Check for updates

Journal of Climate Change Research 2025, Vol. 16, No. 5-2, pp. 1019~1035
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2025.16.5.1019

지방 기후위기 적응대책 수립 지원을 위한 취약성 지수 등급화 방안 연구

백지원[*,**] · 김지연[***†] · 노순아[****] · 박소민[**] · 박찬[*****] · 진형아[***] · 오윤영[****] · 서도현[*] · 이대균[******] · 이종천[*******]

[*]국립환경과학원 기후변화연구과 전문연구원, [**]서울시립대학교 일반대학원 조경학과 박사수료,
[***]국립환경과학원 기후변화연구과 연구관, [****]국립환경과학원 기후변화연구과 연구사, [*****]서울시립대학교 조경학과 교수,
[******]국립환경과학원 기후변화연구과 과장, [*******]국립환경과학원 기후탄소연구부 부장

A study on methods for the vulnerability index to support the formulation of regional adaptation measures for climate crisis

Baek, Jiwon[*,**] · Kim, JiYeon[***†] · Roh, Soon-A[****] · Park, Somin[**] · Park, Chan[*****] · Jin, HyungAh[***] · Oh, Yunyeong[****] · Seo, Do Hyun[*] · Lee, Daegyun[******] and Lee, Jong-chun[*******]

[*]*Research Fellow, Climate Change Research Division, National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon, Korea*
[**]*Ph.D. Candidate, Department of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul, Korea*
[***]*Senior Researcher, Climate Change Research Division, NIER, Incheon, Korea*
[****]*Researcher, Climate Change Research Division, NIER, Incheon, Korea*
[*****]*Professor, Department of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul, Korea*
[******]*Manager, Climate Change Research Division, NIER, Incheon, Korea*
[*******]*Director General, Climate Change and Carbon Research Department, NIER, Incheon, Korea*

ABSTRACT

The recent global climate crisis, including on the Korean Peninsula, is worsening every year, seriously affecting all sectors, including human beings, ecosystems, agriculture, livestock, marine, and fisheries. To reduce vulnerability to the climate crisis and enhance adaptive capacity and resilience to natural disaster damage, national and local governments are establishing adaptation measures every five years. While VESTAP is utilized for regional vulnerability assessments, it has limitations as the relative nature of its results makes them difficult to use and compare across assessment items; however, some prior studies have proposed a grading system to reduce the complexity of assessment indicators. The purpose of this study is to propose a method for grding VESTAP's relative vulnerability assessment results and to analyze the correlation between graded outcomes and its component indices (climate exposure, sensitivity and adaptive capacity), thereby formulation of regional adaptation measures for climate crisis. The study compared a total of three grading methods: equal-interval grading, utilizing Natural Breaks (Jenks), and utilizing the Quantile method. The correlation analysis showed that the equal-interval grading method yielded statistically significant results. The other methods also produced meaningful results, suggesting areas for future improvements to VESTAP. It is expected that local governments can utilize the results of this study to propose a method of converting VESTAP's relative vulnerability assessments into an equal-interval graded system, which can serve as foundational data for understanding the actual degree of regional vulnerability.

Key words : Equal-Interval, Natural Breaks, Quantile, Classification, VESTAP

†Corresponding author : rev8001@korea.kr (National Institute of Environmental Research, Hwangyoung-ro 42, Seogu, Incheon, 22689, Korea. Tel. +82-32-560-7319)

ORCID
백지원 0000-0002-5422-2288
김지연 0000-0001-5999-2188
노순아 0009-0001-3622-938X
박소민 0000-0001-6657-7206
박 찬 0000-0002-4994-6855
진형아 0009-0001-6573-1985
오윤영 0000-0002-9115-814X
서도현 0000-0001-9528-2060
이대균 0000-0001-6012-7757
이종천 0000-0002-6222-9543

Received: August 31, 2025 / Revised: September 22, 2025 1st, October 8, 2025 2nd / Accepted: October 17, 2025

1. 서론

최근 한반도를 비롯한 전 세계에서 기후위기가 해마다 심화되며, 인간은 물론 생태계, 농축산, 해양, 수산 등 모든 부문에 심각한 영향을 끼치고 있다. 전 지구 평균기온은 지속적으로 증가하고 있으며, 전 세계 곳곳에서 이상기후 현상이 빈번히 발생함에 따라 매년 재산 및 인명피해가 발생하고 있다(Ministry Concerned, 2025; WMO, 2023). 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에 따르면 2024년은 역대 가장 따뜻한 해였으며, 산업화 이전(1850 ~ 1900년) 수준보다 1.55℃±0.13℃ 높은 기온을 기록하였다(WMO, 2025). 우리나라의 경우 2024년 연평균 기온이 14.5℃로 평년(12.5℃)보다 2.0℃ 높아 1973년 이래 가장 높았고, 연평균 강수량은 1,414.6 mm로 평년(1,193.2 mm ~ 1,444.0 mm)과 비슷하게 나타났다(Ministry Concerned, 2025). 이상기후로 인해 배추값 폭등, 이상고수온 발생 증가, 수목 생육 피해 증가, 건강 피해 환자 수 증가, 인명 및 재산 피해 등이 발생하였다(Ministry Concerned, 2025). 태풍, 집중호우 등 자연재해 및 극단적 기후 현상도 연이어 발생하며, 그 횟수가 과거에 비해 빈번하게 나타나고 있다(IPCC, 2023; Lim et al., 2023).

기후위기에 대한 취약성을 줄이고 자연재해 피해에 대한 적응역량과 회복력을 높이기 위해서 국가 및 지방자치단체는 5년마다 기후위기 적응대책을 수립하고 있다(MOLEG, 2022). 국가는 2023년에 기존 정책을 보완한 제3차 국가기후위기 적응 강화대책(2023 ~ 2025)을 수립하였으며, 2026년부터는 제4차 국가 기후위기 적응대책(2026 ~ 2030)이 시행될 예정이다(ME, 2024). 지방자치단체 중 17개 광역지자체는 제4차 국가 기후위기 적응대책을 바탕으로 2027년부터 제4차 기후위기 적응대책을 수립할 예정이고, 기초지자체는 이전 차시 수립 기간에 따라 지역별로 기후위기 적응대책을 이행 및 신규 수립하고 있다.

효과적인 적응대책 수립을 위해 기후변화에 따른 영향·취약성·리스크 평가 결과를 활용하여 우선적으로 조치가 필요한 지역을 결정하는 것은 매우 중요하다(Yu et al., 2025). 이에 기후에너지환경부는 지역 취약성 평가 시 기후위기 취약성 평가도구(이하, VESTAP)를 제공하고 있으며 지자체는 시·군·구, 읍·면·동 단위의 상대적 취약성 평가 결과를 활용해 적응대책 세부시행계획 수립 시 참고자료로 사용하고 있다.

VESTAP은 2010년부터 2013년까지 국립환경과학원에서 개발한 GIS 기반 광역·기초지자체 취약성 평가도구인 CCGIS, LCCGIS가 기초가 되어 발전하였다(Chon et al., 2014; Kim and Kim, 2016; Kim et al., 2012; Yoon and Lee, 2017). 이후 시스템이 이관되어 한국환경연구원 국가기후위기적응센터에서 웹기반의 취약성 평가도구인 VESTAP을 개발하였고(Oh et al., 2016; Park et al., 2017), 최신의 기후변화 시나리오 탑재, 평가항목 개선, 원데이터 갱신 등 지속적인 개선 작업을 진행하였다. 2025년부터 VESTAP의 운영 및 관리기관이 국립환경과학원으로 이관되었으며, 같은 해 7월 1일부터는 신규 홈페이지(https://nier.go.kr/vestap)를 통해 취약성 평가 결과가 서비스되고 있다.

VESTAP은 지역 및 부문별 상대적 취약성을 파악하여 정책 우선순위 결정에 필요한 정보를 제공하고(Chae et al., 2017; Füssel and Klein, 2006), 지표법 평가 방법을 활용해 취약성 평가가 용이하고 이해하기 쉬운 장점이 있다(Lee and Kang, 2018). 특히 대용변수를 사용한 지표 기반의 상대적 평가 결과를 활용하여 지역의 의사결정 지원에 도움을 주고 있다(Brooks et al., 2005; Eum, 2016; Eum and Kim, 2024; Kim and Kang, 2022; Koh and Kim, 2010; Lee and Choi, 2018; Lee et al., 2015, 2020; Moss et al., 2001; Park et al., 2017; Yun et al., 2013). 하지만 상대적 취약성 평가 결과를 제공하다 보니 절대적인 취약 정도를 알기 어렵고, 적응대책 수립 시 결과 활용 및 해석이 어렵다(Park, 2023a; Yoon and Lee, 2017). 일부 선행연구에 따르면 취약성 저감을 위한 예산 배분 등 정책 결정자가 취약지역의 우선순위를 결정하는 데 도움이 되는 방안으로 등급화를 제안하기도 하였다(Balica and Wright, 2010; Cutter et al., 2003, 2014; OECD, 2008; Park et al., 2021). 다만, 등급화 방법에 따라 지자체의 취약성 등급이 달라져 정책의 우선순위가 바뀔 수 있으므로, 상대적 취약성 평가 결과를 가장 효과적으로 반영하는 등급화 방법에 대한 검토가 필요하다.

