

실물크기 구조물에 설치된 동조액체질량감쇠기의 성능실험

Performance Test of a Tuned Liquid Mass Damper installed in a Real-Scaled Structure

허재성* 박은천** 이성경*** 이상현****
Heo, Jae-Sung Park, Eun-Churn Lee, Sung-Kyung Lee, Sang-Hyun
김홍진***** 조지성***** 조봉호***** 주석준***** 민경원†
Kim, Hong-Jin Jo, Ji-Seong Cho, Bong-Ho Joo, Seok-Jun Min, Kyung-Won
(논문접수일 : 2007년 12월 31일 ; 심사종료일 : 2008년 4월 10일)

요지

본 연구에서는 하나의 제어장치로 서로 직교하는 2방향의 건물응답을 동시에 제어할 수 있는 동조액체질량감쇠기(Tuned Liquid Mass Damper; TLMD)를 제안하고 제어성능을 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서 제안된 TLMD는 한 방향으로는 동조액체기둥감쇠기(Tuned Liquid Column Damper; TLCD) 내부에 채워진 액체의 운동에너지를 이용하여 구조물의 응답을 제어하게 된다. 그리고, 다른 한 방향 즉 TLCD의 직각 방향으로는 LM guide(linear motion guide) 위에 놓인 TLCD 수조와 내부의 액체의 질량을 이용하여 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)로 거동하게 함으로써 구조물의 응답을 감소시킨다. 이와 같은 TLMD의 양방향 독립거동 특성을 증명하기 위해 실물크기의 구조물에 설치하여 강제진동실험을 수행하였다. 실험결과, 양방향 모두 대상 구조물의 응답을 감소시키는 것을 확인하여 제안된 TLMD의 효용성을 검증하였다.

핵심용어 : 동조액체질량감쇠기, 동조액체기둥감쇠기, 동조질량감쇠기, 2방향 응답, 강제진동실험

Abstract

In this paper, a tuned liquid mass damper(TLMD) was proposed and experimentally investigated on its control performance, which can control bi-axial responses of building structures by using only one device. The proposed TLMD controls the structural response in a specific one direction by using a liquid sloshing of TLCD. Also, the TLMD reduces the response of structures in the other orthogonal direction by behaving as a TMD that uses mass of the container itself and liquid within container of TLCD installed on linear motion guides. Force-vibration tests on a real-sized structure installed with the TLMD were performed to verify its independent behavior in two orthogonal directions. Test results showed that the responses of a structure were considerably reduced by using the proposed TLMD and its usefulness for structural control in two orthogonal directions.

Keywords : tuned liquid mass damper(TLMD), tuned liquid column damper(TLCD), tuned mass damper(TMD), bi-axial response, force-vibration test

1. 서론

† 책임저자, 정회원·단국대학교 건축공학과 교수
Tel : 02-8005-3734 ; Fax : 031-8005-3755
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr
* 학생회원·단국대학교 건축공학과 석사과정
** 정회원·단국대학교 건축공학과 박사과정
*** 정회원·단국대학교 건축공학과 연구전임강사
**** 정회원·단국대학교 건축공학과 조교수
***** 정회원·경북대학교 건축공학과 전임강사
***** 포스코건설 기술연구소 과장
***** 포항산업과학연구원 책임연구원
***** 정회원·(주)티이솔루션 이사

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

초고층 건물의 건설에서는 지진이나 바람과 같은 불규칙한 동적하중에 대하여 거주자들의 편의를 위한 사용성 및 구조물의 안전성 확보를 우선적으로 고려해야 한다. 이러한 외부의 동적하중에 의한 진동을 저감시키기 위해 건설중인 건물은 물론 기존의 건물들까지 다양한 에너지 소산 장치를 적용하고 있다(김홍진 등, 2006). 이러한 제어장치는 외부하중으로부터 건물로 전달된 진동에너지를 흡수하여 다양한 형태로 에너지를 소산시키며, 액체의 점성을 이용한 Viscous Damper(손동인, 2001; Soong, 1993), 재료의 마찰을 이용한 Friction Damper(Lu 등, 2004)가 있으며, 추가적으로 설치되는 질량과 강성을 이용하는 TMD(Den Hartog, 1956), 수조내부 액체의 운동에너지를 이용한 TLD(Soong 등, 1997)와 TLCD(Sakai 등, 1989; 김홍진 등, 2003) 등이 있다. 특히, TMD 및 TLD와 TLCD는 전체 구조물 중량의 약 1~3%에 해당하는 물체를 구조물의 최상층에 설치하여 효율적인 제어성능을 발휘한다(Mohammad 등, 2006; Reiterer 등, 2005). 최근에는 이와 같은 수동형 감쇠기에 대한 설치비용과 공사 이후 유지관리의 용이성에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 뉴욕의 Random House에는 TLCD의 변형인 LCVA(Liquid Column Vibration Absorber)를 사용함으로써, 일반적인 횡력저항 구조시스템에 비해 총 공사비의 5%에 해당하는 약 100억원의 비용절감효과가 있는 것으로 조사되었다(Wright, 2002).

