

기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델 기초연구: 선행연구 분석을 중심으로

홍나은

국토연구원 도시연구본부 도시정책·환경연구센터 연구원

A spatial decision support model for response to climate change based on a literature review

Hong, Na Eun

Researcher, Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong, Korea

ABSTRACT

Climate change significantly impacts urban areas, necessitating spatial adaptation strategies. Using spatial information and decision support systems, effective climate change response strategies can be developed, serving as vital tools for urban planners to mitigate climate risks and bolster resilience. However, discussion and development of systems for spatial decision support concerning climate change response remain insufficient. Therefore, this study aims to propose a framework for a spatial decision support model tailored to climate change adaptation in domestic contexts. The methodology involves collecting and analyzing global and domestic spatial decision support models for climate change adaptation. Using academic databases like SCOPUS and the Korea Citation Index, studies addressing climate change issues through spatial decision-making and applicable to actual spatial planning were reviewed. Through an analysis of previous research, the effective utilization of decision support systems in addressing spatial issues caused by climate change was thoroughly examined. Subsequently, a framework for a domestically applicable spatial decision support model aimed at enhancing responsiveness to climate change was developed. The framework comprises three phases: Intelligence, Design, and Choice. During the Intelligence phase, spatial problems arising from climate change are defined, and problem-solving directions are established. In the Design Phase, optimization methodologies analyze 'Objectives', 'Constraints' and 'Decision Variables' derived from grid-based spatial data to produce outputs. The Choice phase involves selection of the optimal alternatives among the outputs. This study emphasizes the significance of spatial decision support models for climate change adaptation and presents their potential for practical application.

Key words: Climate Change, Spatial Decision Support, Geodesign, Optimization

1. 서론

1.1. 연구 배경 및 목적

기후변화는 전 지구적으로 영향을 미치는 문제이며, 도시 지역에서 그 영향이 특히 두드러지게 나타난다. 도시

는 다양한 부문과 시스템이 유기적으로 상호작용하는 복잡한 공간이기에 에너지, 건물, 수송, 산림 등 다양한 분야에서 기후변화 문제의 영향을 받는다. 이러한 측면에서 다양한 공간 규모의 기후변화 완화 전략 패키지 이행은 여러 부문에 걸쳐 연쇄적인 효과를 긍정적으로 나타내는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2023). 그렇기에 기후변화 문

†Corresponding author : nehong@krihs.re.kr (Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong-si, 30147, Korea. Tel. +82-43-960-0252) **ORCID** [홍나은 0009-0002-6775-0079](https://orcid.org/0009-0002-6775-0079)

Received: March 6, 2024 / Revised: April 8, 2024 / Accepted: June 17, 2024

제에 효과적으로 대응하기 위해서는 공간상의 대응 전략 마련이 중요하다.

기후변화는 폭염, 폭우 등의 극심한 기후의 발생 확률이 높아지면서 홍수, 산사태 등 공간상의 위험을 일으킨다. 그리고 이러한 문제는 전 세계 곳곳에서 다양한 공간 규모로 일어나고 있다. 그리고 이에 대응하고자 공간계획의 일환인 기후변화 적응계획을 각 도시의 특성과 필요에 맞추어 에너지 효율, 교통 개선, 녹지 보전 등과 같은 여러 분야에 걸친 상호 작용을 고려하여 수립한다. 이렇듯 도시에서의 기후변화 대응 전략은 다양한 부문과 시스템 간의 상호 작용을 고려하며, 장기적이고 종합적인 계획을 통해서 오적응을 최소화(IPCC, 2023)하기 때문에 이러한 공간계획을 활용하여 기후변화 영향에 대응하는 방식은 중요하다.

기후변화에 대응하기 위한 지역적 조치가 중요해짐에 따라 공간 계획자들은 기후변화 대응에 대한 결정을 내려야 한다(Eikelboom and Janssen, 2017). 그리고 이 과정에서 공간정보는 기후변화의 공간적 영향을 고려하기 위한 핵심적 요소로 작용한다(Eikelboom and Janssen, 2017; Wilson, 2006). 더 나아가 IPCC 6차 종합보고서(IPCC, 2023)는 기후변화 대응이 다양한 부문과 시스템을 아우르는 복잡한 사항이기에 더 효과적이 되기 위해서는 통합된 의사결정이 필요함을 시사하였다. 공간정보와 의사결정 지원 체계의 활용은 홍수에 대한 리스크를 줄이거나(Sarker et al., 2020), 주거용 건물의 옥상녹화 최적 부지를 선정하는 등 기후변화에 대한 특정 적응 조치를 선택하는 데 있어 도시계획가에게 도움을 줄 수 있다(Mahdiyar et al., 2019). 공간적 접근법을 기후 데이터와 결합하면 기후변화가 특정 지역에 미치는 영향을 자세히 분석할 수 있으므로 보다 표적화된 방식으로 변화를 이해하고 대응할 수 있다(Wallace, 2018). 구체적으로 기후변화 대응을 위한 공간정보는 기후 모델링을 통해 미래의 기후변화를 예측하는 데이터, 과거 기후 데이터를 분석하여 추세를 파악하는 데이터, 지형 및 지리적 특성을 포함한 지리정보 데이터 등 다양한 형태로 제공되고 있다. 그리고 이러한 정보를 기반으로 특정 지역의 기후 변화에 대한 취약성을 분석하여 기후변화 적응계획이나 토지이용계획과 같은 적절한 공간계획을 대응책으로 마련하는 등의 공간 의사결정이 가능하다. 공간 의사결정 지원 모델은 Spatial Decision Support System (SDSS) 혹은 Decision Support Model (DSM)으로 알려져 있다. SDSS는 복잡한 공간 문제에 대해 특정한 의사결정 행위를 지

원하기 위해 설계된 시스템으로, 공간적으로 관련된 문제를 해결하는 데 도움을 줄 수 있는 컴퓨터 기반 정보체계를 의미한다(Densham, 1991; Lim, 2001). 이러한 체계는 다양한 분석모형의 선택적 조합으로 대안 시나리오를 작성함으로써 복잡한 도시 공간상에 전개되는 문제의 복수적이고 상충하는 목적들을 절충하고 조화하는 데 활용될 수 있다(Oh et al., 2009). 그러므로 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델은 공간정보를 바탕으로 구축한 의사결정 행위 지원체계로써 도시계획가들에게 기후변화에 대한 리스크를 줄이고, 대응력을 높일 수 있도록 도움을 줄 수 있기에 중요하다.

그럼에도 현재 기후변화에 의해 발생하는 문제에 대응하고자 공간상에서의 의사결정을 지원하는 방법에 대한 논의는 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히 기후변화의 결과는 불확실성, 다양성, 복잡성을 가짐에도(Eikelboom and Janssen, 2017) 기존의 도시관리 조치에서 기후변화 관련 대응계획 수립 미흡 등 기후변화에 대한 대응력이 부족한 측면을 보이고 있다(Preston et al., 2011; Wang et al., 2023). 해외에서는 기후변화 대응을 위한 적합한 전략 마련을 위하여 현재 구성된 공간계획 시스템의 개선 필요성이 제기되었다(Eikelboom and Janssen, 2017; van Buuren et al., 2013). 또한, 국내에서는 기후정보와 의사결정 지원 도구가 분산되어 제공되고 있어, 의사결정자들이 필요로 하는 통합된 기후변화 적응 의사결정 지원 시스템의 개발 필요성이 대두되고 있다(Hyun et al., 2020).

따라서 본 연구의 목적은 국내에 적용가능한 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델의 방향성을 제시하는 프레임워크를 제안하는 데 있다. 이를 위하여 먼저 선행연구 고찰을 통해 기후변화 영향에 의해 공간상에서 발생하는 문제를 효과적으로 대응하고자 의사결정 지원이 어떻게 활용되고 있는지 종합해 보고, 기후변화에 대한 대응력을 높이는 방향으로 개선된 국내에 적용가능한 공간 의사결정 지원 모델의 프레임워크를 구조화하였다.

2. 연구방법

2.1. 자료 수집

본 연구는 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델을 제시하고자 2017년부터 2023년까지 최근 7년간의 관련 모델을 제시한 국내외 연구를 균형 있게 검토하고자 하였다. 국외 연구로는 과거보다 개선된 최근 7년간의 관

련 모델을 파악하고자 하였다. 국내 연구로는 향후 본 연구에서 구축할 모델의 국내 적용가능성 검토 차원에서 현재 우리나라가 기후변화 대응을 위해 공간 의사결정 지원 모델을 얼마나 어떻게 활용하고 있는지 그 수준을 파악하고자 수집 및 분석되었다.

