



# 건축물 정보를 활용한 도시침수 취약성 진단방법 개발

이은석

건축도시공간연구소 부연구위원

## Development of a Vulnerability Diagnosis Model for Urban Surface Water Floods using Building Big Data

Lee, Eunseok

Associate Research Fellow, Head of National Green Building Center, Architecture & Urban Research Institute, Sejong-si, Korea

### ABSTRACT

Unusual meteorological phenomena in urban areas are causes of life loss and economic damage. Flooding is the major cause of large economic damage among natural disasters that occurs in cities. Especially, localized torrential rains in urban areas cause substantial economic damage in only a short time. Although similar torrential rain falls occur in both the city and nature, the occurrence patterns for flooding are very different. Urbanization is one reason for flooding to exhibit different characteristics, which we refer to as urban characteristics. However, the vulnerabilities of flooding in urban areas to do urbanization are unclear. Thus, it is necessary to analyze and perform a vulnerability diagnosis of the characteristics of different areas and buildings that are repeatedly damaged by flooding. This study identified vulnerabilities using a modified spatial regression model (OLS) using big data for buildings in 2012 in Seoul, which was repeatedly flooded by heavy rains of more than 50 mm/hour since 2000. In addition, the vulnerability diagnosis model was applied to individual parcels containing buildings in Seoul in order to spatially derive and verify the probability distribution of buildings vulnerable to urban flooding.

*Key words:* Climate Change, Ordinary Least Squares(OLS), Local Indicator of Spatial Association(LISA)

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경 및 필요성

도시지역에서 이상 기상현상은 인명·경제적 피해의 원인으로 지목된다. 특히, 인구와 재화가 밀집된 도시지역일수록 그 피해규모는 증가한다. 이상 기상현상에 따른 피해 특징을 살펴보면, 경제적 피해가 제일 큰 현상은 침수이다 (CRED, 2016). 우리나라 역시 이상기상 현상에서 자유롭지 못하다. 최근 국내 도시에서 빈번한 도시침수는 국지적 집중호우에 의해 발생하며, 짧은 시간 많은 경제적 피해를 일으키고 사라지는 특성이 있다 (Falconer et al., 2009). 일시적으로 도시배

수관로의 침투용량을 넘기는 강우량이 도시지역 상류에 내렸을 경우 연결되어있는 하류지역 배수관로가 역류하며 일대를 침수시킨다 (Falconer et al., 2009; Golding, 2009).

도시침수의 원인은 도시지역에서 불투수면적의 확장, 부족한 배수용량이 일시적 집중호우에 의해 발생하는 전형적인 도시화 때문이다 (Jacobson, 2011; Ogden et al., 2011; Amaguchi et al., 2012; Fletcher et al., 2014). 우리나라의 도시침수는 매년 여름마다 겪는 일상적인 피해가 보고되고 있으나 건축물별 취약성과 연계한 예방적 대책은 아직 미흡하다. 선도적으로 취약성을 모형화해 적용하고 있는 기후변화 분야는 취약성을 ‘기후노출’, ‘민감도’, ‘적응능력’의 변수로

\* **Corresponding author:** enlee@auri.re.kr (Dept. of Smart city-Green Building Research Group, Architecture & Urban Research Institute701, 194, Jeolljae-ro, Sejong-si, 30103, Korea Tel.+82-44-417-9672)

ORCID 이은석 0000-0002-1735-7028

이뤄진 함수를 통해 분석한다 (IPCC, 2001; 2007; 2014). 도시침수에 취약한 건축물을 파악할 수 있는 방법론을 기후변화 분야의 취약성 함수를 응용해 개발할 필요가 있다.

## 1.2 연구목적

본 연구는 도시침수에 대한 건축물의 취약성을 기후변화 취약성 분석 함수를 응용해 취약성 진단방법으로 활용할 수 있는지를 확인하고, 이때 공개되어 있는 공공데이터를 바탕으로 어떤 기초 데이터베이스가 필요한지 파악한다. 결과적으로 취약성 진단방법을 실제 피해이력과 비교해 봄으로서 취약성 진단방법으로서 가치를 확인한다. 종합하면, 본 연구의 목적은 건축물 중심의 해상력을 갖는 도시침수 취약지점을 선별할 수 있는 진단방법을 개발하고 검증함으로써 공적인 활용성을 제안하는데 있다.

## 2. 도시의 취약성 관련 이론적 검토 및 시사점

도시의 취약성을 위해 고려해야 할 개념과 관점은 사회적 위험의 형성, 위험 및 재해 적응과 대응으로 구분할 수 있다. 우선 사회적 위험성은 신체적, 자산, 인간 및 생계수단과 관련한 요소들이 복합적인 재해영향으로 인해 취약성이 노출 되었을 때 손해, 손상, 손실을 입게 되는 경향을 의미한다 (UNDRO, 1980; Timmerman, 1981; Maskrey, 1984; Cardona, 1986; 1999; Liverman, 1990; Cannon, 1994; 2006; UNISDR, 2004; Birkmann, 2006, Cutter et al., 2003; Cutter and Finch, 2008; Cutter et al., 2008). 사회적 위험성을 해결하기 위해서는 관련한 이해당사자간의 합의가 필요하며, 언제 어디서든 재해, 취약성, 위험성을 인식할 수 있는 폭 넓은 사회적 위험에 대한 이해가 필요하다 (Chambers, 1989; Cannon, 1994; Lavell, 1999; Wisner, 2006; Carreño et al., 2007a, b; Cardona, 2004). 도시에서 다뤄야 하는 기후변화에 따른 재해는 물리적 환경, 자연환경, 건조 환경, 인간사회의 복잡성에 의해 더욱 큰 피해가 이어질 수 있지만 완화 또는 멈출 수 있다는 것을 인지해야 한다 (Alexander 1993, 2000, Birkmann 2006a, b).

