Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 27, No. 4, August 2023, pp.1-10
https://doi.org/10.11112/jksmi.2023.27.4.1

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

주파수응답함수 기반 다자유도 골조 구조물의 동특성치 도출 및 구조모델링 적용

김소연[1], 김민영[1], 이승재[2], 최경규[3*]

Derivation of Dynamic Characteristic Values for Multi-degree-of-freedom Frame Structures based on Frequency Response Function(FRF)

So-Yeon Kim[1], Min-Young Kim[1], Seung-Jae Lee[2], Kyoung-Kyu Choi[3*]

Abstract: In the seismic design of structures, seismic forces are calculated based on structural models and analysis. In order to accurately address the dynamic characteristics of the actual structure in the structural model, calibration based on actual measurements is required. In this study, a 4-story frame test specimen was manufactured to simulate frame building, accelerometers were attached at each floor, and 1-axis shaking table test was performed. The natural period of the specimen was similar to that of the actual 4 story frame building, and the columns were designed to behave with double-curvature having the infinite stiffness of the horizontal members. To investigate the effects seismic waves characteristics, historical and artificial excitations with various frequencies and acceleration magnitudes were applied. The natural frequencies, damping ratios, and mode shapes were obtained using frequency response functions obtained from dynamic response signals, and the mode vector deviations according to the input seismic waves were verified using the Mode assurance criterion (MAC). In addition, the damping ratios obtained from the vibration tests were applied to the structural model, and the method with refined dynamic characteristics was validated by comparing the analysis results with the experimental data.

Keywords: Multi-degree-of-freedom structure, Shaking table test, Dynamic characteristic extraction, Mode vectors, Frequency response function (FRF) analysis

1. 서 론

구조물의 내진설계에서는 구조모델에 대한 탄성해석에 기반하여 고유주기, 모드벡터를 도출하며 이는 지진하중 산정 시 가장 중요한 동특성치로 사용된다. Kim et al.(2007)에 의해 수행된 기존 연구에 의하면 실제 구조물의 가속도 계측을 통해 분석된 구조물의 고유주기, 모드벡터 등 동특성치는 구조해석에서 사용한 구조모델과 편차가 있다. 예를 들어 해운대에 위치한 L건물의 경우 가속도 계측에 기반하여 평가되는 고유주기 및 강성은 구조모델과 비교하여 10% 내외의 편차가 존재하였다(Dhung et al., 2018). 이는 구조모델 구축 시 실제 구조부재의 치수, 물성 및 강성, 비구조요소와의 상호작용 등을 정확하게 고려하지 못하기 때문이다(Oh, 2008; Bae et al., 2020). 이러한 동특성치의 차이는 내진설계 시 지진하중의 차이로 귀결되며, 따라서 실제 계측 결과에 기반한 시스템 식별 및 동특성치 개선은 내진설계의 합리성과 안전성에 도움을 줄 수 있다.

최근까지 실제 구조물의 가속도계측을 통해서 구조물의 동특성을 정확히 식별하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Kim et al.(2009)는 진동대실험에 기반한 다자유도 구조물의 모드참여계수를 산정하는 방법을 이론적으로 정립하였다. 1개의 입력과 1개의 출력을 가지는 SISO(single input single output) 시스템을 고려하여 3층 골조 시험체에 대한 진동대 실험을 수행하였고 가속도 실계측을 통해 모드참여계수와 모드형상 도출의 정확성을 평가하였다. Hwang et al.(2012)는 기둥 두께와 층수를 달리한 6종의 축소전단모형구조물을 제작하였으며 상시진동계측과 응답가속도 크기를 조절한 백색잡음 가진 실험을 수행하여 응답가속도 크기에 따른 구조물의 동특성의 변화를 분석하였다. 선형회귀분석에 의하면 응답가속도가 증가함에 따라 고유진동수가 감소하는 것으로 나타났다.

한편, 구조물의 진동계측을 통해 도출한 동특성을 이용하여 구조모델을 개선하는 연구가 진행되고 있다. Park et al.(1985)은 실험을 통해 얻은 동특성치를 기존 구조모델에 적용하여 개선된 구조모델을 구성하였고, 해석 결과와 실험 결과를 비교함으로써 구조모델의 정확도 개선을 확인하였다. Hwang et al.(2013)은 실제 구조물인 M성당을 대상으로 장기

[1]학생회원, 숭실대학교 건축학부 석사과정
[2]정회원, 숭실대학교 건축학부 대학원 박사과정
[3]정회원, 숭실대학교 건축학부 교수, 교신저자
***Corresponding author:** kkchoi@ssu.ac.kr
Department of Architecture Engineering, Soongsil University, Seoul, 06978, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2023년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2023 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. 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.

계측을 실시하였으며 계측 결과를 바탕으로 구조모델을 개선하였다. Lee et al.(2016)은 진동계측으로부터 얻은 주파수응답함수를 이용하여 동적해석모델의 질량, 감쇠계수, 강성계수를 개선하는 모델링 기법을 제안하였다. Simoen et al.(2015)에 의하면 동특성치 도출 및 구조모델의 개선을 위해서는 충분한 정보가 필요하므로 적절한 수의 센서가 필요한 것으로 확인되었다. Choi(2010)는 교량 구조모델의 손상을 강성저하로 모델링한 후 손상 위치와 수준을 식별하기 위해 최적 센서 네트워크를 목표 수준에 따라 설계하는 방법을 개발하였다.

본 연구에서는 골조 구조물을 간략하게 모사하는 4층 강재 골조 실험체를 제작 후 진동대 실험을 수행하였다. 진동대 실험 결과에 기반하여 고유진동수, 감쇠비 및 모드형상을 체계적으로 도출하였으며 입력지진파의 주기 및 크기에 따른 영향 분석을 수행하였다.