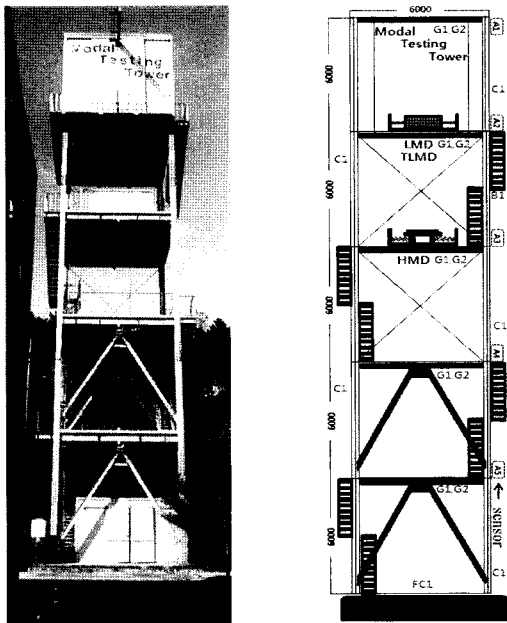
그러나 대부분의 TMD, TLD 및 TLCD는 건물의 특정한방향의 응답을 제어하도록 설계되며, 경우에 따라 진동을 보다 효과적으로 제어하기 위해 건물의 강축과 약축방향으로 여러개의 제어장치 또는 특별한 형태의 제진장치를 사용한다. 대만 타이페이101 건물에는 진자 형식의 TMD를 사용되고 있지만, 대공간을 차지하고 유지관리가 용이하지 않은 단점이 있다(Haskett 등, 2006). 상하이 국제금융센터는 원형 TLD를 사용하고 있지만, 이 경우 건물의 강축과 약축의 구조적 특성이 동일해야 하는 단점이 있다(Kareem 등). 홍콩의 Hang Lung Tower에서와 같이 직사각 형태의 TLD(Banerji 등, 2000)를 설치하여 양방향 제어를 하는 경우에는 설계된 주기와 다른 값을 갖는 양방향 주기를 동시에 동조시켜야 한다는 단점이 존재한다. MTMD(Multiple Tuned Mass Dampers; Li 등, 2002)와 같이 최상층에 질량형 제어장치를 2개 이상 설치하는 경우에는 적재하중이 증가함에 따라 슬래브 보강을 위한 공사비가 소요된다. 그리고, CTMD(Coupled Tuned Mass Damper; Desu 등, 2006)의 경우는 제어장치를 실제 적용하는데 있어서 가동 질량체가 여러 방향으로 거동하도록 하기 위한 가이드 설계와 유지보수에 어려움이 따른다. 이와 같이 다방향의 진동제

어를 위해 진자형태의 TMD 및 원형 TLD, 여러 개의 자유도를 갖는 제어장치 M-TLCD(multi tuned liquid column damper; Gao 등, 1999) 및 MTMD 등이 사용되고 있다. 이처럼 대부분의 진동 제어장치들은 2방향의 진동을 제어하기 위해 여러 개의 제어기를 진동주기에 동조시켜 구조물의 흔들림을 제어한다. 그리고 제한조건이 비교적 적으면서 서로 직교하는 2방향의 진동을 제어하는 장치에 대한 연구사례는 드물다.

본 연구에서는 유지관리 및 시공의 편의성 그리고 경제적이점 등을 고려하여 단일 제어장치로 2방향의 건물응답을 동시에 제어하는 동조액체질량감쇠기(TLMD: tuned liquid mass damper)를 제안함과 동시에 성능을 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서 제안한 TLMD는 TLCD의 1방향 제어성을 보완하기 위해 TLCD 내부의 액체와 이를 담고 있는 수조의 질량을 이용하여 TLCD의 직각 방향으로 TMD로서 거동하도록 설계한 것이다. 따라서, 한 방향으로서는 TLCD에 채워진 액체의 운동에너지로 진동을 제어하게 된다. 그리고, 다른 한 방향 즉, TLCD의 직각 방향으로 TLCD의 액체와 벽체의 질량 및 LM guide(linear motion guide)를 이용하여 TMD로 거동하게 된다. 이 때, TLCD제어에 참여하는 질량은 액체의 수평부 액체질량이며 TMD제어의 참여질량은 액체질량과 TLCD 수조의 질량이다. 또한, 본 연구에서는 단일 제어장치인 TLMD의 양방향 독립거동 특성을 증명하기 위해 층간 높이가 6m이며, 5층 철골구조인 실제 건물에 TLMD를 설치하였으며 TLCD방향과 TMD방향 및 45° 방향으로 회전시키며 연구를 진행하였다.

2. 실험대상 구조물

실험 대상 구조물은 유니슨 천안 소재의 Modal Testing Tower(이상현 등, 2006)로서 실험규모 크기의 건물이다. 이 건물은 평상시 바람에 의한 진동이 발생되고 있으나, 그림 1(a)와 같이 벽체가 없어서 풍하중에 대한 영향을 거의 인지하지 못할 정도로 작기 때문에 실험에 적합한 구조물이다. Modal Testing Tower는 5층 규모의 철골 구조물로 층고와 층질량은 각각 6m와 19.5ton이며, 구조물의 총질량은 97.5ton이다. 구조물의 높이와 폭의 비율은 30/6=5.0이다. 각층은 H형강(H-310×310×20×20) 기둥으로 구성되어 있으며 H형강 기둥은 약축과 강축 방향을 가지고 있다. 표 1은 Modal Testing Tower의 각 부재에 사용된 형강의 제원을 나타낸다. Modal Testing Tower에는 그림 1(b)와 같이 선형질량댐퍼(Linear Mass Damper; LMD)와 복합질량댐퍼(Hybrid Mass Damper; HMD)가 각각 5층과 4층



