

# 건축구조물의 2방향 진동제어를 위한 동조액체질량감쇠기 A Tuned Liquid Mass Damper(TLMD) for Controlling Bi-directional Responses of a Building Structure

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

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

(2007년 10월 31일 접수 ; 2008년 2월 21일 심사완료)

**Key Words :** Two-way Tuned Liquid Mass Damper(2방향 동조액체질량 감쇠기), Tuned Liquid Column Damper(동조액체기둥감쇠기), Tuned Mass Damper(동조질량감쇠기), Shaking Table Test(진동대 실험)

## ABSTRACT

This paper presents a design of a tuned liquid mass damper(TLMD) for controlling bi-directional response of high-rise building structure subjected to windload. The proposed damper behaves as a tuned mass damper(TMD) of which mass is regarded as the mass of a tuned liquid column damper(TLCD) and the case wall of the TLCD itself in one direction and the TLCD in the other direction. Because the proposed device has coupled design parameter along two orthogonal directions, it is very important to select designing components by optimal fine tuning. In the designing TLMD, for easy maintenance, the rubber-bearing with small springs was applied in TMD direction. In this study, the Songdo New City Tower 1A in Korea, which has been designed and constructed two TLCDs in order to control bi-directional response, was chosen as the model building structure. The results of rotation test proved the effectiveness of bi-directional behavior of TLMD.

## 1. 서 론

최근 국내외 초고층 구조물은 바람하중과 지진에 대한 사용성과 안정성을 확보하기 위한 방안으로 구

조물에 진동을 저감시키는 제어장치를 개발하여 설치하고 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 제어장치 중에 질량과 강성을 이용하는 TMD(tuned mass damper)<sup>(2)</sup>, 액체의 수평유지를 위해 중력의 힘을 이용하는 TLD(tuned liquid damper)<sup>(3)</sup>, TLCD(tuned liquid column damper)<sup>(4)</sup> 그리고 TLCD 중 수평부와 수직부의 단면이 서로 다른 LCVA(liquid column vibration absorber)<sup>(5)</sup> 등의 감쇠기가 연구되고 있다. 이러한 제어장치는 적은 설치비용과 유지관리의 용이성 그리고 공사비 절감 등의 이유로 많은 연구가 이루어져 왔다. 실례로 캐나다 벤쿠버에 위치한 one wall

† 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

\*\*\*\* 포스코 기술연구소

\*\*\*\*\*동일고무벨트

center의 경우 LCVA를 설치함으로써 TMD 설치 시보다 약 200만불(약 25억원) 절약된 것으로 조사되었다<sup>(6)</sup>.

그러나 일반적으로 TMD나 TLD는 건물의 1방향 거동을 제어하기 위하여 설치되는 경우가 대부분이며 경우에 따라서는 초고층 건물의 풍하중에 의한 진동을 보다 효과적으로 제어하기 위하여 건물의 강축과 약축 2방향 모두 제어하기 위해 여러 개의 제어장치 또는 특별한 형태의 TLD와 TMD를 사용하기도 한다. 대만 타이페이101, 상하이 국제 금융센터 등 진자형식의 TMD나 원형 TLD를 사용하여 제어의 방향성이 없는 형식을 이용하기도 하지만 이 경우 건물의 강축과 약축의 구조적 특성이 동일하여야 하는 단점이 있다<sup>(7,8)</sup>. 특히 홍콩의 Hang Lung Tower와 같이 직사각형 TLD<sup>(9)</sup>를 설치하여 양방향 제어를 하는 경우에는 설계된 주기와 다른 값을 갖는 주기에 대하여 양방향의 주기에 동조하는 것은 매우 어렵다. 이는 TLD의 폭과 길이가 정해진 상태에서는 TLD의 주기를 변화시킬 수 있는 물높이를 조절하는 방법에서 양방향 주기에 대하여 동시에 만족하는 물높이를 찾는 것이 현실적으로 거의 불가능하다. 또한 양방향 액체의 흐름이 서로 연관성이 있어 비선형성을 강하게 띄고 있어 실제로는 적용하기 어려운 경우가 많다.

그리고 여러 개의 자유도를 갖는 제어장치로 M-TLCD(multi tuned liquid column damper), MTMD(multi tuned mass damper)<sup>(10)</sup>등이 사용되는데, 이러한 연구 또한 하나의 모드를 효과적으로 제어하거나 여러 개의 모드가 참여하여 비중이 높은 경우 여러 개의 모드를 제어하기 위한 제어장치로 제안되었다. 그러나 실제 직교하는 2방향 제어를 위한 제어장치에 대한 연구에 대한 사례는 드물며 일반적으로 2개 이상의 제어장치를 사용하여 건물의 강축과 약축을 제어한다. 또한, 최상층에 설치되는 질량형 제어장치를 2개 이상 설치할 경우, 최적 제어를 위한 질량비를 만족시키기 위해 단 방향 제어장치의 두배 이상의 질량비를 요구하게 된다. 그만큼 건물의 적재하중 또한 크게 증가하게 된다. 실제로 TLCD를 콘크리트로 타설하여 제작할 경우 콘크리트 중량만으로 TMD의 질량을 만족시키게 되며 그만큼 슬래브 보강을 위해 많은 물량을 필요로 하게 된다.

이 연구에서는 이러한 불필요한 적재하중만 증가시키는 TLCD 외벽과 물의 질량을 면진 고무패드의 강성을 이용하여 TMD거동을 하도록 설계하며 양방향으로 각각 TMD와 TLCD로 거동하여 건물의 강축과 약축을 동시에 제어하는 경제적 복합형 동조액체 질량감쇠기를 제안한다.

