

# 엔트로피 가중치를 활용한 대기오염 취약성 평가\*

- 오존을 중심으로 -

이상혁\*\* · 강정은\*\*\* · 배현주\*\*\*\* · 윤동근\*\*\*\*\*

## Vulnerability Assessment of the Air Pollution Using Entropy Weights : Focused on Ozone\*

Lee, Sang-hyeok\*\* · Kang, Jung Eun\*\*\* · Bae, Hyun Joo\*\*\*\* · Yoon, Dong Keun\*\*\*\*\*

**요약** : 지표를 활용한 대기오염 취약성 평가에서는 지표의 선정과 함께 지표별 가중치 결정이 중요한 문제이다. 본 연구는 전국 249개 시군구를 대상으로 엔트로피 가중치 산정법을 활용하여 오존을 중심으로 한 대기오염 취약성을 평가하고, 엔트로피 가중치 방법론의 활용가능성을 검토하였다. 연구방법은 대기오염 취약성 지표를 선정하고 이들을 표준화하고, 엔트로피를 이용한 가중치를 적용하여 취약성을 평가하는 방식을 활용하였다. 노출 지표는 기상요인과 대기오염요인을 고려하였고, 민감도는 취약대상과 취약환경요인을, 지자체별 적응능력은 지역의 사회·경제적 요소, 보건의료요인, 대기관리 요인을 적용하였다. 취약성 평가 결과는 단순합산의 경우 화성시, 광진구, 김포시, 광주시, 군포시 순으로 취약성이 높게 나타났으며, 취약성-탄력성 지표(VRI) 방식도 단순합산 결과와 유사한 취약지역 공간 분포 패턴을 나타내었다. 본 연구에서 제시한 엔트로피 가중치를 이용한 대기오염 취약성 평가는 자료에 기반한 객관적인 취약성 평가로 불확실성을 동반하는 기후변화와 대기오염 취약성 평가에 활용가치가 높을 것으로 보인다. 또한 취약성 평가결과는 지자체별 특성이 반영된 것으로 세부적인 분석을 통해 지역 맞춤형 정책수립에 활용될 수 있다.

**주요어** : 엔트로피, 가중치, 취약성 분석, 대기오염, 오존

**Abstract** : Both the selection of indicators and weights for them are critical issues in the vulnerability assessment. This study is to assess the air pollution vulnerability focused on ozone for 249 local jurisdictions using weights calculated by the entropy methodology and then examine the applicability of the methodology. We selected indicators for air pollution vulnerability assessment and standardized them. Subsequently, we calculated weights of each indicator using the entropy method and then integrated them into the vulnerability index. The exposure indicators consider meteorological and air pollution factors and the sensitivity of the local jurisdiction include variables on vulnerable areas and environments. The adaptive capacity contains socio-economic characteristics, health care capacities and air pollution managemental factors. The results show that Hwaseong-si, Gwangjin-gu, Gimpo-si, Gwangju-si, Gunpo-si are among the highest vulnerabilities based on the simple aggregation of indicators. And vulnerability-resilience (VRI) aggregation results indicates the similar spatial pattern with the simple aggregation outcomes. This article extends current climate change vulnerability assessment studies by adopting the entropy method to evaluate relative usefulness of data. In addition, the results can be used for developing customized adaptation policies for each jurisdiction reflecting vulnerable aspects.

**Key Words** : Entropy, vulnerability assessment, air pollution, ozone

### 1. 서론

지난 100년간 지구의 평균기온은 지속적으로 상승(0.74±0.03°C)해 왔으며 우리나라는 지구평균

상승률보다 높은 수준(1.7°C)으로 기후변화를 경험하고 있다(국립기상과학원, 2009). 이로 인해 전 세계적으로 농작물의 생산량 변화에서부터 자연재해 발생빈도 증가, 대기오염 악화 등의 문제가 발

\* 이 논문은 2015년 Brain Busan (BB) 사업과 환경부의 지원을 받아 한국환경정책·평가연구원이 수행한 “국민 건강보험 빅데이터 연계 기후변화 건강영향 평가” 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

\*\* 부산대학교 도시공학과 석사과정(Master Candidate, Department of Urban Engineering, Pusan National University)(ubscott@pusan.ac.kr)

\*\*\* 부산대학교 도시공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Urban Engineering, Pusan National University)(jekang@pusan.ac.kr)

\*\*\*\* 한국환경정책평가연구원 부연구위원(Ph.D, Korea Environment Institute)(hjbae@kei.re.kr)

\*\*\*\*\* UNIST 도시환경공학부 부교수(Associate Professor, School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)(dkyoon@unist.ac.kr)

생하고 있다. 최근 기상청에서 발표된 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오 기반 미래 기후예측에 따르면 우리나라는 2050년까지 최대 3.4°C, 2100년까지 최대 5.7°C가 상승할 것으로 예상되며, 기후변화에 의한 영향 역시 심각해질 것으로 예측되고 있다. 그 중 대기오염으로 인한 피해는 기온상승과 함께 도시화, 고령화의 영향으로 더욱 심각해지고 있다(기상청 2012, 배현주 등, 2012). 도시지역의 온도증가는 대기순환 체계를 변화시키고 공기순환이 적어져 대기오염 물질의 집중을 가져오게 된다(Hallegatte *et al.*, 2008). 대기오염의 증가는 초과사망의 증가 뿐 아니라 호흡기계 질환, 심혈관계 질환의 발생에 영향을 주고, 기존 심장질환, 폐질환을 악화시킬 수도 있다(Bell, *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2008). 최근 건강에 대한 사람들의 관심증대와 함께 기후변화와 연계한 대기오염 문제 그리고, 이로 인한 건강영향이 증대한 이슈로 대두되고 있다.

최근 다양한 분야의 취약성 평가가 기후변화와 연계하여 활발하게 이루어지고 있다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 취약성을 한 시스템이 기후의 변화와 극한사상에 쉽게 영향을 받거나 대처하지 못하는 정도로 정의(IPCC, 2007; Moss *et al.*, 2001)하고, 이러한 취약성을 기후에 대한 노출(exposure), 해당 시스템의 민감도(sensitivity)와 기후변화에 대한 시스템의 적응능력(adaptive capacity)의 함수로 평가해야 함을 명시하고 있다(IPCC, 2007). Dessal and Hulme(2003)에 의하면 취약성 평가는 기후변화 영향에 대해 취약한 지역을 분석·도출하여 적절한 대응 및 적응정책을 마련하는 기반이 되며, 상향식과 하향식 접근법으로 분류할 수 있다. 상향식 접근법은 통계자료 및 전문가의 판단을 통해 지역에 기반을 둔 여러 대리변수들을 활용하여, 그 시스템의 적응 능력을 평가하는 사회·경제적 평가방법이며, 하향식 접근법은 과학적이고 정량적인 모델링 기법을 기반으로 기후변화에 대한 영향을 분석하여 물리적 취약성을 평가하는 방법이다(강정은·이명진, 2012; 이재범 외, 2012).

