자연재해 리스크 분석을 위한 건축물 취약성 지수 평가

Assessment of Building Vulnerability Index for Natural Disaster Risk Analysis

최승훈* · 함희정** · 이승수***

Choi, Seung Hun*, Ham, Hee Jung**, and Lee, Sungsu***

Abstract

In this paper, a methodology to assess the building vulnerability index for a natural disaster is proposed. The building vulnerability index for the census output areas of Gyeongju city, as a representative example, is evaluated for flood hazard to illustrate the proposed methodology. The building vulnerability index, which can be used for flood risk analysis, is measured by combining the following five weighted proxy variables: density of the hazard-exposed area of a building, importance level of a building, type of building's structural material, status of building's structural design, and deterioration level of a building. The selected proxy variables are evaluated using predefined scoring criteria and are then nondimensionalized on the basis of a normalization method. The weight factor for each proxy variable is obtained by analyzing its frequency of use from the flood risk related literature. In addition, building-information databases are established for each census output area to estimate the proxy variables by classifying the raw data of building ledgers by using GIS-related software. The building vulnerability index estimation methodology proposed in this paper can be used to quickly estimate the natural disaster risk for regions composed with the census output areas.

Key words : Natural Disaster, Flood Hazard, Building Vulnerability Index, Census Output Area, Building Ledger

요 지

본 연구에서는 자연재해 리스크 분석을 위한 건축물 취약성 지수를 평가할 수 있는 방법론을 제안하였다. 제안된 평가 방법론에 따라 대표적인 예로 수해(Flood Hazard)에 대한 경주시 집계구별 건축물의 취약성 지수를 평가하였다. 건축물의 취약성 지수는 가중화된 5개의 취약성 대리변수들(건축물 위험노출 밀집도, 건축물 용도, 건축물 구조재료 형태, 건축물 구조설계 여부, 노후건축물 분포)의 결합으로 평가되었다. 본 연구에서 선택된 취약성 대리변수들은 기설정된 점수화 방법에 따라 평가되고, 정규화 방법에 기초하여 무차원화 되었다. 개별 취약성 대리변수에 대한 가중치는 수해 리스크와 관련된 문헌들에서의 변수 사용빈도를 메타분석(Meta-Analysis)하여 파악되었다. 또한, 취약성 대리변수를 평가하기 위하여 필요한 집계구별 건축물 정보에 대한 데이터베이스는 GIS 관련 소프트웨어를 이용하여 건축물대장 원시자료로부터 구축되었다. 본 연구에서 제안된 취약성 지수 평가 방법론은 집계구로 구성된 지역에서의 자연재해 리스크를 신속히 평가할 시 사용될 수 있다.

핵심용어 : 자연재해, 수해, 건축물 취약성 지수, 집계구, 건축물대장

1. 서 론

한반도에 내습하는 자연재해는 호우, 대설, 지진, 풍랑, 강풍 등으로 다양한 형태의 재해가 발생한다. 재해연보

(MOIS, 2017)에 따르면 2017년 자연재해로 인하여 이재민 8,731명(5,075세대), 부상 15명, 사망 7명의 인명피해와 공공 시설, 건축물, 농경지, 선박, 사유시설 등과 같은 시설에 187,302백만원의 재산피해를 초래하였다. 이와 같은 자연재

*정회원, 강원대학교 건축공학과 박사과정(E-mail: krsh@daum.net)

Member, Ph.D Candidate, Department of Architectural Engineering, Kangwon National University

**교신저자, 정회원, 강원대학교 건축·토목·환경공학부 교수(Tel: +82-33-250-6222, Fax: +82-33-259-5542, E-mail: heejham@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Division of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Kangwon National University

***정회원, 충북대학교 토목공학부 교수

Member, Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

해를 예측하고 대비하기 위해서는 자연재해로 피해를 받을 수 있는 대상물에 대한 직·간접 리스크(Risk)의 평가가 필요하다.

국내·외에서 많이 사용되고 있는 자연재해 리스크 평가 방법은 정량적 리스크 평가법(Quantitative Risk Assessment), 리스크 지수 평가법(Risk Index Assessment) 등이 있다(Van Westen et al., 2011). 정량적 리스크 평가법은 자연재해 위험요인(Hazard)의 강도 및 확률 그리고 피해 대상물의 조건부 피해확률인 취약성 곡선(Vulnerability Curve)을 수치적 또는 실험적 모형을 통해 산정하여 정량적인 값으로 리스크를 평가하는 방법이다. 리스크 지수 평가법은 자연재해 위험요인 지표(Indicator)와 취약성 지표에 대한 대리변수(Proxy Variable)를 점수화 및 가중화하여 상대적이고 정성적인 값으로 리스크를 평가하는 방법이다. 정량적 리스크 평가법은 절대적(Absolute)이고 정량적인 리스크 평가결과를 제공하나, 여러 평가지역에 대한 리스크를 평가할 시 방대한 자료와 오랜 연산시간이 요구된다. 반면에 리스크 지수 평가법은 실제 손실의 기대치를 제공하지 않으나, 리스크 평가시간이 짧아 복수의 평가지역에 대한 상대적인 리스크를 파악한 후, 자연재해 저감대책에 대한 지역별 우선순위를 정할 시 많이 사용된다.

