

# 인천지역 미세먼지에 의한 건강취약성 평가 연구

## A Study on the Health Vulnerability Assessment of Particle Matter in Incheon

정승권\* · 전계원\*\*

Jung, Seung Kwon\*, and Jun, Kye Won\*\*

### Abstract

This study presents health vulnerability assessment indicators of particle matter, such as exposure indicators, sensitivity indicators, and adaptive indicators, based on the health vulnerability assessment indicators presented by IPCC (2007). To derive the suggested evaluation indices, basic data from 2018 were analyzed. The response variables for each indicator through re-scaling were combined to calculate and present vulnerability indices for administrative regions. The response variable of the exposure indicator was weighted to reflect the local environment and regional characteristics. The present study proposes a plan to manage particle matter in the administrative district of Incheon by utilizing the calculated health vulnerability index of such matter.

**Key words :** Particle Matter, Health Vulnerability Assessment, Incheon, Re-scaling, Vulnerability Index

### 요 지

본 연구에서는 IPCC (2007)에서 제시한 건강 취약성 평가지표를 기반으로 미세먼지 건강 취약성 평가지표를 노출지표, 취약성지표, 적응도지표로 구분, 제시하였다. 제시된 평가지표를 도출하기 위하여 2018년 기준, 기초데이터를 수집, 분석하였으며, 분석된 기초데이터를 바탕으로 제시된 각 지표들의 대응변수에 Re-scaling 방법을 적용하여 지수를 산정하는 방식을 적용하였다. Re-scaling을 통해 도출된 각 지표의 대응변수를 조합하여 행정구역별 취약성 지수를 산정, 제시하였는데, 지역환경 및 특성을 반영한 취약성 지수를 산정하기 위해 노출지표의 대응변수에 가중치를 적용하여 취약성 평가를 수행하였다. 취약성 평가는 구 단위 행정구역별로 미세먼지 건강 취약성 지수를 산정, 비교하였으며 산정결과를 바탕으로 인천지역내 취약 자치구에 대한 미세먼지 대응방안을 제시하였다.

**핵심용어 :** 미세먼지, 건강취약성평가, 인천지역, 표준변환, 취약성지수

## 1. 서 론

미세먼지란 대기중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상 물질을 뜻하고 석탄, 석유 등의 화석연료를 태울 때나 공장, 자동차 등의 배출가스에서 많이 발생한다. 미세먼지는 눈에 보이지 않을 만큼 매우 작은 크기로 존재하며 대기 중에 머물러 있다가 호흡기를 거쳐 폐 등에 침투하거나 혈관을 따라 체내로 들어감으로써 건강에 나쁜 영향을 미치게 된다. ME (2016)에 따르면, 미세먼지로 인해 다양한

신체 부위에서 질병이 발생할 수 있으며, 독성을 가진 미세먼지가 우리 몸속으로 들어오면 면역을 담당하는 세포가 미세먼지를 제거하려고 하는데, 이 때 염증반응이 나타나 호흡기, 심혈관계 등을 손상시킨다.

Lee et al. (2014)에 따르면 미세먼지의 인체영향에 대한 중요성이 크게 부각되고 있으며 미세먼지 피해에 대한 감소를 위해 지역별, 부문별 범위와 우선순위 도출이 필요하며 지역의 실정과 특성에 맞는 취약성 평가가 우선시 되어야 한다고 제시하고 있다. Lee et al. (2014)는 부산지역을 대상으

\*정회원, <sup>1</sup> 강원대학교 방재전문대학원 박사수로

<sup>2</sup> (재)국제도시물정보과학연구원 정보화연구실장(E-mail: skjung6779@gmail.com)

Member, <sup>1</sup> Ph.D. Candidate, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

<sup>2</sup> Research Director, International Center for Urban Water Hydroinformatics Research & Innovation

\*\*교신저자, 정회원, 강원대학교 방재전문대학원 교수(Tel: +82-33-570-6816, Fax: +82-33-570-6501, E-mail: kwjun@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

로 미세먼지 노출에 대한 지역적 여건과 특성을 반영하여 정량적으로 취약성 평가를 수행하였다.

본 연구는 미세먼지와 건강의 상관관계 및 건강피해 연계성과 관련된 과학적 근거를 도출하여 미세먼지로 인한 건강피해를 예방해야 한다는 필요성을 기반으로 인천지역의 미세먼지에 의한 건강취약성 평가를 통해 민감계층에게 맞춤형 정보를 제공하고 지자체의 미세먼지 저감대책 수립에 있어 우선지역선정에 필요한 기초자료를 제공하는데 목적이 있다.

이를 위해 본 연구에서는 IPCC (2007)에서 제시한 건강취약성 평가지표를 기반으로 미세먼지 건강취약성 평가지표를 제시하였으며, 평가지표 산정을 위해 2018년을 기준으로 기초데이터를 수집, 분석하고, 기초데이터를 바탕으로 표준지수 변환방법인 Re-scaling 방법을 적용하여 산정한 노출지표, 민감도지표, 적응도지표에 대한 평가항목별 대응변수 표준지수값을 통해 인천지역 자치구별 미세먼지 건강취약성 지수를 산정하였다.

## 2. 연구 방법 및 내용

### 2.1 적용대상 및 자료

본 연구의 대상지역인 인천광역시시는 Fig. 1에서와 같이 행정구역상 8개의 구와 2개의 군으로 구분된다. 지형적으로 항만시설이 입지한 해안매립지와 주거지 및 공업용지로 활용되는 간척지를 제외하고는 기복이 작은 구릉지 또는 낮은 산지로 구성되어 있다.

