

빅데이터 기반 폭염 영향 지역의 공간적 탐색: 도시민의 활동 영향을 중심으로

Spatial Exploration of Areas Affected by Heatwaves Using Big Data: The Impact on Urban Residents' Activities

이상혁* · 강정은** · 배현주***

Lee, Sang-hyeok*, Kang, Jung Eun**, and Bae, Hyun-joo***

Abstract

With the increase in frequency and intensity of heatwaves due to continued climate change and changes in urban spaces, research is needed to reduce their negative impacts. In Korea, several studies have been conducted on the subject since the unusual occurrence of extreme weather in 2018; however, as few have focused on the effects of heatwaves on the lives and activities of urban residents, this study investigates these effects and explores their spatial aspects. Using population big data, the changes in the active population on days when heatwaves occurred were statistically verified through a paired-samples test. Additionally, regional variations in changes were analyzed using GIS and spatial cluster analysis. Despite a slight temporal variation, the statistical analysis showed that the occurrence of heatwave is associated with decreased activity among urban residents. There was a difference in the active population between regions, and cluster analysis revealed that some hot spots saw increased activity in the population despite the occurrence of heatwaves, including Mapo-gu, Songpa-gu, and Gangnam-gu on weekdays and Gwanak-gu, Gangseo-gu, and Eunpyeong-gu on weekends. Conversely, the cold spots found included Seodaemun-gu, Gangbuk-gu, Seongbuk-gu, and Jongno-gu on weekdays and Jongno-gu, Jung-gu, Seocho-gu, and Gangnam-gu on weekends. These results can serve as basic data to prepare a heatwave response policy that reflects the characteristics of the region.

Key words : Heatwave, Urban Residents' Activities, Big Data, Spatial Cluster Analysis

요 지

지속적인 기후변화와 도시공간의 변화로 인해 빈도와 강도가 강해지고 있는 폭염의 부정적 영향 저감을 위해서는 영향에 대한 진단과 관련 연구의 수행이 필요하다. 국내에서는 2018년 이례적인 극한기상의 발생 이후 폭염에 대한 관심의 증가로 많은 연구가 수행되었으나, 폭염이 도시민의 생활과 활동에 미치는 영향에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 폭염의 발생이 도시민의 활동에 미치는 영향을 실증하고, 공간적으로 탐색하고자 하였다. 여름철 인구 빅데이터를 활용하여 폭염 발생일과 대조일 간 활동인구 변화를 대응표본 검정을 통해 통계적으로 검증하였으며, 이들 변화의 지역적 차이를 GIS와 공간군집분석을 활용해 지역 간 차이를 시각화하여 분석하였다. 통계분석 결과 시기에 따라 차이는 있으나 폭염의 발생은 도시민의 활동을 감소시키는 경향을 보였다. 지역 간 활동인구의 변화는 차이를 보였으며, 군집분석 결과 폭염의 발생에도 활동인구가 증가하는 핫스팟은 평일 마포구와 송파구, 강남구 일대, 주말 관악구, 강서구, 은평구 일대에서 나타났다. 반대로 쿨드스팟은 평일 서대문구, 강북구, 성북구, 종로구, 중구 일대에서 뚜렷하게 나타났으며, 주말 종로구와 중구, 서초구와 강남구 일대에서 넓게 도출되었다. 이러한 분석 결과는 지역의 특성을 반영한 폭염 대응정책 마련을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 폭염, 도시민 활동, 빅데이터, 공간군집분석

*정희원, 부산대학교 도시공학과 박사 후 연구원(E-mail: ubscott@pusan.ac.kr)

Member, Postdoctoral Researcher, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

**교신저자, 정희원, 부산대학교 도시공학과 교수(Tel: +82-51-510-2451, Fax: +82-51-513-9108, E-mail: jekang@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

***한국환경연구원 환경보건연구실 선임연구위원(E-mail: hjbae@kei.re.kr)

Chief Research Fellow, Division for Environmental Health, Korea Environment Institute

1. 서론

폭염은 개인의 건강 및 활동에 직접적인 영향을 미치는 주요 환경요인으로 도시민의 생활환경을 악화시키는 요인 중 하나이다. 특히 폭우와 폭설 등으로 인한 이벤트성 재해와 달리 폭염은 미세먼지와 함께 일상생활에서의 체감도가 높아 도시민의 관심과 불안감이 높은 재해이다. 2007년 이후 기상청에서는 일 최고기온이 33 °C 이상 2일간 지속되어 국민의 건강에 피해를 입힐 수 있는 경우를 폭염으로 정의하고, 특보 발령을 통해 피해를 줄이고자 노력해왔다(KMA, 2008). 그러나 국내의 기후와 도시공간의 지속적인 변화로 폭염의 발생빈도와 강도, 피해가 증가해 왔으며, 실제로 1973년 이후 일 최고기온은 1.5 °C가, 폭염일수는 6.9일이 증가한 것으로 나타났다(Chae et al., 2020). 2018년에는 전국 폭염일수가 31.4일(평균 9.8일)로 1973년 이후 가장 많이 발생했으며, 그로 인한 온열질환자 역시 4,526명(사망 48명)으로 평년보다 급격하게 증가하기도 했다(KDCA, 2020). 미래 기후변화 시나리오에 따르면 후반기(2080년~2100년) 한반도의 온난일(일 최고기온 기준 상위 10% 초과일 수)이 최저 74.4일에서 최대 129.9일까지 증가할 것으로 보고 있으며, 그에 따른 피해도 증가할 것으로 예상된다(NIMS, 2020). 따라서 폭염 영향에 대한 진단과 연구, 영향 저감을 위한 대응책 마련 등 지속적인 노력이 필요하다.

폭염이 미치는 영향에 관한 연구는 방재, 환경, 보건, 도시 계획 등 여러 분야에서 이루어져 왔다. 연구에서는 폭염이 온열질환을 포함해 심혈관계 및 호흡기계 등의 만성질환의 발생확률을 증가시키고 관련 질환의 초과사망률을 증가시키는 등 건강 악화를 야기하며, 건강 악화로 인한 활동성 저하와 생산성 저하, 여가 및 활동의지 저하 등 도시민의 활동에도 영향을 미치는 것으로 보고 있다(IPCC, 2014; Cho and Lee, 2018; Lim, 2019). 그러나 수행된 많은 연구들이 대부분 통계 및 설문과 같은 조사자료를 활용해 개인의 차원에서 건강 또는 활동에 미치는 영향을 분석한 연구로, 정량적이고 객관적인 자료를 활용해 폭염이 도시민에게 미치는 영향을 공간적으로 분석한 연구는 미흡한 실정이다. 폭염이 도시민의 활동에 부정적 영향을 미치는 것을 인지하고 있음에도 실증분석 및 공간탐색과 같은 연구의 수행이 어려웠던 가장 큰 이유는 도시민의 활동을 대표할 수 있는 공간단위의 상세 데이터의 수집과 활용에 한계가 존재했기 때문이다. 그러나 최근 국가 및 민간을 통해 빅데이터의 공유와 활용이 가능해짐에 따라 이러한 한계를 극복할 수 있게 되었다.

