기후변화취약성 평가지표 분류체계에 따른 홍수취약성 평가결과의 비교

Comparison of Flood Vulnerability Assessment Outcomes by Classification Schemes for Vulnerability Components to Climate Change

이종석* · 최현일**

Lee, Jong Seok*, and Choi, Hyun Il**

Abstract

Since the structural flood mitigation measures are limited due to climate change, preemptive measures are recently required by the flood vulnerability assessment, one of the nonstructural countermeasures to floods. Although the vulnerability assessment theory to climate change in IPCC (2001) is widely used for the flood vulnerability assessments, there is limited research on the effect of the classification schemes for vulnerability components on flood vulnerability evaluation outcomes. This study has therefore compared the two flood vulnerability results for 231 administrative districts in Korea under study, for which the one is a combination of the three vulnerability components to climate change such as exposure, sensitivity, and adaptability capacity, while the other is a combination of potential impact as a function of exposure and sensitivity along with adaptive capacity indicators. The results of this study are expected to provide basic information for selecting alternatives in flood mitigation plans.

Key words : Flood Vulnerability Assessment, Vulnerability to Climate Change, Assessment Indicator

요 지

최근 기후변화로 인하여 구조적 홍수저감대책에는 한계가 있으므로, 비구조적인 대책 중 하나인 홍수취약성 평가를 통한 선제적 홍수대응 방안이 필요하다. 홍수취약성 평가에는 IPCC(2001)의 기후변화취약성 평가이론이 널리 사용되고 있으나, 평가지표의 구성에 따라 홍수취약성 평가결과에 미치는 영향에 대한 연구는 부족하다. 따라서 본 연구에서는 기후변화취약성의 3가지 평가지표인 노출성, 민감도, 적응능력 지표를 종합한 홍수취약성 지수와, 노출성 및 민감도 지표의 합수인 잠재영향 지표와 적응능력 지표를 종합한 홍수취약성 지수를 우리나라 231개 시군구를 대상으로 산정하여 2가지 홍수취약성 결과를 비교분석하였다. 본 연구의 결과는 홍수저감계획의 대안설정에 기초적인 정보를 제공할 것으로 기대한다.

핵심용어 : 홍수취약성평가, 기후변화취약성, 평가지표

1. 서 론

지구온난화로 인한 기후변화는 지역적 및 전세계적인 기상변수들로 인해 야기될 것이 예상되었으며(IPCC, 1998). 현재 실제로 우리나라뿐 아니라 세계적으로 국지성호우

및 강력한 태풍으로 인해 홍수재해가 잦은 빈도로 나타나고 있다. 따라서 구조적 대책만을 통한 홍수방어와 피해저감에는 한계가 있으므로, 홍수예경보, 홍수터 관리, 대피지도, 홍수보험과 아울러 홍수취약성 평가를 통한 선제적 대비 등의 비구조적 대책을 통한 홍수적응 방안이 여러 나라에서

*정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 박사과정(E-mail: ljs5219@gmail.com)

Member, Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

**교신저자, 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-53-810-2413, Fax: +82-53-810-4622, E-mail: hichoi@ynu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Yeungnam University

마련되고 있다. 우리나라에서도 비구조적 대책마련의 일환으로 다양한 방법을 이용하여 홍수취약성을 평가하고 있으며, 많은 연구자들이 다양한 방법 중 기후변화에 따른 지역별 변수별 취약성을 분석하고 평가하는 IPCC (2001)의 취약성 개념을 사용하고 있다. IPCC (2001)에서는 평가대상 재해의 영향을 나타내는 노출성 지표(Exposure Indicators, EI)와, 영향을 받는 물리, 환경, 사회, 경제적 시스템의 예상 반응 정도를 나타내는 민감도 지표(Sensitivity Indicators, SI), 그리고 외부 영향에 대한 적응, 완화 및 대처하는 능력을 나타내는 적응능력 지표(Adaptive capacity Indicators, AI)의 관계로 표현하여 취약성평가의 개념을 정립하였다. 이와 아울러, 노출성 지표와 민감도 지표의 합수로 잠재영향 지표(Potential Impact Indicators, PI)를 제시하였다.

