

서울특별시 반지하 가구를 고려한 홍수 취약성 평가

음정인* · 김형규**†

*홍익대학교 도시계획과 연구원, **홍익대학교 도시계획과 부교수

Assessment of flood vulnerability of semi-basement households in Seoul

Eum, Jeongin* and Kim, Hyungkyoo**†

*Researcher, Department of Urban Design & Planning, Hongik University, Seoul, Korea

**Associate Professor, Department of Urban Design & Planning, Hongik University, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study estimated the number of semi-basement households in Seoul and evaluated their flood vulnerability at the administrative dong level, taking various factors into consideration. Vulnerability assessment indicators, including the percentages of semi-basement households, were selected based on previous studies and consisted of a total of 26 indicators, considering exposure, sensitivity, and adaptability. Social, economic, environmental, and integrated flood vulnerability were all considered in multidimensional evaluation of both flood vulnerability and the multidimensionality of damage. Vulnerability assessment was conducted by calculating and evaluating vulnerability for each dimension. Subsequently, integrated flood vulnerability was assessed by summing the values of the social, economic, and environmental categories and interpreted in comparison to flood inundation maps. The evaluation results showed that in all vulnerability categories, more than half of the administrative dongs in Seoul exhibited high vulnerability. For social flood vulnerability, in particular, the highest number of administrative dongs had a "very high" rating among the four vulnerability categories, indicating a significant potential for population and social system damage in the event of a flood. Additionally, integrated flood vulnerability exhibited very high results in Seoul's southwestern and northeastern areas. These study findings are expected to contribute to region-specific flood response and policy prioritization aimed at reducing semi-basement dwelling damage. Furthermore, identifying the number of semi-basement households in Seoul and demonstrating their societal flood vulnerability can be utilized as valuable data for the purpose of reducing damage to such households.

Key words: Urban Flood, Semi-Basement Household, Flood Vulnerability, Vulnerability Index

1. 서론

2022년 8월 중부지방에 발생한 폭우는 기록적인 강수량을 보이며 심각한 재산, 인명 피해를 일으켰다. 8월 8일에서 9일 사이 서울특별시에는 호우경보가 발효되었다. 동작구 기상관측장비에는 시간당 141.5 mm/hr의 강우량이 관측되며 역대 최고치를 기록하였다. 이 폭우로 Fig. 1(a)의 강남구 대치역과 같이 도로, 지하주차장, 철도역사

등이 침수되며 피해가 발생했다. 그리고 동작구와 관악구에서는 반지하 주택의 침수로 총 4명이 사망하는 안타까운 사건이 발생했다(Fig. 1(b) 참조). 반지하 주택은 폭우 시 지상에서부터 급속도로 물이 들어오고 수압으로 인해 문을 열고 빠져나가기 어려운 구조적 특징을 가진다. 주로 경제적 취약계층이 거주하며 폭우 시 빠른 대응과 복구가 힘든 특징으로 그 피해가 더욱 가중된다.

도시 내에서 발생하는 홍수는 인구와 건축물, 주요 기반

†Corresponding author : hkim@hongik.ac.kr (Hongik University, 94 Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea. Tel. +82-2-320-1635) ORCID 음정인 0009-0004-6028-1139 김형규 0000-0002-8566-6156

시설 등이 밀집된 공간에서 발생하여 더욱 유의하여야 한다. 하지만 도시지역에는 물을 흡수하지 못하는 불투수 면적이 매우 넓으며 불투수 면적률이 높은 지역에서 폭우가 내리면 지표로 흡수되지 못한 유출수로 인해 홍수가 발생하고 있다. 또한, 기존에 설치된 배수처리시설로는 폭우시의 급격히 늘어난 유출수를 감당할 수 없어 홍수 발생 가능성을 더욱 높이고 있다. 더불어 기후변화의 영향으로 돌발홍수(Flash flood)의 위험도와 피해가 증가하고 있다. 돌발홍수는 집중적인 강우 현상이 일어날 때 유입되는 물의 양이 빠르게 불어나 비교적 짧은 시간 나타나는 홍수로 예측하기 어려우며 유속이 빨라 매우 위험하다.

기후변화로 인한 부정적인 영향과 피해가 심각해지며 도시는 점차 늘어나는 홍수와 침수에 대한 위협과 마주하고 있다. 이러한 상황 속에서 반지하 가구의 분포와 이를 고려한 홍수 취약성을 평가할 필요가 있다. 2022년 여름 반지하 주택 인명 사고 이후 서울시는 ‘지하·반지하 거주 가구를 위한 안전대책’을 발표했다. 주거용 지하·반지하의 건축용도 허가를 불허하고 ‘반지하 주택 일몰제’로 기존에 주거 용도로 사용되던 곳을 순차적으로 줄여 서울시

내 지하·반지하 거주 가구를 없앤다는 계획이다. 반지하 이사 바우처, 반지하 주택 매입 등의 세부 계획을 세웠지만, 체계적이지 않으며 구체적인 실행 전략이 보완되어야 할 필요가 있는 계획이라는 비판을 받고 있다(Ha, 2022; Kim et al., 2023). 실제로 반지하 주택에서 벗어난 주민은 2,300가구로 서울시 전체 반지하 주택 약 21만 가구 중 1.1%에 불과하다. 이에 남아있는 가구에 대한 현황 및 분포 파악과 모든 가구가 반지하에서 벗어나기 전까지 발생할 수 있는 침수 피해에 대한 대책이 필요하다.

본 연구는 폭우, 홍수에 취약하여 그간 심각한 피해를 겪었던 반지하 가구를 고려한 서울특별시의 홍수 취약성을 평가하고자 한다. 더불어 사회·경제·환경 및 통합의 홍수 취약성 지수(Flood vulnerability index, FVI)를 산정하여 다차원적인 평가를 진행하고자 한다. 연구의 흐름은 다음과 같다. 먼저 홍수 취약성 평가에 대한 이론적 고찰 및 국내외 홍수 취약성 관련 선행연구를 살펴보았다. 이후 선행연구를 통해 선정된 지표에 대한 설명과 주요 지표인 반지하 가구 산정방법 그리고 취약성 평가 방법을 소개한다. 도출된 서울특별시의 부문별 홍수 취약성 평가 결과와 침수흔적도를 활용하여 해석을 진행하였다.