기초데이터는 인천광역시 및 주변지역 초미세먼지(PM-2.5) 관측망 현황분석 AirKorea에서 제공하는 자료를 활용하였

는데, ME (2019)에 수록된 2018년 대기연보 자료를 기준으로 Table 1에서 제시한 바와 같이 17개 도시대기측정소에 대한 PM-10, PM-2.5 농도데이터를 사용하였다. 대기오염물질 배출량 정보는 현재기준 가장 최신자료인 NIER (2018)에 수록된 2015년도 국가 대기오염물질 배출량 데이터를 활용하였다. 기상자료는 KMA (2019)의 기상자료개방포털 사이트를 통해 인천지역내 10개의 기상관측소를 통해 최고기온, 평균풍속, 일 강우량 자료를 수집, 분석하였다. 또한, 지역현황자료 구축을 위해서는 국민기초생활수급자수는 MOHW (2019)에서 제공하는 보건복지통계연보를 통해, 민감계층(65세이상, 15세이하) 인구수, 독거노인수, 인구밀도(명/km<sup>2</sup>), 질환별사망률(%), GRDP (지역총생산-조원), 재정자립도(%), 건강보험 적용인구수, 병원수(개수/백만명), 병원의료인력수 자료는 KOSTAT (2019) 국가통계포털을 통해 수집, 분석하였고, 차량등록대수는 MOLIT (2019)의 국토교통 통계누리 자료를 통해 수집, 활용하였다.

### 2.2 취약성 평가 방법

취약성(vulnerability)이란 Climate Change (IPCC, 2007)에서 제시한 바와 같이 “한 시스템이 기후변화의 악영향에 쉽게 영향을 받거나 대처하지 못하는 정도”로 정의하며, 그 요소는 시스템이 자극에 노출되는 정도를 나타내는 노출(exposure), 자극에 의해 시스템이 영향을 받는 정도를 나타내는 민감도(sensitivity)와 자극으로 인한 영향에 대한 적응할 수 있는 잠재력 또는 능력을 의미하는 적응능력(adaptive capacity)으로 정의한다(Fig. 2). 본 연구는 Health vulnerability assessment (IPCC, 2007)에서 제시한 평가지표를 기반으로 건강취약성 평가를 실시하였으며, Table 2에서 제시된 각

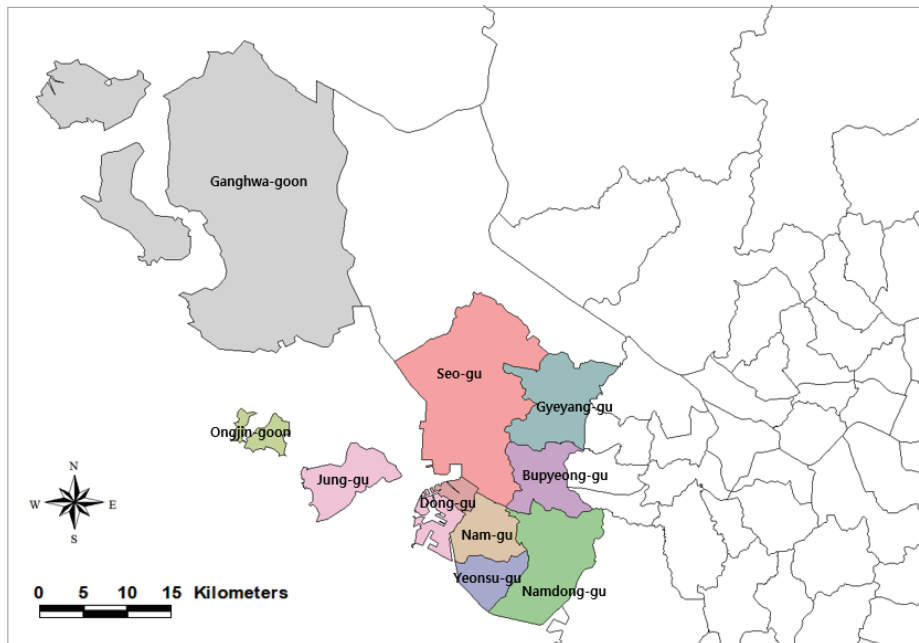


Fig. 1. Research Object Region

**Table 1.** Incheon Network of Observation

Metric system classification	Target material	Numbers	Name of station
Urban atmospheric measuring stations	PM2.5, PM10	17	Geomdan, Gyesan, Gozan, Kuwoldong, Nonhyeon, Dongchun, Bupyeong, Seoknam, Songdo, Songlim, Song Hae, Soongui, Shinheung, Yeonhui, Unseo, Wondang, Cheongna
Weather stations	Maximum temperature, Wind speed, Precipitation	10	Incheon, Gangwha, Gongchon-dong, Gyo-dong, Geumgok, Bupyeong, Songdo, Yeongjongdo, Wangsan, Incheon-yeonsu

**Table 2.** Variables and Research Papers Associated with Exposure, Sensitivity, and Adaptive Capacity Category for PM-10, PM-2.5 Vulnerability Assessment

Category	Indicator variable	Data source	Functional relationship
Exposure	Daily maximum temperature	M.A AWS/ASOS	Temperature↑Exposure↑
	Daily wind speed	M.A AWS/ASOS	Wind↑Exposure↑
	Daily precipitation	M.A AWS/ASOS	Rainfall↑Exposure↑
	PM-10 concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	K.M.C Air Korea	Concentration↑Exposure↑
	PM-2.5 concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	K.M.C Air Korea	Concentration↑Exposure↑
	PM-10 emissions ( $\text{ton}/\text{km}^2$ )	K.M.C Air Korea	Emissions↑Exposure↑
	PM-2.5 emissions ( $\text{ton}/\text{km}^2$ )	K.M.C Air Korea	Emissions↑Exposure↑
	24 hour PM-10 concentration 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ days	K.M.C Air Korea	Days↑Exposure↑
24 hour PM-2.5 concentration 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ days	K.M.C Air Korea	Days↑Exposure↑	
Sensitivity	Population $\geq 65$ years of age	National Statistics Portal	Population↑Sensitivity↑
	Population $\leq 15$ years of age	National Statistics Portal	Population↑Sensitivity↑
	Elder who lives alone	National Statistics Portal	Population↑Sensitivity↑
	Recipient of national basic livelihood security	Health and Welfare Statistics Yearbook	Population↑Sensitivity↑
	Population density ( $\text{people}/\text{km}^2$ )	National Statistics Portal	Population↑Sensitivity↑
	The number of registered vehicles	Department of Land I.T.D	Number of vehicles↑ Sensitivity↑
	Ischemic heart disease mortality rate (%)	National Health Insurance Corporation cohort DB, S.D.N	mortality rate↑Sensitivity↑
	Cerebrovascular disease mortality rate (%)	National Health Insurance Corporation cohort DB, S.D.N	mortality rate↑Sensitivity↑
	Respiratory tuberculosis mortality rate (%)	National Health Insurance Corporation cohort DB, S.D.N	mortality rate↑Sensitivity↑
	Chronic Lower Respiratory disease mortality rate (%)	National Health Insurance Corporation cohort DB, S.D.N	mortality rate↑Sensitivity↑
Adaptive capacity	GRDP(trillion)	National Statistics Portal	GRDP↑Adaptability↑
	Self-reliance ratio of local finance (%)	National Statistics Portal	Financial autonomy↑ Adaptability↑
	Beneficiaries of health insurance	National Statistics Portal	Population↑Adaptability↑
	The number of hospital (num/population)	National Statistics Portal	Hospital number↑ Adaptability↑
	Medical personnel	National Statistics Portal	Manpower↑Adaptability↑

