

# 지역특성을 반영한 지진손실평가

## Earthquake Loss Estimation Including Regional Characteristics

김준형<sup>1)</sup> · 홍윤수<sup>2)</sup> · 유은종<sup>3)\*</sup>

Kim, Joon-Hyung<sup>1)</sup> · Hong, Yun-Su<sup>2)</sup> · Yu, Eunjong<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 건축공학과 석사과정, <sup>2)</sup>한양대학교 건축공학과 박사과정, <sup>3)</sup>한양대학교 건축공학부 교수

<sup>1)</sup>Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, <sup>2)</sup>Ph.D. Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, <sup>3)</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

### / A B S T R A C T /

When an earthquake occurs, the severity of damage is determined by natural factors such as the magnitude of the earthquake, the epicenter distance, soil properties, and type of the structures in the affected area, as well as the socio-economic factors such as the population, disaster prevention measures, and economic power of the community. This study evaluated the direct economic loss due to building damage and the community's recovery ability. Building damage was estimated using fragility functions due to the design earthquake by the seismic design code. The usage of the building was determined from the information in the building registrar. Direct economic loss was evaluated using the standard unit price and estimated building damage. The standard unit price was obtained from the Korean Real Estate Board. The community's recovery capacity was calculated using nine indicators selected from regional statistical data. After appropriate normalization and factor analysis, the recovery ability score was calculated through relative evaluation with neighboring cities.

**Key words:** Earthquake loss estimation, Regional characteristics, Resilience, Socio-economic factors

## 1. 서론

재해에 의한 피해의 규모나 양상은 지역의 자연적, 인위적, 사회적 특성에 따라 많은 차이가 있다. 각 국가에서는 지진발생시 건축물붕괴, 인명 및 재산 피해를 최대한 빨리 예측하고 대처하기 위해 지진피해예측시스템을 운영하고 있다. 미국의 HAZUS[1]와 유럽의 SYNER-G[2]가 대표적인 사례이다. 이들 지진피해 예측시스템의 목적은 지진발생시 예상되는 피해 정도에 따라 응급지원 및 복구자원을 효율적으로 배분하기 위한 것이다. 하지만 지진발생시 피해정도는 지진의 크기, 진원과의 거리, 해당지역의 지반 특성과 같은 자연적인 요인과 건축물의 구조형식 및 내진설계여부와 같은 구조적 특성 뿐 아니라 지진이 발생한 지역에 거주하고 있는 인구수 및 시설의 밀집도, 방재대책, 지역사회의 경제력과 같은 사회경제적 특성에도 영향을 받는다. 즉, 동일한 크기의 지진이 발생할지라도 그 지역의 사회경제적 역량에 의해 지진피해에서 벗어나는 속도가 달라질 수 있다. 따라서 이러한 사회적 특성도 함께 고려하여 지진피해를 최소화하기 위한 방재정책을 수립

하고 준비할 필요가 있다.

자연재난은 아니지만 일상적인 위협의 발생가능성, 취약성, 회복력을 통해 지역의 안전도를 평가하는 사례는 행안부의 ‘지역안전지수’[3]를 들 수 있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 지역안전지수는 안전에 관한 각종 통계를 활용하여 자치단체별 안전수준을 1~5등급으로 계량화한 등급으로 1등급일수록 동일 단위 행정구역 내에서 상대적으로 안전하다는 뜻이다. 지역안전지수의 목적은 안전사고 사망자의 체계적 감축을 위해 안전관련 정책 사업을 결정·집행하는 지자체의 관심과 자율적 개선을 유도하기 위해서이다. 지역안전지수는 ‘재난 및 안전관리 기본법’에 근거하여, 교통사고, 화재, 범죄, 생활안전, 자살, 감염병 등 6개 평가분야에 대해 2015년부터 매년 산출해 생활안전지도 홈페이지[3] 및 언론 브리핑 등을 통해 공개된다.

지진과 같은 자연재난의 경우도 지역별 지리적 특성에 따라 위험도를 경감시키거나 심화시키는 요인들을 고려한 안전도지표를 산정하고 그 결과를 지역별 방재인프라 확충을 위한 정량적인 근거자료로 활용할 수 있다. 예를 들어 예상되는 부상자수와 응급환자 수용능력의 비교, 예상되는 이재민의 수와 임시주거시설의 수용능력의 비교, 예상되는 화재건수와 소방능력의 비교 등을 통해 각 시설의 규모와 분포의 적절성을 판단할 수 있다. 미국에서는 이러한 목적으로 다양한 재해유형에 대해 각 지역별 위험도를 정기적으로 평가하여 제공하고 있다[4]. 일본의 경우 각 지자체별로 지진 재해

\*Corresponding author: Yu, Eunjong

E-mail: eunjongyu@hanyang.ac.kr

(Received September 19, 2023; Revised October 4, 2023; Accepted October 4, 2023)



Fig. 1. Regional safety index [3]



Fig. 2. Community Earthquake Risk Assessment Report of Tokyo [5]

예방을 위해 지역특성을 반영한 지역위험도를 정기적으로 조사하여 발표하고 있다. 동경도의 지진 지역위험도 측정조사[5]가 대표적이다. 국내에서는 아직 지진시 재난발생을 대비한 지역특성의 분석에 대한 연구는 수행되지 않았다. 본 연구에서는 지진에 대한 지역안전도 평가항목의 하나로써 직접적인 경제적피해와 그 지역의 사회경제적 회복력을 같이 고려하는 복구역량도를 정의하고 하나의 사례로서 시범적용 지역에서 복구역량도를 평가하고 향후 보완이 필요한 사항을 정리하였다.

## 2. 지역위험도의 사례조사

### 2.1 지역안전지수

지역안전지수[3]는 ‘재난 및 안전관리 기본법’에 따라 교통, 화재, 범죄, 생활안전, 자살, 감염병의 6개 항목에 대해 분야별 안전수준을 1~5등급으로 평가한다. 평가결과는 2015년부터 매년 공개하고 있다. 지역안전도는 식(1)과 같이 각 지역별로 위해지표, 취약지표, 경감지표를 산정한 후 상대비교를 통해 1~5등급으로 평가한다. Fig.1은 지역안전지수의 설명자료이다.

$$\text{지역안전지수} = 100 - (\text{위해지표} \times 50\%) - (\text{취약지표} \times 10\%) + (\text{경감지표} \times 20\%) \pm (\text{의식지표} \times 20\%) \quad (1)$$

여기서 위해지표는 분야별 사망자수 및 발생건수 등 결과지표를 뜻하며, 취약지표는 사망자 발생 등의 원인이 될 수 있는 지표를, 경감지표는 사망자 발생 등을 경감할 수 있는 지표이다. 의식지표는 위해발생예방 및 대응을 위한 주민 노력을 나타내는 지표이다. 이들 지표는 광역시/도/시/군/구 5개 그룹의 행정구역별로 표준화하여 산정된다.

