

# 2026년 생물기후 연구 전문인력 연구계획서

연구 제목: 도시 기후리스크의 공간 스케일 의존적 요인 전환:  
메커니즘 규명과 기후위기 적응 정책 정밀화

이름: 최희도

소속: 국민대학교 기후기술융합학과

# 연구 제목: 도시 기후리스크의 공간 스케일 의존적 요인 전환: 메커니즘 규명과 기후위기 적응 정책 정밀화

## 1. 연구 배경 및 필요성

가. 기후위기 적응 정책의 공간적 현안: 누구를, 무엇으로부터, 어떤 생태계 기반으로 보호할 것인가

1) 도시 열취약 인구 보호와 기후리스크 평가의 정책적 역할

① 폭염의 빈도와 강도가 가속화되면서 도시 내 취약 계층의 온열 피해는 기후위기 대응의 핵심 현안으로 부상하고 있다. 각국 정부는 IPCC AR6 기후리스크 프레임워크를 기반으로 공간 단위별 리스크를 진단하고, 냉방 지원·폭염 대피소 배치·녹지 확충 등 적응 정책의 우선순위 설정에 그 결과를 활용하고 있다(IPCC, 2022). 특히 자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS)은 IPCC AR6 WGI I 도시 부문(Ch.6)에서 도시 기후 적응의 핵심 축으로 제시되었으며, 도시 식생이 제공하는 기후 조절 서비스가 열 리스크를 완충하는 역할이 과학적으로 인정되고 있다(Seddon et al., 2020). 이에 따라 리스크 평가에서 생태계의 완충 기능을 명시적으로 반영하는 것은 NbS 정책의 과학적 근거 확보를 위한 선결 과제이다. 국내에서도 「탄소중립·녹색성장 기본법」에 따라 지자체별 기후변화 적응대책 수립이 의무화되었으며, 공간 단위 리스크 지도는 그 핵심 도구로 기능하고 있다.

2) 공간 스케일에 따른 기후리스크 요인 전환 문제

① 그러나 이 평가 체계에는 정책적으로 중요한 문제가 내재한다. 동일한 도시, 동일한 인구를 대상으로 하더라도 어떤 공간 단위로 리스크를 분석하느냐에 따라 핵심 취약 요인이 근본적으로 달라진다. 자치구 단위에서는 기온·불투수면적 등 기후 위험 관련 변수가 기후리스크를 주도적으로 설명하는 반면, 500m 격자 단위에서는 고령 인구·저소득층 분포 등 사회경제적 변수가 주요하게 식별된다(He et al., 2024; Yang et al., 2025). 이는 단순한 분석 결과의 차이가 아니라, 공간 단위 선택 하나로 정책이 집중 투자해야 할 요영향요인이 체계적으로 달라짐을 의미한다. 공간 단위 선택의 근거가 마련되지 않은 상태에서 이 문제가 반복될 경우, 취약 계층 보호의 실질적 효과를 담보하기 어렵다(Hsu et al., 2021; Shreevastava et al., 2025). 이 문제는 NbS 정책(녹지 조성·수종 선택)과 사회적 적응 정책(냉방 지원·쉼터 배치)이 상이한 부서·예산·시간 스케일에서 운영되는 현실에서 더욱 심각해진다.

나. 공간 단위 변화에 따른 영향요인 가변성의 구조적 원인과 기존 연구의 한계

1) 기존 MAUP 연구의 성과와 AI 기반 평가에서의 한계

- ① 공간 분석 단위의 선택에 따라 결과가 달라지는 현상은 수정 가능 면적 단위 문제(MAUP)로 40년 전부터 알려져 왔다(Openshaw, 1984). 그러나 기존 MAUP 연구는 통계적 집계 수준에서 현상을 기술하는 데 그쳤으며, 딥러닝 기반 평가 모형에서 이것이 변수 중요도 해석에 어떻게 작동하는지는 규명되지 않은 채로 남아 있다(Yu et al., 2024; Zeng et al., 2021). GNN(Graph Neural Network) · SH AP(Shapley Additive explanations) 등 AI 기반 방법론이 기후리스크 평가에 빠르게 도입되고 있으나(Liu et al., 2025; Lundberg & Lee, 2017), 동일 데이터를 서로 다른 공간 단위로 분석할 때 AI의 변수 해석이 일관성을 갖는지에 대한 체계적 검증은 이루어지지 않고 있다(Salih et al., 2024; Schiller et al., 2025). 이러한 메커니즘이 규명되지 않은 상황에서 정책 담당자는 여러 단위의 분석 결과 중 무엇을 신뢰해야 하는지 판단할 과학적 근거를 갖지 못한다.

