

비보강 조적조 건축물의 외부 보강에 따른 내진성능 연구

김종연¹, 강 종^{2*}

A Study on Seismic Performance of External Reinforcement for Unreinforced Masonry Buildings

Jong-Yeon Kim¹, Jong Kang^{2*}

Abstract: In this study, we evaluated the seismic performance of a masonry building that was not designed to be earthquake-resistant and attempted to improve the seismic performance by adopting a seismic reinforcement method on the exterior of the building. In addition, the building seismic design standards and commentary(KDS 41 17 00:2019) and existing facility(building) seismic performance evaluation methods were applied to evaluate seismic performance, and a pushover analysis was performed using non-linear static analysis. As the result of this study, it was determined that seismic reinforcement was urgent because the distribution rate of earthquake-resistant design of houses in Korea was low and masonry structures accounted for a large proportion of houses. When reinforcing the steel beam-column+brace frame in a masonry building, the story drift angle was 0.043% in the X direction and 0.047% in the Y direction, indicating that it satisfied the regulations. The gravity load resistance capacity by performance level was judged to be a safe building because it was habitable in both X and Y directions. In conclusion, it is believed that the livability and convenience of the house can be secured by reinforcing the exterior of the building and the seismic performance and behavior of the structure can be clearly predicted.

Keywords: Nonlinear static analysis, Pushover, Seismic performance, Seismic retrofitting method, Unreinforced masonry buildings

1. 서 론

우리나라의 경우 내진설계 의무 규정이 1988년에 도입되어 6층 이상 또는 연면적 10만 m² 이상의 건축물이 적용 대상이었으나, 1995년에는 6층 이상 또는 연면적 1만 m² 이상의 건축물, 2005년에는 3층 이상 또는 연면적 1,000m² 이상의 건축물, 2015년에는 3층 이상 또는 연면적 500 m² 이상의 건축물, 2017년에는 2층 이상 또는 연면적 500 m² 이상의 건축물을 적용 대상으로 하여 확대 적용되어 현재에 이르고 있다. 상기 내진설계 적용 대상 건축물의 의무 규정 변천내용에서 알 수 있듯이 소규모 주택 건축물은 대부분 2층 이하로서 오랜 기간 내진설계 대상에서 제외되었으며 특히 지진에 취약한 구조인 조적조 건축물이 많이 차지하고 있다. 또한 조적조 건축물은 공사비가 저렴하다는 이유로 3, 40년 전부터 저층 주거용 건축물에 적용되어왔던 구조 방식이며 우리나라뿐만 아

니라 중국, 일본 및 동남아시아 국가에도 내진설계가 되지 아니한 노후 주거용 건축물이 많은 실정이다. 환경파괴로 인한 자연재해의 강도가 점점 더 강해지는 현 상황을 감안하여 건축물 성능수준에 적합한 구조적 보강이 필요한 시점이다.

현재 국내에서는 건축물 내진 설계기준 및 해설(AIK, 2019) 및 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령(KALIS, 2021)에 준하여 구조물의 내진성능을 평가하고 내진 보강이 필요할 경우 기존 시설물(건축물) 내진성능 향상요령(KALIS, 2022)을 참고하여 적용하고 있는 실정이다. 또한 국내에서는 학교를 비롯한 공공 건축물에 대한 내진보강 공사를 진행하고 있으나 소규모 주택 건축물은 대부분 개인 소유의 사유 재산으로 내진 보강을 강제하기에는 어렵다. 내진 보강 공법으로는 내외부 벽체 자체의 내진성능을 향상시키거나 건축물의 내부 또는 외부에 구조물을 보강하는 방법이 제시되고 있다. 그러나 주택의 내진보강 공법은 거주성을 고려하지 않으면 실제 공사상 발생하는 비용외에 공사기간 동안의 이주성에 비용이 발생될 수 있으며 생활상 많은 불편을 초래할 수 있다. 따라서 이 연구의 목적은 조적조 건축물의 외부 내진 보강 방안과 공사비산출을 통해 합리적이고 현실적인 보강방안을 제시하고자 하는 데에 있다. 따라서 건축물 외부에서만 보강함으로써 거주자의 편의성을 유지하면서 실무적인 해석 방안의

¹정회원, 가민(주) 대표이사

²정회원, (주)상지엔지니어링 건축사사무소 부설 연구소 소장, 교신저자

*Corresponding author: kang108k@naver.com

Sangji Engineering & Architects Inc, Sindonga Building 5F, 42 Jagalchi-ro, Jung-gu, Busan, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

효율성과 건축물의 안전성을 확보하고자 하였다.

Cho et al.(2004)은 유리섬유 보강재를 이용한 보강방법으로 조적조 건축물의 내진성능에 대하여 연구하였다. 유리섬유와 에폭시로 제작한 유리섬유 보강재를 부착한 조적조 실험체에 가력하여 전단 내력 및 연성을 측정하였으며 보강 효과를 비교 분석하였다. Kim et al.(2011)은 기존 건물의 내진성능 평가 요령의 개선안을 바탕으로 비보강 조적조 건물의 내진성능을 평가하였다. 예비평가, 1차 상세 평가, 2차 상세 평가 3단계의 단계적 평가의 실효성을 검증하고 평가 결과와 조적조 벽량과의 상관관계를 분석하였다. Kwon et al.(2013)은 국내 조적조 건축물의 내진성능에 미치는 영향을 증분동적해석에 의한 내진성능 평가방법을 통하여 조사하였으며 연구에 사용된 표본 조적조 건축물의 시간 경과에 따른 지진에 대해 취약한 정도를 정량적으로 제시하였다. Seol et al.(2020)은 국내 비보강 조적조 건물의 외벽 중심 내진보강공법과 내진성능 평가법을 연구하였다. 내진보강 전후의 예비평가와 상세 평가를 수행하고 그 결과를 비교하여 현행 예비평가 방법의 적용성을 검토하였으며 조적조 건물의 경제적인 내진보강을 위한 간편한 내진성능 평가법 요구사항을 도출하였다. 선행 연구에서 알 수 있듯이 기존 조적 벽체에 보강할 경우 실험의 한계로 내진성능 평가가 어려우며 내부 벽체에 보강할 경우 거주성에 불편함을 초래한다. 따라서 이 연구에서는 외부 내진보강공법으로 거주성과 내진성능 평가의 명확성을 동시에 제시하고자 하였다.

