pISSN: 1226-7147, eISSN: 2383-9171
https://doi.org/10.17208/jkpa.2025.10.60.5.223

Check for updates

Journal of Korea Planning Association Vol.60, No.5 (2025)
대한국토 · 도시계획학회지 「국토계획」 제60권 제5호 pp.223-238

다중 스케일 접근에 기반한 도시 공간환경이 여름철 주야간 기온에 미치는 영향 분석*

Analysis of the Impact of Urban Spatial Environment on Summer Daytime and Nighttime Air Temperatures Based on Multi-Scale Approach

홍유정 ** · **윤동근** ***
Hong, You-Jeong · Yoon, Dong Keun

Abstract

This study examines how urban spatial environmental factors affect temperature at multiple spatial scales by analyzing intra-urban spatial variations in summer daytime and nighttime air temperatures using data from the Smart Seoul Data of Things. The factors examined include land use and land cover, vegetation, and building and layout characteristics, encompassing both two- and three-dimensional attributes. Daytime temperatures ranged from 17.1 to 30.9℃, and nighttime temperatures from 13.2 to 28.5℃ during the summer in Seoul, revealing substantial spatial variations. Among multi-scale models with radii ranging from 50 m to 1 km, the 100 m radius model demonstrated the highest explanatory power for daytime temperatures, while the 500 m model was optimal for nighttime temperatures. Across various spatial scales and temporal scopes, extensive low-rise residential areas and grasslands consistently contributed to increased temperatures, while higher normalized difference vegetation index values were linked to cooling effects. Additionally, larger proportions of railway and road areas were associated with elevated temperatures, whereas larger river and lake areas, higher building heights, and higher sky view factors contributed to temperature reductions. However, several of these factors exhibited time-specific effects or were significant only at certain spatial scales. These findings provide empirical insights for improving thermal environments and climate-responsive urban planning strategies.

주제어 도시 공간환경, 기온, 다중 스케일, 기후 대응형 도시계획
Keywords Urban Spatial Environment, Air Temperature, Multi-scale, Climate-responsive Urban Planning

Ⅰ. 서 론

도시화는 공간의 환경적 특성뿐만 아니라 열적 특성까지 변화시켜 열 환경과 온도에 큰 영향을 미친다(Chapman et al., 2017; Ma et al., 2024; Oke, 1982). 지속적인 도시 성장과 개발로 인해 인공 피복 면적은 증가하는 반면, 수목과 녹지 등 자연 식생 면적은 감소해 도시 열 환경은 점차 악화되고 있다. 기후변화로 인한 기온 상승과 폭염 발생은 비도시 지역보다 열 환경이 취약한 도시 공간에서 더욱 심각한 문제로 나타난다(Bowler et al., 2010; Völker et al., 2013; Yan et al., 2014; Cao et al., 2021). 특히, 여름철 폭염은 온열질환자 증가, 에너지 과소비 등의 직·간접적인 피해를 유발함에 따라 도시 열 환경 관리의 중요성이 커지고 있다. 효과적인 열 환경 관리를 위해서는 도시 공간환경이 온도에 어떻게 영향을 미치는지 이해하는 것이 필요하며, 이는 지속 가능한 도시계획과 개발을 위한 핵심 요소이다.

도시의 내부 온도는 단순히 도시와 비도시 간의 온도 차이로 설

* 본 논문은 행정안전부 재난피해 복구 역량 강화 기술개발 사업(RS-2021-ND632021)의 지원을 받아 수행된 연구임.
** Doctorate Candidate, Department of Urban planning and Engineering, Yonsei University (First Author: dbwjd0570@yonsei.ac.kr)
*** Professor, Department of Urban planning and Engineering, Yonsei University (Corresponding Author: dkyoon@yonsei.ac.kr)

명되지 않으며, 다양한 토지피복 특성 등의 공간환경에 따라 상당한 공간적 변화가 있을 수 있다(Yan et al., 2014; Johnson et al., 2020; Cao et al., 2021). 동일한 도시 지역 내에서도 서로 다른 지점의 기온은 인접한 표면 피복의 열적 특성 또는 주변의 난류나 대류를 통한 대기 확산의 영향을 받아 상당히 다를 수 있다(Yan et al., 2014). 실제로 도시민이 체감하는 열 환경은 대기 온도에 더 직접적인 영향을 받으며, 도시 내에서도 지역별로 상이한 기온 분포를 나타내므로 미시적 차원의 기온 분석이 요구된다. 복잡한 도시 환경 내에서 인접 지역 간 기온 차이와 그 원인을 이해하면 공간적으로 정밀한 열 완화 전략을 마련하는 데 효과적인 정보를 제공할 수 있다(Johnson et al., 2020).

도시 온도를 다룬 많은 연구는 도시와 주변 비도시 지역 간의 기온 격차로 측정되는 도시열섬현상(Urban Heat Island, UHI)에 좀 더 초점을 맞추고 있다(e.g., Yin et al., 2018; Yao et al., 2019; Yao et al., 2020). 또한 도시의 온도와 관련하여 지상의 대기 온도보다 지표면 온도를 분석한 연구가 상대적으로 더 많이 수행되었다(e.g., Zhou et al., 2011; Zhou et al., 2022; Patel et al., 2023). 도시 내 기온을 대상으로 한 연구는 제한적인 실정인데, 국내 연구에서도 이러한 경향이 존재한다(e.g., 윤희천 외, 2013; 김준식 외, 2015; 박채연 외, 2016; 고동원·박승훈, 2019; 이연수 외, 2021). 이는 지상 측정지점에 의존하는 기온에 비해 위성 데이터 기반의 지표면 온도 자료가 도시 전역에 대한 온도 분포를 높은 공간해상도로 제공하기 때문으로 보인다. 도시열섬현상의 경우에도 도시와 주위 비도시 지역의 온도 차로 측정할 수 있어 비교적 분석이 용이하다는 특징이 있다. 또한 기온이 열전달 과정의 다양성, 바람에 의한 열의 이동, 공간적 상호작용의 범위 등으로 인해 온도의 형성이나 공간환경과의 관계에 있어 지표면 온도보다 좀 더 복잡한 메커니즘을 가진다는 점(Yan et al., 2014)도 일부 기인한 것으로 판단된다.

최근 기온 측정지점의 공백을 해소하고 정밀한 수준의 기온 분포를 파악하기 위해 대폭 늘어난 지상 온도의 측정지점 데이터를 활용하거나 모바일 기기 기반의 현장 측정 기법을 활용하는 등의 노력이 이루어지고 있다(Xu et al., 2020; 김지수·강민규, 2022; 정지우·남진, 2022). 고해상도의 기온 데이터를 바탕으로 도시 내 기온의 시공간적 변화나 패턴을 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있으며(Johnson et al., 2020; Cao et al., 2021), 이러한 데이터를 활용한 체계적이고 확장된 연구가 더욱 요구되는 상황이다.

대부분의 도시 온도와 공간환경 간 관계를 분석하는 연구에서는 분석에 사용되는 데이터의 공간해상도나 도시계획 및 정책 시행에 적용되는 공간 단위 등을 고려하여 임의의 공간 분석단위를 설정한다. 예를 들어, Alavipanah et al.(2018)은 지표면 온도 데이터 픽셀 크기와 동일한 30m×30m의 공간해상도로 2D 및 3D 공간구조 특성이 표면 온도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 조혜민 외(2019) 및 조희선 외(2014)의 연구에서는 각각 서울시 행정동과 수도권 시군구의 행정구역을 분석단위로 설정하여 도시의 특성과 열섬현상 간의 관계에 대해 분석했다.

연구마다 임의의 공간 분석단위와 그 단위의 크기인 공간 스케일(Scale)을 정하고 있지만, 도시 기온과 공간환경 간의 관계는 스케일에 따라 영향을 받을 수 있다(Yan et al., 2014; Lan and Zhan, 2017; Johnson et al., 2020; Liu et al., 2021). 도시 지역마다 지형, 기상, 토지이용, 인구 구성 등의 차이가 존재하기 때문에 지역별로 분석에 적합한 공간 스케일이 다를 수 있으며, 동일한 요인의 영향 범위도 지역마다 다를 수 있다(Su et al., 2009). 이는 '공간 단위 임의성 문제(Modifiable Areal Unit Problem, MAUP)'와 연결된다(Openshaw and Taylor, 1981; Su et al., 2009). MAUP는 연구에서 설정하는 공간 단위가 임의적이기 때문에, 공간 단위의 크기와 구획 방식에 따라 공간분석 및 통계 분석의 결과가 달라질 수 있음을 의미한다(김감영, 2011; 이건학·김감영, 2013). 따라서 공간 상호작용 데이터 기반의 관계 분석에서 내재된 MAUP를 이해하고, 스케일의 영향을 검토하는 것이 중요하다. 이러한 맥락에서 변수 간의 관계가 공간 스케일에 따라 달라질 수 있다는 점에 주목하여, 변수별로 최적의 버퍼 반경을 설정하는 시도들이 이루어지기도 하였다(Su et al., 2009). 그러나 국내 도시 열 환경 분야에서 대부분의 기존 연구는 단일한 공간 스케일을 설정하여 수행되었으며, MAUP 문제를 체계적으로 검토한 실증 연구가 부족한 실정이다. 따라서 다양한 공간 스케일을 설정하여 스케일에 따라 공간환경이 기온에 미치는 영향이 어떻게 달라지는지 분석하고, 기온과 공간환경 관계에 대한 스케일 효과(scale effect)를 살펴보는 연구가 필요하다.

이러한 배경에서 본 연구는 다중 스케일 접근에 기반하여 도시 공간환경과 여름철 기온의 관계를 미시적으로 분석하고, 공간 스케일이 이러한 관계에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 먼저, 고해상도 기온 데이터를 활용하여 연구 대상 도시의 기온 분포를 분석하고, 도시 내 기온의 공간적 격차를 정량적으로 파악한다. 다음으로, 선행연구 검토를 통해 식별된 토지이용 및 피복, 식생, 건물 및 배치 특성과 같은 2차원 및 3차원 공간환경 요인을 종합적으로 고려하여, 이들 요인이 여름철 기온에 미치는 영향을 분석할 것이다. 아울러, 주간과 야간 기온을 구분하여 시간대에 따른 공간 스케일의 영향과 공간환경 요인의 영향 메커니즘이 어떻게 달라지는지도 비교·분석하고자 한다.

Ⅱ. 선행연구 검토

1. 도시 기온에 영향을 미치는 공간환경 요인

도시 기온에 영향을 미치는 주요한 공간환경 요인으로는 토지이용 및 피복, 식생, 그리고 건물 및 배치 특성이 있다. 먼저, 토

지이용 및 피복 특성은 에너지 저장 및 방출 속도와 인공열 배출 수준의 차이를 통해 기온에 상당한 영향을 미친다(Ward and Grimmond, 2017; Zhang et al., 2020). 대도시의 토지이용 및 피복 특성은 크게 시가화 지역과 녹지 및 수역과 같은 비시가화 지역으로 구분할 수 있다. 주거, 공업, 상업, 교통 등의 건축물로 이루어진 시가화 지역은 도시 면적(urban area), 인공 면적(artificial area), 건물 면적(building area), 포장 면적(paved area), 불투수 면적(impervious area) 등의 유사 변수로 측정되며, 이러한 특성은 도시 내 기온을 높이는 데 기여하는 것으로 입증되어 왔다(Yan et al., 2014; Song and Park, 2019; Johnson et al., 2020; Liu et al., 2021).

