

## 도시생태현황지도를 활용한 열취약성 평가 연구 - 수원시를 사례로 -

이경일\* · 이성주\*\* · Tuvshinjargal Namuun\* · 이은선\*\* · 이관규\*\*\* · 전성우\*\*\*\*†

\*고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생, \*\*고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생,  
\*\*\*고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, \*\*\*\*고려대학교 환경생태공학부 교수

## Study on Heat Vulnerability Assessment Using Biotope Map - A Case Study of Suwon, Korea -

Lee, Kyung Il\* · Lee, Sung Joo\*\* · Tuvshinjargal, Namuun\* · Lee, Eun Sun\*\*  
· Lee, Gwan Gyu\*\*\* and Jeon, Seong Woo\*\*\*\*†

\*Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

\*\*Master Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

\*\*\*Research Professor, Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, Korea

\*\*\*\*Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

Biotope map is a high-resolution ecological information map that reflects environmental and ecological characteristics and values, and can be used as basic data for sustainable urban management. Its utilization for establishment of urban planning is encouraged nationally, but such action has been rarely implemented. In this study, vulnerability assessment in urban thermal environments of Suwon was conducted based on a biotope map. For the vulnerability assessment, 17 indicators for exposure-sensitivity-adaptability were constructed and utilized based on existing studies related to thermal environments such as heat waves and urban heat islands. As a result of the analysis, the regions belonging to the urban biotope showed a higher overall vulnerability than the green biotope regions. Among urban biotope, higher vulnerability was found in manufacturing, residential and commercial areas with high floor-area ratio and impermeable area ratio. In the unit of administrative districts, Paldal-gu, which has the highest ratio of residential and commercial regions, showed the highest overall vulnerability. Thermal vulnerability clearly depended on the distribution of biotope type, even within the same administrative district. In conclusion, an efficient policy and budgeting regarding the thermal environment of urban city should be implemented in consideration of its biotope type and inner driving factor. This study has a meaning in that it could support the establishment of practical and efficient urban and environmental planning to improve thermal environments based on high-resolution biotope map.

**Key words:** *Vulnerability Assessment, Biotope Map, Environmental Planning, Urban Planning, Climate Adaptation*

†Corresponding author : [eepps\\_korea@korea.ac.kr](mailto:eepps_korea@korea.ac.kr) (02841, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Republic of Korea. Tel. +82-2-3290-3043)

ORCID 이경일 0000-0002-9752-1130  
이성주 0000-0003-0745-258X  
Namuun 0000-0002-2605-1673

이은선 0000-0002-7624-4250  
이관규 0000-0002-6870-5387  
전성우 0000-0001-5928-8510

## 1. 서론

최근 기후변화로 인한 지구온난화의 영향으로 지구의 평균기온은 상승하고 있으며, 폭염에 의한 위험성이 많이 부각되고 있다. Christidis et al. (2012)에 따르면 1980년 이후 10년마다 평균적으로  $0.35^{\circ}\text{C} \sim 0.52^{\circ}\text{C}$  온도상승이 나타났고, 유럽 여름철 폭염에 의한 위험성이 약 4배 정도 증가하였음을 발견하였다. Bennett et al. (2014)는 연평균 온도의 상승으로 인해 1968년부터 2007년 사이에 호주 내 여름철 사망의 비율이 증가하였다고 보고하였다. 대한민국 또한 전국 평균기온이 지난 90년 동안 약  $1.0^{\circ}\text{C}$  상승한 것으로 나타났으며, 특히 6대 광역도시의 경우 약  $1.7^{\circ}\text{C}$ 가 증가하여 상대적으로 높은 상승폭을 보였다(Kim and Eum, 2018). 국내의 온열질환자 수는 2018년 약 4,458명으로 2017년 대비 2.8배 증가하여 폭염으로 인한 피해 또한 증가하고 있는 실정이다(Jo and Lee, 2018).

이와 같은 기후변화로 인한 영향을 평가하고 피해를 최소화하기 위해 전 세계적으로 기후변화 적응 및 대응정책들이 많이 제시되고 있는데, 그 기초가 되는 것이 기후변화 취약성 평가이다(Yoo et al., 2012). 기후변화 취약성이란 기후변화에 대한 시스템의 민감성 척도를 나타내는 것으로, 일반적으로 기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 정의를 따른다(Kim and Eum, 2018). IPCC (2007)에서는 취약성을 시스템이 노출된 기후의 특성 및 규모(exposure), 민감도(sensitivity) 및 적응능력(adaptive capacity)의 함수로 정의하였다. IPCC 정의에 따라 국내·외 연구에서 기후변화 취약성을 평가하고 평가결과를 활용한 제도적 기반이 구축되고 있으며, 국내에서는 도시·군기본계획 및 관리계획 수립 시 기후변화에 따른 재해취약성 분석 결과를 활용하기 위한 지침까지 수립되어있는 상태이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018). 하지만 기존 연구들은 대부분 지표자료의 구축현황 등의 이유로 행정구역 단위의 취약성 평가를 수행하였는데, 이는 취약성 평가 시 연구 대상지의 세부적인 환경 및 공간특성 반영 및 결과 활용에 있어 한계가 있다.

본 연구에서는 도시생태현황지도를 활용한 열취약성 평가를 수행하였다. 도시생태현황지도 또는 바이오톱지도는 토지피복도, 수치지형도, 고해상도 항공영상 등을 기초자료로 활용하여 구축된 가장 세부적인 자연환경 공간정보 지도이다. 이는 특별시·광역시·시·군의 자연 및 환경생태적 특성과 가치를 반영한 고해상도 생태정보지도로서 각

지역의 자연환경 보전 및 복원과 지속 가능한 도시관리의 기초자료로 활용할 수 있는 자료이다(Ministry of Environment, 2018). 국토·도시 계획 수립 및 다양한 환경보전제도 수립 등을 위하여 지자체별 제작 및 활용이 권장되고 있다. 독일에서는 1970년대부터 바이오톱 지도를 활용한 자연환경관리를 수행하고 있으며 국내에서는 지난 2000년 처음 개념이 도입된 후 약 20년 만에 실질적인 활용을 위하여 법제화되었다(Lee, 1996; Kim and Oh, 2013; MOE, 2018). 하지만 국내에서는 바이오톱지도에 기초한 적정 제도 수립 및 이행이 아직까진 미흡한 단계이다(Kim and Jang, 2019; MOE, 2018).

