연안 홍수취약성 평가구조 구축 및 적용

Development and Implementation of an Assessment Framework for Coastal Flood Vulnerability

이종석* · 최현일**

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

Abstract

In Korea, severe flood damages caused by regional and climatic effects characterized by the peninsular topography. This study was motivated by limitations found in the widely used flood vulnerability assessment frameworks of the OECD PSR model and the IPCC vulnerability concept. These limitations included ambiguity in the selection of proxy variables by classification of assessment components, quantification issues for some variables, and negative elasticity of countermeasures to vulnerability. To address these limitations, this study has developed a new assessment framework that comprises a flood cause indicator (FI), a potential target indicator (PI), and a damage history indicator (DI). Using these indicators, an assessment of the flood vulnerability was performed for Korea's 73 coastal administrative districts. A coastal flood vulnerability index (CFVI) was calculated by a multiplicative utility function that aggregates the three assessment components from nine selected proxy variables. The calculated CFVI values indicated that the flood vulnerability is relatively high for the major coastal cities, where the values of all three assessment components together are larger. The new flood vulnerability assessment framework proposed in this study is expected to be helpful in coastal flood vulnerability assessment and mitigation decision making.

Key words : Vulnerability Assessment Framework, Coastal Flood Vulnerability, OECD PSR Model, IPCC Vulnerability Concept

요 지

반도지형의 특성을 지닌 우리나라는 지역적 기후적 영향에 의하여 연안지역에서의 홍수피해가 크게 나타나고 있다. 본 논문에서는 홍수취약성 평가에 널리 이용되고 있는 OECD의 PSR 모형과 IPCC의 기후변화취약성 개념에서의 평가지표 분류에 따른 대리변수 선정의 모호성과 대책 관련 인자들의 취약성에 대한 역방향성과 아울러 일부 대책인자의 정량화 문제 등의 한계점을 고찰하였다. 따라서 본 논문에서는 홍수유발 지표(FI), 잠재대상 지표(PI), 피해이력 지표(DI)로 구성되는 새로운 평가구조를 구축하고, 전국 73개 연안 시군구를 대상으로 홍수취약성을 평가하였다. 선정된 9개의 대리변수들로부터 산정한 3개의 평가지표를 승법형 효용함수에 의해 종합한 연안 홍수취약성 지수(CFVI) 산정결과, 3개 평가지표의 값이 고르게 크게 나타나는 연안의 주요 도시들에서 홍수취약성이 상대적으로 높게 나타났다. 본 논문에서 제시한 새로운 홍수취약성 평가구조는 연안 홍수취약성 평가 및 저감대책 수립에 유용할 것으로 기대한다.

핵심용어 : 취약성 평가 구조, 연안 홍수취약성, OECD PSR 모형, IPCC 취약성 개념

1. 서 론

최근의 연안지역과 관련하여 홍수재해 발생이 크게 늘고 있으며, 연안의 지역적인 특성에 의하여 동일한 강우조건에

서도 홍수피해가 크게 발생하는 경향이 있다. 반면에 현재 주요하천을 중심으로 한 홍수저감 대책은 국가적인 차원에서 대비가 비교적 잘 수행되고 있으나, 연안도시들의 특성을 고려한 홍수관리에 관련된 연구는 널리 수행되지 못하고

*정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 박사수료(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

있는 실정이다. 한편 홍수취약성 평가에 관련된 기존 국내의 연구들은 주로 지역별 잠재 취약성을 파악하기 위해 다양한 평가인자들을 고려하고자 노력하고 있지만, 평가지표의 분류 및 선정에 따른 평가결과의 영향으로 인해 실제적인 홍수피해 특성 분석 및 취약성 예측에 한계를 보이고 있다. 더욱이 주로 비교적 저지대에 위치하는 연안지역에서 최근의 강수량 증가 및 해수면 상승의 복합적 영향을 고려하는 연안지역의 홍수취약성 평가에 대한 연구는 제한적으로 이루어져 왔다.

연안지역에 대한 일반적인 취약성 분석에 관한 체계적인 시도를 위하여, Klein and Nicholls (1999)는 연안지역 취약성 평가를 자연시스템 취약성과 사회경제시스템 취약성으로 구분하여 제시하였다. 미국 지질조사국(USGS, 1999)에서는 연안의 평균 조차, 평균 파고, 연안경사도, 연안 침식률, 지형학적 특징, 상대적 해수면 상승 추이 등 6개의 기본적인 정보들을 종합한 연안취약성 지수를 제시하였고, 한국환경정책평가연구원(KEI, 2010)에서는 이를 적용하여 해수면 상승에 따른 우리나라 동해안 지역의 취약성을 분석하였다. 미국 해양대기청(NOAA, 2010)의 기후변화 연안적응 지침에서 제시한 기후변화 적응계획 수립을 위한 총 4단계의 절차 중, 제2단계 과정에서는 취약성 평가방안을 제시하고 시나리오 설정에 따른 변화 모의에 따라 취약성 결과를 요약하여 중점관리 영역을 설정하였다.

