

수도권 지역기후구역 유형을 활용한 도시 폭염 리질리언스 평가: 저항력 중심의 접근

김서현* · 김인화** · 김윤지*** · 신유진** · 임노을*** · 전성우****†

*고려대학교 환경생태공학과 석사과정, **고려대학교 환경생태공학과 박사과정,
고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, *고려대학교 환경생태공학부 교수

Urban heatwave resilience in the Seoul metropolitan area: A resistibility-based assessment using local climate zone classification

Kim, Seo Hyun* · Kim, In Hwa** · Kim, Yoon Ji*** · Shin, Yu Jin** · Lim, No Ol*** and Jeon, Seong Woo****†

*Master Student, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Doctoral Student, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

***Research Professor, Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, Korea

****Professor, Dept. of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Urban heat stress is increasingly exacerbated by the combined effects of climate change and urbanization, imposing considerable burdens on human thermal comfort and urban resilience. This study investigates the spatial variability of heat stress and associated resilience across urban morphological types by applying the Local Climate Zone (LCZ) classification framework to the Seoul metropolitan area and calculating the Universal Thermal Climate Index (UTCI) based on data from automatic weather stations. The analysis reveals that compact urban forms, particularly LCZ1 (Compact high-rise) and LCZ2 (Compact midrise), are associated with elevated UTCI values and prolonged exposure to heat stress, indicating lower levels of resilience. In contrast, land cover types such as LCZA (Dense trees) and LCZD (Low plants) exhibit consistently lower UTCI values and enhanced resilience to thermal extremes, albeit with greater spatial variability. Correlation analysis reveals statistically significant associations between urban physical parameters and resilience indices. These associations indicate that building height and surface coverage are negatively associated with heatwave resilience, whereas sky view factor and water surface ratio show positive associations. The green space ratio, however, does not exhibit a significant correlation, underscoring the necessity of qualitative vegetation attributes in resilience assessments. These findings highlight the importance of integrating human-centered thermal indices with urban morphological classification frameworks. By presenting a perception-informed and spatially explicit approach, this study contributes a practical framework for evaluating urban heat resilience and offers empirical insights for climate-adaptive urban planning and policy development in rapidly urbanizing regions.

Key words : Climate Change, Urban Heat, Local Climate Zone, Universal Thermal Climate Index, Heatwave Resilience

1. 서론

기후변화와 도시화는 도시 환경의 열 스트레스를 심화시키고 있으며, 특히 여름철 폭염은 건강, 생활, 에너지 수

요, 도시 기능 전반에 복합적인 영향을 미치고 있다(Ahn et al., 2012; Jee et al., 2016; Oh and Hong, 2005). 2024년 기상청 발표에 따르면, 우리나라는 북태평양고기압의 지속적인 영향으로 인해 2024년 전국 평균기온은 25.6℃

†Corresponding author : cepps_korea@korea.ac.kr (Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3043)

ORCID 김서현 0009-0008-3161-2639
김인화 0009-0007-3837-9705
김윤지 0000-0003-1490-0782

신유진 0000-0001-9538-3224
임노을 0000-0001-7960-3178
전성우 0000-0001-5928-8510

로, 기상관측 이래 역대 최고를 기록했으며, 폭염일수는 24.0일로 역대 3위, 열대야 일수는 20.2일로 역대 1위를 기록하는 등, 극한 고온 현상이 전국적으로 심화되고 있다. 이러한 열 스트레스는 인구와 인공 피복이 고밀도로 집중된 도시 지역에서 더욱 두드러지게 나타나며, 도시의 구조적 특성은 열 저장 및 냉각 저해를 통해 폭염의 지속성과 강도를 증폭시키는 주요한 물리적 요인으로 작용하고 있다.

이에 따라 단순한 기온 분포나 열섬 진단을 넘어, 도시 시스템이 외부 기후 스트레스에 어떻게 반응하고 회복하는지를 평가하는 ‘리질리언스(Resilience)’ 개념의 적용이 요구된다. 리질리언스는 혼란, 스트레스, 역경 등 변화 상황에서 적응하고 회복하는 능력을 의미한다(Jung et al., 2016). 이는 일반적으로 네 가지 주요 구성 요소를 포함하는 다차원적 개념으로 정의된다: ① 저항력: 기능 저하 없이 버티는 능력, ② 회복력: 기능을 빠르게 정상 상태로 회복하는 능력, ③ 대체성: 기능을 대신할 수 있는 구조나 자원의 존재, ④ 자원 동원력: 위기 상황에서 대응 자원을 효율적으로 확보·운용하는 능력. 그러나 현실의 도시기후 분석 및 공간계획에서는 이 모든 요소를 동시에 정량화하는 데 한계가 있기 때문에, 분석 목적에 따라 특정 요소에 중점을 두는 접근이 필요하다. 이는 단일 요소 중심의 진단에서 출발하되, 궁극적으로는 도시 시스템 전반의 리질리언스를 구성하는 복합 요소 간의 상호작용을 정량적으로 통합 분석할 수 있는 기반을 제공한다.

기존의 도시 열환경 관련 연구는 리질리언스를 개념적으로 언급하거나 사회적·제도적 요인에 중점을 두는 경향이 있으며, 도시의 물리적 구조와 연계된 정량적 진단은 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히 리질리언스의 구성 요소 중에서도 ‘저항력’, 즉 외부 충격에 직면한 도시 공간이 열 스트레스를 기능 저하 없이 견디는 구조적 능력에 대한 실증적 분석은 매우 제한적이다. 도시 열환경을 정량적으로 분석하는 데 활용되는 대표적 지표인 LST (Land Surface Temperature)는 위성 관측 기반의 표면온도 지표로, 열 분포를 파악하는 데 유용하나 인체 체감 온도를 직접 반영하지 못하며 시간 해상도에도 제약이 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 UTCI (Universal Thermal Climate Index, 이하 UTCI)가 주목받고 있으며, 이는 인체 열 쾌적성을 종합적으로 반영할 수 있는 열환경 평가지표로, 여러 기상학적 요소를 종합적으로 반영하므로, 도시의 열환경을 분석하는 데 적합하다. 동시에, 도시 물리 구조를 공간적으로 체계화하기 위한 방법으로

LCZ (Local Climate Zone, 이하 LCZ) 분류체계가 활용되고 있다(Demuzere et al., 2022; Kim and Eum, 2017; Stewart and Oke, 2012). LCZ는 건물 밀도, 표면 재질, 식생 피복 등의 요소를 기준으로 도시 유형을 구분하며, 도시 기후 반응 특성을 비교·분석하는 데 효과적이다. 그러나 도시의 물리적 공간 구조(LCZ)와 체감 기반 열환경(UTCI) 간의 상호작용을 통합적으로 분석하고, 이를 기반으로 ‘저항력’ 관점의 리질리언스를 정량적으로 평가한 연구는 거의 전무하다. 특히, 공간 유형에 따라 고온 스트레스에 대한 구조적 대응 능력이 어떻게 달라지는지를 실증적으로 규명하려는 접근은 여전히 초기 단계에 머물러 있다.

