

Research Paper

지진의 위험요인을 고려한 공동주택의 내진보강 우선순위 결정에 관한 연구

A Study on Priority Determination of Seismic Reinforcement of Apartment Houses Considering Earthquake Risk Factors

한범진*

Han, Bum-Jin*

Assistant Professor, Department of Smart City Construction Convergence Engineering, Daejin University, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 11159, Korea

*Corresponding author

Han, Bum-Jin

Tel : 82-31-539-2240

E-mail : archism@daejin.ac.kr

Received : May 19, 2023

Revised : June 22, 2023

Accepted : June 26, 2023

ABSTRACT

Recent seismic activities in countries like China and Turkey have underscored the widespread and severe damages that earthquakes can inflict globally. Being situated in a seismically active zone, South Korea can no longer regard itself as immune to earthquake hazards, necessitating the urgent adoption of proactive measures against such threats. The government has been proactive in evaluating, formulating processes, and methods for the seismic retrofitting of public buildings lacking in earthquake resistance. However, enforcement mechanisms for privately-owned apartment complexes are absent, and in the face of insufficient previous research and guidelines, preemptive measures for public safety remain alarmingly inadequate. With over 48% of residential structures in Korea aged over 30 years, and apartment complexes constituting more than 80% of these, the gravity of the situation is undeniable. This study deduces key factors for seismic retrofitting of apartment buildings like earthquake zones, soil type, building significance, aging degree, vulnerability, etc., based on building seismic design codes. It further proposes an algorithm for a more succinct and efficient determination of the priority of seismic reinforcements for apartment buildings.

Keywords : apartment houses, seismic reinforcement priority, algorithm

1. 서론

최근 중국, 튀르키예 지진과 더불어 전세계적으로 지진으로 인한 피해가 잇따르고 있으며, 그 피해정도 또한 매우 심각하다. 국내에서도 2016년 9월 규모 5.8의 경주 지진과 2017년 11월 규모 5.4의 포항 지진 이후 현재까지 진도 3이상의 지진 47회, 진도 2 이상의 지진이 500회 이상이 발생하였으며, 이는 지진 활동지대에 위치한 우리나라도 더이상 지진의 안전지대가 아니라는 것을 보여준다.

국내에서는 1960년대부터 원자로 및 발전소에 해외 선진국 내진설계기준을 준용하는 것을 시작으로 주요 기반시설물의 지진 피해를 예방하였으며, 1988년부터 건축물의 내진설계 개념이 도입되어 현재까지 4차례 건축법의 개정을 통해 내진설계 기준을 적용하고 있다. 기존 연구, 기준과 정책들은 학교, 관공서 및 주요 기간 시설물 등 공공 건축물을 중심으로 진행되어 왔으며, 지진방재종합계획과 같이 정부차원의 중장기 계획을 통해 체계적으로 내진설계 점검 및 보강을 추진하여 내진율을 확보해 나가고 있다[1-4].

이에 비해 기 구축된 민간 소유의 건축물은 정부차원에서 내진보강을 강제할 수 있는 방법이 없으며, 관련 선행 연구 및 지



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

침 등이 미비하여 대국민 안전차원의 선제적 대응방안이 매우 미흡한 실정이다[5,6]. 국토교통부(2021년) 자료에 따르면 건축물의 소유구분별 현황은 총 731만동 중 개인 570만동(77.9%), 용도별 현황으로는 주거용 458만동(62.7%)으로, 개인 소유의 주거용 건축물 비율이 가장 높다는 것을 알 수 있다. 주거용 건축물 중 약 48%가 준공 30년 이상의 노후 건축물이며 그 중 공동주택이 80% 이상을 차지하고 있어 그 심각성은 더욱 높다.

본 연구의 목적은 민간건축물인 공동주택의 내진보강 우선순위 결정을 위한 알고리즘을 개발하는 것이다. 주요 영향 요인을 도출하기 위하여 건축물의 내진보강 관련 기준, 정책, 지원제도 및 선행연구 등 다각적인 자료들을 조사·분석하고, 관련분야 전문가의 의견을 수렴하여 주요 영향 인자를 확정하고 가중치를 부여하여 총 점수 100점을 기준으로 점수를 산출한다. 알고리즘에 실제 포항 지진으로 피해를 입은 공동주택의 데이터를 입력하고 비교하여 알고리즘의 적합성 및 효용성을 검토한다. 본 연구는 정부차원의 민간건축물 내진보강 지원 시 우선순위 결정을 위한 근거자료와 안전성에 대한 사전점검 건축물을 선별하는 평가자료로 활용 가능할 것이다.

2. 건축물 내진보강 관련 정책 및 지원제도

2.1 일본의 내진보강 정책 및 지원제도

일본은 1981년 ‘건축기준법’의 개정을 통해 내진설계 기준을 강화하였으나, 한신·아와지 대지진 발생으로 새로운 내진설계기준에 따른 내진성능을 갖추지 못한 건물에서 피해가 다수 발생하였다. 이에 ‘건축기준법’ 개정 전에 건축된 건축물이 새로운 기준에 맞는 내진성능을 확보할 수 있도록 ‘건축물의 내진개수축진에 관한 법률’을 1995년에 제정하였다. 일본의 내진보강 지원 제도는 내진개수축진법의 개정에 따라 내진진단의 의무화 대상이 되는 건축물에 대하여 중점적으로 내진화를 도모하기 위해 보조제도와 세제상의 우대 제도가 신설되어 ‘보조’, ‘세제’, ‘대출’의 세 가지 형태로 지원하고 있으며, 그 내용은 아래 Table 1과 같다[7].

