERS 시나리오 기반 산출된 토지이용 변화 표출이나, RCP 기후 시나리오와 연계한 산림 및 토지피복 변화 분석, 토지이용 변화 요소간 경험적 정량화 등은 SSP 시나리오에 맞춰 검토될 필요가 있다 (Oh et al., 2012; Shin et al., 2012; Kim and Park, 2013; Lee et al., 2016).

기후변화 대응 의사결정을 위해 적절한 SSP 시나리오 활용을 위해서는 Cellular Automata, Markov Chain, Fuzzy Logic 등을 활용한 공간 배분 및 예측과 토지이용 예측에 범용적으로 활용되는 Scenario Generator, CLUE, SLEUTH, Landuse SIM 등의 모델 구동에 있어 SSP 시나리오의 스토리라인, 사회경제 예측 결과, 토지이용 분석 방법론 등을 적용하여 적절한 도시, 농지, 산림 등의 변화 경향을 검토해야 하는 시점이다 (Park et al., 2011). 그러므로 본 연구에서는 국내 SSP 시나리오의 사회경제 예측 결과를 반영을 위한 다양한 요인을 검토하고, 다양한 스토리라인 반영이 용이한 Scenario Generator를 활용하여 SSP1-3에 해당하는 미래 토지이용을 추정하였다. 이를 통해 기후변화 영향 평가 및 취약성 평가와 기후변화 정책 수립에 있어 SSP 시나리오에 기반

한 토지피복 및 토지이용 예측의 활용성을 제고하고자 한다.

2. 연구 재료 및 방법

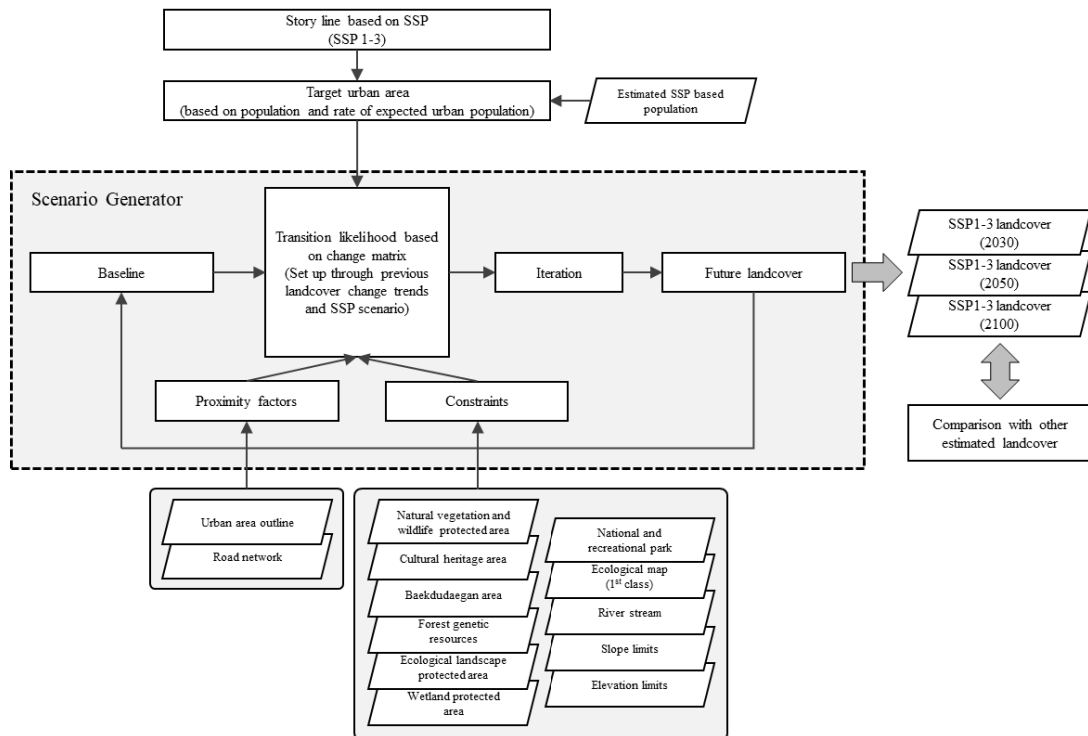
2.1 Scenario Generator를 활용한 연구 방법

Scenario Generator는 미국 National Capital Project에서 토지피복 및 토지이용 지도를 바탕으로 자연 자산의 가치를 평가하는 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff) 모델의 보조 모형 (supporting tools)이다. 현재 오픈소스 프로그램 및 Python 코드를 통해 제공되고 있으며, 미래 정책 의사결정 시 필요한 토지이용을 구축하기 위해 전 세계적으로 널리 사용되고 있다 (Vigerstol and Aukema, 2011; Sharp et al., 2016). 특히, Scenario Generator는 미래 토지이용에 대한 추정이 스토리라인에 따라서 비교적 자유롭게 설정 가능하며, 공간적으로 결과를 도출할 수 있다는 점에서 활용가능성이 높은 것으로 알려져 있다 (Bhagabati et al., 2014).

Scenario Generator는 토지피복 이용에 널리 활용되는 cellular automata를 기본으로 초기 시점의 기준토지피복도

(baseline land cover)가 변화매트릭스 (transition matrix)에 설정된 각 토지이용 형태 간의 변화매트릭스 (change matrix) 형식의 변화 경향성 (transition likelihood)에 의해 가중치를 부여받는 형태로 구동된다. 이때, 토지이용 변화를 유지하게 하는 제약요인 (constraints)과 변화를 가속하는 이용요인 (use factors)에 의해 미래토지이용도 (future land use)를 도출하게 된다 (Fig. 1).