### 2.2 동경도의 지진 지역위험도 측정조사[5]

동경도 지진에 관한 지역위험도 측정조사는 행정구역간의 지진피해를

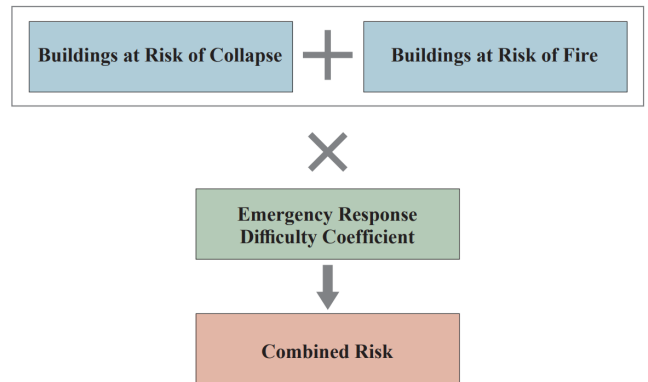


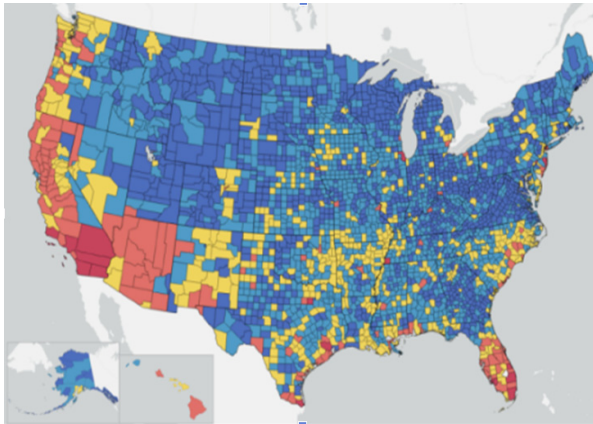
Fig. 3. Assessment of combined risk [5]

비교 평가하여 상대적으로 위험한 지역에 우선적으로 지진피해 경감 대책을 수립하기 위한 목적으로 5년마다 실시하고 있다. Fig. 2는 가장 최근인 2022년의 평가보고서이다. 평가 세부항목은 평가시기마다 다소 변화가 있으나 현재는 Fig. 3과 같이 지진으로 인한 건물 붕괴위험도(Buildings at Risk of Collapse), 화재 위험도(Buildings at Risk of Fire), 활동 곤란도(Emergency Response Difficulty Coefficient)의 세 가지 세부 항목에 대한 평가를 수행한다. 최종 평가결과는 세부 항목의 평가결과를 토대로 산출된 종합위험도를 상대적으로 비교하여 대상 행정구역들을 5단계 위험도 등급으로 분류하여 나타낸다.

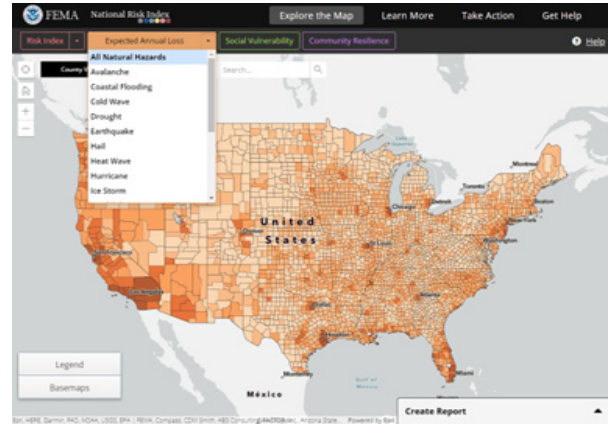
### 2.3 미국의 National Risk Index[4]

미국 재난관리청(FEMA)에서는 지진을 포함한 18개의 재해유형(홍수, 산사태, 가뭄, 이상기온, 산불, 허리케인, 토네이도 등)에 대해 지방자치단체의 재난관리자가 재난발생시 대응계획작성 등의 의사결정에 도움을 주기 위해 시각화된 미국 재난지도를 제공하고 있다.

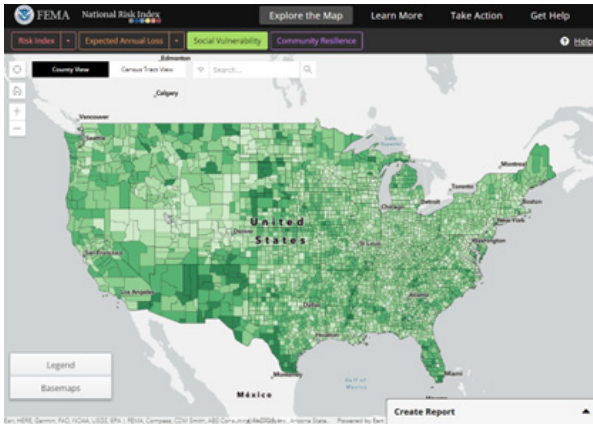
재난지도의 위험지수(risk index)의 계산식은 식(2)와 같으며 한국의 지역안전지수, 일본의 지진지역위험도와 마찬가지로 상대비교를 통해 1~5



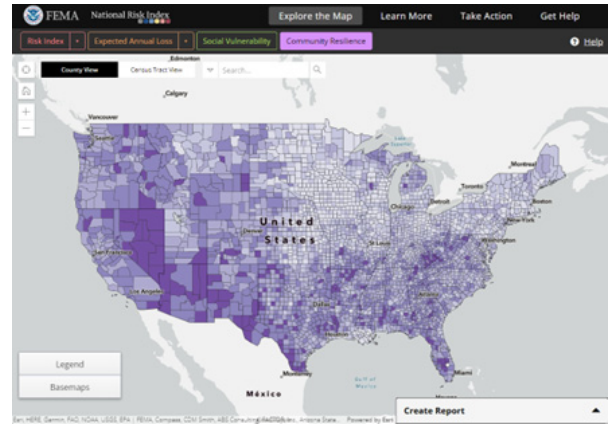
(a) Risk Index



(b) Annual Expected Loss



(c) Social Vulnerability



(d) Community Resilience

Fig. 4. National Risk Index [4]

등급으로 평가한다.

$$Risk = \frac{EAL \times SV}{CR} \quad (2)$$

식 (2)에서 EAL(Expected Annual Loss)은 연중예상손실액으로 매년 자연재해로 인한 건물가치, 인구 및 경제적 가치의 예상손실을 나타낸다. SV(Social Vulnerability)는 통계자료로부터 자연재해에 대한 사회집단 내 구성원의 취약성을 나타내며, CR(Community Resilience)는 자연재해의 영향에 대비하고 적응하고 회복하는 지역사회의 회복력을 나타낸다. Fig. 4는 식 (2)에 사용되는 미국전역에 대해 위험지수, 연중예상손실액, 사회적 취약성, 지역사회 회복력 평가결과를 지도의 형태로 나타낸 것이다.

