

# 빅데이터 기반 건축 · 도시 공간 폭염 취약성 분석 방안

Big Data Based Approaches to Heatwave Vulnerability Assessment of the Built and Urban Environment

허한결 Heo, Hankyul  
변기영 Byun, Giyoung  
송유미 Song, Yumi  
남기천 Nam, Kichoen

( a u r i

## 빅데이터 기반 건축·도시 공간 폭염 취약성 분석 방안

Big Data Based Approaches to Heatwave Vulnerability Assessment of the Built and Urban Environment

지은이 허한결, 변기영, 송유미, 남기천  
펴낸곳 건축공간연구원  
출판등록 제2015-41호 (등록일 '08. 02. 18.)  
인쇄 2025년 12월 30일, 발행: 2025년 12월 31일  
주소 세종특별자치시 가림로 143, 8층  
전화 044-417-9600  
팩스 044-417-9608

<http://www.auri.re.kr>

가격: 10,000원, ISBN: 979-11-5659-540-3

## 연구진

---

연구책임      허한결    부연구위원

연구진            변기영    부연구위원  
                     송유미    부연구위원  
                     남기천    연구원

외부연구진      김호결    청주대학교 조경학과 부교수  
                     김준우    청주대학교 연구원

---

연구심의위원    오성훈    부원장  
                     조영진    공간AI·빅데이터본부장  
                     조상규    선임연구위원  
                     이석민    서울연구원 선임연구위원  
                     이승일    서울시립대학교 도시공학과 교수

연구자문위원    김은섭    홍콩성시대학교 박사후연구원  
                     양현석    삼성SDI 프로  
                     유철희    NASA JPL 박사  
                     최준석    동광지엔티 전무

---



## 서론

### ■ 연구 배경 및 목적

2023년 지구 평균 기온이 역사상 최고치를 기록하면서, 기후 위기는 단순한 지구온난화(Global Warming)를 넘어 지구가 끓고있는(Global Boiling) 단계로 진입했다는 경고가 나오고 있다. 국내에서도 2024년 여름철 폭염일수와 열대야 일수가 역대 상위권을 기록하는 등 기온 상승 추세가 뚜렷하며, 이로 인한 온열질환자 및 사망자 증가와 같은 인명 피해가 확대되고 있다. 서울의 폭염일수 증가세는 세계적으로도 가파른 수준이며, 이러한 기후 변화는 건축물 내 냉방 에너지 수요 급증과 에어컨 실외기 화재 등 물리적 피해로도 이어지고 있다.

기존의 폭염 대응은 주로 거시적인 기상 데이터를 기반으로 이루어졌으나, 도시 내 국지적인 열환경 차이를 반영하기에는 한계가 있었다. 이에 따라 본 연구는 공공데이터와 빅데이터 기술을 활용하여 건축물 및 블록 단위의 미시적 폭염 취약성을 분석하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로는 산재된 공공데이터를 연계하여 빅데이터를 구축하고, 머신러닝 기반으로 서울시의 도시기후대(LCZ: Local Climate Zone)를 분류하며, 이를 지표면 온도(LST: Land Surface Temperature) 및 미기후 시뮬레이션(ENVI-met)과 결합하여 실효성 있는 폭염 위험 건축·공간 도출 프로세스를 개발하고자 한다.

#### 연구의 차별성

본 연구는 기존 기상데이터 기반 거시규모 폭염 취약지역 분석기법의 한계를 개선하기 위해

- 1) 도시기후대(LCZ) 분석을 수행하여 폭염 취약지역을 1차 선별하고
- 2) 취약지역을 대상으로 미기후 시뮬레이션(ENVI-met)을 사용하여 개별 건축물 수준의 폭염 취약성을 분석

### ■ 연구 범위

본 연구의 공간적 범위는 도시화로 인한 열섬 현상이 뚜렷하고 공공데이터가 잘 구축된 서울 특별시 전역을 대상으로 한다. 서울은 고밀도 건축물과 부족한 녹지로 인해 폭염 피해 위험이 높은 대표적인 지역이다. 내용적 범위는 데이터 구축, 도시기후대 기반의 폭염 취약 공간유형

도출, 폭염 취약 공간유형 대상 미기후 시뮬레이션 분석 및 공간별 취약성 분석, 폭염 취약 대응 방안 제안으로 구성된다.

### ■ 연구 방법 및 연구 흐름

연구는 선행연구 고찰을 통한 분석의 틀 구축, 분석을 위한 데이터 구축, LCZ 및 폭염 거시규모 취약지역 분석, ENVI-met 시뮬레이션을 통한 미시규모 폭염 취약지역 분석, 결과 도출 및 정책 제언의 다섯 단계 흐름으로 진행된다. 첫째, 선행연구 고찰을 통해 분석의 틀과 분석에 필요한 데이터 목록을 도출하였다. 둘째, 위성영상과 건축물 대장 등 행정 정보를 수집 및 전처리하여 분석용 데이터셋을 구축하였다. 셋째, 딥러닝(CNN) 기법을 활용해 서울시 전역의 LCZ를 분류하고, 위성영상의 열밴드를 활용해 지표면 온도를 분석한다. 넷째, 도출된 폭염 위험 LCZ 유형에 대해 ENVI-met 시뮬레이션을 수행하여 잠재기온(PAT), 평균복사온도(MRT), 생리적등가온도(PET) 등 상세 열환경을 분석하고, 건축물의 노후도나 용도 등 속성 정보와 결합하여 취약 건축물 유형을 도출한다. 마지막으로, 이를 바탕으로 건축물 및 공간 단위의 폭염 대응을 위한 법·제도적 개선방안을 제안한다.



연구의 흐름

출처: 연구진 작성

## 건축·도시 폭염 분석 방법론 관련 동향 조사

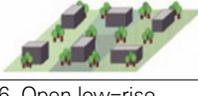
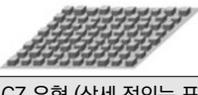
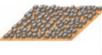
### ■ 도시 폭염 관련 연구 동향

도시 폭염 분석은 크게 대기온도(AWS 등) 데이터 분석과 지표면 온도(LST) 데이터 분석, 그리고 미기후 시뮬레이션(ENVI-met)으로 구분된다. AWS 데이터를 활용한 연구들은 도시 전체의 열섬 강도와 시공간적 분포를 파악하는 데 유용하지만, 관측 지점의 한계로 국지적 분석에는 제약이 있다. 반면 위성영상 기반의 LST 연구는 도시 전역의 상세한 온도 분포를 파악할 수 있어 핫스팟 분석 등에 널리 활용된다. 더 나아가 건축물 배치나 식생, 포장 재질 등 미시적 공간 요소가 열환경에 미치는 영향을 분석하기 위해 ENVI-met과 같은 CFD(전산유체역학) 시뮬레이션 모델이 적극적으로 도입되고 있다. 이러한 시뮬레이션 연구들은 도시 재개발이나 녹지 조성에 따른 열환경 개선 효과를 정량적으로 예측하는 데 효과적임을 보여준다. 본 연구는 이러한 동향을 반영하여 광역적 분석에는 LCZ와 LST를, 상세 분석에는 ENVI-met을 활용하는 다층적 접근 방식을 채택하였다.

## ■ 도시기후대(LCZ) 관련 연구 동향

도시열섬 현상을 객관적으로 비교·분석하기 위해 Stewart & Oke (2012)가 고안한 도시기후대는 전 세계적으로 널리 활용되는 분류체계이다. LCZ는 건축물의 높이, 밀도, 토지 피복 상태 등을 기준으로 도시 공간을 17개 표준 유형(건축물 유형 10개, 토지피복 유형 7개)으로 분류한다. 선행 연구들은 WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) 프로토콜을 활용하거나, 최근에는 정확도 향상을 위해 딥러닝 기법을 도입하여 LCZ를 분류하고 있다. 특히 CNN (Convolutional Neural Network) 기반 연구들은 위성영상의 공간적 특징을 학습하여 기존 방식보다 정밀한 분류 결과를 도출하고 있다. 또한, LCZ 유형별로 지표면 온도나 기온 차이가 뚜렷하게 나타난다는 점이 다수의 연구를 통해 입증되었으며, 고밀도 건축 지역(LCZ 1~3)과 산업 지역(LCZ 8, 10)이 열섬 현상에 특히 취약한 것으로 확인되었다.

### LCZ 유형과 정의 예시

LCZ 유형	정의	LCZ 유형	정의				
1. Compact high-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>수십 층의 고층빌딩 밀집 지역이며 나무는 거의 없음</li> <li>토지 피복은 대부분 포장</li> </ul>	4. Open high-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>수십 층의 고층빌딩의 개방형 배치</li> <li>투과성 높은 토지 피복</li> </ul>				
2. Compact midrise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>중층 건물(3-9층) 밀집 지역이며 나무는 거의 없음</li> <li>토지 피복은 대부분 포장</li> </ul>	5. Open midrise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>중층 건물(3-9층)의 개방형 배치</li> <li>투과성 높은 토지 피복</li> </ul>				
3. Compact low-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>낮은 건물(1-3층) 밀집 지역이며 나무는 거의 없음</li> <li>토지 피복은 대부분 포장</li> </ul>	6. Open low-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>낮은 건물(1-3층)의 개방형 배치</li> <li>투과성 높은 토지 피복</li> </ul>				
LCZ 유형 (상세 정의는 표 2-1 참조)							
7	8	9	10	D	E	F	G
							

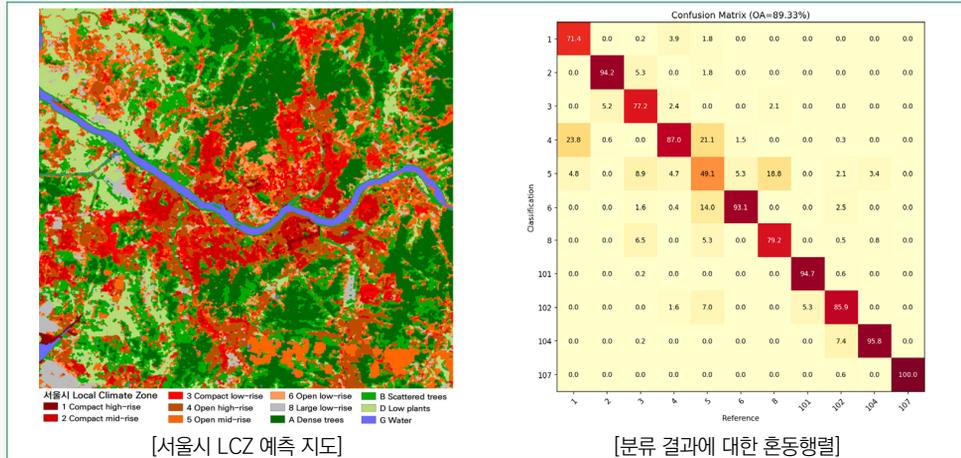
출처: Stewart, I.D. & Oke, T.R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93. p.1,885

## 빅데이터 기반 도시기후대 분석

### ■ 서울시 LCZ 도출

서울시의 LCZ 분류를 위해 Landsat 8 위성영상과 CNN 모델을 활용하였다. 데이터셋은 100m 및 10m 해상도로 리샘플링하여 구축하였으며, 구글 어스 등을 활용한 육안 판독을 통해 학습용(Train) 및 검증용(Test) LCZ 샘플 데이터를 생성하였다.

CNN 모델 학습 결과, 전체 분류 정확도(Overall Accuracy)는 약 89.33%로 나타나 높은 신뢰도를 확보하였다. 분류된 서울시 LCZ 지도를 살펴보면, 도심부와 강남 등 주요 상업지역은 고층 및 중층 고밀도 지역(LCZ 1, 2)으로, 주거지는 저층 및 중층 밀집 지역(LCZ 2, 3)으로, 외곽 산림 지역은 수목 피복 지역(LCZ A, B)으로 명확히 구분되는 특성을 보였다. 다만, 100m 격자 해상도의 한계로 인해 작은 하천 등 일부 미세한 공간 특성이 무시되거나 인접 픽셀 간의 노이즈 발생도 확인되었다.



## 서울시 LCZ 분류 결과

출처: 연구진 작성

## ■ 폭염 위험 LCZ 유형 도출

도출된 서울시 LCZ 지도와 2024년 8월 29일 촬영된 Landsat 8 위성영상의 열적외선 밴드를 통해 산출한 지표면 온도(LST) 데이터를 중첩 분석하여 LCZ 유형별 열환경 특성을 규명하였다. 분석 결과, 평균 온도가 가장 높은 유형은 대규모 저층 건물이 밀집한 LCZ 8 (Large low-rise)로, 평균 45.35℃를 기록하였다. 이는 공장이나 창고 등 바닥 면적이 넓고 식생이 부족한 지역의 특성이 반영된 결과다. 그 뒤를 이어 건물이 조밀하게 배치된 LCZ 3 (Compact low-rise, 43.56℃)와 LCZ 2 (Compact mid-rise, 43.38℃)가 높은 온도를 보였다.

반면, 수목이 밀집된 LCZ A (Dense trees, 32.35℃)와 수역인 LCZ G (Water, 31.55℃)는 가장 낮은 온도를 기록하여 도시 내 열섬 완화 기능을 확인하였다. 주목할 점은 고층 건물이 밀집한 LCZ 1 (Compact high-rise)의 경우 평균 39.71℃로, 저층 밀집 지역보다 상대적으로 낮게 나타났다는 점이다. 이는 고층 건물에 의해 형성되는 그림자와 바람길이 지표면 온도 상승을 일부 억제하는 효과가 있음을 시사한다. 결론적으로 서울시에서는 불투수면 비율이 높고 식생이 부족하며 건물이 조밀한 저층 및 공업 지역이 폭염에 가장 취약한 공간 유형으로 파악되었다.

LCZ 유형별 평균 온도

LCZ 구분	평균온도(°C)	순위	LCZ 구분	평균온도(°C)	순위
LCZ 1 (Compact high-rise)	39.71	7	LCZ 8 (Large low-rise)	45.35	1
LCZ 2 (Compact mid-rise)	43.38	3	LCZ A (Dense trees)	32.35	10
LCZ 3 (Compact low-rise)	43.56	2	LCZ B (Scattered trees)	36.22	9
LCZ 4 (Open high-rise)	40.79	4	LCZ D (Low plants)	39.47	8
LCZ 5 (Open mid-rise)	39.96	6	LCZ G (Water)	31.55	11
LCZ 6 (Open low-rise)	40.59	5	※전체 유형 평균온도는 39.35°C		

출처: 연구진 작성

폭염 취약 건축·공간 유형 도출

■ 폭염 위험 지역 미기후 분석

LCZ 분석을 통해 도출된 고위험 유형을 대표하는 실제 지역(여의도동, 송파동, 문래동, 사당동 등)을 선정하여 ENVI-met 시뮬레이션을 수행하였다. 분석 대상지의 물리적 환경을 컴퓨터 상에 정교하게 구현하기 위해 세 가지 기준을 적용하였다. 1) 모든 분석 대상지의 크기를 300m × 300m 정방형으로 통일하고, 2) 미세한 열환경 변화 탐지를 위해 1m × 1m의 고해상도 격자를 적용하였으며, 3) 건축물대장상의 실제 건축물 높이와 지형(DEM)을 반영하였다. 분석 지표로는 잠재기온(PAT), 평균복사온도(MRT), 생리적등가온도(PET)를 활용하여 시간대별(09시, 13시, 15시, 21시) 열환경 변화를 정밀 분석하였다.

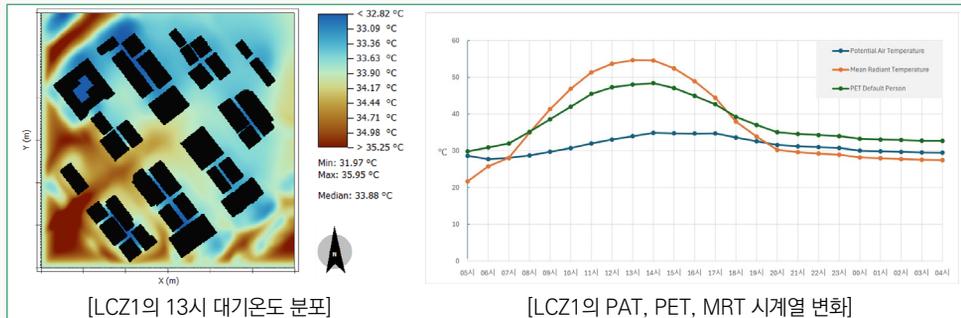


폭염 취약성 분석 절차 흐름도

출처: 연구진 작성

분석 과정은 데이터 구축, 열환경 시뮬레이션, 결과 도출 및 분석, 평가 및 취약 유형 도출의 네 단계로 구분할 수 있다. 이를 통해 도출된 결과는 LCZ 유형별 내부 공간의 세밀한 폭염 취약지역 파악을 가능하게 하며, 물리적 폭염 수준(PAT)과 생리적 폭염 수준(MRT, PET)을 모두 분석할 수 있도록 정보를 제공한다.

분석 결과, LCZ 1 (여의도동)과 LCZ 2 (송파동)와 같은 고밀 지역은 주간에는 복사열 축적이 크고, 야간에는 축적된 열이 쉽게 빠져나가지 못해 열대야와 같은 야간 열부하가 지속되는 '도심 축열형' 특성을 보였다. 반면, LCZ 3 (문래동)과 LCZ 6 (중계동) 등 저층 주거지는 좁은 골목과 높은 포장 비율로 인해 주간에 급격한 온도 상승을 보이며 보행자의 열 스트레스(PET)가 매우 높게 나타났다. 이에 비해 LCZ 4 (사당동)나 LCZ 5 (신촌동)와 같이 건물이 개방적으로 배치되고 녹지가 확보된 지역은 통풍과 그늘 효과로 인해 열이 빠르게 분산되거나 완화되는 특성을 보였다. 수변 지역인 LCZ G (신천동)는 주간 및 야간 모두에서 뚜렷한 냉각 효과를 보여 도시 열환경의 완충 지대 역할을 수행함을 확인하였다.



ENVI-met 분석 결과 예시

출처: 연구진 작성

## ■ 공간 유형별 폭염 취약 건축·공간 도출

ENVI-met 분석 결과를 바탕으로 건축물 속성(높이, 준공연도, 용도)에 따른 열취약도를 정량적으로 평가하였다. 열취약도는 PAT, MRT, PET 지표를 종합하여 등급화하였다. 분석 결과, 건축물의 높이가 높을수록 주변 열취약도가 상승하는 경향이 확인되었다. 이는 고층 건물일수록 외피 면적이 넓어 복사열 반사 및 재복사가 증가하고 통풍을 저해하는 '캐니언 효과'가 강화되기 때문이다. 또한, 준공연도가 오래된 건물(1999년 이전)일수록 단열 성능 미비와 노후화로 인해 열취약도가 높게 나타났으며, 2011년 이후 신축 건물은 강화된 에너지 기준 덕분에 상대적으로 양호한 결과를 보였다. 용도별로는 교육연구시설과 근린생활시설이 넓은 포장 면적과 부족한 녹지로 인해 가장 높은 취약도를 보인 반면, 조경이 확보된 공동주택과 업무시설은 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 폭염 대응을 위해서는 단순히 공간의 온도뿐만 아니라 건축물의 물리적 특성을 고려한 맞춤형 관리가 필요함을 시사한다.

## 결론

본 연구는 빅데이터와 첨단 분석 기술을 활용하여 서울시의 건축·도시 공간 폭염 취약성을 분석하는 방법을 제안하고, 시범적으로 적용하였다. 연구 결과, 도시의 물리적 구조(LCZ)가 열 환경에 결정적인 영향을 미치며, 특히 고밀도·저층·산업 지역이 폭염에 가장 취약함을 확인하였다. 또한 미시적 시뮬레이션을 통해 건축물의 높이, 노후도, 용도가 주변 열환경을 악화시키는 주요 요인임을 정량적으로 확인하였다.

이러한 연구 결과를 바탕으로 다음과 같은 정책적 시사점을 도출하였다. 첫째, 폭염 피해 예측 모델의 고도화를 위해 인구, 경제 등 인문·사회적 정보가 연계된 데이터의 개방 및 활용 방안 마련이 필요하다. 둘째, 「건축물관리법」 상의 건축물 생애이력 정보체계에 재난·재해 데이터를 연계하여, 폭염을 포함한 각종 재난에 위험한 건축물을 상시 모니터링할 수 있는 체계를 구축해야 한다. 셋째, 건축 인허가 단계에서 해당 대지의 폭염 위험성을 사전에 확인하고, 위험 지역 내 건축 시에는 차열 도료 사용, 녹지 확보 등 예방 조치를 의무화하거나 권고할 수 있도록 「건축법」 및 관련 시행규칙을 개정할 필요가 있다. 마지막으로, 현재 제공되는 폭염 위험 지도 서비스에 본 연구의 건축·공간 단위 취약성 분석 결과와 인구·사회적 요인(민감도, 적응 능력 등)을 결합하여, 실질적인 폭염 리스크 관리가 가능한 서비스로 고도화해야 한다. 이는 향후 무더위 쉼터 배치나 취약계층 지원 등 도시 폭염 적응 정책의 효율성을 높이는 데 기여할 것이다.

### 주제어

폭염, Local Climate Zone, 원격탐사, 취약성 분석, ENVI-met

제1장 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	2
2. 연구의 범위 및 방법	8
제2장 건축·도시 폭염 분석 방법론 관련 동향 조사	13
1. 도시기후대 관련 연구 동향	14
2. 도시 폭염 관련 연구 동향	37
3. 소결	53
제3장 빅데이터 기반 도시기후대 분석	55
1. 분석 개요	56
2. 서울시 LCZ 도출	57
3. 폭염 위험 LCZ 유형 도출	70
제4장 폭염 취약 건축·공간 유형 도출	77
1. 분석 개요	78
2. 폭염 위험 지역 미기후 분석	90
3. 공간 유형별 폭염 취약 건축물 도출	107
4. 소결	114
제5장 결론	117
1. 정책적 시사점	118
2. 향후 연구 방향 제안	123
참고문헌	127
SUMMARY	131

[표 2-1]	LCZ의 유형 및 정의	15
[표 2-2]	LCZ 분류를 위한 물리환경 기준	16
[표 2-3]	WUDAPT 기준 서울 LCZ 분류와 측정된 서울 LCZ 분류 비교	18
[표 2-4]	LCZ 분류 정확도 평가	20
[표 2-5]	서울의 AWS 및 LCZ 결과	22
[표 2-6]	위치별 LCZ D 결과와의 차이	25
[표 2-7]	울산광역시 중구, 남구의 건축물 속성정보를 고려한 분석 결과	26
[표 2-8]	일본 도시의 LCZ 분류에 따른 열섬 현상 비교	27
[표 2-9]	2005년~2020년 LCZ 분류 변화율	31
[표 2-10]	2005년~2020년 지표면 온도 비중	32
[표 2-11]	LCZ 분류별 낮시간대, 저녁시간대 LST 측정값 요약	34
[표 2-12]	도시열섬이 높은 LCZ 분류 종합	36
[표 2-13]	연평균 온도를 활용한 3개 연도 열섬 지도 작성	37
[표 2-14]	3개 연도 공간군집분석(Getis-Ord Gi) 결과	38
[표 2-15]	도시열섬현상 다중회귀분석 결과	42
[표 2-16]	연구대상지의 바람장 및 열환경 변화	46
[표 2-17]	기준 및 옥상 녹화 대기온도 비교 분석표	48
[표 2-18]	미기후 개선효과 비교 시나리오 구상	49
[표 2-19]	도시열섬현상 완화 시나리오	51
[표 2-20]	도시열섬현상 분석 데이터 및 분석방법	52
[표 3-1]	분석에 사용한 Landsat 8 밴드 설명	58
[표 3-2]	LCZ 유형별 훈련 및 테스트 데이터셋 개수	61
[표 3-3]	LCZ 유형별 분류사례	66
[표 3-4]	LCZ 유형별 객체 수 및 차지 면적 비율	73
[표 3-5]	LCZ 유형별 평균 온도	75
[표 4-1]	LCZ 유형별 대상지 특성 및 데이터셋 요약	80
[표 4-2]	ENVI-met 시뮬레이션 설정 및 입력자료 요약	82
[표 4-3]	기상 조건 입력값	83
[표 4-4]	LCZ 유형별 표면 거칠기 계수 적용 근거	83
[표 4-5]	토지피복·지형 데이터 구성 및 출처	84
[표 4-6]	토지피복코드 연계 및 INX 변환 과정 요약	85

[표 4-7]	표면 재질코드와 용도 연계 결과	85
[표 4-8]	교목 크기등급별 ENVI-met Plant 코드 매핑	86
[표 4-9]	건축물 정보 구축 단계 및 입력자료 요약	87
[표 4-10]	건축물(구조 및 지붕)재질 연계 및 INX 변환 과정 요약	87
[표 4-11]	모델 영역·격자(Grid)·경계 조건 설정 요약	88
[표 4-12]	주요 출력지표 및 분석 목적	89
[표 4-13]	여의도동(LCZ 1) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21 시; PAT·MRT·PET	92
[표 4-14]	송파동(LCZ 2) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21 시; PAT·MRT·PET	94
[표 4-15]	문래동 4가(LCZ 3) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21 시; PAT·MRT·PET	96
[표 4-16]	사당동(LCZ 4) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21 시; PAT·MRT·PET	98
[표 4-17]	신촌동(LCZ 5) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21 시; PAT·MRT·PET	100
[표 4-18]	중계동(LCZ 6) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21 시; PAT·MRT·PET	102
[표 4-19]	개화동(LCZ D) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21 시; PAT·MRT·PET	104
[표 4-20]	신천동(LCZ G) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21 시; PAT·MRT·PET	105
[표 4-21]	LCZ 유형별 4 시점 폭염 취약 지수 등급화	108
[표 4-22]	건축물 높이 구간별 평균 열취약도	110
[표 4-23]	건축물 준공연도(사용승인일)별 평균 열취약도	111
[표 4-24]	건축물 용도별 평균 열취약도	113
[표 4-25]	LCZ 유형에 따른 열환경 특성	114
[표 5-1]	「건축물관리법」 제 7 조 개정안	119
[표 5-2]	「건축법」 제 11 조 개정안	120
[표 5-3]	「건축법 시행규칙」 제 7 조 개정안	121
[표 5-4]	정부기관 및 지자체의 폭염 위험 지도 서비스	123

[그림 1-1]	1904 년 이후 지구 평균온도 변화 추이 .....	2
[그림 1-2]	2024 년 여름철(6-8 월) 전국 평균기온 시계열 .....	3
[그림 1-3]	재난으로 인한 실종·사망자 수 .....	4
[그림 1-4]	서울연구원의 서울시 주거지역 폭염 취약도 진단 입력자료와 최종 결과물 .....	5
[그림 1-5]	LCZ 및 폭염 대응 도시 발전 개념 .....	9
[그림 1-6]	연구 흐름도 .....	11
[그림 2-1]	캐나다 밴쿠버의 LCZ 에 따른 온도 차이 .....	17
[그림 2-2]	하위 클래스를 활용한 건축물 종류와 토지 피복(가변적 피복 속성) 유형의 조합 .....	17
[그림 2-3]	딥러닝(CNN) 기반 LCZ 분류 연구 흐름 .....	21
[그림 2-4]	서울 29 개 AWS 온도를 이용한 LCZ 의 열 분화 .....	23
[그림 2-5]	LCZ 클래스의 계절별 LST 패턴 박스플롯 .....	24
[그림 2-6]	LCZ 분류에 따른 시간대별 미기후 측정값 .....	28
[그림 2-7]	LCZ 분류별 PET 와 UTCI 값 .....	29
[그림 2-8]	LCZ 와 LST 간의 상관계수 .....	30
[그림 2-9]	스케일별 LCZ 와 LST 회귀분석 결과 .....	30
[그림 2-10]	SUHI 분포도 .....	33
[그림 2-11]	지역별·LCZ 분류별 LST 측정값 종합 .....	35
[그림 2-12]	국지기상예측시스템(LDAPS)과 AWS 측정값 비교 .....	39
[그림 2-13]	S-DoT 를 기반으로 한 군집 분석결과 .....	40
[그림 2-14]	도시열섬 지역과 도시열섬 및 도시오염섬 동시발생 지역 .....	41
[그림 2-15]	서울시 지표면온도(LST) 분포 현황 .....	43
[그림 2-16]	LST 분포도 .....	44
[그림 2-17]	시기별 Moran'I 분석 결과 .....	44
[그림 2-18]	도시구조적 열환경 취약 공간 .....	45
[그림 2-19]	LST 및 핫스팟 분석 결과 .....	46
[그림 2-20]	ENVI-met 녹화 모델링 .....	47
[그림 2-21]	도시숲 조성을 통한 열환경 개선 효과 시나리오별 기온 .....	49
[그림 2-22]	미기후 개선 시나리오별 결과 .....	50
[그림 2-23]	도시열섬현상 완화 시나리오별 대기온도 및 지표 온도 차이 .....	51
[그림 3-1]	USGS earthexplorer 의 데이터 검색 화면 .....	57

[그림 3-2]	분석에 사용한 Landsat 8 데이터 및 LCZ 샘플	59
[그림 3-3]	분석 데이터셋 구축 개념도	60
[그림 3-4]	CNN 학습을 위한 데이터 분석 흐름 개념도	63
[그림 3-5]	분류 결과에 대한 혼동행렬(Confusion Matrix)	64
[그림 3-6]	서울시 Local Climate Zone (LCZ) 예측 지도	65
[그림 3-7]	서울시 분석 대상지역 LST 지도	71
[그림 3-8]	서울시 분석 대상지역 LCZ 폴리곤 데이터	72
[그림 3-9]	Dissolve 개념	73
[그림 3-10]	LCZ 폴리곤 데이터와 LST 데이터 연계결과 시각화	74
[그림 3-11]	LCZ 유형별 평균 온도 비교	75
[그림 4-1]	폭염 취약성 분석 절차 흐름도	79
[그림 4-2]	여의도동(LCZ 1) 평가 지표 24 시간 시계열: PAT·MRT·PET	91
[그림 4-3]	LCZ 1 지역 피크 시간대 PAT 와 MRT 분포	92
[그림 4-4]	송파동(LCZ 2) 평가 지표 24 시간 시계열: PAT·MRT·PET	93
[그림 4-5]	LCZ 2 지역 피크 시간대 PAT 와 MRT 분포	94
[그림 4-6]	문래동 4 가(LCZ 3) 평가 지표 24 시간 시계열: PAT·MRT·PET	95
[그림 4-7]	LCZ 3 지역 피크 시간대 PAT 와 MRT 분포	96
[그림 4-8]	사당동(LCZ 4) 평가 지표 24 시간 시계열: PAT·MRT·PET	97
[그림 4-9]	LCZ 4 지역 피크 시간대 PAT 와 MRT 분포	98
[그림 4-10]	신촌동(LCZ 5) 평가 지표 24 시간 시계열: PAT·MRT·PET	99
[그림 4-11]	LCZ 5 지역 피크 시간대 PAT 와 MRT 분포	100
[그림 4-12]	중계동(LCZ 6) 평가 지표 24 시간 시계열: PAT·MRT·PET	101
[그림 4-13]	LCZ 6 지역 피크 시간대 PAT 와 MRT 분포	102
[그림 4-14]	개화동(LCZ D) 평가 지표 24 시간 시계열: PAT·MRT·PET	103
[그림 4-15]	신천동(LCZ G) 평가 지표 24 시간 시계열: PAT·MRT·PET	105

# 제1장

## 서론

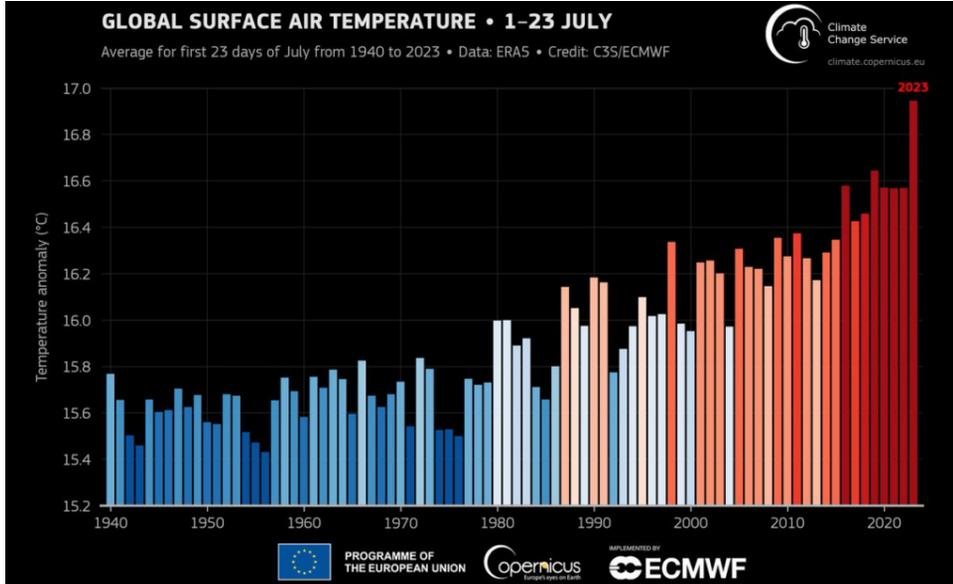
1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 범위 및 방법

# 1. 연구의 배경 및 목적

## 1) 연구의 배경 및 필요성

### ■ 기후변화에 따른 지속적 온도 상승 추세 가속화

2023년 역사상 가장 더운 지구평균 기온을 기록하자 UN 사무총장은 기존의 지구온난화(Global Warming)를 넘어 지구 열대화(Global Boiling)가 시작됨을 선언하였다.(Niranjan, 2023.7.27.) 산업화 이후 2022년까지 지속적인 지구 평균온도 증가 추세가 관측되고 있었으나, 2023년의 급격한 온도 상승은 기존의 지구온난화로는 설명이 부족한 수준이었다. 전세계의 기후변화 대응책 마련을 넘어 즉각적인 대응과 온실가스 배출 중단이 촉구되는 시점이다.



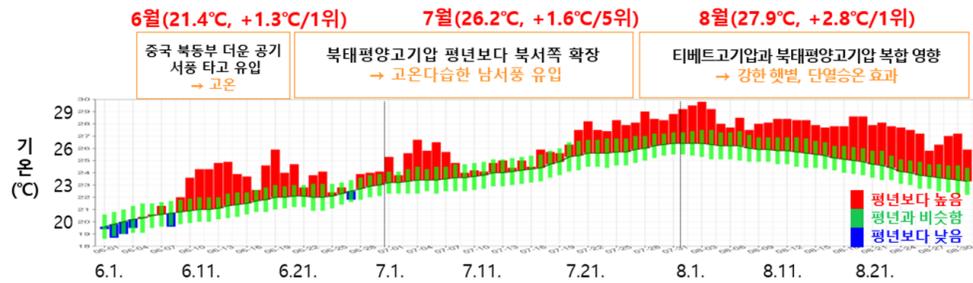
[그림 1-1] 1904년 이후 지구 평균온도 변화 추이

출처: Mackenzie, Kate. & Sahay, Tim.. (2023.8.3). *Global Boiling*. Phenomenal World.  
<https://www.phenomenalworld.org/analysis/global-boiling/> (검색일: 2025.5.28.)

우리나라 또한 2024년 연평균기온이 14.5℃로 평년대비 2.0℃ 높고, 여름철 고온 현상이 9월 까지 이어지며 6월, 8월, 9월의 월 평균기온은 관측 이래 가장 높은 온도를 기록하였다.(기상청, 2025.1.9.) 전 지구적 온도 상승 추세와 향후 온도 상승 전망에 비추어볼 때 우리나라의 평균기온 상승 또한 피할 수 없는 것으로 여겨지며, 향후 기온 상승에 따른 폭염 발생 빈도와 강도가 증가할 것으로 예측되고 있다.

### ■ 폭염 발생 증가에 따른 피해발생 증가

전 지구적 평균기온 상승의 여파로 국내 폭염의 빈도와 강도가 증가하고 있다. 2024년 기준 여름철 열대야일수는 20.2일로 역대 1위였으며, 폭염일수는 20.4일로 역대 3위를 기록하는 등 폭염의 발생 빈도가 증가하고 있다.(기상청, 2024.9.5.) 서울의 경우 지난 30년에 걸쳐 폭염일수 증가추세가 극심한 약 7,360% 수준으로, 두 번째로 가파른 증가 추세를 나타낸 부에노스아이레스의 2배 이상의 증가세를 나타내고 있다.(이홍근, 2024.6.28.)



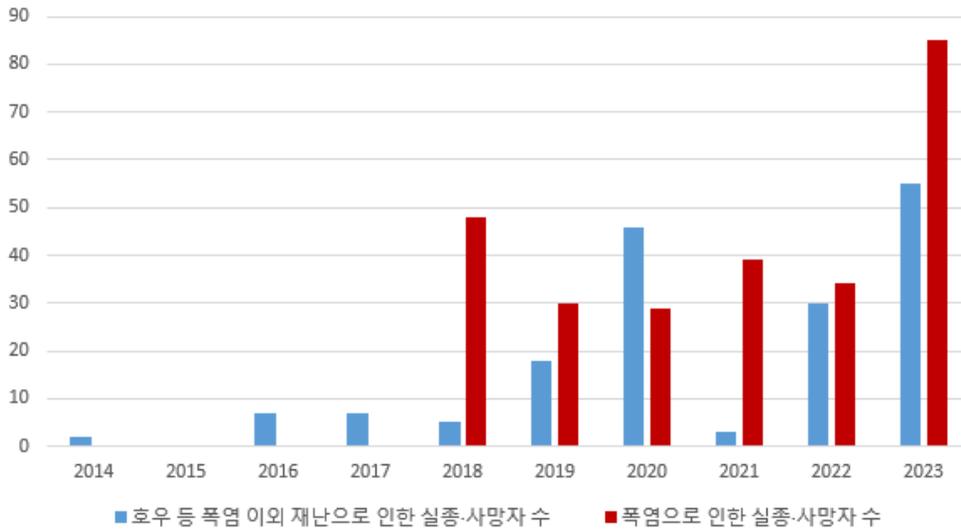
[그림 1-2] 2024년 여름철(6-8월) 전국 평균기온 시계열

출처: 기상청. (2024.9.5.). [2024년 여름철 기후특성] 올여름 평균기온, 열대야일수 1위, 장맛비 평년보다 118.1mm 더 내려 [보도자료]. p.7

폭염 피해의 증가로 폭염에 대응하기 위한 소방청의 출동 건수는 2020년 686건, 2021년 906건에 이어 2024년 3,164건으로 최근 5년간 지속적인 증가 추세를 나타내고 있을 뿐만 아니라 폭염 피해를 입어 구급차로 이송된 인원 또한 2020년 646건, 2021년 819건에 이어 2024년 2,698건으로 매년 증가하는 추세를 나타내고 있다.(박준호, 2025.6.9.)

행정안전부는 2018년부터 재난으로 인한 실종 및 사망자 수 집계를 할 때 폭염을 추가하여 집계하기 시작하였다. 집계된 결과를 보면 폭염으로 인한 실종 및 사망자 수는 전체 자연재난으로 인한 실종 및 사망자 수 중 가장 큰 비중을 차지하고 있다.

이처럼 폭염에 따른 피해증가 추세가 명확하며, 이 같은 상황은 폭염으로 인한 온열질환자 발생 및 사망에서도 확인되고 있다.



[그림 1-3] 재난으로 인한 실종·사망자 수

출처: 행정안전부. (2025). 2023 재해연보. p.17 참고하여 연구진 작성

2024년 여름철 폭염으로 인한 응급실 방문 온열질환자는 3,704명으로, 2023년의 2,818명 대비 31.4% 증가하였으며, 사망자 수는 34명으로 전년대비 6.3% 증가한 것으로 집계되었다. (질병관리청, 2024.10.13.) 국립재난안전연구원은 풍수해에 이어 폭염을 가까운 미래에 2번째로 위험성이 높은 자연재난 유형으로 선정하는 등 폭염에 의한 피해 발생에 주의를 기울이고 있다.(행정안전부, 2021.12.28.)

### ■ 건축물 폭염 피해 발생

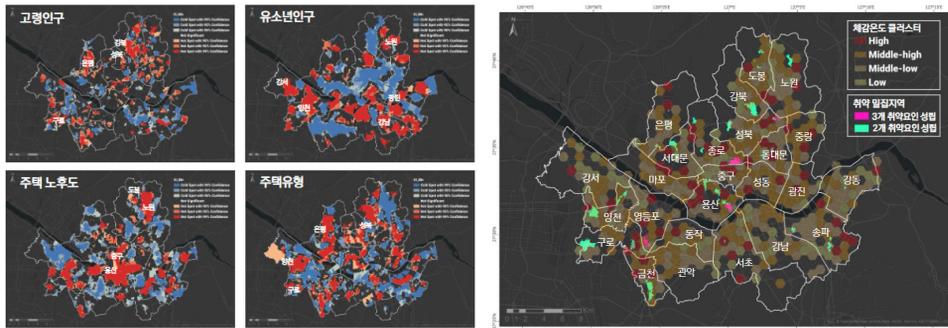
여름철 지속적인 폭염으로 건축물 내 에어컨 사용량이 증가하고 있다. 가정에서는 에어컨 추가설치 및 사용시간 증가로 인한 비용 부담이 가중되고 있으며, 전국적으로도 폭염 대응을 위한 에어컨 사용 증가로 건축물 냉방에너지 수요 증가 추세가 이어지고 있다. 실제로 2024년 8월 초 전력수요는 93.8 기가와트로 최대치를 갱신하였고,(장지민, 2024.8.5.) 전력예비유리한 자릿수 까지 급감하였다.(김승현, 2024.8.6.)

에어컨 사용량 증가는 단순히 에너지사용량의 증가 외에도 건축물 화재와 같은 피해를 야기한다. 2018년부터 2022년 사이 폭염으로 인한 에어컨 사용 수요가 증가하였고 동시에 에어컨 실외기 화재 1,234건과 86명의 사상자가 발생하였다.(박다해, 2023.5.23.) 또한 행정안전부에 따르면, 최근 5년간 에어컨으로 인한 화재가 1.8배 증가하였으며, 화재발생 건수는 6월부터 9월 사이에 집중되어 있고, 특히 8월에 가장 많이 발생하고 있다.(행정안전부, 2025.6.12.)

## ■ 폭염 취약지역 파악을 통한 피해 저감 노력 지속

정부와 지자체는 폭염과 관련한 피해가 증가하자 폭염 취약지역을 선별하고 해당 지역에 대해 우선적으로 대응책을 도입하려는 노력이 지속되고 있다. 특히 폭염에 따른 피해가 예상되는 지역을 선별하기 위해 폭염의 강도가 높은 지역, 폭염에 취약한 지역, 폭염 대응시설이 부족한 지역을 분석하고 있다. 다만, 가용 데이터, 공간적 범위, 결과물의 해상도 등 다양한 한계점을 내포하고 있다.

실제 사례를 보면 국가 단위에서는 국토교통부가 폭염 피해 관련 지원 필요지역 도출을 위한 물리적 환경을 고려한 폭염 위험지역과 폭염 지원 우선 지역 분석 표준분석모델을 제시하였다.<sup>1)</sup> 같은 목적으로 지자체 단위에서도 폭염 대응을 위한 취약지역 선별이 진행되고 있다. 서울시는 체감온도, 연령, 주택 노후도 등 폭염 취약성 관련 인자를 공간분석 하여 폭염에 가장 취약한 지역을 선정하였다.(김상일 외, 2021)



[그림 1-4] 서울연구원의 서울시 주거지역 폭염 취약도 진단 입력자료와 최종 결과물

출처: 김상일, 박해경, 유연주, 한승균. (2021). S·DoT 빅데이터를 이용한 서울시 주거지역 폭염 취약도 진단. Data InsightReport 06. 서울연구원. pp.21-22. <https://data.si.re.kr/data-insight-report/65208> (검색일: 2025.02.24.)

## ■ 건축물을 포함하는 블록단위 분석 필요

폭염 관련 분석은 첫째, 폭염이 발생할 것으로 예상되는 지역을 찾는 방식과 둘째, 폭염에 취약한 계층 및 물리환경을 분석하는 방식 및 첫 번째 방식과 두 번째 방식 두 가지를 연계하는 방식으로 구분할 수 있다. 다만, 폭염 발생 지역을 분석하는 연구는 건축물 단위 혹은 건축물의 특성을 포함하는 블록단위까지 분석하지 않으며, 건축물이나 블록을 고려하는 연구는 건축물을 단순화한 하나의 변수로 다루는 수준이다.

도시 내 공간의 물리환경과 건축물 특성 등 관계 빅데이터의 활용성이 높아졌으며, 빅데이터 및 머신러닝 기술을 활용하여 기존 결과를 개선할 수 있는 가능성이 높아졌다. 폭염으로 인해

1) 공간빅데이터 분석플랫폼. (n.d.). 폭염 취약계층 및 지원 우선 지역 분석. [http://geobigdata.go.kr/portal/case/standardView.do?proj\\_seq=40](http://geobigdata.go.kr/portal/case/standardView.do?proj_seq=40) (검색일: 2025.2.24.)

발생하는 건축물 실외기 화재 및 재실자의 온열질환 피해를 고려할 때 폭염 위험 지역과 함께 폭염 위험 블록과 위험 블록 내 폭염에 노출된 건축물을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

#### ■ 데이터 기반 건축물 재난 안전 확보 연구의 지속적 추진 필요

빅데이터 기반의 건축·도시공간 재난 안전 관련 연구를 2022년부터 지속적으로 진행하고 있으며, 각종 재난에 대한 건축물의 통합안전 확보를 위해 추가 연구를 수행하고 관련 연구품질을 제고할 필요가 있다.

##### 빅데이터 기반 건축물 화재 예측 모델 개발 연구(2022)

- 건축물 화재 발생 가능성을 예측하기 위해 건축물 속성정보와 범죄발생 데이터를 활용
- 정확도는 70% 미만으로 낮으나 건축물 속성과 화재발생과의 상관관계를 확인

##### 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구(2023)

- 재난 발생에 더하여 피해금액까지 고려하는 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석을 수행
- 정확도 80% 이상의 높은 정확도를 확보하였으며, 예상되는 피해금액의 높고 낮음을 사전에 판단
- 화재와 홍수 두 가지 재난을 모두 고려함으로써 건축물 관리의 우선순위 판단 근거 마련

##### 빅데이터 기반 건축물 산사태 리스크 분석 및 건축물 단위 재난 리스크 연계 방안 연구(2024)

- 여러 가지 재난을 동시에 고려할 수 있는 분석 프레임워크 마련
- 화재, 홍수, 산사태의 세 가지 재난을 모두 고려함으로써 건축물 관리의 우선순위 판단 근거 마련

## 2) 연구목적

### ■ 공공데이터 데이터 연계 방법 실증 및 빅데이터 구축을 위한 기초 확립

- 산재되어있는 공공데이터를 건축·도시공간 폭염 분석에 활용할 수 있도록 연계하고 활용할 수 있는 방법론 도출
  - 정부는 「공공데이터의 제공 및 이용 활성화에 관한 법률」에 근거하여 공공데이터 포털을 운영중이며, 국가가 구축한 다양한 데이터를 관리 및 유통
- 개별 부처에서 생산 및 관리하는 공공데이터들의 연계 방안 마련 및 효율적 데이터 생산·관리·연계 방안 모색

### ■ 도시 내 물리환경을 고려한 폭염 위험 건축물 도출 프로세스 개발

- 도시 내 폭염 위험 지역 분석 방법론과 폭염 위험 건축물 도출 방법론에 연계 및 활용 가능한 프로세스 개발
- 소규모건축물 등 정기점검 사각지대에 있는 건축물 중 폭염에 취약한 건축물에 대한 점검 필요성 제안
- 폭염에 취약한 건축물의 특성을 파악하고 분류하여, 효율적인 점검 프로세스 모색을 위한 근거자료 제시

## 2. 연구의 범위 및 방법

### 1) 연구의 범위

#### ■ 공간적 범위

본 연구의 공간적 범위는 폭염 위험도가 높고 관련 공공데이터의 구축이 잘 되어 있는 서울시로 설정하였다. 서울은 지속적인 도시화로 건축물 밀도와 인구밀도가 높아 폭염 피해가 발생하기 쉬운 지역이다. 특히 녹지 면적 부족 등으로 인해 도시열섬 현상이 심화되고 있는 대표적인 지역이다. 또한 서울시는 지난 수십 년간의 기온 상승률이 전국 평균을 상회하고 있으며, 열대야 발생도 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 기후 특성과 함께, 공공데이터의 가용성이 높아 다양한 분석자료의 연계가 가능하여 연구 대상지로 선정하였다.

#### ■ 내용적 범위

내용적 범위는 데이터 구축, 폭염위험 공간유형 도출, 폭염 취약성 도출, 대응방안 제안의 네 가지 측면으로 구성하였다.

첫째, 건축행정정보와 공공데이터의 연계 방안 도출 및 분석을 위한 데이터 구축과 연계과정이다. 이를 위해 건축물 관련 데이터를 수집하고 정제 및 전처리하는 과정을 수행하고, 데이터 간 매칭키를 도출하는 등 연계 방안을 모색한다. 그뿐만 아니라, 연계 과정에서 나타나는 문제점들을 분석하고 원인을 정리하고자 한다.

둘째, 서울시를 대상으로 Local Climate Zone (LCZ) 유형을 도출하고 폭염에 위험한 공간유형을 제안한다. 이를 위해 미국지질조사국(USGS)의 위성영상자료(Landsat 및 Sentinel)를 기반으로 LCZ 분석을 수행하며, 국토지리정보원의 수치표고모델(DEM) 및 수치표면모델(DSM) 등 공간정보를 연계하여 기존보다 분석의 정확도를 개선하고자 한다. 딥러닝과 머신러닝 기법을 활용한 LCZ 분류 프로세스를 적용하고, 위성영상의 열 밴드를 활용하여 지표면온도(LST) 데이터를 구축한다. 이후 LCZ 유형별로 평균 및 최대 지표면온도를 도출하고, 이를 바탕으로 폭염에 더 노출된 공간 유형을 도출한다.

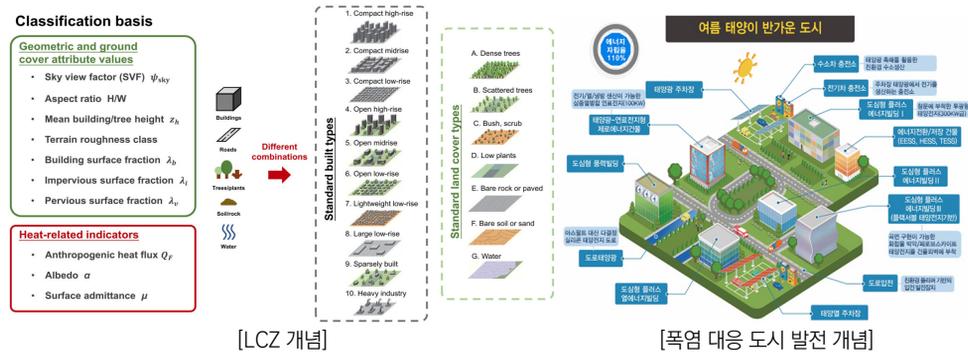
셋째, 폭염에 따른 건축물 및 인근 블록의 취약성을 분석한다. LST 분석 결과를 기반으로 열해 위험이 높은 LCZ 유형 및 시범지역을 선정하고, 도시 미기후 모델링을 수행한다. 이를 위해 CFD (Computational Fluid Dynamics) 기반의 ENVI-met 모델을 활용하여 해당 지역 내 건축물 등 공간정보를 입력하고, 열환경을 분석한다. 또한, 노후 건축물과 같은 속성정보를 결합하여 열해에 취약한 건축·공간 유형을 도출하고자 한다.

마지막으로, 건축물 및 블록 단위의 폭염 대응 방안을 제안하고자 한다. 특히, 최근 증가하고 있는 실외기 화재 문제와 관련하여 「건축물관리법」의 화재안전성능보강 조치와 긴급점검 등 제도적 보완방안을 함께 검토하고자 한다.

## 2) 연구 방법

### ■ 문헌조사

- LCZ 관련 정의 및 분석 방법 등 선행연구 조사
- LST 분석 방법 및 LST를 활용한 도시열섬 분석 방법 조사
- 도시미기후 분석 방법론 조사
- 폭염 대응을 위한 관계 법·제도 조사



[그림 1-5] LCZ 및 폭염 대응 도시 발전 개념

출처: Han *et al.*. (2024). Advancing the local climate zones framework: a critical review of methodological progress, persisting challenges, and future research prospects. *Humanities and Social Sciences Communications*. 11. p. 5;

고광본. (2018.8.19). "폭염·한파 등 기후변화 대비" 정부 도시發電 시범사업 추진. 서울경제. <https://www.sedaily.com/NewsView/1S3F6RSGFH> (검색일: 2025.10.14.)

