

Research Paper

기후변화에 따른 극한기상의 취약성 지수 정량화 연구

- 태풍을 중심으로 -

김철희* · 남기표** · 이종재*

부산대학교 대기환경과학과*, 국립환경과학원 기후대기연구부**

Quantification of Climate Change Vulnerability Index for Extreme Weather

- Focused on Typhoon case -

Cheol-Hee Kim* · Ki-Pyo Nam** · Jong-Jae Lee*

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Korea*
National Institute of Environmental Research, Korea**

요약 : 기후노출, 민감도, 적응능력의 3가지 항목의 함수로 정의되는 취약성-탄력성 지수인 VRI (Vulnerability-Resilience Index)를 이용하여 기후변화로 더 심각해 질 것으로 예상되는 극한 기상 현상인 태풍을 대상으로 기후변화 취약성 지수 정량화 연구를 수행하였다. 기존 취약성 지수인 VRI는 기후변화 취약성에 대한 지자체별 상대적 차이만을 보여 주므로 그 정량화 연구는 매우 필수불가결하며 우리나라 기후변화 대응 정책에도 매우 중요하다. VRI의 정량화를 위하여 과거 20년간 태풍으로 인한 피해액, 발생횟수, 주요 피해지역 등의 통계 정보가 사용되었고, 기후노출 대응변수들에 가중치를 부여하기 이전과 이후의 계산되는 VRI를 각각 지자체별로 분석하였다. VRI의 정량화를 위하여 각 기후노출 대응변수를 하나씩 이용하여 계산한 다음 계산된 VRI를 태풍 피해액과의 상관계수(R)를 구하였고, 이 값에 비례하여 각 기후노출 대응변수들의 가중치를 결정하였다. 그 결과 가중치 없이 계산한 지역별 VRI는 상당 지역에서 피해액과의 상관성이 없는 등 상당한 차이를 보였으나 가중치를 부여한 결과 계산된 VRI는 지역별 피해액과 높은 상관관계를 보이는 등 많은 오류가 크게 줄었다. 이 결과를 토대로 VRI를 정량화하여 그 피해액을 추정해본 결과 VRI=1 일 경우 약 5백억원의 지자체 피해액을 유발하는 것으로 해석할 수 있었다. 이러한 기후변화 취약성 지수의 정량화 연구는 우리나라 미래기후 시나리오연구에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 기후변화 취약성 지수, 취약성-탄력성 지수, 극한 기후, 태풍, 기후노출

Abstract : VRI(Vulnerability-Resilience Index), which is defined as a function of 3 variables: climate exposure, sensitivity, and adaptive capacity, has been quantified for the case of Typhoon which is one of the extreme weathers that will become more serious as climate change proceeds. Because VRI is only indicating the relative importance of vulnerability between regions, the VRI quantification is

prerequisite for the effective adaptation policy for climate in Korea. For this purpose, damage statistics such as amount of damage, occurrence frequency, and major damaged districts caused by Typhoon over the past 20 years, has been employed. According to the VRI definition, we first calculated VRI over every district in the case of both with and without weighting factors of climate exposure proxy variables. For the quantitative estimation of weighting factors, we calculated correlation coefficients (R) for each of the proxy variables against damage statistics of Typhoon, and then used R as weighting factors of proxy variables. The results without applying weighting factors indicates some biases between VRI and damage statistics in some regions, but most of biases has been improved by applying weighting factors. Finally, due to the relations between VRI and damage statistics, we are able to quantify VRI expressed as a unit of KRW, showing that VRI=1 is approximately corresponding to 500 hundred million KRW. This methodology of VRI quantification employed in this study, can be also practically applied to the number of future climate scenario studies over Korea.

Keywords : Climate change vulnerability index, Vulnerability-Realliance Index, Severe weather, Typhoon, Climate exposure

I. 서론

기후변화에 따른 태풍, 홍수, 한파 등의 극한 기상 현상은 전 세계적으로 그 강도와 규모가 커지고 있으며 그 피해액 또한 증가할 것으로 보고된다. 기후 변화에 따른 극한 기상의 피해를 경고하는 보고서인 TNC (The Nature Conservancy)의 World Risk Report(2012)에서는 2002년~2011년에 걸쳐 전 세계적으로 4,130건의 재난과 최소 11억 9500만 달러의 경제적 피해가 발생하였고, 점점 더 많은 사람들이 홍수, 가뭄, 지진, 태풍 등의 위협에 노출되고 있다고 보고하였다. 우리나라의 경우도 예외가 아니어서 기후변화에 따른 극한 기상요소별 피해는 2012년의 경우 기록적인 한파, 전국적 강풍과 집중 호우, 폭염과 열대야, 태풍 등으로 전국이 피해를 입었고, 그 피해는 더욱 심화되는 것으로 보고되었다(기상청, 2012). 이러한 피해의 규모는 국가의 경제 규모가 확대되고 인구 및 산업 시설의 도시 집중이 가속화되면서 기후변화와 더불어 계속 증가할 것으로 전망되고 있다(한국환경정책평가연구원, 2008).

일반적으로 기후변화에 따른 피해는 분야별 접근, 즉 농업, 산업, 산림 분야 내에서의 피해 및 대응연구가 많으며, 반면 특정 기상 혹은 기후 요소 별 피해, 즉 기후변화에 따른 태풍, 한파, 폭우, 가뭄 등의 이

상기상 현상에 의한 피해의 급증이라는 경고에도 불구하고 극한 기상 요소별 최소화를 위한 효율적 대응 연구 혹은 취약성 관련 연구는 거의 없다. 그러나 여러 보고서 등을 통해 예상해 볼 때 극한 기상 요소는 기후변화의 피해를 유발하는 결정적 인자가 되므로, 극한 기상 요소별 취약성 분석을 연구하여 이에 기초한 통합적 기후변화 적응대책을 수립하는 것이 더 효과적이다.

특정 극한기상 현상을 기후 요소와 연관시켜 그 피해를 예상하고 분석할 경우, 기후변화 취약성을 화폐 단위 혹은 물질적 피해액으로 정량화하는 방법이 특히 요구되는데, 이는 대부분의 기후 예측 모델들이 기후변화에 따른 기상요소별 강도 등의 변화를 예측하므로, 태풍, 한파, 가뭄, 폭우 등의 과거 혹은 현재의 정량화된 취약성 정보를 확보할 경우, 기후 예측 모델의 도움으로 미래에 대한 피해를 정량적으로 예상할 수 있다. 그 결과 매우 합리적이고 과학적인 기후 적응 대책을 수립할 수 있을 것이다. 따라서 기후변화 취약성 연구라는 관점에서 볼 때 기후변화 취약성 지수의 정량화 연구는 매우 필수적이라 할 수 있다.