## 2. 모델 구조물

Fig. 1은 64층 236m 높이의 초고층 주상복합 건물인 포스코 뉴송도 시티 Tower 1A이다. 이 건물은 이 논문에서 제안하는 풍응답 제어장치가 설치될 목표 구조물이며 인천시 송도에 건설 중이다. 이 건물은 철근콘크리트 코어와 철골 프레임으로 구성되어 있다. 코어는 주요 풍하중에 저항하고 프레임은

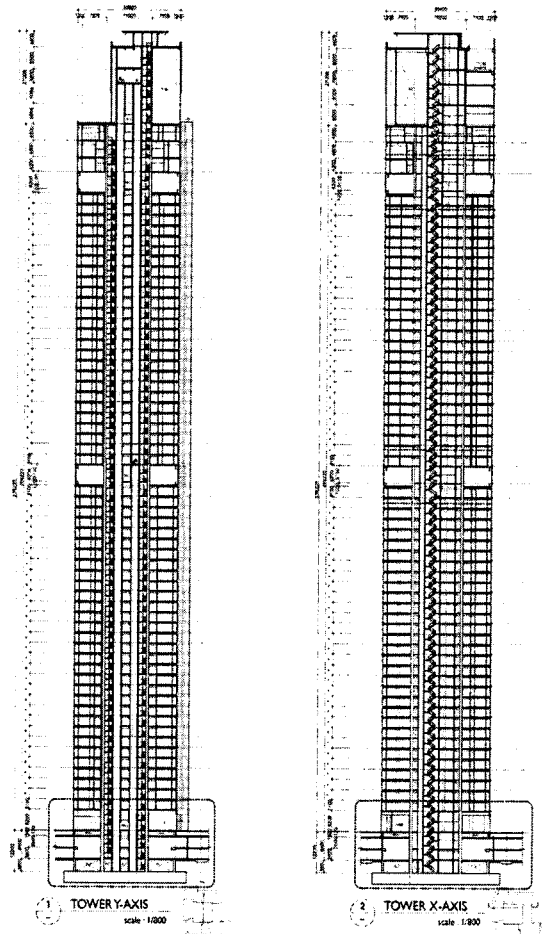


Fig. 1 Elevation of building model

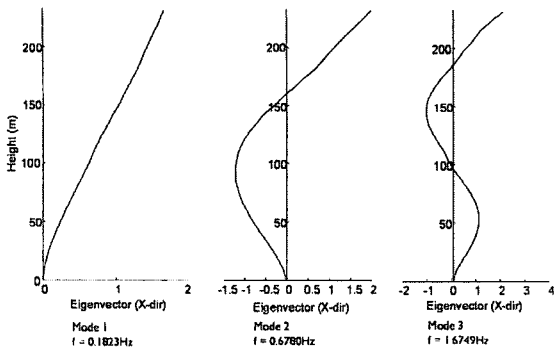


Fig. 2 Modal shapes of building model in the x-direction

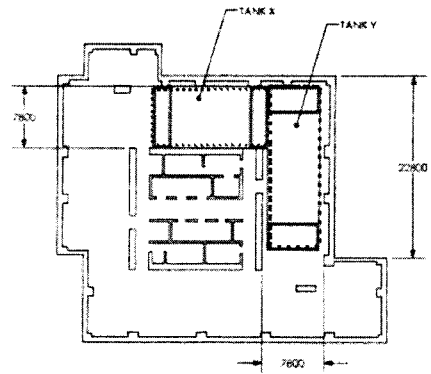


Fig. 4 Roof floor of building model with two TLCs

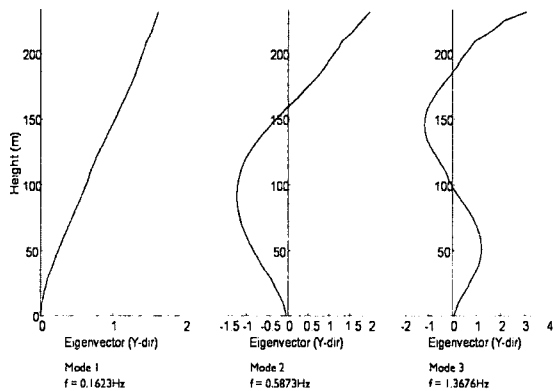
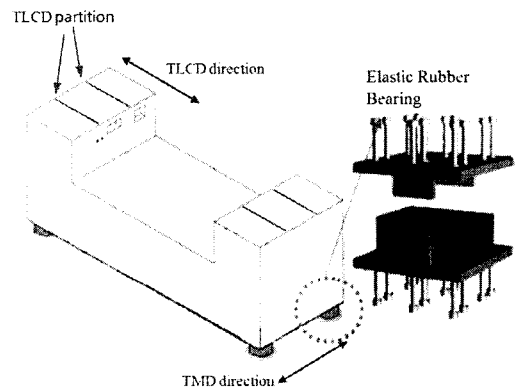


Fig. 3 Modal shapes of building model in the y-direction



(a) Bi-directional TLMD (b) Rubber bearing

Fig. 5 Conceptual view of TLMD

코어에 중력하중과 풍하중의 일부를 전달하도록 설계되었다. 그리고 건물의 세장비 값은  $236.22/33.8 = 7$ 로 바람에 민감한 구조를 가졌다.

모든 제반 구조해석과 설계는 미리 수행되었다. 유한요소모델은 선형 구조설계와 해석을 통하여 얻었으며 각층의 횡방향 변위를 나타내는 69자유도의 고유치해석을 수행하였다. 초기 3개의 x방향 고유진동수는 0.182, 0.678 그리고 1.675 Hz이며, y방향은 0.162, 0.587 그리고 1.368 Hz이다. 각각의 모드 형상은 Fig. 2와 Fig. 3과 같다. 그리고 1차 모드 질량  $M_1$ 은 34000 ton 이며 y방향의 TLC의 유효질량은 340 ton으로 계산되었다.