각 시나리오에 따른 스토리라인에 따라 입력자료 및 변화율을 타당하게 구성하기 위하여 스토리라인에 대한 검토와 이에 따른 토지피복 면적 예측 방법을 적용하였다. 각 스토리라인에 따른 토지이용 유형별 증감에 따른 변화는 변화매트릭스 형식으로, 이후에는 토지이용 변화 제약요인과 가속요인이 벡터형식의 공간자료로 반영된다. 기준토지피복도는 2010년을 기준으로 하였으며, 이를 30회 반복구동을 통해 가까운 미래 시점부터 먼 미래 시점까지 2030, 2050, 2100년에 대한 결과를 도출하였다. 해당 결과는 기존 SSP 시나리오를 바탕으로 토지피복 및 이용에 관한 공간 모델링을 수행한 Kim (2016)의 연구와 비교하여 토지피복 유형 간 면적 구성 등을 비교하였다.



(Modified from Sharp et al., 2016)

Fig. 1. Flow of estimating future land use and land cover using Scenario Generator.

2.2 스토리라인 설정 및 토지피복 예측 방법

SSP 시나리오에서 토지이용에 대한 전지구 차원의 각 스토리라인은 Riahi *et al.* (2017)과 O'Neill *et al.* (2017) 연구에서 확인할 수 있다. 또한, 이를 구체화한 시공간 토지이용 예측은 인구변화와 도시화율을 바탕으로 토지이용과 관련한 시나리오를 정립되었다 (Jones and O'Neill, 2016). 우리나라가 해당하는 OECD 국가의 SSP1-3의 스토리라인 중, SSP1은 인구가 가장 많이 증가함에도 도시화율이 빠르게 진행되어 시가지로 인구가 집중되는 것으로, SSP3는 인구가 가장 많이 감소하는 대신 시가지 내 면적에 인구가 적게 포함되고 분산되는 형태로 나타났으며, SSP2는 현재 추세를 유지하는 형태로 제시되었다.

우리나라의 SSP 시나리오에서도 이와 비슷한 스토리라인을 제시하고 있는데, SSP1에서는 역세권 도시로 인구 유입 증가와 절대적인 시가지면적 증가 추세가 감소할 것으로,

SSP2에서는 현재와 같은 도시계획으로 추세가 유지될 것으로, SSP3에서는 산발적인 도시 성장 형태로 시가지 확산과 녹지 공간의 감소될 것으로 예측하였다 (Chae, 2016). 비록 전지구 차원의 SSP 시나리오 기반 인구 예측에서 국내 SSP 시나리오 기반 인구 예측에 비해 인구 감소량을 보다 크게 산정하는 것으로 나타났으나, 전반적인 스토리라인의 추세는 모두 비슷하게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 스토리라인을 타당하게 적용할 수 있을 것으로 판단하였다.

기존의 우리나라 SSP 시나리오 기반 토지이용 예측은 cellular automata 방식과 토지이용 간 전이 규칙을 통해 SSP 시나리오의 스토리라인을 구현하였으나, 전지구 차원으로 LUH2에 제시된 결과에서는 인구 증감 등의 요인에 따라 시계열적 시가지 증감 반응이 부족하였다 (Kim, 2016; Hurtt *et al.*, 2018). 따라서 본 연구에서는 인구변화에 따른 주거 면적을 픽셀 내 관측된 인구 비례로 계산하여 전지구 차원의 토지이용 예측을 수행한 Jones and O'Neill (2016)의 방식을 우

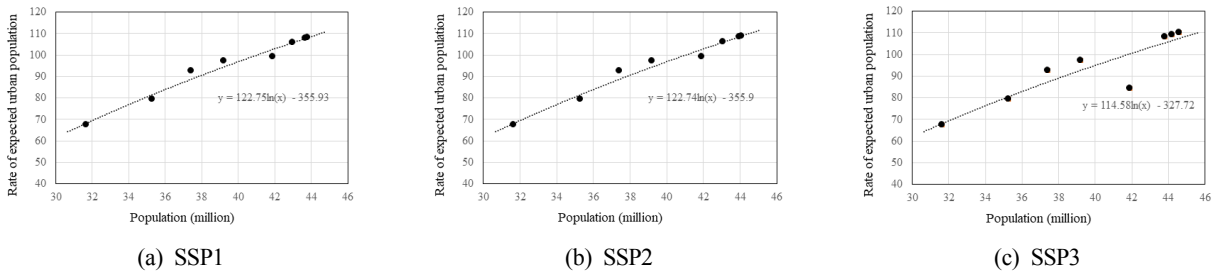


Fig. 2. Trend line based on population and rate of expected urban population.

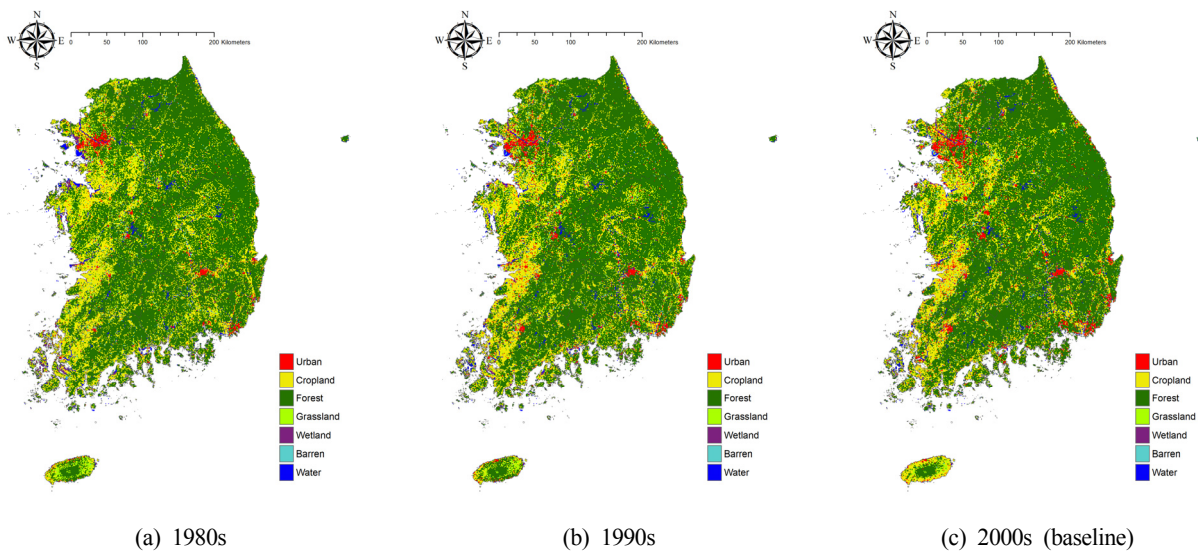


Fig. 3. Land cover maps for tracking previous trends and baseline.