IPCC (2001) 기후변화취약성 평가체계를 이용하여 국외에서 진행된 연구들 중, 몇 가지 사례를 살펴보면, Balica et al. (2009)에서는 루마니아와 독일, 캄보디아의 도시하천 유역을 대상으로, 사회적 요소, 경제적 요소, 환경적 요소, 그리고 물리적 요소로 분류한, 총 71개 대리변수를 지표화하여 각각 노출성, 민감도, 적응능력의 3가지 평가지표(EI, SI, AI)를 산정하고, 이를 종합하여 홍수취약성 평가를 수행하였다. 또한 Balica and Wright (2010)에서는 홍수취약성 지수 산정에 필요한 평가지표의 복잡성을 낮추기 위해, 평가지표의 대리변수들의 상관관계분석과 전문가들의 의견 등을 종합한 노출성, 민감도, 그리고 적응능력의 3가지 평가지표(EI, SI, AI)를 이용하여 홍수취약성 지수 산정에 용의한 평가방안을 제안하였다. Dinh et al. (2012)에서는 베트남의 메콩강유역의 삼각주지역을 대상으로 기후변화로 인한 해수면상승에 따른 홍수취약성 분석을 위해 해수면상승, 파고, 유출량과 인구밀도 등의 대리변수를 이용하여 노출성, 민감도, 적응능력의 3가지 평가지표(EI, SI, AI)를 종합한 홍수취약성지수를 산정하였다. Chang and Huang (2015)에서는 타이완의 도시지역을 대상으로 공간과 도시화의 영향을 고려한 잠재영향 지표(PI)를 산정하고, 이를 적응능력 지표(AI)와 종합하여 홍수취약성 지수를 산정하였다. Kablan et al. (2017)에서는 기후변화취약성 평가이론을 기본으로 재난위험관리 및 기후변화적응과 관련된 기준으로 선정된 대리변수를 통한 노출성, 민감도, 적응능력의 3가지 평가지표(EI, SI, AI)를 이용하여 코트디부아르를 대상으로 홍수취약성지수를 산정하였다.

국내에서는 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)에서 전국 시군구를 대상 보건, 산림, 물관리, 생태계, 농업, 해양 및 수산, 재해 등 총 16개 부문별로 노출성, 민감도 적응능력의 3가지 평가지표(EI, SI, AI)를 종합하여 기후변화취약성 분석 및 취약성 분석을 위한 적응도구 개발에 대한 방법론을 제시하였다(NIER, 2010). Lee et al. (2011)에서는 국내 5대강 유역을 대상으로, 노출성, 민감도, 적응능력의 3가지 평가지표(EI, SI, AI)를 종합하여

현재 상태 및 미래기후 시나리오에 대한 홍수취약성 지수를 각각 산정하여 평가하였다. Kim et al. (2012)에서는 낙동강 유역을 대상으로 엔트로피가중치를 부여한 대리변수를 이용한 3가지 평가지표를 산정하고, 노출성 및 민감도 지표의 합수인 잠재영향 지표(PI)를 적응능력 지표(AI)와 종합한 홍수취약성 지수를 이용하여 국내 대규모 하천정비사업의 효과를 평가하였다. Han et al. (2012)에서는 일강수량이 80 mm 이상인 일수와 일최대강수량으로 산정된 노출성 지표와 공공시설의 면적으로 이루어진 민감도 지표를 합하여 잠재영향 지표(PI)를 산정하고 하천개수율과 인구당 공무원수, 1인당 지역내 총생산으로 이루어진 적응능력 지표(AI)와 종합하여 기후변화에 따른 지자체 기반시설들의 홍수취약성 평가를 수행하였다. 최근에도 Chung et al. (2017)에서는 한강유역을 대상으로 다기준평가법을 이용하여 가중치를 적용한 노출성, 민감도, 적응능력의 3가지 평가지표(EI, SI, AI)를 통한 홍수취약성 평가분석을 수행하였다.

