

## 저층 조적채움벽 철근콘크리트 골조의 내진보강 전후 동특성 변화

유 은 종<sup>1\*</sup> · 김 민 재<sup>1</sup> · 김 승 남<sup>2</sup> · 김 지 영<sup>3</sup> · 최 기 선<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 건축공학부, <sup>2</sup>창민우 구조건설턴트, <sup>3</sup>대우건설 기술연구원 <sup>4</sup>한국건설기술연구원 건축도시연구소

## Dynamic Properties of a Lowrise Masonry-infilled RC Frame Building Before and After Seismic Retrofit

Eunjong Yu<sup>1\*</sup>, Min-Jae Kim<sup>1</sup>, Seung-Nam Kim<sup>2</sup>, Ji-Young Kim<sup>3</sup> and Ki-Sun Choi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engr., Hanyang Univ., Seoul, 133-791, Korea

<sup>2</sup>Chang Minwoo Structural Consultant, Seoul, 135-907, Korea

<sup>3</sup>Dauwoo Institute of Construction Technology, Suwon, 400-800, Korea

<sup>4</sup>Building and Urban Research Institute, KICT, Goyang, 411-712, Korea

### Abstract

In this study, a series of forced vibration testing and ambient vibration measurement were performed at a lowrise masonry-infilled reinforced concrete frame structure before and after seismic retrofit and its dynamic properties were extracted using system identification techniques. Also, analytical models which show similar dynamic properties to the measures ones were constructed. The system identification results showed that damping ratios in  $x$  direction along which the dampers were installed has been increased. From the comparison between the analytical models, the effective stiffness of post-installed member and post-reinforced members (shear walls and damper frames) were only 50% of gross sectional stiffness of the members, which indicates that the these members were not fully integrated with the existing structure or members. In addition, support condition of post-installed footing has to be pinned in  $y$  direction to match the dynamic properties, which is seemingly caused by the change of fixity of the soil due to the installation of new footing.

**Keywords** : masonry-infilled frame, forced vibration testing, ambient vibration measurement, system identification, seismic retrofit

### 1. 서 론

2008년 중국 스촨성 지진과 2011년 일본 대지진 등 우리나라의 인접국가에서 대규모 지진이 발생하고 국내에서도 최근 태안, 백령도, 신안 등지에서 규모 5에 해당하는 지진이 발생함에 따라 지진피해에 대한 경각심이 높아지고 있다. 하지만 국내의 경우 1988년에 최초의 내진설계 규정이 도입되었으나 6층 이상의 건물만이 대상이었고, 이후 개정을 거쳐 2009년에 이르러서야 모든 건물을 대상으로 내진설계를 실시하도록 확대되었기 때문에 국내에 있는 저층건물의 거의

대부분은 내진설계가 적용되지 않은 건물로 볼 수 있다. 학교 건축물의 경우 재난 시 대피장소로 활용되는 중요한 구조물임에도 불구하고 내진설계의 대상에 포함되지 않고 있었으나 스촨성 지진 시 공공건물과 학교건물의 붕괴로 인해 대규모의 인명피해가 보고됨에 따라 국내에서도 내진설계규정이 제정되기 이전의 공공시설물에 대한 내진보강을 의무화하는 지진 재해 대책법이 2009년 제정되었고, 이를 근거로 한 학교내진보강사업에 의해 순차적으로 내진보강이 이루어지고 있다.

국내의 학교건물은 건립시기에 따라 일정한 유형을 가지고 있다. 이중 1990년 이전에 건축된 학교건물의 경우 표준설

\* Corresponding author:

Tel: +82-2-2220-0312; E-mail: eunjongyu@hanyang.ac.kr

Received March 17 2015; Revised April 8 2015

Accepted April 13 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

계도에 따라 건축되어 거의 동일한 형태를 가지고 있는데 이들은 7.5m 정도의 폭을 가진 교실을 일렬로 배치한 길쭉한 장방형의 평면이 특징이다. 구조형식은 철근콘크리트조 골조이나 단변방향으로는 교실을 구획하는 채움벽이, 장변방향으로는 창호의 아래와 옆부분에 조적허리벽과 날개벽이 존재한다. 표준설계도에 따라 건설된 학교건물은 내진성능이 부족하여 학교내진보강사업의 주요 대상이 되고 있다.

학교건물을 포함한 RC조 건물의 내진보강 방법으로는 전단벽 신설, 기존 부재의 증타 혹은 자켓팅(jacketing)을 통한 강성 및 강도보강, 지진에너지의 소산을 목표로 하는 댐퍼의 설치 등이 있다. 하지만 기존 구조물에 추가로 설치되므로 신축건물의 경우와 상세가 다르며 따라서 지진력저항부재로서의 역할도 신축건물의 경우와 다를 것으로 예상된다. 기존 건물 특히 조적채움벽을 가진 학교건물을 대상으로 내진성능의 평가 및 내진보강의 방법에 대한 연구(Jo and Lee, 2012; Huynh *et al.* 2010; Jang *et al.* 2012; Moon *et al.* 2012; Ryu *et al.* 2011; Song *et al.* 2010)는 상당히 많이 수행되었으나 추가된 부재의 성능 혹은 역할에 대한 분석은 시도된 바가 극히 드물다(Lee, 2010).