국외 자료는 ‘SCOPUS (www.scopus.com/, 2023.8.31. 기준)’ 학술 검색엔진을 통해 수집하였으며, ‘Climate Change’, ‘Spatial Decision Support System’, ‘Decision Support System’, ‘Geodesign’ 등을 주요 검색어로 사용하였다. 특히, 공간 의사결정 분야에서 ‘Spatial Decision Support System’은 다양한 공간규모에서의 용도 배분, 특정 시설물의 적지 선정 등에 활용되고 있는 개념이다. 국내 자료는 ‘한국학술지인용색인(https://www.kci.go.kr/kciportal/po/search/poArtiSear.kci, 2023.8.31. 기준)’을 통해 수집하였으며, 이는 국내에서 관련 모델을 활용하거나 제안한 연구들을 포함하도록 하였다. 국외의 경우 ‘Climate Change’와 ‘Spatial Decision Support System’ 키워드 검색결과 약 456건, ‘Climate Change’와 ‘Decision Support System’으로 약 2,058건, ‘Climate Change’와 ‘Geodesign’으로 약 16건의 연구가 검색되었다. 국내의 경우 KCI 등재를 기준으로 ‘Spatial Decision Support System’ 키워드 검색결과 약 94건, ‘Decision Support System’ 키워드 검색결과 약 881건의 연구가 검색되었으나, 게재된 학술지의 분야 및 특성, 논문 내용을 검토하여 다음의 조건을 만족하는 논문들을 최종적으로 선정하였다. 첫째, 개별 논문에서 기후변화 영향에 따른 공간 문제를, 의사결정을 통해 해결하고자 시도하여야 한다. 둘째, 주요 결과가 공간 계획에 적용될 수 있어야 한다. 셋째, 분석 내용 및 결과물의 공간단위가 국내 지자체 환경 계획에 적용가능한 범위여야 한다.

위의 조건을 만족하는 논문을 선정하는 과정에서 ‘Environmental Science’와 ‘Social Science’로 학문 분야를 한정하였으며, 의사결정 지원 시스템 소프트웨어 개발 자체에 집중하는 소프트웨어 분야의 학회지가 제외되었고, 기후변화 전략, 환경 계획 및 관리, 도시 계획 등 응용 분야 학회지에 게재된 논문이 선택되었다. 이밖에, 연구의 전체적인 내용이 본 연구의 자료 수집 조건에서 다소 벗어난 내용을 다루더라도 연구의 일부에서 활용되어 기술된 기후변화에 따른 공간 의사결정을 지원하는 모델 혹은 도구가 앞선 자료 수집 조건에 부합한다면 이를 반영하였다. 이에 따라, 관련 선행연구 중 국외 4건(Dunnett et al., 2018; Eikelboom and Janssen, 2017; Roest et al., 2023;

Wang et al., 2023), 국내 2건(Hyun et al., 2020; Yoon et al., 2018)으로 총 6건의 선행연구를 최종 선정하였다.

Eikelboom and Janssen (2017)은 기후변화에 따른 경작지 피해를 최소화하기 위하여 토지이용에 대한 의사결정 지원 모델을 연구하였다. Dunnett et al. (2018)은 기후변화에 따른 농업 생산 공간 최적화를 위한 의사결정 지원 모델을 연구하였다. Roest et al. (2023)은 기후변화에 따른 도시공간의 피해를 최소화하고자 그린인프라 공간 최적화를 위한 의사결정 지원 모델을 연구하였다. Wang et al. (2023)은 기후변화에 따른 홍수 관리를 위하여 그린인프라 최적화 구역을 의사결정 지원하는 모델을 연구하였다. Yoon et al. (2018)은 연구의 일부로써 기후변화 영향을 최소화하고 이에 적응할 수 있는 용도계획을 의사결정 지원하는 모델의 시범적용을 수행하였다. Hyun et al. (2020)은 국내 기후변화 적응대책 세부시행계획의 의사결정 지원 전략 방향을 연구하였다.

2.2. 수집된 연구의 분석

수집된 연구들에 본 연구의 목적과 공간 의사결정 지원 모델(Spatial Decision Support Model)의 특성을 중심으로 내용 분석을 적용하였다. 내용분석은 특정하게 수집한 연구들로부터 상이한 연구 상황에서도 동일한 연구기법 적용 시 동일한 결과가 도출되도록 반복가능하고 타당한 결론을 끌어내는 방법론이다(Choi et al., 2016). 해당 방법론은 연구자의 주관적인 판단에 의한 오류 가능성으로 인하여 신뢰도 검증이 중요하기에(Lee and Lee, 2015) 본 연구자를 포함한 국내 관계 전문가 4인의 검증을 실시하였다. 조경학, 도시계획, 도시환경공학, 환경계획 분야에서 각 3년, 5년, 6년, 7년 이상의 연구 경력을 가진 전문가로 구성하였으며, 11회에 거친 선행연구 리뷰 논의를 통하여 프레임워크 구축 시도와 반복적 수정 개선, 모델 프레임워크의 적합성 검토, 국내외 연구 경향성 판단 검토 등을 수행하였다. 이러한 전문가 검증 의견은 결과 및 고찰에 반영되었다.

기후변화 대응에 있어 공간계획과 의사결정 지원 연구를 대상으로 한 내용분석의 사례가 없고, 다루고자 하는 내용적 범위가 한정되어 있기 때문에 공간 의사결정 지원 모델을 문제파악 단계(Intelligence Phase), 설계 및 분석 단계(Design Phase), 선택 단계(Choice Phase)로 구분하는 세 가지 절차(Malczewski, 1999; Simon, 1960)를 분석의 틀로 적용하였다. 그리고 이러한 절차는 본 연구의 모델 프레임워크 구조화에도 기반이 되었다.

공간 문제파악 단계(Intelligence Phase)에서는 수집된 연구가 기후변화 영향에 따라 발생한 지역 문제를 어떻게 정의하고, 공간 의사결정 지원 모델을 활용하고자 하였는지 파악하고자 하였다. 수집된 연구는 기후변화에 따라 영향을 받거나, 영향이 예상되는 실제 대상지를 활용한 연구들이다. 다시 말해, 각 연구에서 기후변화에 따른 문제 해결을 위하여 의사결정을 수행하고자 설정한 연구대상지의 공간 규모를 파악하고, 기후변화 영향에 따른 공간에서의 문제를 어떻게 정의하여 문제해결 방향성을 설정하였는지 분석하였다. 그리고 설정한 방향성에 따라 모델에서 활용하고자 하는 공간 데이터의 형식을 종합하였다.

설계 및 분석 단계(Design Phase)에서는 수집된 연구가 기후변화에 따른 공간 문제에 대응하기 위하여 의사결정 지원 모델을 어떻게 설계하고 관련 데이터를 분석하였는지 파악하고자 하였다. 이에 따라 본 단계에서는 수집된 연구에서 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델이 채택한 공간 데이터 분석 방법론은 무엇이고, 분석에 활용된 변수들을 어떻게 구성하였는지 종합하였다.

선택 단계(Choice Phase)에서는 수집된 연구가 기후변화에 따른 공간 데이터 분석을 통해 의사결정을 지원하는 여러 가지 대안들을 도출하고 그 중에서 최적의 대안을 어떻게 선택하였는지 파악하고자 하였다. 이에 따라 본 단계에서는 기후변화를 공간상으로 대응할 때 설계 및 분석 단계에 뒤이어 선택 단계에서 수행이 필요한 절차는 무엇이고, 수집된 연구에서 최적의 대안을 선택하도록 어떠한 지원 절차를 수행하였는지 종합하였다. 더불어, 각 연구에서 도출한 최적의 대안을 바탕으로 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델이 가지는 효과 및 활용성을 분석하였다.

2.3. 모델 프레임워크 구조화

IPCC (2014)는 과학이 아닌 사용자의 니즈(needs)가 바탕이 되어, 사용자와 연구원 간의 논의를 통해 효과적인 의사결정 지원이 이루어질 수 있다는 원칙을 제시하였다. 유사한 개념으로 ‘의사결정 규칙’이란 평가기준에 대한 가중치가 부여된 이후 이를 근거로 하여 대안의 순위를

결정하는 일련의 규칙들을 의미한다(Lee, 2000). 즉, 의사결정 지원 모델은 설계 및 분석 단계에서 사용하기 쉬운 규칙 옵션을 제공하며 이에 대한 의사결정자의 선호도를 바탕으로 선택 단계에서 의사결정 시뮬레이션이 가능해야 한다. 더 나아가, Wenkel et al. (2013)에 따르면 기후변화 관련 의사결정 지원 모델은 최첨단 지식을 대화식으로 전달하고, 사용하기 쉬운 지역 기후정보를 제공하며, 적응 옵션 시뮬레이션이 가능하도록 발전해야 한다. 이렇듯 최근에는 의사결정 지원 모델이 지리 정보 시스템(GIS)을 기반으로 도시의 녹지나 흙이 덮힌 회색 공간의 패턴을 평가할 수 있고, 이를 통해 공공 및 민간의 공간 모두에서 기후 적응 조치를 매핑(Mapping)할 수 있다고 정의된 바 있다(Roest et al., 2023).

