



기후변화 종합 취약성 분석을 통한 재해 관리 강화방안 - 서울시를 중심으로 -

*Measures to Strengthen Disaster Management through Climate Change Comprehensive Vulnerability Analysis
- Focused on Seoul -*

장경은* · 손동욱** · 박초롱*** · 이종호****

Kyung-Eun Jang* · Dongwook Sohn** · Chorong Park*** · Jongho Lee****

* Main author, Master's course, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (jke0918@yonsei.ac.kr)

** Corresponding author, Professor, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (sohndw@yonsei.ac.kr)

*** Coauthor, Ph.D. course, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (parkchorong@yonsei.ac.kr)

**** Coauthor, Research Specialist, Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (leejongho@kict.re.kr)

ABSTRACT

Purpose: Currently, various social problems caused by urbanization are intensifying. Not only domestically, but also the importance of responding to global climate change is growing. Climate change causes natural disasters and causes human and property damage. According to the 2020 Disaster Yearbook presented by the Ministry of Public Administration and Security, the damage caused by natural disasters is steadily increasing from 2010 to 2020. Therefore, the purpose of this study is to present in-depth countermeasures by deriving vulnerability characteristics for each disaster through disaster-specific vulnerability analysis. **Method:** This study utilized Arc GIS Pro, which can perform spatial and quantitative analysis for vulnerability analysis. First, data of different units was standardized, and based on this, numerical data was constructed and Raster Data analysis technique was used. Second, based on the results of vulnerability analysis by spatial disaster, the VRI formula was used to select autonomous districts vulnerable to disasters. Thirdly, an in-depth response strengthening plan was suggested through a review of climate change adaptation measures in areas with high vulnerability. **Result:** The range of disasters with high vulnerability was derived according to the social, economic, environmental, and physical conditions of each district in Seoul. In-depth regional response plans were additionally suggested by reviewing the existing measures to respond to heat waves, floods, fine dust, and cold waves by region. Physical infrastructure expansion plans such as regional heat shelters, flood shelters, fine dust shelters, and cold wave shelters were proposed, and response measures such as strengthening disaster publicity and strengthening the notification system were presented as human response measures.

KEYWORD

기후변화
취약성 분석
지역적 특성
자연재난

Climate Change
Vulnerability Analysis
Regional Characteristics
Natural Disaster

ACCEPTANCE INFO

Received Mar. 2, 2023

Final revision received Apr. 27, 2023

Accepted May. 2, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

최근 도시화 및 기후변화로 인한 미세먼지, 물 부족, 온실가스, 교통혼잡, 고령화 등의 각종 사회문제가 심화되고 있다[1].

전 지구적으로 발생 되는 기후변화 대응에 중요성이 커지고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체인 IPCC¹⁾는 지구 평균 온도가 산업화 이전 대비 2017년 기준 약 1°C 상승하였으며, 극단적인 기상 현상이 갈수록 빈번해지고 있다고 발표했다[2]. 또한 국내의 기후 상황으로 1970년대 이후 폭염 및 태풍의 발생, 빈도 및 지속성이 꾸준히 증가하고 있다.²⁾

행정안전부에서 제시한 2020 재해연보에 따르면 자연 재난으로 인한 인명 및 재산피해 발생이 지속적으로 발생 되는 것으로 집계되었다[3]. 2010년부터 2020년까지 집계된 자연재난으로 인한 인명

및 재산피해는 Fig. 1.과 같다.

이러한 기후변화에 대응하기 위해 국제사회는 1992년 UN 기후 변화 협약을 시작으로 교토의정서, 파리협정, 탄소중립 등의 온실감축을 위한 노력을 이행중에 있다.

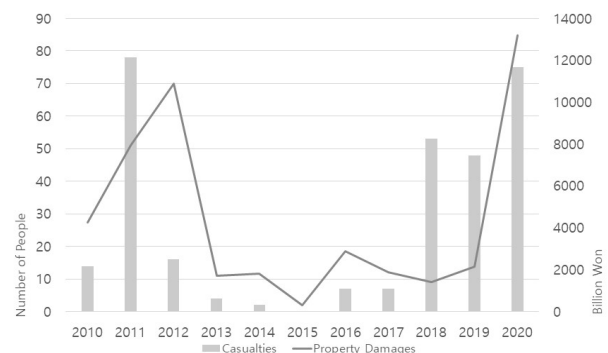


Fig. 1. Statistics on Casualties and Property Damage caused by Natural Disasters(2020 Disaster Annual Report, Ministry of Public Administration and Security)

이러한 기후변화 대응 방식은 두 가지 측면으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 기후변화 현상의 원인을 경감시키고자 하는 대응이며, 두 번째는 가속화되고 있는 기후변화로 인한 영향에 사전적 대비와 사후 복구에 대응하는 측면이다. 전자의 경우 전 지구적으로 온실가스 감축을 위한 시민사회 및 기업들의 참여가 적극적으로 이루어지고 있다. 후자의 경우는 물리적, 사회적, 환경적 차이 간의 상호작용으로 인해 환경 약자, 특히 재난 취약계층의 피해가 가중될 수 있다는 특징이 있다[4]. 이에 따라 특정 지역의 피해 가중을 막기 위해 지역별 특성이 반영된 심층적 대응 정책이 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 기상이변의 규모가 불확실하게 발생되며, 모든 계층이나 지역에 동일한 규모의 피해가 발생 되지 않는 점을 고려하여 지역의 사회·인구적, 물리적, 경제적, 환경적 지표를 바탕으로 재난별 취약성 분석을 실시하였다. 특히, 자연재난 별 위험성이 높은 도시 내 취약한 지역의 특성 도출을 통해 재난별 대응 방안의 정책제언을 하는 것을 목적으로 한다.

1.2. 연구의 범위 및 체계

본 연구의 공간적 범위는 인구밀도와 건축물 밀도가 높아 인명과 재산피해의 위험성이 높은 서울특별시로 한정하였고, 시간적 범위는 최신 데이터 구득이 가능한 2020년으로 설정하였다. 취약성 평가를 위한 자연재난의 범위는 최근 10년간 인명피해가 가장 컸던 홍수, 폭염과 인체에 직접적으로 영향을 주는 미세먼지, 한파 등 네 가지 지표로 설정하였다.³⁾ 첫 번째 지표인 폭염의 현황을 살펴보면 한국환경정책·평가연구원에서 국내 및 해외의 일 최고기온과 폭염일수가 증가추세이며, 1973년에서 2019년까지 대한민국의 폭염일수는 6.9일이 증가했고, 2071년에 이르면 22일로 증가할 것이라고 전망하였다[5]. 두 번째 지표인 홍수는 2018 기후변화 백서에서 서울시의 연 강수량은 1,387.3mm로 우리나라 평균보다 28.8mm 많았으며, 강수강도 역시 1.7mm/일 강하다고 발표했다[6].

세 번째 분석지표인 미세먼지(PM10)는 대기오염물질 중 하나로 「재난 및 안전관리 기본법」에서 행정안전부장관이 재난관리를 위하여 필요하다고 인정하는 피해로서 사회재난으로 정의하고 있다[7]. 2020 대기환경연보에 따르면 서울시는 미세먼지의 나쁨 일수는 전년보다 9일 감소한 45일로 나타났지만, 전국은 15일이 감소한 26일 발생으로 전국과 비교해 큰 폭의 감소세는 보이지 않았다[8]. 네 번째 지표인 한파는 추위가 직접적인 원인이 되어 저체온증이나 동상 동창 등의 한랭질환을 유발시킨다. 또한 도로 결빙으로 인한 피해는 급변하는 기상 상황과 그에 따른 일별 통행 패턴의 불확실성으로 도로 포장률이 높은 서울시에 피해가 확산될 수 있다[9].

본 논문은 총 5장으로 구성하였다. 2장의 이론적 고찰을 통해 기후변화와 관련된 개념을 정립하고, 국내 대응 방안의 고찰을 통해 시사점을 도출하고자 하였다. 또한 취약성 평가 지표의 모색을 위한 선행연구 분석을 진행하였다. 3장에서는 취약성 분석을 위한 지표의 구성과 분석 방법을 명시한다. 4장에서는 구축된 지표를 바탕으로 서울시의 종합적인 기후변화 취약성에 관하여 등급화를 실시하고, 분석 결과를 바탕으로 5장에서 시사점을 도출하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 재난과 기후변화

재난은 「재난 및 안전관리 기본법」 제3조에 따라 자연재난과 사회적 재난으로 구분되어 정의되고 있다. 기후변화는 국내 기상청, 기후변화협약기구(UNFCCC), IPCC 등 여러 관계부처마다 조금씩 다르게 정의하고 있다. 이러한 정의를 종합하였을 때, 일반적으로 자연적, 인위적 원인에 의해 장기간에 걸쳐 관찰된 기후변동에 추가적으로 일어나는 기후체계의 변화를 말한다. 이렇듯 오랜 기간 발생하는 기후의 변화는 자연적인 변동성뿐만 아니라 인간에게 직·간접적인 영향을 미치며 인명 및 재산피해를 야기시킨다. 따라서 이러한 재난의 영향을 감소시키기 위해 국내에서는 5년을 주기로 하여 지자체별 기후변화 적응대책 세부시행계획을 수립중에 있으며, 기후변화로 발생할 수 있는 잠재적인 위험성을 평가하는 기후변화 리스크 평가 등의 연구가 진행되고 있다.