보다 구체적인 토지이용 및 피복 특성 변수로 세분화하여 분석한 연구에서는 세부 유형에 따라 기온에 미치는 영향이 상이하다는 것을 보여주고 있다(조희선 외, 2014; Park et al., 2017; Lee et al., 2019; 조혜민 외, 2019; 이우섭·김형규, 2021). 예를 들어, 조혜민 외(2019)의 연구에서는 서울시 도시열섬현상 지역의 물리적 환경 특성을 탐색하기 위해 주거시설·상업시설·업무시설 연면적 비율과 불투수면 비율, 녹지 및 오픈스페이스·수계면적 비율 등의 변수를 활용하였다. 이 중 열섬 지역에 유의한 영향을 미치는 변수로는 주거시설·상업시설 연면적 비율과 불투수면 비율이 확인되었다. 기재홍 외(2024)의 연구에서는 동일한 주거용도 지역 내에서도 단독주거시설 밀집 지역에 비해 비교적 건물 높이가 높은 공동주거시설 비율이 높은 지역이 그늘 효과로 인해 지표면 온도가 상대적으로 낮아질 수 있음을 보여주었다.

한편, 폭염 완화 전략으로 알려진 녹지와 수역과 같은 자연환경과 관련된 토지 특성은 증발산, 그늘, 열 흡수 효과 등을 통해 도시 기온을 완화하는 효과가 있다(Bowler et al., 2010; Völker et al., 2013). 다만, 이러한 완화 효과 역시 녹지와 수역의 유형, 크기, 모양이나 주변 환경 및 시간대 등의 조건에 따라 달라질 수 있다(Park et al., 2017; Pan et al., 2023). 예를 들어, 동일한 녹지의 유형이라도 나무가 많은 숲 지역은 초지에 비해 증발산, 그늘 형성 등 다면적인 냉각 메커니즘을 통해 도시 열 완화에 훨씬 더 효과적일 수 있다(Grilo et al., 2020; Suen, 2022). 수역의 경우, 밤이나 겨울철에는 냉각 효과가 미미하거나, 오히려 비열 용량과 열 방출 속도 등에 의해 온난화 효과를 유발할 수 있어, 시간대나 계절에 따라 냉각 효과가 다르게 나타날 수 있다(Yan et al., 2014; Pan et al., 2023; Yang et al., 2023). 또한 수역은 하천, 호소와 같은 다양한 유형으로 구분될 수 있으나, 대부분의 연구가 수역 그 자체 또는 하나의 유형만을 다루고 있어 세부 유형에 따른 기온 저감효과를 비교하는 데 한계가 있다.

녹지와 밀접한 관련이 있는 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, 이하 NDVI)는 식생의 풍부함과 상태를 정량화하는 데 가장 널리 사용되는 지수로, 많은 연구에서 기온 저감에 영향을 미치는 중요한 요소로 보고되고 있다(조혜민 외, 2019; Bowler et al., 2010; Grilo et al., 2020; Yang et al., 2023). 또한 최근 2차원적인 토지 특성뿐만 아니라, 3차원적 요인인 건물 및 배치 특성이 기온에 미치는 영향에 주목하는 많은 연구가 이루어지고 있다(Lan and Zhan, 2017; Park et al., 2017; Tian et al., 2019; Liu et al., 2021; Yang et al., 2023). 세부 요인으로는 건물의 밀도, 높이, 용적률, 건폐율과 같은 건물 자체와 관련된 특성이 있으며, 뿐만 아니라 건물 형태와 배치에서 비롯되는 특성들도 있다. 높은 구조물로 이루어진 고밀도 도시 환경은 일반적으로 건물 사이의 복사 트래핑(radiation trapping), 구조물의 현열 용량 증가 등으로 인해 기온 상승에 기여하지만, 그늘 형성과 환기 효과를 통해 기온 저감에도 영향을 미칠 수 있다(Park et al., 2017; Tian et al., 2019; Yang et al., 2023).

Lan and Zhan(2017)은 도시 건물이 열 교환을 변화시켜 도시 열 환경을 지배하는 중요한 역할을 한다고 강조하고 있다. 이들은 건물 밀도, 건물의 local Moran's I 및 건물 높이, 용적률로 구성된 다양한 건물 지표와 기온의 관계를 분석하였으며, 건물이 기온의 분산을 최대 48.9~53.4%까지 설명할 수 있다고 보고하였다. 또한 도시 공간의 배치 특성이 기온에 미치는 영향을 분석한 Liu et al.(2021)은 건물 밀도, 건물 높이, 용적률, 천공개폐율 등으로 구성된 공간 형태학적 변수가 불투수 및 식생 피복을 나타내는 지표 변수들의 영향을 능가하는 것으로 보고하였다.

건물 형태 및 배치와 관련된 3차원적 요인으로는 주로 천공개폐율(Sky View Factor, 이하 SVF), 표면거칠기(Surface Roughness, 이하 SR) 등이 있으며, 이들은 공간 개방성, 환기 성능, 열에너지 교환 등을 조절하여 도시 기온에 영향을 미친다(Martinelli and Marzarakes, 2017; Park et al., 2017; Tian et al., 2019). 건물이 밀집하고 개방성이 낮은 도시 지역은 일반적으로 낮은 SVF 값을 가지며, 이는 태양 복사에 대한 노출을 감소시켜 기온이 낮아질 수 있지만, 반대로 환기 성능을 저하시켜 장파 복사 효과를 강화하고 기온 상승을 유발할 수도 있다(Lee et al., 2017; Park et al., 2017; Zhang et al., 2020). SR의 경우, 경계층 위의 공기 흐름과 그 아래의 난류 크기에 영향을 미치며, 값이 클수록 바람 순환이 감소하여 기온 상승을 초래할 수 있다(Grimmond and Oke, 1999; Park et al., 2017).

이러한 도시의 건물과 배치 특성이 온도에 미치는 영향을 분석한 연구는 국외에서 활발히 진행되었으나, 국내 도시를 대상으로 한 연구는 상대적으로 부족하며 소수의 연구는 주로 지표면 온도에 제한되어 있다(Li et al., 2019; 기재홍 외, 2024). Li et al.(2019)의 연구에서는 건축면적, 건축연면적, SVF, SR을 포함한 3차원 물리 환경 요소와 지표 온도 간의 관계를 분석하였다. 분석 결과, SVF와 지표면 온도는 양(+)의 관계를 가지며, 이는 하늘 방향으로의 개방 정도가 높을수록 지표면에 도달하는 태양 복사에너지가 많아져 온도가 상승하는 것으로 해석되었다. 반면,

SR은 위에서 설명한 영향과는 반대로 지표면 온도와 음(-)의 관계를 가지는 것으로 나타났는데, 이를 지형이나 건물에 의한 그늘의 생성으로 지표 온도를 줄일 수 있는 역할을 하는 것으로 해석하였다.

선행연구 검토 결과, 토지이용 및 피복 특성의 세부 유형을 다룬 연구들은 일부 존재하지만, 이들 연구에서도 다루고 있는 유형과 위계가 상이하고 여전히 대분류 및 중분류 수준의 토지 특성이 많이 다루어지고 있다. 따라서 다양한 시공간적 범위에서 세부적인 토지 특성이 기온에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고, 유형별로 기온에 미치는 영향이 어떻게 다른지 파악하는 연구가 필요하다. 또한 3차원적 특성인 건물 및 배치 요인이 주목받고 있는 가운데, 연구대상 지역의 시공간적 특성에 따라 각 특성과 기온의 관계가 달라지는 경향이 있어 일관된 결론을 도출하는 데 한계가 있다. 특히, 국내에서 3차원적 특성과 지표면 온도의 관계에 대한 실증적 분석이 이루어지고 있으나, 기온과의 관계를 규명한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 마지막으로, 기존 연구들에서는 특정 측면에 초점을 맞춘 변수들만을 다룬 경우가 많았으며, 다양한 측면을 종합적으로 고려한 연구는 여전히 부족한 편이다. 따라서 본 연구는 세분류 수준의 토지이용 및 피복 특성과 더불어 식생과 3차원의 건물 및 배치 특성을 통합적으로 고려하여 도시 내 기온 형성 메커니즘에 대해 포괄적이고 정밀한 분석을 시도하고자 한다.

2. 다중 스케일에 따른 도시 공간환경과 기온의 관계

도시 공간환경이 기온에 미치는 영향이 특정 공간 스케일에 국한되지 않고, 그 스케일에 따라 달라질 수 있다는 점에 주목하여 다양한 분석 공간 스케일을 적용한 시도가 이루어지고 있다. 다중 스케일 접근방식을 활용한 기존 연구들은 도시 내 기온과 공간환경 간 관계가 스케일의 영향을 받는다는 것을 확인하고, 최적의 분석 공간 스케일을 제시하고 있다. 또한 공간환경 요인별로 기온에 유의미한 영향을 미치는 공간 범위를 도출하였다. 예를 들어, Yan et al.(2014)은 중국 베이징의 올림픽 공원 인접 지역을 대상으로 20m에서 300m 반경까지 6개의 버퍼 영역(buffer zone)을 설정하여 토지피복 비율을 측정하고, 공간 스케일에 따라 기온과 토지피복 유형 간의 상관관계와 계절·시간대별 모형 설명력이 달라지는 것을 확인하였다. 여름철 기온 변화는 정오 시간대에는 20m 반경, 밤 시간대에는 200m 반경 모형에서 가장 잘 설명되는 것으로 나타났다. 또한 기온 분포에 대한 녹지와 건물 면적 비율의 상대적 중요성이 시간대와 공간 스케일에 따라 다르게 나타나는 것을 보고하였다. Lan and Zhan(2017)은 중국 우한시를 대상으로 50m에서 1km 반경까지 50m 간격으로 설정된 다양한 버퍼 영역에서 건물 관련 변수와 기온 간의 동적인 관계를 분석하고자 했으며, 200m 반경이 건물 특성과 기온 간 관계를 가장 효과적으로 설명하는 최적의 공간 스케일임을 제시하였다.

Johnson et al.(2020)은 뉴욕시 내 약 150개의 기온 측정지점을 기준으로 50m에서 1km까지 다양한 버퍼 영역을 설정하여, 토지피복 특성, 건물 밀도, 건물 면적, NDVI 등의 도시 환경 지표를 구축하였다. 각 요인이 어느 정도의 공간 스케일에서 기온과 가장 밀접한 관련이 있는지 살펴본 결과, 식생 피복과 NDVI는 각각 200m와 1km 반경에서 기온과 가장 큰 음(-)의 관계를 나타낸 반면, 건물 면적은 600m 반경에서 가장 큰 양(+)의 관계를 보였다. 해당 연구는 가장 관련성이 높은 반경에서 추출된 변수만을 활용하여 단계적 다변량 회귀모델을 구축함으로써 기온의 공간적 변화를 예측하였다. Liu et al.(2021)은 Yan et al.(2014) 연구와 마찬가지로 중국 베이징을 대상으로 다중 스케일에서 도시 공간 배치가 도시열섬, 바람 등 지역 기후에 미치는 영향과 변수별 스케일 효과를 분석하였다. 200m부터 3km까지의 범위에서 건물 밀도, 건물 연면적 등의 공간 형태학적 변수와 식생 및 불투수 피복의 지표 특성이 도시열섬에 미치는 영향을 분석한 결과, 공간 형태 변수는 800m~1km 반경에서 가장 높은 설명력을 가지는 것으로 나타났다.

