TLCD와 고무패드형 TMD를 이용한 2방향 TLMD의 성능평가실험

Experimental Performance Evaluation of a 2-way TLMD using a TLCD and a Rubber Bearing-type TMD

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

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

Key Words : Two-way Tuned Liquid Mass Damper(2방향 동조액체질량 감쇠기), Tuned Liquid Column Damper(동조액체기둥 감쇠기), Tuned Mass Damper(동조질량감쇠기), Shaking Table Test(진동대실험)

ABSTRACT

In this paper, a two-way tuned liquid mass damper(TLMD) using a tuned liquid column damper(TLCD) and a rubber-bearing-type tuned mass damper(TMD) was manufactured for controlling two-way direction acceleration responses of a high-rise building structure. The proposed controlling device behaves as a tuned liquid column damper in one direction and as a tuned mass damper in the other direction. In this study, Performance evaluation of the downscaled model is conducted. The results show that the two-way controllability is behaved independently each other and realscale TLMD applicable to the high-rise building can be designed.

1. 서 론

최근 국내외 초고층 구조물은 바람하중과 지진에 대한 사용성과 안정성을 확보하기 위한 방안으로 구조물에 진동을 저감시키는 제어장치를 개발하여 설치하고 있다. 이러한 제어장치 중에 질량과 강성을 이용하는 TMD(tuned mass damper), 액체가 수평을 유지하려는 중력의 힘을 이용하는TLD(tuned liquid damper), TLCD(tuned liquid column damper) 그리고 TLCD중 수평부와 수직부의 단면이 서로 다른 LCVA(liquid column vibration absorber)등의 감쇠기가 개발되고 있다. 이러한 제어장치는 적은 설치비용과 유지관리의 용이성 그리고 공사비 절감에 의해서 많은 연구가 이루어져 왔다. 실례로 미국 뉴욕의 Random House는 LCVA를 사용하여 부가감쇠장치 없이 골조에만 의존하여 횡력에 저항하는 구조시스템에 비해 약 100억원 (총공사비 대비 약 5%)의 절감효과가 있는 것으로 조사되었고, 캐나다 벤쿠버에 위치한 One Wall Center의 경우 LCVA를 설치함으로써 TMD 설치시보다 약 200만불 (약 25억원) 절약된 것으로 조사되었다.

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. 특히 홍콩의 Hang Lung Tower에서와 같이 직사각형 TLD를 설치하여 양방향 제어를 하는 경우에는 설계된 주기와 다른 값을 갖는 주기에 대하여 양방향의 주기에 대하여 동조하는 것이 매우 어렵다. 이는 TLD의 폭과 길이가 정해진 상태에서는 TLD의 주기를 변화시킬 수 있는 물높이를 조절하는 방법에서 양방

† 교신저자 ; 단국대학교 건축공학과
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr
Tel : (031)8005-3734. Fax: (031)8005-4069
* 단국대학교 대학원 건축공학과
** 경북대학교 건설공학부 건축공학과
*** 포항산업과학연구원
**** 포스코건설 기술연구소 건설기술연구팀
***** 단국대학교 건축대학 건축공학과
****** 동일고무벨트 면진제진 사업팀

향 주기에 대하여 동시에 만족하는 물높이를 찾는 것이 현실적으로 거의 불가능하며 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)등이 사용되는데, 이러한 연구 또한 하나의 모드를 효과적으로 제어하거나 여러 개의 모드가 참여하는 비중이 높을 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 설치하는 경우는 최적 제어를 위한 질량비를 만족시키기 위해 단 방향 제어장치의 질량비의 2배 이상 요구하게 되며 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.

본 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 동조액체질량감쇠기를 제안한다.