기후변화 취약성은 재난·재해 등 취약성을 분석하는 목적과 분석의 범위 및 영향의 크기에 따라 다르게 구분된다. 기후변화 관련 국제사회단체인 UNDP⁴⁾와 IPCC는 기후변화 취약성을 다르게 정의하고 있다. 그 중 IPCC는 취약성 평가를 위한 지표로 노출(Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응능력(Adaptive Capacity)의 함수로 정의하였으며 UNDP와는 노출 함수가 적용된다는 것에 차이점을 가진다. IPCC에서 정의한 노출(Exposure)은 기후에 민감한 시스템의 요소가 기후와 접촉된 정도를 나타내고, 민감도(Sensitivity)는 적응을 고려하지 않은 상태에서 시스템이 기후변화에 얼마나 영향을 받는가를 나타낸다. 적응능력(Adaptive Capacity)은 기후변화와 같은 외부자극에 대해 시스템이 견딜 수 있는 능력으로 정의하였다. 본 연구에서는 IPCC의 취약성 정의가 자연 환경적, 사회, 경제적 측면을 동시에 포함하고 있어 통합 취약성 평가의 정량적 분석에 적합하다고 판단하여 자연재난 별 취약성 정의를 위한 틀로 설정하였다.

2.2. 국내 기후 위기 대응 방안

본 연구에서는 기후변화 취약성 분석을 통해 지역 기반의 재난관리 강화를 위한 대안을 제시하고자 한다. 따라서 인명 및 재산 피해가 큰 폭염, 홍수, 미세먼지, 한파 관련 국내 대응 방안 및 적응대책에 대한 분석을 진행하였다.

첫 번째로 폭염은 2018년 자연재난으로 지정됨에 따라 정부의 폭염 종합대책이 수립되었다. 국내 폭염에 대한 피해는 보건, 축산, 수산양식으로 나뉘며 특히 온열질환자의 발생 및 사망이 증가하고 있다. 따라서 정부는 국민생활 밀착형 대책, 저감시설 확충 등을 통해 수요자 맞춤형 대응 대책을 수행 중이다[5].

두 번째로 홍수는 많은 인명 및 재산 피해를 발생시킨다. 특히 주택침수 세대의 피해가 집중적으로 발생하여 이를 줄이기 위한 신속한 대응 방안들이 수립되고 있다[10]. 홍수 관련 대응 정책은 조기경보체계 구축, 지역 맞춤형 홍수 대응 강화, 국가물관리 시설의 홍수 대응 역량 강화, 홍수피해 예방을 위한 정보제공, 집중호우에 따른 재난 폐기물의 신속한 처리체계 구축 등이 있으며 특히 ICT를 기반으로 한 이행계획들이 수립되고 있다. 하지만 저지대와 저층 주거

에 대한 대책 및 신속한 대피를 위한 방안은 아직 미흡한 실정이다.

세 번째로 미세먼지 저감을 위해 정부에서는 미세먼지 관리 종합 계획(2020~2024년)을 마련하여 부문별 저감계획을 수립 중에 있다. 자동차 배기가스, 건설 현장, 공장 등 주 발생원에 대한 저감계획 위주의 방안을 마련하여 시행 중이며, 국민 행동요령 제시를 통해 국민건강 피해를 최소화하기 위한 대응체계를 구축하고 있다[11].

마지막으로 한파는 2018년 자연재난으로 지정됨에 따라 범정부 한파 종합대책을 추진 중에 있다. 현재 한파에 대한 정부 추진 대책은 주로 동상 및 저체온증 등의 인명피해로 이어질 수 있는 위험을 최소화하고자 신속한 정보제공 및 국민 행동요령 등 인명 보호 중심의 대책을 중점으로 추진하고 있으며, 폭설 및 동파로 인한 피해 예방 및 지원 대책을 시행 중이다[12].

재난별 대응체계를 분석한 결과 주로 정보화를 통해 국민 재난 알림 서비스를 제공하고 있으며, 사전 대응 방안 위주의 대책이 마련되어 있다. 하지만 발생 당시의 국민 참여의 대응 여건은 미흡할 것으로 판단되며 기후변화 관련 재난 대응 인식 제고가 필요할 것으로 판단된다. 정부와 지자체에서 제시한 대응 정책 추진현황 검토를 통해 추후 대응체계가 미흡한 지역의 특성에 맞는 대응 방안을 제시하고자 한다.

2.3. 재난별 취약성 평가 선행연구

기후변화 취약성 분석에 관한 연구에서 취약성의 정의, 지표의 선정 및 적절성 검토, 분석 방법론을 중심으로 다수 연구들이 진행되었다. 이에 따라 본 연구는 종합적인 취약성 분석을 위해 자연재난별 분석 지표에 대한 선행연구 분석을 진행하였다.

우선 본 연구에서는 선행연구 분석을 토대로 재난별 분석 지표를 선정하였다. 이후 종합적으로 선행연구를 분석한 결과, 기존 문헌들에서는 재난의 범위를 한정하여 취약성 분석을 위한 지표 선정방안, 방법론, 산정식의 논의가 주로 이루어졌다.

이에 따라 본 연구는 재난의 범위를 폭염, 홍수, 미세먼지, 한파로 선정함에 따라 지역별 위험이 가중되는 재난 특성을 도출 하는 것에 차별점을 두었다. 또한, 분석된 결과를 바탕으로 기존 정책들의 한계점을 파악하여 물리적, 인적 대응 방안의 추가적인 제언을 통해 재난별 지역의 심층적 대응 방안을 제시하고자 한다는 점에서 차별점을 두었다. 지표별 선행연구 목록 및 주요 내용은 Table 1.과 같다.

1) 폭염 관련 선행연구 분석

박두선 외 2인 (2017)에서는 기후변화 취약성 평가 지원 도구인 VESTAP(Vulnerability Assessment Tool to build Climate Change Adaptation Plan: VESTAP)에서 제시된 폭염 평가항목의 평가를 통해 취약성 평가항목 개발 시 참고할 수 있는 통일된 기준을 제시하였다. 기후노출 부문은 지표의 기여도가 과도하게 평가될 소지를 고려하여 지표의 특성이 중복되지 않는 선에서 1~2개만 선정할 것을 제시하였다. 민감도 부문은 지표상에 서로 상쇄되어 해당 지역의 취약성 지수가 높지 않게 나타날 수 있는 점을 고려하여 일반대상과 취약대상별로 나누어 취약성을 평가할 것을 권장하였다. 적응능력 부문은 잠재적 적응능력과 실질적 적응능력 지표를 함께 사용할 것을 권장하였다[13]. 최예슬 외 2인 (2018)은 서울시의 행정동을 대상으

로 폭염에 대한 공간적 패턴을 실증적으로 분석하였다. 특히 기후변화 취약성 평가 기준 가운데 적응 능력에 초점을 두고 상대적으로 낮은 지역을 파악하여 향후 적응능력 향상을 위한 도시·계획적 방안을 모색하였다.

2) 홍수 관련 선행연구 분석

김지수 (2013)은 기후요인, 민감도, 적응도를 고려하여 서울시 행정동 단위의 홍수취약도를 산정하여 공간적 분포를 분석하였다. 또한 세밀한 공간범위에서 홍수 재해에 대한 도시 내 지역적 특성, 기후, 지형 등의 자연적 요인과 인구, 주택, 토지, 사회기반시설, 홍수 방어시설 등의 사회·경제적 요소가 모두 반영되도록 고려하였다[14]. 이선미 외 2인 (2020)에서는 홍수취약성을 분석하기 위해 서울시 자치구 단위의 기후노출, 민감도, 적응도에 대한 세부 지표를 구성하였다. 기후노출은 강우 크기와 관련된 지표, 민감도는 홍수의 민감한 영향을 받을 수 있는 자치구의 상태와 관련된 지표, 적응도는 홍수에 대응할 수 있는 능력과 관련된 지표로 구성하였다[15].

3) 미세먼지 관련 선행연구 분석

하정희 (2016)은 서울시의 환경 취약계층을 중심으로 미세먼지 취약성을 분석하였다. 노출부문은 주로 대기질을 악화시키는 요소, 민감도 부문은 대기오염의 영향을 받는 지역 내부적 요소로 구성하였다. 특히 대기오염 배출량의 지역 내부적 요소를 반영하여 공업·교통시설 등에 대한 면적 비율을 고려하였다. 적응능력 부문은 대기오염 영향에 대한 대처 능력을 대표할 수 있는 지표로 구성하였다[16]. 문형주 외 1인 (2021)에서는 미세먼지가 도시민의 활동에 미치는 영향을 다각적으로 분석하기 위해 종속변수를 도시 활동 인구수로 설정하였고, 독립변수는 미세먼지의 영향을 가중시킬 수 있는 기후요소와 관련된 지표로 구성하였다[17].