리스크 지수 평가법을 사용하여 자연재해 리스크를 평가한 연구들은 다수 존재한다(Cutter et al., 2003; Lee et al., 2006; Schmidt-Thomé, 2006; Carreno et al., 2007; Peduzzi et al., 2009; Yeon and Jeong, 2014; Park et al., 2015). 대표적으로 Yeon and Jeong (2014) 연구의 경우 리스크 지표를 구조적, 사회적, 대응 및 복구능력으로 분류하여 강풍으로 인한 재해 리스크를 평가할 수 있는 풍해 리스크 지수를 제안하였다. Park et al. (2015) 연구에서는 리스크 지표를 인구통계 및 사회적, 2차 피해유발, 재해 대비 및 대처로 분류하여 도심지 토사재해로 인한 리스크 지수를 평가하였다. 리스크 지수 평가법이 적용된 대부분의 연구들은 위험요인 지수(Hazard Index), 취약성 지수(Vulnerability Index), 대응능력(Response Capacity)을 동시에 고려하여 자연재해에 대한 사회·경제적 리스크를 종합적으로 평가하고 있다. 그러나 기존 연구의 경우 건축물, 사회기반시설 등과 같은 다양한 피해 대상물 중 특정 대상물의 물리적 취약성 지수를 노출도와 민감도(Sensitivity)를 모두 고려하여 평가한 연구는 부재한 형편이다.

본 연구에서는 자연재해에 대하여 정성적 리스크 평가에 사용되는 취약성 지수 평가 방법론을 제시하고, 국내에서 발생될 수 있는 여러 자연재해 중 가장 빈번하게 발생하는 수해(Flood Hazard)를 대표적인 예로 선택하여 건축물의 물리적 취약성 지수를 평가하였다. 본 연구의 평가 시범지역으로는 경상북도 경주시로 선정하였으며, 최소 통계구역 단위인 집계구를 기초로 건축물의 노출도와 민감도를 고려하여 취약성 지수를 평가하였다.

2. 취약성 지수 평가 방법론

본 장에서는 자연재해 리스크 평가를 위한 취약성 지수의 역할을 제시하고, 수해를 대표적인 재해로 선택하여 이에 대한 취약성 지수 평가방법을 보인다. 수해에 대한 취약성 지수 평가를 위하여 시범지역 및 취약성 대리변수의 선정과정과 취약성 대리변수의 점수화(Scoring), 정규화(Normalization), 가중화(Weighting)에 대한 방법을 보인다. 또한, 건축물의 취약성 지수를 평가하기 위하여 필수적으로 요구되는 건축물 정보에 대한 데이터베이스 구축방안에 대하여 기술한다.

2.1 자연재해 리스크 평가 방법론

자연재해에 대한 리스크를 지수로 산정하여 정성적으로 평가하는 경우, Fig. 1과 같이 위험요인 지수와 취약성 지수의 곱(Multiplication) 또는 합성곱(Convolution)을 통하여 리스크를 평가할 수 있다. 위험요인에 대한 형태(Hazard Types), 발생확률(Probability), 강도(Severity) 등으로 구성된 위험요인 지표의 대리변수들과 물리적(Physical), 사회적(Social), 경제적(Economic), 환경적(Environmental) 등으로 구성된 취약성 지표의 대리변수들은 점수화, 정규화, 가중화를 통하여 위험요인 지수와 취약성 지수로 각각 평가되며(Van Westen et al., 2011), 여기서 취약성 지수는 세부지표의 노출도(Exposure)와 민감도(Sensitivity)를 각각 고려하여 평가될 수 있다(IPCC, 2001). 이와 같이 지수를 통하여 자연재해 리스크를 평가하기 위해서는 취약성 지수에 대한 정보가 필수적으로 요구된다.

Fig. 1. Flowchart of Risk Index Estimation (IPCC, 2001; Van Westen et al., 2011)

본 연구에서는 수해에 대한 피해 대상물을 건축물로 국한하여 이에 대한 물리적 취약성을 취약성 지표의 범위로

한정하였다. 이에 건축물의 물리적 취약성은 점수화 및 정규화된 노출도와 민감도에 대한 취약성 대리변수의 평가치와 취약성 대리변수의 가중치가 조합된 취약성 지수의 형태로 평가된다.

