한국소음진동공학회 2000년도 추계학술대회논문집, pp. 268~275.

지반 기진력을 받는 구조물의 진동 제어를 위한 Hybrid Mass Damper의 유용성 연구

A Study on the Adaptability of Hybrid Mass Damper for the Vibration Control of Structure under Base Excitation

°임채욱* 정태영** 문석준**

Chae-Wook Lim Tae-Young Chung Seok-Jun Moon

ABSTRACT

A hybrid mass damper that combines a tuned mass damper and an actuator has been recognized to be one of the most promising devices for vibration control of a tall building subjected to dynamic loads such as wind and earthquake. In this paper, in order to reduce vibration levels of a 5-story test structure, a hybrid mass damper using AC-servomotor was designed and developed. And control performances using HMD and TMD under random and earthquake excitations are compared through experimental test. It is confirmed that it is more effective to reduce the vibration levels of the test structure using HMD especially for earthquake excitation.

1. 서 론

건축 구조물은 사회적인 요구 및 설계·건설기술의 발달과 고강도의 콘크리트 재료나 합성 강관등 철골재의 사용 및 합성구조 시공기술의 향상으로 대형화, 고층화, 경량화 및 세장화 되는 추세에 있다. 이러한 고층 건축 구조물의 큰 유연성 및 작은 감쇠비로 인해 바람 및 지진 등에 의해서 발생하는 과도한 진동을 억제하기 위하여 여러 장치들을 이용한 다각적인 연구가 이루어지고 있으며, 이를 바탕으로 실제 구조물에 적용되어오고 있다[1].이 중 가동 질량을 부가적으로 설치하여 이의 관성력을 이용하는 TMD, AMD, HMD와 같은 장치들은 실제 많은 건축 구조물에 설치되어 졌다. 수동 제어 방식인 TMD는 주로 바람에 의한 구조물의 진동제어를 위해 사용되고 있으며, 능동 제어 방식인 AMD는 능동 제어 알고리듬을 적용하여 바람 및 지진에 의한 구조물의 진동제어를 위해 적용되고 있다. HMD는 수동형과 능동형을 결합한 형태이므로, 동일한 제어 성능을 얻기 위해서 요구되는 파워가 AMD보다 적으므로 이 또한 실제 구조물에 많이 적용되고 있다[1,2].

바람에 의한 건축 구조물의 진동제어를 위한 TMD의 효과는 이미 확인되었지만, 지진에 의한 이의 진동제어를 위한 TMD의 효과에 대해서는 학자들의 동의가 이루어져 있지 않고, 단지 지진의 특성에 의존함을 밝히고 있다[3].

본 연구에서는 지반 기진력을 받는 구조물의 진동제어를 위한 TMD의 유용성 및 이의 한계를 살펴보고, 이의 단점을 극복하는 HMD의 유용성에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 건축 구조물과 유사한 진동특성을 갖는 5층의 후판 구조물 시험모델을 제작하였고, 수평 2축을 동시에 제어하는 HMD를 설계 및 개발하였다. 개발된 HMD는 상부가동 질량과 하부 가동질량으로 구성되어 있는데, 하부는 TMD로 작용하고 상부는 AC-서보모터를 이용하여 HMD로 작동하도록 제작되었다. 또한 2축 제어용 HMD의 제어성능을 검증하기 위하여 이의 최상층에 개발한 2축 제어용 HMD를 설치한 후 2축을 동시에 랜덤 및 지진 파형으로 가진하여 각층의 가속도 응답을 측정하였다. 이 결

* 정회원· 한국과학기술원 기계공학과 대학원
** 정회원· 한국기계연구원 구조시스템 연구부

과로부터 TMD의 효과와 HMD의 효과를 확인 및 비교 분석하였다. 특히 지진 응답의 특성 분석을 위해 시간-주파수 영역해석기법 중 하나인 웨이브렛변환을 이용하였다. 이를 통해 지진이 구조물의 2차 모드 이상을 가진할 경우에 HMD의 유용성과 TMD의 제어성능 한계를 살펴보았다.