(a) 실험 구조물 사진 (b) 구조물의 정면도
그림 1 실험 대상 구조물

표 1 부재 제원

C1	H-310×310×20×20
G1	H-400×200×8×13
G2	H-450×200×9×14
B1	H-200×100×5.5×8
B2	H-400×200×8×13
RB1	H-400×200×8×13
FC1	500×500

바닥에 설치되어 있다. 5층에 설치된 LMD는 구조물의 가진과 진동제어를 할 수 있는 장치이며, 4층 바닥에 설치된 HMD는 AC모터를 사용하여 구조물을 가진할 수 있으며 건물의 약축 방향으로 설치되어 있다. 본 연구의 실험에서는 4층 바닥에 설치되어 있는 HMD로 가진을 하였으며, 5층 바닥에 설치된 LMD를 제거하고, 그 자리에 TLMD를 설치하여 구조물의 진동을 제어하였다.

실험에 앞서 실험 대상인 Modal Testing Tower의 가속도 전달함수를 White-noise 및 Sine-chirp 실험을 통해 구했다. Sine-chirp 실험은 sine 조화하중을 일정한 간격으로 진동수를 변화시키며 연속하중으로 건물을 가진시켜 건물의 고유특성을 알아내는 실험이다. 그림 2는 Modal Testing Tower의 5층 천장 가속도 전달함수를 보여 주고 있으며, 표 2는 이 가속도 전달 함수를 토대로 구한 Modal Testing Tower의 모드별 고유진동수이다. 구조물의 고유 특성을 가장 잘 나타내는 1, 2차 모드의 고유주기는 각각 0.51Hz와 1.75Hz로 해석되었다. 그림 3은 건물의 1, 2차 고유 주기의 모드형상을 보여주고 있다.

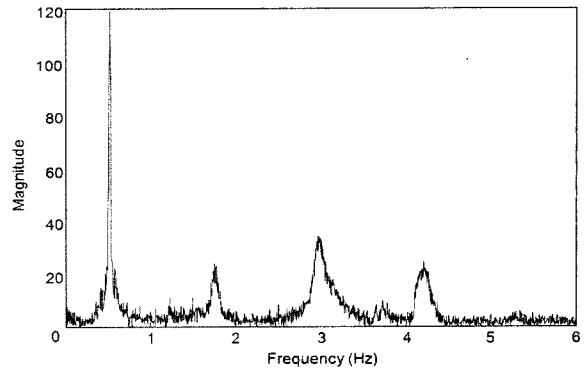


그림 2 Modal Testing Tower 5층 천장 가속도 전달함수

표 2 Modal Testing Tower의 고유진동수

Mode	1st	2nd	3rd	4th	5th
Frequency(Hz)	0.51	1.75	2.95	4.20	5.38

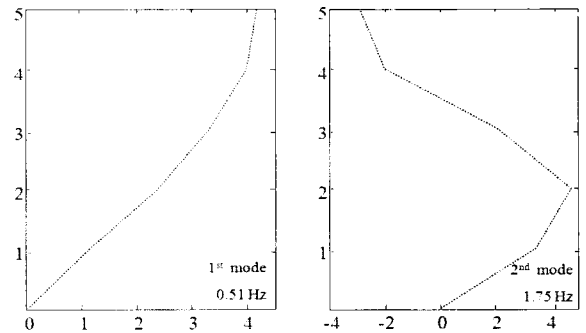


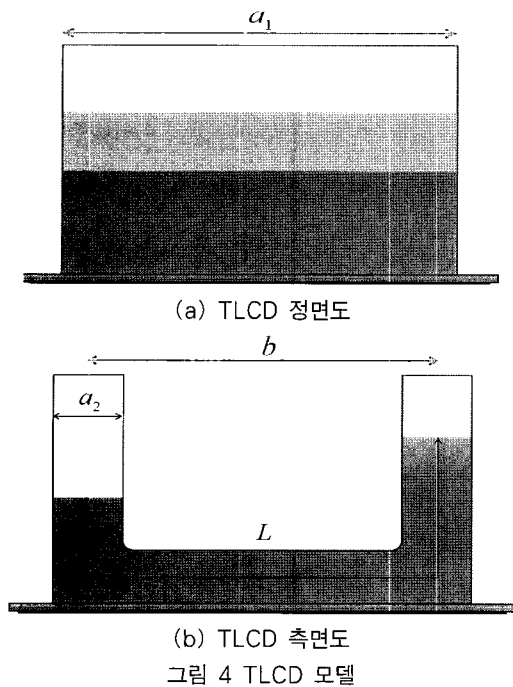
그림 3 Modal Testing Tower 모드 형상

3. TLMD 개요 및 설계

본 연구에서 제안하는 TLMD는 하나의 장치로 TLCD와 TMD의 효과를 동시에 발휘하도록 하는 복합형 양방향 제어 장치이다. TLCD 거동에 참여하는 질량은 액체의 수평부 액체질량이며, TMD 방향의 참여질량은 액체질량과 TLCD 구조의 질량의 합으로 TLCD 참여질량의 거의 2배가 된다. 따라서, TLCD 유효 질량비를 1%로 설계할 경우 TMD의 유효질량비가 2%를 초과하게 된다. 그러므로, 유효질량비의 파다와 Modal Testing Tower의 규모제한으로 TLCD의 참여질량을 0.75%로 최소화하였다.

