도시특성을 고려한 홍수취약성 평가기법 개발: 대구광역시를 대상으로

Development of Flood Vulnerability Assessment Method considering Urban Characteristics: Daegu Metropolitan City

송영석* · 박종표** · 김하룡*** · 정상만**** · 박무종*****

Song, Youngseok*, Park, Jongpyo**, Kim, Hayong***, Jeong, Sangman****, and Park, Moojong*****

Abstract

This study intends to develop a flood vulnerability assessment method and flood damage reduction measures in urban areas for Daegu Metropolitan City. The proxy variables for the flood vulnerability assessment were calculated using the previously investigated proxy variables for urban areas. The Flood Vulnerability Index (FVI) of the urban area was proposed using the Regional Significance Index (RSI), which indicates the importance of each region, and the Damage Possibility Index (DPI) for flood damage data. The RSI selected four proxy variables: population density, vulnerable population ratio, property density, and area ratio of major facilities. The DPI also selected four proxy variables: area ratio of low land, the impervious area ratio, status of domestic disaster risk district, and flood occurrence record. Eight proxy variables were selected and the FVI of urban areas calculated using multiplicative utility functions. As a result of the calculation, the FVI of Daegu Metropolitan City was found to be high in the central urban areas and by the streams. The results of this study are expected to be used for flood vulnerability assessments in urban areas and establishing flood damage reduction measures.

Key words : Flood Vulnerability Assessment, Urban Areas, Regional Significance Index, Damage Possibility Index, Disaster Management

요 지

본 연구에서는 대구광역시를 대상으로 도시지역의 홍수취약성 평가기법을 개발하고 홍수피해에 대한 저감대책을 제공하고자 한다. 홍수취약성 평가를 위한 대리변수는 기존의 선행연구와 부처에서 제공하는 DB 등을 고려하여 도시지역에 적합한 대리변수를 선정하였다. 따라서, 본 연구에서는 지역별 중요도를 나타내는 지역중요성 지수(RSI)와 홍수피해 자료에 대한 피해가능성 지수(DPI)를 이용하여 도시지역의 홍수취약성 지수(FVI)를 제시하였다. 지역중요성 지수(RSI)는 인적요소에 인구밀도와 취약인구 비율, 물적요소에 자산밀도와 주요시설물 면적으로 4개의 대리변수를 선정하였다. 피해가능성 지수(DPI)는 지형요소에 저지대 면적비와 불투수 면적비, 재해요소에 내수재해위험지구 후보지 현황과 풍수해 이력 발생 현황으로 4개의 대리변수를 선정하였다. 선별된 8개의 대리변수는 승법형 효용함수를 이용하여 종합적인 도시지역의 홍수취약성 지수를 산정하였다. 산정결과 대구광역시의 홍수취약성 지수는 도시 중심지역과 하천인근 지역에서 높게 평가되었다. 본 연구결과는 도시지역의 홍수취약성 평가 및 저감대책수립에 활용될 것으로 기대한다.

핵심용어 : 홍수취약성평가, 도시지역, 지역중요성 지수, 피해가능성 지수, 재난관리

*정회원, 대구공업대학교 토목조경과 조교수(E-mail: kind711@hanmail.net)

Member, Assistant Professor, Civil Engineering and Landscape Architectural, Daegu Technical University

**정회원, 주식회사 헥코리아 이사(E-mail: jppark@hecorea.co.kr)

Member, Director, HECOREA

***정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설환경연구실 책임연구원(E-mail: civilkhy@kongju.ac.kr)

Member, Assistant Fellow, Department of Construction Environment Research Land & Housing Institute

****정회원, 공주대학교 건설환경공학부 교수(E-mail: smjeong@kongju.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

*****교신저자, 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-70-8238-5646, Fax: +82-41-660-1119, E-mail: mjpark@hanseo.ac.kr)

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

1. 서 론

도시지역에서 발생하는 침수피해는 산지지역이나 하천 지역에서 발생하는 침수피해와는 달리 불투수면적에 따른 유출량의 증가와 짧은 도달시간으로 1시간~2시간의 집중호우에도 침수피해가 발생한다. 우리나라의 경우 대부분의 재난피해가 풍수해로 집중되어 있으며 2015년 이후에는 기후변화의 영향으로 가뭄, 폭염, 미세먼지 등의 재난이 포함되면서 재난관리가 운영되고 있다. 그러나 지속적인 저감대책에도 불구하고 도시지역에서의 침수피해는 매년 또는 수년을 주기로 발생하고 있으며 홍수피해에 대한 선별적인 투자가 필요하다.