이러한 배경에서 본 연구는 서울시를 대상으로 최근 활용이 가능해진 시공간 인구 빅데이터를 이용해 폭염이 도시민의 활동에 미치는 영향을 검증하고 공간적으로 탐색하고자 한다. 우선 도시민의 활동을 대표할 수 있는 방문인구 빅데이터를 활용해 폭염 발생 시 방문인구가 실제로 감소하는지를

대응표본 검정을 통해 통계적 유의성을 확인한다. 이후 어떤 지역에서 방문활동 인구가 증가했는지 또는 감소했는지를 살펴보고, 공간군집분석을 통해 지역 간 차이를 살펴보고자 한다. 본 연구의 분석 결과는 개념적으로 이해하고 있던 폭염 발생에 따른 영향을 실증할 수 있으며, 폭염 발생 시 도시민의 활동이 증가하는 지역과 감소하는 지역을 확인할 수 있으므로 우선 관리지역 선정 등 다양한 형태의 의사결정 지원이 가능할 것으로 생각된다.

2. 선행연구 검토

폭염으로 인한 영향은 평균 또는 일 최고기온과 노출되는 기간에 따라 달라지지만, 온열질환의 발생과 질환으로 인한 사망과의 관련성은 매우 높다. 폭염으로 인한 온열질환은 80%가 실외에서 발생하며, 고령인구 및 저소득층과 같은 취약계층에서 상대적으로 높은 발생률을 보이는 것으로 나타났다(Chae et al., 2020). 이러한 온열질환은 불쾌감이나 집중력 저하에서부터 불면증, 두통, 구토, 현기증 및 근육경련, 실신 등의 증상과 함께 신체 활동성 저하를 유발한다(Ryu and Min, 2021). 그 외에도 폭염은 고온으로 인한 탈수를 동반해 심혈관질환, 심장질환, 호흡기 질환, 정신질환 발생 및 자살률 증가에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Y. Kim et al., 2015; Lim, 2019; KDCA, 2020). Chung et al. (2009), Ha and Kim (2013), C.T. Kim et al. (2015), Lee et al. (2017)의 기온과 사망률과의 관계에 관한 연구들에 따르면 사망률 증가에 영향을 미치는 임계온도(threshold temperature)가 29~33 °C에 존재하고, 임계온도를 기준으로 기온이 1 °C 증가할 때 사망률이 2~7%까지 증가하는 것으로 분석하였다.

폭염은 개인의 건강 악화와 함께 생산성 저하 및 활동의지 저하에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. Chae et al. (2018)은 여름철 야외근무 및 고온에 노출되는 비중이 높은 직군의 경우 평소대비 평균 62.4%의 효율이 나타나 노동 생산성이 감소하는 것으로 보았으며, 그로 인한 손실액은 일평균 약 230억 원으로 보았다. Adélaïde et al. (2022)은 폭염이 개인의 건강과 활동에 영향을 미치는 것을 인지하고, 2015년부터 2019년까지 폭염으로 인한 시민들의 사망, 활동 제약으로 인한 경제성 손실을 분석하였으며 그중 활동성 저하로 인한 손실을 23억 유로(3조800억)로 분석하였다. Cho and Lee (2018)의 서울시 대상 폭염 인식 연구에 따르면 19세 이상 서울시민 중 75%가 폭염이 발생했을 때, 낮시간 외출을 취소하거나 주의 가족 돌보기, 폭염대피소 이용, 복장변경, 모자 양산 챙기기 등 평소와 다른 행동을 하는 것을 확인했으며, 그중 54% 이상이 낮시간 외출을 취소하는 것을 확인하였다.

폭염과 관련된 선행연구들이 대체로 개인의 신체적, 정신적 건강에 미치는 영향에 초점을 맞추어 수행됐으며 개인의 건강 악화로 인한 신체적 활동능력의 저하를 인식하고 있으나, 실제 폭염 발생으로 인한 위험 인식, 행동변화, 활동에

미치는 영향에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 2018년 9월 폭염이 자연재난으로 포함된 이후 다양한 연구의 필요성의 증대로 관련 연구는 증가해 왔으나 폭염의 영향, 피해를 목적으로 한 연구는 위험과 피해를 산정하기 어려운 폭염의 특성으로 2편의 연구만이 이루어진 것으로 확인되어, 다양한 주제에서 폭염의 영향을 집계하고 위험성을 나타낼 수 있는 연구가 필요하다(Baek and Kwon, 2021).

본 연구에서는 폭염의 영향을 사람들의 활동에 초점을 맞추어 분석하고자 하며, 기존의 설문조사를 통한 연구에서 벗어나 시공간 인구 빅데이터라는 객관적 자료와 통계적 기법을 활용해 폭염의 발생이 도시민의 활동에 영향을 미치는지 실증하고자 한다. 또한 폭염 발생에 따른 활동의 변화를 행정동 경계와 GIS를 활용해 집합적이고, 공간적으로 분석해 지역 간 차이를 탐구하고자 한다.

3. 연구방법

3.1 연구 범위 및 흐름

본 연구는 서울시를 연구 대상으로 선정하였다. 대상지인 서울시는 한국 인구의 약 19% (979.5만 명)가 거주하는 고밀 지역임과 동시에 인프라가 집중되어있는 지역으로 도시민들의 대규모 활동을 살펴볼 수 있는 지역이다(Seoul Solution, 2021). 또한 최근 정보통신, 센서, 데이터 가공기술의 발전으로 활용도가 높아진 빅데이터의 수집이 활발한 지역으로, 데이터의 정밀도와 접근의 용이함을 고려해 대상 지역으로 선정하였다. 서울시는 25개 구와 424개 행정동(2019년 기준)으로 이루어져 있으며, 분석에는 424개 행정동을 대상으로 분석을 수행하였다.

