

연구노트

## 한반도 기후 변화 적응을 위한 취약성 지수 산정에 관한 고찰

김철희\* · 김은화 · 송창근<sup>1)</sup> · 홍유덕<sup>1)</sup> · 유정아<sup>1)</sup> · 홍성철<sup>1)</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공

<sup>1)</sup>국립환경과학원 기후변화연구과

(2011년 2월 3일 접수; 2011년 4월 11일 수정; 2011년 4월 20일 채택)

### A Review of Studies on Vulnerability Indicator for the Climate Change Adaptation over South Korea

Cheol-Hee Kim\*, Eun-Hwa Kim, Chang-Keun Song<sup>1)</sup>, Youdeog Hong<sup>1)</sup>,  
Jeonga Yoo<sup>1)</sup>, Sung-Cheol Hong<sup>1)</sup>

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>1)</sup>Climate Change Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

(Manuscript received 3 February, 2011; revised 11 April, 2011; accepted 20 April, 2011)

#### Abstract

Climate change assessment, together with climate change adaptation process, would be one of the worldwide important issues, and the study on climate change vulnerability indicator has been an essential problem for climate change adaptation. Vulnerability indicator can be used as a good tool to estimate the impact of climate change and to map out the distribution of its vulnerability over the given area both in Korea and other countries. This study addressed the conceptual summary on the assessment of climate change and its adaptation process. Previous studies on how to yield the vulnerability indicators of climate change are reviewed and several previous results of vulnerability indicators applied to Korean provinces are also discussed here.

**Key Words** : Climate change, Vulnerability indicator of climate change, Climate change adaptation

#### 1. 서론

기후 변화 정부간 패널(IPCC) 제 4차 평가보고서에 따르면 현재의 추세대로 연료 사용이 지속되면 지구 평균 온도 상승에 따라 동식물의 20-30%가 멸종 위협에 처할 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2007). 이에 따라 기후 변화 적응(Climate change adaptation)을 위

한 국제적인 노력이 강화되고 있는데 예를 들어 제 13차 UN 기후 변화 협약 당사국 총회(COP13)에서 채택된 발리로드맵의 경우, 당사국들의 온실기체 배출 감축을 통한 기후 변화의 완화뿐만 아니라, 기후 변화의 잠재적 영향과 위험을 파악하게 하는 기후 변화 영향 평가(assessment)와 기후 변화 피해를 최소화하기 위한 기후 변화 적응의 중요성을 심각하게 인식하고 있음을 알 수 있다.

기후 변화 영향평가 및 그 적응에 관한 이슈는 1990년 IPCC 제 2 실무 그룹에서 기후 변화에 따른 영향을 파악하는 데 주력한 것에서 출발하여, 1995년 IPCC 제2차 평가보고서부터 이미 기후 변화에 따른 취약성

\*Corresponding author : Cheol-Hee Kim, Division of Earth Environmental system, Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
Phone: +82-51-510-3687  
E-mail: chkim2@pusan.ac.kr

(vulnerability) 개념이 도입되었고, 제3차, 제4차에 이르기까지 기후 변화 취약성은 기후 변화에 따른 영향과 그에 대한 적응을 연계하는 주요 개념으로 자리 잡게 되었다. 기후 변화 적응이란 지금 당장 온실기체의 배출량을 파격적으로 줄이더라도 기후 변화의 완화 조치 전략이 실효성을 나타내기까지는 상당한 시간이 걸리므로 이에 대한 적응 조치가 상당기간 필연적으로 요구된다는 개념에 기초한다. 따라서 이미 배출된 온실 기체로 인해 미래의 특정 시점까지는 기후 시스템의 변화가 필연적으로 발생할 것이며, 이에 대한 사회 및 경제적인 비용을 줄이기 위한 대응 혹은 적응 전략의 수립을 강조하는 개념이다.

기후 변화 적응을 위한 한 국가의 적응대책을 수립하기 위해서는 현재의 기후 변화 정도를 파악하는 연구와 함께 어디에서 얼마만큼 취약한지에 대한 정보가 최우선적으로 필요하다(IPCC, 2007). 이러한 관점에서 지역별로 기후 변화에 따른 지역별 취약성 지수(vulnerability indicator)를 산정하여 그 공간 분포 결과를 파악하는 것은 적응 대책의 우선순위를 위한 매우 중요한 과정이다. 취약성 지수는 최근까지 국내외 문헌상의 다양한 개념 정의에도 불구하고 기후 변화에 민감한 정도와 이에 따른 적응 능력의 정량화로 요약된다. 그러나 이들 각각의 개념은 직접 산정할 수 없으므로 여러 대리변수(proxy variables)로 추정하게 된다. 외국 주요 연구들의 경향을 살펴보면 대부분 IPCC(2007), UNDP(2005) 등의 개념적 틀을 기초로 대리 변수들의 선정 과정과 결과를 확인할 수 있다(Moss 등, 2001; Wehbe 등, 2005; Cutter 등, 2003).

