

# 점탄성 감쇠기 적용을 위한 실물크기 5층 건물의 가진 및 시스템 식별

## Excitation and System Identification of a Full-Scale Five-Story Structure for the Application of Viscoelastic Dampers

민 경 원\*  
Min, Kyung Won

이 상 현\*\*  
Lee, Sang Hyun

김 진 구\*\*\*  
Kim, Jin Koo

이 영 철\*\*\*\*  
Lee, Young Cheol

이 승 준\*\*\*\*  
Lee, Seung Jun

최 현 훈\*\*\*\*  
Choi, Hyun Hoon

### 국문요약

점탄성 감쇠기의 설계를 위한 자료를 얻기 위해 실물크기 5층 건물에 대해 가진과 시스템 식별을 수행하였다. 5층 바닥에 설치된 HMD는 건물을 움직이는 외부 가진력으로 작용하였고, 각 층의 응답을 측정하여 점탄성 감쇠기의 용량과 최적위치에 필요한 자료를 확보하였다. 고유진동수, 감쇠비, 모드와 같은 동적특성을 파악하기 위해 건물에 HMD로 조화하중과 백색잡음 하중을 주어 실험을 수행하였다. 동반논문에서는 건물의 층간에 설계된 점탄성 감쇠기를 설치한 후 응답 거동을 얻기 위한 실험 연구를 수행하였다.

**주요어** : 시스템 식별, 가진, 실물크기 건물, 점탄성 감쇠기, 동적특성

### ABSTRACT

Excitation and system identification are carried out for a full-scale five-story structure to obtain fundamental data which will be used for the design of viscoelastic dampers. The hybrid mass driver(HMD) installed on the fifth floor was employed as external exciter to provide excitation for the building. Each floor response was measured and processed to find out where and how the viscoelastic dampers are located and designed. The sine-sweep and white noise loadings were applied to the structure by the HMD to obtain dynamic characteristics such as natural frequencies, damping ratios, and modes. The identified building was experimentally investigated again with the designed viscoelastic dampers installed at inter-stories to obtain the response behavior in the companion paper.

**Key words** : system identification, excitation, full-scale five-story building, viscoelastic dampers, dynamic characteristics

## 1. 서 론

점탄성 감쇠기는 지진 및 바람에 의한 건물의 진동을 억제하여 주는 기능을 가지고 있다.<sup>(1),(4)</sup> 건물의 층 사이에 설치되어 층간응답의 진동에 의하여 감쇠기의 점탄성 재료가 전단진동거동을 한다. 외부하중에 의한 입력에너지를 점탄성 재료의 전단거동에 따른 에너지로 소산시켜 응답을 감소시켜 준다. 본 논문은 실물크기의 5층 건물에 점탄성 감쇠기를 설치하여 진동제어성능을 파악하기 위한 사전 연구로써, 실물크기 구조물을 가진시키기 위한 가진기의 적용 가능성과 가진 방법 그리고 이에 따른 건물의 진동응답을 예측하는 것이다. 또한 시스템 식별을 수행하여 구조물의 주요 고유진동수 및 감쇠비, 전달함수 등을 구하여 점탄성 감쇠기의 설계를 위한 자료로 이용한다. 점탄성 재료를 설계하기 위해서는 가진에 의한 건물의 응답을 예측하여 층간 변위가 크게 일어나는 곳, 탄성과 비탄성 거동의 가능성, 층간 변위의 크기 등등을 알고 있어야 한다.<sup>(5)</sup> 가진은 진동제어용으로 개발된 HMD(Hybrid Mass Driver-복합형 질량제어기)를 5층

