

건축구조물의 2방향 진동제어를 위한 TLMD 제어성능평가

Performance Evaluation of Tuned Liquid Mass Damper for Reducing Bi-directional Responses of a Building Structure

허재성* · 이성경* · 박은천* · 이상현* · 김홍진** · 조지성*** · 조봉호**** · 민경원†

Jae-Sung Heo, Sung-Kyung Lee, Eun Churn Park, Sang-Hyun Lee, Kyung-Won Min, HongJin Kim, Ji-Seong Jo, and Bong-Ho Cho

Key Words : Real-Time Hybrid Shaking Table Test(실시간 하이브리드 진동대 실험법), Two-way Tuned Liquid Mass Damper(TLMD)(2방향 동조액체질량 감쇠기)

ABSTRACT

In this study, the control performance of a Tuned Liquid Mass Damper(TLMD) manufactured to reduce the orthogonal bi-directional responses of building structures was experimentally evaluated. the TLMD using only one control device reduce bi-directional responses of building structures by making the TLMD behave as TMD and TLCD to the strong and weak axial direction of building structures. first, the control performance was evaluated by forcing sinusoidal waves to a test model that the TLMD is installed on the scale-downed building structure. Second, the real-time hybrid shaking table test was performed to evaluate the performance of the vibration control system made up of numerical part as a scale-downed building structural model and a physical experimental part as a TLMD. the superiority of bi-directional vibration control performance of the manufactured TLMD was verified by comparing the uncontrolled and controlled results of these tests

1. 서 론

동조 질량 감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)⁽¹⁾, 동조 액체 감쇠기(Tuned Liquid Damper, TLD)⁽²⁾ 그리고 동조 액체 기둥 감쇠기(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)⁽³⁾는 초고층 구조물의 지진응답과 풍응답 제어 분야에 적용되어져 왔다. 그러나 대부분 TMD, TLD와 TLCD는 다방향의 진동을 제어하기 위해서는 2개 이상 또는 특별한 형태의 제어장치를 사용해야했다. Mahendra P. Singh⁽⁴⁾는 여러 방향에서 발생하는 지진으로 인한 건물의 비틀림을 제어하고자 방향별로 TMD를 설치하는 MTMD연구를 수행하였으며 비틀림의 제어를 위해 댐퍼의 질량비, 진동수비, 감쇠비, 설치위치 등의 최적 설계변수를 제안하였다. 그리고 Y. Fujino⁽⁵⁾ 등은 MTLD의 최적

진동수비, TLD의 최적 개수 등에 대해 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 제어장치들은 설치비용과 공사비 등이 과다해 지며 유지관리적인 측면에서 많은 문제점이 발생한다. 대만 타이페이 101의 진자형식의 TMD는 건물의 강축과 약축이 구조적으로 비슷한 특성을 가지고 있어야 한다는 제한조건이 뒤따른다. 또한 제어장치의 설치에 따른 설치공간의 많은 소요로 건물사용에 있어서 비효율성이 커지게 된다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 이와 같은 현실적 어려움을 보완하고자 1개의 제어장치만으로 건물의 강축과 약축 방향으로 각각 TMD와 TLCD로 거동하도록 하여 양방향을 동시에 제어하는 복합형 동조액체질량감쇠기(Tuned Liquid Mass Damper, TLMD)를 제안한다. 그리고 실시간 하이브리드 진동대 실험법으로 TLMD의 제어성능 평가를 수행하고자 한다. TLMD의 가장 큰 특징은 TLCD거동은 물론 TLCD 외벽과 물의 질량을 면진 고무패드의 강성을 이용하여 TMD거동이 서로 직각 방향으로 동시에 이루어지도록 설계한 것이다.

현대적 초고층 구조물에는 지진하중이나 풍하중 같은 불규칙하중이 언제라도 작용할 수 있다. 또한 초고층 구

† 교신저자 : 정희원, 단국대학교 건축공학과

E-mail : kwmin@dankook.ac.kr

Tel : (031)8005-4069, Fax : (031)8005-3755

* 정희원, 단국대학교 건축대학 건축공학과

** 정희원, 경북대학교 건설공학부 건축공학과

*** 포항산업과학연구원

**** 정희원, 포스코 기술연구소

구조물의 거동을 기존의 이론적 배경만으로 분석하여 구조물의 안정성을 확보하는 것으로는 한계가 따른다. 이에 따라 구조적으로 불안정한 구조물에 대해서는 실험을 통한 연구분석이 필히 요구되고 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 건축구조물의 서로 직교하는 2방향의 응답을 감소시키기 위해 제작된 복합형 동조역체질량감쇠기(TLMD)의 진동제어성을 실험적으로 평가하였다. 제작된 TLMD는 1개의 제어장치만을 이용하여 건물의 강축과 약축 방향에 대해서 각각 TMD와 TLCD로 거동하도록 함으로써 2방향의 응답을 동시에 제어하는 방식을 사용한다. 먼저, 축소설계된 구조물의 상부에 TLMD가 설치된 실험모델에 조화하중을 가짐으로써 제어성을 평가하였다. 다음으로, 축소설계된 구조물 모델은 수치해석하고 나머지 부분인 TLMD를 물리적인 실험체로 이용하여 전체 진동제어시스템의 성능을 평가하는 실시간 하이브리드 실험을 수행하였다. 이와 같은 실험으로부터 예측한 비제어 및 제어실험결과들을 비교하여 제작된 TLMD의 2방향 진동제어성이 우수하다는 것을 확인하였다.

특히 실시간 하이브리드 실험법은 실험체의 크기와 무게제한, 그리고 경제성으로 인한 실험용 구조물의 동적 실험의 어려움을 해결하기 위한 것이다. 특히 TLMD의 진동제어 성능평가에 있어 실제 축소건물에 설치하여 제어성을 평가하는 실험은 실험체 제작의 상사법칙적용과 많은 비용 등이 수반되는 어려움이 있으며 실험기기의 크기 및 중량 등의 문제점이 발생된다.⁽⁸⁾ 그리고 비선형성이 있어 수학적으로 정확히 모델링하기 힘든 TLD, TMD와 같은 질량형 제어기의 제어특성 및 성능확인에 매우 유용한 방법이다.