본 연구에서는 표준도면에 따른 학교건물, 즉 조적채움벽을 가진 저층의 철근콘크리트 골조를 대상으로 내진보강 이전과 이후에 각각 가진실험 및 동특성계측을 실시하고 얻어진 계측치로부터 시스템식별 기법을 사용하여 동특성을 분석하였다. 또한 대상건물의 설계도와 정밀안전진단결과 및 실험을 통해 정밀한 해석모델을 구축한 후 부재의 유효강성 및 지지조건을 변화시켜 가며 계측된 동특성과 유사한 동특성을 나타내는 해석모델을 구하고 내진보강 전후를 나타내는 해석모델의 비교를 통해 내진보강을 위해 추가된 부재의 역할을 분석하였다.

## 2. 대상건물의 가진 실험 및 미진동 계측

대상건물은 표준설계도면에 의해 건설된 지상 3층의 초등학교의 교사 한 동이다. Fig. 1은 기준층 평면을 나타낸 것으로 장변( $x$ 축)방향으로 4.5m의 길이를 가지는 19개의 공간으로 구성되어 있으나 12번째 구획을 따라 신축줄눈이 설치되어 좌측동(BD1)과 우측동(BD2)로 나누어져 있다.

대상건물은 현행 구조기준에 의한 검토결과, 수직하중에 대해서는 비교적 안전하지만, 지진하중을 고려할 경우 대부분의 부재에서 내력이 부족한 것으로 나타나 이를 확보하기 위한 내진보강이 이루어졌다. 내진보강은 그림과 같이 단변( $y$ 축)방향으로는 7번째와 16번째 라인의 조적채움벽을 제거하고 1~3층에 걸쳐 200mm 두께의 전단벽을 신설하였으며,  $x$ 축 방향으로는 4번째~6번째 라인, 15번째~17번째 라인의 1~2층에 걸쳐 점성댐퍼 4기를, 3층에는 강재댐퍼 4기를 설치하였다. 댐퍼는 해당위치의 골조를 철골프레임으로 보강한 후 철골프레임에 연결되었는데 모든 댐퍼에는 변위증폭을 위한 토글시스템이 적용되었다. 이를 위해 해당부분의 조적허리벽과 날개벽은 부분적으로 제거되었으며, 그 밖에도 환경개선을 위해 교실 및 복도바닥의 나무 마루를 철거하고 모르타르로 마감으로 교체하였다.

대상건물의 진동가속도 모니터링은 Table 1과 같이 최대 가진용량이 800kN인 소형가진기를 이용한 백색잡음 가진실험과 조화하중가력을 통한 자유진동실험 및 미진동계측으로 구성되어 있다. 먼저 좌측동을 대상으로 백색잡음 가진실험을 실시하고 시스템식별을 통해  $x$ 축,  $y$ 축, 비틀림 방향의 기본진동수를 구한 후 해당진동수로 조화하중을 가진한 후 발생하는 자유진동을 계측하는 실험을 수행하였다. 이후 우측동에 대해서도 동일한 실험을 반복하였다. 신축줄눈에 의해

