

# 도시 홍수 취약성의 공간적 분포

- 서울 지역을 중심으로 -

김지수\* · 성효현\*\* · 최광용\*\*\*

## Spatial Patterns of Urban Flood Vulnerability in Seoul

Kim, Jisoo\* · Sung, Hyo Hyun\*\* · Choi, Gwangyong\*\*\*

**요약** : 본 연구는 최근 5년간(2006~2010) 서울시 행정동 단위별로 도시 홍수를 유발하는 기후요인, 홍수에 노출된 정도를 나타내는 민감도, 홍수피해를 저감하는 능력을 나타내는 적응도 요소들을 종합한 서울 도심지역의 홍수 취약도 지수의 공간적 분포 특성을 밝히고자 하였다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 취약성 모델에 기반을 둔 상관성 분석 결과 서울 도심의 홍수피해 건수는 여러 홍수취약성 관련 변수 중 빗물저류조 용량, 1일 최대강수량, 빗물펌프장 토출량 등과 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 서울 도심지역의 홍수 취약도 공간분포도를 분석한 결과 안양천과 중랑천 등 도심하천 주변의 광범위한 행정동 지역에서는 공통적으로 높은 민감도가 홍수 취약도를 높이는 주요 요인임을 알 수 있었다. 특히, 중랑천 주변지역은 높은 민감도 이외에도 높은 기후요인에 의해 홍수 취약도가 높게 나타남을 알 수 있다. 국지적으로 홍수 취약성이 높게 나타난 강동구와 송파구 일부 행정동 지역에서는 적응도가 낮아 홍수 취약도가 높게 나타났고, 강남구 일부 행정동 지역에서는 극한강수현상과 같은 기후요인과 민감도가 높아 홍수 취약도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이러한 고해상도 행정구역인 행정동 단위에서 도출된 홍수 취약성 분포도는 도심 내부의 지역별 적합한 홍수 대응, 관리 및 예방 정책을 수립하는 데 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

**주요어** : 홍수 취약성, 민감도, 적응도, 극한강수현상, 서울

**Abstract** : In this study, spatial patterns of the urban flood vulnerability index in Seoul are examined by considering climate exposure, sensitivity, and adaptability associated with floodings for recent 5 year (2006~2010) period by the smallest administrative unit called Dong. According to the results of correlation analyses based on the IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)'s vulnerability model, among many variables associated with urban flooding, rainwater tank capacity, 1-day maximum precipitation and flood pumping station capacity have statistically-significant, and relatively-high correlations with the number of flood damage in Seoul. The flood vulnerability map demonstrates that the extensive areas along Anyang and Joongnang streams show relatively high flood vulnerability in Seoul due to high sensitivity. Especially in case of Joongnang stream areas, climatic factors also contribute to the increase of flood vulnerability. At local scales, several Dong areas in Gangdong-gu and Songpa-gu also show high flood vulnerability due to low adaptability, while those in Gangnam-gu do due to high sensibility and climate factor such as extreme rainfall events. These results derived from the flood vulnerability map by Dong unit can be utilized as primary data in establishing the adaptation, management and proactive policies for flooding prevention within the urban areas in more detail.

**Key Words** : flood vulnerability, sensitivity, adaptability, extreme rainfall events, Seoul

### 1. 서론

우리나라는 예로부터 여러 자연재해 중 집중강우에 의한 홍수가 가장 많은 피해를 유발하는 것으로 알려져 있다. 특히 주거, 상업시설, 사회기반

시설 등이 밀집된 도시지역에서 홍수가 발생할 경우 인적 및 물적 피해는 더욱 급증하는 양상을 보인다. 실제 우리나라의 경우 전체 인구의 70%가 도시지역에 거주하고 있으며, 생활공간 확산 및 밀집화, 지하공간의 증대 등의 고밀도 개발로 홍

\* 이화여자대학교 지리학전공 박사과정(Ph.D Student, Department of Social Studies Education, Ewha Womans University)(jisoo.kim01@gmail.com)

\*\* 이화여자대학교 사회과교육과 교수(Professor, Department of Social Studies Education, Ewha Womans University)(hhsung@ewha.ac.kr)

\*\*\* 제주대학교 지리교육전공 조교수(Assistant Professor, Major of Geography Education, Jeju National University)(tribute@hanmail.net)

수로 인한 도시의 재해 취약성이 더욱 높아지고 있다(최충익, 2003; 김우구, 2005; 한건연·김지성, 2005; 김보경 등, 2011; 윤선권, 2012). 특히 우리나라의 경우 인구의 1/4 이상이 밀집한 서울을 포함한 수도권 지역에서는 최근 기후변화로 인하여 극한강수현상의 강도가 증가하고 있다(Choi *et al.*, 2008). 도시 지역의 홍수피해는 일차적인 극한강수현상 이외에도 지형 지세와 관련된 자연적 요소, 인구밀도, 토지이용 등의 인문적 요소들과도 밀접한 관련성이 있다. 기존의 연구에서는 홍수 취약도 평가 요소로서 자연환경적 요인을 배제하거나 사회경제적 요인을 배제하여 도시지역이 지닌 특성을 제대로 반영하지 못한 바 있다(장옥재·김영오, 2009; 서울특별시, 2011; 강정은·이명진, 2012). 즉, 집중강수에 따른 홍수피해 저감 전략수립의 기초자료로서 도시 홍수 취약성에 대한 인문적·자연적 요소 등을 종합적으로 고려한 연구결과가 시급하다고 할 수 있다.

최근 2000년대 중후반부터 시작된 일부 연구들(최충익, 2003; 박석근, 2006; 장옥재·김영오, 2009; 김태형 등, 2011; 손민우 등, 2011; 윤선권, 2012)은 중규모 이상의 유역단위, 시군구 단위에서 홍수 취약성을 평가한 바 있다. 그러나 이러한 공간단위는 강수의 국지성을 고려할 때 집중호우에 의한 도시 내 홍수 재해의 분석을 위한 공간적 범위로는 너무 넓어 제공되는 정보에 한계가 있다(Kubal *et al.*, 2009; 서울특별시, 2011). 일부 선행 연구들(박석근, 2006; 이동률 등, 2009; 임광섭 등, 2010; 서울특별시, 2011; 윤선권, 2012)에서는 도심 홍수 취약성을 정량적으로 평가할 수 있는 모형을 구축하였으나 평가결과의 해석 이전에 개발한 모형에 대한 양적 또는 질적 검증이 부재하여 모형에 대한 신뢰도가 불확실한 실정이다. 10년 이상 장기간의 시간적 범위에서 취득이 이뤄진 데이터를 바탕으로 취약도 모형이 구축된 바 있으나 이때 사용된 자료들 간의 기간에 있어 편차가 매우 크고 상이하여 데이터의 대표성에 대한 문제가 내포되었다(유가영·김인애, 2008; 고재경, 2009).

