

식재 특성에 따른 기온 저감 매커니즘 특성[†]

- 단독수와 군집 식재를 중심으로 -

Temperature Reduction Mechanisms Based on Planting Characteristics[†]

- Focusing on Isolated Trees and Group Plantings -

임재연*, 김효주**, 성욱제***, 손정민****, 박주현*****, 엄정희*****

*경북대학교 빅데이터 기반 글로컬 Forest Science 4.0 전문인력양성센터 연구원, **경북대학교 대학원 조경학과 박사과정, ***경북대학교 대학원 조경학과 박사수료, ****서울대학교 환경계획연구소 연수연구원, *****경북대학교 조경학과 박사, *****경북대학교 산림과학·조경학부 조경학전공 교수

Lim, Jae-Yeon*, Kim, Hyo-Ju**, Sung, Uk-Je***, Son, Jeong-Min****, Park, Ju-Hyeon*****, Eum, Jeong-Hee*****

*Researcher, Human Resources Development Center for Big Data-based Glocal Forest Science 4.0 Professionals, Kyungpook National University

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

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

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

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

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

Received: December 31, 2025

Revised: January 19, 2026

Accepted: January 19, 2026

3인인명 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 현장 관측을 기반으로, 단독수 식재와 군집 식재의 구조적 특성이 여름철 기온 형성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 대구광역시 중구와 달서구에 위치한 공원을 대상으로 2025년 6월부터 8월까지 총 2회에 걸쳐 온·습도 관측을 수행하였으며, 단독수 식재 21개 지점과 군집 식재 7개 지점을 선정하여 낮, 밤, 새벽 시간대별 기온 변화를 분석하였다. 단독수 식재의 경우 수관면적, 지하고, 수고 등 개별 수목의 구조적 변수를, 군집 식재의 경우 SVF(Sky View Factor), 불투수포장 면적, 지하고 등 식재 및 공간적 구조 변수를 중심으로 상관분석과 회귀분석을 실시하였다. 분석 결과, 두 식재 방식 모두 낮 시간대에서 가장 뚜렷한 기온 저감 효과를 보였으며, 단독수 식재에서는 수관면적, 지하고가, 군집 식재에서는 SVF와 불투수포장 면적이 주요 영향 변수로 도출되었다. 본 연구는 단독수 식재와 군집 식재의 열환경 완화 매커니즘을 실측 자료 기반으로 비교·분석함으로써, 도시숲 조성 시 기온 저감을 고려한 식재 구조 및 공간 구성 전략 수립을 위한 기초자료를 제공한다.

주제어: 열환경 완화, 도시 미기후, 수목 관측, 수관면적, SVF

ABSTRACT

The purpose of this study is to quantitatively analyze the effects of structural characteristics of single-tree planting and clustered tree planting on summer air temperature based on observations in urban forests. Air temperature and humidity were monitored during two observations from June to August 2025 at urban parks located in Jung-gu and Dalseo-gu, Daegu, South Korea. A total of 21 observation points representing single-tree planting and 7 points representing clustered planting were selected, and air temperature variations were analyzed across daytime, nighttime, and early morning periods. For single-tree planting, key structural attributes of individual trees, including canopy area, crown base height, and tree height, were examined. For clustered planting, planting- and space-related structural variables, such as sky view factor (SVF), impervious surface area, and crown base height, were analyzed. Correlation analysis and multiple regression analysis were conducted to identify the dominant variables influencing air temperature under each planting type. The results showed that both planting types exhibited the most pronounced cooling effects during the daytime. In single-tree planting, canopy area and crown base height were the primary cooling-related variables (canopy area and crown base, $\beta = -0.585$ to -0.197 and $\beta = -0.461$ to -0.231 , *Zelkova serrata*: $\beta = -1.199$ to -0.672 and $\beta = 0.038$ to 0.342), whereas in clustered planting, air temperature was mainly influenced by sky view factor(SVF: $\beta = 0.485$ to 0.863) and impervious surface area($\beta = 0.204$ to 0.556). This study provides

[†]이 연구는 산림조합중앙회 산림자원조사본부 재원의 “2025년 기후대응 도시숲 산림자원조사 통계 및 효과성분석 사업”과 한국연구재단에서 지원하는 “RS-2024-00354391(기후대응 도시를 위한 도시그늘 네트워크 구축 기술 및 이용자 중심의 그늘네트워크 활용 기법 개발)”의 지원으로 수행되었습니다.

insights into the thermal mitigation mechanisms of different planting configurations and offers foundational evidence for establishing planting structure and spatial configuration strategies aimed at reducing summer air temperature in urban forest planning.

Keywords: Thermal Environment, Urban Microclimate, Observation, Tree Canopy, SVF

1. 서론

기후변화로 인한 도시지역의 여름철 폭염과 열대야 문제가 가속화됨에 따라, 도시 열환경 악화 문제가 심각해지고 있다. 특히 고밀도의 불투수 포장과 건축물의 증가는 태양복사의 흡수와 열 축적을 가속화하여 도시 열섬 현상을 강화시키며, 이는 시민의 건강 악화와 에너지 소비 증가로 이어진다(민진규 등, 2022; 천홍균과 박재민, 2025). 도심에서 도시숲은 수관 차폐에 의한 태양복사 차단, 증산작용, 지표면 냉각 및 공기 순환 개선을 통해 도시 열환경을 완화할 수 있다. 수목 및 관목 피복이 증가할수록 낮 시간대 기온과 지표면 온도가 감소하는 경향을 확인할 수 있으며(Ouyang et al., 2020), 이러한 냉각 효과는 여름철 고온 조건에서 더욱 뚜렷하게 나타나 더운 여름철 기온 저감에 중요한 역할을 한다(박수국 등, 2017; Aram et al., 2019; Ziter et al., 2019).

도시숲의 열환경 완화 효과를 정량적으로 검증하기 위한 연구들은 다양한 방법론을 통해 진행되고 있으며, 주로 원격탐사, 미기후 시뮬레이션, 현장 관측의 방법을 통해 수행되고 있다. 원격탐사 기반 연구에서는 위성 영상과 항공사진을 활용하여 수관피복률(Tree Canopy Cover)과 지표면 온도 간의 관계를 분석함으로써 도시숲의 냉각 효과를 대규모 공간 단위에서 평가하고 있으며(Feyisa et al., 2014; Kim et al., 2018), 미기후 시뮬레이션 연구에서는 ENVI-met과 같은 모델을 활용하여 식재 밀도, 수관 구조, 배치 시나리오에 따른 열환경 변화를 예측함으로써 설계 단계에서의 활용 가능성을 제시하였다(Zolch et al., 2019; Ouyang et al., 2020; Chu et al., 2024). 현장 관측 기반 연구에서는 공원, 가로수, 광장 등 실제 도시 공간에서 온·습도 측정을 수행하여 수목 유무에 따른 기온 차이를 확인하고(박준성 등, 2015; Wang and He, 2024), 수종에 따른 기온 저감의 차이를 확인하는 등 미시적 규모의 연구들이 진행되고 있다(Rahman et al., 2018; 조현민과 권태경, 2022).

수목에 의한 열환경 저감 효과를 설명하기 위해 선행연구에서는 수목의 기하학적 특성과 공간적 배치를 나타내는 다양한 변수를 활용해 왔다. 주요 기하학적 변수로는 수관폭, 수관면적 등이 있으며, 태양복사 차폐와 그늘 형성을 설명하는 핵심 지표로 활용되어 왔다(Rahman et al., 2018; Wang and He, 2024; Cai et al., 2025). Cai et al.(2025)은 단일 수목을 대상으로 수관폭, 지하고 등 형태적 특성이 여름철 수직적 기온 분포와 열쾌적성에 미치는 영향을 분석하여, 수관 규모가 클수록 냉각 효과가 커짐을 확인하였고, Rahman et al.(2018)은 수종별 수관 크기, 밀도, 잎 등 구조적 특징에 따라 수관 아래의 기온이 다르게 나타나며, 이러한 특성이 여름철 주간의 열환경 완화에 중요한 역할을 한다고 제시하였다. 공간적 특성을 나타내는 변수로는 수목배치, 수관피복률, 식재 밀도, 지표면 피복 유형 등이 주로 활용되며, 이러한 변수는 태양복사량 및 수관 하부 통풍 조절을 통한 기온 형성에 영향을 미친다(Morakinyo et al., 2017; Yao et al., 2025). Yao et al.(2025)은 작은 SVF가 태양복사량을 조절하여 열쾌적성을 향상시킴을 제시하였으며, Morakinyo et al.(2017)은 가로 공간에서 수종, 수관폭 차이에 의한 그늘 생성이 태양복사량과 수관 하부 환경을 조절하여 국지적 열환경에 유의한 영향을 미친다고 하였다. Wu and Wu(2024)는 캠퍼스 보행로를 대상으로 식재 밀도와 식재 배열 등 수목 배치 방식에 따라 복사 환경과 기온, 열쾌적성 지표가 뚜렷한 차이를 보임을 확인하였다.

그러나 기존 도시숲 열환경 연구는 수관피복률이나 녹지면적과 같은 평면적 지표를 중심으로 수행된 경우가 많아 지하고, 수관 높이 등 도시숲의 입체적 구조 특성을 충분히 반영하는 데에는 한계가 있다(Ziter et al., 2019; Ouyang et al., 2020). 또한 공원 및 도시공간에서는 단독수 식재와 군집 식재가 복합적으로 나타나지만, 식재 방식에 따른 기온 형성 요인과 메커니즘의 차이를 현장 관측 자료에 기반해 정량적으로 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 다양한 특성이 존재하는 도시숲을 사례로 현장 관측을 수행하여 단독수 식재와 군집 식재의 구조적 특성이 여름철 기온 형성에 미치는 영향을 통계적으로 분석하고자 한다. 이를 통해 단독수 식재와 군집 식재에서 기온 저감에 기여하는 요소를 정량적으로 분석하고, 도시숲 조성 시 열환경 개선을 위한 실질적인 식재 구조 및 공간 구성 전략을 제시하는 것을 목표로 한다.

