초고층 건물의 양방향 풍응답 제어를 위한 액체댐퍼 실험

Experiment of a Liquid Damper Controlling Bi-directional Wind Responses of a Tall Building

이 혜 리*·민 경 원†

Hye-Ri Lee and Kyung-Won Min

(2009년 12월 23일 접수 ; 2010년 1월 27일 심사완료)

Key Words : Bi-directional Liquid Damper(양방향액체감쇠기), SDOF Building(단자유도 건물), Reducing Responses(응답제어), Tuned Liquid Column Damper(동조액체기둥감쇠기), Tuned Liquid Damper(동조액체감쇠기), Shaking Table Test(진동대실험), White Noise Excitation(백색잡음가진), Transfer Function(전달함수)

ABSTRACT

This study deals with the design of a bi-directional damper using a tuned liquid damper(TLD) and a tuned liquid column damper(TLCD) for a SDOF building. 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 a single damper. The damper used in this study behaves as both a TLCD in a specific translational direction and a TLD in the other orthogonal direction. This paper presents experimental verification to confirm its control performance. First, shaking table test is carried out to investigate reducing responses by the damper. Control performance of the damper is expressed by the transfer function from shaking table accelerations to SDOF building ones. Testing results show that the damper reduced bi-directional responses of a SDOF building. Also, it reduced torsion responses.

1. 서 론

최근 들어 전세계적으로 다수의 초고층 건축물이 건설되고 국내에서도 여러 곳에 초고층 건축물이 건설되고 있으며 계획 중에 있다. 초고층 건축물의 구조시스템 및 설계를 좌우하는 것은 주로 풍하중이며 풍동실험기술, 구조재료, 시공기술 등 관련기술의 비약적인 발전으로 인해 충분한 내풍성능을 갖는 초고층 건축물의 건설기술이 일반화 되어 가

고 있다. 초고층 건축물은 풍진동에 취약하여 진동에 의한 거주자의 업무 수행이나 안락에 문제가 발생하기 쉽다. 풍하중을 받는 고층건물은 풍방향과 풍직각 방향으로 진동한다⁽¹⁾. 양방향의 풍하중에 대해 각각의 감쇠기로 응답을 제어할 수도 있으나 2개의 감쇠기를 설치할 경우 경제성과 설치시의 공간의 제약 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 양방향 풍하중 제어가 가능한 하나의 감쇠기를 필요로 한다. 이성경 등이 TMD(tuned mass damper)와 TLCD(tuned liquid coulumn damper)를 이용한 양방향 감쇠기를 제안하여 진동대 실험을 거쳐 성능을 검증하였다⁽²⁾. 이는 한 방향으로만 TMD이기에 강성 구현을 위한 스프링 설치와 동조에 있어 어려움이 있다. 민경원이 TMD 대신 액체의 출렁임

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

Tel : (031)8005-3734, Fax : (031)8005-3755

* 단국대학교 건축공학과

(sloshing)을 이용한 TLD(tuned liquid damper)로 대체한 양방향 감쇠기를 제안하였다. 제안된 감쇠기는 TLCD와 TLD가 독립적으로, 또는 서로 연관된 거동을 입력 가진 각도를 변화시켜 실험하여 전달 함수를 구해 주요 설계변수인 감쇠비와 질량비를 구하였다. 각각의 특성은 입력 가진에 따라 독립 또는 서로 연관되어 나타남을 밝혔다⁽³⁾.

이처럼 현재까지는 양방향 액체 감쇠기 자체의 고유진동수, 질량비 및 감쇠비에 대해서만 연구가 이루어져 왔다. 이 논문에서는 단자유도 건물에 하나의 양방향 액체 감쇠기를 설치하여 양방향 응답 제어를 실험으로 검증하였다. 풍방향 및 풍직각 방향에 따라 양방향 거동을 하는 건물을 묘사하기 위하여 일방향 진동대 방향과 건물의 주축방향을 서로 비틀어지게 설치하였다. 양방향 액체 감쇠기는 건물의 주축방향과 일치하게 설치하였다. 그리고 가진 진폭을 변화시켜 진동대 실험을 수행하였다. 실험결과를 통해 건물의 고유진동수, 각 축 방향 가속도 응답제어 및 비틀림 응답제어를 검토하여 양방향 감쇠기의 성능을 검토하였다.