2.2 미국의 내진보강 정책 및 지원제도

미국은 1977년에 ‘지진위험감소법’이 제정되면서 지진위험 감소를 위한 정책프로그램으로 ‘지진위험감소 프로그램(National Earthquake Hazard Reduction Program: 이하 ‘NEHRP’)'이 시행되었다. ‘지진위험감소 프로그램(NEHRP)’은 국립표준기술원, 국토안보부 연방위기관리청, 연방 내무부 산하 미국 지질조사국, 연방 상무부 산하 국립과학재단과 같은 서로 소속이 다른 4개의 행정기관이 협업하여 지진에 대한 대응 업무를 지원하고 있다[8]. 미국의 내진보강 지원제도는 금융, 정책, 기술, 정보의 4가지로 구성되어 있으며 그 내용은 Table 2와 같다[9].

미국의 50개 중에서 가장 지진의 위험도가 높은 주는 캘리포니아이며, 주정부 내진프로그램 EBB(Earthquake Brace Bolt)을 주 자체에서 운영하며 일반주택이나 노후 건축물 안전도를 점검하고 내진보강을 지원하고 있다. 샌프란시스코는 시 주체로 2012년부터 CAPSS(Community Action Plan for Seismic Safety) 프로그램을 운영하며 민간 건축물의 구조보강을 장려하고 있으며, 2042년까지 총 3단계로 진행할 계획이다.

2.3 국내 내진설계 정책 및 지원제도

국내 건축물에 대한 내진설계 적용은 1962년 건축법 제정으로 시작되었으나, 이를 위한 세부 시행령의 부재로 시행되지 못하였다. 이후 1988년 건축법 시행령 및 건축물 구조기준 등에 관한 규칙이 제정되면서, 6층 또는 10만²m² 이상의 신축 건축물에 대해 적용하는 세부적인 기준이 수립되어 건축물의 내진설계 대상이 의무화 되었다. 건축법 시행령은 4차례 개정되면

Table 1. Japanese seismic retrofitting support system[7]

Division		Contents	
Assistant Support	Deregulation	- Skip the building certification procedures during construction - Deregulation on approval standards and fire resistance / Special treatment of volume ratio - Temporary occupancy of high-quality rental housing during construction	
	Shear and Rehabilitation Design Cost	- Housing: Cost Aid: Government(1/3), Local(1/3) - Except Housing: Cost Aid: Government(1/3), Local(1/3)	
	Rehabilitation Cost	- Housing: Cost Aid: Government(11.5%), Local(11.5%) - Except Housing: Cost Aid: Government(11.5%), Local(11.5%) - Around Emergency Road: Cost Aid: Government(1/3), Local(1/3)	
Taxation System	Income Tax	10%(up to a maximum of 250,000 yen) of the standard construction cost for the earthquake-proofing work carried out until June 30, 2019 is deducted from the income tax	
	Housing		
	Fixed Asset Tax	Decrease the amount of fixed assets(up to 120m ² equivalent) of houses that have been subjected to earthquake-proof reinforcement by 1/2 of one year for March 31, 2018(However, the seismic retrofit of the housing which is the incapacitated structure of the existing seismic disturbance is reduced to 1/2 for two years)	
	Corporate Tax, Income Tax	Earthquake resistant diagnosis subject to earthquake resistant repair promotion law The earthquake resistant diagnosis result report until March 31, 2015 The person who carried out earthquake resistant repair acquisition from April 1, 2014 till five years from the reporting day , a special amortization of 25% of the acquisition price	
	Architecture		
	Fixed Asset Tax	When earthquake proof diagnosis result is reported in buildings earthquake resistant diagnosis by earthquake resistance repair promotion method, If the government subsidized the repair work from April 1, 2014 to March 31, 2017, the amount of fixed assets tax will be reduced to half for two years(Construction cost 2.5% limit)	
Home loan tax cuts	Income Tax	If earthquake repair work is carried out and it is provided for residential use until June 30, 2019, 1% of the loan balance for 10 years shall be deducted from the income tax amount(In order to comply with the current earthquake-resistant criteria, construction work for over 1 million yen is eligible)	
Loan	Individual	Loan Limit	10 million yen(80% of housing part construction cost is upper limit)
		Interest Rate	0.98% within 10 years of repayment period, 1.10% within 20 years from 11 years
		Guarantor	Unnecessary
	Apartment House Management Combination	Loan Limit	5 million yen / house(80% of the construction cost of common part is upper limit)
		Interest Rate	Repayment period Within 10 years 0.71%
	Guarantor	Unnecessary	

Table 2. Seismic retrofit assistance tools of California

Financial	Policy	Technical Assistance	Information
-Loan Programs	-Transfer of Development Rights	-Standardized Retrofit Requirements	-Placards
-Credit Enhancements	-Expedited Permits and Review	-Process Navigation	-Public Awareness Campaign
-Interest Rate Buy-downs	-Early Adopter Incentives	-Training Construction Professionals	-Building Rating System
-Grants	-Right to Rebuild legislation or code	-Developing group of Technical Advisors	-Tenant Notification
-Rebates/Fee Waivers	-Non-permitted work waiver	-Retrofit Ombudsman	-Real Estate Transfer Disclosure
-Property Tax Exemption	-Limited liability legislation		
-Fed/State Tax Credits	-Non-conforming condition exemptions		
-Accelerated Depreciation			

서 내진설계가 적용되는 건축물의 규모 범위가 점차 확대되었으며, 그 내용은 Table 3과 같다.

