

# 도시 구조와 녹지공간이 지표면온도에 미치는 비선형적 영향 분석 : 설명 가능한 기계학습 모형을 활용하여

## Nonlinear Effects of Urban Structure and Green Space on Land Surface Temperature: An Explainable Machine Learning Approach

유소현\* · 이동근\*\*

So Hyun Yoo\* · Dong Kun Lee\*\*

### Abstract

Although the importance of urban green spaces for mitigating the urban heat island effect is widely recognized, understanding their relationship with surrounding urban environments is crucial in densely developed areas. This study examined the nonlinear effects of urban structural elements and green space characteristics on land surface temperature (LST) in Incheon, South Korea. Using the XGBoost machine learning model and SHAP interpretation technique, the research analyzed the relative importance, nonlinear relationships, threshold points, and interaction effects among variables, including green coverage, landscape metrics, building coverage, and building height. Results showed that building area ratio exerted the strongest positive influence on LST, while water body ratio, ground elevation, and green space ratio were the main contributors to temperature reduction. A clear nonlinear relationship was identified for green space ratio: its impact shifted to a cooling effect once it exceeded 36% at the 500m grid scale. In areas below this threshold, building height and height diversity showed a complementary interaction that helped reduce LST. These findings confirm a synergistic relationship between green spaces and urban structure elements. This study provides quantitative evidence of the critical green space threshold and key interactions in high-density urban settings, offering valuable insights for spatial planning and urban thermal environment improvement.

**Keywords:** Urban Structure, Urban Green Space, Building Height, Land Surface Temperature, Explainable Machine Learning

### 1. 서론

도시 열섬 현상은 도시지역이 주변 지역보다 더 높은 기온을 경험하는 현상을 의미하며(Oke, 1982), 이는 도시 거주 환경에 다양한 영향을 미친다(Synnefa

et al., 2006). 기후변화에 따라 온도 상승으로 인한 부정적인 건강 영향은 더욱 증가할 것으로 전망되고 있으며(Trlica et al., 2017), 이에 효과적인 대응 수단으로 도시 녹지의 중요성이 강조되고 있다. 도시 열 환경 개선의 효과적인 수단으로써 녹지의 냉각

\*인천연구원 도시정보센터 전임연구원(주저자: yoosh@ii.re.kr)

\*\*서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부 교수(교신저자: dklee7@snu.ac.kr)

효과는 많은 연구에서 입증되어왔다(Aram et al., 2019). 특히 인프라 개조가 어려운 기존의 도시들은 밀집된 건물 환경에서 열 영향을 완화하는 수단으로서 녹지의 효율적 계획을 위해 도시 환경, 녹지, 열 환경 간의 관계를 탐색하는 것이 중요하데(Ren et al., 2025), 단순히 도시 녹지의 총량을 늘리는 것보다 같은 녹지 면적으로도 효과를 최대화하기 위해서 도시 주변 환경을 고려한 접근 방식이 필요하다(Massaro et al., 2023). 또한 녹지는 기후변화 영향을 완화하고 도시의 회복력을 강화하는 인프라로 가능하며(심지수·구형수, 2024), 이러한 효과를 강화하기 위해 공간 구조를 고려한 연결성 확보의 중요성이 논의된 바 있다(최재혁 외, 2022). 이는 일률적인 양적 공급 위주의 계획이 아니라 녹지의 공간적 구성을 최적화하는 것이 필요함을 의미한다(Guo et al., 2020; Yao et al., 2020).

녹지의 공간적 구성은 크기, 모양의 복잡성, 배열 형태 등 다양한 유형의 경관 지표로 평가된다(Masoudi and Tan, 2019). 도시 녹지의 크기로 대표되는 양적인 지표는 온도 저감에 긍정적인데, 녹지의 크기 또한 특정 크기 이상으로는 온도 저감 효과가 크게 증가하지 않는 임계 효과가 존재한다(Yu et al., 2017). 녹지의 모양과 공간적 배치에 관해서는 녹지 모양이 복잡할수록 온도가 상승하는 경우(Yu et al., 2017), 온도가 저감되는 경우(Qiu and Jia, 2020) 등 상반된 연구 결과들이 존재하여 어떤 형태가 온도 저감에 이상적인지에 관한 명확한 결론은 내려지지 않았고, Yu et al.(2020)은 각 연구 사례별 도시 환경 요소의 차이가 주요한 원인 중 하나라고 분석하였다. 도시의 지배적인 토지피복 유형인 건물과 도로 등의 불투수성 환경은 도시 미기후를 결정하는 주요 영향 요인이고, 도시의 열 환경은 이와 같은 건조 피복과 녹지, 인간 활동 등 다양한 구성 요소들이 비선형적으로 상호작용 하는 복잡한 시스템이다(Yu et al., 2020). 특히 도시 내 녹지일수록 온도

저감 효과를 결정하는 주요한 요인은 인근 토지피복 유형, 건축 재료, 건물 높이, 도시 요소의 배열, 인간 활동 등으로 다양하므로, 이러한 도시적 맥락에 대한 고려가 필요하다(Galalizadeh et al., 2024).

국내 도시를 대상으로 도시 열섬 현상과 도시 구조 간의 관계를 분석하는 다수의 연구가 진행되어 왔다. 특히 도심 지역을 대상으로 온도 저감에 효과적인 녹지 수준을 제시한 연구로, 송봉근·박경훈(2015)은 토지이용 유형 중 주택 및 상업지역에서 녹지율이 40~50%일 때 지표면온도 저감 효과가 나타난다고 분석하였다. 최근 연구들은 건물 높이와 같은 도시의 수직적 구조를 고려하는 방향으로 확장되고 있다. 이경일(2023)은 고층 건물 위주의 아파트 단지에 비해 저층 주거지나 산업단지 지역에서 높은 열섬 강도가 나타나고, 건축물의 수평·수직적 구조가 열섬 강도에 영향을 미치는 주요한 요인이라고 분석하였다. 전규원·박유진(2024)은 식생의 밀도와 건축 형태가 모두 온도에 유의미한 영향을 끼치는 것으로 분석하였고, 식생과 중층 이상의 건물 설계의 적극적 고려를 제안하였다. 그러나 기존 연구에서 제시된 녹지율 기준은 도시 환경 요소와 지표면온도 간의 선형적 관계를 기반으로 도출된 것으로, 주변 도시 환경과의 상호작용을 충분히 반영하지 못한다(Ren et al., 2025; Chen and Guo, 2026). Kim et al.(2022)은 지표면온도와 토지이용 변수 간의 관계가 비선형적으로 나타날 수 있으며 주변 환경의 공간적 맥락에 따라 달라질 수 있음을 분석하였다.

특히 고밀 도심일수록 녹지의 냉각 효과가 주변 건조 환경과의 관계에 따라 달라지므로(Zhu et al., 2025), 선형 관계 기반의 기준만으로는 복합적인 열 환경 특성을 충분히 설명할 수 없다. 또한 녹지의 효과는 주변 건물 등 건조 환경 요소와의 관계 속에서 달라질 수 있으므로, 변수 간 상호작용 효과를 고려할 필요가 있다. 그러나 이러한 맥락에서 도시 환경

변수 간의 비선형적 관계 및 상호작용 효과를 분석한 연구는 부족한 실정이다.

최근 녹지, 도시 환경 요소와 지표면온도 간의 비선형적인 관계와 더불어 임계 효과의 가능성이 제시되고 있다(Masoudi and Tan, 2019; Chen, 2024; Ren et al., 2025; Shu et al., 2025). 선형 기반 모형과 달리 트리 기반의 기계학습 모형은 변수 간의 비선형적인 관계와 상호작용을 식별하는 데 효과적이다(Zhong et al., 2025; Ren et al., 2025). 또한 이러한 관계는 설명 가능한 인공지능(XAI, eXplainable Artificial Intelligence) 기법을 적용함으로써 각 요소가 종속변수에 끼치는 중요도와 영향 방향이 전환되는 임계치를 도출하여 해석력을 높일 수 있으며(Hu et al., 2024), 이는 도시 요소 간의 복잡한 관계를 이해하고 정책적으로 해석하는 기반을 제공하고 있다(Feng et al., 2024). 특히 비선형 관계를 기반으로 한 임계치는 도시의 기후 조건이나 도시 구조 등 맥락적 특성에 따라 다르게 나타날 수 있으므로(Chen and Guo, 2026), 국내 도시지역을 대상으로 한 분석이 필요하다.

이에 본 연구는 고밀 도시지역을 대상으로 도시 내 녹지 경관 변수와 도시 환경 요소가 지표면온도와 가지는 비선형적 관계와 상호작용 효과를 설명 가능

한 기계학습 모형을 활용하여 분석하고, 각 변수의 기여도와 영향 임계값을 도출하여 상호작용 효과를 논의함으로써 쾌적한 도시 열 환경을 계획하기 위한 시사점을 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구의 범위

#### 2.1.1 공간적 범위

본 연구의 대상지는 인천시 육지 지역으로, 인천시는 수도권에 위치하여 바다와 접하고 있으며 계양산, 문학산 등 산지 또한 발달하였다. 인천시는 1990년대 이후 지속적인 매립으로 도시지역 및 나지의 비중이 증가했으며, 주로 산림이나 초지 개발보다는 해안 매립을 통해 개발을 진행해 왔다. 매립을 통해 개발한 지역은 신도시로 조성되었다(김대영, 2011). 인천시는 해안 지역과 산림, 신도시와 구도심이 혼재하여 다양한 도시구조 특성을 나타내고 있어 분석대상지로 선정하였다. 도시 내 녹지의 냉각 효과와 주변 도시 환경 요소의 관계를 분석하기 위해 대상지의 용도지역상 도시지역을 분석 대상으로 하였다. 특히 도시지역 중 주거, 상업, 공업지역은 녹지지역과 달리 불투수면 비율이 높아 도시 열섬과 고온 문제에 취약

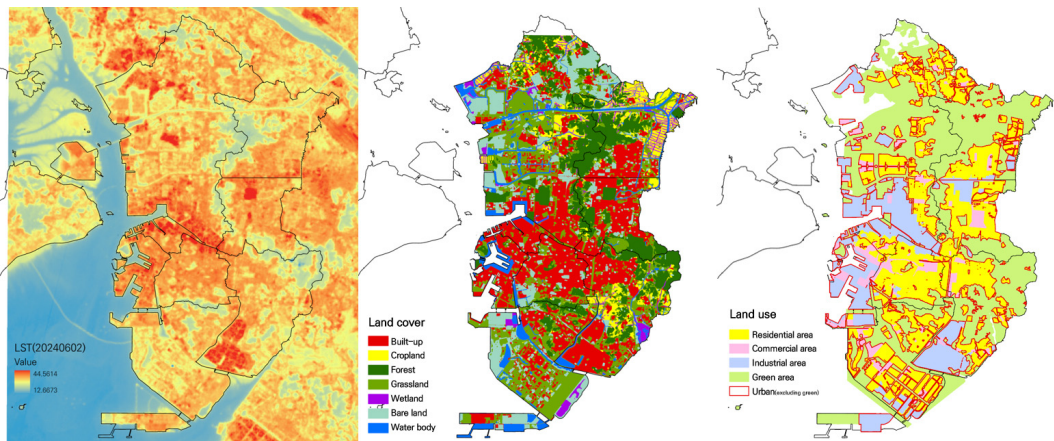


Fig. 1. LST (Land Surface Temperature), Land Cover, Land Use Zoning of the Study Site

한 지역으로(김지숙·김호용, 2020), 녹지지역을 제외한 도시지역에서도 열섬현상 완화를 위한 적정 면적의 녹지 확보가 필요하다(송봉근·박경훈, 2015). 따라서 본 연구에서는 용도지역 중 녹지지역을 제외한 도시지역을 분석 대상으로 하였으며, 연구대상지의 지표면온도, 토지피복, 용도지역 분포는 Fig. 1과 같다.