4) 한파 관련 선행연구 분석

한파 취약성 평가와 관련된 선행연구는 미흡한 실정으로 5국가 기후위기적응정보포털의 참고할 수 있는 지표를 살펴보았다. 한파의 기후노출 부문에는 일 평균기온과 최저기온 등의 기후적 요소, 민감도 부문에는 관계 질환자, 야외노동자, 저소득층, 5세 이하 영유아, 65세 이상 고령 인구의 사회·인구 지표로 구성하였다. 적응능력 부문에서는 지역의 경제적, 물리적 환경을 대표할 수 있는 지표로 구성하였다.

3. 연구 DB 구축 및 분석 방법

3.1. 취약성 분석 지표 선정

본 연구는 선행연구의 상관관계를 통한 가용성을 바탕으로 폭염, 홍수, 미세먼지, 한파의 기후노출, 민감도, 적응능력의 개념적 틀에 따라 사회·인구적, 경제적, 물리적, 환경적 부문의 지표를 선정하였다.

우선 폭염의 취약성 분석 지표는 기후노출 부문으로 폭염 주의보, 경보가 내려지는 기준과 인체에 직접적인 영향을 고려할 수 있는 열 지수로 구성하였다. 특히 기후노출 부문은 많은 지표를 추가했을 때 독립적이지 않은 경우가 발생하여 실질적인 기여도가 과도하게 평가될 소지가 있다. 그러므로 기후요소는 서로 겹치지 않는 선에서 재

Table 1. Precedent Studies on the Vulnerability Analysis Index

Author(s)	Major Index	Classification
Park et al. [13]	<ul style="list-style-type: none"> - Minimize excessive evaluation of indicators and emphasize the composition of indicators that can represent the actual situation of the region - Reinforcement and simplification of representation of composition indicators, Subdivision of vulnerability assessment items into general and vulnerable targets, Classification of potential and actual adaptive capacity - Considering this, it is proposed to construct indicators 	Heat Wave Index
Choi et al. [4]	<ul style="list-style-type: none"> - Constructed based on IPCC's concept of vulnerability - Climate exposure: average daily temperature, number of tropical night days, number of heat wave days - Sensitivity: Population ratio over the age of 65, economically vulnerable population, elderly living alone ratio, child support ratio, population density, number of people with disabilities, etc. - Adaptation ability: Shelter in extreme heat, number of leisure welfare facilities for the elderly, number of public health centers, number of hospital beds, ratio of medical personnel, green area 	Heat Wave Index
J.S. Kim [14]	<ul style="list-style-type: none"> - IPCC's conceptual framework was introduced to form indicators, Compare and review the actual number of flood damages - Climatic Factors: Extreme Climatic Characteristics - Sensitivity Factors: Topography, Population Characteristics, Infrastructure, and Land Use Characteristics - Adaptability Factors: Economic Ability, Flood Defense Facility, Administrative Factors 	Flood Index
Lee et al. [15]	<ul style="list-style-type: none"> - Leverage the concept of vulnerability as defined by the IPCC - Climate exposure: Indicators related to rainfall intensity (maximum rainfall intensity, maximum 3-hour precipitation, 10mm/day occurrence days, 60mm/3hr or more rainfall occurrence days) - Sensitivity: Indicators related to the state of the borough (impervious area ratio, average slope, population density, old state, Housing ratio, basement house ratio, property density by region) - Adaptability: Ability to respond to flooding (financial independence, ratio of rainwater pipes, ratio of rainwater manholes, Preventive measures promotion index, preventive facility maintenance index) 	Flood Index
J.H. Ha [16]	<ul style="list-style-type: none"> - Indicator composition based on vulnerability definitions of IPCC and UNDP - Exposure index: maximum temperature, average precipitation, PM10 air quality standards exceeded - Sensitivity index: population density, area ratio of industrial facilities, area ratio of transportation facilities - Adaptation capacity index: ratio of green area, local financial self-sufficiency 	PM10 Index
Moon et al. [17]	<ul style="list-style-type: none"> - Set as an urban activity variable constituting a causal relationship with fine dust - Urban activity: Number of active population by type of urban activity - Fine dust: ultrafine dust concentration, high concentration PM2.5 duration, PM2.5 warning - Weather: visibility, average temperature, precipitation, depth - Day of the week and season: day of the week, season (summer, fall) 	PM10 Index
Korea Adaptation Center for Climate Change [18]	<ul style="list-style-type: none"> - As a result of using the item inquiry service of the National Climate Change Adaptation Portal, it is composed mainly of cold disease vulnerability indicators due to cold waves - There was no change in indicators for climate exposure and adaptability, but in the sensitivity category, patients with related diseases, outdoor workers, low-income people, infants and toddlers under the age of 5, Select indicators by classifying the elderly population aged 65 or older - Climate exposure: number of days with average daily temperature below 0 degrees, number of days with minimum temperature below -5, amount of snow - Adaptation capacity: GRDP health and social welfare services, population ratio covered by health insurance, health center personnel per population, number of emergency medical institutions per population, Financial Independence, Gross Regional Product (GRDP) 	Cold Wave Index

난의 현상을 대표할 수 있는 지표를 1-2개만 선정해야 한다[10].

박두선 외 2인 (2017)은 폭염에 의한 건강 취약성 평가를 위해 기후요소를 1-2개만 선정할 것을 권장하였지만, 본 연구는 기후요소 뿐만 아니라 지역에 영향을 줄 수 있는 물리적 요인도 함께 고려하기 위해 3개의 지표로 구성하였다[10]. 이에 기후노출 부문은 폭염을 대표할 수 있는 2개의 기후요소인 열지수가 32°C 이상인 날의 수, 폭염주의보 날의 수와 물리적으로 기후영향을 가중시킬 수 있는 불투수성 포장 비율로 구성하였다. 불투수성 포장은 도로포장의 재료가 열을 흡수하여 방출해 내는 아스팔트의 특성으로 도시열섬의 요인이 된다. 서울시는 도로 포장률이 높고 건물의 밀도가 높은 만큼 불투수성 포장 면적은 기후적 요소를 심화시킬 수 있는 요소로서 기후노출 부문의 지표로 구성하였다. 민감도 부문은 취약대상과 일반대상을 대표할 수 있는 지표로 구성하여 지역의 정확한 사회·인구적 취약성을 분석해야 한다[10]. 이에 따라 민감도 부문은 65세 이상 5세 이하 인구수, 국민생활기초수급자 수로 구성하였다.

추가적으로 물리적 요인인 1980년대 이전의 노후 건축물을 민감도 부문의 지표로 구성하였다. 「도시 및 주거환경 정비법」 제2조의3에 따르면 30년 이상된 건축물을 노후·불량 건축물이라고 정의하였다[19]. 노후 건축물은 재료와 단열성능의 저하로 재난에 취약한 구조물이 될 수 있어 민감도 부문의 지표로 구성하였다. 마지막으로 적응능력 부문의 지표는 재난에 대한 기후요소와 민감도 부문을 완화할 수 있는 요소로 선정하였다. 특히 자연적으로 도시열섬을 감소시키고 열을 흡수하는 공원, 녹지로 구성하였으며, 물리적으로 피해를 저감시킬 수 있는 병상 수와 무더위쉼터로 구성하였다.

다음으로 홍수 취약성 분석을 위한 지표를 선정하였다. 홍수의 기후노출 부문은 폭염과 동일한 기후변수에 초점을 맞춰 자치구가 대응을 실시하는 지표로 선정하였다. 10mm/day, 60mm/3hr 이상의 강우 일수, 불투수성 포장 비율로 구성하였다. 불투수성 성질은 도시열섬의 영향을 끼칠뿐만 아니라 빗물을 흡수하지 못하여 집중호우가 발생되면 도로의 피해가 가중될 수 있다. 민감도 부문은 경사

Table 2. DB Construction Content and Source

Classification		Measurement Indicator	Case of Unit	Data Source
Heat Wave Index	Exposure	Number of days With a Heat Index of 32 or Higher	GU	data.kma.go.k
		Number of Heat Wave Advisory Days		data.kma.go.k
		Impervious Pavement Area (%)		urban.seoul.go.kr
	Sensitivity	Aged Buildings Over 30 Years Old		cloud.eais.go.kr
		Population aged 65 to 5 Years Old		data.seoul.go.kr
		National Basic Livelihood Recipient		data.seoul.go.kr
	Adaptive Capacity	Park·Green Space		data.seoul.go.kr
		Number of Beds		data.seoul.go.kr
		Heat Shelter		safekorea.go.kr
Flood Index	Exposure	10mm/day Number of Occurrence Days	data.kma.go.k	
		60mm/ 3hr Number of Days	data.kma.go.k	
		Percentage of Impervious Pavement (%)	urban.seoul.go.kr	
	Sensitivity	Slope	Arc GIS Pro	
		River Area (%)	urban.seoul.go.kr	
		Basement Building (%)	nsdi.go.kr	
	Adaptive Capacity	Stormwater Conduit Length (m)	me.go.kr	
		Rainwater Management Facility (%)	data.seoul.go.kr	
		Flood Shelter	safekorea.go.kr	
PM10 Index	Exposure	Number of Days Exceeding PM10 (Find Dust) Atmospheric Environment	cleanair.seoul.go.kr	
		Number of Days Exceeding PM 2.5 (Ultra Fine Dust) Atmospheric Environment	cleanair.seoul.go.kr	
		Impervious Pavement Area (%)	urban.seoul.go.kr	
	Sensitivity	Number of Environmental Pollutant Discharge Facilities (%)	data.seoul.go.kr	
		Total Floor Area of Industrial Facilities (%)	nsdi.go.kr	
		Number of Patients with Respiratory Related Diseases	nhis.or.kr	
	Adaptive Capacity	Green Area (%)	data.seoul.go.kr	
		Number of People who can Use the Fine Dust Shelter (%)	safekorea.go.kr	
		Number of Emergency Medical Institutions	e-gen.or.kr	
Cold Wave Index	Exposure	Number of days when the average daily temperature is below Zero	data.kma.go.k	
		Number of Days with Daily Minimum Temperature below -12 (Cold Wave Warning)	data.kma.go.k	
		Number of Days when the Lowest Temperature is -5 or less	data.kma.go.k	
	Sensitivity	Number of Cold Disease Patients (%)	nhis.or.kr	
		Population Aged 65 to 5 (%)	data.seoul.go.kr	
		Number of Buildings before 1980 (%)	cloud.eais.go.kr	
	Adaptive Capacity	Cold Wave Shelter Capacity (%)	safekorea.go.kr	
		Number of Emergency Medical Institutions	e-gen.or.kr	
		Financial Independence	data.seoul.go.kr	

