

다행위자시스템을 이용한 산림정책별 토지이용 변화와 영향 분석

박수진* · 안유순** · 신유진*** · 이수연**** · 심우진***** · 문지윤***** · 정관용*****
· 김일권***** · 신혜섭***** · 허동숙***** · 성주한*****
· 박찬열*****

A Multi-agent System to Assess Land-use and Cover Changes Caused by Forest Management Policy Scenarios

Soojin Park* · Yoo Soon An** · Yujin Shin*** · Sooyoun Lee**** · Woojin Sim***** ·
Jiyoon Moon***** · Gwan Young Jeong***** · Ilkwon Kim***** · Hyesop Shin*****
Dongsuk Huh***** · Joo Han Sung***** · Chan Ryul Park*****

요약 : 최근 지표환경변화과정에서 발생하는 복잡계적 특성에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위한 도구로 다행위자시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이 연구는 최근 한국의 산림정책에서 중요하게 다루어지고 있는 산림개방의 문제를 사례로 토지피복변화의 직간접적인 영향을 평가할 수 있는 다행위자시스템(Multi-Agent System)을 개발하여, 강원도 평창과 정선의 가리왕산과 그 주변지역에 적용하였다. 이 연구에서 사용한 다행위자시스템은 LUDAS(Land Use DynAmic Simulator)로 인문환경과 자연환경

이 논문은 2013~2014년 국립산림과학원에서 시행한 위탁과제 ‘다행위자 시스템(Multi-Agent System)을 이용한 산림생태계 이용 효율화 방안’의 일환으로 진행되었다.

* 서울대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Seoul National University), 서울대학교 국토문제연구소 겸임 연구원(Adjunct Researcher, The Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University), catena@snu.ac.kr

** 서울대학교 지리학과 박사과정(Ph.D. Candidate, Department of Geography, Seoul National University), newsoon@gmail.com

*** 국립산림과학원 산림생태연구과 연구원(Researcher, Division of Forest Ecology, Department of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute), detectivekonan@snu.ac.kr

**** 서울대학교 국토문제연구소 연구원(Researcher, The Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University), chang2sy@snu.ac.kr

***** 서울대학교 지리학과 조교(Department Assistance, Department of Geography, Seoul National University), tlang1@snu.ac.kr

***** (주)SI Imaging Service, 대리(Manager, SI Imaging Service), mgy1102@naver.com

***** 바이로이트대학 지구과학과 박사과정 (Ph.D. Candidate, Department of Geosciences, University of Bayreuth), sky-duke@snu.ac.kr

***** 바이로이트대학 지구과학과 박사과정(Ph.D. Candidate, Department of Geosciences, University of Bayreuth), ilkwon.kim@uni-bayreuth.de

***** 서울대학교 국토문제연구소 연구원(Researcher, The Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University), mrsensible@snu.ac.kr

***** 서울대학교 지리학과 BK21플러스 4-Zero지향 국토공간창조 사업단 BK조교수(BK Assistant Professor, SNU BK21 Plus for Geography Department(4-zero Land Space Creation Group), Seoul National University), suk0216@gmail.com

***** 국립산림과학원 산림생태연구과 과장(Director, Division of Forest Ecology, Department of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute), jhs033@korea.kr

***** 국립산림과학원 산림생태연구과 연구사(Researcher, Division of Forest Ecology, Department of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute), park@forest.go.kr

의 공간적인 이질성과 상호작용을 동적으로 구현하는 강점이 있으며, 산지개방에 따른 사회·경제 및 자연환경적 영향을 종합적으로 비교·평가할 수 있는 장점을 가지고 있다. 모형은 인간 행위자와 그 의사결정으로 이루어져 있는 인문환경시스템, 자연환경과 산림생태계를 대표하는 자연환경시스템, 이를 연결하는 상호작용 연결고리와 정책 시나리오로 구성하였다. 모의 결과는 산림정책의 결과로서 지역주민의 소득과 생태계서비스의 가치, 소득 불평등의 정도로 도출하였다. 그 결과 최적의 산림정책 시나리오는 지형을 고려하여 산지를 개방하고, 지역주민을 대상으로 개방하며, 휴양지 목적의 산지 개방으로 도출되었다. 이 연구는 산림정책 수립과 토지이용 관련 정책연구를 위한 의사결정시스템 개발에 중요한 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 다행위자시스템, 토지이용 변화, 산림정책, 산림개방, 가리왕산

Abstract : This paper presents a multi-agent system model of land-use and cover changes, which is developed and applied to the Gariwang-san and its vicinity, located in Pyeongchang and Jeongseon-gun, Gangwon province, Korea. The Land Use Dynamics Simulator (LUDAS) framework of this study is well suited for representing the spatial heterogeneity and dynamic interactions between human and natural environment, and capturing the impacts of forest-opening policy interventions to future socio-economic and natural environment changes. The model consists of four components: (1) a system of human population, (2) a system of landscape environment, (3) decision-making procedures integrating human(or household), environmental and policy information into forest land-use decisions, and (4) a set of policy scenarios that are related to the forest-opening. The results of model simulation by different combination of various forest management scenarios are assessed by the levels of household income, ecosystem service value and income inequality in the study region. As a result, the optimal scenario of forest-opening policies in the study region is to open the forest to local residential community for the purpose of recreation, considering the distinctive topographical feature. The model developed in this research is expected to contribute to a decision support system for sustainable forest management and various land-use policies in Korea.

Key Words : multi-agent system, Land-Use and Land Cover Change (LUCC), forest management policy, forest-opening policy, Gariwang-san

1. 서론

토지이용 및 토지피복의 변화(Land Use and Land Cover Change, 이하 LUCC)는 인간의 활동과 자연환경의 다양한 프로세스, 그리고 이들의 상호작용에 의한 지표시스템 변화의 결과다(Vitousek *et al.*, 1997; Reynolds *et al.*, 2007; Poulsen, 2013). 지표시스템의 변화는 필연적으로 인간의 삶과 자연의 지속가능성(sustainability)에 중대한 영향을 끼친다(Turner II *et al.*, 1995; Lambin *et al.*, 1999; Park *et al.*, 2005; Reynolds *et al.*, 2007). 특히 최근의 인간에 의한 토지이용 및 토지피복 변화는 기후변화 등 인간의 삶과 자연환경에 영향을 끼치는 다양한 변화를 야기하는 요인이자 결과였다. 따라서 토지이용 및 토지피복의 변

화양상과 그 영향에 대해서 파악하는 것은 인간의 지속가능한 삶과 자연환경의 보존 측면에서 중요한 문제이다.

최근 이러한 문제의식을 바탕으로 토지이용 및 토지피복 변화 모델링(LUCC Modeling)이 많이 활용되고 있다(Veldkamp and Lambin, 2001). LUCC Modeling은 토지이용의 변화를 시·공간적으로 모의함으로써 토지이용변화의 동력과 요인(driving force)을 파악하고 미래에 가능한 토지이용 변화 경향을 파악하고자 하는 방법론이다(Verburg *et al.*, 2005; Le *et al.*, 2008). 하지만 토지 이용 및 토지피복 변화는 다양한 사회·경제적 요인과 환경적인 요인간의 상호작용에 따른 비선형적(non-linearity) 프로세스와 이에 기인한 복잡성(complexity)의 결과물로서 그 예측이 어렵다는 문제가 있다(Poulsen, 2013).

이러한 복잡성과 비선형성의 문제를 해결하기 위한 방법으로 최근 LUC Modeling 분야에서는 다행위자시스템(Multi-Agent System)을 적극적으로 활용하고 있다(예, Parker *et al.*, 2003; Monticino *et al.*, 2007; An, 2012; Filatova *et al.*, 2013). 다행위자시스템은 인간과 자연시스템을 구성하는 각종 구성요소를 개별적인 행위자(Agent)로 규정하고, 이들의 상호작용을 모의함으로써 지표시스템의 변화를 모의하는 도구이다(Parker *et al.*, 2003). 다행위자시스템의 이러한 특성은 기존의 LUC Modeling에서 모의하기 어려웠던 현실의 복잡성, 적응, 창발현상을 보다 더 현실적으로 모사할 수 있게 해 준다(Parker *et al.*, 2003; Le *et al.*, 2008). 일례로 경험식을 기반으로 둔 통계기반 또는 수식기반 모형은 과거의 궤적을 크게 벗어나는 현상을 설명하지 못하지만, 다행위자시스템은 여러 요소의 상호작용을 통해 창발현상을 구현해냄으로써 이러한 한계를 극복할 수 있다.

다행위자시스템은 지표생태계 변화, 각종 정책의 결과 및 파급효과의 예측, 인간과 자연시스템의 공진화(co-evolution)라는 측면에서 다양한 분야에 활용되고 있다(Parker *et al.*, 2003; Bousquet and Le Page, 2004; Hare and Deadman, 2004; Robinson *et al.*, 2007; Matthews *et al.*, 2007). 한국에서는 교통(이종호, 2003; 이종덕 등, 2015), 보건(Ariuntsetseg, 2013; 신혜섭, 2014), 도시(김동한, 2012; 김동환 등, 2014) 등 많은 분야에서 다행위자시스템 또는 공간기반의 행위자 기반 모형(Agent-based Modeling)이 활용되고 있다. 하지만 이 연구들은 사회경제 시스템에 치중된 연구로, 자연환경의 공간적 이질성과 인간 행위자와의 복잡한 상호작용에 대한 모형의 구축까지는 그 범위가 미치지 못하고 있는 실정이다.

한국의 산지는 인간과 자연환경의 상호작용과 지속가능성의 측면에서 핵심적인 공간이다. 20세기 초반 한국의 산지는 황폐화된 상태였지만, 적극적인 복원과 보전 중심의 관리정책으로 인해 복원되었다. 하지만 최근 가용토지가 제한되고 친환경적인 산지의 개발수요가 증가하면서, 산지가 가지고 있는 생태적인 기능을 해치지 않는 범위 내에서 산지이용과 개발을 허용해야 한다는 주장이 부각되고 있다(박양호,

1993; 이용범·권용걸, 2009; 최병암, 2011; 산림청, 2013). 우리나라는 산지가 차지하는 비중이 높고 여름철에 집중되는 강우의 특성으로 인해, 지형변형 혹은 산지의 이용으로 인한 자연재해 취약성이 매우 높다(산림청, 2013; 박수진, 2014). 적극적인 산지이용 정책들이 우리나라 산지의 고유한 특성과 그 내부에서 이루어지고 있는 복잡한 사회생태시스템의 상호작용을 효과적으로 고려하지 못한다면 국토의 지속가능성과 안전성을 저해하는 요인이 될 것으로 예상된다. 다행위자시스템은 이러한 사회적, 정책적 필요성과 산지와 인간사이의 상호작용을 효과적으로 고려하여, 지속가능한 산지 및 국토관리정책을 수립하는 데 있어 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 이 연구에서는 산지의 토지이용변화로 인해 야기되는 생태계서비스와 사회경제적인 지표들의 변화를 예측하고, 특정 산림정책의 영향을 파악할 수 있는 다행위자시스템 기반의 토지이용 및 토지피복 변화 모형을 개발하여 적용하는 것이 목적이다. 특히 최근 개발과 보존에 대한 많은 논란이 있었던 강원도 평창·정선군의 가리왕산 일대 토지이용변화와 산지생태계의 특성을 중심으로 연구를 진행할 것이다. 이를 통해 생태계서비스의 증진과 인간의 지속가능성을 위한 연구의 틀과 정책결정의 도구를 제공하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

1) 다행위자시스템의 개념과 구성

기존의 LUC Modeling 기법은 수식기반(Equation-Based), 통계기반(Statistical-Based), 베이저안 네트워크(Bayesian Network)와 같은 전문가 모형, 시스템 다이내믹스(System Dynamics), 진화적 모형, 셀룰러 오토마타(Cellular Automata) 등이 있다(Parker *et al.*, 2003). 그러나 토지이용 변화의 프로세스에는 인간과 자연이 행위주체로서 모두 포함되어 있는데도 불구하고, 기존의 모형들은 인간 또는 자연만을 반

영하는 경우가 많았다(Le *et al.*, 2008). 특히 과거의 자료에 기반한 기존의 연구 기법(수식, 통계기반 등)은 과거의 궤적을 벗어나는 현상을 설명할 수 없기 때문에, 인간과 자연과의 상호작용과 공진화에서 기인하는 복잡성과 창발현상을 설명할 수 없었으며 그 예측력도 낮은 한계를 가지고 있었다(Verburg *et al.*, 2002; Parker *et al.*, 2003; Poulsen, 2013).

