

토지변화과학과 인간-자연 공조시스템 모델링*

최근호** · 김오석***

Land Change Science and Modeling Coupled Human and Natural Systems*

Geunho Choi** · Oh Seok Kim***

요약 : 인간 활동은 자연 시스템을 근본적으로 변화시키며, 이같은 변화는 기후위기를 심화시키는 등 다시 인간에게 다양한 방식으로 되돌아온다. ‘인간-자연 공조시스템(Coupled Human and Natural Systems, CHANS)’ 관점은 이러한 상호작용과 순환관계를 체계화하여, 인간과 자연을 하나의 통합된 유기적인 시스템으로 이해하려는 시도이다. 본 연구의 목적은 CHANS 관점에 기반을 두고 지속가능성을 지향하는 지리학 세부 분야인 ‘토지변화과학(Land Change Science, LCS)’을 소개하는 것이다. 지리학사적 맥락에서 LCS의 등장 배경과 개념을 살펴보고, LCS 핵심 방법론인 토지이용 및 토지피복 변화(Land-Use and Land-Cover Change, LUCC) 모델링 기법을 중심으로 주요 방법론과 사례 연구를 고찰한다. 더 나아가 LUCC 모델을 귀납적, 연역적, 통합적 접근방법으로 구분하고, 각각의 이론적 기반과 구성 원리, 적용 방식 등을 비교·분석했다. 이러한 다면적 고찰을 통해 본 연구는 전지구적 환경변화와 기후위기 대응, 지속가능한 토지이용 및 관리 정책 수립 등과 같이 시급한 사회문제 해결을 위한 LCS의 역할을 강조함과 동시에 인문지리학과 자연지리학이 연구 단위에서 융합될 수 있는 학문적 접점과 토대를 제공한다.

주요어 : 토지이용, 토지이용 및 토지피복 변화, 환경지리, 원격탐사, 지속가능발전목표

Abstract : Human activities often disturb natural systems and accelerate climate crisis, which in turn affects humanity in various ways. A Coupled Human and Natural Systems (CHANS) seeks to capture these cyclical interactions by considering the human system and the natural system as an integrated system. This paper introduces Land Change Science (LCS) that pursues sustainability with the lens of CHANS framework. It explores origins and key concepts of LCS, mainly focusing on its core methodology, i.e., Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) modeling. LUCC models are further classified into inductive, deductive, and integrated approaches: their theoretical backgrounds, structures, and applications are compared. We aim to emphasize the role of LCS in responding to global environmental change and climate crisis, as well as in establishing sustainable land management policies. We also hope that LCS can function as an academic common ground for human and physical geographies to collaborate and work in tandem.

Key Words : Land-use, Land-Use and Land-Cover Change (LUCC), Environmental geography, Remote sensing, Sustainable Development Goals (SDGs)

*본 연구는 2025학년도 고려대학교 사범대학의 특성화연구비 지원을 받아 수행되었음.

**고려대학교 지리학과 석사과정(Graduate Student, Department of Geography, Graduate School of Korea University, choiroot715@korea.ac.kr)

***고려대학교 지리학과, 지리교육과, 미래국토연구소 부교수(Associate Professor, Department of Geography, Graduate School of Korea University, Department of Geography Education, College of Education, and Institute of Future Land, Korea University, oskim@korea.ac.kr)

I. 서론

인간은 특정한 의도와 목적을 갖고 자연을 조작, 변경, 이용한다. 이같은 인간 간섭(Anthropogenic disturbance)은 자연 자체의 고유한 시스템을 변화시킨다. 대표적으로 인간 활동에 의한 열대우림의 광범위한 파괴는 생물다양성 손실로 이어지며 이는 곧 산림의 탄소 저장 기능 저하와 직결된다(Barlow *et al.*, 2016). 개발 압력은 열대우림에만 국한되지 않는다. 중위도 지역의 산림 역시 경제 성장 시기를 거치며 토지이용이 변화함에 따라 제거되곤 한다. 그 결과 산사태 발생빈도가 높아지고, 대규모 산불의 발생 간격은 점차 짧아진다(Park *et al.*, 2009). 나아가, 인간의 활동은 산림을 넘어 해양과 연안 생태계에도 영향을 미치는 데, 해수면 온도를 상승시키고 다양한 생물 군집의 구조를 교란하기도 한다(Won *et al.*, 2017; Hyun *et al.*, 2020).

이같이 전 지구적 생태계에 걸친 인간의 활동은 결국 다시 인간에게 복잡적이고 예기치 못한 방식으로 영향을 끼친다. 사회적 이슈를 넘어 인류 전체의 공동 과제로 자리 잡은 기후변화가 그 대표적인 예시이다. 산업혁명 이후, 경제 성장을 위해 무분별한 지역개발이 이루어져 왔고, 이 과정에서 인간은 다량의 온실가스를 배출했다. 오랜 기간에 걸쳐 대기 중에 축적된 온실가스는 지금도 여전히 지구의 평균 기온을 상승시키고 있으며, 지구 평균 지표 온도 역시 산업화 이전과 비교해 1.5도 이상 상승할 것으로 보고됐다(IPCC, 2018). 이러한 전 지구적 환경변화는 고스란히 인간에게 되돌아온다. 이상기후의 빈도와 강도는 이전과 다르며(IPCC, 2021), 폭염(임연엽 등, 2023; Kim *et al.*, 2022), 홍수(김지수·김오석, 2019) 등이 인간에 끼치는 직간접적인 피해는 우리의 안전을 위협하고 있다. 따라서 인간과 자연을 별도의 시스템으로 간주하고 이루어졌던 과거의 경제 성장과 지역개발은 더 이상 지속가능할 수 없다. ‘인간-자연 공조시스템(Coupled Human and Natural Systems, CHANS)’은 인간과 자연을 연결하여 하나의 시스템으로 바라보는 관점으로, 사회·경제적으로, 환경적으로 급변하는 현대사회를 정확하게 이해하고 현명하게 대응하는 데 반드시 필요한 관점이다.

본 연구에서 소개하고자 하는 ‘토지변화과학(Land Change Science, LCS)’은 토지이용 및 토지피복 변화를 하나의 인간-자연 공조시스템으로 간주하고, 토지 변화 시스템의 구동 요인과 변화 과정, 그리고 그에 따른 환경영향을 연구하는 데 주된 목적을 두는 지속가능성

(Sustainability) 지향의 신지리학이다(Rindfuss *et al.*, 2004a; Turner *et al.*, 2007). 토지는 지구를 구성하는 생물 물리학적 공간이면서, 인류의 터전이다(Meyfroidt *et al.*, 2022). 따라서, ‘인간이 토지를 어떻게 이용하는가?’라는 질문은 다양한 사회 및 환경변화를 이해하고 설명하는 것의 근간이 된다. 일반적으로 ‘토지이용(Land-use)’은 특정 토지피복의 변화나 유지를 목적으로 인간이 행하는 배치(Arrangements), 활동(Activities), 투입(Inputs) 등으로 정의되며, 토지이용의 대상이 되는 ‘토지피복(Land-cover)’은 지표면에서 관찰할 수 있는 물리적인 피복을 의미한다(FAO and UNEP, 1999). 두 용어는 서로 밀접하게 연관되어 있으나, 역사적으로 다른 학문 분야에서 연구됐다. 토지이용은 주로 지리학, 경제학 등 사회과학적 맥락에서, 토지피복은 생태학, 환경과학 등 자연과학에서 각각 다루어졌다(Meyer and Turner, 1994). 이러한 이분법적 접근을 넘어 토지이용과 토지피복의 상호작용을 통합적으로 이해하려는 움직임이 있어 왔고, 사회과학과 자연과학을 아우르는 학문으로써 특히 지리학이 통합적 관점을 정립하는 것에 크게 이바지했다(Meyer and Turner, 1996).

한편, 토지이용과 토지피복은 항상 일대일 대응 관계를 이루지 않는다. 따라서 용어를 사용하는 데 있어 혼용하지 않도록 주의가 필요하다. 도시 지역의 예를 들어보면, 주거지역이라는 한 가지의 토지이용은 아스팔트로 포장된 도로, 잔디, 나무, 수영장 등과 같은 다양한 토지피복으로 구성될 수 있다(Brown and Duh, 2004). 토지이용은 인간의 의도가 토지에 투영되는 것이며, 또 인간은 사회라는 구조에 속한 행위자이다. 따라서 토지이용은 본질적으로 다양한 사회·경제적 요인을 반영한다(Turner *et al.*, 2020). Turner and Meyer(1991)는 ‘인접 요인(Proximate sources)’ 개념을 통해 인간의 의도를 규명하고자 했다. 인접 요인이란 물리적 환경을 직접적으로 변화시키는 인간의 행동을 의미한다, 이를 통해 토지피복의 물리적 상태가 전환되고, 인간이 의도한 토지이용 목적이 실현된다는 것이다. 이때 토지이용이 토지피복 변화를 유발하는데, 이 변화는 사회·경제·정치·문화적 속성과 같은 ‘인위적 동인(Human driving forces)’에 의해 결정된다. 즉, 인간의 목적이 반영된 토지이용은 토지피복을 변화시키고, 그 방향성과 강도는 사회의 구조적 특성에 의해 규정된다고 본 것이다.

Geist and Lambin(2002)은 Turner and Meyer(1991)의 담론을 구체화하여 토지이용과 토지피복 변화의 원인을 ‘직접 원인(Proximate causes)’과 ‘기저 동인(Underlying

driving forces)’으로 보다 명확하게 구분했다. 직접 원인은 산림 벌채, 도시 확장, 경작지 개간과 같이 지표면에 물리적 변화를 일으키는 즉각적인 인간의 행위를 말하며, 기저 동인은 경제적, 제도적, 기술적, 문화적, 인구학적 변화 등과 같이 인간 행위를 유도하거나 제한하는 구조적 조건을 가리킨다. 토지이용 및 토지피복 변화의 직접 원인과 기저 동인은 독립적으로 작용하지 않고 상호작용하며, 궁극적으로 토지 변화의 유형과 결과를 결정짓는다. 산림 전용을 예로 들어보자. 개발 압력이 높은 도시 인근과 농업 집약도가 높은 농촌 지역에서는 전혀 다른 사회·경제적 요인이 산림 전용의 기저 동인이 될 수 있다. 도시 지역에서는 도시화가, 농촌 지역에서는 농업 활동이 기저 동인으로 작용하며, 그 양상과 강도 또한 다르게 나타난다. 즉 토지를 매개로 하면, 사회·경제적 요인이 직·간접적으로 어떠한 환경변화를 일으키는 지 체계적으로 규명할 수 있는 것이다. LCS는 토지를 매개로 복잡한 사회·경제적 현상과 그에 따른 환경변화 및 영향을 함께 다룸으로써, 기후변화와 세계화를 주된 축으로 급변하는 사회를 총체적으로 이해하고 설명할 수 있는 학문적 토대를 제공한다.

본고의 주된 목적은 LCS의 주요 내용과 방법론을 심도있게 살펴보는 데에 있다. 2장에서는 LCS가 등장하게 된 배경과 핵심 개념을 정리하고자 하며, 3장에서는 LCS의 주요 방법론인 ‘토지이용 및 토지피복 변화(Land-Use and Land-Cover Change, LUCC) 모델링’에 대해 소개한다. LCS는 학문 특성상 실증적이고 경험적인 관점이 주를 이루기 때문에 주요 방법론을 통해 정리하는 것이 효과적이라 판단했기 때문이다. 4장에서는 대표적인 LUCC 모델을 제시하고 이와 관련된 연구 주제, 이론, 자료 등을 유기적으로 나열하면서 서술한다.