2. 이론 고찰 및 선행연구

2.1. 홍수 취약성 평가

취약성(Vulnerability)은 기후변화, 생태학, 공중보건, 토지변화 등 다양한 학문에서 목적에 따라 조금씩 다른 개념으로 사용되고 있다. UNDP (2004)는 취약성을 전체 시스템에 대한 기후변화 피해의 잠재적인 노출 상태 및 노출될 확률로 보고 취약성을 민감도와 적응역량의 함수로 정의하였다. IPCC (2015)에 따르면 취약성이란 부정적인 영향을 받기 쉬운 성향이나 경향을 의미하며, 노출, 민감도와 적응역량의 함수로 정의하고 있다. IPCC는 기후변화에 대한 정보는 표준 참고자료로 사용되고 있으며 다수의 연구와 평가에서 널리 사용되고 있다. 본 연구에서도 IPCC의 취약성 개념을 사용하여 평가를 진행하고자 한다.

많은 연구에서 취약성을 노출, 민감도, 적응역량의 함수로 정의하고 활용하고 있으며 홍수 취약성 분야에서도 이러한 동향이 지속되고 있다. 노출(Exposure)은 어떠한 대상이 홍수로 인해 영향을 받을 가능성으로 정의된다(Balica, 2007; Balica and Wright, 2010; Erena and Worku, 2019; Fuchs et al., 2012). 이때의 대상은 인간뿐 아니라



(a) Flooded roads near dacchi station in Gangnam-gu



(b) Flooded semi-basement house in Gwanak-gu

Fig. 1. Flood damage in Seoul

재산, 기반시설, 농업, 문화유산 등 많은 부문이 포함될 수 있다. 민감성(Susceptibility)은 홍수에 대해 민감한 정도로, 홍수가 발생했을 때 상대적 사회·경제적 약점 및 불리한 조건으로 인해 피해를 입을 수 있는 잠재성으로 정의된다 (Balica, 2007; Cardona, 2013; Erena and Worku, 2019; Veenstra, 2013). 그리고 적응역량(Resilience)은 변화나 위협에 적응하고, 잠재적 손상을 방지, 완화 또는 흡수하며,

피해 없이 결과에 대비하거나, 또는 그 기회를 활용할 수 있는 시스템의 능력으로 정의된다(IPCC, 2001; Pelling, 2003; Veenstra, 2013). 일부 연구에서는 활용 데이터 수집이나 취약성 계산의 용이성을 위해 반대 개념인 ‘적응역량의 부족’으로 사용하기도 한다(Erena and Worku, 2019; Ferrari et al., 2019).

Table 1. Flood vulnerability assessment indicators

Components		Indicators	
Social	Exposure	Population density	The number of people living in the area
		Transportation	Percentage of road, rail, airport area
		Infrastructure	Percentage of environmental infrastructure, education and administrative facilities area
	Susceptibility	Semi-basement household	Percentage of semi-basement and basement residential household
		One person household	Percentage of one person household
		Elder population	Percentage of population above age 65
		Child population	Percentage of population under age 5
	Resilience	Civil servant	Percentage of civil servants per population
		Evacuation facility	Number of civil defense evacuation facilities
		Medical facility	Number of general hospital, hospital, oriental medicine clinic, and public health center
Economic	Exposure	Residential area	Percentage of residential area
		Commercial area	Percentage of commercial area
		Industrial area	Percentage of industrial area
	Susceptibility	Low-income group	Percentage of recipients of the national basic livelihood security
		Education level	1-(percentage of highly educated people with college degrees or higher)
Resilience	Land value	Mean of officially assessed individual land price	
Environmental	Exposure	Daily maximum precipitation	5 year average of the largest amount of precipitation in the year
		Number of heavy rain days	5 year average of days with precipitation above 80mm
	Susceptibility	Natural disaster risks zoned	Percentage of natural disaster risks zoned area
		Landslides risk area	Percentage of landslides risk level 1 and 2 area
		Waterfront area	Percentage of area within 100 m of river boundary
		Slope	Mean of the slope
		Impervious area	Percentage of impervious area
		Flood expectation area	Percentage of flood expectation area
	Resilience	Park and green space	Percentage of park and green space area
		Stormwater facility	Number of stormwater facility such as bioswale, infiltration trench

2.2. 선행연구 고찰

해외의 지표기반 홍수 취약성 연구 중 Nasiri et al. (2016)는 도시의 의사 결정을 위한 지구 수준의 홍수 취약성 지수를 개발하고자 하였다. 홍수 취약성 지수는 사회, 경제, 환경 및 물리적 요소를 포함하는 25개의 지표로, 각 요소가 노출, 민감도, 적응 지표를 모두 포함하도록 구성되었다. 결과적으로 사회, 경제, 환경, 물리 요소와 관련되어 연구대상 지역에서 가장 취약한 지역을 설명할 수 있도록 하였다. Erena and Worku (2019)는 홍수와 가뭄이 잦은 에티오피아 Dire Dawa 지역의 마을들을 대상으로 지역의 지속가능한 홍수 위험 관리를 위한 홍수 취약성 지수를 개발하였다. 취약성 지표는 대상 지역의 평가에 적합한 노출, 민감도, 적응역량의 24개 지표로 선정되었다. 사회, 경제 및 물리적 차원의 구성 요소별 홍수 취약성을 각각 계산하여 취약점으로 나타난 지역의 특성과 시사점을 정리하였다.

국내의 Lee et al. (2020)는 엔트로피 가중치 산정방법을 활용하여 서울특별시 25개 구를 대상으로 도시지역의 홍수 취약성을 평가하였다. 기후노출, 민감도, 적응도에 대한 15개의 지표를 선정하여 평가한 결과, 서울 북부 및 서부 지역의 홍수 취약성이 높게 산정되었다. 반면 서울 중부와 남부지역은 홍수 취약성이 낮게 산정되었다. Shin et al. (2019)는 한강 권역의 56개 지자체를 대상으로 하여 지역적 특성을 고려한 도시지역의 홍수 취약성을 평가하였다. 노출, 민감도, 적응력, 홍수피해에 대한 14개 지표를 선정하고 주성분 분석을 통해 주요요인을 도출하였다. 이후 홍수 취약성에 따른 군집 분석을 통해 한강권역의 지자체를 4개로 나누어 군집별 홍수피해를 분석하고 피해 저감 대책을 제시하였다.

