

실시간 하이브리드 진동대 실험법에 의한 양방향 TLMD의 진동제어 성능평가

Vibration Control Performance of a Two-way Tuned Liquid Mass Damper Using Real-time Hybrid Shaking Table Testing Method

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

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

(2007년 11월 5일 접수 ; 2008년 4월 16일 심사완료)

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

ABSTRACT

An experimental real-time hybrid method, which implements the vibration control of a building structure with only a two-way TLMD, is proposed and verified through a shaking table test. The building structure is divided into the upper experimental TLMD and the lower numerical structural part. The shaking table vibrates the TLMD with the response calculated from the numerical substructure, which is subjected to the excitations of the measured interface control force at its top story and sinusoidal waves input at its base. The results show that the conventional method can be replaced by the proposed methodology with a simple installation and accuracy for evaluating the control performance of a TLMD.

1. 서 론

제어장치의 질량을 이용하는 동조질량 감쇠기(tuned mass damper, TMD)⁽¹⁾와 동조액체 감쇠기(tuned liquid damper, TLD)⁽²⁾는 초고층 구조물의 지진응답과 풍응답 제어 분야에 적용되어져 왔다. 그러나 대부분 TMD나 TLD의 제어 범위는 1방향에

제한되어 있었으며 다방향을 제어하기 위해서는 2개 이상 또는 특별한 형태의 제어장치를 사용해야 했다. 실례로 Mahendra P. Singh⁽³⁾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⁽⁴⁾ 등은 MTLT의 최적 진동수비, TLD의 최적 개수 등에 대해 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 제어장치들은 설치비용과 공사비 등이 과다해 지며 유지관리적인 측면에서 많은 문제점이 발생한다. 그리고 대만 타이페이 101의 진자형식의 TMD는 건물의 강축과 약축이 구조적으로

† 교신저자: 정회원, 단국대학교 건축공학과
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr

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

* 정회원, 단국대학교 건축대학 건축공학과

** 정회원, 경북대학교 건설공학부 건축공학과

*** 포스코건설 기술연구소

**** 포항산업과학연구원

비슷한 특성을 가지고 있어야 한다는 제한조건이 뒤따른다. 또한 제어장치의 설치에 따른 설치공간의 많은 소요로 건물사용에 있어서 비효율성이 커지게 된다⁽⁵⁾.

이 연구에서는 이와 같은 현실적 어려움을 보완하기 위해 1개의 제어장치만으로 건물의 강축과 약축 방향으로 각각 TMD와 TLCD로 거동하도록 하여 양 방향을 동시에 제어하는 복합형 동조액체질량 감쇠기(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 언제나 작용할 수 있다. 또한 초고층 구조물의 거동을 기존의 이론적 배경만으로 분석하여 구조물의 안정성을 확보하는 것으로는 한계가 따른다. 이에 따라 구조적으로 불안정한 구조물에 대해서는 실험을 통한 연구분석이 필히 요구되고 있다⁽⁶⁾. 특히, 구조물이 받는 풍하중은 구조물의 형상과 주변의 영향에 따라 변하기 때문에 풍특성 실험이 우선시되고 있다. 이처럼 초고층 구조물에 설치될 제어장치의 진동제어 평가는 풍동실험을 통한 풍특성 실험이 요구되어 진다. 하지만 풍특성 실험은 많은 실험 비용과 시간이 요구된다. 이런 점을 감안하여 풍특성 실험을 대신할 수 있는 실험으로 조화하중을 통한 실시간 하이브리드 실험을 제안한다.

실시간 하이브리드 실험법이란 구조물 부분을 제작하지 않고 수치해석으로 대신하는 실험법 즉, 수치해석부 구조물에 TLMD를 설치하는 실시간 부분구조 실험법이다. 하이브리드 실험은 실험체의 크기와 무게제한, 그리고 경제성으로 인한 실물크기 구조물의 동적 실험의 어려움을 해결하기 위한 것이다. 특히 TLMD의 진동제어 성능 평가에 있어 실제 축소건물에 설치하여 제어 성능을 평가하는 실험은 실험체 제작의 상사법칙 적용과 많은 비용 등이 수반되는 어려움이 있으며 실험기기 크기 및 중량 등의 문제점이 발생된다⁽⁷⁾. 그리고 진동대의 로드셀을 이용한 주기별 TLMD의 제어성능 실험은 실제 구조물과의 동조 또는 비동조시의 거동 특성 및 성능을

