Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 23(1) 2020, pp.1-14 ISSN 1226-9719(Print)On
https://doi.org/10.11108/kagis.2020.23.1.001 ISSN 2287-6952(Online)

Landsat 8 영상과 취약성 분석을 활용한 폭염재해 취약지역의 특성분석*

김지숙[1] · 김호용[1※]

Analysis on the Characteristics of Heat Wave Vulnerable Areas Using Landsat 8 Data and Vulnerability Assessment Analysis*

Ji-Sook KIM[1] · Ho-Yong KIM[1※]

요 약

도시는 인구 및 기반시설의 집중과 집약적 토지이용으로 인해 재해 취약성이 높으며 이들 지역이 가진 지역적, 공간적 특성에 따라 취약성에 영향을 주는 요인들도 다양하다. 본 연구는 폭염지역의 취약원인을 살펴보기 위한 방법으로 Landsat 8 위성자료에서 추출한 지표온도와 폭염 재해취약성 분석을 수행하였다. 지표온도가 높은 지역과 재해취약성이 높은 지역이 일치하지는 않았으나 두 분석에서 공통으로 취약한 지역의 특성을 분석하기 위하여 중첩분석을 수행한 결과, 고밀도로 개발된 상업지역과 준주거지역의 비중이 높은 대상지 내 일부 지역이 가장 취약한 것으로 나타났다. 이는 기후노출요인과 취약인구, 주거불량지역 비율이 주요 원인인 것으로 나타났다. 이에 따라 녹지확충과 주거환경정비와 같은 대안들이 제시될 수 있을 것이다. 폭염피해 저감과 적응을 위한 다양한 정책들이 수립되어 시행되고 있으나, 도시 내부의 지역적, 공간적 특성을 살펴보고 폭염원인의 정확한 진단과 그에 맞는 적절한 대책을 마련하여 향후 그에 맞는 중장기적 대안들을 마련해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 폭염 재해, Landsat 8, 지표온도, 재해취약성분석, 중첩분석

ABSTRACT

Cities are highly susceptible to disasters due to concentration of population and

2020년 02월 14일 접수 Received on February 14, 2020 / 2020년 02월 14일 수정 Revised on February 14, 2020 / 2020년 02월 28일 심사완료 Accepted on February 28, 2020

* 이 논문은 2017년도 정보(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1D1A1B03033743).

1 동아대학교 도시계획공학과 조교수 Dept. of Urban Planning and Engineering, Dong-A University, Assistant Professor

※ Corresponding Author E-mail : hykim@dau.ac.kr

infrastructure and intensive land use, and there are various factors that affect vulnerability according to regional characteristics. This study analyzed the vulnerability of the heat wave and the surface temperature extracted from Landsat 8 satellite data. Areas with high surface temperature and with high vulnerability did not match. This study overlaid the results of vulnerability analysis and the land surface temperature(LST) in order to identify causes of vulnerability. The results showed that some areas within high-density commercial and semi-residential areas were the most vulnerable, with climate exposure factors, the ratio of the vulnerable populations and residential defective areas being the main causes. Accordingly, alternatives such as green space and residential environmental improvement could be suggested. Various policies for reducing and adapting to heat wave have been established and implemented. However, it is necessary to examine the regional and spatial characteristics of the city, to accurately diagnose the cause of the heat wave, and to prepare appropriate long-term alternatives accordingly.

KEYWORDS : Heat Wave, Landsat 8, Land Surface Temperature, Vulnerability analysis, Overlay Analysis

서 론

우리나라의 폭염일수는 80년대 8.2일에서 점차 증가하여 2018년에는 31.5일에 달하는 것으로 집계되고 있다. 또한 2011년부터 2017년까지의 온열 질환자 1,132명(사망 11명)에 비해 2018년에는 온열질환자가 4,526명(사망 48명)으로 늘어(환경부 보도자료 2019.7.29.) 폭염의 심각성이 거론되고 있으며, 이에 따라 지난 2018년 9월에는「재난 및 안전관리 기본법」을 개정하여 기존의 자연재해 분류에 폭염을 추가함으로써 피해자 지원 등을 위한 법적 근거를 마련하였다.

기상학계에서 소리 없는 살인자로 불리는 폭염이 점차 일상화되면서 선제적인 대응이 요구되고 있는 가운데 다양한 분야에서 폭염의 피해를 예측하고 대응하기 위한 노력이 강조되고 있다. 기후변화로 인한 폭염 재해에 대한 적응 노력이 의료, 복지, 환경 분야를 비롯하여 다방면에서 이루어지고 있으나, 공간적으로 폭염에 취약한 지역을 식별하거나 폭염에 취약한 사회적 요인들을 고려하여 취약성 분석을 수행하는 등 도시 공간적 측면에서의 접근방식도 중요한 의미를 갖는다. 도시는 인구와 기반시설의 집중으로 인하여 재해에 대한 취약성이 높으며 특히 집약적인 토지이용과 공간구조로 인해 폭염이나 열섬현상과 같은 열 관련 피해가 심화될 수 있다는 것은 이미 잘 알려져 있다.

본 연구에서는 도시의 폭염 취약지역의 공간적 특성을 고찰하기 위해 인공위성영상에서 추출한 열 영상과 사회적 지표들을 포함하는 폭염재해취약성 분석 결과를 비교하였다. 토지피복의 영향을 받는 위성영상 자료와 취약요인들을 포함하고 있는 폭염취약성 분석 결과를 비교하여 어떠한 요인이 취약지역에 영향을 미치고 있는지를 살펴보았고, 이들 결과의 공간 분류단위를 일치시켜 중첩분석을 수행하여 토지이용적인 물리적 관점이나 취약계층과 같은 요인을 포함하는 사회적 관점에서 매우 취약한 것으로 나타난 지역들을 도출하였다. 이러한 결과는 이후 공간적인 특성에 맞는 폭염 적응대책을 마련하기 위한 근거로 활용될 수 있을 것이다.

연구방법 및 선행연구 고찰

1. 연구의 범위와 방법

본 연구는 공간적 범위로 부산광역시를 설

정하였다(그림 1). 부산광역시는 위성영상을 활용하여 열 환경을 살펴보는 데 있어서 구릉성 산지와 해안, 낙동강 등의 지형적 요소로 다양한 토지이용 및 토지피복 상황들을 고려할 수 있고 또한 산복도로, 구도심쇠퇴, 출산율 감소 및 청년인구 유출로 인하여 일반적으로 재해 취약성 분석에서 검토하는 고령자, 독거노인, 기초생활수급자와 같은 도시취약구성요소가 고루 분포하고 있어 사회적 취약요인의 영향력을 함께 검토할만한 대상지라고 할 수 있다.

부산광역시 전체를 대상으로 본 연구에서는 국토교통부의「도시 기후변화 재해취약성 분석 및 활용에 관한 지침」을 바탕으로 폭염재해 취약성 분석을 수행하고 이를 Landsat8 영상을 이용한 지표 온도 산출 결과와 비교하여 폭염지역의 특성을 도출한다. 이후 중첩분석을 통해 취약지역의 공간적 특성을 살펴보고 그에 맞는 적응대책을 제안한다.