해외 선행연구의 경우, 취약성을 사회, 경제, 환경 및 물리 등의 요소로 구성된 다차원적인 개념으로 인식하고 각 취약성을 평가하였다는 특징을 가진다. 국내 선행연구에서는 하천 유역이나 시, 군 등 대규모 지역 단위를 대상으로 한 경우가 많았다. 또한, 노출 지표를 주로 강수, 강우 등 홍수를 유발하는 기후 관련 변수로 구성하며 해외의 취약성 노출에서 일부 변형된 개념으로 사용하였다. 더불어 취약계층이나 홍수피해 등 특정 대상에 집중하여 평가한 연구는 다수 존재하고 다양한 변수를 활용하지만, 취약성을 여러 차원으로 나누어 각각 평가하지는 않았다. 홍수가 발생하면 물질 피해뿐 아니라 사회, 경제적인 면에서의 피해도 발생하기 때문에 다차원적인 홍수 취약성 평가가 필

요하다. 국내의 선행연구를 검토한 결과 행정동 등 작은 공간 단위 규모와 사회, 경제, 환경 등 다차원적인 평가가 가능한 홍수 취약성 연구의 필요성이 대두된다.

3. 홍수 취약성 평가 방법

3.1. 대상 지역 및 평가지표

본 연구는 여름철 폭우로 인해 발생하는 도시홍수로 반 지하 침수가 반복적으로 나타나며 심각한 인명 및 재산 피해가 발생하고 있는 서울특별시를 대상 지역으로 선정하였다. 세부적인 평가를 위해 공간적 단위는 행정동으로 설정하였다. 시간적 단위는 원자료를 사용할 수 있는 가장 최신 연도로 설정하였으며, 기후 관련 지표의 경우 최근 5년 자료의 평균값으로 사용하였다.

홍수 취약성 평가지표의 선정을 위해 국내외의 기존 홍수 취약성 선행연구에서 활용되고 검증된 각 지표를 검토하였다. 이후 자료 수집 가능 여부, 행정동 단위의 자료 존재 여부 등을 고려하여 Table 1과 같이 최종 평가지표를 선정하였다.

2장에서 언급했듯이 국내 연구에서는 홍수 취약성의 여러 차원을 평가하지 않았던 한계가 존재하였다. 따라서 본 연구는 사회, 경제, 환경 및 통합적 홍수 취약성으로 다차원적인 평가를 위해 평가지표를 사회, 경제, 환경의 3가지 요소로 나누어 분류하였다. 동시에 지표는 IPCC의 취약성 개념에 따라 노출, 민감도, 적응역량을 따라 분류하였다. 결과적으로 각 사회, 경제, 환경 요소 내에서 노출, 민감도, 적응역량 지표를 모두 포함하는 구조를 가지도록 구성하였다.

먼저 사회적 요소는 지역 내에서 생활하는 인구와 그 일상을 영위할 수 있도록 하는 사회 시스템과 관련이 있는 지표로 구성하였다. 인구 및 가구와 관련된 지표, 사회 기반시설과 공무원 등의 지표가 사회 요소에 속한다. 노출 지표에서는 홍수로 인해 영향을 받을 수 있는 대상으로 인구밀도와 교통시설, 사회기반시설을 포함하였다. 민감도 지표에서는 홍수로 인해 더 민감한 영향을 받을 수 있는 대상으로, 본 연구에서 가장 관심을 가지고 있는 반 지하 가구가 포함된다. 그 외에 1인 가구와 고령 인구, 아동 인가로 구성하였다. 적응역량에서는 홍수에 대비하여 피해를 방지하거나 피해 없이 결과에 대처할 수 있도록 작용하는 지표 중 인구당 공무원 비율과 대피 시설, 의료기관을 포함하였다.

경제적 요소는 홍수 발생 시 영향을 받을 수 있는 경제적인 활동 및 역량, 관련된 계층 등의 지표로 구성하였다. 노출 지표로는 상업·공업·주거지역 면적의 비율을 포함하였다. 민감도 지표로는 저소득층과 교육수준을 그리고 적응역량으로는 평균공시지가를 구성하였다.

환경적 요소는 기후 관련 지표를 포함하는 자연조건과 홍수와 연관이 있는 지역의 지리적, 물리적 조건 등으로 구성하였다. 노출 지표로는 기후 조건인 일 최대강수량과 일 강수량이 80 mm 이상인 날을 포함한다. 민감도 지표로는 자연재해위험지구, 산사태취약지역, 수변지역, 평균경사, 불투수면적률, 침수예상면적을 포함하고, 적응역량에는 공원녹지와 빗물관리시설을 포함하여 구성하였다.

3.2. 반지하 가구 선정

반지하 관련 자료는 현재 시군구 자료 또는 2010년 기준 인구총조사 전수 행정동 자료만 공개되어 있다. 본 연구는 현재를 기준으로 더욱 상세한 평가를 위해 직접 주거용도 반지하 가구를 선정하였다. 선정방법은 Seoul Institute (2022)에서 사용한 기준을 활용하였다. 현재 주거 용도로 사용되는 반지하 가구에 대해 단독주택(단독, 다가구, 다중) 및 공동주택(다세대주택) 중 건축물 해당 층이 건축물대장 층별개요에서 지하로 등재된 경우만을 반지하 및 지하 주택으로 선정하였다. 주택 호수 선정은 단독주택(단독, 다가구, 다중)은 1호로, 공동주택에 해당하는 다세대주택은 거주 가능 세대수로 선정하였다. 건축물대장의 ‘층별 개요’와 서울 열린데이터광장의 자료를 활용하여 선정 후 공간자료로 변환하였다.

서울시의 주거용도 반지하는 주소가 불명확한 곳을 제외하고 191,850호, 총 205,892가구로 나타났다. Fig. 2는



Fig. 2. Semi-basement household of Seoul

서울시 행정동별 반지하 가구 수를 나타낸 것이다. 서대문구 연희동이 2,010가구로 가장 많은 주거용 반지하 주택이 위치하며 그 뒤로 강북구 송천동(1,893가구), 성북구 석관동(1,883가구), 강북구 송중동(1,816가구), 중랑구 면목본동(1,693가구) 순으로 많은 반지하가 위치한다.

3.3. 취약성 평가 방법

홍수 취약성 평가 절차는 선정된 지표의 자료 가공 및 표준화 후 취약성 함수식을 적용하는 순서로 진행된다. 표준화 과정을 수행하고 통합적인 취약성을 산정하는 방식은 취약성 평가 시 활발히 활용되고 있다(Myeong et al., 2010; Salazar-Briones et al., 2020). 사회, 경제, 환경 부문의 취약성을 먼저 산정한 후에 통합 홍수 취약성을 도출한다. 취약성 도출 후 표준화 과정을 한 번 더 거쳐 평가와 비교에 용이하도록 하였다. 평가지표의 원자료는 모두 다른 크기와 단위를 가지 때문에 각 지표를 같은 차원으로 변환하는 표준화 과정이 필요하다. 순위를 매기거나 Z-스코어를 이용하는 방법, 표준편차를 이용하는 방법 등 다양한 방법이 존재하지만 본 연구에서는 지표의 범위에 기반한 스케일 재조정 방법을 사용하였다. 수식 (1)과 같이 지표의 최댓값(x_{max})에서 최솟값(x_{min})을 뺀 값으로 원 자료값(x_i)에서 최솟값(x_{min})을 뺀 값을 나누어 구한다. 표준화된 지표들은 모두 0에서 1 사이의 범위를 갖게 된다.