본 연구의 목표는 바이오톱지도를 활용한 도시 열 환경 취약성 평가방법을 제시하는 것으로 연구 대상지는 최근 바이오톱지도가 갱신 및 구축된 수원시로 선정하였다. 지표의 경우 도시 열섬, 폭염 및 사회경제적 지표 등 기존 열 환경 취약성평가 관련 연구에서 활용된 지표들을 고찰하여 선정하였다. 본 연구는 기존 취약성 평가에서 활용하지 않았던 고해상도 환경 공간정보 지도인 바이오톱지도를 활용함으로써 도시 및 환경계획 분야에서 열취약성을 개선하기 위한 정책 및 제도, 공간계획 수립에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 선행연구 고찰

도시 열취약성 평가를 위한 지표 및 특징 분석을 위한 선행연구 고찰을 수행하였다. Eum (2016)의 연구에서는 서울특별시를 대상으로 건물체적, 열환경 취약 건축물, 녹지면적 등 선행연구 고찰을 통해 구축한 12개의 평가지표 및 퍼지 이론(Fuzzy theory)을 활용한 열취약성 평가를 수행하였고, 분석 결과 서초구, 강남구, 영등포구, 동대문구 등이 다른 구에 비해 취약성이 높은 것으로 나타났다. 하지만 단순히 지표 값들의 분포 차이를 활용한 구 단위의 차이를 비교한 것으로 도시관리계획과 같은 구체적인 공간계획 결정에의 활용에는 한계가 있을 것으로 판단된다. Kim and Eum (2018)의 연구에서는 대구광역시를 대상으로 15개의 지표 및 「도시 기후변화 재해취약성분석 및 활용에 관한 지침」에서 명시하고 있는 재해취약성 분석방법을 활용한 열취약성 평가를 수행하였다. 분석 결과 동구, 달서구 등이 취약한 것으로 나타났고 이를 해결하기 위한 녹지공간확충, 온열환자 감시체계, 열 질환 예방 교육 등의 정책을 제시하였으나 정책적용을 위한 지역 내 세부적인 환경공간 정보를 고려하지 못한 한계가 있다. Lee et

al. (2013)와 Koo et al. (2015)의 연구에서는 마찬가지로 IPCC 기후변화 취약성 개념을 적용하여 부산광역시 16개 구·군을 대상으로 현재 또는 미래에 대한 폭염 취약성평가를 수행하였다. 하지만 공간단위의 한계로 민감도, 적응능력과 같이 동 단위 통계자료로 구축되어있는 지표 외 기후노출, 열적관성과 같은 토지피복·환경적 특성과 관련이 있는 값들의 차이가 미흡하게 나타났고, 폭염 및 열섬현상의 적응 및 완화를 위한 공간단위 계획의 제시에는 한계가 존재하였다. Oh et al. (2012)와 Yoo et al. (2012)의 연구에서는 시군구 공간단위를 활용하여 각각 강원도 및 남한을 대상으로 기후변화 취약성평가를 수행하였다. 시군구 공간단위를 활용한 취약성평가는 광역시도 수준의 적응계획 수립지원은 가능하지만, 마찬가지로 시군 내 구체적인 취약지역 구분 및 공간적 분포의 차이를 구분하는 것은 불가능하다는 한계를 나타냈다.

기존 열환경 취약성 평가와 관련한 연구들을 고찰한 결과 대부분 2007년 IPCC 취약성 분석 개념에 따른 지표체계 분류 및 선정작업을 수행하였다. 지표의 경우 기온(폭염일수 등) 및 표면온도와 관련된 기후노출, 연령(65세 이상 인구, 7세 이하 인구) 및 경제적(기초생활수급자 비율 등) 측면의 민감도, 녹지와 의료지원 측면의 적응능력 등 전반적으로 유사한 지표들이 활용되고 있었다. 또한, 취약성 평가를 위한 틀 대부분이 시군구 단위의 행정구역으로 도시 및 환경계획과 같은 구체적인 공간계획에의 도움으로 연결되기엔 한계가 있는 것으로 나타났다.

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1 연구 대상지

연구 대상지는 대한민국의 수원시로 경기도 중남부에 위치하며 2016년 기준으로 면적은 121.05 km<sup>2</sup>, 인구는 1,231,224명이고, 행정구역은 장안구, 권선구, 팔달구, 영통구 등 4개 구로 구분된다(Suwon, 2019). 수원시의 평균 기온은 1964년 처음 관측이 이루어진 후 11.4℃에서 2016년 기준 13.6℃로 2.2℃ 상승하였고, 2016년 폭염일수는 30일, 열대야 일수는 26일로 타 대도시와 비교 시 상대적으로 높게 기록되었다(Kim, 2017). 또한 2010년 이후 완료된 광고 및 소매실 택지지구 개발에 따른 토지이용의 변

화 및 녹지의 소실 등으로 인한 도시 열 환경의 변화가 발생하였을 것으로 판단된다.

#### 3.2 수원시 도시생태현황지도

수원시는 2010년 작성된 기존 지도를 기반으로 택지구 개발지구 등 신규 개발지역 및 토지이용 변화지역에 대한 현장조사 수행 및 반영, 비오톱 유형 재분류를 통해 2019년 도시생태현황지도를 갱신하였다. 갱신 결과 약 50.7%가 시가지 지역으로 이용되고 있었고, 그중 주거지역이 2010년에 비해 약 5% 증가하여 전체면적 대비 17.7%로 가장 높게 나타났다. 녹지 및 오픈스페이스 지역과 기타지역은 전체면적 중 48.6%를 차지하고 있는 것으로 나타났다(Suwon, 2019). 또한, 비오톱 유형 재분류 시 토지이용, 토지피복, 자연환경조사 결과를 반영하여 수원시 내 유네스코 세계문화유산과 같은 생태적, 고유적 특성이 반영될 수 있도록 개선하였다. 본 연구에서는 지역과 상관없이 MOE (2018)에 따라 표준으로 제시되는 대분류 15개 공간 단위를 활용하여 수원시 열취약성을 분석하였으며, 특수지역 중 군사지역의 경우 취약성 평가대상에서 제외하였다 (Table 1). 행정구역별 비오톱 분포현황은 Fig. 2와 같으며, 도심지역인 팔달구의 경우 다른 구에 비해 주거지역 및 상업지역의 비율이 상대적으로 더 높은 것으로 나타났다.

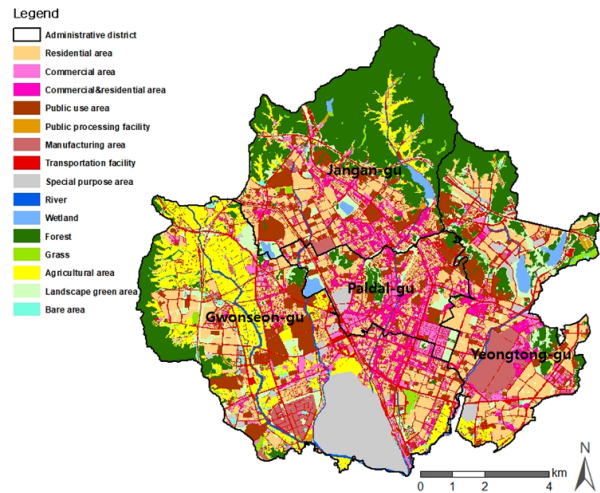


Fig. 1. Level 1 biotope map & administrative districts of Suwon

Table 1. Biotope type classification of Suwon

Division	Level 1	Level 2
Urban biotope	Residential area (R.A.)	detached house area; apartment house area
	Commercial area (C.A.)	commercial area
	Commercial & residential area (C.R.A.)	commercial & residential area
	Public use area (P.U.A.)	educational facilities; administrative agency; hospitals and nursing institutions; cultural heritage
	Public processing facility (P.P.F.)	water related facilities; waste related facilities; energy related facilities
	Manufacturing area (M.A.)	large scale, small scale manufacturing area, factory
	Transportation facility (T.F.)	railroad; road; parking lot
	Special purpose area (S.P.A.)	military facilities; construction sites
Green biotope	River (R)	natural river; artificial river; farm waterway
	Wetland (W)	artificial wetland
	Forest (F)	natural forest; artificial forest; shrub vegetation area
	Grass (G)	natural grass; artificial grass
	Agricultural area (G.A.)	rice paddy; dry field; orchard; nursery field
	Landscape green area (L.G.A.)	park; green area; botanical garden
	Bare area (B.A.)	abandoned land