선 검토하였다 (eq. 1).

$$\frac{P_i^{obs}}{P_T^{obs}} = \frac{P_i^{mod}}{P_T^{mod}} + \epsilon_i(\alpha, \beta) \text{ ----- eq. 1}$$

이때, P_i^{obs} 는 픽셀 내 관측 인구, P_T^{obs} 는 전체 인구, P_i^{mod} 는 픽셀 내 예측 인구, P_T^{mod} 는 예측 전체 인수로 i 시점과 기준 시점의 변화비율로 구성되며, 잔차 (ϵ_i)는 α 는 픽셀 인구비 β 는 픽셀의 공간거리에 대한 가중치로 구성된다.

해당 모델은 전지구 차원에서 0.25도 해상도와 과거 850년부터의 시뮬레이션 결과를 종합한 것으로 주거 면적에 따른 시가지 변화를 대표할 수 있으나, 우리나라에 적합한 해상도 설정과 입력되는 공간자료의 한계가 존재했다. 따라서, 우리나라의 경우에는 기준년도 대비 전체 시가지 지역을 대상으로 계산을 수행하였다.

SSP 시나리오 인구 추정 자료는 국내 SSP 시나리오 자료가 IASA (International Institute for Applied Systems Analysis) SSP public database에서 제공하는 10년 단위의 전지구 SSP 시나리오에서의 우리나라 인구 추계 및 도시 거주

Table 1. Land cover classes' change rates in 1980s, 1990s, and 2000s

class	1980s		1990s		2000s	
	Area	Area	Change rate from 1980s	Area	Change rate from 1980s	Change rate from 1990s
Urban	2,133	3,460	62.22%	4,155	94.77%	20.06%
Agriculture	23,843	21,869	-8.28%	21,348	-10.46%	-2.38%
Forest	67,085	67,007	-0.12%	68,590	2.24%	2.36%
Grassland	3,793	4,371	15.25%	2,886	-23.91%	-33.98%
Wetland	875	502	-42.59%	339	-61.24%	-32.48%
Barren	1,298	1,697	30.73%	1,660	27.85%	-2.21%
Water	2,111	2,232	5.77%	2,167	2.69%	-2.91%

Table 2. Change matrix for transition likelihood composition

Class	2000s							
	Urban	Agriculture	Forest	Grassland	Wetland	Barren	Water	
1980s	Urban	31.16%	1.94%	0.26%	3.25%	3.24%	6.74%	1.62%
	Agriculture	38.65%	66.69%	8.55%	37.94%	14.05%	47.02%	11.19%
	Forest	13.95%	21.06%	87.93%	37.00%	6.67%	27.24%	8.68%
	Grassland	5.28%	5.82%	2.50%	16.36%	1.56%	0.66%	1.87%
	Wetland	1.61%	1.41%	0.08%	1.10%	38.58%	2.74%	11.07%
	Barren	6.18%	2.11%	0.33%	2.59%	3.29%	9.24%	5.83%
	Water	3.16%	0.97%	0.35%	1.77%	32.61%	6.36%	59.74%
1990s	Urban	52.93%	3.10%	0.34%	4.45%	3.50%	11.43%	1.79%
	Agriculture	22.17%	73.33%	5.60%	27.51%	10.90%	27.79%	7.28%
	Forest	7.14%	15.70%	90.61%	28.24%	4.44%	16.41%	4.96%
	Grassland	5.81%	4.81%	2.85%	34.33%	1.37%	6.74%	1.71%
	Wetland	0.77%	0.65%	0.04%	0.88%	63.07%	1.71%	1.87%
	Barren	10.24%	1.86%	0.29%	3.57%	1.96%	31.86%	1.79%
	Water	0.94%	0.55%	0.27%	1.03%	14.76%	4.06%	80.59%

인구, GDP 등의 경향성이 유사함을 확인한 후 국내 개발 자료를 선정하여 활용하였다 (Chae, 2016; Jiang and O'Neill, 2017). 따라서, 해당 수식을 통한 시가지면적 추정 추세선 도출 시 시가지 면적에 대해서는 과거 1980년대부터 공간자료로 구축된 환경부 토지피복도의 시가지 면적을 사용하였으며, 국내 SSP 시나리오에서 제시하는 인구통계 자료를 바탕으로 하였다. 이때, SSP 시나리오별로 인구 성장이 최대치가 되는 2030년에서 2050년까지 추세선을 따르되, 이후에는 선행연구와 마찬가지로 공간 변이가 최소화되도록 제한하였으며, 잔차의 경우는 추세선에 수렴하는 것으로 가정하였다 (Fig. 2).

2.3 공간 자료 구축

본 연구에서 기준토지피복도의 경우에는 환경부에서 제공하는 2000년대 대분류 토지피복도를 기본으로 활용하였다. 또한, 해상도의 경우에는 기후변화 영향 및 취약성 평가를 위한 기존 Kim et al. (2017)의 선행연구에서 활용된 전국 1km 해상도를 기준으로 설정하여 기준토지피복도의 총 픽셀 수를 101,097개로 제한하였다. 시가지 (urban) 4.09%, 농지 (agriculture) 21.09%, 산림 (forest) 67.84%, 초지 (grassland) 2.88%, 습지 (wetland) 0.32%, 나지 (barren) 1.65%, 수역 (water) 2.13%로 총 7개의 토지이용 형태로 구성된다 (Fig. 3).