이와 같이, 국내외의 홍수취약성 평가 분야에서 다양하게 사용되고 있는 IPCC (2001) 기후변화취약성 평가체계를 통한 홍수취약성 지수 산정과정에, 평가지표 분류체계에서 잠재영향 지표(PI) 산정과정에 유·무에 따른 2가지 방식이 사용되고 있음을 확인할 수 있었다. 홍수취약성 평가결과를 토대로 정책을 결정하는 단계에 합리적이고 일관성 있는 정보를 제공하는 것이 중요하므로, 평가지표의 분류 및 적용방법이 홍수취약성 평가결과에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 따라서 본 연구는 IPCC (2001) 기후변화취약성 평가이론을 바탕으로 홍수취약성 지수의 평가체계와 산정 과정에 대한 내용을 정리하고, 전국 231개 시군구를 대상으로 평가지표 분류방법별 홍수취약성 분석결과에 대한 영향을 검토하여, 보다 합리적인 평가결과 도출을 위한 적정방법을 제시하고자 한다.

2. 홍수취약성 평가체계 및 평가지표 선정

2.1 평가지표체계

본 연구에서는 IPCC (2001)에서 정립한 노출성-민감도-적응능력의 평가체계를 적용하여 평가지표를 분류하고 대리변수를 선정하려고 한다.

노출성(Exposure) 지표란 기후변화로 인해 영향 받을 수 있는 노출된 변수들로, 기후변화로 인하여 직접적으로 변화가 일어나는 변수를 말한다. 예를 들면 기온과 강수량 변화, 해수면상승, 조위변화, 태풍빈도 등과 같은 변수를 말한다. 민감도(Sensitivity) 지표는 기후변화에 노출되어진 환경적 변수들로 인하여 영향을 받게 되는 물리적, 경제 사회적, 생태환경과 같은 대부분의 피해를 입게 되는 변수들을 말한다. 예를 들면 인구, 농경지, 구조물(도로, 건물 등), 생태학적 종분류 등과 같은 변수로 구성되어 있다. 적응능력(Adaptive capacity) 지표는 영향력에 반응하기 위

해 정립된 질서(대피방법, 교육의 정도 등)와 저감을 위한 구조물의 능력(수리, 수문학적 이수/치수능력 등), 재정상태(GDP, 재정자립도, 경제수준 등)와 같은, 영향력에 ㄴ 반응과 적응의 능력을 대리하는 변수들로 이루어진다.

이와 같은 IPCC (2001) 기후변화취약성 평가이론에서 제시된 노출성, 민감도, 적응능력의 3가지 평가지표들 중, 노출성 및 민감도 지표의 함수로 잠재영향(potential impact) 지표가 사용되기도 하며, 이들 평가지표들로 구성된 취약성 평가체계는 다음 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 잠재영향 지표(PI) 산정과정의 유·무에 따른 2가지 홍수취약성 평가체계를 비교분석하려고 한다.

Fig. 1. Vulnerability Assessment Components to Climate Change (IPCC, 2001)

2.2 평가지표 대리변수 선정

평가지표를 선정하기 위해 가장 중요한 것은 목표를 명백하고 정확하게 선정함에 있으며, 그 목표에 따른 각 평가지표의 대리변수들을 선정할 필요가 있다(Nguyen et al., 2016). 따라서 본 연구에서는 기존에 수행되어진 홍수취약성 분석 연구에서 사용된 변수들을 검토하고, 변수의 대표성, 측정 및 계량 가능성, 자료구축 용이성 등을 고려하여 홍수취약성 평가를 위한 노출성-민감도-적응능력 평가체계에 따라 3개의 평가지표(EI, SI, AI)별로 3개씩의 대리변수들(총 9개 변수)을 선정하여 분류하였다(Table 1).

Table 1. Proxy Variables for Flood Vulnerability

Indicators	Proxy Variables
Exposure Indicator (EI)	Daily Maximum Rainfall
	Rainfall Intensity
	Days over 80 mm Rainfall
Sensitivity Indicator (SI)	Basin Slope
	Population Density
	Urbanization Rate
Adaptive capacity Indicator (AI)	Civil Servant Ratio
	Capacity of Pumping Station
	River Improvement Rate

노출성 지표(EI)의 대리변수로는, 일최대강우량과 강우강도, 그리고 80 mm 이상의 강우(호우)일수의 3가지 변수를 선정하였다. 3가지 변수 모두 최근 10개년(2007-2016)동안 기상청관할의 75개 지점 관측자료를 역거리가중법을 통하여 공간분석하여 시군구 지역별로 산정하였다. 전국 시군구에 대한 기후변화의 일반적인 영향을 고려하고자, 노출성 지표(EI)의 대리변수는 강우특성에 중점을 두어 선정되었다.