2. 연구 방법

2.1 관측 대상지

공원 내부의 단독수 식재와 군집 식재의 식재 특성에 따른 여름철 열환경 관측을 위해 대구광역시 중구의 국채보상운동기념공원 일대 3개 공원과 달서구의 성서체육공원을 대상으로 온·습도 측정을 수행하였다. 국채보상운동기념공원 일대는 인접한 3개 공원이 유사한 도시적 입지 조건을 공유하고 있다. 일관된 도시 조건에서의 측정이 가능하며, 도심에 위치한 공원 중 단독으로 식재된 수목이 다수 분포하고 있어 단독수 식재의 구조적 특성과 열환경 간의 관계를 분석하기에 적합한 조건을 갖추고 있다. 성서체육공원은 식재 밀도와 수관 구조, 공간 구성 등이 상이한 다양한 군집 식재 유형이 분포하고 있으며, 동일 공원 내에서 공간적 특성이 다른 지점을 비교·분석할 수 있어 군집 식재 특성에 따른 열환경을 평가하는 데 유리한 대상지이다. 이에 국채보상운동기념공원 일대에서는 단독수 식재 관측지점을 선정하였으며 성서체육공원에서는 군집 식재 관측지점을 선정하였다(그림 1 참조).

국채보상운동기념공원 일대의 국채보상운동기념공원, 2·28기념중앙공원, 경삼감영공원 내부에 가장 많이 식재된 단풍나무와 느티나무를 대상으로 단독으로 식재된 수목을 선정하였다. 최종적으로 단풍나무 11그루, 느티나무 10그루에 관측기를 설치하였다. 성서체육공원 내부 군집 식재 관측지점 선정을 위해 공원 내에서 다양한 식재수종, 형태 및 공간특성을 포함하도록 7개 지점을 선정하고, 그 중심에 위치한 수목에 관측기를 설치하였다(그림 2 참조).



그림 1. 연구 대상지



그림 2. 단독수 식재(단풍나무, 느티나무) 및 군집 식재 표본점 대표 이미지

2.2 관측 방법

열환경 관측을 위해 온·습도 데이터로거(RN400-H2PS)를 관측지점 수목의 2m 높이에 북쪽을 바라보도록 설치하였다(그림 3 참조). 해당 기기는 클라우드 기반의 WIFI 로거로, -20°C 에서 60°C 범위의 온도를 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (-20°C 에서 60°C 범위 적용)의 정확도로 측정할 수 있으며, 0-95% 범위의 습도를 $\pm 2.0\%$ (10-90% 범위 적용)의 정확도로 측정할 수 있다(손정민과 엄정희, 2024). 관측에 앞서 기기는 모두 일괄적으로 보정되었다. 2025년 여름철인 6월-8월 동안 두 번의 관측이 진행되었으며, 단독수 식재와 군집 식재 관측지점의 온·습도를 동시에 측정하였다. 데이터는 10분 간격으로 수집되었으며, 결측치와 이상치를 제거하기 위해 별도의 검수를 수행하였다. 추가적으로 일반적인 기상상황에서의 분석을 위해 관측기간 중 비가 오지 않고 연속으로 맑은 날이 지속된 기간의 값을 활용하였다.

1차 관측은 5월 27일-6월 30일, 2차 관측은 7월 22일-8월 12일 동안 수행되었으며, 유효관측일 선정을 위해 동일 기간의 대구 ASOS(143)의 관측자료와 함께 강수 유무, 기온 및 습도의 일변동 폭을 검토하였다. 또한 극한 기상 조건에서의 도시숲 열환경 완화에 대한 변수의 영향을 비교하기 위해, 유효분석일 중 기온이 높고 폭염일에 해당하는 날짜를 별도로 선정하였다. 그 결과, 1차 유효분석일은 6월 4일-6월 12일로 총 9일, 1차 폭염일은 6월 7일, 2차 유효분석일은 7월 24일-8월 1일로 총 9일, 2차 폭염일은 8월 1일로 총 4개의 분석 대상 시기가 선정되었다.

2.3 열환경 분석 방법

열환경 관측에 대한 분석은 유효분석일 및 폭염일의 각 지점별 10분 단위로 측정된 값과 단독수 식재, 군집 식재의 특성을 나타내는 변수를 활용하였다. 이를 통해 공원 내 식재 특성에 따른 기온의 관계를 파악하고, 어떠한 변수가 열환경 완화에 영향을 미치는지 분석하고자 하였다. 선정된 유효관측일 및 폭염일의 데이터는 도시 열환경의 일변화를 고려하기 위하여 낮 시간대(14:00-15:50), 밤 시간대(21:00-22:50), 이튿날 새벽 시간대(03:00-04:50)를 대표 시간대로 구분하여 분석하였다. 시간대 구분은 일 최고 기온 발생 시점, 열 저장 및 방출이 두드러지는 야간, 일 최저 기온이 나타나는 새벽의 열환경 특성을 반영하기 위해 구분되었다.

단독수 식재의 변수는 개별 수목의 구조적 특성이 기온에 미치는 영향을 파악하기 위해 수목 객체의 기하학적 특성을 나타내는 요소로 수고, 지하고, 흉고직경, 수관면적으로 총 4개의 변수를 선정하였다. 각 변수들의 크기에 따라 태양복사 차폐량, 그늘 제공량, 수관 하부 구조에 의한 공기순환 등의 특성이 상이하며 이는 수목에 의한 기온 저감에 영향을 미친다. 군집 식재의 변수는 수목과 주변 토지피복 등의 공간 특성이 기온에 미치는 영향을 파악하기 위해 분수, 흉고직경, 지하고, 수고, SVF, 수관밀도, LAI 지수, 녹지량, 잔디피복 면적, 불투수포장 면적을 포함하여 총 10개의 변수를 선정하였다. 분수, 흉고직경, 지하고, 수고는 수목 특성에 따른 군집 구조를 반영하고, LAI 지수, SVF, 수관밀도는 태양복사 차단 및 상부 차폐 특성과 관련이 있으며, 녹지량, 잔디피복 면적, 불투수포장 면적은 군집 하부 지표면 열특성을 나타낸다.

단독수 식재 및 군집 식재 변수와 기온 간의 관계를 파악하기 위해 Excel, IBM SPSS Statistics 29.0.2.0을 활용하였다. 분석은 단독수 식재와 군집 식재를 구분하여 진행하였으며, 통계 분석에서 유의수준은 0.05로 설정하였다. 단독수 식재의 경우, 단풍나무와 느티나무에 대하여 수종별 기온 경향을 분석한 후, 변수 간 기본적인 연관성을 파악하고 회귀분석을 위한 최종 변수 도출을 위해 피어슨 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 실시하였다. 이



그림 3. 온·습도 관측기

후 수목의 기하학적 변수들이 기온 변화에 미치는 복합적인 영향을 동시에 고려하여 변수의 상대적 영향력을 비교·해석하기 위해 다중 회귀분석을 수행하였으며, 회귀분석 결과를 수종별로 비교함으로써 각 수종에서 변수 영향력의 차이를 검토하였다. 이를 통해 단풍나무와 느티나무의 구조적 특성과 기온 간의 관계를 종합적으로 파악하고자 하였다. 군집 식재의 경우, 군집 특성과 기온 간의 관계를 분석하기 위해 7개 관측 지점을 대상으로 공간 특성의 일반화를 수행하였다. 이를 위해 계층적 군집분석을 실시하여 공간 유형을 3개 그룹으로 분류하였으며, 분류된 그룹 간 기온 차이는 분산분석(ANOVA)을 통해 검증하였다. 분산분석 결과가 유의한 경우 Scheffé 사후검정을 통해 집단 간 차이를 확인하였다. 마지막으로 군집 식재에서 기온에 영향을 미치는 주요 변수를 도출하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석에 앞서 군집 식재 특성 변수 간의 상관분석을 수행하여 변수 간 구조적 연관성을 검토하고, 상관성이 높은 변수를 제거함으로써 다중공선성 발생 가능성을 최소화하였다. 이러한 과정을 통해 연구 목적에 부합한다고 판단된 핵심 변수만을 선별하여 회귀모형을 구성하였다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 단독 수목 식재와 군집 식재 각각의 구조적 특성에 따른 열환경 완화 구조를 종합적으로 비교·검토하였다.

3. 연구 결과

3.1 분석 시기별 기온·습도의 일변화 특성

2025년 6-8월의 1차, 2차 관측 중 유효분석일과 폭염일에 대한 기본적인 기온 경향 분석 결과, 6월 초에 관측된 1차 유효분석일보다 7월 말 관측된 2차 유효분석일의 기온이 상대적으로 높게 나타났으며, 2차 폭염일, 2차 유효분석일, 1차 폭염일, 1차 유효분석일 순으로 높은 평균 기온을 나타냈다. 습도는 기온과 반대의 경향을 보여 반비례하는 경향을 나타냈고 전반적으로 비슷한 일변화 패턴을 보였다.

관측기간 내 평균 일출시각인 05-06시부터 기온이 상승하기 시작하며, 15시에 일 최고기온에 도달하고 이후 해가 뜨기 직전인 04-05시에 가장 낮은 기온을 보였다(그림 4 참조). 이러한 기온 변화는 주간의 태양복사로 인한 지표면 가열과 열 축적, 그리고 야간의 복사 냉각 과정에 의해 기온이 점차 하강하는 일변화 특성을 보여준다. 습도는 기온이 상승하는 주간 시간대에 낮아지고, 기온이 하강하는 야간과 새벽 시간대에 다시 증가하는 경향을 보여 기온과 반대의 일변화를 나타냈다.