지진에 대한 위험지수의 산정절차는 HAZUS의 방법론을 구간으로 개발되었으며 FEMA P-366[6]에 정리되어 있다. FEMA P-366에서는 HAZUS[1]의 방법을 적용하여 다음과 같은 5단계의 절차를 통해 예상손실을 산정한다.

- 1단계: 확률 및 통계 데이터 준비: 지진발생 확률, 건물 가치 데이터
- 2단계: 건물 손상에 따른 손실액 산정: HAZUS의 방법에 의한 건물손실액 평가
- 3단계: 평균 연간지진손실액(AEL)산정: 건물피해와 인명피해를 포함한 손실액 평가

4단계: 평균 연간지진손실비율(AELR) 산정: 건물별 손실액을 건물가치로 정규화한 손실비율 산정

5단계: 건물손실액을 기반으로 연간 사상자, 잔해처리비용, 대피소 요구량 산정

연중예상손실액 EAL(Expected Annual Loss)은 매년 자연재해로 인한 건물가치, 인구 및 경제적 가치의 예상손실액을 나타내는 값으로 지진재해의 경우 지진 손실평가(Earthquake Loss Estimation)를 통해 산정된다. Fig. 5은 HAZUS에서 사용되는 지진손실평가의 개념을 나타낸 그림이다. 우선 지진손실평가의 입력치에 해당하는 지반운동의 크기를 평가 혹은 가정한다. 각 지역에서의 지반운동의 크기는 감쇠식(Attenuation model)을 사용하여 산정한다. Inventory 모듈에서는 각 지역의 지반특성, 그 지역의 건물분포, 인구 통계 자료 등의 정보를 보유하고 있다.

지진데이터가 입력이 되면 먼저 각 지역의 지반조건을 고려한 지진가속도가 산정되며 이 값과 대상 지역 내 건물군의 취약도 함수를 통해 그 지역 내 구조물의 피해를 계산한다. 지진취약도 곡선은 건축물의 구조 유형별로 정의되어 있으며 그 결과는 Slight, Moderate, extensive, Complete의 4단계의 손상단계별 발생확률이다. 건물 가치의 손실 평가는 대상 지역내 건축물의 구조유형별 손상정도에 건물의 용도유형별 가치액을 곱하고 합산하여 산정되며 이후 화재, 잔해 및 위험물질 발생, 침수 등에 의한 2차 피해와 영업손실에 의한 간접적인 피해액이 추가된다.

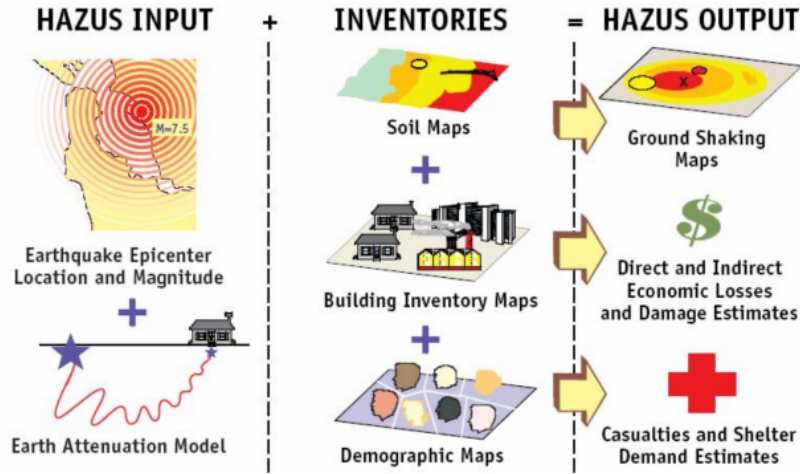


Fig. 5 Concept of earthquake loss estimation [7]



Fig. 6. New Building Unit Price List (2021)

직접적인 경제적 피해액 산정시 사용되는 데이터는 다음과 같다.

- ① 건물구조유형별 손상단계별 확률
- ② 건물인벤토리 데이터
- ③ 건물용도별 평균개축비용, 비구조요소의 평균 신설비용, 건물용도별 건물내 집기의 구입비용

즉, 직접적인 경제적 피해액은 건축물을 구조형식별로 구분하여 피해정도(손상단계)를 예측하고 용도별 가치를 가정한 후 손상단계별 구조물의 개축비용 대비 수리비의 비율과 손상단계별 구조물의 손상확률을 곱하고 합산하여 피해액을 산정한다. 손실편가는 구조물, 변위민감형 비구조요소, 가속도 민감형 비구조요소, 건물내 집기로 구분하여 각각 수행하고 그 결과를 모두 합산하여 전체 경제적 피해액을 산정한다. 우리나라의 경우 건물의 개축비용은 한국부동산원의 건물신축단가표를 통해 구할 수 있다(Fig. 6).

### 3. 지역특성을 반영한 지진손실편가

본 연구에서는 지진에 대한 지역안전도 평가항목의 하나로서 직접적인 경제적피해와 그 지역의 사회경제적 회복력을 같이 고려하는 복구역량도를 정의하였다. 종합지역안전도는 건축물의 지진피해, 지진화재, 경제적 피해, 인명피해 등을 평가한 후 이를 종합하여 결정된다. 일본 동경도의 지진에 관한 지역위험도 측정조사를 하나의 예시로 들 수 있다. 이처럼 지역안전도는 지진발생시 사후대처보다는 평상시 지진피해 예방을 주 목적으로 하고 있으므로 일반적인 지진피해예측시스템처럼 주어진 진원 위치와 지진 규모로부터 감쇠식을 사용하여 각 지역별 지반운동의 크기를 구하고 이 지진강도에 대해 건축물의 구조유형별 붕괴확률을 산정하는 시나리오 기반 평가보다는 모든 지역에서 동일한 지반운동을 가정한 지진피해결과가 사용된다. 즉 동일한 크기의 지진에 대해 상대적으로 피해가 크게 발생하는 지역에 피해예방대책을 집중하기 위함이다.