2. 건물과 양방향 액체형 감쇠기 운동방정식

Fig. 1은 건물이 풍하중을 받을 때 풍방향과 풍직각 방향으로 거동하는 모습을 나타낸다. 양방향 풍하중 응답 제어를 위해 두 개의 감쇠기를 설치할 경우 경제성과 설치 시 공간의 제약 등의 문제가 발생할 수 있다. 이 연구에서는 Fig. 2와 같은 형태의 bi-directional liquid damper(BLD)를 사용하였다. 이것은 건물의 최상층에 설치되어 수조 내부 액체의 운동에 의해 풍하중에 대한 건물의 양방향 응답을 하나의 감쇠기로 제어하게 된다. 건물이 풍직각 방향으로 진동할 때에는 TLD또는 TLCD로 거동을 하며 풍방향으로 진동할 때에는 TLCD 또는 TLD로 거동하여 건물을 제어하게 된다.

2.1 TLCD가 설치된 건물의 운동방정식

건물이 x 방향으로 거동할때는 TLCD의 제어성능이 나타난다. 고층건물의 풍응답 거동은 건물의 1차 모드가 지배한다. 고층건물의 1차 모드에 관련된 질량, 강성으로 변환하여 단자유도 건물로 모델링 할

Fig. 1 Along- and across-wind response of a tall building

Fig. 2 Bi-directional liquid damper

Fig. 3 SDOF building-TLCD system

수 있다. 따라서 Fig. 3과 같이 단자유도 건물에 설치된 TLCD의 2자유도계로 치환할 수 있다. 건물과 TLCD의 운동방정식은 각각 식 (1)과 (2)와 같다.

$$M\ddot{d}_x(t) + C_x\dot{d}_x(t) + K_x d_x(t) = F_x(t) - [m_t\ddot{d}_x(t) + m_h\ddot{u}_z(t)] \quad (1)$$

$$m_t\ddot{u}_z(t) + \frac{1}{2}\rho A\eta|\dot{u}_z(t)|\dot{u}_z(t) + m_t\omega_x^2 u_z(t) = -m_h\ddot{d}_x(t) \quad (2)$$

여기서 $d_x(t)$ 와 $u_z(t)$ 는 건물의 x 축 방향에 대한 변위와 TLCD 수조 내부의 액체의 변위이다. M 은 건물의 질량, C_x , K_x 는 건물의 x 축 방향의 감쇠상수와 강성을 나타낸다. $F_x(t)$ 는 x 방향으로 작용하는 풍하중을 나타낸다. ρ , η , g 는 각각 액체의 밀도, 수두손실계수, 중력가속도를 나타내고, A 는 액체 기둥의 단면적을 나타낸다. L_v , L_h 는 수평과 수직기둥의 길이를 나타내며 액체의 총 길이는 $L=2L_v+L_h$ 로 표현된다. $m_t=\rho AL$, $m_h=\rho AL_h$ 로 액체의 총 질량과 수평기둥의 액체 질량을 나타낸다. 식 (3)은 TLCD의 고유진동수이다.

$$\omega_x = \sqrt{2g/L} \quad (3)$$

식 (1)과 (2)의 양쪽에 건물변위 $d_x(t)$ 와 TLCD변위 $u_z(t)$ 가 있다. 식 (2)에는 $\frac{1}{2}\rho A\eta|\dot{u}_z(t)|\dot{u}_z(t)$ 가 있다. 즉 연립비선형 미분방정식의 형태이다. 수치적으로 해를 구하기 쉽지 않고 제어특성을 예측하기 어렵다. Wen이 제시한 등가선형방법을 이용하여 식 (2)를 등가선형으로 치환하였다. 등가선형감쇠상수 C_{eq} 는 다음과 같다⁽⁴⁾.

$$C_{eq} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\rho A\eta\sigma_{\dot{u}_z(t)} \quad (4)$$

$\sigma_{\dot{u}_z(t)}$ 는 TLCD액체 표면의 평균속도이다.

