

서울시 무더위 쉼터 설치 최적 입지 선정[†]

최원진¹ · 이미성²

¹단국대학교 정보통계학과 · ²단국대학교 통계데이터사이언스학과

접수 2024년 11월 29일, 수정 2025년 1월 3일, 게재확정 2025년 1월 10일

요약

이 연구는 기후변화에 따른 극단 기상현상의 가속화에 주목하여 해마다 심해지는 폭염 피해의 해결책 중 하나인 무더위 쉼터를 설치할 최적의 입지를 선정하는 데 목적이 있다. 입지 선정의 기준은 IPCC의 기후변화 취약성 평가 체계를 바탕으로 서울시 각 행정동에 대하여 폭염 취약성 지수를 도출하고, 행정동 별 노인 인구 대비 무더위 쉼터의 개수와 비교하여 쉼터 우선 설치 지표를 도입했다. 구체적으로, 기후변화에 대한 기후노출정도, 민감도, 적응능력 등의 지표에 해당하는 변수들로 각 그룹에 대한 주성분 분석(PCA)을 시행했고, 생성된 주성분에 가중치를 곱하는 방식으로 폭염 취약성 지수를 계산했다. 또한, 계산된 폭염 취약성 지수를 바탕으로 Moran's I와 스캔 통계량을 이용하여 각 지역의 자기상관성을 파악하고, 높은 취약성 지수를 갖는 행정동들이 밀집되어 군집을 이룬다는 것을 확인하였다. 분석 결과 취약성 지수 대비 무더위 쉼터 개수가 적은 일부 행정동이 있었고, 은평구의 비율이 타 지역 대비 높았다. 이러한 결과는 추후 지역 특성을 반영한 무더위 쉼터 설치 정책을 수립하는 데 기초 자료로 활용될 수 있다.

주요용어: 기후변화, 무더위 쉼터, 주성분 분석, 취약성 지수, 폭염.

1. 서론

폭염(暴炎, heatwave)은 비정상적인 고온 현상이 수 일에서 수십 일간 지속되며 막대한 인명 및 재산 피해를 가져오는 자연재해다. 폭염의 기준은 국가별로 다른데, 우리나라 기상청의 폭염 특보 기준은 일 최고 기온이 섭씨 33도 이상인 날이 이를 이상 지속될 것으로 예측되면 폭염 주의보를, 35도 이상 지속될 것으로 예측되면 폭염 경보를 각각 발령한다. 기준이 되는 기온 및 지속 기간이 국가별로 조금씩 다른 것은 폭염이 단순한 날씨 현상을 넘어서 인체, 생태계, 사회경제 시스템에 미치는 고유한 영향을 함께 고려해야 한다는 점을 시사한다.

최근 기상청 보고서에 따르면, 지구온난화로 인해 2024년 여름 기온이 역대 최고 수준을 기록할 것으로 전망했으며, 이에 따라 폭염 발생 빈도와 강도가 크게 증가할 것으로 예상했다. 실제로 2024년 6월 전국 평균기온은 22.7도를 기록하며 52년 중 가장 높은 것으로 나타났으며, 서울 지역 열대야는 6월 21일 발생해 118년 중 가장 빠른 열대야로 기록됐다(기상청 2024년 6월 기후 분석 결과, <https://www.kma.go.kr/kma/news/press.jsp?mode=view&num=1194405>).

[†] 본 연구는 2024년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업 지원을 받아 수행되었음 (2024-0-00035).

¹ (16890) 경기도 용인시 수지구 죽전로 152, 단국대학교 정보통계학과, 학부생.

² 교신저자: (16890) 경기도 용인시 수지구 죽전로 152, 단국대학교 통계데이터사이언스학과, 교수.

E-mail: misung.yi@dankook.ac.kr

6월 중순 이후로는 기온이 꾸준히 평년보다 높았으며, 특히 일반적으로 비로 인해 기온이 떨어지는 장마철 기간에도 기온이 대체로 평년보다 높았다. 또한, 습하고 더운 공기가 남서풍을 타고 우리나라에 지속적으로 유입되면서, 높은 습도로 인해 밤사이에도 기온이 떨어지지 않아 열대야가 발생했다. 7월 하순부터 8월 하순까지 장기간 따뜻한 티베트고기압과 북태평양고기압이 우리나라 상공을 덮으면서 맑은 날이 많아 낮 동안 강한 햇볕으로 높은 기온이 지속되었으며, 이로 인해 8월의 평균기온은 평년보다 2.8°C 높았다. 올 여름철 전국 평균 폭염일수는 24.0일로 역대 3위를 기록했으며 평년 (10.6일)보다 2.3배 많았다. 열대야 일수는 20.2일로 역대 1위였으며, 평년 (6.5일) 대비 3.1배에 달했다 (Table 1.1).