이러한 원칙을 바탕으로 본 연구는 ‘기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델’ 프레임워크의 기본 골격을 Malczewski (1999)의 프레임워크에 기초하였다(Fig. 1). 해당 프레임워크는 문제파악, 설계 및 분석, 선택의 세 단계로 구성된 일반적인 의사결정의 과정에(Simon, 1960) 다기준 의사결정 분석(Multi-Criteria Decision Anlysis, MCDA)과 공간 지리 정보체계를 결합한 프레임워크이다. 이는 근거 기반의 의사결정지원에 대한 일반화된 접근법으로서(Kim, 2021; Rahman, 2023), 기후문제에도 응용이 가능할 것으로 판단하였다. 다만, 기후변화 대응의 관점에서 Malczewski (1999)가 제안한 의사결정의 각 단계를 구체화 및 고도화하는 것은 선행연구 분석을 통해 얻은 지식을 재료로 활용하는 창의적 과정이기에, 2023년 9월 8일부터 2024년 2월 29일까지 11회에 걸친 관계 전문가 간 체계적 논의를 통해 객관성을 유지하고자 하였다. 처음 1~3회차 회의에서는 본 연구가 도출하고자 하는 프레임워크에서 기후변화 문제와 연계하기 위하여 포함되어야 하는 핵심어와 분석방법론, 불확실성에 대한 내재화 방안 등을 논의하였다. 다음으로 4~7회차 회의에서는 의사결정 과정의 주요한 단계를 정립한 다음 선행연구에서 제시된 의사결정 지원 모델과 비교하여 수정 및 보완하였다. 8~10회차 회의에서는 국내에서 실제 활용 가능한 정보의 범위 등을 고려하여 프레임워크를 구체화하였고, 마지

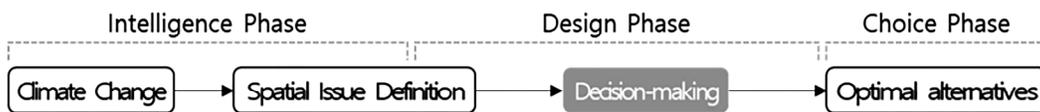


Fig. 1. Structuring the model framework

막 11회차 회의에서는 각 단계별, 단계 내 구성요소별 상호 관계성에 따라 링크를 정리하였다.

위의 내용이 시간의 흐름에 따른 프레임워크 구축 과정에 관한 것이라면, 다음은 의사결정의 세 단계 측면에서 주요하게 고려하였던 요소를 구조화한 것이다. 첫 번째 절차인 문제파악 단계에서는 지역 문제를 정의하고, 문제 해결을 위한 방향성을 설정하여야 한다. 특히, 기후변화 정보를 반영하여 의사결정을 지원하는 경우에는 이해관계자의 가치와 상황적 지식에 대한 고려의 중요성과, 지역의 기후정보를 생성하기 위한 기계학습 등의 새로운 방법론의 필요성이 대두되고 있다(Lampsey et al., 2023). 설정된 방향성에 따라 두 번째 절차인 설계 및 분석 단계에서 문제를 해결할 최적의 대안을 도출하는 방법론을 선정하여 분석모형을 설계하여야 한다. 이때, 의사결정자가 모형분석을 통하여 결정할 대상(Decision Variables)을 명확히 설정하고 분석의 기준이 되는 요인(Objectives)과 제약으로 작용하는 요인(Constraints)은 무엇인지 파악할 필요가 있다. 마지막으로, 모델이 기계학습 등으로 자동화될수록 대안으로 제시하는 결과물의 양이 많아지고, 그만큼 기후변화 시나리오의 불확실성도 높아지기에 의사결정자가 결과물 중에서 최적의 대안을 선택할 수 있도록 지원하는 사항은 필수적이다. 따라서 선택 단계에서는 분석모형의 결과물 중에서 최적의 대안으로 무엇을 선택할지 지원하도록 구조화하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 문제파악

선행연구 대부분은 기후변화 영향에 따라 공간에서 발생한 문제를 정의하고, 이를 해결하고자 의사결정 지원 모델을 활용하였다(Table 1). 수집된 연구가 다루고 있는 대상지의 공간적 규모는 약 0.16km²(Yoon et al., 2018)부터 약 94km²(Dunnett et al., 2018)까지 그 규모가 다양하였다. 수집된 국외 연구에서 공간 규모에 상관없이 공통적으로 정의한 ‘기후변화 영향에 따른 공간상의 문제’는 ‘홍수 위험으로 인한 수위 상승’이었다(Dunnett et al., 2018; Eikelboom and Janssen, 2017; Roest et al., 2023; Wang et al., 2023). 반면, 국내의 연구는 가상의 공간을 대상으로 의사결정 지원 모델을 시범적용한 연구(Yoon et al., 2018)이거나, 의사결정 지원 모델이 사용자에게 제공하는 서비스를 소개하는 연구(Hyun et al., 2020)이기에

대상지의 실체가 존재하지 않아 공간상의 문제를 전반적인 ‘기후변화 영향’으로 정의하고 있었다.

수집된 4건의 국외 연구는 공간상의 문제 해결 방향성을 크게 ‘농업 생산 공간 최적화(Dunnett et al., 2018; Eikelboom and Janssen, 2017)’ 또는 ‘그린인프라 공간 최적화(Roest et al., 2023; Wang et al., 2023)’로 설정하였다. 이와 달리 2건의 국내 연구(Hyun et al., 2020; Yoon et al., 2018)에서는 공통적으로 ‘기후변화 적응형 공간 조성’을 의사결정 지원 모델의 목적으로 설정하였다. 이러한 원인은 국내에서 2011년부터 국가기후변화적응대책을 5년마다 수립하는 등 국가와 지방자치단체가 기후위기 대응을 위한 각종 계획의 수립과 사업의 집행을 지속적으로 추진(KACCC, 2024a)함에 따라 이를 지원할 도구로써 의사결정 지원 모델을 이해하고 있기 때문으로 전문가 검증 을 통하여 판단하였다.

또한, 설정한 공간 문제 해결 방향성에 따라 의사결정 지원 모델에서 활용한 공간 데이터의 형식을 구분할 수 있었다. 벡터(Vector) 데이터를 임의의 토지 구획 단위로 구분 지어 사용한 연구는 2건(Dunnett et al., 2018; Eikelboom and Janssen, 2017)이었다. 이는 점, 선, 다각형을 사용하여 지리적 특징을 표현하는 작업을 포함하기에 임의로 구획한 토지 영역 내 자원의 양을 결정하거나 경관을 재설계하는 등의 공간 데이터 분석을 가능하게 한다(Gharari et al., 2020). 반면, 격자(Grid) 데이터를 사용한 연구는 4건(Hyun et al., 2020; Roest et al., 2023; Wang et al., 2023; Yoon et al., 2018)이었다. 격자 데이터의 활용은 각 셀에 동일한 크기와 모양을 사용하므로 여러 영역을 일관되게 측정하고 비교를 가능하게 한다. 특히 세부 정보가 많은 작은 셀일수록 연구자가 작은 변화와 패턴까지 식별하여 공간에 대한 다양한 분석을 가능하게 한다(Althoff et al., 2021). 이 중 2건의 국내 연구가 격자 데이터를 활용하였는데, 이는 서로 다른 지자체가 동일한 환경에서 기후변화 공간 의사결정 지원을 수행할 때 행정구역의 제약 없이 대상지역을 설정하여 공간분석이 가능(Kang, Wang et al., 2021)하도록 해야 하기 때문으로 전문가 검증을 통하여 판단하였다.

3.2. 설계 및 분석

3.2.1. 공간 데이터 분석 방법론

수집된 연구는 공통적으로 공간 데이터를 분석하여 최적의 대안을 도출하는 의사결정 지원 모델을 제시하였다.

그리고 최적의 대안을 도출하는 공간 데이터 분석 방법론을 크게 ‘알고리즘을 활용한 최적화 분석’과 ‘지도 기반 다기준 분석(Map-based Multi Criteria Analysis)’으로 구분하여 적용하였다(Table 1).

