

# 공간계획 활용을 위한 도시 열환경 취약성 평가 연구<sup>†</sup>

- 서울시를 사례로 -

엄정희

계명대학교 도시학부 생태조경학전공

## Vulnerability Assessment to Urban Thermal Environment for Spatial Planning - A Case Study of Seoul, Korea -

Eum, Jeong-Hee

Dept. of Landscape Architecture, Keimyung University

### ABSTRACT

This study aims to assess vulnerability in urban thermal environments of Seoul by using indicators frequently used in previous studies as well as effective indicators for spatial planning like urban and environmental planning. For this purpose, fifteen indicators that influence urban thermal environments such as heat waves, urban heat island effects, and urban micro-climates were identified based on literature reviews. Indicators for presenting urban structure and spatial properties were included; for example, building volume as 'exposure to climate', buildings completed before 1980 as 'sensitivity', and green space areas as 'adaptive capacity'. Among them, twelve indicators were applied to assess vulnerability in urban thermal environments of Seoul by using a GIS spatial analysis combined with fuzzy logic. The results show that the Gangnam area is identified as more vulnerable to a heat environment as compared to the Gangbuk area. In the Gangnam area, Seocho-gu, Gangnam-gu, Dongjak-gu, Yeongdeungpo-gu, Gangseo-gu were relatively high in vulnerability, while Dongdaemun-gu, Gangbuk-gu, Gwangjin-gu, Jungrang-gu were relatively high in the Gangbuk area. Gwanak-gu, Dobong-gu, Eunpyeong-gu, and Nowon-gu, which include forested areas, have low vulnerability in the sectors of 'exposure to climate' and 'sensitivity' due to the impact of Gwanaksan and Bukhansan. However, some areas with high vulnerability like Seocho-gu and Gangnam-gu may have lower vulnerability if the indicator 'status of air conditioning' from the sector of 'adaptive capacity' is used. This study could support the establishment of a practicable thermal environment policy and spatial planning to reduce heat-related risks in the field of urban and environmental planning.

*Key Words: Heat Wave, Climate Adaptation, Indicator, Fuzzy Theory, Environmental Planning*

<sup>†</sup>: 본 연구는 한국환경정책·평가연구원(2012년도 기본연구과제: 기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 수립/RE2012-11) 및 한국연구재단(과제번호: 2015R1C1A2A01052513)의 지원으로 수행되었습니다.

**Corresponding author:** Jeong-Hee Eum, Dept. of Landscape Architecture, Keimyung University, Daegu 42601, Korea, Tel.: +82-53-580-5646, E-mail: eumjh99@kmu.ac.kr

## 국문초록

본 연구에서는 열환경 취약성 평가에 관한 국·내외 선행연구 고찰을 바탕으로 열환경 취약성 평가에 적합하면서 도시 및 환경계획 등 공간계획 분야에서 활용할 수 있는 취약성 평가지표를 선정하고, 이를 활용하여 사례지역인 서울시의 열환경 상태를 진단하였다. 이를 위해 폭염, 도시 열섬, 도시 미기후 등 국내·외 열환경 취약성 평가에 활용된 지표들을 고찰하여 도시 열환경 취약성 평가를 위한 15개 지표를 선정하였는데, 기후노출 분야의 건물체적, 민감도 분야의 열환경 취약 건축물, 적응능력 분야의 녹지면적 등 도시구조적·공간적 지표를 포함하였다. 선정된 지표 중 사례지역인 서울지역에 대해 활용가능한 12개 지표의 공간정보를 구축하고, 퍼지이론을 활용한 GIS 공간분석을 통해 서울의 열환경 취약성을 평가하였다. 분석 결과, 강남 지역이 강북 지역보다 열환경에 더 취약한 것으로 파악되었는데, 강남 지역에서는 서초구, 강남구, 동작구, 영등포구, 강서구 일대의 열환경 취약성이 상대적으로 높게 나타났으며, 강북 지역에서는 동대문구, 강북구, 광진구, 중랑구 일대가 다른 구에 비해서 취약성이 높은 것으로 나타났다. 산림지역 및 서울시 외곽지역에 위치한 관악구, 도봉구, 은평구, 노원구 등은 관악산, 북한산 등 산림의 영향으로 인해 '기후노출'과 '민감도' 분야의 취약성이 낮았다. 하지만, 자료수집의 한계로 활용하지 않았던 '적응능력' 분야의 에어컨 보유 현황 지표가 분석에 반영된다면, 서초구, 강남구 등 취약성이 높게 평가된 지역의 결과에 영향을 미쳤을 것으로 예상된다. 본 연구는 기존의 국내 열환경 취약성 평가에서 활용하지 않았던 도시구조적·공간적 지표를 활용함으로써 도시 및 환경계획 분야에서 열취약성을 개선하기 위한 정책 마련에 기여하고, 열환경 위험성을 저감하기 위한 공간계획 수립에 기여할 수 있을 것으로 판단한다.

주제어: 폭염, 기후 적응, 지표, 퍼지이론, 환경계획

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

기후변화에 따른 지구온난화의 영향으로 지구의 평균기온은 지속적으로 상승하고 있으며, 최근에는 그 상승속도가 더욱 가속화되고 있다. 그 중 우리나라는 세계적으로도 기후변화의 상승이 빠른 국가 중 하나인데, 지난 100년간(1911~2010년) 전 지구 평균기온이 0.75°C 상승하는 동안(Korea Meteorological Administration, 2011) 우리나라의 전국 평균기온은 지난 90년 동안 약 1.0°C 상승하였다(National Institute of Meteorological Research, 2009). 특히 6대 광역도시 평균기온은 1.7°C 상승하여 세계 평균의 2.3배에 달하는 높은 상승폭을 보이고 있다(National Institute of Meteorological Research, 2009).

이러한 이상 기온은 폭염, 열대야 등 도시의 열환경을 악화시키는데, 기상청 발표에 따르면 폭염은 현재보다 약 3배 이상 증가할 것으로 예상되며, 열대야는 2050년에 현재보다 약 6배 증가할 것으로 알려졌다(Korea Meteorological Administration, 2011). 특히, 올해는 전 지구적인 고온현상으로 인해 1994년 이래 가장 더운 여름으로 기록되고 있는데, 폭염과 열대야의 빈도 및 강도가 더욱 강해졌으며, 이에 따라 온열환자 수 역시 급증하였다. 폭염과 열대야의 증가는 온열질환에 취약한 노인계층과 소아계층에 특히 더 문제가 된다.

기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)은 시스템이 노출된 기후변동의 특성, 규모 및 속도, 기후변화에 대한 민감도, 적응능력의 함수로 기후변화 취약성이 표현된다고 정의하였다(IPCC, 2007). IPCC의 정의에 따라 국·내외 많은 연구들은 홍수, 대기오염, 폭염 등 다양한 분야에서 기후변화 취약성을 평가하고, 평가결과를 정책수립 및 제도마련에 반영하고자 하였다. 국내에서는 기초자치체의 기후변화 적응 세부시행계획 수립을 지원하기 위해 국가 차원에서 홍수, 태풍, 폭염, 한파 등 각 분야별 취약성을 평가하기 위한 지표를 도출하고, 분야별 취약성을 평가하였으며(National Institute of Environmental Research and Ministry of Environment, 2012; Jung *et al.*, 2012), 그 결과를 활용하여 각 지자체 별로 분야별 기후변화 취약성을 진단하였다.

