

가로수 식재 특성에 따른 도시 열환경 개선 효과[†]

- 대구광역시 가로수 온습도 관측을 바탕으로 -

Effect of Roadside Tree Planting Characteristics on Improving Urban Thermal Environment
- Based on Observations of Temperature and Humidity of Roadside Trees in Daegu Metropolitan City -

손정민*, 엄정희**

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

Son, Jeong-Min*, Eum, Jeong-Hee**

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

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

Received: June 20, 2024

Revised: June 25, 2024 (1st)

Accepted: June 26, 2024

3인익명 심사됨

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 가로수의 유무, 구조(교목 식재, 교목+관목 식재), 배열(1열 식재, 2열 식재)에 따른 온습도 변화를 분석하고 불쾌지수를 산출하여 열환경을 평가하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 대구광역시 달서구 및 중구 일대 가로를 대상으로 하여 2023년 6~9월경 3차례에 걸쳐 온습도 관측을 실시하였다. 달서구 일대 가로수 유무 및 구조에 대한 온습도 관측 결과, 온습도는 반비례하며 낮 동안에는 가로수가 있는 지역이 가로수가 없는 지역보다 기온이 낮은 것이 모든 관측 차수에서 명확하게 나타났다. 특히 기온이 높은 시간대(15~16시)로 갈수록 두 지역의 기온차는 더 커졌으며, 낮(14~16시) 동안 교목+관목 식재지, 교목 식재지, 가로수가 없는 지역 순으로 평균 기온이 낮고 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 밤과 새벽에는 교목 또는 교목+관목 식재지에서 최고 기온이 나타나는 경향을 보였다. 반면, 불쾌지수를 산출했을 때 교목뿐만 아니라 관목을 함께 식재한 지역의 열쾌적성이 가장 긍정적으로 나타났다. 중구 일대 가로수 배열에 대한 온습도 관측 결과, 온습도는 반비례하며 거의 모든 관측에서 2열 교목 식재지의 기온이 더 낮았고 이는 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 불쾌지수 또한 2열 교목 식재지가 1열 교목 식재지에 비해 더 긍정적인 것으로 나타났다. 본 연구는 도시 가로수의 기온 저감 효과 및 열쾌적성 향상에 대해 정량적으로 분석함으로써 관련 도시숲 조성 사업 및 정책 시행에 있어 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

주제어: 모니터링, 열쾌적성, 불쾌지수, 도시숲, 도시열섬

ABSTRACT

This study aimed to analyze changes in temperature and humidity based on the presence of roadside trees (tree, tree + shrub) and their arrangement (single row, double row), and calculate the discomfort index to evaluate the thermal environment. For this, three temperature and humidity observation campaigns were conducted from June to September 2023 in Dalseo-gu and Jung-gu, Daegu. Results from the observation in Dalseo-gu showed that temperature and humidity were inversely related. During the day, areas with roadside trees consistently exhibited lower temperatures than those without trees. This pattern was evident in all observation campaigns. In particular, the temperature difference between the areas increased during peak heat hours (15:00-16:00). Specifically, the average temperatures were lowest in areas with tree + shrub planting, followed by tree-only areas, and highest in areas without trees, showing statistically significant differences. The highest temperatures were observed at night and early morning in areas with trees or tree + shrub planting. Conversely, when calculating the discomfort index, areas with trees and shrubs showed the most favorable thermal comfort. In Jung-gu, nearly all observations indicated that areas with double-row tree-planting had significantly lower temperatures than areas with single-row tree-planting. The discomfort index was also found to be more positive in second-row tree planting areas compared to first-row tree planting areas. By quantitatively analyzing the cooling effect of urban roadside trees and the improvement in thermal comfort, this study provides empirical evidence that can be used to support urban forest projects and related policy implementations.

[†]본 연구는 산림조합중앙회 및 한국임업진흥원 “2023년 기후대응 도시숲 산림자원조사” 및 산림청(한국임업진흥원) “산림과학기술 연구개발사업(2022428B10-2224-0802)”의 지원을 받아 연구되었습니다.

Keywords: Monitoring, Thermal Comfort, Discomfort Index, Urban Forest, Urban Heat Island

1. 서론

과도한 도시화로 인해 도심 지역의 기온이 주변 지역보다 더 높은 도심열섬현상이 발생했고, 최근 들어 기후변화에 따른 폭염 및 열대야 발생 일수 증가와 같은 도시 열환경은 더욱 악화되었다. 도시 기온 상승 문제는 궁극적으로 시민들의 생활환경뿐만 아니라 건강까지 위협하기 때문에 도시 열환경을 개선하고자 여러 정책과 방안들이 논의되어 오고 있다. 그중 도시숲은 미기후 조절, 미세먼지 저감, 경관 향상 등 쾌적한 환경을 형성함에 효과를 보이므로 도시숲 조성에 대한 관심은 점점 커지고 있으며, 가로수의 경우 시민들이 일상적으로 접하는 생활과 밀접한 녹지 공간이자 협소한 도시 공간에 효과적으로 도시숲을 확보할 수 있는 중요한 수단이 되었다(한봉호 등, 2013; 정희은 등, 2015). 가로수 수목은 가로에 그늘을 형성하여 복사열을 저감시키고 증산작용을 통해 주변 온도를 저감 시킴으로써 더운 여름철 시민들의 열쾌적성 향상에 매우 중요한 역할을 한다(윤석환 등, 2020; Rahman et al, 2020; Ren et al., 2022; 박주현과 엄정희, 2024).

가로수의 열환경 분석을 위해 다양한 연구들이 수행되고 있는데, 크게 도로 방향, 건물 높이 등 가로 공간의 구조적 특성을 고려한 열환경 분석(Norton et al., 2015; 임현우 등, 2022; Antoszewski et al., 2022)과 가로수 간격, 다열 식재, 식생층위구조, 가로수 수종 등과 같은 가로수의 식재 방법적 특성에 따른 열환경 분석(정희은 등, 2015; 조상만 등, 2017; 권유진 등, 2019; 엄정희 등, 2023; Yan et al., 2023; Jayasinghe et al., 2024)으로 특징된다. 이러한 선행연구들을 종합하면, 가로 공간의 구조적 특성은 조건마다 유리한 열저감 매커니즘이 다르며, 식재 방법적 특성 중 열환경 완화의 가장 효과적인 요인은 수관피복률을 늘릴 수 있는 가로수 간격 및 다열 식재인 것으로 나타났다(박주현과 엄정희, 2024). 연구들은 다양한 도로 환경 및 식재 방법에 따른 시나리오별 열환경 분석을 수행하기 위하여 주로 시뮬레이션(권유진 등, 2019; 민진규 등, 2022; 임현우 등, 2022; 엄정희 등, 2023)을 활용하고 있으며, 추가적으로 관측을 수행하여 시뮬레이션 입력 또는 검증에 위한 보조자료로 활용하고 있다(강건 등, 2022; Yan et al., 2023; Jayasinghe et al., 2024). 시뮬레이션은 다양한 시나리오의 미기후 변화를 예측하는 데 유용하기 때문에 많이 활용되고 있으나, 실제 도시 환경적 요인을 정확하게 반영하는 데에 한계가 있다(Mirzaei and Haghighat, 2010; 민진규 등, 2022). 반면, 관측은 시간, 비용 등 여건으로 인해 어려움이 많지만 도시의 복잡한 환경 요소가 직접 반영되어 더욱 정확한 데이터 수집이 가능하다. 정희은 등(2015)의 연구에서는 서울시 일대 13개 도로 노선을 대상으로 2013년 8월 4일 낮(12~16시)에 실제 기온 관측을 통해 수종, 식재유형, 가로녹지 구조, 녹량과 기온 간의 관계를 분석하였다. 다만, 가로녹지와 기온 간의 관계만을 비교하고 있으며, 습도를 반영한 열체감 정도를 고려하지는 못하였다. 이 외에 가로수 식재 특성이 실제 도시 열환경에 미치는 영향을 실측을 통해 정량적으로 분석한 연구는 미진하고, 가로수가 갖는 기온 저감 기능뿐만 아니라 열쾌적성에 영향을 미치는 효과에 관한 정량적인 연구가 필요하다(정희은 등, 2015; Ren et al., 2022).

