

## 융합도시모델링을 통한 그린인프라 수요 예측 및 지오디자인 적용

- 도시 레질리언스를 위한 근거 기반 디자인 -

### A Spatial Projection of Demand for Green Infrastructure and Its Application to GeoDesign

- Evidence-Based Design for Urban Resilience -

곽윤신

가천대학교 도시계획·조경학부 조교수

Kwak, Yoonshin

Assistant Professor, Division of Urban Planning and Landscape Architecture, Gachon University

Received: August 02, 2023

Revised: August 23, 2023

Accepted: August 29, 2023

3인익명 심사필

Corresponding author :

Yoonshin Kwak

Assistant Professor,

Division of Urban Planning and

Landscape Architecture, Gachon

University, Seongnam 13120,

Korea

Tel.: +82-31-750-5285

E-mail: yoonshink@gachon.ac.kr

#### 국문초록

그린인프라는 지속가능한 커뮤니티를 조성하는 데에 주요한 전략으로 고려되고 있다. 하지만 도시 레질리언스와 시스템의 역동성이라는 관점에서 그린인프라에 관한 연구는 아직 부족하며 이를 어떻게 물리적인 적용과 융합하는가에 관한 연구 역시 미미하다. 본 연구는 두 가지의 원인에 주목한다. 첫째는 정적변수를 고려하는 기존의 그린인프라 계획과 동적변수를 고려하는 도시모델링 연구 사이의 간극이며, 둘째는 도시모델링 연구와 조정설계 간의 정보 및 방법의 차이이다. 본 연구는 도시성장예에 따른 그린인프라의 수요의 분포를 전망하며 설계의사결정을 지원하는 융합모델링을 제안한다. LEAM모델과 MCDA모델을 융합하여 그린인프라의 서비스와 사회경제적 도시변화의 관계성을 평가하고, 2050년의 그린인프라의 수요를 공간적으로 전망한다. 모델의 결과는 시카고 외곽에서의 도시화가 진행될수록 생태시스템 서비스의 질적 저하가 일어날 가능성이 있음을 말한다. 이는 경제성장에 의해 그린인프라에 대한 수요가 지리적으로 변화할 수 있음을 나타내며, 그린인프라 전략이 현재와 미래를 유동적이지 포괄적으로 고려해야 함을 제안한다. 나아가 본 연구는 스튜디오 환경에서의 생산된 정보를 학생들과 공유하여 근거기반 설계의 적용과 가능성에 관해 논의한다. 지오디자인의 관점에서 그린인프라 설계 및 계획과 도시시스템 연구의 융합을 통해 효율적인 설계의사결정을 지원함으로써 보다 탄력적인 도시환경을 조성하는데 기여하고자 한다.

**주제어:** 토지이용 변화, 도시조경, MCDA, 공간적 명확성, 설계의사결정

#### ABSTRACT

Green infrastructure(GI) is considered a key strategy in establishing sustainable communities. However, research on GI from the perspective of urban system dynamics and resilience lacks depth, as does its integration with physical design. This research addresses two primary causes. First, there is a gap in methods between existing GI planning, which considers static variables, and urban modeling research, which addresses dynamic variables. Second, there is a gap in information between landscape design and urban modeling research. To address these issues, this study proposes an integrated modeling approach in consideration of design decision-making. By combining the LEAM model and MCDA model, this study evaluates the relationship between GI services and socioeconomic growth, while spatially forecasting the geographies of GI demand in 2050. The resulting information reveals a potential degradation in ecosystem services over the region due to Chicago's sub-urbanization. This indicates that there would be a spatial shift in GI demand, emphasizing the need for comprehensive, dynamic GI strategies. This study further discusses the applications of evidence-based design in a studio environment. This study aims to contribute to the GeoDesign literature in terms of the creation of a more resilient urban environment by facilitating efficient evidence-based decision-making.

**Keywords:** Landuse Change, Urban Landscape, MCDA, Spatial Explicitness, Design Decision-Making

## 1. 서론

그린인프라와 지속가능성에 관한 연구는 수년간 도시, 조정, 생태, 경제학 등의 융복합적 시각을 통해 이루어져 왔다(Di Marino et al., 2019; Meerow, 2019). 그린인프라는 기능적으로는 지속가능한 도시환경을 만들기 위한 주요한 방법론으로 인식되며, 심미적으로는 도시경관을 가꾸는 도구로서 인식되고, 공학·기술적으로는 레인가든이나 옥상녹화의 효율성 및 효과에 연구가 다방면으로 이루어지고 있다(Alim et al., 2022). 종합적으로, 그린인프라는 효율적인 배치와 활용을 통해 도시의 지속가능성을 위한 중요한 전략으로 고려된다(Meerow, 2019).

도시 레질리언스(resilience) 개념의 부상은 도시를 다루는 조정가에게 그린인프라에 관한 새로운 시각을 요구하고 있다(Kwak et al., 2021a). 특히 생태적 레질리언스(ecological resilience)의 개념은 도시 시스템에 내재하는 다양한 인간-환경 변수 간의 역동성과 변화의 불확실성에 주목한다(Newell et al., 2013; Di Marino et al., 2019). 학자들은 회복력있는 도시환경의 조성을 위해서는 변화를 예측(predict)하여 저항하는 것이 아닌, 그 가능성을 전망(project)하고 평가하여 “함께 살아가야 함”을 주장한다(Holling, 1973; Norberg and Cumming, 2008; Liao, 2012; Pan et al., 2018). 그러나 현재까지도 조정에서 행해지는 대부분의 그린인프라 연구(혹은 프로젝트)는 도시의 가변적인 요인보다는, 경사도, 토양, 수종과 같은 비가변적 요인들과 심미성, 예술성 등과 같은 비체계적 요인에 집중되고 있으며, 이는 레질리언스라는 주요한 도시 담론에 조정의 역할을 제한시키는 결과를 초래하고 있다(Kwak et al., 2021b; Woodward, 2008). 그린인프라를 포함하는 현대의 도시조경은 보다 시스템적으로 접근되어야 하고 동시에 불확실성 및 복잡성을 수용할 수 있도록 유동적이어야 한다(Alberti, 2017; Kwak et al., 2021b).

간학문적 협력을 통한 지리정보 기반의 의사결정을 주장하는 지오디자인(GeoDesign)의 관점에서, 레질리언스에 근거하는 시스템적 접근법은 설계 및 계획 과정에서의 융합학문에 대한 필요성을 시사한다(Gu et al., 2018). 미적 인 관점 혹은 미시적인 접근에 치우친 그린인프라는 장기적인 관점으로 도시의 레질리언스를 향상하는 데에는 한계가 있음이 지적되어왔으며, 이에 대한 대응으로 조정과 다른 분야의 적극적인 융복합이 대두되고 있다(Allen, 2012; Deal et al., 2013; Kwak et al., 2021a). 예를 들어, Alberti(2017)는 다양한 시뮬레이션 모델링과 설계의 융합을 주장하였고, Deal et al.(2013)은 계획지원을 위한 그린인프라와 생태시스템 서비스 모델의 융합을 제안하였으며, Wang et al.(2018)은 도시성장예 유동적으로 적용가능한 그린인프라 모델링을 제안하였다.

본 연구는 일리노이 천연자원청(Illinois Department of Natural Resources: IDNR)과 협력하여 시카고 지역을 대상으로 개발된, 유동적으로 확장가능한 그린인프라 융합모델을 구축한다. 연구의 목표는 다음과 같다. 1) 사회경제적 성장패턴과 그린인프라의 관계성을 설명하고 그린인프라의 종합적 다기능에 대한 수요 변화를 공간 및 시각적으로 전망한다. 2) 제안된 모델을 설계의사결정지원 도구로 사용하여, 출력물의 멀티스케일 조정설계·계획 적용한다. 3) 궁극적으로 더욱 회복력있는 도시를 조성한다는 목적 아래 도시시스템에 대한 정량적 연구와 그린인프라 설계 및 계획의 효과적으로 융합한다.

## 2. 이론 및 선행연구

### 2.1 도시 레질리언스와 도시 시스템

Holling(1973)은 도시 레질리언스를 시스템의 질적 붕괴없이 변화를 수용하는 능력이라고 정의한다. 레질리언스의 개념에는 비선형적 역동성(non-linear dynamicity), 불확실성(uncertainty), 다양성(diversity), 상호의존성(interdependency), 임계점(thresholds) 등이 포함되며, 시스템에 내재된 이러한 특성은 레질리언스를 연구하기 위한 학문 간의 공통된 패러미터를 선정하는 데 어려움을 야기한다. 레질리언스의 개념을 계획 및 정책결정에 적용하는 데에는 더욱 복잡한 과정과 논의가 요구된다(Davoudi and Porter, 2012).