식 (4)를 식 (2)에 대입하고 C_{eq} 를 $2m_t\omega_x\xi_x$ 로 치환하면 아래와 같다.

$$m_t\ddot{u}_z(t) + 2m_t\omega_x\xi_x\dot{u}_z(t) + m_t\omega_x^2 u_z(t) = -m_h\ddot{d}_x(t) \quad (5)$$

여기서, ξ_x 는 TLCD의 등가점성감쇠비이다. 식 (5), 식 (2)와는 달리 선형형태의 미분방정식이다.

2.2 TLD가 설치된 건물의 운동방정식

건물이 y 방향으로 거동할 때는 TLD의 제어성능이 나타난다. Fig. 4는 단자유도 건물에 설치된 TLD의 모델을 나타낸다.

Chang은 건물과 TLD의 운동방정식을 각각 식 (6), 식 (7)과 같이 표현하였다.

$$M\ddot{d}_y(t) + C_y\dot{d}_y(t) + K_y d_y(t) = F_y(t) - [m_t\ddot{d}_y(t) + \beta m_a\ddot{u}_v(t)] \quad (6)$$

$$\beta\ddot{u}_v(t) + 2\omega_y\xi_y\dot{u}_v(t) + \beta\omega_y^2 u_v(t) = -\beta\ddot{d}_y(t) \quad (7)$$

$d_y(t)$ 와 $u_v(t)$ 는 건물의 y 축 방향에 대한 변위와 TLD 수조 내부의 액체의 변위이다. M 은 건물의 질량, m_a 는 액체의 총 질량을 나타낸다. C_y , K_y 는 건물의 y 축 방향의 감쇠상수와 강성을 나타낸다. y 방향으로 $F_y(t)$ 의 풍하중이 작용한다. H , L_w 는 각각 액체의 깊이와 TLD의 폭이다⁽⁵⁾. Fujino 등은 길이비 H/L_w 가 0.04~0.5인 얇은 수심 파동이론에 따른 1차 모드 고유진동수로 식 (8)과 같다고 제안하였다.

$$\omega_y = \sqrt{\frac{\pi g}{L_w} \tanh(\pi \varepsilon)} \quad (8)$$

여기서, ε 는 길이비 H/L_w 를 나타낸다. β 는 액체의 출력임에 관련된 1차 모드 유효질량비로 식 (9)와 같다.

Fig. 4 SDOF building-TLD system

$$\beta = \left(\frac{8 \tanh(\pi \varepsilon)}{\pi^3 \varepsilon} \right) \quad (9)$$

식 (7)의 ξ_y 는 등가점성감쇠비 이다. 작은 하중에 대한 동조액체감쇠기의 감쇠비는 식 (10)와 같다

$$\xi_y = \sqrt{2\omega_y \nu (1 + 2\varepsilon + S)} / (4\pi \varepsilon \sqrt{gh}) \quad (10)$$

ν 는 유체의 점도(물의 경우 $0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$)를 나타낸다. S 는 surface contamination factor(물의 경우 1.0)이다⁽⁶⁾.

3. BLD 설계 및 실험

전 절에서 살펴본 바와 같이, TLCD와 TLD는 식 (3), 식 (8)과 같은 각각의 고유진동수를 건물의 고유진동수에 동조시켜 구조물의 동적 응답을 저감시킨다. 이 연구에서는 제안된 감쇠기의 양방향 진동제어 성능을 검증하기 위한 진동대 실험을 수행하였다.

3.1 건물 및 BLD 설계

(1) 단자유도 건물

이 연구에서는 건물에 대한 BLD의 응답제어를 평가하기 위해 양방향 거동을 할 수 있는 단자유도 건물을 제작하였다. 건물의 주축인 x 와 y 축의 고유진동수가 1.3 Hz로 설정하고 건물을 제작하였다.