이 연구는 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령과 건축물 내진 설계기준 및 해설(KSD 41 17 00)을 기준으로 하였으며 연구 방법은 다음과 같다. 먼저 비보강 조적조 건축물 모델을 선정하여 내진성능 평가요령에 의거한 예비평가를 통해 내진성능을 평가하고 성능수준을 진단하였으며 동시에 각 조적 벽체의 성능수준을 분석하기 위하여 상용 구조해석 프로그램인 midas Gen 2023(ver.940R3)으로 조적 벽체를 모델링하여 성능 수준을 평가하였다. 비보강 건축물의 내진성능 평가에서 성능수준을 만족하지 못한 건축물의 외부에 보-기둥 프레임 형식의 철골 구조체를 보강하여 전체 구조물 및 조적 벽체의 안전성 여부를 검토하였다. 이 단계에서 조적벽체의 안전성 여부가 확보되지 아니하면 철골 보-기둥 프레임에 철골 가새 구조체를 필요한 위치에 보강함으로써 지진력의 대부분을 부담하는 골조가새의 설치로 조적벽체의 안전성을 확보할 수 있는 방안에 대해 연구하였다.

2. 내진성능평가

2.1 예비평가

기존 건축물의 내진 성능 예비평가는 2021년 국토안전관

리원에서 발행한 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령에 준하였다. 건축물의 내진등급별 최소성능목표는 규준(KDS 41 17 00)에 따라 Table 1과 같이 적용되며 1000년 재현주기 지진의 크기는 2400년 재현주기 지진의 2/3로 정의한다.

내진성능 평가를 위한 건축물에 사용된 재료강도는 설계도서에서 명시된 설계기준강도나 건축물의 사용재료를 일부 채취하여 재료실험 등을 통한 그 결과 값을 적용하여야 하나 이 연구에서는 건축 경과년수와 재료상태를 고려하여 재료강도를 적용하였다. 재료가 실제로 발휘할 수 있는 강도는 건축물의 건축 경과년수와 재료상태에 따른 감소계수를 Table 2와 같이 적용하여야 한다.

Table 3은 단주기 지반 증폭계수(F_s)를 산정하는 표이며 Table 4는 1초 주기 지반증폭계수(F_v)를 산정하는 표이다. 여기서, S는 유효 지반 가속도 값이며 중간 값에 대해서는 직선 보간한다.

Table 1 Objectives for minimal performance-based seismic classification of buildings

Seismic classification	Performance objectives	
	Return period	Performance level
Special	2400 years	Life Safety
	1000 years	Operational
I	2400 years	Collapse Prevention
	1400 years	Life Safety
II	100 years	Operational
	2400 years	Collapse Prevention
	1000 years	Life Safety
	50 years	Operational

Table 2 Decrease factor of material strength according to elapsed years and material condition

Classification	Concrete compressive strength	Masonry compressive strength	Masonry shear strength	
Elapsed years	Over 30 years	0.8	0.5	0.7
	Over 20 years	0.9	0.6	0.8
	Less than 20 years-Over 10 years	1.0	0.8	0.9
	Less than 10 years	1.0	1.0	1.0
Material condition	Good	1.0	1.0	1.0
	Normal	0.9	0.8	0.85
	Poor	0.8	0.5	0.7

Table 3 Short-period spectral acceleration

Ground type	Earthquake zone		
	S≤0.1	S=0.2	S=0.3
S ₁	1.12	1.12	1.12
S ₂	1.4	1.4	1.3
S ₃	1.7	1.5	1.3
S ₄	1.6	1.4	1.2
S ₅	1.8	1.3	1.3

Table 4 One-second period spectral acceleration

Ground type	Earthquake zone		
	S≤0.1	S=0.2	S=0.3
S ₁	0.84	0.84	0.84
S ₂	1.5	1.4	1.3
S ₃	1.7	1.6	1.5
S ₄	2.2	2.0	1.8
S ₅	3.0	2.7	2.4

2.2 상세평가

2.2.1 상세평가 과정

일반적으로 내진성능 평가요령(KALIS, 2021)에 준하여 예비평가를 한 후 내진성능상 문제가 없는 것으로 판정되어도 상세평가를 수행한다. 내진성능 상세평가는 선형정적절차, 선형동적절차, 비선형 정적절차, 비선형 동적절차 4종류이며 Fig. 1의 평가절차 선택과정을 거쳐 결정된다. 전체 구조시스템의 성능목표 만족 여부는 내진성능 평가요령에 따라 성능 목표에 해당하는 허용 층간 변형각 및 중력하중 저항능력 모두를 만족할 경우 그 성능 목표를 만족하는 것으로 한다.

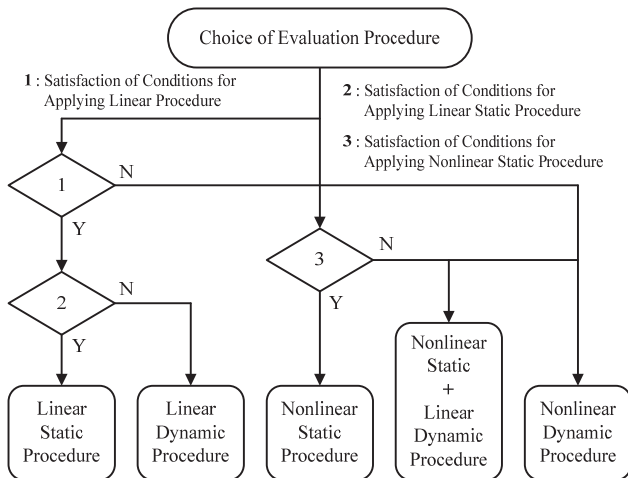


Fig. 1 Selection of seismic performance evaluation procedure

2.2.2 층간변위각

Table 5는 내진설계된 구조물의 성능 수준별 허용 층간 변위각을 나타내며 대상 건축물의 방향별 및 층별로 만족여부를 검토한다. 내진설계되지 아니한 건축물의 허용 층간 변형각은 Table 5에 규정된 값들의 70%로 제한한다. 내진설계되지 아니한 건축물의 경우 내진보강이 이루어졌다 하더라도 변형능력의 제한적인 부재들이 다수 남게 되므로 내진보강 이전과 이후의 허용 층간 변형각 중 불리한 값을 적용한다.

2.2.3 성능수준별 중력하중 저항능력

이에 대한 만족여부는 각 방향별 및 층별, 그리고 수직 부재와 수평 부재로 나누어 평가하며 부재별 연직하중 분담능력은 수직부재의 경우 축하중, 수평 부재의 경우 양단 전단력의 크기를 기준으로 한다.