## ■ 데이터 구축

- 분석용 위성영상, 공공데이터 구축 및 전처리
  - LCZ, LST 분석을 위한 Landsat 8, Sentinel 2 등 위성영상 정보 구축
  - 수치표고모델, 수치표면모델, 건물통합정보 등 공공데이터 구축
  - 공간정보 해상도 통일 및 분석을 위한 좌표체계 통일 등 전처리 수행
- 건축물 형상정보와 속성정보 연계를 통한 건축물 공간정보 구축
  - 건축물 형상정보 및 속성정보 연계방안 도출
  - 품질 저하를 최소화하는 건축물 단위 데이터 연계

## ■ 서울시 폭염 위험 LCZ 도출

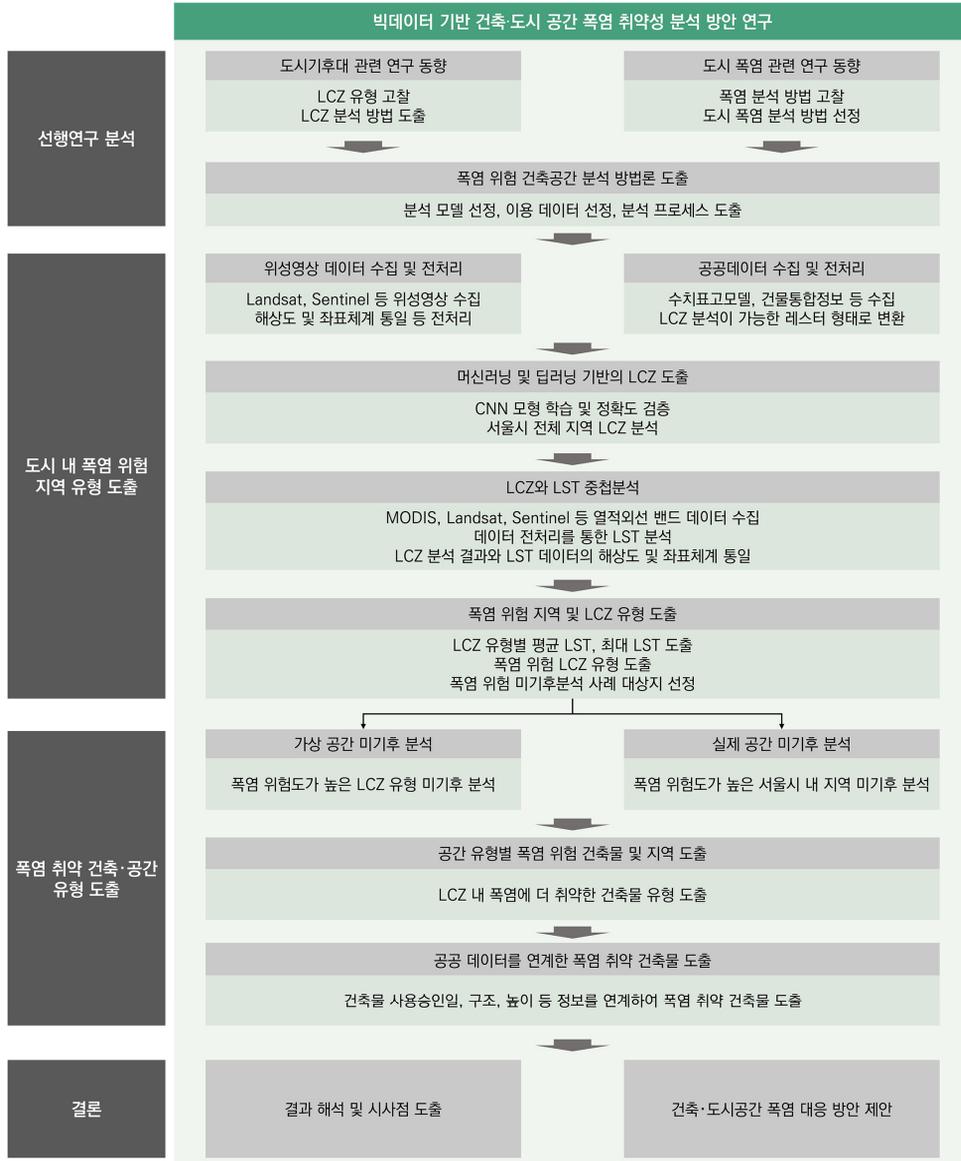
- LCZ 분석 모델 도출
  - 머신러닝 및 딥러닝을 활용한 LCZ 분석 모델 도출
  - 입력데이터 정제 방안 및 데이터 가공 방식 설정
- LST 기반 폭염 위험 LCZ 분석
  - 위성영상 및 항공사진을 이용한 LST 분석 방법론 도출
  - LST 기반 폭염 위험도가 높은 LCZ 유형 도출

## ■ 폭염 위험 LCZ 유형 미기후 분석

- 폭염 위험도가 높은 LCZ 유형에 대해 미기후 분석 수행
- 폭염 위험도가 높은 지역을 가상으로 구축하여 미기후 분석 수행

## ■ 전문가 활용

- LCZ, LST 분석을 위한 주요변수 도출 및 검증
- 분석모형 선정 및 검증 방법 검토
- 데이터 및 개발 모델 활용 방안 검토



[그림 1-6] 연구 흐름도

출처 : 연구진 작성



## 제2장

# 건축·도시 폭염 분석 방법론 관련 동향 조사

1. 도시기후대 관련 연구 동향
2. 도시 폭염 관련 연구 동향
3. 소결

# 1. 도시기후대 관련 연구 동향

## 1) 도시기후대(LCZ: Local Climate Zones)의 정의

### ■ 도시기후대(LCZ) 등장 배경

도시열섬(Urban Heat Island)이라는 용어를 도입한 연구는 Balchin & Pye (1947)의 연구로 알려져 있다. 해당 연구에서 도시의 온도는 주변 농촌과 비교할 때, 분명한 온도 상승 현상이 나타남을 밝히고 있다. 즉 도시 열섬에 대한 접근 방식은 도시와 그를 둘러싼 농촌 지역 간의 온도 차이로 정의 되어왔다.(Han *et al.*, 2024, p.2; 홍제우 외, 2013, p.416)

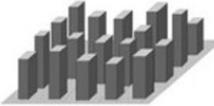
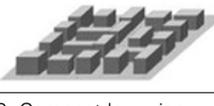
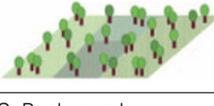
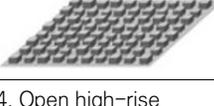
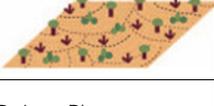
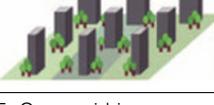
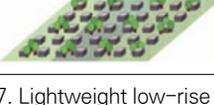
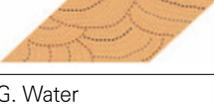
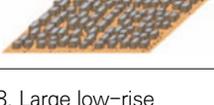
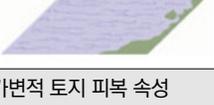
하지만 도시열섬 관련 연구에서 연구자들마다 도시와 농촌의 정의가 상이하기 때문에 도시 간의 비교뿐만이 아닌 동일한 도시 내에서도 도시열섬을 연구한 많은 결과들의 상호 비교가 어려운 문제점이 있었다.(홍제우 외, 2021, p.35) 이러한 문제의 해결을 위해서 Stewart & Oke (2012)는 관측지점 주변 환경을 객관적으로 분류하는 방법인 LCZ (Local Climate Zones)를 고안하였다.

### ■ LCZ의 개념 및 활용<sup>2)</sup>

LCZ는 10가지 항목의 건축물 종류(Built types) 1-10과 7가지 항목의 토지 피복 종류(Land cover types) A-G의 표준 클래스로 구성되어 있다. 또한 표준 클래스를 조합하거나, 가변적(계절·일시적) 토지 피복 특성을 고려한 b(잎이 없는 나무), s(눈 덮인 땅), d(마른 땅), w(젖은 땅)의 분류를 적용한 하위 클래스 생성도 가능하다. 각 LCZ 클래스는 건축물의 높이와 밀도, 토지피복의 성질 등 다양한 공간적 특성 정보를 바탕으로 분류한다.(Stewart & Oke, 2012, p.1,887)

2) Stewart, I. D. & Oke, T. R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93. pp.1,879-1,900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

[표 2-1] LCZ의 유형 및 정의

LCZ 유형	정의	LCZ 유형	정의
1. Compact high-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>수십 층의 고층빌딩 밀집 지역이며 나무는 거의 없음</li> <li>토지 피복은 대부분 포장</li> </ul>	A. Dense trees 	<ul style="list-style-type: none"> <li>낙엽수나 상록수가 우거진 울창한 숲</li> <li>투수성 토지 피복</li> </ul>
2. Compact midrise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>중층 건물(3-9층) 밀집 지역이며 나무는 거의 없음</li> <li>토지 피복은 대부분 포장</li> </ul>	B. Scattered trees 	<ul style="list-style-type: none"> <li>낙엽수나 상록수가 가볍게 우거진 숲</li> <li>투수성 토지 피복</li> </ul>
3. Compact low-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>낮은 건물(1-3층) 밀집 지역이며 나무는 거의 없음</li> <li>토지 피복은 대부분 포장</li> </ul>	C. Bush, scrub 	<ul style="list-style-type: none"> <li>수풀, 관목의 배열</li> <li>투수성 토지 피복</li> </ul>
4. Open high-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>수십 층의 고층빌딩의 개방형 배치</li> <li>투과성 높은 토지 피복</li> </ul>	D. Low Plants 	<ul style="list-style-type: none"> <li>풀이나 초본식물 지역</li> <li>나무가 거의 없음</li> </ul>
5. Open midrise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>중층 건물(3-9층)의 개방형 배치</li> <li>투과성 높은 토지 피복</li> </ul>	E. Bare rock or paved 	<ul style="list-style-type: none"> <li>바위나 포장된 지역</li> <li>나무나 식물이 거의 없음</li> </ul>
6. Open low-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>낮은 건물(1-3층)의 개방형 배치</li> <li>투과성 높은 토지 피복</li> </ul>	F. Bare soil or sand 	<ul style="list-style-type: none"> <li>모래와 같은 토양</li> <li>나무나 식물이 거의 없음</li> </ul>
7. Lightweight low-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>단층건물 밀집 지역이며 나무는 거의 없음</li> <li>압축된 토지 피복</li> </ul>	G. Water 	<ul style="list-style-type: none"> <li>바다, 호수, 강과 같은 수역</li> </ul>
8. Large low-rise 	<ul style="list-style-type: none"> <li>대형 저층 건물(1-3층)의 개방형 배치, 나무는 거의 없음</li> <li>포장된 토지 피복</li> </ul>	가변적 토지 피복 속성  기상패턴, 농업 특성 및 계절 주기에 따라 바뀌는 가변적이거나 일시적인 토지 피복 속성	
9. Sparsely built 	<ul style="list-style-type: none"> <li>자연환경 속 소규모 또는 중규모 건물이 희소하게 배치</li> <li>투과성 높은 토지 피복</li> </ul>	b. bare trees	잎이 없는 낙엽수(예: 겨울)
		s. snow cover	10cm 이상의 눈이 덮임
10. Heavy industry 	<ul style="list-style-type: none"> <li>저층 및 중층 산업 구조물이며 나무가 거의 없음</li> <li>포장된 토지 피복</li> </ul>	d. dry ground	마른 토양
		w. wet ground	물에 잠긴 토양

출처: Stewart, I. D. & Oke, T. R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93. p.1,885

뿐만 아니라 Stewart & Oke (2012, p.1,887)은 LCZ를 분류하기 위한 물리환경적 기준을 제시하였다. 천공률, 종횡비, 건축면적 비율, 불투수 표면 비율, 투수 표면 비율, 건축물과 가로수 기반의 지표 거칠기, 지형 거칠기 등의 요소를 이용하여 각 LCZ 유형을 정의하였다. 즉, 해당 지표의 값을 계산함으로써 LCZ 유형을 분류할 수 있다.

[표 2-2] LCZ 분류를 위한 물리환경 기준

LCZ	Sky view factor <sup>a</sup>	Aspect ratio <sup>b</sup>	Building surface fraction <sup>c</sup>	Impervious surface fraction <sup>d</sup>	Pervious surface fraction <sup>e</sup>	Height of roughness elements <sup>f</sup>	Terrain roughness class <sup>g</sup>
LCZ 1	0.2-0.4	> 2	40-60	40-60	< 10	> 25	8
LCZ 2	0.3-0.6	0.75-2	40-70	30-50	< 20	10-25	6-7
LCZ 3	0.2-0.6	0.75-1.5	40-70	20-50	< 30	3-10	6
LCZ 4	0.5-0.7	0.75-1.25	20-40	30-40	30-40	> 25	7-8
LCZ 5	0.5-0.8	0.3-0.75	20-40	30-50	20-40	10-25	5-6
LCZ 6	0.6-0.9	0.3-0.75	20-40	20-50	30-60	3-10	5-6
LCZ 7	0.2-0.5	1-2	60-90	< 20	< 30	2-4	4-5
LCZ 8	> 0.7	0.1-0.3	30-50	40-50	< 20	3-10	5
LCZ 9	> 0.8	0.1-0.25	10-20	< 20	60-80	3-10	5-6
LCZ 10	0.6-0.9	0.2-0.5	20-30	20-40	40-50	5-15	5-6
LCZ A	< 0.4	> 1	< 10	< 10	> 90	3-30	8
LCZ B	0.5-0.8	0.25-0.75	< 10	< 10	> 90	3-15	5-6
LCZ C	0.7-0.9	0.25-1.0	< 10	< 10	> 90	< 2	4-5
LCZ D	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	> 90	< 1	3-4
LCZ E	> 0.9	< 0.1	< 10	> 90	< 10	< 0.25	1-2
LCZ F	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	> 90	< 0.25	1-2
LCZ G	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	> 90	-	1

a Ratio of the amount of sky hemisphere visible from ground level to that of an unobstructed hemisphere

b Mean height-to-width ratio of street canyons (LCZs 1-7), building spacing (LCZs 8-10), and tree spacing (LCZs A-G)

c Ratio of building plan area to total plan area (%)

d Ratio of impervious plan area (paved, rock) to total plan area (%)

e Ratio of pervious plan area (bare soil, vegetation, water) to total plan area (%)

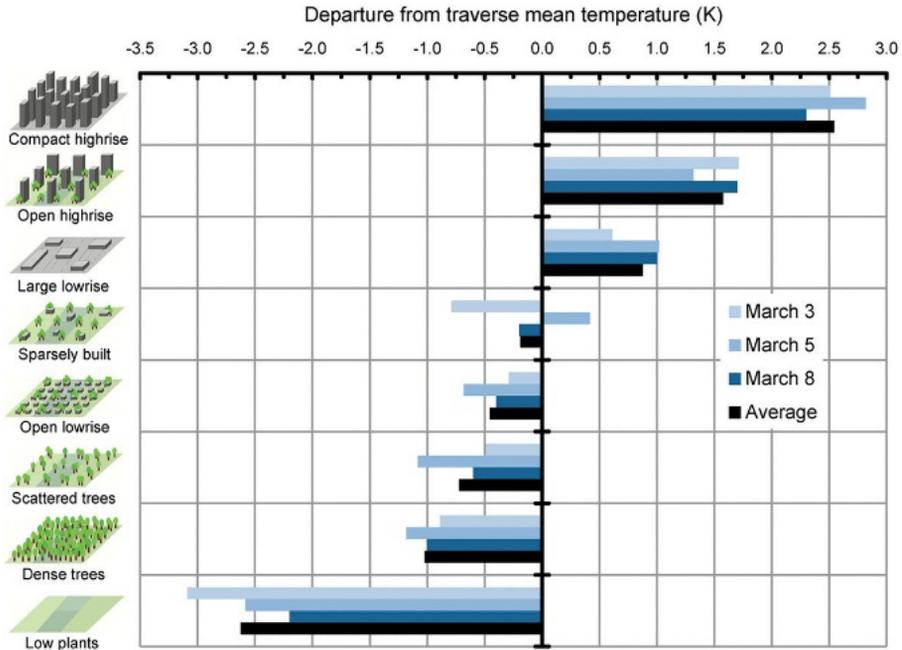
f Geometric average of building heights (LCZs 1-10) and tree/plant heights (LCZs A-F) (m)

g Davenport et al.'s (2000) classification of effective terrain roughness (z0) for city and country landscapes.

See Table 5 for class descriptions

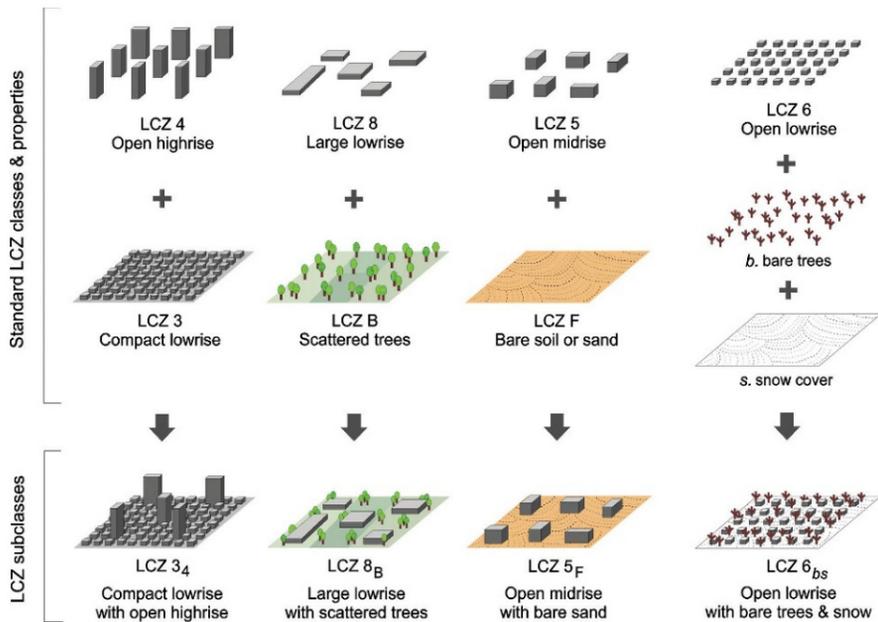
출처: Stewart, I. D. & Oke, T. R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93. p.1,886

Stewart & Oke (2012, pp.1,887-1,888)는 캐나다 밴쿠버에서 자동차로 이동 관측한 기온(지면 1.5m 높이)을 LCZ로 구분하여 온도 차이를 제시하였다. 건축물의 종류와 토지 피복에 큰 차이가 있는 클래스 간에는 5K를 초과하며, 차이가 작은 클래스 간에는 2K 미만일 수 있음이 나타났다. 하지만 이러한 결과는 지표면의 습기, 눈이 쌓임, 계절적 영향에 따라 달라질 수 있음을 지적하였다.



[그림 2-1] 캐나다 밴쿠버의 LCZ에 따른 온도 차이

출처: Stewart, I. D. & Oke, T. R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93. p.1,888



[그림 2-2] 하위 클래스를 활용한 건축물 종류와 토지 피복(가변적 피복 속성) 유형의 조합

출처: Stewart, I. D. & Oke, T. R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93. p.1,892

Stewart & Oke (2012, p.1,892)는 17개의 표준 클래스 집합에서 벗어나는 사이트에 대해 표준 클래스 10가지 건축물 종류 1-10 및 7가지 항목의 토지 피복 종류 A-G와 가변적 토지 피복 속성(b, s, d, w)을 조합한 하위 클래스 도출 방안을 제시하였다.

표준 클래스 중 건축물 종류인 LCZ 4 (Open highrise)와 LCZ 3 (Compact lowrise)를 조합하면 LCZ 34 (Compact lowrise with open highrise)와 같은 하위 클래스 생성이 가능하며, 건축물 LCZ 8 (Large lowrise)과 토지 피복 종류인 LCZ B (Scattered trees)를 조합하여 LCZ 8B (Large lowrise with Scattered trees)를 생성할 수 있다. 또한 가변적 토지 피복 속성을 조합하면, LCZ 6 (Open lowrise)와 b (bare trees), s (snow cover)를 조합하여 LCZ 6bs (Open lowrise with bare trees & snow)의 하위 클래스 생성도 가능하다.

## 2) LCZ 분류 및 폭염 분석 연구사례

### ■ LCZ 도출 연구

- WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools)를 활용한 서울 LCZ 분류<sup>3)</sup>  
김권과 엄정희(2017)는 WUDAPT 분류체계 및 방법론을 기반으로 서울특별시 LCZ 분류를 위해 구글 어스를 활용하여 LCZ 유형별 10개의 훈련지역을 선정하였다. 이후, Landsat 8 위성영상 자료를 활용하여 LCZ 분류 및 분석결과를 보정하였다. 그리고 서울 도시생태현황도에서 건폐율, 불투수포장율, 투수포장율과 2015년 기준 건물 높이, 서울지역 방재기상관측장비(AWS) 27곳에서 2015년도 기온 데이터를 기반으로 LCZ 유형별 분류를 실시하였다.

[표 2-3] WUDAPT 기준 서울 LCZ 분류와 측정된 서울 LCZ 분류 비교

Division	WUDAPT-LCZ (Stewart and Oke, 2012)				Seoul-LCZ			
	A	B	C	D	A	B	C	D
LCZ 1	40~60	40~60	<10	>25	39.9	40.0	2.4	25
LCZ 2	40~70	30~50	<20	10~25	52.4	36.5	2.0	15
LCZ 3	40~70	20~50	<30	3~10	53.8	32.3	3.4	11
LCZ 4	20~40	30~40	30~40	>25	31.1	37.8	3.7	27
LCZ 5	20~40	30~50	30~40	10~25	25.4	31.7	3.0	17
LCZ 6	20~40	30~50	30~60	3~10	24.6	32.3	4.3	11
LCZ 7	60~90	<20	<30	2~4	14.8	17.1	5.7	6
LCZ 8	30~50	40~50	<20	3~10	41.7	33.9	4.7	12
LCZ 9	10~20	<20	40~60	3~10	16.1	23.5	6.3	15
LCZ 10	20~30	20~40	40~60	5~15	27.6	26.8	2.1	16

주) A: Building surface fraction, B: Impervious surface fraction, C: Pervious surface fraction, D: Building stories  
출처: 김권, 엄정희. (2017). WUDAPT Protocol을 활용한 Local Climate Zone 분류 - 서울특별시를 사례로 -. 한국조경학회지. 45(4). p.140

3) 김권, 엄정희. (2017). WUDAPT Protocol을 활용한 Local Climate Zone 분류 - 서울특별시를 사례로 -. 한국조경학회지. 45(4). pp.131-142

기존 LCZ 분류와 서울 LCZ 분류의 유형별 특징 비교 결과, 대부분 지역에서 통상적인 범위 내에 속해있었으나 일부 지역에서는 벗어나 있는 결과가 나타나기도 하였다. 건폐율은 LCZ 7, 불투수포장율은 LCZ 8, 9, 투수포장율은 LCZ 4-6, 9, 10이 범위 밖의 값을 나타냈다.

- WUDAPT를 활용한 창원 LCZ 분류 및 필터링 반경 비교 연구<sup>4)</sup>

김태경 외(2024)는 WUDAPT 절차에 따라 창원시 LCZ 분류를 실시하였다. 위성영상은 Landsat 8의 1-7, 9-11번 밴드 영상을 사용하였다. 지상참조자료는 구글어스를 활용하여 훈련데이터를 제작하고 LCZ 분류 및 정확도 검증에 활용하였다. 위성영상과 지상참조자료를 기반으로 100m 해상도 창원시 LCZ 분류지도 생성하였다.

LCZ 분류지도를 실제와 비교하기 위해 수치지형도와 환피복도를 활용하여 5가지 도시형태 지수(건물높이, 건폐율, 투수표면비율, 불투수표면비율, SVF)를 구축하여 도시지역에서의 정확성을 비교하였다. LCZ 분류지도는 필터링 반경에 따른 정확도 차이를 확인을 위해 반경 3, 반경 2, 반경 1, 필터링 되지 않은 결과물을 Geotiff형식으로 생성하여 분석에 활용하였다. 필터링 반경에 따라 분류 정확도를 비교한 결과 필터링 반경이 1인 경우 OA (overall accuracy) 85%, Kappa 83%로 가장 좋은 결과를 보였다.

도시형태지수의 필터링 반경에 따른 차이점은 적었으며, 건폐율과 SVF가 선행연구에서 제시한 범위를 일부 벗어나는 유형도 있었지만, 대부분의 유형이 제시된 범위를 만족하는 것을 확인하였다. 건물 높이는 LCZ 4 유형의 대부분이 제시된 범위의 최솟값보다 낮은 것으로 나타났다. 나머지 유형에서 대부분 제시된 범위를 만족하는 것을 확인하였다.

- Sentinel-2 이미지를 활용한 딥러닝 기반 LCZ 도출<sup>5)</sup>

Zhou *et al.* (2021)은 LCZ 매핑 시 주로 활용하는 픽셀 단위 학습의 문제를 지적하며, 필지 기반의 계층적 분류 방법을 개발하고자 하였다. Sentinel 2 영상, 도로망, 표고 데이터를 통한 LCZ 분류 기반 방법으로, 우선 Sentinel 2 이미지를 도로망에 따라 분할하여 토지구획을 나누고, 훈련데이터 세트인 So2Sat를 통해 LCZ 42와 일치할 수 있도록 하였다. 이후, 1단계로 CNN 방식을 사용하여 표준화된 필지를 LCZ로 분류하였고, 2단계로 표고 데이터에서 나온 건축물 높이 데이터를 사용하여 룰베이스로 LCZ를 세분화하였다.

4) 김태경, 박경훈, 송봉근, 김성현, 정다은, 박건웅. (2024), WUDAPT 절차를 활용한 창원시의 국지기후대 제작과 필터링 반경에 따른 비교 연구. 한국지리정보학회지. 27(2). pp.78-95

5) Zhou, Yimin., Wei, Tao., Zhu, Xiaolin. & Collin, Melissa.. (2021). A Parcel-Based Deep-Learning Classification to Map Local Climate Zones From Sentinel-2 Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 14. pp.4,194-4,204

독일 쾰른 지역 1곳과 중국 심천 3곳 등 총 4곳을 선정하여 훈련 데이터를 수집하였다. 쾰른은 2019년, 심천은 2018년 Sentinel 2 이미지를 활용하였으며, 이 이미지는 13개 밴드 중 10m 단위 공간해상도를 가진 4개 밴드(청색, 녹색, 적색, 근적외선)를 활용하였다. 이와 더불어 도로망 데이터를 통해 구획을 실시하였다. 이후, 이미지 분할 모듈을 통해 균질한 LCZ를 도출하고자 원 Sentinel 2 이미지를 분할하였으며, 이를 훈련 데이터와 일치시키기 위해 CNN (convolutional neural networks)방식을 활용하였다. 도출된 데이터는 구글 지도와 스트리트뷰 이미지를 기반으로 수동으로 라벨을 지정하여 정확도 평가를 실시하였다.

본 연구에서 제안한 방법(Parcel-based method's)은 0.75 (OA)의 정확성을 보였으며, 이는 기존 방법의 정확도(sliding-window- based method's: 0.47) 보다 높은 것으로 나타났다.

[표 2-4] LCZ 분류 정확도 평가

LCZ	UA (user's accuracy)		PA (producer's accuracy)	
	Parcel-based	sliding-window	Parcel-based	sliding-window
LCZ 1	1	0.29	0.67	1
LCZ 2	0.72	0.09	0.68	0.18
LCZ 3	0.87	0.72	0.78	0.60
LCZ 4	0.68	0	1	0
LCZ 5	0.75	0.40	0.93	0.49
LCZ 6	0.61	0.38	0.79	0.26
LCZ 7	0.33	0	0.70	0
LCZ 8	0.67	0.23	0.92	0.88
LCZ 9	1	0.29	0.36	0.37
LCZ 10	-	-	-	-
LCZ A	1	0.95	1	0.54
LCZ B	0.92	0.85	0.92	0.63
LCZ C	-	-	-	-
LCZ D	0.25	0	0.50	0
LCZ E	-	-	-	-
LCZ F	0.52	0.38	0.88	0.16
LCZ G	0.88	0.83	1	1

출처: Zhou, Yimin., Wei, Tao., Zhu, Xiaolin. & Collin, Melissa.. (2021). A Parcel-Based Deep-Learning Classification to Map Local Climate Zones From Sentinel-2 Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 14. p.4201

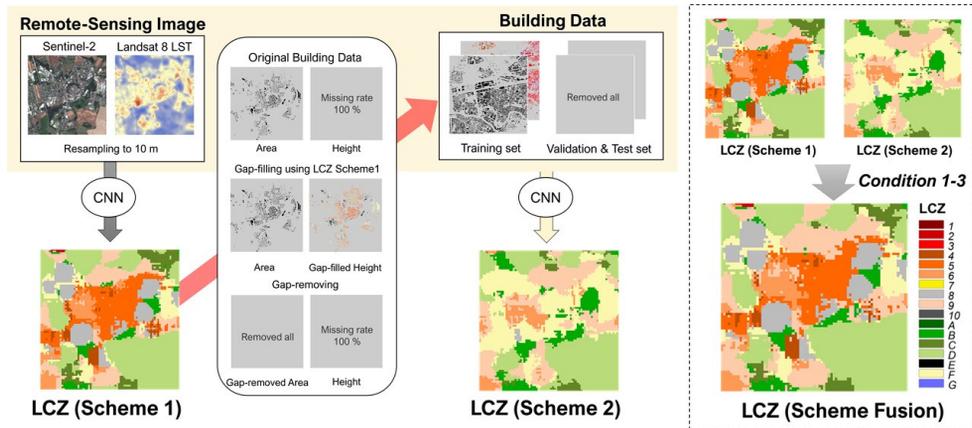
#### • 딥러닝(CNN) 기반 LCZ 분류 개선 연구<sup>6)</sup>

Yoo *et al.* (2020)는 RS (remote sensing) 이미지와 CNN과 같은 딥러닝 분류기법으로 LCZ의 매핑 성능은 향상되었지만, 건물의 구성 요소(수직 또는 수평)를 자세히 제공하지 못하는

6) Yoo, Cheolhee., Lee, Yeonsu., Cho, Dongjin., Im, Jungho. & Han, Daehyeon.. (2020). Improving Local Climate Zone Classification Using Incomplete Building Data and Sentinel 2 Images Based on Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing*. 12(21). 3552. pp.1-22. <https://doi.org/10.3390/rs12213552>

RS 데이터의 한계로 LCZ 1-10의 정확도가 상대적으로 낮은 것을 보완하기 위해 CNN을 기반으로 Sentinel 2 이미지와 불완전한 건물 데이터를 사용하여 새로운 LCZ 분류 방법을 제안하였다.

CNN을 기반으로 입력 변수가 다른 세가지 체계(S1: RS 데이터만 사용, S2: RS데이터와 건물 데이터를 함께 사용, SF: S1과 S2를 융합하여 불완전한 건물 데이터 보정)로 베를린과 서울의 LCZ를 분류하였다. 베를린과 서울의 LCZ 폴리곤 데이터는 WUDAPT 데이터를 활용하였다. S1에서는 10개의 밴드(9: Sentinel 반사율, 1: Landsat-based LST)를 입력 변수로 활용하여 10m 해상도의 RS 이미지를 사용하였다. 훈련시간의 절약을 위해 각 이미지는 정규화(0-1 범위)하였고, 모델 훈련 후 두 도시의 50m LCZ 지도는 S1에서 제작하였다. S2에서는 건물 구성 요소(수평: 면적, 수직: 높이 또는 층 수)를 S1 입력 변수와 함께 사용하였다. 끝으로 CNN의 오류 방지를 위해 LCZ 클래스 할당을 위해 계산된 소프트맥스 확률의 최대값을 S1과 S2의 LCZ 맵에서 픽셀별로 계산한 후 PS1과 PS2로 정의하였다. 그리고 SF는 S2를 기반으로 도출되었지만, 특정 조건<sup>7)</sup>에서 S2를 S1을 대체하여 SF를 도출하였다.



[그림 2-3] 딥러닝(CNN) 기반 LCZ 분류 연구 흐름

출처: MDPI. (2020). *Improving Local Climate Zone Classification Using Incomplete Building Data and Sentinel 2 Images Based on Convolutional Neural Networks*. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3552> (검색일: 2025.1.7.)

LCZ 매핑 후, 테스트 데이터에서 건물 구성요소를 비율별(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)로 제거하여 정확도를 평가한 결과, S1과 비교할 때 모든 LCZ 등급(OA) 및 도시형 LCZ ( $OA_{urb}$ )은 각각 약 4%와 7-9% 증가하였다. 이러한 결과는 SF가 S2에서 오분류를 유발하는 건물 정보의 오류를 보완할 수 있음을 나타낸다.

7) 첫째, PS1 > PS2 경우, 둘째, S1은 도시형(LCZ 1-10)로 분류되지만 S2는 자연형(LCZ A-G)으로 분류되는 경우, 셋째, S1이 소형 도시형 LCZ (LCZ 1-3)로 분류되고 PS1이 1 (100% 신뢰)이지만 S2는 그렇지 않은 경우(LCZ 4-G)

## ■ LCZ와 품업 분석 연구

### • 서울 도시 열섬의 공간 분포<sup>8)</sup>

홍제우 외(2013)는 자동기상관측망(AWS: automatic weather station)을 활용하여 서울과 그 주변의 도시 지표면 특성에 따른 도시 열섬 효과의 강도 변화를 정량화하였다. 그리고 도시 열섬 강도의 공간적 차이가 기후학적 특성이 아닌 건축물의 용도, 밀도, 식생 분포와 같은 미기후학적 요소들과 연관이 있는지를 살펴보았다. 서울 29곳의 자동기상관측소 주변 지형 특성에 따라 LCZ로 분류한 후, 자동기상관측망에서 측정된 기온 관측 자료에 나타난 도시 열섬 강도 및 일교차의 편차를 정량화하였다.

[표 2-5] 서울의 AWS 및 LCZ 결과

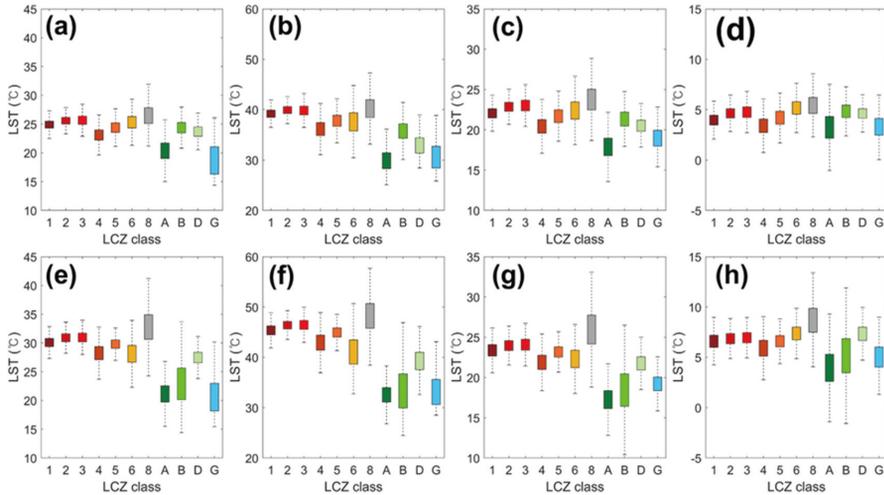
Number	Station	Lat. (N)	Lon. (E)	Height (m)	LCZ
108	서울	37.57141	126.96579	86	2B
110	김포(공)	37.5683	126.7756	18	DE
400	강남	37.5134	127.04699	60	21
401	서초	37.48891	127.01562	36	21
402	강동	37.55551	127.14498	57	15
403	송파	37.51151	127.0967	54	15
404	강서	37.54992	126.84253	79	1A
405	양천	37.52961	126.87819	10	4E
406	도봉	37.66612	127.02946	56	A2
407	노원	37.62101	127.09683	52	5A
408	동대문	37.58463	127.06036	49	51A
409	종량	37.5855	127.08682	40	2
410	기상청	37.49371	126.91809	34	4A
411	마포	37.55174	126.90277	25	2G
412	서대문	37.57046	126.94076	101	A9
413	광진	37.531	127.0875	38	24
414	성북	37.61172	126.99943	126	5A
415	용산	37.52037	126.97609	33	15
416	은평	37.6444	126.9453	70	A9
417	금천	37.46551	126.90015	41	2
418	한강	37.5249	126.93906	11	G9
421	성동	37.5472	127.03884	34	5BG
423	구로	37.49418	126.8265	53	2A
424	강북	37.6397	127.02572	56	21
437	광명	37.47577778	126.8664722	68	21
453	소하	37.44	126.8983333	37	8
509	관악	37.45284	126.95014	145	A5
510	영등포	37.52706	126.90705	24	21
590	과천	37.4404	127.0024	44	DE

출처: 홍제우, 홍진규, 이성은, 이재원. (2013). 자동기상관측소의 국지기후대에 근거한 서울 도시 열섬의 공간 분포. 대기. 23(4). 한국기상학회, p.415

8) 홍제우, 홍진규, 이성은, 이재원. (2013). 자동기상관측소의 국지기후대에 근거한 서울 도시 열섬의 공간 분포. 대기. 23(4). 한국기상학회, pp.413-424



LCZ 분류모델은 수원시와 대구광역시에 대해 각각 87.9%와 81.7%의 높은 분류 정확도를 보였다. 대구가 수원보다 전반적으로 모든 LCZ 클래스에서 LST가 높게 나타났으며 건물이 밀집할수록, 건물의 높이가 낮을수록 LST가 증가하는 공통점을 보였다.



[그림 2-5] LCZ 클래스의 계절별 LST 패턴 박스플롯

주) a-d: 수원, e-h:대구

출처: 이연수, 이시우, 임정호, 유철희. (2021). 딥러닝 기반 Local Climate Zone 분류체계를 이용한 지표면온도와 도시열섬 분석: 수원시와 대구광역시를 대상으로. 대한원격탐사학회지 37(5). p.1,455

SUHI 강도는 수원과 대구 모두 여름철에 가장 강한 값을 가지고 봄과 가을에도 일부 LCZ 클래스를 제외하고 양의 SUHI 강도가 나타났다. 겨울에는 다수의 LCZ 클래스에서 음의 값이 나타났다. 이는 겨울에는 일부 도시지역이 교외지역보다 더 차가운 현상이 나타나기도 함을 의미한다. SUHI 강도의 공간적 패턴은 계절에 따라 큰 차이를 보이나, LCZ 8은 생산활동으로 인해 배출되는 인공열에 의해 계절구분 없이 가장 높은 SUHI값을 나타냈다.

#### • 수원 택지개발지구 야간 열환경 특성 분석<sup>10)</sup>

공학양 외(2020)는 수원시 택지개발지구에 대해 토지피복분류와 LCZ 유형을 함께 고려하여 여름 야간 시간대의 미기후 자료 측정과 인간 열환경지수를 비교 및 분석을 통해 대상 지역의 그린인프라와 그레이인프라 간의 야간 열환경 특성을 비교하였다. LCZ 구분은 토지피복 대분류를 활용하여 시가지건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 나지, 수역의 6가지 지역으로 구분하였다. 미기후 측정은 기온, 상대습도, 풍속 및 풍향, 태양 및 지구복사에너지를 측정하였다. 도출된 자료를 기반으로 인간 열환경지수(human thermal sensation)을 도출하여 PET (physiological equivalent temperature) 방식으로 비교 분석을 실시하였다.

10) 공학양, 최낙훈, 박수국. (2020). Local Climate Zone과 토지피복에 따른 여름철 야간의 인간 열환경 분석 - 경기도 수원시 호매실 택지개발지구. Ecology and Resilient Infrastructure. 7(4). pp.227-237

미기후 지표 분석 결과 그린인프라 지역(LCZ D, LCZ Dd, LCZ Dw, LCZ GD, LCZ A)이 그레이인프라 지역(LCZ 2, LCZ 4, LCZ 6, LCZ E, LCZ F)보다 기온이 낮았으며, 상대습도는 반대로 나타났다. 풍속은 두 지역 모두 차이가 나타나지 않았다. 평균복사온도는 산림이 가장 높은 값을 보였으며, 산림을 제외한 그린 인프라 지역이 그레이인프라 지역에 비해 평균 5.5°C 저감하는 효과를 보였다. PET 분석결과 그린인프라 지역은 '중립'으로 나타났으며, 그레이인프라 지역은 '약간 따뜻함'으로 나타났다. 산림을 제외한 그린인프라 지역이 그레이인프라 지역에 비해 약 3.2°C 가량 저감효과를 보였으며, 야간에도 1/2단계의 인간 열환경 개선 효과를 보인 것으로 나타났다.

[표 2-6] 위치별 LCZ D 결과와의 차이

Nighttime	Difference (% of difference) with LCZ D				
Location	Ta (°C)	RH (%)	u (ms-1)	T <sub>mrt</sub> (°C)	PET (°C)
LCZ D (park)					
LCZ Dd (dry paddy field)	-0.9 (96.4)	7.1 (108.6)	0.3 (163.1)	-8.9 (55.6)	-4.5 (80.0)
LCZ Dw (wet paddy field)	-0.8 (96.6)	7.7 (109.3)	0.3 (153.4)	-0.8 (96.1)	-1.4 (93.8)
LCZ GD (pond)	-0.5 (98.0)	2.6 (103.2)	-0.3 (36.5)	-2.4 (87.8)	-0.8 (96.6)
LCZ A (forest)	-0.6 (97.5)	3.1 (103.7)	-0.5 (6.1)	4.3 (121.6)	3.2 (114.2)
LCZ F (bare land)	1.5 (106.1)	-7.2 (91.3)	0.1 (123.9)	0.9 (104.4)	1.0 (104.4)
LCZ E (parking lot)	0.8 (103.1)	-5.4 (93.5)	0.2 (140.2)	3.0 (115.0)	1.2 (105.5)
LCZ 6 (residential area)	0.7 (103.0)	-2.6 (96.9)	0.0 (109.6)	2.7 (113.5)	1.3 (105.6)
LCZ 2 (commercial area)	1.1 (104.3)	-5.0 (94.0)	0.2 (138.9)	1.9 (109.3)	1.0 (104.3)
LCZ 4 (high APT area)	0.9 (103.7)	-4.0 (95.1)	-0.1 (80.7)	3.1 (115.3)	1.8 (108.0)

출처: 공학양, 최낙훈, 박수국. (2020). Local Climate Zone과 토지피복에 따른 여름철 야간의 인간 열환경 분석 - 경기도 수원시 호매실 택지개발지구. Ecology and Resilient Infrastructure. 7(4). p.233

- 울산광역시 도시 공간구조별 열 집중지역 공간해석 연구<sup>11)</sup>

박진이 외(2022)는 울산광역시를 대상으로 LCZ를 기준으로 도시공간구조를 분류하고 그에 따라 공간자기상관분석을 수행하여 도시공간 내 열이 집중되는 지역을 추출하였다.

11) 박진이, 서민승, 유환희, 이달근, 이준우. (2022). 도시 공간구조별 열 집중지역에 대한 공간해석 연구. 대한공간정보학회지. 30(3). pp.25-35

울산광역시내 최근 3년간('19~'21) 관측된 여름철(6월~9월) 기온 현황을 활용하였으며, 총 7개소 자동기상관측장비(AWS)에서 각 지점별 관측되는 최고, 최저, 평균기온 데이터를 활용하였다. LCZ별 분류된 열 분포 값 중 최솟값과 평균값이 가장 높은 값으로 분류되는 공간구조는 10층 이상의 높은 건물이 밀집되고 식생이 거의 없는 대부분의 지표면이 포장상태인 분포(LCZ 1)로 분류되었다.

열분포값 분류 결과 중구와 남구 내 약 25℃ 이상의 열 분포가 형성되어 있는 것으로 분석되었고, 최댓값으로 분류되는 공간구조는 LCZ 3과 LCZ 10으로 나타나, 중구와 남구의 LCZ 3과 LCZ 10에 대해 핫스팟분석을 실시하였다. 이와 더불어 건축물의 속성정보인 지상높이, 건폐율, 건축물 간의 간격을 기준으로 분석을 실시하였다. 분석한 결과 도시공간 내 열이 집중되는 지역 내 영향을 발생시키는 공간인자 중 수적인 공간인자인 건폐율은 LCZ 3의 공간분포에서 영향정도가 파악된다. 건축물 간의 간격에 대한 분석 결과에서는 LCZ 3과 LCZ 10에서 건축물 간의 간격이 줄어들어 따라 영향이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한, 수직적인 공간인자인 건축물의 지상높이에 대한 분석 결과에서는 각 LCZ별 공간분포의 분류기준에서 제시한 바와 같이 단층으로 구성된 건축물이 분포된 곳에서 영향이 발생하는 것으로 분석되었다.

[표 2-7] 울산광역시 중구, 남구의 건축물 속성정보를 고려한 분석 결과

Type		Space (unit: m) (Mean.)		Height (unit: m)(Mean.)		The build. to land ratio (unit: %) (Mean.)	
		Hotspot area	top area	Hotspot area	top area	Hotspot area	top area
중구	LCZ 3	9.33	7.62	3.35	2.58	16.64	12.84
	LCZ 10	9.14	7.60	2.93	3.01	14.05	14.64
	All area	1.80		3.52		16.89	
남구	LCZ 3	11.51	9.61	4.49	3.49	21.03	21.63
	LCZ 10	13.37	10.19	4.07	3.01	18.58	15.79
	All area	2.67		4.02		18.35	

출처: 박진이, 서민승, 유환희, 이달근, 이준우. (2022). 도시 공간구조별 열 집중지역에 대한 공간해석 연구. 대한공간정보학회지. 30(3). p.32

- 일본 도시 LCZ 분류에 따른 열섬 현상 비교 분석<sup>12)</sup>

Rahmani & Sharifi (2023)은 삿포로와 히로시마를 대상으로 열섬 현상 비교 분석을 실시하였다. 이를 위해 3년간(2000-2022) Landsat 7, 8 영상 중 8월 낮시간대 지표면 온도(LST) 변화를 측정하였다. 그리고 Google Earth Pro와 함께 WUDAPT 방법을 사용하여 LCZ를 분류하고, 도시 열장분산지수(UTFVI)를 사용하여 열 쾌적도와 도시열섬을 도출하였다.

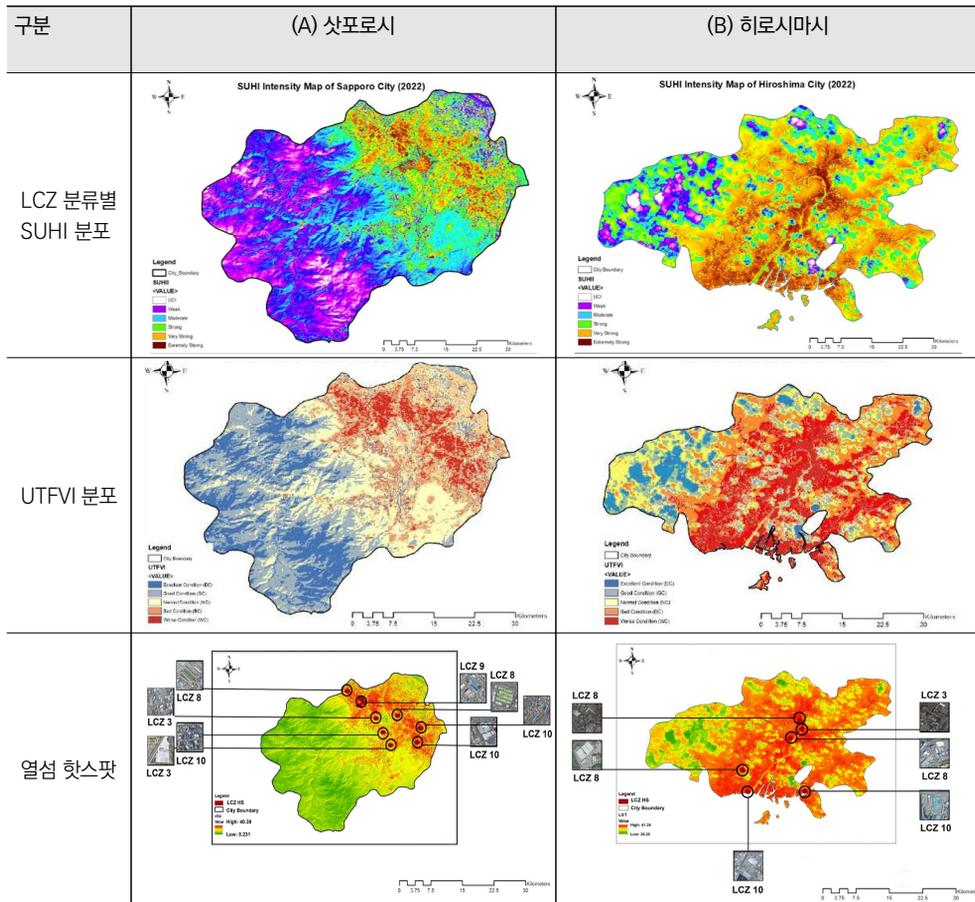
12) Rahmani, Neshat. & Sharifi, Ayyoob.. (2023). Comparative Analysis of the Surface Urban Heat Island (SUHI) Effect Based on the Local Climate Zone (LCZ) Classification Scheme for Two Japanese Cities, Hiroshima, and Sapporo. Climate. 11(7). 142. pp.1-23

SUHI 강도 평가 결과 삿포로는 도시 내 SUHI 현상이 중간 수준이었고, 히로시마는 상대적으로 높은 SUHI 강도 값을 보였으며, SUHI 효과가 더 뚜렷하고 유의하게 나타났다.

열쾌적도 평가를 위해 UTFVI 맵을 생성하고, LCZ로 나누어 가장 높은 온도와 가장 낮은 열쾌적성 조건을 식별하는 지역을 식별하였다. UTFVI는 excellent (EC), good (GC), normal (NC), bad (BC), worst (WC) 클래스로 구분된다. 삿포로시는 절반 이상이 EC한 UTFVI 순위를 보였고 BC 및 WC 수준은 각각 10% 미만이었다. 대조적으로, 히로시마 지역 대다수는 열적 쾌적성이 BC 및 WC로 분류되었고 도시의 20% 이상이 BC UTFVI 순위에 포함되었다.

SUHI 핫스팟은 삿포로에서 LCZ 3 (소형 저층), LCZ 8 (대형 저층), LCZ 10 (중공업)으로 분류된 지역에 위치하며 여름철 표면 온도가 높게 나타났다. 히로시마에서는 LCZ 2 (소형 중층), LCZ 8 (대형 저층) 및 LCZ 10 (중공업)으로 분류된 지역에 온도가 높게 나타났다.

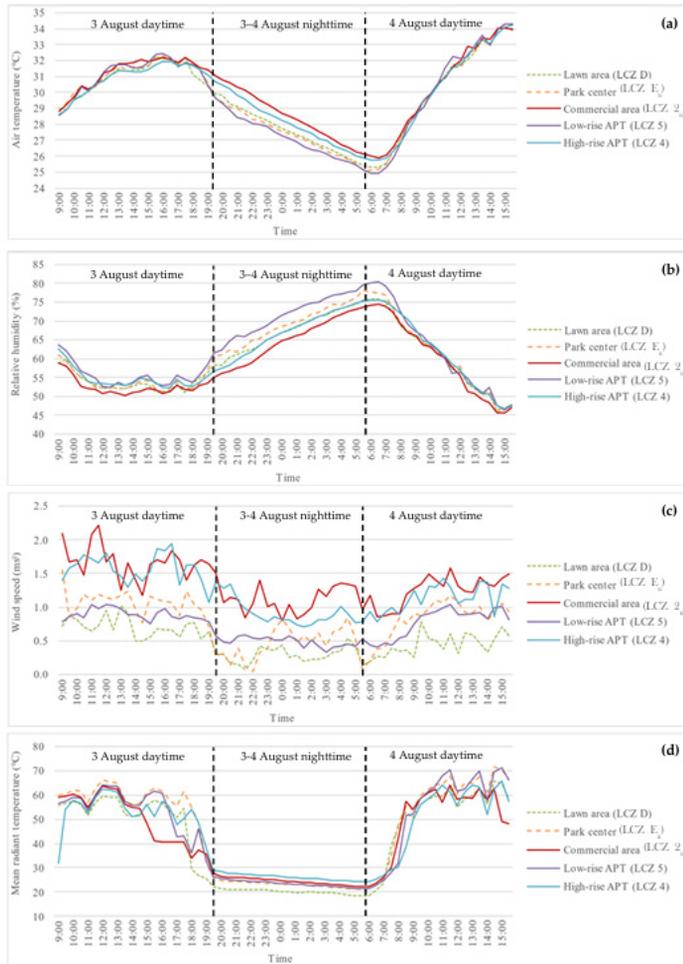
[표 2-8] 일본 도시의 LCZ 분류에 따른 열섬 현상 비교



출처: Rahmani, Neshat. & Sharifi, Ayyoob.. (2023). Comparative Analysis of the Surface Urban Heat Island (SUHI) Effect Based on the Local Climate Zone (LCZ) Classification Scheme for Two Japanese Cities, Hiroshima, and Sapporo. *Climate*. 11(7). 142. pp.15-17

- 수원 효원 근린 공원 인근 LCZ 분류에 따른 열환경 비교 분석<sup>13)</sup>

Jo *et al.* (2023)는 수원시 효원근린공원 인근 지역을 LCZ 분류를 실시하여 미기후 데이터를 수집하여 PET, UTCI (universal thermal climate index) 지수를 도출하였다. LCZ는 LCZ D (low plants), LCZ E<sub>B</sub> (paved with scattered tree), LCZ 2<sub>B</sub> (compact mid-rise with scattered trees), LCZ 4 (open high-rise), LCZ 5 (open mid-rise)의 총 5개로 분류하였다. 그리고 Ta (기온), RH (상대습도), u (풍속), shortwave (단파복사), longwave (장파복사)를 측정하였다.