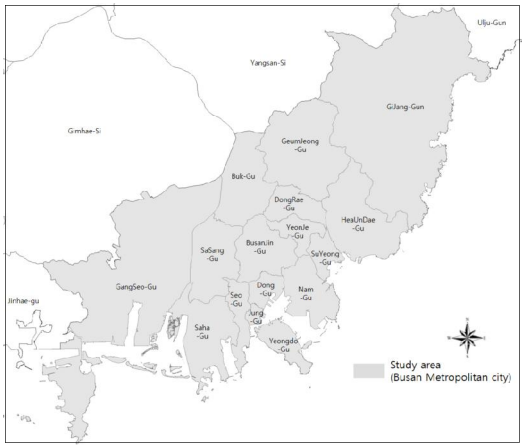


FIGURE 1. Study area

2. 선행연구 및 이론적 고찰

폭염의 영향은 사회 · 인구적, 환경적 요인으로 인해 지역에 걸쳐 균일하게 나타나지 않으며 이는 열환경에 대한 개인들의 반응이나 적응능력에 영향을 끼치게 되어 결국 특정 인구집단의 취약성의 원인이 되는 것으로 알려져 있다(Nayak *et al.*, 2018). 따라서 폭염 취약성 분석은 지역 기반의 데이터를 활용하여 공간적 특성뿐만 아니라 인구 · 사회학적 특성을 함께 고려하고 있다는 특성이 있다.

폭염에 대한 취약성분석을 수행한 연구들은 자체적인 대용변수의 기준을 설정하여 분석한 사례가 많으며, 이외에도 국가기후변화적응센터 기후변화 취약성 평가 프로그램과 같이 제도적으로 수립된 지표를 바탕으로 대용변수를 설정한 연구(이태경, 2017)도 있다. 연구의 목적과 내용에 따라 취약성 분석에 사용되는 지표들은 조금씩 차이를 보이지만, 대부분 기후노출, 민감도, 적응능력을 고려한 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 기후변화 취약성 분석 기준을 기반으로 지표를 선정하였다(Lee *et al.*, 2013; Koo *et al.*, 2015; Eum, 2016; Choi *et al.*, 2018). 대부분의 선행연구에서 기후노출 지표는 일 최고기온과 열대야 발생일을 기준으로 하며, 민감도 지표와 적응능력 지표는 전문가 설문 및 선행연구 등을 바탕으로 선정하여 조금씩 차이가 있다. 이들 연구는 연구대상지나 연구방법상에서 차이를 보이지만 공통적으로 미래 기후변화에 적응 가능하도록 지역별 환경적 특성에 맞는 적응능력 개선 및 선택적 대응정책 수립과 실행을 강조한다.

한편, 연구대상지의 열 환경 분석을 위해 위성영상을 활용하여 지표면의 온도를 추출함으로써 토지 피복유형이나 열섬현상의 조건을 분석한 연구들이 있다. 폭염 및 열섬과 같은 열 환경 연구에서 위성영상의 유용성은 여러 연구에서 입증되어 왔다. 도시지역의 기온변화는 지상에서 관측된 온도를 통하여 알 수도 있지만, 제한적인 관측 때문에 인공위성 등의 원격탐사를 통하여 연구되고 있다. 특히 인공위성의 열적외 센서는 온도에 민감한 복사적 특징을 갖고 있기 때문에 지표면 온도관측에 효과적이다(Jee *et al.*, 2014). 이러한 접근방식은 토지 피복유형에 따른 지표면 온도를 MODIS, Landsat ETM+ 및 Rapideye를 이용하여 분석한 연구(Kim and Yeom, 2012), 도시열섬 완화 및 열쾌적성을 고려하기 위한 기초자료로서 지표면 온도의 활용가능성을 제시한 연구(Yoon and Ahn,

2009)등에서 다루어졌다. Jee *et al.*(2014)의 연구에서는 MODIS와 Landsat 위성의 지표면 온도와 AWS 기온자료를 이용하여 서울을 포함한 수도권 지역의 지표면 온도를 분석하여 위성에서 산출된 지표면 온도는 시골보다는 도시에 위치한 AWS 기온과 상관성이 높게 나타남을 결과로 제시하였다.

도시의 열환경 및 열섬현상과 관련하여 토지피복과의 관련성은 해외의 여러 연구에서도 입증되어 왔으며(Rinner and Hussain, 2011) 국내에서도 여러 연구가 진행되었다. Lee *et al.*(2009)의 연구에서는 도시화에 따른 토지피복 변화로 인한 토지의 열환경에 주목하여 대구지역의 도시 내 주거, 상업, 공업, 공공시설지역 등에 따른 물리적 특성에 따른 도시 열환경을 수치모의하였고, Park *et al.*(2016)는 토지피복과 지형의 특성이 폭염일수에 미치는 영향을 분석하였다.

위에서 살펴본 바와 같이 취약성 분석은 대상지의 기후적, 물리적인 조건뿐만 아니라 사회경제적, 인구학적 취약성을 모두 포함하여 평가함으로써 재해 저감을 위한 정책적 판단 근거를 마련한다는 목적이 있다. 현행「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른 도시 기후변화 재해취약성 분석에서는 기후변화에 따른 재해에 효율적으로 대응하기 위해 재해취약지역을 분석하고 그 결과를 토대로 실효성 있는 재해저감 대책을 마련함으로써 재해예방형 도시계획수립시에 체계적인 판단 근거를 제공하려는 목적을 밝히고 있다. 한편 위성영상을 이용한 분석은 지표면의 토지이용과 건조환경, 지형 등으로 인한 결과로 나타나는 열환경을 보여준다. 이처럼 고온지역을 도출하기 위한 열 영상 분석과 취약지역을 도출하기 위한 취약성 분석은 그 목적과 초점에서 차이가 있지만, 위성영상을 이용한 열환경 분석은 실제 지표면의 토지이용과 건조환경으로 인한 고온 지역과 그렇지 않은 지역을 식별할 수 있고, 취약성 분석은 현재와 미래의 기후적, 사회적 취약요소들이 반영된다. 따라서 두 가지의 분석을 비교하고 중첩하여 그 결과를 고찰함으로써 어떠한 요인이 취약지역에 영향을 미치고 있는지 상호보완적으로 살펴볼 수 있을 것이다.