파악하기에는 많은 난점이 있다. 그리고 비선형성이 있어 수학적으로 정확히 모델링하기 힘든 TLD, TMD와 같은 질량형 제어기의 제어특성 및 성능확인에 매우 유용한 방법으로 실시간 부분구조(real-time sub structure) 실험법을 응용한 실험법이다⁽⁷⁾. 실시간 부분구조 실험방법이 Nakashima⁽⁸⁾ 등에 의해 처음으로 개발된 후, 많은 연구자들은 부분구조기법을 이용한 제어기술에 대한 연구들을 수행하여 왔으며, 실시간 부분구조 실험을 수행하여 구조물의 특성을 파악하는 경우가 증가하는 추세이다. 최근에는, 전체구조물 중 실험적 부분과 수치해석적 부분을 분리하여 실험하는 관련연구가 수행되었다. Neild⁽⁹⁾ 등은 전체 질량중의 일부만을 실험적 부분구조로 하고 나머지 질량부, 스프링 그리고 감쇠를 수치해석적 부분구조로 구성한 단자유도계 질량-스프링-감쇠 시스템에 대하여 부분구조기법을 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 그러나 이러한 연구들은 실험적 부분구조로서 전체 구조물 중의 상부부분을 수치해석적 부분구조로 부분구조실험을 수행하였다.

이 연구는 구조물부분인 하부부분이 수치해석으로 그리고 나머지 상부부분이 실험부일 경우를 이용한 부분구조법 실험에 역점을 두어 TLMD를 실험체로 제작하여 실시간 하이브리드 실험을 수행하였다. 그리고 실시간 하이브리드 실험법의 검증에 위해 전에 실행되었던 축소 실구조물 실험의 결과와 비교를 하였다.

2. TLMD 실험체 개요

Fig. 1의 TLMD는 포스코 뉴송도 시티 Tower 1A에 설치될 제어장치의 1/20 크기의 축소모델이다. 모든 제반 구조해석과 설계는 미리 수행되었다. 타위의 x방향과 y방향의 고유진동수는 각각 0.182 Hz와 0.162 Hz이며 1차 모드 질량은 34000 ton이다.

Table 1 Similitude law applied to TLMD model

Quantity	Dimension	Scaling factor
Length	L	1:20
Mass	M	1:203=1:8000
Frequency	T^{-1}	1:1/ $\sqrt{20}$ = 1:0.22
Damping ratio	-	1:1

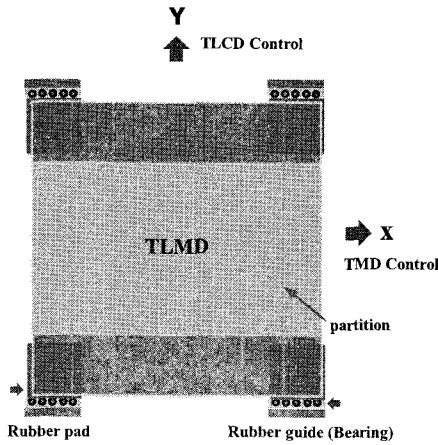


Fig. 1 Concept of TLMD

그리고 제어장치의 총질량은 600 ton이다.

Table 1의 상사법칙을 적용하면 단자유도 구조물의 x방향과 y방향의 고유진동수는 각각 0.82 Hz와 0.73 Hz이며 질량은 4250 kg이다. x방향 강성은 110000 N/m, y방향 강성은 88000 N/m이다. x방향과 y방향 동일하게 감쇠비 2%를 적용하여 각각 x방향 감쇠계수는 910 N-sec/m, y방향 감쇠계수는 770 N-sec/m으로 하였다.

상사법칙을 적용한 TLMD 제어장치의 TMD방향과 TLCD방향의 고유진동수는 각각 0.82 Hz와 0.73 Hz이다. 그리고 TMD 거동과 TLCD 거동별 참여질량은 각각 75 kg과 32 kg이며 참여 질량비는 각각 1.8%와 0.8%이다. 설계된 질량 600 ton의 제어장치에 상사법칙의 질량비를 적용하면 축소모델 TLMD의 질량은 75 kg이며 고무강성과 TLCD 액체의 전체길이는 식 (1),(2)와 같이 각각 1990(N/m)와 0.98 m가 된다. 그러나 시제품으로 나와있는 면진고무의 체원($G=4.5 \text{ kgf/cm}^2$)을 사용하여 계산하면 면진고무의 강성은 22183(N/m)으로 요구강성의 10배 이상이 나오게 된다. 그래서 요구강성 (개당 500 N/m)을 얻기 위해 DRB업체에 고무제작을 의뢰하였다. Table 2는 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 정리한 TLMD의 설계변수이다.

$$k = m(2\pi f_1)^2 = 75 \times (2\pi \times 0.812)^2 = 1990(N/m) \quad (1)$$

$$L = \frac{2g}{(2\pi f_1)^2} = \frac{0.4970}{f_1^2} = 0.98m \quad (2)$$

Table 2 Design parameters of TLMD

Parameter	Value
Rubber stiffness	1952.24 N/m
TLMD liquid length	0.98 m
TLMD mass	75 kg

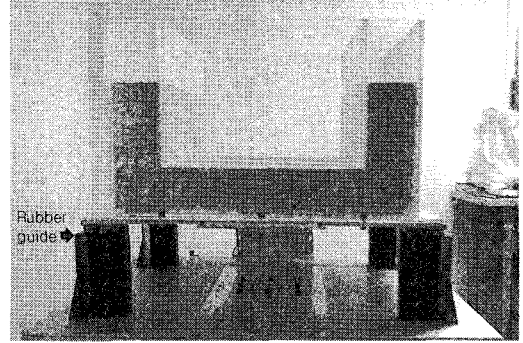


Fig. 2 Photograph of the manufactured TLMD

Fig. 2는 앞에서 계산되었던 TLMD 설계변수 및 상사법칙을 적용하여 최종적으로 제작된 양방향 진동제어장치인 복합형 TLMD 모델을 보여주고 있다.

