

서울시의 여름철 분위별 일 최고기온과 토지피복과의 관계*

노윤진**

Land Cover-Temperature Relationships Across Quantiles of Summer Daily Maximum Temperature in Seoul*

Yoonjin Ro**

요약 : 본 연구는 서울시를 대상으로 여름철 일 최고기온 분포의 분위별 조건에서 토지피복 유형과 기온 간의 조건부 관련성이 어떠한 양상으로 나타나는지를 분석하였다. 2023~2025년 S-DoT(Smart Seoul Data of Things) 관측자료와 각 관측지점 주변 200m 버퍼 내 토지피복 비율을 결합하고, 일 최고기온 분포의 50%, 75%, 90%, 95% 분위에 대한 분위 회귀분석을 수행하였다. 분석 결과, 불투수면은 모든 분위에서 일 최고기온과 유의한 양(+)의 관련성을 나타냈으며 계수 점추정치는 50%와 75% 분위보다 90%와 95% 분위에서 다소 크게 나타났다. 수목은 모든 분위에서 유의한 음(-)의 관련성을 나타냈으며, 계수 점추정치의 절댓값은 상위 분위에서 작게 나타났다. 수계는 전 분위 음(-)의 관련성을 보였으나 통계적 유의성은 확인되지 않았고, 초지는 전 분위에서 유의한 양(+)의 관련성을 나타냈다. 이러한 결과는 도시 열환경 관리에서 평균적인 기온 조건뿐만 아니라 일 최고기온 분포의 분위에 따라 도시의 다양한 토지피복과 기온 간의 관련성이 상이하게 나타날 수 있음을 함께 고려할 필요성을 시사한다.

주요어 : 일 최고기온, 토지피복, 분위 회귀, 극한 고온, 도시 열환경

Abstract : This study examines how conditional relationships between urban land cover types and summer daily maximum temperature vary across temperature quantiles in Seoul. Using three years (2023~2025) of S-DoT (Smart Seoul Data of Things) observations and land cover proportions within 200m buffers around monitoring sites, multivariable quantile regression models were estimated for the 50th, 75th, 90th, and 95th quantiles. Impervious surfaces were significantly and positively associated with daily maximum temperature across all quantiles, with coefficient estimates somewhat larger at the 90th and 95th quantiles than at the 50th and 75th quantiles. Tree cover was significantly and negatively associated across all quantiles, although the absolute magnitude of the coefficient estimates was smaller at the upper quantiles. Water areas showed negative associations across all quantiles, but none were statistically significant, while grass showed significant positive associations across all quantiles. These findings suggest that urban heat management should consider not only average temperature conditions, but also how associations between land cover types and daily maximum temperature differ across quantiles of summer daily maximum temperature.

Key Words : Daily maximum temperature, Land cover, Quantile regression, Extreme heat, Urban thermal environment

I. 서론

기후변화로 인해 전 세계적으로 폭염의 발생 빈도와 강

도가 증가하고 있으며, 한국도 예외가 아니다. 기상청 자료에 따르면, 서울시의 연평균 폭염일수(일 최고기온이 33°C 이상인 날의 수)는 1990년대 8.3일에서 2010년대

*이 연구는 한국연구재단 지원연구와 연계하여 수행되었음(NRF-2024S1A5B5A16021467).

**고려대학교 미래국토연구소 연구교수(Research Professor, Institute of Future Land, Korea University, yjnoh1@korea.ac.kr)

11.4일, 2020년대 13.3일로 증가하였으며(기상청a), 여름철 고온이 지속되는 기간이 길어지고 있다(최우석, 2019). 또한 2010년대 후반부터는 폭염으로 인한 건강 피해가 늘어나 온열질환 발생률 및 사망자수가 증가하는 양상을 보이고 있다(허보영·허원호, 2025). 그런데, 이러한 폭염 피해는 여름철의 평균적 고온 조건보다 기온 분포의 상위 구간, 즉 극한 고온 조건에서 집중되는 경향이 있다(Anderson and Bell, 2009; Kephart *et al.*, 2022). 실제로 기온과 공중보건에 관한 연구들은 기온이 특정 임계값을 넘어서면 사망 위험이 급증함을 확인했고(Calleja-Aguis *et al.*, 2021), 이는 공중보건 측면에서도 극한 고온 조건에서의 열환경 관리가 매우 중요함을 시사한다. 특히, 도시 지역에서는 전 세계적으로 일반적인 열섬효과보다 극한 열섬효과의 강도가 더 빠르게 증가하고 있어(Mentaschi *et al.*, 2022), 극한 열환경에서 토지피복의 역할에 대한 이해가 시급하다. 나아가, 고온에 따른 건강 피해는 도시의 토지피복 환경, 특히 녹지 수준에 따라 서로 다르게 나타날 수 있다. 서울시를 대상으로 한 연구에서 Son *et al.* (2016)은 도시 녹지가 적은 지역에서 고온에 따른 사망위험 증가가 상대적으로 크게 나타남을 확인하였으며, 24개 국가를 대상으로 한 연구에서도 녹지 수준이 높은 도시에서 고온 관련 사망위험이 상대적으로 낮게 나타나는 경향을 보고한 바 있다(Choi *et al.*, 2022). 이는 극한 고온에 따른 피해를 이해하고 대응하기 위해서는 도시의 토지피복 특성이 고온 환경과 어떠한 관계를 갖는지 함께 살펴볼 필요가 있음을 보여준다.

도시의 열환경은 토지피복 특성에 따라 공간적으로 크게 달라진다는 국내외 여러 연구들이 보고되었다. 일반적으로 녹지와 수계는 증발산과 차광 효과를 통해 기온을 저감하고, 건물 등 불투수면은 열의 흡수 및 방출을 통해 기온 상승에 기여하는 것으로 알려져 있다(Peng *et al.*, 2020; Joshi *et al.*, 2024). 국내에서도 녹지와 기온의 관계를 다룬 연구가 다양하게 이루어져 왔는데, 녹지가 인접 지역까지 냉각 효과를 확산시킨다는 연구(명수정, 2015), 원격탐사 기반으로 녹지의 주·야간 냉각 효과를 확인한 연구(권혁수·김장수, 2023) 등이 있으며, 기상 조건에 따라 녹지와 해발고도가 열섬 강도를 완화하는 데 기여함을 밝힌 연구도 존재한다(김용진 등, 2011). 서울시의 위성 영상을 분석한 연구에 따르면, 도심 내 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)가 0.1 증가할 때 지표 온도는 약 0.9°C 하강하며 남산과 같이 식

생이 풍부한 지역은 주변 도심보다 지표 온도가 낮게 형성되는 도시 냉섬의 역할을 수행함도 확인된 바 있다(최광용, 2010). 녹지는 그 유형에 따라 기온과의 관계가 다르게 나타날 수 있다. 수목은 차광과 활발한 증발산을 통해 강한 냉각 효과를 보일 뿐 아니라 주변 인공 피복의 가열도 완화한다는 연구가 있는 반면(김진형 등, 2020; Armson *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2025), 고온·건조 조건에서는 초지가 더 큰 증발산 효과를 보여 기온 저감에 기여할 수 있다는 상반된 결과도 존재한다(Litvak *et al.*, 2014; Gómez-Navarro *et al.*, 2021). 도시의 수공간 역시 기온 형성에 기여하는데, 국내에서는 도시 하천의 기온 저감 효과를 확인한 연구(이규석 등, 2010; 정우식·도우근, 2012; 이미희 등, 2019)가 다수 존재한다. 이렇듯 수계는 일반적으로 도시 열섬현상 완화에 도움이 되는 것으로 알려져 있으나(Hu *et al.*, 2023), 비열이 큰 물은 낮 동안 흡수한 열을 머금고 있는 경향이 있어 낮과 밤에 기온에 미치는 영향에 차이가 존재한다(Yao *et al.*, 2023). 한편, 건물 및 인공 구조물은 인공열 방출과 열 축적을 통해 여름철 기온 상승에 기여하는 주요 요인으로 지적된다(문다솜 등, 2019; 백선옥 등, 2022; 루지에치웅, 2024). 하지만, 건물이나 인공 구조물은 모양이나 배치에 따라 그 영향이 다르게 나타날 수 있다. 예를 들어, 건물과 같은 구조물의 경우 표면적이 증가함에 따라 도시 기온을 상승시키는 경향이 강해지지만(전범석·김학열, 2010), 도로와 같이 천공개폐율, 즉 지표에서 하늘을 바라볼 때 시간적으로 열려 있는 하늘의 비율이 큰 경우에는 오히려 기온 저감 효과에 기여하기도 한다(하재현 등, 2015).

