



도시 지표면 기온의 주간 변동성과 건조환경 요인과의 비선형적 관계 분석

: ECOSTRESS 위성영상과 일반화가법모델의 적용****

Exploring the Diurnal Land Surface Temperature Variability and its Nonlinear Relationship with Urban Built Environmental Characteristics

: An Approach with ECOSTRESS and Generalized Additive Model

윤미영*** · 박유진****

Yun, Miyoung · Park, Yujin

Abstract

Effective management of the Urban Heat Island (UHI) effect and heatwaves is essential for urban sustainability and quality of life. However, prior studies on summer land surface temperature (LST) have primarily focused on specific times, such as noon. Climate change and UHI affect noontime as well as maximum and minimum LSTs, influencing the diurnal temperature range (DTR). This study aims to deepen our understanding of DTR's spatial distribution and key drivers for a heat-resilient urban design. High-resolution LST imagery from NASA's ECOSTRESS mission (2019–2021) over Seoul, South Korea, was used to construct a diurnal time-series dataset and quantify DTR. Unlike atmospheric temperatures, LST is highly sensitive to the urban environment and may exhibit nonlinear relationships with environmental factors. Thus, the study employs nonlinear modeling to examine DTR's complex associations with urban factors, exploring threshold and saturation effects. Seoul was first divided into Local Climate Zones, followed by an analysis of DTR within each type. A Generalized Additive Model was then applied to explore nonlinear relationships between LST variability and explanatory variables. Results show that increased building coverage exacerbates temperature variability, while higher floor area ratios and building heights reduce it until thresholds reverse the trend. Normalized Difference Vegetation Index exhibited a threshold effect, reducing temperature variability only when it exceeded 0.1, while water bodies had an exponential cooling effect. These findings underscore the complex interactions between urban forms and LST, highlighting the need to integrate natural elements into urban planning for climate resilience.

주제어 ECOSTRESS, 도시 지표면 기온, 주간기온변동폭, 국지기후대, 일반화가법모델

Keywords ECOSTRESS, Urban Land Surface Temperature, Diurnal Temperature Range, Local Climate Zone, Generalized Additive Model

1. 서론

2020년 여름, 무려 54일 동안 비가 쏟아지는 대한민국에 전례

없는 최장기간의 장마가 기록되었다. 이처럼 폭염, 폭우, 홍수, 가뭄, 산불과 같은 기존의 예측을 뛰어넘는 기상이변 현상이 전 세계적으로 발생하고 있다. 이러한 기후 위기가 불러온 기후 재

* 이 논문은 2022년도 중앙대학교 CAU GRS 지원에 의하여 작성되었음.

** 이 논문은 대한민국 과학기술정보통신부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-RS-2023-00213472).

*** Ph.D. Candidate, Department of Urban Planning and Real Estate, Chung-ang University (First Author: mmloveu@cau.ac.kr)

**** Assistant Professor, Department of Urban Planning and Real Estate, Chung-ang University (Corresponding Author: yujinp@cau.ac.kr)

난은 인명 피해와 경제적 손실을 초래할 뿐만 아니라 생태계 변화와 생물 다양성 손실, 식량난으로 인한 식량 안보 문제, 극단적 기후 현상으로 인한 인간의 건강 및 안전 문제, 주거 안정성 등에 부정적인 영향을 미친다. 빈번해지고 있는 극단적 기후 현상은 이미 도시 환경에 부정적인 영향을 미치고 있으며, 이에 더해 도시 열섬효과는 도시의 기온을 더욱 상승시켜 도시 환경과 도시민의 삶에 심각한 문제를 야기하고 있다. 도시열섬효과(Urban Heat Island, UHI)란 도시 온도가 그 주변 비도시지역보다 높은 현상이다(Balchin and Pye, 1947), 도시화로 인한 다양한 요인들에 의해 발생되며, 도시열섬효과와 극단적인 기후 현상은 상호작용을 통해 도시 환경에 영향을 미친다. 따라서 도시열섬효과와 폭염의 효과적인 조절은 도시민의 삶의 질과 환경적 지속가능성에 영향을 주는 중요한 과제이다.

도시열섬효과에 관한 국내의 연구는 도시의 물리적 구조(Ng et al., 2011; Li and Quan, 2020), 식생 환경(Dai et al., 2018; Deng et al., 2018; Cureau et al., 2023; Firozjaei et al., 2023), 건물 형태(Li et al., 2019; Han et al., 2023), 인간 활동으로 인한 인공 열 방출(Yuan et al., 2020) 등과 같은 요인이 열섬효과에 미친 영향을 파악한 연구가 주를 이룬다. 도시의 건물이나 도로와 같은 구조물은 태양 복사열을 흡수하여 주변 기온을 상승시키는 역할을 하며, 도시 내 에너지 사용으로 인한 인공 열 방출 또한 기온을 상승시킨다. 반면, 식생은 태양 복사열을 흡수하는 동시에 증발산을 통해 냉각 효과를 일으켜 기온을 낮추는 역할을 한다. 이처럼, 도시 내 구조물과 자연 요소들이 각기 다른 방식으로 열 환경에 영향을 미치며, 도시 공간을 구성하는 다양한 물리적 특성은 도시 내 열 환경 변화에 중대한 영향을 미친다.

이러한 기후 작용은 오전부터 저녁에 이르는 주간(diurnal) 동안 꾸준히 진행되는데 불구하고 열섬 관련 기존 연구들은 주로 시점 기온을 분석하는 데에 초점을 맞고 있었다. 이로 인해 주간 기온변동과 환경설계 요소의 관련성에 관한 연구는 현재까지 제한적이었다. 도시 환경 요소와 기온 변동성 간의 관계를 살펴보는 것은 도시열섬과 같은 고온 현상뿐만 아니라 급격한 기온 상승 및 하강으로 인한 문제를 완화하고 장기적으로는 기후변화에 적응하는 데 기여할 수 있다. 특히 기온 변동성, 즉 일교차가 큰 지역은 급변하는 기후 현상에 더욱 취약할 가능성이 크며 한낮의 지나친 기온 상승은 불쾌감과 온열 질환의 위험을 증가시키는 동시에 실외 여가활동에 제약을 초래한다. 또한 냉난방 에너지 수요를 급증시켜 에너지 효율성을 저해할 수 있다(Zanobetti et al., 2012; Zhang et al., 2018; Zhao et al., 2019). 따라서 주간 기온 변동성의 패턴과 건조환경과의 관계를 분석하는 것은 인공적, 자연적 도시계획 요소를 효과적으로 배치하여 효과적인 주간 기온 조절에 도움을 주고, 장기적으로 도시의 열 쾌적성 및 환경적 지속가능성을 증대하는 데 공헌할 수 있다.

국지기후대(Local Climate Zone, LCZ)는 도시 건축물 특성과 토지 피복 특성을 종합해 도시개발 형태를 유형화한 분류체계로, 도시의 물리적 건조환경과 열 환경 간의 관계를 탐색하는 공통된 분석틀을 제공한다. LCZ는 Stewart and Oke(2012)에 의해 제안되었고, 10가지의 건축 유형(built types)과 7가지의 토지 피복 유형(land cover types), 총 17개의 유형으로 나뉜다. 여러 국제 연구에서 LCZ 분류를 도입하여 LCZ 유형별로 유의미한 지표면 기온(Land Surface Temperature, LST) 차이를 확인하였고, LCZ 분류가 다양한 도시 환경에서도 열 패턴을 분석하는 데 효과적임을 검증하였다(Chang et al., 2021; Liu et al., 2022; Dong et al., 2022; Shi et al., 2022; Bechtel et al., 2019; Yuan et al., 2022; 이연수 외, 2021). 그러나 LCZ 유형별로 지표면 기온의 주간 변동성을 분석한 연구는 미진할 뿐만 아니라, 국내 도시를 대상으로 LCZ 분류를 활용한 기온 변동성 연구는 거의 이루어지지 않았다. LCZ에 따른 기온 변동성 분석은 단순히 열 패턴 분석을 넘어서, 특정 유형이 급격한 기온 변동에 더 취약할 수 있는지 식별할 수 있고, 이를 기반으로 일교차 완화를 위한 맞춤형 전략을 수립할 수 있어 연구 필요성이 높다고 할 수 있다.

본 연구는 도시지역의 여름철 주간기온변동폭(Diurnal Temperature Range, DTR)에 초점을 맞추어 DTR의 공간적 분포와 변이에 영향을 미치는 건조환경 유형 및 요인이 무엇인지 이해하고자 한다. 이를 위해 다양한 시점의 지표면 기온 자료를 구득해 최고·최저기온을 바탕으로 DTR을 계산하고, 다양한 LCZ 유형 간에 DTR에 유의미한 차이가 나타나는지 그리고 어떠한 건조환경 요인들이 DTR의 증가 혹은 감소를 초래하는지를 실증적으로 파악하고자 한다. 더 나아가 본 연구는 건조환경 요인과 DTR 간에 비선형적 관계가 성립하는지를 탐색한다. 이는 잠재적으로 복잡한 상호작용을 보다 현실적으로 이해함으로써 도시 계획적 개입을 정교하게 설계하는 데 도움을 줄 수 있다.

실증분석을 위해 본 연구는 서울시를 대상으로 NASA의 ECOSTRESS(Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station) 위성영상을 토대로 지표면 기온의 일주기 시계열 자료를 구축하였다. 서울시는 높은 인구밀도와 고층·고밀 개발 형태를 지닌 도시화 지역에 하천 네트워크와 산악지형이 결합된 독특한 지리적 조건을 가지고 있어, 인위적·자연적 요소에 의한 DTR의 공간적 변이를 파악하기에 적합한 지역이다. 먼저, 2019년 부터 2021년까지 여름철 오전 7시 30분 부터 오후 5시 30분 사이 지표면 기온을 70m의 공간해상도로 관측한 시계열 자료를 구축하였다. 건조환경 요인으로는 건축물의 물리적 형태, 식생 밀도, 자연지역과의 중력지수, 관심 지점 개수 등을 고려하였다. 구축된 변수를 토대로 DTR의 탐색적 분석 및 LCZ 유형별 차별성을 파악하고, 통계적 분석으로는 비선형적 관계를 추정할 수 있는 일반화가법모델(Generalized Additive Model, GAM)을 활용한다.

본 연구는 제2장에서 지표면 기온과 그 영향요인에 관련된 국내외 연구 동향을 종합적으로 살펴본 후, 본 연구의 차별성을 제시한다. 제3장에서 분석자료 및 연구 방법에 대해 설명한 후 제4장에서는 탐색적 및 통계적 분석 결과를 설명한다. 제5장 논의에서 시사점을 제안한 뒤 제6장 결론에서 연구의 결론을 제시한다.

II. 선행연구 검토 및 차별성

1. 기온 변동성이 도시와 인간에 미치는 영향

기온의 도시 지표면 기온에 관한 연구는 주로 단일 시점 혹은 평균 지표 기온의 공간 분포에 초점을 맞춰왔으며, 주간기온변동폭(Diurnal Temperature Range, DTR)에 대한 연구는 상대적으로 간과되어 왔다. 그러나 주간 기온의 변동성 및 변화는 인간과 생태계 적응시스템에 있어 중요한 영향을 미칠 수 있으며, 특히 극단기후가 빈번해질 것으로 예상되는 미래 세대에 다양한 영향을 끼칠 수 있기에 도시 기온 변동성의 현황과 영향요인을 이해하는 것은 필수적이다(Guo et al., 2021; Shi et al., 2015; Wolf et al., 2009).

기온변동폭과 도시 보건의 상관관계에 관한 연구들은 장단기 기온변화폭의 상승이 취약계층의 사망률과 심혈계 질환에 부정적 영향을 미친다는 것을 발견했다(Laaidi et al., 2012; Zanobetti et al., 2012; Zhang et al., 2018; Zhao et al., 2019). Zanobetti et al.(2012)는 135개 미국 도시를 대상으로 만 65세 이상 기저질환자의 사망률과 여름철 기온 표준편차 간의 연관성을 분석한 결과, 높은 표준편차를 보인 지역에서 고령층과 사망 위험과의 연관성이 더 높게 나타났다. Zhang et al.(2018)은 일 최고기온과 일 최저기온의 차이인 DTR이 사망률에 미치는 영향을 국가적 차원에서 분석하였다. 1993년부터 2006년까지 영국 잉글랜드와 웨일스에서 수집된 14년간의 DTR 및 사망률 시계열 데이터를 바탕으로 분석한 결과, 높은 DTR이 단기적으로 사망률을 증가시킨다는 점을 확인하였다. Zhao et al.(2019)는 높은 기온 변동성(Temperature Variability, TV)에 대한 노출이 허혈성 심장질환(Ischemic Heart Disease, IHD) 입원 위험을 증가시키며, 특히 남성과 고령층에서 두드러지게 나타났다는 연구 결과를 제시하였다.