Table 1은 단자유도 건물의 형상 및 사이즈를 나타낸다. 단자유도 건물의 기둥길이는 1000 mm, 기둥단면 사이즈는 9 mm로 작은 가진 입력으로 건물이 양방향으로 쉽게 거동할 수 있도록 기둥을 세장하게 제작하였다. 건물의 x , y 축 고유진동수를 같게 해주기 위해 정사각형 단면으로 제작하였다. 실험체의 총질량은 53 kg이다.

(2) BLD

이 연구에서는 BLD로 단자유도 건물이 2방향 응답제어를 평가하기 위하여 실험체를 제작하였다. 제작된 BLD의 형상은 Fig. 5와 같다. 실험체는 주축방향으로는 U자관 형태의 TLCD의 형상이다. 직각 축 방향으로는 $t \times H \times L_w$ 의 형태의 TLD가 두 개가 있는 형태이다. 중앙 부분의 액체는 구속되어 있

Table 1 Dimension of a SDOF building (unit : mm)

Column length	Column size	Slab size	Total mass
1000	9×9	600×600	53 kg

Fig. 5 Geometry of a BLD; (a) TLCD control direction, (b) TLD control direction

Table 2 Dimension of a BLD (unit : mm)

t	L_h	L_v	L_w	H
45	145	89.5	375	112

Table 3 Specifications of a BLD (unit : kg)

ω_x	ω_y	m_t	m_h	m_a	β
8.23 rad/sec	8.42 rad/sec	6.04	2.45	3.78	2.4

어 출렁임에 참여하지 않기 때문이다.

Table 2와 Table 3은 실험체의 치수 및 질량을 나타낸다. 물 높이 H 는 112 mm로 하였다. 이때 수치적 TLCD방향의 고유진동수는 1.198 Hz TLD방향의 고유진동수는 1.196 Hz이다. 새로운 형태의 BLD이기에 기존의 TLD의 형태와 다르고 TLCD의 고유진동수도 U자 형태의 TLCD로부터 유도된 것이기에 실험진동수와는 차이가 있다. 이와 같은 새로운 형태의 양방향 액체감쇠기에 대하여 시스템 식별을 수행한 기존의 연구결과를 통해 TLCD의 실험고유진동수는 1.31 Hz이고, TLD의 실험진동수는 1.34 Hz임을 알았다^(3,7). 이는 건물의 고유진동수로 동조시키기 위한 값이다.

3.2 진동대 실험

풍하중에 의해 양방향 거동을 하는 단자유도 건물에 설치된 BLD에 의한 응답제어를 파악하기 위해 진동대 실험을 하였다. Fig. 6은 전체 실험체를

Fig. 6 Building model with a BLD installed on the shaking table

Fig. 7 Plan of the building with a BLD on the shaking table

(a) TLCD control of x direction

(b) TLD control of y direction

Fig. 8 Accelerometers at the building for identifying torsion responses

나타낸다. 일방향 진동대 위에 제작한 단자유도 건물을 설치하였고 그 위에 제작한 BLD를 설치하였다. 진동대위에 설치된 가속도계로 진동대가속도를 측정하였다. 일방향 진동대로 양방향 거동을 하는 단자유도 구조물을 모사하기 위해 Fig. 7과 같이 진

동대 가진 방향과 경사진 방향으로 건물을 비틀어 설치 하였다. 단자유도 건물의 주축방향과 평행하게 BLD를 설치하여 건물의 x, y 방향으로 각각 TLCD와 TLD가 제어할 수 있도록 하였다.