분석방법 설정

1. 폭염 기후변화 재해취약성 분석

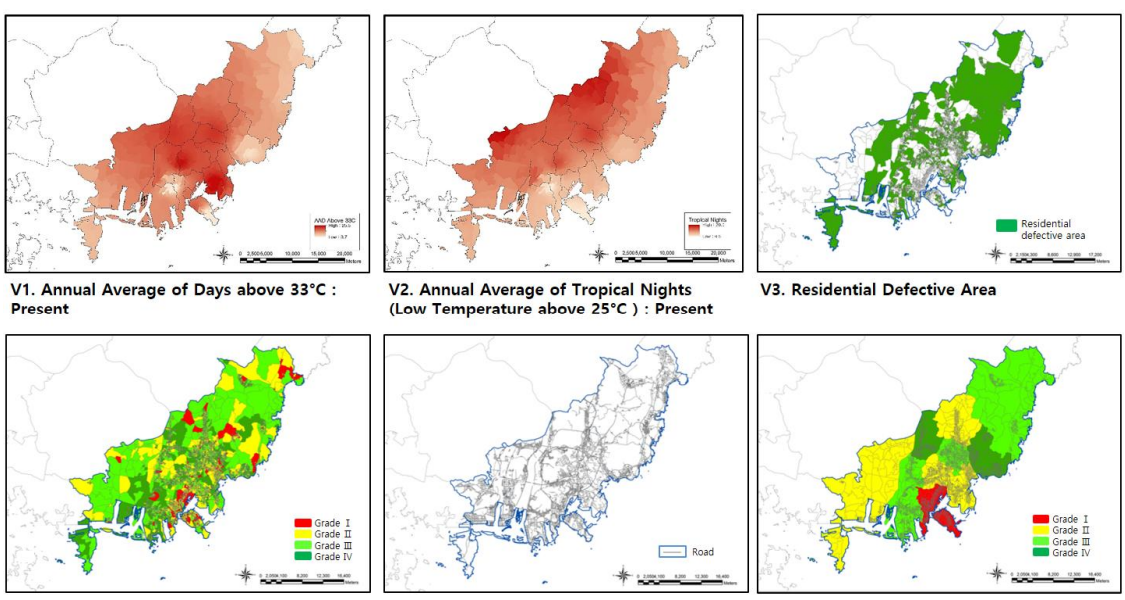
기후변화에 의한 재해취약지역을 고려하여 도시계획체계를 구축할 필요성이 대두됨에 따라 2011년 도입된 도시 기후변화 재해취약성 분석은 2015년「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」개정으로 도시·군 기본계획 및 관리계획에서 분석 결과를 반영하도록 법률적 기반이 마련되었다. 도시 기후변화 재해취약성 분석에서 기후변화 재해는 폭우, 폭염, 폭설, 가뭄, 강풍, 해수면상승 등 6개의 재해로 한정하고 있다. 본 연구에서는 폭염 재해취약성 분석을 수행하였으며,「도시 기후변화 재해취약성 분석 및 활용에 관한 지침」(이하 "지침")을 바탕으로 집계구 단위별로 분석하였다. 지침에서 폭염 재해는 현재와 미래의 기후노출과 민감도로부터 각각 취약성을 분석하고 분석결과로부터 도시종합 재해취약성을 도출하도록 하고 있다. 재해취약성분석 구조를 바탕으로 적용한 폭염 재해의 지표는 그림 2와 같다.

현재 기후노출 데이터는 부산지방기상청에서 제공하는 2009년부터 2018년까지의 기상관측자료를 이용하여 대상지 기후 데이터를 추출하였다. 대상지인 부산광역시에는 유인관측소(ASOS) 1개소와 무인관측소(AWS) 14개소가 있으며, 인근 지역의 ASOS 2개소, AWS 6개소를 같이 활용하여 공간보간법(IDW : Inverse Distance Weighted) 분석으로 데이터를 구축하였다. 연평균 열대야 일수가 가장 적은 지역은 부산시 주례로 연평균 2.9일 발생하였으며, 가장 많은 지역은 부산시 대연으로 연평균 25.6일 발생하였다.

현재 도시민감도 자료는 건축물 대장과 KLIS 데이터 및 해당지자체 요청자료를 사용하였다. 잠재취약지역인 주거불량지역은 30년 이상의 단독주택으로, 대상지역에는 235,832호가 있으

Structure of the Climate Change Vulnerability Analysis			Variable		Data Source
Total Disaster Vulnerability	Present Vulnerability	Present Exposure	v1	Annual Average of Days above 33°C	Regional office of Meteorology(Busan)
			v2	Annual Average of Tropical Nights (Low Temperature above 25°C)	
		Present Sensitivity: Potential Vulnerability Area	v3	Residential Defective Area	Registered building data, KLIS, Building life cycle management system(MOLIT), and related Local governments
		Present Sensitivity: Assessment Object: Citizen	v4	Population Under 5, Over 65 Elderly People Living Alone, Low-income Residents	
		Present Sensitivity: Assessment Object: Urban Infrastructure	v5	Road	
		Present Sensitivity: Assessment Object: Building	v6	Detached House Roof (concrete, slavish, slate)	
	Future Vulnerability	Future Exposure	v7	Annual Average of Days above 33°C	Data created by National Disaster Prevention Research Center(KRIHS)
			v8	Annual Average of Tropical Nights (Low Temperature above 25°C)	
		Future Sensitivity	v9	Densely Populated Area	Land cover map(EGIS), SGIS, and related departments of local governments
			v10	Urbanization Area	
			v11	Urban Development, Renewal Area	