2. TMD의 최적 파라미터의 결정

TMD의 최적 파라미터는 주 구조물에 작용하는 외력의 종류(바람, 지진)와 목표로 하는 주 구조물의 응답(상대 변위, 상대 속도, 절대 가속도)에 따라 그 값이 조금씩 달라진다[4-8]. 본 연구에서는 지진 외력, $\ddot{x}_0(t)$,이 백색 잡음이라고 가정한 경우에 대하여 주 구조물을 하나의 집중 질량으로 치환하여 1-자유도계로 모델링하고, 주 구조물 상부에 설치된 TMD를 또 다른 1-자유도계로 Fig.1과 같이 모델링하여 주 구조물의 지반에 대한 상대 변위를 줄이는 것을 목표로 하였다. 여기서 m_p, k_p 및 c_p는 각각 주 구조물의 집중질량, 강성 및 감쇠를 나타내며, m_s, k_s 및 c_s는 각각 TMD의 질량, 강성 및 감쇠를 나타낸다. 상첨자 p는 주 구조물을 나타내며, 하첨자 s는 TMD를 표시한다. 주 구조물의 감쇠가 없다고 가정하면, 주 구조물의 상대 변위의 mean square 응답을 최소화하는 TMD의 최적 파라미터들은 다음과 같다.

$$f_{s,opt}=\sqrt{\frac{2-\gamma}{2(1+\gamma)^2}} \quad (1)$$

$$\xi_{s,opt}=\sqrt{\frac{\gamma(\gamma-4)}{8(\gamma+1)(\gamma-2)}} \quad (2)$$

여기서 γ는 주 구조물에 대한 TMD의 질량비, f_s는 TMD의 고유 진동수, ξ_s는 TMD의 감쇠비이다.

3. 성능 시험용 시험 구조물

TMD의 제어성능을 검증하기 위하여 건축 구조물에의 적용이 가능한 5층 후판 구조물 시험모델을 제작하였다. 각각의 후판은 4개의 기둥으로 지지되고 있는데, 중량은 약 2,260kg이며, 가로×세로×높이가 1,200mm×800mm×3,300mm이다. 시험모델의 하판은 한국기계연구원에서 보유하고 있는 대형 6 자유도 진동대에 취부할 수 있도록 제작하였다.

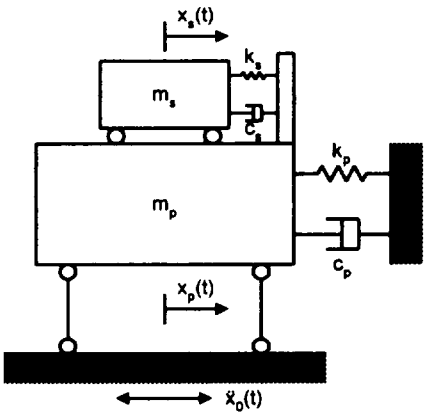


Fig.1 1DOF Primary System with a TMD

제작한 구조물의 동특성 실험은 6자유도 진동대에 시험모델을 고정시킨 후 진동대를 랜덤 파형을 이용하여 수평 방향으로 가진시키면서 수행하였다. 구조물 시험 모델의 각 층에는 가속도계를 부착하여 기반 가진에 의한 각 층에서의 응답을 계측하였다. 계측된 응답으로부터 각 층에서의 전달 함수를 구하여 고유 진동수, 감쇠비, 모드 형상 등을 추정하였다. 추정된 시험 구조물의 고유 진동수 및 감쇠비는 Table 1에 정리하였다.

시험 구조물을 전단 집중질량 모델로 가정할 경우, 동특성 실험을 통하여 추정된 고유 진동수(f_n), 감쇠비(ξ), 진동형(Φ) 등을 이용하여 다음의 운동 방정식 (3)의 감쇠 행렬(C), 강성 행렬(K) 등을 추정하였다.

$$M\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+Kx(t)=-M1\ddot{x}_0(t) \quad (3)$$

여기서 $x(t)=[x_1\ x_2\ x_3\ x_4\ x_5]^T$로 지반에 대한 각 층의 상대 변위를 나타낸다.

Table 1 Natural Frequencies and Damping Ratios of the Test Structure

Direction \ Mode		1	2	3	4	5
Longitudinal (X)	Natural Frequency(Hz)	2.87	7.29	12.15	15.32	20.73
	Damping Ratio(%)	0.41	0.15	0.12	0.11	0.14
Lateral (Y)	Natural Frequency(Hz)	2.87	7.29	12.15	15.32	20.73
	Damping Ratio(%)	0.41	0.15	0.12	0.11	0.14
Effective Mass (kg)		1685.9	250.6	34.3	41.1	9.8

4. 2축 제어용 HMD

제작된 HMD는 수평 2축 방향(X,Y방향)의 제어 실현을 위한 동일 구조의 장치를 이단으로 겹치는 방법을 채택하였는데, 하부의 가동질량은 상부의 가동질량의 무게를 포함하게 설계되므로 상부에 비해 더 큰 힘을 낼 수 있다. 또한 상부의 혼합형 HMD의 구동은 AC-서보 모터 1개를 사용하여 능동적으로 제어할 수 있도록 구성하였다. 따라서 하부장치에 대해서는 완전한 수동형 TMD 장치를 구현하고, 상부장치에 대해서는 수동 및 능동형을 혼합한 HMD 장치를 구현하도록 설계하였다. 강성 구현은 일련의 스프링들을 사용하였으며, 감쇠기는 현재 감쇠비 조절이 가능한 제품을 선정하였다. TMD의 주요 파라미터들은 2장의 최적 설계의 방법을 따라 결정하였다.