#### 3.1 건축물의 지진피해예측

미국의 HAZUS와 유사하게 우리나라에서도 지진피해예측시스템이 운영되고 있다. 이 시스템에서는 국내실정에 맞게 건축물의 구조형식을 14종으로 분류하고 각 구조형식을 저층, 중층, 고층 등으로 높이에 따라 나눠 결과적으로 41종으로 분류하고 있다. 41개 구조유형은 다시 내진설계 여부 및 설계지진하중에 의해 정해지는 내진성능 수준에 따라 Pre-code, Low-code, Moderate-code의 3단계로 분류하고 각각에 대해 취약도 함수가 정의되어 있다.

국내의 지진취약도 함수는 2009년 당시 소방방재청[8]에 의해 개발되었으며 그 이후 지속적으로 개선이 이루어지고 있다. 특히 2016년 경주, 2017년 포항지진 이후 실제 지진피해를 참고하여 지진피해예측 시스템을 개선하기 위한 노력으로 포항지진시 지진피해가 컸던 필로티건물 등을 중심으로 취약도 함수 개선이 이루어졌다[9-11]. 본 연구에서는 구조형식별로 개선된 취약도 함수와 함께 최근 연구[12]를 통해 도출된 스펙트럼가속도기반 지진취약도함수(식(3))를 활용하여 동일기반암 운동에 대해 500 m × 500 m의 격자단위로 지반증폭효과를 고려하여 지진피해를 산정하였다.

$$P[ds|S_a] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{a,ds}} \ln \left( \frac{S_a}{S_{a,ds}} \right) \right] \quad (3)$$

여기서,

- $\Phi$  : 표준 정규누적분포함수
- $ds$  : Slight, Moderate, Extensive, Complete에 해당하는 4단계의 손상상태
- $S_a$  : 대상구조물의 고유주기 혹은 그와 유사한 주기에 해당하는 스펙트럼가속도
- $\bar{S}_{a,ds}$  : 손상상태  $ds$ 에 도달할 때의 스펙트럼가속도의 중간값
- $\beta_{a,ds}$  : 손상상태  $ds$ 에서의 변동성을 나타내는 대수표준편차

이다.

### 3.2 손실 예측

손실은 지진 발생으로 인한 건물의 수리 및 교체 비용의 기댓값을 의미한다. 본 연구에서 연간손실액은 건물의 손상으로 인한 직접적인 피해액으로 한정하였다. 일반적으로 지진 손실평가에는 이러한 직접적인 피해로부터 파생되는 화재발생, 잔해처리 및 위험물질 누출 등의 2차 피해, 또한 영업손실에 의한 간접피해액을 모두 포함한다.

건물의 손상에 의한 직접적인 피해액은 식 (4)와 같이 주어지 지진동에 의해 예상되는 건물의 손상정도별 피해비율에 건물의 신축단가를 곱하여 산정하였다.

$$CS = BRC \times \sum_{ds=2}^5 (PMBSTR_{ds} \times RCS_{ds}) \quad (4)$$

여기서,

- $CS$  : 직접적인 피해액
- $BRC$  : 건물 신축단가
- $PMBSTR_{ds}$  : 3.1 지진피해예측단계에서 산정된  $ds$ 의 손상이 발생할 확률
- $RCS_{ds}$  :  $ds$ 의 손상단계에서 감가비율
- $ds$  : No damage, Slight, Moderate, Extensive, Complete에 해당하는 5단계의 손상단계

이다.

$PMBSTR_{ds}$ 는 지진피해예측으로부터 산정되는 No Damage, Slight, Moderate, Extensive, Complete의 5단계별 손상의 발생확률이다. 또한,  $RCS_{ds}$ 는 각 손상단계별 건물가치의 감가비율로 건물용도마다 상이하다. 본 연구에서 손상단계별 건물가치의 감가비율은 HAZUS의 값을 참고로 결정하였다. 즉, HAZUS에서는 건물의 용도를 33종으로 나누고 각 용도별로 손상단계별 신축비용 대비 수리비용을 제시하고 있으므로 이를 참고하여 우리나라 건축물 대장에서 정의하는 46종의 대표건축물별 감가율을 결정하였다. 건물의 신축단가  $BRC$ 는 한국부동산원의 신축건물단가표[13]의 건물유형별 단위면적당 신축표준단가에 연면적을 곱하여 구한다.

식 (4)의 계산은 대상구역내 모든 건물에 대해 구조제, 가속도 민감형 비

구조요소, 변위민감형 비구조요별로 수행하고 이를 모두 합산한다. 이를 위해서는 평가대상내 건물인벤토리 데이터가 필요하다. 이 인벤토리데이터에는 지진피해예측을 위해 41개 구조유형중 어디에 속하는지, 또한 건축연도와 지역으로부터 Pre-code, Low-code, Moderate-code 중 어디에 속하는지 판정할 수 있는 정보가 포함되어야 한다. 또한 손실예측을 위해서는 연면적과 함께 한국부동산에서 제시하는 건물유형 중 어디에 속하는지 판단할 수 있는 정보가 필요하다.

우리나라의 경우 국가에서 관리하는 건물 인벤토리는 건축물대장이다. 하지만 건축물대장에는 구조시스템이 명확히 기재되어 있지 않으며 용도 분류도 정확하지 않다. Kim[14]은 건축물 대장의 정보로부터 RC구조 건축물의 구조유형을 판단하는 알고리즘을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 건축물 대장의 구조재료 및 Kim[14]의 알고리즘을 통해 41종의 구조유형을 판단하고 구조유형과 건축물 대장 표제부에 나타나있는 구조, 주용도, 지붕 등으로부터 건물용도를 판단하였다.

한국부동산원에서 매년 편찬하는 건물신축단가표는 건축물의 용도를 18종으로 분류하고 좀더 세부적으로 46종의 대표건축물을 정의하고 있다. 또한 전기설비, 위생설비, 급배수-급탕설비등의 부대설비 11종에 대해서도 단위면적당 단가를 수록하고 있다. 본 연구에서는 건축물대장의 정보로부터 46종의 대표건축물중 어디에 속하는지 판단하여 단가를 산정하였다. 부대설비의 경우 특성을 고려하여 가속도민감형 비구조요소와 변위민감형 비구조요소로 구분하고 비구조요소의 취약도함수로부터 손상단계별 확률을 구하고 손상단계별로 감가비용을 산정하였다.

### 3.3 회복력

미국의 National Risk Index에서는 식(2)과 같이 손실평가결과에 추가로 자연재해에 대한 사회집단내 구성원의 취약성을 나타내는 SV(Social Vulnerability)와 자연재해의 영향에 대비하고 적응하고 회복하는 지역사회의 회복력을 나타내는 CR(Community Resilience)을 추가로 고려하여 위험지수를 평가한다[15].

