

보행 공간의 열환경 향상을 위한 가로녹지 조성체계 연구[†]

- 보도폭과 도로폭에 따른 가변 기준을 중심으로 -

A Study on Street Greenery Systems for Improving the Thermal Environment of Pedestrian Spaces[†]

박주현*, 엄정희**, 손정민***

*경북대학교 조경학과 박사, **경북대학교 산림과학·조경학부 조경학전공 교수, ***서울대학교 환경계획연구소 연수연구원

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

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

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

***Postdoctoral Researcher, Environmental Planning Institute, Seoul National University

Received: October 21, 2025

Revised: November 27, 2025

Accepted: November 28, 2025

3인익명 심사필

Corresponding author :

Jeong-Hee Eum

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 열스트레스가 높은 도시지역 내 가로녹지를 대상으로, 열환경 개선을 위한 가로녹지 조성체계를 제안하였다. 이를 위해 가로녹지 계획·설계에서 핵심 변수로 활용되는 보도폭과 도로폭을 중심으로 다열 식재, 띠녹지 폭, 녹지형 중앙분리대 적용기준을 체계화하였다. 연구대상지는 대한민국의 대표적 고온 도시인 대구광역시이며, 열환경 개선에 효율적인 다열 식재 및 녹지형 중앙분리대 적용 방법의 도출을 위해 총 68개의 시나리오를 설계하고 분석하였다. 시나리오 적용에 따른 열환경 변화를 분석하기 위해 ENVI-met 5.6.1을 활용하였다. 그 결과 가로 방향에 관계없이 보도폭 6m 이상은 2열 식재, 보도폭 10m 이상은 3열 식재를 적용하는 것이 열환경 개선에 효과적인 것으로 나타났으며, 4차선 이상의 도로에는 녹지형 중앙분리대를 설치하는 것이 도시 열저감에 유리한 것으로 나타났다. 또한 보도 유효폭 2m를 전제로 보도폭과 띠녹지 폭을 연동한 가로녹지 조성기준을 제시하였는데, 보도폭 3m 미만은 1열+1m 미만, 3~4m 미만은 1열+1~2m, 4~6m 미만은 1열+2m, 6~10m 미만은 2열+2m 이상, 10m 이상은 3열+2m 이상이 바람직한 것으로 나타났다. 더불어 다열 식재와 다층구조를 병행할수록 냉각 효과가 증대하는 것으로 나타났다. 본 연구는 도시 가로의 열환경 개선을 위한 가로녹지의 합리적 계획 및 설계를 위해 보도폭-다열 식재-띠녹지 폭-층위구조-중앙분리대를 통합한 프레임은 제안함으로써 녹지조성의 질적 향상을 유도할 수 있을 것을 기대한다.

주제어: 자연 기반 해법(NBS), 기후변화 대응, 열섬현상, 가로수 설계, Envi-Met 시뮬레이션

ABSTRACT

This study proposes a practical framework for street greenery to improve the thermal environment in urban areas with high heat stress. Centering on sidewalk and road width as key planning variables, the framework systematizes criteria for multi-row tree planting, green-strip widths, and vegetated medians. Daegu Metropolitan City—one of South Korea's hottest cities—served as the study area. Sixty-eight scenarios were designed and analyzed to develop and validate efficient application strategies for multi-row plantings and vegetated central medians to improve the urban thermal environment. Using the 3-D microclimate model ENVI-met 5.6.1, it was found that, irrespective of street orientation, two-row planting is effective at sidewalks $\geq 6m$ wide, and three-row planting is effective at sidewalks $\geq 10m$ wide. Roads with ≥ 4 lanes benefit from vegetated medians. Furthermore, based on a 2m effective sidewalk width, standards for the creation of street greenery strips were proposed, linking their width to the sidewalk width segments. The desirable standards were found to be: Under 3m (sidewalk width) \rightarrow 1 row (of trees/shrubs) + under 1m (greenery strip width); 3m to under 4m \rightarrow 1 row + 1m to under 2m; 4m to under 6m \rightarrow 1 row + 2m; 6m to under 10m \rightarrow 2 rows + 2m or more; 10m or more \rightarrow 3 rows + 2m or more. Cooling is further enhanced when multi-row planting is combined with multi-layer vegetation (trees, sub-trees, shrubs). The integrated framework offers actionable guidance for rational planning and supports priority setting and strategic budget allocation for urban heat mitigation.

[†]본 논문은 주저자의 박사학위논문 의 일부를 발췌하여 작성하였습니다. 더불어 한국연구재단 “RS-2024-00354391 (기후대응 도시를 위한 도시그늘 네트워크 구축 기술 및 이용자 중심의 그늘 네트워크 활용기법 개발)”의 지원으로 작성되었습니다.

Keywords: Climate Change Adaptation, Ecological Design, Nature-Based Solutions(Nbs), Green Infrastructure, Greening Plan

1. 서론

1.1 연구 배경과 목적

IPCC 보고서(2023)에 따르면, 기후변화로 인한 지구 온난화는 폭염의 빈도와 강도를 지속적으로 증가시킬 것으로 예측하고 있다. 이러한 추세는 역학 자료에서도 확인되고 있으며, 특히 2000년 이후에는 폭염으로 인한 사망자 수가 뚜렷한 증가세를 보이며 이를 뒷받침한다. 유럽의 경우, 2022년 폭염 관련 사망은 61,000명 이상으로 보고되었고(Ballester et al., 2023), 2023년에는 47,000명 이상으로 추정되었다(Gallo et al., 2024). 더불어 2024년 추정치는 약 62,755명으로 제시된 바 있다(Janoš et al., 2025). 국내에서도 유사한 양상이 확인된다. 기상청(2025) 발표에 따르면, 2025년 6월에서 8월 3개월간 전국 평균기온은 25.7°C로 관측 이래 역대 최고치를 기록했으며, 일 최고기온 역시 30.7°C로 최고치를 경신했다. 또한 2025년 10월 기준 온열질환자는 총 4,460명으로 2020년(1,078명) 대비 약 4배 이상 증가하였으며, 열 관련 사망자 수도 2020년 9명에서 2025년 29명으로 급증하였다(질병관리청, 2025).

이러한 도시 열환경 문제에 대응하기 위해 최근 연구들은 효과성과 현실성을 겸비한 대안으로서 그린인프라(green infrastructure)의 중요성을 강조하고 있다. 특히 가로협곡(street canyon)은 도시 내에서 열환경 개선의 잠재력이 높은 핵심 공간으로 인식되고 있으며, 이에 세계 주요 도시들은 가로녹지를 중심으로 다양한 미기후 조절 전략을 추진하고 있다. 포틀랜드시(City of Portland, 2025)는 가로 중심의 수관피복률(Tree Canopy Ratio, TCR) 확보 전략을 우선 과제로 수립하고, 2045년까지 수관피복률 35% 이상 달성을 위해 노력하고 있다. 이와 마찬가지로 시드니(NSW Government, 2021), 멜버른(City of Melbourne, 2012) 또한 가로를 중심으로 수관피복률 30~40% 이상 확보를 목표로 제시하였으며, 가로수 디자인 매뉴얼(Street Tree Planting Design Manual 2021), 도시숲 전략(Urban Forest Strategy, 2012-2032) 등을 통해 전략적으로 정책을 추진하고 있다. 한편 바르셀로나는 도로 환경을 녹지로 재구성하는 슈퍼블록(superblock) 정책을 통해 도시 내 녹지공간을 확대하고 있으며, 최근 모형·평가연구에서는 평균 약 0.05°C, 최대 0.42°C의 국지적 기온 저감이 가능하다고 보고하고 있다(Jungman et al., 2025).

우리나라 역시 도시 열 문제 해결을 위한 자연 기반 해법(nature-based solution, Nbs)의 일환으로 도시숲 조성 사업이 수행되고 있다. 특히 '도시 바람길숲' 및 '기후대응 도시숲' 등은 대상지 확보가 용이한 가로녹지를 중심으로 녹지 면적을 확대하고 있으며, 가로수 추가 조성, 띠녹지 조성 확대, 도로 다이어트에 의한 녹지 면적 증대 등 다양한 녹지 전략을 적용하고 있다. 산림청과 국립산림과학원(2024)에 따르면, 2019년부터 2024년까지 전국 17개 시·도를 대상으로 기후대응 도시숲 590개소가 조성되었으며, 도시 바람길숲 역시 27개 지자체에 광범위하게 조성되는 등 도시 내 녹지공간의 양적 확대는 지속적으로 이루어지고 있는 것으로 평가되고 있다. 그러나 이러한 양적 확산에도 불구하고 도시숲의 실효성에 대한 문제 제기는 계속되고 있다. 특히 조성 목적에 부합하는 도시숲 유형별 조성·관리 지침이 명확하지 않아, 조성된 도시숲이 충분한 기능을 발휘되지 못하고 있다는 지적이 꾸준히 제기되고 있다(산림청, 2020; 엄정희 등 2020).

따라서 본 연구는 대표적 공공지역으로 대상지 선정이 비교적 자유로우며, 이용자 접근성이 높고, 녹지조성의 파급효과가 높을 뿐 아니라 기후변화 대응숲 및 도시 바람길숲 조성사업 등에서도 주요 대상으로 추진되고 있는 가로녹지를 대상으로 열환경 개선을 위한 효과적인 가로녹지 조성체계를 제안하고자 한다. 특히 가로수 조성·관리 매뉴얼(산림청)과 지자체 가로수 기본계획 등에서 계획·설계 기준으로 활용되는 핵심 매개변수인 보도폭과 도로폭에 초점을 맞추어 체계적 가로녹지 조성 프레임워크를 제시하고자 한다. 본 연구는 과학적·객관적 근거에 기반한 도시 열환경 개선 방안을 제시함으로써 실효적이고 효율적인 녹지조성 기반 마련을 목표로 한다. 나아가 폭염 및 열섬 등 도시 열환경 문제를 최소화하고 도시민의 삶의 질을 제고함과 동시에, 궁극적으로 기후변화 적응과 기후탄력성을 갖춘 도시 구현에 기여하고자 한다.

1.2 연구체계

본 연구는 열환경 개선을 위한 가로녹지 조성체계를 개발하기 위해 총 4단계의 연구 절차를 수행하였다(그림 1 참조). 첫 번째 단계에서는 선행연구 및 법제도 검토를 통해 가로협곡 내 열환경 형성에 영향을 미치는 주요 매개변수와 가로녹지 계획·설계 시 기준으로 활용되는 핵심 매개변수를 체계적으로 정리하였다. 두 번째 단계에서는

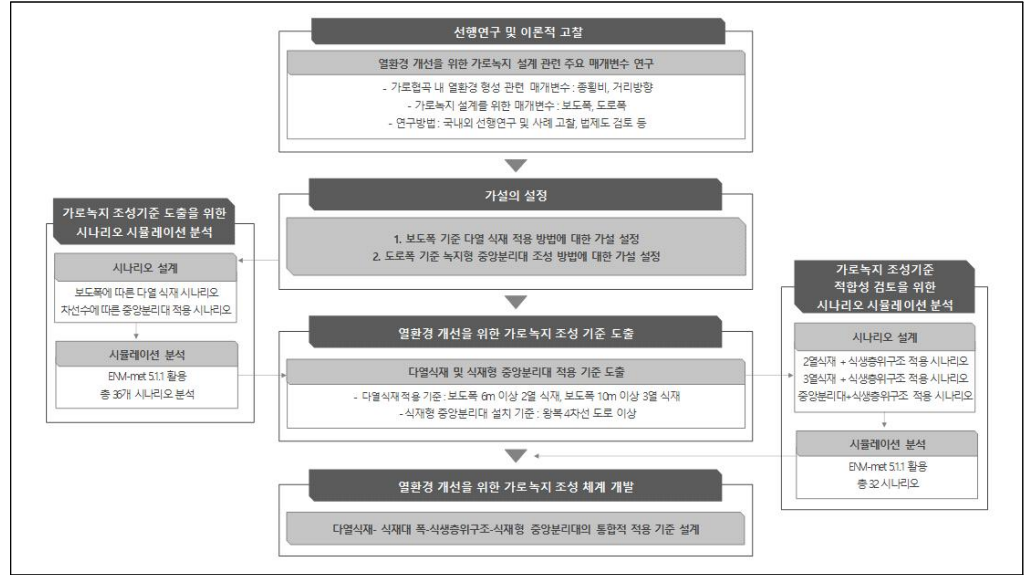


그림 1. 연구체계

도출된 시사점을 바탕으로 다열 식재 및 녹지형 중앙분리대 설치 기준을 도출하기 위한 연구가설을 설정하였다. 세 번째 단계에서는 연구가설을 중심으로 가로녹지 조성기준 도출을 위한 시나리오를 설계·분석하고, 그 결과를 바탕으로 열환경 개선을 위한 가로녹지 조성기준을 제시하였다. 시나리오 시뮬레이션은 두 단계로 수행되었으며, 우선 ‘조성기준 도출’ 단계에서 다열 식재 24개, 녹지형 중앙분리대 12개 등 총 36개 시나리오를 분석하였고, 이어 ‘조성기준 적합성 검토’ 단계에서 다열 식재 24개, 녹지형 중앙분리대 8개 등 총 32개 시나리오를 추가로 분석하였다. 시나리오별 열환경 분석에는 미기후 및 열환경 평가 연구에서 널리 활용되는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 기반 모델인 ENVI-met 5.6.1을 활용하였다. 네 번째 단계에서는 시뮬레이션 분석 결과를 바탕으로 현행 법·제도에서 제시하는 유효폭, 피녹지 조성기준 등을 고려하여 열환경 개선을 위한 가로녹지 조성체계를 개발하였다.