### 2.1.2 시간적 범위

본 연구의 시간적 범위는 2024년 초여름의 단일 시점이다. 종속변수인 지표면온도는 2024년 6월 2일 한국표준시(KST) 기준 오전 11시 10분에 촬영된 Landsat 9 영상을 활용하여 산출하였고, 설명변수는 해당 시기와 가장 근접하게 확보 가능한 자료를 활용하여 구축하였다. 따라서 본 연구는 2024년 초여름 단일 시기의 지표면온도의 공간적 분포와 설명변수 간의 관계를 분석의 범위로 하였다.

### 2.1.3 분석 단위

도시 구조 요소와 열 환경 간의 관계를 분석할 때, 공간적 분석 단위 또한 주요한 영향 요인이다. Lin et al.(2024)은 390~570m의 공간 해상도에서 주변 도시 환경 요인이 지표면온도를 예측하는 설명력이 가장 높은 것으로 분석하였다. Hu et al.(2024)에 의하면 500m 격자 해상도는 도시의 열적 특성을 가장 잘 포착하는 공간 단위이며, 이는 동시에 도시 녹지 공간의 경관적 패턴과 주변 도시 환경 특성에 대한 정보를 확보할 수 있는 적절한 해상도로 평가된다(Xu and Rui, 2024; Lin et al., 2025). 국내 도시인 서울과 부산을 대상으로 도시 구조와 열 환경 간의 관계를 분석한 Xia et al.(2025)은 500m 해상도가 도시 열섬을 설명하는 데 데이터의 미시적인 잡음을 줄이면서도 공간적 변동성을 효율적으로 드러내는 해상도라고 분석하였다. 또한 500~800m 간격의 도로로 둘러싸인 도시 블록은 도시 거주자의 일상 활동

이 수행되는 5분 범위 내의 거리로 평가된다(Zhou et al., 2024). 따라서 500m 격자는 도시 열 환경의 특성이 잘 표현되고 이에 대한 도시 환경 변수의 설명력이 높게 나타나는 공간 단위이며, 5분 보행 생활권이라는 도시 계획적 의미를 가진다.

이에 본 연구에서는 대상지를 500m 크기의 격자로 분할하고, 인천시 도시지역과 교차하는 격자를 추출하여 각 격자에 대해 종속변수와 설명변수를 집계하였다. 각 격자는 분석 단위이자 개별 데이터 샘플을 나타내며, 이를 기반으로 모형을 구축하였다. 본 연구의 분석 결과는 격자 단위에서 나타나는 지표면온도의 공간적 분포와 도시 환경 변수 간의 관계를 나타내는 것으로 해석 범위를 한정하였다.

## 2.2 분석 자료

### 2.2.1 지표면온도(LST)

지표면온도(LST, Land Surface Temperature)는 도시 열 환경을 공간적으로 평가하는 데 널리 사용되는 자료로, 토지 이용 형태와 온도 영향에 관한 연구들이 광범위하게 수행되었다. 지표면 온도는 Google Earth Engine(GEE) 플랫폼을 통해 USGS에서 제공한 Landsat 9 영상에서 추출하였다. 일반적으로 6월에서 8월까지의 기간이 여름철로 분류되며, 몬순형 기후인 한반도 중부 지역의 경우 여름철은 5월 하순에 시작하여 9월 하순에 종료된다(최광용 외, 2006). 몬순형 기후는 여름철에 높은 온량을 나타내므로, 이 시기에는 저온량 영상의 확보가 제한적이다(Qiu and Jia, 2020; Jeong et al., 2025). 기후대가 유사한 중국의 도시들을 대상으로 진행된 선행 연구들(Qiu and Jia, 2020; Zhu et al., 2025; Lin et al., 2025; Wei et al., 2025)에서도 이와 같은 문제로 여름철의 단일 시기 영상을 선택하여 지표면온도를 산출하였는데, 본 연구에서도 가장 최근의 여름철 기간 중 온량이 가장 낮은 단일 시기의 영상을 활용하였다. 따라서 2024년 6월부터 8월의 모든 영상을 온량을 기

준으로 정렬하여 구름이 가장 없는 날의 영상을 분석 자료로 선택하였고, 당시 운량은 2.4%이다.

지표면온도 산출은 USGS에서 제공하는 Landsat 9 Data Users Handbook을 참조하였다. 식 (1)을 활용하여 대기 상층부의 분광 복사량을 구한 후, 이를 식 (2)를 통해 섭씨 밝기 온도로 변환한다.

$$L\lambda = M_L Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

( $L\lambda$ : Spectral radiance,  $M_L$ : Radiance multiplicative scaling factor,  $Q_{cal}$ : Pixel value in DN,  $A_L$ : Radiance additive scaling factor)

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad (2)$$

( $K_1, K_2$ : Band specific thermal conversion constant)

4번, 5번 밴드를 활용하여 식 (3)을 통해 NDVI를 구하고, NDVI의 최대값과 최소값을 산출하여 식 (4)를 통해 식생 비율을 계산하였다.

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4} \quad (3)$$

( $B5$ : Value of landsat band 5,  $B4$ : Value of landsat band 4)

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (4)$$

( $NDVI_{\min}$ : Minimum value of NDVI,  $NDVI_{\max}$ : Maximum value of NDVI)

최종적으로 식 (5)를 적용하여 지표면온도를 산출

하였다. 각 식에서 활용하는 계수들은 해당 가이드 라인에서 제시하는 메타데이터 값들을 적용하였다.

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(\frac{\lambda BT}{\rho}\right) \ln \epsilon} \quad (5)$$

( $\lambda$ : Wavelength of emitted radiance from band 10,  $\rho = h \frac{c}{\sigma}$  ( $h$ : Planck's constant,  $c$ : Velocity of light,  $\sigma$ : Boltzmann constant),  $\epsilon$ : Land surface emissivity)

### 2.2.2 토지피복 및 건물 데이터

토지피복지도는 위성영상을 기반으로 피복을 분류한 지도로, 지표면의 실제 상황을 가장 잘 반영하고 있어 여러 분석의 기초 자료로 활용되고 있다(어성희 외, 2021). 본 연구는 환경부에서 제공하는 2023년 기준 토지피복지도 중분류를 활용하여 녹지지역을 추출하고 녹지 공간 변수 구축에 활용하였다. 이는 중분류 지도는 5m급 해상도로 제작되어 30m 해상도로 제작된 대분류 지도보다 상세한 녹지지역 추출이 가능하다.

건물 데이터는 수치지형도 기반으로 제작된 국토지리정보원의 건물 높이 DB를 사용하였다. 건물 높이 DB는 상세한 건물 높이 정보를 가지고 있어 본 연구에서 핵심적으로 다루고자 하는 건물의 입체적 특성을 분석하기 적합한 것으로 판단하였으며, 모든 변수는 분석 단위별로 가공하여 재집계하였다.

### 2.3 변수 구축

본 연구에서는 국토지리정보원에서 제공하는 500m 격자를 분석 단위로 활용하였다. 연구대상지인 인천시 도시지역과 ArcGIS의 Select by Location 기능을 통해 Intersect 관계에 있는 격자를 추출한 후, 각 격자에 대해 종속변수인 지표면온도를 집계하였다. 이

**Table 1.** List of Explanatory Variables

	Variables	Description	Unit
Urban Environment	Impervious Surface Ratio	The proportion of the impervious surface area in the grid area	%
	Building Surface Ratio	The proportion of the building surface area in the grid area	%
	Building Ground Height	Grid average of building ground height	m
	Building Height	Grid average of building height	m
	Standard Deviation of Building Height	Standard deviation of building heights within the grid	m
	Water Area Ratio	The proportion of the water area in the grid area	%
	NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	-
Green spaces	Green Space Quantity	The proportion of the green space area in the grid area	%
	Green Space Shape Index	The ratio of the perimeter length of the green cover within the grid to the grid perimeter	-
	Green Space Uniformity	Standard deviation of green space area within the grid	m <sup>2</sup>
	Green Space Connectivity	Grid mean of the area-weighted Euclidean neighborhood distance of green space	m

후 도시 환경 특성 변수, 녹지 공간 특성 변수들을 개별로 동일한 격자 단위로 구축하여 설명변수로 활용하였다. 이를 통해 각 격자를 개별 데이터 샘플로 하는 정형 데이터셋을 구축하였으며, 구축된 설명변수의 정의와 단위는 Table 1에 제시하였다.

### 2.3.1 도시 환경 특성 변수

도시 미기후에 영향을 끼치는 환경은 크게 불투수면, 자연 표면으로 구분되며, 자연 표면에는 식생 지역과 수역이 포함된다(Massaro et al., 2023). 도시 피복의 기하학적 특성은 미기후에 영향을 끼치므로 형태적 특성의 영향을 분석할 때 불투수면과 더불어 건축물과 관련된 변수는 필수적이다(Yao et al., 2020). 건물은 태양복사열을 흡수하여 지역의 전반적인 온도를 높이지만, 높은 건물은 그림자를 형성하여 표면온도를 낮추기도 한다. 따라서 건축물이 지표면에서 차지하는 면적의 비율과 건축물 높이는

핵심 변수로 활용된다(Xu and Rui, 2024; Yi et al., 2025; Ren et al., 2025). 또한 건물 높이의 표준편차는 도시 표면의 거칠기를 나타내는 지표로, 복사열 흡수와 공기 순환을 조절하여 지표면온도에 영향을 끼치는 주요 요소이다(Yang and Li, 2015; Zeng et al., 2022).