도, 하천면적, 지하층 건축물의 수로 지표를 구성하였다. 특히 홍수는 지형의 구조와 위치에 따라 피해가 다르게 발생된다. 경사도는 급경사지일수록 홍수로 인한 산사태로 피해가 발생할 수 있다. 하천 면적은 홍수 발생 시 수위상승으로 현재 국가에서도 호우주의보와 경보 등이 발령되면 하천 변의 차량을 통제하기도 한다.

지하층 건물은 빗물이 유입될 시 재산피해를 발생시킬 뿐만 아니라 인명피해를 발생시킬 수 있다는 점을 고려하여 민감도 부문의 지표로 구성하였다. 마지막으로 적응능력 부문은 많은 양의 빗물을 강으로 유출시킬 수 있는 시설인 우수관거길기와 빗물관리시설, 홍수 발생 시 신속한 대피를 위한 수해대피소로 구성하였다.

다음으로 미세먼지 취약성 분석을 위한 지표를 선정하였다. 미세먼지의 기후노출 부문은 대기환경기준에 따라 미세먼지와 초미세먼지의 기준 농도 초과 횟수로 선정하였다. 불투수성 포장면적은 고농도의 대기오염물질을 일으키는 요인으로 작용 된다는 점을 고려하여 기후노출 부문의 지표로 구성하였다. 민감도 부문은 환경오염 배출시설과 공업시설 연면적, 호흡기계 관련 질환자수로 구성하였다. 환경오염 배출시설과 공업시설은 다양한 오염물질 방출로 인한 대

기환경에 악영향을 줄 수 있다. 호흡기계 관련 질환자는 만성 천식을 앓고 있거나 급성 천식을 나타내는 환자들로 대기오염에 취약한 신체적 상태로서 민감도 부문의 지표로 구성하였다. 적응능력 부문은 공원, 녹지면적과 미세먼지집터, 응급의료기관수로 구성하여 민감도와 적응능력을 완화할 수 있는 요소로 구성하였다. 특히 공원과 녹지의 수목은 오염물질을 흡수하여 정화하는 효과를 발생시켜 미세먼지를 저감할 수 있는 환경적 요인으로써 선정하였다.

마지막으로 한파의 취약성 분석을 위한 지표로 기후노출 부문에는 주의보와 경보가 내려지는 기준인 일평균 기온이 0℃ 이하인 날의수, 일최저기온이 -12℃ 이하인 날의수, 서리가 내릴수 있는 기온인 -5℃ 이하인 날의수로 구성하였다. 민감도 부문은 기후의 영향으로 직접적인 영향을 받을 시 위험성이 가중될 수 있는 한랭질환 환자수와 65세이상 5세이하 인구로 구성하였다. 또한 노후된 건물의 성능 저하로 수도 계량기 동파 등의 피해에 취약한 노후건축물로 지표를 선정하였다. 적응 능력의 지표는 한파 쉼터와 응급의료기관수, 재정자립도로 구성하였다. 재정자립도는 지역의 경제적 상황을 대표할 수 있는 지표로 재해 복구를 위한 능력으로서 적응능력의 지표로 구성하였다.

3.2. 지표별 데이터 구축

공간적 취약성 분석을 위해서는 재난별 지표와 서울시 공간 데이터의 공간조인(Spatial Join)을 위한 데이터가 필요하다. 우선 폭염의 기후노출 부문 데이터인 열지수가 32°C 이상인 날의 수와 폭염주의보 날의 수는 기상 자료 개방 포털을 통해 확보하였다. 열지수는 응용기상의 생활 기상지수 일 자료에서 32°C 이상인 날의 수를 합산하여 데이터를 구축하였다[20]. 폭염주의보 날의 수는 기상청에서 제시한 폭염주의보 기준인 일 최고기온이 33°C 이상이 2일 이상 지속될 때를 참고하였다. 이에 따라 방재 기상관측(AWS)에서 일 자료 형태의 평균기온 데이터를 확보하여 33°C 이상인 날이 2일 이상인 일수를 합산하여 데이터를 구축하였다[21]. 불투수성 포장 비율 데이터는 서울 도시 계획 포털의 서울시 생태 현황도 공간정보(SHP)로 확보하였다. 불투수 도양 포장도가 90% 이상인 지역의 토지 면적을 추출하여 자치구별 면적 대비 불투수성 포장 면적의 비율로 구축하였다[22].

민감도와 적응능력 부문의 데이터는 건축 행정 시스템 세움터와 서울특별시 열린 데이터 광장 등에서 수치데이터로 확보하였다. 특히 공원 녹지 면적은 향후 도시·건축 계획 측면에서 추가적인 확대 방안을 제시하기 위해 도시계획시설 중 공간시설에 해당하는 시설의 데이터로 구성하였다. 또한 무더위 쉼터는 국민 재난 안전 포털에서 자치구별 무더위쉼터 수의 데이터를 수집 하였다. 홍수의 기후노출 부문 데이터는 폭염의 데이터 구축 방법과 동일한 방식으로 확보하였다. 민감도 부문의 경사도, 하천 면적, 지하층 건물 데이터는 공공데이터 포털 등에서 자치구별 일반 수치데이터의 구득이 어려워 공간 데이터를 확보함에 따라 수치데이터로 추출하여 데이터를 구축하였다.

우선 경사도는 Arc GIS pro의 DEM(Digital Elevation Model) 자료를 활용하여 경사도(slope)분석을 통해 구축하였다. DEM은 셀 기반의 디지털 표고 모델로 지표면의 특성을 정량화하기 위해 사용된다[25]. DEM 셀 기반의 데이터는 래스터 데이터 분석에서 다양하게 활용되는데 본 연구에서는 경사도(slope) 데이터 추출을 위해 활용하였다. 경사도 분석은 DEM 자료를 기반으로 분석되는 래스터 데이터 분석 도구 중 하나로 지역의 경사도가 0°C-90°C까지 분석되어 데이터가 추출되는 분석기법이다. 하천 면적은 서울시 생태 현황도의 하천 및 호소에 해당하는 공간데이터를 추출하여 자치구의 토지 면적 대비 하천 면적 데이터로 구축하였다. 지하층 건물 데이터는 국가공간정보포털에서 GIS 건물 통합정보 조회 서비스를 통해 지하층을 포함한 건축물의 폴리곤(Polygon) 형태 데이터를 확보하였다[24]. 이후 자치구별 지하층을 포함한 건축물의 개수를 추출하여 전체 건축물 대비 지하층 건축물 비율의 데이터를 구축하였다. 적응능력 부문은 환경부, 국민재난안전포털 등을 통해 수치데이터를 확보하였다. 다음으로 미세먼지의 기후노출 부문 데이터는 서울 대기환경 정보 포털에서 자치구별 수치데이터로 확보하였다[25].

민감도 부문의 공업시설 연면적 데이터는 국가공간정보포털에서 GIS 건물 집합정보 서비스를 통해 폴리곤(Polygon) 형태로 확보하였으며 건축물 용도에서 공장 건축물에 해당하는 데이터를 추출하였다. 이후 자치구별 면적 대비 공업시설의 연면적 데이터를 구축하

였다. 호흡기계 관련 질환 환자 수는 국민건강보험공단에 자료요청을 통해 데이터를 확보하였다[26]. 이외 민감도와 적응능력 부문의 데이터 역시 수치데이터로 확보가 가능한 공공데이터 포털 등에서 구축하였다. 마지막으로 한파의 기후노출 부문 데이터는 기상청에서 확보하였으며, 민감도 부문의 한랭질환 자수는 국민건강보험공단에 자료요청을 통해 구축하였다. 이외 수치데이터는 서울특별시 열린 데이터 광장 등에서 확보하였다.

수치데이터로 확보한 지표는 서울시 자치구 경계의 SHP 파일과 조인(Join) 작업을 통해 지표별 폴리곤(Polygon) 형태로 구축하였으며, 이후 래스터 데이터로의 변환을 통해 데이터를 구성하였다.

