Vol.37, No.3, pp.141-149, June, 2025

Check for updates ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054 DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2025.37.3.141

# 바닥진동 제어를 위한 현수식 동조질량댐퍼의 내진성능평가

이상섭<sup>1</sup> · 오근영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공학박사, 연구위원, 한국건설기술연구원, <sup>2</sup>공학박사, 수석연구원, 한국건설기술연구원

# Seismic Evaluation Performance of the Suspended Tuned Mass Damper Installation System for Controlling Floor Vibration

Lee, Sang Sup<sup>1</sup>, Oh, Keunyeong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Ph. D., Research Fellow, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

<sup>2</sup>Ph. D., Senior Researcher, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,

Goyang, 10223, Korea

Abstract – Shake-table tests were conducted according to ICC-ES AC156 to evaluate seismic performance of a suspended TMD installation system for modular building floors. Structural deflection and fundamental frequency evaluated by MIDAS Gen showed negligible deformation under design loads. A Required response spectrum (RRS) was established with a maximum spectral acceleration of 0.555 g, and artificial earthquake motions were generated and scaled incrementally (80 %–150 % of reference acceleration). No damage occurred even at the maximum tested intensity (150 %, 0.833 g). The fundamental frequency (96.9 Hz) of tray frame substantially exceeded the recommended minimum (20 Hz), indicating minimal resonance risk. Acceleration amplification factors reached up to 1.49 (X-dir.) and 1.29 (Y-dir.), emphasizing directional considerations for practical seismic applications.

Keywords – Shake-table test, Suspended installation system, Required response spectrum, Artificial earthquake motion, Acceleration amplification factor

## 1.서론

세계적으로 주택 건설의 효율성과 경제성을 높이기 위한 모듈러 건축물이 확산되고 있다. 모듈러 건축물은 공장에서 제작된 개별 모듈을 현장에서 조립하여 건설하 는 방식으로 공기 단축과 품질 향상 등의 장점이 있지만, 바닥 슬래브의 연속성 부족과 가장자리에 배치되는 보의 질량 차이 등으로 철근콘크리트 골조에 비해 강성이 상 대적으로 낮아 바닥 진동에 취약해질 수 있다<sup>[1]-[3],[5]</sup>.

앞선 연구<sup>[2]-[4]</sup>에 따르면 모듈러 건축물의 바닥 진동 은 차량 운행, 보행, 세탁기 사용 등 일상적인 생활 활

\*Corresponding author.

Tel. +82-31-910-0647 Fax. +82-31-910-0392 E-mail. oky88@kict.re.kr 동에서도 거주자의 불편을 유발하는 수준으로 나타날 수 있다. 특히 학교용 및 주거용 모듈러 건축물에서는 바닥 진동이 더욱 문제가 될 수 있어 이를 해소하는 방 안이 제시되거나 새로운 기술이 개발될 필요가 있을 것이다<sup>[1],[3]</sup>.

바닥 진동 문제를 해결하는 방안 중 하나로 동조질량 댐퍼(Tuned Mass Damper, TMD)가 널리 활용되고 있 다. TMD는 구조물의 특정 진동수를 목표로 하여 공진 을 억제하고 진동을 저감시키는 장치로 초고층 건축물, 교량 등 다양한 구조물의 진동 제어에 적용된 사례가 있 다. 또한 기존 연구 사례에서 비대칭 TMD<sup>[6]</sup> 및 스마트 가변 감쇠력을 가진 TMD<sup>[7]</sup> 등과 같은 기술이 개발되어 바닥 진동 제어 분야에서 그 성능을 평가한 바 있다.

한편, 비구조요소는 지진과 같은 자연재해 발생 시 심각한 인명 피해와 경제적 손실을 발생시킬 수 있는 중요한 요소로 취급되고 있으며, 비구조요소의 손상 방 지와 내진성능 확보가 필요한 것으로 인식되고 있다<sup>[8]</sup>.