이에 본 연구는 수도권을 대상으로 LCZ 분류체계와 UTCI 지표를 통합 적용하여 도시 열환경 특성을 정량적으로 진단하고, 이를 기반으로 ‘저항력’에 초점을 맞춘 폭염 리질리언스 평가체계를 제시하고자 한다. 이때의 폭염 리질리언스는 ‘고온 재해에 노출된 도시 공간이 열 스트레스를 효과적으로 흡수하거나 완화하며, 안정적인 열환경 상태로 회복할 수 있는 물리적 능력’으로 정의하였으며, LCZ 유형별 UTCI 분석을 통해 열 스트레스의 강도 및 지속성을 고려한 저항력 지수(resistibility index)를 산정하고, 각 공간 유형별 상대적 리질리언스를 평가하였다. 아울러, 건물 밀도, 녹지율, 불투수율 등 도시 물리 환경 요인과의 관계를 분석함으로써 도시 구조가 폭염 대응 능력에 미치는 영향을 실증적으로 규명하였다. 본 연구는 LCZ-UTCI 통합 접근을 통해 도시 공간 구조에 기반한 체감 열환경의 정량적 리질리언스 진단이 가능함을 입증하고자 하며, 이는 향후 도시 기후 적응계획 및 열환경 관리 정책 수립을 위한 실증적 근거로 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 연구 범위

연구는 수도권을 대상으로 하며, 이는 서울특별시의 25개 자치구, 경기도의 31개 시·군, 인천광역시의 10개 구·군을 포함한다(Fig. 1). 여름철 열환경 분석을 위해 2019년부터 2023년까지 수도권 전역에 분포한 방재기상관측장비 98개 지점에서 측정된 6월 1일부터 8월 31일까지의 1시간 단위 기상자료를 활용하였다.

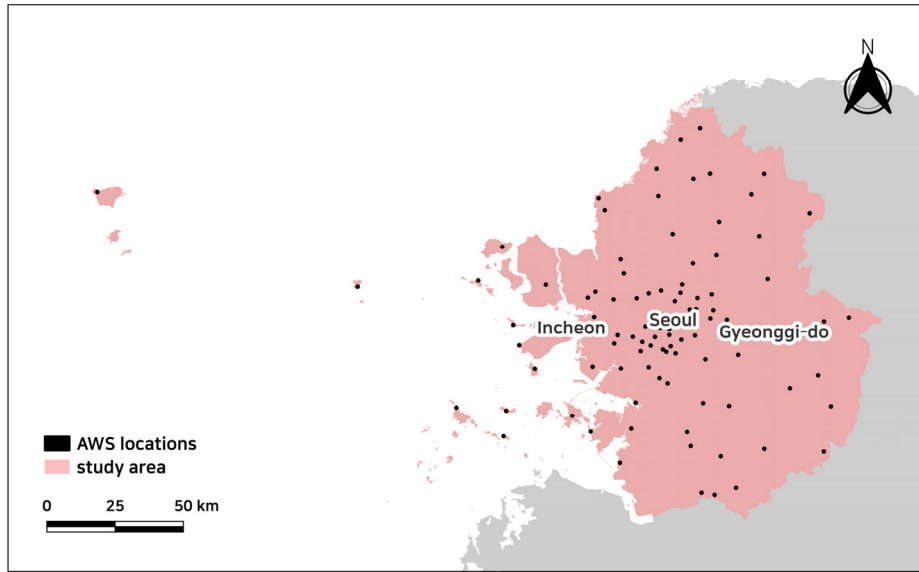


Fig. 1. Study area and meteorological stations

2.2. 연구 방법

2.2.1. LCZ 유형별 열 쾌적성 산정

LCZ는 미세 규모의 토지 피복 관련 물리적 특성을 반영하여 도시 공간을 체계적으로 분류하는 보편적인 도시 유형 체계이다(Demuzere et al., 2022). Stewart and Oke (2012)는 기존의 “도시-농촌” 이분법이 도시열섬현상 분석에 있어 현장 조건을 충분히 설명하지 못하므로 관측 결과의 해석력이 제한된다고 지적하였다. 이에 따라, LCZ는 전 세계 어디서나 보편적으로 적용할 수 있는 도시 및 농촌 지역에 대한 기후 기반 분류체계로 제안되었다(Stewart and Oke, 2012). LCZ는 표면 피복, 구조, 재료, 그리고 인간 활동이 균질한 지역으로 공식적으로 정의되며, 이는 수평적으로 수백 미터에서 수 킬로미터에 이르는 규모를 가진다(Stewart and Oke, 2012). LCZ 분류체계는 17개의 공간 유형을 제시하며, 해당 유형을 통해 열 환경의 공간적 특성을 쉽게 파악할 수 있다(Kim and Eum, 2017). 17개의 공간 유형은 10개의 인공 피복 유형(built types)과 7개의 자연 피복 유형(land cover types)으로 구분된다(Table 1).

본 연구에서 활용한 LCZ는 오픈소스 아카이브인 Zenodo에서 제공하는 100m 해상도의 Global LCZ Map v3 (Demuzere et al., 2022)이다. 이는 전문가의 유형 분류를 통한 학습 지역과 지구 관측 영상 자료를 경량화된 랜덤 포레스트 모델에 적용하여 생성되었다. 지도 품질 평

가는 부트스트랩 교차검증과 함께 수행되었으며, 표면 피복, 불투수면, 건물 높이 등에 대한 벤치마크 분석을 통해 이루어졌다(Demuzere et al., 2022). 해당 자료는 전 지구적이고 공간적으로 일관된 도시 분류 자료로 이용할 수 있도록 제공되었으나, 국내 실적과는 미세한 차이를 보일 수 있다. 따라서 제공되는 LCZ에 대해 정규성 검정, 분산 동질성 검정, Kruskal-Wallis 검정을 추가적으로 수행함으로써 LCZ 유형 간 평균적인 열 쾌적성이 연구대상지에서 통계적으로 유의미한 차이를 보이는지 확인하였다.