IPCC 제2차 및 이후 평가보고서에서는, 기후변화에 대처하는 방법으로는 크게 온실가스 배출 완화(mitigation), 기후변화의 악영향을 최소화하는 적응

(adaptation) 정책으로 분류하고 있다. 기후변화에 따른 취약성(vulnerability) 개념은 두 관점, 즉 완화 및 적응적 관점에서 이미 IPCC 2차 보고서부터 도입되었고, 제 13차 UN 기후변화 협약 당사국 총회(COP13)에서 채택된 발리로드맵에서는, 온실기체 배출 감축을 통한 기후변화의 완화뿐만 아니라, 기후변화 영향평가(assessment)와 피해를 최소화하기 위한 기후변화 적응의 중요성을 동시에 강조하였다. 이러한 연구들을 종합해 볼 때, 결국 한 국가의 기후변화 적응대책을 수립하기 위해서는 어느 지역의 어느 분야가 얼마만큼 기후변화에 취약한지에 대한 기후변화 취약성의 개념이 포함된 진단 정보가 최우선적으로 필요하며, 이러한 목적을 달성하기 위해 사용되는 기후변화 취약성 지수(climate change vulnerability indicator)는 한 국가의 지역별 기후변화 대책 및 그 우선순위를 정하는 데 있어 필수적이라 할 수 있다.

기후변화 취약성 지수를 구하는 개념의 틀은 어느 특정 지역의 여러 정보를 수집하여 취약화 개념과 연관시키는 상향식(Bottom-up) 접근 방법이 주로 사용되는데, 이는 외부로부터 시스템에 가해지는 영향이 시스템의 대처 및 적응 능력에 얼마나 민감한가를 수치화하여 나타내는 방법이다. 국내·외 연구 결과를 종합하면 기후변화 취약성 지수는 Figure 1에 나타난 것처럼 기후변화 민감도(sensitivity), 기후노출(climate change exposure), 적응 능력(adaptive capacity)의 세 가지 인자로 구성되며(IPCC, 2007; UNDP, 2005; Moss *et al.*, 2001; Wehbe *et al.*, 2005; Cutter *et al.*, 2003), 국내에서도 이러한 상향식 기후변화 취약성 지수 이론이 적용된 연구 결과가 다수 있다(유가영·김인애, 2008; 채여라·조연주, 2011; 이동근 외, 2012; 한화진 외, 2007). 그러나 이상의 세 인자, 즉 민감도, 적응능력, 기후노출 정도는 직접 산정할 수 없으므로 상향식 접근 방법론에서는 여러 대용변수(proxy variables)로부터 간접 추정하므로 몇 가지 문제점이 부각된다. 그 첫번째 문제점은 각 인자의 대용변수들의 개수나 연관성 등에 따라 취약성 지수계산에 기여하는 중요도가 다르므로 각 대용변수별 가중치를 고려하여야 함에도 불구하고

그 객관적 근거가 없어서 일반적으로 가중치 없이 일률적으로 사용하여 왔다. 이를 보완하고자 델파이 조사 등을 통해 전문가 혹은 다수의 생각을 수집하여 통계적으로 가중치를 결정하기도 하지만 그 객관적 근거는 미약하거나 매우 정성적이다. 상향식 기후변화 취약성 지수의 두번째 문제점은 그 수치가 한 국가의 다수의 지자체별 취약성의 우선 순위 등을 결정하는 데 이용될 수 있으나, 그 계산결과는 정량적, 절대적 지표가 아닌 상대적 수치로 도출된다. 따라서 실제 계산된 취약성 지수값 그 자체로서는 해당 지자체가 실제 얼마나 취약한지에 대한 정량적 기준을 제시하지 못하여, 그 활용성의 한계를 보여 준다. 따라서 기후 대응을 위한 구체적 전략을 수립하기 위해서는 이러한 취약성 지수의 두 가지 결점, 즉 대용변수의 가중치 문제와 취약성 지수의 정량화를 조속히 보완할 필요가 있다.

본 연구에서는 기후변화의 피해가 결국 극한 기상 요소에 기인한다는 측면에서 태풍이라는 하나의 극한 기상 요소를 선정하고, 상향식 방법으로 지자체별 기후변화 취약성 지수를 계산하되 위에서 설명한 두 가지 문제점, 즉 대용변수 가중치 문제와 산출된 지수의 정량화 문제를 동시에 해결하도록 시도하였다. 특히 취약성 지수의 정량화 연구는 기후 예측 시나리오 모델 결과를 활용하되 우리나라가 향후 극한기상 요소의 변화에 따른 피해 규모가 얼마정도인지를 정량적으로 해석할 수 있는 기반이 될 수 있고, 다른 기상 요소 혹은 분야별 취약성 연구에도 중요하게 응용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 태풍을 하나의 극한 기상 요소로 선정한 이유는 국내 기후변화 취약성과 관련된 연구인 농업, 산업 등의 분야에서의 과거의 피해 정도가 태풍과 제일 연관성이 크다고 판단하였으며, 통계적으로는 다른 기상요소보다는 태풍으로 인한 피해 정도가 제일 크고 구체적이며 관련 자료 또한 잘 보존되어 있기 때문이다. 따라서 계산되는 기후변화 취약성 지수의 정량화 연구가 용이하며 신뢰도 또한 상대적으로 높을 것으로 판단하였기 때문이다.

II. 분석 방법 및 자료

1. 분석 방법

한반도 기후변화 적응을 위한 취약성 지수 산정방법의 연구는 국내에서도 연구결과가 다수 있으며, 대부분 상향식 방식을 수용하여 Figure 1 과 같이 기후노출, 민감도, 적응능력의 3개의 요소로 구성된다. 기후변화 취약성 지수로서는 아래의 식 (1)과 같이 취약성-탄력성 지수(Vulnerability-Resilience Indicator, VRI)를 주로 사용하여 왔다(한국환경정책평가연구원, 2008; 김철희 외, 2011).

$$VRI = \left(\frac{\text{민감도지수} + \text{기후노출지수}}{2} - \text{적응능력지수} \right) \quad (1)$$

여기서 VRI의 부호는 양(+)의 값일수록 기후변화에 취약하고 적응능력이 낮으며, 음(-)의 값일수록 기후변화에 양호하거나 덜 취약한 것을 나타낸다. 위의 식 (1)에서는 결국 기후변화 취약성은 3가지 요소, 즉 민감도(sensitivity), 기후 노출(exposure), 적응능력(adaptive capacity)에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 여기서 민감도란 기후 변화로부터 한 시스템이 해롭거나 이로운 영향을 얼마나 받느냐는 정도이며, 적응 능력은 시스템이 자발적으로 기후 변화를 조절하여 얼마나 그 피해를 감소시키느냐는 개념으로 민감도의 정 반대의 개념이 된다. 반면 기후노출은 민감도의 실제 정도를 결정하는 척도로 기후 변화에 대한 노출 정도를 설명하는 개념이다. 대부분의 선행연

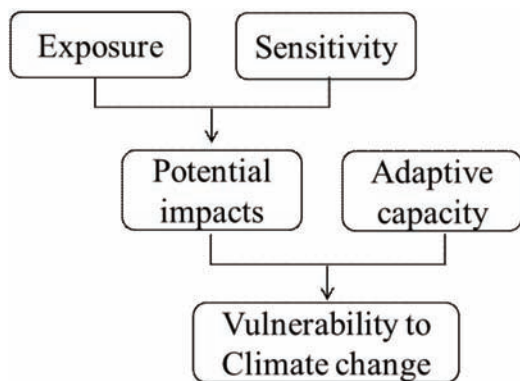


Figure 1. Categorized variables required to identify the climate change vulnerability index defined by IPCC (2007).