2.2 건축물 취약성 지수 평가를 위한 시범지역 선정

수해에 대한 집계구별 건축물 취약성 지수를 평가하기 위하여 본 연구에서 선정한 시범지역은 경상북도 경주시이다. 경주시는 Fig. 2와 같이 23개의 읍면동(행정경계)에 534개의 집계구(통계지역경계)로 구성되어 있다. 집계구는 읍면동의 1/30 규모로 통계청에서 통계정보를 제공하는 최소 통계구역 단위이다. 집계구에 대한 경계기준은 인구지수(최적 500명), 사회동질성지수(지목, 지가), 영상지수(면적-둘레) 등이 고려되어 나누어진다(Park et al., 2015). 본 연구에서는 시범지역인 경주시에 대하여 수해에 대한 집계구별 건축물의 취약성 지수를 평가하였다.

Fig. 2. Census Output Areas of Gyeongju City

2.3 건축물의 물리적 취약성 지표에 대한 대리변수 선정

Fig. 1에 따라 취약성 지수를 평가하기 위해서는 각각의 취약성 지표에 대한 대리변수를 Eq. (1)과 같이 세부 취약성 지표에 대한 노출도와 민감도를 고려하여 선정되어야 한다. 노출도는 피해 대상물이 자연재해에 노출되는 특성 및 정도를 의미하며, 민감도는 자연재해에 의해 피해 대상물이 직접적 또는 간접적인 영향을 받는 정도를 의미한다(IPCC, 2001).

$$VI = \sum W_i E_i \cdot \sum W_j S_j \quad (1)$$

여기서, VI 는 자연재해에 대한 대상물의 취약성 지수, E_i 는 노출도로 고려된 취약성 대리변수의 평가치, S_j 는 민감도로 고려된 취약성 대리변수의 평가치, W 는 취약성 대리변수에 대한 가중치(2.4.3절 참조)를 각각 의미한다.

본 연구에서는 수해 리스크 평가와 관련된 국내·외 대표적인 문헌 14편을 통하여 건축물의 물리적 취약성 지표에 대한 대리변수를 조사하였다(Cutter et al., 2003; Dwyer et al., 2004; Tapsell et al., 2005; Lee et al., 2006; Sim et al., 2013; Park et al., 2015; MOIS, 2018). 조사된 모든 대리변수는 Table 1의 계량 가능성(Measurability), 자료 획득 용이성(Obtainability), 목적 부합성(Congruence), 정기 측정성(Regularity), 미래 예측성(Predictability)에 대한 대리변수 선정요건을 기초로 분석하였다. 대리변수 선정요건은 Yeon and Jeong (2014) 연구에 의한 것으로 대리변수가 갖춰야 할 일관성, 타당성, 대표성, 효율성, 발전성 등의 5가지 측면에 기초하여 도출되었다.

Table 1. Requirements of Proxy Variables for Vulnerability Index (Yeon and Jeong, 2014)

Classification	Definition
Measurability	Proxy variable should be able to use quantitative data and should be used for quantitative evaluation.
Obtainability	Source data for proxy variable should be easily obtained.
Congruence	Proxy variable should well represent corresponding index.
Regularity	Proxy variable should be able to be measured regularly.
Predictability	Future change of the proxy variable should be predicted in advance.

본 연구에서는 대리변수에 대한 선정요건 분석을 통하여 Table 2와 같이 건축물 위험노출 밀집도, 건축물 용도, 건축물 구조재료 형태, 건축물 구조설계 여부, 노후건축물 분포를 수해에 대한 건축물의 취약성 지수를 평가할 수 있는 5개의 대리변수로 선정하였다. 여기서 건축물 위험노출 밀집도는 건축물의 취약성 지수 평가를 위한 노출도로, 건축물 용도, 건축물 구조재료 형태, 건축물 구조설계 여부, 노후건축물 분포는 건축물의 취약성 지수 평가를 위한 민감도로 고려된다. 선정된 취약성 대리변수는 수해에 대한 건축물의 취약성 지수를 평가하기 위해 선정된 것으로 타 자연재해에 대해서 취약성 지수를 평가할 시 대리변수는 재분석되어야 한다. 이렇게 선정된 취약성 대리변수는 2.5절에서 구축된 집계구별 건축물 정보에 대한 데이터베이스를 기초로 2.4절에서 기술된 취약성 대리변수 평가방안에 따라 건축물의 취약성 지수를 평가하는데 이용된다.

