



스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT)를 활용한 미시적 폭염 취약성 평가에 관한 연구^{*,**}

A Study on the Micro-Scale Heat Wave Vulnerability Assessment Using Urban Data Sensors (S-DoT) in Seoul

김지수^{***} · 강민규^{****}

Kim, Ji-Su · Kang, Min-Gyu

Abstract

This study aims to assess the vulnerability of heat waves using IoT (Internet of Things) urban data sensors (S-DoT) in Seoul. The vulnerability of heat waves was estimated at the "dong" level. A K-means cluster analysis was conducted to categorize dongs into three groups. The first cluster was located at the outskirts of Seoul and around the Han River. This group showed the lowest level of vulnerability to the heat waves and the greatest adaptive capacity with large green areas. The second cluster was exposed to the highest level of heat waves and tropical nights, but it had sufficient green spaces. The last cluster was the most vulnerable group with high level of heat waves and the lowest coping ability. This group was located in downtown areas and CBD with high ratio of impermeable areas and low ratio of green spaces. In conclusion, we suggested that expanding green spaces and reducing the disparity of green area across dongs would lower the risk of heat waves. More attention should be paid to the vulnerable areas where dilapidated houses are concentrated. Countermeasures against the heat waves should be tailored to the regional vulnerability. The results of this study are relevant to the understanding of place-based climate change countermeasures using IoT-based urban data sensors. Future studies are warranted to further investigate the association between micro-scale demographic factors and the heat waves.

주제어 사물인터넷(IoT), 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT), 기후변화, 폭염

Keywords Internet of Things (IoT), Smart Seoul Data of Things (S-DoT), Climate Change, Heat Wave

I. 서론

2021년 8월 발표된 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 제6차 평가보고서는 인간을 기후변화의 주범으로 지목하고 있다. 이렇듯 도시를 중심으로 이루어지는 인간 활동이 기후변화에 악영향을 미친다는 증거가 점차 분명해짐에 따라, 지구의 지속가능성을 유지하

기 위한 노력이 그 어느 때보다 절실한 시점이다. 기후변화는 폭염, 폭우, 태풍 등 자연재해의 빈번한 발생 원인이 되고 그로 인한 재난 위험을 동반한다. 특히 기상학계는 지구의 온도가 점차 상승하고 있는 현상에 주목하면서 평균온도가 1.5°C 상승하면 극한 고온을 유발하는 폭염의 빈도가 8.6배 증가할 것이라는 우려를 표명하였다(IPCC, 2018). 이러한 폭염은 '소리 없는 살인자(the silent killer)'로 불리울 만큼 공중보건에 큰 피해를 가져오기 때

* 이 논문은 2021년도 서울시립대학교 기초·보호학문 및 융복합 분야 R&D 기반조성사업에 의하여 지원되었음.

** 이 논문은 2022년도 한국도시계획학회 상반기 학술대회에서 발표한 내용을 수정·보완하여 작성하였음.

*** Master's Candidate, Department of Urban Administration, University of Seoul (First Author: rlawlt3582@gmail.com)

**** Assistant Professor, Department of Urban Administration, University of Seoul (Corresponding Author: mkgang23@uos.ac.kr)

문예(Basarin et al., 2020; Kotharkar and Ghosh, 2022) 적절한 대응책 마련이 요구된다.

폭염으로 인한 피해는 개인 및 지역의 특성에 따라 다르게 나타난다. 개인의 성별, 연령, 소득 등에 따라 그 정도가 달라지며, 지역의 취약계층 거주 현황, 토지이용, 자연환경 등 인구학적·사회경제적·물리적 기반에 따라서도 차이가 난다(박민호·김형규, 2021; 최예술 외, 2018; Eisenman et al., 2016; Wouters et al., 2017). 특히 도시환경에서 발생하는 폭염은 도시 미기후(micro-climate)의 변화를 일으킨다(Le Roy et al., 2021; Kotharkar and Ghosh, 2022; Wouters et al., 2017). 따라서 실효성 있는 폭염대응 정책을 수립하기 위해서는 개인 단위에서 대처하는 전략뿐 아니라 도시와 지역의 현황이 상세히 반영된 폭염 취약지역을 규명하는 작업이 함께 이루어져야 한다(박민호·김형규, 2021; 배민기 외, 2020; 환경부, 2020; Le Roy et al., 2021).

이를 반영하는 듯 폭염 취약성을 평가한 연구의 동향을 살펴보면 도시와 지역의 특색이 좀 더 엄밀하게 반영되고 있음을 확인할 수 있다. 초기 국가, 시·도 단위 등 광역적 차원에서 이루어진 취약성 평가를 시작으로(유가영·김인애, 2008; Moss et al., 2001), 시·군·구 단위의 연구(원주성 외, 2020; 이원정 외, 2013; 황혜선·변병설, 2011), 읍·면·동 단위의 연구(김기욱 외, 2020; 최예술 외, 2018)에 이르기까지, 자료의 축적과 연구 방법론의 발전에 따라 점차 세밀한 공간 단위에서 취약성 평가가 고도화되고 있다.

이처럼 도시 단위에서 기후변화 취약성을 평가하기 위해서는 각 도시가 지닌 고유한 비(非)기후적 특성뿐 아니라 기상 특성 역시 충분히 고려해야 한다(권용석, 2018). 특히 폭염, 도시열섬 등 열 환경을 대표하는 기후요인인 대기 온도(air temperature)는 도시환경에 따라 국지적으로 변화하기 때문에 세밀한 측정이 요구된다(Le Roy et al., 2021; Wouters et al., 2017). 그러나 폭염 취약성을 평가한 국내 선행연구는 주로 국가기상관측망(AOSO·AWS) 자료를 사용하여 지역의 기상요인을 측정하였다. 일반적으로 국가기상관측장비는 지방자치단체별로 1~2대 정도 소수의 장비만이 설치되어 있어서 각 도시의 국지적 기후 특성을 파악하는 데에는 한계가 있다(배민기 외, 2020; 제민희·정승현, 2018). 국지적인 기후를 정밀하게 모니터링(monitoring)하지 못할 경우, 재해 발생 시 부적절한 대응이 이루어질 수 있으며, 이는 곧 막대한 시민의 피해로 이어지게 된다. 따라서 높은 공간 해상도(fine-grained spatial resolution)의 기상 모니터링을 통해 도시 규모의 기상 현상을 면밀히 살펴볼 필요가 있다(권용석, 2018; 신호성·이수형, 2014; Le Roy et al., 2021).

한편, 최근 4차 산업혁명이 대두됨에 따라 세계 주요 도시에서 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 기반의 마이크로 스케일(micro-scale) 도시 센서를 시범적으로 도입하고 있다. IoT 기

반의 도시 센서는 국가기상관측장비에 비해 관리비용이 낮고 전봇대, 건물 등 기존 인프라에 큰 비용 없이 설치 가능하다는 장점이 있다(Chapman et al., 2015; Shete and Agrawal, 2016). 우리나라에서는 서울시가 2019년부터 스마트서울 6S¹⁾ 정책의 일환으로 S-DoT(Smart Seoul Data of Things) 인프라를 구축하기 시작하였다. S-DoT이란, 서울시 전역의 도시 현상을 수집 및 분석하고 데이터 기반의 과학적인 행정 수립 기반을 마련하기 위한 IoT 기반의 도시 데이터 센서이다(스마트서울포털, <http://smart.seoul.go.kr>). 이는 서울시 전역에 총 1,100대가 설치되어 기온, 미세먼지 등 각 행정동을 대표하는 고해상도 기상 빅데이터를 수집한다는 강점이 있다. 또한, CCTV 지주, 건물 벽면 등 생활환경과 밀접한 위치에 설치되어 높은 현장성을 보유하고 있으므로, 국가기상관측장비와는 달리 시민의 삶과 직접적으로 닿아 있는 도시 미기후 측정이 가능하다.

이에 본 연구는 도시 및 지역 단위에서 차별화된 폭염 대응 정책에 대한 논의가 필요하다는 인식하에, S-DoT 센서에서 수집된 도시 미기후 빅데이터를 활용하여 서울시 폭염 취약성을 행정동 단위에서 평가하고자 하였다. 연구의 공간적 범위는 1,100여 대 S-DoT 센서가 설치된 서울시로 한정하며, 다양한 사회·경제적 통계자료를 동시에 활용할 수 있는 행정동을 분석단위로 하였다. 시간적 범위는 2021년 여름철(6~8월)로 설정하였으며, 기상 자료 이외의 지역 특성 요인들은 자료의 가용 여부에 따라 구득 가능한 최신 자료를 활용하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 첫째, 문헌검토를 통해 IPCC 기후변화 취약성 분석 틀을 바탕으로 폭염 취약성 평가지표를 선정하였다. 둘째, 신뢰할 수 있는 세밀한 공간 단위의 기후 데이터를 구축하기 위해 S-DoT 자료를 면밀히 검토한 후 전처리(pre-processing)하였다. 셋째, 선정된 폭염 취약성 평가지표를 바탕으로 서울시 행정동 단위의 폭염 취약성을 분석하였다. 넷째, 폭염 취약성 평가 결과를 바탕으로 지역을 유형화하였다. 마지막으로, 지역 유형별 폭염 대응전략과 관련한 정책적 시사점을 제시하였다.

II. 이론 및 선행연구

1. 기후변화 취약성 평가의 개념 및 분석틀

기후변화 대응전략은 일반적으로 완화(mitigation)와 적응(adaptation)이라는 두 가지 관점에서 논의된다. 완화(mitigation) 방안은 기후변화의 원인이 되는 온실가스 배출량을 줄이거나 탄소 배출을 억제하는 등 기후변화가 더 이상 진전되지 못하도록 그 원인을 경감시키는 것이며, 적응(adaptation)은 현재 혹은 미래에 예상되는 기후변화의 부정적 영향을 최소화하고 긍정적인 영향을 기회로 활용하는 것을 의미한다(고재경, 2011; IPCC,

2007). 과거에는 주로 온실가스 감축 등 완화 전략이 주목을 받았으나, 기후변화의 특성상 이러한 전략은 즉각적인 효과를 거두기 어렵고, 국제사회의 협력에 의한 전 지구적 노력과 지난(至難)한 과정을 필요로 한다(고재경, 2011; 구유성 외, 2015). 이로 인해 최근의 연구들은 지역 차원에서 즉각적인 대응이 가능한 적응 방안에 초점을 두고 적응능력 향상을 통해 기후변화로 인한 피해를 감소시키는 방향으로 나아가고 있다(최예슬 외, 2018; IPCC, 2007).

기후변화에 의한 영향은 지역마다 다르게 나타나기 때문에 지역의 유형과 현황을 고려하여 적응정책을 수립해야 한다. 과거의 기후변화 대응전략은 국가에 의한 하향식 공간계획을 중심으로 수립되었다(김동현 외, 2013). 그러나 최근에는 이와 같은 방식이 지역별 차별화된 정책으로 이어지기 어렵다는 한계가 지적되면서 장소 중심적인(place-based approach) 접근으로의 전환이 강조되기 시작하였다(강정은·이명진, 2012; Dessai and Hulme, 2003). 장소 중심적인 접근은 지리적인 공간 범위에 내재한 사회경제적 특성을 고려하여 계획 및 정책을 도출하는 것을 의미한다(Adger and Kelly, 1999; Masterson et al., 2014). 즉 기후변화에 효과적으로 대응하기 위한 특정 지역의 정책에는 그 지역의 특성이 반영되어야 한다는 것이다.

이처럼 도시 단위의 지역 특성에 기반을 둔 기후변화 적응정책을 수립하기 위해서는 엄밀한 분석에 기반한 기후변화 취약성 평가가 수행되어야 한다. 취약성 평가는 지역별, 부문별 상대적 취약성을 파악하여 정책의 우선순위 결정에 필요한 정보를 제공한다(채여라 외, 2017; Fussler and Klein, 2006). 기후적, 물리적 조건뿐만 아니라 사회·경제적, 인구학적 특성 등 여러 요인을 바탕으로 그 시스템의 취약성을 평가하기 때문에 도시 및 지역 단위 분석에서 가장 많이 활용되고 있는 방법이다(강정은·이명진, 2012; EU Environment Agency, 2010).

기후변화 취약성 평가를 수행한 연구들은 연구의 목적과 내용에 따라 지표 선정에 차이가 있지만, 대부분 IPCC(2007)의 기후변화 취약성 평가 개념을 기준으로 지표를 선정하고 분석을 수행하였다. IPCC는 기후변화 취약성을 “기후 변동과 극한 기후 상황을 포함한 기후변화의 부정적 영향에 대한 한 시스템(체계)의 민감도 및 대처할 수 없는 정도”로 정의하고(IPCC, 2007), <그림 1> 처럼 기후노출(climate exposure), 민감도(sensitivity), 적응능력(adaptive capacity)으로 구성되는 모델을 제시하였다(IPCC, 2007).

먼저 기후노출(climate exposure)은 시스템이 기후와 관련된 자극에 노출된 정도를 뜻하며, 지리적인 위치나 기후변화의 정도에 따라 달라질 수 있는 기온, 강수량 등을 의미한다. 다음으로 민감도(sensitivity)는 시스템이 기후 관련 자극에 대해 얼마나 민감하게 반응하는지를 나타낸다. 마지막으로 적응능력(adaptive capacity)은 기후변화에 대처할 수 있는 잠재력 또는 능력을 의

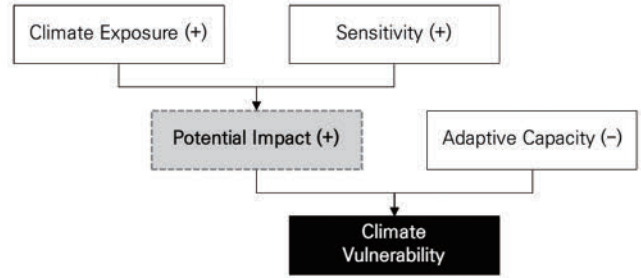


Figure 1. Framework for the climate change vulnerability assessment adopted by IPCC (2007)

미한다. 기후노출은 지역의 기후요인을 반영하고, 민감도와 적응능력은 사회·경제·환경적 요인들을 반영한다(고재경·김희선, 2009).

정리하자면, 기후변화에 대한 노출이 시스템의 민감도에 따라 잠재적 영향(potential impact)으로 나타나게 되고, 적응능력에 따라 최종적인 취약성(vulnerability)이 결정되는 구조이다(유가영·김인애, 2008). 취약성을 구성하는 이 세 가지 요소는 기후변화가 시스템에 초래하게 될 위험을 줄이거나 증가시키는 핵심적인 요인들이다(남기표·김철희, 2013). 이를 통해 기후변화의 위험과 이러한 위험을 줄이기 위한 세 영역에서의 행동을 파악할 수 있어 취약성 평가에 유용한 정보를 제공한다(고재경·김희선, 2009; 남기표·김철희, 2013). 본 연구에서는 기후변화 유형 중 폭염을 중심으로 IPCC 취약성 평가 틀에 따라 서울시 행정동별 폭염 취약성을 진단하고자 한다.