2. 이론적 고찰 및 가설의 설정

2.1 열환경 개선을 위한 가로녹지 설계 관련 매개변수 선정

2.1.1 가로협곡 내 열환경 형성 관련 매개변수 연구

도시 공간의 기하학 및 형태적 특성을 나타내는 매개변수는 효율적인 녹지조성 방향을 결정하는 데 핵심적 역할을 수행한다. Morakinyo et al.(2017)은 종횡비(aspect ratio, H/W)를 거리협곡(street canyon)의 기하학을 결정하는 가장 중요한 매개변수 중 하나로 제시하고 있으며, Antoszewski et al.(2020)은 온대지역 도시열섬 완화에 영향을 미치는 매개변수의 통계적 검토에 관한 연구에서 종횡비에 대한 연구 비중이 13.6%로 가장 높다고 보고하고 있다. 종횡비는 음영 패턴, 열질량, 복사 균형뿐만 아니라 풍향 및 풍속 등에 영향을 미치며, 이를 통해 거리협곡 내 열환경을 형성한다. 일반적으로 넓고 개방적인(종횡비 낮음) 거리협곡은 일사량 및 노출 시간 증가로 인해 높은 열 스트레스를 나타내며, 좁고 깊은(종횡비 높음) 거리협곡은 건물에 의한 그늘 효과로 열 스트레스가 상대적으로 낮은 특성을 보인다. 따라서 종횡비에 따른 거리협곡의 열환경적 특성을 고려하여 녹지조성 방향을 결정하는 것이 필수적이다.

또한 종횡비는 단독으로 작동하기보다 거리방향과의 상호작용을 통해 거리협곡 내 열환경을 형성한다. 거리방향은 협곡 내 유입되는 태양복사의 양, 강도, 지속시간 등을 좌우함으로써 보행자 열 스트레스와 열쾌적성에 직접적인 영향을 미친다. Taleghani et al.(2015)은 종횡비 0.9 거리협곡의 거리방향별 태양 노출에 대한 연구에서 동서 및 남북방향 거리의 태양 노출 시간을 각각 12.5시간 및 4.5시간으로 제시하면서 남북방향의 거리협곡이 동서방향의 거리협곡보다 더 시원하다고 보고하고 있다. Andreou(2013)는 동서 지향적인 거리는 종횡비가 3.0으로 증가하더라도 열 환경이 개선되지 않는 반면, 남북 지향적인 거리는 종횡비 0.8 이상에서 대부분의 시간 동안 열적으로 편안한 조건 내에 있다고 보고했다. Antoszewski et al.(2022)은 선행연구 분석을 통해 남북 지향적인 거리가 동서 지향적인 거리보다 열쾌적성이 우수하며, 남북 지향적인 거리가 최상의 열쾌적성을 가지는 종횡비 범위를 0.8~3.0으로 제한했다.

그러나 거리협곡의 종횡비가 낮아지면 거리협곡 내 열환경 형성 매커니즘은 거리방향과 맞물려 다른 양상을 나타낸다. 특히 종횡비가 낮은 남북방향 거리협곡의 경우, 이른 아침부터 시작된 서측 보도 중심의 빠른 기온 상승과 늦은 오후까지 지속된 동측 보도 중심의 높은 평균기온(air temperature, T_a)으로 같은 종횡비의 동서방향 거리협곡보다 높은 열스트레스를 나타낸다. 임현우 등(2022)은 종횡비 0.48을 기준으로 거리방향별 열환경 변화를 분석한 연구에서 10~16시 평균기온의 경우 남북방향의 서측 보도가 동서방향의 남측 보도와 함께 가장 높은 기온값(31.0°C)을 기록하여 종횡비가 높은 남북방향의 거리협곡과는 다른 양상을 나타냈음을 지적했다. 또한 16시 기준 평균복사온도의 경우 남북방향의 동측 보도(70.5°C)가 동서방향의 북측 보도(67.4°C)보다 더 높은 온도를 기록했음을 보고했다. 따라서 열스트레스가 높은 지역에 대한 판단은 종횡비와 거리방향을 종합적으로 고려하여 결정하는 것이 필요하다.

더불어 태양복사 에너지의 유입량이 많고 지속시간이 긴 거리협곡을 중심으로 우선적으로 녹지를 조성하는 것은 열환경 개선의 효과를 높일 수 있다. 태양복사 에너지 유입량이 많고 그늘이 부족한 거리협곡을 중심으로 우선적으로 녹지조성 지역을 선정하는 것이 열환경 개선에 효과적이다(Morakinyo et al., 2020). 반대로 높은 수준의 자체 음영이 확보된 좁은 가로협곡에서는 가로수의 열환경 개선 효과가 제한적이므로(Masoudi et al., 2019) 우선 식재 지역에서 배제하는 것이 바람직하다. 선행연구 고찰 결과, 열스트레스가 높게 나타난 동서방향의 종횡비 2.0 이하 거리협곡, 남북방향 종횡비 0.8 이하 거리협곡은 '녹지조성 우선지역'으로 선정하여 녹지조성 계획 단계에서 이를 반영하는 것이 도시 열환경 개선에 효과적이다(Andreou, E., 2013; Norton et al., 2015; Zheng et al., 2018; Antoszewski et al., 2022). 특히 대부분의 시간대에 높은 열스트레스를 나타내는 동서방향 종횡비 1.0 미만 거리협곡, 남북방향 종횡비 0.4 미만 거리협곡은 '녹지조성 최우선지역'으로 선정하여 우선적으로 녹지를 조성하는 것이 바람직하다(Norton et al., 2015).

2.1.2 가로녹지 설계를 위한 매개변수 연구

2.1.2.1 보도폭: 다열 식재

보도폭은 가로녹지 조성 시 수종 선정과 식재 규격을 좌우하는 핵심 매개변수로서, 띠녹지 두께, 다열 식재의 열수, 식생층위구조 등 구체적인 식재 방법 결정에 직접적 영향을 미친다. 이에 따라 산림청 「가로수 조성·관리 매뉴얼(2022)」과 서울시 「가로 설계·관리 매뉴얼(2017)」 등 관련 매뉴얼, 그리고 「서울시 가로수 기본계획(2020)」 등 지자체 기본계획에서는 보도폭을 기준 변수로 삼아 수종 선정 원칙과 녹지조성 방법을 제시하고 있다(표 1 참조).

산림청 「가로수 조성관리 매뉴얼(2022)」에서는 보도폭을 기준으로 식재 규격, 다열 식재, 띠녹지 조성, 아교목 적용에 관한 세부 기준을 제시하고 있다. 그중 다열 식재는 보도폭 4~6m 이상 2열 식재, 보도폭 6m 이상 3열 식재를 권고하고 있다. 그러나 정희은 등(2015)은 보도폭 6m 이상 가로에서 2열 이상의 다열 식재가 기온 저감에 유리하다고 보고하고 있으며, 엄정희 등(2022)은 열환경 개선의 효율성 측면에서 10m 보도폭에는 2열, 13m 보도폭에는 3열 식재가 거리협곡 및 보행자 열스트레스 저감에 효과적이라는 결과를 제시한 바 있다. 현행 다열 식재 기준은 주로 보도폭 등 단일 물리 변수에 의존하고 있으나, 종횡비와 도로 방향 등 거리협곡의 열환경적 특성에 따른 차이를 체계적으로 반영한 실증 연구는 부재하다. 따라서 종횡비, 거리방향, 도로폭 등을 종합적으로 고려한 다열 식재 적용기준에 대한 연구가 필요하다(그림 2 참조).

또한 「가로수 조성관리 매뉴얼(2022)」은 띠녹지 폭에 대한 기준도 제시하고 있다. 띠녹지는 유효폭 2m(도로의 구조·시설기준에 관한 규칙)를 고려하여 보도폭 3~4m는 띠녹지 1.0m 이상, 보도폭 4~5m는 띠녹지 1.2m 이상, 보도폭 5m 이상은 띠녹지 1.5m 이상을 권고하고 있으며, 보도폭 4m 이상의 경우에만 아교목을 추가 식재할 수 있도록 제시하고 있다. 정희은 등(2015) 역시 가로녹지의 열환경 개선을 위해 보도폭 3m 이상인 가로에 대해 1m 이상의 띠녹지 형성을 제안하고 있으며, 엄정희 등(2022)은 띠녹지 폭과 면적이 넓을수록 기온 저감에 유리하다고 밝히고 있다. 특히 다층구조식재 도입 시 관목·초화 중심 구성에 비해 교목·아교목을 병행한 구성이 그늘 면적과 음영 농도를 확대하여 냉각 효과를 증대시키는 경향이 확인되므로, 가능한 범위에서 띠녹지 폭을 2m 이상 확보하는 것이 바람직하다.

2.1.2.2 도로폭: 녹지형 중앙분리대

도로폭은 가로녹지 조성 시 수종 선정 및 식재 규격에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 녹지형 중앙분리대 설치 여부를 결정하는 핵심적인 도시공간적 매개변수이다. 「가로수 조성관리 매뉴얼(2022)」 및 「서울시 2차 가로수 조성관리 기본계획(2020)」 등에서는 도로폭 및 차선수를 기준으로 수고 및 수종 특성을 제시하고 있으며, 특히 「가로수 조성관리 매뉴얼(2022)」에서는 차선수를 기준으로 녹지형 중앙분리대 설치 기준을 제시하고 있다(표 2 참조).