2. TLMD 실험체 개요

Fig. 1의 TLMD는 포스코 뉴송도 시티 Tower 1A에 설치될 제어장치의 1/20 크기의 축소모델이다. 모든 제반 구조해석과 설계는 미리 수행되었다. 타워의 x방향과 y방향의 고유진동수는 각각 0.182Hz와 0.162Hz이며 1차 모드 질량은 34,000ton 이다. 그리고 제어장치의 총질량은 600ton이다.

Table 1 Similitude law applied to TLMD model

Quantity	Dimension	Scaling Factor
Length	L	1:20
Mass	M	$1:20^3 = 1:8000$
Frequency(Hz)	T^{-1}	$1:1/\sqrt{20} = 1:0.223$
Damping Ratio	-	1:1

Table 1의 상사법칙을 적용하면 단자유도 구조물의 x방

향과 y방향의 고유진동수는 각각 0.82Hz와 0.73Hz이며 질량은 4,250kg이다. x방향 강성은 110,000 N/m, y방향 강성은 88,000N/m이다. x방향과 y방향 동일하게 감쇠비 2%를 적용하여 각각 x방향 감쇠계수는 910 N·sec/m, y방향 감쇠계수는 770 N·sec/m으로 하였다.

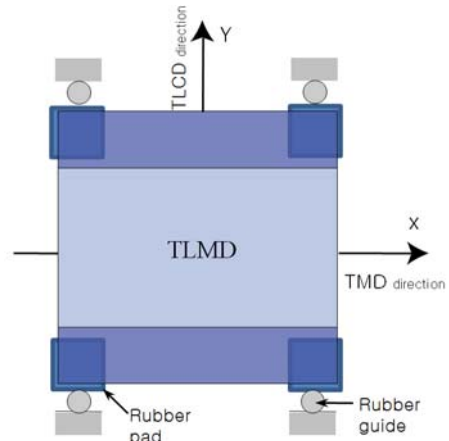


Fig. 1 Concept of TLMD

TLMD의 TMD방향과 TLCD방향의 고유진동수는 각각 0.82Hz와 0.73Hz이다. 그리고 방향별 참여질량은 각각 75kg과 32kg이며 참여 질량비는 각각 1.8%와 0.8%이다. 설계된 질량 600ton의 TMD를 축소모델의 질량비로 나누면 다음과 같이 $m=75\text{kg}$, $k=1990(\text{N/m})$ 가 된다. 그러나 시제품으로 나와 있는 면진고무의 스팩($G=4.5\text{kgf/cm}^2$)을 사용하여 계산하게 되면 면진고무의 강성은 22,183(N/m)으로 요구강성의 10배 이상이 나오게 된다. 그래서 요구강성(개당 500(N/m))을 얻기위해 DRB업체에 고무제작을 의뢰하였다. Table 2는 식(1)과 식(2)를 이용하여 정리한 TLMD의 설계변수이며 Fig.2는 완성된 TLMD 실험체이다.

$$k = m(2\pi f_1)^2 \quad (1)$$

$$L = \frac{2g}{(2\pi f_1)^2} \quad (2)$$

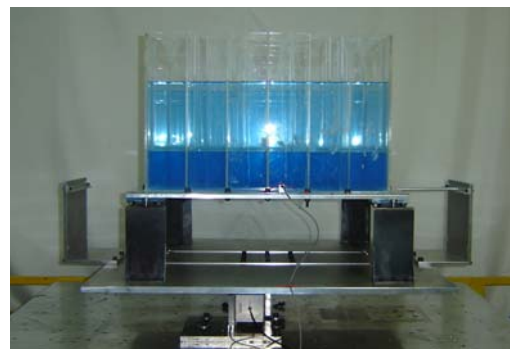


Fig. 2 Photograph of the manufactured TLMD

Table 2 Design parameters of TLMD

Rubber's stiffness	1952.24(N/m)
TLMD's Liquid length	0.98m
TLMD's mass	75kg

3. 축소 실구조물 실험

3.1 축소 실구조물 실험법

초고층 건물에 대한 TLMD의 풍응답 제어성능을 검토하기 위한 것이다. Fig.3은 실험 개념도로 하이브리드 실험법과의 차이점은 수치해석으로 대신했던 구조물 부분을 실제 구조물을 설치하여 실험이 실행된다는 점이다. 그리고 구조물에 TLMD를 설치하여 응답제어 성능을 검토하기 위해 TLMD의 x방향 TMD제어와 y방향 TLCD제어 즉, 양방향 제어성능을 보이는지 결과를 분석한다. TMD의 고유주기는 0.82Hz이며 TLCD의 고유주기는 0.73Hz이다.

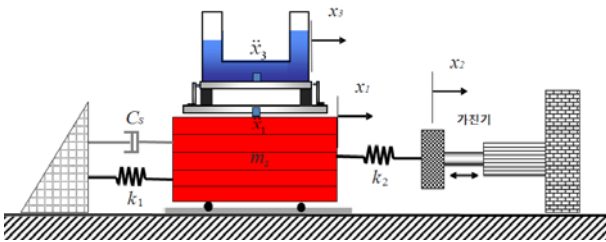


Fig. 3 Conceptual view of experimental set-up

3.2 실험 계획

Fig. 4는 반력벽에 설치된 실험체를 보여주고 있다. 왼쪽 으로부터 액추에이터, 스프링, 4ton 질량체, TMD용 고무패트, TLCD 실험체, 스프링 순으로 조립되어 있다.

