

# 지반 기진력을 받는 구조물의 진동 제어를 위한 Hybrid Mass Damper의 유용성에 관한 연구

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

문석준\*  
Moon, Seok Jun

임채욱\*\*  
Lim, Chae Wook

정태영\*  
Chung, Tae Young

한성용\*\*\*  
Han, Sung Yong

### 국문요약

본 논문에서는 지반 기진력을 받는 5층의 시험 구조물의 진동 레벨을 줄이기 위해 AC 서보 모터를 이용한 복합 질량 감쇠기를 설계 및 제작하여, 5층의 시험 구조물을 랜덤 및 지진 파형으로 가진하였을 때의 복합 질량 감쇠기와 동조 질량 감쇠기의 효과 및 제어 성능을 실험을 통해 비교 분석하였다. 이를 통해 복합 질량 감쇠기는 동조 질량 감쇠기에 비하여 특히 과도 상태의 지진이 구조물의 2개 모드 이상을 동시에 가진할 경우에 구조물의 진동을 줄임에 훨씬 더 유용함을 확인하였다.

주요어 : 복합 질량 감쇠기, 동조 질량 감쇠기, AC 서보 모터

### ABSTRACT

In this paper, a hybrid mass damper using AC-servomotor was designed and developed in order to reduce vibration levels of a 5-story test structure under base excitation. Control performances of the HMD under random and earthquakes excitations are compared with those of TMD through experimental test. It is confirmed that the HMD is more effective to reduce the vibration levels of the test structure especially for the earthquake excitation which excites more than 2 vibration modes of the structure simultaneously.

Key words : hybrid mass damper, tuned mass damper, AC-servomotor

## 1. 서론

건축 구조물은 사회적인 요구 및 설계기술의 발달과 고강도의 콘크리트 재료나 합성 강관등 철골재의 사용 및 합성 구조 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 있다.<sup>(1)</sup> 이 중 가동 질량을 부가적으로 설치하여 이의 관성력을 이용하는 TMD(tuned mass damper, 동조 질량 감쇠기), AMD(active mass damper, 능동 질량 감쇠기), HMD(hybrid mass damper, 복합 질량 감쇠기)와 같은 장치들은 실제 많은 건축 구조물에 설치되어지고 있다. 수동 제어 방식인 TMD는 주로 바람에 의한 구조물의 진동제어를 위해 사용되고 있으며, 능동 제어 방식인 AMD는 능동 제어 알고리즘을 적용하여 바람 및 지진에 의한 구조물의 진동제어를 위해 적용되고 있다. HMD는 수동형과 능동형을 결합한 형태로서, 동일한 제어 성능을 얻기 위해서 요구되는 파워가 AMD보다 적으므로 이 또한 실제 구조물에 많이 적용되고 있다.<sup>(1),(2)</sup>

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 설계하였다. 개발된 HMD는 상부가동 질량과 하부 가동질량으로 구성되어 있는데, 하부는 TMD로 작용하고 상부는 AC-서보 모터를 이용하여 HMD로 작동하도록 제작되었다. 이때 상부 HMD는 클러치를 이용하여 AC-서보 모터를 이용하지 않을 경우에는 TMD로 작동할 수 있도록 설계하였다. 2축 제어용 HMD의 제어성능을 검증하기 위하여 시험 구조물의 최상층에 이를 설치한 후 2축을 동시에 랜덤 및 지진 파형으로 가진하여 각층의 가속도 응답을 측정하였고, 이 결과로부터 TMD의 효과와 HMD의 효과를 확인 및 비교 분석하였다.

## 2. TMD의 최적파라미터의 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.<sup>(3),(7)</sup> 본 연구에서는 지진 외력,  $\ddot{x}_0(t)$ 이 백색 잡음이라고 가정할 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. 여

\* 정회원 · 한국기계연구원 구조시스템 연구부(대표저자 : sjmoon@kimm.re.kr)

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\*\* 삼성중공업 조선플랜트 연구소

본 논문에 대한 토의를 2001년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2001. 2. 10 / 심사종료일 : 2001. 5. 7)

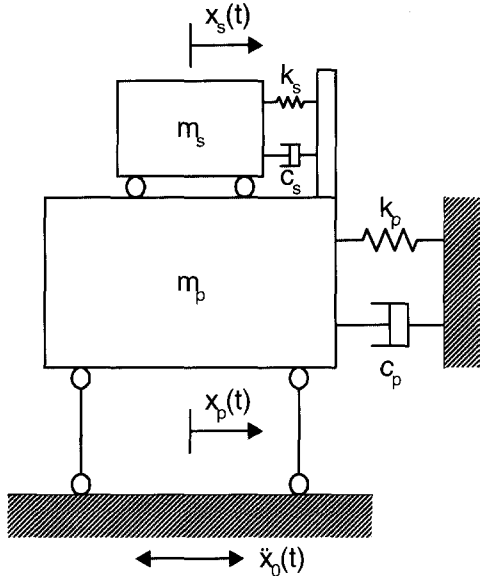


Fig.1 1 DOF primary system with a TMD

기서  $m_p$ ,  $k_p$  및  $c_p$ 는 각각 주 구조물의 집중질량, 강성 및 감쇠를 나타내며,  $m_s$ ,  $k_s$  및  $c_s$ 는 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.<sup>(5),(8)</sup>

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

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

여기서  $\gamma$ 는 주 구조물에 대한 TMD의 질량비,  $f_s$ 는 TMD의 고유 진동수,  $\xi_s$ 는 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, 총 질량은 약 2,260kg이며, 가로×세로×높이가 1,200mm×800mm×3,300mm이다. 시험모델의 하판은 한국기계연구원에서 보유하고 있는 대형 6자유도 진동대에 취부할 수 있도록 제작하였다.