3. 축소 실구조물 실험

3.1 축소 실구조물 실험법

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

3.2 실험 계획

Fig. 4는 반력력에 설치된 실험체를 보여주고 있다. 왼쪽으로부터 액추에이터, 스프링, 4 ton 질량체, TMD용 고무패드, TLCD 실험체, 스프링 순으로 조립되어 있다.

Fig. 5는 실험체에 설치된 dynamic actuator, Actuator LVDT, TLMD LVDT, 구조물 LVDT를 보여주고 있다. 또한 같은 장비에 가속도 센서를 설

치하였다.

TLMD의 질량은 75 kg이며 2방향 거동의 1차 모드 고유진동수는 각각 0.73 Hz, 0.82 Hz이다. 그리고 고무의 강성은 1990 N/m이다. 그리고 질량체의 무게는 약 4250 kg이다. 강성은 Fig. 6에서와 같이

구조물 양단에 설치된 스프링의 전체강성은 k_1 과 k_2 를 합한 것이다. TLCD거동의 고유주기 0.73 Hz에서는 11000 N/m의 강성을 갖는 스프링 8개를 연결하여 88000 N/m이며 TMD거동의 모드 고유주기 0.83 Hz에서는 10개를 연결하여 110000 N/m이다.

$$k = m(2\pi f_1)^2 = 4260 \times (2\pi \times 0.73)^2 = 88000 (N/m) \quad (3)$$

Fig. 6(a)의 질량체의 자유물체도에 따른 운동방정식은 식 (4)처럼 나타낼 수 있다.

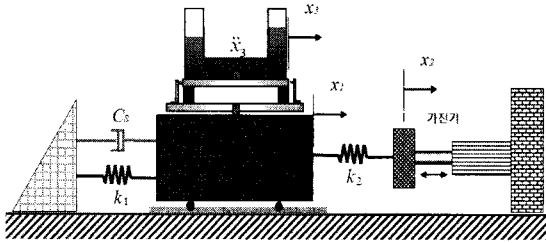


Fig. 3 Conceptual view of experimental set-up

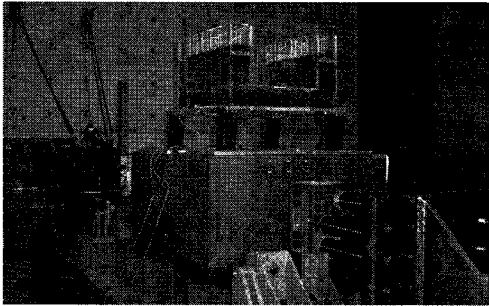
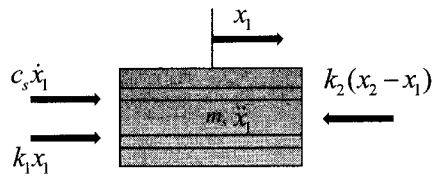
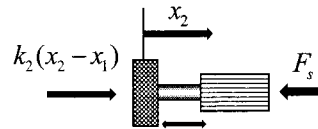


Fig. 4 Photograph of the installed TLMD

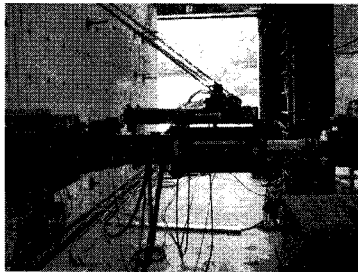


(a) Mass



(b) Actuator

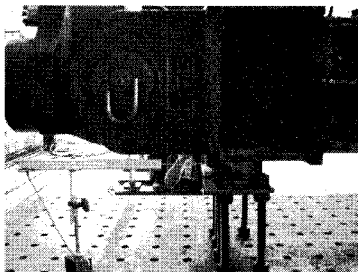
Fig. 6 Free-body diagram



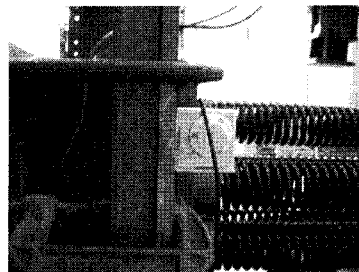
(a) Dynamic actuator



(c) TLMD LVDT



(b) Actuator LVDT



(d) Structure LVDT

Fig. 5 Measuring instrument

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

Fig. 6(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_e 는 각각 가진 크기와 가진진동수(Hz)이다. 마지막으로 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 가진각속도(rad/s)이다.