국내에서 이루어진 취약성 평가 연구들은 대체

로 정책 수립 및 반영을 목표로, 다양한 지표를 활용한 상향식 취약성 평가를 활용하고 있다(국립환경과학원과 환경부, 2012; 신호성 외, 2011; 고재경·김희선, 2009). 지표법은 결과를 이해하기 쉽고 지역간 비교가 용이한 장점이 존재하지만, 지표의 선택과 표준화, 가중치 부여 및 지표의 그룹화 과정이 결과에 크게 영향을 미친다(강정은·이명진, 2012). 선행연구들의 지표별 가중치 결정은 주로 동일 가중치를 적용하는 방법과 계층분석기법(Analytic Hierarchy Process, AHP), 전문가 의견을 반복해서 수립하는 델파이 기법 등을 활용하였다.

그러나, 기존의 취약성 평가 방식들이 기후변화를 비롯한 다양한 자연현상의 불확실성을 고려하지 못하고, 지표별 가중치 선정에 있어 전문가의 주관성이 지나치게 반영되는 등, 지표와 가중치에 관한 객관성을 확보하지 못한 점이 한계점으로 지적되고 있다. 따라서 평가 방법론에 대한 보다 다양한 연구와 시도가 필요한 실정이다. 이러한 상황에서 최근 데이터가 가지는 정량적 특성을 이용해 불확실성을 고려한 엔트로피 가중치 산정법을 이용한 연구가 홍수와 산사태 등의 재해 취약성 평가와 수문학 분야에서 이루어지고 있다. 관련 연구들을 통해 엔트로피 기법을 활용한 가중치의 적용 타당성들이 확보되고 있는 바, 대기오염 취약성 분야에도 적용가능한 방법으로 판단된다.

따라서 본 연구는 최근 강조되고 있는 엔트로피 가중치 산정법을 활용하여 대기오염 취약성 평가를 전국 시군구를 대상으로 수행하고자 한다. 이를 통해 전국 시군구의 대기오염 취약성을 비교 분석하고, 엔트로피 가중치 방법론의 활용가능성을 검토하였다.

본 연구의 방법론은 크게 두 부분으로 구성된다. 첫째, 지표의 정량적 분석을 통해 불확실성을 고려하여 가중치를 산정하는 엔트로피 방법을 이용해 지표별 대기오염 영향에 대한 가중치를 계산한다. 둘째, 도출한 엔트로피 가중치를 지표별로 적용하고 이를 단순합산법과 취약성-탄력성 지표(VRI: Vulnerability-Resilience Indicator) 계산법으로 통합하여 249개 시군구를 대상으로 대기오염에 대한 취약성을 평가하였다.

## 2. 선행연구

### 1) 엔트로피를 활용한 가중치 산정

열역학 이론에 기본을 두고 있는 엔트로피 이론은 열역학 엔트로피, 통계학적 엔트로피, 정보 엔트로피의 세 가지 형태로 나뉘며(전민우 등, 2003), 본 연구에서는 지표의 정보적 특성을 고려할 수 있는 정보 엔트로피의 개념을 기초로 한다. 정보 엔트로피는 클로드 새넨(Claude Shannon)에 의해 제안되었으며, 대안과 속성을 많이 포함하는 다기준 의사결정 문제에 대해 의사결정자가 이해하기 쉬운 정보이론 방법을 적용한 것이다. 각 정보 속성의 크기분포를 기반으로 분산에 따라 엔트로피가 결정되는 방법으로, 각 지표의 대안별 값의 응집도가 높을수록 값은 커지고, 반대로 흩어져 있을수록 엔트로피 값은 작아지게 된다(김환석 등, 2012).

엔트로피를 이용한 가중치 산정방법의 장점은 우선, 전문가 설문조사 기반의 가중치 산정법인 델파이 기법이나, AHP기법이 가지는 한계점인 참여자의 주관성이 배제되고, 정량적 자료의 특성만을 반영하는 객관적인 분석이 가능하다는 것이며, 추가적으로 다음과 같은 장점을 가진다. 첫째, 지표들의 불확실성을 고려할 수 있다. 정보이론의 엔트로피는 정규화 과정을 통해 어떤 확률분포의 불확실성을 측정하는 척도이므로 이를 고려한 가중치의 산정은 불확실성을 반영하고 있음을 의미한다. 둘째, 지표간 연관된 정보를 상세히 설명할 수 있다. 엔트로피 값은 각 지표의 변수별 분포를 바탕으로 도출되고, 도출된 엔트로피 값의 지표별 비교를 통해 엔트로피 가중치를 산정하므로 지표간 연관된 정보를 알 수 있다. 셋째, 엔트로피 가중치 산정은 수학적 계산과정을 거쳐 도출되므로 정보량이 많을 때 활용하기 적합하다. 마지막으로 다른 가중치 산정방법과 결합하여 사용이 가능하다. 엔트로피는 측정된 정보를 이용해 가중치를 산정하는 방법이므로 AHP나 델파이기법과 같이 전문가 설문조사를 통해 산정한 가중치와 결합해서 사용이 가능하다.

이러한 엔트로피를 활용한 평가는 건강 및 환경 분야에 적용한 사례는 없으나, 물관리 분야의 취

약성 평가에는 적용된 바가 있다. 김환석 등(2012)은 낙동강 유역을 대상으로 대규모 하천정비사업 영향에 의한 취약성 변화를 평가하고자 하였다. 이때 엔트로피 방법을 이용해 결정된 가중치를 이용하여 취약성을 계산하고 지도화 하여 홍수 취약성이 높은 지역을 도출하고 과거자료와 비교를 통해 타당성을 확보하였다. 최현일 등(2013)은 통합 홍수위험 관리 측면에서 홍수위험도에 따라 지구를 구분하고자 압력지표, 현상지표, 대책지표를 대표하는 세부항목들을 선정하여 시군구 단위의 평가지표 자료를 구축하고, 엔트로피 가중치 산정방법을 이용해 주관적 판단을 최소화하여 홍수 위험 지구를 선정하였다.

엔트로피 가중치 산정은 측정된 자료만을 가지고 수리적 방법에 의해 지표간 가중치를 도출하는 방법으로, 비교적 객관적이고 정량적인 기법으로 불확실성을 고려할 수 있는 장점이 있고 홍수취약성 평가 분야에서도 타당성을 확인한 만큼 취약성 지표를 활용한 대기오염 취약성 분석에도 적용가능한 방법이라고 할 수 있다.