3.2 단독 식재의 기온 저감 효과

3.2.1 단독 식재의 열환경 특성 및 영향 요인 분석

단독 식재의 열환경 분석을 위해 단풍나무와 느티나무에 대한 관측 지점 특성 평균과 수종별 평균 기온의 경향을 확인하였다. 단풍나무, 느티나무의 평균적인 지점 특성은 표 1과 같다. 표 1에 따르면 수고, 지하고, 흉고직경, 수관면적 모두 느티나무가 단풍나무보다 평균적으로 크게 나타났다. 1차 유효분석일과 2차 유효분석일에서 낮 시간대에는 느티나무가 단풍나무보다 약 1.4-1.5°C 낮은 기온을 나타냈으며 밤과 새벽에는 단풍나무가 느티나무보다 각각 약 0.2-0.3°C, 0.6-0.8°C 낮은 기온을 보였다(그림 5 참조). 낮, 밤, 새벽 시간대의 기온 경향은 1차와 2차 유효분

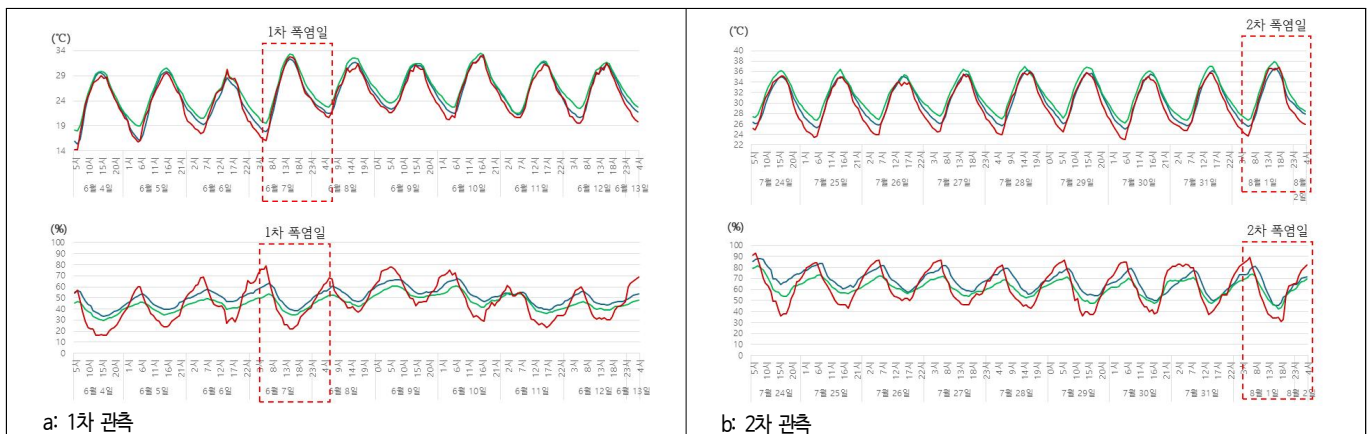


그림 4. 전체 관측일 온·습도 그래프
 범례: — 규채보상운동기념공원 일대, — 성서체육공원, — 대구 ASOS

표 1. 단풍나무와 느티나무 객체 특성 평균

구분	수고(cm)	지하고(cm)	흉고직경(cm)	수관면적(m ²)	본수
단풍나무	778.2	260.0	17.7	38.0	11
느티나무	1,208.0	413.0	38.4	79.0	10

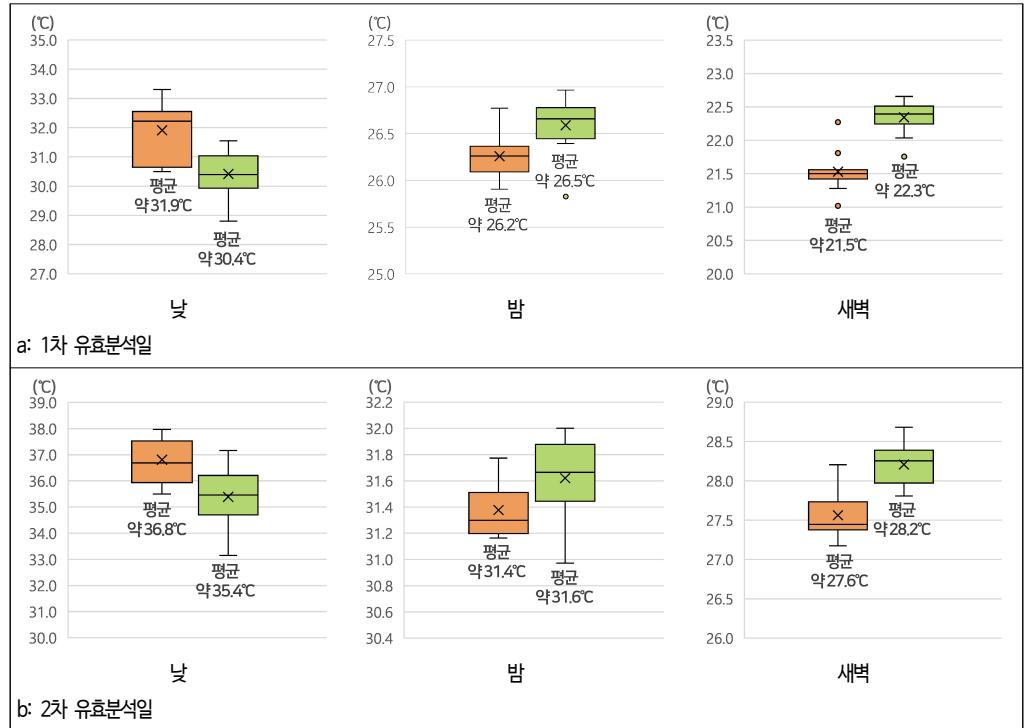


그림 5. 단독수 식재 수종별 기온 분포 비교

범례: 단풍나무, 느티나무

석일에서 일관되었다. 이러한 수종 차이에 따른 기온 경향을 정량적으로 비교하기 위해 단풍나무와 느티나무 각각에 대한 객체 특성 변수 간의 상관관계를 검토하고, 기온과의 관계를 분석하기 위한 회귀분석 변수를 선정하였다.

단풍나무 객체 특성 변수 간 상관분석 결과, 수고와 지하고 간에는 높은 양의 상관관계가 확인되었다($r = 0.737$, $p < 0.01$)(표 2 참조). 또한 지하고는 흉고직경($r = 0.615$, $p < 0.05$) 및 수관면적($r = 0.624$, $p < 0.05$)과도 유의한 상관성을 보였다. 반면 흉고직경과 수관면적 간 상관성은 낮게 나타났다($r = 0.141$). 선행연구에서 제시된 바와 같이, 수관 차폐나 수고, 지하고와 같이 그들 생성에 직접적으로 연관된 변수들이 기온 저감에 보다 핵심적인 역할을 하며, 흉고직경의 경우 태양복사 차단, 그늘제공 등 기온 저감에 미치는 영향을 직접적으로 설명하기에 한계가 있다. 이에 흉고직경은 회귀분석에서 제외하고 수고, 지하고, 수관면적 변수를 최종 분석에 활용하였다.

느티나무 객체 특성 변수 간 상관분석 결과, 수고와 수관면적($r = 0.786$, $p < 0.01$), 흉고직경과 수관면적($r = 0.829$, $p < 0.01$) 간에 강한 양의 상관관계가 확인되었다(표 3 참조). 반면 지하고는 다른 구조 변수들과의 상관성이 낮아 상대적으로 독립적인 특성을 보였다. 이러한 결과는 느티나무에서 수고, 수관면적, 흉고직경이 수목의 규모를 반영하는 변수임을 시사한다. 기온 저감에는 그늘 제공과 직접적으로 연관된 변수들이 보다 중요한 역할을 한다

표 2. 단풍나무 변수 간 상관관계

구분	수고(cm)	지하고(cm)	흉고직경(cm)	수관면적(m ²)
수고	1			
지하고	0.737**	1		
흉고직경	0.564	0.615*	1	
수관면적	0.588	0.624*	0.141	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

표 3. 느티나무 변수 간 상관관계

구분	수고(cm)	지하고(cm)	흉고직경(cm)	수관면적(m ²)
수고	1			
지하고	0.531	1		
흉고직경	0.496	0.014	1	
수관면적	0.786*	0.369	0.829*	1

* $p < 0.01$

는 점을 고려하여 수목의 규모를 반영하는 변수 중 그늘 형성이나 공간 구조를 직접적으로 설명하기 어려운 흉고 직경을 제외하였다. 최종적으로는 수고, 지하고, 수관면적을 느티나무의 기하학적 특성을 대표하는 변수로 선정하여 기온과의 관계를 분석하였다.

시간대별 회귀분석 결과, 낮 시간대는 대부분의 분석 시점과 수종에서 상대적으로 높은 설명력을 보여 수목 객체 특성 변수가 기온 변동을 설명하는 주요 시간대로 나타났다. 낮 시간대 회귀모형의 설명력은 단풍나무와 느티나무 각각에서 1차 유효분석일에 10.8%, 18.4%, 1차 폭염일에 32.3%, 59.7%, 2차 유효분석일에 20.8%, 49%, 2차 폭염일에 40.9%, 66.9%로 나타났으며, 특히 2차 유효분석일과 폭염일에서 설명력이 증가하는 경향을 보였다. 반면 밤에는 모든 분석시기에서 1차 폭염일을 제외하고 0.9-7.1%, 새벽 시간대에서는 1차 폭염일과 2차 폭염일을 제외하고 1.4-6.8%로 전반적으로 유의하지만 설명력이 낮아 수목의 기하학적 특성과 기온의 관계가 제한적인 것으로 판단되었다. 이에 따라 본 연구에서는 설명력이 일관되게 높게 나타난 낮 시간대를 중심으로 수목 구조에 따른 기온 저감 효과를 해석하였으며, 밤과 새벽 시간대는 경향성 파악 수준에서 해석하였다. 다만 폭염일의 일부 새벽 시간대에서는 상대적으로 높은 설명력이 관찰되었으나, 이는 특정일자에 국한된 결과이므로 일반적 경향으로 해석하기에는 한계가 있다. 또한 1차 유효분석일 낮 시간대에서 회귀모형의 설명력이 다른 시기에 비해 상대적으로 낮게 나타난 것은 해당 시기가 상대적으로 기온이 낮아 태양복사에 따른 열 영향이 약했기 때문으로 판단된다. 반면 기온이 상대적으로 높았던 2차 유효분석일과 폭염 사례일에서는 수목 객체 특성 변수의 설명력이 증가하였으며(R^2 최대 0.669), 이는 열환경이 강하게 형성되는 조건에서 수관 차폐 및 기하학적 특성에 따른 기온 저감 효과가 크기 때문으로 해석된다.

