



노후저층주택 밀집지역의 공간적 특성이 도시 미기후에 미치는 영향

Impact of Spatial Characteristics of Deteriorated Low-Rise Residential Areas on Urban Microclimate

홍유진* · 정윤남**

Yujin Hong* · Yunnam Jeong**

* Main author, Master's degree, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Chonnam National Univ., South Korea (happist44@jnu.ac.kr)

** Corresponding author, Professor, School of Architecture, Chonnam National Univ., South Korea (ynj@jnu.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This study examines the effects of spatial structural characteristics on air temperature in deteriorated low-rise residential areas (DLRA) in Gwangju, South Korea, where heat vulnerability is pronounced under extreme summer heat conditions. **Method:** Independent variables included building coverage ratio, floor area ratio, number of building stories, building age, road ratio, green-space ratio, normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference built-up index (NDBI), elevation, and slope; wind speed and relative humidity were included as control variables. Air temperature at 14:00 on the hottest day of 2024 was analyzed using ordinary least squares (OLS), a spatial lag model (SLM), and a spatial error model (SEM). **Result:** SEM was selected as the best-fitting model, and its estimates were interpreted. Building age and the number of stories had significant negative effects on air temperature. NDVI was negatively associated with air temperature in OLS and SLM, but became significantly positive in SEM, indicating that estimated effects can change once spatial dependence is accounted for. The findings suggest that, in DLRA, heat-mitigation strategies should consider not only the amount of green space but also vegetation type, spatial arrangement, and shade provision. In particular, expanding shade through tree planting and shading structures should be prioritized as a practical strategy for improving thermal conditions in space-constrained residential areas.

KEYWORD

미기후
열환경
공간회귀모형
노후저층주택 밀집지역

Microclimate
Thermal Environment
Spatial Regression Model
Deteriorated Low-Rise Residential Areas

ACCEPTANCE INFO

Received Mar. 20, 2026

Final revision received Jun. 4, 2026

Accepted Jun. 9, 2026

© 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

도시 지역에서의 미기후 악화는 도시민의 열 스트레스를 심화시켜 온열질환 발생 위험을 높이고, 주거환경의 쾌적성을 저하시켜 삶의 질에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 도시 열환경의 변동을 설명하는 공간적 특성과 영향요인을 규명하는 것은 중요한 연구 과제이다. 기존 연구는 주로 도시 전체 또는 광범위한 행정구역을 대상으로 고온 지역의 공간적 분포를 파악하고 관련 요인을 분석해 왔다.

한편, 노후화된 저층주택이 밀집된 지역은 기존 연구에서 대표적인 열 취약지역으로 보고되어 왔다. 이러한 지역은 높은 건물 피복률로 인해 열이 쉽게 축적되고, 협소한 건물 간격과 과밀한 공간 구조로 인해 통풍이 어렵다[1]. 또한 식생을 조성할 수 있는 공간이 제한적이고 음영 면적이 작은 낮은 건물로 인해 햇빛으로부터 지표면을 보호하기 어렵다[2]. 따라서 해당 지역 고유의 공간구조 특성과 미기후와의 관계를 미시적 규모에서 분석할 필요가 있다.

이에 본 연구는 건물, 토지피복, 지형 등 도시·건축 공간적 특성이 노후저층주택 밀집지역¹⁾의 미기후에 미치는 영향을 정량적으로 규명하는 것을 목적으로 한다. 아울러 도출된 결과를 바탕으로 대상지의 현황에 맞는 개선방안을 제시하고자 한다.

1.2. 연구의 범위 및 방법

본 연구의 공간적 범위는 광주광역시의 노후저층주택 밀집지역이다. 분석 시점은 2024년 일 최고기온이 기록된 6월 19일의 오후 2시이고, 100m×100m 격자자료를 활용한다.

분석을 위해 첫째, 이론 및 문헌을 통해 도시 미기후의 개념과 영향요인을 검토하고, 기존 도시 미기후 연구에서 사용된 분석방법을 확인하였다. 둘째, 연구를 위한 도시·건축 공간적 특성 변수를 선정하고, 데이터를 수집하여 전처리한 뒤 100m×100m 격자 단위로 결합하였다. 셋째, 광주광역시의 미기후와 노후저층주택 현황을 파악하고, WRF-LES (Large Eddy Simulation mode of Weather Research and Forecasting) 모델로 산출한 오후 2시 기온 데이터를 기준으로 광주광역시의 상위 고온지역을 선별한 뒤 노후저층주택 밀집지역을 최종 대상으로 선정하였다. 넷째, 대상지의 도시·건축 공간적 특성을 독립변수로, 상대습도 및 풍속을 통제변수로, 기온을 종속변수로 설정하여 OLS (Ordinary Least Squares) 회귀모형을 추정한 뒤 기본 가정 충족 여부를 진단하였다. OLS 회귀모형의 잔차에서 공간자기상관이 확인됨에 따라 SLM (Spatial Lag Model, 공간시차모형)과 SEM (Spatial Error Model, 공간오차모형)을 추정하였다. 이후 최적 모형인 SEM의 결과를 해석하고, 대상지 현황과 분석 결과를 교차 검토하였다. 마지막으로 분석 결과를 종합하여 노후저층주택 밀집지역의 미기후 영향요인을 도출하고, 이를 토대로 한 열환경 개선 방향과 연구의 시사점 및 한계를 제시하였다(Fig. 1. 참조).

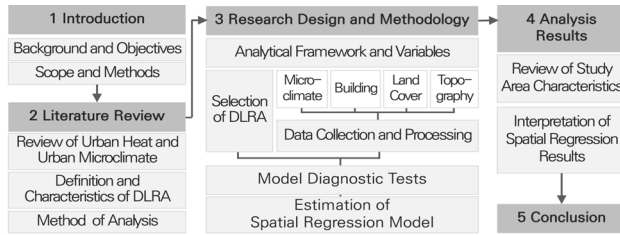


Fig. 1. Research flowchart

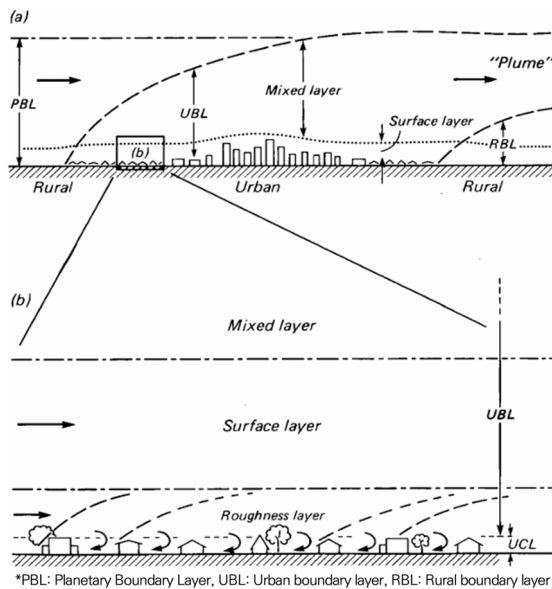


Fig. 2. Idealized arrangement of boundary layer structures over a city (Copyright ©1988 by T.R. Oke Reprinted by Permission of Sage Publications)

2. 이론적 고찰

2.1. 도시 미기후와 영향요인

도시 내에서 미시적 규모(micro-scale)는 개별 건물과 수목, 발코니, 외벽 마감재처럼 그림자를 드리우고 바람의 흐름을 변화시키는 소규모 건축 요소들이 위치한 가장 작은 영역이다[3]. Fig. 2와 같이 도시 지면에서부터 건물 지붕 높이까지에 해당하는 층을 도시 캐노피층(Urban Canopy Layer, UCL)이라 하며[4], 이는 인간 활동이 집중적으로 이루어지고 에너지와 운동량, 수분의 교환과 변화가 활발하게 발생하는 영역이다[5]. 위치에 따라 기상 조건이 크게 달라지기 때문에 각 도시 공간에서는 고유한 미기후가 형성된다[3]. 이러한 도시 미기후는 도시 거주자의 온도 경험에 큰 영향을 미친다. 기온은 사람들의 온도 감각을 가장 크게 좌우하는 요소이며, 바람은 체감되는 열을 강화하거나 완화시키고, 상대습도는 고온 환경에서 특히 불쾌감을 높이는 요인으로 작용한다[6].

도시 열환경에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타난 요인은 크게 건물, 토지피복, 지형 특성으로 구분할 수 있다(Table 1.). 건물 밀도는 높을수록 열을 축적시켜 지표면온도(Land Surface Temperature, LST)를 상승시키는 주요 요인이다[7]. 이와 마찬가지로 높은 건폐율은 온도를 상승시키고, 상대습도를 저감시킨다[8]. 건물 체적 또

Table 1. Spatial characteristics significant to urban microclimate

Type	Variable	Effect	
		Positive	Negative
Building	Density	Building coverage ratio (BCR)	[7~9]
		Floor area ratio (FAR)	[9~10]
	Height	Building stories/height	[7(<10m)] [7(≥10m),15]
		Building shade	[7]
	Geometry	FAI	[7,15]
		Aspect ratio	[11]
Land cover	Impervious cover	Pavement area/Road ratio	[8~9]
		NDBI	[12]
	Water cover	Water ratio	[14,10]
		Distance to water	[10]
		MNDWI	[12]
	Vegetation Green cover	Green-space ratio/area	[9,14(grass)]
		Vegetation volume	[9]
		Street tree density	[10~11,14]
		Distance to green-space	[10]
		Shape index of patches	[14(tree)]
		Edge density of green-space	[14(grass)] [14(tree)]
	Surface properties	NDVI	[12] [15]
		Land use	[10]
Topography	Albedo	[12]	
	Street orientation		[11]
	Elevation		[9~10,12]

[7] Variables with conditional effect directions or mentioned as significant in summer