Table 3. Evolution history of seismic design standards

Revisions	Number of floors	Total floor area	Height of building	Height of eaves	Spacing of columns
Building act enforcement decree article 16 (1988.3.1)	6 floors or more	General hospitals, power plants, and public works facilities larger than 1,000m ²	-	-	-
		Public assembly facilities larger than 5,000m ² Sales facilities larger than 100,000m ²			
Building act enforcement decree article 32 (1992.6.1)		100,000m ² or more	-	-	-
Building act enforcement decree article 32 (2005.7.18)	3 floors or more	General hospitals larger than 1,000m ² (excluding warehouses, barns, crop houses, and structures built to standard design books)	-	-	-
Building act enforcement decree article 32 (2009.7.16)	-		10m or more		
Building act enforcement decree article 32 (2017.3.30)	2 floors or more	500m ² or more (excluding warehouses, barns, crop houses, and structures built to standard design books)	13m or more	9m or more	-

건축법 시행령을 통해 내진설계 기준을 도입한 1988년부터 내진설계 적용 대상 건축물을 점차 확대하면서 구축 당시 기준으로 내진설계가 되어있다 하더라도 현재 기준에서 내진성능을 만족하지 못하는 건축물이 많다. 국토교통부 자료(2016)에 따르면 전체 건축물 690만동 중 내진대상 건축물은 130만동, 내진확보 건축물은 45만동으로 내진대상 건축물 기준 내진율은 34.6%이나, 전체 건축물 기준 6.5%로 매우 저조한 상태이다.

신규 구축시 내진설계 비용은 건축비의 0.7% 정도이며, 완공된 건축물에 내진보강을 하게 될 경우 신축시 소요되는 내진설계 비용보다 더 많은 보강비용이 소요되나, 내진설계의 필요성을 인식하지 못하는 건축주에게는 내진설계 비용조차도 부담으로 인식된다[10]. 특히, 민간건축물의 내진보강은 기존 공공시설물 내진보강 기본계획에 포함된 학교, 병원시설을 제외하면 세금감면 또는 인센티브 제공 등과 같은 소극적인 내진보강 지원이 전부이며, 공공건축물과 같이 강제할 수 있는 방법이 없어 내진보강을 확보는 더욱 어려운 실정이다[11].

공공시설물에 대해서는 ‘지진·화산재해대책법’ 제15조에 따라 기존 공공시설물에 대하여 내진성능 보강 기본계획을 5년마다 수립하여 시행하도록 의무화하고 있다. 건축물은 건축법에 의거하여 내진설계를 실시하고 있으며, 내진성능평가 및 구조보강은 국토안전관리원과 한국지진공학회가 공동으로 연구 제안한 ‘기존 시설물 내진성능 평가요령’을 참고하여 실시하고 있다[12].

민간건축물의 내진보강 지원제도를 살펴보면, 2013년 ‘지방세특례제한법’에 내진설계 비대상 건축물을 대상으로 취득세 및 재산세를 경감하는 조항을 신설하는 것으로 시작되었다. 2016년 경주 지진 발생 이후 지원대상범위를 내진대상 건축물로 확대하였으며, 내진보강 건축물 지원내용은 Table 4와 같다.

행정안전부 자료(2017)에 따르면 Table 5와 같이 기존 민간건축물 내진보강에 따른 지방세 감면실적은 2016년 이전까지 4건(118만 9천원)이었으나, 경주지진 이후 2017년까지 44건(1억8,248만9천원)으로 크게 증가한 것으로 조사되었다. 이는 지진의 영향을 받은 경남, 울산 등을 중심으로 기존 민간건축물에 대한 자발적인 내진보강이 이루어졌음을 보여주며, 건축주가 지진피해의 심각성을 인지하고 자발적으로 내진보강에 동참하는 것이 내진을 확보에 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

Table 4. Support measures for seismic retrofitting of privately owned buildings

Division	Target building	Reduction rate
Reduction of local tax	Buildings that are not required to be seismically designed, but are seismically designed or have confirmed seismic performance	<ul style="list-style-type: none"> • Acquisition tax : new building 50% reduction, major repair 100% reduction • Property tax : new building 50% reduction, major repair 100% reduction
Reduction of national tax	Buildings with confirmed seismic performance that were not required to be seismically designed	<ul style="list-style-type: none"> • Income or corporate tax : 3~7% reduction in investment amount (Major company 3%, mid-sized company 5%, small company 7%)
Reduction of insurance	Seismic performance secured building	<ul style="list-style-type: none"> • For seismic retrofitting of existing buildings : 20% reduction • For seismic design of buildings not subject to seismic design : 30% reduction
Relax of the building to land ratio, floor area ratio	Seismic performance secured building	<ul style="list-style-type: none"> • Relax of the building to land ration, floor area ratio : Maximum 10%(Confirmed by building committee)

Table 5. Local tax reductions for seismic retrofitting of private buildings(Unit: USD)

Division	Number of case	Amount(Dollar)	Region
2013~2015	4	904.18	• Gyeongnam: 3, Gangwon: 1
2016	35	125,551.33	• Gyeongnam: 28, Geonggi: 3, etc.
2017	9	14,401.52	• Gyeongnam: 2, Ulsan: 2, etc.
Total	48	140,857.03	• Gyeongnam: 33, Ulsan: 4, Geonggi, Jeju, Gangwon: 2 each, Seoul, Sejong, Chungnam, Gyeongbuk: 1 each

Note: 1,315 Won = 1 USD as of 2023/4/4(Bank of Korea)

2.4 소결

민간건축물의 내진보강 활성화를 위해서는 내진성능평가 및 내진보강 비용에 대한 정부차원의 적극적인 지원제도를 마련하여 건축주의 부담을 최소화하고 자발적으로 동참할 수 있는 방안을 마련하는 것이 중요하다. 제도적 차원으로는 건축물의 내진성능 확인제도를 마련해야하고, 비용지원 측면으로는 건축주들이 내진 진단과 보강에 드는 많은 비용을 부담스러워하지 않도록 세제혜택과 별도로 해당 지자체가 직접 비용을 지원할 수 있는 방안이 마련되어야 한다.