이러한 논의를 바탕으로 도시 건조 환경 특성을 나타내는 변수를 개발 강도와 관련된 변수, 수직적 형태와 관련된 변수로 구분하였는데, 개발 강도는 불투수면 면적 비율(IMP\_RATIO)과 건물 면적 비율(BLD\_RATIO)로, 수직적인 형태는 평균 건물 높이(BLD\_BV\_MN)와 지반고(BLD\_MN)로, 표면의 거칠기는 건물 높이의 표준편차(BLD\_BV\_MN\_SD) 변수를 사용하였다. 수역 면적(W\_RATIO) 또한 지표면 온도와 음의 관계에 있는데(Yang et al., 2020), 본 연구에서는 녹지 경관 변수와 영향을 구분하여 파악하기 위해 수역 면적 비율 변수로 도시 환경 특성에 포

합하였다.

선정된 변수들 중 백분율로 나타나는 불투수면, 건물, 수역 면적 변수의 경우 각 격자에서 해당 피복 면적이 차지하는 비율로 산출하였다. 격자  $i$ 에서 피복 유형  $j$ 의 면적 비율  $R$ 은 격자 내 해당 피복 면적의 합  $\sum a_{ij}$ 을 격자 면적  $A_i$ 으로 나누어 식 (6)과 같이 백분율로 산출하였다.

$$R_i = \frac{\sum a_{ij}}{A_i} \times 100 \quad (6)$$

평균값으로 산출되는 변수는 건물 높이, 건물 지반고 변수로, 각 격자  $i$ 에 포함되는  $n$ 개의 객체  $k$ 의 값  $x_{ik}$ 의 평균으로 식 (7)을 통해 산출된다.

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} x_{ik} \quad (7)$$

건물 높이의 표준편차의 경우 격자  $i$ 에 포함되는 객체 즉 건물 높이  $x_{ik}$ 의 표준편차  $s_i$ 는 다음 식 (8)을 통해 산출된다.

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} \quad (8)$$

### 2.3.2 녹지 공간 특성 변수

정규식생지수(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)는 식생 엽록소의 활성화 정도를 측정하여 녹지 피복을 나타낼 수 있는 대표적인 지표로서 변수로 활용하였다. 경관 지표는 녹지의 양뿐만 아니라 그 공간적 구조의 특성을 나타내며, 이러한 공간적 구조는 증발산과 그늘 형성 등의 과정을 통해 다양한 기후 조절과 열섬 완화 기능을 가진다 (Kong et al., 2014; Xu and Rui, 2024). 도시 녹지의 공간적 패턴은 일반적으로 면적, 모양의 복잡한

정도, 단편화 수준, 연결성을 측정하여 정량화된다 (Chen, 2024). Masoudi and Tan(2019)은 지표면온도와의 관계를 가장 잘 반영하는 도시 녹지의 공간적 패턴으로 녹지의 비율, 녹지의 모양 관련 지수, 패치 밀도, 녹지의 연결성 관련 지수를 제시하였다. 모양의 복잡한 정도는 가용 공간이 한정된 도시 내에서 녹지의 공간적 구성을 최적화하기 위한 지표로 분석에 포함된다(Yao et al., 2020). 녹지 면적의 표준편차는 녹지 배치의 균일성을 측정하는 지표이고 (Zhou et al., 2024), 연결성을 측정하는 지표는 이웃 녹지와의 거리를 면적 가중하여 계산된다(Masoudi and Tan, 2019; Zhou et al., 2024).

선행 연구들에 공통적으로 활용되고 지표면온도와 관련이 높은 것으로 나타난 녹지 공간 지표의 속성은 식생지수와 녹지 면적 비율로 표현되는 녹지의 양, 녹지의 모양, 녹지 배치의 균일성, 녹지 모양의 복잡성, 녹지의 연결성으로 요약될 수 있다. 따라서 NDVI, 녹지 피복의 면적 비율(G\_RATIO), 녹지 형상 지수(G\_LSI), 면적의 표준편차(G\_AREA\_SD), 녹지 패치 간 면적 가중 평균 거리(G\_NEAR\_DIST)의 5가지 지표를 녹지 공간 분석 변수로 선정하였다.

녹지 면적 비율은 식 (6), 녹지 면적의 표준편차는 식 (8)을 적용하였고, NDVI는 LST 구축 과정에서 식 (3)을 통해 산출하였다. 녹지 모양의 복잡성을 나타내는 형상 지수(LSI, Landscape Shape Index)의 경우 Sun et al.(2012)의 정의에 의해 격자  $i$ 의 녹지의 둘레  $l_i$ , 녹지의 면적  $a_i$ 를 기반으로 식 (9)에 따라 산출된다.

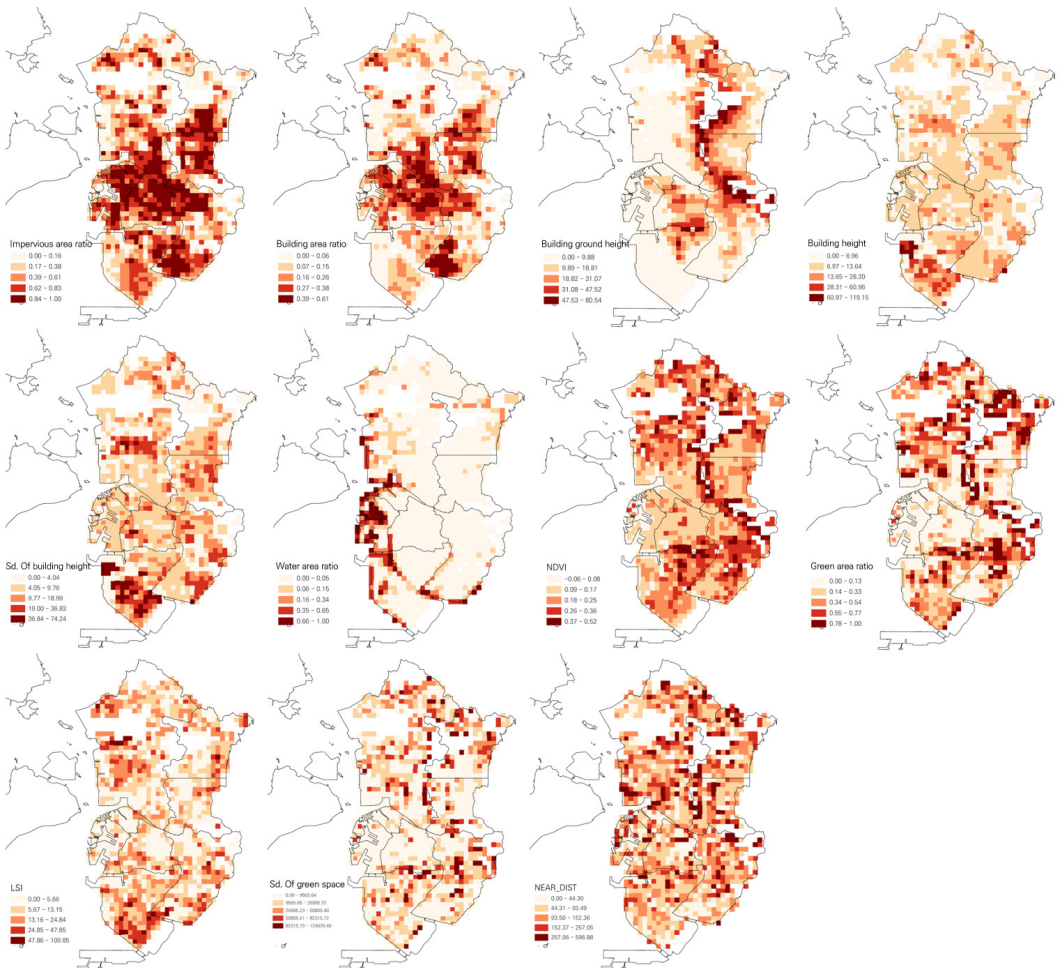
$$LSI_i = \frac{l_i}{2\sqrt{\pi a_i}} \quad (9)$$

녹지의 연결성을 나타내는 녹지 패치 간 면적 가중 평균 거리는 Zhou et al.(2024)가 제시한 식 (10)에 따라 가장 가까운 녹지 패치까지의 거리를 기준으로,

격자 $i$ 의 녹지 패치 중심에서 가장 가까운 녹지 패치 중심까지의 거리  $h_i$ 를 계산하였다.  $a_i$ 는 격자 내 녹지 패치의 면적으로, 면적이 큰 패치의 근접성이 더 높은 연결성을 나타내도록 가중평균 형태로 반영하였다.

$$NEARDIST_i = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \times a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (10)$$

각 변수의 공간 분포는 Fig. 2와 같다. 건물 면적 비율은 불투수면의 비율보다 실제 건축물이 차지하는 면적의 비율을 나타냄으로써 건물의 영향을 더 잘 반영하고, 지반고 또한 실제 건물이 위치하는 장소에 한해 값을 가지고 있으므로, 건물이 위치한 지역 자체의 영향을 파악하기 용이하다. 지반고는 지형 분포와 유사하게 산란에 가까운 지역이 높은 고도를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 건물 자체의 높이와 건물 높이의 표준편차는 지역적으로 유사한 분포를



**Fig. 2.** Spatial Distribution of the Explanatory Variables (From the Top to Left, Impervious Area Ratio, Building Area Ratio, Building Ground Height, Building Height, Standard Deviation of Building Height, Water Area Ratio, NDVI, Green Space Quantity (Green Area Ratio), Green Space Shape Index (LSI), Green Space Uniformity (Standard Deviation of Green Space Area), Green Space Connectivity (NEAR\_DIST))

보이며, 수역의 비율은 해안과 하천 인근에서 높은 값을 나타낸다. 녹지 면적 비율은 산림 인근 지역이 대체로 높으며, 건축 면적 비율과 상반된 공간 분포를 보이고 있다. 녹지 형태의 복잡성은 상대적으로 도시지역의 녹지에서 높은 값을 나타내고 있다. 녹지 배치의 균일성은 산림과 가까운 지역일수록 높은 값을 나타내고 있으며, 녹지의 연결성 또한 높은 값은 산림과 근접한 지역에서 주로 발견되나 도심 지역에서도 값들이 고르게 분포하고 있다.

최종적으로 구축된 격자 단위의 데이터셋은 종속 변수인 지표면온도, 설명변수인 도시 환경과 녹지 공간 특성 변수로 구성되며, 이를 기계학습 모형 구축을 위한 입력자료로 활용하였다.