또한, 각 LCZ 유형에 따라 도시 열환경을 분석하기 위해 UTCI를 산정하였다. UTCI는 다차원적으로 정의된 실제 실외 열환경에 대한 인간의 생리학적 반응을 적절히 반영하는 일차원적 지표로서 개발되었다(Bróde et al., 2012). 해당 지수는 실외 환경에서의 열 스트레스를 평가하는 대표적인 열생리학적 지표로 통용되고 있다. 산출 결과는 기준 환경에서 도출된 환경의 등가온도(equivalent temperature)로 표현되며, 산출 시에는 기상학적 매개변수로 건구 온도, 평균복사온도, 상대습도 그리고 풍속이 고려된다(Zare et al., 2018). 이때의 UTCI 등가온도는 기준 환경에서 동일한 반응 지수 값을 유도하는 기온으로 정의된다(Bróde et al., 2012). 본 연구에서는 pythermalcomfort 라이브러리를 활용하였으며, 해당 함수는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서 정의한 UTCI 계산 모델을 기반으로 동작한다. 산출 시에는 기온, 풍속, 평균복사온도, 상대습도를 입력 변수로 사용하였으

Table 1. Abridged definitions for local climate zones (Stewart and Oke, 2012)

Type	LCZ		Definition
Built types	LCZ1	Compact high-rise	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.
	LCZ2	Compact midrise	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.
	LCZ3	Compact low-rise	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.
	LCZ4	Open high-rise	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.
	LCZ5	Open midrise	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.
	LCZ6	Open low-rise	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.
	LCZ7	Lightweight low-rise	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).
	LCZ8	Large low-rise	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.
	LCZ9	Sparsely built	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).
	LCZ10	Heavy industry	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.
Land cover types	LCZA	Dense trees	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
	LCZB	Scattered trees	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
	LCZC	Bush, scrub	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
	LCZD	Low plants	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
	LCZE	Bare rock or paved	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
	LCZF	Bare soil or sand	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
	LCZG	Water	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.

며, 시간별 기온, 풍속, 습도는 방재기상관측장비를 통한 실측 자료를, 평균복사온도는 ECMWF (European Centre for Medium-Range Forecasts)에서 제공하는 공간해상도 0.25°, 시간해상도 1시간의 ERA5-HEAT (Human thErmAlcomforT) 자료를 활용하였다. 이때 대사율은 보행 속도 4km/h에 해당하는 2.3 MET 수준, 착의량은 기온에 따른 표준 착의량으로 설정되어 있으며, 이는 UTCI 산정 시 사용되는 UTCI-Fiala 생리 모델의 기본 가정에 기반한다(Bröde et al., 2012).

UTCI를 기준으로 인간이 받는 열 스트레스 정도는 극한 한랭 스트레스(extreme cold stress)부터 극한 열 스트레스(extreme heat stress)까지 총 10개 범주로 구분된다(Table 2). UTCI가 32°C를 초과하면 강한 열 스트레스(strong heat stress) 이상에 해당하며, 이는 사망률 증가로 이어질 수 있어 신체 활동을 줄일 필요가 있다(Liu et al., 2022). 따라서 많은 연구에서 32°C를 고온 임계값으로 설정하였다(Antonescu et al., 2021; Kolendowicz et al., 2018; Liu et al., 2022; Shukla et al., 2022). 본 연구에서

Table 2. UTCI equivalent temperature categorized in terms of thermal stress (B łażejczyk et al., 2013)

UTCI (°C) range	Stress Category	UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress	+9 to 0	slight cold stress
+38 to +46	very strong heat stress	0 to -13	moderate cold stress
+32 to +38	strong heat stress	-13 to -27	strong cold stress
+26 to +32	moderate heat stress	-27 to -40	very strong cold stress
+9 to +26	no thermal stress	below -40	extreme cold stress

또한 UTCI가 32°C를 초과하는 열환경을 고온 재해로 간주하였으며, UTCI가 32°C를 초과하는 시간의 지속성과 평균 UTCI 수준을 통해 고온 환경의 강도 및 지속성을 분석하였다. 특히, LCZ 유형별 UTCI의 시계열 특성을 비교함으로써, 도시 구조에 따른 열 스트레스 수준을 정량적으로 분석할 수 있는 기반을 마련하였다.

2.2.2. 리질리언스 분석

본 연구는 폭염 리질리언스를 여름철 중규모 고온 재해에 노출된 도시 공간이 열 스트레스를 효과적으로 흡수하거나 완화하며, 안정적인 열환경 상태로 회복할 수 있는 물리적 능력으로 정의하였다. 리질리언스가 확보된 도시의 경우, 여름철 고온 재해가 발생하였을 때, 강한 열 스트레스(strong heat stress) 이상의 환경에서의 지속 시간이 짧을 것이다. 이에 따라, 리질리언스의 정량적 분석은 UTCI 기반의 시간 누적 열 스트레스와 고온 지속 시간을 반영한 저항력 지수(resistibility index, RES)를 이용하여 수행되었다. 저항력 지수는 Liu et al. (2024)에서 제안한 산식을 기반으로 하여, 열 스트레스의 강도와 지속 시간에 따라 값이 결정된다(Eq. (1)). 본 연구에서는 도시 공간 간의 비교를 위해 최종적인 저항력 지수(RES')를 [0,1] 범위로 정규화하여 도출하였다(Eq. (2)).