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

표준화 과정을 거친 후에는 지표를 부문별로 취합하여 취약성을 평가한다. 사회-노출, 사회-민감도, 사회-적응과 같이 하위부문에 속하는 자료를 합산 후 다시 표준화 과정을 진행하여 사회, 경제, 환경 요소별 취약성을 산정한다. 이후 통합 홍수 취약성은 세 요소를 모두 합산하여 도출하였다.

취약성을 산정하는 과정에서 노출, 민감도, 적응역량을 어떠한 함수식을 사용할지에 대해서 연구의 목적과 주제별로 다양한 방법들이 적용되고 있다. 취약성의 함수식은 노출과 민감도는 취약성을 증가시키고, 적응역량은 취약성을 감소시키는 개념을 바탕으로 자주 사용되는 몇 가지 식이 존재한다. 노출과 민감도를 더하고 적응역량을 빼는 방법, 노출과 민감도를 곱해서 적응역량으로 나누는 방법

등이 있다. 이때 적응역량을 반대의 개념인 적응역량의 부족으로 사용하고 계산 시에도 반대로 적용할 수도 있다. 이 외에도 다양한 방법들을 사용할 수 있지만 본 연구에서는 Myeong et al. (2010), Balica and Wright (2010), Erena and Worku (2019)에서 사용된 바와 같이 가장 널리 사용되고 있는 아래의 함수식 (2)를 사용하였다.

$$\text{취약성} = \text{노출} + \text{민감도} - \text{적응역량} \quad (2)$$

또한, 지표별 가중치를 산정하고 적용하여 지표의 중요도를 다르게 평가하기도 한다. 하지만 홍수 취약성의 경우 세 지표가 같은 가중치를 가졌을 때 합리적인 취약성 평가가 가능하다(Erena and Worku, 2019; Lee and Choi, 2018; Salazar-Briones et al., 2020). 따라서 노출, 민감도, 적응역량이 모두 같은 중요도를 가지는 것으로 판단하여 가중치는 설정하지 않았다.

4. 홍수 취약성 평가

4.1. 평가 결과

본 연구는 서울특별시의 홍수 취약성 평가에 반지하 가구와 홍수피해의 다차원성을 고려하였다. 사회적, 경제적, 환경적 홍수 취약성을 평가하고 이후 세 차원의 값을 모두 합산한 통합 홍수 취약성을 평가하였다. 0 이상 1 이하의 값으로 도출된 취약성 점수는 Erena and Worku (2019), Munyai et al. (2019) 등의 연구에서 사용된 Balica et al. (2013)의 방법으로 분류하였다(Table 2). ‘매우 낮음’에서 ‘매우 높음’ 등급으로 갈수록 홍수 취약성은 증가하게 된다. 동시에 홍수 발생 이후 부정적인 영향을 받을 가능성이 커지며, 피해 복구 능력은 반대로 점차 낮아져 피해 이전으로 돌아가기까지 많은 시간이 소요된다.

Table 2. Flood vulnerability classes

Index value range	Vulnerability classes
< 0.01	very low
0.01 - 0.25	low
0.25 - 0.50	medium
0.50 - 0.75	high
0.75 - 1.00	very high

Balica et al. (2013)

4.1.1. 사회적 홍수 취약성

사회적 홍수 취약성의 경우 성동구 용답동, 영등포구 대림2동, 구로구 가리봉동, 은평구 응암3동, 영등포구 대림1동 순으로 가장 높은 값을 보였다(Table 3). 서초구, 강남구 부근은 낮은 취약성 값을 보인 반면 서남부와 동북부 지역에 0.75 이상의 ‘매우 높음’ 취약성 등급을 갖는 행정동이 다수 나타났다(Fig. 3). 취약성 ‘높음’ 등급의 행정동은 265개, 매우 높음은 112개 동으로 서울특별시 행정동의 약 89%가 사회적으로 홍수 취약한 상태인 것으로 나타났다. 더불어 네 부문의 취약성 중 사회적 홍수 취약성에서 ‘매우 높음’ 등급을 가지는 행정동의 수가 가장 많은 것으로 나타났다. 이는 다른 부문에 비해 홍수가 발생했을 때 생활인구와 사회 시스템이 피해를 입을 가능성이 큼을 의미한다. 취약성 ‘높음’ 등급 이상의 지역은 높은 반지하 가구 비율, 1인 가구 비율과 함께 인구밀도, 고령인구, 교통시설 지표가 큰 값을 보이며 주로 취약한 것으로 나타났다. 반면 홍수피해에 대처할 수 있는 능력인 적응 지표가 낮은 값으로 나타났다.

Table 3. Social FVI top 10 dong

Ranking	Dong	Vulnerability
1	Yongdap-dong, Seongdong-gu	1.00000
2	Daerim 2-dong, Yeongdeungpo-gu	0.96270
3	Garibong-dong, Guro-gu	0.93312
4	Eungam 3-dong, Eunpyeong-gu	0.91898
5	Daerim 1-dong, Yeongdeungpo-gu	0.90816
6	Songcheon-dong, Gangbuk-gu	0.89481
7	Noryangjin 2-dong, Dongjak-gu	0.89477
8	Guro 4-dong, Guro-gu	0.88874
9	Singil 5-dong, Yeongdeungpo-gu	0.88830
10	Banghak 1-dong, Dobong-gu	0.88447

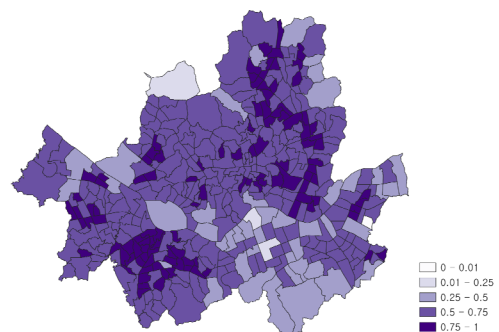


Fig. 3. Social FVI of Seoul

4.1.2. 경제적 홍수 취약성

경제적 홍수 취약성의 경우 강북구 번3동, 구로구 가리봉동, 강북구 번2동, 종로구 창신2동, 양천구 신월1동 순으로 높은 값을 보였다(Table 4). 공간적 분포는 사회적 취약성과 유사한 양상을 보였다(Fig. 4). 서울시 서남부와 동북부 지역에 ‘매우 높음’ 취약성 등급의 행정동이 다수 보였으며 서초구, 강남구 부근은 취약성 ‘낮음’ 등급을 보였다. 취약성 ‘높음’ 등급의 행정동은 231개, ‘매우 높음’은 72개 동으로 서울특별시 행정동의 약 71%가 경제적으로 홍수에 취약한 상태인 것으로 나타났다. 이는 홍수로 인해 영향을 받을 수 있는 경제적인 활동 및 역량, 관련된 계층의 비율이 높다는 것을 의미한다. 더불어 취약성 ‘높음’ 등급 이상의 지역은 주거지역 비율, 교육수준, 저소득층 지표가 큰 값을 보이며 주로 취약한 것으로 나타났다.

