

IPCC 기후변화 취약성 평가 체계를 적용한 부산지역 폭염 취약성 평가*

Assessment of Heat Wave Vulnerability in Busan Using the IPCC Climate Change Vulnerability Assessment Framework

김기욱 Kim Keewook**, 박봉철 Park Bong-Chur***, 허종배 Heo Jongbae****,
강지윤 Kang Ji Yoon***** , 이인재 Lee Injae*****

Abstract

This study performed heat wave vulnerability assessment in Busan using the IPCC Climate Change Vulnerability Assessment Framework which can be used as a baseline data for establishing effective countermeasures that mitigate the damage of the heat wave. This includes selection of the factors, estimation of the weights for the factors, aggregation of the factors to exposure, sensitivity, adaptive capacity, and finally to the vulnerability to heat wave. The assessment also considers the climate change scenarios, RCP(Representative Concentration Pathway)4.5 and RCP8.5, to project the impact of climate change on heat wave by the years 2050 and 2100. The results show high spatial variability on the vulnerability in Busan and application of the climate change scenario raises the average vulnerability by 65% in maximum. To mitigate the damage, locally customized countermeasures, prepared by analyzing the factors for the assessment, and various short- and long-term plans, tied to the urban planning, are required.

Keywords: Heat Wave Vulnerability Assessment, Climate Change Scenario, Locally Customized, Effective Countermeasures

I. 서론

최근 가속화되고 있는 기후변화에 따라 전 세계적으로 폭염피해가 증가하는 추세이다. 1995년 7월 시카고 폭염에 의해 692명(Kaiser, Tertre, Schwarts and Gorway et al. 2007, S158), 2003년 유럽 폭염에 의해

70,000명 이상(Robine, Cheung, Roy and Oyen et al. 2008, 171)의 초과사망자가 발생하는 등 폭염에 의한 피해가 전 세계적으로 확산되고 있으며, 일본에서는 기온이 38℃가 넘는 경우, 폭염일이 증가함에 따라 사망자 수가 기하급수적으로 상승한다고 보고하였다(Morimoto, Nakai and Itoh 2001, 107).

* 본 논문은 부산연구원 정책연구 '부산시 폭염발생 현황 및 대응방안'의 일부를 수정·보완한 것임

** 부산연구원 연구위원(제1저자, 교신저자) | Research Fellow, Busan Development Institute | Primary Author, Corresponding Author | kkim@bdi.re.kr

*** 부산연구원 연구위원 | Research Fellow, Busan Development Institute | bongchur77@bdi.re.kr

**** 부산연구원 연구위원 | Research Fellow, Busan Development Institute | jbheo@bdi.re.kr

***** 부산연구원 연구원, 인제대학교 환경공학과 박사수료 | Assistant Researcher, Busan Development Institute and Doctoral Candidate, School of Environmental Engineering, Inje Univ. | jykang@bdi.re.kr

***** 인천연구원 선임연구위원 | Senior Research Fellow, The Incheon Institute | ijlee@idi.re.kr

우리나라의 경우에도 폭염에 의한 온열질환자가 크게 증가하고 있는 추세이다. 2011년 온열질환 감시 체계 운영 이후, 전국 및 부산지역의 폭염일수 및 온열질환자가 증가하여, 2018년에는 전국에서 발생한 온열질환자가 평년 대비 약 400%로 급증하였으며, 부산지역에서도 208명의 온열질환자가 발생하여 이 중 2명이 사망하였다(부산광역시 2019, 9). 이에 폭염피해 저감을 위한 대응방안의 필요성이 대두되고 있다.

효과적인 폭염 대응방안의 마련을 위해서는 지역의 기후, 지형, 피해, 취약계층 등의 공간적 분포를 고려한 지역별 폭염 취약성에 대한 검토가 선행될 필요가 있다. 특히 기후변화가 가속화되고 있는 현재의 상황에서 기후변화를 고려한 폭염 취약성 평가를 통해 미래지향적인 폭염대책을 마련할 필요가 있다. 본 연구에서는 부산지역에 대한 폭염 취약성 평가를 통해 부산시 폭염 대응방안의 수립을 위한 기초자료 및 근거를 마련하고자 한다. 또한 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 폭염 취약성의 변화를 검토해보고자 하였다.

II. 연구방법

본 연구에서는 부산 내 지역별 폭염에 대한 취약성을 살펴보고 이에 대한 맞춤형 대응방안 제시를 위한 기초자료를 마련하고자 하며, 이를 위해 부산시 각 행정동을 대상으로 폭염 취약성 평가를 수행하였다. 평가의 시점은 2019년으로 설정하였으며, 자료의 가용 여부에 따라 2018년 및 2019년의 자료를 이용하였다.

1. 기후변화 취약성 평가

IPCC(2001, 6)는 기후변화 취약성을 ‘시스템이 기후

변동성, 극치사상(Extreme Events) 등을 포함하는 기후변화의 부정적인 영향에 민감한 혹은 대처하지 못하는 정도로 정의하고 있다. 기후변화 취약성은 시스템이 노출되는 기후변동성의 특성·규모·비율, 시스템의 민감도 및 적응능력의 함수로 정의된다(IPCC 2001, 21).

- Exposure(노출): 시스템이 유의한 기후 변동성에 노출되는 정도
- Sensitivity(민감도): 시스템이 기후와 관련된 자극에 직·간접적으로 부정적·긍정적 영향을 받는 정도
- Adaptation Capacity(적응능력): 시스템이 기후변화의 잠재적 피해를 완화시키고 기회를 이용하여 결과에 대처하기 위해 조절하는 능력

IPCC에서 제시하는 기후변화 취약성 평가를 위한 체계(Framework)는 <Figure 1>과 같다. 취약성은 <식 1>에 의해 얻어질 수 있다. 본 연구에서는 <Figure 1>의 체계를 적용하여 부산지역 폭염 취약성 평가를 수행하였다.

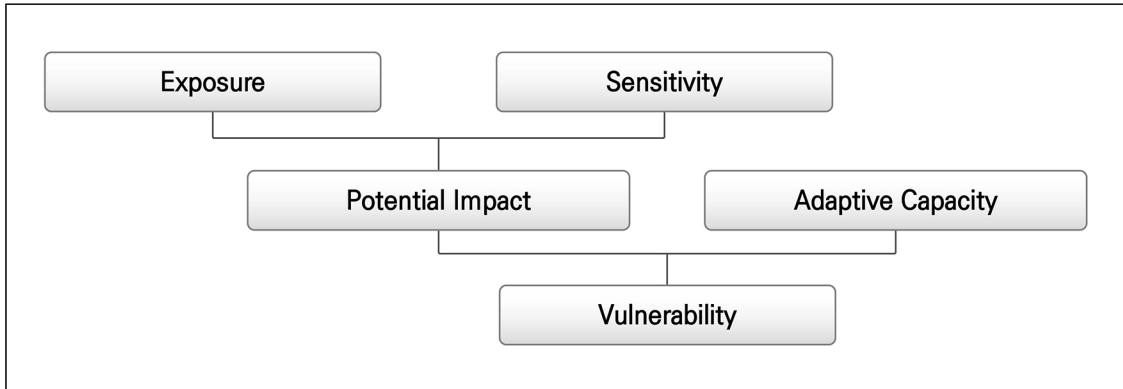
2. 기후변화 시나리오

본 연구에서는 부산지역의 기후변화를 고려하기 위해 IPCC 5차 평가보고서(IPCC 2014a)의 RCP(Representative Concentration Pathway) 시나리오에 기초하여 얻어진 평균기온 상승 전망(기상청 2015, 19)을 적용하였다. RCP 시나리오는 네 가지 종류(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)가 있으며, 본 연구에서는 이 중, RCP(4.5)와 RCP(8.5)를 적용하였다.

1) 적극적인 저감 정책을 수행하였을 경우(1750년 대비 2100년의 총 복사력 근사치 4.5W/m²; IPCC 2014b, 8).

