

산림 인접 도시지역의 주·야간 열환경 특성 분석[†]

- 대구광역시 와룡산 일대 관측 자료를 기반으로 -

Diurnal and Nocturnal Thermal Characteristics of Urban Areas Adjacent to Forests[†]

- Evidence from Field Observations in the Waryong Mountain Area, Daegu -

손정민*, 엄정희**

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

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

*Postdoctoral Fellow, Environmental Planning Institute, Seoul National University

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

Received: January 25, 2026

Revised: February 19, 2026

Accepted: February 20, 2026

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

도시 열환경에 관한 기존 연구들은 주로 위성영상이나 수치 시뮬레이션을 통해 간접적으로 평가되어 왔다. 특히 실제 복잡한 도시공간에서 주·야간 열환경 형성에 미치는 다양한 토지이용과 산림의 영향에 대하여 실측 기반의 정량적 분석은 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 산림이 인접한 도시지역을 대상으로 50m 간격의 고밀도 기온 관측을 수행하고, 다양한 피복 특성의 토지이용 유형과 산림의 영향에 따른 여름철 시간대별(낮·밤·새벽) 열환경 특성을 정량적으로 분석하는 것을 목표로 하였다. 연구 대상지는 대구광역시 와룡산 일대 도심으로, 고밀 저층 주거지역, 저층 주거·상업근린 복합지역, 가로수 식재지역, 아파트 주거단지과 같은 토지이용 유형을 포함하는 남북 방향 공간축을 따라 약 50m 간격으로 기온을 관측하였다. 공간 분포 분석, 일원분산분석, 산림과의 거리 및 기온 간 회귀분석 등을 통해 열환경 특성을 비교하였다. 분석 결과, 주간에는 고층 건축물과 녹지가 풍부한 아파트 주거 단지가 가장 낮은 평균 기온(33.33°C)을 나타냈으나, 야간 기온 저감 폭은 가장 작게 나타났다(4.76°C). 반면, 저층 주거 및 근린상업지역은 주간에 고온 구간이 형성된 이후 야간에 큰 폭의 냉각이 나타나 최대 10.35°C의 기온 저감이 관측되었다. 또한, 새벽 시간대에는 산림으로부터 멀어질수록 기온이 상승하는 경향이 나타났으며, 산림으로부터의 거리가 100m 증가 시 기온은 최대 약 0.2°C 상승하였다. 특히 가로수 식재지역은 주거 밀집 지역보다 거리 증가에 따른 기온 상승률이 낮아 산림 인접에 따른 야간 냉각 효과가 상대적으로 더 유지되는 양상을 보였다. 본 연구는 실측 자료를 기반으로 산림 인접 도시지역의 열환경 형성 요인이 시간대에 따라 달라짐을 정량적으로 제시하였으며, 산림 인접성에 따른 야간 냉각 효과를 확인하였다는 점에서 의의를 가진다. 이러한 결과는 향후 도시 열환경 완화를 위한 녹지계획 및 공간 구조 설계에 실증적 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 도시 미기후, 토지이용 유형, 찬공기, 냉각효과, 산림과의 거리

ABSTRACT

Previous studies on urban thermal environments have mainly relied on satellite imagery or numerical simulations and have therefore been limited to indirect assessments. In particular, quantitative analyses based on field observations remain insufficient in complex urban environments where diverse land-use types and forest proximity interact. Accordingly, this study aimed to conduct high-density air temperature measurements at 50-m intervals in a forest-adjacent urban area and to quantitatively analyze the temporal characteristics of the summer thermal environment (daytime, nighttime, and early morning) in relation to land-use types with diverse surface-cover characteristics and forest influence. The study area was located in the urban district surrounding Mt. Waryong in Daegu, South Korea, where air temperature was measured at approximately 50-m intervals along a north-south transect encompassing four land-use types: high-density low-rise residential areas, low-rise residential-neighborhood commercial mixed areas, tree-lined streets, and apartment residential complexes. Spatial distribution analysis, analysis of variance (ANOVA), and regression analysis between temperature and distance from the forest were applied to compare thermal characteristics. The results showed that during the daytime, apartment residential complexes with high-rise buildings and abundant green

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

space exhibited the lowest mean temperature (33.33°C), while their nighttime cooling magnitude was the smallest (4.76°C). In contrast, low-rise residential and neighborhood commercial areas formed high-temperature zones during the daytime, but experienced substantial nighttime cooling, with a maximum temperature reduction of 10.35°C. In the early morning, air temperature increased consistently with increasing distance from the forest, and a 100-m increase in distance corresponded to a maximum temperature rise of approximately 0.2°C. In particular, tree-lined streets exhibited a lower rate of temperature increase with distance than densely built residential areas, indicating that nighttime cooling effects associated with forest proximity were relatively better preserved. This study quantitatively demonstrates that the dominant factors shaping the thermal environment in forest-adjacent urban areas vary by time of day and confirms the presence of nighttime cooling effects associated with forest proximity based on in situ observations. These findings provide empirical evidence that can support future green space planning and spatial design strategies aimed at mitigating urban thermal environments.

Keywords: Urban Microclimate, Land-use Type, Cold Air, Cooling Effect, Distance from Forest

1. 서론

급격한 기후변화와 도시화로 인한 불투수면의 확대, 건축물 밀도 증가, 인공열 방출 증가 등은 도시 열섬 현상(Urban Heat Island, UHI)을 심화시키는 핵심 요인으로 지적되고 있다(Oke, 1982; Mohajerani et al., 2017; Kong, 2025). 특히 최근에는 여름철 폭염과 열대야 발생 빈도 및 강도가 전 세계적으로 증가하고 있으며, 이는 도시민들의 열 스트레스, 온열질환, 사망률 증가 등 사회·보건 문제로까지 이어지고 있다(Méndez-Lázaro et al., 2018; Yadav et al., 2023; Yang et al., 2024). 국내에서도 여름철 고온 현상으로 인한 건강 피해 등 문제가 지속적으로 나타나며, 도시 열환경 개선을 위한 공간계획적 대응의 필요성이 강조되고 있다(Hong et al., 2019; Jay et al., 2021; An and Dedekorkut-Howes, 2025).

이러한 배경 속에서 도시 열환경을 완화하기 위한 수단으로 도시 내 산림과 녹지의 역할이 중요한 기후 조절 요소로 주목받아 왔다. 수목과 녹지는 증발산 작용, 그늘 형성 등을 통해 냉각 효과(cooling effect)를 발생시키고, 도시 미기후를 조절하는 것으로 알려져 있다(Bowler et al., 2010; Lai et al., 2019; Kim et al., 2024; Kong, 2025). Bowler et al.(2010)은 체계적 문헌고찰을 통해 도시공원과 녹지가 주변 시가지에 비해 일관된 냉각 효과를 나타낸다고 보고하였으며, 도시공원은 낮 동안 평균적으로 0.94°C 더 낮은 기온을 유지하는 것으로 밝혔다. Kim et al.(2024) 또한 도시 녹지 공간의 기온 측정과 관련한 전 세계 선행연구들을 종합·분석하여, 도시 열환경 조절에 있어 수목이 주도적인 역할을 한다고 밝혔으며, 수목은 잔디, 옥상녹화, 벽면녹화보다 대기 온도를 2~3배 더 효과적으로 낮추는 것을 확인하였다. 국내에서도 공원, 가로수 등 다양한 도시 녹지 유형을 대상으로 열환경 특성과 영향 요인을 규명하려는 연구가 수행되어 왔으며, 녹지의 존재 여부뿐만 아니라 규모, 구조, 주변 토지이용 등에 따라 효과가 달라질 수 있다는 점이 확인되어 왔다(조용현과 신수영, 2002; 윤용한 등, 2003; 윤민호와 안동만, 2009; 정희은 등, 2015; 박종화와 조기혁, 2016; 김기중 등, 2018; 서정은과 오규식, 2020; 파오위린과 김영훈, 2021; 민진규 등, 2022; 권혁수와 김장수, 2023; 박주현 등, 2025; 임재연 등, 2025).

나아가 일부 연구에서는 도시 산림지역이 상대적으로 낮은 지표 온도와 복사 냉각 특성을 유지하며, 특히 야간에는 산림에서 형성된 찬공기가 지형을 따라 시가지로 이동할 수 있음을 제시하였다(이재연 등, 2012; 엄정희와 손정민, 2016; 엄정희, 2019; Grunwald et al., 2019; Son et al., 2022; 성욱재 등, 2023). 이러한 현상은 찬공기 유동(cold air drainage) 또는 도시 바람길(ventilation corridor) 개념으로 설명되며, 주로 수치모형이나 이상화된 시물레이션을 통해 그 가능성이 검토되어 왔다. 이러한 기존 연구들을 통해 주간과 야간의 도시 열환경 완화에 영향을 미치는 주요 요인이 다르다는 점을 알 수 있으며, 실제 다양한 토지이용 특성을 가지는 도시공간에서 그 차이가 어떻게 나타나는지에 대한 실측 기반의 정량적 분석은 여전히 부족한 실정이다.