※ Note: M.A: Meteorological Administration; K.M.C: Korea Environment Corporation; S.D.N: Statistics on causes of death at the National Statistical Office; I.D.T: Infrastructure and Transport Vehicle Registration Data

지표들의 대응변수에 Re-scaling 방법을 적용하여 지수를 산정하는 방식을 적용하였다. Re-scaling 방법이란 대응변수의 최소값과 최대값을 찾아 값의 범위를 고정하는 대응변수 선형화 방법으로 표준화 값을 산정하고 표준화된 변수들은 0에서 1사이의 동일한 값을 가지며, 서로 다른 측정단위들이 통일되어진다. 본 연구 적용지역인 인천지역의 특성에 부합하도록 일부 대응변수는 조정, 적용하였다.

### Vulnerability

$$= \alpha \text{Exposure} + \beta \text{Sensitivity} - \gamma \text{Adaptive capacity}$$

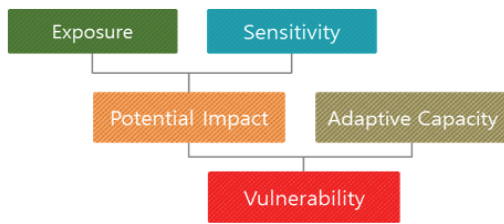


Fig. 2. Vulnerability of Concept

Table 3. Exposure Index Variable

Indicator variable	Data source	Functional relationship
Daily maximum temperature	M.A AWS/ASOS	Temperature↑Exposure↑
Daily wind speed	M.A AWS/ASOS	Wind↑Exposure↑
Daily precipitation	M.A AWS/ASOS	Rainfall↑Exposure↑
PM-10 concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	K.M.C Air Korea	Concentration↑Exposure↑
PM-2.5 concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	K.M.C Air Korea	Concentration↑Exposure↑
PM-10 emissions ( $\text{ton}/\text{km}^2$ )	K.M.C Air Korea	Emissions↑Exposure↑
PM-2.5 emissions ( $\text{ton}/\text{km}^2$ )	K.M.C Air Korea	Emissions↑Exposure↑
24hour PM-10 concentration $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ days	K.M.C Air Korea	Days↑Exposure↑
24hour PM-2.5 concentration $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ days	K.M.C Air Korea	Days↑Exposure↑

Table 4. Administrative District Exposure Index Re-scaling

Administrative district	Sortation								
	Daily max temp	Daily wind speed	Daily precipitation	PM-10 concentration	PM-2.5 concentration	PM-10 emissions	PM-2.5 emissions	24hour PM-10 concentration $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ days	24hour PM-2.5 concentration $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ days
Jung-gu	0.26	0.75	0.00	0.65	0.24	0.16	0.13	1.00	0.47
Dong-gu	0.40	1.00	1.00	0.84	0.77	1.00	1.00	0.32	0.66
Nam-gu	0.89	0.37	0.32	0.36	0.82	0.87	0.39	0.20	0.74
Yeonsu-gu	0.63	0.55	0.01	0.26	0.44	0.21	0.10	0.00	0.36
Namdong-gu	1.00	0.07	0.21	0.72	0.85	0.40	0.19	0.39	1.00
Bupyeong-gu	0.87	0.07	0.44	0.00	0.00	0.68	0.30	0.32	0.00
Gyeyang-gu	0.87	0.00	0.23	1.00	1.00	0.30	0.17	0.89	0.74
Seo-gu	0.69	0.21	0.15	0.41	0.56	0.35	0.17	0.28	0.52
Ganghwa-goon	0.00	0.31	0.25	0.49	0.39	0.00	0.00	0.43	0.25

## 3. 미세먼지 취약성 평가 인벤토리 개발

### 3.1 노출지수(Exposure)

노출지수는 기상변수인 기온, 풍속, 강우량과 대기변수인 미세먼지농도(PM-10, PM-2.5), 미세먼지 배출량, 미세먼지 환경기준초과일수로 구성된다(Table 3). 기상변수 적용을 위해 인천지역내 10개 기상관측소 기상관측자료를 IDW 공간보간법을 이용하여 자치구별 지표값을 산정하였으며 Table 4의 노출지수 산정에 활용하였다. 인천지역 노출지수는 공업교통지역, 공장단지, 미세먼지 발생이 많은 지역에서 높게 나타나는 것으로 분석되었는데 Table 4, Fig. 3에서 제시한 바와 같이 인천지역의 행정구역별 노출지수는 중구>동구>계양구>남구>서구>남동구>강화군>부평구>연수구 순으로 나타났으며, 중구의 경우, 대기변수인 미세먼지 농도 PM-10에 대한 대기환경기준인 24시간 PM-10  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  일수가 높은 것으로 분석된다. 동구의 경우 PM-10, PM-2.5 배출량이 높으며 강화군은 PM-10, PM-2.5의 배출량이 가장 낮다.