Note.-Discussion open until December 31, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 31, 2025; revised on June 2, 2025; approved on June 5, 2025. Copyright © 2025 by Korean Society of Steel Construction

이에 따라 국내에서는 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)<sup>[9]</sup>을 통해 건축물에 설치되는 주요 비구조요소가 설계지진력에 대해 충분한 내력을 가지도록 설계 기준 과 평가 절차를 제시하고 있다.

이 연구에서는 중량물인 TMD를 모듈러 건축물 바 닥에 장착하였을 때 지진 안전성 검증에 초점을 맞추었 다. 기존의 TMD의 경우 목표 고유주파수를 도달하지 못할 경우 스프링 교체 또는 중량 조절 등을 통하여 목 표 고유주파수를 설정하지만, 본 연구의 대상이 되는 TMD의 경우는 TMD 내부에 설치된 강성조절장치를 통하여 고유주파수를 조절하여 복잡한 튜닝 과정 없이 원활하게 강성을 조절할 수 있는 장점을 지니고 있다. 이 TMD의 목표 고유주파수는 5.1 Hz-6.9 Hz 범위로 조절이 가능하고 감쇠비는 약 5 %이며, 바닥 하부에 현 수식으로 설치되는 방식으로 TMD를 포함한 장치의 총무게는 약 3 kN이다<sup>[10]</sup>. 바닥 하부에 설치되는 특성 상 지진이 발생하였을 때 설치 시스템이 탈락하게 되면 아래층 거주자에게 심각한 인명 피해를 줄 수 있다. 따 라서 이 연구에서는 현수식 TMD 설치 시스템을 비구 조요소로 간주하고, 지진에 대한 안전성을 검증하기 위 해 진동대 실험을 계획하고 수행하였다. 이 연구의 현 수식 설치 방식 TMD는 단순히 줄에 매달리는 구조가 아니라 바닥 장선에 강성이 매우 큰 트레이 프레임(tray frame)을 긴 볼트를 이용하여 견고하게 고정하는 형식 이다. 이는 TMD가 효과적으로 진동을 전달받고 성능 을 극대화하기 위해 바닥과의 견고한 연결이 필수적이 기 때문이다.

이 논문에서는 TMD 설치 시스템의 구조적 특성과 진동대 실험 조건 및 방법, 그리고 실험을 통한 시스템 의 지진 발생 시 안전성과 성능 평가 결과 등을 구체적 으로 서술하고, 이를 통해 모듈러 건축물의 비구조요소 내진설계 및 평가 기준에 필요한 실험적 자료를 제시하 고자 한다.

## 2. 현수식 TMD 설치 시스템

2.1 현수식 TMD 설치 시스템의 구성 및 장착 방법

현수식 TMD 설치 시스템은 각형강관 프레임(트레 이 프레임)과 힌지볼트를 이용해 모듈러 바닥 장선에 현수식으로 설치하는 방식으로 Fig. 1과 같이 모듈 바 닥의 장선에 장착된다. 장착은 리프팅 장치를 이용해 트레이 프레임을 장선 하부 공간으로 들어 올려 C형강 장선 플랜지에 천공된 슬롯에 힌지볼트를 일으켜 끼워 넣고, 너트를 체결하여 고정하는 방식으로 이루어진다. 장착된 후 지진 등 진동에 의한 너트 풀림으로 힌지볼 트가 슬롯에서 분리되는 것을 방지하기 위해 별도의 안 전용 와셔를 장선마다 최소 1개씩을 체결하여 설치 시 스템이 탈락되는 것을 예방할 수 있도록 하였다.