II. 토지변화과학(LCS)의 등장 배경 및 주요 내용

LCS의 등장 배경은 크게 세 가지로 정리할 수 있다. 첫째, 지리학은 그 근본 자체가 지표상에서 발생하는 다양한 지리 현상을 기술하고 설명하는 것에 초점을 둔 학문이기 때문에, 예로부터 토지이용 변화를 연구하는 전통이 있어 왔다. 경제지리학의 초기 이론 중 하나인 본 튀넨(von Thünen)의 지대이론이 그 대표적인 예이다. 튀넨의 고전적 모델은 단일 중심지를 기준으로 농업 토지이용의 공간

적 분포와 지대 변화를 설명한다. 이 모형은 농지 경작의 경험에서 통찰을 얻어 정립된 이론으로, 토지이용에 기반한 실증적 이론이기도 하다(Fujita, 2012). Turner and Robbins(2008)는 LCS를 근대적 경관 연구의 연장선에 있는 과학적 학문으로 간주했는데, 그 형성과 발전 과정에 문화생태학(Cultural Ecology)과 인간생태학(Human Ecology)의 영향이 있었다고 설명한다. 이들은 특히 인간과 환경 사이의 관계를 기능적으로 설명하려는 문화생태학의 개념과, 리스크 및 재난 상황에 맞서 인간사회의 대비와 적응을 다룬 인간생태학의 문제의식이 LCS의 이론적 기초로 작용했음을 강조한다. 이처럼 지리학 고유의 학문적 전통은 20세기에 LCS가 등장하는 데 있어 튼튼한 뿌리 역할을 했다.

두 번째는 지속가능한 발전(Sustainable Development)이 중요한 사회적 이슈로 자리매김한 배경이다. 한국에서는 2000년대 후반 ‘녹색성장’이 이와 유사한 의미로 사용되었고(유근배, 2010), 2010년대 이후 지속가능성 담론이 국내 지리학계에서도 통용되고 있다(권상철·고은경, 2020; 현기순, 2022). 지속가능한 발전을 실현하기 위해서는 경제성장뿐만 아니라 과학기술 개발, 현존하는 자원 및 자연환경 보전에 대한 노력이 동시에 이뤄져야 한다. 미국 학계에서는 이를 지지하고자 ‘지속가능성 과학(Sustainability Science)’이라는 새로운 학문을 지리학자 Kates가 중심이 되어 제안한 바 있다(Kates et al., 2001). Clark(2007)가 언급했듯 지속가능성 과학은 다양한 학문을 아우르는 문제 중심의 연구 분야이며, 인간과 환경의 상호작용에 기반한다. 이러한 지속가능성 과학의 문제 지향적 특성은, 인간-자연 시스템의 동태적 상호작용을 다루는 LCS의 접근 방식과도 긴밀히 맞닿아 있는 것이다. 결과적으로 지속가능한 발전이라는 사회적 과제는 LCS의 학문적 기틀을 다지는데 비옥한 토양이 되었으며, 이는 ‘취약성 과학(Vulnerability Science)’와 함께 지속가능성 과학 내에서 LCS의 지위를 공고히 했다(Turner et al., 2003; Polsky et al., 2007).

마지막으로 세 번째, 컴퓨터와 인공위성 등 정보통신 기술이 급속도로 발달하는 시대적 배경에 힘입어 Goodchild(1992)는 ‘지리정보과학(Geographic Information Science, GISc)’을 학문으로 체계화했고, 지리정보과학은 지리학자에게 다양한 공간자료를 더욱 효율적으로 사용할 수 있는 학문적 인프라를 제공했다. 지리정보과학의 탄생은 LCS에서 가장 널리 사용하는 자료인 위성영상을 관리 및

처리할 수 있는 학문적·기술적 기반을 마련했을 뿐 아니라, 모델링과 공간통계기법 등과 같이 과학적 연구를 위한 방법론적 틀을 제공했다(Rindfuss *et al.*, 2004a). 원격탐사와 GIS의 결합은 토지이용 및 토지피복 변화의 패턴을 정량적으로 분석할 수 있는 기반을 마련했으며(Shalaby and Tateishi, 2007; Park *et al.*, 2011), 정밀한 시계열 자료의 구축으로 세밀한 지표상의 변화를 탐지할 수 있게 되었다(박샘·최광용, 2016; 이수진 등, 2016; Weng, 2002). 요약하자면, LCS는 지리학의 고유한 경관 연구 전통, 지속가능한 발전이라는 사회적 요구, 그리고 GIS의 학문적·기술적 기반이라는 세 축을 바탕으로 형성된 학문이라 할 수 있다. 또한 토지이용과 토지피복의 시·공간적 변화와 변화 요인 및 변화 과정을 분석하여 전 지구적 환경변화의 이해와 지속가능한 발전에 필요한 지식을 생성하는 학문이기도 하다(Turner *et al.*, 2007).

LCS는 개념적인 측면에서 보면 인간-자연 공조시스템 관점에 기반을 둔다고 앞서 언급했었다. Liu *et al.*(2007)에 의하면 인간-자연 공조시스템 연구의 특성은 다음과 같다. 먼저, 인간과 자연 시스템을 동시에 다룰 뿐만이 아니라 이들 사이의 연결 관계도 하나의 시스템으로써 함께 고려한다. 이러한 관점은 인간의 영향을 배제했던 전통 자연지리학 또는 생태학이나, 환경·생태적 효과를 배제했던 기존 사회과학 연구의 한계를 극복하며 통합하는 학제

적(Interdisciplinary) 특징을 지닌다. 이에 더해 사회과학 및 자연과학에서 사용하는 다양한 방법론과 자료를 활용하고, 특정 주제와 연구 지역을 대상으로 시간적 역동성을 설명할 수 있을 정도로 장기간에 걸쳐 진행되는 것이 인간-자연 공조시스템 연구의 특징이다. 예로부터 지리학에서는 인간과 자연을 함께 연구하는 전통(Man-Land Tradition)이 있어 왔기 때문에(Pattison, 1990), 인간과 자연을 하나의 시스템으로 고려하려는 관점 자체가 사실 그리 새로운 것은 아니다. 한국에서는 이미 일반적인 버클리 학파 Sauer 학풍 문화지리학의 경관 연구 역시 인간-자연 공조시스템을 규명하는 데 목적을 둔다고 볼 수 있으며(홍금수, 2024; Chung, 2005), LCS의 선구자 중 한 명인 Turner의 마야문명 몰락 연구에서도 인간과 환경의 역할에 근거해 흥망성쇠를 해석한다(Turner and Harrison, 1981; Turner and Sabloff, 2012).

그렇다면, 기존 지리학에서 꾸준히 맥락을 유지한 ‘인간과 자연을 동시에 연구하는 전통’과 비교해서 LCS의 ‘인간-자연 공조시스템’이 갖는 차별성은 무엇일까? 주된 차이는 연구를 수행할 때 활용하는 자료와 방법론에 있다. 기존 지리학에서 연구해 왔던 인간-자연 연구는 주로 정성적인 방법론을 활용하는 경향이 두드러졌다. 반면, LCS는 정량적인 방법론을 주로 활용하며 원격탐사와 지리정보과학이 이를 뒷받침한다. 이때 정량적인 방법론의 주된

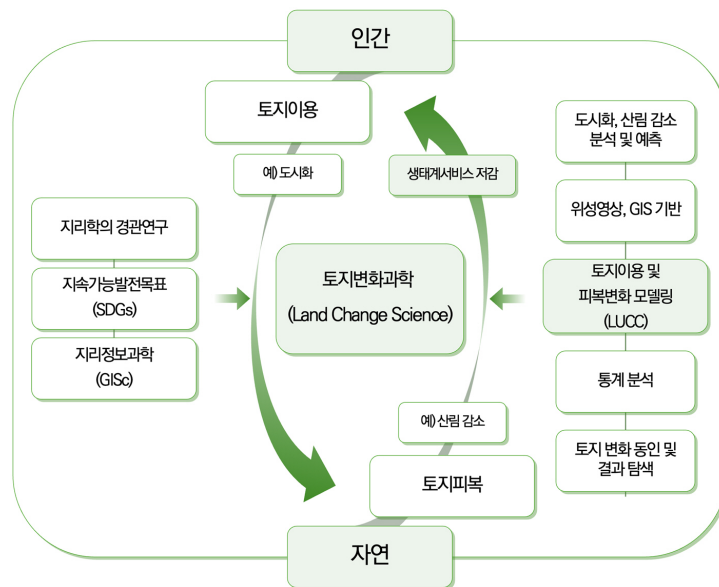


그림 1. 토지변화과학(LCS)과 인간-자연 공조시스템 모식도

자료로 위성영상이 가장 널리 사용된다. 인구 센서스나 경제지표 등과 같은 사회과학 관련 자료를 위성영상 자료와 융합하여 분석하려는 시도가 많은데 이는 ‘화소(Pixel)와 사람(People)을 연결(Link)한다’라고 표현하기도 한다(Rindfuss *et al.*, 2004b). 그림 1은 지금까지 언급한 LCS를 인간-자연 공조시스템의 틀에서 표현한 것이다.

III. 토지변화과학(LCS)의 핵심 방법론: 토지이용 및 토지피복 변화(LUCC) 모델링

토지이용 및 토지피복 변화 모델링은 LCS의 가장 주된 방법론이다. LUCC는 ‘특정 유형의 토지이용 또는 토지피복 면적의 정량적인 변화’를 의미하며(Briassoulis, 2000), LUCC 모델은 ‘최소한 한 가지 토지이용에 할당된 면적 변화를 계산하기 위한 도구’로 정의된다(Heistermann *et al.*,

2006). Verburg *et al.*(2006)는 LUCC 모델링의 기능을 구체적으로 두 가지로 구분했다. 하나는 토지이용 변화의 동인과 시스템 역학을 이해하기 위한 학습 도구로서의 역할, 다른 하나는 토지이용 시스템의 미래 변화를 탐색하는 예측 도구로서의 역할이다. 이러한 점에서 LUCC 모델링은 LCS가 지향하는 주요 연구 목적과도 맞닿아 있다. LCS는 다양한 시공간적 스케일에서 토지 변화 과정을 관찰·모니터링하고, 이를 인간-자연 공조시스템의 맥락에서 이해하며, 공간 모델링을 통해 그 결과로 드러나는 시스템의 취약성·회복력·지속가능성을 평가하는 것을 주요 과제로 삼는다(Turner *et al.*, 2007). 즉 이 과정에서 LUCC 모델은 단순히 땅에서 일어나는 변화를 관측하는 것에 더해 변화에 원인과 결과로 작용하는 인간-자연 공조시스템을 규명하는 핵심적인 역할을 수행한다.