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 측정하였다. 측정된 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

Table 1 Natural frequencies and damping ratios of the test structure

Direction		Mode				
		1	2	3	4	5
Longitudinal(X), 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

실험을 통하여 추정된 고유 진동수( $f_n$ ), 감쇠비( $\xi$ ), 진동형( $\phi$ ) 등을 이용하여 다음의 운동 방정식 (3)의 감쇠 행렬( $C$ ), 강성 행렬( $K$ ) 등을 추정하였다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{l}x_0(t) \quad (3)$$

여기서  $x(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$ 로 지반에 대한 각층의 상대 변위를 나타내며,  $l = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ 이다.

### 4. 수평 2축 제어용 HMD

제작된 HMD는 수평 2축 방향(X,Y방향)의 제어 실현을 위해 동일 구조의 장치를 이단으로 겹치는 방법을 채택하였는데, 하부의 가동질량은 상부의 가동질량의 무게를 포함하게 설계되므로 상부에 비해 더 큰 힘을 낼 수 있다. 그러므로 상부는 혼합형 HMD로 구성하였는데, 이의 구동은 AC-서보 모터 1개를 사용하여 능동적으로 제어할 수 있도록 하였고 AC-서보 모터를 이용하지 않는 경우에는 수동형 TMD로서 작동할 수 있도록 클러치를 달았다. 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 설

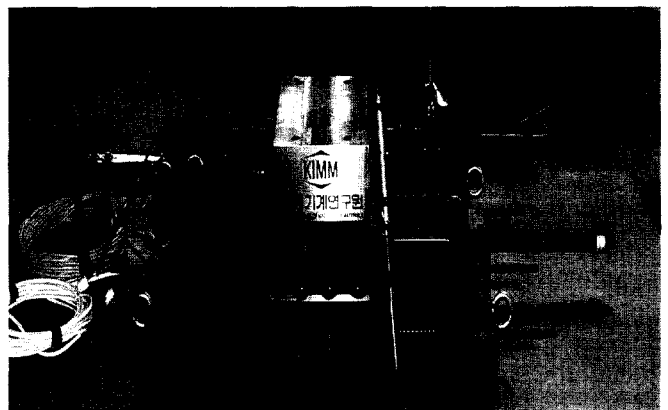


Fig. 2 The developed biaxial HMD

치될 경우 제어장치가 설치되는 상판에 집중질량으로 작용 하게 된다. 그러므로 상부 가동질량의 운동 방향으로는 69kg이, 하부 가동질량의 운동 방향으로는 40kg이 시험 구조물의 최 상층에 집중질량으로 작용할 것이며, 이에 의해 시험 구조물의 동특성이 약간 바뀐다.

제작한 HMD의 동특성을 파악하기 위해 2축 진동대의 수평대 위에 이를 설치한 후 진동대 및 가동질량에 가속도계를 설치하였다. 진동대는 가진 주파수를 0.5Hz부터 10.0Hz 까지 0.1Hz 또는 0.5Hz간격으로 변경시키면서 가진하였으며, 이때의 가진 가속도 레벨 및 가동질량의 가속도 레벨을 계측하였다. 감쇠기는 감쇠력을 오리피스에 조절을 통해 8 단계로 변화시킬 수 있는데, 감쇠기가 설치되지 않은 경우와 감쇠기가 설치된 경우에 대한 시험을 수행하였다.

동특성 실험 결과 감쇠기가 설치된 경우에는 전달 함수의 크기가 매우 낮으며, 고유 진동수가 매우 많이 증가된 것을 알 수 있었다. 이로부터 감쇠기가 자체 감쇠력 뿐만 아니라 매우 높은 강성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 설계 및 제작시에는 감쇠기의 강성을 고려하지 않았으며, 감쇠기가 설치된 경우의 동특성은 본 연구에서 사용하기 어려웠다. 따라서 시험 구조물을 이용한 성능검증시험에서는 감쇠기를 탈착하여 시험을 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. 3(a)), 이를 Laplace 연산자 s를 이용하여 수학적으로 모델링하면 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