따라서 본 연구는 가로수의 유무, 가로수의 배열, 가로수의 구조와 같은 가로수 식재 특성이 실제 도시 열환경에 미치는 영향을 정량적으로 확인하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 다양한 가로수 특성이 나타나는 대구광역시 내 가로를 대상으로 온습도 관측을 수행하고자 한다. 관측 결과를 바탕으로, 가로수 특성에 따른 온습도 변화 및 차이를 확인해 보고 불쾌지수를 산출하여 가로수 특성이 도시 열환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가해 보고자 한다. 본 연구를 통해 가로수 식재가 도시 열환경에 미치는 영향을 규명함으로써, 효과적인 도시 가로수 조성 정책 및 열환경 개선 전략 수립의 근거자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구 방법

2.1 관측 대상지

가로수 식재 특성에 따른 열환경 관측을 위해 대구광역시 내 달서구 및 중구 내 주거·상업지역 중심지에 위치한 가로를 대상으로 온습도 모니터링을 실시하였다(그림 1 참조). 달서구 달구벌대로 북측 일대 가로를 중심으로 가로수 유무 및 가로수 구조(교목 식재지, 교목+관목 식재지)에 따라 총 20개의 관측 지점을 선정하였다. 가로수가 없는 서당로3길의 안내판, CCTV 등 구조물을 대상으로 7지점(1-1~1-7)에 관측기를 설치했으며, 교목 식재지의 경우 달구벌대로 251길 따라 7지점(2-1~2-7)에, 교목+관목 식재지의 경우 성서서로 따라 6지점(3-1~3-6)에 관측

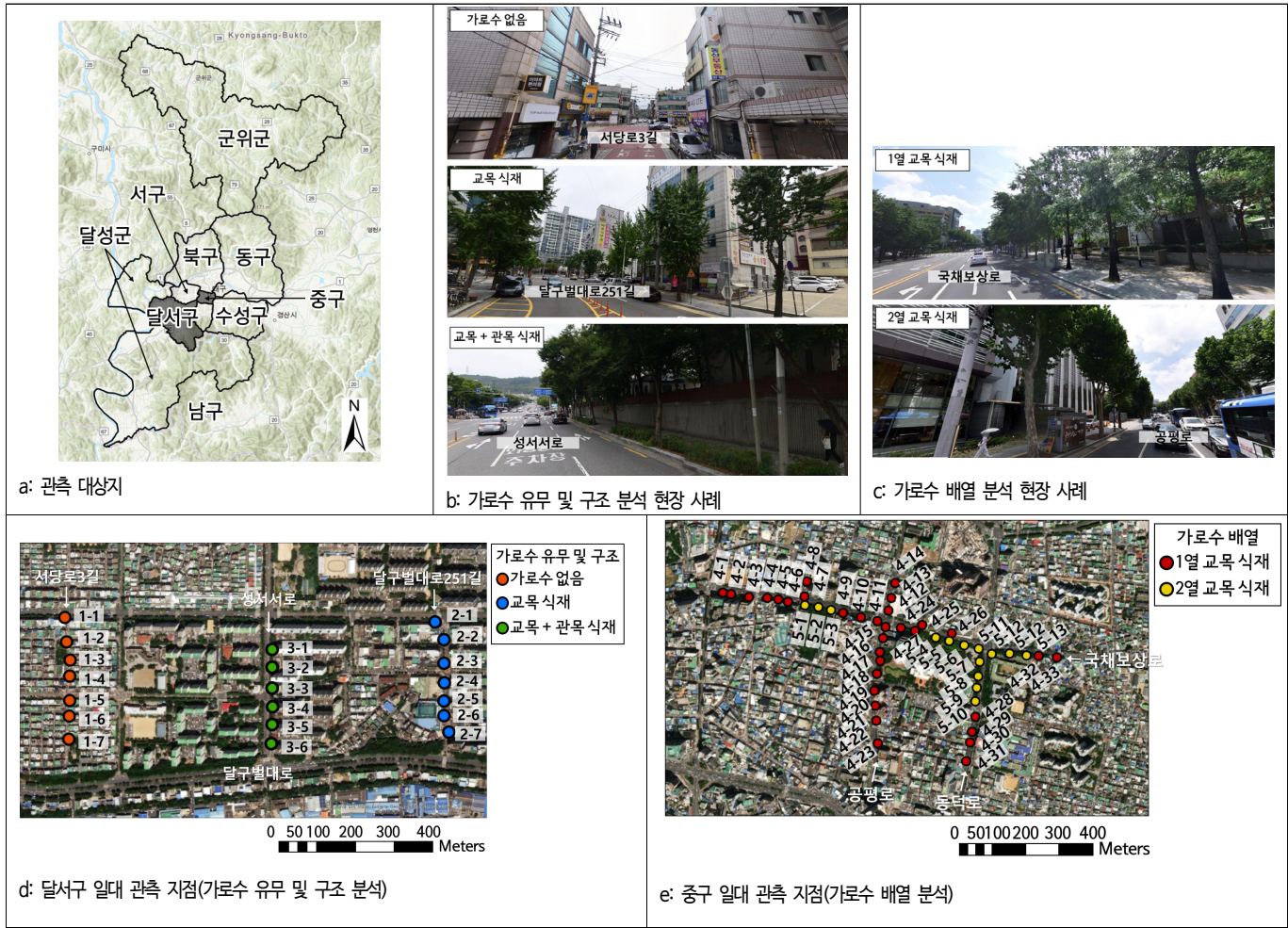


그림 1. 연구 대상지

기를 설치하였다. 가로수 교목은 모두 1열 식재로 수관면적 약 10~90m를 가지는 느티나무, 은행나무 등으로 조성되어 있다.

중구 국제보상로, 공평로 등 가로를 중심으로는 가로수 배열에 따라 총 46개의 관측 지점을 선정하였다. 1열 교목 식재지는 33지점(4-1~4-33), 2열 교목이 식재지는 13지점(5-1~5-13)으로 수관면적 약 20~80m를 가지는 느티나무, 대왕참나무, 양버즘나무 등에 관측기를 설치하였다.

관측기는 약 50m 간격으로 모두 동일하게 배치하였다. 다만, 가로별 주변 건물, 도로 너비 등과 같은 환경적 차이가 존재하며, 달서구 일대 가로수 유무 및 구조를 대상으로 한 관측 지점은 비슷한 태양고도의 영향을 받도록 모두 남-북 방향으로 선정하였으나, 중구 일대의 경우 실제 가로수 배열 현황에 따라 동-서 및 남-북 방향의 가로가 섞여 있다.

2.2 관측 방법

대상지별 열환경 관측을 위해 온습도 데이터로거(RN400-H2PS)가 설치된 측정함을 구조물 및 가로수의 약 2m 이내 높이에 설치하였다(그림 2 참조). 해당 데이터로거는 클라우드 기반의 WIFI 로거로, 온도 센서의 정확도는 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ($-20\sim 60^{\circ}\text{C}$ 범위 적용)로 $-20\sim 60^{\circ}\text{C}$ 범위의 온도를 측정할 수 있다. 습도 센서 정확도는 $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ ($10\sim 90\%$ 범위 적용)로 0~95% 범위의 습도 측정이 가능하다. 본 관측에 활용된 기기는 관측 전 모두 일괄적으로 보정하였다. 관측은 2023년 6월~9월 동안 대상지별로 총 세 차례에 걸쳐 진행되었고 대상지별로 동시에 온습도가 측정되었다. 데이터는 10분 간격으로 수집되었으며, 관측 기간 중 비가 오지 않은 맑은 날을 추출하여 분석에 활용하였으며(표 1 참조), 수집한 온습도 데이터를 검토하여 결측치와 이상치는 별도 처리한 후 분석을 위해 가공하였다.



