TLCD와 TSD를 이용한 새로운 형태의 양방향 감쇠기 설계변수

Design Parameter of a New Type Bi-directional Damper Using a Tuned Liquid Column Damper and a Tuned Sloshing Damper

민 경 원*

Kyung-Won Min

(2009년 6월 17일 접수 ; 2009년 7월 20일 심사완료)

Key Words : Tuned Liquid Column Damper(동조액체기등감쇠기), Tuned Sloshing Damper(동조액체출렁임감쇠 기), Shaking Table Test(진동대실험), White Noise Excitation(백색잡음가진), Transfer Function(전 달함수), Bi-directional Damper(양방향감쇠기), Design Parameter(설계변수)

ABSTRACT

A new type bi-directional damper using a tuned liquid column damper(TLCD) and a tuned sloshing damper(TSD) is introduced in this study. Two dampers are usually needed to reduce wind-induced responses of tall buildings since they are along and across wind ones. The proposed damper has the advantage of controlling both responses with one damper. One of objectives of this study is to derive analytical dynamics to investigate coupled effects due to TLCD and TSD. Another objective is to address the effect of coupled control force due to TLCD and TSD on the dynamic characteristic of the damper based on analytical dynamics. Shaking table test is undertaken to experimentally grasp dynamic characteristics of the damper under white noise excitation. Its dynamic characteristic is expressed by the transfer function from the shaking table acceleration to the control force generated from the damper. Finally, its design parameters are identified based on the coupled dynamics, which include the mass ratio of horizontal liquid column to total liquid for a TLCD, the participation factor of the fundamental liquid sloshing for a TSD and damping ratio for both cases.

1. 서 론

풍하중을 받는 고층건물은 풍방향과 풍직각 방향 으로 진동한다⁽¹⁾. 양방향 진동은 과도할 수가 있어 감소시켜야 한다. 각각의 방향에 관한 2개의 감쇠기 를 생각할 수 있으나 한 층에 설치하기에는 공간이 많이 요구된다. 하나의 감쇠기가 양방향 감쇠기의 역할을 한다면 좋을 것이다. 이성경 등이 TMD (tuned mass damper)와 TLCD를 이용한 양방향 감 쇠기를 제안하여 진동대 실험을 거쳐 성능을 검증

850/한국소음진동공학회논문집/제19권 제8호, 2009년

하였다⁽²⁾. 한 방향으로는 TMD이기에 강성 구현을 위한 스프링 설치와 동조에 있어 어려움이 있다. TMD 대신 액체의 출렁임(sloshing)을 이용한 TSD로 대체한 양방향 감쇠기를 제안한다. 양방향으로 모두 액체의 진동을 이용하기 때문에 이성경 등이 제안한 양방향 감쇠기보다 동조가 수월하고 유지관리가 용 이하며 풍하중에 즉시 반응하는 장점이 있다.

액체를 이용한 감쇠기의 연구는 대부분 일방향 감쇠기에 관한 것이다^(3,4). 민경원 등은 수직관 및 수평관의 단면비가 다른 TLCD의 모형을 제작하여 진동대 실험을 거쳐 주요설계변수의 특성을 파악하 였다. 제안된 양방향 감쇠기는 고층건물의 2개의 주 축 방향으로 각각 TLCD와 TSD로 거동한다. 첫 번 째 목적은 TLCD와 TSD의 거동이 어떻게 서로 연

 ^{*} 교신저자; 정회원, 단국대학교 건축대학 건축공학과
 E-mail: kwmin@dankook.ac.kr
 Tel: (031)8005-3734, Fax: (031)8005-3755

관되어 있는지 해석적인 식을 유도하는 것이다. 액 체형감쇠기는 본래 비선형 감쇠항을 포함하고 있지 만, 이 연구에서는 해석상의 편의를 위하여 등가점 성감쇠로 치환된 식을 이용하기로 한다. 두 번째 목 적은 진동대 실험을 거쳐 제작된 모형이 유도된 해 석적인 식과 유사하게 진동하는 가를 검증하는 것 이다. 마지막 목적은 전달함수를 이용하여 양방향감 쇠기의 설계변수인 동조진동수, 질량참여율 및 감쇠 비 등을 추출하여 성능을 예측하는 것이다.