2. 진동대 실험 계획

2.1 실험 계획

본 연구에서는 4층 골조 구조물을 간략하게 모사하는 4층 강재 골조 모델을 제작하여 진동대 실험을 수행하였다. 제작한 실험체의 규격은 가로 400mm, 세로 300mm, 높이 1600mm이고 각 층의 높이는 400mm이며 각 층 질량은 11.6kg이다. 실험체 설계 시 1차모드의 주기가 대략 0.5초가 되도록 강성과 질량을 결정하였다.

Fig. 1은 구조물의 상세와 접합부를 제시하고 있다. 실험체는 정형구조물로 분석의 용이성을 위해 슬래브의 휨과 뒤틀림이 발생하지 않고 골조 거동에 지배되도록 설계하였다. 따라서 기둥의 양단을 볼트로 고정하였으며, 금매김하여 진동대 실험 전후 볼트 접합부의 풀림 여부를 확인하였다. 슬래브 상부에 보조 플레이트를 설치하여 슬래브의 휨강성과 비틀림 강성을 크게 증가시켰다. 슬래브의 두께는 기둥의 두께의 약2배이며, 기둥 부재의 강성은 16.9kN/m로 동일하다.

2.2 진동대 가진 계획

본 연구에서 사용된 진동대는 1방향 진동을 가력하는 장치로써 규격은 2,000mm×2,000mm이고 최대 허용 가속도는 10g, 최대 허용 변위는 ±400mm이다. Table 1은 진동대의 주요 사양을 제시하였다. 실험체의 각 층별 응답가속도를 계측하기 위해 실험체의 각 층 중앙에 1축 가속도계를 부착하였으며, 입력 지진파를 측정하기 위해 진동대 상부에 1축 가속도계를 부착하였다. Fig. 2는 가속도계 부착 위치를 표시하였으며 Table 2는 가속도계 세부 사항이다. 본 연구에 사용된 가속도계는 1000mV/g의 민감도를 가지며 측정 가속도 범위는 ±5g이다.

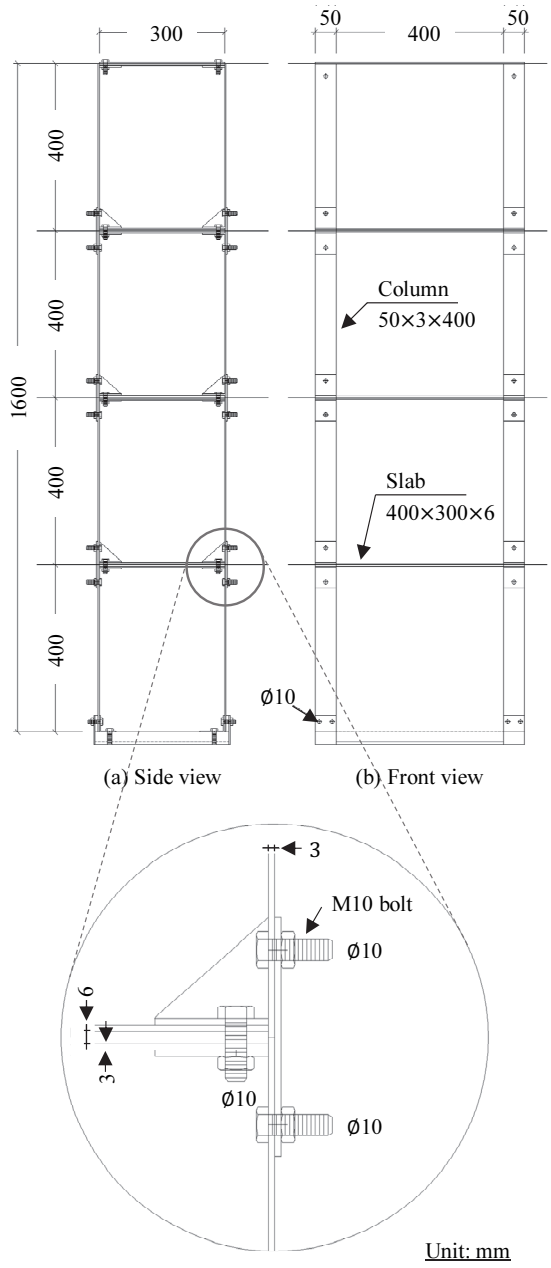


Fig. 1 Details of 4-DOF frame specimen

Table 1 Details of shaking table

Specification	Unit	Values
Size	mm	2000 × 2000
Maximum usable weight	tonf	2
Maximum acceleration	g	10
Maximum displacement	mm	400
Frequency range	kHz	0 ⋯ 20
Amplitude non-linearity	% FSO	±1

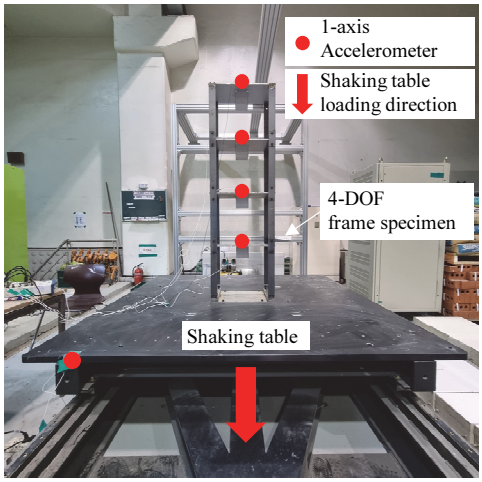
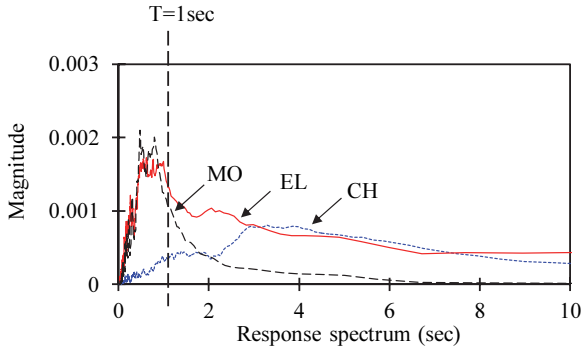