트레이 프레임에 탑재되는 TMD의 크기는 하부판을 기준으로 1,280×550×150 mm이고, 부가 질량 240 kg 을 포함한 무게는 약 2.8 kN으로, 모듈러 건축물의 층 간대에서 공간적 간섭이 없도록 비교적 얇게 설계되었 다. 트레이 프레임은 SRT 275 □-100×50×4.5 규격의 각 형강관을 사용하여 Fig. 2와 같이 제작되었다. 트레이 프레임의 주요 설계 인자로는 TMD 하중에 의한 처짐 최소화와 시스템 자체의 경량화가 중요하게 고려되었 다. 트레이 프레임은 세로 부재와 가로 부재로 이루어 져 있으며, 부재 간 간격과 정확한 위치를 설정한 후 임



Fig. 1. Mounting method of TMD installation system



Fig. 2. Shape and dimensions of tray frame

시 용접을 수행하여 고정하고, 최종적으로 모든 접합부 에 전면적인 모살 용접을 실시하였다. 트레이 프레임의 마구리에 용접된 힌지볼트와 힌지베이스는 트레이 프 레임과 모듈 바닥 장선을 연결하는 주요 연결 부품으로 재질은 S45C이고, 부식 방지를 위한 산화철 피막 처리 가 되어 있으며, M16 미터보통나사의 규격을 갖는다. 총 8개의 힌지볼트가 사용되며, 볼트 1개당 약 62.8 kN 의 인장내력을 보유하고 있어 TMD와 트레이 프레임 의 전체 무게인 약 3 kN 대비 충분한 안전율을 확보하 였다.

#### 2.2 설치 시스템의 처짐 및 고유진동수 특성

진동대 실험에 앞서 현수식 TMD 설치 시스템의 구 조적 영향을 평가하기 위해 설치 시스템의 처짐과 고유 진동수를 MIDAS Gen를 이용하여 해석적으로 조사하 였다.

먼저 트레이 프레임 자중과 TMD 하중에 따른 처짐 해석을 실시하였다. 트레이 프레임과 힌지볼트의 기하 학적 모델을 생성한 후 힌지볼트 단부를 변위만 구속하 는 경계조건을 설정하였다. 하중은 트레이 프레임의 자 중과 TMD의 하중을 안전 측에서 3 kN으로 가정하여 트레이 프레임에 작용시켰다. Fig. 3에 나타낸 해석 결 과에서 트레이 프레임의 자중에 의한 처짐은 0.0015 mm이고, TMD 하중에 의한 처짐은 0.0118 mm로 나타 났다. 이 값들은 모두 육안으로 확인할 수 없을 정도로 매우 미미한 수준으로 구조적 안정성에 유의미한 영향 을 미치지 않는다고 평가할 수 있다.

한편, 트레이 프레임의 각형강관에 비해 힌지볼트의 강성이 작아 공진 현상에 취약할 수 있다. 진동이 가해 졌을 때 공진 현상이 발생할 가능성을 평가하기 위해 모드 해석도 수행하였다. 트레이 프레임은 힌지볼트와 너트를 통해 장선에 장착되는 방식이므로 힌지볼트 연 결부의 회전 자유도를 구속하지 않고 변위 자유도만 을 구속하는 경계조건을 설정하여 보다 정확한 모드 해석을 진행하였다. Table 1에 정리한 모드 해석 결과 에서 트레이 프레임의 기본 고유진동수는 96.9 Hz로 이 수치는 비구조요소의 공진 방지를 위한 ICC-ES AC156<sup>[11]</sup> 및 ASCE 7-16<sup>[12]</sup>에서 권장하는 최소 기준인 20 Hz를 초과하여 공진 가능성은 낮은 것으로 평가되 어 상사의 법칙(similitude law)을 적용하여 고려하지



Fig. 3. Deflection analysis of installation system

Table 1. Modal analysis results of tray frame

Mode No.	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	96.9	0.0103
2	97.8	0.0102
3	116.0	0.0086

않았다.

### 3. 현수식 설치 시스템의 진동대 실험

#### 3.1 비구조요소의 지진 안전성 평가 기준

국내에서는 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진 이후 비구조요소의 내진성능에 대한 평가 기준이 강화 되었다. 특히 포항 지진 당시 외벽, 천장, 내부 마감재와 같은 비구조요소의 손상이 큰 피해를 초래하면서 관련 법과 규정이 개정되었다. KDS 41 17 00(2021년 개정 판)<sup>[9]</sup>에 따르면 비구조요소는 건물 사용자의 안전과 재 산 보호 측면에서 중요하게 다루어져야 하며, 지진 시 움직임과 파손을 방지하기 위한 적절한 고정 장치 및 강화된 설계기준을 제시하고 있다.