2) 온실가스 배출 수준을 현재 추세대로 유지하였을 경우(1750년 대비 2100년의 총 복사력 근사치 8.5W/m²; IPCC 2014b, 8).

Figure 1_ Framework for the Climate Change Vulnerability Assessment Adopted by the IPCC



Source: Johnson and Welch 2010, 107.

$$Vulnerability = \alpha \cdot Exposure + \beta \cdot Sensitivity - \gamma \cdot Adaptive\ Capacity$$

α, β, γ : weights

<식 1>

3. 폭염 취약성 평가

본 연구에서는 다음 과정을 통해 기후변화를 고려한 부산시 각 행정동에 대한 폭염 취약성 평가를 수행하였다.

- 폭염에 대한 기후노출, 민감도, 적응능력 평가를 위한 인자(대리변수) 선정
- 인자들의 단계별 통합을 위한 가중치 산정
- 인자들의 통합을 통한 폭염에 대한 기후노출, 민감도, 적응능력 산정
- 기후노출, 민감도의 통합을 통한 폭염의 영향(Potential Impact) 산정
- 영향, 적응능력 통합을 통한 부산지역 폭염 취약성(Vulnerability) 지도 작성
- 기후변화 시나리오를 적용한 향후 폭염 취약성 변화 분석

III. 기후변화를 고려한 부산지역 폭염 취약성 평가

1. 평가를 위한 인자 선정

폭염 취약성 평가와 같이 인자들을 각각 평가하고, 그 결과의 통합을 통해 취약성을 도출하는 평가방식은 평가에 고려된 인자에 따라 상이한 결과가 나타날 수 있다. 따라서 평가의 성격 및 목적, 공간적 해상도, 자료의 가용성 등 다양한 요소를 고려하여 적절한 인자들을 선정하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 인자의 선정을 위해 기존 연구 및 자료의 가용성을 고려하였다. 특히 본 평가를 위한 분석의 공간적 단위가 일반적으로 많이 수행되고 있는 취약성 평가의 공간적 해상도인 시·군·구 단위가 아닌 행정동 단위임을 고려하여 인자를 선정하고자 하였다.

기후노출, 민감도, 적응능력을 고려하여 폭염 취약성 평가를 수행한 기존의 연구에서 고려된 다양한 인자들은 <Table 1>과 같다. 신호성, 이수형(2014)은

Table 1_ Factors for the Heat Wave Vulnerability Assessment in Previous Studies

Variables	Factors	Source
Exposure	Tropical Night Days; Daily Maximum Temperature	Shin and Lee(2014)
	Heat Wave Days; Tropical Night Days; Daily Maximum Temperature	Koo, Kim, Kim and Lee(2015)
	Heat Wave Days; Tropical Night Days; Feeling Temperature; Discomfort Index; Heat Index; Relative Humidity	Ministry of Environment(2019)
Sensitivity	Numbers of People with Cardiovascular Disease, with Heatstroke, and Live in Vulnerable Area; Ratios of Elderly People, Children, Basic Livelihood Security Recipients, Disabled, Foreigners, Cardiovascular Patients, and Outdoor Workers; Unemployment Rate; Voting Rate; Rate of Household below Minimum Livelihood Standard	Shin and Lee(2014)
	Number of Basic Livelihood Security Recipients and People with Heat-Related Illnesses; Thermal Inertia of Land Cover; Ratio of Elderly People Who Live Alone	Koo, Kim, Kim and Lee(2015)
	Ratios of Elderly People (Who Live Alone), Infants, Basic Livelihood Security Recipients, and Outdoor Workers; Total Population; Population Density	Ministry of Environment(2019)
Adaptive Capacity	Medical (Supporting) Personnel per 1,000 People; Jurisdictional Population per Personnel at Public Health Center; Public Health Care Budget per Person; Number of Emergency Medical Facilities; Areas of Green and Road; Number of Designated Heat Wave Shelters per 1,000 Elderly People; Proportion of Welfare Budget; Educational Investment per Student; Financial Independence Ratio	Shin and Lee(2014)
	Service Capacity of In-Home Elderly People Welfare Facility; Ratio of Medical Personnel; Proportion of Green Area	Koo, Kim, Kim and Lee(2015)
	Proportion of Urban Area, Green Area, and River and Water System Area; GRDP; Financial Independence Ratio; Ratio of Public Health Insurance Recipients; Medical Personnel at Public Health Center per 10,000 People; Number of Emergency Medical Facilities per 100,000 People; Personnels at Fire Stations per 1,000 People; Number of Designated Heat Wave Shelters	Ministry of Environment(2019)

기후변화에 의해 건강에 영향을 주는 매개체 감염병, 홍수, 폭염, 대기오염/알레르기에 대한 시·군·구 단위의 취약성 평가를 수행하였으며³⁾, 구유성, 김자은, 김지숙, 이성호(2015)는 부산시 읍·면·동에 대한 폭염 취약성 평가를 수행하였다. 최근 환경부(2019)는 전국 시·군·구 단위로 기후변화에 따른 폭염 위험도 평가를 수행하였다. 기존 연구에서 고려된 기후노출 인자들은 유사하게 나타나며, 폭염일수, 열대야일수, 최고기온 등과 같이 기온만을 고려한 인자들을 주로 적용한 것을 알 수 있다. 반면 환경부(2019)의 경우, 기온 이외에 습도와 같이 사람이 실제로 느끼는 온도에 영향을 주는 인자 혹은 이러한 인자들이 반영된 인자(체감온도, 불쾌지수, 열파지수 등)들을 고려하여 차이를 보이고

있다. 동일한 기온하에서 지역별·시간별 습도의 차이에 따라 실제로 느껴지는 온도의 차이가 적지 않다는 점을 고려할 때, 기온만이 고려된 인자들의 적용은 적절하지 않은 것으로 판단된다. 특히 김기욱, 허중배, 박봉철(2019, 42)은 부산지역에서 기온과 습도가 함께 고려된 열지수를 기준으로 하는 폭염의 발생이 온열질환자 발생과 높은 일치성을 보이며, 열지수가 기온과 유사한 예측 정확성을 가진다고 보고하였다.

민감도의 인자들은 연구에 따라 차이를 보이나, 주로 폭염에 취약한 계층(취약계층 등) 혹은 폭염에 취약할 수 있는 환경(인구밀도 등) 등이 고려되었다는 점이 유사하게 나타난다. 특히 취약계층 및 인명피해와 관련된 인자들의 가중치가 70~90% 이상으로 나타나 이를

3) 신호성, 이수형(2014)은 인자들을 여섯 개 계층으로 구분하여 각 계층에 대한 평가 및 통합을 통해 취약성 평가를 수행하였음. 따라서 각 계층에서 적용된 인자들을 본 연구에서 적용된 기후노출, 민감도, 적응능력으로 구분하여 정리하였음.