## 2.4 분석 방법

### 2.4.1 XGBoost

XGBoost(eXtreme Gradient Boosting Tree) 모형은 결정 트리와 부스팅 기반 접근 방식을 결합한 모형으로, 트리를 이전 모형에 결합하여 예측의 잔차를 수정하여 손실을 최소화하는 최적의 모형을 구축한다(Friedman et al., 2000). 최적화된 구조로 인해 다른 트리 구조 기반 기계학습 모형보다 계산 효율성이 높고 예측력 또한 뛰어난 것으로 평가되며(Fan et al., 2018), 특히 지표면온도 영향 요인 간의 복잡한 상호 작용을 포착하는 데 높은 성능을 나타내고 있어 최근 관련 연구에 활발히 활용되고 있다(Sun et al., 2019; Ma et al., 2024; Huang et al., 2025; Jeong et al., 2025).

본 연구에서는 모형 구축을 위해 전체 데이터의 80%를 훈련용으로, 20%는 테스트용으로 무작위 분할하였으며, 최적 매개변수를 도출하기 위해 5겹 교차 검증(5-fold cross validation)을 적용하였다. 최적 성능을 보인 매개변수 조합을 최종 모형으로 선정하였으며, 모형의 성능은 테스트 데이터셋을 통해 결정계수( $R^2$ ) 값을 기준으로 평가되었다. 모형 구

축 및 평가는 Python 환경에서 “xgboost” 패키지를 활용하여 수행되었다.

### 2.4.2 SHAP

XGBoost 모형 결과를 해석하기 위해 설명 가능한 인공지능(XAI)의 대표적 방법인 SHapley Additive exPlanations(SHAP) 분석을 적용하였다. 블랙박스 로 여겨지는 기계학습 분석 과정을 해석하여 모형 결과의 신뢰성을 개선하기 위한 방법으로 SHAP 분석은 최근 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. SHAP 분석은 각 변수가 모형 예측에 기여하는 정도를 정량화하기 위해 게임 이론을 바탕으로 한 Shapley값을 계산하는 방법(Lundberg and Lee, 2017)으로, Shapley값은 다음 식 (11)에 따라 특정 요인의 값을 고려한 예측 함수와 값을 고려하지 않은 예측 함수 간의 평균 차이로 계산된다.

$$\Phi_i = \sum_{S \subseteq F \setminus i} \frac{|S|!(|F|-|S|-1)!}{|F|!} [f_{S \cup i}(x_{S \cup i}) - f_S(x_S)] \quad (11)$$

( $\Phi_i$ : Contribution of the variable  $i$ ,  $S$ : The set of all input variables excluding  $i$ ,  $F$ : The set of all input variables,  $f$ : Prediction function model,  $x$ : Value of the input variables)

또한 SHAP 분석은 두 변수 간의 상호작용 효과 또한 정량화할 수 있는데, SHAP 상호작용 값은 두 변수의 개별적인 효과의 합으로 설명되지 않는 효과를 식별하기 위해 두 변수의 결합 효과에서 개별 효과의 합을 뺀 값으로 측정된다(Yuan et al., 2024).

분석을 위해 Python 환경에서 “shap” 패키지를 활용하였고, 모든 분석 샘플에 대한 SHAP 값을 합산하여 변수별 중요도를 정렬하여 LST에 대한 각 변수의 기여도와 일반적인 관계를 나타냈다. 이어서 종속성

플롯으로 지표별 기여도의 비선형적 영향과 임계값을 식별하였고, 두 변수의 결합이 모형 결과에 끼치는 영향인 상호작용 효과 또한 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 LST와 설명변수 간 상관관계

모형 구축 및 분석 결과의 신뢰성과 해석력을 향상시키기 위해 변수 간의 다중공선성을 평가하고 피어슨 상관 분석을 사용하여 LST를 포함한 모든 변수 간 선형 관계를 정량화하였다. 다중공선성은 설명변수 간 분산 팽창 계수(VIF)를 계산해서 평가하였는데, 값이 높으면 해당 변수가 모형의 다른 예측 변수와 유사한 관계를 가지고 있음을 나타내므로 10에 가까운 높은 값이 나오는 변수는 제외하는 것이 필요하다. XGBoost와 같은 트리 기반 모형은 다중공선성에 상대적으로 덜 민감하나, 변수에서 제시되는 정보의 중복을 최소화하고 모형의 복잡성을 줄이기 위해 (Lin et al., 2025) VIF 값을 기준으로 변수를 선정하였다. 11개 설명변수 중 VIF 값이 10 이상으로 높게 나타난 변수는 불투수면 비율, 건물 면적 비율, NDVI, 녹지 면적 비율이다. Yuan et al.(2024)은 건물 면적 비율과 불투수면 비율을 개별 변수로 영향을 분석하

였는데, 건물 면적 비율의 중요도가 불투수 면적 비율의 중요도보다 더 높게 나타나 불투수면적 자체보다 불투수면에서 건물이 위치한 면적이 온도 영향을 더 효과적으로 설명하는 변수로 판단하였다. 이에 근거하여 본 연구에서도 건물 면적 비율과 정보가 중복되는 불투수면 비율을 제외하였다. NDVI는 녹지 면적 비율과 지표면온도에 끼치는 생태학적 기능이 유사하며, 계획적인 측면에서는 녹지 면적 비율 변수가 더 적절한 것으로 평가된다(Yao et al., 2020). 이를 고려하여, 본 연구에서는 녹지 경관 지표와 연계하여 해석을 용이하게 하기 위해 녹지 면적 비율을 분석 변수로 선정하였다. 불투수면 비율과 NDVI를 제외한 후 9개 변수의 VIF 값은 10 이하로 다중공선성의 정도가 크지 않은 것으로 나타나 모두 분석에 활용하였다.

상관관계 분석 결과, 유일하게 건축면적 비율(BLD\_RATIO)이 강한 양의 상관관계를 나타냈고, 나머지 변수들은 모두 음의 상관관계를 나타냈다(Fig. 3). 건축면적 비율의 상관계수는 0.67로, 이는 선행 연구(김현옥·염종민, 2012; Wu et al., 2023; Zhu et al., 2025)에서 분석된 상관계수 범위가 0.5~0.7 수준임을 고려할 때 타당한 상관관계를 나타내는 것으로 판단된다. 가장 강한 음의 상관관계를 나타낸

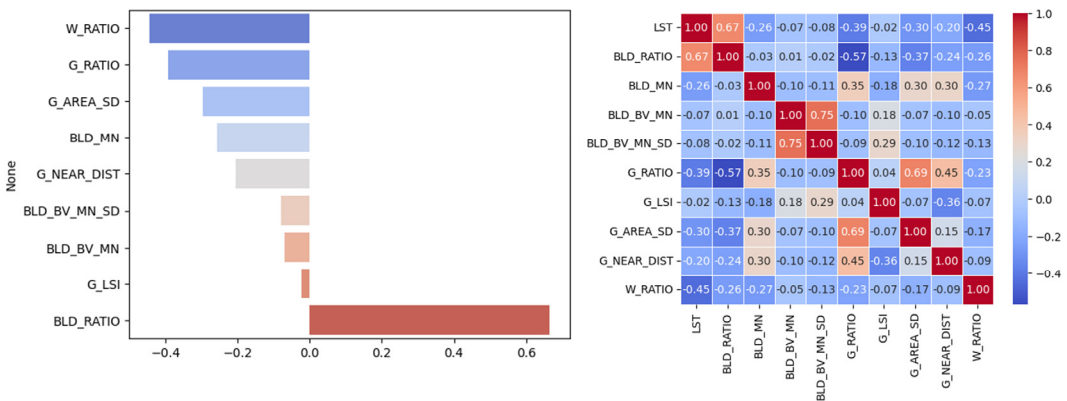


Fig. 3. Correlation between LST and Explanatory Variables

수역 면적 비율(W\_RATIO)의 상관계수는 -0.45이며, 녹지 면적 비율(G\_RATIO)의 상관계수는 -0.39로 나타났다. 녹지 면적 비율의 경우 Masoudi and Tan(2019)이 분석한 녹지 면적과 지표면온도 간 상관관계 범위인 -0.3~-0.45 내에 포함되며, 국내 도시지역을 대상으로 한 선행 연구(김현욱·염종민, 2012)에서 분석된 상관관계수가 -0.562임을 고려할 때, 구축된 변수들이 지표면온도를 적절한 수준으로 설명하고 있는 것으로 판단된다. 이 외에 녹지 경관 지표 변수들, 건물 높이와 관련된 변수들 또한 지표면온도와 음의 상관관계에 있는 것으로 분석되었다. 최종적으로 선택된 변수들은 지표면온도와 합리적인 상관 관계에 있는 것으로 확인되어, 변수 간 비선형 관계 및 상호작용 효과를 분석하기 위해 기계학습 모형 구축에 활용하였다.

### 3.2 XGBoost 모형 성능 평가

교차 검증 결과 구축된 최적 모형의 매개변수는 트리 개수(n\_estimators) 500, 학습률(learning\_rate) 0.01, 최대 트리 깊이(max\_depth) 5, 말단 노드의 최소 데이터 수(min\_child\_weight) 5, 데이터 샘플링 비율(subsample) 0.6, 트리 생성에 필요한 샘플링 비율(colsample\_bytree) 0.8로 구축되었다. 테스트 데이터셋을 활용한 모형 성능 평가 결과, 결정계수( $R^2$ )는 0.758로 나타났다. 이는 유사한 공간 단위에서 구축된 선행 연구(Yuan et al., 2024; Huang et al., 2025; Jeong et al., 2025)의 모형들의 결정계수가 0.6~0.8인 것과 비교할 때 본 모형이 비교적 높은 수준의 설명력을 확보한 것으로 판단된다.

### 3.3 LST에 대한 설명변수의 기여 및 비선형 관계

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 XGBoost 모형의 결과에 대해 SHAP을 활용하여 각 변수가 LST 예측에 기여하는 중요도를 표현한 결과이다. 가장 영향력이

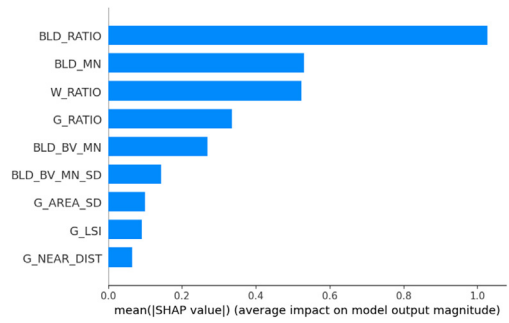


Fig. 4. The Global Importance of the Variables on LST

큰 변수는 건물 비율(BLD\_RATIO)이고, 다음으로 건물의 지반 높이(BLD\_MN)와 수역(W\_RATIO)의 면적이 비슷한 중요도를 가진다. 이어서 녹지 면적의 비율(G\_RATIO), 건물의 높이(BLD\_BV\_MN), 건물 높이의 표준편차(BLD\_BV\_MN\_SD) 순으로 중요도가 감소하며, 녹지의 공간 특성과 관련된 지표들인 녹지 면적의 표준편차(G\_AREA\_SD), 형태의 복잡성(G\_LSI), 녹지의 연결성(G\_NEAR\_DIST)은 상대적으로 중요도가 떨어지는 것으로 나타났다.