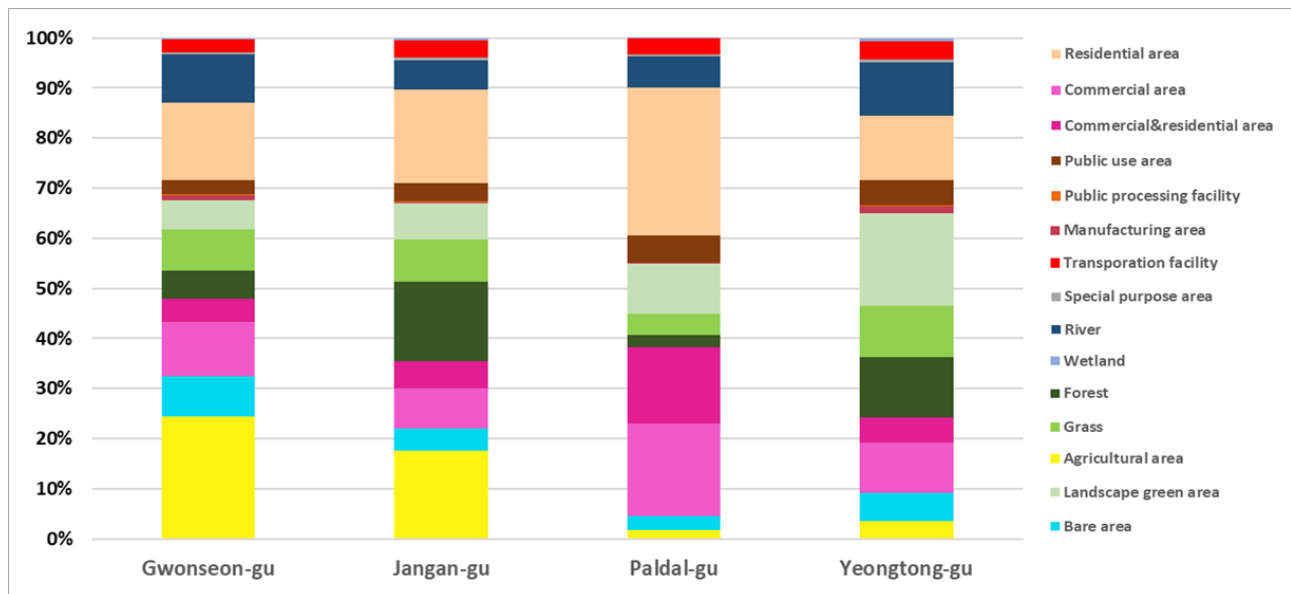


Fig. 2. Distribution status of biotope in each administrative districts of Suwon

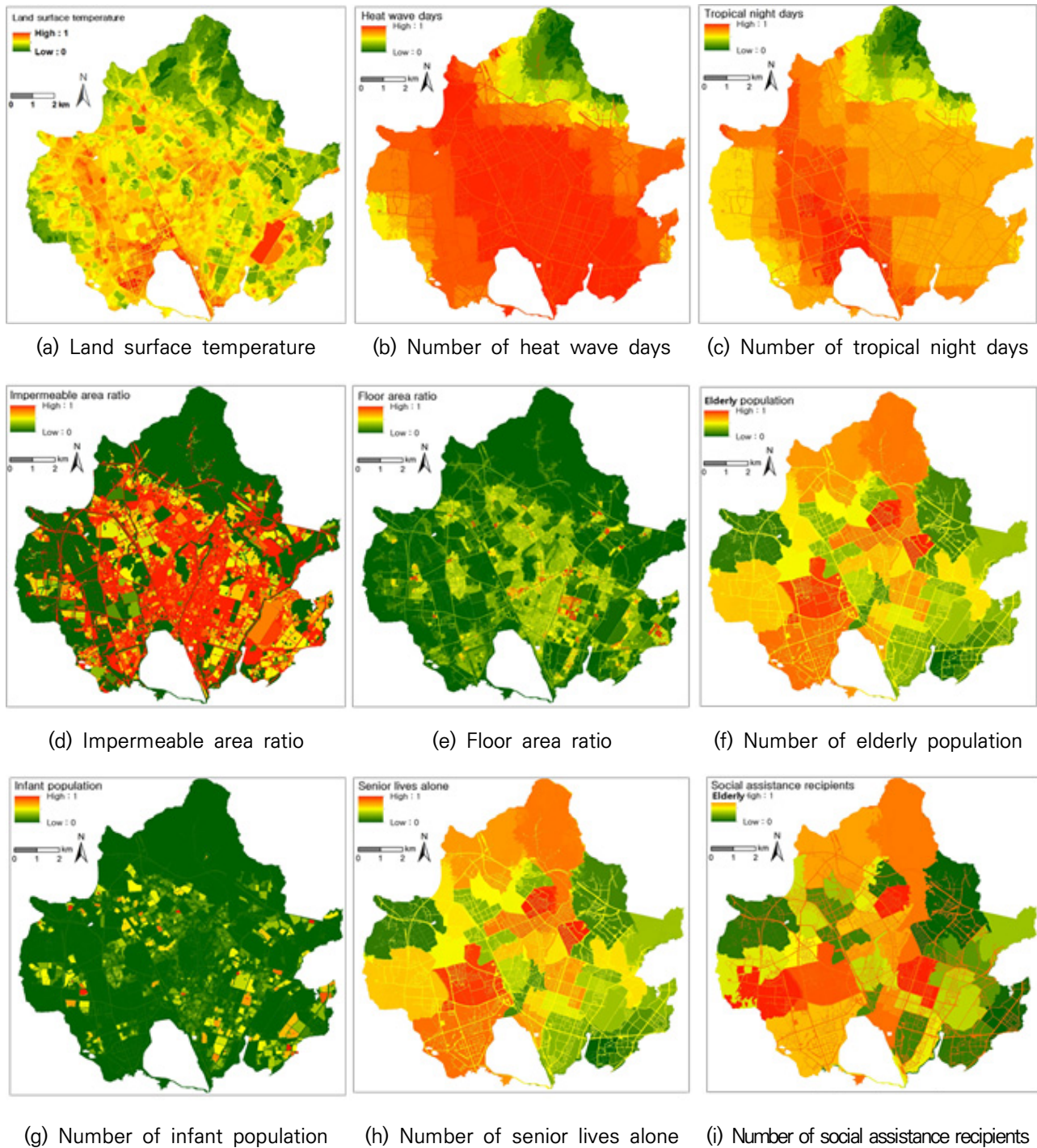


Fig. 3. Standardized factors for vulnerability assessment of thermal environment in Suwon