변화매트릭스 구성에는 인구 추정에 따른 토지이용 면적 설정을 통한 시가지 면적을 적용하였으며, 그 외의 토지이용

형태의 경우에는 기존의 변화율을 유지하는 것으로 설정하였다. 이를 위해 우선 1980년대와 1990년대를 토지피복도에서 기준토지피복 시점인 2000년대까지의 변화를 통해 각 토지이용 형태의 최대 변화율을 선정하였으며 (Table 1), 각 토지피복 간의 변화 경향성은 매트릭스를 구성하여 전반적인 변화 경향성을 파악하고 활용 가능성을 파악하였다 (Kim, 2016; Table 2).

1980년대 토지피복부터 기준토지피복 (2000년대)까지 시가지의 증가, 농지의 감소는 지속적으로 나타났으나, 그 외 토지피복은 증가 및 감소가 번갈아 가면서 나타나는 등 시기에 따라 큰 폭의 변화율을 보였다. 또한, 토지피복도 상의 변화율과 달리 산림의 경우에는 임상도 및 국가통계에서 그 면적이 1980년 65,680 km²에서 2000년 64,220 km²으로 지속적으로 감소하였다 (Korea Forest Service, 2016). 이는 위성영상에 기반하여 구축된 환경부 토지피복도와 다양한 공간 및 통계자료의 차이에서 기인하는 것이라 할 수 있다 (Jeon et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 SSP 시나리오의 스토리라인 구현 시 토지피복의 전반적 변화 경향성 외에도 기존 통계 및 미래 토지이용예측에 대한 부분을 추가로 고려하였다.

본 연구에서는 시가지에 대한 인구 비율이 중심이 되므로, 시가지와 우리나라에서 차지하는 면적이 큰 산림, 농지, 초지에 대한 경향을 고려하여 변화매트릭스의 변화율을 조정하였다 (Sagong, 2004). 또한, 시가지 인근에서 다양한 토지피복이 고려하여 나지 평균 82.8% 감소, 초지 평균 29.9% 증가 등의 추세를 예측한 선행 연구를 계수 설정에 참조하였다

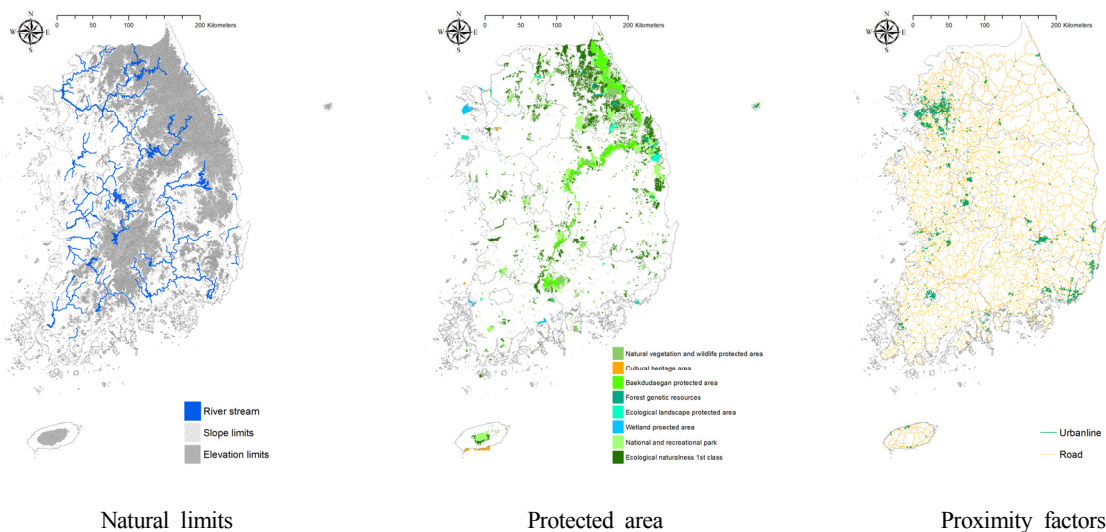


Fig. 4. Mas of land cover change controls (natural limits and protected area) and proximity factors.

(Oh et al., 2011). 이를 통해 변화매트릭스에서 주요 토지이용 형태인 시가지의 최대 변화율은 SSP 시나리오 인구 추정에 따른 시가지 면적에 따라 변화되는 것으로 하였으며, 농업의 경우에는 2-10% 감소, 산림의 경우에는 0-2% 감소로 설정하였다. 그 외에 변동폭이 큰 초지의 경우는 주요 토지이용 형태의 변화에 따라 증감폭을 조정하였으며, 나머지 피복 또한 감소 추세에서 증감폭을 다르게 적용하였다. 변화 경향성은 1-9까지의 숫자로 표현되었으며, 1980년대와 1990년대와 2000년대 간 변화 매트릭스의 변화율을 통해 선정되었다.

환경적으로 보전 우선순위가 높으며, 법률적으로 개발이 제한되어 있어 향후에도 현재의 토지피복 상태로 남아 있을 확률이 큰 것으로 판단되는 지역을 변화가 일어나지 않는 제약요인으로 선정하였다 (Park et al., 2011). 제약요인으로는 국립공원 및 자연휴양림, 문화재보호지역, 백두대간보호지역, 산림유전자원보호림, 생태경관보전지역, 습지보호지역, 야생동물보호지역, 생태자연도 1급 대상지를 활용하였다. 해당 지역은 주로 산림, 초지, 습지 등에 해당하는 지역들이나, 공간적으로 다른 토지피복 형태 또한 포함하고 있다. 또한, 고도 제한과 경사에 따른 한계를 적용하였다 (Kim, 2016). 이용요인은 토지이용 변화를 가속하는 요인으로 기존 토지피복에서 도시 지역과 도로망을 활용하였다 (Fig. 4).