단풍나무의 경우, 낮 시간대에 유의하게 나타난 변수를 살펴보면 지하고와 수관면적이 기온과 음의 관계를 보여, 수관이 크고 지하고가 높을수록 기온이 하강하는 경향이 확인되었다(표 4 참조). 수관면적의 상대적 영향력은 관측 시기에 따라 차이를 보였는데, 1차 관측시기에는 지하고가 수관면적보다 큰 영향을 나타낸 반면(표준화계수: 1차 유효분석일 지하고 $\beta = -0.231$, 수관면적 $\beta = -0.197$; 1차 폭염일 지하고 $\beta = -0.461$, 수관면적 $\beta = -0.219$), 2차 관측시기에는 수관면적의 영향이 가장 크게 나타났다(표준화계수: 2차 유효분석일 지하고 $\beta = -0.232$, 수관면적 $\beta = -0.449$; 2차 폭염일 지하고 $\beta = -0.354$, 수관면적 $\beta = -0.585$). 이러한 결과는 고온 시기에 수관 면적이 기온에 미치는 영향이 커짐을 시사한다. 밤 시간대에는 모든 시기에서 수고가 기온과 양의 관계를 보였으며 2차 유효분석일과 2차 폭염일에서는 수관면적이 기온과 음의 관계를 나타냈고, 새벽 시간대에서도 수고가 기온과 양의 관계를 보였다.

느티나무의 경우, 낮 시간대에 유의하게 나타난 변수를 살펴보면 수고는 기온과 양의 관계를, 수관면적은 기온과 음의 관계를 일관되게 나타내며 수관 규모가 크고 수고가 낮을수록 기온이 하강하는 경향이 확인되었다(표 5 참조). 특히 수관면적은 모든 분석 시점에서 가장 큰 영향력을 미쳤으며(표준화계수: 1차 유효분석일 $\beta = -0.672$; 1차 폭염일 $\beta = -1.159$; 2차 유효분석일 $\beta = -0.988$; 2차 폭염일 $\beta = -1.199$), 수고 또한 수관면적 다음으로 큰 영향을 보여 느티나무의 낮 시간대 기온 상승을 설명하는 주요 구조 변수로 작용하였다. 지하고의 경우, 1차 관측에서는 유의하지 않았으나 2차 관측의 낮 시간대에서 양의 영향이 유의하게 나타났다($\beta = 0.34, p < 0.001$). 이는 고온 시기에 지하고가 높을수록 낮 시간대 기온이 상승하는 수목의 기하학적 특성의 영향이 커짐을 의미한다. 밤 시간대에는 수고가 양의 관계를, 수관면적은 음의 관계를 나타냈으며, 지하고는 1차 관측에서는 음, 2차 관측에서는 양의 관계로 전환되었고 2차 폭염일에서는 유의하지 않았다. 새벽 시간대에는 1차 유효일을 제외한 모든 시점에서 수관면적이 양의 관계를 보였으며, 수고는 2차 관측 시기에 음의 관계를 나타냈다.

3.2.2 단독수 식재의 기온 저감 효과 종합

단풍나무와 느티나무를 대상으로 한 단독수 식재의 회귀분석 결과를 종합하면, 두 수종 모두에서 기하학적 특성은 낮 시간대의 기온 영향을 설명하는 주요 요인으로 작용하였으며, 야간과 새벽 시간대에서는 그 영향이 상대적으로 약한 것으로 나타났다. 이는 태양복사에 따른 열부하가 크게 작용하는 주간 시간대에서 수목 구조에 따른 차폐

표 4. 단풍나무 객체 특성과 기온의 회귀분석

구분	독립변수	B	S.E.	Beta(β)	t	R ²	
1차 유효 분석일	낮	(상수)	34.089	0.251		135.652	0.111***
		수고	0.001	0.000	0.077	1.832	
		지하고	-0.008	0.001	-0.231	-5.328***	
		수관면적	-0.021	0.004	-0.197	-5.445***	
	밤	(상수)	25.528	0.232		109.815	0.011**
		수고	0.001	0.000	0.113	2.563*	
		지하고	0.000	0.001	0.016	0.359	
		수관면적	-0.004	0.004	-0.042	-1.100	
	새벽	(상수)	20.534	0.294		69.737	0.012**
		수고	0.001	0.000	0.085	1.939	
		지하고	0.001	0.002	0.024	0.520	
		수관면적	0.001	0.005	0.010	0.257	
1차 고온일	낮	(상수)	36.870	0.463		79.633	0.323***
		수고	0.001	0.001	0.074	0.664	
		지하고	-0.010	0.003	-0.461	-4.014***	
		수관면적	-0.016	0.007	-0.219	-2.285*	
	밤	(상수)	26.149	0.276		94.735	0.071*
		수고	0.001	0.000	0.304	2.336*	
		지하고	0.000	0.002	0.011	0.078	
		수관면적	-0.004	0.004	-0.093	-0.824	
	새벽	(상수)	22.703	0.110		206.426	0.198***
		수고	0.001	0.000	0.563	4.661***	
		지하고	-0.001	0.001	-0.184	-1.468	
		수관면적	0.000	0.002	0.000	-0.001	
2차 유효 분석일	낮	(상수)	37.774	0.178		212.114	0.208***
		수고	0.002	0.000	0.329	8.330***	
		지하고	-0.006	0.001	-0.232	-5.686***	
		수관면적	-0.036	0.003	-0.449	-13.152***	
	밤	(상수)	30.799	0.124		249.101	0.043***
		수고	0.001	0.000	0.271	6.251***	
		지하고	0.000	0.001	-0.029	-0.656	
		수관면적	-0.008	0.002	-0.149	-3.960***	
	새벽	(상수)	26.726	0.103		259.854	0.068***
		수고	0.001	0.000	0.223	5.210***	
		지하고	0.000	0.001	0.023	0.519	
		수관면적	0.001	0.002	0.031	0.842	
2차 폭염일	낮	(상수)	39.454	0.382		103.154	0.409***
		수고	0.002	0.001	0.384	3.701***	
		지하고	-0.007	0.002	-0.354	-3.302**	
		수관면적	-0.038	0.006	-0.585	-6.522***	
	밤	(상수)	32.007	0.343		93.316	0.102**
		수고	0.002	0.001	0.454	3.553**	
		지하고	-0.003	0.002	-0.194	-1.464	
		수관면적	-0.012	0.005	-0.242	-2.190*	
	새벽	(상수)	27.887	0.109		255.327	0.261***
		수고	0.001	0.000	0.674	5.816***	
		지하고	-0.001	0.001	-0.195	-1.628	
		수관면적	-0.001	0.002	-0.079	-0.789	

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

표 5. 느티나무 객체 특성과 기온의 회귀분석

구분	독립변수	B	S.E	Beta(β)	t	R ²	
1차 유효 분석일	낮	(상수)	28.489	0.312		91.334	0.187***
		수고	0.003	0.000	0.404	8.242***	
		지하고	0.000	0.000	0.038	1.180	
		수관면적	-0.024	0.002	-0.672	-15.035***	
	밤	(상수)	25.542	0.313		81.503	0.027***
		수고	0.002	0.000	0.258	4.813***	
		지하고	-0.001	0.000	-0.103	-2.880**	
		수관면적	-0.008	0.002	-0.236	-4.832***	
	새벽	(상수)	22.580	0.394		57.368	0.010*
		수고	0.000	0.000	0.003	0.054	
		지하고	-0.001	0.000	-0.094	-2.616**	
		수관면적	0.003	0.002	0.083	1.683	
1차 고온일	낮	(상수)	30.290	0.444		68.203	0.597***
		수고	0.003	0.001	0.601	5.721***	
		지하고	0.001	0.001	0.087	1.251	
		수관면적	-0.027	0.002	-1.159	-12.096***	
	밤	(상수)	26.311	0.370		71.026	0.197***
		수고	0.002	0.000	0.570	3.843***	
		지하고	-0.001	0.000	-0.229	-2.324*	
		수관면적	-0.009	0.002	-0.664	-4.909***	
	새벽	(상수)	24.404	0.219		111.548	0.293***
		수고	0.000	0.000	-0.112	-0.804	
		지하고	-0.002	0.000	-0.547	-5.914***	
		수관면적	0.003	0.001	0.306	2.407*	
2차 유효 분석일	낮	(상수)	31.442	0.223		141.107	0.489***
		수고	0.004	0.000	0.611	15.712***	
		지하고	0.004	0.000	0.342	13.235***	
		수관면적	-0.031	0.001	-0.988	-27.881***	
	밤	(상수)	30.806	0.176		175.326	0.036***
		수고	0.001	0.000	0.199	3.726***	
		지하고	0.001	0.000	0.099	2.777**	
		수관면적	-0.004	0.001	-0.246	-5.044***	
	새벽	(상수)	28.664	0.137		208.922	0.054***
		수고	-0.001	0.000	-0.288	-5.452***	
		지하고	0.000	0.000	0.085	2.410*	
		수관면적	0.005	0.001	0.361	7.486***	
2차 폭염일	낮	(상수)	32.607	0.458		71.185	0.669***
		수고	0.004	0.001	0.730	7.666***	
		지하고	0.003	0.001	0.335	5.292***	
		수관면적	-0.032	0.002	-1.199	-13.809***	
	밤	(상수)	31.901	0.506		63.036	0.017
		수고	0.001	0.001	0.181	1.102	
		지하고	0.000	0.001	0.037	0.337	
		수관면적	-0.003	0.003	-0.180	-1.202	
	새벽	(상수)	29.441	0.248		118.777	0.114**
		수고	-0.001	0.000	-0.436	-2.795**	
		지하고	0.000	0.000	0.022	0.215	
		수관면적	0.005	0.001	0.549	3.860***	

*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001

및 공간적 특성이 기온에 직접적인 영향을 미침을 의미한다(조현민과 권태경, 2022; Cai et al., 2025).

두 수종에서 공통적으로 가장 중요하게 나타난 변수는 수관면적으로, 모든 분석 시점의 낮 시간대에서 기온과 음의 관계를 나타내며 가장 큰 영향력을 보였다. 이는 수관면적이 넓을수록 그들의 범위가 확대되어 지표면과 보행 공간으로 유입되는 단파복사를 효과적으로 차단하기 때문으로 해석된다(박수국 등, 2017). 이러한 결과는 수관 규모가 도시 열환경 개선에 핵심적인 역할을 한다는 선행연구의 결과와도 일치하며(Wang and He, 2024), 단독수 식재에 있어 수관면적이 넓은 수목이 기온 저감 효과를 극대화하는 핵심 요소임을 시사한다.