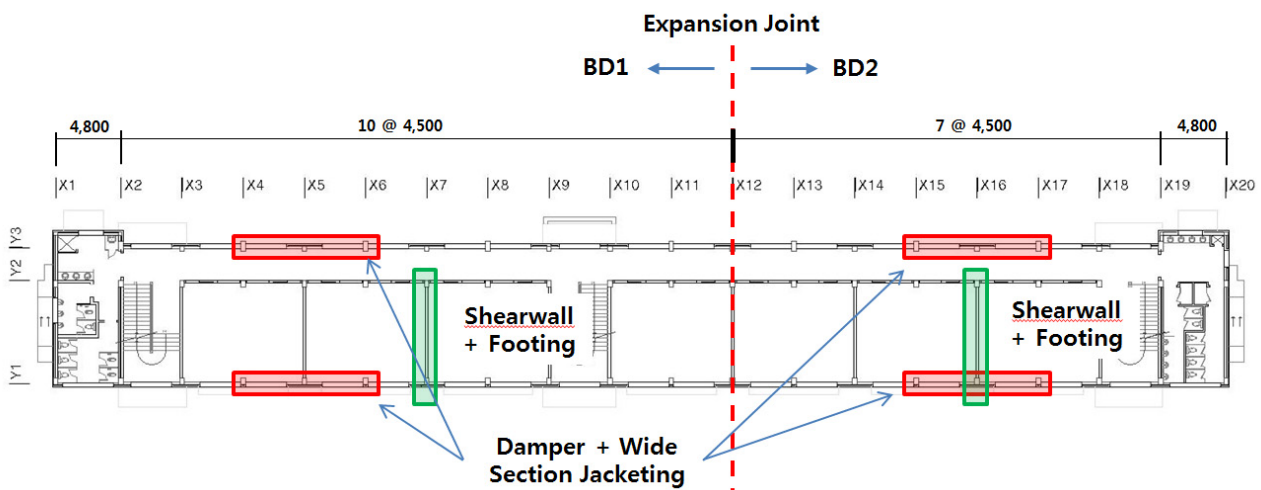


Fig. 1 Typical floor plan and locations of retrofit measure

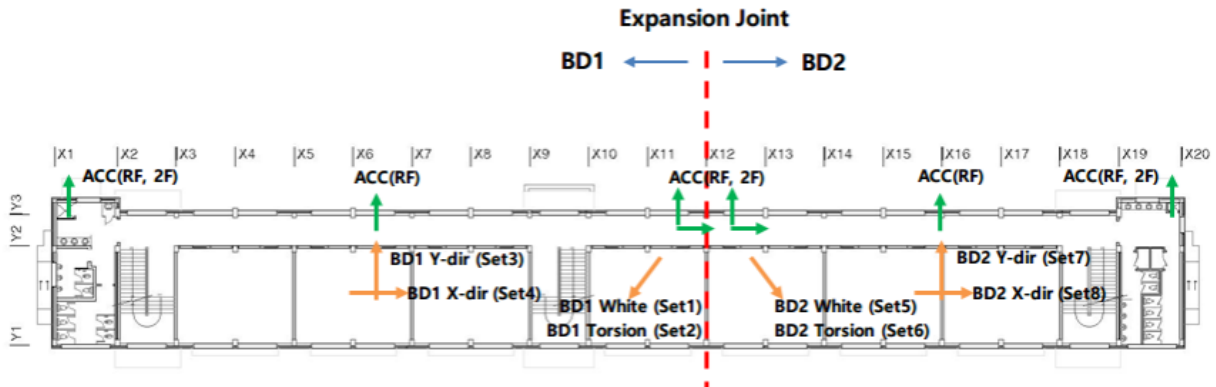


Fig. 2 Locations and directions of accelerometers and shaker

Table 1 Types of vibration testing

Set No.	Testing type
Set 1	BD1 Whitenoise forced vibration
Set 2	BD1 Free vibration in torsional direction
Set 3	BD1 Free vibration in $y$ direction
Set 4	BD1 Free vibration in $x$ direction
Set 5	BD2 Whitenoise forced vibration
Set 6	BD2 Free vibration in torsional direction
Set 7	BD2 Free vibration in $y$ direction
Set 8	BD2 Free vibration in $x$ direction
Set 9	Ambient vibration

구분된 좌측동과 우측동이 독립적으로 거동할 가능성이 있으므로 모든 실험에서 양쪽 동에 동일한 수의 가속도계(지붕층 4채널, 2층 3채널)을 설치하였다. 백색잡음 가진 시에는 모든 모드에 가진이 이루어질 수 있도록 건물의 중앙에서부터 일정한 편심거리를 가진 위치에서 건물의 축에서 45°방향으로 가진하였으며,  $x$ 축 및  $y$ 축방향의 조화하중 가진 시는 대상방향이외의 진동을 최소화하기 위해 건물의 중심부에서 가진하였다. 각 실험별 가속도계 및 가진기의 설치위치는 Fig. 2와 같으며 가진기는 지붕층에 설치하였다.

### 3. 시스템식별을 통한 동특성 추출

각 실험에서 얻어진 데이터로부터 시스템식별 기법을 사용하여 동특성을 추출하였다. 백색잡음 가진 시 시스템식별을 위해서는 부분공간식별법(Subspace System Identification method: Van Overschee and De Moor, 1993)을 사용하였으며, 미진동 계측치는 주파수 영역분해법(Frequency Domain Decomposition: Brincker *et al.*, 2001)를 사용하였다. 감쇠비의 경우 부분공간식별법이나 주파수영역분해법을 통해서도 얻을 수 있으나 진동의 크기가 작을 경우 정확한 추정이 어렵다. 따라서 보다 정확한 감쇠비를 얻기 위해 비교적 진동의 크기가 큰 조화하중가력후 발생한 자유

진동 데이터로부터 힐버트변환(Hilbert transformation)을 적용하여 구하였다. 계측된 가속도 데이터에는 학생의 이동, 난방팬의 구동에 의한 전기적인 충격에 의한 노이즈가 포함되어 있어 시스템식별 시는 이를 제외한 데이터만을 사용하였다.

### 3.1 모드 형상

진동의 크기가 충분할 경우 모드형상은 이론적으로 부분공간식별법과 주파수영역분해법 모두에서 구할 수 있다. 하지만 시스템식별 결과 백색잡음 가진에서는 최대 8차 모드까지 모드 추출이 가능하였다. 진동의 크기가 작은 상시진동의 경우 고차모드의 식별은 불가능하였으나 식별된 저차모드는 백색가진 결과와 유사한 고유진동수와 모드형상을 나타내었다.

Fig. 3은 시스템식별 결과로 얻어진 보강공사전의 모드형상을 나타낸 그림이다. 모드형상을 보면 두 건물이 신축줄눈에 의해 분리되도록 설계 및 시공되었지만 실제로는 연결되어 거동하고 있음을 알 수 있다. 즉, 첫 번째로 모드는 두 건물이 모두  $x$ 축을 따라 같은 위상으로 움직이는 모드(in-phase mode)로 나타났으며, 세 번째로 나타난 모드는 두 건물이  $x$ 축 방향으로 서로 반대되는 위상을 가진 모드(out-of-phase mode)가 나타났다. 이러한 결과는  $y$ 축 방향 모드와 비틀림 모드에서도 모두 유사하게 나타나는데 이는 두 건물이 신축 줄눈부에서 강성을 갖는 연결(link) 요소로 연결되어 있음을 의미한다. 실제 대상건물의 신축줄눈부위는 외장(마루판)으로 덮혀 있고 그 틈새에 콘크리트 조각과 쓰레기가 일부분 차있어 약한 진동은 전달되기 때문인 것으로 판단된다.