2. TLMD 설계안 개요

본 논문에서 제안하는 풍응답 제어장치가 설치될 목표 구조물은 인천시 송도에 건설중인 64층 높이의 초고층 주상복합 건물인 포스코 뉴송도 시티 Tower 1A를 1/20 스케일로 축소한 모델을 선정하고 제어장치를 설계하였다. Fig. 1 과 같이, 송도 the # 1st World에 설치될 초기 설계안은 2개의 TLCD를 y방향으로 20.5m*6m, x방향으로는 14m*6m로 되어있었다. 하지만 필요면적과 경제성 등을 고려하여 Fig. 2 와 같이 x방향의 TLCD를 설치하지 않고 y방향의 TLCD에 혼합형 TLMD를 설치하는 방향으로 실험을 수행하였다. 또한 TMD방향으로 거동시 TLCD폭이 너무 크기 때문에 TMD거동과 함께 TLD거동을 하게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 TLCD를 TMD방향으로 분할하여 TLD거동을 제거하였다.

선행설계 및 해석에 의해 모델구조물의 f_1 은 0.1623Hz로 파악되었으며, 1차 모드 질량 M_1 은 39,000ton 이다. 또한 TLCD의 유효질량은 340ton이며 TMD의 유효질량은 600ton으로 계산되었다.

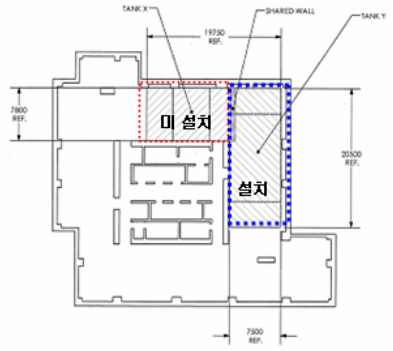


Fig. 1 2개의 TLCD가 설치된 평면도

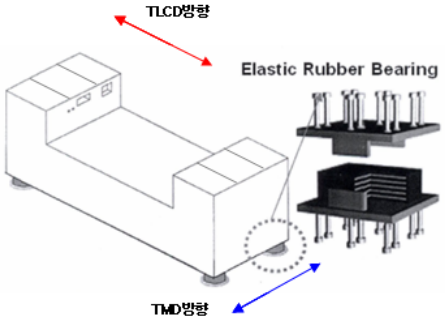


Fig. 2 TLMD 설계안 개요

3. 실험

3.1 실험 방향

1차적으로 이론식에 의거하여 설계된 TLMD가 실제 계획된 주기를 갖는 가를 평가하는 것이 중요하다. 이는 TMD나 TLD 같은 부가질량형태의 진동제어기의 성능이 설치되는 건물의 고유주기에 얼마나 정확히 동조되었는가에 의존하기 때문이다. 그리고 이번 실험의 가장 큰 특징은 X방향으로 TMD를 Y방향으로는 TLCD를 고려한 복합형 진동제어라는 점과 비선형성을 고려한 동조질량감쇠기(TMD)에 고무패드를 사용하였다는 점이다. 따라서 TLMD의 성능평가를 위해 TMD(X방향)와 TLCD(Y방향)가 서로 독립적으로 거동하여 복합형진동제어가 이루어지는지를 평가한다.

3.2 실험 개요

(1) 실험개념

본 실험에서는 실제 송도 the # 1st World에 설치될 TLCD와 같은 진동수를 갖는 실험체에 대하여 동적특성을 평가하였다. 이를 위해 1/20 크기로 축소된 TLCD 및 TMD에 대한 진동대 실험을 수행 하였다.

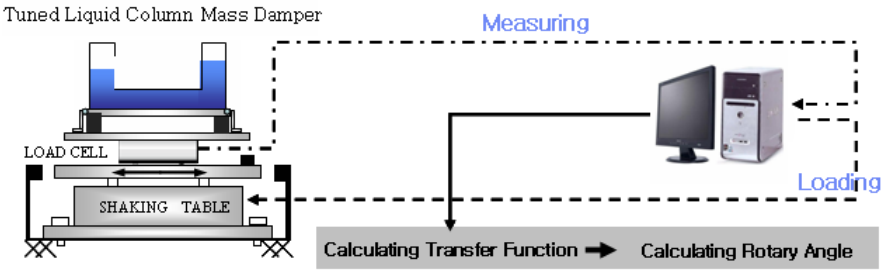


Fig. 3 TLMD 복합형 진동제어 회전각 계산 흐름도

(2) 실험체 진동수 설정

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

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

Table 1 축소모형에 적용된 상사법칙

Quantity	Dimension	Scaling Factor
Length	L	1:20
Material Density	ML^{-3}	1:1
Acceleration	LT^{-2}	1:1
Mass	M	$1:20^3$ =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 상사법칙이 적용된 축소모형 진동수

	Mode #	Full Scale	Model Scale	Ratio
Y-Direction	Mode 1	0.161Hz	0.722Hz	44.8
X-Direction	Mode 2	0.181Hz	0.812Hz	44.8

식 (1)을 1/20 축소율로 표현하면, 다음 식 (2)와 같다.