본 연구에서는 열환경 취약성 평가에 관한 국·내외 선행연구 고찰을 바탕으로 열환경 취약성 평가에 적합하면서 도시 및 환경계획 분야에서 활용할 수 있는 취약성 평가지표를 선정하고, 이를 활용하여 사례지역인 서울시의 열환경 상태를 진단하였다. 이를 위해 폭염, 도시 열섬, 도시 미기후 등 국내·외 열환경 취약성 평가에 활용된 지표들을 고찰하고, 각 지표의 특징을 분석한 후, 체계적인 접근과 이론적인 근거를 바탕으로 도시 열환경 취약성 평가를 위한 지표를 선정하였다. 선정된 평가 지표는 퍼지이론을 활용한 GIS 공간분석을 통해, 서울시의 열환경 취약성을 평가하는데 적용하였다. 본 연구는 기존의

국내 열환경 취약성 평가에서 활용하지 않았던 도시구조적·공간적 지표를 활용함으로써 도시 및 환경계획 분야에서 열취약성을 개선하기 위한 정책 마련에 기여하고, 열환경 위험성을 저감하기 위한 공간계획 수립에 기여할 수 있을 것으로 판단한다.

## 2. 선행연구 고찰

도시 열환경 취약성 평가와 관련한 국외 및 국내 선행연구를 고찰하였다. Lissner *et al.*(2012)은 독일 노르트라인베스트팔렌 주(Nordrhein-Westfalen, NRW)의 396개 지자체를 사례로, Fuzzy-logic 알고리즘을 적용하여 인간의 건강에 미치는 폭염의 영향을 평가하기 위해 표준화된 취약성 평가 방법을 제안하였다. 평가를 위해 4개의 지표를 사용하였는데, 기후노출 지표로써 폭염연속 일수(일최고기온이 30°C 이상인 일수가 3일 이상 지속되는 기간의 일수)를, 민감도 지표로써 불투수포장 지역, 인구밀도, 65세 이상 인구를 활용하였으며, 적응능력에 관한 지표는 활용하지 않았다. Toronto Public Health(2011)는 캐나다 토론토의 특성을 반영하면서 공간적으로 표현되는 열 취약성 평가방법에 관해 연구를 진행하였다. 이를 위해 지리정보체계를 활용해서 열에 대한 노출, 민감도, 취약 정도의 공간적 패턴을 지도화하고 분석하는 평가방법을 개발하였다. 열 취약성 평가는 IPCC에서 제안한 취약성 평가틀인 기후노출(인구밀도, 지면 기온, 녹지공간 접근성, 나무그늘, 5층 이상 고층주택, 1986년 이전에 지어진 고층임대주택 등 6개)-민감도(저소득층, 주거비에 수입의 50% 이상을 사용하는 세입자, 영어를 사용하지 않는 사람, 최근 이민자, 25세 이상 고졸 미만 학력자, 순환계 및 호흡기 질환 긴급 방문자, 노임 민감도 등 12개)-적응능력(건물 냉방시설, 공공녹지지역 등 5개)에 따라 구분된 지표를 활용하였다. 특히, 열환경에 가장 취약한 계층인 노인층에 대한 세밀한 고려를 위해 13개의 노인민감도 지표를 활용하였는데, 저소득층 노인, 영어를 사용하지 않는 노인, 65~74세의 노인계층 중장애인 등이 이에 포함된다. Harlan *et al.*(2006)은 도시 미기후, 인구 특성, 열 환경과 기후 환경에 대처하기 위해 사람들이 가지고 있는 자원 사이의 관계를 이해하기 위해서 미국 Phoenix를 대상으로 열 스트레스(heat stress)에 대한 취약성을 분석하였다. 본 연구에서는 인구적 특성, 열환경적 특성, 적응 자원의 세 분야에 해당하는 16개 변수를 활용하였다. '인구적 특성'에는 수입, 교육, 민족성, 연령이 포함되었으며, '열환경적 특성'에는 도심으로부터의 거리, 인구밀도, 오픈스페이스 비율, 녹지 풍부도가, '적응 자원'에는 사회와의 연계 정도, 에어컨 및 수영장 소유 비율, albedo와 연계된 지붕유형의 반사 정도가 분석 변수로 포함되었으며, 기후노출과 관련된 변수는 포함되어 있지 않다.

한편, 국내에서는 National Institute of Environmental Research

and Ministry of Environment(2012)에서 지자체별 기후변화 적응 세부시행계획 수립을 지원하기 위해서 전국을 대상으로 폭염 분야의 건강 취약성을 평가하였다. 이를 위해, 기후노출, 민감도, 적응능력의 3개 대리변수를 정의하고, 각 대리변수에 대한 세부 대리변수를 선정하여 GIS 기반의 취약성 평가 도구인 CCGIS(Climate Change adaptation program based on GIS)를 통해 취약성을 평가하였다. 기후노출의 세부 대리변수는 일최고기온, 체감온도, 불쾌지수 등 7개, 민감도의 세부 대리변수는 65세 이상 인구, 독거노인 비율 등 6개, 적응능력의 세부 대리변수는 재정자립도, 건강보험 적용인구비율 등 6개로 구성되어 있으며, 델파이 조사를 통해 각 변수의 가중치를 선정하였다. Sin *et al.*(2010)에서는 기후변화의 경로와 건강영향에 관계되는 모든 요소를 포함하는 총 6개의 층으로 구성된 건강분야 취약성 평가모형을 제안하였다. 취약성에 영향을 미치는 6개의 층(vulnerable layers)은 기상자료, 기후변화 건강위험·분야별 영향 정도, 특정 건강영향과 연결되는 환경, 특정 건강영향의 기후변화 취약계층, 분석단위 지자체가 가진 사회여건, 사회경제적 제도(특히, 보건의료체계)이다. 폭염분야에 대해서는 열대야 일수, 폭염관련 질환분포, 녹지면적, 노인 및 아동 비율, 실업률, 인구 천명당 의사수 등 6개층 23개 평가지표를 선정하였다. Park *et al.*(2010)은 옥상녹화 중점지구를 선정하기 위해서 도시열섬 취약성을 분석하였다. 녹지에 의한 영향을 받는 지역을 구분하기 위해 산림과 농업지역 및 연속된 습지지역, 수역, 도시공원녹지 등 3가지로 나누었다. 산림과 농업지역 및 연속된 습지지역은 하나의 큰 패치 경관요소로서 주변부 온도에 미치는 영향이 크고, 수역은 전형의 경관요소, 시가지구역 내 공원녹지는 작은 패치의 경관요소로서 상대적으로 주변부 온도 저감에 작은 영향을 미칠 것으로 예상하였다. 여러 연구 결과를 토대로 산림과 농경지 및 연계 습지의 경계로부터 멀어질수록 열섬취약성이 낮아진다고 가정하여 산림, 농경지, 공원 녹지, 수역 등으로부터의 거리에 따른 열섬취약성 기준점수를 부여하고, 경기도의 열섬취약성을 평가하였다.