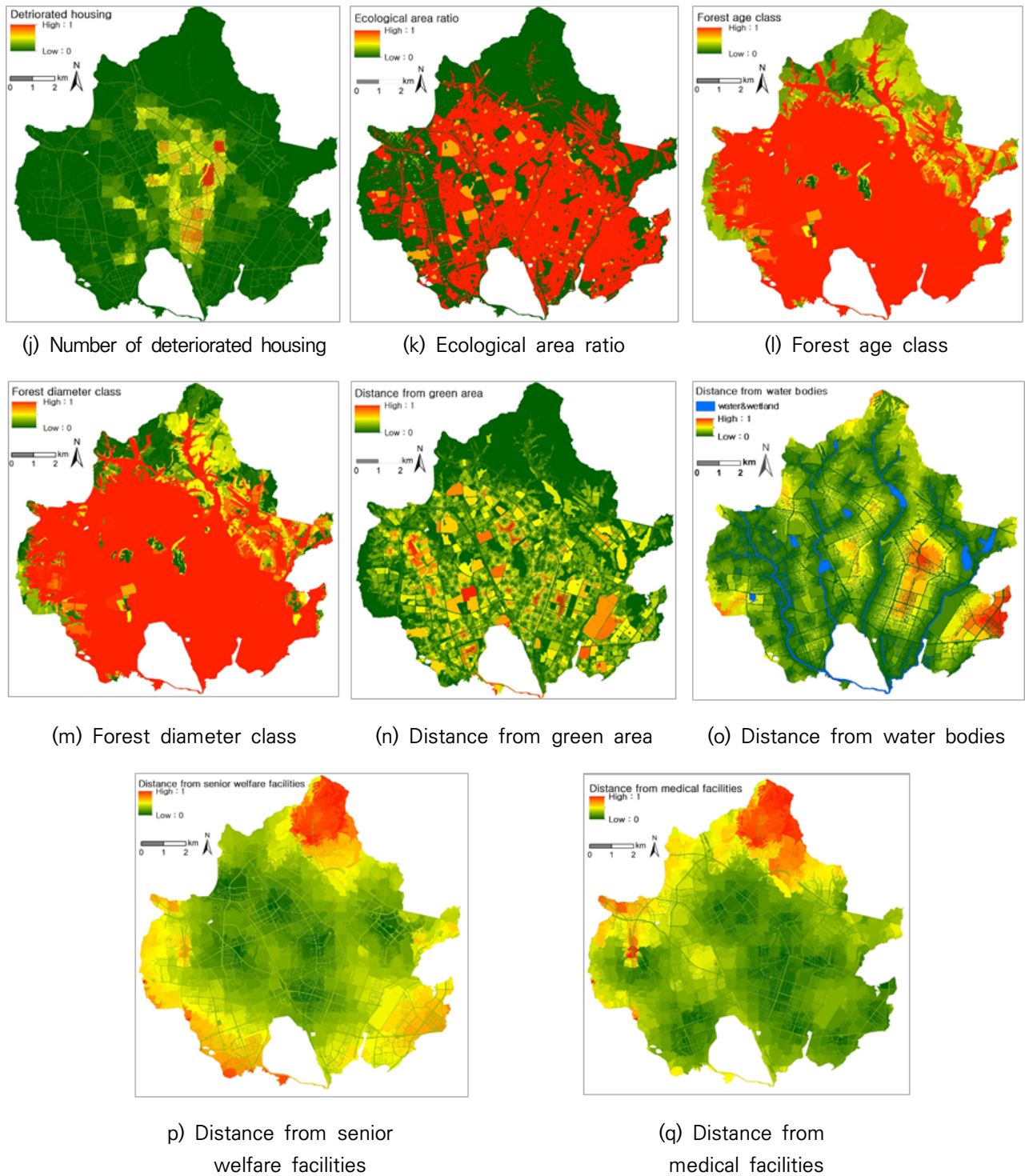


Fig. 3. Standardized factors for vulnerability assessment of thermal environment in Suwon (Continued)

### 3.3 취약성 평가지표 선정 및 구축

선행연구 고찰에 따라 본 연구에서도 IPCC (2007)의 취약성 함수 인자인 기후노출(exposure), 민감도(sensitivity), 적응능력(adaptation)을 사용하여 취약성 평가지표를 분류 및 구축하였다. 선행연구에서 활용되었던 지표 중 도시 및 환경계획과 연관이 있고 이를 개선하기 위한 정책 수립에 도움을 줄 수 있도록 도시의 공간구조, 사회경제적 특성과 연관이 있는 지표들 위주로 구축하였다.

기후노출은 기후변화에 민감한 시스템의 요소가 기후와 접촉되는 정도로 본 연구에서는 열 환경과 직접적으로 연관되는 ‘기상학적 지표’와 간접적으로 연관되는 ‘도시 공간구조 지표’로 구축하였다. 기상학적 지표는 폭염주의보 기준인 일 최고기온 33℃ 이상인 날의 수, 열대야 기준인 최저온도 25℃ 이상인 날의 수 및 지표면 온도(LST, Land Surface Temperature)로 선정하였다. 폭염 및 열대야는 인간에게 영향을 미치는 대표적인 열 환경 요소로 그 강도가 높을수록 적극적인 대처가 필요하다(Eum, 2016). LST는 토지피복 및 이용형태와 직접 적으로 연관이 있는 요소로 열 환경을 판단할 시 중요하게 다루어져야 하며, 본 연구에서는 Landsat 8의 Thermal Infrared Sensor (TIRS) images를 사용하여 추출하였다. 도시 공간구조 지표의 경우 열을 흡수하는 불투수성 표면 및 건축물과 같은 요소로 본 연구에서는 불투수율과 용적률로 선정하였다. 특정 지역의 불투수율 및 용적률이 높을수록 열저장 강도 및 열 방출률이 높아져 열섬현상과 같은 열 환경 변화를 유발할 수 있다(Voogt and Oke, 2003).

민감도는 기후노출이 발생했을 시 시스템이 직간접적으로 받는 피해 정도로 본 연구에서는 사회경제적 민감도인 ‘연령’, ‘경제’와 도시 구조적 민감도인 ‘취약구조물’ 지표로 구축하였다. 65세 이상 노년층 및 5세 이하 영유아층 인구의 경우 폭염 또는 열대야 등 고온의 환경에 노출되었을 때 더 취약한 것으로 나타났으며, 경제적 대응력이 상대적으로 낮은 저소득층은 열악한 환경조건으로 인하여 기후변화에 더 취약할 수 있다(Jeon, 2011; Lee et al., 2010; Mcgeehin and Mirabelli, 2001). 취약구조물의 경우 국내에서 1979년 「건축법 시행규칙」에 따라 건축물 단열 기준이 마련되기 이전에 구축되었을 가능성이 있는 30년 이상 된 노후주택 분포현황을 활용하였다(Kim et al., 2020).

적응능력은 한 시스템이 기후변화에 맞게 스스로를 조절하거나 잠재피해를 감소시키고 대처하기 위한 체계의

역량이다. 본 연구에서는 녹지 및 수계와 관련되어있는 자연환경변수, 기후변화에 따른 취약계층의 피해에 대처할 수 있는 시설로의 접근성을 적응능력 지표로 구축하였다(Cho et al., 2015; Eum, 2016; Oh and Hong, 2005). 생태면적률(Ecological area ratio)은 전체 개발면적 중 생태적 기능 및 자연순환기능이 있는 토양 면적이 차지하는 비율을 의미하며 1에 가까운 지역일수록 녹지비율이 높음을 의미한다(MOE, 2016).

