

## 열환경 개선을 위한 가로녹지 조성 위치에 따른 설계전략<sup>†</sup>

Design Strategies for Improving the Thermal Environment Focusing on Green Space Location in Street Canyons<sup>†</sup>

박주현\*, 엄정희\*\*

\*경북대학교 조경학과 박사, \*\*경북대학교 산림과학·조경학부 조경학전공 교수

Park, Ju-Hyeon\*, Eum, Jeong-Hee\*\*

\*Ph.D., Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

\*\*Professor, Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

Received: May 19, 2025

Revised: June 9, 2025 (1st)

June 22, 2025 (2nd)

Accepted: June 22, 2025

3인익명 심사필

Corresponding author :

Jeong-Hee Eum

Professor, Dept. of Landscape  
Architecture Kyungpook National  
University Daegu 41566, South  
Korea

Tel.: +82-53-950-5780

E-mail: eumjh@knu.ac.kr

### 국문초록

본 연구는 열스트레스가 높은 도시지역의 가로녹지를 중심으로 열환경 개선을 위해 가장 효율적인 녹지조성 위치를 제안하는 것이 목적이다. 구체적으로, 가로협곡의 종횡비와 도로 방향에 따른 열환경적 특성을 고려하여 냉각 효과가 가장 높은 녹지조성 위치를 제안하였다. 연구 대상지는 대한민국에서 가장 더운 도시 중 하나인 대구광역시이며, 도로 방향과 녹지조성 위치를 고려하여 총 8개의 시나리오를 설계하고 분석하였다. 거리협곡 내 열환경 변화를 분석하기 위해 3차원 미기후 시뮬레이션 소프트웨어인 ENVI-met 5.6.1을 활용하였다. 그 결과 기온 저감 및 열쾌적성 향상을 위한 녹지조성의 최적 위치는 가로의 방향과 시간대에 따라 다르게 나타났다. 기온의 경우, 일평균기온 및 주간평균기온 저감을 위해서는 동서 및 남북방향 가로협곡 모두 도로 중앙에 녹지를 조성하는 것이 냉각 효과가 가장 높은 것으로 나타났으며, 야간평균기온 저감을 위해서는 동서방향은 북측보도, 남북·방향은 동측보도에 가로녹지를 조성하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 반면 주간시간대 기준 열쾌적성(PET)의 경우, 동서방향 거리협곡은 북측보도에, 남북방향 거리협곡은 오전에는 서측보도에, 오후에는 동측보도에 가로녹지를 조성하는 것이 열쾌적성 향상에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 본 연구는 도시 가로의 열환경 개선을 위한 추가녹지 조성의 가장 효율적인 위치뿐만 아니라, 토지이용 및 열환경 개선이 필요한 주요시간대를 고려하여 가장 효율적인 녹지조성 위치를 제안함으로써 기후변화 대응을 위한 녹지계획 및 설계의 기본원리를 제시하고자 한다.

**주제어:** 열섬 완화, 보행자 열쾌적성, 그린인프라 설계, 기후변화 대응, 자연 기반 해법(NBS)

### ABSTRACT

This study aims to determine the most efficient location for creating additional green space in urban areas experiencing high heat stress to improve the thermal environment. Specifically, we propose the green space location with the greatest cooling effect by considering the thermal environment characteristics based on the street canyon's aspect ratio and road orientation. Daegu Metropolitan City, in South Korea, was selected as the study area, and eight scenarios were designed to reflect road directions and additional green space locations. To analyze changes in the thermal environment at the street level, we employed ENVI-met, a three-dimensional micro-climate simulation software. The results indicated that the optimal location of green spaces for reducing air temperature and improving thermal comfort varies depending on street orientation and time of day. For air temperature reduction, adding green space to the center of the road was most effective in decreasing both daily and daytime mean temperatures in east-west and north-south oriented street canyons. Regarding thermal comfort, installing green spaces on the northern sidewalk in east-west oriented street canyons significantly improved thermal comfort during the entire daytime period. In contrast, for north-south oriented street canyons, thermal comfort was more effectively enhanced by placing green spaces on the western sidewalk during the morning and on the eastern sidewalk in the afternoon.

**Keywords:** Heat Island Mitigation, Pedestrian Thermal Comfort, Green Infrastructure Design, Climate Change Adaptation, Nature-Based Solutions (NbS)

<sup>†</sup>본 논문은 박사학위논문 일부 발  
표된 연구입니다. 더불어 한국  
연구재단 "RS-2024-00354391 (기  
후대응 도시를 위한 도시그늘 네트워  
크 구축 기술 및 이용자 중심의 그늘  
네트워크 활용기법 개발)"의 지원으로  
작성되었습니다.

## 1. 서론

전 세계의 도시는 폭염 및 열대야 등 심각한 도시열환경 문제에 직면하고 있으며, 열스트레스로 인한 질병률 및 사망률은 점점 더 많은 도시에서 도시환경 문제로 제기되고 있다. 2022년 WHO 보고에 따르면, 3개월간의 폭염으로 인해 스페인 약 4,000명, 포르투갈 약 1,000명, 영국 3,200명 이상의 사망자가 발생한 것으로 나타났으며, 열섬 현상과 결합되는 특정 기간에는 그 위험성이 더 증가할 것으로 예상된다(Lai et al., 2019). 최근 연구에서는 이러한 도시 열환경 문제의 해결 방법으로 가장 효과적이고 효율적이며, 경제적이고 실현가능한 열저감 방법은 그린인프라의 구축이라는 결론(Norton et al., 2015; Coutts et al., 2016; Lai et al., 2019; Antozzewski et al., 2022; Lachapelle et al., 2023)을 도출하였으며, 이를 바탕으로 세계의 많은 도시들은 도시 내 녹지 면적 확대를 위한 다양한 정책을 추진 중이다. 대표적인 사례로는 미국의 'Urban Forestry Master Plans'와 호주 멜버른시의 'Urban Forest Strategy'가 있으며, 이러한 정책들은 공통적으로 도시 내 그늘 면적 확대를 위한 전략으로 수관피복률(Tree Coverage Ratio, TCR) 확보를 주요 목표로 설정하고 있다. 시애틀은 수관피복률을 18%에서 30%로 높이기 위한 계획을 제시했으며, 뉴욕시는 2035년까지 수관 피복률 30%, 보스턴은 2030년까지 수관피복률 35%를 나무로 덮는다는 목표를 발표했다. 홍콩 역시 도시기후지도(Uaban Climate Map, UCMaP) 프로젝트를 통해 수관피복률 20~30%을 권고하고 있다(Morakunyo et al., 2018).

특히 멜버른(City of Melbourne, 2012), 시드니(NSW Government, 2021), 뉴욕 등 대도시들은 가로녹지를 중심으로 수관피복률 30~40% 확보 전략을 적극적으로 추진하고 있으며, 가로수의 간격 조정, 다열 식재, 피복지 조성, 녹지형 중앙분리대 설치, 도로 및 보도 축소를 통한 녹지 면적 확대 등 다양한 전략을 도입하고 있다. 가로녹지를 중심으로 한 도시 열환경 개선에 관한 연구는 거리협곡의 기하학적 특성인 종횡비에 따라 달라지는 열환경 평가에서 출발하였다(Ali-tourdert and Mayer, 2006). 이후 연구는 종횡비, 거리협곡의 방향, 천공률(Sky View Factor, SVF) 등 거리협곡의 공간적 특성에 따라 달라지는 열용량 및 열섬 강도에 대한 연구로 발전하였으며, 최근에는 거리협곡의 공간적 특성에 적합한 녹지조성 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 태양 복사에너지의 유입이 많은 동서방향 지향적이며 종횡비가 낮은 거리협곡의 경우는 수관폭이 넓고, 수고가 높고, 지하고가 낮고, LAI가 높은 수종을 선정하여, 가로수 간격이 좁고, 다열 식재와 다층구조 식재를 적용하여 녹지를 조성하는 것이 열환경 개선에 효과적이다(Andreou, 2013; Takebayashi et al., 2014; Morakinyo and Lam, 2016; Wang and Akbari, 2016; Zolch et al., 2016; Kong et al. 2017; Morakinyo et al., 2017; Morakinyo et al., 2018; Hami et al., 2019; Park et al., 2019; Antoszewski et al., 2020; Balany et al., 2020; Lee et al., 2020; Liu et al., 2020; Morakinyo et al., 2020; Rahman et al., 2020a; Rohman, 2020a ; 2020b, 2020b; Chen et al., 2021; Huang et al., 2021; Lin and Qin, 2021; Lin et al., 2021; Liu et al., 2021; Huang et al., 2023; Lachapelle et al., 2023; 정희은 등, 2015; 임현우 등 2022; 엄정희 등, 2022; 엄정희 등, 2023). 반대로 건물로 인한 그늘의 영향이 많은 남북방향 지향적이며 높은 종횡비를 가지는 거리협곡의 경우는 수관폭이 좁고, 지하고가 높으며, LAI가 낮은 수종을 선정하여, 가로수 간격을 넓게 식재하는 것이 열환경 개선에 유리하며, 다열 식재 및 다층구조 식재는 지양하는 것이 열환경 개선에 효과적이다(Shashua-Bar et al., 2010; Norton et al., 2015; Kong et al. 2017; Morakinyo et al., 2017; Morakinyo et al., 2018; Hami et al., 2019; Park et al., 2019; Morakinyo et al., 2020; Chen et al., 2021; Antoszewski et al., 2022; 엄정희 등, 2022; 임현우 등, 2022; Huang et al., 2023; Lachapelle et al., 2023; 박주현과 엄정희, 2024).

더불어 도시의 열환경을 개선하기 위해서는 올바른 위치에 수목을 심는 것 또한 매우 중요하다(Milošević et al., 2017; Wu and chen., 2017; Morakinyo et al., 2020; Liu et al., 2021). Coutts et al.(2016)은 가로수가 열쾌적성에 미치는 영향에 대한 연구에서 종횡비가 낮은 E-W 방향 거리의 직사광선 노출이 심한 쪽에 가로수를 우선 배치하는 것이 효과적이라고 결론짓고 있으며, Norton et al.(2015)은 호주 멜버른을 대상으로 한 연구에서 E-W 방향의 거리협곡의 경우 특히 태양에 더 많이 노출되는 남측보도에 더 크고 많은 가로수를 심을 것을 제안하고 있다. Lachapelle et al.(2023)은 거리방향과 식재 비율에 따라 달라지는 가로수의 식재 효율에 대한 연구에서 E-W 거리협곡의 북측보도, NW-SE 거리협곡의 동북측보도, N-S 협곡의 동측보도에 우선적으로 가로수를 식재하는 것이 수목의 열저감 효율을 높일 수 있다고 보고하고 있다.

열환경 개선을 위한 효과적인 식재 디자인은 목적에 부합하는 수종의 선정뿐만 아니라, 그늘 영역의 최적화 및 환기개선을 위한 수목의 위치, 배치 방식, 식재 간격 등의 통합적 고려가 필수적이다(Liu et al., 2021). 그러나 도시의 환경적 특성에 따른 수목 선정 및 효과적인 식재 방법에 대한 연구는 비교적 활발하게 이루어지고 있으나 열환경 개선에 효과적인 녹지조성 위치에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 더불어 우리나라는 2019년부터

산림청을 중심으로 열환경 개선 및 미세먼지 저감 등을 목표로 다양한 도시숲 조성사업을 추진하고 있다. 특히 ‘기후대응 도시숲 조성사업’ 및 ‘도시바람길숲 조성사업’ 등은 대상지 확보의 제약으로 인해 가로녹지를 중심으로 사업이 전개되고 있으며, 가로수의 추가 식재, 도로다이어트를 통한 녹지면적 확대 등 적극적인 가로녹지 조성전략이 병행되고 있다. 그럼에도 불구하고, 열환경 개선을 위한 녹지조성 위치에 대한 가이드라인의 부재로 인해 조성된 녹지의 열환경 완화 효과 및 경제적 효율성이 충분히 확보되지 못하는 한계가 존재한다.