도시를 중심으로 한 취약성 유발 변수는 물리생물학적 요소와 사회경제적 요소로 해당 요소의 성격에 따라 나눌 수 있다. 물리생물학적 요소는 기상조건, 자연재해, 지형, 토지피복 등 건축물의 기후변화 적응 취약성을 유발할 수 있는 물리적, 생물학적 또는 생태학적 요소로 구분할 수 있다. 사회경제적 요소로 인구, 빈곤, 직업, 성별, 거버넌스 시스템 등 건축물의

기후변화 적응 취약성을 유발할 수 있는 사회적, 경제적 또는 문화적 요소로 구분할 수 있다 (Preston et al., 2011).

이를 다시 4가지로 정리할 수 있다. 첫째, 위험-재해 모델 (risk-hazard (RH) model)은 물리생물학적 요소에 집중하여 해당 요소들에 대한 노출 (exposure)과 그러한 요소들에 대한 민감도 (sensitivity)를 분석하고 해결방안을 도출하는 방식이다. 둘째, 사회 취약성 모델 (social vulnerability (SV) model)로서 인간 및 자연환경에 영향을 주는 정치-사회적 취약성 인자들의 지리적 분포 특성을 분석하고 해당 취약성 유발 인자에 대응하는 방안을 도출하는 방식이다. 셋째, 통합 분석 모델 (pressure-and-release (PAR) model)은 가장 많이 사용되는 모델로서, 물리생물학적 요소에 대한 노출과 민감도 및 사회경제적 요소의 지리적 분포 특성을 함께 고려하여 기후변화 취약성에 대응하는 방안을 도출하는 방식이다. 넷째, 확장식 취약성 분석 모델 (expanded vulnerability (EV) model)로서 서로 다른 공간적·시간적 단위로 발생하는 특정 물리적 요소 및 사회적 요소의 결합을 통해 특수한 상황에서의 기후변화 취약성 분석과 대응 방안을 도출하는 방식이다 (Preston et al., 2011).

아직까지 취약성 분석을 위한 정형화된 혹은 일반화된 해법과 방법론은 부재하며, 각 연구 주제에 적합한 변수와 방법론을 개발하여 적용하고 있는 실정이다 (Preston et al., 2011; Fussel, H., 2007). 건축·도시와 관련된 기후변화 취약성 유발의 다양한 변수 선택과 기후변화 적응 취약성을 사실적으로 표현할 수 있는 분석방법론을 개발·선택할 필요성이 대두되고 있다. 또한, 건축물을 중심으로 기후변화 취약성 진단 모형을 고려하기 위해서 건축물을 통해 설명 가능한 사회적 요소의 규명과 노출, 민감도, 사회적 대응, 회복탄력성을 설명할 수 있어야 한다. 따라서 연구 범위에 해당하는 동안 건축물 중심의 사회적 요소들을 파악하고 각각의 관계를 통해 취약성을 설명할 수 있는 기초 데이터베이스 구축이 수반되어야 한다.

## 3. 연구방법론

### 3.1 방법론 개념정립 및 연구범위 설정

2장에서 다룬 바와 같이, 도시의 취약성진단은 물리생물학적 요소와 사회경제적 요소를 고려한 모델로 기준을 잡는다. 그 중 가장 많은 활용빈도를 갖는 통합분석모델 (PAR model)의 개념을 활용한다. 통합분석모델은 노출과 민감도의 원자료를 물리생물학적 요소에서 취하고, 사회경제적 요소 중 지

리직 요인들을 활용해 취약성을 도출하는 것으로 본 연구에서 파악하고자 하는 집중호우에 따른 도시침수가 기존 건축물에 미치는 물리적, 사회경제적 영향을 다층적으로 확인하는데 기본개념으로 적합한 것으로 본다. 통합분석모델을 구현하는 공간통계기법으로 본 연구는 최소자승법 (Ordinary Least Squares (OLS))을 선택했다. 최소자승법은 공간회귀모형의 하나로 다양한 독립변수간의 영향이 종속변수에 미치는 영향을 정량적으로 도출 가능하다.

본 연구는 1차적으로 서울시 상습침수 피해 지역에 속한 필지들을 취약성이 가장 높은 표본 추출해 고정하고, 최소자승법을 통해 물리생물학적 요인과 사회경제적 요인간의 상관성을 민감성과 적응능력 지표로 역산된 회귀방정식으로 구성한다. 이후, 해당 회귀방정식을 서울시 전체에 적용해 산출되는 종속변수의 값의 분포로 도시침수에 취약한 특성을 갖는 건축물의 군집이 어떻게 표현되는지 확인하는 방법으로 진행한다. 이는 최소자승법의 원리를 바탕으로 응용한 모델이다. 응용한 모델이므로 검증이 필요하다. 따라서 취약성이 높은 것으로 표현된 건축물의 군집을 실제 반복적인 침수가 있었던 서울시내 상습침수지역과 비교함으로써 회귀방정식으로 도출된 결과를 검증한다.

연구 대상은 물리생물학적 요소의 밀도가 높고 사회경제적인 요소의 집적이 큰 서울특별시를 대상으로 한다. 두 요소를 기반으로 민감도와 적응능력에 대한 기초데이터를 구축한다. 도시침수 피해가 실제로 발생한 시점 (2010년, 2011년) 직후 건축물 (2012년)이 포함된 필지 (977,955개)를 취약성 진단 대상으로 한다. 다만, 도시침수의 원인으로서 집중호우를 노출로 설정해야하나, 지역적 편차를 세밀하게 구분하는데 기초데이터 확보의 한계가 있으므로 침수피해 결과를 중심으로 시간당 50 mm급의 집중호우가 서울시 전역에 내렸음을 노출로서 가정한다. 연구결과의 활용성을 고려해 본 연구에 사용된 기초정보는 모두 공공에 공개된 데이터를 사용함을 원칙으로 한다.