2. 폭염 취약성 평가 관련 연구의 고도화

폭염 취약성 평가와 관련된 선행연구를 살펴보면, 국가, 지방자치단체 등 행정구역 단위의 취약성을 평가하기 위한 지표를 개발하고 취약지역을 식별한 연구가 주를 이루고 있다. 먼저 국가 단위에서 기후변화 취약성을 평가한 연구로 Moss et al.(2001)은 기후변화가 유발하는 재해에 대한 취약성을 종합적으로 평가하였다. 이 연구는 취약성 지수 개념을 가장 구체적으로 도입한 연구로서 취약성 개념을 민감도와 적응능력의 함수로 정의하고, 전 세계의 국가별 기후변화 취약성을 평가하였다.

이후 국내에서 유가영·김인애(2008)는 Moss et al.(2001)의 연구에서 제시된 변수들을 우리나라 시·도 단위에 직접 적용하고, 2000년 서울시 자료를 기준으로 폭염·홍수·가뭄의 취약성을 진단하였다. 그 결과 Moss et al.(2001)의 연구 결과와 차이를 발견하고 이를 통해 각 국가 실정에 맞는 취약성 지표 개발의 필요성을 제시하였다. 이러한 연구들은 기후변화 취약성 평가를 위한 기반을 마련하였다는 의의가 있지만, 광역적인 관점에서의 분석과 정책 제안이 이루어지고 있다는 한계 역시 존재한다.

이에 고재경·김희선(2009)은 기후변화 취약성이 광역지자체뿐 아니라 기초지자체 내에서도 편차를 보일 것이라는 전제하에 경

기도의 폭염·호우·가뭄·해수면상승을 전망하였다. 경기도 31개 시·군을 대상으로 하였으며, 지역성을 고려하여 기초지자체에서 활용 가능한 취약성 평가지수를 산정하였다. 이후 연구 동향은 도시 단위의 기후적·사회적·물리적 현황을 반영하기 위한 노력으로, 시군구 단위에서 폭염 취약성을 진단하는 연구가 주를 이루었다(원주성 외, 2020; 이원정 외, 2013; 황혜선·변병설, 2011).

최근에는 국지적인 공간 단위의 폭염 현상 파악을 위한 방안으로 읍·면·동 단위의 취약성 평가가 이뤄지고 있다. 여러 유형의 기후재해를 종합적으로 평가했던 초기의 연구와는 달리 읍·면·동 단위의 연구들은 특정 유형의 기후변화 취약성을 평가하는 경향을 보였다. 폭염에 중점을 둔 연구로 최예술 외(2018)는 서울특별시 행정동 단위에서 폭염 취약성 지수를 산정하고 Moran's I 및 LISA 군집지도를 적용하여 폭염 취약성의 공간적 자기상관성을 확인하였다. 유사한 연구로 김기욱 외(2020)의 연구는 부산광역시 행정동을 대상으로 폭염 취약성을 평가하였다. 이상의 연구들은 효과적인 폭염 대응전략 수립을 위해 세부 행정구역 단위에서 미시적인 분석을 수행하였다는 의의가 있다.

폭염 취약성을 평가한 선행연구 검토 결과, 초기의 광역적인 논의를 시작으로 점차 미시적인 행정단위에 이르기까지 취약성 평가가 고도화되고 있음을 파악하였다. 이와 같은 흐름은 세부지역의 사회·경제·환경적 여건을 반영한 장소 중심적인 접근(place-based approach)으로의 흐름이 반영된 것이라 할 수 있다. 이처

럼 도시 및 지역 단위에서의 접근은 기존 취약성 연구가 가진 모호한 정책적 함의를 벗어나, 구체적이고 실질적인 적응정책의 방향성을 제시할 수 있으므로 중요하다(Cutter et al., 2008).

한편, 폭염 현상을 대표하는 기상요인인 대기 온도는 도시환경에 따라 국지적으로 변화하므로(배민기 외, 2020; Le Roy et al., 2021; Wouters et al., 2017), 도시 단위에 적합한 높은 해상도의 기상자료가 필요하다(권용석, 2018; 신호성·이수형, 2014). 그러나 취약성 평가가 고도화되고 있음에도 고해상도의 기상자료를 반영한 연구는 미흡한 상황이다.

앞서 검토한 국내 선행연구의 대부분은 국가기상관측장비(ASOS·AWS) 기상자료를 활용하여 폭염 현상을 평가하고 있다. 일반적으로 국가기상관측장비는 지방자치단체별 1~2대 정도의 인프라만 설치되어 있어 지역 내 국지적인 기상 현상을 분별하기 어렵다는 한계가 있다(제민희·정승현, 2018; 황혜선·변병설, 2011). 실제 서울시의 경우, <그림 2-a>처럼 총 27대의 AWS가 운영 중이다. 그러나 낮은 설치 밀도로 인해 녹지, 주거지역 등 같은 자치구 내에서 다양한 토지이용 현황에 따른 온도 차이를 구별해내지 못한다(배민기 외, 2020). 일부 선행연구에서는 이를 보완하고자 공간보간법(spatial interpolation)을 적용하여 측정 불가능한 지역의 자료를 추정하기도 하지만, 국가기상관측장비 간 거리가 상당하기에 보간법을 통해 추정된 값들이 실제 기온과 크게 다를 수 있다는 문제가 있다(김기중·안영수, 2017; 박해경,

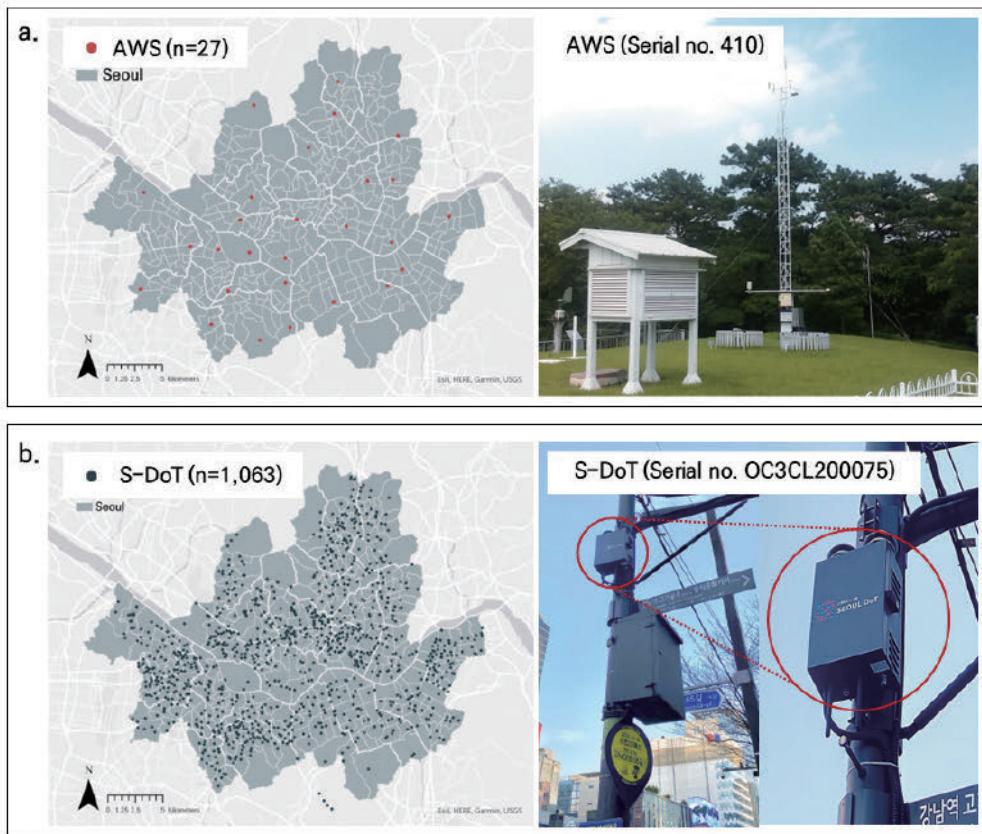


Figure 2. a) AWS locations (n=27) in Seoul and an AWS device (Source: KMA),
b) S-DoT locations (n=1,063) in Seoul and a S-DoT sensor device

2021). 국가기상관측장비의 지역 대표성 문제로 인해 황혜선·변병설(2011)의 경우, 서울시 자치구를 대상으로 기후변화 취약성 평가를 수행하는 과정에서 폭염 현상에 대한 취약성을 평가하는 것을 바람직하지 않다고 판단하기도 하였다.

이와 달리 해외 연구에서는 주로 인공위성 영상자료를 통해 측정된 지표면 온도(Land Surface Temperature, LST)를 폭염 취약성 평가에 활용한다(Buzási, 2022; Guha et al., 2018; Li et al., 2019). 인공위성 영상자료의 경우 넓은 공간범위에서도 고해상도 분석이 가능한 장점이 있다(김기중·안영수, 2017). 그러나 인공위성 자료는 공전주기로 인해 관측 시기가 불연속적이고 운량, 강우량 등 기상조건을 고려해야 하는 번거로움이 있다(황희수·강정은, 2020; Karanja and Kiage, 2021; Wilson and Chakraborty, 2019). 특히 여름철이 분석 시기일 경우 장마의 영향으로 사용이 불가능한 경우가 많다는 한계를 수반한다(박해경, 2021). 또한, 열적외선 영상으로 추정된 지표면 온도는 실제 대기 온도와 다소 차이가 있다(구자용, 2014). 따라서 고온현상으로 인한 도시민의 건강·보건 등과 관련된 연구는 일상생활과 밀접한 관련이 있는 대기 온도를 활용하는 것이 바람직하다(김기중·안영수, 2017).

이에 본 연구는 최근 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 기술의 발전과 함께 등장한 고해상도 센서의 기상자료를 활용하여 폭염 취약성 평가 결과의 엄밀성을 담보하고자 하였다. 미국(뉴욕), 영국(글래스고), 스페인(바르셀로나, 산탄데르) 등 세계 주요 도시뿐 아니라 우리나라에서는 서울시가 2019년 S-DoT 센서를 도입하면서 미시적 공간 단위에서 기상 현상을 파악할 수 있게 되었다. 이는 2021년을 기준으로 <그림 2-b>와 같이 서울시 전역에 총 1,100대가 설치되어 기온, 미세먼지 등을 수집하고 있다. 그러나 아직 시행 초기 단계에 있는 S-DoT 도시 데이터 센서 자료를 실증분석에 적용한 연구는 많지 않다.

최근 수행된 박해경(2021)의 연구는 도시 데이터 센서 자료를 활용한 열섬 분석방법 제안을 목적으로 하고 있으며, 서울시 소재 국가기상관측장비(ASOS·AWS) 2대와 그 인근에 설치된 12개의 S-DoT 센서 데이터를 대상으로 2020년 여름철(5~8월) 중 이들 동안의 기온을 비교하였다. 그 결과 S-DoT에서 측정된 기온이 국가기상관측 기온보다 약 1~1.5℃ 높게 나타나 미시적 공간 단위의 기상측정 필요성을 재확인하였다. 해당 연구는 S-DoT 기온 데이터를 탐색적인 분석에 활용한 국내 최초의 연구로서 의의를 지닌다. 그러나 소수의 센서만을 대상으로 단순한 온도 차이만을 확인하고 있어 실질적인 도시 열 환경 저감 정책 제언으로 이어지기 어렵다는 한계가 있다.

이에 본 연구는 S-DoT 센서 데이터와 지역 통계자료를 활용하여 서울시 폭염 취약성을 행정동 단위에서 평가하고, 정책적 시사점을 제공하는 것을 목적으로 한다. 연구의 차별성은 다음과 같다. 첫째, 사물인터넷(IoT) 센서 기반 기상자료를 활용해 그간

분석할 수 없었던 미시적 공간 단위의 기상 현상을 폭염 취약성 평가 모형에 반영하였다. 둘째, 아직 폭염 연구에 직접적으로 활용된 바가 없는 S-DoT 센서 기반 빅데이터 전처리(pre-processing) 과정을 엄밀하게 제시하여 후속 연구의 토대를 마련하였다. 셋째, 정밀한 기상자료에 근거한 공간분석을 통해 미시적 생활권 단위의 장소 중심적(place-based) 폭염 대응전략을 제시하고자 하였다.

III. 연구 설계

1. 연구자료 및 변수

본 연구의 공간적 범위는 S-DoT 센서 사업을 시행 중인 서울 시이며, 행정동을 분석단위로 한다. 시간적 범위는 2021년 여름철(6~8월)로 설정하였다. 기후노출, 민감도, 적응능력이라는 각 범주는 직접적인 변수로 측정이 어렵기 때문에 대리변수(proxy variables)를 선정해야 한다(남기표·김철희, 2013). 본 연구는 특히 폭염, 도시열섬, 열(heat) 등 관련 선행연구 고찰을 바탕으로 행정동 단위의 도시 및 환경계획 분야에서 활용할 수 있는 취약성 평가지표를 선정하고자 하였으며, 최종적으로 선별된 세부변수는 <표 1>과 같다. 한편, 기후노출과 민감도는 취약성과 정(+)의 관계, 적응능력은 부(-)의 관계를 나타내는 지표로 해석 가능하며, 세부지표별 부호 역시 <표 1>을 통해 정리하였다.

1) 기후노출(climate exposure)

본 연구에서 선정한 기후노출 변수는 2021년 여름철(6~8월) 이내 관측된 폭염일수(일 최고체감온도 33℃ 이상인 날의 횟수) 및 열대야일수(일 최저온도 25℃ 이상인 날의 횟수)이다. 폭염을 나타내는 열적지수는 연구자마다 기준이 다르지만, 폭염 취약성을 평가한 대부분의 선행연구는 폭염일수, 열대야일수, 일 최고 기온 등 기온(temperature)과 관련된 변수를 선정하였다(김기욱 외, 2020; 배민기 외, 2020). 그러나 시민들이 실제 체감하는 열 스트레스(heat stress)는 대기온도뿐 아니라 습도까지 고려한 체감온도(sensible temperature)와 관련이 높다(김동현·송슬기, 2016). Barreca(2012)는 미국지역에서의 습도와 사망률 간의 분석을 통해 상대적으로 온도가 높고 습한 지역일수록 온열질환으로 인한 사망률이 높음을 확인하였다. 국내 폭염 특보 역시 이 같은 특성을 반영하고자 발령기준을 일 최고기온에서 일 최고 체감온도로 변경한 바 있다.²⁾ 이에 본 연구에서는 기존 연구에서 논의되지 않았던 체감온도를 기준으로 '폭염일수'를 산출하였으며, 체감온도는 기상청에서 제공하는 여름철 체감온도 산식³⁾을 기준으로 계산하였다.