3. 내진보강 중요도 평가항목 도출

본 연구에서는 민간건축물인 공동주택의 지진방재에 대한 체계화된 대책을 수립하기 위하여 평가 가능한 주요 영향 요인을 도출하고 내진보강 우선순위를 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 공동주택의 내진보강 시 고려되어야 할 주요 요인들을 도출하기 위하여, 건축물의 내진성능 평가 절차, 기존 공공건축물의 우선순위 산정 모델, 지역계수, 노후도, 구조형식, 중요도 등과 같은 주요 영향 요인(main factor)들을 다각적으로 조사·분석하였으며, 건축구조 및 시공전공 교수, 구조설계 및 안전진단 전문가, 연구원과 같은 17명의 산학연 전문가들을 대상으로 AHP 기법을 활용하여 의견을 수렴하여 주요 영향 요인 선정, 우선순위 및 가중치를 부여하였다[1,2,4,10-12]. 선정된 주요 영향 요인은 콘크리트 강도 감소계수(EF_1), 콘크리트 공칭강도 기준값(EF_2), 지진구역에 따른 지진계수(IF_1), 건축물의 용도에 따른 중요도(IF_2), 지진 취약 건축물 유형(VF_1), 지반조건(VF_2), 층수(VF_3)이다. 총 7개의 주요 영향 요인을 노후도, 중요도, 취약도로 구분하여 가중치를 부여하고 총 점수 100점을 기준으로 점수를 산출하였으며, 총 평가 점수가 70점 이상인 경우 “내진보강 1순위 공동주택”, 60점 이상 70점 미만인 경우 “내진보강 2순위 공동주택”, 60점 미만인 경우 “내진보강 3순위 공동주택”으로 정의하였다.

3.1 노후도에 의한 점수 및 가중치

본 연구에서는 공동주택의 노후도(Elapsed time Factor, P_{EF})에 대한 점수를 산정하기 위하여 경과년수에 의한 콘크리트 강도 감소계수(EF_1)와 건설연도별 콘크리트 공칭강도 기준값(EF_2)을 주요 영향 요인으로 선정하고 다음과 같이 가중치를 부여하였다.

$$\text{노후도}(P_{EF}) = 20 \times (EF_1 \times EF_2) \tag{1}$$

P_{EF} : 노후도

EF_1 : 콘크리트 강도 감소계수에 따른 점수

EF_2 : 콘크리트 공칭강도 기준값에 따른 점수

국토안전관리원의 ‘기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령(2021)’에 따르면 내진성능평가를 위한 현장시험이 어려운 경우 재료강도는 설계도서상의 설계기준강도를 기준으로 Table 6에 제시된 경과년수에 따른 감소계수를 곱하여 재료강도를 결정하며, 이에 따른 점수를 부여하여 노후도를 평가하였다.

Table 6. Concrete strength reduction factor

Division	Concrete compressive strength	EF_1 Score
Number of years	30 or more	0.8
	20 or more	0.9
	20 under	1.0

설계도서가 없어 설계기준강도를 알 수 없고 현장시험이 어려운 경우 콘크리트 강도는 Table 7의 연도별 기본값을 사용할 수 있으며, 이에 따른 점수를 부여하여 노후도를 평가하도록 하였다. 기본값에는 경과년수에 따른 재료강도의 감소가 이미 고려되어 있으나, 본 연구에서는 감소계수와 콘크리트 강도 기본값을 동시에 고려한 안전측의 값으로 노후도를 평가하였다.

Table 7. Default concrete nominal strength

Division	Concrete compressive strength	EF_2 Score
Concrete strength	Before 1970	13
	1971~1987	15
	1988~2000	18
	After 2001	21

3.2 중요도에 의한 점수 및 가중치

공동주택의 중요도(Importance Factor, P_{IF})에 대한 점수를 산정하기 위하여 지진구역에 따른 지진계수(IF_1)와 건축물의 용도에 따른 중요도(IF_2)를 주요 영향 요인으로 선정하고 다음과 같이 가중치를 부여하였다.

$$\text{중요도}(P_{IF}) = 30 \times (IF_1 \times IF_2) \tag{2}$$

P_{IF} : 중요도

IF_1 : 지진구역계수에 따른 점수

IF_2 : 건축물의 중요도에 따른 점수

건축물의 내진설계시 지진의 위험도에 따라 지역적으로 구분되는 지진구역계수를 적용한다. 이는 소방방재청에서 지반 운동 가속도를 반복적으로 측정하여 각 지역의 지진위험수준을 보여주기 위하여 지진의 재현주기별로 나타낸 ‘국가지진위험지도’와 ‘건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)’에 제시되어있는 지역별 계수의 기준을 따른다. 본 연구에서는 Table 8과

같이 건축물 내진설계기준에 제시되어 있는 지역별 지진구역 계수를 기준으로 점수를 부여하고 중요도 평가에 반영하였다.

Table 8. Seismic zone and factor

Seismic zone	Administrative district	Seismic zone factor(Z)	IF ₁ Score	
I	City	Seoul, Incheon, Daejeon, Busan, Daegu, Ulsan, Gwangju, Sejong	0.11g	1.0
	Province	Geonggi-do, Chungbuk, Chungnam, Gyeongbuk, Gyeongnam, Jeonbuk, Jeonnam, Gangwon nambu		
II	Province	Gangwon bukbu, Jeju	0.07g	0.8

건축물의 중요도는 위험한 물질을 취급하는 시설일수록, 비상사태에 사회가 최소한의 기능을 수행하는데 필요한 필수 사회 기반시설에 해당할수록, 붕괴시 많은 인명피해가 예상될수록 중요도를 높게 평가한다. 본 연구에서는 ‘기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령(2021)’에 제시된 건축물의 중요도 등급에 따라 점수를 부여하고 중요도를 평가하였다. 본 연구의 대상은 공동주택으로 붕괴시 많은 인명피해가 예상되는 시설물로 대부분 중요도(1) 또는 (2)에 해당하며 그 기준은 아래 Table 9와 같다.