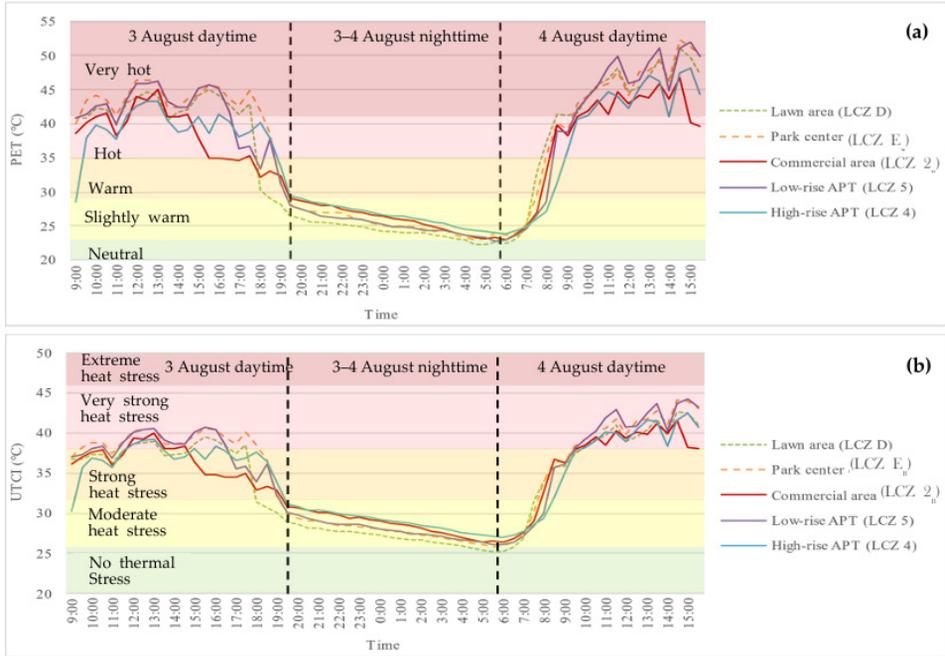
[그림 2-6] LCZ 분류에 따른 시간대별 미기후 측정값

주) a:온도, b:상대습도, c:풍속, d:평균복사온도

출처: Jo *et al.* (2023). Comparison of the Thermal Environment by Local Climate Zones in Summer: A Case Study in Suwon, Republic of Korea. *Sustainability*. 15(3). 2620. p.7

13) Jo, Sangman., Kong, Hakyang., Choi, Nakhoon., Shin, Youngkyu. & Park, Sookuk.. (2023). Comparison of the Thermal Environment by Local Climate Zones in Summer: A Case Study in Suwon, Republic of Korea. *Sustainability*. 15(3). 2620. pp.1-15

LCZ 분류 및 시간대별 PET와 UTCI 지수를 도출하였다. 공원 내에 있는 LCZ E<sub>B</sub>와 LCZ 5는 유사한 패턴을 보였으며, LCZ 2<sub>B</sub>와 LCZ 4는 공원 내 보다 온도가 높게 나타났다.



[그림 2-7] LCZ 분류별 PET와 UTCI 값

주) (a) PET, (b) UTCI

출처: Jo *et al.*. (2023). Comparison of the Thermal Environment by Local Climate Zones in Summer: A Case Study in Suwon, Republic of Korea. *Sustainability*. 15(3). 2620. p.9

#### • LCZ 분류별 도시 열환경 효과 분석<sup>14)</sup>

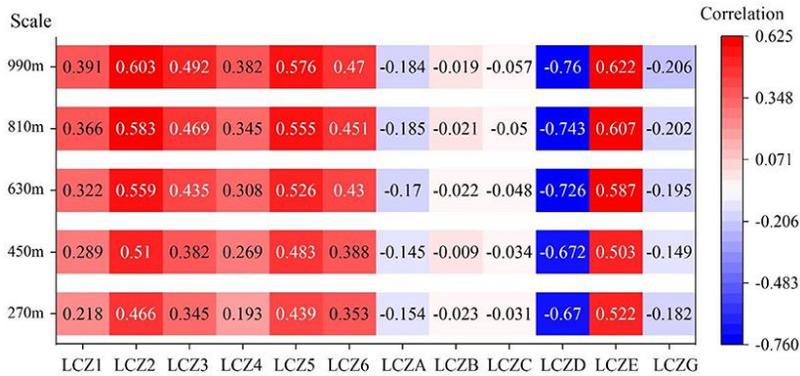
Zhang *et al.* (2022)은 중국 라오닝성 선양 지역을 대상으로 토지이용도, Landsat 8 및 MODIS 자료, 건축물 벡터자료를 활용하여 지표면 온도와 LCZ 분류를 도출하였다. 먼저 다양한 스케일(270-990m)로 LCZ 비율과 지표면 온도를 계산하였다. 이후 상관분석 및 회귀분석을 통해 LCZ 분류 비중을 적용하여 지표면 온도가 어떻게 영향을 미치는지 분석하였다.

이를 위해 원격 탐사 데이터, 토지 이용 데이터 및 건물 벡터 데이터를 사용하여 LST를 계산하고 LCZ를 나눴다. LCZ의 면적 비율 계산을 위해 1단계 그리드 개념이 도입되었다. 상관관계는 LCZ와 LST의 면적 비율에 대해 계산되었고, 단계적 회귀 모델은 LCZ의 온난화 및 냉각 효과를 분석하는 데 사용되었다.

14) Zhang, Rui., Yang, Jun., Sun, Dongqi., Ma, Xinyue., Yu, Wenbo., Xiao, Xiangming. & Xia, Jianhong (cecilia).. (2022). Warming and cooling effects of local climate zones on urban thermal environment. *Frontiers in Public Health*. 10. pp.1-14

LCZ별 온도 특성으로 건축 면적의 LCZ 범주에서 평균 표면 온도(TsMean: the average surface temperature)는 38℃보다 높았다. LCZ에서 등급 간 평균 표면 온도의 가장 높은 통계적 범위는 LCZ 6 (13.5℃)였다. 자연지역인 LCZ G (수역, 34.21℃)는 모든 LCZ 유형 중 평균 표면 온도가 가장 낮았다. 건물 등급 LCZ의 경우 저층 및 중층 건물 등급(LCZ 2, LCZ 3, LCZ 5, LCZ 6)은 고층 건물 등급(LCZ 1, LCZ 4)보다 최대 및 평균 온도가 높았다.

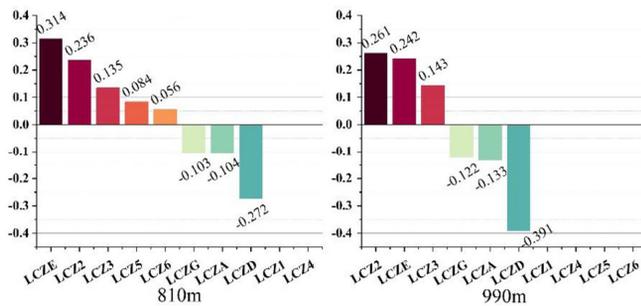
그리고 각 그리드별 LCZ 유형의 면적 비율을 산출한 결과, 450m 및 990m 축척에서 그리드 스케일이 증가함에 따라 LCZ 1-3의 최대 비율이 점차 감소하였다. 각 스케일에서 LCZ 면적 비율과 해당 평균 LST 사이의 상관관계 분석 결과, 시가지 지역은 모든 규모(LCZ 1-6)에서 LST와 유의한 양의 관계를 보였다. 자연 지역은 LCZ A, LCZ D, LCZ G는 LST와 유의한 음의 상관관계를 보였고 LCZ E는 LST와 유의한 양의 상관관계를 보인 유일한 변수였다.



[그림 2-8] LCZ와 LST 간의 상관계수

출처: Zhang *et al.* (2022). Warming and cooling effects of local climate zones on urban thermal environment. *Frontiers in Public Health*. 10. p.9

회귀 모델 분석 결과, 가장 최적의 스케일인 810m에서 열섬현상을 야기하는 LCZ 분류는 LCZ E (0.314) > LCZ 2 (0.236) > LCZ 3 (0.135) 순이었고, 냉각 효과를 야기하는 분류는 LCZ D(-0.272) > LCZ A(-0.104) > LCZ G(-0.103)의 순이었다.



[그림 2-9] 스케일별 LCZ와 LST 회귀분석 결과

출처: Zhang *et al.* (2022). Warming and cooling effects of local climate zones on urban thermal environment. *Frontiers in Public Health*. 10. p.11

• LCZ 분류별 도시열섬현상 시공간적 변화 연구<sup>15)</sup>

Xiang *et al.* (2024)은 중국 후난성 창사지역을 대상으로 Landsat 5, 7, 8, 9 데이터를 활용해 지표면 온도를 측정하고, Mono-Window 알고리즘을 통해 2005년부터 2020년까지 지표면 온도를 추정하였다. 이를 통해 LCZ와 도시열섬현상의 시공간적 변화를 연구하였다.

시계열적으로 건축 유형이 증가하였으며, 특히, LCZ E (Bare rock)의 비중이 증가하였다. 또한, LCZ 분류가 연속적인 패턴이 아닌 파편화되어 나타났다. 2005년 대비 2010년, 2015년, 2020년의 각 LCZ 유형의 백분율 변화를 살펴본 결과, 건축된 LCZ의 비율은 증가하였다. 조밀한 LCZ (LCZ 1: compact high-rise, 2: compact midrise, 3: compact low-rise)의 비율은 안정적으로 유지된 반면, 개방형 LCZ (LCZ 4: open high-rise, 5: open midrise, 6: open low-rise)의 증가 폭이 가장 컸다. 주로 농촌 마을을 포함하는 LCZ 93의 면적은 전체 기간 동안 감소하였다. LCZ는 전반적으로 감소했지만, 대부분이 도시의 도로 및 광장인 LCZ E 및 LCZ EA는 증가하였다.

[표 2-9] 2005년-2020년 LCZ 분류 변화율

YEAR	1	2	3	4	5	6	8	11	91	92	93
2005	0.07	0.66	0.61	1.08	7.87	3.30	0.86	0.30	3.38	8.21	0.60
2010	0.14	0.6	-0.14	0.74	1.68	1.03	-0.08	0.01	0.01	-1.28	-1.19
2015	0.15	-0.15	0.61	4.29	-0.27	0.58	0.66	0.41	0.61	-0.66	-2.72
2020	0.36	-0.01	-0.06	8.93	0.57	1.23	0.34	2.88	3.67	0.65	-3.04
YEAR	91E	92E	93E	A	C	E	EA	F	G	Overall Change	
										Built LCZs	Land Cover LCZs
2005	3.86	1.94	0.03	22.62	31.87	2.57	4.47	0.40	5.30	32.77	67.23
2010	0.56	2.06	2.07	-5.3	-7.97	-0.6	7.9	-0.4	0.16	38.98	61.02
2015	4.44	2.03	1.11	-6.89	-12.61	1.63	6.85	-0.4	0.16	43.86	56.14
2020	7.91	-1.16	-0.66	-13.69	-25.45	0.82	16.68	0.15	-0.43	54.38	45.62

출처: Xiang, Yanfen., Zheng, Bohong., Wang, Jiren., Gong, Jiajun. & Zheng, Jian.. (2024). Research on the Spatial-Temporal Evolution of Changsha's Surface Urban Heat Island from the Perspective of Local Climate Zones. *Land*. 13(9). 1479. p.13

지표면 온도 분석 결과, 여름에는 도심 지역, 산업 단지 및 주요 도로를 따라 고온 지역이 지속적으로 나타났고, 저온 지역은 도심 지역 외곽의 대형 수역, 삼림 공원 및 식생 지역에서 나타났다. 도시가 확장됨에 따라 산업 단지가 고온 지역이 되었다. 시계열적으로 고온지역의 비중은 증가(22.44% → 31.51%)하였으며, 반면에 저온지역은 감소(31.89% → 24.57%)하였다.

15) Xiang, Yanfen., Zheng, Bohong., Wang, Jiren., Gong, Jiajun. & Zheng, Jian.. (2024). Research on the Spatial-Temporal Evolution of Changsha's Surface Urban Heat Island from the Perspective of Local Climate Zones. *Land*. 13(9). 1479. pp.1-28

[표 2-10] 2005년-2020년 지표면 온도 비중

LCZ Class		2005		2010		2016		2020	
		Sum.	Win.	Sum.	Win.	Sum.	Win.	Sum.	Win.
The surface heat island areas	Extremely high-temperature	11.11	2.89	9.64	4.70	10.32	3.12	11.63	4.43
	High-temperature zone	3.88	3.79	6.89	5.46	7.71	4.20	9.36	13.18
	Relatively high-temperature zone	7.45	11.00	9.77	13.52	8.46	13.14	10.52	0.63
	overall	22.44	17.68	26.30	23.68	26.49	20.46	31.51	18.24
Mid-temperature zone		45.67	53.19	35.21	54.17	33.95	53.77	43.92	35.53
The surface cold island areas	relatively low-temperature	20.84	21.17	29.57	14.49	27.95	20.02	17.54	35.92
	low-temperature zone	7.40	6.33	7.69	4.73	8.08	4.86	5.36	9.42
	extremely low-temperature zone	3.65	1.63	1.23	2.93	3.53	0.89	1.67	0.89
	overall	31.89	29.13	38.49	22.15	39.56	25.77	24.57	46.23

출처: Xiang, Yanfen., Zheng, Bohong., Wang, Jiren., Gong, Jiajun. & Zheng, Jian.. (2024). Research on the Spatial-Temporal Evolution of Changsha's Surface Urban Heat Island from the Perspective of Local Climate Zones. *Land*. 13(9). 1479. p,16

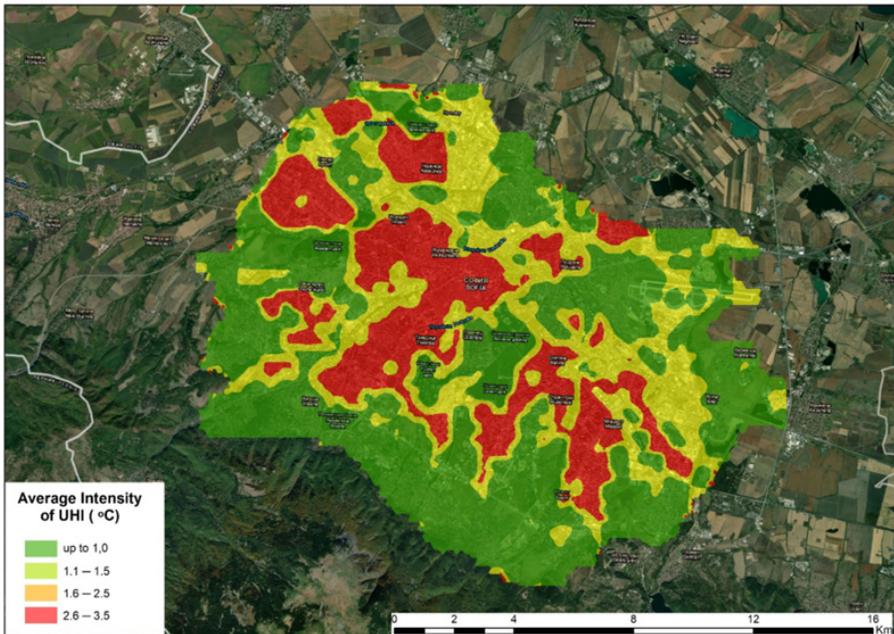
여름철 평균 SUHII 값은 LCZ 유형에 따라 큰 차이가 나타났다. 여름철 SUHII 값은 겨울보다 훨씬 높았으며, 유형별로는 서로 다른 경향을 보였다. 여름에는 건축 유형(built types)이 토지 피복 유형(land cover types)보다 평균 기온이 약 6°C 더 높았고, 겨울에는 그 차이가 약 1.5°C였다. 여름철에는 LCZ 유형별 SUHII 차이가 크게 나타났으며, 건축 유형 중 LCZ 8, 토지 피복 유형 중 LCZ E가 가장 높고 LCZ G가 가장 낮았다. SUHII는 '조밀한 LCZ > 개방형 LCZ > 복합형 LCZ > 희박한 LCZ' 순으로 나타났고, 저층 건물이 가장 높았다. 겨울철에는 SUHII 값의 차이가 줄었지만, LCZ 8과 LCZ E가 여전히 가장 높았으며, 유형 간 경향은 유지되었다. 겨울철엔 낙엽과 마른 풀로 인해 LCZ 간 SUHII 차이가 감소하였다.

- 불가리아 소피아지역 도시열섬현상의 LCZ 적용 연구 16)

Dimitrov *et al.* (2021)은 무인항공시스템(UAS: unmanned aerial system)을 활용하여 불가리아 소피아 지역의 열환경 분석을 실시하였다. UAV (unmanned aerial vehicle systems (UAVs or drones)) 등 자료를 통해 LCZ 분류를 열화상 이미지를 활용하여 LCZ 분류에 속하는 74개 셀을 분석하였다.

16) Dimitrov, Stelian., Popov, Anton. & Iliev, Martin.. (2021). An Application of the LCZ Approach in Surface Urban Heat Island Mapping in Sofia, Bulgaria. *Atmosphere*. 12(11). 1370. pp.1-18

도시열이 집중되는 구역은 LCZ 4 (Open high-rise), LCZ 5 (Open midrise), LCZ 9 (Sparsely built)이며, 열 집중이 적은 구역은 LCZ C (Brush, scrub), LCZ D (Low plants)로 나타났다. 이러한 도시열섬현상 패턴의 공간구조와 도시 지표면 특성간의 상관관계에 대해 회귀분석을 실시하였다. 그 결과, 녹지비율이 증가하면 지표면 온도가 감소하고, 불투수 면적 비율이 증가하면 지표면 온도가 증가한다는 것을 확인했다. SUHI 강도 검토 결과, 지표면 온도 측정값을 통한 평균온도는 20.9℃이며, 가장 높은 최댓값은 LCZ 4 (Open high-rise), LCZ 5 (Open midrise)으로 나타났다.



[그림 2-10] SUHI 분포도

출처: Dimitrov, Stelian., Popov, Anton. & Iliev, Martin.. (2021). An Application of the LCZ Approach in Surface Urban Heat Island Mapping in Sofia, Bulgaria. *Atmosphere*. 12(11). 1370. p.13

- LCZ 분류와 해상풍 영향을 고려한 도시열섬현상 평가 17)

Zhou *et al.* (2020)는 일본 센다이를 도심을 따라 두 지역(산, 바다)으로 나누어 각 도시-농촌 지역의 도시열섬현상 규모에 대한 해륙풍으로 인한 완화 효과를 입증했다. Landsat 7, 8 이미지를 활용하여 WUDAPT를 통해 LCZ를 분류하고, ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)를 활용하여 낮시간(10:30am)과 저녁시간(10:30pm) LST를 측정하였다. 해상풍과 관련하여 대기 온도 측정도 실시하였으며, 일본 대기 측정 시스템(AMeDAS)를 활용하였다.

17) Zhou, Xilin., Okaze, Tsubasa., Ren, Chao., Cai, Meng., Ishida, Yasuyuki., Watanabe, Hironori. & Mochida, Adashi.. (2020). Evaluation of urban heat islands using local climate zones and the influence of sea-land breeze. *Sustainable Cities and Society*. 55. pp.1-17

LCZ 3 (compact low-rise), LCZ E (bare rock or paved)가 모든 시간대에서 높은 온도로 나타났으며, LCZ A (dense trees)가 가장 낮게 나타났다. 저녁시간대는 LCZ 2 (compact mid-rise), LCZ 8 (large low-rise), LCZ E (bare rock or paved) 유형이 LST가 높게 나타났고, 그 중 LCZ 2가 가장 높은 온도를 보였다. 반대로 식생 피복이 높은 LCZ는 LST가 낮았다.

[표 2-11] LCZ 분류별 낮시간대, 저녁시간대 LST 측정값 요약

LCZ	Daytime (°C)				Nighttime (°C)			
	Max.	Min.	Mean	SD	Max.	Min	Mean	SD
LCZ 2	31.42	29.65	30.89	0.25	30.42	30.08	30.23	0.06
LCZ 3	32.31	29.86	31.12	0.18	30.56	29.85	30.15	0.08
LCZ 5	31.49	29.64	30.75	0.32	30.52	29.43	30.11	0.11
LCZ 6	31.72	29.90	30.97	0.24	31.35	29.66	30.06	0.09
LCZ 8	32.00	29.63	31.00	0.26	30.72	29.59	30.17	0.11
LCZ 9	31.96	29.49	30.51	0.27	30.55	29.63	29.99	0.12
LCZ 10	31.39	29.77	30.71	0.27	30.74	29.88	30.16	0.12
LCZ A	31.22	29.66	30.05	0.16	30.56	29.49	29.81	0.08
LCZ B	31.38	29.68	30.39	0.25	30.50	29.66	29.92	0.11
LCZ D	31.82	29.50	30.31	0.23	30.69	29.52	29.98	0.10
LCZ E	31.64	30.47	31.10	0.20	30.51	30.14	30.34	0.10
LCZ F	31.54	29.72	30.73	0.35	30.55	29.89	30.07	0.08

출처: Zhou, Xilin., Okaze, Tsubasa., Ren, Chao., Cai, Meng., Ishida, Yasuyuki., Watanabe, Hironori. & Mochida, Adashi.. (2020). Evaluation of urban heat islands using local climate zones and the influence of sea-land breeze. *Sustainable Cities and Society*. 55. p.10

산측에 위치한 북서쪽 로거들은 해안측의 남동쪽 로거들보다 더 높은 고도에 설치되었으며, 각 LCZ의 평균 열 이상(anomaly)은 모든 로거에서 측정된 평균 기온을 기준으로 한 상대값이다. 분석 결과, 저녁시간대의 산에서 바다로 부는 찬바람의 영향으로 인한 온도 하강 효과는 산악지대에서는 중요하게 작용했지만 해안 지역에서는 큰 영향을 미치지 못하였다는 것을 확인했다. 이처럼 도시의 여러 지역(산악지역, 해안지역 등)에서 산풍과 해풍에 영향을 받는 LCZ 유형과 효과를 고려함으로써 UHI 효과의 표적 분석이 가능함을 제시하였다.

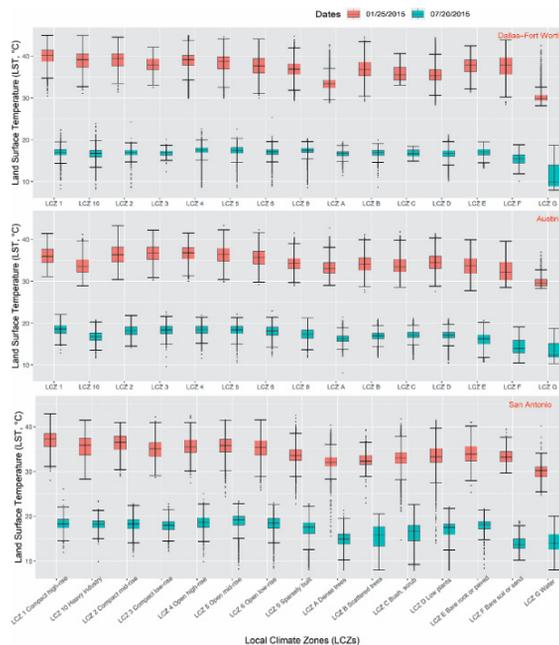
- LCZ 분류를 활용한 미국 텍사스 도시열섬현상 조사<sup>18)</sup>

Zhao *et al.* (2020)는 미국 텍사스 주 오스틴, 샌안토니오, 댈러스-포트워스 도시권 지역의 2015년 겨울과 여름 하루 동안의 Landsat 8 이미지를 활용하여 LST, SUHI를 도출하였다.

18) Zhao, Chunhong., Jensen, Jennifer L. R., Weng, Qihao., Currit, Nathan. & Weaver, Russell.. (2020). Use of Local Climate Zones to investigate surface urban heat islands in Texas. *GIScience & Remote Sensing*. 57(8). pp.1,083-1,101

Zhao *et al.* (2020)는 Zhao *et al.* (2019)의 지표면 온도(LST)와 LCZ를 연결하는 워크플로우를 준용하였다. Stewart & Oke (2012)의 LCZ 정의에 따라 라이더(lidar)와 준궤도 영상(sub-orbital image) 데이터를 결합하여 LCZ를 매핑한다. 토지 피복, 거칠기 요소의 높이, 건축물 구성과 배치, 투수면 비율, 도시 토지이용계획 관련 코드 및 데이터셋 등 다양한 변수들이 분석되어 최종적으로 LCZ 매핑 변수로 분류하였다. 건축물 구조가 지역 기후에 영향을 미친다는 점을 고려하여 건물 높이의 반변산 함수(variogram) 범위를 계산하여 LCZ 매핑 단위를 선정하였다.

SUHI (도시 열섬) 분석은 Landsat 기반 지표면 온도(LST)와 LCZ를 연계하여 수행되었다. 여름 측정 결과, LCZ 1 (compact high-rise)이 가장 온도가 높게 나타났으며, 그 다음으로는 오스틴 지역을 제외한 LCZ 4 (open high-rise)가 높게 나타났다. 컴팩트한 LCZ 유형(compact LCZ types)은 개방형 LCZ 유형(open LCZ type)보다 높은 온도를 기록하였다. 겨울에는 여름과 달리, LCZ 4-6 (개방형 유형)에서 가장 강한 SUHI 강도가 나타났고, 이는 특히 델러스-포트워스와 샌안토니오에서 두드러졌다. 오스틴에서는 LCZ 1, LCZ 4, LCZ 3, LCZ 5, LCZ 2에서 10°C 이상의 LST가 관측되었으며, LCZ 9에서는 상대적으로 낮은 SUHI 강도가 나타났다. 여름과 마찬가지로, LCZ G (water)는 세 도시 모두에서 가장 낮은 평균 지표면 온도를 보였고, 그 뒤는 LCZ F (bare soil or sand)였다.



[그림 2-11] 지역별·LCZ 분류별 LST 측정값 종합

출처: Zhao, Chunhong., Jensen, Jennifer L. R., Weng, Qihao., Currit, Nathan. & Weaver, Russell.. (2020). Use of Local Climate Zones to investigate surface urban heat islands in Texas. *GIScience & Remote Sensing*, 57(8). p.1,090

LCZ를 활용하여 폭염을 분석한 선행연구를 검토한 결과, 대부분의 연구에서 LCZ 1-3 (고밀 시가지지역)과 LCZ 4-5 (개방형 중·고층 지역)에서 열섬 현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 이러한 결과는 건축물의 밀도와 불투수 포장면의 비율, 바람길 저해 요인 등의 도시 형태적 요인과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 반면, LCZ E (바위나 포장된 지역)를 제외한 자연피복형 (LCZ A-B (수목지역), G (수역))에서는 상대적으로 낮은 온도를 유지하며 도시 냉각 효과를 나타냈다.

개별 LCZ 발생 빈도에서는 LCZ 4 (개방형 고층)와 LCZ E (바위나 포장된 지역)이 각 5회, LCZ 2 (고밀 중층)와 3 (고밀 저층)이 각 4회로 높게 나타났다. 이는 도시의 통풍(바람길)이 제한되거나, 불투수 포장면이 많은 지역에서 열 저장과 복사로 인해 표면 온도가 높게 유지됨을 의미한다고 볼 수 있다.

[표 2-12] 도시열섬이 높은 LCZ 분류 종합

구분	LCZ																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	A	B	C	D	E	F	G	
측정데이터																		
AWS	H																	
LST, SUHI								H										
LST		H		H		H									H	H		
열 분포도			H							H								
LST, SUHI		H	H					H		H					H			
LST		H	H		H	H									H			
LST, SUHI								H							H			
LST				H	H				H									
LST, 대기온도			H												H			
LST, (여름)	H			H														
SUHI, (겨울)				H	H	H												
발생 빈도	2	4	4	5	3	3	-	3	1	2	-	-	-	-	5	1	-	

주) 1: Compact high-rise, 2: Compact midrise, 3: Compact low-rise, 4: Open high-rise, 5: Open midrise, 6: Open low-rise, 7: Lightweight low-rise, 8: Large low-rise, 9: Sparsely built, 10: Heavy industry, A: Dense trees, B: Scattered trees, C: Bush, scrub, D: Low Plants, E: Bare rock or paved, F: Bare soil or sand, G: Water

출처: 연구진 작성

## 2. 도시 폭염 관련 연구 동향

### 1) 연구사례

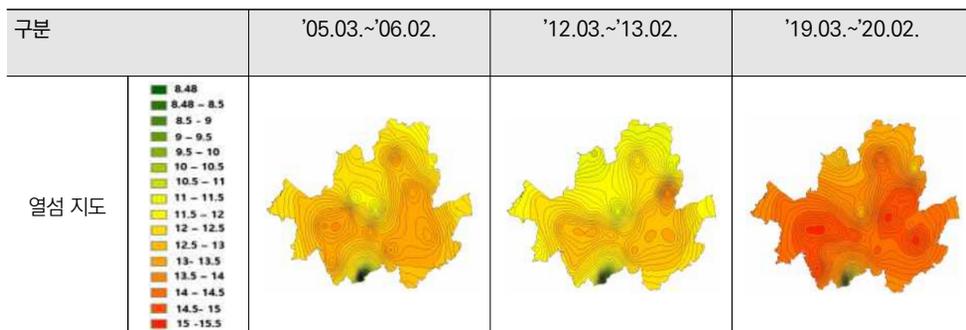
#### ■ 대기온도 자료 분석 연구

- AWS 데이터를 활용한 도시열섬 취약지역 도출 연구<sup>19)</sup>

배웅규와 박세홍(2021)은 서울시의 열섬 대응을 위한 기초자료 마련을 위해 AWS 기온데이터를 활용하여 서울시의 최근 15년 내 3개 연도에 대한 열섬지도를 제작하였고, 서울시의 도시 열섬 구조 및 분포변화를 비교하였다. 그리고 서울시 내외의 기상 측정 자료를 활용하여 열섬 강도를 산출하고 그 변화를 비교 분석하였으며, 도출된 연구 결과를 기초로 군집분석을 실시하고 이를 근거로 열섬 취약지역을 도출하였다.

먼저, 43개 AWS 지점의 3개년 연평균 데이터를 이용해 서울시 주변까지 기온이 보간된 열섬도면을 제작하였다. 다음으로, 해당 도면의 0.1℃ 간격 등온선을 작성, 이를 서울시 경계를 중심으로 중첩 표시하여 열섬 지도를 제작하였다. 이후 열섬 분포변화 분석을 위해 3개 연도 열섬 지도를 기준으로 서울시 내 폐곡선을 이루는 등온선 중 크기가 최대인 것을 ‘최대 열섬 폐곡선’이라 하며, 이 폐곡선 내 최고 기온으로 나타난 폐곡선을 ‘고온 핵’이라 정의하였다.

[표 2-13] 연평균 온도를 활용한 3개 연도 열섬 지도 작성



19) 배웅규, 박세홍. (2021). AWS 데이터를 활용한 도시열섬 분포 및 강도의 군집분석을 통한취약지역 도출 - 2005.03~2020.02 사이의 서울시 및 주변 지역 43개 지점을 대상으로 -. 서울도시연구. 22(4). pp.43-63

구분		'05.03.~'06.02.	'12.03.~'13.02.	'19.03.~'20.02.
등온선 열섬 지도				
	최대 열섬 폐곡선 온도(°C)	13	동측 13.2 서측 12.7	동측 14.5 서측 14.7
고온핵 온도(°C)		13.4	13.6	15
고온핵 개수		3	1	4
평균/최저/최고 온도		12.26/9.00/13.40	11.78/9.00/13.60	13.64/10.80/15.0

출처: 배웅규, 박세홍. (2021). AWS 데이터를 활용한 도시열섬 분포 및 강도의 군집분석을 통한취약지역 도출 - 2005.03~2020.02 사이의 서울시 및 주변 지역 43개 지점을 대상으로 -. 서울도시연구. 22(4), p.51

서울시 열섬 강도 값을 활용한 공간 군집분석(Getis-Ord Gi) 방법은 첫째, 서울시 열섬 강도 값 산출 후, 열섬지도제작과 동일하게 열섬 강도 지도를 제작하고, 둘째, 보간된 서울시 열섬 강도 수치를 point화, 셋째, 서울시 행정동 지도와 중첩 결합, 끝으로 Getis-Ord Gi분석을 활용하여 열섬 강도 값이 추가된 서울시 행정동 지도를 분석하였다. 3개 연도 공간군집분석 결과 지도를 중첩하여 3개 연도, 2개 연도, 1개 연도 중복 열섬지역으로 지역을 구분하여 서울시의 열섬 취약지역을 도출하였다.

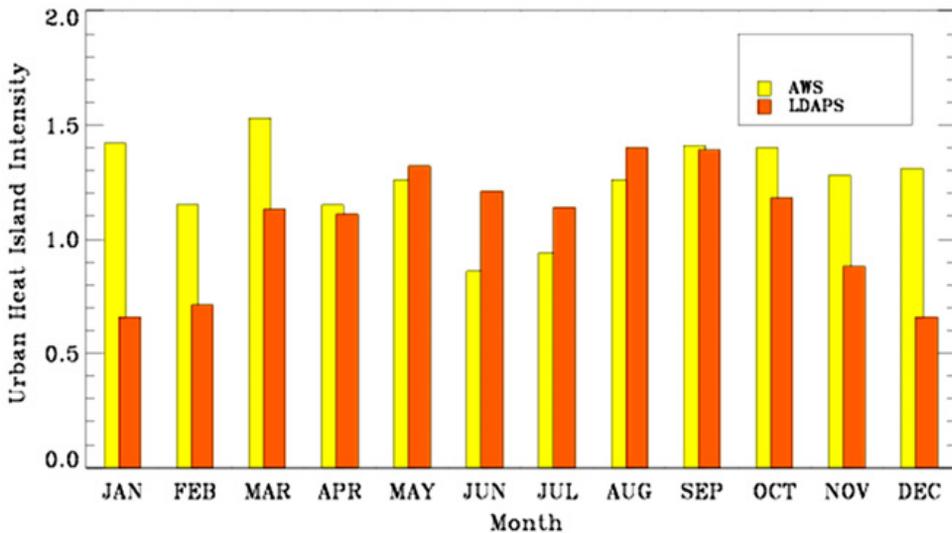
[표 2-14] 3개 연도 공간군집분석(Getis-Ord Gi) 결과

구분		'05.03.~'06.02.	'12.03.~'13.02.	'19.03.~'20.02.
열섬강도값 군집 분석 지도				
	99% hotspot	행정동(개)/면적(km <sup>2</sup> ) 열섬강도 평균값(°C)	13 / 41.22 2.147	41 / 54.90 2.222
95% hotspot	행정동(개)/면적(km <sup>2</sup> ) 열섬강도 평균값(°C)	78 / 110.18 1.932	70 / 96.34 1.956	35 / 57.99 2.106
	90% hotspot	행정동(개)/면적(km <sup>2</sup> ) 열섬강도 평균값(°C)	37 / 51.67 1.828	18 / 27.23 1.729
핫스팟 면적합(km <sup>2</sup> )		203.07	178.47	132.27

출처: 배웅규, 박세홍. (2021). AWS 데이터를 활용한 도시열섬 분포 및 강도의 군집분석을 통한취약지역 도출 - 2005.03~2020.02 사이의 서울시 및 주변 지역 43개 지점을 대상으로 -. 서울도시연구. 22(4), p.57

• 국지기상예측시스템과 AWS관측치 비교 평가<sup>20)</sup>

변재영 외(2021)는 기상청 국지기상예측시스템(LDAPS)으로 예측한 서울 도시열섬강도와 AWS 관측치와 비교평가 하였다. 예측된 열섬 강도는 여름철 과대 모의, 겨울철 과소 모의 특징을 보인다. 특히 여름철은 주간에 과대 모의 경향이 증가하며, 겨울은 새벽 시간 과소 모의 오차가 크게 나타난다. 겨울철 열섬 강도의 과소 모의는 도시 기온의 과소 모의와 관련되었으며, 여름철 열섬 강도의 과대 모의는 교외 지역 기온의 과소 모의로부터 기인하는 것으로 판단되었다.



[그림 2-12] 국지기상예측시스템(LDAPS)과 AWS 측정값 비교

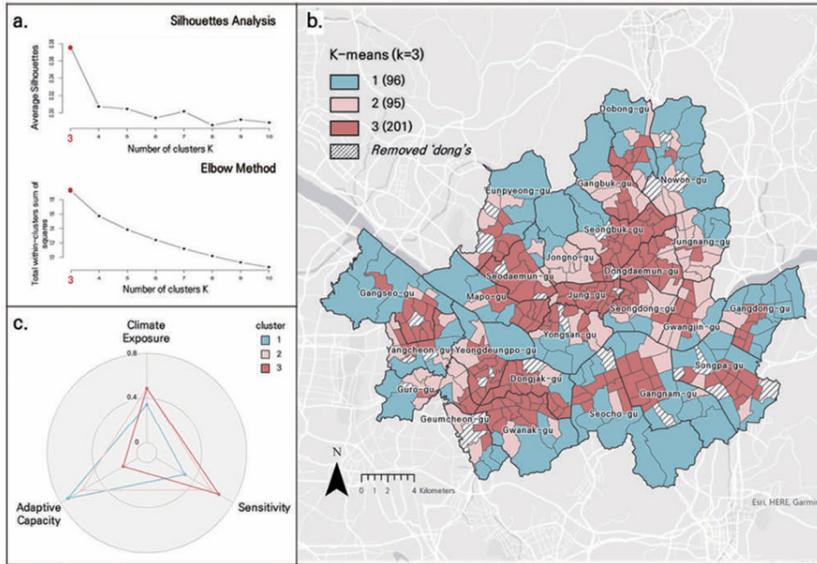
출처: 변재영, 홍선옥, 박영산, 김연희. (2021). 기상청 국지기상예측시스템을 이용한 서울의 도시열섬강도 예측 평가. 한국 지구과학회지. 42(2). p.143

또한, 도시 열섬 강도 예측성 개선을 위해 도시효과를 고려하는 도시캐노피모델을 LDAPS와 결합하였다. 도시와 교외 지역의 기온 일변화를 비교하여 LDAPS와 MORUSES 방안의 예측 성능을 분석한 결과, MORUSES 적용 시 도시는 오전 과소 모의가 개선되었으나, 새벽에는 과대 모의가 나타났다. 교외에서는 새벽과 이른 오전에 과대 모의, 오전부터 야간까지 과소 모의가 나타났으며, LDAPS보다 개선되었지만 여전히 오차가 존재했다. 열섬 강도 예측의 일변화 분석에서 여름철 주간의 과대 모의는 교외 기온의 과소 모의가 주요 원인으로 판단되었다.

20) 변재영, 홍선옥, 박영산, 김연희. (2021). 기상청 국지기상예측시스템을 이용한 서울의 도시열섬강도 예측 평가. 한국 지구과학회지. 42(2). pp.135-148

- 스마트 도시 데이터를 활용한 미시적 폭염취약성 평가 연구<sup>21)</sup>

김지수와 강민규(2022)는 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT)와 지역 통계자료를 활용하여 행정동 단위의 폭염 취약성을 평가했다. 취약성 평가지표로는 기후노출, 민감도, 적응능력으로 설정했다. S-DoT 데이터에 대한 전처리 과정을 거친 후, 표준화 및 엔트로피 가중치를 통해 지표별 수치를 도출하여 K-means분석을 실시했다.



[그림 2-13] S-DoT를 기반으로 한 군집 분석결과

주) a. 실루엣 및 엘보우 지수 분석결과, b. 군집분석결과, c. 군집별 취약성 지수 유형화

출처: 김지수, 강민규. (2022). 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT)를 활용한 미시적 폭염 취약성 평가에 관한 연구. 국토계획. 57(5). p.226

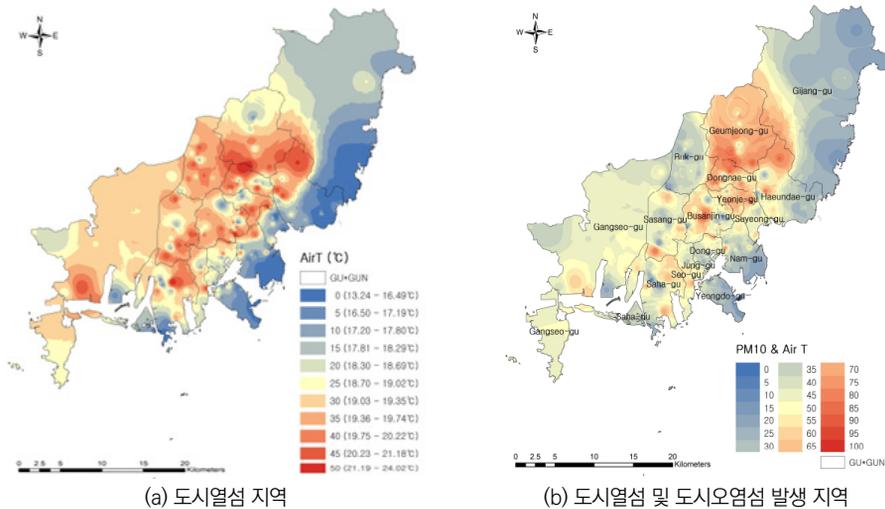
군집별 분석결과로 군집1 유형은 행정동 96개가 포함되며, 기후노출도와 민감도가 가장 낮고, 적응능력은 가장 높은 군집이다. 이는 서울 외곽지역 및 한강 수계주변 지역에 따라 분포한다. 군집2는 행정동 95개 속하며, 기후노출도, 민감도, 적응능력이 모두 높은 것으로 나타났다. 군집3 유형은 201개이며, 가장 많은 행정동이 포함된 군집이다. 기후노출과 민감도는 높고, 적응능력은 가장 낮은 군집이다. 군집 유형 중 가장 폭염에 취약한 유형으로 한강 이북 지역이 주를 이룬다. 군집별 특징으로는 군집1은 기후노출과 민감도 요인이 가장 낮고, 적응도는 높은 가장 이상적인 군집으로, 녹지가 많이 분포하고 있어 열축적 완화에 도움이 되었다. 군집2는 폭염노출 가능성이 크고 취약한 요소가 많은 지역이지만 공원 및 녹지 등이 충분히 조성되어 있어 적절한 수준의 대처능력이 갖춰졌다고 볼수 있다. 군집3은 폭염에 대한 취약한 지역이지만 대처능력도 부족한 지역으로 나타났다. 불투수성 표면이 많고, 녹지가 적고, 인구밀도가 높은 지역으로 열대야 발생 빈도가 높게 나타났다.

21) 김지수, 강민규. (2022). 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT)를 활용한 미시적 폭염 취약성 평가에 관한 연구. 국토계획. 57(5). pp.215-234

- 민간자동관측시스템 자료를 활용한 도시열섬 공간 분포 특성 연구<sup>22)</sup>

황희수와 강정은(2020)은 도시열섬과 도시오염섬의 공간 분포 특성 분석을 위해 KT에서 측정한 민간자동기상관측시스템 자료를 활용하였다. 분석 방법은 대기온도 데이터를 공간보간 방법으로 보정 이후, 30m×30m 격자단위로 공간분석을 실시하였다. 분석 결과 도시열섬의 대표적인 지역으로는 주거취약지역과 공업지역들이 포함되었다. 주거취약지역으로는 주요 정책이주지가 포함되어있으며, 이 지역은 소규모 필지에 건축물 밀도가 높은지역이었다.

도시열섬지역으로 도출된 지역들은 교통량이 많고, 공업지대로, 다른지역 평균온도 보다 약 2℃ 정도 높게 나타났다. 대기온도를 기준으로 도시열섬과 도시오염섬이 함께 나타나는 지역은 주로 건축물의 밀도가 높아 대기오염물질과 인공배열이 순환되지 않고 정체되며, 주민들의 경제적·사회적 취약성이 높아 열환경 악화 문제 발생시 대응 능력이 상대적으로 낮다.



[그림 2-14] 도시열섬 지역과 도시열섬 및 도시오염섬 동시발생 지역

출처: 황희수, 강정은. (2020). 위성영상과 민간자동관측시스템 자료를 활용한 도시열섬과 도시오염섬의 공간 분포 특성 - 부산광역시를 대상으로 -. 한국지리정보학회지. 23(3). p.107, p.109

- 홍콩 도시열섬개발에 대한 기후적 효과 연구<sup>23)</sup>

Zheng *et al.* (2023)은 10년(2002-2012) 동안 도시 관측소 4개소, 농촌 관측소 1개소, 바람 관측소 1개소의 1시간 간격으로 수집한 기상 데이터를 기반으로 도시열섬현상과 홍콩의 기후적 요인이 도시열섬에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

- 22) 황희수, 강정은. (2020). 위성영상과 민간자동관측시스템 자료를 활용한 도시열섬과 도시오염섬의 공간 분포 특성 - 부산광역시를 대상으로 -. 한국지리정보학회지. 23(3). pp.100-119
- 23) Zheng, Yingsheng., Li, Wenjie, Fang, Can., Feng, Biyin., Zhong, Qiru. & Zhang, Dongxu.. (2023). Investigating the Impact of Weather Conditions on Urban Heat Island Development in the Subtropical City of Hong Kong. *Atmosphere*. 14(2). 257. pp.1-17

UHI 형성에 미치는 영향 분석을 위해 기상 조건(구름의 양, 풍속, 바람의 방향, 상대습도, 기온)과 UHIpre-max (전일 도시 열섬 최대 강도)와 UHI 빈도 분포를 분석하였다. 이중 기온자료와 UHI 분석결과, 여름철 일평균 27°C 이상일 때 6°C 이상의 도시열섬현상강도가 나타났으며, 연간적으로는 25°C 이상인 여름철에 2-4°C 정도 도시열섬강도가 집중되는 것으로 나타났다. 연간 데이터를 기반으로 한 다중회귀분석 결과, 기온과 도시열섬강도 사이에는 음의 상관관계로 나타났다. 그러나, 여름철에는 기온이 UHImax와 양의 상관관계를 보였으며, 이는 더운 여름날이 도시 열섬의 위협을 더 심각하게 가져온다는 것을 의미한다.

[표 2-15] 도시열섬현상 다중회귀분석 결과

UHImax in summer using stepwise MLR	Parameter Estimates					
	Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob >  t	VIF
	Intercept	-0.10	0.67	-0.15	0.8807	-
	Air Temp.	0.14	0.02	9.12	<0.0001 *	1.53
	UHIpre-max	0.29	0.03	11.18	<0.0001 *	1.12
	Wind SPD	-0.21	0.03	-6.83	<0.0001 *	1.01
	RH	-0.02	0.004	-6.04	<0.0001 *	1.46
UHImax of the whole year using tepwise MLR	Parameter Estimates					
	Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob >  t	VIF
	Intercept	5.74	0.17	34.75	<0.0001 *	-
	UHIpre-max	0.38	0.01	29.86	<0.0001 *	1.31
	CLD	-0.19	0.01	-17.84	<0.0001 *	1.85
	RH	-0.03	0.002	-14.17	<0.0001 *	2
	Wind SPD	-0.37	0.03	-14.29	<0.0001 *	1.15
	Air Temp.	-0.008	0.003	-2.45	<0.0001 *	1.14

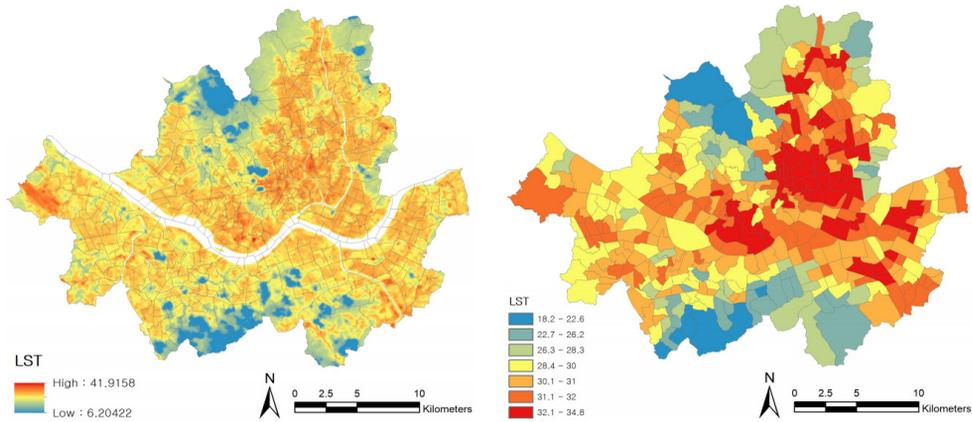
출처: Zheng, Yingsheng., Li, Wenjie, Fang, Can., Feng, Biyin., Zhong, Qiru. & Zhang, Dongxu.. (2023). Investigating the Impact of Weather Conditions on Urban Heat Island Development in the Subtropical City of Hong Kong. *Atmosphere*. 14(2). 257. p.12

## ■ LST(Land Surface Temperature) 분석 연구

- 근린환경과 도시열섬현상과의 상호관계 연구<sup>24)</sup>

고동원과 박승훈(2019)은 서울시의 물리적 환경특성 및 인구 및 사회·경제적 특성을 포함한 근린환경특성과 도시열섬의 연관성을 분석하였다. 공간정보시스템을 활용하여 Landsat 8 고해상도 위성영상 자료를 기반으로 도시열섬을 측정하였고, 도시열섬은 행정동 간 공간적 자기상관성을 나타냄으로 공간계량모형을 사용하였다. 지표면 온도는 도시 열환경 위험도가 높은 여름 중 운량이 10%미만인 해당일자의 위성영상 데이터를 사용하였다.

24) 고동원, 박승훈. (2019). 근린환경특성과 도시열섬현상과의 상호관계에 관한 연구. 한국도시계획학회지. 20(3). pp.55-67



[그림 2-15] 서울시 지표면온도(LST) 분포 현황

출처: 고동원, 박승훈. (2019). 근린환경특성과 도시열섬현상과의 상호관계에 관한 연구. 한국도시계획학회지. 20(3), p. 61

공간적 자기상관성 분석결과, Moran's I값과 z-score값이 각각 0.40, 20.76으로 공간적 자기상관성을 나타내고 있다. 이를 제어하기 위해 인접 모서리나 변 모두를 인접하는 경우로 고려하는 Queen contiguity 방법으로 공간가중치를 적용한 공간계량모형을 사용하였다. 공간계량모형 분석 결과, 인구밀도, 주거지역 비율, 버스정류장 밀도는 도시열섬현상에 부정적 영향을 미치는 주요 요인으로 나타났으며, 반면 주거용 건물 연면적, NDVI는 도시열섬현상을 완화하는 주요 요인으로 나타났다.

- 도시화와 도시열섬효과 상관관계 연구<sup>25)</sup>

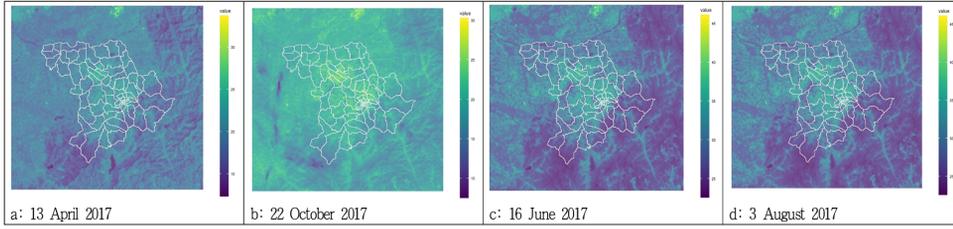
김미경 외(2014)는 세종시를 대상으로 도시화의 정도와 도시열섬효과를 파악하였고 도시화와 지표면온도와의 상관관계를 분석하였다. Landsat 영상을 활용하여 NDVI, NDBI, UI와 지표면 온도를 산출하고, TVI를 통해 도시열섬을 분석하였다. TVI 지수가 높을수록 열섬현상의 강도가 높음을 의미한다. 분석 결과, 과거에는 산업단지지역에서 열섬현상이 강하게 나타났지만, 최근에는 정부청사 및 행정중심복합도시 건설지역의 열섬현상이 강하게 나타났다.

- 핫스팟 분석을 통한 도시열섬 취약지 특성 분석<sup>26)</sup>

고영주와 조기환(2020)은 도시열섬현상 밀집지역 도출을 위해 Landsat 영상을 활용하여 LST를 도출하고 Moran's I 분석과 Getis-Ord Gi 분석을 통해 핫스팟(온도가 높은 지역) 분석을 실시하였다.

25) 김미경, 김상필, 김남훈, 손홍규. (2014). LANDSAT 영상을 이용한 세종특별자치시의 도시화와 열섬현상 분석. 대한토목학회논문집. 34(3). 174. pp.1,033-1,041

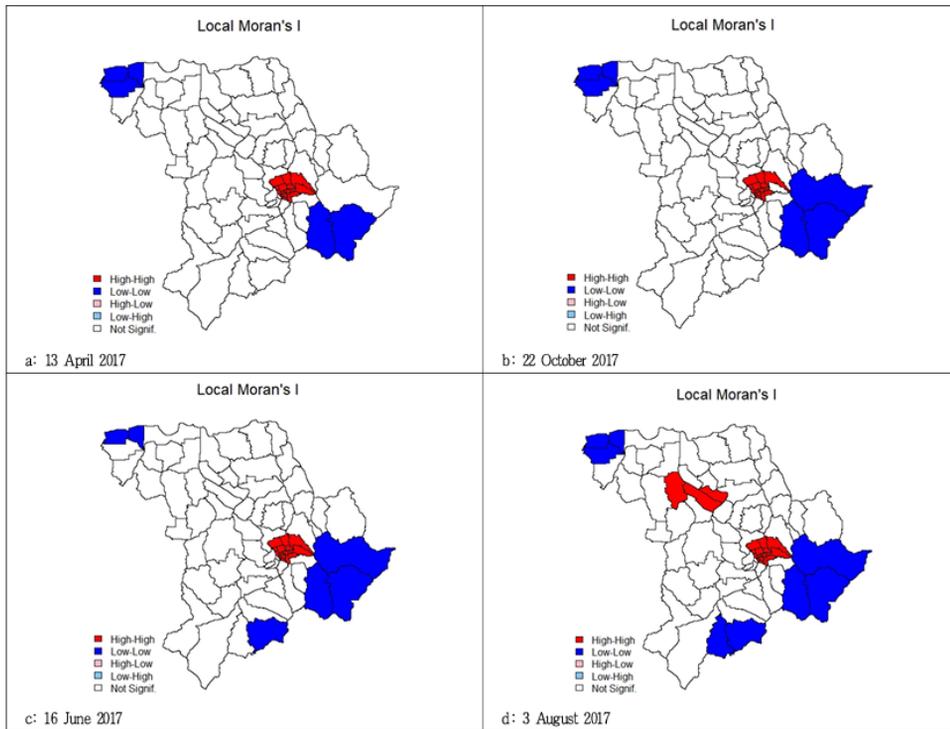
26) 고영주, 조기환. (2020). 핫스팟 분석을 이용한 도시열섬 취약지 특성 분석 - 전주시를 대상으로 -. 한국조경학회지. 48(5). pp.67-79



[그림 2-16] LST 분포도

출처: 고영주, 조기환. (2020). 핫스팟 분석을 이용한 도시열섬 취약지 특성 분석 - 전주시를 대상으로 -. 한국조경학회지. 48(5). p.72

분석결과 핫스팟은 과거 전주시 구도심 지역이며, 콜드 스팟(온도가 낮은 지역)은 전주시 외곽에 분포하고 있다. 한 곳은 관광지가 밀집되어 있는 지역으로 유동인구가 많은 지역이었으며, 다른 한 곳은 주거시설과 산업단지 지역으로 분류할 수 있다. 이들 지역의 공통점은 고층 건물이 거의 없는 저층 밀집지역이며, 녹지시설이 부족한 지역이라는 점이다.