$$RES = \frac{\sum_{i=1}^m UTCI_i}{m} \times H_{all} \tag{1}$$

$$RES' = 1 - \frac{(RES_k - RES_{min})}{(RES_{max} - RES_{min})} \tag{2}$$

UTCI_i 시간 i에서의 UTCI 값
 m 전체 시간
 H_{all} UTCI 값이 32°C를 초과하는 시간

즉, 저항력 지수(RES')는 고온 재해 시 평균적인 UTCI

값이 낮고, UTCI가 32°C를 초과하는 빈도가 낮을수록 큰 값을 보인다. 높은 저항력 지수는 폭염 재해에 대응하는 도시 공간의 리질리언스가 높음을 의미한다. 이후 지점별로 계산된 리질리언스를 여러 도시 표면 매개변수와의 상관성을 분석하여 폭염 리질리언스의 공간적 특성을 파악하였다. 분석에 이용한 도시 표면 매개변수는 건물 높이, 건물 표면 비율, SVF (sky view factor), 녹지율, 수변 면적 비율이다. 국내 여러 선행연구에서는 기상관측 지점을 중심으로 반경 500 m 범위를 설정하여 기상자료와 주변 환경 특성 간의 관계를 분석하였다. Park et al. (2014)는 국지 온도와 토지피복 간의 상관성 분석을 위해 500 m 반경을 미시공간 단위로 설정하였으며, Kim and Song (2016), Park et al. (2017), Lee and Jeong (2018) 또한 체감온도, 도시 열섬, 미기후 요소 등과의 관계 분석을 위해 동일한 공간 범위를 활용하였다. 본 연구 역시 이와 같은 공간적 분석 단위를 참고하여, 방재기상관측장비 지점 주변의 도시 표면 특성이 폭염 리질리언스에 미치는 영향을 정량화하고자 반경 500 m 범위를 설정하였다. 건물 높이 및 건물 표면 비율은 국토지리정보원에서 제공하는 100 m 해상도의 건물 높이 및 건축면적 격자 자료를 활용하였다. 원천 자료는 국토교통부에서 제공하였으며, 2024년을 기준으로 한다. SVF는 ALOS World 3D에서 제공하는 30 m 해상도의 DSM을 이용하여 계산하였다. 해당 DSM은 일본 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)에서 제공하는 전 지구 규모의 자료로, 2021년 구축된 데이터를 활용하였다. 해당 자료는 전 세계 지형 및 건물, 수목 등 인공 구조물의 고도 정보를 포함하고 있다. SVF는 특정 위치에서 하늘이 가시적으로 노출되는 비율을 나타내며, 도심에서는 건물 및 지형의 차폐로 인해 값이 낮게 나타난다. 본 연구에서는 방재기상관측장비를 기준으로 반경 500 m 내의 평균 SVF 값을 해당 지점의 대푯값으로 설정하여 공간적 특성을 반영하였다. 녹지율 및 수변 면적 비율은 2023년 중분류 토지피복지도에서의 산림, 초지, 습지, 수계의 분류를 활용하였다.

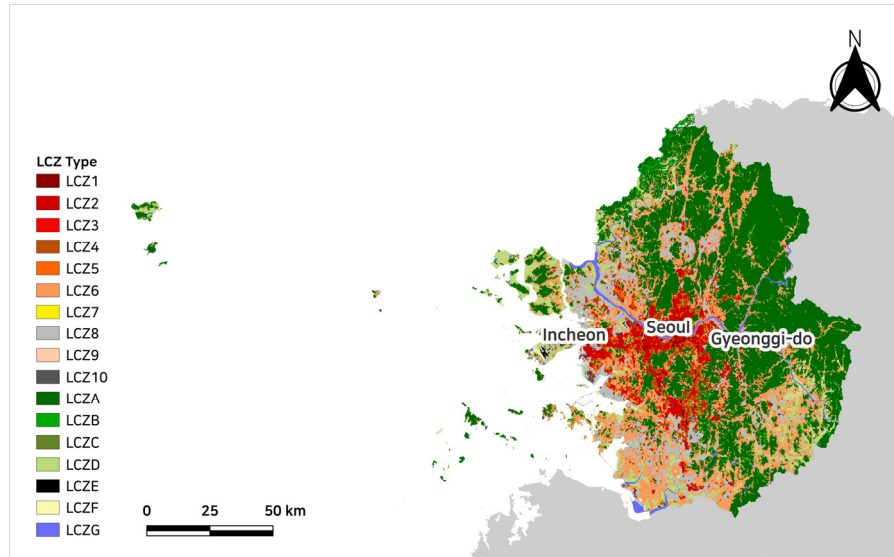


Fig. 2. LCZ map of Seoul metropolitan area

3. 연구결과

3.1. LCZ 유형별 열 쾌적성 산정

본 연구에 활용된 LCZ 자료는 전 지구 단위로 생성된 것으로, 국내 적용의 통계적 타당성이 검토되어야 한다. 따라서, 도시의 열환경 특성을 대표하는 UTCI가 LCZ 유형에 따라 통계적으로 유의미한 차이를 보이는지를 검증하고자 하였다. 이를 위해, 먼저 각 LCZ 유형의 UTCI 데이터가 통계 분석의 전제 조건을 만족하는지 확인하였다. 정규성 여부를 확인한 Shapiro-Wilk 검정 결과, 모든 그룹에서 p 값이 0.005 미만으로 나타나 데이터가 정규분포를 따르지 않음을 확인하였다. 또한, 그룹 간 분산의 동질성 검정을 위한 Levene's Test에서는 $W=3.9203$, $p=0.0001$ 로, 분산이 동일하다는 귀무가설이 기각되었다. 이러한 결과는 전통적인 분산분석(ANOVA)을 적용하기 어려운 상황임을 나타낸다. 이에 따라, 각 LCZ 유형 간 UTCI 값의 차이를 비교하기 위해 비모수 검정인 Kruskal-Wallis 검정을 실시하였다. 검정 결과, $H=166.8865$, $p=0.0000$ 으로 나타났다. 이는 LCZ 유형에 따라 UTCI 값의 분포에 유의한 차이가 존재함을 통계적으로 입증하는 결과이다. 즉, 서로 다른 도시 구조 및 토지 이용 특성을 반영하는 LCZ 유형이 UTCI에 영향을 미친다는 점을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 해당 LCZ 분류에 따라 수도권 지역의 열환경을 분석하였다.

