



쇠퇴도시 내 미시적 공간의 폭염취약성 모델 분석 - 대구광역시 서구 비산 2·3동 일대 도시재생활성화지역을 중심으로 -

Heat Wave Vulnerability Model Analysis in the Microscopic Space of a Decline City - The Urban Regeneration Vitalization Area around Bisan 2·3-dong, Seo-gu, Daegu Metropolitan City -

공병준* · 원주성** · 민병학*** · 김세용****
Byeongjun Gong* · Joosung Won** · Byunghak Min*** · Seiyong Kim****

* Graduate Student, Dept. of Architecture, Korea Univ., South Korea (rhdqudwns08@naver.com)

** Coauthor, Ph.D Candidate, Dept. of Architecture, Korea Univ., South Korea (wonjoosung91@gmail.com)

*** Coauthor, Research Professor, Department of Smart City, South Korea (noahmin@korea.ac.kr)

**** Corresponding author, Professor, Dept. of Architecture, Korea Univ., South Korea (kksy@korea.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Continuous natural disasters caused by climate change are damaging people's lives and property. Among them, heat waves are closely related to the physical elements of urban space. In order to improve this, practical research based on urban space thermal environment is required, and in particular, microscopic spatial pattern analysis is needed in a decline city that is very vulnerable to heat waves. Therefore, this study analyzed the spatial correlation of physical elements of urban space due to heat wave vulnerability in the area of Bisan 2·3-dong, Seo-gu, Daegu Metropolitan City. **Method:** Through previous studies, factors due to heat wave vulnerability were derived in microscopic space. Afterwards, correlation analysis was performed on the measured urban space thermal environment and spatial patterns through the 'Kernel Density Estimation' analysis using the 'Arc GIS Pro' program. For correlation analysis, 'Pearson's Correlation Analysis' analysis method was used. **Result:** The Hazards and vulnerability indicators classified in this study showed a positive correlation with the measured urban space thermal environment. In addition, the adaptive capacity indicator showed a negative correlation, proving the spatial correlation between the heat wave vulnerability indicator presented in this study and the urban space thermal environment.

KEYWORD

기후변화
폭염취약성
도시공간 열환경
공간적 상관성

Climate Change
Heat Wave Vulnerability
Urban Space Thermal Environment
Spatial Correlation

ACCEPTANCE INFO

Received Nov. 15, 2022

Final revision received Dec. 13, 2022

Accepted Dec. 16, 2022

© 2022. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

18세기 중반 영국의 산업혁명이 촉매가 되어 전 세계적으로 급격하게 이루어진 산업화는 온실가스의 축적으로 지구온난화를 심화시켰으며, 이로 인해 발생된 기후변화는 폭염, 강풍, 가뭄, 폭우, 지진, 태풍 등 재난재해를 야기하였다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)가 발표한 '제6차 평가보고서(Assessment Report 6)'에서는 현재의 온실가스 배출량을 유지할 경우, 2021년에서 2040년 사이의 지구 평균온도는 산업화 이전 대비 1.5°C 이상 상승할 것으로 분석하였다[1]. 즉, 인간활동에 따른 기후변화는 시간이 지남에 따라 극심해지고 있으며, 이를 해결하기 위한 기후변화 대응의 필요성을 적극적으로 시사하고 있다.

한반도의 경우, 평균온도 상승 폭이 지구 평균(0.85°C) 대비 약 2배(1.8°C) 수준으로 증가하고 있는 것으로 분석되었으며[2], 2011년부터 2019년까지 국내에서의 폭염(일 최고기온 33°C)에 의한 사망자는 493명으로 태풍, 호우 등에 의한 사망자 대비 3.6배 높게 나타났다[3]. 이상기후 현상 중 폭염의 영향은 도시적 맥락에서 물리적

· 사회적으로 복합적인 관계를 형성하고 있어 막대한 인명피해 및 재산상의 손해를 불러일으킨다. 특히, 쇠퇴도시의 건축물 및 시설물의 노후화, 업무·상업지역의 밀집 등으로 인해 폭염 피해에 대하여 물리적인 측면에 더욱 취약하게 노출되어 있다[3]. 이러한 이유로 쇠퇴도시의 폭염에 대한 피해를 저감하기 위해서는 도시공간 내 도로, 건축물, 시설물 등 물리적 환경 요소를 고려할 필요가 있으며, 실질적인 피해를 유발하는 요소를 판별하기 위해서는 지역·지구·건물단위의 분석에서 더욱 심층적인 분석을 통해 미시단위의 도시공간요소를 파악할 필요가 있다. 서울시의 경우, 도시기온에 직접적으로 영향을 미치는 열에너지의 약 10% 이상이 인공요인에 의해 발생하고 있다고 분석되었으며[4], 이는 인간의 실제 활동범위를 고려한 미시적 관점에서의 도시공간 열환경 개선이 필요하다는 것을 의미한다. 즉, 미시공간 범위에서 물리적 환경 요소를 고려하는 폭염취약성 개선은 도시형성 전·후의 폭염 피해 예방 및 대응을 효과적으로 추진할 수 있을 것으로 사료된다.

쇠퇴도시의 부흥 및 지역적 역량 강화를 위한 도시재생사업은 2013년부터 시행된 「도시재생 활성화 및 지원에 관한 특별법」에 근거하여 추진되고 있으며, 인구 감소, 사업체 감소, 건축물 노후화 등을 기준으로 도시재생활성화지역을 선정하고 있다. 하지만, 상술한 바와 같이 쇠퇴지역은 폭염 등 기후변화 재난재해에 취

약한 것으로 나타났으나, 도시재생활성화지역 선정은 지역 차원의 기후변화 취약성을 고려하지 않고 있어 기후변화로 인한 취약성을 반영하는 법적 근거가 미흡한 것으로 분석되었다[5]. 따라서, 쇠퇴도시 선정에 기후변화 취약성을 고려하는 법·제도적인 개선이 제고 및 타진되어야 하며, 이를 위해 도시재생사업 선정 시 기후변화로 인한 피해를 예방하고 도시공간 내 취약 공간을 사전에 분석·산정할 수 있는 기후취약성 요소들이 우선적으로 선별되어야 한다고 사료된다. 또한, 이를 정확하게 산정할 수 있는 분석 수단을 활용하여 상세한 결과 값을 도출할 필요성이 있으며, 도시공간 열환경의 공간적 패턴에 영향을 미치는 요소들에 대하여 세부적인 비교 분석이 이루어질 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 쇠퇴도시를 대상으로 선정하고, 미시공간 범위 내 폭염취약성을 가중 또는 저감시키는 도시공간 내 요소를 선정하여 CFD 시뮬레이션을 통해 도출된 도시공간 열환경 데이터와 공간적 상관성 분석을 실시한다. 이를 통해 도시공간 열환경에 영향을 미치는 도시공간 내 요소 발굴과 열환경 저감을 위한 물리적·제도적 개선방안을 제시하는 것을 목적으로 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 2018년 도시재생활성화지역으로 선정된 대구광역시 서구 비산2·3동 일대(면적: 158,074m²)를 공간적 범위로 선정하였다. 대구광역시는 평균 기온이 14.6°C로 전국 평균 기온(13.3°C)과 비교해 약 1.3°C 높은 지역으로 폭염에 취약한 도시이다²⁾. 또한, 대상지가 속한 비산2·3동의 인구는 2000년 기준, 17,759명에서 2020년 기준, 9,153명으로 약 51.5% 감소하였으며, 준공 30년 이상인 노후건축물 비율은 전국 평균인 39.6%보다 약 1.65배 높은 65.5%로 기후변화에 취약한 것으로 판단된다³⁾. 이에 본 연구에서는 전국 대비 높은 평균기온, 지속적인 지역 인구감소, 노후건축물이 다수 분포하고 있는 대구광역시 서구 비산2·3동 일대를 연구의 대상으로 선정하였다. 연구 대상지는 다음 [Fig. 1.]과 같다.

폭염취약성에 기인하는 도시공간 요소들이 열환경에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 쇠퇴지역 재생역량 강화를 위한 기술개발 사업(2019~2022)에서 활용된 CFD 시뮬레이션 열환경 데이터를 제공받았다[6]. 이 데이터는 2021년 6월 30일부터 7월 2일까지 측정된 평균풍속, 평균풍향, 평균온도 값으로 구성되며, 열복사 특성 정의와 도시공간의 물리적 특성은 이진원(2021)의 연구를 참고하였

다[7]. 도시공간의 물리적 특성은 국토지리정보원에서 제공하는 2015년 수치지형도에 기재된 정보를 활용하였다. 이후 현장조사 기반으로 구축한 도시공간 요소와 CFD 시뮬레이션을 통해 구축한 도시공간 열환경 데이터의 정규화, 공간패턴 분석, 상관관계 분석으로 본 연구를 수행하였다.