기존 연구의 상당수는 위성영상 기반의 지표면 온도 분석이나 이상화된 수치모형 시물레이션을 통해 간접적 평가를 주로 수행하였다. 하지만 위성 데이터는 시민들이 체감하는 지상 기온과 차이가 있으며, 시물레이션은 복잡한 도시 구조를 모두 반영하는 데 한계가 있다(Mirzaei and Haghghat, 2010; Lai et al., 2019). 따라서 현장 관측은 장비의 설치와 관리 등의 어려움에도 불구하고, 시민이 실제 체감하는 열환경을 분석하고 실질적인 영향력을 검증

하기 위한 필수적인 방식이다.

따라서 본 연구는 산림과 녹지, 다양한 토지이용이 존재하는 도시지역을 대상으로 실제 현장 관측을 수행하고, 주·야간 열환경 변화를 실증적으로 분석하는 것으로 목표로 하여 다음과 같은 연구 질문을 설정하였다. 첫째, 동일한 산림지역이 위치하더라도 인접한 도시지역의 기온 분포는 시간대(낮, 밤, 새벽)에 따라 서로 다른 공간적 특성을 보이는가? 둘째, 도시 토지이용 유형에 따라 열환경은 어떻게 달라지며 유형별 실제 기온 차이는 어느 정도 발생하는가? 셋째, 산림으로부터 떨어진 거리에 따라 주·야간 기온 변화는 어떻게 달라지는가?

이러한 연구질문을 해소하기 위하여 본 연구는 산림과 다양한 토지이용 유형이 나타나는 대구광역시 와룡산 일대의 도시지역을 대상으로 여름철 기온 관측을 수행하고, 공간 분석 및 통계 분석 등을 통해 도시 인접 산림과 도시공간 간의 열환경 관계를 정량적으로 규명하고자 한다. 이를 통해 산림과 도시공간 간의 열환경을 체계적으로 이해하고, 향후 기후변화 적응형 도시 계획 수립을 위한 실증적 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 연구 및 관측 대상지

본 연구는 다양한 토지이용 유형이 나타나며 산림이 인접한 대구광역시 달서구 와룡산 일대를 선정하였으며, 이 일대 도시지의 남-북 방향 공간축을 따라 설정한 4개의 라인을 중심으로 기온 관측을 수행하였다(그림 1 참조). 대

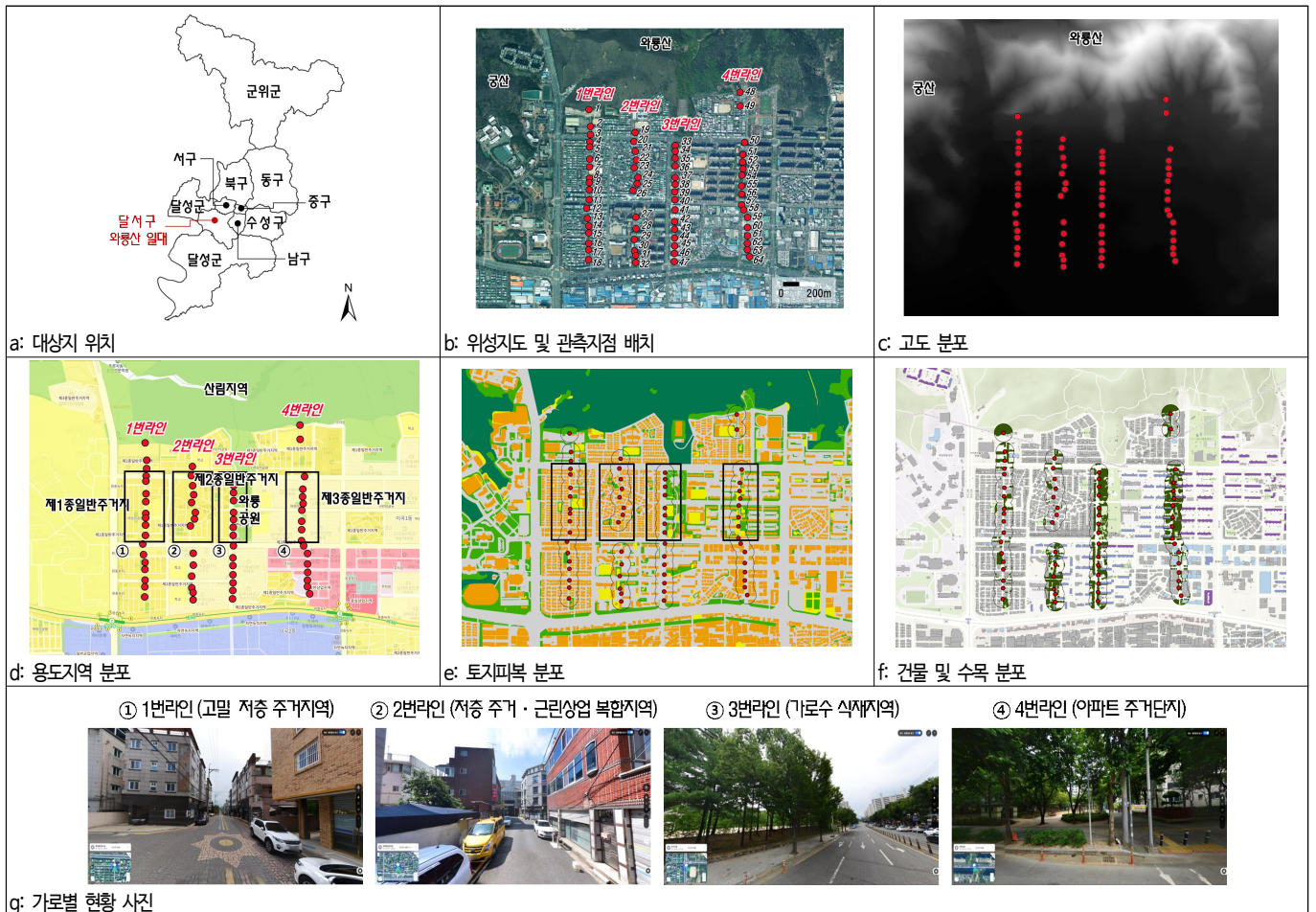


그림 1. 연구 대상지

범례: b: ● 기온 관측 지점

c: 21m 250m

d: 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역, 토지이용 유형 간 기온 비교 구간

e: 아스팔트, 콘크리트, 조지, 산림, 나지

f: 건물 높이 교목 수관피복

상지는 북측으로 와룡산 산림지역이 위치하면서 남측으로는 주거지역, 근린상업지역, 공원 및 대규모 아파트 단지가 혼재된 공간 구조를 형성하고 있고, 남측으로 갈수록 고도가 낮아진다. 이러한 입지 특성은 산림에서 생성되는 찬공기의 냉각 효과를 확인하고 토지이용 특성이 주·야간 열환경에 미치는 영향을 분석하기에 적합한 조건을 갖춘 것으로 판단된다.

라인별 공간적 특징을 살펴보면, 1번라인은 4층 이하의 저층 주거단지가 밀집된 구간으로 건물 면적 비율(36.6%)과 아스팔트(55.7%) 및 콘크리트(34.5%) 비율이 높아 불투수면 중심의 공간 구조를 형성하고 있다(표 1 참조). 2번라인 역시 저층 주거단지와 아파트 단지, 근린상업시설이 혼재되어 있으며 건물 면적 비율(43.0%)이 가장 높고 수관피복 비율(5.0%)이 가장 낮아 인공피복이 우세한 구조를 보인다. 반면, 3번라인은 와룡공원과 인접하고 가로수가 식재된 녹지축을 따라 형성되어 수관피복 비율이 39.7%로 높게 나타났으며, 초지 비율(20.6%) 또한 높은 수준을 보인다. 4번라인은 녹지가 풍부한 아파트 주거단지 내부를 관통하며 평균 건물 높이는 14.3m로 가장 높지만, 수관피복 비율 역시 86.4%로 매우 높은 녹지 비중을 나타내는 특성을 보인다.

관측지점 설계 시에는 관측 장비 설치 및 운영의 현실성을 고려하면서도, 도시 열환경의 공간 변동성을 확인할 수 있고 기존 도시 미기후 관측 연구에서 주로 활용되는 공간 해상도인 50m 간격을 기준으로 설정하였다(Martini et al., 2018; Kousis et al., 2021; Lu et al., 2025). 현장여건에 따라 라인별로 평균 15~18개의 관측기가 설치되어 연속적인 공간적 기온 변화를 파악할 수 있도록 구성하였다.