도시 보전에 대한 영향에 추가로 기온 변동성은 도시 시스템의 지속가능성에도 영향을 미칠 수 있다. Ravestein et al.(2018)은 기후변동성이 간헐적 재생에너지원(Intermittent Renewable Energy Sources, IRES)의 생산성에 미치는 영향을 분석한 결과, 기후변동성이 높은 일부 지역에서는 풍력 발전량이 최대 75% 감소하고 난방도일(Heating Degree Days, HDD)이 최대 30% 증가하는 결과를 확인하였다. Santamouris et al.(2001)은 아테네를 대상으로 도시 기후가 건물 에너지 소비에 미치는 영향을 평

가하였다. 그 결과, 도심의 평균 열섬 강도가 도심 건물의 냉방 부하를 두 배로 증가시키고, 냉방을 위한 피크 전력 수요를 최대 3배까지 증가시킬 수 있음을 밝혔다.

기온 변동성의 변화는 도시화와 밀접한 관련이 있다(Li et al., 2010; Wang et al., 2023b). Li et al.(2010)은 중국 시안을 대상으로 1981년~2008년 도시화와 최저기온, 최고기온, 그리고 DTR의 관계를 분석한 결과, 도시화로 인한 최고기온이 상승폭이 최저기온의 상승보다 높아 DTR이 전반적으로 상승해왔다는 것을 발견하였다. Wang et al.(2023b)은 지난 20년 동안 세계 여러 지역의 DTR을 분석한 결과, 정규식생지수(NDVI)와 DTR 간에 유의미한 부적 관계를 통해 식생 풍부도가 최고기온의 억제를 통해 기온변동폭의 감소에 기여한다는 점을 입증하였다. 반대로 Stjern et al.(2020)에 따르면 도시화와 DTR의 관계는 세계 여러 지역에 따라 다른 양상을 나타냈는데, 중국과 인도에서는 에어로졸과 대기오염물질의 누적이 야간기온 상승을 야기하여 최저기온의 상승으로 인해 단기적으로 DTR이 감소하는 결과가 나타났다. 이러한 상반된 결과는 도시 건조환경 특성과 주간기온 변동폭의 관계를 보다 면밀히 살펴볼 필요가 있음을 시사한다.

2. 지표면 기온의 영향요인

도시지역의 기온에 관한 연구는 대기 기온(Air Temperature, AT)과 지표면 기온(Land Surface Temperature, LST)을 활용한 연구로 나눌 수 있다. 서울시를 대상으로, 이 지역의 대기 기온과 지표면 기온에 영향을 미치는 물리적 환경 및 인구·사회학적 환경을 분석한 연구들이 진행되었다(하재현 외, 2015; 박재민 외, 2017; 권유진 외, 2018; 문현빈·이수기, 2018; 조혜민 외, 2019; 안새결 외, 2017). 대기 기온은 자동기상관측소(Automatic Weather Station, AWS)에서 관측한 기온을 의미한다. 하지만 AWS 센서의 분포가 충분하지 않아 대기 기온을 공간적으로 대표하는 데 한계가 있을 수 있다. 반면, 지표면 기온은 지표면 자체의 열적 상태인 물리적 온도를 나타내는 것으로, 도시의 지표면이 뜨겁거나 차갑게 느껴지는 정도로 인공위성 관측 자료로 도시지역 전체의 기온을 파악할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지표면 기온을 활용하여 서울시의 주간 주기 기온 변동성을 탐색하고자 한다.

일반적으로 도시 지표면 기온에 영향을 미치는 요소로 건물 건조환경, 건물 높이와 용적률과 같은 건물 밀도, 식생 환경 및 수역, 토지피복 종류, 지형, 인간활동에서 수반되는 에너지 소비 및 열 배출 등 다양한 요인이 있으며 이들 요소가 지표면 기온에 영향을 미치는 정도는 지역적, 도시적 특성에 따라 다르게 나타난다.

식생과 수역은 지표면 기온을 조절하고 열 환경을 개선하는 데 중요한 역할을 한다(Liu et al., 2022; Shi et al., 2022; Fiorillo et al., 2023). 식생의 밀도와 상태를 나타내는 정규식생지수

(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)가 증가하면 지표면 기온을 감소시키는 경향이 있는데(Dai et al., 2018; Deng et al., 2018), 이는 식생이 그늘을 제공해 지표면 기온을 낮추고, 식물을 통한 증발산 효과 또한 온도를 낮추는 데 도움이 되기 때문에 도시의 열 부담을 완화시키는 역할을 한다. 또한 수역이 존재하면 물의 높은 열용량과 증발효과에 기인해 주변 도시 지역보다 기온이 낮아져 열섬효과를 줄일 수 있다(Cureau et al., 2023; Firozjaei et al., 2023). Liu et al.(2022)은 도시공원의 냉각 효과를 연구하였는데 소규모 공원이 주변 지역과 온도에서 큰 차이가 없었던 반면, 대규모 공원의 LST가 주간에 상대적으로 낮은 온도를 보였으며 물이 많은 공원이 밤에 열에너지를 방출했다. 따라서 식생 피복이 높은 대규모 공원과 혹은 식생 피복이 낮은 경우 일정량의 물을 확보하면 공원의 냉각 효과가 올라가기 때문에 물을 포함하는 공원을 확보하는 것이 중요하다고 강조했다.

도시화의 진행으로 인구가 도심으로 집중되면서, 도시 내 인구 밀도의 증가는 인간활동으로 인한 열 배출을 촉진하여 지표면 기온 상승을 초래한다(Yuan et al., 2020). 구체적으로 더운 여름철에는 에어컨 사용 증가하면서 인공 열에너지가 방출되고(Li et al., 2011), 차량과 같은 통행 수단이 내뿜는 열에너지도 지표면 기온에 부정적인 영향을 미친다(Louiza et al., 2015). 또한, 도시의 건물 건조환경도 도시 지표면 기온에 유의미한 영향을 주는 주요한 요인이다. 건물이 밀집한 지역은 불투수 면적이 비교적 넓으며 환기가 어려워 대류나 이류에 의한 냉각 효과가 감소한다(Ng et al., 2011; Han et al., 2023; Li and Quan, 2020). 더불어, 도시의 2차원적 요소뿐만 아니라 건축물의 3차원적 특성도 영향을 미치며, 이를 분석한 연구들도 다수 진행되어 왔다. Li et al.(2019)는 3차원 물리적 환경변수와 용적률, 천공개폐율(sky view factor), 표면 거칠기(roughness)와 지표면 기온의 관계를 분석하였다. 분석 결과, 용적률이 높아질수록 태양 일사량이 건물 그림자에 의해 감소하기 때문에, 천공개폐율을 낮추고 건물의 층수를 다양하게 하여 표면 거칠기를 높이는 개발방식이 필요하다고 제안한다.

3. LCZ분류를 사용한 지표 기온 연구

국지기후대(Local Climate Zone, LCZ)는 도시개발 형태를 분류하는 체계로 건물의 유형과 토지 피복 특성을 고려해 분류되며 UHI분석을 위해 Stewart and Oke(2012)에 의해 제안된 이후 도시 형태가 지표 기온에 미치는 영향을 조사하는데 널리 활용되어 왔다(Chang et al., 2021; Liu et al., 2022; Dong et al., 2022; Shi et al., 2022; Bechtel et al., 2019; Yuan et al., 2022; 이연수 외, 2021).

연구 대상 지역의 특징 및 연구 목적에 따라 각 연구마다 분류

하는 LCZ 유형의 개수는 상이하였는데, Shi et al.(2022)는 중국 베이징을 대상으로 도시 열 환경의 계절적 변화와 일별 변화를 조사하기 위해 LCZ를 13개로 구분하여 LST와 공간적 분포는 낮과 밤에 다르게 나타남을 알아냈다. 건축 자재의 열 흡수율이 높아 표면 온도가 높아지기 때문에 낮 시간대 고온 지역이 주로 건물 지역에 집중되어 있는 것으로 나타났다. 또한 LST와 LCZ의 공간분포는 매우 일관되게 나타났는데 건물형태 분류의 LCZ에 비해 자연형태 분류 LCZ는 지표면 기온이 더 낮았고 낮 동안 더 많은 양의 열에너지를 흡수한 지역은 밤에 열을 방출해 낮보다 밤의 기온이 더 높아졌다.

Dong et al.(2022)는 MODIS LST 자료를 활용해 중국 난징의 LCZ 유형별 일별 지표면 도시열섬현상(Surface Urban Heat Island, SUHI)를 분석하여 중층 건물 형태와 공업단지에서 비교적 높은 SUHI가 나타남을 밝혔다. Yuan et al.(2022)은 중국 시안을 대상으로 LCZ 분류를 하여 도시열섬 강도인 SUHI와의 관계를 분석하였는데 지표면 도시열섬 강도가 정오에 최댓값인 2.3℃에 도달하고 밀집된(dense) 것으로 분류된 LCZ는 하루 중 일 열섬효과를 유지한 반면, 개방된(open) 것으로 분류된 LCZ에선 변동이 나타남을 알아냈다.

Chang et al.(2021)는 낮과 밤을 구분해 LCZ 유형별 열 패턴을 확인한 결과 낮시간에 LCZ 유형별로 더 명확한 열 패턴을 관찰할 수 있음을 밝혔다. 특히 낮시간대에 밀집된 건물 LCZ에서 높은 열 노출이 있었고 그중 고층·중층에 비해 저층 건물 밀집 LCZ에서 유의미한 높은 수치를 보였으나 일몰 후에는 밀집 건물 LCZ의 열 노출이 현저하게 감소함을 확인했다. Liu et al.(2022)는 공원 내부의 냉각 효과를 검토하기 위해 공원을 식별하기 위해 자연분류 유형의 LCZ를 사용하여 공원 유형별 냉각 효과가 다를 수 있음을 살펴보았다.

4. ECOSTRESS를 사용한 지표 기온 연구

지금까지 도시의 지표면에 대한 연구는 주로 MODIS나 Landsat 등의 LST를 사용해 이루어졌다(Park et al., 2021; Li et al., 2019; Lu et al., 2020; Siddiqui et al., 2021). 그러나 MODIS 자료의 경우 도시 지역의 상세한 건축특성을 분석하기에 지나치게 큰 해상도(1km)를 가지고 있고, Landsat의 경우 주로 정오시간(12:00) 전후의 기온만을 제공한다. ECOSTRESS는 NASA의 최신 위성자료로서, 70m 해상도로 다양한 시간대에 지표면 기온을 관측한 자료를 제공하여 도시 지역의 일교차 및 기온 변동성 분석에 매우 적합하다고 할 수 있다. 이와 관련하여 최근 ECOSTRESS를 활용한 기온변화 연구가 활발히 진행되고 있다.

Wang et al.(2023a)은 중국 베이징을 대상으로 8개 시점의 자료를 선별해 일간 주기 내 도시 특성과 ECOSTRESS LST 간의 회귀분석을 수행했다. 분석 결과, 낮 동안 지표면 기온이 가장 높

은 지역은 저층 건물 지역이었으며, 기온이 가장 낮은 지역은 물과 식생이 풍부한 지역으로 나타났다. 또한, 밤 시간대 지표면 기온이 낮은 지역 역시 식생이 많은 곳이었다. 반면, 밤에 지표면 기온이 가장 높은 지역은 낮과는 달리 물이 많은 지역과 고층 건물 지역에서 관측되었다. Chang et al.(2022)은 미국 보스턴을 대상으로 GOES-R과 ECOSTRESS를 결합해 SHUI의 일간변동과 토지피복 간 열 차이를 조사한 결과, 높은 시간해상도를 가진 ECOSTRESS LST는 작은 규모의 도시 열 환경의 일상적 변동을 모니터링하기에 적합하다는 결론을 제시하고 있다. 기존에 주로 한 개의 도시로 LST를 탐구한 연구들과 달리 Chang et al.(2023)은 중국 산시성의 43개의 도시를 대상으로 다양한 도시규모에서 ECOSTRESS LST 데이터를 사용하여 일간 주기에 따른 SHUI의 시공간적 변동 패턴을 연구하였다. 개별 도시마다 일간 주기가 다르게 나타났고 큰 도시뿐만 아니라 작은 도시도 극심한 SHUI에 노출됨을 밝혔다. 서로 다른 도시와 동일한 도시 내에서도 일간 시간에 따라 픽셀별 SHUI의 변동은 모두 다르게 나타나 지역단위의 SHUI 대응이 필요하다고 제안했다. Han et al.(2023)은 도시화 수준이 가장 높은 도시 중 하나인 중국 베이징을 대상으로 4개 시점의 ECOSTRESS LST 이미지를 가지고 2D, 3D 도시 경관이 블록 단위의 일별 LST에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 이들 사이에 비선형 관계가 있으며 관측 시간에 따라 그 영향력이 달라짐을 파악해 일주기 변동에 따른 영향력이 달라지므로 일주기 LST 변동에 관한 연구가 필요함을 입증했다.