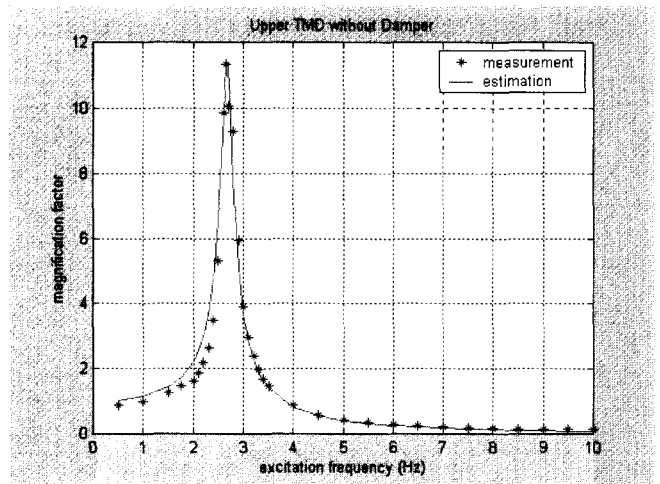
$$H(s) = \frac{9924.2}{35s^2 + 50.69s + 9924.2} \quad (4)$$

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

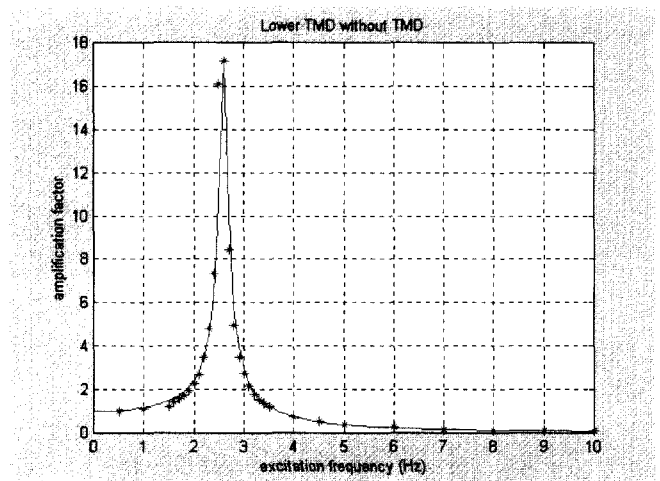
$$H(s) = \frac{17080}{64s^2 + 60.64s + 17080} \quad (5)$$

다음으로 상부 HMD에 설치된 AC-서보 모터를 구동시키면서 능동상태에서의 동특성을 파악하였다. 수동형으로 작동하는 TMD의 경우와 같이 2축 진동대에 고정시킨 후, 속도 제어 모드상태에서 서보 모터에 전압을 인가하면서 가동 질량의 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.

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



(a) Upper TMD



(b) Lower TMD

Fig. 3 Transfer function of TMD without damper

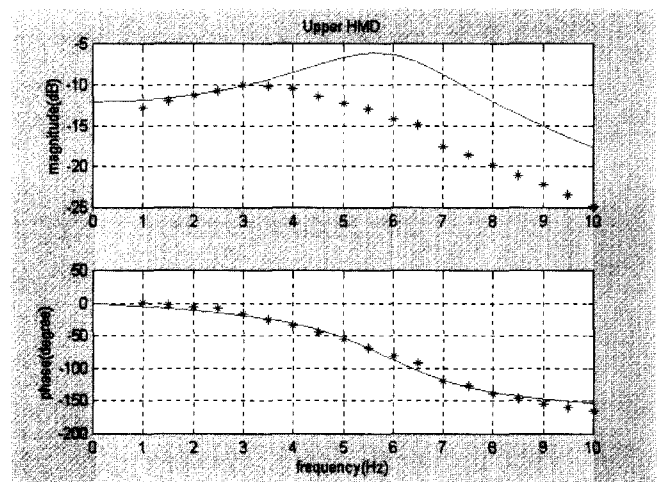


Fig. 4 Dynamic characteristics between the control input voltage and the upper HMD velocity

### 5. 성능검증 시험

제작한 시험 구조물을 Fig. 5와 같이 대형 6자유도 진동대 위에 고정된 후 최상부 층에 제작한 2축 제어용 HMD를 설

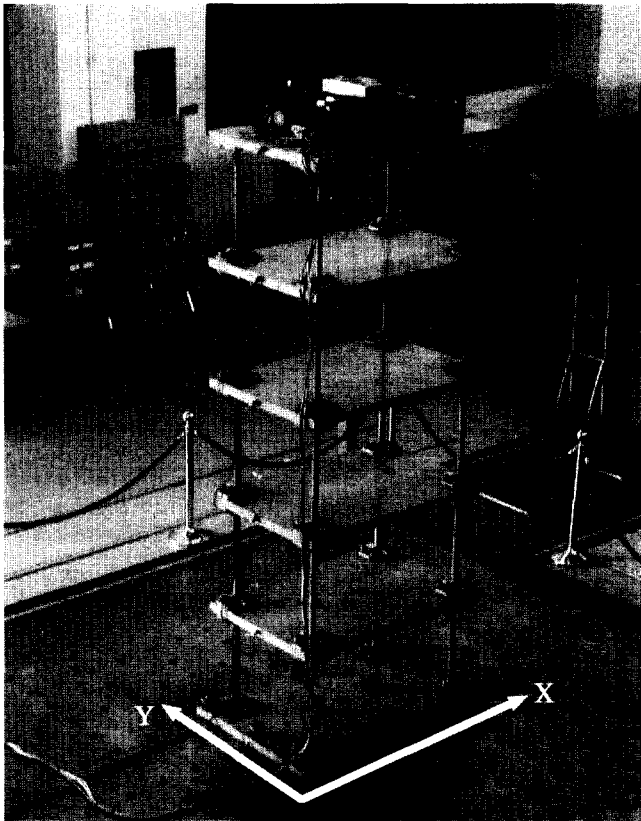


Fig. 5 Experimental setup

치하였다. 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 제어기의 설계

본 실험 대상 구조물은 5자유도의 집중 질량으로 모델링 되었는데, 능동 제어 시에는 2자유도의 모델로 축소하였다.