이처럼 토지피복과 기온의 관계에 대한 이해는 도시 열환경 개선 전략 수립의 기초가 되며, 실제로 이에 기반한 도시 녹지 확충, 불투수면 저감, 수변 공간 조성 등의 정책이 활발히 추진되고 있다(김운수, 2007; Wiseman, 2024). 그런데 이때 간과하면 안 되는 점은 토지피복 요소와 기온 간의 관계가 기온 분포 구간에 따라 다르게 나타날 수 있다는 점이다. 일부 선행연구는 낮은 기온보다 높은 기온 조건에서 녹지의 냉각 효과가 약화되거나(Gao *et al.*, 2024), 불투수면의 가열 효과가 증폭될 수 있음을 시사하였다(Liu *et al.*, 2023). 이러한 맥락에서, 기온 분포 구간별 토지피복의 영향을 분석하려는 시도가 국외에서 증가하고 있으며, 분위수 회귀분석이 그러한 분석을 위한 방법론 중 하나로 활용되고 있다. 분위수 회귀분석은 평균적 관계에 국한되지 않고 기온 분포의 각 분위에서 설명

변수와 종속변수 간의 조건부 관계를 추정할 수 있어, 극한 조건에서의 특성을 포착하는 데 적합하다(Jia *et al.*, 2019; Tinoy *et al.*, 2019). 그 사례로 Zhang *et al.*(2024)은 낮은 기온 구간에서 토지이용 변화에 따른 기온 변화가 평균 대비 크게 나타남을 보였고, Liu *et al.*(2025)은 기온 분포 구간에 따라 녹지의 영향이 달라짐을 밝혔으며, Gu and You(2022)는 높은 분위의 기온 구간에서 녹지의 영향력이 변화하거나 공간적 의존성이 약화되는 양상을 보고한 바 있다. 하지만, 국내의 경우 여름철 평균 기온이나 특정 폭염 사례에 초점을 둔 연구가 주를 이루고 있으며(권이영 등, 2019; 김인혜 등, 2021; 조서림 등, 2023), 기온 분포의 서로 다른 구간에서 토지피복과 기온 간의 관계가 어떠한 양상으로 나타나는지를 체계적으로 검토한 연구는 매우 드문 편이다. 이와 같은 연구 공백을 고려할 때, 폭염 피해가 집중되는 기온 분포 상위 구간에서 각 토지피복 요소와 기온 간의 관계가 어떻게 나타나는지를 검토하는 것은 도시 열환경 관리 전략을 수립하는 데 필수적이다.

이에 본 연구는 급격한 도시화를 겪은 국내 최대 도시이자 고해상도의 기온 관측자료를 제공하는 서울시를 대상으로 여름철 일 최고기온 분포의 분위별 조건(50%, 75%, 90%, 95% 분위)에서 토지피복과 기온 간의 관계를 살펴보고자 한다. 본 연구는 기온 분포의 변화를 일정한 분위 간격으로 추적하기보다, 중위 수준의 기온 조건과 상위 고온 조건에서 토지피복과 기온 간의 관계가 각각 어떠한 양상으로 나타나는지를 살펴보는 데 초점을 두었다. 이에 50% 분위는 일 최고기온 분포의 중위 수준을, 75% 분위는 상위 수준을, 90%와 95% 분위는 보다 극단적인 상위 고온 조건을 살펴보기 위한 분위로 선정하였다. 구체적으로, 분위 회귀분석에 기반하여 여름철 고온의 기온 분위가 높아짐에 따라 불투수면과 일 최고기온 간의 양(+)의 관련성이 어떻게 나타나는지, 녹지(초지, 수목)와 일 최고기온 간의 음(-)의 관련성이 상위 고온 조건에서도 유지되는지, 그리고 수계와 일 최고기온 간의 관계가 분위별로 어떻게 나타나는지를 살펴보고자 한다. 기온 분석은 서울시에서 구축·운영하는 도시데이터 센서(Smart Seoul Data of Things, S-DoT) 관측자료를 활용하며, 각 관측지점 주변의 토지피복 자료와 결합해 각 분위에서 토지피복 유형과 기온 간의 관계가 어떠한 양상으로 나타나는지를 분석한다.

II. 연구 자료 및 방법

1. 연구 대상 지역 및 자료

본 연구는 서울시를 대상으로 한다. 서울시는 2026년 기준 인구 약 930만 명이 거주하는 국내 최대 도시로(국가통계포털, 2026), 1960년대 이후 급격한 도시화를 겪으며 녹지 감소와 불투수면 증가 등 토지피복 변화가 빠르게 진행되어 왔다. 서울시의 불투수면적은 1960년대 10% 미만에서 2024년 약 53%로 증가하였으며(서울솔루션, 2015년 4월 10일자; 기후에너지환경 통계포털), 도심부는 75% 이상, 산지 인접 지역은 약 36.6% 수준으로 공간적으로 큰 차이를 보인다. 기후 환경적으로 서울시는 외곽을 산지가 둘러싼 분지 지형적 특성을 지녀 여름철 열축적이 두드러지며, 최근 폭염 증가로 도시 열환경 관리의 필요성이 커지고 있다(조항문 등, 2017).

1) 기온자료

본 연구에서는 서울시가 열린데이터광장을 통해 제공하는 S-DoT 환경정보를 활용하였다(서울 열린데이터광장a). S-DoT는 서울시 전역에 설치된 1,170대(2026년 3월 기준)의 센서에서 기온, 습도 등의 환경정보를 1시간 단위로 측정함으로써 도시 전역에 대한 고해상도의 기온 관측자료 확보를 가능하게 한다. 해당 자료는 지표로부터 약 3미터 내의 높이에서 정보를 관측하며(박해경, 2021), 관측기는 도로변 전봇대 등 도시 내 다양한 위치에 설치되어 있어 기상청 산하 관측소에 비해 도시 피복 환경을 더 직접적으로 반영한 기온을 관측할 수 있다.

분석 자료의 기간은 2023~2025년 3년 동안의 여름철(6~9월)로 설정하였다. S-DoT 자료는 2020년부터 열람이 가능하나, 초기 연도(2020~2022년)에는 현재 대비 관측지점 수가 약 250개 적고 결측률이 높아 자료의 시공간적 일관성을 확보하기 어려웠다. 이에 관측지점 수와 자료 품질이 안정화된 2023년 이후의 자료를 사용하였다. 한국의 여름철은 6~8월을 포함하는 것이 일반적이나 최근 여름의 장기화와 9월 폭염 발생 증가 등의 상황을(기상청b; 국가기상위성센터) 고려해 6~9월로 설정하였다. 실제로, 최광용·권원태(2006)에 따르면, 1990년대 이후 온난화의 영향으로 여름철 개시일은 빨라지고 종료일(가을철 개시일)은 늦어지면서 여름의 지속 기간이 전반적으로 길어지는 추세에 있다. 시간 단위로 관측된 기온 자

로 중 특정 일자의 관측값이 전부 결측인 지점은 제외하였다. 또한 여름철 일 최고기온으로 보기 어려운 극단적 저온값을 점검하기 위해 기상자료개방포털에서 제공하는 서울시 내 위치한 기상관측지점의 1991~2025년 6~9월 일최저기온 분포를 참고하였다. 해당 기간 기록된 6~9월 일최저기온의 최저값은 15.1°C였으므로, 본 연구에서는 S-DoT 관측자료에서 산출된 일 최고기온이 이보다 낮게 나타난 경우는 기기 이상 또는 결측 처리 오류 등의 가능성이 높은 값으로 판단하여 제외하였다. 최종적으로 1,111개 관측지점에 대한 일 최고기온 관측치를 확보하였다. 그림 1은 1,111개 S-DoT의 위치를 보여준다.

2) 토지피복 및 공간 자료

토지피복자료는 환경공간정보서비스에서 제공하는 2025년 세분류 토지피복지도를 활용하였다. 서울시를 포함하는 도엽을 다운로드하여 ArcGIS Pro 소프트웨어에서 도엽을 하나의 파일로 병합한 후, 클립(Clip) 기능을 사용하여 서울시 행정경계에 해당하는 토지피복도 레이어를 구축하였다(환경공간정보서비스). 세분류 토지피복지도는

총 41개 범례로 구성되며, 이 중 서울시에서 확인되는 35개 세분류 유형 중 도로 및 교통시설(예: 철도)과 나지 관련 범주(강기슭, 암벽·바위, 기타나지 등)를 제외한 나머지 유형을 불투수면, 초지, 수목, 수계의 총 네 유형으로 구분하였다. 불투수면은 주거시설, 공업시설, 상업·업무시설 등 시가화건조지역 가운데 도로 및 교통시설(예: 철도)을 제외한 유형으로 구성하였고, 수목은 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 초지는 자연초지, 기타초지 및 일부 재배지 유형 등을, 수계는 하천, 호소, 내륙습지를 포함하였다. 구체적인 재분류 기준은 표 1과 같다. 한편, 도로는 높은 천공개폐율과 아스팔트 피복 특유의 높은 열흡수율, 차량 통행에 의한 인위적 열 방출 등 상이한 열환경적 특성을 가지고(Zhao *et al.*, 2025) 나지(예: 강기슭, 암벽·바위, 기타나지 등)는 여러 지표 특성이 혼재하여 일관된 토지피복 유형으로 분류하는 데 어려움이 있어(Delaney *et al.*, 2025) 독립변수에서 제외하였다.

