

# Envi-Met 모델을 이용한 가로녹지대의 도시열섬 저감효과<sup>†</sup>

- 청주시 가로수길을 대상으로 -

Quantifying the Cooling Effects of Street Green Infrastructure on Urban Heat Islands Using ENVI-met<sup>†</sup>  
- A Case Study of Garosu-gil, Cheongju -

천홍균\*, 박재민\*\*

\*청주대학교 환경조경학과 박사 과정, \*\*청주대학교 조경학과 부교수

CHEN HONGKUN\*, Park, Jae-Min\*\*

\*Ph.D. Candidate (ABD), Department of Environmental Landscape Architecture, Cheongju University

\*\*Associate Professor, Department of Landscape Architecture, Cheongju University

Received: September 24, 2024

Revised: October 29, 2024

Accepted: July 17, 2025

3인익명 심사필

Corresponding author :

Jae-Min Park

Associate Professor, Department

of Landscape Architecture,

Cheongju University, Cheongju

28503, Korea

Tel.: +82-43-229-8508

E-mail: jm018@cju.ac.kr

## 국문초록

세계적인 기후 위기와 도시화가 심화됨에 따라 도시열섬 현상이 가중되고 있으며, 가로녹지대는 이러한 열섬 현상을 완화하는 중요한 방법으로 여겨진다. 본 연구에서는 Envi-Met 프로그램을 사용하여 중고층 주거지역과 저층 주거지역 주변의 가로녹지대가 열섬 효과에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 가로녹지대는 네가지 유형으로, 녹지대가 없는 유형 1, 중앙 녹지대만 있는 유형 2, 보행로 녹지대만 있는 경우 유형 3, 그리고 중앙 녹지대와 보행로 녹지대를 모두 포함한 유형 4로 분류하였다. 연구 결과, 가로중앙녹지대와 보행로의 녹지대가 있는 유형 4가 도시열섬 효과를 완화하는데 가장 효과적임을 보여주었으며, 특히 유형 4는 평균 지표 온도를 최대 4.4°C까지 저감시키며, 다양한 주거 유형에서 일관된 열환경 개선 효과를 보임으로써 가장 우수한 유형으로 평가되었다. 특히 가로녹지대는 가로와 보행자의 열 환경을 개선할 뿐만 아니라 주거 지역의 열섬 효과도 완화하였다. 이러한 결과는 열섬 효과를 더욱 효과적으로 완화하기 위해 각기 다른 주거지역의 특성에 맞는 녹화 전략이 필요함을 강조한다. 본 연구는 조정 및 도시 계획에 중요한 참고자료를 제공하며, 향후 연구에서는 가로녹지대의 수종 및 식재유형 등의 도시 열 환경에 미치는 영향을 탐구하고자 한다.

**주제어:** 기후변화, 가로수, 탄소중립, 도시재생

## ABSTRACT

As the global climate crisis intensifies and urbanization progresses, the urban heat island phenomenon becomes more pronounced. Roadside green spaces are considered an essential mitigation method. This study utilized the Envi-Met program to analyze the impact of roadside green spaces in mid-rise and low-rise residential areas on the urban heat island effect. The green spaces were categorized into four types: type 1 with no greenery, type 2 with a central green space only, type 3 with pedestrian green spaces only, and type 4 with both central and pedestrian green spaces. The results showed that type 4, which includes both central and pedestrian green spaces, was the most effective in mitigating the urban heat island effect, successfully lowering surface temperatures around roads and pedestrian paths. Type 4 also demonstrated the greatest ability to alleviate the heat island phenomenon across various types of residential areas, particularly in mid-rise residential zones. These findings emphasize the need for tailored greening strategies that can accommodate the specific characteristics of residential areas, thereby more effectively mitigating the heat island effect. This research provides critical reference material for urban and landscape planning and aims to further explore the impact of various types of roadside green spaces on urban thermal environments in future studies.

<sup>†</sup>본 논문은 천홍균(2022)의 석사학위  
논문을 심사를 통해 발전시킨 것임

**Keywords:** Climate Change, Street Tree, Urban Regeneration, Residential Area

# 1. 서론

## 1.1 연구 배경과 목적

세계적인 기후변화로 인해 도시 환경과 시민들의 삶의 질이 점차 악화되고 있다. 이러한 기후위기에 대응하기 위해 유엔은 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)를 설립하였다. IPCC(2023) 보고서에 따르면, 2011년부터 2020년까지의 지구 평균 기온은 1850-1900년 대비 약 1.09°C 상승하였으며, 이는 약 12만 년 동안 관측되지 않았던 이례적인 상승이며, 최근 5년은 1850년 이후 가장 더운 시기로 기록되었다.

도시화로 인한 대표적인 환경 문제 중 하나는 도시열섬 현상이다. 이는 Howard(1818)에 의해 처음 제기되었으며, 도시 기후 문제의 핵심 요소로 인식되고 있다. 도시열섬을 완화하기 위한 효과적인 방법 중 하나로 가로녹화가 주목받고 있다. 가로녹화는 열 차단 및 흡수 기능뿐만 아니라, 대기 중 CO<sub>2</sub>를 흡수하여 기후 변화 대응에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다(Nunez and Oke, 1977).

최근에는 옥상녹화, 가로수 식재 등을 통한 도시 열환경 개선을 위한 다양한 기법이 연구되고 있으며, 또한 Envi-Met을 활용한 도시 미세기후 시뮬레이션 연구도 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, 호주 멜버른에서는 고해상도 모델을 통해 수목 도입이 미세기후에 미치는 영향을 분석하였으며, 특히 덥고 건조한 오후 시간대에 보행자의 열쾌적성이 크게 향상된 것으로 보고되었다(Bruse and Skinner, 1999). 또한, 에티오피아 아디스아바바에서는 특정 수목 종류와 피복률, 공원 형태가 냉각 효과에 결정적 영향을 미치는 것으로 나타났다(Feyisa et al., 2014).