Norberg and Cumming(2008)은 회복력있는 도시환경을 조성하기 위해서는 도시의 사회물리학적(socio-physical) 복잡성이 설명되어야 한다고 주장한다. 결합된 인간-자연 시스템(coupled human and natural systems)에서의 복잡성에 대한 몰이해는 억제되지 않는 도시확산과 같은 도시관리정책의 실패를 초래하기도 한다(Liu et al., 2007). 예를 들어, Ernstson(2013)은 도시의 급진적 확산이 사회·문화 및 경제적 복잡성에 대한 이해가 부족할 때 발생할 수 있다고 지적하며, 이와 같은 현상은 궁극적으로 도시의 레질리언스를 저해한다고 말한다. 도시에는 수많은 작고 큰 변화들은 연속적으로 작동하기에 끊임없이 시스템을 불안정하게 만들고, 시스템에 대한 부족한 고려 즉, 레질리언스에 대한 몰이해는 섬세히 설정된 정책조차 의도치 않는 사회·환경적 결과를 낳게 한다(Alberti and Marzluff, 2004).

그간 많은 선행연구가 복잡성을 설명하고 회복력있는 도시환경을 조성하기 위한 다양한 방법론을 제시해왔다. 예를 들어, Fiksel(2006)는 인간과 자연과의 복잡한 관계성에 대해 다양한 시스템적 해석을 가능하게 하는 다중 모델의 동시 융합과 분석을 제안하였다. 기술적 진보와 이에 상응하는 정책 결정의 중요성은 스마트 시티나 ICT(Information Technology and Communication)의 개념과 함께 발전해왔다(Cai et al., 2023). Deal et al. (2017)은 이러한 접근법에서 도시 시스템의 다중화(redundancy)와 모델의 효율(eficiency)을 강조한다. 구체적으로, 여유는 시스템의 불확실성에 대한 대응 개념으로 도시의 미래는 하나 이상의 시나리오와 상응하는 다양한 대응 정책으로 준비되어야 함을 의미한다. 효율은 효율적인 의사결정을 위해서는 복잡한 해결책을 지양해야 함을 의미한다. 여기에는 복잡한 도시 시스템 모델링의 간략화와 효과적인 전달의 필요성을 포함한다.

## 2.2 시스템 모델의 공간적 명확성과 의사결정 적용

도시 시스템의 복잡성을 다루는 시나리오 모델의 간략화에는 모델의 공간화와 계획지원도구(Planning Support System: PSS) 개발 등의 방법들이 제안되고 있다(Chen et al., 2021; Kwak et al., 2021a). PSS 모델은 도시 시스템의 역동성에 관한 주요한 공간정보를 시각적으로 생산하고 이를 이해관계자 혹은 정책결정자에게 전달하여 민주적 의사결정을 위한 기술적 플랫폼이다(Deal and Pan, 2016; Jiang et al., 2020). 이 과정에서 정보의 공간적 명확성(Spatial explicitness)은 효율적 의사결정과정에서 있어 중요한 요소로 제안된다(Champlin et al., 2019). 모델의 공간적 명확성이 PSS로 구현될 때, 광역 스케일의 데이터는 지역 스케일 혹은 보다 작은 스케일에서의 의사결정을 위한 멀티스케일 공간정보로 활용될 수 있다(Boulangue et al., 2018; Jiang et al., 2020). 특히 도시성장 패턴 분석이나 환경영향 예측과 같은 복잡한 분석을 요구하는 의사결정의 경우, 공간적으로 명확한 시각 정보를 생산하는 PSS의 활용성과 접근성은 더욱 강조된다(Deal and Pan, 2016). 학자들은 레질리언스의 관한 연구를 민주적 의사결정에 적용하기 위해서는 복잡한 모델링이 결합된 PSS가 신뢰성, 명확성, 사용성을 갖춰야 한다고 주장한다. 구체적으로, 1) 사회문화적 시스템의 복잡한 상호 관계성을 설명하고, 2) 직관적으로 이해 가능한 시각화된 공간적 결과물을 생산하여, 3) 의사결정과정에서 비전문가(혹은 비과학자)의 참여를 촉진할 수 있는 모델의 능력을 강조한다(Kwak et al., 2021b; Deal et al., 2017; Li et al., 2017).

Chen et al.(2021)은 지역 투입-산출 모델(regional input-output model)이 토지이용 모델과 결합이 될 때, 개발 정책에 의한 경제적 영향이 30m × 30m 스케일의 명확한 공간정보로서 표현될 수 있음을 보여주었다. 투자에 따른 30년 후의 경제 영향을 6가지의 경제 부문으로 분류하여 예측하였으며, 모델링 융합을 통해 토지이용 변화 예측 역시 6가지의 동일한 부문으로 전망하였다. 나아가 융합 모델링 프로세스를 이용자 친화적 웹 기반의 PSS 플랫폼으로 전환하여 지자체의 정책결정자들이 직접 모델을 활용하고 업데이트할 수 있도록 하였다. Cong et al.(2022)은 오픈 데이터 기반의 교통 다중 모델링(multi-modal urban modeling)을 제안하여 의사결정과정에서의 도시성장 모델의 확장성과 접근성을 강조하였다. Kwak et al.(2021a)은 복잡한 계산과정을 요구하는 수문 모델이 그리드 기반의 사공간 정보를 활용하고 공간적으로 명확성을 띠 때, 멀티스케일로 설계 및 계획과정에 활용될 수 있는 정보를 생산할 수 있음을 보여주었다.

하지만 복잡한 다중 모델링을 통해 공간적으로 명확한 정보를 생산하기 위해서는 아직은 여러 가지의 기술적 한계가 따른다. 특히나 미시 스케일로 구성된 데이터로 광역적 계산을 할 때, 고사양의 컴퓨터가 요구되며 결과물을 출력하는 데에는 여전히 상당한 시간이 걸린다는 것이 한계로 지적된다(Kwak and Deal, 2021). 그러므로 도시 복잡성과 관련된 정보의 효율적인 활용을 위해서는, 특히나 시간에 대한 제약이 있는 설계 및 계획 프로젝트의 경우, 보다 간단하지만 합리적인 의사결정 모델의 사용이 요구된다.

## 2.3 지오디자인과 민주적 의사결정

지오디자인은 지리공간 분석과 협력적 설계 방식을 결합하여 복잡한 사회, 환경 및 경제적 문제를 해결하기 위한 접근 방법이다. Steinitz(2012)는 지오디자인을 "지리적 맥락, 시스템적 사고, 디지털 기술에 기반을 둔 영향 시뮬레이션을 통해 디자인 제안을 만들어내는 디자인 및 계획 방법"이라고 정의한다. 지오디자인은 전통적인 '사이트 리딩'에서 나아가 광역적이고 다각적인 지리정보를 수집, 분석, 모델링 및 시각화하여 사회 및 환경의 다양한 특성을 고려한다.

지오디자인은 다양한 이해 관계자들과의 협업을 강조하고 다양한 분야의 전문가들과의 논의를 통한 효과적이고 더욱 합리적인 결과를 도출하는 데에 도움을 준다. 지적되어온 전통적 설계의 한계에서 벗어나 도시계획, 도시재생, 국토계획, 환경보호 등 다양한 분야에서 활용될 수 있다(Gu et al., 2018; Kwak et al., 2021b). 예를 들어, Davis

et al.(2021)은 지오디자인을 나바호(Navajo) 부족 공동체를 위한 커뮤니티 계획수립에 활용하였으며, Matta and Serra(2016)는 토지이용계획에 지오디자인 활용을 제안하였다. 다각적인 데이터와 폭넓은 협업을 기반으로 하는 지오디자인은 고정된 최적 안의 도출보다는, 민주적인 방법을 통해 유동적인 설계 및 계획 의사결정을 내리는 프로세스에 중점을 둔다.

### 3. 연구방법

본 연구는 크게 세 가지의 순서로 구성된다. 첫째, PSS 도구로 개발된 토지이용 변화 사공간 모델인 LEAM(Landuse Evolution and Impact Assessment Model)을 시카고에 맞추어 조정하고 구축한다. 둘째 IDNR과 논의를 통해 그린인프라에 대한 수요를 평가하는 다기준 의사결정모델(Multi-Criteria Decision Analysis: MCDA)을 설정하고 이를 LEAM과 연결하여 융합모델로 구축한다. 셋째, 예측된 토지이용 정보를 활용하여 미래의 그린인프라 수요를 전망한다. 다섯째, 모델 출력물의 설계 적용을 시험하고 지오디자인의 관점에서 평가하고 해석한다.

#### 3.1 MCDA-LEAM 모델링 시스템

본 연구에서 제안하는 융합 모델링 시스템은 다음과 같다(그림 1 참조). 여기서 LEAM이 설명하는 도시 시스템의 역동성은 MCDA가 설명하는 그린인프라 서비스 수요와 결합하여 미래의 잠재적인 수요를 예측한다. 생태서비스에 대한 접근성이 도시성장 패턴을 결정하는 데에 통계적으로 중요한 요인이라는 것은 다양한 연구를 통해 증명되어있기에(Zhang et al., 2021), 본 연구는 그린인프라에 초점을 두어, 그린인프라 서비스에 대한 접근성이 개발 패턴에 영향을 준다는 가정하에 진행되었다. 구축된 융합 모델링의 상세한 프로세스는 다음과 같다.