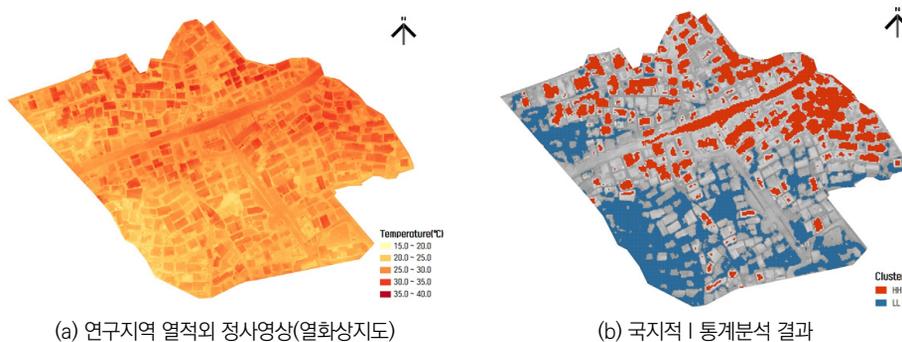
[그림 2-17] 시기별 Moran'i 분석 결과

출처: 고영주, 조기환. (2020). 핫스팟 분석을 이용한 도시열섬 취약지 특성 분석 - 전주시를 대상으로 -. 한국조경학회지. 48(5). p.73

- UAV 기반 열환경 분석을 통한 폭염 대응형 공간전략 분석<sup>27)</sup>

김건형 외(2020)는 도시구조적으로 열환경에 취약한 공간을 도출하기 위해 도시기후구역 선정 및 세분류 토지피복도를 구축하고, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 기반 열적외카메라로 정사영상을 구축하여, 도시기후구역 유형과 토지피복 유형별 표면 온도를 분석하고 표면 온도 영향요인을 파악하였다.

도시기후구역 유형별 표면 온도를 분석한 결과, 저층건물 고밀지역과 포장된 도로의 표면 온도 평균값과 최댓값이 모두 높게 나타나 우선적으로 열환경 개선이 필요한 구역으로 나타났다. 세분류 토지피복 유형별 표면 온도 분석 결과, 도로, 교육·행정시설, 상업·업무시설, 단독주거지역, 기타 나지, 경지정리가 안 된 밭, 공동주거지역, 기타초지 순으로 표면 온도가 높게 나타났다. 이후, 두 표면온도값에 대해 자기상관성 분석을 실시하였다. 국지적 I 통계분석(Local Moran I)을 실시하였으며, 그 결과, HH지역에 해당하는 도시기후구역은 저층건물 고밀지역과 포장된 도로로 나타났다.



[그림 2-18] 도시구조적 열환경 취약 공간

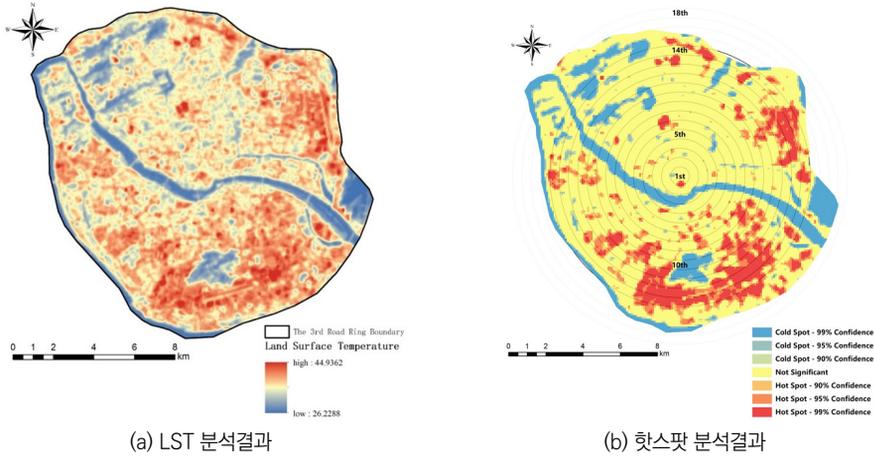
출처 : 김건형, 강영은, 손승우, 김동우, 유재진. (2020). UAV 기반 도시 열환경 분석을 통한 폭염 대응형 공간 전략: 부산시 영도구 도시재생사업을 대상으로. *한국지리학회지*. 9(1). p.197, p.199

- 도시열섬효과에 대한 공간적 분포 정량적 분석 연구<sup>28)</sup>

You *et al.* (2021)은 중국 푸저우 중부 지역의 도시열섬현상 공간적 패턴에 대해 Moran'I 분석과 핫스팟 분석을 통해 도출하였다. LST 분석 결과, 지표면 온도(LST)는 남동쪽이 고온이고 북서쪽이 저온인 경사층 구조를 나타냈다. 핫스팟 분석 결과, 산업단지 지역으로 나타났으며, 차순위 핫스팟 지역으로는 고밀도 주거지역과 대규모 상업지역으로 나타났다.

27) 김건형, 강영은, 손승우, 김동우, 유재진. (2020). UAV 기반 도시 열환경 분석을 통한 폭염 대응형 공간 전략: 부산시 영도구 도시재생사업을 대상으로. *한국지리학회지*. 9(1). pp.191-203

28) You, Meizi., Lai, Riwen., Lin, Jiayuan. & Zhu, Zhesheng. (2021). Quantitative Analysis of a Spatial Distribution and Driving Factors of the Urban Heat Island Effect: A Case Study of Fuzhou Central Area, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18(24). 13088. pp.1-19



[그림 2-19] LST 및 핫스팟 분석 결과

출처: You, Meizi., Lai, Riwen., Lin, Jiayuan. & Zhu, Zhesheng. (2021). Quantitative Analysis of a Spatial Distribution and Driving Factors of the Urban Heat Island Effect: A Case Study of Fuzhou Central Area, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18(24). 13088. p.9, p.10

■ ENVI-met (CFD)

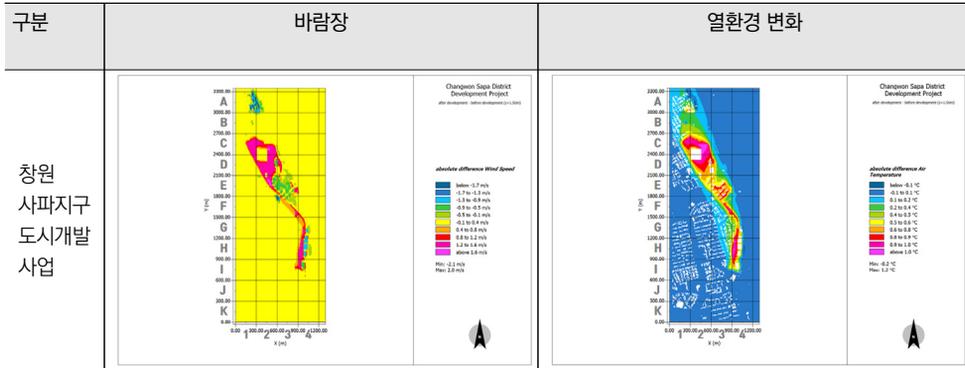
- ENVI-met를 활용한 도시개발사업에 따른 열환경 변화 분석<sup>29)</sup>

김종성과 강정은(2022)은 도시개발사업에 열환경 이슈를 반영하기 위해 열환경 취약지역에서 개발을 진행하고 있는 사업들 가운데, 열환경 측면을 고려하도록 권고한 도시개발사업을 사례로 공간구조, 건물 배치형태, 토지이용 및 토지피복의 변화 등 다양한 공간계획에 따른 열환경 및 미기후적 변화를 사전에 비교하는데 효과적인 ENVI-met 모델을 활용하여, 대상지 두 곳의 개발 전후 바람장 및 열환경 변화를 비교분석 하였다.

[표 2-16] 연구대상지의 바람장 및 열환경 변화

구분	바람장	열환경 변화
창원 국가 산업단지 개발사업		

29) 김종성, 강정은. (2022). ENVI-met를 활용한 도시개발사업에 따른 열환경 변화 분석 : 창원시를 대상으로. 한국기후변화학회지. 13(5), pp.659-677

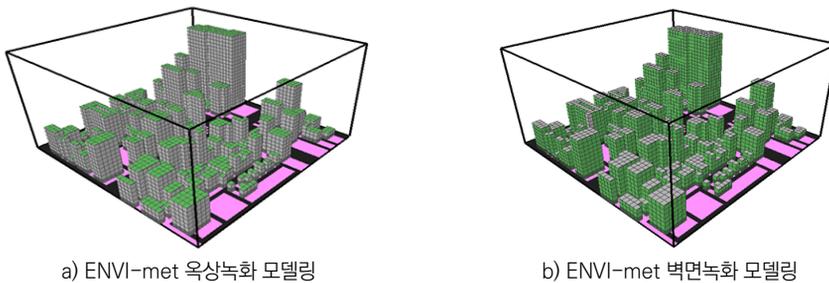


출처: 김중성, 강정은. (2022). ENVI-met을 활용한 도시개발사업에 따른 열환경 변화 분석: 창원시를 대상으로. 한국기후 변화학회지. 13(5). pp.669-672

분석 결과, 두 지역 모두 개발사업 이후 평균기온이 증가하지만, 창원국가산업단지 개발사업의 경우, 바람길을 고려한 건축물 배치, 중앙공원 조성 등 계획이 잘 반영되어 ENVI-met 분석 결과에도 잘 나타났다. 반면, 창원 사파지구 도시개발사업의 경우 공동주택단지로 바람이 통과하지 못하여 공기순환이 저해되고 체육공원, 주차장, 단독주택용지 등이 함께 조성되면서 포장면적이 증가하여 지역 전반의 기온이 상승하고 열환경이 악화되는 것으로 나타났다.

- 도시열섬현상 완화를 위한 입체녹화 기온 저감 효과 분석<sup>30)</sup>

이신영 외(2024)는 테헤란로와 강남역 일대의 건축물의 구조, 재질, 옥상 및 벽면 사용 가능성을 평가하고, 옥상녹화, 벽면녹화, 수직정원 등의 입체녹화기법을 적용하여 ENVI-met 시뮬레이션 프로그램을 통해 기온변화 모델링을 실시하였다.



a) ENVI-met 옥상녹화 모델링

b) ENVI-met 벽면녹화 모델링

[그림 2-20] ENVI-met 녹화 모델링

출처: 이신영, 김용성, 이남규. (2024). 도시 열섬 현상 완화를 위한 입체녹화의 기온 저감 효과 분석. 한국공간디자인학회 논문집. 19(7). 100. pp.487-488

모델링 결과, 옥상녹화는 복사열 억제와 대기 온도 저감에 가장 효과적이었으며, 특히 도심의 열 축적을 방지하는 데 기여하였다. 벽면녹화는 옥상녹화에 비해 열 저감 효과는 다소 낮았으나, 복사열 반사와 증발산을 통해 보조적인 역할을 하였다.

30) 이신영, 김용성, 이남규. (2024). 도시 열섬 현상 완화를 위한 입체녹화의 기온 저감 효과 분석. 한국공간디자인학회 논문집. 19(7). 100. pp.481-496

옥상녹화는 기준 대기 온도보다 낮은 온도를 기록하였으며, 벽면녹화는 불규칙하게 저감효과를 보였다. 두 방식을 비교했을 때, 옥상녹화가 벽면녹화보다 모든 시간대에서 저감효과를 보였으며, 특히, 오후와 저녁시간대 큰 저감효과를 보였다.

[표 2-17] 기준 및 옥상 녹화 대기온도 비교 분석표

시간대	새벽 (00:00 ~ 06:00)	오전 (06:00 ~ 12:00)	오후 (12:00 ~ 18:00)	저녁 (18:00 ~ 00:00)
기준 최고 온도 (°C)	30.639	34.520	37.372	35.178
옥상녹화 최고 온도 (°C)	29.406	33.821	35.520	33.788
벽면녹화 최고 온도 (°C)	29.568	34.724	36.895	35.152
옥상 vs 기준 온도 차이 (°C)	1.233	0.699	1.852	1.390
벽면 vs 기준 온도 차이 (°C)	1.071	-0.204	0.477	0.026
옥상 vs 벽면 온도 차이 (°C)	-0.162	-0.903	-1.375	-1.364

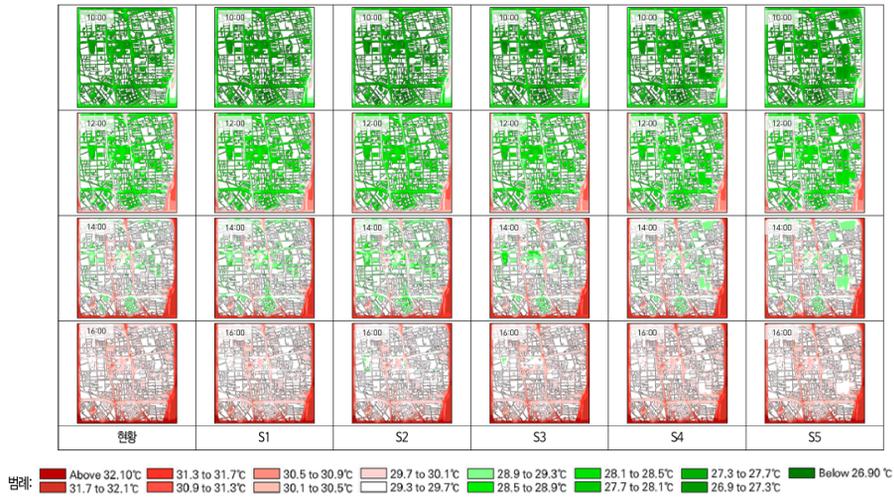
출처: 이신영, 김용성, 이남규. (2024). 도시 열섬 현상 완화를 위한 입체녹화의 기온 저감 효과 분석. 한국공간디자인학회 논문집. 19(7). 100. p.490

- ENVI-met 시뮬레이션을 통한 도시숲 조성으로 인한 열환경 개선 효과 분석<sup>31)</sup>

임재연 외(2025)는 대구광역시 중구의 동서방향 1.5km, 남북방향 1.5km으로, 총 면적 2.25km<sup>2</sup>의 범위를 설정하여 도시숲 조성 시나리오를 작성하고 열저감 효과를 정량적으로 분석하였다. 5가지 시나리오를 설계하여 분석하였으며, 시나리오 S1과 S2는 가로수의 교목 밀도 증가에 따른 열환경 개선 정도를 비교하기 위한 시나리오이다. S1은 가로에 교목 밀도를 증가시켰으며 가능한 보도는 다열식재를 적용하였고, S2는 가로에 추가로 교목을 식재하여 더 많은 범위의 가로 열환경을 개선하고자 하였다. S3은 공원 및 학교숲의 식재면적 및 수관피복률을 증가시켜 열환경 개선정도를 확인하기 위한 시나리오로, 분석범위 내에 존재하는 공원과 학교숲의 피복을 잔디로 변경하고 교목을 추가 식재하였다. S4와 S5는 재개발예정지의 일부(S4: 30%, S5: 50%)를 공원으로 조성하여 도시의 녹지 면적을 늘리는 경우로, 추가되는 녹지 면적의 차이에 따른 열환경 개선 정도를 확인하고자 하였다.

시뮬레이션 결과, 도시의 가로수 교목 밀도를 증가시킨 S1, S2가 상대적으로 높은 기온 저감효과를 보였다. S3에서는 0.1°C 이상의 저감이 나타나 식재 밀도 증가가 인근 지역까지 기온 저감 영향을 미쳤음을 확인하였다. 또한 S4, S5에서 재개발예정지에 더 넓은 녹지를 생성한 S5 시나리오의 기온이 더 큰 저감량을 가졌으며, 시나리오 적용지역의 단면을 비교한 결과, 수평수직방향으로 더 큰 저감효과를 나타냈다. 이를 통해 가로수를 추가하는 시나리오가 저감 효과가 크며, 가로수 추가 구성에 따라 비례하여 온도 저감에 효과적인 것으로 나타났다.

31) 임재연, 손정민, 박주현, 엄정희. (2025). ENVI-met 시뮬레이션을 통한 도시숲 조성 시나리오별 열환경 개선 효과 분석. 한국조경학회지. 53(1). 227. pp.14-25



[그림 2-21] 도시숲 조성을 통한 열환경 개선 효과 시나리오별 기온

출처: 임재연, 손정민, 박주현, 엄정희. (2025). ENVI-met 시뮬레이션을 통한 도시숲 조성 시나리오별 열환경 개선 효과 분석. 한국조경학회지. 53(1). 227. p.19

- ENVI-met을 활용한 바람길 숲 조성방식에 따른 미기후 개선효과 비교<sup>32)</sup>

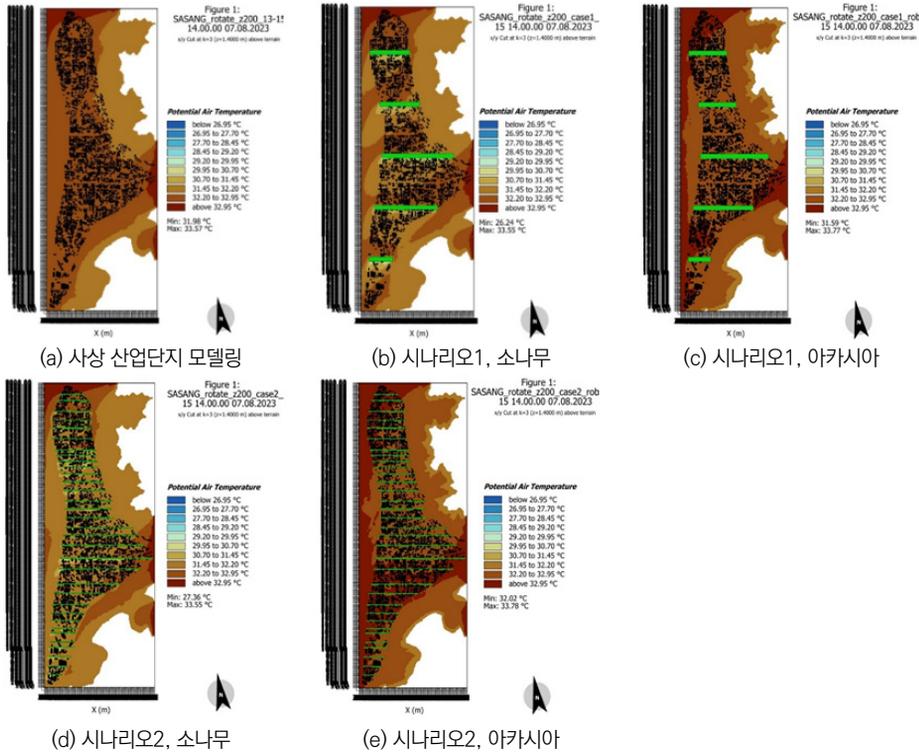
조종훈과 반권수(2025)는 ENVI-met을 활용하여 부산광역시 노후 공업단지를 대상지역으로 바람길 숲 조성방식에 따른 열환경 개선 효과를 비교하였다. 대상지의 물리적 환경을 모델링하여 식재 수종과 배치방식을 구분하여 시나리오를 설정하여 비교 분석을 실시하였다. 첫번째 시나리오는 폭을 넓게 배치하며, 간격을 크게 두는 방식이고, 두 번째 시나리오는 폭과 간격을 좁게 배치하는 방식으로 구성하였다. 분석 결과 좁은 폭으로 녹지를 배치한 시나리오 2가 상대적으로 열쾌적성 저감 효과에 더 유리한 것으로 나타났다.

[표 2-18] 미기후 개선효과 비교 시나리오 구성

	Scenario 1		Scenario 2	
Tree	Pine	Robinia	Pine	Robinia
Tree size (m)	7×7×15	7×7×12	7×7×15	7×7×12
y-axis	6		1	
Schematic diagram				
Grid	150×400×100			
Pixel (m)	20×20×2			

출처: 조종훈, 반권수. (2025) ENVI-met을 활용한 부산지역 노후공업단지 바람길숲 조성 방식에 따른 미기후 개선효과 비교. Ecology and Resilient Infrastructure. 12(1). p.29

32) 조종훈, 반권수. (2025) ENVI-met을 활용한 부산지역 노후공업단지 바람길숲 조성 방식에 따른 미기후 개선효과 비교. Ecology and Resilient Infrastructure. 12(1). pp.26-33



[그림 2-22] 미기후 개선 시나리오별 결과

출처: 조종훈, 반권수. (2025) ENVI-met을 활용한 부산지역 노후공업단지 바람길숲 조성 방식에 따른 미기후 개선효과 비교. Ecology and Resilient Infrastructure. 12(1). p.30

- ENVI-met 활용한 도시열섬현상 완화 방안 연구<sup>33)</sup>

Cortes *et al.* (2022)는 필리핀 만다우 지역에 가로수 식재, 개방형 공간 추가, 녹화 지붕 추가 등의 조합을 통한 도시열섬현상 완화효과를 분석하기 위해 ENVI-met을 활용하였다. 대상 지역은 A, B 두 지역으로 A지역은 거리 지역이며, B지역은 A지역 내 거리를 포함한 도시 개발 예정지(PUD)이다. A지역은 2개의 하위지역, B지역은 4개 하위지역으로 구분하였으며, 이 지역에 대한 시나리오를 만들어 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션 결과, 기온은 더 많은 도시 내 공간과 나무를 추가하면 평균 0.2°C, 녹색 지붕을 사용하면 평균 0.2°C-0.4°C까지 기온을 낮출 수 있고, 나무와 잔디, 녹색 지붕을 함께 사용하면 평균 0.1°C-0.3°C까지 기온을 낮출 수 있었다.

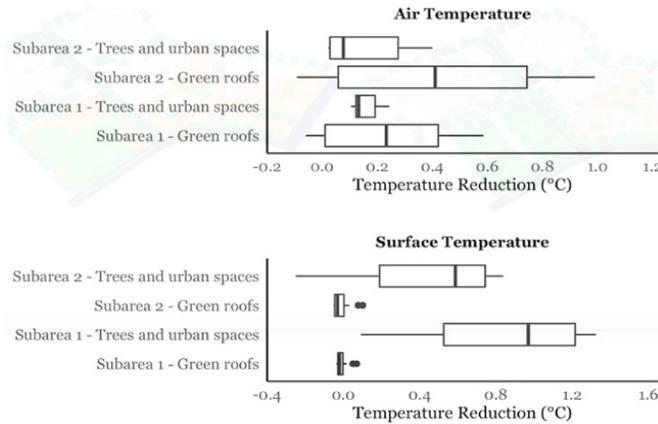
33) Cortes, Aiza., Rejuso, Arnold Jesfel., Santos, Justine Ace. & Blanco, Ariel.. (2022). Evaluating mitigation strategies for urban heat island in Mandaue City using ENVI-met. Journal of Urban Management. 11(1). pp.97-106

[표 2-19] 도시열섬현상 완화 시나리오

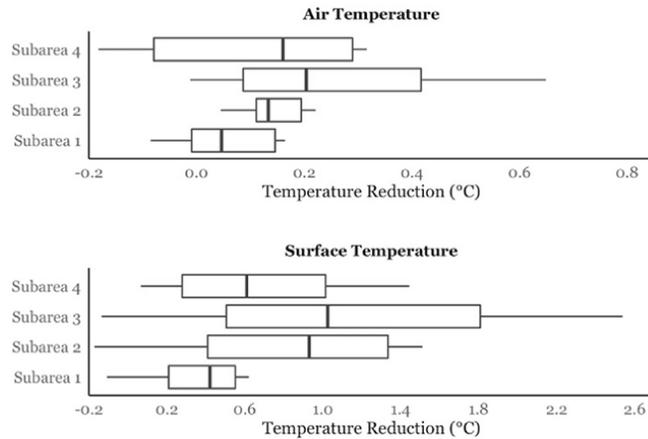
Site, Scenario	Description
A, scenario 1	기존 레이아웃 및 도시 상태; 130 개의 건물
A, scenario 2	10개의 건물을 열린 공간으로 교체, 10m 간격의 보도를 따라 282그루의 나무(모델 3) 추가
A, scenario 3	site Asc1와 유사하지만, 건물 지붕은 녹색 지붕으로 수정
B, scenario 1	기존 레이아웃 및 도시 상태; 249 건물
B, scenario 2	건물 지붕은 녹색 지붕으로 수정, 39 그루의 나무 (나무 모델 1, 4, 5의 조합) 및 잔디가 추가

출처: Cortes, Aiza., Rejuso, Arnold Jesfel., Santos, Justine Ace. & Blanco, Ariel.. (2022). Evaluating mitigation strategies for urban heat island in Mandaue City using ENVI-met. Journal of Urban Management. 11(1). p.99

지표면 온도의 경우, 도시 내 공간과 나무를 추가하면 지표면 온도는 평균 0.5°C-0.8°C까지 낮출 수 있는 반면 건물 옥상의 녹색지붕 전환만으로는 지표면 온도에 영향을 미치지 못했다. 식생과 녹색지붕을 함께 적용할 경우, 지표면 온도는 평균 0.4°C-1.1°C까지 낮출 수 있었다.



(a) site A - M. C. Briones street



(b) site B - PUD in Mandaue

[그림 2-23] 도시열섬현상 완화 시나리오별 대기온도 및 지표 온도 차이

출처: Cortes, Aiza., Rejuso, Arnold Jesfel., Santos, Justine Ace. & Blanco, Ariel.. (2022). Evaluating mitigation strategies for urban heat island in Mandaue City using ENVI-met. Journal of Urban Management. 11(1). p.101, p.103

선행연구 검토 결과, 광역시 또는 시 단위에서는 주로 위성영상(Landsat 8) 과 기상관측자료(AWS)가 주로 활용되었으며, RBF, IDW 보간법이나 Moran's I, 핫스팟 분석 등 공간통계 기법을 이용하여 도시 전체의 열 분포 특성을 규명하였다. 반면, 가로구역, 마을, 개발구역 단위에서는 UAV 열영상이나 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 건물, 포장, 녹지의 미세 기후 영향을 분석하였다. 이러한 결과는 연구의 목적과 공간 규모에 따라 활용 데이터 및 분석 방법이 상이함을 보여준다.

종합하면, 대체적으로 연구 대상 지역의 규모가 커질수록 위성자료와 보간법을 중심으로 활용되었고, 대상 지역의 규모가 작아질수록 현장 관측과 시뮬레이션 중심으로 연구가 이루어진 것을 알 수 있다.

[표 2-20] 도시열섬현상 분석 데이터 및 분석방법

구분	대상 지역 규모	활용데이터	분석방법
1	광역시 단위	AWS	RBF 보간법
2	관측지점	AWS	-
3	행정동 단위	S-Dot	군집분석
4	30m*30m 격자	민간자동관측시스템	IDW 공간보간법
5	관측지점	Air temperature	-
6	행정동 단위	Landsat 8	Moran's I
7	광역시 단위	Landsat 8	TVI 분석
8	시 단위	Landsat 8	핫스팟 분석, Moran's I
9	마을 단위	UAV 열적외 카메라 정사영상	핫스팟 분석, Moran's I
10	지역 단위	Landsat 8	핫스팟 분석, Moran's I
11	개발구역 단위	-	ENVI-met
12	거리 단위	-	ENVI-met
13	2,25km <sup>2</sup> (1.5*1.5) 범위	-	ENVI-met
14	산업단지 단위	-	ENVI-met
15	A: 거리, B: 개발구역 단위	-	ENVI-met

출처: 연구진 작성

### 3. 소결

#### ■ 도시기후대(LCZ)를 활용한 폭염 위험 지역 도출 필요성

LCZ는 건축 구조, 토지 피복, 표면 특성 등을 기준으로 도시 환경을 정량적으로 분류하여, 객관적이고 일관된 기준을 제공한다. 특히, 세분화된 공간 단위에서 폭염에 위험한 지역을 분류할 수 있기 때문에 정책 대상 지역을 보다 정밀하게 타겟팅할 수 있다는 장점이 있다. 이에 따라 도시계획과 연계하여 폭염 위험지역을 분석하고 대안을 마련하려는 연구에 적용가능성이 높다.

이 같은 특성 때문에 다양한 국내·외 연구들이 도시 폭염 분석을 위해 LCZ를 사용하고 있는 것으로 확인되었다. LCZ 유형에 따라 폭염 위험성이 다르게 나타나고 있으며, 전 세계적으로 비교 분석이 가능하다는 점에서 활용가치가 높다. 다만, 분석 지역의 위도, 경도 등 차이로 인해 태양고도나 방향각 등이 달라져 폭염의 발생 양상이 다르게 나타나며, 폭염 위험성 분석에 사용되는 온도데이터가 달라 폭염 위험성이 높은 LCZ 유형은 다르게 나타나고 있다. 즉, 기존 연구를 그대로 적용하기보다는 본 연구 대상지에 대해 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다. 결과적으로 LCZ를 활용하여 폭염 위험 지역 분석을 한다면 다음과 같은 장점을 확보할 수 있다. 첫째, 표준화된 방식으로 공간을 분류하여 일관성 있는 열환경 분석이 가능하다. 둘째, 도시계획에서 사용가능한 수준의 해상도로 폭염 위험성 분석이 가능하다. 셋째, 폭염 위험성에 대한 해외 다른 도시와의 비교 및 협력 연구가 가능하다.

#### ■ CNN 기반 LCZ 분류 필요성

최초의 LCZ 분류 방식은 도시 환경을 정량적으로 분석하고, 도출된 값을 바탕으로 LCZ 유형을 선정할 수 있게 제안되었다. 그러나 이 같은 방식은 도시 전체의 LCZ를 분류하기 위해 과도한 노동력과 시간이 투입될 것이다. 이에 따라 LCZ를 간편하게 분류할 수 있도록 LCZ 샘플 데이터와 위성영상 데이터를 이용한 모델 학습 및 적용 방식이 제시되고 있다.

가장 일반적으로 사용되는 방식은 WUDAPT에서 제공하는 LCZ 분류 모델을 사용하는 것이다. WUDAPT의 LCZ 분류 방식은 픽셀기반 분류 방식으로 기존 원격탐사 분야에서 일반적으로 사용되어온 방식을 적용하였다. WUDAPT는 랜덤포레스트 모델을 이용하여 LCZ 분류 모델을 학습시키는 것으로 확인되었다. 그러나, 최근 픽셀 기반의 분류보다는 LCZ를 하나의 이미지로 인식하여 CNN 모델에 적용하는 경우 정확도가 더 높아진다는 결과들이 나오고 있다. 이에 본 연구에서도 CNN을 활용하여 LCZ를 분류하고자 한다.

#### ■ ENVI-met을 통한 미기후 분석 필요성

공간단위 폭염 위험성 분석을 위해 다양한 입력자료와 방법론들이 활용되고 있다. 관련 연구들을 조사한 결과, 폭염 위험성 분석에는 공간 규모에 따른 경향성이 나타나고 있다. 상대적으로 넓은 지역인 시 단위 이상의 분석을 위해서는 대기온도 측정 데이터인 AWS나 인공위성의 열적외선 밴드 영상을 활용하고 있다. 상대적으로 작은 공간인 블록 단위, 가로 단위 수준에서 정밀한 분석을 수행할 때에는 ENVI-met과 같은 미기후 분석 모델을 사용하고 있다.

블록 단위의 미기후 시뮬레이션 연구에서 ENVI-met은 공간 해상도 측면에서 건축물 규모, 표면재질 등 세부적인 물리환경 요소를 반영할 수 있다. 이에 따라 개별 건축물 단위 혹은 가로 단위의 폭염 대응 방안을 마련하고 도입할 수 있는 근거를 제시할 수 있다. 또한, 복사에너지, 바람, 수증기압 등 세부적인 변수를 활용하여 정확한 결과를 제시해주기 때문에 많은 연구에서 활용중인 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서도 건축·공간 폭염 위험성 분석을 위해 ENVI-met을 활용하고자 한다.

## 제3장

# 빅데이터 기반 도시기후대 분석

1. 분석 개요
2. 서울시 LCZ 도출
3. 폭염 위험 LCZ 유형 도출

## 1. 분석 개요

서울시 LCZ 분석 프로세스는 크게 세 단계로 구분할 수 있다. 첫째로 데이터 수집 및 가공이다. 분석의 기초 자료로는 Landsat 및 Sentinel과 같은 다중 스펙트럼 위성영상과 서울시 지역의 LCZ 샘플 데이터를 활용하였다. 위성 데이터는 기하보정과 방사보정 등 전처리 수행이 필요하며, LCZ 샘플은 항공사진 및 로드뷰 정보를 기반으로 도출하였다. 또한, 분석을 위해 데이터 해상도 및 공간범위 등 영상과 샘플 간의 정합성을 확보하고, CNN 모델 학습에 적합한 형태의 훈련 데이터셋을 구축하였다.

둘째로 CNN 기반의 LCZ 분류 모델을 학습시켰다. 구축된 학습 데이터셋을 기반으로 작동하는 CNN 모델을 설계하였다. 기본적으로 10m×10m 픽셀로 이루어진 100m×100m 패치 단위로 LCZ 클래스를 분류하도록 설계하였다. 학습된 모델은 검증 데이터셋과 테스트 데이터셋을 활용하여 성능을 평가하였으며, 정확도 및 혼동행렬(confusion matrix) 분석을 통해 분류의 정확도를 평가하였다. 이를 통해 도출된 LCZ 분류 모델을 이용하여 서울시의 LCZ 클래스를 도출할 수 있도록 하였다.

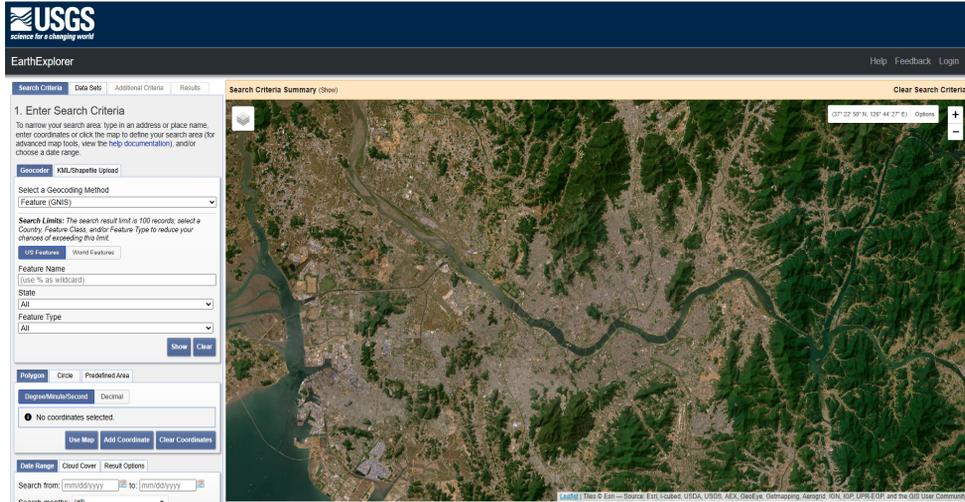
마지막으로 훈련된 CNN 모델을 서울시 지역에 적용하였다. 10m×10m 해상도의 위성영상을 입력자료로 모델을 구동하였으며, 결과적으로 100m×100m 해상도의 서울시 LCZ 지도를 도출하였다. 도출된 서울시 LCZ는 기존의 LCZ 샘플과 비교 분석을 통해 분류 정확성을 검토하였으며, 이를 바탕으로 LST와 비교를 위한 데이터셋을 확보하였다.

## 2. 서울시 LCZ 도출

### 1) 입력데이터 구득 및 전처리

#### ■ 위성영상 데이터 구득

서울시의 LCZ 분석을 위해 Landsat 8 위성영상 데이터를 수집하였다. Landsat 8은 미국 NASA에서 개발 및 발사한 위성으로, 2013년 발사된 이후 최근까지 운용되고 있다. Landsat 8은 16일의 재방문 주기를 가지고 있어 모든 날짜의 영상을 취득하지는 못한다. 그러나 30m 해상도의 OLI (Operational Land Imager) 센서와 100m로 취득 이후 30m 해상도로 변환하여 제공하는 TIRS (Thermal Infrared Sensor)센서를 가지고 있다.



[그림 3-1] USGS earthexplorer의 데이터 검색 화면

출처: U.S. Geological Survey. Earth Explorer. <https://earthexplorer.usgs.gov> (검색일: 2025.4.13.)

또한, 본 연구에서는 USGS earthexplorer<sup>34)</sup>에서 제공하는 L2SP (Level-2 Surface Reflectance and Surface) 자료를 사용하였다. L2SP 자료는 최초 취득된 위성영상자료에 USGS에서 정사보정, 대기보정, 지표면온도보정을 수행한 데이터이다. 해당 데이터는 대기중

34) U.S. Geological Survey. Earth Explorer. <https://earthexplorer.usgs.gov> (검색일: 2025.4.13.)

산란과 흡수를 보정하였기 때문에 실제 지표면 물체의 반사율을 최대한 반영하며, 다양한 분석에 바로 사용 가능한 자료이다.

Landsat 8과 같은 위성 영상은 날씨의 영향으로 모든 취득 데이터를 이용하기에는 어려움이 따른다. 즉, 16일에 한 번 서울시 데이터를 수집하나, 데이터 수집 시점인 오전 11시에 서울시 상공에 구름이 있다면 해당 부분의 데이터는 수집되어도 사용할 수 없는 데이터이다. 이에 따라 구름이 적은 시점의 데이터를 수집해야한다. USGS에서 제공하는 정보를 활용하여 영상 내 구름 비율이 10%미만인 날짜를 우선적으로 선별하였다.

최종 분석에는 여름 시점의 데이터 2024년 8월 29일과 겨울 시점 데이터인 2024년 12월 19일에 촬영된 Landsat 8 데이터로, Path 116, Row 034 데이터를 사용하였다. 본 연구는 각 데이터셋에서 B1-B7, B10 밴드 영상을 사용하였다. 각 밴드는 서로 다른 파장대의 영상을 촬영하며, 영상의 파장대에 따라 다양한 방면으로 사용된다.

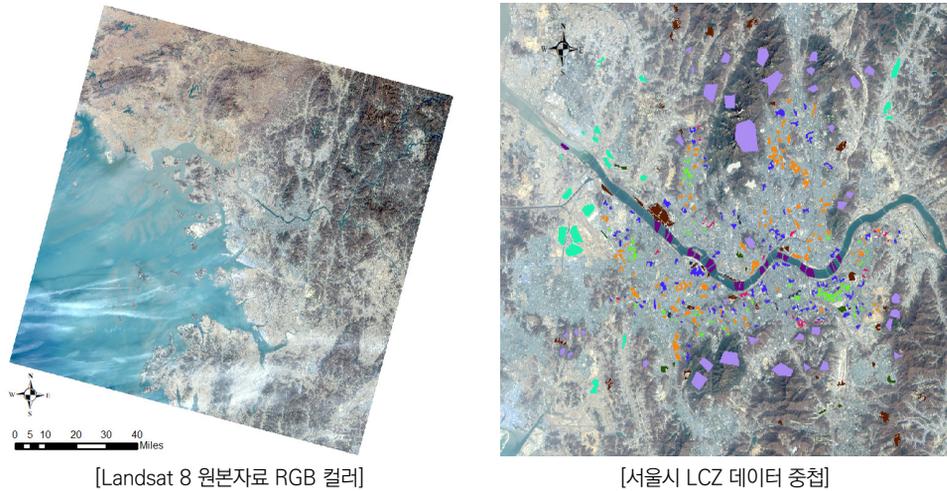
[표 3-1] 분석에 사용한 Landsat 8 밴드 설명

밴드	이름	파장( $\mu\text{m}$ )	주 활용 용도
B1	Coastal/Aerosol	0.43-0.45	연안, 에어로졸 감시
B2	Blue	0.45-0.51	수체, 대기 산란
B3	Green	0.53-0.59	식생 활력, 수체 식별
B4	Red	0.64-0.67	NDVI, 식생 분석
B5	Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	식생, 토양 수분
B6	SWIR 1	1.57-1.65	토양, 수분, 연소 지역
B7	SWIR 2	2.11-2.29	광물, 화재, 건조 지역
B10	Thermal Infrared (TIRS 1)	10.6-11.2	지표온도 분석

출처: 연구진 작성

B1은 연안·에어로졸(Coastal/Aerosol), B2는 파란색(Blue), B3는 녹색(Green), B4는 빨간색(Red), B5는 근적외선(NIR), B6·B7은 단파적외선(SWIR1·SWIR2), B10은 열적외선(TIRS)이다. 두 가지로 나누어 구분하면 사람 눈의 가시광 영역(Blue·Green·Red)에 해당하는 B2, B3, B4가 있고, 그 밖의 비가시광 영역에 해당하는 B1, B5, B6, B7, B10이 있다.

용도 측면에서 가시광 밴드(B2-B4)는 우리 눈에 보이는 것과 같이 합성하여 색상 대비를 통한 문체 판단에 주로 사용된다. 근적외선(B5)은 식물의 엽록소가 강하게 반사하는 특성을 이용해 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) 같은 식생지수 계산을 위한 핵심 요소이며, 작물의 생육상태 판단, 산림 건강도나 수분 스트레스 진단에 주로 활용된다. SWIR 밴드(B6, B7)는 수분 함량 분석에 주로 사용되며, 주요 예시로는 토양이나 식생 수분 함량, 산불 발생지역 탐지 등에 활용된다. 열적외선 B10은 지표에서 방출되는 열복사 에너지를 기록하기 때문에 지표면온도를 산출하는 데 사용된다. 이에 따라 도시 열섬 평가, 열 취약지역 분석, 지역별 열환경 변화 분석에 주로 사용된다.



[그림 3-2] 분석에 사용한 Landsat 8 데이터 및 LCZ 샘플  
출처: 연구진 작성

### ■ LCZ 샘플 데이터 구축

분석을 위해 모델 학습용 데이터가 필요하다. 모델 학습용 데이터는 Bechtel *et al.* (2015)이 제시한 방법론을 적용하였다. 분석대상 도시 지역에 대한 지식이 있는 연구자가 Stewart & Oke (2012)에서 정의한 LCZ 분류 기준(건물 높이, 밀도, 녹지 피복 등)을 토대로 각 LCZ 클래스에 해당하는 대표 지점을 식별하여 폴리곤 형태로 라벨링 한다. 이 방법론은 위성영상과 항공사진 등 원격탐사 자료를 기반으로 연구자가 시각적 해석을 수행하여 결과를 도출한다. 즉, Google Earth 등 고해상도 항공영상을 활용한 시각적 판독 방식으로 수행된다.

Stewart & Oke (2012)는 각 클래스별 10개 이상의 폴리곤 확보를 목표로 하며, 하나의 폴리곤은 100m<sup>2</sup> 이상이 되도록 샘플링하는 것을 제안하고 있다. 그리고 이러한 샘플링은 도시 및 자연형 LCZ 클래스 전체를 균형 있게 포함하도록 개수를 확보하는 것이 모델 학습에 있어 중요한 것으로 제시되고 있다(Yoo *et al.*, 2020). 구축된 LCZ 참조 폴리곤은 훈련용 학습 데이터로 활용되며, 각 폴리곤 내의 픽셀에서 위성 영상의 스펙트럼 정보를 추출하여 분류 모델 학습에 필요한 입력데이터 세트를 구축한다.

## 2) 입력데이터 가공

### ■ 격자 데이터 가공

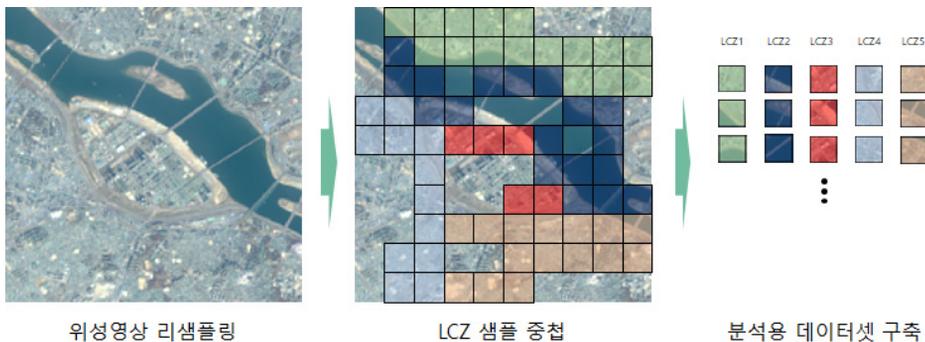
분석을 위한 Landsat 8 영상은 서울시를 포함하는 가로, 세로 50km 영역으로 추출하고, 10m와 100m의 두 가지 해상도로 리샘플링 하였다. Landsat 8 영상 자체는 가로, 세로가 각각

100km를 넘어 분석 시 연산소요가 커지기 때문에 연구 대상지인 서울시를 포함하는 영역만 남기는 작업을 수행하였다. 또한, CNN 분석을 위한 데이터셋 구축을 위해 10m와 100m 해상도 두 가지 형태로 데이터를 리샘플링하였다.

다음으로 LCZ 샘플 데이터를 CNN 학습을 위해 변환하였다. LCZ 샘플 데이터의 해상도와 원격탐사 데이터의 해상도를 동일하게 맞춰주기 위해 10m와 100m로 리샘플링 하였다. 리샘플링 과정에서 격자 간 위치를 동일하게 맞춰주기 위해 Arcgis10.5의 리샘플링 과정 중 snap raster 옵션을 적용하였다. 또한 LCZ 샘플 데이터는 샘플링 되지 않은 지역이 No data 상태로 남아있으나, 이 경우 CNN 분석을 위한 데이터셋 구축 과정에서 오류가 생길 수 있기 때문에 해당 부분은 다른 값(9999)으로 인코딩해주었다.

### ■ CNN 학습용 데이터셋 구축

머신러닝 기반의 LCZ 분류 모델을 구축하기 위한 사전 작업으로, CNN 모델 학습 및 예측에 적합한 형식으로서의 데이터 정제 및 전처리를 수행하였다. CNN 모델은 합성곱 필터(Convolutional Filter)를 사용해 이미지의 공간 정보를 유지한 상태로 학습을 수행하여 이미지 기반 분류 작업 등에 효과적인 성능을 보여준다.(Yoo *et al.*, 2020)



[그림 3-3] 분석 데이터셋 구축 개념도

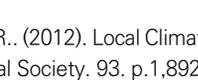
출처: 연구진 작성

LCZ 분류는 도시의 물리적 구조, 토지피복, 건물 형태, 식생 등 복합적인 공간정보를 바탕으로 기후 유형을 분류하는 작업이다. LCZ 분류를 통해 도시 전체의 구조물 및 토지피복의 특성을 나타낼 수 있는 장점이 있어 열환경 및 기온 자료 분석 등에 활용할 수 있다.(공학양 외, 2018; 2020; Yoo *et al.*, 2020).

이때, 활용되는 원격탐사 영상 및 공간데이터는 다차원적이며 공간적으로 연속성을 가지게 된다. Landsat이나 Sentinel 2 위성 이미지에서 추출한 여러 밴드를 입력자료로 사용할 때 CNN 모델은 이러한 특징들을 필터(kernel)를 통해 반복적으로 추출함으로써 분류의 정밀도를 크게 향상시킬 수 있다.

먼저, 100m 해상도의 LCZ 전체 표본 데이터를 기반으로 학습용(train)과 테스트용(test) 데이터를 5:5 비율로 무작위 분할하였다. 이 작업은 WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) 가이드라인에 따라 학습 및 검증의 신뢰도를 확보하기 위한 전처리 단계로 수행되었으며, 각 클래스별 공간적 불균형을 고려하여 균등한 샘플 분포를 유도하였다.

[표 3-2] LCZ 유형별 훈련 및 테스트 데이터셋 개수

LCZ 구분		데이터셋	
		훈련	학습
LCZ 1 (Compact high-rise)		4 (48)	3 (21)
LCZ 2 (Compact mid-rise)		32 (182)	31 (154)
LCZ 3 (Compact low-rise)		66 (363)	65 (508)
LCZ 4 (Open high-rise)		53 (547)	53 (492)
LCZ 5 (Open mid-rise)		14 (54)	14 (57)
LCZ 6 (Open low-rise)		8 (80)	8 (131)
LCZ 8 (Large low-rise)		5 (72)	5 (48)
LCZ A (Dense trees)		19 (889)	19 (1349)
LCZ B (Scattered trees)		57 (299)	56 (631)
LCZ D (Low plants)		12 (104)	11 (262)
LCZ G (Water)		11 (153)	10 (227)

주) 괄호 안 값은 픽셀 수

출처: Stewart, I. D. & Oke, T. R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, Bulletin of the American Meteorological Society. 93. p.1,892 참고하여 연구진 작성

분할된 학습용 데이터는 모델 최적화를 위한 세부 내부 검증 구조로 나뉘며, calibration, validation, test 세트에 추가 구성되었다. 이러한 다단계 분할은 CNN 학습 시 모델 과적합 방지 및 하이퍼 파라미터 튜닝을 위해 필수적으로 필요한 과정으로, 반복되는 전체 실험의 일관성을 보장한다.

다음 단계에서는 세부 분할된 각 데이터셋을 CNN이 처리할 수 있는 형식으로 변환하였다. 이 과정은 일정 수 이상의 픽셀을 포함하는 폴리곤을 대상으로 랜덤 시드를 이용해 반복적·일관적으로 처리된다. 세트별로 선택된 픽셀 인덱스는 추후 CNN 입력 데이터 추출의 기준이 된다. 구체적으로 살펴보면, 각 샘플은 16개 밴드를 기준으로 30×30 픽셀 패치 단위로 추출되었으며, 해당 패치를 CSV 파일로 저장하여 train, validation, test 구조로 관리하였다. 각 CSV 파일은 16개의 밴드 정보를 행 방향으로 연결한 480×30 크기의 텐서 형태로 구성되어 CNN 모델의 입력값으로 사용된다. 각 분할 데이터셋은 CNN이 처리할 수 있도록 별도의 전처리 과정을 거친다.

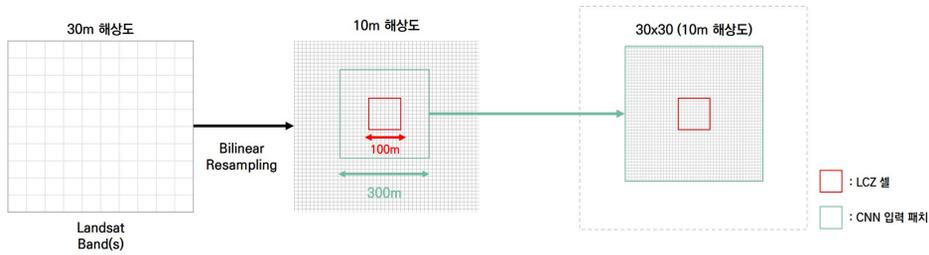
마지막으로, 학습 완료된 CNN 모델의 추론(inference)을 위한 전 지역 데이터셋을 별도로 준비하였다. 이 과정에서는 사전 정규화된 밴드 데이터를 활용하여 10m 해상도로 리샘플링한 전체 영상(16밴드)을 불러온 후, LCZ 클래스별로 통합하여 CNN 모델에 입력 가능한 일괄 구조로 구성하였다. 이 입력 데이터셋은 전체 도시 또는 분석 권역 단위에서 LCZ 지도를 자동 생성하는 데 사용되며, 이후 CSV 기반 결과를 래스터 파일(.tif) 형식으로 변환하여 최종 LCZ 분류 지도로 활용한다.

### 3) CNN 모델 학습

#### ■ CNN 기반 분류를 위한 모델 학습

본 연구에 사용된 CNN 모델의 학습을 위한 입력 샘플은 각각 300m×300m 공간 범위에 해당하는 30×30 크기의 이미지 패치로 구성되며, 각 패치는 16개 밴드를 채널로 포함하는 16×30×30 크기의 텐서로 변환되어 처리된다. 이는 공간적·분광적 특성을 동시에 반영한 학습이 가능하도록 설계된 입력 구조이다.

입력 데이터는 CSV 형식으로 저장된 480×30 크기의 2차원 배열(16개 밴드 × 30픽셀을 행 방향으로 연결한 형태)을 16×30×30 형태의 3차원 텐서로 재구성하는 과정을 거친다. 일부 데이터셋에서 17개 채널(510×30)이 포함된 경우에는 자동으로 감지하여 사전 정의된 16개 채널만을 선택적으로 추출하도록 구현되었다. 모든 입력 샘플은 채널별 평균(mean)과 표준편차(std)를 기반으로 정규화(standardization)되며, 이를 위해 훈련 데이터셋의 최대 2,000개 샘플로부터 채널별 통계량을 사전 계산하여 적용하였다.



[그림 3-4] CNN 학습을 위한 데이터 분석 흐름 개념도

출처: 연구진 작성

모델의 정확도 향상과 개선된 결과를 목표로 훈련 데이터의 일반화 성능을 향상시키기 위해 간단한 기하학적 데이터 증강(augmentation) 기법이 적용되었다. 구체적으로, 각 샘플은 50% 확률로 좌우 반전(horizontal flip), 50% 확률로 상하 반전(vertical flip), 그리고 0°, 90°, 180°, 270° 중 무작위로 선택된 각도로 회전(rotation) 변환이 수행된다. 이러한 증강 기법은 훈련 단계에서만 적용되며, 검증 및 테스트 단계에서는 원본 데이터가 그대로 사용된다.