그림 2. 온습도 관측기 사진

표 1. 온습도 모니터링 기간 및 관측 유효일

대상지		모니터링 기간		
		1차	2차	3차
중구 일대	전체 관측일	6월 1일 18:00~6월 7일 16:00	7월 4일 13:00~7월 31일 09:00	8월 24일 13:00~9월 5일 09:00
	유효 관측일	6월 2일 00:00~6월 6일 23:50 (5일)	7월 26일 00:00~7월 30일 23:50 (5일)	9월 1일 00:00~9월 4일 23:50 (4일)
달서구 일대	전체 관측일	6월 8일 15:00~6월 19일 09:00	8월 2일 15:00~8월 9일 09:00	9월 6일 14:00~9월 13일 08:00
	유효 관측일	6월 15일 00:00~6월 18일 23:50 (4일)	8월 3일 00:00~8월 8일 23:50 (6일)	9월 7일 00:00~9월 12일 23:50 (6일)

2.3 열환경 분석 방법

각 지점별 10분 간격으로 측정된 온습도 데이터를 시간 단위로 평균 내어 관측 차수별 시간에 따른 온습도 변화를 분석했으며, 시간별 최고 기온이 나타난 가로수 식재 특성 및 해당 시간을 도출하고 가로수 식재 특성에 따라 시간별 기온차를 구하여 차수별로 최대로 나타난 기온 저감 정도에 대해 분석함으로써 최대 기온 저감 효과를 산출하고자 했다. 또한, 주요 시간대(낮 14~16시, 밤 21~23시, 새벽 04~06시)를 기준으로 하여, 관측 차수별 각 가로수 특성에 따른 기온 평균이 유의한 차이를 보이는지 검증하고자 IBM SPSS Statistics 27을 활용하여 통계분석을 실시하였다. 가로수 유무 및 구조에 따른 기온 평균 검증은 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 실시했으며, 등분산이 가정되었을 때 Scheffe를, 등분산이 가정되지 않았을 때 Games-Howell를 사용하여 사후분석을 진행하였다. 가로수 식재 배열에 따른 기온 평균 검증은 독립표본 t -검정을 실시하였다.

온습도 측정 데이터를 바탕으로 Thom이 개발한 불쾌지수(Discomfort Index, DI) 지표를 활용하여 열쾌적성을 평가하였다. 불쾌지수는 기온과 습도의 결합된 영향으로 인한 인간의 불편함을 평가하는 척도로서 높은 습도 수준이 특정 온도에서 느끼는 불편함을 증가시킬 수 있다는 가정에 기반하고 있다. 기온과 습도라는 제한된 변수만을 통해 산출되고 태양복사나 바람조건을 포함하지 않는다는 점에서 한계가 있으나, 누구나 쉽게 이해할 수 있다는 점에서 대중적으로 매우 유용한 지표가 될 수 있다(장유정 등, 2012). 본 연구에서는 도시 가로의 온습도 관측 데이터를 기반으로 불쾌지수를 산출함으로써 해당 도시 지역의 기후 환경을 반영하고, 가로수 식재 특성에 따라 사람들이 실제 체감하는 더위를 구체적으로 파악하고자 하였다(김현희 등, 2019). 불쾌지수 산출식은 식(1)과 같으며, 총 6단계로 분류되는데, 21℃ 미만에서 쾌적함을, 21~24℃에서 반 이하의 사람이 불쾌감을, 24~27℃에서 반 이상의 사람이 불쾌감을, 27~29℃에서 대부분 사람이 불쾌감을, 29~32℃에서 모든 사람이 불쾌감을, 그리고 32℃ 이상에서 조치가 필요한 상황으로 구분된다.

$$DI = T - 0.55(1 - 0.01RH)(T - 14.5)$$

여기서, DI = Discomfort Index

T = dry-bulb temperature (Temperature measured by a normal thermometer)

RH = Relative humidity

(식 1)

3. 연구 결과 및 고찰

달서구 및 중구 가로를 대상으로 가로수 유무 및 구조, 가로수 배열에 따라 3차례에 걸친(6~9월) 온습도 관측을 실시한 결과, 2차 관측 시기(7, 8월)의 기온이 1차 및 3차 관측 시기(6, 9월)보다 상대적으로 높게 분포하였고, 기온과 습도는 반비례하는 것으로 나타났다(그림 3(a) 및 그림 5(a) 참조). 온습도 일변화 패턴은 1차, 2차, 3차 관측에서 모두 유사하게 나타났다. 여름철 해가 뜨기 시작하는 05~06시부터 기온이 상승하다가 15~16시에 최고 기온을 나타냈고, 이후 점차 기온이 하강하여 해가 뜨기 전인 04~06시에 최저 기온을 나타냈다. 이러한 결과는 태양 복사열이 지표면을 가열하고, 태양 고도가 가장 높을 때 지표면 가열이 최대화되며, 밤 동안 열이 방출되면서 점차 기온이 하강하는 것을 보여주었다(Yan et al., 2023; Jayasinghe et al., 2024). 습도의 경우 온도와 반대로 변화했는데, 낮 동안에는 기온이 상승함에 따라 증발량이 증가하여 습도가 낮아지고, 밤 동안에는 기온이 하강하면서 습도가 증가하는 것이 관찰되었다.

3.1 가로수 유무 및 구조에 따른 열환경

3.1.1 온습도

관측 기간 동안 가로수가 없는 지역에 비해 가로수가 있는 곳의 평균 기온이 전반적으로 더 낮게 나타났으나, 시간대에 따라서는 다소 차이가 있었다. 일출 후 기온이 상승하는 아침 시간대(07~09시)부터 가로수가 없는 지역의 기온은 서서히 높아졌으며, 낮 시간대, 특히 하루 중 최고 기온이 나타나는 15~16시에는 가로수가 없는 지역에서 기온이 가장 높았고 가로수 식재지(교목 또는 교목+관목 식재지)와의 기온 차이가 가장 크게 나타났다(그림 3(a) 참조). 반면, 일몰 후(20~23시)에는 가로수 식재지의 기온이 가로수가 없는 지역보다 서서히 더 높아지다가, 일출 전 새벽 시간대(05~06시)에는 가로수가 없는 지역에서 기온이 가장 낮게 나타나는 경향이 관찰되었다. 이러한 결과는 시간별 최고 기온이 나타난 식재 특성 비교를 통해 명확하게 관찰할 수 있었는데, 일출 후부터 밤 시간대(07~22시)까지 가로수가 없는 지역에서 기온이 가장 높게 유지되었고, 일출 전 시간대까지는 가로수 식재지에서 기온이 가장 낮았다(그림 3(b) 참조).

가로수가 없는 지점을 기준으로 교목 식재지와 교목+관목 식재지의 기온차를 비교한 결과, 낮에는 교목+관목 식재지의 기온저감 효과가 가장 큰 것으로 나타났다(그림 3(c) 참조). 가로수가 없는 지점과 교목 식재지와의 기온차는 1차 관측에서 최대 3.63°C(6월 18일 16시), 2차 관측에서 최대 3.28°C(8월 8일 15시), 3차 관측에서 최대 3.35°C(9월 10일 15시)로 나타났으며, 교목+관목 식재지와의 기온차는 1차 관측에서 최대 4.04°C(6월 15일 15시), 2차 관측에서 최대 3.96°C(8월 3일 15시), 3차 관측에서 3.89°C(9월 10일 15시)로 나타나, 관목을 추가적으로 식재했을 때 보다 기온저감 효과가 크게 차이를 보였다.

관측 차수별 주요 시간대(낮 14~16시, 밤 21~23시, 새벽 04~06시)를 기준으로 가로수 유무 및 구조에 따른 관측 기온 평균이 차이가 있는지 확인하고자 일원배치 분산분석을 실시하였다(표 2 참조). 낮의 경우 1차($F=211.968$, $p < .001$), 2차($F=678.938$, $p < .001$), 3차($F=651.133$, $p < .001$) 관측 모두 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 새벽에도 1차($F=4.050$, $p < .01$), 2차($F=54.638$, $p < .001$), 3차($F=58.691$, $p < .001$) 관측 모두 유의한 차이를 보였다. 반면, 밤에는 3차 관측($F=7.853$, $p < .001$)에서만 유의하게 나타났다. 유의한 차이를 보이는 변수에 대해서 사후분석을 실시하였고, 그 결과 낮의 경우 평균 기온이 가로수가 없는 지역(낮 1차 34.82°C, 2차 38.27°C, 3차 33.31°C), 교목 식재지(낮 1차 31.99°C, 2차 31.17°C, 3차 30.84°C), 교목+관목 식재지(낮 1차 31.17°C, 2차 35.19°C, 3차 30.31°C) 순으로 더 높은 것이 통계적으로 확인되었다. 새벽의 경우 평균 기온이 1차 관측에서 가로수가 없는 지역(새벽 1차 21.59°C) 대비 교목 식재지(새벽 1차 21.92°C)가 더 높았고, 2, 3차 관측에서는 가로수가 없는 지역(새벽 2차 28.74°C, 3차 22.34°C) 대비 교목 식재지(새벽 2차 29.10°C, 3차 23.20°C) 및 교목+관목 식재지(새벽 2차 29.03°C, 3차 23.05°C)가 더 높은 것이 확인되었다. 밤의 경우 3차 관측에서 가로수가 없는 지역(밤 3차 26.42°C) 대비 교목 식재지(밤 3차 26.65°C) 및 교목+관목 식재지(밤 3차 26.68°C)의 평균 기온이 더 높은 것이 검증되었다.

