

국내 건축물 지진피해 위험도의 지역단위 평가

Regional Seismic Risk Assessment for Structural Damage to Buildings in Korea

안숙진¹⁾ · 박지훈^{2)*} · 김혜원³⁾

Ahn, Sook-Jin¹⁾ · Park, Ji-Hun^{2)*} · Kim, Hye-Won³⁾

¹⁾인천대학교 일반대학원 건축학과 박사과정, ²⁾인천대학교 도시건축학부 교수, ³⁾국립재난안전연구원 지진방재센터 시설연구관

¹⁾Graduate Student, Department of Architecture, Graduate School, Incheon National University, ²⁾Professor, Division of Architecture and Urban Design, Incheon National University, ³⁾Senior Research Officer, National Disaster Management Research Institute

/ A B S T R A C T /

This study proposes a methodology for the regional seismic risk assessment of structural damage to buildings in Korea based on evaluating individual buildings, considering inconsistency between the administrative district border and grid lines to define seismic hazard. The accuracy of seismic hazards was enhanced by subdividing the current 2km-sized grids into ones with a smaller size. Considering the enhancement of the Korean seismic design code in 2005, existing seismic fragility functions for seismically designed buildings are revised by modifying the capacity spectrum according to the changes in seismic design load. A seismic risk index in building damage is defined using the total damaged floor area considering building size differences. The proposed seismic risk index was calculated for buildings in 29 administrative districts in 'A' city in Korea to validate the proposed assessment algorithm and risk index. In the validation procedure, sensitivity analysis was performed on the grid size, quantitative building damage measure, and seismic fragility function update.

Key words: Regional assessment, Seismic risk, Seismic response coefficient, Seismic fragility function, Grid size

1. 서론

최근 발생한 경주, 포항 지진으로 인해 발생한 피해를 복구하기 위해 약 1,800억원의 막대한 국가예산이 투입되었다. 따라서, 지진발생 전 지역단위로 건축물 피해를 평가할 수 있다면, 건축물의 피해 규모를 예측가능하여 상대적으로 피해가 많이 발생할 지역에 구호자원을 효과적으로 투입하거나 사전에 내진보강을 실시하는 등의 방재계획을 세워 국가의 한정된 예산을 효율적으로 집행할 수 있다. 지진에 의한 지역단위 건축물 피해를 평가하는 방법은 시나리오 기반 평가방법과 동일 기반암운동 기반 평가로 분류할 수 있다. 전자는 특정 지진 규모와 진앙지를 가정하여 평가하는 방법이며 지진원의 위치와 특성이 비교적 명확히 알려져 있는 경우 사용된다. 동일 기반암운동 기반 평가는 모든 지역에서 동일한 강도의 기반암을 가정하여 평가하는 방식이며 지역별로 건축물의 지진위험도를 상대적으로 비교하기에 적합한 방식이다. 잘 알려진 지진피해 예측시스템으로는 시나리오 기반

지진재해 지역위험도평가 시스템인 미국 FEMA에서 개발한 HAZUS와 유럽의 SYNER-G 등이 있다[1,2]. 미국의 HAZUS는 진원지의 위치와 지진 규모를 가정한 시나리오 지진에 대해 지역별 지진피해 평가와 지역별로 정의된 확률론적 지진재해도에 기초한 확률론적 지진위험도 평가를 모두 수행할 수 있다. 국내에서도 지진 발생 초기단계에서 피해를 예측하기 위한 목적으로 행정구역별 지진피해 추정을 위한 연구가 수행된 바 있다[3]. 이 연구에서는 기본적으로 진원 정보에 따라 지반운동 감쇠식과 지반증폭률 정보를 활용하여 행정구역별로 지반운동 강도를 예측하고 시설물의 지진 취약도 함수를 활용하여 지진피해를 추정하는 시나리오 기반 평가방식을 취하고 있다. 동일 기반암운동 기반 평가를 활용하는 지진피해 예측시스템은 일본 동경도 지진에 관한 지역위험도 측정조사가 있다[4]. 이는 행정구역간 지진피해를 단위면적당 피해건물 수량으로 비교 평가하여 상대적으로 위험한 지역에 우선적으로 지진피해 경감 대책을 수립하는 목적으로 운영되고 있다.

이 연구에는 국내 지역단위 건축물 지진피해를 평가하기 위하여 동일 기반암운동 기반 평가를 도입하기 위한 것으로서 다양한 지반조건을 고려하여 행정구역별로 피해 연면적 기댓값 백분율과 피해 동 기댓값 백분율

*Corresponding author: Park, Ji-Hun

E-mail: jhpark606@inu.ac.kr

(Received September 17, 2023; Revised September 27, 2023; Accepted October 4, 2023)

을 평가였다. 이때, 지역단위 건축물 지진피해는 물리적 피해로서 비구조 요소의 피해는 고려하지 않고 구조체 피해만 고려하였음을 밝혀준다. 행정구역별 지진피해는 각 구조유형별 건축물의 피해와 지반운동이 결합하여 결정된다. 건축물의 피해는 선정된 기반암 운동 세기에 지반조건별 지반증폭효과를 고려하여 행정구역별 피해확률을 산정하게 된다. 이때, 피해확률은 구조유형별 지진취약도함수로부터 산정할 수 있다. 그러나 국내에서 행정구역별 지진피해 추정을 위해 개발된 기존 지진취약도함수는 KBC2000 기반으로 설계된 건축물의 구조해석에 기초하고 있다[5]. 따라서, 이 연구에서는 내진설계기준 개정에 따른 지진응답계수 변화를 고려하여 기존 지진취약도함수로부터 적용된 설계지진력 비율만큼 역량 스펙트럼을 수정하여 개선된 지진취약도함수를 도출하였다. 이를 통해 지역단위 건축물 지진피해 위험도 평가 검증에 위해 국내 A지역 위치한 전체 건축물을 대상으로 개선된 지진취약도함수를 적용하였다. 또한, 지반조건 다양성을 반영하기 위해 격자크기를 2 km×2 km, 1 km×1 km 및 0.5 km×0.5 km로 세분화하여 격자크기에 따른 행정구역별 피해 연면적 기댓값의 백분율을 비교하였다. 마지막으로 행정구역별 지진피해를 피해 연면적 기댓값의 백분율과 피해 동수 기댓값 백분율로 위험도 지수를 산정하여 피해를 산정방법에 따른 행정구역별 위험도 순위를 비교를 분석하였다.