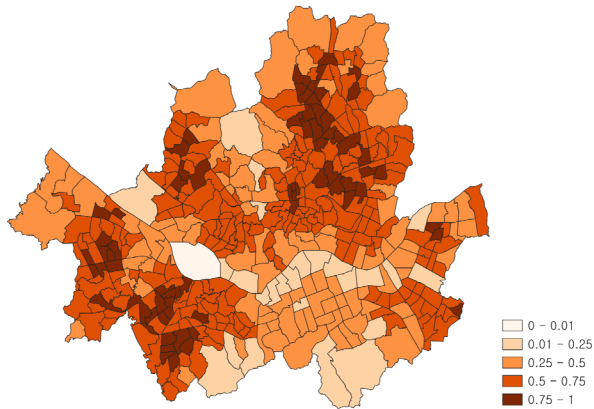


Fig. 4. Economic FVI of Seoul

Table 4. Economic FVI top 10 district

Ranking	Dong	Vulnerability
1	Beon 3-dong, Gangbuk-gu	1.00000
2	Garibong-dong, Guro-gu	0.94760
3	Beon 2-dong, Gangbuk-gu	0.91509
4	Changsin 2-dong, Jongno-gu	0.90735
5	Sinwol 1-dong, Yangcheon-gu	0.90394
6	Jangwi 1-dong, Seongbuk-gu	0.90192
7	Gayang 3-dong, Gangseo-gu	0.89801
8	Junggye 2·3-dong, Nowon-gu	0.89366
9	Doksan 2-dong, Geumcheon-gu	0.89120
10	Daerim 2-dong, Yeongdeungpo-gu	0.87156

4.1.3. 환경적 홍수 취약성

환경적 홍수 취약성의 경우 영등포구 신길6동, 강남구 수서동, 도봉구 방학1동, 동작구 사당1동, 도봉구 쌍문2동 순으로 높은 값을 보였다(Table 5). 환경적 취약성의 공간적 분포는 사회적, 경제적 취약성과는 다른 유형을 보였다(Fig. 5).

서울시 서남부와 동북부 일부 지역에 ‘매우 높음’ 등급의 취약성을 가지는 행정동이 존재할 뿐 아니라 동남권의 서초구, 강남구 일대에도 취약성 ‘매우 높음’ 등급의 행정동이 다수 나타났다. 취약성 ‘높음’ 등급의 행정동은 235개, ‘매우 높음’은 40개 동으로 서울특별시 행정동의 약 65%가 환경적으로 홍수에 취약한 상태인 것으로 나타났다. 이는 홍수와 관련이 있는 자연조건, 지리적, 물리적 조건을 다수 포함하고 있는 것을 의미한다. 따라서 취약성 ‘높음’ 등급 이상의 지역은 일 최대강수량, 일 강수량이

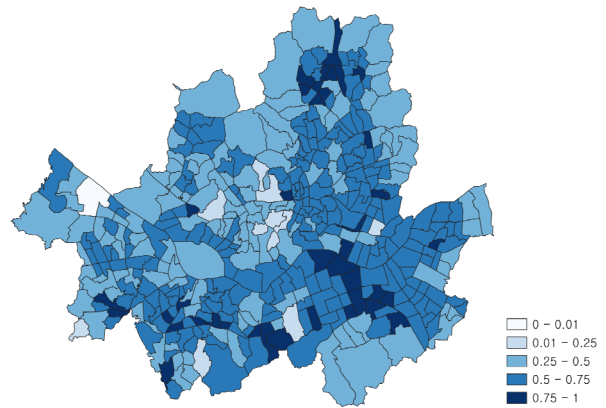


Fig. 5. Environmental FVI of Seoul

Table 5. Environmental FVI top 10 district

Ranking	Dong	Vulnerability
1	Singil 6-dong, Yeongdeungpo-gu	1.00000
2	Suseo-dong, Gangnam-gu	0.96543
3	Banghak 1-dong, Dobong-gu	0.94008
4	Sadang 1-dong, Dongjak-gu	0.89910
5	Ssangmun 2-dong, Dobong-gu	0.87770
6	Irwon 2-dong, Gangnam-gu	0.87013
7	Gaebong 2-dong, Guro-gu	0.86805
8	Jamsil bon-dong, Songpa-gu	0.84777
9	Dobong 2-dong, Dobong-gu	0.83685
10	Sillim-dong, Gwanak-gu	0.82937

80 mm 이상인 날, 불투수면적 지표가 큰 값을 보였으며 적응 지표인 공원녹지면적과 빗물관리시설 지표가 취약한 것으로 나타났다.

4.1.4. 통합 홍수 취약성

마지막으로 서울특별시의 통합 홍수 취약성은 사회, 경제, 환경적 부문 취약성을 합산하여 Fig. 6과 같이 나타났다. 통합 취약성 ‘높음’ 등급의 행정동은 영등포구 대림2동, 도봉구 방학1동, 도봉구 쌍문2동, 영등포구 신길6동, 강북구 수유2동 순으로 나타났다(Table 6). ‘매우 낮음’ 등급의 취약성은 1개 행정동, ‘낮음’ 등급의 취약성은 29개 행정동, 116개 행정동이 ‘중간’ 등급 취약성을 보였다. ‘취약성 높음’ 등급의 행정동은 215개, ‘매우 높음’은 64개 동으로 서울특별시 행정동의 약 66%가 다차원적으로 홍수에 취약한 상태인 것으로 나타났다.