Table 2_ Factors for the Heat Wave Vulnerability Assessment in Busan and its Definitions

Variables	Factors	Definition	Data Period or Point of Time	Spatial Resolution	
Exposure	Heat Wave Days ^{*,1}	Number of Days with Daily Maximum Heat Index of 33°C or more	Jun. 1, 2018 ~ Sep. 30, 2018	Administrative district	
	Tropical Night Days ^{*,1}	Number of Days with Daily Minimum Heat Index of 25°C or more	Jun. 1, 2018 ~ Sep. 30, 2018	Administrative district	
	Annual Average of Daily Maximum Heat Index ^{*,1}	Average of Daily Maximum Heat Index between June and September	Jun. 1, 2018 ~ Sep. 30, 2018	Administrative district	
Sensitivity	Ratio of Socially Vulnerable Groups ^{**}	Ratio of Socially Vulnerable Groups ² to the Population. Average of the Ratios for Each Group	As of 2019	Administrative district	
	Ratio of Healthy Vulnerable Groups ^{**}	Ratio of Healthy Vulnerable Groups ³ to the Population. Average of the Ratios for Each Group	As of 2019	Administrative district	
	Number of People with Heat-Related Illnesses ^{**}	Number of People with Heat-Related Illnesses Reported to the Heat-Related Illnesses Monitoring System	Jun. 1, 2018 ~ Sep. 30, 2018	Borough ⁴	
	Ratio of Elderly People Who Live Alone ^{**}	Ratio of Elderly People (over 65 years old) Who Lives Alone to All	As of 2019	Administrative district	
Adaptive Capacity	Capacity of Designated Heat Wave Shelters	Density ^{**}	Number of Shelters within 1km ²	As of 2019	Administrative district
		Accommodation Capacity ^{**}	Ratio of Accommodation Capacity to All Elderly People	As of 2019	Administrative district
		Opening in Night or Holiday ^{**}	Ratio of the Shelters Which Open in Night or Holiday to All	As of 2019	Administrative district
		Support of Cooling Cost ^{**}	Ratio of the Shelters Which Receive Cooling Cost Support to All	As of 2019	Administrative district
	Density of Shade Canopies ^{**}	Number of Shade Canopy within 1km ²	As of 2019	Administrative district	
	Ratio of Disaster Helpers ^{**}	Ratio of Disaster Helpers to the Elderly People	As of 2019	Administrative district	
	Ratio of Parks and Green Area ^{***,5}	Ratio of Parks and Green Area to the Total Area	As of 2016	Administrative district	

Note: 1. Factors for each administrative district were estimated by interpolating observed hourly temperature and relative humidity at 31 air pollution monitoring stations operated by Institute of Health & Environment at Busan (22 stations), Ulsan (three stations), and Gyeongnam (six stations), then spatially averaging it for each district
 2. Socially Vulnerable Groups: basic livelihood security recipients, visiting health care service recipients, senior care service recipients
 3. Healthy Vulnerable Groups: disabled, infants younger than five years old, elderly people older than 65 years old
 4. The raw data is collected for each borough and identically applied to every administrative districts in each borough
 5. Estimated from ecological map (plane) as of Jan. 22, 2016.

Source: *Institute of Health & Environment (Busan, Ulsan, Gyeongnam); **Busan City Government Internal Data; ***National Spatial Data Infrastructure Portal Open Market

중심으로 하는 인자의 선정이 필요한 것으로 판단된다.

적응능력의 인자들은 폭염에 대응하기 위한 환경적 요인(녹지면적 등) 및 행정적 요인(보건인력 등) 등이 주로 고려된 것을 알 수 있다. 이 중, 보건 인력, 소방서 인력 등과 같은 행정적 요인들은 공간적으로 넓은 시·군·구 단위의 취약성 평가에는 적절하지만, 읍·면·동 단위의 평가, 특히 교통이 발달되어 있는 대도시의 행

정동 단위 평가에서는 이보다 더 실질적인 인자들을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 평가의 공간적 단위를 고려하여 시민들이 도보로 이동 중 쉽게 접할 수 있는 시설, 취약계층 보호 및 건강관리를 위한 서비스 등과 같은 실질적 인자들을 고려하고자 하였다. 기존 연구 및 자료의 가용성을 고려하여 선정된 인자는 <Table 2>와 같다.

Table 3_Weights of Factors for the Heat Wave Vulnerability Assessment

Variables	Factors	Weights	Factors	Weights
Vulnerability	Potential Impact	0.4584	Exposure	0.4681
			Sensitivity	0.5319
	Adaptive Capacity	0.5416	-	-
Exposure	Heat Wave Days	0.5546	-	-
	Tropical Night Days	0.2167	-	-
	Annual Average of Daily Maximum Heat Index	0.2287	-	-
Sensitivity	Ratio of Socially Vulnerable Groups	0.2709	-	-
	Ratio of Healthy Vulnerable Groups	0.2194	-	-
	Number of People with Heat-Related Illnesses	0.2745	-	-
	Ratio of Elderly People Who Live Alone	0.2352	-	-
Adaptive Capacity	Capacity of Designated Heat Wave Shelters	0.3992	Density	0.3075
			Accommodation Capacity	0.1594
			Opening in Night or Holiday	0.1883
			Support of Cooling Cost	0.3448
	Density of Shade Canopies	0.1405	-	-
	Ratio of Disaster Helpers	0.2335	-	-
	Ratio of Parks and Green Area	0.2268	-	-

2. 인자별 가중치 산정

폭염 취약성 평가를 위한 인자들의 단계별 통합을 위해서는 각 인자에 대한 가중치를 산정할 필요가 있다. 일반적으로 재난의 발생 및 피해, 재난 위험도에 영향을 주는 인자들의 가중치 산정을 위해 전문가 설문조사/인터뷰(구유성, 김자은, 김지숙, 이성호 2015; 김기욱, 황영우 2018; 김기욱, 황영우, 염재원, 박현정 2019; 박태선, 여창건, 최민하, 이승오 2010; 신호성, 이수형 2014; 환경부, 국립환경과학원 2012), 관측치를 이용한 회귀분석(신상영, 박창열 2014; 최충익 2003, 2004; 한화진, 안소은, 유가영 외 2006) 등의 방법이 주로 이용되고 있다. 관측치를 이용한 회귀분

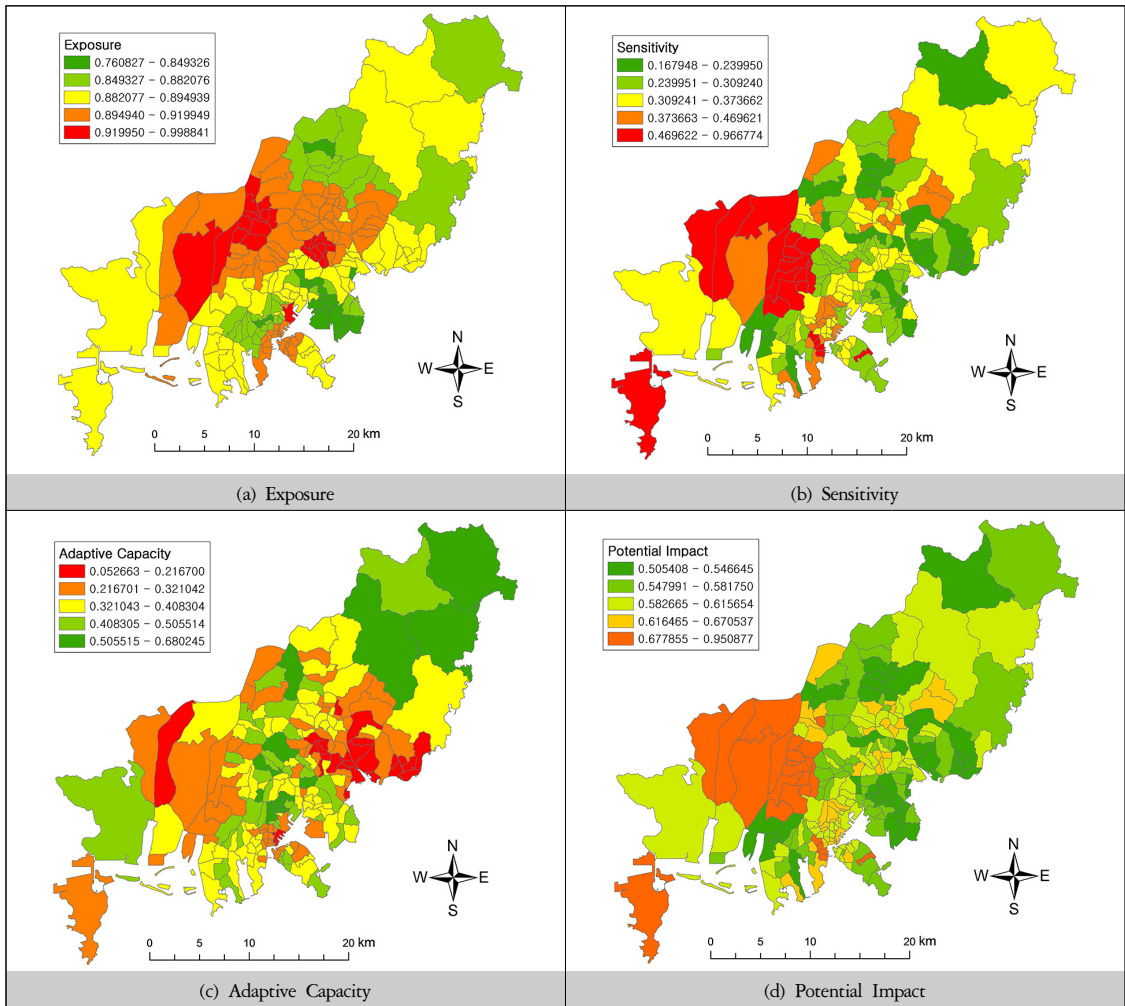
석 방법의 경우, 재난의 발생 및 피해, 이에 영향을 주는 모든 인자들에 대한 정량적 관측치가 존재할 때 적용될 수 있으며, 그렇지 않은 경우 적용에 제약을 가진다.