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

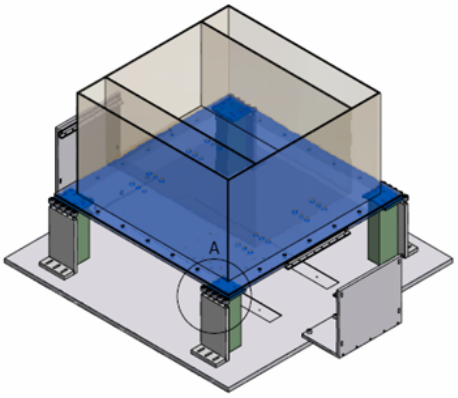
식 (2)를 사용하여, 0.161Hz를 변환하면, 1/20로 축소된 실험체의 Y방향 1차 고유진동수는 0.722Hz 이고 같은 방법으로 0.181Hz를 변환하면 실험체의 X방향 1차 고유진동수는 0.812Hz가 된다.

3.3 TLMD 실험체 제작

본 논문에서 제안하는 풍응답 제어장치가 설치될 목표 구조물은 인천시 송도에 건설 중인 64층 높이의 초고층 주상복합 건물인 포스코 뉴 송도 시티 Tower 1A를 1/20 스케일로 축소한 모델을 선정하고 제어장치를 설계하였다. 송도 the # 1st World에 설치될 초기 설계안은 2개의 TLCD를 x, y방향으로 각각 설치하였다. 하지만 시공성과 경제성 등을 고려하여 x방향의 TLCD를 설치하지 않고 y방향의 TLCD에 TMD의 개념을 추가한 혼합형 TLMD를 설치하는 방향으로 실험을 수행하였다. 또한 TMD방향으로 거동시 TLCD폭이 너무 크기 때문에 TMD 거동과 함께 TLD거동을 하게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 TLCD를 TMD방향으로 균등하게 분할하여 TLD의 거동을 제거하였다.

TLMD의 실험체는 사전 실험에 나타났었던 문제점들을 보완해가면서 제작 되었다. 먼저 LM가이드와는 달리 지속적인 관리가 필요하지 않은 새로운 형식의 TMD (고무패드사용)를 사용하였다. 고무패드를 이용하는 경우 실제적용에서는 문제가 되지 않으나 소형 실험에서는 Fine Tuning이 중요한 사항이기 때문에 스프링으로 보조튜닝을 하였다. 또한 TMD방향으로만 진동을 유도하기 위해 TLCD방향으로 베어링을 제작 및 설치하여 Y방향의 움직임을 구속하였다.

TLMD의 TMD(X방향)와 TLCD(Y방향)가 서로 독립적으로 거동하여 TLMD의 복합형진동제어가 계획대로 이루어지는지 정확한 평가를 위해 회전이 용이하도록 하부판에 회전베어링을 제작하였다. 그리하여 Y방향에 대하여 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 회전 방향에 대한 실험이 가능하도록 하였다.