수도권 지역의 LCZ 유형별 면적 비율을 살펴본 결과,

크게 인공 피복 유형과 자연 피복 유형으로 구분되었다 (Fig. 2). 이는 세부적으로 인공 피복 유형 9종, 자연 피복 유형 6종으로 분류되었다(Table 3). 수도권 지역의 인공 피복 유형은 LCZ6 (Open low-rise)가 22.6%로 가장 높은 면적 비율을 나타냈다. 이어 LCZ8 (Large low-rise)과 LCZ2 (Compact midrise)가 각각 10.1%, 4.8%의 비율을 보이며 상대적으로 높은 면적을 차지하고 있음을 확인하였다. 이는 수도권에서 저층 개방형 및 중층 건물이 광범위하게 분포하고 있음을 시사하며, 이러한 유형은 주거 및 상업 지역의 공간적 특성과 연관될 수 있다. 수도권 지역의 자연 피복 유형은 LCZA (Dense trees)가 43.9%의 면적 비율을 보이며 가장 넓은 면적을 차지하였다. 이는 수도권 내 광범위한 녹지 및 산림 지역의 존재를 반영한다. 또한, LCZD (Low plants), LCZB (Scattered trees)가 각각 6.8%, 2.3%를 차지하며 도시 내 녹지 및 조경 공간이 일부 구성되어 있음을 확인하였다.

분류된 LCZ 유형에 따라 열 쾌적성을 산정하기 위하여 연구대상지의 방재기상관측장비 98개 지점을 LCZ에 따라 분류하였다. 이때, 해당 지점은 반경 500m 내의 가장 우세한 LCZ를 대표한다고 가정하였다. 그 결과, 방재기상관측장비 지점은 인공 피복 유형 6종, 자연 피복 유형 2종으로 분류되었다. 특히, LCZ2 (Compact midrise), LCZ6 (Open low-rise), LCZ8 (Large low-rise), LCZA (Dense trees)에 속하는 지점은 10개 이상으로 해당 LCZ 유형의 면적 비율이 높음을 확인할 수 있었다.

Table 3. The proportion of LCZ

Type	LCZ		Area (%)	Type	LCZ		Area (%)
Built type	LCZ1	Compact high-rise	0.596	Land cover type	LCZA	Dense trees	43.928
	LCZ2	Compact midrise	4.839		LCZB	Scattered trees	2.331
	LCZ3	Compact low-rise	0.856		LCZC	Bush, scrub	0.00
	LCZ4	Open high-rise	2.071		LCZD	Low plants	6.833
	LCZ5	Open midrise	2.45		LCZE	Bare rock or paved	0.081
	LCZ6	Open low-rise	22.605		LCZF	Bare soil or sand	0.208
	LCZ7	Lightweight low-rise	0.001		LCZG	Water	1.879
	LCZ8	Large low-rise	10.076		sum	sum	55.259
	LCZ9	Sparsely built	0.97				
	LCZ10	Heavy industry	0.276				
		sum	44.741				

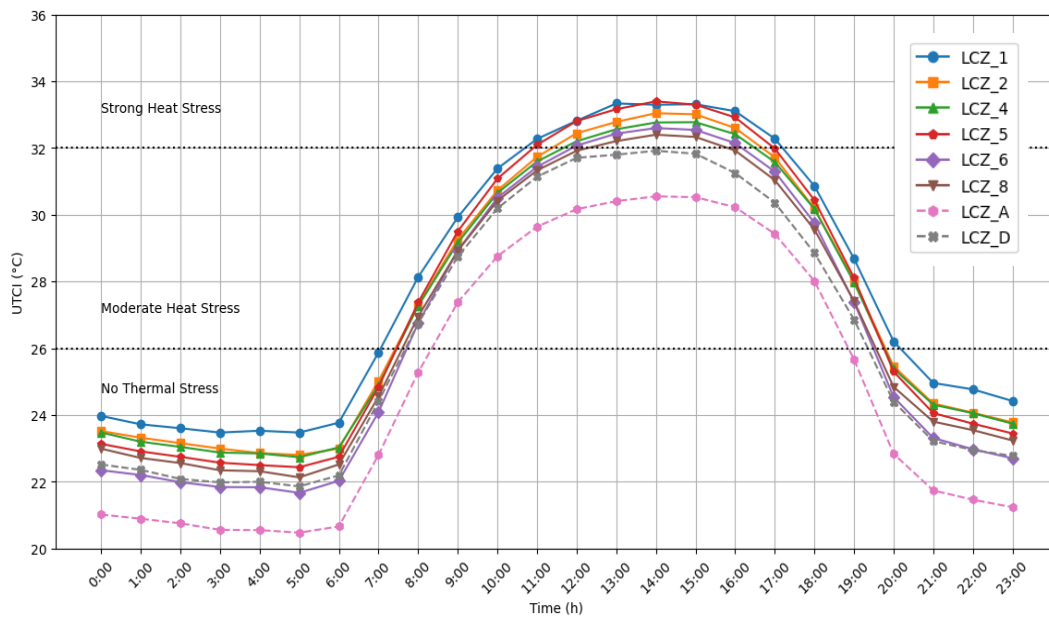


Fig. 3. LCZ-wise average UTCI variation

분석 기간 전체에 대한 한 시간 단위의 UTCI 변화를 확인한 결과, 모든 LCZ 유형에서는 UTCI 값이 14시경 최고점을 기록하는 경향을 보였다(Fig. 3). 이러한 일변화 패턴은 LCZ 유형 간 대체로 유사하였으나, 동일한 시간대 내 UTCI의 절대 수준은 유형별로 뚜렷한 차이를 나타냈으며, 모든 인공 피복 유형은 UTCI 값이 강한 열 스트레스(strong heat stress) 범위에 도달하며 고온 임계값 이상의 값을 보였다. LCZ 유형별로는 LCZ1 (Compact high-rise), LCZ2 (Compact midrise), LCZ5 (Open midrise) 등 밀집된 도시 지역은 다른 피복 유형에 비해 매 시간대 0.936 ~ 1.282°C 높은 UTCI 값을 보였다. 반면,

자연 피복 유형의 경우, 인공 피복 유형에 비해 매 시간대 1.223 ~ 1.781°C 낮은 UTCI 값을 유지하였다. 특히 LCZA (Dense trees)는 최고점에서도 Moderate Heat Stress (26 ~ 32°C) 수준을 유지하였으며, 이는 고밀도 도시 지역과 명확히 구분되는 열환경 특성을 보여준다.