내진보강공사 전과 후의 시스템식별결과 모드의 순서에 차이가 나타났다. 즉, 보강공사 전의 경우 1차 모드는 건물의  $x$ 축방향 in-phase 모드이며, 2차는  $y$ 축방향 in-phase 모드, 3차는  $x$ 축방향 out-of-phase 모드, 4차는  $y$ 축방향 out-of-phase 모드, 5차는 비틀림 in-phase 모드, 6차는 비틀림 out-of-phase 모드로 나타났으나, 보강공사 이후에는 3번째

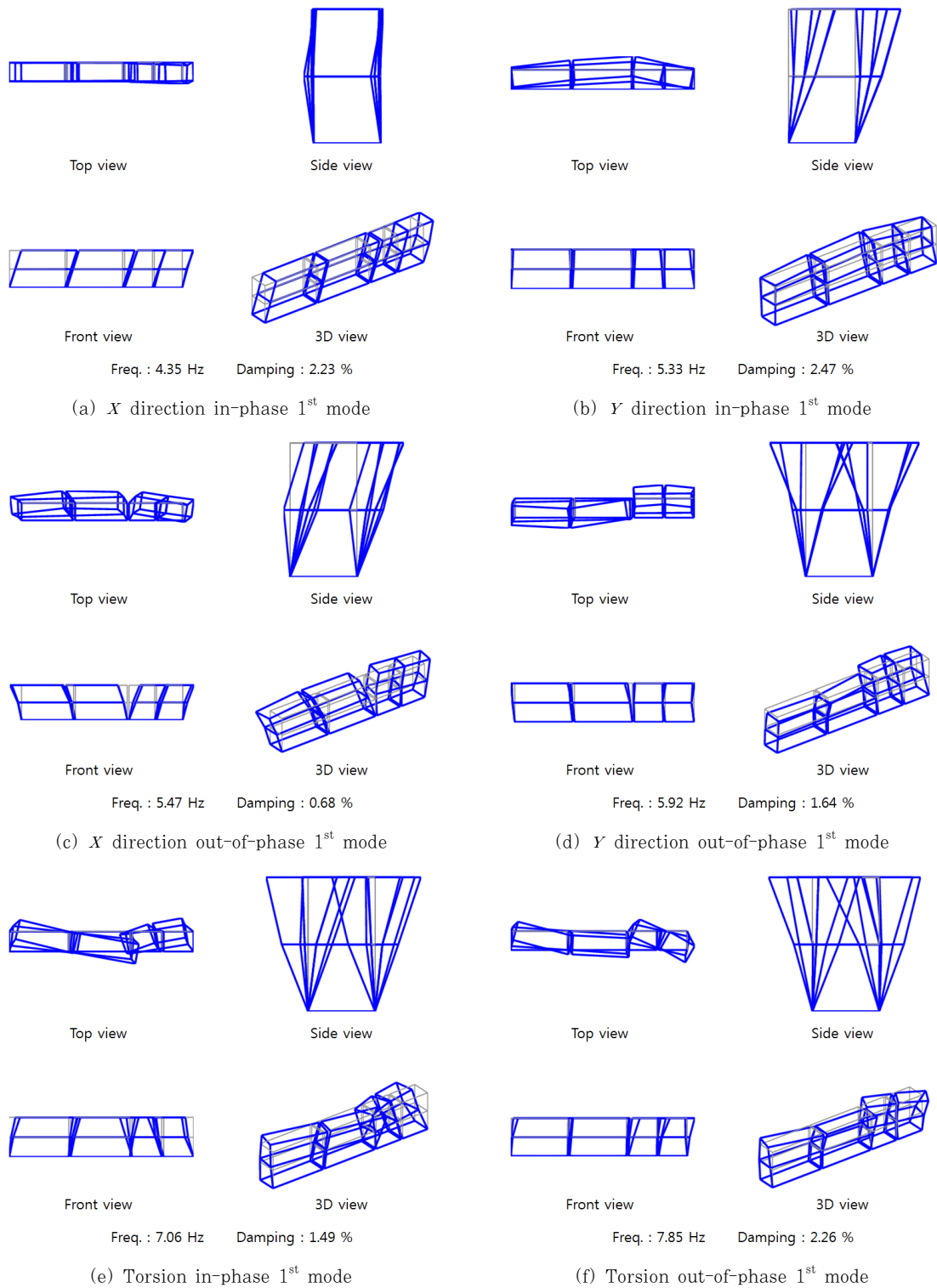


Fig. 3 Mode shapes obtained from system identification(before retrofit)

였던  $x$  축방향의 out-of-phase 모드가 5번째로 나타나고 3번째와 4번째 모드는  $y$  축 out-of-phase와 비틀림 in-phase로 나타났다(Table 2 참조). 단축방향 모드형상에서 신축줄눈 부분의 변위가 다른 부분에 비해 더욱 크게 나타나는 것은 건물의 우측, 좌측 양단에 벽량이 큰 화장실이 배치되어 중앙부분