3.1 TLCD 설계

TLCD는 TLD의 특별한 형태로서 U자 형태를 갖는다. 이러한 TLCD의 1차 고유진동수는 다음 식 (1)과 같이 산정할 수 있고, 구조물의 1차 모드 고유진동수에 동조시킬 때, TLCD의 액체 전체 길이는 다음 식 (2)와 같이 구할 수 있



다(Sakai 등, 1989).

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L}} \quad (1)$$

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

여기서, f_1 은 1차 고유진동수이며, g 와 L 은 각각 중력 가속도(9.8m/s^2)와 TLCD 액체의 전체길이이다.

TLCD의 1차 진동수를 구조물의 1차 고유진동수에 맞추는 것은 물기둥의 높이를 증가시켜 물의 중심길이 L 을 증가시킴으로써 해결이 가능하지만, 일반적으로 실제 측정된 구조물의 고유진동수가 해석상의 진동수와 다르기 때문에 그에 대한 대비가 가능해야 한다. 그림 4를 참고로 TLCD의 액체 전체질량은 ρAL 로 구하고, 제어에 참여하는 유효질량은 ρAb 로 산정한다. 여기서, ρ 는 물의 밀도이며 A 는 $a_1 \times a_2$ 인 TLCD의 수직부 단위면적이다. 그리고 b 는 TLCD의 수평부 길이이다.

Modal Testing Tower의 1차 모드의 고유주기는 0.51Hz이며, 유효질량은 85ton이다. 따라서, 참여질량비가 0.75%인 TLCD의 유효질량은 0.64ton이다. 이들 값과 식 (2)를 이용하여 Modal Testing Tower 고유주기에 동조시키기 위한 TLCD의 액체 전체길이 $L = 2g/(2\pi f_1)^2 = 2 \times 9.81 / (2\pi \times 0.51)^2 = 1.9\text{m}$ 이며, $a_1 = 1.57\text{m}$, $a_2 = 0.35\text{m}$, $b = 1.17\text{m}$ 이다. TLCD 액체의 질량은 1.04ton이며, 설계의 단순화를 위해 수평부와 수직부 단면이 같도록 설계하였다.

3.2 TLMD 설계

Modal Testing Tower의 슬래브의 크기는 $6\text{m} \times 6\text{m}$ 이며 높이가 30m로 실물크기의 구조물이다. Modal Testing Tower의 1차모드 참여질량은 85ton이며, TLCD의 전체질량 및 참여질량은 각각 1ton과 0.64ton이다. 그리고, 위에서 얻은 TLCD의 크기에 따라 TLCD 수조 제작에 사용된 철의 무게는 약 0.5ton이다. 따라서, TMD방향의 참여질량

표 3 Modal Testing Tower 및 TLMD 제원

	Modal Testing Tower	TLMD	
		TLCD	TMD
유효질량(ton)	85	0.64	1.5
참여질량비(%)	1	0.75	1.76
고유주기(Hz)	0.51	0.51	

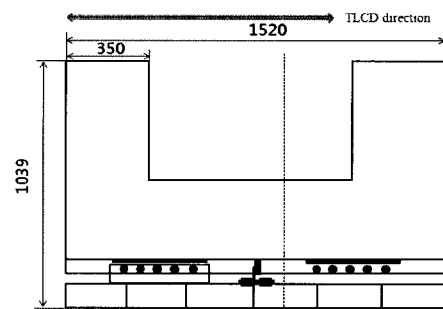
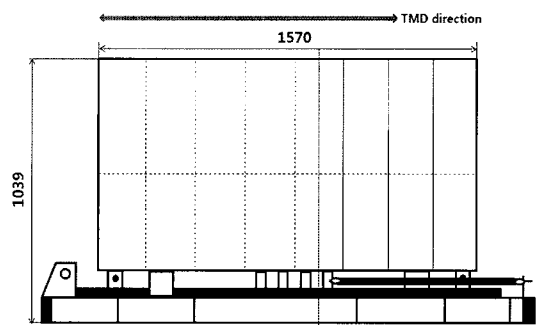
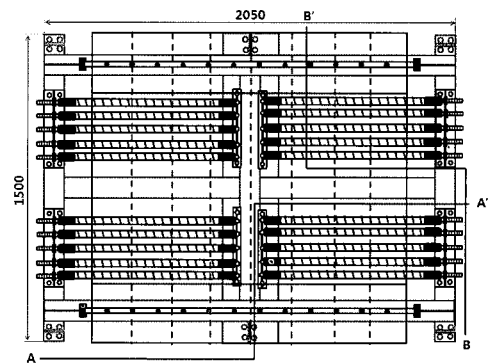


그림 5 TLMD 상세도

은 액체 전체질량 1ton과 TLCD의 벽체질량 0.5ton을 더하면 1.5ton이며, 질량비는 1.76%이다. 그리고 TLMD의 TLCD방향과 TMD방향의 진동수를 각각 다르게 설계할 수 있으나 Modal Testing Tower의 가진이 한 방향으로만 되기 때문에, TLMD의 TLCD와 TMD방향의 진동수는 모두 0.51Hz로 동일하게 설정하였다.