연안지역의 홍수취약성 또는 재해취약성 분석에 대한 연구들의 특성을 살펴보면 다음과 같다. Kleinosky et al. (2007)은 미국 남부 버지니아 지역의 10개 연안도시와 6개 카운티를 대상으로 폭풍해일과 해수면 상승에 의한 홍수취약성을 분석하여 태풍등급, 해수면상승, 인구증가 시나리오별 취약성을 평가하였고, Preston et al. (2008)은 기후변화로 인한 5가지 분야에서의 취약성 분석을 위한 다양한 지표들을 제시하였는데, 그 중 해수면 상승으로 인한 연안지역의 취약성 분석을 위하여 연안의 지형적 및 기상적 인자들과 인구 및 토지피복 관련 인자들, 그리고 다양한 사회적 및 재정적 인자들로부터 호주 시드니연안을 평가하였으며, Harvey et al. (2009)은 유럽의 연안도시를 대상으로 증가하는 홍수피해에 대비하기 위해 폭풍해일에 의한 홍수취약성을 해수면 상승률 및 해일고 변화를 비롯한 인구, 지형적 및 사회적 인자들을 대리변수로 구성하여 평가하였다. Yoo et al. (2011)은 부산광역시 군구 지역에 대하여, 기후변화에 따른 해수면 상승, 폭염, 폭우에 영향을 받는 범람지역 및 인구와 경제력, 기반시설 및 제도적 역량을 종합적으로 고려한 연안 재해취약성 평가를 실시하였고, Balica et al. (2012)은 전 세계 9개 연안도시에 대한 홍수취약성을 평가하기 위하여, 수문-지형적 요소와 사회경제적인 요소, 그리고 정책-행정적 요소들을 종합한 연안도시 홍수취약성 지수를 개발하였으며, 국립해양조사원(KHOA, 2010)에서는 우리나라 연안 재해취약성 평가체계 구축을 위하여, 연안재해노출 지수,

연안민감도 지수, 그리고 연안적용능력 지수로부터 연안재해취약 지수를 산정하여 연차적으로 권역별 연안재해취약성을 평가하고 있다. Lee and Choi (2016)은 우리나라 74개 연안시군구에서 17개년(1998-2014년)동안 발생한 홍수피해 자료를 분석하여 태풍, 호우, 그리고 복합 원인별 홍수취약성 지수를 산정하였고, Lee et al. (2017)은 우리나라 연안지역을 대상으로 지역별 중요도를 나타내는 지역중요성 지수와 홍수 피해가능성을 나타내는 피해가능성 지수로부터 산정되는 연안홍수취약성 지수를 제시하였으며, Bathi and Das (2017)은 미국의 미시시피 연안지역을 대상으로 100년 빈도의 태풍으로 발생하는 침수지역을 산정하는 홍수취약성 지표를 산정하고, 사회적 및 경제적 대리인자들로부터 사회경제적 취약성 지표를 산정하여 연안지역의 태풍해일 및 침수 발생 시 대피 우선순위를 부여하기 위한 연안 홍수취약성 지수를 산정하였다.

이와 같이, 연안지역에 대한 홍수취약성 분석을 위한 국내외의 여러 가지 평가기법들은 대부분 연안지역의 피해발생에 영향을 미치는 다양한 대리변수들로 주요 평가지표를 산정하고 이들을 종합한 지수 또는 등급을 제시하고 있다. 각 연안지역 취약성 평가방법들은 평가의 목적, 분석의 대상, 자료의 가용성, 결과의 활용방안 등에 따라 서로 다른 평가지표들을 구성하고 가능한 다양한 요소들을 고려하기 위해 노력하고 있지만, 오히려 과도한 평가요소의 선정으로 인해 홍수취약성 평가에 대한 직접적이고 현실적인 예측에 어려움이 있는 실정이다. 따라서 강수량 및 해수면 변화 등의 자연적 요인과 연안도시의 지역적 요인을 함께 고려한 종합적인 홍수취약성 분석을 위해서는 연안지역의 홍수피해 발생특성 및 홍수취약성에 직접적으로 영향을 미치는 주요 평가지표를 선정하고 분류하는 평가구조의 구축이 무엇보다 중요하고, 각 평가지표를 대표하는 대리변수를 선별하는 것이 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 통합홍수위험관리 측면에서 연안지역별 홍수방어대책 수립의 우선순위 선정을 위하여, 홍수발생의 원인과 지역의 잠재적 위험, 그리고 홍수재해 피해특성에 대한 관계분석을 통한 연안지역 홍수취약성 분석체계를 새로이 구축하고, 우리나라 연안 시군구에 대한 홍수취약성 분석을 실시하여 적용성을 평가하고자 한다.

2. 홍수취약성 평가체계 구축

2.1 PSR 평가체계 고찰

연안 홍수취약성 분석을 위해서는 적절한 평가체계의 구축 및 평가지표의 분류가 필요하다. 홍수취약성 평가에 많이 활용되고 있는 평가체계로는 1991년 OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)에서 개발된 PSR (Pressure-State-Response) 모형이 있다. 전 세계적으로 기구 또는 국가의 지표설정에 주로 활용되고 있는 PSR 모형은 평가지표를 압력 지표(Pressure Indicator), 현상 지표(State

Indicator), 대응 지표(Response Indicator)로 구분하여, 주어진 문제를 인과관계로 분석할 수 있다. PSR 구조를 사용한 홍수취약성 분석연구들에서 사용한 3개 평가지표별 대리변수들을 살펴보면 다음과 같다.