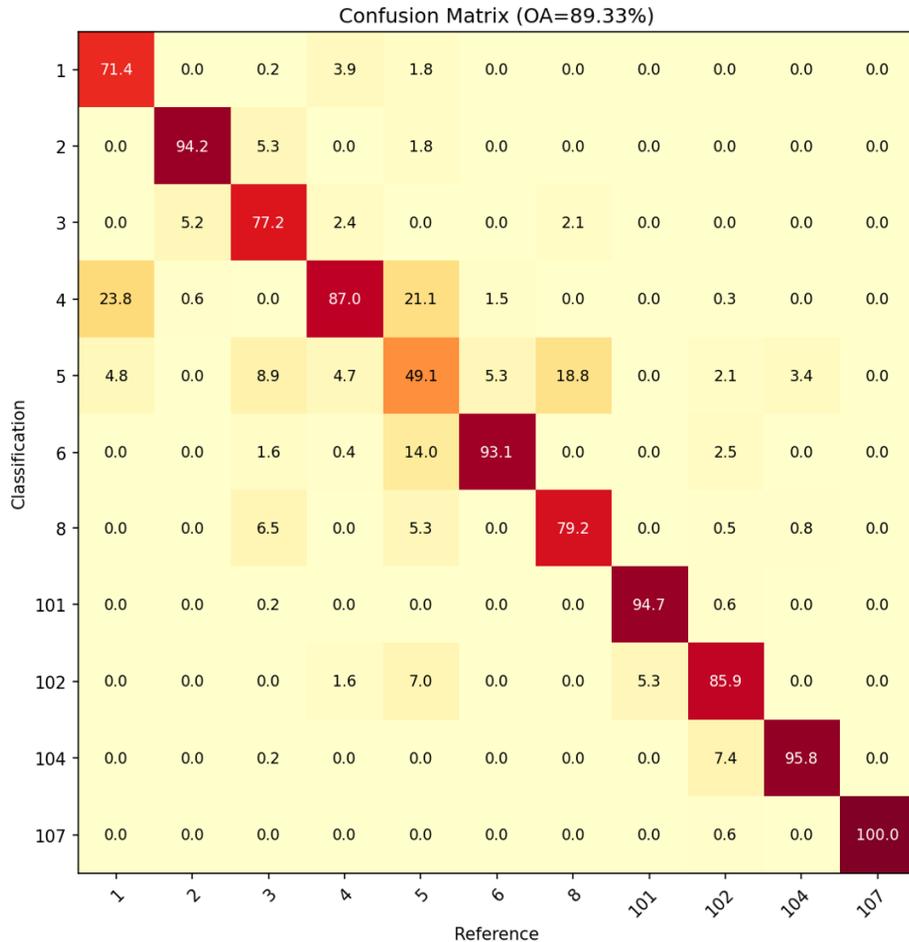
훈련에 사용된 CNN 모델은 총 4개의 합성곱층(Convolutional Layers), 2개의 배치 정규화층(Batch Normalization Layers), 2개의 풀링층(Pooling Layers), 1개의 완전연결층(Fully Connected Layer), 그리고 1개의 출력층(Output Layer)으로 구성된다. 초기 2개의 합성곱층에는 각각 32개의 3×3 필터가 적용되며, 각 합성곱 연산 직후에는 배치 정규화(Batch Normalization)와 ReLU(Rectified Linear Unit) 활성화 함수가 순차적으로 적용된다. 이후 2×2 크기의 Max Pooling 연산을 통해 공간 해상도를 30×30에서 15×15로 축소하였다.

다음 단계에서는 필터 수를 64개로 확장한 2개의 합성곱층이 동일한 구조(Conv2D → BatchNorm → ReLU)로 적용되며, 다시 Max Pooling을 통해 공간 해상도를 7×7로 축소하여 고차원의 공간적 특징을 압축적으로 추출하도록 하였다. 해당 과정에서 특징 맵을 평탄화(Flatten)하여 3,136(= 64×7×7)차원의 1차원 벡터로 변환한 후, 256개의 노드를 갖는 완전연결층으로 전달된다. 이 과정에서 ReLU 활성화 함수가 적용되며, 과적합 방지를 위해 드롭아웃(Dropout) 기법이 비율 0.4로 적용되었다. 최종적으로 256개의 특징은 11개의 LCZ 클래스를 대상으로 하는 출력층으로 전달되어 다중 클래스 분류를 수행한다.

손실 함수로는 CrossEntropy-Loss가 사용되었으며, 클래스 불균형 문제를 완화하기 위해 훈련 데이터셋의 클래스별 샘플 수를 기반으로 계산된 클래스 가중치(class weights)가 손실 함수에 적용되었다. 클래스 가중치는 각 클래스의 역빈도(inverse frequency)를 계산한 후 정규화하여 산출되며, 이를 통해 소수 클래스에 대한 학습 민감도를 높였다. 또한 레이블 스무딩(label smoothing) 기법이 0.05의 비율로 적용되어 모델이 과도하게 확신적인 예측을 하지 않도록 정규화하였다. GPU 환경에서 모델 학습은 Adam 옵티마이저를 사용하여 수행되었으며, 초기 학습률은 0.002, 가중치 감쇠(weight decay)는 0.0001로 설정되었다.

학습률 스케줄링을 위해 Cosine Annealing 스케줄러가 적용되었으며, 전체 120 에포크(epoch) 동안 학습률이 코사인 함수 형태로 점진적으로 감소하도록 하였다. 배치 크기는 64로 설정되었으며, GPU 환경에서 혼합 정밀도 학습(AMP: Automatic Mixed Precision)이 활성화되어 학습 속도와 메모리 효율성을 향상시켰다.

최종 모델의 성능은 테스트 데이터셋에 대한 정확도(accuracy)와 혼동행렬(confusion matrix)을 통해 정량적으로 평가되었다. 혼동행렬은  $11 \times 11$  크기로 생성되어 각 LCZ 클래스별 분류 정확도와 오분류 패턴을 상세히 분석할 수 있도록 하였다. 테스트 세트를 통한 모델 성능 평가 결과 본 모델은 89.33%의 Overall Accuracy를 기록하였으며, 주요 LCZ 클래스에 대해서도 높은 정밀도와 재현율을 나타내었다. 테스트 결과는 혼동행렬(confusion matrix) 형태로 시각화 되었으며, 각 행렬의 대각선이 진할수록 해당 클래스가 정확히 분류되었음을 의미한다.



[그림 3-5] 분류 결과에 대한 혼동행렬(Confusion Matrix)

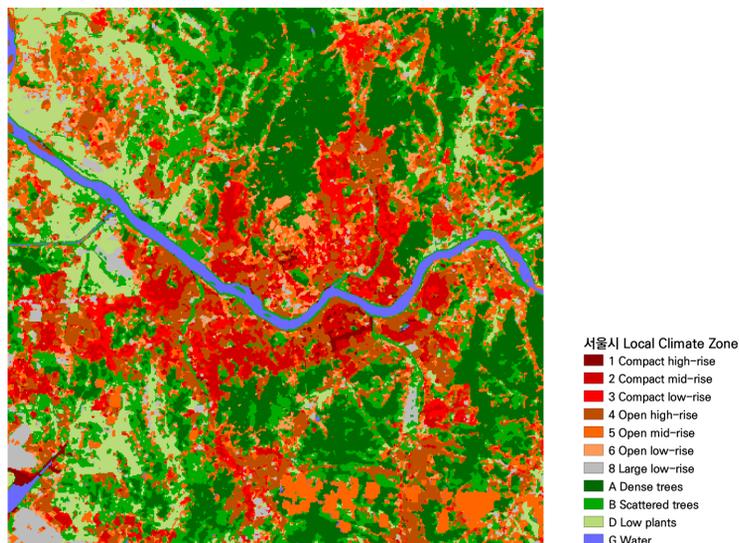
출처: 연구진 작성

약 90% 이상의 정확도로 분류된 클래스들인 LCZ 107 (Water, 수역), LCZ 104 (Bare rock or paved, 나대지/포장지), LCZ 101 (Dense trees, 밀집 수목), LCZ 2 (Compact midrise, 중층 밀집 건물), LCZ 6 (Open lowrise, 저층 개방형 건물)과 더불어 대부분 요소들이 70% 이상의 정확도로 분류되었으나 LCZ 5 (Open midrise, 중층 개방형 건물)가 49.1%로 11개 클래스 중 가장 낮은 분류 정확도를 나타낸다. 이 클래스는 LCZ 4 (4.7%), LCZ 3 (8.9%), LCZ 6 (5.3%), LCZ 8 (18.8%), LCZ 102 (2.1%), LCZ 104 (3.4%) 등으로 혼동되어 분류되었는데, 이는 중층 개방형 건물이 다른 도시 구조 및 자연 피복과 혼재된 복합적 공간 특성을 가지기 때문으로 해석된다. 10m 해상도의 위성 영상만으로는 건물의 3차원 구조를 완벽히 파악하기 어렵기 때문에 추후 연구 단계에서 다양한 해상도를 가지는 입력 데이터의 수정과 3차원 건물 높이 정보(LiDAR, DSM 등) 또는 추가적인 맥락 정보(주변 토지 이용, 도로네트워크 등)를 보조 데이터로 활용하는 것을 고려할 수 있다.

#### 4) 서울 LCZ 분석

##### ■ 전체 영역에 대한 LCZ 분류 예측값 매핑

앞서 수행된 CNN 학습 모델을 기반으로 전 지역의 LCZ 클래스를 추론하고, 그 결과를 공간 데이터로 변환한다. 이는 학습된 CNN 모델을 불러와 전체 서울에 대한 LCZ 클래스를 예측하는 과정을 포함한다. 분류된 LCZ 클래스 결과는 서울시 전체에 대한 래스터파일 이미지로 변환되며, 마지막으로 색상값이 부여된 결과를 생성하여 지역별로 예측 LCZ 클래스를 비교할 수 있도록 하였다.



[그림 3-6] 서울시 Local Climate Zone (LCZ) 예측 지도

출처: 연구진 작성

강남구를 포함한 고밀도 중심지(LCZ 1-3)가 도시 중심부에서 집중적으로 나타났으며, 이는 건물 밀집도와 열섬 중심 영역의 특징과 일치한다. 북한산 근처는 자연 지역 클래스(LCZ A 등)로 산림 등이 도시 외곽지역에서 분포하였으며, 이는 고해상도 정규화 밴드를 통해 식생지 반응이 적절히 반영되었음을 시사한다. 특히, 본 분류 모델은 녹지에 대한 분류가 정확히 되었는데 추후 입력 데이터의 해상도 조절과 훈련 모델의 수정 등으로 정밀한 LCZ를 보완할 수 있다.

LCZ 분류결과를 확대하여 픽셀 단위로 검토한 결과 분류 오류로 추정되는 픽셀을 확인할 수 있으며, 솔트 앤 페퍼 노이즈(Salt and pepper noise)가 발생하는 부분이 다수 확인되었다. 솔트 앤 페퍼 노이즈는 인접한 픽셀들이 같은 토지피복 혹은 LCZ라 가정되는 공간이나 서로 다른 유형으로 분류되는 현상으로, 공간적인 문맥이 반영되지 않아 나타난다. 본 연구에서 사용한 LCZ 분류의 경우 이를 회피하기 위해 대상 픽셀 외부 공간 버퍼를 두어 분석을 수행하였으나 일부 노이즈는 여전히 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 같은 유형의 LCZ라도 분류단위인 100m×100m 픽셀과 내부 10m×10m 픽셀 해상도에서는 객체들을 충분히 분리해내기 힘들기 때문으로 판단된다.

또한 100m×100m 픽셀 크기의 한계로 내부에 있는 작은 물체를 무시하고 분류하는 결과가 다수 발생함을 확인할 수 있었다. 예를 들어 픽셀 내 작은 실개천이 흐르는 경우 대부분 물이 있다는 것은 무시된 상태로 분류되었다.

[표 3-3] LCZ 유형별 분류사례

LCZ 구분	분류결과
LCZ 1 (Compact high-rise) 	

LCZ 구분		분류결과
LCZ 2 (Compact mid-rise)		
LCZ 3 (Compact low-rise)		
LCZ 4 (Open high-rise)		
LCZ 5 (Open mid-rise)		

LCZ 구분	분류결과	
LCZ 6 (Open low-rise)		
LCZ 8 (Large low-rise)		
LCZ A (Dense trees)		

LCZ 구분		분류결과
LCZ B (Scattered trees)		
LCZ D (Low plants)		
LCZ G (Water)		

출처: Stewart, I. D. & Oke, T. R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, Bulletin of the American Meteorological Society. 93. p.1,892 참고하여 연구진 작성

### 3. 폭염 위험 LCZ 유형 도출

#### 1) LST 데이터 구축

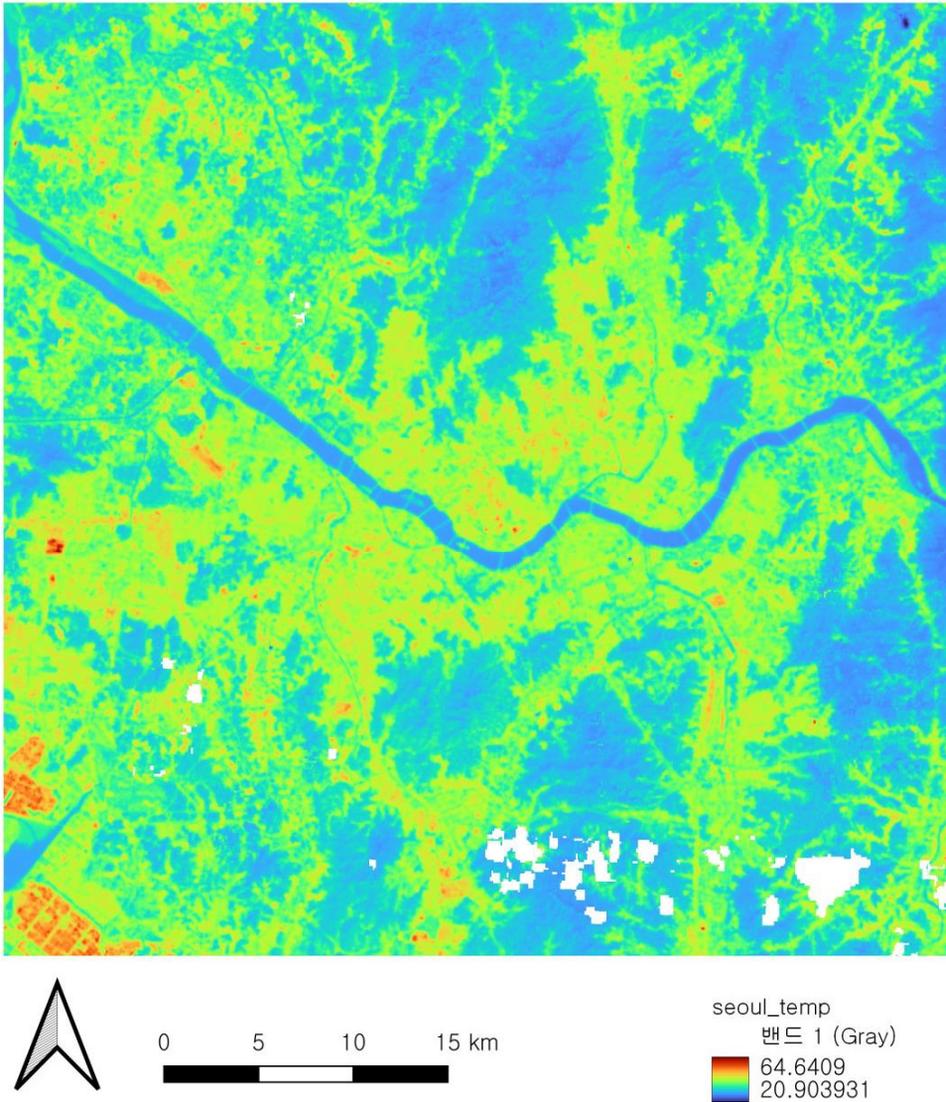
본 장의 목적은 LCZ 유형별 평균 온도를 산정하여 폭염에 취약한 LCZ 유형을 도출하는 것이다. 서울시 단위의 넓은 지역의 온도 데이터를 수집하기 위해 직접 측정은 시간과 예산이 부족하고, AWS와 같은 기상데이터를 활용하기에는 AWS지점 수가 적어 데이터의 불확실성이 높아진다. 이에 본 연구에서는 위성영상 데이터의 열밴드 영상을 활용하여 서울시 온도 데이터를 수집하였다. 위성영상의 열밴드는 지표면 온도에 따라 방출되는 열복사 에너지를 촬영하기 때문에 이를 활용하여 지표면 온도를 추정할 수 있다. 일련의 과정을 통해 지표면 온도 데이터인 LST (Land Surface Temperature)를 얻을 수 있다.

이를 위해 Landsat 8 Collection 2 Level-2의 10번 밴드인 Surface Temperature 데이터를 사용하였으며, 촬영일은 여름철인 6월-8월 중 구름에 의한 관측 방해가 가장 적은 날짜인 2024년 8월 29일로 선정하였다. Landsat 8은 30m 공간해상도로 데이터는 제공하므로 넓은 범위의 온도 분포를 고해상도로 관측할 수 있다는 장점이 있다. 열복사 에너지를 측정하는 B10 밴드는 원래 100m 해상도로 데이터를 수집하고, 대기상태에 의한 왜곡이 일부 발생하나 Collection 2 Level-2자료는 30m 해상도로 데이터를 업스케일링 하며, 대기보정 등 보정을 실시하여 바로 사용 가능한 형태로 데이터를 제공한다. 단, 최초 제공되는 데이터의 값은 온도 값이 아닌 측정에 따른 DN (Digital Number)로 스케일링 계수와 오프셋을 적용해 실제 온도(켈빈, 섭씨)로 변환하여 활용한다. 이를 위해 ArcGIS를 이용해 온도 환산을 수행하였다.

분석에 활용한 Landsat 8 자료는 Landsat 8 Level-2 Science Product에서 제공하는 지표 온도 데이터(ST\_B10)<sup>35)</sup>이다. 데이터는 최초 분석 대상지에 맞는 형태로 마스크하여 사용하였으며, 분석 대상지 내 데이터의 최초 값은 42,438-55,234의 DN 값을 갖는다. 이 래스터의 각 픽셀값에 스케일링 팩터를 곱하고, 덧셈 오프셋을 적용하면 물리 단위인 켈빈(K) 온도로 변환되고, 273.15를 빼줌으로써 섭씨온도(°C)로 변환할 수 있다.

35) LC08\_L2SP\_116034\_20240829\_20240905\_02\_T1\_ST\_B10.tif

ArcGIS의 래스터 칼큘레이터(Raster Calculator) 툴을 활용하여 이 같은 연산을 수행하였다. 수식은 메타데이터의 계수를 그대로 반영하여  $(\text{"B10"} \times M + A) - 273.15$  형태로<sup>36)</sup>로 구성하였다. M은 0.00341802, A는 149 값을 적용하여 최종 섭씨 온도 데이터를 도출하였다. 최종적으로 20.9-63.64℃의 값을 갖는 데이터를 도출하였다. 다만, 원 데이터에 포함된 QA 마스크를 적용하여 구름, 그림자 등 신뢰도 낮은 픽셀은 NoData로 유지되도록 하여 분석의 오류가 최소화되도록 하였다.



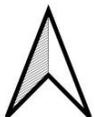
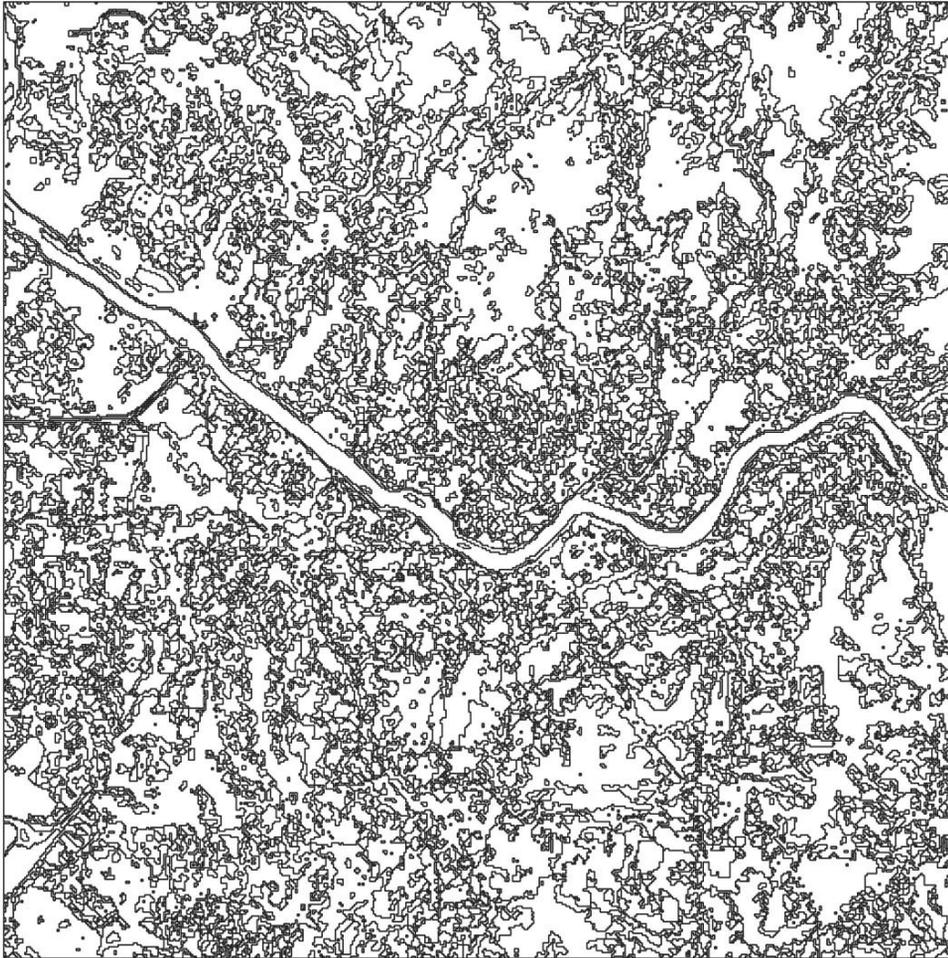
[그림 3-7] 서울시 분석 대상지역 LST 지도  
출처: 연구진 작성

36)  $(\text{"B10"} \times 0.00341802 + 149.0) - 273.15$

## 2) LCZ, LST 중첩 분석

### ■ LCZ 데이터 변환 및 LST 연계

LCZ 유형별 평균 온도를 분석하기 위해 세 단계 프로세스를 진행하였다. 첫째로, 기존 격자 데이터 형태인 LCZ 자료의 폴리곤화를 수행하였다. 둘째로, 서로 다른 객체로 분류된 LCZ 유형들을 하나의 객체로 연결시키기 위해 폴리곤들의 디졸브를 수행하였다. 마지막으로 LCZ 폴리곤과 LST 데이터를 연계하여 폴리곤 객체별 및 LCZ 유형별 온도 계산이 가능하도록 데이터를 구축하였다.



0 5 10 15 km



□ LCZ\_polygon

[그림 3-8] 서울시 분석 대상지역 LCZ 폴리곤 데이터

출처: 연구진 작성

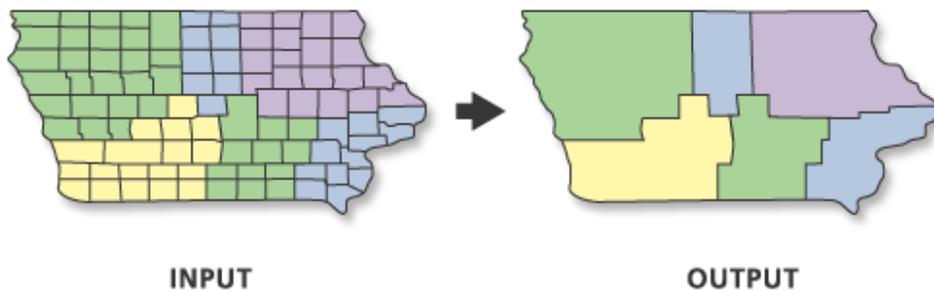
첫 단계인 격자데이터의 폴리곤화는 ArcGIS의 래스터 투 폴리곤(Raster to Polygon) 툴을 사용하였다. 폴리곤 변환 시 격자 데이터의 외곽선을 유지하기 위해 폴리곤의 단순화(Simplify polygons)는 체크 해제하였다. 결과적으로 총 13,940개의 폴리곤 객체가 생성되었으며, LCZ 5가 가장 많은 것으로 나타났다. 수목이나 초지, 물 등을 제외한 도시화지역 중 가장 면적 비율이 높은 유형은 동일하게 LCZ 5로 나타났으며, 뒤를 이어 LCZ 4, LCZ 3, LCZ 8, LCZ 2, LCZ 6, LCZ 1 순서로 나타났다.

[표 3-4] LCZ 유형별 객체 수 및 차지 면적 비율

LCZ 구분	객체 수	면적 비율(%)
LCZ 1 (Compact high-rise)	180	0.4
LCZ 2 (Compact mid-rise)	534	2.9
LCZ 3 (Compact low-rise)	910	6.6
LCZ 4 (Open high-rise)	1,165	10.5
LCZ 5 (Open mid-rise)	3,834	14.5
LCZ 6 (Open low-rise)	1,385	2.5
LCZ 8 (Large low-rise)	838	3.7
LCZ A (Dense trees)	677	21.5
LCZ B (Scattered trees)	3,014	19.6
LCZ D (Low plants)	1,258	15.3
LCZ G (Water)	145	2.5
합계	13,940	100

출처 : 연구진 작성

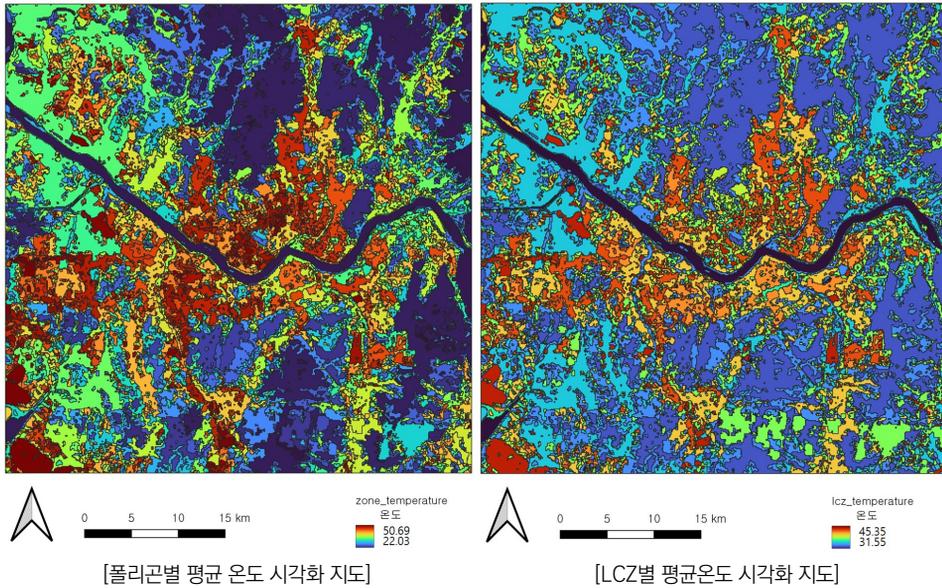
두 번째 단계인 폴리곤의 디졸브는 ArcGIS의 디졸브(Dissolve) 툴을 사용하였다. 디졸브 시에는 기준이 되는 필드(컬럼)를 지정할 수 있다. LCZ 유형이 같은 폴리곤 객체로 선택될 수 있도록 LCZ 유형 필드를 기준 필드로 지정하였고, 결과적으로 11개의 폴리곤 객체만 남은 데이터를 구축하였다.



[그림 3-9] Dissolve 개념

출처: esri. (n.d.). Dissolve. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/data-management-toolbox/dissolve.htm> (검색일: 2025.9.30.)

마지막으로 LST 데이터와 연계하여 폴리곤 객체별 평균온도를 계산할 수 있도록 데이터를 구축하였다. 데이터 구축을 위해 ArcGIS의 통계(Zonal Statistics)툴을 이용하여 폴리곤 객체별 온도 통계치를 도출한 후 조인(Join) 기능을 이용하여 통계치와 폴리곤 객체를 연계하였다. 디졸브를 수행하기 전 LCZ 폴리곤과 LST를 연계한 결과 평균 온도가 가장 높은 폴리곤은 LCZ 8로 open lowrise 지역으로, 영등포구 문래동에 위치한 지역이며 50.59°C로 나타났다.



[그림 3-10] LCZ 폴리곤 데이터와 LST 데이터 연계결과 시각화  
출처: 연구진 작성

### ■ LCZ 유형별 온도 분포 분석

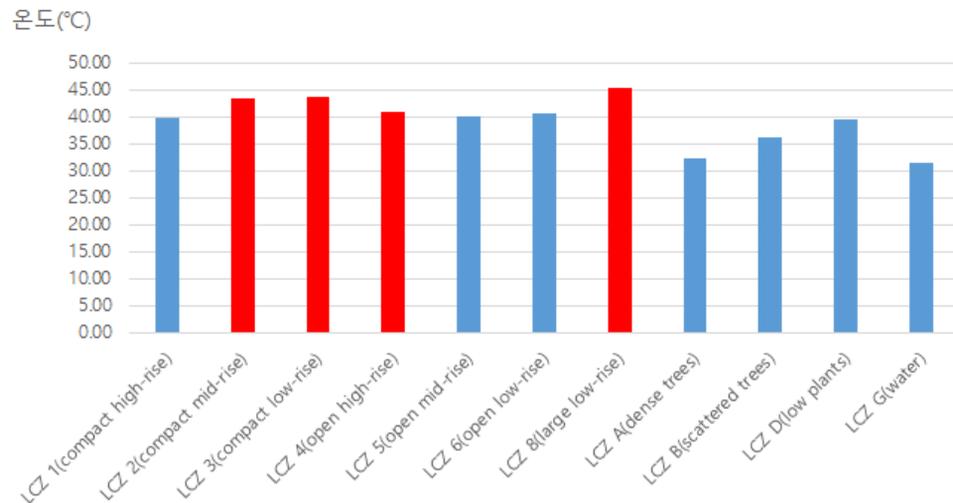
LCZ 유형별로 평균온도를 비교해보면 온도가 가장 높은 유형은 LCZ 8 (Large low-rise)로 평균온도 45.35°C로 도출되었다. 뒤이어 LCZ 3, LCZ 2, LCZ 4, LCZ 6, LCZ 5, LCZ 1의 순서로 평균온도가 높은 것으로 확인되었다. 또한, 비 도시화 지역에 해당하는 LCZ A, LCZ B, LCZ D, LCZ G의 경우 평균온도가 낮은 것으로 확인되었다. 고층 건축물이 고밀도로 분포하는 LCZ 1의 경우가 가장 도시화되었다는 측면에서 평균온도가 가장 높을 것으로 예상할 수 있으나, 전체에서 7번째로 나타났다. 이는 고층 건축물에 의한 그늘 형성, 바람길 확보 등이 일부 냉각 요인으로 작용했을 것으로 판단된다.

[표 3-5] LCZ 유형별 평균 온도

LCZ 구분	평균온도(°C)	평균온도 순위
LCZ 1 (Compact high-rise)	39.71	7
LCZ 2 (Compact mid-rise)	43.38	3
LCZ 3 (Compact low-rise)	43.56	2
LCZ 4 (Open high-rise)	40.79	4
LCZ 5 (Open mid-rise)	39.96	6
LCZ 6 (Open low-rise)	40.59	5
LCZ 8 (Large low-rise)	45.35	1
LCZ A (Dense trees)	32.35	10
LCZ B (Scattered trees)	36.22	9
LCZ D (Low plants)	39.47	8
LCZ G (Water)	31.55	11

출처 : 연구진 작성

이 같은 LCZ 유형별 온도 분포는 2장의 선행연구들을 종합한 결과 나타난 경향과 유사하다. 11개의 선행연구에서 가장 온도가 높은 것으로 나타난 LCZ 유형 4가지는 LCZ 2, LCZ 3, LCZ 4, LCZ E 이다. 본 연구의 대상지 내에는 LCZ E (나대지) 유형이 없기 때문에 LCZ 8을 제외한 상위 3개의 폭염 취약 LCZ가 선행연구와 동일하게 도출되었음을 확인할 수 있다.



[그림 3-11] LCZ 유형별 평균 온도 비교

출처: 연구진 작성

LCZ 8에 해당하는 지역은 대부분 공장, 산업단지가 밀집한 지역으로, 건물이 높지는 않지만 건축면적이 큰 건물들이 밀집하고 식생이 없는 지역이 상대적으로 열에 취약한 것으로 나타났다. 뒤이어 온도가 높은 유형이 LCZ 3과 LCZ 2인 것은 건물 사이의 간격이 좁고, 불투수 면적이 큰 조밀 저층 및 조밀 중층 시가지가 폭염 취약성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



## 제4장

# 폭염 취약 건축·공간 유형 도출

1. 분석 개요
2. 폭염 위험 지역 미기후 분석
3. 공간 유형별 폭염 취약 건축물 도출
4. 소결

# 1. 분석 개요

## 1) 분석 목적 및 필요성

기후변화로 인한 평균기온 상승과 열대야 일수 증가는 도시 내 열축적을 가속화시키며, 특히 인구밀도가 높고 불투수면적이 집중된 도심에서 국지적 폭염 현상(UHI: urban heat island)을 더욱 심화시키고 있다. 이러한 현상은 단순한 기상 문제가 아닌, 도시의 건축 형태, 토지 이용, 표면 재질 등 물리적 공간구조와 밀접하게 연관되어 있으며, 결과적으로 공간적으로 불균등한 열환경(thermal inequity)을 유발한다.

이에 따라, 폭염 대응은 단순히 거시적 수준의 평균 기후 분석에 그치지 않고, 건축물과 주변 공간의 미시적 열환경 특성을 통합적으로 분석하는 정밀한 접근이 필요하다. 본 장에서는 이러한 문제의식을 바탕으로, 기후변화에 따른 도심 폭염의 심화 양상을 과학적으로 규명하기 위해, 공간정보(GIS)와 전산유체역학(CFD) 기반의 미기후 시뮬레이션 도구인 ENVI-met 모델을 활용하여, 블록 단위의 폭염 취약 열환경 특성을 정량적으로 분석한다. 본 장의 핵심 목적은 다음 세 가지이다.

- 고해상도 열환경 분석: 도시 내 열축적을 유발하는 건축, 지표, 식생 요소를 정량화하고 이를 ENVI-met 모델의 입력 매개변수와 연계하는 분석 구조를 구축한다.
- 폭염 취약 유형 도출: LCZ별 열환경 특성(잠재기온, 평균복사온도, 생리적등가온도 등)을 기반으로 도시공간의 폭염 취약성을 정량적으로 평가하고 유형화한다.
- 기후변화 대응 및 공간계획 근거 마련: 시뮬레이션 결과를 바탕으로 도심 내 폭염 취약 지역 및 열저감 잠재지역을 식별하고, 이를 도시열섬 저감형 설계, 녹지계획, 건축물 관리정책 수립의 근거로 활용한다.

본 장에서는 이러한 목적을 달성하기 위해 3단계 분석 절차를 따른다. 먼저, 데이터 구축 단계에서는 폭염 취약성 분석에 필요한 물리적 및 환경 정보를 통합하고, 시뮬레이션에 활용 가능한 형태로 가공한다. 다음으로, 시뮬레이션 및 분석 단계에서는 ENVI-met 모델을 활용하여 도시 공간의 열환경을 고해상도로 정밀 모의하고, 시간대별·지표별 열 분포 특성을 도출한다.

마지막으로, 검증 및 평가 단계에서는 기상 및 위성 관측자료를 통해 시뮬레이션 결과의 신뢰도를 확보하고, 도출된 고해상도 데이터를 바탕으로 LCZ별 폭염 취약성을 정량적으로 평가한다.

결과적으로 본 장의 폭염 취약 건축·공간 유형 도출은 “도시공간 구조가 폭염을 어떻게 증폭 또는 완화시키는가”에 대한 해답을 정량적 시뮬레이션 기반의 실증적 분석을 통해 제시하고자 한다. 이를 통해 향후 폭염 대응형 도시계획 및 재난안전 정책 수립에 활용 가능한 과학적 판단 근거와 공간 유형별 설계 및 관리 가이드라인을 제공하는 것을 궁극적 목표로 한다.



[그림 4-1] 폭염 취약성 분석 절차 흐름도

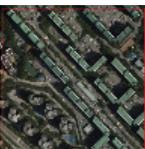
출처: 연구진 작성

## 2) 분석 범위와 대상

### ■ LCZ 분류체계 기반 대상지 선정 및 특성 요약

본 연구에서는 서울시 도시공간의 물리적 구조와 토지이용 특성을 대표할 수 있도록 Local Climate Zone (LCZ) 분류체계 중에서 서울시에서 나타나는 유형 중 평균온도가 높은 지역을 대상으로 분석을 수행하였다.

[표 4-1] LCZ 유형별 대상지 특성 및 데이터셋 요약

LCZ 구분		데이터셋				
		평균 층수(층)	건축물 높이(m)	건축물 수(동)	수목 수(본)	주요 토지이용 및 공간특성
LCZ 1 (Compact High-rise, 여의도동)		11	37	34	123	<ul style="list-style-type: none"> <li>고층 건물이 밀집, 이격 매우 짧고 협곡 가로 형성</li> <li>녹지가 거의 없고 국지적 효과에 그침</li> <li>불투수 포장 매우 높음</li> </ul>
LCZ 2 (Compact midrise, 송파동)		4	12	278	79	<ul style="list-style-type: none"> <li>중층 건물이 촘촘하고 골목형 가로로 통풍 약함</li> <li>녹지는 점상·소 규모위주, 연속성 낮아 열완화 제한</li> <li>골목·소로 중심으로 포장 비율 높음</li> </ul>
LCZ 3 (Compact low-rise, 문래동 4가)		5	15	175	192	<ul style="list-style-type: none"> <li>저층 단독·다가구 밀집 주거·생활권</li> <li>골목·주차장 중심 불투수 포장 우세</li> <li>가로수 도로·경계부 편중, 내부 그늘 부족</li> </ul>
LCZ 4 (Open High-rise, 사당동)		13	39	51	575	<ul style="list-style-type: none"> <li>판상·타워형 고층이 넓은 동간거리로 배치</li> <li>잔디·수목, 보행녹도·선형공원 연계로 그늘 공급 큼</li> <li>보차분리·보행로 중심, 간선·철로 등 대면적 포장</li> </ul>
LCZ 5 (Open Mid-rise, 신촌동)		4	20	14	265	<ul style="list-style-type: none"> <li>중층 판상/타워형이 동간거리 확보된 단지형 배치</li> <li>연속적 녹지로 그늘·증발 냉각 효과 중간 이상</li> <li>보행로·소로 및 단지 순환도로 중심 포장률 중간</li> </ul>
LCZ 6 (Open low-rise, 중계동)		1	3	1053	347	<ul style="list-style-type: none"> <li>개방형 저층 단독·다가구 단지</li> <li>마당·보행로·주차장 등 개방 공간과 포장 혼재</li> <li>수목은 가장자리 위주, 냉각·통풍 효과 제한적</li> </ul>
LCZ D (Low Plants, 개화동)		0	0	0	Simple Plant	<ul style="list-style-type: none"> <li>상주 건물 없음, 방해 요소가 적어 통풍 양호</li> <li>잔디/경작지 등 저초식생이 광범위</li> <li>간선·농로 등 선형 포장부가 국지적 핫스팟을 형성</li> </ul>
LCZ G (Water, 신천동)		10	33	8	58	<ul style="list-style-type: none"> <li>넓은 수면에서 증발냉각과 낮은 표면 온도</li> <li>제방·수변 녹지가 냉각 공기 통과 역할</li> <li>교량·제방도로·자전거도로 등 선형 포장부는 햇볕 노출 시 국지적 핫스팟</li> </ul>

출처: 연구진 작성

### ■ 대상지 범위 및 공간적 설정

본 연구에서는 분석의 공간 단위를 300m × 300m로 통일하여, 각 대상지의 건축물, 지표 피복, 식생, 포장재 등 주요 공간 속성을 정량화하였다. ENVI-met 모델은 격자(Grid) 기반의 수치해석 방식으로 작동하기 때문에, 시뮬레이션의 안정성 확보와 경계 조건 설정을 위해 외곽에 격자 형태의 구조를 형성할 필요가 있다. 이에 따라 실제 도시 구조를 최대한 반영하되, 경계 효과로 인한 계산 오류를 최소화할 수 있도록 정방형 격자 형태로 공간을 구성하였다.

대상지 선정은 LCZ 유형별 대표성을 기준으로 하였으며, 도시형 유형(LCZ 1, 2, 4, 5)과 자연형 유형(LCZ D, G)이 균형 있게 포함되도록 설계하였다. 이를 통해 고밀·중밀·저밀 건축 환경과 저식생·수체 등 자연적 요소가 혼재하는 다양한 도시 미기후 맥락을 포괄하였다.

이와 같은 공간 구성은 각 유형의 물리적 구조와 열환경 반응을 동일한 면적과 분석 체계 하에 비교·평가할 수 있도록 하며, 도시열섬과 폭염 취약성의 공간적 차이를 정량적으로 도출하는 기반이 된다. 나아가, 유형 간 상대적 민감도와 열환경 완화 가능성을 종합적으로 분석할 수 있는 기초 자료로 활용된다.

## 3) 데이터·모델링 개요

### ■ ENVI-met 개요

본 연구에서는 대상지별 도시 미기후 특성을 정밀하게 재현하기 위해 ENVI-met v5.8.0을 활용하였다. ENVI-met은 건축물, 지표, 식생, 대기 간의 열·수분·운동량 교환을 3차원 수치 격자 내에서 시공간적으로 계산하는 모델로, 도시 내부의 열섬 형성 및 야간 냉각 메커니즘을 고해상도로 모의할 수 있다.

모델 도메인은 각 대상지를 300m × 300m로 설정하였으며, 수평 격자 해상도는 1m로 구성하였다. 수직 방향의 격자 구조는 건물 높이와 지형고(DEM)를 반영하고, 실제 최고 높이의 약 두 배에 해당하는 여유고(약 10-20m)를 추가하여 상공 경계에서의 수치 안정성과 난류·복사 계산의 신뢰도를 확보하였다. 이와 같은 격자 기반의 설계는 도시 지형과 건축물의 세부 구조를 충분히 반영하면서도, 계산 효율성과 모델 정확도 간 균형을 고려한 최적화된 설정으로 판단된다.

기상 입력 데이터는 기상청 AWS (Automatic Weather System) 및 ASOS (Automated Synoptic Observing System)에서 서울 권역의 관측 자료를 기반으로 하였으며, 대표 폭염일로 선정된 2025년 8월 24일의 기온, 습도, 풍속, 풍향, 전운량을 적용하였다. 관측 기반의 경계 및 초기 조건을 활용함으로써, 대상지 간 비교 시 외생적 기상 요인의 영향을 최소화하고, 모의 결과의 재현성과 해석 신뢰도를 높일 수 있었다.

시뮬레이션은 총 24시간(05:00 ~ 익일 05:00) 동안 수행하였다. 동일한 시간 창과 격자 해상도에서 각 LCZ 유형별 열환경을 모의함으로써, 공간·시간 스케일이 일치하는 조건하에서 지표별 열분포 패턴을 비교·분석하고, 결과 간 상호 검증이 가능하도록 설계하였다.

[표 4-2] ENVI-met 시뮬레이션 설정 및 입력자료 요약

구분	세부내용
모델 버전	ENVI-met v5.8.0
격자(Grid) 설정	300 m × 300 m (도심·주거·녹지·수체형 포함)
격자 간 간격	x, y : 1m*1m z : 건물 높이 + DEM + $\alpha$ (10m~20m)
시뮬레이션 기간	2025년 8월 24일 24시간 (05:00 ~ 익일 05:00)
분석 중점 시간대	09시(오전 상승기), 13시(최고 일사 시점), 15시(체감 최고기온 시점), 21시(야간 냉각기)
데이터 구성	지형: DEM (국토지리정보원, 축척 1:1,000) / 건축물: 건물통합정보 (국토교통부) 토지피복: 세분류 토지피복도 (환경공간정보서비스) / 기초지도: 수치지형도 (국토지리정보원, 축척 1:1,000)
기상 조건 입력	기상청 AWS(송파, 강서, 서대문, 영등포, 현충원, 노원) 기온·풍속·풍향·습도 자료 활용 기상청 ASOS(서울, 관악산) 전운량(구름량) 자료 활용
Building Settings (건물 설정)	건축물 내부 온도 28도 외부 온도(건물외벽) 25도값 설정
Roughness Length (표면 거칠기)	고층밀집지역 : 1.0 / 중층 건물 밀집지역 : 0.8 / 낮은 건물 지역 : 0.5 농지 : 0.01 / 산지형 + 건물 : 0.5 / 물 : 0.01
Soil Settings (토양 조건 설정)	기본값(Default) 적용 - Loamy soil profile
Pollutant / Source Settings (대기오염, 배출원 설정)	기본값(Default) 적용 - 오염원 비활성화
Radiation Settings (복사열 설정)	기본값(Default) 적용 - IVS Lowest (45°)
Expert Settings (전문 설정)	기본값(Default) 적용 - 수치 안정화 매개변수 미조정

출처: 연구진 작성

## ■ 입력자료 구축 및 모델링 절차

### • 기상 조건

본 연구의 시뮬레이션에서는 풍향, 풍속, 습도, 전운량 등 주요 기상 요소를 실제 관측자료를 기반으로 설정하여, 모델링의 구체성과 재현성을 제고하고자 하였다. 분석 대상일은 여름철 중 평균기온이 가장 높고 폭염 발생이 빈번한 시기를 고려해 2025년 8월 24일로 선정하였으며, 시뮬레이션 기간은 같은 날 05시부터 익일 05시까지 총 24시간으로 설정하였다.

각 기상 요소는 대상지 인근의 기상청 AWS 및 ASOS 관측자료를 바탕으로 입력하였다. 풍속, 풍향, 전운량 등 시간 변동성이 큰 변수들은 ENVI-met 모델의 입력 특성을 고려하여, 시간별 관측값의 평균을 적용하였다.

[표 4-3] 기상 조건 입력값

구분	적용값	데이터 출처
기온	해당 일(8월 24일) 시간대별 측정값 평균	기상자료개방포털 AWS
풍속	대상지 인근 관측소 당일 평균값	기상자료개방포털 AWS
풍향	대상지 인근 관측소 당일 주요풍향	기상자료개방포털 AWS
습도	해당 일(8월 24일) 시간대별 측정값 평균	기상자료개방포털 AWS
전운량	해당일 시간대별 평균값	기상자료개방포털 ASOS

출처: 연구진 작성

한편, ENVI-met의 기상 조건 입력 항목 중 하나인 Roughness Length (공기역학적 표면거칠기)는 지표면의 마찰 특성을 정량화한 변수로, 경계층 내 풍속 감쇠와 난류 강도를 결정하는 데 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 각 대상지의 LCZ 유형별 도시 구조와 토지 피복 특성을 반영하기 위해, 관련 선행연구 및 최근 문헌에서 제시된 값을 참조하여 유형별 표면거칠기 계수를 설정하였다.

[표 4-4] LCZ 유형별 표면 거칠기 계수 적용 근거

공간유형	적용값	주요 내용 요약
LCZ 1 (Compact high-rise)	1.0	고층·고밀 상업지구로 건물 간격이 좁고 난류 강도가 높음. LiDAR 기반 도시형 roughness 추정값 (0.8-1.5 m) 범위 반영
LCZ 2 (Compact midrise)	0.3	단독주택 밀집지로 건물 높이 3-5 m 수준. 장애물 간격이 좁아 중간 수준의 난류 저항과 풍속 감쇠 효과 발생
LCZ 3 (Compact low-rise)	0.5	저층 건물이 연속적으로 밀집된 블록형 시가지로, 높은 건폐율과 좁은 가로 폭 때문에 보행자 높이에서 중간-상위 수준의 난류와 풍속 감쇠가 발생함
LCZ 4 (Open high-rise)	0.8	10-20 m 급 건물이 균집한 중고층 지역으로, 수직 난류 형성이 활발하며 풍속 감쇠 효과는 중간-상위 수준
LCZ 5 (Open mid-rise)	0.5	중층 건물과 식생이 혼재된 개방형 시가지로, 지형-건물 복합 효과에 의한 중간 수준의 마찰 계수 적용
LCZ 6 (Open low-rise)	0.5	저층 건물과 잔디·관목 등이 섞여 있는 저밀 개방형 주거지로, 건물·수목 간 간격이 넓어 바람 관통은 가능한 반면, 분산된 장애물에 의해 중간 수준의 풍속 감쇠 효과가 나타남
LCZ G (Water)	0.01	수면은 마찰 저항이 거의 없는 평탄면으로, 풍속 감쇠 효과가 미미함. Davenport class 1-2 기준 (0.001 - 0.02 m 범위) 중 평균값 적용
LCZ D (Low plants)	0.03	초지 또는 낮은 식생 지역으로 장애물이 희박하며, 지표면 조도 0.01 - 0.05 m 범위 중 평균값 반영. 식생 높이에 따라 조도 변화가 작음

출처 : Stewart, I. D. & Oke, T. R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93. pp.1879-1900

- 지표 및 지형 정보

지형 정보 구축에는 국토환경성 평가에 널리 활용되는 세분류 토지피복도를 기본 자료로 활용하였다. 대상지의 공간적 특성을 보다 정밀하게 반영하기 위해 1:1,000 수치지형도를 병행하여 사용하였으며, 토지피복도의 범주 정보에 수치지형도의 세부 지형 요소(도로 경계, 인도, 경지계, 지류계, 하천 경계, 실폭 하천, 호수·저수지 등)를 공간적으로 결합하여, 실제 지표 경계와 인공·자연 요소의 분포를 세밀하게 반영하였다.

동일한 수치지형도 자료를 기반으로 DEM을 생성하고, 이를 ENVI-met의 지형고도 입력값으로 적용하였다. DEM의 도입은 단순 평면 기반의 피복 분석이 갖는 한계를 보완하고, 미세한 고도 변화, 경사, 배수 체계가 열 및 운동량 교환에 미치는 영향을 모델에 반영하는 데 목적이 있다. 구축된 고해상도 공간 데이터는 지형적 높이 변화와 실제 지표 경계를 동시에 포함하고 있으며, ENVI-met의 토양·표면 특성(Soil/Surface Settings) 및 지형고도 입력자료로 활용되었다.

[표 4-5] 토지피복·지형 데이터 구성 및 출처

구분	활용 데이터	주요 항목	데이터 출처
기본 지형정보	세분류 토지피복도	표면피복 구분	환경공간정보서비스
보조 지형정보	수치지형도 v2 (1:1,000)	표면피복 고도화	국토지리정보원
지형모델 생성	DEM(1m 해상도, 수치지형도 기반 생성)	지표 고도 및 경사 반영	국토지리정보원

출처: 연구진 작성

구축된 지형지물 데이터는 QGIS 환경에서 전처리 과정을 거쳤다. 좌표계 일치화, 위상 오류(겹침·공백) 점검, 속성 정리를 수행한 뒤, ENVI-met Plugin을 이용하여 INX (Input Exchange) 형식으로 변환하였다. ENVI-met은 표면 재질을 사전에 정의된 코드 체계로 관리하므로, 세분류 토지피복도 항목별로 ENVI-met에서 제공하는 재질 코드와의 매칭 및 코드화 작업을 수행하였다.

해당 코드는 QGIS 속성 테이블 내 전용 필드를 생성하여 데이터를 구축하고, 각 재질 특성 및 용도명 목록에 부합하는 코드값을 매칭하였다. 최종적으로 생성된 토지피복(INX) 입력 레이어는 ENVI-met Plugin을 통해 내보낸 후 ENVI-met 프로젝트에 로드되어, 모델링의 Soil/Surface Settings 단계에서 직접 활용되었다.

[표 4-6] 토지피복코드 연계 및 INX 변환 과정 요약

구분	주요작업내용	적용자료	결과 산출물
자료준비	세분류 토지피복도 불러오기 및 속성 정리	토지피복지도 + 수치지형도	QGIS 기반 토지피복지도
코드매칭	ENVI-met 재질 목록과 피복유형 매칭·코드화	ENVI-met Material DB	피복유형별 코드 테이블
속성수정	QGIS 속성테이블에 코드번호 입력	피복별 재질 코드 (예:0000BS,0200PG 등)	코드반영된 속성테이블
INX 변환	ENVI-met Plugin으로 INX 파일 생성	수정된 SHP파일	ENVI-met 호환 INX 파일
모델입력	INX 파일을 ENVI-met SPACES로 모델 구성	INX 파일	최종 ENVI-met 입력 레이어

출처: 연구진 작성

[표 4-7] 표면 재질코드와 용도 연계 결과

재질코드번호	코드재질명	용도명 목록
0200PG	Concrete Pavement(Gray)	단독주거시설(111), 공동주거시설(112), 상업·업무시설(131), 혼합지역(132), 문화·체육·유흥시설(141), 기타 교통·통신시설(155), 환경기초시설(161), 교육·행정시설(162), 기타 공공시설(163), 염전(522), 인도_수치지도(998)
0200PL	Concrete Pavement(Light)	공업시설(121)
0200ST	Asphalt Pavement	도로(154), 도로경계_수치지도(999)
0200SL	Default Unsealed Soil (Sandy Loam)	경지정리가 된 논(211), 경지정리가 안 된 논(212), 침엽수림(321), 자연초지(411), 기타초지(423), 강기슭(612), 운동장(622)
0200LO	Loamy Soil	경지정리가 안 된 밭(222), 시설재배지(231), 목장·양식장(251), 기타재배지(252), 활엽수림(311), 혼효림(331), 묘지(422), 기타나지(623), 경지계_수치지도(997)
0200SD	Sandy Soil	내륙습지(511), 해변(611)
0200WW	Deep Water	하천(711), 호소(712), 해양수(721), 하천경계_수치지도(995), 실폭하천_수치지도(994), 호수/저수지_수치지도(993)

출처: 연구진 작성

- 식생 정보

식생 정보 구축에는 수치지형도(ver.2, 축척 1:1,000)에 포함된 3D 수목 데이터를 기본 자료로 활용하였다. 해당 자료를 기반으로 ENVI-met 식생 입력 자료를 구성하였으며, 일부 누락되거나 불완전한 지역의 경우에는 위성영상 및 거리영상 자료(Kakao Map Road View)를 참조하여 QGIS에서 점(Shapefile) 데이터를 수동으로 보완하였다. 또한, 급경사지나 산림 등 개별 수목의 위치 지정이 어려운 지역에 대해서는 ENVI-met의 Simple Plant 기능을 활용하여 식생 피복 특성을 반영하였다.