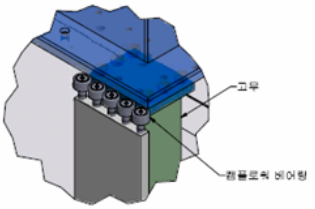


Fig. 4 TLMD 실험체 고무 가이드

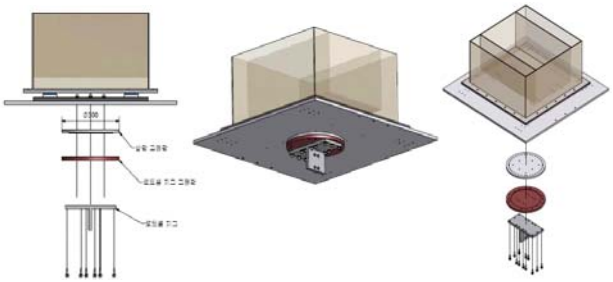


Fig. 5 TLMD 실험체 회전 분해도

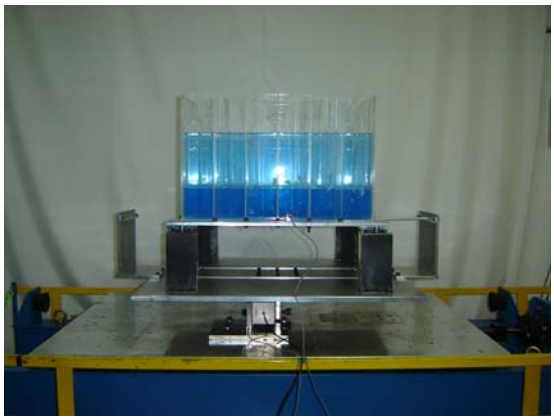
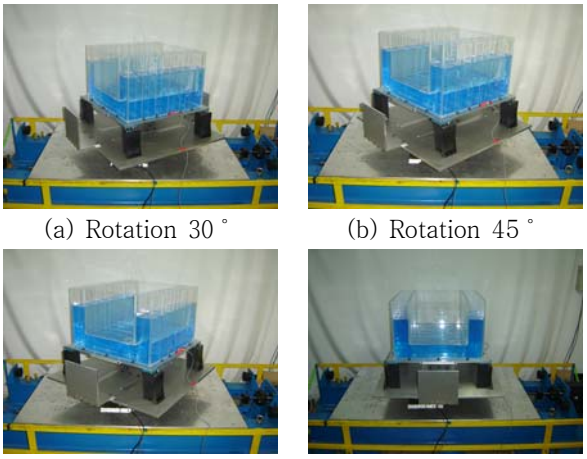


Fig. 6 완성된 TLMD 실험체

3. 실험결과 및 분석

Fig. 7과 같이 설치된 TLMD에 대해서 진동대 실험을 수행하였다.

Sampling time은 0.001s로 0.1~3Hz의 주파수범위를 갖는 백색잡음과 조화하중실험을 진행하였다. 그리고 각각 Y방향에 대하여 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 회전 방향에 대한 실험을 진행하였다.



(a) Rotation 30 ° (b) Rotation 45 °

(c) Rotation 60 ° (d) Rotation 90 °

Fig. 7 TLMD 실험체 회전별 모양

Fig. 8은 TLMD의 백색잡음 실험을 통해 계측된 데이터를 해석한 로드셀의 전달함수를 나타낸 것이다

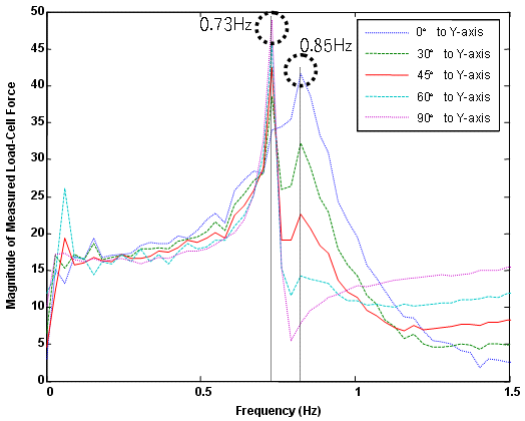


Fig. 8 Load-cell 전달함수

Fig. 9은 각각의 실험체 회전각에 대하여 TLCD방향과 TMD방향이 서로 독립거동의 양상을 나타낸 것이다. 그림에서 나타나듯, 0.73Hz(TLCD)에서는 회전각이 증가할수록 전단력이 커지는 반면 0.85Hz(TMD)에서는 회전각이 증가할수록 전단력이 작아지는 것을 알 수 있다.

