Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 26(1) 2023, pp.132-144 ISSN 1226-9719(Print)
https://doi.org/10.11108/kagis.2023.26.1.132 ISSN 2287-6952(Online)

폭염재해의 재해취약성분석 및 리스크 평가 비교*

설유정[1] · 김호용[2※]

Comparison of Disaster Vulnerability Analysis and Risk Evaluation of Heat Wave Disasters*

Yu-Jeong SEOL[1] · Ho-Yong KIM[2※]

요 약

최근 기후변화 기온상승 따른 폭염의 발생 빈도와 강도가 증가하고 있다. 이에 본 연구는 정부가 채택한 기후변화 재해취약성분석에 따른 폭염 재해취약성분석과 최근 IPCC에서 강조하고 있는 재해평가 방법인 리스크 평가라는 두 가지의 폭염재해 평가를 부산광역시 폭염을 대상으로 평가과정과 평가결과를 비교하고 시사점을 도출하고자하였다. 기후변화 재해취약성분석은 정부에서 마련한 매뉴얼과 가이드라인을 기반으로 평가하고 있다. 리스크 평가는 재해발생가능성과 그 영향의 곱으로 평가될 수 있으며, 재해발생가능성을 산출함에 있어서 사전 정보를 활용하여 사후확률을 추론하는 베이지안 추정법을 기반으로 한 마르코브체인 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 평가하고 있다. 분석 결과 부산광역시를 대상으로 한 두 가지 평가 결과는 폭염 취약 지역의 공간분포에서 다소 차이가 발생하였다. 기후변화에 따른 재해 취약 지역을 적절하게 평가하기 위해서는 기후변화 재해취약성분석과 리스크 평가의 분석 과정 및 결과를 살펴보고 각각의 방법론에 대한 고려와 그에 맞는 대응을 마련해야하며, 이를 통해 장기적인 폭염 대응 방안을 마련할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 폭염, 기후변화 재해취약성분석, 리스크 평가, 베이지안 추정법, MCMC 시뮬레이션

ABSTRACT

Recently, the frequency and intensity of heat waves due to the increase in climate change temperature are increasing. Therefore, this study tried to compare the evaluation

2023년 02월 20일 접수 Received on February 20, 2023 / 2023년 03월 07일 수정 Revised on March 07, 2023 / 2023년 03월 16일 심사완료 Accepted on March 16, 2023
* 본 연구는 환경부 녹색복원 전문인력 양성사업으로 지원을 받아 수행한 과제입니다.
* 이 논문은 저자의 2022년 12월 동아대학교 일반대학원 공학 석사학위논문 “기후변화에 따른 부산광역시 폭염재해 리스크 평가” 의 내용 일부를 수정 · 보완하여 작성하였음
1 동아대학교 도시계획 · 조경학과 석사과정 / Master course, Dept. of Urban Planning and Landscape Architecture, Dong-A University
2 동아대학교 도시공학과 부교수 / Associate Professor, Dept. of Urban Planning and Engineering, Dong-A University
※ Corresponding Author E-mail : hykim@dau.ac.kr

process and evaluation results of the heat wave disaster evaluation, which is the government's analysis of the heat wave disaster vulnerability and the risk evaluation method recently emphasized by the IPCC. The analysis of climate change disaster vulnerability is evaluated based on manuals and guidelines prepared by the government. Risk evaluation can be evaluated as the product of the possibility of a disaster and its impact, and it is evaluated using the Markov chain Monte Carlo simulation based on Bayesian estimation method, which uses prior information to infer posterior probability. As a result of the analysis, the two evaluation results for Busan Metropolitan City differed slightly in the spatial distribution of areas vulnerable to heat waves. In order to properly evaluate disaster vulnerable areas due to climate change, the process and results of climate change disaster vulnerability analysis and risk assessment must be reviewed, and consider each methodology and countermeasures must be prepared.

KEYWORDS : Heat wave, Climate change disaster vulnerability analysis, Risk assessment, Bayesian estimation method, MCMC simulation

서 론

전 지구적으로 기후의 변화는 주요한 환경적 이슈로 기온상승과 함께 강우일수, 강수량 증가, 해수면 상승, 이상기상의 발생빈도 증가 등 다양한 형태로 나타나고 있으며, 이러한 기후변화에 따라 자연재해의 발생빈도와 강도 및 피해가 증가하고 있다.

우리나라의 경우, 기상청 통계자료에 따르면 1973년에서 2019년까지의 일 최고기온 극값은 1.5℃가 상승하였고, 폭염일수 또한 6.9일이 증가하는 등 기후변화로 인한 21세기 후반기(2071년~2100년)에 폭염일수는 22일로 증가될 것으로 전망된다. 2018년 8월 1일 홍천에서는 관측 사상 최고기온인 41℃를 기록하였으며, 서울과 춘천, 수원, 대전 등에서 또한 지역 내 최고기온을 기록하였다. 또한, 폭염일수는 전국 평균 31.5일로 기존의 1994년 기온 당시의 최고 기록을 경신하고 10.1일인 평년 수준 대비 3배 이상 더 많이 발생하는 등 기후변화에 따른 일 최고기온 및 폭염일수는 증가 추세에 있다. 이러한 폭염 발생에 따라 온열질환자 및 사망자도 증가하고 있는 실정이다. 2011년에서 2017년 연평균 온열질환자는 1,132명, 사망자는 11명으로 집계된 것에 비해 2018년 온열질환자는 4,526명, 사망자는 48명으로 큰 폭으로 증가하였고, 2019년 온열질환자는 1,841명, 사망자는 11명으로 집계되었다.

기후변화로 인한 자연재해의 빈도와 피해가 대형화되고 다양해짐에 따라 국가 및 지역적 차원에서 재해취약지역을 고려할 필요성이 대두되었다. 2007년에 발표된 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 4차 평가보고서에서 기후변화를 고려한 정책마련의 근거로 취약성을 강조하며 기후변화 재해취약성분석이 강조되어왔다. 기후변화 재해취약성 분석은 지표를 중첩시켜 평가하는 지표법을 활용한다. 해당 재해에 대한 시스템이 유의한 기후 변동성에 노출되는 정도인 기후 노출과 해당 지자체나 시스템이 기후와 관련된 자극에 직 · 간접적으로 부정적 · 긍정적 영향을 받는 정도인 도시 민감도, 시스템이 기후변화의 잠재적 피해를 완화시키고 재해발생 결과에 대처하기 위해 조절하는 적응능력에 대한 각 항목별 지표를 선정하여 해당 지역의 기후변화 자연재해에 대한 취약성 정도를 분석하는 방법이다. 기후변화 재해취약성 분석은 실무자가 분석과정 및 결과를 이해하기에 쉽고, 지역 간 비교가 용이하여 정책 우선순위 선정 등의 정책적 활용도가 높다는 장점이 있어 국내 · 외적으로 가장 많이 사용되고 있다.