이러한 연구들은 수목의 냉각 효과를 실증적으로 보여주었지만, 열섬 완화 효과는 공간 구조, 수목 구성, 보행 환경 특성에 따라 달라질 수 있음을 보여주고 있다. 특히 중고층 및 저층 주거지 등 다양한 도시 형태에 따라 가로녹지대의 효과가 달라질 수 있음에도 불구하고 이에 대한 비교 분석은 상대적으로 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 Envi-Met을 활용하여 가로녹지대의 유형 및 존재 유무가 주거지역 열환경에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 구체적인 연구 목적은 다음과 같다. 첫째, 가로녹지대(가로녹지대, 보행로 녹지대) 유무에 따른 열섬 저감 효과를 비교한다. 둘째, 가로녹지대 유형에 따른 보행자의 열환경 노출 차이를 분석한다. 셋째, 고층과 저층 주거지 유형별로 가로녹지대의 열섬 저감 효과를 비교하여 공간계획적 시사점을 도출하고자 한다.

# 2. 연구 범위 및 연구 방법

## 2.1 연구 범위

### 2.1.1 공간적 범위 및 시간적 범위

본 연구의 공간적 범위는 충청북도 청주시 흥덕구 일대에 위치한 '청주 가로수길'을 대상으로 설정하였다. 청주 가로수길은 1950년대 초 경부고속도로 청주 IC에서 강서동 반송교까지 약 4.53km 구간으로 조성되었으며, 이후 도시화 및 접근성 향상에 따라 1970년대 4차로, 2010년대 이후 6차로로 확장되었다. 현재는 총 연장 약 5.8km, 플라타너스 1,572그루가 식재된 대표적 도시 가로 녹지공간이다. 주거지 유형에 따른 열환경 차이를 분석하기 위해, 중고층 주거지와 저층 주거지로 구분하여 분석하였다. 구체적으로, 중고층 주거지는 죽천교사거리 기준 동서 각 150m 범위(총 300m×300m), 저층 주거지는 산업지구 육거리 기준 서쪽 200m 범위(총 200m×200m)를 선정하였다. 시간적 범위는 2021년 7월 30일 오후 1시로 설정하였다. 이는 2021년 기상청 관측 자료 기준으로 해당 연도 최고 기온이 기록된 시점으로, 열섬 현상이 가장 뚜렷하게 나타날 수 있는 시간대로 판단하였다.

### 2.1.2 대상지 주변 현황

대상지 일대는 주로 제2종 일반주거지역에 해당하며, 중고층(15층 이상) 아파트와 저층(5층 이하) 주택 및 근린상가가 혼재된 형태를 보인다. 고층건축물 기준(30층 이상 또는 120m 이상)과는 별도로, 본 연구에서는 15층 이상을 '중고층', 5층 이하 밀집 지역을 '저층'으로 조작적 정의하였다.

도로 및 보행로 구성은 다음과 같다. 중고층 지역: 6차선 도로, 폭 약 33.7m, 보행로 폭 약 4-7m. 저층 지역: 6차선 도로, 폭 약 24.6m(보행로 제외), 보행로 폭 약 4-7m. 가로녹지대에는 주로 플라타너스 교목이 식재되어 있으며, 하부는 잔디 피복으로 구성되어 있다(그림 1-3 참조).



그림 1. 대상지 위치



그림 2. 중고층 주거지 위성지도 및 현황



그림 3. 저층 주거지 위성지도 및 현황

## 2.2 연구 방법

### 2.2.1 Envi-Met 시뮬레이션 설정

본 연구는 Envi-Met 소프트웨어(학생용 버전)를 활용하여 열환경 시뮬레이션을 수행하였다. 주요 설정값은 다음과 같다. Envi-Met 모델은 대상지의 위성지도(BMP 파일)와 현장 조사 결과를 기반으로 구축하였으며, Spaces 모듈을 통해 건물, 포장, 수목을 세밀하게 반영하였다(그림 4, 표 1, 2 참조).

### 2.2.2 열환경 분석 과정

Envi-Met Leonardo 모듈을 활용하여 온도 분포를 시각화하고, 열환경 분석은 다음 네 가지 가로녹지 유형별로 수행하였다. 유형 1: 녹지대 없음. 유형 2: 중앙 녹지대. 유형 3: 보행로 녹지대. 유형 4: 중앙 및 보행로 녹지대 모두 존재 각 모델별로 전체 가로, 보행로, 주거지 영역을 구분하여 평균 온도, 최고 온도, 최저 온도를 정량적으로 분석하였다. 데이터 수집은 고정 측정 지점 65개를 기준으로 지상 1.5m 높이에서 수행하였다.

표 1. Envi-Met 시뮬레이션 주요 설정값

구분	설정 내용
격자 해상도	3m
수직 최대 높이	45m
Z축 전체 높이	약 90m
포장 구성	아스팔트(검정), 벽돌(화색), 토양(노란색), 플라스틱(분홍)
수목 설정	플라타너스 수종 적용 (현장 조사 기반)
기상 조건	2021년 7월 30일 기상청 데이터 적용
시뮬레이션 시간	오전 10시 - 오후 5시 (7시간), 대표 분석 시간: 오후 1시

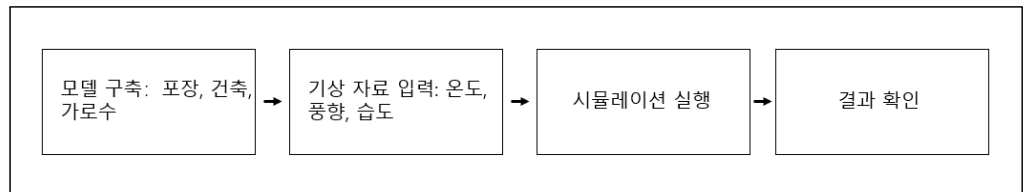


그림 4. Envi - Met 분석

표 2. 주거지 유형별 시뮬레이션 격자 설정 및 분석 범위

구분	격자 크기(m)	격자 수(가로×세로×높이)
중고층 주거지	약 300m × 300m	100 × 100 × 55
저층 주거지	약 200m × 200m	66 × 66 × 66

### 2.2.3 시뮬레이션 공간 구축

Envi-Met 격자 설정을 기반으로 시뮬레이션 공간은 다음과 같이 구성하였다. 지형은 평탄지로 가정하였으며, 포장재는 도로(아스팔트), 보행로(벽돌), 녹지(토양)로 설정하였다. 수목은 현장조사 및 위성지도의 실제 식재 현황을 반영하여 플라타너스로 설정하였다. 최종적으로 4가지 가로녹지 유형별 모델을 구축하여, 가로녹지 구성 방식이 주거지 유형별 열환경에 미치는 차이를 비교·분석하였다.