2. 국내 폭염대응정책 및 선행연구 고찰

2.1. 국내 폭염대응정책 분석

국내 폭염대응정책은 국민안전처, 보건복지부, 고용노동부, 교육부, 국토교통부, 기상청 등 다양한 정부기관에서 수행하고 있으며, 종합적인 대책 마련을 위해 관계부처·지자체가 협력하여 폭염대응정책을 추진하고 있다. 2005년 소방방재청을 중심으로 폭염종합대책이 수립되기 시작하였으며, 2007년 보건복지부와 함께 시·도, 시·군·구 합동 TF(Task Force)가 구성되었다. 이후 2008년부터 기상청은 폭염특보제를 처음으로 실시하는 등 2000년대 초기부터 폭염에 대응하기 위한 국가적 차원의 정책이 활발하게 운영되었다[8]. 2010년대에 들어서는 온열질환자 감시·정보 수집 체계 운영, 독거노인 비상연락체계 구축, 무더위쉼터 확대 운영, 폭염대응 행동요령 홍보 등 폭염에 취약한 계층을 중심으로 정책이 추진되었다. 최근 들어 2020년에는 기온뿐만 아니라 습도의 영향을 반영하여 ‘일 최고 기온 33°C’에 발령하던 폭염주의보 기준을 ‘일 최고 체감온도 33°C’로 변경하는 등 인간중심의 운영체제로 진보된 폭염대응정책이 추진되고 있다. 그럼에도 불구하고 정부기관이 추진하고 있는 국내 폭염대응정책은 단기적인 대응조치에만 편중되어 있는 것으로 판단된다. 국내 폭염대응정책을 수립하는 정부기관들의 주요 역할 및 추진 정책을 살펴본 결과[9], 주로 교육·학습, 홍보·안내, 시설운영, 상시관리, 운영비 지원 등 기초적인 부문에서 폭염대응정책을 추진하고 있었다[Table 1.]. 기상 특성도 과거와 다르게 국지적인 특성이 강해지고 있으나[10], 폭염대응을 위한 정부기관별 주요 역할은 단순히 사고예방 및 사고처리를 위한 단기적이고 보편적인 정책에만 집중되어 있어 도시공간 내 폭염피해에 대한 중·장기적이고 지역 특화적인 대비책 마련이 필요한 것으로 판단된다.

따라서, 중·장기적이고 도시공간의 특성을 반영한 폭염대응정책을 추진하기 위해서는 실질적인 피해를 발생시키며 심화시키는 공간적 위험 요소를 판단하고 개선방안을 수립할 필요가 있다. 이러한 필요성에 따라 도시공간 내 기후환경 및 지역의 물리적 특성을 반영하는 등 다양한 관점에서 폭염 위험성 요인 개발 및 제안이 이루어지고 있으며, 개발·제안된 요인을 기반으로 실제 도시공간 열환경에 미치는 영향에 대해 정량화된 연구의 필요성도 함께 제기되고 있다. 또한, 폭염발생 시 고령자, 저소득층, 온열질환자 등을 지원하는 대응적·단기적 측면의 정책과 폭염취약성을 사전에 분석할 수 있도록 폭염재해에 취약한 도시공간요소를 발굴하여 환경적 개선을 도모하는 물리적·중장기적 측면의 정책이 조화롭게 추진될 수 있도록 해야 한다.



Fig. 1. Research Site Around Bisan 2·3 Dong, Seo-gu, Daegu

Table 1. Domestic Heat wave Response Policy and Roles of Government Agency

Government Agency	Policy	Major Role
Ministry of Public Safety and Security	- Establishment of comprehensive measures for heat wave and situation management system - Operation of an on-site emergency first-aid system in preparation for a heat wave - Promotion of heat wave warning and action tips	P/G, E/D, O/M
Ministry of Health and Welfare	- Life management for the protection of the elderly living alone, establishment of an emergency contact system - Counseling for the vulnerable and emergency shelters 24 hours a day	O/M, F/O
Ministry of Employment and Labor	- Management and education of workers in workplaces vulnerable to heat waves such as construction sites - Promotion of three rules for preventing heat-related diseases (water, shade, rest)	E/L, O/M
Ministry of Education	- Prevention, education and promotion of heatwave damage for kindergarten, elementary/middle/high school, and university students - Review of shortened classes and school closures according to the degree of heat wave	E/L
Ministry of Land, Infrastructure and Transport	- Preparing safety measures for facilities such as trains, subways, and high-speed rails	F/O
Korea Meteorological Administration	- Announcement of heat wave warning and dissemination of information such as weather monitoring, analysis, and situation - National weather information such as daily weather index related to heat waves	P/G
Local Government	- Publicity of village amps, street broadcasting, etc. in case of heat wave warning - Designation and operation of a shelter in the sweltering heat, and support for cooling costs	P/G, F/O

*E/L: education/learning, *P/G: promotion/guide, *F/O: facility operation, *E/D: emergency dispatch, *O/M: ordinary management, *O/E: operational support expenses

2.2. 선행연구 고찰

국내·외 폭염취약성 분석을 위한 연구는 지표개발 및 취약지역 도출을 중심으로 이루어지고 있으며, 시·도, 시·군·구, 읍·면·동 단위의 폭염취약성 분석에서 도시를 격자화하여 세부 공간단위를 측정하는 등 분석 범위가 구체화되는 추세를 보이고 있다. 또한, ENVI-met, CFD 시뮬레이션, Arc GIS 등 공간분석 모델 프로그램을 활용하여 폭염취약 요소를 발굴하고 도시공간 내 인구사회적·물리환경적 상관성을 분석하는 등 방법론이 다양화되고 있다. 이에 공간분석 및 상관분석이 적용된 폭염취약성 관련 선행연구를 공간적 측정 범위에 따라 구분하여 고찰하였다.

공간적 측정 범위가 시·군·구 단위이며 공간분석 및 상관분석을 수행한 연구는 다음과 같다. 오규식 외 1인(2005)은 서울특별시를 공간적 측정 범위로 설정하여 도시를 구성하는 요소들과 기온과의 관계를 분석한 후 도시열섬현상을 저감시키기 위한 공원·녹지의 효과를 분석하였다. ER-mapper 6.0을 활용하여 지표의 온도를 산출하고 Arc GIS 8.3을 이용하여 공원·녹지뿐만 아니라 용적률, 건폐율, 토지이용 표고 등의 자료를 격자화 하였다. 또한, SPSS 11.0을 이용하여 설정한 도시구성요소와 기온간의 회귀분석을 실시하여 도시열섬현상의 저감효과를 측정하였다. 분석 결과 1~3ha 규모의 공원·녹지의 경우 50~150m 범위의 기온저감효과 구간을 가지는 것으로 분석되었으며, 공원·녹지의 교목 식피율을 80%까지 상승시킬 경우 기온저감효과는 -0.10℃로 산출되었다[11]. 엄정희(2016)는 서울특별시 자치구(25개)를 공간적 측정 범위로 설정하였으며, 선행연구를 통해 선정된 지표를 퍼지(Fuzzy)이론을 활용한 GIS 공간분석으로 서울시 열환경 취약성을 평가하였다[12]. Tanja Wolf 외 1인(2013)은 영국 런던을 공간적 측정 범위로 설정하여 런던의 폭염취약요인을 개발하고자 하였으며, 고령자, 인구밀도, 건물밀도, 임대가구 등을 지표로 선정하여 도시의 표면온도 분포에 따른 폭염 취약성

분석을 실시하였다. 폭염 취약성 결과에 따라 공간적 분포를 나타내기 위한 맵핑을 실시하였으며, 취약성 패턴의 공간적 차이를 검토하기 위한 군집의 경향을 분석하는 등 클러스터(Cluster)개념의 공간분석을 실시하였다. 분석 결과, 각 지표들은 공간적으로 인접하여 폭염에 대한 취약지점을 형성하였으며, 폭염 위험요소가 공간적으로 결합하여 열 취약지역을 조성한다는 유의미한 연관성을 입증하였다[13]. S.G. Nayak 외 8인(2018)은 폭염의 빈도가 지속적으로 증가하는 미국 뉴욕을 공간적 측정 범위로 설정하여 열에 취약한 인구와 지역을 식별하기 위한 열 취약성 지수를 개발하고자 하였다. 지역사회 수준의 환경, 사회인구학적·행동적 특성에 따라 폭염에 대한 적응능력이 지역별로 상이하다고 보았으며, 인구·사회적 지표뿐만 아니라 건물 밀도, 건물 밀도가 높은 토지비율 등 공간적 지표들을 포함하여 폭염 피해 및 적응능력에 대한 상관관계 분석을 실시하였다. 분석 결과, 건물 밀도가 높으며, 공터가 적고 고령자 및 저소득층 비율이 높은 지역은 폭염에 취약한 영역임을 입증하였다[14].