제작이 완료된 HMD는 Fig.2와 같다. HMD의 무게는 총 104kg이며, 상부 가동질량은 35kg, 하부 가동질량은 64kg이다. 상/하부의 가동질량을 제외한 무게는 시험 구조물에 설치될 경우 집중질량으로 작용하게 된다. 그러므로 상부 가동질량의 운동방향으로는 69kg이, 하부 가동질량의 운동 방향으로는 40kg이 시험 구조물의 최상층에 집중질량으로 작용할 것이며, 이에 의해 시험 구조물의 동특성이 약간 바뀐다.

제작한 HMD의 동특성을 파악하기 위해 한국기계연구원에서 자체 개발한 2축 진동대의 수평대위에 이를 설치한 후 진동대 및 가동질량에 가속도계를 설치하였다. 진동대는 가진 주파수를 0.5Hz부터 10.0Hz까지 0.1Hz 또는 0.5Hz간격으로 변경시키면서 가진하였으며, 이때의 가진 가속도 레벨 및 가동질량의 가속도 레벨을 계측하였다. 댐퍼는 감쇠력을 오리피스의 조절을 통해 8단계로 변화시킬 수 있으므로, 댐퍼가 설치되지 않은 경우와 댐퍼가 설치된 경우에 대한 시험을 수행하였다.

동특성 실험 결과 댐퍼가 설치된 경우에는 전달함수의 크기가 매우 낮으며, 고유 진동수가 매우 많이 증가된 것을 알 수 있었다. 이는 댐퍼가 자체 감쇠력 뿐만 아니라 매우 높은 강성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 설계 및 제작시에는 댐퍼의 강성을 고려하지 않았으며, 댐퍼가 설치된 경우의 동특성은 본 연구에서 사용하기 어려웠다. 따라서 시험 구조물을 이용한 성능검증시험에서는 댐퍼가 없는 경우에 대해서만 수행하였다.

상부 수동형 TMD(AC-서보 모터를 분리한 경우)의 동특성 실험 결과로부터 댐퍼가 설치되지 않은 경우에 TMD의 고유진동수 및 감쇠비는 각각 2.68Hz 및 4.3%임을 알 수 있었으며(Fig.3a), 이를 수학적으로 모델링하면 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

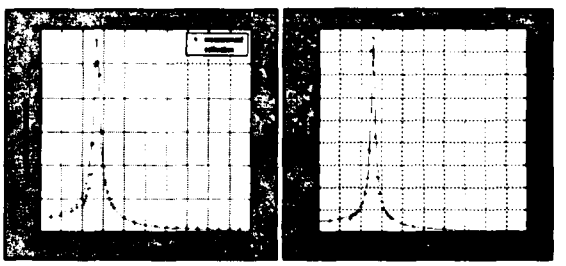
$$H(s)=\frac{9924.2}{35s^2+50.69s+9924.2} \tag{4}$$

또한 하부 수동형 TMD의 동특성 실험 결과로부터 댐퍼가 설치되지 않은 경우에 TMD의 고유진동수 및 감쇠비는 각각 2.60Hz 및 2.9%임을 알 수 있었으며(Fig.3b), 이를 수학적으로 모델링하면 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$H(s)=\frac{17080}{64s^2+60.64s+17080} \tag{5}$$

다음으로 상부 HMD에 설치된 AC-서보 모터를 구동시키면서 능동상태에서의 동특성을 파악하였다. 수동형으로 작동하는 TMD의 경우와 같이 2축 진동대에 고정시킨 후, 속도제어 모드상태에서 서보 모터에 전압을 인가하면서 가동질량의 속도를 계측하였다. 계측된 결과와 수학적 모델링에 의해 추정된 결과를 Fig.4에 보여주고 있는데, 능동 제어 시에 위상차는 구조물을 불안정하게 할 수 있으므로 위상이 실험과 거의 같아지게 식(6)과 같이 모델링하였다.