2.2 기온 관측 데이터 수집 및 가공

기온 관측은 2023년 8월 2일부터 8월 9일까지 수행하였다. 본 연구는 여름철 도시 열환경 특성이 가장 두드러지며, 산림의 찬공기 형성과 녹지의 냉각효과가 뚜렷하게 나타나는 맑고 안정적인 기상 조건(Grunwald et al., 2019; 성욱제와 엄정희, 2023)에서의 열환경을 분석하고자 하였다. 따라서 전체 관측기간 중 기온이 높고 강수 없이 맑은 날이 연속적으로 지속된 8월 4일 10:00부터 8월 5일 06:50까지의 자료를 분석에 활용하였다.

기온 측정에는 온·습도 데이터로거(RN400-H2PS)를 사용하였으며, 해당 장비는 클라우드 기반 Wi-Fi 통신 방식으로 자료를 수집하며, 온도는 -20~60°C 범위에서 ±0.3°C의 정확도, 습도는 0~95% 범위에서 ±2.0%의 정확도를 갖는다. 각 관측지점의 수목 또는 구조물에 지면으로부터 약 2m 높이에 동일한 방식으로 설치하였으며, 모든 장비에 동일한 목재 관측함을 적용하여 직접적인 일사 가열을 완화하고자 하였다(그림 2 참조). 설치 방향과 주변 차광 조건은 지점별 현장 여건에 따라 일부 차이가 존재하였으나, 동일한 장비와 설치 높이를 적용하여 관측 기준을 통일하였다. 또한 모든 지점에서 동일 기간 동안 동시 관측을 수행함으로써 기상 조건의 차이에 따른 영향을 배제하고, 설치 위치에 따른 미세한 복사 환경 차이가 분석 결과에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다. 모든 장비는 현장 설치 이전에 일괄적으로 보정하여 관측 기기 간 편차로 인한 측정 오차를 최소화하였으며, 데이터는 10분 간격으로 수집하였으며, 수집된 원자료에 대해 결측치 및 이상치 검토 과정을 거쳐 분석에 적합한 자료만을 선별하였다. 분석에는 10분 간격의 기온 원데이터를 활용하면서 도시 열환경의 일변동 특성을 고려하여 낮(14:00~16:50), 밤(21:00~23:50), 새벽(04:00~06:50) 시간대의 평균값을 산출하고, 이를 통해 시간대에 따른 기온 변화를 살펴보았다.

2.3 공간 및 토지이용에 따른 기온 특성 분석

도시공간 및 토지이용에 따른 기온 특성을 분석하기 위하여, 먼저 각 라인별 수집된 기온 원자료를 시간대별 평균값으로 산출한 후, GIS 공간 분석을 통해 연속적인 기온 분포 지도를 작성하였다. 공간 보간에는 지점 간의 공간적 상관성을 통계적으로 반영할 수 있는 크리깅(Kriging) 기법을 적용하였으며, 관측지점 배치 간격을 고려하여

표 1. 라인별 공간구조 및 토지피복 구성

구분 ^{a)}	평균 건물 높이 (m)	건물 면적 비율 (%)	수관피복 면적 비율 (%)	아스팔트 면적 비율 (%)	콘크리트 면적 비율 (%)	초지 면적 비율 (%)	나지 면적 비율 (%)
1번라인	8.6	36.6	7.3	55.7	34.5	4.6	5.3
2번라인	7.8	43.0	5.0	56.5	39.7	3.2	0.6
3번라인	7.3	14.9	39.7	55.1	15.0	20.6	9.3
4번라인	14.3	19.1	86.4	48.6	18.8	22.0	10.6

a: 라인별 “토지이용 유형 간 기온 비교 구간”에 해당하는 관측지점들의 50m 버퍼 내 평균값임



그림 2. 관측기 사진

50m 공간 해상도로 기온 분포를 구성하고 시간대별 공간적 변화 양상을 파악하였다.

다음으로, 각 관측 라인 상에서 동일한 거리 구간에 위치하면서 토지이용 유형이 서로 다른 구간을 대상으로 지점을 추출하고, 관측된 기온 원자료를 활용하여 낮, 밤, 새벽 시간대의 기온 특성을 비교·분석하였다. 또한 토지이용 유형 간 평균 기온 차이가 통계적으로 유의미한지 검정하기 위하여 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 수행하고, 분석 결과가 유의한 경우 Scheffé 사후검정을 실시하여 유형 간 구체적인 차이를 검증하였다.

2.4 산림과의 거리에 따른 기온 특성 분석

산림과 떨어진 거리에 따라 변화하는 기온 특성을 분석하기 위하여, 먼저 각 라인별 관측기 설치 위치와 주변 토지이용 및 공간 구조를 고려하여 공간적 특성이 유사한 연속 구간의 관측지점을 추출하였다. 그 결과, 1번라인은 2-18번, 2번라인은 19-26번, 3번라인은 33-47번, 4번라인은 48-56번이 도출되었고, 각 라인별로 와룡산 산림과 인접한 최상단 지점을 기준으로 하여 관측지점과 떨어진 거리를 계산하고 기온 변화를 비교·분석하였다.

한편, 본 연구 대상지는 북측 와룡산 산림지역에서 남측으로 갈수록 고도가 낮아지는 지형적 특징을 가진다. 이러한 고도 차이는 기온 분포에 영향을 미칠 수 있으므로, 산림 파복의 효과를 보다 명확히 분석하고자 고도에 따른 감온 효과를 보정한 기온 자료를 추가로 산출하였다. 구체적으로, 기존 선행연구에서 제시된 월별 기온 단열 감률을 참고하여 8월의 기온 단열 감률 값인 $0.0066776^{\circ}\text{Cm}^{-1}$ 적용하였다(김남신과 김경순, 2013). 고도 보정은 산림지역의 영향만을 고려하기 위하여 와룡산 산림 경계를 기준으로 수행하였으며, 각 관측지점의 실제 고도와 기준 고도의 차이에 단열 감률을 곱하여 식 (1)에 따라 보정 기온을 산정하였다. 이후 관측된 기온 원자료와 고도 보정 기온을 함께 비교함으로써, 지형적 요인을 통제된 상태에서 산림과의 거리 변화에 따른 기온 저감 효과를 보다 정밀하게 분석하였다. 마지막으로 이러한 산림으로부터의 거리와 기온 간의 관계를 정량적으로 검증하기 위하여, 관측지점의 수가 비교적 충분한 1번라인과 3번라인을 대상으로 회귀분석을 수행하였다.

$$T_{corrected} = T_{observed} + (H_{reference} - H_{observed})L \tag{식 1}$$

$T_{corrected}$ = 보정된 기온값, $T_{observed}$ = 관측된 기온값, $H_{reference}$ = 기준 지점의 고도,
 $H_{observed}$ = 관측지점의 고도, L = 기온 단열 감률

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 시간대별 공간의 기온 분포 변화

연구질문 1에 대응하여 대상지의 시간대별 기온 공간 분포를 시각화한 결과, 동일한 북측 산림 배경을 갖는 지역임에도 불구하고, 낮, 밤, 새벽 시간대에 따라 상이한 공간적 패턴이 관찰되었다(그림 3 참조). 낮 시간대에는 토지이용 유형에 따른 공간적 차이가 가장 뚜렷하게 나타났다. 주거 및 상업지역이 밀집된 1번과 2번라인에서 고온 구간이 연속적으로 형성된 반면, 가로수 식재 구간, 와룡공원, 아파트 주거단지 등 녹지를 포함하는 3번과 4번라인에서는 상대적으로 낮은 기온 분포를 보였다. 특히 동일한 라인 내에서도 토지이용이 변화하는 지점에서 기온 분포가 급격히 전환되는 양상이 관찰되어, 주간 도시공간의 기온 분포가 주변 토지이용 및 지표파복 특성에 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 구체적인 기온값의 경우 1번라인 33.04-41.73°C(평균 37.64°C), 2번라인 33.70-40.56°C(평균 36.62°C), 3번라인 33.02-37.59°C(평균 35.05°C), 4번라인 31.41-36.79°C(평균 34.86°C)로 나타났다.