최근 LUCC Modeling 기법에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 다행위자시스템(MAS-LUCC)을 적용해 오고 있다. 다행위자시스템은 토지이용 및 토지피복 변화에 영향을 미치는 사회경제적 요소와 자연적인 요소를 행위자로 설정하고, 이들의 상호작용을 규정하여 이들의 공진화를 모의하는 모형이다(Parker *et al.*, 2003; Le *et al.*, 2008). 다행위자시스템은 이러한 상호작용의 구현을 통해 기존의 모형에서 설명하지 못했던 시스템의 되먹임 구조(feedback-loop), 비선형성, 적응, 창발현상을 설명할 수 있다(Parker *et al.*, 2003). 또한 다행위자시스템은 행위자와 요인에 대한 추가와 수정이 기존 방법론에 비해서 유연하다는 강점을 가지고 있다(Gilbert and Troitzsch, 1999; Parker *et al.*, 2003; Le *et al.*, 2008). 이러한 강점을 바탕으로 LUCC Modeling에서 다행위자시스템은 많은 연구에서 적용되고 있으며, 가상의 압축된 공간에서 현실의 구체적인 공간의 문제를 다루는 데까지 그 연구의 범위가 확장되고 있다(Matthews *et al.*, 2007).

다행위자시스템은 인간 행위자(Human-Agent)와 환경(Environmen), 그리고 이들의 상호작용으로 구성된다(Parker *et al.*, 2003; Le, 2005). 행위자는 다행위자시스템의 목적과 스케일, 시스템 경계에 따라 개인, 가구, 국가, 동물, 식물 등 다양한 방식으로 정의 내려진다(Gilbert and Troitzsch, 1999; Le, 2005; 윤영수 · 채승병, 2005). 행위자들의 행동 양식은 그들의 상태, 다른 행위자의 상태, 환경에 따라 행동을 조정하고 적응하도록 짜여진다(Railsback and Grimm, 2009). 환경은 행위자들이 행동하는 공간이며 동적시스템으로써 다양한 층위로 환경의 다른 요소, 행위자, 외부 요인에 영향을 받는다(Le, 2005; Wooldridge, 2010). 상호작용은 행위자 간, 행위자와 환경, 환경의 구성요소 간, 시스템의 외부 요인과

시스템 내부 요소 간에서 다양하게 이루어진다(Le, 2005). 특히 시스템 외부의 요인(주로 정책요인)과 시스템 내부 간의 상호작용은 토지이용 및 토지피복에 대한 정책을 모의하여 최적의 정책대안을 찾을 때의 필수적인 부분이다(Le *et al.*, 2008).

2) 산림정책에 대한 다행위자시스템의 적용사례

다행위자시스템은 토지피복 변화와 관련된 자연환경 변화, 농업경제, 도시연구 등의 많은 분야에서 활용되고 있다(Parker *et al.*, 2003). 이 연구는 산림정책에 따른 토지이용과 그 주변의 변화를 다루는 것으로 이와 관련되는 최근에 개발된 다행위자시스템은 표 1과 같다. 미국 중부지역을 대상으로 개발된 Hoffmann *et al.*(2002)과 Evans and Kelley(2004)의 산림-농업 토지이용 변화 모형(LandUse Change In the Midwest, 이하 LUCIM), Lim *et al.*(2004)에 의해 개발되어 적용된 아마존 토지이용 변화 모형(Land-Use Change In the Amazon; 이하 LUCITA), Purnomo *et al.*(2005)이 개발한 행위선택모형(Common Pool Resources and Multi-Agent System; 이하 CORMAS), Le *et al.*(2008)이 개발한 유역단위의 농업 및 산림관리정책의 영향을 분석한 LUDAS(Land-Use DYnamic Simulator) 모형 등이 대표적이다(표 1).

위의 방법론들은 산림에 영향을 끼치는 정책요인을 중심으로 다행위자시스템을 구축하고, 이 모형을 바탕으로 토지이용의 변화를 모의하여 그 정책의 효과를 분석하였다는 공통점이 있다. 하지만 한국의 산림정책에 따른 토지이용변화를 살펴보는 데 있어 고려할 수 있는 모형간의 차이점은 다음과 같다. 첫째, 하나의 연구지역에 특화된 모형인지 아니면 다양한 연구지역에서 적용될 수 있는지의 차이이다. LUCIM과 LUCITA는 그 이름에서도 알 수 있듯 특정 연구지역에 특화된 모형으로 그 외의 지역의 적용에는 어려운 모형인 반면, CORMAS와 LUDAS는 수 개의 지역을 대상으로 적용을 진행한 사례가 있는 모형이다. 둘째, 적용한 연구 지역과의 생태적 환경의 차이를 고려할 수 있는지의 문제이다. 표 1의 연구들은 한국과는 생태적 속성이 상이한 지역을 대상으로 연구

표 1. 인간과 자연이 통합된 토지이용정책과 관련된 다행위자시스템의 최근 연구사례(산림이용 중심)

| 연구명/모형명 | 주요 연구 | 연구지역 | 시스템 구성요소의 정의/특성 | | |
|-------------------------------|--|---------------------------|------------------|--|---|
| | | | 행위자 (Agent) | 환경(Envrionment/ Landscape) | 정책 시나리오 |
| 미국 중부 산림-농업 토지이용 변화 모형(LUCIM) | Hoffmann <i>et al.</i> (2002), Evans and Kelley(2004) | 미국 인디애나 주 | 각각의 토지 보유자 | Raster 형태로, 토지이용, 경사도 등의 지리정보로 구축됨 | 농산물 가격, 세금의 변화 등 |
| 아마존 토지이용 변화 모형(LUCITA) | Lim <i>et al.</i> (2001), Deadman <i>et al.</i> (2004) | 브라질 아마존 Altamira일원 | 가구(농부) | 100ha 규모의 격자 형태로 구성, 산림의 변화와 토양의 질의 변화의 상관관계를 회귀식 기반으로 다루는 부속모형이 주된 환경으로 정의됨 | 파괴되어 다시 이차 천이가 이루어진 산림 우선 개간, 원시림 우선 개간 |
| 공유자원과 다행위자시스템 (CORMAS) | Purnomo <i>et al.</i> (2005), Trébuil <i>et al.</i> (2005) | 인도네시아 칼리만탄, 태국 북부 고지대 | 다양한 속성을 가진 농부 개인 | 토양침식, 작물 생산, 시장가격 모형 등 (Polygon 형태) | 행위자의 작물의 선택 등 |
| 토지이용 다이내믹 모형(LUDAS) | Le(2005), Le <i>et al.</i> (2008), Miyasaka <i>et al.</i> (2012) | 베트남 홍하, 중국 내몽골 등 (소유역 단위) | 다양한 직업을 가진 가구 | 식량생산, 토지황폐화, 토양복원 등(Raster로 구성) | 유역 단위의 농업 과 산지 정책 |

출처: 안유순(2013)의 정리 내용을 수정 및 보완함.

를 진행하였다. LUCITA와 CORMAS는 주로 열대 우림 일대를 중심으로 연구를 진행하였다. LUDAS는 열대 몬순지역(베트남), 열대 우림지역(가나), 건조지(내몽골) 등 다양한 지역에서 적용되었으나 우리나라와 유사한 생태적인 지역에 대한 연구는 아직 없다. LUCIM은 한국과 비교적 유사한 기온 및 강수조건을 가지고 있는 연구 지역이나, 앞서 언급했듯 모형 자체가 미국 중부에 특화되어 있는 모형이며 생태에 영향을 끼치는 지형 등의 다른 요인이 상이하다는 문제가 있다. 셋째, 모형 구축의 용이성의 문제이다. LUCITA와 CORMAS는 범용 프로그래밍 툴킷(tool kit)을 사용하여 고급의 프로그래밍 기술을 갖추지 않은 경우 적용이 어려운 반면, LUCIM과 LUDAS는 다행위자시스템 구축을 위한 접근성이 높은 툴킷을 사용하여 그 적용이 상대적으로 용이한 편이다.

이 연구에서는 이러한 다행위자시스템의 차이점을 비교·검토하여, LUDAS의 프레임워크(framework)를 사용하여 모형을 구축하는 것이 타당하다고 판단하였다. LUDAS에 대한 자세한 내용과 선정의 이유는 다음과 같다.

3) LUDAS(Land-Use DynAmic Simulator)

LUDAS(Land-Use DynAmic Simulator)는 소유역을 대상으로 다양한 농업-산지관리 정책이 지역에 미치는 영향을 모의하기 위해 처음 개발된 다행위자시스템이다(Le *et al.*, 2008). LUDAS 자체가 한 개의 완성된 모델을 의미하는 것은 아니며, 인간의 토지이용정책의 수립과 그 결과를 파악하는 한 개의 관점 혹은 프레임워크로 이해해야 한다. 따라서 각 지역의 인간 및 자연환경의 특수성과 정책시나리오는 개별적인 모델링을 통해 완성되어야 한다. LUDAS는 Le(2005) 및 Le *et al.*(2008)에 의해 베트남의 홍하(Hong Ha) 유역에서 처음 개발된 이후, 가나(Schindler, 2009), 내몽골(Miyasaka *et al.*, 2012), 북한(안유순, 2013) 등 다양한 지역에 적용되었다. 기존에 다양한 생태적인 조건을 가진 연구지역에 적용해 왔다는 점에서 한국에 적용할 경우 상대적으로 이질성이 적을 수 있고, 일반인들이 쉽게 접근하고 사용할 수 있는 복잡계시스템 모델링 툴킷인 Netlogo¹⁾를 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 다른 연구에 비해

환경요소를 동적으로 구현할 수 있다는 강점이 있어 LUCC 모델링에서 발생할 수 있는 복잡성, 특히 자연 환경의 복잡성을 보다 더 잘 구현할 수 있다는 강점이 있다(Le, 2005).

LUDAS의 구성은 그림 1과 같이 크게 4가지 부분으로 이루어져 있다. 첫째, 행위자와 행위자의 의사결정 체계를 뜻하는 인간시스템(human-system)으로, 모형의 행위자로 선정된 가구(household)의 행위 패턴을 정의하는 시스템이다. 행위자는 지역의 특성에 맞는 유형의 집단으로 구분되며, 각각 다른 특성을 보인다. 행위자 가구는 정해진 조건과 제한된 합리성(bounded rationality)에 따라 행동한다.²⁾ 둘째, 다양한 속성을 포함하고 있는 각각의 격자로 구성된 자연환경(landscape System)시스템이다. 특히 LUDAS의 자연환경시스템이 다른 다행위자시스템의 환경 요소와 차별적인 것은 환경에 대한 요소 하나하나 또한 행

위자로서 기능한다는 부분이며, 따라서 LUDAS의 자연환경 시스템을 구성하는 격자들은 행위자 및 외부 정책요인과 주변 환경에 영향을 받아 동적으로 변화한다(Le, 2005; 안유순, 2013). 셋째, 토지이용선택에 중요한 정책요인이다. 특정지역에서 현재 논의되고 있거나 향후 개발되어 적용될 다양한 정책시나리오들을 제시하고 그 영향을 분석하는 것이 이 모형의 핵심적인 구성요소이다. 넷째, 가구와 환경, 정책에 대한 정보를 행위자의 토지이용 선택으로 통합하는 의사결정 절차로 구성되어 있다.