Fig.2 The Developed Biaxial HMD



(a) Upper TMD (b) Lower TMD

Fig.3 Transfer Function of TMD without Damper

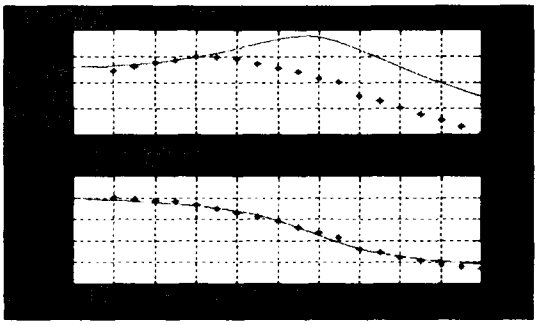


Fig.4 Dynamic Characteristics Between the Control Input Voltage and the Upper HMD Velocity

$$H(s) = \frac{365}{s^2 + 20.08s + 1465} \qquad (6)$$

5. 시험 구조물을 이용한 성능검증 시험

제작한 시험 구조물을 한국기계연구원이 보유하고 있는 대형 6자유도 진동대 위에 고정한 후 최상부 층에 제작한 2축 제어용 HMD를 설치하였다(Fig.5). 진동대에 최대크기가 0.2g인 랜덤파형을 수평 2축 방향(longitudinal(X) : 하부 질량의 가동방향, lateral(Y) : 상부 질량의 가동방향)으로 동시 입력함으로서 가진하였고, 또한 Y축 방향에 대하여 지진 파형을 입력하여 제어 전·후의 가속도 응답을 측정하여 TMD와 HMD의 성능을 비교해 보았다.

5.1 TMD의 성능검증 시험

먼저 수평 2축으로 랜덤파형 입력에 대한 가진 시험을 수행하였다. 시험은 TMD 설치 전·후의 응답 변화를 관찰하기 위해 설치 전의 응답을 계측하고, 이어서 설치 후의 응답을 계측하여 이의 분석을 통해 응답의 변화를 고찰하였다. 자료 취득 주파수는 200Hz이며, 각각 80초동안 시험을 수행하였다. Fig.6은 최대크기가 0.2g일때의 수평 2축 방향의 TMD 설치 전·후의 5층에서의 절대 가속도 응답을, Fig.7과 Fig.8은 이의 전달 함수를 보여주고 있는데, TMD의 설치로 인해 시험 구조물의 주파수가 약간 낮아짐을 확인할 수 있다. 또한 제작된 2축 제어용 TMD는 지반 기진력이 랜덤한 경우에 시험 구조물의 수평 2축 방향의 1차 모드의 진동을 동시에 제어함에 효과적임을 확인할 수 있다.

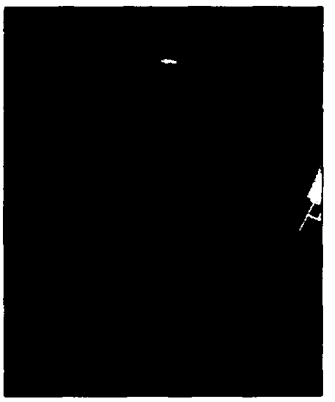


Fig.5 Experimental Setup

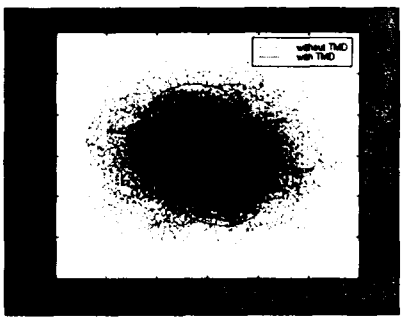


Fig.6 Biaxial Absolute Acceleration at the 5th Story under Random Excitation

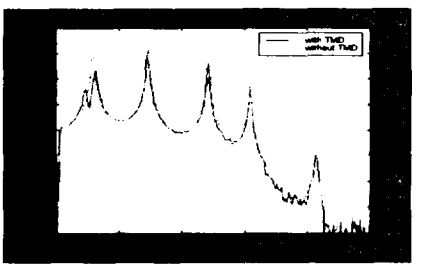


Fig.7 Transfer Function at the 5th Story in Longitudinal(X) Direction

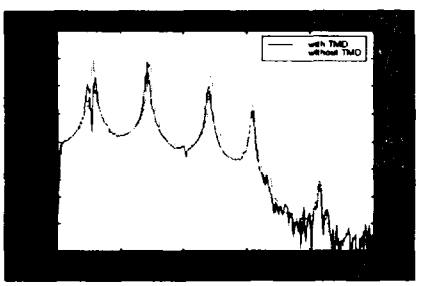


Fig.8 Transfer Function at the 5th Story in Lateral(Y) Direction

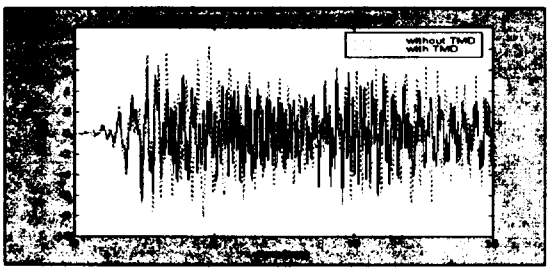


Fig.9 Absolute Acceleration at the 5th Story under El Centro Earthquake(PGA=0.2g)