FIGURE 2. List of Variables



V1. Annual Average of Days above 33°C : Present

V2. Annual Average of Tropical Nights (Low Temperature above 25°C) : Present

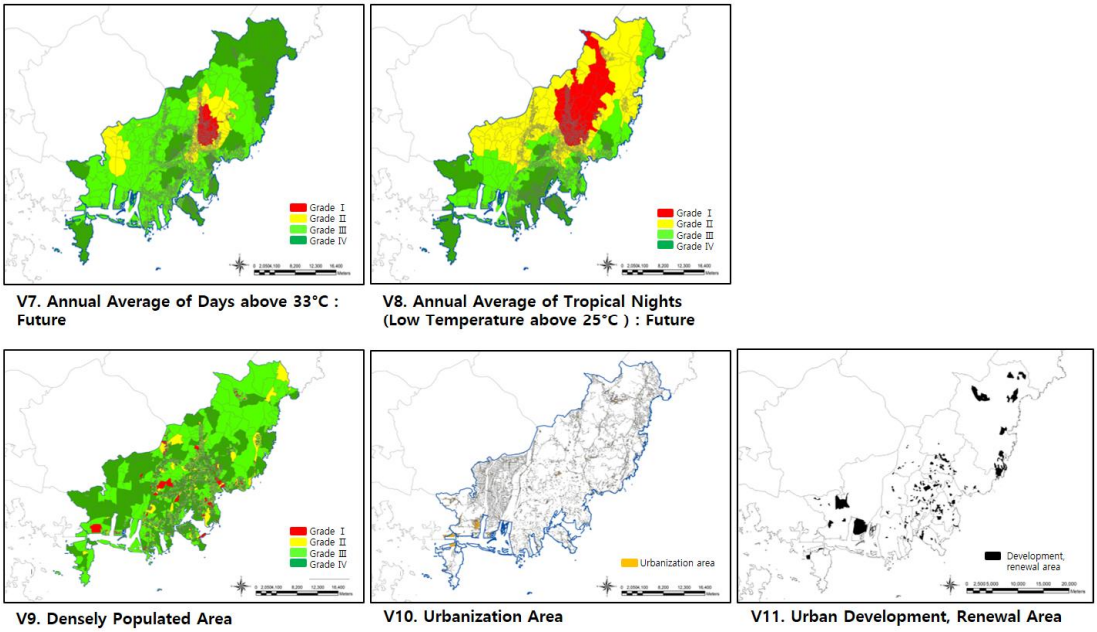
V3. Residential Defective Area

V4. Citizen

V5. Road

V6. Detached House Roof

FIGURE 3. Variables of Present Vulnerability



V7. Annual Average of Days above 33°C : Future

V8. Annual Average of Tropical Nights (Low Temperature above 25°C) : Future

V9. Densely Populated Area

V10. Urbanization Area

V11. Urban Development, Renewal Area

FIGURE 4. Variables of Future Vulnerability

며, 이 중 부산진구에 28,876호로 가장 많은 것으로 나타났다. 도시취약구성요소인 취약인구와 독거노인수, 저소득층 인구수는 통계청 인구총조사(SGIS) 데이터를 활용하였으며, 도로는 KLIS를 이용하여 구축하였다. 단독주택 내 지붕(콘크리트, 슬라브, 슬레이트) 데이터는 국토교통부 건축물 생애이력 시스템을 활용하였으며, 부산 원도심 지역(동구, 서구, 중구, 영도구)을 중심으로 높은 취약등급이 분포하고 있었다. 2018년 기준으로 구축된 현재취약성 데이터의 분포현황은 그림 3과 같다.

미래 기후노출 자료는 기상청 기후변화정보센터에서 제공하는 남한상세 RCP 8.5 기후변화 시나리오 자료를 활용하여야 하나, 스케일의 문제로 국토연구원 국가방재연구센터에서 구축한 데이터를 활용하였다. 부산광역시는 최소 3.13일, 최대 27.75일의 폭염과 최소 21.98일 최대 48.22일의 열대야가 발생할 것으로 전망되었다.

미래 도시민감도에서 최근 10년간 시가화지역은 환경 공간정보서비스에서 구득 가능한 최선의 시점인 2007년과 2014년 토지피복도 데이터를 이용하여 건조지역으로 변경된 지역의 위치와 면적을 분석하였으며, 최근 10년간 증가인구수는 통계청 인구 총조사(SGIS)의 과거 2000년 인구와 현재 2010년 인구 자료를 바탕으로 집계구별 인구증가수를 산정하여 분석지표로 사용하였다. 개발사업진행 · 예정지구는 도시개발과 관련된 사업이 진행 중이거나 예정인 지역으로 택지개발예정지구, 도시개발지구등 9개 사업 지역 및 지구를 관련 부서로부터 협조를 받아서 구축하였다. 대상지역에 구축한 미래취약성 데이터의 분포현황은 그림 4와 같다.

2. 부산광역시 지표온도 분석

Landsat 위성은 1972년 Landsat 1의 발사를 시작으로 2013년 Landsat 8이 발사되어 운영 중이다. Landsat 8 위성의 다양한 관측 파장 중에서 대기의 창 영역에 해당되는 11 μm(Band 10) 자료를 이용하여 지표면 온도를 산출할 수 있다(Jee *et al.*, 2016). 16일에 1회 관측되는 Landsat 8위성의 자료는 USGS의 EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/)

홈페이지에서 제공하고 있다. 본 연구에서는 대상지를 중심으로 관측되는 path114/row36 영역의 자료에 대하여 구름이 적고(10%이하) 폭염에 영향을 주는 여름(7월, 8월) 기간을 설정하여 2018년 7월 14일 낮시간(01:58 GMT) 데이터를 활용하였다.

지표면 온도를 계산하기 위해서는 먼저 Landsat 8 위성자료에서 복사에너지는 정량화된 값(Qcal : Digital Number)으로 제공되기 때문에 위성의 밴드특성을 이용하여 복사에너지를 변환한다. 식 1과 같은 선형회귀식을 이용하여 실제 복사량으로 계산할 수 있다(USGS, 2015).

$$L_\lambda = M_L Qcal + A_L \quad (1)$$

여기서 L_λ는 센서에 도달하는 스펙트럼 복사량, M_L는 해당밴드에 대한 Radiance multiplicative scaling factor, $Qcal$은 해당 화소의 DN, A_L은 해당밴드에 대한 Radiance additive scaling factor를 의미한다. 식 1을 통하여 계산된 복사에너지를 이용하여 밝기온도를 계산할 수 있으며, Landsat 8의 해당 센서에 대해 보정된 식 2를 활용한다.

$$T(k) = \frac{K_2}{\ln(\frac{K_1}{L_\lambda}+1)} \quad (2)$$

여기서 $T(k)$는 밝기온도이고, 계수 K_1과 K_2는 Landsat 8 센서의 적외선 밴드에 대한 보정계수로, 밴드 10과 밴드 11의 경우 각각 774.89와 121.08 그리고 480.89와 1201.14이다(Mattew *et al.*, 2014). 밴드 11은 밴드 10보다 대기에 대한 영향을 많이 받기 때문에 온도가 다소 낮게 측정되는 경우가 있다(Park and Cho, 2016; Kim *et al.*, 2018). 따라서 본 연구에서는 밴드 10을 이용하였다.

지표면 온도는 밝기온도($T(k)$)와 밴드 4와 밴드 5를 이용하여 계산할 수 있는 정규식생지수(NDVI : Normalized Difference Vegetation Index)를 이용하여 계산된 지표면 방출률(ε)을 이용하여 식 3과 같은 방법으로 계산된다.

$$T_s = \epsilon^{1/4} T(k) \quad (3)$$

그림 5는 대상지역의 Landsat 8 위성영상 원본(a)과 지표면 온도에 사용된 밴드 10의 영상(b)으로, 부산을 포함한 남해일부 및 일본의 대마도까지 포함하고 있다.

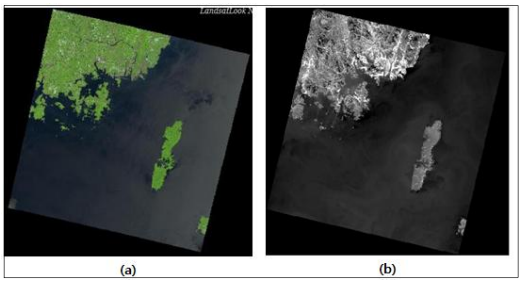


FIGURE 5. Image of Landsat 8 Satellite

폭염 재해취약지역의 특성 분석

1. 폭염 기후변화 재해취약 지역의 특성

기후변화 재해취약성분석(그림 6)에서는 폭염재해에 대한 도시종합 재해취약성을 도출할 때 현재취약성과 미래취약성을 분석하고, 이후 현장조사 및 전문가 의견수렴 결과를 통해 최종 확정된 재해취약성을 도출하도록 되어있다. 그러나 본 연구의 대상지인 부산광역시는 지자체 차원에서 아직 폭염에 대한 재해취약성 분석을 수행하지 않은 지역으로, 본 연구에서는 현장조사 및 의견수렴 이전단계인 현재와 미래 취약성 분석결과로부터 도시종합 재해취약성을 도출하는 것까지를 범위로 하였다.