선행연구 검토 결과, 다중 스케일을 설정한 연구는 소수에 불과하며 일부 특정 도시(예. 베이징, 우한, 뉴욕)에 한정되어 이루어졌으므로 일반화의 한계가 있음을 알 수 있다. 지역 간, 그리고 동일 지역에서도 범위에 따른 도시 공간 특성별 영향력과 관계에 대한 최적의 공간 스케일이 상이하게 나타났다. 따라서 기온과 공간환경 간 관계에 대한 스케일 효과, 즉 공간 스케일의 영향을 명확히 규명하기 위해 다양한 지역을 대상으로 한 연구가 필요함을 시사한다. 특히, 국내에서는 다중 스케일 접근에 기반하여 도시 공간환경이 기온에 미치는 영향을 분석한 사례가 거의 없으므로, 본 연구는 이러한 연구 격차를 보완할 수 있다.

Ⅲ. 연구방법

1. 연구범위 및 분석단위

본 연구의 분석 대상지는 국내 광역지방자치단체 중 도시화 수준이 가장 높은 서울특별시로 설정하였다. 서울시는 인구 밀도가 높고 지리적으로 복잡한 도시 환경이며, 여름철 기온이 점차 상승하고 있다. 분석단위는 종속변수인 기온의 측정지점을 중심으로 50m, 100m, 250m, 500m, 750m, 1km 반경의 6개 버퍼 영역으로 구성하였다. 최대 1km로 설정된 분석 반경은 유사 선행연구에서 확인된 미기후 및 열 환경 영향권을 고려하여 설정하였다(e.g., Lan and Zhan, 2017; Johnson et al., 2020). 또한 도시 계획 및 정책적 활용에 있어 실용적인 공간 단위로 기능할 수 있으며, 50m에서 1km까지의 단계적 확장을 통해 공간 스케일의 영향을 파악할 수 있도록 설정하였다.

분석 기간은 2023년의 6~8월의 여름철로 설정하였다. 주간과 야간 시간대 구분을 위해 한국천문연구원에서 제공하는 2023년 6~8월 서울시의 일·출몰 시간을 검토하였다. 해당 기간의 일출은 05:10~06:01, 일몰은 19:04~19:58 사이였다. 본 연구는 일사 조건이 안정적인 시간대만을 고려하고자 주간은 7:00~18:00, 야간은 21:00~4:00 범위로 설정하였다. 최종적으로 주야간 시간대의 평균 기온별로 6개 반경의 공간 스케일 모형을 사용하여 도시 공간환경이 기온에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고자 하였다.

2. 연구자료

1) 종속변수 (기온)

본 연구의 종속변수인 여름철 기온은 서울시에서 제공하는 스마트서울 도시 데이터 센서(Smart Seoul Data of Things, S-DoT)의 측정자료를 활용하여 계산되었다(Table 1). 먼저 2023년 6~8월의 일별·시간대별 평균 기온 데이터를 추출하여 정제하였다. 서울시 전역에는 약 1,100개 지점에 S-DoT 측정 센서가 설치되어 있으나 결측치나 이상치를 제외하고 낮과 밤 시간대의 기온이 모두 계산되는 지점만을 선정한 결과, 최종적으로 1,010개 지점을 대상으로 기온 데이터를 구축할 수 있었다. 이상치는 IQR(Interquartile Range) 방법을 사용하여 판별하였으며, 본 연구에서는 이상치를 판별하는 기준인 상한 경계선은 [Q3+3×IQR], 하한 경계선은 [Q1-3×IQR]로 설정하였다. 본 연구에서는 1,010개 지점의 일별·시간대별 평균 기온 데이터를 시간대별 평균 데이터로 계산한 후에, 낮과 밤 시간대에 해당하는 데이터만을 이용해 주야간의 평균 기온 데이터로 구축하였다. 종속변수 구축을 위한 기온 데이터 정제는 Python 버전 3.11.5를 활용하여 수행되었다.

2) 설명변수 (도시 공간환경)

설명변수에 해당하는 도시 공간환경 특성은 크게 토지이용 및 피복, 식생, 건물 및 배치 차원으로 구성된다(Table 1). 각 변수는 본 연구에서 설정한 6개 버퍼 영역에 따라 6개 세트씩 구축되었다. 설명변수 구축을 위한 대부분의 데이터 정제는 오픈 지리 정보 시스템 소프트웨어 GIS(Geographical Information System)를 활용하여 수행되었다. 먼저, 토지이용 및 피복 특성 변수를 구축하기 위해 환경부에서 제공하는 세분류 토지피복지도 자

Table 1. Variables used for the analyses

Category		Variable	Description	Source
Air temperature		Daytime air temperature	Mean daytime air temperature (7:00~18:00, Jun.-Aug.)	Seoul Open Data Plaza, Seoul Metropolitan Government
		Nighttime air temperature	Mean nighttime air temperature (21:00~4:00, Jun.-Aug.)	
Land use and land cover	Used area	Low-rise residential area	Low-rise residential building area ratio by buffer zone	Environmental Geographic Information Service, Ministry of Environment
		High-rise residential area	High-rise residential building area ratio by buffer zone	
		Industrial area	Industrial building area ratio by buffer zone	
		Commercial and business area	Commercial and business building area ratio by buffer zone	
	Transport area	Railway area	Railway area ratio by buffer zone	
		Road area	Road area ratio by buffer zone	
	Green and water area	Grass area	Grass area ratio by buffer zone	
		River area	River area ratio by buffer zone	
		Lake area	Lake area ratio by buffer zone	
Vegetation		Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Measure of live green vegetation based on the difference between near-infrared and red light reflectance (-1~1)	Earth Explorer, United States Geological Survey (USGS)
Building and layout		Average number of floors	Average number of floors of each building	Address-based Industry Support Service, Ministry of the Interior and Safety
		Surface Roughness (SR)	Standard deviation of DSM data including terrain and buildings	
		Sky View Factor (SVF)	Proportion of visible sky from a certain observation point (0~1)	

료를 활용하였다. 본 연구에서는 2022년 기준 자료를 활용하였으며, 총 41개의 토지피복 유형을 바탕으로 분석단위 버퍼 영역 대비 해당 유형의 면적으로 불투수 지역, 단독주거시설, 공동주거시설, 공업시설, 상업 및 업무시설, 철도, 도로, 산림, 초지, 하천, 호소의 면적 비율을 산출하였다. 이 중 산림과 초지 면적은 토지피복 대분류 기준을 적용하여 산출하였고 나머지 유형은 세분류 기준을 적용하여 산출하였다. 불투수 지역의 경우, 세분류 토지피복 유형 중 불투수 지역으로 분류되는 모든 유형을 포함하여 집계하였다. 단독주거시설(Low-rise Residential)은 아파트, 연립, 빌라를 제외한 주거시설을 의미하며, 공동주거시설(High-rise Residential)은 아파트, 연립, 빌라를 포함한다. 이는 가구 수 기준이 아니라, 건축물의 물리적 형태를 기준으로 분류한 것이다.

식생 차원의 변수인 NDVI는 위성관측 자료인 Landsat 8 Collection 2 level 2 Science Product (L2SP) 자료를 활용하여 구축하였다. 해당 자료는 미국지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 제공하며, 분석 대상 지역인 서울시가 포함된 path 116, row 34 영역에 대해 2023년 데이터를 구득하였다. Landsat 8 위성은 동일 지점을 16일 주기로 관측하므로 2023년에는 총 23개의 영상을 얻을 수 있었다. 이 중 '구름이 없는 육상(Clear with lows set)'을 나타내는 코드 값 21824를 가지는 격자가 90% 이상을 차지하는 자료만을 추출하였고, 분석 기간인 6~8월에 가장 가까운 시기인 2023년 5월 23일 관측 자료를 활용하였다. NDVI는 -1에서 1 사이의 값을 나타낸다. 한국지질자원연구원에 따르면, 일반적으로 NDVI 값의 분포가 -1~0인 경우 죽은 나무, 0~0.33은 건강하지 않은 수목, 0.33~0.66은 보통 정도로 건강한 수목, 0.66~1은 매우 건강한 수목으로 분류한다.

건물 및 배치 특성 변수의 구축을 위해 행정안전부에서 제공하는 도로명주소 전자지도 데이터를 활용하였다. 해당 데이터는 건물 도형 정보 및 좌표를 비롯하여 건물의 지상층수, 지하층수, 행정구역 경계정보 등을 포함하고 있다. 본 연구에서는 건물 특성과 관련된 변수로 건물 밀도, 연면적 및 평균 층수를 구축하였다. 건물 밀도는 각 버퍼 영역 대비 건축물의 바닥면적 합계의 비율을 계산하여 산출하였다. 또한 건축물별 각 층의 바닥면적 합계를 모두 합하여 분석 단위별 건물의 총 연면적을 산출하였다. 건물의 평균 층수는 활용한 데이터에서 높이에 대한 정보를 제공하지 않아 건물의 평균 높이 대신 활용된 변수로, 각 버퍼 영역에 포함되는 건축물별 지상 층수의 평균값으로 산출하였다.

마지막으로 도시의 3차원 공간환경을 대표하는 요인이자 건물 배치 특성을 나타내는 SR과 SVF는 지형과 건물을 포함한 수치 표면 모델(Digital Surface Model, DSM)을 활용하여 산출하였다. 먼저 DSM을 구축하기 위해 국토교통부에서 제공하는 한반도 전역 범위의 지형 수치 표고 모델(Digital Elevation Model, DEM) 자료를 구득한 후, 서울시의 지형 DEM을 추출하였다. 이후, 도로명주소 전자지도 데이터를 바탕으로 건물 DEM을 구축하였다. 이때, 건물의 높이는 국토교통부의 건축물 대장정보를 활용하여 서울시 건축물의 평균 층고 값(약 3.37m)을 도출하여, 지상 층수와 곱한 값으로 산출하였다.

지형 DEM과 건물 DEM을 결합하여 구축한 DSM 데이터를 활용하여 SR을 계산하였다. SR은 DSM의 표준편차로 산출되며, 값이 클수록 지표면 기복이 크다는 것을 의미한다(Li et al., 2019; Tian et al., 2019). SVF은 표면에서 수신된 복사량과 전체 반구 환경에서 방출된 복사량의 비율로, 지표면에서 하늘을 바라볼 때의 개방 정도를 나타내는 지표이다(Li et al., 2019; Lindberg et al., 2018; Park et al., 2017). SVF 산출에는 GIS에서 다운받을 수 있는 오픈소스 모델인 UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor)(Lindberg et al., 2018)의 [Urban Geometry: Sky View Factor Calculator] 모듈을 활용하였다. 해당 모듈은 DSM 데이터를 기반으로 각 픽셀에 대하여 하늘의 가시 영역을 3차원적으로 분석하여 SVF 값을 산출하며, 이 값은 0(완전히 폐쇄된 공간)에서 1(완전히 개방된 공간) 사이의 무차원 수치로 표현된다(Lindberg et al., 2018). 이 방법론에 대한 세부 사항은 Lindberg and Grimmond(2010)에서 자세히 확인할 수 있다.