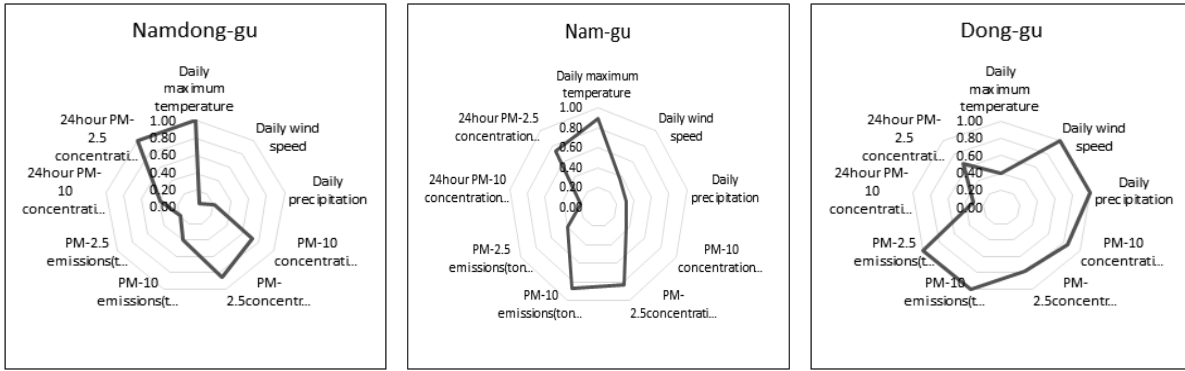


Fig. 3. Administrative District Representative Exposure Index Re-scaling

Fig. 4에서 제시한 가중치 적용전과 적용후의 노출지수 비교자료를 살펴보면, 남동구의 경우 호흡기 및 심혈관 질환에 가장 많은 영향을 미치는 PM-2.5의 농도 및 배출량 값이 높음에도 불구하고, 미세먼지 배출량 지표를 제외한 미세먼지 농도 및 초과일수의 지표가 낮게 나타난 동구에 비해 가중치 적용전에는 노출지수가 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 노출지수의 경우, 기상변수와 대기변수가 동일하게 적용될 경우, 대기변수는 낮은 값을 나타내는 반면

기상변수가 높게 나타나는 경우에도 노출지수가 높게 나타나는 오류가 발생할 수 있어 본 연구에서는 Table 5와 같이 기상변수, 대기변수에 가중치를 적용하여 산정하였다. 노출지수 가중치의 적용은 상대적으로 노출지수에 영향이 적은 기상변수에는 0.5를 적용하고, 미세먼지와 직접적인 연관성이 있는 대기변수에서는 중요도가 높은 PM-2.5에 대해서는 1.3을 PM-10에 대해서는 1.2를 각 행정구역에 동일하게 적용하였다.

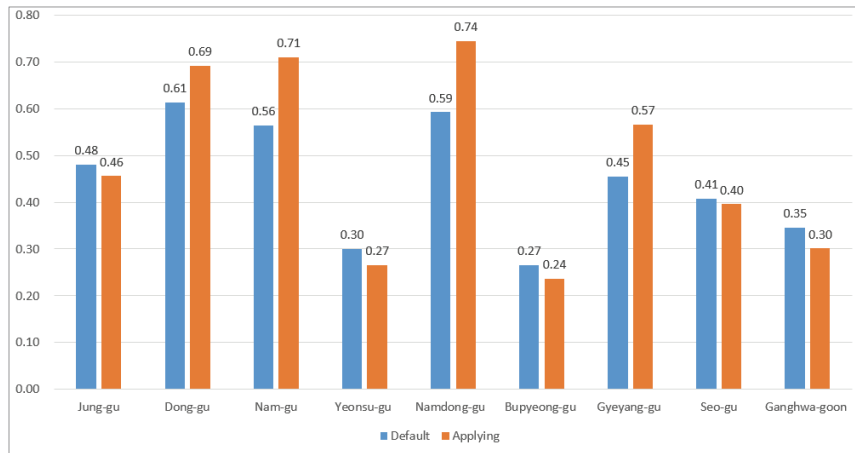


Fig. 4. Changes of Exposure Index with Weight Applying

Table 5. Weight Applying by Exposure Index

Exposure index	Weight	
	Default	Applying
Daily maximum temperature	1.0	0.5
Daily wind speed	1.0	0.5
Daily precipitation	1.0	0.5
PM-10 concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.0	1.2
PM-2.5 concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.0	1.3
PM-10 emissions ( $\text{ton}/\text{km}^2$ )	1.0	1.2
PM-2.5 emissions ( $\text{ton}/\text{km}^2$ )	1.0	1.3
24hour PM-10 concentration $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ days	1.0	1.2
24hour PM-2.5 concentration $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ days	1.0	1.3

### 3.2 민감도 지수

민감도 지수는 민감계층 구성정도, 인구밀집도, 운행차량 정도, 미세먼지와 연관성이 있는 질환사망을 등의 대응변수로 구성되어 있다(Table 6).

Table 7(a)/(b), Fig. 5에서 제시된 바와 같이 인천지역의 경우 부평구>남동구>남구>강화군>서구>계양구>동구>연수구>중구 순으로 부평구가 가장 높고, 중구가 가장 낮은 것으로 분석되었다. 부평구는 인구밀도, 기초생활수급자수, 독거노인수, 취약인구수가 가장 높으나 차량등록대수는 가장 낮으며, 강화군이 취약인구수, 독거노인수, 기초생활수급자수가 제일 낮으나 소화계통의질환, 순환계통의질환, 신경계통의질환, 호흡계통의질환에 의한 사망률이 가장 높았다. 연수구는 소화계통의질환, 순환계통의질환, 신경계통의질환, 호흡계통의질환에 의한 사망률이 가장 낮았다. 본 연구에

서는 민감도 지표는 노출지표와는 다르게 각 대응변수별 가중치의 적용은 고려하지 않았다.