3.1.2 불쾌지수

온습도 관측 자료를 바탕으로 불쾌지수를 산출한 결과, 관측 기간에 따른 시간별 불쾌지수 산출값의 변화 패턴은 기온과 유사한 양상을 보였다(그림 4(a) 참조). 일출 후 기온이 상승하는 아침 시간대(07~09시)부터 가로수가 없는 지역, 교목 식재지, 교목+관목 식재지 순으로 불쾌지수 산출값이 높으며, 기온이 가장 높은 낮 시간대(15~16시)로 갈수록 가로수가 없는 지역과 가로수 식재지와의 불쾌지수값 차이가 더 커졌다. 또한 밤, 야간이 되어서는 교목

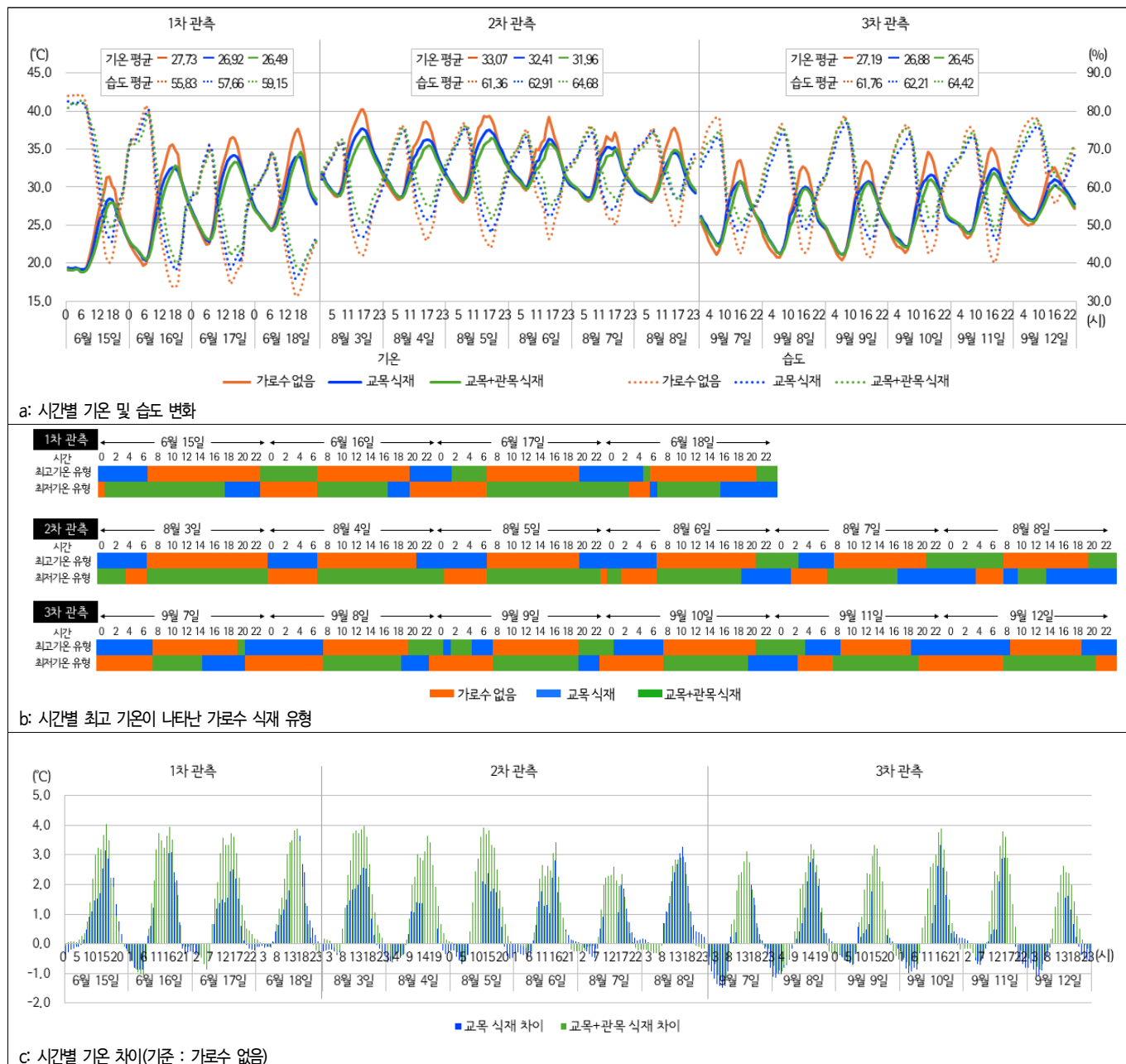


그림 3. 가로수 유무 및 구조에 따른 온습도 비교

표 2. 가로수 유무 및 구조에 따른 기온 평균 비교

관측 시간	관측 차수	분류	빈도	평균	표준편차	F	사후분석	
							Games Howell	Scheffe
낮 (14~16시)	1차	없음 (a)	504	34.82	3.38	211.968***	c < b < a	-
		교목 (b)	504	31.99	2.55			
		교목+관목 (c)	432	31.17	2.62			
	2차	없음 (a)	756	38.27	2.25	678.938***	c < b < a	-
		교목 (b)	756	36.06	1.30			
		교목+관목 (c)	648	35.19	0.99			
	3차	없음 (a)	756	33.31	2.35	651.133***	c < b < a	-
		교목 (b)	756	30.84	1.29			
		교목+관목 (c)	648	30.31	1.06			

표 2. 계속

관측 시간	관측 차수	분류	빈도	평균	표준편차	F	사후분석	
							Games Howell	Scheffe
밤 (21~23시)	1차	없음 (a)	504	27.31	2.09	0.033	-	-
		교목 (b)	504	27.34	2.08			
		교목+관목 (c)	432	27.33	1.99			
	2차	없음 (a)	756	31.70	1.46	0.609	-	-
		교목 (b)	756	31.78	1.71			
		교목+관목 (c)	648	31.71	1.26			
	3차	없음 (a)	756	26.42	1.33	7.853***	a < b, c	-
		교목 (b)	756	26.65	1.52			
		교목+관목 (c)	648	26.68	1.22			
새벽 (04~06시)	1차	없음 (a)	504	21.59	2.24	4.050**	-	a < c
		교목 (b)	504	21.92	2.16			
		교목+관목 (c)	432	21.96	2.25			
	2차	없음 (a)	756	28.74	0.73	54.638***	-	a < b, c
		교목 (b)	756	29.10	0.76			
		교목+관목 (c)	648	29.03	0.66			
	3차	없음 (a)	756	22.34	1.64	58.691***	-	a < b, c
		교목 (b)	756	23.20	1.67			
		교목+관목 (c)	648	23.05	1.59			