2. 지역단위 건축물 지진피해 위험도 평가방법

2.1 건축물 지진피해 위험도 평가지수

지역단위로 건축물 지진피해 위험도를 상대평가하기 위해 행정구역별로 건축물 지진피해 위험도 평가지수를 산정하여 순위를 매기는 방식을 채택하였다. 행정구역의 규모와 인구밀집도에 따라서 건축물 수량과 규모가 상이하므로 피해 규모를 정규화할 필요가 있다. 이 연구에서는 저층 및 고층 건물 간 규모 차이를 고려하여 피해 건물수량 대신 피해 연면적을 기준으로 건축물 지진피해 위험도 평가지수를 정의하였으며 식 (1)~(2) 과 같다.

$$\text{건축물 지진피해 위험도 지수} = 100 \times \frac{\text{지역별 반파이상 지진피해 건축물 연면적}}{\text{지역별 건축물 연면적 합계}} \quad (1)$$

$$\text{행정구역별 반파이상 지진피해 건축물 연면적} = \sum_{k=1}^N [\text{건축물 } k \text{의 반파이상 지진피해 확률} \times \text{건축물 } k \text{의 연면적}] \quad (2)$$

여기서 N 은 행정구역내 전체 건축물 수량이다. 반파는 부분적으로 콘크리트의 탈락에 의한 철근의 노출, 강재의 국부좌굴이나 접합부의 파괴 등이 발생하여 구조체의 수리 없는 건축물을 계속 사용할 수 없는 손상상태를 의미하며 HAZUS의 extensive damage state에 상응한다.

2.2 격자화된 지역별 지반특성

기존 국내 지진피해 추정에 있어서 행정구역별로 지반운동을 결정하는

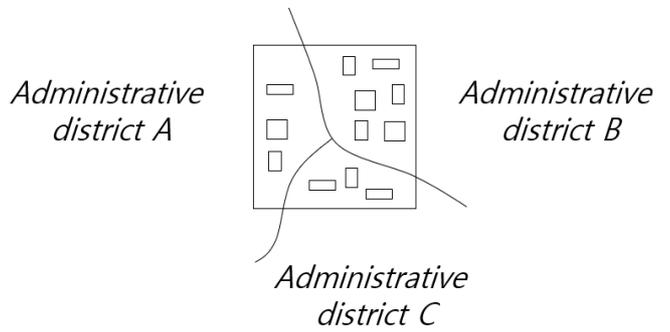


Fig. 1. Example of a grid divided by administrative districts

방법은 전국을 2 km×2 km로 분할하여 각 격자의 중심에서 계측자료 또는 감쇠식에 의한 기반암 운동과 시추공자료, 지형자료 등에 기초한 지반운동 증폭률을 곱해서 결정한 뒤 해당 행정구역과 연관된 격자의 지반운동을 평균화하는 방식이다[3]. 그러나 이와 같은 방식은 정방형 격자가 행정구역의 경계와 일치하지 않고 행정구역내 건축물 또한 각 격자에 고르게 분포하지 않으므로 정확도에 한계가 있다. 이 연구에서는 행정구역내 지반조건 다양성을 반영하기 위해 격자크기를 2 km×2 km, 1 km×1 km, 0.5 km×0.5 km로 세분화하여 격자 크기에 따른 건축물 지진피해 위험도 평가지수의 민감도 분석을 실시하였다. 행정구역별 지반운동은 연관된 격자의 암반노두 유효지반가속도와 지반조건으로부터 산정된 지반증폭계수를 곱하여 결정할 수 있다. 격자의 암반노두 유효지반가속도는 목표 재현주기에 대한 국가지진위험지도로부터 결정한다. 지반증폭계수는 건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00 : 2022)을 적용하였다[6]. 여기서 각 격자별 지반특성 및 조건은 선창국 등(2023)이 다양한 국내 지반조사 자료를 공간정보화하여 구축한 DB를 활용하였다[7].

2.3 건축물 피해 위험도 평가절차

건축물 피해 위험도를 행정적으로 방재계획 수립에 활용하기 위해서는 행정구역별로 평가할 필요가 있다. 앞서 지반특성은 격자별로 정의되지만 Fig. 1과 같이 하나의 격자가 복수의 행정구역에 의해서 분할될 수 있으므로 평가결과는 행정구역별로 재집계 되어야 한다. 따라서, 건축물 피해 위험도의 평가절차는 지반특성과 동일한 격자 단위로 수행되기 보다는 개별 건축물의 피해를 산정한 뒤 행정구역별로 관할 건축물의 피해를 집계하는 방식으로 구성되어야 한다. 전체 평가절차는 Fig. 2와 같다.

먼저 건축물대장 정보로부터 개별 건축물의 연면적, 구조유형, 내진설계 여부 및 적용 기준을 파악한다. 건축물 위경도 정보로부터 해당 건축물이 위치한 격자를 식별한다. 각 격자의 유효지반가속도와 지반조건으로부터 산정된 스펙트럼가속도를 3장에서 설명하는 지진취약도함수에 대입하여 해당 격자내 41종 구조 유형별 피해확률을 산정한다. 각 건축물이 속한 격자의 해당 구조유형 피해확률을 그 건물의 연면적과 곱하면 개별 건축물의 피해 연면적 기댓값을 산정할 수 있다. 마지막으로 개별 건축물의 행정구역 코드를 이용하여 피해 연면적 기댓값을 행정구역별로 집계한 뒤 식 (1) 및 (2)에 따라 행정구역별 위험도 평가지수를 산정한다.