국내 연구로서 개별 연구보다는 주로 연구원 중심으로 연구되어 왔다. 한국환경정책평가연구원(2008)에서는 우리나라가 기후 변화에 얼마나 많이 노출되는지를 나타내는 지표와 사회 경제적으로 기후 변화에 얼마나 대처할 수 있는지를 지표를 통합하여 시도별 기후 변화 취약성 지수를 산정하였고, 경기개발연구원(2009)에서는 경기지역을 대상으로 취약성 지수를 산출한 바 있다. 그러나 기후 변화 취약성 지수는 기후 변화의 잠재적인 영향을 평가하기에 유용한 통합 도구이지만, 매우 복합적인 개념이라서 직접 측정하거나 관측할 수 없고 관련 국내외 연구들의 매우 제한된 연구에 의해 진행됨에 따라 보다 많은 연구자들이 다

양한 연구를 할 수 있는 기반이 필요한 시점에 있다.

이러한 맥락에서 본 연구는 기후 변화 적응 연구를 위한 기초 작업으로서, 지금까지의 기후 변화 적응과 연관된 문헌을 조사하여 기후 변화 취약성 평가 및 그 지수에 관한 개념적 정리를 시도하였고, 객관적이고 다양한 취약성 지수 산출을 위한 국내외 연구 방법과 결과를 비교·정리하였다. 또한 선행연구에서 우리나라를 대상으로 도출된 취약성 지수 산출 방법론 및 산출된 취약성 지수의 분포 특성을 개략적으로 고찰하였으며, 아울러 더 심도 있는 정량화된 기후 변화 취약성 지수 산출을 위한 향후 연구 방향을 전망하였다.

## 2. 기후 변화 적응 및 취약성 개념

IPCC의 제 3 차 보고서(IPCC, 2001)에서 정의하는 기후 변화 적응(adaptation)은 ‘현재 나타나고 있거나 미래에 나타날 것으로 보이는 기후 변화의 파급효과와 영향에 대해 자연 및 인위적 시스템이 피해를 완화시키도록 조절하거나 유익한 기회로 촉진시키는 활동’으로 정의하고 있다. 예컨대 홍수에 대비하여 토지 이용을 제한한다거나 제방을 설치하여 피해를 줄이는 활동, 혹은 기온이 상승함에 따라 이전에 재배가 어려웠던 작물을 새롭게 재배하는 등 기후 변화의 긍정적인 기회를 활용하도록 하는 총체적 행위가 모두 기후 변화 적응 행동에 속한다. Fig. 1은 IPCC의 기후 변화 적응 원리를 보다 개념적으로 정리한 것인데 한 시스템에 기후 변화라는 스트레스가 작용하면 자체적으로

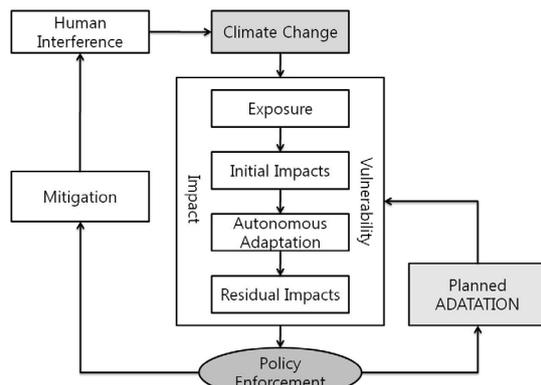


Fig. 1. Conceptual diagram of climate change vulnerability indicators defined by IPCC (2007).

이 스트레스에 적응할 수 있는 자발적 적응 능력이 존재한다. 그러나 자발적인 적응만으로 기후 변화 대응이 어려울 때 기후 변화의 부정적인 영향을 최소화하기 위하여 정교하게 계획된 적응행위가 필요한데, 이때의 계획된 적응행위들을 시행하는 것이 기후 변화 적응이라 할 수 있다.

반면 기후 변화 취약성(vulnerability) 개념은 외부로부터 시스템에 가해지는 영향이 시스템의 대처 및 적응 능력에 얼마나 민감한가를 나타내는 것으로서, IPCC 보고서를 포함한 대체적인 국내외 연구 결과를 종합하면 Fig. 2에 나타난 것처럼 기후 변화 민감도, 기후노출, 그리고 적응 능력의 세 가지 인자로 구성된다(Moss 등, 2001; 한국환경정책평가연구원, 2008; Yoo 등, 2010; 국립환경과학원, 2008). 기후 변화 민감도란 기후 변화로부터 한 시스템이 해롭거나 이로운 영향을 얼마나 받느냐는 정도이며, 적응 능력은 시스템이 자발적으로 기후 변화를 조절하여 얼마나 그 피해를 감소시키느냐는 개념으로 민감도의 반대 개념이 된다. 반면 기후노출은 민감도의 실제 정도를 결정하는 척도로 기후 변화에 대한 노출 정도를 설명하는 개념이다. 대부분의 선행연구에서의 기후노출은 기후 변화에 직접적인 영향을 받을 수 있는 민감도를 계산하는 데 필요한 영향인자로 보았다(IPCC, 2007; Moss 등, 2001).

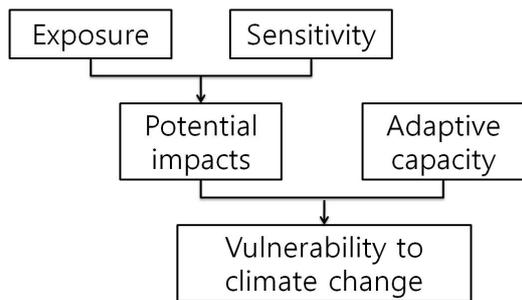


Fig. 2. Categorized variables required to calculate climate change vulnerability indicator defined by IPCC (2007).