본 연구에서는 평가하고자 하는 폭염 취약성의 정량적 관측치에 대한 정의가 어렵다는 점을 고려하여 전문가 설문조사를 통해 인자들의 가중치를 산정하였다. 설문조사는 방재, 기상, 도시계획, 환경 분야 전문가 30명을 대상으로 수행되었으며, 각 단계별 인자들에 대한 쌍대비교(Pairwise Comparison)를 수행한 후, 이를 계층적 분석법(Analytic Hierarchy Process: AHP)에 적용하여 가중치를 산정하였다⁴⁾. 얻어진 인자별 가중치는 <Table 3>과 같다).

4) 일관성 비율(Consistency Ratio: CR)이 0.1 이하인 결과(문항별 26~30개)를 이용하였음.

5) 산정된 가중치에 따라 폭염 취약성 평가의 결과가 크게 달라질 수 있으므로 설문조사 대상 전문가의 전문분야에 따른 설문조사 답변 비교를 통해 평가결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있음. 본 연구에서는 각 분야별 조사 대상 전문가의 수가 적고 서로 상이하여 분야에 따른 답변의 통계적 분석 및 비교가 어렵다고 판단하여 해당 절차를 생략하였음.

Figure 2_Spatial Distributions of Exposure, Sensitivity, Adaptive Capacity and Potential Impact in Busan



Note: Larger values in Exposure, Sensitivity, and Potential Impact imply more negative meaning, while Adaptive Capacity is more positive with larger values (Green: positive; Red: negative).

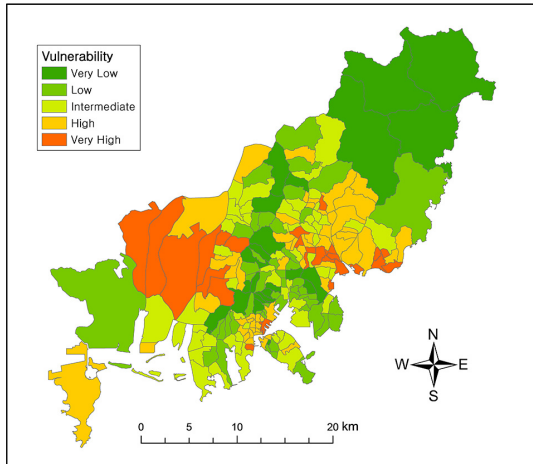
3. 기후노출, 민감도, 적응능력, 영향 산정

인자들의 통합은 각 인자의 값과 가중치를 곱하여 더하는 방식으로 수행하였으며, 이를 위해 먼저 각 인자들에 대한 정규화를 수행할 필요가 있다. 일반적으로 취약성 평가를 위해 인자의 최댓값, 최솟값을 이용하는 정규화(Min-max Normalization)가 많이 적용되고 있다(구유성, 김자은, 김지숙, 이성호 2015; 신호성,

이수영 2014; UNDP 2005). 하지만 이 방법은 모든 인자를 0에서 1 사이의 값으로 변환하여 인자들의 범위 간 상대적인 차이를 반영할 수 없다는 단점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 인자 범위의 상대적인 차이를 반영하고자 최댓값만을 이용한 정규화(<식 2>)를 수행하였다.

$$x_{i,norm} = \frac{x_i}{\max(x)} \quad \text{<식 2>}$$

Figure 3_ Heat Wave Vulnerability Map in Busan



인자들의 통합을 통해 얻어진 부산시 행정동별 기후노출, 민감도, 적응능력의 공간분포는 각각 <Figure 2>의 (a), (b), (c)와 같으며, 기후노출과 민감도를 통합 (<Figure 1> 및 <식 1> 참조)하여 얻어진 영향의 공간분포는 <Figure 2>의 (d)와 같다.

4. 부산지역 폭염 취약성 지도 작성

<Figure 2> (c) 및 <Figure 2> (d)의 적응능력과 영향에 <Table 3>의 가중치를 반영하여 폭염 취약성을 산정하였다. 산정된 폭염 취약성을 Jenks의 Natural Break 방법을 이용하여 다섯 구간으로 구분하고, 각각 ‘매우 낮음’, ‘낮음’, ‘보통’, ‘높음’, ‘매우 높음’의 등급을 부여하였다. 이를 통해 얻어진 부산지역 폭염 취약성 지도는 <Figure 3>과 같으며, 폭염 취약성 등급별 행정동 개수 및 비율은 <Table 4>와 같다.

Table 4_ The Number and Proportion of the Administrative Districts in the each Grade

Administrative District	Grade				
	Very Low	Low	Inter.	High	Very High
#	22	47	55	55	27
Proportion (%)	10.7	22.8	26.7	26.7	13.1

Table 5_ Temperature and Heat Index Increments by the Climate Change Scenarios

Increment	Climate Change Scenario			
	RCP4.5		RCP8.5	
	2050	2100	2050	2100
Temperature (°C)	1.5*	2.4*	2.3*	5.4*
Heat Index (°C)	1.65	3.44	3.26	10.44

Note: 2050 and 2100 mean the periods of 2040~ 2050 and 2090~2100, respectively.

Source: *KMA 2015, 19.

