

도시열환경 개선 및 보행자 열 쾌적성 증대를 위한 효율적 가로녹지 조성방안 연구[†]

- 계획 및 설계를 위한 매개변수 도출과 녹지조성 방법 제안을 중심으로 -

A Study on Efficient Sidewalk Green Space Development for Improving Urban Thermal Environments and Enhancing Pedestrian Comfort[†]

- Focused on the Derivation of Parameters for Design, and Proposing Methods for Green Space Creation -

박주현*, 엄정희**

*경북대학교 대학원 조경학과 박사과정, **경북대학교 산림과학 · 조경학부 조경학전공 부교수

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

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

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

Received: January 29, 2024

Revised: February 09, 2024 (1st)
February 21, 2024 (2nd)

Accepted: February 21, 2024
3인익명 심사필

Corresponding author :

Jeong-Hee Eum

Associate Professor, Dept. of
Landscape Architecture,
Kyungpook National University,
Daegu 41566, Korea
Tel.: +82-53-950-5780
E-mail: eumjh@knu.ac.kr

국문초록

본 연구는 문헌 고찰을 통해 도시 열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 증대를 위한 효율적인 가로녹지 조성방안을 제안하는 것이 목적이다. 특히, 녹지 계획 및 설계에 활용가능한 매개변수를 도출하고, 매개변수별로 열환경 완화 매커니즘을 분석한 후, 이를 바탕으로 녹지 계획 및 설계 시 활용가능한 수종선택 방법 및 녹지조성 방법을 제안하였다. 이를 위해 국내외 관련 논문 중 4단계 과정을 통해 고찰하고자 하는 61개의 논문을 선정하였으며, 선정된 논문을 분석하여 다음과 같은 주요 결과를 도출하였다. 열스트레스가 높은 중형비 낮고 천공률이 높은 오픈된 거리협곡의 경우, 그들의 양과 질을 높이기 위해 수관폭이 넓고, 수고가 높고, 지하고가 낮고, 엽면적 지수가 높고, 수관의 녹량이 많은 활엽수를 다열의 좁은 간격으로 다층식재하는 것이 열저감에 효과적이다. 반면 열스트레스가 비교적 적은 중형비가 높고 천공률이 낮은 깊고 좁은 거리협곡의 경우, 거리협곡 내 환기력을 높이기 위해 수관폭이 좁고, 지하고가 높고, 수관높이가 낮고, 엽면적 지수가 낮은 활엽수를 넓은 간격으로 식재하는 것이 열저감에 효과적이다. 본 연구는 거리협곡 내 열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 증대를 위한 가로녹지 조성의 기초자료로 활용할 수 있으며, 녹지의 위치 선정 및 우선순위 선정 시 기초자료로 활용될 수 있다. 나아가 기후변화 대응을 위한 녹지 계획 및 설계를 위한 가이드라인 작성 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

주제어: 거리협곡, 그린인프라 설계, 녹지 계획, 기후변화 대응

ABSTRACT

This study aims to establish an efficient street green area to improve the urban thermal environment and enhance pedestrian thermal comfort. Specifically, This study identified parameters applicable to green space planning and design, analyzed thermal environment mitigation mechanisms for each parameter, and, based on these findings, proposed methods for tree species selection and planting in green space planning and design. To achieve this, 61 papers were selected through a four-stage process from both domestic and foreign sources. The selected papers were analyzed, and the following main results were derived: In open street canyons with high stress levels due to low aspect ratios and high sky view factors(SVF), broadleaf trees with wide crown widths, low trunk heights, high leaf area index(LAI), and high crown heights were found effective in reducing heat, thereby increasing the amount and quality of shade. In contrast, in deep and narrow street canyons with relatively low heat stress due to high aspect ratios and low SVF, broad-leaved trees with narrow crown widths, high trunks, low crown heights, and low LAI were effective in reducing heat by enhancing ventilation. This study can serve as fundamental data for establishing standards for street green spaces to improve the thermal environment of street canyons and enhance thermal comfort of pedestrians. Additionally, it can be valuable when selecting the location and prioritizing street green spaces. Moreover, it is anticipated to be a foundational resource for creating guidelines for green space planning and design in response to climate change.

Keywords: Street Canyon, Green Infrastructure Design, Greening Plan, Climate Change Adaptation

[†]본 논문은 2023년 한국조경학회 춘계학술대회에서 발표된 “도시열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 증대를 위한 효율적 가로녹지 조성방안 마련의 첫 단계 - 가로녹지 계획 및 설계를 위한 매개변수 도출 및 열환경과의 관계 연구 -”를 발전시킨 것임.

1. 서론

1.1 연구 배경과 목적

지구온난화와 같은 기후변화와 과도한 도시화는 열섬 및 폭염 등의 도시 열환경 문제를 발생시켰으며, 이는 질병 증가 및 사망 등 심각한 도시문제로 이어지고 있다. 점진적인 기후변화로 인해 폭염의 빈도 및 강도는 계속해서 증가할 것으로 예상되며(Alexander and Arblaster, 2009; Jiang et al., 2019), 열섬현상과 결합되는 특정 기간에는 열관련 사망률이 더욱 증가할 것으로 예상된다(Lai et al., 2019). 도시 열환경과 관련하여 지난 10년간 가장 많은 연구가 이루어지고 있는 분야 중 하나는 거리협곡의 기하학적 구조가 열섬에 미치는 영향에 대한 연구이다(Antoszewski et al., 2022). 거리협곡은 거리 양쪽으로 건물들이 줄지어 나타난 경관을 의미하며(김민순과 김형규, 2023; 최원준 등, 2019), 일반적으로 사용되는 거리, 가로, 의미보다는 거리의 구조적 특성에 초점을 맞춘 용어로 종횡비와 같은 기하학적 지표로 표현될 수 있다. 종횡비에 따라 변화하는 거리협곡의 구조적 형태는 도시의 온도, 바람, 공기질 등 미기후적 특성에 영향을 미친다. 초기 거리협곡에 대한 연구는 거리협곡의 종횡비 및 도로 방향에 따라 달라지는 열환경에 대한 평가에서부터 시작되었다(Ail-tourdert and Mayer, 2006). 이후 연구는 종횡비, 거리협곡의 방향, 천공률(SVF; sky view factor) 등 거리협곡의 공간적 특성에 따라 달라지는 열용량 및 열섬 강도에 대한 이해와 함께 거리협곡 내 온도 저감을 위한 수단에 대한 연구로 발전했다. 이는 거리협곡 특성에 적합한 열저감 방안을 찾기 위한 목적으로 진행·발전하였으며, 연구 결과 가장 효과적이고 효율적이며 경제적이고 실현가능한 열저감 방법은 그린인프라의 구축이라는 결론을 도출하였다(Norton et al., 2015; Coutts et al., 2016; Lai et al., 2019; Antoszewski et al., 2022; Lachapelle et al., 2023).

최근 이루어지고 있는 그린인프라의 열저감 효과 관련 연구를 살펴보면, 효과적인 녹지조성 방법을 찾기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 특히 측정 및 시뮬레이션을 기반으로 도시환경에 따른 녹지 관련 매개변수의 열저감 효과를 검증하고 매개변수의 효과적인 적용 방법을 제안하는 연구가 활발하다. 열환경 개선을 위한 녹지조성 방법에 대한 연구는 수관폭, 수고, 엽면적 지수 등 수목 특성 관련 매개변수와 가로수 배열, 가로수 간격, 식생층위구조 등 식재 방법 관련 매개변수의 열환경 개선에 효과에 대한 연구가 대다수를 차지한다. 그러나 대부분의 연구가 매개변수의 열환경 개선 효과 검증에 초점이 맞추어져 있는 관계로 매개변수별 열환경 개선 효과에 대한 데이터는 많은 부분에 대해 검증되었으나 이를 환경적 특성과 연계하여 식재의 방향성을 제시하는 연구는 매우 드물다.

거리협곡의 기하학적 특성에 따른 열환경 형성 및 완화 매커니즘에 대한 연구는 둘 사이의 명확한 상관관계를 제시하고 있으며, 열환경 개선을 위한 수종 특성 및 녹지조성 방법에 대한 연구 또한 대부분의 매개변수에 대해 공통된 연구 결과를 제시하고 있다. 따라서 이제는 거리협곡 내에서 도시 열환경을 개선하고 보행자 열쾌적성을 증대시킬 수 있는 매개변수 간의 상관관계에 대한 정리가 필요하며, 이를 바탕으로 더 섬세한 녹지 계획 및 설계가 이루어질 수 있도록 도시 열환경 개선과 관련된 매개변수들을 종합적으로 도출하고 이들 간의 관계를 밝히는 것이 필요하다.

본 연구는 거리협곡 내 열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 증대를 위한 식재 계획 및 설계에 활용가능한 매개변수를 도출하고 매개변수 간의 상관관계를 연구하여 효율적인 가로녹지 조성방안 마련에 대한 기초자료를 만드는 것을 목적으로 한다. 추후 본 연구는 도시 열환경을 고려한 가로수 및 가로녹지의 위치 및 우선순위 선정에 대한 기초자료로 활용할 수 있으며, 열환경 개선 및 보행자 열쾌적성을 고려한 가로녹지 조성 기준 마련을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구체계 및 방법

본 연구는 도시 열환경 개선 방법 중 하나인 가로녹지 조성의 효율성 증대를 위해 가로녹지 계획 및 설계를 위한 매개변수를 도출하고, 도출된 매개변수의 열환경 개선 매커니즘을 분석하였으며, 이를 통해 매개변수별 가로녹지 조성방안을 제시하였다. 연구는 문헌 고찰을 중심으로 진행하였으며, 고찰된 논문은 연구의 최근 동향을 반영하기 위해 시간적 범위를 2010년부터 2023년까지로 한정하였다. 연구 고찰을 위한 논문의 선정은 다음과 같은 4단계의 과정을 통해 이루어졌다. 첫 번째 단계에서는 ‘도시열섬’ 관련 키워드와 ‘가로녹지’ 관련 키워드를 검색하여 도시 열환경 개선을 위한 녹지조성 관련 논문을 추출하였다. 다음 단계로는 제목 및 초록 검토를 통해 도시 가로환경에 대한 열환경 개선 및 가로녹지 조성에 대한 연구논문을 선별하였다. 세 번째 단계에서는 우리나라와 비슷한 기후 환경을 중심으로 연구한 논문을 선택하기 위해 두 번째 단계에서 선정된 논문 중 온대 및 아열대 기후 지역을 중심으로 한 연구를 선별하였다. 마지막으로 도시 열환경 개선과 관련된 매개변수 도출을 위해 거리협곡 종횡비(H:W

비율), 재료 알베도, 토지피복 등 ‘열환경 강도에 영향을 미치는 매개변수’ 관련 논문과 수고, 수관폭, 식생층위구조 등 ‘열환경 완화에 영향을 미치는 매개변수’ 관련 논문을 중심으로 연구 대상 논문을 최종적으로 선정하였다.