본 연구에서는 대상지의 식생 정보를 교목류(Tree species)에 한정하여 구축하였다. 수목이 다양하게 분포하거나 밀집된 지역의 경우, 거리영상 자료를 통해 줄기 직경, 수형, 수고 등을 시각적으로 확인한 후, 이를 기반으로 소형·중형·대형 교목으로 분류하였다.

ENVI-met은 식생 입력 시 형태 기반(Form-based)과 수종 기반(Species-based) 두 가지 방식의 분류체계를 지원한다. 그러나 본 연구에서는 현장 식생 정보를 위성 및 거리 영상 등 시각 자료에 의존하여 간접적으로 파악하였기 때문에, 개별 수종 식별이 어려운 한계가 존재하였다. 이에 따라 형태적 특성(Form Type)을 중심으로 식생 코드 분류체계를 적용하였다.

ENVI-met의 식생 모델은 형태(Form), 수고(Height), 줄기 굵기(Trunk Thickness), 수관 밀도(Canopy Density)의 네 가지 요소를 조합하여 수목 유형을 구성한다.

- 기본 형태(Form Type): 원통형(Cylindric), 구형(Spherical), 원추형(Conical), 관목형(Bush/Shrub), 수관형(Palm) 등

또한, 특정 지역에서 수목 형태가 유사하거나 수종 다양성이 낮은 경우에는 대상지 내 빈도 높게 출현하는 주요 수종을 대표 수종으로 설정하고, 해당 수종의 형태적 특성과 유사한 ENVI-met 식생 코드(Plant Code)를 적용하였다.

[표 4-8] 교목 크기등급별 ENVI-met Plant 코드 매핑

수목 분류 유형	ENVI-met Plant 템플릿 설명	ENVI-met 코드
소(1)	Small, Cylindric, medium trunk, sparse, small (5m)	02OMSS
중(2)	medium, Cylindric, medium trunk, dense, medium (15m)	02OMDM
대(3)	Large, Spherical, large trunk, dense, large (25m)	02SLDL

출처: 연구진 작성

#### • 건축물 정보

건축물 정보는 국토교통부에서 제공하는 건물통합정보를 기반으로 구축하였다. 원자료 내 속성 정보 중 ‘지붕\_코드1’ 및 ‘구조\_코드1’ 항목을 참고하여 각 건축물의 지붕 재질과 외벽 재질을 분류하였고, ENVI-met에서 요구하는 재질 코드 체계에 맞추어 해당 속성을 코드화하여 변환하였다.

건물통합정보에 지붕, 외벽 재질 또는 층수 정보가 누락되었거나 불완전하게 정의된 경우에는 거리영상 자료(Kakao Map Road View)를 활용하여 시각적으로 확인한 뒤, QGIS의 속성 테이블에서 수동 입력 및 보완 작업을 수행하였다. 이러한 절차를 통해 구축된 건축물 정보는 대상지별 실제 건축물의 구조적 특성과 재질의 이질성을 최대한 반영하였으며, ENVI-met 모델링 시 Building Settings 입력자료로 활용되었다.

건축물의 높이 값이 직접 명시되어 있지 않은 경우에는, 앞서 보완한 층수 정보를 기반으로 건축물 높이를 추정하였다. 본 연구에서는 서울시 건축물 현황자료와 관련 선행연구(도시 열환경 분석, 건축물 층고 설계 기준 등)를 참고하여, 용도별 일반적인 설계 관행을 반영한 층별 높이 기준을 설정하였다.

구체적으로, 주거 및 근린생활시설의 경우 실사용 층고(약 2.7-2.9m)와 구조층 간 거리(약 3.3m)를 반영하여 층당 높이를 산정하였으며, 상업, 업무, 의료 등 공공 이용도가 높은 시설은 1층 로비 및 설비층 확보 등을 고려하여 상대적으로 높은 층고(약 4.0-4.5m)를 적용하였다.

[표 4-9] 건축물 정보 구축 단계 및 입력자료 요약

단계	주요 항목	활용자료	구축·보완 방법
1단계 데이터 수집	건축물 기초 속성 (높이, 층수, 벽재질, 지붕재질)	건물통합정보 (국토교통부)	건물통합정보의 속성데이터 추출 및 ENVI-met 재질코드 체계에 맞춰 코드화
2단계 데이터 보완	누락된 지붕·외벽 재질, 층수	거리영상자료 (Kakao Map Road View)	도로뷰를 통한 시각 확인 후 QGIS 에서 속성테이블 변환 및 층수 수 동 입력
3단계 높이 보정	층고 기준(3.3~4.5m) 산정	층수 데이터 + 서울시 건축물 현황 + 선행연구	용도별 설계 관행을 반영하여 층별 높이 기준 설정
4단계 모델 입력	건축물 높이·재질·층수	ENVI-met Building Settings	ENVI-met 모델 입력자료로 구 성 및 시뮬레이션에 적용

출처: 연구진 작성

[표 4-10] 건축물(구조 및 지붕)재질 연계 및 INX 변환 과정 요약

재질코드번호	코드재질명	해당 지붕유형
0200C1	Concrete Wall (Heavy)	(철근)콘크리트
0200R1	Roofing: Tile	기타지붕, 기와
0200IR	Iron (Single Layer)	철근
0200C3	Concrete Wall (Filed Block)	석재
0200SU	PVC Sun Sail	비닐재질
0200ST	Steel (One Layer)	철판마감
0200B2	Brick Wall	벽돌구조
0200G4	Clear Float glass (one layered)	유리
0200SG	Shading Plexiglass	플라스틱

출처: 연구진 작성

- 모델링 영역 및 경계조건 설정

본 연구에서는 모든 대상지의 모델링 영역을 300m × 300m의 정방형으로 통일하였다. 각 분석 구역은 도심, 주거, 녹지, 수체형 등 주요 도시 공간 유형을 고르게 포함하도록 선정하였으며, 이를 통해 LCZ 특성이 모델 내에서 충분히 재현될 수 있도록 구성하였다.

수직( $z$ ) 방향 격자 구성은 건축물 높이와 지형고(DEM)를 반영한 뒤, 모델 상단에 실제 최고 높이의 약 2배에 해당하는 천정고(ceiling height)를 설정하고, 여기에 여유고( $\alpha$ )를 추가하여 상층 유동 발달 및 복사·난류 계산의 수치적 안정성을 확보하였다.

격자 해상도는 1m로 설정하여, 보행자 높이 수준의 미기후뿐 아니라 건물, 가로수, 수면 가장자리 등에서의 급격한 열·운동량 변화를 세밀하게 재현할 수 있도록 하였다.

300m 정방형 도메인은 계산 부하를 관리하면서도 대상지의 대표적인 공간 구성(건축 밀도, 수변 등)을 유지할 수 있는 범위로, 해상도를 높일수록 계산량이 증가하는 특성을 고려하여 설정된 최적의 크기이다.

모델 영역의 경계 인접부에서는 형상 오류 및 비물리적 경계 영향을 최소화하기 위해, 건축물의 절반 이상( $1/2$ )이 모델링 영역 안에 포함되지 않는 경우 해당 객체를 제외하였다. 이는 경계 부근에 위치한 고층 건물이 모델에서 외벽으로 인식되어 바람의 흐름 계산이 불안정해지거나, 공기 흐름이 차단되어 계산이 수렴하지 않는 문제를 방지하기 위해 경계부 건축물을 단순화 및 제외한 조치이다.

또한, 외곽부에 건축물이 밀집한 일부 대상지에서는 ENVI-met의 Model Area 설정 단계에서 Nesting Grid를 15-20으로 지정하여, 경계로부터 약 15-20m의 완충 격자대(buffer zone)를 확보하였다. 이 완충대는 경계에서의 반사 및 왜곡 효과를 완화하고, 내부 관심 영역에 전달되는 인공적 경계 영향을 최소화함으로써 풍속 수렴 실패 등의 문제를 줄이는 데 목적이 있다.

[표 4-11] 모델 영역·격자(Grid)·경계 조건 설정 요약

항목	설정값	설명
시물레이션 공간	300m x 300m	도심·주거·녹지·수체형 유형 포함. 해당 크기는 LCZ 유형의 공간특성을 유지하면서도 계산 효율성을 확보할 수 있는 최적 범위로 설정함
격자 간 간격 $x, y$	1m (Grid size)	고해상도 시물레이션 결과 확보
수직 격자 간격 $z$	건물 높이 + DEM + $\alpha$	실제 높이의 약 2배로 상공 여유 확보
경계조건 보정	경계부 건물 제외(2/1 미만)	바람값 수렴 오류 방지
Nesting Grid 설정	15~20 Cells (15 ~ 20m 완충공간 확보)	경계 완충공간(Buffer zone) 확보

출처: 연구진 작성

#### 4) 주요 출력 변수 및 분석 항목

본 연구에서는 폭염 시 도시 열환경의 특성을 다각도로 파악하기 위해, 시뮬레이션 결과를 세 가지 열환경 지표를 중심으로 도출하였다. 선정된 주요 출력 변수는 잠재기온(PAT: Potential Air Temperature), 평균복사온도(MRT: Mean Radiant Temperature), 생리적등가온도(PET: Physiological Equivalent Temperature)이다.

잠재기온(PAT)은 기압과 고도 변화의 영향을 제거한 상태에서 대기 중 열 에너지의 절대적인 상태를 표현하는 지표로, 실제 기온보다 공간 간 비교에 더 적합하며 열환경의 상대적 차이를 안정적으로 파악할 수 있다. 평균복사온도(MRT)는 주변 표면으로부터 인체가 받는 모든 방향의 복사열을 등가 온도로 통합한 값으로, 표면 재질, 음영, 반사율 등 복사 환경의 영향을 반영한다. 이는 복사 중심의 환경 차이를 분석하는 데 유용하다. 생리적등가온도(PET)는 기온, 복사, 풍속, 습도 등 다양한 열환경 요소의 복합 효과를 인체 열수지 관점에서 통합한 지표로, 실제 사람이 느끼는 열쾌적성 및 열부하 수준을 정량화한다.

세 지표는 각각 대류·복사·인체 반응 측면의 열환경을 대표하며, 이를 상호 비교함으로써 도시 공간 내 열환경 분포, 인체 열부하, 시간대별 변화 특성을 종합적으로 분석할 수 있다.

[표 4-12] 주요 출력지표 및 분석 목적

지표	의미	분석 목적
Potential Air Temperature (°C)	기압 및 고도 영향을 제거한 표준화 기온	도시 내 대기열 분포 비교 및 고도간 열환경 차이 분석
Mean Radiant Temperature (°C)	복사열 총량 평가, 건축형태 및 음영 효과 검증	복사열 축적 및 냉각효율 비교
Physiological Equivalent Temperature (°C)	인체 열쾌적성 및 생리적등가온도 평가	폭염 취약성 유형화 및 열스트레스 등급화

출처: 연구진 작성

## 2. 폭염 위험 지역 미기후 분석

### 1) 열환경 평가 지표의 분석 체계 및 해석 기준

본 절에서는 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 도출된 잠재기온(PAT), 평균복사온도(MRT), 생리적등가온도(PET)를 주요 열환경 지표로 설정하고, 이들의 표현 체계와 해석 기준을 정리한다. 각 지표는 대류·축열 상태(PAT), 복사환경(MRT), 인체 열수지(PET)를 반영하며, 도시 열환경의 상이한 물리적 특성을 상호 보완적으로 설명한다. 이후 분석 결과 해석의 일관성을 확보하기 위해 지표 간 산정 기준, 시각화 방식, 해석 관점을 통합적으로 정립하고, 시계열 변화 및 대상지 간 비교가 가능한 공통 분석 틀을 마련하였다.

세 지표는 도시 공간의 열분포, 체감 열부하, 시간대별 변화 양상을 복합적으로 해석하는 데 핵심적인 역할을 한다. PAT는 기압 및 고도의 영향을 제거하여 대기열의 절대적 상태를 안정적으로 표현하며, MRT는 주변 복사환경의 영향, PET는 기온, 복사, 풍속, 습도 등 복합 요소에 따른 인체 체감반응을 정량화한다. 각각의 지표는 상이한 차원의 열환경 특성을 반영하지만, 병렬 해석을 통해 물리적 환경과 생리적 반응 간의 유의미한 상관관계를 도출할 수 있다.

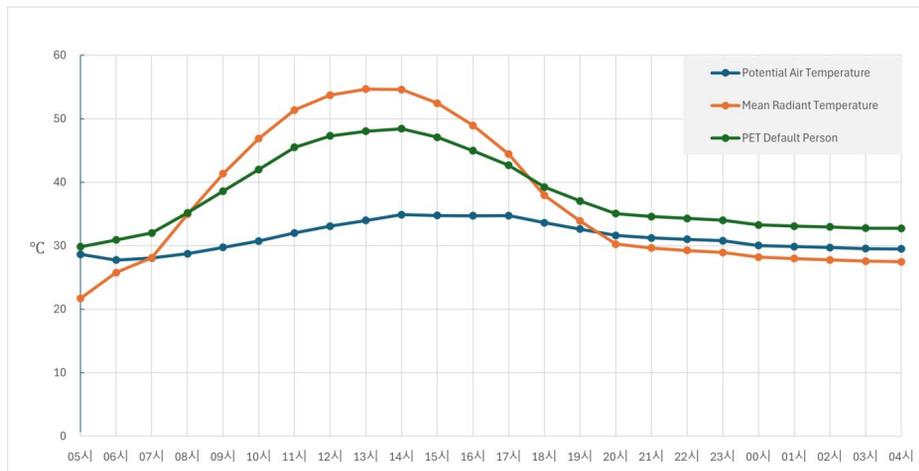
모든 지표는 보행자 높이(1.5m)에서 산정한 값을 기준으로 하며, 09시, 13시, 15시, 21시의 네 시점을 고정 시계열로 설정하였다. 이 시간 구간은 열 축적이 극대화되는 주간과 복사 냉각이 발생하는 야간을 함께 포괄하며, 도시 내 일변화의 전형적 흐름을 반영한다. 시뮬레이션 결과 지도는 지표별 특성을 고려한 개별 범례 스케일을 적용하였으며, 최댓값·최솟값·중윗값 등 핵심 통계를 병기하여, 절대 수치보다는 변화 양상, 고온 집중 구역의 분포, 시간대별 확산 특성에 주목할 수 있도록 구성하였다.

또한, 지표 간 비교를 통해 물리적 요인과 인체 열부하 간의 상호작용을 분석할 수 있다. 예컨대, MRT와 PET가 모두 높은 구역은 복사열이 인체 체감에 강하게 작용하는 공간으로 해석되며, 이는 향후 폭염 저감형 설계, 도시 녹지·표면계획, 열취약성 평가 기준 수립에 활용 가능한 기초 자료로 기능할 수 있다. 이와 같은 지표 기반 해석 체계는 물리 환경과 생리 반응 간 연계 분석을 가능하게 하며, 도시 열환경 대응 전략의 과학적 기반을 제공한다.

## 2) LCZ별 미기후 분석 결과

### ■ 여의도동(LCZ 1: Compact High-rise)

여의도동은 고층·고밀 블록이 연속된 콤팩트 고층(LCZ 1) 유형으로, 건축물 34동(평균 11층, 약 37m)과 수목 123본이 분포한다. 녹지율이 낮고, 불투수 포장 및 대면적 지붕·벽체가 넓게 노출되어 있어, 주간에는 복사 가열이 강하고, 야간에는 축열 잔류가 뚜렷한 전형적인 도심 열환경 특성을 보인다.



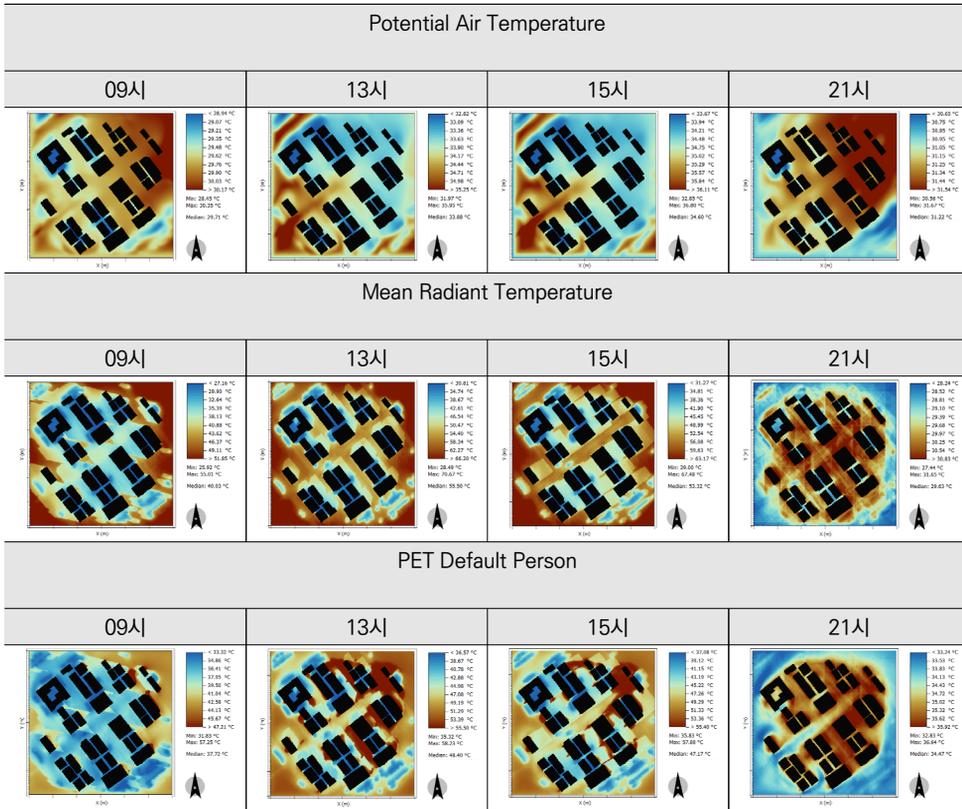
[그림 4-2] 여의도동(LCZ 1) 평가 지표 24시간 시계열: PAT·MRT·PET

출처: 연구진 작성

24시간 시계열에서는 평균복사온도(MRT)가 13시경 54.65°C, 생리적등가온도(PET)는 14시에 48.41°C, 잠재기온(PAT)은 동일 시간대인 14시에 34.89°C로 정점을 기록한다. 세 지표 모두 주간 복사 가열에 의한 열부하가 강하게 반영되며, 특히 MRT의 일변화 폭은 약 33.0°C, PET는 18.6°C, PAT는 7.2°C로 나타나, 복사환경의 급격한 변화가 체감온도와 공기온도 변화를 선도하는 구조임을 보여준다. 표준 시점별 비교에서는 09시에 PAT는 29.73°C, MRT는 41.34°C, PET는 38.57°C로 시작하여, 13-15시에는 각 지표가 주간 정점 수준에 도달한다(MRT: 54.65-52.43°C, PET: 48.01-47.08°C, PAT: 33.98-34.75°C). 이후 21시에는 MRT가 빠르게 감소(29.64°C)하는 반면, PET(34.58°C)와 PAT(31.22°C)는 축열 잔류로 인해 완만한 하강을 보이며, 야간에도 일정 수준의 열부하가 지속된다.

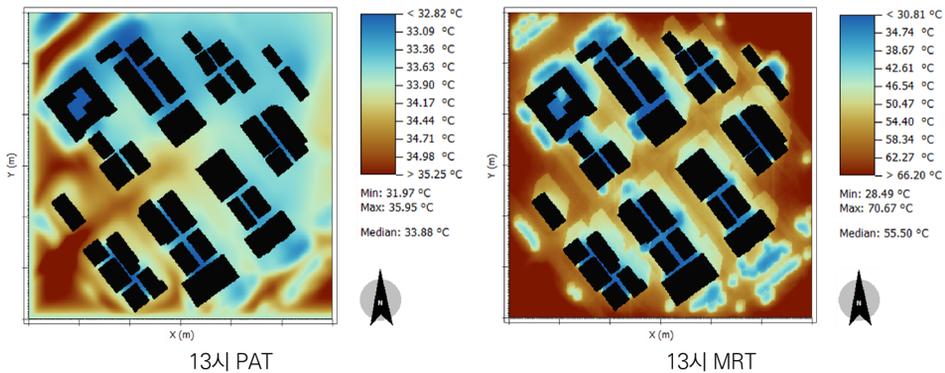
공간 분포에서는 고층 캐니언 구조가 지표별 열환경을 구분한다. 09시에는 캐니언 그늘을 따라 MRT·PET 저감대가 나타나고, 13-15시에는 외벽·포장부 중심의 고온핫스팟이 형성된다. 21시에는 MRT 급감에 비해 PET·PAT은 잔류열로 높게 유지된다. 종합하면, 여의도동(LCZ 1)은 정오에서 오후 시간대의 강한 복사열 축적과 야간 냉각 지연이 병존하는 '도심 축열형' 열환경 특성을 갖는다.

[표 4-13] 여의도동(LCZ 1) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21시; PAT·MRT·PET



출처: 연구진 작성

LCZ 1 지역의 폭염 피크시간대인 13시의 PAT와 MRT를 비교해보면 건축물과 가까운 북동 측면에서, 건물이 밀집한 중심부가 외부보다 열환경이 상대적으로 쾌적하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면 PET를 기준으로 보면 사람이 체감하는 온도는 건물 중심부가 더 높을 수 있으며, 건축물의 남서쪽에서 특히 더 높게 나타난다.

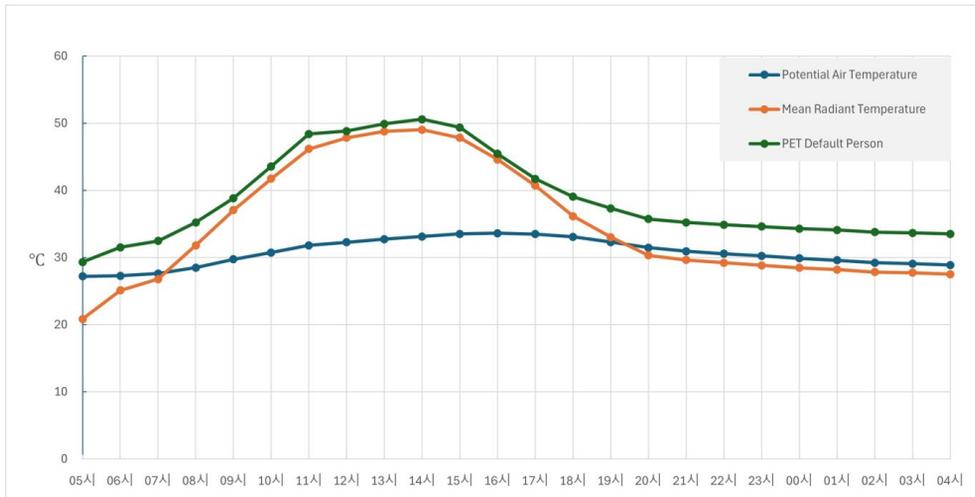


[그림 4-3] LCZ 1 지역 피크 시간대 PAT와 MRT 분포

출처: 연구진 작성

### ■ 송파동(LCZ 2: Compact midrise)

송파동은 평균 4층(약 12m)의 중층 건축물이 조밀하게 배치된 콤팩트 중층형(LCZ 2) 지역으로, 건축물 278동과 수목 79본이 분포한다. 가로폭이 좁은 블록형 가로망과 높은 건폐율, 불연속적인 녹지로 인해 통풍이 제한되며, 고층 대비 낮은 천공률(SVF)로 인해 주간에는 강한 복사축열이, 야간에는 완만한 냉각이 나타난다.



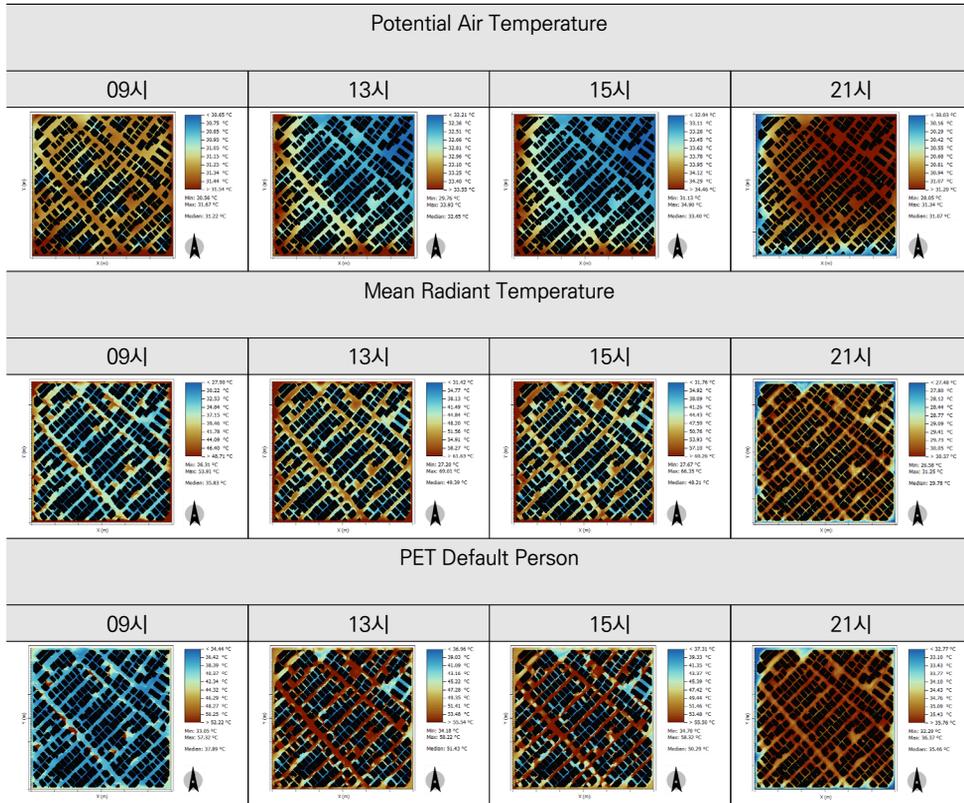
[그림 4-4] 송파동(LCZ 2) 평가 지표 24시간 시계열: PAT·MRT·PET

출처: 연구진 작성

24시간 시계열에서는 평균복사온도(MRT)와 생리적등가온도(PET)가 각각 14 시경 49.03℃, 50.59℃로 정점을 형성하고, 잠재기온(PAT)은 16시 33.62℃로 가장 늦게 최고점에 도달한다. 지표별 일변화 폭은 MRT는 11.7℃, PET는 11.8℃, PAT는 3.9℃로, 복사·체감 지표의 변동성이 공기열보다 크다. 표준 시점별로는 09시 PAT는 29.73℃, MRT는 37.04℃, PET는 38.82℃이며, 13-15시에는 PAT는 32.74-33.51℃, MRT는 48.77-47.82℃, PET는 49.89-49.36℃로 열부하가 정점에 달한다. 21시에는 각각 30.94℃ (PAT), 29.64℃ (MRT), 35.21℃ (PET)로 감소한다. 일몰 이후(18-21시) 하강폭은 MRT는 -6.50℃, PET는 -3.84℃, PAT는 -2.13℃로, 복사와 체감 지표가 더 빠르게 완화되는 경향을 보인다.

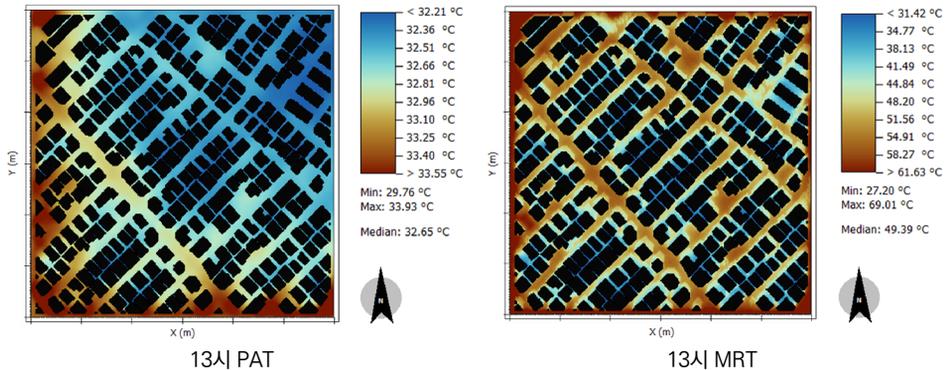
공간 분포상 09시에는 중층 건물의 캐니언 내부에서 MRT, PET 저감대가 형성되고, 13-15시에는 일사 노출이 집중되는 남향 가로축과 교차부를 따라 띠 모양의 고온핫스팟이 나타난다. 같은 시각 PAT는 통풍 제한과 축열 영향으로 블록 중심부에서 상대적으로 높게 유지되며, 21시에는 MRT가 급격히 하강하나 PAT 및 PET는 건물 표면 및 포장층의 축열 방출로 완만히 감소한다. 종합하면 송파동(LCZ 2)은 '주간 복사 축열 지배-오후 지연 가열-야간 완만한 냉각'이 결합된 전형적인 '콤팩트 중층형(Compact Mid-rise)' 도시 열환경 구조를 보인다.

[표 4-14] 송파동(LCZ 2) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21시; PAT·MRT·PET



출처: 연구진 작성

LCZ 2의 경우 LCZ 3과 함께 가장 폭염에 취약한 유형이기 때문에 대부분의 지역에서 폭염에 취약한 것으로 분석되고 있다. 폭염 피크 시간대인 13시를 기준으로 보면 일부 지역을 제외하고 대부분의 지역에서 MRT와 PET가 높게 나타나고 있다. 도로나 보행로가 없는 건물과 건물 사이의 좁은 틈에서는 MRT와 PET가 낮은 경우가 있으나 실제 시민에게는 영향을 주지 못할 것으로 판단된다.

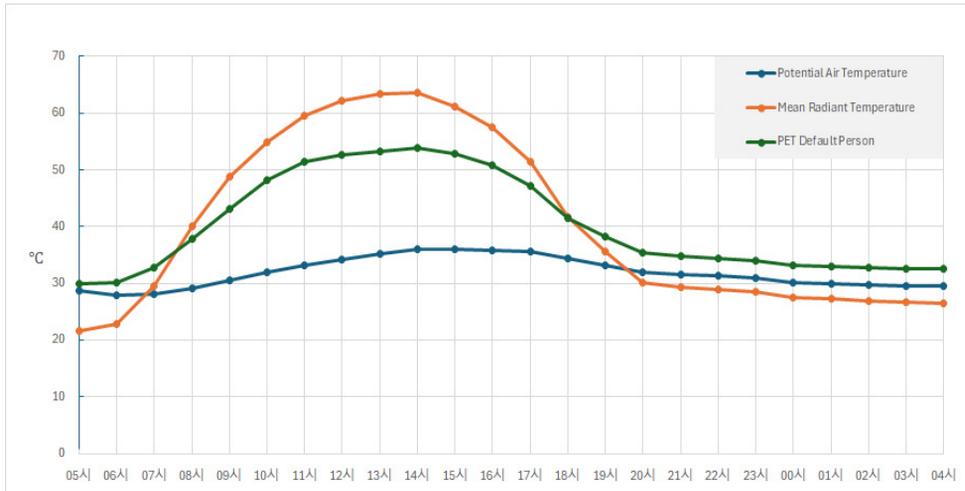


[그림 4-5] LCZ 2 지역 피크 시간대 PAT와 MRT 분포

출처: 연구진 작성

### ■ 문래동4가(LCZ 3: Compact low-rise)

문래동4가는 저층 건축물이 좁은 가로를 사이에 두고 연속적으로 배치된 콤팩트 저층(LCZ 3) 유형으로, 1~3층 규모의 블록형 건물이 촘촘히 배열되어 있다. 대상지 내부는 도로와 건물 사이, 건물 간 경계부에 다양한 포장 공간이 산재해 불투수 면적 비율이 높다. 가로수와 소규모 녹지는 주로 도로변과 블록 외곽에 선형·점상으로 분포해, 블록 내부에는 그늘과 완충녹지가 상대적으로 부족하며 포장 공간 중심의 복사 가열이 두드러진다.



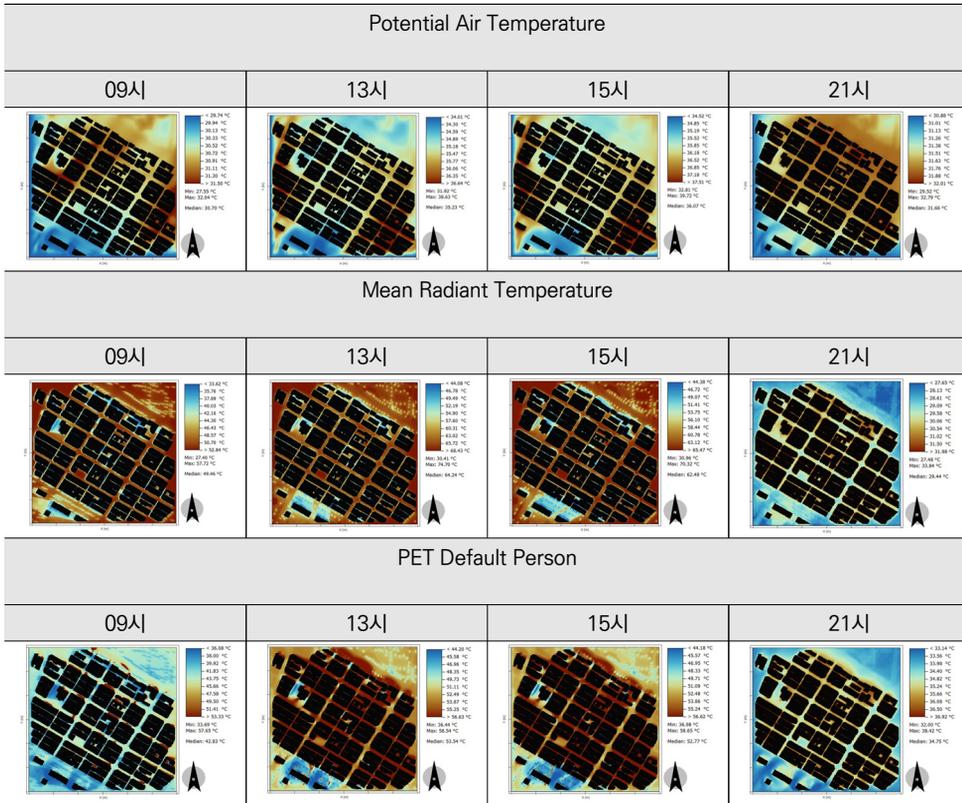
[그림 4-6] 문래동4가(LCZ 3) 평가 지표 24시간 시계열: PAT·MRT·PET

출처: 연구진 작성

24시간 시계열을 보면 세 지표(PAT·MRT·PET)는 모두 14시에 정점을 기록한다. 이때 잠재기온(PAT)은 약 36°C, 평균복사온도(MRT)는 약 64°C, 생리적등가온도(PET)는 약 54°C까지 상승하며, 아침 이후 빠르게 고온대로 진입한 뒤 13-15시에 가장 높은 열부하가 지속된다. 일변화 폭은 PAT는 약 8°C, MRT는 40°C 이상, PET는 약 24°C 수준으로 MRT 변동이 특히 크다. 21시 이후에도 PAT와 PET가 30°C 안팎으로 유지되어, 포장 및 건물 인접 불투수면에 축적된 열의 영향으로 야간에도 열 스트레스가 충분히 해소되지 않는 양상이 나타난다.

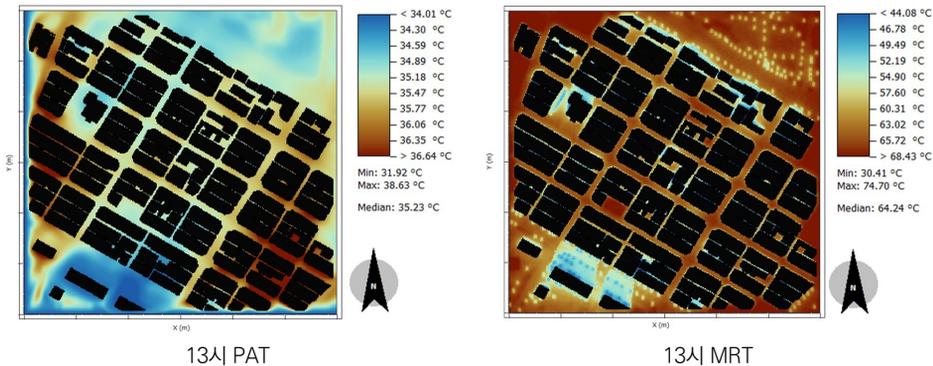
공간 분포를 보면, 09시에는 도로를 따라 연속된 포장 공간과 블록 가장자리의 노출 면에서 MRT·PET가 상대적으로 높고, 가로수·소규모 녹지 인접 구간에서는 다소 낮은 값이 나타난다. 13-15시에는 교차로와 블록 가장자리의 연속된 포장 공간, 골목 축을 따라 고온핫스팟이 형성되며, 블록 내부에서는 음영이 부족한 구간에서 MRT, PET가 매우 높게 나타난다. 21시에는 일사 차단으로 MRT가 전반적으로 감소하지만, 낮 동안 가열된 포장 공간과 건물 인접부에서 방출되는 축열 영향으로 골목과 인접 포장 공간을 따라 PAT, PET가 주변보다 높게 유지된다.

[표 4-15] 문래동4가(LCZ 3) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21시; PAT·MRT·PET



출처: 연구진 작성

LCZ 3 지역의 폭염 피크시간대인 14시의 PAT와 MRT를 비교해보면, 가로수와 인접 녹지가 있는 도로변·필지 경계부에서 연속된 포장·지붕이 집중된 블록 내부보다 상대적으로 쾌적한 열환경이 나타난다. 그러나 PET 관점에서는 상가 전면부 주차장, 골목 교차부 등 보행 활동이 집중되는 포장 공간에서 체감온도가 더 높게 나타나며, 특히 남서향으로 개방된 생활가로와 교차로에서 열 스트레스가 가장 크게 나타난다.

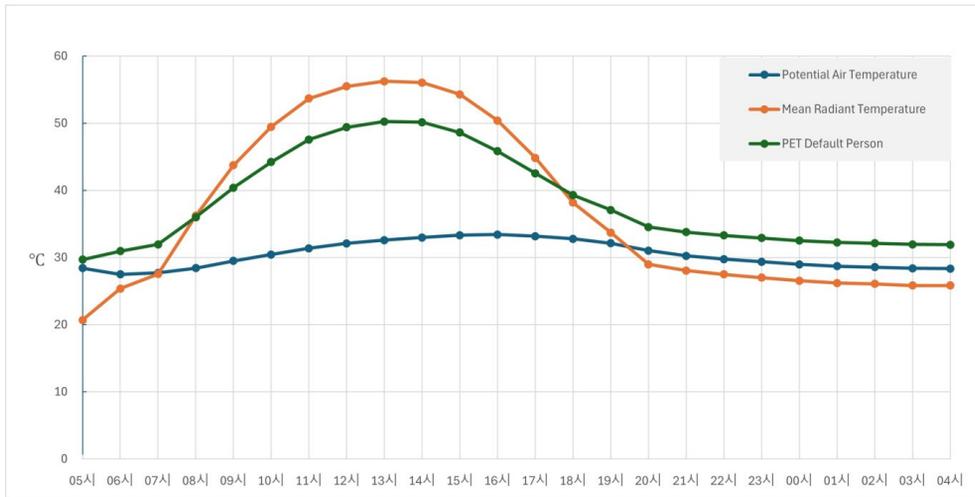


[그림 4-7] LCZ 3 지역 피크 시간대 PAT와 MRT 분포

출처: 연구진 작성

### ■ 사당동(LCZ 4: Open High-rise)

사당동은 평균 13층(약 39m) 건축물이 비교적 넓은 간격을 두고 배치된 유형으로, 건축물 51동과 수목 575본이 분포한다. 판상·타워형 블록과 넓은 포장부가 혼재하며, 가로수와 소규모 녹지축이 분포해 시각적·공간적 차폐가 일부 형성된 구조다. 이러한 배치는 주간 복사 가열은 강하나, 저층 밀집지 대비 야간 냉각은 더 원활하게 나타난다.



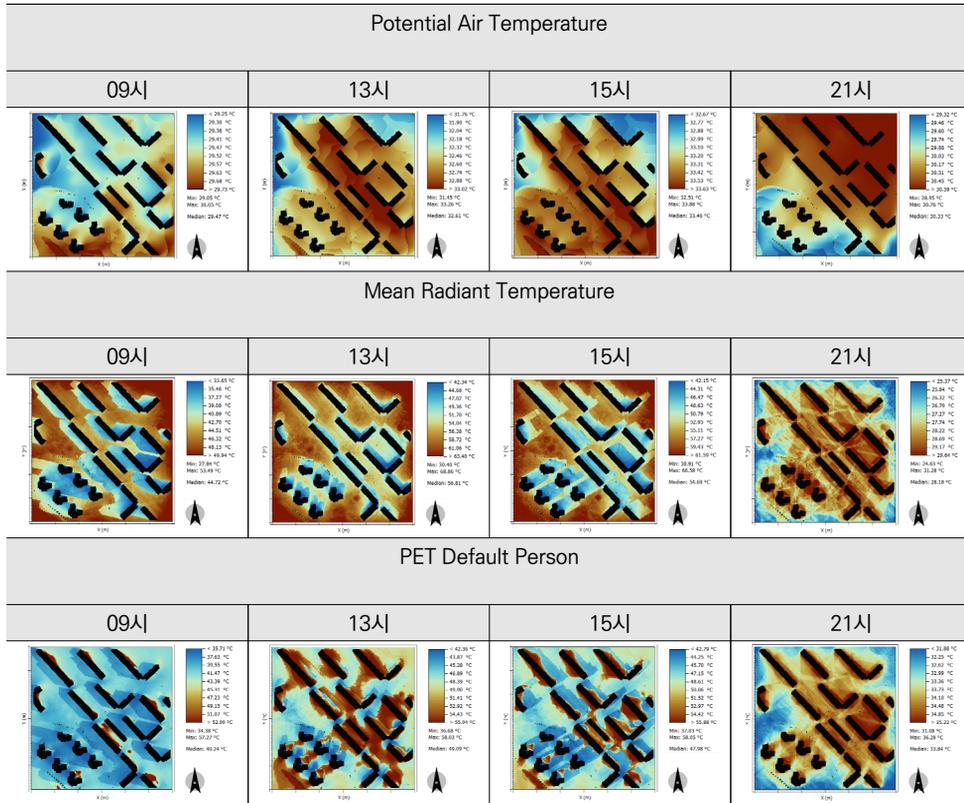
[그림 4-8] 사당동(LCZ 4) 평가 지표 24시간 시계열: PAT·MRT·PET

출처: 연구진 작성

24시간 시계열에서는 평균복사온도(MRT)가 13시 56.25°C, 생리적등가온도(PET)가 13시 50.25°C로 정점에 도달하고, 잠재기온(PAT)은 16시 33.41°C로 가장 늦게 최솟값을 보인다. 표준 시점별 값은 09시 기준 PAT는 29.48°C, MRT는 43.73°C, PET는 40.38°C이며, 13-15시에는 각각 32.58-33.33°C (PAT), 56.25-54.29°C (MRT), 50.25-48.60°C (PET)로 열부하가 정점에 이른다. 21시에는 세 지표가 각각 30.24°C (PAT), 28.06°C (MRT), 33.77°C (PET)로 하강한다. MRT의 일변화 폭은 35.56°C, PET는 20.57°C, PAT는 5.91°C이며, 복사·체감 지표는 18-21시 동안 급격히 완화된다(MRT: -10.10°C, PET: -5.53°C, PAT: -2.55°C).

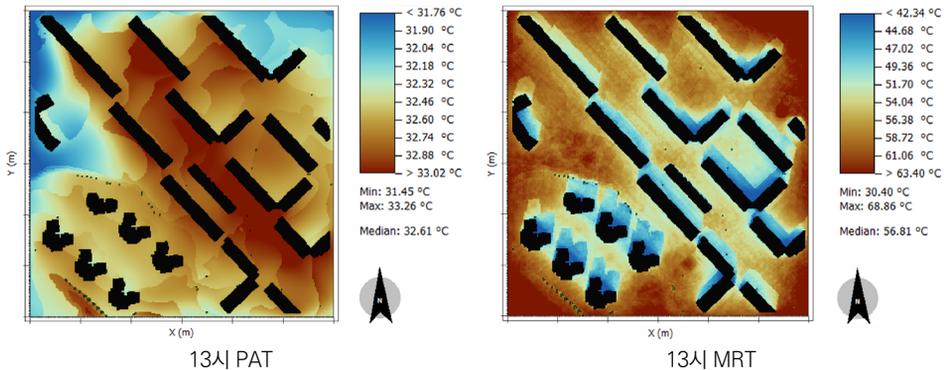
공간분포를 보면, 09시에는 건물 그늘과 녹지 주변에 MRT, PET 저감대가 형성되고, 13-15시에는 블록 외곽 포장부와 일사면을 따라 띠 모양의 고온핫스팟이 발달한다. 같은 시각 잠재기온은 통풍 저하와 축열 영향으로 블록 내부 고온대가 점차 확대되며, 21시에는 MRT가 급락하고 수목 밀집구간을 따라 저온대가 넓게 연결된다. 반면 일부 포장·건물 주변은 축열 방출로 인해 PAT, PET가 상대적으로 높은 값을 유지한다. 종합하면, 사당동(LCZ 4)은 '정오 복사 피크-오후 지연 가열-야간 완화 가속'이 병존하는 '컴팩트 중층형' 열환경을 보이며, 녹지·그늘의 배치가 체감열 저감, 통풍 관리는 공기열 억제에 주요하게 작용한다.

[표 4-16] 사당동(LCZ 4) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21시; PAT·MRT·PET



출처: 연구진 작성

LCZ 4 지역은 폭염 피크 시간대의 MRT와 PET 기준 취약지역 분포가 상이하게 나타난다. MRT 기준으로는 건축물과 건축물 사이 공간의 값이 높지 않게 나타나는 반면 PET는 건축물과 건축물 사이 공간에서 가장 높게 나타나는 경향이 확인되었다. 즉 건축물의 배치로 인해 대기의 순환이 막혀 건축물과 건축물 사이 지역의 PAT가 상승하였고, 이로 인해 PET가 높아진 것으로 추정할 수 있다.

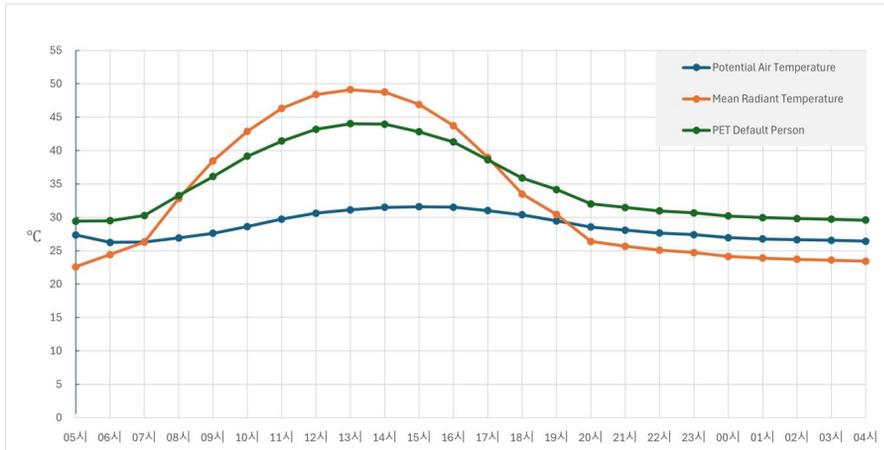


[그림 4-9] LCZ 4 지역 피크 시간대 PAT와 MRT 분포

출처: 연구진 작성

### ■ 신촌동(LCZ 5: Open Mid-rise)

신촌동은 평균 4층(약 20m) 규모의 중층 건물이 넓은 간격으로 배치된 개방형 중층 유형으로, 건축물 14동과 수목 265본이 분포한다. 대지 내 공지, 소규모 녹지, 보행광장 등이 혼재하고, 블록 간 이격으로 일사 노출은 크지만, 수목 캐노피와 건물 그림자가 시차를 두고 형성되어 복사부하를 완충한다. LCZ 2(컴팩트 중층)보다 통풍 경로가 열려 있어 과도한 열 축적은 적지만, 노출 포장부에서는 국지적 고온핫스팟이 발생하기 쉽다.



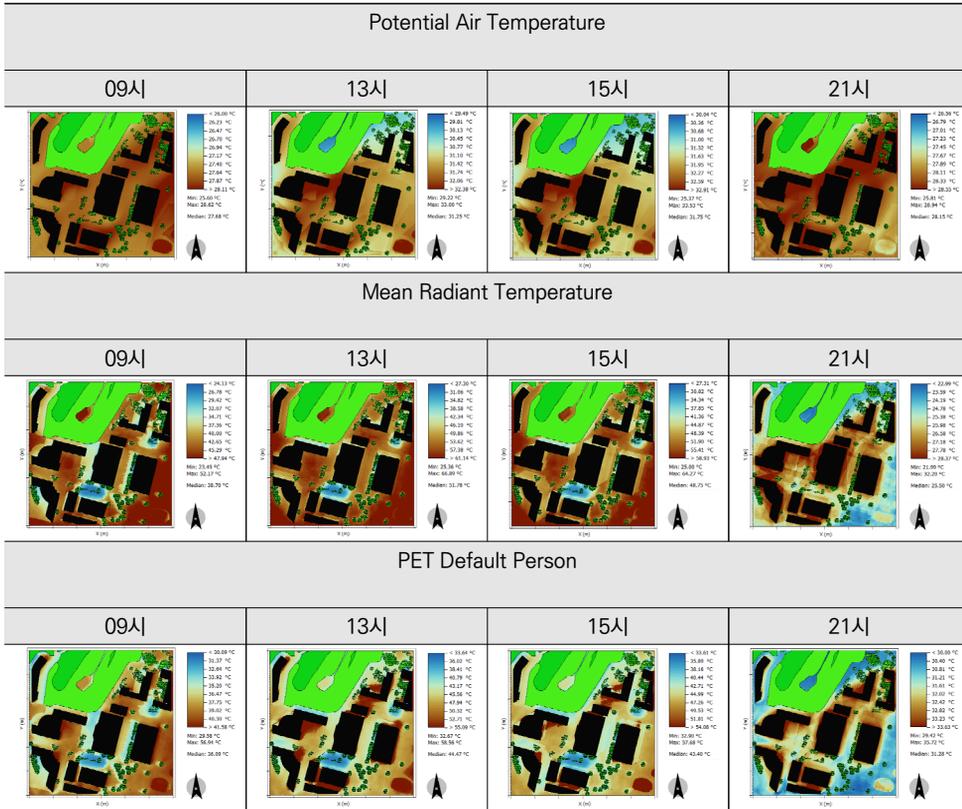
[그림 4-10] 신촌동(LCZ 5) 평가 지표 24시간 시계열: PAT·MRT·PET

출처: 연구진 작성

24시간 시계열에서 평균복사온도(MRT)는 13시 49.12°C, 생리적등가온도(PET)는 같은 시각 44.03°C로 정점에 도달하고, 잠재기온(PAT)은 15시 31.60°C로 가장 늦게 최솟값을 보인다. 09시 기준 지표는 PAT는 27.61°C, MRT는 38.45°C, PET는 36.11°C이며, 13-15시에는 각각 31.11-31.60°C (PAT), 49.12-46.91°C (MRT), 44.03-42.82°C (MRT)로 열부하가 정점을 형성한다. 21시에는 28.08°C (PAT), 25.68°C (MRT), 31.47°C (MRT)로 하강하며, 일변화 폭은 PAT가 5.36°C, MRT가 26.53°C, PET가 14.61°C다. 18-21시 하강폭은 MRT가 -7.82°C, PET가 -4.42°C, 잠재기온가 -2.30°C로 복사·체감열이 공기열보다 빠르게 완화된다. 이는 개방 배치와 수목 캐노피가 주간 복사를 완충하고, 야간 열저감을 촉진하는 구조를 시사한다.

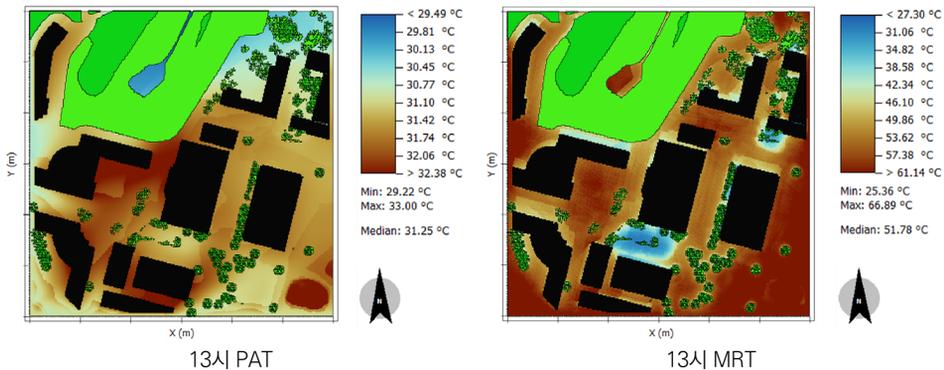
공간분포를 보면, 09시에는 수목·녹지와 건물 그늘을 따라 MRT, PET 저감대가 먼저 나타나고, 13-15시에는 광장, 도로 등의 노출 포장부에서 띠 모양의 고온핫스팟이 형성된다. 같은 시각 잠재기온은 포장·벽체 인접부에서 점차 상승하지만, 블록 간 이격으로 인해 고온대가 넓게 연결되지 않고 분산된 열 패턴을 보인다. 21시에는 MRT가 급락하고, 녹지와 그늘대를 따라 연속적인 저온축이 형성되며, 잠재기온과 PET도 안정적으로 수렴한다. 종합하면, 신촌동은 정오 복사 피크는 비교적 낮고, 일몰 이후 빠른 완화가 가능한 ‘개방 중층형’ 열환경을 보이며, 그늘, 수목, 통풍축의 연계가 한낮 체감열 저감과 야간 열배출에 핵심적으로 기여한다.