따라서 능동 제어는 구조물의 2차 모드까지만을 제어하도록 제어기를 설계하였다. 이를 위해 식 (3)의 모델의 차수를 줄여서 식 (7)과 같이 2차의 모드만을 가지도록 축소된 모델(reduced order model)을 우선 만들었다.<sup>(9)</sup> 이는 HMD가 설치되는 5층과 3차 모드의 영향이 가장 적은 층인 3층에 집중 질량을 가지는 모델로 실현하였다.

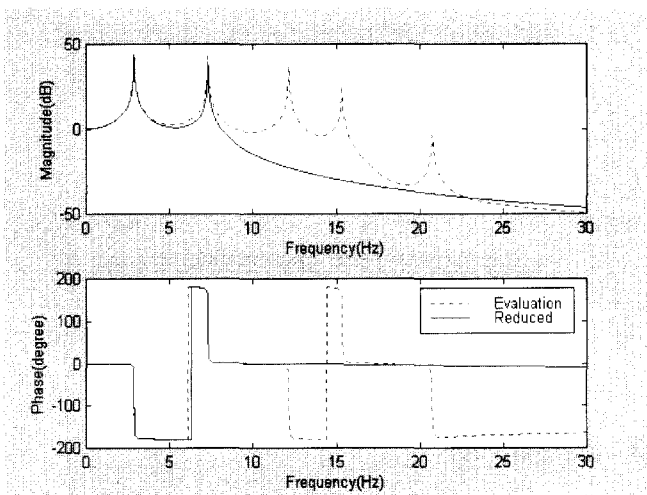
$$M_r \ddot{x}_r(t) + C_r \dot{x}_r(t) + K_r x_r(t) = f_r \ddot{u}_g(t) \quad (7)$$

식 (3)과 식 (7)로 각각 모델링 된 원래의 모델과 축소된 모델을 주파수 영역에서 비교해 보았는데, Fig. 6은 지반 가속도 입력에 대하여 5층과 3층에서의 가속도 응답의 전달함수를 보여주고 있다.

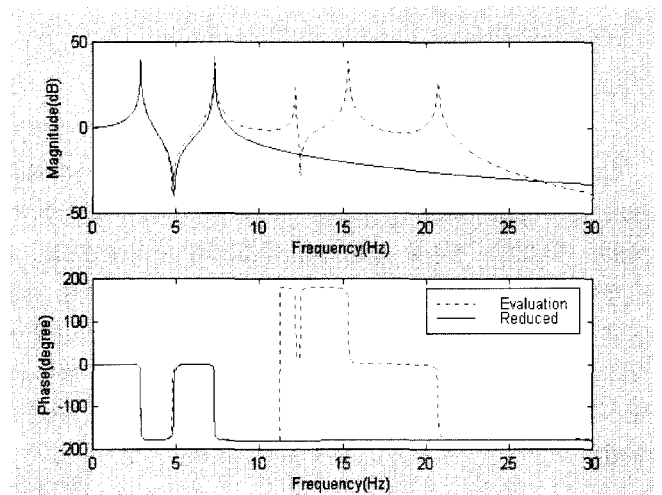
제어 알고리즘은 최적 제어 알고리즘을 적용하였으며, 시스템의 상태 변수는 시험 구조물의 3층과 5층에서의 지반에 대한 상대 변위와 HMD의 가동질량의 속도로 두었다. 실제 실험 시에는 3층과 5층에서의 2개의 가속도 센서를 이용하였는데, 이의 물리량으로부터 시스템의 상태량을 추정하는 Kalman-Bucy 필터를 설계하였다. 또한 제어 대상의 저차 모드만을 가지는 모델에 대하여 최적의 제어 입력 전압을 구했기 때문에, 제어기의 설계 시에 고려되지 않은 3차 이상의 고차 모드의 영향에 의한 넘침효과(spillover effect)가 생겨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

### 5.2 랜덤파형 시험

수평 2축으로 랜덤파형 입력에 대한 가진 시험을 수행하였다. 시험은 TMD 및 HMD의 설치 전·후의 응답 변화를 관찰하기 위해 설치 전의 응답을 계속하고, 이어서 설치 후의 응답을 계속하여 이의 분석을 통해 응답의 변화를 고찰하였다. 랜덤파형의 최대 가속도는 0.2g이며, 각각 80초동안 시험을 수행하였다.



(a) 5th Story



(b) 3rd Story

Fig. 6 Reduced order model of the test structure

먼저 Fig. 7은 수평 2축 방향의 TMD 설치 전·후의 5층에서의 절대 가속도 응답을, Fig. 8과 Fig. 9는 이의 전달 함수를 보여 주고 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.