(1) 거주가능

모든 부재가 붕괴방지를 만족하며, 거주가능을 만족하는 부재가 부담하는 중력하중의 합이 전체 중력하중의 80% 이상, 혹은 건물의 내진성능 목표가 기능수행인 경우 모든 부재가 붕괴방지를 만족하며 거주가능을 만족하지 못하는 부재의 손상이 전체 건물의 기능수행을 방해하지 않음을 확인하는 경우

(2) 인명안전

모든 부재가 붕괴방지를 만족하며, 인명안전과 거주가능을 만족하는 부재가 부담하는 중력하중의 합이 전체 중력하중의 80% 이상

(3) 붕괴방지

모든 부재가 붕괴방지를 만족

Table 5 Allowable story drift ratio(%)

Structural System	Earthquake-resistant Building		
	Immediate occupancy	Life safety	Collapse prevention
RC Moment Frame	0.7	2	3
RC Moment Frame with Masonry Filling Wall	0.5	1	1.5
Shear-controlled RC Shear Wall System	0.25	0.5	1
Force-controlled RC Shear Wall System	0.5	1	2
Unreinforced Construction Shear Wall System	0.3	0.6	1
Steel Frame	0.7	2.5	4
Steel Frame with a Brace	0.5	1.5	2

조적 벽체의 주요 파괴모드는 강체회전, 가로줄눈 파괴, 양단부 압괴파괴, 대각인장파괴로 나눌 수 있으며 각 파괴모드별 공칭 전단강도식은 다음과 같다.

(1) 강체회전 시의 평균전단강도

$$Q_{CE} = V_r = 0.9 (\alpha P_D + 0.5 P_W) \frac{L}{h_{eff}} \quad (1)$$

(2) 가로줄눈 파괴시의 평균전단강도

$$Q_{CE} = V_{bjs1} = v_{me} A_n \quad (2)$$

$$Q_{CE} = V_{bjs2} = 0.5 P_D \quad (3)$$

(3) 양단부 압괴파괴 시의 공칭전단강도

$$Q_{CL} = V_{tc} = (\alpha P_D + 0.5 P_W) \left(\frac{L}{h_{eff}} \right) \left(1 - \frac{f_a}{0.7 f'_m} \right) \quad (4)$$

(4) 대각인장 파괴 시의 공칭전단강도

$$Q_{CL} = V_{dt} = f'_{dt} A_n \beta \sqrt{1 + \frac{f_a}{f'_{dt}}} \quad (5)$$

3. 내진성능 평가 해석모델링

3.1 해석모델 선정

내진성능 평가 해석모델은 다른 연구와의 객관성을 비교하기 위하여 2011년 국토해양부에서 발행한 기존 시설물(건축물) 내진성능 향상요령에 게재된 조적조 주택 건축물과 동일한 조건으로 채택하였다. 주택의 위치는 부산시이며 건립 연한은 10년 미만으로 가정하였다. 지상 2층 건물로서 각층 층고는 3.0m로 하였으며 조적조 재료는 벽돌로 두께는 190mm로 하였다. 평면도는 Fig. 2와 같으며 전체 건물의 치수와 조적 벽체의 부호 및 창문의 폭을 명시하였다. 벽체의 부호 중 X1~X12 및 Y1~Y9는 예비평가에 적용된 기호이며 원 내부의 숫자는 midas Gen 구조해석에 적용된 조적 벽체 번호이다.

각 층별 고정하중 및 적재하중은 일반적인 공사 마감 현황 및 건축물 용도를 고려하여 Table 6과 같이 가정하였다.

3.2 평가 조건

이 연구에서 채택한 해석 모델 건축물은 부산시 소재 단독

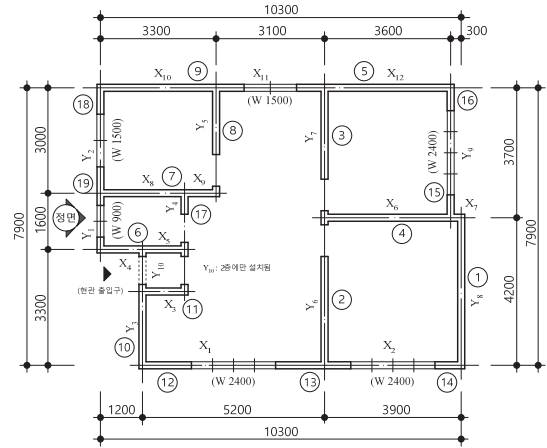


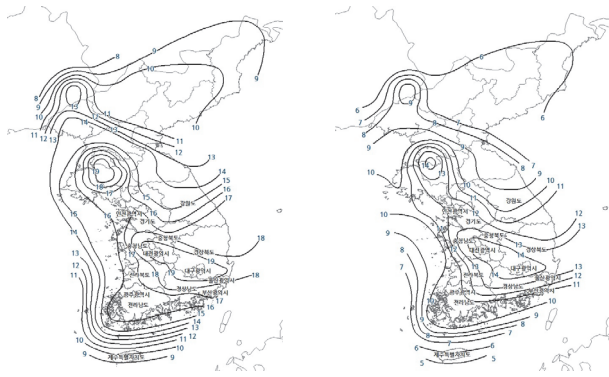
Fig. 2 Floor plan

Table 6 Design loads

Position	Kinds	Dead Load [kN/m ²]	Live Load [kN/m ²]
Roof Floor	plain conc. thk. 60	1.38	3.0
	insulation thk. 60	0.12	
	water proof thk. 20	0.42	
	slab conc. thk. 120	2.88	
	insulation thk. 20	0.04	
	ceiling	0.20	
Second Floor	cement mortar thk. 40	0.84	2.0
	light weight foam conc. thk. 50	0.32	
	insulation thk. 20	0.04	
	slab conc. thk. 120	2.88	
	ceiling	0.20	

주택으로 지진구역 I (Z=0.11g)이며 내진 II 등급으로서 최소 성능목표를 재현주기 2400년과 1000년으로 설정하였으며 성능수준은 각각 붕괴방지와 인명보호 등급을 적용하였다. 재현주기 2400년 및 1000년에 따른 위험도 계수(I)는 각각 2.0과 1.4이며 유효지반 가속도(S)는 수식에 의한 방법(S=Z×I)과 국가지진 위험지도에 의한 방법 두 가지가 있다. 단 국가지진 위험지도를 이용하여 결정한 값은 수식에 의한 값의 80% 보다 작지 않아야 한다. 따라서 유효지반 가속도는 국가지진위험지도(소방방재청 공고 제2013-179호)를 적용하여 재현주기 2400년에서는 0.18, 재현주기 1000년에서는 0.13으로 하였으며 2013년 우리나라 소방방재청에서 공고한 재현주기 2400년 및 1000년의 국가 지진 위험지도는 Fig. 3과 같다.