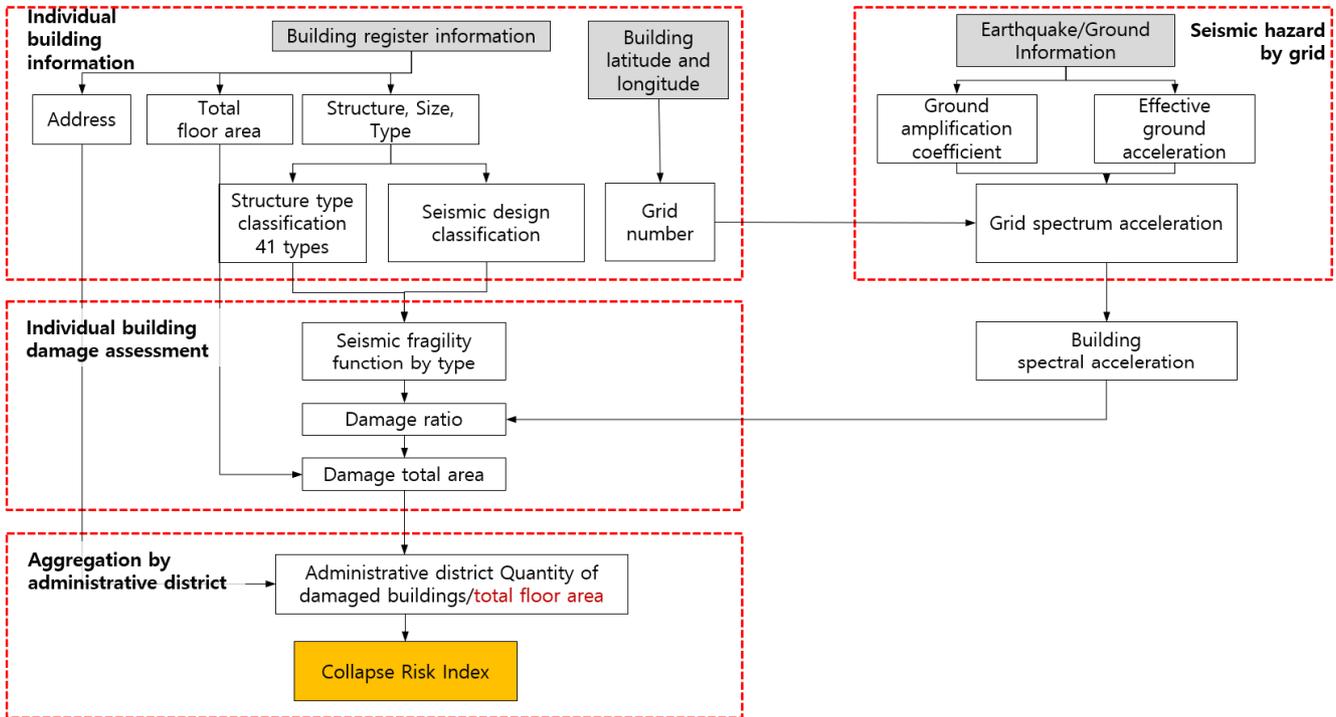


Fig. 2. Building damage risk assessment procedure

3. 내진설계기준에 따라 차등화된 지진취약도함수

3.1 기존 지진취약도함수

국내에서 행정구역 단위의 지진피해 추정을 위해 개발된 기존 지진취약도함수는 「국내 건축구조물의 지진취약도함수 개발」(소방방재청 2009) 연구를 통해 주요 구조유형별로 개발되었으며, 내진설계 미적용 건축물은 Pre-code, 내진설계 적용 건축물은 지진구역II의 경우 Low-code 및 지진구역I의 경우 Moderate-code로 구분된다[3]. 이 지진취약도함수는 개별 건축물의 특성을 평가하기보다는 유형화된 건물의 집합적인 지진피해 특성을 평가하기 위한 목적으로 개발되었다. 피해 추정을 위한 건물 분류는 구조재료에 따라 우선 분류하고 주요 지진력 저항시스템에 따라 세분화한 후 이를 다시 층수에 따라 구분하여 국내실정에 맞는 41종 구조유형을 선정하여 국내 건축물의 구조형식을 전반적으로 포괄하고 있다[3]. 이때, 지진취약도 함수의 확률변수는 스펙트럼 변위로 정의하기 때문에 역량스펙트럼법에 따라 구조유형별 역량스펙트럼과 요구스펙트럼을 조합하여 성능점 변위를 산정할 수 있다. 이는 지진 규모와 진원 거리 및 지반조건에 따른 스펙트럼형상 차이를 반영하지 못하는 단점이 있어 이후 지진취약도 개정 연구에서는 KDS 17에 따른 S2~S4의 지반조건을 모두 고려하여 대표 부지조건에 대한 부지응답해석으로부터 얻어진 지반가속도 기록 및 그 응답스펙트럼을 사용하여 0.3 sec 또는 1.0 sec 스펙트럼가속도를 확률변수로 하는 개정된 지진취약도 함수를 도출하였다[8]. 또한 일부 취약 건축물 유형은 동적해석을 적용하여 전면적인 개정이 이루어졌다. 이 연구에서는 격자별 지반조건의 다양성과 국내 부지응답특성을 반영하기 위해 개정연구에서 도출된 스펙트럼가속도기반 지진취약도함수를 적용하여 피해확률을 산정하였다.

3.2 내진설계기준의 변화

2005년에 개정된 건축구조기준(KBC 2005)에서는 재현주기 정의, 지반증폭 계수, 스펙트럼 형태 등의 변화로 인해 이전 기준(KBC 2000)에 비해 지진하중이 대폭 강화되었다[9]. 대표적으로 500년 재현주기 대신 2400년 재현주기 2/3수준으로 변경되었다. 또한, KBC 2000에서는 지반증폭효과를 장주기 영역에 대해서만 적용하였으나 KBC 2005에서는 단주기와 장주기 설계스펙트럼 가속도 S_{Ds} 와 S_{D1} 로 구분하고 각각에 대해서 증폭효과를 적용하게 되었으며, 증폭비 또한 증가하였다. 내진설계기준별로 구조유형별 지진응답계수를 Fig. 3에 나타냈다. 2005년을 기점으로 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 2005년 이후에 내진설계된 건물의 지진취약도함수는 KBC 2000에 기초한 건축물과 차등화할 필요성이 있다.

3.3 개선된 지진취약도 함수

기존 지진취약도함수는 유형별로 구조해석을 통해 도출된 대표 역량스펙트럼을 이용하여 역량스펙트럼법에 기초한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해서 산정되었다. 이는 미국 HAZUS와 유사한 방법론으로서 HAZUS에서는 내진특등급의 지진취약도함수 도출을 위해서 설계하중의 증가율(중요도 계수와 동일) 만큼 비례조정된 역량스펙트럼을 사용하고 있다. 또한, 손상도 지표의 손상수준별 기준값은 FEMA 356에 구조유형별로 제시된 층간변형각을 스펙트럼 변위로 환산하여 사용하고 있다[10]. 이 연구에서는 2005년 이후 강화된 내진설계기준을 반영하기 위해 Moderate-code 지진취약도함수를 대상으로 기존 역량스펙트럼에 설계지진력 비율 만큼 강도조정계수를 곱하여 역량스펙트럼을 수정하였다. 이때, 강도조정계수는 KBC 2005년 이후 개정된 기준 중 KBC 2009의 지진응답계수를 대폭값으로