표 3은 Modal Testing Tower 및 Tower에 설치된 TLMD의 질량 및 주기를 정리한 것이다. 참고로 TLMD를 Modal Testing Tower에 설치하기 전에는 Modal Testing Tower의 1차 모드 주기가 0.52Hz였다. 그러나 1.5ton의 TLMD를 설치한 이후에는 중량의 증가로 Modal Testing Tower의 고유주기가 0.51Hz로 바뀌었다.

그림 5(a)는 위에서 바라본 TLMD base이며 그림 5(b)와 (c)는 각각 TMD 방향의 단면도와 TLCD 방향의 단면도를 보여주고 있다. 특히 TLMD가 TMD 방향으로 거동하게 되면 액체의 출렁임이 발생하게 되어, TMD 제어에 영향을 주어 정확한 실험이 되지 않는다. 이를 보완하기 위해 그림 5(a)와 (b)처럼 TLCD의 수직부와 수평부에 칸막이를 설치하여 액체의 흐름을 방지하였다.

4. 가진 및 계측계획

Modal Testing Tower는 동적실험 목적으로 세워진 벽체가 없는 골조구조로서, 평상시에 거의 인지하지 못할 정도로 작은 진동이 발생하기 때문에 정확한 가력실험 데이터를 얻기에 좋은 구조물이다.

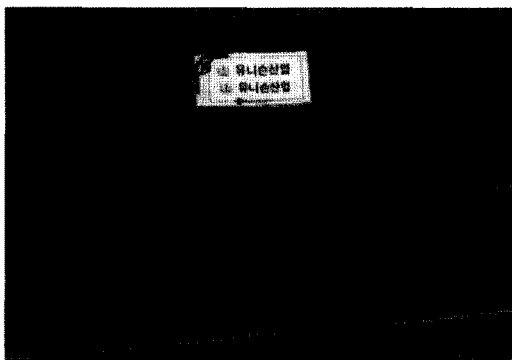


그림 6. 4층 바닥에 설치된 HMD 가진기

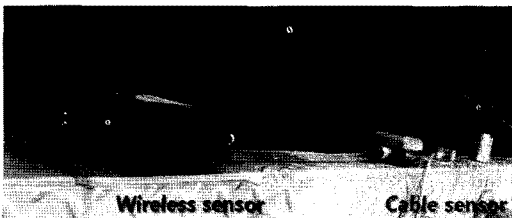
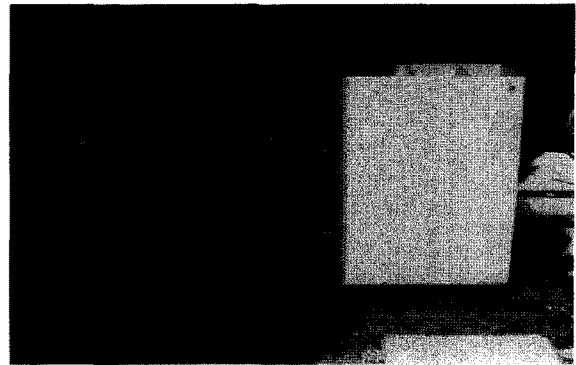
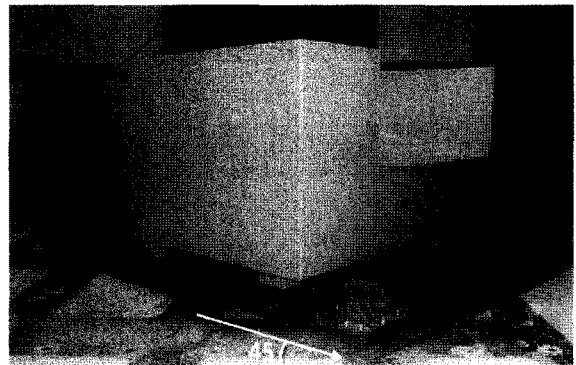


그림 7. 유무선 가속도 센서



(a) 정면도



(b) 45도 방향
그림 8 TLMD 설치 전경

본 실험에서는 그림 6과 같이 4층 바닥에 설치된 HMD로 가진을 하였다. 이 가진기에는 질량체의 과도한 진동을 피하기 위해 HMD 자체의 안전장치가 설치되어 있다. 계획된 실험을 수행하기 위해 가진이 멈추지 않도록 가진 신호는 HMD의 질량체가 안전장치 이내의 범위에서 움직이도록 생성하였다. 가진주기는 0.1~5.0Hz를 0.05Hz 간격으로 가진하였으며, 정확한 데이터를 얻기 위해 구조물의 고유주기 주위에서는 0.01Hz 간격으로 250초이상 가진하였다. 가진과 제어를 통해 나타난 구조물의 응답계측을 위해 그림 7과 같이 Modal Testing Tower와 TLMD에 유무선 가속도 센서를 설치하였다. 특히, 유무선 가속도계는 구조물의 약축 방향으로 층마다 1개씩 설치하였다.