수고는 두 수종 모두에서 낮 시간대 기온과 양의 관계를 나타냈으나, 수관면적 및 다른 변수들과의 유의한 상관성을 통해 수목의 전체적인 규모와 수관의 공간적 위치를 반영하는 변수로 해석된다. 이는 수고가 수관 차폐 효과를 직접적으로 설명하기보다는, 태양복사에 노출되는 수관의 높이와 이에 따른 열 축적 조건을 간접적으로 반영함을 시사한다. 반면 지하고의 영향은 수종에 따라 상이하게 나타났다. 낮 시간대의 회귀분석 결과, 단풍나무는 지하고가 기온과 음의 관계를 보여 지하고가 높을수록 기온이 하강하는 경향이 확인되었다. 느티나무는 지하고와 양의 관계를 보였으며 고온 시기에 그 영향이 뚜렷하게 나타나 지하고가 낮을수록 기온이 하강하는 경향을 보였다. 이는 단풍나무가 상대적으로 수고와 지하고가 낮고 수관이 넓은 수형 특성을 가지기 때문에 지하고가 낮아질 경우 수관 하부에서 공기 순환이 정체되어 열이 축적될 가능성이 커지기 때문으로 해석된다(Rahman et al., 2018). 느티나무의 경우, 수고와 지하고가 높은 수종 특성을 가져 지하고가 상승할수록 수관 하부 공간에서의 지표면의 냉각 및 수관의 증산작용에 의한 기온 저감 효과가 공기 대류에 의해 상쇄되기 때문으로 판단된다.

종합했을 때 단독수 식재를 통한 낮 시간대 기온 저감을 위해서는 넓은 수관면적을 확보하는 것이 가장 효과적이며, 지하고의 경우 수종별 특성에 따른 차이를 고려할 필요가 있다.

3.3 군집 식재의 기온 저감 효과

3.3.1 군집 식재의 열환경 특성 및 영향 요인 분석

군집 식재의 열환경 특성을 분석하기 위해 성서체육공원 내에 위치한 관측 지점의 수목 및 공간 특성과 기온 간의 관계를 분석하였다. 군집 식재의 특성을 반영하기 위해, 각 측정지점 변경 약 5m 범위의 수목을 대상으로 수목 특성 관련 변수의 합계 및 평균을 산정하였으며, 군집 환경의 영향을 포함하기 위해 측정지점으로부터 변경 10m 범위의 공간자료를 활용하였다. 군집 식재 관측 지점의 서로 다른 공간적 특성을 일반화하여 해석하기 위해 지하고, 수고, SVF, 수관 밀도, LAI, 녹지량, 잔디피복 면적, 불투수포장 면적 등 10개의 군집 특성 변수들을 활용하여 계층적 군집분석을 통해 3개의 그룹으로 분류하였다(표 6 참조). 계층적 군집분석 결과, 그룹이 단일 관측 지점으로만 구성될 경우 군집의 수목 및 공간 구조적 특성을 대표하기 어려우므로 각 군집이 최소 2개 이상의 관측 지점을 포함하도록 기준을 설정하였다. 그 결과, 3개 그룹으로 구분되었을 때 수목 특성과 주변 공간 구조에서 서로 다른 특성이 비교적 명확하여 이를 최종 그룹으로 선정하였다. A그룹은 2번, 4번 지점, B그룹은 1번, 3번, 6번 지점, C그룹은 5번, 7번 지점으로 구분되었다.

그룹별 기온 차이를 검증하기 위해 분산분석(ANOVA)을 실시한 결과, 모든 관측 시기의 낮 시간대에서는 군집 유형에 따른 기온 차이가 통계적으로 유의하게 나타났다(1차 유효분석일 $F = 11.542, p < 0.001$; 1차 폭염일 $F = 53.314, p < 0.001$; 2차 유효분석일 $F = 216.152, p < 0.001$; 2차 폭염일 $F = 41.222, p < 0.001$). 반면 밤과 새벽 시간대에서는 기온 차이가 감소하며 일부 시간대(1차 유효분석일 밤 $F = 0.596, p = 0.552$; 1차 유효분석일 새벽 $F = 1.390, p = 0.253$; 2차 폭염일 밤 $F = 1.225, p = 0.299$)에서 유의성이 나타나지 않았다.

Scheffé 사후검정을 통해 군집 유형별 기온 분포를 비교한 결과, 낮 시간대에는 모든 관측 시기에서 B그룹의 기

표 6. 군집 식재 그룹별 특성 평균

그룹	관측 지점	주요 수종	본수	흉고직경 (cm)	지하고 (cm)	수고 (cm)	SVF	수관밀도 (%)	LAI 지수	녹지량	잔디피복 면적 (㎡)	불투수포장 면적 (㎡)
A그룹	2	배롱나무	11.3	2.5	255.0	582.5	56.2	43.8	0.7	231.2	203.2	111.0
	4	이팝나무, 산수유										
B그룹	1	가시나무, 종가시나무	18.7	6.7	405.0	1020.7	26.2	73.8	1.8	288.6	263.6	50.5
	3	곰솔, 단풍나무										
	6	중국단풍, 자두나무, 감나무										
C그룹	5	스트로브잣나무, 이팝나무	25.0	8.5	491.3	1512.6	31.9	68.2	1.5	309.6	314.2	0.0
	7	메타세쿼이아, 스트로브잣나무										

온이 가장 낮고, C그룹, A그룹 순으로 기온이 높아지는 경향이 일관되게 확인되었다(표 7 참조). 특히 1차 유효분 석일 및 폭염일에서 평균 기온이 B그룹에서는 29.97°C, 31.47°C, A그룹에서는 31.40°C, 32.90°C로 약 1.43°C의 차이를 보였다. 2차 유효분석일 및 폭염일에서도 유사한 경향이 나타났으며, 평균 기온이 B그룹에서는 34.74°C, 35.30°C, A그룹에서는 35.89°C, 36.41°C로 나타나 약 1.11~1.15°C의 차이를 보이며 군집 유형에 따른 열환경 차이가 존재했다. 이러한 결과는 B그룹이 상대적으로 SVF가 낮고 불투수포장 면적이 적으며, 지하고가 상대적으로 높게 나타난 구조적 특성을 가져, 태양복사 유입이 제한되고 열 축적이 완화된 것으로 해석된다. 반면 A그룹은 SVF가 높고 불투수포장 비율이 상대적으로 커, 낮 시간대 태양복사 유입과 지표면 열 축적의 영향이 크게 작용하면서 높은 기온을 보인 것으로 판단된다. 밤과 새벽 시간대에는 낮과는 상반된 경향이 일부 관측 시기에서 나타났다. 밤과 새벽 시간대에는 A그룹이 B, C그룹에 비해 상대적으로 낮은 기온을 보였으며, 이는 A그룹이 높은 SVF를 가져 장파복사 방출이 보다 원활하게 이루어졌기 때문으로 해석된다. 다만 이 시간대에서는 군집 간 평균 기온 차이가 낮 시간대에 비해 크지 않았으며, 일부 시기에서는 통계적 유의성이 확보되지 않아 군집 식재에 따른 열환경 효과를 일반화하여 해석하기에는 한계가 있다.

종합하면, 낮 시간대에는 낮은 SVF와 낮은 불투수포장 면적을 중심으로 한 공간 구조가 기온 저감에 가장 큰 영향을 미친 반면, 밤과 새벽 시간대에는 높은 SVF에 따른 장파복사 방출 특성이 기온 형성에 상대적으로 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 이때 군집 식재에 따른 열환경 차이는 태양복사의 영향이 지배적인 낮 시간대에서 가장 뚜렷하게 나타났으며, 이에 따라 군집 식재의 열환경 효과에 대한 해석은 낮 시간대를 중심으로 수행하는 것이 타당하다. 야간 및 새벽 시간대의 결과는 보조적인 경향 파악 수준에서 해석하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

군집 식재 특성 변수와 기온 간의 관계를 정량적으로 분석하기에 앞서 변수 간 구조적 연관성을 파악하고 다중

표 7. 군집 식재 그룹 특성에 따른 시간대별 평균 기온 ANOVA 분석

구분		A	B	C	F	
1차 관측	유효 분석일	낮	31.40 ^b	29.97 ^a	30.64 ^a	11.542 ^{***}
		밤	25.33 ^a	25.70 ^a	25.58 ^a	0.596
		새벽	20.17 ^a	20.77 ^a	20.90 ^a	1.390
	고온일	낮	32.90 ^c	31.47 ^a	32.36 ^b	53.314 ^{***}
		밤	25.47 ^a	25.74 ^a	25.77 ^a	3.251 [*]
		새벽	18.28 ^a	18.98 ^b	19.15 ^b	46.288 ^{***}
2차 관측	유효 분석일	낮	35.89 ^b	34.74 ^a	34.83 ^a	216.152 ^{***}
		밤	30.74 ^a	30.88 ^b	30.58 ^a	8.947 ^{***}
		새벽	26.45 ^a	26.86 ^b	26.73 ^b	20.232 ^{***}
	폭염일	낮	36.41 ^b	35.30 ^a	35.44 ^a	41.222 ^{***}
		밤	30.94 ^a	31.13 ^a	30.84 ^a	1.225
		새벽	27.77 ^a	28.16 ^b	28.04 ^b	10.555 ^{***}

a,b,c: Scheffé's post-hoc test

* $p < 0.05$, *** $p < 0.001$

표 8. 군집 식재 변수 간 상관관계

구분	흉고직경 (cm)	수목량	지하고 (cm)	수고 (cm)	SVF	수관밀도 (%)	LAI 지수	녹지량	잔디피복 (m ²)	불투수포장 (m ²)
흉고직경	1									
수목량	0.541	1								
지하고	0.850 [*]	0.675	1							
수고	0.933 ^{**}	0.616	0.731	1						
SVF	-0.401	-0.736	-0.279	-0.499	1					
수관밀도	0.401	0.736	0.279	0.499	-1.000 ^{**}	1				
LAI	0.256	0.739	0.187	0.402	-0.978 ^{**}	0.978 ^{**}	1			
녹지량	0.841 [*]	0.683	0.661	0.885 ^{**}	0.091	-0.091	0.030	1		
잔디피복	0.845 [*]	0.413	0.730	0.734	0.363	-0.363	-0.381	0.815 [*]	1	
불투수포장	-0.845 [*]	-0.413	-0.730	-0.734	-0.363	0.363	0.381	-0.815 [*]	-1.000 ^{**}	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

공선성 가능성을 검토하기 위해 상관분석을 실시하였다(표 8 참조). 분석 결과, 흉고직경은 지하고, 수고와 높은 양의 상관관계를 보여 수목의 규격을 중복되게 나타내는 변수로 판단되었으며, 녹지량과 잔디피복 면적, 불투수포장 면적은 서로 높은 상관성을 나타내었는데, 이 중 열환경 완화 및 악화 관계를 가장 직접적으로 해석할 수 있는 불투수포장 면적을 회귀분석 변수로 선정하였다. SVF는 수관밀도와 음의 상관관계를 보이며 상부 공간의 개방과 차폐 정도를 설명하며, 공간적 특성을 반영하기에 더 효과적이라 판단된 SVF를 최종 변수로 선정하였다. 이러한 변수 간 상관구조를 종합적으로 고려한 결과, 본 연구에서는 수목의 수직적 구조 특성을 대표하는 지하고와 수고, 군집 상부 특성을 반영하는 SVF, 지표면 열 특성을 설명하는 불투수포장 면적을 군집 식재의 열환경 특성을 설명하기 위한 최종 회귀분석 변수로 선정하였다.