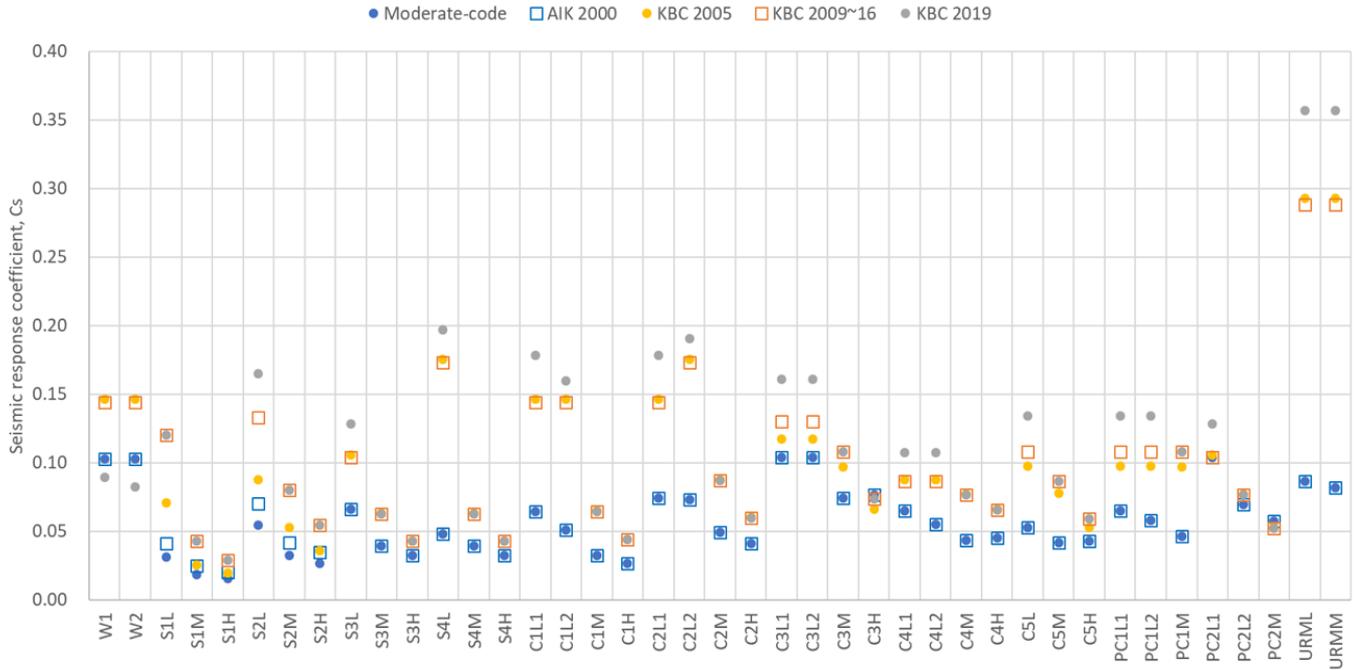


Fig. 3. Seismic risk coefficient of building types for different design codes

Table 1. Classification of seismic fragility function

Classification	Permission year	Design code	Importance factor	Note
Pre-code	-	-	-	Former Pre-code
M00	Before 2005	KBC 2000	1.0, 1.2 or 1.5	Former Moderate-code
M09	After 2005	KBC 2009	1.0 or 1.2	New

로 선정하여 기존 지진취약도함수의 KBC 2000 기반 지진응답계수로 나누어 산정하였으며 이는 식 (3)과 같다[11]. 수정된 역량스펙트럼에 기존 연구(국립재난안전연구원, 2021)에서 사용된 것과 동일한 지반운동 응답 스펙트럼을 적용하여 증분정적해석을 수행하였다. 개선된 스펙트럼가속도기반 지진취약도함수는 식 (4)와 같이 로그 정규분포로 가정하고 중앙값 및 대수표준편차를 산정하기 위하여 Baker가 제시한 최대우도법에 의한 최적화 알고리즘을 적용하였다[12].

$$\text{강도조정 계수} = \frac{\text{KBC 2009 지진응답계수}}{\text{KBC2000 지진응답계수(기존 지진취약도함수)}} \quad (3)$$

$$P[ds|S_a] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{a,ds}} \ln \left(\frac{S_a}{S_{a,ds}} \right) \right] \quad (4)$$

여기서,

S_a : 기준 주기에서의 스펙트럼가속도(기준주기는 구조물의 고유주기 또는 그와 유사한 대표주기).

$\bar{S}_{a,ds}$: 건물 손상상태 ds 의 지표가 임계치에 도달하게 되는 지반운동의 스펙트럼가속도 중앙값.

$\beta_{a,ds}$: 건물 손상상태 ds 의 지표가 임계치에 도달하게 되는 S_a 의 대수표준편차

따라서, 이 연구에서는 내진설계기준의 변화를 고려하여 Moderate-code로 구분되는 일반 건축물을 대상으로 KBC 2005 개정 이전에 허가된 건축물은 설계기준 KBC 2000을 적용한 것으로 보고 기존 지진취약도함수를 적용하였다. KBC2005 개정 이후에 허가된 건축물은 설계기준 KBC 2009에 상응하는 역량스펙트럼을 적용하여 개선된 지진취약도함수를 적용하였다. Moderate-code에 해당되는 지진취약도함수를 적용 기준에 따라 M00 및 M09로 세분하였으며 각각의 적용 조건을 Table 1에 정리하였다. 중요도 계수는 각 건축물별로 관련 내진설계기준(KBC 2000 또는 2009)에서 대표적인 용도와 규모에 해당되는 값을 적용하였다. 반면에 FEMA 356에 제시된 구조유형별 손상도 기준 층간변형각은 강도에 따라 차등하지 않고 제시된다[10]. 따라서, 개선된 지진취약도함수의 손상수준별 기준은 기존 지진취약도함수와 동일하게 적용하였다.

대표적으로 저층 콘크리트 모멘트골조에 해당되는 C1L1 유형을 대상으로 M00 및 M09의 역량스펙트럼을 Fig. 4에 도시하였다. 강도가 설계기준의 지진응답계수 비율만큼 상향되었으나 HAZUS의 제안 사항에 따라 초기강성은 상향되지 않았다[1]. 수직선으로 표시된 손상도 기준 스펙트럼변위의 경우에 기존 지진취약도함수에서는 FEMA 356에 규정한 대표 층간변형각을 환산하여 사용하고 있으며 내진설계 기준에 따라 차등화되지 않기 때문에 두 가지 역량스펙트럼에 동일하게 적용하였다[10]. C1L1 유형의 역량스펙트럼에 상응하는 반파 이상 손상(extensive damage)의 지진취약도함수는 Fig. 5와 같다. 강도 증가에 따라 손상 확률이 낮아지지