본 연구에서는 앞서 제시한 설명변수를 대상으로 선형회귀모형을 일반최소제곱법(Ordinary Least Squares, OLS)으로 추정한 후, 분산팽창요인(Variance Inflation Factor, VIF) 값을 산출하여 설명변수 간의 공선성을 진단하였다. 설명변수의 VIF 값 산출 결과, 불투수 면적, 산림 면적, 건물 밀도, 건물 연면적 변수는 다중공선성 문제로 인해 분석에서 제외하였다. 이외 변수의 VIF 값은 10 미만으로 산출되어 다중공선성 문제가 없는 것으로 판단하였다. 〈Table 1〉에는 최종적으로 분석에 활용된 변수 정보만을 포함하였다.

3. 분석모형

본 연구의 종속변수인 기온과 설명변수인 도시 공간환경 요인들은 모두 지리 공간 데이터라는 점에서 공간자기상관(spatial autocorrelation)을 가질 수 있다. 공간자기상관은 공간상에 분포하고 있는 실체(spatial entities)들의 위치 유사성이 높아짐에 따라 이 실체들이 갖는 값의 유사성도 높아지는 것을 의미한다(Anselin and Bera, 1998). 이를 고려하지 않고 모형을 추정할 경우 일치추정량을 얻을 수 없는 문제 즉, 추정 모수의 편의가 발생할 수 있다. 공간자기상관은 공간가중행렬(spatial weights matrix) W를 적용한 공간계량모형을 통해 제어할 수 있다.

먼저 공간자기상관의 존재 여부를 파악하기 위하여 Moran's I 검정을 수행하였다. 분석 결과, 주간 기온과 야간 기온의 Moran's I는 각각 0.0897($p<0.001$), 0.1412($p<0.001$)로 나타났으며, 모두 통계적으로 유의한 양(+)의 공간자기상관성이 확인되었다. 따라

서 본 연구에서는 이를 고려한 공간계량모형을 활용하여 회귀분석을 수행하고자 하였다. 다음으로 라그랑주 승수(Lagrange Multiplier, LM) 검정을 통해 공간계량모형인 공간시차모형(Spatial Lag Model)과 공간오차모형(Spatial Error Model) 중 더 적합한 최적의 모형을 선택할 수 있다. 일반적으로 종속변수에 공간자기상관이 존재하면 공간시차모형을 활용하는 것이 바람직하며, 모형의 오차에서 공간자기상관이 존재하는 경우 공간오차모형이 활용된다(Li et al., 2019). 본 연구에서는 GIS를 활용하여 측정지점 간 역거리 제곱을 기준으로 공간가중행렬 W를 산출하였으며, 값을 행 단위로 정규화하여 사용하였다. 이외 전 분석 과정은 오픈소스 프로그램 R 버전 4.3.2를 활용하여 수행되었다.

Ⅳ. 연구결과 및 토의

1. 기초통계량: 연구 대상 도시의 공간환경 특성

본 연구에서 활용된 도시 공간환경 요인에 대한 기초통계량은 〈Table 2〉와 같다. 6개 반경에 따른 공간 스케일별 공간환경 요인의 평균값과 표준편차로, 서울시의 공간환경 특성을 스케일에 따라 파악할 수 있다. 모든 공간 스케일에서 도로 면적이 평균 42.3%에서 52.2%를 차지하며 가장 높은 비율을 보였다. 이는 가장 대표적인 도시화로 인한 토지이용과 피복 특성의 변화가 도로 면적의 증가임을 반영하는 바이다(Li et al., 2019). 다음으로, 50m에서 250m 반경의 공간에서는 상업 및 업무시설의 면적이 10.4%에서 12.2%로 높은 비율을 차지하고 있으며, 500m에서 1km 반경에서는 초지 면적이 10.6%에서 11%로 두 번째로 높은 비율을 보였다. 주거시설 면적의 경우, 모든 스케일에서 단독주거시설의 면적 비율(5.5~7.4%)이 공동주택시설 비율(7.2~8.2%)보다 낮게 나타났다. 반면, 교통 지역에 해당하는 철도 면적은 도로 면적과 상반되게 모든 공간 스케일에서 평균 1% 미만으로 낮은 비율을 나타냈으며, 공업 지역 및 호수 면적 역시 평균 1% 미만의 비율을 차지했다. 하천 면적의 경우에도 250m 반경 이내에서는 1%에 미치지 않는 것으로 나타났다.

NDVI는 0.122에서 0.154의 값으로 나타나, 대부분의 지역이 건강하지 않은 수목의 식생 수준(0~0.33)에 속하는 것으로 분석되었다. 건물 및 배치 특성의 경우, 서울시 건축물의 평균 층수는 대략 5층에서 6층으로 나타났다. SR은 8.661에서 21.582의 범위로

Table 2. Descriptive statistics of the variables

Category		Variable	50 m		100 m		250 m		500 m		750 m		1 km	
			Mean	Std. Dev	Mean	Std. Dev	Mean	Std. Dev	Mean	Std. Dev	Mean	Std. Dev	Mean	Std. Dev
Land use and land cover	Used area	Low-rise residential area	0.072	0.093	0.074	0.080	0.068	0.062	0.062	0.048	0.058	0.040	0.055	0.035
		High-rise residential area	0.075	0.078	0.081	0.064	0.082	0.050	0.078	0.041	0.075	0.037	0.072	0.034
		Industrial area	0.002	0.014	0.002	0.014	0.002	0.012	0.002	0.009	0.002	0.007	0.002	0.006
		Commercial and business area	0.122	0.116	0.114	0.099	0.104	0.078	0.095	0.064	0.090	0.056	0.086	0.051
	Transport area	Railway area	0.005	0.035	0.006	0.035	0.008	0.030	0.008	0.023	0.008	0.019	0.009	0.016
		Road area	0.522	0.122	0.497	0.109	0.475	0.096	0.453	0.093	0.436	0.089	0.423	0.087
	Green and water area	Grass area	0.082	0.113	0.089	0.105	0.099	0.088	0.106	0.075	0.109	0.065	0.110	0.058
		River area	0.003	0.021	0.005	0.026	0.009	0.038	0.016	0.051	0.023	0.063	0.031	0.074
		Lake area	0.000	0.006	0.001	0.007	0.001	0.010	0.001	0.009	0.001	0.006	0.001	0.005
Vegetation		NDVI	0.122	0.060	0.126	0.058	0.135	0.056	0.145	0.055	0.151	0.051	0.154	0.050
Building and layout		Average number of floors	4.954	4.105	5.471	3.933	5.791	3.153	5.864	2.463	5.872	2.154	5.844	1.863
		SR	8.661	6.064	10.751	6.251	13.878	6.080	16.969	6.745	19.401	8.562	21.582	10.551
		SVF	0.815	0.089	0.813	0.085	0.813	0.072	0.819	0.061	0.824	0.054	0.830	0.049

산출되어 공간 스케일이 커질수록 포함되는 건축물이 많아져 표준편차도 증가하는 경향을 보였다. SVF는 모든 공간 스케일에서 0.813에서 0.83 사이로 유사한 값을 보이며, 각 스케일에서 일정한 SVF를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 또한 0~1의 범위에서 1에 가까울수록 개방된 공간을 나타낸다는 점을 감안할 때, 기온 측정지점 중심의 지역은 평균적으로 개방된 편임을 알 수 있다.

2. 도시 내 기온의 공간적 분포 및 차이

분석대상 지역인 서울시 내 여름철 주야간 기온의 공간적 분포를 분석하였다(Figure 1). 주간 기온의 경우, 평균 기온이 17.146~30.871℃ 범위에서 형성되었으며, 전체 관측지점의 평균값은 28.148℃로 나타났다. 이는 서울시 내에서도 7~8월의 평균 주간 기온이 최저 17.1℃에서 최고 30.9℃까지 분포하여, 약 13.8℃의 현저한 공간적 격차가 존재함을 의미한다. 야간 기온의 경우, 평균 기온이 13.228~28.483℃ 범위에서 형성되었으며, 전체 관측지점의 평균값은 25.668℃로 분석되었다. 특히 야간 기온의 공간적 격차는 약 15.3℃로, 주간 기온의 공간적 격차보다 더 큰 것으로 확인되었다. 뉴욕시를 대상으로 여름철 평균 기온의 공간적 변화를 분석한 Johnson et al.(2020)에서 확인된 약 8.7℃(17.1~25.8℃) 수준의 격차나 중국 선전시를 대상으로 도시 내 기온의 공간적 패턴과 시간 및 계절적 변동성을 분석한 Cao et al.(2021)에서 밝힌 약 8.6~8.7℃(극심한 더위가 지속되는 날 오후 4시~11시경) 정도의 격차보다 더 큰 수치이다. 서울시는 고도로 도시화되었을 뿐만 아니라, 산지 및 하천 비율이 높은 지형적 특성으로 인해 다른 도시에 비해 상당한 수준의 공간적 기온 격차를 보이는 것으로 해석된다.

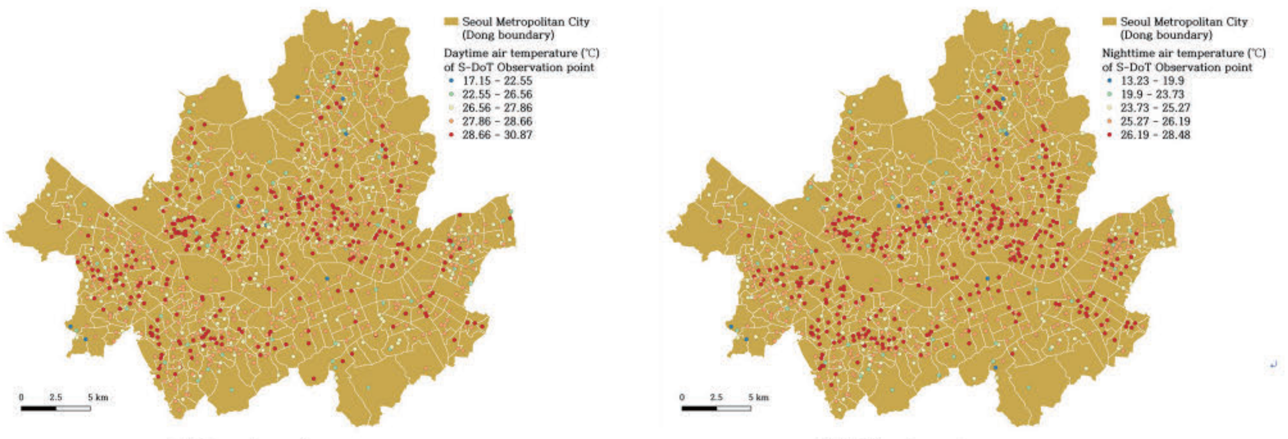
주간 및 야간 기온의 공간적 분포를 살펴보면, 전반적으로 도심부에서 높은 기온이 형성되는 경향이 보이나, 산지가 위치한 주변부에서도 국지적으로 높은 기온이 관찰된다. 또한 기온의 공간자기상관이 존재하는 것으로 분석된 바와 같이, 대부분의 기온 측정지점에서는 인접 지점과의 유사한 기온 분포를 보이나, 동일 행정동 내에서도 급격한 기온 차이가 존재하는 것으로 관찰된다. 이는 서울시의 기온 분포가 단순히 도시-농촌 경사도(urban-rural gradient)나 중심-주변 패턴을 따르지 않으며 도시 열환경이 단순히 도시화 정도만으로 설명될 수 없음을 시사한다. 따라서 도시 열환경을 이해하기 위해서는 미시적 공간 단위에서 공간환경 요소가 기온에 미치는 영향을 심층적으로 분석하는 접근이 필요하다.