Table 1.1 National average days from may to august

Rank	Heatwave days		Tropical night days	
	Year	Days	Year	Days
1	2018	31.0	2024	20.2
2	1994	28.5	2018	16.5
3	2024	24.0	1994	16.5

질병관리청에 따르면 2023년 5월 20일부터 9월 30일까지 온열질환 응급실감시체제로 신고된 온열질환자는 총 2818명 (사망 32명)으로 전년 온열질환자 1,564명 (사망 9명) 대비 80.2% 증가한 것으로 나타났다. 이처럼 2023년도 온열질환자는 큰 폭으로 증가했으며, 앞으로 더욱 증가할 폭염 피해를 최소화할 방법을 찾는 것이 시급하다 판단된다.

서울시의 경우, 폭염에 의한 피해를 최소화할 방법으로 행정동별로 효율적으로 무더위 쉼터를 위치시키는 것을 제시한다. 보건복지부에 따르면 무더위 쉼터는 폭염으로 인한 건강 피해를 예방하고 취약계층의 열 스트레스를 완화하는 데 효과적인 것으로 나타났다 (보건복지부 무더위쉼터 운영 가이드라인, 2022). 하지만 서울시 자치구별로 무더위 쉼터 개수는 5배까지 차이가 난다. 이는 무더위 쉼터 지정이 자치구 재량에 맡겨진 것이 원인으로 재난취약계층을 위한 쉼터 운영 기준 등이 전무하다. 그 결과 서울에서 더위에 취약한 65세 이상 고령 인구 수가 가장 많은 송파구 (11만명, 2023)로 98개의 무더위 쉼터를 운영하고 있지만, 송파구와 고령 인구 수가 1만명가량 차이 나는 강서구 (10만명, 2023)는 32개에 불과하고, 고령 인구 비율이 각각 20%, 21%로 서울시 평균인 18.7%를 웃도는 종로구와 중구도 무더위 쉼터 개수가 각각 64개와 37개로 두 배 가까이 차이가 난다 (Noh, 2024; <https://www.newspim.com/news/view/20240611000781>).

무더위 쉼터는 취약계층의 피해를 최소화하고 폭염 대응 능력을 높이는 데 핵심적인 역할을 하는 만큼 인구 분포, 취약계층 기반 시설 등을 종합적으로 고려하여 무더위 쉼터를 배치해야 할 것이다. 따라서 서울시를 대상으로 행정동 단위의 데이터 분석을 통해 우선적으로 무더위 쉼터를 설치해야 할 행정동을 제시하려고 한다. 본 논문의 2절부터는 서울시 행정동 단위의 폭염 관련 데이터를 활용한 연구 설계와 분석 방법론을 상세히 설명한다. 여기에는 폭염 취약성 지수 산출을 위한 지표 선정과 PCA를 이용한 가중치 산정, 각 지표들을 통합한 우선순위지수 산출 등이 포함된다. 또한, Moran's I와 스캔 통계량을 통해 지역별 자기상관성과 군집에 대해 분석한다. 이어지는 3절에서는 연구의 결론을 요약하고, 정책 활용 가능성을 제시한다.

2. 연구 방법

2.1. 선행 연구

본 연구는 서울시 424개의 행정동을 대상으로 수행되었으며, 폭염 취약성 평가를 수행하기 위해 국내 선행 연구를 조사하여 세부 지표로 활용할 인자들을 선정하였다. 선행 연구에서는 폭염기간 일최고기온 평균, 일최고기온 33°C (폭염) 이상 일수, 일최저기온 25°C (열대야) 이상 일, 체감 온도, 온난일 계

속 기간, 65세 이상 인구 비율, 장애인 비율, 독거노인 비율, 기초생활수급자 비율, 농림어업 야외노동자 인구 비율, 인구밀도, 도시화 면적 비율, 녹지 면적 비율, 하천 및 수계 면적 비율, 1인당 지역내총생산 (GRDP), 재정자립도, 실업률, 일반회계 중 복지예산 비율, 인구당 보건소 인력, 인구당 응급의료기관 수, 인구당 소방서 인력, 65세이상 인구당 무더위 쉼터 설치 수 등이 폭염 취약성 평가를 위한 세부 지표로 활용되었다 (Jung, 2022). 선행 연구를 참고하여 Table 2.1의 데이터를 본 연구에 사용하였다.