열환경 취약성 평가에 관한 국·내외 선행연구를 고찰한 결과, 다음과 같은 특징이 있었다. 우선 국외 선행연구들은 단순한 지표를 활용하는 경우와 다양한 지표를 활용하는 경우로 구분할 수 있다. 전자의 경우에는 기후노출, 민감도 분야에서 대표적인 지표만을 활용하였으며, 적응능력 분야에 대한 지표가 포함되지 않는 등 적응능력 분야에 대한 비중이 크지 않다. 후자의 경우에는 기후노출, 민감도, 적응능력별 다양하고 상세한 지표를 활용하였는데, 특히 토론토를 대상으로 한 연구에서는 기후노출 분야에 녹지공간 접근성, 나무로 덮인 그늘, 오래된 고층 임대 주택 주거 등 녹지분포와 취약건축물 등 물리적인 요소가 고려되었으며, 민감도 분야에서도 열환경에 가장 취약한 노인층에 더욱 세부적인 지표를 활용하였다. 특히, 후자의

연구에서는 적응능력 분야에 있어서 건물 냉방시설, 수영장 소유 비율 등 부정적인 열환경을 회피할 수 있는 단기적 관점에서의 지표들이 활용된 것이 특징이다. 또한, 공간계획에서 이용할 수 있는 지표들이 도입되고 있다. 국내 선행연구들은 대부분 유사한 지표들을 활용하고 있었다. 기후노출 분야에서는 기온(일최고기온이 33°C 이상인 날의 횟수 등)과 관련된 항목이 중심을 이루고 있으며, 민감도 분야는 크게 연령 측면(65세 이상 인구 등), 경제수준 측면(기초생활수급자 비율 등), 질환분포 측면(심혈관질환 사망자 수 등)으로 구성되어 있다. 또한, 적응능력 분야에서는 주로 재정지원 측면(재정자립도 등)과 의료지원 측면(인구당 보건소 인력 등)으로 구성된다.

## II. 연구방법

### 1. 취약성 평가를 위한 지표 선정

열환경 취약성 평가를 위한 지표는 국내·외 선행연구 고찰을 통해 선정하였다. 취약성 평가에 관한 다수의 국내·외 연구들이 IPCC(2007)의 취약성 개념에 따라 노출(exposure)-민감도(sensitivity)-적응능력(adaptive capacity)으로 지표를 구성하였다. 이에, 본 연구에서도 IPCC의 취약성 개념에 준하여 기후노출, 민감도, 적응역량으로 구분하여 지표를 도출하였다(Figure 1 참조).

세부 지표선정을 위해 우선 국내에서 열환경 취약성 평가에 관한 연구와 지자체별 열환경 취약성 평가 사례를 조사하였다. 지자체의 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위해 구축된 폭염 취약성 지도(National Institute of Environmental Research and Ministry of Environment, 2012), 건강 분야 폭염 취약성 평가지표(Sin *et al.*, 2010), Seoul Metropolitan City(2012)를 포함한 9개 지자체의 기후변화 적응대책 세부시행계획(2012~2016년) 중 폭염 취약성 평가를 위한 대응변수, 옥상녹화 중점지구 선정을 위한 도시열섬 취약성 분석 항목(Park *et al.*, 2010)의 모든 지표를 종합하여, 각 선행연구에서 제시하고 있는 평가지표의 특징, 장점 및 단점을 분석하였으며, 마지막으로 평가지표의 활용 빈도를 분석하여 적용 가능한 지표를 선정하였다.

이 외에, 국내 평가항목을 보완하기 위해 독일의 폭염 취약성 평가 항목(Lissner *et al.*, 2012), 캐나다의 열 취약성 평가 변수(Toronto Public Health, 2011) 및 미국의 열 스트레스 취약성 분석 변수(Harlan *et al.*, 2006)를 고찰하여, 국내에 적용 가능한 항목들을 추출하였다. 예를 들어, '수영장 소유 비율'은 국내 여건에 맞지 않는 항목이므로 지표에 포함하지 않았으며, '오래된 고층 임대 주택 주거', '건물 냉방시설'에 대한 항목은 국내 상황에 맞게 변형하여 수용하였다.

### 2. 퍼지이론을 활용한 GIS 공간분석

퍼지 이론(Fuzzy theory)은 불분명한 상태 혹은 모호한 기준을 정량적으로 표현하는데 사용하는 수학적 도구이다. 집합에 속하거나 속하지 않는 것을 0과 1의 두 가지 개념으로 정의하는 전통적인 집합이론에 의해서는 공간정보를 다루는데 한계가 있다. 퍼지이론은 소속함수(membership function)를 이용하여 모든 공간정보를 소속정도에 따라 분류하거나 분석할 수 있으므로 공간정보를 다루는 GIS 분야에서 아주 유용한데, 퍼지 소속함수(Fuzzy membership function)에 의한 퍼지화 연산이 실제 공간자료가 지니는 연속성을 그대로 유지하여 보다 실제 현상에 접근하는 결과를 생성하기 때문이다(Lim *et al.*, 2007).

항목별 퍼지소속함수를 추출하기 위해서 개체들이 소속정도를 할당받는 순위 소속함수(prior membership function)를 사용하는 접근법(Lim and Cho, 2002)을 활용하였으며, 분석자료층에 정의된 퍼지부분집합의 소속함수를 결정짓는 특성값으로 항목별 임계값(threshold)을 활용하였는데, 임계값  $\chi$ 는 식 1에 의해 정하였다. 여기서 max는 항목별 최대값을 의미한다.

$$\cos\left(\frac{x}{\max} \times \frac{\pi}{2}\right)^2 = 0.999 \quad (\text{식 1})$$

퍼지 소속 값을 가진 항목별 지도 레이어 자료들은 퍼지 조합 함수에 의해 하나의 퍼지 소속값으로 통합될 수 있는데, 본 연구에서는 퍼지 조합 중 가장 일반적 활용성이 높은 "Fuzzy intersection(And)" 조합을 적용하여 취약성 지도를 작성하였다. 다양한 Fuzzy intersection operator 중에서 가장 일반적으로 이용

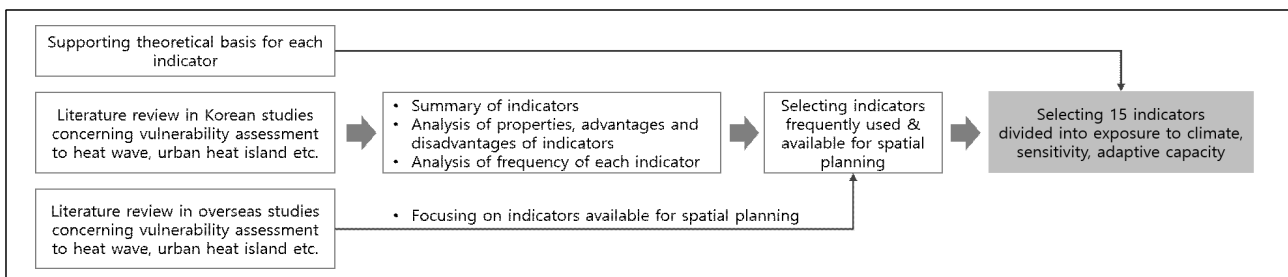


Figure 1. Process of selecting indicators for assessing vulnerability to urban thermal environment

되고 있는 “MIN” 함수를 이용하였으며, 식 2와 같이 표현된다.

$$\mu = MIN(\mu_A, \mu_B, \dots) \quad (\text{식 2})$$

여기서  $\mu$ 는 하나의 값으로 통합된 특정 격자에서의 퍼지 소속 값이며,  $\mu_A$ 는 지도 레이어 A의 해당 격자에서의 퍼지 소속 값,  $\mu_B$ 는 레이어 B의 해당 격자에서의 퍼지 소속 값이다. 이 함수는 최종 데이터의 값이 각 위치에서 퍼지 소속값의 최소값

에 의해 결정되도록 한다(Kang and Lee, 2012).