홍수피해에 대해 합리적으로 대처하기 위해서는 지역의 다양한 홍수특성, 피해특성 그리고 대응능력에 대해 구축 및 정량화뿐만 아니라 홍수취약성의 평가방안 수립이 필요하다. 홍수위험을 관리하기 위하여 지역의 특성에 따른 우선순위를 선정하고 홍수피해의 대책방향을 효율적으로 적용하기 위해 다양한 홍수취약성 분석이 수행되었다. 그러나 홍수취약성 평가방법은 평가 목적에 따라 다양한 지표와 대리변수의 선정으로 평가결과에 대한 비교 고찰은 동일한 조건에 대하여 적용하기에는 어려움이 있다.

국내외에서 연구된 홍수취약성 평가는 다양한 지표의 선정과 대리변수들을 활용하여 대상지역의 취약성 평가를 실시하였다. 홍수취약성 평가는 적절한 대리변수의 선정이 중요하며 취약성 평가를 노출성과 사회학적 지표로 구분하고 Pareto ranking을 이용하여 종합적 취약성 평가기법을 제시하였다(Rygel et al., 2006). 홍수피해위험도를 평가하기 위해 잠재홍수피해요인, 홍수피해현황, 홍수피해주이, 사회경제수준, 홍수대응능력을 활용하였다(Zhang et al., 2002). 지역별 홍수피해 특성을 분석하기 위해 인명피해지수, 이재민수, 홍수피해액, 인명피해밀도, 재산피해밀도, 침수면적밀도 등의 자료를 이용하여 지역재난지수 또는 홍수위험도를 분석하여 전국, 지자체, 한강유역을 대상으로 취약성을 평가하였다(Cardona et al., 2005; Choi and Kim, 2006; Jang and Kim, 2009; Park et al., 2009).

도시지역의 연구는 국내외의 도시지역을 대상으로 타이완에서는 잠재영향 지표와 적응능력 지표를 선정하여 종합적인 홍수취약성 지수를 산정하였으며 독일에서는 과거의 침수면적자료와 재산피해액 등의 지표를 이용하여 다기준 의사결정 분석방법을 적용하여 도시홍수취약성을 평가하였다(Kubal et al., 2009; Chang and Huang, 2015). 또한, 침수면적, 인구밀도, 홍수발생빈도 등의 지표를 이용하여 통합적인 지수접근 방식을 이용하여 홍수취약성을 분석하기도 하였다(Sullivan and Meigh, 2005). 국내에서는 국토교통부에서 인구, 재산, 도시화율, 사회기반시설에 대한 잠재적인 피해요인과 홍수피해액, 확률강우량, 하천개수율, 홍수조절용량의 위험성 요인을 이용하여 홍수피해 발생가능성,

방어능력의 평가를 통해 치수단위구역별 홍수피해잠재능을 평가하였다.

홍수취약성 평가를 위한 지표 선정시 재난위험관리 및 기후변화적응을 고려한 노출성, 민감도, 적응능력에 대하여 평가지표를 선정하였다(Kablan et al., 2017). 홍수피해취약성 평가 인자로는 지표별 인과관계를 고려하여 압력지수, 현상지수, 대책지수가 선정되었으며 지수에 대한 대리변수로는 홍수피해밀도, 침수면적밀도, 우심피해횟수, 인명피해자수, 침수면적, 홍수피해액 등이 선정되어 취약성 평가에 활용되었다(Lee et al., 2009; Lim et al., 2010; Choi et al., 2013; Lee et al., 2013; Song et al., 2013).

도시지역의 홍수취약성 분석을 위해서는 우선적으로 목적에 맞는 적절한 취약성 평가 방법을 선정해야하며 지역적 특성을 반영할 수 있는 적절한 대리변수를 선정해야한다. 국내외의 홍수취약성 분석사례들을 검토한 결과 대리변수의 선정은 대부분 비슷한 유형을 선정하였으며 취약성 분석방법에 따라 대리변수들이 다르게 분리되어 전체 홍수취약성 분석결과가 다르게 분석된다. 본 연구에서는 대구광역시를 대상으로 도시지역의 홍수취약성 평가를 위해 홍수피해잠재능의 지표분류 방법을 활용하여 지역중요성지표와 피해가능성지표로 평가지표를 구성하였다. 도시지역을 대표하는 지표분류 기준에 따라 대리변수를 선정하고 도시지역의 홍수취약성 평가방안을 제안하고자 한다.