선정된 논문은 다음과 같은 연구 절차를 통해 검토·분석하였다(Figure 1 참조). 먼저 도시 가로환경을 중심으로 열환경의 형성 및 완화에 영향을 미치는 요소에 대한 분석을 통해 ‘열환경 강도에 영향을 미치는 매개변수’ 및 ‘열환경 완화에 영향을 미치는 매개변수’를 도출하였다(1차 선정). 그러나 도출된 매개변수에는 풍향, 태양의 고도 등과 같은 ‘통제가 불가능한 매개변수’와 건물 및 포장 재료의 알베도, 수역 등과 같은 ‘녹지조성과의 연계성이 떨어지는 매개변수’가 다수 포함되어 있어 이를 선별하여 매개변수에서 제외시킴으로써 매개변수를 선별하였다. 더불어 녹지 계획 및 설계에 작간접적으로 영향을 미치는 매개변수의 도출을 위해 매개변수 변화에 따른 열환경 개선 효과를 검증하는 방식의 연구인 ‘측정 및 시뮬레이션 기반의 논문’을 중심으로 매개변수와 녹지조성과의 연계성 및 상호인과 관계에 대한 매커니즘을 파악하고 이를 기반으로 녹지 계획 및 설계에 활용가능한 매개변수를 확정하였다(2차 선정). 이렇게 확정된 매개변수는 열환경 형성 및 완화 과정에서 이루어지는 매개변수 간의 열환경 개선 매커니즘 분석을 통해 ‘녹지 계획 및 설계에 영향을 주는 매개변수’와 ‘녹지 계획 및 설계 요소로 활용가능한 매개변수’로 분류하였으며, 더불어 각 매개변수에 대한 열환경 개선 방안을 구체적으로 제시하여 가로녹지조성 방안 제시를 위한 기초자료를 마련했다.

3. 연구 결과

3.1 녹지 계획 및 설계를 위한 매개변수 도출

선정된 61개의 논문을 분석한 결과, 종횡비, 건물 높이, 거리방향 등의 ‘도시공간적 특성’ 관련 매개변수와 가로 수 간격, 다열 식재, 식생층위구조 등과 같은 ‘식재 방법적 특성’ 관련 매개변수, 그리고 수고, 수관폭, 지하고 등과 같은 ‘수목 특성 및 수종 특성’ 관련 매개변수가 도출되었다. 최종 도출된 매개변수는 거리협곡 내 열환경 형성 및 완화 매커니즘을 반영하여 ‘녹지 계획 및 설계에 영향을 주는 매개변수’와 ‘녹지 계획 및 설계 요소로 활용가능한 매개변수’로 분류하여 정리하였다(Table 1 참조). ‘녹지 계획 및 설계에 영향을 주는 매개변수’는 거리협곡 내 열환경 강도에 영향을 미치는 매개변수이며, 태양 노출의 강도와 시간에 따라 녹지조성 방법뿐만 아니라 녹지의 위치 및 녹지조성 우선순위 등을 결정할 수 있는 매개변수이다. ‘녹지 계획 및 설계 요소로 활용가능한 매개변수’는 거리협곡 내 열환경 개선을 위한 효과적인 녹지조성을 위한 매개변수이며, ‘식재 방법 관련 매개변수’와 ‘수목 및 수종

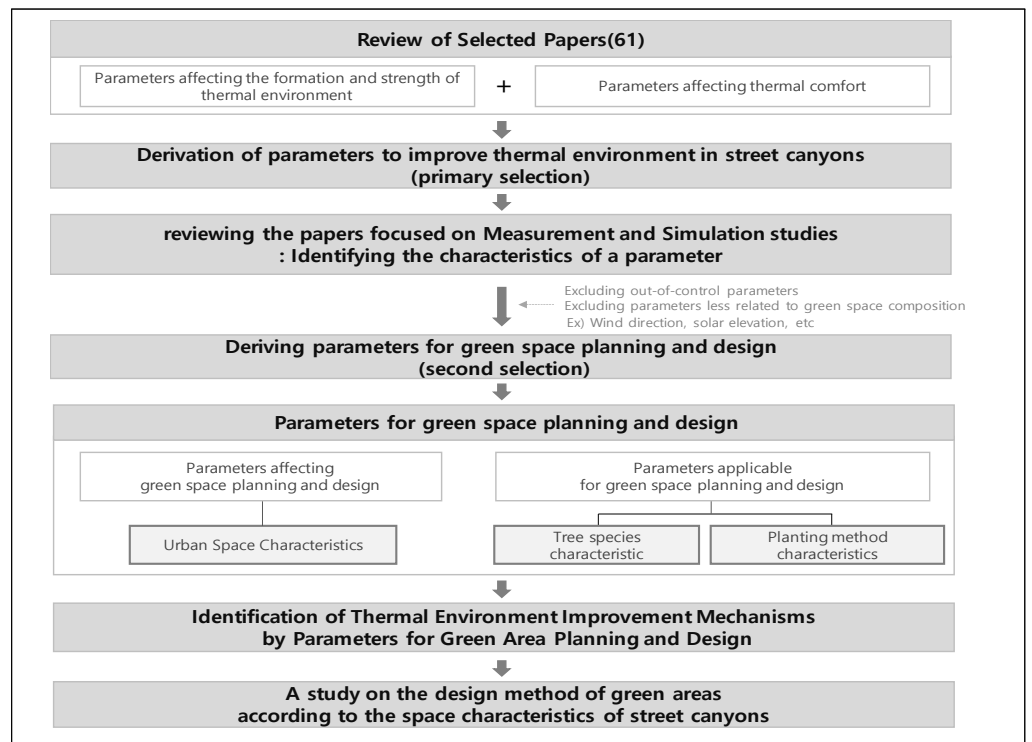


Figure 1. Research process

Table 1. Parameters for green space planning and design

Parameters affecting green space planning and design	Parameters applicable for green space planning and design	
Urban spatial characteristics	Planting method characteristics	Tree and species characteristic
Aspect ratio(H:W ratio), Buildings height(H), Street width(W), Street direction, Sky view factor(SVF), Width of the road, Width of the sidewalk, Presence or absence of a planting-type central divider Use of surrounding land	Tree spacing, Multi-layer structural planting, Multi-row planting, Planting type(green area, wall greening, rooftop greening), Tree coverage ratio(TCR), Green coverage ratio(GCR), Thickness of green strips, Number of green strips, Planting density, Location of trees	Leaf area index(LAI), Tree height, Trunk height, Crown diameter, Crown height, Crown form Plant types (tree, shrubs, flowers), Leaf size, Leaf color, Leaf thickness, Leaf shape

특성 관련 매개변수로 나누어 도출하였다.

나아가 논문 내용 분석과 함께 매개변수별 인용 및 연구 빈도를 통해 매개변수별 중요도를 분석한 결과, 내용 분석을 통해 도출된 매개변수의 중요도와 출현 빈도를 통해 도출된 매개변수의 중요도가 거의 일치했다. 도시 열환경 조성에 가장 많은 영향을 미치는 '도시공간적 특성 관련 매개변수'는 종횡비와 거리방향인 것으로 나타났으며, 열환경 완화의 가장 효과적인 '식재 방법 관련 매개변수'는 수관피복률을 늘릴 수 있는 가로수 간격 및 다열 식재인 것으로 나타났다. 또한 열환경 완화에 가장 큰 영향을 미치는 '수목 특성 및 수종 특성 관련 매개변수'는 엽면적지수(LAI)와 수관폭, 수고, 지하고인 것으로 나타났다(Table 2 참조). 도시 열환경 완화 및 보행자 열환경 개선에 영향을 미치는 매개변수의 도출은 설계자가 도시 내 열환경 개선 관련 매커니즘을 이해하고 기후변화에 대한 해결책으로서 합리적인 녹지를 계획 및 설계할 수 있도록 도움을 줄 수 있다.

3.2 녹지조성에 영향을 주는 매개변수의 특성_도시공간적 특성

도시의 공간적 특성을 설명하는 매개변수는 효율적인 녹지조성 방향을 결정하는데 중요한 역할을 할 뿐만 아니라 녹지의 위치 및 녹지조성 우선순위 등을 선정하는데 중요한 역할을 수행한다. 녹지조성은 더운 오후 시간 동안

Table 2. Importance of each parameter

Division	Parameters	Number of papers	Ratio(%)
Parameters related to urban spatial characteristics (reviewing a total of 36 papers)	Aspect ratio(buildings height(H), street width(W))	32	88.8
	Street direction	23	63.8
	Sky view factor(SVF)	15	41.6
	Width of the road	2	5.5
	Width of the sidewalk	4	11.1
Parameters related to planting method characteristics (reviewing a total of 52 papers)	Tree spacing	11	21.2
	Multi-layer structural planting	5	9.6
	Multi-row planting	8	15.4
	Tree coverage ratio(TCR)	19	34.6
	Thickness of green strips	3	5.8
Parameters related to tree and species characteristics (reviewing a total of 52 papers)	Number of green strips	2	3.8
	Leaf area index(LAI)	22	42.3
	Crown diameter	33	63.5
	Tree height	28	53.8
	Trunk height	15	28.8
	Plant types (wood, shrubs, flowers)	11	21.2
	Crown form	7	13.5
	Crown height	9	17.3
	Leaf size	1	2.0
Leaf color	3	5.8	
Leaf thickness	2	3.8	

수목 식재로 인한 열저감의 영향이 가장 크게 미칠 수 있는 위치에 집중되어야 한다. 따라서 태양에 가장 많이 노출되며, 건물로 인한 그늘이 형성되지 않는 열린 공간에 녹지를 조성하는 것이 효과적이다(Coutts et al., 2016; Lai et al., 2019; 임현우 등, 2022; Lachapelle et al., 2023). 본 연구에서는 태양 노출에 가장 많은 영향을 주는 도시 공간적 매개변수인 종횡비와 거리방향, 천공률을 중심으로 매개변수별 공간적 특성과 열환경 형성 매커니즘, 녹지 조성의 방향, 녹지조성 우선지역 및 우선순위 등에 대해 제시하였다.