수집된 연구 중 ‘알고리즘을 활용한 최적화 분석’ 방법론을 적용한 연구는 3건(Dunnett et al., 2018; Wang et al., 2023; Yoon et al., 2018)이었다. 이 중 2건(Wang et al., 2023; Yoon et al., 2018)이 공통적으로 비지배 정렬 유전 알고리즘-II(Non dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)를 이용하여 의사결정을 위한 최적 대안을 도출하였다. 이는 여러 목적을 가진 최적화 문제에서 상충하는 목적 함수 간의 관계를 이해하고 생물의 진화를 모방하여 비지배 해를 찾아 효과적으로 최적의 대안을 도출하는 기법인 다목적 유전 알고리즘의 하나이다(Lee et al., 2017). 이 밖에도 Dunnett et al. (2018)은 제약요인(Constraints)을 효율적으로 할당하여 목적함수를 최대화하거나 최소화하여 최적의 대안을 도출하는 기법인 선형 계획법(Linear Programming, LP)을 사용하였다. 해당 연구가 분석에 대하여 일반적인 모델 알고리즘을 구성하는 것으로 간주될 수 있는 일련의 순차적 최적화를 수행하였다고 밝힘에 따라, 본 연구에서는 선형계획법을 ‘알고리즘을 활용한 최적화 분석’ 방법론으로 분류할 수 있을 것으로 전문가 검증을 통하여 판단하였다.

반면, ‘지도 기반 다기준 분석’ 방법론은 여러 제약 또는 목표를 바탕으로 의사결정 대안의 특성을 평가, 비교한 결과를 제시하는 방법으로 GIS가 주로 이 결과를 매핑하는데 사용된다(Arciniegas et al., 2011). 수집된 연구 중 해당 방법을 사용한 연구는 3건(Eikelboom and Janssen, 2017; Hyun et al., 2020; Roest et al., 2023)이었다.

3.2.2. 분석에 활용된 변수 구성

수집된 연구는 공간 데이터 분석 방법론에 따라 의사결정 지원 모델을 설계하고 관련 데이터를 분석하였다. 수집된 연구의 대부분은 의사결정자가 분석을 통하여 결정할 대상(Decision Variables)을 명확히 설정하고, 연구대상지 관련 데이터베이스를 토대로 크게 기준요인(Objectives)과 제약요인(Constraints)을 구분하여 공간에 대한 계획기준을 정립하였다(Table 1).

의사결정 변수(Decision Variables)는 ‘의사결정을 위하여 변경할 수 있는 선택항목’으로 보았으며 이는 홍수 위험 감소, 수질 개선, 도시 미관 향상, 생물 다양성 증진 등 이해관계자의 특정 요구 및 우선 순위와 같은 선호도에

따라 값이 달라질 수 있는 사항으로 보았다(Hyun et al., 2020; Wang et al., 2023). 또한, Wang et al. (2023)은 기준요인을 ‘최적화 분석의 목표’로 보았으며, 이를 의사결정 과정을 안내하고 최종 선택할 대안이 원하는 목표를 충족하는지 확인하는 기준 역할을 수행하는 것으로 보았다. 그리고 제약요인은 의사결정 변수에 대한 제한 및 조건을 설정하는데 사용하였다.

의사결정 변수는 분석의 결과로서 확인이 가능하였기에 수집된 연구 6건에서 공통적으로 구분이 가능하였다. 기준요인과 제약요인에 대한 개념 구분을 직접적으로 언급한 연구는 3건(Dunnett et al., 2018; Hyun et al., 2020; Wang et al., 2023)이 있다. 기준요인과 제약요인 개념을 직접적으로 구분짓는 언급을 하지 않은 연구도 있었으나 크게 기준요인은 분석의 목적 성격을 가지는 정보이고, 제약요인은 분석 시 반드시 지켜져야 하는 조건부 성격을 가지는 정보라는 측면에서 활용된 데이터의 요인 구분이 가능하였다(Yoon et al., 2018).

3.3. 선택

3.3.1. 최적의 대안 선택의 지원

수집된 연구는 선택 단계에서 공통적으로 설계 및 분석 단계에서 제시된 여러 가지 대안들 중 의사결정자가 최적의 대안을 선택할 수 있도록 지원하는 절차를 수행하였다(Table 1). 설계 및 분석 단계의 결과는 평가와 검증을 거쳐 최종적으로 의사결정을 위한 공간해석 지식과 정보로서 채택된다(Kim and Lim, 2004). 특히, NSGA-II는 동시에 최적의 목적함수를 모두 달성할 수 없기에 이를 통한 모델을 교정하여 최상의 시나리오에서 최악의 시나리오까지 순위를 매겨 의사결정을 최종 지원해야 한다(Wang et al., 2023). 즉, 수집된 연구에도 마찬가지로 기후변화에 따른 공간 데이터 분석을 통해 의사결정을 지원하는 여러 가지 대안들을 도출하고 그 중에서 최적의 대안을 선택하였다.

설계 및 분석 단계에서 알고리즘을 활용한 최적화 방법론을 적용한 연구들(Dunnett et al., 2018; Wang et al., 2023; Yoon et al., 2018)은 공통적으로 목표 간의 절충점을 분석함으로써 최적의 대안을 선택하도록 지원한다. Wang et al. (2023)은 최적화 분석의 목적이 되는 기준요인으로 홍수 피해 조절 구역과 총 유출량 조절 구역 각각에서 피해와 유출량 최소화, 그리고 수명 주기 비용(Life Cycle Cost) 최소화를 설정하였기에 최적화를 통해 얻을

수 있는 다양한 조합의 형태인 여러 대안들을 대상으로 비용과 혜택의 균형을 찾는 파레토 프론트 솔루션(Pareto Front Solution)을 사용하여 기준요인 측면에서 대안들을 종합하였다. 이후 최상의 시나리오에서 최악의 시나리오까지 순위를 매겨 의사결정을 최종 지원하는 유사도에 따른 선호도 순위 기법(Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)을 수행하여 대안의 우선순위를 찾아내었다. Yoon et al. (2018)은 기준요인으로 공간패턴의 컴팩트와 피해 비용을 최소화하도록 설정하였기에 최적화를 통해 얻을 수 있는 여러 대안들을 대상으로 초래할 비용과 편익을 비교·분석하는 비용 편익 분석(Cost-Benefit Analysis, CBA)을 수행하여 기후변화에 따른 토지이용 시나리오의 피해비용 수준, 그린인프라 설치에 따른 연간 소요되는 비용수준 등을 평가함으로써 기준요인 측면에서 대안들을 종합하여 최적의 대안을 선택할 수 있도록 지원하였다. Dunnett et al. (2018)은 트레이드 오프 분석(Trade-off analysis)을 수행하여 대안의 우선 순위를 정할 수 있는 정보를 얻었다. 이 분석에서는 Latin-Hypercube 샘플링을 활용하여 의사결정 공간상에서의 각 최적화 목표별 가능한 최상과 최악의 결과를 찾아내고, 다양한 목표 사이에서 최적의 균형점을 찾아내었다. 라틴 하이퍼큐브 샘플링은 다양한 테스트 시나리오를 만들어 각 목표 달성의 다양한 수준을 탐색하는 기법이다.

수집된 대부분의 연구(Eikelboom and Janssen, 2017; Hyun et al., 2020; Roest et al., 2023; Wang et al., 2023; Yoon et al., 2018)는 분석 결과를 맵핑한 지도 형태의 시각화된 결과물로 즉각 제공함으로써 의사결정자에게 피드백하였다. 그러나, 설계 및 분석 단계에서 지도 기반 다기준 분석을 수행한 연구(Eikelboom and Janssen, 2017; Roest et al., 2023)는 목표 간의 절충점을 정량적으로 분석하는 과정 없이 시각화된 결과물을 바탕으로 의사결정자 간의 협의를 통하여 최적의 대안을 선택하도록 정성적 지원을 하였다. 그럼에도, Hyun et al. (2020)은 시각화된 적응경로를 바탕으로 의사결정자 간 협의를 통하여 최적의 대안을 선택하는 정성적인 방법 외에도 기후 적응대책 세부시행계획 항목별 비용편익분석을 수행하였다. 이는 ‘계획수립권자의 가치’가 최대화 되어야 하는 기준요인에 비용의 최소화가 포함되어 있거나, 국내 기후변화 의사결정 지원 시스템의 객관적이고 정량화된 정보 제공 어려움의 한계를 극복하고자 정량과 정성의 선택 지원 절차를 수행한 것으로 전문가 검증을 거쳐 판단하였다.