홍수 취약성에 대한 해외 사례연구로는 유역 홍수 취약성 평가 연구(Peck *et al.*, 2007), 사회적 취약성 지표를 토대로 한 재해 관련 긴급지원 연

구(Chakraborty *et al.*, 2005), 취약성의 평가방법론 개발 사례연구(Flax *et al.*, 2002)를 들 수 있다. Peck *et al.*(2007)은 자연환경적, 경제적, 사회적, 사회기반시설적 취약성의 네 가지 요인으로부터 홍수 취약성을 도출하였으나 분석 결과의 검증은 밝히지 않았다. Chakraborty *et al.*(2005)은 홍수 재해를 분석하는 데 있어서 홍수발생확률과 사회적 취약성을 고려하였으며 특히 인구조적 특성의 중요성을 논의하였으나 모형의 검증은 이뤄지지 않았다. Flax *et al.*(2002)의 재해 취약성 평가모형의 경우 병원, 소방서, 대피소와 상수도, 교통, 통신 관련 도시설비 등 중요시설의 물리적 취약성 및 재해로부터의 영향을 추정했다는 점에서 의의를 지닌다.

본 연구에서는 서울시를 중심으로 행정동 단위에서 도시 홍수 취약성의 공간적 분포 특징을 밝히는 것을 주요 목적으로 한다. 이를 위해 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001)의 취약성 개념적 틀을 토대로 행정동 단위별 홍수와 관련된 기후요인, 민감도, 적응도 변수로부터 홍수 취약도 모형을 도출하였다. 그 후 과거 홍수피해 자료와의 비교를 통해 취약성을 정량화한 취약도 모형이 실제 취약지역을 제대로 나타내는지 신뢰성을 검증하였다. 이와 같이 검증된 모형에서 산출된 결과를 토대로 서울시의 동별 기후요인, 민감도, 적응도와 이를 총괄한 홍수 취약도 지수의 공간적 분포를 분석하였다.

## 2. 연구 자료 및 방법

### 1) IPCC의 취약성 개념에 근거한 대표변수 자료 구축

본 연구에서는 서울시 동별 홍수 취약도를 산정 및 분석하기 위해 IPCC(2001)가 정의하여 널리 사용되고 있는 취약성을 개념적 틀로 적용하여 홍수 위험 분석의 일부로서 취약성 분석을 수행하였다. 과거에 취약성 개념은 식량안보, 자연재해 및 재난 연구 분야에서 주로 사용되었고 최근에는 자연재해, 재난 및 위험의 관리와 평가, 공중보건, 기후변화 등 다양한 영역에까지 확대되어 사용되고 있다(UNDP, 2004). 특히, IPCC(2001)의 취약성 개념은 자연환경적 측면과 사회·경제적 측면

을 동시에 포함하고 있어 홍수 취약성의 정량적 분석 시 자연적 요인과 인문적 요인을 모두 고려하려는 본 연구의 목적에 적합하다. IPCC(2001)에서 제시한 자연재해의 취약성 개념은 크게 기후요인, 민감도, 적응도 등 세 가지 요소의 결합으로 이루어진다. IPCC(2001)에 따르면 특정 지역이 지닌 홍수 취약성은 그 지역에 가해지고 있는 기후요인과 홍수피해에 노출된 정도인 민감도로 구성된 홍수피해의 잠재적 영향에서 이를 낮추는 지역의 대처 능력으로서의 적응도를 상쇄한 개념이다(식 1).

$$\text{홍수취약도} = f(\text{기후요인}, \text{민감도}, \text{적응도}) \quad (1)$$

세 가지 요소 중 첫째, 기후요인은 홍수피해를 일으키는 외부자극을 의미한다. 둘째, 민감도는 그러한 외부자극에 시스템이 영향을 받는 정도를 말한다. 셋째, 적응도는 시스템이 피해를 완화하고 주어진 기회를 활용하여 결과에 대처하는 정도를 가리킨다.

본 연구에서는 IPCC(2001)에서 제시한 기후요인, 민감도, 적응도를 종합적으로 고려한 취약성 개념에 근거하여 각 구성요소별 대표변수 자료를

구축하였다. 우선, 홍수 취약성 평가를 위한 대표변수의 선정에 있어 기후요인, 민감도, 적응도 지표들 중심으로 시공간적으로 취득 가능한 범위에서 행정동 단위의 데이터와 홍수피해 자료를 수집하였다. 이때 홍수를 유발하는 기후요인으로 평균적인 기후특성과 극한기후현상의 빈도, 크기를 반영하는 변수를 포함하였다. 민감도는 기후요인에 노출되어 피해에 민감한 정도 및 현황을 나타내므로 대표변수로서 지형, 인구적 특성, 홍수피해에 노출된 기반시설, 토지이용 특성에 대한 변수들을 구축하였다. 적응도는 홍수피해를 저감하는 데 기여하는 인위적 노력을 나타내는 요소로 본 연구에서는 대표변수로 홍수방어시설, 제도·행정적 요인, 경제적 능력을 반영하도록 구축하였다.

취약성을 산출하는데 사용되는 요소의 범주별 다양한 측면을 고려하기 위해 다수의 변수를 사용하여 대표성을 확보하고자 했으며 그 중에서 자료의 취득이 용이한 변수들을 중심으로 홍수 취약성을 분석하고자 하였다(표 1). 그 결과, 서울시 행정동별 침수피해건수 자료가 남아있는 동시에 424개 모든 행정동에 대해 모든 변수의 데이터가 구축될 수 있는 2006년부터 2010년을 시간적 범위로 하여 총 15개의 변수가 행정동 단위로 구축되

표 1. 홍수 취약성 범주별 대표변수

취약성 구성요소	유형	대표변수	단위	
기후요인	극한 강수 지수	1일 최대강우량	mm	
		연속3일 최대강우량	mm	
		강우강도지수	mm/day	
민감도	지형	표고	m	
		경사	.	
	인구적 특성	인구밀도	명/km <sup>2</sup>	
	기반시설	통수능력부족관거 비율	%	
		토지이용 특성	시가화지역면적 비율	%
			지하공간면적 비율	%
	녹지면적 비율	%		
적응도	경제적 능력	재정자립도	%	
	홍수방어시설	단위면적당 하수관거 길이	km/km <sup>2</sup>	
		단위면적당 빗물저류조 용량	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	
		단위면적당 빗물펌프장 토출량	m <sup>3</sup> /분/m <sup>2</sup>	
행정적 요인	1인당 물관리공무원수	명		

표 2. 서울시 동별 홍수피해 자료 수집 현황

	연 도	수집된 데이터
행정동별 홍수피해건수	2006	152개 동 홍수피해건수
	2007	157개 동 홍수피해건수
	2008	170개 동 홍수피해건수
	2009	202개 동 홍수피해건수
	2010	424개 동 홍수피해건수

었다(표 2).