### 3.3 적응력 지수

적응력 지수는 Table 8에서 제시한 바와 같이 지역내 총생산, 재정자립도 등과 같은 경제지표와 지역복지, 의료 인프라 수준을 반영할 수 있도록 지표가 구성되어 있다. Table 9, Fig. 6에서 제시한 바와 같이 인천지역의 적응력 지수는 중구>남동구>서구>부평구>동구>연수구>남구>계양구>강화군 순으로 나타났으며, 중구는 재정자립도가 가장 높고, 병상수는 동구가 가장 높게 나타났고 연수구가 가장 낮게 나타났다. 중구의 경우는 병상수 및 병원의료인원수가 제일 많은 것으로 나타난 반면 건강보험적용 인구수는 낮은 것으로 분석된다.

**Table 6.** Sensitivity Index Variable

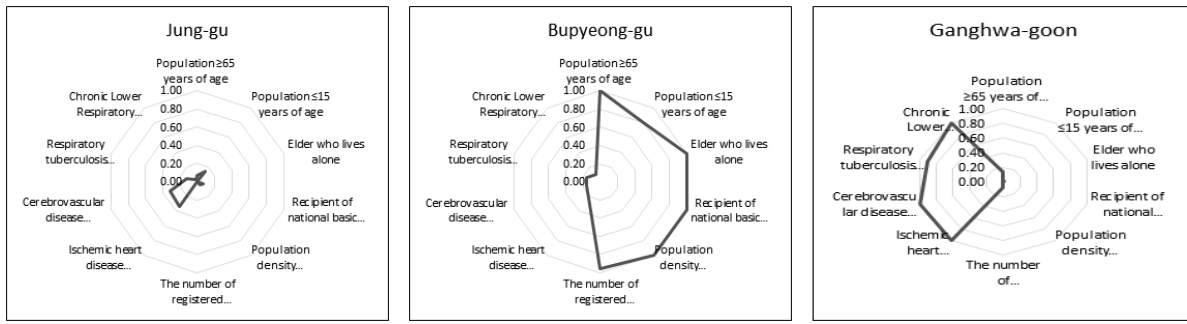
Indicator variable	Data source	Functional relationship
Population ≥ 65 years of age	National Statistics Portal	Population↑Sensitivity↑
Population ≤ 15 years of age	National Statistics Portal	Population↑Sensitivity↑
Elder who lives alone	National Statistics Portal	Population↑Sensitivity↑
Recipient of national basic livelihood security	Health and Welfare Statistics Yearbook	Population↑Sensitivity↑
Population density (people/km <sup>2</sup> )	National Statistics Portal	Population↑Sensitivity↑
The number of registered vehicles	Department of Land I.T.D	Number of vehicles↑ registeredSensitivity↑
Ischemic heart disease mortality rate (%) - per 100,000 people	National Health Insurance Corporation cohort DB, S.D.N	mortality rate↑Sensitivity↑
Cerebrovascular disease mortality rate (%) - per 100,000 people	National Health Insurance Corporation cohort DB, S.D.N	mortality rate↑Sensitivity↑
Respiratory tuberculosis mortality rate (%) - per 100,000 people	National Health Insurance Corporation cohort DB, S.D.N	mortality rate↑Sensitivity↑
Chronic Lower Respiratory disease mortality rate (%) - per 100,000 people	National Health Insurance Corporation cohort DB, S.D.N	mortality rate↑Sensitivity↑

**Table 7(a).** Administrative District Sensitivity Index Re-scaling

Administrative district	Sortation					
	Population ≥ 65years of age	Population ≤ 15 years of age	Elder who lives alone	Recipient of national basic livelihood security	Population density	The number of registered vehicles
Jung-gu	0.07	0.14	0.00	0.07	0.04	0.00
Dong-gu	0.00	0.03	0.16	0.42	0.56	0.06
Nam-gu	0.94	0.57	0.76	0.40	1.00	0.33
Yeonsu-gu	0.31	0.62	0.24	0.20	0.36	0.03
Namdong-gu	0.89	0.93	0.84	0.56	0.55	1.00
Bupyeong-gu	1.00	0.80	1.00	1.00	1.00	0.96
Gyeyang-gu	0.37	0.44	0.81	0.22	0.41	0.50
Seo-gu	0.65	1.00	0.71	0.34	0.25	0.79
Ganghwa-goon	0.14	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07

**Table 7(b).** Administrative District Sensitivity Index Re-scaling

Administrative district	Sortation			
	Ischemic heart disease mortality rate	Cerebrovascular disease mortality rate	Respiratory tuberculosis mortality rate	Chronic Lower Respiratory disease mortality rate
Jung-gu	0.34	0.32	0.13	0.03
Dong-gu	0.79	0.65	1.00	0.37
Nam-gu	0.44	0.34	0.39	0.18
Yeonsu-gu	0.00	0.00	0.02	0.00
Namdong-gu	0.16	0.08	0.27	0.09
Bupyeong-gu	0.22	0.16	0.16	0.09
Gyeyang-gu	0.19	0.11	0.00	0.03
Seo-gu	0.11	0.08	0.03	0.05
Ganghwa-goon	1.00	1.00	0.90	1.00



**Fig. 5.** Administrative District Representative Sensitivity Index Re-scaling

**Table 8.** Adaptive Capacity Index Variable

Indicator variable	Data source	Functional relationship
GRDP (trillion)	National Statistics Portal	GRDP↑Adaptability↑
Self-reliance ratio of local finance (%)	National Statistics Portal	Financial autonomy↑Adaptability↑
Beneficiaries of health insurance	National Statistics Portal	Population↑Adaptability↑
The number of hospital (num/population)	National Statistics Portal	Hospital number↑Adaptability↑
Medical personnel	National Statistics Portal	Manpower↑Adaptability↑

**Table 9.** Adaptive Capacity District Adaptive Capacity Index Re-scaling

Administrative district	Sortation				
	GRDP	Self-reliance ratio of local finance	Beneficiaries of health insurance	The number of hospital	Medical personnel
Jung-gu	1.00	1.00	0.11	1.00	1.00
Dong-gu	1.00	0.45	0.00	0.50	0.20
Nam-gu	1.00	0.13	0.73	0.62	0.08
Yeonsu-gu	1.00	0.79	0.57	0.00	0.00
Namdong-gu	1.00	0.45	1.00	0.60	0.35
Bupyeong-gu	1.00	0.15	0.99	0.43	0.20
Gyeyang-gu	1.00	0.16	0.54	0.65	0.10
Seo-gu	1.00	0.64	0.97	0.41	0.06
Ganghwa-goon	1.00	0.00	0.00	0.64	0.03