2. 도시지역 홍수취약성 평가 방법

2.1 홍수취약성 평가 방법

홍수취약성 평가 방법은 OECD의 PSR 모형, IPCC 기후변화 취약성 개념이론, MOLIT PFD 산정방법을 기반으로 다양한 분야에서 홍수취약성이 연구되었다(MLTM, 2001, 2010; KRIHS, 2005; SI, 2006; Jthink, 2010; NDMI, 2011). 홍수취약성 분석은 크게 홍수에 대한 위협의 위험성(Hazard), 자산이나 인명의 노출성(Exposure), 홍수방어능력 부족의 취약성(Vulnerability)으로 3가지 요소를 기준으로 다양한 대리변수를 종합하여 취약성을 평가하고 있다. 또한, 다양한 연구에서 홍수취약성 요소를 잠재성(Potential), 위험성(Risk), 취약성(Vulnerability), 노출성(Exposure), 민감도(Sensitivity), 방어(Protect) 등으로 목적에 맞게 변형하여 적용하고 있다.

홍수취약성의 평가요소의 분류체계 중 PSR 구조(OECD, 1991)는 대책요소들의 대리변수들이 이미 대책의 효과가 현장요소와 중복적으로 평가되어 피해대책의 영향이 실제보다 과도하게 평가될 우려가 있다. DPSIR 구조(EEA, 1999)는 평가인자를 5가지 개념으로 구분하기가 복잡하고 대리변수를 구축하기 위해 많은 자료수집의 어려움과 적용성의 한계점을 가지고 있다. 기후변화취약성(IPCC, 2001)의 경우 취약성의 노출성과 민감도의 성향이 비슷하여 적응능력이 홍수취약성 평가를 실제보다 완화시킬 우려가 있다.

본 연구에서는 도시지역의 홍수취약성에 영향을 직접적으로 미치는 대표적인 대리변수를 선별할 수 있도록 홍수피해잠재능(PFD)의 지표분류 방법을 활용하여 대리변수를 지역중요성 지수(Region Significance Index)와 피해가능성 지수(Damage Possibility Index)로 분류하였으며 산정방법은 Eqs. (1), (2)와 같다. 도시지역의 홍수취약성을 종합적으로 평가하기 위해서 성격이 다른 각 지수의 특성을 종합하여 홍수취약성 지수(Flood Vulnerability Index)를 Eq. (3)에 적용하여 지역중요성지수와 피해가능성지수에 대한 인자별 가중치를 고려하여 평가하고자 한다.

$$RSI = \sum_{i=1}^n a_i RF_i \quad (1)$$

$$DPI = \sum_{i=1}^n a_i DF_i \quad (2)$$

$$FVI = RSI^\alpha \times DPI^\beta \quad (3)$$

여기서, RSI 는 지역중요성 지수, RF_i 는 i 번째의 지역중요성 지수의 대리변수, DPI 는 피해가능성 지수, DF_i 는 i 번째의 피해가능성 지수의 대리변수, a_i 는 대리변수의 가중치, FVI 는 도시지역 홍수취약성 지수, α 와 β 는 각 지수의 가중치이다.

2.2 표준화 분석

홍수취약성 평가의 분석을 위하여 대리변수를 선정하는데 일반적으로 특성에 따라 단위와 범위가 달라 대리변수를

비교분석하기 위해서는 통일성 있는 단위 또는 범위의 값으로 변환해주는 표준화 과정이 필요하다. 본 연구에서는 취약성 평가를 위한 대리변수의 상대적 크기와 자료의 분포특성을 통일성 있는 기준으로 비교할 수 있는 표준화 분석을 실시하였다. 표준화 분석은 대리변수의 원자료 값(x_i)을 자료의 최대값($x_{\max}$)에 대한 비율로 무차원화하는 방법으로 지표값(s_i)에 대한 표준화 분석방법은 Eq. (4)와 같다. 본 연구에서는 원자료의 분포특성을 유지하며 무차원화하여 최대값 1을 기준으로 표준화 분석을 적용하였다.

$$s_i = \frac{x_i}{x_{\max}} \quad (4)$$

여기서, s_i 는 대리변수의 지표값이며 $x_{\max}$ 는 대리변수의 최대값, x_i 는 대리변수의 원자료 값이다.