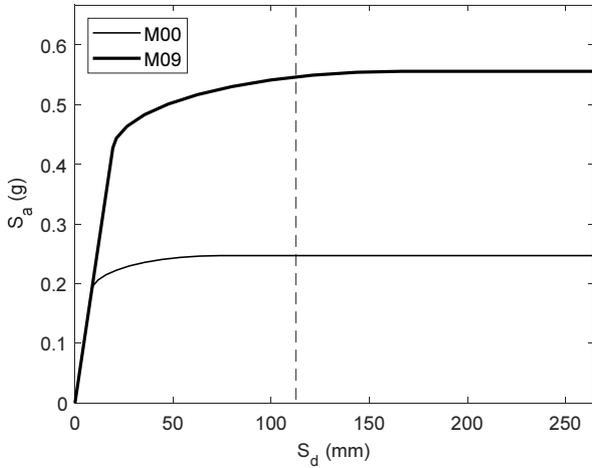


Fig. 4. Capacity spectrum of C1L1 (low-rise concrete moment frame)

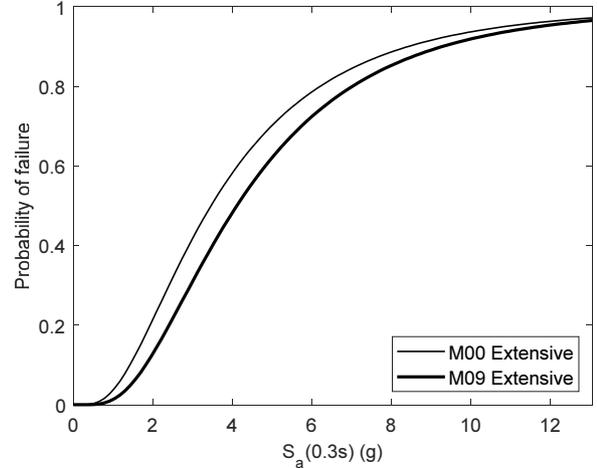


Fig. 5. Seismic fragility function for extensive damage of C1L1

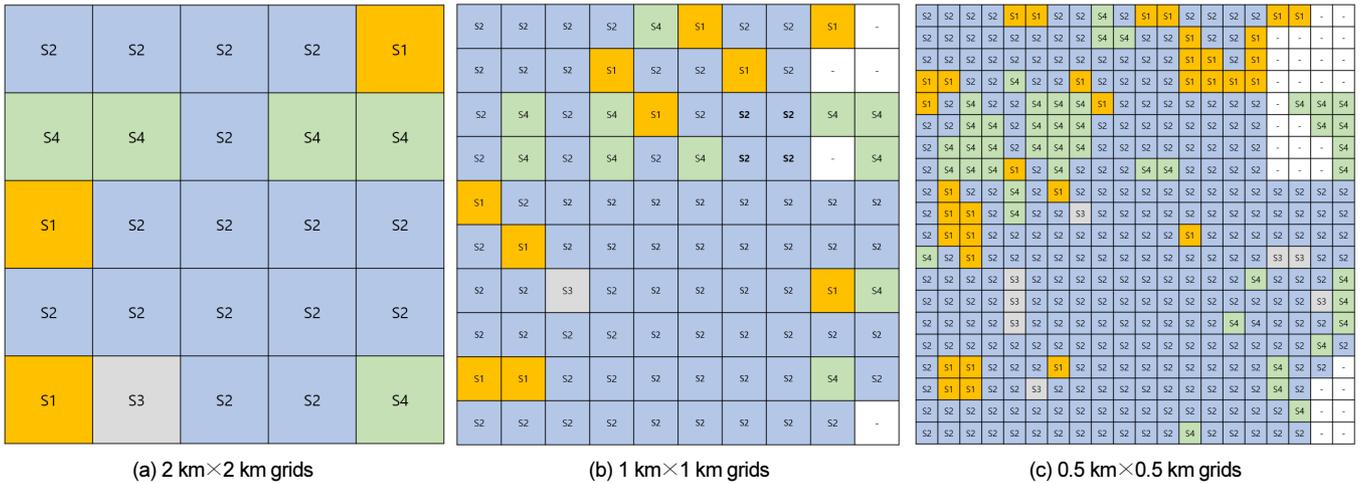


Fig. 6. Distribution of site classes

만 허용기준은 유지되기 때문에 손상확률의 감소폭은 크지 않음을 알 수 있다.

4. 건축물피해 위험도 평가예제

4.1 대상 지역 정보

건축물 피해 위험도 평가절차의 검증을 위해 국내 A시의 29개 행정구역에 위치한 전체건축물을 대상으로 평가를 수행하였다. A시 전체 건축물 연면적(수량)은 452,366,139 m²(96,774동)으로 이 중 내진설계여부와 위치가 불분명한 경우 등을 제외하고 450,655,182 m²(85,894동)을 대상으로 평가를 수행하였으며, 건축물대장 정보를 바탕으로 비내진 건축물(Pre-code) 수량은 14,418,434 m²(49,218동), KBC 2005 개정 이전에 허가된 내진설계 건축물(M00)은 16,996,003 m²(16,273동), 개정 이후에 허가된 내진설계 건축물(M09)은 13,651,081 m²(20,403동)의 연면적을 차지한다. 또한, 대상 지역 격자 크기를 2 km×2 km로 분할 시 격자 개수수량은 360개, 1 km×1 km는 1,295개 그리고 0.5 km×0.5 km는 4,877개로

Table 2. Composition of site classes of buildings located in the validation area (total floor area ratio)

Grid size	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
2 km×2 km	6.6%	81.4%	3.3%	8.7%
1 km×1 km	8.3%	65.2%	8.3%	18.3%
0.5 km×0.5 km	6.7%	68.3%	6.7%	18.4%

분할된다. A시의 각 건축물별 해당 위치의 지반조건을 연면적 기준 백분율로 Table 2에 나타냈다. 격자크기를 세분화함에 따라 S2지반의 비율이 81.4%에서 68.3%로 감소하고 S4지반의 비율이 8.7%에서 18.4%로 증가함을 알 수 있다. 대상 지역 중 주요지역에 해당하는 2 km×2 km 크기의 25개 격자를 선정하여 세분화하였을 때 격자크기별 지반조건 구성을 Fig. 6에 나타냈다. 빈칸은 세분화로 인해 A시의 행정구역에 속하지 않게되는 격자를 나타낸다. 2 km×2 km 격자의 지반조건과 0.5 km×0.5 km 격자의 지반조건이 전혀 다른 경우도 확인된다. 또한 1차적으로는 개별 건축물 별 평가를 수행하게 되므로 세분화된 격자 중 건물 밀집도가 높은 격자의 영향이 증가하게 됨에 유의할 필요가 있다.