또한, 선행 연구들에서는 전국의 시 (市) 단위로 폭염 취약성 지수를 구하여 분석했는데 (Lee 등, 2024; Kim 등, 2021; Gong 등, 2022), 해당 연구에 근거하여 무더위 쉼터 설치의 최적 입지를 구체적으로 선정하는 것은 다소 어려울 수 있다. 왜냐하면 무더위 쉼터의 대상은 노인과 기초생활수급자가 많은 비중을 차지하는 만큼 무더위 쉼터에 대한 접근성이 매우 중요한데, 기존 연구들은 시 (市) 단위로 분석했기 때문에 행정동 단위로 구체적으로 무더위 쉼터의 위치를 선정하는 것에 비해 효율적이지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 무더위 쉼터 설치 위치를 보다 구체적으로 선정하기 위해 서울시의 행정동 단위로 분석할 것이다.

Table 2.1 Features with definition

Features	Definition
UV	Average uv index
Apparent temperature	Average apparent temperature for the seniors
Heatwave duration	Total duration of heatwaves
Patients	Number of heat-related illness cases
Seniors	Ratio of seniors population (over 65)
Isolated seniors	Ratio of seniors living alone
Basic livelihood	Ratio of basic livelihood security recipients
Low-income seniors	Ratio of low-income seniors
Disabled	Ratio of disabled population
Population density	Population density
Dilapidated dwelling	Number of detached house and multiplex house over 20 years old
Cooling centers	Number of cooling centers per seniors population
Healthcare	Number of healthcare workers per population
Firefighters	Number of firefighters per population
Urban	Ratio of urban area
Riverside	Ratio of riverside landscaping
Green space	Ratio of green space area
FIR	Financial independence rate
RGDP	Real gross domestic product

2.2. 폭염 취약성 평가

폭염 취약성 지수는 국가기후변화적응센터에서 UN 기후변화 정부 간 협의체 (IPCC)가 제시한 개념을 바탕으로 폭염에 대응하는 능력의 상대적 차이를 나타낸 값으로, 수치가 높을수록 폭염에 취약하다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 폭염 취약성에 대한 체계적이고 종합적인 분석을 위하여 IPCC에서 제시하는 기후변화 취약성 개념을 기반으로 폭염 취약성 지표의 분류체계를 세분화하여 정의하였다. IPCC에서 제시한 ‘제4차평가보고서 (AR4, 2004)’에서는 기후변화 취약성분류체계를 ‘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 재정 상태와 같은 변수로 구분하였다 (Yu 등, 2008). 아래는 취약성 지수를 계산하는 식이다.

$$V = \text{Exposure} \times \alpha + \text{Sensitivity} \times \beta - \text{Adaptive capacity} \times \gamma. \quad (2.1)$$

2.2.1. Min-max scaling

수집된 각 데이터는 값의 스케일이 모두 다르기 때문에 표준화 과정이 필요하다. 이때, 표준화된 데이터가 $[0,1]$ 사이에 위치하도록 만들기 위해 min-max scaling을 진행했다.

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (2.2)$$

2.2.2. 폭염 취약성 평가 과정

본 연구에서의 폭염 취약성 평가 과정은 다음과 같다. 먼저, 표준화한 변수들을 노출성, 민감성, 적응능력 세 그룹에 각각 할당한다 (Table 2.2). 여기서 변수들을 각 그룹으로 나눈 이유는 IPCC가 기후변화로 인한 부정적 영향을 평가하기 위해 노출도, 민감도, 적응능력 세 가지 요소를 고려하는 방법을 제시하였는데, 해당 방법에서 제시된 수식 (식 2.1)을 본 연구의 데이터에 적용하기 위해서이다. 그 다음, 주성분 분석 (PCA, principal component analysis)을 통해 각 그룹의 가중치를 산정한 후, 마지막으로 표준화된 자료에 가중치를 곱하여 폭염 취약성 지수 V 를 산출한다.

Table 2.2 Group of each features	
Groups	Features
Exposure	UV
	Apparent temperature
	Heatwave duration
	Patients
Sensitivity	Seniors
	Isolated seniors
	Basic livelihood
	Low-income seniors
	Disabled
	Population density
	Dilapidated dwelling
Adaptive capacity	Cooling centers
	Healthcare
	Firefighters
	Urban
	Riverside
	Green space
	Financial independence rate
	RGDP

2.2.3. 가중치 산정 방법

취약성 지수를 도출할 때 사용되는 가중치를 설정하기 위해 기존에 대표적으로 많이 사용되었던 기법에는 동일 가중치 기법, AHP 기법 등이 있으나, 연구자의 주관적 판단에 의존한다는 한계가 존재한다 (Kim 등, 2021). 또한, 본 연구에서 폭염 취약성 지수를 계산하기 위해서는 18개의 변수가 필요한데, 이처럼 많은 변수를 활용하는 분석에는 차원을 축소하는 주성분 분석 (PCA, principal component

analysis)이 매우 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 고차원 데이터를 축소할 수 있고, 변수 간 상관관계를 잘 반영할 수 있는 주성분 분석을 통해 가중치를 산정할 것이다.