3.2.1 거리협곡 종횡비(Aspect ratio: H/W)

종횡비는 거리협곡의 거리 너비(W)에 대한 건물 높이(H)의 비율이며, 거리협곡의 기하학을 결정하는 첫 번째이자 가장 중요한 매개변수이다(Morakinyo et al., 2017). 거리협곡을 기반으로 한 많은 연구들은 보행자의 열쾌적성과 종횡비 사이의 명확한 상관관계를 밝히고 있으며(Johansson, 2006; Andreou, 2013; Abreu-Harbach et al., 2013; Norton et al., 2015; Chatzidimitriou and Yannas, 2017; Kong et al., 2017; Antoszewski et al., 2022), 종횡비는 음영 패턴, 풍향 및 풍속, 열질량, 협곡 내 복사 균형 등에 영향을 미치며 거리협곡 내 열환경을 형성한다. 좁고 깊은 거리협곡은 건물로 인해 생성되는 그늘의 영향으로 태양복사에 대한 노출을 감소시켜 열스트레스 환경에 노출될 확률을 낮춘다. 반대로 종횡비가 낮은 넓고 오픈된 거리협곡은 높은 태양 노출로 인해 더 높은 주간 온도를 나타낸다. 즉, 거리협곡의 열환경을 결정하는 가장 중요한 요소는 협곡 내 태양 단파복사의 양이며, 이를 가장 효과적으로 줄이는 방법은 거리협곡 내 그늘 제공을 통해 평균복사온도를 낮추는 것이다(Morakinyo et al., 2018; Lai et al., 2019; Park et al., 2019; Balany et al., 2020; Antoszewski et al., 2022; Lachapelle et al., 2023).

종횡비에 따른 거리협곡 내 열환경 형성 매커니즘은 수목 식재를 통한 미기후 개선의 방향을 결정한다(Table 3 참조). 거리협곡의 종횡비는 협곡 바닥에 도달할 수 있는 태양복사의 양에 영향을 미치며, 건물에 의해 생성된 그늘의 양이 적을수록 수목이 미기후 수정에 미칠 수 있는 영향력은 높아진다. 따라서 수목은 알고 오픈된 거리협곡(종횡비가 낮은 거리협곡)에 우선적으로 배치하는 것이 효과적이다. Coutts et al.(2016)은 모니터링을 통한 가로협곡의 열쾌적성 연구에서 개방적이고 얇은 거리협곡일수록 열환경 개선을 위해 가로수를 심는 것이 효과적이라고 말하며, SVF > 0.5인 거리협곡을 가로수 식재 우선순위 지역으로 지정해야 한다고 제시했다. Jamei and Rajagopalan(2017)은 매퍼른 시를 대상으로 한 보행자 열쾌적성 증대를 위한 도시개발 및 식재 기준 연구에서 특히 종횡비 0.5 미만의 오픈된 거리협곡에서 많은 열스트레스가 발생함을 지적하면서 수목 식재의 필요성을 강조했다. 반면에 높은 수준의 자체 음영이 있는 좁고 깊은 거리협곡(종횡비가 높은 거리협곡)의 경우 수목 식재로 인한 온도저감 효율이 떨어지며(Shashua-Bar et al., 2010; Park et al., 2012; Coutts et al., 2016; Morakinyo and Lam, 2016; Lai et al., 2019; Masoudi et al., 2019; Lachapelle et al., 2023; Morakinyo et al., 2020), 나아가 수관 형성으로 인한 높은 습도와 풍속의 감소는 깊은 거리협곡의 열쾌적성을 악화시킬 수 있다.(Norton et al., 2015; Jamei et al., 2016; Morakinyo et al., 2018). 따라서 종횡비가 높은 가로협곡에 가로수를 식재할 경우 풍속 및 환기에 방해가 되지 않는 수준에서 녹지율을 높여 증발산 능력을 높이는 것이 중요하며, 건물에 의한 그늘 형성의 정도에 따라 수목의 수고, 수관폭, 가로수 간격, LAI 등에 대한 적절한 선택이 요구된다.

Table 3. Thermal environment characteristics and planting principles according to aspect ratio

Division	Deep and narrow street canyon	Wide and open street canyon
Image	<p style="text-align: center;">H / W = 2</p>	<p style="text-align: center;">H / W = 0.5</p>
Thermal characteristics	High thermal comfort due to shade formation	High heat stress due to a lot of solar radiation
Green space Design principles	<ul style="list-style-type: none"> - Greenery is more important not to obstruct ventilation than to create shade. - Green space must be created in a way that increases the amount of green space. 	<ul style="list-style-type: none"> - Creation of green space requires reducing solar radiation by increasing the amount of shade. - Green space must be created in a way that increases the amount of green space.

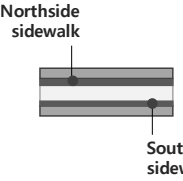
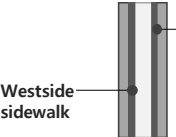
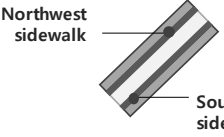
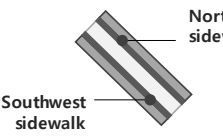
3.2.2 거리방향




거리방향은 협곡 내로 유입되는 태양복사의 양과 강도, 지속시간에 영향을 미침으로써 거리협곡 내 열환경을 결정하는 중요한 매개변수로 작용한다(Taleghani et al., 2014; Lobaccaro and Acero, 2015; Taleghani et al., 2015; Achour-Younsi and Kharrat, 2016; 임현우 등, 2022; Antoszewski et al., 2022; Lachapelle et al., 2023). 이는 보행자가 느끼는 열스트레스 강도와 태양복사 지속시간에 영향을 미쳐 열쾌적성에 직접적으로 관여한다. 남-북 방향의 거리는 건물과 태양고도의 영향으로 인해 가장 짧은 기간 동안 직사광선의 영향을 받으며, 바닥의 음영 비율 또한 계절에 관계없이 일정한 특징을 지닌다(Andreou, 2013; Taleghani et al., 2014; Taleghani et al., 2015; Achour-Younsi and Kharrat, 2016; Antoszewski et al., 2022). 이러한 특징은 남-북 방향의 거리가 동-서 방향의 거리보다 열쾌적성 측면에서 유리하도록 만든다. 반면에 동-서 방향의 거리협곡은 이른 아침부터 햇빛에 노출되어 가장 긴 직사광선 지속시간을 제공한다(Ali-Toudert and Mayer, 2006; Andreou, 2013; Taleghani et al., 2015; Achour-Younsi and Kharrat, 2016; Antoszewski et al., 2022). 그 결과 아침부터 빠른 온도 상승을 경험하며 대략 오전 11시부터 오후 3-5시까지 최고 수준의 열스트레스를 경험한다(Antoszewski et al., 2022). 대각선 방향의 거리인 북서-남동 방향과 북동-남서 방향의 거리협곡은 열스트레스 정도와 태양복사 지속시간 측면에서 남-북 방향과 동-서 방향 거리협곡의 사잇값을 나타내며, 열스트레스 측면에서 동-서 방향보다는 높고, 남-북 방향보다는 낮은 열쾌적성을 보인다(Achour-Younsi and Kharrat, 2016; 임현우 등, 2022; Antoszewski et al., 2022).

그러나 남-북 방향 거리의 경우 종횡비가 낮아지면 열환경을 형성하는 매커니즘은 매우 복잡해진다. 종횡비가 낮은 남-북 방향의 거리협곡은 아침 햇빛에 노출되어 아침 시간 서측 보도를 중심으로 빠른 온도 상승을 나타내고, 오후 시간에는 동측 보도를 중심으로 높은 평균기온(Ta) 및 평균복사온도(Tmrt)를 경험한다. 임현우 외(2022)는 종횡비 0.48을 기준으로 한 거리 방향별 열환경 변화를 연구한 결과, 남-북 방향의 거리 동측 보도가 가장 높은 평균기온을 기록했으며, 평균복사온도 또한 16:00를 기준으로 가장 높은 값을 나타냈다. 반면에 동-서 방향 거리협곡은 종횡비 변화에 큰 영향을 받지 않는 특징을 나타낸다(Andreou, 2013; Andreou, 2014). 이는 여름철 높은 태양고도에 기인한다. 따라서 동-서 방향의 북측 및 남측 보도는 낮시간 동안 거의 대부분의 종횡비 및 시간대에서 높은 열스트레스를 나타낸다(Norton et al., 2015; Taleghani et al., 2015). 대각선 방향 거리의 경우 남-북 방향의 거리협곡과 마찬가지로 종횡비가 높을수록 열쾌적성 증대에 유리하며, 시간에 따른 열환경의 변화가 크다. 종횡비가 낮은 북서-남동 방향의 북동쪽 보도는 동-서 도로의 북측 보도와 함께 가장 높은 평균복사온도를 나타냈으며(임현우 등, 2022; Antoszewski et al., 2022; Lachapelle et al., 2023), 남서쪽 보도와 남동쪽 보도는 가장 적은 태양복사의 유입으로 가장 편안한 열환경을 나타냈다.

거리방향에 따라 다르게 나타나는 열환경적 특성은 녹지조성 방향을 결정한다(Table 4 참조). 열스트레스가 높

Table 4. Thermal environment characteristics and green space creation principles according to street direction

Street direction	E-W		N-S		NE-SW		NW-SE	
Image								
Sidewalk location	North side sidewalk	South side sidewalk	West side sidewalk	East side sidewalk	Northwest sidewalk	Southeast sidewalk	Southwest sidewalk	Northeast sidewalk
Heat stress	High	High	Low side	High	High side	Low	Low	High
Solar radiation duration	All day	All day	Before afternoon	After afternoon	Morning-early afternoon	Late afternoon	Before afternoon	Late Morning ~After afternoon
Green space design principles	Expansion of shade	Expansion of shade	Expansion of ventilation and green volume	Expansion of shade	Expansion of shade	Expansion of ventilation and green volume	Expansion of ventilation and green volume	Expansion of shade
Priority area for green space	◎	○	X	○	△	X	X	○

Legend:  Building  Road  Sidewalk

◎: High priority area, ○: Priority area, △: Lower priority area, X: Lowest a priority area

고 태양복사 지속시간이 긴 동-서 방향의 북측 및 남측 보도, 남-북 방향의 동측 보도, 남서-북동 방향의 남동측 보도, 북서-남동 방향의 북동측 보도는 그늘 형성을 통해 태양복사에 대한 노출을 줄이는 방향으로 녹지를 조성하는 것이 열저감에 효과적이다. 반대로 건물로 인해 충분한 그늘이 형성되는 남-북 방향의 서측 보도, 남서-북동 방향의 남동측 보도, 북서-남동 방향의 남서측 보도는 환기력 증대 및 녹지량 확대에 초점을 맞추어 녹지를 조성하는 것이 열저감에 효과적이다.