압력 지표의 경우, UN (2003)에서는 심각한 자연재해, 홍수피해 원인 동향, 자연재해 동향, 수자원 관련 위험노출 인구를 선정하였고, Chung and Lee (2009)에서는 자산밀도, 인구밀도, 도시 기반시설로 구성하고 있으며, Lee et al. (2009)에서는 강수량, 확률강수량, 초과강우발생회수, 인구밀도, 도시화율, 자산밀도, 경사, 저지대율, 사회기반시설밀도, 불투수지비율, 고도, 녹지면적율과 같이 다양하고 많은 대리변수로 구성된 반면에, Lee et al. (2013)에서는 강한 호우발생회수, 도시화율, 인구밀도로 구축하였다. 이와 같이 압력 지표로 선정된 인자들은 홍수발생에 원인이 되는 수문-지형조건 인자뿐만 아니라, 현상 지표에서도 고려될 수 있는 홍수발생 시 피해의 대상이 되는 인자들과 재해이력 관련 인자들도 선정이 되고 있다.

현상 지표의 경우, UN (2003)에서는 100년 빈도 홍수구역 거주인구, 취약성 지도, 사회경제적 측면에서의 인명피해를 선정하였고, Chung and Lee (2009)에서는 강우강도, 도시화율, 유역경사, 홍수피해액으로 구성하고 있으며, Lee et al. (2009)과 Lee et al. (2013)에서는 홍수피해 자료 관련 인자들로 선정하고 있다. 현상 지표의 대리변수로는 기상조건을 비롯하여 지형 및 사회적 특성 인자들도 일부 선정되고 있지만, 주로 홍수피해 현황자료들이 사용되고 있다. 홍수피해 현황은 이미 대응 지표인자들의 효과가 반영된 결과로 볼 수 있으므로, 이를 현상 지표로 선정할 경우 대응 지표의 영향이 중복적으로 고려될 우려가 있다.

대응 지표를 위한 대리변수들을 살펴보면, UN (2003)의 경우 위험관리를 위한 법제도 조항, 수재해 저감 예산 배정, 홍수위험도 저감대책, 위험감소 및 예방계획 수립, 위험도 기반 자원배분 등을 선정하였고, Chung and Lee (2009)에서는 제방안전도와 펌프용량, 저수용량, 폐수의 재사용, 유출처리시설 등과 같은 대리변수를 포함하였고, Lee et al. (2009)에서는 하수도보급율, 우수관로설치길이, 댐 및 저수지, 중계펌프장, 홍수예보시스템, 치수사업투자비율, 복구비, 기상관측소밀도, 재정자립도를 사용하였으며, Lee et al. (2013)에서는 수자원시설의 저장용량, 물 공급에 관한 대리변수, 수도 요금, 홍수통제능력, 하천개수율, 복구비, 하수도처리시설, 하수도 보급율 등과 같은 대리변수들로 구성하였다. 이와 같이, 대응 지표로는 주로 홍수피해예방 및 저감을 위한 구조적 및 비구조적 대책들이 다양하게 선정되고 있지만, 특히 비구조적 대책의 경우 홍수취약성에 미치는 직접적 영향을 정량적으로 파악하기에는 어려움이 있다.

2.2 기후변화취약성 평가체계 고찰

홍수취약성 평가에 많이 사용되고 있는 기후변화취약성

평가 개념모형은 2001년에 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서에서, 기후변화취약성을 특정 시스템에서 기후변화에 노출도(Exposure)와 민감도(Sensitivity) 및 적응능력(Adaptive Capacity)의 함수라고 정의하였다. 기후변화취약성 개념이론을 이용한 홍수취약성 평가연구들에서 선정한 3개 평가지표별 대리변수들을 살펴보면 다음과 같다.

노출도 지표의 대리변수를 위해, Preston et al. (2008)은 연안선 이격거리, 폭풍해일고, 유출모형으로 모의한 민감도 연안위치, 표고, 경사를 구축하였고, Harvey et al. (2009)은 해수면 변화율과 해일고 변화를 사용하였고, KHOA (2010)은 태풍(빈도, 풍속, 기압, 강우강도), 해일(태풍, 지진), 유의 파고, 조석(약최고조위, 대조차), 해수면상승률, 침식으로 구성하였고, Yoo et al. (2011)은 해수면 상승, 폭염, 폭우를 사용하였고, Balica et al. (2012)은 해수면상승, 폭풍해일, 태풍내습회수, 하천유량, 해안경사, 토양침식, 해안선연장, 해안인구수, 문화유산, 해안인구증가율, 비통제 계획구역을 포함하였으며, Jun et al. (2013)에서는 일최대강수량, 일강수량 80 mm 이상 일수, 5일 최대 강수량, 유출량, 여름철 강수량 등을 선정하고 있다. 노출도 지표의 대리변수들은 주로 강수량 및 유출량, 그리고 해수위 변화 관련 자료들이 선정되고 있으나, 홍수피해의 잠재적인 대상으로 민감도 지표의 대리변수로 많이 선정되는 사회적 및 지형적 요소들도 대리변수로 선정되고 있음을 확인할 수 있다.