Table 9. Degree of importance of buildings

Division	Type of buildings	IF ₂ Score
Importance(S)	(1) Dangerous goods storage and handling facilities with a gross floor area of 1,000m ² or more	1
	(2) National or local government buildings, foreign diplomatic center, fire stations, power stations, broadcasting stations, and telephone stations with a gross floor area of 1,000m ² or more	
	(3) General hospitals, surgical or emergency facilities	
	(4) Buildings designated as emergency evacuation facilities in the event of an earthquake, typhoon, or other emergency	
Importance(1)	(1) Dangerous goods storage and handling facilities with a gross floor area of less than 1,000m ²	0.9
	(2) National or local government buildings, foreign diplomatic center, fire stations, power stations, broadcasting stations, and telephone stations with a gross floor area of less than 1,000m ²	
	(3) Theatres, meeting hall, stadium, exhibition hall, athletic facility, sales facility, transportation facility with a gross floor area of 5,000m ² or more	
	(4) Child-related facility, aged care facility, social care facility, and workforce facility	
	(5) Accommodation, office, dorm, and apartments with 5 or more floors	
	(6) School	
	(7) Hospital without both surgical and emergency facilities, and other medical facilities with a gross floor area of 1,000m ² or more that do not include of importance(S)	
Importance(2)	(1) Buildings that are not of significance(s), (1), or (3)	0.8
Importance(3)	(1) Agriculture, small warehouse	0.7
	(2) Temporary facility	

3.3 취약도에 의한 점수 및 가중치

공동주택의 취약도(Vulnerability Factor, P_{VF})에 대한 점수를 산정하기 위하여 지진 취약 건축물 유형(VF₁), 지반조건(VF₂) 및 층수(VF₃)를 주요 영향 요인으로 선정하고 다음과 같이 가중치를 부여하였다.

$$\text{취약도}(P_{VF}) = 50 \times (VF_1 \times VF_2 \times VF_3) \tag{3}$$

P_{VF} : 취약도

VF₁ : 건축물 유형에 따른 점수

VF₂ : 지반조건에 따른 점수

VF₃ : 층수에 따른 점수

지진 취약 특별관리대상 건축물의 유형으로는 연약지반의 5층 이하 필로티 공동주택, 1990년 이전에 건설된 철근 콘크리트 아파트, 1990년 이전에 건설된 병원, 소방서, 공공건물, 위험물 저장소와 같은 비내진 특등급 건축물, 2000년 이전에 건설된 비내진 학교, 조적조 주택, 외장재로 사용된 조적벽돌 및 비구조재 등이 있다[13-20]. 본 연구에서는 필로티, 조적조, 1990년 이전에 건설된 RC조 및 그 외 기타구조형식으로 지진 취약 공동주택을 구분하여 점수를 부여하였으며, 그 내용은 Table 10과 같다.

Table 10. Degree of importance of buildings

Division	Structure type	VF_1 Score
1	Pilotis structure, Masonry structure	1.0
2	Reinforced concrete structure before 1990	0.8
3	Other structures	0.6

건축물의 지진응답 크기는 지반운동의 동적특성과 관련이 있다. 특히, 지반의 강도가 작을 경우 구조물의 지진응답이 증폭하는데 이를 세분화하여 구조물의 설계에 반영하기 위해 총 6개의 지반으로 종류를 분류하며, 본 연구에서는 이에 따라 차등점수를 부여하여 공동주택의 지진 취약도를 Table 11과 같이 평가하였다.

Table 11. Soil modulus and type

Ground type	Ground condition	Standard of classification		VF_2 Score
		Basement rock depth H(m)	Average soil shear wave velocity $V_{s,soil}$ (m/s)	
S1	Rock	Less than 3	-	0.6
S2	Shallow, hard ground	3~20 or less	260 or more	0.7
S3	Shallow, soft ground	3~20 or less	More than 120 less than 260	0.8
S4	Deep, hard ground	More than 20 less than 50	180 or more	0.9
S5	Deep, soft ground	More than 20 less than 50	More than 120 less than 180	
	Soft ground	3 or more	120 or less	1.0
S6	Ground that requires site-specific evaluation and geotechnical response			

마지막으로, 공동주택의 지진 취약도를 평가하기 위한 주요 영향 요인으로 층수를 선정하였다. 본 연구에서는 지진발생 시 대피 및 소방활동 취약도 측면에서 소방헬기, 고가사다리차, 펌프카 등 소방장비의 성능을 감안하여 소방 활동을 적극적으로 할 수 있는 범위를 기준으로 Table 12와 같이 차등점수를 부여하여 평가를 수행하였다[10].