## 3. 연구 결과

### 3.1 중고층 주거지 Envi-Met 시뮬레이션 분석

#### 3.1.1 전체 가로 열섬 영향 분석

최고 온도 분석 결과, 녹지 미설치(유형 1) 구간이 46.1°C로 모든 유형 중 가장 높았으며, 가로녹지대(유형 2)와 보행로녹지대(유형 3)는 각각 45.1°C로 동일한 수준을 나타냈다. 복합녹지대(유형 4)의 경우 최고 온도가 43.9°C로 나타나 녹지 미설치 구간보다 최대 2.2°C 낮았다(표 3 참조). 이는 단일 유형의 녹지대 설치보다는 복합 녹지 조성 전략이 열 저감에 보다 효과적임을 시사한다(그림 5-8, 표 4, 5 참조).

최저 온도 측면에서도 녹지 미설치(유형 1) 구간이 41°C로 가장 높았으며, 복합녹지대(유형 4)는 37.6°C로 유형 1에 비해 3.4°C 낮아졌다. 또한, 보행로녹지대(유형 3)는 38.6°C로 가로녹지대(유형 2)의 39.9°C보다 1.3°C 낮게 나타났다. 이는 보행로 수목의 차폐 및 증산작용이 열환경 개선에 더욱 효과적으로 작용하고 있음을 보여준다. 평균 온도의 경우, 녹지 미설치(유형 1)는 45.2°C로 가장 높았고, 복합녹지대(유형 4)는 40.8°C로 평균 온도에서 최대 4.4°C의 저감 효과가 나타났다. 특히, 보행로녹지대(유형 3)는 평균 42.2°C로 가로녹지대(유형 2)의 43.2°C보다 평균 1.0°C 낮아, 보행로 중심 녹화가 도로 전체 온도 저감에 더욱 효과적임을 확인할 수 있었다(표 3 참조).

유형별 열 분포 양상을 분석한 결과, 녹지 미설치(유형 1)는 전체 도로 면적의 약 65%가 44.3-46.6°C 이상의 고온 영역으로 구성되어 가장 열악한 상태였다. 가로녹지(유형 2)는 중앙 차선 지역을 중심으로 38.1-40.3°C의 상대적 저온 구간이 약 40% 확대되었으며, 특히 사거리 부근의 40.9°C 이상의 고온 영역은 약 32% 감소한 것으로 분석되었다(그림 9 참조).

표 3. 중고층 주거지 전체 가로 최고 온도, 최저 온도표 및 평균 온도표

녹지 유형	최고 온도(°C)	최저 온도(°C)	평균 온도(°C)
녹지 미설치 가로	46.1	41.0	45.2
가로녹지대	45.1	43.2	
보행로가로녹지대	45.1	38.6	42.2
가로녹지대+보행로가로녹지대	43.9	37.6	40.8