ECOSTRESS LST 데이터를 활용해 지표면 기온과 사회경제적 요인 간의 관계를 조사한 연구도 존재한다. Zhu et al.(2022)은 미국 피닉스를 대상으로 녹지 경관 증가에 따른 지표면 기온 변화를 정량화하고, 도시 열 노출의 불균형을 분석했다. 그 결과, 빈곤층 가구 비율이 높은 지역에서 여름철 낮과 밤의 지표면 기온과 양의 상관관계를 확인했다. Yin et al.(2023)은 미국 로스앤젤레스 대도시 지역을 대상으로 가구소득과 지표면 기온의 관계를 분석한 결과, 낮 시간대 지표면 기온과 가구소득 중앙값 간에 지속적인 음의 상관관계를 발견했다. 또한, 식생 피복의 불균등한 분포로 인한 낮은 증발산량이 저소득층 지역의 지표면 기온을 높이는 주요 요인임을 확인했다. 이러한 연구들은 도시 열 노출의 불균형 해소를 위한 완화 조치의 필요성을 시사한다.

5. 본 연구의 차별성

도시의 지표면 기온과 이에 영향을 주는 요인에 관한 연구를 위해 Landsat, ASTER, MODIS와 같은 다양한 인공위성 관측 자료를 활용한 연구들이 진행되었다. Landsat, ASTER, MODIS 모두 광역 지역의 정보를 수집할 수 있지만 각자 다른 장단점을 가진다. Landsat의 경우 30m의 높은 공간해상도를 갖지만, 관측 주기가 16일로 긴 편이며, MODIS는 재방문 주기는

짧지만 1km의 낮은 공간해상도를 가지고 있어 정밀한 분석에 어려움이 있다. 무엇보다 이들 인공위성 관측자료는 주로 정오 시간대의 고정된 시간의 관측치만 수집할 수 있기 때문에 주간(diurnal) 기온변화 패턴과 변동성 파악이 어렵다는 한계를 가진다. 반면 ECOSTRESS는 70m 격자의 비교적 높은 공간해상도를 제공하면서, 불규칙한 궤도를 돌며 관측치를 제공하기 때문에 하루의 다양한 관측 시간대에서 데이터를 수집할 수 있어 기존 지표면 인공위성 자료에서 관측할 수 없었던 주간 변동주기를 파악하고 분석할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 주간 시점 자료를 조합하여 도시 기온을 DTR 측면에서 조망함으로써 기존의 연구에서 다루지 못한 도시 기후 패턴을 보다 심층적으로 이해하고자 한다.

선행연구에 따르면 도시화는 DTR의 최저기온 및 최고기온의 상대적 변화폭에 모두 영향을 미치므로 DTR은 상승할 수도, 감소할 수도 있다. 기후변화 및 인간활동으로 인해 최고기온이 높아질 경우 DTR은 증가하나, 최저기온이 높아질 경우에 DTR은 낮아질 수 있다. 최저기온의 하강으로 인한 DTR 상승과 최고기온의 하강으로 인한 DTR 하강은 장기적인 기후변화 전망을 고려할 때, 특히 도시지역에서는 현실성이 떨어지는 가정이라고 할 수 있다. 앞선 두 가능성(DTR 상승 및 하강) 모두 해로운 결과를 야기할 수 있으나 장기적인 기후상승 추세를 고려할 때 높은 최고기온으로 인한 DTR 증가가 더욱 부정적으로 작용할 것으로 사료된다. 따라서 최근 서울시에서 나타나는 최고기온, 최저기온, 그리고 DTR의 현황과 공간 분포에 대한 분석을 통해 DTR의 추세와 그 배경 요인 및 도시의 물리적 특성과의 관계를 이해하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구는 서울시의 여름철 주간 지표 기온 변동폭의 공간적 분석을 통해 도시 건조환경 요소와 DTR의 관계를 분석하고자 한다.

이러한 기온 변동성을 일반화기법모형(GAM)을 활용해 추정함으로써, DTR이 도시 물리적 환경에 민감하게 반응하는 비선형적 변동 특성을 효과적으로 파악하고자 하였다. 이는 선형 모형으로 분석할 때 포착하기 힘든 미시적 변화를 반영할 수 있다. 예를 들어 녹지와 하천의 기온 냉각 및 안정화 효과는 규모와 밀도의 상승에 따라 훨씬 강화된 편익을 가져다줄 수 있으며, 반면 건축물의 경우 밀도와 높이에 따라 기온의 가열과 냉각에 동시에 영향을 미치므로 어떠한 조건에서 영향력이 강화, 쇠퇴, 혹은 정체하는지를 파악해 정책설계에 참고할 필요가 있다. 이러한 비선형적 분석을 통해 현실 적합성이 향상된 연구 결과를 도출하여 도시 기후환경정책 수립에 다양한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 본 연구의 목적은 도시 지표면 기온의 주간 변동성을 정량적으로 분석하고, 이러한 변동성이 도시 물리적 환경 요소들과 어떤 비선형적 관계를 가지는지 파악하는 것으로, 본 연구의 질문은 다음과 같다. 첫째, 서울시의 LCZ 유형별로 지표면 기온의

일주기 변동성은 어떻게 다른가? 둘째, 이러한 지표면 기온 변동성에 영향을 미치는 도시의 물리적 구조 및 환경적 요인들은 무엇인가? 셋째, 영향요인들과 일반 기온 변동성 간에는 비선형적 관계가 나타나는가? 이러한 질문들에 답하기 위한 연구의 흐름도는 <그림 1>과 같다. ECOSTRESS 데이터를 활용해 기온 변동성을 파악하는 것에 중점을 두고, LCZ 유형별 기온 변동 특성을 파악하고 기온 변동성의 영향요인을 분석하였다. 이를 위해 서울시를 대상으로 10개의 시점의 시계열 자료를 구축하여 LCZ 분류체계를 사용하여 도시개발 형태 유형별 기온 변동성을 살펴보았다. 이후 도시 건축물 형태, 식생밀도, 자연지역 접근성, 관심 지점의 수 등의 설명변수들을 구축해 도시의 물리적 환경의 개별 요소와 유형화를 모두 고려하여 지표면 주간기온변동폭과의 다양한 관계를 분석해 도시 내에서 발생하는 열섬효과의 정도를 파악해 보다 쾌적하고 건강한 도시 환경 계획을 위한 시사점을 도출하고자 한다.

III. 분석자료 및 방법

1. 분석 방법 및 종속변수

본 연구의 분석에 활용된 자료는 NASA의 국제 우주정거장에 탑재된 센서인 ECOSTRESS에서 추출한 지표면 기온 관측 자료를 활용하였다. ECOSTRESS는 2018년 6월 29일에 탑재되어 현재까지 운용되고 있다. 해당 데이터는 70m의 해상도에서 지표면 기온에 대한 대기보정값을 5개의 열적외선밴드로 추출하여 제공한다. 다른 인공위성 자료와 달리 일정하지 않은 궤도를 돌며 관측하기 때문에 다양한 시간대의 데이터를 수집할 수 있어 주간 주기 지표면 기온변화를 파악할 수 있다(Chang et al., 2022;

Chang et al., 2023; Han et al., 2023; Wang et al., 2023a).

본 연구에서 사용된 LST 데이터는 미국 NASA EarthData 플랫폼에서 제공하는 ECOSTRESS Collection-2 Level-2 자료를 기반으로 하였다. ECOSTRESS 데이터는 LST & E(Land Surface Temperature and Emissivity) 알고리즘을 사용하여 지표면 기온과 방사율을 분리하고, RTTOV(Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder) 복사 전송 모델을 통해 대기 보정을 수행하여 LST값을 산출한다. 'ECO2LSTEv001' 이미지에서 지표면 기온값(Kelvin)을 얻고, 'ECO1BGE0v001' 이미지를 통해 각 픽셀의 품질 코드를 구독하여, 서울시 비자연지역 면적의 90% 이상을 관측할 수 있는 고품질(good quality)의 픽셀만을 선별하여 분석에 사용하였다.

ECOSTRESS를 통한 지표 기온 주간 변동성을 파악하기 위해 위성 발사 이후의 주간 시간대의 데이터를 구독하였고, 연구 대상 지역인 서울시의 2019년부터 2021년에 걸쳐 총 10개 시간대의 관측자료를 확보하였다. 폭염과 열섬현상이 집중되는 여름의 기온 변동성을 파악하기 위해 5월 말에서 8월 사이의 자료를 구축하였고, 여름철 구름의 영향이 적은 맑은 날의 이미지를 수집하는데 어려움이 있어 구름 영향 등을 고려하여 자료의 실효성을 최대한으로 할 수 있는 10개의 자료를 선별하였다. 가능하다면 동일한 일자에 모든 자료가 수집될 수 있다면 바람직하겠으나 이는 현실적으로 매우 어렵다. 그 이유는 첫째, 일정 지역의 지표면 기온을 인공위성이 하루 안에 여러 차례 관측하는 것은 아직 기술적으로 어렵고, 둘째, 모든 방문 시간에 대기가 구름 없이 깨끗해야지만 온전한 자료 획득이 가능하기 때문이다. 이런 이유로 기존 연구들 또한 여러 시기에 수집된 자료들을 조합하여 시계열 기온 분석에 사용하고 있다(Shi et al., 2022; Wang et al., 2023a; 전규원·박유진, 2024). 특히 서울시의 경우 여름철 지표 기온 자료 수집에 매우 불리한데, 이는 잦은 강수와 먹구름으로 인해 대기가 맑은 시간이 매우 한정적이기 때문이다. 이러한 이유로 여름철 주간 지표면 기온 변동성 분석을 위해서는 해와 월이 다른 이미지를 혼합하는 것이 불가피하다. 본 연구는 이러한 시점 혼합으로 인한 잠재적 편의(bias)를 최소화하기 위해 조합된 시점 가운데 이례적인 시기(엘니뇨, 라니냐 등)가 있는지, 일반적인 일별 기온 흐름을 벗어나는 시점이 있는지 확인하였다.

이를 위해 ECOSTRESS LST가 관측된 일자 및 해당 시간의 대기 기온을 살펴보았다(표 1). 이는 기상청이 제공하는 종관기상 관측자료로서, 서울시 관측소를 기준으로 각 일자의 최고기온, 최저기온, 평균기온, 그리고 LST 관측 시점의 기온을 포함하고 있다. 조사 결과, 이상치로 보이는 시점은 없었으며, 본 데이터에 거시 기상현상 및 이상기온으로 인한 편의는 크지 않을 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구는 오전 5개(7시 21분, 7시 41분, 8시 9분, 8시 17분, 11시 15분), 오후 5개(12시 4분, 14시 37분, 15시 25분, 16

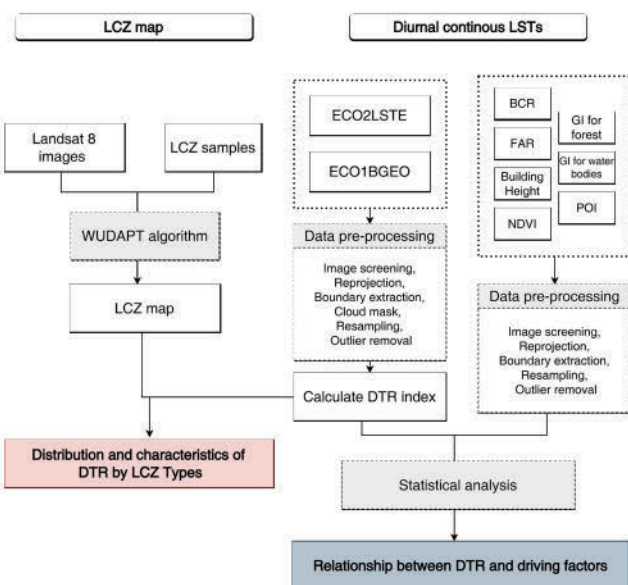


Figure 1. Flowchart of this study

Table 1. Daily air temperature statistics (AT) for ECOSTRESS image collection dates and times

	ECOSTRESS Collection Time	ECOSTRESS Collection Date	Maximum AT (°C)	Minimum AT (°C)	Mean AT(°C)	Point AT (°C)
Before-noon	07:21	2020.06.19	30.0	21.1	24.7	21.1
	07:41	2019.06.21	32.7	19.5	26.1	20.0
	08:09	2019.08.19	31.4	23.6	27.1	23.1
	08:17	2021.08.15	32.4	21.7	26.9	23.8
	11:15	2021.06.09	31.6	19.5	25.8	27.3
After-noon	12:04	2020.06.08	32.0	19.8	25.0	28.9
	14:37	2022.05.31	27.2	14.2	20.7	26.9
	15:25	2020.05.28	29.3	15.0	22.3	28.7
	16:10	2019.05.31	23.3	16.1	19.1	22.9
	17:26	2021.05.24	24.5	16.4	19.4	23.4

Source: Korea Meteorological Administration Weather Past Observation Data (<https://www.weather.go.kr/w/obs-climate/land/past-obs/obs-by-day.do>)

시 10분, 17시 26분)로 총 10개의 지표면 기온을 활용하여 서울시 지표면 기온의 일주기 시계열 자료를 구축하여 분석에 활용하였다. ECOSTRESS는 70m의 공간해상도로 제공되지만, 설명변수들과 동일한 격자로 데이터를 분석하기 위해 100m 격자로 리샘플링하여 데이터를 구축하였으며, 이를 연구의 기본 분석 단위로 사용하였다.