표 1. 기존 매뉴얼 및 선행연구에서 제시한 보도폭에 따른 녹지조성 방법 적용기준

서울특별시 가로 설계·관리 매뉴얼(서울특별시, 2017)	보도폭에 따른 분류기준		
	~2m 미만	따녹지 및 조경시설 설치 권장하지 않음	
~2m 이상	따녹지 설치 및 조경시설 설치 권장		
가로수 조성관리 매뉴얼 (산림청, 2022)	가로수 식재기준	3m 미만	수관폭 5m 이하
		3~5m 미만	수관폭 5m 이하
		5m 이상	수관폭 6m 이상
	따녹지 조성기준	3~4m 미만	따녹지 1.0m 이상
		4~5m 미만	따녹지 1.2m 이상
		5m 이상	따녹지 1.5m 이상
아교목 적용기준	4m 이상	4m 이상 보도폭의 기존 가로수 사이에 추가 식재 가능	
다열 식재 적용기준	4~6m 미만	2열 이상 조성	
	6m 이상	3열 이상	
서울시 가로수 조성관리 기본계획 (서울특별시, 2020)	가로수 구조모델 설정	협소	1열 가로수 + 부분 따녹지
		보통	1열 가로수 + 1열 따녹지
		넓음	2열 가로수 + 2열 따녹지
		매우 넓음	2열 가로수 + 2열(광폭) 따녹지
정희은 등(2015)	따녹지 조성기준	3m 미만	1m 이하의 따녹지
		3m 이상	1m 이상의 따녹지
	다열 식재 적용기준	6m 미만	1열 식재
		6m 이상	다열 식재
엄정희 등(2022)	다열 식재 적용기준	10m	2열 식재가 열저감에 유리
		13m	3열 식재가 열저감에 유리

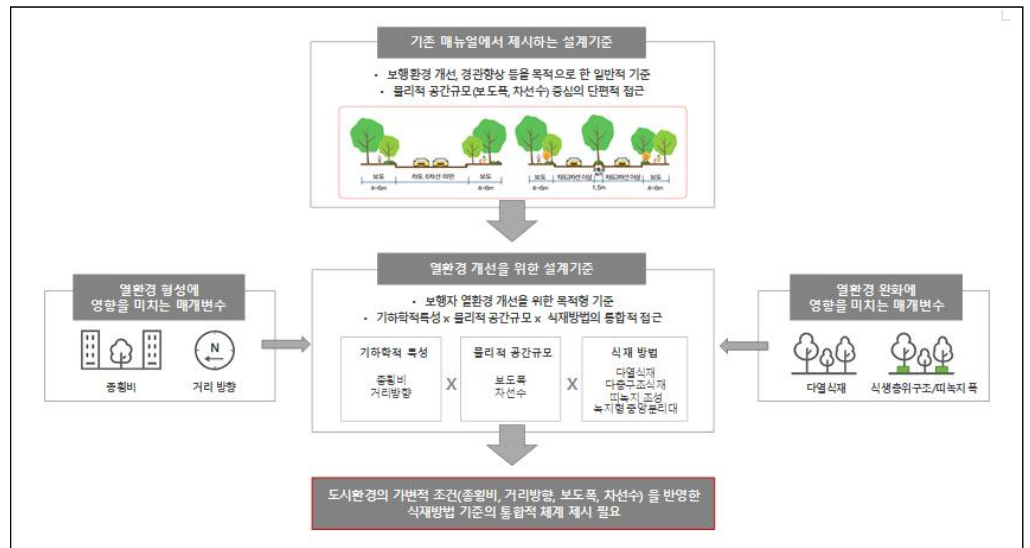


그림 2. 통합적 접근의 필요성

「가로수 조성관리 매뉴얼(2022)」에 따르면, 도로의 폭에 따른 수종 선정 기준은 최고 수고를 중심으로 제시하고 있으며, 도로폭에 따른 공기질, 경관 등을 고려하여 내공해성 등에 대한 추가 기준을 제시하고 있다. 더불어 도로폭이 6차선 이상일 경우 1.5m 이상의 녹지형 중앙분리대를 설치하도록 권고하고 있으며, 녹지폭 3.0m 이상이 확보되는 경우에는 느티나무, 은행나무 등의 녹음이 풍부한 낙엽활엽수의 식재를, 녹지폭 2.0m 이하일 경우에는 이팝나무, 살구나무 등의 생체량이 작은 나무를 식재하도록 권고하고 있다. 그러나 현행 녹지형 중앙분리대 설치 기준은

표 2. 기존 매뉴얼 및 선행연구 기준 도로폭에 따른 녹지조성 방법 적용기준

		도로폭 분류기준		
가로수 조성관리 매뉴얼 (산림청, 2022)	가로수 식재를 위한 분류기준	광로	40m 이상	<ul style="list-style-type: none"> 최고수고 25m 이상 경관 가치 우수, 환경정화 및 내공해성 우수
		대로	25~40m	<ul style="list-style-type: none"> 최고수고 15~20m 경관 가치 우수, 환경정화 및 내공해성 우수
		중로 및 소로	0~25m	<ul style="list-style-type: none"> 최고수고 15m 이하
	중앙분리대 설치를 위한 분류기준	6차선 이상		<ul style="list-style-type: none"> 녹지형 중앙분리대 설치 권고
서울시 가로수 조성관리 기본계획 (서울특별시, 2020)	가로수 식재를 위한 분류기준	광로	8차선 이상	<ul style="list-style-type: none"> 경관축 형성 및 도로변 그늘 조성에 유리한 수종 수고가 높고 수려한 수종, 공해에 강한 수종
		대로	6~8차선	<ul style="list-style-type: none"> 미세먼지 및 대기오염물질 저감에 우수한 수종 열섬 완화를 위해 생체량이 많은 수종
		중로 및 소로	4차선 이하	<ul style="list-style-type: none"> 수고가 낮고 수관폭이 좁은 수종 꽃과 열매, 단풍 등이 아름다운 수종

열환경적 성능을 고려하지 않은 채 일반적 기준에 머물러 있어 열환경 개선 효과를 반영한 설치 기준 마련 연구가 필요하다(그림 2 참조).

2.2 가설의 설정

선행 기준을 종합하면, 다열 식재는 주로 보도폭을 핵심 변수로 삼아 적용 범위를 제시해 왔다. 「가로수 조성관리 매뉴얼(2022)」, 「서울시 가로설계·관리 매뉴얼(2017)」, 「서울시 가로수 조성관리 기본계획(2020)」 등은 보도폭을 중심으로 녹지조성 기준을 제시하고 있으며, 선행 연구(정희은 등, 2015; 엄정희 등, 2022) 또한 보도폭 기준에 근거한 다열 식재 적용의 타당성을 보고하고 있다. 특히 정희은 등(2015)는 보도폭 6m 이상의 거리협곡에서 다열 식재가 열환경 개선에 효과적임을 보고하였으며, 엄정희 등(2022)은 보도폭 10m와 13m에서의 3열 식재 적용에 따른 열환경 완화 효과에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 따라서 본 연구는 이러한 고찰을 바탕으로 보도폭을 ① 6m 미만, ② 6~10m 미만, ③ 10m 이상으로 구분하고, 각각에 대응하는 1·2·3열 식재의 열환경 개선 효과를 검증할 필요성이 있음을 확인하였다. 이에 따라 다음과 같은 가설을 설정하였다(표 3 참조).

한편 녹지형 중앙분리대의 경우, 「가로수 조성관리 매뉴얼(2022)」 및 「도시숲·생활숲·가로수 조성·관리 기준」은 원칙적으로 6차선 이상 도로에서의 설치를 권고한다. 다만 도로폭 및 차로수에 따른 열환경 개선 효과에 대한 실증 연구는 아직 충분히 확인되지 않으므로, 본 연구는 기존 매뉴얼의 차선수 기준을 준거로 다음의 가설을 설정하였다(표 4 참조).

3. 연구 방법

3.1 연구대상지

본 연구에서는 국내 대표적 고열 도시인 대구광역시(위도 35.8714°N, 경도 128.6014°E)를 연구지역으로 선정하

표 3. 시나리오 설계를 위한 가설: 보도폭을 중심으로 한 다열 식재 분류기준

번호	내용
1	보도폭 6m 이상의 거리협곡에서는 2열 식재가 1열 대비 기온변화(ΔT)를 더 크게 감소시킨다.
2	보도폭 10m 이상 거리협곡에서는 3열 식재가 2열 대비 기온변화(ΔT)를 더 크게 감소시킨다.
3	다열 식재를 통한 열환경 개선효과는 거리방향에 따라 달라질 수 있다.

표 4. 시나리오 설계를 위한 가설: 도로폭을 중심으로 한 녹지형 중앙분리대 분류기준

번호	내용
1	6차선 이하 도로에서는 녹지형 중앙분리대 도입 여부에 따른 기온변화(ΔT) 차이가 유의하지 않다.
2	6차선 이상의 도로에서는 녹지형 중앙분리대 도입 시 미도입 대비 기온변화(ΔT)가 더 크게 감소한다.
3	녹지형 중앙분리대 설치를 통한 열환경 개선효과는 거리방향에 따라 달라질 수 있다.

였으며, 그중 대구광역시를 관통하는 주요 도로인 달구벌대로를 분석 대상지로 선정하였다. 달구벌대로는 10차로 이상의 대로에 광복 보도가 접합된 구조로, 교통량 및 보행자 유동이 높고 태양복사 유입이 큰 가로협곡의 전형적 조건을 갖는다. 쾨펜(Köppen) 분류 기준(Peel et al., 2007)에서 대구광역시는 아열대 습윤기후(Gwa)에 속하며, 분지 구조의 영향이 복합적으로 작용하여 고온다습한 미기후가 형성된다. 대구광역시는 종관기상관측(ASOS) 자료 기준 2023년 8월 한 달 일평균 기온은 28.55°C, 평균 상대습도는 58.75%, 평균 풍속은 1.64 m/s이며, 주풍향은 120°를 기록하였다(기상 이벤트가 없는 맑은 날 기준).

3.2 분석 모형의 개요 및 검증

ENVI-met은 도시와 같은 복합공간에서 표면-식물-대기 간의 상호작용을 분석하기 위해 개발된 미기후 시뮬레이션 모델로, 특히 도시녹지의 미기후 개선 효과 평가에 널리 활용되고 있다(Ouyang et al., 2020). 본 모델은 최소 0.5m × 0.5m × 0.5 m 수준의 고해상도를 지원하여 현장의 도시 형태와 녹지 특성을 현실에 가깝게 재현할 수 있으며, 3D-Plant 모듈을 통해 수목의 형태적, 물리적 매개변수를 목적에 맞게 설정 및 분석할 수 있다는 장점을 지닌다.

본 연구는 모형의 검증을 위해 여름철 열스트레스가 높고 다양한 도로폭과 종횡비가 존재하는 대구 대표 가로 중 하나인 국제보상공원 일대를 중심으로 기온을 관측하여 정확성을 검증하였다. 현장 관측은 7월 30일 24시간 연속 관측을 수행하였으며, 10분 단위로 총 90개 지점에서 기온과 상대습도를 측정하였다(그림 3 참조). 온도 및 습도 자료는 90개 측정지점에 대한 시간대별 평균값을 산출하였으며, 풍속 및 풍향 자료는 기상청 종관기상관측(ASOS) 기준으로 풍속 1.57m/s, 풍향 110°를 산출하여 모델 결과와 비교·검증하였다. 분석 범위는 5km × 1.2km이며, 공간해상도는 5m × 5m × 3m로 설정하였다.

본 연구의 정확성 검증은 기온을 중심으로 모니터링 실측값과 시뮬레이션 예측값을 비교하여 수행하였다. 예측 모형의 적합도를 평가하기 위해 일반적으로 활용되는 지표인 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)와 결정계수(coefficient of determination, R²)를 산정하였다. RMSE는 예측값과 관측값 간 오차의 평균 크기를 나타내며, 값이 0에 근접할수록 예측 정확도가 높은 것으로 해석한다. R²는 모형이 관측값의 분산을 설명하는 비율로, 값이 1에 근접할수록 모형의 설명력 및 예측력이 높음을 나타낸다.

3.3 시뮬레이션 분석

3.3.1 시나리오 설계

3.3.1.1 가로녹지 조성방법 적용기준 도출

본 연구는 연구가설을 바탕으로 총 36개의 시나리오를 설계하였다(표 5, 그림 4 참조). 다열 식재 시나리오는 보도폭과 도로 방향을 고려하여 24개의 시나리오를 구축하였으며, 녹지형 중앙분리대 시나리오는 차선수와 도로방향을 고려하여 12개의 시나리오를 설계하였다.

3.3.1.2 가로녹지 조성방법 적용기준 적합성 검토를 위한 보완 분석

다열 식재 및 녹지형 중앙분리대 설치 기준의 적합성을 검증하기 위해, 본 연구는 열환경 개선 효과에 다양한

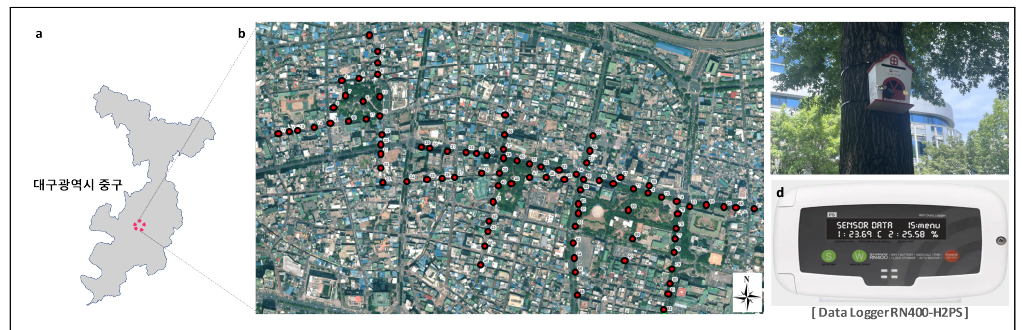


그림 3. 현장 관측 현황

범례: ● 관측기 위치

관측기는 자연 통풍이 가능한 구조의 목재함 내부에 설치하였으며, 지표면으로부터의 복사열 영향을 최소화하기 위해 설치 높이를 2m 이상으로 유지하였다. 관측기는 총 90개를 설치하였으며, 거리 너비, 건물 높이, 수목 식재 방법 등이 서로 다른 다양한 거리협곡 특성을 대표할 수 있도록 관측망을 구성하였다.