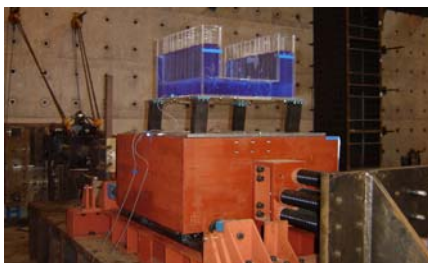


Fig. 4 Photograph of the installed TLMD

Fig. 5는 실험체에 설치된 Dynamic Actuator, Actuator LVDT, TLMD LVDT, 구조물 LVDT를 보여주고 있다. 또한 같은 장비에 가속도 센서를 설치하였다.

TLMD의 질량은 75kg이며 1,2차 모드 고유진동수는 각각 0.73Hz, 0.82Hz이다. 그리고 고무의 강성은 2000N/m이다. 그리고 질량체의 무게는 약 4.25ton이다. 강성은 Fig. 6에서와 같이 구조물 양단에 설치된 스프링 강성 k_1 과 k_2 를 합한 것이다. 1차 모드 고유주기 0.73Hz에서는 11,000 N/m의 강성을 갖는 스프링 8개를 연결하여 88,000N/m이며 2차 모드 고유주기 0.83Hz에서는 10개를 연결하여 110,000N/m이다.

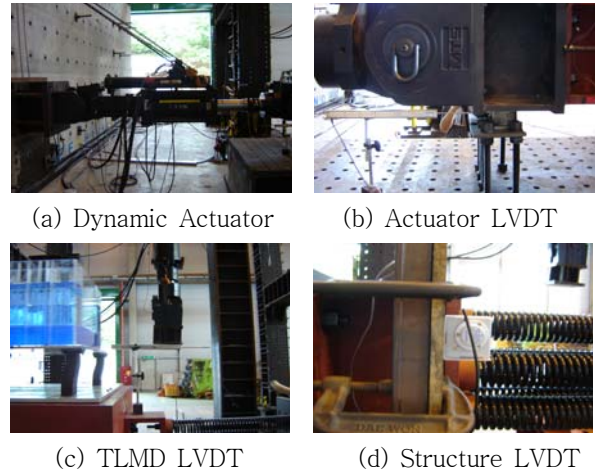


Fig. 5 Measuring instrument

$$k = m(2\pi f_1)^2 = 4250kg \times (2\pi \times 0.73Hz)^2 = 88,000 \quad (3)$$

Fig. 6 (a)의 질량체의 자유물체도에 따른 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_s \ddot{x}_1 + c_s \dot{x}_1 + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (4)$$

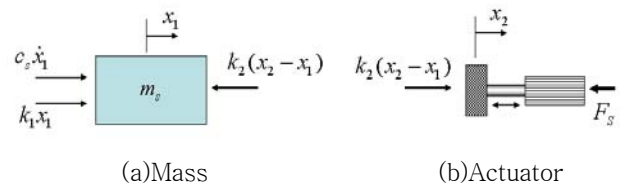


Fig. 6 Free-body diagram

Fig. 6 (b)의 가진 실험은 변위제어 형식으로 이루어지므로 가진기에 작용하는 하중 및 반력 F_s 와 상관없이 다음 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_2 = A \sin(2\pi f_e t) \quad (5)$$

여기서, A 와 f 는 각각 가진 크기와 가진 진동수(Hz)이다. 식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_s \ddot{x}_1 + c_s \dot{x}_1 + k_s x_1 = k_2 A \sin(\omega_e t) \quad (6)$$

여기서, ω_e 는 가진 각속도(rad/s) 이다.

3.3 계측계획

본 실험에서는 액추에이터(Actuator)를 사용하여 가진 변위를 4mm로 고정된 후, 0.1~3.0 Hz를 0.05 Hz 간격으로 가진하고, 구조물의 고유진동수 파악을 위해 0.70~0.89Hz 까지 0.01Hz 간격으로 200초 이상 가진하였다. 가진을 통해 나타난 구조물 및 TLMD의 응답에 대한 계측에는 가속도 및 변위 센서 등을 사용하였고, 계측된 아날로그 신호는 각각의 Amp를 통해 증폭시킨 후, AD 보드를 통해 디지털 신호로 저장한다.

4. 실시간 하이브리드 실험

4.1 실시간 하이브리드 실험법

실시간 하이브리드 진동대 실험은 TLMD와 연결된 전 구조물들을 제어장치와 제어되는 구조물로 구분하여 TLMD가 설치된 상단실험부와 하부구조물 수치해석부로 나뉘진다.

먼저 진동대에 설치된 TLMD에 진단형 로드셀을 설치한다. 그리고 가진되는 동안 로드셀의 하중응답은 제어 컴퓨터에 피드백되어 수치해석부분인 구조물의 상부층의 하중으로 실시간 가진하게 된다. 여기서 수치해석부의 구조물은 TLMD에서 계측한 제어력으로 제어된다.

4.2 수치해석부 구조물 및 진동대 동적특성 보상

진동대는 제어컴퓨터의 디지털-아날로그 변환 채널을 통한 제어신호에 따라 움직이며, 이때 제어컴퓨터 내부의 명령신호와 진동대에서 측정된 신호는 서로 상이한 증폭과 위상을 갖는다. 따라서 Fig. 7의 진동대 전달함수 정의⁽⁷⁾를 통해 Fig. 8의 동적특성 보상⁽⁷⁾을 위한 역전달함수를 설계하고 진동대와 명령신호와의 동적특성을 상쇄시키기 위해서 진동대의 백색잡음실험을 수행하였다. Fig. 9의 점선과 같이 진동대에서 측정된 가속도신호를 입력으로 하고 명령신호를 출력으로 하는 진동대의 역전달함수⁽⁷⁾를 측정하였고, Fig. 9의 실선과 같이 제어컴퓨터에 반영하기 위해 이를 필터화 하였다. 결과적으로 필터화한 5차의 진동대 역전달함수는 식(7)과 같고⁽⁷⁾ 이는 진동대와 명령신호간의 동적특성을 보정하는 역할을 한다. 그리고 Fig. 10은 진동대 역전달함수의 위상⁽⁷⁾을 나타낸다.