일교차라고도 할 수 있는 기온 변동성은 기온의 변화폭을 나타내는 지표로, 급격한 기온변화는 어린이, 노약자, 기저질환자 등 취약계층에게 온열 질환 위험을 증가시킬 뿐만 아니라 불규칙한 냉난방 에너지 수요로 인한 에너지 공급 시스템의 부담, 생태계 부담 등의 문제를 야기한다. 기후변화는 기온 상승뿐만 아니라 기온 변동 범위(range)의 확대를 동시에 가져온다. 본 연구는 기온 변동성을 분석하기 위해 오전부터 오후까지의 지표면 주간기온변동폭(DTR)을 계산하여 사용하였다. 서울시를 100미터 간격 격자로 나뉘었을 때 각 격자마다 10개 시점의 지표 기온 관측값이 존재하며, 해당 값들 중 최솟값에서 최댓값을 뺀 범위(range)를 계산하였다. 최솟값과 최댓값을 고려하는 이유는 기온 극단값(temperature extremes)으로 인한 영향을 파악하기에 용이하며, 같은 지역 내 다른 장소에 비해 상대적으로 기온이 더 큰 폭으로 상승하는 곳을 식별할 수 있기 때문이다.

2. 설명변수

서울시의 도시 지표면 기온의 주간 변동성에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위해 본 연구는 선행연구를 기반으로 도시 건축물 형태 변수, 식생밀도, 자연지역과의 인접성, 관심지점 밀도 등의 설명변수를 구축하였다(문현빈·이수기, 2018; 박재빈 외, 2017; 안새결 외 2017; 하재현 외 2015; Li et al., 2019; Dai et al., 2018; Huanchun et al., 2020; Wang et al., 2022). 도시 건축

물 형태 변수는 국토지리정보원(NGII)에서 건폐율(Building Coverage Ratio, BCR), 용적률(Floor Area Ratio, FAR), 평균 건물 높이(Building Height) 데이터를 100m 격자 단위로 구축하여 사용하였다. 식생밀도를 나타내는 정규식생지수(NDVI) 값은 USGS의 EarthExplorer에서 Landsat 8 이미지를 수집하였다. Landsat 8 이미지에서 밴드 4(Red)와 밴드 5(NIR)를 추출하여 식 (1)과 같이 계산하여 산출하였다.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

Landsat 8은 30m의 공간해상도를 가지지만 연구의 기본 분석 단위로 통일하기 위해 100m 격자 단위로 리샘플링하였다. 또한 인접한 산림과 수역의 영향력을 분석하기 위해 해당 자연지역까지의 거리와 면적을 함께 고려한 중력지수(Gravity Index)를 산출하여 설명변수로 사용하였다. 거리와 면적이 냉각 효과에 다른 방식으로 영향을 미치므로 거리와 면적을 모두 고려한 중력지수를 활용하면 자연지역에 대한 접근성(accessibility)이 도시의 일교차 저감에 미치는 효과를 보다 정확하게 파악할 수 있다. 관심지점(Point of Interest, POI)은 도시 내 사람들이 자주 방문하는 장소나 활동이 많은 지역을 나타내는 지표로 인구 집중, 상업 활동과 같은 도시의 활동성을 반영한다. POI가 높은 지역은 교통량 증가나 인구 활동의 집중으로 인해 인공열 발생이 증가할 수 있다. 건물 건조 환경 변수들은 도시의 물리적 구조를 나타내는 지표인 반면, POI는 도시 공간에서 발생하는 인구활동, 활동 밀집도, 교통량 등을 포괄적으로 반영하기 때문에 단순히 건물 밀도나 개발밀도만으로 설명되지 않는 부분을 보완하는 변수로써 활용되었다. POI 변수는 Kakao Map API를 통해 분석 단위로 동일한 100m 격자 단위로 POI 개수를 수집하여 구축하였다.

최종적으로 분석에 사용된 분석 단위는 100m 격자이며, 지표면 기온과 설명변수에서 자료가 없는 격자를 제외한 총 54,130개의 격자를 이용하여 탐색적 및 통계적 분석을 진행하였다.

3. 분석 모형

1) 국지기후대(LCZ) 분류

서울시 전역을 대상으로 지표면 기온의 주간 변동성 특성과 분포 및 유형별 차이를 파악하기 위해 먼저 LCZ 분류를 사용하였다. Stewart and Oke(2012)에 의해 제안된 LCZ 분류는 10개의 건축 유형(LCZ1-10)과 7개의 토지피복 유형(LCZ A-G)으로 총 17개의 카테고리로 분류된다. 도시열섬효과 연구에서 표준화된 기준을 제공하지만 연구 범위에 따라 적용될 수 있는 LCZ 분류는 다르며 LCZ 분류를 사용한 선행연구들도 연구범위에 따른 재분류를 실시하였다(Shi et al., 2022; Chang et al., 2021).

본 연구에서는 건축 유형 및 토지 피복 유형에 따라 LCZ 분류를 하기 위해 전 세계 도시의 기후 데이터를 수집하고 관리하는 오픈 액세스 온라인 데이터베이스인 WUDAPT(World Urban Database and Access Portal Tools) I0을 사용하여 서울시 LCZ 분류를 재구성 하였다(Demuzere et al., 2021). WUDAPT I0는 Landsat 8 및 Sentinel-2와 같은 위성 이미지를 사용하여 지정된 훈련 지역을 기반으로 랜덤 포레스트 알고리즘을 적용하여 도시 전역에 대한 LCZ 분류를 수행하며, 품질 관리 평가 후 정확한 LCZ 지도를 생성한다. 이와 같이 정제된 LCZ 분류체계를 활용하여, 서울시의 기온 변동성에 영향을 미치는 도시 구성 요소와 그 분포 및 특성을 식별할 수 있다.

분석 범위 내에서 건축 환경과 토지피복 유형에 맞추어 WUDAPT I0을 활용한 본 연구에서의 LCZ 분류는 총 14개의 유형으로 나누었으며, 이 중 9개는 건축 유형, 5개는 토지 피복 유형으로 분류되었다. 분류 결과와 LCZ 유형별 설명, 예시, 및 항공 이미지는 <그림 2>에 제시되어 있다.

2) 일반화가법모형

지표면 기온은 도시의 물리적 환경에 개별 요소에 따라 미시적으로 민감하게 변하는 특징을 가지고 있고 열의 대류, 관성 및 비열 차이로 인해 환경적 요소와 비선형적 관계를 가지고 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서 도시 지표면 기온의 주간 변동성 및 영향요인과의 비선형적인 관계를 분석하기 위해 일반화가법모형(Generalized Additive Model, GAM)을 사용한다. 일반선형회귀모형(Ordinary Least Square, OLS)은 설명변수와 예측변수가 선형적 관계에 있다고 가정하지만, 일반화가법모형은 일반화선형모형(Generalized Linear Model, GLM)이 확장된 형태로 복잡한 비선형 관계를 모델링 할 수 있어 통계 모델의 유연성을 확보할 수 있다. OLS의 전개식이 식 (2)처럼 전개되는데,

Types	LCZ class & Description	Example	Aerial image
Built types	LCZ 1 (Compact high-rise)		
	LCZ 2 (Compact mid-rise)		
	LCZ 3 (Compact low-rise)		
	LCZ 4 (Open high-rise)		
	LCZ 5 (Open mid-rise)		
	LCZ 6 (Open low-rise)		
	LCZ 8 (Large low-rise)		
	LCZ 9 (Sparsely built)		
	LCZ 10 (Heavy industry)		
	Land cover types	LCZ A (Dense trees)	
LCZ D (Low plants)			
LCZE (Bare rock or paved)			
LCZ F (Bare soil or sand)			
LCZ G (Water)			

Figure 2. Reclassification of LCZs for Seoul
Source: Stewart and Oke (2012), Google Earth Pro

GAM은 식 (3)처럼 각각의 설명변수에 대해 별도로 비선형 함수를 적합하여 부분적인 비선형성을 모델링할 수 있다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \epsilon_i \quad (2)$$

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p f_j(x_{ij}) + \epsilon_i \quad (3)$$

$$= \beta_0 + f_1(x_{i1}) + \dots + f_p(x_{ip}) + \epsilon_i$$

OLS에서는 베타계수가 각 독립변수의 변화가 종속변수에 미치는 영향을 설명해 주지만, GAM에서는 각 변수의 영향을 개별적인 스무딩 함수로 나타내며 이 스무딩 함수는 변수의 특정 값에 대한 예측값의 변화를 비선형적으로 나타내기 때문에 부분 의존도 플롯(Partial Dependence Plot)을 통해 각 변수의 비선형적 영향을 시각화하고 해석할 수 있다. GAM에서는 스무딩 파라미터 λ 를 조절하여 최적의 스무딩 함수를 찾아 과적합을 방지한다. 본 연구에서는 일반화 교차 검증(Generalized Cross Validation, GCV) 점수를 기준으로 최적의 모델을 선택하였다. 과적합을 방지하고 모델의 성능을 최적화하기 위해 Python의 scikit-learn 패키지 내의 GridsearchCV를 사용하여 GCV 점수가 가장 낮은 모델을 선택하여 최적의 스무딩 파라미터를 결정하였다.

따라서 본 연구에서는 주간기온변동폭 지표를 종속변수로 하고 개별 변수들을 설명변수로 하여 일반화기법모형을 추정하여 도시 환경 특성과 지표면 주간 기온 변동성 간의 비선형적 관계를 통계적으로 분석하였다.

IV. 분석 결과

1. 기초분석

서울시를 대상으로 이른 아침(07:41)부터 저녁(17:26)까지 10개의 시간대별 지표면 기온 시계열 데이터를 구축한 뒤 시간대별 기온변화를 박스플롯으로 나타내어 분포의 범위와 변동성을 살펴 보았다(그림 3). 그 결과 이른 오전(07:41)에 가장 낮은 지표 온도(17.85°C)를 보였으며, 오전에는 비교적 적은 분포를 보였다. 시간이 지날수록 중앙값과 분포의 범위가 커져 정오(12:04)에 가장 높은 중앙값과 변동성을 보였다. 오후(16:10)와 저녁(17:26)에 이르러 중앙값은 감소하나 오전에 비해 넓은 분포를 보였다. 박스 플롯을 통해 시간대별 기온의 변동폭의 양상이 다르게 나타나고, DTR이 상당히 큼을 확인할 수 있다.

주간 최고기온, 최저기온과 DTR의 관계를 살펴본 결과(그림 4), 최저기온과 DTR의 관계는 선형관계가 명확하지 않으나 최고기온과 DTR의 관계는 선형적인 정적 관계가 나타났다. 이는 서울지역에서 DTR의 분포는 주로 최고기온의 격차와 더 밀접한 관련이 있음을 의미하며, 최고기온의 상승으로 인한 DTR의 상승이라는 시나리오가 더 우세하다는 것을 보여준다. 따라서 서울시에서 높은 DTR은 부정적 함의를 가지고 있다고 보아야 할 것이다.