S-DoT 관측지점 주변의 국지적 토지피복 환경을 파악하기 위해, 관측지점을 중심으로 반경 200m의 버퍼를 설정하고, 해당 버퍼 내 토지피복 유형별 면적 비율을 산출

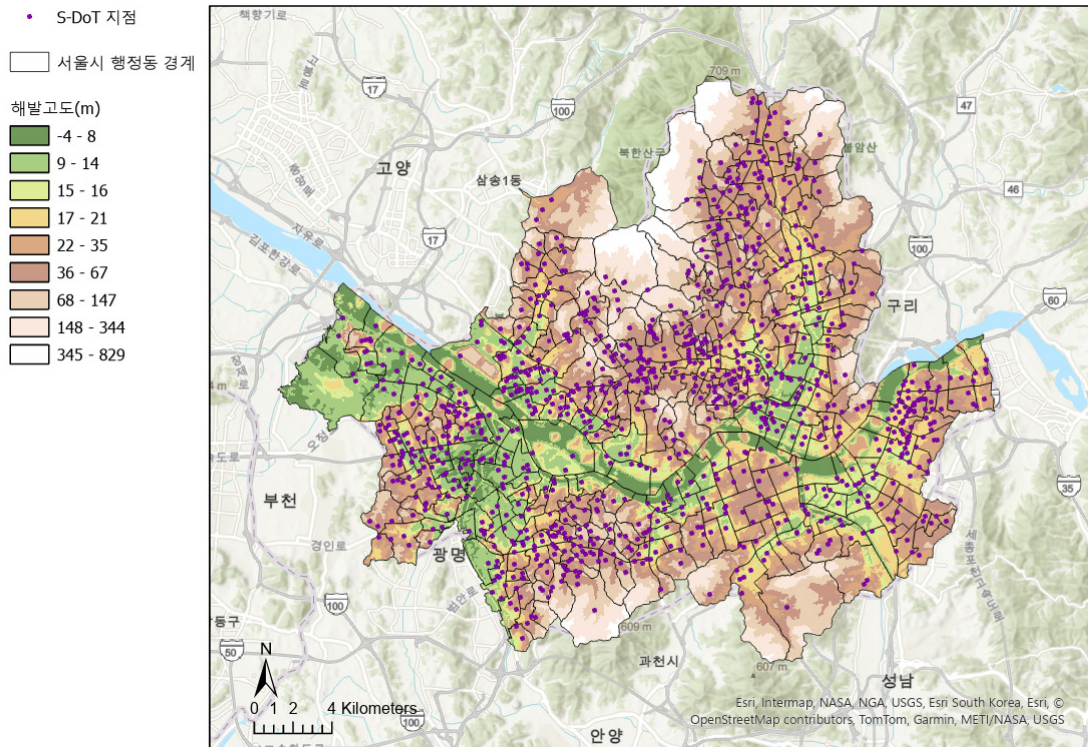


그림 1. 연구 대상 지역 및 분석에 사용된 1,111개 S-DoT 환경정보 관측지점 위치

표 1. 분석에 포함된 토지피복 유형의 재분류 기준

토지피복 변수	환경공간정보서비스 토지피복자료의 세분류명
불투수면	단독주거시설, 공동주거시설, 공업시설, 상업·업무시설, 혼합지역, 문화·체육·휴양시설, 환경기초시설, 교육·행정시설, 기타 공공시설
수목	활엽수림, 침엽수림, 혼효림
초지	자연초지, 기타초지, 경지정리가 안 된 논, 경지정리가 안 된 밭, 시설재배지, 과수원, 목장·양식장, 기타재배지, 골프장, 묘지
수계	하천, 호소, 내륙습지

하였다. 버퍼 반경은 도시 기온과 토지피복의 관계 분석에서 도시 지역의 기온과 토지이용 관계에 대한 버퍼 기반 분석을 수행한 선행연구(Yan *et al.*, 2014; Ghosh and Das, 2018; Foissard *et al.*, 2019; 권혁수·김장수, 2022)를 참고하여 200m로 설정하였다. 이에 더하여, 해발고도 자료는 서울시 열린데이터광장에서 제공하는 2025년도 표고 자료를 활용하여 각 관측지점 주변 버퍼의 평균 해발고도를 산출하였으며(서울 열린데이터광장b), 이는 지형적 조건에 따른 기온 차이를 통제하기 위해 모형에 포함하였다.

2. 분석 방법

본 연구는 여름철 일 최고기온 분포의 분위별 조건에 따라 관측지점 주변 토지피복 변수와 기온 간의 관계가 각 분위에서 어떠한 양상으로 나타나는지를 파악하기 위해 분위 회귀분석을 수행하였다. 일반적인 평균회귀모형은 종속변수의 조건부 평균에서의 관계를 추정하는 데 초점을 두므로, 고온 분포의 상위 구간에서 나타나는 토지피복 변수와 기온 간 관계를 파악하는 데 한계가 있다. 반면 분위 회귀분석은 종속변수 분포의 특정 분위에서 설명변수와 종속변수 간의 조건부 관계를 추정할 수 있어, 동일한 설명변수에 대한 회귀계수가 종속변수의 분위에 따라 어떻게 나타나는지를 살펴볼 수 있다(Gao and Franzke, 2017; Gu and You, 2022; Uddin *et al.*, 2022). 이에 본 연구는 50%, 75%, 90%, 95% 분위에서 각각 분위 회귀모형을 추정하여, 중위 수준(50%), 상위 수준(75%), 그리고 보다 극단적인 상위 고온 조건(90%, 95%)에서 토지피복 변수와 일 최고기온 간의 조건부 관련성이 각각 어떠한 양상으로 나타나는지를 살펴보았다. 토지피복 변수를 고려함에 있어, 단일변수 기반 분석은 각 토지피복 유형과 일 최고기온 간 관계를 직관적으로 보여줄 수 있으나, 본 연구에서는 동일한 관측지점 주변에 여러 토지피

복 유형이 함께 분포한다는 점을 고려하여, 다른 토지피복 변수와 고도를 함께 고려한 다중변수 분위 회귀모형을 사용하였다.

분석 모형의 종속변수는 개별 관측지점의 여름철(6~9월) 일 최고기온이며, 독립변수는 각 관측지점 반경 200m 버퍼 내 초지 비율, 수목 비율, 수계 비율, 그리고 불투수면 비율(도로 제외)이며, 통제 변수로 해발고도를 포함하였다(식 1). 본 연구의 분위 회귀계수는 각 토지피복 유형이 단독으로 일 최고기온에 미치는 절대적 효과를 의미하기보다는, 다른 토지피복 변수와 고도가 함께 고려된 상태에서 해당 토지피복 비율이 각 분위의 일 최고기온과 어떠한 관계를 갖는지를 보여준다. 또한 본 연구에서는 분위 간 회귀계수 차이에 대한 별도의 통계적 검정을 수행하지는 않았으므로, 분위별 계수 크기의 차이를 통계적으로 유의한 차이로 해석하지 않았다. 대신 각 분위에서 추정된 계수의 방향과 크기, 통계적 유의성을 바탕으로 동일한 모형 내에서 토지피복 변수와 일 최고기온 간의 조건부 관련성이 각 기온 분위에서 어떠한 양상으로 나타나는지를 기술하였다.

$$Q_{T_{max},i}(\tau) = \beta_0(\tau) + \beta_1(\tau)\text{초지}_i + \beta_2(\tau)\text{수목}_i + \beta_3(\tau)\text{수계}_i + \beta_4(\tau)\text{불투수면}_i + \beta_5(\tau)\text{고도}_i + \epsilon_i(\tau) \quad (\text{식 1})$$

위 식에서 $Q_{T_{max},i}(\tau)$ 는 관측지점 i 에서 관측된 여름철(6~9월) 일 최고기온 분포의 τ 분위수($\tau = 0.50, 0.75, 0.90, 0.95$)를 의미하며, 추정된 계수는 해당 분위 수준에서 토지피복 유형별 비율과 일 최고기온 간 관계를 나타낸다. 토지피복 변수는 각 관측지점의 200m 버퍼 내 면적 비율(%)로 모형에 투입되었기에, 각 토지피복 변수의 회귀계수는 다른 토지피복 변수와 고도가 일정하다는 조건에서 해당 토지피복 비율이 1%p 증가할 때 일 최고기온

의 해당 조건부 분위수가 변화하는 정도를 나타낸다. 본 연구에서는 결과의 해석을 보다 용이하게 하기 위해 추정된 회귀계수에 10을 곱하여 토지피복 비율 10%p 증가당 일 최고기온 변화량(°C)으로 환산하여 제시하였다. 예를 들어, 수목 비율의 50% 분위 회귀계수가 1%p 증가당 -0.0175°C인 경우 이를 10%p 증가당 -0.175°C로 제시하였다. 각 계수는 다른 독립변수들이 함께 고려된 상태에서 나타나는 조건부 관련성을 의미하며, 해당 토지피복 유형의 독립적인 인과효과를 의미하지는 않는다.