바닥에 설치하여 건물에 조화하중 및 백색잡음의 하중을 가한다. 건물 각 층에 가속도센서를 달아 조화하중과 백색잡음을 입력신호로 하여 그에 대한 출력 자료를 이용하여 건물의 고유진동수, 감쇠비 등 동적특성을 파악하여 동반 논문<sup>(6)</sup>에서 연구된 점탄성 감쇠기의 설치위치 및 크기에 대한 설계자료를 확보하였다.<sup>(2),(3)</sup> 실험대상 구조물은 5층 철골건물로 H형강 기둥으로 인하여 횡방향거동에 대해 약축방향과 강축방향을 가진다. 가진은 약축방향에 대해 실시하며, 대상 구조물에 설치된 HMD를 사용한 조화하중 가진 실험을 통해 1차 모드의 고유진동수와 감쇠비를 알아내었다. 이 방법은 고차모드를 식별하지 못하고, 다양한 진동수의 조화하중을 가진하여야 하는 어려움이 있으나, 해석이 용이하고 공진 진동수를 확실하게 알 수 있는 장점을 가진다. 또한 백색잡음을 가진하중으로 사용하여 고차모드의 고유진동수와 감쇠비를 알아내었다. 주어진 하중은 최대입력전압 1.5V의 0.5Hz의 조화하중을 가진하여, 1차 모드의 거동 특성을 파악하고, 최대 공진변위를 알아냄으로써, 점탄성 감쇠기의 설치위치 및 설치량을 결정하기 위한 기본 자료로 사용하였다.<sup>(7)</sup>

## 2. 가진시스템

연구에 사용된 대상 구조물은 그림 1에 보이는 높이가 30m 실물크기의 5층 철골건물이다. 층고는 6m, 평면은 6m×6m, 총질량은 20ton, 층강성은 2440kN이다. 점탄성 감쇠기를 설

\* 정희원 · 단국대학교 건축공학과, 부교수(대표저자 : kwmin@dankook.ac.kr)  
\*\* 서울대학교 공학연구소, 연구원, 공학박사  
\*\*\* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수  
\*\*\*\* 단국대학교 건축공학과, 석사과정  
\*\*\*\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사수료  
본 논문에 대한 토의를 2003년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2003. 1. 22 / 심사종료일 : 2003. 3. 4)

계하고 구조물에 설치하여 감쇠기의 제어성을 파악하기 위해서는 실물크기의 구조물을 가진할 수 있는 가진기가 필요하다. 가진기로는 건물의 능동제어용으로 개발된 그림 2의 전자기력 리니어 왕복 액츄에이터 시스템(Linear Oscillating Actuator, 이하 LOA라 표기)를 이용한 HMD를 사용하기로 한다. HMD는 구조물의 제어에 사용되는 장치로 특정한 질량, 감쇠, 강성을 가지는 TMD(Tuned Mass Damper, 동조질량감쇠기)에 외력을 가하여 원하는 거동을 구현할 수 있는 장치이다.<sup>(8)</sup>

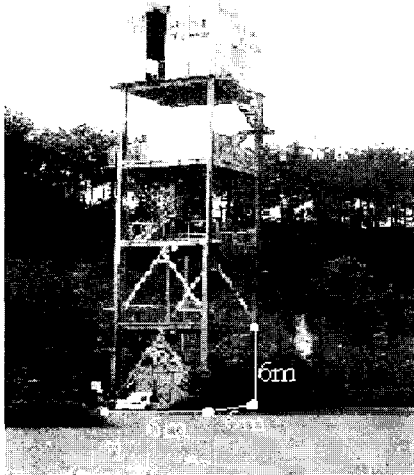


그림 1 실물크기 5층 철골건물

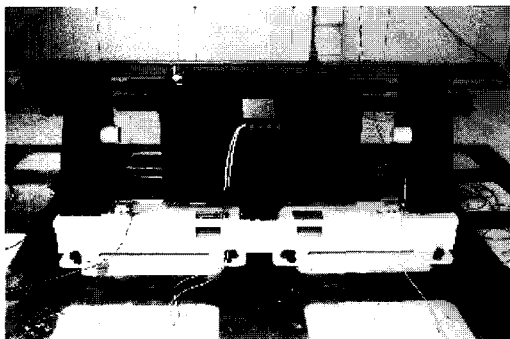


그림 2 건물에 설치된 HMD

LOA 시스템의 HMD는 전자기력을 발생시키기 위하여 영구자석의 고정자와 코일을 감은 가동자로 구성이 되며 코일에 흐르는 전류와 고정자 사이의 로렌쯔 법칙에 따라 전자기 추력이 발생한다. 이러한 추력이 HMD의 질량체를 구동시키게 된다. 코일에서의 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$L \frac{di}{dt} + Ri + k_E \frac{dx}{dt} = e \quad (1)$$