2) 공간 집합 과정에서의 분산 보존율 차이와 변수 중요도 변화

- ① 영향요인 가변성의 구조적 단서는 공간 집합 과정에 있다. 소단위 데이터를 대단위로 통합하는 과정에서 변수의 공간자기상관 특성에 따라 단위 간 분산 보존율이 상이하게 결정된다(Zhang et al., 2019). 기온 · 불투수면적 등 기후 위험 지표는 물리적 지형 조건과 자연 시스템의 연속성에 의해 공간적으로 강한 자기상관을 보이는 반면(Stewart & Oke, 2012), 고령 인구 · 저소득층 등 사회경제적 지표는 역사적 도시 개발 과정과 사회구조적 분리에 의해 형성되어 인접 지역 간 변이가 크고 공간자기상관이 낮은 경향이 보고되어왔다(Massey & Denton, 1988; Cutter et al., 2012; Reardon & Bischoff, 2011; Han, 2022). 이에 따라 공간자기상관이 높은 기후 위험 지표는 집계 후에도 단위 간 분산이 비교적 보존되는 반면, 공간자기상관이 낮은 사회경제적 지표는 집계 과정에서 공간적 변이가 평활화되며 분산이 소실되는 패턴이 예상된다. 이 분산 보존율의 차이가 AI 모형의 변수 중요도 변동으로 이어진다는 관계는 이론적으로 정합하나, 이를 통계적 매개 구조로 정량 분해한 연구는 존재하지 않는다.
- ② 나아가, 현행 AR6 프레임워크에서 도시 생태계의 기후 조절 기능은 적응역량(Adaptive Capacity)의 하위 변수로만 포함되어 있다. 그러나 적응역량은 “시스템이 잠재적 피해에 대응하는 능력”으로 정의되며(IPCC, 2022), 이는 본질적으로 인간 사회의 대응 역량을 지칭한다. 식생의 증발산 냉각은 인간 의사결정과 무관한 물리적 과정으로, 사회적 적응역량과는 메커니즘이 근본적으로 다르다. 두 요소가 동일 구성요소에 혼재할 경우, 공간 단위 전환 시 생태적 완충 효과와 사회적 대응 효과가 분리되지 않아 NbS 정책의 독립적 기여를 식별할 수 없다. IPBES-IPCC 공동 워크숍 보고서(Pörtner et al., 2021)는 생물다양성과 기

후변화의 통합적 대응 프레임워크의 필요성을 공식적으로 제기하였으나, 구체적인 정량적 통합 모형은 제시되지 않은 상태이다.

#### 다. 본 연구의 필요성

기후위기 적응 정책은 현재 특정 공간 단위의 리스크 분석 결과에 근거하여 수립되고 있다. 그러나 어떤 단위의 결과가 어떤 정책 목표에 유효한지를 판별하는 기준이 마련되어 있지 않은 상황에서는, 정밀한 분석 도구를 갖추고도 잘못된 요인에 자원이 투입될 가능성을 배제하기 어렵다(Anguelovski et al., 2025). 공간 단위에 따른 영향요인 가변성의 통계적 매개 구조 정량화와 이에 근거한 공간 단위 선택 기준의 확립은, AI 기반 기후리스크 평가가 실질적인 정책 도구로 기능하기 위한 선결 과제이다. 더불어, 도시 생태계의 기후 조절 기능을 프레임워크 내에서 독립적 구성요소로 분리하여 그 완충 효과를 정량화하는 것은, NbS 기반 적응 정책의 과학적 근거를 확보하고 생물다양성-기후 연계 연구의 정량적 기반을 마련하기 위해 필수적이다.

## 2. 연구 목표

본 연구는 도시 기후리스크 평가에서 공간 단위 전환 시 발생하는 변수 중요도 변동의 통계적 매개 구조를 정량 분석하고, IPBES NCP 기후 조절 서비스 개념을 AR6 프레임워크에 통합하여 생태계의 기후 리스크 완충 효과를 정량화함으로써, 기후위기 적응 정책의 공간 단위 선택 기준을 제시하는 것을 목적으로 한다.

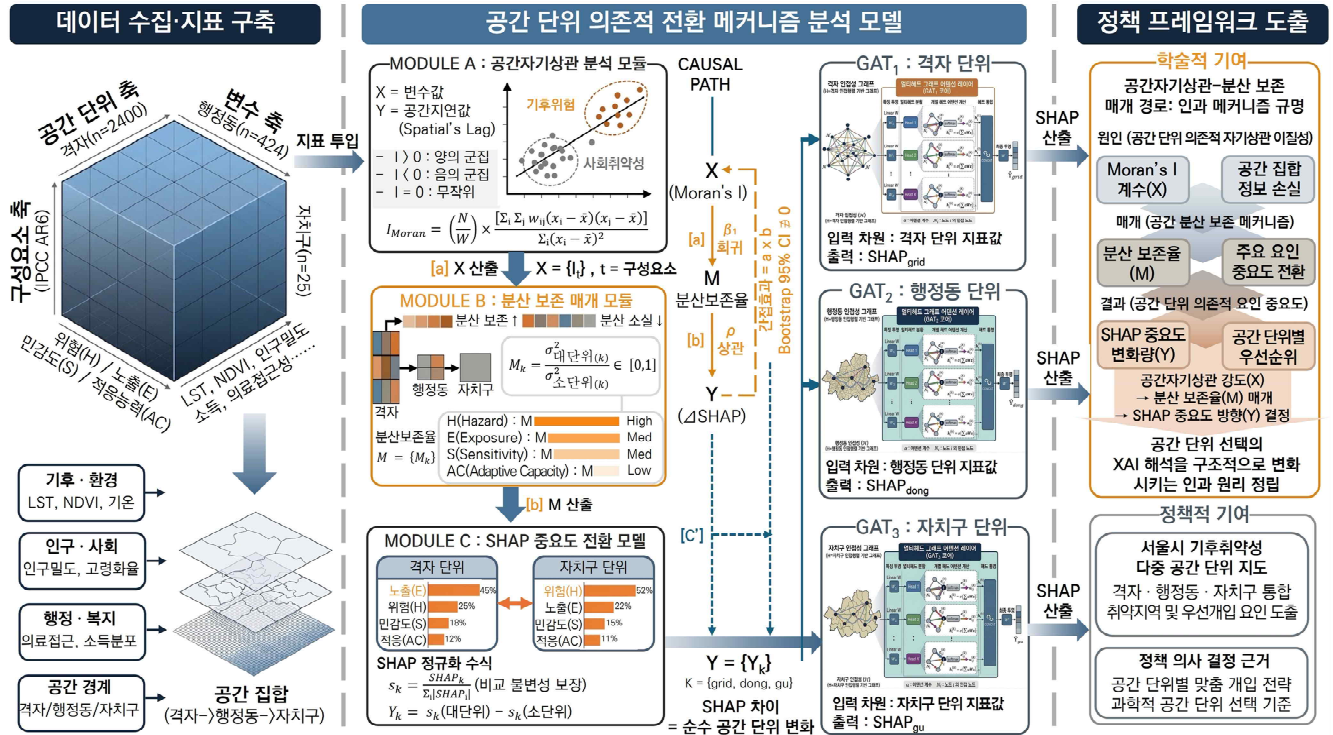
#### 가. 공간 스케일 의존적 변수 중요도 변동의 통계적 매개 구조 정량화