Table 2. Proxy Variables Selected for Building Vulnerability Index Subjected to Flood Hazard

Classification	Proxy Variable	Definition
Exposure	Density of Hazard-Exposed Area of a Building (Building Density)	Density of area of building exposed by flood disaster
Sensitivity	Importance Level of a Building (Building Usage Type)	Importance levels (such as 1, 2, and 3) of building
	Type of Building's Structural Material (Structural Type)	Type of building's structural materials, such as steel, reinforced concrete, masonry structure, etc
	Status of Building's Structural Design (Structural Design)	Status of engineered or non-engineered building
	Deterioration Level of a Building (Building Deterioration)	Age of building to consider deterioration level of building

2.4 취약성 대리변수 평가 및 가중화 방안

2.4.1 취약성 대리변수 점수화 기준

선정된 건축물 취약성 지표에 대한 대리변수는 Table 2의 설명과 같이 각각의 대리변수별로 상이한 건축물의 취약성을 대표한다. 대리변수를 기초로 취약성 지수를 평가하기 위해서는 대리변수별로 취약성을 점수화하는 기준이 정의되어야 한다. 본 연구에서는 Table 3과 같이 위험요인인 수해의 피해양상을 고려하여 영향을 받을 수 있는 건축면적(1층 바닥면적)을 기초로 취약성 대리변수를 점수화하는 기준을 설정하였다.

Table 3. Scoring Criteria for Proxy Variables for Building Vulnerability Index Subjected to Flood Hazard

Proxy Variable	Scoring Criteria
Building Density	Sum of building area / Census output area
Building Usage Type	Sum of building area of Importance levels 2 & 3 / Sum of building area
Structural Type	Sum of building area not utilizing reinforced concrete and the steel structure materials / Sum of building area
Structural Design	Sum of building area of non-engineered buildings / Sum of building area
Building Deterioration	Sum of building area of buildings over 30 years old / Sum of building area

본 연구에서는 개별 건축물의 건축면적에 기초한 1층 바닥면적을 합한 후, 해당 집계구 면적을 나눈 값으로 수해에 대한 건축물 위험노출 밀집도(Building Density)의 노출도를 평가하였다.

건축물 용도(Building Usage Type)의 경우 건축구조기준(AIK, 2016)의 중요도(특, 1, 2, 3)에 따라 분류되며, 중요도가

낮아질수록 건축물의 소요강도(Required Strength)가 낮아진다. 본 연구에서는 중요도 특, 1에 비해 소요강도가 낮은 중요도 2, 3에 해당되는 건축물에 대한 건축면적과 전체 건축물에 대한 건축면적의 비율로 건축물 용도(Building Usage Type)에 대한 민감도를 평가하였다.

일반적으로 건축물은 철근콘크리트구조 및 철골구조로 구성된 건축물이 타 구조재료로 구성된 건축물(조적조, 목조 등)에 비해 재료강도(Material Strength)가 높다(AIK, 2016). 이에 본 연구에서는 철근콘크리트구조 및 철골구조로 구성되지 않은 건축물에 대한 건축면적과 전체 건축물에 대한 건축면적의 비율로 건축물 구조재료 형태에 대한 민감도를 평가하였다.

구조설계가 된 건축물은 구조설계가 되지 않은 건축물보다 수해에 의한 하중에 강하다. 건축법 시행령 상 건축물의 구조설계는 시행령 ‘구조 안전의 확인’에 기술된 건축물의 층수, 연면적 및 높이에 대한 조건에 기초한다. 본 연구에서는 1962년에 제정된 후 2019년까지 개정된 건축법 시행령을 검토하여 구조설계가 된 건축물에 대한 조건을 파악한 후 구조설계가 필요하지 않는 건축물에 대한 건축면적과 전체 건축물에 대한 건축면적의 비율로 건축물 구조설계 여부(Structural Design)에 따른 건축물의 민감도를 평가하였다.

도시 및 주거환경정비법 시행령 제1장 제2조 노후·불량 건축물의 범위에서는 건축물이 준공된 후 20년 이상, 30년 이하의 범위 내에 있는 경우 노후건축물로 지정한다. 본 연구에서는 건축물의 준공연도를 기준으로 30년 이상의 연령을 가진 건축물에 대한 건축면적과 전체 건축물에 대한 건축면적의 비율로 노후건축물 분포(Building Deterioration)에 대한 민감도를 평가하였다.

2.4.2 취약성 대리변수의 정규화

Table 3의 점수화 기준에 의해 계산된 취약성 대리변수의 평가치를 단일차원의 취약성 지수 값으로 변환하기 위해서는 평가치를 동일한 척도(Scale)로 변환하기 위한 무차원화 작업이 필요하다. 대표적인 무차원화 방법으로는 최대치/최

소치 또는 평균치를 이용한 정규화, Z-점수화(Z-scoring) 이용한 표준화(Standardization) 및 등급화 방법 등이 있다. 최소치/최대치를 이용하여 변수를 무차원화하는 정규화 방법은 Eq. (2)와 같이 평가하고자 하는 데이터의 최소값과 최대값을 이용하여 0~1 사이의 값으로 변환하는 방법이다. 이 방법은 변수의 확률분포 형태에 제약이 없이 정규화할 수 있는 장점이 가지는 반면, 데이터에 이상치(Outlier)가 존재할 경우 정규화된 결과치가 왜곡될 수 있다. 본 연구에서는 Table 3의 점수화 기준에 의해 계산된 취약성 대리변수의 평가치가 다양한 확률분포의 형태를 따르고, 평가치에 이상치가 관찰되지 않는 점을 고려하여 Eq. (2)의 최소치/최대치를 이용한 정규화 방법을 본 연구의 무차원화 방법으로 채택하였다.