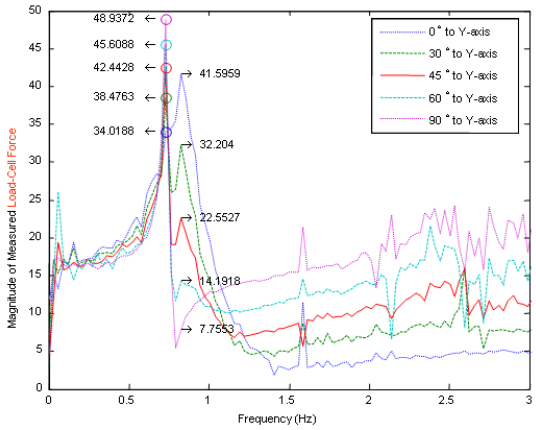


Fig. 9 TLCD방향과 TMD방향의 독립거동

회전각별 TLMD의 최대응답을 바탕으로 회전각을 역계산하였다. 또한 실제 실험체에 회전각을 준상태에서 가진한 후 전달함수의 최대값을 비교하여 나타내였고 이 결과를 바탕으로 식(16)에 적용하여 측정된 회전각을 예측하였다. 실제 회전각과 전달함수의 최대값으로 구한 계측된 회전각은 약간의 차이를 보이지만 합리적으로 비슷한 값을 도출하였고 오차는 실험체 회전각의 오차와 백색잡음 가진에 따른 최대값 예측 오차에 기인한 것으로 보인다.

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(A\pm B)^0}\right)\big|_{C\ Hz}}{\max\left(F_{(A)^0}\right)\big|_{C\ Hz}}\right]=B^O \qquad (3)$$

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(60)^0}\right)\big|_{0.73\ Hz}}{\max\left(F_{(90)^0}\right)\big|_{0.73\ Hz}}\right]=\cos^{-1}\left[\frac{456088}{489372}\right]=21^O \ \text{vs}\ 30^O$$

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(45)^0}\right)\big|_{0.73\ Hz}}{\max\left(F_{(90)^0}\right)\big|_{0.73\ Hz}}\right]=\cos^{-1}\left[\frac{424428}{489372}\right]=29^O \ \text{vs}\ 45^O$$

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(30)^0}\right)\big|_{0.73\ Hz}}{\max\left(F_{(90)^0}\right)\big|_{0.73\ Hz}}\right]=\cos^{-1}\left[\frac{384763}{489372}\right]=38^O \ \text{vs}\ 60^O$$

TMD의 진동수는 0.85Hz이며, 같은 방법으로 계산된다.

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(30)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}{\max\left(F_{(0)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}\right]=\cos^{-1}\left[\frac{322040}{415959}\right]=39^O \ \text{vs}\ 30^O$$

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(45)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}{\max\left(F_{(0)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}\right]=\cos^{-1}\left[\frac{225527}{415959}\right]=57^O \ \text{vs}\ 45^O$$

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(60)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}{\max\left(F_{(0)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}\right]=\cos^{-1}\left[\frac{141918}{415959}\right]=70^O \ \text{vs}\ 60^O$$

실험체에 백색잡음 가진은 공진 주파수의 최대값 예측의 오류를 허용하기 때문에 TMD와 TLCD의 독립거동 양상을 파악하기 위하여 각각 공진 주파수에서의 조화하중 가진실험을 진행하였다.