그러나 몇몇 선행연구에서는 기후 변화 취약성의 개념을 분석하는 목적에 따라 조금씩 다르게 정의하였는데, 예를 들어 UNDP(2005)에서는 취약성을 아

래와 같이 기후 변화에 대한 민감도와 적응 능력 두 인자에 대한 함수로만 보았다. 즉,

$$\text{취약성(Vulnerability)} = f(\text{민감도(Sensitivity), 적응 능력(Adaptive Capacity)})$$

로 정의한다. 따라서 기후 변화가 시스템에 미치는 영향이 크지만 한 시스템의 적응 능력이 그보다 낮다면 그 시스템은 기후 변화에 취약성이 높다고 말할 수 있으며, 반면 기후 변화의 영향과 시스템의 적응 능력이 모두 크다면 그 시스템은 기후 변화에 적절한 대응을 할 수 있다. 이런 점에서 기후 변화 취약성을 피해에 대한 잠재적 노출 상태로 보는 연구도 있다. 예를 들어 IPCC(1996)에서는 취약성의 정의를 적응 조치가 취해진 이후의 기후 변화 잔여 영향으로 파악한다.

$$\text{취약성} = \text{위험(예상된 기후의 영향)} - \text{적응}$$

따라서 IPCC에서 정의하는 취약성은 미래의 배출 추세의 예측에서 시작된 기후 시나리오에 근거하여 생물-물리적 시스템이 반응하는 정도와 이에 따른 적응 옵션을 밝혀내는 일련의 평가 결과를 의미한다. 여기에는 기후 변화 취약성을 시스템에 노출되는 정도, 생물-물리적 시스템이 반응하는 정도 및 사회경제적 시스템이 이에 대응하는 모든 적응 능력을 포괄하여 계산하기도 한다.

### 3. 기후 변화 취약성 지수 선행 연구

이상에서처럼 기후 변화 취약성 지수를, 최근까지의 국내외 문헌을 통해 종합해 볼 때 대체로 기후 변화에 대한 민감도, 적응 능력 그리고 기후노출 등 크게 세 가지 항목으로 요약되며, 이들 각각의 개념을 하나의 지수로 표현하기 위해서는 관련 대리 변수들을 선정하고 해당 변수의 유의성 검증을 통해 그 대리변수의 유용성을 확인하는 연구가 많다. 따라서 대리변수 선정에 대한 연구를 중심으로 지금까지의 기후 변화 취약성 지수 산출에 대한 국내외 연구를 요약하였다.

#### 3.1. 국외 연구

Moss 등(2001) : 이 연구에서는 취약성 지수에 대한 대부분의 개념을 가장 구체적으로 도입한 연구이

**Table 1.** Indicators, sectors, and proxies used in the vulnerability-resilience indicator prototype (VRIP) model (Moss et al., 2001)

Category	Sensitivity or Adaptive capacity category	Proxy variables
Sensitivity	Settlement/infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Population at flood risk from sea level rise</li> <li>• Population without access to clean water/sanitation</li> </ul>
	Food security	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cereals production/area</li> <li>• Animal protein consumption/capita</li> </ul>
	Ecosystem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % of Land managed</li> <li>• Fertilizer use</li> </ul>
	Human health	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Completed fertility</li> <li>• Life expectancy</li> </ul>
	Water resource	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renewable supply and inflow</li> <li>• Water use</li> </ul>
Adaptive Capacity	Economic capacity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GDP(market)/capita</li> <li>• Gini index</li> </ul>
	Human & civic resources	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependency ratio</li> <li>• Literacy</li> </ul>
	Environmental capacity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Population density</li> <li>• SO<sub>2</sub> high emission area</li> <li>• % of Land unmanaged</li> </ul>

다. 즉 취약성의 개념을 생물물리적인 민감도와 사회경제적인 적응 능력의 함수로 정의하고 이를 토대로 취약성 평가를 수행하였다. 이 연구에서 사용된 방법론은 취약성-탄력성 지수 원형 모형(Vulnerability-Resilience Indicator Prototype model: VRIP model)으로 불리며 크게 민감도 부문과 적응 능력 부문의 대리변수가 나열되어 있다. 민감도 부문에는 인간정주, 식량 안보, 보건, 생태계, 수자원 등 5개 분야가 있고, 적응 능력 부문에는 경제적 능력, 인적자원, 환경 역량 등으로 요약하였다 (Table 1).

각 항목에서 사용된 대리변수들은 1990년의 세계 자료나 1990년 미국 자료를 기준으로 각각의 수치를 표준화 되었는데, 이는 통계 자료로부터 기준선을 정하고 그 기준선과의 차이(distance to reference country)를 구체화하는 방법으로 대리변수의 유의성을 평가하였다. 즉 표준화된 대리변수는 민감도와 적응 능력 부문으로 나뉘어 각 부문을 구성하는 대리변수의 기하평균치가 각각 통합 민감도 지수(음수)와 통합 적응 능력 지수(양수)로 계산되고, 이 둘을 합하여 통합적 취약성 지수로 계산하였다. 이 방법의 장점은 취약성을 구성하는 요소들이 계산 이후에도 남아있으므로

지수 사용자들이 이를 부문별로 분석하고자 할 때 도움이 될 수 있다.