3.3 계측계획

이 실험에서는 액추에이터를 사용하였으며 가진 변위를 4 mm로 고정하였다. 0.1~3.0 Hz를 0.05 Hz 간격으로 가진하고, 구조물의 고유진동수 파악을 위해 0.70~0.89 Hz까지 0.01 Hz 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 전체구조물을 제어장치와 제어되는 구조물로 구분하여 TLMD가 설치된 상단실험부와 하부구조물 수치해석부로 나뉜다. 먼저 진동대에 설치된 TLMD에 전달형 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 채

널을 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

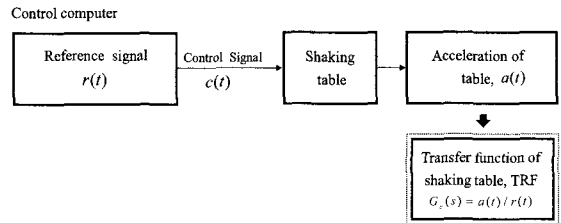


Fig. 7 Definition of the transfer function of shaking table

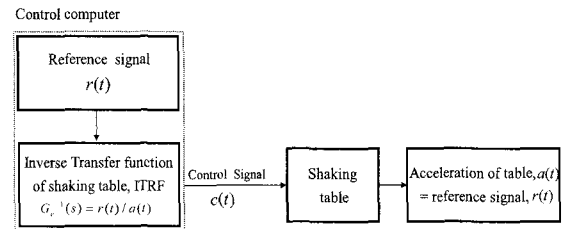


Fig. 8 Compensation using the inverse transfer function of shaking table

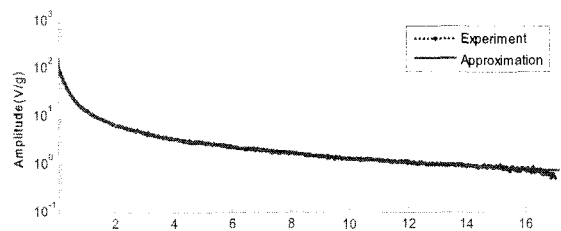


Fig. 9 The transfer function of shaking table

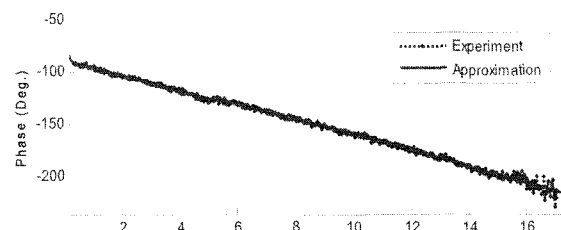


Fig. 10 Phase of inverse transfer function

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

진동대에서 측정된 가속도신호를 입력으로 하고 명령신호를 출력으로 하는 진동대의 역전달함수를 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 위상을 나타낸다.

4.3 실험 계획

실시간 하이브리드 실험에서 구조물에 가진되는 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, k 는 감쇠계수 그리고는 강성이며 $F(t)$ 는 가진하중, $i(t)$ 는 로드셀에서 계측된 제어장치의 제어력이다. 식 (8)을 상태공간 방정식 형태로 표현하면 식 (9)와 같으며 1층의 절대가속도를 출력하는 출력방정식은 식 (10)과 같다.