연구의 시간적 범위는 코로나가 발생하기 이전 시기로 일상생활이 가능했으며, 전국평균 폭염일수가 31.4일로 평년 9.8일 대비 빈도와 강도가 급격하게 증가한 2018년 여름철(6월-9월)로 설정했다. 활동인구는 시간 범위 내 일별·시간별 방문인구 빅데이터를 가공해 활용하였으며, 요일에 따라 일과 학업, 여가 및 휴가 등 도시민의 활동 목적이 달라질 수 있음을 고려해 평일과 주말로 구분해 분석을 수행하였다.

분석을 위해 우선 폭염 발생일을 검토하고, 인구 빅데이터를 활용해 폭염 발생일과 대조일의 활동인구를 계산하였다. 도출된 값을 기반으로 폭염일과 대조일 간 활동인구의 유의미한 차이 여부를 검증하기 위해 대응표본 검정을 수행하였다. 이후 폭염일과 대조일 활동인구의 차이를 계산하고, 지리정보시스템(GIS)을 통해 공간적 분포를 살펴보았다. 마지막으로 공간집분석 기법을 적용해 활동인구 증감의 군집패턴을 분석하고자 하였다.

3.2 활동인구 시공간 빅데이터 구축

전술한 것과 같이 선행된 폭염에 의한 영향은 주로 개인 수준의 질병발생 및 사망에 관한 연구에 초점을 두고 수행되

었으며, 그 외에 경제적 영향, 취약성평가, 모델링을 통한 폭염발생예측, 폭염 대응정책 효과에 관한 연구가 수행되어 왔으나 도시민에게 미치는 피해 및 영향과의 관계에 대한 연구는 미흡한 실정이다(Baek and Kwon, 2021). 이러한 실증분석 및 공간탐색 연구 수행의 어려움은 공간단위 데이터의 수집과 활용의 한계로 인한 것이었으나, 최근 고해상도 빅데이터의 구축과 활용이 가능해짐에 따라 분석의 한계를 극복할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 통신사에서 제공하는 생활(현재)인구를 사용하였다. 생활인구는 특정 시점, 특정 장소에 존재하는 모든 사람을 포함하는 개념으로 특정 장소에 위치하는 현재(De Facto population) 인구를 말한다. 생활인구는 거주인구, 근무인구, 방문인구로 구성되어 있으며, 1시간 단위로 측정된다. 해당 자료는 도시민의 실질적 활동을 시공간적으로 상세하고 정확하게 관찰할 수 있으며, 기존의 공공데이터로 파악이 불가능한 부분에 대한 분석과 결과의 개선이 가능하다. 또한 목적별 인구가 유형화되므로 다양한 부분에서 활용할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 실내에서 머무는 거주인구와 근무인구를 제외한 방문인구를 도시민의 활동인구로 활용하였다. 생활시간조사 결과를 참고해 수면과 개인정비와 같은 실내 필수활동을 제외한 일상생활이 일어나는 아침(06:00)~저녁(21:00)을 활동 시간대로 설정하고 일별 시간평균 방문인구를 구축하였다(Statistics Korea, 2019). 데이터는 서울시를 대상으로 50 × 50 m의 격자 200,515개로 이루어져 있다. 우선 일별 시간별 방문활동인구를 GIS를 기반으로 지오코딩을 통해 공간정보화 하였으며, 행정구역 경계와 공간통계를 통해 행정동별 방문활동 인구를 구축하였다. 최종적으로 행정동별 면적을 나누어 행정동별 일별 시간평균 방문인구 밀도를 계산해 분석에 활용하였다.

3.3 폭염 발생일 검토 및 활동인구 산정

폭염은 기상청에서 2007년부터 ‘폭염 특보제’가 시범 운영된 후 2008년부터 정식 도입되면서 시작되었다(KMA, 2008). 폭염은 주의보와 경보로 구분되며 일 최고기온 33 °C 이상 온도가 2일 이상 지속되는 경우 폭염 주의보를, 일 최고기온 35 °C 이상의 온도가 2일 이상 지속될 때 경보를 발령하여 무더위로 인한 피해를 최소화하고자 노력하고 있다(KMA, 2021). 최근에는 실제 기온보다 체감하는 온도의 중요성이 강조되면서, 2020년 5월부터 일 최고 체감온도를 기준으로 폭염특보를 발령하고 있다. 체감온도를 활용한 특보 발령 또한 주의보와 경보로 분류되며 일 최고 체감온도가 33 °C 또는 35 °C 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상되는 경우와 급격한 체감온도 상승 또는 폭염 장기화로 인한 피해 발생이 예상되는 경우 발령된다.

2011년 이후 폭염의 발생은 연도별로 차이를 보이고 있으나, 시간이 흐름에 따라 폭염일이 증가하는 경향성을 보이며, 폭염의 발생빈도에 비례해 온열질환의 발생률도 급격하게

Table 1. Seoul's Heatwave Warning Status in 2018

Classification	Weekday	Weekend
The date of the heatwave	7/16, 7/18, 7/19, 7/20, 7/23, 7/24, 7/25, 7/26, 7/27, 7/30, 7/31, 8/1, 8/2, 8/3, 8/6, 8/7, 8/8, 8/10, 8/13, 8/14, 8/15, 8/16, 8/17, 8/20, 8/22	6/24, 7/15, 7/21, 7/22, 7/28, 7/29, 8/4, 8/5, 8/11, 8/12, 8/19

증가하는 것으로 나타난다(Chae et al., 2020). 본 연구에서는 폭염이 많이 발생한 2018년 여름을 대상으로 서울시에 발령된 폭염특보의 현황을 살펴보았다. 조사 결과 서울시 폭염 발생일은 6월에서 8월까지 평균 25일, 주말 10일 발생하였으며 9월에는 발생하지 않았다(Table 1).