따라서 본 연구는 폭염으로 인한 도시환경적 문제 및 온열질환자 발생 위험이 높은, 열스트레스가 높은 거리협곡을 중심으로 열환경 개선에 효율적인 녹지조성 위치를 밝히는 것을 목적으로 한다. 특히 거리협곡의 종횡비 및 도로 방향에 따라 달라지는 열환경적 특성을 반영하여 냉각 효과가 가장 높은 녹지조성 위치를 제시하고자 한다. 더불어 분석 결과를 바탕으로 주이용시간, 이용 형태 등 거리협곡 내 보행자 특성과 업무중심가로, 주거지 주변 가로 등 거리협곡 주변의 토지이용별 특성 등을 고려하여 효율적인 녹지조성 위치를 제안하고자 한다.

## 2. 연구 방법

본 연구는 녹지 면적 확보를 위해 거리협곡 내 추가녹지를 조성할 경우 열환경 개선에 가장 효과적인 녹지조성 위치를 도출하기 위해 시나리오 설계 및 시뮬레이션 분석을 실행하였다. 특히 거리협곡 내 열환경 형성에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수인 종횡비와 도로·방향을 고려하여 총 8가지 시나리오를 작성하였으며, 이를 분석·검토하여 녹지조성 위치별 냉각 효과 및 효율적 녹지조성 위치를 도출하였다. 녹지조성에 따른 열환경 변화 분석을 위해 도시 미기후 및 열환경 분석에 주로 이용되는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모델인 ENVI-met 5.6.1을 활용하였다.

### 2.1 연구 대상지

본 연구에서는 대한민국에서 가장 기온이 높은 도시 중 하나인 대구광역시(위도: 35.8714° N, 경도: 128.6014° E)를 연구 지역으로 선정하였다. 쾨펜(Koppen) 기후 분류에 따르면 대구광역시는 아열대 습윤기후(Cwa)에 속하며, 분지 지형의 특성으로 인해 여름철 덥고 습한 기후적 특성을 나타낸다. 대구광역시는 2023년 8월 대구 종관기상관측(ASOS) 자료에 따르면, 대구의 일평균기온은 28.55°C, 평균상대습도는 58.75%로 기록되었다. 기후변화 대응 및 재난 예방의 관점에서 도시 열환경 문제가 심각한 지역을 중심으로 시뮬레이션 대상지를 선정하고자 하였으며, 거리협곡의 너비가 넓어 태양복사 에너지의 유입량이 많은 가로의 선정을 위해 10차선 이상의 대로 중 열스트레스가 높고 보행 이용률이 높은 가로를 기준으로 검토하여 달구벌대로를 분석 대상으로 확정하였다. 대구광역시는 ‘푸른 대구 가꾸기 운동’을 통해 1996년부터 2017년까지 총 3,677만 그루를 식재하였으며, 폭염 완화를 위해 나무 심기 운동, 그늘막 설치, 무더위 쉼터 설치, 옥상녹화 사업 등을 추진하고 있다.

### 2.2 분석모형의 개요 및 검증

ENVI-met은 Ruhr-Universität Bochum의 Michael Bruse가 개발한 모델로 1998년 출시되어 활발하게 활용되고 있으며, 도시와 같은 다양한 공간적 환경에서 표면-식물-대기 간의 복잡한 상호작용에 대해 분석하기 위해 고안된 미기후 시뮬레이션 모델이다. 이 모델은 도시 내 미기후 연구, 특히 공원 및 가로녹지, 옥상녹화, 벽면녹화 등과 같은 녹지의 미기후 개선 효과 및 완화 전략 평가를 위해 널리 활용되고 있다(Ouyang et al., 2020). ENVI-met은 최소 0.5m × 0.5m × 0.5m 격자 해상도로 시나리오 구축이 가능하기 때문에 건물의 형태, 위치, 높이, 밀도 등을 현실과 유사하게 구축할 수 있다. 또한 3D-Plant 모듈을 통해 수목의 형태적, 물리적 특성 관련 매개변수를 목적에 맞게 형상화하여 분석할 수 있는 장점을 지닌다. 본 연구에서는 ENVI-met Version 5.6.1을 활용하여 다양한 시나리오에 대한 열환경 개선 효과를 시뮬레이션하였다.

본 연구에서는 초여름, 한여름, 늦여름에 대한 기온 측정을 통해 여름철 측정값의 변화패턴과 및 범위 파악과 시간적 정확도를 높이기 위해 2023년 6월 6일, 7월 30일, 9월 4일 총 3일에 대해 24시간 동안 국제보상공원 일대를 중심으로 현장 측정을 실시하였다. 더불어 도시의 다양한 공간특성을 반영한 평균값을 도출함으로써 관측값의 정확도를 높이기 위해 총 90개 관측 지점에 대한 온도 및 습도 변화에 대한 현장 측정을 실시하였으며, 풍속과 풍향은 기상청에서 운영하는 종관기상관측(ASOS)의 자료를 활용하여 분석모형에 대한 검증을 실시하였다(표 1, 그림 1 참조). 공간해상도는 5m×5m×3m이며, 분석 범위는 5km × 1.2km이다.

표 1. 분석모형 검증에 위한 ENVI-met 시뮬레이션 입력 조건

입력 조건	국채보상운동 기념공원 일대			
	선정일	6월 6일	7월 30일	9월 4일
기상 관련	온도 및 습도	90개 관측지점의 시간대별 전체 평균값을 산출하여 입력		
	풍속(대구 ASOS)	2.38m/s	1.57m/s	2.76m/s
	풍속(대구 ASOS)	290°	110°	110°



그림 1. 모델 검증을 위한 현장 측정지점 현황

범례 : ● 관측기 설치지점

정합성 검증은 기온값을 중심으로 모니터링 결과인 실측값과 시뮬레이션 결과인 예측값을 비교하였다. 예측모델의 정확도 확인을 위해 많이 활용되는 평가지표인 RMSE(Root Mean Square Error; 평균제곱근오차), R<sup>2</sup> (R-squared; 결정계수) 값을 분석하였다. RMSE는 예측값과 측정값 사이의 평균차이를 측정하며, 0에 가까울수록 높은 정확성을 의미한다. R<sup>2</sup>는 모델의 설명력을 의미하며, 1에 가까울수록 모델의 예측력이 높음을 의미한다.

### 2.3 시나리오 설계 및 분석 방법

#### 2.3.1 시나리오 설계

본 연구는 도로 및 보도에 녹지 1열을 추가로 조성할 경우, 냉각 효과가 가장 높은 녹지조성 위치를 도출하기 위해 시나리오를 설계하였다. 도로 방향에 따라 녹지조성의 효과가 다르게 나타나는 바, 동서방향 및 남북방향 거리협곡을 구분하여 총 8개의 시나리오로 설계하였다. 기본가로수 시나리오는 열환경 개선 효과가 가장 높은 녹지조성 방법을 적용하기 위해 가로수 2열의 다층구조(교목+아교목+관목)를 적용하여 시나리오를 설계하였다. 추가녹지 조성 시나리오는 1열 다층구조(교목+아교목+관목)를 적용하였으며, 녹지조성 위치를 변화시켜 시나리오를 설계하였다.

시나리오는 동서방향의 경우 기본시나리오(EW\_B)를 기준으로 남북보도에 추가녹지를 조성하는 시나리오(EW\_S), 북측보도에 추가녹지를 조성하는 시나리오(EW\_N), 도로 중앙에 추가녹지를 조성하는 시나리오(EW\_M)를 설계하였다. 남북방향의 경우 기본시나리오(NS\_B)를 기준으로 동측보도에 추가녹지를 조성하는 시나리오(NS\_E), 서측보도에 추가녹지를 조성하는 시나리오(NS\_W), 도로 중앙에 추가녹지를 조성하는 시나리오(NS\_M)를 설계하였다(그림 2 참조).

#### 2.3.2. 시뮬레이션 구축

기후변화 대응 및 재난방지 차원에서 폭염 및 열대야 등 도시 열문제가 심각한 지역을 대상지로 설정하기 위해 ‘열스트레스가 높은 거리협곡’을 추출하여 대상지로 설정하였으며, 거리방향에 따라 녹지조성 효과가 다르게 나타나는 것을 고려하여 동서 및 남북방향을 구분하여 시뮬레이션을 진행하였다. ‘열스트레스가 높은 거리협곡’은 Norton et al.(2015)의 연구를 참고하여 동서방향 중형비 0.86과 남북방향 중형비 0.43을 적용하였다.

ENVI-met 시뮬레이션을 위한 공간 시나리오는 대구광역시 중심도로인 달구벌대로의 공간자료를 조사하여 가

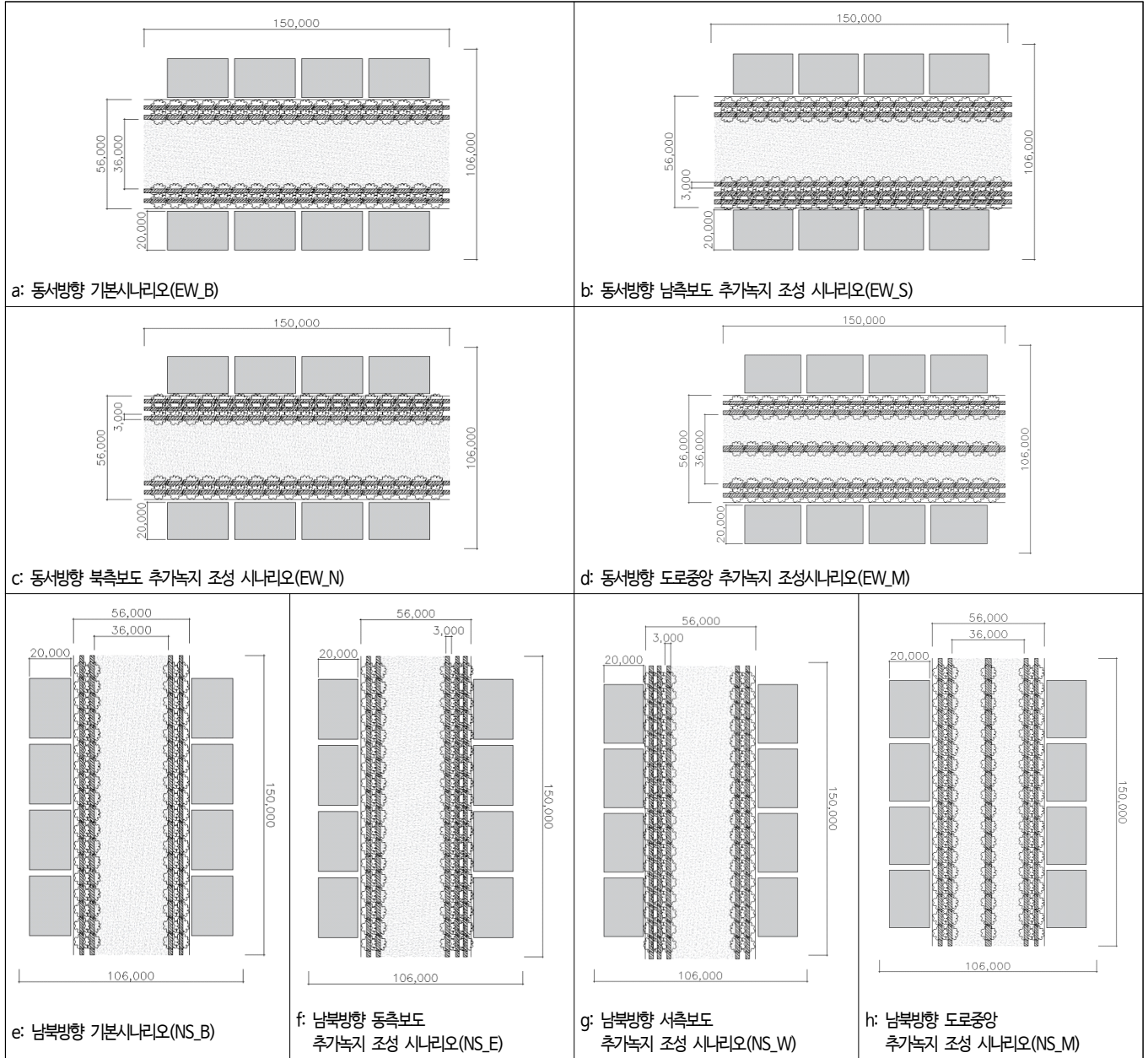


그림 2. 거리협곡 방향별 추가녹지 조성 시나리오\_평면도(단위 : m)

상공공간을 설계하였다. 가상공간의 크기는 길이 150m × 가로폭 106m로 양복 10차선 도로를 기준으로 설계하였으며, 거리 너비는 56m(도로폭 36m, 보도폭 각각 10m), 건물 높이는 동서방향 48m, 남북방향 24m를 적용하였다. 도로폭은 3.5m를 기준으로 시나리오를 설계하였으며, 추가녹지대의 폭은 3m로 적용하였다(그림 3 참조).