LUDAS는 산림지역에서 나타나는 산림 및 토지이용변화과정을 자연환경행위자와 인간행위자의 상호작용에 의해 나타나는 결과로 설정하였으며, 국가차원에서 취해지는 특정 정책들이 어떤 파급효과를 가지는지를 시나리오 기반의 모델로 구현하였기 때문에, 산림정책 이용에 따른 파급효과를 파악하고자 하

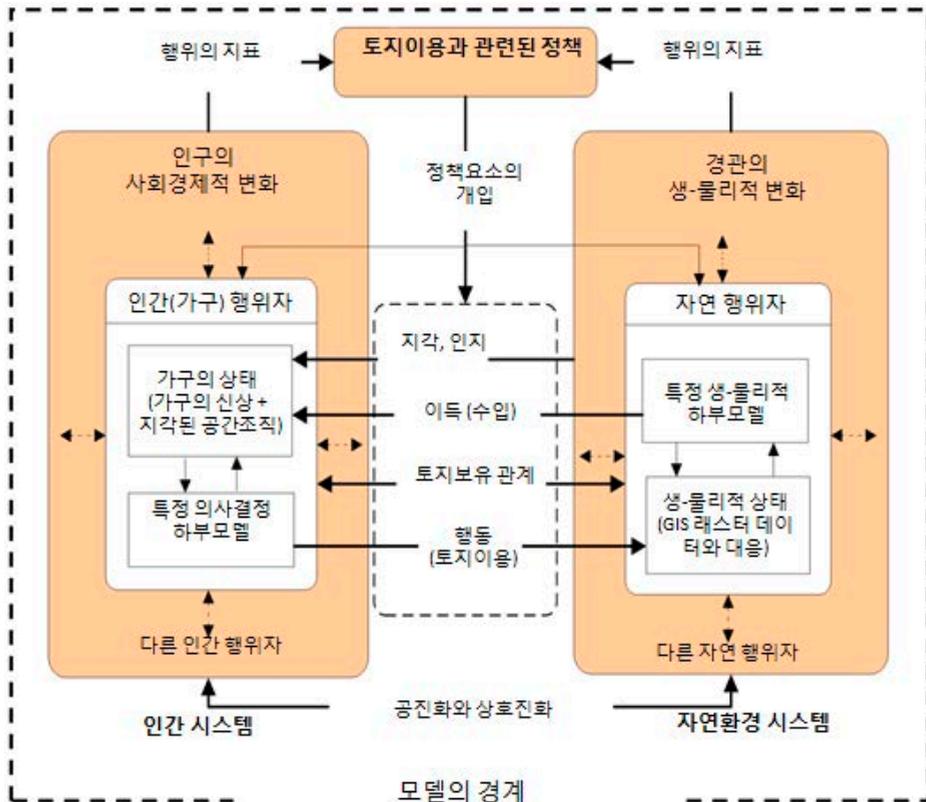


그림 1. LUDAS 프레임워크(Framework)의 구조(Le et al., 2008, 137)

는 이 연구의 목적에 부합한다. 또한 앞서 설명하였듯 LUDAS는 다른 다행위자시스템에 비해 자연환경 요소가 보다 더 동적으로 기능한다는 부분에서, 이 연구에서 확인하고자 하는 산림생태계 변화의 복잡성을 더욱 더 잘 반영할 수 있다는 강점이 있다.

3. 모형의 구성

이 연구의 모형은 LUDAS 프레임워크에 따라 외부정책요인, 자연환경시스템, 인문환경시스템으로 구성되어 있다. 이 장에서는 모형의 전체적인 구성과 자연환경시스템, 인문환경시스템 등 각각의 세부 모델들에 대해서 간략하게 설명한다.

1) 연구지역과 모형의 스케일

연구지역으로 선정한 지역은 가리왕산과 그 주변

지역이다. LUDAS 프레임워크에서 행위자는 농업 및 산림이용과 연관된 각 가구로 정의되었으며, 행위자들의 행동 범위는 소유역 단위로 제한되었다(Le et al., 2008). 하지만 이 연구에서는 가리왕산이라는 산지와 그 주변지역, 그리고 거기에 거주하고 있는 주민들을 대상으로 연구를 수행하였다. 가리왕산은 높이가 1,561m의 산으로 서쪽에 중왕산, 동남쪽에 중봉, 하봉 등과 함께 산지를 구성하고 있다. 가리왕산은 2008년 이 일원의 상당 부분이 '산림유전자원 보호구역'으로 지정되었을 정도로 자연성이 높은 식생이 분포하고 있다. 가리왕산 주변에는 평창군 평창읍, 방림면, 대화면, 진부면과, 정선군 정선읍, 북평면이 위치하고 있으며, 이 연구에서는 평창읍, 방림면, 대화면, 진부면, 정선읍, 북평면 전체와 진부면의 일부를 연구지역에 포함하였다(그림 2).

이 지역은 석회암 지질로 이루어져 있으며 이로 인한 지형적 특성이 나타나고, 비교적 높은 고도로 인해 여름 기온이 낮은 기후적 특성이 존재한다. 인문환경적으로는 낮은 여름 기온과 주변의 영동 고속도로에

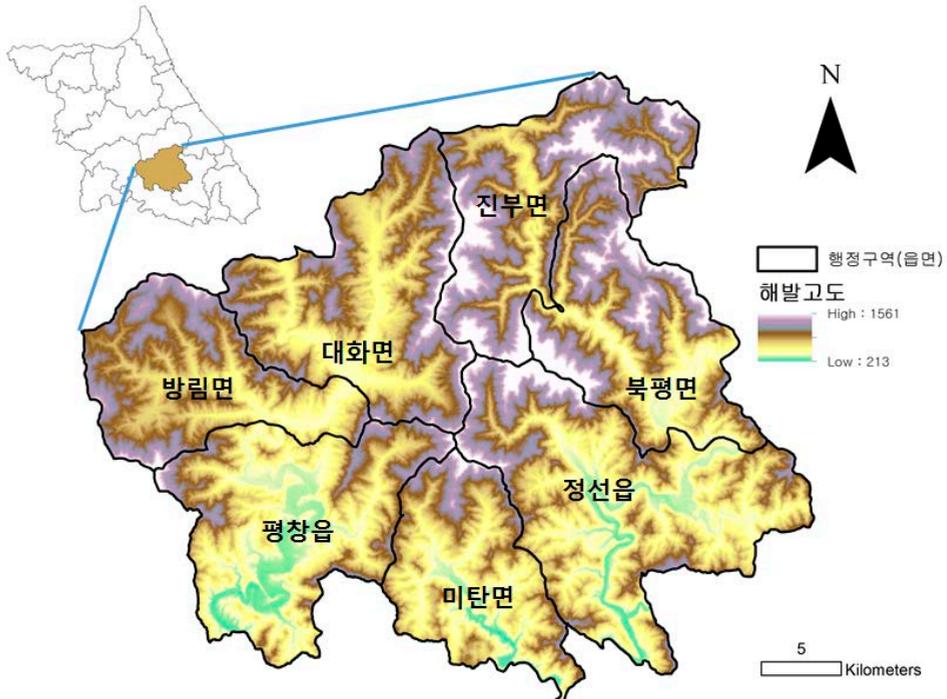


그림 2. 연구지역의 공간적 범위

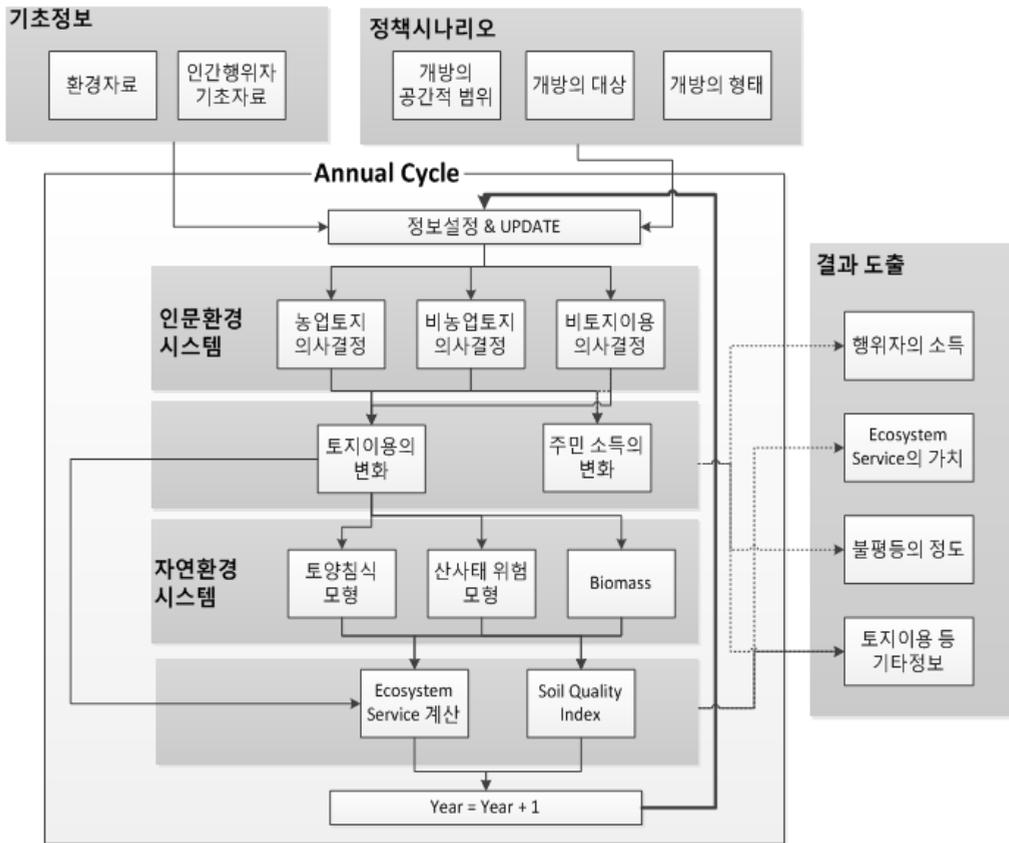


그림 3. 모형의 구조 및 흐름

주: 모형은 기초정보와 정책 시나리오에 따라 기본적인 행위자와 자연환경속성이 설정되는 것을 시작으로, 인문환경시스템을 통해 행위자가 의사결정을 진행하고, 이에 자연환경시스템이 영향을 받아 다시 인문환경시스템에 영향을 끼치는 피드백의 구조로 설계되었다. 모형의 순환 주기는 1년이다.

의해 고랭지 농업 및 목축업이 발달했으며, 주변의 스키장과 아름다운 산림경관을 바탕으로 일부 지역에서 관광산업이 발달했다는 특징이 있다.

2) 모형의 전체적인 구조 및 흐름, 모형 구축 방법

앞서 언급한대로 모형은 외부정책요인, 인문환경시스템, 자연환경시스템과 이들의 상호작용으로 구성된다. 외부정책요인은 과거 유전자보호림으로 지정되어 개방이 이루어지지 않은 가리왕산을 이용형태와 이용대상, 그리고 이용지역을 사전에 선정하여 산림을 개방하는 경우를 상정하였다. 인문환경시스

템의 경우에는 연구지역의 인구 및 가구분포에 따라 분포시켰다. 자연환경시스템은 100×100m의 격자의 형태로, 자연환경의 속성을 대표하는 여러 층위로 구성하였다. 이러한 구성요소를 바탕으로 모형의 전반적인 흐름을 나타낸 것이 그림 3이다.

인문환경시스템의 경우에는 마을 정도의 스케일이 이 지역의 자연환경과 토지이용의 변화에 영향을 끼치는 스케일이라고 판단하였고, 이에 따라 30가구를 하나의 행위자로 정의하였다³⁾. 마을단위로 인문환경시스템을 구성한 가장 중요한 이유는 첫째, 개인 혹은 가구단위로 모델을 구성할 경우, 개인 혹은 가구단위의 이질성을 대표하는 자료들을 수집하는 것이 현

실적으로 불가능하기 때문이었다. 둘째, 행위자의 공간적인 이질성을 고려할 수 있으면서도 자료를 비교적 쉽게 구할 수 있는 최적의 공간단위(spatial scale)가 마을이라는 선행연구의 결과를 참조하였다(Park *et al.*, 2005). 셋째, 개인 혹은 개별 가구단위로 모델을 수행했을 때 문제가 되는 컴퓨터의 계산속도 역시 마을단위로 행위자를 결정할 중요한 요인이었다.

이 연구에서 모형구축은 다행위자시스템 전용 개발 툴킷인 Netlogo 4.1.3을 통해 진행하였다(Wilensky, 1999). Netlogo는 행위자와 시스템에 대해서 정의내릴 수 있는 간단한 언어체계를 가지고 있어 쉽게 모델을 구축할 수 있다는 장점이 있으며, 내장된 그래픽 인터페이스를 가지고 있어 시각화가 용이하다는 장점이 있다(Railsback *et al.*, 2006).

3) 자연환경시스템 세부모듈

이 연구에서는 연구지역의 자연환경을 직관적으로 가장 잘 구현할 수 있는 방법으로 자연환경 및 산림생태계를 대표하는 지표를 선정해 모형에 작용하는 변수로 활용하였다. 이 연구 지역과 동일한 지역을 대상으로 연구를 진행한 정관용 등(2012)의 연구에서는 이 지역에서 자연환경에 큰 영향을 미치고 있는 요소는 지질, 고도, 지형분류로 파악되었다. 이 요소들은 지하수의 이동, 토양 형성, 식생의 차이, 물과 물질과 같은 에너지의 이동에 영향을 주는 물리적인 특성이라 볼 수 있다(Bailey, 2008). 이러한 자연환경의 속성을 나타내는 많은 지표 중 산림이용과 토지이용의 변화에 따라 변화하는 지표를 중심으로 조사해 본 결과, 토양침식에 대한 지표와 산사태 위험(사면안정성)지표가 이 지역을 대표하는 지표인 것으로 판단하였다. 추가적으로, 이 지역의 산림생태계서비스의 양적·질적 속성을 반영하는 지표로서 산림탄소저장량 지표를 반영하는 것이 타당하다고 보았다.