[11] Significant variables of the low-rise high-density area in summer

[12] Significant variables in SEM

[14] Significant variables of the 120m grids in SEM

[15] Significant variables in daytime (10:18) of the low-rise high-density area

한 여름철 기온상승요인으로 확인되었으며[9], 용적률 역시 온도 상승에 기여한다[10]. 반면, 건물 높이가 높으면 그림자가 형성되어 일사를 차단함으로써 기온 상승을 방지하는 효과가 있다[2]. 한 연구에서는 건물 높이가 10m 미만일 때는 LST와 양의 관계를 보였지만 그 이상인 경우 반대 관계가 나타났으며, 이는 고층 건물이 그림자와 기계적 난류를 형성하기 때문이라고 해석하였다[7]. 건물 입면의 표면 거칠기를 나타내는 정면면적지수(Frontal area index, FAI)는 LST 저감효과를, 관측지점에서의 하늘 개방도를 나타내는 하늘시야계수(Sky View Factor, SVF)는 LST 상승효과를 보였다[7]. 종횡비는 건물이나 가로수 등의 높이와 가로 너비 간의 비율로, 기온저감요인으로 나타났다[11]. 하천 면적률이나 MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)는 대표적인 기온저감요인이다[10,12]. 식생의 밀도와 활력을 정량화하는 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)는 주간 LST와 유의한 음의 관계를 보이는 지표로 제시되어 왔다[15]. 반면 도시화 또는 불투수 토지피복의 정도를 나타내는 NDBI (Normalized Difference Built-up

Index)는 식생이 부족한 시가지에서 높은 값을 보이며, LST 상승에 기여하는 요인으로 확인되었다[12]. 불투수면을 대표하는 포장도로 면적 또한 기온상승요인으로 나타났으며[9], 주거지역, 상업지역 등 토지이용별 면적률도 마찬가지로 나타났다[10]. 알베도는 표면에 닿은 빛이 흡수되지 않고 반사되는 정도를 나타내는 지표로, 반사율이 높은 나대지나 산지, 시가지에서 LST가 상승하는 경향을 보였다[12]. 미기후는 지형 조건에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려졌는데, 고밀도 주거지역에서는 우세풍과 유사한 방향의 가로가 기온과는 음의 관계를, 상대습도와는 양의 관계를 갖는 것으로 나타났다[11]. 또한 맑고 기류가 약한 조건에서는 경사도와 향 등 지형의 미세한 차이가 도시 미기후의 공간적 차이를 형성하는 요인으로 보고되었다[5].

기존 연구에서 미기후 변수와 도시·건축 공간적 특성 간 관계는 지역 유형에 따라 상이하게 나타나는 것으로 밝혀졌다. 저층고밀 특성을 보이는 주택 밀집지역은 소규모 필지에 건축물이 밀집한 지역들로 개방 공간이 부족한 경우가 많고, 이로 인해 일조 및 통풍 여건 또한 취약한 공간 구조를 갖는다[16]. 기존 연구에서는 이러한 저층고밀 지역에서 주간 LST가 가장 높게 나타났으며[17], 식생이 부족한 고밀 지역에서 NDVI의 영향력이 상대적으로 크게 작용하는 것으로 나타났다[15]. 또한 다른 지역 유형에 비해 기온이 더 빠르게 상승하는 경향을 보였다[2].

대다수의 기존 연구 결과는 OLS 회귀모형에 기반한다. 그러나 공간데이터는 인접 지역 간 의존성으로 인해 공간자기상관이 나타날 수 있으며, 이 경우 OLS의 독립성 가정이 충족되지 않아 추정 결과를 신뢰하기 어렵다[18]. 또한 공간자기상관을 통제할 경우 변수 간 관계의 크기뿐 아니라 방향도 달라질 수 있다. 실제로 NDVI, NDBI, MNDWI 등의 변수가 SLM에서는 LST와 음의 관계였으나 SEM에서는 양의 관계로 추정된 경우도 있었다[12]. 이에 본 연구에서는 공간자기상관의 영향을 고려하기 위해 공간회귀모형을 적용하였다.

2.2. 도시 미기후 분석 방법

도시 미기후 연구는 데이터 구득 방식에 따라 관측 기반 연구, 원격탐사 기반 연구, 수치모델 연구로 구분 가능하다. 관측 기반 연구는 자동기상관측장비(Automated Weather Station, AWS)나 디지털온도계 같은 측정 장비를 통해 실측한 미기후 데이터를 활용한다[8,9,11]. 이 경우 연구자가 필요한 시간대의 미기후 데이터를 직접 구득 가능하기 때문에 특정 지역의 미세한 환경 차이를 정밀하게 파악할 수 있으나, 여러 지역의 동시관측에는 한계가 있다.

원격탐사 기반 연구는 Landsat, MODIS, ECOSTRESS 등의 위성데이터를 통해 LST를 산출하고, NDVI와 NDBI 등의 지수 및 영향변수와의 관계를 분석한다[2,7,10,12~15,17]. 이는 높은 공간적 해상도를 가지며, 접근성과 재현성이 높다. 그러나 촬영 주기가 정해져 있어 원하는 시점의 관측이 어렵고, 촬영 시점의 대기 및 기상 조건에 따라 데이터의 품질이 달라진다[2,15].

수치모델 기반의 미기후 연구는 수치기상예측모델(Numerical Weather Prediction Model)과 전산유체역학모델(Computational Fluid Dynamics Model)로 구분할 수 있다[19]. WRF는 미국 국립 대기연구센터(NCAR)에서 개발한 중규모 수치기상예측모델로,

WRF-LES는 상세 격자 간격의 수치모의에서 지면 부근 난류를 직접 계산하여 미시적 규모부터 중규모에 이르는 기상 현상의 모의에 적합하다[20]. LES 방식은 난류 운동에너지와 플럭스의 대부분을 운반하는 대형 소용돌이를 직접 계산함으로써 기존 모수화 방식에 비해 난류 통계량을 보다 정확하게 추정할 수 있는 것으로 보고되어 왔으며[20], 컴퓨터 공학의 발달에 따라 대기 난류 연구에서 그 활용이 확대되고 있다. WRF-LES는 경계층 역학과 도시 대기 확산 특성의 재현성이 상대적으로 우수하여, 계산 비용이 높음에도 불구하고 고해상도 도시 기상 응용에 적합한 것으로 제시되었다[21]. 다만 모델 기반으로 산출된 데이터는 결과 해석의 신뢰성 확보를 위해 관측치와의 비교를 통한 타당성 검증 절차를 필요로 한다.

2.3. 선행연구 종합 및 연구의 차별성

기존 연구들은 도시 전체 또는 광역 단위에서 미기후와 공간적·환경적 특성 간 관계를 분석하거나, 도시 내 지역을 유형화하여 유형별 미기후 차이를 비교하였다. 그 중 노후저층주택 밀집지역은 공간 구조상 열 취약성이 높은 지역으로 나타나, 해당 유형을 대상으로 한 열환경의 심층 분석과 대응방안 모색이 필요하다. 또한 본 연구에서는 WRF-LES 모델로부터 산출한 고해상도 기온, 상대습도, 풍속 데이터를 사용하였다. 이를 통해 도시 내 고온 지역을 파악하고, 노후저층주택 밀집지역의 도시 공간구조와 미기후 간 관계 및 상대적 영향력을 규명하였다. 이에 더하여 공간회귀모형을 통해 공간자기상관을 고려하였다는 점에서 의의가 있다.

3. 연구 설계 및 분석방법

3.1. 분석 프레임워크

본 연구는 노후저층주택 밀집지역을 대상으로 도시·건축 공간적 특성이 도시 미기후에 미치는 영향을 체계적으로 분석하기 위해 다음의 분석 프레임워크를 구성하였다(Fig. 3.). 먼저 WRF-LES 모델을 통해 산출한 기온 데이터를 활용하여 도시 전반의 열환경과 상위 고온지역을 파악하고, 그 중 노후저층주택 밀집지역을 최종 분석 대상으로 선정하였다. 다음으로 건물, 토지피복, 지형 특성으로 분류되는 도시·건축 공간적 특성 데이터를 구축하였다. 이후 Stata에서 OLS 회귀모형을 추정하고, 모형의 기본가정 충족 여부 및 적합성을 검토하였다. 그 다음 GeoDa에서 OLS 잔차에 대한 Moran's I 및 Lagrange Multiplier (LM) 검정을 통해 공간자기상관이 확인됨에 따라 SLM과 SEM을 추가로 추정하고, 적합도 지표를 종합적으로 비교하여 SEM을 최종 모형으로 채택하였다.

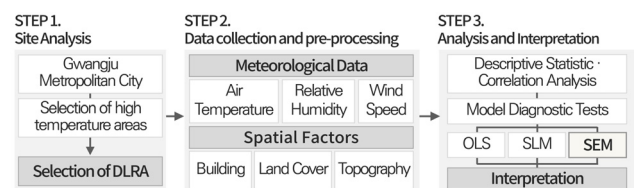


Fig. 3. Analysis framework

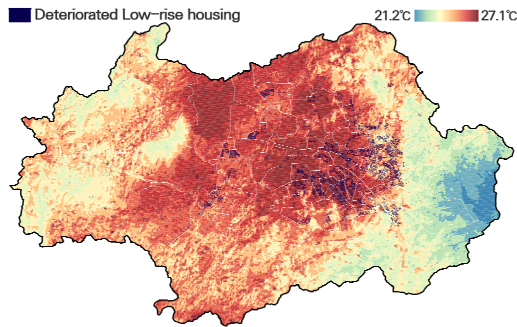


Fig. 4. Spatial distribution of average LST and low-rise residential areas in Gwangju (2024) (Drawn by the author using data sources [26,27])

3.2. 광주광역시 미기후 현황 및 대상지 선정

1) 광주광역시 미기후 현황

2024년 6월부터 9월까지, 기상청 기준 광주광역시는 특·광역시 7 곳 중 가장 높은 기온인 37.2°C를 기록하였다. 폭염일수와 열대야일수는 각각 37일로, 폭염일수는 전년 대비 1.85배 급증하였으며 열대야일수는 최근 10개년 중 최고치를 기록하였다[22]. 온열질환자는 전년대비 6명 증가한 70명이었고, 사망자는 한 명 발생하였다[23].