3. 도시지역의 취약성평가 인자 분석

3.1 대상지역

본 연구에서는 도시지역의 홍수취약성 분석을 위한 대상 지역으로 우리나라의 대표적인 도심지역 중 하나인 대구광역시를 선정하였다. 대구광역시는 7개구 1개군 6개읍 3개면 130개동으로 행정구역이 구분되어 있으며 도시지역의 홍수취약성을 평가하기 위해 대부분 농업지역으로 구성된 달성군을 제외하였다. 따라서, 본 연구에서 도시지역의 홍수취약성 분석을 위한 대상지역으로 Fig. 1과 같이 대구광역시의 130개동을 선정하였다.

Fig. 1. Study Area

3.2 평가지수의 대리변수 선정 및 구축

평가지수의 산정은 취약성 평가를 위해서 정확한 대리변수를 선정해야 하며 평가 목표에 따라 평가지수의 대리변수들을 선정해야한다. 기존에 수행된 도시지역의 홍수취약성 분석연구에서는 위험성, 저감성, 강우, 지역특성 등에 대한 대리변수를 선정하였다. 위험성은 침수면적, 홍수피해액, 저지대, 불투수비율, 인구밀도, 자산밀도 등, 저감성은 내외수방어능력, 홍수조절량, 진단점수 등, 강우는 지속시간별 강우량, 강우강도, 침투강우량 등, 지역특성은 인구밀도, 인구수, 평균연령, 취약가옥수, 토지이용현황 등이 조사되었다. 그러나 이러한 대리변수는 지역적 자료의 여부, 자료의 정확도에서 시군구별로 적용의 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 도시지역의 홍수취약성 평가를 위해서 부처(행안부, 통계청 등)에서 고시한 자료들을 검토하고 인자의 대표성, 측정 및 계량의 정확도, 자료구축의 용이성 등을 고려하여 대리변수를 선정하였다. 대리변수는 지역중요성 지수(RSI)와 피해가능성 지수(DPI)에 대하여 각각 4개를 선정하여 총 8개의 평가인자를 Table 1과 같이 선정하였다.

지역중요성 지수(RSI)의 인적요소에 대한 대리변수는 인구밀도와 취약인구 비율을 선정하였다. 인구밀도는 지적통계연보(MOLIT, 2018a)에서 대구시 행정동별 인구수에 대한 행정동 면적의 비율로 산정하였다. 취약인구 비율은 65세 이상 고령인구로 지적통계연보(MOLIT, 2018a)에서 자료를 수집하고 0세부터 4세의 인구는 구 단위로 정보가 제공되므로 행정동 인구수에 비례하게 배분하여 행정동별 취약인구수에 대한 최대 취약인구수의 비율을 산정하였다. 물적요소의 대리변수로는 자산밀도와 주요시설물 면적비를 선정하였다. 자산밀도는 1 m² 당 표준주택공시가격(MOLIT, 2018b)의 자료를 활용하여 행정동별 단독주택 표준가격에 대한 단위주택 표준가격 최고금액의 비율로 산정하였다. 주요시설물 면적비는 환경부에서 제공하는 토지피복지도를 기준으로 시가화지역에 주요시설면적을 분석하여 행정동 면적에 대한 비율로 산정하였다.

피해가능성 지수(DPI)의 지형요소에 대한 대리변수는 저지대 면적비와 불투수 면적비를 선정하였다. 저지대 면

적비는 DEM 자료를 분석하여 El. 35.0 m 이하지역에 대하여 저지대 면적을 추출하고 행정동별 저지대 면적에 대한 행정동 면적의 비율로 산정하였다. 불투수면적은 환경부에서 제공하는 토지피복지도의 시가화 건조지역과 인공나지 면적을 불투수 면적으로 분석하여 행정동별 불투수 면적에 대한 행정동별 면적의 비율로 산정하였다. 재해요소의 대리변수로는 내수재해위험지구 후보지 현황과 풍수해 이력 발생 현황을 선정하였다. 내수재해위험지구 후보지 현황은 자연재해저감종합계획(MOIS, 2016)에서 내수재해위험지구 후보지 현황을 행정동별로 조사하여 행정동별 내수재해위험지구 선정 건수에 대한 최대 지정 건수의 비율로 산정하였다. 풍수해 이력 발생현황도 자연재해저감종합계획(MOIS, 2016)에서 행정동별 발생 건수에 대한 최대 발생건수의 비율로 산정하였다.