이 연구에서의 자연환경시스템은 위의 세 변수를 도출하는 부속모형으로서, 토양침식 추정모형, 사면안정성모형, 산림탄소저장량 추정모형으로 구성하였다(표 2). 토양침식 추정 모형은 단위면적당 토양침식의 양을 추정하는 모형이다. 이 연구에서는

현장에서 많이 사용하는 경험식 기반 모형인 USLE(Wischmeier and Smith, 1978; Renard *et al.*, 1997)와 상대적인 침식과 퇴적량을 모두 파악할 수 있는 USPED(Mitasova *et al.*, 1996; Mitas and Mitasova, 1998)를 사용하였다. 이 방법들은 토지이용 정보 등 쉽게 구득할 수 있는 정보(강우, 토양, 토지이용)를 바탕으로 토양침식량을 추정할 수 있어 모형 구축이 용이한 장점이 있다. 하지만 이 방법들은 지역의 특수성이 반영되지 않아 현실에 비해 토양침식이 과대 혹은 과소 추정되는 문제가 있기 때문에(Tiwari *et al.*, 2000), 이 연구의 주변지역을 대상으로 진행한 심우진(2015)의 연구결과를 바탕으로 보정 작업을 실시하였다.

사면안정성모형은 산림토지이용의 결과와 물리적 조건을 바탕으로 특정 지역의 산사태의 위험이 어느 정도인지를 파악하는 모형이다. 사면안정성 평가를 위한 모형에는 통계적 기법과 결정론적 기법이 있다(Safaei *et al.*, 2010). 이 연구에서는 그 중 계산이 간단하면서도 지형, 수문, 토지이용 요소를 반영할 수 있는 결정론적인 기법인 SHALSTAB(Montgomery and Dietrich, 1994)을 차용하였다.

산림탄소저장량 추정모형은 산림이 보유하고 있는 탄소의 저장량의 분포가 어떻게 되는지를 파악하는 모형이다. 산림 탄소저장량을 추정하는 방법은 전통적으로 현지 조사자료를 기반으로 하나, 최근의 GIS 및 원격탐사 자료 및 기술의 발전으로 이 정보를 활용하여 산림 바이오매스를 추정할 수 있는 연구가 진행되고 있다(김경민 등, 2011). 이 연구에서는 임상도를 기반으로 관련 연구의 방법론을 차용하여 지상 및 지하 탄소저장량을 추정하였다(표 2). 또한 미래에 대한 모형 구축인 만큼 전어진(2009)의 산림성장 모형을 차용하여 산림의 성장을 재현하고자 하였다.

이 모형은 행위자의 토지이용과 산림이용에 따라 변화를 일으키며, 이 모형에 의해 변화한 자연환경은 토양 질 지표(SQI) 및 산림생태계서비스 등에 영향을 주고, 이는 다시 행위자의 의사결정에 영향을 주게 된다. 이에 대한 세부적인 내용은 인문환경시스템과 모형의 결과에서 세부적으로 설명한다.

표 2. 자연환경시스템의 부속 모형

| 설명 | 다른 모형/결과와의 연결고리 | | | | | | | | | | |
|--|---|------|---------|---|----------------|---|--------------|--|--|--|--|
| <p>① 토양침식 추정모형</p> <p>- USLE(Universal Soil Loss Equation) $A=R \times K \times LS \times C \times P$</p> <p>- USPED(Unit Stream Power-based Erosion Deposition) $T=RKCPA^m(\sin\theta)^n \quad ED=\frac{d(T\cos\alpha)}{dx} + \frac{d(T\sin\alpha)}{dy}$</p> <p>- 인자계산 방법</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">인자</th> <th style="text-align: center;">계산방법</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">강우인자(R)</td> <td>이민부 등(2003; 2008)의 Toxopeus 공식 및 기상청 자료와 DEM을 이용한 보간 자료 이용</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">토양에 의한 침식인자(K)</td> <td>산림청 산림입지토양도의 입도정보를 기반으로 서일규 등(2010)의 방법 이용</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">토지이용 관련 인자</td> <td>이민부 등(2008), 박찬원 등(2010) 등의 자료를 이용하여 행위자의 토지이용 변화에 따라 바뀌도록 설계 * C-식생, P-경지개간 형태</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">지형 관련 인자</td> <td>Aster GDEM을 기반으로 지형분석 전용 프로그램인 DiGEM을 이용하여 도출 * LS-지형인자, θ-경사도, α-향</td> </tr> </tbody> </table> <p>- 심우진(2015)의 연구지역 주변을 대상으로 한 침식량 산정 연구를 바탕으로 보정 진행</p> | 인자 | 계산방법 | 강우인자(R) | 이민부 등(2003; 2008)의 Toxopeus 공식 및 기상청 자료와 DEM을 이용한 보간 자료 이용 | 토양에 의한 침식인자(K) | 산림청 산림입지토양도의 입도정보를 기반으로 서일규 등(2010)의 방법 이용 | 토지이용 관련 인자 | 이민부 등(2008), 박찬원 등(2010) 등의 자료를 이용하여 행위자의 토지이용 변화에 따라 바뀌도록 설계 * C-식생, P-경지개간 형태 | 지형 관련 인자 | Aster GDEM을 기반으로 지형분석 전용 프로그램인 DiGEM을 이용하여 도출 * LS-지형인자, θ -경사도, α -향 | <p>- 행위자의 토지이용 전략의 변화에 따라 변화가 이루어짐</p> <p>- 행위자 의사 결정의 요소 (SQi)로 활용(USPED)</p> <p>- 토양침식에 대한 생태계서비스 가치평가의 기준(USLE)</p> |
| 인자 | 계산방법 | | | | | | | | | | |
| 강우인자(R) | 이민부 등(2003; 2008)의 Toxopeus 공식 및 기상청 자료와 DEM을 이용한 보간 자료 이용 | | | | | | | | | | |
| 토양에 의한 침식인자(K) | 산림청 산림입지토양도의 입도정보를 기반으로 서일규 등(2010)의 방법 이용 | | | | | | | | | | |
| 토지이용 관련 인자 | 이민부 등(2008), 박찬원 등(2010) 등의 자료를 이용하여 행위자의 토지이용 변화에 따라 바뀌도록 설계 * C-식생, P-경지개간 형태 | | | | | | | | | | |
| 지형 관련 인자 | Aster GDEM을 기반으로 지형분석 전용 프로그램인 DiGEM을 이용하여 도출 * LS-지형인자, θ -경사도, α -향 | | | | | | | | | | |
| <p>② 사면안정성모형</p> <p>- 산사태 위험 평가 모형으로 알려진 방법 중 SHALSTAB(Shallow Landslide Slope Stability Model) 사용</p> $\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \sin\theta \left[\frac{C}{\rho_w g h \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right]$ <p>- 인자계산 방법</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">인자</th> <th style="text-align: center;">계산방법</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">고정인자</td> <td>- 토양용적밀도(ρ_s): 장원석(2010) - 수분용적밀도(ρ_w): 한국지질자원연구원(2006) - 내부 마찰각(Φ): 김민석 등(2011)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">토양의 점착력 (C)</td> <td>Wu <i>et al.</i> (1979), 이인모 등(1991), 김민구 등(2005)에 따라 토지피복(행위자 의사결정 결과)와 임상(산림청 임상도)를 기준으로 설정</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">포화토양층의 두께(h)</td> <td>차경섭(2004)에 따라 경사도를 기준으로 설정 * 경사도 계산방법: 상동</td> </tr> </tbody> </table> | 인자 | 계산방법 | 고정인자 | - 토양용적밀도(ρ_s): 장원석(2010) - 수분용적밀도(ρ_w): 한국지질자원연구원(2006) - 내부 마찰각(Φ): 김민석 등(2011) | 토양의 점착력 (C) | Wu <i>et al.</i> (1979), 이인모 등(1991), 김민구 등(2005)에 따라 토지피복(행위자 의사결정 결과)와 임상(산림청 임상도)를 기준으로 설정 | 포화토양층의 두께(h) | 차경섭(2004)에 따라 경사도를 기준으로 설정 * 경사도 계산방법: 상동 | <p>- 행위자의 산림 채취와 토지이용 전략에 따라 변화가 이루어짐</p> <p>- 행위자 의사 결정의 요소 (SQi)로 활용</p> | | |
| 인자 | 계산방법 | | | | | | | | | | |
| 고정인자 | - 토양용적밀도(ρ_s): 장원석(2010) - 수분용적밀도(ρ_w): 한국지질자원연구원(2006) - 내부 마찰각(Φ): 김민석 등(2011) | | | | | | | | | | |
| 토양의 점착력 (C) | Wu <i>et al.</i> (1979), 이인모 등(1991), 김민구 등(2005)에 따라 토지피복(행위자 의사결정 결과)와 임상(산림청 임상도)를 기준으로 설정 | | | | | | | | | | |
| 포화토양층의 두께(h) | 차경섭(2004)에 따라 경사도를 기준으로 설정 * 경사도 계산방법: 상동 | | | | | | | | | | |
| <p>③ 산림탄소저장량 추정모형</p> <p>- 임상도를 기반으로 산림탄소저장량을 추정하는 모형을 구축하여 활용</p> <p>- 임상도를 이용한 기본정보 추출: 김은숙 등(2010), 손영모(2009), 박진우·이정수(2011)</p> <p>- 탄소저장량으로 전환: 손영모(2009)</p> <p>- 산림성장모형: 전어진(2009)</p> | <p>- 행위자의 산림 채취와 토지이용 전략에 따라 변화가 이루어짐</p> <p>- 행위자 의사 결정의 요소(SQi)로 활용</p> <p>- 생태계서비스 가치평가의 기준</p> | | | | | | | | | | |

4) 인문환경시스템 세부모듈

인문환경 시스템은 다행위자시스템 내에서 자연환경 위에 존재하는 인간행위자가 기반이 되는 시스템으로, 행위자들은 서로 의사소통을 하면서 토지이용을 변화시켜 나간다. 이렇게 변화된 토지이용은 다시 인간행위자에게 영향을 미치는 순환구조로 설계된다. 인문환경 시스템은 다행위자시스템의 행위자 구축과, 행위자들의 토지이용에 대한 의사결정으로 구성된다.

행위자의 분포를 구축하기 위해 이 연구에서는 인간이 거주할 수 있는 토지이용(시가지, 농경지)에 인간이 거주한다고 가정하는 것이 가장 합리적이고 판단하였다(Verburg *et al.*, 2004; Kim and Choi, 2011). 이러한 가정과 각 리별 인구 분포를 중심으로 시가지와 600m 이하 농경지에 임의로 행위자를 배치하였다. 행위자의 기본 정보는 통계청, 산림청, 평창군과 정선군의 각종 통계자료를 이용하여 구축하였다.

이 연구에서 행위자는 시가지, 농지, 산지, 나지만을 이용하는 것으로 가정하였다. 행위자는 초기 조건에 따라 자신이 보유하고 있는 토지에서 얻어지는 소득과 비용, 자연환경시스템의 결과로 도출되는 토지이용적합성(Si), 노동 투입 시간 등을 종합적으로 고려하여 토지를 이용할지 하지 않을지, 토지에 노동력을 얼마나 투입할지를 결정하게 되며, 이 결과에 따라 토지이용과 토지의 속성이 바뀌게 된다. 일례로 농지의 경우 소득보다 비용이 크거나, 투입 노동력이 부족하여 방치할 경우, 나지로 바뀌게 되며, 산지의 경우 정책 시나리오에 따라 산지의 탄소저장량이 변화하게 된다. 세부적인 행위자의 토지이용 의사결정 과정은 그림 4와 같다.

행위자의 의사결정 프로세스에 반영되는 Si 지수는 토지이용잠재력지수와 자연환경시스템의 결과로 도출되는 토양 질 지표(Soil Quality Index, 이하 SQi)의 합으로 구성된다. 토지이용잠재력 지수는 허우궁 등(2010)의 연구 결과에 따라 지질, 고도, 지형단위를 기준으로 부여한 점수로 구성된다. 토양 질 지표(SQi)는 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 지표를 통

합하는 지표로서(Karlen *et al.*, 2003), 이 모형에서는 토양침식 추정 모형(USPED)과 사면안정성 평가 모형(SHALSTAB), 산림 탄소저장량 평가 모형을 점수화하여 반영하였다.