** $p < .01$, *** $p < .001$

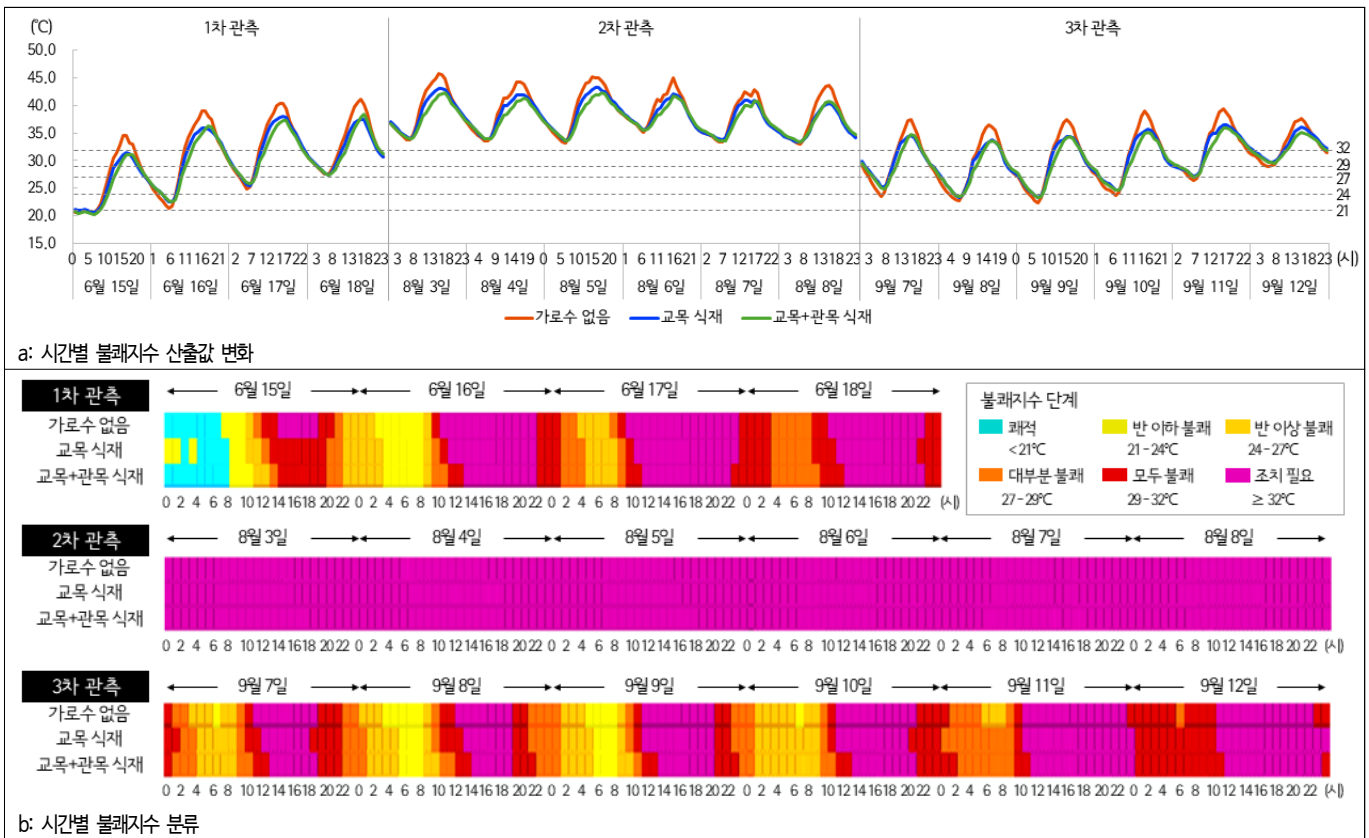


그림 4. 가로수 유무 및 구조에 따른 불쾌지수 비교

식재지와 교목+관목 식재지에서 불쾌지수 산출값이 더 높게 나타났다. 하지만, 불쾌지수 분류 단계를 적용한 결과, 일부 시간(1차 관측 6월 15일 00~02시, 04시 / 3차 관측 9월 7일 06시, 10일 7시, 11일 06~08시, 12일 06시)을 제외하고 교목 또는 교목+관목 식재지의 열쾌적성이 가로수가 없는 지역보다 더 좋은 것으로 도출되었다(그림 4(b) 참조). 가장 기온이 높았던 2차 관측에서는 가로수 유무와 관계없이 모든 지역에서 불쾌지수가 가장 높은 단계인 “조치 필요(불쾌지수 산출값 32℃ 이상)”로 분류되었으나, 1차 및 2차 관측에서는 가로수가 없는 지역에 비해 교목 식재지 및 교목+관목 식재지에서 불쾌지수 단계가 더 낮은 시간대가 나타났고 특히, 1차 관측의 6월 15일 07~20 시에 그 경향이 뚜렷하게 관찰되었다. 조치 필요 단계에 포함되는 시간이 가로수가 없는 지역에서는 43시간, 교목 식재지는 34시간, 교목+관목 식재지는 30시간으로 나타났고, 3차 관측에서는 각각 59시간, 58시간, 51시간으로 나타나 교목뿐만 아니라 관목을 함께 식재한 지역이 열쾌적성에 가장 긍정적이었다.

3.2 가로수 배열에 따른 열환경

3.2.1 온습도

그림 5는 가로수 배열에 따른 온습도 관측 결과이다. 2열 교목 식재지의 기온이 1열 교목 식재지보다 7월 30일 20시를 제외한 모든 시간에 더 낮게 나타났다. 기온이 높은 낮 시간대(14~17시)로 갈수록 기온차가 더 크게 나타났으며, 기온이 낮은 새벽 시간대(04~06시)에는 약 0.10℃의 기온차로 미미하게 나타났다. 최대 기온차를 비교했을 때 1차 관측에서 1.15℃(6월 6일 17시), 2차 관측에서 0.68℃(7월 27일 16시), 3차 관측에서 0.67℃(9월 1일 16시)로 2열 교목 식재지의 기온이 더 낮았다(그림 5(b) 참조).

관측 차수별 주요 시간대(낮 14~16시, 밤 21~23시, 새벽 04~06시)를 기준으로 가로수 배열에 따른 관측 기온 평균이 유의한지 확인하고자 독립표본 t검정을 진행하였다. 그 결과, 2차 관측의 밤 시간대를 제외하고, 모든 관측 차수 및 시간대에서 기온은 가로수 배열에 따라 유의한 차이(1차 낮 $t=14.565$, $p < .000^{***}$, 밤 $t=5.905$, $p < .000^{***}$, 새벽 $t=8.250$, $p < .000^{***}$ / 2차 낮 $t=9.062$, $p < .000^{***}$, 새벽 $t=2.953$, $p < .003^{**}$ / 3차 낮 $t=11.524$, $p < .000^{***}$, 밤 $t=3.615$, $p < .000^{***}$, 새벽 $t=8.458$, $p < .000^{***}$)를 보였다(표 3 참조). 주요 시간대의 평균 기온은 관측 차수 및 시간에 관계없이 모두 2열 교목에서 더 낮게 나타났고, 기온차는 기온이 높은 낮(1차 0.56℃, 2차 0.42℃, 3차 0.42℃)이 밤(1차 0.21℃, 3차 0.18℃)과 새벽(1차 0.26℃, 2차 0.13℃, 3차 0.18℃)에 비해 더 크게 차이나는 것으로 나타났다.

표 3. 가로수 배열에 따른 기온 평균 비교

관측 시간	관측 차수	집단	표본수	평균	표준편차	<i>t</i>	<i>p</i>
낮 (14~16시)	1차	1열 교목	2,970	29.70	1.46	14.565	0.000***
		2열 교목	1,260	29.14	0.95		
	2차	1열 교목	2,970	34.85	1.41	9.062	0.000***
		2열 교목	1,260	34.43	1.23		
	3차	1열 교목	2,376	30.30	1.22	11.524	0.000***
		2열 교목	1,008	29.88	0.84		
밤 (21~23시)	1차	1열 교목	2,970	25.42	1.09	5.905	0.000***
		2열 교목	1,260	25.21	1.07		
	2차	1열 교목	2,970	30.76	2.12	1.720	0.085
		2열 교목	1,260	30.63	2.16		
	3차	1열 교목	2,376	26.51	1.27	3.615	0.000***
		2열 교목	1,008	26.33	1.36		
새벽 (04~06시)	1차	1열 교목	2,970	21.20	0.94	8.250	0.000***
		2열 교목	1,260	20.94	0.90		
	2차	1열 교목	2,970	27.36	1.29	2.953	0.003**
		2열 교목	1,260	27.23	1.31		
	3차	1열 교목	2,376	24.68	0.57	8.458	0.000***
		2열 교목	1,008	24.50	0.57		