LUCC 모델링은 각종 통계자료 및 공간자료를 입력자료로 활용하며, 과거와 현재의 토지이용 및 토지피복의 시·공간적 변화 패턴을 분석함으로써 미래의 변화양상을

표 1. 대표적 LUCC 모델 분류 유형

대표연구	LUCC 모델 분류 기준	LUCC 모델 분류
Lambin <i>et al.</i> (2000)	연구 지역, 토지 변화의 속도 및 변수	경험 및 통계 기반 모델 (Empirical-statistical)
		확률 기반 모델 (Stochastic)
		최적화 모델 (Optimisation)
		동적 시뮬레이션 모델 (Dynamic simulation)
		통합적 모델 (Integrated modeling approaches)
Heistermann <i>et al.</i> (2006)	토지에 대한 인식	지리학적 모델 (Geographic land-use models)
		- 경험 및 통계 기반 (Empirical-statistical)
		- 규칙 및 절차 기반 (Rule-process)
		경제학적 모델 (Economic land-use models)
Lantman <i>et al.</i> (2011)	4가지 핵심 조건 (변화의 연속성, 토지의 적합성, 이웃 간 상호작용, 행위자 간 상호작용)	통합적 모델 (Integrated land-use models)
		셀룰러 오토마타 (Cellular automata)
		통계 기반 모델 (Statistical analysis)
		마르코프 체인 (Markov Chain)
		인공신경망 (Artificial neural networks)
		경제학 기반 모델 (Economics-based models)
Verburg <i>et al.</i> (2006)	모델의 다차원적 특성	행위자 기반 모델 (Agent-based models)
		공간 vs 비공간 (Spatial vs nonspatial)
		동적 vs 정적 (Dynamic vs static)
		설명적 vs 규범적 (Descriptive vs prescriptive)
		연역적 vs 귀납적 (Deductive vs inductive)
		행위자 기반 vs 픽셀 기반 (Agent- vs pixel-based)
		세계적 vs 지역적 (Global vs regional)

출처 : Lambin *et al.*(2000), Heistermann *et al.*(2006), Lantman *et al.*(2011), Verburg *et al.*(2006)의 분류를 재구성

전망할 수 있다. 이를 도시화 연구에 적용하면 미래 도시 팽창 및 도시의 토지이용 패턴을 예측할 수 있고(김오석, 2014; 박현수·장동호, 2020; 정고은·김영호, 2021), 농촌 지역에서의 산림 전용 연구에 적용하면 미래에 얼마만큼의 산림이 어디에서 파괴될지 예측할 수 있다(김오석, 2013, 2015; 김오석·윤여창, 2014; 김오석·한기주, 2015; 류형원·장동호, 2018; Kim, 2010; Kim and Newell, 2015).

인간-자연 공조시스템의 복잡성을 지닌 LCS의 특성상, 학문의 경계를 뛰어넘는 다양한 접근 방식이 LUCC 모델 개발과 LCS 학문 발전에 이바지했다. 대부분의 LUCC 모델은 방법론, 목적, 가정, 연구 지역, 그리고 사용된 데이터의 유형과 출처 측면에서 서로 다르다(Michetti, 2012). Agarwal *et al.*(2001)은 공간성, 시간성, 그리고 정책 등과 같은 주요 의사결정 기여가능성에 따라 19가지 LUCC 모델링 기법을 정리한 바 있다. 이외에도 LUCC 모델은 연구자가 어떤 기준으로 분류하느냐에 따라 다양하게 구분할 수 있다(표 1).

Lambin *et al.*(2000)은 토지 변화의 시기(When)와 위치(Where), 그리고 변화를 일으키는 원인(Why)에 근거해 LUCC 모델을 5가지 범주로 분류했다. 뒤이어 Heistermann *et al.*(2006)은 ‘토지’ 개념을 다루는 차이에 따라 LUCC 모델을 구분했다. 경제학적 모델에서의 주된 관심은 토지 자체가 아니라 지대였다면, 지리학적 모델은 토지이용 변화 과정 자체에 초점을 둔다고 보았다. 이에 따라 크게 지리학과 경제학에 근거한 LUCC 모델을 양분한 후, 둘 사이의 공통점을 공유하는 통합 모델을 제시했으며, Michetti(2012) 역시 동일한 기준에 근거해 모델을 분류했다. Lantman *et al.*(2011)은 토지이용 변화의 4가지 핵심을 제시하며, 토지이용 모델의 범주는 그 중 적어도 한 가지를 만족해야 함을 주장했다. 4가지 핵심 요소는 변화

의 연속성, 토지의 적합성, 이웃 간 상호작용, 행위자 간 상호작용을 포함한다. 한편 Verburg *et al.*(2006)은 LUCC 모델의 다양성은 연구 질문의 깊이, 연구 지역의 범위, LUCC에 대한 통합적 이론의 부재에서 비롯된다고 설명한다. 이러한 이유로 연구자들은 모델을 엄격한 범주로 분류하기보다는, LUCC 모델의 접근법을 포괄적으로 구분하는 핵심 특징들을 중심으로 LUCC 모델을 논의했다.

이처럼 유연하지 못한 분류로 모델의 범주를 제한하는 경우, LUCC 모델의 다차원적 성격을 반영하지 못할 수 있다. 예를 들어, 입력자료로 쓰이는 Slope, Land-use, Excluded, Urban, Transportation, Hillshade의 첫 글자를 따서 만들어진 SLEUTH 모델은 셀룰러 오토마타(Cellular Automata, CA) 기반의 도시 성장 시뮬레이션 모델로써, 픽셀 단위에서 토지이용 및 토지피복의 시공간적 변화를 모의한다(Chaudhuri and Clarke, 2013). 실제 변화를 토대로 미래를 예측한다는 점에서 경험적 접근이라고도 볼 수 있으며 미리 전제된 CA 기반의 전이 규칙에 따라 구성되므로 규칙 기반 모델이기도 하다. 따라서 본 연구에서는 Verburg *et al.*(2006)이 제안한 접근 방식과 같이 모델의 성격을 포괄적으로 구분하는 한가지 특성에 근거해 LUCC 모델을 고찰하고자 하며, 크게 귀납적 모델과 연역적 모델로 구분해 서술하고자 한다. 또한 귀납적 모델과 연역적 모델의 특성을 함께 공유하는 모델은 별도의 통합 모델로 제시한다. 표 2는 본 연구에서 소개하고자 하는 주요 LUCC 모델을 구분한 것이다. 다양한 특성이 존재함에도 불구하고 비교적 단순한 구분을 제시한 이유는, 귀납과 연역이라는 단순하지만 역사적인 분류 기준이 LUCC의 복잡성을 아우를 수 있을뿐더러, 본고의 목적이 모델 간 우열을 가리기보다 여러 LUCC 모델을 통해 LCS의 관점을 명확히 전달하는 데 목적이 있기 때문이다.

표 2. LUCC 모델 분류

LUCC 모델 분류 기준	LUCC 모델 분류	세부 LUCC 모델
모델 기반 이론 유무	귀납적 LUCC 모델	통계 기반 모델
		- 가중합 기반 모델
		- 회귀분석 기반 모델
		- Markov Chain 기반 모델
	연역적 LUCC 모델	경제학 기반 모델
		셀룰러 오토마타 기반 모델
	통합적 LUCC 모델	케일럼 모델
		셀룰러 오토마타-Markov Chain 통합 (CA-Markov) 모델

귀납적 LUCC 모델과 연역적 LUCC 모델을 구분하는 주요한 차이는 모델을 구성하는 이론의 역할이다(Verburg *et al.*, 2006; Overmars and Verburg, 2007). 귀납적 LUCC 모델은 자료를 먼저 분석해 연구 지역의 토지이용 및 토지 피복 변화를 이해하고, 그다음에 이를 설명할 수 있는 이론을 살펴보는 방법론이라면, 연역적 LUCC 모델은 특정 이론을 먼저 선택하고 그 이론이 연구 지역의 토지이용 및 토지피복 변화를 설명할 수 있는지에 대해서 연구하는 방법론이다. Verburg *et al.*(2006)는 복잡한 토지 변화의 특성상 모든 요소를 포괄하는 단일 이론이 부족하므로 LUCC 연구는 귀납적 접근에 의존한다고 설명한다. 이 접근은 일반적으로 통계자료 및 공간자료를 통해 통계적 상관관계를 도출하고, 이를 통해 토지 변화를 설명하고 예측한다. 하지만 귀납적 방법만으로 인과관계를 명확히 규명하는 것은 불가능하며, 일반화 가능성이 작다는 한계 역시 존재한다. Overmars *et al.*(2007)는 이에 근거해 연역적 접근이 토지 변화의 근본적인 원리를 밝히고, LCS의 근본적인 이론 발전에 이바지한다는 점을 강조한다. 요약하자면 두 접근법은 Veldkamp and Lambin(2001)이 말하는 전통적인 모델 구분인 통계 기반(Statistical-based)과 이론 기반(Process-based, Structural-based)의 틀을 따른다고 볼 수 있으며, 각각의 강점과 한계를 가지고 상호보완적인 역할을 한다.

IV. 주요 LUCC 모델 분류

1. 귀납적 LUCC 모델

대부분의 LUCC 모델은 통계적 상관관계를 기반으로 모델을 정의하는 귀납적 접근 방식에 의존하며(Verburg *et al.*, 2006), 귀납적 LUCC 모델의 상당수가 통계 기반 LUCC 모델이라 볼 수 있다. 통계분석 기반 LUCC 모델은 입력자료의 변이를 정량적으로 비교·분석함으로써 LUCC 관련 인자를 파악하고, 이를 통해 LUCC의 과정을 이해·설명하는 방법이다. 로지스틱 회귀분석 등과 같은 고전적인 통계기법부터 인공지능망 등을 비롯한 데이터 마이닝 기법이 여기에 속하며, 가장 널리 사용되는 방법론이라고 볼 수 있다(Pijanowski *et al.*, 2002; Verburg *et al.*, 2002; Lin *et al.*, 2011). 대부분의 경우 통계분석은 위성영상 비롯한 공간자료에 기반해 이루어지며, 토지이용 및

토지피복 변화가 발생하는 위치를 파악할 수 있다는 장점이 있다(Mas *et al.*, 2014). 이에 더해 최종 결과물 역시 지도로 표출되는 경우가 일반적이다.

1) 가중합 기반 모델

통계분석 기반 LUCC 모델링 중 가장 기초적인 방법은 가중합(Weighted summation)을 활용하는 것이며, 그 원리는 다음과 같다(Pontius Jr and Chen, 2006). 먼저 토지이용과 토지피복이 얼마만큼 변화했고 또 그 변화가 어디에서 일어났는지를 계량화할 수 있는데, 이는 일반적으로 서로 다른 시점의 토지피복도를 교차분석하여 도출된다. 교차분석 결과는 경사도, 도로 접근성 등 도시개발과 연관이 있는 공간변수와 중첩하여 분석하며, 구체적인 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 경사도의 경우 5도 이하, 5도와 15도 사이, 15도 이상 등으로 구분하고 도로 접근성의 경우 반경 1km 이내, 1km와 10km 사이, 10km 이상 등으로 구분하여, 두 변수를 중첩하면 경사도가 5도 이하임과 동시에 도로 접근성이 반경 1km 이내인 공간역이나 경사도가 15도 이상이면서 도로 접근성이 반경 10km 이상인 영역 등으로 연구 공간역을 세분화할 수 있다. 가중합 방법은 근본적으로 다기준분석법(Multi criteria analysis)과 흡사하다. 이처럼 도시개발을 설명할 수 있는 공간변수를 활용하여 연구 지역을 여러 개의 등질지역으로 구분하고 난 다음 이를 토지피복 교차분석 결과와 중첩하면, 각 등질지역 별로 얼마만큼의 변화가 발생했는지에 대한 빈도(즉, 픽셀 개수)를 계산할 수 있다. 경사도가 5도 이하이면서 도로 접근성이 반경 1km 이내인 지역은 변화하는 픽셀이 많을 것이고, 경사도가 15도 이상이면서 도로 접근성이 10km 이상인 영역은 상대적으로 변화하는 픽셀이 적을 것으로 예상할 수 있다. 이같은 빈도에 근거하여 앞으로 어느 지역이 더 변화할 여지가 많고 적음을 미루어 짐작할 수 있다. 경사도와 도로 접근성은 토지이용 및 토지피복 변화에 미치는 영향이 다를 수 있다. 이를테면 도로 접근성이 변화를 설명하는데 있어 경사도보다 더 비중이 있다면, 도로 접근성에 더 많은 가중치를 주어야 타당하다. 이처럼 가중합을 활용한 LUCC 모델은 단순한 방법론이지만 다른 방법론과 비교해서 정확도가 크게 떨어지지는 않으며(Pontius Jr *et al.*, 2008), 대표적인 LUCC 모델로는 Geomod가 있다(Hall *et al.*, 1995; Pontius Jr and Chen, 2006; Kim and Newell, 2015).