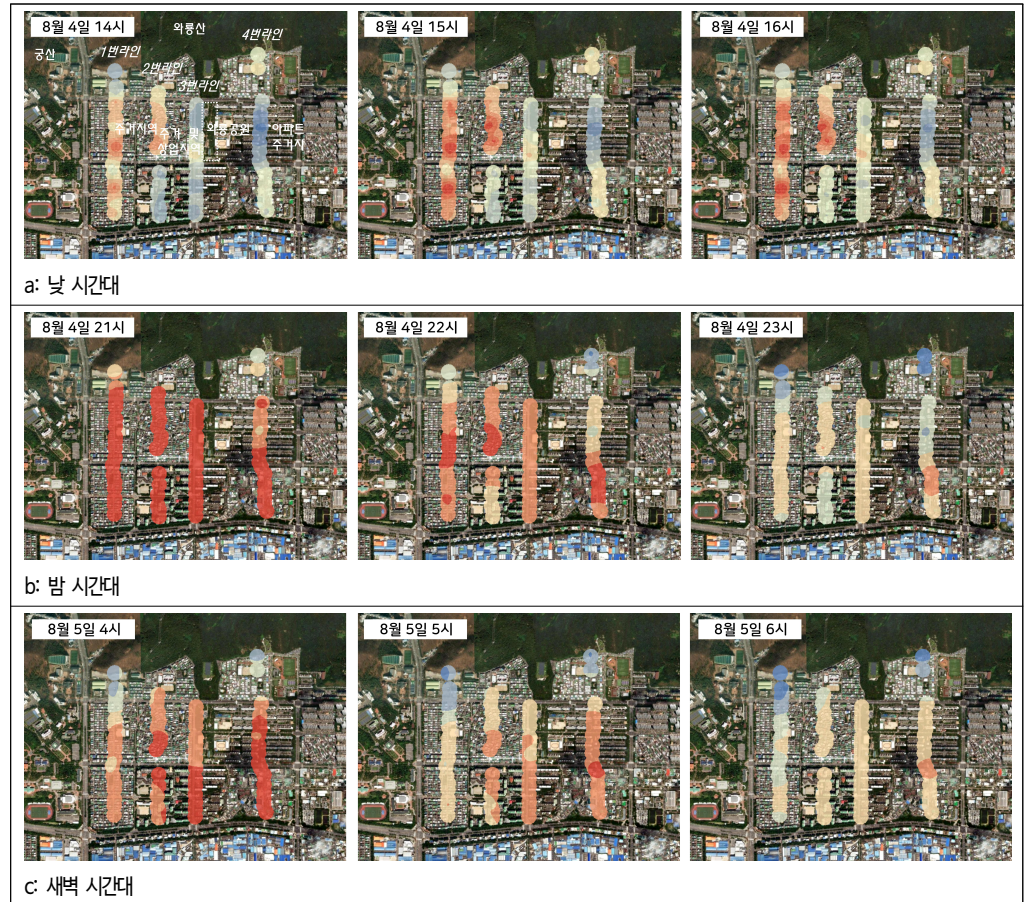


그림 3. 시간대에 따른 도심 관측기온의 공간 분포 현황

■ < 32.0°C	■ 32.0 - 33.0°C	■ 33.0 - 34.0°C	■ 34.0 - 35.0°C	■ 35.0 - 36.0°C	
범례: a: ■ 36.0 - 37.0°C	■ 37.0 - 38.0°C	■ 38.0 - 39.0°C	■ 39.0 - 40.0°C	■ > 40.0°C	
b: ■ < 30.5°C	■ 30.5 - 31.0°C	■ 31.0 - 31.5°C	■ 31.5 - 32.0°C	■ 32.0 - 32.5°C	■ > 32.5°C
c: ■ < 27.0°C	■ 27.0 - 27.5°C	■ 27.5 - 28.0°C	■ 28.0 - 28.5°C	■ 28.5 - 29.0°C	■ > 29.0°C

밤 시간대에는 전체적인 기온 수준이 하강하면서 라인 간 평균 기온 차이가 1°C 이내로 급격히 감소하였다. 공간적 분포 또한 주간에 비해 완만해졌으나, 북측 산림과 인접한 구간에서는 낮은 기온이 유지되는 경향이 나타났다.

새벽 시간대에는 라인별 기온 차이가 더욱 축소되어 1번라인 26.75-28.97°C(평균 27.96°C), 2번라인 27.77-29.21°C(평균 28.51°C), 3번라인 28.01-29.35°C(평균 28.60°C), 4번라인 26.87-29.65°C(평균 28.50°C)로 나타났으며, 공간 분포 양상 역시 낮 시간대와 뚜렷하게 달라졌다. 1번과 2번라인의 남측 시가지 구간에서 비교적 높은 기온이 유지된 반면, 북측 산림과 인접한 구간에서는 모든 라인에서 가장 낮은 기온이 형성되었다. 3번라인과 4번라인의 경우에도 공원과 아파트 녹지 근처 구간을 중심으로 중간 수준의 기온 분포가 나타났다. 특히 새벽 시간대에 모든 라인에서 북측 산림과 인접한 구간이 가장 낮은 기온 분포를 나타내었고, 남측 시가지 방향으로 이동할수록 기온이 전반적으로 상승하는 경향이 보였다.

3.2 토지이용 유형에 따른 기온 차이

연구질문 2에 대응하여 토지이용 유형별 기온 분포를 비교한 결과, 시간대에 따라 유형별 평균 기온 순위와 그 차이가 뚜렷하게 변화하는 것이 확인되었다(그림 4 참조). 낮 시간대 평균 기온은 고밀 저층 주거지역(1번라인, 39.04°C)이 가장 높았고 아파트 주거단지(4번라인, 33.33°C)가 가장 낮았으나, 새벽 시간대에는 저층 주거·근린상업 복합지역(2번라인, 28.93°C)이 최고 기온을 기록하였고, 가로수 식재지역(3번라인, 28.41°C)이 가장 낮게 나타나 시간대에 따른 기온 역전 현상이 발생하였다. 낮 시간대 평균 기온이 가장 낮은 아파트 주거단지를 기준으로 기타 토지이용 유형 간 기온 차이를 비교한 결과, 고밀 저층 주거지역(5.71°C), 중층 주거·근린상업 복합지역(5.03°C), 가로수 식재지역(1.98°C) 순으로 높게 나타났다. 또한 낮 시간대 평균 기온 대비 새벽 시간대의 기온 저감 폭은 고

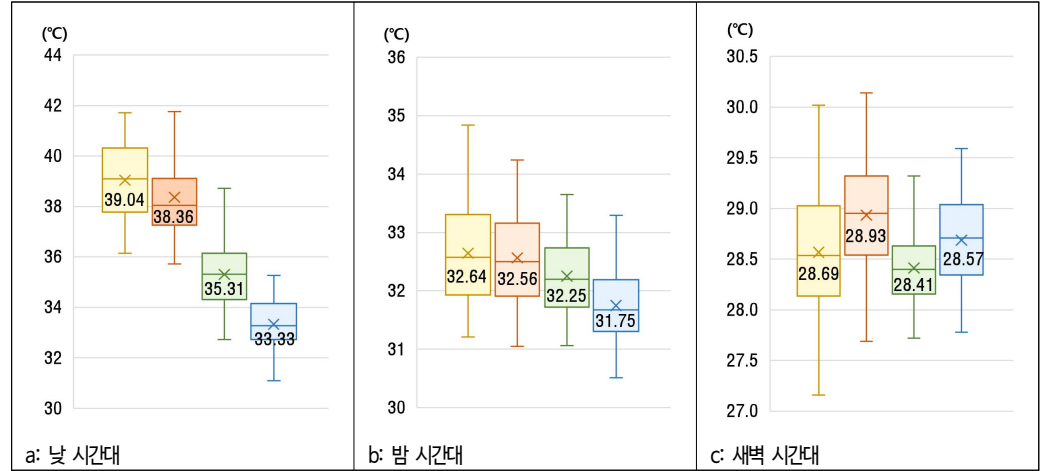


그림 4. 시간대에 따른 토지이용 유형별 관측기온 변화
 범례: ■ 고밀 저층 주거지역(1번라인), ■ 저층 주거·근린상업 복합지역(2번라인),
■ 공원 인접 가로수 식재지역(3번라인), ■ 아파트 주거단지(4번라인)

밀 저층 주거지역(10.35°C)과 저층 주거·근린상업 복합지역(9.43°C)에서 상대적으로 큰 저감 폭이 나타났고, 가로수 식재지역(6.9°C)과 아파트 주거단지(4.76°C)에서는 상대적으로 작게 감소하였다.

이러한 기온 차이의 통계적 유의성을 검증하기 위해 일원분산분석을 수행한 결과, 모든 시간대에서 토지이용 유형 간 유의미한 차이가 확인되었다($p < 0.001$, 표 2 참조). 낮 시간대 효과크기는 0.749로 매우 높게 나타났으며, 이는 토지이용 유형 간 평균 기온 차이가 크게 형성되었음을 보여준다. 반면 밤(효과크기 = 0.189)과 새벽(효과크기 = 0.135)으로 갈수록 효과크기가 감소하였는데, 이는 야간으로 갈수록 토지이용 공간적 특성의 영향력이 약화되고 다른 요인의 영향이 증가한 결과로 해석된다. 사후검정 결과, 낮 시간대에는 모든 토지이용 유형 간 뚜렷한 위계(① 고밀 저층 주거지역 > ② 저층 주거·근린상업 복합지역 > ③ 가로수 식재지역 > ④ 아파트 주거단지)가 존재했으나, 새벽에는 아파트 주거단지와 고밀 저층 주거지역이 동일 군집으로 묶이는 등 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이러한 시간대별 기온 차이는 라인별 토지이용 유형을 구성하는 지표면 피복 재료의 열적 특성, 건축물 배치, 수관피복률 등 복합적 물리적 요인 차이에 기인한 것으로 판단된다. 1번과 2번라인은 건물 및 아스팔트, 콘크리트와 같은 불투수면 비율이 높고 수관피복 비율이 낮은 구조를 보여, 낮 시간대 태양복사에 의한 지표면의 열 축적이 상대적으로 크게 나타날 수 있는 조건을 형성한다. 3번과 4번라인은 수관피복 및 초지 비율이 높아 낮에 일사 차단 및 증발산 작용이 상대적으로 크게 나타날 수 있는 조건을 형성하며, 이에 따라 야간에도 냉각이 유지될 수 있는 구조적 특성을 지닌 것으로 해석된다.