우선 폭염 발생 현황을 바탕으로 폭염이 도시민의 활동에 미치는 영향 분석을 위해 행정동별 폭염 발생일과 대조일(발생하지 않은 날)의 시간평균 방문인구 밀도를 계산하였다. 폭염이 발생한 6월~8월까지 월별로 계산하였으며 계산은 Eqs. (1)과 (2)와 같다. 월별로 계산된 행정동별 도시민의 활동인구를 바탕으로 대응표본 검정을 통해 집단 간 유의미한 차이가 있는지 검정하였다.

$$HWVM_i = \frac{\sum HWV_i}{HWN} \quad (1)$$

$HWVM_i$: i 행정동 폭염일 방문인구 밀도 평균
 HWV_i : i 행정동 폭염일 방문인구 밀도
 HWN : 폭염발생일 수

$$NVM_i = \frac{\sum NV_i}{ND} \quad (2)$$

NVM_i : i 행정동 대조일 방문인구 밀도 평균
 NV_i : i 행정동 대조일 방문인구 밀도
 ND : 대조일 수

이후 폭염 발생일과 대조일 간의 활동인구 변화를 계산하기 위해 행정동별 폭염 발생일의 시간평균 방문인구와 대조일의 시간평균 방문인구의 차이를 계산하였다(Eq. (3)). 계산된 행정동별 활동인구 변화는 폭염이 발생한 날 활동인구가 증가할 경우 양의 값을 가지도록, 감소할 경우 음의 값을 가지도록 하였으며, 최종적으로 행정동 경계자료와 연계해 도시민의 활동 증감의 공간적 분포와 군집 현황을 탐색하고자 하였다.

$$HWVC_i = HWVM_i - NVM_i \quad (3)$$

$HWVC_i$: i 행정동 폭염으로 인한 활동인구 변화
 $HWVM_i$: i 행정동 폭염일 방문인구 밀도 평균
 NVM_i : i 행정동 대조일 방문인구 밀도 평균

3.4 대응표본 검정 및 공간군집분석

본 연구는 폭염의 발생일과 발생하지 않은 날(대조일) 간 도시민의 활동에 유의미한 차이가 있는지 검증하고 공간적으로 분석하기 위해 대응표본 검정과 공간군집분석을 수행하였다.

모집단의 특성을 추론하는 통계 중 가장 많이 활용되는 방법은 가설검정 방법으로 모수 통계와 비모수 통계가 있다. 두 가지 방법은 모집단의 형태 및 조건에 따라 선택되며, 주로 모집단의 분포 형태에 따라 결정되는데 정규분포를 따를 경우 모수 통계 검정 방법을 사용하고 조건을 만족하지 않을 때는 비모수 검정을 수행한다. 이러한 검정은 집단 간 유의미한 차이를 보이는지 확인하는 것으로 검정은 집단을 선정하는 방법에 따라 독립표본과 대응표본 검정으로 구분된다.

본 연구에서는 폭염이라는 위험요인의 발생 여부에 따라 행정동을 대상으로 반복 측정해 활용하므로 대응표본 검정을 수행하였다. 검정을 위한 귀무가설은 “두 집단 간 평균의 차이는 없다”로 귀무가설을 채택할 경우 집단 간 유의미한 차이가 없으며, 대립가설을 채택할 경우 두 집단 간에는 차이를 보이는 것으로 해석한다. 모수 검정에는 t-검정이 대표적이며, 비모수 검정에는 윌콕슨 검정 방법을 많이 활용한다(Lee and Noh, 2013). 윌콕슨 부호순위 검정은 두 집단의 크기와 차에 따른 부호를 기반으로 통계적 유의성을 검증하는 방법으로 사전-사후 비교 등의 실험에 자주 활용되고 있다. 본 연구에서는 폭염일과 대조일의 활동인구 자료의 정규성 검정 결과에 따라 적합한 검정 방법을 선택해 분석하고자 하였다.

공간군집분석에는 국지적 수준에서 공간적 패턴을 분석할 수 있는 국지적 모형을 사용하고자 하였으며, 본 연구에서는 Anselin (1995)에 의해 개발된 방법으로 탐색적 공간데이터를 분석하는 기법인 Local Indicator of Spatial Association (LISA)을 사용하였다. LISA 분석은 연구지역 또는 객체의 군집 탐색을 위해 개발된 방법으로 다양한 공간탐색을 위한 연구에서 사용된다. LISA 분석은 Anselin Local Moran's I 통계치(Eq. (4))를 계산해 추정되며, 한 지역과 이웃한 지역 간 가중치를 속성값에 부여하고 계산된 속성값의 유사 수준에 따라 군집을 도출하는 방법이다(Anselin, 1995).

분석된 군집은 속성값의 유사성과 이질성에 따라 HH (High-High), HL (High-Low), LH (Low-High), LL (Low-Low)의 네 가지로 구분된다. 앞에 위치하는 분류는 특정 지역의 값을 나타내며, 뒷자리에 위치하는 분류는 특정 지역의 주변

지역의 상태로 HH는 한 지역을 중심으로 해당 지역과 주변 지역이 모두 높은 지역, HL은 한 지역은 높은 값을 가지나 주변 지역은 상대적으로 낮은 값을 가지는 유형이다(Lee et al., 2015). LH와 LL은 특정한 한 지역이 낮은 값을 가지고, 주변 지역이 높은 값을 가지거나, 낮은 값을 가지는 것으로 구분할 수 있다. 이중 HH와 LL은 동질성이 모여있는 지역으로 높은 값이 군집된 핫스팟 지역과 낮은 값이 군집된 콜드스팟으로도 볼 수 있다. 이러한 유형 분류는 해당 지역의 이질성과 동질성을 잘 나타낼 수 있어 폭염 영향의 공간적 분포와 탐색에 활용하였다.

$$Local\ Moran's\ I = \left[\frac{n^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \right] \frac{(Y_i - \bar{Y}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

- n : 지역 수
- Y_i : i 지역 속성 값
- Y_j : j 지역 속성 값
- \bar{Y} : 전체 지역 평균값
- w_{ij} : i 와 j 지역간 공간가중치

4. 분석결과

4.1 서울시 도시민 활동

폭염이 도시민의 활동에 미치는 영향 분석에 앞서 구축된 빅데이터를 기반으로 서울시의 활동인구 현황을 살펴보았다. 서울시 전체 시간 평균 방문인구는 약 236만 명으로 1 km²당 3,904명에 달한다. Fig. 1은 행정동별 시간평균 방문인구 밀도로 상대적으로 외곽보다는 서울시 내부에 위치한 행정동에서 높은 방문인구 밀도를 보인다. 지역별로

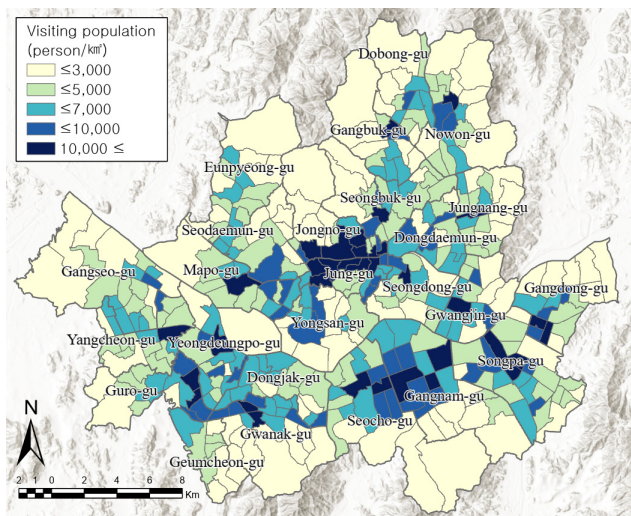


Fig. 1. Visiting Population Density of Seoul (Hourly Average)