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (2)$$

여기서, x' 는 0~1 사이의 상대적인 값으로 정규화된 취약성 대리변수의 평가치, x 는 취약성 대리변수 점수화 기준에 의해 절대적인 값으로 계산된 평가치, $\max(x)$ 와 $\min(x)$ 는 취약성 대리변수 점수화 기준에 의해 절대적인 값으로 계산된 최대 평가치와 최소 평가치를 각각 의미한다.

2.4.3 취약성 대리변수 가중화 방안

취약성 지수는 각각의 취약성 대리변수에 대한 평가치의 조합으로 평가된다. 그렇지만 선정된 취약성 대리변수에 따라 취약성 지수에 미치는 영향은 상이할 수 있다. 이를 반영할 수 있는 방법 중 하나는 각각의 취약성 대리변수에 대한 중요도를 부여하여 가중화하는 것이다. 가중치(Weight Factor)를 파악할 수 있는 방법으로는 메타분석(Meta-Analysis), 계층 분석법(Analytic Hierarchy Process) 등이 있다. 본 연구에서는 기존 문헌을 분석하여 평균적인 효과를 정량적으로 분석할 수 있는 메타분석을 적용하였다. 메타분석은 여러 자료를 통합하여 검정력(Power of Test)을 증가시킬 수 있는 장점을 갖는 반면, 수집된 자료가 주관적이거나 편향된 경우 메타분석의 결과도 신뢰할 수 없는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서 적용한 메타분석 해석결과의 신뢰성을 높이기 위하여 수해 리스크와 관련된 국내·외의 대표적 문헌 14편을 기초로 Table 4와 같이 문헌상의 변수 사용빈도를 분석하여 각각의 취약성 대리변수에 대한 가중치를 산정하였다. Table 4와 같이 노출도(건축물 위험노출 밀집도)와 민감도(건축물 용도, 건축물 구조재료 형태, 건축물 구조설계 여부, 노후건축물 분포)의 각각의 합이 1.00이 될 수 있도록 관련 문헌에서 사용 빈도수를 전체 문헌수로 나누어 무차원화 하였다. 이렇게 산정된 취약성 대리변수의 가중치는 Eq. (1)과 같이 정규화된 취약성 대리변수의 평가치와 종합화하여 수해 리스크 평가 시 적용할 수 있는 건축물의 취약성 지수를 평가한다.

Table 4. Calculated Weight Factors of Proxy Variables for Building Vulnerability Index Subjected to Flood Hazard

Proxy Variable	Number of Total References	Number of Cited Reference	Calculating Weight Factor
Building Density	14	14	1.00
Building Usage Type	14	10	0.38
Structural Type		7	0.27
Structural Design		7	0.27
Building Deterioration		2	0.08

2.5 건축물 정보에 대한 자료 데이터베이스화

2.5.1 건축물대장 원시자료

앞 절에서 기술한 방법론에 따라 취약성 지수를 평가하기 위해서는 선정한 취약성 대리변수를 평가할 수 있는 건축물 정보에 대한 자료가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 건축행정시스템 세움터(E-AIS, 2019)에서 제공하는 건축물 대장을 이용하였다. 건축물대장은 소재지, 면적, 구조, 용도, 층수, 사용승인일, 소유자현황, 기타 건축물 등에 대한 정보를 포함하는 표제부와 전유부로 나누어진다. 본 연구에서는 수해에 대한 건축물의 취약성 지수를 평가하기 위하여 건축물대장 원시자료의 표제부 중 소재지, 건축면적, 연면적, 구조, 용도, 높이, 층수 및 준공연도에 대한 항목의 정보를 이용하였다. 건축물 정보에 대한 자료는 Table 3의 취약성 대리변수에 대한 점수화 기준을 기초로 평가치를 계산하는데 이용된다.

2.5.2 집계구별 건축물 정보에 대한 자료 구축

건축행정시스템 세움터로부터 확보된 건축물대장의 소재지는 지번정보(도로명)로 구성되어 있다. 건축물의 취약성 지수를 집계구별로 평가하기 위해서는 건축물대장의 정보를 집계구별로 가공할 필요가 있다. 본 연구에서는 GIS 관련 소프트웨어의 공간결합(Spatial Joint) 기능을 이용하여 건축물대장의 정보를 집계구별로 분류하였다. 공간결합 기능은 한 레이어(Layer)에서 다른 레이어로 속성을 전달하는 기능으로써, 집계구별 다각형(Polygon) 좌표값 내에 존재하는 건축물 위치(Point) 정보를 자동적으로 분류할 수 있다. 집계구별 다각형 좌표값은 통계지리정보서비스(SGIS, 2019)에서 제공하는 자료를 사용하였으며, 건축물의 위치 좌표값은 다음지도의 Aprication Programming Interface (API)를 활용하여 추출하였다.