기상입력자료는 비, 태풍 등의 기상 이벤트가 없는 맑은 날을 대상으로 2023년 8월 한 달의 평균기온 도출하였으며, 일 최저기온 24°C, 일 최고기온 33°C를 입력하였다(표 2 참조). 풍속의 영향을 최소화하고 바람이 거의 없는 맑은 날의 열환경을 조성하기 위해 풍속은 0.1m/s, 풍향은 거리방향의 90도로 적용하였다. 시뮬레이션 시간은 06:00부터 익일 05:59까지 총 24시간을 진행하였다.

가로수는 대한민국에서 가장 많이 식재된 가로수인 왕벚나무를 적용했으며, 아교목은 달구벌대로에 가장 많이 식재된 아교목상 수종인 단풍나무를 적용하였다. 수종별 사이즈는 달구벌대로에 식재된 가로수의 대푯값을 반영하였다. 가로수의 간격은 가로수 조성관리 매뉴얼(산림청, 2022)에서 제시하는 간격인 8m를 적용하였으며, 식생층위 구조는 냉각 효과를 극대화하기 위해 '교목+아교목+관목'을 적용하였다(표 3 참조).

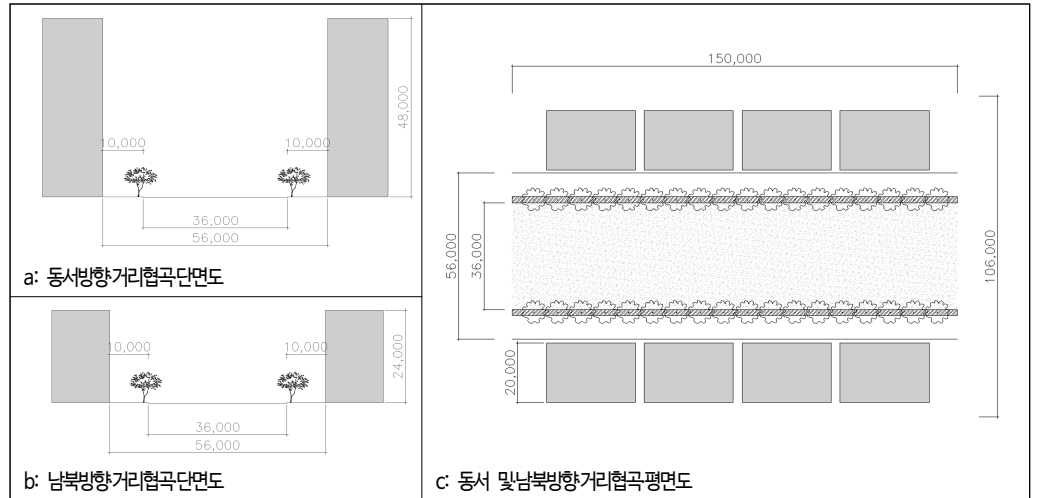


그림 3. 공간 시나리오 평면 및 단면도(단위 : m)

표 2. ENVI-met 시뮬레이션 기상 입력 데이터

시간	기온(°C)	상대습도(%)	풍속(m/s)
06:00	24.82	70.00	0.1  (풍향 : E-W 180° N-S 270°)
07:00	25.64	67.50	
08:00	26.45	65.00	
09:00	27.27	62.50	
10:00	28.09	60.00	
11:00	29.91	57.50	
12:00	29.93	55.00	
13:00	30.55	52.50	
14:00	31.36	50.00	
15:00	32.18	47.50	
16:00	33.00	45.00	
17:00	32.31	47.50	
18:00	31.62	50.00	
19:00	30.92	52.50	
20:00	30.23	55.00	
21:00	29.54	57.50	
22:00	28.85	60.00	
23:00	28.15	62.50	
00:00	27.46	65.00	
01:00	26.77	67.50	
02:00	26.08	70.00	
03:00	25.38	72.50	
04:00	24.69	45.00	
05:00	24.00	72.50	

표 3. ENVI-met 시뮬레이션 수목 입력 데이터

구분	수고(m)	수관폭(m)	지하고(m)	식재간격(m)	LAI
교목	15	8	7	8	5.6
아교목	5	3	2	8	2.8
관목	1	1	x	1	1

### 2.3.3. 데이터 분석

본 연구에서는 녹지조성 위치에 따른 열환경 개선 효과 및 보행자 열쾌적성 향상에 대한 효과를 분석하기 위해 ENVI-met의 Leonardo 모듈과 Bio-met 모듈을 활용하여 기온 및 생리적 등가온도(Physiologically Equivalent Temperature; PET)를 검토하였다.

#### 2.3.3.1 기온

기온은 열환경 개선 효과를 검토할 때 가장 보편적으로 활용되는 지표로서, 일평균기온 뿐만 아니라 주간 및 야간의 냉각 효과를 모두 검토하기 위해 06시부터 익일 06시까지 24시간을 분석하였다. 또한 수목 식재로 인한 도시 차원에서의 냉각 효과와 보행자 측면에서의 냉각 효과를 구분하여 살펴보기 위해 거리협곡 내 평균기온과 보도 내 평균기온을 구분하여 검토하였다. 더불어 거리 특성에 따른 보행자의 특성 및 주 이용 시간 등에 따른 최적의 녹지 조성 위치를 검토하기 위해 시나리오별로 주간 및 야간, 열피크타임(14시~16시) 등 시간대별 냉각 효과를 검토하였다.

#### 2.3.3.2 PET

PET는 실외 환경에서 인간의 열쾌적성을 평가할 때 가장 많이 활용되는 열쾌적성 지수이다(Chen et al., 2021). 태양복사온도가 열쾌적성에 가장 큰 영향을 미치는 요소(Ali-Touder & Mayer, 2006; Lai et al., 2019; Balany et al., 2020; Morakinyo et al., 2020; Antoszewski et al., 2022)임을 고려하여 06시부터 18시까지 12시간을 분석하였으며, 보행자 열쾌적성의 경우 보행자가 주로 보도를 통해 이동하는 것을 고려하여 보도 내 평균값을 중심으로 검토하였다. 시뮬레이션 분석 결과는 휴먼스케일에서 경험하는 열환경 변화를 반영하기 위해 높이 1.5m의 기온값을 기준으로 열환경 개선효과를 비교·검토하였다.

## 3. 연구 결과 및 고찰

### 3.1 시뮬레이션 모델 검증 결과

현장 모니터링 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 RMSE 값은 0.545~1.208, R<sup>2</sup> 값은 0.957~0.979으로 확인되었다(표 4, 그림 4 참조). ENVI-met 모형을 활용하여 모델의 정합성을 확인한 선행연구들을 살펴보면, R<sup>2</sup> 값의 경우 Morakinyo et al.(2017)은 R<sup>2</sup> 0.79~0.81, Haeri et al.(2023)은 R<sup>2</sup> 0.94, 황민수와 김형규(2023)는 R<sup>2</sup> 0.985 값을 가져 적합한 모형인 것으로 판단하고 있다. RMSE 값의 경우 Yang et al.(2021)은 1.11~1.62, Jamei & Rajagopalan(2017)은 1.26~2.4 값을 가져 적합한 모형이라고 판단하고 있다. 따라서 선행연구의 수치와 비교해 볼 때, ENVI-met을 활용한 시뮬레이션은 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.

### 3.2 시나리오 시뮬레이션 분석 결과

#### 3.2.1 E-W 거리협곡 분석 결과

기온의 경우 냉각 효과가 가장 높게 나타난 시나리오는 도로 중앙에 녹지를 조성한 시나리오 EW\_M으로 나타났다. 보도측 녹지의 경우는 북측보도에 녹지를 조성한 시나리오 EW\_N이 남측보도에 녹지를 조성한 시나리오 EW\_S보다 냉각 효과가 높게 나타났다(표 5, 그림 5 참조). 거리협곡 내 일평균기온을 기준으로 살펴보면, 시나리오 EW\_M의 경우 기본시나리오 EW\_B와 비교하여 -0.45의 기온차를 보였으며, 시나리오 EW\_N의 경우는 -0.42°C, 시나리오 EW\_S의 경우는 -0.37°C의 기온차를 기록했다. 따라서 도시열환경 개선을 위해 추가녹지를 조성할 경우 도로 중앙에 녹지를 조성하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