### 3. TLMD 설계

#### 3.1 TLMD 초안

제어기가 설치될 목표구조물은 큰 세장비 등의 이

유로 바람에 민감한 구조를 가졌다. 설계될 TLMD는 이러한 풍하중에 의한 에너지를 흡수하여 건물의 진동을 감소시키며 거주자들의 사용성을 향상시킨다. Fig. 4는 송도 the # 1st World에 설치될 초기 설계안이다. y방향으로는  $20.5\text{ m} \times 6\text{ m}$ 의 TLC, x방향으로는  $14\text{ m} \times 6\text{ m}$ 의 TLC로 설계되어 있었다. 하지만 필요면적과 경제성 등을 고려하여 x방향의 TLC를 설치하지 않고 y방향의 TLC자리에 혼합형 TLMD를 설치하는 것으로 결론을 내렸으며 TLMD에 대한 연구를 수행하였다. 설계될 TLMD는 앞에서 설명한 y방향의 TLC 모델을 바탕으로 1/20로(길이) 축소한 모델이다. Fig. 5(a)가 TLMD의 초안이다. 우선 TLMD의 특징은 하나의 제어기로 양방향 진동을 제어한다는 것이다. 또다른 특징은 TMD 거동시 기존의 방법인 LM guide를 사용하지 않고 Fig. 5(b)와 같이 전단고무를 사용하여 진동을 제어한다는 것이다. 그리고 대형 TLC를 설치하게

되면 TLCD의 직각방향, 즉 TMD방향으로 거동시 TLCD의 직각방향 폭이 너무 크기 때문에 TMD 거동과 함께 액체의 거동이 동시에 발생하게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 TLCD를 TMD방향으로 분할하여 액체의 거동을 제거하였다.

**3.2 TLMD 진동수 설정**

TLMD의 축소모델은 실제 설계된 모델에 대해서 1/20의 크기를 갖는다. 축소율에 따라 Table 2와 같이, 실험체의 고유진동수를 설정하였다. 고유진동수는 실제 대상 구조물의 1차 고유진동수인 0.161 Hz를 기준으로 1/20로 축소하였다. 고유진동수 설정은 상사법칙을 정리한 Table 1과 식 (1)을 통해 산정할 수 있다.

$$f_m = f_p \lambda_f = f_p \lambda_T^{-1} = f_p \lambda_L^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서  $f_p$ 는 축소하지 않은 실제 TLMD 고유진동수이며  $\lambda_f$ 는 진동수 축소비이다. 그리고  $\lambda_T$ 와  $\lambda_L$ 는 각각 주파수 축소비와 길이 축소비이며 이번 실험에서는  $\lambda_L$ 이 1/20이다.

**Table 1** Similitude law applied to TLMD model

Quantity	Dimension	Scaling factor
Length	$L$	1:20
Material density	$ML^{-3}$	1:1
Acceleration	$LT^{-2}$	1:1
Mass	$M$	1:20 <sup>3</sup> =1:8000
Time	$T$	1: $\sqrt{20}$ =1:4.472
Frequency(Hz)	$T^{-1}$	1:1/ $\sqrt{20}$ =1:0.223
Damping ratio	-	1:1

**Table 2** Tuning frequencies of TLMD model

	Mode	Full scale	Model scale	Ratio
Y-Direction	First mode	0.161 Hz	0.722 Hz	4.48
X-Direction	First mode	0.182 Hz	0.818 Hz	4.48

식 (1)을 1/20 축소율로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$f_m = f_p \sqrt{20} \quad (2)$$

식 (2)를 사용하여, 0.161 Hz를 변환하면, 1/20로 축소된 실험체의 Y방향 1차 고유진동수는 0.722 Hz이고 같은 방법으로 0.182 Hz를 변환하면 실험체의 X방향 1차 고유진동수는 0.818 Hz가 된다. Table 2는 이 결과 값을 정리한 것이다.

**3.3 TLMD 디자인**

(1) TMD 디자인

앞절에서 구한 64층 축소모델을 사용하여 TLMD 설계를 위한 파라미터를 구하기 위해 일반적으로 n자유도를 가지는 구조물에 TMD가 설치된 운동방정식을 Lagrange equation으로 전개하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{X}_s} + \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_t} \right) + \left( \frac{\partial D}{\partial \dot{X}_s} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_t} \right) + \left( \frac{\partial V}{\partial X_s} + \frac{\partial V}{\partial x_t} \right) = f \quad (3)$$

여기서,  $X_s$ 는 구조물에 발생하는 지반에 대한 상대 변위이고  $x_t$ 는 TMD의 지반에 대한 상대 변위이다.  $f$ 는 구조물에 작용하는 외력이며  $T, D$  및  $V$ 는 구조물 및 TMD에 축적된 운동에너지, 감쇠에 의한 소산에너지 그리고 강성에 의한 위치에너지이며 각각 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} (\ddot{X}_s^T M_s \ddot{X}_s + m_t \ddot{x}_t^2) \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{2} [\dot{X}_s^T C_s \dot{X}_s + c_t \{ \dot{x}_t^2 - 2\dot{x}_t B \dot{X}_s + (B \dot{X}_s)^2 \}] \quad (5)$$

$$V = \frac{1}{2} [X_s^T K_s X_s + k_t \{ x_t^2 - 2x_t B X_s + (B X_s)^2 \}] \quad (6)$$

여기서,  $M_s, C_s$  및  $K_s$ 는 각각 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬 및 강성행렬이고  $m_t, c_t$  및  $k_t$ 는 TMD의 강성, 감쇠계수 및 강성이다. 그리고  $B$ 는 TMD가 설치된 층을 나타내는 위치 행벡터이다. 최종적으로 Lagrange equation을 전개하면 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + c_t B B^T - c_t B^T & \\ & -c_t \quad c_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s + k_t B B^T - k_t B^T & \\ & -k_t B \quad k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ x_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

전체구조물의 응답이 단일모드로 거동한다고 가정하면  $X_s = \phi_{r1} q_r$ , 여기서  $q_r$ 는 TMD방향의 generalized coordinate의 응답이다.  $B^T \phi_{r1} = 1$ 이 되도록 TMD방향 단일모드  $\phi_{r1}$ 를 정규화 하고 좌변에  $\phi_{r1}^T$ 를 곱하여 정리하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_{x1} & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_r \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{r1} + c_t & -c_t \\ c_t & c_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_r \\ \dot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{r1} + k_t & -k_t \\ k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_r \\ x_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{r1}^T f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $m_{x1}$ ,  $c_{r1}$  및  $k_{r1}$ 은 TMD방향의 각각 단일모드로 정규화한 질량, 감쇠 및 강성이다.