### 2) 대기오염 취약성 평가

최근에 수행된 대기오염 관련 취약성 평가는 기후변화와 연계하여 사회전반에 대한 취약성 평가의 한 부분으로 고려되는 경우가 많았다. 대기오염으로 인한 건강영향에 초점을 맞춘 연구로는 배현주 등(2012), 신호성(2010), 신호성·이수형(2014) 등이 있다. 배현주 등(2012)은 대기오염의 건강영향 분석을 위해 사회적·물리적 측정 자료와 기상요소 대기오염 물질의 농도에 따른 시·공간적 추세를 연구하고 기후변화 시나리오를 활용하여 건강영향을 예측하고, 취약성 가중치 산정에 있어 AHP와 예산배분법(Budget Allocation Process, BAP)을 이용하였다. 또한 FUZZY TOPSIS 기법을 활용해 최종 취약성을 평가하였다. 신호성(2010)은 기후변화에 대한 건강영향을 다양한 측면에서 살펴보고 대기오염 영향으로 발생하는 건강영향과의 관계를 파악하였다. 또한 상대적으로 취약한 집단과 가구별 기후변화 취약 요소의 공간분포를 분석하는 등의 건강영향에 대한 시·공간적 분포를 비교해 봄으로서 취약한 정도를 분석하였다. 또한

신호성·이수형(2014)은 취약성 평가 모형에 근거해 기후변화 건강 취약성 지표를 선정하고 실증자료를 구축을 통해 전국 시군구 행정단위 수준의 기후변화 건강 취약성 평가 지표를 개발하였다. 또한 자료의 표준화와 AHP 가중치를 지표에 적용하여 취약성을 분석하였다.

기존의 취약성 평가 연구에서 지표들의 통합은 주로 단순합산을 통한 분석이 일반적이었다. 그러나 평가의 신뢰도를 높이기 위해 지표의 통합방법으로 FUZZY TOPSIS를 활용하여 불확실성을 고려하거나(배현주 외, 2012), 지표간 보상성을 고려한 비보상성 다기준 합산법이 시도되기도 했다(신호성·이수형, 2014). 그 외 유가영·김인애(2008), Moss 등(2001)은 취약성 평가과정에서 노출과 민감도에 포함된 지표들로 영향 지수를 계산하고 적응역량에 포함된 지표들로 적응지수를 도출하여 이들을 합산하는 취약성-탄력성 지표(Vulnerability - Resilience Indicator, VRI)를 이용하였다.

기후변화 취약성 평가와 대기오염에 대한 건강 영향 취약성 평가에 관한 선행연구들은 국내에 적합한 지표를 개발하고 활용하는 방안에 대한 방향성을 제시하고 있다. 또한 가중치 산정과 통합 지수 산정을 통해 취약성 분석을 진행하고 있었지만, 대체로 AHP, 델파이기법과 같은 전문가 설문조사에 의해 도출된 가중치를 활용하고 있었다. 따라서 본 연구를 통해 엔트로피를 이용한 가중치를 활용하여 대기오염 취약성 평가를 수행하는 것은 내용적 측면 뿐 아니라 방법론적 측면에서도 큰 의미가 있을 것으로 보인다.

### 3. 연구방법

#### 1) 취약성 평가 개요

본 연구에서의 취약성 평가는 <그림 1>의 흐름도와 같이 분석에 필요한 지표를 선정하고, 표준화 과정을 거치고, 엔트로피를 이용한 가중치를 산정한 뒤 표준화된 자료에 가중치를 적용하여 합산 방법에 따라 취약성을 평가한다.

평가는 단순합산과 취약성-탄력성 지표(VRI) 계산법 두 가지를 이용하여 평가하고, 지리정보시스템(GIS)을 이용해 지도화 하고 결과를 비교분석

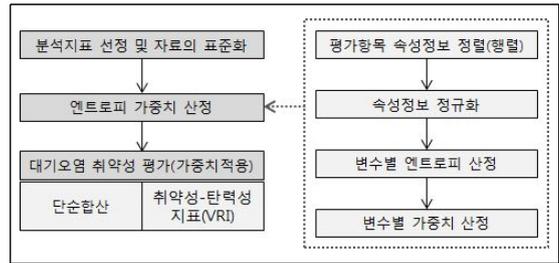


그림 1. 엔트로피 가중치 대기오염 취약성 평가 흐름도

하였다.

#### 2) 대기오염 취약성 평가 지표

대기오염 취약성 평가 지표는 선행연구(배현주 등, 2012; 강정은 외, 2012)를 바탕으로 <표 1>과 같이 취약성 지표를 구축하였다. 지표는 공간적으로 전국 249개 시군구를 대상으로, 시간적으로 2010년 대기오염 영향 분석 자료를 노출, 민감, 적응능력으로 분류하였다.

노출은 주로 기상요인으로 일 최고기온과 강수량, 대기오염요인으로 오존농도 기준 초과 일수와 여름철 오존 평균 농도를 사용하였다. 시스템의 민감도는 취약대상과 취약환경요인으로 13세 이하 인구, 65세 이상 인구, 독거노인 등 각 비율과 도로면적, 대기오염배출 시설, 차량 등록대수, 대기오염 배출 시설 수, 호흡기계 및 심혈관계 관련 질환 입원·사망 지수를 이용하였다. 마지막으로 지자체별 적응능력은 사회·경제적 요소로 지역 내 총생산, 재정자립도, 실업률, 교육수준을 이용하고, 보건 의료 요인으로 주민 1인당 보건 의료 예산, 인구당 의사수, 인구당 응급의료기관 수, 인구당 보건소 인력을 활용하고, 대기 관리 요인으로 주민 1인당 환경예산, 대기오염 농도 알람체계, 인구당 환경공무원 인력, 녹지면적 비율을 선정하고 활용하였다.