Table 3. The most dangerous three administrative districts based on damaged total floor area

Grid size	Administrative district	Damaged total floor area ratio
2 km×2 km	4	4.11%
	6	3.98%
	3	3.35%
1 km×1 km	3	5.29%
	18	4.62%
	6	4.42%
0.5 km×0.5 km	1	4.09%
	2	3.70%
	3	3.61%

Table 4. The safest three administrative districts based on damaged total floor area

Grid size	Administrative district	Damaged total floor area ratio
2 km×2 km	26	0.54%
	27	0.39%
	28	0.35%
1 km×1 km	26	0.69%
	29	0.60%
	28	0.58%
0.5 km×0.5 km	27	0.56%
	28	0.39%
	29	0.35%

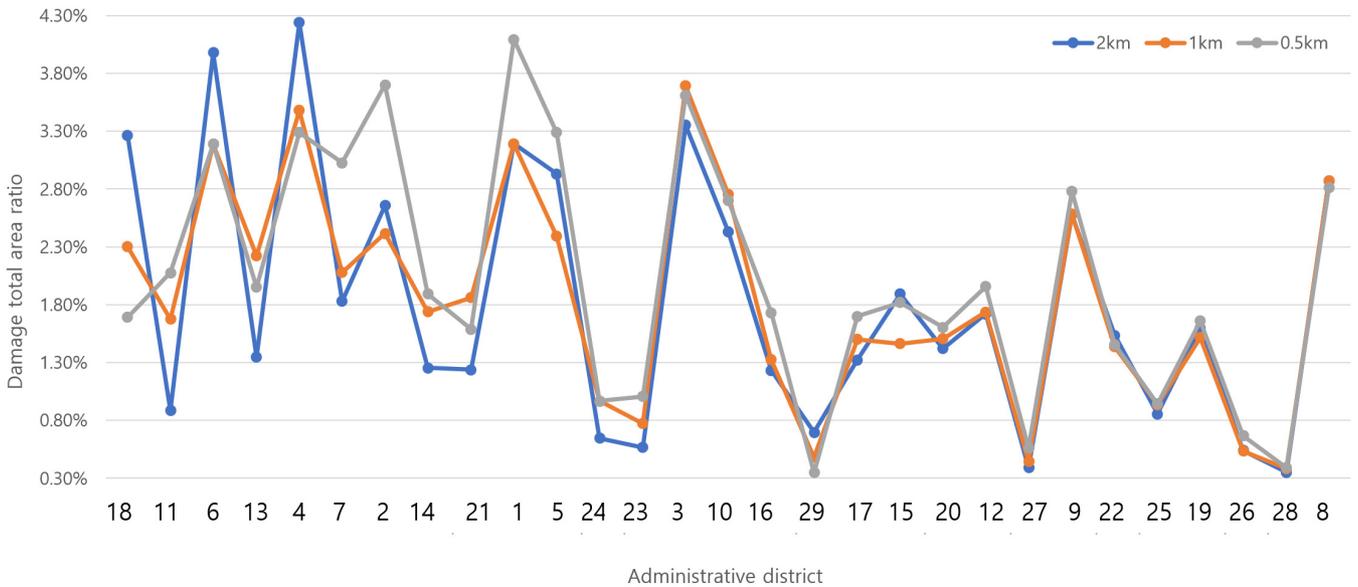


Fig. 7. Damaged total floor area ratios for different grid sizes

Table 5. Ground conditions by grid size (Total area ratio)

Administrative district	Grid size	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
18	2 km×2 km	0%	95%	0%	5%
	1 km×1 km	32%	57%	0%	11%
	0.5 km×0.5 km	41%	46%	0%	14%
1	2 km×2 km	0%	100%	0%	0%
	1 km×1 km	0%	100%	0%	0%
	0.5 km×0.5 km	0%	90%	0%	10%

4.2 격자크기에 따른 피해율 분석

행정구역내 지반조건의 다양성을 반영하기 위해 격자크기를 2 km×2 km, 1 km×1 km, 0.5 km×0.5 km로 세분화하였을 때 행정구역별 위험도 순위를 평가하였다. 심각한 피해 수준인 반파 이상 피해가 발생하였을 때 식 (1)과 같이 피해 연면적 기댓값 백분율을 기준으로 위험도 상위 3개 행정동

과 하위 3개 행정동을 Tables 3~4에 나타냈다. 위험도가 높은 3개 행정동은 격자 크기에 따른 구성 행정동이 크게 변화하는 것을 확인할 수 있는 반면에 위험도가 낮은 3개 행정동은 구성에 큰 변화가 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한, 격자크기 크기에 따른 피해 연면적 기댓값 백분율을 Fig. 7에 도시하여 격자 크기에 따른 변화량이 큰 행정구역 순으로 분류하였다. 격자크기가 세분화할수록 피해율이 감소하는 행정구역 1곳과 피해율이 증가하는 1곳의 격자크기별 지반조건을 Table 5에 나타냈다. 18번 행정동의 경우 0.5 km 격자로 세분화하면서 S2 대신 S1 지반의 비중이 증가하여 피해율이 감소하는 것으로 판단된다. 1번 행정동의 경우에 0.5 km 격자로 세분화하면서 S2 대신 S4 지반의 비중이 증가한 것이 원인으로 판단된다. 이를 통해 격자 크기에 따라 지반조건이 달라져 피해를 역시 달라지므로 행정구역별 위험도 평가 결과가 달라지는 것을 확인하였다. 또한, 행정구역별로 격자크기를 세분화할수록 지반조건에 따른 증폭계수가 증가하는 경우도 있고 감소하는 경우도 있다는 것을 확인하였다. 따라서 격자 크기의 세분화는 건축물 피해 위험도가 상대적으로 높은 행정구역에서 높은 민감도를 나타낼 수 있다.