3.3. 분석 방법

서울시의 종합적인 취약성 분석의 공간적 분석을 위한 Arc GIS Pro (지리정보시스템)를 활용하였다. 이후 취약성이 높은 자치구 선별을 위해 선행연구에서 활용된 취약도 산정식을 선정하였다.

첫 번째로, 공간적 분석에 앞서 서로 다른 단위로 구축된 지표는 표준화 과정이 필요하다. 표준화 방법으로는 최대-최소값을 이용한 스케일 재조정(re-scaling), Z-score 방법 등이 활용된다. 스케일 재조정은 지표들의 값을 동일한 범위(0~1)로 값을 도출하는 방식이다[27]. Z-score 방식은 자료의 수치가 분포된 값의 평균으로부터 표준편차의 몇 배 정도나 떨어져 있는지를 확률변수 값인 Z값으로 나타내는 방식이다[27]. 이러한 산정방식들은 구성된 식의 구조에 따라 자료의 구조나 수치를 왜곡된 값으로 도출하기도 한다. 스케일 재조정 산정식은 지표의 극값 변환으로 자료의 구조와 변환된 지표들이 신뢰할 수 없는 이상치가 될 수 있다. Z-score 방식은 정규분포를 하지 않을 시 왜곡된 결과를 가져올 수 있다. 본 연구에서는 기후변화 취약성 평가와 관련된 연구들에서 보편적으로 사용되며, 자연로그 변환 과정을 거쳐 수치의 오류를 수정할 수 있는 Z-score 방식을 통해 표준화하였다[28]. 표준화를 위한 산정식은 Eq.1 과 같다(Eq. 1).

또한 표준화된 값의 수치가 높을 시 취약도가 높은 것으로 식을 산정하였다. 이에 따라 지표의 수치가 높을 시 취약도가 높은 기후노출, 민감도 부문에 대비하여 취약도가 낮게 평가되는 적응능력의 수치를 산정하기 위해 표준화 이후 (*-1)의 값을 부여하여 산정하였다.

$$Z\text{-score} = \frac{\text{Actual Value} - \text{Mean}}{\text{Standarddeviation}} \quad (\text{Eq. 1})$$

두 번째로 표준화된 값을 바탕으로 시각화 자료의 구현과 정량적 데이터 분석을 위해 Arc GIS Pro를 활용하여 공간적 분석을 실행하였다. 본 연구에서는 오류의 범위를 최소화한 정량적 분석을 위해 공간적으로 분석이 가능한 Arc GIS Pro를 활용하였다. Arc GIS Pro의 공간적 분석기법 중 래스터 데이터 (Raster Data)는 공간통계 분석 도구로서 활용되며, 자료의 연속적인 표면 또는 생성된 표면을 이용한 시각화 및 분석에 유용하므로 분석기법으로 채택하였다[29]. 지표별 구축된 데이터를 서울시의 자치구별 경계 폴리곤(Polygon) 데이터와 결합한 후 래스터 데이터로 변환하였다. 래스터 데이터로 변환된 데이터의 취약 등급을 부여하기 위해 재분류(Reclassification) Tool을 활용하였다. 재분류는 대체 필드를 사용하여 한번에 하나의

값 또는 값 그룹을 재분류할 수 있으며, 지정된 간격 또는 영역별 등의 기준에 따라 재분류할 수 있다[29]. 이에 따라 분류 값을 지정하기 위해 동일한 비율로 등급을 구분할 수 있는 등분위(Quantile) 방식을 활용하여 1-5등급으로 취약도를 분류하였다. 등급이 부여된 데이터들을 종합하여 취약도가 가장 높은 자치구를 선별하기 위해 Raster Calculation Tool을 활용하여 등급이 분류된 데이터들을 합산하였다. 합산된 값들은 5 이상의 수치로 산정되어 이를 다시 1-5등급으로 재분류하였다.

세 번째로 Arc GIS Pro를 통해 분석된 데이터를 바탕으로 취약도가 높은 자치구를 선별하기 위해 VRI (Vulnerability - ResilienceIndicator) 산정식을 활용하였다. 기후변화 취약성 평가 산정에는 단순 합산, 공간통계, VRI, IPCC 및 UNDP에서 제시한 취약도 산정방안 등이 활용되고 있다. 본 연구에서 활용하고자 하는 VRI는 최근 기후변화 취약성 평가를 위해 선행연구에서 응용하여 활용되고 있다[17]. VRI는 Moss 등(2001)에서 사용된 취약성-탄력성 지표원형모형을 (Vulnerability - ResilienceIndicator Prototype model: VRIP model) 응용한 것이다. 이 모형의 산정식은 취약성을 구성하는 요소들이 투명하게 남아 있으므로, 지수의 사용자가 이를 부문별로 분석하고자 할 때 복잡한 산정식의 오류를 범하지 않고 활용할 수 있다. 또한 해당 지역의 취약성을 구성하는 요소에 대한 분석을 통해 궁극적으로 취약성을 감소시킬 수 있는 적응정책 수립의 방향성을 세울 수 있게 된다. 이는 취약성 평가를 위한 사회·인구적, 경제적, 환경적, 물리적 등의 여건을 반영할 수 있으며, 지역의 취약한 부분을 파악할 수 있다는 점에서 연구자들의 의도에 따라 활용할 수 있는 산정식이다. 이에 따라 본 연구에서도 심층적이고 명확한 지역의 취약성을 분석하기 위해 VRI 산정식을 활용하였다. 마지막으로 취약도가 높은 자치구의 현재 적응대책 추진현황과 이행 여부를 검토하여 적절한 대응 방안이 이루어지고 있는지 검토하였다. 이후 분석된 부문별 취약도에 따라 미흡한 대응 방안에 추가적인 기후변화 재난관리를 위한 정책적 제언을 하고자 하였다.

$$VRI = (AdaptationScore + ImpactScore) / 2$$

$$ImpactScore = (ExposureScore + SensitivityScore) / 2$$

(Eq. 2)

4. 서울시 재난별 취약성 분석

4.1. 폭염 취약성 분석

본 연구는 2020년을 기준으로 Arc GIS Pro를 활용하여 서울시 자치구 단위에서 폭염, 홍수, 미세먼지, 한파 취약성의 등급을 시각화하였다. 시각화 자료와 함께 최종 산출된 VRI 값의 비교를 통해 심층적 대응이 필요한 자치구를 선별하고자 하였다. 또한 국민건강보험공단에 자료요청을 통해 서울시의 자치구별 온열질환자, 천식 환자, 한랭질환자의 데이터를 확보하였다. 홍수로 인한 피해 데이터는 구독이 가능한 공공 데이터포털에서 재산피해 데이터로 확보하였다. 이후 자치구별 인구수 대비 환자 수를 표준화하여 VRI 값과 비교 분석하였다.

우선 서울시의 폭염 취약성이 높은 자치구는 용산구, 강북구, 중구, 도봉구, 동대문구로 분석되었으며, VRI값이 높게 도출된 자치구는 용

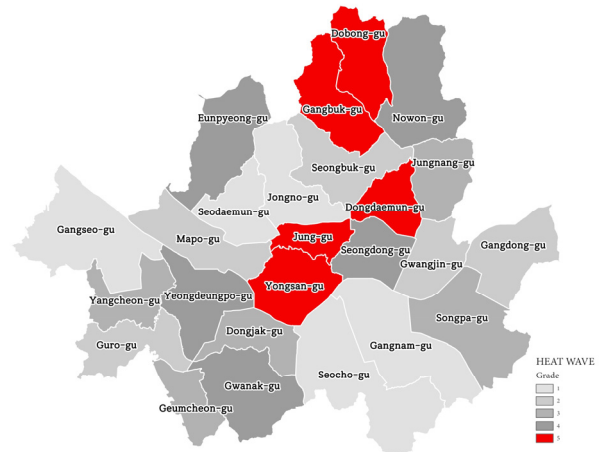


Fig. 2. Heatwave Vulnerability Grading

Table 3. Heatwave VRI Index

GU	Impact Score	Adaptation Score
Yongsan-gu	1.9293	1.3306
Gangbuk-gu	-0.2961	3.2070
Jung-gu	-0.2499	2.6329
Dobong-gu	2.7074	-0.3858
Dongdaemun-gu	1.7526	0.4396

Table 4. Heatwave VRI Index / Damage Rate

GU	VRI	Damage Rate
Yongsan-gu	3.3	0.019%
Gangbuk-gu	2.8	0.004%
Jung-gu	2.4	0.008%
Dobong-gu	2.3	0.002%
Dongdaemun-gu	2.2	0.004%

산구, 강북구, 중구로 분석되었다. 환자 발생률은 용산구가 가장 높았으며 다음으로 중구, 강북구, 동대문구, 도봉구로 나타났다. 용산구는 적응 능력에 대비하여 기후와 민감도 요소가 높게 도출되었으며, 강북구와 중구는 적응 능력 부문에서 취약도가 높게 도출되었다. 동대문구는 적응 능력 부문에 대비하여 기후노출 부문과 민감도 부문의 취약성이 높아 환자 발생률이 높은 것으로 확인되었다. 이를 바탕으로 폭염은 기후 영향에 따라 사회·경제적 부문의 대응이 중요할 것으로 보여졌다. 이에 따라 환자 발생과 VRI 값이 높은 용산구는 기후영향에 따른 민감도 부문에 대한 피해가 가중될 우려가 있어 재난 취약계층의 지원과 노후 건축물의 안전 성능점검이 필요할 것으로 보여졌다.