표 2. 토지이용 유형별 기온에 대한 일원배치 분산분석(one-way ANOVA) 및 사후검정

구분		N	Mean	SD	F	p	효과크기	사후검정(Scheffe) ^a
낮 기온 (14-16시)	① 고밀 저층 주거지역(1번가로)	126	39.04	1.44	551.864***	0.000	.749	① > ② > ③ > ④
	② 저층 주거·근린상업 복합지역(2번가로)	144	38.36	1.52				
	③ 공원 인접 가로수 식재지역(3번가로)	144	35.30	1.37				
	④ 아파트 주거단지(4번가로)	144	33.33	0.97				
밤 기온 (21-23시)	① 고밀 저층 주거지역(1번가로)	126	32.64	0.86	43.160***	0.000	.189	①, ② > ③ > ④
	② 저층 주거·근린상업 복합지역(2번가로)	144	32.56	0.78				
	③ 공원 인접 가로수 식재지역(3번가로)	144	32.25	0.66				
	④ 아파트 주거단지(4번가로)	144	31.75	0.62				
새벽 기온 (04-06시)	① 고밀 저층 주거지역(1번가로)	126	28.57	0.63	28.875***	0.000	.135	② > ①, ④ > ③
	② 저층 주거·근린상업 복합지역(2번가로)	144	28.93	0.52				
	③ 공원 인접 가로수 식재지역(3번가로)	144	28.41	0.34				
	④ 아파트 주거단지(4번가로)	144	28.69	0.45				

a: 사후검정 결과에서 콤마(,)로 연결된 집단은 통계적으로 유의미한 차이가 없는 동일 군집임을 의미함
 *** $p < 0.001$

3.3 산림으로부터 떨어진 거리에 따른 기온 변화

연구질문 3에 대응하여 각 라인별 관측지점과 외룡산 산림 경계 간 거리를 산출하고 지점별 기온 변화를 분석한 결과, 전반적으로 지점별 기온이 모두 다르지만, 특히 낮 시간대에 기온 변동이 불규칙하게 나타났다(그림 5 참조). 이는 3.2절에서 확인된 바와 같이 낮 시간대에는 불투수면 비율, 건물 밀도, 수관피복률 등 공간구조 요인이 기온 형성에 상대적으로 크게 작용했기 때문인 것으로 해석된다. 반면 밤과 새벽 시간대로 갈수록 모든 라인에서 산림으로부터 거리가 증가함에 따라 기온이 상승하는 경향이 일관되게 관찰되었고, 이러한 경향은 결정계수(R^2) 변화에서도 확인되었다. R^2 이 1번라인의 경우 0.063(낮) → 0.113(밤) → 0.480(새벽), 2번라인의 경우 0.461(낮) → 0.854(밤) → 0.708(새벽), 3번라인의 경우 0.001(낮) → 0.039(밤) → 0.541(새벽), 4번라인의 경우 0.057(낮) → 0.001(밤) → 0.236(새벽)으로 나타나 전반적으로 새벽으로 갈수록 높은 설명력을 보였다. 이는 야간으로 갈수록 토지이용 유형 간 구분력이 감소하는 반면, 산림과의 거리가 야간 기온 분포를 설명하는 주요 변수로 작용된 것으로 판단되었다.

연구 대상지는 북측 산림에서 남측 시가지로 갈수록 완만한 경사를 가지므로, 지형에 따른 영향을 배제하고자 고도를 보정하여 분석한 결과 역시 동일한 경향성을 나타내어, 관찰된 야간 기온 저감 현상이 지형적 요인을 넘어 산림 및 녹지의 실질적인 냉각 효과임을 확인할 수 있었다. 다만, 고도 보정 시 거리에 따른 기온 변화의 설명력이 전반적으로 다소 감소하여, 이는 지형 효과가 일부 작용하나, 산림 자체의 냉각 기능이 야간 및 새벽 가로공간 기온 형성에 독립적으로 중요한 역할을 수행하는 것으로 판단되었다.

산림으로부터 떨어진 거리와 기온 변화의 통계적 검증을 위하여 1번과 3번라인을 대상으로 회귀분석을 수행한 결과, 두 라인 모두 새벽 시간대에 산림과의 거리가 기온에 유의미한 영향을 미치는 것으로 확인되었다($p < 0.01$, 표 3 참조). 새벽 시간대에 기온은 산림으로부터 100m 증가 시 1번가로 기준 약 0.2°C, 3번가로 기준 약 0.1°C 상승하는 것으로 나타났다. 특히 불투수 피복 비율이 높은 1번라인에 비해 초지 및 수관피복 비율이 높은 3번라인의 기온 상승률이 상대적으로 완만하게 나타났는데, 녹지 구간이 산림의 냉각효과를 더 길게 유지하는 역할을 수행함을 확인할 수 있었다. 다만, 고도 보정 시 두 라인 모두 산림으로부터 100m 증가 시 약 0.1°C 상승하는 것으로 나