위에서  $e$ 와  $i$ 는 각각 전압과 전류이며  $L$ ,  $R$ ,  $\frac{dx}{dt}$ ,  $k_E$ 는 각각 코일 인덕턴스, 코일 저항, 가동자의 속도, 유기전압상수이다. 위 식의 첫번째 항은 전류변화에 따른 변압기 기전력항이며, 세번째 항은 자계속에서 코일이 운동함에 의해 발생하는 속도 기전력항이다. 위의 전류는 추력상수  $k_T$ 의 곱에

해당되는 추력을 발생시켜 HMD의 질량체에 가해지게 된다.<sup>(7)</sup>

$$m_h \ddot{x}_h + k_h x + c_h \dot{x} = k_T i \quad (2)$$

$m_h$ ,  $k_h$ ,  $c_h$ 는 각각 HMD의 질량, 스프링 상수, 마찰계수를 의미한다. 즉 HMD의 질량체를 구동하기 위한 입력신호는 전압신호이며, 이것은 전류를 발생시키고, 이 전류에 비례하는 힘이 HMD를 가진한다. 따라서 전압신호로부터 발생하는 HMD 가진기의 가진력, 그리고 가진력에 대한 건물의 응답 등의 관계를 파악하여야 한다.<sup>(5)</sup>

HMD가 건물을 가진하기 위하여 위와 같이 HMD는 컴퓨터의 입력전압신호로 그 거동이 제어된다. 식 (2)와 같이 제어력  $k_T i$ 가 HMD에 작용하며 이 힘은 구조물에 반작용 힘으로 작용한다. 이러한 구조물-HMD의 관계식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_h & -c_h \\ -c_h & c_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_h & -k_h \\ -k_h & k_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \end{bmatrix} k_T i \quad (3)$$

위 식에서  $m_s$ ,  $c_s$ ,  $k_s$ 는 각각 구조물의 질량, 감쇠상수, 강성을 의미하며  $x_s$ 는 구조물의 변위이다. 위 식에서 구조물에 관계된 식은 식 (4)와 같이 정리할 수 있으며 HMD 질량체의 가속도에 의한 관성력이 구조물을 가진시키는 힘이 된다는 것을 알 수 있다.

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_h \ddot{x}_h \quad (4)$$

### 3. 실물 구조물 가진 방법

#### 3.1 실험방법

그림 3은 실물크기 철골건물의 가진 실험을 위한 장비 설치 개념도이다. PCB사 모델명 393B12의 가속도계를 각 층의 가속도 응답을 측정하기 위하여 구조물의 약축방향으로 1개

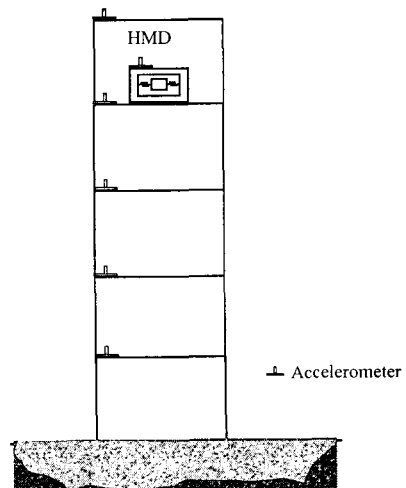


그림 3 실험 건물과 HMD

씩 설치하였고, 시스템의 주파수 전달함수를 얻기 위해 HMD 이동질량에 Dytran사 3191A 모델의 가속도계를 설치하였다. 가속도 신호들을 PC와 B&K type 3560 8 channel의 FFT 장비 및 PULSE Labshop 소프트웨어를 사용하여 데이터 신호들을 실시간으로 얻었다. 시간 영역은 최대 150초, 38.4k 샘플 까지 저장할 수 있다.