구에서의 기후노출은 기후변화에 직접적인 영향을 받을 수 있는 민감도를 계산하는 데 필요한 영향인자로 볼 수 있다(IPCC, 2007; Moss *et al.*, 2001; 유가영·김인에, 2008; 국립환경과학원, 2008; 김철희 외, 2011).

각 항목별, 즉 기후노출, 민감도, 적응 능력을 계산하기 위한 각종 대응변수들은 이전 연구인 남기표·김철희(2013)에서 최종 선정된 대응변수들과 동일하며 그 상세 변수 리스트는 Table 1에 제시되어 있다. 이 중 기후노출 대응변수는 태풍과 연관되는 변수만을 선정하였고, 최종 선정된 기후노출 변수는 총 6개로, 지역별 태풍 발생 빈도(횟수/year)를 먼저 선정하였고, 나머지 5개 변수는 강수와 풍속관련 변수로 크게 구분할 수 있었다. 강수 관련 변수로서 태풍 발생시 평균 일 강수량, 평균 시간 최대 강수량, 일 강수량 80mm 이상인 날의 횟수를 3가지 대응변수로 사용되었고, 풍속과 연관된 대응 변수로서는 태풍 발생시 일 최고 풍속, 일 최고 풍속이 14m/s 이상인 날의 총 횟수이다. 이들 대응변수들은 통계자료 및 한반도 약 70여개의 정규 기상관측소 자료로부터 계산된다. 태풍의 경우 기후노출 대응변수로서 순간 최대 강수량 등과 같이 현재 선정된 변수보다 더 단기적인 기상요소가 효율적일 수 있으므로, 현 연구에서 선정되지 않은 단기 기상요소의 기후노출 대응변수 적용 가능성에 대한 민감도 테스트 연구가 향후 필요할 것으로 판단된다.

민감도 및 적응능력 항목의 대응변수는 국립환경과학원에 의해 개발되어 현재 각 지자체에서 사용되어지고 있는 CCGIS 프로그램에서 제시되는 모든 대응 변수를 그대로 사용하였다 (국립환경과학원, 2008; 2009; 2010; 김철희 외, 2012). 사용된 변수들은 모두 Table 1에 요약하였고, 사용된 자료 역시 다른 특별한 처리 과정 없이 CCGIS의 자료를 그대로 사용하였다. 각 대응변수 선정 및 의미는 남기표 외 (2011)에도 잘 요약되어 있다.

기후변화 취약성 지수를 산정하는 과정에서 각 대응변수들의 단위의 차이를 없애기 위하여 본 연구에서 도입한 표준화 방법은 Nardo *et al.*(2005)이 제안한 아래와 같은 스케일재조정(Re-scaling)법을 사

Table 1. List of proxy variables for climate exposure, sensitivity, and adaptation capability used in this study.

Climate exposure proxy variables
Occurrence frequency of Typhoon (Occurrences/year)
Daily mean precipitation by Typhoon
Maximum precipitation by Typhoon
Number of days with daily precipitation over 80mm
Maximum hourly wind speed
Number of days with hourly maximum wind speed exceeding 14m/s
Sensitivity proxy variables
Percentage (%) of riverbank area to total
Products of agriculture and livestock industry
Total population in agricultural industry
Percentage (%) of agricultural area to total
Lower part of area (%) than 10m level
Number of household with location of lower than 10m
Farming population
Adaptation Capability proxy variables
Percentage (%) of products (primary+secondary) industries to (primary+secondary+tertiary) industries
Percentage (%) of school attendance
Percentage (%) of cost of schooleducation to GRDP(Gross Regional Domestic Product)
GRDP (Gross Regional Domestic Product)

용하였다.

$$I_x = \frac{x - \min(x)}{\text{Max}(x) - \min(x)} \quad (2)$$

여기서 x 는 대응 변수, I_x 는 표준화된 대응 변수, $\text{Max}(x)$, $\min(x)$ 는 해당 대응 변수의 최대값과 최소값을 의미한다. 그 외 표준화 방법으로서 위 식(2)와 같은 스케일 재조정법외에도 국내·외 선행연구에서는 Z 스코어(Z-score) 방법, 순위매기기(Ranking), 기준선과의 차이법(Distance to the reference country) 등이 소개되어 있으며, 각 표준화 방법별 계산되는 기후변화 취약성 지수의 결과의 차이는 남기표·김철희 (2013)에 자세히 기술되어 있다.

태풍에 의한 취약성 지수의 정량화 등급은 목적에 따라 여러 등급으로 나눌 수 있으나, 본 연구에서는 편의상 4등급으로 나누어 각 등급을 화폐단위로 나타낼 수 있도록 시도하였다.

- 등급 1: 취약성 지수가 낮고 기후변화 적응 대책을 고려할 필요가 없는 단계
- 등급 2: 취약성 지수가 약간 높고 기후변화 적응 대책을 고려할 필요가 있는 단계
- 등급 3: 기후변화 취약성 지수가 높고 기후변화

적응 대책을 고려해야 하는 단계

- 등급 4: 기후변화 취약성 지수가 매우 높아서 기후변화 적응 대책을 반드시 고려해야 하는 단계

한편 태풍이 우리나라에 주는 피해는 매년 2-3차례로서, 연속적이 아닌 불규칙적이므로, 본 연구에서는 과거 약 20년간의 태풍 사례를 모두 망라하여 한반도에 영향을 미친 태풍에 대하여 태풍 사례별 통계로 보고된 각 시도별 태풍 피해액을 이용하여 아래와 같은 개념적 틀에서 기후노출변수의 가중치를 고려하여 VRI의 정량화를 시도하였다.

- VRI의 정량화를 위한 전제 조건으로 각 지역별 계산되는 VRI와 각 지역별 태풍 피해액은 어느 정도의 비례관계가 유지되어야 하며,
- 기후노출 6개 대응변수는 각 지역별 태풍 피해액과의 상관관계에 클수록 더 큰 가중치를 부여하여 VRI를 계산하여야 한다.

본 연구에서는 VRI의 결과가 태풍 피해액과 비례관계가 되도록 기후노출 변수의 가중치를 조정하는 방법을 선정하였다. 즉 태풍 피해액과 기후노출 대응변수와의 상관계수를 이용하여 기후노출 변수의 가

중치 문제를 해결하고 궁극적으로 VRI의 정량적 지표를 도출하였는데, 그 구체적인 과정은 아래와 같다.