5. 기후변화 시나리오의 적용

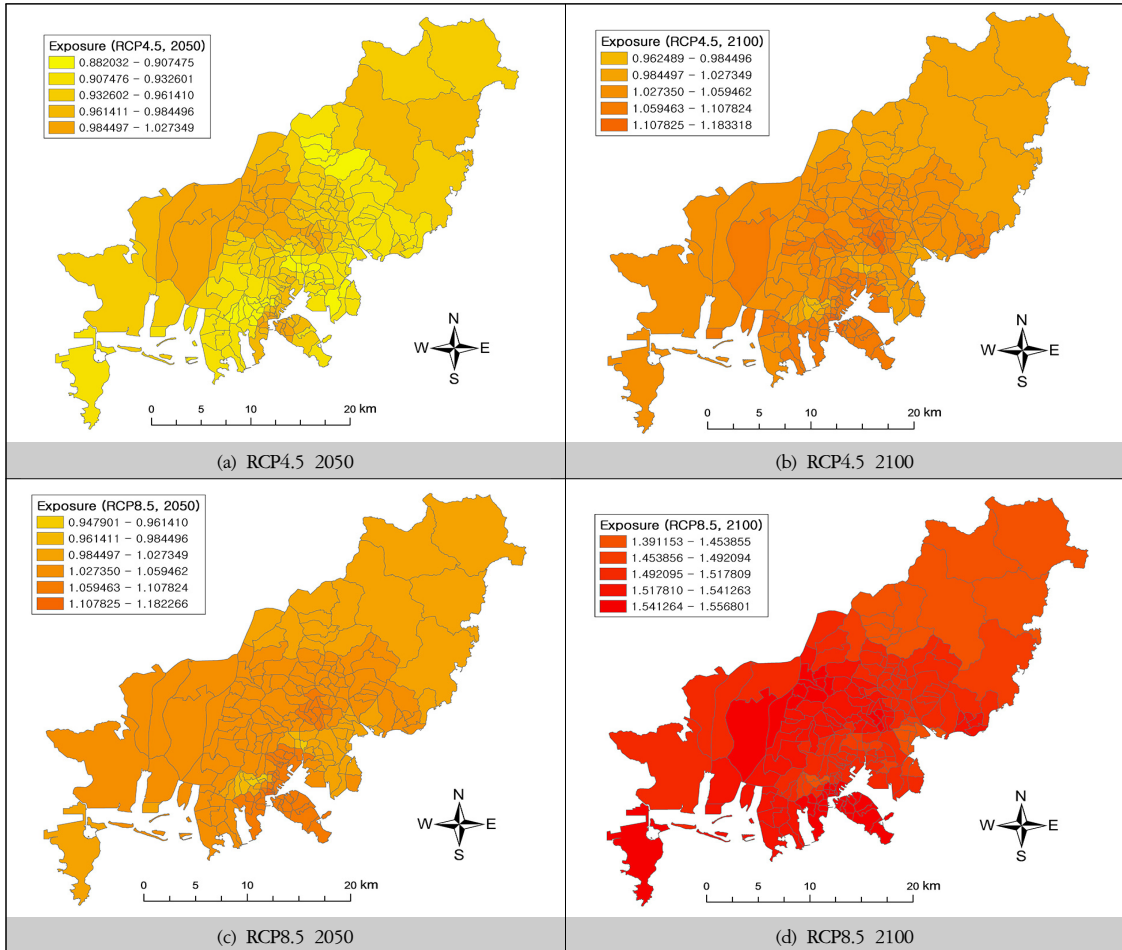
본 연구에서는 기후변화에 따른 폭염 취약성의 미래 변화 경향을 살펴보기 위해 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오를 적용하였다. 각 기후변화 시나리오에 따른 부산 지역 평균기온의 증가량 및 이를 고려하여 얻어진 열지수 증가량⁶⁾은 <Table 5>와 같다.

1) 기후노출

<Table 5>에서 얻어진 시나리오별 열지수 증가량을 적용하여 폭염일수, 열대야일수, 연평균일최대열지수를 각각 산정하였다. 이를 이용하여 얻어진 기후변화에 따른 기후노출의 공간분포는 <Figure 4>와 같다.

6) 기온 증가량을 2018년 6월~9월 시 기온자료에 합산하여 열지수를 산정한 후, 얻어진 열지수 증가량 분포의 중간값을 적용하였음.

Figure 4_Spatial Distributions of Exposure for the Each Climate Change Scenario in Busan



Note: There are administrative districts with exposure larger than unity because the identical value was used for the normalization of the factors with the non climate change scenario. Therefore, the values could be directly compared to those in <Figure 2> (a).

<Figure 4>를 보면, 모든 시나리오에서 현재의 상황(<Figure 2>의 (a))보다 부산 전역의 기후노출이 크게 증가한 것을 알 수 있으며, 특히 RCP8.5 시나리오 적용 시, 2100년의 기후노출이 현재와 비교하여 약 70% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 행정동별 증가율의 편차가 크게 나타나 기후노출 증가의 지역별 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다(<Figure 5> 참조). RCP4.5 시나리오 적용 시, 2050년 약 1~19%(중간값 약 6%), 2100년 약 6~31%(중간값 약 18%),

Figure 5_Box-Plots on Proportional Increments of the Variables for the Each Administrative District by the Climate Change Scenarios

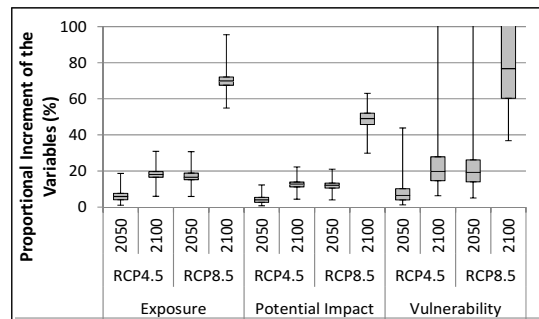
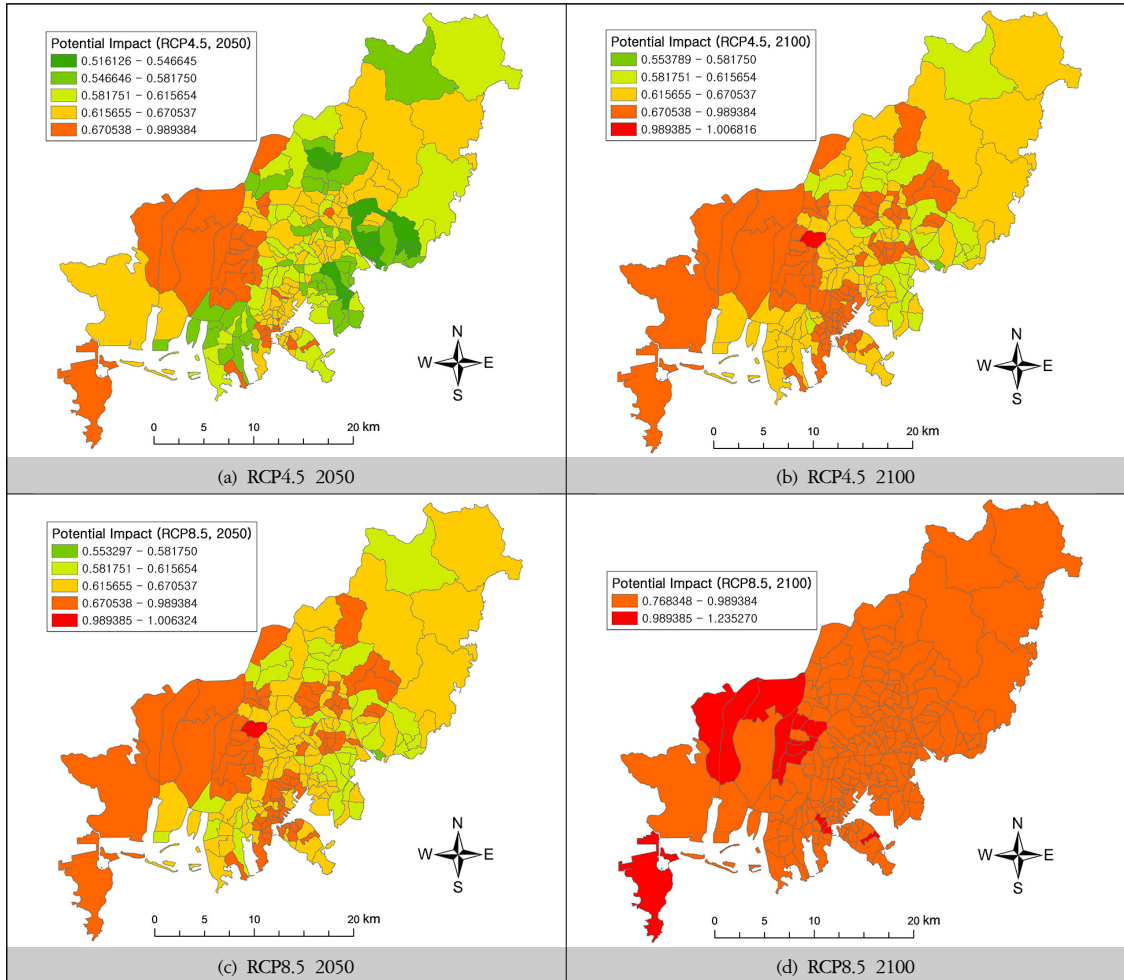


Figure 6 _ Spatial Distributions of Potential Impact for the Each Climate Change Scenario in Busan



Note: There are administrative districts with potential impact larger than unity because the identical value was used for the normalization of the factors with the non climate change scenario. Therefore, the values could be directly compared to those in <Figure 2> (d).