취약성 평가를 위해 구축된 총 17개의 지표는 수원시 비오톱지도 갱신 시 활용된 기초자료의 최신 기준 년도인 2018년도를 기준으로 수집되었고, 각 지표에 대한 출처 및 자료원에 대한 설명은 다음과 같다(Table 2).

### 3.4 취약성 분석

취약성 평가를 위해 구축된 지표자료의 가공 및 취약성 분석은 ArcGIS 10.5 프로그램을 통해 수행되었다. 2018년을 기준으로 수집된 17개 지표의 데이터는 GIS DB 형태로 구축되었고 획득된 자료의 특성에 따라 행정구역 단위 혹은 1 km×1 km, 30 m×30 m 해상도의 그리드 정보로 그 형태가 각각 다르게 구축되었다. 본 연구에서는 모든 지표를 수원시 도시생태현황지도 공간단위로 재구축하기 위해 Raster data로 변환한 뒤 ArcGIS의 Resample Tool을 이용하여 10 m×10 m 해상도로 변환하고 지표별 평균값을 추출하였다.

도시생태현황지도 공간단위로 구축된 각각의 분석지표들은 측정 단위가 서로 다르며 취약성 평가를 위한 직접적인 비교가 불가능하다. 이를 해결하기 위해 국토교통부령 행정규칙인 「도시 기후변화 재해취약성분석 및 활용에 관한 지침」에서 명시하고 있는 z-score 표준화지수 변환방법을 활용하였다.

Z-score은 표준편차를 단위로 측정값이 평균으로부터 이탈된 정도를 계산할 수 있는 지표이며, 음수와 양수의 범위를 가진다. 변환은 Z-score 법(식(1))에 따라 SPSS 24 프로그램을 활용하여 수행되었다. 각 지표별 Z-score 계산 후 표준화하여 0~1 사이의 분포값으로 변환하였다.

본 연구에서는 기존 연구들과 달리 적응능력과 관련된 지표들 또한 값이 높을수록 취약한 지역으로 표현하여 최종 합산을 통한 종합적인 취약지역을 파악하고 이에 따른 정책제언을 수행하였다. 이를 위해 생태면적률, 영급, 경급과 같이 녹지면적과 관련된 지표들의 경우 음수로 변환한 후 표준화를 수행하여 다른 지표들과 마찬가지로 값이 높을수록 적응능력이 낮은 지역임을 나타낼 수 있도록 하였다.

Table 2. Thermal vulnerability assessment indices

Division	Index	Reference	Data source
Exposure	Land surface temperature	Kim and Eum, 2018; Cho et al, 2015	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
	Heat wave days	Kim and Eum, 2018; MOLIT, 2018; Lee et al, 2013	<a href="http://www.climate.go.kr/">http://www.climate.go.kr/</a>
	Tropical night days	Kim and Eum, 2018; MOLIT, 2018; Lee et al, 2013	<a href="http://www.climate.go.kr/">http://www.climate.go.kr/</a>
	Impermeable area ratio	Cho et al, 2015; Oh and Hong, 2005	Suwon (2019)
	Floor area ratio	Cho et al, 2015; Oh and Hong, 2005	<a href="http://map.ngii.go.kr/">http://map.ngii.go.kr/</a>
Sensitivity	Elderly population	Kim and Eum, 2018; MOLIT, 2018; Cho et al, 2015; Lee et al, 2013	<a href="http://map.ngii.go.kr/">http://map.ngii.go.kr/</a>
	Infant population	Kim and Eum, 2018; MOLIT, 2018; Cho et al, 2015	<a href="http://map.ngii.go.kr/">http://map.ngii.go.kr/</a>
	Senior lives alone	Kim and Eum, 2018; MOLIT, 2018; Cho et al, 2015; Lee et al, 2013	<a href="http://stat.suwon.go.kr/">http://stat.suwon.go.kr/</a>
	Social assistance recipients	Kim and Eum, 2018; MOLIT, 2018; Cho et al, 2015; Lee et al, 2013	<a href="http://stat.suwon.go.kr/">http://stat.suwon.go.kr/</a>
	Deteriorated housing	Kim and Eum, 2018; MOLIT, 2018	<a href="http://map.ngii.go.kr/">http://map.ngii.go.kr/</a>
Adaptation	Ecological area ratio	MOE, 2016; Oh and Hong, 2005	MOE(Ministry of Environment)
	Forest age class	Cho et al, 2015; Oh and Hong, 2005	<a href="http://fgis.forest.go.kr/">http://fgis.forest.go.kr/</a>
	Forest diameter class	Cho et al, 2015; Oh and Hong, 2005	<a href="http://fgis.forest.go.kr/">http://fgis.forest.go.kr/</a>
	Distance from green area	Kim and Eum, 2018; Lee et al, 2013; Cho et al, 2015	Suwon (2019)
	Distance from water bodies	Cho et al, 2015; Kim and Eum, 2018; Oh and Hong, 2005	Suwon (2019)
	Distance from welfare facilities	Eum, 2016	<a href="http://map.ngii.go.kr/">http://map.ngii.go.kr/</a>
	Distance from medical facilities	Eum, 2016; Lee et al, 2013	<a href="http://map.ngii.go.kr/">http://map.ngii.go.kr/</a>

$$Z_i = \frac{X_i - X_{mean}}{X_{std}} \quad (1)$$

식(1)에서  $Z_i$ 는 비오름지도 구역별  $i$ 의 Z-score,  $X_i$ 는 구역별  $i$ 의 분석지표  $X$  측정치,  $X_{mean}$ 은 전체 구역별 분석지표  $X$ 의 평균,  $X_{std}$ 는 전체 구역별 분석지표  $X$ 의 표준편차이다.

표준화식(2)는 도출된 Z-score를 다시 0과 1사이의 수

치로 변환한 표준화지수( $Z\text{-score}_{Normal}$ )이다. 이를 통해 구역 간 직접적인 비교가 가능하게 한다.

$$Z\text{-score}_{Normal} = a \times z\text{-score} + b \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{(Z\text{-score}_{max}) - (Z\text{-score}_{min})} \quad (3)$$

$$b = \frac{-Z\text{-score}_{min}}{(Z\text{-score}_{max}) - (Z\text{-score}_{min})} \quad (4)$$