본 연구는 서울시에서 도입한 IoT 기반의 도시데이터 센서 S-DoT을 이용하여 기후노출 변수를 구축하였다. S-DoT 환경

Table 1. Heatwave vulnerability assessment indicators

Category	Variables	Definition	Sources
Climate exposure (+)	Days of heatwaves (+)	Number of days when the maximum daily sensible temperature is over 33°C	Seoul Open Data Plaza (2021) S-Dot
	Days of tropical nights (+)	Number of days when the minimum daily temperature is over 25°C	Seoul Open Data Plaza (2021) S-Dot
Somatic vulnerability factor	Percentage of elderly people (+)	Elderly people (aged over 65)/ total population (%)	Seoul Open Data Plaza (2020)
	Percentage of children ⁴⁾ (+)	Children/ total population (%)	Seoul Open Data Plaza (2020)
	Percentage of disabled (+)	Disabled/ total population (%)	Seoul Open Data Plaza (2020)
Sensitivity (+)	Percentage of elders-living alone (+)	Elderly people (aged over 65) living alone/ total population (%)	Seoul Open Data Plaza (2020)
	Percentage of low-income (+)	Basic livelihood recipients/ total population (%)	Seoul Open Data Plaza (2020)
Urban-environment factor	Percentage of dilapidated housing (+)	Dilapidated housing/ total housing (%)	KOSTAT (2020) request of information disclosure
	Percentage of impervious area (+)	Impervious area/ total area (%)	Seoul Urban Planning Portal (2020)
	Population density (+)	Total population/ total area (number of population / km ²)	Seoul Open Data Plaza (2020)
Infra factor	Percentage of green area (-)	Green area/ total area (%)	Seoul Open Data Plaza (2021)
	Cooling centers per 100,000 people (-)	Number of cooling center/ total population (100,000 people)	Ministry of Public Administration and Security (2020) request of information disclosure
	Civil servant to population (+)	Total population/ prescribed number of civil servants	Seoul Open Data Plaza (2019)
Adaptive capacity (-)	Social welfare budget per capita (-)	Social welfare budget (1,000 KRW)/ number of resident registration people	Seoul Open Data Plaza (2019)
	Accessibility to public health center (+)	Distance to the nearest Public health center (km)	National Geographic Information Institute (2020)
Health and welfare factor	Accessibility to EMS (+)	Distance to the nearest EMS (km)	National Geographic Information Institute (2020)
	Accessibility to fire station (+)	Distance to the nearest Fire station (km)	National Geographic Information Institute (2020)

(+) The higher the value, the more dangerous, (-) The smaller the value, the more dangerous

센서는 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}), 기온, 상대습도, 소음, 자외선, 진동, 풍향·풍속, 흑구온도, 대기오염, 악취 등 총 12개의 환경 데이터를 2분 단위로 측정하며, 기온과 상대습도 데이터를 동시 측정한다는 점에서 체감온도 산출에 용이하다는 장점이 있다. S-DotT 환경 센서에서 측정된 실시간 데이터는 서울열린데이터광장(<https://data.seoul.go.kr/>)에서 구독 가능하며 1시간 단위로 산술평균한 값을 공개하고 있다.

2) 민감도(sensitivity)

본 연구는 폭염에 대한 위험성이 개인 및 지역 특성에 따라 달라지는 점을 고려하여 민감도(sensitivity) 지표를 생물학적, 사회경제적, 도시환경 취약요인으로 나누고 총 8가지 세부지표를 선정하였다.

먼저 생물학적 취약요인은 노인인구, 어린이, 장애인 비율 등

의 세 가지 지표로 구성하였다. 노인인구는 다른 연령대에 비해 심폐기능과 체온조절 능력이 부족하여 고온에 대처하기 어려운 대표적인 폭염 취약계층이다(이나영 외, 2014; 채여라, 2021; IPCC, 2007). 우리나라 고령화 수준은 점점 심각해지고 있으므로 각별히 주의해야 할 계층이다. 어린이는 스스로 충분한 수분을 섭취하지 못하거나 혼자 차 안에 남겨질 경우 자력으로 나오지 못하는 등 재난 사고에 노출되었을 때 자발적인 대처가 어렵기 때문에 보호가 필요하다(배민기 외, 2020; 채여라, 2021). 마지막으로 장애인은 스스로 이동 및 소통이 어려운 계층으로 냉방기 작동이나 식음 등 더위를 피하기 어렵고 일반 사람보다 자외선에 오래 노출될 가능성이 있다.

사회경제적 취약요인으로 독거노인 비율과 저소득층 비율 두 가지 세부지표를 선정하였으며, 저소득층의 경우 국민기초생활수급자를 대리변수로 활용하였다. 독거노인은 자녀의 출가, 사별

등으로 사회적인 관계가 거의 남아 있지 않은 고립된 삶을 살아간다. 따라서 스스로 재난에 대처하기 어렵고 누군가의 도움에 의존할 수밖에 없는 현실에 처해 있다(김은영 외, 2012; Klinenberg, 2015). 저소득층의 경우 냉방기기 소유 여부와 가동시간이 고소득층에 비해 취약하여(채여라 외, 2017) 폭염에 쉽게 노출될 수 있다. 이들은 또한 열사병 등 고온으로 인한 질병에 걸렸을 때조차 어려운 경제적 여건으로 인해 빠른 대처가 불가능한 폭염 취약계층이다(박민호·김형규, 2021; 배민기 외, 2020; 이나영 외, 2014).

마지막으로 도시환경요인은 노후 단독주택 비율과 불투수면적 비율, 인구밀도를 선정하였다. 도시열섬 현상에 취약한 노후 단독주택의 경우, 「도시 및 주거환경정비법」에 따라 준공 이후 30년 이상인 단독주택을 대상으로 하였다. 불투수성 요소가 높은 지역은 열 흡수율이 높기에 폭염 및 도시열섬 현상을 촉진시킨다(엄정희, 2016). 불투수율이 높은 서울시는 폭염에 불리한 환경을 갖추고 있으므로(조항문·이윤혜, 2018) 이를 활용하였다. 또한 인구가 밀집된 도시지역은 기후변화로 인한 재해 위험이 커질 우려가 있으며, 기존 연구에서도 인구밀도가 높은 지역의 폭염 취약성이 높은 것으로 분석되었기에(김근한·정휘철, 2020; 김동욱 외, 2021) 이를 포함하였다.

3) 적응능력(adaptive capacity)

본 연구는 적응능력 부문을 인프라, 제도적, 보건·복지 요인으로 나누고 총 7개의 세부지표를 선정하였다. 인프라 요인은 공원 및 녹지 면적 비율과 인구당 무더위쉼터 설치 수를 활용하였다. 공원 및 녹지면적은 도시지역 내 열 축적을 방지할 수 있게 해주는 중요한 지표이다(김은영 외, 2012; 조항문·이윤혜, 2018; 조혜진·임지현, 2011). 선행연구 검토 결과, 대다수의 폭염 취약성 연구에서 적응능력 요인으로 사용하였으며(김기욱 외, 2020; 구유성 외, 2015; 최예술 외, 2018), 녹지가 도시 고온 현상을 경감시킨다는 연구 결과가 다수 확인되었다(김근한·정휘철, 2020; 김동현·김슬기, 2016; Chow et al., 2012). 이에 따라 공원 및 녹지면적을 폭염의 주요 저감 요인으로 선정하였다.

무더위쉼터는 폭염 취약계층의 적응능력을 향상시키기 위한 서울시 폭염 대응 수단 중 하나로, 지역 특성에 맞게 일상생활 공간 주변에 쉽게 접근 가능한 주민자치센터, 노인 관련 시설 등을 활용하여 지정 및 운영되고 있다(김은영 외, 2012). 한편 행정안전부에서 제공한 서울시 무더위쉼터 운영 현황을 검토한 결과, 냉방시설이 갖춰지지 않은 무더위쉼터가 다수 확인되었다(정보공개청구, 2021). 냉방시설을 갖춘 무더위쉼터의 이용이 온열 질환으로 인한 건강 위험을 낮출 수 있다는 선행연구의 분석결과에 따라(양희진·윤희연, 2020; Bouchama et al., 2007) 본 연구에서는 냉방시설을 갖춘 무더위쉼터의 수만 선정하여 분석에 활용하였다.

다음으로 제도적 요인은 공무원 1인당 담당인구 수 및 인구당

사회복지예산액 지표로 구성하였다. 행정인력은 기후재해 발생 시 동원되고(고재경·김희선, 2009), 매 여름철 수립되는 폭염 대응 종합대책에 따라 취약계층에 대한 관리 업무를 수행하기에 적절한 지표라 판단하였다. 한편 기후변화 취약성을 평가한 대부분의 연구에서 적응능력 부문의 경제적 지표로 재정자립도 또는 GRDP, GDP 등을 활용하였다(고재경·김희선, 2009; 김근한·정휘철, 2020; 유가영·김인애, 2008). 그러나 본 연구에서는 서울시가 폭염, 한파 등 자연재해 발생 시 서울형 긴급복지 지원을 통해 위기 상황을 벗어나기 어려운 취약계층을 지원한다는 점을 고려하여 사회복지 예산액 지표를 활용하였다. 해당 지표의 경우 행정동 단위의 데이터 구득이 어려워 자치구 단위 데이터를 활용하였다.

폭염 등의 이상고온현상은 열사병이나 심혈관, 호흡기 등 각종 질환을 유발하고 공중보건에 큰 피해를 가져오기 때문에(김동현·송슬기, 2016) 보건의료체계는 지역 사회가 기후변화에 대처할 수 있도록 중요한 역할을 하는 요소이다(신호성·이수형, 2014). 폭염 취약성을 평가한 선행연구의 적응능력 지표를 검토한 결과, 주로 보건소, 의료기관, 응급의료시설, 소방서 등 행정기관의 기관수, 인력 수 등 절대적 지표들을 고려하고 있었다.

하지만 의료기관의 경우 상급종합병원, 종합병원 등 병원의 등급에 따라 의료인력 및 병상 수에 큰 차이가 있기에 행정동 단위 분석에 활용하는 것은 적절하지 않다. 또한 보건소, 응급의료시설, 소방서 등은 시군구 관할에서 조직된 시설로서 공간적으로 넓은 시군구 단위의 취약성 평가에는 적절하지만, 행정동 단위 평가에는 적절하지 않다고 판단하였다. 이에 본 연구는 국토정보 플랫폼에서 각 행정동으로부터 가장 가까운 보건기관, 소방서, 응급의료시설까지의 도로 이동 거리라는 세 가지 지표를 선정하였다.⁵⁾

2. S-DoT 데이터 전처리(data pre-processing)

본 연구에서 선정한 폭염일수와 열대야일수 자료를 구축하기 위해서는 그 기준이 되는 일 최고 체감온도와 일 최저기온을 산출하는 과정이 선행되어야 한다. 그러나 S-DoT 센서는 실시간으로 수집되는 빅데이터를 별도의 가공 없이 제공하기 때문에 데이터를 활용하기 전 섬세한 정제과정을 거쳐야만 한다. 2021년 여름철(6~8월)에 관측된 S-DoT 데이터를 검토한 결과, 다음과 같은 특징을 발견할 수 있었다.

첫째, 1,100대의 S-DoT 센서는 1,063대의 '고정식 센서(stationary sensor)'와 37대의 '이동식 센서(mobile sensor)'로 구분된다. 고정식 센서는 특정 위치에 설치되어 위치정보를 파악할 수 있는 센서이고, 이동식 센서는 장비오류 등으로 인해 유동적으로 운용되어 위치정보를 파악할 수 없는 센서를 말한다. 본 연구는 위치정보가 제공되는 고정식 센서의 데이터만을 분석대상

으로 하였다.

둘째, 통신장비 오류 등으로 인해 각 S-DoT 센서마다 일별로 데이터를 수집하는 횟수가 상이하다는 결함을 발견하였다. 즉 S-DoT 센서는 60분 단위로 데이터를 제공하기 때문에 하루에 24회의 측정기록이 있어야 정상이지만, 그렇지 않은 센서가 매일 비일관적으로 발생한다. 예컨대 일부 센서(serial number OC3CL200017)의 경우, 6월 1일에는 24회의 관측기록이 있으나, 6월 5일에는 오전 4시의 관측값만 측정하였고, 6월 7일에는 수집된 데이터가 아예 없는 등 비일관적인 양상을 보였다. 따라서 별도의 데이터 정제과정 없이 일 최고·최저기온을 산출한다면 연구 과정에서 분석 오류가 발생할 가능성이 크다.

셋째, 날마다 관측된 S-DoT 센서의 수와 종류가 다른 경우도 존재한다. 가령 6월 5일에는 1,021대의 센서에서 데이터가 관찰되었으나, 6월 6일에는 826대의 센서에서만 관측값이 측정되었고 8월 29일의 경우에는 모든 센서에서 관측값이 기록되지 않은 오류도 있었다. 이와 같은 데이터 검토크 결과는 본 연구의 시간적 범위인 2021년 6월에서 8월까지의 기간 중 데이터 품질이 보장되지 않은 날짜와 센서 관측치를 선별하여 제거하는 등 데이터 전처리(data pre-processing)과정이 필수적이라는 점을 시사한다.

본 연구에서는 S-DoT 데이터의 문제를 검토하고, 신뢰할 수 있는 분석자료를 구축하고자 <그림 3>의 데이터 정제과정에 따라 각 변수를 구축하였으며, 그 구체적 과정은 다음과 같다. 첫째, 시간대별 기온 및 상대습도 데이터의 분포를 확인한 후 관측 범위를 초과하는 이상치를 제거하였다. 기온은 시간에 따라 뚜렷한 패턴을 보이는 변수이다. 최고기온은 낮 시간대, 최저기온은 새벽 시간대에 관측되는 것이 일반적이므로 이상치 선별 과정에서 관측시간을 고려하는 것이 중요하다. <그림 4-a>처럼 여름철임에도 불구하고 영하 기온이 관측되거나 정상범위를 벗어날 정도로 높은 기온이 관측된 경우는 이상치로 간주하고 제거하였다.