행정동별로 개별적 값이 산정될 수 있는 다른 변수들과 달리 일부 변수는 구역이나 구별 자료를 토대로 도출되었다. 빗물저류조와 빗물펌프장의 경우 행정경계가 아닌 배수 유역을 근거로 설치된다. 그러므로 두 변수에 대해서는 국토교통부 한강홍수통제소가 제공하는 표준구역 경계를 토대로 하여 구역 내에 설치되어있는 저류조, 펌프장의 총 용량을 표준구역 면적으로 나눈 값을 동별로 적용하였다. 또한 재정자립도의 경우 매년 자치구별로 산정되기 때문에 불가피하게 구의 재정자립도 값을 구 내의 행정동에 일괄 적용하였다.

## 2) 홍수 취약도 모형 구축과 검증

홍수 취약성의 대표변수로 수집된 데이터는 각 기 다른 단위를 지니므로 취약도 모형의 구축을 위해 연산되기 전 우선적으로 표준화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되고 있는 표준화 방법인 Z-스코어(Z-score) 방법을 적용하였다. Z-스코어 방법은 모든 자료들을 평균이 0, 표준편차가 1이 되도록 만드는 방법이다(식 2). 이 방법은 자료의 수치가 그 분포의 평균으로부터 표준편차의 몇 배 정도나 떨어져 있는지를 표준화된 확률변수인 Z값으로 나타낸다.

$$Z = \frac{\text{Actual value} - \text{Mean}}{\text{Standard deviation}} \quad (2)$$

표준화되어 구축된 변수들 중 홍수 취약성과 유의미한 관계를 지닌 변수와 변수별 개별적 중요도로서 가중치를 도출하기 위해 본 연구에서는 2006년부터 2010년까지 5년간 수집된 동별 홍수피해건수와 동별 15개의 홍수 취약성 관련 변수의 피

어슨 상관분석을 수행하였다. 이때 2006년부터 2010년까지 최근 5년간 총 1105개의 경우에 달하는 연도별 행정동별 침수피해건수 자료(표 2)와 그에 상응하는 연도 및 행정동별 15개 변수의 값이 이용되었다. 통계적으로 유의미한 상관관계를 보이는 변수들 중 각 범주별 요소들 간의 다중공선성을 조사하여 공선성이 낮은 요소들을 추출해 모형을 구축하는데 사용하였다. 이러한 과정에서 최종 도출된 8개의 변수들을 IPCC의 개념적 틀에 근거하여 기후요인, 민감도, 적응도의 연산을 수행하기 위해 기존 연구사례(고재경, 2009)에서 사용 및 검증된 개념모형을 채택하였다. 본 연구는 기존 모델(고재경, 2009)에 가중치를 부여한 기후요인, 민감도, 적응도 지표를 합산하여 취약도를 도출하였으며, 그 결과와 실제 재해피해 자료와의 비교 분석을 통해 모델의 타당성을 검증하였다. 본 연구는 홍수 취약성 구성 변수별 가중치로서 홍수피해 자료와의 상관분석으로부터 도출된 상관계수를 적용하였다.

산정된 홍수 취약도 모형은 분석 및 유형화에 앞서 객관적인 자료와의 비교를 통해 취약도 결과의 신뢰성을 검증할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 취약도가 높게 나타난 지역을 중점적으로 실제 침수피해 지역과 비교함으로써 모형 설명력의 질적 검증을 수행하였다. 침수피해 자료의 경우 서울시 424개의 모든 행정동에 대한 침수 자료가 구축되어있는 연도인 2010년의 단위면적당 침수세대수 자료를 이용하였다. 홍수 취약도는 앞서 도출된 취약도 모형에 2010년의 동별 자료를 넣어 산정한 2010년의 홍수 취약도 지수를 활용하였다. 이를 토대로 2010년 홍수 취약도 모형에서 취약도가 높은 지역의 분포와 2010년 실제 홍수피해건수의 공간적 분포를 비교하였다.

검증된 홍수 취약도 모형을 토대로 2006년부터 2010년까지 최근 5년 평균 변수값을 적용해 기후요인, 민감도, 적응도와 홍수 취약도의 공간적 분포를 분석하였다. 이때 지도화하는 과정에서 홍수 취약도의 지역 간 상대적인 수준 파악을 시각적으로 용이하게 하고 취약도 계산 결과의 왜곡을 방지하기 위해 선행 연구(윤하연, 1999)에서 제안된 등급화 방법을 이용하였다. 윤하연(1999)은 표준 정규분포도상의 Z값에 따른 확률분포를 바탕으로 자료의 등급을 하위 20%미만, 20%~40%, 40%~60%, 60%~80%, 80%초과의 5등급으로 구분하고, 이에 해당되는 Z값의 범위를 산출하여 범위마다 등급값을 부여한 바 있다. 이러한 방법을 토대로 Z값의 범위에 따라 값이 가장 높은 5등급부터 가장 낮은 1등급까지 다섯 등급으로 나뉜진 기후요인, 민감도, 적응도, 홍수 취약도의 계산 결과는 행정동별 상대적인 차이를 의미한다.

### 3. 결과 및 논의

#### 1) 서울시의 홍수 취약성에 미치는 요인들

서울시 행정동 단위별로 구축한 총 15개의 변수 중 10개의 변수(1일 최대강우량, 연속3일 최대강우량, 인구밀도, 고도, 경사, 지하공간면적 비율, 녹지면적 비율, 단위면적당 빗물저류조 용량, 단위면적당 빗물펌프장 토출량, 단위면적당 하수관거 길이)가 통계적 유의성이 있는 것으로 나타났다(표 3). 특히, 변수별 홍수 취약성과의 관계는 단위면적당 빗물저류조 용량, 1일 최대강우량, 단위면적당 빗물펌프장 토출량, 단위면적당 하수관거 길이, 인구밀도, 경사, 녹지면적비율, 지하공간면적비율 순으로 홍수피해와의 상관계수가 더 높게 나타난다. 즉, 홍수방어시설과 극단적 기후현상 인자가 홍수피해의 정도와 밀접한 관련성이 있을 것으로 사료된다. 취약성 요소별로 살펴볼 경우 민감도 요인 중에서는 인구밀도가, 적응도 요인 중에서는 빗물저류조 용량이 홍수피해와의 상관이 가장 높게 나타난다.