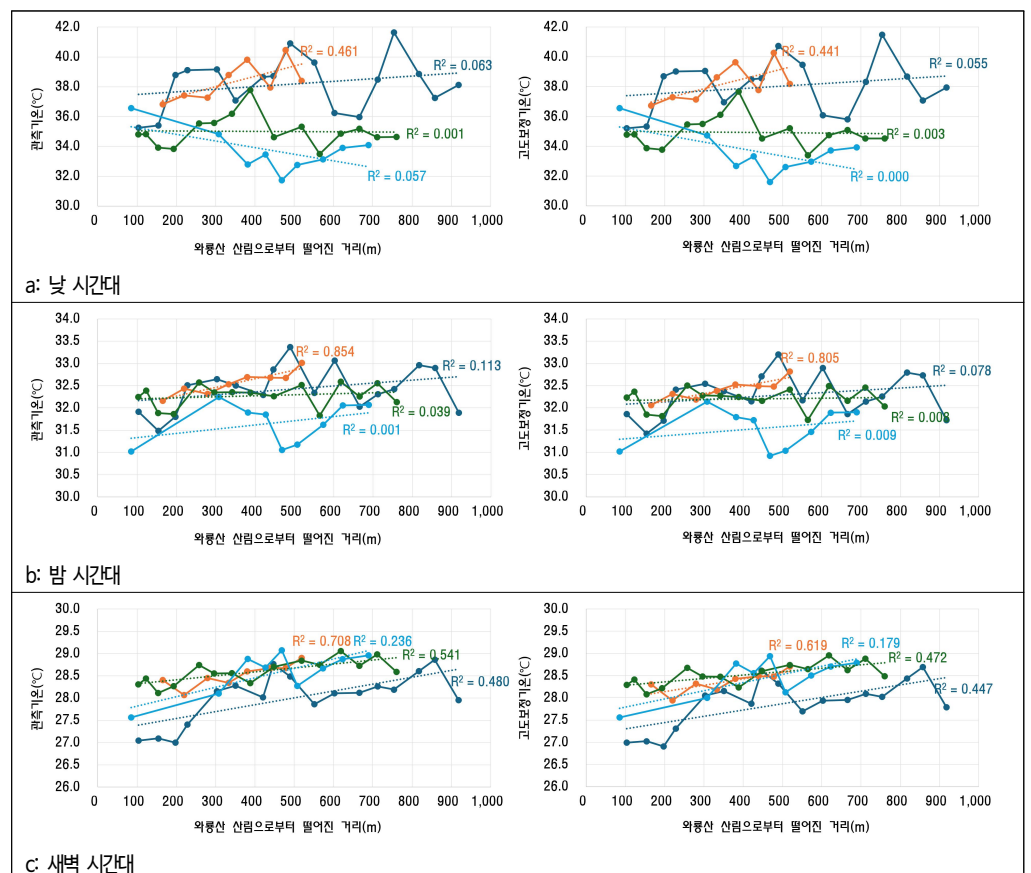


그림 5. 외룡산 산림으로부터 거리에 따른 기온 변화
 범례: ● 1번라인, ■ 2번라인, ▲ 3번라인, ◆ 4번라인

표 3. 외용산 산림으로부터 떨어진 거리가 기온에 미치는 영향

종속변수		독립변수	B	SE	β	t	p		
1번라인 (N=17)	관측기온	낮	(상수)	37.308	0.981		38.042***	<.001	
			거리	0.002	0.002	0.251	1.006	0.330	
		$F = 1.012 (p) .000, R^2 = .063, D-W = 1.314$							
		밤	(상수)	32.097	0.267		120.105***	<.001	
			거리	0.001	0	0.336	1.382	0.187	
		$F = 1.91 (p).000, R^2 = .113, D-W = 1.552$							
	새벽	(상수)	27.234	0.233		116.914***	<.001		
		거리	0.002	0	0.693	3.723**	0.002		
	$F = 13.862 (p < .05), R^2 = .480, D-W = 1.107$								
	고도보정기온	낮	(상수)	37.237	0.976		38.136***	<.001	
			거리	0.002	0.002	0.234	0.933	0.366	
		$F = 0.871 (p) .000, R^2 = .055, D-W = 1.322$							
밤		(상수)	32.027	0.262		122.384***	<.001		
		거리	0.001	0	0.278	1.123	0.279		
$F = 1.261 (p) .000, R^2 = .078, D-W = 1.611$									
새벽	(상수)	27.164	0.228		119.371***	<.001			
	거리	0.001	0	0.668	3.48**	0.003			
$F = 12.109 (p) .000, R^2 = .447, D-W = 1.161$									
3번라인 (N=15)	관측기온	낮	(상수)	35.061	0.603		58.179**	<.001	
			거리	0	0.001	-0.027	-0.097	0.924	
		$F = 0.009 (p) .000, R^2 = .001, D-W = 1.493$							
		밤	(상수)	32.182	0.143		225.042***	<.001	
			거리	0	0	0.197	0.726	0.481	
		$F = 0.528 (p) .000, R^2 = .039, D-W = 2.687$							
	새벽	(상수)	28.231	0.105		268.329***	<.001		
		거리	0.001	0	0.736	3.917**	0.002		
	$F = 15.343 (p < .05), R^2 = .541, D-W = 2.19$								
	고도보정기온	낮	(상수)	35.036	0.598		58.594***	<.001	
			거리	0	0.001	-0.054	-0.194	0.849	
		$F = 0.037 (p) .000, R^2 = .003, D-W = 1.51$							
밤		(상수)	32.158	0.142		226.54***	<.001		
		거리	0	0	0.091	0.328	0.748		
$F = 0.107 (p) .000, R^2 = .008, D-W = 2.717$									
새벽	(상수)	28.206	0.104		270.861***	<.001			
	거리	0.001	0	0.687	3.407**	0.005			
$F = 11.606 (p < .05), R^2 = .472, D-W = 2.236$									

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

타나, 지형적 요인과 피복 특성이 복합적으로 작용한 것으로 판단되었다. 한편, 새벽 시간대 1번라인의 더빈-왓슨(D-W) 지수는 1.107(관측기온), 1.161(고도보정기온)로 다소 낮게 나타나 공간적 자기상관이 존재한다. 이는 50m 간격의 고밀도 관측에 따른 공간적 근접성이 일부 반영된 결과로 판단되었다.

3.4 종합 및 고찰

본 연구는 실측 기반의 정량적 분석을 통해 서론에서 제시한 세 가지 연구질문에 대한 분석 결과를 종합적으로 도출하였으며, 산림이 인접한 도시공간의 열환경이 시간대에 따라 상이한 요인에 의해 나타남을 확인하였다. 낮 시간대에는 토지이용 유형에 따른 지표피복 특성이 열환경에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 저층 주거 및 상업 기능이 혼재된 지역에서는 불투수면 비율 증가, 건축물 밀집에 따른 복사열 축적, 인공열 방출 등의 영향으로

고온 구역이 연속적으로 형성된 반면(윤용한 등, 2003; 윤민호와 안동만, 2009; 서정은과 오규식, 2020; Hua et al., 2020; He et al., 2024), 가로수 식재 구간, 공원 인접부, 아파트 주거단지와 같이 녹지 비율이 높은 구간에서는 수목 그늘 효과와 증산작용으로 인해 상대적으로 낮은 기온이 유지되었다(조용현과 신수영, 2002; 정희은 등, 2015; 박종화와 조기혁, 2016; Ziter et al., 2019; Morabito et al., 2021; 손정민과 엄정희, 2024).

반면 밤, 새벽 시간대로 갈수록 토지이용 유형에 따른 기온 차이는 감소하였고, 유형 간 기온 순위가 역전되었다. 뿐만 아니라 낮 시간대에는 모든 토지이용 유형 간 기온 차이가 통계적으로 유의했으나 밤, 새벽 시간대에는 주거지와 녹지가 있는 유형의 차이만 통계적으로 유의한 것으로 확인되었다. 분산분석 결과, 토지이용 유형의 효과 크기가 낮에는 0.749로 매우 높았으나, 밤과 새벽에는 각각 0.189, 0.135로 크게 감소하였고, 이러한 요인 전환이 통계적으로 확인되었다. 이는 일사 영향이 없는 야간에 지표면과 건축물에 저장된 열의 방출 과정과 더불어, 산림 지역에서 발생하는 복사냉각과 찬공기 형성 과정이 도시 열환경 형성에 보다 중요한 역할을 수행했기 때문인 것으로 해석되었다(이재연 등, 2012; Steigerwald et al., 2022; 성욱제와 엄정희, 2023; 성욱제 등, 2023).

토지이용 유형별 낮 시간 대비 새벽 시간대의 기온 저감 폭을 비교했을 때, 저층 주거·근린상업 복합지역 10.35°C, 고밀 저층 주거지역에서 약 9.43°C, 가로수 식재지역 약 6.9°C, 아파트 주거지역 약 4.76°C 순으로 나타났다. 이는 불투수면과 인공 구조물이 밀집된 지역일수록 주간에 축적되는 열량이 크고, 야간에 방출되는 저장열 또한 증가하여 기온의 일변화 폭이 확대되기 때문인 것으로 판단되었다(송봉근과 박경훈, 2012; Athukorala and Murayama, 2021; Paschalis et al., 2021; Shi et al., 2021). 반면 녹지 비율이 높은 지역은 주간 기온이 낮을 뿐 아니라 야간 또한 인접 녹지의 냉각 효과가 작용하면서 새벽 시간대 평균 기온이 가장 낮게 형성된 것으로 해석된다. 아파트 주거단지의 경우 고층 건물 및 수목 그늘 효과와 증산작용으로 인해 낮 시간대 평균 기온이 가장 낮았지만(Zhang et al., 2019; Chen et al., 2024), 야간에는 고층 건물의 인공열 방출로 인해 가로수 식재지역보다 기온 저감 효과가 작게 나타난 것으로 판단된다(Huang et al., 2021).

산림으로부터의 거리 분석 결과 역시 낮 시간대에는 거리와 기온 간의 관계가 불규칙하고 설명력이 낮았으나, 밤과 새벽 시간대에는 모든 라인에서 산림으로부터 멀어질수록 기온이 상승하는 경향이 일관되게 나타났으며, 새벽 시간대에 결정계수가 가장 높게 나타났다. 이러한 야간 기온 저감 효과는 산림지역에서 형성된 찬공기가 지형을 따라 남측 시가지로 확산된다는 가능성을 시사한다. 북측에 위치한 와룡산과 궁산은 복사냉각이 활발한 산림지역으로서, 일몰 이후 지표면의 장파복사 방출로 인접 공기의 기온이 하강하고 밀도가 증가하며, 이를 통해 형성된 찬공기가 경사 지형을 따라 고도가 낮은 남측 시가지로 이동하는 하강풍의 특성과 일치한다(Goulden et al., 2006; Bigg et al., 2014). 정우호 등(2008)의 연구에서 대구지역 바람길 생성의 공간적 특성 평가를 통해 와룡산 지역이 찬공기 형성에 유리한 공간으로 도출되었으며, 대구광역시 일대를 대상으로 찬공기 시뮬레이션을 연구에서도 와룡산 산림의 지형적 특성에 따른 찬공기 이동이 확인된 바 있다(서보용 등, 2020; 성욱제, 2022). 지형적 효과를 배제한 고도 보정 분석에서도 동일한 경향이 나타나 산림 피복에 의한 실질적인 야간 냉각 효과임을 확인할 수 있었다. 특히 산림으로부터 100m 증가 시 평균 기온이 가로수 식재지역에서 약 0.2°C, 저층 주거지역에서 약 0.1°C 상승하는 것으로 나타났는데, 이는 가로공간 내 녹지와 수목이 산림의 냉각 효과를 도맡아 유지 및 전달하는 역할을 하는 것으로 사료된다. 고도 보정 후에는 두 지역 모두에서 약 0.1°C 수준의 상승을 보였으며, 비록 0.1~0.2°C 수준의 기온 저감 수치가 미미해 보일 수 있으나, 야간 최소기온은 열대야 발생 여부 및 인간 열스트레스에 직접적인 영향을 미치는 지표라는 점에서 계획적 의미를 가진다(Murage et al., 2017; Obradovich et al., 2017). 고밀화된 도심 환경에서는 국지적 기온 차이가 공간적으로 누적될 경우 도시 전체 평균기온 및 열대야 지속 시간에도 영향을 줄 수 있으므로 산림의 냉각 잠재력을 확인한 의미있는 효과라 판단된다(Oke, 1982). 또한 본 연구는 풍속 및 대기 흐름을 직접 관측하지는 않았으나 야간에 산림으로부터의 거리와 기온 사이의 일관된 관계를 확인하였고, 고도 보정 후에도 동일한 경향이 유지된 결과는 기존 수치모형 연구에서 보고된 산림지역의 복사냉각 및 찬공기 형성·확산 특성과 부합하며, 산림 기반 야간 냉각 효과가 도시의 열환경에 실질적인 영향을 미친 것으로 판단되었다(Ruiz et al., 2017; Son et al., 2022; 성욱제 등, 2023). 다만, 권혁수와 김장수(2023)는 InVEST 도시냉각모형과 원격탐사 기반 지표면 온도 자료를 이용한 분석에서 도시 산림을 포함한 녹지의 주간 냉각 효과에 비해 야간 냉각 효과의 거리 영향이 상대적으로 미비했다고 밝혔는데, 이는 현장 기온 관측을 이용한 본 연구와의 자료 및 방법 차이에 따른 결과로 판단되었다.