- 1) 공간 단위 전환 시 AI 기반 기후리스크 평가에서 변수 중요도가 체계적으로 변동하는 현상에 대해, 분산 보존율을 매개 변수로 하는 통계적 매개 구조를 처음으로 정량 분해한다(Baron & Kenny, 1986; MacKinnon, 2012).
- 2) 공간자기상관 수준에 따른 변수별 분산 보존율의 차이가 SHAP 중요도 변화로 이어지는 통계적 매개 관계를 실증하고, 생태적 기후 조절 서비스(Ecosystem Service) 변수군과 사회경제적 민감도 변수군 간 전환 패턴의 체계적 차이를 밝힘으로써, NbS 정책과 사회적 적응 정책 각각의 공간적 유효성을 구분한다.

#### 나. 기후위기 적응 정책의 공간 단위 선택 기준 도출

- 1) 변수 중요도 가변성의 매개 구조 분석 결과와 생태계 완충 효과의 스케일 비교를 토대로, NbS 정책(녹지 배치·구성)과 사회적 적응 정책(냉방 지원·쉼터 배치) 각각에 적합한 적정 공간 단위 판별 기준을 도출한다.
- 2) 서울시 다중 공간 단위 기후리스크 지도와 생태계 서비스 공급-수요 불일치 분석을 포함한 정책보고서를 산출하여, 지자체 기후변화 적응대책 수립 시 과학적 근거로 활용될 수 있도록 한다.

### 3. 연구 방법



〈그림 1. 공간 단위 의존적 영향요인 가변성의 통계적 매개 구조 분석 모형〉

본 연구는 IPCC AR6 기후리스크 프레임워크와 IPBES NCP 기후 조절 서비스 개념을 통합한 5개의 구성요소 GAT(Graph Attention Network) 모형을 세 공간 단위(500m 격자·행정동·자치구)에 독립적으로 구축하고(Veličković et al., 2018), 공간자기상관 계수 → 분산 보존율 → SHAP 중요도 변동량 사이의 통계적 매개 구조를 단계적으로 검증한다. 이하에서 '분산 보존율'은 공간 집합 후 단위 간 분산을 집합 전 전체 분산으로 나눈 값을, 'SHAP 중요도 변화량'은 공간 단위 전환 시 변수별 SHAP 중요도의 변화를 의미한다.

#### 가. 연구 데이터 및 변수 구성

##### 1) 기후리스크 구성 변수

변수는 IPCC AR6 기후리스크 프레임워크에 따라 네 구성요소로 체계화하였으며, 도시기후 문헌과 기후리스크 지수 연구를 검토하여 선정하였다 (Stewart & Oke, 2012; Niu et al., 2021; Cheng et al., 2021).

| 구성요소                      | 변수                                                                                                                        |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 기후 위험<br>(Climate Hazard) | 폭염 일수 (Heat wave days), 열대야 일수 (Tropical nights),<br>온난기간 지속일수 (Warm spell duration), 지표면온도 (Land<br>surface temperature) |
| 노출                        | 인구밀도 (Population density), 불투수면 비율 (Impervious surface                                                                    |

|                             |                                                                                                                                                       |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Urban Exposure)            | ratio), 건물밀도·용적률(Building density/FAR), 교통접근성(Transport accessibility)                                                                                |
| 민감도<br>(Social Sensitivity) | 노인 인구 비율 (Elderly population, 65세 이상), 영유아 비율 (Young children, 0-4세), 저소득층 비율 (Low income), 반지하 주거 비율 (Underground housing ratio)                     |
| 적응역량<br>(Adaptive Capacity) | 여름철 냉방 전력사용량 (Summer cooling electricity), 의료시설 접근성 (Healthcare accessibility), 1인당 녹지면적 (Green space per capita), 폭염쉼터 밀도 (Heatwave shelter density) |

데이터는 기상청 극한기후지수, NASA MODIS 위성자료, 통계청 SGIS, EGIS 토지 피복도, 국가공간정보플랫폼, 복지로 OpenAPI, KEPCO, 국가재난안전데이터포털 등 공공기관 및 위성 자료를 활용한다. 현재 수집된 모든 변수는 500m 격자 단위로 수집 및 전처리가 완료되어 있다.