민감도 지표의 대리변수들은, Preston et al. (2008)에서 토지피복, 인구밀도, 도로밀도, 예상증가인구, 산성염 토양으로 구축하였고, Harvey et al. (2009)은 인명피해, 인구밀도, 표고 및 경사, 제방을 포함하였고, KHOA (2010)에서는 인적 요소(인구밀도, 취약인구), 물적 요소(건물, 접안시설, 산업단지, 도로, 양식장, 취약시설물, 공시지가), 지형적 요소(침수지역, 해안선, 표고, 경사)로 구분하였고, Yoo et al. (2011)은 GIS로 모의한 홍수범람면적비율과 인구밀도 및 65세이상 노령인구를 포함하였고, Balica et al. (2012)은 노약자수(12세 이하 또는 65세 이상)와 홍수위험지도를 사용하였으며, Jun et al. (2013)은 저지대율, 인구밀도, 전체인구, 평균경사, 도로 비율, 3년간 재산피해, 인명피해 등을 선정하였다. 민감도 지표로는 주로 재해에 영향을 받는 인적 및 물적 요소, 자연적 및 사회적 요인들이 선정되고 있으며, 이외에도 홍수피해 이력 등 다양한 인자들이 포함된 것을 확인할 수 있다. 적응능력 지표인자의 효과가 반영된 결과로 볼 수 있는 홍수피해 자료의 경우, 적응능력 지표와 중복적으로 취약성에 반영되는 특성이 있다.

적응능력 지표의 대리변수들은, Preston et al. (2008)에서 12세 이상 인구비율, 비영여권 인구비율, 중분위 주택대출상환금, 주택소유비율, 중분위 소득수준, 재정보조 세대비율, 인터넷 접속가능 인구비율, 유동성 비율, 1인당 보험계약비율, 1인당 주거용적비율, 1인당 사회봉사시간 등을 포함하였고, Harvey et al. (2009)은 GDP와 교육수준을 적응 능력

대리변수로 구축하였고, KHOA (2010)는 사회경제적 요소(재해예산, 의료종사자, 주민대응역량)와 행정자치적 요소(중장비, 공무원, 대피소, 재난정보시스템)로 구분하였고, Yoo et al. (2011)은 경제적 능력을 나타내는 재정독립성과 기반시설을 대표하는 주차장비율, 병상규모, 의료진비율, 보건종사자비율, 종합병원수, 상수보급율, 지하수개발율, 그리고 제도적 역량으로 경각심, 행정력, 정책기조 등을 사용하였고, Balica et al. (2012)은 대피시설, 예경보, 우수관연장, 복구시간, 사회복지단체, 홍수대책으로 구성하였으며, Jun et al. (2013)은 재정자립도, 인구당 공무원수, 지역내총생산(GRDP), 물 관련 공무원수, 하천개수율, 배수설비용량, 저수지조절량 등을 선정하였다. 적응능력 지표의 대리변수들은 홍수피해 예방과 저감, 사후대책을 위한 구조적 및 비구조적 대책이 주로 선정되고 있으며, 행정력 및 제도적 역량과 함께 다양한 생활수준, 소득 및 재정 관련 인자들도 포함되어 있어, 계량화에 불확실성이 높은 평가요소들의 취약성에 대한 정량적 영향평가가 필요하다.

2.3 새로운 평가체계 구축

기존 PSR 모형 또는 기후변화취약성 평가체계를 이용한 국내의 홍수취약성 평가사례들에서 사용되고 있는 대리변수들은 기존 지표분류체계의 모호성으로 인해 혼용되어 최종 홍수취약성 분석결과에도 영향을 미칠 것으로 사료된다. 특히 PSR 구조에서는 압력과 상태 지표들 사이에, 그리고 기화변화취약성 평가이론에서는 노출도와 민감도 지표들 사이에 명확한 구분이 나타나지 않는 경우가 발생한다. 아울러 이미 홍수대책의 효과가 반영된 결과인 홍수피해 이력이 현상 지표 또는 민감도 지표의 인자로 사용되어, 대책인자의 영향이 중복적으로 고려될 우려가 있다. 한편 대응 또는 적응능력 관련 대리변수들 중, 사전 예방대책 인자들의 경우 홍수피해 저감에 영향을 미치지만, 사후 복구 관련 인자들(예, 의료시설, 보험, 중장비 등)은 홍수피해 발생 자체를 저감시킬 수는 없으며, 행정력, 정책역량, 방재공무원, 예산배정, 경제력, 생활수준 등의 인자들은 홍수피해 저감효과에 대한 직접적인 정량화에 한계가 있고 불확실성에 대한 영향평가가 필요하다. 따라서 홍수피해 저감에 대한 직접적, 정량적 분석에 어려움이 있는 대응 또는 적응능력 요소들 대신에, 대응 또는 적응능력이 발현되어 나타나는 피해결과와 관련된 요소를 홍수취약성 평가지표로 고려하는 것이 적합하다고 사료된다. 또한 대응 또는 적응능력 지표는 일반적으로 값이 클수록 취약성을 낮추는 반대의 방향성을 나타내므로, 최근의 일부 연구들(Depietri and Welle, 2013; Weis et al., 2016; Kablan et al., 2017; Liu and Hao, 2017)에서는 대응부족(lack of response) 또는 회복탄력성 부족(lack of resilience) 개념을 사용하기도 한다. 이에 따라 새로운 연안 홍수취약성 평가체계에서는 대응 또는 적응능력에 의해 재해가 감소한 결과인 홍수피해 자료를 대응능력의 부족