첫째, 다섯 개의 그린인프라 서비스에 대한 현재 수요를 MCDA 모델을 통해 공간적으로 도출한다. 기준년도(2016년) 토지이용 데이터가 사용되며 평가기준(criteria)에 적용되는 비중을 달리하여 이슈별 잠재적 수요를 나타낼 수 있도록 시나리오를 설정한다. 둘째, MCDA의 출력물을 LEAM의 입력데이터로 사용해 토지이용 변화와 그린인프라 수요를 포함하는 사회환경적 변수 간의 관계성을 분석한다. 변수 간의 통계적 관계성은 미래 토지이용을 예측하는 데 사용된다. 셋째, LEAM으로 도출된 미래 토지이용 정보를 기반으로 다섯 개의 미래 그린인프라 서비스를 작성하고, 다시 MCDA의 입력데이터로 사용하여 잠재적 수요를 평가한다.

#### 3.2 그린인프라 수요 분석을 위한 MCDA

본 연구에 사용된 MCDA에서 평가기준의 적절한 선택은 그린인프라 수요에 대한 결괏값을 결정하는 중요한 과정이다. 본 연구의 평가기준 선정에는 그린인프라의 다기능을 다룬 선행연구가 참조되었다. 예를 들어, Meerow and Newell(2017)은 6개의 생태시스템 서비스(열섬현상저감, 사회취약성완화, 우수관리, 생태연결성 회복 등) 평가를 통해 미국 디트로이트의 그린인프라 분포와 개발 정책의 간극을 공간적으로 평가하였다. Li et al.(2020)은 9개의 평가 기준(침식위험성 완화, 우수관리, 녹지 접근성 제공 등)을 통해 생태시스템 서비스에 대한 수요를 평가하였다. 이에 본 연구는 시카고 지역에 대한 그린인프라 계획과 보고서에서 언급되는 현재 혹은 잠재적인 도시문제를 참조하여 IDNR과 논의를 통해 표 1과 같은 5개의 그린인프라 서비스를 평가기준으로 지정하였다(City of

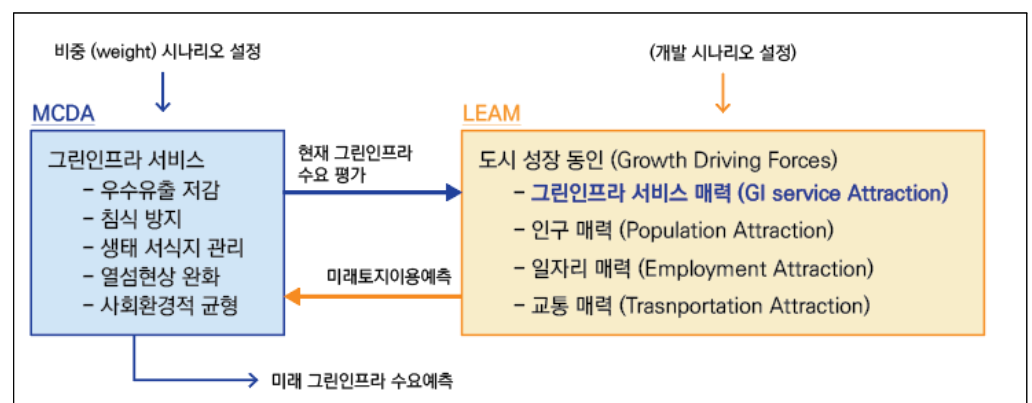


그림 1. 연구 흐름도

표 1. 그린인프라 서비스 수요 평가기준과 평가방법

그린인프라 서비스 수요 평가기준 (criteria)	평가 방법	사용모델/데이터
1. 우수유출 관리	표면우수유출계수	SCS-CN model
2. 침식 방지	토양침식계수 (K-factor)	USGS dataset
3. 생태 질적 관리	생태 질적 지수 (Habitat Quality Index)	InVEST model
4. 열섬현상 완화	불투수면적비율	NLCD dataset
5. 사회생태적 불균형 관리	사회생태 균형 지수	Heckert and Rosan (2016), Zhu et al. (2019) 참조

Chicago, 2014; CMAP, 2016; CDWM, 2018).

선정된 평가기준을 이용하여 그린인프라의 수요를 평가하는 데에는 식 1이 사용되었다.

$$S_k = \sum_{j=1}^5 C_{jk} W_j \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $S_k$ 는 셀  $k$ 에서의 그린인프라 수요를 나타내고,  $C_{jk}$ 는 셀  $k$ 에서의 1부터 5까지의 등급으로 분류된 그린인프라 서비스 평가지수,  $W_j$ 는 각 평가기준에 부여된 비중을 뜻한다.

각 평가지수에 적용된 지수값을 결정하기 위해 Saaty(1987)의 분석적 위계 프로세스(Analytic Hierarchy Process: AHP)가 사용되었다. AHP는 평가지수를 짝을 지어 쌍대비교행렬(Pairwise Comparison Matrix: PCM)을 구축한 후 상대적 비중을 평가하고 이를 종합하는 방법이다. 평가기준 간의 상대적 비중에 따라 1에서 9 사이의 값이 지정되고 일관성 비율(Consistency Ratio: CR) 계산을 통해 도출된 비중의 일관성을 검증한다. 구체적으로, 식 2, 식 3, 식 4와 같다.

$$\overline{P}_{ij} = P_{ij} / \sum_{l=1}^n P_{lj} \quad (\text{식 2})$$

$$W_i = \sum_{j=1}^n \overline{P}_{ij} / n \quad (\text{식 3})$$

여기서,  $P_{ij}$ 는 상대적 비중을 나타내며  $n$ 은 평가지수의 개수(본 연구에서는 5),  $\overline{P}_{ij}$ 는 정규화된 상대적 비중,  $W_i$ 는 각 평가지수  $i$ 별 최종 비중을 나타낸다. 그리고 일관성 비율(CR)은 다음의 식 4로 계산된다.

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI(n-1)} \quad (\text{식 4})$$

여기서,  $\lambda_{\max}$ 는 PCM에서의 최대 고유값이고 RI는 Satty(1987)가 평가기준의 개수별로 제안한 무작위 지수(Random Index)를 나타낸다. 평가기준 5개에 대해 제안된 RI값은 1.12이며, CR의 값은 1 미만이어야 한다. 우수 유출 집중 시나리오 설정을 위한 상대적 비중은 표 2와 같으며 최종 비중은 표 3과 같다. 우수유출 집중 시나리오와 열섬현상 집중 시나리오의 CR 값은 0.034로 일관성 검증을 통과하였다.

### 3.2.1 MCDA 기반 그린인프라 시나리오

본 연구에는 3가지의 그린인프라 시나리오가 시카고 종합플랜을 기반으로 선택되었다. 첫 번째는 이슈에 대한 동 일 고려(equal weights), 두 번째는 우수유출 집중(runoff abatement-focused), 세 번째는 열섬현상 집중(UHI mitigation-focused) 시나리오이다. 각각의 시나리오는 AHP를 적용하여 일관성 검증을 통과(CR=0.034)한 표 2와 표 3의 결과에 따라 비중이 할당되었으며, 그린인프라 계획에 있어 잠재적으로 어떤 이슈에 더 중점을 둘지를 나타 낸다. 그림 2는 특정 도시문제에 관한 단편적 그린인프라 수요를 나타낸다. 그림 2의 5개의 공간 데이터에 표 3에 표



표 2. 우수유출 집중 시나리오\*에 관한 쌍대비교행렬(pairwise comparison matrix)\*\*

GI 서비스	우수유출 관리	침식 방지***	생태 질적 관리	열섬현상 관리	사회생태적 불균형 관리
우수유출 관리	1	7	7	7	7
침식 방지	1/7	1	1/3	1/3	1/3
생태 질적 관리	1/7	3	1	1	1
열섬현상 완화	1/7	3	1	1	1
사회생태적 불균형 관리	1/7	3	1	1	1
합계	1.571	17.000	10.333	10.333	10.333

\*: 동일 고려 시나리오의 경우 모두 1의 값이 적용되었으며, 열섬현상 집중 시나리오의 경우 열섬현상 관리 평가지수에 7의 상대적 비중을 일괄 적용함

\*\*: 1-9 사이의 상대적 비중값은 2020년 2월부터 진행된 IDNR과의 비대면 미팅에서 논의를 통해 결정되었음

\*\*\*: 침식 방지의 경우 시카고와 인접하는 미시간호에는 주요 이슈이나 본 연구는 그린인프라를 통한 주로 내륙 지역을 다루기에 1/3의 상대적 비중을 적용함