3. 공간회귀모형 분석 결과

1) 도시 공간환경과 기온 간 관계에 대한 공간 스케일의 영향

분석에 적합한 공간회귀모형 선정을 위한 LM 검정 결과, 산출된 LM 및 Robust LM 통계량은 〈Table 3〉과 같다. 모든 LM 통계량의 경우 $p<0.01$ 수준에서 유의한 것으로 나타났으며, 공간 스케일에 따라 적합한 공간회귀모형이 상이하게 도출되었다. 주간 기온의 경우, 50m와 100m 반경 모형에서는 lag 통계량이 error 통계량보다 높게 산출되어 공간시차모형의 적합도가 더 큰 것으로 나타났다. 반면, 250m 반경 이상의 모형에서는 error 통계량이 lag 통계량보다 근소하게 높게 나타나 공간오차모형이 더 적합한 것으로 분석되었다. 야간 기온의 경우, 250m 이하 반경에서는 공간시차모형이, 500m 이상 반경에서는 공간오차모형이 더 적합한 것으로 나타났다.

이러한 공간 스케일별 적절한 모형의 차이는 기온과 도시 공간환경 간 관계에서 작용하는 주요한 공간적 영향의 특성이 스케일에 따라 상이함을 시사한다. 50m~250m의 소반경(small radius) 모형에서 공간시차모형이 더 적합하게 나타난 것은 기온과 그 주변 공간환경 간 관계에 있어 인접 지역의 기온으로부터의 공간적 효과가 비교적 더 크게 작용함을 의미한다. 반면, 500m 이상의 비교적 대반경(large radius) 모형에서 공간오차모형이



(a) Daytime air temperature (b) Nighttime air temperature

Figure 1. Spatial distribution of daytime and nighttime air temperature (Criteria for classification: natural break)

Table 3. Results of the LM test

Model	Daytime				Nighttime			
	LM-lag	LM-error	Robust LM-lag	Robust LM-error	LM-lag	LM-error	Robust LM-lag	Robust LM-error
50 m	16.192	12.585	4.473	0.866	45.383	36.644	9.261	0.523
100 m	15.019	12.99	2.12	0.091	39.896	33.425	6.575	0.103
250 m	11.41	11.476	0.174	0.24	25.21	22.387	2.832	0.009
500 m	9.032	10.528	0.312	1.808	15.084	16.454	0.049	1.419
750 m	9.648	11.56	0.934	2.846	13.285	17.777	1.2	5.69
1 km	11.254	12.299	0.26	1.305	13.173	17.043	1.32	5.192

더 적합하게 나타난 것은 인접 지역의 기온으로부터 받는 영향보다 관찰되지 않는 잠재적 요인들에 의한 공간자기상관이 오차항을 통해 간접적으로 발생하는 것이 더 중요해짐을 의미한다. 이는 도시 내 기온과 공간환경 간 관계를 분석할 때 스케일에 따라 고려해야 할 주요한 공간적 영향의 특성이 달라질 수 있음을 실증적으로 보여주는 결과라 할 수 있다.

주야간 기온별 6개 반경 모형의 AIC(Akaike Information Criterion) 통계량을 검토한 결과, 주간 기온의 경우 100m 반경 모형에서, 야간 기온의 경우 500m 반경 모형에서 설명력이 가장 높게 나타났다(Tables 4, 5). 모형 적합도를 나타내는 AIC 값은 모델의 적합도와 복잡성을 동시에 고려하는 지표로서, 변수가 적고 설명력이 높을수록 낮은 값을 갖게 된다. 주간 기온의 모형 적합도 분석 결과, 50m 반경에서 100m 반경으로 확장될 때만 AIC 값이 감소하며, 250m 반경 이상의 모형에서는 반경이 증가할수록 AIC 값이 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 주간 기온과 도시 공간환경 간 관계가 100m 반경에서 최적의 설명력을 가지며, 해당 반경을 초과하는 공간 스케일에서는 모형의 설명력이 점차 저하됨을 의미한다. 야간 기온의 모형 적합도는 50m 반경에서 500m 반경까지 공간 스케일이 확장됨에 따라 AIC 값이 점점 감소하다가, 500m 반경을 변곡점으로 하여 다시 증가하는 양상을 보였다. 이러한 결과는 야간 기온의 경우 500m 반경에서 도시 공간환경과의 관계에 대한 최적의 설명력을 가지며, 그 이상의 스케일에서는 모형의 설명력이 감소함을 시사한다. 주간 및 야간 기온 각각에 대해 최적의 설명력을 가진 공간 스케일을 비교해보면, 태양 일사가 존재하는 주간에는 비교적 근거리 반경의 공간환경으로부터 받는 영향력이 지배적인 반면, 일사가 부재한 야간에는 상대적으로 원거리 반경의 공간환경으로부터의 영향력이 증대되는 것을 알 수 있다.

종합하면, 50m에서 1km에 이르는 분석 반경의 공간 스케일에서 주야간 기온과 공간환경 간의 관계를 최적으로 설명하는 스케일은 각각 100m와 500m 반경인 것으로 나타났다. 따라서 도시 공간환경이 기온에 미치는 영향을 비롯한 도시 열 환경 연구 시, 이러한 최적의 분석 공간 스케일의 존재를 고려하지 않고 스케일을 임의로 설정하거나 시간대와 무관하게 동일한 스케일을 적용한다면, 그 관계를 정확히 파악하는 데 한계가 있을 것이다.

2) 기온에 영향을 미치는 도시 공간환경 요인

공간회귀모형의 추정 결과는 주간 및 야간 기온별로 〈Table 4〉와 〈Table 5〉에 제시하였다. 공간시차모형이 적합한 경우 모든 공간시차계수(ρ)는 $p<0.05$ 수준에서 통계적으로 유의하였으며, 공간오차모형이 적합한 경우 모든 공간오차계수(λ)는 $p<0.01$ 수준에서 유의하게 나타났다. 설명변수의 회귀계수는 시간대별 기온과 공간 스케일에 따라 통계적 유의성이 상이했으나, 유의한 경우에는 회귀계수의 부호가 일관되게 나타났다. 주야간 기온별 6개 반경 모형에서 도출된 회귀계수를 바탕으로 토지이용 및 피복 특성, 식생 수준, 건물 및 배치 특성의 도시 공간환경 요인들이 기온 상승과 저감에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 기온 상승과 통계적으로 유의한 관계를 가지는 공간환경 요인으로 단독주거시설, 공동주거시설, 상업 및 업무시설, 철도, 도로 그리고 초지 면적 비율이 도출되었다. 이 중 기온 상승에 가장 지배적인 영향을 미치는 변수는 단독주거시설과 초지 면적 비율로 나타났다. 단독주거시설의 경우, 750m 반경 모형을 제외한 모든 모형에서 토지 특성 중 기온에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 나타났다. 주간 기온에서 최적의 설명력을 보이는 100m 반경 모형에서는 단독주거시설의 면적 비율이 0.1(10%p) 증가할 때, 기온이 평균적으로 약 0.22℃ 증가하는 것으로 나타났다. 공동주거시설과 상업 및 업무시설은 50m 반경 모형에서 주야간 기온에 통계적으로 유의한 양(+)의 영향을 미쳤으나, 다른 공간 스케일에서는 유의미한 관계가 나타나지 않았다.

시가화 지역에 포함되는 다양한 토지 특성 중 단독주거시설 면적 비율이 기온과 뚜렷한 관계를 보인 것은 건축물의 구조적 특성과 상대적인 녹지 부족, 협소한 도로와 같은 공간적 특성에서 기인한 것으로 추정된다. 일반적으로 단독주거시설은 개별적으로 분리되어 있으며 건물 높이가 낮아 공동주거시설에서 기대할 수

Table 4. Results of spatial regression models (Mean daytime air temperature)

Variables		Mean daytime air temperature											
		50 m		100 m		250 m		500 m		750 m		1 km	
		Coef.	z	Coef.	z	Coef.	z	Coef.	z	Coef.	z	Coef.	z
Intercept		21.683	12.33***	22.693	12.275***	29.794	25.056***	29.119	18.453***	28.622	15.429***	28.279	13.538***
Used area	Low-rise residential area	1.772	4.082***	2.178	4.244***	3.051	3.733***	2.735	2.246**	2.768	1.666	3.622	1.845*
	High-rise residential area	1.045	2.082**	0.141	0.217	-0.813	-0.751	-1.074	-0.707	-0.532	-0.28	-0.201	-0.088
	Industrial area	3.063	1.389	2.918	1.337	-1.923	-0.693	-2.557	-0.604	-3.272	-0.58	-2.729	-0.384
	Commercial and business area	0.903	2.269**	0.136	0.282	-0.395	-0.497	-0.184	-0.166	0.114	0.08	0.77	0.458
Transport area	Railway area	0.511	0.552	0.744	0.8	2.099	1.78*	1.429	0.89	1.258	0.59	0.137	0.052
	Road area	0.224	0.678	0.555	1.417	0.907	1.503*	1.233	1.5	0.72	0.678	-0.003	-0.003
Green and water area	Grass area	0.739	1.893*	1.219	2.841***	1.712	2.969***	2.277	3.266***	2.453	2.863***	2.22	2.174**
	River area	-4.621	-3***	-3.346	-2.612***	-0.675	-0.693	0.134	0.154	-0.113	-0.117	-0.517	-0.507
	Lake area	-11.155	-1.954*	-10.697	-2.361**	-0.315	-0.094	-2.56	-0.667	-7.787	-1.298	-6.034	-0.777
Vegetation	NDVI	-4.134	-5.143***	-4.786	-5.329***	-4.919	-4.057***	-5.591	-3.724***	-6.299	-3.102***	-6.376	-2.854***
Building and layout	Average number of floors	-0.017	-1.078	-0.02	-1.117	-0.041	-1.936*	-0.062	-2.223**	-0.053	-1.636	-0.024	-0.628
	SR	-0.016	-1.314	-0.02	-1.724*	-0.004	-0.441	0.003	0.452	0.003	0.434	0.001	0.234
	SVF	-0.782	-1.246	-1.408	-1.809*	-1.722	-1.619	-0.892	-0.647	0.026	0.017	0.586	0.323
N		1010		1010		1010		1010		1010		1010	
Pseudo R-squared		0.178		0.189		0.165		0.163		0.135		0.109	
Log likelihood		-1428.032		-1420.707		-1435.411		-1436.975		-1453.693		-1468.439	
AIC		2888.1		2873.4		2902.8		2905.9		2939.4		2968.9	
ρ or λ		ρ: 0.26***		ρ: 0.247***		λ: 0.237***		λ: 0.226***		λ: 0.235***		λ: 0.244***	