### 3.1 지표수 침수 취약성분석 기초데이터 구축

#### 3.1.1 건축물 데이터베이스 구축

서울특별시 연속지적도를 매개로 건축물대장정보를 공간 정보화 했다. 건축물대장정보는 장표로만 구성된 방대한 정보로 건축물의 대표정보인 표제부정보를 연구에 사용했다. 건축물 대장정보의 공간정보화는 표제부의 주소정보를 PNU인 대표지적 코드로 변환하고, 변환한 PNU값과 연속지적도상의 PNU값을 연결했다. 결과적으로 건축물의 대표성을 설

명할 수 있는 28개 항목 정보를 지적도에 입력된다. 원본데이터의 질적 수준 때문에 본 연구는 1개 필지에 1개 대표 건축물을 입력했다. 서울시 전체 977,955 필지 중 562,579개 필지에 건축물 정보를 입힐 수 있었다. 이후, 데이터 정제과정을 통해 건축물대장 표제부 정보 중 일부 중복되거나 건축물은 존재하는 것으로 파악되나 주요한 정보가 누락된 신뢰성이 떨어지는 필지정보를 2차 정제작업을 통해 제외했다. 최종 정제된 건축물대장 표제부 정보는 총 12개 유형을 사용했다. (Table 1) 각 정보는 사회경제학적, 물리생물학적 유형으로 나눠 반영했다.

#### 3.1.2 사회경제학적 데이터베이스 구축

사회경제적 정보는 단위면적별 표준공시지가, 도시계획 시설 중 기타기반시설로 분류되어 공개되어 있는 맨홀분포를 사용했다. 서울특별시 표준공시지가는 표로 구성된 속성정보로 공개되어 있다. 속성 정보 중 지적코드인 PNU가 포함되어 있어 연속지적도와 건축물대장정보가 입력되어 있는 공간 정보 값에 PNU 코드를 활용해 연결했다.

맨홀정보는 수치지형도에 각 위치가 점 데이터로 제공된다. 점 데이터는 정량적 특성을 확인할 수 없으므로 밀집도를 Arc-GIS의 Kernel Density 분석 방법을 사용해 공간적 밀도 값으로 변환해 사용했다. 공간 밀도 값을 5 m×5 m 단위 매쉬 (Mesh) 정보로 변환한 뒤 다시 밀도 값을 갖는 점 데이터로 변환해 개별필지별로 합산시켜 공간정보로 만들었다.

#### 3.1.3 물리생물학적 데이터베이스 구축

지리적 정보는 공개된 지형정보를 활용해 침수에 영향을 주는 공간요소를 변수화하기 위한 작업을 목적으로 한다. 지리적 정보를 생산하기 위해 표고점과 측량 점을 활용해 5 m×5 m 해상도의 DEM (Digital Elevation Model)을 구축한 뒤 해발고도, 경사도, 지표수집적도 (Flow accumulation)을 ArcGIS를 활용해 정보화 했다.

해발고도, 경사도, 지표수 집적도는 모두 Raster 이미지로 결과 값이 도출된다. Raster 이미지에 입력되어 있는 값을 기초데이터베이스에 입력하기 위해서는 벡터 값으로 변환해야 한다. Raster 이미지를 모두 5 m×5 m 포인트 데이터로 변환한 뒤 개별필지별로 공간을 기준으로 합산시키는 방법을 사용해 지리적 정보를 입력했다. 2회 이상 침수된 피해지역을 표시한 서울특별시 침수흔적도를 사용했다. 서울특별시 침수 흔적도 정보는 공개된 SHP 파일로서 좌표계 보정작업을 한 후 사용했다 (Fig. 1).

Table 1. Building Information Refining Process and Results

No.	Code Name in Building DB	Contents Name	Refining Process and Results			
			1st	2nd	Final	
1	MGM_BLDRGST_PK	Building Registry PK	Drop	Null	PNU Code	
2	PNU	PNU Code	○	○	Parcel Area	
3	ADDR	Address	Drop	Null	Building Cover Area	
4	BLD_NM	Building Name	Drop	Null	Building Cover Ratio	
5	DONG_NM	Building Code Name	Drop	Null	Floor Area Ratio	
6	PLAT_AREA	Parcel Area	○	○	Main Usage	
7	ARCH_AREA	Building Cover Area	○	○	Structure	
8	BC_RAT	Building Cover Ratio	○	○	Households	
9	VL_RAT_ESTM_TOTAREA	Total Area for FAR	Drop	Null	Floor Numbers	
10	VL_RAT	Floor Area Ratio	○	○	Underground Floors	
11	TOTAREA	Total Area	○	Drop	Approval Date	
12	MAIN_PURPS_NM_DONG	Main Usage	○	○	Approval Year	
13	MAIN_PURPS_NM_FLR	Main Usage for Floor	Drop	Null		
14	PURPS	Usage	Drop	Null		
15	STRCT_NM	Structure	○	○		
16	ROOF_NM	Roof	Drop	Null		
17	HHLT_CNT	Households	○	Drop		
18	FMLY_CNT	Familys	○	○		
19	HO_CNT	Number of Housing	○	Drop		
20	HEIT	Height	○	Drop		
21	GRND_FLR_CNT	Floor Numbers	○	○		
22	UGRND_FLR_CNT	Underground Floors	○	○		
23	USEAPR_DAY	Approval Date	○	○		
24	YYYY	Approval Year	○	○		
25	MEGA_CD	Metropolitan City Code	Drop	Null		
26	CTY_CD	City Code	Drop	Null		
27	BDONG_CD	District Code	Drop	Null		
28	BLOCK_CD	Block Code	Drop	Null		

3.2 취약성 진단 논리구조

3.2.1 노출 대상의 정의 및 공간 모형화

실제 국지성 침수를 야기했던 2010년 9월 21일 시간당 71 mm, 2011년 7월 27일 시간당 57.5 mm로 기록된 기상청 자료를 근거로 시간당 50 mm이상 집중호우를 침수피해의 노출

로 가정하고, 반복 침수된 지역의 건축물을 중심으로 한 공간적 특성을 모형을 통해 파악하고자 한다. 서울시의 침수흔적도에 근거해 해당 지역의 피해면적을 취약성의 기준으로 정의한다. 침수의 원인인 노출은 국지성 집중호우의 특성상 시간적, 공간적 유동성이 매우 높기 때문에 서울시 전역에 동일한 강도의 집중호우가 내렸음을 전제로 한다. 노출정도에 따

른 지역적 편차는 없다는 가정으로 진행했다. 따라서 본 연구의 취약성 분석과정에서 모두 동일한 값 '1'로 적용되어 노출은 별도의 공간적 특성을 설명하지 않으므로 소거했다.