5) 정책 시나리오의 구성

연구지역에 대한 데이터 분석과 심층 인터뷰를 통해, 산지 이용에 영향을 미치는 정책을 크게 개방의 공간적 범위, 개방의 대상, 개방의 형태로 구성하였다.

개방의 공간적 범위의 설정 시나리오는 지형적 조건이 산림정책의 수립과 집행에 중요한 가치판단의 기준이 된다는 현장 연구자의 의견에 따른 지형변수를 고려한 개방 시나리오와, 생태계서비스의 가치가 낮은 지역이 산림을 이용했을 때 그 생태적인 영향력이 작다는 가정에 기반으로 한 생태계서비스를 고려한 개방 시나리오로 구분하였다. 지형변수를 고려한 개방은 Park *et al.*(2001)의 토양경관분석기법(Soil-landscape Analysis)를 기반으로 정관용 등(2012)의 연구지역을 대상으로 진행한 토지이용 적합성의 정도에 따라, 적합하지 않다고 구분된 지역을 판단하였다. 생태계서비스를 고려한 개방은 이 모형의 생태계서비스 결과를 고려하여, 생태계서비스의 가치가 낮은 곳을 개방하도록 설정하였다.

개방의 대상 시나리오는 경험적으로 주변 지역 마을주민의 산림이용과 그 외 사람들의 산림이용에 따른 영향이 달랐다는 지역주민 인터뷰를 토대로 산림 근처 주민을 대상으로 한 개방 시나리오와 그러한 제약이 없는 개방 시나리오로 구분하였다. 마지막으로 개방의 형태는 기존의 산채채취 및 벌목을 중심으로 한 복합경영만 진행되는 경우와 산림의 관광 목적 활용이 복합적으로 이루어지는 경우로 구분하여 시나리오를 설정하였다. 이를 토대로 총 8개의 정책 시나리오를 설정하였다(표 3).

6) 결과 도출과 모형의 인터페이스

모형의 결과는 산림생태계서비스의 가치를 대변할

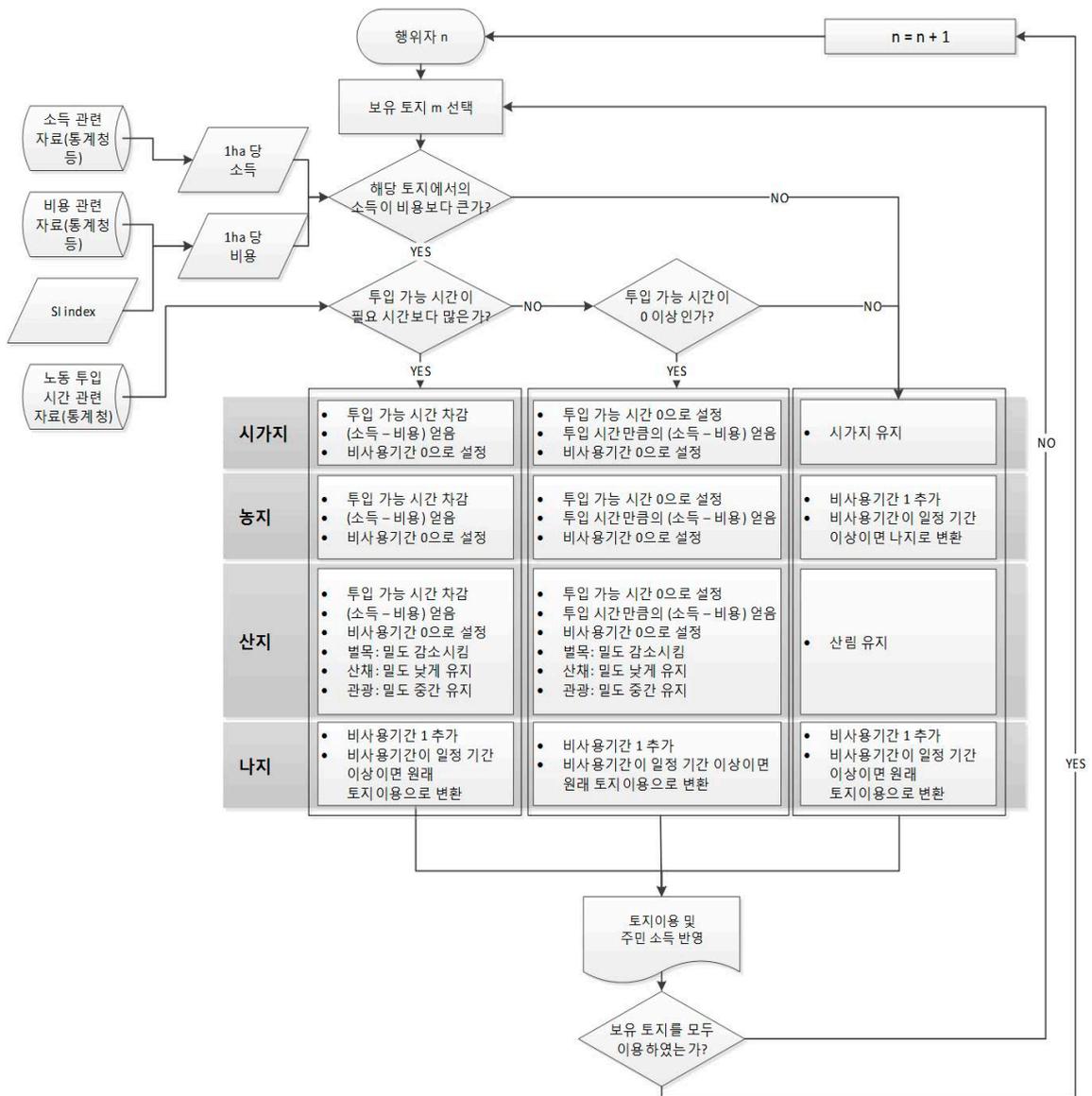


그림 4. 행위자의 토지이용 의사결정 과정

주: 행위자 각각(행위자 n)이 보유하고 있는 토지(m)를 대상으로 토지이용을 실시하는 모식도를 나타낸 것이다. 모든 토지이용 의사결정에 있어서 기초적인 정보는 토지이용을 했을 때 예상되는 소득과 비용이다. 자연환경 의사결정의 결과 (Si index) 토지이용의 잠재력이 극히 낮을 경우, 행위자는 이를 추가적인 비용으로 인식한다. 행위자 n이 m 토지에 대해서 소득과 비용(비용에는 Si index 포함)을 비교한 결과 소득이 더 높다면, 행위자 n은 m 토지에 필요한 시간만큼 자신의 가용 노동 시간을 토지에 투입하게 된다(그림 내 표 두 번째 열). 만일 가용노동시간이 m토지에 필요한 시간보다 적다면, 행위자 n이 가용하고 있는 노동 투입 시간 전체를 투자하게 된다(그림 내 표 세 번째 열). 반대로 비용이 더 높거나 가용 노동력이 없는 경우, 행위자는 토지를 방치하는 행동(그림 내 표 네 번째 열)을 수행하게 된다.

표 3. 정책 시나리오

| 시나리오 구분 | 선택사항 | 설명 |
|----------------------|----------------|--|
| 개방의 공간적 범위 | 지형변수를 고려한 개방 | Park <i>et al.</i> (2001)의 지형특성화지수(TCI: Terrain Characterization Index)를 이용한 CATENA 지형분류를 바탕으로, 토지이용이 적합한 지역과 그렇지 않은 지역을 구분한 결과물(정관용 등, 2012)을 이용하여 지형에 따른 개방의 공간적 범위 설정 |
| | 생태계서비스를 고려한 개방 | 이 모형의 생태계서비스 결과를 고려하여, 생태계서비스의 가치가 낮은 곳을 개방의 공간적 범위로 설정 |
| 개방의 대상 ⁴⁾ | 지역 주민 대상 개방 | 각 리 단위의 주민들만이 자신의 리 내의 산림을 이용할 수 있도록 설정 |
| | 전체 대상 개방 | 모형 내 전 지역의 주민을 대상으로 한 개방 |
| 개방의 형태 ⁵⁾ | 복합경영 형태 | 복합경영(산채재취, 목재활동 등)의 형태로 활용할 수 있도록 개방 |
| | 복합경영+휴양지 형태 | 복합경영의 형태 및 산림의 관광 목적으로 활용할 수 있도록 개방 |

주: 각 시나리오 구분마다 하나의 시나리오만 선택할 수 있으며, 이에 따라 조합하면 각 구분 별 두 개의 시나리오씩 총 세 개의 구분이 있기 때문에, 총 8개의 시나리오가 도출됨.

수 있는 행위자의 소득, 생태계서비스의 화폐 환산가치(Costanza *et al.*, 1997), 소득 불평등의 정도, 토지 이용 등의 정보로 도출된다. 이 결과를 비교·검토하여 행위자의 소득이 가장 높아지며, 생태계서비스의 가치가 높아지거나 유지, 최소한의 감소가 이루어지고, 소득 불평등의 정도가 낮은 시나리오가 최적의 시나리오로서 도출된다.

행위자의 소득은 행위자의 토지이용의 결과로 도출되는 소득이다. 이 모형에서는 행위자 가구별 소득, 행위자들의 총 소득, 행위자들의 평균 소득이 모형의 결과로서 도출된다. 생태계서비스의 가치는 행위자들의 토지이용의 결과에 따른 토지피복의 변화, 자연환경 변화를 Costanza *et al.* (1997)의 생태계서비스 가치추정 방법⁶⁾을 수정하여 반영하였다⁷⁾. 하지만 Costanza *et al.* (1997)의 연구는 전세계적인 스케일

을 대상으로 연구를 진행하여 비교적 소규모 지역을 대상으로 하는 이 연구와 스케일의 불일치 문제가 있고, 생태계서비스를 판단할 수 있는 기준 중 토지이용 변화만을 반영한다는 한계가 있다. 따라서 Costanza *et al.* (1997)이 제시한 17가지의 생태계서비스의 기능 중 이 연구의 자연환경시스템에 반영되어 있는 기후 제어기능과 토양침식 제어기능에 대해서는 기존에 제시된 가치 변환 방법으로 대체하여 연구를 진행하였다(표 4). 또한 휴양 및 문화적 기능에 대해서는 신유진(2015)이 가리왕산 일대를 대상으로 연구를 진행한 결과가 있어 이를 대체하여 적용하였다(표 4). 소득 불평등의 정도는 행위자들의 소득을 바탕으로 지니계수(Gini Coefficient)를 구하여 도출하였다.

이 연구에서 구축한 모형의 인터페이스는 그림 5와 같다. 연구자 및 정책 결정자들이 정책 시나리오를 설

표 4. 생태계서비스 평가 개선방법

| 생태계서비스 기능 | 계산방법 |
|------------------------|--|
| 기후 제어기능 (ES2) | 산림탄소저장량 추정모형에서 도출된 산림탄소저장량을 유럽 탄소시장의 2012년 평균 탄소가격(1톤당 4694.09원)을 이용하여 가치로 변환 |
| 토양침식 제어기능 (ES6) | Guo <i>et al.</i> (2001)의 대체 가치 추정법을 이용하여, 토양침식모형(USLE)으로 추정된 토양침식량과 산림토양 속성을 이용하여 가치 추정 |
| 휴양(ES16), 문화적 기능(ES17) | 신유진(2015)의 가리왕산 자연휴양림(연구지역 내)에 대한 문화생태계서비스 가치 연구를 활용하여 가치 추정 |

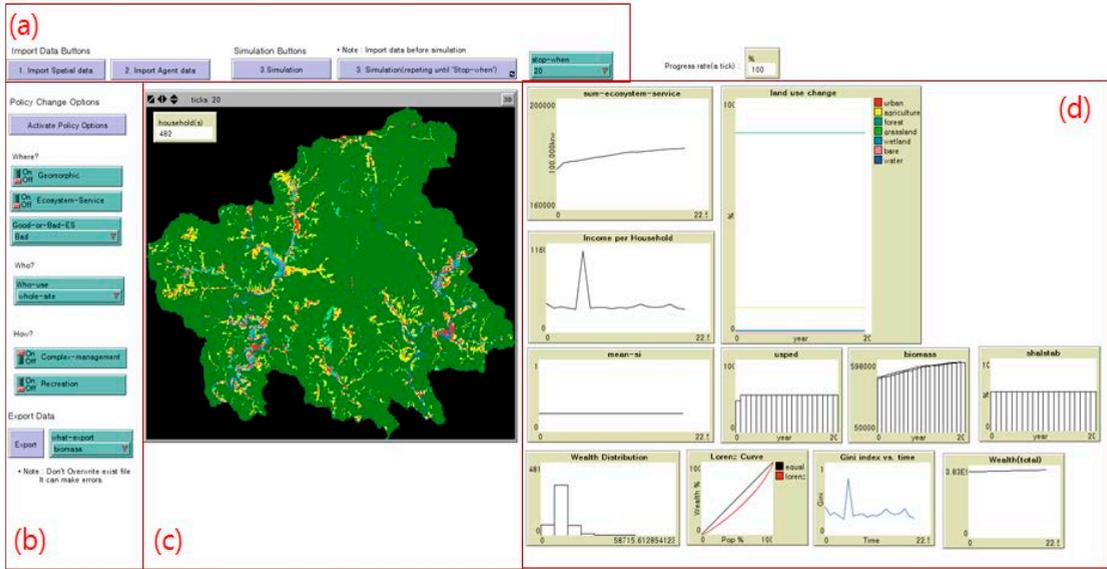


그림 5. 다행위자시스템의 인터페이스

주: (a) 공간데이터를 불러오고 시뮬레이션을 진행하는 버튼, (b) 정책 시나리오 변수 조정, (c) 결과 도출 지도 화면, (d) 모형의 결과에 대한 그래프

정하여 모형을 구동하고, 그 결과를 지도 및 수치상으로 확인할 수 있도록 인터페이스를 설계하였다.