$$G_n^{-1}(s) = \frac{0.6s^5 + 94s^4 + 10,746s^3 + 498,200s^2 + 167,124s + 108,216}{s^5 + 204s^4 + 15,900s^3 + 8,252s^2 + 4,676s + 405} \quad (7)$$

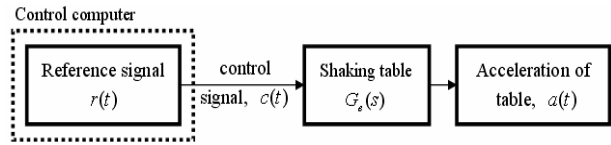


Fig. 7 Definition of the transfer function of shaking table

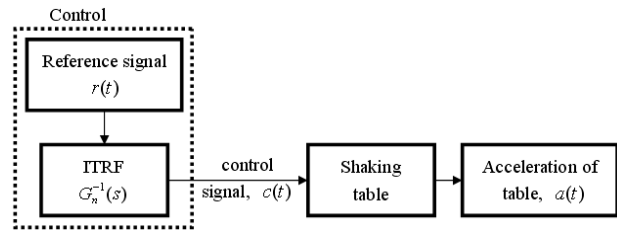


Fig. 8 Compensation using the inverse transfer function of shaking table

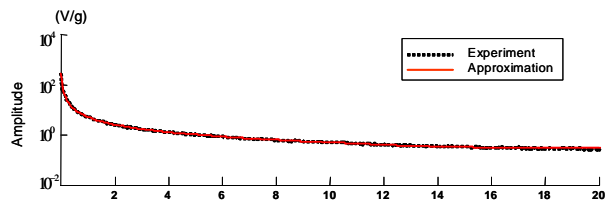


Fig. 9 The transfer function of shaking table

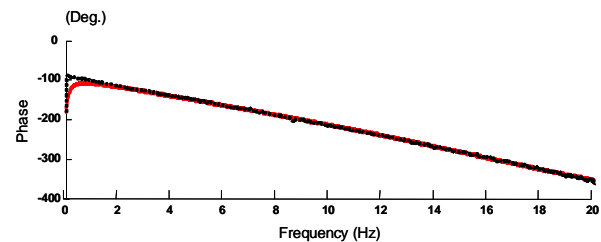


Fig. 10 Phase of inverse transfer function

Fig. 11은 El Centro 지진파를 명령신호로 진동대를 가진했을 경우 실제 진동대에 부착된 센서를 통해 계측된 가속도 응답을 비교한 것이다.⁽⁷⁾ 합리적으로 진동대의 동적특성이 상쇄되었음을 보여준다.

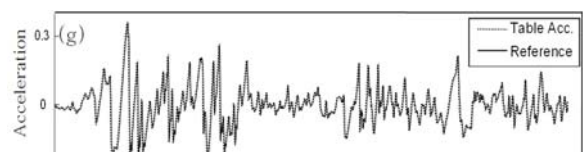


Fig. 11 Comparisons of the reference and the measured accelerations

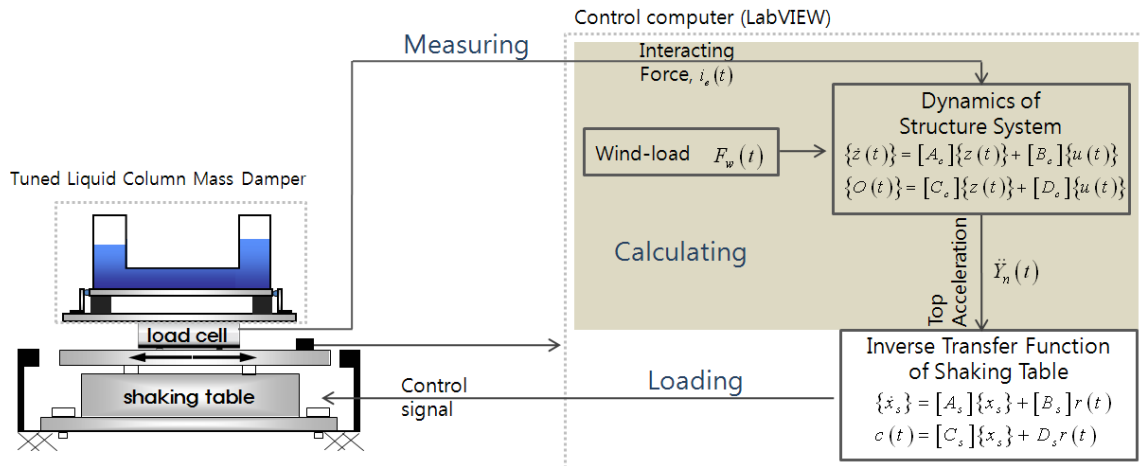


Fig. 12 Design of the controller for the real-time hybrid shaking table testing

4.3 실험 계획

실시간 하이브리드 실험에서 구조물에 가해지는 입력은 조화하중 가진으로 실험을 수행하였다. 앞절에서의 단자유도 수치해석부 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) - i(t) \quad (8)$$

여기서, m 은 구조물의 질량, c 는 감쇠계수 그리고 k 는 강성이며 $F(t)$ 는 가진하중 $i(t)$ 는 로드셀에서 측정하는 TLCD 및 TMD의 제어력이다.

식(8)을 상태공간 방정식 형태로 표현하고 1층의 절대 가속도를 출력하는 출력방정식을 구성하면 다음과 같다.