광주광역시는 기온이 지속적으로 상승하는 추세를 보였으며, 주거밀집지역이 주요 열 취약지역으로 나타났다. 2019년부터 2021년과 2022년부터 2024년까지의 여름철 폭염노출지표를 비교한 결과, 모든 지표가 상승하였고 도심지역의 온도 증가 폭이 외곽지역보다 크게 나타났다[24]. 또한 노후 건물과 고령인구 비율이 높은 원도심 지역이 폭염에 상대적으로 취약한 지역으로 나타났다[24,25]. 2024년 6월부터 9월까지의 평균 지표면온도 분포를 검토한 결과, 노후 저층주택 밀집지역은 상대적으로 기온이 높은 구역에 집중되어 있는 양상이 확인되었다(Fig. 4.).

2) 광주광역시 상위 고온지역 선정 및 현황

본 연구에서는 100m×100m 격자로 구성된 WRF-LES 데이터를 기준으로 광주광역시 미기후 현황과 고온 밀집지역을 검토하였다(Fig. 5.). 먼저, 2024년 광주광역시의 일최고기온 기록일인 6월 19일 오후 2시의 기온 격자 데이터를 Natural Breaks (Jenks)로 분류하였다. 기온은 소수점 단위의 미묘한 차이도 중요한 영향을 미치므로, 구간을 30으로 설정한 후 최상위 구간을 선택하여 고온 밀집지역의 분포를 확인하였다(n=525). 그 다음으로, 선택된 최상위 구간 격자 군집을 최대한 포함하는 중심격자를 고온 순으로 선택하였다. 이후 각 중심격자로부터 500m 반경을 설정하여 11×11 크기의 사각형 영역을 생성하였다. 영역별 토지이용 현황을 검토한 결과, 비시가화건조지역과 시가화건조지역으로 구분 가능하였다.2) 본 연구는 도시·건축 공간적 특성이 뚜렷한 시가화건조지역을 중심으로 고온 지역을 선정하였다(n=1,190).

3) 노후저층주택 밀집지역 선정

노후저층주택 밀집지역을 선정하기 위해 먼저, 고온 지역 중 격자 평균이 20년 이상이고, 건물층수가 4층 이하인 격자를 선택하였다. 그 다음 주택 밀집지역을 선별하기 위해 주거용 건물이 차지하는 비

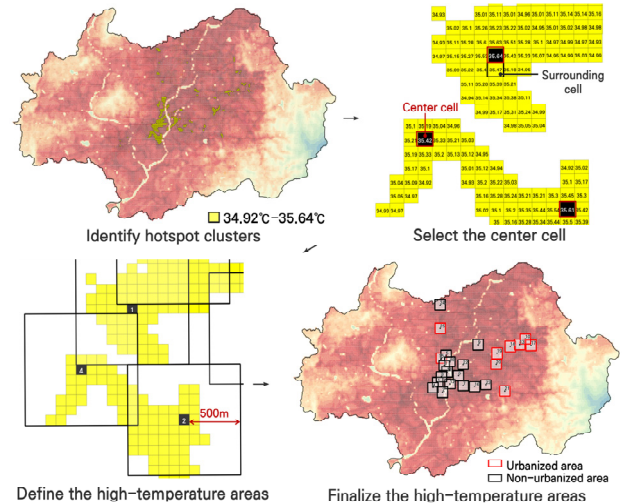


Fig. 5. High-temperature areas selection process

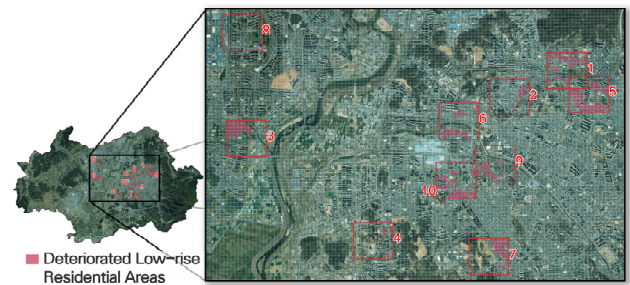


Fig. 6. Distribution of deteriorated low-rise residential areas (n=213)

율³⁾을 Natural breaks(Jenks) 5개 구간으로 구분하고, 상위 두 구간 (20.3% 이상)을 포함하는 격자를 선택하였다(n=246).

현황 검토 결과, 다수의 건물연령이 20년 미만임에도 노후도가 높은 소수의 건물로 인해 평균 건물연령이 높게 산정된 경우가 있었다. 이에 20년 미만 건물이 50% 이상인 2개 격자는 ‘노후’ 개념을 충분히 반영하기 어렵다고 판단하여 제외하였다. 또한 대규모 단지형 연립주택이 포함되어 있거나, 고층 아파트 단지가 포함되어 있음에도 다수의 저층 건물로 인해 평균 건물층수가 4층 이하로 계산된 경우가 있어 23개 격자를 추가로 제외했다(n=221). 이후 이상치⁴⁾를 제거하여 Fig. 6.의 최종 분석 대상지를 선정하였다(n=213).

3.3. 데이터 구축 및 변수 정의

1) 변수 설정

변수를 구성하기 위해 일차적으로 도시·건축 공간적 특성과 미기후 간 관계를 다룬 선행연구를 검토하였으며, 유의한 것으로 밝혀진 변수 중 노후저층주택 밀집지역의 공간적 특성을 반영하는 변수들을 중심으로 설명변수를 선정하였다. 기존 연구에서 제시된 주요 영향변수는 건물 특성, 토지피복 특성, 지형 특성으로 분류하였다.

건물 특성 변수로는 대상지의 밀집도를 나타내는 건폐율과 용적률, 건물의 수직적 규모를 반영하는 건물 층수, 건물의 노후도를 반영하는 건물연령을 선정하였다. 토지피복 특성 변수로는 대상지 내에 포함된 녹지와와의 관계를 검토하기 위한 녹지율과 NDVI, 불투수 표면 특성을 반영하기 위한 NDBI와 도로율을 선정하였다. 또한 지

Table 2. Research variables

Type	Variable	Unit	Data source
Spatial characteristics	Building	BCR	GIS building integrated information, Ministry of land, infrastructure and transport, 2024.06.07., Road name address electronic map, Ministry of the interior and safety(MOIS), 2024.06.
		FAR	
		Building stories	
		Building age	
	Land cover	Road ratio	Actual road width data, MOIS, 2024.05.14.
		Green-space ratio	Land cover map, Environmental Geographic Information Service, 2024.11.20.
		NDVI	Landsat 9, United States Geological Survey(USGS), 2024.06.18.
		NDBI	
	Topography	Slope	DEM, National Aeronautics and Space Administration, Earthdata, 2025.03.13.
		Elevation	
Micro-climate	Air temperature (AT)	°C	WRFOUT data, Gwangju Climate and Energy Agency, 2024.06.19.
	Relative humidity (RH)	%	
	Wind speed (WS)	m/s	

형 특성에 따른 미기후의 영향을 파악하기 위해 표고와 경사도를 추가하였다. 한편, 미기후 변수 중 기온은 대상지의 열환경을 설명하기 위한 종속변수로, 풍속과 상대습도는 통제변수로 설정하였다. 선정된 변수와 데이터 정보는 Table 2.와 같다.

2) 데이터 구축

최종 변수에 해당하는 데이터를 다운받고, 필요한 전처리 과정을 거쳐 100m×100m 격자로 변환 후 병합하였다. 건물과 도로 데이터는 최대한 분석 시점과 근접한 데이터를 사용하고, 일부 최신화가 안된 건물 데이터는 같은 달에 제작된 주소기반산업지원서비스의 도로명주소 전자지도 데이터와 교차 검토해 보완하였다. 건폐율과 용적률은 격자 내 건물의 건축면적 합과 연면적 합을 격자 면적으로 나누어 각각 산출하였다. 속성 정보가 누락된 경우에는 세움터 및 광주 부동산정보 조회 시스템을 기준으로 직접 작성하였다[27,28].

도로율과 녹지율은 격자 전체 면적 대비 도로와 녹지 면적의 백분율이다. 표고 데이터는 USGS에서 받았으며, 이를 활용하여 경사도 데이터를 산출하였다. NDVI와 NDBI 산출에는 USGS에서 2024년 6월 18일에 촬영된 Landsat 9 OLI/TIRS Collection 2 Level-1 Tier 1 영상데이터를 사용하였다. 이는 지형 보정과 기하 보정이 적용된 영상으로, 장면 구름 덮개율 1.24%, 지상 구름 덮개율이 0.25%으로 구름의 영향이 적다. QGIS의 SCP Plugin v.6를 통해 DOS1(Dark Object Subtraction 1) 영상기반 대기보정을 적용하여 반사율을 생성하고 Eq. 1과 Eq. 2로 계산하였다.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR} + \rho_{NIR}} \quad (\text{Eq. 2})$$

ρ_{NIR} = Reflectance of the near-infrared band

ρ_{SWIR} = Reflectance of the shortwave infrared band

ρ_{red} = Reflectance of the red band

기상데이터는 광주기후에너지진흥원에서 제공받은 WRF-LES 모델 산출물을 활용하였다. 2m 높이의 기온과 수증기 혼합비, 10m 높이의 풍속 성분은 NCL (NCAR Command Language) v6.6.2를 통해 추출하였다. 켈빈 단위 기온 데이터는 섭씨 단위로 변환하였다 (Eq. 3). 상대습도는 기온, 기압, 수증기 혼합비를 사용하여 NCL 내 장 함수⁵⁾로 계산하고 (Eq. 4~Eq. 6), 풍속은 U, V 성분값을 사용하여 산출하였다 (Eq. 7). 전처리된 데이터는 Table 3.과 같다.

$$T_K - 273.15 = T_C \quad (\text{Eq. 3})$$

T_K = Temperature in Kelvin

T_C = Temperature in Celsius

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$e = \left(\frac{Q \times p}{0.622 + Q} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$e_s = 6.112 \times \exp\left(\frac{17.67 \times T_C}{T_C + 243.5}\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

e_s = Saturated vapor pressure (hPa)

e = Actual vapor pressure (hPa)

Q = Water vapor mixing ratio (kg/kg)

p = Atmospheric pressure (hPa)

$$W = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

W = Wind speed

u, v = East-West and North-South wind speed component

3) 데이터 타당성 검증

본 연구에서 사용한 WRF-LES 기상예측데이터의 타당성을 검토하기 위해, 광주광역시 7개 AWS 관측소 (Fig. 7.)의 기상데이터 측정 높이에 맞춰 WRF-LES 데이터를 보간하여 추출하였다.