현재 취약성은 현재 기후노출 등급(Ⅰ~Ⅳ)과 현재 도시민감도 등급(Ⅰ~Ⅳ)에 대한 매트릭스 매칭을 통해 현재 재해취약지역(Ⅰ, Ⅱ등급) 등급을 도출한다. 폭염재해에 매우 취약한 Ⅰ등급 지역은 전체면적 대비 1.5% 수준으로 금정구,

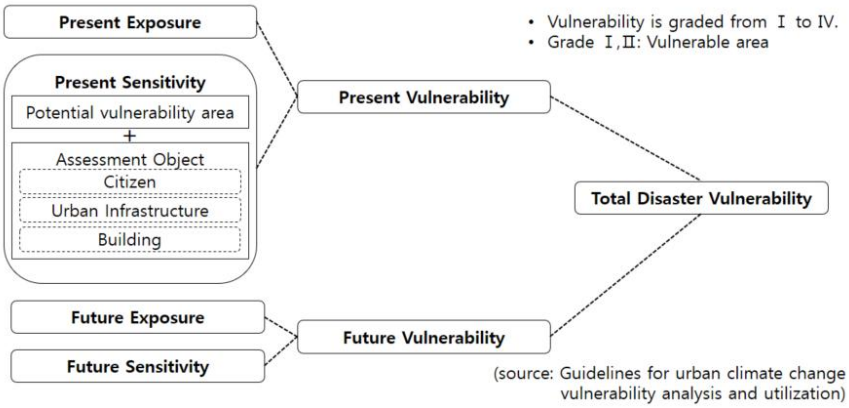


FIGURE 6. Structure of the vulnerability analysis (edited based on Kim et al.(2014))

동래구, 부산진구, 연제구 등 시가화가 진행된 6개 구군에 집중적으로 분포하였으며, 취약한 Ⅱ등급은 영도구와 사하구를 제외한 지역에 다양하고 넓게(33.8%)게 분포하는 것으로 나타났다(표 1).

미래 취약성은 최근 10년간 증가인구수, 최근 10년간 시가화·건조지역, 도시개발 관련 개발예정지구의 표준화지수 평균을 산출하여 미래 도시민감도 점수를 도출한다. 미래 도시민감도 분석결과 동래구 일대에 Ⅰ등급 지역이 가장 널리 분포하고 있으며, 금정구와 연제구에 취약한(Ⅱ등급) 지역이 많은 것으로 분석되었다. 미래 재해취약지역(Ⅰ, Ⅱ등급)은 전체 면적대비 5.2% 수준으로 매우 적은 지역에 나타났다(표 2, 그림 7, 8 참고).

TABLE 2. Result of Present Vulnerability

Grade	Location	Area (㎢)	Per. (%)	Count
Ⅰ	4 Gu : Gangse-Gu, Geumjung-Gu, Sasang-Gu, etc.	11.4	1.5	108
Ⅱ	11 Gu : Gangse-Gu, Geumjung-Gu, Dong-Gu, etc.	264.8	33.8	2,013
Ⅲ	-	366.1	46.7	3,494
Ⅳ	-	141.8	18.1	1,307
total	-	784.0	100.0	6,922

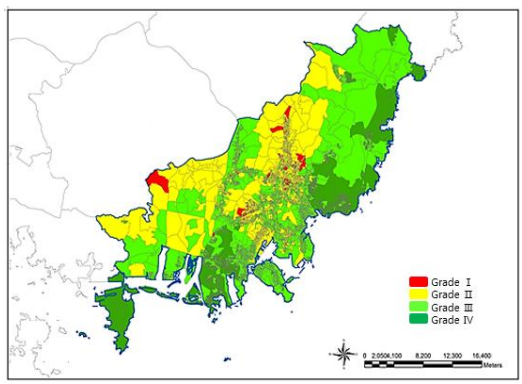


FIGURE 7. Result of Present Vulnerability

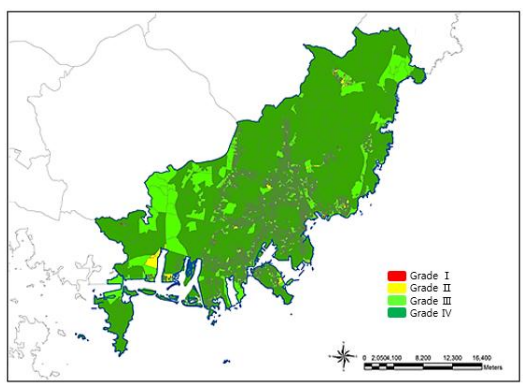


FIGURE 8. Result of Future Vulnerability

폭염 종합재해취약성은 현재 재해취약성 분석

결과와 미래 취약성 분석결과를 중첩하여 작성하되 둘 중 높은 등급을 반영하여 도출한다. 앞서 현재와 미래의 재해취약성 결과에서 확인한 바와 같이 미래 재해취약성에서 재해취약지역(Ⅰ, Ⅱ등급)이 적은 관계로 종합재해취약성 결과도 현재취약성과 유사하게 나타났다(표 3, 그림 9). 폭염에 취약한 지역은 강서구의 일부 지역을 제외하고 현재 기후노출에 의해 등급이 높게 나타난 지역과 유사한 분포 패턴을 나타냈다. 즉, 연평균 일 최고기온 33℃이상 일수와 연평균 열대야가 많이 나타나는 지역으로 시가화가 진행된 지역을 중심으로 높게 나타났다. 시가화 지역은 아니지만 취약 등급이 높게 나타난 강서구 일부지역은 공항에 의한 영향으로 판단되며, 시가화 지역이면서 취약 등급이 낮은 지역은 바다에 접한 지역으로 현재기후노출이 낮은 영향으로 판단된다.