민감도 지표(SI)는 유역경사, 인구밀도, 도시화율 총 3개의 대리변수로 구성하였다. 환경부에서 2010년을 기준으로 제공하는 수치지형표고자료를 사용하여 시군구별 평균경사로 산정한 유역경사는 홍수에 대한 지형적 요소로서, 경사가 완만할수록 배수가 원활하지 못할 가능성을 고려하여 홍수에 대한 취약성이 높은 것으로 산정하였다. 인구밀도는 국가통계포털(<https://kosis.kr>)에서 제공하는 2014년 시군구별 인구자료를 기준으로 산정한 시군구면적별 인구로서 인구밀도에 따라 홍수로 인한 인적요소의 취약성을 분석하는 중요한 민감도 변수이다. 도시화율은 환경부에서 제작하여 환경공간정보서비스(<https://egis.me.go.kr>)에서 제공하는 토지피복지도의 도로 및 주거지역, 공공시설 등으로 분류된 시가지지역을 시군구 면적당 비율로 산정하여 구축하였으며, 홍수발생 시 물리적, 경제적 피해에 대한 물적 요소의 민감도를 나타내는 변수이다.

적응능력 지표(AI)는 인구당 공무원수 비율, 배수펌프장의 배수능력, 하천 개수율 총 3개의 대리변수로 구성하여 구축하였다. 공무원수 비율은 2014년을 기준으로 한 시군구별 인구당 공무원수의 비율로서, 홍수발생 전, 후 예방과 관리 등을 통해 홍수피해를 저감하기 위한 지역별 사회적 적응능력을 평가하는 변수로 구축하였다. 배수펌프장의 배수능력은 강우로 인해 발생 가능한 내수침수피해를 저감하는 변수로 구축하였다. 하천개수율은 호우와 태풍 발생 시 외수의 범람으로 인한 홍수피해에 대한 저감능력을 평가하는 변수로 선정하였다.

3. 홍수취약성 평가 및 비교분석

3.1 대상 지역 선정

본 연구에서는 IPCC (2001) 기후변화취약성 평가체계에 따른 홍수취약성 평가를 수행하기 위해서, 우리나라 행정구역 시·군·구를 대상 지역으로 선정하였다. Fig. 2와 같이 특별시 1개의 25개의 구, 광역시 6개의 49개의 구, 시 80개와 군 77개로 구성된 총 231개의 행정구역을 홍수취약성 평가 대상 지역으로 선정하였다.

Fig. 2. Administrative Districts for Study Site

3.2 표준화 방법

홍수취약성 평가를 위한 대리변수인 9개의 각 변수들은 값의 크기와 단위가 다르기에 동일한 기준으로 표준화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 각 변수들을 동일한 기준으로 비교하기 위해, 원자료값의 분포 및 상대적 크기에 대한 자료특성을 변형없이 그대로 유지하여 변환할 수 있는 표준화 방법을 선정하였다. 즉, Eq. (1)과 같이 각 대리변수의 원자료값(x_i)을 각 자료의 최대값($x_{\max}$)으로 나누어 최대값 1의 지표값(s_i)으로 무차원 표준화하였다. 대리변수의 값이 클수록 취약성을 높이는 특성을 지닌 노출성 지표(EI)의 3개 변수와 유역경사를 제외한 민감도 지표(SI)의 2개 변수들과는 달리, 적응능력 지표(AI)의 3개 변수들은 민감도 지표(SI)의 유역경사 변수와 아울러, 변수의 값이 클수록 취약성을 감소시키는 반대적인 개념이므로, 이들 대리변수들의 표준화 시, Eq. (2)를 사용하여 반대 방향으로 구축하였다.

$$s_i = \frac{x_i}{x_{\max}} \quad (1)$$

$$s_i = 1 - \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max}} \quad (2)$$

여기서, $x_{\min}$ 는 각 변수의 최소값으로, 0보다 큰 값을 나타낼 수 있으므로, Eqs. (1)과 (2)를 사용한 결과가 정확히 대칭적으로 표준화되도록 고려하였다.