지반의 종류는 S4(깊고 단단한 지반)로 가정하였으며 비선형 정적해석의 경우 반응수정계수R=1.0으로 하였다. Table 3과 4의 규정에 따라 재현주기 2400년의 단주기 스펙트럼 가속



(a) Return Period 2400 years (b) Return Period 1000 years

Fig. 3 National earthquake hazard map

도와 1초 주기 스펙트럼 가속도는 각각 0.648과 0.3672로 산정되었으며 재현주기 1000년의 경우에는 각각 0.5005와 0.2782로 산정되었다.

4. 내진성능 평가 및 분석

4.1 일반사항

3장에서 선정한 해석 모델에 대하여 2021년 5월 국토교통부에서 제정한 기존시설물 내진성능 평가요령에 따라 비보강 조적조 건축물 내진성능 예비평가를 수행하였다. 동시에 midas Gen 프로그램을 이용하여 지진하중 작용 시 조적 벽체에 발생하는 응력을 산출하여 내진성능 상세평가를 하였으며 예비평가의 결과와 비교 분석하였다. 비보강 조적조 건축물의 내진성능 예비평가 및 상세평가 결과에 따라 다음 단계에서는 철골보기둥 프레임을 보강하여 지진력을 부담하게 하여 비선형 구조해석을 한 후 보강 구조물의 내진 성능 안전성 및 조적 벽체의 내진성능 상세 평가를 하였다. 이 단계에서도 보강 구조물이나 조적 벽체에 지진력으로 인한 성능에 문제가 발생하면 구조적 효율성을 고려하여 일부 구간에 가새를 설치하여 내진성능을 검토하였다. 가새는 기존 창호 배치를 감안하여 기능상 크게 불편을 주지 아니하는 사자 형태로 하였다.

내진성능 상세평가 절차를 정하기 위해 해석 모델 건축물에 대한 고차모드 영향 판정을 수행하였다. 그 결과 X방향 및 Y방향 모두 모드 참여율이 90%인 해석 모델과 1차 모드만 사용한 해석 모델의 층 전단력 차이가 130% 이하이므로 비선형 정적 해석을 수행하였다.

4.2 비보강 내진성능 평가

4.2.1 내진성능 예비평가

(1) 기본사항

건축물명 : 조적조 단독주택

건축물 규모 : 지상 2층(지하 없음)

건설연도(경과연수) : 10년 미만

경과연수에 따른 강도보정계수 : 1.0

재료상태에 따른 강도보정계수 : 1.0

지반종류 : S4 지진구역 : I 지반구역계수 : 0.11g

재현주기에 따른 위험도 계수

재현주기 2400년 : I=2.0, 재현주기 1000년 : I=1.4

유효지반가속도(국가 지진 위험 지도 이용)

재현주기 2400년 : S=0.18, 재현주기 1000년 : S=0.13

단주기 지반 증폭계수

재현주기 2400년 : F_a=1.44, 재현주기 1000년 : F_a=1.54

단주기 스펙트럼 가속도(S_{xs})

재현주기 2400년 : S_{xs}=0.648

재현주기 1000년 : S_{xs}=0.5005

(2) 층별 요구량 산정

평가층의 위치 : 1층 벽체방향 : X방향

전체 바닥면적(ΣA_i) : 152.6m²

총중량(W) : 전체 바닥면적 × 13 kN/m² = 1983.8 kN

층 전단력 분포계수(γ_i) : 1

평가층 요구량 (Demand) = 0.648 × 1983.8 × 1 = 1285.5
= 0.5005 × 1983.8 × 1 = 993.88

조적 벽체 전단강도의 합

X방향 784.7 kN, Y방향 628.9 kN

(3) 성능등급 결정

조적조 성능수준 판정을 위한 DCR 기준

X방향 조적 벽체(1층)

$$DCR_i = \frac{Demand_i}{Capacity_i} = \frac{S_{xs} \cdot W \cdot \gamma_i}{(0.8) \Sigma V_i} = \frac{1285.5}{784.7}$$

Y방향 조적 벽체(1층)

$$DCR_i = \frac{Demand_i}{Capacity_i} = \frac{S_{xs} \cdot W \cdot \gamma_i}{(0.8) \Sigma V_i} = \frac{1285.5}{628.9}$$

1층의 X방향 및 Y방향 조적벽체의 DCR 값은 각각 1.64 및 2.04로 모두 1.0을 초과하므로 최종 성능 수준은 붕괴위험으로 판단되었다.

4.2.2 내진성능 상세평가

지진하중에 의해 각 조적 벽체에 발생하는 응력을 산출하여 내진성능 상세 평가를 수행하였다. 이를 위해 midas Gen 프로그램을 이용하였으며 재료시험을 별도로 하지 아니하였으므로 조적 벽체의 설계기준 압축강도는 4.1(MPa), 전단강도는 0.055(MPa)로 하였다. 탄성계수 E_m=200f_m (MPa), 전단

탄성계수 $G_m=0.4E_m$ (MPa)으로 하였으며 벽체 모델링은 두께 150의 철근콘크리트 구조로 하였다. 선형 동적해석을 통하여 개별 조적 벽체에 발생하는 응력은 산출하여 이를 내진성능 상세평가 규정에 적용시켜 벽체의 성능수준을 평가하였다. 구조해석 결과 산출된 개별 조적 벽체를 내진성능 평가 규정에 따라 상세 평가를 한 결과 Table 7과 같다.

비보강 조적 벽체의 주요 파괴모드는 강제회전, 가로줄눈 파괴, 양단부 압괴파괴, 대각인장파괴로 분류되며 이에 따른 각 파괴모드별 공칭 전단강도를 산정하여 성능 판정을 하였다. 그 결과 개별 조적 벽체 19개 중 약57.9% 정도인 11개 벽체가 붕괴되는 것으로 나타났다. 해석 모델 건축물의 1층 19개의 조적 벽체 중 벽량은 X방향이 약 62.7%이며 Y방향이 약 37.3%로 구성되어 있다. 붕괴되는 것으로 판단되는 11개 벽체 중 X방향 벽체는 3개로 약 27.3%이며 Y방향 벽체는 8개로 약 72.7%인 것으로 나타났다. 또한 내부 벽체가 4개로 약 36.4%이며 외부 벽체가 7개로 약 63.6%인 것으로 나타났다.