다 강성이 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2. 고유진동수 및 감쇠비

Table 2는 내진보강 공사 전후의 고유진동수 및 감쇠비를

**Table 2** Measured natural frequencies and damping ratios before and after the retrofit of building

Mode	Natural frequencies(Hz)(mode)			Damping ratios(%)		
	Before retrofit	After retrofit	Ratio	Before retrofit	After retrofit	Ratio
X-dir in-phase	4.35(1)	4.22(1)	97%	2.23	2.69	121%
Y-dir in-phase	5.33(2)	5.71(2)	107%	2.47	1.99	81%
X-dir out-of-phase	5.47(3)	7.18(5)	131%	0.68	2.15	316%
Y-dir out-of-phase	5.92(4)	6.22(3)	105%	1.64	2.33	142%
Torsion in-phase	7.06(5)	6.76(4)	96%	1.49	1.76	118%
Torsion out-of-phase	7.85(6)	8.38(6)	107%	2.26	2.28	101%

비교한 것이다. 대부분의 모드에서 보강공사로 인한 강성의 증가에 따라 고유진동수가 증가하였으나 *x* 축 방향의 in-phase 모드와 비틀림 in-phase 모드의 고유진동수는 보강공사 이후 오히려 감소하였는데 이는 바닥을 모르타르 마감으로 교체함에 따른 자중의 증가 및 신축줄눈부의 보수에 따른 연결강성의 변화에 의한 것으로 생각된다.

감쇠비는 백색잡음가진 후 분석된 가속도 파워스펙트럼의 피크에 주파수에 해당하는 사인파로 가진한 후 충분한 크기의 진동을 얻었을 때 가진기를 정지시키고 이때 발생하는 자유진동파형을 통해 감쇠비를 추정하였다(set 2~4, 6~8). 이는 가진기의 특성상 백색잡음보다는 조화하중가진 시 더 큰 진동을 얻을 수 있기 때문이다. 식별결과 감쇠비는 Table 2에서 볼 수 있듯이 보강공사후 *y*방향 in-phase 모드를 제외하고 모두 증가한 것으로 나타났으며 댐퍼 설치방향인 *x* 방향에서 비교적 증가폭이 크게 나타났다.

**4. 유한요소모델링**

시스템식별 결과 내진보강전후 건물의 동특성에 변화가 있음을 알 수 있으나 동특성의 비교만으로는 그러한 변화를 가져온 원인에 대한 분석이 불가능하다. 본 연구에서는 내진보강 전후 건물의 상태를 나타내는, 즉 최대한 유사한 동특성을 나타내는, 정밀한 유한요소모델을 구축한 후 유한요소모델사이의 비교를 통해 동특성 변화의 원인을 파악해 보고자 하였다. 이를 위해 설계도서 및 실측, 정밀안전진단보고서 등의 자료를 토대로 초기해석모델을 만든 후 재료의 유효강성, 신축줄눈부의 강성, 지지조건을 변화시키면서 계측치와 최대한 유사한 동특성을 가지는 해석모델을 구하였다.

**4.1 초기해석모델**

일반적인 구조설계를 위한 구조해석모델에서는 조적채움벽은 비구조체로 보고 무시하고 모델링한다. 하지만 실제의 경우 채움벽은 구조물의 강성 및 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 기존 문헌(ASCE 41, 2006)에는 조적

채움벽을 등가의 스트럿으로 치환하여 모델링하는 방법이 제시되고 있으며 이 방법은 채움벽을 가진 골조의 내진평가에 많이 활용되고 있다. 하지만 본 연구에서는 탄성한계 이내의 정밀한 강성평가를 위해 면요소를 사용하여 조적채움벽을 모델링하였다. 또한 시스템식별 결과에서 나타난 바와 같이 신축줄눈을 사이에 둔 좌측동과 우측동은 상호 구조적 거동에 영향을 미치고 있으므로 이를 해석모델에 반영하기 위하여 양쪽을 탄성연결요소(Elastic Link)로 연결하였다.

초기해석모델의 탄성계수로는 정밀안전진단 시 수행한 반발경도법에서 얻은 콘크리트강도인 24.8MPa을 근거로 산정하였다. 즉, 콘크리트구조설계기준(국토교통부, 2007년)의 식 (1)을 사용하여 27209MPa의 탄성계수를 얻었으며 이를 초기해석모델의 기둥, 보, 계단, 슬래브의 탄성계수로 사용하였다.

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \tag{1}$$

조적채움벽의 탄성계수는 ASCE 41(2006)에 조적의 강도  $f_m'$ 을 사용한 식 (2)가 제시되어 있는데 재료상태가 보통 상태인 경우, 2275.3MPa가 구해진다.

$$E_m = 550 \times f_m' \tag{2}$$

대상건물의 질량으로는 정밀안전진단보고서 상의 구조체의 자중 및 마감하중에 파라펫과 조적벽의 하중 등을 고려하여 최대한 정밀히 산정하고 모델링 시 반영하였다.

**4.2 보강전 해석모델의 결정**

이상과 같이 작성한 초기해석모델의 고유치해석 결과는 계측을 통해 구한 동특성과 차이를 보였다. 이를 최소화하기 위해 콘크리트와 조적조의 유효강성, 신축줄눈부의 강성, 지지조건을 변화시키면서 최대한 유사한 해석모델을 구하였다.