다음으로 Fig. 10은 수평 2축 방향의 HMD 설치 전·후의 5층에서의 절대 가속도 응답을, Fig. 11은 HMD가 작동하는 Y축 방향에 대한 이의 전달 함수를 TMD의 경우와 비교하여 보여주고 있다. 이로부터 HMD는 TMD보다 구조물의 1차 모드에 더 큰 감쇠 효과를 줄 수 있으며, 또한 2차 모드에도 동시에 감쇠 효과를 줄 수 있으므로 시험 구조물의 응답을 TMD보다 더 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

### 5.3 지진파형 시험

지진파형은 1940년에 발생한 El Centro 지진의 남북방향

의 가속도 신호에 대하여 최대크기가 0.2g인 파형을 사용하였고, 시간 스케일이 1인 경우와 1/2인 경우에 대하여 각각 시험을 수행하였다. 제어성능 비교를 위해서 AC-서보 모터가 작동하는 Y축 방향에 대해서만 지진파형을 입력하였다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각 시간 스케일이 1인 경우와 시간 스케일이 1/2인 경우에 대하여 TMD 설치 전·후의 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. 반면에 Fig. 14와 Fig. 15에서 보여주는 것처럼 HMD의 경우에는 TMD와는 달리 두 경우 모두 제어성능은 효과적임을 확인할 수 있었다. 시간 스케일이 1인 경우에는 최대응답은 30.46%, rms값은 60.11% 감소했고, 시간 스케일이 1/2인 경우에는 최대응답은 32.61%, rms값은 55.72% 감소했다.