2) 회귀분석 기반 모델

회귀분석에 기반한 접근 역시 통계 기반 모델로써, 근본적으로는 가중합 기반 모델과 유사한 원리에 근거한다. 가중합 모델이 공간 변수에 가중치를 부여하여 변화를 예측하는 것처럼, 회귀분석 기반 모델 역시 다양한 변수들이 특정 토지이용 및 토지피복 변화에 끼치는 영향을 통계적으로 추정한 후, 이를 토대로 변화 가능성을 계산한다 (Verburg *et al.*, 2004). 특정 픽셀 i 가 있다고 가정했을 때, 두 시점의 자료를 비교해 변화가 발생했다면 1로, 변화가 없다면 0으로 상정할 수 있다. 그다음, 경사도, 도로 접근성과 같은 전통적인 공간변수에 생물·물리학적, 사회·경제적 변수들에 근거한 회귀식을 도출할 수 있다. 회귀식의 각 변수별 계수는 해당 변수가 특정 픽셀 i 의 토지이용 변화에 미치는 상대적 영향력을 의미하며, 이를 바탕으로 픽셀 i 가 다른 토지이용 유형으로 전이될 가능성을 산출할 수 있다. 다중 회귀분석(Verburg *et al.*, 1999a), 로지스틱 회귀분석(Verburg and Overmars, 2007) 등을 사용해 변수 간 상호작용과 영향력을 더욱 정교하게 반영할 수 있으며, 위치별 변화 가능성을 예측할 수 있다. 대표적인 LUCC 모델로 현재까지 널리 사용되는 토지이용 전환 및 영향 모델(Conversion of Land Use and its Effects, CLUE) 계열의 LUCC 모델들이 회귀분석에 기반을 둔 모델이다 (류지철 등, 2014; Verburg *et al.*, 2002; Verburg *et al.*, 2004). 통계 기반 모델은 변수들 사이의 관계만으로 변화 확률을 간단하게 추정할 수 있는 장점 덕분에 국내에서도 활발하게 활용되며, 도시 및 산림의 면적 변화를 예측하거나(이용관 등, 2016; 광두안·박소희, 2021) 환경정책에 따른 효과(이성주 등, 2020)를 분석하기도 한다.

3) Markov Chain 기반 모델

통계 기반 LUCC 모델 가운데 하나인 마르코프 체인(Markov Chain) 모델은 토지이용의 전환 확률에 근거해 미래의 변화를 예측하는 접근이다. 앞선 가중합과 회귀모

델이 공간 변수를 반영했다면, 마르코프 체인은 공간적 변수보다 과거 시점 사이의 토지이용의 시계열적 전이 그 자체에 집중한다. Burnham(1973)은 마르코프 체인 개념을 토지이용 모델에 도입해 확률에 기반한 토지이용 변화를 이해하고자 했다. 마르코프 체인은 한가지 토지이용 상태에서 다른 상태로의 전환은 직전 단계와 현재 상태에만 의존한다는 마르코프 성질에 기반하며, 전이 확률은 시간에 따라 일정하다는 정상성(Stationarity)을 가정한다(Lantman *et al.*, 2011). 이때 전이확률은 전이행렬에 기반하고 주로 토지피복도나 국가통계자료에서 도출할 수 있다. 토지피복도에 근거한 전이행렬 도출은 과거 두 시점의 지도를 비교함으로써 계산할 수 있는데, 앞서 언급한 교차분석과 유사한 과정을 거쳐 결과가 도출된다. 예를 들어, 아래 표 3과 같이 시가화와 비시가화 지역으로 구분했을 때 발생할 수 있는 경우의 수는 총 네 가지이다. 시가화 지역 또는 비시가화 지역이 유지되는 두 가지 경우와 시가화 지역이 비시가화 지역으로 바뀌는 경우, 그 반대의 경우를 합해 네 가지 상태로 표현된다. 즉 여러 범주에서의 변화를 모두 고려할 수 있으며(Pontius Jr and Malanson, 2005), 이때 미래의 LUCC 역시 이 네 가지 확률에 따른 현재의 변화 경향에 근거한다는 것이 마르코프 체인의 전제이다. 단순한 형태의 마르코프 체인 모델은 비공간적(Non-spatial) 확률 모형으로써 토지 변화의 경향을 수치로 나타내는 데 활용됐다(Muller and Middleton, 1994). 이후 공간정보를 통합한 복합 모델로 발전하며, 마르코프 체인은 LUCC 모델의 기반으로 자리 잡았다.

2. 연역적 LUCC 모델

1) 경제학 기반 모델

연역적 LUCC 모델의 한 부류인 경제학적 모형은, 튜넨의 지대이론 등과 같이 이론에 기반을 두고 토지이용 및 토지피복 변화를 모델링한다. 경제학에서 다루는 토지이용

표 3. 남양주 일대의 전이행렬표

시기	2010년			2023년 총계
	분류 (비중)	시가화 지역	비시가화 지역	
2023년	시가화지역	0.1992	0.1576	0.3568
	비시가화 지역	0.0292	0.6140	0.6432
2010년 총계		0.2284	0.7716	1.0000

출처 : 최근호·김오석(2024)의 결과를 재구성

모델이 여기에 속하며, 농업 경제학의 시초로 여겨지기도 한다(Heistermann *et al.*, 2006). 일반적으로 경제학은 자원이 이윤을 극대화하도록 배분된다고 가정하며, 이윤을 극대화하는 방향으로 토지이용 역시 이루어진다고 상정한다. 이 때문에 경제학적 분석의 최종 결과물은 대부분의 경우 국가나 광역지자체 등과 같이 특정 공간적 수준을 대표하는 수치나 지표로 표현되는 경우가 많다. 초기 모형의 경우 토지이용의 공간적 측면은 배제되기도 했으나, 이후 모형은 공간적 이질성을 고려하기도 한다(Irwin, 2010). 경제학적 모형은 다양한 사회·경제적 변수를 LUCC 모델링에 통합할 수 있는 것이 주된 장점이다. 그 대표적인 예로 Ahn(2005, 2008)은 대한민국 전국 수준에서의 산림, 농지, 도시화 지역 간 토지이용 변화를 경제학적 관점으로 분석하고자 했다. 표 4는 Ahn(2005)의 주요 결과물 중 하나인데, 각 토지이용 별 전국 수준 면적 변화의 전망을 나타낸다. 이 모델은 농작물이나 임산물 등으로부터 얻을 수 있는 재정적 수익과 미래 인구추계를 총체적으로 고려하기 때문에 토지이용 변화의 기저 요인을 명확하게 설명할 수 있는 강점이 있으며, 이와 같은 특징은 앞서 기술했듯이 귀납적 LUCC 모델에서 달성하기 어렵다.

Geoghegan *et al.*(2001)은 멕시코 유카탄반도를 연구지역으로 튜넨의 이론뿐만 아니라 리카르도(Ricardian)와 차야노프(Chayanovian) 이론에 기반하여 모델 구축에 필요한 변수를 선별했는데, 튜넨 이론에서는 접근성을, 리카디안 모형에서는 토지의 질을, 차야노프 모형에서는 가구 내 노동자 비율을 주요 변수로 활용했다. 이에 더해 설문조사와 위성영상을 활용한 계량경제학적 분석이 토지이용 및 토지피복 변화를 설명하는 데 효과적임을 시사했

다. 저자들은 현지 농민을 대상으로 수행한 설문조사를 통해 인문·환경 변수를 고려한 미래 산림 벌목량을 예측했으며, 이 결과가 위성영상과 기타 공간변수를 활용하여 생성된 결과와 무엇이 다른지를 비교했다.

2) 셀룰러 오토마타 기반 모델

앞서 설명한 경제학적 모델이 인간 의사결정을 중심으로 토지이용과 토지피복 변화를 모델링했다면, CA는 비교적 단순한 공간적 규칙성에 기반해 ‘셀(cell)’ 기반 공간(Cellular space)에 시공간 변화 과정을 구현하는 이산적 모델(Discrete models)을 의미한다. CA 기반 모형은 인접한 셀 간의 상호작용에 단순한 규칙성을 부여함으로써 복잡한 시·공간 변화양상을 설명·예측할 수 있다는 것이 주된 장점이며, von Neumann과 Ulam이라는 수학자들에 의해서 개발된 이론적 체계이다(O’Sullivan, 2001). CA를 효과적으로 활용하면 통계 기반 모델로는 구현하기 어려운 복잡한 시·공간 변화양상을 비교적 적은 연산량으로 모델링할 수 있다는 장점이 있고, Hägerstrand(1967)의 ‘공간 과정으로써의 혁신 확산(Innovation diffusion as a spatial process)’ 연구나 Tobler(1970)의 ‘지리학 제1 법칙(Tobler’s First Law of Geography), 모든 것들은 서로 관련되어 있지만, 서로 가까이 위치한 것들이 멀리 위치한 것들보다 관련성이 더 크다’ 등과 같은 지리학 대가들의 연구와도 유사한 개념적 배경을 공유한다고 볼 수 있다. 실제로 Tobler(1979)는 지구 표면을 동일한 크기의 격자로 분할하고, 각 셀의 상태는 이웃 셀의 상태에 따라 변화한다는 개념을 지리학에 도입하기도 했다.

이후 1990년대 초반 White and Engelen(1993)이 CA 개

표 4. 한국 전국 수준의 국토이용 베이스라인 전망(2003년부터 2033년)

연도	토지이용 유형별 면적 (헥타르) 및 (비중)		
	산림	농지	도시 및 기타
2003	4,403,620 (.5834)	1,787,491 (.2368)	1,356,689 (.1797)
2013	4,395,089 (.5823)	1,774,965 (.2352)	1,377,746 (.1825)
2023	4,390,521 (.5817)	1,768,623 (.2346)	1,388,656 (.1840)
2033	4,389,677 (.5816)	1,767,477 (.2342)	1,390,646 (.1842)
시기	토지이용 유형별 면적 순증감 (헥타르)		
2003 - 2013	-8,531	-12,526	21,057
2013 - 2023	-4,568	-6,342	10,910
2023 - 2033	-844	-1,146	1,990

출처 : Ahn(2005)의 결과를 재구성.

념을 도시 시스템 시뮬레이션에 적용해, 도시 확산 과정을 시간에 따라 동적으로 모사하며 단순한 규칙에 기반해 현실적인 도시 경관이 생성될 수 있음을 증명했다. 이와 같은 배경으로 지리학에 유입된 CA 방법론은 도시 팽창을 연구하는 데 주로 활용됐는데, CA 기반 Urban Growth Model(UGM)을 거쳐(강영옥·박수홍, 2000; Clarke *et al.*, 1997; Clarke and Gaydos, 1998) SLEUTH 모형으로 개선되기도 했다(Herold *et al.*, 2003; Clarke, 2008). 국내에서는 강영옥·박수홍(2000)이 CA 기반 UGM을 국내 사례에 도입해 서울과 수도권권을 대상으로 도시 성장을 예측했다. CA 기반 UGM은 CA 개념을 토대로 도시 성장을 파악하고, 해당 규칙을 만들어내는 변수들의 값을 토대로 향후의 도시 성장을 예측한다. 이후 조대현(2008)은 CA와 개발 밀도를 동시에 고려해 서울 도심부의 토지 이용 변화를 분석했으며, 김일권·권혁수(2018)는 객체기반 CA를 이용해 수도권의 토지이용변화를 모의했다. 공간 스케일의 측면에서 국내 연구의 경우 전국 단위보다 수도권 혹은 개별 도시 지역에 초점을 둔 연구가 우세하며, 이는 도시 지역의 변화를 모의하는데 특화된 모델의 특성에 기인하는 것으로 보인다.