이밖에 의사결정 문제의 불확실성을 다루기 위해서는

서로 다른 시나리오 하에서 가능한 결과에 대해 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 수행할 수 있다(Lim, 2001). 이러한 맥락에서 기후변화 시나리오와 토지이용 변화율에 대한 민감도 분석을 실시한 연구가 1건(Dunnett et al., 2018) 있었으며, 해당 연구는 결과에 가장 큰 영향을 미치는 요인을 파악하고, 결과의 일관성을 검증할 수 있기에 미래의 기후변화 혹은 사회·경제적 변화 불확실성에 관계 없이 최적화 분석 결과가 대안을 도출하는지 확인하고자 하였다. 이때 민감도 분석은 최적화 분석 외의 범위에서 수행되었으며, 기후변화의 경우 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 및 RCP 8.5 시나리오 범위에서 2020, 2050, 2080년대의 작물 총 생산량(kT)을 비교 파악하여 선택한 최적의 대안이 강력(Robust)한지, 그리고 다양한 미래 상황에서 잘 작동할 수 있는지 확인하였다. 토지이용의 경우는 그 변화 속도가 작물 성장, 기술 및 비용에 영향을 어떻게 미치며, 이러한 영향을 모델이 처리할 수 있는지 확인하였다. 국내에서는 Hyun et al. (2020) 또한 기후변화 적응 조치가 효과적이고 가장 필요한 지역을 대상으로 하는지 확인하려면 민감도를 고려하는 것이 중요하다고 강조한 바 있다.

3.3.2. 효과 및 활용성

기후변화에 대응하기 위한 공간 의사결정 지원 모델은 모두 공간 데이터를 활용하여 기후변화에 따른 위험이나 피해를 줄이는 최적의 대안을 도출하는 것에 초점을 두고 있다.

이 중 알고리즘을 활용한 최적화 방법론을 적용하여, 다양한 결정 변수에 대한 객관적이고 정량적인 결과를 도출한 연구는 3건(Dunnett et al., 2018; Wang et al., 2023; Yoon et al., 2018)이었다. 알고리즘 기반 최적화를 적용한 공간 의사결정 지원 모델은 토지이용, 농업, 그린인프라 등 기후변화와 관련한 다양한 분야에서 활용되며, 기후변화 대응 전략 수립에 있어서 효과적인 의사결정을 가능하게 하였다.

수집된 연구들 중 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 모델의 선택 단계에서 비용과 편익을 종합적으로 고려함으로써 최적의 대안을 선택할 수 있도록 지원하는 연구는 4건(Dunnett et al., 2018; Hyun et al., 2020; Wang et al., 2023; Yoon et al., 2018)이었다. 이러한 고려는 대안들 간의 비교에 있어 객관적이고 정량적인 기준을 제공을 하였으며, 기후변화에 대응하는 계획을 수립함에 있어 한정된 예산의 효율적 활용에도 반영될 것으로 전문가 검증을 통

Table 1. Summary of the phases of the preceding research model

References	Intelligence Phase			Design Phase						Choice Phase		
	Study area	Area size	Definition of spatial problems	Setting the direction for problem-solving	Spatial data format	Methods for spatial data analysis	Objectives	Constraints	Decision variables	Methods for supporting decision-making		
Eikelboom and Janssen (2017)	Sweden, Stockholm	50km ²	Vector (using arbitrary land units ¹⁾)	Risks of soil subsidence, and water management	Optimization of agricultural production spaces	• To make land-use adoption decisions for a range of stakeholders	Map-based multi criteria analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Maximization of stakeholder value • Minimization of damages resulting from reduced goals of stakeholders affected by other stakeholders 	<ul style="list-style-type: none"> • Land use type • Water level 	<ul style="list-style-type: none"> • Land use (purpose) • Location for implementation 	qualitative	<ul style="list-style-type: none"> • Decision maker consensus through (map) visualization
Dunnett et al. (2018)	India, Bihar	94km ² ¹⁾	Vector (using arbitrary land units ²⁾)	Risks of flooding, drought, heat		• To identify location specific technological options and prioritize them for climate change adaptation in agriculture	The optimization method utilizing an algorithm (linear programming)	<ul style="list-style-type: none"> • Minimization of CO2 emissions • Maximization of crop production • Maximization of farm margin NPV 	<ul style="list-style-type: none"> • Land use change • Land type: distinguishing between irrigated land and non-irrigated land • Farm size • Costs: labor, water access, working capital, etc. • Constrained access to specific technologies • Minimum target harvest • Maximum affordable cost for investment 	<ul style="list-style-type: none"> • Crop type • Agricultural technology package • Timing of investment 	quantitative	<ul style="list-style-type: none"> • (within optimization analysis) trade-off analysis • (outside optimization analysis) sensitivity analysis
Roest et al. (2023)	Netherlands, Groningen	4km ² ³⁾	Grid	Risks of flooding, drought, and heat	Optimization of Green Infrastructure (GI) spaces	• To find spatial opportunities for implementing climate adaptation measures in both public and private spaces	Map-based multi criteria analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Minimization of the impact of heatwaves, floods, and droughts on urban areas • Maximization of subsidy usage amount 	<ul style="list-style-type: none"> • Land use status: NDVI, NDWI, GRVI, SR, albedo, run-off coefficients, greenness, greyness, neighborhood typology • Climate parameters: Temperature, the amount of rain • Status of subsidy payments 	<ul style="list-style-type: none"> • Location for implementing climate adaptation measures 	qualitative	<ul style="list-style-type: none"> • Decision maker consensus through (map) visualization

1) The information refers to details inferred from the research content, despite the absence of specific mentions within the reference.

2) Bihar was divided into 34 homogeneous parcels of land, resulting in 194 land units.

3) Represented by 5 neighborhood clusters, with a maximum range of 80 hectares applied as suggested in Farr's (2008) sustainable neighborhood clusters.

4) In accordance with the mention of setting up a simple virtual space with 400 grids of 20m×20m each, as mentioned in the reference.

Table 1. Summary of the phases of the preceding research model (Continued)

References	Intelligence Phase			Design Phase						Choice Phase	
	Study area	Area size	Definition of spatial problems	Setting the direction for problem-solving	Spatial data format	Methods for spatial data analysis	Objectives	Constraints	Decision variables	Methods for supporting decision-making	
Wang et al. (2023)	China, Dongying	4.0332km ²	Grid	Risks of flooding	Optimization of Green Infrastructure (GI) spaces	• To make GI adoption decisions	The optimization method utilizing an algorithm (NSGA-II)	<ul style="list-style-type: none"> • Minimization of damages caused by rainfall • Minimization of total runoff • Minimization of life cycle cost 	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum area available for GI installation • Volumetric capture rate of annual rainfall for GI • Suitability index (land use, slope, soil, building buffer, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • GI type • GI size • GI location 	quantitative <ul style="list-style-type: none"> • Pareto front solution • TOPSIS
Yoon et al. (2018)	South Korea, Virtual Space	0.16km ⁴)	Grid	Virtual damages	Creation of climate change adaptive spaces	• To make land-use adoption decisions	The optimization method utilizing an algorithm (NSGA-II)	<ul style="list-style-type: none"> • Minimization of total damage cost from land use scenarios • Maximization of compactness of land use spatial patterns 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribution ratio of area by land use type: development area, agricultural area, natural area 	<ul style="list-style-type: none"> • Land use (purpose) • Location for implementation 	quantitative <ul style="list-style-type: none"> • Cost-Benefit Analysis (CBA)
Hyun et al. (2020)	South Korea	Administrative area	Grid	Climate change adaptation sector-specific damages		• To find opportunities for implementing climate adaptation projects and policies for policy makers	Map-based multi criteria analysis ¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> • Minimization of damages from climate change • Maximization of value for planners¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> • Regional status information • Climate information • Maximum available budget 	<ul style="list-style-type: none"> • Location for implementation • Climate adaptation plan items: sector, strategy, practical tasks 	qualitative + quantitative <ul style="list-style-type: none"> • Decision maker consensus through (adaptation path) visualization¹⁾ • CBA

1) The information refers to details inferred from the research content, despite the absence of specific mentions within the reference.

2) Bihar was divided into 34 homogeneous parcels of land, resulting in 194 land units.

3) Represented by 5 neighborhood clusters, with a maximum range of 80 hectares applied as suggested in Farr's (2008) sustainable neighborhood clusters.

4) In accordance with the mention of setting up a simple virtual space with 400 grids of 20m×20m each, as mentioned in the reference.

하여 판단하였다.

수집된 연구 대부분의 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 모델에서 최적의 대안은 지도상의 공간패턴의 형태로 표현이 가능하였다(Eikelboom and Janssen, 2017; Hyun et al., 2020; Roest et al., 2023; Wang et al., 2023; Yoon et al., 2018). 이러한 시각화는 의사결정자에게 직관적인 피드백을 제공하기에 모델의 결과를 보다 쉽게 이해하여 계획에 활용이 용이하게 한다. 특히, 다양한 의사결정자가 협의할 때에도 효과적이다.