RCP8.5 시나리오 적용 시, 2050년 약 6~31%(중간값 약 17%), 2100년 약 55~95%(중간값 약 70%)의 기후노출이 증가하는 것으로 나타났다. 이를 평가에 적용된 열지수의 증가량(<Table 5> 참조)과 비교하면, 기후노출 증가의 최댓값은 열지수의 증가와 유사한 비율로 증가하는 반면, 최솟값 및 중간값은 이보다 더 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 열지수(기온)가 증가함에 따라, 상대적으로 낮은 기후노출을 보였던 지역의 기후노출이 더 빠른 비율로 증가한다는 것

을 의미한다.

2) 영향

<Figure 4>의 기후변화에 따른 기후노출과 <Figure 2> (b)의 민감도를 이용하여 얻어진 기후변화에 따른 영향의 공간분포는 <Figure 6>과 같다. <Figure 6>을 보면, 모든 시나리오에서 현재의 상황(<Figure 2>의 (d) 참조)보다 부산 전역의 영향이 크게 증가한 것

Table 6_ Average Vulnerability by Region by the Climate Change Scenarios

Region	Present	RCP4.5		RCP8.5	
		2050	2100	2050	2100
Busan	0.49	0.52	0.58	0.58	0.86
Jung-gu	0.66	0.71	0.79	0.78	1.06
Seo-gu	0.54	0.58	0.63	0.63	0.92
Dong-gu	0.28	0.31	0.39	0.39	0.66
Yeongdo-gu	0.46	0.51	0.57	0.56	0.85
Busanjin-gu	0.32	0.36	0.42	0.41	0.70
Dongnae-gu	0.48	0.51	0.57	0.57	0.85
Nam-gu	0.37	0.40	0.47	0.46	0.76
Buk-gu	0.43	0.47	0.50	0.49	0.79
Haeundae-gu	0.66	0.68	0.75	0.75	1.03
Saha-gu	0.40	0.42	0.49	0.48	0.78
Geumjeong-gu	0.48	0.51	0.57	0.57	0.84
Gangseo-gu	0.62	0.66	0.71	0.70	0.99
Yeonjae-gu	0.63	0.67	0.73	0.73	1.01
Suyeong-gu	0.67	0.69	0.75	0.74	1.02
Sasang-gu	0.69	0.72	0.78	0.77	1.07
Gijang-gun	0.21	0.25	0.29	0.29	0.55

Note: The values are the arithmetical mean without considering area of the administrative districts.

을 알 수 있으며, 특히 RCP8.5 시나리오 적용 시, 현재와 비교하여 2100년에 약 48% 증가하는 것으로 나타났다.

또한 기후노출과 마찬가지로 행정동별 증가율의 편차가 크게 나타나 영향 증가의 지역별 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다(<Figure 5> 참조). RCP4.5 시나리오 적용 시, 2050년 약 0.7~12%(중간값 약 4%), 2100년 약 4~22%(중간값 약 13%), RCP8.5 시나리오 적용 시, 2050년 약 4~21%(중간값 약 12%), 2100년 약 30~63%(중간값 약 49%)의 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 이를 평가에 적용된 열지수의 증가량(<Table 5> 참조)과 비교해 보

면, 기후노출의 영향에 의해 영향 증가의 최댓값은 열지수의 증가와 유사한 비율로 증가하는 반면, 최솟값 및 중간값은 이보다 더 빠른 비율로 증가하는 것을 알 수 있다.

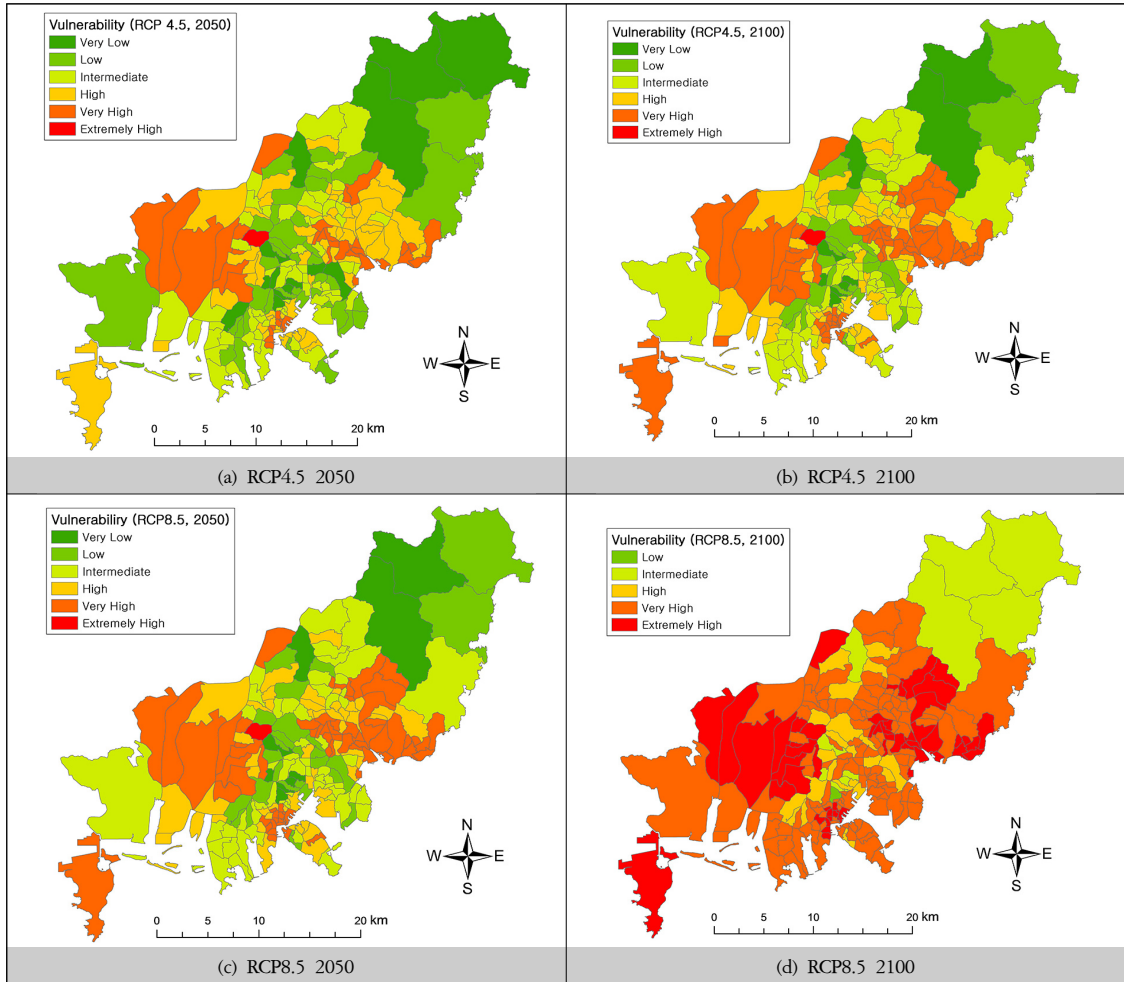
3) 폭염 취약성

<Figure 6>의 기후변화에 따른 영향과 <Figure 2> (c)의 적응능력을 이용하여 작성된 기후변화에 따른 폭염 취약성 지도는 <Figure 7>과 같다. <Figure 7>을 보면, 모든 시나리오에서 현재의 상황(<Figure 3> 참조)보다 부산 전역의 폭염 취약성이 크게 증가한 것을 알 수 있으며, 특히 RCP8.5 시나리오 적용 시, 2100년의 영향이 현재와 비교하여 약 65% 증가하는 것으로 나타났다(<Table 6> 참조).