### III. 열환경 취약성 평가를 위한 지표 선정

#### 1. 국내 열취약성 평가지표 분석

Table 1은 국내 선행사례에서의 열 취약성 평가지표 및 활용 정도를 기후노출 분야, 민감도 분야, 적응능력 분야로 정리

Table 1. Vulnerability assessment indicators to urban thermal environment in previous studies and their application

Division	Indicator	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
Exposure	Daily maximum temperature	○	○			○		○	○		○	
	Number of days with daily maximum temperature $\geq 33^{\circ}\text{C}$	○						○	○	○		○
	Number of days with daily minimum temperature $\geq 25^{\circ}\text{C}$	○	○					○		○	○	○
	Effective temperature	○						○	○			
	Temperature-humidity index	○					○	○	○			
	Heat wave index	○					○	○	○			
	Relative humidity	○				○	○	○	○		○	
	Temperature				○		○					
Sensitivity	Daily maximum heat index in July/August					○					○	
	Number of people aged 65 and over	○	○	○	○	○		○	○		○	
	Number of children	○	○	○				○	○			
	Number (or rate) of elderly people living alone	○			○			○	○			
	Number (or rate) of households supplied by national basic livelihood security	○	○		○			○	○			
	Number of cardiovascular disease patients	○	○			○	○	○	○			○
	Number of deaths by heatstroke	○	○					○	○			
	Number of deaths by respiratory organs disease					○					○	
	Area of road		○	○						○		○
	Population density			○		○					○	
	Thermal inertia of land cover types					○					○	
	Rate of air conditioning					○					○	
Adaptive capacity	Area of impervious surface			○								
	Gross regional domestic product(GRDP)	○					○	○	○	○		○
	Rate of financial independence	○	○			○	○	○	○		○	
	Rate of beneficiaries of health insurance	○						○	○			
	Number of staffs in public health center	○	○					○	○			
	Number of emergency medical institution	○	○		○	○		○	○			
	Industry of social and welfare service	○	○					○	○			
	Number of doctor per 1,000 population	○				○					○	
	Medical institution				○	○					○	
	Area of green spaces		○		○				○			○
	Number of government official per population									○		○
	Number of heat shelters		○		○							
Number of street trees				○								

R1: National Institute of Environmental Research and Ministry of Environment(2012), R2: Sin *et al.*(2010), R3: Sim(2013), R4: Seoul Metropolitan City (2012), R5: Daegu Metropolitan City(2012), R6: Gwangju Metropolitan City(2012), R7: Ulsan Metropolitan City(2012), R8: Province of Gyeongsangbukdo (2012), R9: Province of Gyeongsangnamdo(2012), R10: Province of Chungcheongbukdo(2012), R11: Province of Jeollanamdo(2012)

한 것이다. 국내 선행연구들은 대부분 유사한 지표들을 활용하고 있다. 기후노출 분야에서는 기온과 관련된 항목이 중심을 이루고 있으며, 민감도 분야는 연령 측면, 경제수준 측면, 질환 분포 측면으로 구성되어 있다. 또한, 적응능력 분야에서는 주로 재정지원 측면과 의료지원 측면으로 구성되어 있다.

## 2. 도시 열환경 취약성 평가지표 선정

국내 · 외 선행사례를 분석한 결과를 바탕으로 열환경 취약성 평가를 위한 지표 선정의 방향을 다음과 같이 정리하였다. 특히, 도시 및 환경계획 분야에서 열취약성을 분석하고, 이를 개선하기 위한 정책을 수립하는데 기여할 수 있도록 도시구조적 · 공간적 지표를 활용하고자 하였다. 우선, '기후노출' 분야는 직접적으로 영향을 미치는 기상학적 환경뿐만 아니라, 간접적으로 영향을 미치는 도시구조적 환경을 고려하도록 하였다. '민감도' 분야는 연령 측면, 경제수준 측면, 질환분포 측면 등 사회인구적 민감도뿐만 아니라, 취약 구조물에 의해 영향을 받는 물리적 민감도를 고려하도록 하였다. 마지막으로, '적응능력' 분야는 그린인프라 등 열환경을 완화 · 저감할 수 있는 장기적 관점에서의 요소뿐만 아니라, 부정적인 열환경을 회피할 수 있는 단기적 관점에서의 요소를 고려하도록 하였다.

### 1) 기후노출 분야 지표 선정

기후노출이란 기후변화에 민감한 시스템의 요소가 기후와 접촉되는 정도를 나타낸다. 본 연구에서는 기후노출 지표를 도시 열환경에 직접적으로 작용하는 '기상학적 환경'과 간접적으로 작용하는 '도시구조적 환경' 분야로 구분하였다.

기상학적 환경은 폭염을 유발하는 기상요소와 관련된 것으로서, 폭염주의보 기준인 일최고기온이 33°C 이상인 날의 수와 일최고 열지수(Heat Index)가 32°C 이상인 날의 수를 선정하였다. 열지수는 습도와 기온을 활용하여 사람이 실제로 느끼는 더위를 지수화한 것으로, 똑같은 기온이라도 습도에 따라 값이 달라진다. 폭염관련 기상요소와 더불어, 일최저기온이 25°C 이상인 날의 수 또한 야간 열대야 현상 등 인간에게 영향을 미치는 열환경을 대표할 수 있는 기상학적 환경이다. 특히, 야간은 주간과 달리 에어컨이 있는 공공시설 공간을 활용하는데 제한이 있는 등 부정적인 열환경을 적극적으로 대처하는데 제한이 생기기 때문에, 야간에 발생하는 열대야 현상이 기후노출 요소로써 중요하게 다루어져야 한다.

도시구조적 환경은 도시열섬을 야기하는 도시구조와 관련된 것으로서, 폭염 등 기상학적 영향으로 도시의 열환경이 악화되었을 때 도시구조로 인해 더욱 취약한 열환경을 야기할 수 있다. 도시열섬은 주로 열을 흡수하는 불투수성 건축요소가 높게 밀집된 곳에서 발생하는데, 이러한 물질이 토양이나 식물과 같

은 자연적 지표요소보다 주간에는 더 많은 열을 가두고, 야간에는 그 열을 보다 천천히 방출하기 때문이다(Voogt, 2002). 이와 관련해서, 자연적 지표면이 아닌 불투수 포장면의 비율이 도시열섬을 형성하는 중요한 하나의 요소이다(Lissner *et al.*, 2012). 불투수포장률이 높을수록 낮동안 열의 흡수율이 높아지며, 반대로 도시 온도를 낮추는데 기여하는 녹지면적률이 상대적으로 낮아지는 것을 의미한다. 불투수포장률이 평면적인 측면의 도시구조적 환경이라면, 건물의 높이는 수직적인 측면에서 도시열섬을 야기하는 도시구조적 요소이다. 이는 건물의 높이가 높을수록 열을 흡수하는 표면적이 수직적으로 증가함으로써, 도시열섬이 더 증가할 수 있기 때문이다(Hupfer and Kuttler, 2005; Matzarakis and Mayer, 2008). 나아가, 건물 높이와 면적으로 계산되는 건물 체적이 증가하면, 도시열섬 형성에 영향을 미치는 또 다른 요소인 인공열(Shahamohamadi *et al.*, 2011)의 발생이 증가한다. 이는 건물 체적이 증가할수록 에너지 소비가 증가하면서 인공열(anthropogenic heat)의 발생 또한 증가하기 때문이다(Hamilton *et al.*, 2009).

### 2) 민감도 분야 지표 선정

민감도란 적응능력을 고려하지 않은 상황에서 기후변화에 영향을 받는 정도를 나타낸다. 본 연구에서는 민감도 지표를 물리적 민감도인 '취약구조물' 분야와 사회인구적 민감도인 '연령', '경제', '질환' 분야로 구분하였다.