Brooks 등(2005) : 앞서 소개한 Moss 등(2001)의 연구가 전 세계를 대상으로 국가별 기후 변화 취약성을 비교 분석한 것이라면, Brooks 등(2005)은 국가 수준의 취약성을 구성하는 여러 변수들을 종합하여 국가별로 주요한 변수를 추출하려는 목적으로 취약성 연구를 수행하였다. 취약성을 구성하는 주요 변수들은 국가 단위에서의 취약성과 적응 능력의 지수로 제시하였는데, 항목별로는 기후 위험과 사회적으로 구성된 취약성의 함수로 정의하는 개념 틀에 근거하고 있다. 취약성을 구성하는 주요 대리변수의 유용성을 파악하기 위해 경험적인 연구 방법을 도입하였는데, 이 때 문헌 조사와 전문가의 판단을 통해 취약성 대리 변수 후보로 경제, 보건과 영양, 교육, 인프라, 거버넌스, 지리 및 인구학적 요인, 농업, 생태, 기술 분야의 46개 변수를 도출하였고, 이 중에서 보다 중요한 변수를 선정하기 위하여 잠재적 대리변수와 기후위험에 따른 초과사망을 자료간의 상관성을 계산하여 유의한 상관성을 갖는 10개이 주요 평가 지표로 선정하였다. 다양한 가중치 지표 세트를 활용하여 국가별 취약성

을 평가한 결과 사하라 이남의 아프리카에 위치한 국가들이 대체로 취약한 것으로 보고하였다.

Wehbe 등(2005) : 이 연구에서는 농업 분야에 국한하여 취약성을 평가하는 방법론을 제안하였다. Moss 등(2001)이 GDP, 인구 증가, 복지 등 국가 수준의 전반적인 적응 능력을 대표하는 지수를 사용하였다면, Wehbe 등(2005)은 농업 부문에 초점을 맞추어 농업 부문의 적응 능력을 표현할 수 있는 보다 구체적인 지수를 적용하였다. 이 연구 역시 기후 변화의 취약성을 민감도와 적응 능력의 함수로 보고, 농업 부문에서의 적응 능력은 그 시스템의 지속가능성 특성에도 연관이 있다고 보았으며 민감도는 다른 분야가 아닌 농업 분야 특유의 대리 변수만을 취급하였다는 점에서 매우 구체적이다.

### 3.2. 국내 연구

한국환경정책연구원(2008) : 이 연구에서는 Moss 등(2001)이 제안한 취약성 지수를 우리나라 지역별 취약성 지수 분포 파악에 직접 적용하여 처음으로 그 결과를 도출한 것에 많은 의미가 있다. Moss 등(2001)에서 제시한 15개의 대리변수를 우리나라 16개 시도별로 수집하여 2000년 서울자료를 기준으로 표준화하였으며, 민감도와 적응 능력 항목에 사용된 대리변수는 Moss 등(2001)의 항목을 변형하여 인간정주와 기반시설, 경제적 능력, 거버넌스, 인력자원과 교육, 환경역량 등을 포함한다. 표준화된 자료를 기반으로 우리나라 지역별 취약성-유연성 지수(Vulnerability-Resilience Indicator: VRI)의 공간분포를 도출하였다. 따라서 이 연구에서는 우리나라 광역지자체를 대상으로 기후 변화 취약성을 평가하여 시도간의 취약성 정도를 파악할 수 있는 기반을 마련하였다는 점에서 의미가 크다 할 수 있다. 그 결과 취약성-탄력성 지수는 민감도가 높은 제주, 충청남도 등에서 취약성이 상대적으로 높았고 적응 능력이 높게 계산된 서울, 경기지역 등에서 취약성이 낮게 계산되었다. Yoo 등(2010)은 한국환경정책평가연구원(2008)의 연구 개념을 목포시를 포함한 우리나라 남서 해안가에 적용하여 평균해수면 상승에 따른 기후 변화 취약성 지표를 연구한 바 있다.

국립환경과학원 (2008, 2009) : 국립환경과학원의

연구 결과는 한국환경정책평가연구원(2008) 및 국립환경과학원(2008)의 결과가 분야별로 따로 구분되지 않은 것을 보완하기 위하여 16개 분야별 기후 변화 취약성을 각각 따로 계산할 수 있는 도구(tool-kit)를 개발하였다(국립환경과학원, 2009, 2010). 기후 변화 취약성 관련 지자체 전문가들이 직접 사용할 수 있도록 기후 변화 적응에 필요한 각 시군구별, 분야별 취약성 지수를 선정한 후 각 지역별 기후 변화 취약성 지수를 실제 계산할 수 있도록 취약성 연구 도구를 개발하였다. 적용 가능한 지역은 우리나라 전체를 포함하는 232개 시군구를 대상으로 하였고 적용 가능한 분야는 16개 분야 즉, 농업 및 축산, 예 및 임업(산림), 수문수자원수질, 산업, 보건·건강, 생태계, 대기질, 수산업, 관광·레저, 해양생태, 재해, 교통·통신, 에너지, 건설·토목·건축, 교육, 거버넌스 및 기타로 구분하여 취약성 지수를 계산할 수 있도록 하였다.