주성분 분석으로 가중치를 설정하는 과정은 다음과 같다. Table 2.2와 같이 각 그룹에 할당된 변수들로 그룹별 주성분 분석을 수행한다. 먼저, PCA를 이용한 그룹별 첫 번째 주성분을 계산한다. 여기서 w_i 는 각 변수에 대한 주성분 계수이다.

$$PC_1 = \sum_{i=1}^n w_i x'_i. \quad (2.3)$$

Table 2.3 PC_1 of each group

$PC_{1,Group}$
$PC_{1,E} = 0.16x_1 + 0.02x_2 + 0.18x_3 - 0.97x_4$
$PC_{1,S} = 0.5x_5 + 0.35x_6 + 0.41x_7 + 0.53x_8 + 0.36x_9 - 0.15x_{10} - 0.18x_{11}$
$PC_{1,A} = 0.07x_{12} + 0.34x_{13} + 0.39x_{14} + 0.18x_{15} + 0.09x_{16} + 0.03x_{17} + 0.64x_{18} + 0.52x_{19}$

그 다음 각 그룹별 첫 번째 주성분의 분산 설명 비율과 해당 그룹의 모든 주성분의 분산 설명 비율을 합한 값의 비를 각 그룹별 가중치로 산정한다.

$$w_{group} = \frac{\text{Explained variance of } PC_1}{\sum_{j=1}^k \text{Explained variance of } PC_{1,j}}. \quad (2.4)$$

마지막으로 각 그룹 내에서 변수별 가중치는 해당 변수의 주성분 계수의 절대값을 기준으로 할당한다.

$$w_{variable} = w_{group} \times \frac{|w_i|}{\sum_{i=1}^n |w_i|}. \quad (2.5)$$

2.3. 폭염 취약성 지수 및 우선순위지수 산출

각 그룹의 변수마다 주성분 분석으로 산정한 가중치를 적용하여 서울시 행정동별 폭염 취약성 지수를 산정하였다. 여기서 e, s, a는 각 그룹의 변수 개수이다.

$$V = \sum_{i=1}^e x'_{e,i} w'_{e,i} + \sum_{j=1}^s x'_{s,j} w_{s,j} - \sum_{k=1}^a x'_{a,k} w_{a,k}. \quad (2.6)$$

우선순위지수는 폭염 취약성 지수는 높지만 노인 인구 대비 무더위 쉼터 개수는 적은 행정동 즉, 가장 우선적으로 무더위 쉼터를 설치해야 할 행정동을 선정하는 기준 지표이며, 해당 지수가 높을수록 우선적으로 무더위 쉼터를 설치해야 할 행정동임을 의미한다. 우선순위지수를 산출하는 과정은 다음과 같다. 먼저, 폭염 취약성 지수를 min_max scaling을 적용한 표준화 취약성 지수를 생성한다.

$$V'_i = \frac{V_i - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}. \quad (2.7)$$

그 다음 각 행정동별 노인 인구 대비 무더위 쉼터 개수 변수를 표준화하는데, 노인 인구수 대비 쉼터 개수가 적을수록 높은 값을 갖도록 반대로 표준화한 역비례 표준화 쉼터 지수를 생성하였다.

$$S'_i = 1 - \frac{S_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}. \quad (2.8)$$

두 표준화 지수인 표준화 취약성 지수와 역비례 표준화 쉼터 지수를 합산해 우선순위지수를 산출하는데, 이때 각 변수의 분산을 바탕으로 가중치 w_V , w_S 를 산정한다. 그 결과 두 가중치는 각각 0.77, 0.23으로 산정되었다.

$$w_V = \frac{Var(V')}{Var(V') + Var(S')}, \quad (2.9)$$

$$w_S = \frac{Var(S')}{Var(V') + Var(S')}. \quad (2.10)$$

마지막으로 표준화된 각 지수와 구한 가중치 w_V , w_S 를 결합하여 우선순위지수 P 를 산출한다.

$$P_i = 0.77V'_i + 0.23S'_i. \quad (2.11)$$

2.4. Moran's I를 통한 공간적 자기상관 검정

각 행정동이 서로 공간 연관성을 가지는지 알아보기 위해 Moran's I 통계량을 이용한 검정을 시행했다 (Gittleman 등, 1990). 여기서 Moran's I는 분석에 사용할 지역이 공간 의존성, 즉 공간적 자기상관을 가지는 지 확인할 때 사용되며 다음과 같이 정의된다 (Kim 등, 2021).