LCZ 유형별 UTCI의 차이는 야간 및 이른 아침 시간대에 뚜렷해지는 경향이 확인되었다. 인공 피복 유형 중에서도 LCZ1 (Compact high-rise)은 밀집된 고층 건축물로 인해 낮 동안 강한 열 스트레스에 도달할 뿐만 아니라, 야간에도 상대적으로 높은 UTCI를 유지하는 특성을 보인다. 이는 건축물과 포장면과 같은 도시 표면이 높은 열 흡

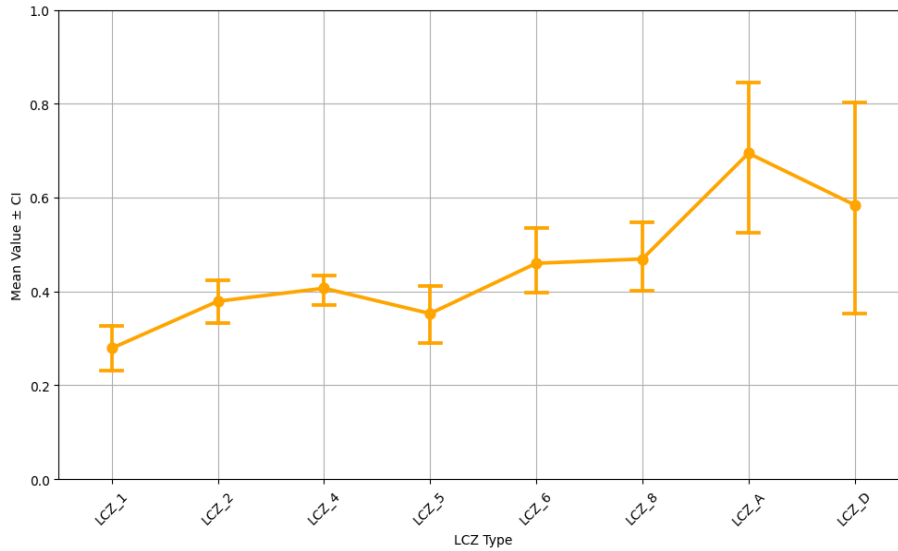


Fig. 4. Point plot of LCZ-wise resistibility index

수율을 가지며, 일사로 인한 에너지를 낮 동안 저장하고 야간에 방출함으로써 야간 온도 상승을 유도하는 도시 열 환경 특성에 기인한 결과일 수 있다(Krayenhoff et al., 2018; Oke and Cleugh, 1987). 더불어 도시 구조에 의해 복사 및 대류 손실이 억제되며 공기 흐름이 약화되어 도시는 일종의 복사 함정(radiation trap)으로 작용하게 된다(Stewart and Oke, 2012). 반면, LCZ6 (Open low-rise) 및 LCZ8 (Large low-rise)은 상대적으로 개방된 구조를 가지고 있어 강한 열 스트레스 지속 시간이 짧고, 야간에는 UTCI가 빠르게 감소하는 경향을 보였다. 또한, LCZA (Dense trees)와 LCZD (Low plants) 유형은 녹지 공간이 확보된 유형으로 낮 동안 열 스트레스가 짧게 지속되고, 야간에 UTCI가 빠르게 감소하는 경향이 나타나 인공 피복 유형과의 차이가 극대화되었다. Bowler et al. (2010)은 녹지 공간이 풍부한 지역일수록 낮에는 증발산 및 그림자 효과에 의해 열이 효과적으로 제거됨을 보였다.

LCZ 유형별 열 쾌적성을 산정한 결과, 건축 및 토지 피복 특성이 UTCI 변화에 미치는 영향이 크며, 시간대별로 UTCI 차이가 다르게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다. 도시화율이 높은 지역일수록 높은 열 스트레스 수준을 유지하며, 야간에도 열 축적 효과가 지속되는 특징을 보였다.

3.2. 리질리언스 분석

도시 물리적 공간의 폭염 리질리언스는 UTCI값을 기반으로 산정되었으며, 폭염 리질리언스의 정량적 비교를 위

해 포인트 플롯을 활용하였다(Fig. 4). 포인트 플롯은 각 LCZ 유형에 대한 평균 저항력 지수와 95% 신뢰구간을 함께 제시함으로써, 공간 유형별 열 스트레스 저항력의 경향성과 변동성을 나타내었다.

LCZ 분류체계를 기반으로 방재기상관측장비 지점별 폭염 리질리언스를 분석한 결과, 전체 LCZ의 평균적인 저항력 지수(RES)는 0.45로, LCZ 유형 간의 뚜렷한 차이가 관찰되었다. 인공 피복 유형에 해당하는 LCZ1 (Compact high-rise), LCZ2 (Compact midrise), LCZ4 (Open high-rise), LCZ5 (Open midrise)는 평균 이하의 저항력을 보였으며, 특히 LCZ1 (Compact high-rise) 평균 저항력 지수가 0.28로 가장 낮은 리질리언스를 보였다. 인공 피복 유형 중에서는 LCZ6 (Open low-rise)와 LCZ8 (Large low-rise)가 평균 이상의 저항력을 보이며, 이를 통해 저층 건물이 개방적으로 배치된 지역의 경우 리질리언스를 확보할 수 있음을 확인하였다. 자연 피복 유형에 해당하는 LCZA (Dense trees)와 LCZD (Low plants)의 저항력 지수는 각각 0.69, 0.58로 다른 LCZ 유형에 비해 평균적인 리질리언스가 높음을 확인하였다. 또한, 인공 피복 유형은 신뢰구간의 폭이 비교적 좁아, 열 스트레스에 대한 반응이 공간 간 유사하게 나타나는 경향을 보였다. 반면, 자연 피복 유형은 넓은 신뢰구간과 높은 표준편차를 보였으며, 이를 통해 자연 피복 유형의 경우 동일 유형이라도 지점 간 변동성이 큼을 확인하였다.

세부적으로 폭염 리질리언스의 공간적 특성을 파악하

Table 4. Correlation analysis of heatwave resilience and urban parameters

variable	correlation	p-value
building height	-0.26	0.011
building surface fraction	-0.24	0.018
sky view factor (SVF)	0.36	0.000
green area ratio	0.01	0.949
water area ratio	0.22	0.032

기 위해 건물 높이, 건물 표면 비율, SVF 등 도시 표면 매개변수와 저항력 지수 간의 상관성을 분석하였다. 분석에 이용한 도시 표면 매개변수로는 방재기상관측장비 지점을 기준으로 반경 500 m 범위 내의 평균 건물 높이, 평균 건물 표면 비율, 평균 SVF, 녹지율, 수변 면적 비율을 활용하였다.