시간대별 열환경 변화를 살펴보면, 사람들이 주로 활동하는 08시~18시의 주간시간대의 경우 추가녹지를 조성한

표 4. ENVI-met 시뮬레이션 값과 관측값 간의 기온 비교 검증 결과

	RMSE	R <sup>2</sup>
1차	1.208	0.979
2차	0.545	0.957
3차	0.550	0.971

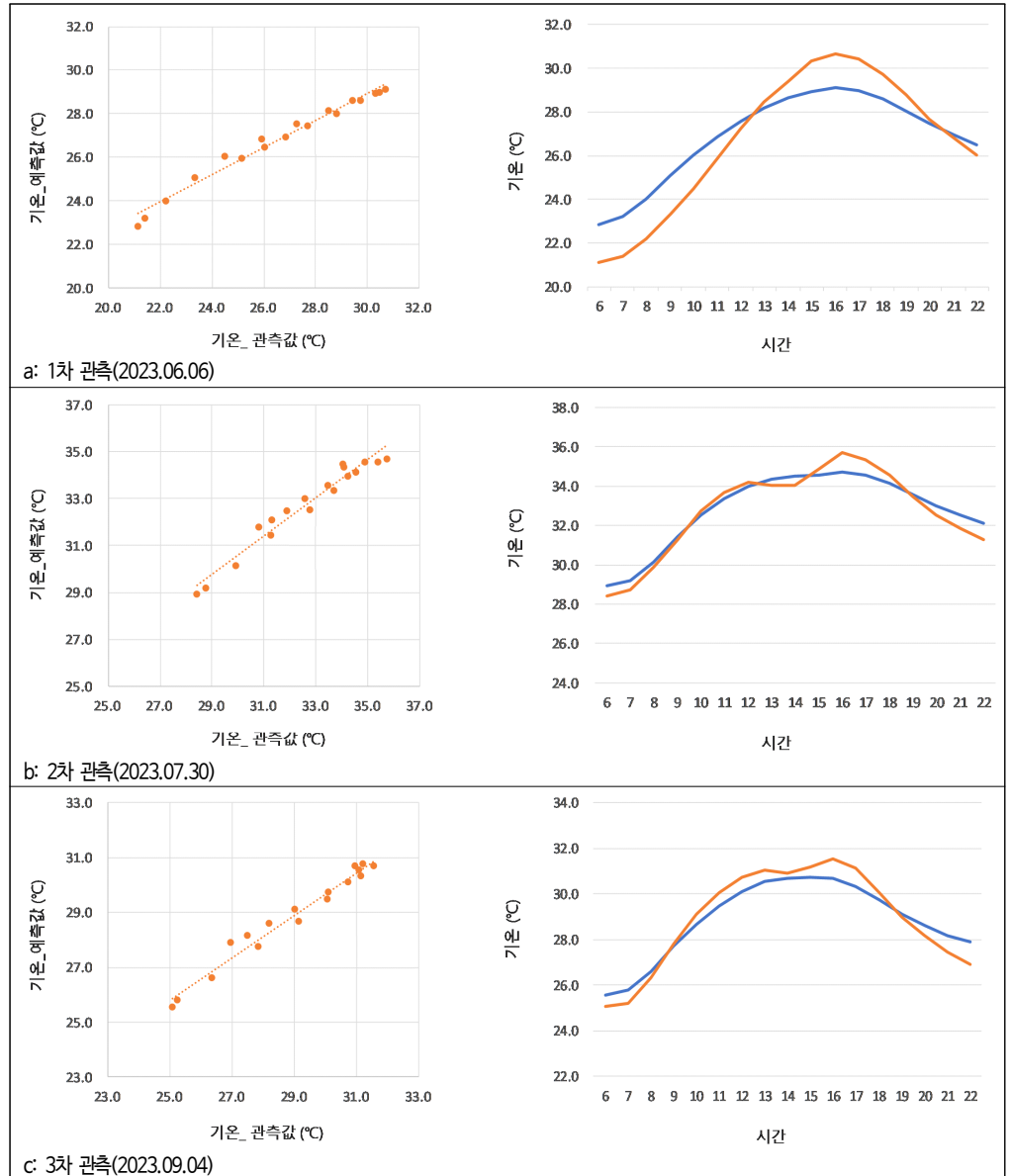


그림 4. 시뮬레이션 정합성 검증 그래프

범례 : — 기온 측정값    — 기온 예측값

식 : a.  $y=0.6221x+10.278$ ,  $R^2=0.9788$ , b.  $y=0.8211x+5.9521$ ,  $R^2=0.9569$ , c.  $y=0.7773x+6.3636$ ,  $R^2=0.9709$

모든 시나리오에서 기온 저감 효과를 나타냈으며, 열피크타임인 14~16시 시간대의 경우 모든 시나리오에서 가장 높은 냉각 효과를 기록했다(표 5, 그림 5a, 5b 참조). 거리협곡 내 평균기온 기준, 주간시간대 냉각 효과가 가장 높은 시나리오는 시나리오 EW\_M으로  $-1.12^{\circ}\text{C}$ 의 기온차를 보였으며, 시나리오 EW\_S는  $-0.92^{\circ}\text{C}$ , 시나리오 EW\_N는  $-0.81^{\circ}\text{C}$  순으로 냉각 효과를 나타냈다. 주간시간대 평균기온의 경우 일평균기온과 달리 EW\_N보다 EW\_S에서 냉각효과가 더 높게 나타났는데, 이는 북측보도가 풍향과 수직으로 위치한 영향과 함께 보도 남측에 위치한 건물 그늘과 수목 그늘의 상호작용으로 인해 주간시간대 평균기온에 영향을 미친 것으로 판단된다. 시나리오 EW\_M은 보도 내 평균기온에도 긍정적인 영향을 미쳤는데, 사람들의 이용이 활발한 주간시간대 평균기온의 경우  $-0.15^{\circ}\text{C}$ 의 기온차를 나타내었으며, 가장 더운 시간대인 14~16시 평균기온의 경우  $-0.60^{\circ}\text{C}$ 의 온도차를 기록하여 시나리오 중 가장 큰 냉각 효과를 기록했다. 그러나 20시~05시 야간시간대의 경우 추가녹지를 조성한 결과 시나리오 EW\_N에서  $-0.02^{\circ}\text{C}$ 를 기록한 것을 제외하고는 평균기온이 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 야간시간대의 경우 주간시간대 냉각효과와 비교하여 열환경 개선 효과는 미미하나, 그 외 녹지조성 위치와 비교해 볼 때 북측보도 추가녹지를 조성하는 것이 열환경 개선에 가장 유리한 것으로 판단된다.

도시 냉각 효과 및 보행자 열쾌적성 증대 측면에서 가장 높은 효과를 나타낸 시나리오 EW\_M를 중점적으로 살

표 5. 동서방향 추가 녹지 조성 위치에 따른 기온 저감 효과 분석

(단위: °C)

시간	기본 시나리오 (EW_B)		남측보도 추가녹지 조성 시나리오 (EW_S)				북측보도 추가녹지 조성 시나리오 (EW_N)				도로중앙 추가녹지 조성 시나리오 (EW_M)			
	거리 평균	보도 평균	거리 평균		보도 평균		거리 평균		보도 평균		거리 평균		보도 평균	
			기온	온도 변화	기온	온도 변화	기온	온도 변화	기온	온도 변화	기온	온도 변화	기온	온도 변화
06시	24.33	24.25	24.45	0.11	24.30	0.04	23.99	-0.34	23.88	-0.38	24.51	0.18	24.40	0.15
08시	25.51	24.59	25.42	-0.09	24.87	0.28	25.72	0.20	25.23	0.63	25.17	-0.34	24.75	0.15
10시	30.98	29.21	30.43	-0.55	30.11	0.90	30.46	-0.52	30.12	0.91	30.18	-0.80	29.87	0.67
12시	33.21	31.66	32.02	-1.19	31.73	0.07	32.11	-1.09	31.78	0.12	31.87	-1.34	31.61	-0.05
14시	34.22	32.93	32.68	-1.54	32.43	-0.50	32.74	-1.48	32.46	-0.47	32.53	-1.69	32.33	-0.60
16시	34.10	33.04	32.77	-1.33	32.57	-0.46	32.86	-1.25	32.63	-0.41	32.59	-1.51	32.43	-0.60
18시	32.50	31.84	31.68	-0.82	31.55	-0.29	31.75	-0.75	31.60	-0.23	31.48	-1.02	31.40	-0.44
20시	30.01	29.75	29.77	-0.24	29.66	-0.09	29.81	-0.20	29.64	-0.11	29.66	-0.35	29.59	-0.17
22시	27.89	27.61	28.11	0.21	28.00	0.39	28.17	0.28	28.02	0.41	28.17	0.28	28.08	0.47
00시	26.54	26.40	27.00	0.46	26.89	0.50	26.88	0.34	26.74	0.35	27.08	0.53	26.99	0.59
02시	25.69	25.58	25.98	0.29	25.86	0.28	25.70	0.01	25.57	-0.01	26.05	0.36	25.96	0.38
04시	24.83	24.75	25.03	0.19	24.88	0.14	24.61	-0.23	24.48	-0.27	25.09	0.26	24.98	0.24
일평균기온	29.15	28.47	28.78	-0.37	28.57	0.10	28.73	-0.42	28.51	0.04	28.70	-0.45	28.53	0.07
주간평균기온	31.75	30.54	30.83	-0.92	30.54	0.00	30.94	-0.81	30.63	0.09	30.64	-1.12	30.40	-0.15
야간평균기온	26.99	26.39	27.18	0.18	26.60	0.21	26.53	-0.02	26.39	0.00	27.21	0.22	26.67	0.28

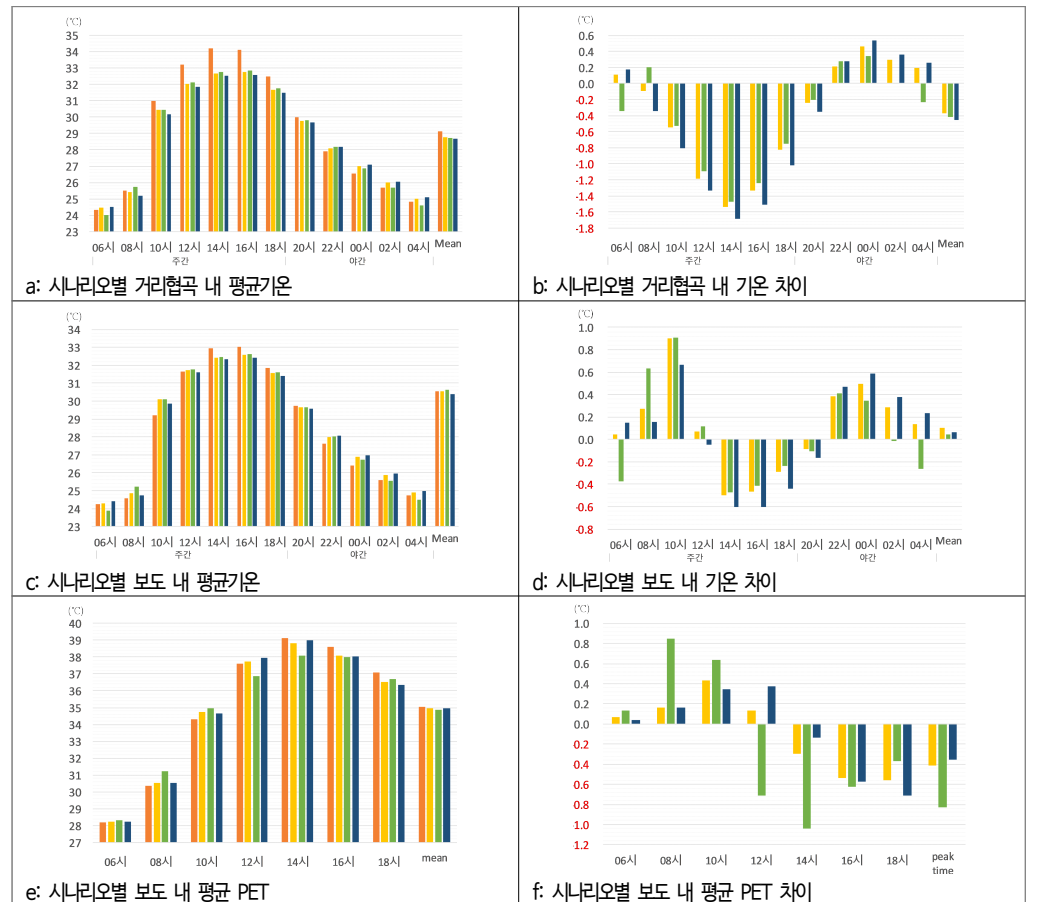


그림 5. 동서방향 거리협곡 녹지조성 위치에 따른 시나리오별 열환경 개선 효과 분석: EW\_B 기준

범례 : ■ EW\_B ■ EW\_S ■ EW\_N ■ EW\_M

피해보면, 거리협곡 전체 평균기온, 보도 내 평균기온, 열피크타임 평균기온, 주간평균기온에서 가장 낮은 기온을 기록했다(표 5, 그림 5a, 5b 참조). 거리협곡 내 평균기온의 경우 일평균기온  $-0.45^{\circ}\text{C}$ , 주간평균기온  $-1.12^{\circ}\text{C}$ 의 기온차를 나타냈으며, 열스트레스가 가장 높은 14~16시 시간대의 경우 거리협곡 내 평균기온 기준 최대  $-1.69^{\circ}\text{C}$ 의 기온차를 기록했다. 그러나 22시 이후 야간시간대 평균기온의 경우는 시나리오 EW\_B보다 시나리오 EW\_M이 더 높은 기온을 기록했다. 이는 장파복사 분석 결과, 수목의 수관이 야간 장파복사의 방출을 방해하여 열에너지의 방출량이 줄어들어 인한 것으로 판단할 수 있으며, 이로 인해 야간에는 평균적으로  $0.22^{\circ}\text{C}$ 의 온도 상승을 기록했다(표 5, 그림 6). 이를 종합해 볼 때, 추가녹지 조성으로 인한 일평균기온의 하락은 수목의 수관이 형성한 그들의 효과가 야간 장파복사 방출을 방해하는 효과보다 더 크게 작용한 것으로 판단할 수 있으며, 이는 수목의 그늘 형성은 주간동안 거리협곡 내 열축적량을 줄여 거리협곡 내 열환경을 개선한다는 Lachapelle et al.(2023)의 연구 결과와 일치한다.