취약구조물은 건물의 단열과 관련된 분야로, 동일한 기후 조건에서 건물 단열정도가 실내 온도 저감에 영향을 미친다(Mavrogianni *et al.*, 2012). 즉, 건물 단열은 기상학적 환경으로 인해 변하는 외부 기온에 따른 실내 온도의 변동폭을 줄이는데, 여름철 더운 외부 기온을 차단하는데 기여할 수 있다. 국내에서는 1979년 9월 「건축법 시행규칙」에서 처음으로 단열기준을 법적으로 규정(건축법 시행규칙 제25조 건축물의 열손실 방지를 위한 조치 신설)하였다. 2010년 서울에서 현재 단열기준이 전혀 적용되지 않는 1980년 이전의 노후 건물은 연면적 기준으로 10% 정도를 차지하고 있다(Kim, 2010).

사회인구적 민감도는 연령, 경제, 질환 분야로 구분하였다. 연령과 관련해서는 고온노출에 민감한 연령에 주목하였는데, 특히 65세 이상인 노년층 인구 및 5세 이하의 영유아층 인구가 폭염 등 고온에 노출되었을 때보다 영향을 받기 쉽다(McGeehin and Mirabelli, 2001; Laschewski and Jendritzky, 2002). 또한, 만성적 호흡기 질환 및 심장질환이 있는 경우 고온에 노출되었을 때 사망위험이 더 높은 것으로 보고되고 있다(McGeehin and Mirabelli, 2001; Institut De Veille Sanitaire, 2004). 그리고, 사회적으로 고립되어 다른 사람과 정기적인 접촉이 없는 경우 및 낮은 경제적 수입 또한 열환경과 관련해서 더 높은 건강위험도를 가진다(Klinenberg, 2002; Congressional Black Caucus

Foundation, 2004).

3) 적응능력 분야 지표 선정

적응능력이란 기후변화와 같은 외부 자극에 대한 사회적 조치를 나타낸다. 본 연구에서는 적응능력 지표를 장기적 조치인 '완화·저감 요소'와 단기적 조치인 '회피 요소'로 구분하였다.

도시열섬 및 폭염 등 부정적인 도시 열환경을 장기적으로 완화·저감하기 위해서는 도시계획을 통해 도시를 열환경에 유리한 구조로 변경해야 한다. 특히, 녹지 및 수공간은 도시 열환경 개선에 중요한 요소이며, 이들의 크기와 거리에 따라 도시 온도 저감에 기여하는 정도가 달라진다(Oh and Hong, 2005; EPA, 2008; Park *et al.*, 2010). 또한, 도시계획 과정에서 바람길을 도입하는 것도 도시열섬을 장기적으로 저감하는 조치일 수 있으며, 이를 위해서는 차고 신선한 공기가 생성되는 곳과 이동 정도를 파악하는 것이 필요하다(Eum, 2008; Eum, 2010). 한편, 에어컨 냉방이 가능한 시설로의 접근이 열로 인한 사망을 방지할 수 있는 가장 효과적인 방법이다(Harlan *et al.*, 2006).

4) 도시 열환경 취약성 평가를 위한 최종 지표

국내·외 기존연구 및 문헌을 바탕으로 도시 열환경 취약성을 평가하기 위해 선정한 최종 지표는 Table 2와 같다. 기후노출 분야, 민감도 분야, 적응능력 분야별 각 5개 지표를 포함하여 총 15개의 지표로 구성된다.

**IV. 지표를 활용한 사례지역의 열환경 취약성 평가**

1. 사례지역 및 적용 지표

열환경 취약성 평가를 위한 사례지역으로 서울특별시를 선정하였다. 서울특별시의 전체 면적은 약 605.21km<sup>2</sup>로 25개의 자치구와 424개의 행정동으로 구성되어 있다. Table 3은 사례지역의 열환경 취약성 분석에 사용된 지표이다. 선행연구를 기반으로 도출된 총 15개의 지표 중 실제 사례분석에 사용된 지표는 총 12개로, '기후노출' 분야에서 일최고열지수가 32℃ 이상인 날의 수, '민감도' 분야에서 심뇌혈관 질환자 수, '적응능력' 분야에서 에어컨 보유현황에 대한 지표가 자료수집의 한계(습도 및 에어컨 보유현황 등 자료가 구축되지 않았거나 의료자료와 같이 민감한 자료 특성에 따른 수집의 한계)로 제외되었다.

12개 지표에 대한 데이터는 2010년을 기준으로 수집되었고, 획득된 자료는 GIS DB로 구축되었다. 획득된 자료의 특성에 따라 구 단위, 동 단위 혹은 30m×30m의 그리드 정보로 구축되었다. 일최고기온이 33℃ 이상인 날의 수 및 일최저기온이 25℃ 이상인 날의 수는 서울지역 내에 설치되어 있는 25개 자동기상관측소(AWS)의 온도자료를 활용해 공간보간법(interpolation)을 실시하여 그리드 정보로 구축하였다. 1980년 이전에 준공된 건축물에 대한 자료는 구별 자료만 존재하였기 때문에 구 단위로 구축하였다. 서울시 통계자료에서 동별 자료로 수집할 수 있는 65세 이상 및 5세 이하 인구수, 65세 이상 독거노인수, 국민 기초생활보장 수급자 수는 동 단위로 구축하였다. 불투수포장률은 서울시 도시생태현황도에서 제공한 불투수도양포장률을 10등급으로 변환하여 사용하였고, 건물체적은 건폐율과 층수를 활용하여 건물체적을 산정한 후, 이를 백분율로 표시하여 10등급화하였다. 녹지면적과 하천으로부터의 거리에 관한 DB

Table 2. Vulnerability assessment indicators of urban thermal environment

Division	Subdivision		Indicator		
Exposure	Direct forcing	Meteorological factor	Number of days with daily maximum temperature ≥ 33℃		
			Number of days with daily maximum heat index ≥ 32℃		
			Number of days with daily minimum temperature ≥ 25℃		
	Indirect forcing	Structural factor	Impervious surface ratio Building volume		
Sensitivity	Physical sensitivity	Vulnerable structure	Building completed before 1980		
	Socio-demographic sensitivity	Age	Number of people aged 65 and over & children under age 5		
		Economy	Number of elderly people living alone Number of households supplied by national basic livelihood security		
		Disease	Number of cardiovascular disease patients		
Adaptive capacity	Long-term measures	Reduction / mitigation	Area of green spaces Distance from riparian sites Intensity of cold air flow		
			Short-term measures	Avoidance	Distance from heat shelters Status of air conditioning

Table 3. Vulnerability assessment indicators of urban thermal environment and their values of the fuzzy method used for the case study

Divison	Indicator	Use	Data source	Max.	Threshold
Exposure	Number of days with daily maximum temperature $\geq 33^{\circ}\text{C}$	○	KMA(2010)	18	14,155,90434
	Number of days with daily maximum heat index $\geq 32^{\circ}\text{C}$	×	-	-	-
	Number of days with daily minimum temperature $\geq 25^{\circ}\text{C}$	○	KMAv(2010)	38	29,884,61703
	Impervious surface ratio	○	Seoul Biotope Map(2010)	100	78,644,34991
	Building volume	○	Seoul Biotope Map(2010)	100	78,644,34991
Sensitivity	Building completed before 1980	○	Seoul Statistic Data(2010)	20.8	16,364,86684
	Number of people aged 65 and over & children under age 5	○	Seoul Statistic Data(2010)	6,671	5,246,364583
	Number of elderly people living alone	○	Seoul Statistic Data(2010)	1,817	1,428,967838
	Number of households supplied by national basic livelihood security	○	Seoul Statistic Data(2010)	3,043	2,393,147568
	Number of cardiovascular disease patients	×	-	-	-
Adaptive capacity	Area of green spaces	○	Seoul Biotope Map(2010)	4,735.9	637,614,5874
	Distance from riparian sites	○	Seoul Biotope Map(2010)	1,000	134,634,3013
	Intensity of cold air flow	○	Eum(2008)	2	0,269,268,603
	Distance from heat shelters	○	Seoul Biotope Map(2010)	1,000	134,634,3013
	Status of air conditioning	×	-	-	-

역시 서울시 도시생태현황도에서 제공한 녹지와 하천 data를 활용하였는데, 그 중 하천으로부터의 거리는 큰 하천으로부터 100m 간격으로 버퍼 존(buffer zone)을 생성하여 10개의 zone을 구축·활용하였다. 찬공기 이동 강도는 Eum(2008)에서 제공한 찬공기 이동 강도를 활용하였는데, 총 3등급(0: low, 1: medium, 2: high)으로 구분하였다. 점데이터 형식의 무더위 쉼터는 100m 간격으로 버퍼 존(buffer zone)을 생성하여 10개의 zone을 구축함으로써, 무더위 쉼터로부터 최대 1,000m까지를 분석에 활용하였다.