이에 본 연구의 목적은 VESTAP의 상대적 취약성 평가 결과를 3가지 방법으로 등급화하고, 취약성 평가 결과와 등급화 결과 간 상관관계를 비교하여 지방 기후위기 적응대책 수립 시 효과적으로 활용할 수 있는 등급화 방안을 도출하는 것이다. 본 연구 결과를 통해 지방 기후위기 적응대책 수립 시 취약 지역 선정 및 관리를 용이하게 할 수 있을 것이며, 취약성 저감을 위한 재정 투입의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 방법

본 연구에서는 VESTAP의 상대적 취약성 평가 결과를 가장 설명력 있게 반영하는 등급화 방법을 도출하기 위해 다음과 같은 절차로 연구를 진행하였다(Fig. 1). 우선 VESTAP의 기후노출 지수, 민감도 지수, 적응능력 지수를 계산해 취약성 종합지수를 산출하였다. 그 이후 3가지 방법을 활용해 취약성 종합지수를 등급화하였다. 등급화 결과와 기후노출 지수, 민감도 지수, 적응능력 지수 간의 상관관계를 분석해 최종적으로 VESTAP 취약성 평가 결과를 가장 잘 설명하는 등급화 방안을 제안하는 것이다.

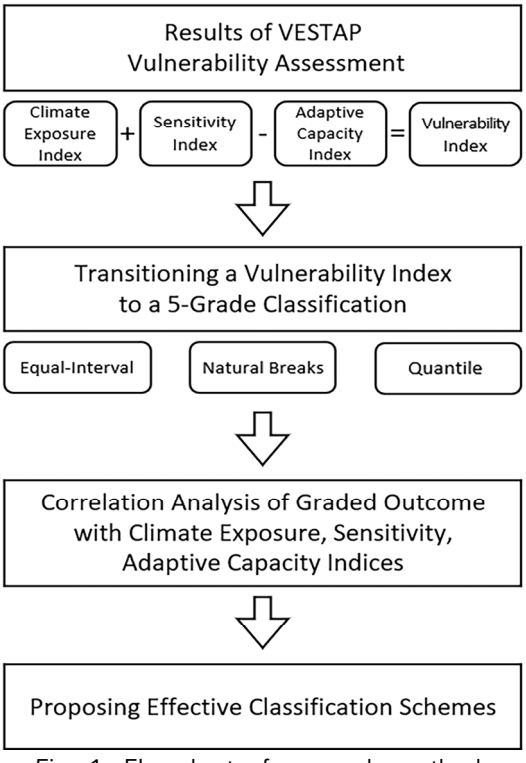

Fig. 1. Flowchart of research methods

Table 1. VESTAP sector and assessment item related to heat wave

Sector	Assessment item	
Health	Heat wave	Mental disorders due to extreme heat
	Heat-related illnesses due to extreme heat (general)	Heat-related illnesses due to extreme heat (vulnerable social group)
Territorial/ Coastal infrastructure	Infrastructure for heat wave	House area for heat wave
Industries/ Energy	Heating and cooling management (costs) to heat wave and cold wave	

VESTAP의 평가 결과 도출을 위해 취약성 평가항목 중 다른 기후변화 관련 자연재해와 달리 직접적인 시설물 파괴는 적은 편이지만, 노출 대상이 광범위하고 많은 인명피해로 이어질 수 있는 폭염을 중심으로 평가항목을 선정하였고(Kang et al., 2024; Kim and Lee, 2024; Kim et al., 2006)(Table 1), 건강, 국토·연안, 산업·에너지 부문 중 건강 부문의 '폭염에 의한 건강 취약성'을 중심으로 연구를 진행하였다(Table 2).

취약성 평가 결과 비교 시 SSP5-8.5 시나리오를 기준으로 평가했으며, 분석 기간은 2021 ~ 2040년이며, 분석 지역은 2024년 폭염으로 인한 온열질환 추정 사망 비율이 제일 높았던 경상남도, 충청남도, 서울특별시이다(KDCA, 2025).

2.1.1. VESTAP 취약성 평가 방법

VESTAP은 지방 기후위기 적응대책 수립 지원을 위한 웹 기반의 상대적 취약성 평가도구이다(Oh et al., 2016, 2017; Park et al., 2017). IPCC 제4차 평가보고서(AR4)의 취약성(Vulnerability) 개념을 활용해 기후노출, 민감도, 적응능력 지표를 활용해 평가하고 있다(Baek et al., 2024) (수식 (1)). 기후노출 지표의 경우 기상청 국가 기후변화 표준 시나리오(RCP, SSP)의 최고기온, 강수량 등의 데이터를 사용하고, 민감도와 적응능력 지표의 경우 국가·공공기관의 통계 데이터를 활용해 지표를 구축한다. VESTAP은 공간적 분석을 통해 행정구역 단위(시·군·구, 읍·면·동)로 취약성 평가 결과를 제공한다. 서로 다른 단위로 구축된 지표는 표준화 과정이 필요하다. 표준화 방법으로는 최대-최소값을 이용한 스케일 재조정(re-scaling) 방식을 활용하며(수식 (2)), 표준화된 지표값은 동일한 범위(0 ~ 1)로 값을 도출한다(Jang et al., 2023). 그 이후 표준화된 지표에 가중치를 곱하여 기후노출, 민감도, 적응능력 지표 지수를 도출한다. 지표별 지수를 요인별(기후노출, 민감도, 적응능력)로 합산하고 가중치를 한 번 더 곱하여 기후노출 지수, 민감도 지수, 적응능력 지수를 산출한다. 최종적으로 기후노출 지수와 민감도 지수를 더하고, 적응능력 지수를 빼서 취약성 종합지수를 산출하고 이를 바탕으로 취약성 순위를 평가한다.

Table 2. Indicator and weighting value for health vulnerability to heat wave

Factor	Factor weighting value	Indicator	Indicator weighting value
Climate exposure	0.54	• Number of days in which daily minimum temperature exceeds 25℃	0.083
		• Number of occurrences where the daily maximum human-sensible temperature is 33℃ or higher for 2 or more consecutive days	0.563
		• Annual average of maximum daily human-sensible temperature	0.354
Sensitivity	0.297	• Ratio of basic living recipients to the population	0.209
		• Ratio of the elderly living alone to the population	0.27
		• Population density	0.021
		• Proportion of the population of cardiovascular diseases	0.112
		• Proportion ratio of more than 65 years old	0.057
		• Proportion of the people under the age of five	0.04
		• Proportion of outdoor workers	0.155
		• Proportion of urbanized dry area	0.015
		• Unemployment rate	0.012
		• Mortality rate due to heatstroke/sunstroke per population	0.08
		• Proportion of people with disability	0.029
Adaptive capacity	0.163	• Population rate having health insurance	0.024
		• Number of staffs in public health centers per population	0.268
		• Number of emergency medical treatment centers per population	0.372
		• Financial independence rate of local government	0.065
		• Gross Regional Domestic Product (GRDP) per population	0.132
		• Fire department personnel per 1,000 people	0.093
		• Ratio of green space area to urbanized dry area	0.046

Vulnerability = (climate exposure × α) + (sensitivity × β) - (adaptive capacity × γ) (1)

※ α, β and γ are the weights for each assessment item

$$x_{normalization} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

2.1.2. 취약성 평가 결과 등급화 방법

VESTAP 취약성 지수와 같은 연속형 자료를 다룰 때 5등급 체계로 전환하는 방안이 제시되었으며(GIZ, 2017), 등급화 방안은 총 세 가지로 정리되었다. 첫 번째, 등간격 방법은 절차가 간단하고 직관적으로 이해할 수 있어(Park, 2023b), 정책 수립 및 이행 담당자가 의사결정 시 빠른 판단을 도와주는 방안이다(GIZ, 2017; Kim et al., 2014) (Table 3). 두 번째, Natural Breaks (Jenks) 방법은 각 클래스 내의 평균 편차를 최소화하고 클래스 간의 편차는 최대화하는 클러스터링 기법으로, 클래스 내의 동질성을 높이고 등급 간의 이질성을 최대화해 같은 등급에 속한 지자체의 취약성을 유사한 정도로 판단할 수 있는 방안이다(Jenks, 1967). 마지막으로 분위수 분할(Quantile) 방법은 균등한 비율로 나눠 등급별로 균형 잡힌 분포를 나타내 데이터가 몰리는 현상을 방지할 수 있으며 이상치(outlier)의 영향을 덜 받아(Idukunda et al., 2025), 정책 이행의 대상을 균등하게 나누고자 할 때 유리한 방안이다.