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

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

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

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

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

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

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

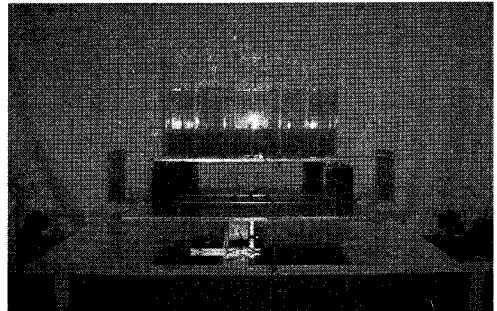


Fig. 12 Photograph of the real-time hybrid shaking table testing

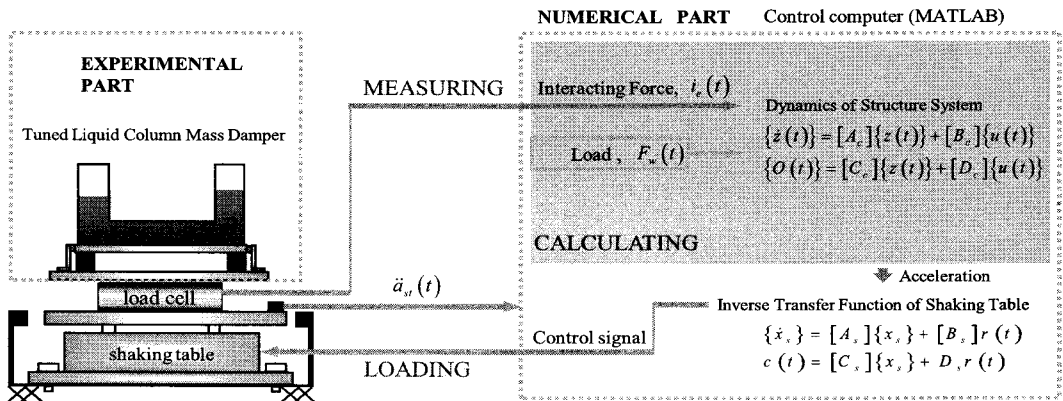


Fig. 11 Design of the controller for the real-time hybrid shaking table testing

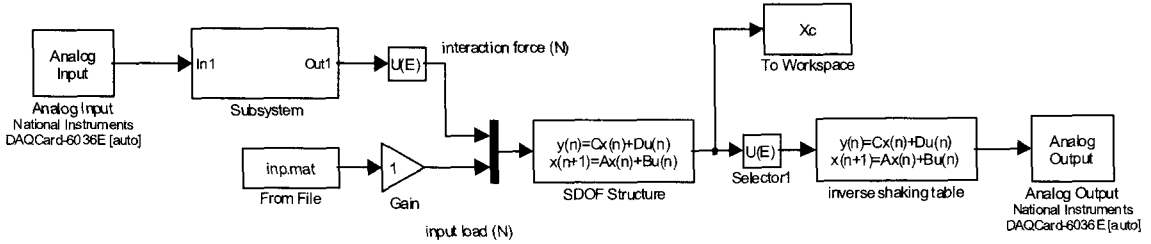


Fig. 13 Design of the MATLAB Simulink

수치해석부 구조물과 진동대 역전달함수를 포함하여 Fig. 13과 같이 실시간 하이브리드 실험 가진 설계를 하였다. 그리고 실시간 하이브리드 실험은 실험체에서 계측되는 응답을 실시간으로 계산되어 진동대를 구동하여 움직이므로 노이즈 및 위상오차에 치명적이다. 따라서 위상과 계산오차를 최소화하기 위하여 sampling rate를 1000 Hz 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 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 이루어졌다.

5. 결과 분석 및 비교

5.1 축소 실구조물 실험 결과

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

Fig. 14와 15는 각각 TMD거동으로 인한 단자유도 구조물의 제어(실선) 및 비제어(점선)시의 주파수별 변위와 가속도 응답 이력을 보여준다. Fig. 14는 주파수별 최대 변위 이력으로 제어성능지수는 0.18

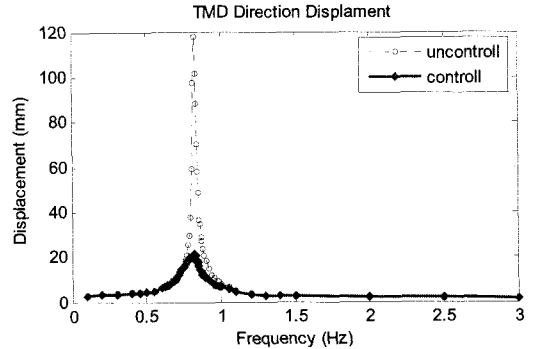


Fig. 14 Displacement in the frequency domain (TMD direction)

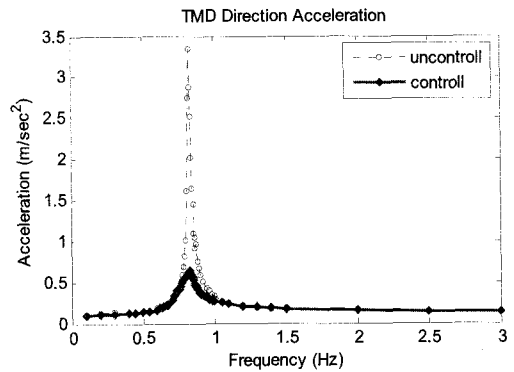


Fig. 15 Acceleration in the frequency domain (TMD direction)

이며 Fig. 15는 주파수별 최대 가속도 결과로 제어 성능지수는 0.20이었다.

Fig. 16과 17은 TMD거동으로 인한 단자유도 구조물의 제어 및 비제어시의 변위 와 가속도 시간이력을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 TMD의 동조된 주파수 0.83 Hz에서 구조물 변위와 가속도의 제어된 효과를 볼 수 있다.