국외 기준으로는 미국의 FEMA P-58<sup>[13]</sup>과 ASCE 7-16<sup>[12]</sup>이 대표적이다. FEMA P-58<sup>[13]</sup>은 건물의 구조적 요소와 비구조요소에 대한 지진 성능 평가를 통해 손실 산출 및 위험 평가를 지원하는 것을 목표로 한다. 또한 비구조요소의 지진 안전성 분석을 위해 건축적 요소, HVAC 시스템, 전기 설비 및 배관 시스템 등 다양한 요 소를 평가하며, 실험적 및 해석적 방법의 병행을 권고 하고 있다.

ASCE 7-16<sup>[12]</sup>에서는 비구조요소의 내진 설계에 대 한 명확한 지침을 제시하며, 건물의 높이, 구조물의 종



Fig. 4. Definition of parameters for calculating horizontal seismic design force (ASCE 7-16)

류, 비구조요소의 무게와 크기 등을 고려하여 수평설계 지진력(F<sub>b</sub>)을 식 (1)을 이용하여 계산하도록 규정하고 있다. 이 수식에 사용된 기호가 나타내는 의미 등을 Fig. 4에 이해하기 쉽도록 나타내었다. 또한 비구조요 소의 위치 높이비(z/h)는 비구조요소가 놓이는 위치와 설치 방식에 따라 Fig. 4를 참조하여 결정할 수 있다.

$$F_{p} = \frac{0.4 a_{p} S_{DS} W_{p}}{\left(\frac{R_{p}}{I_{p}}\right)} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right)$$
(1)

- z: 비구조요소의 위치 높이(m)
- h: 건물 전체 높이(m)

₩₀: 비

- R<sub>b</sub>: 비구조요소 반응수정계수(비구조요소의 고정 방식 에 따라 결정)
- I: 중요도계수(중요성에 따라 1.0 또는 1.5)

#### 3.2 진동대 가력 프로토콜

TMD 설치 시스템의 진동대 실험 계획은 ICC-ES AC156 Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-Table Testing of Nonstructural Components<sup>[11]</sup>의 표준 절차를 따랐다. AC156<sup>[11]</sup>에 규정된 요구응답스펙 트럼(required response spectrum, RRS)은 진동대 실험 에서 비구조요소가 경험하는 지진 하중을 모사하여 정 의한 가속도 응답스펙트럼이다. RRS는 수평(X, Y축)



Fig. 5. Required response spectrum of nonstructural components (ICC-ES AC156)

및 수직(Z축) 방향의 지진 가속도를 설치된 건물의 내 진등급과 설계 스펙트럼, 비구조요소가 위치한 층의 높 이에 따른 증폭 효과, 지진 위험도 및 지반 조건을 고려 하여 설정된다. 수평축 방향의 RRS는 강체와 유연체 비구조요소에 따라 식 (2)와 식 (3)으로 계산되며, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다.

$$A_{RIG-H} = 0.4 S_{DS} \left( 1 + 2\frac{z}{h} \right) \tag{2}$$

$$A_{FLX-H} = S_{DS} \left( 1 + 2\frac{z}{h} \right) \le 1.6 S_{DS}$$
(3)

유연체 비구조요소는 진동에 민감하여 고유진동수 가 낮기 때문에 가속도 증폭구간(1.3 Hz-8.3 Hz)에서 는 가속도 증폭계수 2.5가 추가로 곱해진다. AC156<sup>[11]</sup> 은 RRS를 0.1 Hz부터 33.3 Hz까지의 주파수 범위에서 정의하고 있다.