- ① 가중치 부여하지 않고 식 (1)을 이용하여 지자체별 VRI를 산정한 후, 산정된 지역별 VRI와 피해액과의 상관계수 $(r(A, B) = \frac{\sum(A-\bar{A})(B-\bar{B})}{[\sum(A-\bar{A})^2 \sum(B-\bar{B})^2]^{1/2}})$ 를 구하였다. 여기서 $r(A, B)$ 는 변수 A와 B의 상관계수를, \bar{A} 와 \bar{B} 는 각각 변수 A와 B의 평균값을 나타낸다. 이 단계에서는 대응변수 가중치를 부여하기 위한 전단계로서 지자체별 피해 정도의 순위 등이 VRI로 얼마나 적절하게 표현되는지를 분석하기 위한 단계이다.
- ② 기후노출 대응변수를 하나씩만 순차적으로 적용하여 위 ①과 동일하게 VRI를 지자체별로 계산하여 VRI-피해액과의 상관관계를 계산한다. 이때 나머지 5개 기후노출 대응변수는 ①의 계산에서 제외된다.
- ③ 나머지 기후노출 대응변수를 ②의 단계를 반복

하여 모든 기후 노출 대응 변수별 VRI-피해액과의 상관계수를 구한다.

- ④ 위의 ②~③에서 구한 각 대응변수별 상관계수에 비례하도록 기후노출 변수에 가중치를 최종 결정하여 최종 지자체별 VRI를 구하여, 구간을 정하고, 이에 대응하는 태풍 피해액을 산정하여 VRI의 정량화를 완성한다.

이상의 모든 과정을 거치게 되면 VRI와 태풍 피해액과 일대일 대응이 가능하게 되며, 따라서 태풍에 의한 정량적 기후변화 취약성 지수가 완성된다. 위의 계산 방법은 Figure 2에 도식적으로 나타내었으며, 그 결과로 도출된 취약성 지수의 공간분포를 분석하고 그 특징을 기술하였다.

2. 사용된 자료

선정한 대상은 1990년에서 2010년 우리나라에 영향을 미친 태풍으로서, 총 30개에 대한 태풍을 대상으로 하였다 (Table 2). 태풍의 강도를 나타낼 수 있

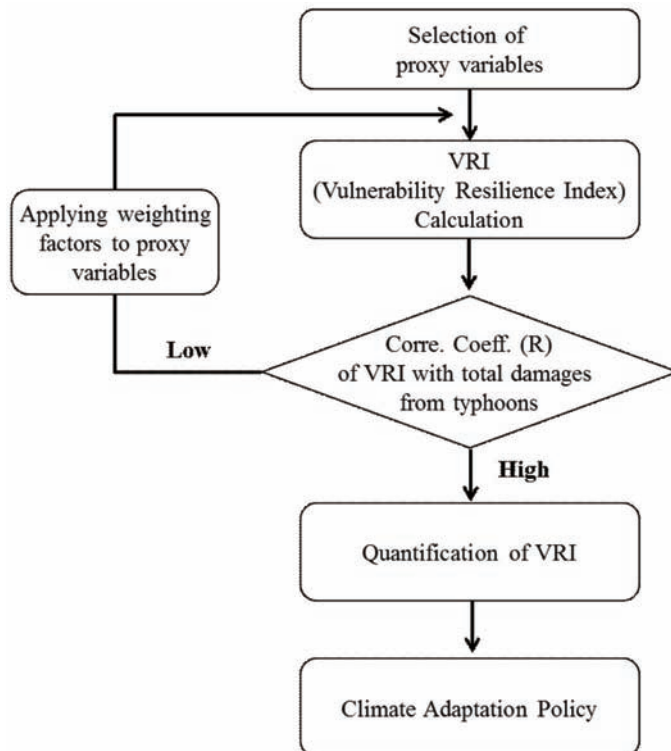


Figure 2. Schematic diagram of quantification of climate change vulnerability index in this study.

Table 2. List of typhoons, their occurrence dates and durations observed over Korean Pheninsula since 1990.

Year	Name of Typhoon	Occurrence Date	Duration Days
1990	ROBYN	7/11~12	2
1990	ABE	9/1~2	2
1991	CAITLIN	7/28~30	3
1991	GLADYS	8/22~26	5
1991	MIREILLE	9/27~28	2
1992	TED	9/22~26	5
1993	PERCY	7/29~30	2
1993	ROBYN	8/8~12	5
1994	BRENDAN	7/31~8/1	2
1994	DOUG	8/9~12	4
1994	ELLIE	8/14~16	3
1994	SETH	10/10~12	3
1995	FAYE	7/23~24	2
1997	WINNIE	8/19~21	3
1997	OLIWA	9/15~17	3
1998	YANNI	9/29~10/1	3
2000	SAOMAI	9/12~16	5
2002	RAMMASUN	7/5~6	2
2002	RUSA	8/30~9/1	3
2003	SOUDELOR	6/18~19	2
2003	MAEMI	9/12~13	2
2004	MEGI	8/17~19	3
2004	SONGDA	9/6~7	2
2006	WUKONG	8/17~21	5
2006	SHANSHAN	9/16~18	3
2007	MAN-YI	7/13~16	4
2008	KALMAEGI	7/19~21	3
2010	DIANMU	8/9~12	4
2010	KOMPASU	9/1~3	3
2010	MALOU	9/5~7	3

는 기후 노출 대응변수로서 선정된 강수와 풍속 관련 자료는 최근 30년간(1981~2010년) 기상청 산하 61개 정규기상관측소 지점(Figure 3)에서 관측한 지상·기후 자료를 사용하였으며, 본 연구에서 사용된 자료는 지점별 기온, 강수, 풍속 등의 기후노출 대응변수들이다.

기후노출 대응변수로서 본 연구에 포함된 태풍 발생 횟수는 기상청 기상연보를 참고하였고, VRI의 정

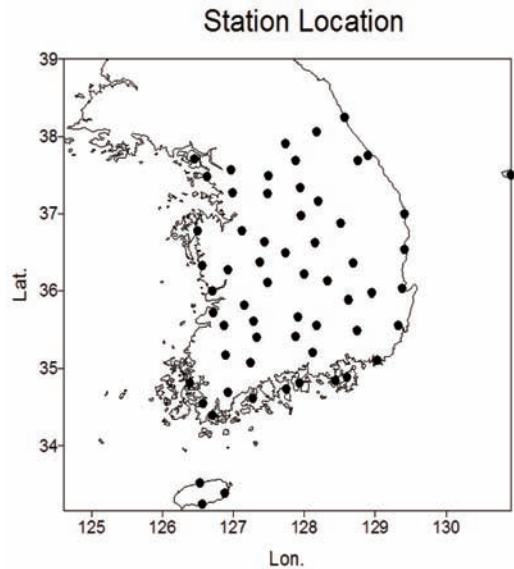


Figure 3. Location of 61 meteorological stations used in this study.

Table 3. Monetary value conversion factors to the base year of 2010 (National Emergency Management Agency, 2012).

Year	Values
1990	1.874
1991	1.694
1992	1.658
1993	1.634
1994	1.591
1995	1.519
1996	1.472
1997	1.418
1998	1.264
1999	1.290
2000	1.264
2001	1.270
2002	1.274
2003	1.247
2004	1.176
2005	1.151
2006	1.141
2007	1.125
2008	1.036
2009	1.038
2010	1.000

량화를 위하여 태풍에 의한 피해액은 국가재난정보 센터(<http://www.safekorea.go.kr>)의 1990년 이후 태풍의 한반도 영향 기간과 각 태풍별 재산 피해 자료를 이용하였다. 그러나 태풍 피해액과 같은 통계적 자료는 통계를 작성한 연도에 따라 그 정량적 가치가 달라지므로 물가 상승에 따른 피해액의 증가성을 통일시켜 사용하였다. 본 연구에서는 소방방재청에서 발행한 재해연보(2012)에 수록된 피해액 전환 계수를 사용하여 과거 20년간의 피해액을 2010년 기준으로 환산하였다. 사용된 2010년 기준, 각 연도별 피해액 전환 계수는 Table 3에 수록하였다.