[표 4-17] 신촌동(LCZ 5) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21시; PAT·MRT·PET



출처: 연구진 작성

LCZ 5의 경우 규모가 큰 식생에 의한 쿨링 효과가 다른 LCZ 유형보다 두드러지게 나타났다. 중간 조금 아래쪽에 위치한 쿨링존은 수고 20m 수준의 양버즘나무와 느티나무가 2열 식재되어 있다. 전반적으로 건물과 건물 사이 공간에서 MRT에 비해 PET가 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 이 또한 LCZ 4와 같이 대기 흐름과 관련이 있는 것으로 판단된다.

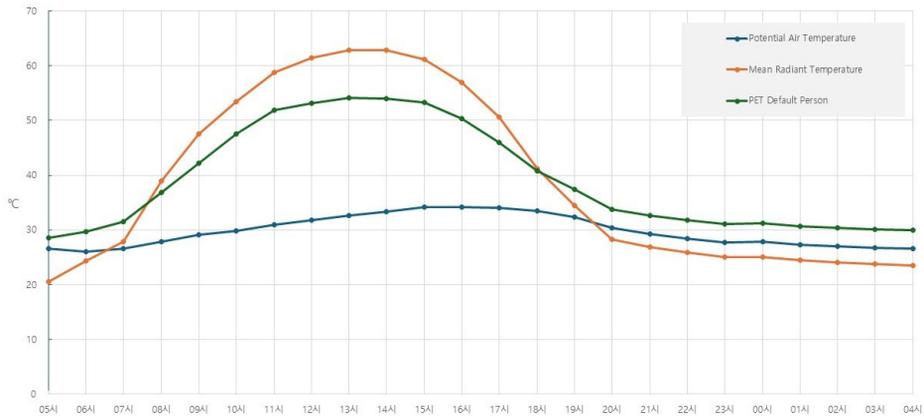


[그림 4-11] LCZ 5 지역 피크 시간대 PAT와 MRT 분포

출처: 연구진 작성

### ■ 중계동(LCZ 6: Open low-rise)

중계동은 2층 안팎의 저층 주거 건축물이 일정한 간격으로 배치된 개방 저층(LCZ 6) 유형으로, 건물 사이사이에 보행로와 소규모 개방 공간, 수목이 모자이크처럼 분포한다. 도로망과 건물 경계부를 따라 포장 공간과 녹지가 함께 나타나며, 블록 내부에는 가로수와 개별 수목이 분산 배치되어 부분적인 그늘과 증발냉각 효과를 제공한다. 이러한 구조는 콤팩트한 저층 주거지에 비해 통풍 여지는 크지만, 포장 면적이 적지 않아 일사 시간대에는 열 축적이 뚜렷하게 나타난다.



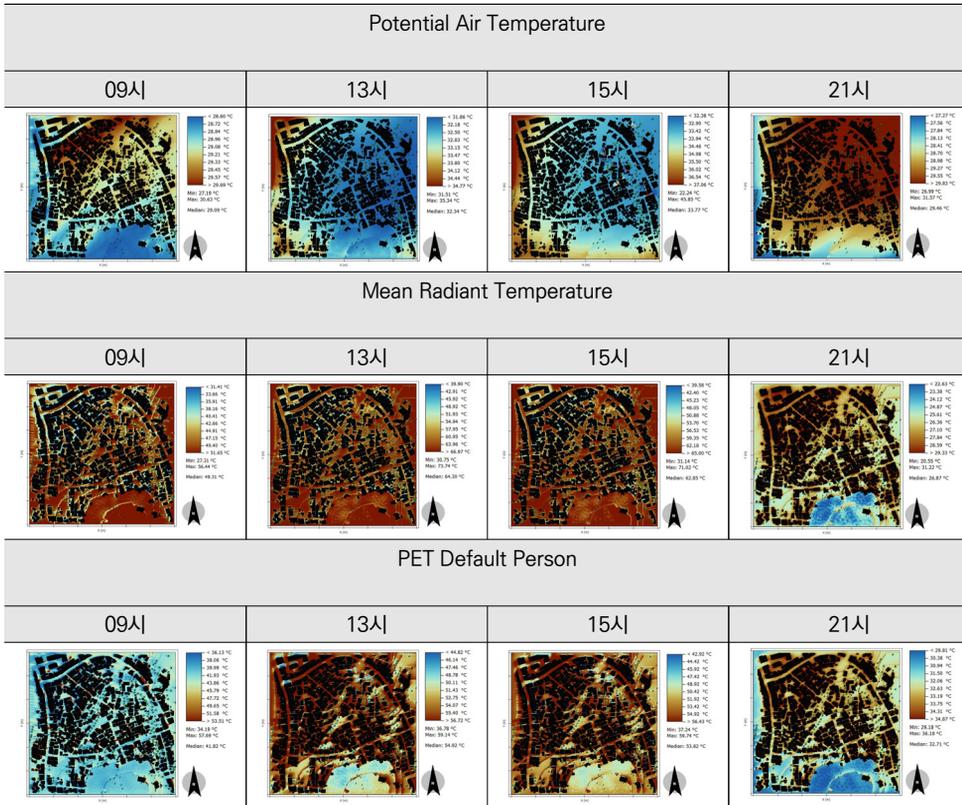
[그림 4-12] 중계동(LCZ 6) 평가 지표 24시간 시계열: PAT·MRT·PET

출처: 연구진 작성

24시간 시계열을 보면 평균복사온도(MRT)와 생리적등가온도(PET)는 13시에 각각 약 63°C와 54°C로 가장 높고, 잠재기온(PAT)은 15-16시경 약 34°C까지 완만하게 상승한다. 세 지표의 일변화 폭은 MRT가 40°C 이상, PET는 약 25°C, PAT는 약 8°C 수준으로, 복사환경의 변동성이 가장 크다. 09시 무렵에는 이미 MRT와 PET가 고온대로 진입해 오전부터 높은 열부하가 시작되며, 13-15시 동안 세 지표가 모두 정점 수준을 유지한다. 21시 이후에도 PAT와 PET가 각각 29°C, 32-33°C 내외로 유지되어, 포장된 지역과 건물 주변 불투수면에 축적된 열이 야간까지 잔류하는 양상을 보인다.

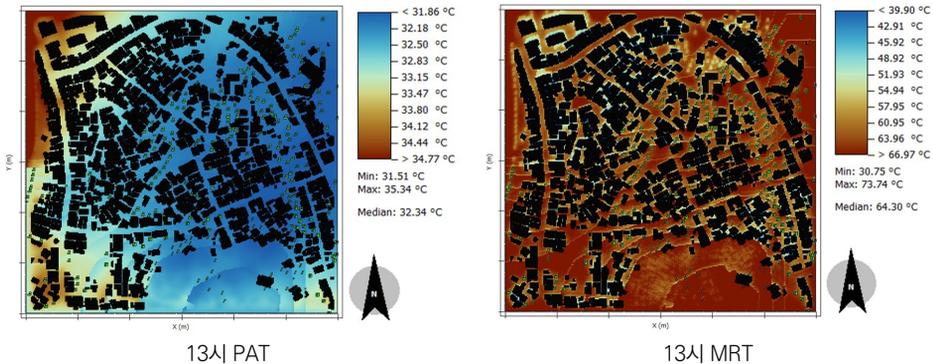
공간 분포를 보면, 09시에는 도로를 따라 형성된 포장 공간과 건축물이 밀집한 내부 구간에서 PAT, MRT, PET가 상대적으로 높고, 외곽부 녹지와 개방 공간에서는 다소 낮은 값이 나타난다. 13-15시에는 도로축과 블록 가장자리의 연속된 포장 공간을 따라 고온핫스팟이 형성되며, 건물 간 이격이 좁거나 포장 비율이 높은 구간에서 MRT, PET가 두드러지게 높다. 21시에는 일사 차단으로 MRT는 전반적으로 크게 낮아지지만, 낮 동안 가열된 포장 공간과 건물 인접부에서 방출되는 축열 영향으로, 내부 도로와 포장 공간을 따라 PAT, PET가 주변보다 높게 유지된다.

[표 4-18] 중계동(LCZ 6) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09:13:15:21시; PAT·MRT·PET



출처: 연구진 작성

LCZ 6 지역의 폭염 피크 구간(13-15시) 중 대표 시점인 13시의 PAT와 MRT 분포를 비교해 보면, 가로수와 수목이 집중된 도로변·경계부에서 두 지표가 상대적으로 낮아 국지적인 완화 효과가 나타난다. 반면 포장 면적이 넓고 그늘이 부족한 도로 교차부와 건물 사이 개방 포장 공간에서는 PAT와 MRT가 모두 높게 나타나며, 이들 구간에서 보행자가 경험하는 열 스트레스가 가장 크게 나타나는 것으로 해석된다.

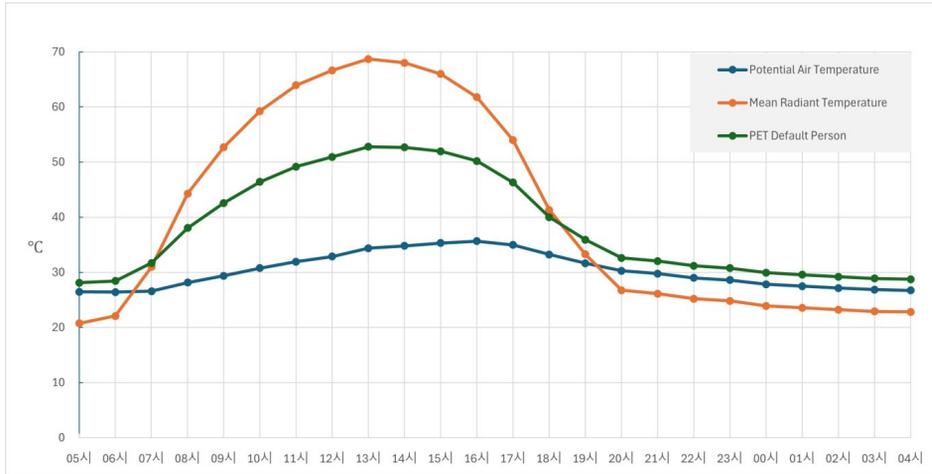


[그림 4-13] LCZ 6 지역 피크 시간대 PAT와 MRT 분포

출처: 연구진 작성

### ■ 개화동(LCZ D: Low plants)

개화동은 저식생 기반의 개방형 평지로, 상주 건축물이 없으며 수목 피복도는 단순 식생(Simple Plant) 위주로 매우 낮은 편이다. 가로망과 농로 등 선형 포장부가 일부 분포하고, 주변 차폐 요소가 거의 없어 주간에는 일사 노출이 크고, 야간에는 복사 냉각이 빠르게 진행되는 공간 구조를 보인다. 이러한 특성은 세 평가 지표의 일변화 및 공간 분포 전반에서 '주간 급가열-야간 급냉각'의 열환경 양상을 강화한다.



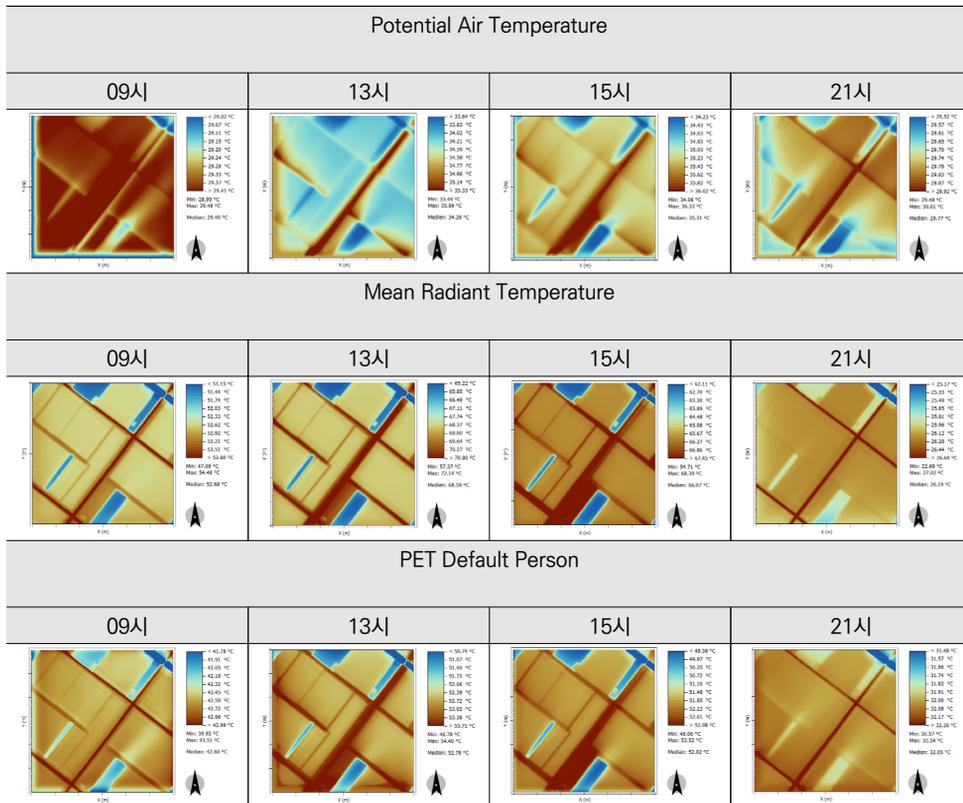
[그림 4-14] 개화동(LCZ D) 평가 지표 24시간 시계열: PAT·MRT·PET

출처: 연구진 작성

24시간 시계열 분석 결과, 평균복사온도(MRT)가 09시 이후 급상승하여 13-14시경 최고치에 도달한 뒤, 일몰 이후 빠르게 하강하며 가장 큰 일변화를 나타낸다. 생리적등가온도(PET)도 13-14시경 최댓값에 도달하여 한낮 체감열 부담이 가장 크게 나타났으며, 잠재기온(PAT)은 MRT와 PET보다 약간 늦은 15시 무렵 최고점에 도달하는 경향을 보였다. 세 지표 모두 19시 이후 급격히 하강하며, 21시 무렵에는 약 30°C 수준으로 수렴하고, 이후에는 안정적인 저온 상태를 유지한다. 요약하면, 한낮에는 복사 가열이 체감열 상승을 선도하고, 오후 중반에는 대기 자체의 축열이 정점에 이르며, 일몰 이후에는 모든 지표가 빠르게 평형 상태로 복귀하는 경향을 보인다.

4개 시점의 공간 분포에서도 유사한 패턴이 확인된다. 09시에는 포장부를 중심으로 국지적 가열이 시작되며, 13-15시에는 노출된 경작지와 잔디면이 광범위한 고온대로 확산되고, 선형 포장부에서는 띠 형태의 고온 핫스팟이 뚜렷하게 나타난다. 수로나 습윤지 주변은 상대적으로 낮은 MRT 및 PET 영역이 형성되어 열 대비가 뚜렷하게 나타나며, 21시에는 전체적으로 냉각된 가운데, 포장부를 따라 일부 잔존하는 미약한 고온대만 확인된다. 결론적으로, 개화동(LCZ D)은 한낮 복사 노출에 매우 민감한 반면, 차폐 및 축열 요소가 부족해 일몰 이후 빠르게 냉각되는 '개방 저식생' 공간 유형의 전형적인 열환경 특성을 보인다.

[표 4-19] 개화동(LCZ D) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09:13·15·21시; PAT·MRT·PET

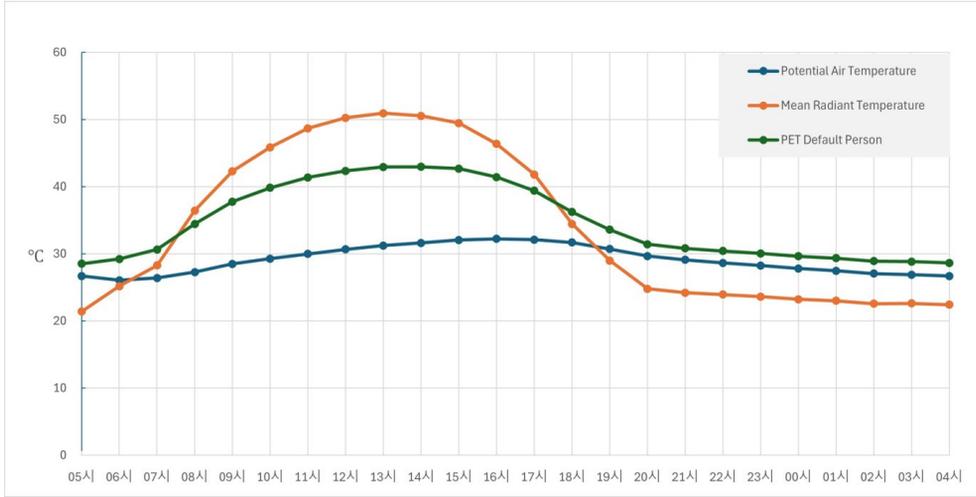


출처: 연구진 작성

### ■ 신천동(LCZ G: Water)

신천동은 대수면(LCZ G)과 수변 녹지가 중심을 이루는 지역으로, 주변에는 일부 중층 이상의 건축물이 혼재되어 있다(건축물 8개, 평균 10층, 평균 높이 약 33m; 수목 58본). 수면은 일사 흡수와 증발산에 따른 열완충 효과가 크며, 인접한 포장지나 고밀 건축지역과 뚜렷한 열적 대비를 형성한다. 이로 인해 한낮에는 수면 중심의 저온대가, 일몰 이후에는 광역적인 냉각대가 형성되는 특성을 보인다.

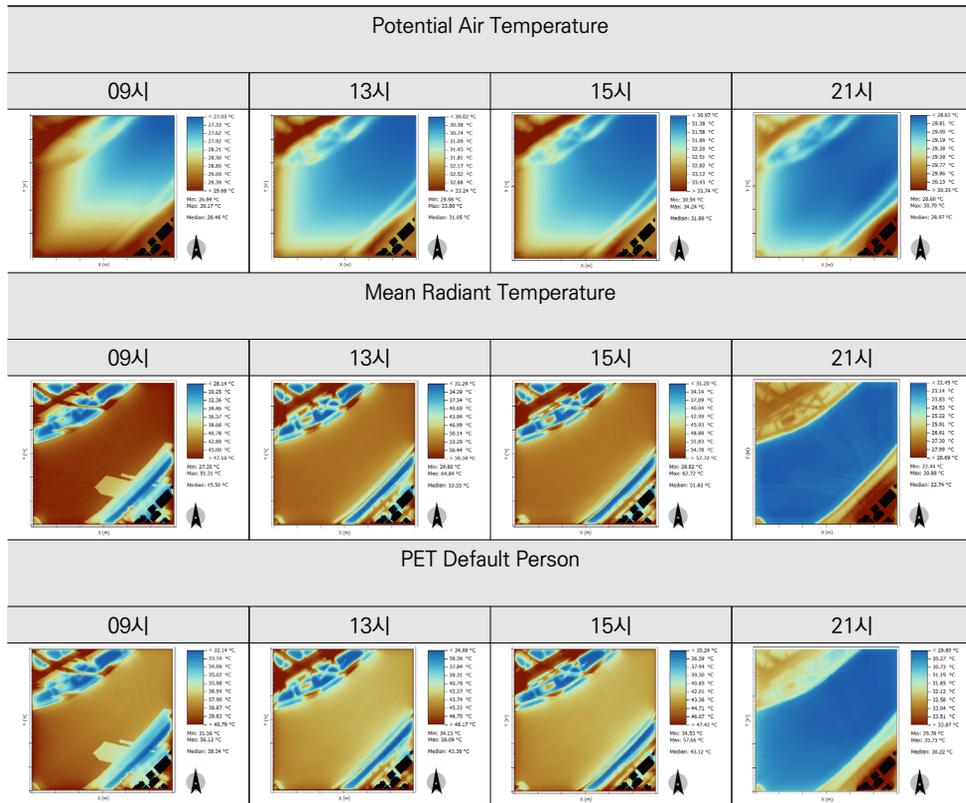
24시간 시계열 분석 결과, 세 평가 지표의 최고 시점과 크기는 서로 다르게 나타난다. 평균복사온도(MRT)는 13시경 약 50.9℃, 생리적등가온도(PET)는 14시경 약 42.9℃, 잠재기온(PAT)은 16시경 약 32.2℃로 정점을 기록한다. 세 지표 모두 개화동(LCZ D)에 비해 일변화 폭이 작게 나타나며(MRT: -17.8℃, PET: -9.7℃, PAT: -3.5℃), 이는 수면의 높은 열용량과 증발잠열 작용이 주간 가열을 억제하고 야간 냉각을 완충하기 때문으로 해석된다. 일몰 이후(18시-21시)에는 MRT가 약 10.2℃, PET가 약 5.4℃, PAT가 약 2.6℃ 하강하며, 열부하가 급격히 완화되는 경향이 뚜렷하다. 21시에는 세 지표가 각각 약 29.1℃ (PAT), 24.2℃ (MRT), 30.8℃ (PET)로 수렴하면서 상대적으로 안정된 야간 열환경을 유지한다.



[그림 4-15] 신천동(LCZ G) 평가 지표 24시간 시계열: PAT·MRT·PET

출처: 연구진 작성

[표 4-20] 신천동(LCZ G) 평가 지표 시점별 공간분포 비교: 09·13·15·21시; PAT·MRT·PET



출처: 연구진 작성

공간 분포 측면에서도 수면 중심의 저온대와 육지부의 고온대가 시계열 전반에 걸쳐 일관되게 나타난다. 09시에는 수변부를 중심으로 낮은 MRT, PET 구간이 먼저 형성되고, 13-15시에는 수면 전역이 광범위한 저온대(열완충 구역)를 유지하는 반면, 인접 포장부에서는 띠 모양의 고온핫스팟이 생성된다. 21시에는 냉각대가 수면에서 시작되어 수면 녹지로 확산되며, 포장부 고온대는 급격히 약화된다. 종합하면, 신천동(LCZ G)은 낮 동안에도 복사열과 체감 열부하가 낮고, 해가 진 뒤에는 빠른 냉각 효과가 공간 전역으로 확산되는 ‘수면 완충형’ 열환경 특성을 보인다.

### 3. 공간 유형별 폭염 취약 건축물 도출

#### 1) 열 지표 중첩 기반 통합 열취약도 산정

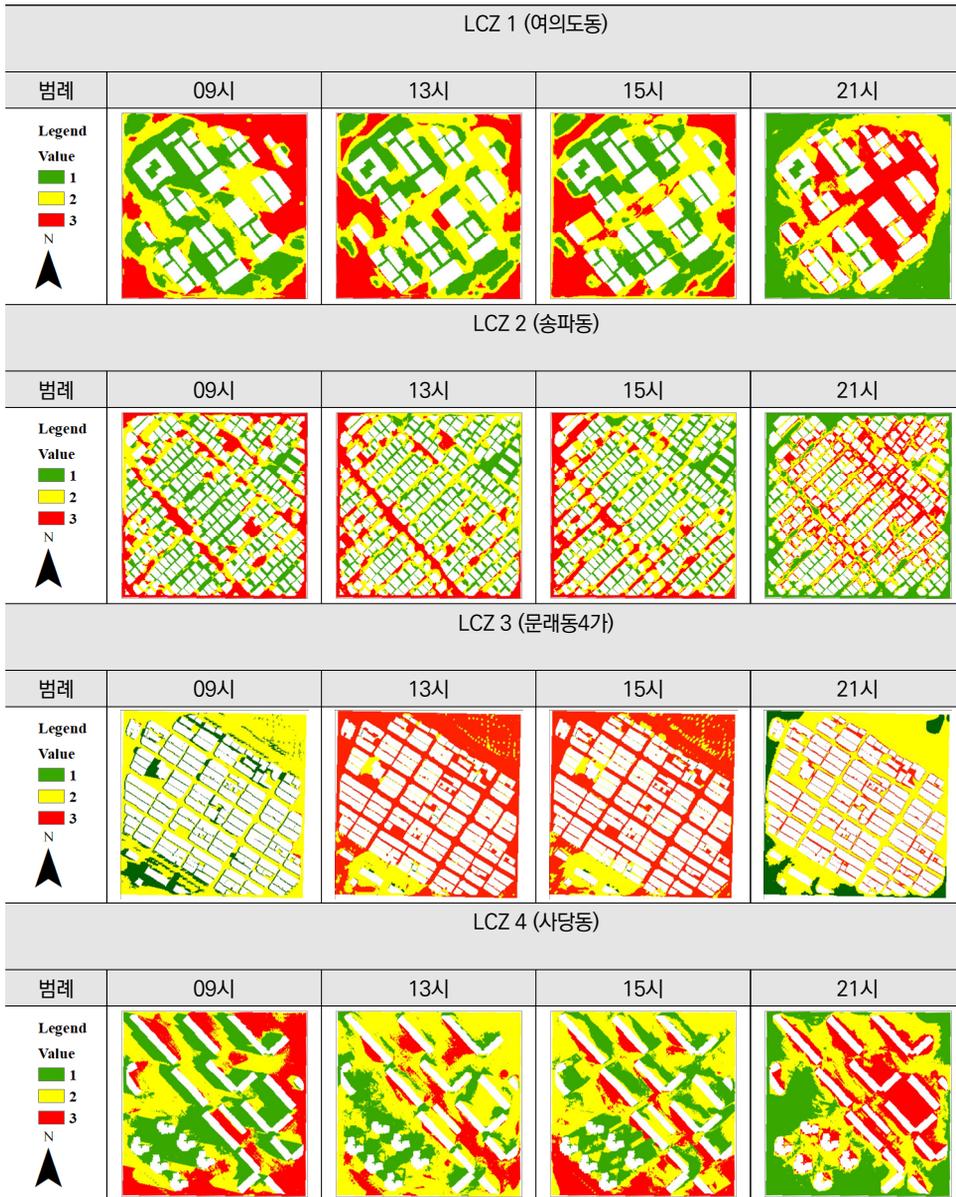
본 연구에서는 잠재기온(PAT), 평균복사온도(MRT), 생리적등가온도(PET) 등 3개의 주요 열환경 지표를 활용하여 건축물 단위의 통합 폭염취약도를 도출하였다. 각 지표는 도시 열환경의 대류·복사·체감열 특성을 반영하며, 시뮬레이션 결과는 분위수(Quantile) 기준으로 5등급화하여 고위험(5등급)일수록 열환경 부담이 크도록 구성하였다. 이후 각 지표의 등급을 합산해 총합 점수를 산출하고, 이를 3-6점, 7-10점, 11-15점의 세 구간으로 나누어 통합 폭염취약도 1-3등급으로 재분류하였다. 이러한 등급화는 지표 간의 상이한 단위를 통합하여 정량 비교를 가능하게 하며, 개별 시점·공간에서의 열환경 반응을 입체적으로 해석할 수 있는 기반을 제공한다.

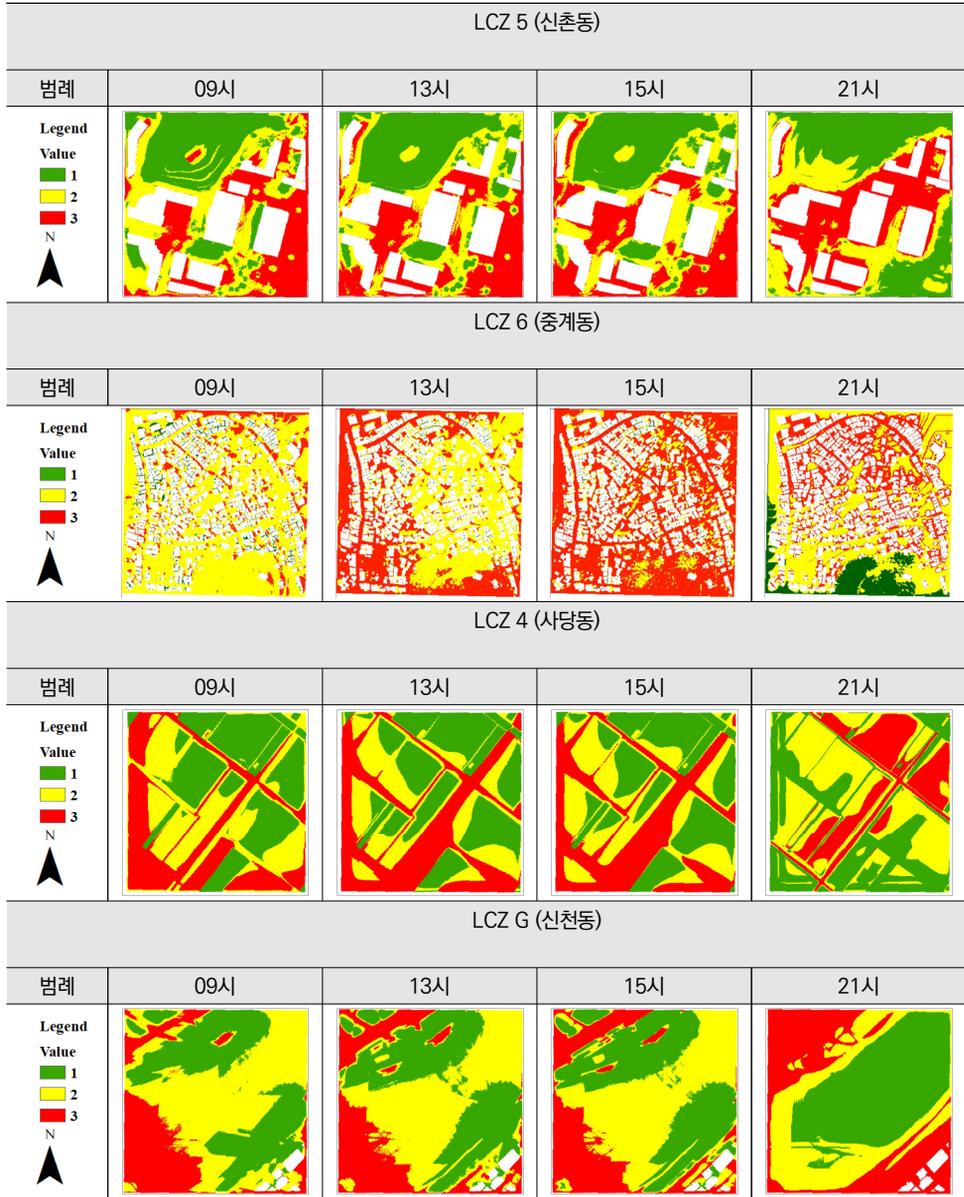
4개 표준 시점(09시, 13시, 15시, 21시)에 대한 통합 취약도 결과를 시각화하면, 각 LCZ 유형별 공간 분포 특성과 시간대별 변화 경향을 한눈에 파악할 수 있다. 전반적으로 정오-오후(13-15시) 시간대에 3등급(고위험) 구간이 가장 넓게 나타나며, 21시 이후에는 복사 냉각과 기류 회복 등의 영향으로 열환경 부담이 완화되는 경향이 공통적으로 확인된다. 하지만 공간 유형에 따라 고온 집중 시점, 고위험 분포 범위, 완화 속도에서 뚜렷한 차이를 보인다.

- LCZ 1 (여의도동), LCZ 2 (송파동)은 고밀·고불투수 구조와 복사열 축적, 통풍 저감 등의 요인으로 인해 고온 영역이 넓고 장시간 잔존하며, 특히 오후 이후에도 열 완화 속도가 느리다.
- LCZ 3 (문래동4가), LCZ 6 (중계동)은 저층 건축물과 도로·포장 공간이 혼재된 구조로, 13-15시에 내부 도로와 개방 포장부를 따라 3등급 고위험대가 뚜렷이 형성되며, 21시에도 도로·포장 공간을 중심으로 2-3등급 구간이 일부 잔존해 야간까지 열부담이 이어지는 경향을 보인다.
- LCZ 4 (사당동), LCZ 5 (신촌동)은 수목 캐노피, 통풍축, 공간 이격 등의 요소로 인해 13-15시 일시적인 고온 영역이 나타나더라도 열 분산 및 완화가 빠르게 이루어진다.

• LCZ G (신천동), LCZ D (개화동)처럼 수면과 개방 녹지 중심의 공간은 주간에도 저온대가 넓게 형성되고, 일몰 이후에는 빠르게 1등급으로 수렴하는 완충형 특성을 보인다. 이러한 시계열 기반의 공간 분포 해석은 시간-공간적 열반응의 상호작용, 건축·녹지·지형 구조의 열환경 기여도, 그리고 폭염 대응 전략의 설계 근거로서 실효성 높은 정보를 제공한다.

[표 4-21] LCZ 유형별 4시점 폭염 취약 지수 등급화





출처: 연구진 작성

## 2) 건축물 버퍼 기반 인근 열취약도 평가

건축물 인근의 열취약도는 단순히 지표면 복사열의 영향에 그치지 않고, 건축물의 형태적 특성(높이, 체적, 외피 구성) 및 시대적 건축기술 수준(준공연도)에 따라 현저한 차이를 보인다. 이에 본 절에서는 건축물의 높이와 준공연도(사용승인일)를 주요 구분 변수로 설정하고, 각 특성이 주변 열환경에 미치는 상대적 영향을 정량적으로 평가하였다.

### ■ 건축물 높이에 따른 열취약도 변화

건축물의 높이를 10m 이하, 11-20m, 21-29m, 30m 이상 네 구간으로 구분하고, 각 건물 외곽 3m 버퍼 영역 내 평균 열취약도를 비교 분석한 결과, 건축물 높이가 증가할수록 주변 열취약도가 선형적으로 상승하는 경향은 나타나지 않았으며, 저층(10m 이하)에서 가장 높은 값이 나타나고 11-20m 및 30m 이상 구간에서는 상대적으로 낮은 값이 관찰되는 등 비선형적인 분포 특성이 확인되었다. 이는 건축물 높이 자체보다는, 높이 구간별로 동반되는 블록 밀도, 포장·녹지 배치, 통풍 구조 등 도시 형태 차이가 인근 열취약도에 영향을 미친 결과로 해석할 수 있으며, 도시 캐니언 효과와 같은 미기후 조절 요인들이 복합적으로 작용하고 있음을 시사한다.

- 저층(≤10m)은 지표면 복사열의 직접 영향을 가장 많이 받고, 주변 저층 블록·포장 공간과의 상호작용으로 열이 체류하기 쉬워 평균 열취약도가 2.51로 가장 높게 나타났다.
- 중층(11-20m)은 건물 높이와 이격이 어느 정도 확보되어 복사열이 분산되고 통풍이 비교적 원활해 평균 열취약도 1.79로 가장 낮은 수준을 보였다.
- 고층(21-29m)은 일사에 노출되는 외피 면적이 증가하면서 저층부 캐니언에서 재복사·축열 효과가 커져 평균 열취약도가 1.99로 중간 수준 이상을 나타냈다.
- 초고층(≥30m)은 상부 외피의 열 노출은 크지만, 저층부 주변에 광장·도로·녹지 등 개방 공간이 함께 계획된 경우가 많아 평균 열취약도는 1.76으로 중층과 유사한 낮은 값을 보였다.

이 결과는 단순히 지면과의 거리보다는, 높이 구간별로 동반되는 블록 밀도, 포장·녹지 배치, 통풍 구조 등 도시 형태 특성이 인근 열취약도를 결정하는 핵심 요인임을 시사한다.

[표 4-22] 건축물 높이 구간별 평균 열취약도

높이 구간(m)	건축물 수	평균 열취약도	해석
≤10m	1328	2.51	• 저층 건물 주변은 지표 복사열과 저층 고밀 블록 영향으로 열이 체류하기 쉬워, 네 구간 중 평균 열취약도가 가장 높게 나타남
11 - 20m	215	1.79	• 중층 건물은 높이·이격이 어느 정도 확보되어 복사열 분산과 통풍이 비교적 원활해, 평균 열취약도가 가장 낮은 구간으로 나타남
21 - 29m	11	1.99	• 고층 건물은 외피 노출 면적 증가와 캐니언 하부 재복사 영향으로 저층보다는 낮지만 중간 수준의 열취약도를 보임
≥30m	59	1.76	• 초고층 건물은 상부 외피의 열 노출은 크지만, 주변에 광장·도로·녹지 등 개방 공간이 동반되는 경우가 많아 평균 열취약도가 중층과 유사한 낮은 수준으로 나타남

출처: 연구진 작성

### ■ 준공연도(사용승인일)에 따른 열취약도

건축물의 사용승인일을 기준으로 1900-1999년, 2000-2010년, 2011-2020년 세 구간으로 구분하여 각 건물 외곽 3m 버퍼 영역의 평균 열취약도를 산정한 결과, 1900-1999년 건축물군의 평균 열취약도는 1.81로 가장 높았으며, 2000-2010년과 2011-2020년 건축물군은 각각 1.67, 1.65로 상대적으로 낮은 값을 보였다. 즉, 분석 대상에서는 오래된 건물군에서 다소 높은 열취약도가 관찰되고, 2000년 이후 건축물군에서는 유사한 수준의 열환경이 유지되는 경향이 나타났다.

단, 준공연도(사용승인일) 정보가 없는 건축물은 분석에서 제외되었기 때문에, 표본 건축물 수는 대상지 전체 건축물 수보다 적으며 결과 해석 시 이 점을 고려할 필요가 있다.

- 1900-1999년 건축물군은 평균 열취약도 1.81로 가장 높아, 단열 성능 저하와 외피 노후화의 영향을 반영한다.
- 2000-2010년 건축물군은 평균 1.67로 낮아져, RC 구조 보편화와 에너지 기준 강화 이후 열취약도가 완화된 양상을 보인다.
- 2011-2020년 건축물군은 평균 1.65로 가장 낮고 2000-2010년과 큰 차이가 없어, 최근 건축물의 단열·창호 성능이 일정 수준 이상 유지되고 있음을 시사한다.

이 결과는 도시의 열취약성 관리에서 건축물의 노후도(연령)가 매우 중요한 인자임을 의미하며, 향후 도시 열적 복원력(Urban Thermal Resilience) 확보를 위해서는 노후 건물 외피의 단열 개선 및 재도장(고반사 페인트) 등 수리형 개선 방안이 병행되어야 함을 시사한다.

[표 4-23] 건축물 준공연도(사용승인일)별 평균 열취약도

준공연도 구간	건축물 수	평균 열취약도	해석
1900-1999	132	1.81	• 1980-1990년대 건축물군에서 가장 높은 평균값과 분산을 보여, 상대적으로 낮은 단열 성능과 외피 재료의 노후화가 열축적을 크게 만드는 경향을 반영
2000-2010	132	1.67	• 2000년대 중기 이후 RC 구조가 주류로 자리잡으며 평균값이 다소 하락
2011-2020	53	1.65	• 2000-2010년과 큰 차이가 없어, 최근 건축물의 단열·창호 성능이 일정 수준 이상 유지되고 있음을 시사함

출처: 연구진 작성

### ■ 건축물 용도에 따른 열취약도

건축물의 주요 용도를 기준으로 각 건물 외곽 3m 버퍼의 평균 열취약도를 산정·비교한 결과, 제1종·제2종 근린생활시설과 공장 용도에서 평균 열취약도가 가장 높게 나타났고, 단독주택과 노유자시설은 중간 수준, 공동주택, 업무시설, 숙박시설, 교육연구시설은 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 특히 공장, 교육연구시설, 노유자시설, 숙박시설은 표본 건축물 수가 매우 적어, 해당 용도 전체의 특성으로 일반화하기보다는 개별 사례의 경향으로 해석할 필요가 있다.

- 교육연구시설(1.20)은 단일 사례이지만, 캠퍼스 내 녹지·운동장 비율이 높아 인근 평균 열취약도가 가장 낮게 나타났다.
- 공장(2.68)은 대형 체적과 야적장·하역장 등 광범위한 포장·개방면이 포함된 사례로, 높은 불투수 비율을 반영해 상위 수준의 열취약도를 보였다.
- 노유자시설(2.36)은 표본 수는 3동으로 적지만, 평균 열취약도가 중간 이상 수준으로 나타나 열환경 관리에 대한 추가 검토가 필요한 용도로 파악된다.
- 공동주택(1.67)은 조경·공용녹지와 동간 이격, 캐니언 음영 등이 어느 정도 확보되어, 주거용도 가운데 비교적 낮은 열취약도 수준을 보였다.
- 단독주택(2.37)은 소규모 필지와 도로 인접 포장 비율이 높아, 주거용도 중에서는 상대적으로 높은 열취약도를 보였다.
- 숙박시설(1.44)은 배치·외피 특성상 음영과 통풍이 일정 부분 확보되어 낮은 열취약도 값을 보였으나, 표본 규모가 작아 해석 시 주의가 필요하다.
- 업무시설(1.64)은 건물 간 이격과 가로 통풍축, 전면부 개방 공간 등으로 인해 비교적 낮은 열취약도를 기록하였다.
- 제1종 근린생활시설(2.73)·제2종 근린생활시설(2.53)은 상업·서비스 기능과 연계된 높은 불투수 포장 비율과 부족한 그늘·증발산면을 반영해, 전체 용도 중 가장 높은 열취약도 수준을 보였다.

이 결과는 건축물의 기능적 이용 특성과 주변 열환경이 밀접하게 연관되어 있음을 보여준다. 향후 도시 열취약성 완화 전략에서는 용도지역별 특성을 고려한 맞춤형 관리가 필요하며, 상업·근린생활 및 공장 밀집지에는 불투수 포장 저감, 고반사 포장·외피 적용, 수목 식재 및 통풍축 확보 등을 우선적으로 도입할 필요가 있다.

[표 4-24] 건축물 용도별 평균 열취약도

건축물 용도	건축물 수	평균 열취약도	해석
공동주택	173	1.67	• 조경·공용녹지와 건물 간 이격·음영이 어느 정도 확보되어 인접부 열부하가 비교적 낮은 수준으로 나타남
공장	3	2.68	• 대형 체적과 광범위한 포장·개방면으로 복사 재복사 누적과 냉각 지연이 커 높은 수준의 열취약도를 보이며, 표본 수가 적어 해석에 주의가 필요함
교육연구 시설	1	1.20	• 캠퍼스 내 녹지·운동장 비율이 높아 인근 열취약도가 가장 낮게 나타났으나, 단일 사례로 일반화에는 제한이 있음
노유자시설	3	2.36	• 통풍·그늘 확보가 제한된 사례가 포함되어 중간 이상 수준의 열취약도로 나타나며, 표본 수가 적어 보수적 해석이 필요함
단독주택	248	2.37	• 소규모 필지와 도로 인접 포장 등으로 불투수 비율이 상대적으로 높아 주거용도 중 높은 수준의 열취약도를 보임
숙박시설	4	1.44	• 배치·외피 특성상 음영과 통풍이 일부 확보되어 낮은 수준의 열취약도를 보이지만, 표본 수가 적어 결과 해석에 주의가 필요함
업무시설	29	1.64	• 건물 간 이격과 가로 통풍축·차폐 구조로 인접부 열부하가 낮게 나타나, 비교적 안정적인 열환경을 보임
제1종근린 생활시설	106	2.73	• 상업·서비스 기능 밀집과 높은 불투수 포장 비율, 부족한 그늘 증발산면으로 인해 전체 용도 중 가장 높은 열취약도 수준을 보임
제2종근린 생활시설	84	2.53	• 제1종 근린생활시설과 유사한 특성을 지니며, 높은 불투수 비율과 제한된 녹지로 인해 상위 수준의 열취약도가 나타남

출처: 연구진 작성

## 4. 소결

본 장에서는 서울시에서 나타나는 도시기후대(LCZ) 유형들을 대상으로 ENVI-met 시뮬레이션을 수행하고, 잠재기온(PAT), 평균복사온도(MRT), 생리적등가온도(PET)를 활용하여 미기후 기반 폭염 취약성을 정량적으로 분석하였다. 세 지표의 시계열·공간 분포를 비교하고, 4개 표준 시점(09·13·15·21시)에 대해 지표를 중첩해 통합 열취약도를 산정함으로써, 도시 구조 특성에 따른 폭염 취약 지역을 체계적으로 평가하고자 하였다.

[표 4-25] LCZ 유형에 따른 열환경 특성

LCZ 유형	공간 특성	시간 특성
LCZ 1	• 외벽 포장부 중심 고온	• 낮에 복사열 축적, 야간 냉각 지연(도심 축열형)
LCZ 2	• 일사 노출이 집중되는 남향 가로축과 교차부를 따라 띠 모양의 고온핫스팟	• 주간 복사 축열 지배-오후 지연 가열-야간 완만한 냉각
LCZ 3	• 저층 건축물이 골목형 가로를 따라 밀집한 블록 구조 • 내부 도로·포장부에서 선형 고온핫스팟, 도로변 수목 인근에 국지적 저온대 형성	• 정오~오후 내부 도로·포장 축 고온 지속, 야간 냉각 지연
LCZ 4	• 건물 그늘과 녹지 주변에 MRT, PET 저감대 • 블록 외곽 포장부와 일사면을 따라 띠 모양의 고온핫스팟 • 녹지·그늘의 배치가 체감열 저감, 통풍 관리는 공기열	• 정오 복사 피크-오후 지연 가열-야간 완화 가속
LCZ 5	• 광장·도로 등의 노출 포장부에서 띠 모양의 고온 핫스팟 • 포장 벽체 인접부에서 점차 상승하지만, 블록 간 이격으로 인해 고온대가 넓게 연결되지 않고 분산된 열 패턴	• 정오 복사 피크는 비교적 낮고, 일몰 이후 빠른 완화
LCZ 6	• 저층 건축물이 이격 배치된 개방 주거지, 도로·포장·녹지가 모자이크 분포 • 수목·녹지 주변에 저온대, 내부 도로·포장부와의 온도 대비가 뚜렷함	• 정오~오후 도로·포장부 산발 고온, 야간 녹지 중심 빠른 완화

출처: 연구진 작성

LCZ별 분석 결과, 도심 고밀형(LCZ 1, LCZ 2)은 주간 복사열 축적과 야간 잔류열이 가장 뚜렷했으며, 개방 중층형(LCZ 4, LCZ 5)은 녹피울과 통풍축 확보로 열 완화가 나타났다. 저식생·수변형(LCZ D, LCZ G)은 주간 냉각과 야간 복사 냉각 효과가 강해 도시의 열완충 공간으로 기능하였다. 이는 건물 높이, 포장·녹피울, 통풍 구조 등 물리적 요인이 미기후를 결정하는 핵심 변수임을 보여준다.

열취약도 분석 결과, 13-15시에 대부분의 LCZ에서 고위험 구간이 최대 범위로 나타났으며, 특히 고밀 상업·업무지(LCZ 1, LCZ 2)와 내부 도로·포장 축이 발달한 저층 블록(LCZ 3, LCZ 6)에서 3등급 고위험대 비율이 높았다. 개방 중층형(LCZ 4, LCZ 5)은 같은 시간대에 2-3등급 구간이 일시적으로 확대되지만 21시 이후 1-2등급으로 빠르게 전환되었고, 수변·저식생형(LCZ D, LCZ G)은 전 시간대에 1등급 저위험대가 우세했다. 이는 복사열 집중, 통풍 저해, 불투수 포장 집중이 결합될수록 열취약도가 증가하고, 녹지·수면·통풍축이 열부담 완화에 효과적임을 보여준다.

건축물 높이 구간( $\leq 10\text{m}$ , 11-20m, 21-29m,  $\geq 30\text{m}$ )을 비교하면, 저층( $\leq 10\text{m}$ )에서 평균 열취약도가 가장 높고 11-20m와  $\geq 30\text{m}$  구간에서 낮은 값, 21-29m에서 중간 수준이 나타나는 비선형 분포가 확인되었다. 준공연도별로는 1900-1999년 건축물군의 평균 열취약도가 가장 높고, 2000-2010년과 2011-2020년 건축물군은 유사한 낮은 수준을 보였다. 다만 준공연도 정보가 없는 건축물이 제외되어 표본 수와 연대·용도 분포가 전체와 다를 수 있으므로, 결과 해석 시 이러한 표본 특성을 함께 고려할 필요가 있다.

용도별 비교에서는 제1·제2종 근린생활시설, 공장, 단독주택, 노유자시설에서 상대적으로 높은 평균 열취약도가, 공동주택·업무시설·숙박시설·교육연구시설에서 낮은 수준의 열취약도가 나타났다. 이는 상업·서비스 및 일부 생활지원 용도에서 불투수 포장과 외부 노출 면적이 크고 그늘, 증발산면이 부족한 반면, 공동주택, 업무·교육 용도는 동간 이격, 공용녹지, 개방공간 등이 확보되어 인근 열부하가 완화되기 때문이다.

종합하면, 폭염 노출은 단일 요인이 아니라 LCZ 유형, 건축물 높이·연령, 용도 등 공간 구조·형태의 조합에 의해 결정된다. 특히 고밀 상업·업무지와 저층 고밀 블록, 상업·근린생활·공장 용도는 열적 부담이 집중되는 유형으로, 고반사 포장·외피, 통풍축 확보, 수목 캐노피 확대, 포장면 저감 등 우선적인 완화 대책이 요구된다. 반대로 수변·녹지와 개방형 중층 주거·업무지는 도시 열완충·분산 기능을 수행하므로, 향후 폭염 적응 계획에서 이러한 유형을 보전·확대하고 고위험 유형과 연계하는 네트워크형 공간계획이 중요하다.



## 제5장

## 결론

1. 정책적 시사점
2. 향후 연구 방향 제안

# 1. 정책적 시사점

## ■ 폭염 피해 분석을 위한 데이터 개방 필요

인명 및 재산상의 피해를 주로 발생시키며, 건축물 단위에서 정보가 집계되는 건축물의 화재와 침수 피해와 달리 폭염 피해는 인명 피해가 주를 이룬다. 폭염으로 인한 피해는 다른 재난에 비해 피해의 발생 위치와 피해자의 연령, 성별 등 특성이 피해 강도나 발생여부에 영향을 미친다. 이에, 기계학습, AI 등을 활용한 폭염 위험 지도의 고도화와 활용성 증대 측면에서 폭염으로 인한 사망자 발생 정보와 심혈관계 질환자의 거주지 정보 등을 공간 단위로 관리할 필요성이 제기된다. 이러한 데이터의 수집 및 활용은 기존의 물리 공간 단위의 폭염 위험 정도에 대한 분석뿐만이 아닌, 폭염으로 인해 발생한 사망자 수와, 향후 위험이 예상되는 거주자의 특성을 학습하여 보다 실효적인 폭염 피해 예측 모델을 구축할 수 있다.

폭염으로 인한 사망자 수와 심혈관계 질환자의 거주지 정보 등은 개인(민감) 정보로 데이터 제공에 어려움이 예상된다. 최근 대통령 주재로 개최된 ‘제1차 핵심규제 합리화 전략회의’에서 발제된 내용과 같이, 폭염 피해 예측 모델의 정교화 및 고도화를 위해서 가명정보화를 활용한 데이터 수급과 AI 데이터 규제 샌드박스, 비공개정보(개인정보)의 실질적 판단 기준의 구체화 등 분석을 위한 데이터의 원활한 수급 방안이 마련되어야 할 필요가 있다.

**‘제1차 핵심규제 합리화 전략회의’, ‘주제 1. 신산업 핵심규제 합리화’ 발제 내용**

-최근 대통령 주재로 개최(‘25.09.15.)된 ‘제1차 핵심규제 합리화 전략회의’에서는 신산업 핵심규제 합리화를 골자로 한 발제 내용 중, 데이터 개발의 걸림돌이 되는 담당자의 책임 문제, 공급자 중심의 개방 체계, 비공개정보(개인정보)의 형식적 판단, 가명처리 정보의 실효성 등의 공공부문 이슈와 개인정보 이슈를 제시하였다. 이러한 문제 개선을 위해 저작권 활용 혁신 특례로 저작권 및 개인정보 이슈의 일괄해결과 AI 데이터 규제 샌드박스, 가명정보 제도 적극행정, 공공데이터 활용 네거티브 접근방식 원칙 설정 등 정책 개선 방안을 제안하였다.

공공부문 이슈	개인정보 이슈
담당자 책임의 문제	AI 대안형에 따른 개인정보 처리 환경의 변화 : AI 내장 책임, 실시간, 개인적 정보 집계
공급자 중심 공공데이터 개방 체계	AI 학습을 위한 활용 곤란
다자형 대안형(AIX) 불충분	개인정보, 가명정보, 익명정보의 일괄 활용
정보공개법 상 비공개정보(개인정보)의 형식적 판단	가명처리 실효성 낮음
공공데이터법령의 한계	AI 활용에 적합한 합법처리 근거 미흡
	AI 기반 맞춤형 개인화 행정 서비스 개발 곤란
	규제 불확실성 증대

저작권 활용 혁신 특례	공공데이터 수요자 중심 제공 체계로 전환
저작권 및 개인정보 이슈 일괄 해결	공공데이터 활용 네거티브 접근방식 원칙 설정
TDM 면책 규정 고도기회 도입	법무부 "AI Data 코디네이터" 도입
공공이용 적극 적용	공공데이터 민간 제공형식 권유가 함께 강화
AI 데이터 규제 샌드박스	담당자 면책 근거 구체화 및 명확화
가명정보 제도 적극행정	정보공개법 상 비공개정보(개인정보) 실질적 판단 기준 구체화

출처: KTV 국민방송. (2025.9.15.). <https://www.youtube.com/watch?v=WMzsUralTtM> (검색일: 2025.10.2.)