문헌(ACI 318, 2011)에 의하면 콘크리트의 품질관리와 응력의 크기에 따른 비선형성에 의해 유효강성은 식 (1)로 계산된 값에서 20%정도의 오차를 가질 수 있는 것으로 보고

되고 있다. 또한 조적채움벽의 경우 ASCE 41에서 재료상태가 나쁜 경우, 1137.6MPa, 보통일 경우 2275.3MPa로 비교적 큰 차이를 가지고 있다. 기본 해석모델에서 콘크리트와 조적조의 탄성계수를 변화시키면서 고유진동수의 변화를 살펴보면 콘크리트의 탄성계수를 식 (1)의 80%에서 120%로 변화시킬 경우 구조물의 고유진동수는 모든 모드에서 5~7% 정도로 비슷한 비율로 증가하며, 조적조의 경우에도 재료상태를 나쁨에서 보통으로 변화할 경우 모든 모드에서 20% 정도로 비슷하게 증가하였다.

신축줄눈부분에 해당하는 탄성연결요소 강성의 경우 초기 값이나 그 변동범위를 결정할 수 있는 자료가 없으나 강성값을 변화시키며 해석한 결과 탄성연결요소의  $x$ 방향 강성은 건물전체의  $x$ 방향 out-of-phase 모드에 큰 영향을 미치며 나머지 모드에 대한 영향은 미미함을 알 수 있었으며 탄성연결요소의  $y$ 방향 강성은 건물전체의  $y$ 방향 out-of-phase 모드 및 비틀림 out-of-phase 모드에만 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

대상건물과 같이 지하층이 없고 비교적 강성이 낮은 지중보가 사용된 건물의 경우 기둥하단부를 반드시 고정단으로 볼 수는 없다. 본 연구에서는 지중보와 1층 바닥슬래브를 모두 모델링한 다음 기둥하단과 바닥슬래브에 해당하는 노드의 지지조건을 힌지와 고정단의 여러 조합으로 변화시킨 다음 각 경우에 대해 고유치해석을 수행해본 결과 지지조건 변화에 따라 일부 특정모드가 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

이상과 같이 재료특성은 모든 모드의 고유진동수에 비슷한 영향을 미치며 지지조건 및 탄성연결요소의 강성은 특정 모드에 큰 영향을 미치는 것으로 나타남에 따라 우선 계측된 고유진동수와 해석모델의 모드별 고유진동수의 비율이 유사해지도록 지지조건 및 탄성연결요소의 강성을 결정한 다음 재료의 탄성계수를 조절하였다. 지지조건인 경우 기둥하단과 지중보, 1층 바닥슬래브 모두를 고정단으로 설정하는 경우가 가장 적합한 것으로 나타났으며 탄성연결요소의 강성은  $x$ 방향이 40000N/mm,  $y$ 방향은 12000N/mm가 가장 적합한 것으로 나타났다.

이러한 과정을 통해 결정된 보강전 구조물의 상태를 나타내는 해석모델 및 해석결과는 보강후의 경우와 함께 Table 3과 4에 각각 나타내었는데 비틀림 모드의 경우를 제외하면 계측된 고유진동수와 3% 이내의 오차를 나타낸다.

#### 4.3 보강후 해석모델의 결정

보강후 해석모델은 보강전 해석모델의 재료특성은 기본적으로 동일하나 보강공사를 통해 제거되거나 교체된 부분만을 반영하였다. 여기에는 전단벽과 댐퍼-철골프레임의 설치에 의한 강성증가가 있으며 바닥 교체에 의한 질량증가도 포함된다. 이를 반영하기 위해 신설전단벽을 모델링하고 댐퍼설치를 위해 철골프레임으로 보강된 부분은 완전 일체화된 단면이라고 보고 그만큼 단면의 강성을 증가시켰다. 점성댐퍼는 해당위치의

Table 3 Material properties and support condition of analytical models

	Before retrofit	After retrofit
Effective stiffness of frame	120% of gross section stiffness	120% of gross section stiffness
Elastic modulus of masonry	91% of normal condition	91% of normal condition
Stiffness of elastic link in $X$ direction (Expansion joint)	40000N/mm	120000N/mm
Stiffness of elastic link in $Y$ direction (Expansion joint)	12000N/mm	36000N/mm
Support conditions	Fixed support	Fixed but rotational at the bottom of 1 <sup>st</sup> story column in $Y$ direction
Effective stiffness of damper frame	-	50% of gross section stiffness
Effective stiffness of shear wall	-	50% of gross section stiffness

Table 4 Comparison of analytical and measured natural frequencies

Mode	Before retrofit			After retrofit		
	Messured	Analytical	Difference(%)	Messured	Analytical	Difference(%)
$X$ -dir in-phase	4.35	4.25	-2.30%	4.22	4.18	-0.95%
$Y$ -dir in-phase	5.33	5.45	2.25%	5.71	5.88	2.98%
$X$ -dir out-of-phase	5.47	5.6	2.38%	7.18	7.21	0.42%
$Y$ -dir out-of-phase	5.92	6.07	2.53%	6.22	6.23	0.16%
Torsion in-phase	7.06	6.76	-4.25%	6.76	6.85	1.33%
Torsion out-of-phase	7.85	7.2	-8.28%	8.38	8.37	-0.12%

가새 노드와 기둥 노드를 Elastic Link를 이용하여 연결하고 Link의 강성을 댐퍼의 물성치인 350kN/mm로 입력하였다.