#### 3) 자료의 표준화 및 적응지표 변환

서로 단위가 다른 변수들 간의 연산을 위해서는 우선 자료의 표준화 과정이 필요하다. 일반적으로 Z-SCORE변환, 최댓값을 이용한 변환, 최대-최소를 이용한 스케일재조정, 기준선과의 차이 등의

표 1. 엔트로피 가중치 활용 대기오염 취약성 분석 이용지표

요소	세부지표	출처	요소	세부지표	출처
노출	일 최고기온(연평균)	기상청 AWS	적응 능력	지역 내 총생산	통계청
	강수량			행정안전부	
	8시간 평균 오존농도의 60ppb 초과 일수	국립환경 과학원		재정자립도	통계청
	시간 오존농도 100ppb 초과일수			교육수준	행정안전부
	여름철 오존 연평균 농도			주민 1인당 보건의료예산	
민감도	65세 이상 인구 비율	통계청		인구당 의사 수	통계청
	13세 이하 인구 비율			인구당 응급의료기관 수	
	독거노인 비율			인구당 보건소 인력	행정안전부
	기초생활 수급자 비율			주민 1인당 환경예산	
	장애인 비율			대기오염농도 알람체계	
	도로면적 비율	국토교통부		인구당 환경공무원 인력	행정안전부
	대기오염배출 시설 수	통계청		녹지면적비율	국립환경 과학원
	자동차등록대수				
	호흡기계 관련 질환 입원환자 수	국민건강 보험공단			
	심혈관계 관련 질환 사망자수	통계청			

방법이 있다(유가영·김인애, 2008). 본 연구에서는 가중치 산정과 취약성 분석에서 변수간의 연산을 위해 UNDP(2006)가 사용한 표준화 방법인 최대-최소값(Dimension Index)을 이용한 스케일 재조정을 통해 표준화 하였다.

$$M_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{Dimension index})$$

특성별로 노출, 민감도, 적응능력으로 연구지표를 분류할 수 있으며, 적응능력 지표의 표준화된 속성 값들은 노출, 민감도 지표들과 취약성에 대한 영향의 방향이 같도록 변환해 사용하였다.

#### 4) 취약성 지표 연산

취약성 평가에서 가중치가 적용된 지표의 통합 방법에는 단순합산, 기함평균을 이용한 합산, 다기준 합산방법 등 다양한 합산방법이 존재한다(신호성·이수형, 2014). 본 연구에서는 단순합산(Linear aggregation)과 Moss 등(2001)과 유가영·김인애(2008)는 취약성 평가를 위해 취약성을 민감도와

적응능력의 함수로 제시한 취약성-탄력성 지표(VRI)를 이용하여 평가하였다.

단순합산은 표준화된 값에 엔트로피 가중치를 적용한 값을 단일 합산한 값을 이용해 취약성을 평가하는 방법이며, 취약성-탄력성 지표는 먼저 표준화된 변수들에 각각 가중치를 곱하여 분야별 지수(노출, 민감도, 적응능력)를 계산한다. 도출된 노출과 민감도 지수를 평균하여 잠재영향지수를 계산한 후 적응 지수와 계산하는 과정을 거쳐 평가한다(유가영·김인애, 2008). 취약성-탄력성 지표 계산 절차는 다음과 같다.

##### ① 노출 지수 계산

$$\text{Exposure Score} = \frac{\sum^n (w_j \times \text{Rescaled Exposure Factors})}{\text{Number of Variables}}$$

##### ② 민감도 지수 및 잠재영향지수 계산

$$\text{Sensitivity Score} = \frac{\sum^n (w_j \times \text{Rescaled Sensitivity Factors})}{\text{Number of Variables}}$$

$$\text{Impact Score} = (\text{Exposure Score} + \text{Sensitivity Score})/2$$

엔트로피 가중치를 활용한 대기오염 취약성 평가

③ 적응 지수 계산

$$Adaptation.Score = \frac{\sum (w_j \times Rescaled\ Adaptation\ Factors)}{Number\ of\ Variables}$$

④ 취약성-탄력성지표 계산

$$VRI = (Adaptation\ Score + Impact\ Score)$$

5) 엔트로피 가중치 산정

엔트로피 가중치 산정 절차는 먼저 지표의 변수들을 각 열이 지표의 값을 대표하도록 하는 형태로 자료들을 구성하고 정규화 과정을 거친다. 정규화 된 지표의 엔트로피 값을 산정한 후 최종적으로 엔트로피 가중치를 산정한다. 가중치 산정의 절차를 살펴보면 다음과 같다.

① 지표의 자료 행렬 구성 및 정규화

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} m : \text{행정구역 개수} \\ n : \text{대리변수(지표) 개수} \end{matrix}$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$$

② 정규화 된 자료를 이용한 지표별 엔트로피 산정

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \log p_{ij} \quad (k = \frac{1}{\log n}; j=1,2,\dots,n)$$

③ 계산된 지표별 엔트로피를 다양성을 고려해 엔트로피 가중치 산정

$$d_j = 1 - E_j$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (j=1,2,\dots,n) \quad \begin{matrix} d_j : \text{다양성 정도} \\ w_j : \text{가중치} \end{matrix}$$

4. 연구결과

1) 엔트로피 가중치

노출, 민감도, 적응능력 세 가지 변수 특성별 지표간에 엔트로피 가중치를 산정하였고 그 결과 값은 <표 2>와 같다.

전체적으로는 시간 오존농도 100ppb 초과일수에 대한 가중치가 가장 높게 나타났으며 그 외 대기오염 배출 시설 수, 8시간 평균 오존농도의 60ppb 초과 일수, 인구당 환경 공무원 인력등도 비교적 높은 가중치를 나타냈다.

취약성의 구성 요소 별로 살펴보면 기후노출에

표 2. 변수 특성별 엔트로피 가중치

요소	세부지표	요소	세부지표		
노출	일 최고기온(연평균)	0.0005	적응능력	지역 내 총생산	0.1595
	강수량	0.0410		재정자립도	0.1025
	8시간 평균 오존농도의 60ppb 초과 일수	0.2358		실업률	0.0353
	시간 오존농도 100ppb 초과일수	0.7029		교육수준	0.0734
	여름철 오존 연평균 농도	0.0199		주민 1인당 보건의료예산	0.0298
민감도	65세 이상 인구 비율	0.0599		인구당 의사 수	0.0122
	13세 이하 인구 비율	0.0102		인구당 응급의료기관 수	0.0185
	독거노인 비율	0.1026		인구당 보건소 인력	0.0112
	기초생활 수급자 비율	0.0537		주민 1인당 환경예산	0.0705
	장애인 비율	0.0252		대기오염농도 알람체계	0.0398
	도로면적 비율	0.1232	인구당 환경공무원 인력	0.2396	
	대기오염배출 시설 수	0.2999	녹지면적비율	0.2078	
	자동차등록대수	0.1157			
	호흡기계 관련 질환 입원환자 수	0.1506			
	심혈관계 관련 질환 사망자수	0.0591			

포함되는 지표들 중 시간오존 농도 100ppb 초과 일수에서 가중치가 가장 높고, 8시간 평균 오존농도 60ppb초과 일수, 여름철 오존 연평균 농도 순으로 높게 나타났으며, 일 최고기온에서 가장 낮은 가중치를 나타냈다. 민감도에서는 대기오염 배출시설 수에서 가장 높고, 호흡기계 관련 질환 입원환자 수, 도로면적비율, 자동차 등록대수 순으로 높았으며, 13세 이하 인구 비율에서 가장 낮게 나타났다. 마지막으로 적응능력에서는 인구당 환경공무원 인력에서 가장 높게 나타나고, 녹지면적비율, 지역내 총생산, 재정자립도 순으로 높게 나타났으며, 인구당 보건소 인력이 가장 낮은 가중치 값을 보였다.