Fig. 18과 19는 각각 TLCD거동으로 인한 단자유도 구조물의 제어(실선) 및 비제어(점선)시의 주파수

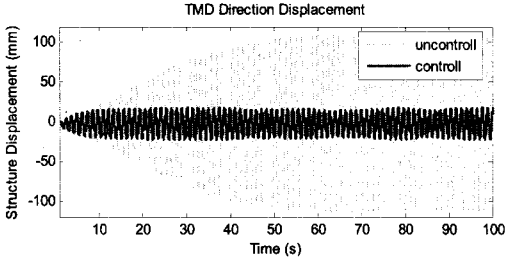


Fig. 16 Displacement in the time domain(0.83 Hz)

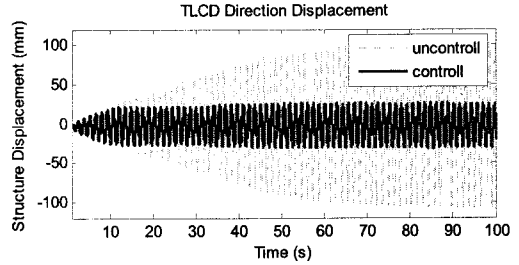


Fig. 20 Displacement in the time domain(0.73 Hz)

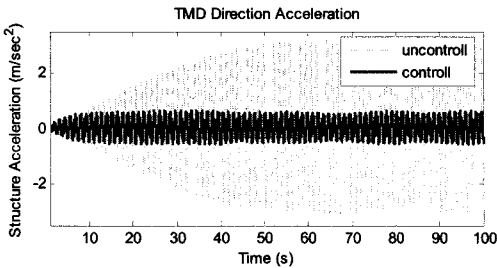


Fig. 17 Acceleration in the time domain(0.83 Hz)

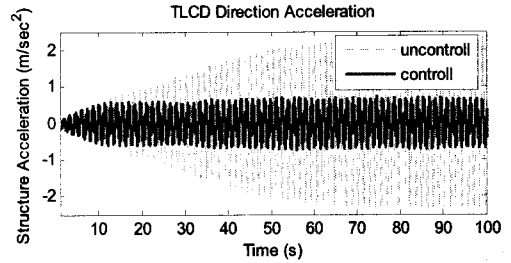


Fig. 21 Acceleration in the time domain(0.73 Hz)

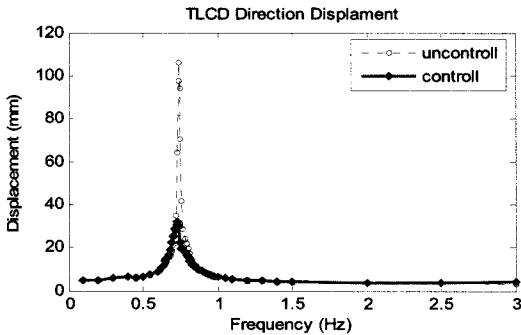


Fig. 18 Displacement in the frequency domain

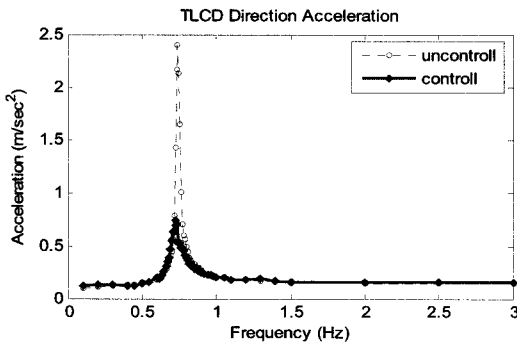


Fig. 19 Acceleration in the frequency domain

별 변위와 가속도 응답을 보여준다. Fig. 18은 주파수별 최대 변위 이력으로 공진 시 제어성능지수는

0.29이며 Fig. 19는 주파수별 최대 가속도로 공진 시 제어성능지수는 0.30이었다.

Fig. 20과 Fig. 21에서 알 수 있듯이 TMD거동과 동조된 주파수 0.73 Hz에서 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 y 방향 제어 즉, 양방향 제어성능을 보인지 결과를 분석한다. 그리고 제어성능으로부터 TMD와 TLCD의 고유주기가 각각 0.82 Hz와 0.73 Hz에서 나타나는지 확인하여야 한다.

Fig. 22와 Fig. 23은 각각 실시간 하이브리드 실험법에 따른 TMD거동의 제어(실선) 및 비제어(점선) 시의 주파수별 변위와 가속도 응답을 보여준다. Fig. 22는 주파수별 최대 변위 응답으로 제어성능지수는 0.22이며 Fig. 23은 주파수별 최대 가속도 응답으로 제어성능지수는 0.22이었다.

Fig. 24와 25는 실시간 하이브리드 실험법에 따른 TMD거동의 제어 및 비제어시의 변위와 가속도 시간이력을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 TMD의 동조된 주파수인 0.83 Hz에서 비제어 시 최대응답의 약 78%를 제어한 효과를 변위와 가속도 모두에서

확인할 수 있다.

Fig. 26과 Fig. 27은 각각 실시간 하이브리드 실험

법에 따른 TLCD거동의 제어(실선) 및 비제어(점선) 시의 주파수별 변위와 가속도 응답을 보여준다.