국토교통부에서도 이상기후에 따른 재해로 인

명 및 재산 피해가 커지게 되면서 2015년「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」의 개정으로 도시·군기본계획, 도시·군관리계획에서 재해에 대한 도시 기후변화 재해취약성분석을 반영하도록 하고, 도시계획 수립과정에서 재해대응을 위한 기반을 마련하도록 하였다. 이와 관련해서 기후변화 재해취약성분석과 관련된 평가의 빠른 정착 및 활용을 위해 국토연구원과 국토교통부는「도시 기후변화 재해취약성 평가 매뉴얼」을 제작하여 공무원 및 관련 실무자들에게 배포하여 활용하도록 하였다.

기후변화 재해취약성분석과 다른 재해평가방법론은 IPCC 제5차 평가 보고서(2014)에서는 기후변화 적응 정책의 일환으로 리스크 평가를 강조하였 으며, 최근 발표된 IPCC 제6차 평가보고서(2022)에서도 기후변화 리스크 개념을 정립하고 부문별·지역별 기후변화 리스크 평가에 대해 강조하고 있다. IPCC 제4차 평가보고서(2007)에서는 리스크 평가를 기후변화를 평가함에 있어 기후변화 재해취약성분석을 강조했던 것에서 기후변화라는 불확실한 미래의 손실을 예측하는 데 유리하며, 이를 관리하는 전반적인 과정에서 용이하다는 장점이 있다고 하였다.

이에 본 연구는 폭염으로 인한 피해가 증가하는 도시의 장기적인 폭염대응방안 마련을 위하여 도입된 기후변화 재해취약성분석과 최근 새롭게 강조되고 있는 리스크 평가를 국내 주요 자연재해 중 하나인 폭염을 대상으로 적용하여, 평가과정과 평가결과를 비교하고 기후변화 재해취약성 분석의 방법론의 개선방안을 도출하고자 한다.

이에 본 연구는 현재 배포되어 활용되고 있는「도시 기후변화 재해취약성 분석 및 활용에 관한 지침」매뉴얼에 따라 폭염 재해취약성분석을 실시하고 그 분석결과를 살펴보고자 한다. 또한. 최근 IPCC 및 주요 선진 국가에서 강조하고 있는 재해 리스크 평가의 개념을 고찰하고 폭염을 대상으로 리스크를 평가하고자 한다. 그 후 두 평가방법론의 분석과정 및 결과를 비교·분석해 보고자 한다. 폭염 리스크 평가의 재해 발생확률은 사전 정보를 기반으로 사후 확률을 추론하는 베이지안(Bayesian) 추정법 중 마르코브체인 몬테카를로(Marcov Chain Monte Carlo, MCMC) 시뮬레이션을 활용하여 분석을 시행하고자한다. 마지막으로 기후변화 폭염 재해취약성분석과 폭염 리스크 평가의 비교를 통해 지역 기반 공간적 특성을 도출하고 이를 토대로 재해평가의 개선을 위한 시사점을 도출하고자 한다.

이론적 배경 및 선행연구 고찰

1. 도시 기후변화 재해취약성분석

「현재 국내에서 시행되고 있는 기후변화 재해취약성분석은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 정의한 기후변화 취약성의 개념을 바탕으로 하고 있다. IPCC(2001)에서 정의하고 있는 취약성은 “시스템이 기온상승에 따른 이상기후와 극한 사상과 같은 기후변화의 부정적인 영향에 쉽게 영향을 받고 대응하지 못하는 정도이며, 해당 시스템이 기후변화에 노출되어 있는 정도와 그 시스템의 민감도, 적응능력의 함수로서 표현가능하다” 고 정의한다. 기후노출(Exposure)은 시스템이 유의한 기후 변동성과 같은 기후요소에 노출되어 있는 정도를 말하며 도시 민감도(Sensitivity)는 시스템이 기후와 관련된 자극에 영향을 받는 정도, 적응능력(Adaptive Capacity)은 시스템이 기후변화의 잠재적 피해를 완화시키고 위험을 대처하기 위해 조절하는 능력을 의미한다.

따라서, 기후변화 재해취약성분석에서 정의되는 취약성의 개념은 기후변화에 노출되는 정도, 생물·물리적으로 시스템이 영향을 받는 정도 및 사회·경제적 시스템이 기후변화에 적응하는 포함한 것으로, 기후변화의 부정적인 효과에 대해 해당 시스템이 영향을 받는 정도 또는 대처하지 못하는 정도로 정의할 수 있다.

2. 기후변화 리스크 평가

리스크(Risk)는 다양한 분야에서 사용되는 개념으로 사전적으로는 해로움이나 손실이 생길

가능성으로 정의되며 일반적으로 재해 혹은 일련의 바람직하지 않은 결과를 가져오는 사건과 그 사건의 확률로 정의된다. 재해분야에서 리스크(Risk)는 위해(Hazard), 노출(Exposure) 및 취약성(Vulnerability)으로 결정된다. 위해(Hazard)는 재해요소로 그 현상이 외부적 또는 자연적 요인에 의해 발생할 가능성을 말하며, 취약성(Vulnerability)은 재해요소의 영향으로 어떤 시스템이 피해를 입는 정도 또는 피해를 입을 가능성을 말한다.

IPCC(2012)는 리스크를 "미래에 악영향이 생길 잠재적인 가능성"으로 정의하고 결정요인을 위해(Hazard), 노출(Exposure), 취약성(Vulnerability)로 규정하였다. 위해(Hazard)는 "기후와 관련된 물리현상 또는 경향 또는 물리적 영향"으로 정의하였고, 노출(Exposure)은 "위해성이 발생할 수 있는 지역에 있는 요소들의 인벤토리"로, 취약성(Vulnerability)은 "인간, 자산 등의 노출된 요소들이 위해성의 영향을 받는 특성(성향)"으로 정의하였다. UNDRR(2009)에서는 리스크를 "하나의 사건과 더불어 그 사건으로 인한 부정적인 결과들을 종합한 가능성"으로 정의하였다. 위해(Hazard)는 "재해의 원인이 되는 위험한 현상, 물질, 인간 활동 혹은 상태"로 정의하였고, 노출(Exposure)은 "위험지역에 위치하여 피해를 받을 수 있는 사람, 재산, 시스템 또는 기타 요소"로, 취약성(Vulnerability)은 "위험 피해를 쉽게 받을 수 있는 조직, 시스템 혹은 재산의 특성 및 상황"으로 정의하였다. UNDP(2005)는 리스크를 위해(Hazard)와 취약성(Vulnerability)으로 인한 부정적인 결과와 손실로 정의하며, 이러한 개념 속에는 취약성이 커지면 리스크(Risk)도 커지게 된다는 의미를 포함하고 있다. 이러한 재해 리스크(Risk)에 대한 평가는 재해의 발생가능성과 실제 입을 수 있는 피해정도의 곱으로 표현이 가능하다.