표 5. 가로녹지 조성방법 적용기준 도출을 위한 시나리오 설계

구분		시나리오	
		동서방향	남북방향
다열 식재 (보도폭 기준)	2열 식재	6m 1열 vs 6m 2열	6m 1열 vs 6m 2열
		8m 1열 vs 8m 2열	8m 1열 vs 8m 2열
		10m 1열 vs 10m 2열	10m 1열 vs 10m 2열
	3열 식재	10m 2열 vs 10m 3열	10m 2열 vs 10m 3열
		12m 2열 vs 12m 3열	12m 2열 vs 12m 3열
		14m 2열 vs 14m 3열	14m 2열 vs 14m 3열
녹지형 중앙분리대 (도로폭 기준)	4차선 도로	설치 O vs 설치 X	설치 O vs 설치 X
	6차선 도로	설치 O vs 설치 X	설치 O vs 설치 X
	8차선 도로	설치 O vs 설치 X	설치 O vs 설치 X

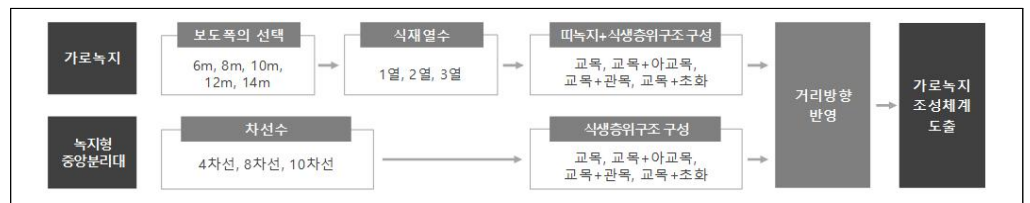


그림 4. 폭·방향·층위 기반 가로녹지 조성체계 도출을 위한 시나리오 설계 구조

영향을 미칠 수 있는 다층구조 식재와 결합 효과를 고려한 보완 시나리오를 설계하였다(표 6, 그림 4 참조). 실제 조성 사례에서 가로녹지 및 녹지형 중앙분리대는 교목 단독보다 아교목, 관목, 초화를 포함한 다층구조가 일반적이며, 특히 아교목을 포함하는 구성이 높은 냉각 효과를 보이는 것으로 보고된다. 이에 따라 다열 식재에서 관찰된 냉각 효과를 다층구조 식재의 효과와 체계적으로 비교·분석할 필요가 있다.

선행 분석에서 도출한 다열 식재의 임계 보도폭은 6m(2열 식재)와 10m(3열 식재)였다. 이에 본 연구는 해당 임계 구간을 대상으로, 아교목을 포함하는 다층구조 식재를 중심으로 검증 시나리오를 구성하였다. 예컨대 보도폭 6m 구간에서 유효폭을 반영할 경우, 1열 식재는 2m 따녹지 조성이 가능하며 교목+아교목+관목의 다층구조 적용이 가능하다. 반면 2열 식재는 1m 따녹지 확보에 그쳐 교목 2열+관목 2열의 다층구조 적용이 가능하다. 이처럼 다열 식재와 층위구조의 차이가 열환경 개선에 미치는 영향을 정량적으로 검증하고자 한다. 더불어 녹지형 중앙분리대 시뮬레이션 분석 결과 열환경 개선효과가 가장 낮게 도출된 8차선 도로를 중심으로 층위구조 적용에 따른 열환경 개선 효과를 분석하여 녹지형 중앙분리대 설치 기준의 적합성을 검증하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 가로수가 없는 대조군을 포함하여 총 32개의 시나리오를 설계하였다. 다열 식재 시나리오

표 6. 가로녹지 조성방법 적용기준 마련을 위한 보완분석 시나리오 설계

구분		동서방향		남북방향		
		다열 식재	다열 식재+식생층위구조	다열 식재	다열 식재+식생층위구조	
다열 식재	2열 식재 (보도폭 6m)	대조군	가로수 없음		가로수 없음	
		1열 식재	교목	교목+아교목+관목	교목	교목+아교목+관목
		2열 식재	교목2	교목2+관목2 교목2+초화2	교목2	교목2+관목2 교목2+초화2
	3열 식재 (보도폭 10m)	대조군	가로수 없음		가로수 없음	
		1열 식재	교목	-	교목	-
		2열 식재	교목2	교목2+아교목2+관목2	교목2	교목2+아교목2+관목2
	3열 식재	교목3	교목3+아교목1+관목3	교목3	교목3+아교목1+관목3	
녹지형 중앙분리대	8차선 도로 (도로폭)	교목	교목+아교목+관목 교목+아교목+초화 교목+관목 교목+초화	교목	교목+아교목+관목 교목+아교목+초화 교목+관목 교목+초화	

는 적용기준과 도로 방향을 고려하여 총 24개의 시나리오를 구축하였으며, 녹지형 중앙분리대 시나리오는 설치 기준과 도로 방향을 고려하여 총 8개의 시나리오를 작성하였다.

3.3.2 입력 자료

3.3.2.1 기후 및 수목 입력 자료

기상 입력자료는 2023년 8월 한 달의 평균기온과 평균습도를 도출(비, 태풍 등 기상 이벤트가 없는 맑은 날 기준)하였으며, 일 최저기온 24.00°C, 일 최고기온 33.00°C, 일 최저습도 45.00%, 일 최고 습도 75.00%를 입력하였다. 바람이 거의 없는 맑은 날의 열환경을 형성하기 위해 풍속은 0.1 m/s, 풍향은 거리방향의 90도로 적용하였다(부록 A 참조). 시뮬레이션의 시간적 범위는 06:00-익일 06:00(24h)로 설정하였다.

가로수는 전국 가로수 통계에서 식재 빈도가 가장 높은 수종인 왕벚나무를 선정하였으며, 아교목은 전국 단위 통계의 부재로, 대상지(달구벌대로) 현장 조사에서 출현 빈도가 가장 높은 아교목상 수종인 단풍나무를 적용하였다. 수종별 규격(수고, 수관폭 등)은 달구벌대로의 수목 현황조사를 통해 도출한 대푯값을 반영하였다(부록 B 참조).

3.3.2.2 공간 입력 자료

(1) 다열 식재 공간 입력 자료

본 연구에서는 기후변화에 대응하고 폭염 및 열대야에 대한 피해를 최소화하기 위해 열스트레스 강도가 높은 거리협곡을 추출하여 분석 대상으로 선정하였으며, 거리방향에 따른 녹지조성 효과의 차이를 규명하기 위해 동서 및 남북 방향으로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. ‘열스트레스가 높은 거리협곡’은 선행연구 결과를 바탕으로 종횡비와 거리방향을 기준으로 선정하였으며, 동서방향 0.86, 남북방향 0.43을 적용하였다(Norton et al., 2015). 다열 식재 시나리오 분석을 위한 공간 시나리오는 대구광역시 중심을 관통하는 주요 도로인 달구벌대로의 공간 특성을 조사하여 가상공간에 반영하였다. 가상공간의 규모는 150m × 106m, 왕복 10차선 도로이며, 거리 너비 56m, 건물 높이 동서방향 48m, 남북방향 24m, 도로폭 36m, 보도폭 각각 10m를 적용하였다(부록 C 참조).

(2) 녹지형 중앙분리대 공간 입력 자료

본 연구에서는 대구광역시 주요 간선도로에 대한 현황 조사를 실시하여 대푯값을 도출하였으며, 이를 기반으로 가상공간을 설정하였다. 종횡비는 다열 식재 분석과 동일하게 동서방향 종횡비 0.86과 남북방향 종횡비 0.43을 적용하였다. 도로 방향에 따라 열환경 개선 효과가 다르게 나타날 수 있음을 감안하여 동서 및 남북방향에 대해 시나리오를 구분하여 구축·분석하였다. 공간 시나리오는 4차선 도로 길이 150m × 가로폭 22m, 6차선 도로 길이 150m × 가로폭 34m, 8차선 도로 길이 150m × 가로폭 46m로 설계하였다(부록 D 참조).

3.3.3 데이터 분석

본 연구는 녹지조성 방법에 따른 열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 향상을 평가하기 위해 ENVI-met(Leonardo 모듈을 이용한 출력 처리) 기반의 기온자료를 중심으로 분석을 수행하였다. 기온은 열원화 효과를 검토할 때 가장 보편적이고 비교 가능성이 높은 지표로서, 본 연구에서는 일평균기온, 주간평균기온, 야간평균기온 등의 주·야간 냉각효과를 포괄적으로 분석하기 위해 분석 범위를 06:00-익일 06:00(24h)로 설정하였다. 또한 수목 식재에 따른 지역 규모의 냉각 효과와 보행자 수준의 냉각 효과를 구분하기 위해, 거리협곡 평균기온과 보도(보행 공간) 평균기온을 분리 산정하여 비교하였다. 아울러 거리 이용 특성과 주 이용 시간대를 고려한 최적 녹지조성 방안 도출을 목적으로, 각 시나리오에 대해 주간·야간 및 열피크 시간대(14:00-16:00)의 냉각 효과를 세분화하여 분석하였다.

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 시뮬레이션 모델 적합성 평가

적합성 검증은 예측모델의 정확도 평가에 널리 사용되는 평가 지표인 RMSE, R²값을 통해 수행하였다. 현장 모니터링 관측값과 시뮬레이션 분석값을 비교한 결과, RMSE 값은 0.545, R² 값은 0.957(y=0.8211x+5.9521)로 나타났다. ENVI-met 모형의 적합성을 확인한 선행연구에서도 유사한 수준의 성능이 보고된다. R²의 경우 Haeri et al.(2023)은 0.94, Antoniadis et al.(2018)은 0.97을 보고하고 있으며, RMSE의 경우 Haeri et al.(2023)은 0.45, Taleghani et al.(2015)은 0.7~1.3을 제시하였다. 따라서 본 연구의 지표는 보고 범위 내에서 동등하거나 우수한 수

준으로, ENVI-met 기반 시뮬레이션의 신뢰성이 확보된 것으로 판단된다.

4.2 시나리오 시뮬레이션 분석 결과 및 고찰

4.2.1 다열 식재

4.2.1.1 동서방향

동서방향 거리협곡 보도폭 6m, 8m, 10m에 2열 식재를 적용한 결과(그림 5a, 5b 참조), 일평균기온, 주간평균기온, 야간평균기온에서 2열 식재가 1열 식재보다 더 큰 냉각 효과를 나타냈다. 보도폭 6m를 기준으로 살펴보면, 거리협곡 내에서는 일평균기온 -0.20°C , 주간평균기온 -0.03°C , 야간평균기온 -0.38°C 의 기온 저감 효과가 관찰되었으며, 보도 내에서는 각각 -0.32°C , -0.26°C , -0.37°C 의 기온 저감 효과가 나타났다. 특히 다열 식재는 야간에 더 큰 폭의 기온 저감을 기록했으며, 보도폭이 6m에서 10m로 증가함에 따라 기온 저감 효과 또한 확대되는 경향을 보였다. 따라서 거리협곡 및 인접 지역의 열환경 개선과 보행공간의 온열조건 향상을 위해 보도폭 6m 이상 구간에서는 2열 식재를 적용하는 것이 열환경 개선에 유리한 것으로 판단된다.