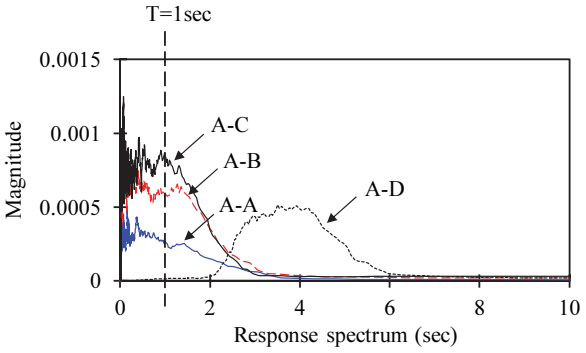
Fig. 2 Shaking table test set up

Table 2 Details of accelerometers

Specification	Unit	Values
Acceleration range	g	±5
Acceleration limit	gpk	±500
Normalized threshold	grms	0.0004
Sensitivity, ±10%	mV/g	1000
Normalized Resonant frequency mounted	kHz	27
Frequency response, ±5%	Hz	1 ⋯ 6000
Amplitude non-linearity	% FSO	±1
Normalized time constant	s	0.5
Normalized transverse sensitivity	%	1.5



(a) Historical seismic excitations



(b) Artificial excitations

Fig. 3 Response spectrum for each excitation

진동대 실험에서는 지진파의 주기와 가속도 크기가 실험체의 동특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 역사지진파 3종과 인공지진파 4종이 사용되었고 각각 3회씩 반복 가력하였다. 본 연구에 사용된 역사지진파 Chichi, Morgan hill, El centro는 태평양지진연구센터(Pacific Earthquake Engineering Research

Table 3 Details of historical excitations and scale factors

Excitation names	Seismic observatory location	Peak ground acceleration (PGA)	Scale factors
Chichi (1999)	CHY012	0.60g	0.067
Morgan hill (1984)	Halls Valley	0.60g	0.22
El Centro (1940)	Array Station 9	0.35g	0.34

Table 4 Details of input excitations

Excitation names	Peak ground acceleration (PGA)	Loading period (sec)	Natural frequency (Hz)	Period (sec)	Seismic waves
CH	0.04g	135	0.3	3.29	Chichi (1999)
A-A	0.05g	43	1-50	0.02-1	Artificial excitation
EL	0.12g	48.37	1.62	0.62	El Centro (1940)
A-B	0.106g	46	1-50	0.02-1	Artificial excitation
MO	0.13g	40	2.1	0.48	Morgan hill (1984)
A-C	0.15g	68	1-50	0.02-1	Artificial excitation
A-D	0.05g	298	0.1-0.5	2-10	Artificial excitation

Center; PEER)에서 제공되었으며 모두 각 지진에 대하여 근거리 관측소에서 계측된 가속도기록을 사용하였다. 입력지진파의 PGA, 계측 위치, 스케일 계수는 Table 3에 제시하였다.

지진파별 스펙트럼은 Fig. 3에 나타내었으며 Table 4는 각 지진파의 특성을 제시하고 있다. 장주기 지진파인 Chichi (CH)는 1초 이상의 주기를 가지며, 단주기 지진파인 Morgan hill(MO)은 1초 이하의 주기를 갖는다. 그 외 지진파인 El centro(EL)는 장주기와 단주기의 중간적 특성을 가지고 있다. 인공지진파 A-A, A-B, A-C의 경우 1~50Hz의 성분을 갖는 백색잡음을 사용하여 생성하였으며 각각 역사지진파 CH, EL, MO의 최대지반가속도(Peak ground acceleration; PGA)와 유사한 크기를 가진다. 또한 대략 2초의 주기를 갖는 장주기 인공지진파 A-D를 사용하였는데 최대지반가속도 및 탁월주기는 역사지진파 CH와 유사하다. 역사지진파 중 MO의 최대가속도가 0.13g로 가장 크고, CH의 최대가속도가 0.04g로 가장 작다.

3. 시간이력데이터 추출

3.1 데이터 추출 방법

데이터 분석 시 데이터 샘플링 주파수가 낮으면 분석 데이터의 정확도가 떨어지는 위신호(Aliasing)가 발생하는데, 일반적으로 위신호를 제거하는 방법은 크게 두 가지로 분류한다.

첫 번째는 Nyquist Shannon 샘플링 이론에 기반하여 샘플링 주파수를 원본 데이터 주파수의 2배 이상으로 정의하는 방법이다(Lee, 1999).

$$f_s \geq 2f \tag{1}$$

여기서 f_s는 샘플링 주파수(Hz)이며 f는 원본 데이터의 주파수(Hz)이다. 샘플링 주파수를 크게 할수록 샘플링되는 데이터의 개수가 많아지므로 원본 데이터를 안정적으로 추출 및 분석할 수 있다(Lee et al., 2015).

두번째 방법은 저주파통과필터를 사용하여 차단 주파수(Cut-off frequency)를 초과하는 데이터를 제거함으로써 고주파 성분에 의한 왜곡을 방지하는 것이다. 본 연구에는 첫 번째 방법을 사용하였으며 식 (1)에 의해 샘플링 주파수를 원본 데이터 주파수의 2배로 설정하여 위신호를 제거하였다.

3.2 시간이력데이터 추출 결과

Fig. 4는 층별 최대응답가속도(Peak response acceleration; PRA)와 최대지반가속도의 비를 나타내며 Table 5는 입력지진파에 따른 층별 최대응답가속도를 제시하고 있다. 최대지반가속도가 큰 지진파 A-C, MO, EL이 비교적 큰 최대응답가속도 비를 나타낸다. 또한 주어진 실험체 조건과 가력에 사용된 지진파 특성의 범위 이내에서는 입력지진파에 관계없이 4층의 응답가속도 비가 가장 크게 나타났으며 1층의 응답가속도 비가 상대적으로 작게 나타났다. 이를 통해 지진파의 크기가 클수록 가속도 증폭의 정도가 크고, 1층보다 4층에서의 가속도 증폭이 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 인공지진파 A-D는 2층, 3층의 응답가속도가 1층보다 낮게 나타나는 경향을 보이며 이는 가력지진파의 크기가 작아 노이즈로 인한 영향이 큰 것으로 판단된다.