**2) 취약성 평가결과**

취약성 평가 결과는 249개 시군구를 대상으로 지도로 표시하였다. 노출과 민감 지수는 노출도와 민감도가 높을수록, 적응능력지수는 적응능력이 떨어질수록 취약성이 높게 나타난다.

요소별 결과를 살펴보면, 서울·경기도와 경북, 전남일부지역에서 대기오염에 대한 노출지수가 상대적으로 높게 나타났으며, 특히 <그림 2>에서 보여주듯 서울의 광진구와 노원구, 경기도의 화성시, 군포시, 광주시, 양평군이 대기오염 노출지수가 높은 지역으로 나타났다. 민감 지수의 경우 지역적으로 서울·경기와 부산 일부지역, 제주시에 높은 시스템 민감 지수를 보였으며, 그 중 경기도의 화성시와 김포시, 경남의 김해시, 대구의 달서구 등에서 높은 민감지수가 나타나고 있다. 또한 부산, 광주, 충남과 경기도 지역에서는 적응능력이 낮은 지역들이 다수 분포하고 있으며, 특히 부산은 중구, 영도구, 동구 등 많은 지역에서 대기오염에 관한 적응능력이 상대적으로 낮은 것으로 나타나고 있다(그림 2).

대기오염 취약성 평가 결과는 두 개의 값으로 도출(단순합산, 취약성-탄력성 지표)하였다. 엔트로피 가중치를 적용한 값을 단일 합산한 결과인 단순합산결과는 <그림 2>의 아래와 같이 나타났다. 취약성-탄력성 지표(VRI)을 통한 결과는 앞서 산정된 노출지수와 민감지수의 연산을 통해 잠재영향 지수를 산출하고, 적응능력 지수와 연산을

통해 <그림 3>의 아래 그림과 같이 나타나며, <표 3>은 두 개의 취약성 평가별 상위 10개 지역과 하위 10개 지역을 나타내고 있다. 취약성-탄력성 지표(VRI)에서는 화성시, 광진구, 군포시, 여주군, 광주시 순으로 취약성이 높게 나타났다. 반대로 진안군, 장수군, 임실군, 무주군, 속초시 순으로 대기오염에 대해 안전하게 나타났다. 단순합산을 통한 취약성 평가 결과는 화성시, 광진구, 김포시, 광주시, 군포시 순으로 취약성이 높게 나타났으며, 진안군, 속초시, 장수군, 무주군, 평창군 순으로 대기오염에 대한 취약성이 낮은 것으로 나타났다.

취약성-탄력성 지표(VRI)의 취약성과 단순합산의 결과 값의 패턴을 비교하기 위해 핫스팟(Hotspot) 분석을 실시하였다. <그림 4>의 핫스팟 분석 결과(HH: 주변지역과 해당지역이 모두 취약성이 높

**표 3. 대기오염 취약성 평가 상·하위 각 10개 지역**

구분	단순합산		취약성-탄력성 지표(VRI)	
	시군구 code	시군구 이름	시군구 code	시군구 이름
상위 10개	31240	화성시	31240	화성시
	11050	광진구	11050	광진구
	31230	김포시	31160	군포시
	31250	광주시	31320	여주군
	31160	군포시	31250	광주시
	31260	양주시	31230	김포시
	31070	평택시	31260	양주시
	11110	노원구	31380	양평군
	31320	여주군	11110	노원구
31270	포천시	31092	단원구	
하위 10개	35320	진안군	35320	진안군
	32060	속초시	35340	장수군
	35340	장수군	35350	임실군
	35330	무주군	35330	무주군
	32340	평창군	32060	속초시
	35350	임실군	35360	순창군
	32050	태백시	32340	평창군
	35360	순창군	32050	태백시
	33390	증평군	35012	덕진구
32350	정선군	11230	강남구	