서울시 전체 상습 침수 피해지역 내 건축물의 특성은 최소자승법 (OLS)의 원리를 이용해 도출한다. 과거 침수피해를 입은 사건이 필지 전체에 영향을 줬을 때, 최대 취약성으로 정의하고 그 값을 '1'로 고정했으며, 피해를 입지 않은 지역을 '0'으로 정했다. 최소자승법에 의해 '1'에 해당하는 지역 내 건축물 정보, 사회적 정보, 지리적 정보를 필지별로 입력하고 취약성을 회귀방정식으로 도출한다 (Fig. 2). 결과적으로 1개 필지마다 그 특징을 설명하는 독립변수의 종합 합산된 결과가 '1'에 수렴하는 값을 가질수록 취약성이 높은 회귀방정식이 도출되도록 설계했다.

도출된 공간회귀방정식에 사용된 독립변수들은 통계적 검증과정을 거쳐 유의미한 변수를 남기고 그렇지 않은 변수군은 기각하는 정제과정을 거친다. 변수의 의미가 중복되어 왜곡된 결과를 도출하면 신뢰도가 떨어지기 때문이다. 즉, 다중공선성과 자기상관성을 유발하는 변수를 기각시키는 지속적인 환류과정을 통해 제거함으로써 모형의 신뢰도를 높였다.

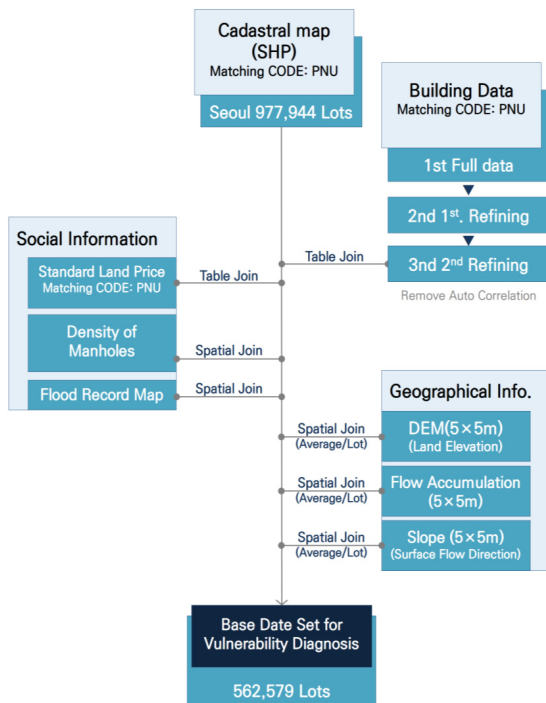


Fig. 1. Basic data construction and processing process of vulnerability diagnosis model using building big data.

### 3.2.2 취약 건축물의 공간분포 표출방법

상습침수지역을 표본으로 도출된 취약성을 설명하는 공간회귀방정식을 서울시내 모든 필지에 확대시켜 적용한다. 공간회귀방정식에 따라 시간당 50 mm 이상 집중호우에 따른 도시침수 피해를 받은 경우 1값이 나오도록 독립변수의 계수가 설정되어있으므로 모든 필지에 입력되어있는 독립변수의 정량적 수치에 따라 y값이 필지마다 차별적으로 산출된다. 초기 산출된 모든 취약성 예측 값이 신뢰도를 갖는다고 확신할 수 없다.

따라서 공간가중행렬 (Spatial Weighted Matrix)을 구축하고 공간적 자기상관성 측정을 위한 Univariate Moran's I 분석, 국지적 차원의 공간적 연관성 측정 (Local Indicator of Spatial Association, LISA)을 시행해 유의성을 확보하는 과정을 적용했다. Moran's I와 LISA 측정과정에서 Z-test를 수행하여 신뢰도 95%이상 통계적 유의성을 갖는 필지들을 추출하고, 이를 바탕으로 개별필지 간의 관계성을 중심으로 LISA 클러스터분석 결과를 도출한다. LISA 분석을 통해 전체 필지 중에서 정규분포구간 95% 신뢰도를 갖는 필지가 선별된 결과를 바탕으로 HH와 LL 지역을 추출할 수 있다. HH는 취약

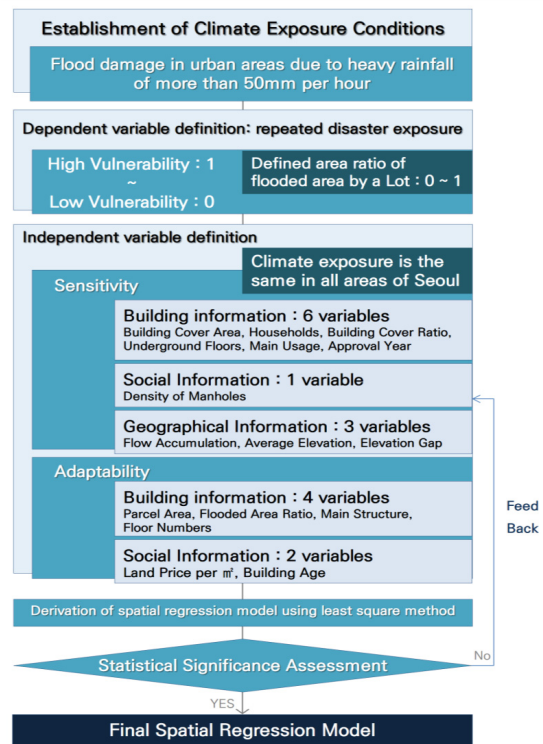


Fig. 2. Spatial regression model applying climate change vulnerability concept.