4. 도시지역 홍수취약성 분석

4.1 지역중요성 지수의 표준화 분석

도시지역의 홍수취약성 평가를 위한 지역중요성 지수(RSI)는 2개의 요소와 4개의 대리변수를 선정하였다. 인적요소는 인구밀도와 취약인구 비율, 물적요소는 자산밀도와 주요시설물 면적비에 대하여 홍수취약성 평가를 위한 표준화 분석을 실시하였다(Fig. 2).

인구밀도의 표준화 지표는 평균 0.360, 최소 0.005에서 1.000으로 행정동별 다양한 범위의 지표가 분포되어 있으며 대구의 주거지역 및 상업지역에서 대부분 높은 지표가 분석되었다. 상위 5개의 행정동은 죽정동, 신안2동, 본리동, 수성1가동, 신천1·2동으로 0.900~1.000이며 하위 5개는 고산2동, 안심2동, 무태조야동, 도평공, 공산동으로 0.005~0.031이 분석되었다. 취약인구 비율은 평균 0.340, 최소 0.094에서 1.00으로 대부분의 지표가 0.200에서 0.600의 범위에 분포되어 있으며 도시지역의 외곽지역에서 높은 지표가 분석되었다. 상위 5개의 행정동은 안심3·4동, 진천동, 안심1동, 상인1동, 도원동으로 0.644~1.000이며 하위 5개는 성내 1동, 도평동, 삼덕동, 침산1동, 대봉2동으로 0.094~0.119로 분석되었다.

Table 1. Urban Flood Vulnerability Factors

Type	Section	Factors	Symbol
Region Significance Index (RSI)	Human Element	Population Density	RF ₁
		Vulnerable Population Ratio	RF ₂
	Material Element	Property Density	RF ₃
		Area Ratio of Major Facility	RF ₄
Damage Possibility Index (DPI)	Geomorphic Element	Area Ratio of Low Land	DF ₁
		Area Ratio of Impervious	DF ₂
	Disaster Element	Candidate Place Status of Domestic Disaster Risk District	DF ₃
		Occurrence Status of Flood Record	DF ₄

Fig. 2. Result for Vulnerability Analysis of Region Significance Index

자산밀도는 평균 0.347, 최소 0.236에서 1.00으로 대부분의 지표가 0.200에서 0.400의 범위에 분포되어 있으며 높은 지표지역은 공항인근과 산업단지인근으로 분석되었다. 상위 5개의 행정동은 월성2동, 월성1동, 불로·봉무동, 공산동, 범어1동으로 0.536~1.000이며 하위 5개는 비산7동, 비산1동, 비산4동, 비산6동, 비산5동으로 0.236의 동일한 지표가 분석되었다. 주요시설물 면적비율은 평균 0.681, 최소 0.037에서 1.000로 행정동별 다양한 범위의 지표가 분포되어 있으며 50% 이상이 0.600 이상에 위치하고 있으며 도시지역의 중심 지역에서 외곽으로 갈수록 지표는 감소한다. 상위 5개의 행정동은 비산6동, 효목2동, 평리2동, 신암3동, 비산5동으로 0.995~1.000이며 하위 5개는 무태조야동, 상인3동, 범물1동, 도평동, 공산동으로 0.037~0.085이 분석되었다.

4.2 피해가능성 지수의 표준화 분석

도시지역의 홍수취약성 평가를 위한 피해가능성 지수(DPI)는 2개의 요소와 4개의 대리변수를 선정하였다. 지형요소는 저지대 면적비와 불투수면적비, 재해요소는 내수재해 위험지구 후보지 현황과 풍수해 이력 발생 현황을 대리변수로 선정하고 홍수취약성 평가를 위한 표준화 분석을 실시하였다(Fig. 3).