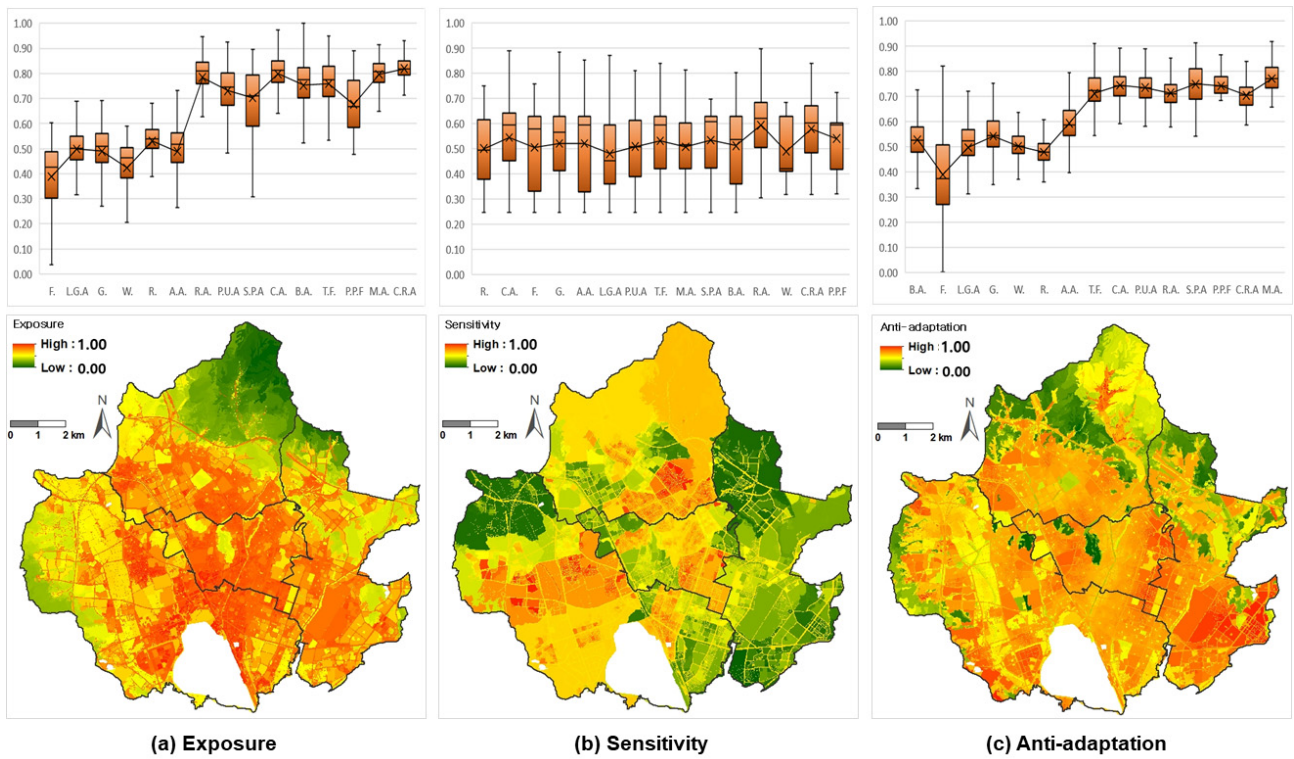


Fig. 4. Maps and box-plots of vulnerability assessment elements in Suwon

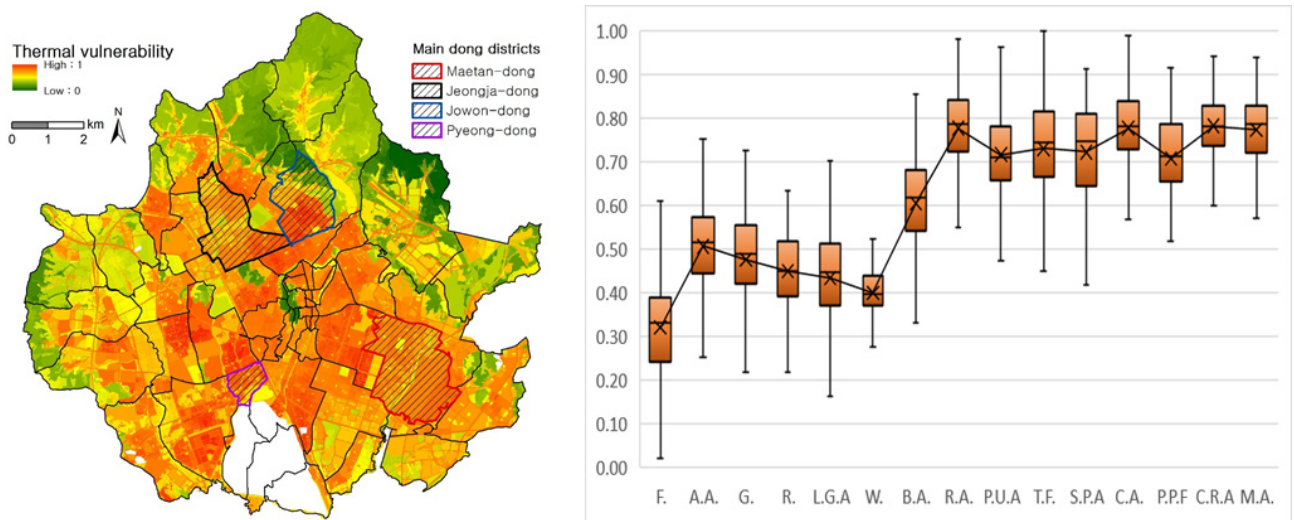


Fig. 5. Map and box-plot of total thermal vulnerability in Suwon

표준화를 통해 최종적으로 도출된 지표들의 합산을 통해 비오름 공간별 종합적인 열취약성 지수를 산출하였다 (Oh et al., 2017) (식(5)). 계산된 최종 열취약성 값 또한 0에서 1 사이로 표준화시켜 상대적인 분포로 표현하였다.

취약성 지수가 높을수록 기후노출 및 민감도가 높거나 적응능력이 낮은 것으로 해석할 수 있으며, 취약 원인에 따라서 도시·군 관리계획을 통한 장기적 조치, 취약계층 건강관리 모니터링 시스템 구축과 같은 단기적 조치가 적절

하게 제시될 수 있다.

$$\begin{aligned} Vulnerability &= Exposure + Sensitivity \\ &+ Anti - adaptation \end{aligned} \quad (5)$$

#### 4. 결과 및 고찰

각 지표를 비옴지도에 공간화하여 Z-score법 및 표준화를 통해 0~1의 값을 가지는 지수로 변환한 결과들은 다음과 같다(Fig. 3). Fig. 4의 경우 지표들을 합산하여 취약성평가 분류체계에 따라 각각 기후노출, 민감도, 적응능력을 도출한 결과이다. 기후노출과 민감도의 경우 높을수록 열 환경에 취약한 것을 나타내며, 본 연구에서는 적응능력 또한 높을수록 취약한 지역임을 나타낸다. 도시생태현황지도 및 도출된 지표를 활용한 수원시 열 환경 취약성 분석 결과, 기후노출의 경우 녹지비옴에서 시가지비옴으로 갈수록 증가하는 경향이 나타났으며 특히 시가지비옴 중 상업지역에서 가장 높은 분포값이 나타났다. 「국토계획법」에 따라 정해진 용도지역의 건폐율 중 상업지역의 경우 최대 90%, 주거지역 및 공업지역의 경우 70%로 정해져 있고, 따라서 같은 도시지역 내에서도 상업지역의 경우 불투수 면적이 더 넓어 열에 노출될 환경이 증가한 것으로 판단된다. 위치적으로는 수원시의 도심지역인 팔달구를 중심으로 건폐율 및 불투수 면적률과 같은 기후노출 지표들이 높게 나타났고, 장안구 북쪽과 권선구의 서쪽의 경우 각각 광교산과 칠보산이 위치하여 기후노출의 영향이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

민감도의 경우 값이 높을수록 열 환경에 민감한 계층 또는 환경적 특성이 많다는 것을 의미하며 대부분 사회경제적 특성과 관련된 지표들이기 때문에, 토지이용현황과 관련된 비옴별 차이가 상대적으로 적게 나타났다. 기후노출과 달리 장안구와 권선구 쪽에서 전체적으로 높은 민감도가 나타났다. 이는 65세 이상 인구 및 독거노인이 연무동, 금호동, 파장동, 평동 등 장안구의 산림지역과 권선구의 농경지역 및 주거지역에 많이 거주하고 있는 영향으로 판단된다. 노후주택의 경우 수원시 전체적으로는 적게 분포하고 있었으나 지동, 행궁동 등 팔달구 구도심에 분포하고 있는 주거지역 비옴을 위주로 나타나고 있었다.