더불어 보도에 녹지를 추가 조성한 시나리오를 분석한 결과 시나리오 EW\_N이 시나리오 EW\_S보다 냉각 효과가 높게 나타났다(표 5, 그림 5c, 5d 참조). 거리협곡 내 일평균기온을 기준으로 살펴보면, 시나리오 EW\_N의 경우 일평균기온  $-0.42^{\circ}\text{C}$ 의 기온차를 기록하였으며, 시나리오 EW\_S의 경우 일평균기온  $-0.37^{\circ}\text{C}$ 의 기온차를 나타냈다. 그러나 열피크타임 평균기온, 주간평균기온에서는 EW\_S에 추가녹지를 조성했을 때 더 큰 냉각 효과를 기록했다. 따라서 도로 중앙에 녹지를 조성하지 못하는 환경적 요인이 있을 경우 열쾌적성 증대를 위한 목표시간대의 설정에 따라 가장 효과적인 녹지조성 위치가 결정될 수 있다.

PET의 경우 보행자 열쾌적성이 가장 높은 추가녹지 조성 위치는 시나리오 EW\_N로 나타났으며, 그 뒤를 이어 EW\_S, EW\_M 순으로 나타났다. 주간평균 PET 기준 시나리오 EW\_N에서  $-0.16^{\circ}\text{C}$ 로 가장 큰 차이값을 나타냈으며, EW\_S는  $-0.08^{\circ}\text{C}$ , EW\_M는  $-0.07^{\circ}\text{C}$ 를 기록했다. 가장 더운 시간대인 14시~16시 평균 PET 역시 시나리오 EW\_N가  $-0.83^{\circ}\text{C}$ 로 가장 큰 차이값을 나타냈으며, EW\_S는  $-0.42^{\circ}\text{C}$ , EW\_M는  $-0.35^{\circ}\text{C}$ 를 기록했다(표 6, 그림 5e, 5f 참조). 따라서 동서방향 거리협곡의 경우는 북측보도에 추가녹지를 조성하는 것이 보행자 열쾌적성 증대에 가장 효과적이며, 도로 중앙보다는 보행자에게 그늘을 제공할 수 있는 보도쪽에 추가녹지를 조성하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

### 3.2.2 N-S 방향 거리협곡 분석 결과

기온의 경우 냉각 효과가 가장 높게 나타난 시나리오는 도로 중앙에 녹지를 조성한 시나리오 NS\_M인 것으로 나타났으며, 보도측 녹지의 경우는 동측보도에 녹지를 조성한 시나리오 NS\_E와 서측보도에 녹지를 조성한 시나리오 NS\_W의 냉각 효과가 비슷한 것으로 나타났다(표 7, 그림 7 참조). 거리협곡 내 일평균기온을 기준으로 살펴보면, 시나리오 NS\_M의 경우 기본 시나리오(EW\_B)와 비교하여  $-0.34$ 의 기온차를 보였으며, 시나리오 NS\_E의 경우  $-0.25^{\circ}\text{C}$ , 시나리오 NS\_W의 경우  $-0.24^{\circ}\text{C}$ 의 기온차를 기록했다.

그러나 남북방향 거리협곡은 동서방향 거리협곡과는 다르게 추가녹지 조성 위치에 따른 냉각 효과가 시간대별로 다르게 나타났다(표 7, 그림 7a, 7b 참조). 주간시간대 평균기온의 경우 시나리오 NS\_M이  $-0.49^{\circ}\text{C}$ 를 기록하여 냉각 효과가 가장 크게 나타났으며, 시나리오 NS\_W  $-0.24^{\circ}\text{C}$ , 시나리오 NS\_E  $-0.01^{\circ}\text{C}$  순으로 냉각 효과를 나타냈다(표 7, 그림 7). 이는 도로 중앙에 녹지를 조성하는 경우 주간 시간 동안 건물 및 주변 수목의 영향을 거의 받지

표 6. 동서방향 추가 녹지조성 위치에 따른 열쾌적성 개선효과 분석\_보도 내 평균 PET (단위:  $^{\circ}\text{C}$ )

시간	기본 시나리오 (EW_B)	남측보도 추가녹지 조성 시나리오 (EW_S)		북측보도 추가녹지 조성 시나리오 (EW_N)		도로중앙 추가녹지 조성 시나리오 (EW_M)	
	기온	온도변화	기온	온도변화	기온	온도변화	기온
06시	28.18	28.25	0.07	28.31	0.13	28.22	0.04
08시	30.37	30.53	0.16	31.22	0.85	30.54	0.16
10시	34.32	34.75	0.43	34.96	0.64	34.66	0.35
12시	37.59	37.72	0.13	36.87	-0.72	37.96	0.37
14시	39.13	38.84	-0.29	38.09	-1.04	39.00	-0.14
16시	38.60	38.06	-0.54	37.98	-0.62	38.03	-0.57
18시	37.08	36.52	-0.56	36.71	-0.37	36.36	-0.71
주간 평균	35.04	34.95	-0.08	34.88	-0.16	34.97	-0.07
14~16시 평균	38.87	38.45	-0.42	38.04	-0.83	38.51	-0.35

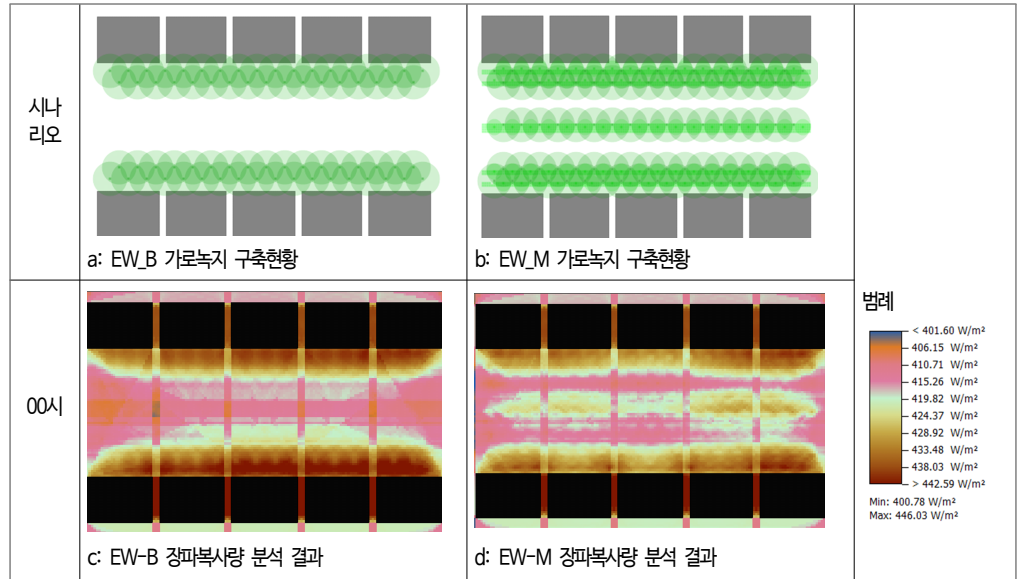


그림 6. 수목 캐노피 등에서 방출되는 장파복사량 분석 결과

범례 : ● 교목 ■ 관목 ■ 건물

표 7. 남북방향 추가 녹지 조성 위치에 따른 기온 저감 효과 분석

(단위: °C)

시간	기본 시나리오 (NS_B)		동측보도 추가녹지 조성 시나리오 (NS_E)				서측보도 추가녹지 조성 시나리오 (NS_W)				도로중앙 추가녹지 조성 시나리오 (NS_M)			
	거리 평균	보도 평균	거리 평균		보도 평균		거리 평균		보도 평균		거리 평균		보도 평균	
			기온	온도 변화	기온	온도 변화	기온	온도 변화	기온	온도 변화	기온	온도 변화	기온	온도 변화
06시	23.54	23.43	23.02	-0.53	22.74	-0.69	23.29	-0.26	23.23	-0.20	23.43	-0.12	23.33	-0.10
08시	25.01	24.69	25.51	0.50	25.45	0.76	24.59	-0.42	24.38	-0.31	24.41	-0.60	24.42	-0.27
10시	30.68	30.36	30.55	-0.13	30.37	0.01	30.46	-0.23	30.07	-0.30	30.00	-0.69	29.75	-0.61
12시	32.02	31.70	31.87	-0.15	31.60	-0.10	31.84	-0.18	31.50	-0.20	31.71	-0.31	31.47	-0.23
14시	32.63	32.35	32.46	-0.17	32.19	-0.16	32.41	-0.22	32.16	-0.20	32.17	-0.46	31.99	-0.37
16시	32.61	32.48	32.59	-0.02	32.44	-0.05	32.40	-0.21	32.30	-0.18	32.09	-0.52	32.03	-0.45
18시	31.46	31.45	31.38	-0.08	31.36	-0.09	31.29	-0.16	31.30	-0.16	31.06	-0.39	31.10	-0.35
20시	29.94	29.90	29.65	-0.29	29.58	-0.31	29.73	-0.21	29.69	-0.21	29.59	-0.35	29.58	-0.32
22시	28.42	28.28	28.13	-0.29	28.03	-0.25	28.19	-0.23	28.06	-0.22	28.20	-0.22	28.09	-0.19
00시	27.10	26.93	26.56	-0.54	26.50	-0.43	26.87	-0.23	26.71	-0.22	26.92	-0.19	26.76	-0.17
02시	25.74	25.59	25.06	-0.68	24.96	-0.63	25.50	-0.24	25.36	-0.23	25.60	-0.14	25.44	-0.15
04시	24.38	24.25	23.73	-0.65	23.54	-0.71	24.13	-0.25	24.04	-0.22	24.28	-0.10	24.14	-0.12
일평균기온	28.63	28.45	28.37	-0.25	28.23	-0.22	28.39	-0.24	28.23	-0.22	28.29	-0.34	28.18	-0.28
주간평균기온	30.73	30.51	30.73	-0.01	30.57	0.06	30.50	-0.24	30.28	-0.22	30.24	-0.49	30.13	-0.38
야간평균기온	26.52	26.40	26.02	-0.50	25.89	-0.50	26.28	-0.24	26.18	-0.22	26.33	-0.19	26.22	-0.17

않고 그늘 면적을 가장 넓게 조성하여 태양 단파복사를 가장 효과적으로 차단했음을 의미한다. 또한 시나리오 NS\_W가 시나리오 NS\_E보다 냉각 효과가 큰 이유는 동측보도에 추가된 녹지는 오전 시간 동안 건물 그늘의 영향으로 수목 그늘의 효과가 축소(Lachapelle et al., 2023)된 반면에, 서측보도에 추가 조성된 녹지는 오전부터 정오 사이에 서쪽 건물벽과 포장면에 대한 열충적량을 감소시켜 그로 인한 냉각 효과가 오후까지 영향을 미친 것으로 판단된다(Ng et al., 2012). 더불어 열피크타임인 14시~16시 시간대의 냉각 효과 역시 시나리오 NS\_M에서 최대 -0.52°C로 가장 큰 기온차를 나타냈으며, 시나리오 NS\_W에서 최대 -0.22°C, 시나리오 NS\_E에서 최대 -0.17°C