또한 기후노출 및 영향과 마찬가지로 행정동별 증가율의 편차가 크게 나타나 폭염 취약성 증가의 지역별 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다(<Figure 5> 참조). RCP4.5 시나리오 적용 시, 2050년 약 1~44%(중간값 약 6%), 2100년 약 6~136%(중간값 약 20%), RCP8.5 시나리오 적용 시, 2050년 약 5~135%(중간값 약 19%), 2100년 약 37~507%(중간값 약 77%)의 폭염 취약성이 증가하는 것으로 나타났다. 이를 평가에 적용된 열지수의 증가량(<Table 5> 참조)과 비교해 보면, 폭염 취약성의 경우, 기후노출 및 영향과는 다르게 최솟값, 중간값, 최댓값 모두가 열지수의 증가율보다 더 빠른 비율로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

<Table 6>의 구별, 시나리오별 폭염 취약성을 살펴보면, 중구와 사상구의 폭염 취약성이 부산지역 전체에서 가장 높은 것으로 나타나며(시나리오에 따라 상이), 그 외에 수영구, 해운대구, 연제구, 강서구, 서구가 부산지역 평균보다 높은 폭염 취약성을 보이는 것을 알 수 있다. 반면, 기장군의 경우 상대적으로 가

Figure 7_Heat Wave Vulnerability Map for the Each Climate Change Scenario in Busan



Note: The identical criteria with the non climate change scenario were used for the grades. Therefore, the grades could be directly compared to those in <Figure 3>. 'Extremely High' indicates Vulnerability larger than unity.

장 낮은 폭염 취약성을 보이며, 동구, 부산진구, 남구 등이 폭염에 상대적으로 안전한 것으로 나타났다. 이와 같은 폭염 취약성의 순위는 시나리오에 따라 약간의 차이를 보이지만, 대체로 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

현재의 폭염 취약성 등급에 따른 기후변화 시나리오 적용 시의 등급 및 취약성의 증가비율은 <Table 7>과 같다. <Table 7>을 보면, 현재의 등급이 낮을수록 기후변화 시나리오 적용 시의 취약성 증가비율

이 높게 나타나는 것을 알 수 있으며, 특히 현재의 취약성이 '매우 낮음' 및 '낮음'인 경우, RCP8.5 시나리오 2100년의 취약성이 두 배(100%) 이상 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 현재 상대적으로 폭염에 안전한 것으로 평가된 행정동의 취약성이 더 큰 비율로 증가한다는 것을 의미하는 결과로서, 폭염 취약성의 증가를 완화하기 위한 대책 마련이 필요함을 시사한다.

Table 7_ The Number of Administrative Districts and Proportional Increment of the Vulnerability (in parentheses) by the Present Grade by the Climate Change Scenarios
unit: number (%)

Scenario	Year	Grade	Present				
			Very Low	Low	Inter.	High	Very High
RCP 4.5	2050	Very Low	14 (23)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		Low	8 (22)	32 (10)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		Inter.	0 (0)	15 (11)	42 (6)	0 (0)	0 (0)
		High	0 (0)	0 (0)	13 (8)	45 (5)	0 (0)
		Very High	0 (0)	0 (0)	0 (0)	10 (7)	26 (4)
		Ext. High	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (5)
	2100	Very Low	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		Low	13 (44)	14 (32)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		Inter.	0 (0)	33 (27)	22 (20)	0 (0)	0 (0)
		High	0 (0)	0 (0)	33 (20)	16 (16)	0 (0)
		Very High	0 (0)	0 (0)	0 (0)	39 (16)	26 (12)
		Ext. High	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (7)
RCP 8.5	2050	Very Low	9 (78)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		Low	13 (41)	14 (29)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		Inter.	0 (0)	33 (26)	23 (19)	0 (0)	0 (0)
		High	0 (0)	0 (0)	32 (18)	17 (15)	0 (0)
		Very High	0 (0)	0 (0)	0 (0)	38 (15)	26 (11)
		Ext. High	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (7)
	2100	Very Low	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		Low	1 (-*)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		Inter.	10 (270)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		High	11 (166)	12 (127)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		Very High	0 (0)	35 (108)	55 (80)	30 (64)	0 (0)
		Ext. High	0 (0)	0 (0)	0 (0)	25 (59)	27 (48)

Note: * Proportional Increment was not estimated because the administrative district has the lowest vulnerability ('0') at present.

IV. 결론

본 연구에서는 IPCC의 기후변화 취약성 평가 체계를 적용한 폭염 취약성 평가를 통해 부산지역 행정동별 폭염 취약성의 공간분포를 살펴보고 효과적인 폭염

대응방안 수립을 위한 기초자료를 마련하고자 하였다. 또한 기후변화 시나리오의 적용을 통해 기후변화에 따른 미래 폭염 취약성의 변화를 검토해보고자 하였다.

평가결과, 폭염 취약성이 '높음' 혹은 '매우 높음'으로 평가된 행정동이 중구, 사상구, 수영구, 해운대구, 연제구, 강서구 등에서 상대적으로 많이 나타났으며, 기장군, 사하구, 북구에는 '높음' 이상의 폭염 취약성을 가지는 행정동이 없는 것으로 나타나 지역 간의 큰 차이를 확인할 수 있었다. 이는 폭염 취약성의 구별 평균에서도 확인할 수 있었으며, 현재 상황에서의 폭염 취약성이 최소 0.21(기장군)에서 최대 0.69(사상구)까지 세 배 이상의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

기후변화 시나리오를 적용한 평가에서는 시나리오 적용에 따른 폭염 취약성의 증가가 나타났다. 부산지역 전체적으로 시나리오 및 목표연도에 따라 최대 약 65%까지 폭염 취약성이 증가하였으며, 증가율은 현재 상대적으로 폭염에 안전한 것으로 나타난 지역에서 더 크게 나타났다. 한편, 현재 '높음' 및 '매우 높음'의 폭염 취약성을 보이는 지역의 경우에도 폭염 취약성이 지속적으로 증가하는 것으로 나타나 전체적으로 부산지역의 폭염 취약성 증가를 완화하기 위한 도시 계획적 대책이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행된 폭염 취약성 평가의 결과는 지역에 따른 맞춤형 대책을 수립하는 데 유용하게 활용될 수 있다. 상대적으로 높은 폭염 취약성을 가지는 지역에 대하여 해당 폭염 취약성의 원인이 되는 인자를 기후노출, 민감도, 적응능력별로 파악할 수 있으며, 이에 따라 폭염 취약성 개선을 위해 가장 효율적인 방법을 선택할 수 있다.

본 연구에서는 부산지역 전체에 대한 행정동별 자료의 획득, 자료의 일률적인 적용, 분석의 효율성 등

의 문제에 따라 필요한 모든 인자들을 고려하지 못하였으며, 이는 본 연구의 한계라고 할 수 있다. 특히 이와 같은 한계에 의해 동일한 대상지역에 대하여 기존에 수행된 유사한 연구들의 결과와 다소 다른 결과를 제시할 수 있다는 문제점을 가진다. 하지만 이는 본 연구만의 문제가 아니며, 취약성 평가를 수행한 많은 연구들이 유사한 한계를 내포하고 있다. 따라서 지역별 대책 수립 시, 본 연구에서 고려하지 못한 인자들을 적절히 고려할 필요가 있으며, 다양한 연구에서 얻어진 결과를 종합적으로 고려한 결과의 해석이 필요하다. 이를 통해 지역 맞춤형 대책에 의한 폭염 취약성의 개선을 기대할 수 있다.