Table 12. Vulnerability based on building floors

Division	Height	VF_3 Score
1	50 floors or more	1.0
2	30~50 floors	0.9
3	15~30 floors	0.8
4	5~15 floors	0.7
5	5 floors or less	0.6

4. 점수산출 및 우선순위 알고리즘

4.1 점수 산출

앞에서 언급한 산출식을 활용하여 노후도, 중요도 및 취약도 점수를 산출하고 각 항목의 가중치를 적용하여 최종 점수를 산정한다. 공동주택의 노후도(Elapsed time Factor, P_{EF})에 대한 점수를 산정하기 위하여 경과년수에 의한 콘크리트 강도 감소계수(EF_1)와 건설연도별 콘크리트 공칭강도 기준값(EF_2)을 주요 영향 요인으로 선정하고 20%의 가중치를 부여하였다. 중요도(Importance Factor, P_{IF})에 대한 점수를 산정하기 위하여 지진구역에 따른 지진계수(IF_1)와 건축물의 용도에 따른 중요도(IF_2)를 주요 영향 요인으로 선정하고 30%의 가중치를 부여하였다. 취약도(Vulnerability Factor, P_{VF})에 대한 점수를 산정하기 위하여 지진 취약 건축물 유형(VF_1), 지반조건(VF_2) 및 층수(VF_3)를 주요 영향 요인으로 선정하고 50%의 가중치를 부여하였다. 공동주택의 내진보강 우선순위를 결정하기 위한 최종점수 산출식은 아래 식(4)와 같으며, 100점을 기준으로 산출한다.

$$\text{Total Score}(S_p) = 20 \times P_{EF} + 30 \times P_{IF} + 50 \times P_{VF} \quad (4)$$

P_{EF} : 노후도

P_{IF} : 중요도

P_{VF} : 취약도

4.2 우선순위 알고리즘

본 연구에서는 앞에서 정의한 바와 같이 노후도, 중요도 및 취약도로 구분하고 점수를 산정하여 아래의 우선순위 알고리즘에 적용하여 3개의 그룹으로 분류하였다. 총 평가 점수가 70점 이상인 경우 “내진보강 1순위 공동주택”, 60점 이상 70점 미만인 경우 “내진보강 2순위 공동주택”, 60점 미만인 경우 “내진보강 3순위 공동주택”으로 정의하였다. 알고리즘을 표현하는 방법으로 자연어, 순서도, 의사코드, 프로그래밍 언어 등 다양한 방법이 있으며, 본 연구에서는 Figure1과 같이 순서도로 표현하였다[21,22].

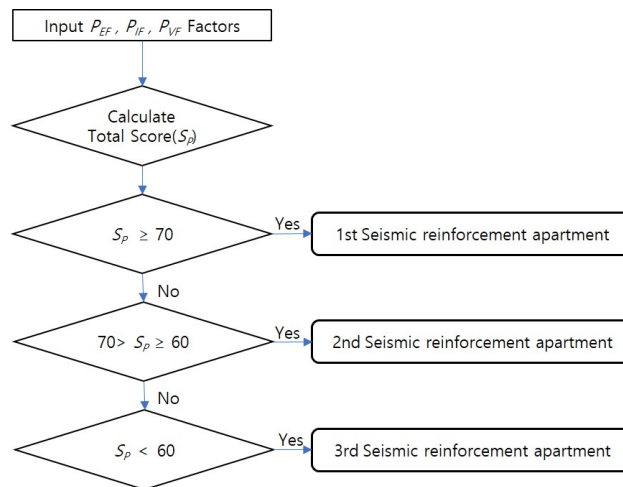


Figure 1. Algorithm for determining seismic reinforcement priority

4.3 우선순위 알고리즘 적합성 평가

공동주택의 내진보강 우선순위를 결정하기 위한 점수산출 식과 알고리즘의 적합성을 평가하기 위하여 “2017 포항 지진

백서(2018.01)”에서 조사된 공동주택의 피해 조사 자료를 활용하였으며, 본 연구에서는 피해 조사 결과 등급인 긴급, 단기, 중기와 알고리즘 우선순위 결과인 1순위, 2순위, 3순위를 비교하였다. 예를 들어 포항 북구 양덕동에 위치한 ○○아파트를 대상으로 점수를 산출하면 다음과 같다. 2014년에 준공된 지하1층 지상 20층의 890세대 아파트로 구조형식은 RC조(벽식)이며, 지진 피해 조사결과 피해등급은 중기, 피해 양상은 일부 구조체 균열, 마감재 박리/박락 등이며, 거주 가능 상태로 조사되었다. 조사된 정보를 바탕으로 점수산출식에 대입하면, 노후도(P_{EF}) 점수는 $20 \times (0.8 \times 0.7) = 11.2$ 점, 중요도(P_{IF}) 점수는 $30 \times (1 \times 0.9) = 27$ 점, 취약도(P_{VF}) 점수는 $50 \times (0.6 \times 0.9 \times 0.8) = 21.6$ 점으로 총 점수는 59.8점으로 산출되었으며, 본 점수를 알고리즘에 적용하면 “내진보강 3순위 공동주택”으로 정의된다. 이와 같은 방법으로 포항 지진으로 조사된 공동주택의 피해 데이터들을 활용하여 Table 13과 같이 알고리즘의 적합성을 검토하였다.