경기개발연구원(2009) : 경기개발연구원에서는 우리나라 광역 지자체 대상에서 기초 지자체로 취약성 지수 산정 범위를 좁혀 연구하였다. 즉, 기후 변화 취약성이 광역 지자체 뿐만 아니라 기초 지자체 내에서도 편차를 보일 것이라는 전제하에 기후 변화 적응의 지역성을 고려하는 것을 특징으로 하고 있어 기초 지자체에 적합한 적응 전략 수립에 초점이 맞춰져 있다. 경기도 31개 시군을 공간적 범위로 하고, 문헌 연구, 국내외 사례 분석, 전문가 설문 조사, GIS 분석기법 등을 통해 기초 지자체에 활용 가능한 취약성 평가 지수를 산출하였다(경기개발연구원, 2009).

## 4. 취약성 지수 정량화 방법

앞서 살펴본 기후 변화 취약성 평가지수와 관련된 국내외 문헌상에 나타난 방법론은 개념적으로 우리나라의 각 지역별 취약성 평가에 그대로 활용되었음을 알 수 있다. 각 분야별 기후 변화 취약성 지수는 3가지 항목(기후노출, 민감도, 적응 능력)의 대리 변수를 경험적으로 결정하므로 대리변수 선정에 대한 세심한 주의가 필요하다. 그러나 사회 지리적 정보 등을 토대로 현실적으로 적용 가능한 여러 대리 변수가 결정되면 세 항목별 각각 하나의 값으로 적절히 계산하여 최종적인 기후 변화 취약성 지수 계산에 가도출된다. 본

연구에서는 기존 선행 연구에서 주로 사용된 기후 변화 취약성 지수를 결정하는 흐름도와 표준화 방법을 정리하고자 한다.

선행연구, 예를 들어 Moss 등(2001)과 환경정책평가연구원(2008)에서 제시한 취약성 지수인 VRI (Vulnerability-Resilience Indicator)는 다음의 세 단계로 요약되는데, ①표준화→②부호 결정→③취약성 평가 지수 계산으로 진행된다. 이때 표준화란 어떤 대응변수들을 무차원화 하는 것으로서 서로 단위가 다른 변수들 간의 연산을 위해서 반드시 필요한 과정이다. 서로 다른 단위를 가진 대리 변수들을 표준화방법에는 여러 가지가 있으며 Table 2에 정리하였다.

표준화 방법이 선정되면 이상에서 제시한 각 항목들 즉 민감도 지수, 적응 능력 지수, 기후노출 지수가 각각 모두 표준화 방법을 통해 무차원화 된다. 예를 들어 UNDP(2005)에서는 대응변수의 최대값, 최소값, 현재 값을 이용하여 무차원화 시키는 Table 2의 세 번째 방법을 사용하였다. 세 항목이 모두 표준화되면 Moss 등(2001)은 아래의 계산 방법에 의해 VRI를 계산하여 사용하였다.

$$VRI = \frac{\text{평균(민감도 지수, 기후노출 지수)} + \text{적응능력지수}}{2}$$

이상의 개념은 각 항목별 대리변수에 대한 가중치 문제가 여전히 미결로 남아 있을 뿐만 아니라 표준화 방법별 민감도 연구 또한 테스트 하여 그 특성을 살펴 보아야 한다. 아울러 민감도, 기후노출, 적응 능력 부문으로 사용할 수 있는 변수 또한 추가로 더 밀접한 변수를 취사선택한 경우 그 결과가 다르게 나타나므로 향후 추가적인 연구가 반드시 필요할 것으로 판단 된다.

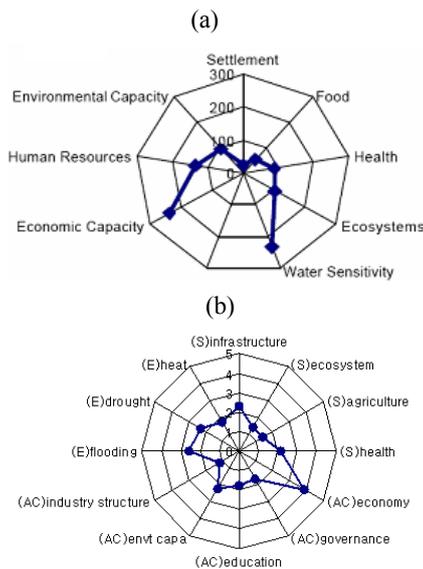
### 5. 취약성 지수 연구 결과 및 향후 연구 전망

앞에서 소개한 선행 연구를 모두 포함하여 대부분의 국내의 기후 변화 취약성 지수 연구는 많은 대리 변수를 사용하고 이들이 혼합된 하나의 지수, 즉 혼합지수 (composite indicator)로 어떻게 도출하였느냐에 대한 연구이다. 대부분의 연구에서는 한 국가 혹은 도시의 민감도 및 적응 능력의 대리 변수를 국가별 인간정주 기반시설 부분과 보건·복지 부분의 변수를 통해 산출 하였다. 각 민감도 및 적응 능력의 대응변수들은 세계 혹은 국가 자료를 기준으로 그 수치를 표준화하였다.