한편 적응도 요인에 해당하는 변수의 경우 개념적으로는 홍수피해와 음(-)의 상관관계를 보여야 하지만, 지난 5년간 홍수피해건수와 서울시의 적응도 변수는 양(+)의 상관관계를 나타낸다. 이러한 차이는 아래와 같은 세 가지 근거와 관련성이 있

표 3. 서울시 2006년~2010년 동별 홍수피해건수와 15개 변수 간의 상관분석 결과

요 인	대표변수	단위면적당 동별 침수건수 r(p-value)
기후요인	1일 최대강우량	.250(.000)
	연속3일 최대강우량	.172(.000)
	강우강도	.052(.083)
민감도	인구밀도	.139(.000)
	고도	-.097(.001)
	경사	-.111(.000)
	통수능력부족관거 비율	.029(.331)
	지하공간면적 비율	.075(.013)
	시가화면적 비율	.049(.104)
	녹지면적 비율	-.108(.000)
적응도	재정자립도	-.046(.127)
	단위면적당 빗물저류조 용량	.285(.000)
	단위면적당 빗물펌프장 토출량	.178(.000)
	단위면적당 하수관거 길이	.141(.000)
	1인당 물관리공무원수	-.018(.561)

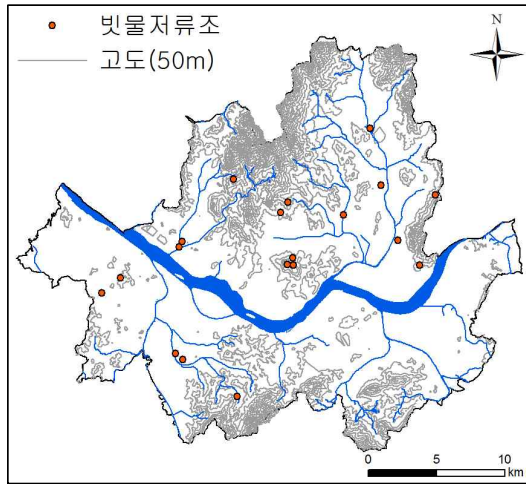


그림 1. 서울시 빗물저류조의 위치 (2012년)

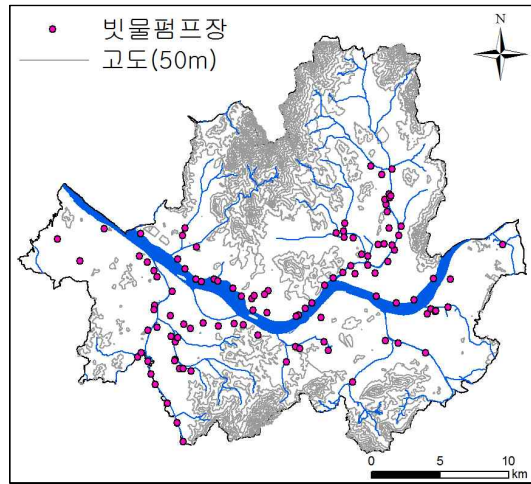


그림 2. 서울시 빗물펌프장의 위치 (2012년)

을 것으로 사료된다.

첫째, 적응도 요인을 구성하는 빗물저류조와 빗물펌프장 및 하수관거의 위치를 고려해볼 수 있다. 서울시에 설치된 빗물저류조와 빗물펌프장의 위치는 홍수가 발생하기 쉬운 경사가 급변하는 지역과 주요하천의 하류부에 집중적으로 분포하고 있다(그림 1, 2). 즉, 서울시에서 이미 홍수피해의 발생 가능성이 높은 곳에 대다수의 홍수방어시설이 설치되었기 때문에 홍수방어시설과 홍수 취약성과의 관계가 정적으로 나왔을 것으로 유추할 수 있다.

둘째, 기 설치된 홍수방어시설의 절대적 용량이 그 지역의 홍수피해를 감소시키기에 여전히 충분하지 않았기 때문으로 볼 수 있다. 홍수피해의 가능성이 높은 지역에 홍수방어시설이 집중적으로 설치되어 있음에도 불구하고 해당 지역에서는 최근까지 침수피해가 빈발한 바 있다. 이는 홍수방어시설이 피해를 줄이는 적응의 역할을 제대로 하지 못했음을 의미하며 해당 지역이 현재 상대적으로 낮은 홍수방어능력을 지녔음을 시사한다.

셋째, 극단적 강우현상이 발생했을 때 홍수방어시설의 용량이 넘치게 되어 오히려 피해가 가중되는 경우를 생각해볼 수 있다. 홍수방어시설의 설계용량을 초과하는 극단적인 폭우가 발생한 경우 빗물저류조나 펌프장에 저장 및 처리 중인 우수가 넘치게 되면서 하수관거나 맨홀 등을 통한 역류현상이 나타나 오히려 홍수피해가 가중된 사례는

서울시 홍수피해의 주요한 원인 중 하나로 선행연구에서 정리된 바 있다(김윤종 등, 2002; 서울시 정개발연구원, 2006). 이는 2006년부터 2010년까지 지난 5년간 침수건수가 발생할 만한 극단적인 강우현상이 나타났을 때 같은 시기 동안 서울시의 홍수방어시설이 적응의 역할을 제대로 하지 못했음을 드러낸다. 즉, 현재 설치된 수방시설이 홍수피해를 줄일 수 있을 만한 충분한 저감 대책으로 작용하고 있지 않음을 의미하므로 좀 더 합리적인 홍수 저감 대책의 필요성을 시사한다. 이러한 내용들을 종합해보면, 지난 5년간 서울시 적응도 변수 자료를 분석한 결과 현재 서울시 홍수방어시설의 적응도는 홍수를 유발하는 기후요인과 그에 노출된 민감도의 잠재적 영향을 상쇄하기에는 아직 부족한 것으로 판단된다. 향후 적응능력을 증대하기 위해 빗물저류조 및 펌프장의 적절한 입지를 고려한 증설, 홍수방어시설 설계 용량의 증대 등의 필요성이 시사되었다.

## 2) 모형 기반 2010년 서울시 홍수 취약성 추정

홍수 취약성과 유의한 관계를 지닌 변수들 간의 다중공선성을 확인한 결과 1일 최대강우량과 연속 3일 최대강우량이 0.901, 고도와 경사가 0.884의 상관계수를 보여 공선성이 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 문제를 해결하기 위해 공선성이 발견된 변수들과 홍수 피해 건수를 대상으로 회귀분

$$\begin{aligned}
 \text{홍수 취약도} &= f(\text{기후요인, 민감도, 적응도}) && (3) \\
 &= 0.250 * \text{일최대강우량} \dots\dots\dots \text{기후요인} \\
 &+ 0.139 * \text{인구밀도} + 0.075 * \text{지하공간} - 0.111 * \text{경사} - 0.108 * \text{녹지} \dots \text{민감도} \\
 &+ 0.285 * \text{빗물저류조} + 0.178 * \text{빗물펌프장} + 0.141 * \text{하수관거} \dots\dots\dots \text{적응도}
 \end{aligned}$$

석을 실시하여 유의확률이 더 높은 변수들을 선택한 결과 홍수의 기후요인으로 1일 최대강우량, 민감도 요인으로 인구밀도, 경사, 지하공간면적 비율, 녹지면적 비율, 적응도 요인으로 단위면적당 빗물저류조 용량, 단위면적당 빗물펌프장 토출량, 단위면적당 하수관거 길이 등이 선택되었다. 이러한 요소들을 이용하여 앞의 방법론에서 제시한 홍수 취약도 모형을 구축하면 위와 같다(식 3).