표 3. 평가기준에 대한 시나리오별 최종 비중

GI 서비스	최종 비중		
	동일 고려 시나리오	우수유출 집중 시나리오	열섬현상 집중 시나리오
우수유출 관리	0.200	0.616	0.112
침식 방지	0.200	0.049	0.049
생태 질적 관리	0.200	0.112	0.112
열섬현상 완화	0.200	0.112	0.616
사회생태적 불균형 관리	0.200	0.112	0.112
합계	1.000	1.000	1.000

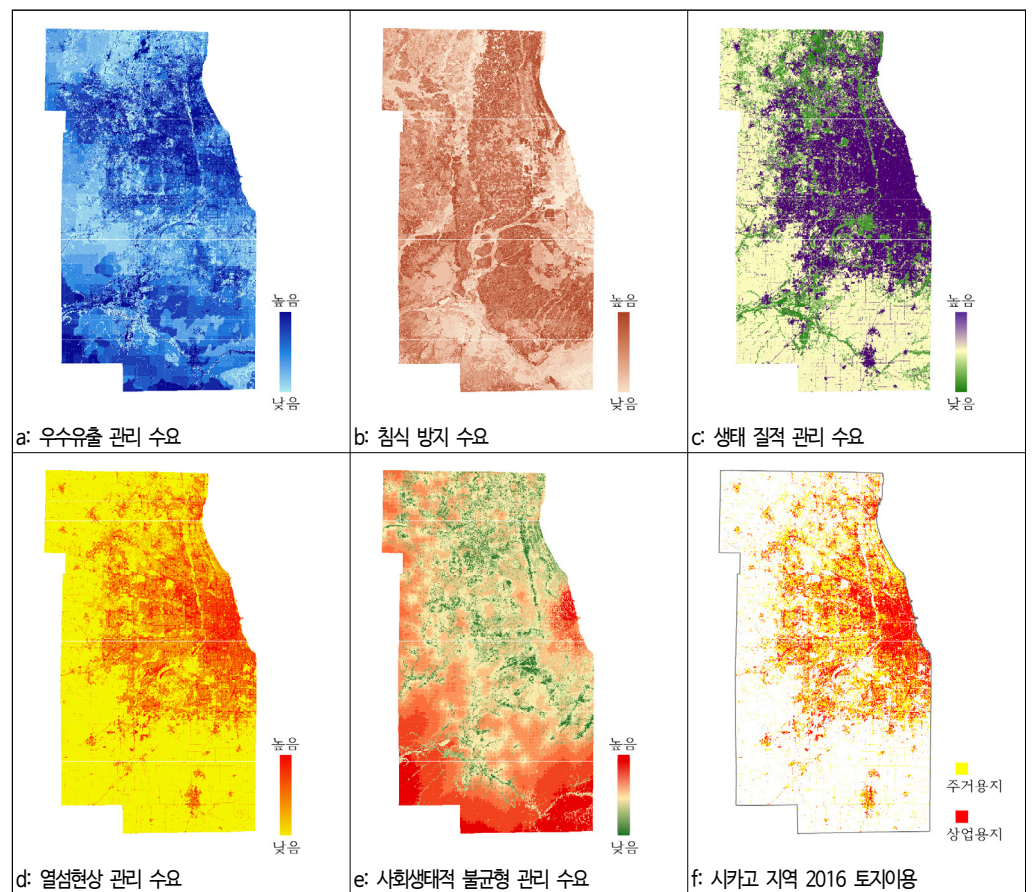


그림 2. 5가지 그린인프라 서비스 수요 지도 및 대상지 2016 토지이용

시된 비중을 적용하여 계산했으며, 이는 30m × 30m의 스케일로 특정 이슈에 따라 그린인프라 배치가 어느 위치에 우선시되어야 하는지를 명확히 나타내기 위함이다. 예를 들면, 우수유출 관리를 위해 우선적으로 배치될 레인가의 위치는 열섬현상 관리를 위해 배치될 옥상녹화의 위치와 다를 것이다.

### 3.3 LEAM(Landuse Evolution and Impact Assessment Model)

LEAM 모델은 사회경제 및 생태물리적 도시성장 동인 변수를 기반으로 토지개발 확률을 계산하고 미시 스케일로 잠재적 주거 및 상업 토지이용 변화를 예측한다. 모델은 미국 지리조사국(USGS)의 National Land Cover Database에서 제공하는 토지이용 데이터의 스케일인 30m × 30m로 구축되며, 잠재적 개발 예측에는 성장 동인(growth drivers) 간의 공간 및 통계적 관계성과 대상지의 공식적인 인구 및 일자리 전망 지수가 사용된다. 모델에서 사용되는 성장 동인은 이동시간 기반의 접근성을 사용하며, 본 논문에서는 이를 “매력도(attraction)”라 지칭한다. 매력도의 계산에는 각각의 셀(cell)에서 인구조사지역(census tract) 경계를 기준으로 지정된 인구집중 장소, 일자리집중 장소와 같은 영향지점(points-of-influence)으로의 최소 이동시간과 일자리 개수와 같은 상대적 영향성이 고려된다. 개발위치를 선정하는 과정에서는 직선거리보다는 이동시간이 더 영향력이 있다는 가정 아래, LEAM 모델은 사람들의 개발에 대한 위치적 선호도 즉, 개발 매력도를 유사 중력 모델(gravity-like model)을 통해 다음 식 5와 같이 계산한다.

$$A_k = \sum_l n \frac{O_j}{T_{k,l}} \quad (\text{식 5})$$

여기서,  $A_k$ 는 셀에서의 매력도 지수,  $T_{k,l}$ 는 셀 $k$ 에서 영향력 지점으로의 최소 이동시간,  $O_j$ 는 영향성(예를 들어, 상업 개발 매력도의 경우, 일자리 개수),  $n$ 은 조절 상수이다. 본 연구에는 4가지의 개발 매력도가 사용되었고 결과물은 아래의 그림 3과 같다. 그린인프라 서비스 매력도의 경우 동일 비중을 적용하여 나온 MCDA 출력물을 포인트 데이터로 변환시킨 후 계산되었다.

개발 확률은 각각의 미개발 토지가 개발될 확률을 공간적으로 표현하며, 확률 계산에는 수정된 로지스틱 모델(modified logistic model)이 사용되었다. 모델을 통해 선택된 4개의 성장 동인이 토지개발에 어떤 영향을 끼치는지를 표현하였다. 각각의 셀에서 개발 확률은 아래의 식 6을 통해 계산되었다.

$$P_k = \frac{1}{1 + e^{-f^m(A_{k,1}, A_{k,2}, A_{k,3}, A_{k,4})}} * C_k \quad (\text{식 6})$$