공간적 측정 범위가 읍·면·동 단위이며 공간분석 및 상관분석을 수행한 연구는 다음과 같다. 구유성 외 3인(2015)은 부산광역시 행정동을 공간적 측정 범위를 설정하여 폭염 취약성 평가를 수행하였으며, IPCC의 기후변화 취약성 개념을 바탕으로 각 평가요인별 대응변수 표준화 및 AHP(Analytic Hierachy Process, 계층적 분석법) 통한 가중치를 부여하여 취약성 지수를 행정동 단위로 산출하였다. 이후 AWS 자료를 IDW(Inverse Distance Weighting, 역거리가중법)보간하여 적용하였다. 분석 결과 금정구(구서2동, 남산동)와 사상구(모라1동)에서 폭염위험정도가 가장 높을 것으로 예상하였다[15]. 안윤정 외 2인(2016)은 공간적 측정 범위를 전국의 읍·면·동으로 설정하여 분석을 실시하였다. 폭염 관심지역(Hot Spot)을 분석하기 위한 지표를 개발하고 이를 적용하여 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오에 따른 관심지역 등급의 변화 추세를 분석하였다. 분석 결과, 현재 추세로 기후변화가 진행될 경우 기후위해에 따른 피해의 증가와 함께 지역별

로 폭염 관심지역 등급이 2, 3단계씩 증가하는 등 관심지역 등급과 면적의 비율의 증가가 지속될 것으로 예측하였다[16]. 성지훈 외 4인(2020)은 대구광역시 내 읍·면·동을 공간적 측정 범위로 설정하였으며, 공간적 자기상관성을 고려하여 공간시차모형(Spatial Lag Model)을 활용한 대구광역시 폭염취약지역을 도출하였다. 분석 결과 태양복사량, 수변이격거리, 도로 분포, 폭염취약계층 분포, 에너지 사용량은 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났으며, 정규식생지수의 경우 음의 상관관계를 나타내는 것으로 분석되었다[17]. 김기욱 외 4인(2020)은 부산광역시 행정동을 공간적 측정 범위로 설정하였으며, IPCC 기후변화 취약성 평가체계를 적용하여 RCP 4.5와 RCP8.5를 이용한 시나리오 작성을 통해 미래 폭염 취약성 변화를 검토하고자 하였다. 선행연구 고찰을 통하여 폭염 취약성 대응변수들을 조사한 후 실용성 및 가용성을 고려한 인자들을 도출하였으며, 노출(열대야 일수, 폭염 일수 등), 민감도(온열질환자 수, 독거노인 수 등), 적응능력(무더위쉼터 수용능력, 공원·녹지 비율 등)으로 분류하여 대응변수를 선정하였다. 또한, 전문가 설문조사를 통하여 대응변수들의 가중치를 산정하였으며, 설문조사의 경우 각 대응변수별 쌍대비교(Pairwise Comparison)를 수행한 후 AHP를 적용하여 가중치를 산정하였다. 분석 결과 폭염 취약성이 높은 행정동은 수영구, 해운대구, 중구 등에서는 높음 또는 매우 높음으로 나타났으며, 기장군, 사하구, 북구에서는 높음 이상의 폭염 취약성을 나타내는 행정동은 없는 것으로 확인하였다[18].

공간적 측정 범위가 가구·격자 단위이며 공간분석 및 상관분석을 수행한 연구는 다음과 같다. Cheng He 외 6인(2019)은 중국 상하이를 공간적 측정 범위로 설정한 후 격자화 하였으며, 도시공간에서의 폭염일수, 폭염 빈도수, 도로의 밀도, 식생 범위 등 다양한 공간 변수를 기반으로 폭염 취약지역 도출하고자 하였다. 공간적 변수의 분포에 따라 도출된 취약지역에서의 가구 규모를 고려하여 인간에게 악영향을 미치는 폭염 취약성에 대한 공간분포를 매핑화 하였다. 분석 결과, 인간 활동의 강도가 증가함에 따라 도시 열환경의 노출성, 민감도가 증가하였으며, 폭염으로 인한 인간의 사망 위험률은 도심지뿐만 아니라 교외로 확장된다고 분석되었다[19]. Suresh Kumar Rathi 외 4인(2021)은 인도의 4개 도시(Angul, Kolkata, Ongole, Karimnagar)를 공간적 측정 범위로 설정하여 도시 내 가구에 대한 다차원 열 취약성 지수를 구성하기 위하여 열 관련 지표를 집계하고자 하였다. 지붕 유형, 연간 소득, 수변공간, 식생 정도 등 노출성, 민감성, 적응능력 부문에서의 폭염취약성 지표를 선정하여 도시별 폭염취약성 지수를 도출하였으며, 그 외 경험기반에 의해 선정된 고층빌딩 수, 고혈압·당뇨 질병 유무, 교육 수준 등과 앞서 도출한 폭염취약성 지수의 상관관계 분석을 통해 노출성, 민감성, 적응능력에 기인하는 가구차원의 다양한 지표들을 개발하였다[20].

국·내외 선행연구는 일반적으로 전국, 시·군·구, 읍·면·동 범위에서 분석이 이루어졌으며, 도시공간 내 폭염취약성 지표 선정 이후 공간분석 모델을 활용하여 폭염취약지역을 도출하는 방식의 연구가 진행되었다. 이와 같은 방법론은 기후관련 데이터를 구축하여 비교적 넓은 범위의 폭염취약지역을 빠르게 도출할 수 있으나 미시적인 관점에서의 폭염취약성 분석은 다소 미흡하다는 한계점을

내재하고 있어 인간활동 범위에서 지역의 열분포 환경과 물리적 도시구성요소 간의 공간적 연관성 도출이 어려울 것으로 사료된다. 또한, 각 선행연구들은 폭염취약성 지표 선정을 위해 도시공간 내 물리적 측면의 요소들을 고려하였으나 이는 도시 전반적으로 폭염에 취약한 지점을 도출하거나, 인적 피해를 판별하는 인구·사회적 측면의 분석에만 활용되고 있었다. 즉, 물리적 도시공간요소는 폭염취약성 지표를 선정 후 취약지점을 도출하는 수단으로만 활용되었으며, 도시공간 열환경과 도시공간요소에 관한 연관성을 검토하는 실제적인 연구 결과는 다소 미흡한 것으로 고찰되었다. 이에 따라 본 연구에서는 미시적인 범위에서 도시공간요소를 선별하고 이러한 요소들이 공간적으로 도시공간 열환경과 유의미한 연관성을 갖는지 판단하기 위해 미시공간에서의 공간패턴 분석을 통해 공간적 상관성을 분석하고자 한다.

3. 폭염취약성 지표 선정 및 분석방법

3.1. 폭염취약성 지표 분류 및 선정

1) 폭염취약성 지표 분류

본 연구에서는 폭염취약성에 대한 체계적이고 종합적인 분석을 위하여 IPCC에서 제시하는 기후변화 취약성 개념을 기반으로 폭염취약성 지표의 분류체계를 세분화하여 정의하였다. IPCC에서 제시한 ‘제4차평가보고서(AR4, 2004)’에서는 기후변화 취약성 분류체계를 ‘노출성(Exposure)’, ‘민감성(Sensitivity)’, ‘적응능력(Adaptive Capacity)’의 부문으로 구분하였다. 노출성은 기후변화에 영향을 받는 변수들로 직접적인 변화가 일어나는 변수로 정의하였다. 민감성은 물리적, 경제적, 사회적으로 피해를 입는 변수로 정의하였으며, 적응능력은 온도 저감을 위한 물리적 능력 또는 재정상태와 같은 변수로 구분하였다. 이후 ‘제5차보고서(AR5, 2014)’에서는 취약성 개념을 리스크로 확장 및 재정립하여 ‘위해성(Hazards)’, ‘노출성(Exposure)’, ‘취약성(Vulnerability)’으로 구분하였다. 위해성은 인간 또는 자연에 의해 발생하는 물리적인 사건 및 경향을 의미하며, 노출성은 사람, 재산, 생태계, 사회 기반시설 또는 경제적, 사회적, 문화적 자산의 변수로 정의하였다. 취약성은 피해에 대한 민감성이나 적응능력이 부족한 정도로 정

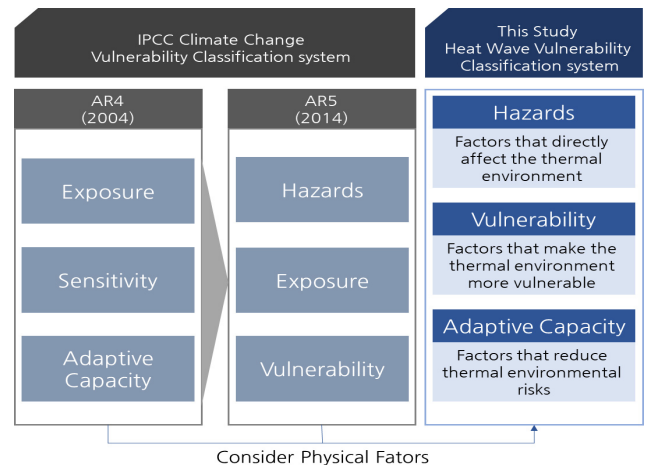


Fig. 2. Definition of Heat Wave Vulnerability Classification System in this Study

의하여 취약성을 민감성과 적응능력이 포함된 개념으로 보았다. 이와 같이 급속하게 변화하는 기후 및 도시환경에 따라 기후변화 취약성을 평가하는 평가체계 및 개념은 확장되고 있으며, 선행연구들에서는 연구의 목적 및 특성에 따라 자체적인 해석 및 개념 정립을 통해 지표 분류 및 평가체계에 대한 정의를 다르게 하고 있다[21].