4. 모의 결과 및 토론

설정된 총 여덟 개의 정책 시나리오에 따라 다행위자시스템 모형을 구동하여 시나리오별 결과를 도출하였다(표 3 참조). 모형의 전체 시간 주기는 20년이며, 각 시나리오 별로 20회씩 구동한 뒤, 그 평균값과 표준편차를 계산하였다. 결과는 행위자들의 총 소득, 연구지역의 생태계서비스의 변화, 지니계수의 변화, 토지이용의 변화 결과 등으로 도출된다(그림 5, 6 참조). 이들 변수를 시나리오간 비교를 위한 모형의 결과값으로 선정하는 이유는 토지이용변화가 지역주민의 소득을 높이면서도, 생태계서비스 가치를 상승시키며, 그 과정에서 주민들간의 소득차(지니계수)가 적어지는 것이 최적의 토지이용변화라는 것을 가정한 것이었다.

모의 결과, 모의 시간에 따라 생태계 서비스의 가치와 지역 총 소득, 나지 면적의 비율은 점차 증가하는 추세를 보이고, 산림의 면적은 감소하는 추세를 보였으며, 지니계수는 상승과 하락을 반복하는 양상을 나타냈다. 세부적인 지표로 살펴보면, 생태계서비스의 경우, 지형을 고려하여 지역 주민을 대상으로 개방하는 것이 가장 최적의 시나리오로 생태계서비스 가치가 증가하였다. 총 소득의 경우, 복합경영의 형태로 전체를 대상으로 개방하는 것이 소득증대에 가장 좋은 시나리오로 분석되었다. 지니계수의 경우, 지역주민을 대상으로 개방하는 시나리오가 상대적으로 소득의 불평등이 적게 나타났다(그림 6). 이 값들을 요약하고 비교를 통해 최적 시나리오를 파악하기 위해, 총소득과 생태계서비스는 20년 후의 가치와 초기의 차이를 계산하여 표준화(-2~2점)를 진행하였고, 지니계수는 20년간의 평균값을 계산하여 표준화(-2~2점)를 진행하였다. 그 결과 도출된 산림생태계서비스 보전을 위한 최적 시나리오와 어떤 정책이 가장 많은 영향을 끼쳤는지는 표 5와 같다.

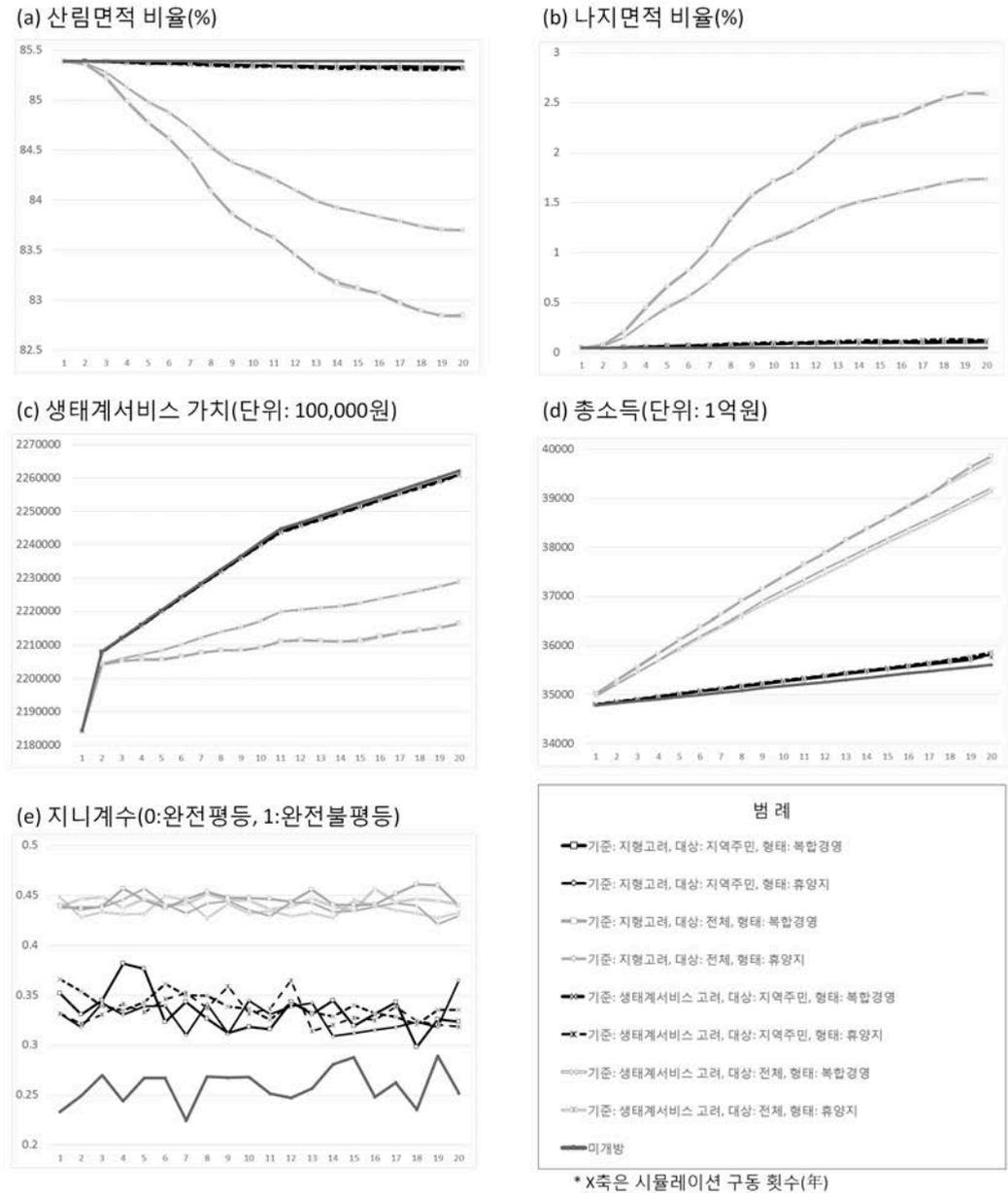


그림 6. 모의결과 예시-토지이용의 변화, 생태계서비스 가치의 변화, 총소득 및 소득의 형평성의 변화

1) 최적 시나리오의 도출

앞서 언급한 표준화의 과정을 거친 값들을 같은 가중치를 두어 합하여 시나리오를 비교·평가할 수 있도록 만든 결과는 표 5와 같다. 이를 비교해 보면, ‘지

형 고려 개방-지역주민 대상 개방-복합경영+휴양지 형태’의 시나리오가 1.017로 가장 우수한 값을 보였다. 그 다음으로는 ‘지형 고려 개방-지역주민 대상 개방-복합경영 형태’의 시나리오, ‘생태계서비스 고려 개방-지역주민 대상 개방-복합경영+휴양지 형

표 5. 시나리오별 표준화 지수 비교

| 개방의 공간적 범위 | 지형 | | | |
|-------------|--------|---------------|---------------|--------|
| | 지역주민 | | 전체 | |
| 개방의 대상 | | | | |
| 개방의 형태 | 복합경영 | + 휴양지 | 복합경영 | + 휴양지 |
| 지니계수(연평균) | 0.932 | 1.022 | -1.031 | -0.887 |
| 총소득(증가값) | -0.931 | -0.924 | 1.114 | 0.785 |
| 생태계서비스(증가값) | 0.912 | 0.918 | -1.204 | -0.621 |
| 지수 | 0.913 | 1.017 | -1.122 | -0.723 |
| 순위 | 2 | 1 | 7 | 6 |
| 개방의 공간적 범위 | 생태계서비스 | | | |
| | 지역주민 | | 전체 | |
| 개방의 대상 | | | | |
| 개방의 형태 | 복합경영 | + 휴양지 | 복합경영 | + 휴양지 |
| 지니계수(연평균) | 0.836 | 0.941 | -0.978 | -0.835 |
| 총소득(증가값) | -0.905 | -0.954 | 1.065 | 0.749 |
| 생태계서비스(증가값) | 0.901 | 0.916 | -1.210 | -0.612 |
| 지수 | 0.832 | 0.903 | -1.123 | -0.697 |
| 순위 | 4 | 3 | 8 | 5 |

태'의 시나리오가 각각 0.913, 0.903으로 2, 3위의 정책적 시나리오로 평가되었다. 반면, '생태계서비스 고려 개방-전체 대상 개방-복합경영 형태'의 시나리오가 -1.123으로 가장 좋지 않은 시나리오로 평가되었다.

세부적으로 살펴보면 개방 대상의 시나리오에 따라 지수의 값이 양수와 음수의 값으로 명확하게 나뉘어 개방 대상이 시나리오 모의 결과에 가장 주요하게 작용하는 변수임을 확인할 수 있다. 특징적인 부분은 개방의 대상이 지역 주민인 경우 시나리오의 순위는 개방의 공간적 범위에 따라 결정되며(지형을 고려한 개방 1-2위, 생태계 서비스를 고려한 개방 3-4위), 개방의 대상이 전체인 경우에는 개방의 형태에 따라 순위가 결정되는 양상을 보였다(휴양지 형태 5-6위, 복합경영 형태 7-8위).

2) 정책 시나리오별 효과의 차이

개방의 공간적 범위, 대상, 형태의 세 가지 정책 별 두 가지 시나리오 중 우수한 시나리오를 평가하고 여

덥 가지 시나리오의 순위에 영향을 미친 정도를 알아보기 위하여 각 정책별 시나리오의 평균을 계산하였다. 또한 각 정책별 시나리오 평균의 차이를 계산하였다. 이는 차이가 클수록 해당 정책의 적용 여부가 시나리오 별 순위에 영향을 미치는 정도가 크다고 볼 수 있으므로, 이를 통해 각 정책이 영향을 미치는 정도를 평가할 수 있다고 판단했기 때문이다.

이 결과를 세부적으로 살펴보면 '개방의 대상' 정책의 지역주민 대상 개방 시나리오와 전체 대상 개방 시나리오 간의 차이가 1.832로 가장 크게 나타났다. 그 다음으로 개방의 형태 정책의 복합경영 시나리오와 복합경영+휴양지 시나리오 간의 차이가 0.25로 나타났다. 가장 차이가 적은 정책은 개방의 공간적 범위 정책으로, 지형 고려 개방 시나리오와 생태계 고려 개방 시나리오 간의 차이는 0.042로 나타났다. 이에 따라 각 정책 별로 지역주민 대상 개방, 복합경영+휴양지 형태 개방, 지형 고려 개방이 더 우수한 것으로 나타났다.

3) 토론 및 모형의 한계

최적 시나리오 도출과 정책 시나리오별 효과를 분석한 결과 개방의 대상을 어떻게 하느냐가 가장 유의미한 차이를 불러 온다는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 심층 인터뷰에서 지역주민들이 이웃 주민들에게까지 산지가 개방되는 경우 산림에 큰 피해를 유발할 수 있다는 우려와 일치하는 부분이다. 그 외의 시나리오는 큰 차이가 없었지만, 개방의 형태 시나리오에서 복합경정보다 복합경영과 휴양지를 같이 운영하는 것이 더욱 더 좋은 시나리오로 도출되었다. 이는 휴양지로 운영했을 때 산림의 미적·휴양적 기능이 보다 더 증시되기 때문에 산지의 생태계서비스의 훼손이 더 적게 나타난 것으로 해석할 수 있다. 특히 개방의 형태 시나리오의 결과의 차이는 개방의 대상 시나리오에 의해 강한 영향을 받은 것으로 보이며, 특히 전체를 대상으로 개방하였을 때 개방의 대상에 의한 영향이 컸다.