여기서,  $A_{i,k}$ 는 식 5에서 계산된 셀 $k$ 에서의 매력도  $i$ 의 값이며, 회귀분석에는 잠재적 개발과 성장 동인 사이의

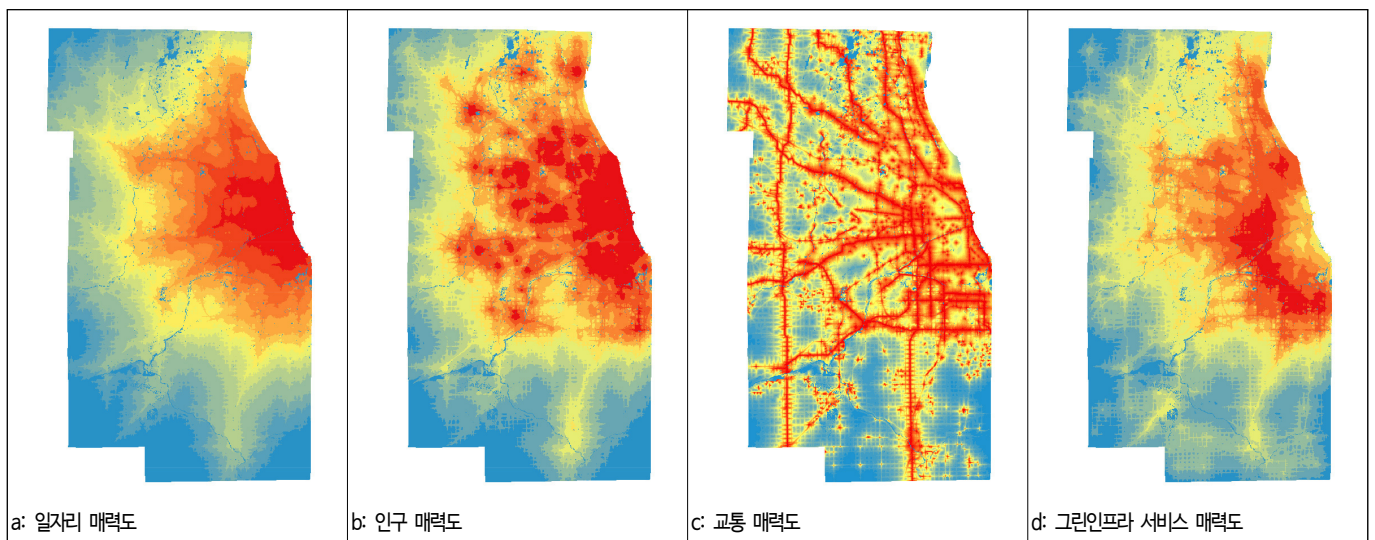


그림 3. 발 매력도(attraction). 영향지점으로부터 인지적 접근성을 표현함

비선형성 관계성(Kwak and Deal, 2021; Zhang et al., 2021)을 설명할 수 있도록 제네릭 함수(generic function)  $f^m()$ 가 사용되었다.  $C_k$ 는 셀  $k$ 가 개발제한구역에 지정되어 있는지에 대한 여부(0 = 내부, 1 = 외부)를 나타낸다. 모델은 현재 상업 및 주거용지와 매력도 사이의 다변수 로지스틱 회귀 분석을 통해 보정되었다. 3차 함수까지 고려되어 변수가 선정되었으며 AIC값이 가장 낮은 모델을 사용하였다. 관계성 분석을 통해 토지이용 변화의 경향성을 평가하였으며 이를 토대로 토지이용을 전망하였다. LEAM 모델링의 자세한 방법론과 적용사례는 다음과 같은 다양한 선행연구에 기술되어있다(Deal et al., 2017; Pan et al., 2018; Kwak, et al, 2021a; Cong et al, 2022).

## 4. 연구결과

### 4.1 2016년 그린인프라 수요 분포

2016년의 5개의 그린인프라 서비스 분포지도와 MCDA 모델을 통해 그림 4와 같은 3개의 종합적 수요 지도를 작성하였다. 당연히 도시화가 집중되어있는 시카고 중심지역에 그린인프라 수요가 모든 시나리오에서 높은 것으로 나타난다. 하지만 세 지도에서 다르게 나타나는 수요 분포는 주목하는 이슈에 따라 그린인프라 배치의 우선도가 달라야 함을 의미한다. 할당된 비중에 따라 공간적 및 계량적 결맞음이 달라지며 이는 그린인프라의 위치뿐만 아니라 종류 역시 다르게 지정되어야 함을 의미한다. 예를 들어, 그림 4(b)에서 붉게 표시된 지역은 우수 관리에 중점을 두었을 때의 그린인프라의 우선적 위치를 나타낸다. 대부분의 토지가 주거용도로 사용되고 있는 시카고 북서쪽 지역의 경우, 지역 커뮤니티의 조경을 위한 식생수목가 우수유출 관리를 위해 추천될 수 있다. 하지만 열섬현상의 중점을 둔 그림 4(c)의 경우, 밀도 높게 개발된 도시 중심부에 더 주목해야 함을 나타낸다. 이 경우 식생수목보다는 쿨링효과를 위한 옥상녹화의 배치 혹은 수자원의 활용이 우선시되어야 할 것이다(Dong et al., 2020; Kwak et al., 2020).

### 4.2 2050년 LEAM 토지이용 변화 전망

시카고 지역의 성장 경향성을 이해하고 전망하기 위해 LEAM 모델을 통해 계산된 4개의 매력도와 상업용지 및 주거용지 개발 간의 관계성을 분석하였다. 그림 5에서 y축은 미개발 용지가 상업용지 혹은 주거용지로 개발될 가능성을 나타내며 x축은 표준화된 매력도값 즉, 영향지점으로서의 접근성을 나타낸다. 상업 개발 가능성은 일차리가 집중되어있는 중심 비즈니스 구역에 가까워질수록 높아지는 것으로 나타난다. 주거 개발 또한 대체적으로는 비슷한 양상을 보이지만 매력도의 값이 0.3이 넘어갈 때 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이는 시카고의 주거 개발이 중심 지에서의 점차 외곽으로 밀려나는 경향이 있음을 나타낸다. 예를 들면, 주거시설에 복합용도로서 상업시설이 들어올 가능성은 있지만, 스타벅스와 같은 중심 상업시설이 주거시설로 전환될 가능성은 사실상 0에 수렴한다. 그림 5는 또한 그린인프라 서비스에 대한 접근성 역시 개발 가능성을 결정하는 데에 중요한 변수( $p < 0.01$ )라는 것을 나

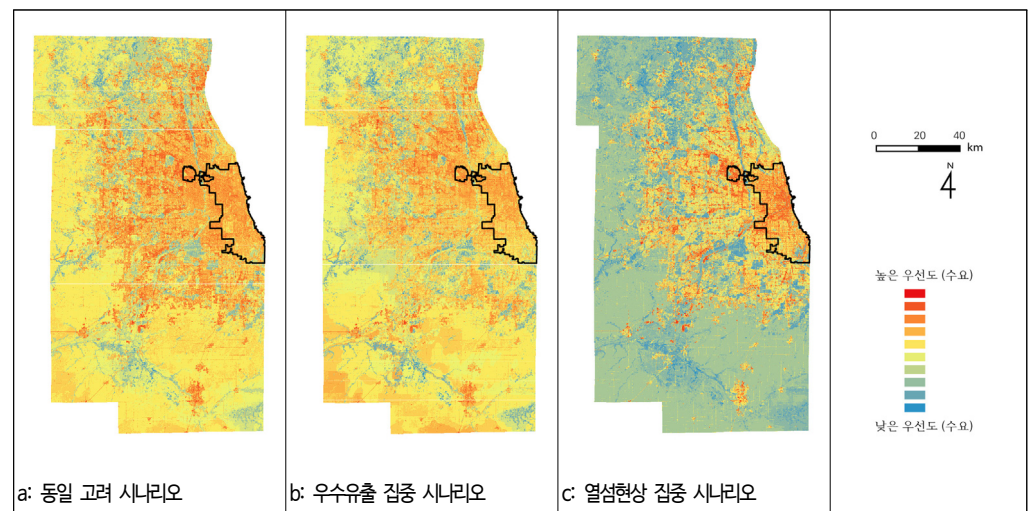


그림 4. 시나리오별 2016 종합적 그린인프라 서비스 수요 평가지도



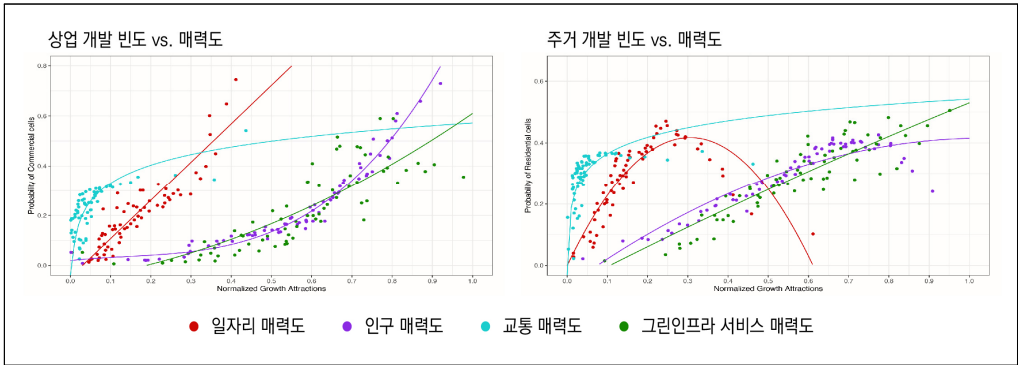


그림 5. 시산업 및 주거 개발 빈도와 4개의 매력도(성장 동인) 간의 관계성

타난다. 그린인프라 서비스는 도심의 녹지, 숲, 강 등의 도시 자연환경에 집중되어있다는 것을 고려할 때, 회귀분석 결과에서 표현되는 개발 빈도와는 긍정적인 관계성은 시카고 지역 주민들의 그린(혹은 블루) 인프라와 근접한 곳에 살거나 일하고 싶어 한다는 것을 말한다.

개발위치에 대한 경향성을 토대로 개발 가능성이 계산되었고 그림 6과 같이 공간적으로 시각화되었다. 30m × 30m로 표현된 개발가능성 지도는 붉은색에 가까울수록 상업용 혹은 주거용지로 토지이용이 변할 가능성, 푸른색에 가까울수록 새로운 개발이 일어나지 않을 가능성을 나타낸다(그림 6(a), (b) 참조). 앞서 회귀분석을 통해 설명했듯이 공간적으로 표현된 개발 가능성 역시, 상업 개발은 도시 중심지역으로 이끌리는 경향 그리고 주거 개발은 외곽 쪽으로 밀리는 경향을 보인다. 그림 6(c)는 개발 가능성을 기반으로 예측된 2050년의 토지이용 변화 전망을 나타낸다. 시카고 공식 인구 및 일자리 전망 데이터가 상업 및 주거 용지 셀 개수를 계산하는 데에 사용되었다(그림 6c 참조). 예측된 미래 토지이용 공간 데이터를 사용해 미래의 그린인프라 서비스가 계산되었고 MCDA 모델을 통해 수요 지도가 작성되었다.