Table 13. Comparison of earthquake damages with algorithm outcomes

No.	Year of completion	Structure type	Floors	P_{EF}		P_{IF}		V_{F3}			Total score	Priority	Earthquake Damage	Result
				EF_1	EF_2	IF_1	IF_2	VF_1	VF_2	VF_3				
1	2014	RC(Wall)	20	0.8	0.7	1	0.9	0.6	0.9	0.8	59.8	3	Mid term	match
2	1992	RC(Wall)	6	1	0.8	1	0.9	0.6	0.9	0.7	61.9	2	Short term	match
3	2016	RC(Wall)	16	0.8	0.7	1	0.9	0.6	0.9	0.8	59.8	3	Mid term	match
4	1993	RC(Wall)	15	0.9	0.8	1	0.9	0.6	0.9	0.8	63.0	2	Short term	match
5	1994	RC(Piloti)	5	0.9	0.8	1	0.8	1	0.9	0.6	65.4	2	Emergency	mismatch
6	1999	RC(Wall)	20	0.9	0.8	1	0.9	0.6	0.9	0.8	63.0	2	Short term	match
7	2021	RC(Wall)	5	0.8	0.7	1	0.8	0.6	0.9	0.6	51.4	3	Mid term	match
8	1993	RC(Wall)	15	0.9	0.8	1	0.9	0.6	0.9	0.8	63.0	2	Short term	match
9	2013	RC(Wall)	22	0.8	0.7	1	0.9	0.6	0.9	0.8	59.8	3	Mid term	match
10	1990	RC(Wall)	15	1	0.8	1	0.9	0.6	0.9	0.8	64.6	2	Short term	match
11	1989	RC(Wall)	15	1	0.8	1	0.9	0.8	0.9	0.8	71.8	1	Short term	mismatch
12	1983	RC(Wall)	5	1	0.9	1	0.8	0.8	0.9	0.6	63.6	2	Short term	match

최종적으로 포항 지진으로 조사된 12개의 공동주택 피해 데이터들을 점수산출식에 적용하고 알고리즘에 의한 우선순위 산정 결과를 실제 피해 정도와 비교하였다. 총 12개의 사례 검토 결과 2개의 적합성 검토 결과가 일치하지 않는 것으로 분석되었으며, 나머지는 모두 적합한 것으로 분석되었다. 향후 지속적인 지진피해 데이터 축적 및 평가에 의해 알고리즘의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 민간건축물인 공동주택의 체계화된 지진방재 대책을 수립하기 위하여 내진보강 관련 평가 가능한 주요 영향 요인(main factor)을 도출하고 우선순위를 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 주요 영향 요인을 도출하기 위하여 건축물의 내진보강 관련 기준, 정책, 지원제도 및 선행연구 등 다각적인 자료들을 조사·분석하였으며, 총 7개의 주요 영향 요인을 선정하였다. 선정된 주요 영향 요인은 콘크리트 강도 감소계수(EF_1), 콘크리트 공칭강도 기준값(EF_2), 지진구역에 따른 지진계수(IF_1), 건축물의 용도에 따른 중요도(IF_2), 지진 취약 건축물 유형(VF_1), 지반조건(VF_2), 층수(VF_3)이다. 주요 영향 요인을 노후도(Elapsed time Factor, P_{EF}), 중요도(Importance Factor, P_{IF}) 및 취약도(Vulnerability Factor, P_{VF})로 구분하여 가중치를 부여하고 총 점수 100점을 기준으로 점수를 산출하였으며, 총 평가 점수가 70점 이상인 경우 “내진보강 1순위 공동주택”, 60점 이상 70점 미만인 경우 “내진보강 2순위 공동주택”, 60점 미만인 경우 “내진보강 3순위 공동주택”으로 정의하였다.

공동주택의 내진보강 우선순위를 결정하기 위한 점수산출 식과 알고리즘의 적합성을 평가하기 위하여 “2017 포항 지진 백서(2018.01)”에서 조사된 공동주택의 피해 조사 자료를 활용하였으며, 본 연구에서는 실제 피해 조사 결과 등급 중 “긴급”을 “내진보강 1순위 공동주택”, “단기”를 “내진보강 2순위 공동주택”, “중기”를 “내진보강 3순위 공동주택”으로 정의하고 비교·검토하였다. 총 12개의 사례 검토 결과 2개의 적합성 검토 결과가 일치하지 않는 것으로 분석되었으며, 나머지는 모두 적합한 것으로 분석되었다.

본 연구는 정부차원의 민간건축물 내진보강 지원 기준을 마련하기 위한 일환으로 그 기준의 적합성과 신뢰성을 향상시키기 위해서는 추가적인 내진분야 전문가의 의견수렴과 더불어 내진보강 활성화를 위한 지원 정책 및 제도 분야 전문가의 의견이 반영되어야 할 것이다. 또한, 우선순위 평가를 위한 점수 산출식과 알고리즘의 신뢰성을 상대적으로 향상시키기 위해서는 지속적으로 축적되는 지진 피해 데이터를 통한 평가 및 보완이 이루어져야 할 것이다. 본 연구의 결과는 정부차원의 민간건축물 내진보강 지원 시 우선순위 결정을 위한 근거자료와 안전성에 대한 사전점검 건축물을 선별하는 평가 자료로 활용 가능할 것이다.

요약


최근 중국과 튀르키예에서 발생한 지진과 함께 세계 곳곳에서 지진으로 인한 피해가 발생하고 있으며, 그 피해의 정도 또한 매우 심각한 상황이다. 지진 활성단층에 위치한 우리나라도 더 이상 지진의 안전지대가 아니며, 지진에 대한 선제적 대응이 절대적으로 필요한 시점이다. 정부에서는 기존에 지어진 공공건축물에 대한 내진성능평가, 절차, 내진보강 방법 등을 마련하여 내진설계가 미흡한 시설물에 대한 내진보강을 추진하고 있다. 하지만 민간 소유의 아파트는 강제할 방법이 없고, 사전 연구와 가이드라인의 부족으로 국민 안전을 위한 선제적 조치가 매우 미흡한 실정이다. 국내 주거용 건축물의 약 48%가 30년 이상 된 노후 건축물이며, 그 중 공동주택은 80% 이상으로 그 심각성을 뒷받침하고 있다. 본 연구에서는 건축물의 내진설계 기준을 기반으로 지반 유형, 건물의 중요도, 노후도, 층수 등 공동주택의 내진보강을 위한 총 7개의 주요 영향 요인도 출하고, 내진보강 우선순위를 보다 간결하고 효율적으로 결정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

키워드 : 공동주택, 내진보강 우선순위, 알고리즘

Funding

This research was supported by a grant(NRF- 2021R1F1A1046321) from the National Research Foundation of Korea by Ministry of Science, ICT and Future Planning.