나아가 거리방향과 종횡비는 녹지조성 우선지역을 선정하는데 도움이 될 수 있다(Table 5 참조). 식재를 통한 열환경 개선은 대부분 그늘 형성을 통해 복사 부하를 줄이는 방향으로 초점이 맞추어져 있다. 이는 보행자가 흡수하는 단파복사의 양을 감소시킴과 동시에 거리 표면을 더 시원하게 유지하여 장파복사를 줄임으로써 열쾌적성을 높인다(Lachapelle et al., 2023). 따라서 그늘의 형성이 적고 태양복사의 노출이 많은 보도를 중심으로 식재를 우선 배치하는 것이 효과적이며(Morakinyo et al., 2020), 열스트레스가 높은 남-북 방향 종횡비 0.8 이하의 지역, 동-서 방향 종횡비 2.0 이하의 지역, 대각선 방향 종횡비 1.5 이하의 지역을 녹지조성 우선지역으로 선정하는 것이 열저감에 효율적이다(Andreou, 2013; Krayenhoff et al., 2014; Norton et al., 2015; Zheng et al., 2018; Antoszewsk et al., 2022). 반대로 건물로 인한 그늘 형성이 많아 열스트레스에서 비교적 편안한 상태를 유지하는 남-북 방향 종횡비 0.8 이상의 지역(Andreou, 2013; Norton et al., 2015; Antoszewski et al., 2022), 동-서 방향 종횡비 3.2 이상의 지역(Andreou, 2013; Norton et al., 2015; Chatzidimitriou and Yannas, 2017), 대각선 방향 종횡비 1.5 이상의 지역(Andreou, 2013; Norton et al., 2015)은 녹지조성 우선순위에서 제외시키는 것이 녹지조성의 효율성을 높이는데 도움을 줄 수 있다.

3.2.3 천공률(SVF : Sky View Factor)

천공률은 '주어진 특정 지점에서 볼 수 있는 하늘의 양과 잠재적으로 사용할 수 있는 하늘의 양의 비율'로 정의한다(Oke and Cleugh, 1987). 따라서 천공률은 거리협곡 내 태양 노출의 정도를 결정한다. 천공률은 건물의 토지 파복, 건물 밀도, 건물 부피, 종횡비, 건물 대칭, 건물 높이, 건물 방향, 나무의 존재 및 크기 등의 요소로 인해 결정된다(Antoszewski et al., 2022). 이미 조성된 도시 내에서 재개발 등의 이벤트가 없는 한 건물 관련 요소의 수정은 불가능하기 때문에 많은 연구에서 녹지조성을 통해 천공률을 조정할 것을 권고한다(Coutts et al., 2016; Tan et al., 2017). 천공률이 높은 오픈된 거리협곡(종횡비가 낮은 거리협곡)의 경우 많은 태양복사로 인해 높은 열스트레스 값을 기록하는 반면 천공률이 낮은 거리협곡(종횡비가 높은 거리협곡)의 경우 건물로 인한 그늘의 영향으로 편안한 열환경을 가진다(Coutts et al., 2016; Jamei and Rajagopalan, 2017; Tan et al., 2017; Lai et al., 2019; Morakinyo et al., 2020). 따라서 Coutts et al.(2016)은 종횡비, 천공률, 가로수 식재 여부가 다른 3곳의 거리협곡을 대상으로 가로수가 열쾌적성에 미치는 영향에 대한 연구에서 $SVF > 0.5$ 인 거리협곡을 녹지조성 우선 지역으로 지정해야 한다고 제안했다. 같은 맥락으로 Morakinyo et al.(2020)은 $SVF > 0.6$ 인 거리협곡의 경우 건물의 음영효과가 거의 없어 나무의 식재가 열환경 개선에 많은 영향을 미치므로 식재 우선순위가 높다고 밝히고 있다.

그러나 야간에는 상반되는 매커니즘이 작동한다. 천공률이 낮은 거리협곡은 닫힌 기하학적 구조로 인해 장파복사를 가두어 도시열섬을 유발한다. 즉 낮은 천공률로 인한 닫힌 공간 구조는 태양 노출을 감소시켜 주간에는 유리하나 밤에는 장파복사 및 환기를 막아 불리하게 작용한다(Morakinyo et al., 2020). 그러나 Coutts et al.(2016)은 건물로 형성된 닫힌 공간과 나무의 수관으로 형성된 닫힌 공간을 비교한 결과 나무는 다공성의 수관을 통해 크고 단단한 건물보다 더 많은 장파복사를 방출함과 동시에 수목에 의한 증발산의 효과로 야간 냉각에 있어 훨씬 유리하다고 밝혔다. 더불어 건물은 높은 열효율로 흡수된 태양복사 에너지를 많이 보유하는 반면 수목은 광합성 작용으로 인해 더 적은 장파복사를 방출함으로써 야간 도시열섬에 더 유리하다.

Table 5. Priority areas for green space creation according to aspect ratio and street direction

Street direction	Aspect ratio			
	High priority area	Moderate priority area	Lower priority area	Not a priority area
E-W	Less than 1.0	Less than 1.0-2.0	Less than 2.0-3.2	3.2 or higher
N-S	Less than 0.4	Less than 0.4-0.8	Less than 0.8-2.4	2.4 or higher
NW-SE	Less than 0.4-1.0	1.5 or less	1.5 or higher	-
NE-SW	Less than 0.4-1.0	1.5 or less	1.5 or higher	-

data: Rewritten with reference to Norton et al.(2015)

3.3 녹지 설계를 위한 매개변수의 특성·수종 특성 및 식재 방법적 특성

거리협곡의 공간적 특성 관련 매개변수를 통해 열환경 개선을 위한 녹지조성 방향 및 녹지조성 위치의 우선순위를 결정했다면 수목 및 식재 방법 관련 매개변수는 녹지조성의 효율성을 결정한다. 수목은 그늘 제공을 통한 열분산 및 방사율 조절, 증발을 통한 냉각 등을 통해 표면 에너지 교환과정을 조절하고 공기 이동 및 열교환에 영향을 미침으로써 도시의 열저감 및 열환경 개선을 돕는다(Lin and Lin, 2010; Krayerhoff et al., 2014; Morakinyo et al., 2017; Lai et al., 2019; Antoszewski et al., 2020; Morakinyo et al., 2020; Rahman et al., 2020b). 첫 번째 교목 식재를 통한 그늘의 제공은 수목 식재로 인한 냉각 효과의 80% 이상을 차지하며(Zardo et al., 2017; Park et al., 2019; Shashua-bar and Hoffman, 2000), 태양 노출을 차단하여 건물벽, 포장면, 보행자에게 전달되는 단파복사를 감소시킴으로써 지표면 온도, 기온, 평균복사온도를 감소시켜 열쾌적성을 증가시킨다. 두 번째 수목은 증산작용으로 인한 냉각 효과를 통해 열환경을 개선한다. 본 연구에서는 수종 선정 및 식재 방법 선정에 있어 수종 특성 및 식재 방법 관련 매개변수의 열저감 매커니즘을 분석하여 거리협곡의 열환경 특성에 적합한 효율적인 매개변수 활용방안을 제시하였다(Table 6, Table 7 참고).

3.3.1 수종 특성 관련 매개변수

3.3.1.1 수목의 형태적 특성 관련 매개변수: 수관폭, 수고, 지하고, 수관 형태(수관높이 및 면적) 등

수목의 형태적 특성 관련 매개변수인 수관폭, 수고, 지하고, 수관의 형태 등은 그늘의 면적과 음영의 농도, 증발산의 양, 대기의 순환 등에 영향을 미침으로써 도시열환경 개선에 관여한다. 열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 증대를 위해 가장 중요한 원칙은 평균복사온도를 줄이는 것이며, 이를 위해 가장 좋은 방법은 많은 그늘을 거리협곡 내 제공하는 것이다(Coutts et al., 2016; Jamei and Rajagopalan, 2017; Wu and Chen, 2017; Lai et al., 2019; Antoszewski et al., 2020; Lin et al., 2021a; Lachapelle et al., 2023). 수목을 통해 형성되는 그늘은 면적이 넓을수록, 음영이 짙을수록 더 좋은 열환경 개선 효과를 나타낸다. 따라서 수관폭이 넓고 수고는 높고 지하고가 낮으며, 수관높이가 높은 두꺼운 수관 형태를 가진 수목이 열환경 개선에 유리하다(Morakinyo et al., 2017; Morakinyo et al., 2018; Helletsgruber et al., 2020; Morakinyo et al., 2020; Rahman et al., 2020a; Liu et al., 2021; 임정희 등, 2022; 임현우 등, 2022). 수관폭이 넓은 수목은 더 넓은 면적의 그늘을 제공할 수 있으며, 지하고가 낮은 수목은 더 넓은 면적의 그림자를 더 오랜 시간 더 진하게 드리울 수 있어 음영의 면적과 농도에 영향을 미친다(Kong et al., 2017; Morakinyo et al., 2017; Rahman et al., 2020a). 수관의 형태는 수관폭이 넓을수록, 수관높이가 높을수록 넓고 짙은 그늘을 형성할 수 있어 열환경 개선에 도움을 준다.