3. 결과

비교적 가까운 미래 시점인 2030년과 2050년, 먼 미래 시점인 2100년 미래 토지피복 예측 결과를 도출하였다. 공간변화의 경우에는 각 가중치에 따라서 시나리오와 연대별로 차이를 보였으나 대체로 Scenario Generator에서 설정한 것과 같이 도시 주변 및 도로망을 중심으로 확장되는 경향이 나타났다. 도시 주변으로 도로망이 발달한 수도권을 중심으로 도시의 확장이 나타났으며, 충남 및 전북 지역의 많은 픽셀에서 농지가 도시로 전환되는 결과를 보였다. 특히, 이러한 경향성은 SSP1과 SSP2에 비해서 시가지 면적 확대가 큰 SSP3에서 보다 두드러지게 드러났다 (Fig. 5).

주요 토지피복인 시가지, 농지, 산림과 그 외의 기타 토지피복 유형으로 구분하여 전체 토지 면적에서 차지하고 있는 비중과 각 유형별 면적 변화 도출 시, 도시지역 및 기타 토지피복 유형의 면적 증가와 농지 및 산림의 면적 감소가 파악되었다 (Table 3).

기준토지피복과 추정된 토지피복 간 변화율을 파악하였을 경우, SSP1의 경우에는 시가지가 2030년까지는 기준대비 12.26%, 2100년까지 기준대비 20.27% 증가하는 것으로 나타

났으나 SSP3에서는 2030년까지 기준대비 53.07%, 2100년까지 82.41% 증가하는 것으로 나타났다. 농지의 면적 감소 추세가 산림에 비해 크게 나타났으나, 반대로 나지 및 초지가 소폭 증가하였으나 해당 면적 변화는 미미한 수준이었다. 기존 Kim (2016)의 연구는 시나리오 구동 결과로서 본 연구와는 다른 시나리오 해석에 근거하여 기준 설정, 공간자료 및 수식의 적용에 차이가 있어 개별 픽셀 간의 직접적인 비교는 어려우나, 토지피복 유형별로 전체 토지피복 면적에서의 구성비를 통해 비교하였을 경우, SSP 1-3의 시가지 면적에 있어서 2030년까지 각각 -0.04%, -0.50%, -7.56%로, 2050년까지 각각 0.05, -0.40%, -8.98%로, 2100년까지 각각 0.28%, -0.16%, -10.65%의 차이를 갖는 것으로 나타났다. 농지와 산림의 경우에는 최대 6.66%의 비율 차이를 나타내는 등 타 토지피복의 구성비는 시가지 면적에 따라서 변화하였으나 전반적으로는 구성에 유사성을 나타냈다.

4. 고찰

SSP 시나리오의 구성에 있어서 기후변화 적용에 대한 사회적 부담과 온실가스 감축에 대한 사회적 노력 필요성은 기본 전제조건이 된다. 또한, 토지피복의 경우에는 사회경제적 상황을 대표하는 자료의 역할을 한다. 따라서 미래 상황에 대한 그럴듯한 가이드라인으로 역할을 하나, 시나리오의 가정에 따라 제한적으로 활용이 이루어진다. 또한, 이러한 시나리오 오는 기후변화에 따른 다양한 영향과 이에 따른 관계를 추정하는데 기본 가정으로 활용된다. 그러나 SSP 시나리오를 통해 추정되는 사회경제적 요인이 제한적이며, SSP 시나리오 및 스토리라인이 아닌 현실적인 미래 토지피복 추정에는 미래 환경 및 국토 정책에 따른 다양한 요소가 반영되어야 한다. 따라서 여러 분야의 미래 변화 추정이 종합되어 미래 토지피복에 대한 분석으로 연결되어야 할 것이다.

본 연구에서는 비교적 활용이 용이하고 범용성이 뛰어난 Scenario Generator를 통해 SSP1-3 시나리오에 따른 스토리라인을 기존 연구에서 도출한 토지피복 형태와 유사하게 구현하였다. 또한, 인구를 고려하는 Jones and O'Neill (2016)의 방식을 변형하여 활용하였다. 기존 cellular automata 방식으로 전국 36개 권역에서 30m급 해상도로 구동된 Kim (2016)의 연구에 비해 큰 공간 해상도에서 구동되었지만, 인구 감소 시점 이후에도 토지피복 면적의 변화가 없거나, 도시 면적의 팽창 수준이 조절되지 못한 부분이 개선되었다. 인구 감소 시점 이후에 적용 가능한 모의 방안을 활용하여 SSP3 시나리오의 2100년 시점에서 시가지 면적을 선행 연구에 비해