중구와 종로구, 노원구, 마포구와 영등포구, 서초구와 강남, 송파구 일대에서 많은 방문인구가 발생하였다. 그중 중구와 종로구는 역사문화자원과 상업시설이 밀집되어 있으며, 서초구와 강남구, 마포구 일대 역시 대표적인 상업과 업무시설 밀집 지역으로 많은 도시민의 활동을 유도하는 지역이다. 송파구와 노원구 일대의 높은 밀도를 보이는 지역은 상업시설뿐 아니라 주거시설이 밀집된 지역으로 거주민들의 이동과 개인 간의 만남이 활발하게 이루어지는 지역이다. 반대로 방문인구의 밀도가 낮은 지역은 주로 산지 또는 넓은 규모의 녹지(금천구, 관악구, 노원구, 강북구, 은평구)가 위치한 경우가 많으며, 고속도로와 같은 도로 시설이 위치하는 외곽지역(강동구 및 서초구 외곽)에서 많이 나타났다.

4.2 폭염 영향 유의성 검정

폭염이 도시민의 활동에 미치는 영향의 유의성 검정을 위해 대응표본 검정을 수행하였으며, 시기별 특성을 통제하기 위해 월별로 구분하였다. 3장 4절에서 설명한 것과 같이 대응표본 검정 방법은 모집단의 형태 및 조건에 따라 선택되며, 주로 모집단의 분포 형태에 따라 결정된다. 집단의 분포 형태가 정규분포를 따를 경우 모수 통계 검정 방법을 사용하고 조건을 만족하지 않을 때는 비모수 검정을 수행하므로, 본 연구에서는 Kolmogorov-Smirnov와 Shapiro-Wilk 검정을 통해 정규성을 검정하였다. 평일은 6월과 9월에 폭염이 발생하지 않아 7월과 8월을 대상으로 검정하였으며, 주말에는 9월을 제외한 6월, 7월, 8월을 대상으로 검정하였다. 행정동별 방문인구는 오른쪽으로 꼬리가 긴 분포로, 검정 결과 Table 2와 같이 평일과 주말 모든 시기에서 Kolmogorov-Smirnov와 Shapiro-Wilk의 유의확률이 0.001보다 작아 “변수의 값이 정규성을 보인다”라는 귀무가설을 기각해 정규성을 가지지

Table 2. Normality Test of Visiting Population Difference between Heatwave and Control Day

Classification		Kolmogorov-Smirnova		
		Statistic	df	p-value
Weekday	Jul.	.157	424	.000
	Aug.	.232	424	.000
Weekend	Jun.	.184	424	.000
	Aug.	.254	424	.000
Classification		Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	p-value
Weekday	Jul.	.835	424	.000
	Aug.	.642	424	.000
Weekend	Jun.	.778	424	.000
	Aug.	.500	424	.000

Table 3. Result of Wilcoxon Signed-Rank Test (Weekday)

Classification		N	Mean Rank
(July) Heatwave day - Control day	Negative Rank ^a	292	216.01
	Positive Rank ^b	132	204.73
(August) Heatwave day - Control day	Negative Rank ^a	214	194.36
	Positive Rank ^b	220	220.10

a : Heatwave day < Control day

b : Heatwave day > Control day

Table 4. Wilcoxon Signed Rank Test Statistic (Weekday)

Classification	Heatwave day - Control day	
	July	August
Statistics (Z)	-7.139	3.668
Asymp. Sig. (2-tailed)	.000	.310

않았다. 이에 따라 비모수 대응표본 검정인 윌콕슨 부호-순위 검정을 수행하였다. Table 3은 평일 폭염일과 대조일 간 윌콕슨 부호-순위 검정 결과로, 7월과 8월 상이한 결과를 보였다. 7월 폭염 발생일에 도시민의 활동이 감소한 행정동이 292개, 증가한 행정동이 132개로 나타났다. 8월은 7월과 반대로 폭염이 발생한 날 도시민의 활동이 감소한 지역이 214개이며 증가한 지역이 220개로, 폭염이 발생하였음에도 활동이 증가한 행정동이 많았다. Table 4의 검정통계를 살펴 보면, 7월에는 -7.139로 도시민의 활동이 감소하는 경향이, 8월에는 3.668로 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 그러나 8월의 경우 유의확률이 0.310으로 활동이 통계적 유의성은 갖지 않는 것으로 나타났다.

주말 윌콕슨 부호-순위 검정에서는 6월, 7월, 8월 모두 폭염 발생 시 활동인구가 대조일보다 감소하는 행정동이 많은 것으로 나타났다(Table 5). 6월에는 253개의 행정동에서, 7월에는 244개, 8월에는 250개의 행정동에서 활동인구의 감소세를 보였다. 검정통계량 또한 부호-순위 검정 결과와 동일하게 모든 기간 음의 값을 보여 폭염이 발생할 때 활동인구가 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 7월은 감소하는 경향은 보였으나 통계적 유의성은 갖지 않았다(Table 6).

대응표본 검정을 통한 분석결과 폭염이 도시민의 활동에 미치는 영향은 평일과 주말 차이를 보였다. 평일은 대상 기간인 7월과 8월 모두 유의미한 차이를 보였으나 7월에는 활동인구가 감소하였으며, 8월에는 유의성은 확보하지 못했으나 활동인구가 증가하는 상이한 결과를 보였다. 주말의 경우 6월, 7월, 8월 모두 폭염 발생 시 도시민의 활동이 감소하는 것으로 나타났으나 7월에는 통계적 유의성을 보이

Table 5. Result of Wilcoxon Signed-Rank Test (Weekend)

Classification		N	Mean Rank
(June) Heatwave day - Control day	Negative Rank ^a	253	245.62
	Positive Rank ^b	171	163.50
(July) Heatwave day - Control day	Negative Rank ^a	244	194.50
	Positive Rank ^b	180	236.89
(August) Heatwave day - Control day	Negative Rank ^a	250	210.34
	Positive Rank ^b	174	215.60

a : Heatwave day < Control day

b : Heatwave day > Control day

Table 6. Wilcoxon Signed Rank Test Statistic (Weekend)