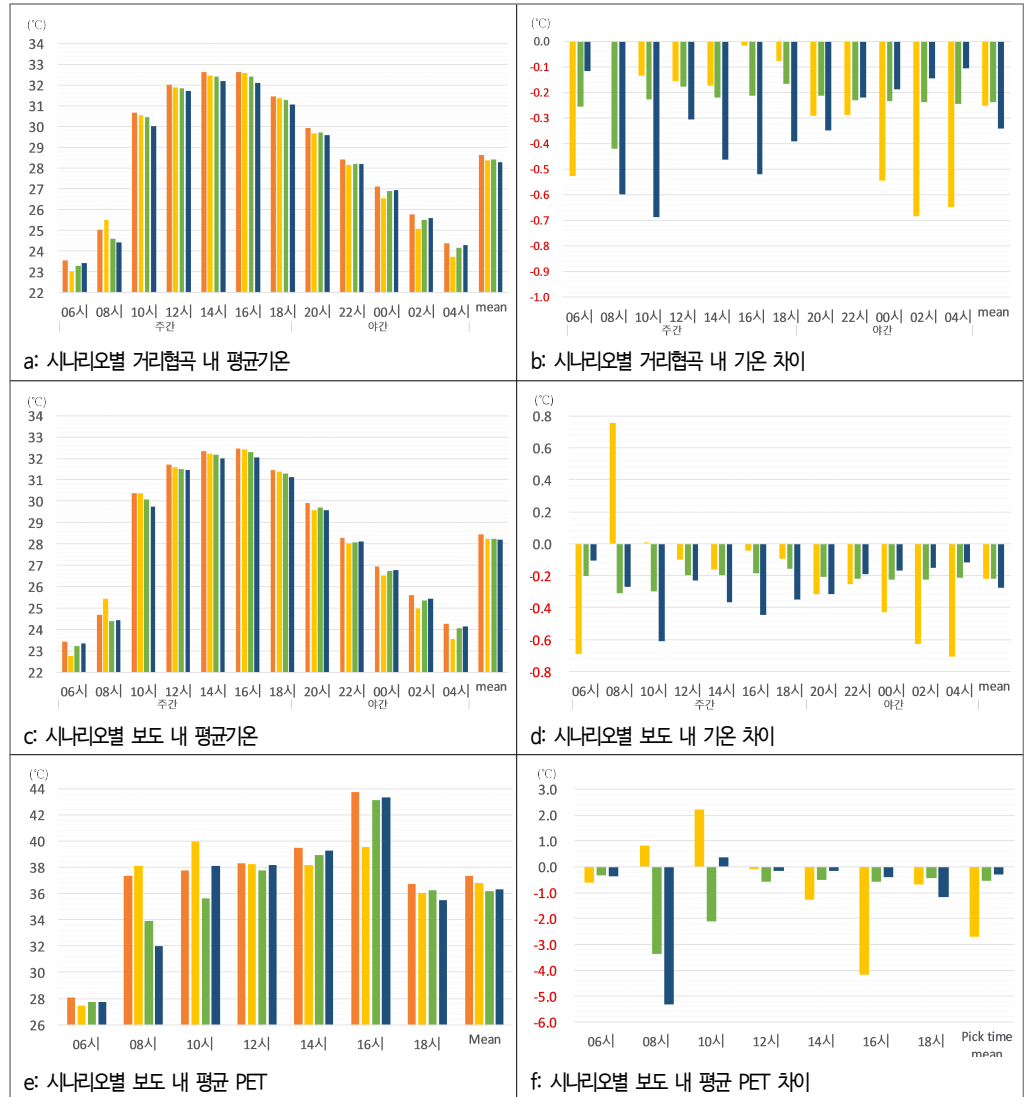


그림 7. 남북방향 거리협곡 녹지조성 위치에 따른 시나리오별 열환경 개선 효과: NS\_B 기준

범례 : ■ NS\_B    ■ NS\_E    ■ NS\_W    ■ NS\_M

순으로 기온차를 기록했다. 따라서 일평균기온의 저감 및 주간시간대 냉각 효과가 중요한 거리협곡의 경우는 도로 중앙에 추가녹지를 조성하는 것이 도시열환경 개선에 가장 효율적이다. 또한 시나리오 NS\_M은 보도 내 평균기온에도 긍정적인 영향을 미쳤는데, 사람들이 주로 이용하는 주간시간대 평균기온의 경우  $-0.15^{\circ}\text{C}$ 의 기온차를 나타내었으며, 가장 더운 시간대인 14~16시 평균기온의 경우  $-0.41^{\circ}\text{C}$ 의 온도차를 기록하여 시나리오 중 가장 큰 냉각 효과를 나타냈다(표 7, 그림 7c, 7d 참조).

그러나 야간시간대 평균기온의 경우 시나리오 NS\_E에서 가장 큰 냉각 효과를 보였다. 20시~05시 야간평균기온의 경우 시나리오 NS\_E에서  $-0.50^{\circ}\text{C}$ 의 기온 차이를 나타내어 가장 큰 냉각 효과를 기록했으며, 시나리오 NS\_W가  $-0.24^{\circ}\text{C}$ , 시나리오 NS\_M이  $-0.19$ 를 기록하여 주간시간대와 정반대의 결과를 나타냈다(표 7, 그림 7a, 7b 참조). 이는 동측보도에 추가한 녹지의 경우 오후 시간의 뜨거운 직사광선을 효율적으로 차단하여 동측 건물벽과 포장면에 축적되는 열용량을 효과적으로 줄인 영향으로 판단되며(Lachapelle et al., 2023), 반대로 도로 중앙에 추가 녹지를 조성한 경우는 수목의 위치 및 높은 수관피복률로 인해 야간 장파복사의 방출을 더 많이 방해하여 야간시간대의 냉각 효과가 더 큰 폭으로 줄어든 것으로 판단된다. 더불어 남북방향의 거리협곡의 경우 녹지조성에 따른 냉각 효과가 야간에도 지속되는 특징을 나타냈다.

남북방향 거리협곡의 PET 역시 기온과 마찬가지로 추가녹지 조성 위치에 따른 냉각 효과가 시간대별로 다르게 나타났다(표 8, 그림 7e, 7f 참조). 먼저 주간시간대 전체에 대한 평균 PET를 기준으로 보행자 열쾌적성이 가장 높은 추가녹지 조성 위치는 시나리오 NS\_W로 나타났으며, 그 뒤를 이어 NS\_M, NS\_E 순으로 나타났다. 주간 평균

표 8. 남북방향 추가 녹지조성 위치에 따른 열쾌적성 개선효과 분석\_보도 내 평균 PET

(그림: °C)

시간	기본 시나리오 (EW_B)	동측보도 추가녹지 조성 시나리오 (NS_E)		서측보도 추가녹지 조성 시나리오 (NS_W)		도로중앙 추가녹지 조성 시나리오 (NS_M)	
	기온	온도변화	기온	온도변화	기온	온도변화	기온
06시	28.07	27.47	-0.60	27.73	-0.35	27.70	-0.37
08시	37.32	38.13	0.81	33.95	-3.37	31.99	-5.32
10시	37.75	39.96	2.21	35.63	-2.12	38.12	0.38
12시	38.32	38.24	-0.08	37.74	-0.59	38.15	-0.17
14시	39.47	38.20	-1.27	38.96	-0.51	39.29	-0.18
16시	43.73	39.56	-4.18	43.14	-0.59	43.32	-0.42
18시	36.70	36.02	-0.68	36.26	-0.44	35.51	-1.19
낮평균	37.34	36.80	-0.54	36.20	-1.14	36.30	-1.04
14~16시	41.60	38.88	-2.72	41.05	-0.55	41.30	-0.30

PET 기준 시나리오 NS\_W은 -1.14°C로 가장 큰 차이값을 나타냈으며, NS\_M는 -1.04°C, NS\_E는 -0.54°C를 기록했다. 오전시간대에는 시나리오 NS\_W가 가장 큰 차이값을 나타냈으며, 최대 -3.37°C를 기록했다. 오후시간대에는 시나리오 NS\_E가 가장 높은 열쾌적성 향상을 보였는데, 최대 -4.18°C를 기록했다. 가장 더운 시간대인 14시~16시 평균 PET는 오후시간 평균 PET와 마찬가지로 시나리오 NS\_E에서 -2.72°C로 가장 큰 차이값을 나타냈으며, NS\_W는 -0.55°C, NS\_M는 -0.30°C를 기록했다. 따라서 남북방향 거리협곡의 경우 열쾌적성 증대를 위한 목표시간대의 설정에 따라 가장 효과적인 녹지조성 위치가 결정될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3. 도시열환경 개선을 위한 추가녹지 조성 전략

#### 3.3.1. 기온 저감을 위한 추가녹지조성 전략

기온저감을 위한 전략적 가로녹지 설계는 도시공간적 환경(Andreou, 2013; Achour-Younsi and Kharrat, 2016; Coutts et al., 2016; Chatzidimitriou and Yannas, 2017), 사회 인구학적 특성(Norton et al., 2015), 주변 토지이용에 따른 가로 이용 특성 및 주요 이용시간대(임현우 등, 2022) 등을 고려하여 설계하는 것이 중요하며, 가로녹지 내 기온 저감효과는 블록 단위 및 지역 단위의 열환경에도 영향을 미친다. 특히 주간 및 야간 평균기온이 높아 열스트레스가 높은 지역, 인구 밀집 지역, 노인이나 어린이의 인구 비율이 높은 지역, 경제적 취약계층 밀집 지역 등 열환경 취약지역에서는 기온 저감을 통한 도시열환경 개선이 필요하다. 동서방향 거리협곡의 경우 일평균 기온을 기준으로 살펴본 결과, 추가녹지 조성 시 도로 중앙에 녹지를 조성하는 것이 기온저감 효과가 가장 크게 나타났으며, 도로 중앙, 북측보도, 남측보도 순으로 열환경 개선효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 주간시간대 및 열피크타임 역시 도로 중앙에 녹지를 조성하는 것이 온도저감에 가장 효율적인 것으로 나타났으며, 도로 중앙, 북측보도, 남측보도 순으로 열환경 개선효과가 큰 것으로 나타났다. 그러나 야간에는 북측보도에 추가녹지를 조성한 시나리오를 제외한 모든 시나리오에서 기온 상승이 기록되었다(그림 8 참조). 따라서 주간시간대 이용률이 높은 상업지

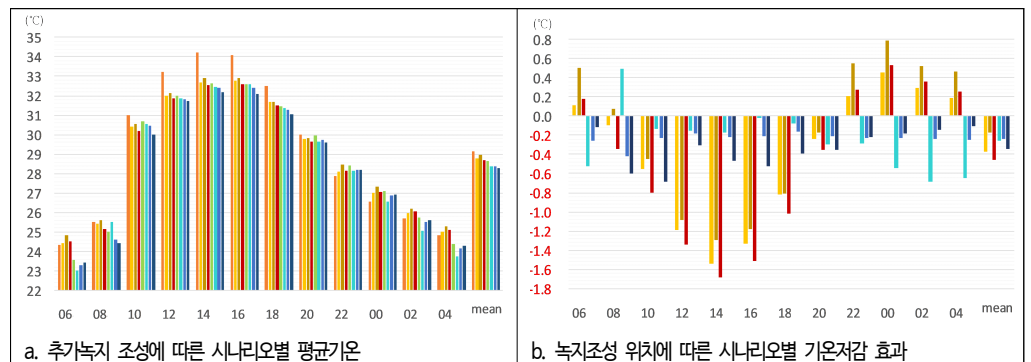


그림 8. 시나리오별 열환경 개선 효과

범례 : ■ EW\_B ■ EW\_S ■ EW\_N ■ EW\_M ■ NS\_B ■ NS\_E ■ NS\_W ■ NS\_M

역이나 중심업무지역 주변 도로 등에서는 도로 중앙에 녹지공간을 추가로 조성하는 것이 기온저감에 효과적일 수 있다. 반대로, 야간시간대 기온이 열쾌적성에 상당한 영향을 미치는 주거지역 주변 도로에서는 북측보도에 추가녹지를 조성하는 것이 기온저감에 효과적일 수 있다(표 9, 그림 9 참조).