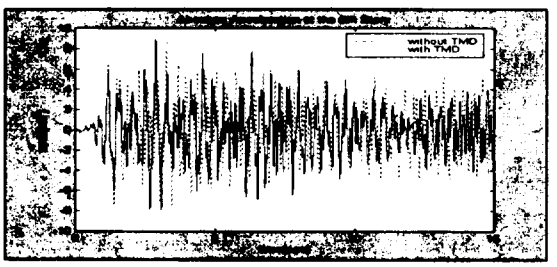


Fig.10 Absolute Acceleration at the 5th Story under 1/2 Time-Scaled El Centro Earthquake(PGA=0.2g)

다음으로 지진파형에 대한 TMD의 제어성능 시험을 수행하였다. 지진파형은 1940년에 발생한 El Centro 지진의 남북방향의 가속도 신호에 대하여 최대크기가 0.2g인 파형을 사용하였고, 시간 스케일이 1인 경우(50Hz)와 1/2인 경우(100Hz)에 대하여 각각 시험을 수행하였다. HMD와의 제어성능 비교를 위해서 AC-서보 모터가 작동하는 Y축 방향에 대해서만 지진파형을 입력하였다. Fig.9와 Fig.10은 각각 시간 스케일이 1인 경우와 시간 스케일이 1/2인 경우에 대하여 시험 구조물의 5층에서의 절대 가속도 응답을 보여주고 있다. 시간 스케일이 1인 경우에는 최대응답은 18.66%, rms값은 34.64% 감소했고, 시간 스케일이 1/2인 경우에는 최대응답은 12.23%, rms값은 13.72% 감소했다. 시간 스케일이 1/2인 경우에는 TMD의 제어성능 효과가 떨어짐을 확인할 수 있다.

5.2 HMD의 성능검증 시험

본 실험 대상 구조물은 5자유도의 집중 질량으로 모델링 되었는데, 능동 제어 시에는 2자유도의 모델로 축소하였다. 따라서 능동 제어는 구조물의 2차 모드까지 만을 제어하도록 제어기를 설계하였다. 이를 위해 식 (3)의 모델의 차수를 줄여서 식 (7)와 같이 2차의 모드만을 가지도록 축소된 모델(Reduced order model)을 우선 만들었다. 이는 HMD가 설치되는 5층과 3차 모드의 영향이 가장 적은 층인 3층에 집중 질량을 가지는 모델로 실현하였다.

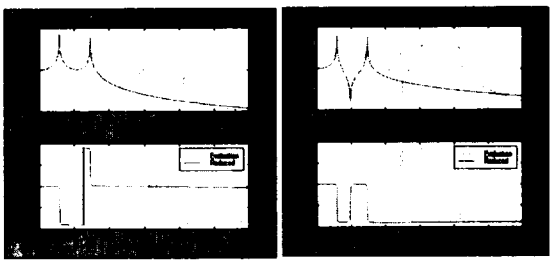
$$M_r\ddot{x}_r(t) + C_r\dot{x}_r(t) + K_r x_r(t) = f_r\ddot{u}_g(t) \qquad (7)$$

식 (3)과 식 (7)로 각각 모델링 된 원래의 모델과 축소된 모델을 주파수 영역에서 비교해 보았는데, Fig.11은 지반 가속도 입력에 대하여 5층과 3층에서의 가속도 응답의 전달함수를 보여주고 있다.

제어 알고리듬은 최적 제어 알고리듬을 적용하였으며, 시스템의 상태 변수는 시험 구조물의 3층과 5층에서의 지반에 대한 상대 변위와 HMD의 가동질량의 속도로 두었다. 실제 실험 시에는 3층과 5층에서의 2개의 가속도 센서를 이용하였는데, 이의 물리량으로부터 시스템의 상태량을 추정하는 Kalman-Bucy 필터를 설계하였다. 또한 제어 대상의 저차 모드만을 가지는 모델에 대하여 최적의 제어 입력 전압을 구했기 때문에, 제어기의 설계 시에 고려되지 않은 3차 이상의 고차 모드에 의한 넘침효과(Spillover effect)가 생겨 구조물을 오히려 가진하는 경우가 발생할 수 있으므로, 이를 극복하기 위해서 저주파 필터를 도입하여 이의 동특성을 제어 시스템에 결합하여 최종적으로 제어 입력 전압을 선정하여 시험을 수행하였다.