2. 양방향 감쇠기의 개별 운동방정식

양방향 감쇠기의 모습이 Fig. 1에 나타나 있다. 이 감쇠기가 주축 방향인 x로 풍하중을 받을 때 TLCD로 거동을 하며 주축과 직각 방향인 y로 풍 하중을 받을 때 TSD로 거동을 한다. TSD는 사각 형 통모양의 TLD과는 달리 중앙 부분이 비어 있는 새로운 형태이다.

건물모델을 단자유도로 치환하면, Fig. 2와 같이 2 자유도계의 건물-감쇠기로 모델링 할 수 있다. 이것의 운동방정식은 다음 식(1)과 (2)와 같이 유도된다⁽⁴⁾.

$$M_{x}\ddot{X}(t) + C_{x}\dot{X}(t) + K_{s}X(t)$$

$$= -\left[\rho AL\ddot{X}(t) + \rho AL_{h}\ddot{u}_{x}(t)\right]$$
(1)

$$\rho AL\ddot{u}_{x}(t) + \frac{1}{2}\rho A\eta |\dot{u}_{x}(t)| \dot{u}_{x}(t) + 2\rho Agu_{x}(t)$$

$$= -\rho AL_{b}\ddot{X}(t)$$
(2)

X(t)와 ux(t)는 건물의 변위와 TLCD내의 액체표 면의 수직변위이다. Mx, Cx과 Kx는 각각 건물의 질



Fig. 1 Configuration of TLCD

량, 감쇠상수와 강성이다. *ρ*는 액체의 밀도, *η*는 수두손실계수로 TLCD 중앙부의 막힌 정도에 상관 한다. g와 *A*는 각각 중력가속도상수와 TLCD 관의 단면적이다. *L_h*와 *L_ν*는 각각 TLCD의 수평 및 수직 관 길이이며 전체 길이는 *L=L_h+2L_ν*이다.

TLCD 내의 액체의 고유원진동수는 다음과 같다.

$$\omega_x = \sqrt{\frac{2g}{L}} \tag{3}$$

식(2)는 식(3)을 적용하여 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$m_{t}\ddot{u}_{x}(t) + \frac{1}{2}\rho A\eta |\dot{u}_{x}(t)| \dot{u}_{x}(t) + m_{t}\omega_{x}^{2}u_{x}(t)$$

$$= -m_{b}\ddot{X}(t)$$
(4)

m_t = *ρAL* 와 *m_h* = *ρAL_h*는 각각 액체 전체질량 과 수평부 질량을 의미한다.

식(4)의 속도항이 연속으로 두 번 있는 두 번째 항으로 인하여 비선형 미분 방정식이어서 수치적으 로 해를 구하는데 많은 시간이 요구된다. 더구나 수 치결과만을 가지고 제어특성을 예측하기가 쉽지 않 다. Wen이 제시한 등가선형방법에 의한 등가선형감 쇠상수 C_{eq} 를 이용하였다⁽⁵⁾. 백색잡음가진에 관한 비선형 감쇠력과 점성감쇠로 가정한 감쇠력의 오차 를 최소화하여 구한 것으로 식(4)의 왼쪽에서 두번 째항의 $\dot{u}_x(t)$ 앞에 있는 식은 다음과 같이 등가감 쇠상수항으로 변경된다.

$$C_{eq} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \rho A \eta \sigma_{\dot{u}_x(t)} \tag{5}$$



한국소음진동공학회논문집/제19권 제8호, 2009년/851



Fig. 3 Equivalent linearized TLCD system

 $\sigma_{\dot{u}_{x}(t)}$ 는 TLCD액체 표면의 평균속도이다. 식(5)를 식(4)에 대입하고 $C_{eq} \equiv 2m_i \omega_x \xi_x$ 로 치

환하면 아래와 같다.

$$m_t \ddot{u}_x(t) + 2m_t \omega_x \xi_x \dot{u}_x(t) + m_t \omega_x^2 u_x(t) = -m_h \ddot{X}(t)$$
(6)

위 식은 Fig. 3과 같이 $\ddot{X}(t)$ 의 가진을 받는 등가 TMD의 운동방정식과 동일하다.