비보강 조적조 건축물 상세평가에서 X방향 벽체보다 Y방향 벽체가 더 많이(2.67배) 발생하는 것으로 나타났다. 비보강 조적조 건축물에 지진하중이 작용할 경우 내진성능 상세 평가에서 붕괴되는 것으로 판정된 11개소 벽체 중 X방향 벽체

는 3개소이며 Y방향 벽체는 8개소로 Y방향 벽체가 2.67배 높게 발생하는 것으로 나타났다.

비보강 조적조 건축물에 지진하중이 작용할 경우 내진성능 상세 평가에서 붕괴되는 것으로 판정된 11개소 벽체 중 내부 벽체는 4개소이며 외부 벽체는 7개소로 외부 벽체가 1.75배 높게 발생하는 것으로 나타났다.

4.3 보강 후 내진성능 평가

4.3.1 철골 보-기둥 프레임 보강 후 내진성능 평가

구조보강 전 조적조 건축물의 내진성능 예비평가 결과를 토대로 내진 성능 판정 결과에 따라 조적 벽체의 붕괴방지를 위한 방안으로 건축물 외부에 철골구조물을 보강하여 구조해석을 수행하였다. 보강 구조의 형태는 2장에서 선정한 해석 모델에 대하여 건축물 외부에 각형강관 보-기둥 프레임을 Fig. 4와 같이 보강하였다. 철골 기둥의 최하부는 기존 기초 위에 고정하여 옥상 바닥 슬래브까지 도달하는 것으로 하였으며 철골 보는 2층 및 옥상 바닥 슬래브에 설치하여 기존 바닥 슬래브나 인방 보에 고정하는 것으로 하였다.

철골 보-기둥 프레임과 기존 바닥 슬래브를 지진하중 저항 시스템으로 하여 비선형 구조해석을 수행하였다. midas Gen

Table 7 Performance evaluation of individual masonry walls reinforced with beam-Column Frame, 1st floor)

Wall ID	Q _G (kN)	P _d (kN)	Shear		Axial P _{UF}	P _w (kN)	f _a (kN)	Shear Strength				Axial Strength	m	Ratio				Judge		
			V _{UD}	V _{UF}				1	2	3	4			1	2	3	4		Axial	
1	247.40	138.60	176.7	88.11	82.53	50.03	0.310	187.4	83.2	185.7	113.1	3271.8	1.0	3	0.94	0.71	0.47	0.78	0.025	OK
2	259.70	181.83	114.1	59.46	72.90	39.31	0.414	181.3	109.1	172.4	100.7	2570.7	1.0	3	0.63	0.35	0.34	0.59	0.028	OK
3	172.70	69.53	101.5	53.44	6.37	33.36	0.325	65.8	41.7	64.9	76.9	2181.2	1.0	3	1.54	0.81	0.82	0.69	0.003	NG
4	252.65	155.43	103.2	61.52	80.03	46.46	0.341	190.0	93.3	186.1	109.4	3038.1	1.0	3	0.54	0.37	0.33	0.56	0.026	OK
5	237.67	134.35	126.3	64.06	59.81	52.42	0.284	192.7	80.6	192.9	114.2	3427.6	1.0	3	0.66	0.52	0.33	0.56	0.017	OK
6	138.73	70.84	43.1	20.85	0.24	29.78	0.292	58.5	42.5	58.3	65.6	-33.3	1.0	3	0.74	0.34	0.36	0.32	0.722	OK
7	215.44	136.61	73.6	36.03	152.6	39.31	0.344	140.6	82.0	137.5	92.9	2570.7	1.0	3	0.52	0.30	0.26	0.39	0.059	OK
8	117.97	47.08	6801	35.17	32.96	23.83	0.310	32.2	28.3	31.9	36.1	1558.0	1.0	3	2.11	0.80	1.10	0.97	0.021	NG
9	202.81	104.97	102.0	53.31	78.33	48.84	0.260	144.7	63.0	146.2	102.6	3193.9	1.0	3	0.71	0.54	0.36	0.52	0.025	OK
10	76.19	38.56	136.1	107.2	5.31	39.31	0.122	52.4	23.2	55.7	61.9	2570.7	3.0	3	0.87	1.96	1.93	1.73	0.002	NG
11	32.36	30.87	23.84	16.91	32.34	15.49	0.131	13.7	18.5	14.5	16.8	1012.7	1.5	3	1.16	0.43	1.17	1.01	0.032	NG
12	83.47	29.57	45.45	22.28	-44.7	16.68	0.314	14.5	17.8	14.3	25.4	-18.6	1.0	3	3.13	0.85	1.56	0.88	2.401	NG
13	152.70	99.97	57.17	28.68	29.04	25.61	0.374	66.1	60.0	63.9	42.1	1674.9	1.0	3	0.86	0.32	0.45	0.68	0.017	OK
14	20.30	14.58	16.15	8.27	-30.3	8.93	0.142	3.9	8.8	4.1	10.0	-10.0	1.5	3	2.76	0.62	2.02	0.83	3.030	NG
15	20.38	19.76	10.51	5.62	-21.5	7.74	0.165	4.2	11.9	4.4	9.1	-8.7	1.0	3	2.50	0.30	1.28	0.62	2.485	NG
16	17.83	16.73	81.71	5.96	-4.77	7.74	0.144	3.7	10.1	3.9	8.7	-8.7	1.5	3	1.47	0.27	1.53	0.69	0.552	NG
17	49.65	33.25	12.35	6.40	8.88	8.34	0.373	7.1	20.0	6.9	13.7	545.3	1.0	3	1.74	0.21	0.93	0.47	0.016	NG
18	14.26	13.55	19.25	10.14	-11.6	8.93	0.100	3.7	8.2	4.0	8.8	-10.0	1.5	3	3.47	0.79	2.54	1.15	1.157	NG
19	15.97	14.42	16.97	8.85	-6.61	8.93	0.112	3.9	8.7	4.1	9.2	-10.0	1.5	3	2.90	0.65	2.16	0.97	0.662	NG