먼저 수평 2축으로 랜덤파형 입력에 대한 가진 시험을 수행하였는데, 시험 조건은 TMD의 경우와 동일하다. Fig.12는 최대크기가 0.2g일때의 수평 2축 방향의 HMD 설치 전·후의 5층에서의 절대 가속도 응답을, Fig.13은 HMD가 작동하는 Y축 방향에 대한 이의 전달 함수를 보여 주고 있으며, Fig.14는 이를 TMD의 경우와 비교하여 보여주고 있다. HMD는 TMD보다 구조물의 1차 모드에 더 큰 댐핑 효과를 줄 수 있으며, 또한 2차 모드에도 동시에 댐핑 효과를 줄 수 있으므로 시험 구조물의 응답을 TMD보다 더 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 지진파형에 대한 HMD의 제어성능 시험을 수행하였는데, 시험 조건은 TMD의 경우와 동일하다. Fig.15와 Fig.16은 각각 시간 스케일이 1인 경우와 시간 스케일이 1/2인 경우에 대하여 시험 구조물의 5층에서의 절대 가속도 응답을 보여주고 있다. 시간 스케일이 1인 경우에는 최대응답은 30.46%, rms값은 60.11% 감소했고, 시간 스케



(a) 5th Story (b) 3rd Story

Fig.11 Reduced Order Model of the Test Structure

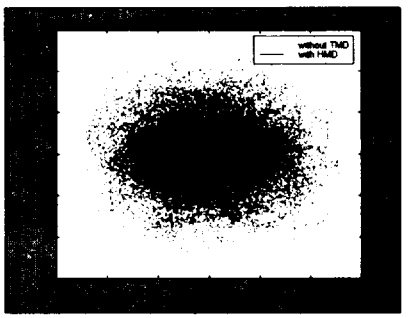


Fig.12 Biaxial Absolute Acceleration at the 5th Story under Random Excitation

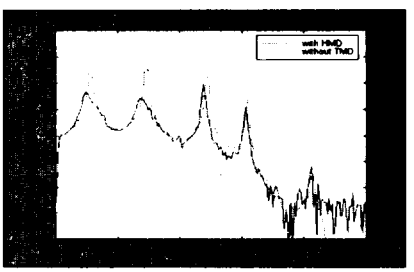


Fig.13 Transfer Function at the 5th Story in Lateral(Y) Direction

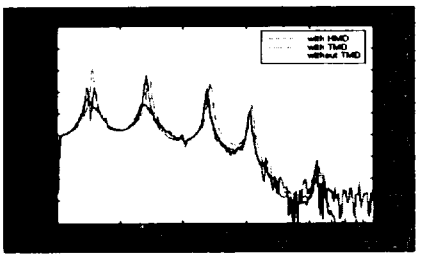


Fig.14 Transfer Function at the 5th Story in Lateral(Y) Direction

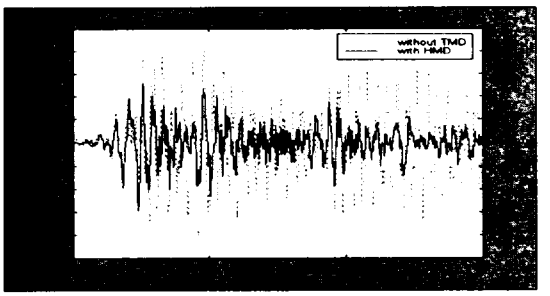


Fig.15 Absolute Acceleration at the 5th Story under El Centro Earthquake(PGA=0.2g)

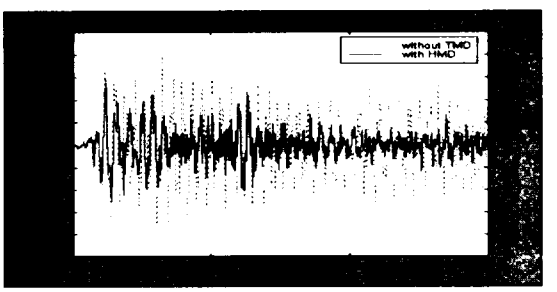


Fig.16 Absolute Acceleration at the 5th Story under 1/2 Time-Scaled El Centro Earthquake(PGA=0.2g)

일이 1/2인 경우에는 최대응답은 32.61%, rms값은 55.72% 감소했다. TMD와는 달리 두 경우 모두 HMD의 제어성능은 효과적임을 확인할 수 있다.

6. 시험 결과의 고찰

시험 결과 TMD는 지반 기진력이 랜덤한 경우에는 효과적이었지만, El Centro 지진파의 시간 스케일이 1/2인 경우에 대해서는 효과적이지 않음을 확인하였다. 이의 원인을 분석하기 위하여 지진파와 이에 대한 구조물의 응답에 대한 웨이브렛 해석을 수행하여 각 레벨(주파수)별로 분해하였다. 해석에는 Daubechies의 D20 웨이브렛을 이용하여 변환을 수행하였고[9], Matlab Toolbox의 'db10'을 이용하여 이산 웨이브렛을 수행하였다.