그러나 보도폭 6m 및 8m의 거리협곡에서는 열스트레스가 가장 높은 14-16시 시간대에 상이한 양상을 보였다. 거리협곡 내 평균기온의 경우 1열 식재가 2열 식재보다 약 $0.06^{\circ}\text{C}\sim 0.36^{\circ}\text{C}$ 낮은 기온을 기록하여 거리협곡 내 평균기온 측면에서는 1열 식재를 적용하는 것이 열환경에 더 유리한 것으로 나타났다. 반면, 보행자 열쾌적성과 직접적으로 연관되는 보도 내 평균기온은 동일 시간대에 2열 식재가 더 낮은 기온을 기록하여, 보행 공간에서는 2열 식재가 우수한 열환경을 제공하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 보도폭 6m 및 8m 등의 일부 보도폭에서 다열 식재의 효과가 공간적 위치와 시간대에 따라 달라질 수 있음을 나타내며, 토지이용 특성과 이용자 활동 시간 등을 종합적으로 고려하여 다열 식재의 적용기준을 차별화할 필요가 있음을 시사한다.

보도폭 10m 거리협곡에서는 모든 시간대에서 1열 식재 대비 2열 식재가 우수한 온도 저감 효과를 나타냈다. 특히 최고기온을 기록한 시간대인 14-16시에는 -0.22°C 에서 -0.36°C , 최저기온을 기록한 시간대인 04-06시에는 -0.49°C 에서 -0.57°C 의 기온 저감 효과가 확인되었다. 따라서 보도폭 10m 이상의 거리협곡에서는 토지이용이나 이용자 활동 시간과 관계없이 2열 식재를 적용하는 것이 도시 열환경 개선에 효과적이라 할 수 있다.

한편, 동서방향 거리협곡 보도폭 10m, 12m, 14m에 3열 식재를 적용한 결과(그림 5c, 5d 참조), 일평균기온, 주간평균기온, 야간평균기온에서 3열 식재가 2열 식재보다 더 큰 냉각 효과를 나타냈다. 보도폭 10m를 기준으로 살펴보면, 거리협곡 내에서는 일평균기온 -0.19°C , 주간평균기온 -0.05°C , 야간평균기온 -0.35°C 의 기온 저감 효과가 관찰되었으며, 보도 내에서는 각각 -0.20°C , -0.18°C , -0.22°C 의 기온 저감 효과가 나타났다. 특히 다열 식재

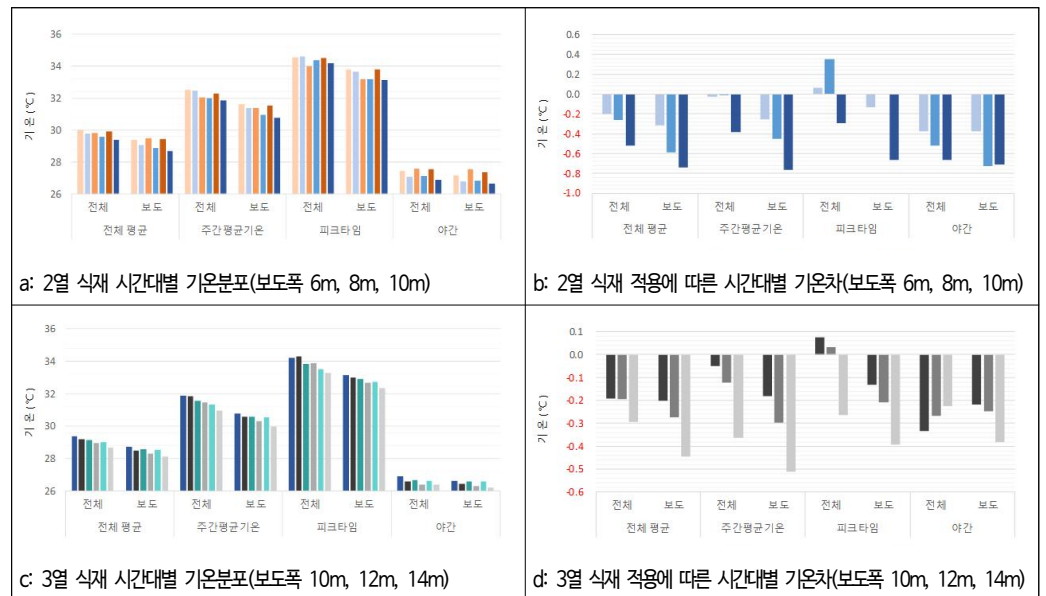


그림 5. 동서방향 보도폭에 따른 다열 식재 기온저감 효과 분석

범례: 6M 1열 (orange), 6M 2열 (blue), 8M 1열 (red), 8M 2열 (green), 10M 1열 (purple), 10M 2열 (yellow), 10M 3열 (grey), 12M 2열 (cyan), 12M 3열 (brown), 14M 2열 (pink), 14M 3열 (black)

는 야간에 더 큰 폭의 기온 저감을 기록했으며, 보도폭이 10m에서 14m로 증가함에 따라 기온 저감 효과 또한 확대되는 경향을 보였다. 따라서 동서방향 거리협곡 및 인접 지역의 열환경 개선과 보행공간의 온열조건 향상을 위해서는 보도폭 10m 이상 구간에 3열 식재를 적용하는 것이 열환경 개선에 유리한 것으로 판단된다.

그러나 보도폭 10m 및 12m의 거리협곡에서는 14~16시 시간대에 상이한 패턴을 나타냈다. 거리협곡 내 평균 기온의 경우 3열 식재가 2열 식재보다 약 0.03°C~0.08°C 더 높은 기온을 기록하여 거리협곡 내 평균기온 측면에서는 2열 식재를 적용하는 것이 열환경에 더 유리한 것으로 나타났다. 반면, 보도 내 평균기온은 동일 시간대에 3열 식재가 더 낮은 기온을 기록하여, 보행 공간에서는 3열 식재가 우수한 열환경을 제공하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 10m와 12m 등의 일부 보도폭에서 다열 식재의 효과가 공간적 위치와 시간대에 따라 달라질 수 있음을 나타내며, 토지이용 특성과 이용자 활동 시간 등을 종합적으로 고려하여 다열 식재의 적용기준을 제시할 필요가 있음을 의미한다.

보도폭 14m 거리협곡에서는 모든 시간대에서 2열 식재 대비 3열 식재가 우수한 온도 저감 효과를 나타냈다. 특히 최고기온 시간대인 14~16시에는 -0.23°C에서 -0.29°C, 최저기온 시간대인 04~06시에는 -0.01°C에서 -0.08°C의 기온 저감 효과가 확인되었다. 따라서 보도폭 14m 이상의 거리협곡에서는 토지이용이나 이용자 활동 시간과 관계없이 3열 식재를 적용하는 것이 도시 열환경 개선에 효과적이라 할 수 있다.

4.2.1.2 남북방향

남북방향 거리협곡 보도폭 6m, 8m, 10m에 2열 식재를 적용한 결과(그림 6a, 6b 참조), 일평균기온, 주간평균기온, 야간평균기온뿐만 아니라 열피크시간대 평균기온까지 포함하여, 모든 보도폭에서 1열 식재 대비 2열 식재가 더 큰 냉각 효과를 나타냈다. 보도폭 6m를 기준으로 살펴보면, 거리협곡 내에서는 일평균기온 -0.25°C, 주간평균기온 -0.15°C, 야간평균기온 -0.34°C, 피크타임 평균기온 -0.05°C의 기온 저감 효과가 확인되었으며, 보도 내에서는 각각 -0.30°C, -0.22°C, -0.38°C, -0.19°C의 기온 저감 효과를 기록했다. 남북방향 거리협곡 역시 다열 식재는 야간에 더 큰 폭의 온도 저감을 기록했으며, 보도폭이 6m에서 10m로 확대됨에 따라 기온 저감 효과 또한 증가하는 경향을 보였다.

더불어 남북방향 거리협곡은 14시~16시간대에도 다른 시간대와 동일한 패턴을 나타냈다. 거리협곡 내 지역의 14~16시 평균기온을 살펴보면, 보도폭 6m -0.05°C, 8m -0.28°C, 10m -0.29°C를 기록하였으며, 보도 내 지역의 평균기온은 각각 -0.19°C, -0.32°C, -0.37°C를 기록하였다. 따라서 남북방향 거리협곡 및 인접 지역의 열환경 개선과 보행공간의 온열조건 향상을 위해서는 보도폭 6m 이상의 구간에 2열 식재를 적용하는 것이 열환경 개선에 효과적인 전략으로 판단된다.

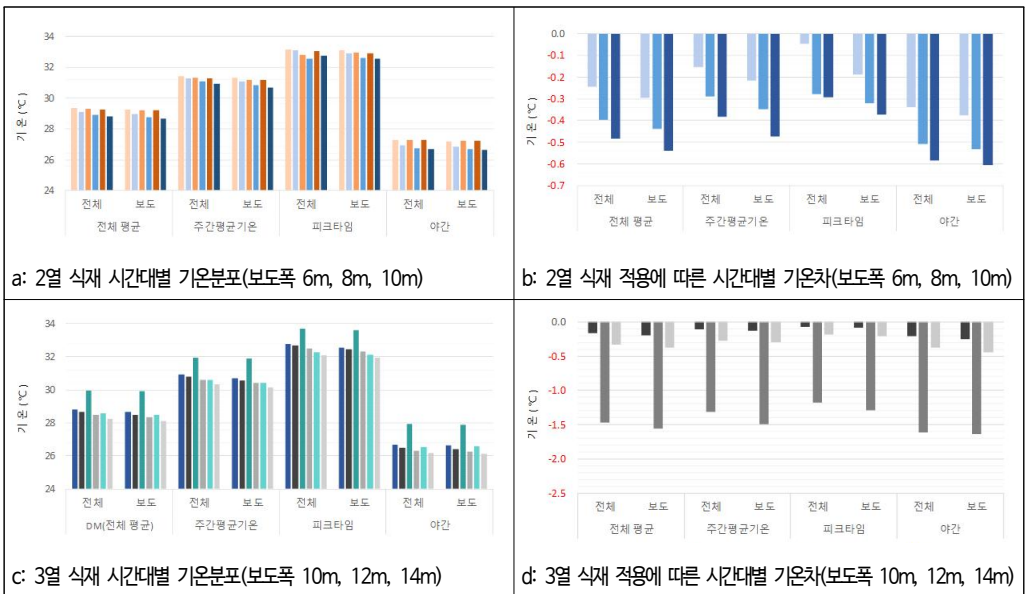


그림 6. 남북방향에 보도폭에 따른 다열 식재 기온 저감 효과 분석

범례: 6M 1열 (orange), 6M 2열 (light blue), 8M 1열 (dark orange), 8M 2열 (blue), 10M 1열 (dark orange), 10M 2열 (dark blue), 10M 3열 (black), 12M 2열 (teal), 12M 3열 (grey), 14M 2열 (light teal), 14M 3열 (grey)

한편, 남북방향 거리협곡 보도폭 10m, 12m, 14m에 3열 식재를 적용한 결과(그림 6c, 6d 참조), 일평균기온, 주간평균기온, 야간평균기온뿐만 아니라 열피크시간대 평균기온까지 포함하여, 모든 보도폭에서 2열 식재 대비 3열 식재가 더 큰 냉각 효과를 나타냈다. 보도폭 10m를 기준으로 살펴보면, 거리협곡 내에서는 일평균기온 -0.16°C , 주간평균기온 -0.11°C , 야간평균기온 -0.21°C , 피크타임 평균기온 -0.07°C 의 기온 저감 효과가 확인되었으며, 보도 내에서는 각각 -0.19°C , -0.13°C , -0.26°C , -0.08°C 의 저감 효과가 나타났다. 동서방향의 결과와 마찬가지로 다열 식재는 야간에 더 큰 폭의 온도 저감을 기록했으며, 보도폭이 10m에서 14m로 확대됨에 따라 기온 저감 효과 또한 증가하는 경향을 보였다.

더불어 남북방향 거리협곡은 14시~16시간대에도 다른 시간대와 동일한 패턴을 나타냈다. 거리협곡 내 지역의 14~16시 평균기온을 살펴보면, 보도폭 10m -0.07°C , 12m -1.18°C , 14m -0.18°C 를 기록하였으며, 보도 내 지역의 평균기온은 각각 -0.08°C , -1.29°C , -0.21°C 를 기록하였다. 따라서 남북방향 거리협곡 및 인접 지역의 열환경 개선과 보행공간의 온열조건 향상을 위해서는 보도폭 10m 이상의 구간에 3열 식재를 적용하는 것이 도시 열환경 개선에 효과적인 전략으로 판단된다.