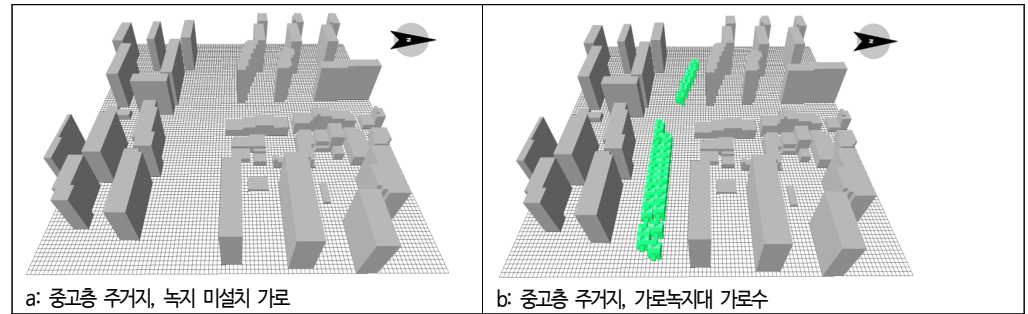


그림 5. 중고층 주거지 유형 1 및 유형 2 Envi-Met 모델링

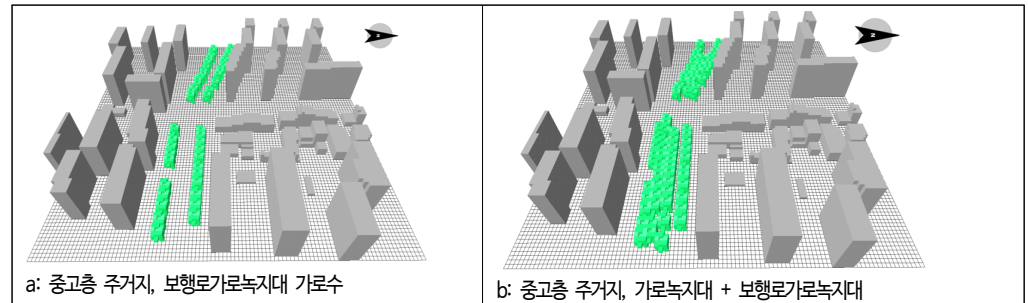


그림 6. 중고층 주거지 유형 3 및 유형 4 Envi-Met 모델링

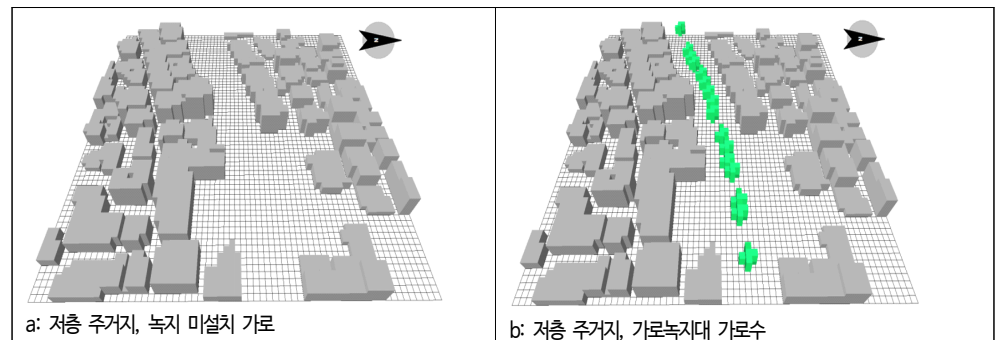


그림 7. 저층 주거지 유형 1 및 유형 2 Envi-Met 모델링

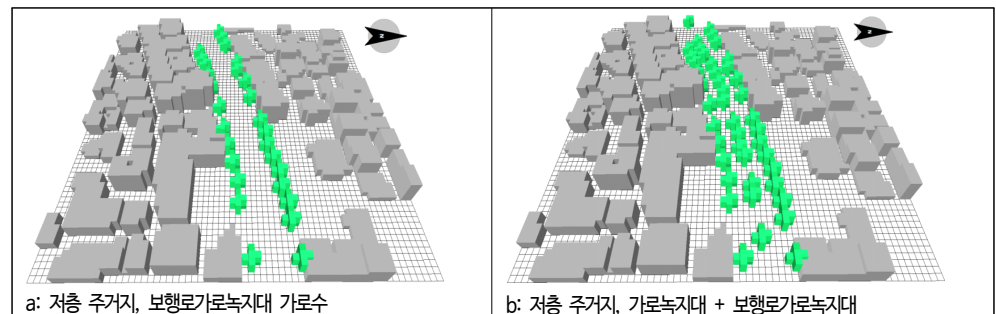


그림 8. 저층 주거지 유형 3 및 유형 4 Envi-Met 모델링

표 4. 중고층 주거지 보행로 최고 온도, 최저 온도표 및 평균 온도표

녹지 유형	최고 온도(단위:°C)	최저 온도(단위:°C)	평균온도(단위:°C)
녹지 미설치 가로	45.9	41.0	43.2
가로 녹지대	45.1	39.9	41.8
보행로가로녹지대	44.6	38.6	40.4
가로녹지대+보행로가로녹지대	44.1	37.6	39.7

표 5. 중고층 주거지 최고 온도, 최저 온도표 및 평균 온도표

녹지 유형	최고 온도(단위:°C)	최저 온도(단위:°C)	평균온도(단위:°C)
녹지 미설치 가로	46.64	37.52	42.0
가로 녹지대	43.82	36.97	41.4
보행로가로녹지대	43.74	36.88	41.2
가로녹지대+보행로가로녹지대	43.47	36.58	40.9

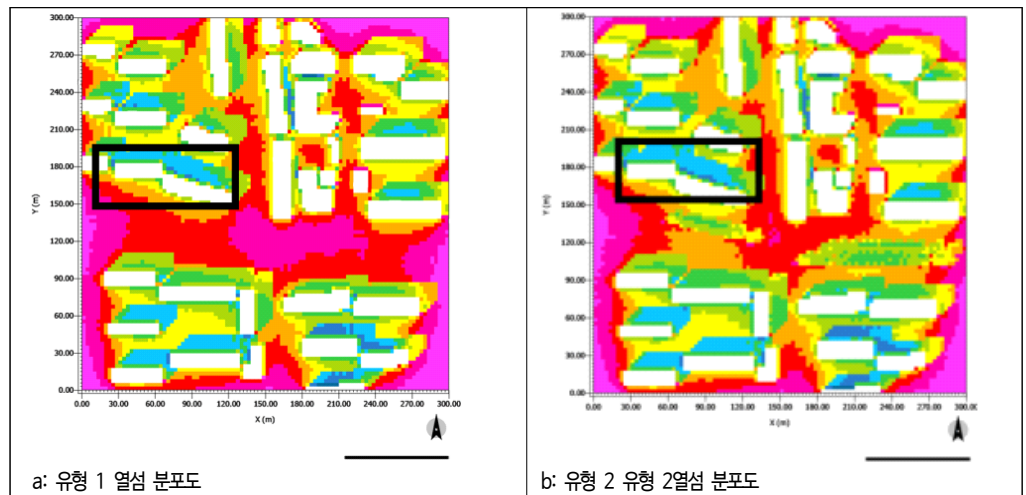


그림 9. 중고층 주거지 유형 1 및 유형 2 열섬 분포도

범례: A 영역(직사각형 1)  
 a: ■ 이하 37.5 °C ■ 37.5-38.6 °C ■ 38.6-39.8 °C ■ 39.8-40.9 °C ■ 40.9-42.0 °C ■ 42.0-43.2 °C  
 ■ 43.2-44.3°C ■ 44.3-45.5 °C ■ 45.5-46.6 °C ■ 46.6 °C 이상 최소: 36.3 0°C, 최대: 47.7 °C  
 b: ■ 이하 36.9 °C ■ 36.9-38.1 °C ■ 38.1-39.2 °C ■ 39.2-40.3 °C ■ 40.3-41.5 °C ■ 41.5-42.6 °C  
 ■ 42.6-43.8 °C ■ 43.8-44.9 °C ■ 44.9-46.1 °C ■ 46.1 °C 이상, 최소, 35.8 °C, 최대: 47.2 °C

보행로녹지(유형 3)는 도로 서측 차선에서 수목에 의한 저온 영역(38.6-39.8°C)이 뚜렷하게 형성되었지만, 수목이 식재되지 않은 사거리 구역은 여전히 42.043.2°C의 높은 온도를 유지하였다. 복합녹지(유형 4)는 사거리 동측에서 37.7-38.8°C의 저온 중심부가 형성되었으며, 도로 동서 차선에서 38.8°C 이하의 저온 면적이 유형 1 대비 약 3.2배로 확대되었다(그림 10 참조). 이는 복합적인 녹지 배치가 가로의 열환경 개선에 가장 효율적임을 명확하게 보여주는 결과이다.