### 3.2 조화하중

5층 철골건물의 층질량과 층강성을 알고 있으므로 전단거동을 하는 5자유도 건물이라고 설정하여 미리 고유치해석을 수행하였다. 해석 결과 고유 진동수가 0.5Hz, 1.46Hz, 2.3Hz, 2.95Hz, 3.37Hz 로 나타났다. 실험을 통하여 1차 고유진동수 및 감쇠비를 구하기 위해 0.4Hz~0.8Hz 범위를 0.05Hz 간격으로 조화하중 실험을 수행하였다. 공진주파수 근처에서 좀더 세밀한 주파수 간격으로 실험하였다. 최대입력전압 1.5v의 0.5Hz의 조화하중을 가진하여 1차모드의 거동특성을 파악하고 공진변위를 알아냄으로써, 효과적인 점탄성 감쇠기의 설치위치 및 설치량을 결정하기 위한 기본자료로 사용한다. 조화하중을 만들기 위한 HMD에 대한 컴퓨터의 입력신호는 다음 식 (5)와 같다.

$$e = 1.5 \sin(2\pi \times 0.5t) \quad (5)$$

그림 4는 입력신호  $e$ 와 그에 따라 발생하는 HMD의 가진력  $m_h \ddot{x}_h$ 의 시간이력을 보여준다. 1.5v 입력 신호시 최대 1286N의 힘이 발생하며, 정상상태에서는 최대 800N, 진동수 0.5Hz의 조화하중이 발생함을 알 수 있다.

그림 5는 조화하중 가진에 의한 지붕층 가속도의 전달함수를 나타내는 것으로 0.5Hz에서 공진현상이 일어나는 것을 볼 수 있다. 즉, 0.5Hz에서 1차 고유진동수가 나타났으며 half power 방법을 이용하여 감쇠비가 1.98%임을 알 수 있다.

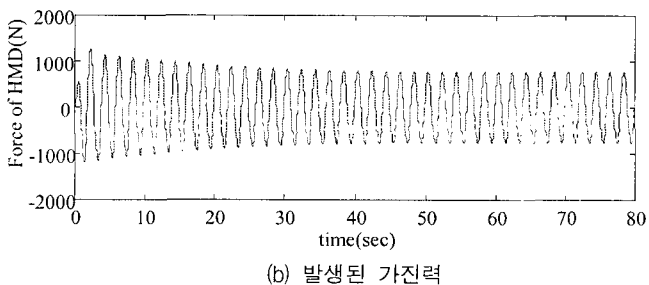
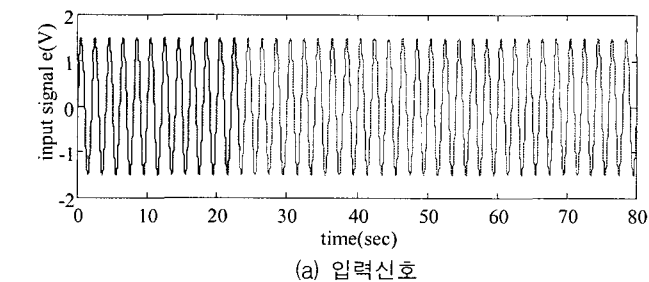


그림 4 0.5Hz 조화하중을 위한 입력신호와 HMD에 의해 발생하는 가진력

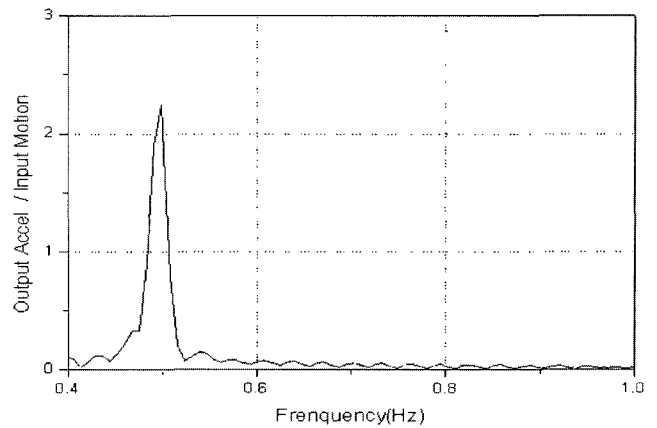


그림 5 HMD 가진력-지붕층 가속도의 전달함수

5층에 작용하는 가진력을 알고 있으며 건물과 HMD의 상호작용을 무시하면, 5층에 가해지는 가진력에 대한 전단건물 모델을 수치해석하여 표 1과 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 1 최대입력전압 1.5V의 0.5Hz 조화하중에 대한 건물의 해석응답