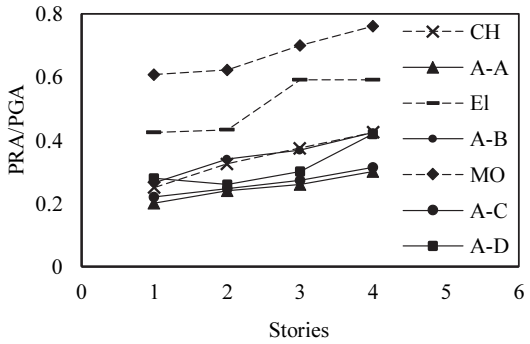


Fig. 4 Ratio of PRA and PGA for each excitation

Table 5 Peak response acceleration of test specimen

Excitation names	Peak response acceleration (g)			
	1st Story	2nd Story	3rd Story	4th Story
CH	0.010	0.013	0.015	0.017
A-A	0.010	0.012	0.013	0.015
EL	0.051	0.052	0.071	0.071
A-B	0.028	0.033	0.036	0.042
MO	0.079	0.081	0.091	0.099
A-C	0.033	0.037	0.041	0.047
A-D	0.014	0.013	0.015	0.021

4. 실험체의 동특성치 분석

4.1 고유진동수 분석

실험체의 고유진동수와 감쇠비 등 동특성 평가를 위해 전달함수(Transfer function)를 사용하였다. 전달함수는 입력가속도의 고속퓨리에변환(Fast fourier transform; FFT)에 대한 응답가속도의 FFT의 비율을 나타내며 다음과 같이 구할 수 있다(Lee et al., 2022).

$$H(\omega) = \frac{\mathrm{FFT}(\ddot{u})}{\mathrm{FFT}(\ddot{u}_g)} \tag{2}$$

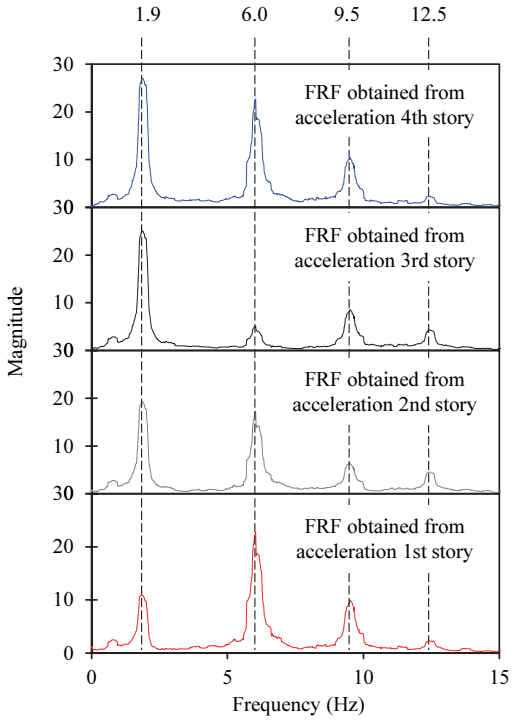


Fig. 5 Natural frequency acquired from test result of A-B excitation

여기서 $\mathrm{FFT}(\ddot{u})$는 출력 데이터에 대한 FFT 해석 결과이며 $\mathrm{FFT}(\ddot{u}_g)$는 입력 데이터에 대한 FFT 해석 결과이다.

Fig. 5는 인공지진파 A-B를 가진하여 실험체의 고유진동수를 도출한 결과를 제시하고 있으며 Table 6은 입력지진파에 따라 도출된 고유진동수를 정리한 결과이다. 입력지진파에 관계없이 1~4차모드의 고유진동수는 각각 1.9Hz, 6.0Hz, 9.5Hz, 12.3Hz로 일관되게 도출되었다. 일반적으로 구조물의 고유주기, 입력지진파의 종류, 출력가속도의 위치(층수), 층강성 분포에 따라서 특정 모드의 고유진동수가 다소 불명확하게 나타날 수 있다. 이 경우 모든 층에 대한 고유진동수 계측결과를 비교 분석하여 모든 모드의 명확한 고유진동수 도출이 필요하다.

Table 6 Natural frequency acquired from test results of each excitation

Excitation names	Natural frequency (Hz)			
	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode	4th Mode
CH	1.9	6.1	9.5	12.5
A-A	1.9	6.0	9.3	12.5
EL	1.8	6.0	9.4	12.3
A-B	1.9	6.0	9.4	12.5
MO	1.9	6.0	9.5	12.4
A-C	1.9	6.1	9.5	12.4
A-D	1.8	5.9	9.4	12.4

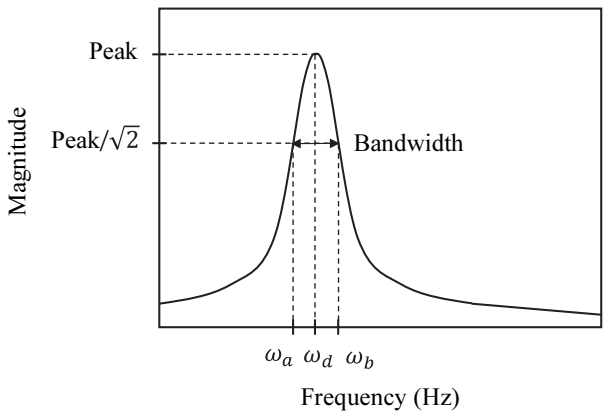


Fig. 6 Half-power bandwidth

4.2 감쇠비 분석

본 연구에서는 진동대 실험을 통해 역사지진파와 인공지진파를 가력한 후 주파수영역에서 동특성을 분석하였으므로, 반전력 대역폭법(Half-power bandwidth)을 사용하여 감쇠비를 도출하였다(Papagiannopoulos, 2011).

$$\zeta = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_d} \tag{3}$$

여기서 ω_a와 ω_b는 출력 데이터가 국부 최댓값(peak)의 $1/\sqrt{2}$에 도달할 때의 주파수를 각각 나타낸다. 반전력 대역폭법은 주파수응답함수를 사용하여 감쇠비를 도출하는 방법으로 선형점성 감쇠를 가정한 후 Fig. 6과 같이 반전력 대역 두 점을 이용하여 감쇠비를 도출한다.