(2) TLCD 디자인

마찬가지로 TLD가 설치된 구조물을 Lagrange equation을 통해 전개하여 TLCD가 설치된 구조물의 운동방정식과 액체표면운동방정식(liquid surface motion)을 나타내면 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$\{m_{y1} + \rho A_h (2\nu L_v + L_h)\} \ddot{q}_y + \rho A_h \nu L_h \ddot{z} + c_{y1} \dot{q}_y + k_{y1} q_y = \phi_{y1}^T f \quad (9)$$

$$\rho A_h \nu L_c \ddot{z} + \rho A_h \nu L_h \ddot{q}_y + \frac{1}{2} \rho A_h \nu^2 \eta |q| \dot{q} + 2\rho A_h g \nu z = 0 \quad (10)$$

여기서,  $m_{y1}$ ,  $c_{y1}$  및  $k_{y1}$ 은 TLCD방향의 각각 단일모드로 정규화한 질량, 감쇠, 및 강성이고  $q_y$ 는 TLCD방향의 generalized coordinate 변위응답이며,  $z$ 는 물높이 변위 응답이다.  $L_h$ 와  $L_v$ 는 각각 수평부와 수직부 기둥의 길이이며  $A_h$ 와  $A_v$ 는 수평부와 수직부 기둥의 단면적이다.  $\rho$ 는 TLCD 액체의 밀도이며 수평부와 수직부의 면적 비인  $\nu = A_v/A_h$ 이다. 유효길이인  $L_c = \nu L_v + 2L_v$ 이며  $\eta$ 는 TLCD의 수두손실 계수이다. TLCD의 고유진동수는  $\omega_{TLCD} = \sqrt{2g/L_c}$ 의 식을 통해 구한다.

(3) Optimal Parameter

구조물에 가해지는 하중조건에 대해 peak 및

RMS 응답을 각각 최소화 시키는 TMD와 TLCD의 최적진동수비를 구한다. 예를 들어, white-noise에 대해 RMS 가속도 응답을 최소화 시키는 TMD의 최적진동수비  $\alpha_{opt} = \omega_{TMD}/\omega_s$ 는 식 (11)과 같으며 TLCD의 최적진동수비  $1/\beta_{opt} = \omega_{TLCD}/\omega_s$ 는 식 (12)와 같다.

$$\alpha_{opt} = \frac{\sqrt{1 + \mu_{TMD}/2}}{1 + \mu_{TMD}} \quad (11)$$

$$1/\beta_{opt} = \sqrt{\frac{1 + \mu_{TLCD} - \mu_{TLCD} m n / 2}{1 + \mu_{TLCD}}} \quad (12)$$

여기서,  $\mu_{TMD}$ 와  $\mu_{TLCD}$ 는 각각 TMD와 TLCD의 구조물 모드질량에 대한 유효질량비이며 각각 식 (13)과 (14)와 같다. TLCD벽체의 질량을  $m_c$ 라고 할 때, TMD의 유효질량인  $m_t = \rho A_h (L_h + 2\nu L_v) + m_c$ 이 된다.  $m$ 과  $n$ 은 전체길이에 대한 수평부와 수직부 기둥길이의 비율이며 각각  $m = \nu(L_h/L) / (\nu - (L_h/L)(1 - \nu))$ ,  $n = L_h/L_c$ 이다. 만약, 수직부와 수평부 면적이 같은 경우 즉,  $\nu = 1$ 일 경우  $L_c = L = 2L_v + L_h$ 가 된다. 따라서, 최적 진동수비를 도입하여 TLMD 설계에 필요한 TMD 질량과 TMD 강성은 식 (15)와 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_{TMD} = \frac{m_t}{m_{x1}} \quad (13)$$

$$\mu_{TLCD} = \frac{\rho A_h (L_h + 2\nu L_v)}{m_{y1}} \quad (14)$$

$$m_t = \frac{2g\rho A_h \beta_{opt}}{\omega_{y1}^2} + m_c \quad (15)$$

$$k_t = 2g\rho A_h \left( \frac{\omega_{1x}}{\omega_{1y}} \right)^2 \alpha_{opt}^2 \beta_{opt} + m_c \omega_{1x}^2 \alpha_{opt}^2 \quad (16)$$

(4) Design Procedure

이 논문에서는 축소모델이 1차모드에 지배적이며 1차모드로 거동한다는 가정하에 TLMD 설계를 수행하였다. 또한 x방향과 y방향의 1차모드 질량이 동일하며 강성차이에 의해 고유주기가 다르다고 가정하였다. 축소모델 구조물을 대상으로 TLMD를 설계하는 절차는 TLCD 설계과정과 같으며 최종적으로 TMD의 강성을 결정하는 단계가 추가 된다. 설계과정은 단계별로 다음과 같다.

가. y방향 주기  $f_{y1}=0.82$  Hz와 모드질량을 적용하여 질량비와 white-noise와 조화하중의 최적동조진동수비를 각각  $\mu=0.01$ 와  $1/\beta_{opt}=\omega_{TLCD}/\omega_s=0.9935$ 로 정하였다. 따라서,  $\omega_{TLCD}=\sqrt{2g/L}=\omega_{y1}(1/\beta_{opt})$  식을 통하여 액체기둥의 길이  $L$ 은 0.95 m로 결정되었고 수평부 길이는 0.60 m로 결정되었다.