총 9개 대리변수를 Eqs. (1) 또는 (2)를 통하여 표준화한 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

3.3 지표 산정 방법

대리변수들을 종합하여 홍수취약성 평가지표인 노출성 지표(EI), 민감도 지표(SI), 적응능력 지표(AI)를 산정하기 위해, 본 연구에서는 Eq. (3)과 같이 가법형 효용함수(additive

utility function)을 사용하였다.

$$I = \sum_{i=1}^n w_i u_i \quad (3)$$

여기서, I 는 각 평가지표(EI, SI, AI), w_i 및 u_i 는 각 대리변수 i 의 가중치 및 표준화 값, 그리고 m 은 대리변수의 개수를 나타낸다. 모든 가중치는 동일한 것으로 가정하였다.

3.4 홍수취약성 지수 산정 방법

3개의 취약성 평가지표(EI, SI, AI)를 종합하여 홍수취약성 지수(Flood Vulnerability Index, FVI)를 산정하기 위하여, 여러 선행연구에서 사용되어 온 2가지 종합화 방법을 적용하였다. 첫 번째는 Eq. (4)와 같이, 3개 평가지표(EI, SI, AI)를 동일가중치로 종합하여 홍수취약성 지수 $FVI(3)$ 를 산정하는 방법이고(Yusuf and Francisco, 2009; Balica et al., 2009; Balica and Wright, 2010; Dinh et al., 2012; Kim and Chung, 2013; Yoo et al., 2014; Chung et al., 2017), 두 번째는 Eq. (5)와 같이, 노출성 지표(EI)와 민감도 지표(SI)를 종합한 잠재영향 지표(PI)를 적응능력 지표(AI)와 종합하여 홍수취약성 지수 $FVI(2)$ 를 산정하는 방법이다(Füssel and Klein, 2006; Metzger et al., 2005; Johnston and Williamson, 2007; Lindner et al., 2010; Kim et al., 2012; Han et al., 2012; Chang and Huang, 2015).

$$FVI(3) = \frac{EI + SI + AI}{3} \quad (4)$$

$$FVI(2) = \frac{PI + AI}{2} \quad (5)$$

여기서, $PI = (EI + SI)/2$ 이다.

홍수취약성 지수 $FVI(3)$ 에서는 3개의 평가지표(EI, SI, AI)가 1/3의 동일한 가중치를 지니지만, 홍수취약성 지수 $FVI(2)$ 는 결과적으로 적응능력 지표(AI)에는 1/2의 가중치, 그리고 노출성 지표(EI) 및 민감도 지표(SI)에는 각각 1/4의 가중치가 적용된다.

3.5 홍수취약성 산정결과 비교분석

본 연구에서는 잠재영향 지표(PI)의 산정유·무에 따른 산정방법의 차이로 인한 홍수취약성 평가의 결과비교를 위해서, 노출성 지표(EI), 민감도 지표(SI), 적응능력 지표(AI)의 3개 평가지표의 평균에 의한 홍수취약성 지수 $FVI(3)$ 와 노출성 지표(EI)와 민감도 지표(SI)의 함수인 잠재영향 지표(PI)와 적응능력 지표(AI)의 평균에 의한 홍수취약성 지수 $FVI(2)$ 를 각각 전국 231개 시군구에 대하여 산정하고, 홍수취약도 순위를 부여하여 두 결과에 대한 비교평가를 진행하였다.

Fig. 3. Spatial Distribution of Normalized Proxy Variables

Fig. 4. Spatial Distribution of Flood Vulnerability Indicator Results

Fig. 5. Spatial Distribution of Flood Vulnerability Rank Results

Fig. 4와 같이, 우선 본 연구에서 산정된 평가지표들을 살펴보면, 노출성 지표(EI)의 최소값은 0.502로서 경상북도 지역을 제외한 대부분의 행정구역에서는 높은 값을 나타내고 있다. 민감도 지표(SI)의 최소값은 0.050으로, 대부분의 행정구역에서 낮은 값을 보이고 있으나 인구밀도와 도시화율이 높은 도시지역에서 높은 수치를 나타낸다. 노출성 지표(EI)와 민감도 지표(SI)의 평균으로 산정되는 잠재영향 지표(PI)는 최소값이 0.360이고, 주로 도시지역에서 높은 값을 확인할 수 있다. 적응능력 지표(AI)는 최소값이 0.473인 서울특별시 구로구를 제외하고, 전반적으로 지표의 수치가 높은 양상임을 확인할 수 있다.