수직축(Z축) 방향의 가속도(Av)는 수평축 방향 가속 도(A<sub>H</sub>)의 2/3 수준으로 식 (4)와 같이 계산된다.

$$A_V = \frac{2}{3} A_H \tag{4}$$

설치 시스템의 내진성능 평가를 위한 진동대 실험에 사용될 RRS는 용인 영덕에 위치한 13층 모듈러 공동주 택을 대상으로 산정하였다. 국내 건축설계기준(KDS)<sup>[9]</sup> 에 따라 단주기 영역의 설계 스펙트럼 가속도(S<sub>ns</sub>)는 구조계산서에 제시된 0.411 g을 적용하였으며, TMD가 설치될 위치 높이(z)는 건물 전체 높이(=49.65 m)에서 1개 층 높이(3 m)를 뺀 46.65 m로 결정하였다. 이 값들

을 식 (2)와 식 (3)에 대입하여 수평축 방향의 RRS를 계 산하였고, 이 건물의 고유진동수는 1.3 Hz보다 작아 최 대스펙트럼가속도( $A_{max}$ )는 0.1 Hz와 1.3 Hz 사이에서 선형 보간하여 0.555 g로 결정되었다.

대다수의 비구조요소는 수평축에서 주된 지진하중 을 받기 때문에 실험은 진동대 가진 조건을 고려하여 수직(Z축) 방향을 제외하고 수평(X, Y축) 방향에서만 계획되었다. 가진을 위한 인공지진파는 최대스펙트럼 가속도 0.555 g를 기준으로 80 %, 100 %, 120 %, 150 % 로 진폭을 조정하여 Fig. 6와 같이 생성하였다. 생성된 인공지진파의 주요 조건은 감쇠비 5 %, 지속시간 최소 30초 이상, 난수 15,360개이며, 강진 구간은 최소 20초 이상 포함하도록 하였다.

생성한 인공지진파의 실험응답스펙트럼(test response spectrum, TRS)을 AC156<sup>[11]</sup>에서 규정한 RRS와 비교 하여 Fig. 7에 나타내었다. 저주파 영역(1.3 Hz 이하)에 서는 기준 가속도를 120 % 이상으로 조정한 경우 RRS 를 만족하거나 초과하였고, 가속도 증폭 구간(1.3 Hz-8.3 Hz)에서는 기준 가속도(100 %)부터 RRS를 초과하 였다. 1.3 Hz 이하의 저주파 영역에서 인공지진파의 응 답 스펙트럼이 RRS를 넘지 못하는 일부 구간은 TMD 의 고유파수는 매우 낮아 공진 현상의 발생 가능성이 적을 것이라 판단된다. AC156<sup>[11]</sup>의 기준에 따르면 TRS는 전반적으로 RRS를 초과하는 것이 바람직하므 로 본 연구의 진동대 가력 프로토콜은 적절하게 설계되 었다고 평가할 수 있다.

#### 3.3 진동대 실험 방법

TMD 설치 시스템의 진동대 실험은 실제 모듈러 바 닥에 설치된 상태를 최대한 정확하게 재현되도록 계 획되었다. 진동대 실험체는 TMD를 탑재한 트레이 프 레임이 실제 모듈 바닥의 C형강 장선에 현수식으로 장착되는 것이 모사될 수 있도록 Fig. 8에 나타낸 1,800×1,800×1,500 mm의 마운팅 프레임에 장착되 도록 제작되었다.

마운팅 프레임은 진동대의 면적 및 진동 제어 성능을 고려하여 부재의 단면과 배치를 설계하였으며, 주요 치 수와 상세는 Fig. 9에 나타내었다. 마운팅 프레임의 기 등과 보는 □-75×75×4.5 mm, 가새는 □-50×50×3.2 mm, 장선은 C-75×75×4.5 mm, 베이스 플레이트는 두께 15 mm 강판으로 구성되었고, 모든 부재의 항복강도는 275 MPa 이었다.