■ 건축물 재난·재해 유관 데이터의 집적과 이를 활용한 모니터링 체계 구축

건축물의 안전 모니터링을 위해 건축물 안전 관련 유관 데이터의 통합이 필요하다. 그리고 통합된 정보를 활용하여 건축물 및 거주자에게 피해를 입히는 화재, 홍수, 산사태, 열해 등 위험 지역을 도출할 수 있어야 하며, 해당 지역에 위치한 건축물을 모니터링 할 수 있는 기반이 마련될 필요가 있다. 이를 위해 건축물 단위의 데이터 연계가 필수적이다.

기존 건축물 재난 관련 연구들을 보면 리스크 분석을 위해 국가 및 공공기관에서 구축한 데이터의 구축이 선행되어야 했다.<sup>37)</sup> 그리고 구축 과정에서의 비효율(개별시스템 접속, 기관 연락 등)이 다양한 연구들에서 발생되고 있으며, 데이터 연계의 필요성을 제시하였다. 이에 한 단계 더 나아가 생애이력 정보체계를 통한 유관데이터의 집적과 이를 활용하여 재난에 취약한 건축물을 상시 도출·모니터링할 수 있는 체계 마련이 필요하다. 이러한 체계의 구축은 재난 안전 관련 통계 산출, 위험 경보의 발령, 긴급 점검, 재난 위험 지역에서 건축물 신축 시 사전예방 조치, 건축물 거래 시 활용 등 다양한 방면에 활용이 가능하다.

[표 5-1] 「건축물관리법」 제7조 개정안

개정 전	개정 후
<p>제7조(건축물 생애이력 정보체계 구축 등)</p> <p>③ 국토교통부장관은 다음 각 호의 자료 또는 정보를 보유 또는 관리하는 자에게 건축물 생애이력 정보체계의 구축·운영에 필요한 자료 또는 정보의 제공을 요청할 수 있다. 이 경우 자료 또는 정보의 제공을 요청받은 자는 특별한 사유가 없으면 이에 따라야 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 제55조에 따른 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 정보</li> <li>2. 「소방시설 설치 및 관리에 관한 법률」 제22조에 따른 소방시설등의 자체점검 등에 관한 정보</li> <li>3. 「수도법」 제33조에 따른 위생상의 조치에 관한 정보</li> <li>4. 「승강기 안전관리법」 제28조 및 제32조에 따른 승강기 설치검사 및 안전검사에 관한 정보</li> <li>5. 「에너지이용 합리화법」 제39조에 따른 검사대상기기의 검사에 관한 정보</li> <li>6. 「전기안전관리법」 제12조에 따른 일반용전기설비의 점검에 관한 정보</li> <li>7. 「하수도법」 제39조에 따른 개인하수처리시설의 운영·관리에 관한 정보</li> <li>8. 「자연재해대책법」 제34조에 따라 구축된 재해정보 &lt;신 설&gt;</li> </ol>	<p>제7조(건축물 생애이력 정보체계 구축 등)</p> <p>③ 국토교통부장관은 다음 각 호의 자료 또는 정보를 보유 또는 관리하는 자에게 건축물 생애이력 정보체계의 구축·운영에 필요한 자료 또는 정보의 제공을 요청할 수 있다. 이 경우 자료 또는 정보의 제공을 요청받은 자는 특별한 사유가 없으면 이에 따라야 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 제55조에 따른 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 정보</li> <li>2. 「소방시설 설치 및 관리에 관한 법률」 제22조에 따른 소방시설등의 자체점검 등에 관한 정보</li> <li>3. 「수도법」 제33조에 따른 위생상의 조치에 관한 정보</li> <li>4. 「승강기 안전관리법」 제28조 및 제32조에 따른 승강기 설치검사 및 안전검사에 관한 정보</li> <li>5. 「에너지이용 합리화법」 제39조에 따른 검사대상기기의 검사에 관한 정보</li> <li>6. 「전기안전관리법」 제12조에 따른 일반용전기설비의 점검에 관한 정보</li> <li>7. 「하수도법」 제39조에 따른 개인하수처리시설의 운영·관리에 관한 정보</li> <li>8. 「자연재해대책법」 제34조에 따라 구축된 재해정보</li> <li>9. 「<b>재난 및 안전관리 기본법</b>」 제74조 및 제74조의2에 따른 <b>재난관리정보</b></li> <li>10. 「<b>소방의 화재조사에 관한 법률</b>」 제19조에 따른 <b>화재 정보</b></li> <li>11. 「<b>자연재해대책법</b>」 제21조에 따른 <b>재해지도</b></li> </ol>

37) 조영진, 허한결, 현대환, 송유미, 김호결, 염승일, 김준우. (2024). 빅데이터 기반 건축물 산사태 리스크 분석 및 건축물 단위 재난 리스크 연계 방안 연구. 건축공간연구원

개정 전	개정 후
9. 그 밖에 대통령령으로 정하는 사항 ④ 제3항에 따른 자료 또는 정보의 요청 절차, 제출 방법 등 필요한 사항은 국토교통부령으로 정한다.	12. 「산림보호법」 제45조의5에 따른 산사태정보체계 13. 그 밖에 대통령령으로 정하는 사항 ④ (현행과 같음)

출처: 조영진, 허한결, 현대환, 송유미, 김호걸, 염승일, 김준우. (2024). 빅데이터 기반 건축물 산사태 리스크 분석 및 건축물 단위 재난 리스크 연계 방안 연구. 건축공간연구원. pp.104-105

■ 건축 허가 시 폭염 등 재난 위험 정보를 반영할 수 있는 체계 필요

본 연구에서 LCZ를 이용하여 분석한 결과에 따르면 건축물의 규모, 공간배치, 식생의 분포가 폭염 취약성에 영향을 준다. 즉, 폭염에 취약한 공간을 사전에 판단할 수 있으며, 이를 이용하여 폭염 취약지역에 건설될 건축물에 대해 인허가 단계부터 안전성을 확보할 수 있다. 이를 위해 1) 폭염 취약지역 정보가 구축되어야 하며, 2) 건축 인허가 단계에 폭염 취약지역 여부를 기입하거나 확인할 수 있어야 하고, 3) 폭염 취약지역에 건축물을 건축하려는 경우 폭염 대응 설비를 포함하도록 지시할 수 있어야 한다. 「건축법」과 「건축법시행규칙」의 개정을 통해 재난·재해 위험 지역에 신축 시 재난·재해에 대비한 사전예방 조치가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

[표 5-2] 「건축법」 제11조 개정안

개정 전	개정 후
제11조(건축허가) ① 건축물을 건축하거나 대수선하려는 자는 특별자치시장·특별자치도지사 또는 시장·군수·구청장의 허가를 받아야 한다. 다만, 21층 이상의 건축물 등 대통령령으로 정하는 용도 및 규모의 건축물을 특별시나 광역시에 건축하려면 특별시장이나 광역시장의 허가를 받아야 한다. ② 시장·군수는 제1항에 따라 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 건축물의 건축을 허가하려면 미리 건축계획서와 국토교통부령으로 정하는 건축물의 용도, 규모 및 형태가 표시된 기본설계도서를 첨부하여 도지사의 승인을 받아야 한다. 1. 제1항 단서에 해당하는 건축물. 다만, 도시환경, 광역교통 등을 고려하여 해당 도의 조례로 정하는 건축물은 제외한다. 2. 자연환경이나 수질을 보호하기 위하여 도지사가 지정·공고한 구역에 건축하는 3층 이상 또는 연면적의 합계가 1천제곱미터 이상인 건축물로서 위락시설과 숙박시설 등 대통령령으로 정하는 용도에 해당하는 건축물 3. 주거환경이나 교육환경 등 주변 환경을 보호하기 위하여 필요하다고 인정하여 도지사가 지정·공고한 구역에 건축하는 위락시설 및 숙박시설에 해당하는 건축물 <신 설>	제11조(건축허가) ① 건축물을 건축하거나 대수선하려는 자는 특별자치시장·특별자치도지사 또는 시장·군수·구청장의 허가를 받아야 한다. 다만, 21층 이상의 건축물 등 대통령령으로 정하는 용도 및 규모의 건축물을 특별시나 광역시에 건축하려면 특별시장이나 광역시장의 허가를 받아야 한다. ② 시장·군수는 제1항에 따라 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 건축물의 건축을 허가하려면 미리 건축계획서와 국토교통부령으로 정하는 건축물의 용도, 규모 및 형태가 표시된 기본설계도서를 첨부하여 도지사의 승인을 받아야 한다. 1. 제1항 단서에 해당하는 건축물. 다만, 도시환경, 광역교통 등을 고려하여 해당 도의 조례로 정하는 건축물은 제외한다. 2. 자연환경이나 수질을 보호하기 위하여 도지사가 지정·공고한 구역에 건축하는 3층 이상 또는 연면적의 합계가 1천제곱미터 이상인 건축물로서 위락시설과 숙박시설 등 대통령령으로 정하는 용도에 해당하는 건축물 3. 주거환경이나 교육환경 등 주변 환경을 보호하기 위하여 필요하다고 인정하여 도지사가 지정·공고한 구역에 건축하는 위락시설 및 숙박시설에 해당하는 건축물 4. 「건축물관리법」에 따른 건축물 생애이력 정보체계에 구축된 재난·재해 위험 지역에 위치한 건축물

출처: 연구진 작성

[표 5-3] 「건축법 시행규칙」 제7조 개정안

개정 전	개정 후
<p>제7조(건축허가의 사전승인)</p> <p>① 법 제11조제2항에 따라 건축허가사전승인 대상건축물의 건축허가에 관한 승인을 받으려는 시장·군수는 허가신청일부터 15일 이내에 다음 각 호의 구분에 따른 도서를 도지사에게 제출(전자문서로 제출하는 것을 포함한다)하여야 한다.</p> <p>1. 법 제11조제2항제1호의 경우 : 별표 3의 도서</p> <p>2. 법 제11조제2항제2호 및 제3호의 경우 : 별표 3의2의 도서</p> <p>〈신 설〉</p> <p>② 제1항의 규정에 의하여 사전승인의 신청을 받은 도지사는 승인요청을 받은 날부터 50일 이내에 승인여부를 시장·군수에게 통보(전자문서에 의한 통보를 포함한다)하여야 한다. 다만, 건축물의 규모가 큰 경우등 불가피한 경우에는 30일의 범위내에서 그 기간을 연장할 수 있다.</p>	<p>제7조(건축허가의 사전승인)</p> <p>① 법 제11조제2항에 따라 건축허가사전승인 대상건축물의 건축허가에 관한 승인을 받으려는 시장·군수는 허가신청일부터 15일 이내에 다음 각 호의 구분에 따른 도서를 도지사에게 제출(전자문서로 제출하는 것을 포함한다)하여야 한다.</p> <p>1. 법 제11조제2항제1호의 경우 : 별표 3의 도서</p> <p>2. 법 제11조제2항제2호 및 제3호의 경우 : 별표 3의2의 도서</p> <p><b>3. 법 제11조제2항제4호의 경우 : 별표 3의3의 도서</b></p> <p>② (현행과 같음)</p>

출처: 연구진 작성

「건축법 시행규칙」 별표 3 및 별표 3의2 도서

■ 건축법 시행규칙 [별표 3] <개정 2017. 2. 3>  
대형건축물의 건축허가 사전승인신청 및 건축물 안전영향평가 의뢰시 제출도서의 종류(제7조제1항제1호 및 제9조의2제1항 관련)

1. 건축계획서

분 야	도 서 종 류	표시하여야 할 사항
건축 설계 설명서	<ul style="list-style-type: none"> <li>○공사 개요</li> <li>○위치·대지면적·공사기간·공사금액 등</li> <li>○사건조사사항</li> <li>○지반고·기후·풍진정도·수용인원·상하수와 주변지역을 포함한 지질 및 지형, 인공, 교통, 지역, 지구, 토지이용현황, 시설물현황 등</li> <li>○건축계획</li> <li>○배치·평면·입면계획·통신계획·계락조정계획·주차계획 및 교통처리계획 등</li> <li>○시공방법</li> <li>○계약공정계획</li> <li>○주요설비계획</li> <li>○주요차계 사용계획</li> <li>○기타 필요한 사항</li> </ul>	
구조 계획서	<ul style="list-style-type: none"> <li>○설계근거기준</li> <li>○구조재료의 성질 및 특성</li> <li>○하중조건분석 적용</li> <li>○구조의 형식설계계획</li> <li>○각부 구조계획</li> <li>○건축구조성능(단면·내하·좌측·진동장애 등)</li> <li>○구조안전검토</li> </ul>	
지질 조사서	<ul style="list-style-type: none"> <li>○토질개황</li> <li>○각종 토질시험내용</li> <li>○지대역 산출근거</li> <li>○지하수현황</li> <li>○기초에 대한 의견</li> </ul>	
시 명 서	<ul style="list-style-type: none"> <li>○지방내용(국도교통부경관의 작성한 표준시명서에 없는 공법인 경우에 한한다)</li> </ul>	

■ 건축법 시행규칙 [별표 3의2] <신설 2017.9.28>  
수질환경 등의 보호관련 건축허가 사전승인신청시 제출도서의 종류 (제7조제1항제2호관련)

1. 건축계획서

분 야	도 서 종 류	표시하여야 할 사항
건축 설계 설명서	<ul style="list-style-type: none"> <li>○공사 개요</li> <li>○위차·대지면적·공사기간·작공예정일</li> <li>○사건조사사항</li> <li>○지역·지구, 지반높이, 상·하수도, 토지이용현황, 주변현황</li> <li>○건축계획</li> <li>○배치·평면·입면·주차계획</li> <li>○계락조정계획</li> <li>○주요설비계획</li> </ul>	

2. 기본설계도서

분 야	도 서 종 류	표시하여야 할 사항
건축 투시도 또는 투시도시간	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 각실의 용도 및 면적</li> <li>2. 기둥·벽·창문 등의 위치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 축척</li> <li>2. 외벽의 마감재료</li> </ul>
평면도(주요층)	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 축척</li> <li>2. 건축물의 높이, 각층의 높이 및 반자높이</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 축척</li> <li>2. 건축물의 높이, 각층의 높이 및 반자높이</li> </ul>
내·외 하·상·하·좌·우 및 주차의 마감계획 종류		
주차장 평면도	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 주차장면적</li> <li>2. 도로폭도 및 출입구의 위치</li> </ul>	
설비 건축 설비 도	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 난방설비·환기설비 그 밖의 건축설비의 설비계획</li> <li>2. 비상조명장치·통신설비 설비계획</li> </ul>	
상·하수도계획도	상·하수도의 연결관계, 저수조의 위치, 급배수 등	

출처: 「건축법 시행규칙」, 국토교통부령 제 1531호

건축물 신축 시 해당 지역이 재난·재해에 크게 취약하여 건축물 신축이 위험을 초래할 경우 「건축법」제11조제4항과 「건축법 시행령」제9조의2 등의 예와 같이, 건축위원회 심의를 거쳐 건축허가를 제한하는 방안 또한 향후 검토해 볼 수 있다.

## 「건축법」 제11조(건축허가)

④ 허가권자는 제1항에 따른 건축허가를 하고자 하는 때에 「건축기본법」 제25조에 따른 한국건축규정의 준수 여부를 확인하여야 한다. 다만, 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우에는 이 법이나 다른 법률에도 불구하고 **건축위원회의 심의를 거쳐 건축허가를 하지 아니할 수 있다.**

1. 위락시설이나 숙박시설에 해당하는 건축물의 건축을 허가하는 경우 해당 대지에 건축하려는 건축물의 용도·규모 또는 형태가 주거환경이나 교육환경 등 주변 환경을 고려할 때 부적합하다고 인정되는 경우
2. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제37조제1항제4호에 따른 방재지구(이하 "방재지구"라 한다) 및 「자연재해대책법」 제12조제1항에 따른 자연재해위험개선지구 등 **상습적으로 침수되거나 침수가 우려되는 대통령령으로 정하는 지역**에 건축하려는 건축물에 대하여 일부 공간에 거실을 설치하는 것이 부적합하다고 인정되는 경우

출처: 「건축법」, 법률 제21065호, 2025.10.1.. 타법개정

## 「건축법시행령」 제9조의2(상습 침수 우려지역)

허가권자는 법 제11조제4항제2호에 따라 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 지역에 건축하려는 건축물에 대하여 일부 공간에 거실을 설치하는 것이 부적합한 경우에는 **건축위원회의 심의를 거쳐 건축허가를 하지 않을 수 있다.**

1. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제37조제1항제4호에 따른 방재지구
2. 「자연재해대책법」 제12조제1항에 따른 자연재해위험개선지구(같은 법 시행령 제8조제1항제1호에 따른 상습가뭄재해지구는 제외한다)
3. 제1호 및 제2호에 준하는 지역으로서 허가권자가 **상습적으로 침수되거나 침수가 우려된다고 인정하여 지정·고시하는 지역**

출처: 「건축법 시행령」, 대통령령 제35716호, 2025.8.26.. 타법개정

뿐만 아니라, 건축 허가 시 폭염 등 재난 위험 정보를 반영할 수 있는 시스템이 구축될 경우 건축물 생애이력 정보체계에도 건축물의 재난 안전성 여부가 포함될 수 있다. 생애이력 정보체계에 재난·재해 위험 지역 및 취약 건축물 모니터링 체계가 구축되면, 건축물 허가 시 재난 위험에 위치한 건축물에 대한 사전 예방 대책 등의 수립이 가능하다.

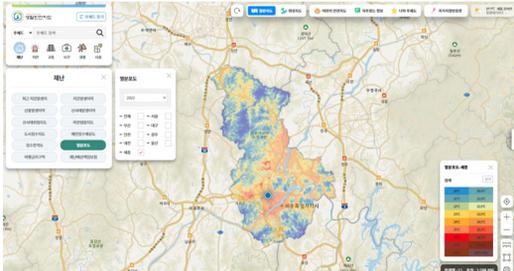
## 2. 향후 연구 방향 제안

### ■ 폭염 위험 서비스 연계 및 활용성 고도화 방향 검토

폭염에 의한 피해 증가에 따라 다양한 정부기관 및 지자체에서 폭염 관련 지도를 구축 및 서비스 중이다. 이 같은 서비스와 연계하여 본 연구의 폭염 취약성 분석을 고도화하고, 활용성을 제고할 수 있는 방안을 확보할 필요가 있다. 행정안전부의 생활안전지도, 서울시 폭염 위험 지역 분석, 경기도의 폭염 등급 평가, 대구광역시 열환경지도 등 기존 서비스를 보면 기본적으로 열환경을 수행하고 있다.

이에 더하여 서울시나 대구광역시와 같은 지자체에서는 단순한 열환경 분석 이외에 사람들의 안전 확보를 위한 인문사회적 변수들이 추가적으로 고려되고 있다. 고령 및 유소년 인구, 저소득 가구, 생활 인구, 집계구별 인구증가 수, 시가지지역 분포 등의 인구·사회적 요인을 고려하여 폭염 취약 지역을 추출하고 있다. 본 연구에서 제시한 LCZ 유형별 폭염 위험 지역 산정에 더하여, 향후 분석 결과의 활용성 제고를 위해 인구·사회적 변수 역시 분석 활용할 필요가 있다.

[표 5-4] 정부기관 및 지자체의 폭염 위험 지도 서비스

폭염 위험 지도 서비스 표출 형태	서비스의 주요 특징
	<p>〈생활안전지도의 열 분포도〉<sup>1)</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Landsat에서 획득한 자료를 기반으로, 전국의 여름철(6~9월) 평균기온을 30m 격자단위로 나타내어 지역 간 상대적인 열 분포 차이를 파악</li> </ul>

	<p><b>&lt;서울시 S·DoT 센서 활용 폭염 위험 지역 분석&gt; <sup>2)</sup></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- S·DoT 센서 1,100개의 시간대별 기온, 습도 자료를 활용</li> <li>- 폭염 취약 요인을 인구학적·주택 관련·경제적 요인 세가지로 정의하고 각 요인별 취약 변수를 선정</li> <li>- 선정 변수는 고령인구, 유소년인구, 저소득가구, 주택 노후도, 주택유형 5가지로 핫스팟 분석을 실시하여, 서울시 도시공간의 폭염 취약성 지도 도출</li> </ul>
	<p><b>&lt;경기도 폭염 등급 평가&gt; <sup>3)</sup></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기온, 습도, 풍속, 태양복사열 등을 종합적으로 고려해 실제 인체가 체감하는 열쾌적성을 UTCI 10단계 등급으로 평가</li> <li>- 폭염취약지역 내 생활인구를 1~10단계 등급으로 구분하여 함께 표출</li> </ul>
	<p><b>&lt;대구광역시 열환경 지도&gt; <sup>4)</sup></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 현재 및 미래의 기후노출, 도시민감도와 열환경 현재 및 미래의 취약성으로 구분하여 지도 표출</li> <li>- 최근 10년간 기상 관측 자료와 RCP모델(미래기후)을 기반으로 연평균 일최고기온 33°C 이상 일수 및 열대야 일수 지표값을 이용하여 집계구를 기준으로 등급화</li> <li>- 불량주거지역, 취약시만, 기반시설, 건축시설, 시가화지역, 인구증가수 등을 분석에 반영</li> </ul>

출처: 1) 안전정보 통합공개시스템. 생활안전지도. <https://www.safemap.go.kr/main/smap.do?flag=2> (검색일: 2025.10.16.)  
 2) 김상일, 박해경, 유연주, 한승균. (2021). S·DoT 빅데이터를 이용한 서울시 주거지역 폭염 취약도 진단. Data InsightReport 06. 서울연구원. p.22  
 3) 경기기후플랫폼. 경기기후지도. [https://climate.gg.go.kr/gcs/cmm/selectMainMap.do#climate\\_heat](https://climate.gg.go.kr/gcs/cmm/selectMainMap.do#climate_heat) (검색일: 2025.10.16.)  
 4) 대구녹색환경지원센터. 대구광역시 열환경 지도. <http://www.markmap.kr/uhim/main.do> (검색일: 2025.10.16.)

■ 폭염 리스크 분석 및 관계 정책 지원

본 연구에서는 단순히 열환경 분석을 통한 건축·도시공간 열환경 취약성 분석을 수행하였다. 그러나, 폭염에 의한 피해는 공간 및 열 분포에 의한 영향뿐 아니라 사람의 나이, 성별, 건강상태에 따라 악화될 수 있으며, 병원, 보건소, 그늘쉼터의 유무에 따라 완화될 수 있다. 즉, 폭염 취약성 분석에 민감도와 적응요소를 포함시켜 리스크 분석이 수반되어야 더 효과적인 정책 대안 설정 및 폭염 피해 완화가 가능할 것이다.

현재 정부에서는 제2차 기후변화대응 기본계획(2020~2040)을 통해 도시 폭염 저감을 위한 시설 입지 선정 연구 수행 및 무더위 쉼터(50,900개소) 지정을 추진하고 있다. 뿐만 아니라 기후변화에도 안전한 기후탄력적 사회 구축을 목표로, 총체적 적응 역량을 강화하고 환경정의 차원에서 취약계층 지원 확대를 이어가고 있다.

향후 연구에서는 공간단위 리스크 분석을 통해 정부 정책을 더 효율적으로 추진할 수 있도록 시설 도입 우선순위 설정 근거와 폭염 대응을 위한 취약계층 지원 전략 도출을 위한 근거를 마련할 필요가 있다. 즉, 동일한 수준의 폭염이 발생한다면, 이용자가 더 많은, 취약인구 비율이 더 높은, 체류시간이 더 긴 공간에 우선적인 기술 적용 필요하다. 또한, 폭염 강도가 강하고, 거주 및 이동 취약계층이 많은 지역에 우선적으로 열관리 적응 기술을 도입해야 할 것이다.



- 「건축법」. 법률 제21065호
- 「건축법 시행규칙」. 국토교통부령 제 1531호
- 「건축법 시행령」. 대통령령 제35716호
- 경기기후플랫폼. 경기기후지도. <https://climate.gg.go.kr/gcs/>
- 고광본. (2018.8.19.). "폭염·한파 등 기후변화 대비" 정부 도시發電 시범사업 추진. 서울경제
- 고동원, 박승훈. (2019). 근린환경특성과 도시열섬현상과의 상호관계에 관한 연구. 한국도시설계학회지. 20(3). pp.55-67
- 고영주, 조기환. (2020). 핫스팟 분석을 이용한 도시열섬 취약지 특성 분석 - 전주시를 대상으로 -. 한국조경학회지. 48(5). pp.67-79
- 공간빅데이터 분석플랫폼. (n.d.). 폭염 취약계층 및 지원 우선 지역 분석. [http://geobigdata.go.kr/portal/case/standardView.do?proj\\_seq=40](http://geobigdata.go.kr/portal/case/standardView.do?proj_seq=40) (검색일: 2025.2.24.)
- 공학양, 최낙훈, 박성애, 이종찬, 박수국. (2018). 여름철 택지개발지역의 열쾌적성에 관한 연구. Ecology and Resilient Infrastructure. 5(4). 응용생태공학회. pp.219-228
- 공학양, 최낙훈, 박수국. (2020). Local Climate Zone과 토지피복에 따른 여름철 야간의 인간 열환경 분석 - 경기도 수원시 호매실 택지개발지구. Ecology and Resilient Infrastructure. 7(4). pp.227-237
- 기상청. (2024.9.5.). [2024년 여름철 기후특성] 올여름 평균기온, 열대야일수 1위, 장맛비 평년보다 118.1mm 더 내려 [보도자료]
- 기상청. (2025.1.9.). [2024년 연 기후특성] 2024년, 우리나라 113년 관측 이래 가장 더운 해, 역대 최고 기록 경신 [보도자료]
- 김건형, 강영은, 손승우, 김동우, 유재진. (2020). UAV 기반 도시 열환경 분석을 통한 폭염 대응형 공간 전략: 부산시 영도구 도시재생사업을 대상으로. 한국지리학회지. 9(1). pp.191-203
- 김권, 엄정희. (2017). WUDAPT Protocol을 활용한 Local Climate Zone 분류 - 서울특별시를 사례로 -. 한국조경학회지. 45(4). pp.131-142
- 김미경, 김상필, 김남규, 손홍규. (2014). LANDSAT 영상을 이용한 세종특별자치시의 도시화와 열섬 현상 분석. 대한토목학회논문집. 34(3). 174. pp.1,033-1,041
- 김상일, 박해경, 유연주, 한승균. (2021). S·DoT 빅데이터를 이용한 서울시 주거지역 폭염 취약도 진단. Data InsightReport 06. 서울연구원. <https://data.si.re.kr/data-insight-report/65208> (검색일: 2025.02.24.)
- 김승현. (2024.8.6.). [기획] 역대급 폭염에 전력 사용량 최고조...수급 우려 ↑. 매일일보

- 김종성, 강정은. (2022). ENVI-met을 활용한 도시개발사업에 따른 열환경 변화 분석 : 창원시를 대상으로. 한국기후변화학회지. 13(5). pp.659-677
- 김지수, 강민규. (2022). 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT)를 활용한 미시적 폭염 취약성 평가에 관한 연구. 국토계획. 57(5). pp.215-234
- 김태경, 박경훈, 송봉근, 김성현, 정다운, 박건웅. (2024). WUDAPT 절차를 활용한 창원시의 국지기후대 제작과 필터링 환경에 따른 비교 연구. 한국지리정보학회지. 27(2). pp.78-95
- 대구녹색환경지원센터. 대구광역시 열환경 지도. <http://www.markmap.kr/uhim/main.do>
- 박다해. (2023.5.23.). 5년간 에어컨 화재 1234건... 소방청 "실외기 위험요인 점검해야". 한겨레신문
- 박준호. (2025.6.9.). 때 이른 무더위 기승에... 소방청, 폭염 대응 119구급활동 대책 가동. 소방방재신문
- 박진이, 서민송, 유환희, 이달근, 이준우. (2022). 도시 공간구조별 열 집중지역에 대한 공간해석 연구. 대한공간정보학회지. 30(3). pp.25-35
- 배용규, 박세홍. (2021). AWS 데이터를 활용한 도시열섬 분포 및 강도의 군집분석을 통한취약지역 도출 - 2005.03~2020.02 사이의 서울시 및 주변 지역 43개 지점을 대상으로 -. 서울도시연구. 22(4). pp.43-63
- 변재영, 홍선옥, 박영산, 김연희. (2021). 기상청 국지기상예측시스템을 이용한 서울의 도시열섬강도 예측 평가. 한국지리과학회지. 42(2). pp.135-148
- 안전정보 통합공개시스템. 생활안전지도. <https://www.safemap.go.kr/main/smap.do?flag=2>
- 이신영, 김용성, 이남규. (2024). 도시 열섬 현상 완화를 위한 입체녹화의 기온 저감 효과 분석. 한국공간디자인학회 논문집. 19(7). 100. pp.481-496
- 이연수, 이시우, 임정호, 유철희. (2021). 덤러닝 기반 Local Climate Zone 분류체계를 이용한 지표면 온도와 도시열섬 분석: 수원시와 대구광역시를 대상으로. 대한원격탐사학회지 37(5). pp.1,447-1,460
- 이홍근. (2024.6.28.). 서울 폭염일수 '7360%' 증가...전세계 도시 중 최악. 경향신문
- 임재연, 손정민, 박주현, 엄정희. (2025). ENVI-met 시뮬레이션을 통한 도시숲 조성 시나리오별 열환경 개선 효과 분석. 한국조경학회지. 53(1). 227. pp.14-25
- 장지민. (2024.8.5.). "에어컨 24시간 가동 중"...펄펄 끓는 폭염에 전력 수요 최대치. 한국경제
- 조영진, 허한결, 안의순, 류수연, 송유미, 현대환. (2022). 빅데이터 기반 건축물 화재 예측 모델 개발 연구. 건축공간연구원
- 조영진, 허한결, 송유미, 현대환. (2023). 빅데이터 기반 건축물 화재 및 홍수 리스크 분석 모델 개발 연구. 건축공간연구원
- 조영진, 허한결, 현대환, 송유미, 김호결, 염승일, 김준우. (2024). 빅데이터 기반 건축물 산사태 리스크 분석 및 건축물 단위 재난 리스크 간 연계 방안 연구. 건축공간연구원
- 조종훈, 반권수. (2025) ENVI-met을 활용한 부산지역 노후공업단지 바람길숲 조성 방식에 따른 미기후 개선효과 비교. Ecology and Resilient Infrastructure. 12(1). pp.26-33
- 질병관리청. (2024.10.13.). 024년 여름철 긴 폭염으로 온열질환자 응급실방문 전년 대비 31.4% 증가 [보도자료]
- 행정안전부. (2021.12.28.). 미래 위험성이 높은 재난으로 풍수해·폭염 등 5개 유형 선정 [보도자료]
- 행정안전부. (2025). 2023 재해연보
- 행정안전부. (2025.6.12.). 최근 5년 에어컨 화재 1.8배↑..."실외기 주변 항상 깨끗하게". 대한민국 정책브리핑

- 홍제우, 홍진규, 이성은, 이재원. (2013). 자동기상관측소의 국지기후대에 근거한 서울 도시 열섬의 공간 분포. 대기. 23(4). 한국기상학회. pp.413-424
- 홍제우, 이근민, 조한나, 박진한, 임정호, 유철희, 심창섭, 박주영, 조연경. (2021). 도시 신진대사 (Urban Metabolism)를 고려한 도시기후대(Urban Climate Zone) 분류방법 연구. 한국환경연구원
- 황희수, 강정은. (2020). 위성영상과 민간자동관측시스템 자료를 활용한 도시열섬과 도시오염섬의 공간 분포 특성 - 부산광역시를 대상으로 -. 한국지리정보학회지. 23(3). pp.100-119
- Balchin, W. G. V. & Pye, N.. (1947). A micro-climatological investigation of Bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 73. pp.297-323. <https://doi.org/10.1002/qj.49707331706>
- Bechtel, Benjamin., Alexander, Paul J., Böhner, Jürgen., Ching, Jason., Conrad, Olaf., Feddema, Johannes., Mills, Gerald., See, Linda. & Stewart, Iain.. (2015). Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 4(1). pp.199-219. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>
- Cortes, Aiza., Rejuso, Arnold Jesfel., Santos, Justine Ace. & Blanco, Ariel.. (2022). Evaluating mitigation strategies for urban heat island in Mandaue City using ENVI-met. *Journal of Urban Management*. 11(1). pp.97-106. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2022.01.002>
- Dimitrov, Stelian., Popov, Anton. & Iliev, Martin.. (2021). An Application of the LCZ Approach in Surface Urban Heat Island Mapping in Sofia, Bulgaria. *Atmosphere*. 12(11). 1370. pp.1-18. <https://doi.org/10.3390/atmos12111370>
- esri. (n.d.). *Dissolve*. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/data-management-toolbox/dissolve.htm> (검색일: 2025.9.30.)
- Han, Jie., Mo, Nan., Cai, Jingyi., Quyang, Leixin. & Liu, Zhengxuan.. (2024). Advancing the local climate zones framework: a critical review of methodological progress, persisting challenges, and future research prospects. *Humanities and Social Sciences Communications*. 11. pp.1-18. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03072-8>
- Jo, Sangman., Kong, Hakyang., Choi, Nakhoon., Shin, Youngkyu. & Park, Sookuk.. (2023). Comparison of the Thermal Environment by Local Climate Zones in Summer: A Case Study in Suwon, Republic of Korea. *Sustainability*. 15(3). 2620. pp.1-15. <https://doi.org/10.3390/su15032620>
- KTV 국민방송. (2025.9.15.). (25.9.15.) 제1차 핵심규제 합리화 전략회의. <https://www.youtube.com/watch?v=WMzsUraITtM> (검색일: 2025.10.2.)
- Mackenzie, Kate. & Sahay, Tim.. (2023.8.3). *Global Boiling*. Phenomenal World. <https://www.phenomenalworld.org/analysis/global-boiling/> (검색일: 2025.5.28.)
- MDPI. (2020). *Improving Local Climate Zone Classification Using Incomplete Building Data and Sentinel 2 Images Based on Convolutional Neural Networks*. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3552> (검색일: 2025.1.7.)
- Niranjan, Ajit. (2023.7.27.) 'Era of global boiling has arrived,' says UN chief as July set to be hottest month on record. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/science/2023/jul/27/scientists-july-world-hottest-month-record-climate-temperatures> (검색일: 2025.2.23.)
- Rahmani, Neshat. & Sharifi, Ayyoob.. (2023). Comparative Analysis of the Surface Urban Heat Island (SUHI) Effect Based on the Local Climate Zone (LCZ) Classification Scheme for Two Japanese Cities, Hiroshima, and Sapporo. *Climate*. 11(7). 142. pp.1-23. <https://doi.org/10.3390/cli11070142>

- Stewart, I. D. & Oke, T. R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93. pp.1,879-1,900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- U.S. Geological Survey. Earth Explorer. <https://earthexplorer.usgs.gov>
- Xiang, Yanfen., Zheng, Bohong., Wang, Jiren., Gong, Jiajun. & Zheng, Jian.. (2024). Research on the Spatial-Temporal Evolution of Changsha's Surface Urban Heat Island from the Perspective of Local Climate Zones. *Land*. 13(9). 1479. pp.1-28. <https://doi.org/10.3390/land13091479>
- Yoo, Cheolhee., Lee, Yeonsu., Cho, Dongjin., Im, Jungho. & Han, Daehyeon.. (2020). Improving Local Climate Zone Classification Using Incomplete Building 2 Data and Sentinel 2 Images Based on Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing*. 12(21). 3552. <https://doi.org/10.3390/rs12213552>
- You, Meizi., Lai, Riwen., Lin, Jiayuan. & Zhu, Zhesheng. (2021). Quantitative Analysis of a Spatial Distribution and Driving Factors of the Urban Heat Island Effect: A Case Study of Fuzhou Central Area, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18(24). 13088. pp.1-19. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413088>
- Zhang, Rui., Yang, Jun., Sun, Dongqi., Ma, Xinyue., Yu, Wenbo., Xiao, Xiangming. & Xia, Jianhong (cecilia).. (2022). Warming and cooling effects of local climate zones on urban thermal environment. *Frontiers in Public Health*. 10. pp.1-14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1072174>
- Zhao, Chunhong., Jensen, Jennifer., Weng, Qihao., Currit, Nathan. & Weaver, Russell.. (2019). Application of airborne remote sensing data on mapping local climate zones: Cases of three metropolitan areas of Texas, U.S.. *Computers, Environment and Urban Systems*. 74. pp.175-193. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.11.002>
- Zhao, Chunhong., Jensen, Jennifer L. R., Weng, Qihao., Currit, Nathan. & Weaver, Russell.. (2020). Use of Local Climate Zones to investigate surface urban heat islands in Texas. *GIScience & Remote Sensing*. 57(8). pp.1,083-1,101. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1843869>
- Zheng, Yingsheng., Li, Wenjie, Fang, Can., Feng, Biyin., Zhong, Qiru. & Zhang, Dongxu.. (2023). Investigating the Impact of Weather Conditions on Urban Heat Island Development in the Subtropical City of Hong Kong. *Atmosphere*. 14(2). 257. pp.1-17. <https://doi.org/10.3390/atmos14020257>
- Zhou, Xilin., Okaze, Tsubasa., Ren, Chao., Cai, Meng., Ishida, Yasuyuki., Watanabe, Hironori. & Mochida, Adashi.. (2020). Evaluation of urban heat islands using local climate zones and the influence of sea-land breeze. *Sustainable Cities and Society*. 55. pp.1-17. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102060>
- Zhou, Yimin., Wei, Tao., Zhu, Xiaolin. & Collin, Melissa.. (2021). A Parcel-Based Deep-Learning Classification to Map Local Climate Zones From Sentinel-2 Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 14. pp.4,194-4,204. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3071577>

---

## Summary

### Big Data Based Approaches to Heatwave Vulnerability Assessment of the Built and Urban Environment

Heo, Hankyul Byun, Giyoung Song, Yumi Nam, Kichoen

#### Introduction

##### ■ Research Background and Purpose

As the global average temperature recorded an all-time high in 2023, warnings have emerged that the climate crisis has moved beyond simple Global Warming and entered the stage of Global Boiling. In Korea, the upward trend in temperature is evident, with the number of heatwave days and tropical nights in the summer of 2024 ranking among the highest on record, leading to increased casualties such as heat-related illnesses and deaths. The increase in heatwave days in Seoul is steep even by global standards, and this climate change is leading to physical damage such as surging demand for cooling energy in buildings and fires in air conditioner outdoor units. Existing heatwave responses were mainly based on macroscopic meteorological data, which had limitations in reflecting local thermal environment differences within the city.

Accordingly, this study aims to analyze microscopic heatwave vulnerability at the building and block level by utilizing public data and big data technologies. Specifically, the study aims to develop an effective process for identifying heatwave-risk buildings and spaces by linking scattered public data to construct big data, classifying Seoul's Local Climate Zones (LCZ) based on machine learning, and combining this with Land Surface Temperature (LST) and microclimate simulations (ENVI-met).

### Novelty of the Study

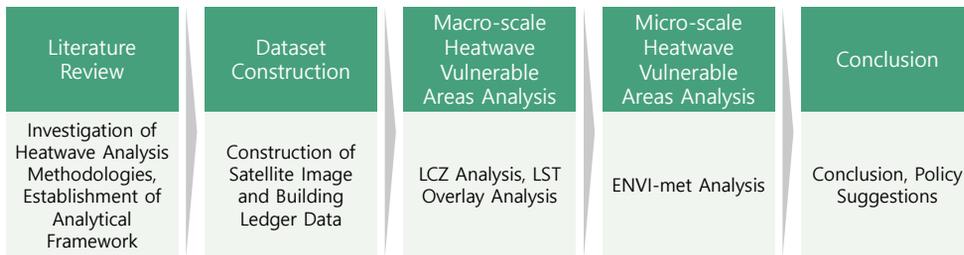
The Novelty of this study lies in improving the limitations of existing macro-scale analysis techniques by 1) performing LCZ analysis to primarily screen heatwave-vulnerable areas, and 2) analyzing heatwave vulnerability at the individual building level using microclimate simulation (ENVI-met) for these vulnerable areas.

### ■ Research Scope

The spatial scope of this study covers the entire area of Seoul, where the heat island phenomenon due to urbanization is distinct and public data is well-established. Seoul is a representative area with a high risk of heatwave damage due to high-density buildings and insufficient green space. The content scope consists of data construction, derivation of heatwave-vulnerable space types based on LCZ, microclimate simulation analysis for these types, vulnerability analysis by space, and proposals for heatwave response measures.

### ■ Research Method and Flow

The research proceeds in a five-step flow: establishing an analytical framework through literature review, constructing data for analysis, analyzing LCZ and macro-scale heatwave vulnerable areas, analyzing micro-scale heatwave vulnerable areas through ENVI-met simulation, and deriving results and policy suggestions. First, the framework and necessary data list were derived through literature review. Second, a dataset for analysis was constructed by collecting and preprocessing administrative information such as satellite images and building ledgers. Third, LCZ in Seoul is classified using deep learning (CNN) techniques, and Land Surface Temperature is analyzed using the thermal bands of satellite images. Fourth, ENVI-met simulations are performed on the derived heatwave-risk LCZ types to analyze detailed thermal environments such as Potential Air Temperature (PAT), Mean Radiant Temperature (MRT), and Physiological Equivalent Temperature (PET), and vulnerable building types are derived by combining this with attribute information such as building age and usage. Finally, based on this, legal and institutional improvement plans for heatwave response at the building and spatial unit are proposed.



Research flow

## Trends in Building and Urban Heatwave Analysis Methodologies

### ■ Urban Heatwave Research Trends

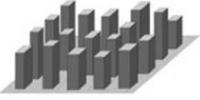
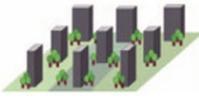
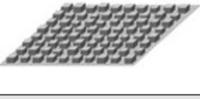
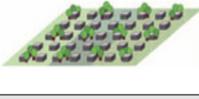
Urban heatwave analysis is largely divided into air temperature (AWS, etc.) data analysis, Land Surface Temperature (LST) data analysis, and microclimate simulation (ENVI-met). While studies using AWS data are useful for understanding the heat island intensity and spatiotemporal distribution of the entire city, they are limited in local analysis due to the limitations of observation points. On the other hand, LST research based on satellite images can grasp the detailed temperature distribution across the city, making it widely used for hotspot analysis. Furthermore, CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation models like ENVI-met are being actively introduced to analyze the impact of microscopic spatial elements such as building layout, vegetation, and pavement materials on the thermal environment. Such simulation studies demonstrate effectiveness in quantitatively predicting thermal environment improvement effects resulting from urban redevelopment or green space creation. This study adopted a multi-layered approach utilizing LCZ and LST for wide-area analysis and ENVI-met for detailed analysis, reflecting these trends.

### ■ Local Climate Zone (LCZ) Research Trends

The Local Climate Zone (LCZ) system, devised by Stewart and Oke (2012) to objectively compare and analyze urban heat island phenomena, is a classification system widely used worldwide. LCZ classifies urban spaces into 17 standard types (10 building types, 7 land cover types) based on building height, density, and land cover status. Previous studies have classified LCZ using the WUDAPT protocol or, more recently, by introducing deep learning techniques to improve accuracy. In particular,

CNN (Convolutional Neural Network) based studies are deriving more precise classification results than existing methods by learning the spatial characteristics of satellite images. Additionally, multiple studies have proven that distinct differences in land surface temperature or air temperature appear by LCZ type, confirming that high-density building areas (LCZ 1~3) and industrial areas (LCZ 8, 10) are particularly vulnerable to the heat island phenomenon.

Examples of LCZ type and definition

LCZ Type	Definition	LCZ Type	Definition				
1. Compact high-rise 	Dense mix of tall buildings (dozens of stories). Few or no trees. Land cover is mostly paved	4. Open high-rise 	Open arrangement of tall buildings (dozens of stories). Highly permeable land cover				
2. Compact midrise 	Dense mix of mid-rise buildings (3-9 stories). Few or no trees. Land cover is mostly paved	5. Open midrise 	Open arrangement of mid-rise buildings (3-9 stories). Highly permeable land cover				
3. Compact low-rise 	Dense mix of low-rise buildings (1-3 stories). Few or no trees. Land cover is mostly paved	6. Open low-rise 	Open arrangement of low-rise buildings (1-3 stories). Highly permeable land cover				
LCZ Type (Refer to Table 2-1 for detailed definitions)							
7	8	9	10	D	E	F	G
							

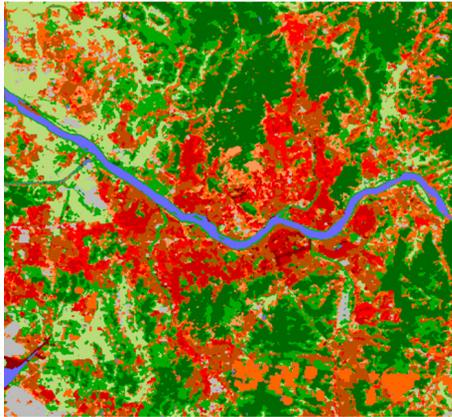
Source: Stewart, I.D. & Oke, T.R.. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93. p.1,885

## Big Data-Based Local Climate Zone Analysis

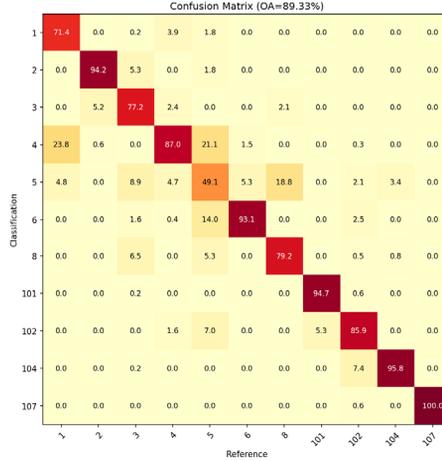
### ■ Derivation of Seoul LCZ

Landsat 8 satellite images and a CNN model were utilized for LCZ classification in Seoul. The dataset was constructed by resampling to 100m and 10m resolutions, and LCZ sample data for training and testing were generated through visual reading using Google Earth, etc.. As a result of CNN model training, the Overall Accuracy was approximately 89.33%, securing high reliability. Looking at the classified Seoul LCZ map, major commercial areas such as the city center and Gangnam were clearly

distinguished as high-rise and mid-rise high-density areas (LCZ 1, 2), residential areas as low-rise and mid-rise dense areas (LCZ 2, 3), and outer forest areas as dense tree areas (LCZ A, B). However, due to the limitation of the 100m grid resolution, limitations were also identified where some minute spatial characteristics (e.g., small streams) were ignored or noise occurred between adjacent pixels.



[Seoul LCZ Prediction Map]



[Confusion Matrix of Classification Results]

LCZ classification result

■ Derivation of Heatwave-Risk LCZ Types

The thermal environment characteristics by LCZ type were identified by overlaying the derived Seoul LCZ map with Land Surface Temperature (LST) data calculated through the thermal infrared band of Landsat 8 satellite images taken on August 29, 2024. The analysis showed that the type with the highest average temperature was LCZ 8 (Large low-rise), where large low-rise buildings are concentrated, recording an average of 45.35°C. This reflects the characteristics of areas with large floor areas and a lack of vegetation, such as factories or warehouses. This was followed by LCZ 3 (Compact low-rise, 43.56°C) and LCZ 2 (Compact mid-rise, 43.38°C), where buildings are densely arranged. Conversely, LCZ A (Dense trees, 32.35°C) and LCZ G (Water, 31.55°C) recorded the lowest temperatures, confirming the heat island mitigation function within the city. Notably, LCZ 1 (Compact high-rise), where high-rise buildings are concentrated, showed an average of 39.71°C, appearing relatively lower than the low-rise dense areas. This suggests that the shadows and wind paths formed by high-rise buildings have an effect of partially suppressing the

rise in land surface temperature. In conclusion, in Seoul, low-rise and industrial areas with high impervious surface ratios, lack of vegetation, and dense buildings were identified as the spatial types most vulnerable to heatwaves.

Average Temperature by LCZ Type

LCZ Type	Average Temperature (°C)	Rank	LCZ Type	Average Temperature (°C)	Rank
LCZ 1 (Compact high-rise)	39.71	7	LCZ 8 (Large low-rise)	45.35	1
LCZ 2 (Compact mid-rise)	43.38	3	LCZ A (Dense trees)	32.35	10
LCZ 3 (Compact low-rise)	43.56	2	LCZ B (Scattered trees)	36.22	9
LCZ 4 (Open high-rise)	40.79	4	LCZ D (Low plants)	39.47	8
LCZ 5 (Open mid-rise)	39.96	6	LCZ G (Water)	31.55	11
LCZ 6 (Open low-rise)	40.59	5	※Overall average temperature: 39.35°C		

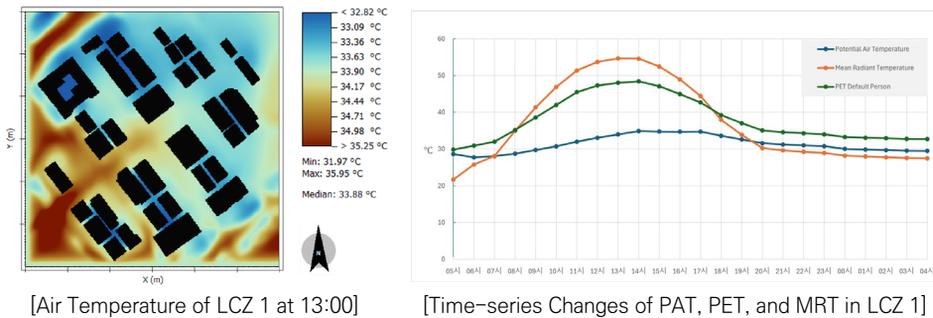
## Derivation of Heatwave-Vulnerable Building and Spatial Types

### ■ Microclimate Analysis of Heatwave Risk Areas

Actual areas representing high-risk types derived through LCZ analysis (Yeouido-dong, Songpa-dong, Mullae-dong, Sadang-dong, etc.) were selected to perform ENVI-met simulations. To elaborately implement the physical environment of the analysis sites on the computer, three criteria were applied. 1) Uniform size of all analysis sites to 300m × 300m squares, 2) application of a high-resolution grid of 1m × 1m to detect minute thermal environment changes, and 3) reflection of actual building height and terrain (DEM) from the building ledger. Potential Air Temperature (PAT), Mean Radiant Temperature (MRT), and Physiological Equivalent Temperature (PET) were utilized as analysis indicators to precisely analyze thermal environment changes by time (09:00, 13:00, 15:00, 21:00).

The analysis results showed that high-density areas such as LCZ 1 (Yeouido-dong) and LCZ 2 (Songpa-dong) exhibited 'urban heat storage' characteristics, where radiant heat accumulation is large during the day and accumulated heat does not easily escape at night, leading to sustained nighttime heat loads such as tropical nights. On the other hand, low-rise residential areas such as LCZ 3 (Mullae-dong) and

LCZ 6 (Junggye-dong) showed a rapid temperature rise during the day due to narrow alleys and high pavement ratios, and pedestrian heat stress (PET) appeared very high. In comparison, areas where buildings are openly arranged and green space is secured, such as LCZ 4 (Sadang-dong) or LCZ 5 (Sinchon-dong), showed characteristics where heat is quickly dispersed or mitigated due to ventilation and shading effects. The waterfront area, LCZ G (Sincheon-dong), showed distinct cooling effects in both day and night, confirming its role as a buffer zone for the urban thermal environment.



Example of ENVI-met analysis result

### ■ Derivation of Heatwave-Vulnerable Building and Space by Spatial Type

Based on the ENVI-met analysis results, thermal vulnerability according to building attributes (height, year of construction, usage) was quantitatively evaluated. The analysis confirmed a tendency for surrounding thermal vulnerability to increase as building height increases. This is because the 'canyon effect,' which increases radiant heat reflection and re-radiation and hinders ventilation, is strengthened as the building becomes higher and the envelope area increases. Also, buildings with older construction years (before 1999) showed higher thermal vulnerability due to lack of insulation performance and deterioration, while new buildings since 2011 showed relatively favorable results thanks to strengthened energy standards. By usage, educational research facilities and neighborhood living facilities showed the highest vulnerability due to large paved areas and lack of green space, while apartment complexes and office facilities with secured landscaping appeared relatively low. This suggests that customized management considering the physical characteristics of buildings, not just the temperature of the space, is necessary for heatwave response.

## Conclusion

This study multidimensionally identified the heatwave vulnerability of building and urban spaces in Seoul using big data and advanced analysis technologies. The results confirmed that the physical structure of the city (LCZ) has a decisive influence on the thermal environment, and in particular, high-density, low-rise, and industrial areas are most vulnerable to heatwaves. It was also quantitatively proven through microscopic simulation that building height, deterioration, and usage are major factors worsening the surrounding thermal environment.

Based on these research results, the following policy implications are proposed. First, deregulation of the opening and use of data linked to personal information (health, death, etc.) is necessary to advance heatwave damage prediction models. Second, a system to constantly monitor buildings at risk of various disasters, including heatwaves, should be established by linking disaster data to the building life cycle information system under the 'Building Management Act'. Third, it is necessary to revise the 'Building Act' and related enforcement rules to check the heatwave risk of the site in advance at the building permit stage and to mandate or recommend preventive measures such as the use of heat-shielding paint and securing green space when building in risk areas. Finally, the current heatwave risk map service should be upgraded to an intelligent service capable of practical heatwave risk management by combining the building/spatial unit vulnerability analysis results of this study with socio-demographic factors (sensitivity, adaptive capacity). This will contribute to enhancing the efficiency of urban heatwave adaptation policies, such as the placement of cooling centers and support for vulnerable groups.

**Keywords :**

Heatwave, Local Climate Zone, Remote Sensing, Vulnerability Analysis, ENVI-met