본 연구의 기온자료는 동일한 S-DoT 관측지점에서 여러 날짜에 걸쳐 반복적으로 관측된 자료이므로, 같은 관측지점 내 관측값들 사이에는 오차항의 상관가능성이 존재한다. 이에 관측지점을 군집 단위로 설정한 군집-강건(cluster-robust) 표준오차를 부트스트랩 방식(200회 반복)으로 추정하였다. 이를 통해 개별 관측치 수준의 미세한 기온 변동성을 포착하면서도 동일 관측지점 내 관측치 간의 통계적 독립성 문제를 보완하고자 하였다.

III. 연구 결과 및 고찰

분석에 최종 활용된 자료는 2023~2025년 여름철(6~9월) 기간 동안 1,111개 S-DoT 관측지점에서 수집된 일 최고기온 관측치로 구성된다. 이들 일 최고기온 관측치의 평균은 32.0°C(표준편차 4.0°C)로 나타났으며, 최솟값은 15.1°C, 최댓값은 57.7°C였다. 분위별 기온 분포를 살펴보면, 중위값(50% 분위)은 32.4°C, 75% 분위는 34.9°C, 90% 분위는 36.9°C, 95% 분위는 38.0°C로 나타났다. 그림 2는 관측지점별 평균 일 최고기온의 분포를 보여준다. 연도별로는 2024년의 평균 일 최고기온이 32.66°C로 가장

높았고, 2023년은 31.16°C, 2025년은 32.15°C를 기록하였다.

관측지점 주변 200m 버퍼 내 토지피복 구성을 살펴보면, 분석에 포함된 네 가지 토지피복 유형 중 불투수면 비율이 평균 30.9%로 가장 높았고, 초지 비율 10.1%, 수목 비율 5.15%, 수계 비율 1.11% 순으로 나타났다. 관측지점 주변 버퍼의 평균 해발고도는 31.4m(표준편차 23.6m)였으며, 최저 4.8m에서 최고 205.3m의 범위를 보였다. 다만, 한 가지 명시하고자 하는 점은 이 기술통계값들은 본 연구에서 설정한 분석 기간인 2023~2025년의 6~9월을 기준으로 산출된 값이며, 여름철을 6~8월 또는 폭염기 중심으로 달리 정의하거나 햇수를 장기간으로 확장하는 경우 기온 분포는 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해당 값들을 서울시 여름철 기온의 절대적 대표값이라기보다, 본 분석자료의 분포 특성을 설명하는 기술통계로 설

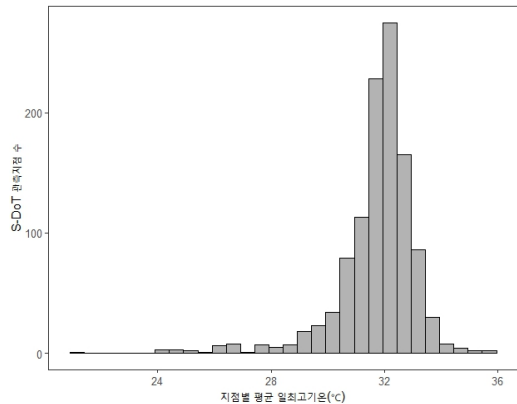


그림 2 S-DoT 관측지점별 평균 일 최고기온의 분포도(2023~2025년 6~9월 자료)

표 2 본 연구의 다중변수 분위 회귀분석에 사용된 변수의 기술통계

변수	통계	평균	표준편차	최소값	중위값	최대값
일 최고기온 (°C)		32.0	4.0	15.1	32.4	57.7
초지 비율 (%)		10.1	9.6	0.0	7.2	71.6
수목 비율 (%)		5.1	11.9	0.0	0.0	100
수계 비율 (%)		1.1	4.1	0.0	0.0	38.5
불투수면 비율 (%)		30.9	11.3	0.0	32.3	57.8
S-DoT 관측지점 주변 200m 버퍼의 평균 해발고도 (m)		31.4	23.6	4.8	24.8	205.3

* 초지, 수목, 수계 및 불투수면 비율은 각 S-DoT 관측지점을 중심으로 설정한 반경 200m 버퍼 내 해당 토지피복 유형의 면적 비율을 의미함.

명하였다. 표 2는 분석 변수에 대한 기술통계를 보여준다.

관측지점 주변 200m 버퍼 내 토지피복 비율과 여름철 일 최고기온 간의 분위별 관계를 분석한 결과는 표 3과 같다. 각 분위에서 추정된 계수의 방향과 크기를 살펴보면 토지피복 유형별로 서로 다른 양상이 나타났다. 불투수면은 모든 분위에서 통계적으로 유의한 양(+)의 계수를 나타냈으며, 수목은 모든 분위에서 유의한 음(-)의 계수

를 나타냈으나 상위 분위로 갈수록 계수 점추정치의 절댓값이 감소하였다. 초지는 모든 분위에서 통계적으로 유의한 양(+)의 계수를 나타낸 반면, 수계는 모든 분위에서 음(-)의 계수를 나타냈으나 통계적 유의성은 확인되지 않았다. 한편 통제 변수로 포함한 관측지점 주변 버퍼의 평균 해발고도는 전 분위에서 양(+)의 계수를 나타냈으나, 통계적 유의성은 확인되지 않았다. 그림 3은 각 토지피복

표 3. 일 최고기온에 대한 다중변수 분위 회귀분석 결과

분위	변수	상수	초지	수목	수계	불투수면	관측지점 주변 평균 해발고도 (통제 변수)
$\tau = 0.50$		31.484*** (0.206)	0.125** (0.046)	-0.175*** (0.035)	-0.115 (0.085)	0.277*** (0.050)	0.001 (0.001)
$\tau = 0.75$		34.075*** (0.209)	0.097* (0.048)	-0.167*** (0.037)	-0.081 (0.091)	0.270*** (0.052)	0.000 (0.001)
$\tau = 0.90$		35.750*** (0.237)	0.134* (0.054)	-0.138** (0.043)	-0.030 (0.090)	0.314*** (0.058)	0.001 (0.002)
$\tau = 0.95$		36.807*** (0.255)	0.138* (0.056)	-0.113* (0.046)	-0.040 (0.107)	0.307*** (0.063)	0.003 (0.002)

* 괄호 안은 군집-강건 표준오차임. *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

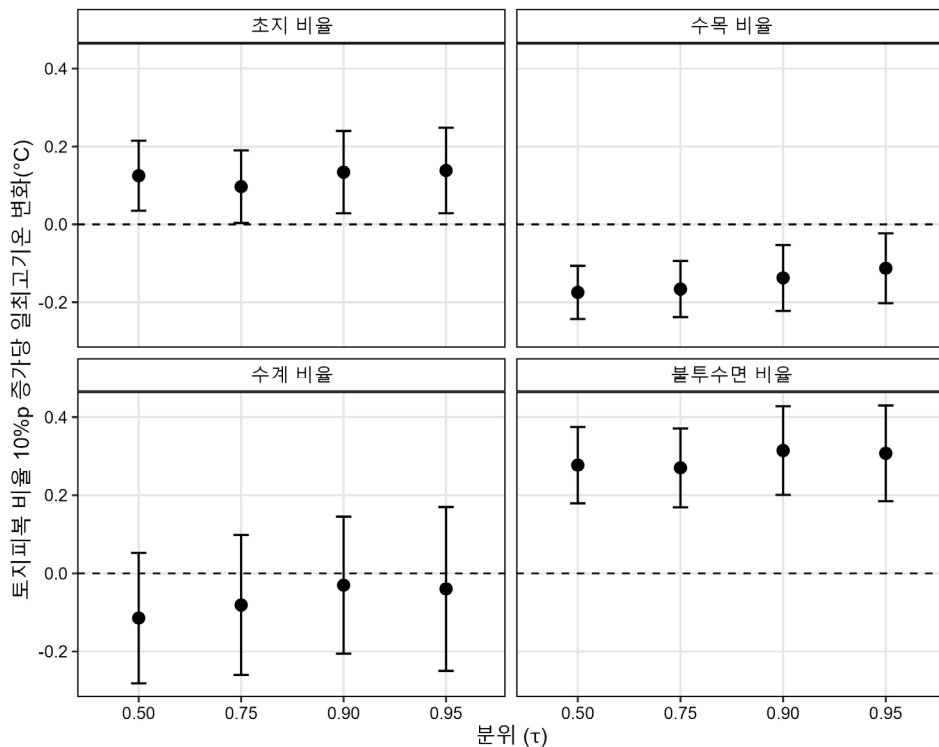


그림 3. 토지피복 변수별 분위 회귀계수 추정치와 95% 신뢰구간. 점은 각 분위의 추정계수를, 세로선은 군집-강건 표준오차($R=200$)를 이용해 산출한 95% 신뢰구간을 나타냄.