나. 설계를 단순화하기 위해 수평부와 수직부 단면이 같도록 설계하였고 액체의 질량인  $\rho AL=57.2$  kg이고 두께가 10 mm인 아크릴로 제작된 TLCD의 벽체 질량은  $m_c=20$  kg로 계산되었다. 그리고 구조물에 작용하는 불특정 하중에 대한 TMD의 최적 진동수비가  $\alpha_{opt}=\omega_{TMD}/\omega_s=0.99$ 로 결정되었고 최종적으로 식 (16)을 통해 TMD의 강성  $k_t=1952.24$  N/m가 계산되었다.

다. 결정된 TLCD의 유효길이와 단면, 그리고 TMD의 강성을 통하여 TLMD를 설계하였다.

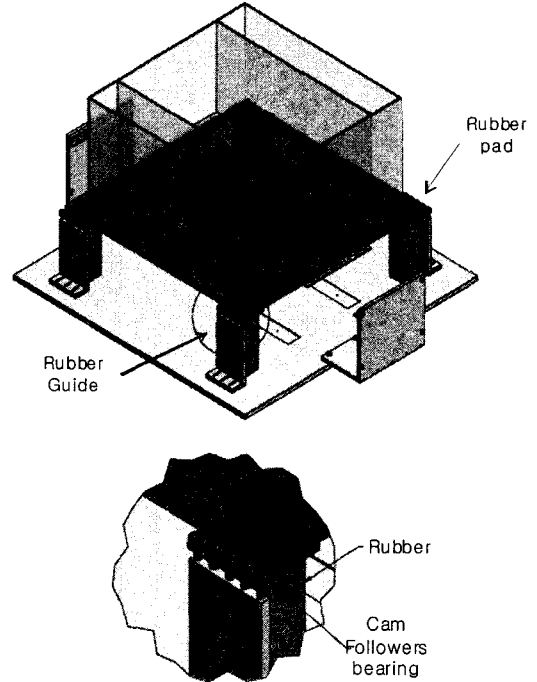


Fig. 6 Specimen of TLMD model

### 3.4 TLMD 실험체 제작

TLMD의 실험체는 사전 실험에 나타났었던 문제점을 보완해가며 제작 되었다. 먼저 LM 가이드와는 달리 지속적인 관리가 필요하지 않은 고무패드를 사용한 TMD를 도입하였다. 그러나 고무패드를 이용할 경우 실제 적용에는 문제가 되지 않으나 소형 실험에서는 미세조정이 중요하기 때문에 스프링으로 보조 튜닝을 하였다. 또한 TMD 방향으로만 진동을 유도하기 위해 Fig. 6과 같이 TLCD 방향으로 고무가이드를 설치하여 고무의 Y방향 움직임을 구속하였다.

마지막으로 TLMD의 TMD(X방향)와 TLCD(Y방

향)가 서로 독립적으로 거동하여 TLMD의 복합형진동제어가 계획대로 이루어지는지 정확한 평가를 위해 Fig. 7과 같이 회전이 용이하도록 하부판에 회전베어링을 제작하였다. 그리하여 Y방향에 대하여 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 회전 방향에 대한 실험이 가능하도록 하였다. Fig. 8은 최종적으로 제안된 TLMD 실험체의 TMD 방향(0°)와 TLCD 방향(90°)의 형상을 보여주고 있다.

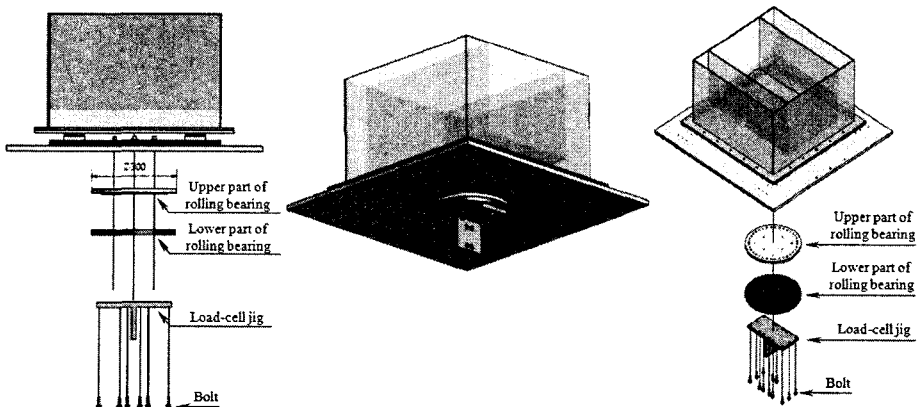


Fig. 7 Proposed TLMD and jigs

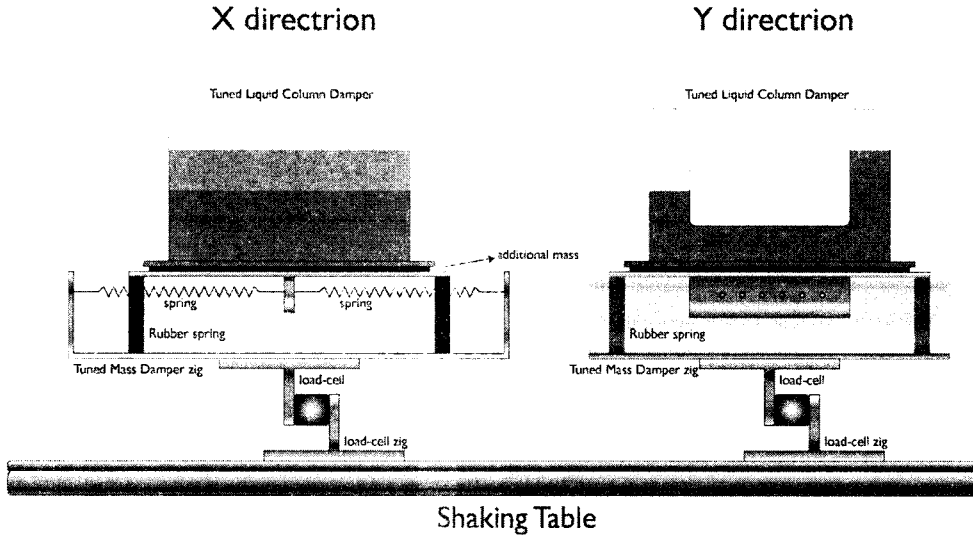
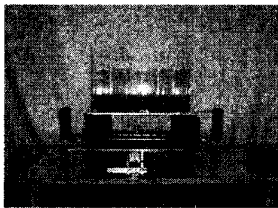
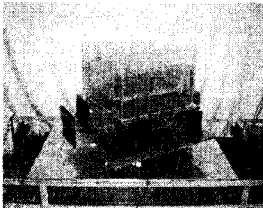