Fig.17은 최대크기가 0.2g인 El Centro 지진파형의 시간 스케일이 1인 경우의 지진파형과 이의 이산 웨이브렛 변환을 통해 얻어진 각 레벨 중에서 특히 진폭이 큰 레벨 6-9에 대한 파형 및 이의 퓨리에 변환을 통한 스펙트럼을 보여주고 있다. Fig.18은 시험 구조물의 5층의 절대 가속도에 대하여 레벨 7-9에 대한 응답을 보여주고 있다. 이와 동일하게 Fig.19와 Fig.20은 El Centro 지진파형의 시간 스케일이 1/2인 경우의 지진파형 및 시험 구조물의 5층에서의 절대 가속도에 대한 이산 웨이브렛 변환의 결과를 보여주고 있다. 각 레벨은 주

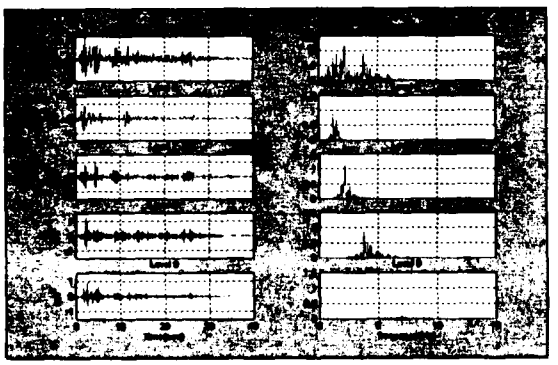


Fig.17 El Centro Earthquake (PGA=0.2g) and Wavelet Decomposition of This

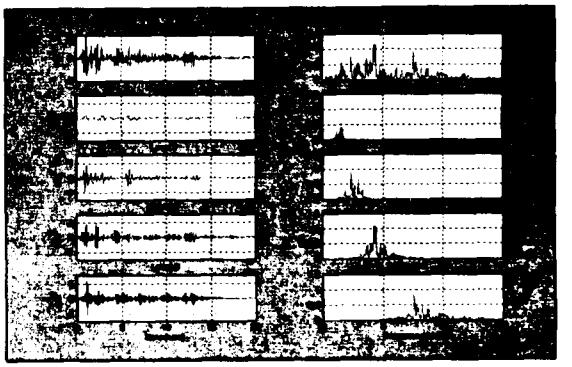
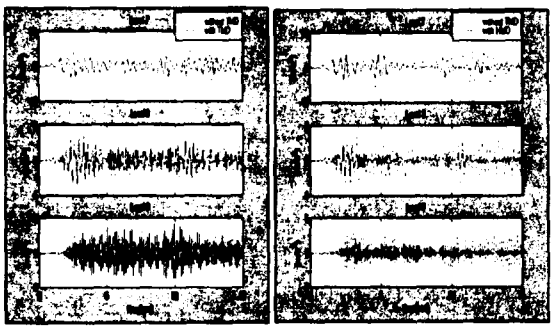
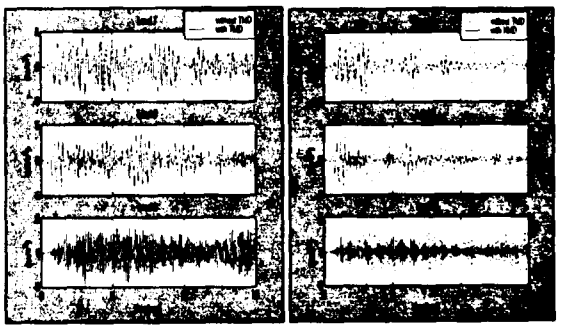


Fig.19 1/2 Time-Scled El Centro Earthquake (PGA=0.2g) and Wavelet Decomposition of This



(a) TMD (b) HMD

Fig.18 Wavelet Decomposition of Absolute Acceleration at the 5th Story under El Centro Earthquake(PGA=0.2g)



(a) TMD (b) HMD

Fig.20 Wavelet Decomposition of Absolute Acceleration at the 5th Story under 1/2 Time-Scaled El Centro Earthquake(PGA=0.2g)

파수 대역을 의미하며, 레벨 6은 1.14-1.92Hz, 레벨 7은 1.92-3.48Hz, 레벨 8은 3.48-6.58Hz, 레벨 9는 6.58-12.78Hz의 주파수 대역에 해당한다.