지역별 민감도, 적응능력 등의 대응변수를 구하기 위하여 통계청의 지역별 인구 통계연감을 통계청 홈

페이지(<http://kosat.go.kr>)추가로 참고하였고, 문헌에서 참고할 수 없는 대응변수들 즉 1차 산업 비율 등은 국립환경과학원에 의해 개발되어 현재 각 지자체에서 사용되어지고 있는 CCGIS에 탑재된 정보를 사용하였다. CCGIS의 구성 및 정보는 국립환경과학원(2008, 2009, 2010) 및 김철희 외(2012)에 자세히 설명되어 있다.

III. 결과 및 토론

1990년 이후 약 20년간의 태풍과 연관된 지역별 피해의 정도는 Table 4에 요약하였다. 먼저 과거 20년간 우리나라에서는 태풍이 약 24번 (1.2회/년) 영

Table 4. List of typhoon, and their statistics of damaged districts with the amount of damage (expressed as K million KRW) since 1990.

Year	Typhoon	Max. Damage Area		2 nd Damage Area	
		Region	Amount of Damage [†]	Region	Amount of Damage [†]
1990	ROBYN	Jeonnam	42,937	Gwangju	2,061
1990	ABE	Gangwon	137,633	Gyeonggi	25,011
1991	CAITLIN	Gyeongnam	42,535	Jeonnam	11,784
1991	GLADYS	Gwangju	20,923,537	Gyeongnam	4,216,981
1991	MIREILLE	Gyeongbuk	6,761	Gyeongnam	3,736
1992	TED	Jeonnam	11,360	Gangwon	4,759
1993	ROBYN	Gyeongbuk	6,140,735	Gangwon	2,388,030
1994	BRENDAN	Jeonbuk	2,100,530	Chungnam	1,372,343
1994	DOUG	Gyeongnam	83,538	Jeonnam	49,724
1994	SETH	Gyeongnam	477,730	Jeonnam	136,571
1995	FAYE	Gyeongnam	47,499,188	Jeonnam	3,252,988
1997	OLIWA	Jeonnam	7,572	Jeju	6,373
1998	YANNI	Gyeongbuk	12,039,532	Gyeongnam	3,122,193
2000	SAOMAI	Gyeongnam	11,923,153	Busan	860,930
2002	RAMMASUN	Jeonnam	85,563	Gangwon	78,654
2002	RUSA	Gangwon	356,123,031	Gyeongbuk	124,246,578
2003	SOUDELOR	Gyeongbuk	187,663	Ulsan	113,155
2003	MAEMI	Gyeongnam	204,609,041	Gyeongbuk	64,170,239
2004	MEGI	Jeonnam	13,094,094	Gyeongnam	1,614,915
2006	WUKONG	Ulsan	26,888	Gyeongbuk	6,588
2006	SHANSHAN	Busan	27,656	Gyeongbuk	25,777
2008	KALMAEGI	Chungnam	44,627	Gyeonggi	25,726
2010	DIANMU	Jeonnam	71,129	Gyeongnam	12,305
2010	KOMPASU	Chungnam	40,342,457	Gyeonggi	12,734,427

[†] expressed as a unit of (1000 KRW)

향을 주었고, 각 태풍은 평균 2~5일의 지속시간을 보였다. 30개 중에서 나머지 6개 태풍은 농업 분야 피해와 무관한 것으로 조사되어 제외하였다. 따라서 농업 분야에 피해를 준 총 24개 태풍 중에서 태풍의 지속 시간이 5일로 제일 긴 태풍은 GLADYS, ROBYN, SAOMAI, WUKONG 이었으며, 그 피해액이 가장 많은 태풍은 RUSA로서 강원도 3500억원, 경북

1200억원의 피해액을 기록하였다. 그 외 MAEMI, GLADYS는 모두 2,000억이 넘는 피해를 기록하였다. 지역별로는 남해안 지역이 태풍의 상습 피해 지역으로서 경남, 부산, 전남 등에 집중되어 있으며, 그 피해액 또한 이에 비례하여 나타났다. Figure 4에 과거 20년간 각 지역별 태풍 피해액(단순 총액)의 공간 분포를 나타내었으며, 2010년 기준으로 변환한 피해

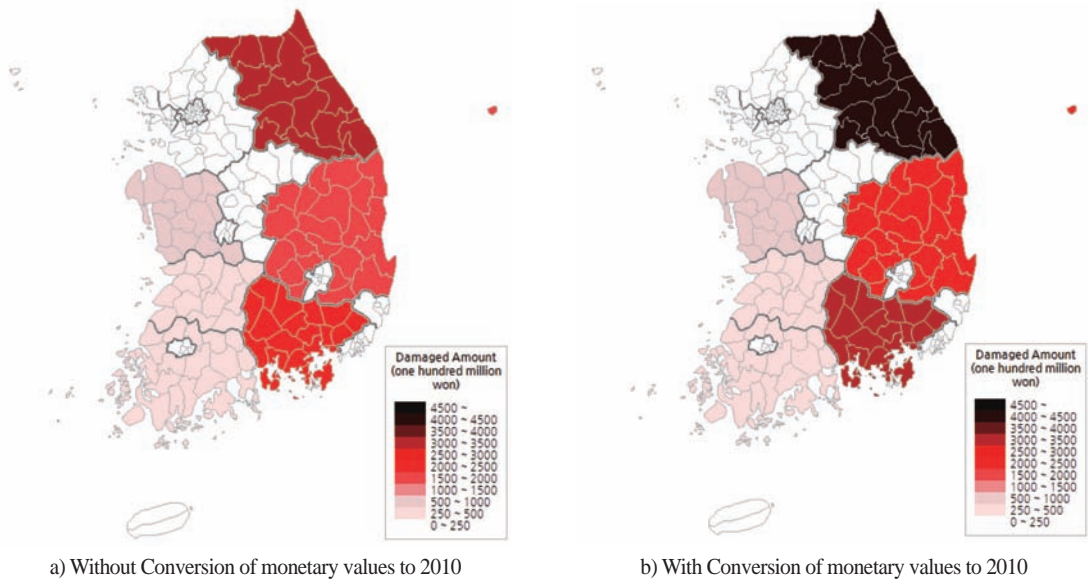


Figure 4. Summation of amount of damage caused by Typhoon over the past 20 years a)without and b)with conversion of monetary values to the base year of 2010 (unit: 100,000,000 KRW).