3. 건축물 취약성 지수 평가결과

본 장에서는 앞 장에 기술한 자연재해 취약성 지수 평가 방법론을 기초로 수해에 대한 경주시 집계구별 건축물 취약성 지수의 평가결과를 보인다. 각각의 건축물 취약성 지표에 대한 대리변수와 취약성 지수 평가결과에 대한 자세한 분석 결과는 다음과 같다.

3.1 노출도에 대한 취약성 대리변수 평가결과

Fig. 3은 건축물의 노출도로 고려된 대리변수(건축물 위험 노출 밀집도)를 점수화한 후 정규화한 평가치이다. Fig. 3의 범례(Legend)의 값은 Eq. (2)의 최소치/최대치를 이용한 정규화 방법을 통하여 0~1 사이로 정규화한 값으로 값이 커질수록 해당 집계구에서의 건축물 취약성 대리변수에 대한 노출도가 높다는 것을 의미한다. 전반적으로 평가치가 0~0.2의 값을 갖는 것은 경주시 집계구별 면적에 비해 건축물이 차지하는 건축면적이 현저히 작기 때문이다. 경주시 동천동, 성건동, 용강동, 황남동, 황성동, 황오동 등 시내에 위치한 집계구(중앙지역)와 안강읍에 위치한 집계구(북서쪽지역)에서는 높은 위험노출 밀집도를 보여 다른 지역과 비교하여 볼 때 상대적으로 수해에 대해 피해를 받을 수 있는 건축물의 노출면적이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 3. Proxy Variable (Exposure): Building Density

3.2 민감도에 대한 취약성 대리변수 평가결과

Figs. 4~7은 건축물의 민감도로 고려된 4가지의 대리변수(건축물 용도, 건축물 구조재료 형태, 건축물 구조설계 여부, 노후건축물 분포)를 점수화 및 정규화한 평가치를 나타낸다. Figs. 4~7의 범례는 Fig. 3과 같이 Eq. (2)를 통하여 정규화한 값으로 값이 커질수록 해당 집계구에서 4가지의 건축물 취약성 대리변수에 대한 민감도가 높다는 것을 의미한다.

Fig. 4와 같이 건축물 용도에 대한 대리변수의 집계구별 평가치는 경주시 외곽지역에서 중요도 2, 3에 해당되는 건축물이 많이 분포되어 0.8~1.0의 높은 평가치를 보인다. 반면, 경주시 시내에 위치한 집계구(중앙지역)와 경주보문관광단지 조성되어 있는 신평동에 위치한 집계구(경주시 시내 동쪽지역)에서는 중요도 특, 1에 해당되는 사회기반시설(학교, 병원 등)과 건축물(5층 이상 숙박업소)이 밀집되어 있어 취약성 대리변수의 평가치가 상대적으로 낮은 0~0.6의 값으로 평가되었다.

Fig. 4. Proxy Variable: Building Usage Type

Fig. 5는 건축물 구조재료 형태(Structural Type)에 대한 대리변수의 집계구별 평가치로 경주시 산내면과 건천읍에 위치한 집계구(서쪽지역)의 경우 철근콘크리트구조 및 철골구조로 구성되지 않은 건축물이 상대적으로 많이 분포되어 0.8~1.0의 높은 평가치를 보인다.

Fig. 5. Proxy Variable: Structural Type

Fig. 6과 같이 건축물 구조설계 여부(Structural Design)에 대한 대리변수의 집계구별 평가치의 경우 경주시 산내면과 건천읍(서쪽지역), 내남면(남서쪽지역), 양북면(동쪽지역)에 위치한 집계구에서 0.8~1.0의 높은 평가치를 보인다.

Fig. 6. Proxy Variable: Structural Design

Fig. 7의 노후건축물 분포(Building Deterioration)에 대한 대리변수의 집계구별 평가치는 경주시 동천동, 성건동, 용강동, 황남동, 황성동, 황오동 등이 위치한 집계구(중앙지역)를 제외한 대부분의 경주시 외곽지역의 집계구에서는 노후건축물이 상대적으로 적게 분포되어 0~0.4의 평가치를 보인다.