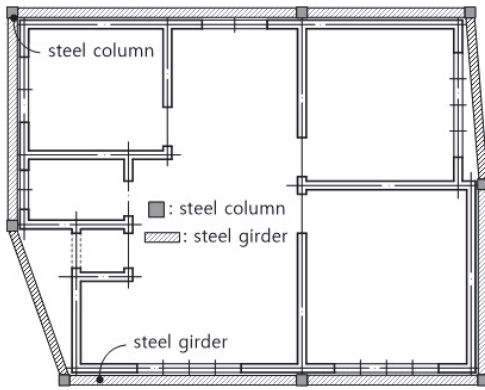


Fig. 4 Beam-column frame reinforcement plot

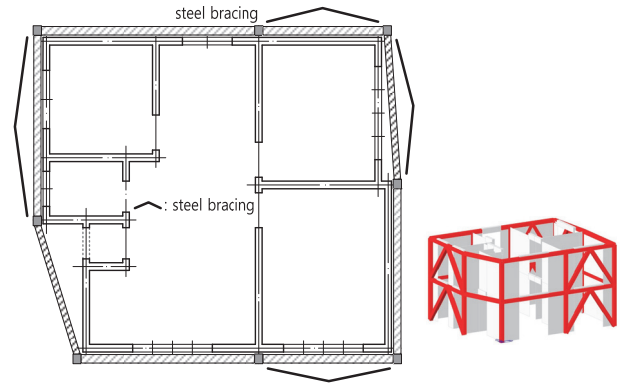


Fig. 5 Beam-column frame + bracing reinforcement plot

프로그램을 이용하여 보강 철골 구조와 조적 벽체를 모델링하여 전체 구조물의 내진성능과 개별 조적 벽체의 성능판정을 하였으며 그 결과 붕괴되는 조적 벽체의 개수와 위치 및 파괴모드가 비보강 해석모델과 거의 유사한 것으로 나타났다. 이는 철골 보-기둥 프레임이 지진하중에 대한 저항 능력이 떨어져 조적 벽체가 지진하중을 부담하는 결과로 보여진다.

4.3.2 철골 보-기둥+가새 프레임 보강 후 내진성능 평가

구조보강 전 조적조 건축물에 각형강관 보-기둥 프레임을 보강하였으나 일부 조적 벽체에 붕괴 위험이 발생되어 횡력 저항 능력이 우수한 가새 구조물을 보강하여 조적 벽체의 안전성 여부를 검토하였다. 가새 구조물은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 횡력이 작용하였을 때 전체 구조물의 비틀림을 최소화할 수 있는 위치를 선정하여 사자 형태로 평면상 4개소 일층 및 이층 총 8개소에 설치하였다.

건축물 매스 중심에서의 X방향 및 Y방향 층간 변형각은 Table 8과 같이 산정되었다. X방향은 0.043%이며 Y방향은 0.047%이다. 이는 Table 5의 구조시스템 중 가새가 있는 철골 조의 층간변형각 기준에 적합함을 알 수 있었다.

성능 수준별 중력하중 저항능력을 정리해 보면 Table 9와 같다. 모든 부재의 방향별(X, Y 방향) 및 층별(1층, 2층) 판정

Table 8 Story drift ratio

Str.	Load case	Step	Allowable story drift ratio			Drift at the center of mass			
			IO	LS	CP	Story drift (m)	Story drift ratio	Remark	Performance
2F	POX	8	0.005	0.015	0.02	0.0013	0.00043	OK	IO
1F	POX	8	0.005	0.015	0.02	0.0013	0.00043	OK	IO
2F	POY	5	0.005	0.015	0.02	0.0011	0.00037	OK	IO
1F	POY	5	0.005	0.015	0.02	0.0014	0.00047	OK	IO

* Story Height(2F&1F) : 3.0m

Table 9 Gravity load resistance capacity by performance level (X-dir.)

Str.	Level (m)	Load case	Step	Horizontal Member			
				IO/LS/CP	80% Performance	Collapsed member (EA)	Total Performance
RF	6.0	POX	8	1.0	IO	0	IO
2F	3.0	POX	8	1.0	IO	0	IO
1F	0.0	POX	8	-	-	-	-
Vertical+Inclined Member							
RF	6.0	POX	8	-	-	-	-
2F	3.0	POX	8	1.0	IO	0	IO
1F	0.0	POX	8	1.0	IO	0	IO

* Structure Performance(X&Y-dir.) : 80%&Total Performance IO

* Vertical Load Factor for Calculating Performance Criteria

= 1.0DL, 0.25LL

Table 10 Gravity load resistance capacity by performance level (Y-dir.)

Str.	Level (m)	Load case	Step	Horizontal Member			
				IO/LS/CP	80% Performance	Collapsed member (EA)	Total Performance
RF	6.0	POY	5	1.0	IO	0	IO
2F	3.0	POY	5	1.0	IO	0	IO
1F	0.0	POY	5	-	-	-	-
Vertical+Inclined Member							
RF	6.0	POY	5	-	-	-	-
2F	3.0	POY	5	1.0	IO	0	IO
1F	0.0	POY	5	1.0	IO	0	IO

* Structure Performance(X&Y-dir.) : 80%&Total Performance IO

* Vertical Load Factor for Calculating Performance Criteria

= 1.0DL, 0.25LL

기준에 적합 여부를 검토한 결과 IO(거주가능)으로 판정되었다. 비선형 정적해석인 pushover 해석결과에 따라 구조물의 성능점을 정리해 보면 아래 Fig. 6과 같다.

철골 보강 구조물에 대한 안전성 여부를 확인한 후 개별 조

적 벽체에 대한 지진력 안전 여부를 검토하였다. 상세평가 규정에 따라 검토한 결과 Table 11에서 보는 바와 같이 붕괴되는 조적 벽체는 없는 것으로 나타났다.