Table 3. Spatial distribution of variables

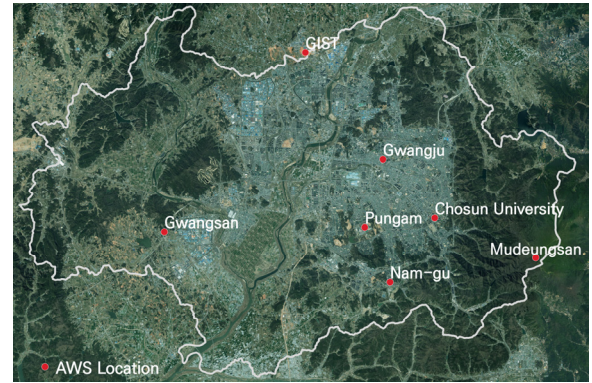
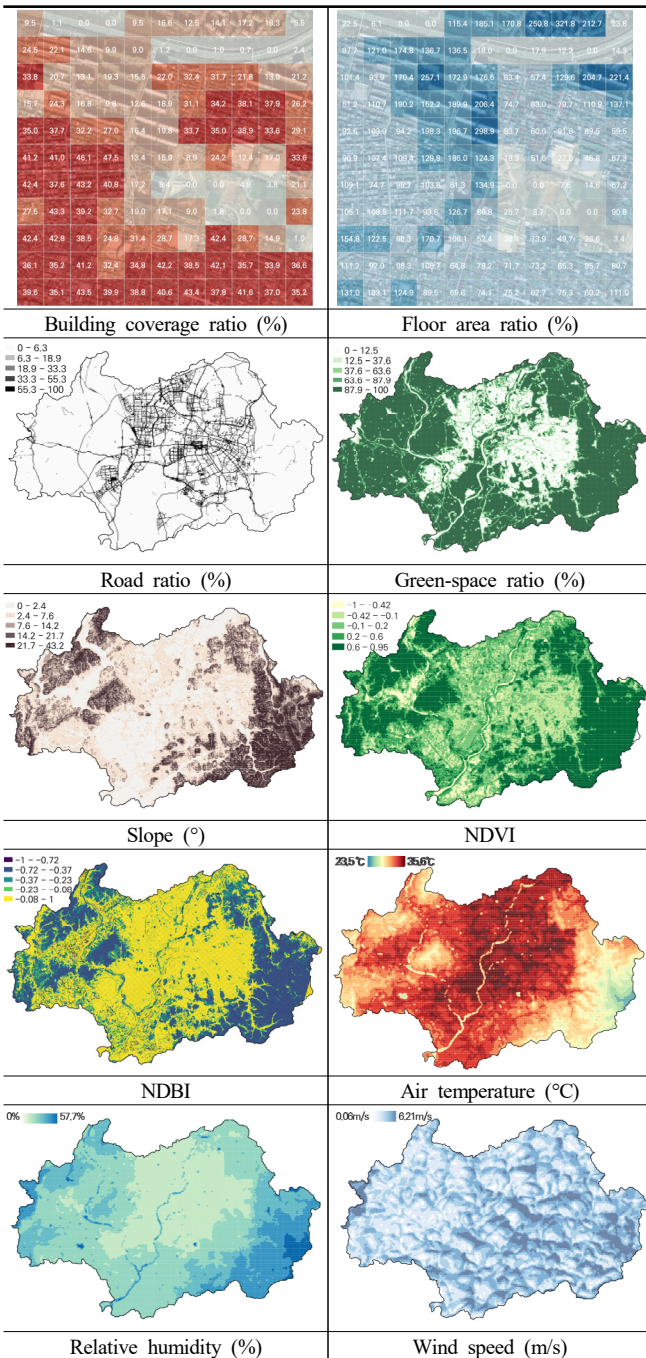


Fig. 7. Location of AWS

Table 4. Comparison of meteorological data changes by station

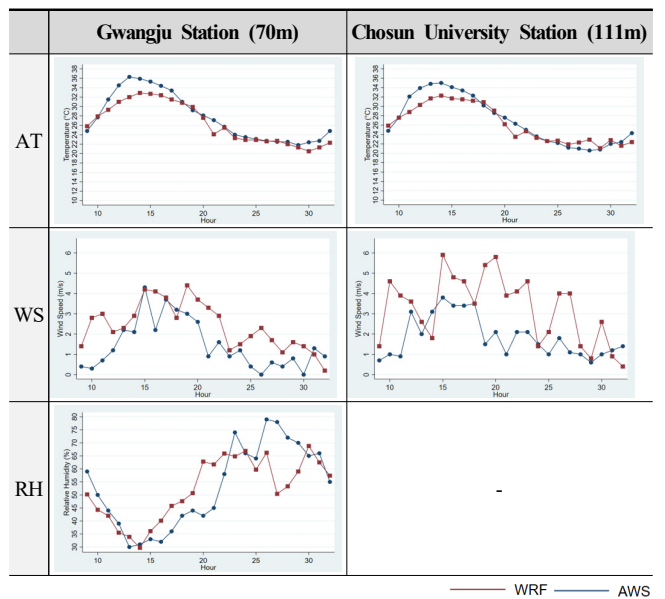


Table 5. Statistical indicators by station

	Gwangju station (70m)					Chosun university station (111m)				
	r	MAE	MSE	RMSE	BIAS	r	MAE	MSE	RMSE	BIAS
AT	0.91	1.41	3.46	1.86	-1.24	0.96	1.41	3.16	1.78	-0.73
WS	0.69	1.07	1.71	1.31	0.95	0.46	1.63	4.10	2.03	1.41
RH	0.74	8.25	112.38	10.60	-0.78	-				

이 중 조선대, 광주지방기상청 지점⁶⁾을 대상으로 2024년 6월 19일 오전 9시부터 다음날 오전 9시까지 24시간의 데이터 분포 그래프를 검토한 결과는 Table 4.와 같다.

Table 5.는 Pearson 상관계수(r), 평균절대오차(MAE), 평균제곱오차(MSE), 평균제곱근오차(RMSE), 편향(BIAS) 산출 결과이다. 조선대학교와 광주지방기상청 지점은 모두 기온에 대해 높은 양의 상관관계를 보였다. 광주지방기상청 지점에서 상대습도의 RMSE는 상대적으로 높게 나타났으나, 변수의 측정 단위에 영향을 받는 RMSE 지표의 특성상 % 단위로 표현되는 상대습도는 다른 변수와 비교할 때 오차값이 상대적으로 크게 나타날 수 있다. 반면 상관계수

는 높게 나타나 두 자료 간 전반적인 변동 경향은 유사한 것으로 확인되어, 본 연구에서는 상대습도를 통제변수로 포함하였다. 해당 지점에서 풍속은 비교적 양호한 상관을 보였다. 그러나 조선대학교 지점의 풍속은 비교적 낮은 수준의 상관관계가 확인되었다. 이러한 지점 간 차이가 나타난 것은 풍속이 건물의 배치나 국지적 난류의 영향을 크게 받아 관측지점 주변 환경에 민감하게 반응하는 변수이기 때문으로 해석된다. 그럼에도 풍속은 체감온도 및 열쾌적성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 기상요소이므로, 본 연구에서는 이를 통제변수로 포함하였다. 조선대학교 지점에서는 일부 시간대의 상대습도 AWS 관측값이 누락되어, 타당성 검토에서 제외하였다.

3.4. 분석방법

1) 기술통계량 및 상관분석

노후저층주택 밀집지역을 대상으로 도시·건축 공간적 특성이 미기후에 미치는 변수별 영향을 분석하기 위해 앞서 선정된 221개의 격자를 대상으로 변수의 기술통계량을 산출하고 결측치와 이상치를 검토하였다. 검토 결과, 결측치는 확인되지 않았다. 이상치는 Cook의 거리(Cook's distance, D_i)와 DFFITS (Difference in Fits)를 활용하여 확인하였다[29,30]. 영향점 판별을 위해 Eq. 8, Eq. 9를 통해 임계값을 계산하고, 두 지표의 임계값을 모두 초과하는 관측치 8개는 분석 결과의 신뢰성과 안정성을 확보하기 위해 제외하였다. 이에 따라 최종 분석에 사용된 격자 수는 213개이다.

$$D_i > \frac{4}{n-k-1} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$|DFFITS| > 2\sqrt{\frac{k+1}{n-k-1}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Table 6. Descriptive statistics (N=213)

Variable		Unit	Mean	Std. dev.	Min	Max
Building	BCR	%	36.14	5.14	21.64	50.13
	FAR	%	80.18	23.74	38.38	234.50
	Building stories	stories	2.27	0.42	1.32	3.76
	Building age	years	34.24	5.93	21.49	46.85
Land cover	Road ratio	%	25.03	6.54	3.75	46.63
	Green-space ratio	%	2.01	5.41	0.00	35.72
	NDVI	-1≤X≤1	-0.18	0.08	-0.37	0.11
	NDBI		0.39	0.06	0.19	0.52
Topography	Slope	°	2.67	1.26	0.65	8.48
	Elevation	m	40.69	9.60	20.44	66.08
Microclimate	AT	°C	34.40	0.28	33.68	35.00
	WS	m/s	2.16	0.90	0.23	4.12
	RH	%	29.87	1.20	27.16	33.42

Table 7. Results of correlation analysis (N=213)