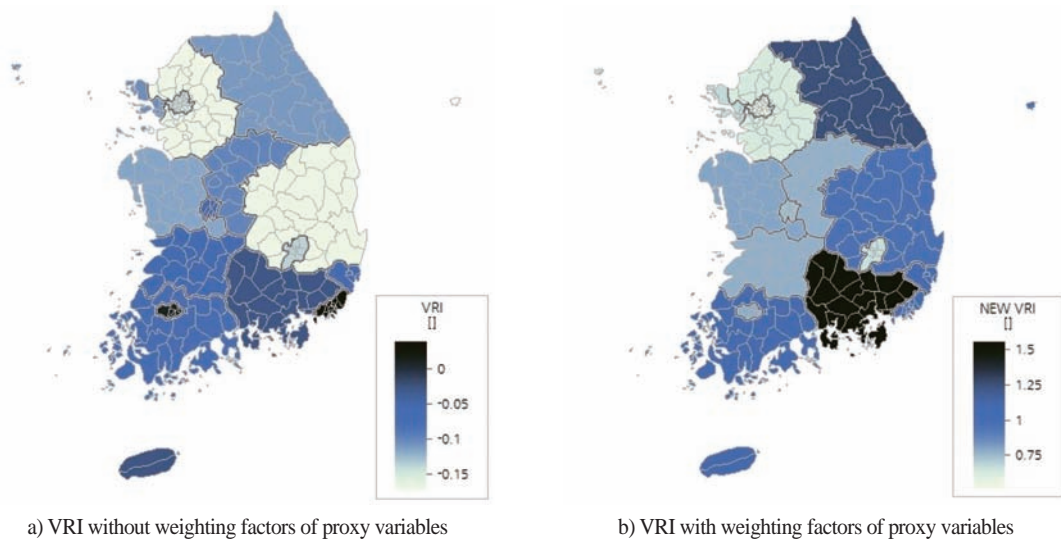


Figure 5. Horizontal distributions of VRI (Vulnerability-Resilience Index) calculated a) without, and b)with applying weighting factors of climate exposure proxy variables.

액의 분포 또한 함께 제시하였다.

지역별 VRI를 기후노출 대응변수 가중치 부여 전과 후의 차이를 자세히 분석하기 위하여, 우선 지역별 VRI에 필요한 기후 노출 대응변수의 가중치를 고려하지 않고 1차 산출하여 분석하였다. Figure 5a)는 가중치 고려 없이 단순 계산한 VRI의 공간분포이다. 그 결과 상습적 태풍 피해가 심하였던 경남 지역이 전남 및 강원지역 등과 큰 차이가 없이 약 -0.05 ~ 0 사이의 VRI를 보였다(Figure 5a). 부산지역의 경우 경남지역과 인접하여 태풍 피해액의 차이가 적음에도 불구하고 부산지역의 VRI 값은 경남지역에 비해 상대적으로 훨씬 취약한 것으로 계산되었다. 광주 지역에서는 태풍에 의한 피해액이 상대적으로 적음에도 불구하고(Figure 4) -0.01의 상당히 높은 VRI를 보여 주변 전남 지역과 비교하여 기후변화에 매우 취약한 것으로 나타났으며, 수도권과 경북 지역이 음(-)이 아닌 양(+의 부호를 보이는 등 태풍 피해액의 지역별 상대적 차이를 반영하지 못하는 문제점을 보였다. 이는 결국 기후 노출 대응변수 모두 가중치를 부여하지 않고 일률적으로 처리하여 계산한 경우 여러 문제점이 존재함을 알 수 있다.

결국 이러한 문제점은 대응변수의 가중치를 적용함으로써 대부분 해결할 수 있는데, 본 연구에서는 위의 분석방법에서 설명하였듯이 각 기후노출 대응변수를 독립적으로 적용하여 구한 VRI와 태풍 피해액과의 상관계수를 구하여 대응변수에 가중치를 적용하는 방법으로 해결하였다. 그 결과 태풍 발생시 일평균 강수량, 시간최대 강수량, 80mm이상 일수, 시간평균풍속 14m/s 이상이 관측된 날의 횟수, 일 최대풍속 순으로 태풍 발생에 따른 지역별 피해액과의 상관계수는 0.20, 0.15, 0.12, 0.0088, 0.008로 나타났고, 따라서 태풍 발생 시 강수량과 연관된 기상 변수가 풍속 관련 변수보다 훨씬 더 태풍 피해액과 상관성이 높게 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 가장 상관계수가 낮은 기후노출 대응변수인 시간 최고 풍속변수를 기준값(= 1.0)으로 두고 나머지 가중치를 이에 단순 비례하도록 Table 5와 같이 기후노출 대응변수 순서대로 각각 24, 18, 15, 1.1, 1.0으로 가중치를 최종 부여하였다.

Table 5. Correlation coefficients of climate exposure proxy variables with amount of damage by typhoon, and the resultant weighting factors used in this study for the calculation of vulnerability index.

Climate exposure proxy variables	R ²	Weighting factor
Daily mean precipitation	0.20	24
Maximum precipitation	0.15	18
Number of days with daily precipitation over 80mm	0.12	15
Maximum hourly wind speed	0.008	1
Number of days with hourly maximum wind speed exceeding 14m/s	0.0088	1.1

Figure 5b)는 기후노출 대응 변수에 가중치를 부여한 이후의 각 지역별 VRI의 공간분포를 나타낸 그림이다. Figure 5a)의 가중치 부여하기 이전과 비교해 보면, 가중치 부여 이전에는 부산지역을 포함하여 광주 지역에서도 기후변화에 제일 취약한 것으로 나타났으며, 경북, 강원 지역에서는 오히려 덜 취약한 것으로 나타나는 등 본 연구에서의 통계적 피해액과의 큰 차이를 보였음을 알 수 있다 (Figure 5a). 그러나 가중치를 적용한 경우의 VRI의 공간 분포는 (Figure 5b)는 가중치 적용 이전(Figure 5a)과 비교하여 매우 다른 양상을 보였다. 즉 가중치 적용 이전에는 기후변화에 취약하게 (VRI가 높게) 나타났던 광주 지역이 주변 지역인 전남 지역과 유사하거나 더 양호하게 (VRI가 낮게) 나타났으며, 가중치 부여 이전에는 부산 지역보다 월등하게 취약하지 않게 나타났던 경남 지역이 부산 지역과 유사한 취약성을 보였다. 강원과 경북 지역에서도 상대적으로 수도권 및 충청지역에 비해 더 취약하게 계산되었으며, 이는 통계적으로 조사된 태풍 피해액과 훨씬 더 유사한 공간 분포를 보였다 (Figure 5b, Figure 4).

각 기후노출 대응변수별 도출된 가중치를 실제 적용함으로써 보정된 VRI의 분포를 Figure 5에 제시하였으며, 비교 분석을 위하여 가중치 적용 이전의 VRI 분포도 함께 나타내었다.

Figure 6은 각 지자체별 VRI와 태풍에 의한 피해액과의 관계를 기후노출 대응변수에 가중치를 부여하기 이전과 이후의 산포도를 나타낸 그래프이다. 가중치를 고려하기 이전에는 VRI와 피해액과의 로그선

형회귀분석 기울기가 오히려 음의 값(-2×10^{-3})을 보였으며 상관계수(R^2) 또한 0.0044의 매우 낮은 수치를 보여 계산된 VRI가 실제 태풍 피해액을 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 반면, 가중치를 부여한 경우는 선형회귀식의 기울기가 양(+)의 값일 뿐만 아니라 상관계수(R^2) 또한 0.4578로서 상당히 높게 나타나 VRI의 정량화에 사용될 수 있는 근거를 잘 보여 주었다.