또한, 최적의 대안을 시각적으로 제시한 연구들 중 대부분(Hyun et al., 2020; Roest et al., 2023; Wang et al., 2023; Yoon et al., 2018)은 공간패턴이 격자 단위로 표현되었다. 격자 단위 공간 데이터는 공간 범위에서 경계에

대한 한계 없이 분석이 가능한 편의성을 가진다. 격자 단위는 래스터 모델의 데이터 또한 격자의 균일한 셀의 2차원 행렬에 저장 가능하기에 광범위한 규모의 계획에 활용되는 다양한 주제도를 종합할 수 있는 등 다양한 공간의 분포패턴을 다루기 쉽다는 점 외에도 연산과정에 대한 직관적인 이해가 용이하다(Stewart and Janssen, 2014; Yoon et al., 2018). 최근 국내에서는 디지털 전환에 따라 기후변화, 정주체계 등의 관측 및 통계데이터 기반이 격자 단위로 표준화되는 경향을 보인다(Kang, Park et al., 2021).

수집된 연구 중 Dunnett et al. (2018)은 미래 기후 조건을 예측하고 장기적인 효과를 고려하여 적응성을 강조하였다. 이는 미래 불확실성에 대응하고 변화하는 환경에서

Table 2. The effectiveness and applicability of the preceding research model

References	Decision Variables	The Effectiveness and Applicability
Eikelboom and Janssen (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Land Use (Purpose) • Location for Implementation 	<ul style="list-style-type: none"> • Representation of optimal alternatives on the map in the form of spatial patterns • Receive immediate visual feedback in the form of traffic light signals that indicate the potential value of land use changes based on selected decision variable values
Dunnett et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Crop Type • Agricultural Technology Package • Timing of Investment 	<ul style="list-style-type: none"> • Application of optimization algorithms to provide quantitative and objective decision support • Integration of considerations for carbon emissions, agricultural margins, and total crop production • Consideration of future climate change and land use changes • Identification of which crops will grow best • Understanding how crops will grow based on agricultural technology • Planning for investing in types of crops and technologies that can adapt to climate change at appropriate times
Roest et al. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • Location for Implementing Climate Adaptation Measures 	<ul style="list-style-type: none"> • Deriving optimal alternatives in the form of spatial patterns at the grid level on the map • Exploration of locations for more green space based on mapped spatial patterns • Exploration of suitable locations for ClimateScan projects
Wang et al. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • GI Type • GI Size • GI Location 	<ul style="list-style-type: none"> • Deriving optimal alternatives in the form of spatial patterns at the grid level on the map • Application of optimization algorithms to provide quantitative and objective decision support • Consideration of reducing flood risk and total runoff ratio and average annual cost • Exploration of suitable locations for bioretention, green roofs, permeable pavements
Yoon et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Land Use (Purpose) • Location for Implementation 	<ul style="list-style-type: none"> • Deriving optimal alternatives in the form of spatial patterns at the grid level on the map • Application of optimization algorithms to provide quantitative and objective decision support • Planning of land use plans to minimize damages from climate change based on cost and benefits
Hyun et al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> • Location for Implementation • Climate Adaptation Plan Items: Sector, Strategy, Practical Tasks 	<ul style="list-style-type: none"> • Deriving optimal alternatives in the form of spatial patterns at the grid level on the map • Receiving immediate visual feedback on adaptive path changes based on selected decision variable values • Identification of policy priorities based on cost and benefits

지속 가능한 대응 전략을 구축하는 데 기여할 수 있을 것으로 전문가 검증을 통하여 판단하였다.

3.4. 모델 프레임워크 구축

기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델 프레임워크 구축의 목적은 수집된 연구에서 소개한 관련 모델들을 바탕으로 기후변화에 대한 대응력을 높이도록 개선하여 국내에 적용가능한 공간 의사결정 지원 모델의 방향성을 제시하는 데 있다.

본 연구에서는 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델 프레임워크를 공간 문제파악 단계, 설계 및 분석 단계, 선택 단계를 중심으로 구조화하였으며, 앞서 3.1, 3.2, 3.3장의 결과를 토대로 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델 프레임워크를 구축하였다(Fig. 2). 또한, 이 과정에서 본 연구는 총 11회의 관계 전문가 논의를 통해 모델 프레임워크의 객관성을 검증하고, 논의한 사항을 반영하였다.

먼저 공간 문제파악 단계에서는 기후변화가 발생함에 따라 공간에서 해결이 필요한 문제를 정의하기 위하여 대상지의 공간적 범위를 설정하고 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화가 미친 영향, 혹은 미칠 것으로 예상되는 영향을 검토한다. 이에 따라 모델의 목적이 되는 기후변화에 따른 공간 문제를 어떻게 해결할지에 대한 방향성을 설정한다. 향후 수행할 분석의 용이성을 위하여 격자 단위의 공간 데이터를 수집한다.

정량적이고 객관적인 모델은 알고리즘을 적용한 최적화 방법론을 적용하여 기준요인과 제약요인, 그리고 결정변수를 설정하고 이에 의사결정자의 선호도를 반영하여 최적화 분석을 수행하였음을 앞서 확인함에 따라 설계 및 분석 단계에서는 알고리즘을 활용한 최적화 방법론을 적용한다. 최적화 방법론은 수학적 모델(Malczewski, 1999) 측면에서 공식화된 주어진 공간 결정 문제에 대한 최상의 솔루션을 찾는 알고리즘을 포함하고 있기에 보다 자동화된 방식으로 결과물을 생성한다(Arciniegas et al., 2011).

또한, 공간 최적화 분석 수행을 위하여 설정한 기준요인과 제약요인, 그리고 결정변수는 의사결정자의 선호도에 따라 조합되며, 이는 공간 최적화 분석의 입력값(Inputs)이 된다. 이때, 의사결정자가 최적화 알고리즘에 대한 명확한 지식이 없더라도 선호도에 따른 조합을 쉽게 입력할 수 있도록 변수들을 가공해 주어 모델에 대한 이해도와 활용도를 높일 필요가 있다. 예를 들면 기준요인으로 ‘예산 최소화’를 설정할 경우, 이를 의사결정자가 모

델에 입력할 때는 ‘예산’이라는 이름의 변수에 최소화를 의미하는 ‘0’ 입력값이나 최대화를 의미하는 ‘1’ 입력값을 넣을 수 있도록 의사결정자가 선택할 수 있는 옵션을 가진 변수의 형태로 가공하여 주는 것이다.

기준요인의 경우, 분석의 목적이 되는 변수들이기에 기존의 국내 기후변화 적응 및 영향평가에서 구축된 데이터베이스 등을 반영할 수 있다. 결정변수의 경우, 입력값(inputs)뿐만 아니라, 기준요인과 제약요인에 대한 의사결정자의 선호도에 따라 수행된 공간 최적화 분석의 결과로서 변하는 값(Outputs)으로 도출된다. 분석의 결과값(Outputs)은 기준요인의 달성 정도와 제약요인의 달성 정도가 각기 적용되었을 때의 결정변수에 대한 다양한 시나리오이며, 이는 의사결정자에게 시각화를 통한 직관적인 피드백을 제공하고자 도면화될 필요가 있다.

마지막으로 선택 단계에서는 공간 최적화 분석의 결과값 가운데에서 최적의 시나리오를 선택할 수 있도록 지원하고자 평가 및 검증 절차를 수행한다. 이때, 기준요인으로 예산과 관련한 항목이 있는 경우에는 파레토 프론트 솔루션이나 비용편의 분석 등을 통하여 최적화 분석의 결과별 목표값을 종합하여 의사결정자가 기후변화에 대응하는 계획을 수립함에 있어 한정된 예산의 효율적 활용을 고려토록 지원해야 한다. 물론 최적화 목표에서 예산과 관련한 항목을 고려하지 않더라도 비용편의 분석은 최적의 대안 선택을 지원하는 추가 분석 방법으로도 적용될 수 있다. 최종적으로 기준요인들의 절충점을 객관적이고 정량적으로 찾는 TOPSIS, 트레이드 오프 분석 등을 수행하여 결과값의 우선순위를 토대로 최적의 시나리오 선택을 지원한다.

이 밖에도 기후변화 혹은 미래의 사회경제적 변화에 대한 불확실성에 관계없이 일정한 결과값(Outputs)을 도출하는지 검증하기 위하여 서로 다른 시나리오 하에서 가능한 결과에 대해 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 수행하여 이를 모델의 설계 및 분석 단계에 피드백할 수 있다. 결과값은 일종의 정책안 혹은 계획안 형태이므로 정답이 명확하지 않을 수 있다. 이에 따라 최적의 시나리오에 영향을 미치는 미래시나리오와 입력값(Inputs)을 식별하는 민감도 분석을 통해 최적의 시나리오가 예상치 못한 변화와 같은 불확실성에 어떻게 대응할 수 있는지 확인하는 것은 중요하다(SFPE, 2023).