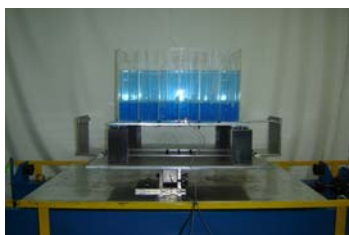


Fig. 13 Photograph of the real-time hybrid shaking table testing

$$\dot{z} = Az + Bu \quad (9)$$

$$\overline{y}_1 = Cz + Du \quad (10)$$

여기서, z 는 상태변수이며 $z = [x, \dot{x}]^T$ 이고 u 는 입력벡터로 $u = [i(t), F(t)]^T$ 이다. 그리고 \overline{y}_1 는 1층의 절대가속도이며 A, B, C, D 행렬은 각각 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1/m & 1/m \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C = [-k/m \quad -c/m] \quad (13)$$

$$D = [-1/m \quad 1/m] \quad (14)$$

수치해석부 구조물과 진동대 역전달함수를 포함하여 Fig. 14와 같이 실시간 하이브리드 실험 가진 설계를 하였다. 그리고 실시간 하이브리드 실험은 실험체에서 측정되는 응답을 실시간으로 계산되어 진동대를 구동하여 움직이므로 노이즈 및 위상오차에 치명적이다. 따라서 위상과 컴퓨터 계산오차를 최소화하기 위하여 sampling rate를 1,000Hz 환경으로 MATLAB Simulink의 Real-Time Window Target을 이용하여 설계하고 실시간 하이브리드 실험을 진행하였다.

4.4 계측계획

TLMD 실험체는 일축 진동대에 의해 가진되며, 전단형 로드셀이 진동대에 부착되어있고, 진동대의 동적특성을 모니터링하기 위해 진동대에 가속도 센서를 부착하였다. 데이터 수집과 디지털 제어는 실시간 디지털 신호 처리기 (DSP)를 통해 수행된다. 데이터 수집 보드의 주된 업무는 측정된 가속도 및 로드셀 전단력 데이터 등을 측정하여 아날로그-디지털 변환하는 기능과 제어용 프로그램에 의해 계산된 명령신호를 디지털-아날로그 변환하는 기능을 수행한다. 데이터 수집은 8채널 BNC-2110 BNC케이블 커넥터가 연결된 AD/DA보드인 NI DAQcard-6036E로 수집되는 시스템으로 이루어졌다.

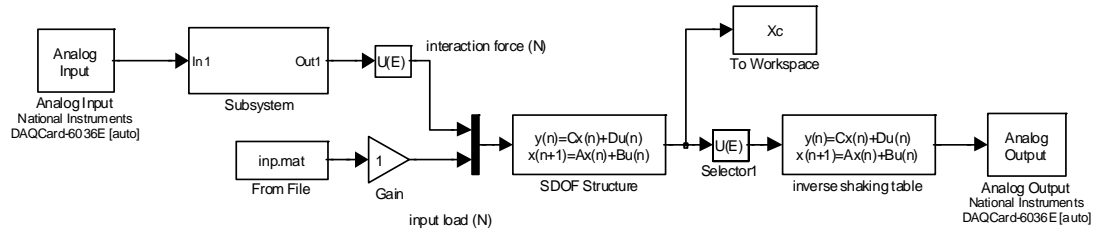


Fig. 14 Design of the MATLAB Simulink

5. 결과 분석 및 비교

5.1 축소 실구조물 실험 결과

TLMD 설치 유무에 따른 구조물의 가속도 및 변위의 제어 응답을 비교 평가 하였다.

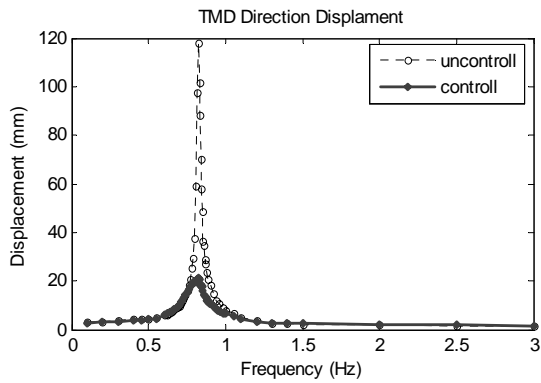


Fig. 15 Displacement in the frequency domain (TMD direction)

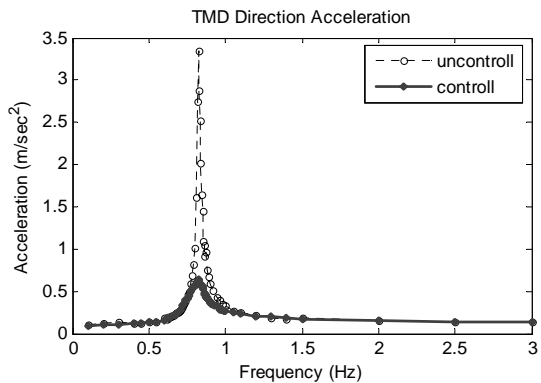


Fig. 16 Acceleration in the frequency domain (TMD direction)

Fig. 15와 16은 각각 TMD거동으로 인한 단자유도 구조물의 제어(실선) 및 비제어(점선)시의 주파수별 변위와 가속도 응답 이력을 보여준다. Fig. 15는 주파수별 최대 변위 이력으로 제어성능지수는 0.18이며 Fig. 16은 주파수별 최대 가속도 결과로 제어성능지수는 0.20이었다.

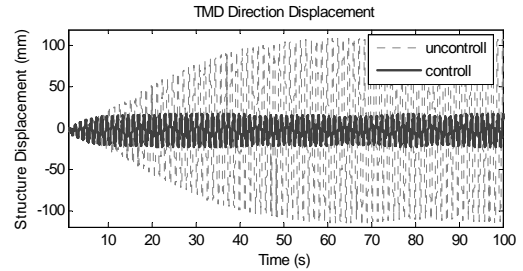


Fig. 17 Displacement in the time domain (TMD direction, 0.83Hz)

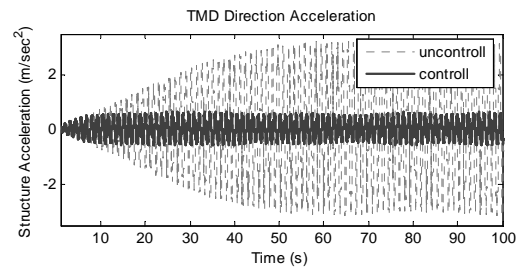


Fig. 18 Acceleration in the time domain (TMD direction, 0.83Hz)

Fig. 17과 18은 TMD거동으로 인한 단자유도 구조물의 제어 및 비제어시의 변위 와 가속도 시간이력을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 TMD의 동조된 주파수 0.83Hz에서 구조물 변위와 가속도의 제어된 효과를 볼 수 있다.