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \times \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (p_i - \bar{p})(p_j - \bar{p})}{\sum_i (p_i - \bar{p})^2}, \quad (2.12)$$

여기서 N 은 행정동의 총 개수, w_{ij} 는 행정동 i 와 j 간의 공간적 가중치, p 는 각 행정동의 우선순위지수이다. Moran (1950)에서는 귀무가설 ‘공간적 자기상관을 가지지 않는다.’와 대립가설 ‘공간적 자기상관을 가진다.’를 검정한다. 이때, I 는 -1과 1 사이의 값을 가지는데, 큰 값을 가질수록 높은 공간적 자기상관을, 작은 값을 가질수록 작은 공간적 자기상관을, 0에 가까운 값을 가지면 공간적 자기상관이 없다는 것을 나타낸다.

2.4.1. Moran's I에서의 공간적 가중치

식 (2.13)에서 d_{ij} 는 위도, 경도를 기반으로 계산한 각 행정동 사이의 거리이고, 이에 역수를 취해 생성한 행렬의 성분이 공간적 가중치 w_{ij} 이다. 이때 각 행정동 사이의 거리에 역수를 취하는 이유는 거리가 멀수록 더 작은 가중치를 할당하기 위해서이다. w_{ij} 를 구하기 위한 수식은 식 (2.14)와 같다.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (2.13)$$

$$w_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}, \quad (2.14)$$

여기서 (x_i, y_i) 는 점 i 의 위도와 경도이고, (x_j, y_j) 는 점 j 의 위도와 경도이며, 구한 역수 거리행렬의 대각 성분은 모두 ∞ 이므로 0을 대신 할당한다. 아래의 행렬 (2.15)는 일부 행정동 (가락1동, 가락2동, 가락본동, 가리봉동, 가산동 순서)의 공간적 가중치 행렬 W 의 산정 결과이다.

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 44.61 & 73.87 & 4.54 & 4.45 \\ 44.61 & 0 & 109.83 & 4.12 & 4.05 \\ 73.87 & 109.83 & 0 & 4.27 & 4.20 \\ 4.54 & 4.12 & 4.27 & 0 & 144.25 \\ 4.45 & 4.05 & 4.20 & 144.25 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

2.5. 스캔 통계량

스캔 통계량은 공간 데이터에서 특정 사건의 발생이 무작위 분포와 비교하여 유의하게 높은 영역, 즉 클러스터를 탐지하는 데 사용되는 통계적 방법이다 (Kulldorff, 1997). 본 연구에서는 식 (2.7)에서 구한 표준화 취약성 지수에 100을 곱한 값 (V_{new})을 사건의 수로 사용하고, 모집단 크기를 V_{new} 의 상한인 100으로 모든 행정동을 통일해 사용할 것이다. 이때, 귀무가설을 ‘어떠한 특정 지역은 다른 지역보다 사건의 수가 유의미하게 차이 난다.’라고 할 것이며, 표준화 취약성 지수에 100을 곱하는 이유는 기존 취약성 지수의 범위가 $[0,1]$ 으로 상당히 좁기 때문에 유의미한 클러스터를 도출할 수 없을 가능성이 크기 때문에 범위를 보다 더 넓게 만들기 위해서이다.

2.5.1. 스캔 통계량 계산

스캔 통계량을 구하기 위해서는 관심 영역 내의 모든 가능한 클러스터 Z 에 대해 우도비 $L(Z)$ 를 계산하는데, 여기서 $O(Z)$ 는 클러스터 Z 에 포함된 행정동의 V_{new} 의 합계, N 은 $100 \times$ (행정동 개수), N_Z 는 $100 \times$ (클러스터 Z 에 포함된 행정동 개수), T 는 모든 행정동의 V_{new} 의 합계이다. 먼저, 각 클러스터에 포함된 행정동의 V_{new} 의 합의 기댓값 $E(Z)$ 을 구한다 (식 2.16).

$$E(Z) = \frac{N_Z}{N} \times C. \quad (2.16)$$

그 다음 $O(Z)$ 와 $E(Z)$ 의 비율을 이용하여 우도비 $L(Z)$ 를 구한다 (Seo 등, 2023).