4.2.1.3 다열 식재 적용기준 적합성 검토

동서방향 거리협곡에서 2열 식재 적용기준에 대한 적합성 검토 결과, 보도폭 6m에서 2열 식재+식생층위구조가 1열 식재+식생층위구조 대비 전 시간대에서 더 큰 기온 저감 효과를 나타냈다(그림 7a, 7b 참조). '가로수 없음'을 기준으로 한 가로협곡 내 일평균기온 저감량(ΔT_a)을 살펴보면, 1열 식재(기본가로수) -0.67°C , 교목+아교목+관목 -1.11°C , 2열 식재 -0.87°C , 교목2+관목2 -1.54°C , 교목2+초화2 -1.52°C 를 기록하여 1열 식재+다층구조보다 2열 식재+다층구조의 열환경 개선효과가 일관되게 우수한 것으로 나타났다. 특히 상세한 검증이 필요했던 14시~16시의 경우, 거리협곡 내 평균기온은 교목+아교목+관목 -1.64°C , 교목2+관목2 -2.57°C , 교목2+초화2 -2.57°C 를, 보도 내 평균기온은 교목+아교목+관목은 -1.89°C , 교목2+관목2 -2.73°C , 교목2+초화2 -2.72°C 를 기록하여 2열 식재+다층구조가 1열 식재+다층구조 대비 월등한 기온 저감 효과를 나타냈다. 따라서 보도폭 6m 이상에서는 2열 식재를 적용하는 것이 도시 열환경 개선에 효과적인 것으로 판단된다.

더불어 3열 식재 적용기준에 대한 적합성 검토 결과, 보도폭 10m에서 3열 식재+식생층위구조가 2열 식재+식생층위구조보다 전 시간대에서 더 큰 저감 효과를 기록했다(그림 7c, 7d 참조). '가로수 없음'을 기준 가로협곡 내 일평균기온 저감량(ΔT_a)을 살펴보면, 1열 식재(기본가로수) -0.75°C , 2열 식재 -1.28°C , 교목2+아교목2+관목2 -1.52°C , 3열 식재 -1.47°C , 교목3+아교목1+관목3 -2.03°C 를 기록하여 3열 식재+다층구조가 2열 식재+다층구조의 열환경 개선 효과를 상회하는 것으로 나타났다. 특히 14시~16시의 경우, 거리협곡 내 평균기온은 2열 식재 -0.86°C , 교목2+아교목2+관목2는 -0.91°C , 3열 식재 -0.78°C 교목3+아교목+관목3 -2.90°C 를, 보도 내 평균기온은 2열 식재 -1.92°C , 교목2+아교목2+관목2는 -2.08°C , 3열 식재 -2.06°C 교목3+아교목+관목3 -3.05°C 를 기록하여 3열 식재+다층구조가 2열 식재+다층구조보다 현저히 우수한 기온 저감 효과를 보였다. 따라서 보도폭 10m 이상에서는 3열 식재를 적용하는 것이 도시 열환경 개선에 효과적인 것으로 나타났다.

한편 남북방향 거리협곡에서 2열 식재 적용기준에 대한 적합성 검토 결과, 동서방향과 마찬가지로 보도폭 6m에서 2열 식재+식생층위구조가 1열 식재+식생층위구조 대비 전 시간대에서 더 큰 기온 저감 효과를 기록했다(그림 7e, 7f 참조). '가로수 없음'을 기준으로 한 가로협곡 내 일평균기온 저감량(ΔT_a)을 살펴보면, 1열 식재(기본가로수) -0.57°C , 교목+아교목+관목 -0.69°C , 2열 식재 -0.83°C , 교목2+관목2 -1.42°C , 교목2+초화2 -0.86°C 의 기온차를 기록하여 1열 식재+다층구조보다 2열 식재 및 2열 식재+다층구조의 열환경 개선효과가 더 높은 것으로 나타났다. 특히 상세한 검증이 필요했던 14시~16시의 경우, 거리협곡 내 평균기온은 교목+아교목+관목 -0.44°C , 교목2+관목2 -1.16°C , 교목2+초화2 -0.61°C 를 기록하였으며, 보도 내 평균기온은 교목+아교목+관목 -0.66°C , 교목2+관목2 -1.40°C , 교목2+초화2 -0.83°C 를 기록하여 2열 식재+다층구조가 1열 식재+다층구조보다 높은 기온 저감 효과를 보였다. 따라서 남북방향 거리협곡 역시 보도폭 6m 이상에서는 2열 식재를 적용하는 것이 도시 열환경 개선에 효과적인 것으로 판단된다.

더불어 3열 식재 적용기준에 대한 적합성 검토 결과에서도 보도폭 10m에서 3열 식재+식생층위구조가 2열 식재+식생층위구조보다 전 시간대에서 높은 기온 저감 효과를 보였다(그림 7g, 7h 참조). '가로수 없음'을 기준으로 한 가로협곡 내 일평균기온 저감량(ΔT_a)을 살펴보면, 1열 식재(기본가로수) -0.65°C , 2열 식재 -1.13°C , 교목2+아교목2+관목2 -1.27°C , 3열 식재 -1.29°C , 교목3+아교목1+관목3 -1.43°C 를 기록하여 2열 식재+다층구조보다 3열 식재 및 3열 식재+다층구조식재의 열환경 개선효과가 더 높은 저감량을 나타냈다. 특히 상세한 검증이 필요했던 14시~16시의 경우, 거리협곡 내 평균기온은 2열 식재 -0.89°C , 교목2+아교목2+관목2는 -0.96°C , 3열 식재 -0.96°C ,

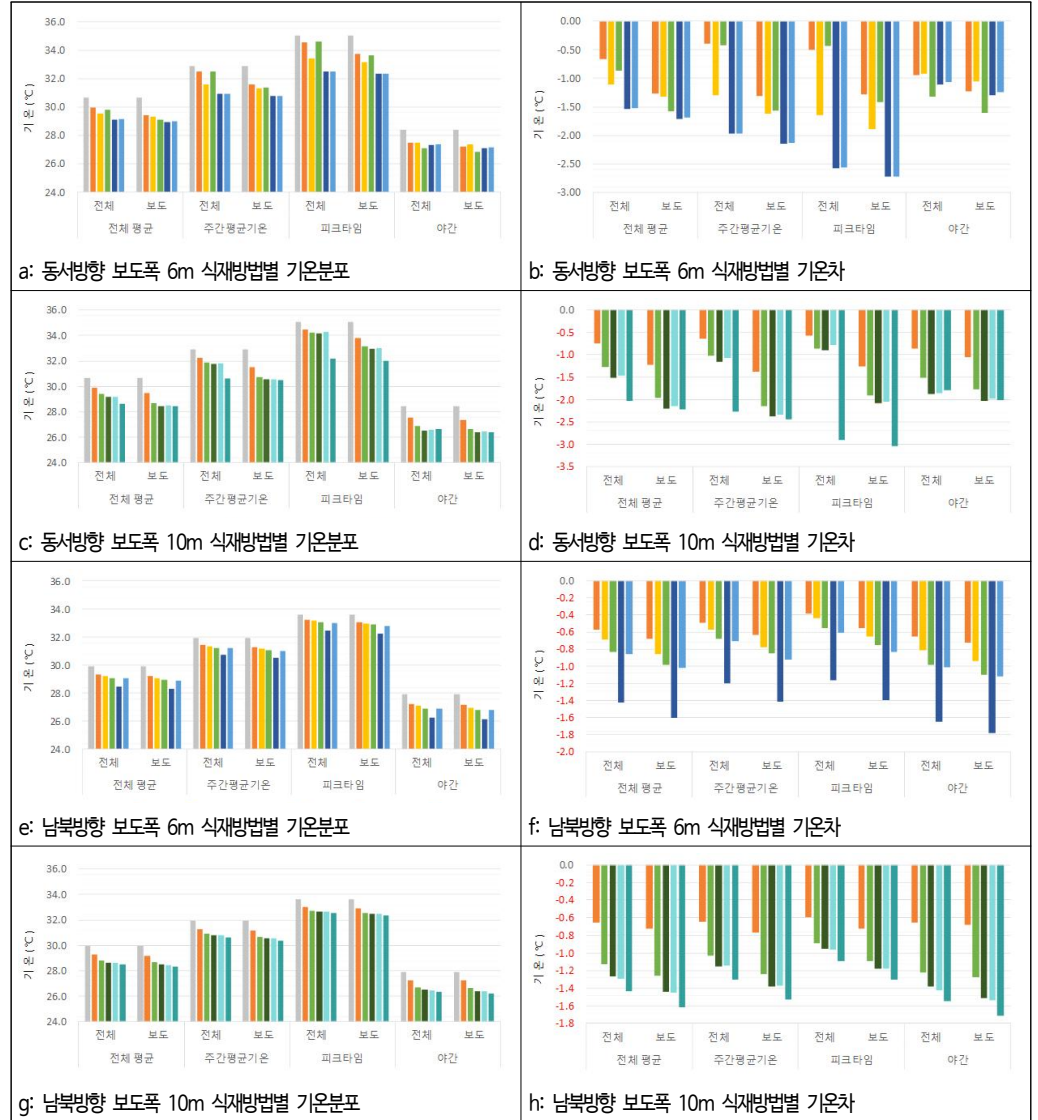


그림 7. 거리방향 및 보도폭에 따른 식재방법별 기온 저감 효과 분석

범례: ■ 1열식재 ■ 교목+아교목+관목 ■ 2열식재 ■ 교목2+관목2 ■ 교목2+초화2
 ■ 교목2+아교목2+관목2 ■ 3열식재 ■ 교목3+아교목1+관목3

교목3+아교목+관목3 -1.09°C를 기록하였으며, 보도 내 평균기온은 2열 식재 -1.10°C, 교목2+아교목2+관목2는 -1.18°C, 3열 식재 -1.18°C, 교목3+아교목+관목3 -1.30°C를 기록하여 3열 식재+다층구조 시나리오가 2열 식재+다층구조 시나리오보다 우수한 기온저감 효과를 나타냈다. 따라서 보도폭 10m 이상에서는 3열 식재를 적용하는 것이 도시 열환경 개선에 효과적인 것으로 판단된다.

4.2.2 녹지형 중앙분리대

4.2.2.1 동서방향

동서방향 녹지형 중앙분리대 시뮬레이션 결과를 살펴보면(그림 8a, 8b 참조), 4차선 이상의 도로에서는 녹지형 중앙분리대를 조성하는 것이 거리협곡 내 열환경 개선에 효과적인 것으로 나타났다. '중앙분리대 없음'을 기준으로 녹지형 중앙분리대 적용 시 거리협곡 내 평균기온 저감량(ΔT_a)을 살펴보면, 4차선 도로의 경우 일평균기온 -0.89°C의 기온 감소를 보였으며, 주간시간대 -0.98°C, 야간시간대 -0.80°C, 가장 더운 시간대인 14시~16시는 -0.7°C의 온도 저감 효과를 기록했다. 6차선 도로의 경우 일평균기온 -0.73°C의 기온 감소를 보였으며, 주간시간대 -0.82°C, 야간시간대 -0.64°C, 14시~16시 0.58°C의 온도 저감 효과를 기록했다. 8차선 도로의 경우 일평균기온 -0.35°C의 기온 감소를 보였으며, 주간시간대 -0.36°C, 야간시간대 -0.34°C, 14시~16시 -0.30°C의 온도 저감

효과를 기록했다. 따라서 동서방향의 거리협곡의 경우 4차선 이상의 거리협곡에서는 녹지형 중앙분리대를 설치하는 것이 도시 열환경 개선에 유리한 것으로 나타났다.

또한 같은 종횡비의 경우 도로폭이 넓은 거리협곡보다 도로폭이 좁은 거리협곡에서 기온 감소 폭이 더 크게 나타나는 양상을 보였다. 일평균기온의 경우 8차선 도로는 -0.35℃, 6차선은 -0.59℃, 4차선은 -0.89℃를 기록하였는데, 이는 같은 종횡비라고 하더라도 도로폭이 더 넓은 거리협곡에 더 많은 태양복사 에너지가 축적되는 것에서 기인하는 것으로 판단된다. 더불어 녹지형 중앙분리대의 설치는 주간과 더불어 야간 열환경 개선에도 효과적인 것으로 나타났다.