Floor	변위(cm)		상대변위(cm)		절대가속도(cm/sec <sup>2</sup> )	
	Peak	RMS	Peak	RMS	Peak	RMS
2	0.95	0.61	0.95	0.61	9.34	5.99
3	1.82	1.17	0.87	0.56	17.93	11.50
4	2.55	1.63	0.73	0.47	25.07	16.08
5	3.07	1.97	0.52	0.33	30.19	19.36
Roof	3.33	2.14	0.27	0.17	32.84	21.06

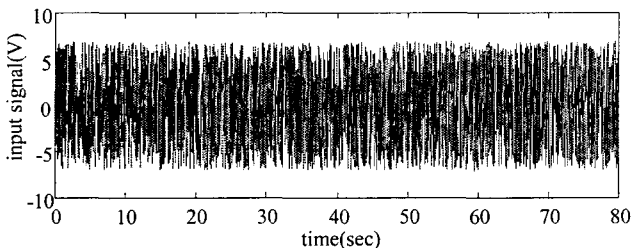
표 1로부터 건물이 1차 고유진동수로 공진하는 경우, 2층과 1층의 층간변위가 0.95cm로 최대이며, 지붕층의 가속도가 최대 32.84cm/sec<sup>2</sup>가 발생함을 알 수 있다. 이 층간변위 값은 이 하중하에서 철골건물이 탄성변형거동을 하며, 1.5V의 0.5Hz 조화하중이 실험의 안전 및 반복실험을 고려하였을 경우의 가진 신호로 사용될 수 있음을 보여준다. 또한, 1차모드로 거동시 최대층간변위는 1층과 2층의 층간에서 발생함을 알 수 있다. 구조물이 탄성변형을 하는 것을 고려할 때, 0.2% 전단변형율을 가정한 경우의 최대층간변위는 1.2cm이므로 구조물은 탄성범위 내에서 거동함을 확인할 수 있다.

### 3.3 백색잡음하중

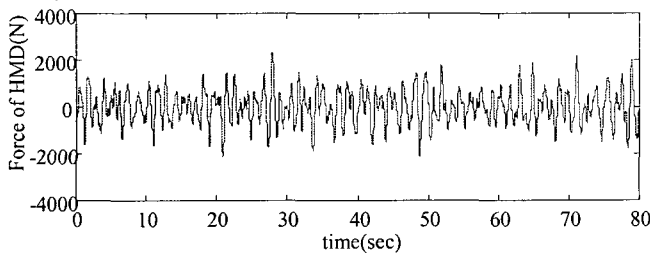
조화하중 실험을 통해 건물의 전달함수를 구하기 위해서는 다른 여러 진동수 성분의 조화하중에 대한 실험을 여러 번 수행해야 하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점은 백색잡음이나 구조물의 진동수 대역성분을 가진할 수 있는 가진신호로 가진 시 해결될 수 있다. 가진기로 사용하는 HMD는 자체의 전달함수를 가지고 있으며, 백색잡음으로 컴퓨터 입력전압신호를 설정하는 경우, 이 전달함수에 의해 특정한 진동수 대역의 성분의 크기가 변한 신호를 발생하게 된다. 백색잡음 입력에 대한 HMD의 가속도가 건물의 모든 모드 성분을 가진할 수 있는 진동수 대역을 가질 수 있다면 단일의