Pearson 분석 결과, 건물 높이, 건물 표면 비율, SVF, 수변 면적 비율은 p-value < 0.05 로 나타나 통계적으로 유의미한 상관관계를 확인할 수 있었다(Table 4). 건물 높이($r=-0.26$, $p=0.011$), 건물 표면 비율($r=-0.24$, $p=0.018$)은 저항력 지수와 유의한 음의 상관관계를 보여, 고밀도 도시 구조가 열 스트레스를 악화시킴을 시사하였다. 반면, SVF와 수변 면적 비율은 폭염 저항력 지수와 양의 상관관계(0.36, -0.22)를 보였다. SVF 값이 크다는 것은 개방감이 큰 환경을 의미하며, 이는 폭염에 대한 리질리언스 증가로 이어졌다. 물 환경은 높은 투과율과 열용량을 가지기 때문에 낮 동안의 열 축적을 완화하고 열 쾌적성을 향상시킬 수 있다.

반면, 녹지율은 상관계수가 0.01 ($p=0.949$)로, 폭염 리질리언스와의 유의미한 상관관계가 나타나지 않았다. 초지의 경우, 기온 저감 효과가 있으나 상대습도 증가와 풍속 감소로 인해 열 쾌적성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 실제로 Makaremi et al. (2012)와 Min et al. (2022)의 연구에서는 수목 밀도가 높은 지역이 기온은 낮추었지만, 상대습도 상승과 풍속 감소로 인해 열 쾌적성 지수(PET)가 오히려 악화되는 사례가 확인되었다. 이러한 연구 결과는 LCZ 유형에 따라 폭염 리질리언스에 차이를 보이며, 구성 형태에 따라 리질리언스를 확보할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구는 수도권 지역을 대상으로 LCZ 분류체계를 활용하여 여름철 열 쾌적성을 UTCI를 기반으로 분석하고,

방재기상관측장비 지점별 폭염 리질리언스를 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, 도시화가 집중된 인공 피복 유형인 LCZ1 (Compact high-rise), LCZ2 (Compact midrise), LCZ4 (Open high-rise)에 해당하는 고층 밀집지역에서는 UTCI 값이 타 유형에 비해 0.936 ~ 1.282℃ 높고, 야간에도 열이 지속되어 열 스트레스가 장기간 유지되는 경향이 나타났다. 반면, 조밀한 수목이 분포하는 LCZA (Dense trees) 및 초지(LCZD, Low plants)와 같은 자연 피복 유형은 UTCI 값이 인공 피복 유형에 비해 1.223 ~ 1.781℃ 낮고, 야간 냉각 효과가 뚜렷하게 나타나 상대적으로 높은 리질리언스를 보였다.

이러한 차이는 도시 표면의 물리적 특성에 기인하며, 인공 구조물로 구성된 지역은 열용량이 높은 자재, 낮은 투과성, 제한된 환기성으로 인해 열 축적이 심화되는 반면, 자연 피복 지역은 복사냉각과 증발산이 활발히 이루어져 열환경 개선에 유리한 조건을 제공한다. 특히 인공 피복 유형은 야간에도 고온 상태가 지속되는 경향이 뚜렷하게 나타나며, 이는 도심 열섬 현상의 심화 및 열 취약성 관리에 있어 도시 구조적 특성이 결정적인 영향을 미침을 시사한다. 반면, 자연 피복 유형은 고온 상태로부터의 비교적 신속한 회복과 높은 리질리언스 수준을 보였으나, 식생 구성, 토양 수분 등의 복합적인 미기후 요인에 따라 공간 간 편차가 크게 나타나, 일반화에 한계가 있는 것으로 나타났다. 이는 자연 피복의 경우 식생 특성 등 질적 요소에 따라 리질리언스 반응이 이질적으로 나타날 수 있음을 시사하며, 단순한 피복 유형 구분만으로는 리질리언스 수준을 일관되게 설명하기 어려움을 보여준다. 그럼에도 불구하고, 인공 피복과 자연 피복 간의 뚜렷한 리질리언스 차이는 LCZ 분류체계가 도시 열환경 및 폭염 리질리언스의 공간적 이질성을 설명하는 데 효과적인 분석 틀로 기능할 수 있음을 시사한다.

도시 표면 특성과 리질리언스 간의 상관관계 분석 결과, 건물 평균 높이와 건물 표면 비율은 리질리언스 지수와 유의한 음의 상관관계를 보였으며, SVF와 수변 면적 비율은 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. 이는 고밀도·고층의 도시 구조에서는 건물 간 개방성이 낮아지고, 지표면에서 방출되는 복사 에너지가 대기 중에 잔류함으로써 도시 내부의 열 축적이 가중되는 효과와 관련이 있다(Stewart and Oke, 2012). 본 연구에서는 이러한 열 축적 현상이 폭염 리질리언스 수준의 저하와 밀접한 관련이 있음을 실증적으로 확인하였으며, 하천 등 수역의 인접성은 도시 공간의 리질리언스를 향상시키는 중요한 물리적 요

인으로 작용함을 확인하였다. 한편, 녹지율은 리질리언스와 유의한 상관관계를 보이지 않았는데, 이는 단순한 면적 지표보다 식생의 구조, 공간적 배열, 위치, 음영 효과 등 질적 특성이 리질리언스에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

본 연구는 도시 열환경 리질리언스를 구성하는 다양한 요소 중 물리적 저항력에 중점을 두고, UHCI 기반의 열 스트레스 진단과 도시 물리 구조 간의 관계를 실증적으로 분석하였다. 이는 리질리언스의 다차원적 구성 요소 가운데 구조적 대응 능력에 대한 정량적 이해를 심화하고, 향후 통합적 리질리언스 평가로의 확장을 위한 기초를 마련하였다는 점에서 의의를 지닌다. 본 연구는 분석 목적에 따라 물리적 저항력에 초점을 두었기 때문에, 사회·제도적 대응 역량이나 건강 취약성과 같은 비물리적 요소는 분석 범위에서 제외되었다. 향후 이러한 요인을 포함한 다차원적 프레임워크의 도입을 통해 리질리언스 전반을 포괄하는 종합적 진단이 가능할 것으로 기대되며, 이는 도시 기후 리스크 대응을 위한 정책 설계의 정합성과 실효성을 제고하는 데 기여할 수 있을 것이다.