따라서, 기후변화 재해취약성분석은 취약성의 기후노출, 민감도, 적응능력의 함수로 표현되고 이러한 취약성은 시스템(지역)이 노출된 기후변화에 의한 역효과에 영향을 받는 정도 또는 대처하지 못하는 정도로 정의할 수 있다. 리스크 평가는 재해라는 위해가 실제로 나타났을 때, 이 재해에 의해 실제로 시스템(지역)에서 발생하게 되는 피해의 정도로 정의할 수 있으며 , 이러한 리스크의 재해발생가능성과 그로 인한 발생영향의 곱으로 표현 할 수 있다.

연구범위 및 방법론 설정

1. 대상지 및 연구범위 설정

본 연구는 부산광역시를 대상으로 폭염재해에 대한 기후변화 재해취약성분석 및 리스크 평가를 실시하였다. 부산광역시 통계연보에 따르면 2018년 208명의 온열질환자 및 2명의 사망자가 발생하는 등 전국 온열질환자 수가 평년 대비 약 400% 급증하였다. 폭염의 경우, 주요 피

TABLE 1. Comparison of heat wave vulnerability and risk assessment methods

Classification	Vulnerability assessment (heat wave)	Vulnerability risk assessment (heat wave)
Spatial range	Busan metropolitan city	Busan metropolitan city
Method of analysis	index or total score (Exposure, Sensitivity Index)	Probability of event x Impact (Human DB)
Variables	Use of variables adopted from the manual and guidelines	Use of variables adopted from the manual and guidelines
Unit of Spatial analysis	Census	Census
Method of result display	Current vulnerability, Future vulnerability, total vulnerability (Unit: Census)	Current-Future probability, Current risk, Future risk, Total risk (Unit: Census)
Verification of results	-	AUC verification

해자인 미취학 아동, 65세 이상 노인 및 독거노인 그리고 기타 기초생활수급자 등 취약계층인 것으로 나타났으며, 도시 낙후지역에서 더욱 더 위험할 것으로 알려져 있다. 부산광역시는 도시 내에 많은 구릉성 산지로 인해 산복도로가 형성되고 낙후지역이 상당지역 분포하고 있어 의료 인프라와의 접근성이 낮으며, 타 지역으로의 지속적인 청년인구유출로 인한 노령인구의 증가는 폭염 취약계층의 증가로 이어지고 있는 실정이다.

이에 부산광역시는 기후변화에 따른 폭염으로 인한 직접적인 노출이 우려되는 도시로서 장기적인 폭염 대응방안 마련이 필요한 지역으로 판단되었다. 지역별 폭염발생 및 피해 특성 파악을 위하여 기후, 지형, 피해, 취약계층 등의 공간적 분포를 고려하여 폭염에 대한 피해를 줄이기 위해 다양한 노력이 필요한 지역으로서 부산광역시를 본 연구의 분석 대상지로 선정하였다. 본 연구에서의 기후변화 재해취약분석 및 리스크 평가는 인구집계의 가장 기초단위인 집계구를 공간단위로 설정하였으며 부산광역시의 총 6,922개의 집계구를 활용하였다. 시간적 범위는 데이터들간의 자료구축 가능성을 고려하여 2018년을 기준으로 설정하였다.

2. 폭염 재해취약성분석

도시 기후변화 재해 취약성 분석에서 적용되는 취약성 분석의 개념은 도시 기후변화 재해취약성 분석 매뉴얼과 활용에 관한 지침에 따르면 기후노출(Exposure)에는 도시 기후변화 재해취약성 분석은 기후변화 재해를 유발요인인 기온, 강수량 등과 같은 기후적 요소를 포함하고, 도시 민감도(Sensitivity)는 도시의 물리적 취약특성과 도시구성요소의 부정적 영향(시민, 기반시설, 건축물)을 고려한다. 재해취약성 분석의 수행은 먼저 6개의 재해(폭우, 폭염, 폭설, 가뭄, 강 풍 , 해수면상승) 중 해당 지자체에서 사전조사를 통해 지역 특성에 맞는 재해를 선정한다. 선정된 재해별 약간의 차이가 있으나 분석의 기본 구조는 현재 취약성분석과 미래 취약성 분석으로 구분되고 도출된 현재와 미래 취약성 분석 결과의 종합을 통해 도시 종합 재해취약성을 도출하는 과정으로 구축되어있다.

본 연구에서 수행한 폭염 재해취약성 분석은 부산광역시를 대상으로 인구 센서스 조사 시 가장 작은 단위인 집계구(읍면동의 1/23 크기이며 기초단위구를 기반으로 인구규모 최적 500명, 최소 300명 기준) 단위로 공간분석을 수행하였다. 현재 취약성 평가를 위한 데이터는 2018년을 기준으로 수집되었으며, 일부 지표는 10년간의 누적 데이터를 활용하였다. 미래취약성 분석은 기상청 기후변화정보센터의 남한상세 RCP 8.5 기후변화 시나리오 자료를 기반으로 분석해야하지만, 스케일의 문제로 국토연구원에서 제공하는 국가방재연구센터의 데이터를 활용하였다. 전체 폭염 재해취약성 분석의 과정은 기후노출 지표와 도시민감도 지표를 각각의 공간정보로의 가공하고 표준화, 점수화 과정을 거쳐 최종적으로 등급을 도출하였다.

