

동일 시공간 조건에서의 저층·고층 주거지 LST 산출 방법 비교* - 위성영상, 시뮬레이션, UAV를 중심으로 -

이승현¹⁾²⁾ · 장국화³⁾ · 송영근⁴⁾ · 길승호⁵⁾

¹⁾서울대학교 환경대학원 협동과정조경학 · ²⁾서울대학교 스마트시티 글로벌 융합 전공 ·

³⁾서울대학교 스마트시티 글로벌 융합 혁신인재양성 교육연구단 ·

⁴⁾서울대학교 환경대학원 환경설계학과, 교수 · ⁵⁾강원대학교 산림환경과학대학 생태조경디자인학과, 교수

Comparing LST Estimation Methods under Matched Spatiotemporal Conditions in Low- and High-Rise Residential Areas* - Satellite, Simulation, and UAV Approaches -

Lee, Seunghyeon¹⁾²⁾ · Jang, Gukhwa³⁾ · Song, Youngkeun⁴⁾ and Kil, Sung-Ho⁵⁾

¹⁾Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,

²⁾Integrated Major in Smart City Global Convergence, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,

³⁾Innovative Human Resource Development Education and Research Group for Smart City Global Convergence, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,

⁴⁾Professor, Department of Environmental Design, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,

⁵⁾Professor, Department of Ecological Landscape Architecture Design, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea.

ABSTRACT

As climate change and the urban heat island effect intensify, there is a growing need for fine-scale assessments of urban thermal environments. This study compares land surface temperature (LST) derived from three approaches—satellite imagery (Landsat 9), microclimate simulation (ENVI-met),

* 본 연구성과물은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. RS-2024-00461971)

First author : Lee, Seunghyeon, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University; and Integrated Major in Smart City Global Convergence, Seoul National University,
Tel : +82-2-880-8860, Email : shlee5598@snu.ac.kr

Corresponding author : Jang, Gukhwa, Innovative Human Resource Development Education and Research Group for Smart City Global Convergence, Seoul National University, Postdoctoral Researcher,
Email : nrghk6811@snu.ac.kr

Received : 5 February, 2026. **Revised** : 25 March, 2026. **Accepted** : 26 March, 2026.

and thermal unmanned aerial vehicle (UAV) observations—under identical summer conditions in two types of residential areas (low-rise and high-rise) of Chuncheon, South Korea. To ensure comparability across methods, building footprints were excluded from all datasets, and analyses were conducted at the Landsat 9 pixel scale (30 m) to avoid pseudo-replication, yielding 223 spatial units. Descriptive statistics, pixel-level Pearson correlation analysis, and mixed-design analysis of variance (mixed ANOVA) were applied. Mean LST differed substantially by method, with Landsat showing the highest values (42.7°C), followed by UAV (33.8°C) and ENVI-met (28.3°C). By residential type, UAV revealed the largest contrast between low-rise (37.4°C) and high-rise (31.9°C) areas (5.5°C), whereas smaller differences were observed for Landsat (43.6°C vs. 41.7°C, 1.9°C) and ENVI-met (30.4°C vs. 27.1°C, 3.3°C). Correlation analysis indicated generally limited spatial agreement among methods; however, a strong positive correlation was found between UAV and ENVI-met in high-rise areas ($r = 0.736$, $p < 0.001$), whereas no significant correlation was observed in low-rise areas or between Landsat and either high-resolution sensor in either residential type. The absence of significant correlation between Landsat and high-resolution sensors reflects the within-pixel thermal heterogeneity (UAV std: 4.92°C; ENVI-met std: 3.89°C) that is averaged into a single Landsat value. Results from the mixed ANOVA demonstrated that LST estimation method, residential type, and their interaction were all statistically significant ($p < 0.001$). The main effect of method was particularly strong ($\eta^2 = 0.898$), and simple effects analysis revealed that the magnitude of LST contrast between residential types varied across methods, with high-rise areas showing larger effect sizes than low-rise areas (e.g., Landsat vs. ENVI-met: $g = +7.984$ vs. $+4.588$). Overall, the three LST approaches provide distinct interpretations of urban thermal conditions even under identical spatiotemporal conditions. Rather than assuming direct equivalence among LST products, effective urban heat assessments require careful selection or combined use of methods based on urban morphology and specific research objectives.

Key Words: *Thermal UAV, Microclimate simulation, ENVI-met, Satellite image, Land surface temperature*

I. Introduction

기후변화가 가속화되면서 도시 지역 열환경 악화에 대한 연구는 전 세계적으로 중요해지고 있다. 특히 도시에서는 높은 불투수면, 인공열 배출 등으로 인해 주변 농촌 대비 기온이 높아지는 도시열섬 현상이 발생하며, 이는 폭염 시 열스트레스 및 열관련 건강위험을 증가시키는 핵심 요인으로 지적된다(박종철 & 채여라, 2020). 특히 인공표면의 확장과 도시 구조의 복잡화로 인해 도시 내부의 미세 열 분포가 더욱 불균질해지고 있으며, 이에 따라 도시 미기후를

정밀하게 관찰하고 이해하기 위한 다양한 분석 기법이 필요해지고 있다.

이러한 배경 속에서 도시 열환경 연구는 전통적으로 기상 관측소 자료, 현장 실측, 위성영상 기반 분석, 미기후 시뮬레이션을 중심으로 발전해왔다(Cheval et al., 2024; Jang & Kim, 2021). 기상 관측소 자료는 장기간에 걸친 연속적 시계열 관측이 가능하다는 장점이 있으나, 관측소의 공간적 밀도가 제한적이어서 도시 내부의 미세한 열환경 변동을 충분히 반영하기 어렵다. 현장 실측은 측정 지점에서의 높은 정확도와 유연한 측정 설계를 제공하지만, 시간 및 비용 소모로 인해 측정 가능

한 공간 범위가 제한된다는 한계가 있다. 반면 위성 영상 자료는 광범위한 지역을 일관된 방식으로 관측할 수 있으나, 공간해상도가 상대적으로 낮아 복잡한 도시 구조와 피복에 따른 세부적인 열환경 차이를 포착하는 데 제약이 따른다(Voogt & Oke, 2003; Rasul et al., 2017). 마지막으로 미기후 시뮬레이션은 도시 형태, 식생, 표면 물성 등 다양한 요소를 반영하여 가상 공간에서 열환경을 평가할 수 있으나, 입력 자료의 품질과 모델 설정에 따라 결과 오차가 확대될 수 있고, 높은 연산 비용이 요구된다는 제약이 존재한다(Aleksandrowicz et al., 2023).

이와 같은 한계를 보완하기 위한 방안으로 2010년대 이후 열화상 드론(Unmanned Aerial Vehicle; UAV)을 활용한 도시 열환경 분석 연구가 주목받고 있다(김성현 외 3인, 2022; Soto-Estrada et al., 2017; 이근왕, 2025; Lee et al., 2021; Cho et al., 2023; Ahmad et al., 2025). UAV에 열화상 카메라를 탑재하여 수 m 혹은 그보다 세밀한 수준의 고해상도 지표면온도(Land Surface Temperature; LST) 자료를 획득할 수 있으며, 관측 시점과 영역을 연구 목적에 따라 조정할 수 있다는 점에서 위성 기반 관측의 한계를 보완할 수 있다(Henn & Peduzzi, 2024). 또한 상대적으로 높은 공간 및 시간 해상도, 다각도 관측, 측정 유연성 및 비용 효율성을 바탕으로 도시 내부의 국지적 열 패턴과 고온 지점을 파악하는 데 유리하다(Song and Park, 2020).

선행 연구에서는 UAV 기반 LST가 기존의 방법(현장 실측, 위성영상, 미기후 시뮬레이션)으로 산출한 LST를 대체하거나 보완할 수 있는 수단임을 밝혔다(Ji et al., 2025; Kim et al., 2021; Jiang et al., 2025). Song et al. (2020)의 연구에서는 UAV 기반 LST가 현장 실측 자료와 높은 일치도를 보여, 미시 스케일 열패턴 진단에 유효함을 제시하였다. 또한, 기존 현장 실측 자료를 대체하여 CFD (Computational Fluid Dynamics) 미기후

시뮬레이션 모델의 효과 검증 및 보정에 유용하게 활용될 수 있다(Moediartianto et al., 2026).