본 연구에서는 앞서 설정한 방법론 및 목적에 부합하는 결과를 도출하기 위해서 미시적 공간 범위 내 열환경에 영향을 끼치는 물리적 요소만을 고려하였으며, IPCC에서 제시한 기후변화 취약성 개념을 세분화하여 ‘위해성’, ‘취약성’, ‘적응능력’을 분류체계로 활용하였다. 위해성은 도시 열환경에 직접적인 영향을 미치는 요소이며, 취약성은 폭염 발생 시 열환경을 더욱 취약하게 하는 요소로 정의하였다. 적응능력은 열환경 변화에 대한 리스크를 저감시키고 열저감능력을 증대할 수 있는 요소로 정의하였다. 이와 같이 본 연구에서는 위해성, 취약성, 적응능력의 3가지 분류체계 및 정의를 기준으로 지표를 분류하였다. IPCC와 본 연구의 분류체계 및 정의는 다음 [Fig. 2.]와 같다.

2) 폭염취약성 지표 선정

본 연구에서의 폭염취약성 지표는 국내에 적용가능한 지표를 선정하기 위하여 국내 선행연구를 중심으로 도출하였으며[22], 도시공간요소의 현장데이터 구축 가능 여부, 미시공간에서의 열환경가중 및 저감 등을 고려하여 실제 열환경에 영향을 미치는 것으로 분석된 요소들을 기준으로 선정하였다. 이에 ‘실외기 위치 및 개수’, ‘아스팔트 도로 너비’, ‘건물마감재 알베도’, ‘일조·일사량’, ‘구간별풍속’, ‘가로수 위치 및 개수’를 폭염취약성 지표로 선정하였으며, 정의 및 개념은 다음 [Table 2.]와 같다. 각 지표는 미시공간에서 열영향에 미치는 도시공간요소들을 분석한 선행연구를 중점적으로 고찰하여 선정되었으며, 상술한 위해성, 취약성, 적응능력 정의를 기준으로 각 폭염취약성 지표를 분류하였다.

도시공간 내 열환경을 직접적으로 가중시키는 요소로 ‘실외기 위치 및 개수’를 선정하였다. 신학중 외 3인(2019)은 건물 사이 공간에 설치되어있는 실외기가 주변 열환경에 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위해 상용 프로그램 ANSYS-FLUENT 19.1과 CFD 시뮬레이션을 통하여 열환경 변화를 분석하였다. 이 연구에서는 높이 20m인 건물 2개를 모델링(Modeling)하여 서로 마주보고 있는 벽면에 10개의 실외기를 설치해 분석하였다. 분석 결과 실

외기가 설치된 장소에서 환기가 이루어지지 않는 경우 열 정체 현상과 대류 현상으로인하여 정체된 열이 고층부로 이동하는 굴뚝 효과가 발생하여 열환경에 영향을 끼치는 것으로 나타났다[23]. 이에 ‘실외기 위치 및 개수’는 미시공간에서 직접적으로 열환경에 영향을 주는 요소로 아파트, 오피스텔, 다세대·다가구 주택 등에 밀집해 있을 경우 위험요소로 작용할 수 있어 위해성 부분의 지표로 선정하였다.

폭염발생 시 도시공간 열환경을 더욱 취약하게 만드는 요소로 ‘아스팔트 도로 너비’, ‘건물마감재 알베도’, ‘일조·일사량’을 선정하였다. 오승식(2020)은 아스팔트 표면이 갖는 광범위한 피복면적에 기인하는 다량의 열 흡수는 표면온도를 60~70℃까지 상승시키며, 여름철 평균기온 상승에 따라 아스팔트 또한 온도 증가 현상이 발생하면서 도시열섬 효과를 악화시키는 것을 문제의식으로 보았다. 국내에서 보편적으로 사용되는 아스팔트 혼합물에 대한 열전달 특성 시험을 시행하였으며, 아스팔트의 공극률, 두께, 포장면적 등에 따라 열섬현상에 영향을 미치는 것으로 분석되었다[24]. 정주리(2017)는 도시나 교외 또는 건물이 위치한 곳의 국지적인 미기후 특성은 지형, 지표면 등의 자연적 요인과 도로, 건물 외피, 조경 등의 인공적 요인에 의해 다양하게 형성된다고 보았으며, 단지를 구성하는 표면 재질에 따른 도시열섬 저감효과를 분석하였다. 분석 결과, 콘크리트, 우레탄 방수, 아스팔트, 보도블럭, 녹지 등의 표면재질 변화에 따라 표면 반사율 조정, 녹지 조성 등으로 도시열섬효과를 저감시킬 수 있는 것으로 분석되었다[25]. 이에 태양열에 직접 노출될 경우 마감, 재질, 포장 등 물리적 특성에 따라 도시공간 열환경을 더욱 취약하게 만드는 ‘아스팔트 도로 너비’, ‘건물마감재 알베도’, ‘일조·일사량’을 취약성 부분의 지표로 선정하였다.

도시공간 열환경 내 온도저감 효과를 가지는 요소로 ‘구간별 평균 풍속’, ‘가로수 위치 및 개수’를 선정하였다. 엄정희 외 3인(2018)은 도시 열환경 저감능력을 판별하기 위한 선행연구에서는 열환경 개선을 위한 바람길 확보전략을 제시하였으며, 각 지역별 지표면 온도 및 풍속을 측정하여 취약지점에서의 바람길 개선으로 도시열섬현상을 저감하고자 하였다. 산림 및 녹지가 많을수록 지표면의 온도가 낮게 나타난다는 것을 입증하였으며, 농공단지, 산업단지, 아파트 단지 등이 밀집한 공간은 열환경에 취약한 것으로 분석되었다. 또한, 실제 열 분포가 높고 풍속이 낮게 나타나는 도시공간은 도시계획적

Table 2. Heat Wave Vulnerability Indicator Selection

Division	Indicator	Definition	Code
Hazards	Location and number of outdoor units	The location and number of outdoor units that can be observed from outside the building	H1
Vulnerability	Asphalt Road Width	Paved with asphalt material in the site	V1
	Albedo of Building Finishing Materials	Types of finishing materials on the exterior of the building	V2
	Solar Radiation and Sunlight	The amount of solar radiation for each section according to the physical environment	V3
Adaptive Capacity	Wind Speed by Section	Wind speed by section according to physical environment	A1
	Location and number of street trees	Location and number of street trees planted in the site	A2

측면에서 기후친화적 도시형성을 위한 바람길 확보전략 마련이 필요함을 강조하였다[26]. 이에 대상지 내로 유입되어 직접적인 열저감 효과를 가지는 바람의 세기인 ‘구간별풍속’과 바람이 도시공간을 통과하여 열환경의 개선을 원활하게 하는 ‘가로수 위치 및 개수’를 적응능력 부문의 지표로 선정하였다.

3.2. 데이터 속성 분석 및 정규화 프로세스

선정된 폭염취약성 지표의 데이터 구축범위는 대상지를 1m 격자로 나누어 각 격자가 데이터를 포함할 수 있도록 구축하였다. 대상지 내 국지적으로 분포되어 격자 안에 값을 포함할 수 없는 경우, ‘0’의 값을 갖도록 설정하였으며, 이는 공간분석모델을 활용한 상관관계 분석 시 하나의 변수가 연속적으로 변화할 경우 이에 상응하는 변수가 상대적으로 상관관계수에 영향을 미치지 않게 하기 위한 방안으로써 적용하였다. 데이터 구축방식은 ‘현장조사(Field Investigation)’, ‘로드맵(Road Map)’, ‘전산유체역학(CFD)’, ‘그래스호퍼(Grasshopper)’를 활용하여 구축하였다.