현재 기후노출 데이터는 2009년부터 2018년까지 부산지방기상청에서 제공하는 기상관측자료를 활용하여 대상지의 기후 데이터를 추출하였다. 대상지인 부산광역시에는 유인관측소(ASOS) 1개소 및 무인관측소(AWS) 14개소가 설치되어있으며, 인근 지역의 ASOS 2개소, AWS 6개소를 함께 활용하여 공간보간법(IDW: Inverse Distance Weighted)을 통해 데이터를 구축하였다. 연평균 열대야 일수가 가장 적은 지역은 부산광역시 주례동으로 연평균 2.9일 발생하였고, 연평균 열대야 일수 가장 많이 발생한 지역은 부산광역시 대연동으로 연평균 25.6일이 발생하였다. 현재 도시민감도 데이터는 건축물 대장과 KLIS및 해당지자체 요청 데이터를 활용하였다. 잠재취약지역인 주거불량지역(30년이상의 단독주택)은 대부산광역시에 235,832호가 존재하였으며, 이 중 부산광역시 부산진구에 28,876호로 가장 많은 것으로 집계되었다. 취약인구와 독거노인 수, 저소득층 인구수의 도시취약구성요소는 통계청 인구 총 조사(SGIS) 데이터를 활용하였으며, 도로는 KLIS의 데이터를 활용하였다. 단독주택 내 지붕(슬

라브, 슬레이트, 콘크리트) 데이터는 국토교통부에서 제공하는 건축물생애이력 시스템을 활용하였으며, 이를 살펴본 결과 부산광역시 동구, 서구, 중구, 영도구를 중심으로 한 원도심 지역에 높은 취약등급이 분포하고 있었다.

미래 기후노출 데이터는 기상청 기후변화정보센터의 남한상세 RCP 8.5 기후변화 시나리오 자료를 활용하여야 하나, 스케일의 문제로 국토연구원 국가방재연구센터에서 제공하는 데이터를 활용하였다. RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따르면, 부산광역시는 최대 27.75일, 최소 3.13일의 폭염과 최대 48.22일, 최소 21.98일의 열대야가 발생할 것으로 전망되었다. 미래 도시민감도에서 최근 10년간 시가화지역은 2007년, 2014년(환경공간정보서비스에서 제공하는 최선의 시점) 토지피복도 데이터를 활용하여 건조지역에 해다하는 지역의 위치와 면적을 살펴보았으며, 최근 10년간 증가 인구수는 통계청 인구총 조사(SGIS)에서 제공하는 과거 2000년 인구와 현재 2010년 인구 데이터를 활용하여 집계구별 인구증가수를 산정한 후, 분석지표로 활용하였다. 개발사업진행 · 예정지구 데이터는 도시개발과 관련된 사업이 예정인 지역이거나 진행 중인지역에 대한 것으로 택지개발예정지구 및 도시개발지구등 9개 사업 지역 · 지구를 관련 기관으로부터 협조를 받아서 구축하였다.

3. 폭염 리스크 평가

폭염 리스크 평가는 먼저, 발생가능성에 해당 재해의 발생가능성 분석을 위해 선행연구를 기반으로 폭염 발생에 영향을 미치는 변수를 선정하였다. 발생가능성은 Landsat8 위성영상의 지표온도를 기반으로 추정하여 결과를 지도화 하였다. Landsat 8 위성의 다양한 관측 파장 중에서 대기의 창 영역에 해당되는 11 μm(Band 10) 자료를 이용하여 지표면 온도를 산출할 수 있으며, 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 낮 시간(01:58 GMT) 데이터를 활용하였다. 또한, 도출된 발생가능성의유효성 검증을 위해 실제 지표온도가 높게 발생지역과 중첩 · 비교하여 AUC(Area Under the Curve)값을 계산하여 결과 검증을 실시하였다. 최종적으로 폭염 발생의 영향의 인명 피해를 고려하기 위해 집계구 DB를 구축하고 발생가능성과 계산하여 리스크

TABLE 2. Heat Wave vulnerability assessment and risk assessment variables

Variable				Data source
Present Vulnerability	Present Exposure	v1	Annual average of days above 33℃	Regional office of Meteorology (Busan)
		v2	Annual average of tropical nights (Low temperature above 25℃)	
	Present Sensitivity	v3	Residential defective area	Registered building data, KLIS, Building life cycle management system(MOLIT), and related Logical governmnets
		v4	Population under 5	
		v5	Over 65 elderly people living alone	
		v6	Low-income residents	
		v7	Road	
		v8	Detached house roof(concrete, slavish, slate)	
Future Vulnerability	Future Exposure	v9	Annual average of days above 33℃	Data created by National Disaster Prevention Research Center(KRIHS)
		v10	Annual average of tropical nights (Low temperature above 25℃)	
	Future Sensitivity	v11	Densely populated area	Land cover map(EGIS), SGIS and related departments of local governmnets
		v12	Urbanization area	
		v13	Urban development · Renewal area	

를 평가하였다.

본 연구에서는 리스크 평가를 위해 베이지안 추정법을 활용한다. 베이지안 추정법(Bayesian estimation)은 모수 추정법의 하나로, 관찰된 결과로부터 가설에 대한 결론을 내리는 베이즈 정리(Bayes' theorem)를 기반으로 한다. 베이즈 정리는 어떤 사건이 발생하였을 때, 이를 바탕으로 특정 가설의 조건부 확률을 산정하는 정리이다. 즉, 어떤 사건 또는 결과에 근거하여 특정 원인에 대한 확률을 계산하는 정리이며, 이를 수식으로 나타내면 식 1과 같이 정리 할 수 있다.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} = \frac{P(A) \cdot P(B|A)}{P(A) \cdot P(B|A) + P(\overline{A}) \cdot P(B|\overline{A})} \quad (1)$$

베이지안 추정법은 사전에 알고 있는 정보나 데이터를 통해 사전분포(prior distribution)을 생성한 후, 사전분포와 실제 관측으로 얻어진 데이터를 베이즈 정리를 통해 구해지는 사후분포(posterior distribution)에 의한 사후확률로 구할 수 있다. 베이즈 정리를 통한 베이지안 추정법은 조사자의 주관적인 견해를 바탕으로 한 결과에 대한 비판이 있어왔으나 도출된 결과에 대한 해석이 용이하고, 모호한 결과를 제공하지 않으며 학습에 의한 추정으로 추후 정보를 수정하는 과정에서 용이하게 작업할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 베이지안 추정법을 활용하여 특정 사건으로 폭염을 적용하여 폭염발생에 영향을 미치는 정보인 물리 · 기후 · 환경적 요인으로 사전확률을 구축하였다. 구축한 사전확률를 통해 예측하고자 하는 시점의 물리 · 기후 · 환경적 정보를 도출한 뒤 베이즈 정리를 활용하여 폭염발생 가능성을 도출하였다. 본 연구는 베이지안 추정법을 활용한 폭염발생 가능성을 도출하기 위하여 Amos 프로그램을 사용하였다. Amos 프로그램을 통한 베이지안 추정법은 마르코브 체인 몬테카를로(MCMC: Markov Chain Monte Carlo) 시뮬레이션을 이용한다. MCMC 시뮬레이션은 베이지안 추정법 중 사후분포를 도출함에 있어 복잡한 모형이나 다차원 문제에도 적용이 용이하며 필요에 따라 잠재변수의 사용으로 문제를 단순화시킬 수 있고 결측치 처리 또한 용이한 것으로 알려져 있다.