민감도 분석 결과에 따라 의사결정자가 또다시 기준요인과 제약요인을 수정하여 최적의 시나리오를 다시 수정·도출할 수 있는 피드백 절차가 포함된다. 이러한 피드백

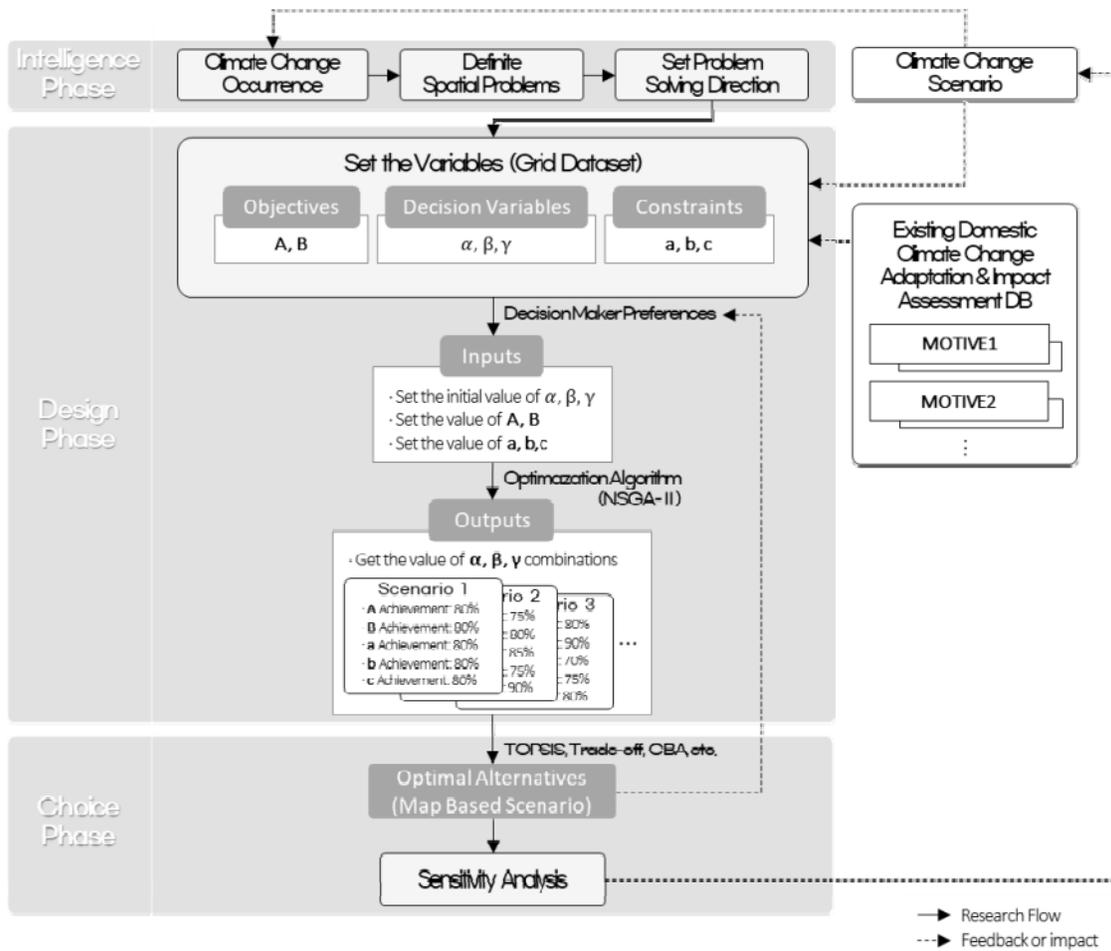


Fig. 2. Model Framework

절차는 불확실성을 처리할 때 최적화 분석을 순조롭게 진행토록 할 뿐만 아니라 예측과 가정을 사용하여 최적화를 반복함으로써 알고리즘을 조정하는 데에도 도움이 된다 (Ospina et al., 2022).

국내에서는 기후정보와 의사결정 지원 도구들은 파편화되어 제공되고 있어 의사결정자의 요구에 맞는 통합적 의사결정 지원 시스템 및 맞춤형 기후서비스가 필요한 실정이다(Hyun et al., 2020). 그러나, 기후변화에 따른 공간 문제, 공간의 범위, 공간 의사결정 지원에 적용된 방법론, 모델의 기술적 고도화 부분 등은 각기 다르기에 연구자가 기후변화 문제와 공간 의사결정 지원 모델에 관한 선행연구를 수집하고 종합하는 데는 상당한 시간과 비용이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 관련 선행연구를 중심으로 기후변화와 관련한 다양한 분야에서 활용이 가능한 공간 의사

결정 지원 모델의 프레임워크를 구축하였다. 해당 모델 프레임워크는 알고리즘으로 연결된 복잡한 공간 데이터를 이해하기 쉬운 선택의 단계로 단순화하기 때문에 최적화 알고리즘에 대한 명확한 지식이 없는 의사결정자까지도 모델에 입각하여 공간상의 기후변화 문제 해결에 대한 의사결정을 내릴 수 있도록 지원한다.

향후에는 국내 특성을 고려하여 국가 및 지자체의 기후변화 적응대책 수립 지원하고자 개발되어 현재 국가기후위기적응센터(KACCC, 2024b)에서 배포하여 활용되고 있는 기후변화 영향 및 취약성 평가 모형(Model of Integrated Impact and Vulnerability Evaluation of Climate Change, MOTIVE) 등에서 구축된 기존의 데이터베이스를 기준요인으로 반영하는 방법, 변수들을 의사결정자의 선호도에 따라 쉽게 설정할 수 있도록 가공하여 입력값에 대한 선택 옵션을 제공하는 방법, 최적의 시나리오 선택

을 지원하기 위한 방법론과 민감도 분석에 있어 효과적인 방법론 채택 등 더 많은 연구와 데이터 수집을 통해 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델 프레임워크의 지속적인 개선과 업데이트가 수행될 예정이다.

4. 결론

4.1. 연구 요약

본 연구는 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원에 관한 국내외 선행연구들을 종합적으로 검토하였다. 서론에서는 공간에서 기후변화 문제를 해결해야 하는 중요성과 기후변화에 대응할 수 있는 공간 의사결정 지원 모델의 필요성을 강조하였다. 연구방법에서는 국내외의 다양한 연구들을 비교·분석하고, 그 특징들을 도출하기 위해 문헌 고찰을 수행하였다. 결과 및 고찰에서는 국내외 선행연구에서 제시한 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델 프레임워크를 제시하였으며, 이를 문제파악, 설계 및 분석, 선택의 세 단계로 구성하여 그에 따른 시사점을 종합하였다.

기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델의 프레임워크를 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 모델은 알고리즘을 활용한 최적화 방법론을 적용하며, 이를 통해 다양한 결정 변수에 대한 객관적이고 정량적인 결과를 도출한다. 이는 토지이용, 농업, 그린인프라 등 다양한 분야에서 기후변화 대응을 위한 효과적인 의사결정을 가능하게 한다. 둘째, 비용과 편익을 종합적으로 고려하여 최적의 대안을 선택하도록 지원할 수도 있기에 기후변화 대응계획 수립 시 한정된 예산의 효율적인 활용의 고려가 가능하다. 셋째, 모델은 직관적인 지도상의 시각화를 통해 의사결정자에게 효과적인 시각적 피드백을 제공하며, 다양한 의사결정자 간 협의에도 효과적이다. 넷째, 격자 단위로 공간 데이터를 표현하고 활용하기에 공간 범위에서 경계에 대한 한계 없는 분석이 가능하여 편리하게 활용된다. 마지막으로, 기후변화 시나리오를 반영하여 미래 기후 조건을 예측하고 장기적인 효과를 고려하여 적응성을 강조함에 따라 미래 불확실성에 대응하고 변화하는 환경에서 지속가능한 대응 전략을 고려하는 데 기여한다.

4.2. 향후 연구 방향

국내에 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 연구가 다소 부족하다는 점을 확인하였다. 향후에는 기존의

관련 모델을 중심으로 국내의 지역적 특성과 기후변화 대응계획을 고려한 의사결정 지원 연구가 더욱 필요하다. 또한, 기후변화 대응을 위한 공간 의사결정 지원 모델 프레임워크가 구축되었지만, 이론상의 수행 절차이므로 실제 계획수립에의 활용성을 높이고자, 국내 관련 R&D를 통하여 공간 최적화 방법론, 기준요인, 제약요인, 결정변수, 최적의 대안 선택 지원 방법론, 그리고 민감도 분석 방법론을 규명할 필요가 있다. 또한, 각 지자체 간 협업 없이도 기후변화 공간 의사결정을 지원할 수 있도록 모델의 격자 데이터 구축을 전제하였지만, 향후 모델의 정확성과 유용성을 높이기 위해서 지속적인 사용자 참여와 지자체 간의 협업 강화가 필요하다.