3. 통합 모형

1) CA-Markov 모델

귀납적 모델에서 언급한 일반적인 마르코프 체인 모델은 공간적 요소를 고려하지 않는다. 특정 셀의 다음 토지 이용 및 토지피복 변화를 고려하는 데 있어 직전과 현재 시점의 상태만 고려되며, 인접한 셀의 영향과 같은 공간적인 요소는 배제되곤 한다. CA-Markov 모델은 마르코프 체인의 시계열 예측과 CA 이론의 공간 요소를 통합해 시공간 패턴을 규명하고자 하는 모델이다(Sang *et al.*, 2011). 일반적인 CA 모델에서 토지이용 변화와 전이 확률은 셀의 위치와 근린효과(Neighborhood effect)에 좌우된다. 예를 들어 도시 지역에 인접한 셀은 도시로 변화할 가능성이 높다는 같은 공간적 의존에 기반한다. CA-Markov 모델에서는 CA의 공간 전이 규칙을 반영하는 동시에, 마르코프 체인을 통한 시간 전이 확률을 계산함으로써 시공간을 모두 고려한 토지이용 예측을 가능하게 한다.

CA-Markov 모델은 토지이용 및 토지피복 변화를 비교적 간단하게 예측할 수 있는 장점 덕에, 국내 연구 역시 다양한 분야에 걸쳐 수행되었다. 김성준·이용준(2007)은

각기 다른 공간 해상도의 자료에 CA-Markov 모델을 적용해 경안천 유역의 토지이용 변화를 예측했다. CA 기반 모델은 실제 공간을 셀과 그리드로 표현하며, 이로 인해 셀의 크기에 따라 예측 결과가 달라질 수 있다. 저자들은 30m 공간해상도에 기반한 예측이 최적의 결과를 도출함을 실제 토지피복도와 비교를 통해 제시했다. 서현진·전병운(2017)은 기존 연구가 도시 지역에 치중된 경향을 언급하며 도시 내 녹지 공간 변화를 탐색했다. 30m 해상도를 지닌 대분류 토지피복도를 활용해 대구 일대의 녹지 변화를 탐지·예측했으며, 개발제한구역을 고려한 녹지 관리 필요성을 평가했다. 이처럼 CA-Markov의 단순한 구현 방식과 범용성은 도시뿐 아니라 비도시 지역에도 적용 가능하며, 조원희 등(2023)은 북한 지역을 대상으로 토지 이용 변화를 예측하고, 탄소 저장량을 추정하기도 했다.

2) 케일럼 모델

한국환경연구원의 케일럼 모델(KEI's Integrated Land-Use Model, KEI-ILUM)은 통합형 LUCC 모델이다(김오석 등, 2015). 케일럼 모델의 방법론적 기반은 경제학적 모델과 지리학적 모델을 통합하는 것에 있으며, 모델의 기능적 목적은 기후변화 시나리오별로 예측된 LUCC에 따라 미래 기후 리스크를 전망하는 것이다. 먼저 케일럼 모델은 계량경제학 기반의 토지이용 모델(Econometric land-use modeling)과 지리학 기반 토지피복 변화 모델링(Geographic land-change modeling)을 통합하는데 초점을 둔다. 여기서 말하는 지리학적 모델은 모델을 구분할 때 ‘공간’을 명시적으로 다루느냐에 대한 것이다. 일반적으로 계량경제학에 기반한 LUCC 모델은 특정 토지이용 유형의 관계에 따라 면적 변화의 시계열적 예측을 수행한다. 다만 국가 수준이 아닌 하위 수준에서 살펴볼 때, 해당 면적 변화가 어느 지역에서 발생하는지는 설명하지 못한다. 지리학적 LUCC 모델은 위치정보를 공간적으로 명료하게 나타내기 때문에, 어느 지역의 토지가 개발 혹은 전환될 확률이 높은지 파악한다. 케일럼 모델은 인공지능망 기반의 다층 퍼셉트론(Multi-Layer Perceptron, MLP)을 활용해 지목별 면적 변화를 공간적으로 배분하는 과정을 수행한다. 그림 2는 케일럼 모델의 모식도이며, ‘개발(Built)’, ‘농지(Agriculture)’, ‘산림(Forest)’ 지목에 대해 사회·경제적 요인과 자연·물리적 인자를 함께 포함하는 시나리오를 적용했다. 경제학적 고려를 하지 않은 기존 지리학적 모델링과 정확도를 비교했을 때(김오석·윤정호,

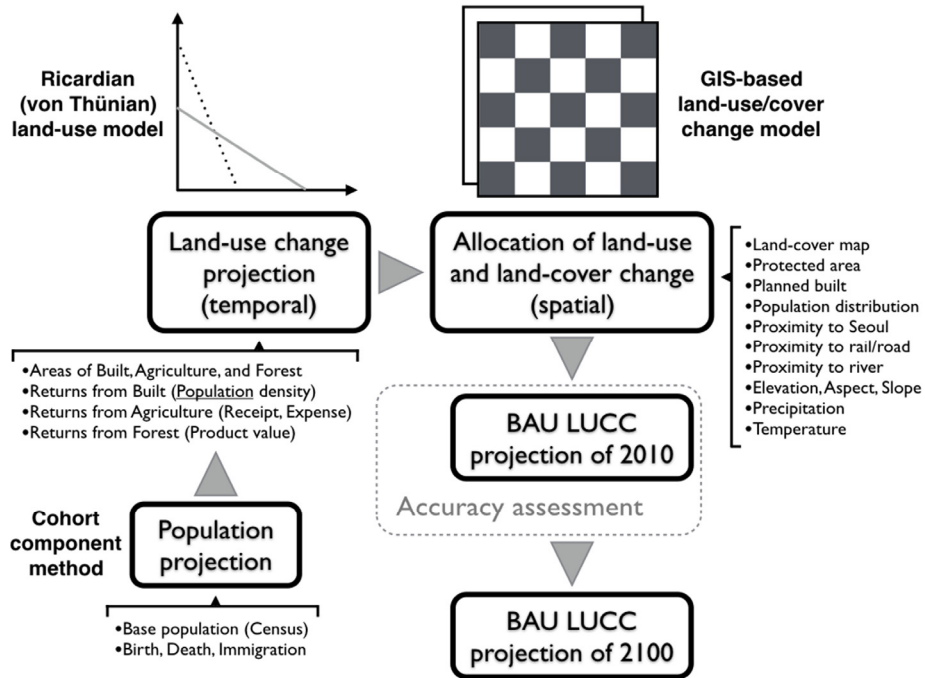


그림 2 케일럼 모델의 분석틀

출처 : 김오석 등(2015)

2015), 케일럼의 결과가 더 높은 정확도를 보였다. 이는 통합적 모델이 기존의 단방향적 모델에 비해 개선점이 있음을 시사한다.

기능적 측면에서 케일럼 모델은 기후변화와 인구 변화를 함께 고려하며 이는 기후변화 대응에 있어 의사결정 도구로 역할할 수 있다(김오석 등, 2016). 인구는 LUCC를 설명하는 데 있어 중요한 변수로써, 인구 증가에 따라 LUCC 예측 결과는 달라진다(Verburg and Bouma, 1999; Kroll and Haase, 2010). 이러한 점에서 장래인구추계를 활용한 케일럼 모델은 인구 구조 변화를 명시적으로 반영한 LUCC 모델이라 볼 수 있다. 또한 기후변화는 본질적으로 미래를 예측하는 것이므로 불확실성을 내포한다. 따라서 다양한 시나리오를 고려하는 것은 폭염과 해수면 상승 등으로 인해 어떤 토지이용이 영향을 받는지, 인구 감소로 인해 개발은 되었으나 사용되지 않는 토지가 증가하는지 등의 예측 가능한 대비를 할 수 있다. 특히 대한민국의 경우, 환경정책 수립의 기초 자료가 되는 토지이용 변화 연구가 제약적이었다는 점에서 케일럼 모델은 의미 있는 시도를 할 수 있다.

V. 결론

LCS는 고전 지리학의 경관 연구 전통, 지속가능성 담론, 지리정보과학의 기술적 진보 아래 등장했으며, 인간 활동에 따른 LUCC를 과학적으로 규명하는 것에 목적을 두는 지리학이다. 인간-자연 공조시스템 아래, 이 시스템을 실증적으로 분석하고 설명하는 LCS, 그리고 LCS의 핵심 방법론인 LUCC는 ‘토지’를 매개로 연결된다. 본 연구는 LCS의 주요 방법론인 LUCC 모델링을 귀납적, 연역적, 통합적 접근으로 분류하고 그 특징을 비교·분석하는데 집중했다. LUCC 모델은 각기 다른 이론적 기반과 기술적 특성을 보이지만, 공통적으로 인간-자연 상호작용의 복잡성을 반영한다는 점에서 LCS와 깊이 연결된다.

하지만 LUCC 모델은 끊임없이 발전한다. 특히 모델의 대상이 되는 국가와 지역의 특성에 따라 필요에 맞게 성장하며 다양화되고 있어, 본 연구에서 모든 세부적인 모델의 종류와 그 발전 양상을 깊이 있게 다루는 것에는 한계가 있다. 통계 기반 모형에서 언급한 CLUE 계열 모델이 이에 해당한다고 볼 수 있다. LUCC 연구에 지대한 공을 세운 네

덜란드 학자 Verburg의 기여 아래, 기존의 CLUE 모델은 여러 공간 스케일을 모의하는 CLUE-S(Verburg *et al.*, 2002), 시간의 역학까지 고려하는 Dyna-CLUE(Verburg and Overmars, 2009)와 같이 모델의 사용 목적에 따라 발전했다. 또한 전 세계적으로 가장 많이 인용되고 적용되는 LUCC 모델로서 연구 지역의 특성을 반영한 CLUE-china(Verburg *et al.*, 1999b), CLUE-Naban(Gibreel *et al.*, 2014) 등 지역에 특화된 모델도 존재한다.

이처럼 LUCC 모델이 적용 목적과 지역성에 따라 다양화되는 흐름 속에서, 행위자의 의사 결정 과정을 중심으로 현상을 이해하는 행위자 기반 모델(Agent Based Model, ABM)이 국내에서도 주목받고 있으며(강전영 등, 2024), 향후 LUCC 연구에서도 특히 중요한 접근 방식이 될 것이다. LUCC에서 활용되는 ABM은 행위자(Agent)의 행동(Action)에 초점을 맞춰 토지이용 및 토지피복변화를 해석하고자 한다. 일반적으로 자율성을 지닌 행위자인 인간과 이를 둘러싼 환경 요소로 구성되는 ABM은, 토지이용의 주체가 되는 인간의 개입에 주목한다(Parker *et al.*, 2003). Valbuena *et al.*(2009)는 ABM의 구현 과정을 확률 기반 구조로 설명하며, 행위자의 판단이 경험적 자료와 외부 요인을 함께 반영하여 모사될 수 있음을 보여준다. 이러한 접근이 최신 개념은 아니지만, 컴퓨팅 시뮬레이션의 발전과 함께 국내 LUCC 연구에서도 활발히 활용될 여지가 존재하며 복잡한 인간-자연 상호작용의 실마리를 제공할 수 있다.