본 연구에서 사용한 변수들의 기초 통계값은 <표 2>와 같다. 평

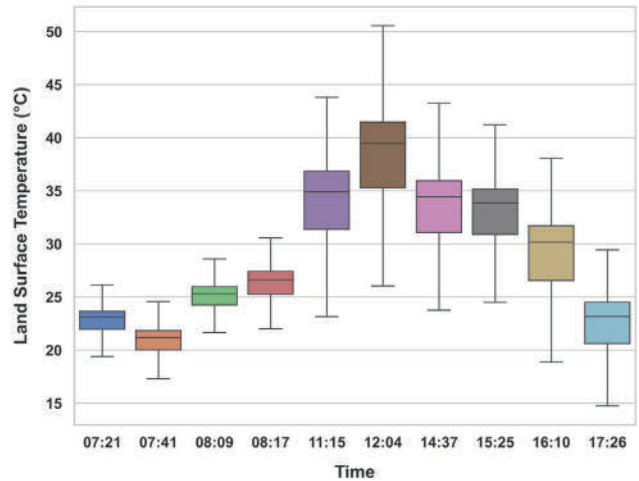


Figure 3. Box plot of diurnal LST in Seoul

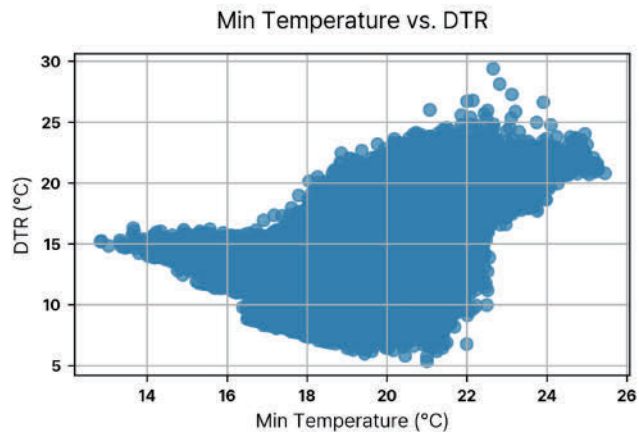
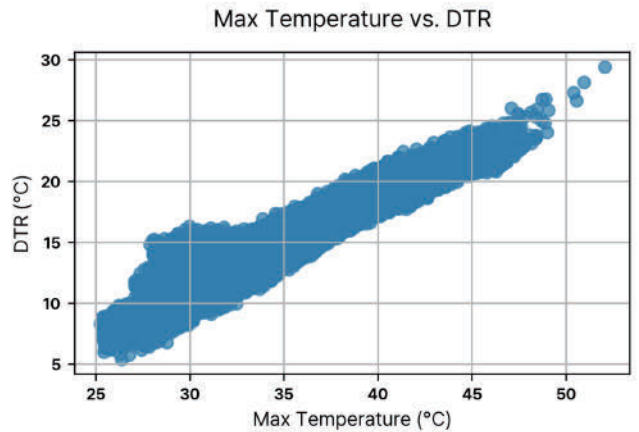


Figure 4. Maximum, minimum temperatures and daytime DTR in Seoul

균 기온 변동은 17.5°C로 나타났으며, 최소기온변동폭은 5.38°C, 최대기온변동폭은 29.41°C로 서울시의 DTR이 상당히 큰 것으로 나타났다. 도시의 물리적 구조를 파악할 수 있는 건폐율과 용적률, 건물 높이를 보면 최댓값이 평균에 비해 높게 나타나는 것으로 보아, 일부 지역에 개발밀도가 높고 고층 건물이 존재하는 것을 알 수 있다. 정규식생지수(NDVI)의 평균이 0.18이고, 산림과 수역이 지표면 기온에 미치는 거리·감쇠 효과를 나타내는 산림 중

Table 2. Descriptive statistics of key variables

Variable	Mean	Std	Min	Max
Diurnal temperature range	17.50	3.03	5.38	29.41
Building coverage ratio (%)	24.11	26.54	0.00	91.18
Floor area ratio (%)	87.97	120.17	0.00	1,420.19
Building height (m)	9.20	14.10	0.00	250.73
NDVI	0.18	0.09	-0.02	0.49
Gravity index of forest (m ²)	1,503.97	18,23.51	0.00	13,979.73
Gravity index of water bodies (m ²)	399.77	842.87	0.00	6,041.85
POI (count)	5.07	10.82	0.00	151.00
N	54,130			

력지수와 수역 중력지수를 보면 평균에 비해 최댓값이 매우 높은 것으로 보아 특정 지역에 산림이 집중되어 있음을 알 수 있다.

2. LCZ 분류 결과

본 연구에서는 서울시의 건물의 물리적 구조와, 토지 피복 상황에 맞게 LCZ1-10, LCZA-G에서 LCZ7과 LCZB,C를 제외한 총 14개 유형으로 분류하였다. 각 LCZ 유형별 격자 수는 <표 3>과 같다. LCZ 유형별 공간적 분포 및 특징을 살펴보기 전에 LCZ 유형 간 차이에 대해 one-way ANOVA 분석을 실시한 결과, LCZ 유형 간 DTR은 유의미한 차이가 있음을 확인하였다($F=6183$, $p<0.001$).

LCZ 유형별로 서울시에 어떤 공간적 분포를 보이는지 살펴본 결과(그림 5), 고밀 고층 건물에 해당하는 LCZ1이 분포하는 영역

은 서울시의 3대 중심업무지구로 종로를 포함하여 강남, 여의도 일대에서 관찰된다. 이러한 중심업무 지구는 고층건물들이 고밀형태로 모여 있으며 많은 인구의 집중을 유발한다. 자연 유형을 제외한 도시유형 분류에서 LCZ3인 고밀 저층 건물이 가장 많이 분포되어 있는데, 서울시는 급속한 도시화를 이룬 도시로 고밀도로 개발된 도시 구조를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 높은 식생을 나타내는 LCZA와 같은 유형은 서울시의 산림 분포 형태와 매우 유사한데, 이는 서울시의 식생피복은 도심 내 도시공원과 같은 자연 공간보다 지형적 특징에 의해 형성되어 있음을 시사한다.

기온 변동성의 범주를 나누어 각 범주에 따른 LCZ 분포를 파악함으로써 LCZ 유형별 특징을 살펴보았다. DTR의 범주는 Jenks의 natural break classification을 사용하여 5개의 카테고리 분류하였다. 이 분류 방법은 군집 내 분산을 최소화하고 군집 간 분산을 최대화하여 데이터 내 자연스러운 군집을 식별하는 데에 사용되는 통계적 기법이다. 기온 변동성 범주에 따른 LCZ별 격자 수와 비율은 <표 4>와 같다. 각 LCZ 유형의 특성을 5개의 DTR 범주로 구분하여 분석한 결과(그림 6), DTR이 가장 낮은 범주(5.38-11.38°C)에서는 LCZG(수역)가 주요 부분을 차지하였고, 11.38-14.58°C범위에서는 LCZA(고밀 식생)가 주를 이루었다. 14.85-17.47°C는 다양한 도시 유형이 나타나기 시작하는 구간으로 건축 유형의 분포가 두드러지기 시작했다. 이 범주에서는 LCZA가 여전히 주요하지만, LCZ4, LCZ5, LCZ6과 같

Table 3. Number of grids for each LCZ in Seoul

LCZ class	Built types	Number of grid units
1	Compact high-rise	2,531
2	Compact mid-rise	1,867
3	Compact low-rise	12,735
4	Open high-rise	6,113
5	Open mid-rise	5,748
6	Open low-rise	2,337
8	Large low-rise	3,176
9	Sparsely built	2,570
10	Heavy industry	496
A	Dense trees	12,622
D	Low plants	1,267
E	Bare rock or paved	300
F	Bare soil or sand	70
G	Water	2,298

Table 4. Number and percentage of grids by DTR category for each LCZ

DTR category	Number of grid units	Percentage(%)
5.38-11.38°C	1,999	3.69
11.38-14.85°C	9,468	17.49
14.85-17.47°C	9,537	17.62
17.47-19.57°C	17,640	32.59
19.57-29.41°C	15,486	28.61

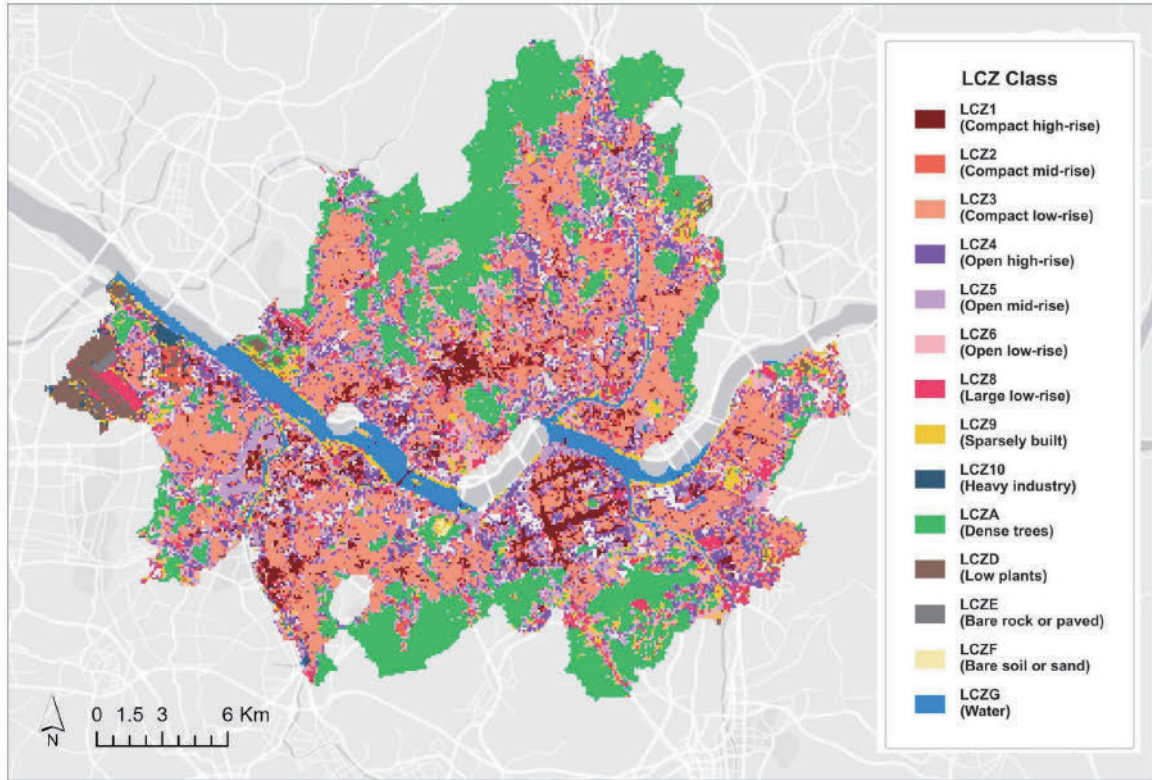


Figure 5. Spatial distribution of LCZ classes

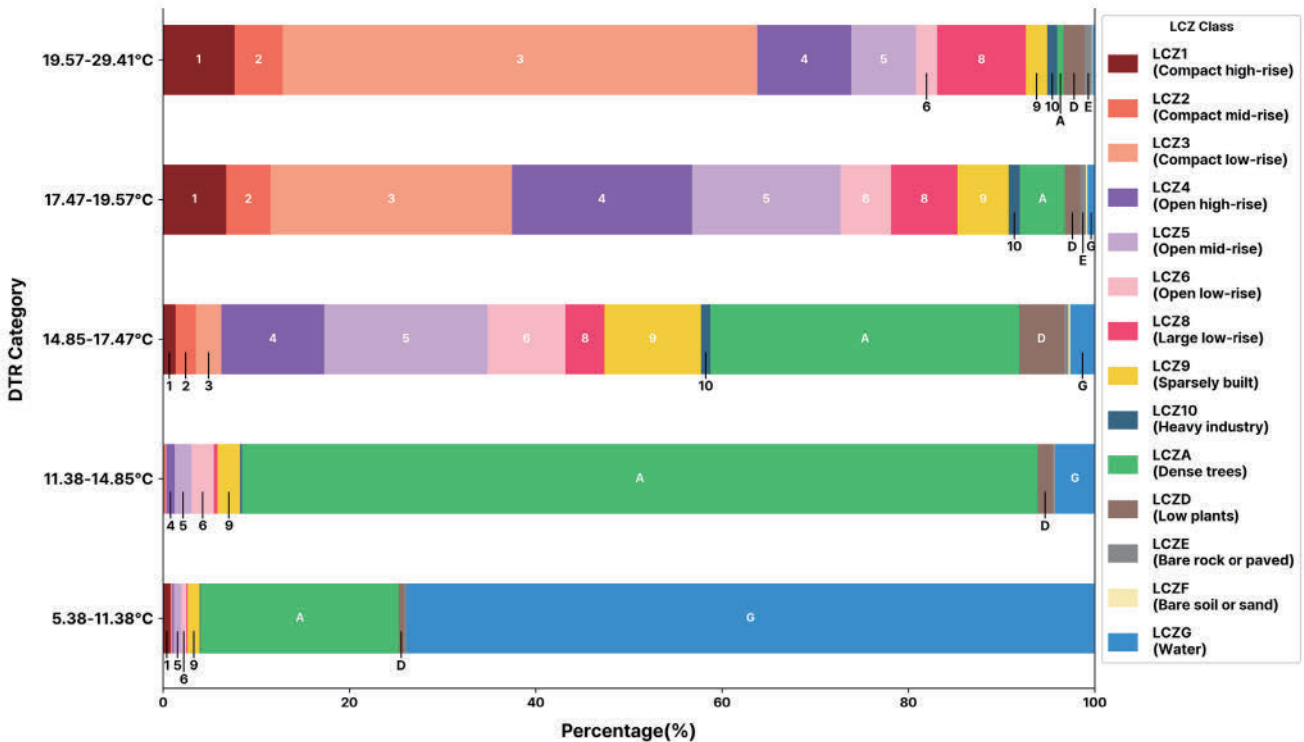


Figure 6. Distribution of LCZs by DTR category

은 도시 지역이 눈에 띄게 증가하였다. 평균 기온 변동성인 17.5°C를 포함하는 17.47-19.57°C 범주에서는 LCZ3, LCZ4, LCZ5 등 도시 지역이 지배적이었다. 마지막으로, DTR이 가장 극심한 범주(19.57-29.41°C)에서는 LCZ1, LCZ2, LCZ3과 같은 고밀도

도시 유형이 60% 이상을 차지했다. 17.47-19.57°C 범주와 비교했을 때, LCZ4와 LCZ5의 비율은 감소한 반면, 고밀도 도시 유형의 비중이 증가하였다.