이렇게 기후 노출 대응변수를 가중치로 하여 최종 결정된 VRI는 지자체별 태풍 피해액과의 상관성이 확보되었다고 판단하여 VRI의 정량화를 시도하였다. VRI 정량화는 본 연구에서는 편의상 4개의 취약성 구간으로 구분하였으며, 이는 우리나라 16개 지역 중에서 가장 취약한 지역과 가장 덜 취약한 지역을 하나로 정하고 나머지 지역을 두 개의 구간으로 구분하여, 구간별 태풍 피해액을 산정하였다. Table 6은 이들 구간을 정의하여 구간별 피해액을 나타낸 표이다. 그 결과 VRI의 값이 1.3 이상일 경우 연간 1200억원 이상을, VRI가 0.6 이하의 경우 연간 90억원 이하의 피해액을 추정할 수 있었다. 추정된 회귀분석 결과식은 $y = 0.0849 \ln(x) + 0.4888$ 로 나타났으며, 여기서 x, y는 각각 태풍 피해액(단위: 100,000천원)과 VRI를 의미한다. 따라서 어느 지역의 VRI의 값이 1.0로 계산된다면 위의 로그-회귀식으로부터 대략 약 500억 정도의 태풍 피해액을 예상할 수 있는 것으

로 해석할 수 있다.

이러한 VRI의 정량적 해석은 미래의 기후에도 그대로 적용될 수 있다. IPCC AR5에서는 새로운 온실가스 농도 시나리오와 시나리오 개발 전략을 상세히 논하였는데, 그 결과 IPCC 실무 그룹인 기후모델링 커뮤니티에서 현재 4개의 온실가스 대표농도경로(Representative Concentration Pathway: RCP)로 확정하고, RCP 시나리오에 기반하여 기후변화를 전망하고 있다. 현재 IPCC에서 채택된 4개의 RCP 시나리오는 RCP 8.5, 6.0, 4.5, 2.0이며 이 중 가장 극단적인 고배출 시나리오인 RCP8.5 시나리오는 2100년에 복사강제력이 $8.5W/m^2$ 에서 안정화되는 시나리오로서 국내에서도 많이 연구되고 있다. 국내에서는 이러한 시나리오를 바탕으로 기후변화 영향평가 및 적응 전략 수립하고 IPCC의 RCP8.5 시나리오 자료를 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 연구의 VRI 정량화 결과를 이용하면 극한 기상에 대한 미래기후 시나리오 연구에 적용될 수 있고, 따라서 보다 과학적이고 현실적인 기후변화 대응정책을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 기후변화 취약성 지수는 기후노출 대응변수 뿐만 아니라 민감도, 적응 능력 대응변수 또한 미래에는 다르게 나타날 수 있어 미래시나리오 연구 시에는 해석상 특별한 주의가 필요하다.

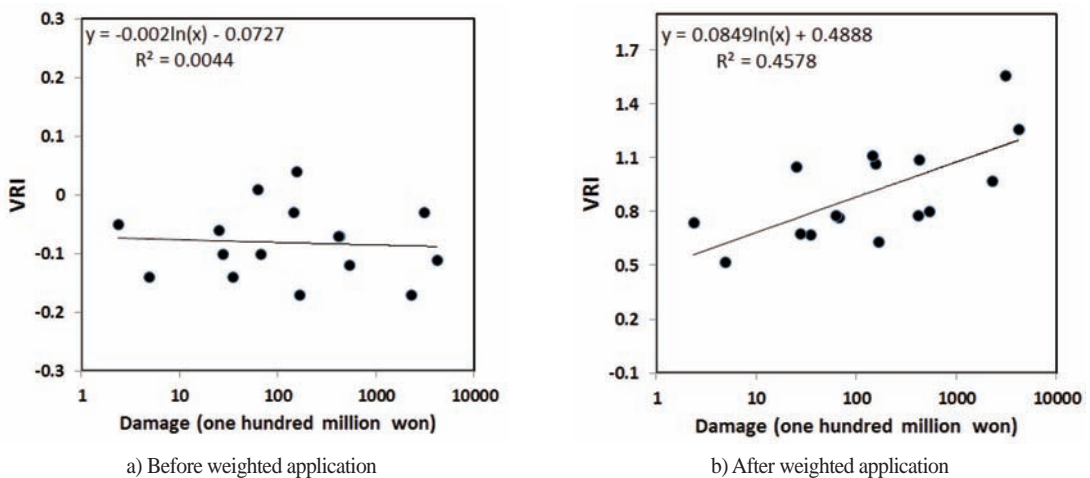


Figure 6. Scatter diagrams of damaged statistics against VRI (Vulnerability-Resilience Index) calculated a) without, and b) with applying weighting factors of climate exposure proxy variables.

Table 6. Quantified climate change vulnerability index, and its grades estimated by damaged amount (expressed as 00 million KRW) due to typhoon in South Korea.

Grade	VRI	Range of VRI	Range of Damaged Amount (DA)	Adaptation actions needs
Grade I	Low	VRI < 0.6	DA < 90	Not Necessary
Grade II	Moderat	0.9 < VRI < 1.3	90 < DA < 160	Moderately necessary
Grade III	High	0.9 < VRI < 1.3	160 < DA < 1200	Necessary
Grade IV	Extremely High	VRI > 1.3	DA > 1200	Urgently necessary

† expressed as a unit of (100 million KRW)

IV. 결론

기후변화가 진행되면서 극한 기상 현상이 얼마나 심화되는가의 기초 연구를 위하여 태풍이라는 하나의 극한 기상 요소를 선정하고 이를 대상으로 기후변화 취약성 지수를 계산하고 정량화를 시도하였다. 취약성 지수 계산 방법은 상향식 방법 중 하나인 VRI (Vulnerability-Resilience Index)를 계산하되 문제점으로 지적되었던 가중치 문제, 상대적 지표 문제 등을 보완한 후, VRI의 정량화를 시도하였고, 최종 계산되는 VRI의 공간 분포를 살펴보았다. VRI의 정량화는 지자체별 태풍 피해액의 순위 및 결과가 계산되는 VRI 값과 가장 유사하게 대응되도록 하기 위하여 기후 노출 대응변수에 가중치를 부여고, 이 때 계산되는 VRI를 4단계로 구분하여 단계별 해당되는 태풍 피해액으로 정량화하였다.

통계로 본 태풍 피해액은 경남, 부산, 전남 등 남해안에 위치한 지역이 상대적으로 높았다. 기후 노출 대응 변수에 가중치를 부여하지 않고 단순 VRI를 계산한 경우 태풍 피해가 많은 남해안 지역은 상대적으로 낮게, 그리고 내륙에 위치한 광주 등 태풍에 의한 피해액이 상대적으로 높게 나타나는 등 여러 문제점이 노출되었다. 그러나 기후노출 변수에 가중치를 부여한 결과, 가중치를 부여하기 이전의 문제점으로 지적되던 경남, 광주, 경북 등의 VRI 값이 많이 완화되는 등 여러 문제점이 보완되었다. 또한 태풍 피해액과 VRI의 대응관계가 높은 상관성을 보였고, 이를 근거로 VRI의 정량화를 시도하였고 그 결과 VRI = 1인 경우 약 500억의 태풍 피해를 받을 수 있는 지역으로 해석할 수 있었다.