TMD의 경우에 제어성능 효과가 떨어지는 것은 지진파형의 주파수 성분을 확인함을 통해 알 수 있다. Fig. 16은 시간

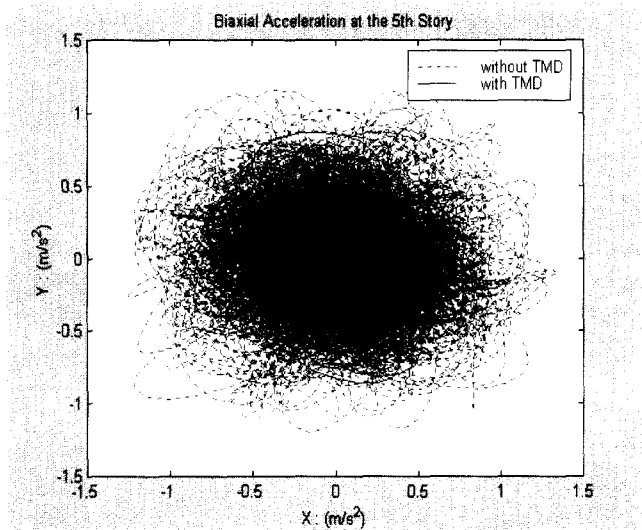


Fig. 7 Biaxial absolute acceleration at the 5th story under random excitation

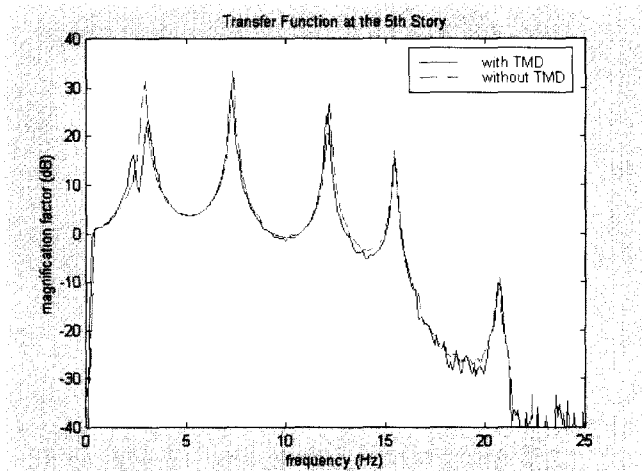


Fig. 8 Transfer function at the 5th story in longitudinal(X) direction

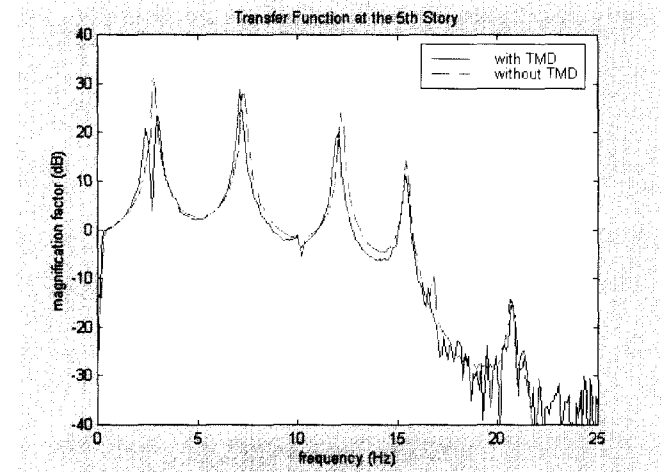


Fig. 9 Transfer function at the 5th story in lateral(Y) direction

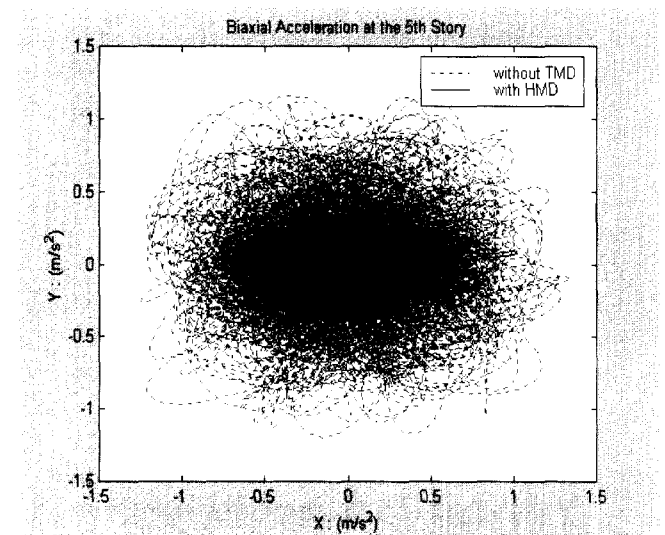


Fig. 10 Biaxial absolute acceleration at the 5th story under random excitation

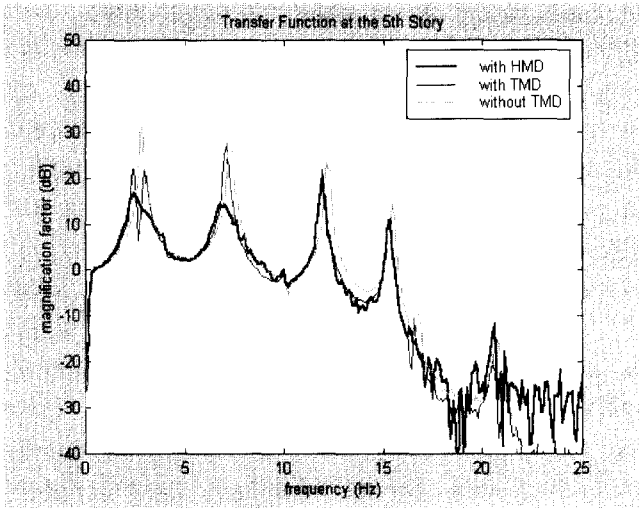


Fig. 11 Transfer function at the 5th story in lateral(Y) direction

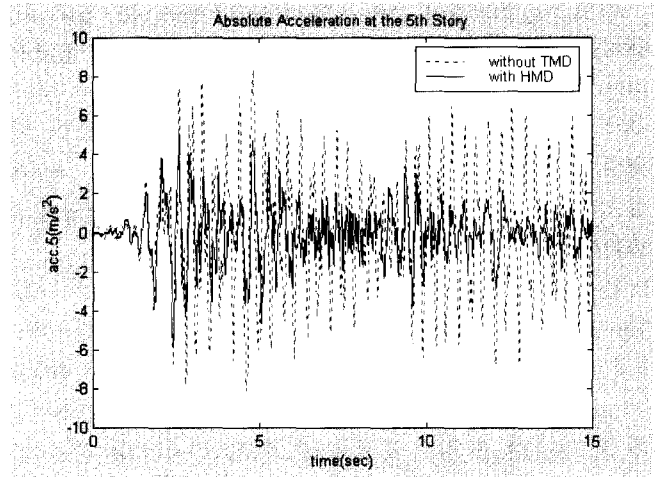


Fig. 14 Absolute acceleration at the 5th story under El Centro earthquake(PGA=0.2g)

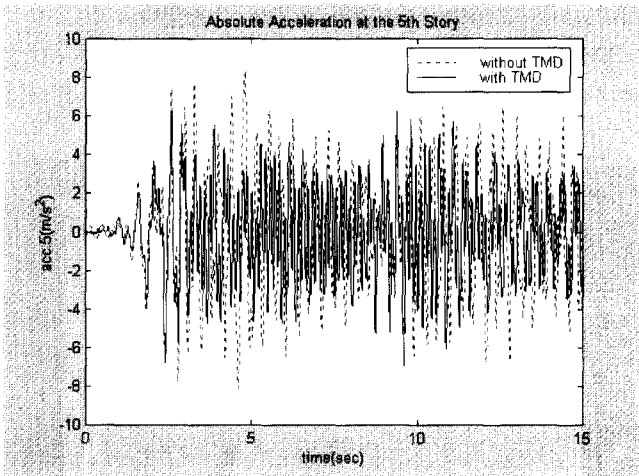


Fig. 12 Absolute acceleration at the 5th story under El Centro earthquake(PGA=0.2g)