Table 7은 지진파 CH와 A-C를 가진하여 얻은 주파수응답함수로부터 감쇠비를 도출한 결과를 예시로 제시하고 있다. 모드별 평균 감쇠비는 1차모드의 감쇠비가 가장 크고 4차모

Table 7 Damping ratio of excitations CH and A-C

Excitation names	Stories	Damping ratio of each mode			
		1st	2nd	3rd	4th
CH	1	0.051	0.017	0.012	0.008
	2	0.051	0.017	0.012	0.008
	3	0.051	0.017	0.012	0.008
	4	0.052	0.017	0.012	0.008
	average	0.051	0.017	0.012	0.008
A-C	1	0.065	0.021	0.014	0.010
	2	0.065	0.021	0.015	0.010
	3	0.065	0.020	0.015	0.010
	4	0.065	0.021	0.015	0.010
	average	0.065	0.021	0.015	0.010

드의 감쇠비가 가장 작았다. 입력지진파의 주파수와 가속도 크기에 관계없이 감쇠비가 거의 유사함을 알 수 있다.

4.3 모드벡터 도출

4.3.1 모드벡터 및 모드형상 도출

본 절에서는 시스템의 운동방정식에 기반하여 모드형상을 도출하는 방법을 제시하였다. 시스템의 감쇠비가 낮고 i차 모드의 고유진동수(ω_i)를 가지며 조화함수로 가진 되는 자유도계 시스템의 운동방정식은 아래 식과 같다(Chopra, 2007; Lee et al., 2008).

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{f\}e^{A\omega_i t} \tag{4}$$

이때, $[M]$은 질량 행렬이고 $[C]$는 감쇠비 행렬, $[K]$는 강성 행렬이다. $\{u\}$는 변위량에 대한 행렬이며 $\{f\}$는 입력 데이터에 대한 행렬이다. 입력과 출력의 비율로 정의되는 전달함수 $[H(\omega_i)]$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[H(\omega_i)]=\left([K]-\omega_i^2[M]+A\omega_i[C]\right)^{-1} \tag{5}$$

여기서 정규화된 질량, 강성 매트릭스를 도입하고 감쇠비 행렬 $[C]$를 강성행렬과 질량 행렬의 선형조합으로 나타내는 레일레이 감쇠(Rayleigh damping)으로 가정하면 식 (5)를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$[H(\omega_i)]=[\psi][\Gamma][\psi]^T \tag{6}$$

이때, $[\Gamma]$는 대각행렬로써, $\Gamma_i=1/(2A\zeta_i\omega_i^2)$이며 $[\psi]$는 정규모드벡터(Normalized mode vector)이다. 식 (6)을 전개하여 각 모드벡터를 도출하면 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$|\psi_{pi}\psi_{qi}|\approx 2\zeta_i\omega_i^2|H_{pq}(\omega_i)| \tag{7}$$

식 (7)에서 ψ_{pi}는 i차 모드벡터의 요소를 나타내며 모드벡터의 부호는 전달함수의 위상각으로 도출할 수 있다. p는 p번째 출력, q는 q번째 입력을 나타내는데, 본 실험의 경우 진동대를 활용하여 가진하였기에 입력 q(q=1)는 하나의 위치이며, 출력 p(p=1,2,3,4)는 각 가속도계의 4개의 위치에서 측정되었다. 따라서 고유진동수와 감쇠비, 전달함수의 크기를 사용하여 입력 q를 가진하였을 때 실험체의 p번째 층의 k번째 모드벡터 도출이 가능하다. 모드벡터 요소의 부호는 전달함수의 위상각으로 도출하였다. Fig. 7은 진동대 실험의 입력지진파에 따른 모드별 모드형상을 제시하고 있으며, 비교결과 입력지진파에 관계없이 모드형상이 거의 동일한 것으로 나타났다. 고차모드로 갈수록 모드형상의 편차가 발생하나 그 차이는 미미한 수준이다.

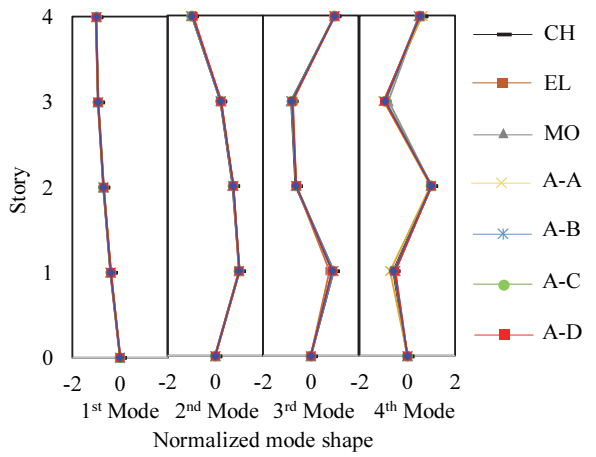


Fig. 7 Mode shape of test specimen for each excitation

Table 8 MAC values of excitations A-A and MO

MAC		Mode vector for A-A			
	Mode	1	2	3	4
Mode vector for MO	1	**1.000**	0.003	0.005	0.002
	2	0.004	**1.000**	0.075	0.106
	3	0.005	0.067	**1.000**	0.004
	4	0.016	0.036	0.001	**0.979**

4.3.2 Modal Assurance Criterion(MAC)

각 지진파의 모드벡터 해석 결과의 검증을 위하여 모드의 유사성을 평가할 수 있는 Modal assurance criterion(MAC)을 산정하였다(Miroslav et al., 2012; Kim et al., 2015). MAC는 0에서 1사이의 값을 나타내며 MAC의 결과가 1에 가까울수록 모드벡터가 상호 유사함을 나타낸다. Table 8은 입력지진파 MO와 A-A에 대한 MAC 결과를 제시하고 있는데 모드벡터 간의 최소일치율은 98%이며, 상이한 모드벡터의 MAC 값은 거의 0에 가깝다. 이를 통해 모드벡터 추출 방식의 신뢰성을 입증하였다.