‘도시공간 열환경(T1)’의 경우, CFD 시뮬레이션을 위하여 대상지에서 직접 측정된 평균풍속(2.6m/s), 평균풍향(북동쪽 72°), 평균온도(30.3°C) 값을 반영하였으며, 토지피복은 대지, 녹지, 아스팔트, 건축물, 물, 흙으로 상정하여 열복사 특성을 정의하였다. ‘실외기 위치 및 개수(H1)’는 현장조사를 통하여 대상지 내 건물에 설치된 실외기 개수를 확인하여 지도에 표시하였다. 이후 조사한 각 위치별 실외기를 기반으로 하나의 실외기 위치에서 주변으로 10m의 구간까지 열영향을 미칠 것으로 가정하여 히트맵(Heat Map) 분석을 통해 데이터를 구축하였다. ‘아스팔트 도로 너비(V1)’는 현장조사 및 로드뷰를 통하여 대상지 도로 중 아스팔트 구간을 확인하였으며, 도로의 너비에 따라 데이터를 구축하였다. ‘건물마감재 알베도(V2)’는 현장조사를 통하여 실제 대상지 내 건축물의 외부 마감재를 확인하였으며, 콘크리트, 목재, 징크, 시멘트 사이딩, 타일 등 마감재별 알베도(Albedo, 열반사율)값과 건물의 높이값을 곱하여 건물의 규모에 따라 열반사율이 고려될 수 있도록 데이터를 구축하였다. ‘일조·일사량(V3)’은 그래스호퍼 프로그램 내 알고리즘을 설계하여 3D 모델링한 대상지의 물리적 여건을 반영하여 각 지점별 일조일사시간(분)을 측정하였다. ‘구간별풍속(A1)’은 전산유체역학을 활용하여 대상지 모델링 후 구간별 풍속값(m/s)을 도출하여 데이터를 구축하였다. ‘가로수 위치 및 개수(A2)’는 현장조사를 통하여 가로수를 지도상에 표기한 후 하나의 식재가 주변 10m의 구간까지 영향을 미칠 것으로 가정하여 히트맵 분석을 통해 데이터를 구축하였다.

이후 구축된 데이터의 일반적인 속성을 파악하기 위한 분석을 실시하였으며, 결과는 다음 [Table 3.]과 같다. ‘도시공간 열환경’의 경우, 표면온도는 평균 50.11°C(S.D=2.30)를 나타냈다. 대상지 특성상 다세대·연립주택이 가장 많고, 건축물의 높이 및 층수가 비슷하게 형성되어 있어 열분포는 다른 지표들에 비해 비교적 고르게 나타났다. ‘실외기 위치 및 개수’의 경우, 평균 0.66개(S.D=0.98)로 나타났다. 실외기는 대상지 내 편중되어 있으며, 특히, 연립·다세대·다가구 주택에 밀집하여 분포된 실외기는 대상지 내 특정 도시공간의 열환경을 취약하게 만들고 있는 것으로 판단된다. ‘아스팔트

Table 3. Result of Data Properties

Division		Number of Grids	Min	Max	Mean	S.D
T1		158,074	37.85	52.69	50.11	2.30
Hazards	H1	158,074	0.00	13.00	0.66	0.98
	V1	45,644	5.71	30.00	19.75	10.96
	V2	158,074	1.50	46.55	7.95	5.39
Vulnerability	V3	158,074	55.00	235.00	174.77	48.56
	A1	158,074	0.00	16.29	8.39	5.17
Adaptive Capacity	A2	158,074	0.00	5.00	0.67	0.71

도로 너비’의 경우, 평균 19.75m(S.D=10.96)으로 나타났으며, 다른 지표들과 비교해 표준편차가 크게 나타났다. 실제로 대상지 중심에는 대상지를 동서로 가로지르는 왕복 6·7차선 도로가 형성되어 있으나, 주거시설로 이용되고 있는 북측과 남측 도시공간은 골목길 등으로 인하여 도로의 폭이 작아 표준편차가 큰 것으로 판단된다. ‘건물마감재 알베도’의 경우, 평균 7.95(S.D=5.39)의 값을 나타냈으며, 대상지 동과 서측으로 형성된 노후 주거시설 및 저층 근린생활시설의 건물마감재에 의한 열반사량이 높아 각 도시공간 별로 격차가 있을 것으로 판단된다. ‘일조·일사량’의 경우, 평균 174.77분(S.D=48.56)으로 지표들 중 가장 높은 표준편차를 보이고 있어, 태양열이 도시공간 내 미시범위의 물리적 여건에 따라 열환경에 다양하게 영향을 주고 있는 것으로 분석된다. ‘구간별풍속’은 평균 8.39m/s(S.D=5.17)으로 나타났으며, 건축물 및 시설물에 의한 풍속의 저하, 녹지 및 오픈스페이스 등에 의한 바람길 확보 등 물리적 환경에 의해 비교적 미시적인 분포를 나타낸 것으로 분석된다. ‘가로수 위치 및 개수’는 평균 0.67개(S.D=0.71)로 하나의 가로수로 인하여 생기는 그늘 또는 연속적으로 분포하여 형성되는 선형녹지가 직접적인 도시공간 열환경을 저감시키는 요인으로써 비교적 넓은 범위에서 대상지 내 열환경을 저감하는 요인으로 작용할 수 있다고 판단된다.

각 지표별 데이터는 서로 단위가 다른 변수들 간의 통일성 및 ‘원자료(Raw data)’의 추가적인 연산의 편의성을 위하여 ‘UNDP(유엔개발계획)’에서 제시하는 ‘스케일 재조정 방법(2006)’을 활용(Eq. 1)하였으며, 모든 지표를 ‘0.1~1’의 값으로 정규화(Min-Max Normalization) 하였다⁴⁾. 일반적인 정규화식은 ‘0’부터 ‘1’사이의 값을 나타내지만 본 연구에서는 원자료의 최솟값이 정규화 이후 0이 나올 경우를 대비하여 계산식을 개선함으로써 ‘0.1’에서 ‘1’사이의 값이 1m 격자에 각각 할당될 수 있도록 하였다. 다음 [Fig. 3.]은 도시공간 열환경 및 폭염취약성 지표들의 정규화 값을 기반으로 작성된 ‘데이터 셋(Data Set)’ 지도이며, 이를 기반으로 폭염 취약지점의 공간적 패턴에 따른 상관관계를 분석하였다.

$$x_{new} = \left\{ (1 - 0.1) \times \left(\frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) \right\} + 0.1 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$x = \text{random variable}$$

Urban Space Thermal Environment	Division	
	Range	1×1m
	Method	CFD
	Data construction	Temperature
	Normalization	0.1~1
Location and Number of Outdoor Units	Division	
	Classification	Harzards variable
	Range	1×1m
	Method	Field investigation
	Data construction	Heat map
	Normalization	0.1~1
Asphalt Road Width	Division	
	Classification	Vulnerability variable
	Range	1×1m
	Method	Field investigation
	Data construction	Road width
	Normalization	0.1~1
Albedo of Building Finishing Materials	Division	
	Classification	Vulnerability variable
	Range	1×1m
	Method	Field investigation
	Data construction	Albedo* Height
	Normalization	0.1~1
Solar Radiation and Sunlight	Division	
	Classification	Vulnerability variable
	Range	1×1m
	Method	Grasshopper
	Data construction	Solar time
	Normalization	0.1~1

Wind Speed by Section	Division	
	Classification	Adaptive capacity variable
	Range	1×1m
	Method	CFD
	Data construction	Wind speed
	Normalization	0.1~1
Location and Number of Street Trees	Division	
	Classification	Adaptive capacity variable
	Range	1×1m
	Method	Field investigation
	Data construction	Heat map
	Normalization	0.1~1

Fig. 3. Data set Map

3.3. 데이터 분석 방법

본 연구에서는 상술한 바와 같이 인간의 실제 활동 범위인 미시적 공간범위를 1m로 정의하였으며, 이에 따라 각 지표들의 데이터는 1m 격자(Grid) 단위로 구축하였다. 폭염취약성 지표는 선행연구 관찰을 통하여 미시적 공간 범위 내 실제 열환경에 직·간접적인 영향을 미치는 것으로 분석된 요소들을 대상으로 선정하였다. 또한, 현장조사를 통한 데이터 구축 용이성 등을 기준으로 최종 선별하였다. 이후 격자별 구축된 데이터를 기반으로 정규화 및 공간패턴 분석을 실시하였으며, 공간패턴값에 따른 상관관계분석을 실시하였다. 공간패턴값은 ‘Arc GIS Pro’ 프로그램을 활용하여 ‘커널 밀도 추정(Kernel Density Estimation)’ 공간분석모델을 사용하였다. 커널 밀도 추정법은 ‘커널 함수(Kernel Function)’를 기반으로 데이터 분포에 따라 파악하고자 하는 변수를 추정하여 연속성 있는 패턴을 분석하고(Eq. 2), 상대적으로 높은 결과 값을 가진 데이터가 밀집한 공간에 높은 격자 데이터를 할당하여 이를 시각적으로 매핑(Mapping)화 한다. 이를 통해 각 지표별로 폭염에 취약하다고 판단되는 지점에서 공간패턴값을 도출할 수 있다. 해당 공간분석모델을 활용하여 대상지의 지표별 1m 격자 데이터를 도출한 후 각 격자가 포함하는 공간패턴값에 대하여 상관관계 분석을 실시하였다.