Table 3. Transformation of relative vulnerability index to equal-interval

Class	Class Value within range of 0 to 1	Description
1	0.8 < X ≤ 1	Very High
2	0.6 < X ≤ 0.8	High
3	0.4 < X ≤ 0.6	Normal
4	0.2 < X ≤ 0.4	Low
5	0 < X ≤ 0.2	Very Low

Source: GIZ (2017)

2.1.3. 취약성 평가 결과와 취약성 등급 상관관계 분석 방법

취약성 평가 결과와 등급화한 결과의 통계적 타당성을 검토하기 위해 상관관계를 분석하였다. VESTAP 취약성 평가 시 산출한 기후노출, 민감도, 적응능력 지수와 등급화한 결과와의 상관관계 분석을 통해 등급화 결과가 VESTAP 취약성 종합지수와 얼마나 일관된 관계를 가지고(OECD, 2008), 어떤 방법이 취약성 평가 결과를 잘 반영하는지 확인하고자 하였다(Idukunda et al., 2025).

기후노출, 민감도, 적응능력 지수의 경우 연속형 데이터, 등급화된 취약성 평가 결과는 순서형 데이터이다. 두 변수 간 순위(Rank) 일치도를 측정하기 위해 스피어만 상관계수(Spearman rank correlation coefficient)를 사용하여 상관관계를 평가하였으며(Tellman et al., 2020), 계산에는 R 소프트웨어(version 4.5.1)를 활용하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. VESTAP 폭염에 의한 건강 취약성 평가 결과

3.1.1. 경상남도

SSP5-8.5 시나리오 2021~2040년 경상남도의 폭염에 의한 건강 취약성 평가 결과 18개 지자체 중 1순위 창녕군, 2순위 함안군, 3순위 밀양시가 도출되었으며, 상대적으로 취약성이 낮은 지자체는 16순위 창원시, 17순위 거창군, 18순위 거제시로 나타났다(Fig. 2, Table 4). 창녕군, 함안군은 기후노출과 민감도 지수의 합이 첫 번째와 두

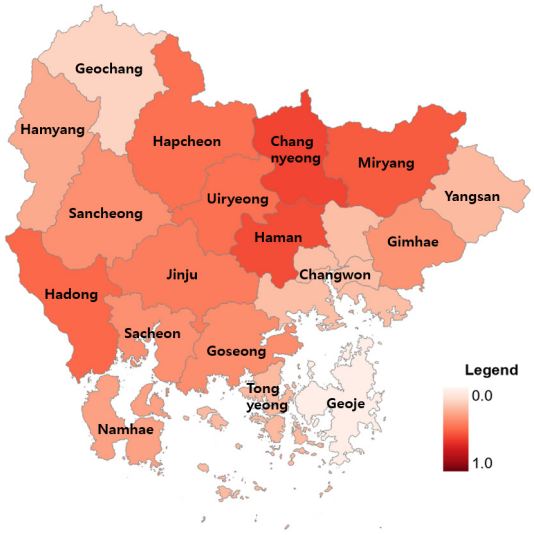

Fig. 2. Health vulnerability assessment results by heat waves in Gyeongsangnam-do

Table 4. Health vulnerability assessment results by heat waves in Gyeongsangnam-do

Vulnerability Rank	Administrative District	Climate Exposure Index	Sensitivity Index	Climate Exposure Index + Sensitivity Index	Adaptive Capacity Index	Vulnerability result
1	Changnyeong-gun	0.5	0.16	0.66	0.06	0.60
2	Haman-gun	0.52	0.11	0.63	0.05	0.58
3	Miryang-si	0.42	0.14	0.56	0.02	0.54
4	Hadong-gun	0.35	0.19	0.54	0.04	0.50
5	Hapcheon-gun	0.35	0.2	0.55	0.07	0.48
6	Uiryeong-gun	0.38	0.22	0.60	0.12	0.48
7	Jinju-si	0.43	0.05	0.48	0.04	0.44
8	Goseong-gun	0.27	0.17	0.44	0.05	0.39
9	Sancheong-gun	0.3	0.18	0.48	0.1	0.38
10	Sacheon-si	0.32	0.1	0.42	0.04	0.38
11	Gimhae-si	0.37	0.03	0.40	0.03	0.37
12	Namhae-gun	0.2	0.19	0.39	0.06	0.33
13	Hamyang-gun	0.2	0.18	0.38	0.08	0.30
14	Tongyeong-si	0.15	0.12	0.27	0.02	0.25
15	Yangsan-si	0.23	0.03	0.26	0.01	0.25
16	Changwon-si	0.23	0.03	0.26	0.02	0.24
17	Geochang-gun	0.09	0.13	0.22	0.05	0.17
18	Geoje-si	0.04	0.02	0.06	0.02	0.04

번째로 높은 것으로 나타나, 기후노출과 민감도 지수가 취약성 순위에 영향을 준 것으로 판단된다. 밀양시는 기후노출과 민감도의 지수의 합은 네 번째로 높았지만, 적응능력 지수를 합산하였을 때, 취약성 종합지수가 3순위로 나타났다(Table 4).

3.1.2. 충청남도

SSP5-8.5 시나리오 2021 ~ 2040년 충청남도 폭염에 의한 건강 취약성 평가 결과 15개 지자체 중 논산시, 부여군, 예산군이 1 ~ 3순위로 나타났으며 13 ~ 15순위의 보령시, 서산시, 태안군보다 상대적으로 더 취약한 것으로 나타났다(Fig. 3, Table 5). 논산시, 보령시, 예산군 모두 기후노출과 민감도 지수의 합이 첫 번째, 두 번째, 세 번째로 높은 것으로 나타나, 기후노출과 민감도 지수가 취약성 순위에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 공주시는 예산군과 같이 기후노출과 민감도 지수의 합은 세 번째로 높았으나, 적응능력 지수를 합산한 결과 취약성 4순위로 나타났다(Table 5).

3.1.3. 서울특별시

SSP5-8.5 시나리오 2021 ~ 2040년 서울시 폭염에 의한 건강 취약성 평가 결과 25개 자치구 중 송파구가 1순위, 중랑구가 2순위 동대문구가 3순위로 도출되었고, 관악구가 23순위, 서대문구가 24순위, 종로구가 25순위로 나타

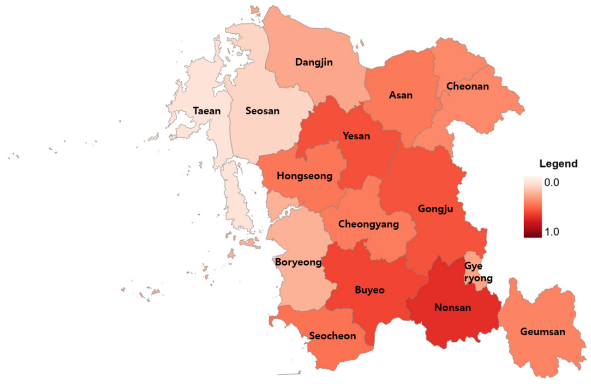

Fig. 3. Health vulnerability assessment results by heat waves in Chungcheongnam-do

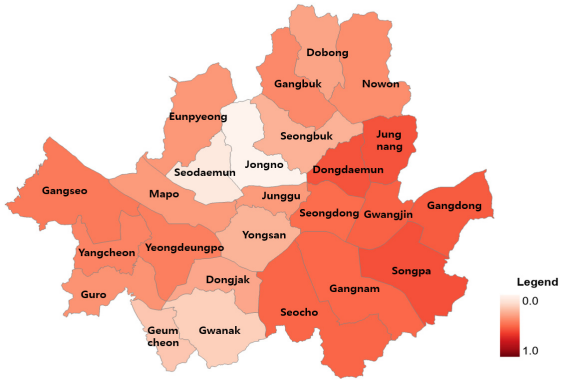

Fig. 4. Health vulnerability assessment results by heat waves in Seoul

Table 5. Health vulnerability assessment results by heat waves in Chungcheongnam-do

Vulnerability Rank	Administrative District	Climate Exposure Index	Sensitivity Index	Climate Exposure Index + Sensitivity Index	Adaptive Capacity Index	Vulnerability result
1	Nonsan-si	0.53	0.16	0.69	0.02	0.67
2	Buyeo-gun	0.45	0.2	0.55	0.05	0.60
3	Yesan-gun	0.45	0.15	0.60	0.03	0.57
4	Gongju-si	0.47	0.13	0.60	0.04	0.56
5	Seocheon-gun	0.33	0.2	0.53	0.06	0.47
6	Hongseong-gun	0.38	0.11	0.49	0.03	0.46
7	Asan-si	0.42	0.04	0.46	0.01	0.45
8	Cheongyang-gun	0.39	0.18	0.57	0.13	0.44
9	Geumsan-gun	0.31	0.15	0.46	0.04	0.42
10	Cheonan-si	0.39	0.02	0.41	0.01	0.40
11	Gyeryong-si	0.33	0.02	0.35	0.03	0.32
12	Dangjin-si	0.27	0.06	0.33	0.02	0.31
13	Boryeong-si	0.16	0.15	0.31	0.03	0.28
14	Seosan-si	0.13	0.06	0.29	0.03	0.16
15	Taean-gun	0.02	0.14	0.16	0.06	0.10

났다(Fig. 4, Table 6). 송파구, 중랑구, 동대문구는 기후노출과 민감도 지수의 합이 각 두 번째, 두 번째, 첫 번째로 높았으나, 적응능력을 합산한 결과 취약성 순위는 각 1, 2, 3 순위로 도출되어, 기후노출과 민감도 지수값이 전체적인 취약성 정도에 영향을 주었지만, 적응능력 지수로 최종 취약성 순위가 달라졌음을 확인할 수 있었다(Table 6).