5. 구조모델 구축 및 실험과 비교

본 연구에서는 4층 골조 시험체를 기반으로 4자유도 구조모델을 Fig. 8과 같이 구축하였다. M_1~M_4는 각 층의 질량이며 k_1~k_4는 각 층의 기둥 강성이다. 실험체의 기둥 강성 산정 시

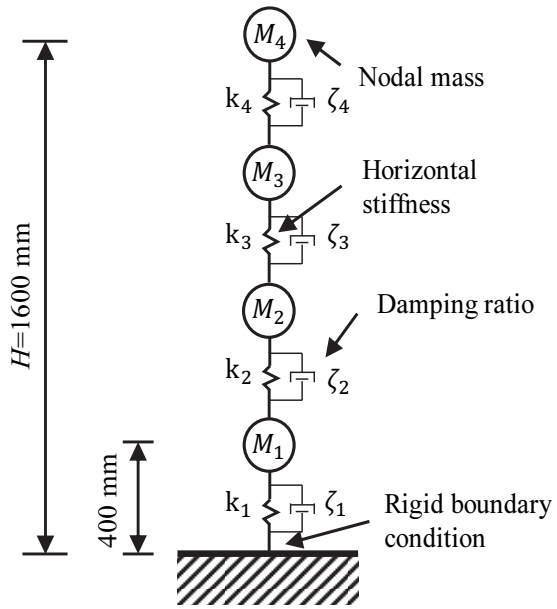


Fig. 8 4-DOF modeling of test specimen

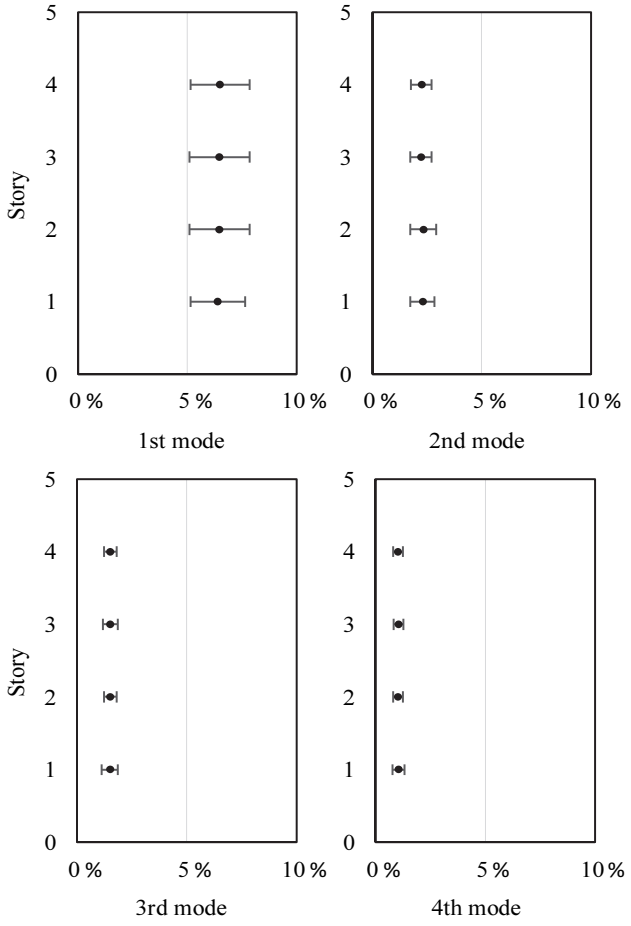


Fig. 9 Damping ratio and standard deviation

Table 9 Designed values according to 4-DOF modeling

Parameters	Unit	Values
$M_1^{(1)}$	kg	11.64
$M_2^{(1)}$	kg	11.86
$M_3^{(1)}$	kg	11.86
$M_4^{(1)}$	kg	11.55
$k_1 \sim k_4$	kN/m	16.9

(1) measured separately

Table 10 Natural frequency of shaking table test results and analysis results

Mode	Shaking table test results	Analysis results
1	1.9 Hz	2.1 Hz
2	6.0 Hz	6.1 Hz
3	9.4 Hz	9.3 Hz
4	12.4 Hz	11.3 Hz

수평부재의 무한 강성을 고려하여 기둥은 이중곡률로 거동하는 것으로 가정하였다. ζ_1~ζ_4는 각 층의 감쇠비를 제시하고 있으며 진동대 실험을 통해 도출된 감쇠비를 적용하였다. Table 9는 구조모델의 상세를 제시하고 있다. Fig. 9는 진동대 실험을 통해 식 (3)에서 도출된 각 모드별 감쇠비의 평균과 표준편차를 제시하고 있다. 각 층 감쇠비는 모두 거의 동일하였으며 1차모드를 제외한 감쇠비의 표준편차는 크지 않았다. 구조모델에 대하여, 앞서 진동대 실험에서 사용한 입력지진파 7종을 이용하여 선행시간이력해석을 수행하였다.