이러한 VRI의 정량적 해석은 미래의 기후에도 그

대로 적용될 수 있을 것으로 판단되며, RCP 시나리오 등을 기반으로 기후변화를 전망할 경우, 이에 대응하는 정량화된 VRI를 전망할 수 있으므로, 미래의 기후변화에 따른 기후 대응정책을 보다 과학적이고 합리적으로 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 기후노출 대응변수 뿐만 아니라 민감도, 적응 능력의 대응 변수 또한 사회 경제 시나리오 역시 전망치를 추정하여 적용하여야 더 정확한 기후변화 대응 진단을 할 수 있으므로 미래 시나리오 연구 적용 시에는 해석상 특별한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

사사

이 연구는 환경부 기후변화대응 환경기술개발사업 (2013001310001)의 지원과 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 (2013R1A1A2057732)의 일부 지원을 받아 수행되었습니다.

인용문헌

국립환경과학원, 2008. 기후 및 대기환경 통합시스템 구축 및 운영(I).
 국립환경과학원, 2009. 기후 및 대기환경 통합시스템 구축 및 운영(II).
 국립환경과학원, 2010. 기후 및 대기환경 통합 모델링 구축 및 운영(III).
 기상청, 2012. 이상기후보고서, pp.12-21.
 김철희, 김은화, 송창근, 홍유덕, 유정아, 홍성철, 2011. 한반도 기후 변화 적응을 위한 취약성 지수 산정에 관한 고찰, 한국환경과학회지,

- 20(6), 789-798.
- 김철희, 송창근, 홍유덕, 유정아, 류성현, 임광영. 2012. 한반도 기후변화 취약성 지수 산정을 위한 CCGIS의 개발 및 활용, 한국기후변화학회지, 3(1), 13-24.
- 남기표, 강정언, 김철희. 2011. 기후변화 취약성 지수 산출을 위한 한반도 관측 기후 특성 분석, 한국환경영향평가학회지, 20(6), 891-905.
- 남기표, 김철희. 2013. 표준화 방법에 따른 기후변화 취약성 지수의 민감성 연구, 환경영향평가학회지, 22(6), 677-693.
- 소방방재청. 2012. 재해연보 2012.
- 유가영, 김인애. 2008. 기후변화 취약성 지표의 개발 및 도입방안, 한국환경정책평가연구원.
- 이동근, 김호걸, 백경혜, 서창완, 김재욱, 송창근, 유정아. 2012. 지자체 기후변화 적응계획 수립지원을 위한 집중호우에 의한 산사태 취약성 평가, 한국기후변화학회지, 3(1), 39-50.
- 채여라, 조현주. 2011. 기후변화 적응대책 우선 순위 평가 방법론 분석, 한국환경정책평가연구원.
- 한국환경정책평가연구원. 2008. 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안, 4-43, 51-52.
- 한화진, 안소은, 최은진, 한기주, 이정택, 김해동, 손요환, 박용하, 조광우, 윤정호, 이은애, 김승만. 2007. 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 (III), 한국환경정책평가연구원.
- Cutter SL, Boruff BJ, Shirley WL. 2003. Social Vulnerability to Environmental Hazards, Social Science Quarterly, 84(2), 242-261.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007, Impacts, adaptation, and vulnerability, Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Moss RH, Brenkert AL, Malone EL. 2001. Vulnerability to climate change: A quantitative approach, PNNL-SA-33642, Prepared for the U.S. Department of Energy.
- Nardo M, Saisana M, Saltelli A, Taranta S. 2005. Tools for Composite Indicators Building, European Commission Joint Research Centre, EUR 21682 EN.
- The Nature Conservancy. 2012. World Risk Report, 11-23.
- UNDP. 2005. Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measures, Cambridge University Press, UK.
- Wehbe MB, Seiler RA, Vinocur MR, Eakin H, Santos C, Civitaresi HM. 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.

References

- Chae YR, Jo HJ. 2011. Analysis of Methodologies for Prioritizing Climate Change Adaptation Measures, Korea Environment Institute.
- Cutter SL, Boruff BJ, Shirley WL. 2003. Social Vulnerability to Environmental Hazards, Social Science Quarterly, 84(2), 242-261.
- Han HJ, An S, Choi EJ, Han KJ, Lee JT, Kim HD, Son Y, Park YH, Jo K, Yoon JH, Lee E, Kim SM. 2007. Climate Change Impact Assessment and Construction of Adaptation System, Korea Environment institute.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007, Impacts, adaptation, and vulnerability, Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kim CH, Kim EH, Song CK, Hong YD, Yoo

- JA, Hong SC. 2011. A Review of studies on Vulnerability Indicator for the Climate Change Adaptation over South Korea, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(6), 789-798.
- Kim CH, Song CK, Hong YD, Yoo JA, Ryu SH, Yim GY. 2012. Development and Application of CCGIS for the Estimation of Vulnerability Index over Korea, *Climate Change Research*, 3(1), 13-24.
- Korea Meteorological Administration. 2012. Report on Abnormal Climate, 12-21.
- Korea Environment Institute. 2008. Introduction Plan and Building Vulnerability Index on Climate Change, 4-43, 51-52.
- Lee DK, Kim HG, Baek GH, Seo C, Kim J, Song C, Yu JA. 2012. Vulnerability Assessment of Landslide by Heavy Rain to Establish Climate Change Adaptation Plan for Local Governments, *Climate Change Research*, 3(1), 39-50.
- Moss RH, Brenkert AL, Malone EL. 2001. Vulnerability to climate change: A quantitative approach, PNNL-SA-33642, Prepared for the U.S. Department of Energy.
- Nam KP, Kang JE, Kim CH. 2011. Analysis of Climate Characteristics Observed over the Korean Peninsula for the Estimation of Climate Change Vulnerability Index, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 20(6), 891-905.
- Nam KP, Kim CH. 2013. Study on Sensitivity of different Standardization Methods to Climate, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(6), 677-693.
- Nardo M, Saisana M, Saltelli A, Taranta S. 2005. Tools for Composite Indicators Building, European Commission Joint Research Centre, EUR 21682 EN.
- National Emergency Management Agency. 2012. Disaster yearbook.
- National Institute of Environmental Research. 2008. Development and Operation of the Integrated System on Climate and Air Quality (I).
- National Institute of Environmental Research. 2009. Development and Operation of the Integrated System on Climate and Air Quality (II).
- National Institute of Environmental Research. 2010. Development and Operation of the Integrated System on Climate and Air Quality (III).
- The Nature Conservancy. 2012. World Risk Report, 11-23.
- UNDP. 2005. Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measures, Cambridge University Press, UK.
- Wehbe MB, Seiler RA, Vinocur MR, Eakin H, Santos C, Civitaresi HM. 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, Kim I. 2008. Development and application of Climate Change Vulnerability Index, Korea Environment Institute.