TABLE 3. Result of Future Vulnerability

Grade	Location	Area (㎢)	Per. (%)	Count
Ⅰ	4 Gu : Dongrae-Gu, Geumjung-Gu, Yumjea-GU, etc.	15.8	2.0	520
Ⅱ	14 Gu : Gangse-Gu, Dongrae-Gu, Busanjin-Gu, etc.	25.1	3.2	308
Ⅲ	-	106.5	13.6	1,350
Ⅳ	-	636.6	81.2	4,744
total	-	784.0	100.0	6,922

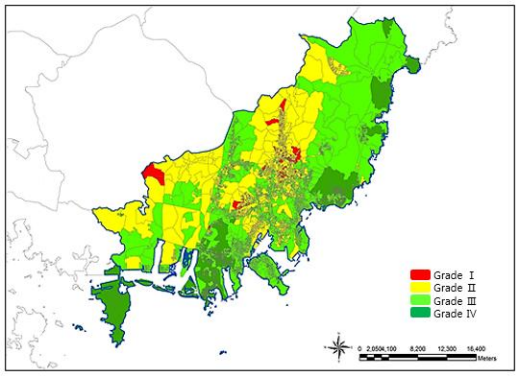


FIGURE 9. Total Disaster Vulnerability

TABLE 4. Result of Total Disaster Vulnerability

grade	location	Area (㎢)	Per. (%)	Count
Ⅰ	9 Gu : Gangse-Gu, Geumjung-Gu, Dongrae-Gu, etc.	12.3	1.6	172
Ⅱ	14 Gu : Gangse-Gu, Geumjung-Gu, Busanjin-Gu, etc.	280.6	35.8	2,462
Ⅲ	-	384.6	49.1	3,436
Ⅳ	-	106.5	13.6	852
total	-	784.0	100.0	6,922

2. 지표온도에 의한 취약지역 특성

Landsat 8 위성영상을 이용하여 도출한 대상지의 지표면 온도는 그림 10과 같다. 지표면온도의 분포를 구군별로 살펴보면 서측의 사상구와 사하구 지역 및 강서구 남쪽지역의 온도가 높은 것으로 나타났으며, 항만 및 컨테이너부두가 있는 남구와 동구일대가 높게 나타났다. 지리적 특성에서 살펴보면 일반적으로 바다와 인접한 지역과 녹지의 비중이 높은 지역에서 지표면 온도가 낮은 것으로 관측되었으나 바다와 인접해 있더라도 항만지역은 높은 온도로 나타났다. 이는 선행연구(Ahn *et al.* 2012)에서도 관측된 것으로 항만지역의 콘크리트 인공구조물의 영향인 것으로 판단된다.

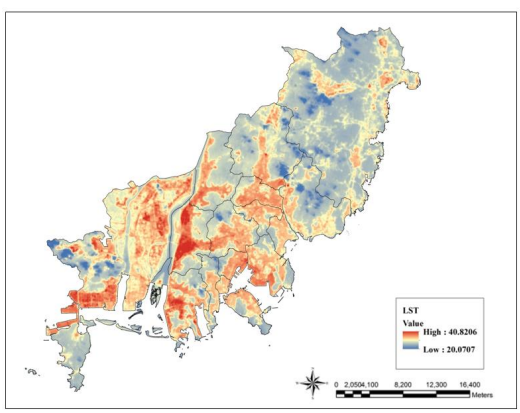


FIGURE 10. Land Surface Temperature

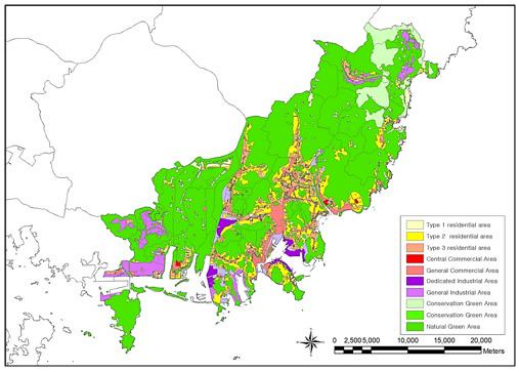


FIGURE 11. Land Use in Study Area

대상지역의 용도지역도(그림 11)와 비교하여 살펴보면 주상·공업지역이 위치하는 시가화지역의 온도가 높고, 산림과 녹지지역의 온도가 낮은 것으로 나타났다. 특히 사상구의 사상공단과 사하구의 장림공단, 강서구 녹산공단 등 용도지역상 공업지역으로 공장의 밀집도가 높은 지역에서 지표온도가 매우 높은 것으로 나타났다. 산림지역과 녹지지역은 전반적으로 낮은 지표온도를 나타내고 있으나, 강서구의 일부 녹지 지역에서 높은 지표온도가 관측되었다. 이는 대상지역이 용도지역상은 녹지지역이나, 토지피복이 시가화지역과 유사한 특성을 가진 김해공항이 원인인 것으로 판단된다.

3. 중첩분석을 통한 취약지역 특성

기후변화 재해취약성 분석과 지표온도 분석을 통하여 공통적으로 위험한 부분을 도출하기 위하여 중첩분석을 수행하였다. 분석결과 지표온도가 높은 지역이 재해취약성이 높은 지역으로 나타나지는 않았다. 실질적으로 고온의 지표온도지역과 폭염취약성 요인들과 어떤 연관성이 있는지 분석하기 위하여 지표온도를 종속변수로, 재해취약성 분석에서 사용되는 변수들을 독립변수로 설정하여 OLS분석을 수행한 결과 변수들의 설명력을 나타내는 R^2값이 0.16에 불과한 것으로 나타났다. 이는 지표온도가 높은 지역은 위성영상을 분석하여 도출한 결과이지만, 폭염 재해취약성 분석결과는 사회적·인문적 요인과 현재와 미래에 대한 기후노출을 반영하는 등 다양한 요인들이 복합적으로 적용되어 있기 때문이다.

그럼에도 불구하고 두 가지 분석에서 모두 높게 나타나는 지역은 폭염에 취약한 지역으로 볼 수 있다. 이를 살펴보기 위해 재해취약성분석에서 사용되는 분석 단위인 집계구단위로 지표온도 분석결과를 일치시킨 후, 지표온도의 등급 또한 기후변화 재해취약성분석에서 등급 분류에 사용되는 Jenks의 최적화 기법을 적용하여 4등급으로 분류하였다(그림 12).

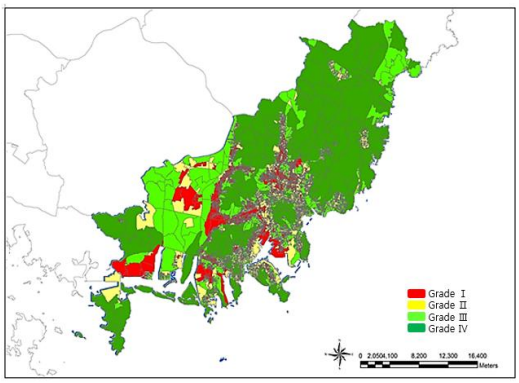


FIGURE 12. 4 Grades of Land Surface Temperature

재해취약성 분석에서는 Ⅰ등급 또는 Ⅱ등급인 지역을 "재해취약지역" 으로 분류하고 있다. 이러한 기준을 적용하여 두 분석 모두에서 Ⅰ등급 또는 Ⅱ등급으로 나타난 지역(Grade Ⅱ)을 도출하였다(그림 13). 공간단위와 분류 단위를 일치시킨 중첩분석을 통하여 폭염 취약지역의 특성을 살펴본 결과, 재해취약성과 지표온도 모두 높은 지역은 용도지역상(그림 11) 주거와 상업, 공업용도로 사용되는 내륙지역의 시가화지역과 유사하게 나타났다. 다만 동구를 제외한 해안지역은 재해취약성분석 결과 나타난 낮은 등급의 영향을 받아 위험도가 낮았다. 동구의 경우 현재기후노출의 변수 중에서 취약인구계층(v4)과 단독주택 내 지붕(v6)의 분포가 매우 높게 나타남으로써, 중첩분석결과에서도 위험도가 높은