이와 같이 구축된 모델을 바탕으로 2010년 홍수 취약도 모형에서 취약도가 높은 지역의 분포와 2010년 홍수피해건수의 공간적 분포를 비교하였다(그림 3, 4). 그 결과 2010년 서울시 홍수 취약도 모형에서 가장 높은 취약성을 보이는 4, 5등급 지역의 분포가 같은 해에 실제로 홍수피해가 발생한 세대의 분포와 공간적으로 매우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 취약도 등급에 따른 홍수 발생 여부를 분석한 결과 4, 5등급의 높은 홍수 취약도가 나타난 행정동 중 97%의 동에서 실제로 1건 이상의 침수가 발생했다. 취약도가 가장 높은 5등급으로 나타난 동의 경우 96%의 동에서 실제 침수가 발생한 것으로 나타났다. 1km<sup>2</sup>당 10건 이상의 홍수피해에 대해서는 취약도가 높은 4, 5등급 동의 86%에서 발생했다. 취약도가 가장

높은 5등급 동의 경우 88% 지역에서 1km<sup>2</sup>당 10건 이상의 피해가 발생하였다. 따라서 홍수 취약도가 높게 산정된 지역이 실제로도 홍수피해에 취약한 지역으로 나타나는 경향이 확인되었다.

이러한 홍수 취약도 모형의 검증을 위해 실제 침수데이터와 비교할 때 유의할 점이 있다. 홍수 취약도는 개념 상 자연환경 및 사회·경제적 측면에서 홍수피해 노출 정도의 지역 간 상대적인 차이를 파악하는 것을 기반으로 한다. 따라서 취약도가 높다는 것이 곧 홍수 현상의 절대적 발생으로 직결되는 것은 아니다. 또한 취약도를 산정할 때 평균적인 기후조건이 반영된다는 점을 고려해야 한다. 산정된 홍수 취약도는 현재의 인문상황에서 평년과 같은 강우요인이 발생할 때의 전반적인 취약도를 보여준다. 따라서 특정 지역에서 강수 현상이 평년과 다른 특이한 양상을 보일 경우 실제 침수피해는 취약도와 다른 패턴으로 발생할 수 있다. 그럼에도 불구하고 높은 취약도는 낮은 취약도보다 분명 추후 홍수피해가 발생할 가능성이 높다는 것을 의미한다. 그러나 이는 영속적으로 고정된 것이 아니며 오히려 동적인 성격을 지녀 해당지역의 토지이용 방식을 변경하거나 적응도를 높임으로써 충분히 취약도를 낮출 수 있다.

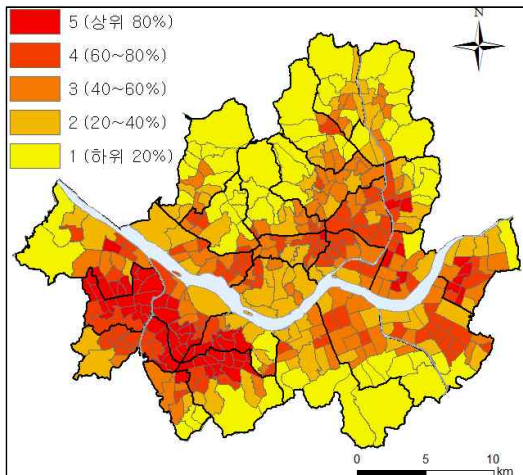


그림 3. 2010년 서울시 홍수 취약도의 분포

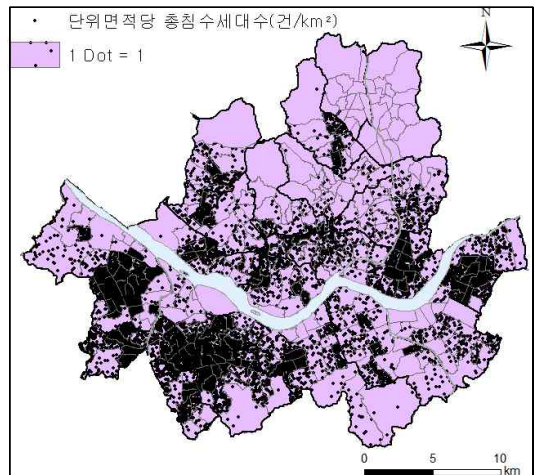


그림 4. 2010년 서울시 홍수피해건수의 분포

### 3) 서울시 홍수 취약성 요인들의 공간적 분포

기후요인은 1일 최대강우량 변수로 구성되었으며 5년 평균 동별 1일 최대강우량에 가중치로서 홍수피해건수와의 상관계수 0.250을 곱하여 산정되었다(그림 5). 따라서 특정 지역에 대하여 기후적 요인의 영향력이 크다는 의미는 강우 발생시 그 지역의 평균적인 1일 최대강우량이 다른 지역보다 상대적으로 더 높게 나타난다는 의미로 볼 수 있다. 1일 최대강우량에 절대적 영향을 받는 기후요인은 서울 중앙에서 동남부, 서부, 북부로 뻗어나가며 점차 높게 나타났다. 특히 강동구, 송파구, 강남구, 강서구 전반과 강북구 우이동, 도봉구 도봉동, 방학동 일대에서 가장 높게 나타났다. 가장 낮은 등급의 기후 요인이 도출된 지역은 서울 중앙에서 남부, 동북부, 서북부로 이어지는 지역들로 나타났다(그림 5).

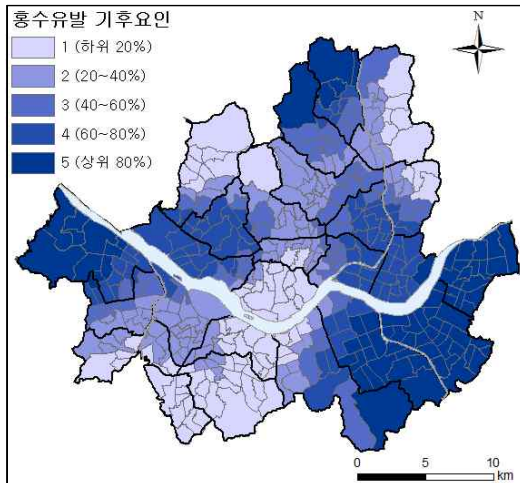


그림 5. 5년(2006-2010) 평균 서울시 기후요인

민감도는 동별 경사와 최근 5년 평균 인구밀도, 지하공간면적 비율 및 녹지면적 비율에 가중치로서 홍수피해건수와의 상관계수  $-0.111$ ,  $0.139$ ,  $0.075$ ,  $-0.108$ 이 각각 곱해진 값의 합산으로 도출되었다(그림 6). 민감도가 높다는 것은 인구가 밀집하고 지하공간의 개발이 고도로 이뤄졌으며 녹지가 부족한 저경사지의 특성이 강하다는 것으로, 동일한 집중강우 사상에 대해 저경사지 내에 수해에 노출

된 인구나 자산이 많다는 의미로 볼 수 있다. 서울시 전체 424개 행정동 중 21%인 90개 동이 민감도가 가장 높은 5등급으로 나타났다. 이러한 지역이 많이 분포하는 구는 양천구와 도봉구가 50%로 가장 높고, 영등포구, 노원구, 강동구 순으로 높게 나타났다. 공간적으로는 안양천, 중랑천, 탄천 및 성내천, 불광천 유역에 속한 동 전반에서 높게 나타났다.