$$L(Z) = \left(\frac{O(Z)}{E(Z)} \right)^{O(Z)} \times \left(\frac{T - O(Z)}{T - E(Z)} \right)^{T - O(Z)}. \quad (2.17)$$

2.5.2. Monte Carlo 시뮬레이션

귀무가설 하에서 취약성 지수가 랜덤하게 분포한다고 가정하고, 이를 기반으로 다수의 시뮬레이션 데이터를 생성한 후, 각 시뮬레이션 i 에 대해 실제 데이터와 동일한 취약성 지수의 총합 T 를 유지하면서 취약성 지수를 무작위로 재배치한다. 그 다음, 생성된 각 시뮬레이션 데이터에 대해, 모든 가능한 클러스터 Z 에 대한 우도비 $L_i(Z)$ 를 계산하고, 그 중 최대값을 취하여 시뮬레이션 스캔 통계량 L_i 를 얻는다 (식 2.18).

$$L_i = \max_Z (\ln(L_i(Z))). \quad (2.18)$$

이 과정을 총 N 번 반복하여, 시뮬레이션 스캔 통계량 집합 $\{L_1, L_2, \dots, L_N\}$ 을 얻는다. 마지막으로 실제 데이터의 스캔 통계량 L_{obs} 와 시뮬레이션 스캔 통계량 집합을 비교하여, L_{obs} 보다 크거나 같은 시뮬레이션 통계량의 수를 세어 p 값을 계산한다. 이를 통해 실제 데이터에서 관찰된 클러스터의 통계적 유의성을 평가할 수 있다. 2.4절과 2.5절의 연구 결과는 3절에서 설명할 것이다.

3. 연구 결과

3.1. 지표 요약

각 그룹별 가중치와 각 그룹에 속한 변수들의 세부 가중치를 Table 3.1에 표시하였다. 적응능력 (Adaptive capacity) 그룹에 속한 재정자립도 (Financial independence rate), RGDP 변수는 동일 그룹의 다른 세부 변수에 비해 상대적으로 높은 가중치가 산정되었는데, 그 이유는 PCA의 특성과 관련이 있다. PCA는 변수들 간의 상관관계를 바탕으로 새로운 축 (주성분)을 생성하는데, 이때 재정자립도와 RGDP의 상관계수는 약 0.88로 매우 강한 양의 상관관계를 가지고 있으며 인구당 보건·소방 인력 변수 (Healthcare, Firefighters) 또한 재정자립도, RGDP와 각각 0.4 이상의 상관계수를 가지므로 강한 양의 상관관계를 가진다고 할 수 있다. 이러한 상관성이 가중치 결정에 결정적인 역할을 하는 PC1에 강하게 반영되었기 때문에 적응능력 그룹의 로딩 벡터 (loading vector)에서 FIR, RGDP, Healthcare, Firefighters 변수들이 다른 변수들에 비해 높은 로딩 값을 가지게 되고, 그 결과 동일 그룹 내의 다른 변수들보다 상대적으로 높은 가중치가 산정된다.

Table 3.1 Weights of features

Groups	Features	Weights	
Exposure	UV	0.314	0.039
	Apparent Temperature		0.004
	Heatwave Duration		0.042
	Patients		0.229
Sensitivity	Seniors	0.278	0.056
	Isolated Seniors		0.040
	Basic Livelihood		0.046
	Low-Income Seniors		0.059
	Disabled		0.040
	Population Density		0.017
	Dilapidated Dwelling		0.021
Adaptive Capacity	Cooling Centers	0.408	0.012
	Healthcare		0.061
	Firefighters		0.071
	Urban		0.033
	Riverside		0.016
	Green Space		0.006
	Fiscal Self-Reliance Ratio		0.116
	RGDP		0.094

2.3절에서 스케일링한 폭염 취약성 지수와 쉼터 지수를 바탕으로 우선순위지수를 행정동 별로 산출하였고, 결과를 Table 3.2에 요약하였다.