4.2. 홍수 취약성 분석

홍수의 취약성이 높은 자치구는 강남구, 광진구, 관악구, 서초구, 성북구로 분석되었으며 종합적으로 VRI 값이 높은 자치구는 강남구, 광진구, 관악구로 도출되었다. 강남구는 기후와 민감도 부문에서 높은 취약성을 보였으며 광진구 역시 기후와 민감도 부문에서 높은 취약성을 보였다. 2020년에 발생한 홍수피해 데이터는 구독의 한계로 2018~2020년까지의 데이터를 집계하여 비교 분석하였다. 홍수는 신체에 직접적인 영향으로 인한 인명피해보다 건물 침수로 인한 재산피해 발생률이 높다. 이에 구독이 가능한 주택침수로 인한 피해로 데이터를 구축하였다. 주택침수피해가 가장 높은 자치구는 강

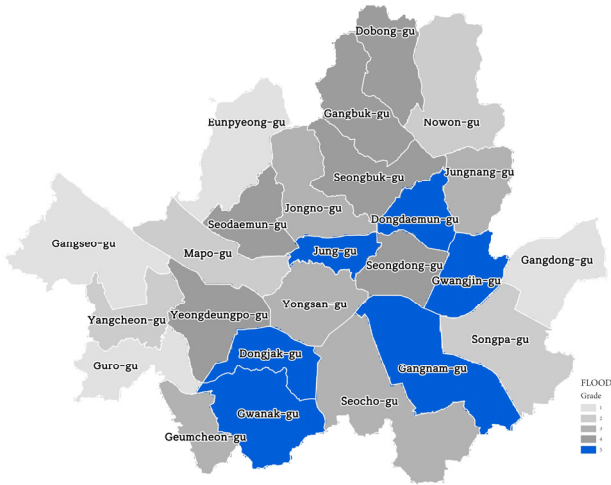


Fig. 3. Flood Vulnerability Grading

Table 5. Flood VRI Index

GU	Impact Score	Adaptation Score
Gangnam-gu	3.6205	0.3470
Gwangjin-gu	3.3077	0.3664
Gwanak-gu	0.7746	1.4541
Seocho-gu	0.8818	0.7999
Gangbuk-gu	0.1387	1.4792

Table 6. Flood VRI Index / Damage Rate

GU	VRI	Damage Rate
Gangnam-gu	3.97	0.854%
Gwangjin-gu	3.67	0.000%
Gwanak-gu	2.23	0.000%
Seocho-gu	1.68	0.167%
Gangbuk-gu	1.62	38.28%

북구로 나타났으며 다음으로 강남구, 서초구로 확인되었다. 강북구는 우수관거시설, 빗물관리시설, 대피소로 구성된 적응능력 부문에 취약성이 높게 분석되었다. 이는 홍수 발생 시 빗물을 관리할 수 있는 인프라 요소가 중요한 것으로 볼 수 있다. 다음으로 피해 발생률이 높은 강남구는 적응능력 부문에 대비하여 기후노출과 민감도 부문에서 상대적으로 높은 취약성을 보였다. 홍수는 지역의 취약한 특성에 따라 피해가 발생하는 것으로 분석되었다.

4.3. 미세먼지 취약성 분석

미세먼지의 취약성이 높은 자치구는 중구, 서초구, 성동구, 도봉구, 양천구로 분석되었으며 VRI 값이 높은 자치구는 중구, 서초구, 성동구로 도출되었다. 중구와 서초구는 적응능력 부문의 취약도가 높기로 분석되었고, 성동구는 기후와 민감도 부문에 있어 취약도가 높게 분석되었다. 2020년에 발생된 천식환자는 도봉구가 가장 높게 발생되었으며 다음으로 중구, 성동구, 서초구, 양천구로 분석되었다. 중구와 서초구는 재난을 완화하고 복구를 위한 물리적, 환경적 방안의 마련이 필요할 것으로 보여졌다. 또한 성동구에서도 미세먼지에 대응하기 위해서는 물리적인 대응방안의 마련이 필요할 것으로 보여졌다. 대기오염에 있어 부정적 영향을 끼치는 물리적 환경의 변화는 기후변화를 감소시킬 수 있는 인위적 행위로서 자연적 환경과 함께 물리적 환경을 개선할 필요가 있다.

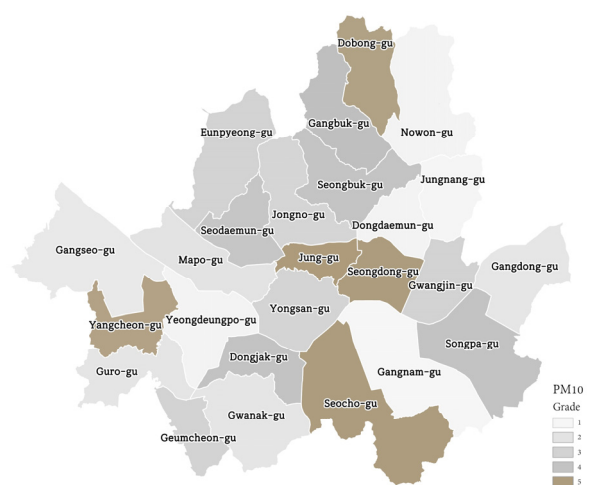


Fig. 4. PM10 Vulnerability Grading

Table 7. PM10 VRI Index

GU	Impact Score	Adaptation Score
Jung-gu	0.6166	1.8864
Seocho-gu	0.3936	1.964
Seongdong-gu	1.5227	0.8020
Dobong-gu	-0.7205	2.4297
Yangcheon-gu	-0.4436	2.1251

Table 8. PM10 VRI Index / Damage Rate

GU	VRI	Damage Rate
Jung-gu	2.5	1.733%
Seocho-gu	2.4	1.297%
Seongdong-gu	2.3	1.470%
Dobong-gu	1.7	1.878%
Yangcheon-gu	1.7	1.257%

4.4. 한파 취약성 분석

한파의 취약성이 높은 자치구는 은평구, 성북구, 노원구, 도봉구, 중구로 분석되었으며, VRI 값이 높은 자치구는 은평구, 성북구, 노원구로 분석되었다. 은평구, 성북구, 노원구는 적응능력 부문에 대비하여 기후와 민감도 부문에서 높은 취약성을 보였다. 2020년 발생된 한랭질환 발생률은 성북구가 가장 높았으며 다음으로 은평구, 노원구, 도봉구, 중구로 나타났다.

4.5 기후변화 적응정책 비교를 통한 재난별 정책제언

기후변화에 대응하기 위해 5년마다 지자체별 기후변화 적응대책 세부시행계획을 수립·이행 중에 있다. 분야별 기후변화 리스크 분석을 통해 적절한 적응대책을 도출하고 있지만 광범위한 대응체계와 여러 부처의 합동으로 인한 시간과 예산의 소요로 인명피해와 재산피해의 뚜렷한 감소세는 보이지 않고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 취약성 분석을 바탕으로 자치구별 이행 중인 적응대책의 추가적인 물리적, 인적 대응 방안을 제시하고자 한다. 지역별 심층적인 대응방안의 제시를 위해 지자체별로 시행 중인 재난별 대응 방안을 참고하였다. 기후노출, 민감도, 적응능력 부문의 취약한 특성에 따라 VRI값이 높은 3개의 상위 자치구에 대하여 대응 방안을 제시함으로써 재난별 재해관리의 집중강화 체계의 필요성을 시사하고자 하였다.



Fig. 5. Cold wave Vulnerability Grading

Table 9. Cold wave VRI Index

GU	Impact Score	Adaptation Score
Eunpyeong-gu	4.2026	-0.1881
Seongbuk-gu	2.9903	0.9876
Nowon-gu	3.2885	-0.1881
Dobong-gu	1.8215	0.9876
Jung-gu	2.3443	0.3997

Table 10. Cold wave VRI Index / Damage Rate

GU	VRI	Damage Rate
Eunpyeong-gu	4.01	0.007%
Seongbuk-gu	3.97	0.022%
Nowon-gu	3.10	0.005%
Dobong-gu	2.80	0.004%
Jung-gu	2.74	0.000%

다. 취약성이 높은 지역에 추가적인 대응방안의 제시는 타지역에서 진행중인 대응방안을 참고하여 기후노출, 민감도, 적응능력에 따라 추가적으로 도입이 필요한 부문에 제시하였다.

우선 폭염의 취약성이 가장 높은 용산구의 [2021~2025] 세부 시행계획을 살펴본 결과, 무더위 쉼터의 지정 운영 및 홍보물 제작, 배부를 계획 중에 있다[30]. 용산구는 기후요인과 민감도 부문의 취약도가 높게 분석된 만큼 취약계층의 안전을 위한 인적 대응으로서 사전 알림체계 강화와 냉방 시스템의 지원이 필요하다. 물리적 대응으로는 노후 건축물의 성능 개선을 위해 정기 점검 및 지원을 통한 단열 성능의 보완이 필요하다. 또한 도로에서 나오는 열을 식힐 수 있는 쿨링 시스템을 추가적으로 설치하여 도시열섬을 완화할 수 있는 요소가 필요할 것으로 보여졌다. 강북구와 중구는 무더위 쉼터 운영 및 확충과 시설물 안전점검, 폭염 대책 본부의 구성 등으로 적응대책을 수립하였다[31]. 강북구와 중구는 적응능력 부문의 취약성이 높아 물리적 대응 방안이 필요하다. 특히 녹지면적의 확충을 통한 도심 내 열섬 현상 완화 방안과 온열질환자 발생 시 신속하게 대응할 수 있는 병상수 확보가 필요할 것으로 분석되었다[32].