노출성 지표(EI)와 민감도 지표(SI)의 함수인 잠재영향 지표(PI)를 산정하여 취약성을 분석하는 홍수취약성 지수 $FVI(2)$ 의 경우, 적응능력 지표(AI)가 다른 평가지표들(EI, SI)보다 홍수취약성 산정결과에 더 큰 영향력을 미칠 것으로

예상된다. 그러나, 이와 같은 취약성 산정과정의 차이로 인해 취약성 분석결과에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가는 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 많은 연구들에서 사용되고 있는 홍수취약성을 산정하는 각 방법의 영향력에 대한 분석을 위해, 2가지 홍수취약성 산정방법에 따라 전국 231개 시군구에 적용한 취약성 순위결과를 Fig. 5에 나타내었다. 또한 2가지 홍수취약성 지수 $FVI(3)$ 및 $FVI(2)$ 로 산정된 홍수취약성 결과의 차이가 큰 행정구역 20곳에 대한 순위 차이와 각 평가지표들의 값을 Table 2에 표시하였다. 산정된 등위의 숫자가 작을수록 높은 홍수취약성을 나타낸다.

Table 2를 보면, 홍수취약성 지수 $FVI(3)$ 순위가 $FVI(2)$ 순위보다 더 높게 평가되는 가장 큰 차이는 서울특별시 구로구로서 81등급 차이를 보이고 있다. 또 그 이외에 서울특별시 서초구, 마포구, 양천구, 영등포구 순으로 차이가 크게

Table 2. Selected Administrative Districts with Large Difference between Two Flood Vulnerability Results

Administrative Districts Name	Flood Vulnerability Indicator Value				Flood Vulnerability Rank		FVI(3) - FVI(2)
	EI	SI	PI	AC	FVI(3)	FVI(2)	
Guro-gu, Seoul	0.775	0.851	0.908	0.473	53	134	-81
Gangseo-gu, Busan Metropolitan City	0.843	0.365	0.675	0.566	150	204	-54
Goyang City, Gyeonggi-do	0.774	0.461	0.690	0.600	131	185	-54
Seocho-gu, Seoul	0.782	0.553	0.746	0.647	77	126	-49
Gwangmyeong City, Gyeonggi-do	0.774	0.535	0.731	0.661	79	127	-48
Gimpo City, Gyeonggi-do	0.754	0.425	0.659	0.673	124	164	-40
Dalseo-gu, Daegu Metropolitan City	0.618	0.583	0.670	0.678	114	153	-39
Mapo-gu, Seoul	0.795	0.746	0.861	0.608	49	82	-33
Yangcheon-gu, Seoul	0.779	0.985	0.985	0.576	16	48	-32
Youngdeungpo-gu, Seoul	0.789	0.826	0.902	0.602	36	67	-31
Geochang-gun, Gyeongsangnam-do	0.700	0.152	0.476	0.877	171	149	22
Gijang-gun, Busan Metropolitan City	0.763	0.224	0.551	0.954	88	65	23
Hoengseong-gun, Gangwon-do	0.683	0.158	0.470	0.906	163	140	23
Wanju-gun, Jeollabuk-do	0.694	0.158	0.476	0.885	169	146	23
Hamyang-gun, Gyeongsangnam-do	0.754	0.137	0.498	0.899	147	123	24
Uiryeong, Gyeongsangnam-do	0.773	0.155	0.519	0.900	135	110	25
Gumi City, Gyeongsangbuk-do	0.574	0.268	0.470	0.911	158	132	26
Sancheong-gun, Gyeongsangnam-do	0.815	0.130	0.528	0.957	102	75	27
Ulju-gun, Ulsan Metropolitan City	0.681	0.205	0.495	0.918	143	115	28
Changnyeong-gun, Gyeongsangnam-do	0.712	0.232	0.527	0.952	107	78	29