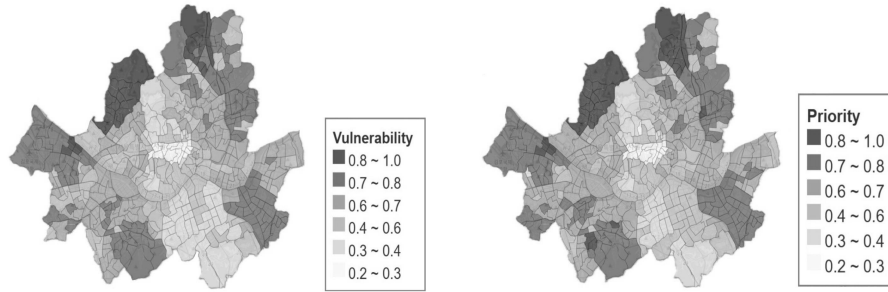


Figure 3.1 Plot of heatwave vulnerability index and priority index

Table 3.2 Regions with each scaled index

Case	Rank	Region	V'	S'	P
Top 7	1	Bulgwang 2-dong	0.984	0.907	0.966
	2	Banghak 2-dong	1.000	0.825	0.959
	3	Galhyeon 1-dong	0.980	0.887	0.958
	4	Daejo-dong	0.972	0.889	0.953
	5	Gusan-dong	0.969	0.893	0.951
	6	Galhyeon 2-dong	0.955	0.935	0.951
	7	Yeokchon-dong	0.955	0.936	0.950
Bottom 7	1	Sogong-dong	0.000	0.649	0.152
	2	Pil-dong	0.022	0.600	0.157
	3	Jangchung-dong	0.040	0.598	0.170
	4	Gwanghui-dong	0.046	0.590	0.173
	5	Jungnim-dong	0.059	0.618	0.190
	6	Euljiro-dong	0.104	0.520	0.201
	7	Donghwa-dong	0.092	0.606	0.212

3.1.1. Moran's I 통계량

2.3절에서 구한 우선순위지수와 2.4.1절에서 구한 공간적 가중치를 바탕으로 Moran's I를 계산한 결과 Moran's I는 0.181로 산출되었다. 해당 통계량이 양수이고, R에서의 Moran.I 함수 결과 p 값이 0에 매우 가까우므로 5% 유의수준에서 귀무가설을 기각하며 양의 공간적 자기상관이 있다고 할 수 있다. 이는 인접한 지역들이 약간의 유사성을 보이지만, 그 정도가 강하지 않음을 의미한다.

3.1.2. 스캔 통계량

2.5절에서 설명한 스캔 통계량을 R로 구한 결과는 다음과 같다 (Table 3.3).

Table 3.3 Scan statistics result by R

ID	nregions	Max dist	Cases	Ex	RR	Stat	p-value
1	66	10.6	4807	3751.1	1.4	166.2	0.02
2	14	4.3	1317	795.7	1.7	148.6	0.02
3	14	3.7	1097	795.7	1.4	53.0	0.02
4	35	7.1	2436	1989.2	1.3	51.6	0.02
5	36	6.3	2412	2046.1	1.2	34.2	0.02
6	5	3.4	385	284.2	1.4	16.3	0.02

Table 3.3의 열의 의미는 순서대로 클러스터 번호, 클러스터에 포함된 행정동 수, 클러스터의 최

대 반경, 클러스터 내의 취약성 지수 총합, 클러스터 내의 취약성 지수 총합의 기댓값, 상대위험도 (Cases/Ex), 우도비 검정통계량, p값을 의미한다. 여기서 1, 3, 6번 클러스터는 취약성 지수의 총합이 기댓값보다 약 40% 더 높고, 2번 클러스터는 기댓값보다 약 70% 더 높다. 또한, Stat이 높을수록 강한 클러스터임을 나타내는데, 1번과 2번이 타 클러스터보다 강한 클러스터임을 알 수 있다. 여기서 강한 클러스터의 의미는 취약성 지수의 정도가 특정 영역에 집중되어 있다는 것을 뜻한다. 이 결과를 바탕으로 기존 취약성 지수의 분포와 클러스터의 분포를 지도를 이용하여 시각적으로 비교해 보면 취약성 지수가 높은 행정동이 밀집되어 있는 지역에 클러스터들이 생성된 것을 알 수 있다 (Figure 3.2). 이때, 클러스터의 크기는 클러스터의 최대 반경인 Max dist 값을 킬로미터 (km)로 사용하여 표시했다.



Figure 3.2 Plot of heatwave vulnerability index and clusters

3.2. 결론

본 연구는 서울시 행정동별 무더위쉼터 설치의 최적 입지를 선정하기 위해 폭염 취약성 지수를 기반으로 한 분석을 수행하였다. 최근 이상기후와 폭염으로 인한 피해가 증가하고 있는 상황에서, 무더위쉼터의 증설은 지역사회의 기후 적응력을 강화하는 중요한 과제이다. 이를 위해 본 연구에서는 폭염 취약성 지수와 노인 인구 대비 쉼터 수를 활용하여 우선순위지수라는 새로운 지표를 개발하였고, Moran's I를 이용하여 각 지역의 자기 상관성을 파악하였으며, 스캔 통계량을 이용해 취약성 지수의 공간적 군집을 생성하여 높은 취약성 지수를 보유하고 있는 행정동들이 밀집되어 있다는 사실을 확인하였다.