그러나 열환경 분석을 위한 최적의 방법론 선택에는 여전히 한계가 존재한다. 기존의 선행 연구들은 UAV 자료와 단일 방법론 간의 상관성 및 정확도 평가에 집중되어 왔다. 반면 UAV, 위성영상, 미기후 시뮬레이션 기반 LST를 동일 시공간 조건에서 종합적으로 비교한 연구는 제한적이다. 특히 한국 도시를 사례로 이러한 방법론을 체계적으로 비교한 실증 연구는 충분하지 않다. 한국의 도시 주거 구조는 저층 주거지와 고층 아파트 단지가 공간적으로 혼재하는 특성을 가지며, 동일 도시 내부에서도 건물 높이와 밀도, 표면 재질, 녹지 구성, 통풍 조건 등 미기후 조절 요소가 크게 달라질 수 있다. 따라서 동일 도시 내에서도 주거지 유형에 따라 LST의 공간적 분포 패턴과 평균 수준이 서로 다른 방식으로 나타날 가능성이 크며, 자료 특성에 따라 두 결과가 다르게 해석될 수 있다. 이처럼 이질적인 도시 구조에서는 단일 관측 또는 단일 모형만으로 열환경을 충분히 설명하기 어렵기 때문에, 서로 다른 방법론을 결합한 다원적 관측과 상호 검증이 필요하다.

따라서 본 연구는 춘천시의 고층 및 저층 주거지를 대상으로 위성 영상, ENVI-met 미기후 시뮬레이션, UAV 기반 LST를 비교 분석함으로써 각 방법론이 도시 미기후를 어떻게 포착하는지, 어떤 차이와 한계를 가지는지, 그리고 상호 보완 가능성이 무엇인지를 체계적으로 규명하고자 한다. 구체적으로, (1) 방법별 LST의 평균 수준과 분포 특성을 기술통계로 비교하고, (2) Landsat 9 픽셀(30m) 단위의 상관분석을 통해 동일 위치에서의 공간 패턴 일치도를 평가하며, (3) 혼합설계 분산분석(mixed ANOVA)을 통해 방법, 주거지 유형, 그리고 상호작용 효과를 검정하여 평균 수준 차이와 유형 대비가 방법에 따라 달라지는지를 정량적으로 확인한다. 이를 통해 도시 미기후 분석에서의 방법론 선택

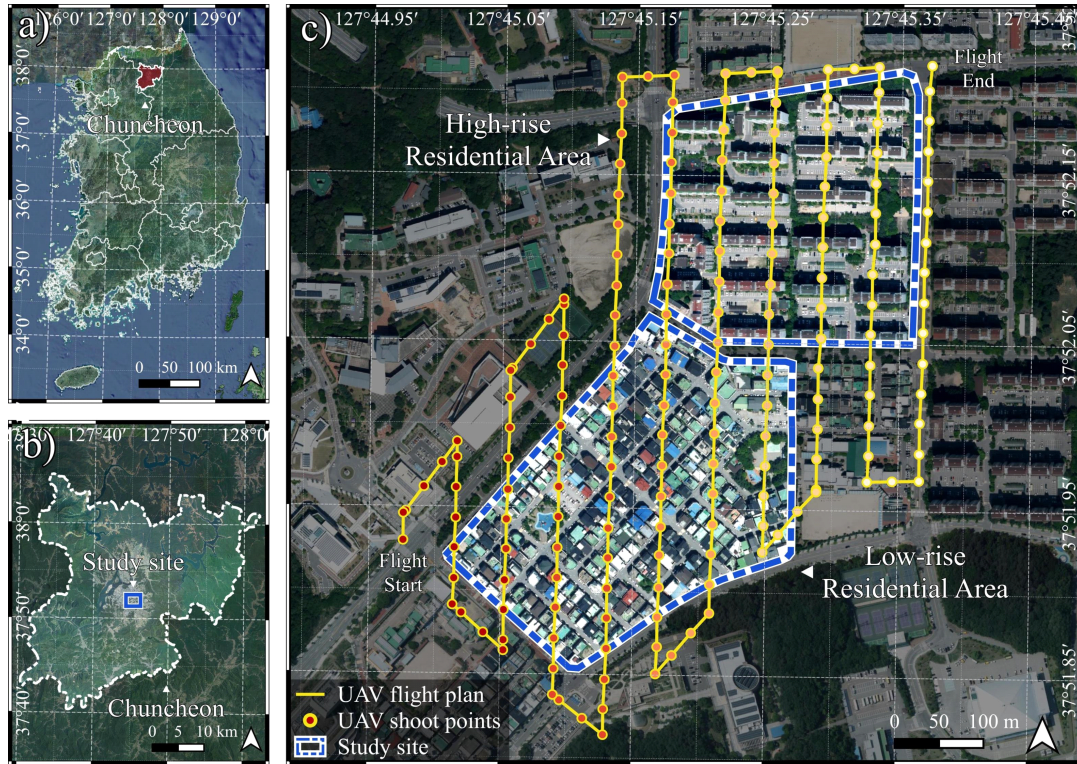


Figure 1. Study site. a)The location of Chuncheon, South Korea; b)The location of study site in the Chuncheon; c)The northern and southern part of study site is high-rise and low-rise residential area. The yellow line and colorized points indicate UAV flight path and location of shoot points

및 결합 방식에 대한 실증적 근거를 제시하고, 다양한 도시 구조에 적용 가능한 열환경 평가 체계 구축의 가능성을 논의하고자 한다.

II. Methods

1. 연구대상지

본 연구의 대상지는 강원특별자치도 춘천시 석사동의 주거지 일대이다(Figure 1). 연구대상지는 서쪽으로 강원대학교 춘천캠퍼스가 자리하고 동쪽으로는 구릉지가 자리 잡고 있다. 본 연구에서는 도시 공간의 다양한 물리적 특징을 고려하여 한국 도시에서 가장 대표적인 주거 형태인 다세대주택 및 단독주택으로 구성된 저층주거지와 고층주거지(아파트단지)를 대상지로 선정하였다.

저층주거지 대상지는 약 10만 m^2 (약 10ha) 규모로, 3~5층 규모의 다세대주택이 밀집한 블록 단위의 주거지이다. 이 지역은 1층부 근린상업시설과 상층부 주거가 혼재하는 용도복합 건물이 다수 분포하며, 생활도로망과 소규모 상권으로 이루어진 전형적인 저층 도시조직을 보인다. 대상지 내부는 근린공원 2개를 제외하면 식생 피복이 거의 없으며, 도로 및 보도 등 불투수포장면의 비율이 높은 것이 특징이다.

고층주거지 대상지는 약 8ha 규모의 아파트 단지로, 1990년대 후반에 건설된 4개 단지(각 438세대, 515세대, 563세대, 498세대)로 구성된다. 단지 내 아파트는 15~18층 규모의 판상형 동 배치가 특징이며, 동 사이로 조경 공간과 어린이 놀이터, 주차장이 배치된 전형적인 중고층 아파트 단지 형태를 보인다.

이와 같이 석사동의 저층주거지와 고층주거지는 한국 도시 주거 구조를 대표하는 두 유형을 동시에 포괄하면서도, 건물 높이 및 규모, 식재 유형, 포장 패턴 등이 뚜렷이 대비되는 공간이다. 따라서 본 연구에서는 이 두 대상지를 통해 UAV, 미기후 시뮬레이션, 위성 기반 열자료가 서로 다른 도시 주거 구조에서 나타나는 열적 특성을 어떻게 포착하고, 각 방법론의 장단점과 보완 가능성이 무엇인지를 정교하게 비교 분석하고자 한다.

2. LST 산출 방법

본 연구에서는 도시 열환경 분석을 위해 위성영상, 미기후 시뮬레이션, UAV 기반 LST를 중심으로 연구를 수행하였다(Table S1). 자료 확보 일자는 2022년 6월 22일이며, 이는 한국의 평균적인 여름날이다. AWS 기상관측소(위도 37.94738° N, 경도 127.75443° E)에 따르면 당일 일평균 기온은 28.8°C, 일최고는 32.7°C, 일최저는 26.2°C였고, 강수는 관측되지 않았다. 시간대별로는 북서-서남서 계열의 약한 바람(10m 풍속 0.1-2.7 m/s)이 지속되었으며, 상대습도는 새벽 90%대에서 오후 30-40%대로 점차 낮아졌다. 본 연구에서는 위성영상 촬영 시간을 고려하여 오전 11시를 촬영 및 자료 확보 시간으로 선정하였다. 이 시간대 전후에는 기온 27.6°C, 상대습도 64%, 풍속 1.4 m/s(서북서)가 기록되었다.