TLCD의 동적인 거동에 영향을 미치는 설계변수 들을 파악하기 위해 식(6)을 m,으로 나누면 아래와 같다.

$$\ddot{u}_x(t) + 2\omega_x \xi_x \dot{u}_x(t) + \omega_x^2 u_x(t) = -\alpha \dot{X}(t)$$
(7)

 $\alpha = m_h/m_i$ 는 액체 전체질량 대 수평부 질량 비 로 중요 설계변수이다. 식 (7)과 같이 TLCD의 감 쇠비 ξ_x 와 고유원진동수 ω_x 이외에 질량비 α 가 TLCD의 진동특성에 영향을 미치는 설계변수라는 것을 알 수 있다. 식(7)의 우변과 같이 액체 전체 질량 중에서 수평부 질량만이 관성력으로 작용하여 TLCD의 가진력으로 참여한다는 것을 알 수 있다.

이 연구에서 제안한 양방향 감쇠기가 v방향으로 거동할 때는 TSD의 역할을 한다. 건물을 단자유도 계로 치환하면 Fig. 4와 같이 건물-TSD의 2자유도 계로 나타낼 수 있다. 건물의 1차모드를 대상으로 하면 M_v, C_v와 K_v는 건물의 1차모드질량, 1차모드 감쇠 및 1차모드강성을 의미하는 상수이다. Y(t)는 건물 변위로서 TLCD만의 동적특성을 고려하는 경 우 이러한 건물에 의한 변위가 TLCD가 가진입력 으로 작용한다.

길이비 H/L,,가 0.04~0.5인 수심이 얉은 파동이 론에 따르면 액체표면 r(y,t)은 아래와 같은 고유 원진동수로 진동한다⁽⁶⁾.





Fig. 4 Structure-TSD system

$$\omega_{y} = \sqrt{\frac{\pi g}{L_{w}}} \tanh\left(\frac{\pi H}{L_{w}}\right)$$
(8)

H와 Lw는 각각 액체의 깊이와 TSD의 폭이다. 액체의 움직임으로 고유원진동수, 강성과 감쇠가 강 한 비선형을 나타낸다. Chang 등은 다음과 같이 등 가의 질량, 감쇠 및 강성의 식을 제시하였다⁽⁷⁾.

$$m_{y} = \beta m_{t} \tag{9}$$

$$c_y = 2\omega_y \xi_y m_t \tag{10}$$

$$k_y = \beta \omega_y^2 m_t \tag{11}$$

 $\beta = (8L_w/\pi^3 H) \tanh(\pi H/L_w)$ 는 액체의 출렁임에 관련된 1차 모드 참여질량비이다.

식(9)~(11)을 이용하여 건물과 TSD의 연립미분 방정식을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$M_{y}\ddot{Y}(t) + C_{y}\dot{Y}(t) + K_{y}Y(t) = -\left[m_{t}\ddot{Y}(t) + \beta m_{t}\ddot{u}(t)\right]$$
(12)

$$\beta m_i \ddot{u}_y(t) + 2\omega_y \xi_y m_i \dot{u}_y(t) + \beta \omega_y^2 m_i u_y(t) = -\beta m_i \ddot{Y}(t)$$
(13)

식(13)은 등가의 TMD로 판단할 수 있으며 Fig. 5와 같다. k_v 와 c_v 는 각각 $\beta \omega_v^2 m_t$ 와 $2\omega_v \xi_v m_t$ 이다. 식(13)을 m_t로 나누면 아래와 같다.

$$\beta \ddot{u}_{v}(t) + 2\omega_{v}\xi_{v}\dot{u}_{v}(t) + \beta\omega_{v}^{2}u_{v}(t) = -\beta \ddot{Y}(t)$$
(14)



Fig. 5 Equivalent linearized TSD system

위 식에서 알 수 있듯이 TSD에서의 설계변수가 참여질량비 β, 감쇠비 ^ζ,와 고유원진동수 ω,이다.

3. 백색잡음 가진 실험

3.1 실험체

실험체의 형상은 Fig. 6에 나타나 있다. 제안된 양방향감쇠기의 주축방향으로의 TLCD는 기존의 U 자형과 동일하나 TSD는 기존의 TLD와는 중앙부분 의 면적 $(L_h - t) \times (H - t) \times L_w$ 이 없는 형태이다.