사업 착수 이후, 도시 생태계의 기후 조절 기능이 적응역량 내에 혼재되어 있어 독립적 기여를 식별할 수 없다는 구조적 한계가 확인되었다. 이에 IPBES NCP 10 (기후 조절 서비스) 개념에 기반하여 다섯 번째 구성요소 'Ecosystem Service'를 신규 구축하였다.

## 2) IPBES NCP 10 기반 Ecosystem Service 구성요소 (신규 4변수)

IPBES NCP 10(Regulation of climate)은 “생태계에 의한 온도·습도·바람의 조절”을 다루며(Díaz et al., 2018), 도시 맥락에서 식생의 증발산 냉각, 교목 수관의 차광, 식생 구조에 의한 에너지 수지 변화로 구체화된다(Gómez-Baggethun & Barton, 2013). 본 연구는 이 메커니즘을 네 가지 측정 축으로 설정하여 AR6 프레임워크의 다섯 번째 구성요소로 구성하였다.

| NCP 10 측정 축 | 변수               | 데이터 소스                      |
|-------------|------------------|-----------------------------|
| 기능적 냉각      | 증발산량(ET) 여름 평균   | NASA MODIS MOD16A2GF (500m) |
| 식생 활력       | NDVI 여름 평균       | Landsat 8 (30m→500m 집계)     |
| 구조적 차광      | 수목피복률            | 산림청 임상도 (1:5,000)           |
| 서비스 안정성     | NDVI 시간 변동계수(CV) | Landsat 8 5개년 파생            |

네 번째 변수(NDVI CV)는 IPBES가 기존 생태계 서비스 프레임워크에 추가한 것으로, 생물다양성에 의한 서비스 안정성(Yachi & Loreau, 1999)을 정의하였다. Pörtner et al. (2021)이 강조한 “생물다양성 손실이 기후 조절 서비스의 안정성을 훼손한다”는 관계의 관측 가능한 지표이다.

이에 따라 최종 변수 체계는 5구성요소 × 4변수 = 20개 변수로 구성되며, 모든 구성요소의 변수 수가 균형을 이루어 교차 구성요소 어텐션에서 표현 편향이 발생하지 않는다. 신규 4변수는 Google Earth Engine(ET, NDVI, NDVI CV)과 산림청 임

상도(수목피복률)에서 구축하며, 4월 중 전처리를 완료할 예정이다.

## 2) 공간 단위별 데이터 구조

본 연구는 500m 격자( $n \approx 2,634$ ), 행정동( $n \approx 424$ ), 자치구( $n=25$ ) 세 공간 단위에서 동일한 5구성요소 20개 변수 체계를 운영한다. 500m 격자 기준 13,170개 시공간 관측치(2,634격자, 5개년, 2015-2019)의 기존 16변수는 수집 및 전처리가 완료되어 있으며, 신규 4변수를 포함한 20변수 통합 데이터셋을 구성한 후, 행정동·자치구 단위 데이터는 500m 격자 데이터를 면적가중 집계법으로 변환하여 생성한다. 이 집합 과정에서 발생하는 변수별 분산 변화가 본 연구의 핵심 분석 대상이며, 각 공간 단위는 고유한 공간 가중치 행렬을 별도로 구성하여 단위별 공간 인접 구조를 독립적으로 반영한다.

## 나. 공간 단위별 독립 GAT 모형 구축 및 SHAP 산출

### 1) 독립 GAT 모형 설계

세 공간 단위 각각에 독립적인 GAT 모형을 구축한다. 독립 설계를 채택하는 이유는 계층적 단일 모형을 사용할 경우, 공간 단위 전환에 따른 변수 중요도 변화가 모형 구조의 차이에서 비롯된 것인지 공간 집합 효과에서 비롯된 것인지를 분리할 수 없기 때문이다.

- ① 각 공간 단위의 공간 가중치 행렬은  $k=8$  최근접 이웃 연결로 구성하며, 노드 간 연결 강도는 유클리드 거리 기반 가우시안 커널 함수로 산출한다. 연결 반영은 도시 미기후 분석의 최소 단위 기준인 LCZ(Local Climate Zone) 스케일링 원칙에 따라 1.5km로 설정한다(Stewart & Oke, 2012).
- ② 교차구성요소 어텐션 메커니즘을 통해 위험·노출·민감도·적응역량·생태적 기후조절 서비스 다섯 구성요소 간 비선형 상호작용을 학습한다. 특히 Ecosystem Service 구성요소는 Tanh 활성화를 통해 생태계 기여의 양방향성(긍정적 냉각과 부정적 고습도 효과)을 표현하며, 학습 가능한 완충 파라미터( $\lambda$ )를 통해 생태계의 기후 리스크 완충 효과를 데이터에서 정량화한다.
- ③ 시간적 순방향 교차검증, 공간적 블록 교차검증, 중첩 시공간 교차검증을 순차적으로 적용하여 각 모형의 시공간 외삽 성능과 강건성을 검증한다.