4.3 2050년 그린인프라 수요 전망

본 연구의 그린인프라 수요 전망에는 동일 고려 시나리오만 사용되었다. 첫째는 현재와 미래의 그린인프라 수요 분포는 시각적으로는 큰 차이를 보이지 않기 때문이며(그림 4(a), 그림 7(a) 참조), 둘째는 멀티 스케일로서 결과를 분석하여 지오디자인의 활용을 논의하기 위함이다.

지역 스케일(census tracts)에서의 분석은 시카고 지역에서 그린인프라 서비스에 대한 수요가 공간적으로 이동할 수 있음을 나타낸다. 특히 그림 7(c)는 그린인프라 수요가 증가된 지역을 표시함으로써 선제적 대응을 위한 우선

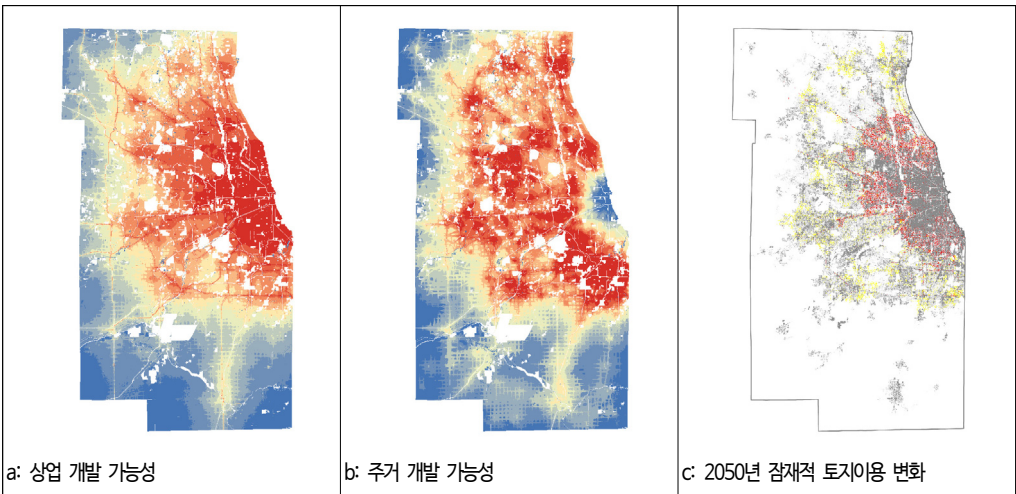


그림 6. 시카고 개발 가능성 및 잠재적 토지이용 변화

범례: 개발 가능성 low high ■ 현재 상업용지 □ 현재 주거용지 ■ 상업용지로의 변화 ■ 주거용지로의 변화

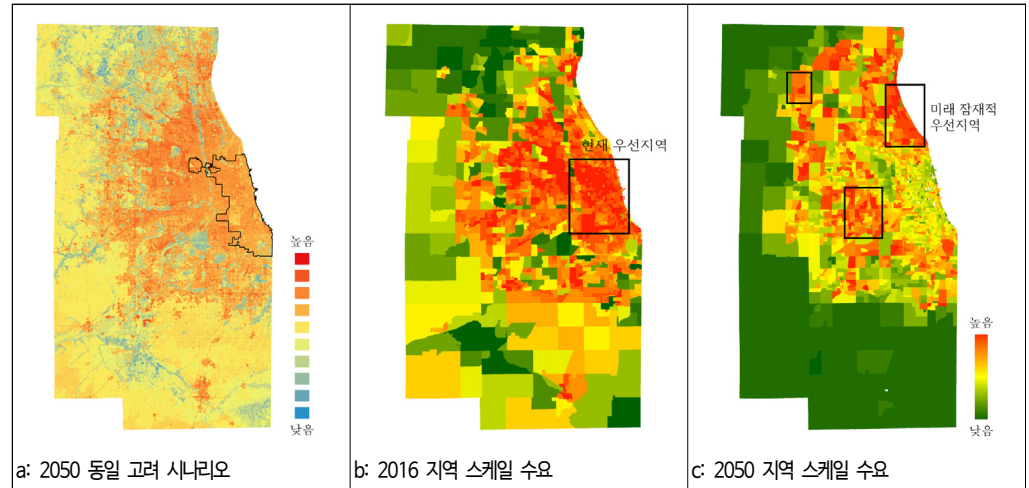


그림 7. 2050년 그린인프라 수요 전망(ArcGIS의 Quantile 분류법으로 등급화)

지역(priority areas)을 나타낸다. 모델링을 통해 표현된 도시확산 패턴에 따라 도시 외곽 지역에서의 수요가 상승할 것으로 전망된다. 다시 말해, 이 결과는 시카고 외곽에 위치한 유흥지 혹은 농지에서의 도시화가 진행되고 개발이 일어날수록 높은 확률로 생태시스템 서비스의 질적 저하가 일어날 수 있음을 의미한다. 이는 경제성장에 의해 그린 인프라에 대한 수요 분포가 지리적으로 변화할 수 있음을 나타낸다. 다시 말해, 본 결과는 시카고 지역의 그린인프라 전략이 현재를 위해 도심지에 집중하거나 단순히 미래를 위해 외곽지역에만 집중해서는 안된다는 결론으로 귀결될 수 있다. 카운티(County) 지자체 간의 협력을 통해 광역적이고 통합적이며 무엇보다 선제적으로 접근되어야 함을 의미한다.

## 5. 고찰: 설계 스튜디오 환경에서 공간·계량 정보의 활용

본 논문은 시카고 지역의 그린인프라 수요와 토지이용 간의 상호작용을 평가하는 leam-mcda 융합 동적(dynamic) 모델링을 제안하였다. 도시의 성장 패턴에 따른 잠재적 수요를 시각화하여 ‘조정’이 선제적으로 대응할 수 있는 지역(census tract)과 공간(cell)을 위치정보로써 제시하였다(그림 7 참조). 그린인프라 서비스의 수요는 도시의 성장에 영향을 받을 뿐만 아니라 성장의 공간적 패턴 역시도 서비스의 공간적 분포에 영향을 받는다는 것을 밝혔다. 제안된 모델은 단순한 입력정보를 통해 다양한 시나리오에 대한 실험을 가능하게 하여 참여기반의 전략적인 그린인프라 접근을 도모하고, 무엇보다 토지이용과 그린인프라 수요에 대한 메커니즘을 공간적으로 명확한 방식으로 제공한다. 본 연구는 선택된 시나리오를 시카고 지역에 적용하여 1) 도시확산에 따른 현재(2016년)와 미래(2050년)의 그린인프라 수요의 공간 분포를 시뮬레이션하였고, 2) 개발 패턴과 관련하여 도심 내부에서 외곽으로 공간적 수요의 지리적 이동이 발생할 것을 전망하였고, 3) 가능성있는 미래에 대비하기 위해 그린인프라를 전략적으로 배치할 우선적 위치를 확인하였고, 4) 결과물이 멀티스케일의 그린인프라 의사결정에 활용될 수 있음을 보였다.

하지만 본 연구에서 제시한 접근 방식과 정보는 그린인프라와 레질리언스에 대한 최적의 정답을 보장하지는 않는다. 실제 설계 의사결정은 현장의 조건을 충분히 고려해야 할 것이며 필요한 정보 역시 대상지 컨텍스트에 맞게 추가되어야 한다. 다시 말해, 본 연구의 결과 정보가 조정설계 과정에서 ‘유용’하기 위해서는 지역 커뮤니티의 사회·경제·환경적 특성, 관리 및 기술적 실현 가능성 등 다양한 세부 맥락적 요소를 고려해야 할 것이며, 나아가 설계가의 디자인 창의성이 더해져야 할 것이다.

그렇다면, 본 연구에서 제시하는 공간·계량 정보를 어떻게 효율적으로 설계과정과 연결할 수 있을까? 레질리언스라는 범지구적 키워드 아래, 도시환경을 얹혀있는 유동적 시스템으로 바라보는 인식의 필요성은 대두되고 있으며 인간과 자연을 다루는 조정 역시 그 영향 아래 있다는 것은 분명하다. 더욱 복잡해지는 도시 문제를 더욱 탄력적인 방식으로 다루기 위해 과학적 접근을 이해하고 이를 물리적인 설계 영역으로 가져와야 할 것이다.