전역적으로 건물과 관련된 변수의 중요도가 녹지 관련 변수보다 높게 나타났는데, 이는 LST를 설명하는 데 있어 자연지역 관련 변수로 구성된 모형보다 도시지역 관련 변수로 구성된 모형의 설명력이 더 높게 나타난 Yi et al.(2025)의 연구 결과와 일치한다. 도시 개발 지역의 밀도가 녹지의 영향보다 우선하는 것은 녹지공간의 이점이 도시 밀도 증가로 인해 제한되는 것으로 해석될 수 있다(Xu and Rui, 2024). Yi et al.(2025)는 자연지역의 경우 2차원적 지표인 면적, 건물 지역의 경우 3차원적 지표인 건물 높이를 반영한 천공률이 가장 중요도가 높은 것으로 분석하였는데, 본 연구에서 활용한 변수 또한 녹지 지역의 경우 2차원적인 속성, 건물 높이는 3차원적 속성을 반영하고 있다.

각 변수의 영향 방향에 관한 정보는 Fig. 5의 SHAP 요약 플롯을 통해 파악할 수 있다. 구체적으로 그래

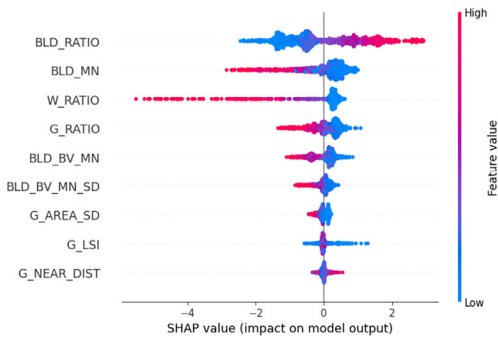


Fig. 5. The Local Feature Importance of the Variables

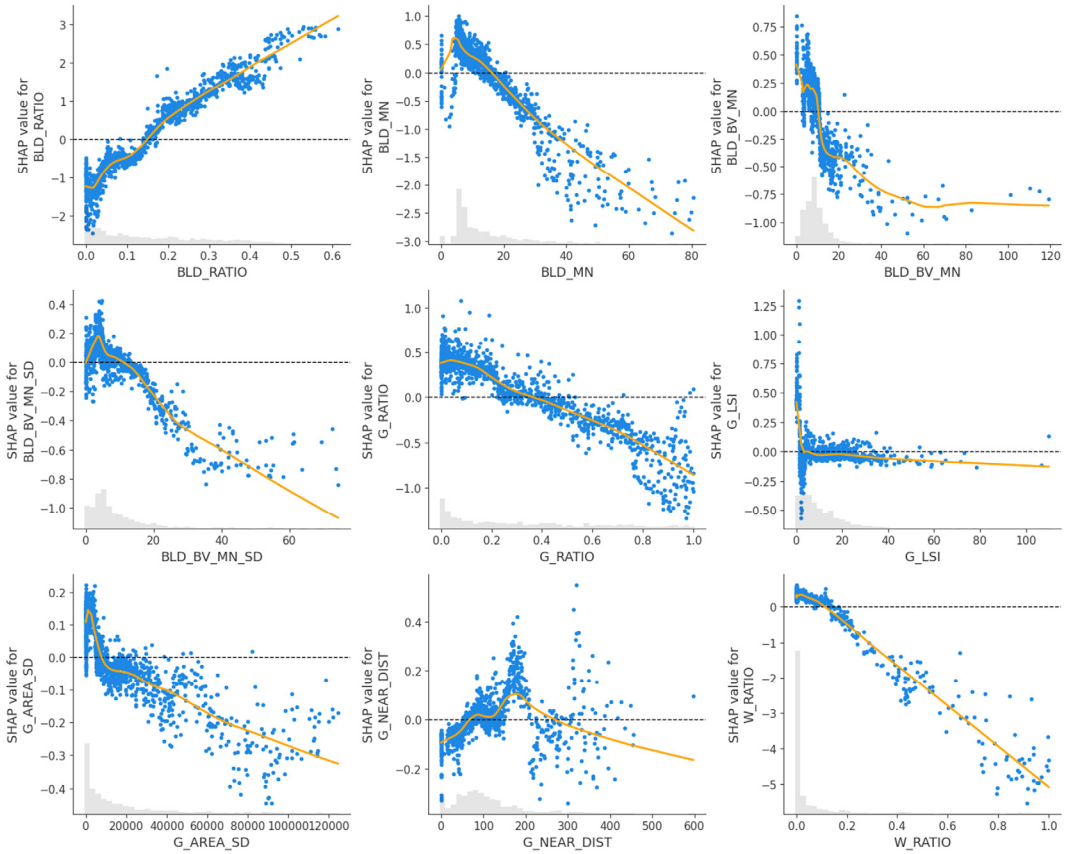
프의 x축은 각 변수의 모형 출력에 대한 기여도를 나타내는 SHAP 값, 색상은 각 변수의 값의 크기를 의미한다. SHAP 값이 음수의 영역에 위치할 경우 종속변수에 음의 영향을 끼치고, 양수의 영역에 위치할 경우 양의 영향을 끼친다. 색상이 파란색에 가까울수록 변수의 값이 작고, 빨간색에 가까울수록 변수의 값이 크다.

가장 영향력이 높은 변수인 건물 면적 비율은 LST에 양의 영향 방향에 많이 분포하며, 해당 변수들이 높은 값을 나타내므로, 즉 건물 면적 비율이 높을수록 온도 상승과 관련됨을 확인할 수 있다. 다음으로 영향력이 높은 변수인 건물 지반 높이는 값이 클수록 온도가 낮게 예측되는데, 건물 지반 높이는 표고와 거의 유사하게 분포하는 변수로 토지피복지도상의 산림에 가까울수록 증가함을 확인할 수 있다. 수역 면적의 비율은 연안 또는 하천 인근 지역에 많이 분포하고 있다. 지반고를 제외한 건물 높이 또한 온도 저감과 관련된다. 이어서 녹지 면적, 건물 높이의 표준편차, 녹지 면적의 표준편차 변수들 또한 온도 저감과 관련되나, 녹지의 형상과 연결성과 관련된 변수는 영향 방향이 명확하게 식별되지 않는다. 녹지의 기여도가 전체 변수에서 상대적으로 작게 나타나더라도 녹지는 도시 열섬 완화 효과의 핵심적인 변수이며(Yao et al., 2020), 특히 녹지의 절대적인 양을 나타내는 지표인 녹지 면적 비율은 밀도, 연결

성, 복잡성 관련 지표보다 더 중요하게 다뤄진다(Chen, 2024). 녹지보다 수역의 온도 영향이 두드러지게 나타난 것과 관련하여 수역과 녹지의 냉각 효과를 평가한 Yang et al.(2020)은 수역의 냉각 범위와 강도가 녹지보다 크고 최대 냉각 효과를 달성하는 지점까지의 임계 면적 또한 가장 크다고 분석하였다. 녹지는 상대적으로 온도를 낮추는 정도와 그 범위가 수역보다 작으나, 최적의 냉각 효과를 위해 수역보다 더 작은 면적이 필요하므로 도시 내 적절한 위치에 계획되는 것이 중요하다.

Fig. 6과 같이 변수별 산점도를 통해 LST와의 비선형 연관성과 영향 방향이 바뀌는 지점을 식별할 수 있다. 산점도는 x축인 각 변수의 값에 따라 종속변수에 끼치는 영향 방향을 의미하는 y축의 SHAP 값이 어떻게 분포하는지를 나타낸다. SHAP 값이 양의 영역에 위치할 경우 해당 변수의 값이 온도 상승에 기여하며, 음의 영역에 위치할 경우 온도 저감에 기여함을 의미한다. 변수와 LST 간의 비선형 관계를 효과적으로 시각화하기 위해 LOWESS(locally weighted scatterplot smoothing) 방법으로 데이터를 평활화하여 산점도에서 회귀선을 도출하였고, 회귀선이 0을 교차하는 지점, 즉 LST 예측에 끼치는 영향 방향이 음에서 양으로, 또는 양에서 음으로 전환되는 지점을 임계값으로 식별하였다. 본 결과에서 논의하는 임계값은 절대적 수치가 아니라 LST에 대한 해당 변수의 기여 방향이 상대적으로 변화하는 지점을 나타낸다.

건물 면적 비율은 증가할수록 LST에 양의 방향으로 기여하는 관계를 확인할 수 있으며, 구체적으로는 비율이 0.15 이상일 때부터 SHAP 값이 양의 영역으로 이동하는 변화가 관찰된다. 반면에 건물의 지반 높이와 건물 높이는 온도와 음의 관계로 나타났는데, 건물의 지반 높이는 16.14m 이상일 때부터, 건물 자체 높이는 10.29m 이상일 때부터 온도에 끼치는 영향이 음의 방향으로 바뀐다. Yuan et al.(2024)는 건



**Fig. 6.** Partial Dependence Plots of the Variables (From the Top to Left, Building Area Ratio, Building Ground Height, Building Height, Standard Deviation of Building Height, Green Area Ratio, Green Space Shape Index, Green Space Uniformity, Green Space Connectivity)

물 높이가 19m에 도달하는 지점부터 상당한 냉각 효과가 있다고 분석하였는데, 본 연구에서는 지반고와 건물 자체 높이를 별도로 분리함에 따라서 선행 연구보다 더 낮은 높이가 임계 높이로 제시되었다. 건물 높이의 표준편차 또한 온도와 음의 관계가 있는데, 10.88m 이상일 때부터 음의 영향의 영역으로 전환되는 것을 확인할 수 있다. Yuan et al.(2024)는 건물 높이의 표준편차가 15m보다 클 때 온도에 음의 영향이 시작된다고 분석하였다. 건물 높이의 표준편차가 크다는 것은 고층 건물의 비중이 증가함을 의미하는데(Zeng et al., 2022), 다양한 건물 높이의 혼합은 지역 미기후를 안정시키는 데 기여한다고 볼

수 있다.