남북방향의 거리협곡의 경우 일평균을 기준으로 살펴본 결과, 동서방향 거리협곡과 마찬가지로 도로 중앙에 추가녹지를 조성하는 것이 냉각 효과가 가장 크게 나타났으며, 동측보도와 서측보도의 경우는 열환경 개선 효과가 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 시간대별 녹지의 냉각 효과는 태양의 방향 및 고도의 변화에 따른 건물 그늘의 방향 및 면적의 변화로 인해 녹지조성 위치에 따라 상이한 결과를 나타냈다. 주간시간대 및 오피크타임 시간대의 경우 도로 중앙에 추가 녹지를 조성하는 것이 냉각 효과가 가장 크게 나타났으며, 도로 중앙, 서측보도, 동측보도 순으로 열환경 개선효과가 큰 것으로 나타났다. 그러나 야간에는 동측보도에 추가녹지를 조성한 경우가 냉각 효과가 가장 크게 나타났으며 오히려 도로 중앙에 추가녹지를 조성한 경우가 가장 적은 냉각 효과를 나타냈다(그림 8 참조). 따라서 주간시간대 열환경 개선이 중요한 상업지역이나 중심업무지역 주변 도로 등에서는 도로 중앙부에 추가녹지를 조성하는 것이 기온저감에 효과적일 수 있다. 반대로, 야간시간대 열쾌적성에 큰 영향을 미치는 주거지역 주변 도로의 경우는 동측보도에 추가녹지를 조성하는 것이 열환경 개선에 효과적일 수 있다(표 9, 그림 9 참조).

더불어 도로 방향에 따른 추가 녹지조성 냉각 효과를 검토한 결과 일평균기온, 주간평균기온, 오피크타임 평균기온의 경우 동서방향의 거리협곡이 남북방향 거리협곡보다 더 높은 냉각 효과를 기록하였다(그림 8 참조). 도로 방향과 관계없이 냉각 효과가 가장 높게 나타난 도로 중앙 추가녹지 조성 시나리오를 중심으로 거리협곡 내 일평균 기온을 살펴본 결과, 동서방향의 경우  $-0.45^{\circ}\text{C}$ 의 기온 차이를 나타내었으며 남북방향의 경우  $-0.34^{\circ}\text{C}$ 의 기온차이를 나타냈다. 주간시간대 평균기온의 경우, 동서방향의 거리협곡이  $-1.12^{\circ}\text{C}$ 의 기온차이를 나타내어  $-0.49^{\circ}\text{C}$ 의 기온차이를 나타낸 남북방향 거리협곡보다 높은 열저감 효과를 나타냈다. 열스트레스가 가장 높은 14시 평균기온 역시 동서방향 거리협곡이  $-1.69^{\circ}\text{C}$ 의 기온차이를 기록하여  $-0.46^{\circ}\text{C}$ 의 기온차이를 기록한 남북방향 거리협곡보다 높은 냉각 효과를 나타냈다. 냉각 효과에 앞서 그림 7a에서 나타나듯 주간평균기온 및 오피크타임 평균기온 측면에서도 동서방향 거리협곡의 열스트레스가 남북방향 거리협곡보다 더 높은 특징(Taleghani et al., 2015; Antoszewski et al., 2022; Lachapelle et al., 2023)을 가지므로 온열질환 방지 및 주간시간대 열환경 개선을 위해서는 동서방향 거리협곡을 우선적으로 녹화하는 것이 타당하다. 따라서 열환경 취약지역 내 가로, 상업지역이나 중심업무지역, 관광지역 등 주간시간대 사람들의 활동이 많은 가로, 버스정류장, 지하철 등의 교통 밀집 가로, 병원이나 관공서 등 주요 시설 주변 가로 등은 추가녹지 조성지역 선정 시 동서방향의 거리협곡을 우선적으로 선정하는 것이 열환경 개선에 효과적일 수 있다.

본 연구는 가로협곡 내 추가녹지 조성 시 열환경 개선에 효과적인 녹지조성 위치를 연구한 결과이며, 가로수가 없는 거리협곡의 경우 효과적인 녹지조성 위치와는 다른 결과를 나타내었다. 선행연구에 따르면 가로수가 없는 거리협곡의 경우 동서방향의 거리협곡은 북측보도에, 남북방향 거리협곡의 경우 동측보도에 가로수를 조성하는 것이 보

표 9. 열환경 개선 목표 시간대에 적합한 도로방향별 추가녹지 조성 위치 기온 저감 (단위:  $^{\circ}\text{C}$ )

구분	E-W			N-S		
	남측보도	북측보도	도로중앙	동측보도	서측보도	도로중앙
일평균		○	◎	○	○	◎
주간시간대	○		◎		○	◎
오피크타임	○		◎		○	◎
야간시간대		◎	○	◎	○	

범례 : ◎ 최적의 녹지조성 위치 ○ 적절한 녹지조성 위치

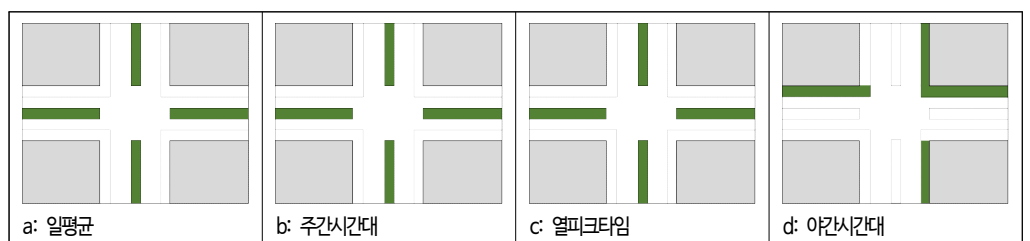


그림 9. 기온 저감을 위한 최적의 추가녹지 조성 위치

행자 열쾌적성을 높일 수 있다고 보고하고 있다(Lachapelle et al., 2023; 임현우 등, 2022). 따라서 열환경 개선을 위한 녹지조성 계획 시 기존 가로수의 유무에 따라 다른 녹지조성 전략을 세우는 것이 필요하다.

### 3.3.2. 보행자 열쾌적성 증대를 위한 추가녹지 조성 전략

보행자 열쾌적성의 증대는 기온저감을 통한 열환경 개선보다 보도 내 PET를 개선하는 것이 더 효과적일 수 있다(Zhou et al., 2024). 가로수의 수관은 그늘 제공을 통해 태양복사를 차단하여 보행자가 느끼는 열스트레스를 직접적으로 개선할 수 있다(Lai et al., 2019; Balany et al., 2020; Morakinyo et al., 2020; Antoszewski et al., 2022). 동서방향 거리협곡의 경우 보행자 열쾌적성 증대를 위해서는 주간시간대 평균 PET 및 열피크타임 PET 향상 폭이 가장 큰 북측보도에 추가녹지를 조성하는 것이 열쾌적성 향상에 가장 효과적이며, 북측보도에 녹지 조성 어려운 경우는 남측보도에 추가녹지를 조성하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 남북방향 거리협곡의 경우는 보행자 열쾌적성 증대를 위한 녹지조성 위치가 시간대별로 다르게 나타났다(그림 10 참조). 남북방향 거리협곡의 경우 보행자 열쾌적성 향상을 위해서는 거리협곡의 이용 시간 및 이용자 특성을 고려하여 녹지조성 위치를 선정하는 것이 필요하다. 특히 상업지역이나 관광지 내 거리협곡, 버스정류장, 지하철 등의 교통밀집가로 등 주간시간대 통행량이 많은 지역과 병원이나 노인정, 유치원, 초등학교 등 열환경 취약계층이 주로 이용하는 시설이 위치한 주변 가로의 경우는 그 지역을 이용하는 주이용시간대 및 통행량을 고려하여 녹지조성 위치를 선정하는 것이 온열질환 예방 및 열스트레스 완화에 효과적일 수 있다(표 10, 그림 11 참조).

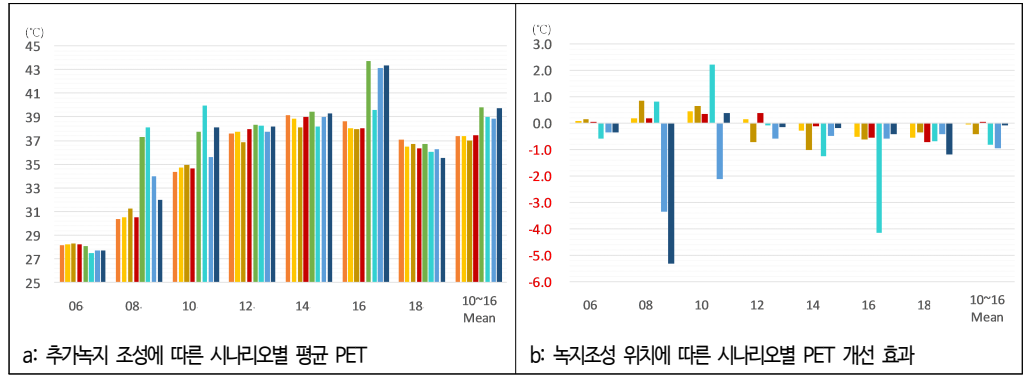


그림 10. 시나리오별 보행자 열쾌적성 개선 효과

범례 : ■ EW\_B ■ EW\_S ■ EW\_N ■ EW\_M ■ NS\_B ■ NS\_E ■ NS\_W ■ NS\_M

표 10. 열환경 개선 목표시간대에 적합한 도로방향별 추가녹지 조성 위치\_보행자 열쾌적성 (단위: °C)

구분	E-W			N-S		
	남측보도	북측보도	도로중앙	동측보도	서측보도	도로중앙
주간시간대 평균 PET	○	◎			◎	○
오전시간대 평균 PET	-	-	-		◎	○
오후시간대 평균 PET	○	◎		◎	○	
14~16시 평균 PET	○	◎		◎	○	

범례 : ◎ 최적의 녹지조성 위치 ○ 적절한 녹지조성 위치

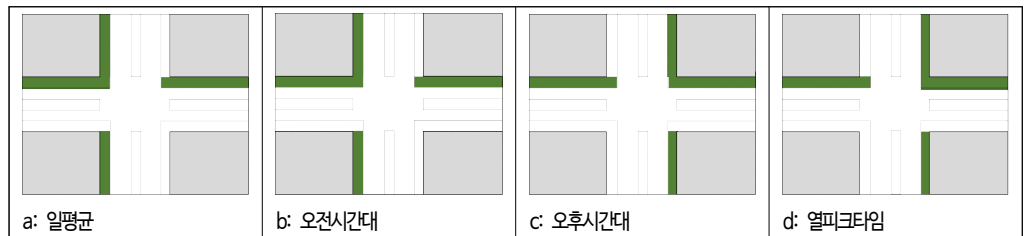


그림 11. 보행자 열쾌적성 향상을 위한 최적의 추가녹지 조성 위치

## 4. 결론

도시 열환경 개선을 위해 세계 여러 도시들은 수관피복률 30~40% 달성을 목표로 가로녹지 정책을 추진 중이며, 우리나라 역시 관련 사업을 확대하고 있다. 그러나 가로수 추가 식재, 도로다이아트 등을 통한 가로녹지 조성 등 열환경 개선을 위한 녹지조성 사업 수행 시 가이드라인의 부재로 인해 실효성있는 녹지조성이 어려운 실정이다. 따라서 본 연구는 열스트레스가 높은 가로 내 추가녹지 조성 시 열환경 개선에 가장 효과적인 녹지조성 위치를 제안하고자 총 8가지의 시나리오를 설계하고 이를 비교·분석하였다.