2019년, 2020년 일리노이대학교 대학원 스튜디오에서 과학적 이론·기술의 설계 융합이 실험되었다(융합 프레임워크는 선행연구, Kwak et al. 2021b, 참조). 학생들은 웹 기반 PSS로 개발된 LEAM 모델을 학습 후 직접 조작하였으며 MCDA와 AHP를 통해 비중을 대상지의 이슈에 맞게 보정하였다. 그림 7(c)에서 드러난 미래 잠재적 우

선지역이 포함된 카운티(County)를 1차 광역적 대상지(그림 8(a)의 주황색 점선 경계(McHenry County))로 선정 후, 대상지 내부에서 학생들은 세부적 분석과 조사를 통해 지역 커뮤니티의 이슈를 파악하고 2차 세부 대상지를 선정하였다. 이 과정에서 본 연구의 결과물이 GIS 정보로 공유되었다. 예를 들어, 그림 8(a)는 2016년부터 2050년 사이의 도시성장예에 따라 그린인프라 서비스 수요가 증가한 상위 20%의 셀을 나타내며 각 셀에는 증가값 정보가 포함되어있다. 제시된 공간 및 계량 정보를 활용해 학생들은 그린인프라의 전략적인 배치를 논의하고 2차 대상지의 컨텍스트를 고려하여 2050년을 위한 조정 계획·설계를 진행하였다. LEAM 모델을 통해 미래의 잠재적 변화가 예측되었고 설계안의 영향과 효과가 계량적으로 검증되었다.

설계과정에서는 모델링 과정에서 생략된, 사회문화적 현황, 현재 그린인프라 정보, 동식물 군 등의 세부 맥락적 정보가 추가로 조사 및 분석되었다(그림 8(b), (c) 참조).

공간정보와 계량적 방법론으로 의사결정이 진행된 학생들의 설계안이 전통적인 프로세스로 생산된 설계안보다 더 나은 것이라 단정하여 말할 수는 없을 것이다. 하지만 분명한 것은, 현대 조경은 기후변화 등의 도시환경 시스템 과학과 접목되는 경향이 증가함에 따라 이전보다 더 정교하고 융복합적 접근을 요구하고 있다는 것이다. 이에 대한 대응으로서 다학제적 협업을 도모하는 지오디자인에 대한 연구는 조정학에서 더욱 비중 있게 다뤄져야 할 것이며, 과학적인 근거의 설계 활용성 역시 주요한 조정의 영역으로 인식되어야 할 것이다.

## 6. 결론

본 연구는 시카고 지역을 대상으로 그린인프라 서비스와 토지이용 변화 간의 관계성을 분석하고 평가할 수 있는 융합모델을 제안하였다. 2016년의 그린인프라 서비스에 대한 수요를 공간적으로 시각화하고 도시성장 패턴에 따라 2050년의 잠재적인 수요를 예측하였다. MCDA 모델을 통해 변화하는 도시환경 이슈에 따른 유동성을 부여했으며, LEAM 모델을 통해 도시의 역동성을 설명했다. 공간적으로 명확한, 그래서 멀티 스케일 분석을 가능케 하는 모델 출력물을 통해, 그린인프라 수요 분포에 잠재적인 공간적 이동을 밝혔으며 설계 단계에서 활용 가능한 그린인프라 배치에 대한 위치정보 또한 제공하였다.

그러나 LEAM-MCDA 모델의 유용성을 높이기 위해서는 추후 연구가 요구된다. 먼저, 다양한 도시성장 시나리오를 테스트하여 모델의 견고성(robustness)을 검증해야 할 것이다. 본 연구에서 적용한 공식 데이터 기반의

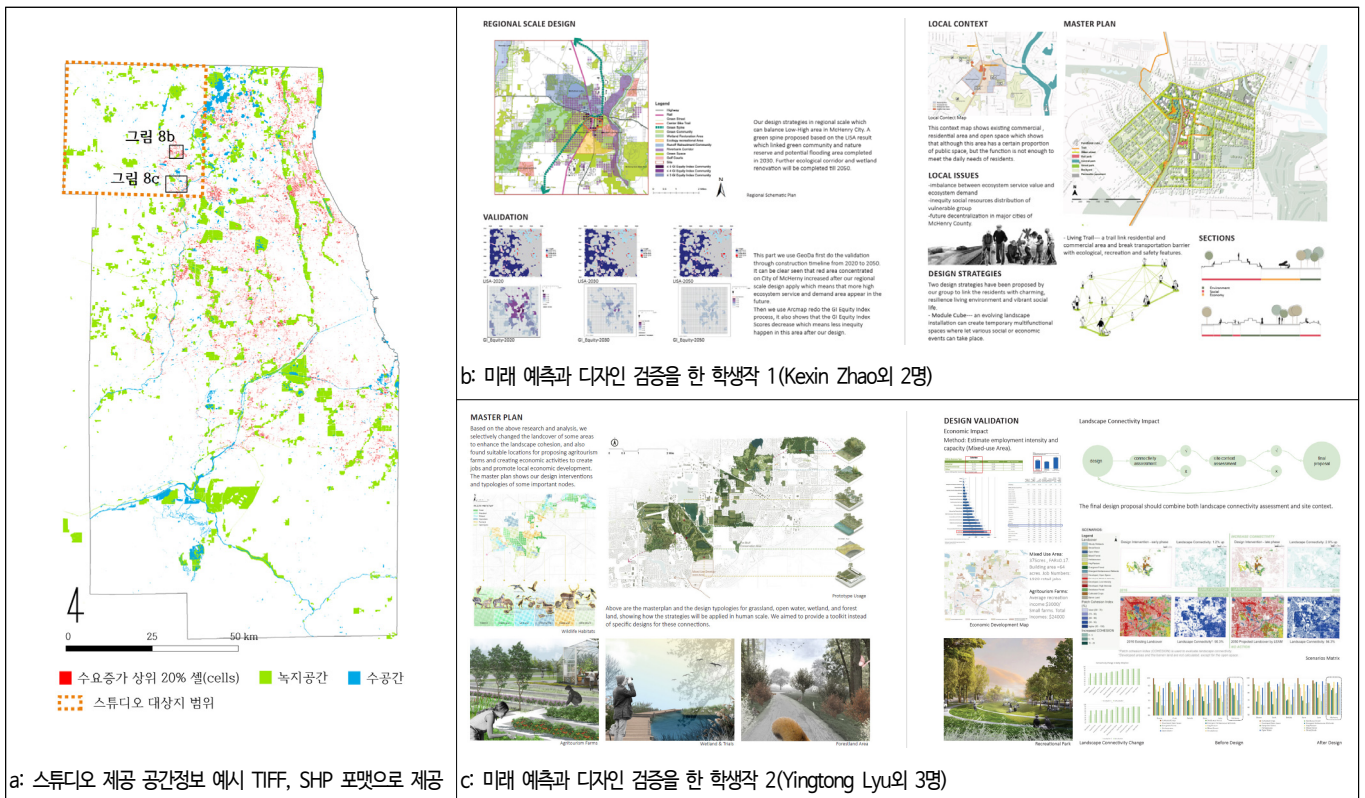


그림 8. 일리노이대학교 대학원 Fall 2020 근거기반디자인 스튜디오(Evidence-Based Design Studio)



'Business-as-Usual' 성장 시나리오 외에도 폭발적인 인구성장 혹은 인구감소 시나리오를 테스트하여 그린인프라 수요 변화에 대한 다각적인 고찰이 필요할 것이다. 둘째, 본 연구에서는 문헌을 기반으로 다섯 가지 그린인프라 서비스를 선택하였지만, 이해관계자와의 논의를 통해 지역적 특성을 더욱 적합하게 반영할 수 있는 추가적인 평가기준이 필요할 것이다. 기존의 선택부터 비중의 결정까지 정량적 데이터로는 평가할 수 없는 정성적인 컨텍스트가 참여형 의사결정과정을 통해 고려되어야 한다. 마지막으로 융합된 LEAM-MCDA 모델을 실제 PSS도구로 개발해야 할 필요성이다. 본 연구가 복잡한 모델의 설계 의사결정에서의 활용을 주장하기 위해서는 실제로 융합된 PSS모델을 개발하여 조정설계가 계획가와 그 유용성을 검증해야 할 것이다.

본 연구는 지오디자인의 관점에서 과학적인 방법론과 설계 의사결정을 연결하는 예시를 제안한다. 그간 많은 학자들이 지적해 온 과학과 설계 간의 간극은 ICT, AI의 등으로 대표되는 첨단기술이 일상에서 쉽게 접근 가능해짐에 따라 새로운 국면을 맞이하고 있다. 열섬현상, 해수면상승, 탄소중립 등의 복합적인 도시환경 이슈의 등장은 조경이 어떻게 과학적 연구를 물리적인 공간으로 풀어내는가에 대한 질문을 하고 있다.