수관에 의한 그늘 제공은 보행자의 열쾌적성에 가장 중요한 요소이며, 10-14시에 가장 두드러진 효과를 나타낸다(Rahman et al., 2020b). 또한 수관에 의한 그늘 제공의 효율을 높이기 위해서는 가장 더운 시간에 그늘의 면적을 최대화할 수 있도록 식재하는 것이 중요하다(Rahman et al., 2020b; Lachapelle et al., 2023). 따라서 거리협곡의 종횡비가 낮을수록 천공률이 높을수록 태양복사 에너지의 유입이 많으므로 이러한 거리협곡에 우선적으로 수목을 배치하는 것이 효과적이다. 그러나 종횡비가 높은 좁고 깊은 거리협곡의 경우 매커니즘은 반대로 작동한다. 종횡비가 높고 천공률이 낮은 거리협곡의 경우 건물로 인한 충분한 그늘이 제공되므로 수목은 녹지량 증진을 통한 증발산 증대와 환기력 증대에 초점을 맞추어야 한다(Norton et al., 2015; Liu et al., 2021; Lachapelle et al., 2023). 따라서 이러한 거리협곡의 경우 수관폭이 좁고, 수고는 낮고, 지하고가 높은 수목이 열환경 개선에 유리하다(Kong et al., 2017; Morakinyo et al., 2017; Morakinyo et al., 2018; Antoszewski et al., 2020; Rahman et al., 2020a; Huang et al., 2021; Liu et al., 2021; 임현우 등, 2022). 나아가 충분한 그늘이 형성되는 거리협곡의 경우 원활한 환기를 위해 교목보다는 관목이나 초화, 벽면녹화를 통해 녹지율을 높여 증발산량을 늘리는 것이 효과적이다(Norton et al., 2015; Chen et al., 2021; Antoszewski et al., 2022).

3.3.1.2 엽면적 지수(LAI: Leaf Area Index)

지표면에 대한 잎면적의 비율(Kong et al., 2017)을 나타내는 지표인 엽면적 지수(LAI)는 음영의 농도, 녹지량 및 증산량, 환기력에 영향을 미치는 수목 관련 매개변수 중 가장 중요한 매개변수이다. 엽면적 지수는 수관밀도를 설명하기 위해서도 활용되는데(Liu et al., 2021), 수관밀도는 나무의 열감소 잠재력의 주요 결정 인자이며(Wu et al., 2016; Morakinyo et al., 2017; Morakinyo et al., 2018; Morakinyo et al., 2020), 기온 감소의 약 60%에 기여한다(Morakinyo et al., 2018).

엽면적 지수가 높은 수목일수록 잎의 밀도가 높으며, 이로 인해 음영의 농도가 짙어 방사선 차단 능력이 높다

(Krayenhoff et al., 2014; Morakinyo and Lam, 2016; Kong et al., 2017; Rahman et al., 2020a). Lai et al.(2019)은 평균 LAI가 6.1인 *Mesua ferrea* L. 종은 방사선을 92.55%까지 줄일 수 있는 반면, 평균 LAI가 1.5인 *Hura crepitans* L.는 방사선 여과율이 79%인 사실을 발견했다. 또한 엽면적 지수가 높은 수목일수록 녹지량이 많음을 의미하며, 따라서 증발산량이 많아 열환경 개선 효과가 높다(Kong et al., 2017; Rahman et al., 2020a). Lin et al.(2021b)은 도로 방향별 다열 식재 및 엽면적 지수의 효과를 분석한 연구에서 엽면적 지수를 낮음에서 높음으로 변경할 경우, 도로 방향에 따라 평균복사온도 3.0-5.5°C, 평균 PET 1.7-3.2°C가 줄어드는 것을 보고했다.

엽면적 지수가 높은 수목은 종횡비가 낮고 천공률이 높은 오픈된 거리협곡에 짙은 음영을 제공함으로써 열환경 개선을 돕는다(Morakinyo et al., 2017; Morakinyo et al., 2018; Antoszewski et al., 2020). 특히 음영은 보행자의 열쾌적성을 향상시키는 가장 중요한 요소이며 오전 10시에서 오후 2시 사이에 가장 두드러진 열저감 효과를 나타낸다(Rahman et al., 2020a). 그러나 종횡비가 높고 천공률이 낮은 깊은 거리협곡에서 엽면적 지수가 높은 수목은 환기를 방해하여 거리협곡 내 열환경을 악화시킬 수 있으며, 더 많은 장파 방사선이 가두어 나무 캐노피 아래의 야간 냉각을 방해할 수 있다(Jamei et al., 2016; Morakinyo et al., 2017; Lee et al., 2020). 따라서 Morakinyo et al.(2017)은 좁고 깊은 거리협곡의 경우 지하고가 높고 엽면적 지수가 낮은 나무를 제안했으며, 얇고 오픈된 거리협곡의 경우 수관폭이 넓고 엽면적 지수가 높은 수목을 권고했다.

3.3.1.3 기타(엽색, 잎모양, 잎의 두께, 털의 유무 등)

도시 거리협곡에서 식생의 냉각 효율은 넓고 뾰족한 수관과 가장 밀접한 관련이 있으며, 수목의 수관 외에도 다양한 수목의 구조적 특성과 식재 방법이 열환경 완화에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다(Shashua-Bar et al., 2012; Ballinas and Barradas, 2016; Morakinyo and Lam, 2016; Tan et al., 2017). 수목은 그늘 형성과 증발산을 통해 열환경 완화에 관여한다. 첫째, 그늘 형성을 통한 열저감의 경우 수관폭이 넓을수록, 지하고가 낮을수록, 엽면적 지수가 높을수록 효율적이며, 그 외에도 잎색이 짙은 녹색일수록, 잎이 두꺼운 수종일수록 음영의 농도면에서 효율적이다(Kong et al., 2017; Rahman et al., 2020b). 또한 침엽수목 및 바늘잎은 높은 밀도와 형태적 특성으로 인해 음영의 농도 측면에서 효율적일 수 있으나(Rahman et al., 2020b) 수관폭이 작다는 측면에서 활엽수보다 효율성이 떨어진다(정희은 등, 2015; Norton et al., 2015). 둘째 증발산량의 경우 엽면적 지수가 높을수록, 수관폭이 클수록, 수관높이가 높을수록, 녹피울 및 수관 용적 등이 클수록 녹지량이 증가하여 거리협곡 내 열환경 완화에 효율적이다. 더불어 털이 없고 엽록소 함량이 높으며, 잎이 얇고 단순한 잎모양을 가진 수목이 증발산량이 많아 냉각 효과가 우수하다(Rahman et al., 2020b).

3.3.2 식재 방법 관련 매개변수

3.3.2.1 가로수의 간격

가로수의 간격은 거리협곡의 그늘 면적과 녹지량에 영향을 미침으로써 거리협곡 내 열환경에 관여한다. 가로수

Table 6. Application plan for parameters related to tree species characteristics according to spatial characteristics

Division	Wide and open street canyon	Deep and narrow street canyon
Aspect ratio	Low	High
SVF	High	Low
Green space design principles	Reduce solar radiation by increasing the amount of shade	Expansion of ventilation and green volume
Application of parameters related to morphological characteristics of trees	Crown width is wide, Tree height is high Trunk height are low, Tree with high crown height, Planting of trees as a focus	Crown width is narrow, Tree height are high, Trunk height are high, Trees with low crown height, Planting of shrubs and plants as a focus
LAI	Tree species with high LAI	Tree species with low LAI
Application of other parameters	Parameter that deepens the shade : Darker the leaf color, Thicker the leaf	Parameters that increase transpiration : Without hairs on leaves, Higher chlorophyll content, Thinner leaves, Simple leaf shape

의 간격이 좁아지면 더 많은 그늘 형성을 통한 태양복사의 차단으로 인해 거리협곡 내 열환경 개선에 도움을 줄 수 있다(Takebayashi et al., 2014; Wang and Akbari, 2016; Park et al., 2019; 민진규 등, 2022; 엄정희 등, 2023; 임현우 등, 2022; Lachapelle et al., 2023). 따라서 수관폭이 넓은 수종을 좁은 간격으로 식재하는 것이 열환경 저감에 매우 효율적이다.

그러나 가로수의 수관은 풍속 및 환기력을 감소시켜 보행자 열쾌적성에 부정적인 결과를 초래할 수 있다(Lin et al., 2008; Morakinyo et al., 2018; Karttunen et al., 2020). Lin et al.(2008)은 그늘이 충분한 공간에 나무를 추가하면 풍속이 감소하기 때문에 여름철 열쾌적성을 악화시킬 수 있다고 주장했다. 이는 거리협곡의 종횡비와 수관폭과의 관계에 따라 다양하게 작동된다. 종횡비가 높은 좁고 깊은 거리협곡의 경우 건물로 인해 이미 충분한 그늘이 형성되어 있기 때문에 가로수의 열저감 효과가 거의 없을 뿐 아니라 수관폭이 넓은 가로수는 수관 덮개를 형성하여 거리 내 환기를 감소시킴으로써 열환경을 악화시킬 수 있다. 따라서 종횡비가 낮은 넓고 오픈된 거리협곡의 경우는 수관폭이 넓은 가로수를 좁은 간격으로 심어 그늘 면적을 넓히는 것이 열환경 완화에 유리하며, 종횡비가 높은 좁고 깊은 거리협곡의 경우는 수관폭이 좁은 가로수를 넓은 간격으로 심어 환기력을 높이는 것이 거리협곡 내 열환경 개선에 더 효과적이다(Norton et al., 2015; Park et al., 2019; Lee et al., 2020; Morakinyo et al., 2020; 임현우 등, 2022; Lachapelle et al., 2023).

가로수의 간격은 거리협곡의 종횡비와 더불어 수관폭과의 관계도 매우 중요하다. Park et al.(2019)은 수관폭이 더 큰 나무 또는 나무 사이에 공간이 거의 없는 간격의 수관폭이 작은 나무가 열저감에 효과적이라는 것을 발견했다. Zheng et al.(2018)은 나무 사이의 거리가 수관폭과 같을 때 냉각효율성이 가장 높다고 보고하고 있으며, 가로수 간격이 수관폭보다 멀면 거리가 더워지고, 수관폭보다 가까우면 수목의 열저감 효율이 떨어진다고 밝혔다. 따라서 가로수의 간격은 수종 및 성숙한 수목의 수관폭을 고려하여 결정하도록 하며, 가로수의 간격은 수관폭과 같거나 더 좁은 것이 열저감에 효과적이다(Zheng et al., 2018; Park et al., 2019; 엄정희 등, 2022).