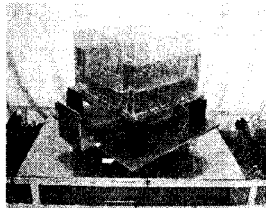
Fig. 8 Configurations of experimental set-up equipped with the proposed TLMD



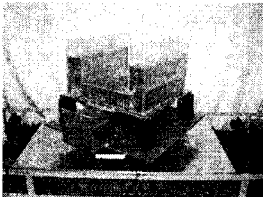
(a) 0° Rotation



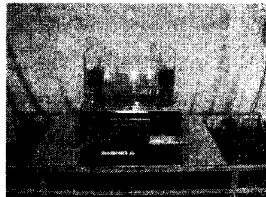
(b) 30° Rotation



(c) 45° Rotation



(d) 60° Rotation



(e) 90° Rotation

Fig. 9 Experimental set-up with respect to the rotational angle

#### 4. 실험 개요

##### 4.1 실험 전개

이 논문에서 제안하고 최종설계된 TLMD의 독립

거동 양상을 파악하기 위하여 회전형 지그에 설치된 실험체는 일축 진동대에 의해 가진된다. 그리고 전단형 로드셀을 진동대에 부착하였으며, 진동대의 동적특성을 모니터링하기 위해 가속도 센서를 진동대와 TLMD에 부착하였다. 데이터 수집과 디지털 제어는 실시간 디지털 신호 처리기(DSP)를 통해 수행되었다. 데이터 수집 보드의 주된 업무는 측정된 가속도 및 로드셀 데이터를 측정하여 아날로그-디지털 변환하는 기능과 디지털-아날로그 변환하는 기능을 수행하는 것이다. 데이터 수집은 25 Hz 저주파수 통과 필터를 통과한 AD/DA보드인 NI PCI-6052E로 수집되는 시스템으로 이루어졌다. 마지막으로 가우시안 분포를 따르는 white-noise와 조화하중 신호를 진동대에 가진하여 전달력과 가속도를 계측하였다.

Fig. 9는 TLMD의 양방향 거동의 독립성을 판단하기 위해 일축 진동대에 설치된 TLMD를 각각 0°, 30°, 45°, 60° 그리고 90° 방향으로 회전시킨 실험체 전경이다.

##### 4.2 회전각 계산

TLMD가 TLCD와 TMD 방향으로 서로 독립거동한다면 x방향과 y방향 이외의 다른 방향성은 없다. 이를 증빙하기 위해 실험 데이터를 통해 얻은 전달함수의 최대값을 이용하여 회전각을 역 계산하였다. 이 결과값은 실제로 회전시킨 각과 일치하여야 한다.

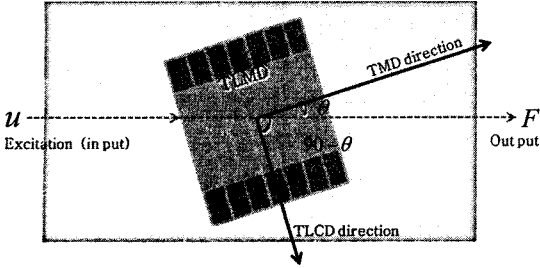


Fig. 10 Directions of excitation and control forces

전달함수는 실험을 통해 얻은 출력값을 가진 값으로 나누는 것이다. 출력( $F$ )는 Fig. 10을 참고하여 식(17)과 같이 정리할 수 있다.

$$F_{\theta} = u_{\theta} \cos \theta \times TMD(f) \cos \theta + u_{\theta} \sin \theta \times TLCD(f) \sin \theta \quad (17)$$

여기서  $u_{\theta}$ 는 진동대를 통해 가진된 입력값이며  $F_{\theta}$ 는  $\theta$ 만큼 TLMD를 회전시켜 얻는 출력값이다. 그리고  $TLCD(f)$ 와  $TMD(f)$ 는 각각  $f$  Hz로 가진하여 얻은 TLCD와 TMD의 전달함수이다.

실험 데이터를 통한 전달함수의 최대값을 이용하여 역계산된 회전각은 식(18)과 같다.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{\beta - \alpha}{1 - \alpha}} \right) \quad (18)$$

$$\beta = \frac{F_{\theta}}{u_{\theta} TMD(f)} \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{TLCD(f)}{TMD(f)} \quad (20)$$

여기서  $\beta$ 의  $F_{\theta}/u_{\theta}$ 는 출력값을 입력값으로 나누는 것으로  $\theta$ 에서의 최대 전달함수이다. 그리고 식(20)의  $\alpha$ 는 TLCD와 TMD의 전달함수 비이다.

### 5. 결과 분석

이 연구에서는 실제 송도 the # 1st World에 설치될 TLCD와 같은 진동수를 갖는 실험체에 대하여 동적특성을 평가하는 것이다. 1차적으로 이론식에 의거하여 설계된 TLMD가 실제 계획된 주기를 갖는가를 평가하는 것이 중요하다. 이는 TMD나 TLCD 같은 부가질량형 진동제어의 성능이 설치되는 건물의 고유주기에 얼마나 정확히 동조되었는가에 의

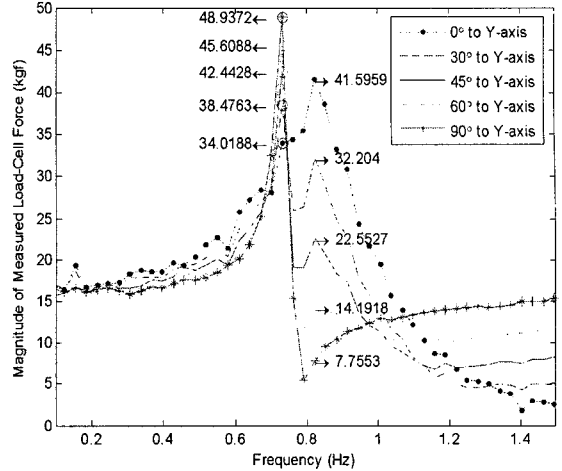


Fig. 11 Transfer functions from the table acceleration to the force of load-cell under the excitation of white-noise

존하기 때문이다.