	AT	WS	RH	BCR	FAR	Building stories	Building age	Road ratio	Green-space ratio	NDVI	NDBI	Slope	Elevation
AT	1												
WS	0.36***	1											
RH	-0.83***	-0.16*	1										
BCR	0.11	-0.05	-0.14*	1									
FAR	0.25***	0.10	-0.26***	0.44***	1								
Building stories	0.27***	0.10	-0.29***	0.11	0.73***	1							
Building age	-0.14*	0.14*	0.16*	-0.08	-0.41***	-0.71***	1						
Road ratio	-0.04	-0.13+	0.07	-0.37***	-0.15*	0.09	-0.18**	1					
Green-space ratio	0.07	-0.01	-0.06	-0.42***	-0.23***	-0.13+	0.02	-0.15*	1				
NDVI	0.09	0.03	-0.15*	-0.32***	-0.27***	-0.28***	0.15*	-0.19**	0.40***	1			
NDBI	-0.27***	-0.16*	0.32***	0.34***	0.12+	0.00	0.00	0.14*	-0.32***	-0.82***	1		
Slope	0.14*	0.28***	-0.12+	-0.01	-0.03	0.00	0.02	-0.16*	0.12+	0.17*	-0.32***	1	
Elevation	0.09	0.20**	0.01	0.02	0.18**	0.31***	-0.15*	0.08	-0.21**	-0.01	-0.13+	0.23***	1

+p<0.1, *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

n =Number of observations

k =Number of explanatory variables

최종적으로 선정된 213개 격자의 기술통계량은 Table 6.과 같다. 분석 대상 지역의 평균 건폐율은 36.14%로 나타났으며 최소 21.64%에서 최대 50.13%까지 분포하였다. 용적률의 평균은 80.18%로 나타났고 최대 234.50%에 이르러 일부 격자에서 상대적으로 높은 개발 밀도가 관찰된다. 대상지의 건물층수는 평균 2.27층이고, 녹지가 없는 지역에서부터 최대 35.72%인 지역까지 존재하나 평균은 2.01%로 현저히 낮은 수준이다. NDVI는 평균 -0.18로 나타나 전반적으로 식생보다 인공 피복 위주의 공간 특성을 보인다.

변수 간 상관관계를 검토하기 위해 피어슨 상관분석을 수행하였다(Table 7.). 기온은 상대습도와 높은 음의 상관을 보였고, 풍속과는 양의 상관을 나타냈다. 건물 변수 중에서는 건물층수와 용적률, 건물연령이, 토지피복 변수 중에서는 NDBI가, 지형 변수 중에는 경사도가 기온과 유의한 상관을 보였다.

2) 다중회귀모형(OLS) 및 모형 진단

본 연구는 노후저층주택 밀집지역의 도시·건축 공간적 특성과 기온 간 관계를 정량적으로 분석하고자 하나의 종속변수가 두 개 이상

Table 8. Results of VIF test

Variable	VIF	1/VIF
Building stories	5.65	0.176995
NDBI	4.91	0.203765
NDVI	4.69	0.213429
FAR	3.24	0.308387
Building age	2.51	0.398612
BCR	2.47	0.405357
Road ratio	1.63	0.614968
Green-space ratio	1.62	0.617371
RH	1.44	0.696341
Elevation	1.35	0.739564
Slope	1.33	0.749802
WS	1.27	0.787248
Mean VIF	2.67	-

의 독립변수에 의해 동시에 영향을 받을 때 변수 간 통계적 관계를 검토하는 다중회귀분석을 수행하였다. 회귀계수 추정 방식은 잔차의 제곱합을 최소화하여 회귀계수를 추정하는 OLS이다[31].

Stata를 통해 OLS 회귀모형의 통계적 가정 충족 여부를 검토한 결과, 모든 변수의 분산팽창계수(Variance Inflation Factor, VIF) 값이 6 이하로 다중공선성 문제는 없었다(Table 8.). Shapiro-Wilk 검정 결과, 정규성 가정이 위배되지 않았다($p=0.740$). Breusch-Pagan 검정 결과와($p=0.367$) White 검정 결과($p=0.264$), 등분산성 가정 또한 위배되지 않았다.

3) 공간회귀모형

본 연구와 같이 건폐율, 용적률, 녹지율 등 실제 공간에서 수집한 공간 기반 데이터에서는 가까운 것은 먼 것보다 더 크게 관련된다는 지리학 제 1법칙이 적용된다[32]. 이 경우 종속변수의 관측치 및 오차항이 공간적으로 상관될 수 있으며, OLS 회귀모형의 오차항 독립성이 위배된다. 이에 공간자기상관 유무를 검토하기 위해 GeoDa를 통해 Global Moran's I를 산출하였다. 공간가중치 행렬은 고립된 관측치가 발생하지 않도록 모든 관측치가 최소 1개 이상의 이웃을 갖는 임계거리를 기준으로 인접지역을 정의하고, 가중치는 역거리가중치(Inverse Distance Weight, IDW)를 적용하였다. Fig. 8은 종속변수의 Global Moran's I 산점도이며, Moran's I는 0.597로 나타나 유의한 공간자기상관을 보였다(pseudo p -value<0.001).

OLS 회귀모형의 잔차에 대한 Global Moran's I는 0.3007로, 통계적으로 유의한 공간자기상관이 확인되었다($p<0.001$). 보다 타당한 공간회귀모형을 선정하기 위해 LM 및 Robust LM 검정을 통해 공간시차(Lag) 구조와 공간오차(Error) 구조를 비교한 결과, SLM과 SEM 모두에서 통계적으로 유의한 것으로 확인되었다(Table 9.).

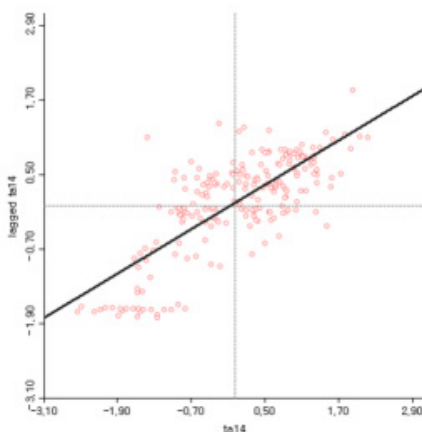


Fig. 8. Global Moran's I of dependent variable

Table 9. Results of LM test

Test	DF	Value
LM (Lag)	1	12.6749***
Robust LM (Lag)	1	19.5511***
LM (Error)	1	88.8012***
Robust LM (Error)	1	95.6774***
Lagrange multiplier (SARMA)	2	108.3523***

*** $p<0.001$

다만 Robust LM 검정에서 Error 구조의 통계량이 Lag 구조보다 더 크게 나타나 OLS 잔차의 공간자기상관이 공간오차 구조에 의해 설명될 가능성이 상대적으로 높은 것으로 해석되었다.

4. 분석 결과

4.1. 노후저층주택 밀집지역의 미기후 및 공간 특성 분석

Fig. 9는 본 연구의 분석 시점에서 광주광역시 상위 고온지역 열 곳 내부의 노후저층주택 밀집지역을 표기한 것이다. 노후저층주택 밀집지역은 소규모 필지를 중심으로 저층 주거건물이 밀집된 공간 구조를 보이는 곳으로, 건물 간 이격이 협소한 경우가 많아 전반적으로 공기 흐름이 원활하지 않다. 이러한 공간 구조는 국지적인 열의 축적 및 체류를 유발할 가능성을 내포한다. 전체 노후저층주택 밀집 지역의 현황을 살펴본 결과, 분석 시점인 오후 2시 기온은 33.7℃에서 35.0℃ 범위로 나타났다. 녹지는 주로 공원과 하천 인근 격자에 위치한다. 침엽수림이나 혼효림 등 수목이 분포하는 산림 격자는 토지피복 데이터 기준 2개로, 각각 대상지 c와 e에 존재하였다. 그 외 격자는 초지 또는 논·밭 등의 농업지역으로, 증산작용과 음영을 형성하는 수목이 부족하였다. 대상지 e와 i, j에서는 4° 이상의 경사 구간이 다수이며, 특히 대상지 i에서 7° 이상 경사 구간이 관찰되었다. 이러한 지형 조건은 국지적인 바람 흐름과 열환경에도 영향을 미칠 수 있다.

국지적인 지역 특성을 살펴보면, 본 연구의 분석 시점에서 가장 상위 고온지역으로 나타난 대상지 a는 오치1동 일대로, 노후저층주택 밀집지역에 해당하는 격자의 평균 기온이 가장 높고 풍속은 가장 낮은 것으로 나타났다. 대상지 b와 c는 각각 대학교 인근의 용봉동 일대와 수역 인근인 월곡1동 일대의 노후저층주택 밀집지역이다. 개발 밀도가 높은 대상지 d는 금호1동 일대로, 상대적으로 노후도가 낮은 저층주택이 밀집되어 있는 것으로 확인되었다. 건물 노후도가 높은 우산동과 문흥동, 중흥동 일대에 해당하는 대상지 e의 노후저층주택 밀집지역은 도로가 차지하는 비율이 가장 높아 포장면 비중이 두드러진다. 운암2동과 광천동을 포함하고 있는 대상지 f에는 녹지율이 비교적 높은 지역이 포함되어 있는 반면, 주월2동에 위치한 대상지 g는 건물 노후화 수준이 높고 식생 피복률이 낮은 노후저층주택 밀집지역에 속한다. 대상지 h는 공장, 아파트 단지, 저층 건물이 저밀도로 혼재된 수완동 일대로, 광주광역시 상위 고온지역에 해당하나 노후저층주택 밀집지역에 해당하는 격자가 포함되어 있지 않아 분석에서 제외하였다. 농성1동과 양3동 일대에 위치한 대상지 i의 노후저층주택 밀집지역은 가장 높은 노후화 수준을 보이며, 화정동과 농성2동 일대에 위치한 대상지 j의 노후저층주택 밀집지역은 교통량과 유동량이 높은 버스터미널 인근에 위치한다.