3. 일반화가법모형(GAM) 분석결과

마지막으로 지표면의 주간기온변동폭을 종속변수로 하고 개별 변수들을 설명변수로 하는 일반화가법모형(GAM)을 추정하여 도시 환경 특성과 지표 기온 변동성 간의 비선형적 관계를 통계적으로 분석하였다. GAM 분석 결과, Pseudo R-Squared 값이 0.799로 모델이 비선형 관계를 효과적으로 포착해 종속변수인 DTR을 설명하는 데 더 높은 설명력을 보임을 알 수 있다(표 5). EDoF(Effective Degrees of Freedom)는 해당 변수의 스무딩에 대한 유효 자유도를 나타내는 것으로 선형관계일 때 EDoF는 1로 나타난다. 따라서 EDoF가 높을수록 변수가 모델에 보다 복잡한 비선형적 영향을 미치고 있음을 의미한다. NDVI의 EDoF가 17.4로 가장 높게 나타난 것은 NDVI가 지표 기온 변동성에 비선형적이고 복잡한 영향을 가지고 있음을 시사한다. 또한, 모든 변수의 p-value 값이 0.001 미만으로 나타나 각 변수가 통계적으로 유의미한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 이는 해당 모델의 각 변수가 DTR에 대해 높은 예측력을 가짐을 의미한다.

부분 의존도 플롯(Partial Dependence Plot)을 통해 각 변수가 주간 지표 기온 변동성에 미치는 영향을 시각화한 결과는 <그림 7>과 같다. 기온 변동성의 예측된 변화는 파란 실선이며 다른 변수들의 영향을 평균화한 상태에서 특정 변수의 값이 변할 때, 타겟 변수의 예측값이 어떻게 변화하는지를 나타낸다. 빨간 점선은 95%의 신뢰구간을 보여주는데 건폐율, 용적률, 건물 높이와 같이 건물과 관련된 수들은 변수의 크기가 극단적으로 커질수록 표본이 희소해지기 때문에 신뢰구간이 넓어진다. 따라서 신뢰구간이 일정하게 유지되는 구간에 집중하여 해석하는 것이 바람직하다.

건폐율 변수를 살펴보면, 건폐율이 증가할수록 DTR이 높아지는 양상이 나타난다. 그러나 80%를 넘는 경우에는 기온 변동성이 다시 감소하는 모습이 관찰된다. 용적률의 경우, 증가함에 따라 DTR이 전반적으로 감소하지만, 800%를 초과하면 이러한 감소세

가 멈추고 오히려 변동성이 증가하는 특징을 보인다. 건물 높이는 전반적으로 높아질수록 DTR이 줄어드는 경향이 있지만, 100~150m 구간에서는 변동성이 소폭 상승했다가, 150m를 초과한 이후 다시 감소한다. NDVI값을 통해 지표면의 식생 밀도와 상태를 확인해 본 결과, 수역을 의미하는 0 근처에서는 DTR이 낮았다. 그러나 도시화된 지역을 나타내는 0.1 부근까지 급격히 상승한 후, 해당 지점을 지나면서 급격히 감소하는 양상을 보인다.

산림 중력지수와 수역 중력지수는 산림과 수역의 면적 및 거리가중치를 반영하여 냉각 효과를 평가하는 지수이다. 산림의 냉각 효과가 증가할수록 DTR이 낮아지다 약 7000 부근에서 변동이 있지만, 여전히 평균적인 기준선에서 벗어나지 않으므로 산림 중력지수의 증가는 기온 변동성을 감소시키는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 수역 중력지수의 경우 수역의 냉각 효과가 증가할수록 기온 변동성은 가파르게 낮아지는 양상을 보인다. 즉, 산림이나 수역이 주는 냉각 효과가 증가할수록 기온 변동성이 낮아지는 것을 파악할 수 있다. POI(point of interest)는 사람들이 자주 방문하는 장소나 활동이 많은 지역을 나타내는 지표로 인구 집중, 상업 활동과 같은 도시의 활동성을 반영한다. POI 변수는 비선형적 영향이 두드러지게 관찰되지 않지만, POI가 높을수록 DTR을 소폭 상승시키는 모습을 보인다. POI 값이 낮은 구간에서는 인간 활동이 적어 기온 변동성이 비교적 안정적이지만 POI 개수가 50~110개 사이일 때는 DTR이 미세하게 증가와 감소를 반복하는 모습을 보인다.

GAM 모형을 통해 기존의 선형적 관계가 아닌 영향요인과의 비선형적 관계를 분석한 결과, 용적률과 건물 높이는 증가할수록 기온 변동성에 미치는 효과가 경감되었다. 반면에 건폐율은 기온 변동성에 미치는 효과의 정도가 강화되는 것으로 나타났다. 또한 산림이나 수역과 같은 자연지역은 기온 변동성을 줄이는 데 중요한 변수로 작용하지만, 수역의 기온 변동성의 완화효과가 더 큰 것으로 확인되었다.

Table 5. Generalized additive model results

Parameter	Lamda	EDoF	P > x	Sig. Code	VIF
BCR (%)	[0.7035]	16.6	1.11E-16	***	4.59
FAR (%)	[0.0673]	16.3	1.11E-16	***	6.96
Building height (m)	[0.2907]	13.3	1.11E-16	***	3.04
NDVI	[0.0642]	17.4	1.11E-16	***	5.22
Forest GI (m ²)	[1.6248]	11	1.11E-16	***	4.01
Water GI (m ²)	[10.514]	11.4	1.11E-16	***	1.19
POI (count)	[0.2941]	14.8	1.28E-13	***	1.63
N			54,130		
Log likelihood			-97769.1575		
Pseudo R-Squared			0.799		

*** p<0.01; ** p<0.05; * p<0.10

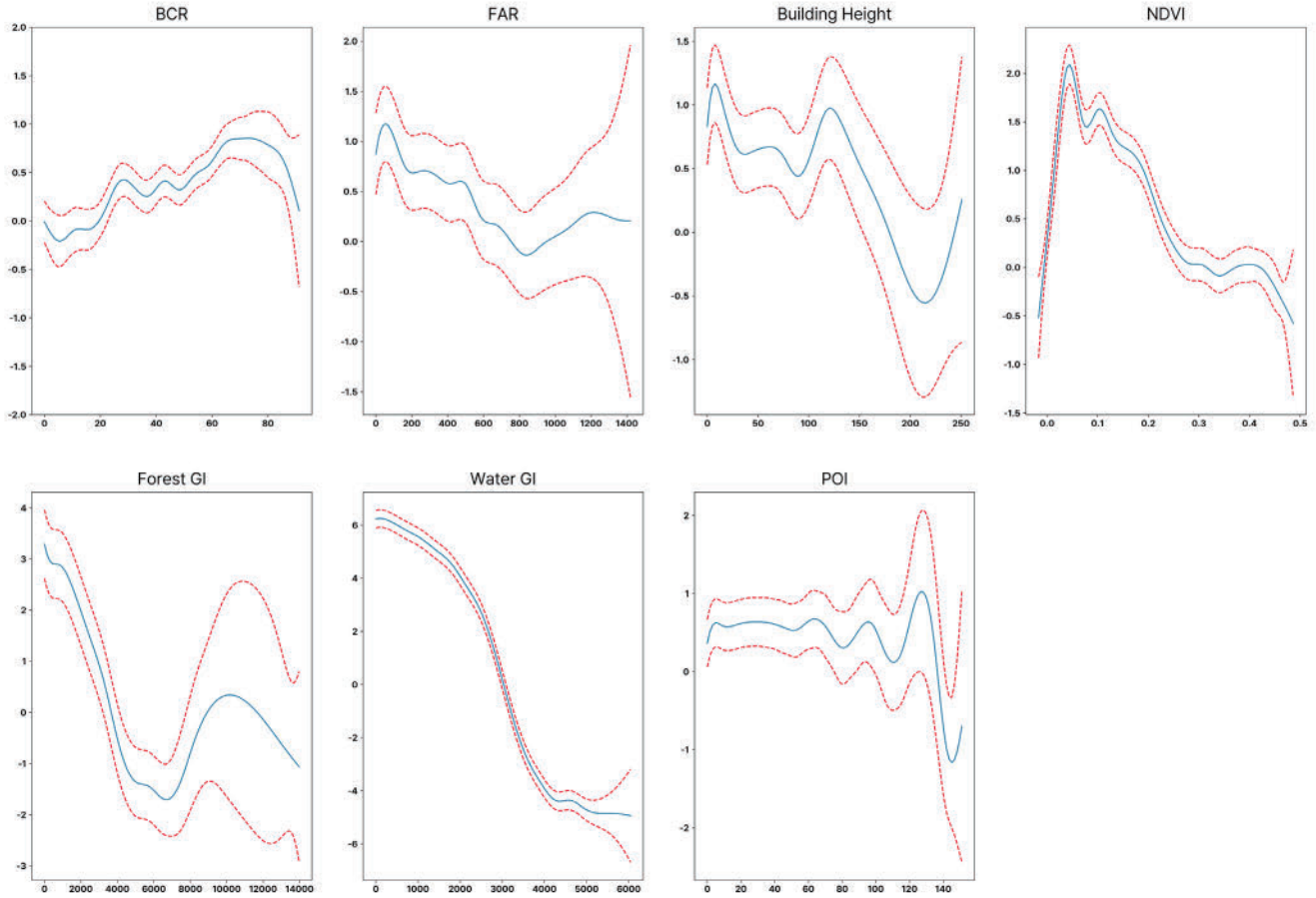


Figure 7. Partial dependence plot

V. 논의

본 연구는 서울시를 대상으로 인공위성 지표면 기온 관측자료인 ECOSTRESS를 활용하여 2019년에서 2021년 사이의 여름철 주간 도시 지표면의 기온 변동성을 살펴보았다. ECOSTRESS를 활용하여 이른 오전부터 저녁 시간까지 총 10개 시간대의 도시 지표면 기온 시계열 데이터를 구축하여 도시 지표면 주간기온변동 폭과 영향요인과의 비선형적 관계를 분석하였다.

먼저, 시간대별 지표 기온의 박스플롯을 통해 살펴본 서울시의 지표 기온은 시간대에 따라 서로 다른 열 패턴을 보여 주었다. 특히 태양 복사열이 최고조에 달하는 정오에 가장 높은 기온과 변동 폭을 보였는데, 이는 도시 표면이 열을 흡수하고 저장하는 특성에 기인한 결과이다. 정오의 변동성 증가는 도시 표면과 열 축적 특성의 차이를 반영하는 것으로 보이며, 오후 시간대에는 태양 복사열 감소와 대류 작용에 의해 기온이 서서히 낮아지는 양상이 나타났다. 이른 아침에는 변동성이 낮게 나타나, 태양열 부재로 인해 지표면 기온이 일정하게 냉각되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 도시 기후 연구와 열섬 현상 완화 대책 수립 시 주간 기온변화를 고려해야 함을 강조한다.

이어서, 도시 건축 유형과 토지 피복에 따라 도시개발 형태를

분류한 LCZ 분류 결과, 5개의 기온 변동 범주 중 기온 변동성이 가장 낮은 두 범주는 주로 LCZG(수역)와 LCZA(고밀 식생)가 가장 많은 부분을 차지하였다. 이는 낮은 기온 변동성에 토지 피복 유형의 영향이 크다는 것을 의미한다. Shi et al.(2022)의 연구에서도 유사한 경향이 관찰되었는데, 식생과 수역이 여름철 주간 모두 낮은 LST를 유지한다고 밝혔다. 이러한 안정화 효과는 물의 높은 비열로 인해 열 흡수와 방출이 느리게 이루어지기 때문이며, 식생 또한 증산작용을 통해 주변 공기를 냉각시키고, 태양 복사를 흡수하며, 표면의 과열을 방지하는 그늘을 제공함으로써 주변 환경에 비해 주간 기온 변동성을 줄이는 데 기여하기 때문이다. 본 연구의 결과는 LCZ 분류 중 건축 유형에서 UHI 효과가 더 두드러진다는 기존 연구(Budhiraja et al., 2020; Anjos et al., 2020; Ngarambe et al., 2021)들과도 일치한다. 14.85~17.47°C 범주에서는 다양한 LCZ 유형이 관찰되며, 건축 구조가 우세하게 나타난다. 이는 해당 기온 범위 내 도시 지역이 기온 변동성에 민감한 구조적 특성을 지님을 시사한다. 이 범위를 넘어가면 도시 구조물이 우세해지면서 건물과 도로가 더 많은 태양 에너지를 흡수해 변동 차이를 만들어낸다. 기온 변동성이 극심한 19.54~29.41°C 범주에서는, LCZ1·LCZ2·LCZ3으로 대표되는 고밀도 도시 형태가 전체 면적의 절반 이상을 차지했다. 이들

LCZ들은 서울시의 도시 지역에 주로 분포하고 있어, 서울시가 기온 변동성에 취약한 고밀도 도시 구조를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 고밀도 도시 지역에서는 건축물이 태양 에너지를 흡수하고, 제한된 바람길로 인해 도시 중심부가 과열되기 쉬우며, 밀집된 시설로 인한 인구밀도가 높은 곳에서는 인위적인 열 방출도 증가하여 해당 지역의 기온과 기온 변동성이 높아지는 경향이 나타난다. 따라서 본 연구는 기온 변동성을 안정화하고 기후 적응성을 향상시키기 위한 도시계획 및 설계가 필요함을 강조하며, 특히 기온 변동에 취약한 고밀도 지역에서 도시 냉각 통로나 환기 개선과 같은 맞춤형 완화 전략이 필요함을 제안한다.