엔트로피 가중치를 활용한 대기오염 취약성 평가

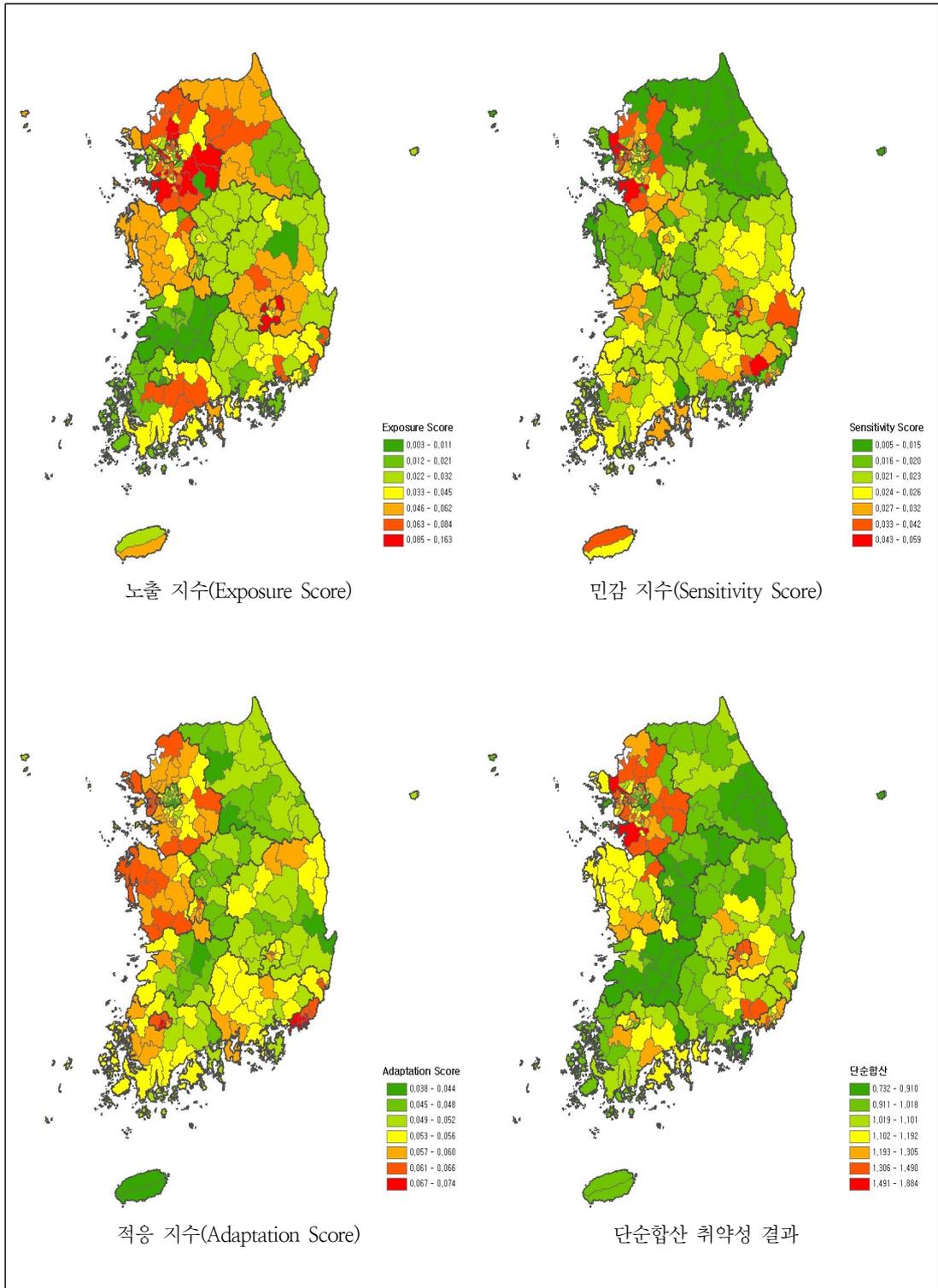


그림 2. 노출, 민감, 적응역량 및 단순합산 취약성 결과

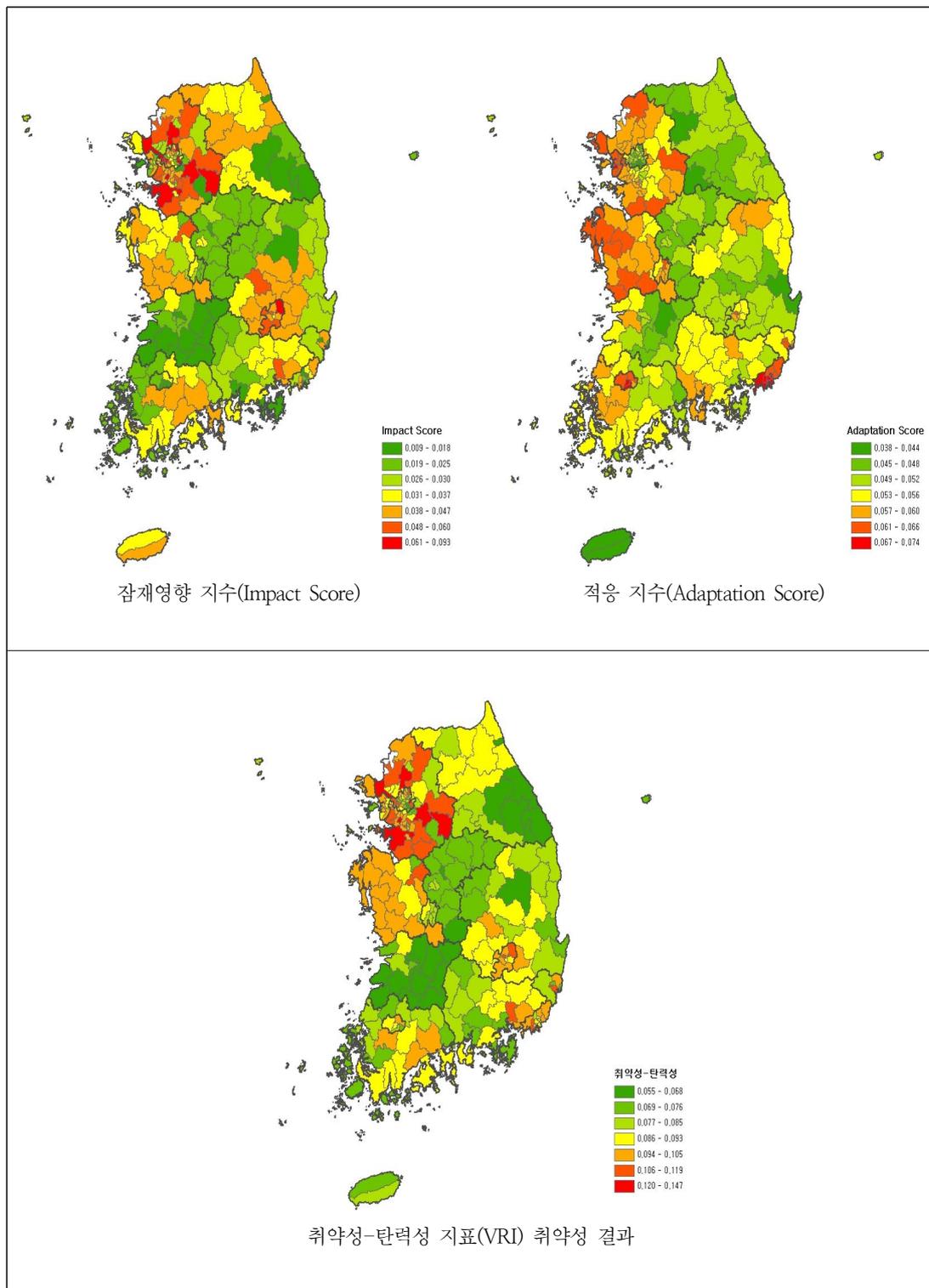


그림 3. 잠재영향, 적응 및 취약성-탄력성 지표 취약성 결과

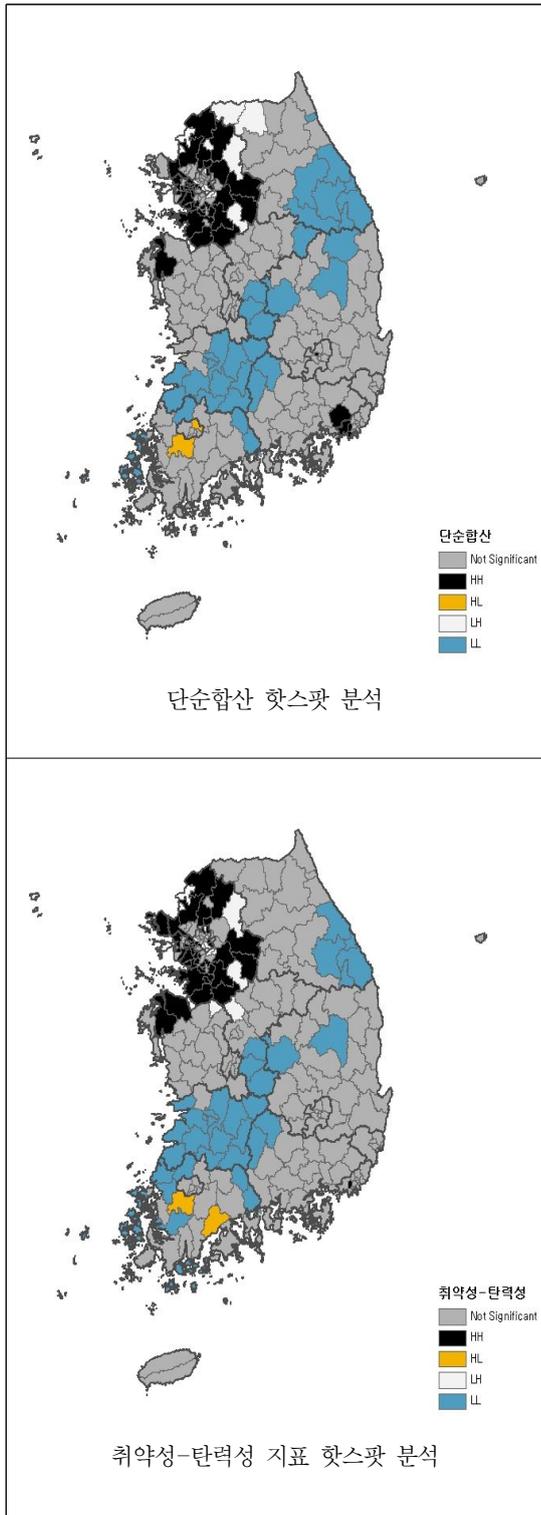


그림 4. 핫스팟 분석을 통한 취약성 평가결과 비교

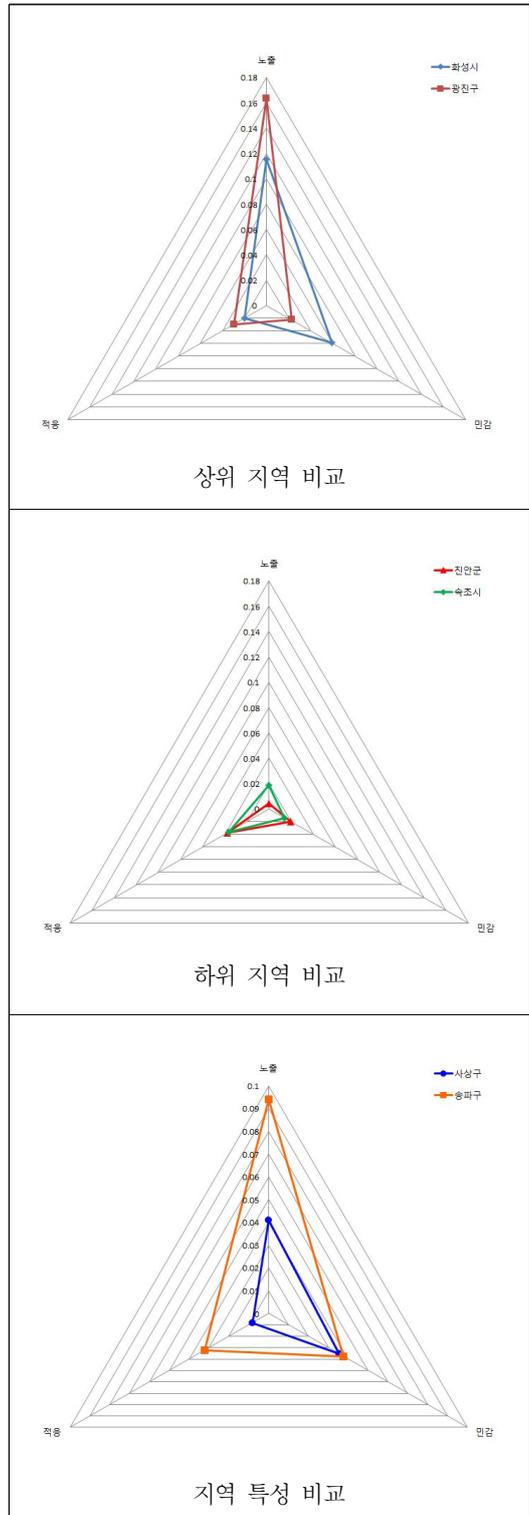


그림 5. 지역별 취약성 요인 비교

음, HL: 주변지역의 취약성은 낮으나 해당지역의 취약성이 높음, LH: 주변지역의 취약성이 높으나 해당지역의 취약성은 낮음, LL: 주변지역과 해당 지역 모두 취약성이 낮음)를 참고해 볼 때 두 가지 결과 값의 공간 패턴은 경기도와 강원도 내륙 일부지역, 부산에서 약간의 차이를 보이지만, 전반적으로 서울·경기 지역에서 높은 취약성을 보이고, 전라북도와 강원도, 충청북도 일부를 포함하여 한반도 남서부에서 동쪽을 가로지르는 내륙 지역에서 낮은 취약성 패턴을 보이고 있다. 정리하면 두 방법 모두 유사한 형태의 취약성 공간분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구의 분석결과는 지역별 특성이 반영된 것으로 지역별로 세부취약 요인의 분석이 가능하다. 