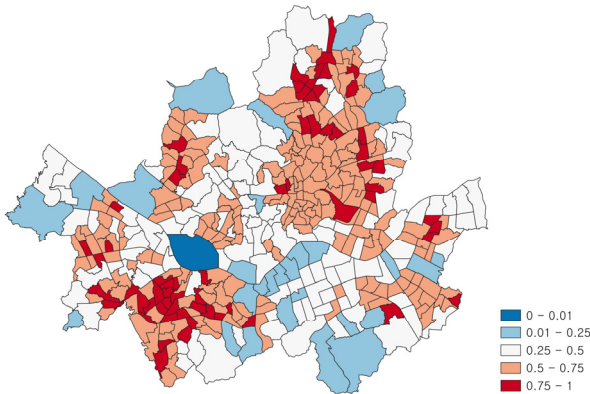


Fig. 6. Integrated FVI of Seoul

Table 6. Integrated FVI top 10 district

Ranking	Dong	Vulnerability
1	Daerim 2-dong, Yeongdeungpo-gu	1.00000
2	Banghak 1-dong, Dobong-gu	0.97123
3	Ssangmun 2-dong, Dobong-gu	0.94235
4	Singil 6-dong, Yeongdeungpo-gu	0.91716
5	Suyu 2-dong, Gangbuk-gu	0.91484
6	Beon 1-dong, Gangbuk-gu	0.90371
7	Songcheon-dong, Gangbuk-gu	0.89248
8	Sinwol 1-dong, Yangcheon-gu	0.88391
9	Ssangmun 3-dong, Dobong-gu	0.88382
10	Eungam 3-dong, Eunpyeong-gu	0.86863

통합 취약성의 공간적 분포는 서남부와 동북권 일대에 매우 높은 등급의 취약성을 가지는 행정동이 위치하였다. 통합 취약성 산정 시 사회, 경제, 환경 부문의 가중치를 동일하게 부여하였기 때문에 환경 부문보다 서로 유사한 결과로 나타난 사회 및 경제 부문의 취약성 결과와 더 비슷한 양상을 보이고 있다.

4.2. 종합적 해석

본 절에서는 사회, 경제, 물리적 홍수 취약성 평가 결과에 대한 해석과 함께 통합 홍수 취약성 결과와 서울특별시 침수흔적도와의 비교로 구성하였다.

사회적 홍수 취약성이 높게 나타난 행정동은 홍수로 인해 생활인구와 사회 시스템이 피해를 입을 가능성이 크다는 것을 의미한다. 인구가 밀집한 지역, 교통시설이 밀집한 지역은 다른 지역에 비해 피해를 입을 대상의 밀도가 높아 취약성이 높게 나타났다고 볼 수 있다. 고령인구가 많은 지역, 반지하 등 주거환경이 열악한 지역에서 취약성이 높게 나타나 관련 도시계획 정책 마련과 폭우, 홍수 상황 시 신속한 대응이 필요하다.

경제적 홍수 취약성이 높게 나타난 행정동은 홍수로 인해 영향을 받을 수 있는 경제적인 활동 및 역량, 관련된 계층의 비율이 높다는 것을 의미한다. 특히 취약성이 높게 나타난 지역에서 교육수준 지표가 높은 것은 고학력자의 비율이 낮다는 것을 나타내며, 해당 지역은 홍수의 위험성, 침수 시 대응 정보 및 지식의 인식과 이해도가 낮을 수 있다. 저소득층 지표가 높게 나타난 것은 재정적으로 취약한 주민의 비율이 높다는 것을 의미한다. 이러한 지역은 충분한 지원체계가 존재하지 않는다면 침수 피해 발생 시 재건과 복구가 어려울 수 있어 침수로부터 더 장기적인 어려움을 겪을 수 있다.

물리적 홍수 취약성이 높게 나타난 행정동은 홍수와 관련이 있는 자연 및 물리적 조건을 다수 포함하고 있는 것을 의미한다. 취약성이 높게 나타난 지역에는 일 최대강수량, 일 강수량이 80 mm 이상인 날, 불투수면적의 비율이 높음을 알 수 있다. 큰비가 집중적으로 내리는 날이 많은 지역에서 우수를 흡수하지 못하는 지표면 면적 비율이 높다면 효율적인 배수 체계를 구축하여 대비해야 하며, 강우량 예측 및 실시간 침수 모니터링 등 대응 시스템을 구축하여야 한다.