녹지와 관련된 변수들 중 가장 중요도가 높은 녹지 면적 비율은 지표면온도와 음의 관계를 나타내며, 녹지 비율이 0.36 이상일 때부터 지표면온도에 끼치는 영향이 음의 방향으로 전환된다. 비선형 관계 분석을 통해 온도 저감 임계값을 식별한 선행 연구들 중 Ren et al.(2025)는 도시 블록 단위에서 녹지 비율이 0.2~0.4 범위 내에 있을 때 냉각 효율이 최대라고 분석하였으며, 냉각에 기여하기 시작하는 녹지 분율이 거리 단위에서는 0.3(Zhu et al., 2025), 도시 지역 중 식생 밀집 지역을 중심으로 한 격자 단위에서는 0.45(Yi et al., 2025)로 분석된 바 있다. SHAP

분석은 변수 간 상대적 영향 변화가 관찰되는 지점을 해석적으로 식별하는 방법론이므로, 분석에서 도출되는 임계값은 대상지의 특성, 공간 단위, 변수 구성에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 분석에서 나타난 녹지 면적 비율의 임계값 0.36은 용도지역상 도시 지역을 중심으로 한 500m 격자 단위에서 도출되는 결과로 해석을 한정해야 한다. 다만 선행 연구에서 제시된 임계 범위와 비교할 때, 고밀 도시에서 권장되는 녹지 확보 수준으로 합리적인 범위에 해당하는 것으로 판단된다.

녹지 모양의 복잡성은 대부분 약한 음의 영향을 나타내는데, 영향 정도가 선형적으로 증가하지는 않고 0에 가까운 임계값 이후로는 같은 영향이 유지된다. 녹지 경계가 복잡해질수록 주변 지역과 열 교환이 많이 일어나 온도저감 효과가 떨어져(Yu et al., 2017) 해당 지표는 단순히 녹지의 존재에 따라 온도가 감소한 것으로 해석될 수 있다. Qiu and Jia(2020)은 녹지의 복잡한 모양이 차가운 공기를 운반하는 역할을 하므로 지역 전체적으로는 온도 저감 효과가 있다고 분석하였는데, 해당 지표의 대부분의 값이 온도에 음의 영향 관계에 있는 것은 지역 전반적인 냉각 효과에 기여하고 있는 것으로 해석된다. 녹지 규모와 관련하여 크기가 작으면 단순한 모양의 녹지가 온도 저감에 유리하고 녹지 규모가 클수록 모양이 복잡할수록 효과적이라고 분석한 선행 연구 결과(Yang et al., 2020; Xu and Rui, 2024)를 고려할 때, 모양의 복잡성은 녹지의 크기와 연관하여 분석될 필요가 있다. 녹지의 균일성과 연결성을 나타내는 지표는 중요도가 상대적으로 낮은 변수로, LST와 음의 영향 관계에 있으나 특히 녹지 연결성 지표는 가장 복잡한 비선형적 추세가 확인됨에 따라 공간 특성에 따라 다른 요소와의 상호작용을 고려해야 하는 지표로 판단된다. Zhong et al.(2025)는 작고 단편화된 녹지의 경우 온도 저감에 기여하지 못하므로 연결성을 유지하는 것이 중요하다고 분석하였다. 수역의 비율은 전

체 영향 요인 중 세 번째로 중요한 요소로, 수역 면적이 격자의 10% 이상일 경우 온도 저감에 기여하는 것으로 나타났다. 수역의 냉각 범위와 강도는 녹지보다 더 크므로(Yang et al., 2020) 수역에 인접한 지역 샘플들의 영향이 강조되는 것으로 판단된다. 녹지의 온도저감 효과는 주변 환경과 결합된 결과로, 주변 경관의 누적된 냉각 효과를 고려할 때 녹지 인근에 다른 녹지 및 수역이 있는 것이 전체 지역 온도 저감에 긍정적이다(Qiu and Jia, 2020).

### 3.4 녹지 비율과 건물 높이의 LST 기여에 대한 상호작용

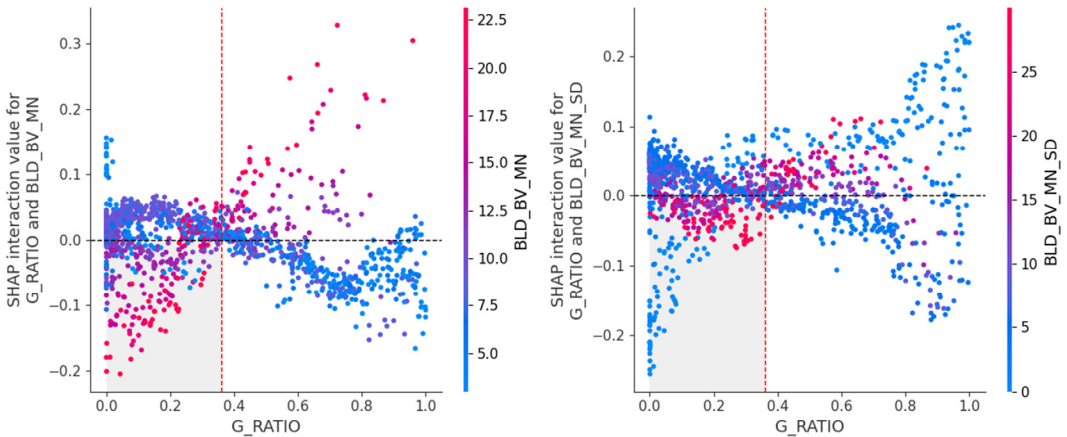
SHAP 분석 결과에 따르면 녹지 경관 지수로 대표되는 공간적 특성들이 온도에 끼치는 영향이 건조 환경 변수 및 녹지 면적 변수와 비교하여 유의미하지 않은 것으로 나타나, 녹지의 양적인 특성과 도시 환경 특성이 온도에 끼치는 영향을 상호작용 효과를 중심으로 분석하고자 한다. 녹지 면적 비율은 녹지 관련 지표 중 지표면 온도 저감에 영향을 끼치는 가장 핵심적인 변수이며, 도시 건조 환경 변수 중 건물 면적 비율은 녹지 면적 비율과 달리 LST에 대해 상반되는 영향 관계에 있다. 반면, 건물 높이와 관련된 변수의 경우 Fig. 6에 나타난 것과 같이 건물의 지반고, 높이, 표준편차는 값이 커질수록 LST와 음의 영향 관계에 있다. Feng et al.(2024)는 DEM이 LST의 44%를 결정할 정도로 핵심적인 변수임을 밝혔는데, 건물 지반고를 변수로 사용한 본 분석에서 지반고의 영향이 건물 관련 변수 중 면적 변수 다음으로 큰 영향을 나타낸 것 또한 같은 맥락으로 볼 수 있다. 본 분석에서는 LST 완화를 위한 도시 구성 요소 간의 상호작용 파악을 위한 변수로 녹지 면적 비율과 건물 높이, 건물 높이의 표준편차를 선택하였다.

SHAP 상호작용 값은 한 변수의 효과가 다른 변수의 값에 따라 달라지는 정도를 측정한다. 상호작용 값이 0에 가까우면 상호작용이 거의 없고, 양수이면

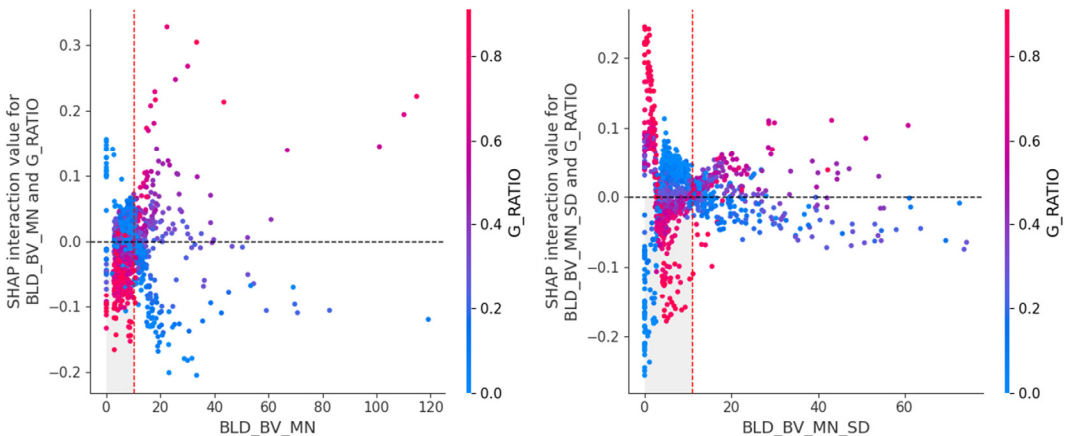
예측값의 증가에 기여하고, 상호작용 값이 음수이면 예측값의 감소에 기여하는 것으로 해석한다. 각 포인트의 색상은 우측 Y축 상호작용 변수의 값으로, 빨간색은 높은 값, 파란색은 낮은 값을 나타낸다.

Fig. 7은 녹지 비율과 건물 높이, 건물 높이의 표준편차 간의 SHAP 상호작용 값을 나타낸 것이다. 온도 완화에 기여하기 시작하는 녹지 비율 0.36 이하인 구간에서 건물 높이가 큰 샘플들이 음의 상호작용 영역에 많이 분포하는 경향이 나타난다. 구체적으로

건물 높이가 상위 25%(11.72m 이상)인 샘플들 중 77.57%, 온도 저감 영향 임계값인 10.29m 이상인 샘플들 중 71%가 음의 상호작용 영역에 분포한다. 이는 녹지가 부족한 조건에서 건물 높이가 증가할 경우, 지표면온도의 예측을 낮추는 방향으로 기여함을 시사한다. 녹지 비율이 0.36 이상으로 높아지면 높은 건물 높이는 오히려 온도 상승에 기여하는 상호작용 영역에 분포하고, 낮은 건물 높이와 녹지 면적에 의한 온도 저감 상호작용이 주로 관찰된



**Fig. 7.** The Dependence Plot Using the SHAP Interaction Value of (Left) Green Space Ratio and Building Heights, (Right) Green Space Ratio and Standard Deviation of Building Heights



**Fig. 8.** The Dependence Plot Using the SHAP Interaction Value of (Left) Building Height and Green Space Ratio, (Right) Standard Deviation of Building Heights and Green Space Ratio

다. 건물 높이 표준편차의 경우 상대적으로 상호작용 방향이 분명하게 식별되지는 않으나, 녹지 비율이 0.36 이하인 지역의 경우 높이의 표준편차 값의 상위 25%(11.98m 이상)인 샘플들의 67.82%가, 온도 저감 영향 임계값인 10.88m 이상인 샘플들 중 63.23%가 음의 상호작용 영역에 분포하여 녹지 비율이 부족한 곳에서 건물 높이의 표준편차 또한 온도를 저감하는 상호작용이 있는 것으로 나타난다.