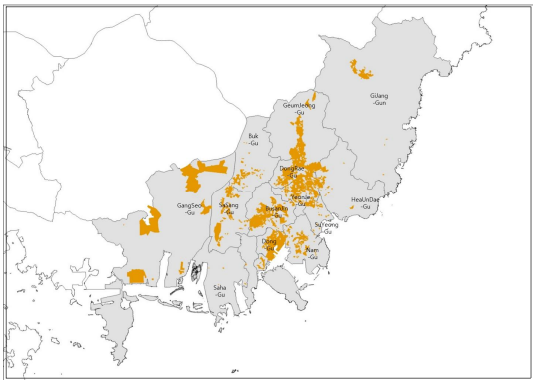


FIGURE 13. Overlay Analysis : Grade II

FIGURE 14. Overlay Analysis : Grade I

TABLE 5. Characteristics of Overlay Analysis: Grade I & Grade II

Grade	Land Use	Count (%)	Characteristics
Grade I	Residential	137 (71.7%)	– High proportion of commercial and semi-residential areas – Residential area: Geumjung-Gu, Dongrae-Gu, Busanjin-Gu – Need to expand green areas for heat prevention
	Business	22 (11.5%)	
	Industrial	2 (1.0%)	
	Etc.	30 (15.7%)	
Grade II	Residential	3,789 (67.9%)	– An inland urbanization areas. – Low vulnerability in coastal areas. – Major causes of vulnerability: population(v4) and detached houses(v6)
	Business	487 (8.7%)	
	Industrial	13 (2.4%)	
	Etc.	1,168 (20.9%)	

것으로 나타났다.

두 분석 결과에서 모두 I등급으로 나타난 지역은 열 환경과 폭염 취약성 모두에서 가장 취약한 지역(Grade I)으로 볼 수 있으며, 금정구와 동래구, 부산진구 일부에 분포한다(그림 14). 용도지역과 중첩해본 결과 대부분 높은 밀도로 개발된 상업지역과 준주거지역의 비중이 높은 것으로 나타났다. 지표온도가 높게 나타났던 공업지역은 기후노출과 민감도가 반영된 재해취약성 분석 결과의 낮은 등급으로 인하여, 중첩했을 때 I등급 지역으로 나타나지 않았다.

상업 및 주거지 비율이 높은 I등급지역인 금정구의 서동과 부곡동, 동래구의 복산동과 온천동, 부산진구의 개금동 일원은 재해취약성 분석에서 연평균 일최고기온 33℃이상 일수와 연평균 열대야(일최저기온 25℃ 이상) 일수가 높고 폭염에 취약한 인구가 많으며, 주거불량지역도 많은 것으로 나타난 지역이다. 따라서 열대야가 많이 발생하는 여름철에 높은 지표온도에 의한 폭염피해 방지를 위하여 녹지의 확충이 우선적으로 시행되어야 할 것으로 보이는데, 선행연구(Kim *et al.*, 2018)에서 도심의 녹지가 상업지역보다 주거지역에서 냉각효과의 강도와 범위가 큰 것으로 제시된 바 있다. 또한 폭염에 의한 인명피해의 방지차원에서 주거지 비율이 높은 해당지역 일원을 중심으로 주택개량과 주거환경정비가 필요할 것이다. 해당 주민의 자발성이 있는 주택개량을 지원하기 위한 주택개량자금 융자제도 개선, 주택역모기지상품 도입과 같은 제도도 동반되어야 할 것이다. 이와 같이 폭염재해에 대응하기 위하여 공공지원 사업의 확대도 중요하지만, 취약지역마다 다르게 존재하는 재해취약 원인을 바탕으로 우선순위를 고려한 맞춤형 방재대책의 도입이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 폭염취약지역의 인공위성 열 영상과 취약성 분석결과를 비교분석하고 이를 중첩하여 그 지역이 갖는 공간적 특성과 관련하여 취약 원인을 살펴보고자 하였다. 도시의 열 환경을 분석하는 데 효과적인 위성영상과 한 지역의 기후 및 사회적 민감도를 변수로 포함하는 취약성 분석의 결과는 상이하게 나타날 수 있다. 그러나 고온지역을 추출하여 토지이용을 살펴보고 그 지역의 취약성분석 결과와 중첩시켜 살펴봄으로써 지역기반 데이터를 이용한 공간적 특성을 도출할 수 있다는 의의를 찾을 수 있을 것이다.

본 연구에서는 연구대상지의 위성영상을 통해 항만이나 공업지역과 같이 지표온도를 높이는 요인과 녹지와 바다처럼 열을 완화할 수 있는 요인들을 확인할 수 있었다. 한편 취약성 분석으로 폭염과 열대야가 빈발하는 시가화 지역의 취약성을 확인하였고, 이를 열 영상과 중첩하여 위험 등급에 따라 특성을 살펴본 결과, 상업 및 주거지 비율이 높은 폭염 취약지역을 도출하였다. 폭염 취약지역에 대한 대책은 주로 폭염 예·경보 시스템 구축이나 응급의료지원, 무더위 쉼터와 같이 폭염발생기간에 적용할 수 있는 수단들이 적용되어 왔으나, 도시의 건조 환경 개선이나 도시계획제도를 통한 중장기적 대책도 마련할 필요가 있다. 한 도시의 기후조건이나 지형특성은 통제가 불가능한 요인이지만 도시 밀도나 녹화 공간, 포장도로와 오픈스페이스, 건축재료, 건물 및 공간의 활용 등은 도시 계획과 의사결정과정에서 충분히 개선이 가능한 요인이다.

폭염에 대한 취약성은 지역과 공간의 특성에 따라 영향을 미치는 요인이 다양할 수 있으며 이에 대한 폭염 저감이나 적응 대책에 있어서도 지역 기반의 다양한 요인들이 반영되어야 한다. 기후변화와 도시환경의 영향으로 폭염의 위험성이 증대되고 있는 가운데 폭염 취약지역의 공간적 특성을 확인하고 지역기반의 취약요인 분석 및 진단을 통해 적절한 대비책을 강구해야 할 것이다.

본 연구에서는 대상지에 대한 폭염 위험도 및 대처방안을 일반적으로 서술하였으나, 폭염 취약성 분석 결과에 대하여 더욱 미시적으로 접근하여 지역 하나하나에 대한 검토가 동반된다면 지역 방재력 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 지표온도를 산출하는 과정에서 한 해의 데이터를 활용하였다는 한계가 있는데, 다수 년도의 열영상을 활용한다면 더욱 정확하고 시계열적으로 의미 있는 결과가 도출될 것으로 보인다. KAGIS

REFERENCES

Ahn, J.S., Hwang, J.D., Park, M.H.,and Suh, Y.S. 2012. Estimation of urban heat island potential based on land cover type in Busan using Landsat-7 ETM+ and AWS data. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 15(4):65-77 (안지숙, 황재동, 박명희, 서영상. 2012. Landsat-7 ETM+ 영상과 AWS 자료를 이용한 부산의 토지피복에 따른 여름철 도시열섬포텐셜 산출. 한국지리정보학회지 15(4):65-77).