본 연구에서 비교 분석하는 세 방법에 의한 LST는 관측 스케일, 에너지 산출 방식, 그리고 포함되는 지표면 구성 요소에 따라 서로 다른 물리적 표현 범위와 정의를 갖는다. 위성영상 기반 LST는 광역 지역의 복사 휘도(Radiance)를 대기 보정 및 지표 방사율을 적용하여 산출한 온도로, Landsat 9는 30m 해상도의 한 픽셀 내에 도로, 식생, 그림자 등이 혼합된 평균적 열 에너지를 나타낸다. ENVI-met 시뮬레이션의 LST는 도시의 물리적 형태, 포장 재질, 식생 등

의 정보를 입력받아 모델링을 통해 계산된 이론적 온도로, 본 연구에선 건물 격자가 제외된 지면부 온도를 의미하며, 이는 별도의 후처리 마스킹을 수행한 것이 아닌 ENVI-met 모델의 출력 정의에 따른 것이다. 마지막으로, UAV 기반 LST는 지면과 인접한 저고도에서 열화상 센서를 통해 직접 포착한 고해상도의 유효 복사 온도로, 아스팔트 도로, 개별 수목 등을 식별해 도시 공간의 미세한 지표면 열환경을 가장 민감하게 반영한다.

1) 위성자료

위성자료를 통한 광역적 LST 분포를 산정하기 위해 Landsat 9 OLI/TIRS Collection 2 Tier 1 Level-2 자료를 활용하였다. Landsat 자료의 전처리 및 LST 산정은 Google Earth Engine (GEE) 환경에서 수행하였다. 본 연구에서는 Level-2 이미지에 포함된 Surface Temperature band를 LST 산정의 입력 자료로 사용하였다. ST_B10은 대기 보정 및 지표 방사율(emissivity)이 반영된 LST 산출물로, 본 연구에서는 원시 열적외선 밴드로부터 밝기온도(brightness temperature)를 산출하고 NDVI 기반 방사율을 추가로 계산하는 전통적인 LST 산정 절차를 별도로 적용하지 않았다. 대신 Level-2 ST 제품의 메타데이터에 제공된 밴드별 스케일 팩터와 오프셋을 적용하여 Kelvin 단위의 LST를 계산한 후, 273.15를 차감하여 섭씨(°C) 단위의 LST로 변환하였다. LST 산정식은 Equation (1) 과 같다.

$$\text{Equation (1). LST (}^\circ\text{C)} = \text{ST_B10} \times \text{scale} + \text{offset} - 273.15$$

이렇게 산정된 LST는 연구대상지를 포함하는 영역으로 클리핑하여 불필요한 외곽 영역을 제거하였으며, 최종 결과는 30m 공간해상도의 래스터 자료로 출력하였다.

2) 미기후 시뮬레이션

미기후 시뮬레이션은 ENVI-met를 이용하여 LST 분포를 산출하였다. ENVI-met은 도시 미기후 평가를 위한 CFD 기반 모델로, 건물, 포장, 식생, 지형 정보를 입력하여 블록 단위의 미기후 변화를 고해상도로 재현하는 데 적합하다. 본 연구에서는 먼저 SketchUp 프로그램을 활용하여 저층주거지와 고층주거지에 대한 3차원 공간 모델을 구축하였다 (Table S2). 공간 모델의 격자 해상도는 수평 방향(x, y축) 2m, 수직 방향(z축) 3m로 설정하였다. 저층주거지 모델의 경우, 격자 수는 x축 221개(약 442m), y축 211개(약 422m), z축 30개(약 90m)로 구성되며, 저층 건물과 인접 공원, 주변 도로망이 포함되도록 시뮬레이션 영역을 설정하였다. 고층주거지 모델은 x축 159개(약 318m), y축 172개(약 344m), z축 52개(약 156m)의 격자로 구성하여, 15~18층 아파트 동 전체와 단지 내 녹지, 주차장, 보행 공간이 충분히 포착되도록 하였다.

본 시뮬레이션의 공간모델에는 건물, 도로, 공원, 바닥 포장, 지형, 수목 및 초본류 식재를 반영하였다. 먼저 지형은 수치지도를 기반으로 DEM을 구축하여 구현하였으며, 건물은 이를 바탕으로 실제 배치와 형태를 반영하여 모델링하였다. 식재는 가로수와 공원 내 교목을 대상으로 인공위성 자료와 비교하여 식재 위치와 유형을 고려해 배치하였다. 다만 본 연구에서는 교목만 구현하였으며, 관목과 초화류는 제외하였다. 포장 재질의 경우 건물 외벽과 옥상은 세부 마감재를 구분하지 않고 ENVI-met의 기본 건물 표면 조건을 적용하였다. 도로는 아스팔트로 설정하였고, 그 외 바닥면은 콘크리트로 처리하였다. 식재 유형, 도로 포장 재질, 건물 표면 조건 등 주요 표면 특성은 저층주거지와 고층주거지 모델에서 동일하게 적용하여, 건물 높이와 배치 등 공간구조의 차이가 열환경에 미치는 영향을 중심으로 분석하였다.

ENVI-met 시뮬레이션은 열화상 드론 촬영이

수행된 시기와 일치하도록 2022년 6월 22일을 기준일로 설정하여 수행하였다 (Table S3). 시뮬레이션 구동 시간은 태양고도 변화에 따른 일사 조건을 반영하기 위해 일출 시점인 06:00부터 시작하였으며, ENVI-met 모델은 안정적인 미기후 재현을 위해 최소 6시간 이상의 구동이 필요하다는 점을 고려하여 15:00까지 총 9시간 동안 수행하였다. 또한, 일 최고 기온과 열환경이 두드러지는 시간대를 포함하도록 구동 시간을 설정하였으며, 최종 분석에는 11:00 시점의 LST 값을 사용하였다. 시뮬레이션을 위한 기상 조건값으로는 해당일의 시간별 기온과 상대습도를 입력하였다. 해당일의 시간별 기온은 평균 27.1°C였고, 22.0-32.6°C 범위에서 분포하였으며, 상대습도는 평균 70.3%였고, 48-96% 범위로 나타났다. 본 시뮬레이션 구동 시간인 06:00부터 15:00까지의 기온은 평균 27.6°C로, 전체적으로 매우 높은 수준은 아니었으나 정오 이후 점차 상승하여 일부 시간대에서는 30°C를 상회하였다. 또한 풍속과 풍향은 해당일의 일평균 값을 적용하였으며, 10 m 고도에서의 풍속은 1.5 m/s, 풍향은 220°의 남서풍 계열로 설정하였다.

3) 열화상 드론

도시 주거지의 미세 공간 단위 열환경을 고해상도로 관찰하기 위해 열화상 센서를 탑재한 UAV를 활용하여 LST 지도를 구축하였다. 촬영에는 DJI Matrice 210 기체와 FLIR Zenmuse XT2 열화상 카메라를 사용하였다. Zenmuse XT2는 실화상(RGB)과 열화상(Thermal)을 동시에 취득할 수 있는 듀얼 센서 장비로, 본 연구에서는 두 영상 자료를 함께 확보하였다. RGB 이미지는 4,000 × 3,000 픽셀 해상도로, 열화상 이미지는 640 × 512 픽셀 해상도로 취득되었다.

UAV 촬영 또한 2022년 6월 22일, Landsat 9 위성이 연구대상지 상공을 통과하는 날짜와 동일한 날에 수행되었으며, 촬영 시 절대고도는

약 345m이며, 연구 대상지와의 상대 고도는 200m였다. 영상 정합과 정사영상 생성을 안정적으로 수행하기 위해, 전방 중첩률 75%, 측방 중첩률 60%로 계획하여 진행하였다. 짐벌 피치 -90° 의 수직 하향 조건으로 촬영하였으며, 총 180장의 열화상/실화상 이미지를 획득하였다. 촬영 시작 시각은 위성 관측 시각과의 시공간 정합성을 확보하기 위해 오전 11시경으로 설정하였다. 또한 열화상 이미지 병합 과정에서 발생할 수 있는 온도 오차를 최소화하기 위해, 전체 비행 및 촬영 시간은 10분 미만으로 제한하였다. 이러한 촬영 전략은 시간 경과에 따른 일사 조건 변화 및 지표면 가열 차이가 열화상 결과에 반영되는 것을 최소화하기 위한 목적이다.

이를 통해 취득된 이미지는 Pix4D 소프트웨어를 이용하여 정사영상으로 병합하였다. 열화상 이미지의 경우, 경계부를 제외한 대부분의 영역이 픽셀당 5장을 초과하는 영상으로 덮이는 것을 확인하였다. 최종적으로 GSD 약 5.6 cm의 RGB 정사영상과 GSD 약 19 cm의 열화상 정사영상을 획득하였다. UAV 기반 열화상은 emissivity 가정 및 촬영 당시 대기 조건(바람, 습도 등)에 영향을 받을 수 있으며, 본 연구에선 현장 실측을 통한 정확도 검증이 수행되지 않아 산출된 값을 정확한 절대 표면온도로 해석하는 데에는 한계가 있다.