4.2. 분석 결과

Stata를 통한 OLS와 GeoDa를 통한 SLM, SEM의 추정 결과는 Table 10.과 같다. OLS에서 잔차의 공간자기상관이 확인되었기 때문에 공간모형을 추정한 결과, SLM의 공간시차계수는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 반면 SEM의 공간오차계수는 유의

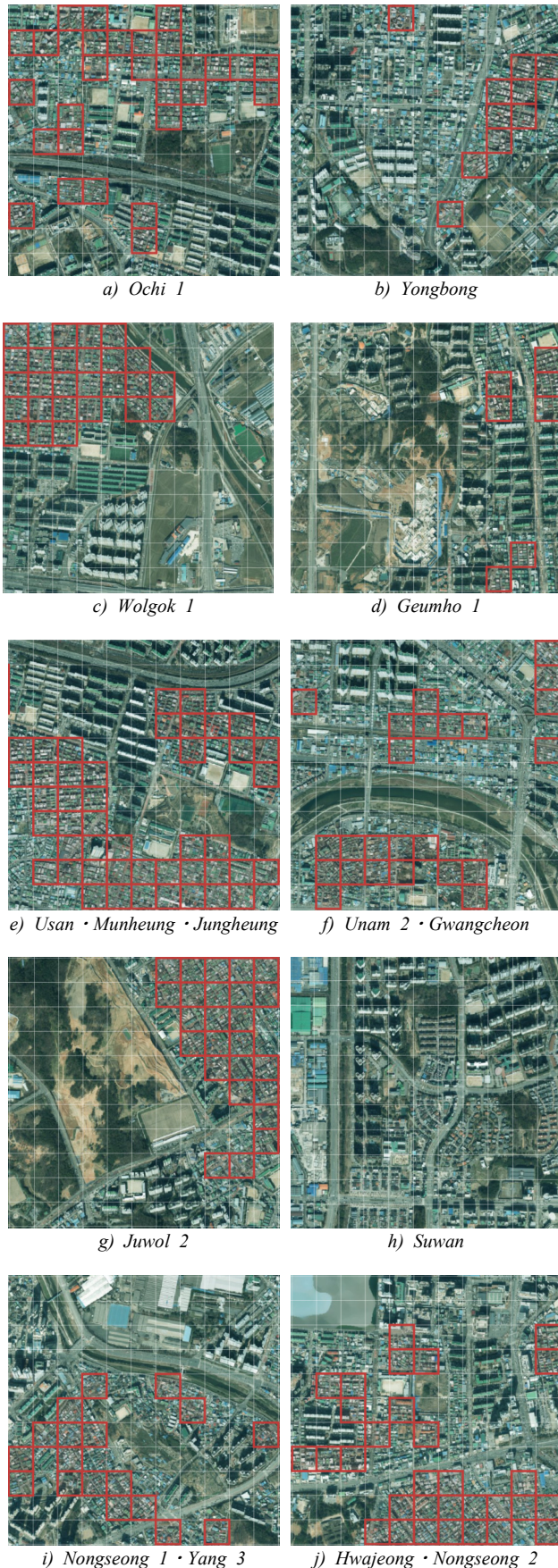


Fig. 9. Location and characteristics of selected high-temperature areas

Table 10. Results of analysis (N=213)

Variable	OLS	SLM		SEM	
	Coef.	Coef.	z	Coef.	z
WS	0.077***	0.077***	6.273	0.040**	2.732
RH	-0.184***	-0.187***	-9.951	-0.320***	-16.996
BCR	0.002	0.002	0.798	0.002	0.860
FAR	0.001	0.001	0.936	0.001	1.197
Building stories	-0.085	-0.085	-1.558	-0.079 ⁺	-1.692
Building age	-0.004	-0.003	-1.363	-0.008 ⁺	-2.689
Road ratio	0.003	0.003	1.362	0.002	1.409
Green space ratio	0.005 ⁺	0.005 ⁺	2.036	0.001	0.789
NDVI	-0.336	-0.346	-1.348	0.452 ⁺	1.864
NDBI	-0.308	-0.315	-0.831	0.345	1.103
Slope	-0.009	-0.009	-0.979	-0.004	-0.513
Elevation	0.002 ⁺	0.002 ⁺	1.991	0.000	0.070
Spatial effects	-	$\rho=-0.020$		$\lambda=0.882^{***}$	
AIC	-	-207.791		-272.633	
SC	-	-160.733		-228.936	
Log likelihood	-	117.896		149.317	
R ²	0.750	0.750		0.841	
Adjusted R ²	0.735	-		-	
F(12,200)	50.10	-		-	
RMSE	0.144	-		-	

⁺p<0.1, *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

한 영향을 받는다기보다는, 모형에 포함되지 않은 요인들이 공간적으로 군집되어 그 영향이 오차항에 반영되어 있음을 시사한다. AIC, SC, log likelihood 등 모형 적합도 지표를 종합적으로 고려한 결과, SEM이 가장 적합하여 본 연구의 최종 모형으로 채택하였다.

SEM 추정 결과, R²는 0.841로 나타났으며, 유의한 것으로 나타난 변수는 다음과 같다. 통계변수인 풍속은 한 단위 증가할 때 기온이 0.040℃ 상승하는 것으로 나타난 반면(p<0.01), 상대습도는 한 단위 증가 시 기온이 0.320℃ 하강하는 것으로 나타났(p<0.001). 개별 독립변수의 효과를 보면, 건물 변수 중 건물층수가 한 단위 증가할 때 기온은 0.079℃ 하강한다(p<0.1). 건물연령이 한 단위 증가할 때 기온은 0.008℃ 하강하는 것으로 나타났(p<0.05). 토지피복 변수인 NDVI는 OLS와 SLM에서는 음의 계수로 추정되었으나 통계적으로 유의하지 않았고, SEM에서는 양의 계수로 전환되며 10% 수준에서 유의하였다.

4.3. 분석 결과 해석

공간회귀모형 비교 결과, SEM이 가장 적합한 모형으로 나타났다. SEM 분석 결과에서 통계변수인 상대습도는 기온과 음의 관계를 보여 일반적인 열환경 특성과 일치하였다. 반면 풍속은 OLS, SLM, SEM 모두에서 양의 계수로 추정되었으며, SEM에서 기온과 유의한 양의 관계를 보였다. 이는 풍속 증가가 환기 및 열환경 완화에 기여한다고 보는 일반적 경향과는 상이한 결과이나, 본 연구의 분석 시점과 대상지의 공간 조건을 고려하여 해석할 필요가 있다. 본 연구는 일사에 의해 도시 표면과 대기가 강하게 가열되는 오후 2시를 대상으로 하였으며, 대상지의 풍속은 평균 2.16m/s, 최대 4.12m/s로 비

교적 약한 수준의 바람 조건에 해당한다. 맑고 바람이 약한 낮 시간대에는 도시 표면 열섬이 강하게 나타날 수 있으며, 저층 건축물과 도로가 밀집한 거친 도시 표면은 바람에 대한 항력을 증가시켜 난류와 기계적 혼합을 강화할 수 있다[3]. 이러한 조건에서는 풍속이 단순한 환기·냉각 효과로만 작용하기보다, 지표면 부근의 가열된 공기와 관측 높이의 기온 분포가 함께 나타날 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서 나타난 풍속의 양의 계수는 특정 시간대와 노후저층주택 밀집지역의 공간 조건에서 나타난 통계적 관련성으로 이해하는 것이 타당하며, 향후 연구에서는 풍향, 가로 방향, 건물 배치, 표면온도, 시간대별 기상자료를 함께 고려하여 풍속과 기온 간 관계를 보다 정밀하게 검토할 필요가 있다.

NDVI는 OLS와 SLM에서는 음의 방향으로 추정되었으나 유의하지 않았던 반면, SEM에서는 계수의 방향이 양으로 전환되며 유의하게 나타났다. 이는 공간오차의 통제 여부에 따라 변수의 추정 효과가 달라질 수 있음을 시사한다. 이와 같은 경향은 녹지율과 표고 변수에서도 확인되는데, 두 변수 모두 OLS에서는 유의하였으나 SEM에서는 유의하지 않은 것으로 전환된 점도 같은 맥락에서 이해된다. 대상지의 녹지 분포와 토지피복 현황을 함께 교차 검토한 결과, 격자 평균 0 이상인 지역은 전체 격자의 4% 수준으로, 대상지 내 식생 수준은 열악하였다. 녹지가 포함된 격자는 산림을 포함하는 일부 격자를 제외하면 대부분이 관목과 잔디 위주의 소규모 초지와 논, 밭 등의 저식생 피복으로 구성되어 있었다. 이러한 경우, 수목에 의한 증산 작용이 부족할 뿐만 아니라 음영이 형성되기 어려워 지표면이 일사에 직접 노출되기 때문에 오후 시간대에 지표 가열이 심화된다.

건물 특성 변수는 공간오차를 통제한 이후에도 OLS와 동일한 방향성을 보였다. 먼저, 건물층수가 높을수록 기온이 낮아지는 경향이 관찰되었다. 본 연구의 대상지는 노후저층주택이 높은 밀도로 밀집한 지역으로, 건물 높이가 상대적으로 높을수록 형성되는 음영의 면적과 차폐 효과가 증가한다. 특히 여름에는 태양 고도가 높아 음영 길이가 상대적으로 짧아지는 대신 일사량은 증가하여 지표면과 건물 외벽의 가열과 축열이 강화되기 때문에, 상대적으로 건물층수가 높은 지역에서 기온 상승이 완화된 것으로 해석 가능하다. 건물연령은 기온에 대해 음의 방향으로 유의하게 나타났다. 대상지 현황 검토 결과, 건물연령이 높은 지역은 낮은 지역에 비해 건물 밀도가 높았으며, 협소한 골목을 주된 특성으로 한다. 이러한 공간 구조에서는 건물의 차폐 효과로 인해 직달일사에 노출되는 면적이 감소하여, 기온이 상대적으로 낮게 나타난 것으로 해석할 수 있다. 반면, 건물연령이 낮은 지역은 비교적 개방적인 공간 구조를 가지며, 넓은 도로와 주차장 등 포장면 비중이 높아 일사에 노출되는 면적이 크고, 이에 따라 기온이 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 결과는 건물연령을 단독 지표로 해석하기보다, 건물이 형성되어 있는 주변 공간의 구조적 특성을 함께 고려하여 해석해야 함을 의미한다.