AMOS는 확인적 요인분석과 연립방정식모델을 기반으로 경로분석 및 다중회귀분석 등이 결합된 방법론인 구조방정식모형을 분석할 수 있는 통계 프로그램이다. AMOS는 베이지안 추정값의 수렴 정도를 MCMC에 의한 분석과정에서 알 수 있으며, 사후예측 p value(posterior predictive p value)를 통해 활용하고자하는 모형 적합도를 검증할 수 있다. 베이지안 추정법을 활용한 폭염 발생가능성 추정은 폭염이라는 사건에 영향을 미치는 지표 선정에서부터 시작된다. 본 연구에서는 지표선정을 위해 폭염에 관한 선행 연구들을 고찰하고,「도시 기후변화 재해취약성분석 및 활용에 관한 지침」매뉴얼에 따라 자료를 구축하였다(표 2).

분석 결과

1. 폭염 재해취약성분석 결과

폭염 재해취약성분석은 폭염에 대한 현재 취약성과 미래취약성을 분석하고, 이후 관련 기관의 전문가의 의견 및 현장조사 등을 통해 도출한다. 본 연구에서는 전문가의 의견과 현장조사 제외하고 현재와 미래 재해취약성분석을 통한 폭염 종합재해취약성을 도출하였다. 현재 재해취약성분석은 현재 기후노출 등급(Ⅰ~Ⅳ)과 현재 도시민감도 등급(Ⅰ~Ⅳ)에 대한 매트릭스 매칭을 통해 현재 재해취약지역(Ⅰ, Ⅱ등급) 등급을 도출한다. Ⅰ등급의 폭염재해에 매우 취약한 지역은 부산광역시 전체면적 대비 1.5% 수준으로 강서구, 금정구, 사상구 등 시가화가 진행된 6개 구군에 분포하였으며, Ⅱ등급의 취약지역은 사하구와 영도구를 제외한 지역에서 다양하고 넓게(33.8%)게 분포하는 것으로 나타났다. 미래 재해취약성분석은 최근 10년간 시가화 · 건조지역,

최근 10년간 증가인구수, 도시개발 관련 개발예정지구를 표준화지수의 평균으로 산출하여 미래 도시민감도 점수를 도출하였다. 분석결과 동래구에서 재해에 매우 취약한 Ⅰ등급 지역이 가장 넓게 분포하였으며, Ⅱ등급의 취약지역은 금정구와 연제구에서 넓게 분포하였다.

현재 재해취약성 분석결과와 미래 취약성 분석결과를 중첩하여 작성하되 둘 중 높은 등급을 반영하여 도출하는 폭염 종합재해취약성분석(표 3, 그림 1)은 강서구의 일부 지역을 제외하고 현재 기후노출에 의해 등급이 높게 나타난 지역과 유사한 분포 양상을 보였다. 즉, 시가화가 진행된 지역을 중심으로 연평균 일 최고기온 33℃이상 일수와 연평균 최저기온 25℃이상 일수가 많이 나타났다. 또한, 시가화 지역은 아니지만 강서구 일부지역에서 취약지역이 높게 나타난 것은 공항에 의한 영향으로 사료되며, 취약등급이 낮으면서 시가화 지역은 바다에 접한 지역으로 현재기후노출이 낮은 영향으로 판단된다.

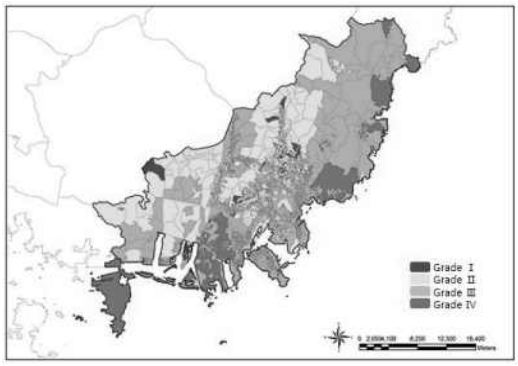

FIGURE 1. Total disaster vulnerability

2. 폭염 리스크 평가 결과

본 연구에서 폭염 리스크 평가를 하기에 앞서 수행되는 발생가능성에 관한 추정은 2018년 Landsat8 위성영상을 기반으로 한 지표온도 데이터 중 50%를 무작위 추출 (Random sampling) 하여 계산하였으며, 추출되지 않은 50%롤 결과 검증에 활용하였다. 발생가능성의 계산에 활용되지 생결과에 대한 추가적 검증자료로 활용하였다. 폭염 리스크 평가는 MCMC 시뮬레이션을 적용한 베이지안 추정법을 통해 폭염 발생가능성을 분석하였으며, 앞서 추정을 위해 선정된 변수는 정규화를 통해 0에서 1사이 값을 갖도록 하였다. 난수 생성 및 학습에는 무작위 추출을 통해 각 지표별 가중치 계산을 10회 실시하였으며 폭염 발생가능성 계산에는 평균값을 활용하였다. 폭염발생에는 연평균일 최고기온≥33도 일수, 연평균일 최저기온≥25도 일수, 주거불량지역, 65세이상 노인 및 5세 미만 어린이 인구수, 독거노인 수, 저소득층 인구수, 집계구 내 도로, 단독주택 내 지붕, 연평균일 최고기온≥33도 일수, 연평균일 최저기온≥25도 일수, 최근 10년간 시가화지역, 최근 10년간 인구증가 수, 개발사업진행 · 예정지구 도출된 지표별 가중치를 각 요안에 포반fl 계산한 폭염 발생가능성 지수를 적용하여 폭염 발생가능성 지도를 작성하고, 재해취약성분석과 비교하기 위해 Jenks의 최적화방법(자연적 구분법)에 따라 4개의 등급으로 분류하여 표현하였다.(표 4).