낮, 밤, 새벽 시간대별 회귀분석 결과, 군집 식재에서도 낮 시간대에서 전반적으로 높은 설명력이 나타나, 군집 특성 변수가 기온 변동을 설명하는 주요 시간대로 확인되었다(표 9 참조). 낮 시간대 회귀모형의 설명력은 1차 유효분석일 22.7%, 1차 폭염일 80.4%, 2차 유효분석일 50.1%, 2차 폭염일 61.9%로 나타났으나, 밤과 새벽 시간대에서는 낮 시간대에 비해 설명력이 감소하는 경향을 보였다. 그중 2차 폭염일 새벽 시간대에서는 설명력이 66.9%로 나타나 기온이 높은 조건에서 군집 식재 특성이 밤·새벽 시간대 기온에도 영향을 미칠 수 있음을 보였지만, 이러한 결과는 폭염일 하루의 결과에서 나타난 특성이므로 일반적인 경향으로 해석하기에는 한계가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 설명력이 일관되게 높게 나타난 낮 시간대를 중심으로 군집 식재의 기온 저감 효과를 분석하였으며, 밤과 새벽 시간대의 결과는 고온 조건에서 나타나는 보조적인 경향으로 제한적으로 해석하였다.

표 9. 군집 식재 특성과 기온의 회귀분석

구분	독립변수	B	S.E.	Beta(β)	t	R ²	
1차 유효 분석일	낮	(상수)	30.733	0.375		81.904**	0.227**
		지하고	-0.006	0.001	-0.389	-7.696**	
		수고	0.000	0.000	0.085	0.095	
		SVF	0.048	0.004	0.485	11.776**	
		불투수포장면적	0.006	0.002	0.204	3.825**	
	밤	(상수)	24.234	0.443		54.754	0.019
		지하고	0.002	0.001	0.144	0.520	
		수고	0.000	0.000	0.069	1.209	
		SVF	-0.002	0.005	-0.016	-0.342	
		불투수포장면적	0.003	0.002	0.105	1.750	
	새벽	(상수)	20.239	0.508		39.835	0.034**
		지하고	0.003	0.001	0.143	2.529*	
		수고	0.000	0.000	0.046	0.811	
		SVF	-0.007	0.006	-0.061	-1.137	
		불투수포장면적	-0.002	0.002	-0.060	-1.010	
1차 고온일	낮	(상수)	32.126	0.312		102.993**	0.804**
		지하고	-0.007	0.001	-0.838	-10.898**	
		수고	0.001	0.000	0.401	5.210**	
		SVF	0.047	0.003	0.863	13.785	
		불투수포장면적	0.001	0.001	0.397	4.914**	
	밤	(상수)	24.665	0.384		64.175	0.098*
		지하고	0.002	0.001	0.370	2.241*	
		수고	0.000	0.000	0.113	0.685	
		SVF	0.003	0.004	0.089	0.661	
		불투수포장면적	0.002	0.002	0.186	1.074	
	새벽	(상수)	21.564	0.240		89.993	0.583**
		지하고	0.002	0.001	0.465	4.147**	
		수고	0.000	0.000	0.205	1.820	
		SVF	-0.002	0.003	-0.056	-0.615	
		불투수포장면적	-0.002	0.001	-0.236	-2.003*	

표 9. 계속

구분	독립변수	B	S.E.	Beta(β)	t	R ²	
2차 유효 분석일	낮	(상수)	34.86	0.170		204.992**	0.501**
		지하교	-0.002	0.000	-0.170	-4.183**	
		수교	-0.001	0.000	-0.254	-6.231**	
		SVF	0.030	0.002	0.537	16.228**	
		불투수포장면적	0.009	0.001	0.509	11.899**	
	밤	(상수)	28.325	0.202		140.125	0.213**
		지하교	0.004	0.000	0.475	9.360**	
		수교	0.000	0.000	0.117	2.290*	
		SVF	0.003	0.002	0.051	1.222	
		불투수포장면적	0.010	0.001	0.648	12.078**	
	새벽	(상수)	24.839	0.188		132.110	0.178**
		지하교	0.003	0.000	0.394	7.561**	
		수교	0.000	0.000	0.218	4.165**	
		SVF	0.003	0.002	0.069	1.631	
		불투수포장면적	0.004	0.001	0.293	5.345**	
2차 폭염일	낮	(상수)	35.62	0.365		97.481**	0.619**
		지하교	-0.002	0.001	-0.255	-2.376**	
		수교	-0.001	0.000	-0.253	-2.353**	
		SVF	0.025	0.004	0.551	6.311**	
		불투수포장면적	0.008	0.002	0.556	4.929**	
	밤	(상수)	28.047	0.508		55.246	0.352**
		지하교	0.004	0.001	0.567	4.059**	
		수교	0.001	0.000	0.290	2.070*	
		SVF	-0.001	0.006	-0.018	-0.156	
		불투수포장면적	0.013	0.002	0.874	5.945**	
	새벽	(상수)	26.081	0.186		140.527	0.669**
		지하교	0.004	0.000	0.871	8.727**	
		수교	0.000	0.000	0.325	3.251**	
		SVF	0.003	0.002	0.102	1.255	
		불투수포장면적	0.005	0.001	0.616	5.866**	

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

낮 시간대 회귀분석 결과, SVF, 지하교, 불투수포장 면적은 대부분의 분석 시기에서 통계적으로 유의한 변수로 도출되었다. 1차 관측 결과를 살펴보면, 유효분석일 낮 시간대에서 SVF가 가장 큰 영향력을 보여($\beta = 0.485, p < 0.001$) SVF가 낮을수록 기온이 저감되는 경향을 보였다. 지하교는 기온과 음의 관계를 나타내 지하교가 높을수록 기온이 저감되는 경향이 확인되었고($\beta = -0.389, p < 0.001$), 불투수포장 면적은 기온과 양의 관계를 보이며($\beta = 0.204, p < 0.01$) 지표면 특성이 낮 시간대 기온 형성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 폭염일 낮 시간대에서는 이러한 경향이 더욱 강화되었으며 동일하게 SVF의 영향력이 가장 크게 나타났다. 지하교와 불투수포장 면적은 1차 유효분석일과 동일하게 양의 관계를 보였으며, 추가적으로 수교가 기온과 양의 관계로 유의하게 나타났다. 2차 관측 결과에서도 유사한 결과를 보였으나, 변수의 영향력에 차이가 나타났다. 2차 유효분석일 낮 시간대에서 SVF는 여전히 가장 큰 영향력을 보였으며($\beta = 0.537, p < 0.001$), 불투수포장 면적의 영향은 1차 관측에 비해 크게 증가하여 낮 기온 상승에 대한 주요 설명 변수로 작용하였다($\beta = 0.509, p < 0.001$). 지하교는 기온과 음의 관계를 유지하였으나($\beta = -0.170, p < 0.01$), 수교는 1차 관측과 달리 음의 관계를 보였다. 2차 폭염일 낮 시간대에서도 유사한 경향이 확인되었으며, SVF($\beta = 0.551, p < 0.001$)와 불투수포장 면적($\beta = 0.556, p < 0.001$)의 영향이 크게 나타났고, 지하교는 기온과 음의 관계를 유지하였다. 이러한 결과는 군집 식재지에서 낮 시간대 기온 형성에 있어 상부 차폐 구조(SVF)와 지표면 열 특성(불투수포장 면적), 그리고 수관 하부 공간 구조(지하교)가 복합적으로 작용함을 의미한다. 특히 기온이 상대적으로 낮았던 1차 관측에서는 SVF의 영향이 지배적으로 나타난 반면, 기온이

상승한 2차 관측 및 폭염일에서는 불투수포장 면적의 영향이 함께 증가하는 경향을 보여, 고온 조건에서 지표면 열 축적 효과가 더욱 중요해짐을 시사한다.

밤과 새벽 시간대의 회귀분석 결과는 낮 시간대에 비해 전반적으로 설명력이 낮고 기온의 변동 폭 또한 제한적 이므로, 본 연구에서는 밤과 새벽 시간대의 분석 결과를 군집 식재의 열환경 특성을 보조적으로 이해하기 위한 경 향 수준의 결과로 해석하였다. 1차 관측에서는 밤과 새벽 시간대 모두에서 유의하게 도출된 변수가 제한적이었으 며, 특히 1차 관측의 밤 시간대에서는 통계적으로 유의한 회귀모형이 도출되지 않았다. 이 시기에는 지하교와 불투 수포장 면적이 일부 시간대에서만 유의하게 나타났으며, 변수의 영향력 또한 전반적으로 크지 않았다. 이는 1차 관 측이 상대적으로 기온이 낮은 조건에서 이루어져, 낮 동안 축적된 열이 야간까지 지속적으로 영향을 미치지 못했기 때문으로 해석된다. 2차 관측에서는 밤과 새벽 시간대에 유의하게 나타나는 변수가 증가하였으며, 불투수포장 면적, 지하교, 수고가 반복적으로 유의하게 도출되었다. 이는 2차 관측이 상대적으로 고온 조건에서 수행되어, 낮 동안 축 적된 열이 야간과 새벽까지 지속되면서 군집 식재 특성이 기온 형성에 보다 명확하게 반영된 결과로 판단된다. 2차 관측에서 불투수포장 면적은 밤 시간대에 가장 큰 영향력을 보였는데, 이는 낮 시간대에 가열된 불투수 표면이 야 간에 열을 방출하면서 주변 기온을 유지하거나 상승시키는 열 저장 효과가 크게 작용했기 때문으로 해석되며, 새벽 시간대에는 불투수포장 면적의 영향이 지하교보다 작게 나타나 지표면의 열 방출 이후의 공기 순환 구조가 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

3.3.2 군집 식재의 기온 저감 효과 종합

군집 식재를 대상으로 한 분석 결과를 종합하면, 군집 식재의 열환경은 낮 시간대에서 군집 구조 특성에 따라 뚜렷한 기온 차이를 보였으나, 밤과 새벽 시간대에서는 그 영향이 상대적으로 약하게 나타났다. 이는 낮 시간대의 태양복사에 의한 열부하가 군집 특성과 지표면 특성이 기온에 직접적인 영향을 미치지 때문으로 해석된다.