성이 높은 필지의 군집으로, LL은 취약성이 낮은 필지의 군집으로 해석가능하다. 즉, 서울시 전체 필지 중에서 취약한 건축물이 모여 있는 필지 군집과 안전한 건축물이 모여 있는 필지 군집을 통계적으로 유의미하게 정리할 수 있다.

## 4. 결과

### 4.1 도시침수 취약건축물 공간회귀모형

#### 4.1.1 최소사승법을 통한 서울시 반복 침수 건축물의 특성

서울시 상습침수피해지역내 모든 필지 중 건축물이 속한 필지 전체가 침수되었던 필지를 취약성이 매우 높음('1')로

중속변수로 고정하고, 독립변수는 건축물 변수 10개 변수, 사회적 변수 3개, 지리적 변수 3개 등 총 16개 변수를 대상으로 통계적 검증절차를 진행했다. 변수유형화 선정사유는 Table 2와 같다. 다중공선성과 자기상관성을 유발하는 독립변수를 기각시켜 최종 10개 변수로 이루어진 공간회귀방정식을 도출했다(식 (1)). 해당 회귀방정식을 서울시 전체 원자료에 적용하는 과정을 진행해야 하므로 표준화 과정을 생략했다. 공간회귀방정식은 GeoDA V. 1.6을 사용해 산출했다. 서울시의 반복 침수에 노출된 건축물의 특성을 10개의 독립변수로 설명하는 공간회귀모형(식 (1))과 적용된 변수는 다음과 같다.

Table 2. Initial Variables Used to Diagnose Vulnerability from Building and Spatial Database

Type	Column Name	Contents Name	Reason for Variable Adoption	Category
Code	FID	Field ID	-	Reference
Code	PNU	PNU Code	-	
Code	JIBUN	Lot Number	-	
Code	YYYY	Reference year	-	
Record	FLD_AREA	Flooded Area	Record of actual repeated damage	Vulnerability
Record	RA_FLD_A	Flooded Area Ratio	The size of the actual damage	
Building	ARCH_AREA	Building Cover Area	Scale of building	Sensitivity
Building	BC_RAT	Building Cover Ratio	Impervious to the parcel	
Geographical	ELEV_GAP	Elevation Gap	Relative elevation of the parcel	
Building	MAIN_PURPS	Main Usage	Basis for Determination of Types of Economic Damage Due to Flooding	
Social	FMLY_CNT	Households	Estimating the Number of People Affected by Flooding	
Geographical	Avg_ELEV	Average Elevation	Confirmation of land level	
Geographical	FAC_PLAR	Flow Accumulation	Check Surface Water Accumulation	
Social	MHD_PLAR	Manhole Density	Find out the number and location of discharge ports of underground drainage backflow	
Building	UGRAND_FLR	Underground Floors	Sensitive building area on flood damage	
Building	USE_YR	Approval Year	Confirmation of standard year of the Disaster Prevention System for Buildings	
Building	GRAND_FLR_C	Floor Numbers	Determination of buffering capacity of building flooding damage	Adaptability
Social	JIGA	Land Price per $m^2$	Identify the economic capacity to recover from flood damage	
Building	VL_RAT	Floor Area Ratio	Identify building scale	
Building	STRCT_NM	Main Structure	Understanding durability of building	
Building	PLAT_AREA	Parcel Area	Criteria for judging property damage due to flooding	Adaptability
Building	BD_AGE	Building Age	Determination of Damage Level Related to Building Age	

$$y = 3.40 \times 10^{-6}x_1 - 1.66 \times 10^{-7}x_2 + 1.85 \times 10^{-5}x_3 - 6.84 \times 10^{-3}x_4 + 0.031x_5 - 2.5 \times 10^{-4}x_6 - 8.08 \times 10^{-9}x_7 + 1027.78x_8 + 8.93 \times 10^{-5}x_9 - 3.6 \times 10^{-3}x_{10} + 0.0657 \quad (1)$$

(x1:Building Cover Ratio, x2:Floor Area Ratio, x3:Households, x4:Floor Numbers, x5:Underground Floors, x6:Building Age, x7:Land Price per m<sup>2</sup>, x8:Manhole Density, x9 :Flow Accumulation, x10:Gap with Average Elevation)

식 (1)을 해석하면, 반복 침수피해 위험성이 높은 서울지역의 건축물은 ‘건폐율이 크고, 용적률이 낮고, 가구 수가 많고, 층수가 낮고, 지하층수가 많고, 건축물 사용기간이 짧고, 공시지가가 낮고, 인접한 맨홀밀도가 높고, 지표수의 집적도가 크고, 해당 필지가 저지대’인 조건을 동시에 충족하는 것으로 설명할 수 있다.

4.1.2 통계적 유의성 점검

회귀분석 결과 통계적 유의성을 점검하면, 모델의 설명력은 (R-squared) 0.074474로 다소 낮게 평가되었으나, 모집단의 수가 541,278개이므로 다른 검정요인과 함께 비교해야한다. F-검정결과는 4355.37로 본 모델이 적합한 것으로 설명가능하다. 변수 간 다중공선성을 판단한 결과 (MULTICOLLINEARITY CONDITION)는 11.222857로 30이하 변수간 다중공선성은

낮았다. 공간회귀방정식에 의해 발생한 오차 항이 정규분포 하면 유의하지 않은 회귀방정식이 나, 오차 항은 Jarque-Bera 검정결과 정규분포 할 확률이 0.00000으로 도출되어 본 회귀방정식은 통계적으로 유의미한 모형으로 설명할 수 있다.