Fig. 10과 11은 각각 TMD의 공진시 조화하중 실험의 전단력와 가속도 응답을 나타낸 것이다

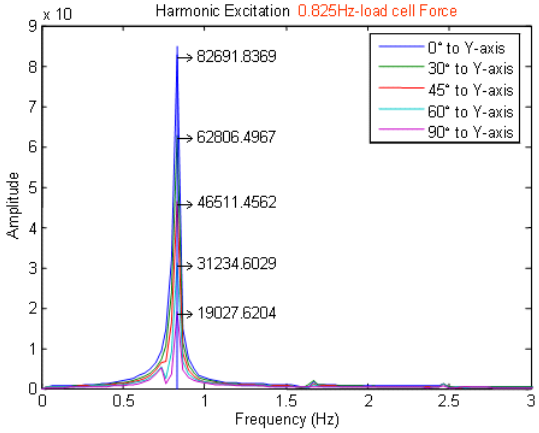


Fig. 10 TMD 조화하중의 전단력

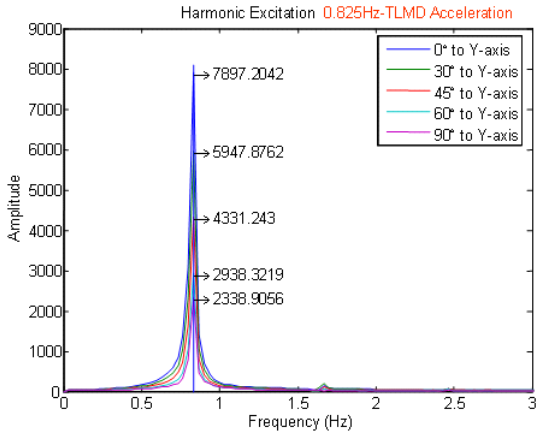


Fig. 11 TMD 조화하중의 가속도 응답

전단력의 회전각 별 최대응답으로 구한 계측된 회전각 계산은 아래와 같으며 회전각별 최대값으로 구한 계측 회전각은 백색잡음 가진에 의한 결과보다 오차를 줄인 결과를 얻었다.

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(30)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}{\max\left(F_{(0)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}\right]=\cos^{-1}\left[\frac{31235}{82692}\right]=40^O \quad \text{vs} \quad 30^O$$

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(45)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}{\max\left(F_{(0)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}\right]=\cos^{-1}\left[\frac{46511}{82692}\right]=55^O \quad \text{vs} \quad 45^O$$

$$\cos^{-1}\left[\frac{\max\left(F_{(60)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}{\max\left(F_{(0)^0}\right)\big|_{0.85\ Hz}}\right]=\cos^{-1}\left[\frac{62806}{82692}\right]=67^O \quad \text{vs} \quad 60^O$$

또한, 1/20 축소 모델의 설계진동수인 0.812Hz와 0.722Hz와 거의 동일한 진동수가 확인되었으며 White-noise 실험의 모든 실험 결과에서 나타나듯, TLCD와 TMD가 서로 독립거동을하는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 초고층 건물의 풍응답 저감을 위한 2방향 복합형 진동제어장치인 TLMD를 설계 제작하였고 설계시 목표한 축소 구조물모델의 TLCD와 고무패드를 이용한TMD를 동조한 결과를 진동대 실험을 통해 확인하였다. 또한 TLCD방향과 TMD방향이 서로 독립거동함을 볼 수 있었으며, 회전각 계산 결과를 보면 알 수 있듯이 회전 방향별 (0°,30°,45°,60°,90°) 계측 회전각과 목표 회전각은 약 10°의 오차가 발생하였다.

Table 3 최대응답의 비교를 통한 계측된 회전각

	$\cos^{-1}\left(\frac{\max\left(F_{30^\circ}\right)\big\|_{0.83Hz}}{\max\left(F_{0^\circ}\right)\big\|_{0.83Hz}}\right)$	$\cos^{-1}\left(\frac{\max\left(F_{45^\circ}\right)\big\|_{0.83Hz}}{\max\left(F_{0^\circ}\right)\big\|_{0.83Hz}}\right)$	$\cos^{-1}\left(\frac{\max\left(F_{60^\circ}\right)\big\|_{0.83Hz}}{\max\left(F_{0^\circ}\right)\big\|_{0.83Hz}}\right)$
Original	30°	45°	60°
White-noise TLCD(reverse)	21°	29°	38°
White-noise TMD	39°	57°	70°
Sine wave TMD	40°	55°	67°

후 기

이 연구는 (주)포스코건설 및 (재)포항산업과학연구원의 연구비 지원과 (주)동일고무벨트의 협조에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21사업」의 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

(1) 김홍진, 김현배, 조지성, 이상현, 우성식, 최기영, 2006, “LCVA를 이용한 초고층건물의 풍진동 제어성능 실험 평가”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제 26권 제1호, pp.13-16.

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

(3) T. T. Soong, and G. F. Dargush, 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) C. C. Chang and C. T. Hsu, 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) Jangid, R. S., 1995, “Dynamic characteristics of structures with multiple tuned mass dampers”, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 3, No. 5, pp.497-509.