3. 분석 방법

1) 기술통계 및 상관성 분석

본 연구에서는 LST 취득 방법에 따른 저층 및 고층 주거지 열환경 확인을 위해, ENVI-met LST는 모델 출력 상 건물 격자가 제외된 지면부 값을 그대로 활용하였으며, UAV LST는 원본에서 건물 영역이 겹치는 픽셀을 후처리 단계에서 제외한 뒤, 기술통계값을 확인하였다. Landsat LST는 픽셀이 완벽히 건물 영역으로 제외되는 영역이 없어 모든 픽셀을 활용하였다.

기술통계값 확인에는 세 종류 LST의 원본 값

을 사용하였으나, 상관성 분석과 이후 진행된 mixed ANOVA 분석에선 세 자료의 공정한 비교를 위해, Landsat 9의 해상도인 30m 픽셀을 비교 분석의 단위로 설정하였다. 이는 고해상도인 ENVI-met이나 UAV 결과의 공간 단위를 비교 단위로 설정했을 때 나타날 수 있는 공간적 의사반복(pseudo-replication) 문제를 방지하기 위함이다. Landsat 9 LST는 각 픽셀의 단일값을, ENVI-met과 UAV는 각 결과 원본으로부터 건물 영역에 포함된 값을 제외한 후, Landsat 9 픽셀과 동일 영역의 값들에 대해 평균을 산출하였다. 또한, Landsat 픽셀 단위 공간 집계 고해상도 자료의 열환경 이질성을 얼마나 평탄화하는지 정량화하기 위하여 표준편차로 산출하였다. 해상도가 2m 인 ENVI-met 결과를 기준으로, 셀 수가 5개 미만으로 포함되는 경계부의 Landsat 9 LST 영역은 분석에서 제외하였다. 최종적으로, 저층주거지 117개, 고층주거지 106개의 분석 단위를 확보하였다.

이후, 30m 해상도 단위로 집계된 값을 활용해 격자 기반의 상관분석을 수행하였다. 구체적으로, 세 방법 간 모든 쌍(Landsat vs ENVI-met, Landsat vs UAV, ENVI-met vs UAV)을 대상으로 피어슨 상관계수(r)와 유의확률(p)을 산출하였고, 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 통계적 유의성을 판정하였다. 모든 전처리와 통계 계산은 QGIS와 Python을 활용하여 수행하였다.

2) mixed ANOVA

세 가지 방법으로 산출된 LST 차이를 검정하기 위해 Landsat의 30m 해상도 단위로 확보한 분석 단위값에 대해 혼합설계 분산분석(mixed analysis of variance, mixed ANOVA)을 수행하였다. mixed ANOVA는 동일 분석 단위에서 반복 산출된 복수의 요인을 동시에 고려할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 산출 방법에 따른 LST의 절대적 수준 차이, 주거지 유형(저층·고층)에 따른 차이, 그리고 주거지 유형 간 LST

Table 1. Summary statistics of land surface temperature at original spatial resolution with building-footprint masking applied (Unit: °C)

Source	Area	Mean	Std	Min	Max	CI 95_lower	CI 95_upper
Landsat	overall	42.7	1.3	39.5	45.4	42.6	42.9
	low-rise	43.6	0.9	39.5	45.4	43.5	43.8
	high-rise	41.7	0.7	40.5	43.2	41.6	41.8
ENVI-met	overall	28.3	5.8	20	45	28.2	28.3
	low-rise	30.4	6.7	20	45	30.2	30.5
	high-rise	27.1	4.8	20	35	27	27.2
Thermal UAV	overall	33.8	6.8	5.1	65.7	33.8	33.8
	low-rise	37.4	6.2	18.8	65.7	37.4	37.4
	high-rise	31.9	6.3	5.1	61.2	31.9	31.9

대비가 산출 방법에 따라 달라지는지 여부(상호작용 효과)를 평가하는 데 사용하였다.

LST를 종속변수로 설정하고, 세 가지 LST 산출 방법은 반복 산출 요인으로(within-subject factor), 주거지 유형은 집단 요인(between-subject factor)으로 설정하였다. 이를 통해 산출 방법의 주효과, 주거지 유형의 주효과, 그리고 산출 방법×주거지 유형 간 상호작용 효과를 검정하였다. 주효과는 다른 요인의 수준과 무관하게 해당 요인이 LST 평균에 미치는 영향을 의미하며, 상호작용 효과는 저층과 고층 주거지 간 LST 차이의 크기가 산출 방법에 따라 동일하게 나타나는지를 평가한다. 각 효과의 유의성 확인 후, 차이의 방향과 크기를 확인하기 위해 추가 분석을 수행하였다. 산출 방법은 방법 간 쌍비교(pairwise comparisons)를 수행하고 다중 비교에 따른 오류를 제어하기 위해 Holm 보정을 적용하였다. 주거지 유형은 두 수준으로 구성되어 주효과 자체가 단일 비교이므로, 주거지 유형 주효과에 대한 별도 사후검정은 수행하지 않았다. 다만 상호작용 효과가 유의한 경우, 각 산출 방법별로 저층과 고층의 평균 LST 차이를 확인하는 단순효과 분석을 수행하였다.

또한, 통계적 유의성과 함께 차이의 실질적 크기를 제시하기 위해 효과크기를 함께 보고하였다. mixed ANOVA의 주효과 및 상호작용 효

과에 대해서는 부분 에타 제곱(partial eta squared; η^2)을 사용하였으며, 이는 전체 LST 변동 중에서 해당 요인이 독립적으로 설명하는 비율을 의미한다. 즉, η^2 값이 클수록 해당 요인이 LST 차이에 미치는 영향이 상대적으로 크다는 것을 나타낸다. 쌍비교 및 단순효과 분석에서는 두 집단 평균 차이를 표준편차로 나눈 Hedges g 를 사용하였다.

III. Results

1. 산출 방식 및 주거지 유형별 온도 분포 특성

본 절에서는 위성영상, ENVI-met 시뮬레이션, UAV 기반 LST 자료의 평균 수준, 분포 특성, 공간적 이질성에 따른 차이를 기술통계와 공간패턴 관찰에 기반하여 분석하였다. 세 자료 간 LST의 평균 수준과 분포 폭에는 큰 격차가 확인되었고, 동일 자료 내에서도 주거지 유형(저층 및 고층주거지)에 따라 LST의 분포가 뚜렷이 달랐다(Table 1 & Figure 2).

첫 번째로 위성영상을 통해 확보한 LST 자료는 전체 평균이 42.7°C로 세 자료 중 가장 높았다. 반면 LST의 분포 범위는 39.5–45.4°C(표준편차 1.3°C)로 가장 공간적 차이가 미미하였다. 이는 상대적으로 낮은 공간 해상도(30m)로 인해 소규모 연구 대상지의 LST 공간적 이질성을

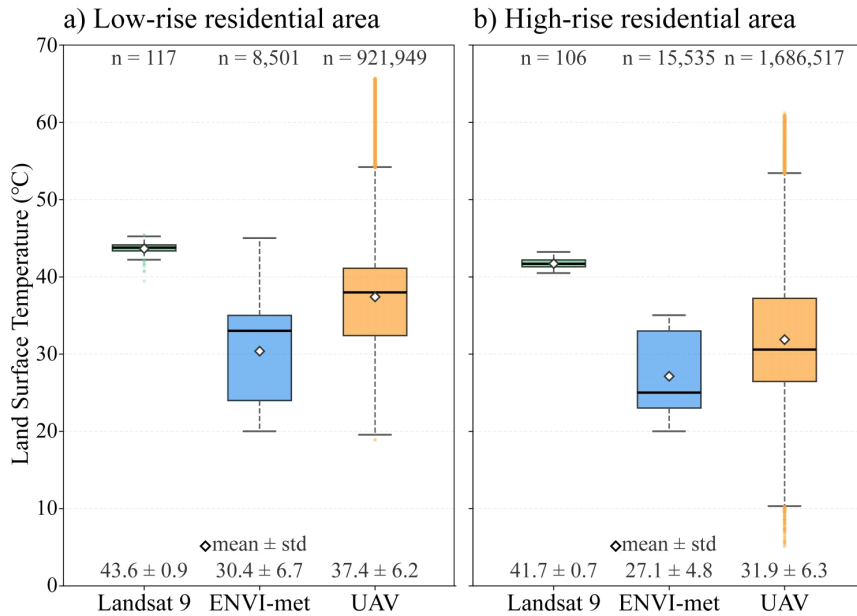


Figure 2. Boxplots of land surface temperature by data source at a) Low-rise residential area; b) High-rise residential area

포착하는 데 한계가 있었기 때문이다(Figure 3a). 주거지 유형별로는 저층주거지에서 평균 43.6°C(95% CI: 43.5–43.8), 고층주거지에서 평균 41.7°C(95% CI: 41.6–41.8)로 확인되었다. 건물이 밀집되고 식재가 적은 저층주거지에서 고층주거지에 비해 평균적으로 LST가 약 1.9°C 높았으며, 분포 범위도 더 크게 나타났다.