*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01

Table 5. Results of spatial regression models (Mean nighttime air temperature)

Variables		Mean nighttime air temperature											
		50 m		100 m		250 m		500 m		750 m		1 km	
		Coef.	z	Coef.	z	Coef.	z	Coef.	z	Coef.	z	Coef.	z
Intercept		18.055	11.551***	19.447	11.553***	20.674	10.563***	28.922	16.893***	28.036	13.853***	27.472	12.024***
Used area	Low-rise residential area	1.863	3.852***	2.296	4.054***	2.995	3.612***	2.555	1.93**	2.636	1.451	3.987	1.851**
	High-rise residential area	1.103	1.972**	0.535	0.748	-0.737	-0.67	-2.666	-1.61	-1.818	-0.873	-2.391	-0.957
	Industrial area	-0.006	-0.003	-0.233	-0.097	-4.032	-1.454	-6.18	-1.337	-7.226	-1.164	-5.663	-0.723
	Commercial and bbusiness area	1.115	2.511**	0.634	1.187	0.399	0.501	0.179	0.148	0.627	0.442	0.794	0.431
Transport area	Railway area	1.24	1.202	1.464	1.425	3.003	2.462**	2.788	1.602*	3.77	1.62	2.23	0.773
	Road area	0.345	0.935	0.656	1.515	1.662	2.649***	2.303	2.579***	1.894	1.636*	1.877	1.355
Green and water area	Grass area	0.626	1.438	1.179	2.489**	1.702	2.871***	1.943	2.567***	1.809	1.934**	1.214	1.086
	River area	-2.677	-1.559	-0.688	-0.486	1.362	1.312	1.429	1.516	1.004	0.954	0.705	0.632
	Lake area	-8.475	-1.332	-7.762	-1.551	0.147	0.042	-2.675	-0.644	-8.991	-1.376	-4.662	-0.549
Vegetation	NDVI	-4.604	-5.135***	-5.859	-5.895***	-5.838	-4.683***	-7.227	-4.439***	-8.354	-3.769***	-8.048	-3.287***
Building and layout	Average number of floors	-0.023	-1.325	-0.021	-1.104	-0.042	-1.855*	-0.073	-2.41**	-0.048	-1.359	-0.012	-0.285
	SR	-0.007	-0.518	-0.014	-1.113	0.003	0.324	0.005	0.6	0.006	0.857	0.005	0.852
	SVF	-2.999	-4.278***	-3.586	-4.166***	-3.516	-3.185***	-3.797	-2.534**	-2.523	-1.441	-2.026	-1.019
N		1010		1010		1010		1010		1010		1010	
Pseudo R-squared		0.24		0.266		0.28		0.29		0.263		0.236	
Log likelihood		-1543.357		-1525.757		-1515.999		-1509.08		-1527.603		-1546.213	
AIC		3118.7		3083.5		3064		3050.2		3087.2		3124.4	
ρ or λ		ρ: 0.397***		ρ: 0.366***		ρ: 0.298**		λ: 0.267***		λ: 0.278***		λ: 0.277***	

*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01

있는 그늘 효과가 제한적이다. 이로 인해 햇빛에 직접적으로 노출되는 면적이 상대적으로 더 많아 기온 상승에 영향을 미칠 수 있다. 이는 기재홍 외(2024)의 연구에서 공동주거시설 비율이 높은 지역이 그늘로 인한 냉각 효과로 인해 지표면 온도가 상대적으로 낮게 나타난다고 보고한 바와 유사한 맥락이다. 또한 단독주거지역은 공동주거지역이나 상업지역에 비해 조경과 녹지가 부족하여 자연적인 냉각 효과가 제한적이며, 협소한 도로로 인해 환기 성능이 저하되고 열 축적이 증가할 수 있다(서수정·임강륜, 2010).

철도와 도로 면적은 주간 기온에 대해 250m 반경 모형에서만 유의한 양(+)의 영향을 나타냈으나, 야간 기온의 경우 각각 250~500m, 250~750m 반경 모형에서 유의한 관계가 나타났다. 특히, 최적의 설명력을 가진 야간 기온의 500m 반경 모형에서는 철도와 도로 모두 유의한 영향요인으로 도출되었으며, 각각의 면적 비율이 0.1(10%p) 증가할 때 평균 기온이 약 0.28℃, 0.23℃ 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다. Li et al.(2019)은 철도 및 도로시설 밀도가 지표면 온도와 양(+)의 관계를 가지는 원인을 강철과 콘크리트와 같은 각 시설의 피복 재료의 특성으로 인해 태양열을 흡수하여 지표면 온도 상승에 영향을 미치기 때문으로 해석하였다. 이러한 피복 재료는 열용량이 큰 재질로 낮 동안 흡수한 열을 저장한 후, 야간에 저장된 열을 천천히 방출하게 되면서 주간에는 지표면 온도를 상승시킨 후 야간에는 방출되는 열로 인해 기온 상승에 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한 교통 시설 자체에서 발생하는 열 뿐만 아니라 전철·기차 및 차량에서 방출되는 인공열 역시 기온 상승에 기여한 것으로 예상된다(조희선 외, 2014; Li et al., 2019).

초지는 주간 기온의 모든 공간 스케일에서 양(+)의 관계를 보였으며, 야간 기온과는 100m~750m 반경 모형에서만 양(+)의 관계를 보이는 것으로 나타났다. 주간 기온의 100m 반경 모형과 야간 기온의 500m 반경 모형 결과에 따르면, 초지의 면적 비율이 0.1(10%p) 증가할 때 낮 시간대 평균 기온은 약 0.12℃, 밤 시간대 평균 기온은 약 0.19℃ 증가하는 경향이 확인되었다. 일반적으로 초지를 비롯한 녹지가 냉각 효과를 제공하는 것으로 알려져 있으나, 초지가 오히려 기온 상승 요인으로 작용할 수 있음을 보여주는 연구들이 존재한다(Nonomura et al., 2014; Grilo et al., 2020; Suen, 2022). 초지는 낮은 알베도로 다른 토지 유형보다 더 많은 열을 흡수할 수 있으며, 과도한 일사량으로 수분 스트레스를 받는 경우 기공 통제로 인해 냉각 효과는 감소하고 기온 상승에 기여할 수 있다(이호진 외, 2018). 본 연구에서도 초지는 단독주거시설에 이어 기온 상승에 중요한 영향을 미치는 변수로 확인되었으며, 서울시의 기후 및 환경 조건에서 초지가 기온 상승 요인으로 작용할 수 있음을 시사하는 바이다.

둘째, 기온 저감과 통계적으로 유의한 관계를 보인 공간환경 요인으로는 하천과 호소 면적 비율, NDVI 그리고 3차원 특성인 평균 건물 층수, SR과 SVF가 도출되었다. 하천과 호소의 경우, 야간 기온 완화에는 유의한 영향을 미치지 않았으나, 주간 기온에서는 50m와 100m 반경 모형에서 유의한 부(-)의 관계를 나타냈다. 이는 수역이 복사에너지를 흡수하고 높은 비열 용량을 갖는 특성으로 인해 낮에는 냉각 효과가 두드러지지만, 밤에는 흡수했던 열을 방출하여 기온 저감효과가 제한적임을 보여준다(Yan et al., 2014; Pan et al., 2023; Yang et al., 2023). 100m 반경 모형 결과에 따르면, 하천 면적 비율이 0.1(10%p) 증가하면 주간 기온은 약 0.33℃ 감소하며, 호소의 경우 약 1.1℃ 정도 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 이는 동일 면적 비율 대비 호소가 하천보다 더 강한 기온 저감효과를 가진다는 것을 의미하며, 이는 호소가 하천보다 태양 복사에너지 흡수 능력이 더 큰 경향이 있기 때문으로 해석된다. 한편, 하천과 호소의 냉각 효과가 50m~1km 반경 중 100m 이하의 좁은 반경에서만 유의한 영향을 미친다는 결과는 넓은 공간 스케일에서는 이들 수역의 기온 저감효과가 제한적일 수 있음을 의미한다.

NDVI는 공간 스케일과 관계없이 주야간 기온 저감에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 야간 기온에서 더 큰 폭의 저감효과를 보였다. 주간 기온의 경우, 100m 반경 모형에서 NDVI 값이 0.1(10%p) 증가하면 평균적으로 약 0.48℃ 감소하고, 야간 기온의 500m 반경 모형에서는 약 0.72℃ 감소하는 경향이 있는 것으로 분석되었다. 이는 NDVI가 도시의 기온 저감에 미치는 영향을 보고한 여러 선행연구와 일치한다(조혜민 외, 2019; Grilo et al., 2020; Johnson et al., 2020; Yang et al., 2023). 특히 Yang et al.(2023)은 NDVI가 10% 증가하면 여름철 기온이 0.73℃ 감소한다는 것을 입증하여, NDVI와 식생면적이 모든 공간 스케일에서 기온과 가장 강한 관계를 가지며, 공간 스케일 및 시간 범위와 무관하게 기온 변화를 설명하기에 적합한 지표임을 강조한 바 있다. 이는 본 연구의 결과와 유사한 경향을 보여 NDVI의 기온 저감효과의 보편적 타당성을 뒷받침한다.

건물의 층수는 250m와 500m 반경 모형에서 주야간 기온과 음(-)의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 즉, 어떤 지역의 평균적인 건축물 층수가 많을수록 기온이 감소하는 경향이 있는 것으로 해석할 수 있다. 건물의 층수가 많다는 것은 건물의 높이가 높다는 것을 의미하는데, 이에 따라 생성된 그늘이 지표면이나 인공 구조물의 열 흡수량을 감소시키고, 그늘진 공간에서의 대기 가열을 완화하는 효과를 나타낸다. 또한 건물 높이에 의한 난류 생성이나 와류(vortex) 효과 등이 대기 순환을 촉진하여 열 축적을 완화할 수 있다. 이는 건물의 높이가 높을수록 기온 상승에 영향을 미친다는 연구(Liu et al., 2021; Yang et al., 2023)와 대조되는 결과이다. 한편, 250m 반경 미만이나 500m 반경을 초과하는 공간 스케일에서 건물의 층수와 기온 간 관계는 유의하지 않았기에, 그늘로 인한 기온 저감효과는 특정한 공간 스케일에서만 기대할 수 있을 것으로 보인다.