### 2) SHAP 기반 변수 중요도 산출

세 모형 각각에 SHAP 분석을 수행하여 각 구성 변수의 공간 단위별 중요도를 산출한다. 이후 격자→행정동, 행정동→자치구 두 전환 쌍에 대해 단위 전환 시 변수별 SHAP 중요도 변화량을 산출한다. 이 SHAP 중요도 변화량은 어떤 변수의 중요도가 어느 방향으로 얼마나 변화하는지를 정량적으로 포착하는 핵심 지표로, 이후

통계적 매개 구조 분석의 기반이 된다. 본 연구는 SHAP가 학습된 모형 내에서 각 변수가 예측에 기여하는 한계 기여도를 정량화하는 도구이며(Lundberg & Lee, 2017), 반사실적 의미의 인과관계를 직접 식별하지는 않음을 명시한다(Pearl, 2009). 이에 따라 본 연구의 분석 범위는 데이터에서 관찰되는 변수 중요도 변동 패턴의 통계적 매개 구조에 한정되며, 인과 식별은 본 연구의 분석 목적이 아니다.

## 2) 생태계 완충 메커니즘과 $\lambda$ 파라미터

본 연구의 5구성요소 GAT는 기존 AR6 이론적 손실 함수를 다음과 같이 확장한다.

기존:  $Risk = Hazard \times Exposure \times Vulnerability$

확장:  $Risk = Hazard \times Exposure \times Vulnerability \times (1 - \lambda \cdot ES_{buffer})$

여기서  $ES_{buffer}$ 는 Ecosystem Service 구성요소의 어텐션 표현에서 sigmoid를 거친  $[0,1]$  스칼라이며,  $\lambda \in [0,1]$ 은 데이터에서 학습되는 생태계 완충 효과 크기 파라미터이다.  $\lambda = 0$ 이면 생태계 완충이 없는 기존 4구성요소 모형과 동일하며,  $\lambda > 0$ 이면 생태계 서비스가 취약성을 완충한다. 곱셈적 구조를 채택한 이유는 증발산 냉각의 효과가 고온일수록 크다는 실증 결과(Ziter et al., 2019)에 근거한다.

$\lambda$ 가 세 공간 단위에서 다르게 학습되는 것 자체가 핵심 결과이다. “어떤 공간 단위에서 NbS의 완충 효과가 가장 크게 포착되는가”에 대한 직접적 증거가 되며, NbS 정책의 적정 공간 단위 기준 도출의 근거로 활용된다.

## 다. 통계적 매개 구조 분석

### 1) 분석 변수 산출

- ① **공간자기상관 계수:** 16개 구성 변수 각각에 대해 세 공간 단위별 Global Moran's I 지수를 산출한다. 공간자기상관이 구성요소 유형에 따라 체계적인 차이를 보이는지는 본 연구에서 실증적으로 확인해야 할 사항이며, 이 값이 이후 통계적 매개 관계 실증에서 **분산 보존율**과 **SHAP 중요도 변화량**을 설명하는 출발점으로 기능한다.
- ② **분산 보존율:** 각 변수에 대해 집합 후 단위 간 분산을 집합 전 전체 분산으로 나눈 값으로 산출한다. 공간자기상관이 높은 변수일수록 분산 보존율이 높게 나타날 것으로 예상되나, 이 역시 검증의 대상이다.

### 2) 매개 경로 단계별 검증

변수 중요도 변동의 매개 구조는 세 단계 경로를 순차적으로 분석하는 방식으로

정량화하며(Baron & Kenny, 1986; MacKinnon, 2012), 격자→행정동, 행정동→자치구 두 전환 쌍에 대해 독립적으로 수행하여 결과의 일관성을 통해 강건성을 확인한다..

- ① 공간자기상관이 분산 보존율을 예측하는가: 변수별 공간자기상관 계수를 독립변수, 분산 보존율을 종속변수로 하는 회귀분석을 수행한다. 공간자기상관이 높은 변수일수록 집합 후에도 단위 간 분산이 보존된다는 관계의 유의성을 회귀계수와 결정 계수로 확인한다(Zhang et al., 2019)
- ② 분산 보존율이 SHAP 중요도 변화량을 예측하는가: 분산 보존율을 독립변수, SHAP 중요도 변화량을 종속변수로 하는 Spearman 순위상관을 수행한다. 분산이 보존된 변수일수록 단위 전환 후에도 중요도가 유지되고, 분산이 소실된 변수일수록 중요도가 감소하는 패턴이 나타나는지를 확인한다.
- ③ 공간자기상관이 분산 보존율을 경유하여 SHAP 중요도 변화량에 미치는 간접효과: 부트스트랩 신뢰구간 기반 매개효과 분석을 수행한다(Preacher & Hayes, 2008). 간접 효과의 신뢰구간이 0을 포함하지 않을 경우, 세 변수 간 통계적 매개 구조의 성립으로 판단한다. 본 연구의 매개 분석은 Baron and Kenny (1986)와 MacKinnon (2012)에 기반한 통계적 매개 분해 의미에 한정되며, 반사실적 의미의 인과 매개와는 구분된다(Pearl, 2009).

### 3) 변수 유형별 가변성 패턴 비교

통계적 매개 구조 분석 결과를 바탕으로, 위험·노출·민감도·적응역량·생태적 기후조절 서비스 변수군이 공간자기상관 수준에 따라 실제로 고·저 집단으로 구분되는지 확인하고, 집단 간 분산 보존율과 SHAP 중요도 변동량의 차이를 비교한다. 특히 Ecosystem Service 변수군(ET, NDVI, 수목피복률)은 물리적으로 공간 연속 분포하여 공간자기상관이 높을 것으로 예상되며, 대단위에서도 분산이 보존되어 SHAP 중요도가 유지될 가능성이 높다. 반면 Sensitivity 변수군(노인, 저소득층)은 공간자기상관이 낮아 대단위에서 분산이 소실되고 SHAP이 감소할 것으로 예상된다. 이 차별적 메커니즘이 “대단위에서 생태적 요인이 상대적으로 지배적이 되는” 전환의 구조적 원인이라는 가설을 본 연구에서 검증한다.