양방향 감쇠기의 설계 변수는 첫째로 액체높이 H와 폭 L_w이다. 높이 H는 식(3)을 이용하여 주어 진 설계진동수인 1.23 Hz를 만족하도록 결정되었다. 폭 L_w도 동일한 진동수 1.23 Hz를 만족하도록 식 (8)을 이용하여 구하였다. 고층건물의 주축 및 직각 인 축 방향의 고유진동수가 동일한 경우를 가정하 여 양쪽진동수를 동일하게 하였다.

액체로는 물을 이용하였다. Table 1에 양방향 감 쇠기 실험체 치수 및 질량을 나타내었으며 수평관 과 수직관의 단면적은 동일하다.

3.2 실험시스템

Fig. 7과 같이 진동대 위에 설치된 양방향 감쇠기 는 일축 방향으로 가진된다. 전단형 로드셸(sheartype load-cell)이 양방향 감쇠기와 진동대 사이에 설치가 되어 감쇠기의 수평방향 관성력에 의한 힘 을 측정한다. 진동대 위에 설치된 가속도계는 입력 가속도를 계측한다. 감쇠기의 내부에 설치된 파고계 는 물 표면의 변위를 측정한다.

TLCD와 TSD의 독립된 거동 외에 서로 연관된 거동을 파악하기 위하여 회전이 가능한 설치대 (rotational jig)를 만들어 양방향 감쇠기를 위에 고 정시켰다. 회전설치대는 TLCD 방향과 θ각도만큼 회전시켜 감쇠기를 설치할 수 있다. 45°만큼 회전시



(unit: mm, kg)						
t	L_h	L_{v}	Н	L_w	m_h	m_t
44	144	92	114	380	2.41	5.5





켜 입력가진이 TLCD와 TSD 양쪽 감쇠기의 거동 에 영향을 주어 연관된 거동을 파악할 수 있다

3.3 동적특성

양방향 감쇠기의 동적특성은 입력인 가속도와 출 력인 힘의 비인 전달함수를 구하여 파악하였다. 입력 가진은 0Hz부터 15Hz까지의 대역을 가지는 백색잡 음이다. 식(5)를 보면 TLD의 감쇠는 액체속도응답에 의존하기 때문에 입력 가진 크기 및 진동수에 따라

한국소음진동공학회논문집/제19권 제8호, 2009년/853



Fig. 8 Experimentally measured transfer functions from shaking table acceleration to load-cell force

변화한다⁽⁸⁾. 이 실험에서는 가진 입력크기의 변화에 다른 변수파악이 목표가 아니기 때문에 액체속도 응답의 평균이 매실험마다 일정하게 유지되도록 백 색잡음크기를 조절하였다. 입력인 진동대 가속도와 출력인 감쇠기에 설치된 로드셸에 의한 제어력의 비는 다음과 같다.

$$T(s) = \frac{F(s)}{A(s)} \tag{15}$$

여기에서, *s* = *iw* 는 라플라시안 변수이며 *T*(*s*), *F*(*s*)와 *A*(*s*)는 각각 전달함수, 로드셸 측정값, 가속 도 측정값을 라플라스 변환한 것이다.

Fig. 8은 양방향 감쇠기의 진동대와의 각도를 변 화시켜 가면서 구한 전달함수이다. 측정된 전달함수 는 힘/가속도이기 때문에 단위가 질량인 kg이다. 설 계 동조진동수가 TLCD 및 TSD가 모두 1.23 Hz 이다. 그림에서 볼 수 있듯이 각도가 0°인 TLCD인 경우에는 고유진동수가 1.25 Hz, 각도가 90°인 TSD 인 경우에는 1.32 Hz로 설계진동수인 1.23 Hz보다 높게 나타났다. 그 사이의 각도에서는 고유진동수가 위의 양극 진동수 사이에 있다. TSD의 고유진동수 가 높게 측정된 이유는 중앙부 하단의 물이 움직이 지 않아 양쪽 TSD의 물과 마찰으로 작용하여 강성 이 증가된 것으로 파악된다.