입력지진파를 가진한 후 구조모델의 주파수응답함수를 통해 고유진동수를 도출하였다. Table 10은 진동대 실험과 구조모델의 고유진동수 평균값을 비교하고 있다. 1~3차모드에서의 고유진동수는 매우 유사하나, 4차모드에서 9% 이내의 오차를 보였다. Fig. 10은 입력지진파 CH 가진 시 진동대 실험과 구조모델의 모드형상을 비교하여 제시하고 있으며 2, 3차모드형상에서 주로 오차가 발생하였다. MAC 도출 결과는 Table 11에 제시하고 있으며 모드벡터간의 최소 일치율은 94.1%이다. 실제 시험체가 단순 4-DOF 구조모델과 달리 접합부와 볼트의 슬립(slip) 등 다양한 영향을 받으므로 오차가 발생하며 이는 미미한 수준이다. 결론적으로 진동대 실험 결과와 구조모델 분석 결과는 유사하며 이를 통해 동적 특성 및 모드형상의 도출 방식의 신뢰성을 입증하였다.

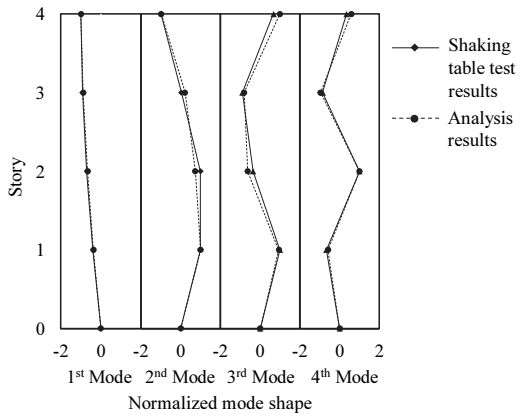


Fig. 10 Mode shape obtained from shaking table test results and analysis results

Table 11 MAC values of shaking table test results and analysis results

MAC		Mode vector obtained from analysis results			
	Mode	1	2	3	4
Mode vector obtained from shaking table test results	1	**0.999**	0.001	0.006	0.005
	2	0.003	**0.972**	0.060	0.005
	3	0.000	0.067	**0.941**	0.004
	4	0.000	0.044	0.008	**0.970**

6. 결 론

본 연구는 4층 강재 골조 실험체를 제작하여 진동대 실험을 수행하였으며, 동특성 도출 방법의 제시, 모드형상 도출 및 비교, 입력지진파의 주기 및 크기에 따른 영향 분석, 4층 골조 실험체의 설계 및 안전성 검증 등 다양한 관점의 분석을 제시하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 응답가속도 분석 결과, 입력지진파의 최대지반가속도가 클수록 최대응답가속도가 크게 도출되었다. 층수가 높아질수록 응답가속도가 크게 나타났다.

(2) 고유진동수 분석 결과, 입력지진파의 종류에 관계없이 실험체의 1~4차모드의 고유진동수는 각각 1.9Hz, 6.0Hz, 9.5Hz, 12.3Hz이다. 입력지진파의 특성, 출력가속도의 위치(층수)에 따라 고유진동수가 다소 불명확하게 나타날 수 있으나 모든 층의 분석 결과를 비교하여 모든 모드의 명확한 고유진동수 도출이 가능하다. 따라서 계측 센서의 수가 증가할수록 고유진동수 도출의 정확성이 높아진다.

(3) 반전력 대역폭법(Half-power bandwidth)을 사용하여 감쇠비를 도출하였으며 입력지진파의 주파수와 가속도 크기에 관계없이 감쇠비가 서로 유사함을 확인하였다.

(4) 모드벡터의 MAC 결과 최소 일치율은 98%로 입력지진파에 관계없이 실험체의 모드벡터가 일관되게 도출됨을 확인하였다. 모드형상은 고차모드로 갈수록 오차를 보이나 미미한 수준이다.

(5) 4자유도 구조모델을 구축하여 진동대 실험 결과와 비교하였다. 진동대 실험과 동일한 입력지진파를 가진하였으며, 주파수응답함수로부터 도출한 감쇠비를 적용하였다. 4차모드 고유진동수는 약 9% 이내의 오차를 보였으며 MAC 결과 최소 일치율 94.1%이다. 이를 통해 실험체의 동적 특성과 모드형상 도출 방식의 신뢰성을 입증하였다.

(6) 추후 도출된 동특성을 활용하여 강성 도출 방법 및 모델링 방법을 제안할 수 있다. 또한 대규모 비정형 실험체, 무선 가속도계 센서 활용을 통한 실제 건축물, 비구조요소의 적용 등 연구의 확장이 가능하다. 이러한 연구는 가속도 계측을 통한 동특성 도출, 간편 모델링 등 다양한 방면에 활용이 가능하다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단 대학중점연구소지원사업의 연구비 지원(2020R1A6A1A03044977)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Kim, J. Y., Kim, D. Y., and Kim, S. D. (2007), Evaluation of the Dynamic Properties of Structures through the Measurement of Wind-induced Responses, *Architectural Institute of Korea*, 51(5), 193-196 (in Korean).
2. Dhung, K. R., Woo, W. T., and Song, H. B. (2018), A Dynamic Characteristics and Analysis for Applying SHM of High-rise Building: Landmark Tower of Haeundae LCT, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, JAIK, 38(1), 730-731.
3. Bae, C. J., Lee, C. H., and Jun, S. C. (2020), Evaluation of seismic design force for non-structural elements considering supporting structure and non-structural element interaction, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 31(1), 139-140 (in Korean).
4. Oh, H. O., and Park, H. G. (2008), Analysis of tall buildings considered staged construction and geometry non-linearity, *Architectural Institute of Korea*, 24(7), 3-10 (in Korean).
5. Kim, H. J., Hwang, J. S., Cho, B. H., and Jo, J. S. (2009), Modal Parameter Identification of Structures based on Vibration Test, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, JAIK, 25(1), 13-20 (in Korean).
6. Hwang, S. K., Kim, H. J., Kang, N. C., and Jo, J. S. (2012), A Study on Changes of Dynamic Characteristics of Structures at Various Acceleration Level Using a Shaking Table, *The Wind Engineering Institute of Korea*, 16(4), 157-165 (in Korean).
7. Park, Y. S., and Park, H. S. (1985), A Study on Improving the Realiablity of a Finite Elements Model and Stiffness Damage Detection by Dynamic Characteristics Measurements, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 10(1), 157-163 (in Korean).