사회적 취약성(Social Vulnerability)은 SoVI 지수[16]를 사용하여 평가하는데 이 지수는 사망, 부상, 손실 또는 생계 중단을 포함한 자연 재해의 악영향에 대해 사회 집단을 구성하는 개인의 민감성을 나타내는 지표로 Table 1과 같은 29개의 사회경제적인 통계자료를 활용하여 산출한다. 표에서 볼 수 있듯이 SoVI지수는 사회경제적 지위(소득, 정치력, 사회적 권위), 성별, 인종, 나이, 고용상태, 주택의 소유형태, 직업, 가족 구조, 교육수준, 의료 서비스 에의 접근성 등의 사회경제적 요인을 망라하며, 동일한 수준의 지역사회와의 상대비교를 통해 평가한다. SoVI지수가 높을수록 위험성이 높아진다.

Table 1의 각 항목을 나타내는 데이터는 기본적으로 미국 통계청(US Census Bureau)의 통계자료로부터 구한다. 각 통계자료는 서로 다른 단위를 가지므로 분석을 위해서는 정규화되어야 한다. 즉, 비교대상이 되는 모든 지역사회의 통계자료를 수집한 후 통계자료의 성격별로 비율, 1인당 수치, 단위면적당 수치 등으로 정규화한다. 이후 이들값은 0의 평균값과 1의 분산값을 가지는 z-score 표준점수로 변환된다. 또한 주성분분석(Principal Component Analysis), 상관계수 등을 통해 각 통계자료간의 상관성 및 유사성을 분석한 후 SoVI 지수를 산정한다.

**Table 1.** SoVI (Social Vulnerability) index

No.	Notation	Definition
1	QASIAN	Percent Asian
2	QBLACK	Percent Black
3	QSPANISH	Percent Hispanic
4	QINDIAN	Percent Native American
5	QAGEDEP	Percent Population under 5 years or 65 and over
6	QFAM	Percent Children Living in 2-parent families
7	MEDAGE	Median Age
8	QSSBEN	Percent Households Receiving Social Security Benefits
9	QPOVTY	Percent Poverty
10	QRICH	Percent Households Earning over \$200,000 annually
11	PERCAP	Per Capita Income
12	QESL	Percent Speaking English as a Second Language with Limited English Proficiency
13	QFEMALE	Percent Female
14	QFHH	Percent Female Headed Households
15	QNRRES	Nursing Home Residents Per Capita
16	QNOHLTH	Percent of population without health insurance (County Level ONLY)
17	QED12LES	Percent with Less than 12th Grade Education
18	QCVLUN	Percent Civilian Unemployment
19	PPUNIT	People per Housing Unit
20	QRENTER	Percent Renters
21	MDHSEVAL	Median Housing Value
22	MDGRENT	Median Gross Rent
23	QMOHO	Percent Mobile Homes
24	QEXTRCT	Percent Employment in Extractive Industries
25	QSERV	Percent Employment in Service Industry
26	QFEMLBR	Percent Female Participation in Labor Force
27	QNOAUTO	Percent of Housing Units with No Car
28	QUNOCCHU	Percent Unoccupied Housing Units
29	HOSPPTPC	Hospitals per Capita (County Level ONLY)

지역사회회복력은 BRIC(Baseline Resilience Indicators for Communities) 지수[17]로 평가한다. BRIC 지수는 Table 2와 같이 6개의 범주에 해당하는 49개의 평가항목을 사용하여 평가한다. SoVI 지수와 마찬가지로 각 통계자료는 서로 다른 단위를 가지므로 분석을 위해서는 상대비교 및 정규화의 과정을 거친다. 즉, 최대값을 1, 최소값을 0으로 변환하여 점수화하고 BRIC 지수는 각 범주 점수의 평균값의 합계로 산정한다.

기본적으로 SoVI 지수는 재난에 대한 사회구성원의 개인적 취약성 평가를 목적으로 하고 BRIC 지수는 사회, 경제 및 제도적 회복력 평가를 목적으로 하고 있다. 하지만 이들 지수 평가에는 인구와 사회경제적 특성을 나타내는 통계자료가 동일하게 사용되므로 두 수치사이에 어떠한 경향성을 가질 것으로 생각될 수도 있다. 그러나 사례연구에 의하면 SoVI 지수와 BIRC 지수의 상관관계는 -0.26으로 나타나 통계적으로 상관관계가 낮음이 보고되었다[18].

Table 1과 Table 2에서 볼 수 있듯이 National Risk Index의 사회적 취약성과 지역사회의 회복성을 평가하는 항목은 상당히 많으며 인종이나 차

량보유현황 등 우리나라 실정에 맞지 않는 부분도 상당히 있어 우리나라의 실정에 맞는 평가지표 개발이 필요하다.

## 4. 평가 예제

### 4.1 평가대상 지역

4장에서는 시범적용지역을 대상으로 건축물 내진설계기준에 따른 설계 지진에 해당하는 동일지반운동에 대해 건축물의 지진피해예측, 이를 근거로 한 손실예측과 이후 그 지역의 사회경제적인 특성을 반영한 회복력을 평가해보았다.

시범적용대상지역은 국내의 중규모 도시이다. 평가 대상도시 내의 전체 건축물의 수는 89,006동으로 건축물 대장의 정보로부터 구조형식, 용도, GPS 좌표 등 지진피해 및 손실평가를 위한 건물인벤토리를 작성하였다. Table 3은 건물동수기준으로 시범적용대상 지역내 건축물의 구조형식중 많이 사용되는 순서로 10개의 구조형식과 그 비율을 나타낸 표이다. 표에서 볼 수 있듯이 URML(저층무보강조적조)가 전체 건물의 동수 중 30.4%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며 그 다음으로는 저층철골조(SIL), 목구조(W1), 저층RC조(C2L1)이 많이 사용되고 있다. 용도별로는 Table 4에 나타낸 바와 같이 단독주택이 54%로 가장 구성비가 높으며 그 다음으로는 2종과 1종 근린생활시설이다. 또한 건축시점으로 판단해 볼 때 비내진건물인 Pre-code 건물이 56%이며 내진설계 건축물인 Moderate-code가 44%이다. 내진설계 적용 건축물은 지진구역 II의 경우 Low-code, 지진구역 I의 경우 Moderate-code로 구분된다. 시범적용대상지역은 지진구역 I에 속하므로 내진설계 건물물은 모두 Moderate-code에 해당한다.