Fig. 8은 녹지 비율과의 상호작용을 건물 높이 변수를 기준으로 판단하기 위하여 Fig. 7의 상호작용 그래프의 축을 전환한 도표이다. 건물 높이는 10.29m 이상일 때부터 온도 저감에 기여하는데(Fig. 6), 해당 임계값 이하일 때 높은 녹지 비율과 온도를 낮추는 방향으로 상호작용이 나타난다. 구체적으로는 녹지 면적 비율 상위 25%(0.56 이상)인 샘플들 중 94.25%가, 임계값 0.36 이상인 샘플들 중 81.8%가 음의 상호작용 영역에 분포한다.

건물 높이의 표준편차는 10.88m 이상일 때부터 온도 저감에 기여하는데(Fig. 6), 해당 임계값 이하에서는 녹지와와의 상호작용 방향이 혼재되어 있다. Fig. 6에서 건물 높이 표준편차가 3.65m일 때 회귀선의 SHAP 값이 최대이므로 온도 예측에 가장 큰 양의 기여를 하는데, 이후로 표준편차가 증가함에 따라 온도 저감에 기여하기 시작하는 10.88m 지점까지는 녹지 비율이 높은 샘플들이 음의 상호작용 영역에 분포하고 있다.

분석 결과에 따르면 녹지 면적이 일정 수준 이상 확보된 지역에서는 녹지가 온도 저감에 기여하는 효과가 두드러지는 반면, 녹지가 상대적으로 부족한 지역에서는 저층 이상의 건물과 건물 높이의 다양성을 통해 온도를 저감하는 방향으로 상호작용 효과가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 대규모 아파트 단지과 같은 중층 이상의 건물과 개방 공간이 동시에 존재하는 구역에서 낮은 표면온도가 관측된다는 선행 연구 결과와 같은 맥락이며(정혜진·정윤남,

2025), 도시 녹지와 건물 높이 요소가 도시 열섬 완화에 있어 상호 보완적인 역할을 할 수 있음을 시사한다.

#### 4. 결론

본 연구는 인천시 도시지역을 대상으로 500m 격자 단위에서 도시의 공간 구조적 요소들이 지표면 온도(LST)에 미치는 영향을 분석하고, 열 환경 개선을 위한 시사점을 도출하고자 하였다. 기계학습 모형인 XGBoost와 SHAP 해석 기법을 활용하여 각 변수의 기여도, 비선형 관계와 영향 방향이 전환되는 임계값을 도출하고, 온도 저감에 기여하는 요소들의 상호작용을 분석하였다.

분석 결과, 건물 면적 비율이 온도를 상승시키는 가장 주요한 요소이며, 건물 지반고를 비롯해 자연 피복인 수역 면적과 녹지 면적 비율이 온도를 낮추는 대표적인 요소로 나타났다. 건물 높이와 높이의 표준편차는 특정 임계값 이상에서 온도 저감에 기여하는 것으로 나타나 도시 건조 환경의 수직적 특성 또한 도시 열 환경을 조절하는 주요한 요소임을 확인하였다. 다만 녹지 경관 지표 변수들은 다른 도시 환경 변수들과 비교하여 영향 중요도가 상대적으로 낮게 나타났는데, 이는 도시 미기후 개선을 위해서는 녹지의 모양, 배치의 균일성, 연결성과 같은 평면적 기준보다는 녹지의 절대적인 양과 더불어 건물의 배치 및 높이와 같은 도시의 3차원적 구조를 고려하는 접근이 필요함을 시사한다. 녹지 비율과 건물 높이 변수 간의 상호작용을 분석한 결과, 녹지 비율이 일정 임계 수준을 초과한 이후부터는 녹지의 온도 저감 영향이 두드러지나, 녹지 비율이 낮은 지역에서는 건물 높이와 높이의 다양성이 온도를 낮추는 방향으로 상호작용 하는 것으로 나타났다.

본 연구 결과는 도시 열섬 완화를 위한 공간 계획 시 비선형적 관계를 통해 도출된 임계값들과 상호작용

용 효과를 고려할 필요성을 시사한다. 본 연구에서는 도시지역의 500m 격자 기준으로 녹지 면적이 약 36%를 초과할 때부터 지표면온도에 끼치는 영향이 음의 방향으로 전환되는 관계가 관찰되었다. 이는 해당 수준 이상의 녹지 확보가 열 환경 개선에 효과적일 수 있음을 나타낸다. 그러나 녹지 확보가 어려운 개발 지역에서는 약 10m 이상의 높이를 가진 건물과 다양한 건물 높이의 혼합이 온도를 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다. 결론적으로, 쾌적한 도시 열 환경 구현을 위해서는 녹지의 양적 확보뿐 아니라 주변 도시 환경과의 상호작용을 고려한 공간 구성이 필요하며, 본 연구 결과는 관련 계획 수립 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

다만 본 연구에서 도출된 임계값은 SHAP 기반의 비선형 해석을 통해 도출된 결과로 변수 구성, 대상지의 특성, 분석 공간 단위에 따라 달라질 수 있다. 따라서 절대적 기준이 아니라 분석이 이루어진 도시지역의 500m 격자 단위에서 나타나는 상대적 특성으로 해석해야 한다. 또한 본 연구에서 적용한 500m 격자 단위의 데이터는 격자 외부의 환경과 경계 효과를 직접적으로 반영하지 못하며, 각 변수들이 격자 단위의 대표값으로 집계되어 격자 내부에서 나타나는 미세한 도시 구조를 반영하지 못하는 한계가 있다. 아울러 지표면온도 산출에 활용한 영상과 토지피복 자료 간 시점 차이가 있어, 향후 연구에서는 동일 시기의 고해상도 영상에서 지표면온도와 토지피복 정보를 산출하고, 인접 공간의 영향을 반영하는 분석 단위를 검토하여 분석의 정밀도를 높일 필요가 있다. 본 연구에서는 XGBoost 모형을 중심으로 분석을 수행하였으나, 다양한 비선형 기반 모형 분석 결과와 비교 검증이 이루어지지 못한 한계가 있어, 향후 연구에서는 다양한 모형을 적용하여 예측 성능과 모형 적합도를 향상시키는 것이 필요하다.

## 참고문헌

1. 김대영(2011), "위성영상을 이용한 토지피복과 지표 온도 변화의 관계: 인천시를 사례로", 「국토지리학회지」, 45(4): 493~501.
2. 김지숙·김효용(2020), "Landsat 8 영상과 취약성 분석을 활용한 폭염재해 취약지역의 특성분석", 「한국지리정보학회지」, 23(1): 1~14.
3. 김현옥·염종민(2012), "도시지역의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향: 경기도 일산 신도시를 중심으로", 「대한원격탐사학회지」, 28(2): 203~214.
4. 송봉근·박경훈(2015), "도시열섬완화를 위한 토지 이용 유형별 합리적 녹지율 분석", 「한국지리정보학회지」, 18(2): 59~74.
5. 심지수·구형수(2024), "그린인프라의 도시침수 위험 완화 효과: 전라남도 구례군을 대상으로", 「토지주택연구」, 15(4): 81~95.
6. 여성희·최희선·김근한·이길상(2021), "Landsat 8 위성영상을 이용한 지표면 온도와 식생피복의 관계 분석: 대구광역시를 대상으로", 「한국기후변화학회지」, 12(6): 713~720.
7. 이경일(2023), "신도시 개발에 따른 표면 열섬현상 변화분석 및 도시 형태와의 상관관계", 「원격탐사학회지」, 39(5): 921~932.
8. 전규원·박유진(2024), "도시 건조환경 유형에 따른 서울시 주간 지표면온도 변동성 분석: ECOSTRESS 데이터의 활용", 「지역연구」, 40(2): 107~130.
9. 정혜진·정윤남(2025), "도시 및 건축 형태와 도시 미기후 간 관계 분석: 서울시 S-DoT 기반 유동인구 밀집지역을 중심으로", 「한국도시계획학회지」, 26(6): 65~83.
10. 최광용·권원태·David A. Robinson(2006), "우리나라 사계절 개시일과 지속기간", 「대한지리학회지」, 41(4): 435~456.
11. 최재혁·임병호·이시영(2022), "그린인프라 구축을 위한 개발제한구역의 활용가치: 대전광역시를 중심으로", 「LHI Journal」, 13(1): 67~84.
12. Aram, F., E. García, E. Solgi and S. Mansournia (2019), "Urban Green Space Cooling Effect in Cities", *Heliyon*, 5(4): 01339.
13. Chen, L. and G. Guo (2026), "Exploring the Nonlinear Interactions and Threshold Effects of Urban Building