본 연구에서 소개한 LUCC 모델을 비롯한 대부분의 모델은 앞서 언급한 바와 같이 최소 두 시점의 시계열 자료, 즉 해당 지역이 지금까지 경험한 변화 경향을 토대로 미래를 예측한다. 따라서 수십 년 이내의 단기 예측에는 비교적 높은 정확도와 신뢰도를 보이는 반면, 그보다 긴 장기 예측의 정확도는 낮아지는 한계가 존재한다(Silva and Clarke, 2002; Pontius Jr and Spencer, 2005). 이는 미래를 예측하는 과정에서의 필연적으로 마주하는 불확실성과 인간-자연 시스템의 다층적인 복잡성에 기인한다(Pontius Jr *et al.*, 2006; Verburg *et al.*, 2019). 이러한 한계를 극복하는데 있어 머신러닝과 딥러닝 기법의 적용 가능성이 주목받고 있다. 두 방법론은 복잡하고 비선형적인 패턴을 학습하고 예측하는데 강점을 지니며, 기존 모델이 포착하기 어려웠던 토지이용 변화의 미묘한 동인을 보다 정교하게 분석할 수 있는 가능성을 제시한다(Aburas *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2022; Bai *et al.*, 2023). 더불어, 구글어

스엔진(Google Earth Engine)과 같은 클라우드 기반 플랫폼의 발전은 방대한 시계열 위성 영상 데이터를 효율적으로 처리·분석할 수 있는 환경을 제공하며(Zhao *et al.*, 2021), LCS 연구의 정확도와 시공간 해상도를 크게 향상시키고 있다(Tahir *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025). 이러한 기술적 진보는 LUCC 예측의 정확도를 높이며 LCS의 발전에 기여하고 있다.

LCS는 LUCC가 단순한 물리적 현상을 넘어 인간의 사회·경제적 동인에 의해 발생하는 복합적인 과정을 강조하는데, 이는 경제지리학적 관점에서도 중요한 함의를 지닌다. 토지이용은 인간이 소득, 비용, 노동 투입시간을 고려하거나(허동숙 등, 2016) 시장과의 거리와 같은 상대적 공간 요인에 의해 결정되기도 한다(Manson, 2005). 또한 통계 기반 LUCC 모델링의 주요 변수로 활용되는 경사도, 도로 접근성과 같은 공간변수 역시 토지이용의 경제적 특성을 드러낸다(Nelson and Hellerstein, 1997). 더 나아가 토지 변화를 주도하는 사회·경제적 동인은 지역을 넘어, 세계적인 차원의 맥락에서 연결된다. Munroe *et al.*(2014)는 도시와 농촌의 상호 의존성을 이야기하며 서로 다른 공간 스케일에서의 인간-경제-환경 시스템이 모두 연결되어있다고 보기도 했다. 이러한 맥락에서 Seto *et al.*(2012)이 제안한 ‘도시 텔레커넥션스(Urban Land Teleconnections)’ 개념은 물리적으로 멀리 떨어져 있지만 관계가 긴밀한 장소 간의 상호작용을 이해함으로써, 도시화나 다른 지역 토지이용의 결과 및 영향을 총체적으로 설명할 수 있는 관점을 제공한다. 즉 LCS는 다학문적 접근을 띠는 동시에, 경제지리, 도시지리 등 다양한 세부 전공과의 밀접한 연관성을 통해 복합적인 토지 시스템을 이해하는데 기여한다.

궁극적으로 LCS는 전지구적 기후변화 대응과 지속가능한 정책 마련이라는 인류의 공동 과제 해결에 핵심적인 역할을 한다. LUCC 모델링을 통해 LCS는 인간-자연 공조 시스템의 순환적 관계를 토지를 매개로 분석하고, 다양한 미래 시나리오에 따른 토지 시스템의 취약성 및 잠재적 위험을 예측할 수 있다. 이는 탄소 흡수원으로서의 산림 관리(Kim, 2010; Houghton *et al.*, 2012), 지속가능한 도시 계획 수립(Wolch *et al.*, 2014; Acuto *et al.*, 2018), 환경보전을 위한 토지이용 규제(Andam *et al.*, 2008) 등 기후변화 완화 및 적응 정책의 과학적 근거를 제공한다. 향후 국내 지리학계에서도 LCS의 이론적 틀과 LUCC 모델링 기법을 한국적 맥락에 맞게 발전시킬 필요가 있다. 대한민국

은 수도권 집중과 지방 소멸이 공존하고 분단 체제라는 지정학적 특수성을 지니는 등 고유한 토지이용 환경에 놓여 있다. 실제로 국내 연구는 그린벨트에 따른 토지이용 및 토지피복 변화를 예측하거나(Song *et al.*, 2021; Hwang *et al.*, 2022) 북한 지역을 대상으로 변화를 탐지하고 원인을 분석했다(Kim and Neubert, 2018; Kim *et al.*, 2022). 또한 위성영상을 통해 자료의 한계를 극복하며 탄소 저장량을 추산하거나(Kim *et al.*, 2016) 기근을 예측하는 등(An and Park, 2023) LCS의 광범위한 적용 가능성을 보여줬다. 이처럼 지리학에서의 LCS 연구가 계속된다면, 앞으로의 사회문제 해결을 위해 역할할 수 있음은 물론, 인문지리학과 자연지리학이 융합할 수 있는 토대가 될 것이다.

참고문헌

- 강영옥·박수홍, 2000, “서울대도시지역 도시성장 예측에 관한 연구,” *대한지리학회지*, 35(4), 651-639.
- 강전영·신혜섭·최문기, 2024, “공간 시뮬레이션 모델(Geo-simulation Model)과 활용 분야·질병 및 보건, 재해 대피, 도시 교통,” *대한지리학회지*, 59(3), 417-430. <http://dx.doi.org/10.22776/kgs.2024.59.3.417>
- 곽두안·박소희, 2021, “로지스틱 회귀모형을 이용한 우리나라 산지면적의 공간변화 예측에 관한 연구,” *한국지리정보학회지*, 24(4), 99-112. <http://dx.doi.org/10.11108/kagis.2021.24.4.099>
- 권상철·고은경, 2020, “지속가능발전목표 (SDGs) 와 지방 정부: 공적개발원조(ODA)의 발전 방안과 제주도 사례,” *한국지리학회지*, 9(3), 587-608. <http://dx.doi.org/10.25202/JAKG.9.3.9>
- 김성준·이용준, 2007, “면적규모 및 공간해상도가 CA-Markov 기법에 의한 미래 토지이용 예측결과에 미치는 영향,” *한국지리정보학회지*, 10(2), 57-69.
- 김오석, 2013, “토지 이용 변화 예측 모형의 정확도 검정을 위한 통계량 연구,” *한국경제지리학회지*, 16(3), 458-471.
- 김오석, 2014, “시계열 원격탐사 기법을 활용한 도시 식별 연구,” *한국지도학회지*, 14(2), 119-126.
- 김오석·윤여창, 2014, “북한의 탄소저감과 산림보존을 위한 사업대상지 선정방법 연구,” *대한지리학회지*, 49(2), 264-274.
- 김오석, 2015, “지리가중회귀모델을 이용한 천연 라텍스 산출량 요인분석: 중국 운남성 시창반나를 중심으로,” *한국지도학회지*, 15(2), 67-77. <http://dx.doi.org/10.16879/jkca.2015.15.2.067>
- 김오석·안소은·윤정호·빈슬지·김기환, 2015, 「기후변화 적응정책 지원을 위한 토지이용통합모델 개발(I)」, 세종: 한국환경정책평가연구원.
- 김오석·윤정호, 2015, “현 상태 유지 시나리오를 이용한 토지피복 변화 예측,” *한국도시지리학회지*, 18(3), 121-135.
- 김오석·한기주, 2015, “인도네시아 캄빠르 지역의 탄소저감을 위한 시나리오별 기준선 설정 연구,” *한국지도학회지*, 15(1), 59-68. <http://dx.doi.org/10.16879/jkca.2015.15.1.059>
- 김오석·안소은·윤정호·김기환·김걸, 2016, 「기후변화 적응정책 지원을 위한 토지이용통합모델 개발(Ⅱ)」, 세종: 한국환경정책평가연구원.
- 김일권·권혁수, 2018, “객체기반 셀룰러오토마타 모형을 이용한 하남시 토지이용변화 모의,” *한국지리정보학회지*, 21(4), 202-217. <https://doi.org/10.11108/kagis.2018.21.4.202>
- 김지수·김오석, 2019, “저출산·고령화를 고려한 서울시 구별 수해노출인구 전망,” *한국도시지리학회지*, 22(2), 159-171. <http://dx.doi.org/10.21189/JKUGS.22.2.12>
- 류지철·안기홍·한미덕·황하선·최재완·김용석·임경재, 2014, “오염총량관리제의 시공간적 미래 토지이용 변화분석을 위한 CLUE-S 모델의 적용 및 평가,” *한국환경학회지*, 30(4), 418-428. <https://doi.org/10.15681/kswe.2014.30.4.418>
- 류형원·장동호, 2018, “다중시기 위성영상을 이용한 제주도 중산간지역의 토지피복 변화 탐지,” *경관과 지리*, 28(3), 89-100. <https://doi.org/10.35149/jakpg.2018.28.3.007>
- 박샘·최광용, 2016, “위성영상에 탐지된 1980년대 이후 수도권 지역의 도시 팽창,” *한국지리학회지*, 5(3), 331-343.
- 박현수·장동호, 2020, “시계열 토지피복 변화 탐지를 통한 대전광역시의 시가지지역 변화 패턴 분석: 다중시기 위성영상을 활용하여,” *한국지리학회지*, 9(1), 177-190. <http://dx.doi.org/10.25202/JAKG.9.1.12>
- 서현진·전병운, 2017, “CA-Markov 모형을 이용한 대구시 녹지의 공간적 변화 모델링,” *대한지리학회지*, 52(1), 123-141.

- 유근배, 2010, “녹색성장과 지리학,” *대한지리학회지*, 45(1), 11-25.
- 이성주·류지은·전성우, 2020, “로지스틱 회귀모형을 이용한 환경정책 효과 분석: 울산광역시 녹지변화 분석을 중심으로” *한국환경복원기술학회지*, 23(4), 13-30. <https://doi.org/10.13087/kosert.2020.23.4.13>
- 이수진·원명수·장근창·이병두·변상우·김광진·이양원, 2016, “MODIS 위성자료를 이용한 한반도 산불발생 GIS 데이터베이스 구축,” *한국지도학회지*, 16(3), 129-137. <https://doi.org/10.16879/jkca.2016.16.3.129>
- 이용관·조영현·김성준, 2016, “도시성장 시나리오와 CLUE-s 모형을 이용한 우리나라의 토지이용 변화 예측,” *한국지리정보학회지*, 19(3), 75-88. <http://dx.doi.org/10.11108/kagis.2016.19.3.075>
- 임연엽·박종철·김오석, 2023, “2050년대와 2090년대 기후변화 시나리오에 따른 한국의 고온에 의한 고령자 사망 위험 전망,” *경관과 지리*, 33(3), 51-64. <https://doi.org/10.35149/jakpg.2023.33.3.004>
- 정고은·김영호, 2021, “CA (Cellular Automata) 와 ARD (Automatic Rule Detection) 를 이용한 제주도 도시 스프롤의 시공간적 변화 예측 모델링,” *한국지리학회지*, 10(1), 139-152. <http://dx.doi.org/10.25202/JAKG.10.1.9>
- 조대현, 2008, “개발밀도를 고려한 셀룰러 오토마타 기반의 도시 토지이용 변화 모델링,” *대한지리학회지*, 43(1), 117-133.
- 조원희·김인유·고동욱, 2023, “북한 산림복원 전략에 따른 탄소저장량 잠재성 평가,” *환경생물*, 41(3), 204-214. <https://doi.org/10.11626/kjeb.2023.41.3.204>
- 최근호·김오석, 2024, “대규모 택지 개발이 토지피복 변화에 미치는 영향 분석-Land Change Modeler를 활용한 별내신도시와 다산신도시 사례 연구, *한국도시지리학회지*,” 27(3), 45-59. <http://dx.doi.org/10.21189/JKUGS.27.3.4>
- 허동숙·안유순·박수진, 2016, “토지이용 및 토지피복 변화 모델링 (LUCC Modeling) 에서의 행위자 의사결정 체계 구축 방안-가리왕산 일대를 중심으로,” *국토지리학회지*, 50(1), 63-80.
- 현기순, 2022, “지속가능성에 대한 지리학의 연구 동향 분석 - 토픽 모델링과 키워드 네트워크 분석을 중심으로,” *대한지리학회지*, 57(1), 1-17. <https://doi.org/10.22776/kgs.2021.57.1.1>
- 홍금수, 2024, “칼 사우어(Carl O. Sauer)의 문화·역사지리학에 투영된 환경관,” *문화역사지리*, 36(2), 1-32. <http://dx.doi.org/10.29349/JCHG.2024.36.2.1>
- Aburas, M.M., Ahamad, M.S., and Omar, N.Q., 2019, Spatio-temporal simulation and prediction of land-use change using conventional and machine learning models: a review, *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(4), 205. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7330-6>
- Acuto, M., Parnell, S., and Seto, K.C., 2018, Building a global urban science, *Nature Sustainability*, 1(1), 2-4. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0013-9>
- Agarwal, C., Green, G.M., Grove, J.M., Evans, T.P., and Schweik, C.M., 2001, *A review and assessment of land-use change models: Dynamics of space, time and human choice*, Bloomington, IN: Center for the study of Institutions Population, and Environmental Change.
- Ahn, S., 2005, An econometric analysis on the costs of carbon sequestration in Korea, *Korea Environment Institute*, 1-71.
- Ahn, S., 2008, How feasible is carbon sequestration in Korea? A study on the costs of sequestering carbon in forest, *Environmental and Resource Economics*, 41(1), 89-109. <https://doi.org/10.1007/s10640-007-9182-8>
- An, Y. and Park, S., 2023, Developing an Agent-Based Model to Mitigate Famine Risk in North Korea: Insights from the “Artificial North Korean Collective Farm” Model, *Land*, 12(4), 735. <https://doi.org/10.3390/land12040735>
- Andam, K.S., Ferraro, P.J., Pfaff, A., Sanchez-Azofeifa, G.A., and Robalino, J.A., 2008, Measuring the effectiveness of protected area networks in reducing deforestation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(42), 16089-16094. <https://doi.org/10.1073/pnas.080043710>
- Bai, T., Wang, L., Yin, D., Sun, K., Chen, Y., Li, W., and Li, D., 2023, Deep learning for change detection in remote sensing: a review, *Geo-Spatial Information Science*, 26(3), 262-288. <https://doi.org/10.1080/100>