적응능력은 기후변화에 의한 피해를 감소시키고 대처하기 위한 체계의 역량을 의미하며, 분석 결과 녹지비옴에 비해 시가지비옴의 적응능력이 전체적으로 낮은 것으로 나타났다. 수원시는 광고 및 호매실 택지개발지구의 개발

로 주거, 교통시설 비옴의 증가로 2010년 이후 시가지 비옴의 비율이 50% 이상이 되었고, 이에 따라 산림지역, 농업지역 및 공원 등을 제외한 도시 전체적인 생태면적률은 낮은 상태로 나타났다. 영급과 경급의 경우 각각 임목의 연령과 흉고직경을 나타내는 단위로 1에 가까울수록 지역 내 수목의 양과 질이 높음을 의미한다. 광교산과 칠교산 등 산림 비옴 지역에서 높은 영급 및 경급이 나타났으나 생태면적률과 달리 경작지 및 광고저수지 등 하천 비옴에서는 임목으로 인한 적응능력이 낮게 나타났다. 녹지와는 거리는 녹지 비옴 외 시가지비옴에서 전반적으로 높게 나타났고, 그중에서도 매탄3동, 고등동, 정자동, 서둔동 등 행정구역별 중심지역에 존재하는 시가지 비옴들이 상대적으로 녹지와 거리가 높은 것으로 나타났다. 반대로 병원 및 복지시설의 경우 전체적인 시가지 비옴 내에서 접근성이 비슷하게 높은 것으로 나타났고 산림지역에서의 접근성은 낮은 것으로 나타났다. 하천과의 거리의 경우 황구지천, 서호천, 수원천, 원천리천 4개의 하천이 수원시 중부, 서부, 동부지역에서 흐르고 있어 전체적으로 유사한 접근성이 나타났으나, 산지 외곽지역과 팔달구 및 영통구 외곽에 존재하는 시가지비옴 등 일부 지역들이 상대적으로 하천과의 거리가 먼 것으로 나타났다.

각 분야를 종합한 최종 열취약성 도출 결과 산림 비옴의 취약성이 가장 낮은 것으로 나타났고, 시가지비옴 중 공공용도지역 외 공업지역, 주거지역 등 건폐율이 높은 지역일수록 높은 취약성을 가지는 것으로 나타났다 (Fig. 5). 행정구역으로는 팔달산 및 숙지근린공원 등 일부 녹지 비옴 지역을 제외하고 시가지비옴 비율이 가장 높은 팔달구의 취약성이 전체적으로 높게 나타났다. 그 외 행정구역에서도 시가지 비옴의 열 취약성이 전체적으로 높게 나타났으며 그중에서도 평동, 메탄3동 등 공업지역 비옴이 존재하거나 조원1동, 정자동 등 주거지, 상업지 비옴이 밀집된 지역 또는 경작지 비옴에서 취약성이 특히 높게 나타났다. 하지만 취약성이 높게 나타난 지역이라도 비옴 속성에 따라서 원인이 다를 수 있다. 예를 들어 메탄3동에 존재하는 공업지역 비옴의 경우 기후노출 및 적응능력과 관련된 취약성은 높게 나타나고 있으나, 인구와 같은 사회경제적 특성과 관련된 민감도의 경우 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 따라서 공업지역 비옴의 경우 높은 건폐율 및 불투수율에 의한 표면온도의 증가가 높은 취약성의 주요 원인임을 파악할 수 있다. 특히 공단 내 대형 건물들의 지붕면은 대부분 열용량이 큰 철판으로 주간 열에너지 비축량 및 야간 열 방출량이 높

고, 주거지 또는 상업지역과는 달리 건물 내 옥상녹화, 벽면녹화 등을 통한 저감방안에 불리하다(Ahn et al., 2016). 따라서 취약성을 저감을 위해 공단 내 열저감 보도블럭 도입, 공단 주변지역에 대한 적극적인 녹지공간 확충, 햇빛 반사율 및 단열효과가 우수한 소재로의 지붕 교체 또는 태양광패널 설치 등 기후노출 취약성을 낮추고 적응능력을 높일 수 있는 저감대책 및 제도적 지원이 필요하다. 반면 경작지역의 경우 고령인구 및 독거노인 등 기후변화 취약 계층이 높고 복지시설의 접근성이 낮은 것이 취약성의 주요 원인이다. 따라서 위와 같은 지역의 경우 무더위쉼터 확충, 주거환경 개선, 냉방기기, 구호물품 제공 등 취약계층 기반 열저감 개선방안이 필요하다. 또한, 기후변화 취약 집단의 건강피해 감소를 위해 정확한 감시시스템 구축과 교육 및 방문건강관리 등을 통한 지속적인 건강관리대책이 필요하다. 주거지 및 상업지 바이오톱의 경우 건폐율 및 불투수율은 공업지역과 유사하나 다른 바이오톱에 비해 인구밀도 및 건물 밀집도가 높아 열 환경에 더욱 민감한 바이오톱이라고 할 수 있다(Kim and Moon, 2016). 따라서 녹지조성, 고밀도의 건물들로 인해 파편화된 바람길 네트워크 조사 및 인동간격 확보를 통한 바람길 조성, 벽면녹화, 옥상녹화 등 다양하고 구체적인 열 환경 개선방안이 요구된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 열 환경 개선을 위한 구체적인 공간계획 수립에 도움을 주기 위해 수원시를 대상으로 도시생태현황지도를 활용한 열 취약성 평가를 수행하였다. 열취약성 평가를 위한 지표의 경우 폭염, 도시 열섬 등 열환경과 관련된 기존 연구 고찰을 통한 이론적 근거를 기반으로 노출-민감도-적응능력에 관한 17개의 지표를 국가기관 및 미국 지질조사국을 통하여 구축 및 활용하였다.

수원시 열 취약성 분석 결과, 시가지 바이오톱에 속한 지역들의 취약성이 녹지 바이오톱에 속한 지역들보다 전체적으로 높게 나타났고, 시가지 바이오톱에 속한 지역들 중 법적 건폐율이 높은 공업지역, 주거지역 및 상업지역에서 높은 열 취약성이 나타났다. 행정구역으로는 시가지바이오톱 비율이 가장 높은 팔달구에서 전체적으로 높은 취약성이 나타났으며, 그 외 행정구역에서도 공업지역, 주거지역, 상업지역은 상대적으로 높은 취약성을 보였다.