둘째, 일 최고 체감온도 및 일 최저기온의 기준을 조작적으로 정의하였다. 서울시 종관기상관측망(ASOS)에서 2021년 여름철(6~8월)의 일 최고 및 최저기온 관측 시간대를 파악한 결과, 일 최고기온은 오후 2~4시, 일 최저기온은 오전 4~6시에 빈번하게 관측되었음을 확인하였다. 따라서 본 연구는 일 최고 체감온도를 '오후 2~4시 중 최고 체감온도'로, 일 최저기온을 '오전 4~6시 중 최저기온'으로 재정의하였다. 이후 하루 중 각 시간대에 적어도 1회 이상의 측정기록이 있는 센서를 유효센서(valid sensor)로 간주하였다. 그 결과 <그림 4-b>에 나타난 885대가 유효센서인 것으로 도출되었다.

셋째, 데이터 품질이 보장되지 않은 날짜를 선별하여 제거하였다. S-DoT 센서는 날마다 관측되는 센서의 수와 종류가 다르다. 이에 따라 885대의 유효센서에서 일 최고 체감온도 및 일 최저기온을 산출할 수 있는 날짜를 선별하였다. <그림 4-c>와 같이 날짜별로 관측된 유효센서의 대수를 파악한 결과, 2021년 여름철

(6~8월) 92일 중 79일이 유효한 시간적 범위로 도출되었다.

넷째, 구체적인 공간 범위를 결정하였다. 본 연구의 분석단위는 서울시 행정동 424개이다.⁶⁾ 본래 S-DoT 센서는 행정동별 한 대씩 균등하게 설치하도록 계획되었기 때문에(서울정보소통광장, <https://opengov.seoul.go.kr/>) 공간보간법을 수행하지 않아도 각 행정동을 대표하는 기온 값을 수집할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 전술한 S-DoT 센서 데이터의 결함 등으로 인해 본 연구의 분석목적에 적합한 유효센서는 총 885대로 나타났다. 이 과정에서 행정동별 균등설치된 S-DoT 센서가 상당수 제거되었으므로 모든 행정동을 대표하는 기상자료 구축은 어렵다. 이에 본 연구는 S-DoT 센서 기상자료가 각 행정동을 대표할 수 있다는 강점을 최대한 살리고자 <그림 4-b>처럼 유효센서가 적어도 한 대 이상 설치된 392개⁷⁾의 행정동을 공간적 범위로 한정하였다.

다섯째, 행정동 단위의 기후노출 변수를 구축하였다. 이를 위해 정제된 885대의 S-DoT 유효센서로부터 일별 최고체감온도 및 최저기온을 산출하고, 최종적인 연구의 시간적 범위 79일 내에서 폭염 및 열대야 조건에 충족하는 날의 수를 계산하였다. 이후 앞서 산출한 센서 단위의 기후노출 값을 행정동 단위로 변환하는 작업을 진행하였다. 이때 행정동마다 설치된 S-DoT 센서의 수를 파악한 후, 단 1대의 S-DoT 센서가 설치된 행정동일 경우 센서 단위 기후노출 값을 그대로 할당하였고, 2대 이상의 S-dot 센서가 설치된 행정동일 경우 선별된 기후노출 값을 산출 평균하여 적용하였다.

3. 폭염 취약성 평가 지표 산정

취약성 평가 지표는 기후노출, 민감도, 적응능력으로 구성되고 세부변수들 간 연산과정을 거쳐 부문별 취약성 지수(vulnerability index)가 결정된다. 본 연구는 다음 과정을 통해 서울시 각 행정동에 대한 폭염 취약성 평가 지표를 산출하였다.

1) 표준화(standardization)

서로 다른 단위와 특성을 가진 세부변수들을 부문별로 취합하여 하나의 지표로 정의하기 위해서는 반드시 표준화(standardization) 과정이 필요하다. 대표적으로 Z-score 방법과 스케일재조정(re-scaling) 방법이 활용되고 있으며 본 연구에서는 UNDP (2005)에서 제안한 스케일재조정법을 이용하였다. 스케일재조정법은 변수의 최댓값과 최솟값을 이용하여 동일한 범위인 0~1로 표준화하는 것이다(남기표·김철희, 2013). 본 연구는 표준화 과정에서 이상치(outlier)에 의한 영향을 최소화하고자 자연로그 및 제곱근 변환 등을 통한 정규성 검정을 수행한 후 표준화하였다.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

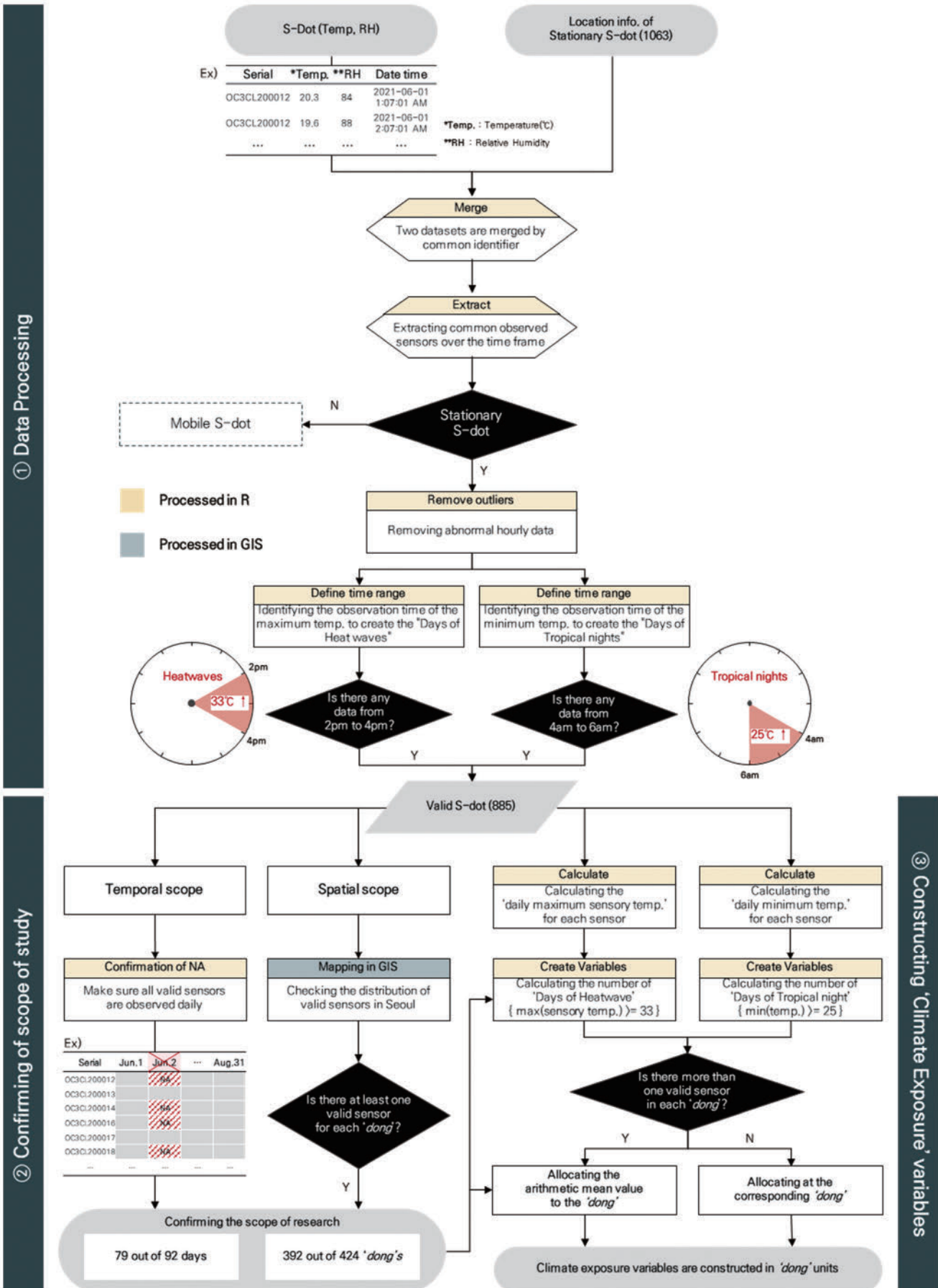


Figure 3. Flowchart of S-DoT data processing

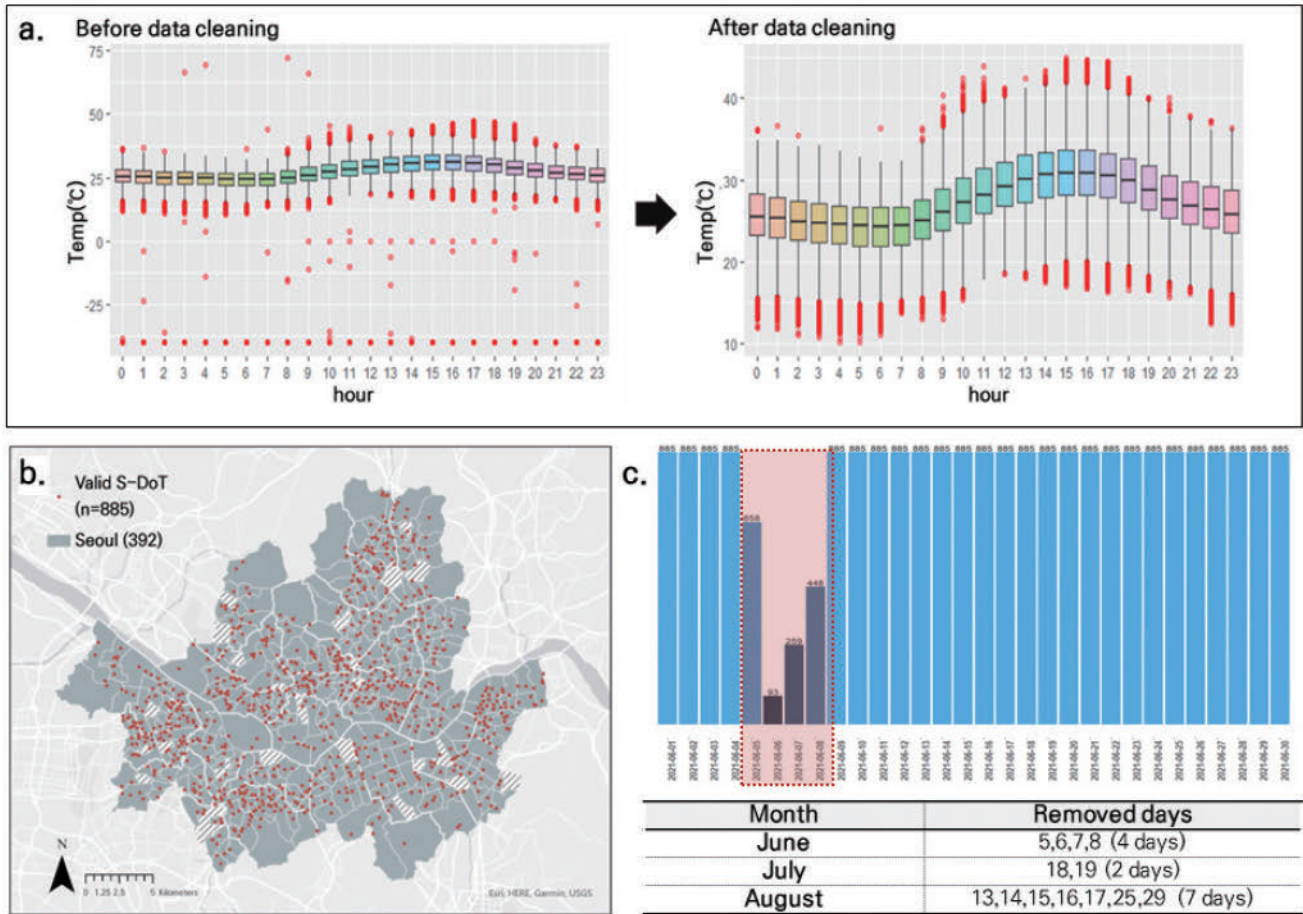


Figure 4. a) Detecting outliers, b) Confirming valid sensors and spatial scope, c) Confirming temporal scope

2) 엔트로피 가중치(entropy weighted method)

의사결정과정에서 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 선정된 각 변수의 상대적 중요도인 가중치(weight)를 부여하는 작업이 필요하다. 일반적으로 취약성 평가를 수행한 연구들은 세부변수들에 관하여 가중치를 부여하지 않거나(유가영·김인애, 2008; 이원정 외, 2013; 최예술 외, 2018), AHP 기법을 활용하거나(고재경·김희선, 2009; 구유성 외, 2015; 김기욱 외, 2020; 신호성·이수형, 2014) 엔트로피 가중치(entropy weighted method)를 적용하였다(김동욱 외, 2021; 이선미 외, 2020; Xu et al., 2018).

이 중 본 연구에서 적용한 엔트로피 가중치는 Shannon(1948)의 정보이론을 근거로 한다. 엔트로피 가중치는 AHP 분석, 델파이 기법 등 연구자의 주관이 개입되고 많은 시간과 비용이 소요되는 주관적인 가중치 산정 방법과는 달리 평가항목의 데이터 속성 정보를 기반으로 하는 객관적 가중치 산정방법 중 하나이다(Shannon, 1948). 엔트로피는 데이터 분산값에 따라 결정되며 각 지표값의 응집도가 높을수록 값은 커지고, 반대로 흩어져 있을수록 엔트로피 값이 작아지게 된다(이상혁 외, 2015). 구체적인 가중치 산정방법은 다음과 같다.

첫째, 식 (2)처럼 자료를 행렬(D)로 구성해야 한다. 이때 n은 세부변수의 개수, m은 분석단위(행정동)의 수를 의미한다.