두 번째로 홍수의 취약성이 높은 강남구의 세부시행계획은 하수관로 정비와 빗물 침투 및 저류 공간 확대 등의 계획을 수립하였다[33]. 광진구와 관악구는 하수관로 정비사업과 추가적으로 풍수해 보험 시민홍보, 지하주택 침수 방지시설 등을 계획중에 있다[34]. 광

Table 11. Measures to Reinforce Heat Wave Response

	GU	
	Yongsan-gu	Gangbuk-gu / Jung-gu
Existing Countermeasures	<ul style="list-style-type: none"> Operation of a shelter for the elderly in the heat Low-income family visits Heat wave reduction facility (shade) installation 	<ul style="list-style-type: none"> Operation and expansion of summer shelters Facility safety inspection Organization of heat wave countermeasures headquarters
Human Resources	<ul style="list-style-type: none"> Reinforcing Citizen Awareness on Heat Wave Reinforcing the advance notification system Heat illness insurance 	<ul style="list-style-type: none"> Reinforcing Citizen Awareness on Heat Wave Reinforcing the advance notification system Heat illness insurance
Physical Countermeasures	<ul style="list-style-type: none"> Cooling system support Periodic inspection of performance of old buildings Cooling system installation 	<ul style="list-style-type: none"> Expansion of green area Cooling system support Periodic inspection of performance of old buildings Cooling system installation Securing the number of beds

Table 12. Measures to Reinforce Flood Response

	GU	
	Gangnam-gu	Gwangjin-gu / Gwanak-gu
Existing Countermeasures	<ul style="list-style-type: none"> Sewer pipe maintenance Expansion of rainwater infiltration and retention space 	<ul style="list-style-type: none"> Sewer pipe maintenance Storm and flood damage insurance publicity Underground Housing Flood Prevention Facility Plan
Human Resources	<ul style="list-style-type: none"> Strengthen publicity for citizens suffering from storm and flood damage Flood evacuation prevention training and publicity 	<ul style="list-style-type: none"> Reinforcing the advance notification system
Physical Countermeasures	<ul style="list-style-type: none"> Expansion of flood shelters Expansion of installation of permeable pavement Reinforcement of advance notification system for occupants of basement buildings 	<ul style="list-style-type: none"> Expansion of flood shelters Expansion of installation of permeable pavement

Table 13. Measures to Reinforce PM10 Response

Existing Countermeasures	GU	
	Jung-gu / Seocho-gu	Seongdong-gu
	<ul style="list-style-type: none"> Support for Disaster Vulnerable Classes Safety inspection of indoor air quality at daycare centers 	<ul style="list-style-type: none"> Old vehicle management Road cleaning Eco-friendly car purchase support project
Human Resources	<ul style="list-style-type: none"> Cultivating civic awareness on fine dust Arrangement of insurance related to air pollution 	<ul style="list-style-type: none"> Cultivating civic awareness on fine dust Arrangement of insurance related to air pollution
Physical Countermeasures	<ul style="list-style-type: none"> Expansion of fine dust shelters Expansion of green area Expansion of emergency medical institutions 	<ul style="list-style-type: none"> Discussion of factory site reduction plans

Table 14. Measures to Reinforce Cold Wave Response

Existing Countermeasures	GU	
	Eunpyeong-gu, Seongbuk-gu, Nowon-gu	
	<ul style="list-style-type: none"> Cold wave shelter operation Visit management for the vulnerable Publicity to Raise Citizen Awareness 	
Human Resources	<ul style="list-style-type: none"> Cultivating civic awareness about cold waves Strengthen the advance notification system Cold disease insurance 	
Physical Countermeasures	<ul style="list-style-type: none"> Safety inspection of old buildings Heating system support 	

진구와 관악구는 기후요인과 민감도 부문의 지역적 특성이 반영된 대응 정책을 이행중에 있는 것으로 확인되었다[35]. 취약성이 가장 높은 강남구는 풍수해 보험 홍보를 통한 시민인식 제고와 인명피해를 예방하기 위해 시민들이 신속하게 대피할 수 있는 알림 체계 및 대피소의 추가 확대 설치가 필요할 것으로 판단된다.

세 번째로 미세먼지의 취약성이 높은 중구와 서초구는 재난 취약계층인 어린이를 위한 대응 정책을 위주로 계획중에 있다. 어린이는 호흡기에 고농도 오염물질이 흡수될 시 신체의 직접적인 피해를 입을 수 있어 어린이집의 실내 공기질과 관련된 안전점검을 이행하고 있다. 추가적으로 중구와 서초구는 기후요소를 완화할 수 있는 물리적 대응 방안인 녹지면적의 확충과 응급의료기관, 미세먼지의 쉼터 확대가 필요할 것으로 분석되었다[36]. 성동구는 오염물질을 발생시키는 노후차량관리와 도로 물청소, 친환경 자동차 구매 지원 사업 등의 방안이 계획중에 있다[37]. 민감도 부문의 취약성을 보인 성동구는 추가적으로 대기오염 물질을 배출하는 시설과 공장입지의 감축 방안도 함께 논의되어야 할 것으로 분석되었다.

마지막으로 한파의 취약성이 높은 은평구, 성북구, 노원구는 한파 쉼터 운영, 취약계층 방문관리, 시민인식제고를 위한 홍보 방안이 계획중에 있다[38]. 기후요인과 민감도 부문의 취약성이 높은 은평구, 성북구, 노원구는 물리적 대응방안으로 건물의 단열성능 및 수도관 계량기의 안전점검과 도로의 결빙을 예방하기 위한 제설차의 확대가 필요하다[39]. 인적 대응으로는 재난 취약계층의 방문 관리와 시민들이 신속하게 대응할 수 있는 알림체계가 필요할 것으로 보여졌다[40].

5. 결론

본 연구에서는 Arc GIS Pro를 활용하여 서울시의 재난별 취약성을 분석하였으며 분석된 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 폭염, 홍수, 미세먼지, 한파의 지역별 취약한 특성을 파악하여 심층적 대응 방안을 제시하기 위해 Arc GIS Pro를 활용하여 공간적 분석을 실시하였다. 그 결과, 폭염은 용산구, 강북구, 중구로 분석되었으며, 홍수는 강남구, 광진구, 관악구, 미세먼지는 중구, 서초구, 성동구, 한파는 은평구, 성북구, 노원구로 분석되었다.

두 번째, 공간적 취약성 분석 결과를 바탕으로 취약한 자치구의 재난별 피해 현황과 VRI 지수값의 비교 분석을 실시하였다. VRI 값과 피해 발생률은 정비례한 관계가 나타나지 않았지만, 피해 현황을 바탕으로 기후노출, 민감도, 적응능력 부문별 요구되는 대응력 강화의 특성을 도출할 수 있었다.

셋째, 취약성 지수가 높은 자치구의 특성을 파악하여 현재 국가에서 시행 중인 기후변화 적응대책 세부시행계획과 비교하였다. 앞으로 시행될 지역별 대응 방안은 정보의 전달과 물리적 환경 개선 위주의 방안이 계획되어 있다. 재난 대응의 강화된 방안으로서 시민 인식 제고를 위한 홍보방안과 쉽게 접근이 가능한 도심 인프라 확충을 통해 재난 발생 시 신속한 대피를 위한 구체적인 방안이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구는 자연재난 뿐만 아니라 사회적 재난 측면에서도 지역별 심층적 대응 방안 제시를 위한 공간 정보와 적응대책의 방향성을 제시를 위한 정보로서 활용도가 높을 것으로 사료된다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. 본 연구에서 제안된 지표는 절대적이지 않으며 국내에서 지역 및 부문별 정책 판단의 여러 근거들 중 하나일 뿐이므로 이에 관한 심층적인 연구가 추가로 요구된다[17]. 또한 본 연구는 재난별 피해 현황과 VRI 값과 정확한 인과관계를 파악하지 못했다. 이에 따라 지역을 대표할 수 있는 지표와 피해관계의 파악을 통해 지표의 우선순위를 결정할 수 있는 연구를 통해 지표의 개선은 계속되어야 할 것으로 보여진다. 또한 재난으로 인한 피해에 대하여 기후적 요소뿐만 아니라 사회적, 환경적, 물리적, 경제환경에 따른 피해요소를 고려하지 못했다. 이에 추후 연구에서는 각 부문별 지표에 따른 피해현황이 고려되어야 할 것으로 보여졌다. 마지막으로 재난 대응을 위한 인프라 확충과 관련된 입지 분석이 수행되지 않아 도시의 물리적 대응을 위한 적재적소 배치 방안을 제시하지 못하였다.