침수흔적도는 태풍, 호우, 해일(지진해일 포함) 등으로 침수 피해가 발생한 지역에 대하여 침수 흔적 조사 및 측

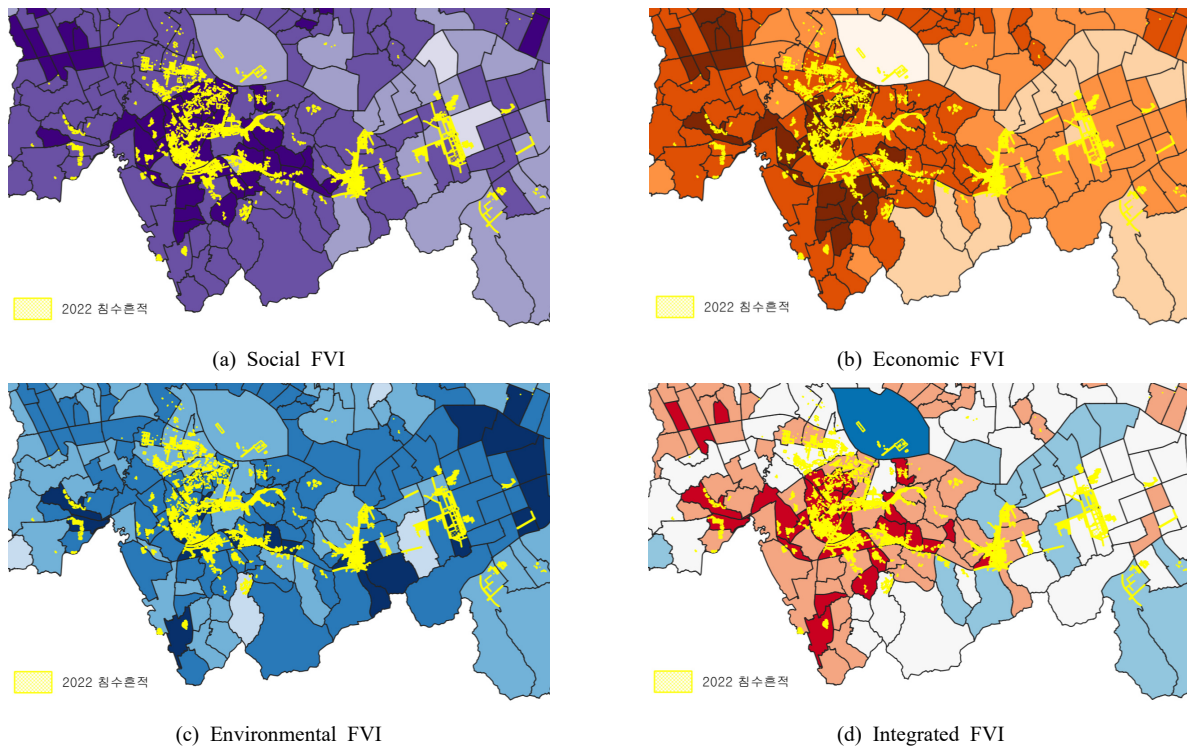


Fig. 7. FVI and inundation flood map

량을 시행하고 침수구역에 대한 침수위, 침수심, 침수시간 등을 조사하여 연속지적도 및 수치지형도 등에 표시한 지도이다(MOIS, 2021). 서울특별시의 침수흔적도는 서울 열린데이터광장에서 내려받을 수 있다. 취약성과의 비교에는 최근 자료인 2022년의 침수흔적도를 사용하였으며, 피해 건수가 많고 인명 피해가 발생했던 영등포구, 동작구, 관악구, 서초구, 강남구를 위주로 나타내었다.

사회, 경제, 환경 그리고 통합 홍수 취약성 결과와 침수 흔적도를 중첩한 Fig. 7을 참조하였을 때, 침수 피해를 겪은 행정동 모두에서 높은 취약성 등급을 보이지는 않음을 볼 수 있다. 행정동별 취약성 점수와 2022년 행정동별 침수 흔적 면적 간의 상관관계도 모든 취약성에서 낮을 보이는 관계임을 볼 수 있다(Table 7 참조).

취약성은 위해에 대해 부정적인 영향을 받기 쉬운 성향이나 경향으로 피해의 발생 가능성과는 다른 개념이다. 따라서 이처럼 취약성과 실제 피해에 대한 상관관계가 낮거나 없는 것은 또 다른 해석으로 연결될 수 있다.

침수 흔적이 있었던 지역을 중심으로 통합 홍수 취약성이 낮은 지역과 높은 지역을 나눠 비교해보고자 한다(Fig. 7). 먼저 침수 피해를 겪었지만, 취약성은 낮게 나타난 행

Table 7. Correlation between flood vulnerability and flood trace

	Social FVI	Economic FVI	Environment FVI	Integrated FVI
Flood trace	-0.033	-0.128	0.168	-0.003

정동은 침수에 대해 부정적인 영향을 받을 가능성이 낮은 상태에서 피해가 발생한 지역이다. 이 경우 다른 지역과 비교해 침수로 인해 더해지는 부정적 영향이 비교적 적고 대처능력이 뛰어난 지역으로 볼 수 있다. 이러한 지역은 투수성 면적을 늘리고, 배수관로의 용량을 증대시키는 등 침수가 발생할 가능성을 줄이는 방안의 정책을 시행하여야 한다. 반대로 침수 피해도 겪고 취약성도 높게 나타난 행정동은 이미 침수에 대해 부정적인 영향을 받을 가능성이 큰 상태에서 피해가 발생한 경우이다. 이러한 행정동은 침수로 인한 부정적 영향을 비교적 더 많이, 심각하게 받게 되고 대처능력 또한 부족하여 재산적 피해와 인명 피해까지 발생할 가능성이 큰 지역으로 볼 수 있다. 이러한 상황은 기후변화와 그로 인해 발생하는 극한 호우로

인해 더욱 악화할 수 있다. 앞선 침수 발생 가능성 감소 정책뿐 아니라 행정동별 취약 부문에 대한 선제적이고 적극적인 지원과 대책이 필요하다.

5. 결론

본 연구는 서울특별시의 반지하 가구를 고려한 다차원적이고 행정동 단위의 상세한 홍수 취약성을 평가하고자 하였다. 평가지표는 선행연구를 기반으로 사회, 경제, 환경 요소 구분되며 각 요소 내에서 노출, 민감도, 적응역량으로 구성되는 총 26개의 지표를 선정하였다. 취약성 평가는 요소별 취약성을 각각 산정하고 평가한 후 세 부문의 값을 모두 합산한 통합 홍수 취약성을 평가하였고 평가 결과와 침수흔적도를 비교하며 해석하였다.

점차 심각해지고 있는 서울시의 침수 피해와 더불어 사회, 경제적으로 취약한 반지하 주거 가구에 대한 현황 파악의 필요성에 따라 반지하 가구를 고려한 홍수 취약성을 평가하였다. 건축물대장을 바탕으로 서울시 내의 주거 용도 반지하 가구를 행정동 단위로 산출하고 분포를 알아보았으며 홍수 취약성의 지표로 포함하여 평가하였다. 이를 통해 기존의 홍수 취약성 연구보다 상세하고 현실적인 접근이 가능했다. 특히 반지하 지표가 포함된 사회적 취약성이 높은 지역에서 반지하가 주된 취약 변수 중 하나로 나타난 점에서 이러한 점이 강조되었다. 따라서 본 연구에서 접근한 홍수 취약성 평가가 더욱 의의를 가진다.

평가 결과 모든 취약성 부문에서 다수의 행정동의 취약성 결과가 높게 나타났다. 특히 사회적 홍수 취약성은 네 부문의 취약성 중 ‘매우 높음’ 등급을 가지는 행정동의 수가 가장 많아 홍수가 발생했을 때 생활인구와 사회 시스템의 피해를 입을 가능성이 큰 것으로 평가되었다. 서남부와 동북부 지역에 ‘매우 높음’ 취약성 등급의 결과가 나타났다. 또한, 취약성 ‘높음’ 등급 이상의 지역에서 반지하 가구 비율이 주로 취약한 변수 중 하나인 것으로 나타나 해당 지역의 더욱 적극적인 반지하 침수 대책의 필요성이 대두되었다. 경제적 취약성에서는 전체 행정동의 약 71%가 홍수에 취약한 상태인 것으로 나타났으며 사회적 취약성과 유사한 양상으로 서남부와 동북부 지역에 ‘매우 높음’ 취약성 등급의 행정동이 다수 나타났다. 경제적 취약성 ‘높음’ 등급 이상의 지역은 주거지역 비율, 교육수준, 저소득층 지표가 큰 값을 보이며 주로 취약한 것으로 나타났다. 환경적 취약성은 65%가 경제적으로 홍수에 취약한 상태인 것으로 나타났고, 서남부와 동북부 일부 지역,

동남권의 서초구, 강남구 일대의 취약성이 매우 높게 나타났다. 이 지역은 일 최대강수량, 일 강수량이 80 mm 이상인 날, 불투수면적 지표가 큰 값을 보이며 주로 취약한 것으로 나타났다. 통합 취약성에서는 전체 행정동의 약 66%가 홍수에 취약한 상태이며 서남부와 동북권 일대의 취약성이 매우 높은 결과를 보였다.