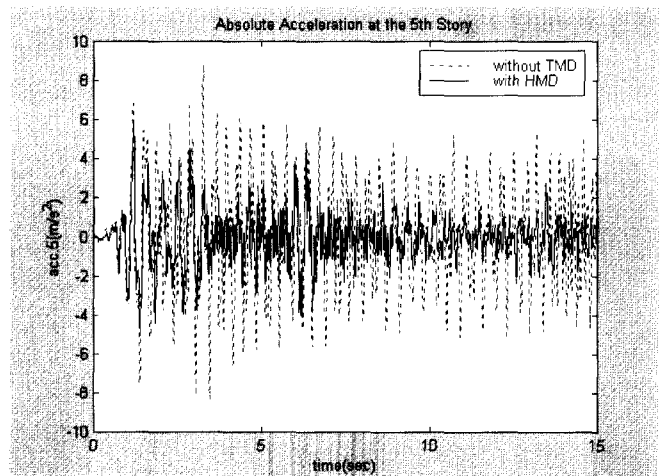


Fig. 15 Absolute acceleration at the 5th story under 1/2 time-scaled El Centro earthquake(PGA=0.2g)

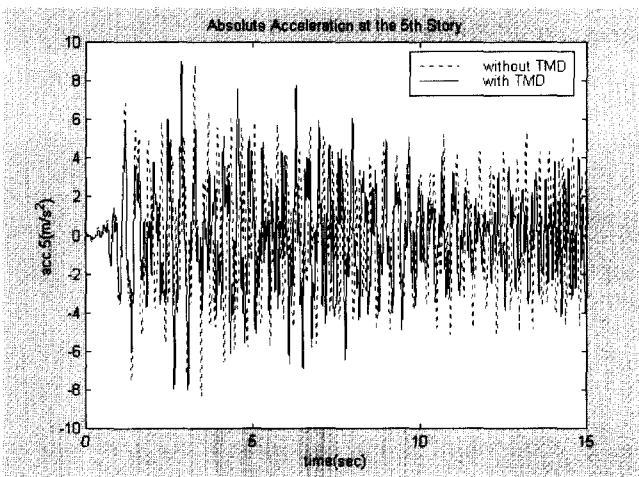


Fig. 13 Absolute acceleration at the 5th story under 1/2 time-scaled El Centro earthquake(PGA=0.2g)

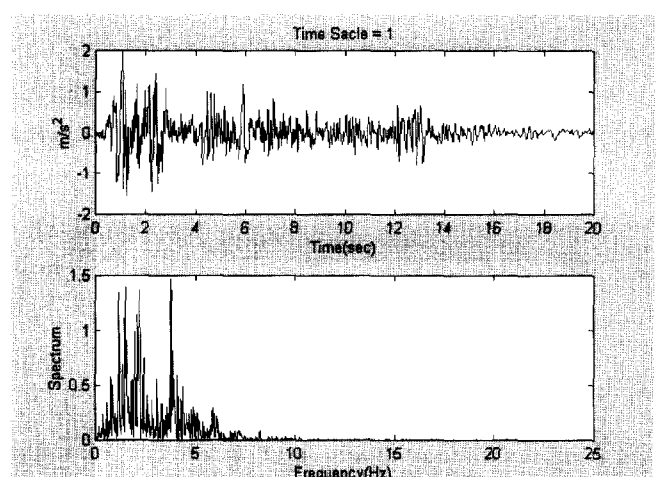


Fig. 16 El Centro earthquake(PGA=0.2g) and spectrum of it

스케일이 1인 경우의 지진파형을, Fig. 17은 시간 스케일이 1/2인 경우의 지진파형을 보여주고 있다. 시간 스케일이 1인 경우의 지진파형의 주 주파수 성분은 시험 구조물의 1차 모드에 해당함을 알 수 있다. 그러나 시간 스케일이 1/2인

경우에는 주 주파수 성분은 주로 시험 구조물의 1차 및 2차 모드가 섞여진 형태임을 알 수 있다. 이 경우에 TMD는 1차 모드의 응답을 조금 감소시키나 2차 모드의 응답을 감소시키지 못함으로, Fig. 13에서 보여주는 것처럼 구조물의 응답을