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (\text{Eq. 2})$$

x = random variable
 x_i = sample data
 h = bandwidth
 K = kernel function

상관관계 분석은 'IBM SPSS Statistics 26' 프로그램을 활용하였으며, '피어슨의 이변량 상관분석(Pearson's Correlation Analysis)' 방법을 통해 도출된 지표별 격자의 공간데이터를 비교분석 하였다. 피어슨 이변량 상관분석은 두 변수 간의 선형적 관계의 강도를 측정하는 연구모형으로 등간·비율척도로 구축된 데이터의 관계성을 증명하기 위하여 본 연구의 분석모형으로 활용하였다. 일반적으로 데이터 기반의 상관관계 분석은 피어슨 이변량 상관분석, 스피어만 순위 상관분석(Spearman Correlation Rank Coefficient), 켄달 타우 상관분석(Kendall Tau Correlation Rank Coefficient)의 3가지 상관분석 모형을 사용한다. 본 연구는 데이터의 양이 많고 순위에 기반한 분석이 아닌 공간적 패턴의 결과 값에 대한 일반적인 선형관계를 입증하기 때문에 이를 반영하여 피어슨 이변량 상관분석을 사용하였다. 도시공간 열환경의 공간패턴이 밀집하여 폭염에 취약한 지점에서 각 폭염취약성 지표가 유사한 공간패턴을 보일 경우, 정(+)적 상관관계수(r)를 나타내며, 유사하지 않은 공간패턴을 보일 경우, 부(-)적 상관관계수를 나타낸다. 즉, 공간패턴값에 대한 상관관계수의 부호 및 수치는 도시공간 열환경과 폭염취약성 지표 간의 공간적 상관성을 판단하는 척도로서 활용할 수 있다. 또한, 피어슨의 이변량 상관분석은 유의확률(p)이 0.05보다 작을 경우 통계적으로 유의한 수준의 상관관계로 해석할 수 있다.

4. 공간적 상관분석 및 결과

4.1. 커널 밀도 추정(Kernel Density Estimation)

폭염취약성 지표별 1m 격자 정규화 값을 기반으로 커널 밀도 추정법을 실시하였으며, 도시공간 열환경 데이터를 포함하여 각 지표별로 공간패턴값을 도출하였다. 해당 공간분석모델은 하나의 격자 주변으로 상대적으로 높은 정규화 값이 밀집하여 분포할 경우, 기준이 되는 격자에 높은 공간패턴의 '결과 값(Raster Value)'을 할당한다. 다음 [Fig. 4.]는 커널 밀도 추정에 따른 폭염 취약성 지표 공간패턴값을 맵핑한 결과이다. 분석 결과, '도시공간 열환경'의 공간적 패턴은 주로 대상지 북측과 서측에 집중되어 분포하는 것으로 나타났다. 대상지 북측과 서측은 대상지 내 다른 도시공간과 비교해 노후 건축물이 다수 분포해 있으며, 주로 저층의 주거시설 및 근린생활시설로 이용되고 있어 비교적 열환경에 대한 영향을 높게 받을 것으로 판단된다. '실외기 위치 및 개수'는 대상지 북측과 중앙을 중심으로 밀집하고 있으며, 해당 도시공간 내 다수 분포한 다세대·다가구 주택과 연립주택 등의 영향으로 밀집되어 분포하는 것으로 판단된다. '아스팔트 도로 너비'는 대상지 중심을 가로지르는 왕복 6·7차선의 넓은 도로에 의해 해당 도시공간에 밀집 분포하고 있는 것으로 나타났다. '건물마감재 알베도'의 경우 노후 주거시설과 저층의 근린생활시설로 이용하고 있는 대상지의 동측과 서측에 열반사율이 높은 마감재가 밀집해 분포하고 있는 것으로 분석되었다. '일조·일사량'은 건축물에 의해 형성되는 그림자 및 그늘에 의한 영향이 적은 대상지 내 도로 부근에 밀집하여 높은 공간패턴값을 나타냈으며, 대상지 내부에 저층 주거시설로 이용되고 있는 도시공간을 중심으로도 공간패턴값이 높게 나타났다. '구간별풍속'

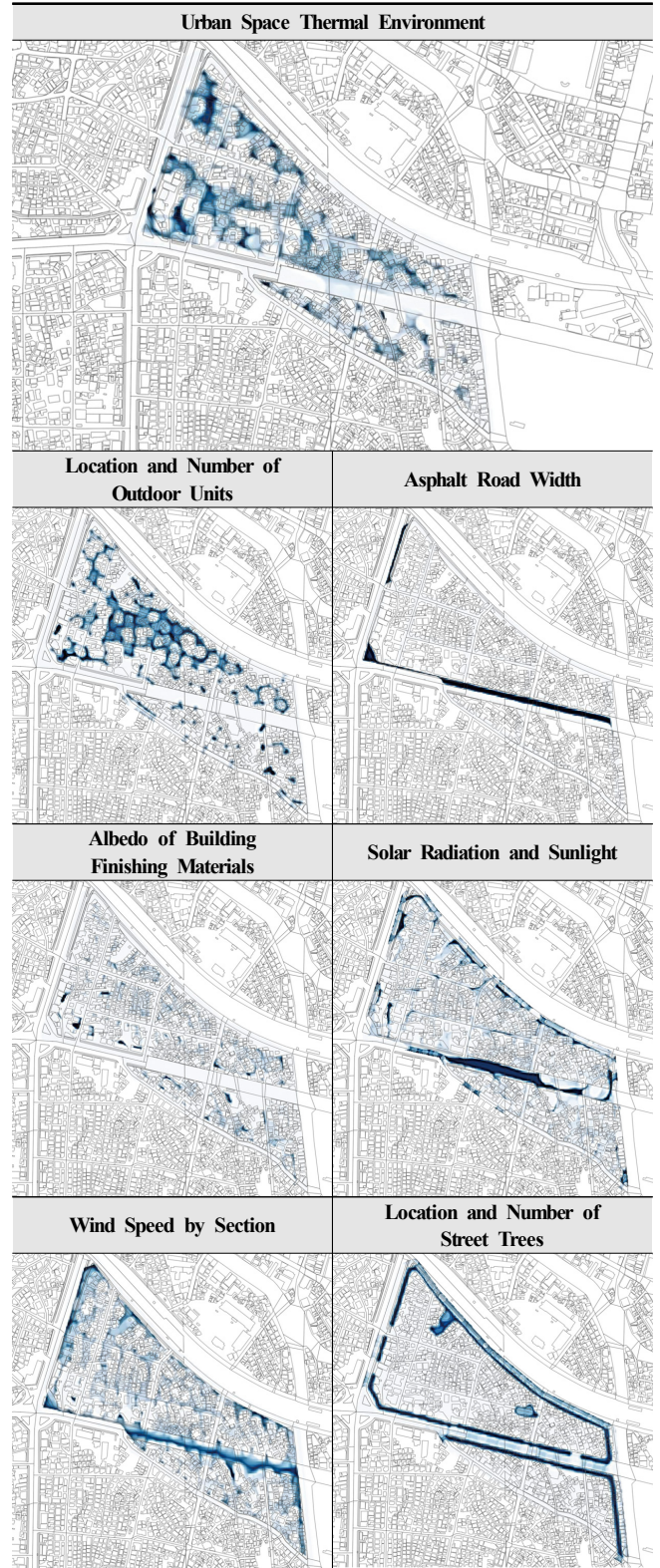


Fig. 4. Result of Kernel Density Estimation

도 건축물, 시설물 등의 영향이 비교적 적은 도로 부근에서 높게 나타났다. '가로수 위치 및 개수'는 대상지 내 도로 및 보행로를 따라 연속적으로 분포하고 있는 가로수에 의해 도로변을 따라 밀집 분포하고 있는 것으로 나타났다.

4.2. 공간적 상관성 분석 결과

커널 밀도 추정법을 실시하여 각 격자내 폭염취약성 지표별 공간 패턴값을 도출하였으며, 이를 기반으로 피어슨 이변량 상관관계 분석을 실시하였다. ‘도시공간 열환경(T1)’과 ‘실외기 위치 및 개수(H1)’, ‘아스팔트 도로 너비(V1)’, ‘건물마감재 알베도(V2)’, ‘일조·일사량(V3)’, ‘구간별풍속(A1)’, ‘가로수 위치 및 개수(A2)’의 상관관계 분석 결과는 다음 [Table 4.]과 같다. 아스팔트 도로는 주거 및 근린생활시설로 이용되고 있는 토지이용을 배제하고 도로 너비에 따른 열환경 분포의 상관성을 분석하기 위하여, 도로로 이용되고 있는 격자와 도시공간 열환경의 단순 상관분석을 실시하였다.