진동대 실험의 정확성을 확보하기 위해 마운팅 프레 임의 고유진동수를 MIDAS Gen을 이용한 모드 해석을 실시하였다. 마운팅 프레임의 모드 해석 결과를 고유진



Fig. 6. Artificial earthquake motions scaled for incremental shake-table test



Fig. 7. Comparison of Test Response Spectrum (TRS) and Required Response Spectrum (RRS)



Fig. 8. Shake-table test specimen configuration and measurement



Fig. 9. Detailed dimensions of mounting frame



1<sup>st</sup> mode 114.9 Hz 2<sup>nd</sup> mode 114.9 Hz 3<sup>rd</sup> mode 135.5 Hz

Fig. 10. Modal analysis results of mounting frame

동수와 함께 Fig. 10에 나타내었다. 기본 고유진동수는 114.9 Hz로 평가되어 AC156<sup>[11]</sup> 및 ASCE 7-16<sup>[12]</sup>에서 권장하는 최소 기준인 20 Hz를 충분히 초과하여 공진 의 가능성은 극히 낮다는 것을 알 수 있다.

진동대는 바닥면이 2.0×2.0 m, 최대 적재하중 50 kN, 스트로크 ±75 mm, 최대 가속도 1.0 g의 제원을 가진다. 실험은 조정된 가속도(최대가속도 0.555 g의 80 %, 100 %, 120 %, 150 %)를 갖는 인공지진파를 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 진동대의 X방향과 Y방향으로 가진 하여 진행하였다. 가속도 측정을 위해 3축 가속도계를 Fig. 8과 같이 진동대, 마운팅 프레임, 트레이 프레임 및 TMD에 설치하였다.

## 4. 현수식 설치 시스템의 지진 응답 분석

#### 4.1 손상 정의 및 관찰 결과

AC156<sup>[11]</sup> 기준에서는 비구조요소의 진동대 실험 후 손상 여부를 직접 눈으로 평가하도록 하고 있지만, 명 확한 정량적 손상 기준은 제공되지 않고 있다. 이로 인 해 손상의 정도를 판단하기 위한 객관적 기준이 없어 실험 결과를 일관되게 평가하기 어렵다. 따라서 이 연 구에서는 TMD의 현수식 설치 시스템에 대해 실험 과 정에서 나타날 수 있는 손상 수준을 「경미(허용 가능한 수준)」와 「심각(허용 불가능한 수준)」의 구분에서접합 부의 미세한 균열(육안으로 측정 불가한 경우), 구성 요 소들의 약간의 움직임 등을 「경미(허용 가능한 수준)」 으로 정의하였으며, 육안으로 식별이 가능한 접합부의 균열과 구성 요소들의 과도한 움직임이 발생하였을 경 우에는 「심각(허용 불가능한 수준)」으로 정의하였다.

손상의 평가는 주요 구성 요소별로 트레이 프레임, 마운팅 프레임 및 접합 요소, TMD 본체로 구분하였으 며, 각 구성 요소별 예상되는 손상 유형을 Table 2에 정 리하였다.

X방향과 Y방향으로 각각 80 %, 100 %, 120 %, 150 % 로 조정된 인공지진파가 가진되는 전체 과정 동안 손상 을 관찰하였다. Fig. 11과 같이 최대 가진(150 %) 시점 과 실험 종료 후의 상태를 육안 및 사진 촬영으로 상세 히 조사하였다. 모든 실험 조건에서 구성 요소의 변형,

 Table 2. Definition of allowable damage for suspended TMD installation system

Components	Level	Typical damage
Tray frame	Minor (allowable)	Minor damage to hinge bolts
		Minor damage to tray frame
	Severe (unallowable)	Severe damage to hinge bolts
		Severe damage to tray frame
Mounting frame and connecting elements	Minor (allowable)	Minor damage to mounting frame
		Minor damage to joists
	Severe (unallowable)	Severe damage to mounting frame
		Severe damage to joists
Tun ed Mass Damper (TMD)	Minor (allowable)	Minor damage to TMD
	Severe (unallowable)	Severe damage to TMD



Fig. 11. Key stages of shake-table test for suspended TMD installation system (150 % intensity)

접합부 균열, 볼트 풀림 등의 경미한 손상마저도 관찰 되지 않았다. 이는 트레이 프레임을 이용한 설치 시스 템의 내진성능이 실험 조건 내에서 안정적으로 확보됨 을 나타내며 이 시스템이 실질적인 지진 환경에서도 우 수한 성능을 발휘될 것으로 평가할 수 있다.