같은 행정구역 내에서도 도시생태현황, 즉 바이오톱에 따라서 열 취약성의 명확한 구분이 발생하는 것을 확인하였

고, 같은 바이오톱 유형 간 취약성 값의 변동성 또한 큰 것으로 나타났다. 이는 도시생태현황지도가 다양한 주제도를 복합적으로 활용하여 제작된 환경 공간정보지도로서 실제 도시 내에서 토지의 이용 및 현 상태를 표현할 수 있는 공간 단위로 표현되어 열 완화 정책을 위한 더욱 상세한 의사결정 지원이 가능함을 의미한다. 따라서 열 환경 개선을 위해 열 취약성이 높은 지역에 대하여 종합적인 도시생태 특성을 확인한 후 취약 원인에 맞는 맞춤형 개선 정책을 수립하여야 한다. 실제 공장이 들어선 철판 지붕의 공업지역의 경우 공단 내 열저감 보도블럭 도입 및 태양광패널 설치를 하거나 주거지로 활용 중인 농경지의 경우 취약계층 주거환경개선 위주의 정책, 도심 내 주거지역 및 상업지역의 경우 바람길 조성 또는 토지피복을 고려한 정책 등 가장 효율적인 열 환경 개선 정책이 시행되어야 한다.

본 연구는 국가적으로 토지이용 및 개발계획 수립·시행을 위해 활용이 요구되고 있는 도시생태현황지도를 활용한 열취약성 평가 및 도출결과를 연계한 효율적인 개선 정책을 제시하였다는 것에 의의가 있다. 본 연구를 기반으로 열 취약성 평가 및 차별화된 정책수립, 도시생태현황지도 활용방안 구축에 도움이 될 것으로 기대된다.

## 사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RE202001064).

## References

- Ahn SM, Kim SJ, Lee HC. 2016. A Study on the Urban Area Microclimate Management Direction. Sejong, Korea: Korea Research Institute for Human Settlements. 16-03. (in Korean)
- Charmian M. Bennett, Keith B. G. Dear, Anthony J. Michael. 2014. Shifts in the seasonal distribution of deaths in Australia, 1968-2007. *International Journal of Biometeorology* 58: 835-842. DOI 10.1007/s00484-013-0663-x
- Cho HM, Ha JH, Lee SK. 2015. An Analysis of Urban Heat Island Effect and Spatial Distribution of the Socially Vulnerable Class in Seoul, Korea. *Proceedings of Korean Urban Management Association*: 129-148. (in Korean)

- Eum JH. 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. <http://dx.doi.org/10.5668/JEHS.2013.39.6.492> (in Korean with English abstract)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007; pp. 1-30.
- J.A. Voogt, T.R. Oke. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment* 86: 370-384. DOI : 10.1016/S0034-4257(03)00079-8
- Jeon HJ. 2011. Effect of Climate Change on the Health of Vulnerable Populations – Health Impact Assessment of Weather Variables [Dissertation]. Hanyang University. (in Korean)
- Jo HM, Lee YH. 2018. Strategy on Heat Wave Management Plan in Seoul Capital City. Seoul, Korea: The Seoul Institute. Policy Report 257. (in Korean)
- Kim EY. 2017. An Analysis of Heat Wave Vulnerability Assessment and Establishment a Strategy in Suwon. Suwon, Korea: Suwon Research Institute. SRI Policy Report 2017-14. (in Korean)
- Kim HS, Jang NR. 2019. Task and Alternatives in Gyeonggi Biotope Maps. Suwon, Korea: Gyeonggi Research Institute. Issue & Diagnosis 395. (in Korean)
- Kim JH, Sung JE, Kim HG, Park DJ, Kim SS. 2020. Improvement in Energy Performance of Office Buildings according to the Evolution of Building Energy Code. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems* 14(1): 101-111. <https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20200010> (in Korean with English abstract)
- Kim K, Eum JH. 2018. Policies for Improving Thermal Environment using Vulnerability Assessment – A Case Study of Daegu, Korea. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 21(2): 1-23. <https://doi.org/10.11108/kagis.2018.21.2.001> (in Korean with English abstract)
- Kim MY, Moon ES. 2019. The Research of Planning Method of Adaptation for Old Residential Neighborhoods According to Heat wave and Urban Heat-island Phenomena – Focused on Gun-Ja Dong, Gwang-Jin Gu. *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment* 16(3): 31-39. <http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2016.16.4.031> (in Korean with English abstract)
- Kim YS, Oh KK. 2013. A Study on the Selection of Evaluation Index of Biotopes in Korea. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 41(2): 27-37. <http://dx.doi.org/10.9715/KILA.2013.41.2.027> (in Korean with English abstract)
- Koo YS, Kim JE, Kim JS, Lee SH. 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): 331-348. (in Korean with English abstract)
- Lee DG, Byon JY, Choi YJ, Kim KR. 2010. Relationship between Summer Heat Stress (Perceived Temperature) and Daily Excess Mortality in Seoul during 1991~2005. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 26(3): 253-264. (in Korean with English abstract)
- Lee MC. 1996. A Conceptual Study of Biotope Mapping in the City. *Journal of Korea Planning Association* 31(6): 197-211. (in Korean with English abstract)
- Lee WJ, Kang JE, Kim YK. 2013. The Impact of Environmental Health Factors on Extreme-heat Vulnerability Assessment in a Metropolitan City. *Journal of Environmental Health Science* 39(6): 492-504. <http://dx.doi.org/10.5668/JEHS.2013.39.6.492> (in Korean with English abstract)
- Michael A. McGeehin, Maria Mirabelli. 2001. The Potential Impacts of Climate Vulnerability and Change on Temperature-related Morbidity and Mortality in the United States. *Environmental Health Perspect* 109(suppl 2): 185-189.
- Ministry of Environment. 2016. A Guideline for Using the

- Ecological Area Ratio. (in Korean)  
 Ministry of Environment. 2018. A Guideline for Creating a Biotope Map. (in Korean)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2018. Instruction for Urban Climate Change Vulnerability Analysis and its Application. (in Korean)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2019. Enforcement Decree of the National Land Planning and Utilization Act.
- Nikolaos Christidis, Peter A. Stott, Gareth S. Jones, Hideo Shiogama, Toru Nozawa, Jurg Luterbacher. 2012. Human activity and anomalously warm seasons in Europe. *International Journal of Climatology* 32: 225-239. DOI: 10.1002/joc.2262
- Oh KS, Hong JJ. 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. (in Korean with English abstract)
- Oh KY, Lee MJ, Jeon SW. 2017. Development of the Korean Climate Change Vulnerability Assessment Tool(VESTAP) - Centered on Health Vulnerability to Heat Waves. *Sustainability* 1103. DOI : 10.3390/su9071103
- Oh SH, Lee WK, Yoo SJ, Byun JY, Kwak HB, Cui G, Kim MI, Jung RS, Nam KJ, Shin DH. 2012. A Study on Vulnerability Assessment and Prioritizing Sectors to Support Adaptation Strategy to Climate Change - Case study of Gangwon Province. *Journal of Climate Change Research* 3(4): 245-257. (in Korean with English abstract)
- Suwon. 2019. Natural Ecosystem Survey in Suwon and Renewal of Biotope Maps. (in Korean)
- Yoo SJ, Lee WK, Oh SH, Byun JY. 2012. Vulnerability Assessment for Public Health to Climate Change using Spatio-temporal Information Based on GIS. *Journal of Korea Spatial Information Society* 20(2): 13-24. (in Korean with English abstract)