Classification	Heatwave day - Control day		
	June	July	August
Statistics (Z)	-6.769	-.954	-2.984
Asymp. Sig. (2-tailed)	.000	.340	.003

지는 않았다. 이러한 부호순위 검정 결과는 도시민의 활동 형태 및 목적과 연계해 생각해 볼 수 있다. 평일은 학업이나 출근 및 생계를 위한 활동과 같은 의무적 활동이 일반적으로 발생하며, 주말은 휴식, 여가, 여행 등이 주요 목적인 선택적 활동이 상대적으로 많이 발생하게 된다. 따라서 평일에는 개인의 생계와 같은 활동이 지속해서 발생함으로 폭염의 발생이 활동에 영향을 주지 못했으며, 주말에는 폭염 발생 시 무더위를 피하기 위해 야외에서의 활동을 선택하지 않는 현상이 반영된 결과로 보인다.

해당 절에서는 대응표본 검정을 통해 폭염 발생이 도시민의 활동저하에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 그러나 시기에 따라 활동인구가 증가하거나 유의성이 존재하지 않는 기간이 있으며, 또한 행정동에 따라 그 영향이 다르게 나타나므로 본 연구에서는 이러한 영향의 공간적 차이를 확인하기 위해 공간패턴 분석을 수행하였다.

4.3 폭염으로 인한 활동인구 변화의 공간패턴 분석

폭염 영향의 활동인구 변화의 공간패턴 분석을 위해 폭염일과 대조일 간 활동인구(시간평균 방문인구) 차이를 계산하고 공간군집분석을 수행하였다. Fig. 2는 폭염일과 발생일 간의 활동인구의 변화를 지도화한 것이다. 평일은 감소하는 행정동이 225개, 증가하는 행정동이 199개였으며, 주말은 감소하는 행정동이 273개, 증가하는 행정동이 151개로 평일과 주말 모두 감소하는 행정동이 많이 나타났다.

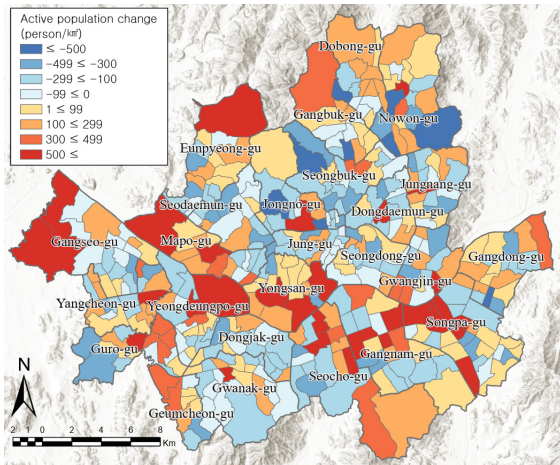
평일에는 종로구와 성북구, 노원구, 동대문구, 관악구,

동작구는 감소하는 행정동이 많이 나타났다. 특히 종로구(청운효자동, 종로5·6가동), 성북구(정릉3동), 강북구(송정동), 노원구(월계1동, 상계6·7동, 공릉2동), 강동구(성내3동)에 위치한 행정동에서 뚜렷한 활동인구 감소를 보였다. 반대로 강서구와 영등포구, 마포구, 용산구, 강남구와 송파구에 위치한 행정동에서 활동인구의 증가를 보였으며, 그중 강서구(공항동, 방화2동), 영등포구(영등포동), 마포구(서교동), 송파구(잠실3동, 잠실6동)에서는 상대적으로 많은 활동인구의 증가를 보였다. 주말에는 서울시에 행정동 전반에서 활동인구 감소를 보였으며, 그중 마포구와 서초구, 강남구, 종로구와 중구, 송파구에 위치한 행정동에서는 뚜렷한 활동인구 감소를 보였다. 반대로 강서구(방화2동, 공항동), 구로구(고척1동), 영등포구(영등포동), 강남구(삼성1동), 송파구(잠실3동과 잠실6동, 은평구 진관동)에서는 활동인구가 500

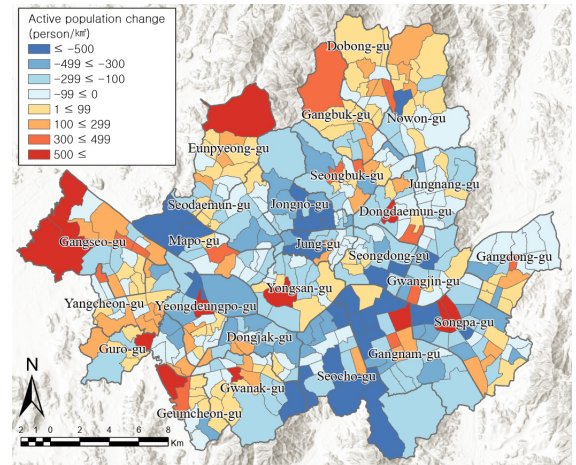
명 이상의 증가하기도 했다.

Fig. 3은 LISA 분석을 통한 평일과 주말 군집분포 결과이다. HH 지역은 핫스팟 지역으로 폭염의 발생에도 도시민의 활동이 증가한 군집이며, LL 지역은 콜드스팟으로 활동이 감소한 군집이다. 분석결과 평일과 주말 모두 활동인구가 감소하는 콜드스팟이 넓게 분포하였으며, 평일과 주말에 따라 군집의 지리적 위치에서 차이를 보였다.