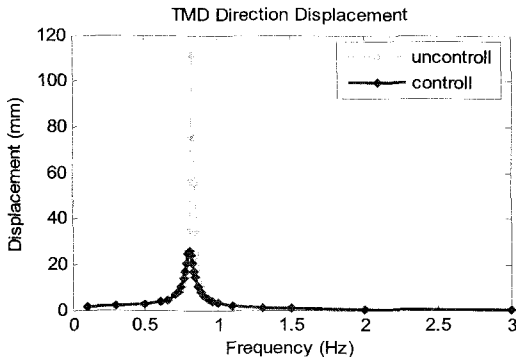


Fig. 22 Displacement in the frequency domain

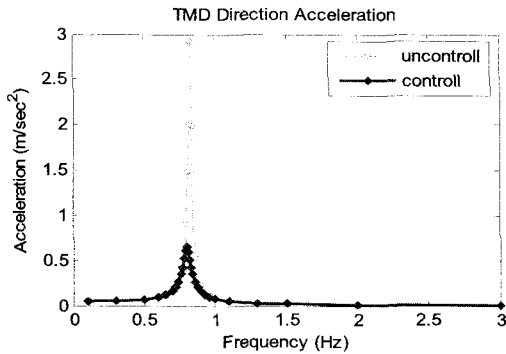


Fig. 23 Acceleration in the frequency domain

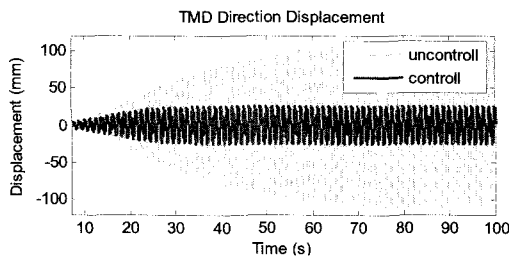


Fig. 24 Displacement in the time domain(0.83 Hz)

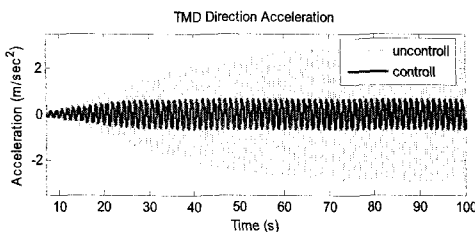


Fig. 25 Acceleration in the time domain(0.83Hz)

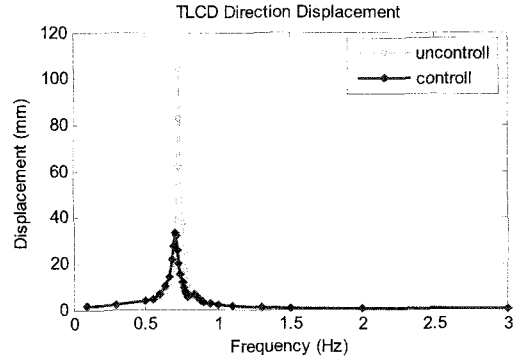


Fig. 26 Displacement in the frequency domain

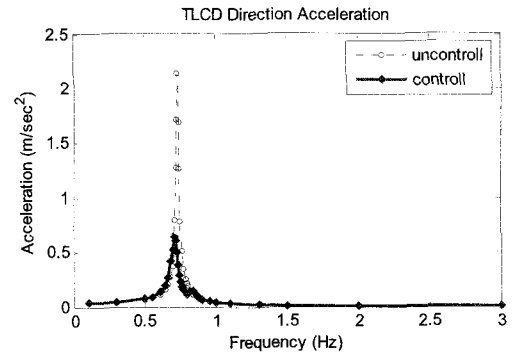


Fig. 27 Acceleration in the frequency domain

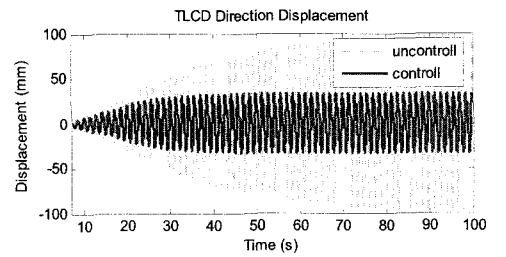


Fig. 28 Displacement in the time domain(0.73 Hz)

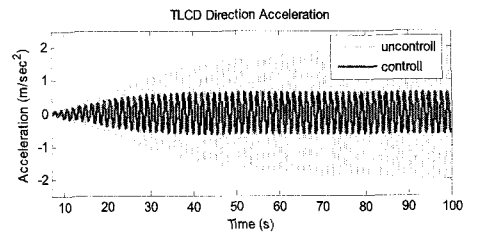


Fig. 29 Acceleration in the time domain(0.73 Hz)

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

Fig. 26은 주파수별 최대 변위 응답으로 제어성능 지수는 0.29이며 Fig. 27은 주파수별 최대 가속도 응답으로 제어성능지수는 0.30이었다. TLCD거동에서도 변위와 가속도 제어성능이 0.29와 0.30으로 거의 비슷하게 나타나는 걸 확인할 수 있었다.