취약성-탄력성 지표 분석을 기준으로 취약성이 높게 나타나는 지역과 낮게 나타나는 지역의 특성을 비교하기 위해 상위 지역에 포함되는 화성시와 광진구를 대상으로 방사형 그래프를 작성하였고, 하위 지역인 진안군과 속초시의 결과를 방사형 그래프로 나타내었다. 또한 지역의 특성별 비교를 위해 특정 지표에 따라 취약성에 큰 영향을 받는 부산 사상구와, 서울 송파구를 그래프로 나타내었다(그림 5).

상위 지역인 취약지역들은 대기오염에 대한 노출요인이 지역 전체의 취약성에 크게 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 다시 말해, 이들 지역은 다른 지역에 비해 대기오염에 대한 적응역량은 상대적으로 낮으며, 노출에 대한 영향은 상당히 높음을 확인할 수 있다. 이에 반해, 대기오염 취약성이 낮은 지역들은 다른 지자체들과 비교할 때 시스템의 민감 정도의 차이는 크지 않았으나 상대적인 노출 정도가 낮아 취약성이 낮게 결정되는 경우가 많았다.

지역 특성을 비교해 보기 위해 비슷한 수준의 취약성을 보인 사상구와 송파구를 살펴보면, 사상구의 경우 잠재영향 지수에 속하는 노출지수가 낮은 값을 가져 대기오염에 대해 안전성이 높을 가능성이 크지만, 상대적으로 적응역량이 매우 낮아 전체 취약성이 높이는 결과를 초래했다. 이에 반해 송파구는 노출지수와 민감도 지수의 값이 최상위에 들지만 적응역량이 높아 잠재영향 지수 값에 비해 상대적으로 낮은 취약성을 보였다.