- 95020.2022.2085633
- Barlow, J., Lennox, G., Ferreira, J., Berenguer, E., Lees, A., Nally, R., Thomson, J., Ferraz, S., Louzada, J., Oliveira, V., Parry, L., Solar, R., Vieira, I., Aragaõ, L., Begotti, R., Braga, R., Cardoso, T., Oliveira Jr, R., Souza Jr, C., Moura, N., Nunes, S., Siqueira, J., Pardini, R., Silveira, J., Vaz-De-Mello, F., Veiga, R., Venturieri, A., and Gardner, T., 2016, Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation, *Nature*, 535(7610), 144-147. <https://doi.org/10.1038/nature18326>
- Briassoulis, H., 2000, Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches, *The Web Book of Regional Science*, Regional Research Institute, West Virginia University.
- Brown, D.G. and Duh, J.D., 2004, Spatial simulation for translating from land use to land cover, *International Journal of Geographical Information Science*, 18(1), 35-60. <https://doi.org/10.1080/13658810310001620906>
- Burnham, B.O., 1973, Markov intertemporal land use simulation model, *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 5(1), 253-258. <https://doi.org/10.1080/13658810310001620906>
- Chaudhuri, G. and Clarke, K., 2013, The SLEUTH land use change model: A review, *Environmental Resources Research*, 1(1), 88-105.
- Chung, H., 2005, Making an Epistemological Distinction in Landscape Studies Based on Insider/Outsider Perspectives, *The Geographical Journal of Korea*, 39(2), 171-180.
- Clark, W.C., 2007, Sustainability science: A room of its own, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(6), 1737-1738. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611291104>
- Clarke, K.C., Hoppen, S., and Gaydos, L., 1997, A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247-261. <https://doi.org/10.1068/b240247>
- Clarke, K.C. and Gaydos, L., 1998, Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore, *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699-714. <https://doi.org/10.1080/136588198241617>
- Clarke, K.C., 2008, Mapping and modelling land use change: an application of the SLEUTH model in Pettit, C., Cartwright, W., Bishop, I., Lowell, K., Pullar, D. and Duncan, D. eds., *Landscape analysis and visualisation: Spatial models for natural resource management and planning*, Berlin and Heiderberg, Germany: Springer, 353-366.
- FAO and UNEP, 1999, *The Future of Our Land: Facing the Challenge. Guidelines for Integrated Planning for Sustainable Management of Land Resources*, Rome, Italy: FAO Lands and Water Development Division.
- Fujita, M., 2012, Thünen and the new economic geography, *Regional Science and Urban Economics*, 42(6), 907-912. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2011.12.002>
- Geist, H.J. and Lambin, E.F., 2002, Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation: Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations, *BioScience*, 52(2), 143-150. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2)
- Geoghegan, J., Villar, S.C., Klepeis, P., Mendoza, P.M., Ogneva-Himmelberger, Y., Chowdhury, R.R., Turner, B.L., and Vance, C., 2001, Modeling tropical deforestation in the southern Yucatan peninsular region: comparing survey and satellite data, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3), 25-46. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00201-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00201-8)
- Gibreel, T.M., Herrmann, S., Berkhoff, K., Nuppenau, E.A., and Rinn, A., 2014, Farm types as an interface between an agro-economical model and CLUE-Naban land change model: Application for scenario modelling, *Ecological Indicators*, 36, 766-778. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.009>
- Goodchild, M.F., 1992, Geographical information science, *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(1), 31-45. <https://doi.org/10.1080/026937>

- 99208901893
- Hall, C.A., Tian, H., Qi, Y., Pontius, G., and Cornell, J., 1995, Modelling spatial and temporal patterns of tropical land use change, *Journal of Biogeography*, 753-757. <https://doi.org/10.2307/2845977>
- Hägerstrand, T., 1967, The computer and the geographer, *Transactions of the Institute of British Geographers*, 1-19.
- Heistermann, M., Muller, C., and Ronneberger, K., 2006, Land in sight?: Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2-4), 141-158. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.015>
- Herold, M., Goldstein, N.C., and Clarke, K.C., 2003, The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling, *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 286-302. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00075-0)
- Houghton, R.A., House, J.I., Pongratz, J., van der Werf, G.R., Defries, R.S., Hansen, M.C., Le Quéré, C., and Ramankutty, N., 2012, Carbon emissions from land use and land-cover change, *Biogeosciences*, 9(12), 5125-5142. <https://doi.org/10.5194/bg-9-5125-2012>
- Hwang, J., Choi, Y., Sung, H.C., Yoo, Y.J., Lim, N.O., Kim, Y., Shin, Y., Jeong, D., Sun, Z., and Jeon, S.W., 2022, Evaluation of the function of suppressing changes in land use and carbon storage in green belts, *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106600. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106600>
- Hyun, J., Choi, K., Lee, K., Lee, S., Kim, Y., and Kang, C., 2020, Climate Change and Anthropogenic Impact Around the Korean Coastal Ecosystems: Korean Long-term Marine Ecological Research (K-LTMER), *Estuaries and Coasts*, 43(3), 441-448. <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00711-6>
- IPCC, 2018, Framing and Context, *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 49-92.
- IPCC, 2021, Ocean, Cryosphere and Sea Level Change, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1211-1362.
- Irwin, E.G., 2010, New directions for urban economic models of land use change: incorporating spatial dynamics and heterogeneity, *Journal of Regional Science*, 50(1), 65-91. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2009.00655.x>
- Kates, R.W., Clark, W.C., Corell, R., Hall, J.M., Jaeger, C.C., Lowe, I., McCarthy, J.J., Schellnhuber, H.J., Bolin, B., Dickson, N.M., Faucheux, S., Gallopin, G.C., Grubler, A., Huntley, B., Jager, J., Jodha, N.S., Kasperson, R.E., Mabogunje, A., Matson, P., Mooney, H., Moore, B., O'Riordan, T., and Svedin, U., 2001, Sustainability science, *Science*, 292(5517), 641-642. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1059386>
- Kim, D., Lim, C.H., Song, C., Lee, W.K., Piao, D., Heo, S., and Jeon, S., 2016, Estimation of future carbon budget with climate change and reforestation scenario in North Korea, *Advances in Space Research*, 58(6), 1002-1016. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.049>
- Kim, O.S., 2010, An assessment of deforestation models for reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD), *Transactions in GIS*, 14(5), 631-654. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2010.01227.x>
- Kim, O.S. and Newell, J.P., 2015, The 'Geographic Emission Benchmarkmodel: A baseline approach to measuring emissions associated with deforestation and degradation, *Journal of Land Use Science*, 10(4), 466-489. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2014.947640>
- Kim, O.S. and Neubert, M., 2018, Construction of a historical map database as a basis for analyzing land-use and land-cover changes, exemplified by the Korean demilitarized zone and inner-German Green Belt (Part 1), Sejong: Korea Environment Institute.
- Kim, O.S., Han, J., Kim, K.W., Matthews, S.A., and Shim,

- C., 2022, Depopulation, super aging, and extreme heat events in South Korea, *Climate Risk Management*, 38, 100456. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100456>
- Kim, O.S., Václavík, T., Park, M.S., and Neubert, M., 2022, Understanding the intensity of land-use and land-cover changes in the context of postcolonial and socialist transformation in Kaesong, North Korea, *Land*, 11(3), 357. <https://doi.org/10.3390/land11030357>
- Kroll, F. and Haase, D., 2010, Does demographic change affect land use patterns?: A case study from Germany, *Land Use Policy*, 27(3), 726-737. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.10.001>
- Lambin, E.F., Rounsevell, M.D., and Geist, H.J., 2000, Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity?, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1-3), 321-331. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00235-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00235-8)
- Lantman, J., Verburg, P.H., Bregt, A., and Geertman, S., 2011, Core principles and concepts in land-use modelling: A literature review in Koomen, E. and Beurden, B. eds., *Land-use modelling in planning practice*, Dordrecht, Netherlands: Springer Nature, 35-57.
- Lin, Y.P., Chu, H.J., Wu, C.F., and Verburg, P.H., 2011, Predictive ability of logistic regression, auto-logistic regression and neural network models in empirical land-use change modeling-a case study, *International Journal of Geographical Information Science*, 25(1), 65-87. <https://doi.org/10.1080/13658811003752332>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S.R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A.N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S.H., and Taylor, W.W., 2007, Complexity of coupled human and natural systems, *Science*, 317(5844), 1513-1516. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1144004>
- Mas, J.F., Kolb, M., Paegelow, M., Olmedo, M.T.C., and Houet, T., 2014, Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages, *Environmental Modelling & Software*, 51, 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>
- Manson, S.M., 2005, Agent-based modeling and genetic programming for modeling land change in the Southern Yucatan Peninsular Region of Mexico, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 111(1-4), 47-62. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.024>
- Meyfroidt, P., De Bremond, A., Ryan, C.M., Archer, E., Aspinall, R., Chhabra, A., Camara, G., Corbera, E., DeFries, R., Diaz, S., Dong, J., Ellis, E.C., Erb, K.H., Fisher, J.A., Garrett, R.D., Golubiewski, N.E., Grue, H.R., Grove, J.M., Haberl, H., Heinimann, A., Hostert, P., Jobbagy, E.G., Kerr, S., Kuemmerle, T., Lambin, E.F., Lavorel, S., Lele, S., Mertz, O., Messerli, P., Metternicht, G., Munroe, D.K., Nagendra, H., Nielsen, J.Ø., Ojima, D.S., Parker, D.C., Pascual, U., Porter, J.R., Ramankutty, N., Reenberg, A., Chowdhury, R.R., Seto, K.C., Seufert, V., Shibata, H., Thomson, A., Tunner, B.L., Urabe, J., Veldkamp, T., Verburg, P., Zeleke, G., and Zu Ermgassen, E. K., 2022, Ten facts about land systems for sustainability, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(7), e2109217118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2109217118>
- Meyer, W.B. and Turner, B.L., 1994, Global land-use and land-cover change: an overview in Meyer, W.B. and Turner, B.L. eds., *Changes in land use and land cover: a global perspective*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 3-10.
- Meyer, W.B. and Turner, B.L., 1996, Land-use/land-cover change: challenges for geographers, *GeoJournal*, 39(3), 237-240. <https://doi.org/10.1007/BF00188373>
- Michetti, M., 2012, Modelling land use, land-use change, and forestry in climate change: A review of major approaches.
- Muller, M.R. and Middleton, J., 1994, A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada, *Landscape Ecology*, 9(2), 151-157. <https://doi.org/10.1007/BF00124382>
- Munroe, D.K., McSweeney, K., Olson, J.L., and Mansfield, B., 2014, Using economic geography to reinvigorate land-change science, *Geoforum*, 52, 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.12.005>
- Nelson, G.C. and Hellerstein, D., 1997, Do roads cause