추정 결과에 대한 유효성을 정량적으로 검증하기 위해 예측의 판단결과를 보여주는 ROC(Receiver Operating Characteristic)

TABLE 3. 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

곡선의 아래 면적을 나타내는 AUC(Area Under the Curve) 값을 활용해 판단하였다. ROC 곡선은 예측 또는 검사 값이 참일 확률이 높을수록(민감도), 예측의 거짓일 확률(1-특이도)이 낮을수록 우수한 모델로 구분하며, 그래프가 왼쪽위로 그려질수록 예측의 정확도가 높음을 나타낸다. 이는 그래프 아래 면적을 나타내는 AUC가 1에 가까울수록 결과의 정확성이 높다고 할 수 있는데, 본 연구의 베이지안 추정법을 활용한 폭염 발생가능성에 대한 결과는 0.643으로 약 64.3%의 정확도를 나타냈으며, 이러한 검증결과는 베이지안 추정법을 활용한 추정의 신뢰도가 높음을 의미한다.

인명피해에 대한 리스크 평가는 일차적으로 분석한 폭염 발생가능성과 인구밀도를 곱해 결과를 도출하였다. 일반적으로 선행연구에서의 자연재해 리스크 평가를 도출할 때에는 인명피해와 함께 재산피해에 대한 리스크도 평가하고 있으나, 본 연구의 대상이 되는 폭염의 경우, 재산피해에 대한 리스크는 크지 않을 것으로 판단하여 인명피해에 대한 리스크 평가만을 다루었다. 인명피해에 대한 리스크 평가 결과는 각 위험도별 등급에서 차이는 있으나 전체적 경향은 비슷한 것으로 나타났다. 위험한 지역의 위치와 활용된 지표를 고려할 때 지형이 낮은 지역임과 동시에 급격한 경사지 주변 평지이며, 집계구 면적이 좁고 세분화 되어있는 지역에서 주로 높게 나타나고 있다. 인명피해의 가장 위험한 지역은 지도상 재산피해 위험이 더 많아 보이지만 위험 지역의 밀집정도에 따라 달라 보이는 것으로, 실제 인명피해 위험도의 경우 1등급이 약 10.1㎢로 전체 면적대비 1.3%와 기후변화 재해취약성분석에서의 1.6%와 거의 동일하다. 2등급은 약 240.5㎢로 전체 면적대비 32.5%로 넓게 분포하였으며, 3등급은 약 390.3㎢로 전체 면적대비 49.6%로 가장 넓게 분포하였다. 인명피해 리스크는 기후변화 재해취약성분석과 비슷하게 시가화가 진행된 지역을 중심으로 리스크 결과 값이 큰 것으로 나타났다.

3. 평가 결과 비교

본 연구에서는 앞서 수행한 분석과정을 통해 부산광역시 폭염 재해취약성분석 결과와 리스크 평가 결과를 비교하였다. 결과 비교를 위해 취약 지역에 대한 면적과 위험지역의 지리적 분포를 살펴보았다. 폭염 재해취약성 분석 결과 재해취약지역인 Ⅰ등과 Ⅱ등급 지역은 각각 부산광역시에서 1.6%, 35.8%를 차지하였으며 리스크 평가를 통해 도출된 재해취약지역인 Ⅰ등과 Ⅱ등급 지역 각각 1.3%와 29.5%로 나타났다. 그림 1과 그림 2를 비교해보면, 두 분석의 재해

TABLE 4. Assessing the weights of the indicators using bayesian inference

Variables	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ave.
v1	0.037	0.036	0.038	0.037	0.036	0.037	0.036	0.038	0.038	0.037	0.036
v2	0.025	0.026	0.026	0.025	0.027	0.026	0.026	0.025	0.027	0.026	0.025
v3	−0.010	−0.011	−0.010	−0.010	−0.009	−0.010	−0.011	−0.010	−0.010	−0.009	−0.010
v4	−0.017	−0.017	−0.017	−0.017	−0.017	−0.017	−0.017	−0.017	−0.017	−0.017	−0.017
v5	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
v6	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
v7	0.014	0.014	0.014	0.014	0.013	0.014	0.013	0.014	0.013	0.014	0.014
v8	0.012	0.012	0.012	0.011	0.012	0.011	0.012	0.011	0.012	0.011	0.011
v9	0.033	0.034	0.033	0.035	0.036	0.033	0.034	0.033	0.035	0.034	0.034
v10	0.022	0.022	0.023	0.022	0.024	0.023	0.022	0.024	0.023	0.022	0.023
v11	0.017	0.017	0.017	0.016	0.017	0.017	0.016	0.017	0.017	0.017	0.017
v12	0.021	0.022	0.022	0.021	0.021	0.022	0.022	0.021	0.021	0.022	0.022
v13	−0.010	−0.010	−0.011	−0.010	−0.011	−0.010	−0.010	−0.010	−0.011	−0.010	−0.011

TABLE 5. Result of total risk assessment

Grade	Location	Area(㎢)	Per.(%)	Count
I	9 Gu : Gangse-Gu, Geumjung-Gu, Dongrae-Gu, etc.	10.1	1.3	164
II	14 Gu : Gangse-Gu, Geumjung-Gu, Busanjin-Gu, etc.	240.5	29.5	2,451
III	-	390.3	49.6	3,457
IV	-	116.5	18.6	850
total	-	794.3	100.0	6,922

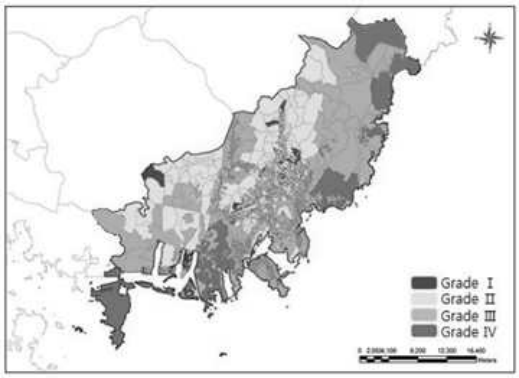

FIGURE 2. Result of total risk

취약지역 및 위험지역의 분포는 공간적 패턴은 유사하게 나타났으며 주요 위험지역인 부산광역시 금정구, 부산진구, 연제구 등 시가화가 진행된 지역에서 상대적으로 높게 나타났으며, 영도구와 사하구를 제외한 지역에서도 다양하고 넓게 분포하는 것으로 보였다.