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

둘째, 식 (3)에 따라 스케일제조정 표준화 작업을 수행한 세부변수의 엔트로피 값(E_j)을 식 (3)을 통해 산정한다.

$$E_j = \frac{-\sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln(m)} \tag{3}$$

마지막으로, 식 (4)처럼 다양성 척도(d_j)를 계산하고, 식 (5)에 의해 세부변수별 가중치(w_j)를 산정한다. 각 세부변수별 엔트로피 가중치를 적용한 결과는 <표 2>과 같다.

$$d_j = 1 - E_j \tag{4}$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \tag{5}$$

가중치 부여작업을 마무리한 후, 식 (6)에 따라 부문별 가중평

Table 2. Entropy weight and ANOVA result

Category	Variables	Entropy weight	df	F value	Pr (>F)
Climate exposure	Days of heatwaves	0.5904	2	8.222	0.000318 ***
	Days of tropical nights	0.4096	2	82.44	<2e-16 ***
Sensitivity	Percentage of the elderly people	0.0863	2	6.968	0.00106 **
	Percentage of children	0.0251	2	5.123	0.00637 **
	Percentage of disabled	0.0661	2	11.56	1.32e-05 ***
	Percentage of elders-living alone	0.0624	2	17.39	5.84e-08 ***
	Percentage of low-income	0.0567	2	15.7	2.78e-07 ***
	Percentage of dilapidated housing	0.3185	2	33.35	4.3e-14 ***
	Percentage of impervious area	0.1608	2	271.2	<2e-16 ***
	Population density	0.2240	2	108.2	<2e-16 ***
	Adaptive capacity	Percentage of green area	0.6341	2	1189
Cooling centers per 100,000 people		0.0427	2	1.322	0.268
Civil servant to population		0.0262	2	8.079	0.000365 ***
Social welfare budget per capita		0.1479	2	3.661	0.0266 *
Accessibility to public health center		0.0468	2	29.31	1.4e-12 ***
Accessibility to EMS		0.0554	2	34.12	2.22e-14 ***
Accessibility to fire station		0.0468	2	88.42	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

균 값을 계산하였다. 세부변수 표준화 값(p_{ij})과 엔트로피 가중치 (w_j)를 곱하여 기후노출, 민감도, 적응능력지수를 산출하였고, 이를 다시 식 (1)에 따라 0에서 1 사이의 값으로 표준화하였다.

$$\begin{matrix} \text{Climate exposure,} \\ \text{Sensitivity,} \\ \text{Adaptive Capacity Index} \end{matrix} = \frac{\sum_n (w_j \times p_{ij})}{\text{Number of Variables}} \quad (6)$$

4. 폭염취약지역 유형화 및 검증

본 연구는 가장 대표적인 비계층적 군집분석 기법인 K-means 분석기법을 적용하여 서울시 행정동을 유형화하였다. 비계층적 군집분석(non-hierarchical cluster analysis)은 사전에 k개의 군집 수를 정하고 각 데이터를 군집에 배정하는 방식으로(Xu and Wunsch, 2005), 계산 시간이 짧고 대용량 데이터 분석에 유리하기 때문에 여러 연구에서 사용되고 있다.

군집분석 과정에서 군집의 수를 정하는 것은 중요한 결정 사항이다. 그러나 적절한 군집 개수 설정에 대한 명확한 기준이 없어 연구자의 판단에 따라 차이를 보일 수 있다. 본 연구는 이처럼 군집 개수 선정 시 연구자의 주관이 개입되는 것을 최대한 방지하고자 실루엣 분석(silhouette analysis)과 엘보우 분석(elbow method)을 통해 최적의 군집 수(k)를 도출하였다. 먼저 실루엣 분석은 군집 내 거리와 군집 간 거리를 하나의 지표로 만들어 확

인하는 방법이다(Rousseeuw, 1987). 실루엣 지수는 -1에서 1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 군집결과가 타당하다. 다음으로 엘보우 분석(elbow method)은 군집 수에 따른 군집 내 총 제곱합(within-cluster sum of squares, WCSS)을 그래프를 통해 확인하고, 그래프의 기울기가 급격하게 변하는 지점(elbow point)을 최적의 군집 수로 판단하는 기법이다. 본 연구는 이와 같은 방법들을 통해 최적의 군집 수(k)를 도출한 후 K-means 군집분석을 수행하여 서울시를 폭염 취약성에 따라 유형화하였다.

이후 본 연구는 군집 간 세부변수에 유의미한 차이가 있는지를 검증하고자 분산분석(analysis of variance, ANOVA)을 추가로 수행하였다. 분산분석은 분산의 차이를 이용하여 3개 이상의 집단 간 평균 차이를 검증하는 통계기법으로, 총 분산을 집단 내 분산(within-group)과 집단 간 분산(between-group)으로 나누어 그들 간의 비율 분석을 통해 집단 간의 차이를 검증하는 통계 기법이다(채구목, 2010).

IV. 분석결과

〈그림 5-a〉는 최적의 군집 수를 선정하기 위해 군집 수 3개부터 10개까지의 실루엣 및 엘보우 지수를 계산한 결과이다. 군집 수가 3개일 때 실루엣 지수가 가장 높았으며, 엘보우 그래프의 기울기도 가장 급격한 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 서울시 392개의 행정동을 3개의 군집으로 구분한 결과는 〈그림 5-b〉와 같으

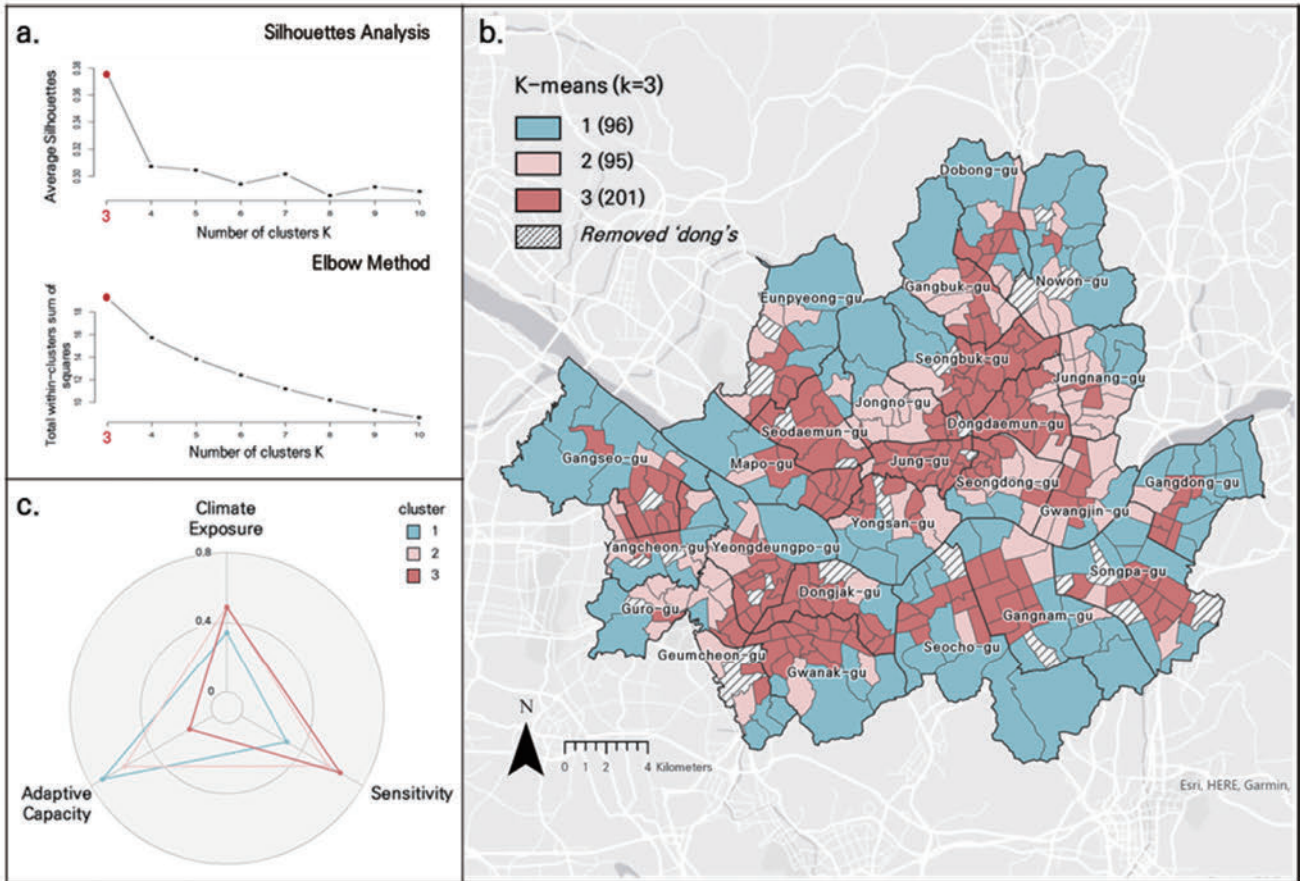


Figure 5. a) Result of silhouettes and elbow indices (k=3~10), b) Result of K-means clustering analysis (k=3), c) Vulnerability index radar chart by cluster

며, <그림 5-c>를 통해 군집 간 폭염 취약성 지수의 차이를 전체적으로 파악할 수 있다. 본 연구에서는 군집 간 세부변수에 유의미한 차이를 검증하고자 분산분석을 추가로 수행하였다. 그 결과, 인구당 무더위쉼터 개소 수를 제외한 16개의 세부변수에서 군집 간 차이가 유의한 것으로 나타났다. 분석결과는 <표 2>에 제시하였으며, <그림 6>의 박스플롯(boxplot)을 통해 시각적으로 확인할 수 있다.

각 군집별 특징을 살펴본 결과는 다음과 같다. 먼저 군집1에 속한 행정동은 96개로 나타났다. 군집1 유형은 세 군집 중 기후노출(0.3452) 및 민감도(0.3013)가 가장 낮고 적응능력(0.7264)은 가장 높은 군집으로 나타났다. 주로 서울시 외곽지역 및 한강 수계 주변을 따라 분포하며, 구체적으로 한강 이북의 노원구 일대와 한강 이남 지역의 강남구, 강동구, 노원구, 서초구 일대가 해당한다. <표 3>를 통해 제시된 군집 간 폭염 취약성 부분별 상·하위 5개의 행정동을 살펴보면, 노원구 중계1동, 강동구 명일2동, 서대문구 홍제2동, 노원구 상계1동, 구로구 오류2동 순으로 녹지 인근에 위치한 행정동에서 낮은 기후노출 지수를 보였다. 민감도는 송파구 위례동, 오류동, 서초구 반포2동, 반포본동 등 강남권 지역의 민감도가 가장 낮은 것으로 조사되었다. 다음으로 적응능력 지수는 강북구 우이동, 노원구 상계3·4동, 노원구 공릉2동 등 서울시 경계와 인접한 행정동에서 높게 나타났다. 이때 전체 행정

동 중 가장 낮은 민감도 정도를 보이는 강동구 둔촌1동과 가장 높은 적응능력 정도를 보이는 강북구 우이동이 군집1에 포함된 것을 확인할 수 있다. <그림 6>을 통해 군집 간 세부변수 차이를 살펴본 결과, 군집1의 기후노출 부문 중 열대야일수가 다른 군집에 비해 낮은 행정동이 다수 속해 있음을 알 수 있다. 또한, 민감도 부문 중 노후 단독주택 비율, 불투수면적 비율, 인구밀도 등 도시 환경이 상대적으로 덜 취약하고, 적응능력 부문에서는 공원 및 녹지면적이 월등히 높은 반면, 보건의료체계의 접근성은 가장 낮은 것을 확인하였다.

군집2에는 총 95개의 행정동이 속해 있다. 군집2의 경우 기후노출(0.4967), 민감도(0.5729), 적응능력(0.5819)이 모두 높은 편으로 나타났으며, 특히 기후노출이 세 군집 중 가장 높게 도출되었다. 군집2 유형은 구로구, 강북구, 종로구, 중랑구 일대에 분포하고 있다. 구체적으로는 전체 행정동 중 가장 높은 기후노출 지수를 보이는 구로구 구로5동과 종로구 무악동, 삼청동, 청운효자동, 영등포구 문래동이 폭염에 많이 노출된 지역으로 나타났으며, 용산구 보광동, 노원구 상계5동, 강북구 삼양동, 중랑구 중화2동 및 면목2동 등의 민감도 지수가 높은 것으로 조사되었다. 적응능력의 경우 높은 기후노출 정도를 보였던 종로구 삼청동 및 청운효자동과 강북구의 인수동, 수유1동 등에서 높게 도출되었다. 군집2 유형은 공원 및 녹지가 어느 정도 조성된 지역임에도 불구하고

Table 3. Top and Bottom 5 'dong's by cluster vulnerability index

Category	Climate exposure		Sensitivity		Adaptive capacity	
	Top 5 'dong's	Bottom 5 'dong's	Top 5 'dong's	Bottom 5 'dong's	Top 5 'dong's	Bottom 5 'dong's
Cluster 1 (n=96)	Ichon 2-dong (0.583)	Junggye 1-dong (0.008)	Siheung 5-dong (0.616)	Dunchon 1-dong (0.000)	Ui-dong (1.000)	Daechi 2-dong (0.273)
	Oksu-dong (0.556)	Myeongil 2-dong (0.077)	Jeongneung 3-dong (0.537)	Wirye-dong (0.031)	Sanggye 3, 4-dong (0.958)	Jamsil 4-dong (0.358)
	Hapjeong-dong (0.556)	Hongje 2-dong (0.112)	Hongseon 1-dong (0.528)	Oryun-dong (0.050)	Gongneung 2-dong (0.956)	Mok 5-dong (0.424)
	Banpobon-dong (0.552)	Sanggye 1-dong (0.119)	Mangubon-dong (0.525)	Banpo 2-dong (0.071)	Jingwandong (0.954)	Wirye-dong (0.426)
	Mok 1-dong (0.551)	Oryu 2-dong (0.147)	Nokbeon-dong (0.507)	Banpobon-dong (0.076)	Gonghang-dong (0.949)	Seocho 3-dong (0.431)
Cluster 2 (n=95)	Guro 5-dong (1.000)	Cheonyeon-dong (0.193)	Bogwang-dong (0.882)	Cheongdam-dong (0.287)	Samcheong-dong (0.968)	Samjeon-dong (0.367)
	Muak-dong (0.871)	Samyang-dong (0.211)	Sanggye 5-dong (0.843)	Sinjeong 6-dong (0.316)	Insu-dong (0.845)	Beon 3-dong (0.375)
	Samcheong-dong (0.850)	Beon 3-dong (0.228)	Samyang-dong (0.824)	Samseong 1-dong (0.335)	Suyu 1-dong (0.838)	Chang 2-dong (0.378)
	Cheongunhyoja-dong (0.822)	Muk 1-dong (0.244)	Junghwa 2-dong (0.797)	Dangsan 2-dong (0.356)	Myeonmok 7-dong (0.817)	Hwigyeong 2-dong (0.385)
	Mullae-dong (0.790)	Bulgwang 2-dong (0.270)	Myeonmok 2-dong (0.788)	Seocho 1-dong (0.403)	Cheongunhyoja-dong (0.812)	Guro 5-dong (0.396)
Cluster 3 (n=201)	Changsin 3-dong (0.889)	Yeonhui-dong (0.000)	Changsin 2-dong (1.000)	Daechi 1-dong (0.187)	Banghak 1-dong (0.394)	Banpo 1-dong (0.000)
	Hwagok 2-dong (0.857)	Bukgajwa 1-dong (0.104)	Noryangjin 2-dong (0.938)	Sogong-dong (0.239)	Noryangjin 2-dong (0.370)	Bangbaebon-dong (0.015)
	Geumho 1-ga-dong (0.827)	Sadang 5-dong (0.156)	Songcheon-dong (0.935)	Seocho 2-dong (0.283)	Junggok 3-dong (0.356)	Bangi 2-dong (0.017)
	Changsin 2-dong (0.806)	Donam 2-dong (0.177)	Jangwi 2-dong (0.918)	Banpo 4-dong (0.308)	Ssangmun 1-dong (0.347)	Seokchon-dong (0.017)
	Sangdo 2-dong (0.800)	Samgaksan-dong (0.207)	Garibong-dong (0.908)	Namgajwa 1-dong (0.326)	Gaebong 2-dong (0.345)	Seocho 4-dong (0.021)