Fig. 7. Proxy Variable: Building Deterioration

Fig. 8은 Table 4에 산정된 민감도에 대한 취약성 대리변수의 가중치를 반영하여 종합화된 집계구별 건축물의 민감도

를 나타낸다. Figs. 4~7과 같이 건축물 취약성 지표에 대한 대리변수의 평가치가 0~1 사이의 값인 것에 반해 Fig. 8의 종합화된 민감도는 각각의 대리변수별 가중치가 대리변수에 곱한 후 합해짐에 따라 0~0.99 사이의 값으로 평가된 것이다. 또한, Fig. 8은 건축물 용도(Fig. 4), 건축물 구조재료 형태(Fig. 5), 건축물 구조설계 여부(Fig. 6)에 대한 민감도 평가치가 0.8~1.0으로 평가되고, Table 4의 가중치가 0.27 이상이 적용됨에 따라 Fig. 8에 보이는 바와 같이 경주시 산내면과 건천읍에 위치한 집계구(서쪽지역)에서 0.79~0.99의 높은 평가치를 보이는 것이 확인되었다.

Fig. 8. Sensitivity: Four Weighted Proxy Variables

3.3 집계구별 건축물 취약성 지수 평가결과

Fig. 9는 Eq. (1)과 같이 노출도(Fig. 3)와 민감도(Fig. 8)에 대한 취약성 대리변수가 종합화된 집계구별 건축물 취약성

Fig. 9. Building Vulnerability Index for Census Output Areas of Gyeongju City Subjected to Flood Hazard

지수에 대한 평가결과이다. Fig. 9의 취약성 지수는 노출도와 민감도에 대한 취약성 대리변수가 서로 곱해짐에 따라 0~0.35 사이의 값으로 평가되었다. 이를 통하여 Table 5와 같이 총 534개의 경주시 집계구 중 건축물의 취약성 지수가 가장 높은 집계구 1위~10위에 대하여 노출도 및 민감도에 대한 취약성 대리변수와 지수의 평가치를 나타내었다. Table 5에 나타난 결과로부터 건축물의 취약성 지수가 가장 높은 집계구 1위~3위는 황성동, 4위는 안강읍, 5위~10위는 성건동에 위치한 것을 확인하였다.

Table 5에 보이는 바와 같이 1위~4위인 집계구는 아파트 단지(1위: 신안그린파크 아파트, 2위: 청우 아파트, 3위: 청우타운 3차 아파트, 4위: 안강유성 아파트)가 위치한 집계구로써, 타 지역(논, 밭, 저층 건축물 지역 등)에 비해 건축물이 수해에 노출되는 정도가 높기 때문에 취약성 지수가 0.1975~0.3475로 평가된 것을 확인할 수 있다. 특히, 집계구 4위가 위치한 안강읍은 2013년 4월 산대저수지 붕괴로 인하여 주택, 상가 등의 건축물에 수해가 발생된 이력이 있는 지역으로 현재 집계구의 건축물들이 상대적으로 취약함을 확인할 수 있었다(Go et al., 2015). 5위~10위인 집계구는 건축물들의 노출도(건축물 위험노출 밀집도)보다 민감도(건축물 용도, 건축물 구조재료 형태, 건축물 구조설계 여부, 노후건축물 분포)의 영향으로 높은 취약성 지수의 값(0.1546~0.1857)을 보이는 것으로 평가되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 자연재해 리스크 분석에 적용할 수 있는 건축물의 취약성 지수 평가 방법론을 제안하였다. 제안된 취약성 평가 방법론에 따라 자연재해 중 수해에 대한 경주시 집계구별 건축물의 취약성 지수를 대표적인 예로 평가하였

다. 건축물의 취약성 지수를 평가하기 위하여 취약성 지표에 대한 대리변수의 5가지 선정요건(계량 가능성, 자료 획득 용이성, 목적 부합성, 정기 측정성, 미래 예측성)을 기초로 수해에 대한 5개의 취약성 대리변수(건축물 위험노출 밀집도, 건축물 용도, 건축물 구조재료 형태, 건축물 구조설계 여부, 노후건축물 분포)를 선정하고, 선정한 대리변수의 평가치와 가중치의 조합으로 건축물의 취약성 지수를 평가하였다. 또한, 집계구별 건축물의 취약성 지수를 평가하기 위해 필수적으로 요구되는 건축물 정보에 대한 자료는 건축행정시스템 세움터(E-AIS, 2019)에서 제공하는 건축물대장과 GIS 관련 소프트웨어의 공간결합 기능을 이용하여 구축하였다.

본 연구에서는 총 534개의 경주시 집계구에 대하여 건축물 취약성 지표에 대한 5가지의 대리변수와 개별 대리변수에 대한 가중치를 반영하여 종합화된 집계구별 건축물 취약성 지수를 평가하였다. 그 중 건축물의 취약성 지수가 가장 높은 1위~10까지의 대표적인 집계구에 대한 평가결과를 고찰하였다.