4.2 공간회귀모형의 서울시내 건축물 존재 필지 적용 결과

4.2.1 공간회귀방정식 적용결과 및 신뢰성 검증

앞서 정리한 회귀모형 (식 (1))을 서울시 건축물이 존재하는 전체 필지에 적용한 결과는 Fig. 4와 같다. 16개 변수 중 정량적 산출이 가능한 10개 변수에 각 필지가 갖고 있는 정보를 x값에 입력하면 최소값 -0.903161에서부터 최대값 0.798309까지 산출되어 공간에 표현된다. 모형은 값이 1에 수렴하면 취약성이 높은 것으로 설계되었으므로 값이 1에 가까우면 취약성이 높고, 멀어지면 취약성이 낮은 것으로 해석할 수 있다 (Fig. 4).

결과의 신뢰성 확보를 위해 1차 공간회귀방정식 결과, 전체 514,278개 취약성 값을 갖는 필지에 대해 정규분포구간에서 95% 신뢰구간에 있는 표본을 LISA Significant 결과를 토대로 판단했다. 결과적으로 전형적인 재해특성과 유사하게 군집화를 나타냈다. 구체적으로 공간적 자기상관성 분석 (Moran’s I)가 도출한 산포도를 보면, Moran’s I 값은 0.854667로 유사한 값을 가진 필지들이 공간적으로 인접해

Table 3. Summary of Output : Ordinary Least Squares Estimation

GENERAL INFORMATION		REGRESSION DIAGNOSTICS MULTICOLLINEARITY CONDITION NUMBER : 11.222857		
Dependent Variable : RA_FLD_A	TEST ON NORMALITY OF ERRORS			
Number of Observations : 541278	TEST	DF	VALUE	PROB
Mean dependent var : 0.11449	Jarque-Bera	2	629861.3337	0.00000
Number of Variables : 11	DIAGNOSTICS FOR HETEROSKEDASTICITY RANDOM COEFFICIENTS			
S.D. dependent var : 0.315205	TEST	DF	VALUE	PROB
Degrees of Freedom : 541267	Breusch-Pagan test	10	14886.1855	0.00000
R-squared : 0.074474	Koenker-Bassett test	10	5828.8525	0.00000
F-statistic : 4355.37	DIAGNOSTICS FOR SPATIAL DEPENDENCE FOR WEIGHT MATRIX : 08_RESULT01 (row-standardized weights)			
Adjusted R-squared : 0.074456	TEST	MI/DF	VALUE	PROB
Prob (F-statistic) : 0	Moran's I (error)	0.9495	786.4225	0.00000
Sum squared residual : 49773.1	Lagrange Multiplier (lag)	1	623878.8228	0.00000
Log likelihood : -122172	Robust LM (lag)	1	6003.6196	0.00000
Sigma-square : 0.0919567	Lagrange Multiplier (error)	1	618441.2017	0.00000
Akaike info criterion : 244365	Robust LM (error)	1	565.9985	0.00000
S.E. of regression : 0.303244	Lagrange Multiplier (SARMA)	2	624444.8213	0.00000
Schwarz criterion : 244488				
Sigma-square ML : 0.0919548				
S.E of regression ML : 0.30324				

있음이 설명됐다 (Fig. 5).

95% 신뢰도 구간에 포함된 연구대상 필지는 155,054개 필지다. Fig. 6에 표현된 바와 같이, LISA 클러스터 지도를 작성하면, 높은 취약성 필지 군집인 HH에 해당하는 필지는 96,703개이며, 취약성이 낮은 군집인 청색으로 표시된 LL에 해당하는 필지는 57,284개 필지다. 즉, 2012년 기준 서울시 전체 건축물이 존재하는 필지 중 96,703개는 도시침수에 높은 취약성을 보이며, 취약성이 낮은 필지는 57,284개 필지임을 위치를 기반으로 설명가능하다 (Fig. 6).

4.2.2 실제 침수피해지역과 정합성 비교

LISA 결과도면에서 HH에 해당하는 필지를 취약지역 (남

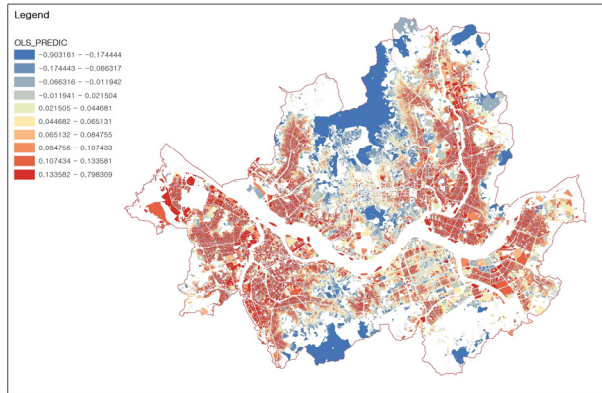


Fig. 4. Primary OLS result of the vulnerability prediction (Blue: low, Red: high).

LISA Significance Map

- Not Significant (372115)
- p = 0.05 (89545)
- p = 0.01 (54490)
- p = 0.001 (11019)
- Neighborless (14109)

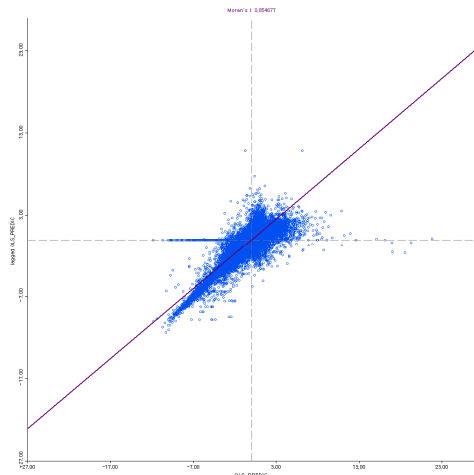
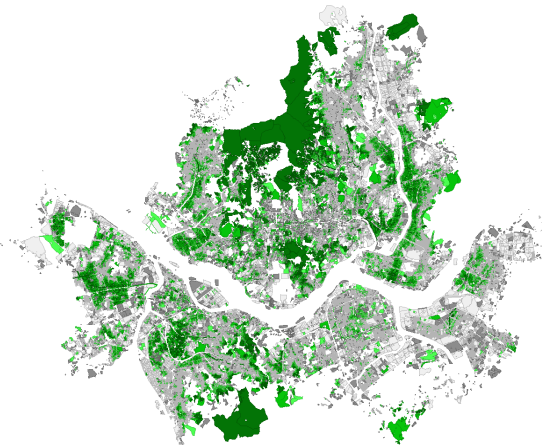


Fig. 5. The 95% confidence interval data are selected and displayed in green (left) and the result of the Spatial Autocorrelation by Moran's I (right).