4.2.2.2 남북방향

남북방향 녹지형 중앙분리대 시뮬레이션 결과를 살펴보면(그림 8c, 8d 참조), 동서방향과 마찬가지로 4차선 이상의 도로에서는 녹지형 중앙분리대를 도입하는 것이 거리협곡 내 열환경 개선에 효과적인 것으로 나타났다. '중앙분리대 없음'을 기준으로 녹지형 중앙분리대 적용 시 거리협곡 내 평균기온 저감량(ΔT_a)을 살펴보면, 4차선 도로의 경우 일평균기온 -0.94℃의 기온 감소를 보였으며, 주간시간대 -0.90℃, 야간시간대 -0.98℃, 14시~16시는 -0.82℃의 온도 저감 효과를 기록했다. 6차선 도로의 경우 일평균기온 -0.59℃의 기온 감소를 보였으며, 주간시간대 -0.59℃, 야간시간대 -0.60℃, 14시~16시 0.55℃의 온도 저감 효과를 기록했다. 8차선 도로의 경우 일평균기온 -0.36℃의 기온 감소를 보였으며, 주간시간대 -0.38℃, 야간시간대 -0.33℃, 14시~16시 약 -0.32℃의 온도 저감 효과를 기록했다. 따라서 동서방향과 마찬가지로 남북방향의 거리협곡 역시 4차선 이상의 거리협곡에서는 녹지형 중앙분리대를 설치하는 것이 도시 열환경 개선에 효과적인 것으로 나타났다.

남북방향 거리협곡 역시 같은 종횡비의 경우 도로폭이 넓은 거리협곡보다 도로폭이 좁은 거리협곡에서 기온 감소 폭이 더 크게 나타나는 양상을 보였다. 일평균기온의 경우 8차선 도로는 -0.36℃, 6차선은 -0.59℃, 4차선은 -0.94℃를 기록하여 같은 종횡비의 경우 거리협곡의 도로폭이 좁을수록 녹지형 중앙분리대의 열저감 효과가 더 큰 것으로 나타났다. 더불어 녹지형 중앙분리대의 설치의 동서방향 거리협곡과 마찬가지로 주간 및 야간 열환경 개선에 모두 효과적인 것으로 나타났다.

4.2.2.3 녹지형 중앙분리대 적용기준 적합성 검토

동서방향 거리협곡의 녹지형 중앙분리대 적용기준에 대한 적합성 검토 결과, 녹지형 중앙분리대+다층구조식재를 도입한 모든 시나리오에서 열환경 개선 효과가 나타났다(그림 9a, 9b 참조). 교목만 식재한 시나리오를 기준으로 한 가로협곡 내 일평균기온 저감량(ΔT_a)을 살펴보면, 교목+아교목+관목 -0.62℃, 교목+아교목+초화 -0.55℃, 교목+관목 -0.56℃, 교목+초화 -0.54℃를 기록했다. 특히 주간시간대의 열환경 개선효과가 높게 나타났으며, 열피

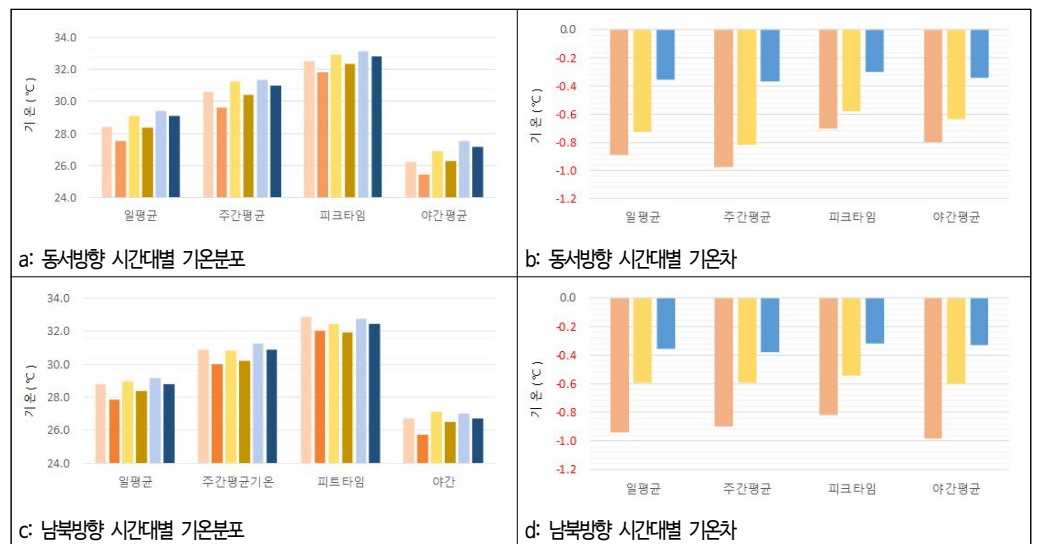


그림 8. 녹지형 중앙분리대 설치 유무에 따른 기온 저감 효과 분석

범례: 4차선 설치 x, 4차선 설치 o, 6차선 설치 x, 6차선 설치 o, 8차선 설치 x, 8차선 설치 o
 4차선, 6차선, 8차선

크타입에서 최대 냉각효과를 기록했다. 주간평균기온은 교목+아교목+관목 -1.17°C, 교목+아교목+초화 -1.18°C, 교목+관목 -1.20, 교목+초화 -1.18°C를 기록했으며, 14시~16시 평균기온은 교목+아교목+관목 -1.61°C, 교목+아교목+초화 -1.62°C, 교목+관목 -1.64, 교목+초화 -1.62°C를 나타냈다. 다만 동서방향의 경우 야간에는 교목+아교목+관목을 제외한 일부 다층구조에서 소폭의 기온상승이 관찰되었다. 따라서 야간 열환경 개선이 중요한 지역에는 교목+아교목+관목 형식의 다층구조식재를 중앙분리대에 우선 적용하는 것이 바람직하다.

남북방향 거리협곡의 녹지형 중앙분리대 적용기준에 대한 적합성 검토 결과, 동서방향과 마찬가지로 녹지형 중앙분리대+다층구조식재를 도입한 전 시나리오에서 열환경 개선 효과가 나타났다(그림 9c, 9d 참조). 교목만 식재한 시나리오 대비 가로협곡 내 일평균기온 저감량(ΔT_a)을 살펴보면, 교목+아교목+관목 -0.38°C, 교목+아교목+초화 -0.36°C, 교목+관목 -0.37°C, 교목+초화 -0.38°C의 기온차를 기록했다. 특히 주간 시간대와 열피크시간(14~16시)에서 기온 저감 효과가 두드러졌으며, 주간평균기온은 교목+아교목+관목 -0.52°C, 교목+아교목+초화 -0.50°C, 교목+관목 -0.52, 교목+초화 -0.51°C, 14시~16시 평균기온은 교목+아교목+관목 -1.61°C, 교목+아교목+초화 -1.62°C, 교목+관목 -1.64, 교목+초화 -1.62°C의 기온차를 나타냈다. 남북방향의 경우 모든 다층구조식재에서 시간대와 관계없이 일관된 냉각효과를 기록했다.

4.2.3 열환경 개선을 위한 가로녹지 조성체계

본 연구는 열스트레스가 높아 우선적으로 녹지를 조성하는 것이 도시 열환경 개선 및 보행자 열쾌적성 증대에 효율성을 높일 수 있는 동서방향 종횡비 약 2.0 이하 및 남북방향 종횡비 약 0.8 이하 가로협곡을 중심으로 가로녹지 조성체계를 도출하였다(그림 10 참조). 시뮬레이션 결과를 반영하여 동서 및 남북방향 모두 보도폭 6m 이상 2열 식재, 보도폭 10m 이상 3열 식재를 중심으로 가로녹지 조성체계를 제안하였다. 더불어 2m의 유효폭을 고려하여 보도폭별로 적용가능한 띠녹지 폭을 함께 제시하였다. 그 결과 보도폭 3m 미만은 1열 식재+띠녹지 1m 미만, 보도폭 3~4m 미만은 1열 식재+띠녹지 1~2m, 보도폭 4~6m 미만은 1열 식재+띠녹지 2m, 보도폭 6~10m 미만은 2열 식재+띠녹지 2m 이상, 보도폭 10m 이상은 3열 식재+띠녹지 2m 이상을 설치하는 것이 열환경 개선에 효과적인 전략으로 판단된다. 더불어 다열 식재와 함께 띠녹지 및 다층구조식재를 병행하는 전략은 거리방향과 시간대를 막론하고 일관된 열환경 개선 효과를 보였다. 특히 띠녹지 2m 이상 설치가 가능한 보도폭 4m 이상 구간에서는 '교목+아교목+관목'의 다층구조를 적용할 것이 열환경 개선에 유리하다.

녹지형 중앙분리대는 가로협곡의 방향과 무관하게 4차로 이상의 도로에 설치하는 것을 원칙으로 제한한다. 다만 동서방향 8차로 도로의 경우, 중앙분리대 도입에 따른 열환경 개선 효과가 상대적으로 낮으며, 야간시간대에 '교목+아교목+관목'을 제외한 일부 다층구조에서 소폭의 기온 상승이 관찰되었다. 따라서 야간 열환경 개선이 중요한 지역에서는 녹지형 중앙분리대 조성 시 '교목+아교목+관목'의 다층구조를 우선 적용하는 것이 바람직하다.

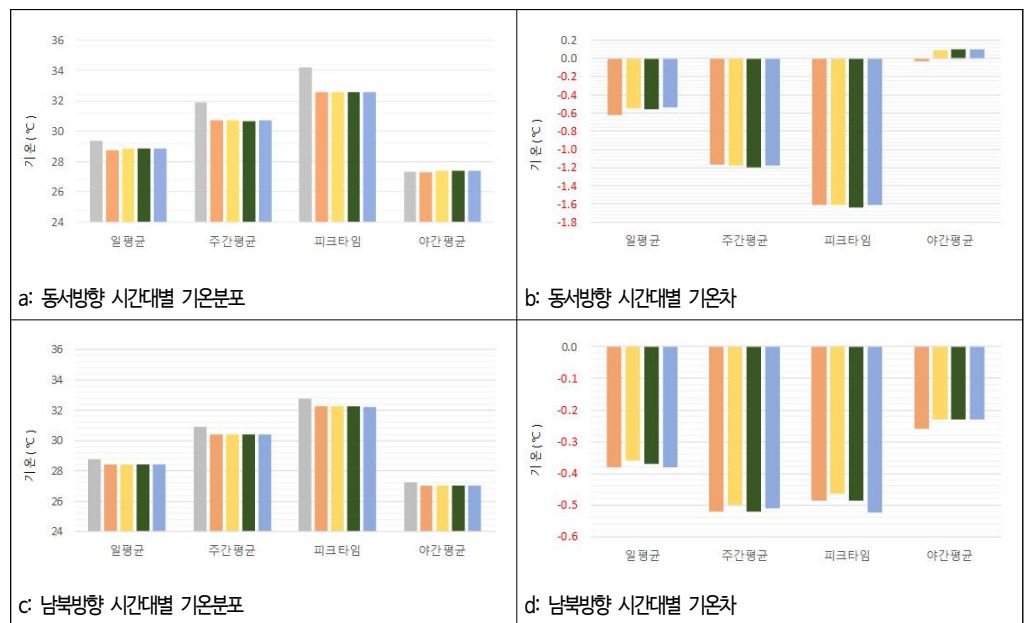


그림 9. 녹지형 중앙분리대 + 다층구조식재 적용에 따른 기온 저감 효과 분석(8차선 도로 기준)
 범례: ■ 중앙분리대 없음 ■ 교목+아교목+관목 ■ 교목+아교목+초화 ■ 교목+관목 ■ 교목+초화