변수의 분위별 회귀계수 추정치와 95% 신뢰구간을 시각적으로 제시한 것이다. 본 연구에서는 이를 토지피복 변수 간 계수 크기를 직접 비교하기보다는, 각 토지피복 변수의 계수 추정치가 기온 분위에 따라 어떠한 양상으로 나타나는지를 살펴보는 데 활용하고자 하였다.

1. 녹지와 일 최고기온의 관계

1) 초지

초지는 모든 분위에서 통계적으로 유의한 양(+)의 계수를 나타냈다(표 3, 그림 3). 계수는 50% 분위에서 0.125, 75% 분위에서 0.097, 90% 분위에서 0.134, 95% 분위에서 0.138로 나타났다. 그림 3에서 계수 점추정치는 75% 분위에서 다소 낮아진 후 상위 분위에서 다시 증가하였으나 분위에 따른 일관된 증가 또는 감소 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 한편, 본문에 포함하지는 않았으나 다중 분위 회귀분석의 결과를 보완적으로 확인하기 위해 변수별 단일 분위 회귀분석을 별도로 수행한 결과, 초지 비율만을 투입하고 고도를 통제한 분석에서는 음(-)의 계수가 확인되어, 다른 토지피복 변수를 포함하지 않은 경우와 수목·불투수면·수계 등을 함께 고려한 경우 초지와 일 최고기온 간의 조건부 관련성의 방향과 크기가 다르게 나타날 수 있음을 보여준다. 이는 초지 비율이 다른 토지피복 변수들과 함께 고려될 경우, 초지와 일 최고기온 간의 단순한 음(-)의 관련성이 약화되거나 방향이 달라질 수 있음을 보여준다. 관련 사례 연구로 Armson *et al.* (2012)는 같은 녹지라도 초지의 기온 저감 효과가 수목에 비해 제한적이라 밝힌 바 있다. 또한, 본 연구의 분위 회귀계수는 다른 토지피복 변수와 고도를 함께 고려한 상태에서의 조건부 관련성을 의미하므로, 초지 자체가 기온 상승을 유발한다고 해석하는 데에는 주의가 필요하다. 이러한 점에서 본 연구 결과는, 열환경 관리를 위한 초지의 역할을 단정하기보다는 초지의 유형, 규모, 주변 토지피복과의 조합이 고려되어야 함을 시사한다(Kraemer and Kabisch, 2022).

2) 수목

수목은 모든 분위에서 통계적으로 유의한 음(-)의 계수를 나타냈다(표 3, 그림 3). 계수는 50% 분위에서 -0.175 ($p<0.001$), 75% 분위에서 -0.167($p<0.001$), 90% 분위에서 -0.138($p<0.01$), 95% 분위에서 -0.113($p<0.05$)로, 다

른 토지피복 변수와 고도가 동일하다는 조건에서 수목 비율이 10%p 높은 지역은 그렇지 않은 지역 대비 일 최고기온이 약 0.11~0.18°C 낮게 나타나는 관련성을 의미한다. 이러한 양상은 수목의 증발산 작용과 차광 효과가 주변 지역의 기온을 저감시켜 도시 열환경 완화에 기여한다는 선행연구(Speak *et al.*, 2020; Shaamala *et al.*, 2024)와 부합한다. 한편, 그림 3의 계수 점추정치를 살펴보면 50%와 75% 분위에서는 유사한 수준을 보였으나, 90% 분위 이상에서 계수의 절댓값이 감소하여 95% 분위에서의 계수 절댓값은 50% 분위 대비 약 65% 수준으로, 상위 분위에서 수목 비율과 일 최고기온 간 음(-)의 관련성 크기가 조금 작아지는 양상이 나타났다. 이렇게 극한 고온 조건에서 계수의 절댓값이 감소하는 양상은 주목할 만한데, 이는 극한 고온 조건에서 토양수분, 관수 여부, 대기 건조도 등에 따라 수목의 증산 작용이 제한될 수 있음을 보고한 선행연구와 관련하여 해석해 볼 수 있다(Meili *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2024). 더하여, 극한 고온 시에는 대기 중에 이미 존재하는 열과 지표에서 방출되는 열이 수목의 차광 효과를 일정 부분 상쇄할 수 있다는 점도 이러한 경향에 영향을 미쳤을 가능성이 있다(Li *et al.*, 2024). 따라서 폭염 대응 전략 수립 시 수목 면적의 확대와 함께, 극한 고온기에도 증발산 작용이 유지될 수 있는 관수 시스템 등 환경 조성이 중요할 것이다.

2. 수계와 일 최고기온의 관계

수계의 계수는 모든 분위에서 음(-)의 값을 나타내어 수계 비율이 높은 지역의 기온이 상대적으로 낮은 경향을 보였다(표 3, 그림 3). 이는 수계가 도시 열환경 완화에 기여한다는 기존 연구와 부분적으로 부합한다(Solcerova *et al.*, 2019; Ampatzidis and Kershaw, 2020). 하지만, 모든 분위에서 통계적 유의성은 확인되지 않았으며, 계수는 50% 분위에서 -0.115, 75% 분위에서 -0.081, 90% 분위에서 -0.030, 95% 분위에서 -0.040으로 나타났다. 따라서 본 연구의 다중모형 결과만으로는 극한 고온 조건에서 수계와 일 최고기온 간 음(-)의 관계가 안정적으로 나타난다고 해석하기 어려운 것으로 볼 수 있다. 다만, 보조적으로 검토한 토지피복 변수 중 수계만을 포함하고 고도를 통제한 분위 회귀분석에서도 네 분위 모두에서 음(-)의 계수가 확인되어, 이러한 결과는 수계가 도시 지역의 열섬 현상을 완화하는 데 도움이 된다는 선행연구(이규석 등,

2010; Hu *et al.*, 2023)와 유사한 방향을 보였다. 다만, 다중회귀 모형에서 수계의 계수 점추정치의 절댓값이 상위 분위에서 전반적으로 작게 나타난 것은, 수계의 주변 지역 기온에 대한 음(-)의 관련성이 주변 건축 밀도, 바람길, 습도 조건 등과 결합하여 달라질 가능성을 시사한다. 실제로 기존 연구에 따르면, 여름철 습도 조건에 따라서는 수면으로부터의 증발이 제한되어 잠열 소비가 감소할 수 있으며(Yao *et al.*, 2023), 이는 수계의 기온 저감 효과를 약화시키는 요인이 될 수 있다(Theeuwes *et al.*, 2013). 또한, 서울시의 주요 수계인 한강 주변에는 고밀도 건축 환경이 존재하여, 수면에서 발생한 저온 공기의 확산을 주변 건물이 저해함을 보인 연구도 존재한다(이재준, 2024). 이렇듯, 수계의 기온에 대한 관련성은 수역의 존재만으로 결정되기보다는 주변 건축 밀도, 바람길, 습도 조건 등과 결합하여 달라질 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 이러한 조건을 직접 분석하지 않았으므로, 향후 연구에서는 수계와 기온 간의 관계를 주변 건축환경 및 기상조건과 함께 살펴볼 필요가 있다.

3. 불투수면과 일 최고기온의 관계

본 연구에서 분석에 포함한 불투수면은 시가화건조지역 중 도로 및 교통시설(예: 철도)을 제외한 유형(주거, 상업·업무, 공업, 문화·체육·휴양시설 등)으로 구성된다. 불투수면은 모든 분위에서 통계적으로 유의한 양(+)의 계수를 나타냈다(표 3, 그림 3). 계수는 50% 분위에서 0.277($p<0.001$), 75% 분위에서 0.270($p<0.001$), 90% 분위에서 0.314($p<0.001$), 95% 분위에서 0.307($p<0.001$)로, 다른 토지피복 변수와 고도가 동일하다는 조건에서 불투수면 비율이 10%p 높은 지역은 그렇지 않은 지역 대비 일 최고기온이 약 0.27~0.31°C 높게 나타나는 관련성을 의미한다. 그림 3의 계수 점추정치를 살펴보면, 50%와 75% 분위에서는 매우 유사한 수준의 계수가 나타났고, 90% 분위에서 계수가 가장 크게 나타났으며, 95% 분위에서는 90% 분위 대비 소폭 감소하였다. 따라서 불투수면과 일 최고기온 간 양(+)의 관계는 모든 분위에서 확인되지만, 그 크기가 고온 분위로 갈수록 단조롭게 증가한다고 보기는 어렵다.