폭염 재해취약성 분석 결과 부산광역시 금정구, 부산진구, 연제구 등 시가화가 진행된 지역에서 상대적으로 높게 나타났으며, 영도구와 사하구를 제외한 지역에서도 다양하고 넓게 분포하는 것으로 보였다. 폭염 리스크 평가의 발생가능성 추정 결과 금정구와 연제구에서 높은 발생가능성이 넓게 분포했으며 남구와 북구, 기장군 일대에서도 높은 발생가능성을 보였다. 폭염 리스크 평가 결과는 인명피해는 기존 시가화 지역이면서 저지대 및 하천주변 지역인 금정구와 연제, 동래, 진구와 수영구 및 해운대구 일부에서 위험지역이 밀집되어 있으며, 특징적으로 중구와 사상구에서 재산피해가 높은 것으로 나타났다. 두 분석결과 전반적으로 취약지역이 유사하게 나타났지만, 주로 기장군과 강서구에서 차이가 나타났다(그림 3). 기장군은 정관신도시(그림 3의 A)에서 차이가 났으며, 강성구는 해안 근처(그림3의 B)에서 취약지역이 낮게 나타났다. 이는 폭염 재해취약성분석과 리스크 평가가 집계구 단위로 이루어졌고, 이에 따라 기장군의 인구밀도가 낮아 인구피해를 고려하는 폭염 리스크 평가에서 취약지역의 분포가 상대적으로 낮게 나타는 것을 확인되었다.

두 분석결과간의 폭염 취약지역 공간분포 차이는 재해를 평가하는 데 있어 두 분석 간 분석 방법론의 차이 때문인 것으로 사료된다. 재해취약성분석은 지표를 중첩 · 활용하여 실무 관계자들이 쉽게 이해할 수 있지만 재해평가 결과에 대한 정량적인 검증이 부재하다. 반면 리스크 평가는 기후변화 재해취약성분석 매뉴얼을 기반으로 선정한 지표를 기반으로 과거 정보를 기반을 통해 학습을 활용하여 신뢰성 있는 발생가능성을 예측할 수 있다. 이러한 두 분석의 방법론에 대한 차이를 고려하고 이를 보완한다면 기후변화에 따른 재해를 평가하는 데 있어 불확실성을 줄일수 있을 것으로 사료된다.

결 론

본 연구는 부산광역시에 발생한 폭염을 대상으로 기후변화 재해취약성 분석과 리스크 평가를 실시하고 두 평가 간 평가절차 및 결과를 비교 및 분석하였다. 재해취약성분석은 대형화 · 다양화되고 있는 재해에 효율적으로 대응하기 위해 제도적으로 마련된「도시 기후변화 재해취약성 분석 및 활용에 관한 지침」매뉴얼에 따라

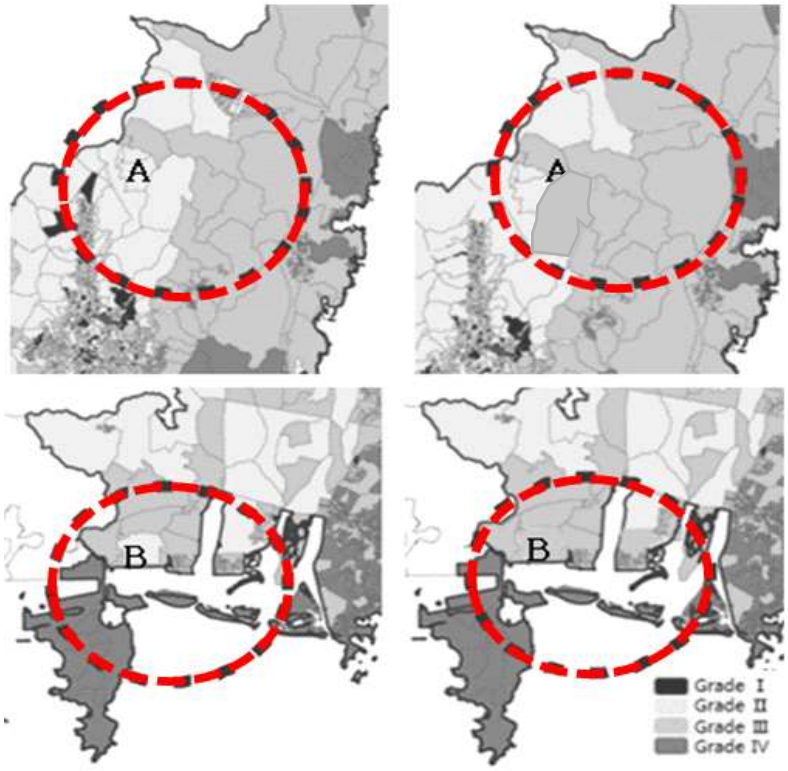

FIGURE 3. Result Heat Wave Disaster Vulnerability and Risk Assessment in Gijang-gun

분석하였다. 리스크 평가는 불확실한 재해발생에 대한 손실을 예측하고 이를 관리하기 위해 최근 IPCC 및 주요 선진 국가들에서 강조하고 있는 확률·통계적인 재해 평가방법이다. 본 연구에서는 폭염 재해취약성분석과 리스크 평가의 절차와 분석 과정을 살펴보고 적절한 재해평가를 위한 지표를 선정하였다. 지표선정은 「도시 기후변화 재해취약성 분석 및 활용에 관한 지침」 매뉴얼에 명시된 6개 재해 중 폭염에 해당하는 재해평가 분석과정을 매뉴얼과 지침에 따라 기후노출과 민감도 지표를 구축하고 현재 폭염 재해취약성과 미래 폭염 재해취약성 및 종합 재해취약성분석을 실시하였다,

폭염 리스크 평가는 먼저 재해발생가능성을 도출한 후, 그 영향을 곱하여 산정된다. 재해발생가능성을 도출함에 있어서는 확률·통계적 방법인 베이지안 추정법 중 난수생성과 반복학습에 효과적인 MCMC 시뮬레이션을 활용하였다. 그 후, 인명피해 리스크 평가를 위해 인구 DB를 구축하여 계산하였다. 폭염 재해취약성분석 결과와 리스크 평가 결과를 비교하기 위해 「도시 기후변화 재해취약성 분석 및 활용에 관한 지침」 매뉴얼에서 명시하고 있는 Ⅰ~Ⅳ등급 매트릭스 방법과 중첩을 통한 종합 방법을 실시하여 최종 리스크를 평가하였다. 분석결과 폭염 재해취약성분석은 부산광역시 금정구, 부산진구, 연제구 등 시가화가 진행된 지역에서 상대적으로 높게 나타났으며, 영도구와 사하구를 제외한 지역에서도 다양하고 넓게 분포하는 것으로 보였다. 폭염 리스크 평가 발생가능성 추정 결과

금정구와 연제구에서 높은 발생가능성이 넓게 분포했으며, 남구와 북구, 기장군 일대에서도 높은 발생가능성을 보였다. 예측 값인 발생가능성은 정량적 검증이 필요한 결과로 결과의 활용도 검토를 위해 AUC검증을 실시하였으며, 그 결과 64.3%의 정확도를 나타내 베이지안 추정법을 활용한 결과가 비교적 높은 신뢰도를 나타내었다. 인명피해를 살펴보기 위해 인구 DB를 곱한 리스크 평가 결과 기존 시가화 지역이면서 저지대 및 하천주변 지역인 금정구와 연제, 동래, 진구와 수영구 및 해운대구 일부에서 위험지역이 밀집되어 있으며, 특징적으로 중구와 사상구에서 재산피해가 높은 것으로 나타났다, 종합 리스크 평가는 매트릭스와 중(상위등급 반영)의 방법에 따라 폭염에 취약한 지역의 경향은 비슷한 것으로 나타났다.