색)으로 정리하고, 기존 침수지역 (적색)과 중첩해 확인해 보았다 (Fig. 7). 대체적으로 식 (1)을 통한 취약성이 높은 건축물이 존재하는 필지의 분포와 실제 반복 침수피해지역간의 공간적 분포의 유사성이 있음을 확인 할 수 있다. 다만, 식 (1)의 독립변수의 계수가 갖는 경향성과 다른 지역인 서초구와 강남구, 종로구, 도봉구, 강북구, 중구는 다소 정합성이 낮게 나왔다. 은평구와 송파구, 성동구, 강서구, 영등포구, 구로구의 일부지역은 식 (1)로 설명된 취약특성을 갖는 건축물이 다수 밀집되어 있는 것으로 확인 할 수 있었다.

5. 결론

파리협약에 따른 신 기후체제에서 추구하고자 하는 기후변화 '적응'의 요소와, 노출에 따른 '손실과 피해'를 최소화는 위험과 취약성에 대한 진단이 선행되어야 한다. 지구적 규모에서 국가적 규모, 다시 도시규모로 다운스케일링에 의한 기후변화 취약성 진단법은 그 정밀함에 있어 많은 오류를 안고 있는 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 건축물 단위규모에서부터 상향식으로 취약성을 파악하기 위한 연구체계를 구성해 분석과정과 결과를 도출했다.

본 연구 결과가 갖는 의미는 기후변화에 따른 이상 기상현상의 발생 빈도가 증가할 것임을 전제로 반복적인 도시침수 피해를 입는 대상을 지역이 아닌 건축물로 축소해 본 것이다. 연구과정에서 데이터 정제의 기술적 여건으로 인해 개별 필지가 갖는 대표 건축물을 중심으로 살펴본 한계는 존재한다. 그러나 실제 서울시의 상습침수지역내 건축물이 입지한



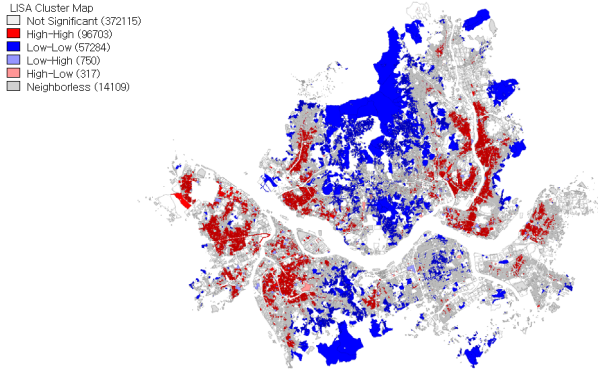


Fig. 6. Results of cluster analysis through LISA analysis (red: High vulnerable spot (HH), blue: Low vulnerable spot (LL)).

54만 여개 필지를 대상으로 도시침수의 위험성과 나아가 취약성으로 설명가능 한 건축물 관련 기초 데이터베이스를 구축하고 경향성을 도출한 것에 의미가 있다. 통계적 유의성을 확보한 독립변수와 결합되어 총 900여만 개의 데이터를 구축 할 수 있었다. 본 연구를 통해 구축된 건축물 중심의 데이터베이스는 현재 2012년도 1개 시점에 한하지만, 동일한 연구방법을 시도한다면 다양한 연도별 특성을 파악할 수 있다. 나아가 서울뿐만 아니라 전국단위 반복 재해 위험성에 대한 분석 또한 가능할 것으로 생각된다.

건축과 도시를 연구하는 분야에서 정책을 만들기에 앞서 현재 상황에 대한 객관적 진단과 연구는 앞으로 필수적으로 이행되어야 한다. 본 연구는 상습침수지역내 건축물 중심의 공간을 설명하는 공간 빅 데이터의 분석을 통해 명확한 설명이 가능할 수 있음을 검증했다. 이는 기후변화 취약성 분석의 공간적 기초가 건축물 단위로 구현이 가능함을 확인한 것이며, 구체적으로 실제 정책적용의 대상이 될 수 있는 건축의 취약성을 사전에 최소화함과 동시에 반드시 살펴봐야할 대상을 명확히 할 수 있음을 확인했다.

본 연구가 갖는 한계점은 추출 표본에 근거한 최소자승법에 의해 도출된 공간회귀방정식을 다시 연구대상지 전체에 적용시키기 위해 표준화를 생략할 수밖에 없었다는 점이다. 이는 향후 보완연구를 통해 원자료의 표준화를 통한 연구결과의 객관성을 높이는 방안을 연구 설계 초반부터 고려해야 함을 시사한다.

## 사 사

이 연구는 건축도시공간연구소의 기본연구 (2017-11) “신

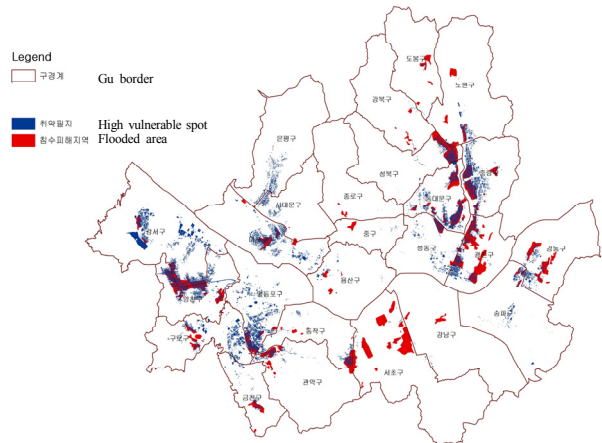


Fig. 7. Comparison of consistency between actual flooded areas (Red) and vulnerable areas (Navy) in Seoul.