## 2. 사례지역의 열환경 취약성

Table 3에는 각 항목의 최대값 및 최대값으로부터 산정된 임계값이 제시되어 있다. 이를 바탕으로, 지표별 GIS 자료를 선형 퍼지 소속 함수에 의해 0과 1 사이의 퍼지 소속값을 가지는 지도로 변환하였다(Figure 2 참조). 기후노출 지표 및 민감도 지표는 1에 가까울수록 기후노출과 민감도가 높아지므로 열환경에 취약한 지역을 나타내며, 적응능력 지표는 1에 가까울수록 적응능력이 낮아지므로 열환경에 대한 대처가 잘 이루어질 수 없는 지역, 즉 다른 항목의 지표와 마찬가지로 열환경에 취약한 지역을 나타낸다.

퍼지 소속값은 퍼지 연산 함수를 통한 가중치를 계산하는 것으로 각 항목의 등급별 가중치가 퍼지소속 함수로 변환되고 난 다음, 'Fuzzy intersection(and)' 조합을 통해 하나의 퍼지 소속값으로 통합하여 최종 열환경 취약성 지도를 도출하였다(Figure 3 참조).

도출된 지표를 활용해 서울지역의 열환경 취약성을 분석한

결과, 강남 지역이 강북 지역보다 열환경에 더 취약한 것으로 파악되었다. 강남 지역에서는 서초구, 강남구, 동작구, 영등포구, 강서구 일대의 열환경 취약성이 높게 나타났으며, 강북 지역에서는 동대문구, 강북구, 광진구, 중랑구 일대가 다른 구에 비해서 열환경 취약성이 높은 것으로 나타났다. 영등포구, 강남구, 광진구, 중랑구, 동대문구 등이 열환경에 취약한 지역으로 분석된 것은, 일최고기온이  $33^{\circ}\text{C}$  이상인 날의 수 및 일최저기온이  $25^{\circ}\text{C}$  이상인 날의 수 등 '기후노출' 분야에서 취약성이 매우 높았기 때문인 것으로 파악된다. 특히, 광진구, 중랑구 등이 '민감도' 분야에서 낮은 혹은 보통의 취약성을 나타낸 반면, 영등포구는 서초구와 함께 민감도 분야에서도 높은 취약성을 나타내었는데, 이는 구단위로 구축된 1980년 이전에 준공된 건축물 지표의 분석자료가 결과에 크게 반영되었기 때문인 것으로 판단된다. 송파구와 강동구는 '기후노출' 분야에서는 취약 지역으로 분석되었으나, '민감도' 분야에서 취약성이 낮은 것으로 분석되었기 때문에, 최종적으로는 취약성이 낮은 지역과 높은 지역이 혼재되어 있다.

열환경 취약성이 상대적으로 낮은 지역은 관악구, 노원구, 도봉구, 은평구, 서대문구, 종로구 일부, 강동구 일부, 강서구 일부 등으로, 산림지역 및 서울시 외곽지역에 주로 분포되어 있다. 관악구, 도봉구, 은평구, 노원구 등은 관악산과 북한산 등 외곽에 있는 산림지역의 영향으로 인해 기후노출과 민감도가 낮으며, 적응능력이 상대적으로 높은 지역으로 분석되었다. '녹지 및 수계와의 거리' 지표에서 높은 적응능력으로 분석된 한강, 남산, 관악산 등은 서울지역에서 열취약성이 낮은 곳으로 평가되었다.