둘째, ENVI-met 시뮬레이션으로 산출한 LST는 전체 평균이 28.3°C(95% CI: 28.2–28.3)로 세 자료 중 가장 낮았다. 온도 분포는 20.0–45.0°C(표준편차 5.8°C)의 범위를 보여 분포 폭은 두 번째로 큰 편이었다. 이러한 상대적으로 낮은 LST 수준은, 우선 시뮬레이션 입력값으로 사용한 해당일 대기온도의 평균이 약 27.6°C로 비교적 낮은 수준이었던 점과 관련이 있는 것으로 해석된다. 또한 ENVI-met은 2m 공간 해상도에서 건물 배치, 협곡형 가로 공간, 주변 구조물에 의한 그림자 효과를 크게 반영하므로, 일사 노출이 제한되는 그리드에서는 지표온도가 상대적으로 낮게 산출되는 특성이 있다. 그럼에도

불구하고 위성영상 대비 정밀한 미시적 이질성을 포착할 수 있으며, 이에 따라 넓은 온도 분포와 높은 표준편차가 나타났다. 주거 유형별로는 고층주거지 27.1°C(95% CI: 27.0–27.2°C), 저층주거지 30.4°C(95% CI: 30.2–30.5°C)로, 고층이 저층보다 약 3.3°C 낮았다. 분포 폭은 저층주거지에서 더 크게 나타났으며, 저층에서는 국지적으로 45.0°C까지 상승하는 고온 셀이 관찰된 반면, 고층에서는 상한이 약 35.0°C로 제한되었다(Figure 3b).

마지막으로, UAV 열화상으로 산출한 연구 대상지 LST의 전체 평균은 33.8°C(95% CI: 33.8–33.8)이며, 분포는 5.1–65.7°C(표준편차 6.8°C)였다. 열화상 드론은 0.19m 수준의 고해상도로 공간적으로 미시적인 온도 차이를 포착할 수 있으며, 항공 관측 특성상 도로와 같은 지표면을 세밀하게 관측한다. 그 결과, 표면 피복과 일사 및 그늘 조건이 혼재하는 도시 환경에서 온도 분포 폭이 크게 확장되는 경향을 보였다. 이러한 공간 패턴은 태양복사 조건과 표면

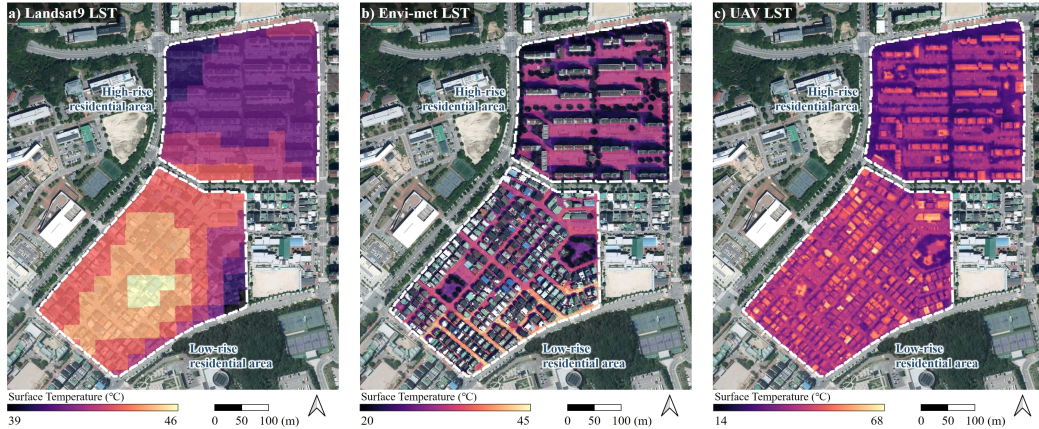


Figure 3. Spatial distribution of land surface temperature from a) Landsat 9 satellite imagery; b) ENVI-met simulation; c) Thermal UAV

재료의 열적 물성 차이에 기인하며, 그늘 및 식생 영향이 큰 구역에서는 LST가 5.1°C까지 낮아지는 반면, 아스팔트 도로 등 인공 표면에서는 65.7°C까지 상승하여 미세 공간 단위의 열 이질성이 뚜렷하게 나타났다(Figure 3c). 저층주거지의 평균은 37.4°C(95% CI: 37.4–37.4)로, 고층주거지 31.9°C(95% CI: 31.9–31.9)보다 약 5.5°C 높게 나타났다. 분포 범위 역시 저층(18.8–65.7°C)이 고층(5.1–61.2°C)보다 고온 극값이 크게 나타나, 저층주거지에서 일사에 노출된 포장면이 광범위하게 형성될 가능성을 시사한다. 한편 공간적 변동성(표준편차)은 저층 6.2°C, 고층 6.3°C로 두 지역이 유사하게 나타났는데, 이는 저층주거지의 고온 포장면과 고층주거지의 건물 그늘·반사 환경이 각각 다른 방식으로 열 이질성을 형성하기 때문으로 판단된다.

2. 방법 간 LST 공간적 분포 패턴 유사성

공간적 의사반복(pseudo-replication) 문제를 방지하기 위해 Landsat 9의 공간해상도인 30m 픽셀을 분석 단위로 설정하고, 각 픽셀 내 건물 영역을 제외한 ENVI-met 및 UAV LST의 평균값을 산출하여 세 방법 간 공간적 분포 패턴 유사성을 평가하였다(Table 2). 본 분석은 산출 방법 간 절대적 온도 수준 차이보다는, 동일 픽셀

위치에서의 LST 상대적 증감 패턴이 얼마나 일치하는지에 초점을 둔다.

저층주거지에서는 세 방법 간 모든 쌍에서 유의한 상관성이 나타나지 않았다(Landsat vs ENVI-met: $r=-0.141$, $p=0.130$; Landsat vs UAV: $r=0.107$, $p=0.251$; ENVI-met vs UAV: $r=0.106$, $p=0.256$). 이는 저층주거지의 복잡한 건물 배치와 다양한 표면 피복이 센서별로 상이하게 포착되어, 동일 위치에서의 공간 패턴 일치도가 전반적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다.

고층주거지에서는 ENVI-met과 UAV 간 강한 양의 상관성이 확인되었다($r=0.736$, $p<0.001$). 이는 고층주거지의 건물 배치와 열 분포 구조가 상대적으로 단순하고 규칙적이어서 시뮬레이션이 주요 공간 패턴을 안정적으로 재현했기 때문으로 판단된다. 반면 Landsat과 고해상도 센서 간 상관성은 고층·저층 모두에서 유의하지 않았다. 이는 30m 픽셀 내에서 UAV 표준편차가 평균 4.92°C, ENVI-met 표준편차가 평균 3.89°C에 달하는 열환경 이질성이 존재함에도 Landsat이 이를 단일값으로 평탄화하기 때문으로, 위성 기반 광역 관측의 본질적 한계를 정량적으로 반영한다.

한편 전체 연구 지역을 대상으로 하면 세 쌍 모두 유의한 상관성이 나타났다. 그러나 이는 저층과 고층주거지 간 평균 온도 수준 차이에서

Table 2. Pearson correlation coefficients (r) and p-values among three LST estimation methods at the 30 m pixel scale with building footprints excluded

Sensor pair	Overall (n=223)	High-rise (n=106)	Low-rise (n=117)
Landsat vs ENVI-met	0.322*** (p<0.001)	-0.048 (p=0.626)	-0.141 (p=0.130)
Landsat vs UAV	0.570*** (p<0.001)	-0.020 (p=0.836)	0.107 (p=0.251)
ENVI-met vs UAV	0.577*** (p<0.001)	0.736*** (p<0.001)	0.106 (p=0.256)

Table 3. Results of mixed ANOVA and post-hoc comparisons for LST by estimation method and residential area

Analysis	Effect	F	p	Effect size
Mixed ANOVA	Method	F(2, 442) = 1954.21	<0.001	$\eta^2 = 0.898$
Mixed ANOVA	Area	F(1, 221) = 285.78	<0.001	$\eta^2 = 0.564$
Mixed ANOVA	Method × Area	F(2, 442) = 39.96	<0.001	$\eta^2 = 0.153$
Post-hoc	Landsat vs ENVI-met	-	<0.001	g = +4.876
Post-hoc	Landsat vs UAV	-	<0.001	g = +2.680
Post-hoc	ENVI-met vs UAV	-	<0.001	g = -1.434

비롯된 구조적 상관으로, 동일 주거지 유형 내에서 센서 간 공간 패턴이 일치함을 의미하지 않는다. 따라서 주거지 유형을 구분한 분석이 방법 간 공간적 유사성을 평가하는 데 보다 적합하다.