앞서 언급한 바와 같이 먼저 이들 건물에 동일한 크기의 지진동이 작용한다고 가정하고 건축물의 지진피해를 산정하였다. 이 때 각 건물의 위치한 대지의 지반정보로부터 지반증폭계수를 산정하고 이를 입력지진동으로 사용하였다. 각 격자별 지반특성 및 조건은 선장국 등(2023)이 다양한 국내 지반조사 자료를 공간정보화하여 구축한 DB를 활용하였다[19]. 500 m×500 m로 구획된 각 격자의 지반등급은  $S_2$  지반이 68.3%로 가장 많고 그 다음으로  $S_4$ 가 18.4%,  $S_1$ 과  $S_3$ 가 각각 6.7%를 차지하였다.

### 4.2 손실평가

지진취약도함수는 개별 건축물의 특성을 평가하기보다는 유형화된 건물의 집합적인 지진피해 특성을 평가하기 위한 목적으로 개발되었다. 따라서, 개별 건물의 손상수준보다는 유형별 건물의 손상확률을 나타낸다. Table 5는 많이 사용된 구조형식(Table 3 참조)의 각 손상단계별 발생확률을 나타낸 표이다. 비보강조적조 (URML), 저층 필로티형 콘크리트 전단벽 건물(C5L), 저층 콘크리트전단벽 건물이 상대적으로 지진에 취약한 것으로 보이며 이들 구조형식에서 Moderate에 해당하는 손상의 발생확률이 가장 큰 것으로 나타났다. 현재 사용하고 있는 취약도 함수는 내진설계시 적용하는 용도별 중요도계수를 무시하고 일반구조물의 해석결과를 반영하여 취약도함수를 도출하였다. 따라서 내진특등급과 내진 I 등급으로 설계된 건물의 경우 지진피해를 과대평가하게 됨에 유의할 필요가 있다.

**Table 2.** BRIC (Baseline Resilience Indicators for Communities) Index

Category	No.	Definition
Social resilience	1	(% population with college education) – (%population with less than high school education)
	2	% Population below 65 years of age
	3	% Households with at least one vehicle
	4	% Households with telephone service available
	5	% Population proficient English speakers
	6	% Population without sensory, physical, or mental disability
	7	% Population under age 65 with health insurance
	8	Psychosocial support facilities per 10,000 persons
	9	Food security rate
	10	Physicians per 10,000 persons
Economic resilience	11	% Owner-occupied housing units
	12	% Labor force employed
	13	Negative Gini coefficient
	14	% Employees not in farming, fishing, forestry, extractive industry, or tourism
	15	Negative absolute difference between male and female median income
	16	Ratio of large to small businesses
	17	Large retail stores per 10,000 persons
	18	% Labor force employed by federal government
Community capital	19	% Population not foreign-born persons who came to US within previous five years
	20	% Population born in state of current residence
	21	% Voting age population participating in presidential election
	22	Persons affiliated with a religious organization per 10,000 persons
	23	Civic organizations per 10,000 persons
	24	Red cross volunteers per 10,000 persons
	25	Red cross training workshop participants per 10,000 persons
Institutional resilience	26	Ten year average per capita spending for mitigation projects
	27	% Housing units covered by National Flood Insurance Program
	28	Governments and special districts per 10,000 persons
	29	Presidential disaster declarations divided by number of loss-causing hazard events
	30	% Population in communities with Citizen Corps program
	31	Proximity of county seat to state capital
	32	Proximity of county seat to nearest county seat within a Metropolitan Statistical Area
	33	Population change over previous five year period
	34	% Population within 10 miles of nuclear power plant
	35	Crop insurance policies per square mile
Housing/infrastructural resilience	36	% Housing units not manufactured homes
	37	% Vacant units that are for rent
	38	Hospital beds per 10,000 persons
	39	Major road egress points per 10,000 persons
	40	% Housing units built prior to 1970 or after 2000
	41	Hotels/motels per 10,000 persons
	42	Public schools per 10,000 persons
	43	Rail miles per square mile
	44	% Population with access to broadband internet service
Environmental resilience	45	Farms marketing products through Community Supported Agriculture per 10,000 persons
	46	% Land in wetlands
	47	Megawatt hours per energy consumer
	48	Average percent perviousness
	49	Inverted water supply stress index

**Table 3.** Composition of buildings in terms of structure type

Structure Type	Type of buildings	Ratio
URML	Unreinforced Masonry (1-5 stories)	30.40%
S1L	Steel Moment Frame (1-5 stories)	26.80%
W1	Traditional Wood Structure	13.50%
C2L1	Concrete Frame with URM Infill Walls (1-2 stories)	10.20%
C2L2	Concrete Frame with URM Infill Walls (3-5 stories)	6.10%
C5L	Pilotis Type Concrete Shear Walls (1-5 stories)	5.10%
C3L2	Concrete Shear Walls (3-5 stories)	1.50%
C4L2	Concrete Frame with Shear Walls (3-5 stories)	1.10%
W2	Western Wood Structure	0.80%
C3M	Concrete Shear Walls (6-15 stories)	0.80%
C3H	Concrete Shear Walls (16+ stories)	0.70%

**Table 4.** Composition of buildings in terms of building usage

Rank	Building Usage	Ratio
1	Single Family Dwelling	53.90%
2	Type 2 neighborhood living facility	10.40%
3	Type 1 neighborhood living facility	9.10%
4	Factory	6.50%
5	Multi Family Dwelling	5.20%
6	Warehouse facilities	4.60%
7	Facilities related to animals and plants	3.00%
8	Education and research facilities	1.30%
9	Hotel	0.70%
10	Automobile-related facilities	0.70%

건물의 손상으로 인한 피해액 산정, 즉 손실평가는 손상단계별 발생확률에 손상단계별 피해액을 곱하여 산정한다. 즉, 건물 인벤토리내 모든 건물을 대상으로 식 (4)와 같이 건축물대장정보로부터 추출한 건물용도와 한국 부동산원의 신축건물단가표로부터 산정한 용도별 표준단가와 손상단계별 감가율을 곱한후 합산하여 시범적용지역의 총 손실을 평가하였다. Table 6은 주요구조유형별 건물 연면적의 합, 건물가치대비 손실액(Loss value/ Building value), 전체 손실액중 각 구조유형이 차지하는 비율(Loss value/ Total Loss)을 나타낸다.

전체적으로 볼 때 신축단가대비 손실액은 2.16%이다. 구조종별로 볼 때 예상과 같이 비보강조적조가 신축단가 대비 손실율이 9.5%로 가장 높으며 이는 전체 손실액의 41.7%에 해당한다. 그 다음으로는 3-5층의 조적채움 벽골조의 손실액이 전체의 16.9%를 차지하고 있다. 무보강조적조에서 손실률이 큰 것은 대부분 비내진건물로 지진에 취약하기 때문이며, 조적채움 벽골조의 경우 해당 구조형식 건물 연면적의 합이 크며 Complete에 해당하는 손상의 발생비율이 높기 때문인 것으로 판단된다.