저지대 면적비의 표준화 지표는 평균 0.178, 최소 0.001에서 0.987로 대부분의 지표가 0.200 이하에 분포되어 있으며 금호강과 진천천에 낙동강 합류지역은 높은 지표가 분석되었다. 상위 5개의 행정동은 비산7동, 비산5동, 노원동, 월성2동, 방촌동으로 0.764~0.987이며 하위 5개는 도평동, 대당1동, 두류1·2동, 대명11동, 복현1동으로 0.001~0.006이 분석되었다. 불투수면적비는 평균 0.580, 최소 0.034에서 0.800으로 행정동별 다양한 범위에 분포되어 있으며 도시지역의 중앙에서 외곽으로 갈수록 지표가 감소하는 것으로 분석되었다. 상위 5개의 행정동은 비산6동, 대신동, 대봉2동, 대명1동, 신암3동이 0.800으로 동일하며 하위 5개는 무태조야동, 상인3동, 도평동, 범물1동, 공산동으로 0.034~0.083이 분석

되었다.

내수재해위험지구 후보지 현황은 평균 0.155, 최소 0.100에서 1.000으로 대부분 미후보 지역은 0.100의 지표가 분석되었으며 1회 이상 시 0.100 이상의 지표가 분석되었다. 상위 5개의 행정동은 산격2동, 수성1가동, 비산7동, 효목1동, 국우동으로 0.677~1.000이며 17개의 행정동이 0.333, 나머지 108개 행정동이 0.100으로 분석되었다. 풍수해 이력 발생 현황은 평균 0.148, 최소 0.100에서 1.000으로 풍수해가 발생하지 않은 지역은 0.100, 발생한 지역은 1.000의 지표가 분석되었다. 풍수해 이력을 보유하고 있는 행정동은 삼중이동, 신천2·3가동, 중동, 범어4동, 황금2동으로 7개가 1.000의 지표가 분석되었으며 나머지 123개 지역은 피해가 없어 0.100으로 분석되었다.

4.3 도시지역 홍수취약성 평가

도시지역의 홍수취약성을 평가하기 위해서는 지역중요성 지수(RSI)와 피해가능성 지수(DPI)의 표준화된 대리변수를 종합하여 평가지수를 산정하는 과정이 필요하다. 대리변수의 가중치는 2개의 평가지수에 대하여 적절하지 못한 기준으로 가중치를 적용하게 되면 지표의 영향력을 평가하기 어려워지며, 홍수취약성 평가시에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 도시지역의 홍수취약성을 평가함으로써 지역중요성 지수와 피해가능성 지수에 대한 홍수피해 특성을 각각 동등하게 고려하기 위하여 지수별 4개의 대리변수에 대하여 동일가중치를 적용하고 평가지표를 산술평균하여 홍수취약성 지수를 분석하였다. 홍수취약성의 평가지수를 대표하는 대리변수들의 가중치는 대리변수별 미치는 영향이 동일하다고 가정하여 Eq. (1)을 이용하여 RSI 지수를 Eq. (2)를 이용하여 DPI 지수의 값을 산정하였다(Figs. 4(a), (b)).

가중치를 적용한 분석결과는 지역중요성 지수(RSI)가 평균 0.432, 최소 0.125에서 최대 0.686의 지표가 분석되었으며 행정동별 0.200~0.600의 지표 범위에 다양하게 분포되어 있다. 지역중요성의 위험지역으로는 대부분 산업단지와 도

Fig. 3. Result for Vulnerability Analysis of Damage Possibility Index

Fig. 4. Result of Flood Vulnerability Analysis in Urban Area

시지역 중앙에 위치하고 있다. 피해가능성 지수(DPI)는 평균 0.341, 최소 0.116에서 최대 0.856의 지표가 분석되었으며 지역특성과 과거피해이력으로 대부분 0.300 이하에 분포하고 있다. 피해가능성의 위험지역으로는 과거 피해가 발생하거나 내수재해 후보지 그리고 하천인근지역의 저지대 지역에서 위험지역이 위치하고 있다.