### 다. 생태계 서비스 공급-수요 불일치 분석

Ecosystem Service 구성요소 기반의 공급(Supply)과 나머지 구성요소 기반의 수요(Demand) 사이의 공간적 불일치를 bivariate LISA(Local Moran's I)로 분류한다(Blum, 2017). High-Demand / Low-Supply 지역을 NbS 투자 최우선 지역으로 도출하며, 이 유형 분류가 공간 단위에 따라 어떻게 달라지는지를 Kappa 일치도 지수로 정량화한다. 이

결과는 정책보고서의 NBS 투자 우선지역 도출과 공간 단위별 분업 체계 설계의 핵심 근거가 된다.

#### 4. 월별 계획 및 학술대회 발표 계획

##### 가. 월별 계획 및 성과 목표

|     | 월별 계획                                                                           | 성과 목표              |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 3월  | • 연구계획 최종 확정                                                                    | • 연구수행계획서 제출       |
| 4월  | • 행정동·자치구 단위 공간 집합 데이터 구축<br>• 공간 단위별 공간 가중치 행렬 구성                              | • 3개 공간 단위 데이터셋 구축 |
| 5월  | • 세 공간 단위 독립 GAT 모형 학습<br>• 시공간 교차검증 수행                                         | • 독립 GAT 모형 검증 완료  |
| 6월  | • 세 모형 SHAP 분석 수행<br>• 변수별 공간 단위별 중요도 산출<br>• 변수별 공간자기상관 및 분산 보존율 산출            | • 핵심 분석 변수 산출      |
| 7월  | • 공간자기상관과 분산 보존율 간 관계 분석<br>• 분산 보존율과 SHAP 중요도 변동 간 관계 분석<br>• 중간 정책보고회 발표자료 작성 | • 중간 정책보고회 발표자료    |
| 8월  | • 중요도 변동의 간접 효과 분해<br>• 변수 유형별 가변성 패턴 비교 분석                                     | • 통계적 매개 구조 분석 완료  |
| 9월  | • 세 공간 단위 기후리스크 공간 분포 지도 작성<br>• 정책 목표 유형별 공간 단위 판별 기준 도출<br>• 정책보고서 초안 작성      | • 정책보고서 초안 완성      |
| 10월 | • 정책보고서 수정·보완<br>• 학술논문 초안 작성                                                   | • 정책보고서 1부 제출      |
| 11월 | • 최종 성과공유회 발표자료 작성<br>• 학술논문 투고 준비                                              | • 최종 성과 공유회 발표 자료  |
| 12월 | • 연구 결과 최종 정리<br>• 후속 연구 방향 도출                                                  | • 학술논문 투고 1편       |

##### 나. 학술대회 발표 계획

본 연구자의 선행 연구는 2026년 한국기후변화학회 상반기 학술대회에서 발표될 예정이며, 본 사업의 사사 표시가 이루어졌다. 이는 본 사업의 초기 단계에서 도시 기후리스크 평가의 기본 분석 프레임워크가 학계에 공유되는 의미를 가진다. 본 연구의 핵심 성과는 2026년 하반기에 다음 두 학술대회에서 측면별로 구분하여 발표될 예정이다. 한국기후변화학회 추계학술대회에서는 본 연구의 방법론적 기여에 초점을 둔다. 즉 IPCC AR6과 IPBES NCP 프레임워크의 그래프 어텐션 신경망 기반 통합 방법, 다섯 구성요소 모형 아키텍처, 분산 보존율을 매개로 한 변수 중요도 변동의 통계적 매개 구조 분석 결과를 중심으로 발표한다. 한국환경정책학회 추계학술

대회에서는 본 연구의 정책적 기여에 초점을 둔다. 즉 자연 기반 해법(NbS) 우선 지역 도출 결과와 기존 서울시·국가 기후 적응 정책과의 비판적 연계, 분석 단위 의존적 정책 분업 체계 설계 등 정책 함의를 중심으로 발표한다. 두 학술대회는 동일 연구를 다루지만 발표 측면이 방법론과 정책으로 명확히 구분되어 중복이 발생하지 않도록 설계되었다. 학회 발표를 통해 수렴한 전문가 의견은 정책보고서 최종본과 학술논문 최종본에 반영한다.

## 5. 연구의 정책 연계성 및 예상 성과

### 가. 연구의 정책 연계성

본 연구는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」에 따라 지자체가 의무적으로 수립해야 하는 기후변화 적응대책의 실효성 문제를 다룬다. 현행 적응대책은 특정 공간 단위의 리스크 평가 결과에 근거하여 수립되나, 공간 단위 선택의 과학적 기준이 부재한 상황에서 정책 자원이 실질적으로 취약한 요인에 집중되고 있는지 담보하기 어렵다. 본 연구가 도출하는 공간 단위 선택 기준은 이 문제에 대한 직접적인 해답을 제공한다.