모든 분위에서 일관되게 양(+)의 관련성이 확인된 이러한 결과는 건물 및 인공 구조물이 열을 축적하고 이를 재방출함으로써 기온 상승에 기여한다는 기존 연구(문다

숨 등, 2019)와 부합한다. 특히, 극한 고온 조건에서는 건축물의 열의 축적과 재방출의 특성이 평상시보다 훨씬 강력하게 작용함을 보여준 선행연구(Varquez and Kanda, 2018)의 결과와도 일치한다. 특히, 본 연구 결과에서 90% 분위에서 계수 점추정치가 가장 크게 나타난 양상은, 극한 고온 조건에서 도시협곡과 같은 건축환경이 열 축적에 기여할 수 있음을 보고한 선행연구와 관련하여 해석해 볼 수 있다(Marciotto *et al.*, 2010; Gabriel and Endlicher, 2011). 계수가 90% 분위에서 가장 크게 나타난 뒤 95% 분위에서 소폭 감소한 것은 불투수면과 기온의 관계가 단순히 고온 분위로 갈수록 선형적으로 강화되기보다는, 건물 그림자, 환기 조건, 도시형태 등과 결합하여 비선형적으로 나타날 수 있음을 시사한다(Ma and Peng, 2021; Liu *et al.*, 2023). 이를 불투수면의 독립적 영향 증가로 단정하기보다는 상위 고온 조건에서 나타나는 조건부 관계의 차이로 해석할 필요가 있다. 따라서 도시 고온 현상 대응을 위해서는 불투수면의 면적 축소뿐 아니라, 고온 발생 시 열 방출을 최소화할 수 있는 건축 소재 도입이나 바람길을 고려한 건물 배치 전략 등의 대안이 필요할 것이다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 서울시를 대상으로 여름철 일 최고기온의 분위별 조건에서 토지피복 유형과 기온 간의 관계가 각 분위에서 어떠한 양상으로 나타나는지를 분위 회귀분석을 통해 살펴보았다. 폭염 피해가 극한 고온에서 증폭된다는 점에 주목하여, 각 S-DoT 관측지점 주변 200m 버퍼 내 토지피복 비율을 산출하고 50%, 75%, 90%, 95% 분위 조건을 구분함으로써 기온 분포 구간에 따른 토지피복 변수와 일 최고기온 간의 조건부 관계를 분석하고 그 시사점을 도출하고자 하였다.

다중변수 분위 회귀분석 결과, 불투수면, 수목 및 초지는 모든 분위에서 통계적으로 유의한 결과를 나타냈다. 불투수면은 전 분위에서 양(+)의 계수를 나타내었고, 50%와 75% 분위 대비 상위 분위인 90%와 95% 분위에서 계수 점추정치가 다소 크게 나타나는 경향을 보였다. 단, 90% 분위 이후 95% 분위에서는 계수가 소폭 감소하였다. 따라서 불투수면과 일 최고기온 간 양(+)의 관계는 전 분위에서 확인되었으나, 계수 크기가 고온 분위로 갈수록 단조로이 증가한다고 보기는 어렵다. 수목은 전 분위에

서 유의한 음(-)의 계수를 나타내었으나, 상위 분위로 갈수록 계수 점추정치의 절댓값이 감소하여 95% 분위에서는 50% 분위 대비 약 65% 수준으로 줄어들었다. 이는 상위 고온 조건에서 수목 비율과 일 최고기온 간 음(-)의 관련성 크기가 작아지는 양상을 보여준다. 수계는 전 분위에서 음(-)의 계수를 나타냈으나 통계적 유의성이 확인되지 않아 본 연구의 다중모형 결과만으로는 수계와 일 최고기온 간 음(-)의 관계가 안정적으로 나타난다고 해석하기는 어렵다. 초지는 전 분위에서 유의한 양(+)의 계수를 나타냈으나, 분위에 따른 일관된 증가 또는 감소 경향은 나타나지 않았다. 다만 이는 다른 토지피복 변수와 고도가 함께 고려된 상태에서 나타난 조건부 관련성이므로, 초지 자체가 기온 상승을 유발하는 것으로 해석하는 데에는 주의가 필요하다.

이러한 결과는 도시 지역의 열환경 관리에 다음과 같은 시사점을 제공한다. 첫째, 폭염 특보 기준과 대응의 정교화를 고려할 필요가 있다. 현재 한국에서는 여름철 체감온도 33°C와 35°C가 이를 이상 지속될 것으로 예상될 때 각각 폭염주의보와 폭염경보가 발효되고, 폭염중대경보는 폭염경보 지역 중 일 최고체감온도 38°C 이상 또는 일 최고기온 39°C 이상이 예상될 때 발효되며(2026년 6월 신설), 피해 대책도 이러한 특보 기준을 바탕으로 이루어지고 있다(질병관리청). 본 연구 결과에 따르면, 불투수면은 전 분위에서 유의한 수준의 양(+)의 계수를 나타냈을 뿐 아니라 계수는 50%와 75% 분위 대비 90%와 95% 분위, 즉 극한 고온 조건에 해당하는 상위 분위에서 다소 크게 나타났다. 또한, 수목의 주변 지역 기온에 대한 음(-)의 관련성은 90%와 95% 등 상위 분위에서 그 정도가 줄어드는 것으로 나타났다. 즉, 폭염 주의보·경보가 발령되는 조건 아래에서도 토지피복 양상에 따라 국지적인 기온은 다르게 나타날 수 있고, 특히 불투수면의 면적 비율이 높은 지역은 더 높은 기온을 경험하게 될 가능성이 있다. 따라서 폭염 특보 발령 시 불투수면 비중이 높은 지역을 ‘열집중 관리 구역’ 등으로 지정해 해당 지역의 열환경을 우선적으로 점검하고, 필요에 따라 살수차 등 대응 자원을 우선 투입하는 방안을 검토할 필요가 있다. 둘째, 건물 및 인공 구조물의 설계 단계에서 열 축적과 방출을 줄일 수 있는 재료 사용을 장려해야 한다. 녹색건축인증제 등 제도를 통해 친환경 건축을 장려하고 있으나(저탄소건물지원센터), 여기에 더해 태양 복사 반사율이 높은 자재 사용이나 열을 가두지 않는 구조 설계를 확대할 필요가 있

다. 이는 여름철 인공 구조물로 인한 기온 상승을 완화하는 데 기여할 수 있다. 셋째, 녹지 확충은 단순한 면적 확대를 넘어 식생의 증산 작용을 도울 수 있는 환경 조성이 필요하다. 특히 수목의 경우, 본 연구 분석 결과 전 분위에서 유의한 음(-)의 계수를 나타내어, 도시 열환경 관리에 있어 수목의 관련성이 실증적으로 확인되었다. 하지만, 극한 고온 조건에서는 계수의 절댓값이 작아지는 양상이 나타났다. 기존 연구에서는 극한 고온 시 토양수분, 관수 여부 및 대기 조건에 따라 수목의 증산 작용이 제한될 수 있음이 보고되어 있으므로, 이러한 환경조건을 함께 고려할 필요가 있다. 따라서, 여름철 폭염 피해 예방을 위해 단순히 녹지의 면적 확대보다도 효과적인 관수 시스템 확충 등 극한 고온기 식생의 증산 작용을 보장할 수 있는 환경의 조성이 중요할 것이다. 넷째, 수변 공간을 무더위 쉼터나 폭염 대피 공간으로 활용할 경우 바람길 확보와 차열 설계를 함께 고려해야 한다. 수계는 전 분위에서 기온에 대해 음(-)의 계수를 나타냈으나 통계적 유의성은 확인되지 않았다. 이는 본 연구 결과만으로는 수계와 일 최고기온 간 음(-)의 관련성이 고온 조건 전반에서 안정적으로 나타난다고 보기 어려움을 시사하므로, 수변 공간을 폭염 대피 공간 등으로 활용할 경우 주변 토지이용 환경과 기상 조건을 함께 고려할 필요가 있다. 마지막으로, 본 연구 결과는 여름철 도시 열환경 대책이 기온 분포 구간을 고려하여 수립될 필요가 있음을 시사한다. 분위 회귀 분석을 통해 확인한 바, 각 토지피복 유형의 일 최고기온과의 관계는 각 기온 분위에서 서로 다른 양상으로 나타났다. 이는 평균적 고온 조건에 기반한 열환경 관리 전략이 극한 고온 조건에서는 충분하지 않을 수 있음을 의미하며, 상위 고온 조건에서 나타나는 토지피복과 기온 간의 관련성도 함께 고려한 열환경 관리가 필요함을 시사한다.