### 3.1.2 보행로 열섬 영향 분석

보행로의 열섬 분포를 분석한 결과, 녹지가 조성되지 않은 유형 1이 가장 높은 열 환경을 나타내며 최고 기온은 45.9°C로 분석되었다. 이에 비해 가로녹지만 조성된 유형 2, 보행로녹지만 조성된 유형 3, 그리고 가로녹지와 보행로녹지가 모두 조성된 유형 4의 최고 기온은 각각 45.1°C, 44.6°C, 44.1°C로 유형 1에 비해 최대 1.8°C 낮은 수준을 보였다(표 4 참조). 최저 기온 측면에서도 유형 1은 41.0°C로 가장 높았으며, 유형 2는 39.9°C, 유형 3는 38.6°C, 유형 4는 37.6°C로 각각 낮은 값을 나타내었다. 평균 기온 역시 유형 1이 43.2°C로 가장 높은 반면, 유형 2, 유형 3, 유형 4는 각각 41.8°C, 40.4°C, 39.7°C로 점차적으로 낮아지는 경향을 보였다(표 4 참조). 이는 보행로 주변의 녹지 도입이 전체 보행로의 열환경을 개선하는 데 긍정적인 영향을 미친 것으로 해석할 수 있다. 중앙분리대와 보행로 모두에 녹지를 도입한 유형 4는 모든 온도 지표에서 가장 낮은 수치를 기록하였다(그림 9, 10 참조).

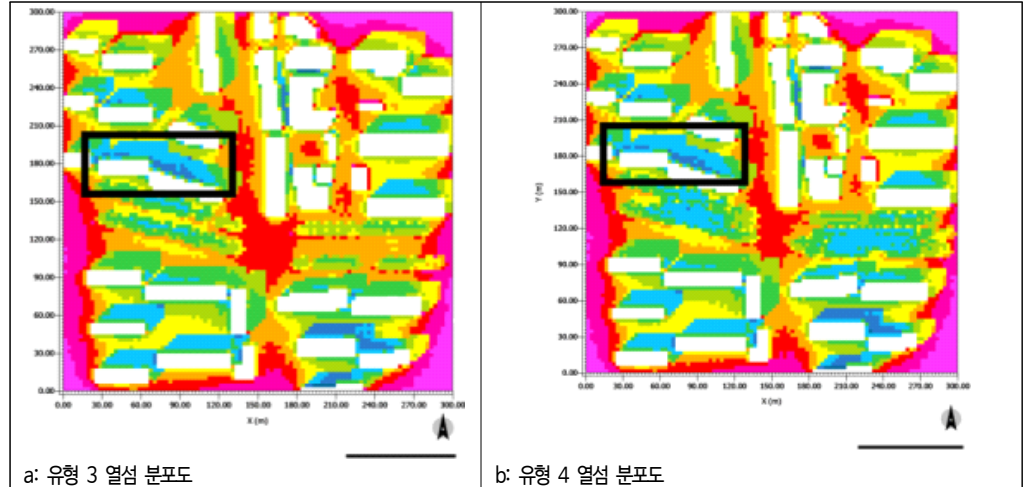


그림 10. 중고층 주거지 유형 3 및 유형 4 열섬 분포도

범례:  A 영역(직사각형 1)

- a:  이하 37.5 °C  37.5-38.6 °C  38.6-39.8 °C  39.8-40.9 °C  40.9-42.0 °C  42.0-43.2 °C  43.2-44.3 °C  
 44.3-45.5 °C  45.5-46.6 °C  46.6 °C 이상, 최소: 36.3 °C, 최대: 47.7 °C
- b:  이하 36.5 °C  36.5-37.7 °C  37.7-38.8 °C  38.8-40.03 °C  40.0-41.1 °C  41.1-42.3 °C  42.3-43.4 °C  
 43.4-44.6 °C  44.6-45.7 °C  45.7 °C 이상, 최소: 35.4 °C, 최대: 46.9 °C

### 3.1.3 주거지 주변 열섬 영향 분석

본 연구는 보행로와 중고층 주거지의 열환경 변화를 종합적으로 분석하기 위해, 그림 10 및 그림 11에 나타난 검은색 사각형 영역(이하 분석 대상 영역)을 중심으로 각 유형 간 열 분포를 비교하였다.

유형 1의 분석 대상 영역에서는 43°C 이상의 고온 분포가 대부분을 차지하였으며, 38°C 이하의 저온 영역은 극히 제한적으로 관찰되었다. 유형 2에서는 해당 영역 내 일부 구간에서 온도 감소 현상이 확인되며, 39-41°C 범위의 중간 온도 분포가 증가하였다. 유형 3의 경우 저온 분포 범위가 더욱 확대되며, 일부 영역에서는 38°C 이하의 온도 분포가 확인되었다. 유형 1의 분석 대상 영역에서는 43°C 이상의 고온 분포가 대부분을 차지하였으며, 38°C 이하의 저온 영역은 극소수 영역에서만 관찰되었다. 표 3의 결과에 따르면, 평균 온도는 유형 1이 42.0°C로 가장 높고, 유형 2, 3, 4는 각각 41.4°C, 41.2°C, 40.9°C로 유의미한 개선 효과가 있음을 입증하였다. 최고 및 최저 기온도 유사한 감소 양상을 나타내며, 가장 효과적인 유형은 중앙분리대와 보행로에 녹지를 모두 도입한 유형 4로 나타났다. 이러한 결과는 가로변 및 보행로 녹지대 조성이 중고층 주거지의 열환경에 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 특히 중앙분리대와 보행로 모두에 녹지를 조성한 유형은 최대 1.1°C의 평균 온도 저감 효과를 보였다(표 5 참조). 다만 주거지 내의 온도 분포 변화는 보행로에 비해 비교적 완만하며, 열 저감 효과는 주변 건물 배치 및 공간 구조에 따라 차등적으로 나타날 수 있다. 향후 도시 계획에서는 열환경 개선을 극대화하기 위해 주거지의 구조 특성과 연계한 녹지 조성 전략이 필요할 것이다(그림 9, 10 참조).