개념으로 홍수취약성 평가에 반영하고자 한다.

이와 같은 기존 지표구분체계의 한계점들을 개선하기 위해, 논문에서는 Fig. 1과 같이 홍수발생을 유발하는 인자인 홍수유발 지표(Flood Cause Indicator), 홍수발생 시에 예상되는 잠재적인 피해대상을 나타내는 잠재대상 지표(Potential Target Indicator), 그리고 홍수로 인한 피해특성을 통해 대응능력의 부족을 나타내는 피해이력 지표(DI)로 연안 홍수취약성 평가구조를 구축하고, 각 평가지표의 적절한 대리변수들을 선정하여 연안 홍수취약성 평가를 수행하고자 한다.

Fig. 1. Assessment Framework for Coastal Flood Vulnerability

3. 홍수취약성 평가지표 구축

3.1 분석대상 시군구

전국 시군구 중, 해안선을 포함하고 있는 시군구를 연안 홍수취약성 분석대상 지역으로 선정하였다. 특별시 및 광역시의 경우는 구단위 행정구역으로, 일반 도시의 경우는 시단위로 행정구역으로 구분하였으며, 새만금 방조제의 완공으로 해안선과 이격된 전라북도 김제시는 대상지역에서 제외하여, 최종적으로 Fig. 2와 같이 전국 73개 시군구를 분석대상 시군구로 선정하였다.

Fig. 2. Coastal Administrative Districts Under Study

3.2 대리변수 선정 및 구축

본 논문에서 제시한 새로운 홍수취약성 평가체계에 따라, 홍수유발 지표(FI), 잠재대상 지표(PI), 피해이력 지표(DI)에 대하여 Table 1과 같이 각각 3개씩의 대리변수를 선정하였다.

Table 1. Coastal Flood Vulnerability Factors

Type	Factors	Symbol
Flood Cause Indicator	Daily Maximum Rainfall	FF1
	Sea Level Change	FF2
	Highest Tide Level	FF3
Potential Target Indicator	Population Density	PF1
	Main Facilities Ratio	PF2
	Lowland Ratio	PF3
Damage History Indicator	Casualty Loss Density	DF1
	Property Damage Density	DF2
	Inundation Area Ratio	DF3

연안지역에서 홍수발생의 원인이 될 수 있는 홍수유발 지표(FI)의 대리변수로는 전국 75개 기상관측소 지점의 과거 자료를 바탕으로 최근 10개년(2007~2016)의 연평균 일최대 강수량[mm/day] 산정결과와, 국립해양조사원(KHOA, 2013)에서 수행한 조위관측소 18개 지점에 대한 최근 18개년(1993~ 2010)간 해수면 상승률[mm/yr] 관측결과, 그리고 전국 조위관측소 45개 지점에서 최근 10개년(2007~2016)동안의 평균값을 이용하여 구축한 고극조위[cm]를 선정하였다. 대리변수 자료구축 시, 강수량, 해수면, 조위 등의 지점자료는 역거리가중법(Inverse Distance Weight)을 통하여 공간자료로 변환 후 연안지역 행정구역별 값으로 산정하였다.

연안지역의 지역적 중요성과 홍수가 발생할 경우 잠재적 피해대상을 나타내는 잠재대상 지표(PI)에는 시군구별 행정안전부 통계자료로부터 산정한 인구밀도[인/km²]와 환경부에서 제공하는 2011년 토지피복지도를 이용하여 공공시설지역, 주거지역, 상업지역, 공업지역, 교통지역, 문화체육휴양지역의 면적자료를 시군구의 면적당 비율로 산정한 주요시설물비율[km²/km²], 그리고 잠재적 침수구역에 대한 취약성을 고려하기 위하여, 2010년을 기준으로 환경부에서 제공한 수치지형표고자료를 이용하여 표고 10 m 이하의 저지대 면적을 해당 시군구의 면적당 비율로 산정한 저지대비율[km²/km²]로 구성하였다.