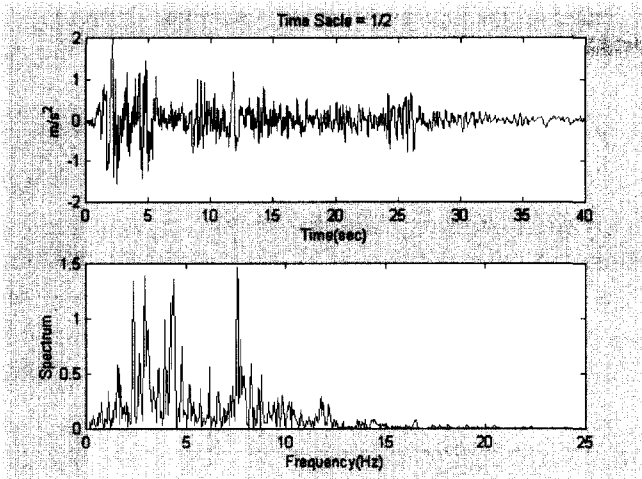


Fig. 17 1/2 Time-scaled El Centro earthquake(PGA=0.2g) and spectrum of it

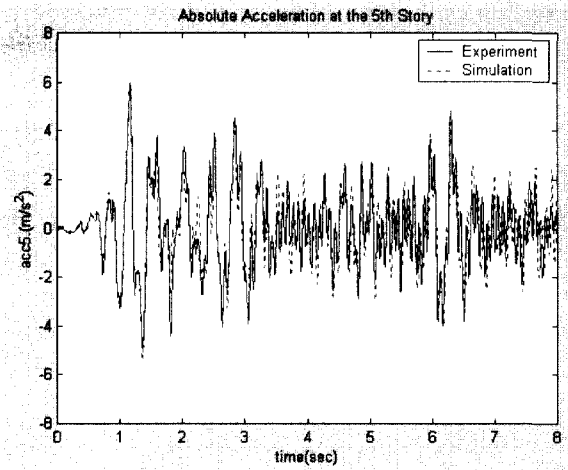


Fig. 19 Comparison of simulation and experimental results under 1/2 time-scaled El Centro earthquake(PGA=0.2g)

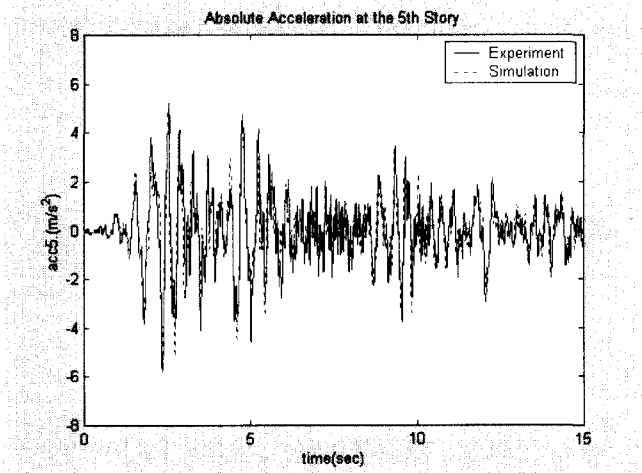


Fig. 18 Comparison of simulation and experimental results under El Centro earthquake(PGA=0.2g)

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

Fig. 18과 Fig. 19는 HMD의 경우에 대하여 각각 시간 스케일이 1인 경우와 시간 스케일이 1/2인 경우의 지진파형에 대한 실험 결과 중 5층에서의 절대 가속도 응답을 수치실험 결과와 비교하여 보여주고 있는데, 대체적으로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 지반 기진력을 받는 구조물의 진동제어를 위한 HMD의 효과에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 수평 2축을 동시에 제어하는 HMD를 설계하였고 5층의 시험 구조물의 최상층에 이를 설치하여 랜덤파형과 지진파형에 대한 시험을 수행하여 TMD의 한계와 HMD의 유용성을 살펴보았다. 이를 통하여 다음과 같은 결과들을 확인할 수 있었다.

먼저 TMD는 예상했던 바와 같이 주로 구조물의 1차 모드만을 제어하는데 효과적임을 실험적으로 확인하였다. 한편 HMD는 TMD보다 구조물의 1차 모드에 더 큰 감쇠 효과를 줄 수 있고, 또한 2개 모드 이상에도 동시에 감쇠 효과를 줄 수 있으므로, 지반 기진력이 랜덤파형인 경우나 지진파형인 경우 모두 TMD보다 시험 구조물의 응답을 더 많이 감소시킬 수 있다. 특히 구조물의 2개 모드 이상을 가진시키는 주파수 성분을 가지는 과도 상태의 지진파형인 경우에도 이의 모드를 동시에 제어할 수 있으므로, 구조물의 응답을 감소시킴에 매우 효과적임을 실험적으로 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 건설 기술 연구 개발 사업으로 수행중인 “초고층 건축물의 풍 및 지진 진동 제어용 동흡진기 개발”과제의 일부로 수행된 결과 중 일부이며, 연구비 지원에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Soong, T. T. and Dargush, G. F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, 1997.
2. Spencer, Jr., B. F. and Saint, M. K., “Controlling buildings : A new frontier in feedback,” *Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology*, Vol. 17, No. 6, 1997, pp. 19-35.
3. Luft, R. W., “Optimal tuned mass dampers for buildings,” *Journal of the Structural Division*, Vol. 105, 1979, pp. 2766-2772.
4. Ayorinde, E. Q. and Warburton, G. B., “Minimizing structural vibrations with absorbers,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, 1980, pp. 219-236.
5. Warburton, G. B., “Optimal absorber parameters for

- various combinations of response and excitation parameters," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, 1982, pp. 381-401.
6. Asami, T., Wakasono, T., Kameoka, K., Hasegawa, M., and Sekiguchi, H., "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, 1990, pp. 93-101.
  7. Asami, T., Momose, K., and Hosokawa, Y., "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, 1993, pp. 56-61.
  8. 문석준, 엄재광, 한성용, 송영훈, "지반 기진력을 받는 건축구조물의 최적 동흡진기 설계", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 1998, pp. 841-847.
  9. Seto, K. and Mitsuta, S., "A new method for making a reduced-order model of flexible structures using unobservability and uncontrollability and its application in vibration control," *JSME, Series C*, Vol. 37, No. 3, 1994, pp. 444-449.