## 3.2 저층 주거지 Envi-Met 시뮬레이션 분석

### 3.2.1 전체 가로 열섬 영향 분석

최고 온도 분석 결과, 녹지 미설치(유형 1) 구간이 46.1°C로 모든 유형 중 가장 높았으며, 가로녹지대(유형 2)와 보행로녹지대(유형 3)는 각각 45.1°C로 동일한 수준을 나타냈다. 복합녹지대(유형 4)의 경우 최고 온도가 43.9°C로 나타나 녹지 미설치 구간보다 최대 2.2°C 낮았다(표 3 참조). 이는 단일 유형의 녹지대 설치보다는 복합 녹지 조성 전략이 열 저감에 보다 효과적임을 시사한다(그림 11, 12 참조).

최저 온도 측면에서도 녹지 미설치(유형 1) 구간이 41°C로 가장 높았으며, 복합녹지대(유형 4)는 37.6°C로 유형 1에 비해 3.4°C 낮아졌다. 또한, 보행로녹지대(유형 3)는 38.6°C로 가로녹지대(유형 2)의 39.9°C보다 1.3°C 낮게 나타났다. 이는 보행로 수목의 차폐 및 증산작용이 열환경 개선에 더욱 효과적으로 작용하고 있음을 보여준다. 평균 온도의 경우, 녹지 미설치(유형 1)는 45.2°C로 가장 높았고, 복합녹지대(유형 4)는 40.8°C로 평균 온도에서 최대 4.4°C의 저감 효과가 나타났다. 특히, 보행로녹지대(유형 3)는 평균 42.2°C로 가로녹지대(유형 2)의 43.2°C보다 평

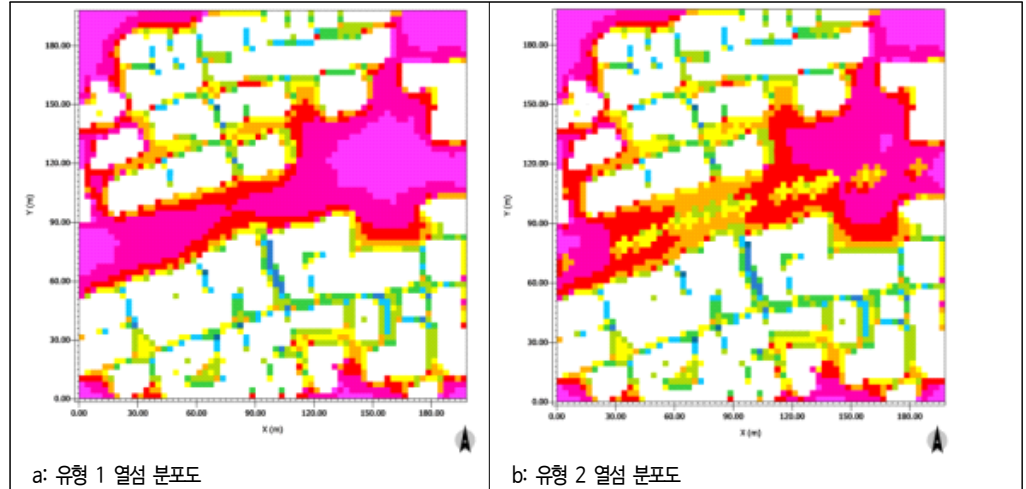


그림 11. 저층 주거지 유형 1 및 유형 2 열섬 분포도  
 범례: a: ■ 이하 38.5 °C ■ 38.5-39.7 °C ■ 39.7-40.9 °C, ■ 40.9-42.1 °C ■ 42.1-43.3 °C ■ 43.3-44.5 °C  
 ■ 44.5-45.8 °C ■ 45.8-47.0 °C ■ 47.0-48.2 °C ■ 48.2 °C 이상, 최소: 37.3 °C, 최대: 49.4 °C  
 b: ■ 이하 37.7 °C ■ 37.7-39.0 °C ■ 39.0-40.2 °C ■ 40.2-41.5 °C ■ 41.5-42.7 °C ■ 42.7-44.0 °C ■ 44.0-45.2 °C  
 ■ 45.2-46.5 °C ■ 46.5-47.7 °C ■ 47.7 °C 이상, 최소: 36.5 °C, 최대: 49.03 °C