실험으로도 건물의 전달함수를 구할 수 있으며, 이로부터 점탄성 감쇠기를 설치한 건물의 진동제어성능평가를 수행할 수 있다. 조화하중의 경우 공진현상을 이용하여 작은 가진력을 가지고도 큰 층간변위응답을 얻을 수 있으나, 백색잡음의 경우 조화하중의 경우와 동일한 크기의 응답을 얻기 위해서는 매우 큰 제어력을 발생시켜야 한다. 그러나, 이는 HMD의 성능에 의해 제한될 수 밖에 없으며, 따라서 조화하중 보다 작은 크기의 응답에 대한 성능평가를 수행할 수 밖에 없다. 이는 층간응답에 의해 성능을 발휘하는 점탄성 감쇠기의 성능평가에 제한으로 작용한다.

그림 6은 백색잡음 입력신호  $e$ 와 그에 따라 발생하는 HMD의 가진력  $m_h \ddot{x}_h$ 의 시간이력을 보여준다.



(a) 백색잡음 입력전압



(b) 발생된 가진력

그림 6 백색잡음 입력전압과 HMD에 의해 발생되는 가진력

그림 6으로부터, 최대 7V의 백색잡음 입력에 의해 발생하는 HMD의 최대가진력은 약 2000N이다. 시간이력으로도 식별할 수 있듯이, 고진동수가 있는 백색잡음과 달리 HMD의 가진력은 저진동수 성분 중심의 신호이다. 이러한 저진동수 성분의 가진력으로 건물의 주요 모드를 가진할 수 있는지 알아보기 위해 가속도의 진동수 성분을 나타내면 다음과 같다.

위 그림으로부터, 백색잡음 입력에 의해 발생하는 HMD 하중의 가속도는 낮은 진동수 대역 성분이 큰 신호임을 알 수 있다. 5자유도 전단건물의 고유 진동수가 0.5Hz, 1.46Hz, 2.3Hz, 2.95Hz, 3.37Hz 임을 고려하면 건물의 저차모드까지 가진할 수 있을 것으로 판단되며, 크기는 약하지만 고차모드의 가진도 어느 정도는 가능할 것으로 판단된다. 위의 분석과 같이 저진동수성분의 HMD 하중에 의한 건물의 해석응답이 표 2에 있다. 컴퓨터 최대 입력전압이 7V로 1차 모드 공진조화하중 1.5V보다 큼에도 불구하고, 응답이 작아 탄성 거동임을 예측할 수 있다. 따라서, 백색잡음의 경우에도 실험의 안전 및 반복실험을 고려하였을 경우의 가진 신호로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 최대 층간변위는 1층-2층