3.2. 등간격 방법을 이용한 취약성 등급화 결과

3.2.1. 경상남도

등간격으로 등급화한 결과 창녕군, 함안군, 밀양시, 하동군 4개 지자체가 1등급, 합천군, 의령군, 진주시, 고성군, 산청군, 사천시 6개 지자체가 2등급, 김해시, 남해군, 함양군 3개 지자체가 3등급, 통영시, 양산시, 창원시, 거창군 4개 지자체가 4등급, 거제시 1개 지자체가 5등급으로 도출되었다(Fig. 5, Table 7).

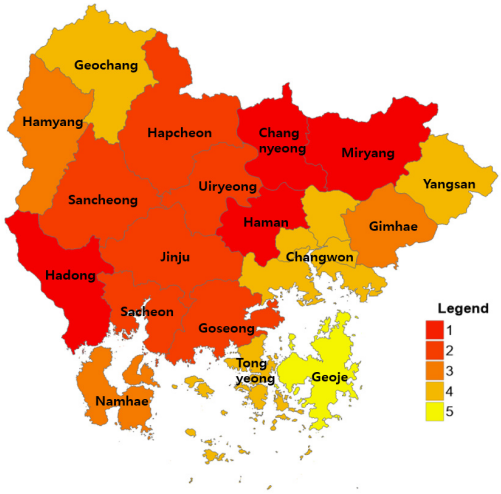

Fig. 5. Convert VESTAP result to equal-interval in Gyeongsangnam-do

Table 6. Health vulnerability assessment results by heat waves in Seoul

Vulnerability Rank	Administrative District	Climate Exposure Index	Sensitivity Index	Climate Exposure Index + Sensitivity Index	Adaptive Capacity Index	Vulnerability result
1	Songpa-gu	0.51	0.07	0.58	0.01	0.57
2	Jungnang-gu	0.38	0.2	0.58	0.02	0.56
3	Dongdaemun-gu	0.45	0.14	0.59	0.03	0.56
4	Gangdong-gu	0.46	0.1	0.56	0.02	0.54
5	Gwangjin-gu	0.45	0.1	0.55	0.03	0.52
6	Seocho-gu	0.5	0.04	0.54	0.03	0.51
7	Gangnam-gu	0.47	0.05	0.52	0.02	0.50
8	Seongdong-gu	0.42	0.09	0.51	0.02	0.49
9	Gangseo-gu	0.3	0.15	0.45	0	0.45
10	Yeongdeungpo-gu	0.4	0.08	0.48	0.05	0.43
11	Yangcheon-gu	0.33	0.11	0.44	0.02	0.42
12	Gangbuk-gu	0.24	0.2	0.44	0.04	0.40
13	Nowon-gu	0.26	0.15	0.41	0.02	0.39
14	Guro-gu	0.27	0.12	0.39	0.02	0.37
15	Eunpyeong-gu	0.24	0.13	0.37	0.01	0.36
16	Jung-gu	0.29	0.14	0.43	0.08	0.35
17	Mapo-gu	0.32	0.05	0.37	0.02	0.35
18	Dobong-gu	0.2	0.15	0.35	0.03	0.32
19	Dongjak-gu	0.25	0.08	0.33	0.02	0.31
20	Seongbuk-gu	0.2	0.09	0.29	0.01	0.28
21	Yongsan-gu	0.21	0.1	0.31	0.04	0.27
22	Geumcheon-gu	0.09	0.15	0.24	0.03	0.21
23	Gwanak-gu	0.1	0.09	0.19	0.01	0.18
24	Seodaemun-gu	0.01	0.09	0.1	0.03	0.07
25	Jongno-gu	0.02	0.12	0.14	0.13	0.01

3.2.2. 충청남도

충청남도의 VESTAP 취약성 종합지수를 등간격으로 등급화한 결과, 논산시, 부여군, 예산군, 공주시 4개 지자체가 1등급으로 가장 취약한 것으로 나타났다. 서천군, 홍성군, 아산시 3개 지자체가 2등급, 청양군, 금산군, 천안시 3개 지자체가 3등급, 계룡시, 당진시, 보령시 3개 지자체가 4등급, 서산시, 태안군 2개 지자체가 5등급으로 취약성 평가 결과가 도출되었다(Fig. 6, Table 7).

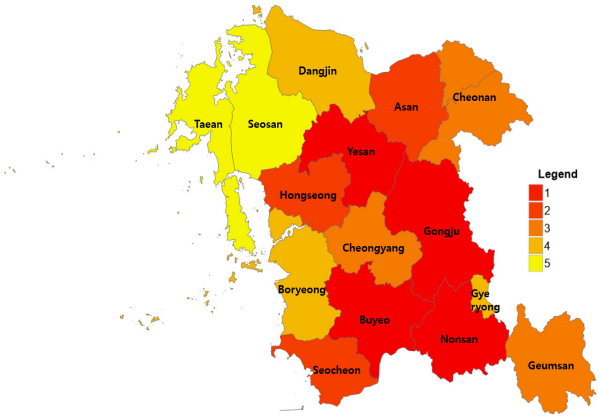

Fig. 6. Convert VESTAP result to equal-interval in Chungcheongnam-do

3.2.3. 서울특별시

VESTAP의 상대적인 취약성 평가 결과를 등간격으로 등급화한 결과 송파구, 중랑구, 동대문구, 강동구, 광진구, 서초구, 강남구, 성동구 8개 지자체가 1등급, 강서구, 영등포구, 양천구, 강북구, 노원구, 구로구, 은평구, 중구, 마포구 9개 지자체가 2등급, 도봉구, 동작구, 성북구, 용산구 4개 지자체가 3등급, 금천구, 관악구 2개 지자체가 4등급, 서대문구, 종로구 2개 지자체가 5등급으로 나타났다(Fig. 7, Table 7).

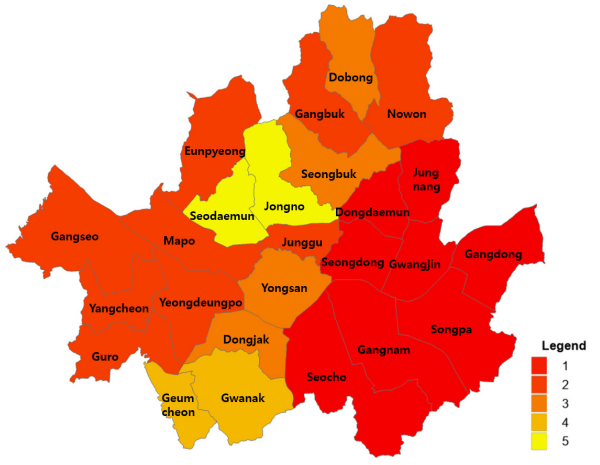

Fig. 7. Convert VESTAP result to equal-interval in Seoul

3.3. Natural Breaks (Jenks) 방법을 이용한 취약성 등급화 결과

3.3.1. 경상남도

상대적 취약성 평가 결과를 Natural Breaks (Jenks)로 전환한 결과 창녕군, 함안군, 밀양시 3개 지자체가 1등급으로 가장 취약성이 높은 것으로 도출되었다. 하동군, 합천군, 의령군, 진주시 4개 지자체가 2등급, 고성군, 산청군, 사천시, 김해시, 남해군 5개 지자체가 3등급, 함양군, 통영시, 양산시, 창원시, 거창군 5개 지자체가 4등급으로 계산되었다. 거제시 1개 지자체는 5등급으로 폭염에 의한 건강 취약성이 다른 지역과 비교했을 때 상대적으로 취약성이 가장 낮은 것으로 나타났다(Fig. 8, Table 7).