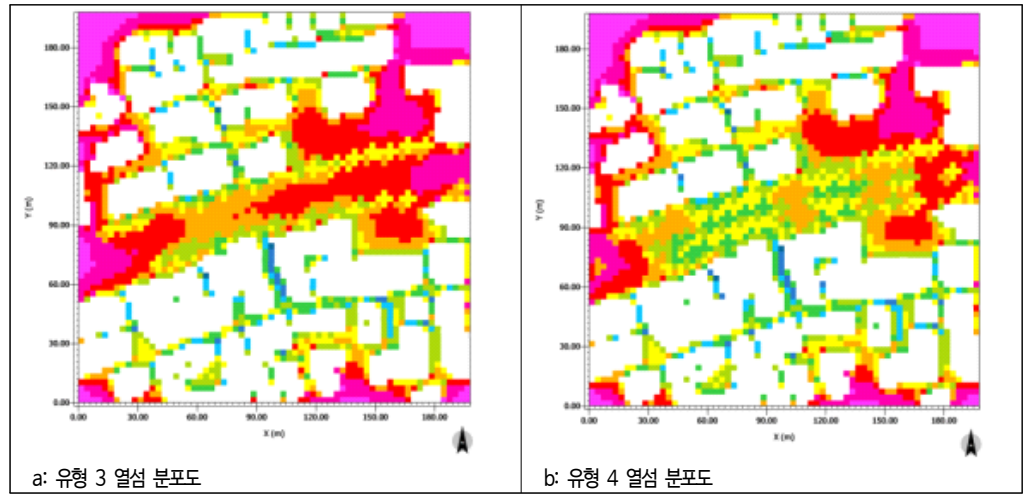


그림 12. 저층 주거지 유형 3 및 유형 4 열섬 분포도  
 범례: a: ■ 이하 37.0 °C ■ 37.0-38.3 °C ■ 38.3-39.5 °C ■ 39.5-40.8 °C ■ 40.8 °C-42.1 °C ■ 42.1-43.4 °C  
 ■ 43.4-44.7 °C ■ 44.7-45.9 °C ■ 45.9-47.2 °C ■ 47.2 °C 이상, 최소: 35.7 °C, 최대: 48.5 °C  
 b: ■ 이하 336.5 °C ■ 36.5-37.8 °C ■ 37.8 °C-39.1 °C ■ 39.15-40.4 °C ■ 40.45-41.7 °C ■ 41.7-43.0 °C  
 ■ 43.0-44.3 °C ■ 44.3-45.6 °C ■ 45.6-46.9 °C ■ 46.9 °C 이상, 최소: 35.2 °C, 최대: 48.2 °C

균 1.0°C 낮아, 보행로 중심 녹화가 도로 전체 온도 저감에 더욱 효과적임을 확인할 수 있었다(표 3 참조). 유형별 열 분포 양상을 분석한 결과, 녹지 미설치(유형 1)는 전체 도로 면적의 약65%가 44.3-46.6°C 이상의 고온 영역으로 구성되어 가장 열악한 상태였다. 가로녹지(유형 2)는 중앙 차선 지역을 중심으로 38.1-40.3°C의 상대적 저온 구간이 약 40% 확대되었으며, 특히 사거리 부근의 40.9°C 이상의 고온 영역은 약 32% 감소한 것으로 분석되었다(그림 9 참조). 보행로녹지(유형 3)는 도로 서측 차선에서 수목에 의한 저온 영역(38.6-39.8°C)이 뚜렷하게 형성되었지만, 수목이 식재되지 않은 사거리 구역은 여전히 42.0-43.2°C의 높은 온도를 유지하였다. 복합녹지(유형 4)는 사거리 동측에서 37.7-38.8°C의 저온 중심부가 형성되었으며, 도로 동서 차선에서 38.8°C 이하의 저온 면적이 유형 1 대비 약 3.2배로 확대되었다(그림 10 참조). 이는 복합적인 녹지 배치가 가로의 열환경 개선에 가장 효율적임을 명확하게 보여주는 결과이다.

표 6. 저층 주거지 전체 가로 최고 온도, 최저 온도표 및 평균 온도표

녹지 유형	최고 온도 (단위:°C)	최저 온도(단위:°C)	평균 온도(단위:°C)
녹지 미설치 가로	48.8	46.7	47.8
가로 녹지대	47.3	44.6	45.4
보행로가로녹지대	45.9	43.9	44.5
가로녹지대+보행로가로녹지대	44.6	38.9	42.4

표 7. 저층 주거지 보행로 최고 온도, 최저 온도표 및 평균 온도표

녹지 유형	최고 온도 (단위:°C)	최저 온도(단위:°C)	평균 온도(단위:°C)
녹지 미설치 가로	48.7	42.8	43.2
가로 녹지대	47.8	41.6	41.8
보행로가로녹지대	45.6	39.4	40.4
가로녹지대+보행로가로녹지대	45.4	38.5	39.7

표 8. 저층 주거지 최고 온도, 최저 온도표 및 평균 온도표

녹지 유형	최고 온도 (단위:°C)	최저 온도(단위:°C)	평균 온도(단위:°C)
녹지 미설치 가로	48.2	38.5	44.9
가로 녹지대	47.8	37.8	44.4
보행로가로녹지대	47.3	37.0	43.6
가로녹지대+보행로가로녹지대	45.6	35.8	43.1

### 3.2.2 보행로 열섬 영향 분석

표 5와 그림 12, 그림 13을 기반으로 저층 주거지 내 보행로 주변의 열환경을 분석한 결과, 유형별 녹지 조성 방식에 따라 보행로 주변의 온도 분포가 체계적으로 변화하였으며, 모든 관측 지점에서 일관된 온도 감소 경향이 확인되었다.

유형1은 관측된 12개 지점 모두에서 최고/최저/평균 기온이 다른 유형보다 2.5~4.8°C 높게 기록되어, 녹지 부재가 열환경 악화에 직접적 영향력을 미침을 입증하였다. 이는 녹지가 없는 보행로의 열환경이 쉽게 악화될 수 있음을 보여준다. 이에 반해 유형 2는 녹지 미설치 가로 대비 최고 온도가 약 3.1°C 낮아 현저한 냉각 효과를 나타냈으며, 평균 온도 또한 1.4°C 낮았다.

유형 3의 경우, 최고 기온은 유형 2와 유사하나 평균 온도는 더 낮게 나타났으며, 이는 보행로 녹지대의 밀도나 연속성이 더 높아 미기후 조성에 유리했기 때문으로 해석된다. 유형 4는 모든 유형 중 온도 조절 효과가 가장 컸으며, 평균 온도는 유형 1 대비 3.5°C 낮아 복합적인 녹지 전략의 열환경 개선 효과가 가장 뛰어남을 입증하였다(표 5 참조). 열화상 분포도를 살펴보면, 유형 1의 보행로는 전체적으로 고온 분포가 넓게 퍼져 있으며, 특히 동측 보행로에 최고 기온 영역이 집중되어 있는 것으로 나타났다. 유형 2에서는 도로 중앙 및 동측 구간의 온도가 일부 감소하였으나, 전체적으로 고온 분포는 여전히 광범위하게 분포하고 있었다. 이는 조성된 녹지의 간격이 넓고 불연속적으로 분포함에 따라 열환경 개선 효과가 제한적이었음을 시사한다. 유형 3의 경우, 동측 보행로를 중심으로 고온 영역이 상당 부분 줄어들었으며, 온도 분포가 보다 균일해진 것으로 분석되었다. 유형 4에서는 열 분포가 가장 안정적으로 나타났으며, 특히 도로 중간과 서측 보행로 부근에 상대적으로 낮은 온도 분포가 관찰되었다. 이는 가로 및 보행로 녹지를 동시에 도입함으로써 도로 전 구간에 걸친 열섬 저감 효과를 실현할 수 있음을 보여준다(그림 11, 12 참조).