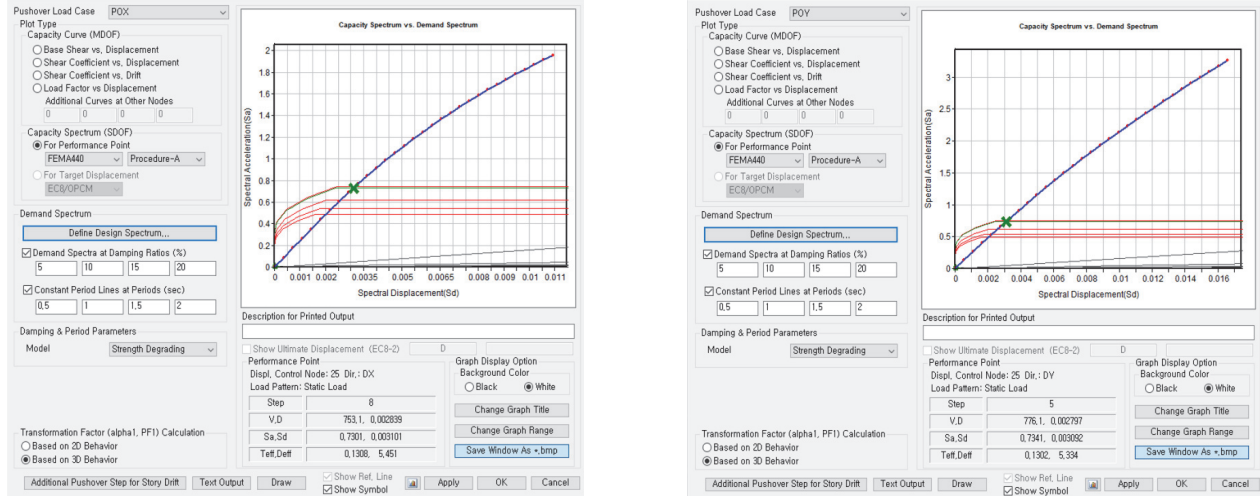


Fig. 6 Pushover curve (left:X-dir., right:Y-dir.)

Table 11 Performance evaluation of individual masonry walls (Reinforced with Beam-Column + Bracing, 1st floor)

Wall ID	Q _G (kN)	P _d (kN)	Shear		Axial P _{UF}	P _w (kN)	f _a (kN)	Shear Strength				Axial Strength	m	Ratio				Judge		
			V _{UD}	V _{UF}				1	2	3	4			1	2	3	4		Axial	
1	2.51	56.65	0.343	0.172	-18.9	50.03	0.003	93.50	33.99	103.8	45.07	-55.9	3.8	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.339	OK
2	66.34	76.50	0.290	0.166	247.5	39.31	0.106	86.50	45.90	92.60	59.00	2570.7	3.0	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.096	OK
3	43.02	52.04	0.246	0.141	189.6	33.36	0.081	52.50	31.22	56.70	46.01	2181.2	2.6	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.087	OK
4	63.13	71.93	0.343	0.189	233.9	46.46	0.085	101.2	43.16	109.1	65.02	3038.1	3.6	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.077	OK
5	1.45	54.33	0.402	0.199	-19.0	52.42	0.002	96.60	32.59	107.3	46.81	-58.5	3.8	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.324	OK
6	19.43	27.80	0.220	0.147	142.6	29.78	0.041	29.10	16.68	31.90	34.52	1947.5	2.3	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.073	OK
7	214.07	135.07	0.298	0.164	196.2	39.31	0.341	139.2	81.04	136.3	92.53	2570.7	1.0	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.076	OK
8	24.84	32.86	0.186	0.133	129.3	23.83	0.065	24.40	19.71	26.50	20.68	1558.0	1.8	3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.083	OK
9	-2.27	43.15	0.356	0.180	-2.7	48.84	0.003	75.60	25.89	83.90	44.00	-54.5	3.8	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.049	OK
10	9.32	23.60	0.203	0.108	-0.4	39.31	0.015	38.90	14.16	43.00	38.90	-43.9	3.0	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.008	OK
11	21.26	24.50	0.147	0.147	116.4	15.49	0.086	11.40	14.70	12.30	14.57	1012.7	1.5	3	0.01	0.00	0.01	0.01	0.115	OK
12	9.95	15.91	0.116	0.097	63.8	16.68	0.037	9.30	9.55	10.20	12.68	1090.6	1.5	3	0.01	0.00	0.01	0.01	0.059	OK
13	16.95	27.30	0.172	0.097	-0.3	25.61	0.041	23.50	16.38	25.80	19.89	-28.6	2.0	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.010	OK
14	3.94	7.80	0.049	0.037	22.7	8.93	0.028	2.50	4.68	2.80	6.45	584.3	1.5	3	0.01	0.00	0.01	0.01	0.039	OK
15	6.81	9.23	0.236	0.236	67.2	7.74	0.055	2.30	5.54	2.50	6.44	506.4	1.5	3	0.07	0.01	0.09	0.04	0.133	OK
16	1.98	5.73	0.044	0.028	15.4	7.74	0.016	1.70	3.44	1.90	5.17	506.4	1.5	3	0.02	0.00	0.01	0.01	0.030	OK
17	47.50	30.78	0.055	0.027	58.6	8.34	0.357	6.70	18.47	6.50	13.41	545.3	1.0	3	0.01	0.00	0.00	0.00	0.107	OK
18	0.48	5.12	0.061	0.033	18.8	8.93	0.003	2.00	3.07	2.20	5.39	584.3	1.5	3	0.02	0.01	0.01	0.01	0.032	OK
19	44.27	15.08	0.143	0.143	54.5	8.93	0.311	4.00	9.04	4.00	13.55	584.3	1.0	3	0.04	0.01	0.04	0.01	0.093	OK

4.4 보강 공사비

철골 보-기둥 프레임+가새 보강을 하였을 경우 개략적인 공사비를 산출하였다. 공사비는 국토교통부에서 발행한 2023년 건설공사 표준품셈을 근거로 하여 실행공사비용으로 개산 견적 하였다. 또한 공사비에는 재료비, 노무비, 경비(장비비 포함)의 세 가지 항목으로만 분류하였으며 기업 이윤은 제외 하였다.

재료비에는 주된 보강 골조인 각파이프 □-200×200×4.5를 비롯하여 steel plate, 부속자재, 볼트류, 케미컬앵커(M16-150), 무수축 몰탈, 페인트 등이 포함되었다. 여기서 케미컬앵커는 철골 각파이프를 기존 RC슬래브나 인방보에 체결하는 용도로 사용되었다. 철골 각파이프의 최 하단부는 RC줄기초 위에 steel plate를 고정시킨 후 그 위에 설치하는 것으로 하였다. RC줄기초 상면은 지반면에서 200mm 하부에 있는 것으로 하였다. 보강 공사비는 재료비 23,720,210원과 노무비 7,562,500원 및 경비 2,141,500원으로 총 보강공사비는 33,424,210원으로 산출되었다.