4. 연계된 제어력

Fig. 9는 일축방향 가진진동대와 TLCD 방향과 각 도 θ 인 것을 나타내고 있다. 진동대 가속도 $\ddot{X}_{\theta}(t)$





Fig. 9 Schematic view of TLCSD under the excitation of incident wave with an angle

와 TLCD의 관성력인 힘 $f_{\theta}(t)$ 이 측정된다. 진동대 변위를 $X_{\theta}(t)$ 를 각도 θ 로 분해하면 각각 TLCD와 TSD 방향으로 X(t)와 Y(t)로 나타낼 수 있다. 마찬가 지로 $f_{\theta}(t)$ 의 각 방향 제어력은 $f_{TLCD}(t)$ 와 $f_{TSD}(t)$ 로 분해된다. 이렇게 분해된 변위와 제어력은 식 (6) 과 식 (14)에 나타난다.

진동대 가속도와 제어력의 관계를 TLCD와 TSD 의 운동방정식을 이용하여 라플라시안 변환하고 다 음과 같이 입력 대 출력의 비인 전달함수 식을 유 도할 수 있다.

$$\frac{F_{\theta}(s)}{\ddot{X}_{\theta}(s)} = \left[(m_t + m_a) - \frac{\alpha^2 m_t s^2}{s^2 + 2\xi_x \omega_x s + \omega_x^2} \right] \cos^2 \theta \\ + \left[(m_t + m_a) - \frac{\beta^2 m_t s^2}{\beta s^2 + 2\xi_y \omega_y s + \beta \omega_y^2} \right] \sin^2 \theta$$
(16)

위 식을 관찰하여 보면 저진동수 가진이 될수록 정적 질량인 (*m_i* + *m_a*)으로 수렴하며 고진동수로 갈수록 다음과 같이 수렴하는 것을 알 수 있다

$$(m_t + m_a - \alpha^2 m_t) \cos^2 \theta$$

+ $(m_t + m_a - \beta m_t) \sin^2 \theta$ (17)

위 식의 오른쪽 항을 정적질량으로 나누어 전달 함수를 무차원화하면 다음과 같다.

$$T(s) = \left[1 - \frac{\alpha^2 m_t s^2}{(m_t + m_a)\left(s^2 + 2\xi_x \omega_x s + \omega_x^2\right)}\right] \cos^2 \theta + \left[1 - \frac{\beta^2 m_t s^2}{(m_t + m_a)\left(\beta s^2 + 2\xi_y \omega_y s + \beta \omega_y^2\right)}\right] \sin^2 \theta$$
(18)

5. 변수 식별

양방향 감쇠기의 거동에 영향을 주는 변수들이 전 달함수 식(18)에 나타나 있다. 양방향 감쇠기의 물과 물통의 총 질량인 *m*_i와 지그 등 부가질량인 *m*_a는 미 리 계측할 수 있다. TLCSD와 TSD의 고유각진동수 인 *ω*_x와 *ω*_y는 각각 측정된 전달함수에서 쉽게 구 할 수 있다. 그 외의 변수들인 **p**=[*α*, *ξ*_x, *β*, *ξ*_y]⁷를 식별하면 된다. 변수식별은 다음과 같이 실험으로 구한 전달함수 *T*(*s*)와 식 (18)인 해석식과 오차를 최소화하면서 **p**=[*α*, *ξ*_x, *β*, *ξ*_y]⁷ 을 찾는 최적화 기 법으로 수행되었다.

$$E(\mathbf{p}) = \sum_{\omega=\omega_{\rm l}}^{\omega_2} \left[T(i\omega) - T_{\theta}(\mathbf{p}, i\omega) \right]^2$$
(19)

변수 식별을 체계적으로 하기 위하여 다음과 같 은 변수의 제한 조건을 정하였다.

$$\alpha, \xi_x, \beta, \xi_y < 1.0 \tag{20}$$

최적화 작업은 최소자승법(least square method) 을 기반으로 한 Matlab toolbox의 'fmincon' 명령 어를 이용하였다⁽⁹⁾.

변수를 식별하여 다시 전달함수를 식(18)을 이용 하여 그려 실험 전달함수와 Fig.10에 비교하였다. 진동수를 설계 고유진동수로 나누어 x축을 무차원 화 하였다. 2쌍의 전달함수가 매우 잘 일치하는 것 을 알 수 있어 최적화 작업이 성공리에 수행된 것 을 확인할 수 있다.