Table 6. The most dangerous three administrative districts based on the number of damaged buildings

Grid size	Administrative district	Ratio of the total number of damaged buildings
2 km×2 km	4	3.65%
	18	2.50%
	17	2.31%
1 km×1 km	6	3.64%
	10	2.49%
	17	2.02%
0.5 km×0.5 km	3	2.39%
	2	2.17%
	4	1.94%

Table 7. The safest three administrative district based on the number of damaged buildings

Grid size	Administrative district	Ratio of the total number of damaged buildings
2 km×2 km	11	0.56%
	17	0.56%
	9	0.46%
1 km×1 km	14	0.42%
	15	0.30%
	26	0.26%
0.5 km×0.5 km	27	0.40%
	28	0.27%
	29	0.19%

4.3 평가지수의 정의에 따른 결과분석

격자크기별로 식 (1)의 건축물 피해 위험도 평가지수 정의에서 연면적 대신 건축물 수량으로 대체하여 평가지수를 산정할 수 있다. 건축물 수량에 기초한 위험도 평가지수를 산정하여 가장 높은 3개 행정동과 가장 낮은 3개 행정동을 각각 Tables 6~7에 나타냈다. 이때, 순위를 산정하기 위한 피해수준은 4.2 격자크기에 따른 피해율과 동일하게 적용하였다. 건축물의 연면적을 기준으로 하는 평가지수와 피해 동수를 기준으로 하는 위험도 평가지수로 행정구역별 순위를 매긴 결과 평가지수에 따라 행정동별 건축물 피해 위험도 순위가 달라진다. 다만 격자 크기 0.5 km×0.5 km의 경우에 가장 안전한 행정동의 구성은 바뀌지 않았으며 위험한 행정동의 구성은 다소 변화가 발생하였다.

피해 연면적에 기초한 위험도 평가지수와 피해 건축물 수량에 기초한 위험도 평가지수를 Figs. 8~9에 도시하였으며, 각 행정동의 위험도 평가지수는 Pre-code, M00과 M09의 기여분을 구분하여 표시하였다. 피해 건물 동수를 기준으로 하는 Fig. 9의 경우에 전반적으로 연면적을 기준으로 하는 Fig. 8보다 Pre-code의 비중이 크게 나타나며, 비내진 건축물에서 소규모 건축물이 차지하는 비중이 크기 때문에 판단된다. 위험도 평가지수가 가장 낮은 25~29번 행정동은 평가지수의 정의와 무관하게 순위가 바뀌지 않는다. 반면에 1번 행정동은 평가지수에 매우 민감한 순위 변화를 타나내고 있어서 평가지수의 정의가 결과에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다

4.4 지진취약도함수의 영향

앞서 내진설계된 건축물의 경우 설계기준의 변화를 고려하여 지진취약도함수를 M00과 M09로 구분하였으며, 후자는 수정된 역량스펙트럼을 적용하여 이 연구에서 도출한 것이다. 여기서는 역량스펙트럼 수정의 영향을 확인하기 위해서 내진설계된 건물 전체(총 36,676개 동, 총연면적 30,647,084 m²)에 종전의 Moderate-code와 동일한 지진취약도함수인 M00을 적용한 평가를 추가적으로 수행하였다. 격자크기는 0.5 km×0.5 km를 적용하였으며, 피해 연면적에 기초한 위험도 평가지수를 산정하였고

그에 따른 위험도 평가지수는 Fig. 10과 같다. 내진설계 시기에 따른 지진취약도 구분을 적용한 Fig 8과 비교하면 내진설계기준을 구분하지 않은 경우 (Fig. 10)에 비해 손상 연면적 비율이 약간 낮게 산정되며, 행정동 간에 제한적으로 위험도 평가지수 순위의 변동이 발생함을 알 수 있다.

5. 결론

지역단위 건축물 지진피해 위험도평가를 위해 개별 건축물 피해 연면적 기반 평가지수 및 평가 알고리즘을 제안하였다. 국내 건축물의 물리적 지진 피해를 평가하기 위한 지진취약도함수 중 2005년 이후의 내진설계기준 강화에 따라 상향된 내진역량을 반영하여 수정된 지진취약도함수를 제안하였다. 제안된 알고리즘과 지진취약도함수를 검증하기 위해 대상 A시의 29개 행정동을 대상으로 평가를 수행하고 격자 크기의 세분화, 평가지수 정의 및 지진취약도함수에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 개별 건축물 평가 알고리즘 제안하여 이를 활용한 지역단위 건축물 위험도 평가지수를 산정하였다. 이를 통해 행정구역별로 건축물 피해 위험도 지수를 산정하여 상대 비교할 수 있음을 확인하였다.
2. 격자크기를 2 km에서 0.5 km 수준으로 세분화함에 따라 지반조건 및 그에 따른 지반운동강도가 달라지고 행정구역별 위험도 순위가 변동한다. 특히 격자 크기에 대한 민감도는 위험도가 낮은 지역보다 높은 지역에서 큰 것으로 나타났다.
3. 피해 연면적 비율과 피해 건축물 수량의 비율로 위험도 평가지수를 달리 정의하여 평가한 결과 평가방법에 따라 행정구역별 위험도 순위가 변동이 발생하며, 위험도가 큰 행정구역에서 주로 변화가 발생하는 것으로 나타났다.
4. 2005년 이후 내진설계된 건축물에 대해서 설계기준의 강화를 고려하여 지진취약도함수를 수정하여 적용하는 경우 제한적 수준에서 위험도 지수의 감소 및 순위 변동이 발생하여 그 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 다만, 설계기준 강화에 따른 강성, 손상도 기준 등의 변화를 반영하기 위하여 추후 보다 정교한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