** $p < .01$, *** $p < .001$

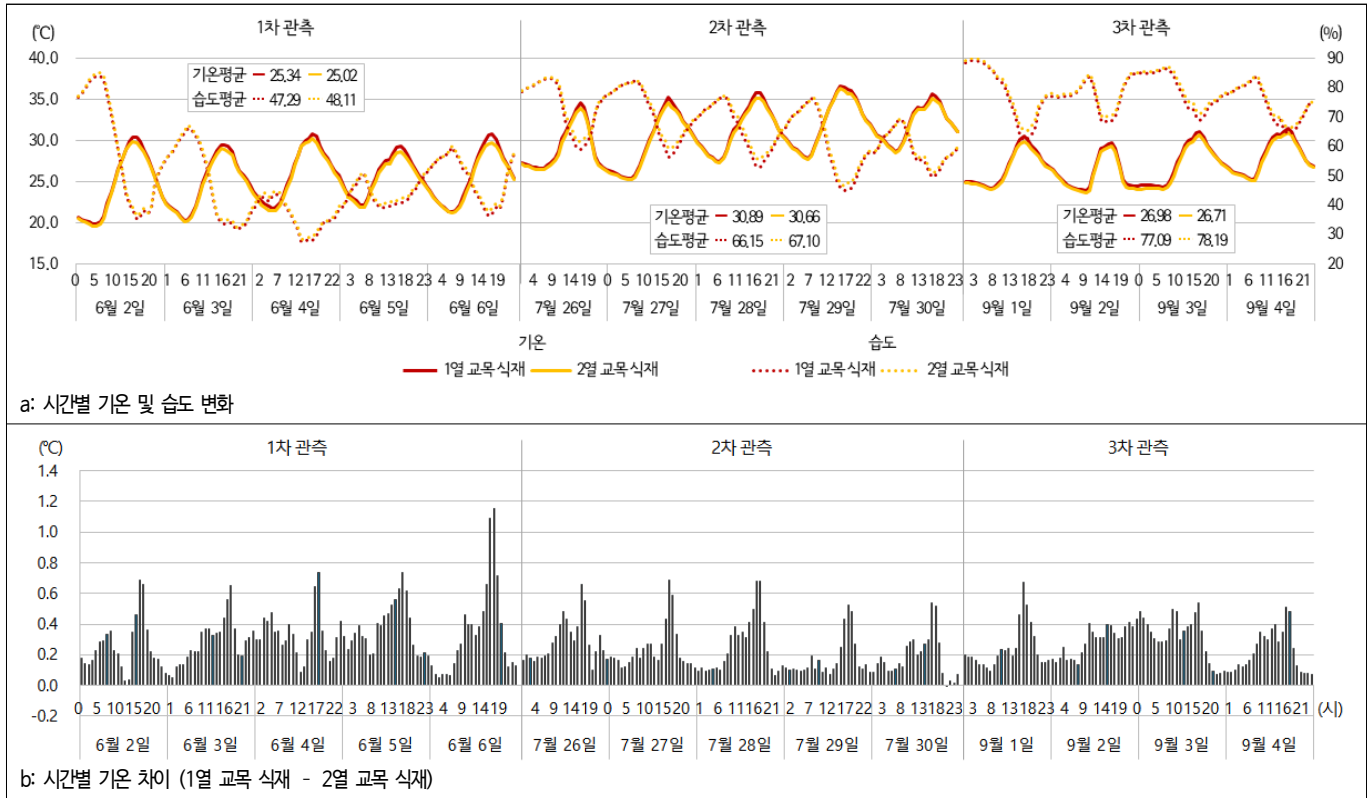


그림 5. 가로수 배열에 따른 온습도 비교

3.2.2 불쾌지수

온습도 관측 자료를 바탕으로 불쾌지수를 산출한 결과, 관측 기간에 따른 시간별 불쾌지수 산출값의 변화 패턴은 기온과 매우 유사하게 나타났다(그림 6(a) 참조). 일부 시간(6월 2일 12시, 7월 29일 10~14시, 7월 30일 20시)을 제외하고 모든 시간에 1열 교목 식재지의 불쾌지수 산출값이 2열 교목 식재지보다 높았다. 또한 기온이 높은 낮 시간대(14~17시)로 갈수록 불쾌지수 산출값 차이가 더 크게 나타났다. 이러한 산출값을 불쾌지수 단계로 분류한 결과, 1차 관측에서 불쾌지수 단계가 가장 높은 “조치 필요(불쾌지수 산출값 32°C 이상)”인 시간이 1열 교목 식재지에서 8시간, 2열 교목 식재지는 4시간으로 나타났고, 2차 관측에서는 각각 103시간, 101시간, 3차 관측에서는 각각 41시간, 39시간으로 나타나 2·3차 관측에서는 다소 차이가 적었지만, 2열 교목 식재지의 열쾌적성이 더 긍정적 인 것으로 도출되었다(그림 6(b) 참조).

3.3 종합 및 고찰

달서구 일대 가로로를 대상으로 가로수 유무 및 가로수 구조(교목 식재 및 교목+관목 식재)에 따른 관측 기온을 비교한 결과, 시간대에 따라 기온 분포가 다르게 나타났다. 일출 후 낮 동안에는 가로수 식재지의 기온이 가로수가 없는 지역보다 더 낮았는데 특히 기온이 높은 낮 시간대(15~16시)일수록 두 지역의 기온 차이가 더 크게 나타났다(조현민과 권태경, 2022). 일몰 후 밤과 새벽에는 가로수가 없는 지역의 기온이 가로수 식재지보다 더 낮은 경향이 관찰되었다. 이는 기온이 높을수록 가로수 식재지 수목의 증산작용이 활발해지고, 낮 동안 가로수가 그늘을 제공하여 평균복사온도를 낮추고 기온 상승을 억제하면서 가로수가 없는 지역에 비해 상대적으로 열 축적을 적게 했기 때문에(윤용한 등, 2003; Herath et al., 2018; Rahman et al., 2020) 일몰 후에도 해당 기온을 유지하게 됨에 따라 가로수가 없는 지역보다 기온이 높게 나타난 것으로 판단되었다. 즉, 낮의 가로수 식재지는 교목 수관을 통해 그늘을 형성하고 태양 노출을 감소시켜 기온저감에 효과적이었으나, 야간에는 장파복사 및 환기를 막아 불리하게 작용한 것으로 판단되었다(Morakinyo et al., 2020). 나아가 낮 동안 교목 식재지보다 교목+관목 식재지의 기온이 더 낮게 나타났는데, 이는 추가된 관목의 증산작용이 더해져 기온저감 효과가 더 크게 나타난 것으로 판단되었다(윤용한, 2003; 정하은 등, 2015; Cheung et al., 2021). 관측 기온 평균값이 통계적 차이가 있는지 확인한 결과,