사사

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(2022003570002).

References

- Althoff D, Ribeiro RB, Rodrigues LN. 2021. Gauging the ungauged: Regionalization of flow indices at grid level. *J Hydrol Eng* 26(4): 04021008. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002067
- Arciniegas G, Janssen R, Omtzigt N. 2011. Map-based multicriteria analysis to support interactive land use allocation. *Int J Geogr Inf Sci* 25(12): 1931-1947. doi: 10.1080/13658816.2011.556118
- Choi SH, Jeong JH, Jeong SW. 2016. Concept and procedures of qualitative content analysis (in Korean with English abstract). *J Qual Inq* 2(1):127-155.
- Densham PJ. 1991. Spatial decision support systems. *Geogr Inf Syst Princ Appl* 1:403-412.
- Dunnett A, Shirsath PB, Aggarwal PK, Thornton P, Joshi PK, Pal BD, Khatri-Chhetri A, Ghosh J. 2018. Multi-objective land use allocation modelling for prioritizing climate-smart agricultural interventions. *Ecol Model* 381: 23-35. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2018.04.008
- Eikelboom T, Janssen R. 2017. Collaborative use of geodesign tools to support decision-making on

- adaptation to climate change. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 22: 247-266. doi: 10.1007/s11027-015-9633-4
- Farr D. 2008. *Sustainable urbanism: Urban design with nature*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Gharari S, Clark MP, Mizukami N, Knoblen WJM, Wong JS, Pietroniro A. 2020. Flexible vector-based spatial configurations in land models. *Hydrol Earth Syst Sci* 24(12): 5953-5971. doi: 10.5194/hess-24-5953-2020
- Hyun JH, Kim JY, Lee DK, Heo JY, Bae CY, Jeong H, Jeong TY, Cha DH. 2020. A user-centered decision support system for climate change adaptation planning (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 11(6-1): 657-667. doi: 10.15531/ksccr.2020.11.6.657
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Climate change 2014 - Impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects: Working group II contribution to the IPCC fifth assessment report*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781107415379
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. *Climate change 2021 - The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157896
- KACCC (Korea Adaptation Center for Climate Change). 2024a. *Korea national climate change adaptation plan*. [accessed 2024 Feb 1]. https://kaccc.kei.re.kr/portal/policy/measure/measure1st_list.do
- KACCC (Korea Adaptation Center for Climate Change). 2024b. *Web evaluation tool*. [accessed 2024 April 21]. <https://kaccc.kei.re.kr/portal/tool/motive.do>
- Kang HS, Park JS, Lim ES, Ahn YH, Cho MS, Yoon EJ, Lee YJ, Park JH, Hong NE. 2021. *Greenhouse gas reduction strategy at local government and spatial level*. Sejong, Korea: Korea Research Institute for Human Settlements. KRIHS Issue Report No. 51.
- Kang YJ, Wang W, Lee H, Kim KT, Kim S, Kim HS. 2021. Quantitative flood damage evaluation using grid-based spatial analysis data (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 21(6): 265-273. doi: 10.9798/KOSHAM.2021.21.6.265
- Kim J. 2021. Spatial multicriteria decision analysis: A powerful tool for participatory decision-making in community-based tourism research. *J Smart Tour* 1(4): 3-7. doi: 10.52255/SMARTTOURISM.2021.1.4.2
- Kim YP, Lim ES. 2004. *Applications of GIS-based spatial analysis methodology (in Korean with English abstract)*. Anyang, Korea: Korea Research Institute for Human Settlements. KRIHS 2004-35.
- Lamprey B, Kolli R, Amo-Boateng M. 2023. *Climate change information for regional impact and risk assessment*. Lausanne: Frontiers Media SA. doi: 10.3389/978-2-8325-2533-3
- Lee DH, Kim BR, Yang JK, Oh SH. 2017. Dual response surface optimization using multiple objective genetic algorithms (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Ind Eng* 43(3): 164-175. doi: 10.7232/JKIE.2017.43.3.164
- Lee HR, Lee H. 2015. A critical analysis of the relationship between motivation and specialization -A content analysis of previous studies- (in Korean with English abstract). *J Tour Stud* 27(1): 49-73.
- Lee HY. 2000. The site selection for public facilities in using the multi-criteria evaluation method in geographic information system -A case study of the waste incinerator- (in Korean with English abstract). *J Korean Geogr Soc* 35(3): 437-454.
- Lim ES. 2001. *Spatial decision support systems for solid waste management: The vehicle routing-scheduling for waste collection and the site selection of incinerator [dissertation] (in Korean with English abstract)*. Konkuk University.
- Mahdiyari A, Tabatabaee S, Durdyev S, Ismail S, Abdullah A, Rani WNMWM. 2019. A prototype decision support system for green roof type selection: A cybernetic fuzzy ANP method. *Sustain Cities Soc* 48: 101532. doi: 10.1016/j.scs.2019.101532
- Malczewski J. 1999. *GIS and multicriteria decision*

- analysis. New York: John Wiley & Sons.
- Oh K, Lee D, Jeong S, Park C. 2009. A spatial decision support system for establishing urban ecological network; Based on the landscape ecology theory (in Korean with English abstract). *J GIS Assoc Korea* 17(3): 251-259.
- Ospina AM, Bastianello N, Dall'Anese E. 2022. Feedback-based optimization with sub-weibull gradient errors and intermittent updates. *IEEE Control Syst Lett* 6: 2521-2526. doi: 10.1109/LCSYS.2022.3167947
- Preston BL, Westaway RM, Yuen EJ. 2011. Climate adaptation planning in practice: An evaluation of adaptation plans from three developed nations. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 16: 407-438. doi: 10.1007/s11027-010-9270-x
- Rahman M. 2023. Herbert Simon rationalistic theory of decision making. *Int J Sci Res Sci Technol* 10(3): 1117-1120. doi: 10.32628/ijrst523103184
- Roest AH, Weitkamp G, Van Den Brink M, Boogaard F. 2023. Mapping spatial opportunities for urban climate adaptation measures in public and private spaces using a GIS-based decision support model. *Sustain Cities Soc* 96: 104651. doi: 10.1016/j.scs.2023.104651
- Sarker MNI, Yang B, Yang L, Huq ME, Kamruzzaman MM. 2020. Climate change adaptation and resilience through big data. *Int J Adv Comput Sci Appl* 11(3): 533-539. doi: 10.14569/ijacsa.2020.0110368
- SFPE (Society of Fire Protection Engineers). 2023. Sensitivity and uncertainty analysis. In: SFPE (ed). *SFPE guide to fire risk assessment*. Cham: Springer. p. 117-124. doi: 10.1007/978-3-031-17700-2_13
- Simon HA. 1960. *The new science of management decision*. New York: Harper & Row.
- Stewart TJ, Janssen R. 2014. A multiobjective GIS-based land use planning algorithm. *Comput Environ Urban Syst* 46: 25-34. doi: 10.1016/j.compenurbsys.2014.04.002
- van Buuren A, Driessen PP, van Rijswick M, Rietveld P, Salet W, Spit T, Teisman G. 2013. Towards adaptive spatial planning for climate change: Balancing between robustness and flexibility. *J Eur Environ Plan Law* 10(1): 29-53. doi: 10.1163/18760104-01001003
- Wallace M. 2018. Spatializing the modelled impacts of future climate change - A case study on wheat in the Western Cape. *S Afr J Geomat* 7(2): 177-189. doi: 10.4314/SAJG.V7I2.6
- Wang J, Liu J, Yang Z, Mei C, Wang H, Zhang D. 2023. Green infrastructure optimization considering spatial functional zoning in urban stormwater management. *J Environ Manag* 344: 118407. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118407
- Wenkel K, Berg M, Mirschel W, Wieland R, Nendel C, Köstner B. 2013. LandCaRe DSS - An interactive decision support system for climate change impact assessment and the analysis of potential agricultural land use adaptation strategies. *J Environ Manag* 127: S168-S183. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.02.051
- Wilson E. 2006. Adapting to climate change at the local level: The spatial planning response. *Local Environ* 11(6): 609-625. doi: 10.1080/13549830600853635
- Yoon EJ, Lee DK, Heo HK, Sung HC. 2018. Suggestion for spatialization of environmental planning using spatial optimization model (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Environ Restor Technol* 21(2): 27-38. doi: 10.13087/kosert.2018.21.2.27