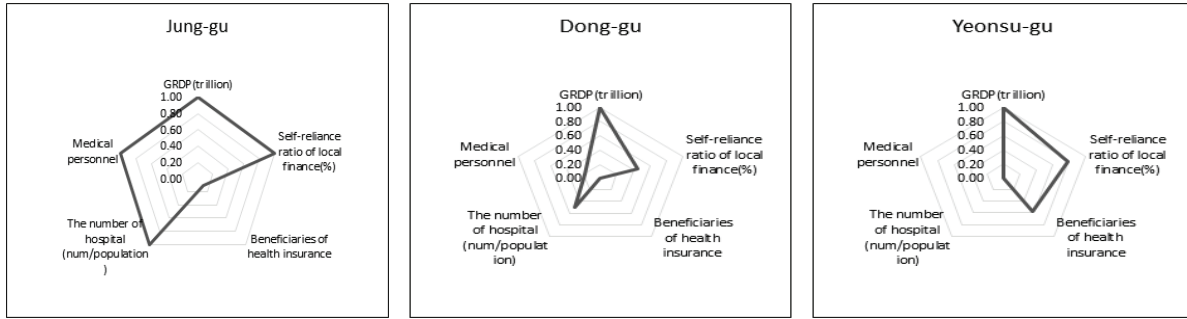


Fig. 6. Administrative District Representative Adaptive Capacity Index Re-scaling

본 연구에서는 적응력 지표에 대한 가중치 적용은 민감도 지표와 마찬가지로 각 대응변수별 가중치의 적용은 고려하지 않았다.

#### 4. 인천지역 행정구역별 미세먼지 취약성 평가

##### 4.1 평가항목별 취약성 평가

취약성평가 인벤토리를 기반으로 Re-scaling을 통해 도출된 각 지표에 대하여 자치구별로 지표간 지수값의 범위를 쉽게 파악하기 위하여 Table 10과 Fig. 7에서 제시하였다.

각 지표별 지수값을 살펴보면 노출 지표는 동구가 0.78로 가장 높고, 강화군이 0.23로 가장 낮다. 민감도 지표는 부평구가 0.64로 가장 높고, 중구가 0.11로 가장 낮다. 적응력 지표는 중구가 0.82로 가장 높고, 강화군이 0.33으로 가장 낮게 나타났다.

##### 4.2 행정구역별 건강취약성 평가

지표별로 산정된 지수값을 Fig. 2에서 제시한 방법을 통해 조합하면 Fig. 8에서 제시한 바와 같이 최종적으로 행정구역별 미세먼지 건강취약성 지수가 산정된다. Fig. 2에서 제시한 바와 같이 취약성 지수를 산정하기 위해서는 각 지표에 가중치를 적용하여 산정하여야 하는데, 가중치의 적용목적은 지역특성을 고려하고, 모델의 불확실성을 보정하기 위한 것으로 가장 효율적인 가중치 산정방안은 산정된 건강취약성 지수와 실제 지역의 미세먼지 건강취약성과의 비교를 통해 보정(Calibration)하고 검증(Validation)하는 과정을 통해 산정하는 것이다. 본 연구에서는 각 지표별 대응변수를 선정, 적용한 것에 지표별 특성이 이미 반영

된 것으로 간주하고, 각 지표에 가중치를 1로 설정하여 적용하였다.

자치구별로 산정된 미세먼지 건강취약지수를 살펴보면 동구 0.75, 남구 0.73, 남동구 0.60, 부평구 0.34, 계양구 0.38, 서구 0.16, 강화군 0.32로 나타났으며, 중구와 연수구 지역은 각각 -0.29와 -0.03으로 건강 취약성 지수가 음(-)의 값으로 산정되었다. 인천지역의 미세먼지 건강취약성은 동구>남구>남동구>계양구>부평구>강화군>서구>연수구>중구 순으로 평가되었다.

##### 4.3 결과 분석 및 고찰

인천지역 미세먼지 취약성 평가를 위해 IPCC에서 제시한 취약성 평가 인벤토리를 준용한 미세먼지 건강취약성 평가 인벤토리를 제시하였다. 이를 위해 2018년도 기초데이터를 수집, 분석하였으며, 수집된 기초데이터를 바탕으로 표준지수 변환방법인 Re-scaling 방법을 적용하였다. Re-scaling 방법을 통해 취약성 평가지표별 대응변수 표준지수값을 산정하고, 이를 인천지역내 자치구별로 비교, 제시하였다. 노출지표 대응변수 적용에 있어 지역의 환경 및 특성을 고려하여 대응변수별 가중치를 적용하였는데, 기상지표인 기온, 풍속, 강수량에 대해서는 0.5를 적용하고, 대기지표중 미세먼지 PM-10에 대한 변수는 1.2를, PM-2.5와 관련된 대응변수에는 1.3의 가중치를 적용하였다. 제시된 노출지수, 민감도지수, 적응도지수를 이용하여 산정한 인천지역 자치구별 미세먼지 건강취약성지수는 남구>동구>남동구>계양구>강화군>부평구>서구>연수구>중구 순으로 평가되었다. 특이한 점은 연수구와 중구의 경우는 취약성 지수가 음(-)의 값을 나타냈다는 것이다.