5.1 감쇠비

Fig. 11은 식별된 감쇠비로 TLCD와 TSD 일 때 인 경우와 45° 각도로 입력가진 되었을 때 복합적 으로 나타나는 경우일 때이다. *ξ*,와 *ξ*,는 각각 TLCD와 TSD의 감쇠비로 각각의 방향일 때는 그 값이 최대이며 전혀 다른 방향인 90°일 때는 0°으로 나타나 실험 및 변수식별이 잘 수행되었음을 알 수 있다. 45°일 때는 양 감쇠기가 일정부분 작용하여 *ξ*,와 *ξ*,의 감쇠비가 중간값으로 나타나는 것을 확 인할 수 있다.



Fig. 10 Comparisons of experimental and analytical transfer functions



Fig. 11 Damping ratio according to the variation of incident angle

5.2 질량비

감쇠비 다음으로 중요한 설계변수가 질량비다. TMD와는 달리 액체를 이용한 감쇠기인 TLCD와 TSD는 액체의 수직 출렁임으로 인하여 액체의 총 질량이 제어력으로 작용하는 관성력이 되지 않는다. 액체 총질량의 일정부분이 횡방향 관성력인 제어력 으로 작용을 하는데 이 비율이 높을수록 제어율이 좋다고 할 수 있다.

Fig. 12은 TLCD와 TSD방향의 질량비인 α 와 β



Fig. 12 Mass ratio according to the variation of incident angle

를 나타내고 있다. 각 감쇠기의 방향일때는 TLCD 와 TSD 모두 질량비가 약 0.5와 0.6으로 최대값을 가진다. 45°일때는 두 감쇠기가 서로 작용을 하여 최 대값보다 약간 값이 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

풍하중을 받는 고층건물은 풍방향 및 풍직각 방 향으로 진동한다. 2방향 진동을 감소시켜주기 위해 서 2개의 감쇠기가 통상 요구되나 공간 및 비용 등 의 제약으로 실현되기에 어려움이 많다. 이 연구에 서 1개의 감쇠기로 2방향 응답을 제어하는 새로운 형태의 감쇠기를 제안하였다. 한 방향은 TLCD, 다 른 방향은 TSD의 역할을 하도록 설계, 제작하고 운동방정식을 유도하였다. 거동에 영향을 미치는 변 수가 포함된 전달함수식을 구하였다. 제안된 감쇠기 가 TLCD와 TSD가 독립적으로, 또는 서로 연관되 어 거동하는지 입력가진각도를 변화시켜 진동대로 가진하였다. 실험으로 전달함수를 구하였고 최적화 기법을 적용하여 해석 전달함수식과 비교하여 주요 설계변수인 감쇠비와 질량비를 구하였다. 각각의 특 성은 예상대로 입력가진에 따라 독립 또는 서로 연 관되어 나타났다.

후 기

이 연구는 2008년도 단국대학교 대학연구비(연구

년 연구비)의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) Simiu, E. and Scanlan, R. H., 1996, "Wind Effects on Structure," John Wiley & Sons.

(2) Lee, S. K., Min, K. W. and Park, E., 2008, "Dynamic Characteristic of A Bi-dirctinal Damper Using A Tuned Mass Damper and A Tuned Liquid Column Damper," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 21, No. 6, pp. 589~596.

(3) Min, K. W. and Park, E., 2009, "Dynamic Characteristic of Tuned Liquid Column Damper Using Shaking Table Test," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 620–627.

(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 Highrise Buildings, Nanjing, China, pp. 926–931.

(5) Wen, Y. K., 1980, "Equivalent Linearization for Hysteretic Systems under Random Excitation," Journal of Applied Mechanics, Vol. 47, pp. 150~154.

(6) Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M. and Chaiseri, P., 1995, "Modelling of Tuned Liquid Damper(TLD)," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 43(1/3), pp. 1883~1894.

(7) Chang, C. C. and Qu, W. L., 1998, "Unified Dynamic Absorber Design Formulas for Windinduced Vibration Control of Tall Buildings," The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 7, No. 2, pp. 147~166.

(8) Tait, M. J., 2008, "Modelling and Preliminary Design of a Structure-TLD System," Engineering Structures, Vol. 30, No. 10, pp. 2644~2655.

(9) The Math Works, Inc, 2007, Simulink Reference, MATLAB® SIMULINK®