발생하였고 부산광역시 강서구와 대구광역시 달서구, 경기도 고양시, 광명시, 김포시 등도 홍수취약성 지수 $FVI(3)$ 의 순위가 높게 평가되었다. 이와 같이 잠재영향 지표(PI)와 적응능력 지표(AI)가 동등하게 작용하는 홍수취약성 지수 $FVI(2)$ 에서는, 적응능력 지표(AI)의 값이 최소(0.473)인 서울특별시 구로구를 비롯하여, 상대적으로 낮은 수치의 적응능력 지표(AI)가 순위변동(저하)에 큰 영향력을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로, 홍수취약성 지수 $FVI(3)$ 의 순위가 $FVI(2)$ 의 순위보다 낮게 결정된 행정구역은 경상남도 창녕군과 울산광역시 울주군, 경상남도 산청군, 경상북도 구미시, 경상남도 의령군, 함양군, 전라북도 완주군, 강원도 횡성군, 부산광역시 기장군, 경상남도 거창군 순으로 큰 차이가 발생하였다. 홍수취약성 지수 $FVI(2)$ 의 결과에서는, 잠재영향 지표(PI)가 상대적으로 낮고 적응능력 지표(AI) 값이 상당히 높은 행정구역이 적응능력 지표(AI)의 큰 영향력으로 $FVI(3)$ 의 순위보다 상승하게 되는 결과를 확인할 수 있다. 이상의 비교결과를 살펴보면, 홍수취약성 지수 $FVI(2)$ 의 산정과정에서, 노출성 지표(EI)와 민감도 지표(SI)보다 결과적으로 더 큰 가중치를 갖는 적응능력 지표(AI)가 홍수취약성 결과에 더 큰 영향력을 미치게 되므로, 적응능력 지표(AI)의 불확실성이 클 경우에는 홍수취약성 산정결과의 신뢰도에도 영향을 미치게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 우리나라 231개의 행정구역을 대상으로 IPCC (2001) 기후변화취약성 이론을 적용한 홍수취약성 평가에서 평가지표의 분류체계와 산정과정에 따른 영향력을 분석하였다. 노출성 지표(EI), 민감도 지표(SI), 적응능력(AI) 지표의 3개 평가지표 산정에 필요한 대리변수들은 기존의 많은 연구들에서 사용하였던 인자들을 비교 검토하여 총 9개의 인자들로 선정하고 표준화를 거쳐 구축하였고, 동일가중치를 부여한 가법형 효용함수로 3개 평가지표를 산정하였다. 또한 3개 평가지표(EI, SI, AI)의 평균으로 산정한 홍수취약성 지수 $FVI(3)$ 를 노출성 지표(EI) 및 민감도 지표(SI)의 함수인 잠재영향 지표(PI)와 적응능력 지표(AI)의 평균으로 산정한 홍수취약성 지수 $FVI(2)$ 와 비교하여, 지수산정방법에 따른 홍수취약성 결과의 영향을 고찰하였다.

전국 231개 행정구역에 대해 산정한 2개 홍수취약성 지수 $FVI(3)$ 및 $FVI(2)$ 의 비교결과를 보면, 잠재영향 지표(PI)를 통한 홍수취약성 지수 $FVI(2)$ 산정결과는 다른 2개 평가지표들(EI, SI)보다 적응능력 지표(AI)가 높은 가중치를 받게 됨으로 영향력이 큰 것으로 확인되었다. 그러나 3개 평가지표 중, 적응능력 지표(AI)는 노출성 지표(EI) 및 민감도 지표(SI)와는 다르게, 상대적으로 실제 관측 자료값 보다는 정책,

제도 등의 대리변수들로부터 산정되는 경향으로 인해 일반적으로 정량화가 어렵고 불확실성이 더 클 수 있다. 이러한 특성을 고려할 때, 홍수취약성 분석에서 타당한 가중치의 부여조건이 없다면, 3개 평가지표(EL, SI, AI)의 영향을 크게 반영하는 것이 바람직하다고 사료된다. 따라서 3개 평가지표(EL, SI, AI)의 동일한 영향력을 바탕으로 산정되는 홍수취약성 지수 $FV(3)$ 가 보다 합리적인 홍수취약성 평가결과를 제공한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발 사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MOIS-재난-2015-03].