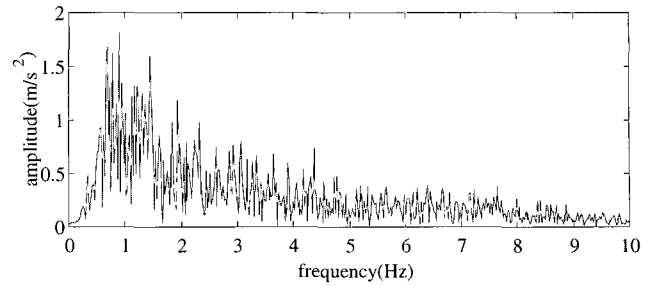


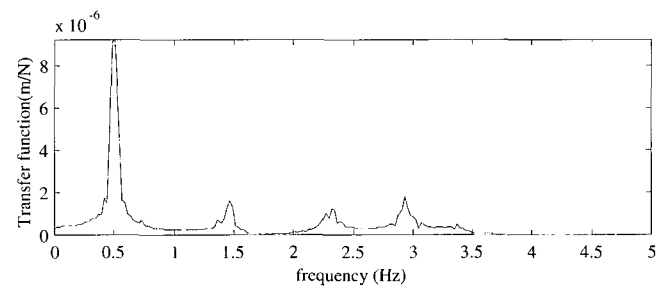
그림 7 백색잡음 입력에 의해 발생하는 HMD 가속도의 진동수 성분

표 2 저진동수 성분의 HMD 가진력에 대한 건물의 해석응답

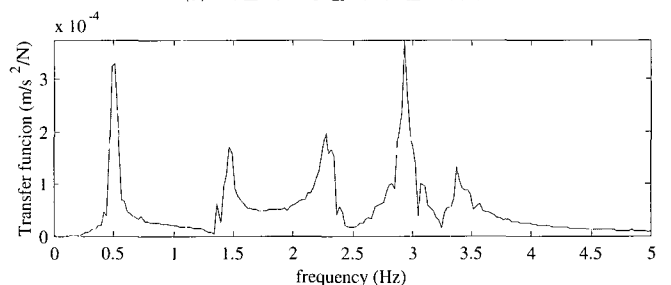
Floor	변위(cm)		상대변위(cm)		절대가속도(cm/sec <sup>2</sup> )	
	Peak	RMS	Peak	RMS	Peak	RMS
2	0.33	0.11	0.33	0.11	8.18	1.95
3	0.64	0.22	0.31	0.10	10.45	2.77
4	0.89	0.30	0.26	0.09	13.14	3.48
5	1.07	0.36	0.19	0.06	13.92	3.98
Roof	1.21	0.39	0.14	0.04	16.62	4.43

간에서 발생하였고, 2층, 3층, 4층 그리고 5층의 순서로 큰 층간변위가 발생하였다.

그림 8은 저진동수성분의 HMD 하중에 대한 건물 응답의 전달함수를 보여준다. 5층 HMD의 가진력의 입력에 대한 2층 변위의 출력 전달함수를 나타내는 그림 8(a)로부터, 변위 응답의 경우 1차 모드부터 4차 모드까지 가진할 수 있으며, 지붕층 가속도의 전달함수인 그림 8(b)로부터, 가속도응답의 경우 5차 모드까지 가진할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 이 가진신호에 대한 각 층의 가속도 응답과 1층 혹은 2층의 층간변위 응답으로부터 시스템 식별을 수행할 수 있을 뿐 아니라, 점탄성 감쇠기의 성능평가도 가능함을 예측할 수 있다.



(a) 가진력-2층변위의 전달함수



(b) 가진력-지붕층 가속도의 전달함수

그림 8 5층 HMD 가진력에 대한 응답의 전달함수

#### 4. 시스템 식별

조화하중 실험의 경우, 입력신호의 진동수 성분 이외의 신호는 잡음으로 생각하여 이를 필터링 하는 것이 수월하다. 그러나, 백색잡음에 의해 가진하는 경우, 비록 작은 횡수의 실험으로도 구조물의 전달함수를 구할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 잡음과 실제 구조물의 응답을 구분하기가 어렵다. 따라서, 점탄성 감쇠기에 의한 구조물의 특성 변화를 구하기 위해서는 측정된 신호에서 잡음을 제거하고, 구조물의 특성이 반영된 신호만을 가지고 시스템 식별을 수행해야 한다. 본 연구에서는 신호의 평균값의 편중된 경향과 고진동수 성분을 제거하기 위해 대역통과필터(band pass filter)를 사용하였다. 사용된 필터는 실험대상 구조물의 진동수대역을 고려하여, 4차의 0.3Hz-10Hz butterworth 필터로 그림 9에 나타내었다.

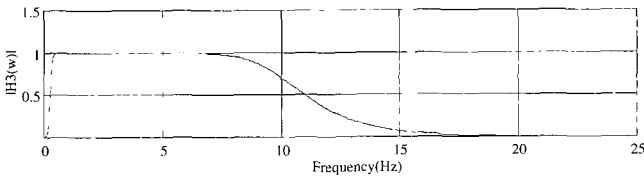


그림 9 4차의 0.3Hz-10Hz butterworth 필터

입력  $y$ 에 대한 출력  $u$ 의 전달함수는 식 (6)에 의해 계산되며  $S(\omega)$ 는 관련된 신호의 스펙트럼 밀도 함수이다.