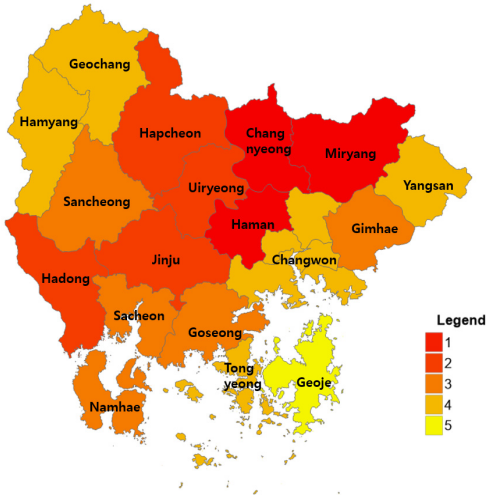

Fig. 8. Convert VESTAP result to Natural Breaks (Jenks) in Gyeongsangnam-do

3.3.2. 충청남도

Natural Breaks (Jenks)로 등급화한 결과 논산시, 부여군, 예산군, 공주시 4개 지자체가 1등급으로 폭염에 의한 건강 취약성이 가장 높은 것으로 도출되었다. 2등급으로 서천군, 홍성군, 아산시, 청양군 총 4개 지자체가 나타났고, 3등급은 금산군, 천안시 총 2개 지자체가, 4등급은 계

룡시, 당진시, 보령시 총 3개 지자체가, 5등급은 서산시와 태안군 총 2개 지자체가 도출되었다(Fig. 9, Table 7).

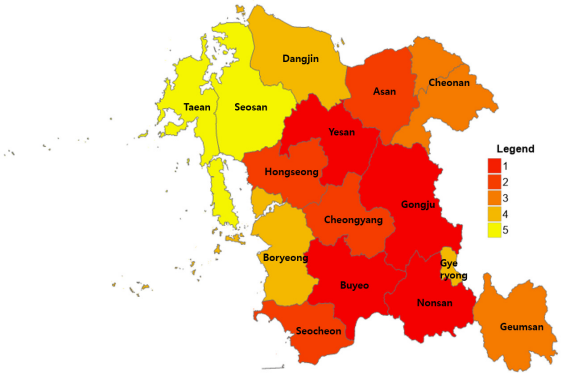

Fig. 9. Convert VESTAP result to Natural Breaks (Jenks) in Chungcheongnam-do

3.3.3. 서울특별시

VESTAP의 상대적 취약성 평가 결과를 Natural Breaks (Jenks)로 등급화한 결과 송파구, 중랑구, 동대문구, 강동구, 광진구, 서초구, 강남구, 성동구 총 8개 지자체가 상대적으로 폭염에 의한 건강 취약성이 가장 높은 1등급으로 나타났다. 2등급으로는 강서구, 영등포구, 양천구, 강북구, 노원구 총 5개 지자체가 도출되었고, 3등급은 구로구, 은평구, 중구, 마포구, 도봉구, 동작구 총 6개 지자체에서, 4등급은 성북구, 용산구, 금천구, 관악구 총 4개 지자체에서 결과가 도출되었다. 서대문구와 종로구 총 2개 지자체에서는 폭염에 의한 건강 취약성이 상대적으로 가장 낮은 것으로 나타난 5등급으로 계산되었다(Fig. 10, Table 7).

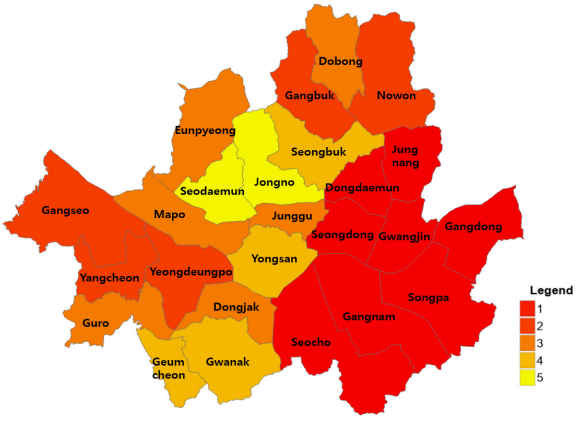

Fig. 10. Convert VESTAP result to Natural Breaks (Jenks) in Seoul

3.4. 분위수 분할(Quantile) 방법을 이용한 취약성 등급화 결과

3.4.1. 경상남도

분위수 분할(Quantile)을 활용하여 등급화로 전환한 결과 창녕군, 함안군, 밀양시, 하동군 4개 지자체가 1등급으로 가장 취약성이 높게 도출되었다. 합천군, 의령군, 진주시, 고성군, 산청군, 사천시 6개 지자체가 2등급, 김해시, 남해군, 함양군, 통영시, 양산시 5개 지자체가 3등급, 창원시 1개 지자체가 4등급, 거창군, 거제시 2개 지자체가 5등급으로 계산되었다(Fig. 11, Table 7).

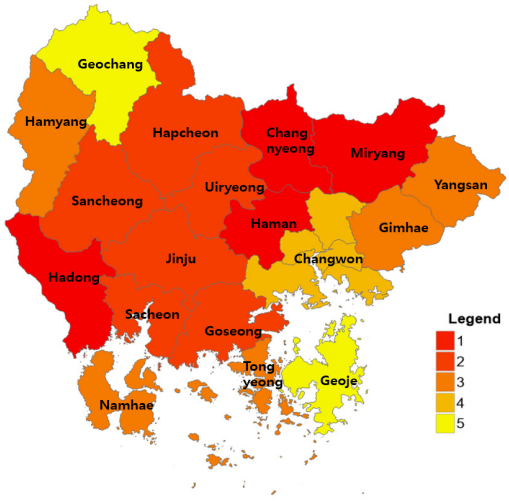

Fig. 11. Convert VESTAP result to Quantile in Gyeongsangnam-do

3.4.2. 충청남도

VESTAP의 상대적 취약성 평가 결과를 분위수 분할(Quantile)로 등급화한 결과 논산시, 부여군, 예산군 총 3개 지자체가 1등급으로 폭염에 의한 건강 취약성이 가장 높게 도출되었다. 공주시, 서천군, 홍성군 등 총 3개 지자체는 2등급, 아산시, 청양군, 금산군 총 3개 지자체는 3등급, 천안시, 계룡시, 당진시, 보령시 총 4개 지자체는 4등급으로 도출되었다. 서산시와 태안군 총 2개 지자체는 5등급으로 폭염에 의한 건강 취약성이 상대적으로 가장 낮은 것으로 나타났다(Fig. 12, Table 7).

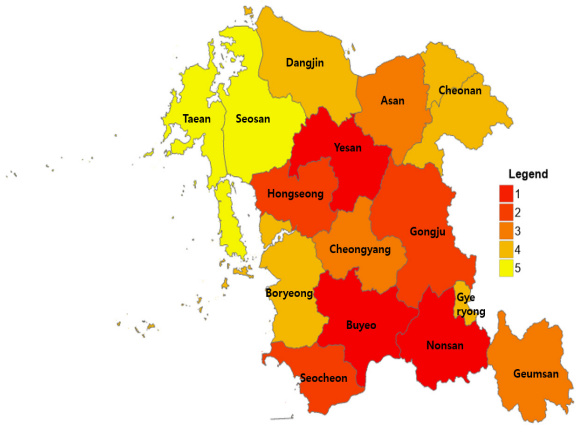

Fig. 12. Convert VESTAP result to Quantile in Chungcheongnam-do

3.4.3. 서울특별시

VESTAP의 상대적 취약성 평가 결과를 분위수 분할(Quantile)을 이용해 5등급으로 전환한 결과 송파구, 중랑구, 동대문구, 강동구, 광진구 총 5개 지자체가 상대적으로 취약성이 가장 높게(1등급) 도출되었고, 용산구, 금천구, 관악구, 서대문구, 종로구 총 5개 지자체가 상대적으로 취약성이 가장 낮게(5등급) 계산되었다. 서초구, 강남구, 성동구, 강서구 4개 지자체는 2등급, 영등포구, 양천구, 강북구, 노원구, 구로구, 은평구 6개 지자체는 3등급, 중구, 마포구, 도봉구, 동작구, 성북구 5개 지자체는 4등급으로 나타났다(Fig. 13, Table 7).

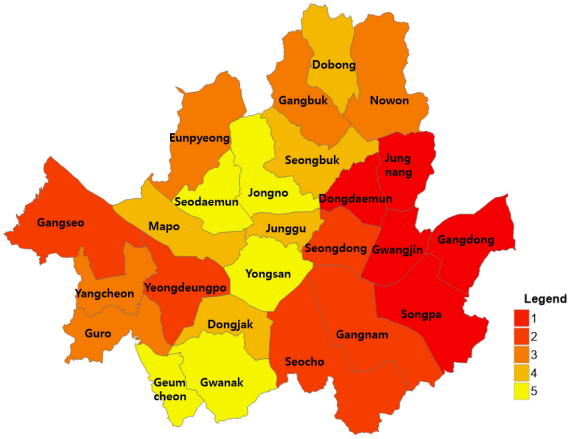

Fig. 13. Convert VESTAP result to Quantile in Seoul

3.5. 취약성 평가 결과와 세 가지 방법을 이용한 등급화한 결과 종합

VESTAP의 상대적 취약성 평가 결과를 세 가지 방법으로 등급화한 결과를 종합한 내용은 다음과 같다(Table 7). 경상남도는 등급화 방법에 따라 등급별 지자체 개수가 다소 차이를 보였는데, 특히 4등급에서 가장 큰 차이를 나타냈다. 세 가지 방법에서 동일한 등급을 받은 기초지자체는 1등급이 3개, 2등급이 3개, 3등급이 2개, 4등급이 1개, 5등급이 1개로 나타났다.