공간적 상관분석 결과, 6개의 도시공간요소들은 열환경 데이터에 대해 모두 유의미한 수준에서 공간적 상관성이 있는 것으로 분석되었다. 도시공간 열환경과 실외기 위치 및 개수($r=.194, p<.001$), 아스팔트 도로($r=.919, p<.001$), 건물마감재($r=.401, p<.001$), 일조·일사지역($r=.572, p<.001$)은 정(+)적 상관관계로 분석되었으며, 구간별풍속($r=-.266, p<.001$), 가로수 위치 및 개수($r=-.204, p<.001$)는 부(-)적 상관관계로 분석되었다. ‘실외기 위치 및 개수’의 경우, 다른 지표와 비교하여 비교적 낮은 상관계수로 분석되었으나, 대상지 내 실제 실외기 위치 및 개수는 높은 층수의 주택이 밀집해 있는 공간에 집중적으로 분포하고 있어 특히 해당 도시공간에서는 열환경과 더욱 높은 수준의 공간적 상관성을 가질 것으로 판단된다. ‘아스팔트 도로 너비’의 경우, 도로 너비에 따른 열분포 패턴을 분석하였으며, 폭염취약성 지표 중 가장 높은 공간적 상관성을 가지는 것으로 분석되었다. 아스팔트로 포장된 도로 너비가 넓은 구간은 도로 너비가 좁은 구간보다 높은 열분포 패턴을 보이는 것으로 분석되었다. ‘건물마감재 알베도’의 경우, 다른 지표들에 비해 비교적 높은 상관계수를 나타냈으며, 건축물이 반사하는 열량 값이 높은 마감재질을 사용할 시 해당 도시공간에서는 열분포가 집중되는 것으로 분석되었다. ‘일조·일사량’의 경우, 비교적 높은 상관관계를 나타냈으며, 물리적·환경적 여건에 의해 일조·일사가 오랜 시간 이뤄지는 도시공간에서 열분포가 집중되는 것으로 분석되었다. ‘구간별풍속’의 경우, 풍속이 높은 구간에서는 비교적 낮은 열분포 패턴을 보이는 것으로 분석되었으며, ‘가로수 위치 및 개수’의 경우, 상관계수가 음의 부호를 띄고 있어 가로수가 위치한 지점에서의 열분포는 밀도가 낮은

것으로 분석되었다.

공간적 상관성 분석 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 위해성에 해당하는 지표인 ‘실외기 위치 및 개수’의 경우 정(+)적 상관관계를 나타냈다. 이는 실제 실외기가 위치한 곳의 공간적 패턴과 열환경에 취약한 공간에서의 패턴이 유의미한 상관성을 나타낸다고 판단할 수 있다. 이는 아파트, 연립주택, 다세대·다가구 주택 등의 건물 외부에 실외기가 밀집되어 분포하는 곳은 고온의 환경이 조성된 곳과 공간적으로 위치가 유사함을 확인할 수 있었다. 둘째, 취약성에 해당하는 지표인 ‘아스팔트 도로 너비’, ‘건물마감재 알베도’, ‘일조·일사량’ 모두 정(+)적 상관관계를 나타냈다. 아스팔트 도로의 경우 도로로 이용되고 있는 격자들만 열환경 데이터와 상관분석이 이루어졌으며, 도로 너비가 넓은 구간에서 높은 열환경 분포를 나타내어 지표 중 가장 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 열반사율이 높은 건물마감재와 일조·일사량이 밀집 분포한 공간은 고온의 열환경이 조성된 공간과 공간적으로 위치가 유사함을 확인할 수 있었다. 셋째, 적응능력에 해당하는 지표인 ‘구간별풍속’, ‘가로수 위치 및 개수’는 모두 부(-)적 상관관계를 나타냈다. 대상지 내 풍속이 높은 구간과 가로수가 밀집 분포한 공간은 저온의 열환경이 조성된 공간과 공간적으로 위치가 유사함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

5.1. 연구의 결론 및 시사점

본 연구는 쇠퇴도시인 대구광역시 서구 비산2·3동 일대 도시재생활화지역을 대상지로 선정하여 미시공간(1m 격자)에서의 폭염취약성 분석을 실시하고자 하였다. 선행연구를 통한 미시공간에서의 폭염취약성 지표를 선정한 후 커널 밀도 추정을 통해 공간적 패턴의 결과 값을 도출하였다. 이를 기반으로 상관관계 분석을 통한 공간적 상관성을 입증하였다. 즉, 대상지 내 실질적으로 위해성, 취약성, 적응능력에 기인하는 도시공간요소의 공간적 패턴은 열환경에 취약한 공간과 유의미한 상관관계를 가진다는 결과를 도출하였다.

본 연구의 공간적 상관성 결과는 폭염취약성 요인이 실제 도시공간 내 열환경에 취약한 지점에서 얼마나 밀집하여 분포하고 있는지

Table 4. Result of Pearson's Correlation Analysis

Division		T1	H1	V2	V3	A1	A2
T1		1					
Hazards	H1	.194***	1				
	V2	.401***	.383***	1			
Vulnerability	V3	.572***	.047***	.177***	1		
	A1	-.266***	-.190**	-.486***	.064***	1	
Adaptive Capacity	A2	-.204***	-.256***	-.319***	.139***	.455***	1

Division		T1	V1
T1		1	
Vulnerability	V1	.919***	1

* $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$

파악할 수 있다. 이를 통해 도시공간 내 물리적 요소들이 가지고 있는 공간적 패턴이 실질적인 열분포 패턴과 유의미한 수준에서 분포하고 있는지 정량화할 수 있다. 또한, 이를 활용하여 폭염취약성 요인의 우선순위 도출 및 물리적 환경의 개선방안 제시가 가능하다. 열환경에 직접적으로 악영향을 끼치는 실외기는 최대한 밀집되어 배치하는 것을 지양하며, 불가피한 경우에는 인간활동 범위에 직접적인 열영향이 가지 않도록 녹지가 형성된 옥상이나 건축물 후면에 배치하도록 유도가 필요하다. 열환경을 더욱 취약하게 만드는 아스팔트 도로는 보수성 포장, 차열성 아스팔트 등을 활용하여 도시열섬현상을 저감할 수 있도록 해야 한다. 건물마감재는 직접적인 태양열을 반사하는 건물 벽체 및 외장 마감재의 차열도로 적용 등 개선을 도모함과 동시에 건축물의 배치 및 인공간격의 조정으로 그늘진 공간을 형성하도록 해야 하며, 노후주택에 대한 리모델링 등 개선사업이 지속적으로 이루어져야 한다. 일조·일사량은 도심지 내 비교적 열영향을 높게 받는 지점에서 공원 및 녹지, 수목 식재 등을 고려하는 등 열영향을 최소화해야 한다. 또한, 열환경에 대한 리스크를 저감시키는 도심지 내 차고 신선한 바람의 영향을 극대화하기 위한 바람길 확보전략은 대대적으로 수행되어야 하며, 가로수를 연속적으로 배치시켜 선형녹지 및 녹지 네트워크를 조성함으로써 직접적인 열저감정책을 수립하는 것이 요구된다.

본 연구는 기존에 대응적 조치로만 운영되던 국내 폭염대응정책에 선제적인 폭염취약요인 도출과 이에 따른 개선방안을 제시할 수 있으며, 국가적·지역적 차원에서 적극적인 물리환경 개선으로 계획적 측면의 폭염대응전략 수립을 추진하는 연구 프로세스를 확립할 수 있다. 특히 이와 같은 공간적 상관성의 도출은 물리적 환경이 취약하며 개선이 시급한 쇠퇴도시에서 더욱 요구된다. 이를 파악하기 위한 미시공간범위에서의 폭염취약요인 분석을 통해 지속적으로 도시공간요소를 발굴해야할 필요성이 있으며, 공간적 상관성에 따른 지표 우선적용 및 다양화를 실현함과 동시에 도시계획 및 설계 차원에서 폭염피해 저감정책을 수립하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

5.2. 연구의 한계점

본 연구는 대상지 내 높은 수준의 열환경을 가지는 격자가 밀집한 도시공간과 도시공간을 구성하는 물리적 요소간의 공간적 상관성을 입증한다는 점에서 연구의 의의를 가지며, 쇠퇴도시 내 미시적 공간범위에서 폭염취약성 및 공간적 상관성을 분석한다는 점에서 기존의 연구들과 차별성을 보유하고 있다. 하지만, 다음과 같은 한계점을 가지고 있다.

첫째, 각 지표에 따른 상관관계 계수는 대상지 및 구축범위에 따라 상이하게 나타날 수 있다. 데이터는 앞서 설정한 대구 서구 비산2·3동 대상지를 1m 격자로 나누어 구축하였으나, 대상지 및 데이터 구축의 범위가 광범위해지거나 축소될 경우 공간적 상관성의 결과값은 다르게 도출될 수 있다. 도시공간 내 열환경은 다양한 요인에 의해 복합적으로 형성되므로 비교적 상관성이 낮게 나온 지표들도 다양한 연구모형을 적용할 시 높은 유의성을 보일 가능성이 존재한다. 향후 연구에서는 상관성을 판별하는 연구모형을 고도화하여 적용하는 것이 필요하다.

둘째, 아스팔트 도로는 아스팔트의 두께 및 면적에 의해 아스팔트

가 방출하는 열량의 값이 상이하지만 이를 반영하는 것이 미흡하였다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위하여 도로 너비에 따른 열환경분포의 공간적 패턴을 분석하였으며 높은 상관관계가 나타난 것으로 분석되었으나 명확한 열량 값을 반영하는 데에 미흡하였다. 향후 아스팔트의 재질, 종류, 포장, 두께 등에 따른 열방출량에 대하여 세부적인 고려가 필요하다.