셋째, GAM을 사용하여 지표면 주간기온변동폭을 종속변수로 두고 다양한 설명변수를 통해 비선형 관계를 파악한 결과, 건폐율이 증가함에 따라 기온 변동성도 증가하는 것으로 나타났다. 높은 건폐율은 건물과 도로 같은 구조물이 더 많은 면적을 차지하여 불투수 면적을 증가시키는 것을 의미한다. Liao et al.(2021)은 건폐율과 도시열섬효과 사이의 선형 관계를 보고했지만, 비선형적 관계를 살펴본 본 연구 결과에 따르면 일정 수준을 넘어서면 이러한 경향이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 도시화 수준이 특정 수준을 초과하면 추가적인 구조물이 기온 변동성에 미치는 영향이 크지 않음을 의미한다. 용적률과 건물 높이는 증가할수록 기온 변동성이 감소하는 경향을 보였으나, 특정 임계값을 초과하면 효과가 약화되었다. 용적률은 800%를 초과할 때 감소세가 멈추고 변동성이 소폭 증가했다. 건물 높이는 100~150m 구간에서 변동성이 상승했다가 150m를 초과하면 다시 감소했다. 이러한 결과는 Boosted Regression Tree(BRT) 분석을 통해 비선형 관계를 확인한 Hu et al.(2020)의 연구와 유사하다. 해당 연구에서는 건물 높이가 68m 이하일 때는 지표면 기온에 긍정적인 영향을 미쳤으나, 100m를 초과하면 그 효과가 미미해졌다고 보고했다. 용적률과 건물 높이가 증가하면 건물의 그늘이 지표면의 태양 복사열 흡수를 줄여 기온을 낮추고, 공기 흐름을 촉진하는 바람길을 형성해 열을 분산시키며 기온을 안정할 수 있다. 그러나 임계점을 초과하면 이러한 효과는 반대로 작용하여 지나치게 높은 건물은 주요 바람길을 차단하여 환기를 제한하고, 도시 협곡 내에 열을 가두어 냉각 효과를 상쇄하며 기온 변동성 감소를 제한할 수 있다. 이러한 비선형 효과를 분석하여 건폐율, 용적률, 건물 높이 등 도시 형태 특성에서 임계점을 식별함으로써, 열섬 완화 정책 수립 시 이러한 중요한 지점들을 반영할 필요가 있음을 시사한다. 예를 들어, 건폐율이 기온 변동성에 더 이상 큰 영향을 미치지 않는 특정 임계값을 초과하지 않도록 건물 밀도에 제한을 두거나, 용적률과 건물 높이의 냉각 효과가 감소하는 지점에 도달하면 이를 제한하는 규정을 마련할 수 있다. 이러한 임계값을 정책의 지침으로 활용함으로써 고밀 도시 지역에서 극심한 기온 변동을 효과적으로 완화하고, 기후 회복력이 강한 도시 환경을 조성할 수 있다.

건축 환경 관련 변수 외에도, 산림과 수역의 냉각 효과는 기온 변동성에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 NDVI와 LST 간의 음의 관계를 확인한 선행연구 결과(Dai et al., 2018; Chang et al., 2021)와 전반적으로 일치하지만, 도시화된 지역에서는 NDVI가 약 0.1까지 증가한 이후 기온 변동성이 급격히 감소하는 경향을 확인했다. 산림 및 수역 증력지수는 자연 요소의 크기와 근접성을 고려한 지수로, 지숫값이 증가할수록 기온 변동성이 현저히 감소하는 것으로 분석되었다. 녹지 공간은 식물의 증산작용으로 주변 공기를 냉각시키고, 그늘을 제공해 기온을 낮춘다. 수역은 증발 냉각을 통해 온도를 낮추는 동시에 높은 비열로 인해 낮 동안 열을 저장하고 밤에 방출하여 기온 변동성을 완화한다. 이러한 자연 요소들의 공기 냉각과 열 방출 조절 메커니즘이 기온을 안정화하고 변동성을 줄이는 데 기여한다. 산림 증력지수와 수역 증력지수가 기온 변동성을 감소시키는 본 연구의 결과는 도시계획에서 열 완화 및 공중 보건 대책 수립 시 이들 요소의 크기와 근접성을 모두 고려해야 할 필요성을 강조한다. 예를 들어, 정책 입안자들은 LCZ1, LCZ2, LCZ3 같은 고밀도 지역 근처에 규모가 크고 근접한 녹지-수변 인프라를 우선적으로 개발하여, 냉각 효과를 최적화하도록 설계해야 한다. 또한 건폐율 상승을 동반하는 개발을 지양할 때, 기존의 생태면적률 규제를 활용해 건축면적 확대가 필요하더라도 녹지 투수층 및 자연지반과의 연결성 확보를 통해 건폐율 상승이 기온변동폭에 미치는 부정적 영향을 완화시키는 것이 바람직하다.

마지막으로, 고해상도 인공위성 자료를 사용하여 도시 지표면 기온의 주간 변동성을 살펴본 본 연구의 접근 방식은 기후 위기가 심화되는 가운데 도시 기온의 주간 변동폭을 보다 정교하게 모델링할 수 있는 접근 방식을 제안한다. 이는 도시 계획가 및 의사결정자로 하여금 효과적인 열 완화 전략과 도시 환경 설계 방안을 마련하는 데 도움이 될 것이라고 판단된다. 특정 시간대에 따라 기온 변동이 크게 나타나는 지역을 우선적으로 개선하는 전략을 수립할 수 있고, 미시적 분석이 가능한 인공위성 데이터는 기후 변화에 따른 장기적인 기온 변동 예측에도 유용하게 사용될 수 있어 지속가능하고 탄력적인 도시 환경을 조성하는 데 도움이 될 것이다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. ECOSTRESS 데이터 구득 시 동일한 관측 연도를 가지는 것이 이상적이지만, 여름철 구름의 영향이 적은 맑은 날의 이미지를 수집하는 데 어려움이 있어 동일한 연도에 데이터를 수집하지 못하는 한계가 있다. 또한, 본 연구에서 사용한 기온 변동성 지표는 평균적으로 기온이 높은 지역과 낮은 지역 간의 기온 변동성을 구분하지 못하는 한계를 가지고 있다. 향후 연구에서 양질의 ECOSTRESS 데이터를 구득할 수 있고 기온 변동성 지표를 개선한다면, 보다 정교한 주간 주기의 기온 변동성을 설명할 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 결론

본 연구는 서울시를 대상으로 ECOSTRESS 인공위성 관측자료를 활용하여 여름철 도시 지표면 주간기온의 변동폭을 살펴보았다. 분석 결과, LCZ1, LCZ2, LCZ3과 같은 압축된 도시 형태를 갖춘 고밀 도시 지역이 자연 토지 피복을 가진 지역에 비해 더 높은 기온 변동성을 나타냈다. 또한 식생과 수역의 냉각 효과는 기온 변동성 완화에 중요한 역할을 하며, NDVI, 산림 중력지수, 수역 중력지수가 기온 변동성을 현저히 감소시키는 것을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 도시 형태와 자연 요소의 구성 방식이 도시 열 환경을 형성하는 데 중요한 영향을 미친다는 점을 강조한다.

본 연구는 도시 구조와 도시 지표면 주간기온변동폭 간의 비선형적 관계를 규명함으로써 도시계획에 대한 중요한 통찰력을 제공한다. 연구 결과에 따르면 건물 밀도와 높이에 대한 임계값을 유지하고, 그린 및 블루 인프라를 확장하는 등의 전략적인 개입이 특히 고밀도 도시 지역에서의 기온 변동성의 부정적인 영향을 완화할 수 있음을 시사한다. 또한, 기온 변동성을 완화에는 인위적 열에 관련된 요인보다 건축 환경 요소의 적절한 배치가 더욱 중요하다는 결론을 도출했다. 최신 인공위성 관측자료를 기반으로 한 본 연구 결과를 정책에 반영함으로써 도시열섬 완화와 기후 회복력 강화를 위한 도시 환경을 조성할 수 있을 것이다.

인용문헌

References

- 권유진·안새결·이동근·윤은주·성선용·이기승, 2018. “열수지를 활용한 서울시 열환경 개선을 위한 공간 유형화”, 『국토계획』, 53(7): 109-126.
Kwon, Y.J., Ahn, S.K., Lee, D.K., Yoon, E.J., Sung, S.Y., and Lee, K.S., 2018. “Spatial Typification based on Heat Balance for Improving Thermal Environment in Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 53(7): 109-126.
- 문현빈·이수기, 2018. “공동주택 단지의 구성요소와 3차원 물리적 환경이 지표온도에 미치는 영향 분석 - 서울시 340개 공동주택 단지를 중심으로”, 『한국도시계획학회지 도시설계』, 19(6): 35-52.
Moon, H.B. and Lee, S.G., 2018. “Analysis of Compositional Factors and Three Dimensional Physical Environments Affecting Surface Temperature in Apartment Complex - Focused on 340 Apartment Complexes in Seoul”, *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 19(6): 35-52.
- 박재빈·임하나·김수현·최창규, 2017. “다세대·다가구 우세지역과 아파트 우세지역의 건폐율과 용적률이 열섬효과에 미치는 영향분석 - 서울시 AWS지점을 중심으로 -”, 『국토계획』, 52(7): 159-176.
Park, J.B., Im, H.N., Kim, S.H., and Choi, C.G., 2017. “An Effect of Building-Coverage Ratio and Floor-Area Ratio on Urban Heat Island Effect - Focused on Multi-Family Housing and Apartments with Automatic Weather Station in Seoul -”, *Journal of Korea Planning Association*, 52(7): 159-176.
- 안새결·이동근·김준식·성선용, 2017. “서울시 주거지역의 건축물 면적 비율에 따른 여름철 주간 지표면온도 영향 분석”, 『국토계획』, 52(2): 171-181.
Ahn, S.K., Lee, D.K., Kim, J.S., and Sung, S.Y., 2017. “The Effect of Ground Coverage Ratio on Daytime Land Surface Temperature - Focusing on the Residential Area of Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 52(2): 171-181.
- 이연수·이시우·임정호·유철희, 2021. “딥러닝 기반 Local Climate Zone 분류체계를 이용한 지표면 온도와 도시열섬 분석: 수원시와 대구광역시를 대상으로”, 『대한원격탐사학회지』, 37(5), 1447-1460.
Lee, Y.S., Lee, S.W., Im, J.H., and Yoo, C.H., 2021. “Analysis of Surface Urban Heat Island and Land Surface Temperature Using Deep Learning Based Local Climate Zone Classification: A Case Study of Suwon and Daegu, Korea”, *Korean Journal of Remote Sensing*, 37(5): 1447-1460.
- LiYige·이수기·한재원, 2019. “도시의 3차원 물리적 환경변수와 지표온도의 관계 분석”, 『국토계획』, 54(2): 93-108.
Li, Y., Lee, S.G., and Han, J.W., 2019. “Analysis of the Relationship between Three-Dimensional Built Environment and Urban Surface Temperature”, *Journal of Korea Planning Association*, 54(2): 93-108.
- 조혜민·하재현·이수기, 2019. “서울시 도시열섬현상 지역의 물리적 환경과 인구 및 사회경제적 특성 탐색”, 『지역연구』, 35(4): 61-73.
Cho, H.M., Ha, J.H., and Lee, S.G., 2019. “Exploring Physical Environments, Demographic and Socioeconomic Characteristics of Urban Heat Island Effect Areas in Seoul”, *Journal of the Korean Regional Science Association*, 35(4): 61-73.
- 전규원·박유진, 2024. “도시 건조환경 유형에 따른 서울시 주간 지표면 온도 변동성 분석: ECOSTRESS 데이터의 활용”, 『지역연구』, 40(2): 107-130.
Jeon, G.W. and Park, Y.J., 2024. “Examining Diurnal Thermal Variations by Urban Built Environment Type with ECOSTRESS Land Surface Temperature Data: Evidence from Seoul, Korea”, *Journal of the Korean Regional Science Association*, 40(2): 107-130.
- 하재현·이수기·박철영, 2015. “도시의 물리적 환경이 시간대별 대기온도에 미치는 영향 분석: 천공개폐율을 중심으로”, 『국도시행정학회 2015년 하반기 학술대회』, 217-248, 서울: 서울시립대.
Ha, J.H., Park, C.Y., and Lee, S.G., 2015. “The Temporal Effects of Physical Environmental Characteristics on Urban Air Temperature - Focused on Sky View Factor(SVF)”, Paper presented at the Korean Urban Management Association Conference in the Second Half of 2015, 217-248, Seoul: University of Seoul.
- Anjos, M., Targino, A.C., Krecl, P., Oukawa, G.Y., and Braga, R.F., 2020. “Analysis of the Urban Heat Island under Different Synoptic Patterns Using Local Climate Zones”, *Building and Environment*, 185: 107268.