종합적으로, 산출 방법 간 공간적 LST 분포 패턴 일치도는 주거지 유형에 따라 크게 달랐으며, 특히 고층주거지에서 ENVI-met과 UAV 간 공간적 유사성이 높게 나타났다. 다만 상관분석은 LST의 공간적 패턴 유사성 평가에는 유효하나, 세 방법에 따른 절대적 LST 수준이나 주거지 유형 간 평균 차이의 설명에는 한계가 있다. 이에 따라 추가적으로 혼합설계 분산분석(mixed ANOVA)을 진행하였다.

3. 산출 방식 및 주거지 유형에 따른 지표면온도의 차이

세 가지 방법으로 산출된 LST의 차이와 주거

지 유형에 따른 대비를 검정하기 위해 30m 픽셀을 분석 단위로 혼합설계 분산분석(mixed ANOVA)을 수행하였다(Table 3). 분석 결과, 산출 방법, 주거지 유형, 그리고 둘의 상호작용이 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났다(p<0.001).

먼저, 산출 방법의 주효과가 유의하게 나타나(p<0.001), 동일 30m 픽셀 단위에서도 LST 평균 수준이 산출 방법에 따라 다름을 확인하였다($\eta^2=0.898$). 이는 전체 LST 변동 중 약 90%가 방법의 차이로 설명됨을 의미하며, 세 방법 간 절대적 LST 수준 차이가 매우 크다는 것을 보여준다. 방법 간 쌍비교 결과, Landsat과 ENVI-met 간 차이가 가장 크게 나타났으며(g=+4.876), Landsat과 UAV 간에도 큰 차이가 확인되었다(g=+2.680). 반면 UAV와 ENVI-met 간 비교에서는 음의 효과크기(g=-1.434)가 나타나, UAV가 ENVI-met보다 전반적으로 더 높

Table 4. Simple effects of LST estimation method by residential area type: mean differences (°C) and effect sizes (Hedges g)

Sensor pair	High-rise (n=106)		Low-rise (n=117)	
	Mean diff (°C)	Hedges g	Mean diff (°C)	Hedges g
Landsat vs ENVI-met	15.05	7.984	13.1	4.588
Landsat vs UAV	10.37	4.356	6.34	3.332
ENVI-met vs UAV	-4.67	-1.578	-6.76	-2.047

은 LST를 산출하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 세 방법이 동일 시공간 조건에서도 서로 다른 평균 LST 기준선을 갖고 있음을 시사한다. 주거지 유형의 주효과 또한 유의하게 나타나($p < 0.001$, $\eta^2 = 0.564$), 전체적으로 저층주거지가 고층주거지보다 더 높은 평균 LST를 보였다. 이는 주거지 유형만으로도 LST 변동의 약 56%를 설명할 수 있음을 의미하며, 도시 형태 차이가 열환경에 미치는 영향이 상당함을 보여준다.

아울러, 산출 방법과 주거지 유형 간 상호작용 효과 역시 통계적으로 유의하였다($p < 0.001$, $\eta^2 = 0.153$). 이는 저층과 고층주거지 간 LST 차이의 크기가 산출 방법에 따라 다르게 나타남을 의미한다. 상호작용 효과의 구체적인 양상을 파악하기 위해 단순효과 분석을 수행하였다(Table 4). 분석 결과, 세 방법 모두에서 저층주거지가 고층주거지보다 높은 LST를 보였으나, 그 차이의 크기는 방법에 따라 뚜렷하게 달랐다. UAV에서는 저층-고층 간 평균 차이가 5.5°C (37.4 vs 31.9°C)로 가장 크게 나타난 반면, Landsat에서는 1.9°C (43.6 vs 41.7°C), ENVI-met에서는 3.3°C (30.4 vs 27.1°C)로 상대적으로 작게 나타났다. 이는 UAV가 고해상도 관측을 통해 주거지 유형 간 열환경 대비를 가장 민감하게 포착함을 시사하며, Landsat의 낮은 공간 해상도와 ENVI-met의 시물레이션 특성이 주거지 유형 간 열환경 차이를 상대적으로 완화하는 방향으로 작용함을 보여준다. 또한 고층주거지에서의 방법 간 효과크기가 저층주거지보다 전반적으

로 크게 나타나(Landsat vs ENVI-met: high $g = +7.984$ vs low $g = +4.588$), 고층주거지에서 센서 방법에 따른 LST 해석 차이가 더 두드러짐을 확인하였다.

종합하면, mixed ANOVA 결과는 세 가지 LST 산출 방법이 동일 공간에서도 서로 다른 절대적 온도 수준을 제공하며, 주거지 유형에 따른 LST 대비 또한 산출 방법에 따라 그 크기와 양상이 달라진다는 점을 명확히 보여준다. 이러한 결과는 상관분석에서 확인된 공간적 패턴 유사성과는 별도로, 방법 선택에 따라 해석되는 평균 LST 수준과 주거지 유형 간 대비가 크게 달라질 수 있음을 시사한다.

IV. Discussion

본 연구는 고층과 저층의 두 주거지 유형에서 세 종류의 방법으로 도출된 LST의 분포 특성과 방법 간 차이를 비교하였다. 분석 결과, 동일 시공간 조건 및 동일 비교 표면에서도 산출 방법에 따라 LST의 평균 수준과 분포 폭이 크게 달랐으며, 공간적 분포 패턴의 유사성 또한 주거지 유형에 따라 상이하게 나타났다. 이는 LST 자료 해석 시 산출 방법의 물리적 특성과 공간 해상도의 차이를 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다. 세 방법이 산출하는 LST는 혼합 픽셀 복사 에너지(Landsat), 모델 기반 이론적 지면 온도(ENVI-met), 직접 관측 유효 복사 온도(UAV)로 물리적 정의가 상이하며, 따라서 절대적 온도 수준의 차이를 단순히 방법론적 오차

로 해석하기보다는 각 방법이 포착하는 열환경의 본질적 차이로 이해하는 것이 적절하다.

열화상 UAV를 통해 산출된 LST는 약 0.19m의 고해상도로 포장면, 식생 등 다양한 지면 피복의 열적 이질성을 직접적으로 포착하였다(Jiang et al., 2025; Elfarkh et al., 2023). 그 결과, 고온과 저온 극값이 뚜렷하게 나타나고 전체 온도 분포 폭이 다른 자료에 비해 크게 확장되는 경향을 보였다. 특히 주변 건물과 수목에 의한 그늘 형성, 반사 및 난반사 조건이 복합적으로 작용하는 도시 환경에서는 동일 공간 내에서도 LST 변동성이 크게 확대될 수 있다(Song and Park, 2020; Kim et al., 2021). 다만 UAV 기반 열화상은 현장 방사율과 촬영시 대기 조건에 영향을 받으며, 절대 온도값의 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 특성은 UAV 기반 LST가 고온 핫스팟과 열환경의 국지적 대비를 탐지하는 데 매우 유리함을 의미하는 한편, 관측 조건에 따라 평균 LST 수준 해석에는 주의가 필요함을 시사한다.

주거지 유형별 비교에서는 방법별 평균 LST 차이의 크기가 달리 나타났다. UAV에서 저층·고층 간 평균 LST 차이가 5.5°C(37.4 vs 31.9°C)로 가장 크게 관찰되었으며, 이는 저층 주거지에서 도로 등 고온 인공표면이 광범위하게 분포한 반면, 고층주거지에서는 건물에 의한 그늘대 형성이 상대적으로 넓게 나타났기 때문으로 해석된다. 반면 Landsat에서는 주거지 유형 간 평균 차이가 1.9°C(43.6 vs 41.7°C)로 가장 완만하게 나타났는데, 이는 30m 픽셀 내에서 UAV 표준편차 평균 4.92°C, ENVI-met 표준편차 평균 3.89°C에 달하는 열환경 이질성이 단일값으로 평탄화되기 때문으로 판단된다. ENVI-met에서의 차이(3.3°C, 30.4 vs 27.1°C)는 두 방법의 중간 수준으로 나타났으며, 이는 2m 공간 해상도로 미시적 이질성을 포착하면서도 도시 구조와 표면 재료의 열적 특성을 완전히 재현하지 못하는 시뮬레이션의 한계에서 기인

한 것으로 판단된다(Moediartianto et al., 2026). 또한 ENVI-met의 전체 평균(28.3°C)이 타 방법 대비 현저히 낮게 산출된 것은 입력 파라미터 설정값 및 시뮬레이션 모델이 실제 표면 재료의 열적 특성을 완전히 재현하지 못하는 데 일부 기인할 수 있다. 이에 대한 상세한 파라미터 입력값은 부록(Table S2, Table S3)에 제시하였다.