3.3.2.2 다열 식재

다열 식재는 그늘 면적과 녹지량에 영향을 줌으로써 거리협곡 내 열환경 개선에 도움을 준다. 다열 식재와 가로수의 간격 조정은 거리협곡 내 수관피복률을 늘려 그늘에 의한 냉각효과를 증가시킨다. Roman et al.(2020b)은 수목의 캐노피는 그늘을 제공하여 지면에 대한 단파복사의 입력을 약 60-90% 줄일 수 있다고 보고했다. 더불어 다열 식재는 수관을 늘려 차광면적뿐만 아니라 증산을 위한 나뭇잎의 양을 증가시켜 열환경 개선에 도움을 준다. Lin et al.(2021a)은 다열 식재가 늘어날수록 열쾌적성이 높다는 것을 밝혔으며, Morakinyo and Lam(2016)은 보도에 두 줄로 나무를 심는 것이 중앙에 나무를 추가 식재하는 것보다 냉각 규모가 더 크다는 것을 알아냈다. 엄정희 외(2023)는 수관폭 8m 가로수의 다열 식재를 연구한 결과 보도폭 10m에서는 2열 식재가, 보도폭을 13m에서는 3열 식재가 거리협곡 내 온도 저감에 더 효과적이라는 것을 발견하였으며, 다열 식재 시 교목 간 간격에 임계값이 존재함을 이야기했다.

다열 식재 역시 거리협곡의 기하학적 특성에 따라 다르게 적용하는 것이 합리적이다. 거리협곡의 종횡비가 낮은 오픈된 거리협곡의 경우는 다열 식재가 수관피복률을 늘려 거리협곡 내 열저감에 효과적이지만 거리협곡의 종횡비가 높을 경우 오히려 공기 순환에 방해가 될 수 있으므로 지양하는 것이 좋다. 또한 다열 식재는 주간과 더불어 야간 열섬현상에도 긍정적인 효과를 미치는 것으로 나타났다. 권유진 등(2019)은 수목 식재 방법에 따른 냉각 효과에 대한 연구 중 다열 식재의 경우 야간 냉각 효과가 높은 식재 방법 중 하나임을 밝히고 있으며, Lin et al.(2021b)은 다열 식재가 17-18시 냉각 효과가 가장 높은 매개변수라고 결론지었다. 다열 식재는 열을 맞추어 식재하는 것보다 교차식재하는 것이 더 효과적이다(권유진 등, 2019; 엄정희 등, 2022).

3.3.2.3 식생층위구조

식생층위구조는 거리협곡 내 그늘의 질과 양뿐만 아니라 녹지량에 영향을 주는 중요한 매개변수이며, 다층구조 식재일수록 단파복사 차단률이 높고 녹지량이 증대되어 열저감에 효과적이다(정희은 등, 2015; Zolch et al., 2016; Balany et al., 2020; Rohman et al., 2020b; Lin et al., 2021b; 엄정희 등, 2022). 교목 및 아교목은 수관의 면적과 두께의 변화, 지하고의 변화를 통해 그늘 면적 및 농도에 직접적인 영향을 주며, 관목 및 초화는 녹지량 및 토지피복에 영향을 미쳐 도시 열저감에 기여한다. 따라서 교목 및 아교목을 통한 다층식재는 그늘 면적을 넓게 유지할 수 있도록 식재하는 것이 효과적이며, 캐노피 구조 및 지하고가 다른 교목 및 아교목을 혼합 식재하여 장파복사가 빠져나갈 수 있는 틈을 형성하고 환기력을 높이는 것이 열저감에 효율적이다(Pauleit, 2003; Norton et al., 2015; Rahman et al., 2020b). 관목 및 초화는 다층구조 식재를 통해 녹지량을 증대시킬 수 있도록 식재하는 것이

Table 7. Application plan for parameters related to planting method according to spatial characteristics

Division	Wide and open street canyon	Deep and narrow street canyon
Aspect ratio	Low	High
SVF	High	Low
Green space design principles	Reduce solar radiation by increasing the amount of shade	Expansion of ventilation and green volume
Tree spacing	Narrower than crown diameter	Wider than crown diameter
Multi-row planting	Multi-row planting	1 row planting
Multi-layer structural planting	Planting with a multi-layered structure, including trees + small trees + shrubs + ground cover	Trees and small trees are kept to a minimum. Increasing the amount of green space, Focusing on shrubs and ground cover
Thickness and number of green strips	The thicker green strips, The more rows of plantings,	The thicker green strips, The more rows of plantings,

열저감에 유리하며, 일반적으로 초화보다는 관목이 열저감에 효과적이다(Lin et al., 2021b). 그러나 관목의 경우 지하고가 없는 구조적인 특징으로 인해 주간에 저장한 열이 야간에 잘 식지 않는 특성을 가지므로(권유진 등, 2019) 주간 열저장을 최소화 할 수 있도록 교목과 함께 식재하는 것이 효과적이다. Zolch et al.(2019)은 잔디의 경우 바람의 흐름을 전달하고 열저장을 최소화하는데 도움을 줄 수 있기 때문에 공공녹지 조성 시 그늘 면적을 최대화할 수 있는 교목과 잔디를 결합하여 녹지를 조성할 것을 권고했다.

식생층위구조 역시 거리협곡의 기하학적 구조에 따라 다르게 적용하는 것이 효과적이다. 태양복사 에너지의 유입이 많은 종횡비가 낮고 천공률이 높은 오픈된 가로협곡의 경우 교목 + 아교목 + 관목 또는 교목 + 아교목 + 지피를 활용한 다층구조 식재가 열저감에 더 유리하다(정희은 등, 2015; Lin et al., 2021b; 엄정희 등, 2022). 반대로 종횡비가 높고 천공률이 낮은 거리협곡의 경우 건물로 인한 그늘의 면적이 넓을수록 교목 및 아교목보다는 관목 및 지피 위주의 식생층위구조가 더 유리하다(Norton et al., 2015; Chen et al., 2021; Antoszewski et al., 2022).

3.3.2.4 띠녹지 두께 및 스트랩 수

띠녹지의 두께 및 스트랩 수는 거리협곡 내 그늘의 면적, 녹지량, 토지피복에 영향을 주는 매개변수이며, 띠녹지의 두께가 두꺼울수록, 스트랩 수가 증가할수록 열저감에 효과적이다(Kong et al., 2017; Rohman et al., 2020; Lin et al., 2021a; 엄정희 등, 2022). Lin et al.(2021a)은 보도 내 열쾌적성 증대를 위한 도로 방향, 식재스트랩 수, 엽면적 지수의 영향에 대한 연구에서 식재스트랩 수가 증가할수록 열쾌적성이 높게 나타났다고 보고했으며, 엄정희 외(2022)는 열저감에 효과적인 식재 방법에 대한 연구에서 띠녹지의 두께가 두꺼울수록 열저감률이 높게 나타남을 밝혔다. 그러나 띠녹지 두께의 경우 보도폭 및 보행자 통로 기준(2m: 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 16조 3항)을 고려하여 적절한 두께를 정하는 것이 중요하다. 가로수 조성·관리 매뉴얼(산림청, 2022)에서는 이를 고려하여 도로폭에 따른 띠녹지 조성 기준을 제시하고 있는데, 보도폭 3-4m 미만 시 띠녹지 1.0m 이상, 보도폭 3-4m 이상 시 띠녹지 1.2m 이상, 보도폭 5m 이상 시 띠녹지 1.5m 이상을 조성하도록 권고하고 있다. 또한 토양 부피가 큰 식재대에 심겨진 나무일수록 높은 증발산으로 인한 열환경 완화효과가 큰 것으로 나타나(Kong et al., 2017) 띠녹지의 경우 넓은 면적으로 조성하는 것이 열저감에 유리하다. 나아가 띠녹지는 다열식재 및 다층구조 식재와 함께 적용함으로써 그 효과를 상승시킬 수 있다(엄정희 등, 2022; Han et al., 2022).

4. 매개변수를 활용한 녹지 계획 및 설계 방향

4.1 열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 증대를 위한 가로녹지 조성 원리

도시의 가로는 건물의 높이, 거리의 너비, 종횡비, 거리방향, 천공률 등 다양한 매개변수로 인해 서로 다른 열환경이 조성된다. 따라서 가로녹지는 거리협곡의 공간적 특성에 따라 형성되는 가로 내 열환경과 이에 대한 열저감 매커니즘에 부합하도록 계획하고 설계하는 것이 필요하다. 가로녹지의 조성은 크게 식재를 통한 직접적인 그늘 제

공, 증발산을 통한 냉각 효과, 환기력 증대를 통한 열 분산 등을 통해 거리협곡 내 열환경을 조절할 수 있다(Figure 2 참조).

4.1.1 그늘 형성을 위한 녹지조성

열환경 개선에 가장 효율적인 열저감 매커니즘은 녹지조성을 통한 그늘 제공이다. 교목의 수관부는 태양으로부터 유입되는 높은 단파복사를 차단하여 거리 내 포장면 및 건축물에 대한 열축적을 방지함으로써 열환경을 개선할 뿐만 아니라 보행자가 직접적으로 흡수하는 단파복사를 차단함으로써 보행자의 열쾌적성을 증진시킨다. 따라서 그늘 제공을 위한 녹지조성은 종횡비가 낮고 천공률이 높은 오픈된 거리를 중심으로 계획하는 것이 바람직하다. 효율적인 그늘 제공을 위해서는 수종 및 식재 방법에 대한 계획이 중요하다. 그들의 양과 질을 높이기 위해서는 수관폭이 넓고, 엽면적 지수가 높으며, 지하고가 낮고, 수관높이가 높은 수종을 선택하여 녹지 계획 및 설계에 반영하는 것이 효과적이다. 그늘 면적을 높이는 녹지조성 방법으로는 다열 식재, 띠녹지 조성, 식재형 중앙분리대의 설치, 가로수 간격 조정, 교목 및 아교목을 적용한 다층구조식재 등이 있다. 특히 교목 및 아교목을 적용한 다층구조 식재는 그늘 면적 확대는 물론 음영의 질을 높이는 효과를 기대할 수 있으며, 교목과 아교목 간의 지하고 높이 차이는 공기 순환 및 환기에도 긍정적인 효과를 줄 수 있어 열환경 개선의 효율성을 높일 수 있다. 관목 및 지피 식재를 통한 토지피복의 변화도 열저감에 긍정적일 수 있으나 관목의 경우 열저장량이 높아 거리협곡 내 열환경에 부정적 결과를 가져올 수 있으므로 열스트레스가 높은 가로에서는 교목 그늘 아래 식재하도록 한다.