본 연구에서 평가된 집계구별 건축물의 취약성 지수는 추후 발생될 수 있는 자연재해에 대한 리스크 평가를 통하여 손실 예측 및 경감에 활용될 수 있다. 추후 실제 피해 데이터와의 비교검증을 위하여 본 연구에서 평가된 취약성 지수와 위험요인 지수의 연계를 통해 수해로 인한 집계구별 리스크를 평가할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009)에 의해 수행되었습니다.

Table 5. Rank of Building Vulnerability Index in Gyeongju City Subjected to Flood Hazard

Rank	Census Output Area Code	Location	Building Density (Exposure)	Building Usage Type	Structural Type	Structural Design	Building Deterioration	Combined Sensitivity	Vulnerability Index
1	3702063020701	Hwangseong-dong	0.5314	0.6066	0.7541	0.7541	0.0000	0.6540	0.3475
2	3702063021302		0.9702	0.0066	0.0165	0.7195	0.0000	0.2796	0.2713
3	3702063021301		0.6960	0.3575	0.0000	0.6667	0.0000	0.3499	0.2435
4	3702012011201	Angang-eup	0.8229	0.0000	0.2857	0.4286	0.0000	0.2400	0.1975
5	3702055030001	Seonggeon-dong	0.2187	0.7260	0.8055	0.9911	0.7376	0.8491	0.1857
6	3702055030004		0.2204	0.5581	0.6670	0.9521	0.6267	0.7427	0.1637
7	3702055030005		0.2157	0.5739	0.6286	0.9887	0.5802	0.7468	0.1611
8	3702055030009		0.1977	0.7082	0.7136	0.9901	0.6576	0.8127	0.1607
9	3702055030013		0.1932	0.7159	0.7436	0.9734	0.6078	0.8126	0.1570
10	3702055040004		0.3428	0.0718	0.3718	0.7252	0.6955	0.4510	0.1546

References

- Architectural Institute of Korea (AIK). (2016). *Korean building code-Structural*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Carreño, M.L., Cardona, O.D., and Barbat, A.H. (2007). A disaster risk management performance index. *Natural Hazards*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-20.
- Cutter, S.L., Boruff, B.J., and Shirley W.L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, Vol. 84, No. 2, pp. 242-261.
- Dwyer, A., Zoppou, C., Nielsen, O., Day, S., and Roberts, S. (2004). *Quantifying social vulnerability: A methodology for identifying those at risk to natural hazards*. Geoscience Australia Record 2004/14.
- Electronic Architectural Administration Information System (E-AIS). (2019). Retrieved from <https://www.eais.go.kr/>
- Go, D.H., Lee, K.H., Kim, J.M., and Kim, S.W. (2015). FLO-2D simulation of the flood inundation zone in the case of failure of the Sandae Reservoir Gyeongju, Gyeongbuk. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 25, No. 4, pp. 449-458.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lee, C.H., Lee, S., and Yeo, C.G. (2006). Development of the regional safety assesment model in Seoul: Focusing on Flood. Report No. 2006-R-37, The Seoul Institute.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2017). *Statistical yearbook of natural disaster*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2018). *Methodology development for the estimation and prediction of direct and indirect damages/losses from flood and wind disasters*. Disaster Prediction and Mitigation Technology Development Program.
- Park, Y., Kim, J., Jo, D.J., and Kim, S. (2015). Urban mud and debris flow disaster vulnerability assessment associated with landslide hazard map: Application to Busan, Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 283-289.
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., and Mouton, F. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: The disaster risk index. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 9, pp. 1149-1159.
- Schmidt-Thomé, P. (2006). *Natural and technological hazards and risks affecting the spatial development of european regions*. Special Paper 42, Geological Survey of Finland. European Spatial Planning Observation Network (ESPON).
- Statistical Geographic Information Service (SGIS). (2019). Retrieved from <https://sgis.kostat.go.kr/>
- Sim, O.B., Lee, B.J., Lee, C.H., and Kim, J.H. (2013). A study on the methods to analyze climate change driven urban disaster vulnerability for disaster preventive urban planning. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 6, pp. 239-247.
- Tapsell, S., Tunstall, S., Green, C., and Fernandez-Bilbao, A. (2005). *Integrated flood risk analysis and management methodologies: Task 11 social indicator set*. Project Contract No. GOCE-CT-2004-505420, FLOODsite.
- Van Westen, C.J., Alkema, D., Damen, M.C.J., Kerle, N., and Kingma, N.C. (2011). *Multi-hazard risk assessment*. Distance Education Course Guide Book, United Nations University (UNU-ITC DGIM).
- Yeon, H.J., and Jeong, K.C. (2014). An urban wind disaster risk index model considering socio-economic environments in South Korea. *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 18, No. 1, pp. 9-19.

Received	August 26, 2019
Revised	August 28, 2019
Accepted	September 9, 2019