Table 2. Methods of Normalization for generating composite indicator (Nardo et al., 2005)

Method	Equation
Scale Transformation	$f = x \rightarrow y = \alpha x + \beta; \alpha > 0, \beta \neq 0$ $f : x \rightarrow y = \log(x); x > 0$
z-score	$I_{qc}^t = (x_{qc}^t - x_{qc=c}^t) / (\sigma_{qc=c}^t)$
Rescaling by Min-Max	$I_{qc}^t = [x_{qc}^t - \min_c(x_q^t)] / [\max_c(x_q^t) - \min_c(x_q^t)]$
Distance to a reference	
Indicators above or below the mean	$I_{qc}^t = \begin{cases} 1 & \text{if } w > (1+p) \\ 0 & \text{if } (1-p) \leq w \leq (1+p) \\ -1 & \text{if } w < (1-p) \end{cases}$ where $w = x_{qc}^t / x_{qc=c}^t$
Method for cyclical indicators	
Percentage of annual differences over consecutive years	$I_{qc}^t = (x_{qc}^t - x_{qc}^{t-1}) / x_{qc}^{t-1} \times 100$

이렇게 표준화 된 대응변수들은 각 부문의 대응 변수의 기하 평균치가 각각 통합 민감도 지수(음수)와 통합 적응 능력 지수(양수)로 계산되고, 이 둘을 합하여 최종 취약성 지수로 계산된다. Fig. 3(a)는 이렇게 계산된 미국의 대응 변수의 크기를 부문별로 비교한 결과이다(Moss 등, 2001). 이 연구는 1990년 세계 자료를 기준으로 표준화시킨 것으로, 미국은 민감도 측면에서 수자원 부문이 기후 변화에 가장 민감하고 적응 능력 측면에서는 경제적 능력이 기후 변화 적응 능력에 가장 큰 기여를 하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(b)에서는 이러한 부문별 적용 방법을 우리나라 지자체 중 하나인 경기도 지역을 대상으로 연구한 결과로서 경기도에서는 경제, 인간정주-기반시설, 그리고 건강 분야 순으로 기후 변화에 취약함을 알 수 있다.

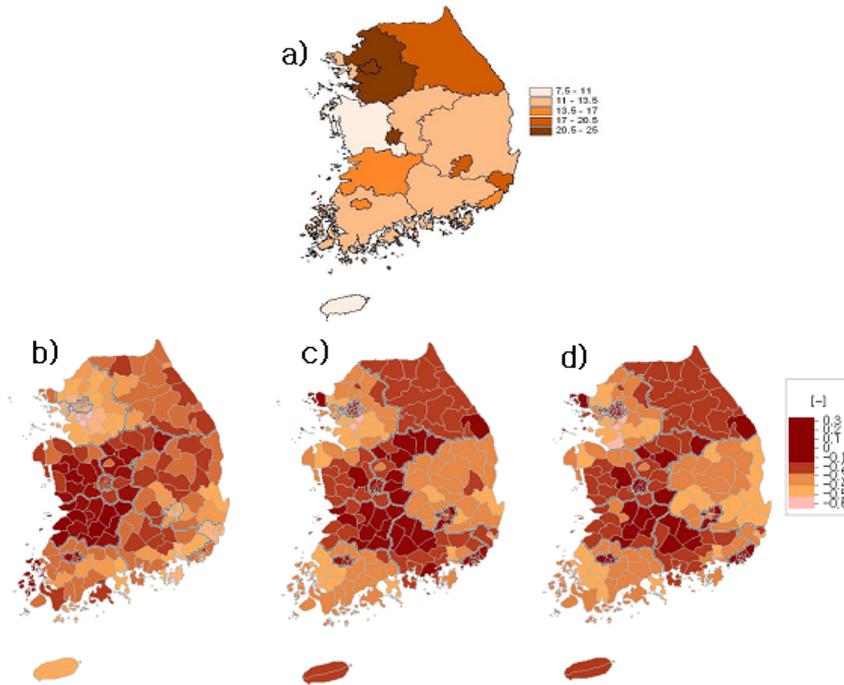


**Fig. 3.** Sectional indicators cited from previous studies. Proxies indexed against world baseline values in the (a) USA (Moss et al., 2001) and (b) Kyong-Gi province in Korea (GRI, 2009).

Fig. 4(a)는 한국환경정책평가연구원(2008)의 연구 결과로서 기후 변화 취약성에 필요한 민감도, 적응 능력의 대리 변수들을 Table 1에 따라 설정한 후 이를 16개의 시도에 대해 대리 변수들을 모두 조사하여 최종적으로 계산한 VRI의 공간 분포이다(한국환경정책평가연구원, 2008).