### 4.3 복구능력 평가

본 연구에서는 국가데이터 포털[20]에 공개된 지역별 통계데이터중 사회경제적으로 재난에 대한 취약성 혹은 회복성에 관련되었다고 판단되는

**Table 5.** Summary of building damage (Probability of each structural damage state)

Structure type	No damage	Slight	Moderate	Extensive	Complete
URML	23.2%	16.8%	44.9%	6.2%	8.8%
S1L	48.5%	22.0%	26.6%	2.4%	0.5%
W1	34.3%	39.8%	24.3%	1.5%	0.1%
C2L1	36.2%	30.2%	27.9%	2.9%	2.8%
C2L2	22.4%	30.0%	38.2%	6.2%	3.2%
C5L	13.3%	25.1%	42.4%	12.2%	6.9%
C3L2	14.4%	31.0%	40.3%	12.2%	2.1%
C4L2	74.9%	16.7%	7.4%	1.0%	0.0%
W2	65.6%	27.7%	5.3%	0.8%	0.6%
C3M	44.1%	20.4%	30.8%	4.4%	0.4%
C3H	46.0%	23.8%	25.5%	4.5%	0.3%

**Table 6.** Expected loss per structure type

Structure Type	Total Floor Area (m <sup>2</sup> )	Loss Value/ Building Value	Loss Value/ Total Loss
URML	2,754	9.50%	41.7%
S1L	11,615	0.71%	6.6%
W1	540	1.14%	1.0%
C2L1	3,395	2.36%	8.0%
C2L2	6,392	2.57%	16.9%
C5L	2,500	2.37%	8.1%
C3L2	774	1.87%	1.6%
C4L2	1,367	0.90%	1.2%
W2	70	0.63%	0.1%
C3M	4,852	1.02%	5.2%
C3H	7,015	0.96%	7.1%
Total	-	2.16%	-

자료를 선정할 후 이를 통해 지역사회의 복구능력을 평가하고 식 (5)과 같은 형태로 직접적인 물적피해를 나눈 값을 복구역량도로 정의하였다.

$$\text{복구역량도} = \frac{\text{물적피해}}{\text{지역의 복구능력}} \tag{5}$$

지역의 복구능력은 다른 지자체와의 상대평가를 통해 산정된다. 복구능력평가를 위해 선정된 지표는 아래와 같다.

1. 경제활동참가율
2. 등록장애인수
3. 지역내총생산(GRDP)
4. 1인가구비율
5. 독거노인가구비율
6. 무주택가구비율
7. 노후주택비율
8. 재정자립도



## 9. 재정자주도

본 연구에서는 시범적용지역(C1)과 인접한 22개 지자체(C2~C23)에 대해 위의 지표에 해당되는 데이터를 국가통계포털로부터 모은 후 정규화하고 상대비교를 통해 복구능력점수를 산정하였다. 선정된 10개의 지표는 절대수치와 비율이 혼재되어 있다. 인구수와 경제규모에 차이가 있는 지자체의 통계데이터를 직접 비교하는 것을 불합리하므로 등록장애인 수와 지역내총생산과 같은 절대수치는 인구수에 대한 비율로 변환하여 사용하였다. 또한 특성상 복구능력에 긍정적효과를 가지는 항목(1, 3, 8, 9)은 양수로 부정적효과를 가지는 항목(2, 4, 5, 6, 7)은 음수로 변환하였다.

이렇게 취합된 데이터로부터 복구능력점수를 산정하는 방법으로는 다음의 두 절차가 사용될 수 있다.

1. Min-max normalization : 각 지표별로 최대값을 1, 최소값을 0으로 변환하고 각 지표의 평균값을 점수로 한다. 즉,

$$\bar{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

2. z score normalization : 변환후 지표의 평균값은 0, 분산은 1 되도록 변환한다. 즉,

$$z = \frac{x - x_{\text{mean}}}{\sigma} \quad (7)$$

첫 번째 Min-max 정규화는 미국의 National risk index의 BRIC 지수 산정시 적용되는 절차이며, 두 번째 z score 정규화는 SoVI 지수 산정시 적용되는 절차이다. 만약 거의 유사한 특성을 나타내는 지표(예를 들어 주택 보급률과 무주택자비율)가 두 개이상 선택될 경우 그 지표는 과대평가될 수 있다. 따라서 BRIC 지수의 경우 Table 2에 나타낸 바와 같이 6개 영역을 평가하기 위한 지표를 미리 결정해 놓고 영역별 점수를 산정하여 그 평균값으로 점수를 산정한다. SoVI 지수의 경우 주요인분석(Principal Component Anaysis)을 수행하여 지표들 사이의 유사성을 반영하여 점수를 산정한다.

본 연구에서는 z score normalization으로 표준화후 주요인분석(Principal Component Anaysis)을 수행하여 지표들 사이의 유사성을 분석하였다. 분석결과 독거노인가구비율, 노후주택비율, 재정자립도, 등록장애인수 비율, 1인가구비율의 5개 지표가 유사성이 높은 하나의 그룹이며 재정자주도와 경제활동참가율이 또 다른 그룹, GRDP와 무주택가구비율이 세 번째 그룹으로 분석되었다.

Table 7은 지표의 그룹핑이후 Min-max normalization의 경우와 z score normalization의 경우 그룹별 점수의 평균값으로부터 산출한 복구능력점수, 그리고 각 경우 지자체별 순위를 나타낸 표이다. 복구점수의 경우 음수가 되는 것을 방지하기 위해 평균값에 1.0을 더하였다. 시범적용지역(C1)의 순위는 Min-max normalization의 경우 23개 지자체중 8위, PCA의 경우 5위로 나타났다. 전체적으로 볼 때 복구능력점수를 산정하는 절차에 따라 지자체별 순위는 완벽히 일치하지는 않으나 어느 정도 유사성을 가지는 것으로 나타났다.