시간 스케일이 1인 경우에는 초기의 과대한 지진파가 발생하는 구간에서와 긴 시간 동안에 작용하는 주 주파수 성분은 시험 구조물의 1차 모드에 해당함을 알 수 있다. 이 경우에 TMD는 1차 모드의 응답을 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나 시간 스케일이 1/2인 경우에는 초기의 과대한 지진파가 발생하는 구간에서와 긴 시간 동안에 작용하는 주파수 성분은 주로 시험 구조물의 2차 모드에 1차 모드의 성분이 섞인 형태임을 알 수 있다. 이 경우에 TMD는 1차 모드의 응답을 조금 감소시키나 2차 모드의 응답을 감소시키지 못함으로, Fig.10에서 보여주는 것처럼 구조물의 응답을 감소시킴에 효과적이지 못함을 알 수 있다. 그러므로 이 경우 시간 스케일이 1인 경우에 비해 최대응답의 감소가 적은 것은 초기의 과대한 지진파가 발생하는 구간에서 제어되지 못한 구조물의 2차 모드 성분이 큰 비중을 차지하기 때문이며, 또한 응답의 rms값의 감소가 적은 것도 지진이 발생하는 긴 시간동안 2차 모드의 가진에 의한 이의 응답 성분이 큰 비중을 차지하기 때문이다.

HMD의 경우에는 TMD의 경우와는 달리 1차 및 2차 모드의 응답을 동시에 제어할 수 있으므로, 이 두 경우 모두에 대하여 시험 구조물의 응답을 감소시킴에 효과적임을 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 지반 기진력을 받는 구조물의 진동제어를 위한 TMD 및 HMD의 효과에 대하여 실험적으로 고찰하였는데, 이를 위해 5층의 시험모

델에 제작한 2축 제어용 HMD를 설치하여 랜덤파형과 지진파형에 대하여 시험을 수행하였다. 또한 지진파와 이로 인한 구조물의 응답에 대하여 이산 웨이브렛 변환을 수행하여 각 주파수 대역에 대한 응답을 비교하여 TMD의 한계와 HMD의 유용성을 살펴보았다. 이를 통해 다음과 같은 결과들을 확인할 수 있었다.

1) TMD는 지반 기진력이 랜덤파형인 경우에는 구조물의 응답을 감소시킴에 효과적이지만, 지진파형인 경우에는 지진의 특성에 의존한다. 즉 지진파형이 초기의 과대한 구간과 작용하는 긴 시간동안에서 제어되지 않는 2차 모드 이상을 가진하는 다소의 주파수 성분을 가지는 경우에는 구조물의 최대응답과 rms값을 줄임에 효과적이지 못하다.

2) HMD는 TMD보다 구조물의 1차 모드에 더 큰 댐핑 효과를 줄 수 있고, 또한 2차 모드 이상에도 동시에 댐핑 효과를 줄 수 있으므로, 지반 기진력이 랜덤파형인 경우나 지진파형인 경우 모두 TMD보다 시험 구조물의 응답을 더 많이 감소시킬 수 있다. 특히 구조물의 2차 모드 이상을 가진시키는 다소의 주파수 성분을 가지는 지진파형인 경우에도 이의 모드를 동시에 제어할 수 있으므로, 구조물의 응답을 감소시킴에 효과적이다.

감사의 글

본 연구는 건설 기술 연구 개발 사업으로 수행중인 "초고층 건축물의 풍 및 지진 진동 제어용 동흡진기 개발"과제의 소과제 일부로 수행된 결과중 일부이며, 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

1.T.T.Soong, and G.F.Dargush (1997), "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons

2.B.F.Spencer, Jr. and M.K.Saint(1997), "Controlling Buildings : A New Frontier in Feedback", Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology, Vol.17, No.6, pp.19-35

3.R.Villaverde(1994), "Seismic Control of Structures with Damped Resonant Appendages", 1st World Conference on Structural Control, WP4-113-WP4-121

4.R.W.Luft(1979), "Optimal Tuned Mass Dampers for Buildings", Journal of the Structural Division, Vol.105, pp.2766-2772

5.E.Q.Ayorinde and G.B.Warburton(1980), "Minimizing Structural Vibrations with Absorbers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.8, pp.219-236

6.G.B.Warburton(1982), "Optimal Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10,pp.381-401

7.T.Asami, T.Wakasono, K.Kameoka, M.Hasegawa, and H.Sekiguchi(1990), "Optimum Design of Dynamic Absorbers for a System Subjected to Random Excitation", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, Vol.56, No.523, pp.93-101

8.T.Asami, K.Momose and Y.Hosokawa(1993), "Approximate Expression for Design of Optimal Dynamic Absorbers Attached to Damped Linear Systems(Optimization Process Based on the Minimum Variance Criterion)", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, Vol.59, No.566, pp.56-61

9.D.E.Newland(1993), "An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis", 3rd Edition, Longman, John Wiley & Sons, New York