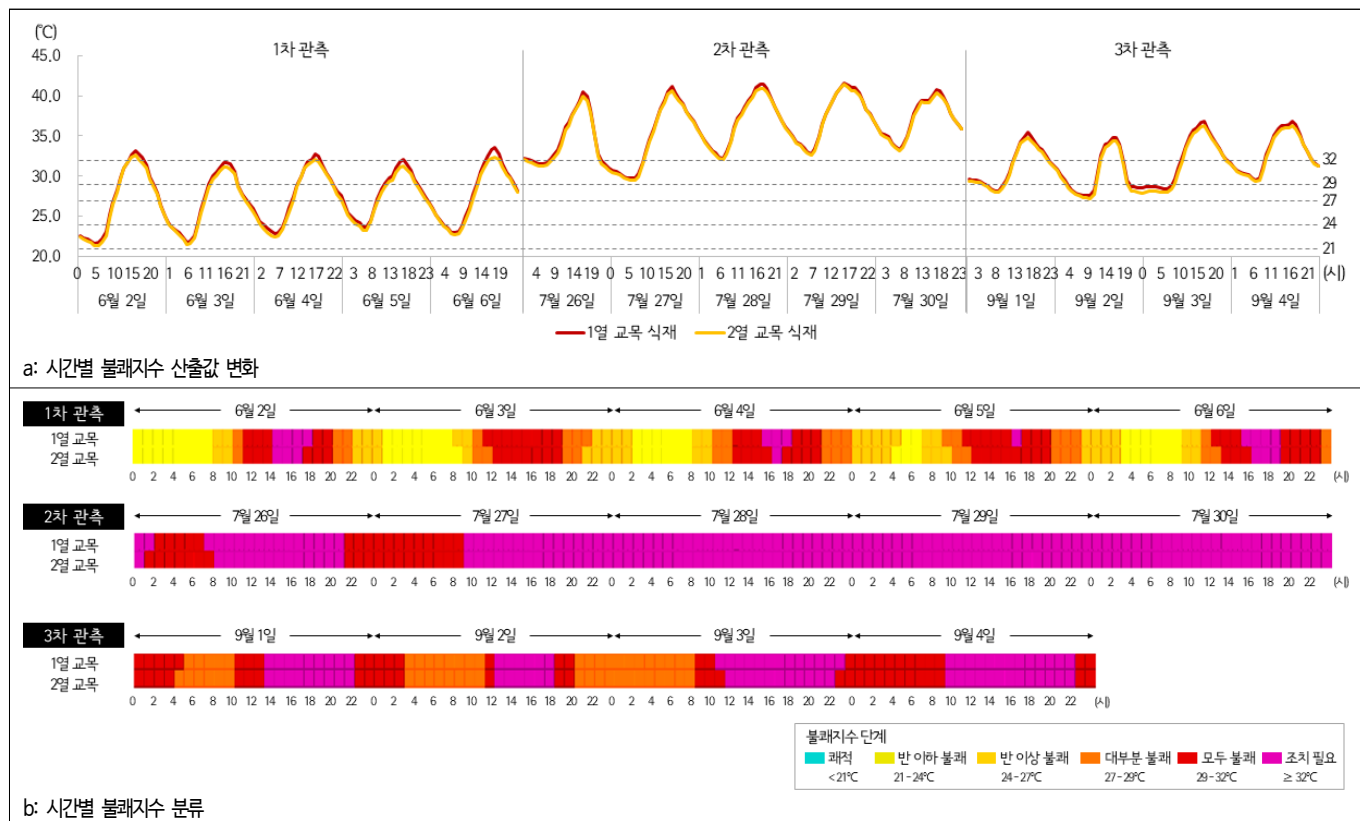


그림 6. 가로수 배열에 따른 불래지수 비교

낮(14~16시)의 경우 모든 관측 치수가 유의미했으며 평균 기온은 가로수가 없는 지역, 교목 식재지, 교목+관목 식재지 순으로 높은 것이 통계적으로 확인되었다. 새벽의 경우에도 모든 관측 치수의 기온 관측값이 유의미했으나 식재지의 평균 기온 순서가 관측 치수에 따라 다르게 나타났고, 밤에는 3차 관측에서만 가로수가 없는 지역 대비 교목 식재지 및 교목+관목 식재지의 평균 기온이 더 높다는 것이 통계적으로 확인되었다. 따라서 기온이 높은 낮일수록 가로수의 기온 저감 효과가 명확하고 통계적으로 유의미한 결과를 나타내었다. 불래지수 산출 결과, 기온 관측 결과와 마찬가지로 일출 후 기온이 상승하는 아침(07~09시)부터 가로수가 없는 지역에서 불래지수 산출값이 가장 높았고, 기온이 높은 낮 시간대(15~16시)로 갈수록 가로수 식재지와 값 차이가 더 크게 나타났다. 반면, 밤, 야간에는 가로수 식재지의 불래지수 산출값이 가로수가 없는 지역에 비해 상대적으로 높아졌다. 하지만 불래지수 분류 단계를 적용했을 때에는 일부 시간(1차 관측 6월 15일 00~02시, 04시 / 3차 관측 9월 7일 06시, 10일 7시, 11일 06~08시, 12일 06시 / 즉, 전체 분석 기간의 432시간 중 10시간)을 제외하고 거의 대부분 시간에서 가로수 식재지의 불래지수 분류 단계가 더 낮게 나타났고, 전반적으로 교목 식재지, 교목+관목 식재지, 가로수가 없는 지역 순으로 열쾌적성에 긍정적이었다. 따라서 불래지수에 기반한 열쾌적성은 기온과 습도의 영향을 종합적으로 받아 불래지수 산출값이 크더라도 불래지수 분류 단계에서 가로수 식재지의 열쾌적성이 더 긍정적으로 평가된 것으로 판단되었다. 다만, 기온이 가장 높았던 2차 관측에서는 가로수 유무 및 구조와 관계없이 모든 지역에서 불래지수 단계가 가장 높게 나타나 가로수 수목으로 인한 냉각 효과보다 해당 여름철 높은 대기온도의 영향이 더 크게 작용한 것으로 사료되었다.

중구 일대 가로를 대상으로 가로수 배열에 따른 관측 기온을 비교한 결과, 2열 교목 식재지의 기온이 1열 교목 식재지보다 더 낮았고, 특히 기온이 높은 낮 시간대(14~17시)로 갈수록 두 지역의 기온차가 더 크게 나타났다(조현민과 권태경, 2022). 이는 2열 교목 식재지가 1열 교목 식재지에 비해 교목의 수관피복률이 높아 더 많은 그늘을 제공함으로써 낮 동안의 햇빛 차단율을 높이고, 기온 상승을 억제한 것으로 판단되었다(윤용환 등, 2003; 정희은 등, 2015; 박주현과 엄정희, 2024). 또한 기온이 높을수록 활발한 수목의 증산작용에 의한 결과로 판단되었다. 주요 시간대를 기준으로 관측 기온 평균값을 통계적으로 확인한 결과, 관측 차수 및 시간에 관계없이 모두 2열 교목에서 기온이 더 낮고 유의한 차이를 나타냈다. 불래지수 산출 결과, 기온 관측 결과와 마찬가지로 낮 시간대에는 2열 교목 식재지의 불래지수 산출값이 더 적었고, 불래지수 단계로 분류했을 때에도 2열 교목 식재지의 열쾌적성이 더 좋

았다. 따라서 가로수 배열의 경우 관측 차수 및 시간대와 관계없이 모두 2열 교목 식재지가 1열 교목 식재지보다 열환경 향상에 더 효과적인 것으로 나타났다.

공통적으로 두 대상지 분석 결과 모두에서 하루 동안 기온이 높은 낮 시간대로 갈수록 가로수의 기온 저감 정도가 뚜렷하게 나타났으나, 계절적으로 비교하면 기온 분포가 낮은 1차(6월), 3차(9월), 2차(7~8월) 관측 순으로 기온 저감 효과가 상대적으로 크게 나타났다. 이는 앞서 말했듯이, 기온이 높을수록 수목의 증산작용이 활발해지고 그늘에 의해 강한 직사광선이 차단되어 냉각효과가 커졌기 때문이다(윤용한 등, 2003; 정희은 등, 2015; Cheung et al., 2021). 하지만, 평균 기온 자체가 매우 높은 8월과 같은 한 여름철은 이미 대기 중의 열이 많아 수목의 그늘 효과가 최대치에 도달할 수 있고, 수목 자체가 수분 스트레스를 받게 되어 증산작용의 효율이 떨어진 것으로 판단되었다. 한편, 수목은 기온을 효과적으로 낮출 수 있지만 수목에 의한 증발산량은 상대 습도를 높여 열쾌적성을 일부 상쇄시킬 수 있다(Cheung et al., 2021). 본 연구 결과에서도 수목의 증산작용으로 인해 가로수가 없는 지역보다 가로수 식재지에서 습도가 높은 것으로 나타났다. 하지만 수목의 증산작용으로 인해 불쾌지수값이 증가하더라도 불쾌지수 단계로 분류했을 때 가로수로 인한 열쾌적성이 향상되는 것이 확인됨에 따라 수목의 증산 효과보다 그늘 형상으로 기온 저감 효과가 더 크게 작용한 것으로 판단되었다(박주현과 엄정희, 2024).

4. 결론

본 연구는 다양한 가로수 특성이 존재하는 대구광역시 달서구 및 중구 일대 가로를 대상으로 하여 2023년 6~9월경 3차례 걸쳐 온습도 관측을 실시하고, 가로수 유무 및 구조, 가로수 배열에 따른 열환경을 분석하였다. 먼저, 관측 차수별 시간에 따른 온습도 변화를 분석했으며 주요 시간대(낮 14~16시, 밤 21~23시, 새벽 04~06시)를 기준으로 가로수 특성별 기온 평균에 차이가 있는지 확인하고자 통계분석을 실시하였다. 또한 온습도 관측 자료를 바탕으로 불쾌지수를 산출하여 열쾌적성을 비교하였다.

달서구 일대 가로수 유무에 따른 온습도 관측 결과, 기온이 높은 낮(15~16시) 시간대로 갈수록 가로수가 있는 지역의 기온이 낮은 것을 모든 관측 차수에서 명확하게 확인할 수 있었으며, 가로수가 없는 지역과의 기온차는 교목 식재지에서 최대 3.63°C(1차 관측 6월 18일 16시), 교목+관목 식재지에서 최대 4.04°C(1차 관측 6월 15일 15시)까지 나타났다. 관측 차수별 주요 시간대에 따른 기온값을 일원배치 분산분석을 실시한 결과, 낮과 새벽의 경우 모든 관측 차수에서 가로수 유무 및 구조의 기온 평균이 유의한 차이를 보였다. 하지만 밤에는 3차 관측에서만 유의하게 나타났다. 유의한 차이를 보이는 변수에 대하여 사후분석을 실시한 결과, 낮에는 가로수가 없는 지역(1차 34.82°C, 2차 38.27°C, 3차 33.31°C), 교목 식재지(낮 1차 31.99°C, 2차 31.17°C, 3차 30.84°C), 교목+관목 식재지(낮 1차 31.17°C, 2차 35.19°C, 3차 30.31°C) 순으로 평균 기온이 더 높은 것이 통계적으로 확인되었다. 새벽에는 1차 관측에서 가로수가 없는 지역(1차 21.59°C) 대비 교목 식재지(1차 21.92°C)가 더 높았고, 2, 3차 관측에서는 가로수가 없는 지역(2차 28.74°C, 3차 22.34°C) 대비 교목 식재지(2차 29.10°C, 3차 23.20°C) 및 교목+관목 식재지(2차 29.03°C, 3차 23.05°C)가 더 높은 것이 확인되었다. 밤의 경우 3차 관측에서 가로수가 없는 지역(밤 3차 26.42°C) 대비 교목 식재지(밤 3차 26.65°C) 및 교목+관목 식재지(밤 3차 26.68°C)의 평균 기온이 더 높은 것이 검증되었다. 따라서 기온이 높은 낮일수록 관측되는 기온값이 유의미하게 나타났다. 불쾌지수 분석 결과, 불쾌지수 분류 단계를 적용했을 때 전반적으로 교목 또는 교목+관목 식재지의 열쾌적성이 가로수가 없는 지역보다 더 좋은 것으로 나타나 가로수 조성으로 인해 열쾌적성이 향상되는 것이 확인되었으며, 특히 관목을 추가적으로 조성했을 때 열쾌적성에 가장 긍정적이었다.