연구 결과, 기온 저감 차원에서는 거리방향과 관계없이 도로 중앙에 녹지를 추가 조성하는 것이 열환경 개선에 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 보행자 열쾌적성 향상을 위해서는 보행자가 직접 그늘의 혜택을 볼 수 있도록 도로 중앙보다는 보도쪽에 추가녹지를 조성하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 열환경 취약지역과 같이 전반적인 열환경 개선이 필요한 지역의 경우는 거리방향에 관계없이 도로 중앙에 추가녹지를 조성하는 것을 권장하며, 이러한 경우는 녹지형 중앙분리대의 설치가 가장 효과적일 수 있다.

그러나 주간시간대 사람들의 활동이 많은 가로, 버스정류장, 지하철 등의 교통 밀집 가로, 병원이나 관공서 등 주요 시설 주변 가로 등은 보행자 열쾌적성 향상이 기온 저감보다 더 중요하게 작용할 수 있으므로 동서방향 거리협곡의 경우는 북측보도에, 남북방향의 거리협곡은 동측 또는 서측보도에 추가녹지를 조성하는 것을 권장한다. 특히 남북방향 거리협곡은 시간대별 녹지의 냉각효과가 다르게 나타남을 고려하여, 전일 시간대 구분없이 이용률이 높거나 오전시간대 이용률이 높은 거리협곡은 서측 보도에, 오후시간대 이용률이 높은 거리협곡은 동측보도에 녹지를 조성하는 것이 보행자 열쾌적성 향상에 효과적이다. 더불어 주거지역과 같이 야간기온에 민감한 지역의 경우는 동서방향 거리협곡은 북측보도, 남북방향 거리협곡은 동측보도에 추가녹지를 조성하는 것이 야간열환경 개선에 효과적이다.

본 연구는 한정된 가상공간에 대한 시뮬레이션 결과로서 실제 도시지역보다 작고 단순하게 구성되어 있으며, 도시 내 다양한 변수가 통제된 대상지에 대한 시뮬레이션 된 결과이다. 따라서 추후 사례지를 중심으로 한 녹지조성 위치에 따른 열환경 개선 효과에 대한 추가 연구가 필요하며, 나아가 추가녹지 조성계획을 가진 대상지를 중심으로 녹지조성 전후 모니터링을 통한 검증 또한 요구된다. 더불어 본 연구에서는 분석모델의 정확성 검증 시 PET 값에 대한 검증이 이루어지지 않았다는 연구 한계가 존재한다.

본 연구의 결과는 도시 및 지역 규모에서 열환경 개선을 위한 녹지조성 방법에 대한 기초지식을 제공할 수 있으며, 나아가 도시계획가 및 설계자에게 과학에 기반한 녹지조성 계획을 지원할 수 있을 것으로 기대한다.

## References

1. 박주현, 엄정희(2024) 도시열환경 개선 및 보행자 열 쾌적성 증대를 위한 효율적 가로녹지 조성방안 연구-계획 및 설계를 위한 매개변수 도출과 녹지조성 방법 제안을 중심으로. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 52(2): 21-38.
2. 박주현, 엄정희(2024) 도시열환경 개선 및 보행자 열 쾌적성 증대를 위한 효율적 가로녹지 조성방안 연구-계획 및 설계를 위한 매개변수 도출과 녹지조성 방법 제안을 중심으로. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 52(2): 21-38.
3. 산림청(2022) 가로수 조성·관리 매뉴얼. 산림청 보고서.
4. 엄정희, 민진규, 박주현, 손정민, 서홍덕, 오정학(2023) 가로수 식재 시나리오에 따른 기온 및 미세먼지 저감 효과 분석. *한국지리정보학회지* 26(2): 68-81.
5. 엄정희, 박주현, 손정민, 성옥제, 민진규, 김주은(2022) 바람길숲 유형별 조성 효과 및 환경 특성 분석. 국립산림과학원 연구보고서.
6. 임현우, 조상만, 박수국(2022) ENVI-Met 시뮬레이션을 통한 도로 방향별 가로수 식재 형태에 따른 여름철 열환경 개선 효과 분석. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 50(2): 1-22.
7. 정희은, 한봉호, 광정인(2015) 서울 도심 가로수 및 가로녹지의 기온 저감 효과와 가능 향상 연구. *한국조경학회지* 43(4): 37-49.
8. 황민수, 김형규(2023) 새로운 광화문광장 조성 후의 여름철 미기후 및 열쾌적성 변화. *한국도시설계학회지 도시설계* 24(2): 23-41.
9. Achour-Younsi, S. and F. Kharrat(2016) Outdoor thermal comfort: impact of the geometry of an urban

- street canyon in a Mediterranean subtropical climate—case study Tunis, Tunisia. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 216: 689–700.
10. Ali-Toudert, F. and H. Mayer(2006) Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment* 41(2): 94–108
  11. Andreou, E.(2013) Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy* 55: 182–188.
  12. Antoszewski, P., M. Krzyżaniak and D. Świerk(2022) The future of climate-resilient and climate-neutral city in the temperate climate zone. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(7): 4365.
  13. Antoszewski, P., D. Świerk and M. Krzyżaniak(2020) Statistical review of quality parameters of blue-green infrastructure elements important in mitigating the effect of the urban heat island in the temperate climate(C) zone. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(19): 7093.
  14. Balany, F., A. W. Ng, N. Muttill, S. Muthukumaran and M. S. Wong(2020) Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy—a review. *Water* 12(12): 3577.
  15. Chatzidimitriou, A. and S. Yannas(2017) Street canyon design and improvement potential for urban open spaces: the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society* 33: 85–101.
  16. Chen, T., H. Yang, G. Chen, C. K. C. Lam, J. Hang, X. Wang, Y. Liu and H. Ling(2021) Integrated impacts of tree planting and aspect ratios on thermal environment in street canyons by scaled outdoor experiments. *Science of The Total Environment* 764: 142920.
  17. City of Melbourne(2012) East Melbourne Urban Forest Precinct Plan 2013–2023. pp.1–46
  18. Coutts, A. M., E. C. White, N. J. Tapper, J. Beringer and S. J. Livesley(2016) Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and applied climatology*, 124(1), 55–68.
  19. Haeri, T., N. Hassan and A. Ghaffarianhoseini (2023). Evaluation of microclimate mitigation strategies in a heterogenous street canyon in Kuala Lumpur from outdoor thermal comfort perspective using Envi-met. *Urban Climate* 52: 101719.
  20. Hami, A., B. Abdi, D. Zarehaghi and S. B. Maulan(2019) Assessing the thermal comfort effects of green spaces: A systematic review of methods, parameters, and plants' attributes. *Sustainable Cities and Society* 49: 101634.
  21. Huang, X., J. Song, C. Wang, T. F. M. Chui and P. W. Chan(2021) The synergistic effect of urban heat and moisture islands in a compact high-rise city. *Building and Environment* 205: 108274.
  22. Huang, J. M., and L. C. Chen(2023) Synergistic effects of roadside trees and spatial geometry on thermal environment in urban streets: A case study in tropical, medium-sized city, Taiwan. *Buildings* 13(8): 2092.
  23. Jamei, E. and P. Rajagopalan(2017) Urban development and pedestrian thermal comfort in Melbourne. *Solar Energy* 144: 681–698.
  24. Kong, L., K. K. L. Lau, C. Yuan, Y. Chen, Y. Xu, C. Ren and E. Ng(2017) Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society* 31: 12–25.
  25. Lachapelle, J. A., E. S. Krayenhoff, A. Middel, P. Coseo and J. Warland(2023) Maximizing the pedestrian radiative cooling benefit per street tree. *Landscape and Urban Planning* 230: 104608.
  26. Lai, D., W. Liu, T. Gan, K. Liu and Q. Chen(2019) A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment*, 661: 337–353.
  27. Lee, H., H. Mayer and W. Kuttler(2020) Impact of the spacing between tree crowns on the mitigation of daytime heat stress for pedestrians inside EW urban street canyons under Central European conditions. *Urban Forestry & Urban Greening* 48: 126558.

28. Lin, P., D. Song and H. Qin(2021) Impact of parking and greening design strategies on summertime outdoor thermal condition in old mid-rise residential estates. *Urban Forestry & Urban Greening* 63: 127200.
29. Liu, Z., W., Cheng, C. Y. Jim, T. E. Morakinyo, Y. Shi and E. Ng(2021) Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. *Building and Environment* 200: 107939.
30. Milošević, D. D., I. V. Bajšanski and S. M. Savić(2017) Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and foot ways. *Urban forestry & urban greening* 23: 113-124.
31. Morakinyo, T. E., L. Kong, K. K. L. Lau, C. Yuan and E. Ng(2017) A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment* 115: 1-17.
32. Morakinyo, T. E. and Y. F. Lam(2016) Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Building and Environment* 103: 262-275.
33. Morakinyo, T. E., K. K. L. Lau, C. Ren and E. Ng(2018) Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving. *Building and Environment* 137: 157-170.
34. Morakinyo, T. E., W. Ouyang, K. K. L. Lau, C. Ren and E. Ng(2020) Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of the Total Environment* 719: 137461.
35. Ng, E., L. Chen, Y. Wang and C. Yuan(2012) A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and environment* 47: 256-271.
36. Norton, B. A., A. M. Coutts, S. J. Livesley, R. J. Harris, A. M. Hunter and N. S. Williams(2015) Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning* 134: 127-138.
37. NSW Government(2021) *Street Tree Planting Design Manual* pp. 1-86.
38. Ouyang, W., T. E. Morakinyo, C. Ren and E. Ng(2020) The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: A study in a subtropical climate. *Building and Environment* 174: 106772.
39. Park, C. Y., D. K. Lee, E. S. Kravynhoff, H. K. Heo, J. H. Hyun, K. Oh and T. Y. Park(2019) Variations in pedestrian mean radiant temperature based on the spacing and size of street trees. *Sustainable Cities and Society* 48: 101521.
40. Rahman, M. A., C. Hartmann, A. Moser-Reischl, M. F. von Strachwitz, H. Paeth, H. Pretzsch, S. Pauleit and T. Rötzer(2020a) Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 287: 107947.
41. Rahman, M. A., L. M. Stratopoulos, A. Moser-Reischl, T. Zölch, K. H. Häberle, T. Rötzer, H. Pretzsch and S. Pauleit(2020b) Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. *Building and Environment* 170: 106606.
42. Shashua-Bar, L., O. Potchter, A. Bitan, D. Boltansky and Y. Yaakov(2010) Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology. A Journal of the Royal Meteorological Society* 30(1): 44-57.
43. Takebayashi, H., Y. Kimura and S. Kyogoku(2014) Study on the appropriate selection of urban heat island measure technologies to urban block properties. *Sustainable Cities and Society* 13: 217-222.
44. Taleghani, M., L. Kleerekoper, M. Tenpierik and A. Van Den Dobbelaar(2015) Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and environment* 83: 65-78.
45. Wang, Y. and H. Akbari(2016) The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities and Society* 27: 122-128.
46. Wu, Z., and L. Chen(2017) Optimizing the spatial arrangement of trees in residential neighborhoods for

- better cooling effects: Integrating modeling with in-situ measurements. *Landscape and Urban Planning* 167: 463-472.
47. Yang, J., Y. Yang, D. Sun, C. Jin and X. Xiao (2021) Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. *Sustainable Cities and Society* 72: 103045.
  48. Zhou, W., J. Zhang, X. Li, F. Guo and P. Zhu(2024) Influence of environmental factors on pedestrian summer vitality in urban pedestrian streets in cold regions guided by thermal comfort: A case study of sanlitun—Beijing, China. *Sustainability* 16(23): 10419.
  49. Zölch, T., J. Maderspacher, C. Wamsler and S. Pauleit(2016) Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry & Urban Greening* 20: 305-316.