4. 결론

본 연구는 산림이 인접한 도시지역을 대상으로 여름철 기온 관측을 수행하고, 산림 및 토지이용 유형에 따른 기

온 변화 특성을 낮, 밤, 새벽 시간대로 분석함으로써 도시 열환경 형성 요인을 실증적으로 규명하고자 하였다. 분석 결과, 주간에는 토지이용 유형과 지표피복 특성이 기온 분포에 가장 큰 영향을 미치는 반면, 야간에는 산림과 지형 조건이 기온 저감 효과에 주요 결정 요인으로 작용하는 것으로 나타났다. 특히 저층 주거 및 근린상업지역에서는 주간에 건물 밀집과 불투수면 등으로 인해 높은 기온이 형성된 이후, 야간에는 축적된 열의 방출과 함께 북측 산림에서 형성된 찬공기의 영향으로 급격한 기온 저감이 나타남으로써 기온의 일변화 폭이 가장 크게 발생하였다. 반면, 주간에는 녹지가 풍부한 아파트 주거단지에서 평균 기온이 가장 낮았고, 가로수 식재지역에서도 기온이 낮게 관측되었는데 야간에는 역전되어 가로수 식재지역의 평균 기온이 가장 낮게 나타났다. 아파트 주거단지의 경우 주간에 축적된 대규모 고층 건물에서 발생하는 인공열 방출의 영향으로 야간 기온 저감 정도가 감소된 것으로 판단되었다. 또한 새벽 시간대에는 산림으로부터 거리가 증가할수록 기온이 상승하는 경향이 모든 공간축 라인에서 일관되게 나타났다. 또한, 산림으로부터 100m 증가 시 최대 약 0.2°C의 기온 상승이 나타나 산림 냉각 효과의 공간적 영향 범위를 정량적으로 제시할 수 있었다. 특히 건물이 밀집된 주거지역보다 가로수 식재지역에서 야간 산림의 찬공기 형성에 따른 냉각 효과가 더 잘 유지되는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 도시 열환경 관리 전략이 주·야간에 따라 차별화되어야 함을 시사한다. 주간에는 녹지 확대, 그늘 조성 등과 같은 전략이 중요하며, 야간에는 산림 및 녹지 보전, 산림-도심을 연결하는 녹지축 확보 등을 통해 찬공기 흐름이 원활히 유지될 수 있도록 하는 공간 구조 설계가 요구된다.

본 연구는 도시산림의 냉각 잠재력을 정량적으로 규명하고, 도시공간의 열환경을 현장 실측을 통해 시간대별·토지이용 유형별로 체계적으로 비교하였다는 점에서 의의를 가진다. 특히 50m 간격의 고밀도 관측 자료는 향후 ENVI-met 등 미기후 수치모형 및 CFD(전산유체역학) 기반 도시 열환경 예측모형의 보정 및 검증에 위한 기초 데이터셋으로 활용될 수 있으며, 산림 기반 야간 냉각 효과를 반영한 도시계획 및 녹지계획 수립에 실증적 근거를 제공할 수 있다.

그럼에도 불구하고 몇 가지 한계점도 가진다. 본 연구는 2023년 8월 단일 여름철 관측기간 자료에 기반하고 있어 장기적 기상 특성을 대표하는 데에는 한계가 있으며, 연도 간 기상 변동성을 충분히 반영하지 못하였다. 또한 관측 이후 토지이용 및 공간구조 변화 가능성을 고려하여 2023년과 2025년 최신 세분류 토지피복지도를 비교한 결과, 분석 대상지 내 극히 일부 지역에서 소규모 토지이용 변화가 확인되었으나 주요 관측지점과 인접 공간의 구조적 특성에는 변화가 없는 것으로 나타났다. 본 연구는 기온 관측에 기반한 분석으로, 풍속, 풍향, 습도, 일조 환경 등 바람길과 열환경에 영향을 미치는 기타 미기상 요소를 종합적으로 고려하지 못하였다. 일부 회귀모형에서는 잔차의 공간적 자기상관 가능성이 나타나 공간적 의존성을 충분히 통제하지 못한 한계도 존재한다.

향후 연구에서는 다년간 관측 자료를 활용한 계절·연도 간 비교 분석과 함께, 풍환경 관측 및 수치모형을 결합한 통합적 검증이 필요하다. 또한 공간회귀모형 등 공간적 자기상관을 고려한 분석기법을 적용하여 산림 인접지역에서 실제 찬공기 형성 및 이동에 대한 공간적 확산 매커니즘을 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다.

References

1. 권혁수, 김장수(2023) InVEST 도시냉각모형을 이용한 도시녹지의주·야간 냉각 효과 평가. 한국지리학회지 12(4): 577-589.
2. 김기중, 김동준, 이창효, 이승일(2018) 도시공원의 규모와 형태별 주변지역의 지표온도·건물에너지소비저감 영향범위 분석 연구. 한국지역개발학회지 30(2): 155-176.
3. 김남신, 김경순(2013) 지난 40년간 한반도 기온의 시, 공간적 분포 변화에 관한 연구. 한국지리정보학회지 16(4): 29-38.
4. 민진규, 엄정희, 성욱제, 손정민, 김주은(2022) 녹지 조성 시나리오에 따른 도시 열환경 개선 효과 분석. 한국조경학회지 50(6): 1-14.
5. 박종화, 조기혁(2016) 공원 크기에 따른 공원의 온도저감 효과 분석: 일산 신도시를 대상으로. 국토계획 51(5): 247-261.
6. 박주현, 엄정희, 손정민(2025) 보행 공간의 열환경 향상을 위한 가로녹지 조성체계 연구: 보도폭과 도로폭에 따른 가변 기준을 중심으로. 한국조경학회지 53(6): 110-129.
7. 서보용, 이상범, 권순범, 차재규, 정우호(2020) 대구시 열대야 대응 구역 설정을 위한 야간 찬공기 유동성 분석. 한국조경학회지 23(3): 220-235.
8. 서정은, 오규식(2020) 도시공원 및 주변환경의 특성이 도시공간의 온도저감에 미치는 영향. 한국환경복원기술학