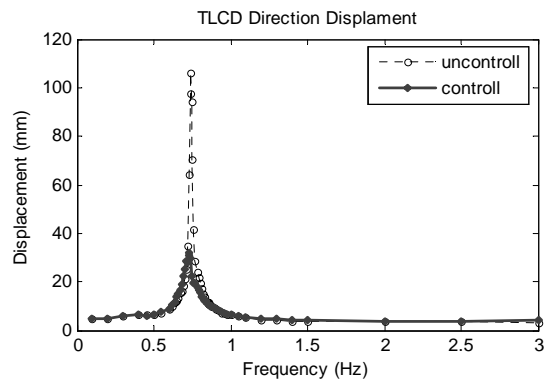


Fig. 19 Displacement in the frequency domain (TLCD direction)

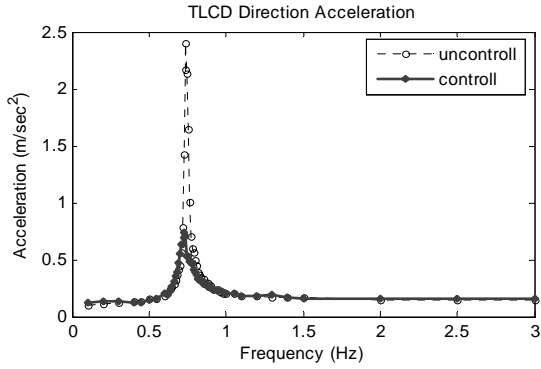


Fig. 20 Acceleration in the frequency domain (TLCD direction)

Fig. 19와 20은 각각 TLCD거동으로 인한 단자유도 구조물의 제어(실선) 및 비제어(점선)시의 주파수별 변위와 가속도 응답을 보여준다. Fig. 19는 주파수별 최대 변위 이력으로서 공진시 제어성능지수는 0.29이며 Fig. 20은 주파수별 최대 가속도로 공진시 제어성능지수는 0.30였다.

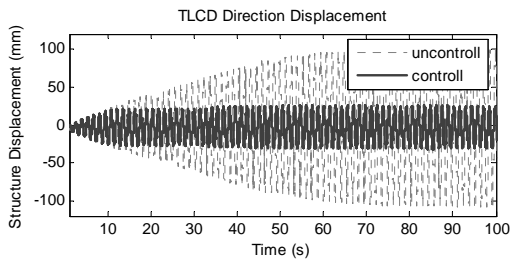


Fig. 21 Displacement in the time domain (TMD direction, 0.73Hz)

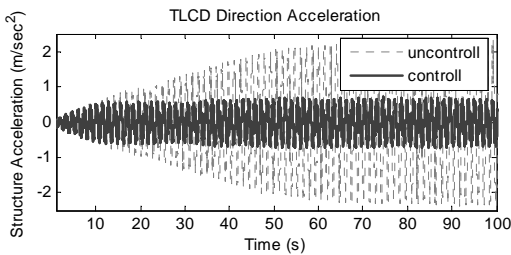


Fig. 22 Acceleration in the time domain (TMD direction, 0.73Hz)

Fig. 21과 Fig. 22에서 알 수 있듯이 TMD의 동조된 주파수 0.73Hz에서 구조물의 변위와 가속도 모두 제어된 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다.

5.2 실시간 하이브리드 실험 결과

실시간 하이브리드 실험에 따른 TLMD의 가속도 및 변위의 제어성능을 비교 평가 하였다. x방향과 y방향 제어

즉, 양방향 제어성능을 보이는지 결과를 분석한다. 그리고 제어성능으로부터 TMD와 TLCD의 고유주기가 각각 0.82Hz와 0.73Hz에서 나타나는지 확인하여야 한다.

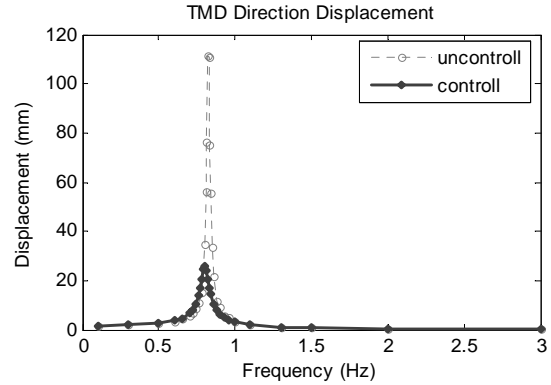


Fig. 23 Displacement in the frequency domain by the real-time hybrid testing (TMD direction)

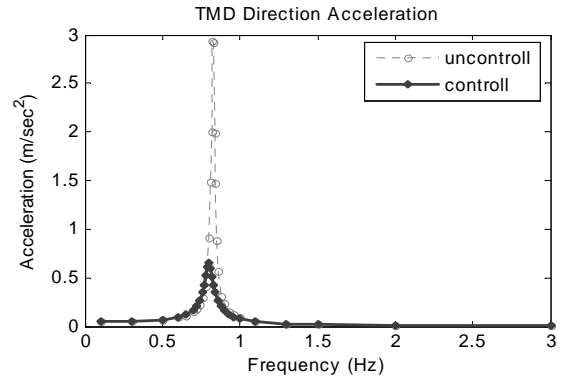


Fig. 24 Acceleration in the frequency domain by the real-time hybrid testing (TMD direction)

Fig. 23과 Fig. 24는 각각 실시간 하이브리드 실험법에 따른 TMD거동의 제어(실선) 및 비제어(점선)시의 주파수별 변위와 가속도 응답을 보여준다. Fig. 23은 주파수별 최대 변위 응답으로 제어성능지수는 0.22이며 Fig. 24는 주파수별 최대 가속도 응답으로 제어성능지수는 0.22이었다.