8. Hwang, I. H., Jeon, J. Y., and Kim, J. Y. (2013), FE Model Calibration of Myeong-dong Cathedral Using Vibration Measurement Data, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 23(11), 987-995 (in Korean).
9. Lee, S. K. (2016), Dynamic Analytical Model Identification of Structures Using Frequency Response Function, *Architectural Institute of Korea*, 18(5), 133-139 (in Korean).
10. Simoen, E., De Roeck, G., and Lombaert, G. (2015), Dealing with uncertainty in model updating for damage assessment: A review, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 56, 123-149.
11. Choi, K-K. (2010), Numerical Investigation on Cracking of Bridge Deck Slabs with Latex Modified Concrete Overlays, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(1), 77-84 (in Korean).
12. Lee, B. J. (1999), Vibration and Repair Handbook (in Korean).
13. Lee, J. Y., and Kim, D. B. (2015), Recommendation of Adequate Sampling Rate for Drop Weight Impact Test with Application of Nyquist's Sampling Theorem, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(3), 61-67 (in Korean).
14. Lee, J. E., Lee, S. J., Park, W. I., and Choi, K. K. (2022), Dynamic Characteristic of the Seismic Performance of Uninterruptible Power Supply with Combined Isolator Using Shaking Table Test, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection,* KSMI, 26(1), 19-28 (in Korean).
15. Papagiannopoulos, G. A., and Hatzigeorgiou, G. D. (2011), On the use of the half-power bandwidth method to estimate damping in building structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 1075-1079
16. Chopra, A. K. (2007), Dynamics of structures. Pearson Education India.
17. Lee, W. S., Heo, G. H., Park, K. T., and Jeon, J. R. (2008), Identify Modal Parameter by The Output Response of Structure Using Smart Sensor System. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection,* KSMI, 12(4), 149-160 (in Korean).
18. Pastor, M., Binda, M., and Harčarik, T. (2012), Modal Assurance Criterion, *Procedia Engineering*, 48, 543-548.
19. Kim, H. J., Cho, S. J., and Sim, S. H. (2015), Finite Element Model Updating Based on Data Fusion of Acceleration and Angular Velocity, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection,* KSMI, 19(2), 60-67 (in Korean).

부 록

본 연구는 4층 강재 골조 실험체를 대상으로 진동대 실험을 수행하였다. 슬래브 강성의 증가로 하중과 변형이 기둥에 집중되므로 기둥이 탄성영역에서 거동하도록 설계되어야 한다. 기둥부재의 상세 및 계산에 사용된 물성치는 Table A1에 제시하였다. 한 층의 질량은 11.6kg로 설계하였으며, 동적 해석을 통해 가장 큰 역사지진파인 Morgan hill (PGA=0.13g)을 가진하였을 때 최대 변위는 36mm이다. 식 A1부터 식 A6에 기반하여 기둥이 받는 하중과 설계강도를 계산하였으며 이를 Table A2에 제시하였다. 이를 통해 기둥이 탄성영역에서 거동함을 확인하였다.

좌굴하중, $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2}$ (A1)

최대 축하중, $P_c = \frac{4m_s + 12m_c}{4} \times 10$ (A2)

기둥이 받는 횡하중, $P = k \times (\frac{u}{4})$ (A3)

단부모멘트, $M = P \times L$ (A4)

항복모멘트, $M_y = f_y \times Z$ (A5)

볼트의 설계전단강도, $R_n = 0.4 \times f_u n_b A_b N_s$ (A6)

Table A1 Details of column member

Parameters	Values
Width of column , b (mm)	50
Depth of column, d (mm)	3
Length of column , L (mm)	388
Modulus of elasticity, E (N/mm^2)	200,000
Moment of interia, I (mm^4)	112.5
Section modulus, Z (mm^3)	75
Stiffness of column, k (N/mm)	4.62
Mass of column, m_c (kg)	0.76
Mass of slab, m_s (kg)	7.6
Mass of floor, m_f (kg)	11.6
Yield strength, f_y (N/mm^2)	275
Tensile strength, f_u (N/mm^2)	410
Number of shear faces, N_s	1
Number of boits, n_b	2
Nominal cross-sectional area of bolt, A_b (mm^2)	78.5

Table A2 Design parameters of column member

Design parameters	Values
Buckling load, P_{cr} (N)	368.8
Load on the lowest column, P_c (N)	98.8
Yield moment, M_y (N·mm)	20,625
End moment, M(N·mm)	16,141.5
Design shear strength of high tensile bolts, R_n (N)	12,874
Lateral force of column, P(N)	41.6

Received : 04/06/2023
Revised : 06/19/2023
Accepted : 06/22/2023

요 지 : 구조물의 내진설계 시 지진력은 구조모델 수립 및 구조해석에 기반하여 산정되는데, 구조모델이 실제 구조물의 동특성치를 정확하게 반영하기 위해서는 실제 계측을 통한 보정이 요구된다. 본 연구에서는 실제 건물을 모사한 4층 골조 시험체를 대상으로 각 층별 가속도계를 부착하여 1축 진동대 실험을 수행하였다. 실험체의 주기는 실제 건축물의 주기와 유사하며, 수평부재의 무한강성을 고려하여 기둥은 이중곡률로 거동하도록 설계하였다. 입력지진파의 특성에 따른 영향을 고려하기 위해 다양한 주파수와 가속도 크기를 갖는 역사지진파와 인공지진파를 가력하였다. 동적응답신호를 통해 얻은 주파수응답함수를 이용하여 고유진동수와 감쇠비, 모드벡터를 도출하였으며, Mode assurance criterion(MAC)를 통해 입력지진파에 따른 모드벡터 간의 편차를 확인하였다. 또한 진동대 실험을 통해 도출된 감쇠비를 구조모델에 적용하였으며, 실험 결과와의 비교를 통하여 동특성 도출 방법을 검증하였다.

핵심용어: 다자유도계 구조물, 진동대 실험, 동특성치도출, 모드벡터, FRF 해석