- 회지 23(5): 1-14.
9. 성욱제(2022) 냉각에너지를 활용한 바람길순 유형 분류: 대구광역시를 사례로. 경북대학교 대학원 석사학위논문.
 10. 성욱제, 엄정희(2023) 냉각에너지를 활용한 바람길 구성요소 분류: 대구광역시를 사례로. 한국조경학회지 51(5): 70-83.
 11. 성욱제, 손정민, 엄정희, 민진규(2023) 도시환경 개선을 위한 산림 기반 바람길 관리 계획-낙동정맥을 사례로. 한국지리정보학회지 26(1): 21-40.
 12. 손정민, 엄정희(2024) 가로수 식재 특성에 따른 도시 열환경 개선 효과: 대구광역시 가로수 온습도 관측을 바탕으로. 한국조경학회지 52(4): 32-44.
 13. 송봉근, 박경훈(2012) 도시공간을 고려한 야간시간대의 열섬특성 분석. 한국지리정보학회지 15(1): 133-143.
 14. 엄정희, 손정민(2016) 찬공기 특성을 고려한 낙동정맥 관리방안 연구: 부산, 울산, 포항 인근을 대상으로. 한국조경학회지 44(5): 103-115.
 15. 엄정희(2019) 바람길 활용을 위한 정맥의 찬공기 관리 방안: 낙동정맥을 사례로. 한국지리정보학회지 22(1): 154-167.
 16. 윤민호, 안동만(2009) 위성영상을 이용한 도시녹지의 기온저감 효과 분석. 한국조경학회지 37(3), 46-53.
 17. 윤용한, 조계현, 백승엽, 김승태, 김원태(2003) 녹지주변의 토지이용형태가 녹지내의 기온저감효과에 미치는 영향. 한국잡초학회·한국잔디학회지 17(1): 45-52.
 18. 이채연, 김규량, 최영진, 원혜영, Scherer, D.(2012) 고밀도 관측자료를 이용한 야간 지면냉각과 찬공기 이동 분석: 서울은평구 뉴타운 사례. 한국지리정보학회지 15(4): 124-137.
 19. 임재연, 손정민, 박주현, 엄정희(2025) ENVI-met 시뮬레이션을 통한 도시숲 조성 시나리오별 열환경 개선 효과 분석. 한국조경학회지 53(1): 14-25.
 20. 정응호, 김대욱, 류지원, 차재규, 손경수(2008) 위성자료를 활용한 대구지역 바람길생성의 공간적 특성평가. 한국지리정보학회지 11(2): 73-84.
 21. 정희은, 한봉호,곽정인(2015) 서울 도심 가로수 및 가로녹지의 기온 저감 효과와 가능 향상 연구. 한국조경학회지 43(4): 37-49.
 22. 조용현, 신수영(2002) 도시림의 여름 대기온도 저감효과: 서울시를 대상으로. 한국조경학회지 30(4), 28-36.
 23. 파오위린, 김영훈(2021) 도시 녹지 블록의 기온 저감 효과와 영향 범위 분석: 청주시를 사례로. 한국지역지리학회지 27(1): 27-39.
 24. An, S. and A. Dedekorkut-Howes(2025) The heat is on: How well are densely populated korean cities adapting to increased temperatures and urban heat island effect? *Environments* 12(3): 87.
 25. Athukorala, D. and Y. Murayama(2021) Urban heat island formation in Greater Cairo: Spatio-temporal analysis of daytime and nighttime land surface temperatures along the urban-rural gradient. *Remote Sensing* 13(7): 1396.
 26. Bigg, G. R., S. M. Wise, E. Hanna, D. Mansell, R. G. Bryant and A. Howard(2014) Synoptic climatology of cold air drainage in the Derwent Valley, Peak District, UK. *Meteorological Applications* 21(2): 161-170.
 27. Bowler, D. E., L. Buyung-Ali, T. M. Knight and A. S. Pullin(2010) Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 97(3): 147-155.
 28. Chen, J., K. Wang, P. Du, Y. Zang, P. Zhang, J. Xia, C. Chen and Z. Yu(2024) Quantifying the main and interactive effects of the dominant factors on the diurnal cycles of land surface temperature in typical urban functional zones. *Sustainable Cities and Society* 114: 105727.
 29. Goulden, M. L., S. D. Miller and H. R. Da Rocha(2006) Nocturnal cold air drainage and pooling in a tropical forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111(D8).
 30. Grunwald, L., M. Kossmann and S. Weber(2019) Mapping urban cold-air paths in a central European city using numerical modelling and geospatial analysis. *Urban Climate* 29: 100503.
 31. He, T., N. Wang, J. Chen, F. Wu, X. Xu, L. Liu, D. Han, Z. Sun, Y. Lu, Y. Hao and Z. Qiao(2024) Direct and indirect impacts of land use/cover change on urban heat environment: A 15-year panel data study across 365 Chinese cities during summer daytime and nighttime. *Landscape Ecology* 39(3): 67.
 32. Hong, J. W., J. Hong, E. E. Kwon and D. K. Yoon(2019) Temporal dynamics of urban heat island

- correlated with the socio-economic development over the past half-century in Seoul, Korea. *Environmental Pollution* 254: 112934.
33. Hua, L., X. Zhang, Q. Nie, F. Sun and L. Tang(2020) The impacts of the expansion of urban impervious surfaces on urban heat islands in a coastal city in China. *Sustainability* 12(2): 475.
 34. Huang, X., J. Song, C. Wang, T. M. Chui, and P. W. Chan(2021) The synergistic effect of urban heat and moisture islands in a compact high-rise city. *Building and Environment* 205: 108274.
 35. Jay, O., A. Capon, P. Berry, C. Broderick, R. De Dear, G. Havenith, Y. Honda, R. Sari Kovats, W. Ma, A. Malik, N. B Morris, L. Nybo, S. Seneviratne, J. Vanos and L. Ebi(2021) Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: From personal cooling strategies to green cities. *The Lancet* 398(10301): 709–724.
 36. Kim, J., A. Khouakhi, R. Corstanje and A. S. Johnston(2024) Greater local cooling effects of trees across globally distributed urban green spaces. *Science of the Total Environment* 911: 168494.
 37. Kong, Y. S.(2025) The relationship between urban morphology and the urban heat island effect: A study of cooling strategies in urbanized areas. *Applied and Computational Engineering* 122: 77–83.
 38. Kousis, I., I. Pigliautile and A. L. Pisello(2021) A mobile vehicle-based methodology for dynamic microclimate analysis. *International Journal of Environmental Research* 15(5): 893–901.
 39. Lai, D., W. Liu, T. Gan, K. Liu and Q. Chen(2019) A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment* 661: 337–353.
 40. Lu, Y., L. Chapman, E. J. Ferranti and C. Pfrang(2025) The relationship between street greenery and daytime air temperature: A study based on parameters derived from street view images. *Urban Climate* 64: 102623.
 41. Martini, A., D. Biondi and A. C. Batista(2018) Distance and intensity of microclimatic influence provided by urban forest typologies. *Floresta e Ambiente* 25(2): e00021317.
 42. Méndez-Lázaro, P. A., C. M., Pérez-Cardona, E. Rodríguez, O. Martínez, M. Taboas, A. Bocanegra and R. Méndez-Tejeda(2018) Climate change, heat, and mortality in the tropical urban area of San Juan, Puerto Rico. *International Journal of Biometeorology* 62(5): 699–707.
 43. Mirzaei, P. A. and F. Haghighat(2010) Approaches to study urban heat island-abilities and limitations. *Building and Environment* 45(10): 2192–2201.
 44. Mohajerani, A., J. Bakaric and T. Jeffrey-Bailey(2017) The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management* 197: 522–538.
 45. Morabito, M., A. Crisci, G. Guerri, A. Messeri, L. Congedo and M. Munafò(2021) Surface urban heat islands in Italian metropolitan cities: Tree cover and impervious surface influences. *Science of the Total Environment* 751: 142334.
 46. Murage, P., S. Hajat and R. S. Kovats(2017) Effect of night-time temperatures on cause and age-specific mortality in London. *Environmental Epidemiology* 1(2): e005.
 47. Obradovich, N., R. Migliorini, S. C. Mednick and J. H. Fowler(2017) Nighttime temperature and human sleep loss in a changing climate. *Science advances* 3(5): e1601555.
 48. Oke, T. R.(1982) The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108(455): 1–24.
 49. Paschalis, A., T. C. Chakraborty, S. Fatichi, N. Meili and G. Manoli(2021) Urban forests as main regulator of the evaporative cooling effect in cities. *AGU Advances* 2(2): e2020AV000303.
 50. Ruiz, M. A., M. B. Sosa, E. N. Correa and M. A. Cantón(2017) Design tool to improve daytime thermal comfort and nighttime cooling of urban canyons. *Landscape and Urban Planning* 167: 249–256.
 51. Shi, Z., X. Xu and G. Jia(2021) Urbanization magnified nighttime heat waves in China. *Geophysical Research Letters* 48(15): e2021GL093603.
 52. Son, J. M., J. H. Eum and S. Kim(2022) Wind corridor planning and management strategies using cold

- air characteristics: The application in Korean cities. *Sustainable Cities and Society* 77: 103512.
53. Steigerwald, F., M. Kossmann, H. Schau-Noppel, S. Buchholz and O. Panferov(2022) Delimitation of urban hot spots and rural cold air formation areas for nocturnal ventilation studies using urban climate simulations. *Land* 11(8): 1330.
54. Yadav, N., K. Rajendra, A. Awasthi, C. Singh and B. Bhushan(2023) Systematic exploration of heat wave impact on mortality and urban heat island: A review from 2000 to 2022. *Urban Climate* 51: 101622.
55. Yang, X., X. Xu, Y. Wang, J. Yang and X. Wu(2024) Heat exposure impacts on urban health: A meta-analysis. *Science of The Total Environment* 947: 174650.
56. Zhang, M., W. Bae and J. Kim(2019) The effects of the layouts of vegetation and wind flow in an apartment housing complex to mitigate outdoor microclimate air temperature. *Sustainability* 11(11): 3081.
57. 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.