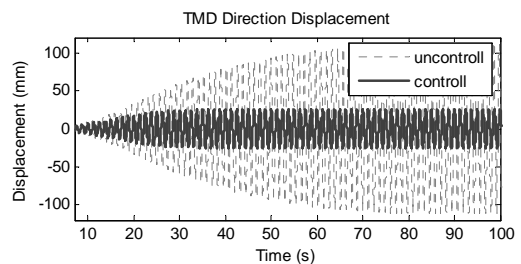


Fig. 25 Displacement in the time domain by the real-time hybrid testing (TMD direction, 0.83Hz)

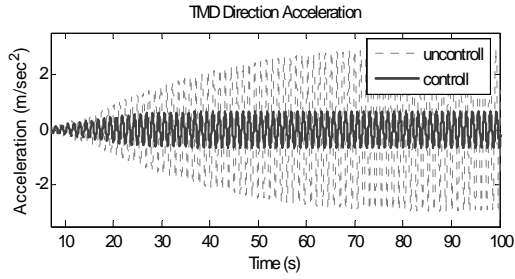


Fig. 26 Acceleration in the time domain by the real-time hybrid testing (TMD direction, 0.83Hz)

Fig. 25와 26은 실시간 하이브리드 실험법에 따른 TMD거동의 제어 및 비제어시의 변위 와 가속도 시간이력을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 TMD의 동조된 주파수인 0.83Hz에서 비제어시 최대응답의 약 78%를 제어한 효과를 변위와 가속도 모두에서 확인할 수 있다.

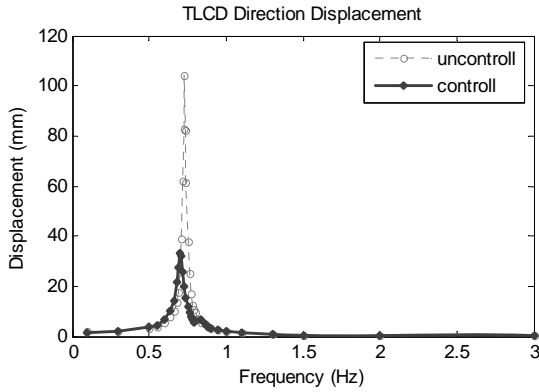


Fig. 27 Displacement in the frequency domain by the real-time hybrid testing (TLCD direction)

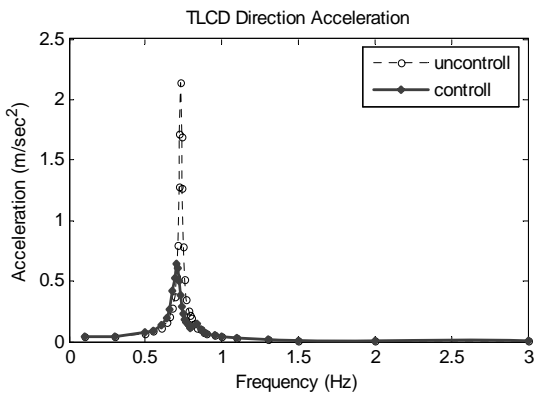


Fig. 28 Acceleration in the frequency domain by the real-time hybrid testing (TLCD direction)

Fig. 27과 Fig. 28은 각각 실시간 하이브리드 실험법에 따른 TLCD거동의 제어(실선) 및 비제어(점선)시의 주파수

별 변위와 가속도 응답을 보여준다. Fig. 27은 주파수별 최대 변위 응답으로 제어성능지수는 0.29이며 Fig. 28은 주파수별 최대 가속도 응답으로 제어성능지수는 0.30이었다. TLCD거동에서도 변위와 가속도 제어성능이 0.29와 0.30으로 거의 비슷하게 나타나는걸 확인할 수 있었다.

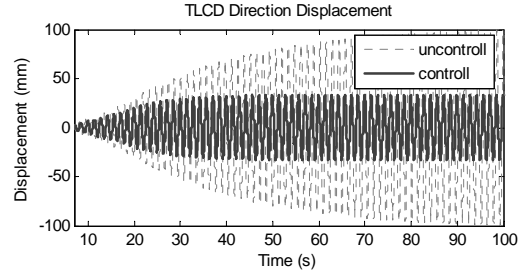


Fig. 29 Displacement in the time domain by the real-time hybrid testing (TLCD direction, 0.73Hz)

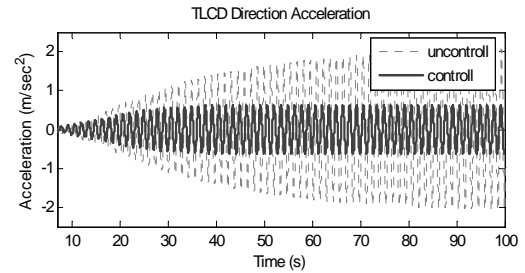


Fig. 30 Acceleration in the time domain by the real-time hybrid testing (TLCD direction, 0.73Hz)

Fig. 29와 30에서 알 수 있듯이 TLCD의 동조된 주파수인 0.73Hz에서 비제어시 최대응답의 약 70%를 제어한 효과를 변위와 가속도 모두에서 확인할 수 있다.