우선순위지수는 폭염 취약성이 높고 무더위쉼터 접근성이 낮은 지역을 효과적으로 식별할 수 있도록 설계되었으며, 이를 통해 행정동별 무더위쉼터 설치의 시급성을 평가하였다. 분석 결과, 우선순위지수 상위 10개 행정동 중 8개가 은평구에 위치해 있었고, 불광2동, 대조동, 갈현1동 등의 행정동이 이에 해당된다. 이러한 결과는 해당 지역들이 폭염 피해 가능성이 높고 쉼터와 같은 적응 시설이 부족하다는 점을 시사한다.

따라서 본 연구는 폭염 피해 완화 및 시민 안전 강화를 위해 은평구의 불광2동, 갈현1동, 도봉구의 방학2동 등을 중심으로 무더위쉼터를 우선적으로 설치할 것을 제안한다. 본 연구에서 개발된 우선순위지수

수는 향후 다른 도시의 폭염 취약성 평가 및 적응 전략 수립에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Gittleman, J. L. and Kot, M. (1990). Adaptation: Statistics and a null model for estimating phylogenetic effects. *Systematic Zoology*, **39**, 227-241
- Gong, B. J., Won, J. S., Min, B. H. and Kim, S. Y. (2022). 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. *KIEAE Journal*, **22**, 69-79.
- Jung, H. C and Kim, G. H. (2020). Climate justice assessment considering regional inequality: A focus on heatwave. *Journal of Climate Change Research*, **11**, 621-268.
- 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**, 39-47.
- Kim, S. D., Jeon, Y. J. and Oh, H. J. (2021). Analysis of PM10 data using spatio-temporal correlation clustering and time series similarity. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **32**, 1259-1279.
- Kulldorff, M. (1997). A spatial scan statistic. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, **26**, 1481-1496
- Lee, H. J., Jang, H. B., Han, J. H. and Chung, G. H. (2024). Heat wave vulnerability in Korea: An analysis using D-P-S-I-R techniques. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **24**, 173-184.
- Moran, P. A. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, **37**, 17-23.
- Seo, Y. A. and Yoon, S. H. (2023). Analysis of population migration in Korean bon-gwan using scan statistics. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **34**, 673-684.
- Shim, J. H. (2017). *2017 Summer Issue of the Disaster Safety Journal Volume 19, Issue 2*, **75**, 36-40.
- Yoo, G. Y. and Kim, I. A. (2008). Development and application of a climate change vulnerability index. *Korea Environment Institute (KEI)*, **2008**, 1-97.

Selection of optimal locations for heatwave shelters in Seoul[†]

Won Jin Choi¹ · Misung Yi²

¹Department of Information Statistics, Dankook University

²Department of Statistics and Data Science, Dankook University

Received 29 November 2024, revised 3 January 2025, accepted 10 January 2025

Abstract

This study aims to identify the optimal locations for establishing cooling shelters as a solution to the intensifying heatwave damages exacerbated by the acceleration of extreme weather events due to climate change. The site selection criteria are based on the IPCC's climate change vulnerability assessment framework. A Heatwave Vulnerability Index (HVI) was derived for each administrative district in Seoul, and a priority installation index for cooling shelters was introduced by comparing the number of shelters with the Senior population in each district. Specifically, principal component analysis (PCA) was conducted on variables corresponding to climate exposure, sensitivity, and adaptive capacity. The HVI was calculated by assigning weights to the generated principal components. Furthermore, Moran's I and scan statistics were employed to analyze spatial autocorrelation based on the HVI, confirming that administrative districts with high vulnerability indices tend to form clusters. The analysis revealed that certain districts had relatively fewer cooling shelters compared to their vulnerability index, with Eunpyeong-gu showing a particularly high ratio compared to other regions. These findings can serve as foundational data for developing future policies to establish cooling shelters tailored to the characteristics of each region.

Keywords: Climate change, heatwave, heatwave shelters, principal component analysis, vulnerability index.

[†] This research was supported by the MSIT (Ministry of Science, ICT), Korea, under the National Program for Excellence in SW, supervised by the IITP (Institute of Information & communications Technology Planing & Evaluation) in 2024. (2024-0-00035).

¹ Student, Department of Information Statistics, Dankook University 152, Jeongja-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16890, Korea.

² Corresponding author: Professor, Department of Statistics and Data Science, Dankook University 152, Jeongja-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16890, Korea. E-mail: misung.yi@dankook.ac.kr