References

- Balica, S.F., Douben, N., and Wright, N.G. (2009) Flood Vulnerability Indices at Varying Spatial Scales. *Water Science and Technology*, Vol. 60, No. 10, pp. 2571-2580.
- Balica, S., and Wright, N.G. (2010) Reducing the Complexity of the Flood Vulnerability Index. *Environmental Hazards*, Vol. 9, No. 4, pp. 321-339.
- Chang, L.F., and Huang, S.L. (2015) Assessing Urban Flooding Vulnerability with an Emergy Approach. *Landsc. Urban. Plan.*, Vol. 143, pp. 11-24.
- Chung, E.S., Abdulai, P.J., Park, H., Kim, Y. Ahn, S.R., and Kim, S.J. (2017) Multi-Criteria Assessment of Spatial Robust Water Resource Vulnerability Using the TOPSIS Method Coupled with Objective and Subjective Weights in the Han River Basin. *Sustainability*, Vol. 9, No. 1, p. 29.
- Dinh, Q., Balica, S., Popescu, I., and Jonoski, A. (2012) Climate Change Impact on Flood Hazard, Vulnerability and Risk of the Long Xuyen Quadrangle in the Mekong Delta. *International Journal of River Basin Management*, Vol. 10, No. 1, pp. 103-120.
- Füssel, H.M., and Klein, R.J.T. (2006) Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. *Climatic Change*, Vol. 75, No. 3, pp. 301-329.
- Han, W.S., Sim, O.B., Lee, B.J., and Yoo, J.H. (2012) The Proposal of Evaluation Method for Local Government Infrastructure Vulnerability Relating to Climate Change Driven Flood. *Journal of Climate Change Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 25-37.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1998) *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001) *Human Health and Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- Johnston, M., and Williamson, T. (2007) A Framework for Assessing Climate Change Vulnerability of the Canadian Forest Sector. *The Forestry Chronicle*, Vol. 83, No. 3, pp. 358-361.
- Kablan, M.K.A., Dongo, K., and Coulibaly, M. (2017) Assessment of Social Vulnerability to Flood in Urban Côte d'Ivoire Using the MOVE Framework. *Water*, Vol. 9, No. 4, p. 292.
- Kim, H.S., Park, G.J., Kim, S.D., Choi, M.H., Park, M.J., and Yoon, J.Y. (2012) Assessment of Flood Vulnerability Considering Climate Change and Large-Scale River Restoration Project. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 2, pp. 107-113.
- Kim, Y., and Chung, E.S. (2013) Assessing Climate Change Vulnerability with Group Multi-criteria Decision Making Approaches: A Case Study with the Water Resources System in South Korea. *Clim. Change*, Vol. 121, pp. 301-315.
- Lee, M.H., Jung, I.W., and Bae, D.H. (2011) Korean Flood Vulnerability Assessment on Climate Change. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 653-666.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J., and Marchetti, M. (2010) Climate Change Impacts, Adaptive Capacity, and Vulnerability of European Forest Ecosystems. *For. Ecol. Manage.*, Vol. 259, pp. 698-709.
- Metzger, M.J., Leemans, R., and Schröter, D. (2005) A Multidisciplinary Multi-scale Framework for Assessing Vulnerabilities to Global Change. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, Vol. 7, pp. 253-267.
- Nguyen, T.T.X., Bonetti, J., Rogers, K., and Woodroffe, C.D. (2016) Indicator-based Assessment of Climate-change Impacts on Coasts: A Review of Concepts, Methodological Approaches and Vulnerability Indices. *Ocean & Coastal Management*, Vol. 123, pp. 18-43.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2010) *GIS based Climate Change Adaptation Tool*. Ministry of Environment Press.

- Yoo, G., Kim, A.R., and Hadi, S. (2014) A Methodology to Assess Environmental Vulnerability in a Coastal City: Application to Jakarta, Indonesia. *Ocean & Coastal Management*, Vol. 102, Part A, pp. 169-177.
- Yusuf, A.A., and Fransisco, H. (2009) *Climate Change Vulnerability Mapping for Southeast Asia*. EEPSEA Special and Technical Paper tp200901s1, Economy

and Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA).

<i>Received</i>	February 7, 2018
<i>Revised</i>	February 9, 2018
<i>Accepted</i>	February 20, 2018