하고 유독 다른 군집에 비해 기후노출이 높게 나타난 것이 특징이다. <그림 6>을 보면, 열대야일수도 높지만 유독 폭염일수가 높은 행정동이 많이 속한 것을 확인할 수 있다. 또한, 민감도 부문에서 어린이 비율을 제외한 모든 폭염 취약계층의 비율이 상당히 높은 것으로 나타났다. 도시환경 취약요인도 대부분 군집1에 비해 높은 수치를 보이고 있었는데, 그중에서도 노후 단독주택 비율이 세 군집 중 가장 높은 것으로 조사되었다. 적응능력 부문에서는 다른 두 집단에 비해 높은 1인당 사회복지 예산 등의 제도적 역량을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

군집3에 해당하는 행정동은 201개로, 가장 많은 행정동이 속한 군집으로 확인되었다. 이 군집은 기후노출(0.4893)과 민감도(0.6520)는 높고, 적응능력(0.1552)은 가장 낮은 것으로 나타났다. 세 군집 중 가장 폭염에 취약한 지역으로 중구, 동작구, 성북구, 동대문구, 서대문구 등 한강 이북 지역 일대가 이에 해당한다. 특히 중구는 중림동, 서대문구는 천연동을 제외한 나머지 행

정동이 전부 군집3 유형으로 분석되었다. 구체적으로 군집3의 기후노출은 종로구 창신3동 및 창신2동, 강서구 화곡2동, 성동구 금호1가동, 동작구 상도2동에서 높게 나타났다. 민감도 요인은 종로구 창신2동, 동작구 노량진2동, 강북구 송천동 등에서 높게 도출되었으며, 적응능력은 서초구 일대 반포1동, 방배본동, 서초4동과 송파구 일부 행정동 방이2동, 석촌동 등 한강 이남에서 낮게 도출되었다. <그림 6>을 보면 군집3 유형에서 열대야에 노출되는 행정동이 많은 것을 알 수 있다. 민감도는 전반적으로 취약한 양상을 보였는데, 특히 높은 불투수면적 비율과 인구밀도 등 도시환경요인이 두드러지게 취약한 것으로 나타났다. 한편, 군집3에서 관찰할 수 있는 특이점은 군집3의 보건의료시설과의 접근성이 다른 두 집단에 비해 우수하게 나타났음에도 불구하고 적응능력 지수가 상당히 낮게 도출되었다는 점이다. 이는 0에 수렴할 정도로 부족한 공원 및 녹지면적의 영향이 크게 작용한 것으로 볼 수 있다.

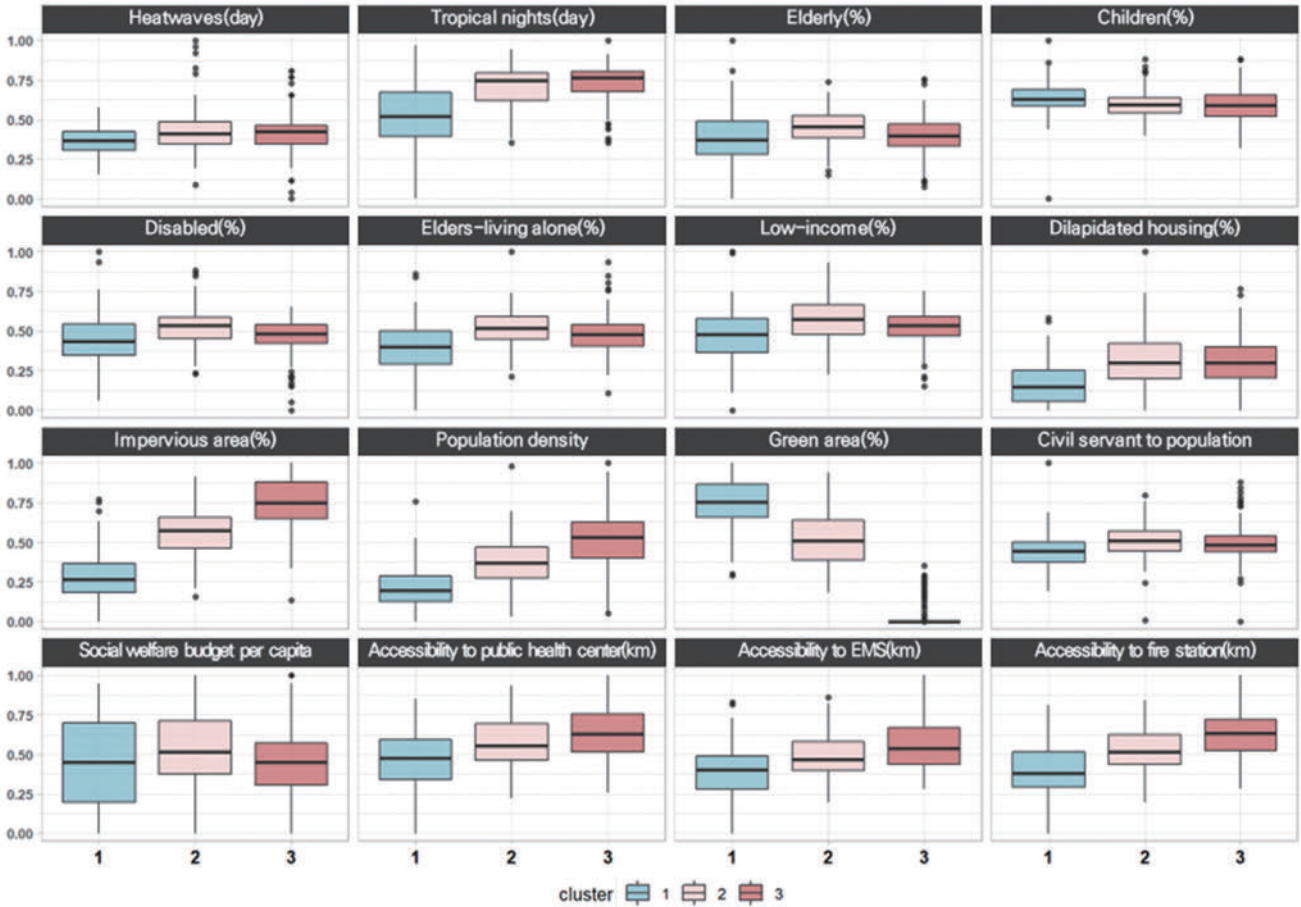


Figure 6. Boxplot of ANOVA result

V. 논의 및 결론

서울시는 폭염종합대책에 따라 폭염전달체계 수립, 취약계층 보호서비스, 폭염 저감시설 관리, 응급의료기관 연계 등의 대응책을 마련하고 있다. 이에 따라 각 자치구는 폭염에 대응하기 위한 관련 계획을 수립·이행하며, 하위 동 단위 역시 이러한 계획에 따라 폭염에 대응하고 있다(엄지연·윤수진, 2015). 그러나 자치구 단위에서 이루어지는 폭염 대책은 미시적 생활권인 동 단위 지역 특색을 반영하지 못한다는 한계를 갖는다. 동일 자치구에 속한 행정동이라 하더라도 동별 사회경제적, 물리적, 제도적 환경이 모두 다르므로, 이들을 엄밀한 분석을 통해 유형화하고 각 유형별 대응 전략을 검토하는 과정이 필요하다. 본 연구는 이를 위해 IoT 기반의 S-DoT 도시데이터 센서를 이용하여 서울시 행정동을 대상으로 폭염 취약성 평가를 수행하였다.

먼저 군집1은 폭염에 취약한 기후노출과 민감도 요인은 가장 낮으면서 적응능력은 가장 큰 이상적인 집단으로 나타났다. 이는 군집1 유형이 서울시 외곽지역과 한강 인접지역에 분포하여 녹지가 풍부하게 조성되었기 때문에 열 축적 완화에 영향을 미친 것으로 분석된다. 이를 통해 선행연구(김은영 외, 2012; 조항문·이윤혜, 2018; 조혜진·임지현, 2011; Chow et al., 2012)의 결과와

마찬가지로, 공원 및 녹지면적 비율이 도시 고온 현상 완화에 중요한 요소임을 확인할 수 있다. 또한 군집1의 경우 도시환경요인이 상대적으로 취약하지 않은 것으로 드러났다. 이는 상대적으로 서울시 외곽지역이 도심부에 비해 개발이 더디고, 불투수면적 비율과 인구밀도가 낮은 것이 반영된 결과라고 판단하였다. 한편 군집1은 폭염 취약성을 심화시키는 요소들이 상대적으로 적은 것에 비해, 생물학적 취약요인 중 어린이 인구 비율이 다른 두 집단에 비해 높은 것으로 나타났다. 아동은 재난 사고에 노출되었을 때 자발적인 대처가 어려운 계층이므로(배민기 외, 2020; 채여라, 2021) 이들 지역은 여름철 어린이 놀이시설 안전 점검 강화, 폭염 발생에 따른 행동요령 교육 등에 중의를 기울일 필요가 있다.

군집2는 폭염 노출 가능성이 크고 폭염에 취약한 요소가 많은 지역임에도, 적절한 수준의 대처능력을 갖춘 곳이다. 특히 군집2 유형은 공원 등 녹지가 어느 정도 조성되어 있음에도 폭염일수가 높은 행정동이 다른 두 집단에 비해 많은 것으로 나타났다. 이는 도시 기온 상승을 야기하는 높은 불투수면적 비율이나 인구밀도 등이 기온 상승에 영향을 미친 것으로 판단된다. 특히 군집2는 노후 단독주택 비율이 세 군집 중 가장 높게 도출되었는데, 노후 단독주택 밀집 지역의 경우, 열 발산에 취약한 좁은 골목길로 조성되어 있어(배용규·최준혁, 2021) 고온 현상에 영향을 미쳤을 것

으로 예상된다. 한편, 군집2는 상대적으로 높은 비율의 폭염 취약 계층이 거주하는 지역임에도 제도적 역량이 상대적으로 우수한 지역인 것으로 확인되었으며, 보건의료시설과의 접근성도 양호했다. 군집2 지역은 폭염에 쉽게 노출되면서 취약계층 비율이 높은 지역이기 때문에 우수한 제도적 요인을 활용하여 폭염 취약계층 보호에 노력을 기울여야 할 것이다.

군집3은 폭염에 자주 노출됨과 동시에 취약요인도 많아 유의가 필요한 지역이지만, 이에 대처할 만한 능력이 부족한 지역으로서 폭염에 가장 취약할 것으로 예상되는 지역이다. 기후노출 변수 중에서도 열대야일수가 다른 두 군집에 비해 높게 도출되었는데, 이는 상당수의 지역이 불투수성 표면으로 덮여 있어 녹지가 현저히 부족하고, 인구밀도가 높은 지역이기 때문에 열대야에 자주 노출된 것이라 판단된다. 실제 군집3 행정동 201개 중 165개(약 82%)의 행정동에는 공원 및 녹지가 없는 것으로 확인되었는데, 이는 군집3에 속한 행정동에 기온 저감 요인이 상당히 부족하다는 것을 시사한다. 한편 군집3의 세부변수들을 검토한 결과, 보건의료시설과의 접근성이 다른 두 집단에 비해 우수하게 나타났음에도, 상당히 낮은 적응능력 지수가 확인되었다. 이는 서울시 내 보건의료자원이 균등하게 배치되어 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 나타내며, 낮은 엔트로피 기온치가 이를 증명한다. 그럼에도 폭염에 가장 민감할 것으로 예상되는 군집3 유형이 보건의료 시설과 가장 가깝다는 것은 열사병, 열경련 등 온열질환에 빠르게 대처할 수 있는 역량을 갖추었다는 것을 의미한다.

본 연구의 취약성 평가 결과가 실질적인 대안으로 이어지기 위해서는 지역 수준의 차이를 반영한 폭염 대응정책이 이행되어야 함을 시사한다. 본 연구의 분석결과에 따른 정책적 제언은 다음과 같다. 첫째, 각 지자체마다 폭염 취약성 평가를 수행함으로써 하부 행정기관이 치한 취약성을 파악하고, 폭염 취약지역을 세밀하게 규명하고 미시적인 정책 수립을 도모해야 한다. 기후변화 취약성 평가는 그 결과를 통해 기후변화가 유발하는 각종 재해에 대한 적응능력을 향상시키는데 그 의의가 있다. 그러므로 무엇보다 각 지역의 이해관계자가 폭염에 취약한 지역의 특성을 파악하고 이를 토대로 미시적인 정책을 수립하는 것이 중요하다(Fritzsche et al., 2014). 분석결과를 통해 동일한 자치구에 속한 행정동일지라도 각 행정동이 갖춘 특성에 따라 기후노출(climate exposure), 민감도(sensitivity), 적응능력(adaptive capacity) 등 폭염 취약성을 구성하는 요인에 차이가 있음을 밝혀냈다. 예컨대 이를 바탕으로 자치구마다 무더위쉼터, 쿨링포그, 그늘막 등 폭염 저감시설 설치 계획 시 폭염에 더 취약한 행정동을 선별함으로써 효율적인 폭염 적응 증진에 기여할 수 있을 것이다.

둘째, 서울시 행정동별 공원 및 녹지면적의 편차를 줄이기 위한 노력이 필요하다. 분석 결과, 서울시 외곽 및 한강 인근에 분포한 군집1 지역의 풍부한 공원 및 녹지가 폭염 취약성 완화에 큰 영향을 미쳤다는 것이 확인되었다. 반면에 폭염에 가장 취약했던

군집3의 경우, 대부분이 불투수성 표면으로 덮여 있고, 대다수 행정동에 공원 및 녹지가 조성되지 않은 것을 확인하였다. 이는 서울시 내 공원 및 녹지의 지역적 불균형이 심각한 수준이라는 것을 의미하며, 여전히 서울시의 공원 및 녹지 서비스 소외현상이 해소되지 않았음을 방증한다. 군집3 유형에 해당하는 행정동은 공원화 우선 지역으로 지정하여 소공원 조성 등 녹지 인프라의 확충을 통해 국지적으로 온도를 저감시키기 위한 노력이 시급하다. 이때 면적 확보가 요구되는 공원 조성이 어려운 경우, 건물 외벽 녹화 및 가로수 확대 등을 통해 녹피율을 높이는 방향 또한 검토되어야 한다. 녹지가 서울시 폭염에 미치는 영향이 지대한 것으로 드러난 만큼, 녹지면적의 보전과 확충에 관하여 서울시 도시계획의 핵심사항으로 다뤄져야 할 것이다.