SR은 주간 기온 형성을 최적으로 설명하는 100m 반경 모형에서만 유의한 부(-)의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 바람 순환의 감소로 인한 기온 상승보다 건물로 인한 그늘 생성이 기온을 낮추는 효과가 더 강하게 작용한다는 것으로 해석할 수 있다(Li et al., 2019). 비록 다른 모형에서는 유의미한 결과가 나타나지 않았지만, 표면의 거칠기가 클수록 기온을 저감할 수 있는 잠재적인 가능성을 시사한다. SVF는 SR과 동일하게 주간 기온에 대해서는 100m 반경 모형에서만 부(-)의 영향을 미쳤지만, 야간 기온에 대해서는 50m에서 500m 반경까지 상당한 기온 저감효과를 가지는 것으로 나타났다. 500m 반경 모형에서 SVF가 0.1(10%p) 증가할 때 야간 기온이 평균적으로 약 0.38℃ 감소하는 경향을 보였다. 즉, 하늘 방향으로의 공간 개방 정도를 나타내는 SVF가 커질수록 기온이 완화될 수 있음을 의미한다. 이는 공간이 개방됨으로써 태양 복사량이 증가해 온도가 상승하는 경향(Li et al., 2019; Zhang et al., 2020)보다는, 환기 성능 개선으로 기온이 저감되는 효과가 더 강하게 나타난다고해석할 수 있다(Lee et al., 2017; Park et al., 2017). 정리하면, 건물의 층수, SR, SVF와 같은 3차원 공간환경 지표들은 모두 500m 반경 이하의 모형에서 기온에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 층수와 SVF는 야간 기온의 500m 반경 모형에서 기온과 가장 강한 관계를 가지는 것으로 분석되었다. 이는 유사 연구인 Yang et al.(2023)에서 건물 높이 및 부피와 같은 3차원 도시 형태 지표가 500m 반경에서 기온을 예측하는 데 가장 큰 설명력을 가지는 것으로 도출된 결과와 유사한 경향을 보인다.

V. 결 론

본 연구는 다중 스케일 접근에 기반하여 도시 공간환경과 기온 간 관계에 대한 공간 스케일의 영향과 더불어, 2차원 및 3차원 공간환경 요인이 여름철 도시 주야간 기온에 어떻게 영향을 미치는지 실증하였다.

먼저, 서울시를 대상으로 고해상도의 S-DoT 데이터를 활용하여 도시의 주야간 기온 분포를 분석하고 어느 수준의 공간적 격차가 존재하는지 확인하였다. 2023년 6~8월 여름철을 기준으로 서울 지역의 평균 주간 기온은 약 17.1~30.9℃, 야간 기온은 약 13.2~28.5℃의 범위로 나타나, 최대 약 13.8℃(주간), 15.3℃(야간)의 공간적 격차가 존재하였다. 따라서 서울시와 같이 고밀 개발되었으며 복잡한 지형적 특성을 가진 도시 지역 내 기온은 미시적 공간 단위에서 상당한 공간적 변화가 있다는 것을 확인할 수 있었다.

50m에서 1km 반경까지의 6개 모형 중 주간 기온은 100m 반경, 야간 기온은 500m 반경 모형이 공간환경 요인과의 관계에 있어 최적의 설명력을 갖는 것으로 나타났다. 이는 주간에는 근거리 반경의 공간환경이, 야간에는 상대적으로 원거리 반경의 공간환경이 기온에 더 큰 영향을 미친다는 것을 시사한다. 더불어 공간 스케일에 따라 적합한 공간회귀모형이 상이하게 도출되어 스케일에 따라 고려해야 할 주요한 공간적 영향의 특성이 달라질 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 공간환경과 기온 간 관계를 파악하는 데 있어 내재된 MAUP 문제를 이해하고, 다양한 공간 스케일을 고려하여 주야간 시간대에 따라 최적의 분석 공간 스케일을 설정하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

도시 공간환경을 구성하는 2차원적 특성인 토지이용 및 피복 변수 중 단독주거시설과 초지 면적 비율이 대부분의 공간 스케일에서 시간대와 관계없이 기온을 높이는 주요 요인으로 나타났다. 반면, NDVI가 모든 공간 스케일에서 주야간 시간대의 기온 저감에 주요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 한편, 도로과 철로 면적 비율은 기온 상승에, 하천과 호소 면적을 비롯한 3차원적 특성인 건물 높이와 SVF는 기온 저감에 영향을 미치는 것으로 나타났지만, 각각의 변수가 기온에 미치는 영향이 시간대에 따라 상이하거나 유효 영향 범위가 제한적인 것으로 나타났다.

종합하면, 이러한 관계는 비교적 저층 건물의 특성을 가진 단독주거시설이 밀집된 지역을 저밀도의 고층 건물 지역으로 개발하는 방식이 여름철 열 환경을 개선할 수 있는 것을 시사한다. 높은 SVF 즉, 공간 개방성을 유지하면서 도시 내 녹지의 양과 질을 높이는 것이 중요할 것이다. 또는 단독주거지역에 양질의 녹지를 확충하여 기후 조절 기능을 기대할 수 있다. 다만, 초지가 기온 상승에 기여할 수 있는 것으로 나타나 초지보다는 수목이 있는 녹지의 공급이 바람직할 것이다. 다양한 공간 환경요인과 기온 간 관계를 살펴본 결과, 건물과 그것들의 배치를 통한 그늘 생성이나 환기 효과가 기온 저감에 중요한 역할을 하는 것으로 나타나, 열 환경 개선을 위한 도시계획 시 2차원 및 3차원 환경요인을 함께 고려한 입체적인 공간계획이 필요함을 강조하는 바이다.

본 연구는 도시 공간환경이 여름철 기온에 미치는 영향을 분석하기 위해 다양한 2차원 및 3차원 요인을 고려했으나, 다중공선성 문제로 인해 모든 요인을 모형에 포함하지 못한 한계가 있다. 추후 공간자기상관을 고려할 수 있으면서도 다중공선성 문제에서 자유로울 수 있는 방법론을 활용한다면 공간환경과 기온 간 관계에 대한 더욱 포괄적이고 정밀한 분석이 이루어질 수 있을 것이다. 또한 다양한 공간적 자기상관을 동시에 고려할 수 있는 일반 공간회귀모형 등의 분석기법을 활용한다면, 기온과 도시 공간환경 간의 관계를 좀 더 정교하게 추정할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 2023년 여름철 서울시를 대상으로 수행되었기 때문에 분석 결과의 일반화 가능성에는 한계가 있다. 특히, 특정 도시 공간환경 변수가 기온에 미치는 영향이 다른 도시에서도 동일하게 작용하지 않을 수 있으며, 도시별 지리적·기후적·물리적 특성의 차이에 따라 영향 범위와 강도가 달라질 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 도시를 대상으로 한 비교분석 또는 공간 범위의 확장을 통해 결과의 일반화 및 확장 가능성을 높일 필요가 있다.

아울러 계절적·장기적 변화를 고려하지 못한 점 또한 본 연구의 한계로, 분석의 시간 범위를 확장한다면 도시 공간환경이 기온에 미치는 영향의 계절적 특성 파악과 강건한 관계 규명이 가능할 것이다.

인용문헌
References

1. Li, Yige·이수기·한재원, 2019. "도시의 3차원 물리적 환경변수와 지표온도의 관계 분석", 「국토계획」, 54(2): 93-108.
   Li, Y., Lee, S., and Han, J., 2019. "Analysis of the Relationship Between Urban 3D Physical Environmental Variables and Surface Temperature", *Journal of Korea Planning Association*, 54(2): 93-108.
2. 고동원·박승훈, 2019. "근린환경특성과 도시열섬현상과의 상호 관계에 관한 연구", 「한국도시설계학회지 도시설계」, 20(3): 55-67.
   Ko, D. and Park, S., 2019. "A Study on the Interaction Between Neighborhood Environmental Characteristics and Urban Heat Island Phenomena", *Journal of Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 20(3), 55-67.
3. 기재홍·최연우·윤동근, 2024. "도시공간의 건물 및 토지이용 특성이 지표면 온도에 미치는 영향", 「국토계획」, 59(2: 1-13.
   Ki, J., Choi, Y., and Yoon, D., 2024. "Effects of Building and Land Use Characteristics on Surface Temperature in Urban Areas", *Journal of Korea Planning Association*, 59(2): 1-13.
4. 김감영, 2011. "공간 상호작용 모델에 대한 공간단위 수정가능성 문제 (MAUP) 의 영향", 「대한지리학회지」, 46(2): 197-211.
   Kim, G., 2011. "Effects of Modifiable Areal Unit Problem (MAUP) on Spatial Interaction Models", *Journal of the Korean Geographical Society*, 46(2): 197-211.
5. 김준식·이동근·성선용·정승규·박종훈, 2015. "정규화 지수를 이용한 토지이용에 따른 도시열섬 취약지 특성분석 - 대구시 주거지역을 대상으로 -", 「국토계획」, 50(5): 59-72.
   Kim, J., Lee, D., Sung, S., Jung, S., and Park, J., 2015. "Analysis of Urban Heat Island Vulnerable Areas Using Normalized Indices", *Journal of Korea Planning Association*, 50(5): 59-72.
6. 김지수·강민규, 2022. "스마트서울 도시데이터 센서 (S-DoT) 를 활용한 미시적 폭염 취약성 평가에 관한 연구", 「국토계획」, 57(5): 215-234.
   Kim, J. and Kang, M., 2022. "A Study on Micro Heatwave Vulnerability Assessment Using Smart Seoul Urban Data Sensors (S-DoT)", *Journal of Korea Planning Association*, 57(5): 215-234.
7. 박채연·이동근·성선용·박종훈·정승규, 2016. "지표면 도시열섬 강도의 시공간적 분포와 영향을 주는 변수 분석: 국내 30개 도시를 대상으로", 「국토계획」, 51(1): 125-136.
   Park, C., Lee, D., Sung, S., Park, J., and Jung, S., 2016. "Spatiotemporal Distribution and Variables Influencing Surface Urban Heat Island Intensity: A Study of 30 Cities in Korea", *Journal of Korea Planning Association*, 51(1): 125-136.
8. 서수정·임강륜, 2010. 「단독주택지 재생을 위한 주택 관리 및 정비 지원방안」, 건축도시공간연구소.
   Seo, S.J. and Lim, K.R., 2010. *Support Policy of Housing Management and Renewal for Neighbourhood Regeneration*, Architectural and Urban Research Institute.
9. 윤희천·김민규·정갑용, 2013. "도시열섬 완화를 위한 녹지증가에 따른 온도변화 분석", 「한국측량학회지」, 31(2): 143-150.
   Yoon, H., Kim, M., and Jeong, G., 2013. "Analysis of Temperature Changes Due to Green Space Increase for Urban Heat Island Mitigation", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 31(2): 143-150.
10. 이건학·김감영, 2013. "개별공시지가와 주택실거래가의 공간적 불일치에 관한 연구: 공간 단위 임의성 문제 (MAUP) 의 스케일 효과 탐색", 「대한지리학회지」, 48(6): 879-896.
    Lee, G. and Kim, G., 2013. "A Study on the Spatial Mismatch between the Assessed Land Value and Housing Market Price: Exploring the Scale Effect of the MAUP", *Journal of the Korean Geographical Society*, 48(6): 879-896.
11. 이연수·이시우·임정호·유철희, 2021. "딥러닝 기반 Local Climate Zone 분류체계를 이용한 지표면온도와 도시열섬 분석: 수원시와 대구광역시를 대상으로", 「대한원격탐사학회지」, 37(5): 1447-1460.
    Lee, Y., Lee, S., Lim, J., and Yoo, C., 2021. "Urban Heat Island Analysis Using a Deep Learning-Based Local Climate Zone Classification System: Case Studies of Suwon and Daegu", *Korean Journal of Remote Sensing*, 37(5): 1447-1460.
12. 이우섭·김형규, 2021. "LSTM과 GRU를 활용한 도시공간 특성 기반의 평균기온 예측 모델: 강원도 원주시를 대상으로", 「국토연구」, 109: 89-104.
    Lee, W. and Kim, H., 2021. "Urban Space Characteristics-Based Average Temperature Prediction Models Using LSTM and GRU: A Case Study of Wonju, Gangwon Province", *The Korea Spatial Planning Review*, 109: 89-104.
13. 이호진·조성식·강민석·김준·이훈택·이민수·전지현·이채연·Britta J Nicke·조창범·김규랑·김백조·김현석, 2018. "여름철 도시 인근 산림에 의한 냉각효과의 정량화에 대한 연구", 「한국농림기상학회지」, 20(1): 73-87.
    Lee, H., Cho, S., Kang, M., Kim, J., Lee, H., Lee, M., Jeon, J., Yi, C., Britta, J., Cho, C., Kim, K., Kim, B., and Kim, H., 2018. "The Quantitative Analysis of Cooling Effect by Urban Forests in Summer", *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 20(1): 73-87.
14. 정지우·남진, 2022. "S-DoT 빅데이터와 머신러닝 알고리즘을 활용한 서울시 열섬 관리 시뮬레이션 연구", 「사단법인 스마트도시건축학회 논문집」, 3(1): 20-29.
    Chung, J. and Nam, J., 2022. "A Study on Heat Island Management in Seoul Using S-DoT Big Data and Machine Learning Algorithms", *Journal of Smart City*, 3(1): 20-29.
15. 조혜민·하재현·이수기, 2019. "서울시 도시열섬현상 지역의 물리적 환경과 인구 및 사회경제적 특성 탐색", 「지역연구」, 35(4): 61-73.
    Cho, H., Ha, J., and Lee, S., 2019. "Exploring Physical Environments, Demographic and Socioeconomic Characteristics of Urban Heat Island Effect Areas in Seoul, Korea", *Journal of the Korean Regional Science Association*, 35(4): 61-73.