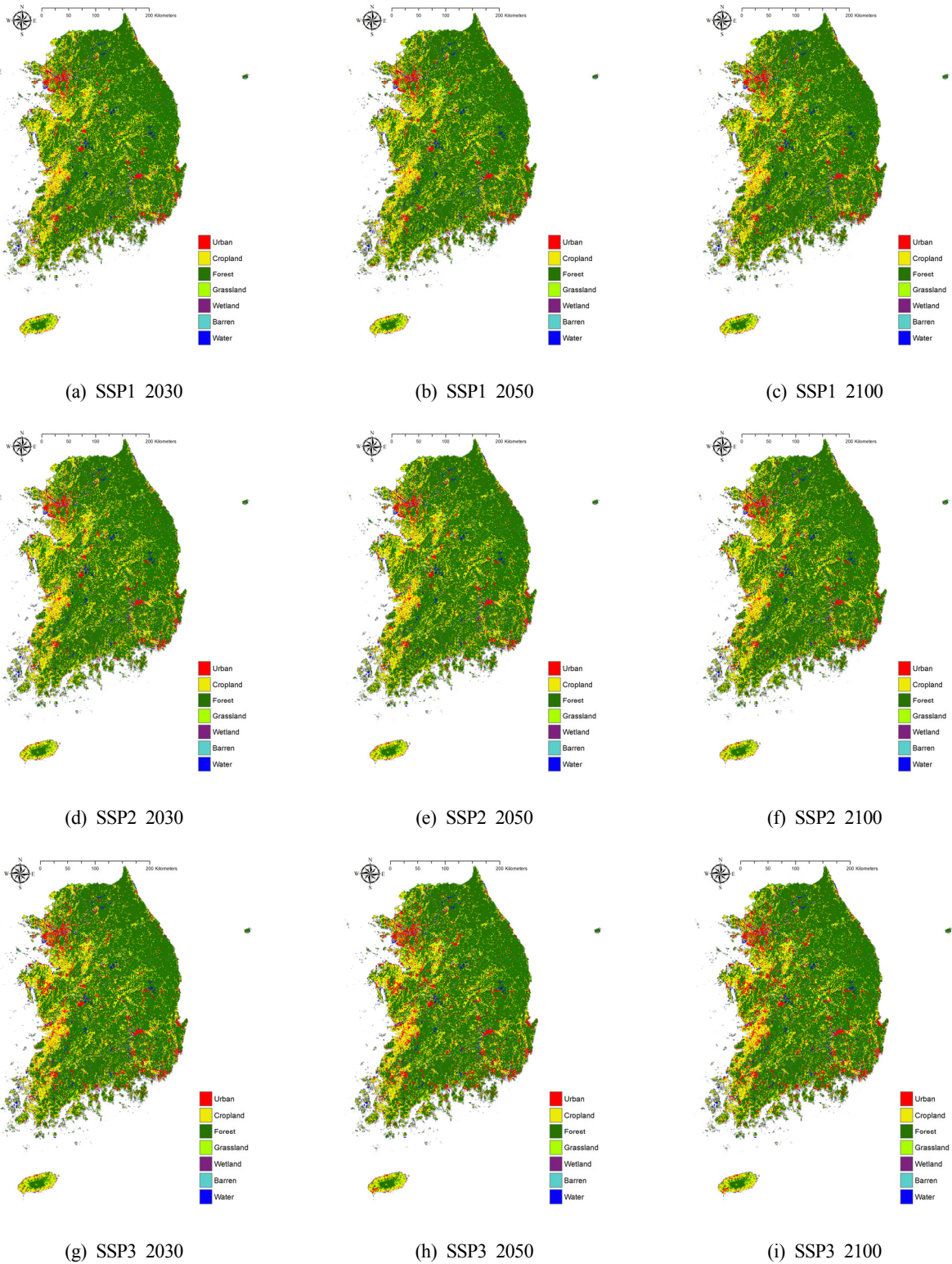


Fig. 5. Estimated future land cover maps in 2030, 2050, and 2100 by SSP1-3.

Table 3. Summary of estimated future land covers

Scenario	Variables	Classes				Overall
		Urban	Agriculture	Forest	etc.	
SSP1 2030	Area (km ²)	4,641	20,952	68,330	7,174	101,097
	Portion of each class (%)	4.59	20.72	67.59	7.10	100.00
	Change rate from baseline (%)	+12.26	-1.74	-0.37	+4.01	0.00
	Differences on portions *	-0.04	+2.30	+2.92	-5.17	0.00
SSP1 2050	Area (km ²)	4,733	20,847	68,238	7,234	101,097
	Portion of each class (%)	4.68	20.62	67.54	7.16	100.00
	Change rate from baseline (%)	+14.49	-2.24	-0.44	+6.07	0.00
	Differences on portions *	+0.05	+2.19	+2.88	-5.12	0.00
SSP1 2100	Area (km ²)	4,972	20,559	68,177	7,389	101,097
	Portion (%)	4.92	20.33	67.44	7.31	100.00
	Change rate from baseline (%)	+20.27	-3.59	-0.59	+11.39	0.00
	Differences on portions *	+0.28	+1.91	+2.77	-4.96	0.00
SSP2 2030	Area (km ²)	4,849	20,840	68,234	7,174	101,097
	Portion of each class (%)	4.80	20.61	67.49	7.10	100.00
	Change rate from baseline (%)	+17.30	-2.27	-0.51	+4.01	0.00
	Differences on portions *	-0.50	+2.53	+2.88	-4.91	0.00
SSP2 2050	Area (km ²)	4,945	20,728	68,190	7,234	101,097
	Portion of each class (%)	4.89	20.50	67.45	7.16	100.00
	Change rate from baseline (%)	+19.62	-2.79	-0.57	+6.07	0.00
	Differences on portions *	-0.40	+2.42	+2.84	-4.86	0.00
SSP2 2100	Area (km ²)	5,194	20,449	68,065	7,389	101,097
	Portion of each class (%)	5.14	20.23	67.32	7.31	100.00
	Change rate from baseline (%)	+25.64	-4.10	-0.75	+11.39	0.00
	Differences on portions *	-0.16	+2.14	+2.72	-4.70	0.00
SSP3 2030	Area (km ²)	6,328	20,089	67,506	7,174	101,097
	Portion of each class (%)	6.26	19.87	66.77	7.10	100.00
	Change rate from baseline (%)	+53.07	-5.79	-1.57	+4.01	0.00
	Differences on portions *	-7.56	+5.29	+4.85	-2.58	0.00
SSP3 2050	Area (km ²)	7,107	19,549	67,146	7,295	101,097
	Portion of each class (%)	7.03	19.34	66.42	7.21	100.00
	Change rate from baseline (%)	+71.92	-8.32	-2.09	+8.16	0.00
	Differences on portions *	-8.98	+5.35	+5.68	-2.05	0.00
SSP3 2100	Area (km ²)	7,541	19,114	66,955	7,487	101,097
	Portion of each class (%)	7.46	18.91	66.23	7.40	100.00
	Change rate from baseline (%)	+82.41	-10.36	-2.37	+14.75	0.00
	Differences on portions *	-10.65	+5.47	+ 6.66	-1.48	0.00

*Differences on Portions: compared with Kim (2016)

10.65% 작게 도출한 본 연구 결과에 비추어 볼 때, 인구 비례와 Scenario Generator의 확장성을 함께 활용한다면 향후 기후변화 영향평가 시 사회경제적 요소를 보다 적절하게 고려할 수 있을 것이다.