한편, 본 연구는 3년간(2023~2025년)의 여름철 자료를 활용하여 장기적 기후 변동성을 충분히 반영하지 못하였기에 앞으로 S-DoT 장기 자료가 축적됨에 따라 다년도 분석을 통해 본 연구 결과의 안정성을 검증할 필요가 있겠다. 또한, 토지피복을 2차원적 면적 비율로만 고려하여, 건물 높이, 용적률 등 입체적인 도시 구조를 충분히 반영하지 못하였다는 한계도 존재하므로, 향후 연구에서는 3차원 도시 형태 정보를 결합하여 토지피복뿐 아니라 도시 구조가 극한 고온에 미치는 영향을 종합적으로 고려한다면 더욱 정밀한 분석이 가능할 것이다. 추가적으로, 본 연구에서 불투수면에 포함하지 않은 도로 역시 도시 열환

경과 관련된 중요한 요소이므로, 향후 연구에서는 도로의 폭, 포장 특성, 차량 통행량, 주변 건축물 배치 등을 고려하여 도로를 별도 범주로 구분한 분석을 수행할 필요가 있다. 이러한 한계에도 불구하고, 본 연구는 국내에서 여름철 일 최고기온은 분포의 분위별 조건에 따라 관측지점 주변 토지피복 비율과 기온 간의 조건부 관련성이 어떠한 양상으로 나타나는지를 실증적으로 검토하였다는 점에서 의의가 있다. 나아가, 본 회귀모형에서 예측된 값과 관측값의 차이가 크게 나타난 관측지점들의 국지적 물리환경 특성을 검토하는 극단적 잔차 사례 분석은 회귀 모형으로 포착되지 않는 미기후 요인을 이해하는 데 유용한 후속 연구 과제가 될 것이다.

감사의 글

본 연구에 사용된 토지피복자료의 취합 및 정리 과정에서 많은 도움을 주신 성균관대학교 건설환경공학부 한금진 박사님께 감사드립니다. 또한 원고의 개선을 위해 유익하고 세심한 의견을 주신 심사위원께 감사드리며, 편집 과정에서 도움을 주신 한국지리학회지 편집위원회에도 감사드립니다.

참고문헌

- 권이영·박수현·함재희·김연옥·이승협·최동원·김예솔·한유진·Agossou Casimir, 2019, “폭염 기간 중 도심 지역의 토지 피복별 기온과 지면온도 분포 분석,” 한국기상학회 학술대회 논문집, 329-329.
- 권혁수·김장수, 2022, “도시녹지의 지표 냉각 능력 평가를 위한 InVEST Urban Cooling Model의 적용,” 한국지리학회지, 11(4), 449-463.
- 권혁수·김장수, 2023, “InVEST 도시냉각모형을 이용한 도시녹지의 주·야간 냉각 효과 평가,” 한국지리학회지, 12(4), 577-589.
- 김진형·강영은·손승우·김동우·유재진, 2020, “UAV 기반 도시 열환경 분석을 통한 폭염 대응형 공간 전략: 부산시 영도구 도시재생사업을 대상으로,” 한국지리학회지, 9(1), 191-203.
- 김용진·강동화·안건혁, 2011, “기후변화에 따른 도시열섬

- 현상 특성 변화와 도시설계적 대안 모색에 관한 기초연구,” 한국도시설계학회, 12(3), 5-14.
- 김운수, 2007, 「서울정책포커스: 서울시 도심열섬 완화방안」, 서울연구원.
- 김인혜·김재민·이그림·임철희·이윤곤, 2021, “최근 한반도 폭염 및 열대야의 도시별 특성 분석,” 한국기상학회 학술대회 논문집, 385-385.
- 루지에치웅, 2024, “지속 가능한 도시 환경을 위한 극한 고온 현상의 변화특성 분석을 통한 녹지 대응전략 연구: 부산광역시를 중심으로,” 동아대학교 대학원 박사학위논문.
- 명수정, 2015, “도시지역의 녹지가 도시열섬현상 완화에 미치는 효과,” 한국기상학회 가을학술대회 논문집, 402-403.
- 문다솜·박수진·강정은·김재진, 2019, “인공열을 고려한 도시지역 기온 분포 특성 연구,” 한국기상학회 학술대회 논문집, 504-504.
- 박해경, 2021, “도시 열섬 강도 분석을 위한 도시데이터 센서와 국가기상관측간 기온 및 공간해상도 비교 연구,” 한국방재학회논문집, 21(3), 39-48.
- 백선옥·김동현·김형수·구본엽·정윤재, 2022, “시계열 Landsat 위성영상을 활용한 도시 열섬 현상 완화 방안에 관한 연구 - 청라 국제도시를 중심으로,” 한국지리정보학회지, 25(3), 1-16.
- 서울솔루션, 2015년 4월 10일자, “서울시 치수관리 정책” 서울정책실.
- 이규석·신동훈·김재철·이상화·이효진·김문성·정해연, 2010, “복원된 도시 하천에 의한 기온저감효과,” 환경영향평가, 19(1), 75-81.
- 이미희·이달근·김진영, 2019, “열 분포도를 활용한 청계천 복원사업의 열 분포 변화 분석,” 한국측량학회 정기학술발표회, 93-94.
- 이재준, 2024, “한강변 개발형태에 따른 폭염기 저온공기의 확산 시뮬레이션 연구 -서울시 동작구 흑석동 일대를 대상으로-,” 중앙대학교 석사학위논문.
- 저탄소건물지원센터, <https://ecobuilding.seoul.go.kr/>
- 전범석·김학열, 2010, “3차원 도시공간정보를 이용한 도시열섬현상의 분석,” 한국공간정보학회지, 18(4), 1-11.
- 정우식·도우곤, 2012, “부산지역 도심하천 복원에 따른 기온변화 효과 분석,” 한국환경과학회지, 21(8), 939-951.
- 조서림·황철수·황태건·김강민·이유빈, 2023, “도시 폭염

- 의 미시적 특성 및 패턴 탐색: 서울특별시를 대상으로,” *대한지리학회 학술대회논문집*, 139-140.
- 조항문·손창우·유기영·최유진·이윤희·김정아, 2017, 「서울시 폭염 대응력 강화방안」, 서울연구원.
- 최광용·권원태, 2006, “우리나라 사계절 개시일과 지속기간” *대한지리학회지*, 41(4), 435-456.
- 최광용, 2010, “지난 100년 동안 서울시에 발생한 강한 열파 패턴과 노인사망자에 미치는 영향” *대한지리학회지*, 45(5), 573-591.
- 최우석, 2019, 「체감형 도시폭염 실태평가 및 모의기술개발 기획연구」, 서울기술연구원.
- 하재현·이수기·박철영, 2015, “도시의 물리적 환경이 시간대별 대기온도에 미치는 영향 분석,” *한국도시행정학회 학술발표대회 논문집*, 217-248.
- 허보영·허원호, 2025, “매트릭스 분석을 통한 지역별 폭염 피해 분석” *한국산학기술학회논문지*, 26(10), 10-17.
- Ampatzidis, P. and Kershaw, T., 2020, A review of the impact of blue space on the urban microclimate, *Science of The Total Environment*, 730, 139068.
- Anderson, B.G. and Bell, M.L., 2009, Weather-related mortality, *Epidemiology*, 20(2), 205-213.
- Armson, D., Stringer, P. and Ennos, A.R., 2012, The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area, *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3), 245-255.
- Calleja-Agius, J., England, K., and Calleja, N., 2021, The effect of global warming on mortality, *Early Human Development*, 155, 105222.
- Choi, H.M., Lee, W., Roye, D., Heo, S., Urban, A., Entezari, A., Vicedo-Cabrera, A.M., Zanobetti, A., Schwartz, J., Analitis, A., Tobias, A., Armstrong, B., Guo, Y., Chen, K., Li, S., Alahmad, B., Diaz, M.H., Huber, V., Kyselý, J., Kim, H., Lee, S.J., Overcenco, A., Ragetti, M.S., Rao, S., Rytí, N.R.I., Saldiva, P.H.N., Serra, B., Scovronick, N., Stafoggia, M., Valdés, W., Lavigne, E., Matus, P., O’Ryan, R., Maasikmets, M., Jaakkola, J.J.K., Rabe, K., Forsberg, B., Åström, C., Indermitte, E., Honda, Y., Guo, Y.L.L., Fratianni, S., De’ Donato, F., Mayvaneh, F., Kim, Y., Chung, Y., Hashizume, M., Madureira, J., Gasparrini, A., and Bell, M.L., 2022, Effect modification of greenness on the association between heat and mortality: A multi-country multi-city study, *EBioMedicine*, 84, 104251.
- Delaney, B., Tansey, K., and Whelan, M., 2025, Satellite remote sensing techniques and limitations for Identifying bare soil, *Remote Sensing*, 17, 630.
- Foissard, X., Dubreuil, V., and Quénol, H., 2019, Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France), *Urban Climate*, 29, 100490.
- Gabriel, K.M.A. and Endlicher, W.R., 2011, Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany, *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2044-2050.
- Gao, K., Feng, J., and Santamouris, M., 2024, Are grand tree planting initiatives meeting expectations in mitigating urban overheating during heat waves? *Sustainable Cities and Society*, 113, 105671.
- Gao, M. and Franzke, C.L.E., 2017, Quantile regression-based spatiotemporal analysis of extreme temperature change in China, *Journal of Climate*, 30, 9897-9914.
- Ghosh, S. and Das A., 2018, Modelling urban cooling island impact of green space and water bodies on surface urban heat island in a continuously developing urban area, *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 501-515.
- Gómez-Navarro, C., Pataki, D.E., Pardyjak, E.R. and Bowling, D.R., 2021, Effects of vegetation on the spatial and temporal variation of microclimate in the urbanized Salt Lake Valley, *Agricultural and Forest Meteorology*, 296, 108211.
- Gu, Y. and You, X., 2022, A spatial quantile regression model for driving mechanism of urban heat island by considering the spatial dependence and heterogeneity: An example of Beijing, China, *Sustainable Cities and Society*, 79, 103692.
- Hu, N., Wang, G., Ma, Z., Ren, Z., Zhao, M., and Meng, J., 2023, The cooling effects of urban waterbodies and their driving forces in China, *Ecological Indicators*, 156, 111200.
- Jia, G., Shevliakova, E., Artaxo, P., De Noblet-Ducoudre,