- deforestation? Using satellite images in econometric analysis of land use, *American Journal of Agricultural Economics*, 79(1), 80-88. <https://doi.org/10.2307/1243944>
- Overmars, K.P., de Groot, W.T., and Huigen, M.G., 2007, Comparing inductive and deductive modeling of land use decisions: Principles, a model and an illustration from the Philippines, *Human Ecology*, 35(4), 439-452. <https://doi.org/10.1007/s10745-006-9101-6>
- Overmars, K.P. and Verburg, P.H., 2007, Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model, *Land Use Policy*, 24(3), 584-599. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2005.09.008>
- O'Sullivan, D., 2001, Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models, *Geographical Analysis*, 33(1), 1-18. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2001.tb00433.x>
- Park, P., Lee, K., Jung, M., Shin, H., Jang, W., Bae, K., Lee, J., and Lee, D., 2009, Changes in Forest Disturbance Patterns from 1976 to 2005 in South Korea, *Journal of Korean Forest Society*, 98(5), 593-601.
- Park, S., Jeon, S., Kim, S., and 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. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.09.001>
- Parker, D.C., Manson, S.M., Janssen, M.A., Hoffmann, M J., and Deadman, P., 2003, Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review, *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2), 314-337. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.9302004>
- Pattison, W.D., 1990, The four traditions of geography, *Journal of Geography*, 89(5), 202-206. <https://doi.org/10.1080/00221346408985265>
- Pijanowski, B.C., Brown, D.G., Shellito, B.A., and Manik, G.A., 2002, Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a land transformation model, *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6), 553-575. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00015-1)
- Polsky, C., Neff, R., and Yarnal, B., 2007, Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram, *Global Environmental Change*, 17(3-4), 472-485. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.01.005>
- Pontius Jr, R.G. and Malanson, J., 2005, Comparison of the structure and accuracy of two land change models, *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 243-265. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713434>
- Pontius Jr, R.G. and Spencer, J., 2005, Uncertainty in extrapolations of predictive land-change models, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(2), 211-230. <https://doi.org/10.1068/b31152>
- Pontius Jr, R.G. and Chen, H., 2006, GEOMOD modeling, Clark University, 44.
- Pontius Jr, R.G., Versluis, A.J. and Malizia, N.R., 2006, Visualizing certainty of extrapolations from models of land change, *Landscape Ecology*, 21(7), 1151-1166. <https://doi.org/10.1007/s10980-006-7285-1>
- Pontius Jr, R.G., Boersma, W., Castella, J.C., Clarke, K., de Nijs, T., Dietzel, C., Duan, Z., Fotsing, E., Goldstein, N., Kok, K., Koomen, E., Lippitt, C.D., McConnel, W., Sood, A.M., Pijanowski, B., Pithadia, S., Sweeney, S., Trung, T.N., Veldkamp, A., and Verburg, P.H., 2008, Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change, *The Annals of Regional Science*, 42(1), 11-37. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0138-2>
- Rindfuss, R.R., Walsh, S.J., Turner, B.L., Fox, J., and Mishra, V., 2004a, Developing a science of land change: challenges and methodological issues, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(39), 13976-13981. <https://doi.org/10.1073/pnas.0401545101>
- Rindfuss, R.R., Turner, B.L., Entwisle, B., and Walsh, S.J., 2004b, Land cover/use and population in Gutman, G., Janetos, A.C., Justics, C.O., Moran, E.F., Mustard, J.E., Rindfuss, R.R., Skole, D., Turner, B.L. and Cochrane, M.A. eds., *Land Change Science: Observing, monitoring and understanding trajectories of change*

- on the Earth's surface, Dordrecht, Netherlands: Springer, 351-366.
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., and Yun, W., 2011, Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model, *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 938-943. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.019>
- Seto, K.C., Reenberg, A., Boone, C.G., Fragkias, M., Haase, D., Langanke, T., Marcotullio, P., Munroe, D.K., Olah, B., and Simon, D., 2012, Urban land teleconnections and sustainability, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(20), 7687-7692. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117622109>
- Shalaby, A. and Tateishi, R., 2007, Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt, *Applied Geography*, 27(1), 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2006.09.004>
- Silva, E.A. and Clarke, K.C., 2002, Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal, *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6), 525-552. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00014-X)
- Song, K., Choi, Y.E., Han, H.J., and Chon, J., 2021, Adaptation and transformation planning for resilient social-ecological system in coastal wetland using spatial-temporal simulation, *Science of the Total Environment*, 789. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148007>
- Tahir, Z., Haseeb, M., Mahmood, S.A., Batool, S., Abdullah-Al-Wadud, M., Ullah, S., and Tariq, A., 2025, Predicting land use and land cover changes for sustainable land management using CA-Markov modelling and GIS techniques, *Scientific Reports*, 15(1), 3271. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87796-w>
- Tobler, W.R., 1970, A computer movie simulating urban growth in the Detroit region, *Economic Geography*, 46, 234-40.
- Tobler, W.R., 1979, Cellular Geography, *Philosophy in Geography*, 379-386.
- Turner, B.L. and Harrison, P.D., 1981, Prehistoric raised-field agriculture in the Maya lowlands, *Science*, 213(4506), 399-405. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.213.4506.399>
- Turner, B.L. and Meyer, W.B., 1991, Land use and land cover in global environmental change: considerations for study, *International Social Science Journal*, 43(129).
- Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A., and Schiller, A., 2003, A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8074-8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Turner, B.L., Lambin, E.F., and Reenberg, A., 2007, The emergence of land change science for global environmental change and sustainability, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20666-20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>
- Turner, B.L. and Robbins, P., 2008, Land-change science and political ecology: Similarities, differences, and implications for sustainability science, *Annual Review of Environment and Resources*, 33(1), 295-316. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.33.022207.104943>
- Turner, B.L. and Sabloff, J.A., 2012, Classic Period collapse of the Central Maya Lowlands: Insights about human-environment relationships for sustainability, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(35), 13908-13914. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210106109>
- Turner, B.L., Meyfroidt, P., Kuemmerle, T., Müller, D., and Chowdhury, R., 2020, Framing the search for a theory of land use, *Journal of Land Use Science*, 15(4), 489-508. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2020.1811792>
- Valbuena, D., Verburg, P.H., Bregt, A.K., and Ligtenberg, A., 2010, An agent-based approach to model land-use change at a regional scale, *Landscape Ecology*, 25(2), 185-199. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9380-6>
- Veldkamp, A. and Lambin, E.F., 2001, Predicting land-use change, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1-3), 1-6. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2)

- Verburg, P.H. and Bouma, J., 1999, Land use change under conditions of high population pressure: the case of Java, *Global Environmental Change*, 9(4), 303-312. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(99\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00175-2)
- Verburg, P.H., De Koning, G.H.J., Kok, K., Veldkamp, A., and Bouma, J., 1999a, A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use, *Ecological Modelling*, 116(1), 45-61. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00156-2)
- Verburg, P.H., Veldkamp, A., and Fresco, L.O., 1999b, Simulation of changes in the spatial pattern of land use in China, *Applied Geography*, 19(3), 211-233. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(99\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(99)00003-X)
- Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V., and Mastura, S.S., 2002, Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model, *Environmental Management*, 30(3), 391-405. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2630-x>
- Verburg, P.H., Van Eck, J.R., de Nijs, T.C., Dijst, M.J., and Schot, P., 2004, Determinants of land-use change patterns in the Netherlands, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 125-150. <https://doi.org/10.1068/b307>
- Verburg, P.H., Kok, K., Pontius Jr, R.G., and Veldkamp, A., 2006, Modeling land-use and land-cover change in Lambin, E.F. and Geist, H.J. eds., *Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts*, Berlin and Heiderberg, Germany: Springer, 117-135.
- Verburg, P.H. and Overmars, K.P., 2007, Dynamic simulation of land-use change trajectories with the CLUE-s model in Koomen, E., Stillwell, J., Bakema, A. and Scholten, H.J. eds., *Modelling land-use change: Progress and applications*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 321-337.
- Verburg, P.H. and Overmars, K.P., 2009, Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model, *Landscape Ecology*, 24(9), 1167-1181. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7>
- Verburg, P.H., Alexander, P., Evans, T., Magliocca, N.R., Malek, Z., Rounsevell, M.D. and Van Vliet, J., 2019, Beyond land cover change: towards a new generation of land use models, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 38, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.05.002>
- Wang, J., Bretz, M., Dewan, M.A., and Delavar, M.A., 2022, Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects, *Science of The Total Environment*, 822, 153559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153559>
- Weng, Q., 2002, Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling, *Journal of Environmental Management*, 64(3), 273-284. <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0509>
- White, R. and Engelen, G., 1993, Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns, *Environment and Planning A*, 25, 1175-1199. <https://doi.org/10.1068/a251175>
- Wolch, J.R., Byrne, J., and Newell, J.P., 2014, Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough', *Landscape and Urban Planning*, 125, 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.017>
- Won, N., Kim, K., Kang, J., Park, S., and Lee, H., 2017, Exploring the impacts of anthropogenic disturbance on seawater and sediment microbial communities in Korean coastal waters using metagenomics analysis, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph14020130>
- Zhang, A., Tariq, A., Quddoos, A., Naz, I., Aslam, R.W., Barboza, E., Ullah, S., and Abdullah-Al-Wadud, M., 2025, Spatio-temporal analysis of urban expansion and land use dynamics using google earth engine and predictive models, *Scientific Reports*, 15(1), 6993. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92034-4>
- Zhao, Q., Yu, L., Li, X., Peng, D., Zhang, Y., and Gong, P.,

2021, Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine, *Remote Sensing*, 13(18), 3778. <https://doi.org/10.3390/rs13183778>

교신: 김오석, 02841, 서울특별시 성북구 안암로 145 고려대학교 운초우선교육관 633호, 고려대학교 일반대학원 지리학과, 사범대학 지리교육과, 미래국토연구소 (이메일: oskim@korea.ac.kr)

Correspondence: Oh Seok Kim, Department of Geography, Graduate School of Korea University, Department of Geography Education, College of Education, and Institute of Future Land, Uncho-Useoun Hall #633, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Republic of Korea (E-mail: oskim@korea.ac.kr)

투 고 일: 2025년 7월 29일

심사완료일: 2025년 8월 22일

투고확정일: 2025년 8월 25일