다음으로 이번 실험의 가장 큰 특징은 X방향으로 TMD를 Y방향으로는 TLCD를 고려한 복합형 진동 제어라는 점이다. 따라서 TLMD의 TMD 방향과 TLCD 방향의 거동이 각각 독립적으로 거동하여 복합형진동제어가 이루어지는지를 평가하는 것이다.

Fig. 11은 회전 세트별 white-noise 실험을 통해 진동대 가속도에 의한 전단 로드셀의 전달함수를 그린 것이다. 진동대 가속도에 의한 전단 로드셀의 전달함수를 보면 TLCD 고유진동수 0.73 Hz와 TMD 0.85 Hz에서 2개의 피크가 계측되었으며 이 두 응답이 각각 회전각이 증가함에 따라 증폭이 교차하는 양상을 보이고 있다. 즉 각각의 실험체 회전각에 대하여 TLCD 거동과 TMD 거동이 서로 독립적으로 거동하는 양상을 나타낸 것이다. Fig. 11에서 나타나듯, 0.73 Hz에서는 회전각이 증가할수록 TLCD의 거동이 커져 전단력이 커지는 반면 0.85 Hz에서는 회전각이 증가할수록 TMD의 거동이 작아져 전단력이 작아지는 것을 알 수 있다. 결국 0°가 TMD의 거동 방향이며 90°가 TLCD의 거동방향인 것을 알 수 있었다.

또한 회전별 TLMD 실험세트의 최대응답을 바탕으로 회전각을 역계산하였다. 이 계산은 실제 실험체에 회전각을 준상태에서 가진한 후 전달함수의 최대값을 산출한다. 이 결과를 바탕으로 식(18)에 적용하여 회전각을 측정할 수 있다. 먼저 식(18)에 적



용되는  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 TLCD 전달함수와 TMD 전달함수를 찾아야 한다. Fig. 9(a)는 0°때의 사진으로 TLCD의 거동은 거의 없으며 TMD의 거동만 발생하게 된다. 즉, 0.73 Hz는 TLCD의 진동수이지만 0°만큼 회전시켜 0.73 Hz로 가진하여 발생한 전달함수의 amplitude값인 34.02는 TMD의 전달함수가 되는 것이다. 그리고 0.85 Hz는 TMD의 진동수로 0°로 회전시켜 0.85 Hz로 가진하였을 경우에는 0.73 Hz보다 큰 TMD amplitude 값이 41.60로 발생하게 되었다. 반대로 Fig. 9(e)는 90°만큼 회전시켰기 때문에 TMD의 거동은 생기지 않으며 TLCD만의 거동이 발생하게 된다. 그래서 90° 만큼 회전시켜 0.73 Hz로 가진하여 발생된 전달함수의 amplitude값인 48.94는 TLCD의 전달함수가 되는 것이다. 그리고 0.85 Hz로 가진하였을 경우에는 0.73 Hz보다 작은 TLCD amplitude 값이 7.76으로 발생하게 되었다. 이를 바탕으로 실제 회전각과 전달함수의 최대값으로 구한 회전각을 아래 Table 3과 Table 4와 같이 정리를 하였다. 두 회전각은 약 1°~4°정도의 차이를 보이지만 합리적인 값이 도출되었고 오차는 실험체 회전각의 오차와 가진에 따른 최대값 예측 오차에 기인한 것으로 보인다.

실험체를 white-noise로 가진 할 경우 공진 주파수의 최대값 예측의 오류를 허용하기 때문에 TMD

방향과 TLCD 방향의 독립거동 양상을 좀더 정확히 파악하기 위하여 각각 조화하중 가진실험을 수행하였다. 실험체는 white-noise 실험과 동일하게 설치되었다. 가진 신호는 sine 조화하중이며 sampling rate는 0.001s로 하였다. 가진주기는 0.1~1.4 Hz 영역이며 실험체 고유주기 주위에서는 0.005 Hz 간격으로 가진하였다.

Fig. 12를 분석하게 되면 0°만큼 회전시켜 0.73 Hz로 가진하여 발생한 TMD의 전달함수는 38.87이며 0.85 Hz로 가진하였을 경우에는 0.73 Hz 때보다

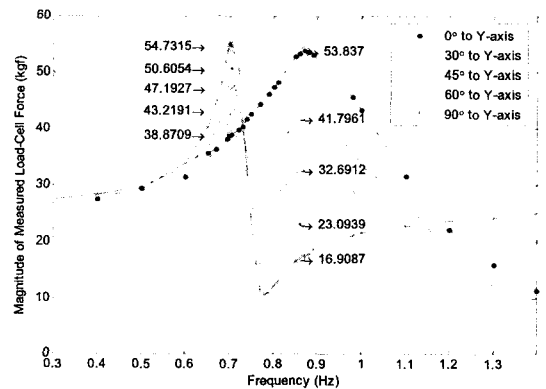


Fig. 12 Transfer functions from the table acceleration to the force of load-cell under the excitation of sinusoidal waves

Table 3 Rotation angle calculated from the white-noise excitation testing results (0.73 Hz)

	0°	30°	45°	60°	90°
$\alpha$	1.439	1.439	1.439	1.439	1.439
$\beta$	1.000	1.132	1.248	1.342	1.439
$\theta$	0°	33.2°	48.8°	61.9°	90°