11. Balchin, W.G.V. and Pye, N., 1947. "A Micro-climatological Investigation of Bath and the Surrounding District", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73(317-318): 297-323.
12. Bechtel, B., Demuzere, M., Mills, G., Zhan, W., Sismanidis, P., Small, C., and Voogt, J., 2019. "SUHI Analysis Using Local Climate Zones-A Comparison of 50 Cities", *Urban Climate*, 28: 100451.
13. Budhiraja, B., Agrawal, G., and Pathak, P., 2020. "Urban Heat Island Effect of a Polynuclear Megacity Delhi-Compactness and Thermal Evaluation of Four Sub-Cities", *Urban Climate*, 32: 100634.
14. Chang, Y., Xiao, J., Li, X., Middel, A., Zhang, Y., Gu, Z., Wu, Y., and He, S., 2021. "Exploring Diurnal Thermal Variations in Urban Local Climate Zones with Ecostress Land Surface Temperature Data", *Remote Sensing of Environment*, 263: 112544.
15. Chang, Y., Xiao, J., Li, X., and Weng, Q., 2023. "Monitoring Diurnal Dynamics of Surface Urban Heat Island for Urban Agglomerations Using Ecostress Land Surface Temperature Observations", *Sustainable Cities and Society*, 98: 104833.
16. Chang, Y., Xiao, J., Li, X., Zhou, D., and Wu, Y., 2022. "Combining GOES-R and ECOSTRESS Land Surface Temperature Data to Investigate Diurnal Variations of Surface Urban Heat Island", *Science of the Total Environment*, 823: 153652.
17. Cureau, R.J., Pigliautile, I., and Pisello, A.L., 2023. "Seasonal and Diurnal Variability of a Water Body's Effects on the Urban Microclimate in a Coastal City in Italy", *Urban Climate*, 49: 101437.
18. Dai, Z., Guldmann, J.M., and Hu, Y., 2018. "Spatial Regression Models of Park and Land-Use Impacts on the Urban Heat Island in Central Beijing", *Science of the Total Environment*, 626: 1136-1147.
19. Deng, Y., Wang, S., Bai, X., Tian, Y., Wu, L., Xiao, J., Chen, F., and Qian, Q., 2018. "Relationship among Land Surface Temperature and LUCC, NDVI in Typical Karst Area", *Scientific Reports*, 8(1): 641.
20. Demuzere, M., Kittner, J., and Bechtel, B., 2021. "LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps", *Frontiers in Environmental Science*, 9: 637455.
21. Dong, P., Jiang, S., Zhan, W., Wang, C., Miao, S., Du, H., Li, J., Wang, S., and Jiang, L., 2022. "Diurnally Continuous Dynamics of Surface Urban Heat Island Intensities of Local Climate Zones with Spatiotemporally Enhanced Satellite-Derived Land Surface Temperatures", *Building and Environment*, 218: 109105.
22. Fiorillo, E., Brillì, L., Carotenuto, F., Cremonini, L., Gioli, B., Giordano, T., and Nardino, M., 2023. "Diurnal Outdoor Thermal Comfort Mapping through Envi-Met Simulations, Remotely Sensed and In Situ Measurements", *Atmosphere*, 14(4): 641.
23. Firozjaei, M.K., Sedighi, A., Mijani, N., Kazemi, Y., and Amiraslani, F., 2023. "Seasonal and Daily Effects of the Sea on the Surface Urban Heat Island Intensity: A Case Study of Cities in the Caspian Sea Plain", *Urban Climate*, 51: 101603.
24. Guo, F., Do, V., Cooper, R., Huang, Y., Zhang, P., Ran, J., Qiang Zhang, Q., Tian, L., and Fu, Z., 2021. "Trends of Temperature Variability: Which Variability and What Health Implications?", *Science of the Total Environment*, 768: 144487.
25. Han, D., An, H., Cai, H., Wang, F., Xu, X., Qiao, Z., Jia, K., Sun, Z., and An, Y., 2023. "How Do 2D/3D Urban Landscapes Impact Diurnal Land Surface Temperature: Insights from Block Scale and Machine Learning Algorithms", *Sustainable Cities and Society*, 99: 104933.
26. Hu, Y., Dai, Z., and Guldmann, J.M., 2020. "Modeling the Impact of 2D/3D Urban Indicators on the Urban Heat Island over Different Seasons: A Boosted Regression Tree Approach", *Journal of environmental management*, 266: 110424.
27. Huanchun, H., Hailin, Y., Xin, D., Cui, H., Zhifeng, L., Wei, L., and Peng, Z., 2020. "Analyzing the Influencing Factors of Urban Thermal Field Intensity Using Big-data-based GIS", *Sustainable Cities and Society*, 55: 102024.
28. Laaidi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E., and Beaudeau, P., 2012. "The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave", *Environmental Health Perspectives*, 120(2): 254-259.
29. Li, X., Chen, F., Ye, H., Xiong, Y., Shi, L., Pan, L., and Wang, K., 2010. "Trends of Maximum Temperature, Minimum Temperature and Diurnal Temperature Range and Their Correlations with Urbanisation in Xiamen, China", *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 17(4): 299-303.
30. Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X., and Wu, J., 2011. "Impacts of Landscape Structure on Surface Urban Heat Islands: A Case Study of Shanghai, China", *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3249-3263.
31. Li, N. and Quan, S.J., 2020. "Identifying Urban Form Typologies in Seoul with Mixture Model Based Clustering", Paper presented at the International Seminar on Urban Form 2020.
32. Liao, W., Hong, T., and Heo, Y., 2021. "The Effect Of Spatial Heterogeneity in Urban Morphology on Surface Urban Heat Islands", *Energy and Buildings*, 244: 111027.
33. Liu, Y., Xu, X., Wang, F., Qiao, Z., An, H., Han, D., and Luo, J., 2022. "Exploring the Cooling Effect of Urban Parks Based on the Ecostress Land Surface Temperature", *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10: 1031517.
34. Louiza, H., Zérroual, A., and Djamel, H., 2015. "Impact of the Transport on the Urban Heat Island", *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 5(3): 252-263.
35. Lu, Y., Wu, P., Ma, X., Yang, H., and Wu, Y., 2020. "Monitoring Seasonal and Diurnal Surface Urban Heat Islands Variations Using Landsat-scale Data in Hefei, China, 2000-2017", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 6410-6423.
36. Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., and Fung, J.C., 2011. "Improving the Wind Environment in High-density Cities by Understanding Urban Morphology and Surface Roughness: A Study in Hong Kong", *Landscape and Urban Planning*, 101(1): 59-74.

37. Ngarambe, J., Oh, J.W., Su, M.A., Santamouris, M., and Yun, G.Y., 2021. "Influences of Wind Speed, Sky Conditions, Land Use and Land Cover Characteristics on the Magnitude of the Urban Heat Island in Seoul: An Exploratory Analysis", *Sustainable Cities and Society*, 71: 102953.
38. Park, Y., Guldmann, J.M., and Liu, D., 2021. "Impacts of Tree and Building Shades on the Urban Heat Island: Combining Remote Sensing, 3D Digital City and Spatial Regression Approaches", *Computers, Environment and Urban Systems*, 88: 101655.
39. Ravestein, P., Van der Schrier, G., Haarsma, R., Scheele, R., and Van den Broek, M., 2018. "Vulnerability of European Intermittent Renewable Energy Supply to Climate Change and Climate Variability", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97: 497-508.
40. Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., and Assimakopoulos, D.N., 2001. "On the Impact of Urban Climate on the Energy Consumption of Buildings", *Solar Energy*, 70(3): 201-216.
41. Shi, Z., Yang, J., Wang, L., Lv, F., Wang, G., Xiao, X., and Xia, J., 2022. "Exploring Seasonal Diurnal Surface Temperature Variation in Cities Based on Ecstress Data: A Local Climate Zone Perspective", *Frontiers in Public Health*, 10: 1001344.
42. Shi, L., Kloog, I., Zanobetti, A., Liu, P., and Schwartz, J.D., 2015. "Impacts of Temperature and Its Variability on Mortality in New England", *Nature Climate Change*, 5(11): 988-991.
43. Siddiqui, A., Kushwaha, G., Nikam, B., Srivastav, S.K., Shelar, A., and Kumar, P., 2021. "Analysing the Day/Night Seasonal and Annual Changes and Trends in Land Surface Temperature and Surface Urban Heat Island Intensity (Suhii) for Indian Cities", *Sustainable Cities and Society*, 75: 103374.
44. Stewart, I.D. and Oke, T.R., 2012. "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12): 1879-1900.
45. Stjern, C.W., Samset, B.H., Boucher, O., Iversen, T., Lamarque, J.F., Myhre, G., Shindell, D., and Takemura, T., 2020. "How Aerosols and Greenhouse Gases Influence the Diurnal Temperature Range", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(21): 13467-13480.
46. Wang, Q., Wang, X., Zhou, Y., Liu, D., and Wang, H., 2022. "The Dominant Factors and Influence of Urban Characteristics on Land Surface Temperature Using Random Forest Algorithm", *Sustainable Cities and Society*, 79: 103722.
47. Wang, Q., Wang, X., Meng, Y., Zhou, Y., and Wang, H., 2023a. "Exploring the Impact of Urban Features on the Spatial Variation of Land Surface Temperature within the Diurnal Cycle", *Sustainable Cities and Society*, 91: 104432.
48. Wang, Y.R., Samset, B.H., Stordal, F., Bryn, A., and Hessen, D.O., 2023b. "Past and Future Trends of Diurnal Temperature Range and Their Correlation with Vegetation Assessed by MODIS and CMIP6", *Science of The Total Environment*, 904: 166727.
49. Wolf, K., Schneider, A., Breitner, S., von Klot, S., Meisinger, C., Cyrys, J., Hoyer, H., Wichmann, H., and Peters, A., 2009. "Air Temperature and the Occurrence of Myocardial Infarction in Augsburg, Germany", *Circulation*, 120(9): 735-742.
50. Yin, Y., He, L., Wennberg, P.O., and Frankenberg, C., 2023. "Unequal Exposure to Heatwaves in Los Angeles: Impact of Uneven Green Spaces", *Science Advances*, 9(17): eade8501.
51. Yuan, B., Zhou, L., Hu, F., and Zhang, Q., 2022. "Diurnal Dynamics of Heat Exposure in Xi'an: A Perspective from Local Climate Zone", *Building and Environment*, 222: 109400.
52. Yuan, C., Adelia, A.S., Mei, S., He, W., Li, X.X., and Norford, L., 2020. "Mitigating Intensity of Urban Heat Island by Better Understanding on Urban Morphology and Anthropogenic Heat Dispersion", *Building and Environment*, 176: 106876.
53. Zanobetti, A., O'Neill, M.S., Gronlund, C.J., and Schwartz, J.D., 2012. "Summer Temperature Variability and Long-term Survival among Elderly People with Chronic Disease", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(17): 6608-6613.
54. Zhang, Y., Peng, M., Wang, L., and Yu, C., 2018. "Association of Diurnal Temperature Range with Daily Mortality in England and Wales: A Nationwide Time-series Study", *Science of the Total Environment*, 619-620: 291-300.
55. Zhao, Q., Li, S., Coelho, M.S., Saldiva, P.H., Hu, K., Huxley, R.R., Abramson, M.J., and Guo, Y., 2019. "Temperature Variability and Hospitalization for Ischaemic Heart Disease in Brazil: A Nationwide Case-crossover Study during 2000-2015", *Science of the Total Environment*, 664: 707-712.
56. Zhu, Y., Myint, S.W., Schaffer-Smith, D., Muenich, R.L., Tong, D., and Li, Y., 2022. "Formulating Operational Mitigation Options and Examining Intra-urban Social Inequality Using Evidence-Based Urban Warming Effects", *Frontiers in Environmental Science*, 9: 795474.

Date Received	2024-07-03
Reviewed(1 st)	2024-09-28
Date Revised	2024-10-31
Reviewed(2 nd)	2024-11-15
Date Revised	2024-12-12
Reviewed(3 rd)	2024-12-26
Date Accepted	2024-12-26
Final Received	2025-01-14