열환경 취약성 분석 결과가 구별로 뚜렷한 차이를 보이는 것



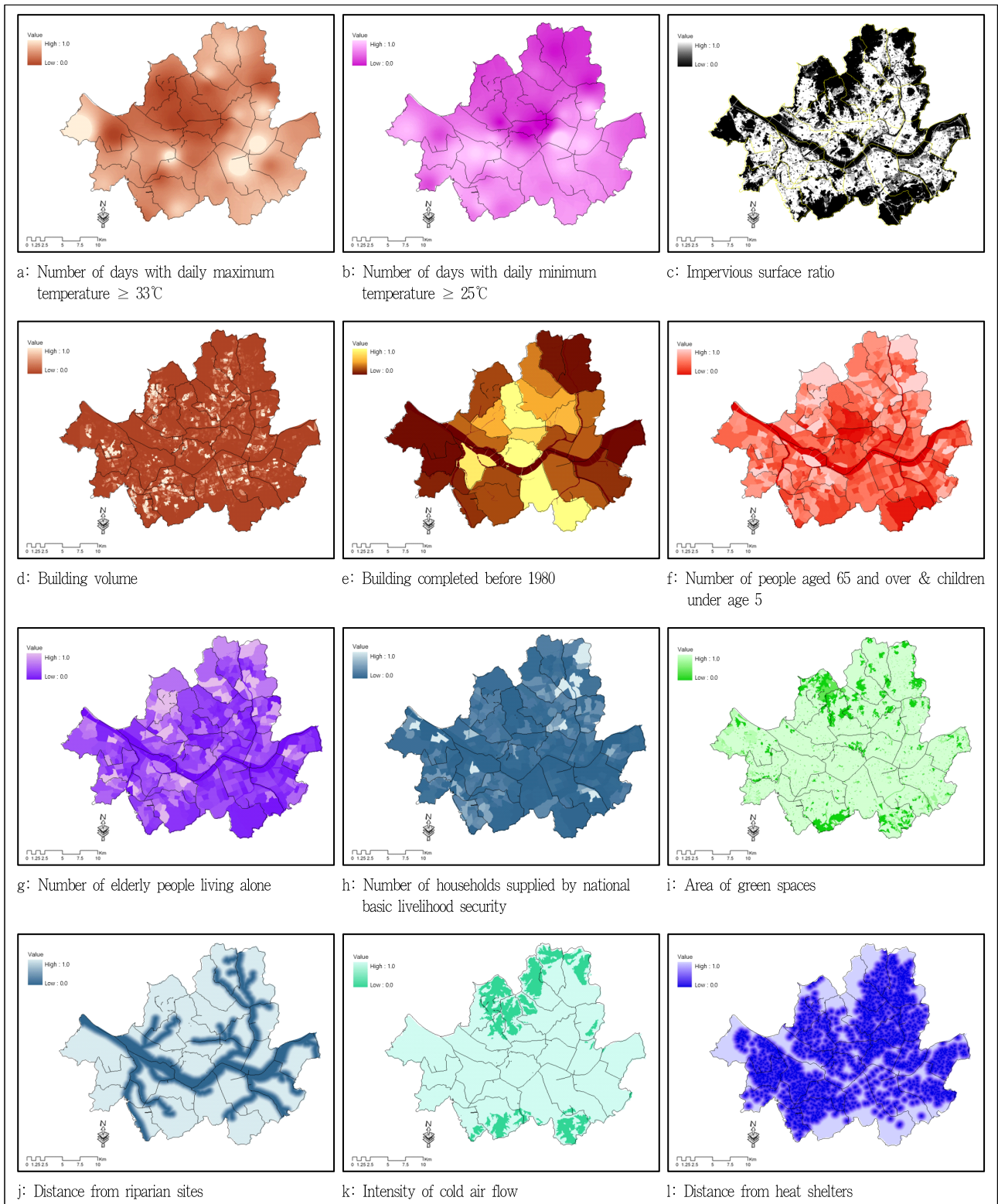


Figure 2. Fuzzified maps of indicators for the case study area

은 1980년 이전에 준공된 건축물 등 구 단위 지표의 분석결과가 종합적인 취약성 평가에 크게 반영되었기 때문인 것으로

판단된다. 한편, 취약성이 높은 서초구, 강남구 지역은 폭염 및 열대야가 발생했을 때, 단기적으로 회피할 수 있는 에어컨 시

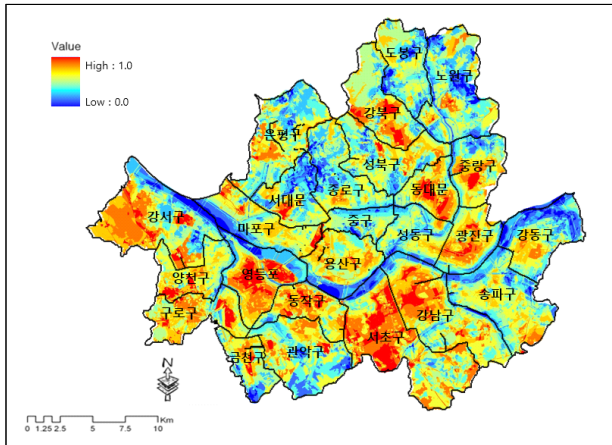


Figure 3. Predictive thermal environment vulnerability assessment map

설 보유 가구가 다른 지역에 비해 많을 것으로 예상되기 때문에, 자료수집의 한계로 활용하지 않았던 '적응능력' 분야의 에어컨 보유 현황 지표가 분석에 반영되었다면, 종합적인 열환경 취약성 평가의 결과가 달라졌을 것으로 예상된다. 또한, 온도, 녹지, 찬 공기 이동과 관련한 지표에서 활용할 수 있는 자료의 한계로 인해 한강수계의 열취약성이 제대로 반영되지 않았는데, 정확한 자료를 활용해서 분석한다면 한강수계는 본 연구의 결과보다 더 낮은 열취약성을 가진 것으로 평가되었을 것이다.

## V. 결론

본 연구에서는 열환경 취약성 평가에 관한 국·내외 선행연구 고찰을 바탕으로 열환경 취약성 평가에 적합하면서 도시 및 환경계획 분야에서 활용할 수 있는 취약성 평가지표를 선정하고, 이를 활용하여 사례지역인 서울시의 열환경 상태를 진단하였다. 이를 위해, 폭염, 도시 열섬, 도시 미기후 등 국내·외 열환경에 관한 취약성 평가 연구에서 활용된 지표들을 고찰하고, 각 지표의 특징을 분석한 후, 체계적인 접근과 이론적인 근거를 바탕으로 도시 열환경 취약성 평가를 위한 3개 분야(노출-민감도-적응능력) 15개 지표를 선정하였다.

선정된 지표 중 사례지역인 서울지역에 대해 활용 가능한 12개 지표의 공간정보를 구축하고, 퍼지이론을 활용한 GIS 공간분석을 통해 서울의 열환경 취약성을 평가하였다. 분석 결과, 강남 지역이 강북 지역보다 열환경에 더 취약한 것으로 파악되었는데, 강남 지역에서는 서초구, 강남구, 동작구, 영등포구, 강서구 일대의 열환경 취약성이 상대적으로 높게 나타났으며, 강북 지역에서는 동대문구, 강북구, 광진구, 중랑구 일대가 다른 구에 비해서 취약성이 높은 것으로 나타났다. 영등포구, 강남구, 광진구, 중랑구, 동대문구 등이 열환경에 취약한 지역으로

분석된 것은, 일최고기온이 33℃ 이상인 날의 수 및 일최저기온이 25℃ 이상인 날의 수 등 '기후노출' 분야에서 취약성이 매우 높았기 때문인 것으로 파악된다. 열환경 취약성이 상대적으로 낮은 지역은 관악구, 노원구, 도봉구, 은평구, 서대문구, 종로구 일부, 강동구 일부, 강서구 일부 등으로, 산림지역 및 서울시 외곽지역에서 주로 분포되어 있다. 관악구, 도봉구, 은평구, 노원구 등은 관악산과 북한산 등 외곽에 위치한 산림지역의 영향으로 인해 기후노출과 민감도가 낮으며, 적응능력이 상대적으로 높은 지역으로 분석되었다.

열환경 취약성 분석 결과가 구별로 뚜렷한 차이를 보이는 것은 1980년 이전에 준공된 건축물 등 구 단위 지표의 분석결과가 종합적인 취약성 평가에 크게 반영되었기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 취약성이 높은 서초구, 강남구 지역은 폭염 및 열대야가 발생했을 때 단기적으로 회피할 수 있는 에어컨 시설 보유 가구가 다른 지역에 비해 많을 것으로 예상되기 때문에, 자료수집의 한계로 활용하지 않았던 '적응능력' 분야의 에어컨 보유 현황 지표가 분석에 반영되었다면, 종합적인 열환경 취약성 평가의 결과가 달라졌을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 도시 열환경 취약성을 평가하기 위해 지표를 선정하고, 퍼지이론을 활용한 GIS 공간분석을 통해 서울지역의 열환경 취약성을 평가하였으나, 실제 현장과의 일치성에 대한 검증은 이루어지지 못한 한계가 있다. 특히, 자치구별 재정자립도 등 기존 연구의 적응능력 분야에서 활용빈도가 높았던 재정 지원 측면과 의료지원 측면의 지표를 활용하지 않았기 때문에, 실제 현장에서 느끼는 열취약성과 상이할 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서는 건물체적(노출 분야), 열환경에 취약한 건축물(민감도 분야), 녹지 및 하천으로부터의 거리, 찬 공기 이동 강도, 무더위 쉼터(적응능력 분야) 등 기존 연구에서 활용하지 않았던 도시구조적·공간적 지표를 활용함으로써, 도시 및 환경계획 분야에서 열취약성을 개선하기 위한 정책을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 판단한다. 한편, 취약성 평가 지표를 공간적으로 분석하기 위해 지표의 특성을 반영하기 위한 가장 적합한 공간DB를 활용하고자 하였으나, 자료수집의 한계로 인해 현황에 대한 반응이 부족한 측면이 있었다. 특히, 열취약성 평가에 퍼지이론을 활용함으로써 취약성 분포가 연속적이고 점진적인 경향을 나타낼 수 있었으나, 픽셀에 기반한 자료대신 구단위 기반 자료의 활용으로 인해 퍼지이론을 활용한 GIS 공간분석의 장점이 최대한 발휘되지 못한 한계가 있다.