평일은 대표적으로 송파구(잠실동, 석촌동, 송파1동), 강남구(역삼2동), 마포구(합정동, 서강동)에서 핫스팟 군집이 등장하였다. 콜드스팟은 다섯 군집으로 종로구(평창동)와 성북구(정릉동, 돈암2동, 삼선동, 보문동), 강북구(수유1동, 삼양동, 삼각산동)에 걸쳐 위치하였으며, 동대문구(계기동, 용신동)와 성북구(삼선동, 보문동), 종로구(창신동, 숭인동)·구(황학동, 신당동)·성동구(왕십리도선동)에 걸친 군집도 나

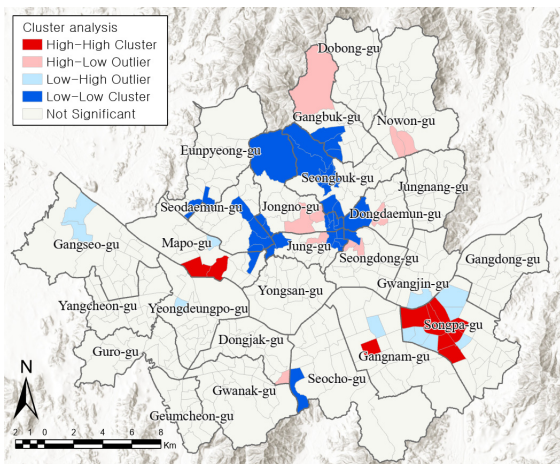


(a) Changes in the active population on weekdays

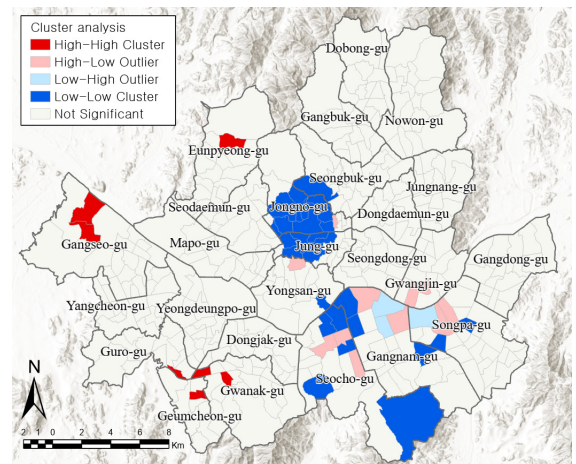


(b) Changes in the active population on weekends

Fig. 2. Changes in the Active Population Due to the Heatwave



(a) Active population change cluster (Weekday)



(b) Active population change cluster (Weekend)

Fig. 3. Cluster of Changes in the Active Population Due to the Heatwave

타났다. 다음으로 서대문구(홍제동, 천연동, 북아현동)·중구(소공동, 중림동)·종로구(무악동, 교남동)에 걸쳐 위치했으며, 서초구(방배2동)와 은평구(증산동, 응암3동)에서는 1-2개의 행정동에서 별개로 콜드스팟이 나타났다.

주말 분석 결과에서는 평일과 달리 강서구(방화1동, 방화2동), 은평구(불광2동), 구로구(가리봉동), 금천구(독산4동), 관악구(신원동, 조원동)에서 핫스팟 군집이 소규모로 발생하였다. 콜드스팟은 종로구(교남동, 가회동, 사직동, 삼청동, 이화동, 종로1·2·3·4가동, 종로5·6가동, 청운효자동, 혜화동)·성북구(성북동)·중구(광희동, 명동, 소공동, 을지로동, 필동, 회현동)에 걸쳐 위치하였으며, 서초구(내곡동, 반포4동, 방배3동, 서초4동, 잠원동), 강남구(논현1동, 신사동, 일원2동), 송파구(방이2동, 삼전동)에서 나타났다.

분석된 핫스팟 지역은 폭염의 발생에도 활동인구가 증가하는 경향이 뚜렷한 지역으로 정책적 대응방안 마련이 필요한 지역이다. 대표적인 평일 핫스팟 지역인 송파구 일대는 상업지역과 큰 규모의 공원과 유원지가 위치해 많은 도시민들의 이용과 방문 활동이 이루어지는 지역으로, 주말 송파구의 주거 밀집지역에 해당하는 곳이 콜드스팟으로 변한 것과는 차이를 보였다. 평일 마포구 일대는 대학이 위치하고 상업시설 밀집되어 있으며, 강남구는 상업과 업무시설이 집적된 곳으로 상업시설 이용 및 업무를 위한 야외활동이 많아 폭염에도 활동인구 많은 것으로 해석된다. 주말에는 강서구에서 핫스팟이 나타나는데, 해당 지역은 공항에 인접한 지역으로 4개의 지하철 및 공항철도 노선과 공항로가 위치해 주말 공항 이용객이 모여드는 지역이다.

콜드스팟은 폭염의 발생에 따라 활동인구가 감소하는 지역의 군집들로 주말 서초구의 반포 및 잠원동, 방배3동에 위치하는 콜드스팟과 강남구 일원동과 및 송파구 삼전동 및 송파1동에 위치하는 콜드스팟은 주거지역이 밀집한 지역으로 폭염 발생 시 주거지 내에 머무름으로써 야외활동의 감소하는 경향이 있는 것으로 보인다. 또한 평일 종로구 평창동과 성북구 정릉동, 주말 서초구 내곡동은 주로 산지와 도로로 이루어진 지역으로 도시민의 방문활동이 적은 지역이며, 폭염 발생 시 주변 행정동의 활동인구 감소의 영향으로 콜드스팟으로 도출된 것으로 보인다.

마지막으로 평일과 주말 HL군집과 LL군집으로 유형이 달라지는 종로구와 중구 일대는 도시기본계획상 3도심중 하나로 과거부터 고밀 개발된 중심지이다. 역사문화자원과 상업지역, 업무지역이 밀집된 지역으로 시간에 관계없이 많은 인구이동과 활동이 이루어지는 지역이다. 평일에는 업무 및 상업시설 이용을 위한 방문인구가 주변 지역보다 상대적으로 많은 것으로 나타났으나, 주말에는 업무를 위한 방문인구가 감소하고, 폭염 발생에 따라 상업시설 이용 및 역사문화자원의 방문인구 감소 현상으로 인해 평일과 주말의 군집이 달라지는 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구는 통신사 기반 인구 빅데이터를 활용해 폭염이 도시민의 활동에 미치는 영향을 통계적으로 실증하고, 폭염 발생에 따른 활동의 변화를 공간적, 지리적으로 탐색하고자 하였다. 빅데이터의 구축은 통신사 서비스망을 통해 측정되는 일별·시간별 50 × 50 m 격자 인구자료를 활용하였으며, 도시민의 활동을 가장 잘 나타낼 수 있는 방문인구를 가공해 분석에 활용하였다.