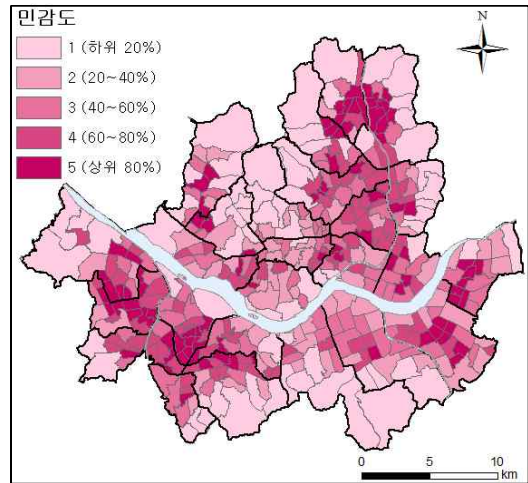


그림 6. 5년(2006-2010) 평균 서울시 민감도

적응도는 표준유역별로 산출된 빗물저류조 용량, 빗물펌프장 토출량, 하수관거 길이가 고려되었

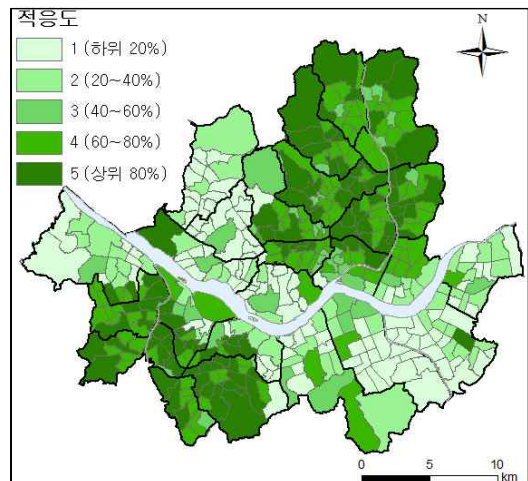


그림 7. 5년(2006-2010) 평균 서울시 적응도



으며 최근 5년 평균 동별 변수값에 가중치로서 홍수피해건수와 상관계수 0.285, 0.178, 0.141을 각각 곱한 값을 합산하여 도출되었다(그림 7). 적응도가 가장 높은 5등급에 해당하는동이 많이 분포하는 구는 관악구가 62%로 가장 높고, 그 다음 동대문구, 중랑구, 강북구, 구로구 순으로 높은 것으로 나타났다. 적응도가 높은 지역은 전반적으로 안양천, 중랑천, 청계천 유역에 속한 지역에서 나타났다.

4) 서울시 홍수 취약도 지수의 공간적 분포 패턴

2006년부터 2010년 최근 5년간 서울시의 행정동별 홍수 취약도의 공간적 분포를 분석한 결과 도심하천을 기준으로 한 광범위한 취약지역 두 지역과 국지적인 취약지역 세 지역이 드러났다(그림 8).

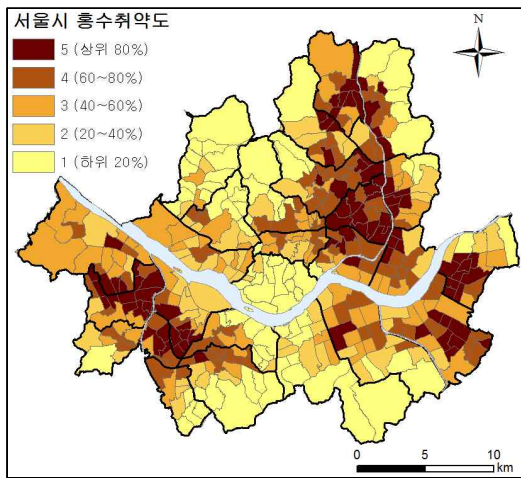


그림 8. 5년(2006-2010) 평균 서울시 홍수 취약도

우선 안양천을 중심으로 한 강서구 화곡동, 등촌동, 양천구 목동, 신정제1, 2, 4, 6동, 신월제1, 4, 5동, 영등포구 대림동, 문래동, 신길동 일대, 구로구 구로동 및 신도림동, 금천구 가산동, 독산제3동, 관악구 신사동, 조원동, 신림동, 은천동, 중앙동 등지, 동작구 신대방동, 상도동 일대의 넓은 범위에서 매우 높은 홍수 취약도가 산정된 것으로 나타났다. 또한 중랑천 유역의 도봉구 방학제1동, 쌍문제2, 3, 4동, 창제4, 5동 일대, 노원구 상계제5, 6, 7, 8동 및 하계제2동, 공릉1, 3동, 강북구 수

유동, 번제1동, 송천동 일대, 성북구 장위동, 정릉제1동, 석관동, 종암동 등지, 중랑구 면목동, 상봉제2동, 중화제2동 일대, 동대문구 전역, 광진구 군자동 및 중곡동, 성동구 행당동 및 마장동 인근, 성수1가제2동 일대에서 넓은 범위의 취약도가 매우 높은 지역이 나타났다. 비교적 좁은 범위에서 취약도가 높은 것으로 나타난 지역은 강동구 길동, 성내동, 천호동 일대와 송파구 가락동, 방이동, 오금동 일대가 있으며 강남구 역삼제1동의 경우 주변지역에 비해 국소적으로 높은 취약도가 산정되었다.

광범위하게 매우 높은 취약도가 산정된 안양천 지역, 중랑천 지역은 두 곳 모두 적응도 역시 높다는 공통점을 갖는다. 안양천 지역의 경우 서울 전체 평균수준보다 기후요인이 낮고 적응도가 높게 나타났음에도 불구하고, 서울 평균수준을 훨씬 웃도는 매우 높은 민감도로 인해 최종적인 취약도가 매우 높은 것으로 나타났다. 중랑천 주변의 도봉구, 노원구, 강북구, 성북구, 중랑구, 동대문구, 광진구 일대의 경우 기후요인은 서울 전반의 평균에서 높은 정도로 나타났고 민감도가 높고 적응도도 전체평균보다 매우 높은 편임에도 결과적으로 홍수에 취약한 것으로 드러났다. 지난 5년 간 안양천 유역과 중랑천 유역은 홍수방어시설 수나 용량에 있어 적응도가 다른 지역보다 분명 높은 편이었다. 그러나 다른 지역보다 더 높은 수준의 기후요인, 민감도 요인으로 인한 홍수피해의 잠재적 영향이 이러한 적응도를 능가했기 때문에 홍수 취약도가 매우 높은 수준으로 산정된 것으로 분석된다. 이는 결과적으로 이 지역의 홍수피해 저감 및 완화를 위한 적응능력이 다른 지역에 비해 상대적으로 부족한 것을 의미한다. 즉, 앞서 살펴본 바와 같이 안양천 및 중랑천 지역이 홍수피해를 경감하는 데 있어 지난 5년간 홍수방어시설이 적응의 역할을 충분히 하지 못했다는 점을 시사한다.