Fig. 8의 (a)는 단자유도 건물에 x 축 방향으로 BLD의 TLCD로 제어하였음을 보여준다. Accelerometer3,4는 건물의 TLD방향의 가속도를 나타내며 이 두 가속도의 차를 이용해 건물의 y 축의 비틀림 현상을 파악하였다. Fig. 8의 (b)는 y 축 방향으로 BLD 중 TLD로 제어하였음을 보여준다. Accelerometer1,2는 건물의 TLCD방향의 가속도를 나타내며 이 두 가속도의 차를 이용해 건물의 x 축의 비틀림 현상을 파악하였다.

데이터 수집과 디지털 제어는 실시간 디지털 신호처리(DSP)를 통해 수행되었다. 디지털-아날로그(D/A)변환을 통해 화이트 노이즈 명령신호가 출력되어 진동대가 구동된다. 또한 아날로그-디지털(A/D)변환에 의해 진동대의 가속도, 단자유도 건물의 x, y 축 가속도가 측정된다. 데이터 취득은 25 Hz 저 주파수를 통과 필터를 통한 AD/DA보드인 NI PCI-6025E로 수집되는 시스템이다. 모든 계측 및 가진은 Matlab Simulink의 Real-time Windows Target으로 수행되었다⁽⁸⁾. 입력 가진은 0 Hz 부터 15 Hz까지의 대역을 가지는 백색잡음이다. 가진 하중의 크기는 gain을 1, 1.5, 2로 변화시켜서 실험을 수행하였다. 이를 진동대 가속도 분산의 평균값으로 나타내면 gain1은 0.13 m/s^2 , gain1.5, gain2는 각각 0.2006 m/s^2 , 0.2694 m/s^2 이다. 단자유도 건물의 고유진동수와 비틀림 진동수를 알기 위해, 비 제어 시의 가속도 값을 측정하였다. 단자유도 건물에 동조시킨 BLD를 설치하여 제어 시 가속도 값을 측정하였다.

4. 단자유도 건물에 설치된 BLD

이 연구에서는 단자유도 건물에 설치된 BLD의 응답제어를 분석하기 위해서 진동대 가속도와 비 제어 시, 제어 시의 단자유도 건물의 x 축, y 축, 비틀림 가속도를 사용하였다.

4.1 건물의 TLCD방향 응답제어

BLD의 TLCD방향으로 단자유도 건물의 응답제

Fig. 9 Time history of x-directional building acceleration with a TLCD for case of gain2

(a) The case of gain1

(b) The case of gain1.5

(c) The case of gain2

Fig. 10 Transfer functions from shaking table accelerations to x-directional building ones with a TLCD

Fig. 11 Transfer functions with various input loadings for a building-TLCD system

어를 알기 위해 비 제어, 제어 시에 건물의 x 축 방향에서 계측된 가속도를 비교 하였다. Fig. 9는 진동대 가진 입력이 gain2일 때 비 제어 시와 제어시의 시간에 따른 가속도 응답을 나타낸다. 제어 시 가속도 응답이 비 제어 시의 가속도 응답 보다 감소되고 있음을 알 수 있다.

단자유도 건물의 공진 시 응답제어를 더욱 효과적으로 알기 위해 진동대가속도를 입력으로 하고 TLCD가 제어하는 건물의 x 축 방향에서 계측된 가속도를 출력으로 한 전달함수를 사용하였다. Fig. 10은 BLD가 설치된 단자유도 건물의 x 축 가속도 응답의 전달함수이다. 단자유도 건물의 x 방향의 고유진동수는 1.28 Hz가 나왔다. 제어시의 BLD의 질량이 건물의 질량으로 추가되어 건물의 고유진동수가 저주파로 이동하였다. 진동대 가속도 입력크기가 피크를 기준으로 할 때, gain1일 때는 49% 감소하였다. gain1.5, gain2일 때는 가속도 응답이 각각 62%, 72% 감소하였다. BLD가 x 축 방향 고유진동수의 응답을 더욱 효과적으로 제어를 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 가진 입력크기에 따른 제어된 x 축 가속도응답의 전달함수 이다. 가진 입력크기가 커질수록 건물 응답의 피크치가 줄어들고 있다. 이를 통해 입력크기가 증가함에 따라 감쇠비가 증가하는 TLCD의 비선형 특성이 나타나는 기존의 연구결과와 일치한다⁽⁷⁾.