본 연구에서는 홍수취약성 평가에서 전반적인 특성을 나타낼 수 있는 지수화 방법 중 승법형 효용함수(Multiplicative utility function)를 사용하여 지역중요성 지수(RSI)와 피해가능성 지수(DPI)를 종합한 도시지역 홍수취약성 지수(FVI)를 Eq. (3)을 이용하여 산정하였다(Fig. 4(c)). 취약성에 대하여 같은 방향성을 보이는 평가지수를 동등한 영향이 반영될 수 있도록 승법형 효용함수를 적용하여 지역중요성 지수(RSI)와 피해가능성 지수(DPI)에 대하여 평가지표의 극치값과 극저값을 보완하였다. 지역중요성 지수와 피해가능성 지수의 선정은 이러한 극치값과 극저값에 대한 취약성을 잘 보완하는 지수로서 적절하다고 판단된다.

도시지역의 홍수취약성 지수의 평가 결과 130개의 행정동 중에 지수 결과가 높은 지역은 대부분 하천을 중심으로 급호

강, 진천천, 신천 인근의 행정동이 평가되었다. 130개의 행정구역 중 상위 20%인 26개의 행정구역을 순위별로 살펴보면 수성2·3가동, 중동, 범어4동, 수성1가동, 범어1동, 황금2동, 상중이동, 방촌동, 죽전동, 산격2동, 비산7동, 월성1동, 월성2동, 남산4동, 비산5동, 효목2동, 본리동, 상인1동, 침산3동, 지산1동, 신천1·2동, 효목1동, 신암2동, 원대동, 노원동, 범어3동이 평가되었다. 분석결과를 바탕으로 도시지역의 홍수취약성 평가결과는 지역의 중요한 지역이나 과거 피해가 발생한 지역에서 그리고 하천지역 인근 행정동에서 대부분 도시지역 홍수취약성이 높은 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 수행된 다양한 홍수취약성 평가에서 도시지역의 특성을 고려할 수 있는 합리적인 평가방법을 고려하여 지수와 대리변수를 선정하였다. 평가방법과 대리변수의 선정은 기존의 수행된 다양한 홍수취약성에서 선정된 대리변수를 검토하였으며 대상지역인 도시지역에 행정동 단위로 부처에서 제공되고 지속적으로 사용이 가능한

대리변수를 선정하였다. 기존의 수행된 홍수취약성 평가는 유역 및 시군구 단위를 대상으로 수행되었다면 본 연구에서는 읍면동 단위의 상세취약성을 평가하였다. 읍면동 단위에 평가를 위해서는 대리변수들의 자료들이 상세히 적용되어야 하며 일회성이 아닌 부처에서 제공하는 대리변수를 선정해야 한다. 과거에 도시지역을 대상으로 하는 홍수취약성 평가의 대리변수들을 검토하여 본 연구에 적합한 인자들을 선정하였다. 또한, 기존의 홍수취약성 평가는 취약성, 노출성, 위험성으로 구분되었다면 도시지역의 경우 재해저감을 위한 지속적인 관리가 진행되는 것을 고려하여 저감성과 노출성을 통합하여 지역중요성 지수(RSI)로 위험성을 피해가능성 지수(DPI)로 평가체계에 의한 지수와 대리변수를 선정하였다.

도시지역의 홍수피해를 고려한 취약성과 노출성에 대한 대리변수는 인구밀도와 취약인구 비율의 인적요소와 자산밀도와 주요시설물 면적비의 물적요소에 대하여 지역중요성 지수(RSI)를 선정하였다. 위험성에 대하여 대리변수는 저지대면적비와 불투수면적의 지형요소와 내수재해위험지구 후보지 현황과 풍수해 이력 발생 현황의 재해요소에 대하여 피해가능성 지수(DPI)를 선정하였다. 지역중요성 지수(RSI)와 피해가능성 지수(DPI)에 각각 4개의 대리변수를 분석하여 도시지역의 홍수취약성 평가를 대구광역시의 130개 행정동을 대상으로 실시하였다.

도시지역의 홍수취약성의 평가결과 대구광역시의 교외 지역보다는 금호강, 진천천, 신천의 주변지역에 위치한 도시 지역과 산업단지 지역에서 높은 지수의 평가결과가 분석되었다. 또한, 낙동강으로 유입되는 하천 합류지점도 저지대의 영향으로 높은 지수가 평가되었다. 도시지역에서 홍수에 취약한 지역으로는 중요시설물이 위치한 지역, 과거 피해가 발생한 지역 그리고 하천인근 저지대 지역이 취약한 것으로 분석되었다. 향후 연구에서는 델파이, 엔트로피 등의 가중치 산정 분석을 통해 동일한 대리변수를 적용하여 광역시를 평가하다면 과거의 피해와 비교분석하여 홍수취약성 평가의 적정성을 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 스마트시티 혁신성장동력 프로젝트 지원으로 수행되었음(과제 번호 20NSPS-B149842-03).