Table 5 Rotation angle calculated from the sinusoidal excitation testing results (0.73 Hz)

	0°	30°	45°	60°	90°
$\alpha$	1.408	1.408	1.408	1.408	1.408
$\beta$	1.000	1.112	1.214	1.328	1.408
$\theta$	0°	31.5°	46.4°	59.4°	90°

Table 4 Rotation angle calculated from the white-noise excitation testing results (0.85 Hz)

	0°	30°	45°	60°	90°
$\alpha$	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186
$\beta$	1.000	0.774	0.542	0.341	0.186
$\theta$	0°	31.8°	48.6°	64.0°	90°

Table 6 Rotation angle calculated from the sinusoidal excitation testing results (0.85 Hz)

	0°	30°	45°	60°	90°
$\alpha$	0.314	0.314	0.314	0.314	0.314
$\beta$	1.000	0.776	0.607	0.429	0.314
$\theta$	0°	34.8°	49.2°	65.8°	90°

큰 53.84로 해석되었다. 그리고 90°만큼 회전시켜 0.73 Hz로 가진하여 발생된 TLCD의 전달함수는 54.73이며 0.85 Hz로 가진하였을 경우에는 0.73 Hz보다 작은 16.91로 해석되었다.

White-noise 실험에서도 마찬가지로 Table 5와 Table 6과 같이 약 1°~4°정도의 작은 오차를 보였다. 원인 역시 실험체 회전각의 오차와 가진에 따른 최대값 예측 오차에 기인한 것으로 보인다.

조화하중의 회전각별 최대값으로 구한 계측 회전각은 white-noise 가진에 의한 결과와 거의 비슷한 결과가 나왔으며 조화하중시에 0.75 Hz에서 white-noise보다 오차를 줄인 결과를 얻었다. 또한, 1/20 축소 모델의 설계진동수인 0.82 Hz와 0.72 Hz와 거의 동일한 진동수인 0.85 Hz와 0.73 Hz가 확인되었으며 white-noise와 조화하중 실험의 모든 결과에서 나타나듯, TLCD와 TMD가 서로 독립거동을 하는 것을 확인 할 수 있었다.

## 6. 결 론

초고층 건물의 풍응답 저감을 위한 2방향 복합형 진동제어장치인 TLMD를 설계 제작하였다. 이 TLMD 실험체는 2방향을 제어한다는 점에서 한 방향을 제어하는 일반 제어장치와 구별되며, 일체형이라는 점에서 2방향을 제어하는 멀티형 제어장치와 구별된다. 마지막으로 설계 시 목표한 축소 구조물모델의 TLCD와 고무패드를 이용한 TMD의 동조된 결과를 진동대 실험을 통해 확인하였다.

(1) 실구조물의 1/20 축소 모델의 설계진동수인 0.82 Hz와 0.72 Hz와 거의 동일한 진동수인 0.85 Hz와 0.73 Hz에서 2개의 피크가 확인되었다.

(2) TLCD 진동수인 0.73 Hz에서 액체의 거동이 많은것을 확인할 수 있었으며 0.85 Hz에서는 고무패드의 거동이 많은것을 확인할 수 있었다.

(3) 0.73 Hz는 TLCD의 고유주기이며 90°에서 최대 amplitude를 확인할 수 있었으며 회전각이 증가할수록 로드셀의 전달함수가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 0.73 Hz와 반대로 0.85 Hz는 TMD의 고유주기로 0°에서 최대 amplitude를 확인할 수 있었으며 회전각이 증가할수록 로드셀의 전달함수가 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

(5) (3)과 (4)에서 TLMD가 TLCD방향과 TMD방향이 서로 독립거동함을 볼 수 있었으며, 이를 확인하기 위해서 회전각을 역계산하였다. Table 3~6의 회전각 계산 결과를 보면 알 수 있듯이, 회전 방향별(0°, 30°, 45°, 60°, 90°) 계측 회전각과 실제 회전각이 약 3°의 오차가 발생된 것이 확인되어 독립거동의 원리를 뒷받침해 주었다.

(6) 두 회전각간의 오차가 발생된 이유로는 실험체 회전의 오차와 계측된 최대값 오차에 기인한 것으로 판단된다.

## 후 기

이 연구는 (주)포스코건설 및 (재)포항산업과학연구원 연구비 지원과 (주)동일고무벨트의 협조에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21사업」 및 한국과학재단 지정 스마트사회기반시설 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Lee, S.-K., Park, E. C., Min, K.-W., Lee, S.-H. and Park, J.-H., 2007, "Experimental Implementation of a Building Structure with a Tuned Liquid Column Damper based on the Real-time Hybrid Testing Method", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, pp. 885~890.
- (2) Den Hartog, J. P., 1956, Mechanical Vibrations, 4th edn, McCraw-Hill, New York.
- (3) Soong, T. T. and Dargush, G. F., 1997, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, New York, John Wiley & Sons.
- (4) 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.
- (5) Chang, C. C. and Hsu, C. T., 1998, "Control Performance of Liquid Column Vibration Absorbers", Engineering Structures, Vol. 20, No. 9, pp. 580~586.
- (6) Wright, G., 2002, "Steadying Influence -

Damper Systems Save Millions in Cost, While Reducing Lateral Movement in Tall Buildings”, Building Design & Constuction.

(7) 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.

(8) Ahsan, K., Rtacy, K. and Yukio, T., 1999, “Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications”, Wind

and Structures, Vol. 2 No. 3, pp. 201~251.

(9) Pradipta Banerji, Mohan Murudi, Arvind H. Shah, Neil Popplewell, 2000, “Tuned Liquid Dampers for Controlling Earthquake Response of Structures”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 29 No. 5, pp. 587~602.

(10) Jangid, R. S., 1995, “Dynamic Characteristics of Structures with Multiple Tuned Mass Dampers”, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 3, No. 5, pp. 497~509.