4.2 건물의 TLD방향 응답제어

BLD의 TLD방향으로 단자유도 건물의 응답제어를 알기 위해 비 제어, 제어 시에 건물의 y 축 방향에서 계측된 가속도를 비교하였다. 4.1절과 동일한 방법으로 전달함수를 구하였다. Fig. 12는 진동대 입력크기

Fig. 12 Time history of y -directional building accelerations with a TLD for case of gain2

(a) The case of gain1

(b) The case of gain1.5

(c) The case of gain2

Fig. 13 Transfer functions from shaking table accelerations to y -directional building ones with a TLD

단자유도 건물의 공진 시 응답제어를 더욱 효과적으로 알기 위해 4.1절과 같은 방법으로 전달함수를 구하였다. Fig. 13는 BLD가 설치된 건물의 y 축 응답의 전달함수를 나타낸다. 건물의 y 축 고유진동수는 1.31 Hz이고 BLD의 TLD방향으로 제어되었다. 진동대 가속도 입력크기가 gain1일 때 응답의 피크치가 25 %감소하였으며, gain1.5, gain2일 때 응답의 피크치가 각각 37 %, 47 % 감소하였다. 제어 시에 피크가 두 개로 나타나는 것은 BLD가 BLD도 질량체로 인식하여 2자유도 건물로 해석되기 때문이다. 감쇠기의 감쇠비가 증가하면 하나의 피크로 바뀌게 된다⁽⁹⁾. TLD에 감쇠네트 등을 설치하여 감쇠비를 높일 수 있다.

Fig. 14는 가진 입력크기에 따른 제어된 y 축 응답으로 이 또한 가진 입력크기가 커짐에 따라 응답이 줄어들었다. TLD는 가진 진폭의 크기가 커질수록 “robust” 에너지 소산 장치로 작용하는 비선형적 특성이 나타남을 알 수 있다⁽¹⁰⁾.

Fig. 14 Transfer functions with various input loadings for building-TLD system

Fig. 15 Trajectory of x -directional accelerations with a TLCD and y -directional ones with a TLD

Fig. 15는 TLCD, TLD방향의 건물의 가속도를 각각 x , y 축으로 나타내었다. 이를 통해 건물의 x , y 방향의 건물의 응답제어를 동시에 알 수 있다. 건물의 x 방향은 비 제어 시에 $-1\sim 1\text{ m/s}^2$ 의 가속도가 나타났으며, 제어 시에는 $-0.5\sim 0.5\text{ m/s}^2$ 의 가속도가 나타나 제어시의 응답이 감소함을 알 수 있다. 건물의 y 방향은 비 제어 시에 $-0.6\sim 0.6\text{ m/s}^2$ 의 가속도가 나타나고 제어 시에는 $-0.4\sim 0.4\text{ m/s}^2$ 의 가속도가 나타나 제어시의 가속도 응답이 감소됨을 알 수 있다. 건물의 x 방향의 가속도 범위가 y 방향의 가속도 범위보다 더 큰 이유는 건물의 x 방향이 가진 방향으로 더 많이 비틀어져 있기 때문이다. 가속도 궤적은 원래 대각선 방향의 일직선으로 나타나야 하는데 넓은 범위로 나타나는 이유는 건물의 비틀림 현상과 x , y 방향으로 동일한 가속도가 주어지지 않았기 때문이다. 이 가속도 궤적을 통해서도 BLD가 건물의 양방향 응답을 제어하고 있음을 알 수 있다.

4.3 건물의 비틀림 응답제어

이 연구에 설치된 단자유도 건물의 비틀림 현상을 파악하기 위해 각 방향의 가속도 차를 이용하였다. Fig. 16은 진동대 가속도를 입력으로 하고 x 축 방향의 가속도 차를 출력으로 하는 전달함수이다. 여기서, 비틀림 진동수가 2.2 Hz 로 나타났다. 이는 건물의 x 축 방향 가속도 응답 전달함수에서 2.2 Hz 로 나타난 응답과 동일하다. BLD는 비틀림 응답의 피크 기준으로 72 % 감소시켰다.