References

Cardona, O.D., Hurtado, J.E., Chardon, A.C., Moreno, A.M., Prieto, S.D., Velasquez, L.S., et al. (2005). *Indicators of disaster risk and risk management: Program for Latin America and the Caribbean, Summary report*

for world conference on disaster reduction. IDB/IDEA Program of Indicators for Disaster Risk Management, National University of Colombia.

Chang, L.F., and Huang, S.L. (2015). Assessing urban flooding vulnerability with an emergy approach. *Landsc. Urban Plan.*, Vol. 143, pp. 11-24.

Choi, C.I., and Kim, W. (2006). Implications of the flood risk assessment in urban and regional planning. *Journal of the Korea Planners Association, KPA*, Vol. 41, No. 4, pp. 143-155.

Choi, H.I., Park, S.Y., Song, J.H., and Park, M.J. (2013). Identification of flood risk areas using a multi-criteria decision making method. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 2, pp. 237-243.

European Environment Agency (EEA). (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*. Technical Report No. 25, EEA.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate change 2001: The scientific basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jang, O.J., and Kim, Y.O. (2009). Flood risk estimation using regional regression analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 9, No. 4, pp. 71-80.

Jeonbuk Development Institute (Jthink). (2010). *Improving flood plans against climate change in Jeollabuk-do*. Jthink 2010-PR-10.

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. doi:10.3390/w9040292

Korea Research Institute for Human Settlements (KRIHS). (2005). *Analysis of flood damage characteristics and development of flood damage index*.

Kubal, C., Haase, D., Meyer, V., Scheuer, S. (2009). Integrated urban flood risk assessment: Adapting a multicriteria approach to a city. *Natural Hazards Earth System Sciences*, Vol. 9, pp. 1881-1895.

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

Lee, M.W., Kim, T.W., and Moon, G.W. (2013). Assessment of flood damage vulnerability considering regional

- flood damage characteristics in South Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4, pp. 245-256.
- Lim, K.S., Choi, S.J., Lee, D.R., and Moon J.W. (2010). Development of flood risk index using causal relationships of flood indicators. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1B, pp. 61-70.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT). (2018a). *Cadastral statistical annual report*.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT). (2018b). *Standard housing announced price*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2001). *National water resource plan*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2010). *National water resource plan (2010-2020)*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2016). *Comprehensive plans for hazard mitigation plan*.
- National Disaster Management Research Institute (NDMI). (2011). *Development of community-based flood disaster risk reduction index*.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (1991). *Environmental indicators. A preliminary set*. Paris, France.
- Park, T.S., Choi, M.H., Yeo, C.G., and Lee, S.O. (2009). Analysis of regional flood damage characteristics using relationship between flood frequency and damages. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 9, No. 5, pp. 87-92.
- Rygel, L., O'Sullivan, D., and Yarnal, B. (2006). A method for constructing a social vulnerability index: An application to hurricane storm surges in a developed country. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 11, No. 3, pp. 741-764.
- Song, J.H., Kim, S.D., Park, M.J., and Choi, H.I. (2013). Estimation of flood risk index for the Nakdong River watershed. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 1, pp. 35-45.
- Sullivan, C.A., and Meigh, J.R. (2005). Targeting attention on local vulnerabilities using an integrated index approach: The example of the climate vulnerability index. *Water Science & Technology*, Vol. 51, No. 5, pp. 69-78.
- The Seoul Institute (SI). (2006). *Development of the regional safety assessment model in Seoul: Focusing on flood*.
- Zhang, J., Okada, N., Tatano, H., and Hayakawa, S. (2002). Risk assessment and zoning of flood damage caused by heavy rainfall in Yamaguchi prefecture, Japan. In B. Wu et al. (Eds.), *Flood defence '2002* (pp. 162-170). New York: Science Press.

Received	July 31, 2020
Revised	July 31, 2020
Accepted	August 19, 2020