마지막으로 연안지역의 홍수피해 취약성을 나타내는 홍수이력 지표(DI)를 위해, 해마다 발생특성이 상이한 지역의 홍수피해 발생특성을 충분히 고려함과 동시에 지역의 최근 변화된 기상적, 지형적, 사회경제적 현황을 반영할 수 있도록 본 연구에서는 최근 10개년(2007~2016)간의 시군구별 홍수피해 집계자료를 사용하였다. 국가재난정보센터(National Disaster Information Center, www.safekorea.go.kr)에서 제공하는 자료를 사용한 대리변수들의 선정결과로, 인명피해자

밀도[인/km²]는 시군구 면적당 홍수로 인한 사망, 실종 및 부상 등의 인구수를 나타내고, 재산피해액밀도[km²/km²]는 시군구 면적당 공공시설, 건물, 농작물, 선박, 기타 등의 손실액(화폐가치를 통계청의 2016년 소비자물가지수를 기준으로 환산하여 산정)을 의미하며, 침수면적비율[km²/km²]은 시군구 면적당 농경지 및 기타 부지의 침수면적을 나타낸다.

4. 연안 홍수취약성 분석

4.1 표준화

본 논문에서 제시한 3개 평가지표 FI, PI, DI의 특성으로 선정된 9개 대리변수들은 일반적으로 서로 다른 범위값과 단위를 갖고 있으므로, 변수들을 비교평가하기 위해서는 같은 범위와 단위로 통일시킬 필요가 있다. 여러 가지 표준화 방법들 중, 본 논문에서는 원자료의 분포특성을 유지하며 무차원 최대값 1로 표준화시킬 수 있도록 Eq. (1)과 같이, 각 대리변수 원자료값(x_i)을 대리변수별 최대값(x_{max})에 대한 비율로 표준화($\hat{x}_i$)하는 방법을 사용하였다.

$$\hat{x}_i = \frac{x_i}{x_{max}} \quad (1)$$

위의 방법을 통해 표준화한 9개의 대리변수 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

4.2 연안 홍수취약성 지수

연안 홍수취약성지수를 산정하기 위해서는 Eq. (1)에 의해 표준화된 대리변수들을 종합하여 3개의 평가지표를 산정하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 각 평가지표를 대표하는 대리변수들의 영향(가중치)은 동일하다고 가정하여, 다음 Eq. (2)에 의해 3개 평가지표 FI, PI, DI의 값을 산정하였다.

$$FI = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \widehat{FF}_i; PI = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \widehat{PF}_i; DI = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \widehat{DF}_i \quad (2)$$

Eq. (2)에 의한 3개 평가지표 산정결과와의 최대값은 FI = 0.763, PI = 0.693, DI = 0.398로 서로 차이를 보이기 때문에, 3개 평가지표는 서로 독립적으로 홍수취약성에 영향을 미치므로 최대값의 차이로 인한 영향을 배제하기 위해 각 평가지표는 다시 Eq. (1)에 의해 표준화하였다.

이와 같이 산정된 평가지표들을 종합하여 전반적인 홍수취약성을 나타낼 수 있도록 지수화하는 방법 중, 본 논문에서는 승법형 효용함수(Multiplicative multi-attribute function)를 사용하여 3개 평가지표 FI, PI, DI를 종합한 연안 홍수취약성 지수(CFVI)가 다음 Eq. (3)에 의해 산정되었다.

$$CFVI = FI \times PI \times DI \quad (3)$$

Fig. 3. Spatial Distribution of Standardized Proxy Variables in Assessment Components for Coastal Flood Vulnerability

Eq. (3)에서도 3개 평가지표가 연안 홍수취약성 지수에 미치는 영향이 동일하다고 가정하여 지표별 가중치를 부여하지 않았고, 산정된 결과는 다시 Eq. (1)에 의해 최대값 1로 표준화하였다. 이와 같은 산정방법을 통한 3개 평가지표(FI, PI, DI) 및 연안 홍수취약성지수(CFVI)의 산정결과는 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4. Coastal Flood Vulnerability Index Results

4.3 연안 홍수취약성 평가

73개 연안 시군구를 대상으로 분석된 연안 홍수취약성 평가지표 산정결과를 살펴보면, 우선 홍수유발 지표(FI)는 일 최대강수량이 많고 고극조위가 높은 서해안에서 전반적으로 높은 취약성을 나타내고 있다. 동해안은 상대적으로 홍수유발 지표(FI)가 낮게 평가되었지만, 해수면 상승률이 높은 동해 남부 연안의 일부지역은 중상위권의 결과를 보이고 있다.

홍수가 일어날 경우 피해대상이 되는 잠재대상 지표(PI)는 인구와 주요시설물이 밀집되어 있는 주요 대도시에서 높은 취약성을 보이고, 저지대비율이 대체로 높은 서해안의 지역들이 상대적으로 높은 잠재대상 지표(PI) 값을 나타내고 있다.

최근 10개년의 홍수자료를 이용하여 산정된 피해이력 지표(DI)는 인명피해가 높은 대도시 지역, 태풍으로 인해

큰 재산피해를 입은 강원도 지역과 남해안 일부지역, 그리고 침수피해가 발생한 서해안 및 남해안 일부지역에서 높은 취약성을 나타내고 있다. 이와 같이 3개 홍수피해 특성이 각기 상이하고, 최근 홍수피해가 발생하지 않은 지역도 많으므로, 3개 대리변수 중 하나의 값 이상이 두드러진 지역에서 높은 피해이력 지표(DI) 값을 나타내고 있다.