기후체제 대응 건축부문 기후변화 취약성 진단연구”의 일부 내용을 수정·보완한 것으로 일부 내용이 중복될 수 있음을 밝힌다.

## REFERENCES

Alexander DE. 1993. Natural disasters. UCL Press Limited. London.

Amaguchi H, Kawamura A, Olsson J, Takasaki T. 2012. Development and testing of a distributed urban storm runoff vent model with a vector-based catchment delineation. *J Hydrol* 420-421: 205-215.

Birkmann J. 2006a. Measuring vulnerability to natural hazards—towards disaster resilient societies. United Nations University Press. Tokyo.

Birkmann J. 2006b. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: conceptual frameworks and definitions. In: Birkmann J (ed) *Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies*. United Nations University Press. Tokyo. 9-54.

Birkmann J. 2006c. Indicators and criteria for measuring vulnerability: theoretical bases and requirements. In: Birkmann J (ed) *Measuring vulnerability to natural hazards-towards disaster resilient societies*. United Nations University Press. Tokyo. 55-77.

Cannon T. 1994. Vulnerability analysis and the explanation of ‘natural’ disasters. In: Varley A (ed) *Disasters*,

- development and environment. Wiley. Chichester. 13-29.
- Cannon T. 2006. Vulnerability analysis, livelihoods and disasters. In: Ammann WJ, Dannenmann S, Vulliet L (eds) Risk 21: coping with risks due to natural hazards in the 21st century. Taylor and Francis Group plc. London. 41-49.
- Cardona OD. 1999. Environmental management and disaster prevention: two related topics. In: Fernandez MA (ed) Cities at risk: environmental degradation, urban risks and disasters in Latin America. A/H Editorial. La RED. US AID. Quito. 77-102.
- Cardona OD. 2004. 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: disasters, development and people. Publishers. London. 37-51.
- Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH. 2007a. Urban seismic risk evaluation: a holistic approach. *Nat Hazards* 40 (1): 137-172.
- Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH. 2007b. Disaster risk management performance index. *Nat Hazards* 41 (1): 1-20.
- Chambers Robert. 1989. Vulnerability, coping and policy. *Inst Dev Stud Bull.* 20 (2): 1-7.
- CRED. 2016. The Human Cost of Weather Related Disasters 1995-2015. UNISDR. p.13.
- Cutter S, Barnes L, Berry M, Burton C, Evans E, Tate E, Webb J. 2008. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Glob Environ Change* 18 (4): 598-606.
- Cutter S, Boruff BJ, Shirley WL. 2003. Social vulnerability to environmental hazards. *Soc Sci Q* 84 (2003): 242-261.
- Cutter S, Finch C. 2008. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *PNAS* 105 (7): 2301-2306.
- Dessai S, Hulme M. 2003. Does climate policy need probabilities?. Tyndall centre for climate change research working paper 34. UEA. Norwich.
- EU Environment Agency. 2010. THE EUROPEAN ENVIRONMENT STATE AND OUTLOOK 2010 ADAPTING TO CLIMATE CHANGE. p.7.
- Falconer RH, Cobby D, Smyth P, Astle G, Dent J, Golding B. 2009. Pluvial flooding: new approaches in flood warning, mapping and risk management. *J Flood Risk Manage.* 2. (III): 198-208.
- Fletcher TD, Shuster W, Hunt WF, Ashley R, Butler D, Arthur S, Viklander M. 2014. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more: the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water J.* 12. (VII): 1-18.
- Fussel, H. M. 2007. Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustainability Science* 2 (2): 265-275.
- Golding BW. 2009. Long lead time flood warnings: reality or fantasy? *Meteorol Appl.* 16. (I): 3-12.
- IPCC. 2001. Technical summary: climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. 2007. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds) Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability, contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press. p.7-22.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. p.18, 27, 50, 51.
- Jacobson C.R. 2011. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review. *J Environ Manage.* 92. (VI): 1438-1448.
- Lavell A. 1999. Environmental degradation, risks and urban disasters. issues and concepts: towards the definition of a research agenda. In: Fernandez MA (ed) Cities at risk: environmental degradation. urban risks and disasters in Latin America. A/H Editorial. La RED. US AID. Quito. 19-58.
- Liverman DM. 1990. Chapter 26—vulnerability to global environmental change. In: Kasperson RE, Dow K, Golding D, Kasperson JX (eds) Understanding global environmental change: the contributions of risk analysis and management. Clark University. Worcester. 27-44.

- Maskrey A. 1984. Community based hazard mitigation. Disasters mitigation program implementation. Virginia Polytechnic Institute, Virginia.
- Ogden FL, Pradhan NR, Downer CW, Zahner JA. 2011. Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment. *Water Resour Res.* 47. (XII): W12503.
- Preston BL, Yuen EJ, Westaway RM. 2011. Putting vulnerability to climate change on the map: a review of approaches, benefits, and risks. *Sustainability Science.* 6 (2): 177-202.
- Timmerman P. 1981. Vulnerability, resilience and the collapse of society. Environmental monograph no. 1. Institute for Environmental Studies. University of Toronto. Toronto.
- UNDRO. 1980. Natural disasters and vulnerability analysis. Report of experts group meeting of 9-12 July 1979. Geneva.
- UNISDR. 2004. Living with risk. UNISDR. Geneva.
- Wisner B, Blaikie P, Cannon T, Davis I. 2004. At risk, natural hazards. *People's Vulnerability and Disasters.* Routledge.