그리고 Sine-chirp, white-noise, Sine조화하중을 사용하였다. TLMD의 양방향 독립거동을 보여주기 위해 TMD방향(0°)과 TLCD방향(90°: 그림 8(a)참조) 및 45°방향(그림 8(b)참조)으로 TLMD를 회전시키며 제어실험을 실시하였다. 가진 시스템에서의 가진신호와 계측신호는 모두 전압신호이며 가진 신호는 HMD의 인버터를 통해 전압신호에 해당하는 축력을 발생시켜 HMD의 질량체에 전달한다. 그리고 계측된 아날로그 신호는 각각의 Amp를 통해 증폭시킨 후, AD 보드를 통해 디지털 신호로 저장하였다. 그림 9는 이와

같은 가진 시스템 실험 개념도를 보여주고 있다.

5. 실험결과 및 분석

White-noise 실험을 실시하였으나 현장의 상태에 따른 관심 진동수대역 이외의 노이즈가 발생하였다. 이를 제거하기 위해 데이터 취득시 가속도 앰프에서 제공하는 30Hz 저주파 통과 필터를 적용하였다. 또한 신호 컨디셔너에서 25Hz Butterworth 아날로그 저주파 통과 필터를 사용하였다. 마지막으로 Modal Testing Tower의 1층에 위치한 자체의 전원을 사용하지 않고 외부전원을 연결하여 사용하였다.

구조물에 TLMD를 설치하여 응답제어 성능을 검토하기 위해 TLMD의 TMD(X방향) 및 TLCD(Y방향)와 45도 방향에서의 제어성능 결과를 분석하였다. 그림 10과 11은 TLMD를 TMD(0°)로 거동하도록 설치하여 실험을 수행한 Modal Testing Tower의 제어 및 비제어시의 진동수영역의 가속도 응답을 보여준다. 그림 10은 5층의 진동수별 최대 가속도 결과이며, 공진인 0.51Hz에서 제어되지 않은 구조물의 최대응답의 60%를 감소시켜 TMD 거동으로 인한 TLMD의 제어성능은 0.4이다. 또한 그림 11은 4층 가속도 결과로 최대응답의 59%를 감소시켰다.