위의 3개 평가지표(FI, PI, DI)의 특성을 하나의 지수로 나타내기 위한 연안 홍수취약성 지수(CFVI)는 취약성에 대해 같은 방향성을 보이는 3개의 평가지표가 각각 동등한 영향력을 미치어 종합적인 홍수취약성을 나타내도록 승법형 효용함수를 통해 산정되었다. 즉, 어느 한 평가지표의 높은 값이 다른 평가지표의 부족한 값을 보완하여 높은 취약성 값을 나타내지 못하도록 하여, 3개의 평가지표 중 어느 하나의 값이 두드러진 경우보다 각각의 평가지표가 고르게 높은 경우에 더 높은 홍수취약성을 나타내게 된다. 이와 같이 산정된 연안 홍수취약성 지수(CFVI) 결과가 높은 상위 15개의 행정구역을 살펴보면, 인천광역시 남구, 남동구, 연수구와 부산광역시 수영구, 남구, 동구, 영도구, 사하구, 해운대구, 강서구, 서구, 울산광역시 남구, 동구, 경기도 안산시와 같은 연안 주요 도시들에서 홍수취약성이 높게 평가되었고, 이외에 잠재대상 지표(PI) 값이 중간정도인 충청남도 서천군은 높은 홍수유발 지표(FI)와 침수피해로 인한 높은 피해이력 지표(DI)에 의해 취약성이 상대적으로 높게 평가되었다. 이와 같이 새로운 평가체계에 의한 연안 홍수취약성 평가결과는 홍수발생 원인요소와 잠재적인 대상요소, 그리고 피해발생 현황요소가 고르게 높은 지역에서 대부분 홍수취약성이 높은 것으로 분석되었다.

5. 결 론

우리나라는 삼면이 바다에 접한 연안지역을 가지고 있으므로, 연안지역에 대한 특성을 고려할 수 있는 합리적인 평가체계에 의한 홍수취약성 분석이 필요하다. 기존의 홍수취약성 평가사례에서는 많은 평가인자를 이용하여 다양한 조건을 반영하고자 노력하였으나, 오히려 복잡하고 과도한 평가요소의 선정이 홍수취약성 산정결과의 타당성과 활용성을 저하시킬 수 있다고 판단된다. 본 논문에서는 홍수취약성 평가를 위한 대표적인 방법 중, PSR 구조와 기후변화취약성 이론의 적용사례를 검토한 결과, 압력 지표와 현상 지표, 그리고 노출도 지표와 민감도 지표의 대리변수들은 구분이 모호하여 혼용될 수 있고 홍수대책의 효과가 반영된 결과인 홍수피해 자료가 대응 지표 또는 적응능력 지표와 같이 사용될 경우 피해대책의 영향을 중복적으로 평가할 우려가 있으며, 대응 지표 또는 적응능력 지표에 사용되는 대리변수 중, 대책효과에 미치는 영향의 정량화가 어려운 일부 인자들은 취약성에 대한 불확실성을 증가시킬 가능성이 있다는 것을 고찰하였다. 따라서 본 논문에서는 홍수를 유발시키는

특성을 나타내는 홍수유발 지표(FI), 홍수발생 시 피해가 우려되는 대상들을 나타내는 잠재대상 지표(PI), 그리고 홍수로 인한 피해특성을 통해 대응능력의 부족을 나타는 피해이력 지표(DI) 등의 3개 평가지표로 구성되는 새로운 홍수취약성 평가구조를 제시하였다.

새로운 평가구조에 따른 우리나라 73개 연안지역 시군구를 대상으로 한 홍수취약성 평가를 위해, 홍수유발 지표(FI)에는 연안지역의 홍수발생 원인이 되는 일최대강수량, 해수면 상승률, 고극조위를 대리변수로 선정하고, 잠재대상 지표(PI)를 위한 대리변수는 홍수피해 대상이 되는 인구밀도, 주요시설물밀도, 저지대비율로 구성하였으며, 피해이력 지표(DI)를 위해서는 인명피해밀도, 재산피해밀도, 침수면적비율을 대리변수로 구축하였다. 각 인자별 원자료 분포값의 특성을 유지하도록 각 인자별 최대값에 대한 비율로 대리변수들을 표준화하여 동일가중치 가정으로 3개 평가지표를 산정한 후, 각 평가지표의 영향이 고르게 반영되어 종합적인 홍수취약성 평가가 가능하도록 승법형 효용함수에 의한 연안 홍수취약성 지수(CFVI)를 산정하였다. 새로운 홍수취약성 평가체계에 의한 우리나라 연안지역의 홍수취약성 분석결과는 주요 연안도시지역에서의 홍수취약성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