충청남도의 경우, 세 가지 방법에서 동일한 등급을 받은 기초지자체는 1등급이 3개, 2등급이 2개, 3등급이 1개, 4등급이 3개, 5등급이 2개로 나타났다. 세 지자체 중 충청남도가 등급화 방법별로 가장 작은 차이를 보였다.

서울특별시의 경우 세 가지 방법에서 동일한 등급을 받은 기초지자체는 1등급이 5개, 2등급이 1개, 3 ~ 5등급은 없었다. 세 광역지자체 중 서울특별시가 등급화 방법별로 가장 큰 차이를 보였다.

등급화 방법 중 분위수 분할(Quantile)은 전체 지역을 5개 등분으로 나누는 것을 목적으로 하지만, 세 지자체 모두 동일한 개수로 등급이 구분되지 않았다. 이는 등급화로 전환 시 동일한 점수를 가진 지자체를 하나의 등급에 포함해야 하므로 지자체별 개수가 불균등해진 것으로 해석할 수 있다(Longley et al., 2015).

3.6. VESTAP 취약성 평가 결과와 취약성 등급 간 상관관계 분석

3.6.1. 취약성 평가 결과와 등간격 방법을 이용한 취약성 등급 상관관계 분석

경상남도, 충청남도, 서울특별시의 취약성 종합지수를 등간격으로 등급화하여 기후노출, 민감도 및 적응능력 지수와 상관관계를 분석한 결과는 다음과 같다(Table 8). 세 지자체 모두 기후노출, 민감도 지수에서 음의 상관관계가 도출되었는데, 이는 취약성 등급이 높아질수록(5 → 1등급), 기후노출, 민감도 지수의 값이 커지는 것을 의미한다. 기후노출 지수와 취약성 등급의 상관성은 p-value가 0.001 이하로 1% 수준에서 유의한 것으로 나타났다. 다만, 민감도 지수와 취약성 등급은 경상남도에서는 0.021로 10% 수준에서 유의한 것으로 나타났고, 충청남도와 서울특별시는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 충청남도와 서울특별시의 경우 적응능력 지수와 양의 상관관계

Table 7. Total result of Health vulnerability assessment by heat waves

Index	Administrative District	Vulnerability result	Equal-interval	Natural Breaks (Jenks)	Quantile
Gyeongsangnam-do	Changnyeong-gun	0.60	1	1	1
	Haman-gun	0.58	1	1	1
	Miryang-si	0.54	1	1	1
	Hadong-gun	0.50	1	2	1
	Hapcheon-gun	0.48	2	2	2
	Uiryeong-gun	0.48	2	2	2
	Jinju-si	0.44	2	2	2
	Goseong-gun	0.39	2	3	2
	Sancheong-gun	0.38	2	3	2
	Sacheon-si	0.38	2	3	2
	Gimhae-si	0.37	3	3	3
	Namhae-gun	0.33	3	3	3
	Hamyang-gun	0.30	3	4	3
	Tongyeong-si	0.25	4	4	3
	Yangsan-si	0.25	4	4	3
	Changwon-si	0.24	4	4	4
	Geochang-gun	0.17	4	4	5
	Geoje-si	0.04	5	5	5
Chungcheongnam-do	Nonsan-si	0.67	1	1	1
	Buyeo-gun	0.60	1	1	1
	Yesan-gun	0.57	1	1	1
	Gongju-si	0.56	1	1	2
	Seocheon-gun	0.47	2	2	2
	Hongseong-gun	0.46	2	2	2
	Asan-si	0.45	2	2	3
	Cheongyang-gun	0.44	3	2	3
	Geumsan-gun	0.42	3	3	3
	Cheonan-si	0.40	3	3	4
	Gyeryong-si	0.32	4	4	4
	Dangjin-si	0.31	4	4	4
	Boryeong-si	0.28	4	4	4
	Seosan-si	0.16	5	5	5
	Taean-gun	0.10	5	5	5
Seoul	Songpa-gu	0.57	1	1	1
	Jungnang-gu	0.56	1	1	1
	Dongdaemun-gu	0.56	1	1	1
	Gangdong-gu	0.54	1	1	1
	Gwangjin-gu	0.52	1	1	1
	Seocho-gu	0.51	1	1	2
	Gangnam-gu	0.50	1	1	2
	Seongdong-gu	0.49	1	1	2
	Gangseo-gu	0.45	2	2	2

Index	Administrative District	Vulnerability result	Equal-interval	Natural Breaks (Jenks)	Quantile
Seoul	Yeongdeungpo-gu	0.43	2	2	3
	Yangcheon-gu	0.42	2	2	3
	Gangbuk-gu	0.40	2	2	3
	Nowon-gu	0.39	2	2	3
	Guro-gu	0.37	2	3	3
	Eunpyeong-gu	0.36	2	3	3
	Jung-gu	0.35	2	3	4
	Mapo-gu	0.35	2	3	4
	Dobong-gu	0.32	3	3	4
	Dongjak-gu	0.31	3	3	4
	Seongbuk-gu	0.28	3	4	4
	Yongsan-gu	0.27	3	4	5
	Geumcheon-gu	0.21	4	4	5
	Gwanak-gu	0.18	4	4	5
	Seodaemun-gu	0.07	5	5	5
	Jongno-gu	0.01	5	5	5

Table 8. Correlation analysis results between vulnerability factors and the equal-interval

Area	Factor	Spearman's rho	p-value
Gyeongsang nam-do	Climate exposure	-0.791	<.001***
	Sensitivity	-0.539	0.021*
	Adaptive capacity	-0.359	0.144
Chungcheong nam-do	Climate exposure	-0.093	<.001***
	Sensitivity	-0.408	0.132
	Adaptive capacity	0.094	0.740
Seoul	Climate exposure	-0.950	<.001***
	Sensitivity	-0.060	0.777
	Adaptive capacity	0.367	0.071

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

가 도출되었다. 이는 취약성 등급이 낮아질수록(1 → 5등급), 적응능력 지수의 값이 커지는 것을 의미한다. 하지만, 경상남도는 반대의 결과를 보였다. 세 지자체 모두 적응능력 지수와 등급의 상관관계가 p-value 0.05 이상으로 통계적 유의성이 나타나지 않았다.

3.6.2. 취약성 평가 결과와 Natural Breaks (Jenks) 방법을 이용한 취약성 등급 상관관계 분석

경상남도, 충청남도, 서울특별시의 취약성 종합지수를 Natural Breaks (Jenks) 방법으로 등급화하여 기후노출, 민감도 및 적응능력 지수와의 상관관계 분석한 결과는 다음과 같다(Table 9). 세 지자체에서 동일하게 기후노출 지수와 음의 상관성이 도출되었는데, 이는 취약성 등급이 낮아질수록(1 → 5등급), 적응능력 지수의 값이 커지는 것을 의미한다. 또한, p-value가 모두 0.001 미만으로 통계적 유의성이 도출되었다. 민감도 지수는 경상남도와 충청남도에서 음의 상관성이, 서울특별시에서 양의 상관성이 도출되었다. 경상남도와 충청남도에서는 취약성 등급이 높아질수록(5 → 1등급) 민감도 지수의 값이 커지는 것으로 나타났으나, 서울시는 반대의 결과를 보였다. 적응능력 지수의 경우, 경상남도와 충청남도는 음의 상관관계를 보이고 서울특별시는 양의 상관관계를 보였다. 서울특별시는 취약성 등급이 낮아질수록(1 → 5등급) 적응능력 지수의 값이 커지는 경향을 보였으나, 경상남도와 충청남도는 반대의 경향을 보였다. 세 지자체 모두 민감도 지수, 적응능력 지수와 등급의 상관관계가 p-value 0.05 이상으로 통계적 유의성은 나타나지 않았다.