Fig. 16 Transfer functions from shaking table accelerations to x -directional building torsion ones with a TLCD

Fig. 17은 진동대 가속도를 입력으로 하고 y 축 방향의 가속도 차를 출력으로 하는 전달함수이다. 이

Fig. 17 Transfer functions from shaking table accelerations to y -directional building torsion ones with a TLD

(a) x -direction

(b) y -direction

Fig. 18 Torsion transfer functions with various input loadings for building-BLD system

또한 피크치의 진동수가 2.2 Hz로 나타났고 건물의 y축 방향 가속도 응답 전달함수에서 2.2 Hz로 나타난 응답과 동일하다. 이로써 2.2 Hz가 비틀림 진동수임을 확인 할 수 있었다. BLD로 제어된 y축의 비틀림 응답이 피크기준으로 71 % 감소하였다.

Fig. 18은 가진 입력크기에 따른 각 축 방향의 비틀림 응답을 나타내었다. 축 방향의 응답제어와 마찬가지로 비틀림 응답도 가진 크기가 커짐에 따라 감쇠효과가 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 이로써 BLD가 축 방향 응답 뿐 만 아니라 건물의 비틀림 응답제어에도 효과적임을 알 수 있다.

3. 결 론

이 연구에서는 TLCD와 TLD로 구성되어 있는 하나의 BLD를 사용하였다. 진동대 실험으로 건물에 설치된 BLD의 응답제어성능을 검증하였다. 일축 가진에 의한 건물모델의 양방향 응답을 구현하기 위해 실험체를 가진 방향에 대하여 경사지게 설치하였다. BLD의 수조크기와 수위를 조절하여 건물의 양방향 주기에 동조시켜 실험을 수행한 결과, 건물모델의 양 축의 응답이 모두 저감됨을 확인하였다. 부수적으로, 건물의 비틀림 응답도 감소되는 것을 확인하였다. 가진 입력의 크기가 커짐에 따라 BLD의 감쇠비가 증가하여 제어효과가 더욱 증가하였다.

이 연구에서는 BLD를 건물모델에 설치하여 양방향 진동제어 성능을 실험적으로 검증하는 것에 주안점을 두었다. 추후연구로서 비 제어 시 건물과 제어 시 건물의 system identification를 통해 감쇠비를 구함으로서, 진동제어성능을 정량적 평가가 필요하다. 또한 건물의 강 축 및 약 축의 강성이 상이한 경우의 제어 성능 검증도 필요하다.

후 기

이 연구는 2009학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었습니다.

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-directional Damper Using A Tuned Mass Damper and A Tuned Liquid Column Damper," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 589~596.

(3) Min, K. W., 2009, "Design Parameter of a New Type Bi-directional Damper Using a Tuned Liquid Column Damper and a Tuned Sloshing Damper," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 850~856.

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

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

(6) Fujino, Y., Pacheco, B. M., Chaiseri, P., Sun, L. M. and Koga, K., 1990, "Understanding of TLD Properties Based on TMD Analogy," JSCEJ, Structures Engineering, 36A.

(7) Lee, S. K., Lee, H. R. and Min, K. W., 2009, "Nonlinear Characteristic of a Tuned Liquid Column Damper under Various Excitation Amplitude," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 11, pp. 1167~1176.

(8) The MathWorks, Inc, 2007, Simulink Reference, MATLAB SIMULINK.

(9) Kim, H. Y., Cho, J. E., You, K. P., Kim, Y. M., 2005, "Wind-induced Vibration Control of a Tall Building Using TLDs," Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 1, pp. 139~142.

(10) Yu, J. K., Wakahara, T., Reed, D. A., 1999, "A Non-linear Numerical Model of The Tuned Liquid Damper," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28, pp. 671~686.