Table 10. Comparison of Vulnerability Value by Evaluation Indicators

	Jung-gu	Dong-gu	Nam-gu	Yeonsu-gu	Namdong-gu	Bupyeong-gu	Gyeyang-gu	Seo-gu	Ganghwa-goon
Exposure	0.41	0.78	0.56	0.28	0.59	0.30	0.68	0.37	0.23
Sensitivity	0.11	0.41	0.54	0.18	0.54	0.64	0.31	0.40	0.41
Adaptive capacity	0.82	0.43	0.51	0.47	0.68	0.55	0.49	0.62	0.33



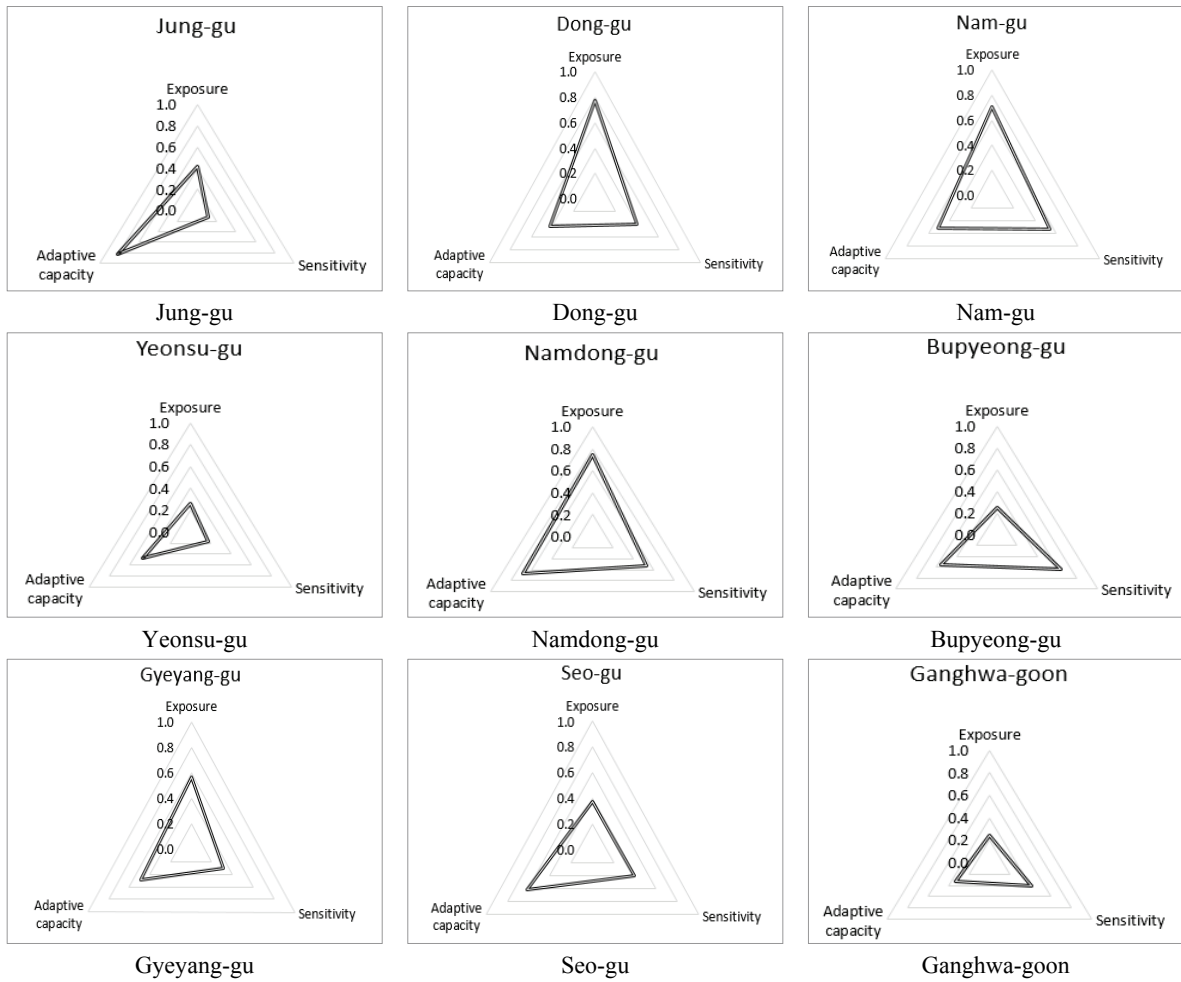


Fig. 7. Comparison of Vulnerability Value by Evaluation Indicators

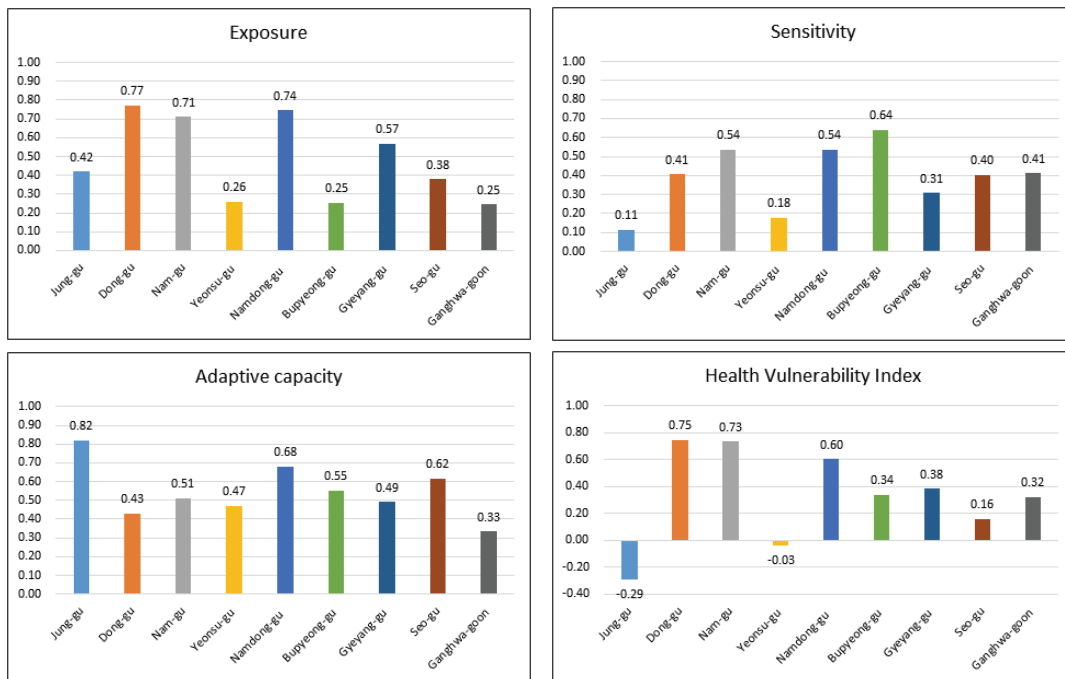


Fig. 8. The Results of Particle matter Health Vulnerability by Administrative District