4.1.2 환기력 증대를 위한 녹지조성

거리협곡 내 녹지의 조성은 조성 방법에 따라 공기 흐름 및 장파복사의 확산을 방해하여 거리협곡 내 열환경을 악화시킬 수 있다. 특히 종횡비가 높은 좁고 깊은 거리협곡의 경우 교목 식재로 인한 부정적 효과는 더 커질 수 있다. 또한 종횡비가 높은 거리협곡은 건물로 인한 그늘 면적이 넓어 상대적으로 안정적인 열환경이 형성될 수 있다. 따라서 녹지의 조성은 공기 순환 및 환기에 방해가 되지 않는 범위에서 녹지량을 늘리는 방향으로 계획 및 설계하는 것이 필요하다. 종횡비가 높고 천공률이 낮은 깊고 좁은 거리협곡 내 녹지조성은 엽면적 지수가 낮고, 수관폭이 좁으며, 지하고가 높고, 수관고가 낮은 수종을 선택하는 것이 바람직하며, 가로수 간격은 넓히고, 식재형 중앙분리대는 설치하지 않는 것이 열환경 개선에 효과적이다. 그들이 충분히 확보된 거리협곡의 경우 교목보다는 관목 및 초화 중심의 식재가 더 유리하며 옥상녹화 및 벽면녹화의 도입도 효과적이다. 종횡비가 높은 거리협곡 내 다층구조로 녹지를 도입할 경우는 환기력에 방해가 되지 않도록 교목 + 아교목 + 관목 식재보다는 교목+초화 식재가 효율적이다.

Mechanism of thermal environment improvement		Expansion of shade	Increased ventilation	Increased evapotranspiration
Parameters related to tree species characteristics	Leaf Area Index(LAI)	Higher (Forming a darker shade)	Lower	Higher
	Crown diameter	Wider (Forming a wider shade)	Narrower	Wider
	Tree height	Higher (Forming a wider shade)	Lower	Higher
	Trunk height	Lower (Forming a darker shade)	Higher	-
	Crown height	Higher (Forming a darker shade)	Lower	Higher
	Plant types	Focusing on trees (Forming a wider shade)	Focusing on shrubs and ground cover	-
Parameters related to planting method	Street trees spacing	Narrower than crown diameter (Forming a wider shade)	Wider than crown diameter	Narrower than crown diameter
	Multi-layer structural planting	More Multi-layered (Forming a darker shade)	Less Multi-layered	More Multi-layered
	Multi-row planting	More rows of planting (Forming a wider shade)	1 rows of planting	More rows of planting
	Thickness of green strips	More thicker (Forming a wider shade)	-	More thicker
	Numbers of green strips	More rows of plating (Forming a wider shade)	-	More rows of plating

Figure 2. Parameter application plan for each mechanism to improve the thermal environment of green areas

4.1.3 녹지량 및 증발산 증대를 위한 녹지 조성

수목은 증산작용으로 인한 냉각 효과를 통해 가로협곡 내 열환경을 개선할 수 있다. 증산작용으로 인한 냉각은 수관용적이 클수록, 녹지 면적 및 체적이 늘어날수록 효과적이다. 따라서 엽면적 지수가 높고, 수관폭이 넓으며, 수고가 높고, 수관높이가 높은 수종을 녹지 계획 및 설계에 반영하는 것이 효과적이다. 증발산량을 늘리는 식재 방법으로는 다열 식재, 다층구조식재, 띠녹지 조성 및 띠녹지 두께 증대, 식재형 중앙분리대의 설치 등이 있으며, 가로수의 간격은 좁게 설치하여 수목량을 늘릴 수 있다. 단 증산작용의 증대는 열스트레스가 높은 오픈된 가로에서는 불쾌지수를 높이는 결과를 초래할 수 있으므로 교목 식재를 통한 그늘 제공과 함께 녹지 용적을 늘리는 것이 필요하다.

4.2 녹지 조성 우선지역 선정 및 가로협곡의 열환경 특성별 식재 설계 방향

가로녹지 계획은 가로협곡의 공간적 특성에 따라 다르게 형성되는 열스트레스 정도에 따라 녹지 조성 방향의 목표를 다르게 설정하고 접근해야 한다(Figure 3 참조). 태양복사의 강도가 높고 직사광선 노출 지속시간이 긴 특징을 가지는 거리협곡의 경우 그늘 형성을 주된 목적으로 녹지를 조성하는 것이 열환경 개선에 효과적이다. 따라서 수관폭이 넓고, 지하고가 낮으며, 엽면적 지수가 높고, 수관이 높은 수종을 선택하는 것이 좋으며, 다열 식재 및 식재 간격 축소 등을 통해 수관피복률을 늘리거나 띠녹지 넓게 설치함으로써 열저감 효과를 높일 수 있다. 반대로 건물로 인한 그늘이 많은 거리협곡은 비교적 높은 종횡비로 인해 좁고 깊은 거리협곡이 조성되어 그늘이 충분히 형성된 지역으로 녹지의 보완이 필요한 경우 대기순환에 초점을 맞추어 녹지를 조성하는 것이 바람직하다. 따라서 수관폭은 좁고, 지하고는 높으며, 엽면적 지수는 낮은 교목을 선택하도록 하며, 가로수의 간격은 넓히고 다열 식재 및 다층구조 식재는 지양하며, 관목 및 초화 중심의 식재를 하는 것이 열환경 개선에 유리하다.

더불어 가로녹지 계획 시 녹지 조성 우선지역의 선정은 태양복사의 양과 강도, 노출 지속시간을 종합적으로 고려하여 열스트레스가 많은 지역을 우선적으로 고려하는 것이 바람직하다. 열스트레스가 많은 지역은 도시공간적 매개변수 중 거리협곡의 종횡비와 거리방향을 종합적으로 고려하여 선별할 수 있다. 선행연구 결과 열스트레스가 높게 나타난 동-서 방향의 종횡비 2.0 이하 가로, 남-북 방향의 종횡비 0.8 이하 가로, 대각선 방향의 종횡비 1.5 이하 가로는 녹지 조성 우선지역으로 선정하여 녹지 계획을 시 반영하는 것이 도시 열저감에 효과적이다. 특히 거의 모든 시간에 높은 열스트레스를 나타내는 지역인 동-서 방향 종횡비 1.0 미만의 가로, 남-북 방향 종횡비 0.4 미만의 가로, 대각선 방향 1.0 미만의 가로는 녹지 조성 최우선지역으로 선정하여 녹지 조성 계획 시 우선적으로 녹지를 조성하도록 한다. 또한 가로수가 없는 거리에 녹지를 조성하는 것이 가로수가 있는 거리에 녹지를 보완하여 식재하는 것보다 약 2배 이상 열저감 효과가 높게 나타난 결과(Lachapelle et al., 2023)를 바탕으로 녹지 조성 계획 수립 시 최우선 순위 지역 중 가로수가 없는 지역을 우선 녹지 조성 지역으로 선정하도록 한다.

Parameters related to Spatial characteristics of street canyons	Aspect ratio		Lower (Open & Wide)	Higher (Deep & Narrow)
	Street direction		Closer E-W direction	Closer N-S direction
	Sky view factor(SVF)		Higher	Lower
	Street direction + Aspect ratio	E-W	H/W 2.0 less than(H/W 1.0 less than)	H/W 2.0 or higher
N-S		H/W 0.8 less than (H/W 0.4 less than)	H/W 0.8 or higher	
NE-SW / NW-SE		H/W 1.5 less than (H/W 1.0 less than)	H/W 1.5 or higher	
thermal environment		High Stress (High sun exposure)		Low Stress (lots of shadow from buildings)
Green space creation principles		Increased shade and green volume		Improved ventilation and increased green volume
Parameters applicable for green space planning and design	Parameters related to tree species characteristics	Leaf area index(LAI)	Higher	Lower
		Crown diameter	Wider	Narrower
		Trunk height	Lower	Higher
		Crown height	Higher	Lower
		Plant types	Focusing on tree	focusing on shrubs and ground cover
	Parameters related to planting method	Tree spacing	Narrower	Wider
		Multi-layer structural planting	more multi-layered	Less multi-layered
		Multi-row planting	more rows of plantings	1 row planting
		Thickness of green strips	More thicker	More thicker
Number of green strips	the more rows of plantings	the more rows of plantings		

Figure 3. Parameter application method according to the spatial characteristics of the street canyon

5. 결론

본 연구는 도시열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 증대를 위한 효율적인 가로녹지의 조성방안 제시를 위해 녹지계획 및 설계에 활용할 수 있는 매개변수를 도출하였으며, 매개변수가 열환경 형성 및 완화 과정에서 작동하는 매커니즘을 파악하여 '열환경 형성에 관여하는 매개변수'(도시공간적 매개변수)와 '열환경 완화를 위한 녹지조성 관련 매개변수'(수종 및 식재 방법적 매개변수)를 분류하여 제시하였다. 또한 매개변수별로 열환경 완화 매커니즘을 반영한 매개변수별 활용방안을 제안하였다.

도시공간적 특성은 거리협곡 내 다양한 열환경을 형성하여 녹지 계획 및 설계 방향에 영향을 주는 매개변수로서 건물의 높이, 거리 너비, 종횡비, 거리방향, 천공률 등이 도출되었다. 종횡비가 낮고 천공률이 높은 오픈된 거리협곡은 태양 단파복사량이 많아 열스트레스가 높게 나타나는 특성을 나타내므로 녹지는 그늘 형성 및 녹지량 증대에 초점을 맞추어 계획하는 것이 바람직하다. 반대로 종횡비가 높고, 건물 높이가 높으며 천공률이 낮은 거리협곡은 건물로 인한 그늘 형성으로 인해 비교적 안정적인 열환경이 조성되므로 환기력을 높이고 녹지량을 늘리는 방향으로 녹지를 조성하는 것이 열환경 개선에 효과적이다. 또한 동-서 방향 종횡비 2.0 미만, 남-북 방향 종횡비 0.8 미만, 대각선 방향 종횡비 1.5 미만의 거리협곡의 경우는 태양에너지의 유입 강도 및 지속시간 측면에서 녹지조성 우선지역으로 선정하여 관리하는 것이 열환경 개선에 효율적이다.