이때 분야별 구분하여 계산하지 않고 통합적으로 전체 하나의 지수로 기후 변화 취약성 분포를 나타내었다. 그 결과 최종적인 VRI 지수가 가장 낮게 나타난 제주도의 경우는, 극한 기후에의 심한 노출 때문에 취약한 결과를, 그리고 충청남도에서는 기반시설 등의 높은 민감도와 상대적으로 낮은 적응 능력으로 인하여 취약한 지역으로 분류되었다. 경상남도의 경우는 적응 능력과 민감도는 중간권 정도였으나 극한 기후에의 노출(특히 가뭄에의 노출)이 제주, 강원에 이어 취약한 것으로 나타났고, 충청북도, 전라남도, 경상북도, 전라북도 등에서는 대부분 농업 비중이 상대적으로 높아 민감도와 극한 기후에의 노출이 타 지역에 비해 높게 나타난 것으로 조사되었다(한국환경정책평가연구원, 2008; 국립환경과학원, 2008). 그러나 이러한 해석은 역시 부문별로 따질 경우 또 다른 차이가 발생할 수 있는데, 이는 민감도, 적응 능력, 기후 노출 계산에 필요한 적절한 대리 변수가 분야별로 다르게 선정되어야 한다. 물론 분야별 지수가 아닌 하나의 통합된 지수를 구하는 경우에도 이들 대리변수 설정을 어떻게 하느냐에 따라 그 결과가 다르게 나타날 수 있으므로 지역별 상대적인 비교에 대해서도 해석 시 주의가 필요하다.

Fig. 4(b)-(d)는 국립환경과학원에서 개발된 기후변화 취약성 평가 도구를 이용하여 분야별, 지역별(300여개 시군구별) 민감도와 적응 능력을 구분하여 취약성 지수를 계산한 결과이다. 각 대리 변수 항목은 모두 동일한 가중치를 부여하였다. 이 때 국립환경과학원에서는 VRI 값은 (+)로 갈수록 취약하다는 개념으로 Fig. 4(a)와 반대로 부호를 정의하였다. 각 해당 분야는 농업 분야를 포함하여 16개로 나누어 구분하였고, 각 분야별 민감도와 적응 능력은 분야별로 각기 다르게 대리 변수를 설정하였다. 예를 들어 농업분야의 경우 선정된 민감도 대리 변수로는, 5 m 이하 저지대 면적, 농작 인구, 5 m 이하 저지대 가구, 지역당 곡물 생산, 국토이용면적 중 제방사용면적을 등을 사용하였고, 적응 능력 대리변수로는 GDP, 재정자립도, (1차+2차 산업)/(1+2+3차 산업), 인구밀도, 인구당 공무원 수, 교육지출, 관리되지 않는 토지율, 성인문자 해독률, 취학률을 각각 적응 능력의 대리변수로 사용되었다. 산림 및 생태계 분야 역시 해당 분야 별 민감도와



**Fig. 4.** Horizontal distributions of VRI (Vulnerability- Resilliance Index) over Korea cited from previous studies. (a) sector-aggregated VRI (KEI, 2008), and (b)-(d) individual sector-based three distributions for agriculture, forest, and ecosystem sector (NIER, 2009; 2010).

적응 능력, 기후노출 대리 변수가 분야별로 수록되어 있다(국립환경과학원, 2009, 2010). 그 결과 Fig. 4(b)-(d)의 VRI 분포 특징을 살펴보면 농업, 산림, 생태계 모두 모든 분야에서 수도권을 중심으로 양호한 취약성을 보였고 경상북도의 포항 부근 지역에서 수도권이 다음으로 덜 취약한 것 역시 동일한 맥락에서 그 이유를 찾을 수 있었다. Fig. 4(b)에 나타난 농업분야 취약성 지수는 전라북도와 충청남도에서 상대적으로 더 취약한 것으로 계산되었다. 이는 평야와 같은 농업 토지가 상대적으로 많을 뿐만 아니라 기후 변화에 따른 적응 능력 또한 그리 많지 않기 때문으로 판단된다. Fig. 4(c)의 산림분야 역시 경상북도 및 충청북도 등 지리산, 덕유산, 속리산이 포함되어 있는 지역에서 제일 취약한 것으로 나타난 것은 민감도 항목에서 산림면적과 이와 연관된 생산량이 상대적으로 많았기 때문으로 분석되며 적응 능력에 대한 상대적 차별성은

덜 중요한 것으로 계산되었다. Fig. 4(d)의 생태계 분야 역시 산림분야와 유사한 특성이 많아서 산림분야와 중복되는 대리 변수가 다수 있어서 산림분야의 VRI 분포 특징과 크게 다르지 않게 나타났으며, 다만 충청북도 일부지역과 경상남도 남해안 지역 등에서 산림분야보다 더 상대적으로 양호한 분포 특성을 보였다.

이상의 선행연구 결과들은 동일한 개념적 틀에서 계산된 것이지만 여전히 대리 변수 선정과 연관된 불확실성을 줄여야 하며, 각 대기변수들끼리의 상대적 중요도 또한 재고하여야 할 것이다. 표준화 방법에 따른 취약성 지수의 민감도 연구 또한 필요할 것으로 보이며, 무엇보다도 선정된 대리 변수들끼리의 상대적 중요도를 판별하기 위해서는 각 분야별 전문가들의 연구 및 설문 조사 등을 통해 개별 대리변수들의 가중치 문제 등을 객관적으로 해결하기 위한 통계적

연구(예를 들어 다변량 통계 분석)가 추가되어야 할 것이다.