공간적 분포 패턴의 유사성 측면에서, 상관분석 결과는 방법 간 일관성이 전반적으로 제한적이며 주거지 유형에 따라 상이함을 보여주었다. 특히 고층주거지에서는 ENVI-met과 UAV 간 강한 양의 상관성이 확인되었는데($r=0.736$, $p<0.001$), 이는 고층주거지의 공간 구조가 상대적으로 규칙적이어서 시뮬레이션이 주요 열 분포 패턴을 안정적으로 재현했기 때문으로 해석된다. 반면 저층주거지에서는 복잡한 건물 배치와 피복 구성으로 인해 모든 방법 쌍에서 공간적 상관성이 나타나지 않았다($r<0.15$). 한편 Landsat과 고해상도 센서 간 상관성은 주거지 유형에 관계없이 유의하지 않았으며, 이는 단일 30m 픽셀 내 평균 4~5°C에 달하는 지면 열환경 이질성이 위성 기반 단일값으로 평탄화됨으로써 발생하는 본질적 한계를 반영한다.

Mixed ANOVA 결과는 이러한 패턴 분석을 보완하여, 산출 방법에 따른 평균 LST 수준 차이와 주거지 유형 대비가 통계적으로 유의함을 정량적으로 입증하였다. 특히 산출 방법의 주효과($\eta^2=0.898$)가 매우 크게 나타나, 동일 공간에서도 LST 산출 방법에 따라 해석의 기준선이 크게 달라질 수 있음을 확인하였다. 주거지 유형의 주효과($\eta^2=0.564$) 또한 유의하게 나타나, 도시 형태 차이가 열환경 수준에 미치는 영향이 상당함을 보여주었다. 아울러 산출 방법과 주거지 유형 간 상호작용 효과($\eta^2=0.153$)는 방법 주효과나 주거지 유형 주효과에 비해 상대적으로 작으나 무시할 수 없는 수준으로, 두 유형의 주거지 간 LST 대비의 크기와 양상이 모든 산출 방법에서 동일하지 않음을 보여주었다. 단순효과 분석에서는

고층주거지에서의 방법 간 효과크기가 저층주거지보다 전반적으로 크게 나타났으며(Landsat vs ENVI-met: high $g=+7.984$ vs low $g=+4.588$), 이는 고층주거지에서 복잡한 건물 배치와 수직 구조물에 의한 그늘·복사 환경이 센서 방법에 따라 더 상이하게 포착됨을 시사한다. 이러한 결과는 특정 산출 방법이 주거지 유형 간 열환경 대비를 보다 민감하게 포착할 수 있음을 강조하며, 연구 목적과 주거지 유형에 따라 적절한 자료 선택이 필요함을 시사한다.

종합하면, 각 산출 방법은 도시 주거지 열환경의 서로 다른 측면을 강조하여 포착하며, 단일 방법만으로 도시 열환경을 완전하게 설명하기에는 한계가 있다. 따라서 연구 목적과 대상지 특성에 따라 산출 방법을 선택하거나, 복수의 자료를 상호 보완적으로 활용하는 접근이 보다 신뢰도 높은 해석을 가능하게 할 것이다.

V. Conclusion

본 연구는 춘천시 주거지를 대상으로 Landsat 9, ENVI-met, 열화상 UAV로 산출된 LST의 특성과 방법 간 차이를 비교 분석하였다. 건물 영역을 제외한 LST 값을 분석에 활용하였으며, 상관분석과 mixed ANOVA에는 Landsat 9 해상도인 30m 픽셀을 분석 단위로 설정하여 세 방법이 동일한 지면 표면에서 비교되도록 하였다.

Mixed ANOVA 결과, 산출 방식($\eta^2=0.898$), 주거지 유형($\eta^2=0.564$), 두 요인의 상호작용($\eta^2=0.153$)이 모두 유의하게 나타나, 동일 공간에서도 방법에 따라 LST 평균 수준과 주거지 유형 간 대비 해석이 크게 달라짐을 확인하였다. 방법 간 쌍비교에서는 Landsat과 ENVI-met 간 차이가 가장 크게 나타났으며($g=+4.876$), 세 방법 모두 서로 다른 평균 LST 기준선을 가짐을 확인하였다. 특히 UAV는 저층-고층 간 열환경 대비(5.5°C)를 가장 민감하게 포착하였으며, 고층주거지에서 ENVI-met과 높은 공간적 일치도

를 보였다($r=0.736$). 반면 저층주거지에서는 복잡한 건물 배치와 피복 구성으로 인해 모든 방법 쌍에서 유의한 공간적 상관성이 나타나지 않았다. Landsat은 30m 픽셀 내 평균 $4\sim5^\circ\text{C}$ 에 달하는 열환경 이질성을 단일값으로 평탄화하여 주거지 유형에 관계없이 고해상도 센서와의 공간적 상관성이 매우 낮았으며($r<0.11$), 이는 위성 기반 광역 관측의 본질적 한계를 반영한다.

각 산출 방식은 고유한 장단점을 가진다. 위성영상은 광역 범위와 장기적 변화 분석에 유리하지만 공간 해상도 한계가 있으며, ENVI-met은 시나리오 기반의 미기후 변화 평가에 적합하나 입력 자료와 설정값에 대한 의존도가 높다. 열화상 UAV는 중·소규모 지역에서 실제 표면의 미시적 열환경과 고온 지점을 직접 관측할 수 있어, 위성자료와 시뮬레이션 결과를 보완하고 검증하는 데 효과적인 수단으로 활용될 수 있다. 특히 위성 통과 시각과 일치시킨 UAV 관측과 30m 픽셀 단위의 통합 비교는 자료 간 시공간 불일치를 최소화하고 해석의 신뢰도를 높이는 데 기여한다. 이처럼 각 방법의 특성을 고려할 때, 고층주거지처럼 공간 구조가 규칙적인 환경에서는 UAV와 ENVI-met의 상호 검증 활용이 효과적이며, 저층주거지처럼 복잡한 도시 조직에서는 복수 방법의 상호 보완적 활용이 권장된다.

본 연구는 다양한 LST 산출 방법을 동일 대상지의 동일 비교 표면에서 체계적으로 비교했다는 점에서 의의를 가지나, 몇 가지 한계를 지닌다. 첫째, 분석이 단일 날짜의 주간 시점에 국한되어 있어 시간대 및 계절 변화에 따른 열환경 특성을 충분히 반영하지 못했다. 둘째, 대상지가 특정 도시의 주거지 유형으로 제한되어 있어 결과의 일반화에는 제약이 있다. 셋째, 30m 픽셀 집계 단위는 고해상도 센서가 포착하는 미시적 공간 변이를 압축하며, 분석 단위 수($n=223$)가 시뮬레이션 및 UAV 원본 LST 대비 감소하여 세밀한 공간 패턴 분석에는 한계가 있

다. 넷째, 세 방법이 산출하는 LST는 물리적 정의가 상이하어 완전한 동등 비교에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 동일 물리량 기반의 방법론적 표준화와 함께, 다양한 시간대·계절·도시 형태를 포함한 다중 스케일 분석을 통해 산출 방식별 LST 특성에 대한 보다 종합적인 이해가 필요할 것이다.