이러한 취약성 지수의 구성요소별, 지표별 분석은 지자체별 대기오염 취약성에 영향을 미치는 요소가 다르고 세부지표별 영향의 크기도 차이가 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 개별 지역별로 부문별, 지표별 상세분석을 통해 지역 맞춤형 대기오염 대책마련이 필요하며, 취약성 평가과정은 이러한 지역 특성에 파악에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 대기오염 취약성 평가에 있어 다양한 가중치 산정법 중 변수들의 정량적 정보를 이용하여 불확실성을 고려한 엔트로피를 이용해 가중치를 산정하고 적용하고자 하였다. 이를 위해 지표의 분류와 표준화 및 계산과정을 거쳐 엔트로피 가중치를 산정하고 적용하여 노출, 민감, 적응 지수별로 분석해 보고, 단순합산과 취약성-탄력성 지표의 합산 두 가지 방법을 이용해 취약성을 평가하였다.

엔트로피를 이용한 가중치는 노출 지표에서는 시간 오존농도 100ppb 초과일수가, 민감도 지표에서는 대기오염 배출시설 수, 적응능력에서는 인구당 환경 공무원 인력이 높은 가중치 값을 나타내었다. 계산된 가중치를 활용하여 합산한 취약성 평가 결과를 살펴보면, 단순합산한 취약성 평가 결과는 화성시, 광진구, 김포시, 광주시 순으로 높은 취약성을 보였으며, 취약성-탄력성 지표(VRI)를 통한 결과에서는 화성시, 광진구, 군포시, 여주군 순으로 높은 취약성을 보였다. 두 평가 방법 간 결과의 비교를 통해 취약성 평가 값과 순위에 약간의 변동은 존재하였으나 전국적인 취약성의 공간패턴에는 큰 차이를 보이지 않았다.

본 연구에서 제시한 엔트로피 가중치를 통한 대기오염 취약성 평가는 설문조사를 통한 가중치 산정이 아닌 자료에 기반한 객관적인 취약성 평가로 불확실성을 동반하는 기후변화와 대기오염 취약성 평가에 활용가치가 높을 것으로 보인다. 그리고, 이러한 취약성 평가결과는 지자체별 특성이 반영된 것으로 세부적인 분석을 통해 지역 맞춤형 정책수립에 활용될 수 있다.

엔트로피 방법을 통한 가중치 산정은 정량적 자

료의 분포에 따라 결정되어 주관이 배제된 객관적인 취약성 분석이 가능 하지만, 지표간 가중치의 편차가 큰 값을 가지게 되어 전문가적 관점에서 주요한 지표에서 낮은 가중치를 가지거나, 반대로 주요하지 않은 지표에서 높은 가중치가 산정되기도 하는 한계점이 존재한다. 따라서 추후 취약성 평가에 있어 설문조사를 통해 도출된 가중치와 혼용해 사용하거나, 가중치의 계산과정에서 수정과 보완해 활용한다면 보다 신뢰도 높은 취약성 평가 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한 평가 결과에 대한 정량적인 타당성평가 방안에 대한 연구도 추가적으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

## 문 헌

- 강정은, 이명진, 2012, 퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가, 한국지리정보학회지, 15(3), 119-136.
- 강정은 외, 2012, 기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 수립, 한국환경정책·평가연구원.
- 고재경, 김희선, 2009, 경기도 기후변화 취약성 평가 연구, 경기개발연구원.
- 국립기상과학원, 2009, 기후변화이해하기II: 한반도 기후변화 현재와 미래.
- 기상청, 2012, 한반도 기후전망 보고서.
- 김환석 외, 2012, 기후변화와 대규모 하천정비 사업을 고려한 낙동강 유역 자연재해 홍수 취약성 평가, 한국방재학회논문집, 12(2), 107-113.
- 배현주 외, 2012, 기후변화에 의한 대기오염 및 건강영향 연구II, 국립환경과학원, 한국환경정책·평가연구원
- 신호성 외, 2011, 사회보건분야 기후변화 취약성 평가 및 적응역량 강화, 한국보건사회연구원.
- 신호성, 이수형, 2014, 기후변화 건강 취약성 평가 지표 개발, 환경정책연구, 13(1), 69-93.
- 유가영, 김인에, 2008, 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안, 한국환경정책·평가연구원.
- 이재범 외, 2012, 기후변화에 따른 보건 분야의 취약성 평가: O3을 중심으로, 한국대기환경학회지, 28(1), 22-38.
- 전민우 외, 2003, 엔트로피 개념을 이용한 하천중 단고도 결정, 충북대학교 건설기술논문집, 22(1), 23-34.
- 최현일 외, 2013, 다기준의사결정기법을 이용한 홍수위험지구 선정, 한국방재학회지, 13(2), 237-243.
- 환경부, 2012, 지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도, 국립환경과학원.
- 환경부, 2010, 서울특별시 기후변화 영향평가 및 적응대책 세부시행계획 수립: 건강 및 재난 분야, 한국환경정책·평가연구원, 국가기후변화적응센터.
- Bell M. L. and F. Dominici, 2008, Effect modification by community characteristics on the short-term effects of ozone exposure and mortality in 98 US communities, Am J Epidemiol, 167(8): 986-997.
- Dessai, S. and M. Hulme, 2003, Does climate policy need probabilities?, Tyndall Center for Climate Change Research, UK.
- D. K. Yoon, 2012, Assessment of social vulnerability to natural disasters: a comparative study, Natural Hazard, 63(2), 823-843.
- Hallegatte, S., F. Henriot, and J. Corfee-Morlot, 2008, The economics of climate change impacts and policy benefits at city scale: A conceptual framework, Environment working paper No.4, Paris, OECD
- IPCC, 2007, Climate Change 2007: Impact, adaptation and vulnerability, Parry, M. et al. eds.
- Lin, S. et al., 2008, Chronic exposure to ambient ozone and asthma hospital admissions among children, Environ Health Perspect, 116(12): 1725-1730.
- Moss, R.h., E.L., Brenkert, A.L., Malone, 2001, Vulnerability to climate change: a quantitative approach, Prepared for the US Department of Energy.
- 교신 : 강정은, 609-735 부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2 부산대학교 도시공학과(이메일: jekang@pusan.ac.kr, 전화: 051-510-2451)

Correspondence : Jungeun Kang, Department of Urban  
Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak  
-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 609-735,  
Korea(E-mail: jekang@pusan.ac.kr, Tel: +81-51-

510-2451)

(접수: 2015.10.20, 수정: 2015.11.15, 채택: 2015.11.18)