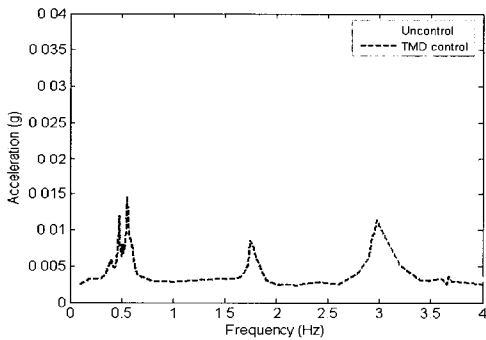


그림 10 TMD방향 진동수별 5층 가속도 최대 응답 이력

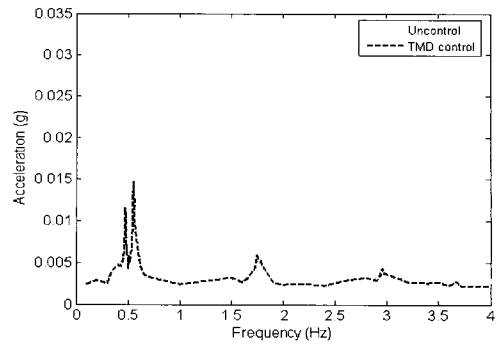


그림 11 TMD방향 진동수별 4층 가속도 최대 응답 이력

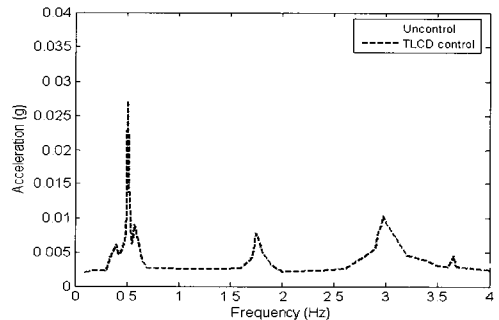


그림 12 TLCD방향 진동수별 5층 가속도 최대 응답 이력

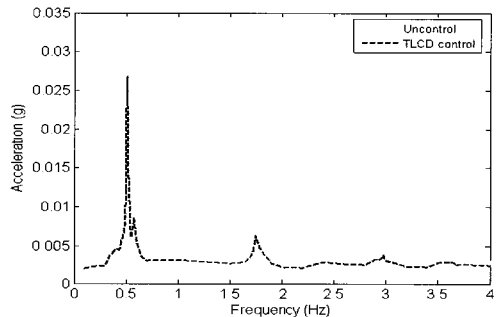


그림 13 TLCD방향 진동수별 4층 가속도 최대 응답 이력

그림 12와 13은 TLCD가 설치된 Modal Testing Tower의 제어 및 비제어시의 진동수별 가속도 응답 이력 결과를 보여

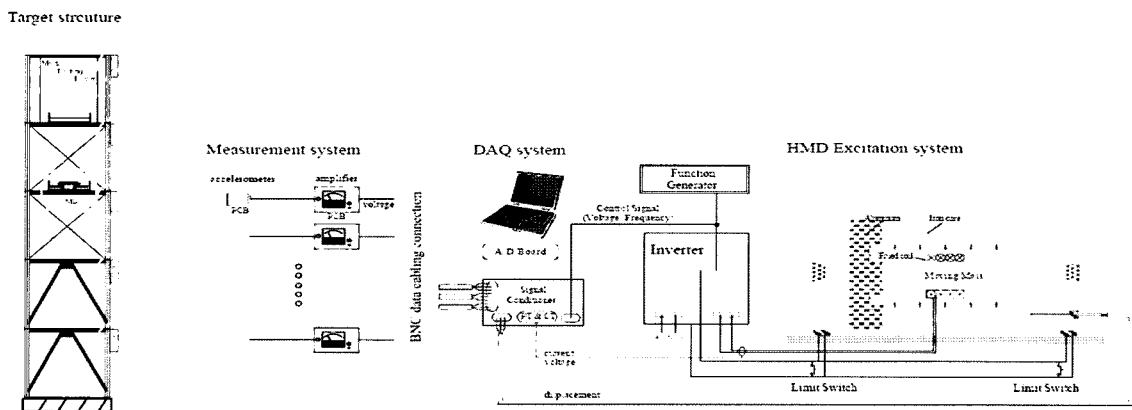


그림 9 가진시스템 실험 개념도

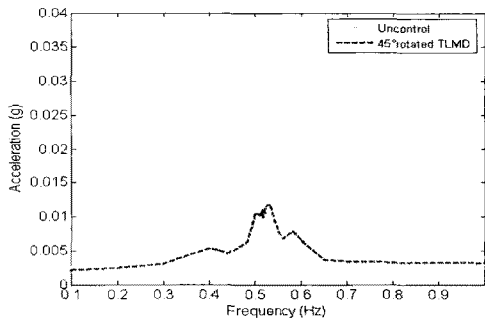


그림 14 45도 회전 진동수별 5층 가속도 최대 응답 이력

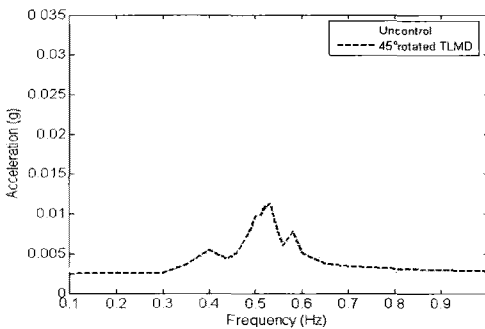


그림 15 45도 회전 진동수별 4층 가속도 최대 응답 이력

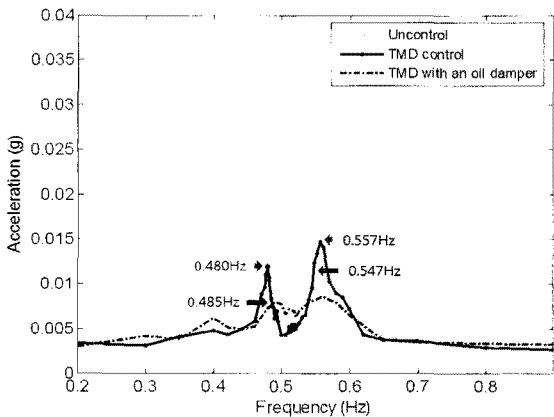


그림 16 TMD의 오일댐퍼 설치유무에 따른 제어성능 평가 비교(5층)

준다. 그림 12는 5층의 진동수별 최대 가속도 결과로 제어되지 않은 구조물 응답의 28%를 제어하여 TLCD 거동으로 인한 TLMD의 제어성능은 0.72로 나타났다. 그리고 4층의 경우, 가속도 응답의 23%를 제어하였다.

그림 14와 15는 TLMD를 45도 회전시킨 상태의 실험결과로 TMD와 TLCD가 제어에 참여한 진동수별 가속도 응답 이력 결과를 보여준다. 그림 14은 5층의 진동수별 최대 가속도 결과로 제어성능은 0.33이었으며, 그림 15은 4층 가속도 결과로 제어성능은 0.34로 나타났다.

그림 16은 TMD에 오일댐퍼를 설치하였을 경우와 설치하지 않았을 경우의 제어성능 보여주고 있다. TMD에 오일댐

퍼를 설치하지 않았을 때에는(실선) 구조물의 최대 가속도 응답의 60%를 제어하였으며, 오일댐퍼를 설치하였을 때에는(점선) 76%를 제어하였다.

TMD 거동으로 제어되는 구조물의 응답증폭계수는 peak가 두 개로 나누어지는 현상이 발생하였다(Ghosh 등, 2006). 그리고 그 진동수(0.480Hz, 0.557Hz) 사이에서 구조물의 고유진동수(0.51Hz)가 존재한다. 이 진동수 근처에서는 원 구조물의 응답보다 TMD가 설치된 구조물의 응답이 더 커지게 되었다. TMD의 유효한 가진 진동수 대역은 0.485Hz와 0.547Hz사이이며, 이 대역의 진동수에서는 원 구조물의 응답을 감소시켰다. 그리고 0.485Hz와 0.547Hz의 가속도 값의 차이가 작아지도록 하는 TMD 진동수가 최적 진동수가 된다. 이론적으로 공진인 경우, TMD의 감쇠비가 0에 가까워지면 구조물의 응답을 완전히 소거하지만 물리적인 한계와 감쇠가 0인 TMD 제작 등의 한계가 있다.