Reference

- 김성현, 박경훈, 이수아, & 송봉근. (2022). UAV와 ENVI-met을 활용한 공간 유형별 열환경 특성 분석. *한국지리정보학회지*, 25(1), 28-43.
- 박종철, & 채여라. (2020). 2018년 폭염으로 인한 온열질환자와 초과사망자 분석. *대한지리학회지*, 55(4), 391-408.
- 이근왕. (2025). 드론 기반의 열화상카메라를 이용한 토지이용 유형별 지표 온도 분석. *한국산학기술학회 논문지*, 26(1), 82-87.
- Ahmad, J., Sajjad, M., & Eisma, J. (2025). Small unmanned aerial vehicle (UAV)-based detection of seasonal micro-urban heat islands for diverse land uses. *International Journal of Remote Sensing*, 46(1), 119-147.
- Aleksandrowicz, O., Saroglou, T., & Pearlmutter, D. (2023). Evaluation of summer mean radiant temperature simulation in ENVI-met in a hot Mediterranean climate. *Building and Environment*, 245, 110881.
- Cheval, S., Amihăesei, V. A., Chitu, Z., Dumitrescu, A., Falcescu, V., Iraşoc, A., ... & Tudose, N. C. (2024). A systematic review of urban heat island and heat waves research (1991–2022). *Climate Risk Management*, 44, 100603.
- Cho, Y. I., Yoon, D., & Lee, M. J. (2023). Comparative Analysis of Urban Heat Island Cooling Strategies According to Spatial and Temporal Conditions Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Observation. *Applied Sciences*, 13(18), 10052.
- Elfarkh, J., Johansen, K., Angulo, V., Camargo, O. L., & McCabe, M. F. (2023). Quantifying within-flight variation in land surface temperature from a UAV-based thermal infrared camera. *Drones*, 7(10), 617.
- Henn, K. A., & Peduzzi, A. (2024). Surface heat monitoring with high-resolution UAV thermal imaging: Assessing accuracy and applications in urban environments. *Remote Sensing*, 16(5), 930.
- Jang, G., & Kim, S. (2021). Are decline-oriented strategies thermally sustainable in shrinking cities?. *Urban Climate*, 39, 100924.
- Ji, M., Xu, Y., Zhu, S., Zhang, Y., Xin, Y., & Mo, Y. (2025). Exploring the potential of UAV-based thermal imagery for monitoring diurnal variations in the microscale urban thermal environment. *Energy and Buildings*, 116375.
- Jiang, L., Li, L., Zhan, W., Cao, B., Chen, J., & Zhao, H. (2025). Spatiotemporal variations of urban micro-scale thermal environment: Insights from UAV and Landsat data. *Building and Environment*, 113630.
- Kim, D., Yu, J., Yoon, J., Jeon, S., & Son, S. (2021). Comparison of accuracy of surface temperature images from unmanned aerial vehicle and satellite for precise thermal environment monitoring of urban parks using in situ data. *Remote Sensing*, 13(10), 1977.
- Lee, S., Song, Y., & Kil, S. H. (2021). Feasibility analyses of real-time detection of wildlife using UAV-derived thermal and RGB images. *Remote Sensing*, 13(11), 2169.

- Moediartianto, A., Montazeri, H., & Blocken, B. (2026). On the use of UAV-thermal imaging for CFD validation of urban thermal microclimate. *Sustainable Cities and Society*, 106968.
- Rasul, A., Balzter, H., Smith, C., Remedios, J., Adamu, B., Sobrino, J. A., ... & Weng, Q. (2017). A review on remote sensing of urban heat and cool islands. *Land*, 6(2), 38.
- Song, B., & Park, K. (2020). Verification of accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) land surface temperature images using in-situ data. *Remote Sens* 12: 288.
- Soto-Estrada, E., Correa-Echeveria, S., & Posada-Posada, M. I. (2017). Thermal analysis of urban environments in Medellin, Colombia, using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 11(2), 142-149.
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, 86(3), 370-384.

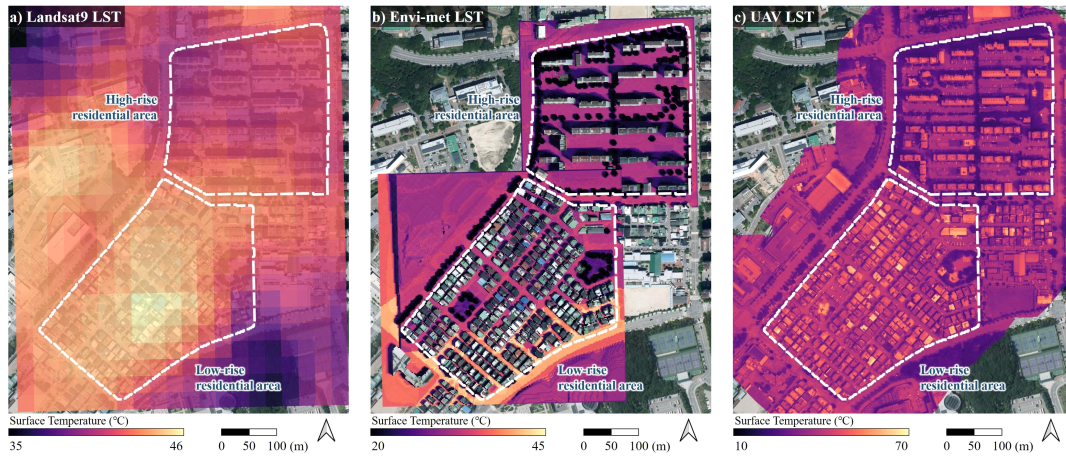


Figure S1. Land surface temperature at original resolution

Table S1. Spatial resolution and acquisition setup by method

Method	Spatial resolution	Acquisition platform / software
Satellite data	30m	Landsat 9
Microclimate simulation	2.0m	ENVI-met
Thermal UAV	19.0cm	DJI Matrice 210 FLIR Zemmuse XT2

Table S2. ENVI-met model configuration by residential type

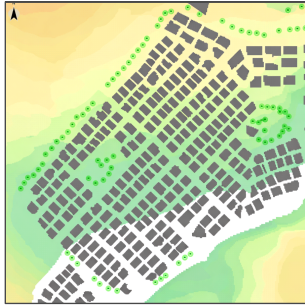


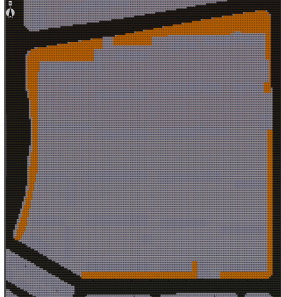
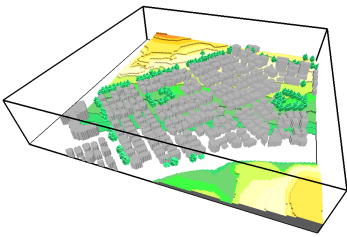
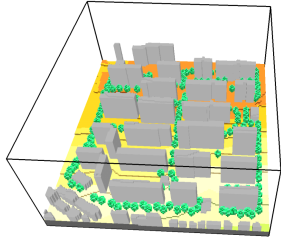
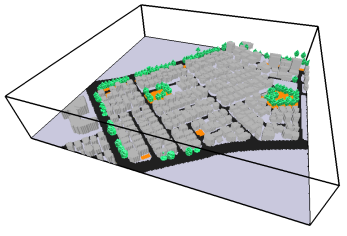
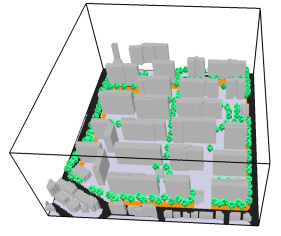
Parameter		Low-rise residential area	High-rise residential area
Grid resolution		x, y : 2m / z : 3m	
Grid dimensions		x : 221 (442m) y : 211 (422m) z : 30 (90m)	x : 159 (318m) y : 172 (344m) z : 52 (156m)
Spatial model (2D)	DEM, buildings, and vegetation		
	Surface cover		
		Ground surface types are indicated by color: orange for soil areas such as planting beds and parks, black for asphalt roads, and gray for other concrete-paved surfaces	
Spatial model (3D)	DEM, buildings, and vegetation		
	Surface cover		
		Ground surface types are indicated by color: orange for soil areas such as planting beds and parks, black for asphalt roads, and gray for other concrete-paved surfaces	

Table S3. ENVI-met simulation setting parameters by residential type

Parameter	Low-rise residential area	High-rise residential area
Date	June 22, 2022	
Simulation duration	9 hours (from 6 a.m to 3 p.m)	
Wind speed (10 m ab. Ground) [m/s]	1.5	
Wind direction [°]	220	
Range of air temperature [°C]	22.0 - 32.6 (from 0 a.m to 23 p.m) 22.2 - 32.6 (from 6 a.m to 3 p.m)	
Ranger of relative humidity [%]	48 - 96 (from 0 a.m to 23 p.m) 48 - 95 (from 6 a.m to 3 p.m)	
Meteorological inputs	<p style="text-align: center;">Hourly air temperature and relative humidity</p> <p style="text-align: center;">Temperature [°] and Relative humidity [%]</p> <p style="text-align: center;">Light dashed vertical lines indicate the simulation input period (06:00-15:00).</p>	