16. 조희선·정유진·최막중, 2014. "도시공간특성이 열섬현상에 미치는 영향", 「환경정책」, 22(2): 27-43.
Jo, H., Jung, Y., and Choi, M, 2014. "Effects of the Urban Spatial Characteristics on Urban Heat Island", *Journal of Environmental Policy and Administration*, 22(2): 27-43.

17. Alavipanah, S., Schreyer, J., Haase, D., Lakes, T., and Qureshi, S., 2018. "The Effect of Multi-dimensional Indicators on Urban Thermal Conditions", *Journal of Cleaner Production*, 177: 115-123.

18. Anselin, L. and Bera, A.K., 1998. "Spatial Dependence in Linear Regression Models with an Introduction to Spatial Econometrics", In *Handbook of Applied Economic Statistics,* edited by A. Ullah, 237-290, CRC Press.

19. Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., and Pullin, A.S., 2010. "Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence", *Landscape and Urban Planning*, 97(3): 147-155.

20. Cao, J., Zhou, W., Zheng, Z., Ren, T., and Wang, W., 2021. "Within-city Spatial and Temporal Heterogeneity of Air Temperature and Its Relationship with Land Surface Temperature", *Landscape and Urban Planning*, 206: 103979.

21. Chapman, S., Watson, J.E., Salazar, A., Thatcher, M., and McAlpine, C.A., 2017. "The Impact of Urbanization and Climate Change on Urban Temperatures: A Systematic Review", *Landscape Ecology*, 32: 1921-1935.

22. Grilo, F., Pinho, P., Aleixo, C., Catita, C., Silva, P., Lopes, N., Freitas, C., Santos-Reis, M., McPhearson, T., and Branquinho, C., 2020. "Using Green to Cool the Grey: Modelling the Cooling Effect of Green Spaces with a High Spatial Resolution", *Science of the Total Environment,* 724: 138182.

23. Grimmond, C.S.B. and Oke, T. R., 1999. "Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form", *Journal of Applied Meteorology and Climatology,* 38(9): 1262-1292.

24. Johnson, S., Ross, Z., Kheirbek, I., and Ito, K., 2020. "Characterization of Intra-urban Spatial Variation in Observed Summer Ambient Temperature from the New York City Community Air Survey", *Urban Climate*, 31: 100583.

25. Lan, Y. and Zhan, Q., 2017. "How Do Urban Buildings Impact Summer Air Temperature? The Effects of Building Configurations in Space and Time", *Building and Environment*, 125: 88-98.

26. Lee, D., Oh, K., and Jung, S., 2019. "Classifying Urban Climate Zones (UCZs) Based on Spatial Statistical Analyses", *Sustainability*, 11(7): 1915.

27. Lee, S., Ha, J., and Cho, H., 2017. "Spatial and Temporal Effects of Built Environment on Urban Air Temperature in Seoul City, Korea: An Application of Spatial Regression Models", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 16(1): 123-130.

28. Lindberg, F. and Grimmond, C.S.B., 2010. "Continuous Sky View Factor Maps from High-resolution Urban Digital Elevation Models", *Climate Research*, 42: 177-183.

29. Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C.W., Sun, T., Theeuwes, N.E., Järvi, L., Ward, H.C., Capel-Timms, I., Chang, Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, K.FG., Tan, J., Wästberg, D., Xue, L., and Zhang, Z., 2018. "Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An Integrated Tool for City-based Climate Services", *Environmental Modelling and Software*, 99: 70-87.

30. Liu, Y., Xu, Y., Weng, F., Zhang, F., and Shu, W., 2021. "Impacts of Urban Spatial Layout and Scale on Local Climate: A Case Study in Beijing", *Sustainable Cities and Society*, 68: 102767.

31. Ma, X., Miao, S., Masson, V., Wurtz, J., Zhang, Y., Wang, J., Huang, X., and Yan, C., 2024. "The Synergistic Effects of Urbanization and an Extreme Heatwave Event on Urban Thermal Environment in Paris", *Urban Climate*, 53: 101785.

32. Martinelli, L. and Matzarakis, A., 2017. "Influence of Height/Width Proportions on the Thermal Comfort of Courtyard Typology for Italian Climate Zones", *Sustainable Cities and Society*, 29: 97-106.

33. Nonomura, A., Uehara, Y., Masuda, T., and Tadono, T., 2014. "Impact of Mid-high Rise Buildings on Summer Air Temperatures in the Coastal City of Takamatsu in Southwestern Japan", *Urban Climate*, 9: 75-88.

34. Oke, T.R., 1982. "The Energetic Basis of the Urban Heat Island", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455): 1-24.

35. Openshaw, S. and Taylor, P.J., 1981. "The Modifiable Areal Unit Problem", In *Quantitative Geography: A British View*, edited by Wrigley, N. and Bennett, R.J., 60–69, London: Routledge.

36. Pan, H., Luo, Y., Zeng, L., Shi, Y., Hang, J., Zhang, X., Hua, J., Zhao, B., Gu, Z., and Buccolieri, R., 2023. "Outdoor Thermal Environment Regulation of Urban Green and Blue Infrastructure on Various Types of Pedestrian Walkways", *Atmosphere*, 14(6): 1037.

37. Park, C., Ha, J., and Lee, S., 2017. "Association between Three-dimensional Built Environment and Urban Air Temperature: Seasonal and Temporal Differences", *Sustainability,* 9(8): 1338.

38. Patel, S., Indraganti, M., and Jawarneh, R.N., 2023. "A Comprehensive Systematic Review: Impact of Land Use/Land Cover (LULC) on Land Surface Temperatures (LST) and Outdoor Thermal Comfort", *Building and Environment*, 249: 111130.

39. Song, B. and Park, K., 2019. "Analysis of Spatiotemporal Urban Temperature Characteristics by Urban Spatial Patterns in Changwon City, South Korea", *Sustainability*, 11(14): 3777.

40. Su, J.G., Jerrett, M., and Beckerman, B., 2009. "A Distance-decay Variable Selection Strategy for Land Use Regression Modeling of Ambient Air Pollution Exposures", *Science of the Total Environment,* 407(12): 3890-3898.

41. Suen, I.S., 2022. "Assessment of Urban Heat Islands and Land Cover Types in Relation to Vulnerable Populations", *Earth*, 3(2): 733-747.

42. Tian, Y., Zhou, W., Qian, Y., Zheng, Z., and Yan, J., 2019. "The Effect of Urban 2D and 3D Morphology on Air Temperature in Residential Neighborhoods", *Landscape Ecology*, 34: 1161-1178.

43. Völker, S., Baumeister, H., Claßen, T., Hornberg, C., and Kistemann, T., 2013. "Evidence for the Temperature-mitigating Capacity of Urban Blue Space—A Health Geographic Perspective", *Erdkunde*, 67(4): 355-371.

44. Ward, H.C. and Grimmond, C.S.B., 2017. "Assessing the Impact of Changes in Surface Cover, Human Behaviour and Climate on Energy Partitioning across Greater London", *Landscape and Urban Planning*, 165: 142-161.

45. Xu, H., Chen, H., Zhou, X., Wu, Y., and Liu, Y., 2020. "Research on the Relationship between Urban Morphology and Air Temperature Based on Mobile Measurement: A Case Study in Wuhan, China", *Urban Climate*, 34: 100671.

46. Yan, H., Fan, S., Guo, C., Hu, J., and Dong, L., 2014. "Quantifying the Impact of Land Cover Composition on Intra-urban Air Temperature Variations at a Mid-latitude City", *PLOS ONE*, 9(7): e102124.

47. Yang, C., Kui, T., Zhou, W., Fan, J., Pan, L., Wu, W., and Liu, M., 2023. "Impact of Refined 2D/3D Urban Morphology on Hourly Air Temperature across Different Spatial Scales in a Snow Climate City", *Urban Climate*, 47: 101404.

48. Yao, L., Li, T., Xu, M., and Xu, Y., 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.

49. Yao, L., Xu, Y., and Zhang, B., 2019. "Effect of Urban Function and Landscape Structure on the Urban Heat Island Phenomenon in Beijing, China", *Landscape and Ecological Engineering*, 15: 379-390.

50. Yin, C., Yuan, M., Lu, Y., Huang, Y., and Liu, Y., 2018. "Effects of Urban Form on the uRban Heat Island Effect Based on Spatial Regression Model", *Science of the Total Environment*, 634: 696-704.

51. Zhang, J., Cui, P., and Song, H., 2020. "Impact of Urban Morphology on Outdoor Air Temperature and Microclimate Optimization Strategy Based on Pareto Optimality in Northeast China", *Building and Environment*, 180: 107035.

52. Zhou, L., Hu, F., Wang, B., Wei, C., Sun, D., and Wang, S., 2022. "Relationship between Urban Landscape Structure and Land Surface Temperature: Spatial Hierarchy and Interaction Effects", *Sustainable Cities and Society*, 80: 103795.

53. Zhou, W., Huang, G., and Cadenasso, M.L., 2011. "Does Spatial Configuration Matter? Understanding the Effects of Land Cover Pattern on Land Surface Temperature in Urban Landscapes", *Landscape and Urban Planning*, 102(1): 54-63.

Date Received	2024-12-31
Reviewed(1st)	2025-05-24
Date Revised	2025-06-08
Reviewed(2nd)	2025-07-01
Date Accepted	2025-07-01
Final Received	2025-08-11