자치구별로 취약성이 가장 높게 나타난 동구와 중간 수준의 서구, 그리고 음(-)의 값을 나타낸 중구를 대상으로 결과를 분석해보면, 동구의 경우는 미세먼지 농도나 배출량 지표가 다른 자치구에 비해 상대적으로 높게 나타난 것은 물론 풍속, 강우량 등의 기상변수도 높은 값을 나타내 노출지수가 높게 나타났고, 민감도지수 또한 관련질환자 사망률 등의 지표로 인해 높게 제시된 반면 적응도지수에서는 건강보험 적용 인구수 및 병원의료인력 지표에 대한 지수가 낮게 나타나고 있어 미세먼지 건강취약성 지수가 인천지역내 자치구 중 가장 높은 것으로 평가되었다. 서구의 경우는 기상변수와 대기농도변수 등 노출지수가 전반적으로 중간 수준을 나타내고 있으며, 민감도지수의 경우 취약계층과 독거노인수는 상대적으로 높은 값을 나타내고 있으나 나머지 지표에 대한 지수가 낮게 산정되어 있다. 적응도지수의 경우 의료보험적용 인구수와 재정자립도 등은 높게 산정되어 미세먼지 건강취약성 지수가 인천지역내 중간수준을 나타내고 있다. 인천지역에서 미세먼지 건강취약성이 가장 낮게 평가된 중구의 경우는 노출지수에서는 PM-10에 대한 환경기준 초과일수를 제외한 나머지 지표가 낮게 제시되어 있고, 민감도의 경우는 대부분 지표가 자치구 중 가장 낮은 값을 나타내고 있을 뿐만 아니라 적응도지수의 경우는 건강보험적용 인구수를 제외한 모든지표가 가장 높은 값을 나타내고 있다.

## 5. 결론

취약성 평가에 있어 노출지표, 민감도지표, 적응력지표를 구성하는 지표 변수의 구성에 한계점이 있는 것으로 판단된다. 노출지수의 경우, 기상변수보다 미세먼지 변수에 가중치를 높게 적용 필요가 있으며, 본 연구에서 이를 반영하였다. 민감도지수의 경우, 질환사망율과 미세먼지 농도와의 상관성이 낮은 것으로 보이는데, 강화군의 경우, 미세먼지 농도 및 미세먼지 배출량값은 매년 낮게 발생하나, 질환별 사망률은 높게 나타나는 것으로 분석되었으나, 2018년 이전의 데이터를 바탕으로 분석한 결과 미세먼지 농도 및 배출량과 질환별 사망률의 상관성은 찾기 어려웠다. 적응력지수의 경우, 지역내총생산, 재정자립도 등과 같은 경제지표보다는 미세먼지 저감을 위한 지자체의 노력(예산 증감액 등) 등이 반영되어야 할 것으로 판단되었다. 각 지표 변수에 따른 취약성을 토대로 지역별 미세먼지 저감대책 방안 수립 자료로 활용이 가능한 것으로 판단된다. 동구의 경우, 노출지수가 가장 높게 나타났음에도 불구하고, 노출지수의 대응변수별 분포도를 살펴보면, 미세먼지 농도는 가장 높게 나타난 계양구에 비해 낮게 산정되었고, 환경기준초과일수 또한 높지 않은 것으로 분석된 반면, 미세먼지 배출량은 높게 발생하는 것으로 분석되었다. 동구지역의 민감도지수나 높지 않고, 적응력지수 또한 낮지 않은 것을 감안할 때 동구지역의

미세먼지 건강취약성의 요인은 노출지표 중 미세먼지 농도보다는 미세먼지 배출량이 원인인 것으로 판단되기 때문에 향후 동구지역의 미세먼지 저감을 위해서는 미세먼지 배출량을 낮추기 위한 노력, 예를 들면 항구지역에서 주로 운행되는 대형트럭의 운행일 조정 및 차량 배기가스 농도 점검 등의 저감 대책을 수립할 수 있을 것으로 판단된다. 결과분석을 통해 제시된 내용과 같이 지역내 미세먼지 건강취약성 평가 방법을 통해 평가지표별(노출지표, 민감도지표, 적응도지표) 지수를 분석하고, 최종 미세먼지 건강취약성 지수를 평가함으로써 각 지표 변수에 따른 취약성을 토대로 지역별 미세먼지 저감대책 방안 수립에 필요한 기초자료로의 활용이 가능한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 인천녹색환경지원센터의 2018년도 연구개발 사업비 지원(과제번호 18-3-2-40-41)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007: Impact, adaptation and vulnerability*. pp. 1-22.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2019). *Weather data open portal*. Retrieved from <https://data.kma.go.kr>
- Lee, W.J., Hwang, M.K., and Kim, Y.K. (2014). Health vulnerability assessment for PM<sub>10</sub> in Busan. *J. Environ. Health Sci.*, Vol. 40, No. 5, pp. 355-366.
- Ministry of Environment (ME). (2016). *You can see right away. Particulate matter, what the hell is it is?*
- Ministry of Environment (ME). (2019). *2018 Annual report of air quality in Korea*.
- Ministry of Health and Welfare (MOHW). (2019). *2018 Health and welfare statistics yearbook*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2019). *Statistics nuri*.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2018). *2015 Annual report of air pollutant emissions*.
- Statistics Korea (KOSTAT). (2019). *Korean statistical information service*. Retrieved from <http://kosis.kr>

Received	November 29, 2019
Revised	December 6, 2019
Accepted	December 17, 2020