3.6.3. 취약성 평가 결과와 분위수 분할(Quantile) 방법을 이용한 취약성 등급 상관관계 분석

경상남도, 충청남도, 서울특별시 세 지자체의 VESTAP 취약성 종합지수를 분위수 분할(Quantile)로 등급화하여 기후노출, 민감도, 적응능력 지수와 상관관계를 분석한 결과를 다음과 같다(Table 10). 세 지자체 모두 기후노출과 민감도 지수와는 음의 상관성을 보였다. 즉, 취약성 등급이 높아질수록(5 → 1등급) 기후노출 및 민감도 지수의 값

Table 9. Correlation analysis results between vulnerability factors and the Natural Breaks (Jenks) system

Area	Factor	Spearman's rho	p-value
Gyeongsang nam-do	Climate exposure	-0.924	<.001***
	Sensitivity	-0.430	0.075
	Adaptive capacity	-0.289	0.245
Chungcheong nam-do	Climate exposure	-0.916	<.001***
	Sensitivity	-0.457	0.086
	Adaptive capacity	-0.059	0.836
Seoul	Climate exposure	-0.937	<.001***
	Sensitivity	0.025	0.907
	Adaptive capacity	0.342	0.094

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

Table 10. Correlation analysis results between vulnerability factors and the Quantile system

Area	Factor	Spearman's rho	p-value
Gyeongsang nam-do	Climate exposure	-0.827	<.001***
	Sensitivity	-0.433	0.073
	Adaptive capacity	-0.254	0.308
Chungcheong nam-do	Climate exposure	-0.835	<.001***
	Sensitivity	-0.557	0.031*
	Adaptive capacity	-0.009	0.975
Seoul	Climate exposure	-0.881	<.001***
	Sensitivity	-0.037	0.861
	Adaptive capacity	0.337	0.100

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

이 커지는 경향을 보였다. 세 지자체 모두 기후노출 지수는 p-value가 0.001 미만으로 통계적 유의성을 보였다. 그러나 민감도 지수는 충청남도만 0.031로 10% 수준의 유의성을 보였다. 적응능력 지수는 경상남도와 충청남도는 음의 상관성을 보였고, 서울특별시에서는 양의 상관성을 보였다. 즉, 취약성 등급이 높아질수록(5 → 1등급) 서울특별시는 적응능력 지수의 영향이 커지는 경향을 보였지만, 경상남도와 충청남도는 반대의 경향을 보였다. 세 지자체 모두 적응능력 지수와 등급의 상관성에 통계적 유의성이 나타나지 않았다.

3.6.4. VESTAP의 취약성 평가 결과와 취약성 등급 간 상관관계 분석 종합

세 가지 방법을 활용해 경상남도, 충청남도, 서울특별시를 대상으로 취약성 평가 결과를 등급화했을 때 등간격으로 등급화하는 방법이 VESTAP의 취약성 평가 순위를 가장 효과적으로 반영하는 것으로 나타났다. 기후노출 및 민감도 지수의 값이 커질수록 취약성 등급이 높게(5 → 1등급) 나타났으며(음의 상관관계), 적응능력 지수의 값이 커질수록 취약성 등급(1 → 5등급)은 낮게 도출되었다(양의 상관관계). 즉, 기후노출과 민감도 지수가 커질수록 취약성이 커져 취약성 등급이 높아지고, 적응능력 지수가 커질수록 취약성이 작아져 취약성 등급이 낮아지는 것으로 나타났다. 다만, 기후노출 지수는 등급과 통계적으로 유의한 것으로 나타났으나 민감도 지수는 충청남도에서만 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 또한, 적응능력 지수는 세 개의 지자체 모두 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

Natural Breaks (Jenks)과 분위수 분할(Quantile) 방법을 활용해 등급화한 결과도 기후노출 지수는 값이 커질수록 취약성 등급이 낮아지는 것으로 나타났고, 통계적으로도 유의하였다. 다만, 민감도 지수와 적응능력 지수는 등급과 각 지수값의 증감 방향이 일정하지 않았고, 통계적인 유의성도 나타나지 않았다. 종합하면, 세 개의 등급화 방법에서 기후노출 지수가 커질수록 취약성 등급이 높아졌고 통계적으로도 유의하였다. 반면, 민감도 지수와 적응능력 지수는 등급과 각 지수의 상관관계가 유의하지 않는 것으로 나타났다. 그 이유에 대해서는 크게 세 가지로 정리할 수 있다. 첫 번째 수도권과 비수도권 사이에 인구밀도, 재정자립도 등 사회경제 요인 간 차이가 크다 보니 등급화의 일관성을 떨어뜨리고, 타당성이 부족해 상관관계에 영향을 미쳤을 수 있다고 해석할 수 있다(Deziel et al., 2023). 두 번째 민감도와 적응능력의 가중치가 상대적으로 낮고 절대적으로 지표의 수가 많아져 통계적으로 지표 변동성이 낮아져 최종 등급에 영향을 줄 수 없게 된다고 분석할 수 있다(Park et al., 2017). 마지막 세 번째, 시군구 단위의 통계자료가 부재하여 시도 단위의 통계자료를 활용하다 보니 지역별 자치구에서 동일한 지표값이 적용되어 변수의 값이 차이가 없어 상관관계의 통계적 유의성이 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구는 VESTAP의 상대적 취약성 평가 결과를 세

가지 방법을 활용하여 5등급 체계로 등급화하고, VESTAP 평가 결과와 등급화 결과를 상관분석해 지자체 적응대책 수립 시 가장 효과적으로 활용할 수 있는 등급화 방법을 도출하는 것을 목적으로 하였다.

취약성 평가 결과를 등급화하기 위하여 세 가지의 방법을 활용하였다. 첫 번째 등간격 방법을 활용하였고, 두 번째, Natural Breaks (Jenks) 방법을 활용하였다. 마지막으로 분위수 분할(Quantile)을 활용해 전환하였다. 취약성 평가 결과를 등급화한 결과, 등급화 방법에 따라 기초지자체의 등급이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 취약성 평가 등급과 VESTAP의 취약성 평가 결과의 상관관계를 분석한 결과, 등간격으로 등급화하는 방법이 VESTAP의 취약성 평가 결과를 가장 잘 설명하는 것으로 나타났다. 취약성 등급이 높아져 취약성이 커질수록 기후노출 지수, 민감도 지수는 커지고 적응능력 지수는 작아지는 경향을 보였다. 또한, 기후노출 지수 및 경상남도의 민감도 지수는 통계적으로도 유의하였다. 등간격으로 등급화한 결과는 점수 범위를 동일하게 나누기 때문에 각 등급이 가진 의미를 직관적으로 이해하기 쉽고, 등급과 점수 간의 일관된 선형 관계를 유지하므로 지자체에서 활용하기에 유용하다(Balio et al., 2025; Park, 2023b). 그러므로 지자체에서 적응대책 수립 시 상대적인 평가 결과 해석 및 활용 등에 한계점을 충분히 보완할 수 있는 수단으로 활용이 가능할 것으로 생각된다(Kim et al., 2014; OECD, 2008).

이번 연구에서는 폭염에 의한 온열질환자 발생 환자 수가 많았던 3개의 지자체를 대상으로 연구를 진행하였지만, 후속 연구에서는 전국 17개 시도 혹은 226개 시군구를 대상으로 연구를 진행하여 5등급 체계로 취약성 평가 전환 시 통계적으로 유의한 결과를 도출하는지 추가 연구가 필요하다. 또한, 폭염 외 한파, 가뭄, 홍수 등 다양한 기후 요인을 적용해 어떤 방법이 통계적으로 유의한지에 대해서는 연구의 확장이 필요하다. Natural Breaks (Jenks) 등급화 방법과 분위수 분할(Quantile) 등급화 방법은 취약성 등급이 높아져 취약성이 커질수록 기후노출, 민감도가 커지고 적응능력 지수가 작아지는 경향이 대부분 나타나지 않았고, 민감도 및 적응능력 지수와의 상관성이 통계적으로 유의하지 않았다. 그러나 같은 등급 내 지자체의 취약성을 가장 유사하게 구분하여 정책을 수립해야 하거나, 등급별로 균등한 개수로 지자체를 구분하여 예산 집행이 필요한 경우 등에는 각각의 방법을 적용하는 게 유용할 수 있으므로, 각 경우에 적합한 등급화 방법을 적용하는 것이 필요하다. 또한, 상관관계 분석 결과 민감도와 적응능력 지수는 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타난 만큼, 지자체별 지수의 변별력을 높일 수 있도록 취약성 평가 지표 개선에 대한 검토가 필요하다. 마지막으로, VESTAP 평가 결과와 취약성 등급 간 상관성을 파악하기 위해 스피어만 상관계수를 활용해 상관분석을 진행하였는데, 향후 회귀분석, 분산분석, 카이제곱 분석 등 다양한 통계 방법을 활용해 추후 상관성 분석의 확대 검토가 필요할 것으로 생각된다.

사사

본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2025-05-02-021).

Reference

Baek JW, Kim JY, Roh SA, Park C, Kim SR, Kim JU, Jin HA, Oh YY, Seo DH, Yoo MS. 2024. A study on the linkage and integrated application of impact and vulnerability assessment tools (MOTIVE, VESTAP) to support the formulation of regional adaptation measures for climate crisis: Focusing on health sector (in Korean with Englsih abstract). J Clim Change Res 15(5-2): 831-843. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.5.831

Balica S, Wright NG. 2010. Reducing the complexity of the flood vulnerability index. Environ Hazards 9(4): 321-339. doi: 10.3763/ehaz.2010.0043

Balio CP, Sullivan OA, Petty EG, Pelton B, Dockery N, Beatty KE. 2025. An assessment of area-level vulnerability and resilience indices by geography: A rural-urban comparison. J Rural Health 41(3): e70059. doi: 10.1111/jrh.70059

Brooks N, Adger WN, Kelly PM. 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. Global Environ Change 15(2): 151-163. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2004.12.006

Chae YR, Lee SJ, Jeon HC, Ahn YJ, Lee JH, Choi SH. 2017. Evidence-based climate change risk management

framework for customized adaptation. Sejong, Korea: Korea Environment Institute (KEI).