### 3.2.3 주거지 주변 열섬 영향 분석

표 6 및 그림 12, 그림 13을 기반으로 저층 주거지 주변의 열 분포를 분석한 결과, 녹지의 유형별 구성 방식에 따라 주거지 전반의 열환경에 유의미한 차이를 보였다. 녹지가 조성되지 않은 유형 1의 최고 기온은 48.2°C로, 모든 유형 중 가장 높은 수치를 기록하였으며, 평균 온도 역시 44.9°C로 가장 높았다. 이에 반해, 가로녹지만 설치된 유형 2는 최고 기온이 47.8°C로 소폭 감소하였고, 평균 온도는 44.4°C로 나타나 온도 저감 효과가 일부 확인되었

다. 보행로에만 녹지를 설치한 유형 3의 경우 최고 기온이 47.3°C로 낮아졌으며, 최저 기온 또한 37.0°C로 유형 1 대비 1.5°C 낮아지는 효과가 나타났다. 가로 및 보행로 모두에 녹지를 도입한 유형 4는 평균 온도가 43.1°C로 가장 낮았으며, 이는 유형 1 대비 1.8°C 감소한 수치로, 복합 녹지 조성이 가장 효과적인 열환경 개선 방안임을 보여준다(표 6 참조).

열화상 분포도(그림 12, 13)를 살펴보면, 주거지 북측에서는 유형 1에서 고온 분포를 나타내는 격자의 밀도가 높게 나타났으며, 유형 2-4 유형에서는 해당 고온 분포가 일부 감소하였다. 그러나 주거지 남측 영역에서는 유형 간 명확한 온도 차이는 크게 드러나지 않았다. 특히 동일한 색상 범위 내에서도 범례 기준에 따라 실제 온도 차이가 존재할 수 있으므로, 시각적 판단 시 범례의 온도 구간 해석이 병행되어야 한다. 결과적으로, 녹지대의 도입은 주거지 외부뿐만 아니라 주변 열환경에도 일정 수준의 긍정적인 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 그 효과는 공간 배치 및 식재 밀도에 따라 차등적으로 나타날 수 있음을 시사한다(그림 9, 10 참조).

#### 4. 결론

본 연구는 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 가로녹지와 보행로 녹지의 다양한 유형의 녹지대를 도입하였을 때, 주거지 주변 열환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 그 결과, 중앙 가로와 보행로에 동시에 녹지를 배치한 유형 4가 모든 유형 중 가장 현저한 기온 저감 효과를 나타내었다. 특히 차량 통행량이 많은 가로 환경에서는 평균 기온 기준 최대 4.6°C의 열섬 완화 효과를 보였으며, 이는 복합적인 녹지 전략의 우수성을 실증한 결과이다.

유형 2(가로녹지)와 유형 3(보행로녹지)는 각각 약 10m 및 15m 범위에서 국지적인 냉각 효과가 나타났으나, 그 효과는 제한적이었다. 반면 유형 4는 약 25-30m 범위까지 냉각 효과가 확장되었고, 평균 3.5°C의 온도 저감이 관측되었다. 같은 면적의 녹지를 조성하더라도 배치 방식에 따라 효과의 강도와 범위가 달라질 수 있다는 점은 본 연구의 주요한 발견 중 하나이다.

또한, 주거지 유형에 따라 동일한 녹지라도 열환경 개선 효과가 달라지는 특성이 나타났다. 중고층 주거지에서는 도로 주변에는 냉각 효과가 있었지만, 열 음영구역 형성으로 제한적인 결과를 보였다. 반면, 저층 주거지는 건축 밀도가 낮고 공간이 개방적이기 때문에 녹지의 열완화 효과가 비교적 광범위하게 퍼지는 경향을 보였다. 이는 향후 도시 열환경 개선 전략에서 단순한 녹지 면적 확대뿐 아니라, 건물 구조·밀도·공간 개방성과 연계된 맞춤형 녹지 배치 전략의 필요성을 시사한다.

다만 본 연구는 다음과 같은 한계를 가진다. 첫째, 여름철 조건을 중심으로 시뮬레이션을 수행하였기 때문에, 식생의 계절별 생육 특성과 이에 따른 냉각 효과의 변동성은 충분히 반영되지 않았다. 둘째, ENVI-met에서 제공하는 수목 모델은 실제 식생의 구조 및 생리적 특성과 다소 차이가 있어, 보다 현실적인 현장 기반 식생 데이터 반영이 필요하다. 셋째, 본 연구는 네 가지 유형의 가로녹지를 중심으로 분석하였으나, 실제 도시 환경에서는 토지이용의 혼잡도, 건물 배치 방향, 도로 폭 등 다양한 변수가 열환경에 영향을 미칠 수 있다.

향후 연구에서는 계절별 시뮬레이션, 실제 식생 데이터 기반 모델링, 그리고 다양한 도시 구조 변수를 반영한 연구를 통해, 더욱 현실적이고 적용 가능한 도시 맞춤형 녹지 설계 가이드라인 마련이 가능할 것으로 기대된다.

#### References

1. Bruse, M. and C. J. Skinner(1999) Rooftop greening and local climate: A case study in Melbourne. Proceedings of the International Conference on Urban Climatology and International Congress of Biometeorology, Sydney, Australia, pp. 1-6.
2. Feyisa, G. L., K. Dons and H. Meilby(2014) Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. Landscape and Urban Planning 123: 87-95.
3. Howard, L.(1818) The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations (Vol. 1). London: W. Phillips.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)(2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC.
5. Nunez, M. and T. R. Oke(1977) The energy balance of an urban canyon. Journal of Applied Meteorology 16(1): 11-19.