Fig. 28과 29에서 알 수 있듯이 TLCD의 동조된 주파수인 0.73 Hz에서 비제어 시 최대응답의 약 70%를 제어한 효과를 변위와 가속도 모두에서 확인할 수 있다.

5.3 결과 비교

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

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

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

$$J_3 = \frac{E[x_c^2(t)]}{E[x_u^2(t)]} \quad (17)$$

$$J_4 = \frac{E[\ddot{x}_c^2(t)]}{E[\ddot{x}_u^2(t)]} \quad (18)$$

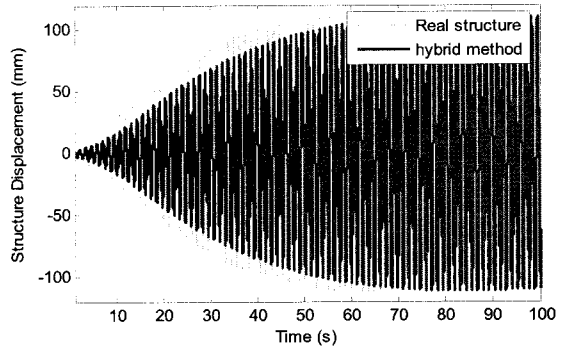


Fig. 30 Uncontrolled Displacement comparison in the time domain between the real-structure test and real-time hybrid test (TMD direction)

여기서, x_u 와 x_c 는 각각 비제어와 제어시의 변위이며 \ddot{x}_u 와 \ddot{x}_c 는 각각 비제어와 제어시의 가속도이다. 그리고 $E[\cdot]$ 는 평균값이다.

Table 3과 Table 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 TMD 제어 시 실구조물 실험결과는 각각 0.18과 0.20였으나 실시간 하이브리드 실험결과는 각각 0.22와 0.22로 확인 되었다. 그러나 오차가 0.02~0.04로 아주 작아 하이브리드 실험결과의 신뢰성이 높았다.

6. 결 론

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

실시간 하이브리드 실험에 따른 TLMD의 가속도 및 변위의 제어성능을 실구조물 실험결과와 비교 평가 하였다. TLCD 제어 시 peak value 값으로 계산

된 제어성능지수 J_1 과 J_2 는 0.29와 0.30로 0.01의 오차가 발생하였으며 TMD 제어 시 실구조물 실험 결과와의 오차가 0.2~0.4로 커졌으나 전체적으로 오차가 작아 하이브리드 실험결과의 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 수치해석상의 실험체 질량, 강성 및 감쇠비의 미세한 오차로 Fig. 30과 같이 최고점에 도달하는 수렴시간의 차이가 발생하는 등의 이유로 이 같은 오차가 발생하였다.

이같이 선형부분과 비선형 부분으로 구분하여 실험을 실시하는 실시간 하이브리드 실험법은 실제로 실험체를 제작하여 실험을 실시하는 경우와 비교하여 실험 비용을 줄이는 동시에 신속한 실험을 수행할 수 있었으며 또한 만족스런 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

이 연구는 (주)포스코건설 및 (재)포항산업과학연구원 연구비 지원과 (주)동일고무벨트의 협조에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업(05산학연 C105A10 50001-05A050500210)의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Den Hartog, J. P., 1956, "Mechanical Vibrations", 4th Ed., McCraw-Hill, New York.
- (2) Soong, T. T. and Dargush, G. F., 1997, "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", New York, John Wiley & Sons.
- (3) Singh, M. P., Singh, S. and Moreschi, L. M., 2002, "Tuned Mass Dampers for Response Control of Torsional Buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, pp. 749~769.
- (4) Fujino, Y., Sun, L. M., 1993, "Vibration Control by Multiple Tuned Liquid Dampers (MTLDs)", Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 12, pp. 3482~3502.
- (5) Haskett, T., Breukelman, B., Robinson, J. and Kottelenberg, J., "Tuned Mass Dampers Under Excessive Structural Excitation", Response of Structures to Extreme Loading(Conference), pp. 37~43.
- (6) Lee, S.-K., 2006, "Real-time Hybrid Shaking Table Testing Method for the Control Performance of a TLD", Journal of the KSNVE, Vol. 16 No. 4, pp. 57~63.
- (7) Lee, S.-K., Park, E. C., Min, K.-W., Leek, S.-H., Chung, L. and Woo, S.-S., 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.
- (8) Nakashima, M., Kato, H. and Takaokas, E., 1992, "Development of Real-time Pseudo Dynamic Testing", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 79~92.
- (9) Neild, S. A., Stoten, D. P., Drury, D. and Wagg, D. J., 2005, "Control Issues Relating to Real-time Substructuring Experiments Using a Shaking Table", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, pp. 1171~1192.