셋째, 노후 단독주택이 밀집한 지역을 대상으로 온도 저감을 위한 대책 마련이 필요하다. 단독주택 밀집 지역은 아파트 단지에 비해 녹지 및 오픈스페이스가 부족하고, 높은 밀도의 골목길과 협소한 건물 간격으로 인해 열 발산이 어려운 구조이다(배응규·최준혁, 2021). 또한 거주자의 대부분이 고령층 등 취약계층에 해당하기 때문에 폭염 재난에 유의해야 한다. 본 연구의 분석 결과, 군집2와 군집3 유형에서 노후 단독주택 비율이 높고, 폭염 노출 정도가 높은 것으로 나타났으므로 이들 지역에 대한 특별한 관리가 요구된다. 서울시는 폭염 발생 시 소방차 등을 이용한 골목길 살수 작업을 시행하고 있다. 이때 상대적으로 폭염에 민감한 노후 단독주택 밀집지역이 조성되어 있는 군집2 및 군집3을 중심으로 시행될 필요가 있을 것이다. 또한, 허드렛물을 이용한 내 집 앞 물뿌리기 캠페인 등 기온 상승을 억제하기 위한 미시적인 정책 역시 검토되어야 한다.

넷째, 지역별 폭염 취약계층 맞춤형 대응책을 마련할 필요가 있다. 본 연구의 분석 결과, 같은 자치구에 속해 있다 하더라도 취약계층의 거주비율에 따라 폭염 취약성의 정도는 달리 나타났다. 특히 군집2 유형으로 구성된 행정동에서 폭염 취약계층이 많이 거주하고 있으며, 동시에 이 지역의 기후노출 정도가 가장 심각한 것으로 나타났다. 독거노인과 저소득층 비율이 높았는데 엄지연·윤수진(2015)의 연구에 따르면 이들은 폭염으로 인한 건강 문제와 더불어 열악한 주거환경 및 전기요금에 대한 부담 등의 어려움을 함께 겪고 있는 것으로 나타났다. 따라서 현재 시행 중인 냉방기기 제공 정책과 함께 에너지 바우처 등 경제적 부담을 줄여줄 수 있는 방안을 고민할 필요가 있다. 한편 군집1의 경우 어린이 비율이 높은 지역으로 나타났다. 그러나 현재 폭염 취약계층 돌봄 정책은 고령층과 저소득층에 집중되어 있다. 이들 이외에 어린이, 장애인 등 폭염에 취약한 계층이 소외되지 않도록 지역 현황에 따른 적절한 대응책 마련이 이뤄져야 한다.

한편, 본 연구는 기존에 활용되지 않았던 IoT 기반의 스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT) 기상자료를 이용하여 서울시 폭염 취약성을 최초로 진단했다는 점에서 의의를 갖는다. 현재 국가기

상관측장비의 수와 분포는 시민들이 현장에서 체감하는 온도를 충분히 측정하지 못한다는 한계가 있으나, S-DoT은 서울시 내 도시공간의 국지적 기후 차이를 감지할 수 있어(박해경, 2021) 폭염 취약성 개선을 위한 장소 중심적(place-based approach) 정책 개발이 가능하다. 이러한 도시데이터 센서는 가로등, CCTV 지주 등 기존 인프라에 쉽게 설치 가능하기 때문에 노후 단독주택 밀집지역, 고밀도 상업지역, 취약계층 밀집지역 등 정책적 수요가 높은 공간의 기상자료를 큰 비용 없이 구축하는 데 유리하다. 이처럼 정밀한 센서기반의 도시 데이터 구축 및 활용을 통해 향후 폭염 및 도시열섬 대응 전략 수립이 효과적으로 이루어질 수 있을 것이라 기대한다.

한편, 서울시 도시데이터 센서(S-DoT) 자료는 별도의 가공과정을 거치지 않은 집계 데이터가 그대로 제공되고 있기 때문에, 이를 활용하기 위해서는 데이터를 정밀하게 검토하고 이상치를 판별할 수 있는 연구자의 역량이 요구된다. 또한 대용량 자료를 분석하기 위한 컴퓨팅 파워와 관련 기술 역시 갖추어져야 한다. 본 연구에서는 데이터 정제 중 발견된 다양한 이슈를 처리하는 과정에서 시간적 범위인 2021년 여름철(6~8월) 79일의 기상자료만을 분석대상으로 하였으며, 서울시 424개 행정동 중 392개의 행정동을 분석하였다. 향후 S-DoT을 비롯한 도시 데이터 센서 인프라의 고도화 및 관리 시스템 구축 등을 통해 데이터 오류를 정비하고 품질이 개선된다면, 서울시 전역의 기상 현상을 더욱 세밀하게 분석할 수 있을 것이다. 또한 현재 다양한 채널을 통해 구축되고 있는 미시적 공간단위의 사회경제 자료가 결합된다면, 향후 보다 정밀한 취약지역 규명도 가능할 것으로 기대된다.

가치 변수는 생활 인프라 접근성에 해당하는 지표로서 격자의 중심점으로부터 가장 가까운 생활 인프라까지의 도로상 최단 거리를 측정된 것임. 본 연구는 격자단위의 국토지표 데이터를 연구의 분석단위인 행정동 단위로 변환하였음. 이를 위해 벡터(vector) 형태로 제공되는 국토지표 데이터를 래스터(raster) 형태로 바뀐 후, GIS의 Zonal Statistics as Table 툴(tool)을 활용하여 단일 행정동에 속한 다수의 격자에 대한 평균값을 해당 행정동으로 할당해주는 과정을 거침.

- 주6. 본 연구의 시간적 범위인 2021년을 기준으로 서울시 행정구역은 총 425개로 구성되어 있으나, 서울시 행정경계 데이터(shp)는 '구로구 향동'을 제외한 424개의 행정동으로 구축되어 있음. '구로구 향동'은 2020년 1월, 구로구 오류2동에서 분동되었으며 본 연구는 원활한 분석을 위해 향동에 할당된 지점값을 오류2동에 통합하여 분석을 진행함.
- 주7. 424개의 행정동 중 제거된 32개의 행정동은 아래와 같음.

종로구 송인1동	노원구 상계9동	강서구 화곡본동	서초구 잠원동
종로구 송인2동	은평구 갈현2동	구로구 오류1동	강남구 개포1동
중구 신당5동	은평구 신사1동	금천구 독산1동	송파구 거여2동
용산구 남영동	은평구 신사2동	금천구 독산2동	송파구 마천1동
성북구 정릉2동	서대문구 남가좌2동	금천구 독산3동	송파구 마천2동
노원구 월계2동	서대문구 북아현동	영등포구 신길4동	송파구 가락1동
노원구 하계1동	양천구 신월6동	영등포구 신길5동	송파구 잠실7동
노원구 하계2동	양천구 신정1동	동작구 노량진1동	송파구 잠실3동

인용문헌 References

- 주1. 6S는 서울시 스마트도시 인프라의 여섯 가지 구성 요소인 S-Net, S-Data, S-Brain, S-Map, S-Security과 S-DoT을 일컫음.
- 주2. 2008년 6월부터 시행된 폭염특보제는 일 최고기온을 기준으로 33도 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 폭염주의보를, 35도 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 폭염경보를 발령하였음. 그러나 2020년 5월, 지역별 습도 차이에 따라 달라지는 체감온도를 반영하기 위해 폭염특보 발령 기준을 일 최고온도에서 일 최고 체감온도로 변경함.
- 주3. 체감온도 산출식은 다음과 같음.
 체감온도(Sensible temperature)

$$= -0.2442 + 0.55399 Tw + 0.45535 Ta - 0.0022 Tw^2 + 0.00278 TwTa + 3.5$$

 * Tw(습구온도)

$$= Ta ATAN[0.151977(RH + 8.313659)^{1/2}] + ATAN(Ta + RH) - ATAN(RH - 1.67633) + 0.00391838 RH^{3/2} ATAN(0.023101 RH) - 4.686035$$

 ** Ta: 기온(℃), Tw: 습구온도, RH: 상대습도(%)
- 주4. 어린이 인구는 6세 미만의 미취학 아동을 의미하나, 자료구축을 위해 '5세 미만 어린이 인구 수' 지표로 대응함.
- 주5. 국토정보플랫폼은 국토통계지도 서비스를 통해 인구, 건물, 토지이용, 생활인프라 접근성 등에 관한 데이터를 500m 격자 단위로 구축하여 소지역 단위 분석에 적합한 데이터를 생산하고 있음. 본 연구에서 활용한 세

1. 강정은·이명진, 2012. "퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수 취약성 평가 - 서울시 사례를 중심으로", 「한국지리정보학회지」, 15(3): 119-136.
 Kang, J.E. and Lee, M.J., 2012. "Assessment of Flood Vulnerability to Climate Change Using Fuzzy Model and GIS in Seoul", *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 15(3): 119-136.
2. 고재경, 2011. "지방자치단체 기후변화 취약성 유형 및 적응방안 연구: 경기도 사례를 중심으로", 「한국사회와 행정연구」, 22(2): 93-118.
 Koh, J.K., 2011. "A Study on Climate Change Vulnerability Types and Adaptation in Local Government: With Cases from Gyeonggi-Do", *Korean Society and Public Administration*, 22(2): 93-118.
3. 고재경·김희선, 2009. 「경기도 기후변화 취약성 평가 연구」, 수원: 경기연구원.
 Koh, J.K. and Kim, H.S., 2009. *A Study on Vulnerability Assessment to Climate Change in Gyeonggi-Do*, Suwon: Gyeonggi Research Institute

4. 구유성·김자은·김지숙·이성호, 2015. “폭염 취약성평가를 통한 도시의 적응능력 향상: 부산광역시를 중심으로”, 『한국지역개발학회지』, 27(5): 331-347.
Koo, Y.S., Kim, J.E., Kim, J.S., and Lee, S.H., 2015. “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): 331-347.
5. 구자용, 2014. “LANDSAT 8호 열적외선 영상과 AWS 자료를 이용한 지상 기온 분포도 제작”, 『한국지도학회지』, 14(1): 17-27.
Ku, C.Y., 2014. “Development of Land Surface Temperature Map Generation Method with Landsat 8 TIRS Imagery and Automatic Weather System Data”, *Journal of the Korean Cartographic Association*, 14(1): 17-27.
6. 권용석, 2018. “도시구조적 차원에서 바라본 대구 대도시 지역의 폭염 기증원인 추정과 해결과제”, 『국토연구』, 98: 23-35.
Kwon, Y.S., 2018. “Estimation and Countermeasure of the Heat Wave Cause of Daegu Metropolitan Basin from the Urban Structural Dimension”, *The Korea Spatial Planning Review*, 98: 23-35.
7. 김근한·정휘철, 2020. “지역 불평등을 고려한 기후 정의 평가: 폭염을 중심으로”, 『한국기후변화학회지』, 11(6-1): 621-628.
Kim, G.H. and Jung, H.C., 2020. “Climate Justice Assessment Considering Regional Inequality: A Focus on Heatwave”, *Journal of Climate Change Research*, 11(6-1): 621-628.
8. 김기욱·박봉철·허종배·강지윤·이인재, 2020. “IPCC 기후변화 취약성 평가 체계를 적용한 부산지역 폭염 취약성 평가”, 『국토연구』, 104: 23-38.
Kim, K.W., Park, B.C., Heo, J.B., Kang, J.Y., and Lee, I.J., 2020. “Assessment of Heat Wave Vulnerability in Busan Using the IPCC Climate Change Vulnerability Assessment Framework”, *The Korea Spatial Planning Review*, 104: 23-38.
9. 김기중·안영수, 2017. “도시열섬 지역에 대한 정의 및 구분 방법론에 관한 비교연구”, 『지역연구』, 33(2): 47-59.
Kim, K.J. and An, Y.S., 2017. “An Empirical Study on the Definition and Classification Methodology of Urban Heat Island Areas”, *Journal of the Korean Regional Science Association*, 33(2): 47-59.
10. 김동욱·김지은·장초록·장문엽, 2021. “사회·경제적 인자를 고려한 우리나라의 폭염 취약성 평가”, 『한국방재학회논문집』, 21(5): 39-47.
Kim, D.W., Kim, J.E., Jang, C.R., and Jang, M.Y., 2021. “Assessment of Heatwave Vulnerability in Korea Considering Socio-economic Indices”, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 21(5): 39-47.
11. 김동현·송슬기, 2016. “도시 고온현상에서의 토지피복 유형과 체감온도 간 관계분석”, 『국토계획』, 51(1): 137-152.
Kim, D.H. and Song, S.K., 2016. “Analyzing the Relationships between Land Cover Type and Sensible Temperature in Urban Heat Wave”, *Journal of Korea Planning Association*, 51(1): 137-152.
12. 김동현·이수재·이명진·서혜정, 2013. 『기후변화 적응형 공간계획방법의 개발과 모의적용 연구 (1)』, 서울: 한국환경정책·평가연구원.
Kim, D.H., Lee, S.J., Lee, M.J., and Seo, H.J., 2013. *Spatial Planning Method and Applications for Climate Change Adaptation (1)*, Seoul: Korea Environment Institute.
13. 김은영·전성우·이정원·박용하·이동근, 2012. “서울시 기후변화 영향평가 및 적응대책 수립: 폭염영향을 중심으로”, 『환경영향평가』, 21(1): 71-80.
Kim, E.Y., Jeon, S.W., Lee, J.W., Park, Y.H., and Lee, D.K., 2012. “Local Adaptation Plan to Climate Change Impact in Seoul: Focused on Heat Wave Effects”, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 21(1): 71-80.
14. 남기표·김철희, 2013. “표준화 방법에 따른 기후변화 취약성 지수의 민감성 연구”, 『환경영향평가』, 22(6): 677-693.
Nam, K.P. and Kim, C.H., 2013. “Study on Sensitivity of Different Standardization Methods to Climate Change Vulnerability Index”, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(6): 677-693.
15. 박민호·김형규, 2021. “폭염 취약성이 수도권 청년 1인 가구 분포에 미치는 영향”, 『한국도시설계학회지 도시설계』, 22(3): 41-53.
Park, M.H. and Kim, H.K., 2021. “Effects of Heat Vulnerability on the Distribution of Young Single-person Households in the Seoul Metropolitan Area”, *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 22(3): 41-53.
16. 박해경, 2021. “도시 열섬 강도 분석을 위한 도시데이터 센서와 국가기상관측 간기온 및 공간해상도 비교 연구”, 『한국방재학회논문집』, 21(3): 39-48.
Park, H.K., 2021. “Comparison of Temperatures and Spatial Resolutions between Urban Sensors and National Weather Observations (ASOS, AWS) for Urban Heat Island Intensity Analysis”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 21(3): 39-48.
17. 배민기·김보은·이채연, 2020. “폭염 시 위험지역과 취약계층 거주지역 간의 공간관계 분석”, 『환경정책』, 28(3): 243-280.
Bae, M.K., Kim, B.E., and Lee, C.Y., 2020. “Analysis on the Spatial Relationship between the Residential Area of the Vulnerable Groups and the Hazardous Area during the Heat Wave”, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 28(3): 243-280.
18. 배용규·최준혁, 2021. “폭염기 저층주거지 골목길의 주민 체감온도 분포 특성 연구 -서울시 동작구 본동 일대를 대상으로-”, 『한국경관학회지』, 13(1): 46-69.
Bae, W.K. and Choe, J.H., 2021. “Distribution Characteristics of the Residents’ Sensible Temperature (ST) in the Low-rise Residential Alley -For the Area around Bon-dong, Dongjak-gu, Seoul, Korea-”, *Journal of the Korea Landscape Council*, 13(1): 46-69.
19. 신호성·이수형, 2014. “기후변화 건강 취약성 평가지표 개발”, 『환경정책연구』, 13(1): 69-93.
Shin, H.S. and Lee, S.H., 2014. “Development of a Climate Change Vulnerability Index on the Health Care Sector”, *Journal of Environmental Policy*, 13(1): 69-93.
20. 양희진·윤희연, 2020. “기후위험에 대비한 폭염 적응정책의 효과성 평가: 지역수준 건강영향평가 방법론의 적용”, 『국토계획』, 55(2): 101-110.
Yang, H.J. and Yoon, H.Y., 2020. “Evaluating the Effectiveness