신설전단벽과 댐퍼설치부에 H형강으로 보강된 부재의 강성을 완전 모두 반영할 경우, 즉 전체단면강성을 사용할 경우, 계측된 동특성과 매우 큰 차이가 나타났다. 가장 큰 차이점은  $y$ 방향의 강성이 매우 높아져  $y$ 방향 병진모드의 고유진동수가 비틀림 모드보다 커지게 되는 것으로 이는 전단벽의 유효강성을 감소시킬 경우 해소가 되어 식별된 모드와 같은 순서를 나타내었다. 반복 해석을 통해 식별결과와 일치되도록 최적의 강성값을 찾은 결과 댐퍼설치를 위해 단면이 보강된 기둥의 유효강성은 완전합성단면의 전단면강성의 50%, 신규전단벽의 경우도 전단면강성의 50%였다. 이는 기존 구조체에 추가로 설치된 부분 즉, 신규 혹은 단면증설이 이루어진 부재가 강성의 측면에서 기존 구조체와 완벽히 일체화되지 않았음을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 실제로 신설된 전단벽의 경우 신축건물의 경우와 달리 아래층에서부터 최상층까지 일체화되어 타설되는 것이 아니라 기존의 보 상단과 하단면에 다우얼근을 매립한 후 콘크리트를 타설하므로 기존 부재인 보와 완전히 일체화된다고 볼 수 없다. 하지만 이러한 결과는 작은 동적하중에 대해 계측된 구조물의 탄성거동에 근거한 것으로 지진과 같은 큰 하중이 작용할 경우 강도측면의 거동에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

보강후 해석모델의 경우에도 보강전 해석모델과 동일한 절차를 통해 지지조건 및 탄성연결요소의 강성을 결정하였다. 보강후 구조물 식별 결과에서 볼 때  $x$ 축 방향 out-of-phase 모드의 진동수는 보강전보다 상당히 증가하여  $y$ 축 방향 in-phase, out-of-phase 모드, 비틀림 in-phase 모드의 진동수보다 높아졌다. out-of-phase 모드의 진동수는 신축준강성에 큰 영향을 받는다. 따라서  $x$ 방향에서 out-of-phase 모드의 진동수 증가는 바닥교체 시 신축준부분을 수선하여 이 부분의 강성이 증가하였기 때문인 것으로 판단되었다. 신축준의  $x$ 방향의 강성을 증가시키면서 식별된 고유진동수와 비교한 결과 보강전에 비해 3배 정도 강성을 증가시킬 경우 가장 유사한 결과를 얻을 수 있었다.  $y$ 축 방향의 out-of-phase 모드의 경우도 보강 전에 비해 진동수가 증가하여 신축준의  $y$ 방향 강성도  $x$ 방향 강성과 같은 비율로 증가시켰다. 또한 1층 바닥의 지지조건도 신설기초 부분의  $y$ 방향 회전 구속을 해제한 경우가 가장 적합한 것으로 나타났다. 이는 신규로 설치된 기초하부의 지지조건이 기존건물(보강전)의 경우와 다르기 때문인 것으로 추정된다. 즉 신축건물의 경우와 달리 보강 시에는 기존 건물의 최하층 바닥을 굴토하고 마이크로파일로 지정을 만든 후 기초를 타설하게 되므로 지반의 고정도에 차이가 있을 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 과정을 통해 결정된 보강공사 후 해석모델 및 해석 결과는 Table 3과 4에 각각 나타내었는데 모든 모드에서 계측된 결과와 3%이내의 오차를 가진다.

## 5. 결 론

조적채움벽이 사용된 저층 철근콘크리트건물을 대상으로 내진보강 전과 후에 가진기 및 14채널의 가속도계를 사용하여 가진실험 및 미진동계측을 수행하였다. 실험의 종류는 백색잡음 가진실험과 조화하중가진후 자유진동계측, 상시진동 실험으로, 백색잡음 및 상시진동 실험 데이터로는 주파수 및 시간영역 시스템식별 기법을 적용하여 구조물의 고유진동수를 식별하였으며 자유진동실험치 얻어진 데이터에는 힐버트변환을 적용하여 감쇠비를 산정하였다. 대상건물은 장변방향으로는 댐퍼설치를 위해 일부 부재에 철골단면을 이용한 부재보강이, 단면방향으로는 전단벽의 신설을 통해 내진보강공사가 이루어졌다. 내진보강공사 전후 시스템식별을 통해 구한 구조물의 고유진동수로 볼 때 전단벽 신설 및 댐퍼설치부 기둥 단면증설에 의한 고유진동수의 증가효과는 그렇게 크지 않았으며 식별결과 감쇠비는 댐퍼 설치방향인  $x$ 방향에서 비교적 증가폭이 크게 나타났다. 하지만 성능 모니터링 실험을 통해 발생시킬 수 있는 진동의 크기가 매우 작아 지진레벨에 해당하는 댐퍼 성능 자체에 대한 평가는 어려운 것으로 판단된다.