5. 결 론

이 연구에서는 내진설계 되지 아니한 조적조 주택 건축물에 대해 내진성능을 평가하고 개별 조적 벽체의 안전성을 검토하였다. 보강하지 않고서는 지진하중을 견딜 수 없는 것으로 판단되어 먼저 철골 보-기둥 프레임을 보강하여 전체 구조물 및 개별 조적 벽체의 내진성능을 평가하였다. 이 단계에서도 건축물의 붕괴가 우려되어 철골 보-기둥+가새 프레임을 보강하여 내진성능을 평가하고 안전성을 분석하였다. 그 결과 요약하면 다음과 같다.

- (1) 비보강 조적조 건축물의 건축 경과 연수를 10년 미만으로 하고 재료 상태도 양호한 것으로 가정하였음에도 불구하고 조적조 건축물 예비평가에서 내진성능 수준이 요구성능 수준에 비해 X방향 163.8%, Y방향 204.4% 부족한 것으로 나타났다. 현재 우리나라의 주택 내진설계 비율을 고려하면 내진 보강이 시급한 것으로 판단된다.
- (2) 비보강 조적조 건축물에 지진하중이 작용하였을 때 1층의 총 19개의 개별 조적 벽체에 작용되는 응력을 산출하여 상세 평가를 한 결과 붕괴되는 것으로 나타난 벽체는 전체 11개로 X방향 벽체보다 Y방향 벽체가 많은 것으로 나타났다. 이러한 값은 전체 벽량에 대한 각 방향의 벽량(X방향 약 62.7%, Y방향 약 37.3%)과 관련된 것으로 보여지며 조적조 건축물의 벽량이 많은 방향의 벽체가 붕괴에 대한 위험이 줄어들음을 알 수 있었다. 또한 내부 벽체보다 외부 벽체가 붕괴되는 위험이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서 벽체 자체의 내진보강공법을

선정할 경우 내부 벽체에 대한 보강공사가 이루어져야 하므로 공사에 따른 직접공사비 이외에 이주성과 불편함을 초래할 수 있다.

- (3) 철골 보-기둥+가새 프레임 보강 구조물의 경우 개별 조적 벽체 내진상세 평가를 수행한 결과 내진성능 수준을 만족하는 것으로 나타났다. 구조물의 층간 변형각은 X방향 0.043%, Y방향 0.047%로 나타났으며 허용 층간 변형각 규정 IO 0.5%(가새가 있는 철골 골조)를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 성능 수준별 중력하중 저항능력은 X, Y방향 모두 거주 가능(IO)으로 판정되어 만족하는 것으로 나타났다.
- (4) 건축물의 외부에 보강함으로써 주택의 거주성과 편의성을 확보하면서 공사가 가능할 것으로 보여지며 지진성능과 구조물의 거동을 보다 명확하게 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

건축물 보강공사비는 건축물의 층수와 평면 현황에 따른 변수가 많이 있어 다양한 해석 모델을 통한 자료의 축적이 필요할 것으로 보여지며 이를 통하여 합리적인 외부 내진보강 공법이 제시될 것으로 기대된다.

Notation

- P_D : 자중을 제외한 고정하중 P_D : 벽체의 자중
 h_{eff} : 벽체 하단에서부터 지진하중의 합력까지의 거리
 v_{me} : 모르타르 접착면의 평균 줄눈 전단강도
 f_a : 하중조합에 의한 축응력
 f'_m : 조적조의 공칭압축강도
 f'_{dt} : 조적벽체의 공칭사인장 강도
 β : L/h_{eff} , 다만 0.67 이상, 1.0 이하

감사의 글

이 연구는 ㈜상지엔지니어링 건축사사무소의 연구지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Architectural Institute of Korea. (2019), Seismic Building Design Code and Commentary(Korea Building Code, KDS 41 17 00:2019), 23-112.
2. KALIS (2021), Guidelines for Seismic Performance of Existing Buildings, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, JinJu, 1-138.
3. KALIS (2022), Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Buildings, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, JinJu, 9-70.

4. Cho, S. M., Choi, S. M., Kwon, K. H., and Lee, S. C. (2004), An Experimental Study on Seismic Capacity Improvement of Masonry Buildings by Glass Fiber Reinforced Methods, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 4(2), 47-52 (in Korean).
5. Kim, T. W., Min, C. G., and Lee, H. M.(2011), Seismic Performance Evaluation of Unreinforced Masonry Buildings by using a Three-Step Procedure, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 4(2), 47-52 (in Korean).
6. Kwon, K. H., Min, M. H., and Kim, H. J. (2013), Seismic Performance Assessment of Unreinforced Masonry Buildings using Incremental Dynamic Analysis, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(3), 28-39 (in Korean).
7. Seol, Y. J., and Park, J. H. (2020), Seismic Performance Evaluation of Unreinforced Masonry Buildings Retrofitted by Strengthening External Walls, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 24(2), 77-86 (in Korean).
8. KALIS (2011), Guidelines for Seismic Performance of Existing Buildings, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, JinJu, 111-115.

Received : 02/05/2024
 Revised : 03/04/2024
 Accepted : 03/05/2024

요 지 : 내진설계 되지 아니한 조적조 건축물의 내진성능을 평가하고 건축물의 외부에 내진 보강 공법을 채택하여 내진성능을 향상시키고자 하였다. 내진성능을 평가하기 위해 건축물 내진설계 기준 및 해설(KDS 41 17 00 : 2019)과 기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령을 적용하였으며 비선형 정적해석으로 pushover 해석을 수행하였다. 해석결과, 우리나라 주택의 내진설계 보급 비율이 낮고 주택의 많은 비중을 차지하고 있는 것이 조적조 건축물임을 고려하면 내진보강이 시급한 것으로 판단되었다. 조적조 건축물에 철골 보-기 등+가새 프레임을 보강할 경우 층간 변형각은 X방향 0.043%이며 Y방향 0.047%로 나타나 규정을 만족하였다. 성능 수준별 중력하중 저항능력은 X, Y방향 모두 거주가능으로 판정되어 안전한 것으로 판단되었다. 건축물의 외부에 보강함으로써 주택의 거주성과 편의성을 확보하면서 공사가 가능할 것으로 보여지며 지진성능과 구조물의 거동을 보다 명확하게 예측할 수 있을 것으로 사료 되었다.

핵심용어 : 비선형 정적해석, 푸쉬오버, 내진성능, 내진보강 공법, 비보강 조적조 건축물