전국을 대상으로 한 미래 토지피복에 대한 추정은 각 토지피복 변화에 따른 큰 틀의 시나리오를 작성하는데 용이하며, 공간모형에 기반한 산림 및 농업 모형의 입력자료로의 역할을 할 수 있다 (Swetnam et al., 2011). 따라서 토지피복 변화가 나타나는 각 픽셀의 경우에는 시나리오 상 잠재적인 토지이용 변화 압력이 존재하는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 시나리오에 따른 미래 예측 결과는 각 모형에 따른 가정이 전제되어 있으며, 과거로부터 급격한 토지이용 변화가 나타나는 우리나라 토지피복 및 이용 변화의 특성을 고려해야 하는 한계가 있다 (Park et al., 2011; Kim and Yoon, 2015). 그러므로 향후 연구에서는 단순한 토지피복면적 증가율 적용에서 나아가 SSP 시나리오 상의 스토리라인의 설정 수준과 토지피복 및 토지이용 관련 정책 우선순위 및 개별 토지피복에 대한 수요 등을 종합한 분석이 이루어져야 할 것이다.

미래 토지피복 예측 결과는 정책적인 기후변화 적응 대책, 토지이용 구성 등에 영향을 줄 수 있다. 또한, 현재 이루어지고 있는 기후변화 영향평가 및 취약성 평가, 리스크 평가에 활용이 기대된다. 이러한 점에서 케일럼 (Korea Environmental Institute's Integrated Land-Use Model, KEI-ILIM) 및 URCM (Urban and Regional Carbon Management)과 같은 계량경제적 모형에 기반하여 SSP 시나리오를 재해석해야 할 필요가 있다 (Kim and Yoon, 2015; Yoo et al., 2015). 현재까지 SSP 시나리오가 각 국가별로 개발되고, 이에 따른 토지피복에 대한 공간적인 요인을 고려한 분석과 SSP 시나리오에서 제공하는 단순한 데이터를 병합한 분석이 이루어졌다면, 이러한 모형들은 SSP 시나리오에서 주어지는 자료를 바탕으로 각 토지이용 유형별 미래 수요 예측 통합적 수행할 수 있게 할 것으로 보인다 (Jones and O'Neill, 2016). 따라서 Scenario Generator의 확장성과 다양한 모형이 결합된 형태로 토지피복 및 이용 모형의 발전이 요구된다.

5. 결론

미래 사회경제 시나리오의 개발과 이에 따른 공간자료들은 미래 기후변화 영향평가와 이와 관련된 의사결정 시 적합한 가이드라인을 제시하는데 활용된다. 기존의 토지피복 예측은 SSP 시나리오의 개발과 공개 시점과 병행되는 측면에서 공간 분석 방법에 따른 분석이 진행된 반면, Scenario

Generator에 인구변화에 따른 시가지 면적 변화를 반영하여 SSP1-3에 따른 미래 토지피복을 보다 활용성 있게 도출할 수 있었다. 이러한 방법은 현재 SSP 시나리오에 기반한 토지피복 예측에 다양하게 활용될 수 있으며, 향후 개별 토지피복 유형에 따른 수요 예측과 결합하여 그 확장성이 넓어질 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 시나리오에 따른 미래 가용 자료의 한계가 있으므로 현실성 있는 요인을 반영할 수 있도록 방법론의 고도화가 향후에는 필요할 것이다. 특히, 토지피복 및 토지이용 예측 및 구성에 있어서 다양한 정책적 요인이 있을 수 있으므로, 적합한 시나리오와 스토리라인을 구현하는 방법과 이를 통한 기후변화 적응 방안에 대한 논의가 요구된다.

사 사

본 연구는 환경부 “기후변화대응환경기술개발사업 (2014-001310008)”의 지원과 산림청 (한국임업진흥원) “산림과학기술 연구개발사업 (2018133B10-1820-BB01)”에 의하여 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Bhagabati NK, Ricketts T, Sulistyawan TBS, Conte M, Ennaanay D, Hadian O, McKenzie E, Olwero N, Rosenthal A, Tallis H, Wolny S. 2014. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans. *Biological Conservation* 169: 147-156.
- Calvin K, Bond-Lamberty B, Clarke L, Edmonds J, Eom J, Hartin C, Kim S, Kyle P, Link R, Moss R, McJeon H. 2017. The SSP4: A world of deepening inequality. *Global Environmental Change* 42: 284-296.
- Chae Y. 2016. Development of socio-economic scenarios for low carbon climate change adaptation read society in Korea, Korea Environment Institute Research Report. Korea Environment Institute, Sejong.
- Fricko O, Havlik P, Rogelj J, Klimont Z, Gusti M, Johnson N, Kolp P, Strubegger M, Valin H, Amann M, Ermolieva T. 2017. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: a middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change* 42: 251-267.
- Fujimori S, Hasegawa T, Masui T, Takahashi K, Herran DS, Dai H, Hijioka Y, Kainuma M. 2017. SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways.