본 연구에서는 시스템식별을 통해 결정된 고유진동수와 최대의 유사한 동특성을 나타내는 정밀한 유한요소모델을 구축한 후 유한요소모델 사이의 비교를 통해 동특성 변화의 원인을 파악해 보고자 하였다. 이를 위해 설계도서 및 실측, 정밀안전진단보고서 등의 자료를 토대로 초기해석모델을 만든 후 재료의 유효강성, 신축준부의 강성, 지지조건을 변화시키면서 최대의 유사한 해석모델을 구하였다. 내진보강후 해석모델에서 신규로 설치되거나 기존 부재에 앵커링되어 단면증설이 이루어진 부재의 경우(전단벽 및 댐퍼 프레임부분)에는 그 유효강성을 50% 정도로 감소시켜야 계측된 동특성과 유사한 거동이 나타났다. 이는 신규로 설치되는 부분이 기존 부재와 완전히 일체화되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 보강 전 해석 모델의 경우 하단 지지조건은 모든 노드가 고정단일 경우 모드형상이 가장 유사하게 나타났으나 보강후의 경우에는 신설기초부는  $y$ 방향으로 회전이 가능하도록 한 경우 모드형상이 가장 유사하게 나타났다. 이는 기초신규설치 등 보강 공사로 인해 지반의 고정도가 변화되었기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 진동의 크기가 작은 진동계측을 통해 얻어진 결과이므로 대변위가 발생하는 실제 지진발생 시 거동 및 내진보강의 강도측면의 효과에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

### 감사의 글

이 연구는 국토교통부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 첨단도시개발사업(과제번호 : 07도시재생B04) 및 국토교통부 도시건축연구개발사업(13AUDP -B066083-01)의 연구비 지원에 의해 수행된 것으로, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### References

**ACI 318 Committee** (2011) Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-11) and Commentary, *American Concrete Institute*.

**ASCE Committee** (2007) Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-06), *American Society of Civil Engineers*, Reston, VA.

**Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P.** (2001) Modal Identification of Output-only Systems using Frequency Domain Decomposition, *Smart Mater. & Struct.*, 10(3), p.441.

**Jang, J.H., Hwang, J.H., Yang, K.S., Choi, J.H.** (2012) Proposed Seismic Performance Evaluation Enhancement for Existing School Building, *J. Korean Inst. Edu. Facil.*, 19(4) pp.29~38.

**Jo, M.J., Lee, J.N.** (2012) A Study on the Current State of Seismic-Resistance and the Feature of Seismic Performance in School Buildings, *J. Korean*

*Inst. Edu. Facil.*, 19(3), pp.33~40.

**Huynh, C.T, Park H.K., Kim, J.** (2010) Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Structures using Steel Braces and Moment Frames, *J. Comput. Eng. Inst. Korea*, 23(5), pp.509~516.

**Lee, C.K.** (2010) Dynamic Characteristics of RC Buildings and Confirmation of the Effect of Retrofitting, *Korea Concr. Inst.*, 22(3), pp.95~98.

**Ministry of Land, Infrastructure and Transport** (2007) *Design Provisions for Concrete Structures*.

**Moon, K.H., Jeon, Y.R., Lee, C.S., Han, S.W.** (2012) Evaluation of Performance of Korean Existing School Buildings with Masonry Infilled Walls Against Earthquakes, *J. Earthq. Eng. Korea*, 16(6), pp.37~46.

**Ryu, S.H., Yun, H.D., Kim, S.W., Lee, K.S., Kim, Y.C.** (2011) Nonlinear Behavior of Seismic-Strengthened Domestic School Building, *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, 15(1), pp.243~253.

**Song, J.K., Hwang, J.S., Kim, G.W., Song, H.B., Lee, J.H.** (2010) Seismic Performance Evaluation and Seismic Retrofit of School Building Considering Deterioration, *J. Archi. Inst. Korea*, 26(8) pp.3~10.

**Van Overschee, P., De Moor, B.** (1993) N4SID: Numerical Algorithms for State Space Subspace System Identification, *In Proc. of the World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC*, 7, pp.361~364.

### 요 지

본 연구에서는 저층 조적채움벽 철근콘크리트 골조 구조물의 내진보강 전과 후에 대하여 강제 진동 실험과 상시 진동 계측을 수행하였으며 시스템 식별과정을 통하여 구조물의 동특성을 구하고 해당 구조물과 유사한 동특성을 보이는 해석 모델을 만들었다. 시스템 식별 결과 댐퍼가 설치된  $x$ 방향의 감쇠비가 증가되었으며, 해석 모델과 비교한 결과 추가 설치된 부재들(전단벽과 댐퍼)의 유효 강성은 부재의 총단면 강성의 50%만이 발현되어 해당 부재들이 기존의 구조물이나 부재와 완전히 일체화되지는 않음을 알 수 있었다. 또한, 추가 설치된 기초의  $y$ 방향 구속조건을 편으로 하여야 동특성을 일치시킬 수 있었는데, 이는 새로운 기초가 설치되며 해당 지질의 특성이 변화되었기 때문으로 보인다.

**핵심용어** : 조적채움벽 골조, 가진 실험, 미진동 계측, 시스템식별, 내진보강