향후, 열환경 취약성 평가에 실질적으로 활용될 수 있는 다양한 지표가 개발될 필요가 있으며, 지표별 공간정보의 확보가 능성이 높아져야 할 것으로 판단된다. 국외에서는 열환경 취약성을 평가하기 위해 실질적인 지표들을 활용하고 있었다. 예를 들어, '기후노출' 분야에서 나무로 덮인 그늘지역, 오래된 고층 임대 주택 주거 등 단순한 기후관련 항목뿐만 아니라, 기후에

취약한 건축물과 같은 물리적인 항목이 고려되었다. '민감도' 분야에서는 열환경에 가장 취약한 노인층에 대해 보다 세부적인 지표를 활용하였다. 또한, '적응능력' 분야에 있어서 건물 냉방시설, 수영장 소유 비율 등 부정적인 열환경을 단기간에 회피할 수 있는 지표들이 활용되었다. 이러한 다양한 지표들을 활용하기 위해서는 각 지표별 정보가 확보되어야 하는데, 본 연구의 사례 적용 과정에서 '적응능력' 분야의 지표인 에어컨 보유 현황에 대한 구별 혹은 동별 통계 자료가 존재하지 않아, 실질적인 적응능력에 대한 평가가 이루어지기에 부족하였다. 앞으로 국내의 도시 열환경 취약성 평가에 실질적으로 활용될 수 있는 지표 개발에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이며, 이와 더불어 지표별 공간정보 구축 방법에 대한 연구도 진행된다면, 보다 정확한 열환경 저감 정책마련과 기후변화 적응 계획수립에 도움이 될 것으로 기대된다.

## References

1. Congressional Black Caucus Foundation(2004) African Americans and Climate Change: An Unequal Burden, Washington, D.C: Redefining Progress.
2. Daegu Metropolitan City(2012) Climate Change Adaptation Plan of Daegu Metropolitan City(2012-2016).
3. EPA(2008) Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, p.26.
4. Eum, J. H.(2008) Integration of climate information into spatial planning in Seoul, South Korea. Dissertation, TU Berlin, p.164.
5. Eum, J. H.(2010) Establishing the urban climate information and its applications for spatial planning in Yongsan garrison, Journal of Korea Planners Association 45(1): 185-198.
6. Gwangju Metropolitan City(2012) Climate Change Adaptation Plan of Gwangju Metropolitan City(2012-2016).
7. Hamilton, I. G., M. Davies, P. Steadman, A. Stone, I. Ridley and S. Evans(2009) The significance of the anthropogenic heat emissions of London's buildings: A comparison against captured shortwave solar radiation. Building and Environment 44: 807-817.
8. Harlan, S. L., A. J. Brazel, L. Prashad, W. L. Stefanov and L. Larsen (2006) Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress, Social Science & Medicine 63: 2847-2863.
9. Hupfer, P. and W. Kuttler(Eds.)(2005) Witterung und Klima, 11th edn, Wiesbaden: Teubner.
10. Institut De Veille Sanitaire(2004) Etude des facteurs de deces des personnes agees resident a domicile durant la vague de chaleur d'août 2003. Institut de veille sanitaire(InVS). Available in [http://www.invs.sante.fr/publications/2004/chaleur2003\\_170904/rapport\\_CANICULE.pdf](http://www.invs.sante.fr/publications/2004/chaleur2003_170904/rapport_CANICULE.pdf)
11. IPCC(2007) "Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007," Cambridge Univ. United Kingdom and New York, NY, USA.
12. Jung, H. C., W. K. Lee and J. G. Cho(2012) A study on climate change vulnerability for supporting pilot project of local government adaptation implementation, Korea Environment Institute.
13. Kang, J. E. and M. J. Lee(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.
14. Kim, M. K.(2010) How to reduce building energy? SDI Strategy Report No. 79.
15. Klinenberg, E. M.(2002) Heat Wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago. Chicago: University of Chicago Press.
16. Korea Meteorological Administration(2011) How should we use climate change information of region?: Suggestions for adapting to climate change policy. Korea Meteorological Administration.
17. Laschewski, G. and G. Jendritzky(2002) Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. Climate Research 21: 91-103.
18. Lim, S. H. and G. S. Cho(2002) The methodology of GIS spatial analysis integrating of fuzzy and AHP theory. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 22: 173-184.
19. Lim, S. H., J. T. Hwang, Y. K. Park and J. C. Lee(2007) A study on the application of fuzzy membership function in GIS spatial analysis. Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information System 15(2): 43-49.
20. Lissner, T. K., A. Holsten, C. Walther and J. P. Kropp(2012) Toward sectoral and standardised vulnerability assessments: The example of heatwave impacts on human health. Climate Change 112: 687-708.
21. Matzarakis, A. and H. Mayer(2008) Dependence of the thermal urban climate on morphological variables. Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg 17: 129-139.
22. Mavrogiani, A., P. Wilkinson, M. Davies, P. Biddulph and E. Oikonomou (2012) Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. Building and Environment 55: 117-130.
23. Mcgeehin, M. A., and M. Mirabelli(2001) The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. Environmental Health Perspectives 109 (Supplement 2): 185-189.
24. National Institute of Environmental Research and Ministry of Environment(2012) Sectoral maps of climate change vulnerability for supporting climate adaptation implementation plans of local government, 134p.
25. National Institute of Meteorological Research(2009) Understanding the climate change III. National Institute of Meteorological Research.
26. Oh, K. S. and J. J. Hong (2005) The relationship between urban spatial elements and the urban heat island effect. Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design 6(1): 47-63.
27. Park, E. J., K. E. Kang and M. A. Nam(2010) Green roof strategy for mitigating the urban heat island effect. Kyeonggi Research Institute, 168p.
28. Province of Chungcheongbukdo(2012) Climate Change Adaptation Plan of Chungcheongbukdo(2012-2016).
29. Province of Gyeongsangbukdo(2012) Climate Change Adaptation Plan of Gyeongsangbukdo(2012-2016).
30. Province of Gyeongsangnamdo(2012) Climate Change Adaptation Plan of Gyeongsangnamdo(2012-2016).
31. Province of Jeollanamdo(2012). Climate Change Adaptation Plan of Jeollanamdo(2012-2016).
32. Seoul Metropolitan City(2012) Climate Change Adaptation Plan of Seoul Metropolitan City(2012-2016).
33. Shahmohamadi, P., A. I. Che-Ani, K. N. A. Maulud, N. M. Tawil and N. A. G. Abdullah(2011) The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. Urban Studies Research, Volume 2011, Article ID 497524, 9 pages, DOI:10.1155/2011/497524.
34. Sim, W. B.(2012) A study on improving the methods to analyze urban disaster vulnerability due to climate change. KRIHS issue paper 2013-1, Korea Research Institute for Human Settlements, 32p.
35. Sin, H. S., S. H. Lee, S. M. Chae, D. J. Kim and M. Y. Hong(2010) Strengthening community health sector climate change vulnerability

- assessments and adaptation capacity, Korea Institute for Health and Social Affairs, 415p.
36. Toronto Public Health(2011) Implementation of a map-based heat vulnerability assessment and decision support system - Final project report and map series. Toronto: City of Toronto. 123p.
37. Ulsan Metropolitan City(2012) Climate Change Adaptation Plan of Ulsan Metropolitan City(2012-2016).
38. Voogt, J. A.(2002) Urban heat island. In I. Douglas(Ed.), Causes and Consequences of Global Environmental Change, Vol. 3, Encyclopedia of Global Environmental Change(pp. 660-666). Chichester: Wiley.

---

Received : 16 August, 2016

Revised : 23 August, 2016 (1st)

29 August, 2016 (2nd)

Accepted : 29 August, 2016

3인익명 심사필