## 6. 결론

기후 변화 적응에 관한 이슈는 현재 누가 얼마만큼 취약한지에 대한 정보가 필요하기 때문에 기후 변화에 따른 취약성 연구와 필연적으로 연계되는 개념이다. 개별 국가 차원에서는 기후 변화에 따른 취약성 연구를 통해 정부 정책의 상대적 우선순위를 각 지역에 대해 정할 수 있어야 하므로 기후 변화 취약성 지수의 산출에 관한 연구는 기후 변화 적응 분야에서 매우 필수불가결한 연구이다. 그러나 국내외 선행연구 고찰을 통해 지적한 바와 같이 한 지역의 기후 변화 취약성 지수는 기후 변화의 잠재적인 영향을 평가하기에 유용한 통합 도구이지만, 복잡한 개념이라서 직접 측정하거나 관측할 수 없다. 그래서 취약성 지수의 개념을 잘 나타낼 수 있는 대리변수를 동일시하여 사용하였다. 본 연구에서는 이러한 측면에서 기후 변화 적응에 대한 기초 연구로서 기후 변화 취약성 개념을 먼저 살펴보았으며, 취약성 지수 도출에 대한 국내외 선행 연구들의 연구 방법과 결과를 비교 분석해 보았다. 아울러 선행 연구 결과로서 우리나라에 적용한 취약성 지수 공간 분포 등의 연구결과를 개략적으로 논의하였다.

그 결과 기후 변화 취약성 지수 산출을 위한 최근까지의 대부분의 국내외 연구에서는 기본적으로 민감도, 적응 능력, 기후노출 등 크게 세 가지 함수로 요약되었으며 이들 각각의 개념을 하나의 지수로 나타내기 위한 대리 변수를 선정하고 해당 변수의 유의성을 검증하는 연구가 지배적이었다. 우리나라에 적용한 연구 결과 또한 동일한 맥락에서 이해할 수 있었으나, 여전히 각 항목별 대리변수 선정의 문제가 존재하므로 이를 보다 객관적으로 해결할 수 있는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 취약성에 대한 개념은 생태적 측면뿐만 아니라 넓게 보면 사회, 경제 등의 측면도 포함할 수 있으므로 이를 정확히 평가하기 위한 다양한 측면의 정보를 종합할 수 있는 연구가 계속 진행되어야 하며, 선정된 각 대기변수들끼리의 상대적 중요도를 고려할 수 있는 대리변수별 가중치

(weighting factor) 결정 등이 향후 연구 과제로서 중요할 것으로 전망해 본다. 예컨대, 델파이 조사 결과를 바탕으로 전체 경향성을 파악하고 각 항목별 경향성이 전체 경향성에 얼마나 부합되는지를 알기 위하여 주성분분석(principal component analysis)을 수행하는 방법을 생각해 볼 수 있다. 이 때 산출되는 성분(항목)별 경향성이 델파이 조사 결과와 얼마나 부합되는지를 통계적으로 산출하여 그 수치를 항목별 상대적으로 비교한다면 가중치 문제를 해결할 수 있는 한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다. 결국 기후 변화에 취약한 지역과 분야에서는 전문가들의 사회과학적 견해와 이를 통계적으로 검증하여 반영하는 통계 분석적 연구가 병행하여야 비로소 체계적이고 과학적인 기후 변화 취약성 지수가 도출될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

## 참고 문헌

- 경기개발연구원(GRI: Gyeonggi Research Institute), 2009, 경기도 기후변화 취약성 평가 연구 (in Korean).
- 국립환경과학원(NIER: National Institute of Environmental Research), 2008, 지자체 기후변화 취약성 현황에 기초한 적응대책 수립 가이드라인 개발 (in Korean).
- 국립환경과학원(NIER: National Institute of Environmental Research), 2009, GIS 및 WEB 기반 기후변화 취약성 파악 및 분석기법 개발 (I) (in Korean).
- 국립환경과학원(NIER: National Institute of Environmental Research), 2010, GIS 및 WEB 기반 기후변화 취약성 파악 및 분석기법 개발 (II) (in Korean).
- 한국환경정책평가연구원(KEI: Korea Environmental Institute), 2008, 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안 (in Korean).
- Brooks, N., Adger, W. N., Kelly, P. M., 2005, The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation, *Global Environmental Change*, 15, 151-163.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., Shirley, W. L., 2003, Social vulnerability to environmental hazards, *Social Science Quarterly*, 84 (2), 242-261.

- IPCC, 1996, Climate Change 1995: The science of climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 95-561.
- IPCC, 2001, Climate Change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 75-451.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability. Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 719-737.
- Moss, R. H., Brenkert, A. L., Malone, E. L., 2001, Vulnerability to climate change: A Quantitative Approach. Prepared for the U.S. Department of Energy.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., 2005, Tools for Composite Indicators Building. European Communities. Available at <http://europa.eu.int>.
- UNDP, 2005, Adaptation policy frameworks for climate change: Developing Strategies, policies, and measures. Cambridge University Press, USA, 29-205.
- Wehhbe, M. B., Seiler, R. A., Vinocur, M. R., Eakin, H., Santos, C., Civitaresi, H. M., 2005, Social methods for assessing agricultural producer's vulnerability to climate variability and change based on the notion of sustainability, Assessments of Impacts and Adaptations of Climate Change Working Papers.
- Yoo, G. Y., Park, S. W., Chung, D. K., Kang, H. J., Hwang, J. H., 2010, Development and application of a methodology for climate change vulnerability assessment-Sea level rise impact on a coastal city, Environmental Policy Research, 9(2), 185-205.