중구 일대 가로수 배열에 따른 온습도 관측 결과, 2열 교목 식재지의 기온이 1열 교목 식재지보다 7월 30일 20시를 제외한 모든 시간에 더 낮게 나타났다. 또한 기온이 높은 낮 시간대(14~17시)로 갈수록 기온차가 더 크게 나타났으며 최대 기온차의 경우 1차 관측에서 1.15°C(6월 6일 17시), 2차 관측에서 0.68°C(7월 27일 16시), 3차 관측에서 0.67°C(9월 1일 16시)로 2열 교목 식재지의 기온이 더 낮았다. 관측 차수별 주요 시간대의 기온값을 독립표본 t검정을 진행한 결과, 2차 관측의 밤 시간대를 제외하고 모든 관측 차수 및 시간대에서 기온은 가로수 배열에 따라 유의한 차이를 보였다. 기온차는 기온이 높은 낮(1차 0.56°C, 2차 0.42°C, 3차 0.42°C)이 밤(1차 0.21°C, 3차 0.18°C)과 새벽(1차 0.26°C, 2차 0.13°C, 3차 0.18°C)에 비해 더 크게 차이나는 것으로 나타났다. 불쾌지수 분석 결과에서도 2열 교목 식재지의 열쾌적성이 1열 교목 식재지에 비해 더 좋은 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 가로수 수목이 도시의 기온 저감과 열쾌적성 향상에 중요한 역할을 한다는 실증적 증거를 제공했다는 점에 의의가 있다. 특히 기후완화를 위해 각종 도시숲 조성사업이 활발히 시행되고 있는 시점에서 실제 현장관측을 통해 가로수가 더운 여름철 낮 시간대 최고 기온을 낮추고 시민의 열쾌적성을 향상시키는데 기여하는

점을 정량적으로 분석함으로써 관련 도시숲 정책 및 조성사업 시행의 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 하지만, 본 연구에서 유효한 온습도 관측 데이터를 선정해 분석했으나 서로 다른 관측 기간 및 대상지에 따른 온습도 보정을 진행하지 못해 가로수 유무 및 구조, 배열에 따른 열환경을 직접적으로 비교하지 못하였다. 후속 연구를 통해 온습도 보정을 실시하여 비교하거나 추가적인 실측을 통해 보다 다양한 가로수 식재 특성에 대한 열환경을 평가하고자 한다. 또한 본 연구는 도시 가로 열환경에 영향을 미치는 거리 방향, 건물 높이, 도로 너비 등 주변 환경과 배경 기후 등 기타 변수를 고려하지 못했다는 점에서 한계가 있다. 향후 열환경에 영향을 미치는 다양한 도시 가로 공간환경과 구조를 종합적으로 고려한 실증 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

References

1. 강건, 최원식, 김재진(2022) 도시숲과 가로수가 대기 흐름과 기온에 미치는 영향에 관한 수치 연구. 대한원격탐사학회지 38(6): 1395-1406.
2. 권유진, 이동근, 안새결(2019) 미시적 열섬현상 저감을 위한 도시 가로수 식재 시나리오별 분석-서울시를 대상으로. 환경영향평가 28(1): 23-34.
3. 김현희, 김다빈, 공우석(2019) 서울시 여름철 불쾌지수의 시공간적 특성. 한국기후변화학회지 10(3): 173-184.
4. 민진규, 엄정희, 성욱제, 손정민, 김주은(2022) 녹지 조성 시나리오에 따른 도시 열환경 개선 효과 분석. 한국조경학회지 50(6): 1-14.
5. 박주현, 엄정희(2024) 도시열환경 개선 및 보행자 열 쾌적성 증대를 위한 효율적 가로녹지 조성방안 연구-계획 및 설계를 위한 매개변수 도출과 녹지조성 방법 제안을 중심으로. 한국조경학회지 52(2): 21-38.
6. 엄정희, 민진규, 박주현, 손정민, 서홍덕, 오정학(2023) 가로수 식재 시나리오에 따른 기온 및 미세먼지 저감 효과 분석. 한국지리정보학회지 26(2): 68-81.
7. 윤석환, 이동근, 박재연(2020) 도시 가로수의 증산 작용으로 인한 불쾌지수 변화 분석. 한국환경복원기술학회지 23(5): 29-43.
8. 윤용한(2003) 수립의 계층구조가 녹지내의 기온 및 습도에 미치는 영향. 환경생물학회지 21(2): 120-125.
9. 윤용한, 조계현, 백승엽, 김승태, 김원태(2003) 녹지주변의 토지이용형태가 녹지내의 기온저감효과에 미치는 영향. 한국산단학회지 17(1): 45-52.
10. 임현우, 조상만, 박수국(2022) ENVI-Met 시뮬레이션을 통한 도로 방향별 가로수 식재 형태에 따른 여름철 열환경 개선 효과 분석. 한국조경학회지 50(2): 1-22.
11. 장유정, 허해숙, 김백조, 김성균, 홍기만, 이우균(2012) 한반도의 여름철 불쾌지수 특성 분석. 한국기후변화학회지 3(2): 89-100.
12. 정희은, 한봉호, 광정인(2015) 서울 도심 가로수 및 가로녹지의 기온 저감 효과와 기능 향상 연구. 한국조경학회지 43(4): 37-49.
13. 조상만, 현철지, 박수국(2017) 여름철 인간 열환경지수에 미치는 가로수의 영향 분석. 한국조경학회지 45(5): 105-112.
14. 조현민, 권태경(2022) 여름철 도시공원의 열환경 개선 효과-서울숲 미기상 관측자료 분석을 중심으로-. 한국조경학회지 50(6): 30-41.
15. 한봉호, 광정인, 김홍순(2013) 가로녹지 조성 및 관리를 위한 가로환경 영향요인 분석 연구-서울시 관리도로를 대상으로. 한국환경생태학회지 27(2): 253-265.
16. 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.
17. Cheung, P. K., C. Y. Jim and C. T. Siu(2021) Effects of urban park design features on summer air temperature and humidity in compact-city milieu. Applied Geography 129: 102439.
18. Herath, H. M. P. I. K., R. U. Halwatura and G. Y. Jayasinghe(2018) Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. Urban Forestry & Urban Greening 29: 212-222.
19. Jayasinghe, S., V. Jayasooriya, S. M. Dassanayake and S. Muthukumaran(2024) Effects of street tree configuration and placement on roadside thermal environment within a tropical urban canyon.

- International Journal of Biometeorology 68(6): 1133-1142.
20. Mirzaei, P. A. and F. Haghighat(2010) Approaches to study urban heat island-abilities and limitations. Building and Environment 45(10): 2192-2201.
 21. 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.
 22. 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.
 23. Rahman, M. A., L. M. Stratopoulos, A. Moser-Reischl, T. Zölch, K. H. Häberle, T. Rötzer, H. Pretzsch and S. Pauleit(2020) Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. Building and Environment 170: 106606.
 24. Ren, Z., H. Zhao, Y. Fu, L. Xiao and Y. Dong(2022) Effects of urban street trees on human thermal comfort and physiological indices: A case study in Changchun city, China. Journal of Forestry Research 33(3): 911-922.
 25. Yan, S., T. Zhang, Y. Wu, C. Lv, F. Qi, Y. Chen, X. Wu and Y. Shen(2023) Cooling effect of trees with different attributes and layouts on the surface heat island of urban street canyons in summer. Atmosphere 14(5): 857.