4.4. 소결

본 장에서는 공간회귀모형을 통해 노후저층주택 밀집지역에서 도시·건축 공간적 특성이 기온에 미치는 영향을 분석하였다. OLS, SLM, SEM 분석 결과, 데이터의 공간오차 구조를 반영하는 SEM이 가장 적합한 모형으로 나타났다. 이에 따라 SEM을 분석한 결과, 풍

속과 상대습도를 비롯하여 건물 특성인 건물층수와 건물연령, 토지 피복 특성인 NDVI가 유의한 변수로 나타났다. 지형 특성 변수는 유의하지 않았다.

건물층수와 건물연령은 통계적 유의성은 높지 않았으나, 공간오차를 통제한 뒤에도 기온과 음의 관계를 보였다. 먼저 건물층수의 증가는 건물의 음영 면적을 증가시켜 낮 시간대의 기온 상승을 완화시키는 것으로 드러났다. 또한 대상지에서 건물연령이 높은 구역에서 저층주택이 고밀도로 분포하여 협소한 가로공간이 주로 나타나, 직달 일사에 노출되는 면적이 상대적으로 줄어들어 기온이 낮아지는 양상이 나타난 것으로 해석된다.

토지피복 변수 중 NDVI는 OLS와 SLM에서는 음의 방향으로 추정되었으나 통계적으로 유의하지 않았고, SEM에서는 양의 방향으로 전환되어 10% 수준에서 유의하였다. 이는 공간오차를 통제할 경우 NDVI와 기온 간 추정 관계가 달라질 수 있음을 의미한다. 기존 연구에서도 NDVI는 일반적으로 주간 LST와 음의 관계를 보이는 지표로 제시되어 왔으나[15], 공간회귀모형을 적용할 경우 NDVI, NDBI 등 원격탐사 기반 지표와 열환경 변수 간의 관계 방향이 달라질 수 있음이 보고된 바 있다[12]. 또한 위성영상 기반 지표는 영상 취득 시각과 태양고도에 따른 그림자 분포, 주변 토지피복 조건 등의 영향을 받을 수 있어[12], 그 해석에는 관측 조건에 대한 고려가 수반되어야 한다. 따라서 본 연구의 결과는 NDVI가 높은 지역이 기온 상승을 직접 유발한다는 의미로 해석하기보다는, 대상지의 토지피복 구성과 주변 공간 조건을 함께 고려하여 이해할 필요가 있다. 본 연구 대상지는 저층고밀의 공간구조로 인해 녹지가 제한적으로 분포하고, 수목 중심의 녹지보다 초지, 농업지역, 소규모 식생 피복이 인공피복 및 내대지와 함께 혼재하는 특성을 보인다. 이러한 조건에서는 식생 피복이 존재하더라도 충분한 음영 형성이나 지표면 가열 완화에 이어지기 어려울 수 있다. 따라서 노후저층주택 밀집지역의 열환경 개선을 위해서는 녹지면적의 확대 여부뿐 아니라 수목 식재, 음영 형성, 녹지의 유형과 공간적 배치, 주변 인공피복과의 관계를 종합적으로 고려할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구는 노후저층주택 밀집지역의 도시·건축 공간적 특성이 도시 미기후에 미치는 영향을 실증적으로 분석하기 위해 2024년 광주광역시 일최고기온 기록일을 기준으로 분석 대상지를 선정하고 공간회귀분석을 실시하였다. 가장 적합한 모형으로 나타난 SEM 분석 결과, 대상지의 기온에 영향을 미치는 요인은 상대습도, 풍속, 건물층수, 건물연령, NDVI로 파악되었다.

이에 따른 결론은 다음과 같다. 첫째, 대상지의 열환경 개선을 위해서는 음영을 충분히 확보하고, 보행 동선 및 체류공간을 중심으로 폭염 대응형 공간설계를 적용할 필요가 있다. SEM 분석 결과를 종합하면, 건물과 수목에 의해 형성되는 음영은 지표면과 건물 외피가 일사에 노출되는 면적을 축소시켜 대상지의 기온 저감에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 열환경 개선 전략 수립 시 우선적으로 음영 확보가 고려되어야 한다. 다만 기존 시가지의 공간구조를 단기간에 재편하는 데에는 한계가 있으므로, 개별 건물, 주요 보행 동선,

골목 진입부, 교차로, 버스정류장, 소규모 체류공간 등을 중심으로 차양시설과 수목 식재를 단계적으로 도입할 필요가 있다. 특히 가장 높은 온도를 보인 대상지 a와 도로율이 높고 노후도가 큰 대상지 e의 경우, 버스정류장에서 주거지로 진입하는 주요 보행 동선과 교차로를 중심으로 그늘막과 가로수 등 음영 요소를 우선적으로 설치하여 이동 과정에서의 일사 노출을 완화할 필요가 있다. 동시에 개별 주택 차원에서 차양 설치가 가능하도록 개보수 지원과 유도책을 병행함으로써 지역 전반의 음영 연속성을 강화할 필요가 있다. 이러한 접근은 공간 제약이 큰 노후저층주택 밀집지역에서도 단기간 내 실행하기 용이하며, 폭염 시 보행자와 거주자가 체감하는 열 부담을 즉각적으로 완화하는 데 기여할 수 있다.

둘째, 노후저층주택 밀집지역에서는 녹지면적 확충 중심의 접근보다 기존 공간자원을 활용한 소규모 녹지 조성과 수목 중심 녹지의 질적 개선을 병행할 필요가 있다. 해당 지역은 전반적으로 녹지가 부족하고, 기존 식생 피복 역시 초지 또는 비수목성 식생 위주로 분포하여 수목에 의한 음영 형성 기능이 제한적인 것으로 나타났다. 또한 가로 폭이 좁고 필지 규모가 작아 신규 녹지를 대규모로 조성할 수 있는 공간이 제한적이므로, 옥상이나 벽면 등 건축물 기반의 입체 녹화와 함께 빈 공터, 나대지, 유휴공간 등 기존 공간자원을 활용한 소규모 녹지 조성을 병행할 필요가 있다. 특히 초지 위주의 기존 녹지의 경우, 수목 식재를 통해 음영 형성과 차폐 기능을 강화하는 등 녹지의 질적 개선이 함께 이루어져야 한다. 노후도가 높고 식생 피복률이 낮은 대상지 g와 i의 경우, 주거지 내부의 열 노출을 완화하기 위해 유휴공간을 활용한 소규모 녹지 조성을 우선 검토하고, 건축물의 구조적 여건을 고려하여 옥상·벽면녹화 등 입체녹화를 단계적으로 적용할 필요가 있다. 특히 노후화 수준이 높은 지역에서는 입체녹화를 즉시 적용하기 어려울 수 있으므로, 단기적으로는 유휴공간을 활용한 소규모 녹지와 수목 식재를 우선 추진하고, 중장기적으로는 개보수가 가능한 건축물을 중심으로 입체녹화 지원을 연계하는 전략이 요구된다.

셋째, 기후재난 대응 연구의 실효성을 제고하기 위해 건물과 토지 피복, 지형 등 기본 공간 데이터의 구축, 정비 및 주기적인 최신화가 필요하다. 본 연구 과정에서는 일부 데이터가 최신 현황을 충분히 반영하지 못하거나 서로 다른 기준시점의 데이터가 혼재하는 경우가 확인되었다. 따라서 실제 현황과 데이터의 일치 여부를 상시 점검하는 모니터링 체계의 구축이 필요하다.

본 연구는 도시 전체를 포괄적으로 다루는 기존 접근방식과 달리, 광주광역시 노후저층주택 밀집지역을 대상으로 해당 지역의 열환경이 도시·건축 공간적 특성과 밀접하게 연관되어 있음을 규명하였다는 점에서 의의가 있다. 특히 WRF-LES 기반의 고해상도 기상데이터를 활용함으로써 관측 자료가 갖는 시·공간적 제약을 보완하고, 보행자 높이의 대기 미기후를 반영하여 실제 거주자와 보행자가 체감하는 열환경에 근접한 분석을 수행하였다. 또한 공간회귀모형을 적용하여 데이터의 공간자기상관을 고려함으로써 노후저층주택 밀집지역의 공간적 맥락을 보다 정밀하게 분석하였다. 이러한 결과는 열환경 개선 및 기후적응 전략 수립에 있어 대상 지역을 구성하는 공간 특성을 종합적으로 고려한 맞춤형 접근이 필요함을 시사한다. 구체적으로 본 연구는 광주광역시의 공간 제약이 큰 노후저층주택 밀

집지역을 대상으로 음영 확보, 차양시설 도입, 보행 동선 및 체류공간의 폭염 대응 설계, 수목 중심의 녹지 질적 개선, 옥상·벽면 등 입체 녹화, 유휴공간을 활용한 소규모 녹지 조성 등 지역의 물리적 조건을 반영한 열환경 개선 방향을 제시하였다. 이는 향후 노후저층주택 밀집지역의 주거환경 개선, 골목 및 보행공간 정비, 폭염 대응형 생활환경 개선, 기후적응형 공공공간 조성 등과 연계되어, 물리적 환경 정비 과정에서 열저감 설계 요소와 사업 우선순위를 구체화하는 기초자료로 활용될 수 있다.

본 연구는 2024년 광주광역시의 일최고기온 기록일인 6월 19일 오후 2시를 기준으로 상위 고온지역을 선별하고, 해당 범위 내의 노후저층주택 밀집지역 격자를 최종 분석 대상으로 설정하였다. 따라서 본 연구는 여름철 전체 기간의 평균적 열환경을 설명하기보다, 극한 고온 조건에서 열환경 대응이 우선적으로 요구되는 노후저층주택 밀집지역의 공간적 특성과 기존 분포 간 관계를 규명하는 데 초점을 둔다. 이러한 접근은 폭염 대응과 공간 정비의 우선순위를 설정하는 데 기초자료를 제공한다는 점에서 의의가 있다. 다만 단일 시점 분석이라는 연구설계의 특성상, 결과를 전체 여름철 또는 다양한 기상 조건으로 일반화하는 데에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 시간대별 관측자료와 복수의 폭염일 및 비폭염일 자료를 함께 구축하여, 노후저층주택 밀집지역의 열환경 특성이 시간에 따라 어떻게 변화하는지 비교·검증할 필요가 있다.