참고문헌 •••••

1. 구유성, 김자은, 김지숙, 이성호. 2015. 폭염 취약성평가를 통한 도시의 적응능력 향상: 부산광역시를 중심으로. 한국지역개발학회지 27권, 5호: 331-347.
Koo Youseong, Kim Jaeun, Kim Jisook and Lee Sungho. 2015. Study on the improvement of adaptation ability by vulnerability analysis of heat wave: The case of Busan Metropolitan City. *The Journal of the Korean Regional Development Association* 17, no.5: 331-347.
2. 기상청. 2015. 부산광역시 부산진구 기후변화 상세 분석보고서. 서울: 기상청.
KMA. 2015. *Report on Detailed Analysis of Climate Change in Busanjin-gu, Busan*. Seoul: Korea Meteorological Administration.
3. 김기욱, 허종배, 박봉철. 2019. 부산시 폭염발생 현황 및 대응방안. 부산: 부산연구원.
Kim Keewook, Heo Jongbae and Park Bongchur. 2015. *The Impacts and Corresponding Strategies of Heat Waves in Busan*. Busan: Busan Development Institute.
4. 김기욱, 황영우. 2018. 재난위험도평가를 통한 효율적 재난 대비전략 구축방안. 부산: 부산연구원.
Kim Keewook and Hwang Young Woo. 2018. *An Establishment Plan of Disaster Preparedness Strategy using Hazard*

Risk Assessment. Busan: Busan Development Institute.

5. 김기욱, 황영우, 염재원, 박현정. 2019. 재난위험도평가를 위한 리스크 매트릭스의 적용: 부산광역시를 중심으로. 한국방재학회논문집 19권, 3호: 59-65. <https://doi.org/10.9798/KOSHA.M.2019.19.3.59>
Kim Keewook, Hwang Young Woo, Yeom Jaeweon and Park Hyun Jung. 2019. Application of a risk matrix for hazard risk assessment in Busan Metropolitan City. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 19, no.3: 59-65. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.3.59>
6. 박태선, 여창건, 최민하, 이승오. 2010. 지역별 홍수피해특성을 고려한 홍수피해지표 개발. 대한토목학회논문집 30권, 4B호: 361-366.
Park Taesun, Yeo Chang Geon, Choi Minha and Lee Seung Oh. 2010. Flood damage index regarding regional flood damage characteristics. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 30, no.4B: 361-366.
7. 부산광역시. 2019. 2018년 폭염백서. 부산: 부산광역시. Busan Metropolitan City. 2019. *2019 Heat Wave White Paper*. Busan: Busan Metropolitan City.
8. 신호성, 이수형. 2014. 기후변화 건강 취약성 평가지표 개발. 환경정책연구 13권, 1호: 69-93. <https://doi.org/10.17330/joep.13.1.201403.69>
Shin Hosung and Lee Suehyung. 2014. Development of a climate change vulnerability index on the health care sector. *Journal of Environmental Policy* 13, no.1: 69-93. <https://doi.org/10.17330/joep.13.1.201403.69>
9. 신상영, 박창열. 2014. 토지이용 특성과 침수피해면적 간의 관계 분석: 서울시를 사례로. 국토연구 81권: 3-20. <http://doi.org/10.15793/kspr.2014.81..001>
Shin Sangyoung and Park Changyeol. 2014. Analyzing relationships between land use characteristics and flood damage areas: The case of Seoul. *The Korea Spatial Planning Review* 81: 3-20. <http://doi.org/10.15793/kspr.2014.81..001>
10. 최충익. 2003. 도시적 토지이용의 변화가 도시의 자연재해 취약성에 미치는 영향에 관한 연구: 경기도를 사례로. 국토계획 38권, 2호: 35-48.
Choi Choong-Ik. 2003. A study on natural hazards vulnerability in urban area by urban land use change: In case of Kyonggi Province. *Journal of Korea Planning Association* 38, no.2: 35-48.
11. 최충익. 2004. 수도권 도시지역 자연재해 유발요인에 관한

- 실증연구. 한국지역개발학회지 16권, 4호: 23-50.
- Choi Choong-Ik. 2004. A empirical research on the factors causing natural disasters in metropolitan urban area. *Journal of the Korean Regional Development Association* 16, no.4: 23-50.
12. 한화진, 안소영, 유가영, 황진환, 김정은. 2006. 기후변화 영향 평가 및 적응시스템 구축 II. 서울: 한국환경정책평가연구원. Han Hwajin, Ahn Soyoung, Yoo Gayoung, Hwang Jinhwan and Kim Jungeun. 2006. *Climate Change Impact Assessment and Establishment of an Adaptation System*. Seoul: Korea Environment Institute.
13. 환경부. 2019. 향후 10년 우리나라 폭염 위험도 더욱 높아진다. 7월 29일, 보도자료. Ministry of Environment. 2019. Risk of heat wave will increase for the next 10 years. July 29, Press release.
14. 환경부, 국립환경과학원. 2012. 지자체 기후변화 적응 세부 시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도: 총괄/요약보고서. 과천: 환경부. Ministry of Environment·National Institute fo Environmental Research. 2012. *Vulnerability Mapping on Climate Change Sectors for Supporting Establishment of Detailed Adaptation Action Plans in Local Governments - General/Summary Report -*. Gwacheon: Ministry of Environment.
15. IPCC. 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press.
16. _____. 2014a. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Geneva: IPCC.
17. _____. 2014b. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
18. Johnson, J. E. and Welch, D. J. 2010. Marine fisheries management in a changing climate: A review of vulnerability and future options. *Review in Fisheries Science* 18, no.1: 106-124. <https://doi.org/10.1080/10641260903434557>
19. Morimoto, T., Nakai, S. and Itoh, T. 2001. Global warming and deaths from heat stroke. In *Thermotherapy for Neoplasia, Inflammation and Pain*, eds. Kosaka, M., Sugahara, T., Schmidt, K. L. and Simon, E., 107-110. Tokyo: Springer.
20. Kaiser, R., Tertre, A. L., Schwartz, J., Gotway, C. A., Daley, W. R. and Rubin, C. H. 2007. The effect of the 1995 heat wave in Chicago on all-cause and cause-specific mortality. *American Journal of Public Health* 97, no.S1: S158-S162. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2006.100081>
21. Robine, J. M., Cheung, S. L. K., Roy, S. L., Oyen, H. V., Griffiths, C., Michel, J. P. and Herrmann, F. R. 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the Summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* 331, no.2: 171-178.
22. UNDP. 2005. *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing strategies, policies, and measures*. Cambridge: Cambridge University Press.

-
- 논문 접수일: 2019. 11. 29.
 - 심사 시작일: 2019. 12. 18.
 - 심사 완료일: 2020. 2. 5.

요약

주제어: 폭염 취약성 평가, 기후변화 시나리오, 지역 맞춤형, 효과적 대응방안

본 연구에서는 최근 증가하는 폭염피해 대응방안 수립을 위한 기초자료를 마련하고자 IPCC의 기후변화 취약성 평가 체계를 적용하여 부산지역을 대상으로 폭염 취약성 평가를 수행하였다. 평가를 위한 인자 선정, 인자의 가중치 산정, 인자의 통합을 통한 기후 노출, 민감도, 적응능력 산정을 통해 부산지역의 폭염에 대한 취약성을 평가하였다. 또한 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오를 적용하여 기후변화가 폭염에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 평가 결과, 부산지

역의 폭염 취약성이 공간적으로 높은 변동성을 보이는 것으로 나타났으며, 기후변화 시나리오 적용에 따라 최대 65%의 취약성 증가가 나타났다. 이와 같이 앞으로 심화될 것으로 예상되는 폭염에 의한 피해를 완화하기 위해서는 평가에 고려된 인자들에 대한 분석을 통해 지역 맞춤형 대응방안을 마련할 필요가 있으며, 도시계획과 연계된 다양한 장단기 계획의 수립 및 시행이 필요할 것으로 판단된다.