이와 같은 결과는 취약한 부문에 대해 특화된 대응 방안으로 취약성을 감소시키고 홍수 발생 시 피해를 줄이는 등 지역별로 차별화된 홍수 대응과 정책의 우선순위 결정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 더불어 최근 피해가 크고 사회적 이슈로 제기된 서울특별시의 반지하 가구를 파악하고 이 지표가 사회적 홍수 취약성과 관련이 있다는 것을 보여 반지하 피해 저감을 위한 정책 수립을 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

연구의 한계는 다음과 같다. 행정동 단위의 평가로 세밀한 취약성 평가를 제시하였지만, 동시에 평가 단위로 구성된 자료의 한계로 인해 적용할 수 없는 지표들이 다수 존재하였다. 특히 이러한 자료는 재정자립도, 홍수 복구금액, 배수펌프장, 우수지 면적 및 용량, 하천 개수율 등 각 부문의 적응역량을 구성하는 지표에서 다수 발견되어 취약성을 구성하는 노출, 민감도, 적응역량의 지표의 비중이 동일하게 반영되지 않았다. 차후 연구에서는 적응 능력의 비중을 충분히 포함하여 이러한 한계를 보완하고자 한다. 본 연구는 세부 공간 단위 규모와 함께 홍수 취약성과 피해의 다차원성을 모두 고려하는 다차원적인 평가가 가능한 지표와 평가 방법을 제안하였고, 이는 개선된 홍수 취약성 지표로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 미래 기후 요소를 추가하여 기후변화를 고려한 홍수 취약성을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2022-00143404).

References

- Balica S, Wright NG. 2010. Reducing the complexity of the flood vulnerability index. *Environ Hazards* 9(4): 321-339. doi: 10.3763/ehaz.2010.0043
- Balica SF. 2007. Development and application of flood

- vulnerability indices for various spatial scales [dissertation]. IHE Delft Institute for Water Education.
- Balica SF, Popescu I, Beevers L, Wright NG. 2013. Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: A comparison. *Environ Model Softw* 41: 84-92. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.11.002
- Cardona OD. 2013. The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management. In: Bankoff G, Frerks G, Hilhorst D (eds). *Mapping vulnerability*. London: Routledge. p. 37-51.
- Erena SH, Worku H. 2019. Urban flood vulnerability assessments: The case of Dire Dawa city, Ethiopia. *Nat Hazards* 97(2): 495-516. doi: 10.1007/s11069-019-03654-9
- Ferrari S, Oliveira S, Pautasso G, Zêzere JL. 2019. Territorial resilience and flood vulnerability. Case studies at urban scale in Torino (Italy) and Porto/Vila Nova de Gaia (Portugal). In: Brunetta G, Caldarice O, Tollin N, Rosas-Casals M, Morató J (eds). *Urban resilience for risk and adaptation governance: Theory and practice*. Cham: Springer. p. 147-174. doi: 10.1007/978-3-319-76944-8_10
- Fuchs S, Birkmann J, Glade T. 2012. Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: Current approaches and future challenges. *Nat Hazards* 64: 1969-1975. doi: 10.1007/s11069-012-0352-9
- Ha MJ. 2022. Legal and institutional review for guaranteeing the housing rights of the housing vulnerable groups - Focusing on housing support measures for the housing vulnerable groups such as semi-basement households at risk of flooding - (in Korean with English abstract). *Ilkam Real Estate L Rev* 25: 183-233. doi: 10.35148/ILSIRE.2022..25.183
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2015. *Climate change 2014: Mitigation of climate change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781107415416
- Kim MK, Choi YH, Jang J. 2023. Analysis of residential environment issues in semi-underground housing for future tasks: Application of LDA topic modeling (in Korean with English abstract). *J Korea Urban Regen Assoc* 9(2): 99-115. doi: 10.23214/KURA.2023.9.2.005
- Lee JS, Choi HI. 2018. Comparison of flood vulnerability assessment outcomes by classification schemes for vulnerability components to climate change (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 18(3): 221-229. doi: 10.9798/KOSHAM.2018.18.3.221
- Lee S, Choi Y, Yi J. 2020. Urban flood vulnerability assessment using the entropy weight method (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 20(6): 389-397. doi: 10.9798/KOSHAM.2020.20.6.389
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety). 2021. *Guidelines on the criteria for preparing disaster maps. etc.* Sejong, Korea: Author. MOIS Notice No. 2021-89.
- Munyai RB, Musyoki A, Nethengwe NS. 2019. An assessment of flood vulnerability and adaptation: A case study of Hamutsha-Muongamunwe village, Makhado municipality. *Jamba: J Disaster Risk Stud* 11(2): a692. doi: 10.4102/jamba.v11i2.692
- Myeong S, Kim J, Shin S, Ahn B. 2010. Assessing vulnerability to climate change of the physical infrastructure and developing adaptation measures in Korea II (in Korean with English abstract). Seoul, Korea: Korea Environmental Institute. *Green Growth Research* 2010-13.
- Nasiri H, Mohd Yusof MJ, Mohammad Ali TA. 2016. An overview to flood vulnerability assessment methods. *Sustain Water Resour Manag* 2: 331-336. doi: 10.1007/s40899-016-0051-x
- Pelling M. 2003. *The vulnerability of cities: Natural disasters and social resilience*. London: Earthscan.

- Salazar-Briones C, Ruiz-Gibert JM, Lomelí-Banda MA, Mungaray-Moctezuma A. 2020. An integrated urban flood vulnerability index for sustainable planning in arid zones of developing countries. *Water* 12(2): 608. doi: 10.3390/w12020608
- Seoul Institute. 2022. How many semi-basement houses are there in Seoul; [accessed 2018 Sep 13]. <https://www.si.re.kr/node/66309>
- Shin H, Choi Y, Yi J. 2019. Analysis of the local characteristics of flood damage vulnerability in an urban area: The Han River basin (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Hazard Mitig* 19(5): 293-303. doi: 10.9798/KOSHAM.2019.19.5.293
- UNDP (United Nations Development Programme). 2004. *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies and measures*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Veenstra J. 2013. Flood vulnerability assessment on a commune level in Vietnam. Bachelor thesis about the application of a flood vulnerability assessment to communes of the Ca river basin in Nghe An province in Vietnam [dissertation]. University of Twente.