5.3 결과 비교

TLMD의 제어성능 평가를 위해 J_1, J_2, J_3, J_4 의 값을 축소 실구조물 실험과 실시간 하이브리드 실험 결과를 비교하였다. 이 값은 각각 식(15)~식(18)과 같다.

$$J_1 = \frac{\max(x_c(t))}{\max(x_u(t))} \quad (15)$$

$$J_2 = \frac{\max(\ddot{x}_c(t))}{\max(\ddot{x}_u(t))} \quad (16)$$

$$J_3 = \frac{rms(x_c(t))}{rms(x_u(t))} \quad (17)$$

$$J_4 = \frac{rms(\ddot{x}_c(t))}{rms(\ddot{x}_u(t))} \quad (18)$$

여기서, x_u 와 x_c 는 각각 비제어와 제어시의 변위이며 \ddot{x}_u 와 \ddot{x}_c 는 각각 비제어와 제어시의 가속도이다.

6. 결론

Table 3 Control performance of real-structure test

		TMD	TLCD
effective mass		1.8%	0.8%
Peak Value	J_1	0.18	0.29
	J_2	0.20	0.30
RMS Value	J_3	0.17	0.28
	J_4	0.17	0.27

Table 4 Control performance of real-time hybrid test

		TMD	TLC
effective mass		1.8%	0.8%
Peak Value	J_1	0.22	0.30
	J_2	0.22	0.29
RMS Value	J_3	0.23	0.31
	J_4	0.23	0.31

Table 3과 4는 각각 실구조물 실험과 실시간 하이브리드 실험을 통한 TLMD의 제어성능을 평가한 것이다. 이를 통해 실구조물 실험 결과와 하이브리드 실험 결과중 J_1 과 J_2 를 비교하였다. TLCD제어시 0.29와 0.30로 거의 비슷한 결과가 나왔으나 TMD제어시 실구조물 실험결과는 각각 0.18와 0.20였으나 실시간 하이브리드 실험결과는 각각 0.22와 0.22으로 확인 되었다. 그러나 오차가 0.2~0.4으로 아주 작았다.

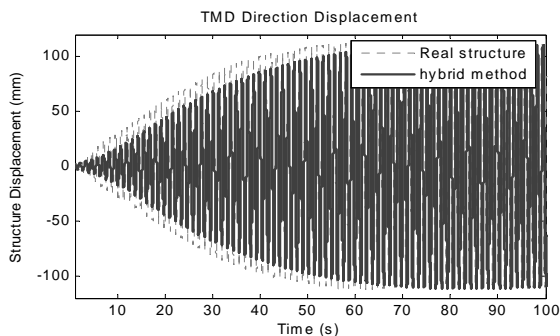


Fig. 31 Uncontrolled Displacement comparison in the time domain between the real-structure test and real-time hybrid test (TMD direction)

실구조물 실험과 하이브리드 실험을 통해 TLMD의 양방향 제어성능을 확인할 수 있었다. x방향인 TMD거동에서는 비제어시 최대응답의 약 80%를 제어하여 제어성능지수가 0.20으로 확인 되었으며 y방향인 TLCD 거동에서는 비제어시 최대응답의 약 70%를 제어하여 제어성능지수가 0.30으로 확인 되었다. 두 실험에서 모두 참여질량 대비 TLCD의 성능이 뛰어났다. 그리고 TMD와 TLCD의 동조 주파수가 각각 0.82Hz와 0.73Hz로 확인 되었다.

실시간 하이브리드 실험에 따른 의 가속도 및 변위의 제어성능을 실구조물 실험결과와 비교 평가 하였다. TLCD제어시 peak value 값으로 계산된 제어성능지수 J_1 과 J_2 는 0.29와 0.30로 0.1의 오차가 발생하였으며 TMD제어시 실구조물 실험결과와의 오차가 0.2~0.4으로 커졌으나 전체적으로 오차가 작아 하이브리드 실험 결과의 신뢰성이 높았다. 마찬가지로 RMS value 값으로 계산된 제어성능지수인 J_3 이나 J_4 간의 오차가 0.5로 발생하였으나 실험당시 TLMD의 튜닝오차와 외부환경의 변화로 인해 발생한 거라 생각된다. 그리고 수치 해석상의 실험체 질량, 강성 및 감쇠비의 미세한 오차로 Fig. 31과 같이 최고점에 도달하는 수렴시간의 차이가 발생하는 등의 이유로 이 같은 오차가 발생하였다.

후 기

이 연구는 (주)포스코건설 및 (재)포항산업과학연구원의 연구비 지원과 (주)동일고무벨트의 협조에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21사업」의 지원을 받았습니 다.

참 고 문 헌

- (1) J. P. Den Hartog, 1956, Mechanical Vibrations, 4th edn, McCraw-Hill, New York.
- (2) T. T. Soong, and G. F. Dargush, 1997, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, New York, John Wiley & Sons.
- (3) Sakai, F., Takaeda S., and Tamaki T., 1989, "Tuned Liquid Column Damper-New Type Device for Suppression of Building Vibrations", Proc. Int Conf. on Hight Rise

Building, Nanjing, China, pp.25-27.

(4) Mahendra P. Singh, Sarbjeet Singh and Luis M. Moreschi, 2002, "Tuned mass dampers for response control of torsional buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, pp.749-769.

(5) Y. Fujino, L. M. Sun, 1993, "VIBRATION CONTROL BY MULTIPLE TUNED LIQUID DAMPERS (MTLDs)", *Journal of Structural Engineering*, Vol.119, No.12, pp.3482-3502

(6) T. Haskett, B. Breukelman, J. Robinson, J. Kottelenberg, "Tuned Mass Dampers Under Excessive Structural Excitation", *Response of structures to extreme loading (Conference)*, pp.37-43

(7) Sung-Kyung Lee, 2006, "Real-Time Hybrid Shaking Table Testing Method for the control performance of a TLD", *Journal of KSNVE*, Vol.16 No.4, pp.57-63.

(8) Sung-Kyung Lee, Eun Churn Park, Kyung-Won Min, Sang-Hyun Leek, Lan Chung and Sung-Sik Woo, 2006, "Experimental Verification for the Control Performance of a TLD by using Real-Time Hybrid Shaking Table Testing Method", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.302 No.3 pp.596-612.