본 연구에서 실시한 두 평가 방법은 각각의 장점과 단점이 존재한다. 기후변화 재해취약성 분석의 경우 제공되는 매뉴얼과 지침에 따라 분석을 진행할 수 있으므로 실무자 및 관계자들의 접근이 용이하고, 관련 실무자들이 이해하기 쉽다는 장점이 있다. 그러나 종합적인 재해취약성을 도출하기 위해 각각의 재해에 해당하는 지표들을 중첩시켜 분석하는 지표법은 분석 결과에 대한 정량적 검증에 대한 방법이 부재하다. 반면, 베이지안 추정법을 통한 리스크 평가는 확률 · 통계적인 방법을 통한 재해발생가능성을 도출하고, 이에 대한 정량적 검증이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 두 분석의 방법론에 대한 차이를 고려하고 이를 보완한다면 기후변화에 따른 재해를 평가하는 데 있어 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

마지막으로 베이지안 추정법을 활용한 리스크 평가에서는 2018년 Landsat8 위성영상 자료만을 활용하였다. 폭우를 대상으로 리스크를 평가한 선행연구들에서는 침수 흔적도라는 실제 침수지역에 대한 자료가 있어 이를 활용하였지만, 폭염의 경우 폭염재해에 대한 실제 피해지역의 지도와 같은 데이터가 부재하다. 이에 본 연구에서는 리스크 평가의 발생가능성의 추정과 검증에 있어 Landsat8 위성영상 지표온도 데이터로 분석이 이루어졌다. 추후 지속적인 데이터의 구축 및 가공방법의 개선과 데이터 처리 도구의 활용과 같은 추가적인 연구를 통해 보완할 수 있을 것이라 생각된다. KAGIS

REFERENCES

Ahn, Y.J., Y.E. Kang and C.S. Park. 2016. Developing Indexes for Analyzing Severe Heat Hot Spot Under Climate Change. Journal of Korea Planning Association 51(4):199-209 (안윤정, 강영은, 박창석. 2016. 기후변화에 따른 폭염 관심지역(Hot spot) 평가 지표 개발 및 적용. 국토계획 51(4):199-209).

Baek, J.B. and Kwon, Y.S. 2021. Analysis of Domestic Heatwave Research Trends. Journal of the Society of Disaster Information 17(4):755-768 (백준범, 권용석. 2021. 국내 폭염 연구 동향 분석. 한국재난정보학회 17(4): 755-768).

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).

Kang, M.H. and Kim, H.K. 2021. Prediction of Heat Wave based on LSTM Considering Urban-social Characteristics of Busan. The Korea Spatial Planning Review 109: 23-36 (강민희, 김형규. 2021. 부산의 도시사회적 특성을 고려한 LSTM 기반의 폭염 발생 예측. 국토연구 109:23-36).

Kim, J.S. and Kim, H.Y. 2020. Characteristics Analysis of Heat Wave Disaster Vulnerable

Areas Using Landsat 8 Video and Vulnerability Analysis. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 23(1): 1-14 (김지숙, 김호용. 2020. Landsat 8 영상과 취약성 분석을 활용한 폭염재해 취약지역의 특성분석. 한국지리정보학회지 23(1):1-14).

Kim, K.W., B.C. Park, J.B. Heo, J.Y. Kang and I.J. Lee. 2020. Assessment of Heat Wave Vulnerability in Busan Using the IPCC Climate Change Vulnerability Assessment Framework. The Korea Spatial Planning Review 104:23-38 (김기욱, 박봉철, 허종배, 강지윤, 이인재. 2020. IPCC 기후변화 취약성 평가 체계를 적용한 부산지역 폭염 취약성 평가. 국토연구 104:23-38).

Kim, S.Y., C.S. Park and B.S. Byun. 2015. Urban Management Strategies based on Climate Change Risk Assessment. The Geographical Journal of Korea 49(4): 479-490 (김수영, 박창석, 변병설. 2015. 기후변화 리스크 평가에 기초한 도시관리 전략 -인천광역시를 대상으로-. 국토지리학회지 49(4):479-490).

Koo, Y.S., J.E.. Kim, J.S. Kim and S.H. Lee. 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).

Kwon. H.G., M.Y. Choi, C.Y. Yi and J.C. Park. 2021. Analysis of the Causes of Heatwave Vulnerability on a Detailed Scale in the Summer of 2018 - Focus on Gurye-gun, Sunchang-gun -. Journal of Climate Change Research 12(6):661-676 (권혁기, 최민영, 이채연, 박종철. 2018년 여름 집계구 단위의 상세 폭염취약성 원인 분석 -구례군과 순창군을 대상으로-. 한국기후변화학회지 12(6):661-676).

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. 87pp (이태경. 2017. 폭염을 중심으로 한 기후변화 취약성 평가 지표개선 연구. 세종대학교 대학원 석사학위논문 87쪽).

Lee, S.H., J.E. Kang and C.S. Park. 2016. Evaluation of the risk of flooding in cities with climate change linking Bayesian probability statistics and GIS: targeting Seocho-gu, Seoul, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 19(4):36-51 (이상혁, 강정은, 박창석. 2016. 베이지안 확률통계와 GIS를 연계한 기후변화 도시홍수 리스크 평가: 서울시 서초구를 대상으로. 한국지리정보학회지 19(4): 36-51).

USGS. 2015. Landsat 8(L8) Data Users Handbook. Department of the Interior US Geological Survey, v1.

Yoo, J.Y., J.G. Kim, J.W. Han and T.W. Kim. 2021. Impact Assessment between Heatwave and Drought Based on PLS-SEM. KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research 41(2):113-121 (유지영, 김장경, 한정우, 김태웅. 2021. 부분최소제곱 구조방정식(PLS-SEM)을 이용한 폭염과 가뭄의 영향평가. 대한토목학회논문집 41(2):113-121). KAGIS