추후 자연재난 대응을 위한 방안으로 본 연구에서 제시한 폭염, 홍수, 미세먼지, 한파의 지역별 취약한 특성을 적용하여 시민들의

자발적인 인적 대응과 도심 인프라의 확충을 위한 입지 분석을 통해 심층적 대응 대책이 마련되기를 기대한다.

References

- [1] 김주성, 민수진, ICT 기반 도시 교통문제 대응방안, ETRI Insight Report, 2018, p.1. // (J.S. Kim, S.J. Park, ICT-based urban traffic problem response plan, ETRI Insight Report, 2018, 2021, p.1.)
- [2] 2050 탄소중립위원회, 2050 탄소중립 시나리오, 제2021. // (2050 CNC, 2050 Carbon neutrality scenario, 2021.)
- [3] 행정안전부, 2020 재해연보, 2021.12.23. // (Ministry of the Interior and Safety, 2020 Disaster Yearbook, 2021.12.23)
- [4] 최예슬, 김재원, 임업, 서울시 폭염 취약지역의 공간적 패턴 및 적응능력 취약지역 분석, 한국: 국토계획, 제53권 제7호, 2018.12, pp.87-107. // (Y.S. Choi, J.W. Kim, U. Lim, An analysis on the spatial patterns of heat wave vulnerable areas and adaptive capacity vulnerable areas in Seoul, Korea: Journal of Korea Planning Association, 53(7), 2018.12, pp.87-107.)
- [5] 한국환경정책·평가연구원, 2020 폭염영향 보고서, 한국환경연구원 제2020. // (Korea Environment Institute, 2020 Heatwave impact report, 2020.)
- [6] 서울특별시, 2018 기후변화 백서 제2019. // (Seoul, 2018 Climate Change White Paper, 2019.)
- [7] Korea Law Information Center, Framework Act On The Management Of Disasters And Safety, <https://www.law.go.kr/법령/재난및안전관리기본법>, 2023.03.28.
- [8] 국립환경과학원, 대기환경연보 2020, 국립환경과학원 제2021. // (National Institute of Environmental Research, Annual report of air quality in Korea 2020, 2021.)
- [9] 임민수 외 3인, 기상상황에 따른 서울시 대중교통 이용 변화 분석: 폭설을 중심으로, 한국: 대한토목학회논문집, 제39권 제6호, 2019.12, pp.859-867. // (M.C. Won et al., Analysis of public transport ridership during a heavy snowfall in Seoul, Korea: Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 39(6), 2019.12, pp.859-867.)
- [10] 환경부, 제3차 국가 기후변화 적응대책 (21~25) 세부시행계획, 2020. // (Ministry of Environment, 3rd national climate change adaptation plan (21~25) detailed action plan, 2020.)
- [11] 환경부, 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024), 2019. // (Ministry of Environment, Fine dust management comprehensive plan (2020~2024), Ministry of land, Infrastructure and Transport press release, 2019.)
- [12] 한국환경연구원, 2021 한파영향 보고서, 2021. // (Korea Environment Institute, 2021 Cold wave impact report, 2021.)
- [13] 박두선, 박보영, 정은화, VESTAP 기반 기후변화 취약성 평가 지침, 한국: 한국기후변화학회지, 제8권 제4호, 2017.08, pp.339-346. // (D.S. Park, B.Y. Park, E.H. Jung, Guidelines for the VESTAP-based climate change vulnerability assessment, Korea: Journal of Climate Change Research, 8(4), 2017.08, pp.339-346.)
- [14] 김지수, 서울 도심 내 홍수취약성의 공간적 특성 분석, 한국: 이화여자대학교 석사학위논문, 2012. // (J.S. Kim, Urban flood vulnerability mapping for Seoul, Korea.: The Graduate School of Ewha Womans University, 2012.)
- [15] 이선미, 최영제, 이재웅, 엔트로피 가중치 산정방법을 활용한 도시지역 홍수취약성 평가, 한국: 한국방재학회논문집, 제20권 제6호, 2020.12, pp.389-397. // (S.M. Lee, Y.J. Choi, J.E. Yi., Urban flood vulnerability assessment using the entropy weight method, Korea: J. Korean Soc. Hazard Mitig., 20(6), 2020.12, pp.389-397.)
- [16] 하정희, 서울시 미세먼지(PM10) 취약지역 분석, 한국: 서울시립대학교 대학원 석사학위논문, 2016. // (J.H. Ha, Analysis of the fine dust (PM10) vulnerable areas in Seoul.: The Graduate School of the University of Seoul, 2016.)
- [17] 문형주, 송재민, 미세먼지가 도시민의 활동에 미치는 영향 - 서울시 종로구를 대상으로 -, 한국: 한국지역학회, 제37권 제1호, 2021.03, pp.29-44. // (H.J. Moon, J.M. Song, The impacts of particulate matter on urban activities in Jongno-Gu, Seoul, Journal of the Korean Regional Science Association, 37(1), 2021.03, pp.29-44.)
- [18] Korea Adaptation Center For Climate Change Potal, Cold wave topological evaluation index data information, <https://kaccp.kei.re.kr>, 2022.12.10
- [19] Korea Law Information Center, Act on the improvement of urban areas and residential environments, <https://www.law.go.kr/법령/도시및주거환경정비법>, 2023.03.28.
- [20] Korea Meteorological Administration Open MET Data Potal, Living Weather Index, <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>, 2022.12.10.
- [21] Korea Meteorological Administration Open MET Data Potal, Disaster Prevention Weather Observation, <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>, 2022.12.10.
- [22] Seoul Urban Planning Portal, Ecological Status Map of Seoul, <https://urban.seoul.go.kr/>, 2022.12.10.
- [23] 한국에스리 기술지원센터, 수치지도를 이용한 DEM 생성, 한국에스리 기술지원센터, 2020.12, // (Esri Korea, DEM creation using digital maps, 2020)
- [24] Ministry of Land, Infrastructure and Transport National Spatial Information Portal, GIS Building Integration Information Inquiry Service SHP format, <http://www.nsdg.go.kr>, 2023.03.01
- [25] Seoul Metropolitan Government Seoul Atmospheric Environment Information, Air Quality Statistics by Period, <https://cleanair.seoul.go.kr>, 2022.12.10.
- [26] National Health Insurance Corporation, Request for Data Information on the Number of Asthma Patients by County by District in Seoul, <https://www.nhis.or.kr>, 2022.12.10.
- [27] 한국환경정책·평가연구원, 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입 방안, 한국환경연구원 제2008. // (Korea Environment Institute, Development and application of a climate change vulnerability index, 2008.)
- [28] 황혜선, 변병설, 기후변화 취약성 평가 지표의 개발: 서울시를 중심으로, 한국환경정책학회, 제19권 제4호, 2011.12, pp.93-119. // (H.S. Hwang, B.S. Byun, Building vulnerability index on climate change: Focused on Seoul metropolitan city, Journal of Environmental Policy and Administration, 19(4), 2011.12, pp.93-119.)
- [29] 한국에스리 기술지원센터, 재분류(Reclassification)를 통한 래스터 활용, 한국에스리 기술지원센터, 2020.12. // (Esri Korea, Utilizing raster through reclassification, 2020)
- [30] 용산구, 제2차 용산구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 용산구 제2021. // (The 2nd Yongsan-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [31] 강북구, 제2차 강북구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 강북구 제2021. // (The 2nd Gangbuk-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [32] 중구, 제2차 중구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 중구 제2021. // (The 2nd Jung-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [33] 강남구, 제2차 강남구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 강남구 제2021. // (The 2nd Gangnam-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [34] 광진구, 제2차 광진구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 광진구 제2021. // (The 2nd Gwangjin-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [35] 관악구, 제2차 관악구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 관악구 제2021. // (The 2nd Gwanak-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [36] 서초구, 제2차 서초구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 서초구 제2021. // (The 2nd Seocho-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [37] 성동구, 제2차 성동구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 성동구 제2021. // (The 2nd Seongdong-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [38] 은평구, 제2차 은평구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 은평구 제2021. // (The 2nd Eunpyeong-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [39] 성북구, 제2차 성북구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 성북구 제2021. // (The 2nd Seongbuk-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)
- [40] 노원구 제2차 노원구 기후변화 적응대책 세부시행계획(2021~2025), 노원구 제2021. // (The 2nd Nowon-gu Climate Change Adaptation Plan, 2021.)

- 1) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): 기후변화 문제에 대처하기 위해 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 1988년에 공동 설립한 국제기구
- 2) '뜨거워지는 한반도' 21세기말 폭염일수 3.5배 ↑·사과재배 불가, 세무사신문, 2020(<https://webzine.kacpta.or.kr/news/articleView.html?idxno=7340>)

- 3) 행정안전부, 2020 재해연보 | 자연재난 | 의 최근 10년간 원인별 인명피해 현황 분석 결과 폭염이 평균 35.67(명/년), 호우(홍수)가 13.9(명/년)로 인명피해가 있는 재난 유형 중 91.8%의 높은 비율을 차지함.
- 4) 유엔 개발 계획(United Nations Development Programme)
- 5) 국가기후위기정보센터, 한국환경연구원 국가기후위기 적응센터가 운영하고 있는 국가기후위기정보포털은 기후변화 적응과 관련된 일반적인 상식부터 정보, 교육, 전문가 네트워크 등의 종합서비스를 제공하는 종합플랫폼