한편, 본 연구는 LCZ 유형, 건물 밀도, 피복 유형 등 도시 구조의 거시적 특성을 중심으로 분석을 수행하였으며, 도로 포장률이나 건축 자재의 열 물성 등 미시적 물리 변수는 충분히 고려되지 않았다. 이러한 변수들은 지표면의 열 저장 및 방출 특성과 밀접하게 연관되어 있어, 향후 공간 간 리질리언스 차이를 보다 정밀하게 설명하기 위해서는 추가적인 반영이 요구된다. 또한, 녹지 및 수변 공간의 열 완화 기능은 단순한 면적보다는 식생 구성, 수종, 밀도, 음영 효과 등 질적 속성에 따라 상이하게 나타날 수 있으므로, 향후 고해상도 공간 자료와 질적 특성에 기반한 정밀 분석이 필요하다. 이러한 보완은 도시 리질리언스의 구조적 특성을 보다 정교하게 진단하고, 공간 특성에 기반한 도시계획 및 기후적응 전략 수립에 실질적으로 기여할 수 있을 것이다.

사사

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(RS-2022-KE002123).

Reference

- Ahn JS, Hwang JD, Park MH, Suh YS. 2012. Estimation of urban heat island potential based on land cover type in Busan using Landsat-7 ETM+ and AWS data (in Korean with English abstract). *J Korean Assoc Geogr Inf Stud* 15(4): 65-77. doi: 10.11108/kagis.2012.15.4.065
- Błażejczyk K, Jendritzky G, Bröde P, Fiala D, Havenith G, Epstein Y, Psikuta A, Kampmann B. 2013. An introduction to the universal thermal climate index (UTCI). *Geogr Pol* 86(1): 5-10. doi: 10.7163/GPol.2013.1
- Bowler DE, Buyung-Ali L, Knight TM, Pullin AS. 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape Urban Plann* 97(3): 147-155. doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006
- Bröde P, Fiala D, Błażejczyk K, Holmér I, Jendritzky G, Kampmann B, Tinz B, Havenith G. 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol* 56: 481-494. doi: 10.1007/s00484-011-0454-1
- Demuzere M, Kittner J, Martilli A, Mills G, Moede C, Stewart ID, Van Vliet J, Bechtel B. 2022. A global map of Local Climate Zones to support earth system modelling and urban scale environmental science. *Earth Syst Sci Data Discuss* 2022: 1-57. doi: 10.5194/essd-2022-92
- Jee JB, Kim BY, Zo IS, Lee KT, Choi YJ. 2016. Retrieval of land surface temperature based on high resolution landsat 8 satellite data (in Korean with English abstract). *Korean J Remote Sens* 32(2): 171-183. doi: 10.7780/kjrs.2016.32.2.9
- Jung EJ, Jeong BH, Na JM. 2016. A study on the sustainability and resilience of city (in Korean with English abstract). *J Korean Reg Dev Assoc* 28(4): 87-108.
- Kim DH, Song SK. 2016. Analyzing the relationships between land cover type and sensible temperature in

- urban heat wave (in Korean with English abstract). *J Korea Plann Assoc* 51(1): 137-152. doi: 10.17208/jkpa.2016.02.51.1.137
- Kim K, Eum JH. 2017. Classification of local climate zone by using WUDAPT protocol- A case study of Seoul, Korea (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Landscape Archit* 45(4): 131-142. doi: 10.9715/KILA.2017.45.4.131
- Krayenhoff ES, Moustauou M, Broadbent AM, Gupta V, Georgescu M. 2018. Diurnal interaction between urban expansion, climate change and adaptation in US cities. *Nat Clim Change* 8(12): 1097-1103. doi: 10.1038/s41558-018-0320-9
- Lee GW, Jeong YN. 2018. An observation study of the relationship of between the urban and architectural form and microclimate (in Korean with English abstract). *Asia-Pac J Multimedia Serv Convergent Art Humanit Soc* 8(11): 109-119. doi: 10.21742/AJMAHS.2018.11.10
- Liu J, Wang J, Chen T, Wang L. 2024. Heat stress resilience assessment of urban form from physical space dimension: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Urban Clim* 55: 101905. doi: 10.1016/j.uclim.2024.101905
- Makaremi N, Salleh E, Jaafar MZ, GhaffarianHoseini, AH. 2012. Thermal comfort conditions of shaded outdoor spaces in hot and humid climate of Malaysia. *Build Environ* 3(7): 1-14. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.024
- Min JK, Eum JH, Sung UJ, Son JM, Kim JE. 2022. Scenario-based analysis on the effects of green areas on the improvement of urban thermal environment (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Landscape Archit* 50(6): 1-14 doi: 10.9715/KILA.2022.50.6.001
- Oh KS, Hong JJ. 2005. The relationship between urban spatial elements and the urban heat island effect (in Korean with English abstract). *J Urban Des Inst Korea Urban Des* 6(1): 47-63
- Oke TR, Cleugh HA. 1987. Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary Layer Meteorol* 39: 233-245.
- Park JB, Im HN, Kim SH, Choi CG. 2017. An effect of building-coverage ratio and floor-area ratio on urban heat island effect-Focused on multi-family housing and apartments with automatic weather station in Seoul-. *J Korea Plann Assoc* 52(7): 159-176.
- Park YN, Lee GW, Jeong YN, Kim SY. 2014. Analyzing relationship between the local temperature, land usage and land coverage: Focused on the integrated model in the microspace (in Korean with English abstract). *KIEAE J* 14(5): 123-130. doi: 10.12813/kieae.2014.14.5.123
- Stewart ID, Oke TR. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull American Meteorol Soc* 93(12): 1879-1900. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1
- Zare S, Hasheminejad N, Shirvan HE, Hemmatjo R, Sarebanzadeh K, Ahmadi S. 2018. Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. *Weather Clim Extremes* 19: 49-57. doi: 10.1016/j.wace.2018.01.004