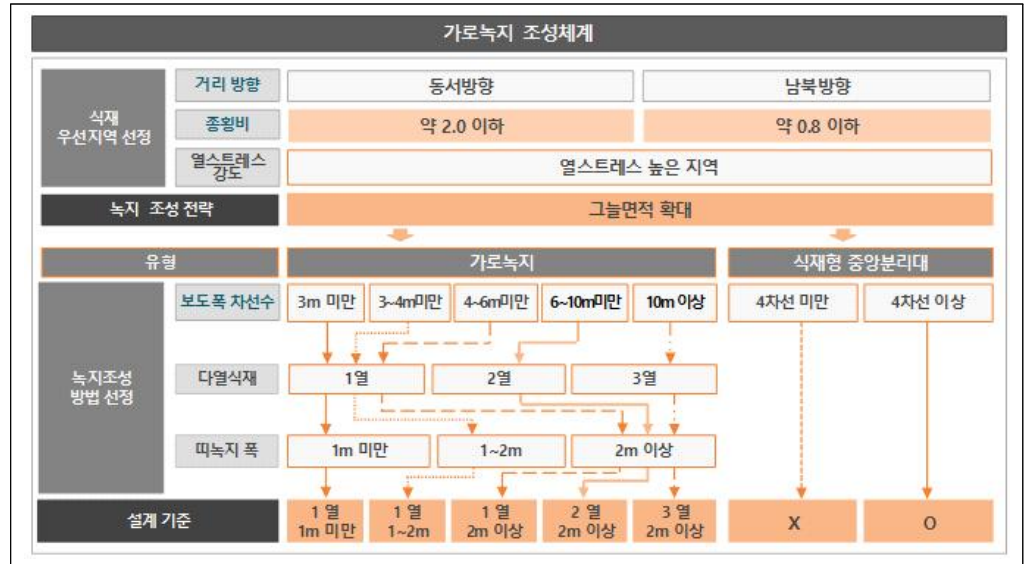


그림 10. 열환경 개선을 위한 가로녹지 조성체계
 띠녹지 폭 1m 이상은 교목+관목, 띠녹지 폭 2m 이상은 교목+아교목+관목의 다층구조를 적용

5. 결론

최근 기후위기에 대응해 도시녹지와 가로수를 활용하여 기후 완화, 대기질 개선, 건강 증진, 회복탄력성 강화를 동시에 달성하려는 자연기반해법이 국제적으로 급부상하고 있다. 특히 도시 열환경 개선을 위해 수관피복률 30% 이상을 확보하려는 정책이 다수의 도시에서 채택되고 있으며, 우리나라 또한 기후변화 대응을 위해 도시 바람길숲, 기후대응 도시숲 등의 도시숲 조성 규모와 적용 범위를 매년 확대하고 있다. 그러나 열환경 개선을 위한 실질적인 녹지조성 방법에 대한 기준은 상대적으로 부족하다.

본 연구는 도시 가로녹지의 열환경 개선 효과를 높이기 위해 가로협곡의 기하학적 조건(종횡비, 거리방향)과 가로공간 변수(보도폭, 도로폭)를 통합적으로 고려하여, 도시 열스트레스 완화를 위한 가로녹지 조성체계를 도출하였다. 보도폭을 핵심 설계 변수로 한 다열 식재 기준은 다음과 같이 정리된다. 거리방향에 관계 없이 보도폭 6m 이상 구간에서는 2열 식재가, 10m 이상 구간에서는 3열 식재가 일·주간 전 시간대에서 일관된 냉각 효과를 제공하였다. 또한 보도 유효폭 2m를 전제로 보도폭 구간과 띠녹지 폭을 연동한 조성 기준을 제시하였는데, 보도폭 3m 미만은 1열+띠녹지 1m 미만, 보도폭 3~4m 미만은 1열+띠녹지 1~2m, 보도폭 4~6m 미만은 1열+띠녹지 2m, 보도폭 6~10m 미만은 2열+띠녹지 2m 이상, 보도폭 10m 이상은 3열+띠녹지 2m 이상이 열환경 개선에 전라적인 기준으로 판단된다. 더불어 띠녹지 조성과 함께 다층구조(교목+아교목+관목 또는 교목+관목)를 병행할수록 냉각 효과는 증대하는 것으로 나타났다.

녹지형 중앙분리대는 가로협곡의 방향과 무관하게 4차로 이상의 도로에 도입할 경우 유의미한 냉각효과가 나타났다. 다만 동서방향 8차로의 야간에는 ‘교목+아교목+관목’을 제외한 일부 식생층위구조에서 소폭의 기온 상승이 관찰되어, 야간 쾌적성이 중요한 주거지 인접 구간에서는 반드시 교목+아교목+관목 형태의 다층구조를 우선 적용할 것을 권고한다. 더불어 동일한 종횡비 조건에서는 도로폭이 좁을수록 중앙분리대의 냉각 효과가 더 크게 나타나는 경향도 확인되었다.

정책 및 실무적 관점에서 현행 보도폭 중심의 일률적 기준은 종횡비, 거리방향, 도로폭 등과 연계된 가변형 기준으로 확장될 필요가 있다. 본 연구가 제시한 보도폭-다열 식재-띠녹지 폭-층위구조-중앙분리대를 통합한 프레임은 열스트레스가 높은 협곡의 우선 식재 대상을 선별하고, 보도폭, 식재열 수, 띠녹지 폭, 층위구성을 통합적으로 매치시키는 실무적 프레임워크를 제공함으로써 효율적인 녹지조성의 기회를 제공할 수 있다. 더불어 예산과 사업을 우선순위에 따라 효율적으로 배분하는 데 있어 실질적 의사결정 도구가 될 수 있을 것으로 기대한다.

그러나 본 연구는 컴퓨터 시뮬레이션 결과에 기반하여 열환경 개선 효과를 분석하였다는 한계를 지닌다. 본 연구의 시뮬레이션은 가상 단면 공간을 기반으로 구축되었기 때문에 교차로에서의 난류와 연속 가로의 누적 열영향 등 실제 도심 미기후의 복잡성을 충분히 반영하지 못하였으므로, 향후 복잡적 도시 가로 환경을 대상으로 한 추가 검증이 필요하다. 또한 실제 도시 공간에서 가로녹지를 조성하고 열환경을 모니터링하는 실증 연구를 통해 본 연구

에서 제시한 식재 기준의 이론적 근거를 강화하고, 이를 바탕으로 기준을 수정·보완하는 과정이 요구된다. 더불어 다양한 CFD 기반 미기후 모델과의 교차 검증을 통해 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높이는 연구 역시 필요하다. 식재구성 측면에서도 다양한 가로수 수종을 대상으로 적용기준을 비교·분석하여 본 연구에서 제안한 가로녹지 조성체계를 정교화할 필요성이 있다. 아울러 연구는 열스트레스가 높은 거리협곡을 중심으로 가로녹지 조성체계를 제시하였으므로 추후 그 외의 열환경적 특성을 가지는 거리협곡으로 연구 범위를 확대할 필요가 있다.

References

1. 산림청(2020) 도시숲 경관 사업계획.
2. 산림청(2022) 가로수 조성·관리 매뉴얼. 산림청 보고서.
3. 산림청-국립산림과학원(2024) 기후대응 도시숲 등 조성·관리 현장 실무가이드.
4. 서울특별시(2017) 2017 서울시 가로설계·관리 매뉴얼.
5. 서울특별시(2020) 서울시 가로수 기본계획.
6. 엄정희, 박주현, 손정민, 성욱제, 민진규, 김주은(2022) 바람길숲 유형별 조성 효과 및 환경 특성 분석. 국립산림과학원 연구보고서.
7. 엄정희, 손정민, 백준범, 성욱제, 김주은, 민진규, 박주현, 김연비, 김대욱(2020) 도시 바람길숲의 조성원리와 제도화를 위한 연구. 산림청 연구보고서.
8. 임현우, 조상만, 박수국(2022) ENVI-Met 시뮬레이션을 통한 도로 방향별 가로수 식재 형태에 따른 여름철 열환경 개선 효과 분석. 한국조경학회지 50(2): 1-22.
9. 정희은, 한봉호, 광정인(2015) 서울 도심 가로수 및 가로녹지의 기온 저감 효과와 기능 향상 연구. 한국조경학회지 43(4): 37-49.
10. 질병관리청(2025) 2025년 온열질환 응급실감시체계 운영결과 발표. 질병관리청 누리집. Available at: <https://www.kdca.go.kr>
11. Andreou, E.(2013) Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. Renewable Energy 55: 182-188.
12. Antoniadis, D., N. Katsoulas, and C. Kittas(2018) Simulation of schoolyard's microclimate and human thermal comfort under Mediterranean climate conditions: Effects of trees and green structures. International Journal of Biometeorology 62(11): 2025-2036.
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 zone. International Journal of Environmental Research and Public Health 17(19): 7093.
14. 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.
15. Ballester, J., M. Quijal-Zamorano, R. F. Mendez Turrubiates, F. Pegenaute, F. R. Herrmann, J. M. Robine, X. Basagana, C. Tonne, J. M. Anto, and H. Achebak(2023) Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. Nature Medicine 29(7): 1857-1866.
16. City of Melbourne(2012) East Melbourne Urban Forest Precinct Plan 2013-2023. pp. 1-46.
17. City of Portland(2025) Recommended Draft Portland Urban Forest Plan. Portland Parks & Recreation, Urban Forestry.
18. Gallo, E., M. Quijal-Zamorano, R. F. Mendez Turrubiates, C. Tonne, X. Basagana, H. Achebak, and J. Ballester(2024) Heat-related mortality in Europe during 2023 and the role of adaptation in protecting health. Nature Medicine 30(11): 3101-3105.
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. IPCC(2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. IPCC.
21. Iungman, T., S. V. Caballe, R. Segura-Barrero, M. Cirach, N. Mueller, C. Daher, G. Villalba, E. P.

- Barboza, and M. Nieuwenhuijsen(2025) Co-benefits of nature-based solutions: A health impact assessment of the Barcelona Green Corridor (Eixos Verds) plan. *Environment International* 196: 109313.
22. Janoš, T., M. Quijal-Zamorano, N. Shartova, E. Gallo, R. F. Mendez Turrubiates, N. Denisse Beltran Barron, F. Peyrusse, and J. Ballester(2025) Heat-related mortality in Europe during 2024 and health emergency forecasting to reduce preventable deaths. *Nature Medicine*: 1-10.
23. 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.
24. 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 thermal comfort. *Building and Environment* 115: 1-17.
25. 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.
26. 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.
27. NSW Department of Planning, Industry and Environment(2021) Street Tree Planting Design Manual. NSW Government.
28. 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.
29. Peel, M. C., B. L. Finlayson, and T. A. McMahon(2007) Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(5): 1633-1644.
30. 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.
31. 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.

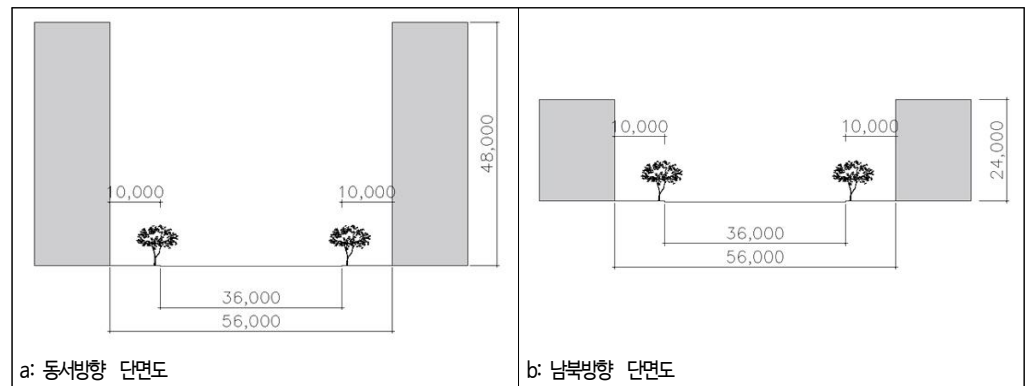
Appendix

부록 A. ENVI-met Simulation 기상 입력자료

시간	기온(°C)	상대습도(%)	풍속(m/s)	풍향(°)
00:00	27.46	65.00	0.1	동서방향: 180 남북방향: 270
01:00	26.77	67.50		
02:00	26.08	70.00		
03:00	25.38	72.50		
04:00	24.69	75.00		
05:00	24.00	72.50		
06:00	24.82	70.00		
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		

부록 B. ENVI-met 시뮬레이션 수목 입력자료

구분	수고(m)	자하고(m)	수관폭(m)	LAI
교목	15	7	8	5.6
아교목	5	2	3	2.8
관목	1	-	1	1



부록 C. 다열 식재 공간입력자료(단위: m)



부록 D. 녹지형 중앙분리대 공간입력자료(단위: m)