이와 같이, 본 논문에서는 평가지표별 대리변수 선정 및 대리변수를 통한 평가지표의 정량화를 용이하게 하고, 취약성과 동일한 방향성의 평가지표 구성을 통해 일관성 있는 홍수취약성 평가체계를 구축하여, 연안지역의 특별한 조건과 특성을 반영한 연안 홍수취약성 평가결과를 제시하였다. 대리변수의 대표성, 평가지표 및 홍수취약성 지수 산정 시의 가중치 적용 등이 평가결과에 미치는 영향은 후속연구에서 추가 분석할 필요가 있지만, 본 연안 홍수취약성 평가체계를 통해 기존의 혼용되었던 취약성 평가방법을 합리적으로 정립하여, 연안지역에서의 홍수대응을 위한 우선순위 선정에 기본적인 정보를 제공할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

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

References

Balica, S.F., Wright, N.G., and Van Der Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Nat. Hazards*, Vol. 64, No. 1, pp. 73-105.

Bathi, J.R., and Das, H.S. (2016). Vulnerability of coastal communities from storm surge and flood disasters. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 13, Article

No. 239. doi:10.3390/ijerph1302023

Chung, E.S., and Lee, K.S. (2009) Identification of spatial ranking of hydrological vulnerability using multi-criteria decision making techniques: Case study of Korea. *Water Resour. Manag.*, Vol. 23, No. 12, pp. 2395-2416.

Depietri, Y., Welle, T., and Renaud, F.G. (2013). Social vulnerability assessment of the Cologne urban area (Germany) to heat waves: Links to ecosystem services. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 6 pp. 98-117.

Harvey, A.R., Hinkel, J., Klein, R.J.T., Lasage, R., and Horrocks, L. (2009). *Preliminary assessment and roadmap for the elaboration of climate change vulnerability indicators at regional level*. Final Report to the European Commission, London: AEA Technology.

Jun, K.S., Chung, E.S., Kim, Y.G., and Kim, Y. A. (2013). A fuzzy multi-criteria approach to flood risk vulnerability in South Korea by considering climate change impacts. *Expert Syst. Appl.*, Vol. 40, No. 4, pp.1003-1013.

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, Article No. 292.

KEI (Korea Environment Institute). (2010). *Vulnerability assessment of the Korean coast due to sea-level rise and appropriate response strategies II: Evaluation of coastal inundation and its responses*.

KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Administration). (2010). *A study on establishing the basic plan and an initial construction for a Coastal Disaster Assessment System*.

KHOA. (2013). *Report of precise analysis and prediction of sea level variation* (5th).

Klein, R.J.T., and Nicholls, R.J. (1999). Assessment of coastal vulnerability to climate change. *AMBIO*, Royal Swedish Academy of Science, Vol. 28, No. 2, pp. 182-187.

Kleinosky, L.R., Yarnal, B., and Fisher, A. (2007). Vulnerability of Hampton roads, Virginia to storm-surge flooding and sea-level rise. *Nat. Hazards*, Vol. 40, pp. 43-70.

Lee, D.R., Lim, K.S., and Choi, S.J. (2009). Establishment of flood risk index for flood management. *Proceedings 2009 Annual Conference*, KWRA, pp. 342-346.

- Lee, D.R., Choi, S.J., and Moon, J.W. (2013). Development of integrated water resources evaluation index. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 10, pp. 1017-1028.
- Lee, J.S., and Choi, H.I. (2016). Flood vulnerability assessment by analysis of flood damage data in coastal areas. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 2, pp. 377-385.
- Lee, J.S., Myeong, S.J., and Choi, H.I. (2017). Development of a flood vulnerability assessment methodology for coastal areas. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 397-402.
- Liu, D., Hao, S. (2017) Ecosystem health assessment at county-scale using the pressure-state-response framework on the loess plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 14, No. 1, Article No. 2. doi:10.3390/ijerph14010002
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2010). *Adapting to Climate Change: A Planning Guide for State Coastal Managers*. NOAA Office of Ocean and Coastal Resource Management.
- Preston, B.L., Smith, T.F., Brooke, C., Gorddard, R., Measham, T.G., Withycombe, G., et al. (2008). *Mapping climate change vulnerability in the Sydney coastal councils group*. Report prepared for the Sydney Coastal Councils Group, Australia, p. 117.
- UN (United Nations). (2003). *Water for people, water for life*. World Water Development Report 1. UNESCO and Berghahn Books.
- USGS (United States Geological Survey). (1999). *National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise. U.S. Atlantic coast: U.S. Geological Survey, Open-File Report* pp. 99-593.
- Weis, S.W.M., Agostini, V.N., Roth, L.M., Gilmer, B., Schill, S.R., Knowles, J.E., et al. (2016). Assessing vulnerability: an integrated approach for mapping adaptive capacity, sensitivity, and exposure. *Climate Change*, Vol. 136, No. 3-4, pp. 615-629.
- Yoo, G., Hwang, J.H., and Choi, C., (2011). Development and application of a methodology for vulnerability assessment of climate change in coastal cities. *Ocean Coast. Manag.*, Vol. 54, No. 7, pp. 524-534.

Received	September 11, 2018
Revised	September 12, 2018
Accepted	September 27, 2018