- N., Houghton, R., House, J., Kitajima, K., Lennard, C., Popp, A., Sirin, A., Sukumar, R., and Verchot, L., 2019, Land-climate interactions, in Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Portner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M. and Malley, J. eds., *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, 131-247.
- Joshi, K., Khan, A., Anand, P., and Sen, J., 2024, Understanding the synergy between heat waves and the built environment: A three-decade systematic review informing policies for mitigating urban heat island in cities, *Sustainable Earth Reviews*, 7(1), 25.
- Kephart, J.L., Sánchez, B.N., Moore, J., Schinasi, L.H., Bakhtsiyarava, M., Ju, Y., Gouveia, N., Caiaffa, W.T., Dronova, I., Arunachalam, S., Diez Roux, A.V., and Rodríguez, D.A., 2022, City-level impact of extreme temperatures and mortality in Latin America, *Nature Medicine*, 28(8), 1700-1705.
- Kraemer, R. and Kabisch, N., 2022, Parks Under Stress: Air Temperature Regulation of Urban Green Spaces Under Conditions of Drought and Summer Heat, *Frontiers in Environmental Science*, 10.
- Li, H., Zhao, Y., Wang, C., Ürge-Vorsatz, D., Carmeliet, J., and Bardhan, R., 2024, Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait, *Communications Earth & Environment*, 5(1), 754.
- Litvak, E., Bijoor, N.S., and Pataki, D.E., 2014, Adding trees to irrigated turfgrass lawns may be a water-saving measure in semi-arid environments, *Ecohydrology*, 7(5), 1314-1330.
- Liu, B., Guo, X., and Jiang, J., 2023, How urban morphology relates to the urban heat island effect: A multi-indicator study, *Sustainability*, 15(14), 10787.
- Liu, G., Wang, W., and Chen, Z., 2025, Impacts of vegetation greening on summer mean and extreme land surface temperatures in Eastern China, *Geophysical Research Letters*, 52(19), e2025GL118453.
- Ma, X. and Peng, S., 2021, Assessing the quantitative relationships between the impervious surface area and surface heat island effect during urban expansion, *PeerJ*, 9, e11854.
- Marciotto, E.R., Oliveira, A.P., and Hanna, S.R., 2010, Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme, *Building and Environment*, 45(11), 2497-2505.
- Meili, N., Manoli, G., Burlando, P., Carmeliet, J., Chow, W.T.L., Coutts, A.M., Roth, M., Velasco, E., Vivoni, E.R., and Fatichi, S., 2021, Tree effects on urban microclimate: Diurnal, seasonal, and climatic temperature differences explained by separating radiation, evapotranspiration, and roughness effects, *Urban Forestry & Urban Greening*, 58, 126970.
- Mentaschi, L., Duveiller, G., Zulian, G., Corbane, C., Pesaresi, M., Maes, J., Stocchino, A., and Feyen, L., 2022, Global long-term mapping of surface temperature shows intensified intra-city urban heat island extremes, *Global Environmental Change*, 72, 102441.
- Peng, J., Liu, Q., Xu, Z., Lyu, D., Du, Y., Qiao, R., and Wu, J., 2020, How to effectively mitigate urban heat island effect? A perspective of waterbody patch size threshold, *Landscape and Urban Planning*, 202, 103873.
- Shaamala, A., Yigitcanlar, T., Nili, A., and Nyandega, D., 2024, Strategic tree placement for urban cooling: A novel optimisation approach for desired microclimate outcomes, *Urban Climate*, 56, 102084.
- Solcerova, A., van de Ven, F. and van de Giesen, N., 2019, Nighttime Cooling of an Urban Pond, *Frontiers in Earth Science*, 7.
- Son, J.-Y., Lane, K.J., Lee, J.-T., and Bell, M.L., 2016, Urban vegetation and heat-related mortality in Seoul, Korea, *Environmental Research*, 151, 728-733.
- Speak, A., Montagnani, L., Wellstein, C., and Zerbe, S., 2020, The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling, *Landscape and Urban Planning*,

- 197, 103748.
- Theeuwes, N.E., Solcerová, A., and Steeneveld, G.J., 2013, Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(16), 8881-8896.
- Tinoy, M.M., Novero, A.U., Landicho, K.P., Baloloy, A.B., and Blanco, A.C., 2019, Urban effects on land surface temperature in Davao City, Philippines, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4-W19, 433-440.
- Uddin, M.A., Kamal, A.S.M.M., and Shahid, S., 2022, Vegetation response to climate and climatic extremes in northwest Bangladesh: a quantile regression approach, *Theoretical and Applied Climatology*, 148, 985-1003.
- Varquez, A.C.G. and Kanda, M., 2018, Global urban climatology: A meta-analysis of air temperature trends (1960-2009), *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 32.
- Wiseman, J., 2024, 「Cooling urban heat: Understanding and addressing extreme heat in cities」, Harvard Kennedy School.
- 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.
- Yao, L., Sailor, D.J., Yang, X., Xu, G., and Zhao, L., 2023, Are water bodies effective for urban heat mitigation? Evidence from field studies of urban lakes in two humid subtropical cities, *Building and Environment*, 245, 110860.
- Zhang, M., Gao, Y., Ting, M., Yu, Y., and Wang, G., 2024, Land-use induced changes in extreme temperature predominantly influenced by downward longwave radiation, *Communications Earth & Environment*, 5(1), 758.
- Zhao, Z., Yan, H., Zhu, H., Nan, X., Wu, R., Wang, W., Zhu, L., Shi, J., Yang, F., and Bao, Z., 2025, Air temperature differences and view factor influences between sidewalks and roadways in urban streets: A case study in Hangzhou, China, *Building and Environment*, 290, 114149.
- 국가기상위성센터, <https://nmssc.kma.go.kr/homepage/html/base/cmm/selectPage.do?page=static.drought.droughtIntro>
- 국가통계포털, 2026, <https://kosis.kr/index/index.do>
- 기상청a, 폭염일수, <https://data.kma.go.kr/climate/heatWave/selectHeatWaveChart.do>
- 기상청b, 계절길이, https://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_2021/influence/inf_2-1.php
- 기후에너지환경 통계포털, 빗물 등이 지하로 스며들수 없게 하는 불투수면 현황, https://stat.mceec.go.kr/portal/stat/easyStatPage/DT_106N_36_1100003.do
- 서울 열린데이터광장a, 스마트서울 도시데이터 센터(S-DoT) 환경정보, <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-15969/S/1/datasetView.do>
- 서울 열린데이터광장b, 서울시 경사도, <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-22241/F/1/datasetView.do>
- 질병관리청, 기후변화에 의한 폭염, https://health.kdca.go.kr/healthinfo/biz/health/gnrlzHealthInfo/gnrlzHealthInfo/gnrlzHealthInfoView.do?cntnts_sn=3848
- 환경공간정보서비스, 토지피복지도, <https://aid.mceec.go.kr/intro/land.do>
- 교신 : 노윤진, 02841, 서울시 성북구 안암로 145, 고려대학교 사범대학 미래국토연구소(이메일: yjnoh1@korea.ac.kr)
- Correspondence: Yoonjin Ro, 02841, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, South Korea, Institute of Future Land, College of Education, Korea University (Email: yjnoh1@korea.ac.kr)
- 투고접수일: 2026년 3월 2일
심사완료일: 2026년 8월 16일
게재확정일: 2026년 9월 1일