References

- [1] 김민영, 문은설, 폭염 및 도시열섬현상에 따른 노후 주거지의 적응 계획기법에 관한 연구, KIEAE Journal, 제16권 제4호, 2016, pp.31-39. // (M.Y. Kim, E.S. Moon, The research of planning method of adaption for old residential neighborhoods according to heat wave and urban heat island phenomena, KIEAE Journal, 16(4), 2016, pp.31-39.)
- [2] 전규원, 박유진, 도시 건조환경 유형에 따른 서울시 주간 지표면 온도 변동성 분석: ECOSTRESS 데이터의 활용, 지역연구, 제40권 제2호, 2024, pp.107-130. // (G.W. Jeon, Y.J. Park, Examining diurnal thermal variations by urban built environment type with ECOSTRESS land surface temperature data: Evidence from Seoul, Korea, Journal of the Korean Regional Science Association, 40(2), 2024, pp.107-130.)
- [3] E. Erell, D. Pearlmutter, T. Williamson, Urban microclimate: Designing the spaces between buildings, 1st ed., UK: Routledge, 2011, pp.1-288.
- [4] T.R. Oke, The urban energy balance, Progress in Physical Geography, 12(4), 1988, pp.471-508.
- [5] T.R. Oke et al., Urban Climates, UK: Cambridge University Press, 2017, pp.1-519.
- [6] S. Lenzholzer, Weather in the city: How design shapes the urban climate, 1st ed., Netherlands: nai010 publishers, 2015, pp.1-224.
- [7] H. Li et al., Quantifying 3D building form effects on urban land surface temperature and modeling seasonal correlation patterns, Building and Environment, 204, 2021, pp.1-10.
- [8] 황지욱, 김소정, 도시열섬현상의 주거 형태별 비교분석, 국토계획, 제38권 제7호, 2003, pp.235-244. // (J.W. Hwang, S.J. Kim, A comparative analysis on the urban heat island by residential types, Journal of Korea Planning Association, 38(7), 2003, pp.235-244.)
- [9] 조현길, 안태원, 도시기온에 작용하는 입체적 토지피복의 영향, 한국조경학회지, 제37권 제3호, 2009, pp.54-60. // (H.K. Jo, T.W. Ahn, Impacts of three-dimensional land cover on urban air temperatures, Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture, 37(3), 2009, pp.54-60.)
- [10] 오규식, 홍재주, 도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구, 한국도시설계학회지 도시설계, 제6권 제1호, 2005, pp.47-63. // (K.S. Oh, J.J. Hong, The relationship between urban spatial elements and the urban heat island effect, Journal of the Urban Design Institute of Korea, 6(1), 2005, pp.47-63.)

- [11] T. Elbondira et al., Impact of neighborhood spatial characteristics on the microclimate in a hot arid climate – A field based study, *Sustainable Cities and Society*, 75, 2021, pp.1-16.
- [12] A.-R. B. Ismaila, I. Muhammed, B. Adamu, Modelling land surface temperature in urban areas using spatial regression models, *Urban Climate*, 44, 2022, pp.1-14.
- [13] Y. Gao et al., Exploring the spatial heterogeneity of urban heat island effect and its relationship to block morphology with the geographically weighted regression model, *Sustainable Cities and Society*, 76, 2021, pp.1-13.
- [14] Y. Hu, Z. Dai, J.M. Guldman, Greenspace configuration impact on the urban heat island in the Olympic Area of Beijing, *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 2021, pp.1-12.
- [15] X. Yao et al., Exploring the diurnal variations of the driving factors affecting block-based LST in a furnace city using ECOSTRESS thermal imaging, *Sustainable Cities and Society*, 98, 2023, pp.1-11.
- [16] 배용규 외 3인, 저층주거지 특성에 따른 관리방향 및 검토과제 도출 연구, 한국도시설계학회지, 제12권 제3호, 2011, pp.137-152. // (W.K. Bae et al., Characteristics of low-rise residential areas and improvement schemes for better management, *Journal of the Urban Design Institute of Korea*, 12(3), 2011, pp.137-152.)
- [17] B. Sützl et al., Urban morphology clustering analysis to identify heat-prone neighbourhoods in cities, *Sustainable Cities and Society*, 107, 2024, pp.1-11.
- [18] 조항훈, 김홍순, 도시특성이 건축물의 탄소배출에 미치는 영향에 관한 연구: 서울시 424개 행정동에 대한 공간회귀분석의 적용, 토지주택연구, 제14권 제3호, 2023, pp.77-92. // (H.H. Jo, H.S. Kim, The impact of urban characteristics on carbon emissions of buildings in Seoul: Application of spatial regression analysis, *Land and Housing Review*, 14(3), 2023, pp.77-92.)
- [19] 김희주, 오규식, 이승재, 중규모 기상모델(WRF-ARW)을 활용한 서울시 옥상녹화와 쿨루프의 기온저감 효과 분석, 서울도시연구, 제19권 제2호, 2018, pp.39-57. // (H.J. Kim, K.S. Oh, S.J. Lee, The effects of green and cool roofs on temperature reduction in Seoul using a mesoscale meteorological model (WRF-ARW), *Seoul Studies*, 19(2), 2018, pp.39-57.)
- [20] 국립기상연구소 응용기상연구과, WRF-LES 구축 및 평가, 2014. // (Research Applications Department, Applied Meteorology Research Division, WRF-LES development and evaluation, 2014.)
- [21] M. Golbazi et al., High-resolution modeling of extreme heat events with socioeconomic consideration: A real-case WRF-LES approach, *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 2025, pp.21666-21680.
- [22] 기상청, 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr>, 2025.02.13. // Korea Meteorological Administration, Korea national climate data center, <https://data.kma.go.kr>, 2025.02.13.
- [23] 질병관리청, 2024년도 폭염으로 인한 온열질환 신고현황 연보, 2025. // (Korea Disease Control and Prevention Agency, 2024 Annual Report on the Notified Patients with Heat-related illness in Korea, 2025.)
- [24] 광주광역시기후에너지안전지원, 시원한 도시 조성을 위한 폭염취약상세지도 구축 기획연구, 2024. // (Gwangju Climate and Energy Agency, Planning research on the development of a detailed heat wave vulnerability map for creating cool cities, 2024.)
- [25] 김연수, 여름철 폭염에 따른 광주지역 영향 및 대응 영향, 광주연구원, 2024. // (Y.S. Kim, Impacts of summer heat waves on the Gwangju region and response measures, Gwangju Institute, 2024.)
- [26] 국립재난안전연구원, 열분포도(6-9월), 2024. // (National Disaster Management Research Institute, Heat Distribution Map, June to September 30mx30m grid data, 2024.)
- [27] 세움터, 건축물대장, <https://www.eais.go.kr>, 2025.08.09. // Electronic Architectural Information System, Building ledger, <https://www.eais.go.kr>, 2025.08.09.
- [28] 국토교통부, 광주 부동산정보조회 시스템, <https://kras.gwangju.go.kr>, 2025.08.09. // Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea real estate administration system, <https://kras.gwangju.go.kr>, 2025.08.09.
- [29] R.D. Cook, Detection of influential observation in linear regression, *Technometrics*, 19(1), 1977, pp.15-18.
- [30] D.A. Belsley, E. Kuh, R.E. Welsch, Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity, New York: John Wiley & Sons, 1980
- [31] J.M. Wooldridge, Introductory econometrics: A modern approach, 4th ed., Mason: Cengage Learning, 2009
- [32] W.R. Tobler, A computer movie simulating urban growth in the detroit region, USA: *Economic Geography*, 46, 1970, pp.234-240.
- [33] 국토교통부, 도시 및 주거환경정비법 시행령, 대통령령 제2025-35683호. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Enforcement Decree of the Act on the Improvement of Urban Areas and Residential Environments, Presidential Decree, 2025)
- [34] 광주광역시, 광주광역시 도시 및 주거환경정비 조례, 광주광역시조례 제2025-6649호. // (Gwangju Metropolitan City, Gwangju Metropolitan City Ordinance on the Improvement of Urban areas and Residential Environment, Gwangju Metropolitan City, 2025.)
- [35] 국토교통부, 주택법, 국토교통부 고시 제2024-20048호. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Housing Act, MOLIT, 2024.)
- [36] 기후에너지환경부, 토지피복지도 작성 지침, 기후에너지환경부 고시 제2025-4호. // (Ministry of Climate, Energy and Environment, Guidelines for Land Cover Mapping, MCEE, 2025.)
- [37] D. Bolton, The computation of equivalent potential temperature, *Monthly Weather Review*, 108, 1980, pp.1046-1053.
- [38] NCAR Command Language, Overview of NCL, <https://www.ncl.ucar.edu/overview.shtml>, 2025.03.17.

- 1) 본 연구에서는 「도시 및 주거환경 정비법 시행령」 제2조 제3항 제1호와 「광주광역시 도시 및 주거환경 정비조례」 제3조 제2항에 따라 20년을 건물 노후도의 판별 기준으로 선정하고[33,34], 「주택법」 제2조에 따라 4층을 저층의 기준으로 정하였다[35]. 이에 따라 '사용승인일로부터 20년 이상 지난 4층 이하의 주택 밀집지역'을 노후저층주택 밀집지역이라 정의하였다.
- 2) 시가화건조지역은 주거시설, 상업 및 공업시설, 교통시설 등의 건조물을 포함하는 지역이고, 비시가화건조지역은 시가화건조지역에 해당하지 않는 지역이다[36].
- 3) GIS 건물통합정보 데이터와 건축물대장의 건물용도 항목을 기준으로 하여, 주거용 건축물의 건축면적 합을 격자 면적으로 나눈 백분율 값을 산출하였다.
- 4) Cook의 거리와 DFFITS를 활용하여 산출하였다.
- 5) NCL의 상대습도 계산 함수는 1980년에 Bolton이 Wexler(1976)의 계산 결과를 토대로 수정한 포화수증기압 공식을 기반으로 한다[37,38].
- 6) 보간 가능한 높이 값을 가진 도시지역 내 두 지점을 대상으로 한다.