개방의 대상이 넓어질수록 산림의 파괴가 극심해진다는 이 모형의 모의 결과는 Hardin(1968)이 주장했던 공유지의 비극을 연상케 한다. 즉, 국유림 중심인 한국 산지의 공공재적 속성을 고려한다면, 공유재의 비극을 막으려는 정책적인 대안이 필요하다는 것이 이 결과의 시사점이라고 할 수 있다. 이를 위한 정책적인 대안으로써, 지역적이고 자발적인 거버넌스(Governance)를 제안할 수 있다(Park *et al.*, 2005). Ostrom(1990)은 마을 단위의 거버넌스를 통해 산림 공공재를 공유하는 스위스와 일본의 사례를 소개하였으며, 한국에도 과거 송계(松契)를 통한 마을 단위의 공유산림관리의 전통(윤순진, 2003; Yu *et al.*, 2014)이 있다. 행위자의 네트워크와 의사소통을 고려하지 않은 이 모형의 설계 구조상 해석에 유의할 필요가 있지만, 지역 주민을 대상으로만 산지를 개방했을 때 산지에 미치는 영향이 상대적으로 크지 않았던 또 다른 모의결과는 산지 이용에 있어 지역적이고 자발적인 거버넌스의 사례들의 적용 가능성을 보여준다. 따라서 산림개방 정책을 수립할 때 자발적인 산림 거버넌스를 구축할 수 있는 방안을 고려할 수 있으며, 이 모형의 지속적인 발전을 통해 구체적인 방안을 도

출할 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구는 인간과 자연의 복잡한 상호작용에 의한 복잡성을 가지고 있는 토지이용과 정책의사결정의 문제를 모의하는 방법으로서 다행위자시스템의 방법론을 소개하고, 한국의 자연현상과 인문현상을 반영한 모형을 구축하였다는 것에서 의의를 찾을 수 있다. 하지만, 이 모형이 한국의 산림 및 국토이용정책에 적극적으로 사용되기 위해서는 다양한 부분에서 개선이 이루어져야 할 것이다. 앞서 모형의 설계에서 30가구당 1행위자(약 1마을당 1행위자)로 행위자를 축약한 부분은 행위자의 의사결정 구현의 측면에서 행위자의 학습과 네트워크에 대한 구현을 모사하는데 부족했고, 경제적 의사결정 외의 사회적, 문화적 요인들을 반영하기는 것이 어려운 구조이다. 이 부분은 보다 체계적인 연구를 통해 향후 개선되어야 할 부분이다. 더불어 인간의 활동이 자연환경 및 생태계와 가지게 되는 복잡계적인 상호작용은 선형성을 가정한 단기간의 현장조사 및 연구로는 그 실체를 파악하는 것이 어렵다(Poulsen, 2013). 인간의 토지이용행위가 환경에 미치는 영향은 향후 추가적인 현장조사와 장기적인 모니터링을 통해 지속적으로 보완되어야 한다. 이 과정에서 주민과 의사결정주체들이 적극적으로 참여하여 모형을 진화·발전시킬 수 있는 적응적 의사결정시스템(adaptive decision support system)을 구축해 나가는 것이 향후의 과제이다.

5. 결론

이 연구에서는 한국의 산지와 그 일원을 대상으로 다행위자시스템에 기반을 둔 토지이용 및 토지피복 변화 모델링을 적용하고자 하였다. 특히 산림의 보존 중심의 관리와 산림의 활용에 관련된 현실의 정책적 논의에 기반하여, 산지개방이 산지와 그 일대의 토지이용 변화와 산지의 생태계서비스로 대표되는 산지의 자연환경에 어떻게 영향을 주는지 파악해 보고자 했다. 이를 위해 연구의 주제 및 한국의 생태환경에 적용하기 용이하다고 판단되는 LUDAS 프레임워크

을 적용하여 모형을 구축하였다. 모형은 인간 행위자와 그 의사결정으로 이루어져 있는 인문환경시스템, 자연환경과 산림생태계를 대표하는 자연환경시스템, 이를 연결하는 상호작용 연결고리와 정책 시나리오로 구성되었으며, 산림생태계서비스를 대표하는 행위자의 소득, 생태계서비스의 화폐 환산가치(Costanza *et al.*, 1997), 소득 불평등의 정도 등으로 도출하였다.

모형의 결과를 지수화하고 종합화한 결과, 지형을 고려하여 산지를 개방하고, 지역주민을 대상으로 개방하며, 휴양지 목적의 산지 개방이 산지의 생태계서비스 손실을 최소화하고 주민의 소득을 높이는 최적의 산림정책 시나리오로 도출되었다. 반면 생태계서비스를 고려하여 산지를 개방하며, 지역주민 대상으로 산지를 개방하고, 복합경영 형태로 산지를 개방하였을 때 가장 좋지 않은 결과를 보여 주었다. 이를 각 시나리오별로 구별하였을 때 각 정책이 개방의 대상을 어떻게 정하는가가 산림정책에 있어 가장 큰 효과를 보여주었다. 이를 통해 산지 이용 시 넓은 지역을 개방하여 고도의 이용을 하는 것보다 산림을 최대한 보전하는 방향으로 지역을 제한적으로 개방하여 점진적으로 이용을 확대하는 것이 경제적, 생태적으로 모두 바람직하다는 결론을 얻을 수 있었으며, 산지이용에 있어서 미시적인 수준의 자원관리 거버넌스가 필요하다는 함의를 얻을 수 있었다.

이 연구는 인간과 자연의 복잡한 상호작용에 의한 복잡성을 가지고 있는 토지이용과 정책의사결정의 문제를 모의하는 방법으로서 다행위자시스템의 방법론을 소개하였다는 점에서 그 의미가 있으며, 모의결과를 통해 산림정책 대안을 도출할 수 있었다. 이 연구를 통해 구축한 모형은 궁극적으로는 산림정책 뿐만 아니라 인간과 자연의 상호작용과 토지이용에 의한 다양한 환경문제에 대한 정책대안을 제시하는 의사결정시스템으로 발전할 수 있기를 기대해본다. 이 연구는 이를 위한 초기 단계로서 아직까지는 많은 한계를 가지고 있으며, 추가적인 현장조사와 참여관찰을 통해 지속적으로 보완·개선되어야 할 것이다. 이 과정에서 사회-생태계시스템이 가지고 있는 복잡계적 특성을 보다 적극적으로 고려하기 위해서는 모델

의 개발과 그 결과의 평가과정에 주민과 의사결정주체들이 적극적으로 참여할 수 있는 적응적 의사결정시스템으로 활용될 수 있기를 기대해 본다.

주

- 1) 이 연구에서 모델에 사용한 Netlogo는 MIT 미디어랩에서 개발한 스타로고(Starlogo)를 기반으로 미국 노스웨스트 대학의 연결학습 및 컴퓨터 기반 모형화 센터에서 자바(Java)로 다시 개발한 것이다(윤영수 · 채승병, 2005). 프로그램과 다양한 복잡계시스템 모델의 예는 <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>에서 확인할 수 있다.
- 2) 제한된 합리성은 일부 행위자가 최적의 대안을 선택하지 않고, 가장 좋은 대안을 선택할 가능성이 높다는 것을 의미하며, 따라서 특정한 의사결정으로 인한 위험성을 포함하고 있다(Le *et al.*, 2008).
- 3) 가로 및 세로 격자가 1,000이 넘으면 구동이 되지 않는 Netlogo 프로그램의 한계 또한 이러한 스케일 설정에 추가적인 요인으로 작용하였다. 향후 연구에서는 모형 공간의 축소, 고급 언어(C++ 등)의 사용 등으로 이 한계를 극복할 필요가 있다.
- 4) 산림 이용 관계자(인근 평창국유림관리소 직원)과 지역 주민을 대상으로 한 심층 인터뷰 결과, 산림 개방 시 그 대상이 지역 주민에 한정되는지, 아니면 외부인에게까지 개방을 확대하는지가 산림이용과 보존에 있어서 중요한 문제라는 의견을 얻을 수 있었다.
- 5) 산림의 다양한 이용과 보존을 복합적으로 목표로 해야 한다는 현재의 인식(이종열, 2012)에 바탕을 두고 있으며, 최근 산림정책의 주요 화두인 산림복지 및 산림관광에 대한 관심을 반영하여 시나리오를 구성하였다.
- 6) Costanza *et al.* (1997)의 생태계서비스 가치 추정 방법은 생태계 서비스를 17가지 독립적인 범주로 구분하여 생태계 서비스가 지닌 잠재적 가치의 범주를 뚜렷하게 보여주며, 12가지 생물군계(biome)에 따라 그 가치를 추정하였으며 면적을 곱하여 가치를 산출하기에 용이한 방법이다. 이 방법으로 연구지역의 생태계서비스를 단순 평가한 결과 약 0.9~1억 USD(1994년 기준)으로 추정되었다.
- 7) World Bank(<http://data.worldbank.org>)에서 제공하는 1994년과 2012년 화폐가치의 상대적인 비교 자료를 통해 2012년의 달러 가치로 변환하였고(1994년 USD×2.24=2012년 USD), 이를 2012년 통계청(<http://kosis.kr>)의 원-달러 환율의 평균값(1USD=1126.88KRW)을 반영하여 원화로 환산하였다.

참고문헌

- 김경민·이정빈·김은숙·박현주·노영희·이승호·박기호·신휴석, 2011, “원격탐사와 GIS 기반의 산림탄소저장량 추정에 관한 주요국 연구동향 개관,” 한국지리정보학회지, 14(3), 236-256.
- 김동한, 2012, “행위자 기반 도시모형의 장점 및 한계 분석에 관한 연구,” 국토연구, 75, 69-85.
- 김동한·서태성·구형수·강민규·성혜정·김은빈, 2014, “행위자 기반의 공간변화 시뮬레이션 모형구축과 국토도시정책 활용방안 연구,” 국토연구원 정책보고서.
- 김민구·윤영진·장훈, 2005, “GIS 기반의 뿌리보강모형을 활용한 산사태 위험도 작성방법 연구,” 한국지형공간정보학회논문집, 13(1), 45-53.
- 김민석·김진관·조용찬·김석우, 2011, “원격탐사와 수지모형을 이용한 2002년 태풍 ‘루사’에 의해 발생한 토석류 발생지점특성: 지리산 마천면 지역을 사례로,” 한국지형학회지, 18(4), 193-202.
- 김은숙·김경민·김종찬·이승호·김성호, 2010, “국가산림자원조사 자료와 임상도를 이용한 경기지역 산림의 임분재적 공간분포 추정,” 한국임학회지, 99(6), 827-835.
- 박수진, 2014, “한반도 지형의 일반성과 특수성, 그리고 지속가능성,” 대한지리학회지, 49(5), 656-674.
- 박양호, 1993, “국토개발과 산지이용,” 최정호 편, 산과 한국인의 삶, 나남, 310-329.
- 박진우·이정수, 2011, “GIS와 행정 자료를 이용한 산림전용지의 공간분포 및 탄소배출량 분석-강원도 원주시를 대상으로,” 한국임학회지, 100(3), 466-475.
- 박찬원·손연규·장용선·홍석영·현병근·송관철·하상건·문용희, 2010, “분포형 토양침식지도를 이용한 한강상류지역 토양유실 위험성 평가,” 한국토양비료학회지, 43(6), 826-836.
- 산림청, 2013, 지속가능한 산림자원 관리지침.
- 서일규·박윤식·김남원·문종필·류지철·옥용식·김기성·임경제, 2010, “SATEEC과 USPED를 이용한 토양 유실량 산정 및 우선관리 유역 선정 평가,” 한국물환경학회지, 26(3), 497-506.
- 손영모, 2009, “소나무 탄소배출계수 개발,” 월간 산림, 2009년 11월호, 88-90.
- 신유진, 2015, 생태계 서비스의 문화적 가치 평가: 가리왕산 지역을 대상으로, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 신혜섭, 2014, An Agent-based Approach for Modelling Spatial Transmission Processes of Foot-and-mouth Disease in Korea 2010-11, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 심우진, 2015, 방사성 동위원소와 토양침식모형을 통한 토양 침식의 공간적 분포에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.
- Ariuntsetseg, E., 염재홍, 2013, “행위자 기반 공간을 이용한 구역역 확산 시뮬레이션,” 한국측량학회지, 31(3), 209-219.
- 안우순, 2013, 다행위자시스템(Multi-Agent System)을 이용한 북한 토지황폐화의 모형구축 및 분석, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 윤순진, 2003, “전통적인 공유지이용관행에서 살펴본 지속가능한 발전의 방향: 송계의 경험을 중심으로,” 한국환경사회학회 2003년도 춘계학술대회 자료집, 66-88.
- 윤영수·채승병, 2005, 복잡계 개론, 삼성경제연구소.
- 윤홍근·안도경(역), 2010, 공유의 비극을 넘어, 랜덤하우스(Ostrom, E., 1990, *Governing the Commons*, Cambridge University Press, New York).
- 이민부·김남신·강철성·신근하·최한성·한욱, 2003, “북한 회령지역의 농경지 변화에 따른 토양침식 추정,” 한국지역지리학회지, 9(3), 373-384.
- 이민부·김남신·金石株·김항덕, 2008, “임진강유역의 토지이용에 따른 지표침식에 관한 연구,” 대한지리학회지, 43(3), 263-275.
- 이인모·성상규·임충모, 1991, “뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구,” 대한토질공학학회지, 7(2), 51-66.
- 이종덕·박인선·황기연, 2015, “행위자기반모형을 활용한 Personal Mobility와 Partial Autonomous Vehicle의 교통혼잡개선효과 분석,” 교통연구, 22(1), 27-44.
- 이종호, 2003, “교통시스템분석시 에이전트기반모형기법의 적용,” 대한교통학회지, 21(1), 147-156.
- 이용범·권용걸, 2009, “산지이용실태변화에 따른 이용확대 방안에 관한 연구,” 부동산학연구, 15(3), 215-226.