- of Heat-Wave Adaptation Policies against Climate Risk: Application of Local-Level Health Impact Assessment”, *Journal of Korea Planning Association*, 55(2): 101-110.
21. 엄정희, 2016. “공간계획 활용을 위한 도시 열환경 취약성 평가 연구 - 서울시를 사례로”, 『한국조경학회지』, 44(4): 109-120.
Eum, J.H., 2016. “Vulnerability Assessment to Urban Thermal Environment for Spatial Planning - A Case Study of Seoul, Korea”, *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture*, 44(4): 109-120.
 22. 엄지연·윤수진, 2015. “저소득 노인계층에 대한 폭염대응대책 연구: 서울시 관악구를 중심으로”, 『공간과 사회』, 25(4): 317-342.
Eum, J.Y. and Yun, S.J., 2015. “A Study on the Heatwave Management Plan for Low-income Aged People”, *Space and Environment*, 25(4): 317-342.
 23. 원주성·민병하·김세용, 2020. “기후변화 취약성을 고려한 쇠퇴 도시 진단지표 산정 개선 연구 - 폭염재해 취약성을 중심으로”, 『한국생태환경건축학회 논문집』, 20(6): 147-158.
Won, J.S., Min, B.H., and Kim, S.Y., 2020. “The Improvement of Diagnostic Indicators for Decline Cities Considering the Vulnerabilities in Climate Change - Focusing on the Vulnerability of Heat Wave Disasters”, *KIEAE Journal*, 20(6): 147-158.
 24. 유가영·김인애, 2008. 「기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안」, 한국환경정책·평가연구원.
Yoo, G.Y. and Kim, I.H., 2008. *Development and Application of a Climate Change Vulnerability Index*, Korea Environment Institute.
 25. 이나영·조용성·임재영, 2014. “폭염으로 인한 기후변화 취약계층의 사망률 변화 분석: 서울을 중심으로”, 『보건사회연구』, 34(1): 456-484.
Lee, N.Y., Cho, Y.S., and Lim, J.Y., 2014. “Effect of Climate Change on Mortality Rate Analysis of Vulnerable Populations”, *Health and Social Welfare Review*, 34(1): 456-484.
 26. 이선미·최영재·이재웅, 2020. “엔트로피 가중치 산정방법을 활용한 도시지역 홍수취약성 평가”, 『한국방재학회논문집』, 20(6): 389-397.
Lee, S.M., Choi, Y.J., and Yi, J.E., 2020. “Urban Flood Vulnerability Assessment Using the Entropy Weight Method”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 20(6): 389-397.
 27. 이원정·강재은·김유근, 2013. “환경보건적 요소가 도시 내 폭염 취약성 평가 결과에 미치는 영향 분석”, 『한국환경보건학회지』, 39(6): 492-504.
Lee, W.J., Kang, J.E., and Kim, Y.K., 2013. “The Impact of Environmental Health Factors on Extreme-heat Vulnerability Assessment in a Metropolitan City”, *Journal of Environmental Health Sciences*, 39(6): 492-504.
 28. 이상혁·강정은, 배현주, 윤동근, 2015. “엔트로피 가중치를 활용한 대기오염 취약성 평가: 오존을 중심으로”, 『한국지역지리학회지』, 21(4): 751-763.
Lee, S.H., Kang, J.E., Bae, H.J., and Yoon, D.K., 2015. “Vulnerability Assessment of the Air Pollution Using Entropy Weights: Focused on Ozone”, *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 21(4): 751-763.
 29. 제민희·정승현, 2018. “토지이용 유형별 도시열섬강도 분석”, 『한국콘텐츠학회논문지』, 18(11): 1-12.
 - Je, M.H. and Jung, S.H., 2018. “Urban Heat Island Intensity Analysis by Landuse Types”, *The Journal of the Korea Contents Association*, 18(11): 1-12.
 30. 조항문·이윤혜, 2018. 「서울시 폭염 대응력 향상 방안」, 서울연구원.
Cho, H.M. and Lee, Y.H., 2018. *A Study on the Improvement of Response to Heat Wave in Seoul*, The Seoul Institute.
 31. 조혜진·임지현, 2011. “도시도로 녹지의 도로 표면온도 저감 효과에 관한 연구”, 『한국조경학회지』, 39(3): 107-116.
Cho, H.J. and Lim, J.H., 2011. “The Effect of Urban Road Vegetation on a Decrease of Road Surface Temperature”, *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture*, 39(3): 107-116.
 32. 채구목, 2010. 「사회과학 통계분석」, 파주: 양서원.
Chai, G.M., 2010. *Statistics in Social Sciences*, Paju: Yangseowon.
 33. 채여라, 2021. 「폭염 분야 재해영향모델 개발」, 세종: 한국환경정책·평가연구원.
Chae, Y.R., 2021. *Development of Disaster Impact Model in Heat Wave Field*, Sejong: Korea Environment Institute.
 34. 채여라·이승준·전호철·박종철·안윤정·이주형·최상희, 2017. 「국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가: 체감형 적응을 위한 데이터 기반 기후변화 리스크 대응체계 구축」, 세종: 한국환경정책·평가연구원.
Chae, Y.R., Lee, S.J., Jeon, H.C., Park, J.C., Ahn, Y.J., Lee, J.H., and Choi, S.H., 2017. *Evidence-based Climate Change Risk Management Framework for Customized Adaptation*, Sejong: Korea Environment Institute.
 35. 최예슬·김재원·임업, 2018. “서울시 폭염 취약지역의 공간적 패턴 및 적응능력취약지역 분석”, 『국토계획』, 53(7): 87-107.
Choi, Y.S., Kim, J.W., and Lim, U., 2018. “An Analysis on the Spatial Patterns of Heat Wave Vulnerability Areas and Adaptive Capacity Vulnerable Areas in Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*, 53(7): 87-107.
 36. 환경부, 2020. 「한국 기후변화 평가보고서 2020 -기후변화 영향 및 적응」, 세종.
Ministry of Environment, 2020. *Korean Climate Change Assessment Report 2020*, Sejong.
 37. 황혜선·변병실, 2011. “기후변화 취약성 평가 지표의 개발: 서울시를 중심으로”, 『환경정책』, 19(4): 93-119.
Hwang, H.S. and Byun, B.S., 2011. “Building Vulnerability Index on Climate Change: Focused on Seoul Metropolitan City”, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 19(4): 93-119.
 38. 황희수·강정은, 2020. “위성영상과 민간자동관측시스템 자료를 활용한 도시열섬과 도시오염의 공간 분포 특성 -부산광역시를 대상으로», 『한국지리정보학회지』, 23(3): 100-119.
Hwang, H.S. and Kang, J.E., 2020. “Spatial Distribution of Urban Heat and Pollution Islands using Remote Sensing and Private Automated Meteorological Observation System Data -Focused on Busan Metropolitan City, Korea”, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 23(3): 100-119.
 39. Adger, W.N. and Kelly, P.M., 1999. “Social Vulnerability to Climate Change and the Architecture of Entitlements”, *Mit-*

- igation and Adaptation Strategies for Global Change, 4(3): 253-266.
40. Barreca, A.I., 2012. "Climate Change, Humidity, and Mortality in the United States", *Journal of Environmental Economics and Management*, 63(1): 19-34.
 41. Basarin, B., Lukić, T., and Matzarakis, A., 2020. "Review of Biometeorology of Heatwaves and Warm Extremes in Europe", *Atmosphere*, 11(12): 1276.
 42. Bouchama, A., Dehbi, M., Mohamed, G., Matthies, F., Shoukri, M., and Menne, B., 2007. "Prognostic Factors in Heat Wave-related Deaths: A Meta-analysis", *Archives of Internal Medicine*, 167(20): 2170-2176.
 43. Buzási, A., 2022. "Comparative Assessment of Heatwave Vulnerability Factors for the Districts of Budapest, Hungary", *Urban Climate*, 42: 101127.
 44. Chapman, L., Muller, C.L., Young, D.T., Warren, E.L., Grimmond, C.S.B., Cai, X., and Ferranti, E.J.S., 2015. "The Birmingham Urban Climate Laboratory: An Open Meteorological Test Bed and Challenges of the Smart City", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(9): 1545-1560.
 45. Chow, W.T., Brennan, D., and Brazel, A.J., 2012. "Urban Heat Island Research in Phoenix, Arizona: Theoretical Contributions and Policy Applications", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4): 517-530.
 46. Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., and Webb, J., 2008. "A Place-based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters", *Global Environmental Change*, 18(4): 598-606.
 47. Dessai, S. and Hulme, M., 2003. *Does Climate Policy Need Probabilities?*, UK: Tyndall Center for Climate Change Research.
 48. Eisenman, D.P., Wilhalme, H., Tseng, C.H., Chester, M., English, P., Pincetl, S., Fraser, A., Vangala, S., and Dhaliwal, S.K., 2016. "Heat Death Associations with the Built Environment, Social Vulnerability and Their Interactions with Rising Temperature", *Health & Place*, 41: 89-99.
 49. EU Environment Agency, 2010. *Urban Regions: Vulnerabilities, Vulnerability Assessments by Indicators and Adaptation Options for Climate Change Impacts - A Scoping Study*, ETC/ACC Technical Paper.
 50. Fritzsche, K., Schneiderbauer, S., Bubeck, P., Kienberger, S., Buth, M., Zebisch, M., and Kahlenborn, W., 2014. *The Vulnerability Sourcebook: Concept and Guidelines for Standardised Vulnerability Assessments*.
 51. Fussler, H.M. and Klein, R.J., 2006. "Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking", *Climatic Change*, 75(3): 301-329.
 52. Guha, S., Govil, H., Dey, A., and Gill, N., 2018. "Analytical Study of Land Surface Temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS Data in Florence and Naples City, Italy", *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 667-678.
 53. IPCC, 2007. *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*, Cambridge University, United Kingdom and New York, USA.
 54. IPCC, 2018. *Global Warming of 1.5 °C: an IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, Intergovernmental Panel on Climate Change.
 55. Karanja, J. and Kiage, L., 2021. "Perspectives on Spatial Representation of Urban Heat Vulnerability", *Science of The Total Environment*, 774: 145634.
 56. Klinenberg, E., 2015. *Heat Wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago*, University of Chicago press.
 57. Kotharkar, R. and Ghosh, A., 2022. "Progress in Extreme Heat Management and Warning Systems: A Systematic Review of Heat-health Action Plans (1995-2020)", *Sustainable Cities and Society*, 76: 103487.
 58. Le Roy, B., Lemonsu, A., and Schoetter, R., 2021. "A Statistical-dynamical Downscaling Methodology for the Urban Heat Island Applied to the EURO-CORDEX Ensemble", *Climate Dynamics*, 56(7): 2487-2508.
 59. Li, Y., Wang, L., Liu, M., Zhao, G., He, T., and Mao, Q., 2019. "Associated Determinants of Surface Urban Heat Islands across 1449 Cities in China", *Advances in Meteorology*, 2019(12): 1-14.
 60. Masterson, J.H., Peacock, W.G., Van Zandt, S.S., Grover, H., Schwarz, L.F., and Cooper, J.T., 2014. *Planning for Community Resilience: A Handbook for Reducing Vulnerability to Disasters*, Washington DC: Island Press.
 61. Moss, R.H., Brenkert, E.L., and Malone, A.L., 2001. *Vulnerability to Climate Change: A Quantitative Approach*, the US Department of Energy.
 62. Rousseeuw, P.J., 1987. "Silhouettes: A Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20: 53-65.
 63. Shannon, C.E., 1948. "A Mathematical Theory of Communication", *The Bell System Technical Journal*, 27(3): 379-423.
 64. Shete, R. and Agrawal, S., 2016. "IoT Based Urban Climate Monitoring using Raspberry Pi", paper presented at International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), India: Melmaruvathur.
 65. UNDP, 2005. *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies, and Measures*, USA: Cambridge University Press.
 66. Wilson, B. and Chakraborty, A., 2019. "Mapping Vulnerability to Extreme Heat Events: Lessons from Metropolitan Chicago", *Journal of Environmental Planning and Management*, 62(6): 1065-1088.
 67. Wouters, H., De Ridder, K., Poelmans, L., Willems, P., Brouwers, J., Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., Broucke, S.V., van Lipzig, N.P.M., and Demuzere, M., 2017. "Heat Stress Increase under Climate Change Twice as Large in Cities as in Rural Areas: A Study for a Densely Populated Midlatitude Maritime Region", *Geophysical Research Letters*, 44(17): 8997-9007.
 68. Xu, H., Ma, C., Lian, J., Xu, K., and Chaima, E., 2018. "Urban

Flooding Risk Assessment Based on an Integrated K-means Cluster Algorithm and Improved Entropy Weight Method in the Region of Haikou, China”, *Journal of Hydrology*, 563: 975-986.

69. Xu, R. and Wunsch, D., 2005. “Survey of Clustering Algorithms”, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 16(3): 645-678.

Date Received	2022-05-21
Reviewed(1 st)	2022-06-16
Date Revised	2022-08-18
Reviewed(2 nd)	2022-08-23
Date Accepted	2022-08-23
Final Received	2022-09-07