향후 연구에서는 제한적 항복이나 경미한 손상에 대 한 구체적이고 정량적인 기준의 설정을 통해 실험 결 과의 일관성과 명확성을 더욱 향상시킬 필요가 있을 것이다.

#### 4.2 가속도 증폭 계수 분석

현수식 TMD 설치 시스템이 지진 하중을 받을 때 발 생하는 가속도 증폭을 평가하기 위하여 진동대 실험에 서 측정된 데이터를 활용하여 가속도 증폭 계수를 분석 하였다. Fig. 8과 같이 X방향과 Y방향에 대해 트레이 프레임과 마운팅 프레임의 전면부에 부착된 3축 가속 도계를 이용하여 각 지점에서 가속도를 측정하였다. 동 일한 높이에서 측정된 데이터는 마운팅 프레임의 가속 도를 기준으로 하여 트레이 프레임의 가속도를 정규화 함으로써 가속도 증폭 계수를 산정하였다. 분석 결과는 Fig. 12에 비교하였으며, X방향의 가속도 증폭 계수는 1.33에서 최대 1.49로 나타났으며, Y방향의 경우는 1.09에서 최대 1.29로 나타났다. Y방향에서 TMD를 설 치할 때에 힌지볼트가 베이스에 체결이 원활하게 하기 위하여 힌지볼트의 직경만큼 일부 구간을 오픈하였으



suspended TMD installation system

며, 설치 후에는 와셔와 너트로 고정하였다. X방향과 Y 방향의 증폭 계수에 대한 차이는 상기의 힌지볼트와 베 이스 간의 설치 시 발생되는 미세한 유격 때문으로 판 단되며, 이는 동조질량댐퍼 시스템이 설치될 방향에 따 라 지진력에 대한 상대적 취약성이 있음을 의미한다.

## 5. 결론

이 연구에서는 모듈러 건축물 바닥에 현수식으로 설 치되는 TMD의 설치 시스템에 대한 지진 안전성을 평 가하기 위해 ICC-ES AC156<sup>[11]</sup> 기준에 따라 진동대 실 힘을 수행하고 손상 관찰 및 가속도 응답 특성 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 현수식 TMD 설치 시스템은 기준 가속도의 최대 150 % (0.833 g)까지 가력한 진동대 실험 조건에 서도 힌지볼트의 풀림이나 슬립, 부재의 변형 및 용접부 균열 등 경미한 손상조차 발생하지 않으 며, 이것은 시스템의 구조적·기능적 안정성이 높 고, 설계된 설치 방식이 지진에 대해 충분히 안전 한 내진성능을 확보했음을 나타낸다.
- (2) 현수식 설치 시스템의 기본 고유진동수는 모드 해석 결과 96.9 Hz로 나타났으며, 이는 비구조요 소의 공진 현상 방지를 위해 ICC-ES AC156 및 ASCE 7-16에서 권장하는 최소 기준인 20 Hz를 크게 초과하는 값으로 설치 시스템이 실제 지진 발생 시 공진으로 인해 과도한 응답이나 손상을 받을 가능성은 매우 낮은 것으로 평가된다.
- (3) 현수식 설치 시스템의 가속도 증폭 계수는 X방향에서 1.33-1.49, Y방향에서 1.09-1.29로 측정되었으며, 이는 설치 방향에 따라 동적 응답 특성이 달라질 수 있음을 나타내는 것으로 이러한 차이는 주로 트레이 프레임과 힌지볼트 연결부 사이의 미세한 유격 때문으로 분석되며, 실제 현장에 적용할 때 설치 방향에 따른 가속도 증폭 특성을 충분히 고려한 설계가 이루어져야 함을 시사한다.