- 장원석 · 류지철 · 강현우 · 김기성 · 이철 · 김영석 · 임경재, 2010, "SATEEC, USPED, SHALSTAB을 이용한 충주호 유역 부댐(사방댐) 최적지 선정," 환경연구소 논문집, 7(1), 19-31.
- 전여진, 2009, "우리나라 산림의 임상별 · 수종별 재적생장량 및 재적성장률 추정에 관한 연구," 국민대학교 대학원 산림자원학과 석사학위논문.
- 정관용 · 양희문 · 김석권 · 박수진, 2012, "환경요인의 다계층성을 고려한 생태지역 분류," 대한지리학회지, 47(5), 654-676.
- 채미옥 · 엄형민 · 송하승, 2005, 계획적 국토관리를 위한 산지관리제도 개선방향, 국토연구원.
- 최병암, 2011, "미래지향적 산지관리 패러다임에 입각한 과학적 기준 제시," 국토연구원 전자저널, 354(4), 152-153.
- 한국산지보전협회, 2009, 자연친화적 산지이용기준 정립 연구.
- 한국지질자원연구원, 2006, 산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발.
- 허우궁 · 박기호 · 박수진 · 손정렬 · 김용창 · 이원호, 2010, 21세기 국토공간 관리방안 연구, 토지주택연구원.
- An, L., 2012, Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 229, 25-36.
- Bousquet, F. and Le Page, C., 2004, Multi-agent simulations and ecosystem management: a review, *Ecological modelling*, 176, 313-332.
- Costanza, R., D'arge, R., Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. and Belt, M., 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, 253-260.
- Deadman, P., Robinson, D., Moran, E. and Brondizio, E., 2004, Colonist Household Decisionmaking and Land-use Change in the Amazon Rainforest: an Agent-based Simulation, *Environment and Planning, Planning and Design*, 31, 693-709.
- Evans, T.P. and Kelley, H., 2004, Multi-scale Analysis of a Household Level Agent-based Model of Landcover Change, *Journal of Environmental Management*, 72, 57-72.
- Filatova, T., Verburg, P.H., Parker, D.C. and Stannard, C.A., 2013, Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects, *Environmental Modelling & Software*, 45, 1-7.
- Gilbert, N. and Troitzsch, K., 1999, *Simulation for the Social Scientist(first edition)*, Open University Press, Philadelphia.
- Gilbert, N. and Troitzsch, K., 2005, *Simulation for the Social Scientist(second edition)*, Open University Press, Philadelphia.
- Guo, Z., Xiao, X., Gan, Y. and Zheng, Y., 2001, Ecosystem functions, services and their values - a case study in Xingshan County of China, *Ecological Economics*, 38, 141-154.
- Hardin, G., 1968, The Tragedy of the Commons, *Science*, 13, 1243-1248.
- Hare, M. and Deadman, P., 2004, Further toward a taxonomy of agent-based simulationmodels in environmental management, *Mathematics and Computers in Simulation*, 64, 25-40.
- Hoffmann, M., Kelley, H. and Evans, T., 2002, Simulating Land-Cover Change in South-Central Indiana: an Agent-Based Model of Deforestation and Afforestation, 219-248, in Janssen, M. A.(ed.), 2002, *Complexity and Ecosystem Management-International Society for Ecological Economics*, Edward Elgar Publishing.
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A. and Andrews, S. S., 2003, Soil Quality: Why and How?, *Geoderma*, 114, 145-156.
- Kim, H. and Choi, J., 2011, A hybrid dasymmetric mapping for population density surface suing remote sensing data, *Journal of the Korean Geographical Society*, 46(1), 67-80.
- Lambin, E.F., Baulies, X., Bockstael, N., Fischer, G., Krug, T., Leemans, R., Moran, E.F., Rindfuss, R. R., Sato, Y., Skole, D., Turner II, B.L. and Vogel, C., 1999, Land-Use and Land-Cover Change Implementation Strategy, *IGBP Report No. 48 and IHDP Report No. 10*. Bonn.
- Le, Q. B., Park, S. J., Vlek, P. L.G. and Cremers, A. B., 2008, Land-Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-

- temporal dynamics of coupled human-landscape system. I. Structure and theoretical specification, *Ecological Informatics*, 3, 135-153.
- Le, Q.B., 2005, Multi-Agent System for Simulation of Land-Use and Land Cover Change: a Theoretical Framework and Its First Implementation for an Upland Watershed in the Central Coast of Vietnam, *Ecology and Development Series* NO.29.
- Lim, K., Deadman, P. J., Moran, E., Brondizio, E. and McCracken, S., 2001, Agent-Based Simulation of Household Decision Making and Land Use Change near Altamira, Brazil, 277-310 In: Gimblett, H. R., 2002, *Integrating Geographic Information Systems and Agent-based Modeling*, Oxford University Press, New York.
- Matthews, R. B., Gilbert, N. G., Roach, A., Polhill, J. G. and Gotts, N. M., 2007, Agent-based land-use models: a review of application, *Landscape Ecology*, 22, 1447-1459.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M. and Iverson, L. R., 1996, Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS, *International Journal of Geographical Information Science*, 10(5), 629-641.
- Mitasova, H. and Mitas, L., 1998, Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention, *Water Resources Research*, 34(3), 505-516.
- Miyasake, T., Le, Q. B., Okuro, T., Zhao, X., Scholz, R. W. and Takeuchi, K., 2012, An agent-based model for assessing effects of a Chinese PES programme on land-use change along with livelihood dynamics, and land degradation and restoration, *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet*, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany (<http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>)
- Montgomery, D. R., and Dietrich, W. E., 1994, A Physically based model for topographic control on shallow landsliding, *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171.
- Monticino, M., Acevedo, M., Callicott, B., Cogdill, T. and Lindquist, C., 2007, Coupled human and natural systems: A multi-agent-based approach, *Environmental Modelling & Software*, 22, 656-663.
- Park, S.J., McSweeney, K. and Lowery, B., 2001, Prediction of Soils Using a Process Based Terrain Characterisation, *Geoderma*, 103, 249-272.
- Park, S.J., van de Giesen, N. and Vlek, P.L.G., 2005, Optimal Spatial Scale for Land Use Change Modelling: A Case Study in a Savanna Landscape in Northern Ghana, *Journal of the Korean Geographical Society*, 40(2), 221-241.
- Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Hoffmann, M. J. and Deadman, P., 2003, Multi-agent system for the simulation of land-use and land-cover change: a review, *Annals of the Association of American Geographers*, 93, 314-337.
- Poulsen, L., 2013, Costs and benefits of policies and practices addressing land degradation and drought in the drylands, *White Paper II. UNCCD 2nd Scientific Conference*, UNCCD Secretariat, Bonn. Available at <http://2sc.unccd.int>.
- Purnomo, H., Mendoza, G. A., Prabhu, R., and Yasmi, Y., 2005, Developing multi-stakeholder forest management scenarios: a multi-agent system simulation approach applied in Indonesia, *Forest Policy and Economics*, 7(4), 475-491.
- Railsback S. F., Grimm V., 2009, *A Course in Individual-based and Agent-based Modeling*, Princeton University Press, Princeton.
- Railsback, S.F., Lytinen, S.L. and Jackson, S.K., 2006, Agent-based simulation platforms: review and development recommendations. *Simulation*, 82, 609-623.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoder D.C., 1997, Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agriculture Handbook* No.703, U.S. Department of Agriculture.
- Reynolds J.F., Stafford-Smith, D.M., Walker, B., Lambin, E.F., Turner, B.L. II, Mortimore, M., Batterbury S.P.J., Downing, T.E., Dowlatabadi, H., Fer-

- nandez, R.J., Herrick, J.E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F.T., and Ayarza, M., 2007, Global desertification: Building a science for dryland development, *Science*, 316, 847-851.
- Robinson, T. R., Brown, D. G., Parker, D. C., Schreinemachers, P., Janssen, M. A., Huigen, M., Wittmer, H., Gotts, N., Promburom, P., Irwin, E., Berger, T., Gatzweiler, F. and Barnaud, C., 2007, Comparison of empirical methods for building agent-based models in landuse science, *Journal of Land Use Science*, 2(1), 31-55.
- Safaei, M., Omar, H., Yousof Z. B. M., and Ghiasi, V., 2010, Applying Geospatial Technology to Landslide Susceptibility Assessment, *Electronic Journal of Differential Equations*, 15, 677-696.
- Schindler, J., 2009, A Multi-Agent System for Simulating Land-use and Land-cover Change in the Atankwidi Catchment of Upper East Ghana, *Ecology and Development Series No. 68*.
- Tiwari, A. K., Risse, L. M. and Nearing, M. A., 2000, Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE, *Transactions of the ASAE*, 43(5), 1129-1135.
- Trébuil, G., Bousquet, F., Ekasingh, B., Baron, C. and Le Page, C., 2005, A multi-agent model linked to a GIS to explore the relationship between crop diversification and the risk of land degradation in northern Thailand highlands 167-189; Bousquet F., Trébuil G., Hardy B.(eds.), 2005. *Companion modeling and multi-agent systems for integrated natural resource management in Asia*, International Rice Research Institute.
- Turner II, B.L., Skole, D., Sanderson, S., Fischer, G., Fresco L. and Leemans, R., 1995, Land-Use and Land-Cover Change Science/Research Plan, *IGBP Report No. 35/HDP Report No. 7*, Bonn.
- Veldkamp, A. and Lambin, E. F., 2001, Predicting land use change, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 1-6.
- Verburg, P. H., de Nijs, T. C. M., van Eck J. R., Visser, H. and de Jong K., 2004, A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns, *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, 667-690.
- Verburg, P., Kok, K. and Veldkamp, T., 2005. Pixels or agents? Modelling land-use and land-cover change, *IHDP Newsletter* 3, 8-9.
- Verburg, P. H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V. and Mastura, S. A., 2002, Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model, *Environmental Management*, 30(3), 391-405.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenko, J. and Melillo, J.M., 1997. Human domination of Earth's ecosystems, *Science*, 277, 494-499.
- Wilensky, U., 1999. *NetLogo*, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling (CCL), Northwestern University, Evanston.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D., 1978, Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning, U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook NO.537*.
- Wooldridge, M., 2010, *Introduction to Multi Agent Systems*, Wiley, New York.
- Wu, T. H., Mckinnell, W. P., and Swanston, D. N., 1979, Strength of tree roots and slides on prince of Wales Island, *Alaska, Canadian Geotechnical Journal*, 21, 699-709.
- Yu, D.J., Anderies, J.M., Lee, D. and Perez, I., 2014, Transformation of Resource Management Institutions under Globalization: the Case of songgye community forests in South Korea, *Ecology and Society*, 19(2), 2.
- The World Bank Data (<http://data.worldbank.org>).
- 교신: 안유순, 151-742, 서울시 관악구 관악로 1 서울대학교 지리학과(이메일: newsoon@gmail.com)
- Correspondence: Yoo Soon An, Department of Geography, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea (e-mail: newsoon@gmail.com)

최초투고일 2015. 5. 19

수정일 2015. 6. 16

최종접수일 2015. 6. 22