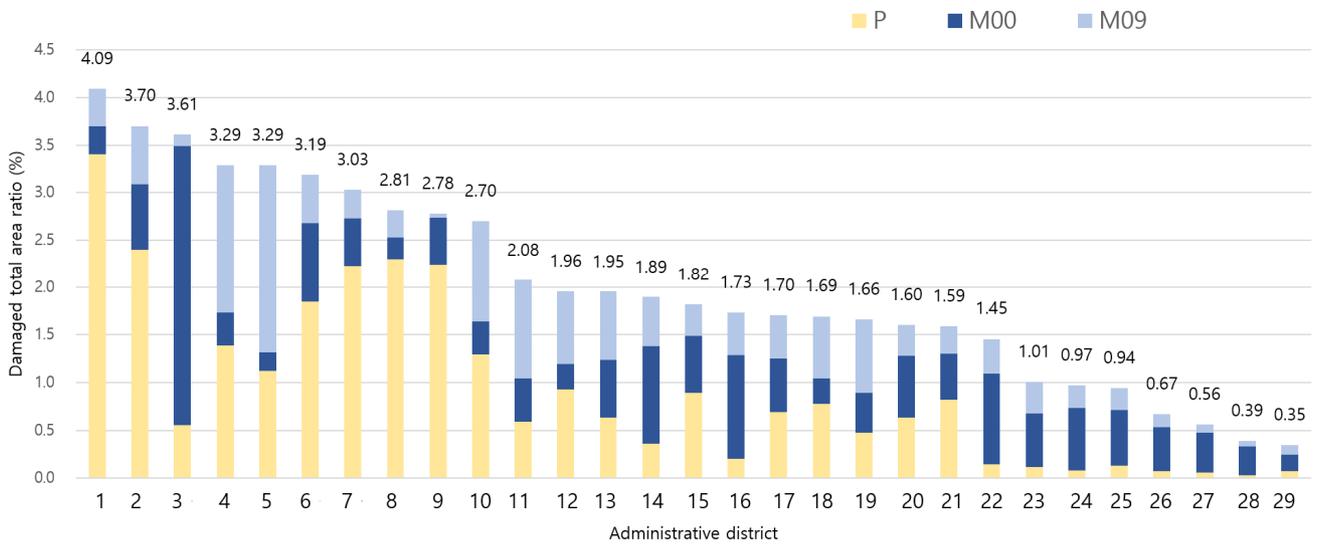


Fig. 8. Composition of damaged total floor area ratio

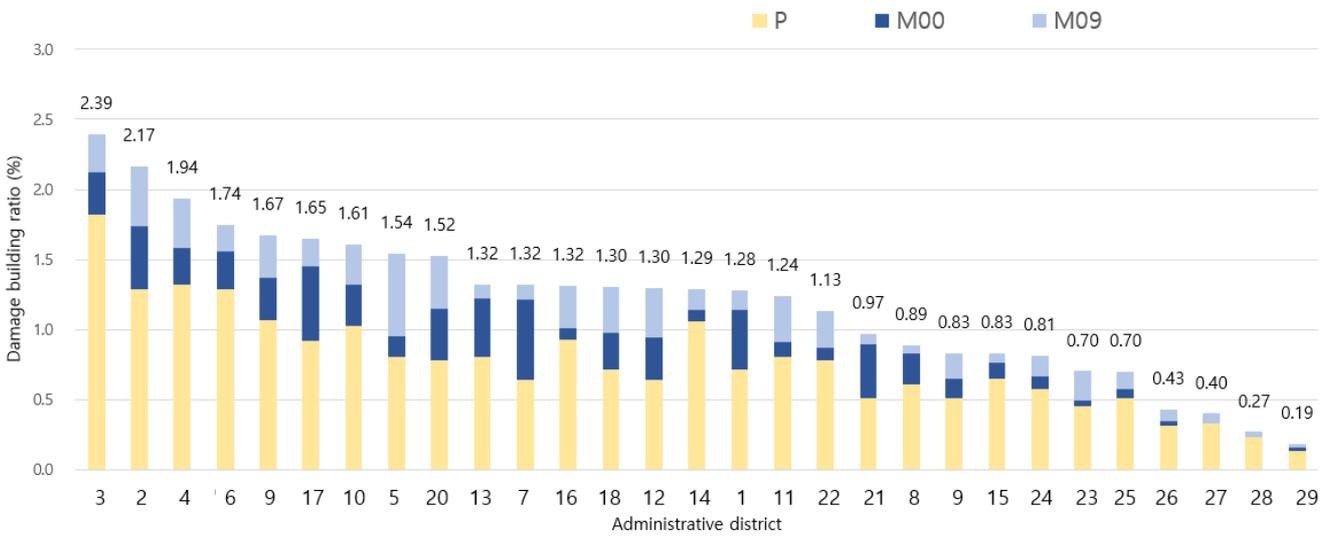


Fig. 9. Composition of damaged building ratio

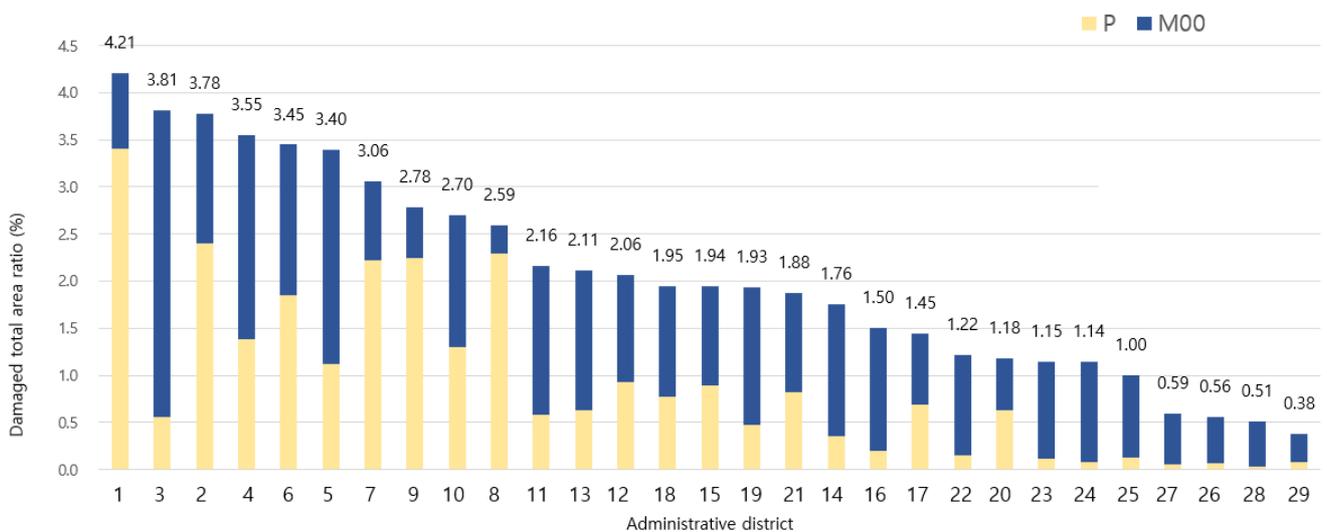


Fig. 10. Composition of damaged total floor area ratio (old seismic fragility)

/ 감사의 글 /

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

/ REFERENCES /

1. FEMA, Hazus—MH 2.1: Technical manual, Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model; c1999.
2. European Union Commission, Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities; c2013.
3. National Emergency Management Agency, Development of seismic fragility functions for Korean building structures; c2009.
4. Bureau of Urban Development, Your Community's Earthquake Risk – The Eighth Community Earthquake Risk Assessment Study, Tokyo Metropolitan Government; c2018.
5. Architectural Institute of Korea, Standard Design Loads for Buildings(AIK 2000); c2000.
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Seismic Building Design Code(KDS 41 17 00); c2022.
7. 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 Workshop; 2023.
8. National Institute of Disaster and Safety, Development of Social and Economic Effect Prediction Methodology due to Large Earthquakes; c2021.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korean Building Code(KBC 2005); c2005.
10. FEMA, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building; c2000.
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korean Building Code(KBC 2009); c2009.
12. Baker JW, Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis, Earthquake Spectra, 2015;31(1):579–599.