Chon SU, Lee KD, Lee DH, Heo BG. 2014. Vulnerability evaluation of garlic productivity against climate change using CCGIS program at 232 cities and counties in Korea (in Korean with Englsih abstract). J Korean Soc People Plants Environ 17(3): 219-227. doi: 10.11628/ksppe.2014.17.3.219

Cutter SL, Ash. KD, Emrich CT. 2014. The geographies of community disaster resilience. Global Environ Change 29: 65-77. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005

Cutter SL, Boruff BJ, Shirley WL. 2003. Social vulnerability to environmental hazards. Soc Sci Q 84(2): 242-261. doi: 10.1111/1540-6237.84020002

Deziel NC, Warren JL, Bravo MA, Macalintal F, Kimbro RT, Bell ML. 2023. Assessing community-level exposure to social vulnerability and isolation: spatial patterning and urban-rural differences. J Exposure Sci Environ Epidemiol 33: 198-206. doi: 10.1038/s41370-022-00435-8

Eum JH. 2016. Vulnerability assessment to urban thermal environmental for spatial planning -A case study on Seoul, Korea- (in Korean with Englsih abstract). J Korean Inst Landscape Archit 44(4): 109-120. doi: 10.9715/KILA.2016.44.4.109

Eum JI, Kim HK. 2024. Assessment of flood vulnerability of semi-basement households in Seoul (in Korean with Englsih abstract). J Clim Change Res 15(1): 35-46. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.1.035

Füssel HM, Klein RJ. 2006. Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking. Clim Change 75(3): 301-329. doi: 10.1007/s10584-006-0329-3

GIZ (Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit). 2017. The vulnerability sourcebook - Concept and guidelines for standardize vulnerability assessments. Frankfurt, Germany.

Idukunda C, Michellier C, Longueville FD, Twarabamenye E, Henry S. 2025. Assessing community vulnerability to landslide and flood in northwestern Rwanda. Int J Disaster Risk Reduct 123: 105329. doi: 10.1016/j.ijdrr.2025.105329

IPCC. 2023. Climate change 2023: Synthesis Report.

Jang KE, Sohn DW, Park CR, Lee JH. 2023. Measures to strengthen disaster management through climate change comprehensive vulnerability analysis -Focused on Seoul- (in Korean with Englsih abstract). J Korea Inst Ecol Archit Environ 23(3): 39-50. doi: 10.12813/kieae.2023.23.3.039

Jenks GF. 1967. The data model concept in statistical mapping. Int Yearb Cartogr 7: 186-190.

Kang SW, Kim JJ, Jeon SM, Han JH, Kim YM. 2024. Locations of cooling centers according to spatial patterns of heatwave vulnerability and elderly inhabitants of administrative districts in Seoul (in Korean with Englsih abstract). J Climate Change Res 15(6): 1001-1022. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.6.1001

KDCA (Korea Disease Control and prevention Agency). 2025. Annual report on heat disease reporting status due to heat wave in 2024. Sejong, Korea.

Kim CC, Kim TG. 2016. Evaluation on climate change vulnerability of Korea national parks (in Korean with Englsih abstract). Korean J Ecol Environ 49(1): 42-50. doi: 10.11614/KSL.2016.49.1.042

Kim CH, Song CK, Hong YD, Yu JA, Ryu SH, Yim GY. 2012. Development and application of CCGIS for the estimation of vulnerability index over Korea. J Clim Change Res 3(1): 13-24.

Kim JS, Kang MG. 2022. A study on micro-scale heat wave vulnerability assessment using urban data sensos (S-DoT) in Seoul (in Korean with Englsih abstract). J Korea Plann Assoc 57(5): 215-234. doi: 10.17208/jkpa.2022.10.57.5.215

Kim JS, Kim HY, Lee SH. 2014. A review on improvements of climate change vulnerability analysis methods: Focusing on sea level rise disasters (in Korean with Englsih abstract). J Korean Assoc Geogr Inf Stud 17(1): 50-60. doi: 10.11108/kagis.2014.17.1.050

Kim JY, Lee DG, Park IS, Choi BC, Kim JS. 2006.

Influences of heat waves on daily mortality in South Korea. Atmosphere 16(4): 269-278.

Kim SH, Lee DK. 2024. Prediction of the future summertime deaths based on climate change scenario (in Korean with Englsih abstract). J Korean Insur Acad Soc 137(24-1): 91-112.

Koh JK, Kim HS. 2010. A study on local vulnerability assessment to climate change: The case of municipalities of Gyeonggi-Do (in Korean with Englsih abstract). J Environ Policy Administration 18(2): 79-105.

Lee GM, Choi JW, Jun KS. 2020. A study on urban flood vulnerability assessment considering social impact (in Korean with Englsih abstract). Land Hous Rev J 11(1): 109-116. doi: 10.5804/LHIJ.2020.11.1.109

Lee JS, Choi HI. 2018. Comparison of flood vulnerability assessment outcomes by classification schemes for vulerability components to climate change (in Korean with Englsih abstract). J Korean Soc Hazard Mitigation 18(3): 221-229. doi: 10.9798/KOSHAM.2018.18.3.221

Lee SH, Kang JE. 2018. Urban flood vulnerability and risk assessments for applying to urban planning (in Korean with Englsih abstract). J Korea Plann Assoc 53(5): 185-206. doi: 10.17208/jkpa.2018.10.53.5.185

Lee SH, Kang JE, Bae HJ, Yoon DK. 2015. Vulnerability assessment of the air pollution using entropy weights: Focused on Ozone. J Korean Assoc Reg Geogr 21(4): 751-763.

Lim WS, Lee JM, Hwang NH, Hwang JH, Lee JE, Shin YK. 2023. Climate crisis inequality and social security: Focusing on conceptual approach and case studies. Sejong. Korea: KIHASA.

Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW. 2015. Geographic information science and systems. John Wiley & Sons.

ME (Ministry of Environment). 2024 Dec 23. Holding a national forum to prepare measures to adapt to the era of climate crisis [Press release].

Ministry Concerned. 2025. Abnormal climate report 2024. Sejong, Korea.

MOLEG (Ministry of Government Legislation). 2022. Framework act on carbon neutrality and green growth for coping with climate crisis.

Moss RH, Brenkert AL, Malone EL. 2001. Vulnerability to climate change. A quantitative approach. Washington DC: Pacific Nortwest National Laboratory. Report No. PNNL-SA-33642.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). 2008. Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide. Paris, France.

Oh KY, Lee MJ, Han DE. 2016. Development of web-based supporting tool (VESTAP) for climate change vulnerability assessment in lower and municipal-level local government (in Korean with Englsih abstract). J Korean Assoc Geogr Inf Stud 19(1): 1-11. doi: 10.11108/kagis.2016.19.1.001

Oh KY, Lee MJ, Jeon SW. 2017. Development of the korean climate change vulnerability assessment tool (VESTAP) - Centered on health vulnerability to heat waves. Sustainability 9(7): 1103. doi: 10.3390/su9071103

Park C. 2023a. Advancement of the assessment model of climate change impact and vulnerability (I). National Institute of Environmental Research (NIER).

Park DS, Park BY, Jung EH. 2017. Guidlines for the VESTAP-based climate change vulnerability assessment (in Korean with Englsih abstract). J Clim Change Res 8(4): 339-346. doi: 10.15531/KSCCR.2017.8.4.339

Park JH. 2023b. Assessment of local adaptaion plan addressing climate risk (in Korean with Englsih abstract). J Clim Change Research 14(6-1): 849-857. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.849

Park JR, Im JH, Sim OB, Seo HD, Jeong SM. 2021. Analysis of integrated assessment and characteristics of coastal agricultural regions (in Korean with Englsih abstract). J Clim Change Res 12(6): 721-737. doi: 10.15531/KSCCR.2021.12.6.721

Tellman B, Schank C, Schwarz B, Howe PD, Sherbinin

A. 2020. Using disaster outcomes to validate components of social vulnerability to floods: Flood deaths and property damage across the USA. Sustainability 12(15): 6006. doi: 10.3390/su12156006

WMO. 2023. Guidelines on the definition and characterization of extreme weather and climate events.

WMO. 2025 Mar 19. WMO report documents spiralling weather and climate impacts [Press release].

Yoon SH, Lee SS. 2017. Development of climate change vulnerability assessment analysis tool: Based on the vulnerability assessment of forest fires in Chungcheongnam-do (in Korean with Englsih abstract). J Clim Change Res 8(3): 275-285. doi: 10.15531/KSCCR.2017.8.3.275

Yu IS, Kim HG, Park JT, Jung HC. 2025. High-resolution flood risk assessment using Shared Socioeconomic Pathway (SSP) climate change scenarios (in Korean with Englsih abstract). J Clim Change Res 16(1): 25-42. doi: 10.15531/KSCCR.2025.16.1.025

Yun SG, Choi BS, Jeon EC. 2013. A study on vulnerability assessment to climate change in Siheung-si. J Clim Change Res 4(1): 1-10.