그 외 비교적 좁은 범위에서 취약도가 매우 높게 산정된 지역은 기후요인이나 민감도가 주변지역에 비해 상대적으로 매우 높은 반면, 적응도는 낮기 때문에 국지적으로 높은 취약도가 나타났다. 강동구 길동, 성내동, 천호동 일대와 송파구 가락동, 방이동, 오금동 중심 일대는 기후적 요인과 민감도가 매우 높은 수준으로 나타난 반면, 적응도

는 서울지역 전반에 비해 비교적 낮은 것으로 나타났다. 강남구 역삼제1동의 경우 적응도가 다른 지역보다 높은 편임에도 서울 전체 평균을 상회하는 기후요인과 결코 낮지 않은 민감도로 인해 매우 높은 취약도가 산정된 것으로 드러났다.

한편 홍수 취약도가 매우 낮은 것으로 나타난 지역은 한강 이북의 경우 북한산 주변의 은평구 진관동, 불광동, 갈현동, 녹번동 등지, 서대문구 홍은동, 송제동 등지, 종로구 평창동, 부암동, 삼청동 등지, 성북구 정릉제3, 4동, 강북구 우이동 일대, 수락산 주변의 노원구 상계제1, 3, 4동, 중계본동 및 중계제4동, 공릉제2동, 중랑구 신내동 일대, 용산구에 속한 행정동 전반인 것으로 드러났다. 한강 이남지역에서는 관악산 주변의 관악구 남현동, 인현동, 낙성대동, 대학동, 삼성동, 난향동 일대와 금천구 시흥동 일대, 청계산 주변의 서초구 양재동, 내곡동과 강남구 세곡동 및 일원본동 일대, 동작구 노량진동, 흑석동, 사당동 일대, 서초구 반포동 일대에서 취약도가 가장 낮은 등급이 산정되었다.

취약도가 매우 낮게 나타난 북한산 주변의 은평구, 서대문구, 종로구, 성북구의 북부 일대, 용산구 일대 지역에 대한 취약도 구성 요인을 살펴볼 경우 적응도가 비교적 낮지만 다른 지역보다 매우 낮은 수준의 기후요인과 민감도 지표에 의해 결과적으로 취약도가 낮은 것으로 분석되었다. 수락산 주변의 노원구 동부 일대의 경우 기후요인과 민감도는 서울 전체평균보다 낮은 반면 적응도는 매우 높아 취약도가 낮은 것으로 나타났다. 한강 이남에서 가장 낮은 취약도가 도출된 관악산 주변의 관악구 남부, 금천구 남부 일대는 기후요인과 민감도가 매우 낮고 적응도가 매우 높아 매우 낮은 수준의 취약도가 산정된 것으로 나타났으며 청계산 주변 지역의 경우 기후요인이 서울 전반에서 중간 수준이고 민감도는 매우 낮고 적응도는 평균 이상으로 높은 수준이어서 취약도가 낮게 나타났다. 동작구의 노량진, 흑석동, 사당동 일대와 서초구의 반포동 일대는 적응도가 낮거나 매우 낮고 기후요인과 민감도 역시 서울 평균 수준보다 매우 낮아 전체적으로 취약도가 낮은 것으로 분석되었다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 도시 홍수 재해에 접근하는 데 있어 IPCC(2001) 취약성의 개념을 중심으로 기후요인, 민감도, 적응도의 개념적 틀을 이용해 최근 5년간(2006~2010) 서울시 행정동 단위의 고해상도 취약성 지수를 산출 및 지도화하여 이를 바탕으로 서울 지역의 홍수 취약성의 공간적 분포를 밝히고자 하였다. 주요한 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

첫째, 상관분석 결과 서울시 홍수 취약성과 서울시 홍수피해건수와의 상관성이 가장 높은 변수는 빗물저류조 용량, 1일 최대강우량, 빗물펌프장 토출량임을 알 수 있다.

둘째, IPCC(2001)의 취약성 개념 틀과 선행연구(고재경, 2009)의 모델을 적용하여 서울시를 대상으로 기후요인 변수인 1일 최대강우량, 민감도 요인인 인구밀도, 경사, 지하공간면적 비율, 녹지면적 비율, 적응도 요인인 빗물저류조 용량, 빗물펌프장 토출량, 하수관거 길이 등을 고려한 홍수 취약도 모형을 도출하였다. 2010년에 대한 홍수 취약도 추정결과와 2010년 실제 홍수피해건수 자료를 비교한 결과 취약도가 높은 대부분의 지역에서 실제 침수가 발생함에 따라 취약성이 높은 지역에 대해 본 모형의 높은 설명력을 보였다.

셋째, 홍수 취약도 공간분포도를 분석한 결과 지역에 따라 기후요인, 민감도 요인, 적응도 요인들이 기여하는 바가 상이하게 나타났다. 특히, 취약도가 높게 나타난 안양천은 민감도 요인, 중랑천 주변지역들은 기후요인과 민감도 요인들이 지배적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 국지적 규모에서도 강동구와 송파구 일부 행정동 지역에서는 적응도가 낮아 홍수 취약도가 높게 나타났고, 강남구 일부 행정동 지역에서는 극한강수현상과 같은 기후요인과 민감도가 높아 홍수 취약도가 상대적으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 지역들의 홍수 취약성을 낮추기 위해서는 도시지역 내에서도 차별화된 정책마련이 필요함을 알 수 있다.

기존 연구의 한계점은 공간분석단위가 세밀하지 못한 점과 검증단계를 거치지 않은 모델을 사용하여 홍수 취약성의 공간적 분포를 연구하였다는 점

이다. 이에 본 연구는 세밀한 행정구역 단위인 행정동 단위에서 홍수 취약성을 정량화하여 취약성 분포를 분석함으로써 도시 내 세부 지역에 좀 더 적합한 홍수 대응 및 관리 정책의 기초자료로 활용될 수 있다는 데에 그 의의가 있다. 나아가 검증된 모델을 사용하여 도시 방재전략, 토지이용 계획 등의 수립 등 궁극적으로 홍수에 대한 잠재 위험을 억제하는 기반으로서 적용가능하다는 점에서 의미를 지닌다. 또한, 본 연구는 IPCC의 취약성 평가 개념들을 적용해 기후요인, 민감도, 적응도와 홍수 취약도의 공간적 분포를 분석하여 기존의 연구들이 지닌 한계를 보완하고자 하였다. 특히, 홍수 취약도 산정을 위해 고려해야 하는 요인에 있어 본 연구는 연구지역의 자연환경적 요인과 더불어 사회경제적 특성을 취약도 지표의 구성요소에 모두 반영하고자 하였다.