본 논문은 시간과 공간에 따라 끊임없이 변하는 도시환경의 역동성의 관점에서, 그린인프라를 평가할 것을 주장한다. 장기적으로 이 불확실성에 대응할 수 있는 조정 공간을 만들어내기 위해서는 유동적인 계획과 멀티스케일의 설계가 접목이 되어야 할 것이다. 본 연구에서 제안된 LEAM-MCDA 모델은 그린인프라의 잠재력을 유동적이고 공간적으로 명확하게 평가하는 그 예시이다.

본 연구는 도시환경의 변화와 전략적 그린인프라 배치 사이의 동적인 관계를 이해하는 데 유용한 정보를 제공하며, 나아가 연구 결과물의 설계 의사결정과정에서의 활용을 제안한다. 과학적 방법론에 대한 교육을 통해 그 접근성(혹은 과학과 설계 간의 간극)을 낮춘다면, 장기적 그린인프라 계획뿐만 아니라 물리적 설계를 수립하는 데에 활용될 수 있음을 보여주었다. 본 연구가 그린인프라와 도시환경 시스템, 그리고 조경에 대한 폭넓은 논의에 기여할 수 있기를 바란다.

## References

1. Alberti, M.(2017) Simulation and Design of Hybrid Human-Natural-Technological Systems. *Technology|Architecture + Design* 1: 135-139.
2. Alberti, M. and J. M. Marzluff(2004) Ecological resilience in urban ecosystems: Linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban Ecosystems* 7: 241-265.
3. Alim, M. A., A. Rahman, Z. Tao, B. Garner, R. Griffith and M. Liebman(2022) Green roof as an effective tool for sustainable urban development: An Australian perspective in relation to stormwater and building energy management. *Journal of Cleaner Production* 362: 132561.
4. Allen, W. L.(2012) Advancing green infrastructure at all scales: From landscape to site. *Environmental Practice* 14: 17-25.
5. Boulange, C., C. Pettit, L. D. Gunn, B. Giles-Corti and H. Badland(2018) Improving planning analysis and decision making: The development and application of a walkability planning support system. *Journal of Transport Geography* 69: 129-137.
6. Cai, Z., Y. Kwak, V. Cvetkovic, B. Deal and U. Mortberg(2023) Urban spatial dynamic modeling based on urban amenity data to inform smart city planning. *Anthropocene* 42: 100387.
7. Champlin, C., M. te Brommelstroet and P. Pelzer(2019) Tables, tablets and flexibility: Evaluating planning support system performance under different conditions of use. *Applied Spatial Analysis and Policy* 12: 467-491.
8. Chen, S., Y. Kwak, L. Zhang, G. Mosey and B. Deal(2021) Tightly coupling input output economics with spatio-temporal land use in a dynamic planning support system framework. *Land* 10: 1-17.
9. Chicago Department of Water Management(CDWM)(2018) City of Chicago Stormwater Management Plan.
10. Chicago Metropolitan Agency for Planning(CMAP)(2016) Integrating Green Infrastructure.
11. City of Chicago(2014) Green Stormwater Infrastructure Strategy.
12. Cong, C., Y. Kwak and B. Deal(2022) Incorporating active transportation modes in large scale urban modeling to inform sustainable urban development. *Computers, Environment and Urban Systems* 91: 101726.



13. Davis, J., K. D. Pijawka, E. Wentz, M. Hale and D. A. King(2021) Evaluating geodesign for community-based tribal planning. *Journal of the American Planning Association* 87: 527–541.
14. Davoudi, S. and L. Porter(2012) Resilience: A bridging concept or a dead end? *Planning Theory & Practice* 13: 299–333.
15. Deal, B. and H. Pan(2016) Discerning and addressing environmental failures in policy scenarios using planning support system (PSS) technologies. *Sustainability* 9(1): 13.
16. Deal, B., V. Pallathucheril and T. Heavisides(2013) Ecosystem services, green infrastructure and the role of planning support systems. In Geertman, S., F. Toppen and J. Stillwell, eds., *Planning Support Systems for Sustainable Urban Development*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp. 187–207.
17. Deal, B., H. Pan, S. Timm and V. Pallathucheril(2017) The role of multidirectional temporal analysis in scenario planning exercises and Planning Support Systems. *Computers, Environment and Urban Systems* 64: 91–102.
18. Di Marino, M., M. Tiitu, K. Lapintie, A. Viinikka and L. Kopperoinen(2019) Integrating green infrastructure and ecosystem services in land use planning. Results from two finnish case studies. *Land Use Policy* 82: 643–656.
19. Dong, J., M. Lin, J. Zuo, T. Lin, J. Liu, C. Sun and J. Luo(2020) Quantitative study on the cooling effect of green roofs in a high-density urban Area—A case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production* 25: 120152.
20. Ernstson, H.(2013) The social production of ecosystem services: A framework for studying environmental justice and ecological complexity in urbanized landscapes. *Landscape and Urban Planning* 109: 7–17.
21. Fiksel, J.(2006) Sustainability and resilience: Toward a systems approach. *Sustainability: Science, Practice and Policy* 2: 14–21.
22. Gu, Y., B. Deal and L. Larsen(2018) Geodesign processes and ecological systems thinking in a coupled human–environment context: An integrated framework for landscape architecture. *Sustainability* 10: 3306.
23. Holling, C. S.(1973) Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4(1): 1–23.
24. Jiang, H., S. Geertman and P. Witte(2020) The effects of contextual factors on PSS usefulness: An international questionnaire survey. *Applied Spatial Analysis and Policy* 14: 221–245.
25. Kwak, Y. and B. Deal(2021) Resilient planning optimization through spatially explicit, bi-directional sociohydrological modeling. *Journal of Environmental Management* 300: 113742.
26. Kwak, Y., B. Deal and T. Heavisides(2021a) A large scale multi criteria suitability analysis for identifying solar development potential: A decision support approach for the state of Illinois, USA. *Renewable Energy* 177: 554–567.
27. Kwak, Y., B. Deal and G. Mosey(2021b) Landscape design toward urban resilience: Bridging science and physical design coupling sociohydrological modeling and design process. *Sustainability* 13: 4666.
28. Kwak, Y., C. Park and B. Deal(2020) Discerning the success of sustainable planning: A comparative analysis of urban heat island dynamics in Korean new towns. *Sustainable Cities and Society* 61: 102341.
29. Li, F., S. Guo, D. Li, X. Li, J. Li and S. Xie(2020) A multi-criteria spatial approach for mapping urban ecosystem services demand. *Ecological Indicators* 112.
30. Li, Y., L. Zhang, J. Qiu, J. Yan, L. Wan, P. Wang, N. Hu, W. Cheng and B. Fu(2017) Spatially explicit quantification of the interactions among ecosystem services. *Landscape Ecology* 32: 1181–1199.
31. Liao, K. H.(2012) A theory on urban resilience to floods—A basis for alternative planning practices. *Ecology and Society* 17.
32. Liu, J., T. Dietz, S. R. Carpenter, M. Alberti, C. Folke, E. Moran, A. N. Pell, P. Deadman, T. Kratz, J. Lubchenco, E. Ostrom, Z. Ouyang, W. Provencher, C. L. Redman, S. H. Schneider and W. W. Taylor (2007) Complexity of coupled human and natural systems. *Science* 317: 1513–1516.
33. Matta, A. and M. Serra(2016) A geodesign approach for using spatial indicators in land-use planning. *Civil Engineering and Architecture* 4: 183–192.

34. Meerow, S.(2019) A green infrastructure spatial planning model for evaluating ecosystem service tradeoffs and synergies across three coastal megacities. *Environmental Research Letters* 14.
35. Meerow, S. and J. P. Newell(2017) Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning* 159: 62–75.
36. Newell, J. P., M. Seymour, T. Yee, J. Renteria, T. Longcore, J. R. Wolch and A. Shishkovsky(2013) Green alley programs: Planning for a sustainable urban infrastructure? *Cities* 31: 144–155.
37. Norberg, J. and G. Cumming(2008) *Complexity Theory for a Sustainable Future*. Columbia University Press.
38. Pan, H., B. Deal, G. Destouni, Y. Zhang and Z. Kalantari(2018) Sociohydrology modeling for complex urban environments in support of integrated land and water resource management practices. *Land Degradation & Development* 29: 3639–3652.
39. Saaty, R. W.(1987) The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling* 9: 161–176.
40. Steinitz, C.(2012) *A Framework for Geodesign: Changing Geography by Design*. Esri.
41. Wang, Y. C., J. K. Shen and W. N. Xiang(2018) Ecosystem service of green infrastructure for adaptation to urban growth: Function and configuration. *Ecosystem Health and Sustainability* 4: 132–143.
42. Woodward, J. H.(2008) Envisioning resilience in volatile Los Angeles landscapes. *Landscape Journal* 27(1): 97–113.
43. Zhang, L., C. Cong, H. Pan, Z. Cai, V. Cvetkovic and B. Deal(2021) Socioecological informed comparative modeling to promote sustainable urban policy transitions: Case study in Chicago and Stockholm. *Journal of Cleaner Production* 281: 125050.