군집 식재에서 가장 중요한 변수는 SVF로, 모든 관측 시기의 낮 시간대에서 기온과 양의 관계를 나타내며 가장 큰 영향력을 나타냈다. 이는 SVF가 낮을수록 수관에 의한 차폐 효과가 강화되어 지표면으로 유입되는 단파복사가 효과적으로 차단되기 때문으로 판단된다(박수국 등, 2017; Yao et al., 2025). 불투수포장 면적 또한 낮 시간대에서 기온과 양의 관계를 보였으며, 특히 기온이 높았던 2차 관측 및 폭염일에서는 영향력이 증가하며 고온 시기에서의 핵심적인 기온 상승 요소로 나타났다. 이는 불투수포장이 태양복사를 흡수 및 저장한 후 재방출함으로써 군집 식재 내부의 열 축적을 가중시키고, 수관 차폐 효과 이상의 열부하를 형성하기 때문으로 해석된다(송봉근과 박경훈, 2014; Kim et al., 2018; 조현민과 권태경, 2022). 지하교는 낮 시간대에서 일관되게 기온과 음의 관계를 보여, 수관 하부 공간이 확보될수록 기온이 저감되는 경향이 확인되었다. 이는 군집 식재에서 수관 하부의 통풍 조건과 공기 순환 구조가 기온 형성에 중요한 역할을 함을 의미한다. 특히 1차 관측에서 2차 관측으로 갈수록 야간·새벽 시간대에 기온 형성에 영향을 미치는 요인이 증가한 것은, 주간 축적된 열이 야간 열환경에 지속적으로 작용했음을 시사한다(박 수국 등, 2017; Rahman et al., 2018; Chu et al., 2024). 반면 수고는 관측 시기별로 영향 방향이 달라 일관된 경 향을 보이지 않았으며, 군집 식재에서 수고는 다른 변수들과 결합된 보조적 요인으로 작용하는 것으로 해석된다.

밤 및 새벽 시간대에서는 낮 시간대에 비해 변수의 영향이 제한적으로 나타났으나, 고온 시기인 2차 관측에서 불투수면적의 영향이 상대적으로 커지는 경향을 확인하였다. 이는 기온이 높은 조건일수록 낮 동안 가열된 지표면 의 열 축적 효과가 밤과 새벽에까지 지속됨을 의미한다. 밤 시간대에는 불투수포장 면적이 주로 양의 영향을 보이며 낮 동안 가열된 지표면에서 방출되는 열이 야간 기온을 유지 및 상승시키는 주요 요인으로 작용한 반면, 새벽 시간대에는 지표면 열 방출의 영향이 약화되고 지하교의 역할이 상대적으로 커져 수관 하부 공간의 공기 순환의 영향이 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 이는 밤 시간대에는 지표면의 열 방출이, 새벽 시간대에는 수관 하부 공간 구조가 기온 저감에 더 큰 영향을 미침을 의미한다.

종합하면, 군집 식재를 통한 낮 시간대 기온 저감을 위해서는 낮은 SVF를 형성할 수 있는 수관 차폐 구조의 확보, 불투수포장 면적의 최소화, 지하교 조절을 통한 수관 하부 공간의 확보가 핵심적인 전략으로 도출된다.

3.4 종합

본 연구에서 단독수 식재와 군집 식재의 기온 저감 효과를 종합·비교한 결과, 두 식재 방식 모두 낮 시간대에 서 가장 뚜렷한 기온 저감 효과를 보였다. 이는 태양복사에 따른 열부하가 지배적인 주간 시간대에 수목 및 공간 구조 특성이 기온 형성에 직접적으로 작용하기 때문으로 해석된다(Cai et al., 2025; Yao et al., 2025). 반면 밤과 새벽 시간대에서는 두 식재 방식의 변수와 기온과의 관계는 제한적으로 나타났다.

단독수 식재의 경우, 기온 저감 효과는 개별 수목의 수관 규모의 영향이 가장 크게 나타났다. 단풍나무와 느티나무 모두에서 수관면적은 낮 시간대 기온과 음의 관계를 보이며 가장 중요한 변수로 작용하였는데(Xiao et al., 2024), 이는 단일 수목이 제공하는 그들의 면적이 기온 저감의 핵심 매커니즘임을 의미하며, 수관에 의한 태양복사 차단과 그에 따른 지표면의 열 저장 감소에 의한 것으로 해석된다(박준성 등, 2015; Wang and He, 2024). 지하로의 영향은 수종별로 상이하게 나타나, 단독수 식재에서는 수종의 수형 특성과 결합된 개별적 관리가 필요함을 시사한다. 단독수 식재를 대상으로 한 선행연구들에서도 수관 규모와 지하고가 낮 시간대 기온 저감에 영향을 미침을 확인하였다. Sharmin et al.(2023)은 여름철 10종의 수목에 대한 관측 결과, LAI가 높고, 넓은 수관을 가진 수목이 큰 그늘 면적을 가져 낮 시간대 기온 저감에 유리함을 제시하였다. Feng et al.(2023)은 4개 수종에 대하여 기온과 수관에 의한 그늘이 상관관계가 있으며 수관 아래 미기후에 미치는 영향이 상당함을 제시하였다. 또한 수관 아래 풍속 증가가 여름철 기온 저감에 영향을 미침을 언급하였다. 이는 본 연구에서 지하고가 낮 시간대 기온과 유의한 관계를 보인 것이 수관 하부 공간의 개방성과 관련된 미기후 조건과 연계되어 해석될 수 있음을 시사하며, 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

군집 식재에서는 개별 수목의 특성보다는 군집 전체의 공간 구조가 기온 형성에 큰 영향을 미쳤다. 낮 시간대에서 SVF는 모든 관측 시기에서 가장 큰 영향력을 보였으며, 이는 군집 식재에서 태양복사량을 조절하는 상부 차폐 구조가 기온 저감을 위한 주요 요인임을 의미한다(박수국 등, 2017; Zheng et al., 2018). 또한 불투수포장 면적은 특히 고온 시기에서 영향력이 크게 증가하여, 군집 식재의 기온 저감 효과가 수관 구조뿐만 아니라 지표면 열 특성과 밀접하게 연계됨을 보여준다(Rahman et al., 2018). 지하고는 군집 식재에서도 일관되게 기온과 음의 관계를 나타내어, 수관 하부 공간의 확보와 통풍 구조가 중요한 요소로 작용하였다. 선행연구에서 또한 군집 식재의 기온 저감에 대하여 SVF, 불투수포장면적 등이 기온 저감에 주된 영향을 미침을 확인하여 본 연구와 유사한 결과를 제시하고 있다. Wang et al.(2023)은 수관의 형태에 대한 기온 저감을 분석한 결과, 군집 식재에서 SVF가 낮을수록 낮 시간대 기온이 감소하는 경향을 확인하여 상부 차폐 구조가 태양복사량을 조절하여 기온 저감에 영향을 미침을 제시하였다. Sharmin et al.(2023)은 그늘에 의한 태양복사량 저감을 통해 지표면이 흡수하는 에너지 저장량이 줄어드는 것이 기온을 낮춰 냉각효과를 높일 수 있다고 하였고, Locke et al.(2024)은 여름철 다양한 환경의 경로에 대한 기온 측정을 통해 불투수표면 피복이 높은 곳의 기온이 높게 나타나며, 고온 시기에 기온 상승에 미치는 영향이 큼을 언급했다. 추가적으로 기온 상승에 대한 지연효과를 고려해야함을 제시하였는데, 이는 낮시간대의 열 축적이 밤과 새벽에까지 영향을 미친다는 본 연구 결과와 유사한 관점을 보인다.

이와 같이 단독수 식재와 군집 식재는 변수의 구성과 작용 방식에서는 차이를 보이지만, 공통적으로 태양복사 유입을 효과적으로 조절하고 수관 하부의 공기 순환을 원활하게 유지하여 기온 저감에 핵심적으로 작용한다는 점에서 동일한 물리적 매커니즘을 가졌다. 다만 이러한 매커니즘은 식재 방식에 따라 서로 다른 구조적 요인을 중심으로 나타났다. 단독수 식재에서는 개별 수목의 수관 규모와 수형 특성이 기온 저감 효과를 설명하는 주요 요인으로 작용한 반면, 군집 식재에서는 SVF에 따른 상부 차폐 구조와 지표면 특성, 수관 하부 공간 구조가 결합된 공간적 특성이 기온 형성에 보다 중요하게 작용하는 것으로 나타났다.

결론적으로, 단독수 식재를 통한 기온 저감을 위해서는 수관면적이 충분히 확보된 수목을 우선적으로 도입하고, 수종별 특성을 고려한 지하고 관리가 효과적인 전략으로 도출되며, 군집 식재에서는 낮은 SVF를 형성할 수 있는 연속적인 수관 차폐 구조, 불투수포장 면적의 최소화, 수관 하부 공간 확보를 통한 통풍 구조 개선이 핵심적인 기온 저감 전략으로 제시된다.