그럼에도 본 연구에서 산정된 행정동별 홍수 취약도는 동별로 평균적으로 발생한 침수피해에 대한 홍수 취약성의 상대적인 정도를 밝힌 것이기 때문에 특정 지역에 대한 절대적 의미의 판단은 피해야 할 것이다. 본 연구를 진행하며 자료를 수집하는 과정에서 동별 홍수피해주택·세대수나 침수가 발생한 주소지 등 실제 침수피해 자료가 공공기관 자료의 보존연한 문제로 파기된 경우가 많았다. 따라서 본 연구결과에서 개발된 홍수 취약도 모형은 향후 더 높은 신뢰도를 지닌 모형 개발 가능성을 열어두고 있다. 향후 침수피해 자료가 잘 보존 및 축적되어 시·공간적으로 좀 더 광범위한 데이터가 보완될 경우 더욱 높은 신뢰도로 지역 간 홍수 취약성을 좀 더 정확하게 표현하는 모형이 개발될 수 있을 것이다. 나아가 구축된 모형을 바탕으로 지역의 홍수 취약성의 시계열적 분석도 가능해질 것으로 기대된다.

## 사사

이 연구는 한국연구재단 글로벌박사펠로우십 사업(NRF-2013H1A2A1033829)의 지원으로 수행되었다.

## 문헌

- 강정은·이명진, 2012, 퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가: 서울시 사례를 중심으로, 한국지리정보학회지, 15(3), 119-136.
- 고재경, 2009, 경기도 기후변화 취약성 평가 연구, 경기개발연구원.
- 김보경·장대원·장남·양동민, 2011, 기후변화를 고려한 도시홍수 위험요인 도출, 한국위기관리논집, 7(1), 125-142.
- 김우구, 2005, 홍수에 강한 국토관리를 위한 홍수 지도의 역할, 대한토목학회지, 53(5), 101-106.
- 김윤중·이석민·김태화, 2002, 서울시 상습침수지역 관리시스템 구축 방안, 서울시정개발연구원.
- 김태형·한건연·조완희, 2011, 홍수위험지도 활용을 위한 낙동강 유역에서의 홍수 취약도 분석, 한국지리정보학회지, 14(3), 203-222.
- 박석근, 2006, 홍수피해발생 잠재위험도 산정방안 연구, 인하대학교 대학원 석사학위 청구논문.
- 손민우·성진영·정은성·전경수, 2011, 기후변화를 고려한 홍수 취약성지표의 개발, 한국수자원학회논문집, 44(3), 231-248.
- 서울시정개발연구원, 2006, 서울시 지역안전도 평가모형 개발연구: 홍수재해를 중심으로, 서울특별시.
- 서울특별시, 2011, 재난위험도 평가 및 활용방안, 서울특별시.
- 유가영·김인애, 2008, 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안, 한국환경정책평가연구원.
- 윤선권, 2012, 기후변화에 따른 도시하천의 홍수 위험 및 취약성 분석에 관한 연구, 서울시립대학교 대학원 박사학위 청구논문.
- 윤하연, 1999, 인천광역시 환경지표의 개발과 적용, 인천발전연구원.
- 이동률·임광섭·최시중, 2009, 치수특성평가를 위한 홍수위험지수 개발, 2009년 한국수자원학회 학술발표회, 초록집, 342-346.
- 임광섭·최시중·이동률·문장원, 2010, 홍수지표의 인과관계를 이용한 홍수위험지수 개발, 대한토목학회논문집, 30(1), 61-70.
- 장옥재·김영오, 2009, 지역회귀분석을 이용한 홍수피해위험도 산정, 한국방재학회논문집, 9(4), 71-80.
- 최충익, 2003, 도시적 토지이용의 변화가 도시의

도시 홍수 취약성의 공간적 분포: 서울 지역을 중심으로

- 자연재해 약성에 미치는 영향에 관한 연구: 경  
기도를 사례로, 국토계획, 38(2), 35-48.
- 한건연·김지성, 2005, 도시홍수재해 경감을 위한  
침수해석, 대한토목학회논문집, 53(9), 50-56.
- Choi, G., Kwon, W., Boo, K., Cha, Y., 2008,  
Recent Spatial and Temporal Changes in  
Means and Extreme Events of Temperature  
and Precipitation across the Republic of Korea,  
대한지리학회지, 43(5), 681-700.
- Chakraborty, J., Tobin G. A., and Montz, B. E.,  
2005, Population Evacuation: Assessing Spatial  
Variability in Geophysical Risk and Social  
Vulnerability to Natural Hazards, *Natural  
Hazard Review*, 6(1), 23-33.
- Flax, L. K., Jackson, R. W., and Stein, D. N.,  
2002, Community Vulnerability Assessment  
Tool Methodology, *Natural Hazard Review*,  
3(4), 163-176.
- IPCC, 2001, *Climate Change 2001: Impacts,  
Adaptation, and Vulnerability. A Report of  
the Working Group 2 of the Intergovernmental  
Panel on Climate Change*, Cambridge University  
Press, Cambridge.
- Kubal, C., Haase, D., Meyer, V., and Scheuer,  
S., 2009, Integrated urban flood risk assessment  
- adapting a multicriteria approach to a city,  
*Natural Hazards and Earth System Sciences*,  
9, 1881-1895.
- Peck, A., Karmakar, S., and Simonovic, S., 2007,  
*Physical, Economical, Infrastructural and Social  
Flood Risk - Vulnerability Analyses in GIS*.  
Department of Civil and Environmental  
Engineering, The University of Western Ontario
- UNDP, 2004, *Adaptation Policy Frameworks for  
Climate Change: Developing Strategies, Policies  
and Measures*, Cambridge University Press,  
Cambridge..
- 서울특별시 서울통계 / <http://stat.seoul.go.kr/>  
서울특별시 수해예방정보 / <http://hongsu.seoul.go.kr/>  
서울특별시 열린 데이터 광장 / <http://data.seoul.go.kr/>
- 교신 : 성효현. 우편번호: 120-750. 주소: 서울특별시 서대문구 이화대길 52 이화여자대학교 사범대학 사회과교육과. 이메일: hhsung@ewha.ac.kr. 전화: 02-3277-2657. FAX: 02-3277-2659
- Correspondence : Sung, Hyo Hyun, 120-750, Department of Social Studies Education, Ewha Womans University, 52 Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul, Republic of Korea. E-mail: hhsung@ewha.ac.kr. Tel: +82-2-3277-2657. FAX: +82-2-3277-2659
- (접수: 2013.10.30, 수정: 2013.11.19, 채택: 2013.11.25)