- Morphology and Green Space on Land Surface Temperature in High-Density Areas: A Cross-city Comparative Study”, *Sustainable Cities and Society*, 136: 107069.
14. Chen, P. (2024), “Inequality in Heat: The Role of Spatial Patterns of Urban Green Infrastructure”, *Urban Climate*, 53: 101820.
  15. Fan, J., X. Wang, L. Wu, H. Zhou, F. Zhang, X. Yu, X. Lu and Y. Xiang (2018), “Comparison of Support Vector Machine and Extreme Gradient Boosting for Predicting Daily Global Solar Radiation Using Temperature and Precipitation in Humid Subtropical Climates: A Case Study in China”, *Energy Conversion and Management*, 164: 102~111.
  16. Feng, J., Y. Ren, C. Xu, B. Jia, S. Wu and R. Laforteza (2024), “Exploring the Non-Linear Impacts of Urban Features on Land Surface Temperature Using Explainable Artificial Intelligence”, *Urban Climate*, 56: 102045.
  17. Friedman, J., T. Hastie and R. Tibshirani (2000), “Additive Logistic Regression: A Statistical View of Boosting”, *Annals of Statistics*, 28(2): 337~407.
  18. Galalizadeh, S., A. Morrison-Saunders, P. Horwitz, R. Silberstein and D. Blake (2024), “The Cooling Impact of Urban Greening: A Systematic Review of Methodologies and Data Sources”, *Urban Forestry & Urban Greening*, 95: 128157.
  19. Guo, G., Z. Wu, Z. Cao, Y. Chen and Z. Yang (2020), “A Multilevel Statistical Technique to Identify the Dominant Landscape Metrics of Greenspace for Determining Land Surface Temperature”, *Sustainable Cities and Society*, 61: 102263.
  20. Hu, J., T. Fan, X. Tang, Z. Yang and Y. Ren (2024), “Nonlinear Relations of Urban Morphology to Thermal Anomalies: A Cross-Time Comparative Study based on Grad-CAM and SHAP”, *Ecological Indicators*, 162: 112024.
  21. Huang, C., K. Liu, T. Ma, H. Xue, P. Wang and L. Li (2025), “Analysis of the Impact Mechanisms and Driving Factors of Urban Spatial Morphology on Urban Heat Islands”, *Scientific Reports*, 15: 18589.
  22. Jeong, H., H. Shin and K. An (2025), “City-Specific Drivers of Land Surface Temperature in Three Korean Megacities: XGBoost-SHAP and GWR Highlight”, *Land*, 14: 2232.
  23. Kim, M., D. Kim and G. Kim (2022), “Examining the Relationship between Land Use/Land Cover (LULC) and Land Surface Temperature (LST) using Explainable Artificial Intelligence (XAI) Models: A Case Study of Seoul, South Korea”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16: 15926.
  24. Kong, F., H. Yin, C. Wang, G. Cavan and P. James (2014), “A Satellite Image-based Analysis of Factors Contributing to the Green-Space Cool Island Intensity on a City Scale”, *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4): 846~853.
  25. Lin, L., Y. Zhao, J. Zhao and D. Wang (2025), “Comprehensively Assessing Seasonal Variations in the Impact of Urban Greenspace Morphology on Urban Heat Island Effects: A Multidimensional Analysis”, *Sustainable Cities and Society*, 118: 106014.
  26. Lin, Z., H. Xu, X. Yao, C. Yang, and D. Ye (2024), “How does Urban Thermal Environmental Factors Impact Diurnal Cycle of Land Surface Temperature? A Multi-Dimensional and Multi-Granularity Perspective”, *Sustainable Cities and Society*, 101: 105190.
  27. Lundberg, S. and S. Lee (2017), “A Unified Approach to Interpreting Model Predictions”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30: 4768~4777.
  28. Ma, X., J. Yang, R. Zhang, W. Yu, J. Ren and X. Xiao (2024), “XGBoost-based Analysis of the Relationship between Urban 2-D/3-D Morphology and Seasonal Gradient Land Surface Temperature”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 4109~4124.
  29. Masoudi, M. and P. Tan (2019), “Multi-Year Comparison of the Effects of Spatial Pattern of Urban Green Spaces on Urban Land Surface Temperature”, *Landscape and Urban Planning*, 184: 44~58.
  30. Massaro, E., R. Schifanella, M. Piccardo, L. Caporaso, H. Taubenbock, A. Cescatti and G. Duveiller (2023), “Spatially-Optimized Urban Greening for Reduction of Population Exposure to Land Surface Temperature Extremes”, *Nature Communications*, 14: 2903.

31. Oke, T. R. (1982), "The Energetic Basis of the Urban Heat Island", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108: 1~24.
32. Qiu, K. and B. Jia (2020), "The Roles of Landscape Both Inside the Park and the Surroundings in Park Cooling Effect", *Sustainable Cities and Society*, 52: 101864.
33. Ren, S., Z. Huang, G. Yin, X. Yan, Q. Dong, J. Qi, J. Zheng, Y. Bao and S. Zhang (2025), "Spatially-Optimized Greenspace for More Effective Urban Heat Mitigation: Insights from Regional Cooling Heterogeneity via Explainable Machine Learning", *Landscape and Urban Planning*, 256: 105296.
34. Shu, M., Y. Lu, R. Chen, K. Chen and X. Lin (2025), "Study on the Diurnal Difference of the Impact Mechanism of Urban Green Space on Surface Temperature and Sustainable Planning Strategies", *Sustainability*, 17: 10193.
35. Sun, R., A. Chen, L. Chen and Y. Lü (2012), "Cooling Effects of Wetlands in an Urban Region: The Case of Beijing", *Ecological Indicators*, 20: 57~64.
36. Sun, Y., C. Gao, J. Li, R. Wang and J. Liu (2019), "Evaluating Urban Heat Island Intensity and its Associated Determinants of Towns and Cities Continuum in the Yangtze River Delta Urban Agglomerations", *Sustainable Cities and Society*, 50: 101659.
37. Synnefa, A., M. Santamouris and I. Livada (2006), "A Study of the Thermal Performance of Reflective Coatings for the Urban Environment", *Solar Energy*, 80(8): 968~981.
38. Trlica, A., L. R. Hutyrá, C. L. Schaaf, A. Erb and J. A. Wang (2017), "Albedo, Landcover, and Daytime Surface Temperature Variation Across an Urbanized Landscape", *Earth's Future*, 5: 1084~1101.
39. U.S. Geological Survey (2022), "Landsat 9 Data Users Handbook", LSDS-2082.
40. Wei, S., Z. He, W. Zhai, C. Zhao and Y. Li (2025), "How does Vegetation Influence Surface Temperature Across Various Road Types and Urban Morphology Types?", *Building and Environment*, 270: 112511.
41. Wu, Z., X. Zhang, P. Ma, M. Kwan and Y. Liu (2023), "How did Urban Environmental Characteristics Influence Land Surface Temperature in Hong Kong from 2017 to 2022? Evidence from Remote Sensing and Land Use Data", *Sustainability*, 15: 15511.
42. Xia, J., Y. Yan, Z. Dou, D. Han and Y. Zhang (2025), "Exploring the Role of Urban Green Spaces in Regulating Thermal Environments: Comparative Insights from Seoul and Busan, South Korea", *Forests*, 16: 1515.
43. Xu, Z. and J. Rui (2024), "The Mitigating Effect of Green Space's Spatial and Temporal Patterns on the Urban Heat Island in the Context of Urban Densification: A Case Study of Xi'an", *Sustainable Cities and Society*, 117: 105974.
44. Yang, G., Z. Yu, G. Jorgensen and H. Vejre (2020), "How Can Urban Blue-Green Space Be Planned for Climate Adaption in High-Latitude Cities? A Seasonal Perspective", *Sustainable Cities and Society*, 53: 101932.
45. Yang, X. and Y. Li (2015), "The Impact of Building Density and Building Height Heterogeneity on Average Urban Albedo and Street Surface Temperature", *Building and Environment*, 90: 146~156.
46. Yao, L., T. Li, M. Xu and Y. Xu (2020), "How the Landscape Features of Urban Green Space Impact Seasonal Land Surface Temperatures at a City-Block-Scale: An Urban Heat Island Study in Beijing, China", *Urban Forestry & Urban Greening*, 52: 126704.
47. Yi, S., X. Li, C. Ma, R. Wang, Y. Zhou, Q. Xu and T. Zhao (2025), "Assessing the Differential Impact of Vegetated and Built-Up Areas on Heat Exposure Environment: A Case Study of Los Angeles", *Building and Environment*, 271: 112538.
48. Yu, Z., X. Guo, G. Jorgensen and H. Vejre (2017), "How Can Urban Green Spaces be Planned for Climate Adaptation in Subtropical Cities?", *Ecological Indicators*, 82: 152~162.
49. Yu, Z., G. Yang, S. Zuo, G. Jorgensen, M. Koga and H. Vejre (2020), "Critical Review on the Cooling Effect of Urban Blue-Green Space: A Threshold-Size Perspective", *Urban Forestry & Urban Greening*, 49: 126630.
50. Yuan, B., L. Zhou, F. Hu and C. Wei (2024), "Effects of 2D/3D Urban Morphology on Land Surface

- Temperature: Contribution, Response, and Interaction”, *Urban Climate*, 53: 101791.
51. Zeng, P., F. Sun, Y. Liu, T. Tian, J. Wu, Q. Dong, S. Peng and Y. Che (2022), “The Influence of the Landscape Pattern on the Urban Land Surface Temperature Varies with the Ratio of Land Components: Insights from 2D/3D Building/Vegetation Metrics”, *Sustainable Cities and Society*, 78: 103599.
  52. Zhong, Q., Z. Li, J. Zhu and C. Yuan (2025), “Revealing Multiscale and Nonlinear Effects of Urban Green Spaces on Heat Islands in High-Density Cities: Insights from MSPA and Machine Learning”, *Sustainable Cities and Society*, 120: 106173.
  53. Zhou, C., S. Zhang, B. Liu, T. Li, J. Shi and H. Zhan (2024), “Using Deep Learning to Unravel the Structural Evolution of Block-Scale Green Spaces in Urban Renewal”, *Cities*, 150: 105030.
  54. Zhu, S., Y. Yan, B. Zhao and H. Wang (2025), “Assessing the Impact of Adjacent Urban Morphology on Street Temperature: A Multisource Analysis Using Random Forest and SHAP”, *Building and Environment*, 267: 112326.

## 요 약

도시 열섬 현상의 효과적인 대응 수단으로 녹지의 중요성이 강조되고 있으나, 기존의 밀집된 개발 환경에서 열 영향 완화를 위해서는 녹지와 주변 도시 환경의 관계를 탐색하는 것이 필요하다. 본 연구는 인천시 도시지역을 대상으로 도시 구성 요소와 녹지의 공간적 속성이 지표면온도(LST)에 미치는 비선형적인 영향을 파악하기 위해 XGBoost 기계학습 모형과 SHAP 해석기법을 활용하여 녹지피복 및 경관 변수들과 건물 피복, 높이 정보와 같은 도시 환경 변수의 상대적 중요도, 비선형적 영향방향과 임계 전환 지점, 변수 간 상호작용을 분석하였다. 연구 결과, 건물 면적 비율이 LST 상승에 가장 큰 영향을 미치는 요소이며, 수역 비율, 지반고, 녹지 비율은 온도 저감에 기여하는 주요 요소로 분석되었다. 녹지 비율은 도시지역의 500m 격자 단위에서 36% 이상일 때부터 지표면온도에 대한 영향이 음의 방향으로 전환되는 비선형적 관계가 나타났으며, 녹지 비율이 해당 임계값 이하로 상대적으로 낮은 지역에서는 건물 높이와 높이의 다양성이 온도 저감에 기여하는 상호작용이 나타나, 녹지와 도시 구조 요소가 지표면온도 저감에 상호 보완적으로 작용하는 관계가 있음이 확인되었다. 본 연구는 고밀 도시지역을 대상으로 지표면온도 저감에 기여하는 녹지의 임계수준과 도시 구조 요소 간 상호작용을 정량적으로 제시함으로써, 도시 열 환경 완화를 위한 공간 계획 수립의 기초자료를 제공한다.

**주제어:** 도시 구조, 도시녹지, 건물 높이, 지표면온도, 설명 가능한 기계학습