## 감사의 글

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 수행된 한국건설기술연구원 주요사업의 결과물임(No.202400 90-001 & No.20250116-001).

### 참고문헌(References)

- Oh, K.Y., and Lee, S.S. (2024) An Analysis on Floor Vibration According to the Floor System of Steel Module, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.4, pp.209–217 (in Korean).
- [2] Lee, E.J., Lee, M.J., and Hyoun, C.K. (2019) Evaluations of Dynamic Characteristics and Floor Vibration Serviceability for Stacked Modular House, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, KIAEBS, Vol.13, No.6, pp.473–480 (in Korean).
- [3] Chun, Y.S., Park, J.Y., Chun, C.Y., and Kim, G.D. (2013) Evaluation for Vibration Performance in House Modular Mock-up, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.25, No.2, pp.107–108 (in Korean).
- [4] Chun, Y.S., Bang, J.D., Kim, G.D., and Yoo, S.L. (2014) Performance Evaluation of the Floor Impact Sound Insulation in Steel Framed Modular House, *LHI Journal* of Land, Housing, and Urban Affairs, Land & Housing Research Institute, Vol.5, No.2, pp.81–89 (in Korean).
- [5] Go, A., Lee, C.H., and Kim, S.Y. (2014) Enhancing Robustness of Floor Vibration Control by Using Asymmetric Tuned Mass Damper, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.177–189 (in Korean).
- [6] KIIT (2017) Developed Smart Tuned Mass Damper with Adaptive Variable Damping Force, R&D Report (JF-17-0150), Korea Institute of Industrial Technology (in Korean).
- [7] Jeong, J.M. (2011) A Study on TMD Application for the Floor Vibration Reduction of Structure, Master's Thesis, Hanyang University (in Korean).
- [8] Applied Technology Council (2011) Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage - A Practical Guide (FEMA E-74), Federal Emergency Management Agency, USA.
- [9] MOLIT (2022) Korean Design Standard: Seismic Design Standards for Buildings (KDS 41 17 00), Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [10] KICT (2024) Development of Stiffness Adjustable Tunned Mass Damper (TMD) to Reduce Floor Vibration in Modular Buildings, R&D Report (KICT 2024-056), Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (in Korean).
- [11] International Code Council (2010) Acceptance Criteria

for Seismic Certification by Shake-Table Testing of Nonstructural Components (ICC-ES AC156), USA.

[12] American Society of Civil Engineers (2017) *Minimum* Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16), USA.

[13] FEMA (2018) Seismic Performance Assessment of Buildings (FEMA P-58), (2nd Ed.), Volumes 1-3, USA.

핵심용어 : 진동대 실험, 현수식 설치 시스템, 요구 응답 스펙트럼, 인공지진파, 가속도 증폭 계수

**요 약**: 모듈러 건축물 바닥에 현수식으로 설치되는 강성 조절형 TMD 설치 시스템의 지진 안전성을 ICC-ES AC156 기준의 진동대 실험으로 평가하였다. 설치 시스템의 처짐과 고유진동수는 MIDAS Gen 해석을 통해 평가하였고, 처짐은 매우 미미했다. 요구 응답 스 펙트럼(RRS)을 계산하여 최대 스펙트럼 가속도(0.555 g)를 도출하였고, 이를 반영한 인공지진파를 생성하여 피크(peak) 가속도를 기 준 가속도의 80 %-150 %로 조정하며 실험하였다. 실험 결과 최대 가속도(150 %, 0.833 g)에서도 손상은 없었으며, 기본 고유진동수 (96.9 Hz)는 최소 기준(20 Hz)을 초과하여 공진 위험도 매우 낮았다. 가속도 증폭 계수는 최대 X방향 1.49, Y방향 1.29로 나타나, 설치 방향에 따른 특성을 고려한 설계가 필요하다.