Table 7. Resilience scores

City	min-max		PCA	
	Score	Rank	Score	Rank
C1	0.988	8	1.132	5
C2	0.985	10	1.086	10
C3	0.986	9	1.096	9
C4	0.902	18	0.847	15
C5	1.271	1	1.936	1
C6	0.923	15	0.904	14
C7	0.999	6	1.126	6
C8	0.911	16	0.820	19
C9	0.967	13	1.066	11
C10	0.868	20	0.840	16
C11	1.053	3	1.213	3
C12	0.978	12	0.962	13
C13	1.027	5	1.171	4
C14	0.991	7	1.059	12
C15	0.780	23	0.389	23
C16	0.948	14	0.836	18
C17	0.903	17	0.714	20
C18	1.028	4	1.122	7
C19	0.980	11	1.116	8
C20	0.853	22	0.658	22
C21	1.096	2	1.364	2
C22	0.883	19	0.706	21
C23	0.862	21	0.837	17

본 연구에서 제안한 복구역량도는 식 (5)와 같이 손실평가를 통해 산정한 물적피해를 복구능력점수로 나눈 값이다. 시범적용지역의 경우 물적피해로는 Table 6의 손실평가에서 산정된 전체건물의 손실률 2.16%를, 복구능력으로는 Table 7에서 산정된 1.132를 사용할 수 있다. 하지만 시범적용지역 이외의 건물인벤토리가 확보되지 않아 복구역량도의 지자체간 상대비교는 수행하지 못하였다.

## 5. 결론

지진발생시 피해정도는 지진의 크기, 진원과의 거리, 해당지역의 지반특성과 같은 자연적인 요인과 건축물의 구조형식 및 내진설계여부와 같은 구조적 특성뿐 아니라 지진이 발생한 지역에 거주하고 있는 인구수 및 시설의 밀집도, 방재대책, 지역사회의 경제력과 같은 사회경제적 특성에도 영향을 받는다. 따라서 이러한 사회적 특성도 함께 고려하여 지진피해를 최소화하기 위한 방재정책을 수립하고 준비할 필요가 있다.

본 연구에서는 지진시 직접적인 경제적 피해액과 사회경제적으로 재난에 대한 취약성 혹은 회복성에 관련되었다고 판단되는 자료를 선정후 이를 통해 지역사회의 복구능력을 평가하였다. 경제적 피해액 산정을 위한 건축물 피해는 모든 지역에 동일한 지진동이 작용할 때 지반조건에 따른 지반증폭을 고려한 입력지진에 대해 41개 구조종별 취약도함수를 사용하여 구하였다. 건축물대장의 정보로부터 용도를 판단하고 용도별 표준단가와 손

상별 감가율을 고려하여 피해액을 산정하였다. 용도별 표준단가는 한국부동산원의 건물신축단가표를 기초로 구하였다. 지역사회의 복구능력은 지역별 통계자료로부터 선택된 9개의 지표를 사용하여 산정하였다. 통계적분석을 위해 적절한 정규화 및 요인분석기법을 사용하였으며 복구능력점수는 인접한 지자체와의 상대평가를 통해 산정하였다.

본 논문에서 복구역량도산정을 위한 방법론은 제시되었으나 시범적용 지역 이외의 건물인벤토리가 확보되지 않아 복구역량도의 직접적인 비교는 수행하지 못하였다. 향후 관련 데이터 확보후 추가연구가 요망된다.

**/ 감사의 글 /**

이 논문은 행정안전부 국립재난안전연구원 재난안전 공동연구 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-MOIS63-003(RS-2022-ND 641021))

**/ REFERENCES /**

1. Federal Emergency Management Agency (FEMA). Hazus-MH 2.1: Technical manual. Multi-hazard loss estimation methodology; c1999.
2. European Union Commission, Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities; c2013.
3. Ministry of the Interior and Safety. "Living Safety Information." <https://www.safemap.go.kr/asds/safe.do#tab1>.
4. Federal Emergency Management Agency (FEMA). FEMA National Risk Index Technical Documentation; c2021.
5. Bureau of Urban Development, Tokyo Metropolitan Government, Your Community's Earthquake Risk 2022 - The Ninth Community Earthquake Risk Assessment Study, Available from: [https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/bosai/chousa\\_6/download/kikendo\\_english.pdf](https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/bosai/chousa_6/download/kikendo_english.pdf)
6. Federal Emergency Management Agency (FEMA). FEMA P-366: Hazus® estimated annualized earthquake losses for the United States; c2017.
7. Graf WP. Basic principles of earthquake loss estimation-PML and beyond. A Campaign by the Earthquake Engineering Research Institute, Northern California; c2006.
8. National Emergency Management Agency, Development of seismic fragility functions for Korean building structures; c2009.
9. Joo C, Kim T. Seismic Fragility of Low-rise Piloti Buildings Designed According to KDS 41 17 00. EESK J Earthquake Eng. 2019;26(2):49-58.
10. Ahn SJ, Park JH. Seismic Fragility Function for Unreinforced Masonry Buildings in Korea. EESK J Earthquake Eng. 2021;25(6):293-303
11. Jun S, Shin DH, Kim HJ. Annual Loss Probability Estimation of Steel Moment-Resisting Frames(SMRFs) using Seismic Fragility Analysis. J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea. 2014;27(6):517-524.
12. National Disaster Management Research Institute. Estimation Technology Development of Social and Economic Impact Analysis by Large-scale Earthquakes; c2021.
13. Korea Real Estate Agency. New Building Unit Price List; c2021.
14. Kim T. A Classification Methodology of Structural Types of RC Buildings for Improving Seismic Fragility Functions. EESK J Earthquake Eng. 2020;24(6):285-292
15. Zuzak C, Mowrer M, Goodenough E, Burns J, Ranalli N, Rozelle J. The national risk index: establishing a nationwide baseline for natural hazard risk in the US. Natural Hazards. 2022 Nov; 114(2):2331-2355.
16. Sustainability of Vulnerable Populations Index (SoVI). "Sustainability of Vulnerable Populations Index." University of South Carolina, n.d., Available from: [https://sc.edu/study/colleges\\_schools/artsandsciences/centers\\_and\\_institutes/hvri/data\\_and\\_resources/sovi/index.php](https://sc.edu/study/colleges_schools/artsandsciences/centers_and_institutes/hvri/data_and_resources/sovi/index.php).
17. Baseline Resilience Indicators for Communities (BRIC) Index. University of South Carolina, College of Arts and Sciences, Health and Vulnerability Research Institute (HVRI), Available from: [https://sc.edu/study/colleges\\_schools/artsandsciences/centers\\_and\\_institutes/hvri/data\\_and\\_resources/bric/index.php](https://sc.edu/study/colleges_schools/artsandsciences/centers_and_institutes/hvri/data_and_resources/bric/index.php).
18. Cutter SL, Ash KD, Emrich CT. The geographies of community disaster resilience. Global Environmental Change. 2014;29:65-77.
19. Sun CG, Kim HS, Cho HI, Lee MG. Determination of Earthquake Ground Motions by Implementing Spatial Information Liaised with Regional Geotechnical Data/Knowledge. Earthquake Engineering Society of Korea; c2023.
20. Korea Statistics Information Service (KOSIS). Available from: <https://kosis.kr>.