분석에는 우선 폭염 영향의 실증을 위해 폭염의 발생일과 발생하지 않은 날(대조일)의 시간평균 방문인구 밀도를 각각 계산하고 비모수 대응표본 검정인 윌콕스 부호-순위 검정을 수행하였다. 분석결과 폭염의 발생이 도시민의 활동을 감소시키는 경향을 보이는 것을 통계적으로 확인할 수 있었다. 그러나 평일과 주말, 시기에 따라 행정동별로 차이를 보여 영향의 공간적 차이를 확인하기 위해 공간군집 분석을 수행하였다. 공간군집 분석에는 폭염일과 대조일 간 활동인구의 차이를 계산하고 국지적 군집분석 방법론인 LISA 분석을 수행하였다. 분석결과 전반적으로 활동인구가 감소하는 콜드스팟이 넓게 나타났으며, 평일과 주말에 따라 공간적 분포는 차이를 보였다. 평일에는 송파구, 강남구, 마포구에서 활동인구가 증가하는 핫스팟이 발생하였으며, 주말에는 강서구, 관악구, 금천구, 은평구에서 핫스팟이 나타났다. 반대로 콜드스팟은 평일 종로구, 성북구, 강북구, 동대문구, 성동구 일대에서 도출되었으며, 주말에는 종로구, 중구, 서초구, 송파구 일대에서 넓게 나타났다.

본 연구는 기존에 수행된 폭염의 영향에 관한 연구가 주로 개인의 건강에 초점을 맞춘 것과 달리 도시민의 활동에 미치는 영향을 집단적이고 공간적으로 살펴보았다는 것에 차별성을 가진다. 실증분석 결과를 통해 실제로 폭염의 발생이 도시민의 활동을 저하시키는 것을 확인할 수 있었으며, 폭염 영향을 저감시키기 위한 대책과 도시민의 활동저하로 인한 도시공간의 활력저하 관리방안 마련의 필요성을 확인할 수 있었다.

공간탐색에 따른 행정동별 활동 영향은 동일한 위해의 발생에도 도시민의 활동에 미치는 영향은 공간적으로 차이가 있음을 확인하였다. 폭염의 발생에도 의무적이고 필수적인 활동들로 도시민의 활동이 증가하는 지역은 폭염 영향 중점 관리지역으로, 반대로 폭염 발생에 따라 도시민의 활동이 급격하게 감소하는 지역은 도시 쇠퇴 우려 지역으로 공간별 정책 수립의 방향과 우선순위를 부여해 대응할 필요가 있음을 시사한다. 또한 분석된 지역별 활동인구 변화는 폭염의 영향과 취약성, 방재안전 등의 분야에서 하나의 지표로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

군집분석에서 나타난 동질의 공간 특성은 하나의 행정동 또는 자치구가 아닌 여러 행정동에 걸쳐 발생하므로 폭염 대응 종합대책, 폭염 저감시설 설치, 폭염 취약계층 지원

사업 등의 대책 마련 시 단일한 행정구역보다 넓고 유연한 공간적 범위의 고려가 필요함을 의미하며, 분석 결과는 생활권 또는 권역 수준의 대책 및 계획 수립 시 활용도가 높을 것으로 생각된다. 마지막으로 본 연구에서 구축한 것과 같은 고해상도의 인구 빅데이터 활용은 방재와 도시, 보건 등 여러 분야에서 목적에 맞는 연구 수행을 가능하게 할 수 있으며, 도출된 연구 결과는 기후변화 영향 저감 및 적응을 위한 정책의 수립 시 신뢰성 있는 기초자료로써 활용도가 높을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 「환경보건디지털 조사기반 구축기술개발사업(2021003330002)」과 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Adélaïde, L., Chanel, O., and Pascal, M. (2022). Health effects from heat waves in France: an economic evaluation. *Eur J Health Econ.*, Vol. 23, No. 1, pp. 119-131.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, Vol. 27, No. 2, pp. 93-115.
- Baek, J.B., and Kwon, Y.S. (2021). Analysis of domestic heatwave research trends. *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 17, No. 4, pp. 755-768.
- Chae, Y.R. et al. (2020). *2020 heatwave impact report*. Korea Environment Institute.
- Chae, Y.R., Lee, S.J., Jeon, H.C., Jeong, D.U., Park, J.C., Kim, D.S., et al. (2018). *Evidence-based climate change risk management framework for customized adaptation, research report*. Korea Environment institute.
- Cho, H.M., and Lee, Y.H. (2018). *Measures to improve Seoul's ability to respond to heat waves*. Seoul Institute Policy Report, No. 257, pp. 1-29.
- Chung, J.Y., Honda, Y., Hong, Y.C., Pan, X.C., Guo, Y.L., and Kim, H. (2009). Ambient temperature and mortality: An international study in four capital cities of East Asia. *Science of the total environment*, Vol. 408, No. 2, pp. 390-396.
- Ha, J., and Kim, H. (2013). Changes in the association between summer temperature and mortality in Seoul, South Korea. *International Journal of Biometeorology*, Vol. 57, pp. 535-544.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impact, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- KDCA. (2020). *2020 annual report on the notified patients with heat-related illness in Korea*.
- Kim, C.T., Lim, Y.H., Woodward, A., and Kim, H. (2015). Heat-attributable deaths between 1992 and 2009 in Seoul, South Korea. *PLoS ONE*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-14.
- Kim, Y., Kim, H., Honda, Y., Guo, Y.L., Chen, B.-Y., Woo, J.-M., and Ebi, K.L. (2015). Suicide and ambient temperature in East Asian countries: A time-stratified case-crossover analysis. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 124, No. 1, pp. 75-80.
- KMA. (2008). *Implementation of heatwave warning system to prepare for the extreme heat in summer*. Press Release.
- KMA. (2021). *Criteria for advisory/warning information*. Retrieved March 25, 2022, from <https://www.weather.go.kr/w/index.do>
- Lee, H.Y., and No, S.C. (2013). *Advanced statistical analysis*. Korea: Munu.
- 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*, Vol. 21, No. 4, pp. 751-763.
- Lee, W.H., Lim, Y.H., Dang, T.N., Seposo, X., Honda, Y., Guo, Y.L., et al. (2017). An investigation on attributes of ambient temperature and diurnal temperature range on mortality in five East-Asian countries. *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-9.
- Lim, Y.H. (2019). The health effects of heat waves. *Health and welfare policy forum*, Vol. 269, pp. 7-19.
- NIMS. (2020). *Korean climate change outlook report*.
- Ryu, J.H., and Min, M.K. (2021). Diagnosis and treatment of patients with heatrelated illnesses. *Journal of the Korean Medical Association*, Vol. 64, No. 4, pp. 296-302.
- Seoul Solution. (2021). *The statistic of Seoul*. Retrieved March 25, 2022, from <https://seoulsolution.kr/en>
- Statistics Korea. (2019). *Results of 2019 time use survey*. Press Release.

Received	March 28, 2022
Revised	March 29, 2022
Accepted	April 8, 2022