TMD에 오일댐퍼를 설치했을 경우에는 오일댐퍼를 설치하지 않았을 때보다 공진때의 제어성능이 조금 떨어졌다. 하지만 피크점들간의 가속도 차이가 거의 없어졌으며, 그 진동수 근처에서의 가속도 값도 TMD가 설치된 구조물의 응답보다 커지는 경우가 없었다. 그리고 TMD의 제어효과가 큰 진동수 대역에서 고르게 응답감소를 가져오는 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 각각의 방향에 대해서 TLCD 및 TMD로 거동하는 TLMD를 제작하고, 이를 실험 크기 구조물에 설치하여 강제진동실험을 수행함으로써 제안된 TLMD의 제어성능을 검토하였다. 또한, TMD방향에 대해서는 오일댐퍼를 추가적으로 설치하여 그 성능을 검토하였다.

(1) TLCD로 거동하는 TLMD가 설치된 구조물의 제어 및 비제어시의 진동수별 응답 이력 결과, 공진시 최상층 최대 가속도의 28%를 감소시켜 제어성능은 0.72로 나타났다.

(2) TLMD가 TMD로 거동한 경우, 공진시 최상층 최대 가속도 제어성능은 각각 0.24(오일댐퍼설치), 0.40(오일댐퍼미설치)였다.

(3) MODAL TESTING TOWER TEST에서 쓰였던 TLMD의 TLCD와 TMD의 참여질량은 각각 0.74%와 1.76%이다. 이러한 참여질량의 차이로 성능지수도 각각 0.72와 0.24/0.40로 큰 차이를 보였으나 참여질량 대비 성능지수는 비슷하게 평가 되었다.

(4) TMD에 오일댐퍼를 설치하지 않았을 때에는 제어된 응답의 peak가 두 개로 나누어지는 현상이 발생하였다. 그리고 이 진동수 근처에서는 원 구조물의 응답보다 TMD가

설치된 구조물의 응답이 더 커지게 되었다. TMD가 유효한 가진 진동수 대역은 0.485Hz와 0.547Hz사이이며, 이 대역의 진동수에서는 원 구조물의 응답을 감소시켰다.

(5) TMD에 오일댐퍼를 설치했을 경우에는 TMD가 설치되지 않은 구조물의 가속도응답보다 커지는 경우가 없었다. 그리고 TMD의 제어효과가 큰 진동수 대역에서 고르게 구조물응답을 감소시키는 것을 확인할 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

김홍진, 김현배, 조지성, 이상현, 우성식, 최기영 (2006) LCVA를 이용한 초고층건물의 풍진동 제어성능 실험 평가, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 26(1), pp.13~16.

김홍진, 김형섭, 민경원, 오정근 (2003) TMD와 TLCD의 지진응답에 대한 제어성능 평가 연구, 한국지진공학회논문집, 7(5), pp.85~91.

손동인 (2001) 건축구조물에서 지진하중에 대한 점탄성 감쇠기의 최적 설계, 석사학위논문, 서울 대학교.

이상현, 박은천, 윤경조, 이성경, 유은중, 민경원, 정란, 민정기, 김영찬 (2006) 실물 크기 구조물의 강제진동실험 및 지진응답 모사를 위한 HMD제어기 설계, 한국지진공학회논문집, 10(6), pp.103~114.

Banerji, P., Murudi, M. Shah, A.H. Popplewell, N. (2000) Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29(5), pp.587~602.

Den Hartog, J.P. (1956) *Mechanical Vibrations*, 4th edn, McCraw-Hill, New York.

Desu, N.B., Deb, S.K., Dutta, A. (2006) Coupled tuned mass dampers for control of coupled vibrations in asymmetric buildings, *Structural control and health monitoring*, 13(5), pp.897~916.

Gao, H., Kwok, K.S.C., Samali, B. (1999) Characteristics of multiple tuned liquid column dampers in suppressing structural vibration,

Engineering structures, 21(4), pp.316~331.

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

Kareem, A., Kijewski, T., Tamura, Y. Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, *Wind and Structures*, 2(3), pp.201~251.

Li, C., Liu, Y. (2002) Active multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(5), pp.1041~1052.

Lu, L.Y. (2004) Semi-active modal control for seismic structures with variable friction dampers, *Engineering structures*, 26(4), pp.437~454.

Mohammad, R.O., Mohammad, R., Amir, K.T. (2006) Tuned Mass Dmaper For Seismic Response Reduction of Tehran Tower, *4th International Conference on Earthquake Engineering*, Taipei, Taiwan, Paper No.132.

Sakai, F., Takaeda S., 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.

Chang, K. C., Lai, M. L., Soong, T.T., Hao, D. S. (1993) Seismic Behavior and Design Guidelines for Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers, *Technical Report NCEER-93-0009, National Center for Earthquake Engineering Research*, Buffalo, NY.

Soong, T.T., Dargush, G.F. (1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, New York, John Wiley & Sons.

Reiterer, M., Ziegler, F. (2005) Bi-axial Seismic Activation of Civil Engineering Structures Equipped with Tuned Liquid Column Dampers, *JSEE*, 7(1), pp.45~60.

Wright, G. (2002) Steadying Influence-Damper systems save millions in cost, while reducing lateral movement in tall buildings, *Building Design & Constuction*.

Ghosh, A., Basu, B. (2006) A closed-form optimal tuning criterion for TMD in damped structures, *Structural control and health monitoring*, 14, pp.681~692.