- 1) NbS 정책(녹지 배치·조성)과 사회적 적응 정책(냉방 지원·쉼터 배치)이 각각 어떤 공간 단위에서 수행될 때 정책 효과를 극대화할 수 있는지에 대한 실증적 근거를 제공한다. 전자는 도시 열섬 저감·녹지 확충·수종 다양화 등 생태계 기반 개입을, 후자는 취약 계층 지원·열 불평등 완화 등 사회적 개입을 포괄한다.
- 2) 다중 공간 단위 기후리스크 지도는 광역·기초 지자체가 각자의 행정 단위에서 어떤 요인을 우선적으로 관리해야 하는지를 시각적으로 제시함으로써, 중앙-지방 간 기후적응 거버넌스의 공간적 분업 체계 설계에 기여한다.
- 3) AI 기반 기후리스크 평가 결과의 공간 단위별 해석 유효성 기준을 제시함으로써, 향후 정부 및 지자체의 AI 기반 정책 도구 도입 시 신뢰성 검증 프로토콜로 활용될 수 있다.

### 나. 예상 성과

- 1) 정책보고서: 서울시 세 공간 단위 기후리스크 공간 분포 지도 및 정책 목표 유형별 공간 단위 선택 가이드라인을 포함한 정책보고서 1부를 제출한다. 지자체 기후변화 적응대책 수립 담당자가 실무에서 직접 활용할 수 있는 형태로 작성한다.
- 2) 학술논문: 공간자기상관-분산 보존율-SHAP 중요도 변화의 매개 인과 체계 검증 결과IPCC-IPBES 통합 GAT 프레임워크를 담은 학술논문을 도시기후·생태계서비스 분야 SCI 상위 저널에 투고한다.
- 3) 학술대회 발표: 국내외 학술대회 발표를 통해 연구 성과를 확산하고, 수렴한 전

문가 피드백을 정책보고서 및 학술논문 최종본에 반영한다.

- 4) **방법론적 기여:** 도시 기후리스크 평가에서 MAUP와 AI 기반 변수 중요도 해석 일관성을 연결한 통합 분석 프레임워크를 제시한다. 본 연구는 서울특별시를 대상으로 한 사례 분석을 통해 본 프레임워크를 개발·검증하며, 본 프레임워크의 학술적 일반성은 향후 다중 도시 비교 연구를 통해 검증될 수 있는 기반을 마련한다.

#### 다. 기존 서울시·국가 기후 적응 정책과의 비판적 연계

- 1) 본 연구의 결과는 기존 기후 적응 정책의 검토에 직접 활용 가능하다. 첫째, 서울시 폭염 종합대책은 자치구 단위로 폭염 쉼터와 의료 인프라를 분배하고 있으나, 본 연구의 다중 공간 단위 분석은 자치구별 dominant factor에 가변성이 있음을 보여줄 가능성이 있다. 따라서 단일 분배 기준이 아닌 자치구별 dominant factor에 따라 차별화된 정책 개입 기준을 제안할 수 있다. 둘째, 환경부 제3차 국가 기후변화 적응대책은 자연 기반 해법(NbS)을 명시하고 있으나 우선 개입 지역 선정 기준이 부재하다. 본 연구의 분산 보존율과 생태계 서비스 결핍 분석은 NbS 우선 지역의 학술적 선정 기준을 제공할 수 있다. 이러한 비판적 검토 결과는 정책보고서의 핵심 절로 포함된다.

## 6. 연구활동지원비 계획

| 구분       | 금액(원)     | 산출 근거                               | 비고                  |
|----------|-----------|-------------------------------------|---------------------|
| 유인물비     | 200,000   | 연구 관련 문헌 복사, 정책보고서 인쇄, 학술대회 발표자료 출력 | 문헌 복사 등             |
| 전산처리비    | 1,500,000 | 클라우드 GPU 서버 이용료, 프린터 소모품, A4 용지     | 모델 학습 및 분석 연산 비용 포함 |
| 시약 및 재료비 | 800,000   | 연구 데이터 저장용 외장 SSD, USB, 문구류         | 실험 시약 해당 없음         |
| 시험 분석료   | 700,000   | 공간통계 소프트웨어 라이선스 및 데이터 분석 도구 구독료     | ArcGIS Pro, GeoDa 등 |
| 임차료      | -         | -                                   | 해당없음                |
| 합계       | 3,200,000 |                                     | 여비 별도               |

## ■ 참고문헌

- Anguelovski, I., Kotsila, P., Lees, L., Triguero-Mas, M., & Calderón-Argelich, A. (2025). From heat racism and heat gentrification to urban heat justice in the USA and Europe. *Nature Cities*, 2(1), 8–16. <https://doi.org/10.1038/s44284-024-00179-6>
- Blum, J. (2017). Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: the case of urban forests in Barcelona, Spain. In *Urban forests* (pp. 21–54). Apple Academic Press.
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., ... & Shirayama, Y. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270–272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- Cheng, W., Li, D., Liu, Z., & Brown, R.D. (2021). Approaches for identifying heat-vulnerable populations and locations: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 799, 149417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149417>
- Gómez-Baggethun, E. & Barton, D.N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019>
- He, J., Shi, Y., Xu, L., Lu, Z., Feng, M., Tang, J., & Guo, X. (2024). Exploring the scale effect of urban thermal environment through XGBoost model. *Sustainable Cities and Society*, 114, 105763. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105763>
- Hsu, A., Sheriff, G., Chakraborty, T., & Manya, D. (2021). Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities. *Nature Communications*, 12(1), 2721. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22799-5>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Liu, P., Lei, B., Huang, W., Biljecki, F., Wang, Y., Li, S., & Stouffs, R. (2025). Sensing climate justice: A multi-hyper graph approach for classifying urban heat and flood vulnerability through street view imagery. *Sustainable Cities and Society*, 118, 106016. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106016>
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3295222.3295230>
- Niu, Y., Li, Z., Gao, Y., Liu, X., Xu, L., Vardoulakis, S., & Liu, Q. (2021). A systematic review of the development and validation of the heat vulnerability index: major factors, methods, and spatial units. *Current Climate Change Reports*, 7(3), 87–97. <https://doi.org/10.1007/s40641-021-00173-3>
- Openshaw, S. (1984). The modifiable areal unit problem. *Concepts and Techniques in Modern Geography*.