셋째, 본 연구에서는 폭염취약성 분석을 위한 물리적인 요소만을 고려하였기 때문에 사회적인 요소의 반영이 미흡하였다. 기존의 기후취약성 지표는 독거노인, 기초생활수급자 등 재난재해 발생 시 실질적으로 피해에 취약한 요소를 포함하는 개념이다. 이에 향후 폭염취약성 분석 시 사회적인 요소를 고려하는 방법론을 함께 활용하여 도시공간을 구성하고 있는 다양한 요소를 반영해 종합적 결과를 도출하는 후속연구의 수행이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 쇠퇴지역 재생역량 강화를 위한 기술개발사업의 연구비지원(22TSRD-C151228-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), Climate Change 2022 Mitigation of Climate change(AR6_WGIII), Summary for Policymakers, 2022, pp.7-52.
- [2] 기상청, 한국 기후변화 평가보고서 2020, 본보고서, 2020, pp.2-334. // (Korea Meteorological Administration, Korea Climate Change Assessment Report 2020, Original Report, 2020, pp.2-334.)
- [3] 왕광익, 유선철, 노경식, 기후변화 대응 도시재생 정책과제 및 전략계획 수립방향, 한국: 국토연구원 Brief, 462호, 2014.4, pp.1-8 // (K.I. Wang, S.C Yu, K.S. No, Climate change response urban regeneration policy tasks and strategic plan establishment direction, Korea: Korea Research Institute for Human Settlements Brief, No.462, 2014.4, pp.1-8.)
- [4] 국토교통부, 기후변화 적응형 도시 열환경 설계시스템 기술 개발, 최종보고서, 2021.03, pp.1-344. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Climate change adaptive urban thermal environment design system technology development, Final Report, 2021.03, pp.1-344.)
- [5] 원주성, 민병학, 김세용, 기후변화 취약성을 고려한 쇠퇴도시 진단지표 산정 개선 연구, KIEAE Journal, 제20권 제6호, 2020, pp.147-158. // (J.S Won, B.H Min, S.Y Kim, The improvement of diagnostic indicators for decline cities considering the vulnerabilities in climate change, KIEAE Journal, 20(6), 2020, pp.147-158.)
- [6] 국토교통과학기술진흥원, 도시재생지역의 도시공간 재난재해 위험성 분석 기술개발, 3단계 단계보고서, 2021, pp.1-88. // (Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Technology development of urban disaster risk analysis and prediction in urban regeneration areas, Step3 Report, 2021, pp.1-88.)
- [7] 이건원, 도시재생사업의 소규모 녹지 조성이 바람길 형성 및 열환경에 미치는 영향, KIEAE Journal, 제21권 제5호, 2021, pp.91-100. // (G.W. Lee, The impacts of creation of small green areas within urban regeneration projects on the formation of wind paths and the thermal environment, KIEAE Journal, 21(5), 2021, pp.91-100.)
- [8] 김도우 외 3인, 우리나라 폭염 인명피해 발생특징, 한국기상학회지, 제24권 제2호, 2014.06. pp.225-234. // (D.W. Kim et al., Characteristics of heat wave mortality in Korea, Journal of Korean Meteorological Society, 24(2), 2014.06. pp.225-234.)
- [9] 정환도, 환경재난형 폭염에 관한 기초연구, 한국: 대전세종연구원, 2016, pp.3-74. // (H.D. Jong, Research on environmental disasters and heat waves, Korea: Daejeon Sejong Research Institute, 2016, pp.3-74.)
- [10] 윤용선, 이상권, 안홍환, 기후변화대비 폭염피해 방지를 위한 중장기적 대안, 방재저널, 제18권 제5호, 2016, pp.12-35. // (Y.S. Yoon, S.G.

- Lee, H.H Ahn, A long-term counterproposal of Heat wave damage measures for climate change, *Journal of Disaster Prevention*, 18(5), 2016, pp.12-35.)
- [11] 오규식, 홍재주, 도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구, 도시설계, 제6권 제1호, 2005, pp.47-63. // (K.S. Oh, J.J Hong, The relationship between urban spatial elements and the urban heat island effect, *Journal of Urban Design Institute of Korea*, 6(1), pp.47-63.)
- [12] 엄정희, 공간계획 활용을 위한 도시 열환경 취약성 평가 연구 - 서울시를 사례로 -, 한국조경학회지, 제44권 제4호, 2016, pp.109-120. // (J.H. Eum, Vulnerability Assessment to Urban Thermal Environment for Spatial Planning - A Case Study of Seoul, Korea -, *Journal of The Korean Institute of Landscape Architecture*, 44(4), pp.109-120.)
- [13] Tanja Wolf, Glenn McGregor, The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom, Netherlands: ELSEVIER, *Journal of Weather and Climate Extremes*, 2013, pp.59-68.
- [14] S.G. Nayak et al., Development of a heat vulnerability index for New York State, Netherlands: ELSEVIER, *Journal of Public Health*, 2018, pp.127-137.
- [15] 구유성 외 3인, 폭염 취약성평가를 통한 도시의 적응능력 향상: 부산광역시를 중심으로, 한국지역개발학회지, 제27권 제5호, 2015, pp.331-348. // (Y.S. Koo et al, Study on the improvement of adaptation ability by vulnerability analysis of heat wave - the case of Busan Metropolitan City, *Journal of The Korean Regional Development Association*, 27(5), pp.331-348.)
- [16] 안윤정, 강영은, 박창식, 기후변화에 따른 폭염 관심지역(Hot spot) 평가 지표 개발 및 적용, 국토계획, 제51권 제4호, 2016, pp.199-209. // (Y. Ahn, Y. Kang, C.S. Park, Developing indexes for analyzing severe heat hot spot under climate change, *Journal of Korea Planning Association*, 51(4), 2016, pp.199-209.)
- [17] 성지훈 외 4인, 공간적 자기상관성을 고려한 폭염취약지역 도출에 관한 연구 - 대구광역시를 중심으로, 한국측량학회지, 제38권 제4호, 2020, pp.295-304. // (J.H. Seong et al, A study on identification of the heat vulnerability area considering spatial autocorrelation - Case study in Daegu, *Journal of the Korean Society of Survey, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, 38(4), 2020, pp.295-304.)
- [18] 김기욱 외 4인, IPCC 기후변화 취약성 평가 체계를 적용한 부산지역 폭염 취약성 평가, 국토연구, 통권 제104권, 2020, pp.23-38. // (K.W. Kim et al., Assessment of heat wave vulnerability in Busan using the IPCC climate change vulnerability assessment framework, *The Korea Spatial Planning Review*, 104, 2020, pp.23-38.)
- [19] Cheng He et al., Exploring the mechanisms of heat wave vulnerability at the urban scale based on the application of big data and artificial societies, Netherlands: ELSEVIER, *Journal of Environment Internaional*, 2019, pp.573-583.
- [20] Suresh Kumar Rathi et al., A heat vulnerability index: Spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for urbanites of four cities of India, Switzerland: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, pp.1-17.
- [21] 유가영, 김인애, 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안, 한국: 한국환경정책·평가연구원, 2008, pp.1-97. // (G.Y. Yoo, I.A Kim, Development and application of a climate change vulnerability index, Korea: Korea Environment Institute, 2008, pp.1-97.)
- [22] 신호성, 이수형, 기후변화 건강 취약성 평가지표 개발, 한국정책연구, 제13권 제1호, 2014, pp.69-93. // (H. Shin, S. Lee, Development of a climate change vulnerability index on the health care sector, *Journal of Environmental Policy*, 13(1), 2014, pp.69-93.)
- [23] 신학중 외 3인, 상업지역내 건물 사이 공간에 설치된 실외기 주변 열환경 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 제39권 제3호, 2019, pp.19-27. // (H.J. Shin et al., Thermal environment around the outdoor unit installed in the space between buildings in the commercial area, *Journal of The Korean Solar Energy Society*, 39(3), 2019, pp.19-27.)
- [24] 오승식, 아스팔트 포장의 열전달 특성, 공주대학교 박사학위 논문, 2020, pp.1-99. // (S.S Oh, Heat transfer characteristic of hot mix asphalt, Kongju University Doctoral Dissertation, 2020, pp.1-99.)
- [25] 정주리, 단지 유형에 따른 열섬현상 저감 방안에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위 논문, 2017, pp.1-98. // (J. Jeong, Mitigation strategies of urban heat island phenomenon by type of complex, Chung-ang University Master's Thesis, 2017, pp.1-98.)
- [26] 엄정희 외 3인, 도시 열환경 개선을 위한 바람길 관리 전략 - 김해시를 사례로 -, 한국지리정보학회지, 제21권 제1호, 2018, pp.115-127. // (J.H. Eum et al., Management strategies of ventilation paths for improving thermal environment - A case study of Gimhae, South Korea -, *Journal of The Korean Association of Geographic Information Studies*, 21(1), 2018, pp.115-127.)
- 1) 통계청 자연재난 원인별 피해 현황 참조.
- 2) 기상청, 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/>).
- 3) 국토교통부 전국 건축물 현황 2022 참조.
- 4) UNDP(United Nations Development Programme, 유엔개발계획).