4. 결론

본 연구는 단독수 식재와 군집 식재의 구조적 특성에 따른 열환경 개선 효과를 정량적으로 분석하기 위해 대구광역시 중구 및 달서구에 위치한 공원을 대상으로 2025년 6월부터 8월까지 총 2회에 걸쳐 온·습도 관측을 수행하였다. 중구 일대 3개 공원에서는 단독수 식재 지점을 중심으로 총 21개 관측 지점을 선정하였으며, 달서구의 1개 공원에서는 군집 식재 특성을 반영할 수 있도록 7개 관측 지점을 선정하였다. 분석은 낮, 밤, 새벽 시간대로 구분하여 수행하였으며, 단독수 식재는 개별 수목의 기하학적 특성을 중심으로, 군집 식재는 수목 및 공간적 특성을 함께 고려하여 분석하였다. 단독수 식재는 상관분석, 회귀분석을 통해 기온 영향 변수를 도출하였고, 군집 식재는 계층적 군집분석과 분산분석, 회귀분석을 통해 공간 특성에 따른 기온 차이와 영향 변수를 정량적으로 분석하였다.

연구 결과, 단독수 식재와 군집 식재 모두에서 기온 저감 효과는 낮 시간대에 가장 뚜렷하게 나타났으며, 밤과 새벽 시간대에서는 그 영향이 상대적으로 약하게 나타났다. 이는 태양복사에 의한 열부하가 지배적인 주간 시간대

에 수목 및 공간 구조 특성이 기온 형성에 직접적으로 작용하기 때문으로 해석된다.

단독수 식재의 경우, 두 수종 모두에서 수관면적이 낮 시간대 기온과 음의 관계를 보이며 가장 중요한 변수로 도출되었다. 수목의 수관 규모가 그늘 제공 범위를 직접적으로 결정함으로써 지표면으로 유입되는 단파복사를 효과적으로 차단하기 때문으로 판단된다. 지하고의 영향은 수종별로 상이하게 나타났는데, 단파나무에서는 지하고가 높을수록 기온이 저감되는 경향이 확인된 반면, 느티나무에서는 고온 시기에 지하고가 낮을수록 기온 저감 효과가 크게 나타났다. 이는 수종별 수형과 수관 구조 차이에 따라 수관 하부의 공기 순환 및 열 축적 양상이 달라지기 때문으로 해석된다. 단독수 식재에서는 그늘 생성을 통한 태양 단파복사 차단과 수종 특성을 고려한 지하고 관리가 중요함을 시사한다.

군집 식재의 경우, 낮 시간대 회귀분석 결과 SVF가 모든 관측 시기에서 가장 큰 영향력을 보여 군집 상부의 차폐 구조에 의한 태양복사량 조절이 중요함을 확인하였다. 지하고는 일관되게 기온과 음의 관계를 나타내 수관 하부 공간이 확보될수록 통풍과 공기 교환이 원활해지면서 기온 저감에 기여하는 것으로 나타났다. 이는 군집 식재에서 수관 차폐 구조와 더불어 수관 하부 공간 구조가 함께 고려되어야 함을 의미한다. 또한 불투수포장 면적은 특히 고온 시점에서 영향력이 크게 증가하여, 군집 식재의 열환경은 수관 구조뿐만 아니라 지표면 열 저장도 중요하게 고려되어야 함을 알 수 있다.

본 연구의 결과를 종합하면, 공통적으로 태양복사 유입을 효과적으로 조절하고 수관 하부의 공기 순환을 원활하게 유지하는 구조가 기온 저감에 핵심적으로 작용한다는 점에서 동일한 물리적 메커니즘을 보였다. 하지만 이러한 공통된 메커니즘은 식재 방식에 따라 서로 다른 구조적 요인을 중심으로 나타났으며, 단독수 식재를 통한 낮 시간대 기온 저감을 위해서는 수관면적이 충분히 확보된 수종을 우선적으로 고려하고, 수종별 수형 특성을 반영한 지하고 및 수고의 조절이 필요하다. 군집 식재에서는 SVF에 따른 상부 차폐 구조, 불투수포장 면적과 같은 지표면 열 특성, 수관 하부 공간 구조를 고려한 복합적인 공간적 특성이 기온 형성에 보다 중요하게 작용하여 단독수 식재와는 다른 공간 단위의 열환경 관리 전략이 필요하다.

본 연구는 단독수 식재와 군집 식재를 동일한 관측 프레임과 분석 체계 내에서 비교·분석함으로써 식재 방식에 따른 열환경 개선 메커니즘을 실측 자료 기반으로 정량화했다는 점에서 의의가 있다. 또한 최근 기후변화 대응을 위한 도시숲 및 녹지 확충 정책이 본격적으로 추진되는 상황에서 실제 설계·시공 단계에서 활용 가능한 수목 구조에 대한 기초적인 가이드라인을 제시한다는 점에서 의미를 가진다.

한편 본 연구는 남부 지역에 위치한 대구광역시의 공원을 대상으로한 실측 자료에 기반하고 있어, 기후대가 상이한 지역이나 비도시 지역에서는 다른 경향이 나타날 가능성이 있다. 또한 군집 식재 분석의 경우 관측 지점 수가 부족하여 연구 결과를 일반화하기에 제한적일 수 있다. 하지만 본 연구에서 도출된 결과는 다양한 지역에서 수행된 선행연구의 경향과 대체로 일치하여 기본적인 경향성은 충분히 신뢰할 만한 것으로 판단된다. 다만 향후 연구에서는 관측 지점의 수를 확대하고, 다양한 지역을 대상으로 한 추가 분석이 이루어질 필요가 있다. 추가적으로, 향후 연구에서는 수목의 기하학적 특성과 주변 공간 특성이 낮 시간대뿐만 아니라 밤과 새벽 시간대 열환경에 미치는 영향을 보다 상세하게 분석할 필요가 있으며, 기온 외에도 평균복사온도(MRT), 풍속, 복사 환경 등 도시 열환경에 직접적으로 영향을 미치는 요소들을 포함한 종합적인 분석이 필요하다.

References

1. 민진규, 엄정희, 성욱제, 손정민, 김주은(2022) 녹지 조성 시나리오에 따른 도시 열환경 개선 효과 분석. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 50(6): 1-14.
2. 박수국, 조상만, 현철지, 공학양, 김승현, 신영규(2017) 여름철 도시근린공원의 기온저감 효과: 경기도 수원시 호원공원. *한국환경과학회지* 26(9): 1057-1072.
3. 박준성, 한승원, 김재순, 정명일(2015) 공동주택 정원의 지피식물식재를 위한 수목의 일사차폐 특성. *인간식물환경학회지* 18(5): 421-427.
4. 손정민, 엄정희(2024) 가로수 식재 특성에 따른 도시 열환경 개선 효과: 대구광역시 가로수 온습도 관측을 바탕으로. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 52(4): 32-44.
5. 송봉근, 박경훈(2014) 도시지역의 물리적 환경요소가 복사에너지 흐름에 미치는 영향. *환경영향평가* 23(6): 477-491.
6. 조현민, 권태경(2022) 여름철 도시공원의 열환경 개선 효과: 서울숲 미기상 관측자료 분석을 중심으로. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 50(6): 30-41.
7. 천홍균, 박재민(2025) Envi-Met 모델을 이용한 가로녹지대의 도시열섬 저감효과: 청주시 가로수길을 대상으로. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 53(4): 111-120.

8. Aram, F., E. H. García, E. Solgi, and S. Mansournia(2019) Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon* 5(4).
9. Cai, Y., C. Li, C. Pan, G. Wang, J. Xu, W. Cui, and G. Zhou(2025) Quantifying the impact of single-tree morphological characteristics on the vertical gradient cooling effect and human thermal comfort during summer. *Urban Forestry & Urban Greening* 107: 128789.
10. Chu, Z., S. Li, T. Li, H. Qian, C. Liu, and Z. Yan(2024) Numerical simulation of layout and landscape elements on the thermal environment of urban squares. *Ecological Informatics* 82: 102770.
11. Feng, X., H. Wen, M. He, and Y. Xiao(2023) Microclimate effects and influential mechanisms of four urban tree species underneath the canopy in hot and humid areas. *Frontiers in Environmental Science* 11: 1108002.
12. 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.
13. Kim, G., Y. Lee, J. Kim, H. Choi, and B. Kim(2018) Analysis of the cooling effect of urban green areas using Landsat 8 satellite data. *Journal of the Korean Society of Remote Sensing* 34(2): 167-178.
14. Locke, D. H., M. Baker, M. Alonzo, Y. Yang, C. D. Ziter, C. Murphy-Dunning, and J. P. O'Neil-Dunne(2024) Variation the in relationship between urban tree canopy and air temperature reduction under a range of daily weather conditions. *Heliyon* 10(3).
15. 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.
16. 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.
17. Rahman, M. A., A. Moser, A. Gold, T. Rötzer, and S. Pauleit(2018) Vertical air temperature gradients under the shade of two contrasting urban tree species during different types of summer days. *Science of the Total Environment* 633: 100-111.
18. Sharmin, M., M. G. Tjoelker, S. Pfautsch, M. Esperón-Rodríguez, P. D. Rymer, and S. A. Power(2023) Tree traits and microclimatic conditions determine cooling benefits of urban trees. *Atmosphere* 14(3): 606.
19. Wang, H., Y. Cai, W. Deng, C. Li, Y. Dong, L. Zhou, and G. Zhou(2023) The effects of tree canopy structure and tree coverage ratios on urban air temperature based on ENVI-Met. *Forests* 14(1): 80.
20. Wang, W. and B. J. He(2024) Assessment of vertical cooling performance of trees over different surface covers. *Journal of Thermal Biology* 119: 103779.
21. Wu, P. L. and S. J. Wu(2024) Research on the effect of planting design on the thermal comfort of campus sidewalk in Tunghai University, Taiwan. *Applied Sciences* 14(17): 7561.
22. Xiao, Q., X. Fan, Y. Guo, S. Li, W. He, Y. Deng, and C. Wu(2024) Tree form characteristics as criteria for tree species selection to improve pedestrian thermal comfort in street canyons: Case study of a humid subtropical city. *Sustainable Cities and Society* 105: 105339.
23. Yao, Z., P. Wang, Y. Tian, Y. Zhang, Q. Zhang, X. Wang, and Q. Han(2025) Impact of sky view factor on seasonal microclimate and thermal comfort variability across urban campus streets and buildings. *Buildings* 15(22): 4121.
24. Zheng, B., K. Bernard Bedra., J. Zheng, 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.
25. Ziter, C. D., E. J. Pedersen, C. J. Kucharik, and M. G. Turner(2019) Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(15): 7575-7580.
26. Zölch, 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.