- Global Environmental Change 42: 268-283.
- Hurtt G, Chini L, Sahajpal R, Frolking S. 2018. harmonization of global land-use change and management for the period 850-2100. Geoscientific Model Development (In prep).
- Jeon SW, Kim J, Jung H. 2013. A Study on the Forest Classification for Ecosystem Services Valuation. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology 16 (3): 31-39.
- Jiang L, O'Neill BC. 2017. Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways. Global Environmental Change 42: 193-199.
- Jones B, O'Neill BC. 2016. Spatially explicit global population scenarios consistent with the Shared Socioeconomic Pathways. Environmental Research Letters 11 (8): 084003.
- Kashung Y, Das B, Deka S, Bordoloi R, Paul A, Tripathi OP. 2018. Geospatial technology based diversity and above ground biomass assessment of woody species of West Kameng district of Arunachal Pradesh. Forest Science and Technology, 14 (2): 84-90.
- Kim C. 2016. Land use classification and land use change analysis using satellite images in Lombok Island, Indonesia. Forest Science and Technology 12 (4): 183-191.
- Kim HY. 2016. Simulation of Land Use Change by Storyline of Shared Socio-Economic Reference Pathways. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 19 (2): 1-13.
- Kim JS, Choi CU. 2013 Impact of Changes in Climate and Land Use/Land Cover Change Under Climate Change Scenario on Streamflow in the Basin. Journal of the Korean society for geospatial information system 21 (2): 107-116.
- Kim JS, Park SY. 2013. Urban growth prediction each administrative district considering social economic development aspect of climate change scenario. Journal of Korean Society for Geospatial Information System 21 (2): 53-62.
- Kim M, Yoo S, Kim N, Lee W, Ham B, Song C, Lee WK. 2017. Climate Change Impact on Korean Forest and Forest Management Strategies. Korean Journal of Environmental Biology 35 (3): 413-425.
- Kim OS, Yoom J. 2015. Modeling Land-Change of South Korea under a Business-as-usual Scenario. Journal of the Korean urban geographical society 18 (3): 121-135.
- Korea Forest Service. 2016. 2015 Statistical Yearbook of forestry. Korea Forest Service. Dajeon.
- Kriegler E, Bauer N, Popp A, Humpenöder F, Leimbach M, Strefler J, Baumstark L, Bodirsky B.L, Hilaire J, Klein D, Mouratiadou I. 2017. Fossil-fueled development (SSP5): an energy and resource intensive scenario for the 21st century. Global environmental change 42: 297-315.
- Kriegler E, Edmonds J, Hallegatte S, Ebi KL, Kram T, Riahi K, Winkler H, van Vuuren DP (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions. Climatic Change 122 (3): 401-414.
- Lee YG, Cho YH, Kim SJ, 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.
- Morgan MG, Keith DW. 2008. Improving the way we think about projecting future energy use and emissions of carbon dioxide. Climatic Change 90 (3): 189-215.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Simith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Wayant JP, Wilbanks TJ. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463 (7282): 747.
- O'Neill BC, Kriegler E, Ebi KL, Kemp-Benedict E, Riahi K, Rothman DS, van Ruijven BJ, van Vuuren DP, Birkmann J, Kok K, Levy M. 2017. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change 42: 169-180.
- O'Neill BC, Kriegler E, Riahi K, Ebi KL, Hallegatte S, Carter TR, Mathur R, van Vuuren DP. 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. Climatic Change 122 (3): 387-400.
- Oh YG, Choi JY, Yoo SH, Lee SH. 2011. Prediction of Land-cover Change Based on Climate Change Scenarios and Regional Characteristics using Cluster Analysis.

- Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 53 (6): 31-41.
- Oh YG, Yoo SH, Lee SH, Park NY, Choi JY, Yun DK. 2012. Prediction of land-cover changes and analysis of paddy fields changes based on climate change scenario (A1B) in agricultural reservoir watersheds. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54 (2): 77-86.
- Park S, Jeon S, Kim S, Choi C. 2011. Prediction and comparison of urban growth by land suitability index mapping using GIS and RS in South Korea. *Landscape and urban planning* 99 (2): 104-114.
- Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'neill BC, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko O, Lutz W, Popp A, Cuaresma JC, KC S, Leimbach M, Hasegawa T, Havlik P, Humpenoder F, Da Silva LA, Smith S, Stehfest E, Bosetti V, Eom J, Gernaat D, Masui T, Rogelj J, Strefler J, Drouet L, Krey V, Luderer G, Harmsen M, Takahashi K, Baumstark L, Doelman JC, Kainuma M, Klimont Z, Marangoni G, Lotze-Campen H, Obersteiner M, Tabeau A, Tavoni M. 2017. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change* 42: 153-168.
- Sagong H. 2004. Characteristics of Urban Sprawl in Seoul Metropolitan Region: An Integration of Remote Sensing and GIS Approach. *Panning and Policy*: 98-108.
- Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wood SA, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim CK, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl AL, Rogers L, Bierbower W, Denu D, Douglass J. 2016. *INVEST User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, USA.
- Shin HJ, Park G, Park MJ, Kim SJ. 2012. Projection of Forest Vegetation Change by Applying Future Climate Change Scenario MIROC3. 2 A1B. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15 (1): 64-75.
- Swetnam RD, Fisher B, Mbilinyi BP, Munishi PK, Willcock S, Ricketts T, Mwakalila S, Balmford A, Burgess ND, Marshall AR, Lewis SL. 2011. Mapping socio-economic scenarios of land cover change: A GIS method to enable ecosystem service modelling. *Journal of environmental management* 92 (3): 563-574.
- van Vuuren DP, Carter TR. 2014. Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with the old. *Climatic Change* 122 (3): 415-429.
- van Vuuren DP, Stehfest E, Gernaat DE, Doelman JC, van den Berg M, Harmsen M, de Boer HS, Bouwman LF, Daioglou V, Edelenbosch OY, Girod B. 2017. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Global Environmental Change* 42: 237-250.
- Vigerstol KL, Aukema JE. 2011. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of environmental management* 92 (10): 2403-2409.
- Yoo S, Lee WK, Yamagata Y, Lim CH, Song CH, Choi HA. 2015. Analyzing Residential Land Use Change and Population Density Considering Climate Change Using Land Use Equilibrium Model in Jeju. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18 (4): 43-58.