- Pörtner, H. O., Scholes, R. J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, X., ... & Ngo, H. T. (2021). IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. IPBES and IPCC, 10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4659158>
- Preacher, K. J., & Hayes, A. F. (2008). Asymptotic and resampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models. *Behavior Research Methods*, 40(3), 879–891. <https://doi.org/10.3758/BRM.40.3.879>
- Salih, A. M., Raisi-Estabragh, Z., Boscolo Galazzo, I., Radeva, P., Petersen, S. E., Lekadir, K., & Menegaz, G. (2024). A perspective on explainable artificial intelligence methods: SHAP and LIME. *Advanced Intelligent Systems*, 7, 2400304. <https://doi.org/10.1002/aisy.202400304>
- Schiller, J., Stiller, S., & Ryo, M. (2025). Artificial intelligence in environmental and Earth system sciences: explainability and trustworthiness. *Artificial Intelligence Review*, 58(10), 316. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11165-2>
- Seddon, N., et al. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 375(1794), 20190120. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>
- Shreevastava, A., Hulley, G., Prasanth, S., Chakraborty, T. C., Ramos Aguilera, D., Twomey Sanders, K., & Yin, Y. (2025). Contemporary income inequality outweighs historic redlining in shaping intra-urban heat disparities in Los Angeles. *Nature Communications*, 16(1), 4950. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59912-x>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Veličković, P., Cucurull, G., Casanova, A., Romero, A., Liò, P., & Bengio, Y. (2018). Graph attention networks. *International Conference on Learning Representations (ICLR 2018)*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.10903>
- Yachi, S. & Loreau, M. (1999). Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. *PNAS*, 96(4), 1463–1468. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.4.1463>
- Yang, J., Li, H., Xin, J., Yu, W., Ren, J., Yu, H., & Xia, J. C. (2025). Investigating the effect of urban form on land surface temperature at block and grid scales based on XGBoost-SHA P. *Environmental Modelling & Software*, 106738. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106738>
- Yu, M., Huang, Q., & Li, Z. (2024). Deep learning for spatiotemporal forecasting in Earth system science: a review. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), 2391952. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2391952>
- Zeng, W., Lin, C., Lin, J., Jiang, J., Xia, J., Turkay, C., & Chen, W. (2021). Revisiting the modifiable areal unit problem in deep traffic prediction with visual analytics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(2), 839–848. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3030410>
- Zhang, B., Xu, G., Jiao, L., Liu, J., Dong, T., Li, Z., Liu, X., & Liu, Y. (2019). The scale effect

- ts of the spatial autocorrelation measurement: aggregation level and spatial resolution. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(5), 945–966. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1564316>
- Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J., & Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7575–7580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116>
- Choi, H., et al. (under review). Climate Justice through Explainable Graph Neural Networks: A Spatiotemporal Attention-Based Urban Heat Risk Assessment under IPCC AR6 Framework. *Urban Climate*.
- Goodchild, M. F., & Lam, N. S. N. (1980). Areal interpolation: A variant of the traditional spatial problem. *Geo-processing*, 1(3), 297–312.
- Pace, R. K., & Barry, R. (1997). Quick computation of spatial autoregressive estimators. *Geographical analysis*, 29(3), 232–247.
- Bivand, R. S., Pebesma, E. J., & Gómez-Rubio, V. (2008). *Applied spatial data analysis with R*. New York, NY: Springer New York.
- Shin, Y. J., Arneth, A., Chowdhury, R. R., Midgley, G. F., & Alkemade, J. R. M. (2019). Plausible futures of nature, its contributions to people and their good quality of life. In *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services* (pp. 599–766). Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES).
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- Pearl, J. (2009). *Causality: Models, Reasoning, and Inference* (2nd ed.). Cambridge University Press, New York. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511803161>
- Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986). The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of personality and social psychology*, 51(6), 1173.
- MacKinnon, D. (2012). *Introduction to statistical mediation analysis*. Routledge.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2012). Social vulnerability to environmental hazards. In *Hazards vulnerability and environmental justice* (pp. 115–132). Routledge.
- Reardon, S. F., & Bischoff, K. (2011). Income inequality and income segregation. *American journal of sociology*, 116(4), 1092–1153.
- Massey, D. S., & Denton, N. A. (1988). The dimensions of residential segregation. *Social forces*, 67(2), 281–315.
- Han, S. (2022). Spatial stratification and socio-spatial inequalities: the case of Seoul and Busan in South Korea. *Humanities and social sciences communications*, 9(1), 1–14.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulleti*

n of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900.