도시 공간적 매개변수를 통해 녹지조성 방향이 결정되면 가장 효율적인 방법으로 녹지를 조성하는 것이 필요하다. 종횡비가 낮고 천공률이 높은 오픈된 거리협곡의 경우 그늘의 양과 질을 높이기 위해 수관폭이 넓고, 수고가 높으며, 지하고가 낮고, 엽면적 지수가 높고, 수관의 녹량이 높은 활엽수를 선정하는 것이 열저감에 효과적이다. 더불어 가로수의 간격이 좁을수록, 다열 식재일수록, 띠녹지의 두께가 두꺼울수록, 다층구조 식재일수록 열저감 효과가 크다. 반면에 종횡비가 높고 천공률이 낮은 깊고 좁은 거리협곡의 경우는 거리협곡 내 환기력을 높이기 위해 수관폭이 좁고, 수고가 낮으며, 지하고가 높고, 수관높이가 낮고, 엽면적 지수가 낮은 활엽수를 선정하는 것이 열환경 개선에 효과적이다. 더불어 가로수 간격이 넓을수록, 교목보다는 관목 및 초화 위주의 식재일수록 열저감에 효과적이며 다열 식재 및 다층구조 식재는 지양하는 것이 좋다. 그러나 계획 및 설계에 적용하기 위해서는 조금 더 구체적인 녹지조성 방안의 마련이 필요하다. 따라서 후속 연구에서는 미기후 모델링을 활용하여 한국의 가로환경에 적용가능한 구체적인 기준 및 수치 등을 도출하는 연구를 진행할 계획이며, 이와 함께 이를 실제 대상지에 적용하여 매개변수의 적용에 대한 효과 검증도 진행할 계획이다.

본 연구는 거리협곡 내 열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 증대를 위한 가로녹지 조성 기준 마련을 위한 기초자료로 활용할 수 있으며, 가로녹지 조성 시 가로녹지의 위치 선정 및 우선순위 선정 시 기초자료로 활용할 수 있다. 또한 가로수의 수종 갱신, 보식, 전정 및 전지, 수형 관리 등 유지관리를 위한 가이드라인 작성 시 기초자료로 활용 가능하다. 나아가 기후변화 대응을 위한 녹지계획 및 설계를 위한 가이드라인 작성 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

1. 권유진, 이동근, 안재결(2019) 미시적 열섬현상 저감을 위한 도시 가로수 식재 시나리오별 분석 - 서울시를 대상으로. 환경영향평가 28(1): 23-34.
2. 김민순, 김형규(2023). 도심의 거리 협곡에서 건폐율과 외관비에 따른 미세먼지 농도의 미시적 분포 추정. 국토연구: 43-60.
3. 민진규, 엄정희, 성옥제, 손정민, 김주은(2022) 녹지조성 시나리오에 따른 도시 열환경 개선 효과 분석. 한국조경학회지 50(6): 1-14.
4. 산림청(2022) 가로수 조성·관리 매뉴얼. 산림청 보고서.
5. 엄정희, 민진규, 박주현, 손정민, 서홍덕, 오정학(2023) 가로수 식재 시나리오에 따른 기온 및 미세먼지 저감 효과 분석. 한국지리정보학회지 26(2): 68-81.
6. 엄정희, 박주현, 손정민, 성옥제, 민진규, 김주은(2022) 바람길숲 유형별 조성 효과 및 환경 특성 분석. 국립산림과학원 연구보고서.
7. 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.
8. 정희은, 한봉호, 광정인(2015) 서울 도심 가로수 및 가로녹지의 기온 저감 효과와 기능 향상 연구. 한국조경학회

- 지 43(4): 37-49.
9. 최원준, 이상훈, 윤용환, 김정호(2019) 거리협곡 내 가로수 식재구조에 의한 복사에너지 변화. *한국환경생태학회 학술발표논문집* 2019(2): 61-61.
 10. Abreu-Harbich, L. V., L. C. Labaki and A. Matzarakis(2013) Thermal bioclimate in idealized urban street canyons in Campinas, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*: 1-8.
 11. 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.
 12. Akbari, H. and R. Levinson(2008) Evolution of cool-roof standards in the US. *Advances in Building Energy Research* 2: 1-32.
 13. Alexander, L. V. and J. M. Arblaster(2009) Assessing trends in observed and modelled climate extremes over Australia in relation to future projections. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 29(3): 417-435.
 14. 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): 94-10.
 15. Andreou, E.(2013) Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy* 55: 182-188.
 16. Andreou, E.(2014) The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. *Renewable Energy* 63: 587-596.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Balany, F., A. W. Ng, N. Mutil, S. Muthukumaran and M. S. Wong(2020) Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy—a review. *Water* 12(12): 3577.
 20. Ballinas, M. and V. L. Barradas(2016) The urban tree as a tool to mitigate the urban heat island in Mexico City: A simple phenomenological model. *Journal of Environmental Quality* 45(1): 157-166.
 21. 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.
 22. 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.
 23. 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: 55-68.
 24. Helletsgruber, C., S. Gillner, A. Gulyas, R. R. Junker, E. Tanacs and A. Hof(2020) Identifying tree traits for cooling urban heat islands—a cross-city empirical analysis. *Forests* 11(10): 1064.
 25. 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.
 26. Han, D., T. Zhang, Y. Qin, Y. Tan and J. Liu(2022) A comparative review on the mitigation strategies of urban heat island (UHI): A pathway for sustainable urban development. *Climate and Development*: 1-25.
 27. 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.

28. Jamei, E., P. Rajagopalan, M. Seyedmahmoudian and Y. Jamei(2016) Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 1002–1017.
29. Jamei, E. and P. Rajagopalan(2017) Urban development and pedestrian thermal comfort in Melbourne. *Solar Energy* 144: 681–698.
30. Jiang, S., X. Lee, J. Wang and K. Wang(2019) Amplified urban heat islands during heat wave periods. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124(14): 7797–7812.
31. Johansson, E.(2006) Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment* 41(10): 1326–1338.
32. Karttunen, S., M. Kurppa, M. Auvinen, A. Hellsten and L. Jarvi(2020) Large-eddy simulation of the optimal street-tree layout for pedestrian-level aerosol particle concentrations—A case study from a city-boulevard. *Atmospheric Environment: X* 6: 100073.
33. 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.
34. Krayerhoff, E. S., A. Christen, A. Martilli and T. R. Oke(2014) A multi-layer radiation model for urban neighbourhoods with trees. *Boundary-Layer Meteorology* 151: 139–178.
35. Lachapelle, J. A., E. S. Krayerhoff, A. Middel, P. Coseo and J. Warland(2023) Maximizing the pedestrian radiative cooling benefit per street tree. *Landscape and Urban Planning* 230: 104608.
36. 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.
37. 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.
38. Lin, B., X. Li, Y. Zhu and Y. Qin(2008) Numerical simulation studies of the different vegetation patterns' effects on outdoor pedestrian thermal comfort. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96(10–11): 1707–1718.
39. Lin, B. S. and Y. J. Lin(2010) Cooling effect of shade trees with different characteristics in a subtropical urban park. *HortScience* 45(1): 83–86.
40. Lin, B. S., Y. H. Cho and C. I. Hsieh(2021a) Study of the thermal environment of sidewalks within varied urban road structures. *Urban Forestry & Urban Greening* 62: 127137.
41. Lin, P., D. Song and H. Qin(2021b) Impact of parking and greening design strategies on summertime outdoor thermal condition in old mid-rise residential estates. *Urban Forestry & Urban Greening* 63: 127200.
42. 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.
43. Lobaccaro, G. and J. A. Acero(2015) Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. *Urban Climate* 14: 251–267.
44. Masoudi, M., P. Y. Tan and S. C. Liew(2019) Multi-city comparison of the relationships between spatial pattern and cooling effect of urban green spaces in four major Asian cities. *Ecological Indicators* 98: 200–213.
45. Mayer, H., J. Holst, P. Dostal, F. Imbery and D. Schindler(2008) Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 17(3): 241–250.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
 49. 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.
 50. 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.
 51. Oke, T. R. and H. A. Cleugh(1987) Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary–Layer Meteorology* 39: 233–245.
 52. Park, C. Y., D. K. Lee, E. S. Krayenhoff, 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.
 53. Park, M., A. Hagishima, J. Tanimoto and K. I. Narita(2012) Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site. *Building and Environment* 56: 38–46.
 54. Pauleit, S.(2003) Urban street tree plantings: Identifying the key requirements. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Municipal Engineer* (Vol. 156, No. 1, pp. 43–50). Thomas Telford Ltd.
 55. Rahman, M. A., C. Hartmann, A. Moser–Reischl, M. F. von Strachwitz, H. Paeth, H. Pretzsch, S. Pauleit and T. Rotzer(2020a) Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 287: 107947.
 56. 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.
 57. Shashua–Bar, L. and M. E. Hoffman(2000) Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings* 31(3): 221–235.
 58. 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.
 59. Shashua–Bar, L., I. X. Tsiros and M. Hoffman(2012) Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Building and Environment* 57: 110–119.
 60. 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.
 61. Taleghani, M., L. Kleerekoper, M. Tenpierik and A. Van Den Dobbela(2015) Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment* 83: 65–78.
 62. Tan, Z., K. K. L. Lau and E. Ng(2017) Planning strategies for roadside tree planting and outdoor comfort enhancement in subtropical high-density urban areas. *Building and Environment* 120: 93–109.
 63. 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.
 64. 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.
 65. Wu, Z., F. Kong, Y. Wang, R. Sun and L. Chen(2016) The impact of greenspace on thermal comfort in a residential quarter of Beijing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*

- 13(12): 1217.
66. Zardo, L., D. Geneletti, M. Perez-Soba and M. Van Eupen(2017) Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning, *Ecosystem Services* 26: 225-235.
 67. Zheng, B., K. Bernard BEDRA, J. Zheng and G. Wang(2018) Combination of tree configuration with street configuration for thermal comfort optimization under extreme summer conditions in the urban center of Shantou City, China, *Sustainability* 10(11): 4192.
 68. Zolch, 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.
 69. Zolch, T., M. A. Rahman, E. Pfeleiderer, G. Wagner and S. Pauleit(2019) Designing public squares with green infrastructure to optimize human thermal comfort, *Building and Environment* 149: 640-654.