ORCID

Bum-Jin Han,  <https://orcid.org/0000-0003-1197-0048>

References

1. Ministry of Public Administration and Security. 2016 Announcement of Results of Promotion of seismic retrofit measures for existing public facilities. Sejong (Korea): Ministry of Public Administration and Security; 2017. p. 129-303.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Guidelines for evaluating seismic performance of previously constructed facilities (buildings). Sejong (Korea): Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2019. 19 p.
3. Jo JR, Kwack YJ, Han JT, Shin HS, Jo CB, Jin WJ, Kim JM, Lee SH, Lee YH, Shin JW, Jeon JS, Jang YG, Park DH, Oh CK,

- Ha IS, Song JH. Strategic study on seismic performance level inspection and management system of deteriorated infrastructure. Goyang (Korea): Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. 2019 Dec. 189 p. Report No.: KICT 2019-109.
4. Lee YJ, Kim JY. Determining the seismic-retrofit priority for school facilities. *Journal of The Korea Society of Hazard Mitigation*. 2019 Jun;19(7):11-20. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.7.11>
 5. Chung L, Woo S. Seismic performance preliminary evaluation method of reinforced concrete apartments with bearing wall system, *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2007 Jun;19(3):293-300.
 6. Santarsiero G, Masi A, Manfredi V, Ventura G. Requalification of RC frame apartment buildings: Comparison of seismic retrofit solutions based on a multi-criteria approach. *Sustainability*. 2021 Sep;13(17):9962. <https://doi.org/10.3390/su13179962>
 7. Hur J, Kim HK, Shin MJ. Improvement plan of seismic retrofitting support system for establishing earthquake disaster prevention policy. *Journal of the Korea Academia Industrial cooperation Society*. 2017 Jul;18(7):611-7. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.7.611>
 8. Lee JS. A study on the U.S. legislation for earthquake response - Focused on the United States Federal Earthquake Hazards Reduction Act and California Emergency Service Act. 2017 Mar;34(1):25-57. <https://doi.org/10.18018/HYLR.2017.34.1.027>
 9. David B, Brian E, Mike H, Ian M, Mark T, Reid Z, Amit K, Andrew P. Unreinforced masonry(URM) seismic retrofit project. Portland (OR): Portland Bureau of Emergency Management. 2015 Apr. p. 1-31.
 10. Park J, Kim S. A study on evaluation criteria for infrastructure importance regarding earthquake. *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*. 2018 Jun;21(6):317-27.
 11. Ha KJ, Lee DL. Support schemes to encourage seismic retrofitting of existing buildings for earthquakes. *Journal of Architectural Institute of Korea*. 2022 Dec;24(6):121-8.
 12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Guidelines for evaluating seismic performance of previously constructed facilities. Sejong (Korea): Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2021 May. 19 p.
 13. Shin JS, Kim JH, Lee KH. Seismic assessment of damaged piloti-type RC building subjected to successive earthquakes. *The Journal of The International Association for Earthquake engineering*. 2014 Feb;43(11):1603-19. <https://doi.org/10.1002/eqe.2412>
 14. Gong M, Zuo Z, Wang X, Lu X, Xie L. Comparing seismic performances of pilotis and bare RC frame structures by shaking table tests. *Engineering Structures*. 2019 Nov;199:109442. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109442>
 15. Hong DV, Lee DH, Shin JU, Lee KH. Influence of shear-axial force interaction on the seismic performance of a piloti building subjected to the 2017 earthquake in Pohang Korea. *Structural Concrete*. 2020 Feb;21(1):220-34. <https://doi.org/10.1002/suco.201800291>
 16. Jintendra K, Bothara P, Dhakai, Jhon B. Seismic performance of an unreinforced masonry building: An experimental investigation. *The Journal of The International Association for Earthquake engineering*. 2010 Jan;39(1):45-68. <https://doi.org/10.1002/eqe.932>
 17. Cardoso R, Lopes M, Bento R. Seismic evaluation of old masonry buildings. Part I: Method description and application to a case-study. *Engineering structures*. 2005 Dec;27(14):2024-35. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.06.012>
 18. D'Ayala D. Handbook of seismic risk analysis and management of civil infrastructure systems. Cambridge(UK): Civil and Structural Engineering; c2013. Chapter 13, Assessing the seismic vulnerability of masonry buildings; p. 334-65. <https://doi.org/10.1533/9780857098986.3.334>
 19. Repapis C, Vintzileou E, Zeris C. Evaluation of the seismic performance of existing rc buildings i: Suggested methodology. *Journal of Earthquake Engineering*. 2006 Oct;10(2):265-87. <https://doi.org/10.1080/13632460609350596>
 20. Celarec D, Dolsek M. The impact of modelling uncertainties on the seismic performance assessment of reinforced concrete frame buildings. *Engineering Structures*. 2013 Jul;52:340-54. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.036>
 21. Giordano D, Maiorana F. Teaching algorithms: Visual language vs flowchart vs textual language. 2015 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). 2015 Mar 18-20; Tallin, Estonia. Manhattan (NY): Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2015. p. 15092691. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2015.7096016>
 22. Andrzejewska M, Stolińska A, Błasiak W, Pęczkowski P, Rosiek R, Rożek B, Wcisło D. Eye-tracking verification of the strategy used to analyse algorithms expressed in a flowchart and pseudocode. *Interactive learning environments*, 2016 Aug; 24(8):1981-95. <https://doi.org/10.1080/10494820.2015.1073746>