Choi, Y.S., Kim, J.W, and Lim, U., 2018. An analysis on the spatial patterns of heat wave vulnerable areas and adaptive capacity vulnerable areas in Seoul. Journal of Korea Planning Association 53(7):87-107 (최예술, 김재원, 임업. 2018. 서울시 폭염 취약지역의 공간적 패턴 및 적응능력 취약지역 분석. 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 53(7):87-107).

Eum, J.H. 2016. Vulnerability assessment to urban thermal environment for spatial planning: a case study of Seoul, Korea. Journal of Korean Institute of Landscape Architecture 44(4):109-120 (엄정희. 2016. 공간계획 활용을 위한 도시 열환경 취약성 평가연구: 서울시를 사례로. 한국조경학회지 44

(4):109-120).

Jee, J.B., Kim, B.Y., Zo, I.S., Lee, K.T., and Choi, Y.J. 2016. Retrieval of land surface temperature based on high resolution Landsat 8 satellite data. Korean Journal of Remote Sensing. 32 (2):171-183 (지준범, 김부요, 조일성, 이규태, 최영진. 2016. 고해상도 Landsat 8 위성자료기반의 지표면 온도 산출. 대한원격탐사학회지 32(2):171-183).

Jee, J.B., Lee, K.T., and Choi, Y.J. 2014. Analysis of land surface temperature from MODIS and Landsat satellites using by AWS temperature in Capital area. Korean Journal of Remote Sensing. 30(2):315-329 (지준범, 이규태, 최영진. 2014. 수도권 AWS 기온을 이용한 MODIS, Landsat 위성의 지표면 온도 분석. 대한원격탐사학회지 30(2):315-329).

Jeong, J.J. 2001. Cellular automata modeling for analysis and prediction of urban growth in capital area. Ph.D. Thesis. Univ. of Seoul, Seoul, Korea (정재준. 2001. 수도권의 도시성장 분석 및 예측을 위한 셀룰라 오토마타 모델링. 서울대학교 대학원 박사학위논문).

Kim, G.H., Y.G. Lee, J.H. Kim, H.W. Choi and B.J. Kim. 2018. Analysis of the Cooling Effects in Urban Green Areas using the Landsat 8 Satellite Data. Korean Journal of Remote Sensing 34(2-1):167-178 (김근회, 이영곤, 김재환, 최희욱, 김백조. 2018. Landsat 8 위성자료를 이용한 도심녹지 냉각효과 분석. 대한원격탐사학회지 34(2-1):167-178).

Kim, H.O. and Yeom, J.M. 2012. Effect of the urban land cover types on the surface temperature: Case study of Ilsan new city. Korean Journal of Remote Sensing 28(2):203-214 (김현옥, 염종민. 2012. 도시지역의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향: 경기도 일산 신도시를 중심으로. 대한원격탐사학회지 28(2):203-214).

Kim, J.S., Kim, H.Y. and Lee, S.H. 2014. A review on improvements of climate change vulnerability analysis methods: Focusing on sea level rise disasters. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies. 17(1):50-60 (김지숙, 김호용, 이성호, 2014, 도시 기후변화 재해취약성분석 방법의 개선방안 검토: 해수면상승 재해를 중심으로. 한국지리정보학회지 17(1):50-60).

Koo, Y.S., Kim,, J.E.., Kim, J.S. and Lee S.H. 2015. Study on the improvement of adaptation ability by vulnerability analysis of heat wave: the case of Busan Metropolitan city. Journal of the Korean Regional Development Association. 27 (5):331-348 (구유성, 김자은, 김지숙, 이성호. 2015. 폭염 취약성 평가를 통한 도시의 적응능력 향상: 부산광역시를 중심으로. 한국지역개발학회지 27(5):331-348).

Lee, H.J., Lee, K.O., Won, G.M., and Lee, H.W. 2009. Application of the latest land use data for numerical simulation of urban thermal environment in the Daegu. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 25(3):196-210 (이현주, 이귀옥, 원경미, 이화운, 2009, 최신토지피복자료를 이용한 대구시의 열환경 수치모의, 한국대기환경학회지 25(3):196-210).

Lee, T.K. 2017. A study on improvement of climate change vulnerability index focused on heat wave. Master degree thesis. The graduate school of Sejong university. Seoul. Korea. (이태경. 2017.

폭염을 중심으로 한 기후변화 취약성 평가 지표개선 연구. 세종대학교 대학원 석사학위논문).

Lee, W.J., Kang, J.E. and Kim, Y.K. 2013. The impact of environmental health factors in extreme-heat vulnerability assessment in a metropolitan city. Journal of Environmental Health Science 39(6):492-504 (이원정, 강재은, 김유근. 2013. 환경보건적 요소가 도시 내 폭염 취약성 평가 결과에 미치는 영향 분석. 한국환경보건학회지 39(6):492-504).

Mattew, M., L. Allen, T. Zelalem, W. Brian and R. Dennis. 2014. Radiometric Calibration Methodology of the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor. Remote Sensing 6(9):8803-8821.

Nayak, S.G., Shrestha, S., Kinney, P.L., Ross, Z., Sheridan, S.C., Pantea, C.I., Hsu, W.H., Muscatiello, N., and Hwang, S.A. 2018. Development of a heat vulnerability index for New York State. Public Health. 161:127-137.

Park, J.H. and G.H. Cho. 2016. Influence of Park Size on the Park Cooling Effect : Focused on Ilsan New Town in Korea. Journal of Korea Planning Association 51(5):247-261 (박종화, 조기혁. 2016. 공원 크기에 따른 공원의 온도저감 효과 분석 : 일산 신도시를 대상으로. 대한국토도시계획학회지 51(5):247-261).

Park, K.H., Song, B.G., and Park, J.E. 2016. Analysis on the effects of land cover types and topographic features on heat wave days. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies. 19(4):76-91 (박경훈, 송봉근, 박재은. 2016. 토지피복유형과 지형특성이 폭염일수에 미치는 영향분석. 한국지리정보학회지 19(4):76-91).

Rinner, C. and Hussain, M. 2011. Toronto's urban heat island: Exploring the relationship between land use and surface temperature. Remote Sensing 3(6):1251-1265.

USGS. 2015. Landsat 8(L8) Data Users Handbook. Department of the Interior US Geological Survey, v1. https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook.. (Accessed August 15, 2019)

Yoon, M.H. and Ahn, T.M. 2009. An application of satellite image analysis to visualize the effects of urban green areas on temperature. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture. 37(3):46-53 (윤민호, 안동만. 2009. 위성영상을 이용한 도시녹지의 기온저감 효과 분석. 한국조경학회지 37(3):46-53). KAGIS