$$H_{yu}(j\omega) = \frac{S_{wy}(\omega)}{S_{uu}(\omega)} \quad (6)$$

상기 식은 연속시간영역의 전달함수이며, 지정된 시스템 입력의 연속시간 기록과 반응 결과는 시간 간격  $N$ 으로 표본화된다. 입력과 출력신호의 표현은 각각  $u(nT)$ ,  $y(nT)$ 이다. 여기서  $T$ 는 시간간격이고  $n=0,1,\dots,N$ 은 정수이다. 주기적으로 표현되는 신호(주기  $NT$ )는 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$u_p(nT) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} u(nT+rNT) \quad (7)$$

$N$ 개의 데이터 수에 대한 FFT는 식 (8)에 주어진 이산 푸리에 변환으로 계산된다.

$$U(jk\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} u_p(nT)W^{-nk} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (8)$$

여기서  $W = e^{2\pi j/N}$ ,  $\Omega = \omega_s/N$ ,  $\omega_s$ 는 표본 진동수이다.

이산시간에 대한 입력의 자기상관스펙트럼(auto-spectral) 밀도함수와 입력과 출력의 교차스펙트럼(cross-spectral) 밀도함수는 각각 식 (9)와 식 (10)과 같다.<sup>(9)</sup>

$$S_{uu}(k\Omega) = cU^*(jk\Omega)U(jk\Omega) \quad (9)$$

$$S_{wy}(k\Omega) = cU^*(jk\Omega)Y(jk\Omega) \quad (10)$$

여기서,  $c$ 는 변하지 않는 상수로  $c = T/N$ 으로 정의하고 \*는 켈레 변환을 나타낸다.

그러나, 실제로 길이  $N$ 인 표본들은 정확한 결과를 제시하지 못하며, 보다 정확한 결과는 다음과 같이 동일한 길이의 표본들에 대한 평균에 의해 얻을 수 있다.

$$\overline{S}_{uu}(k\Omega) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{uu}^i(k\Omega) \quad (11)$$

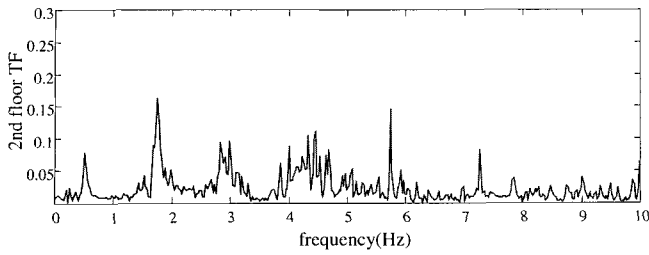
$$\overline{S}_{wy}(k\Omega) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_{wy}^i(k\Omega) \quad (12)$$

$$\overline{H}_{yu}(jk\Omega) = \frac{\overline{S}_{wy}(k\Omega)}{\overline{S}_{uu}(k\Omega)} \quad (13)$$

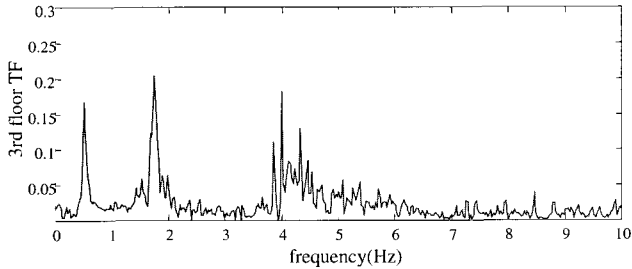
여기서  $S^i$ 는  $i$ 번째 표본들의 스펙트럼 밀도함수를 의미하며,  $M$ 은 동일한 길이의 표본갯수이다. 본 연구에서는 시간 간격  $T=0.0195$ (초)으로 모두 2600개의 데이터를 측정 한 후,  $2^{11}=2048$ 개의 데이터를 가지는 표본들을 2038개만큼 중첩하여 56개의 표본을 구성하였다. 전달함수는 이 각각의 표본으로부터 구해진 전달함수들의 평균으로부터 계산하였다. 또한, 전달함수의 평활화한 윈도우 방식은 Hanning 윈도우를 사용하였다. 실험을 통해 얻은, HMD 가속도를 입력으로 하고, 각 층 가속도를 출력으로 하는 전달함수는 다음 그림에 나타나 있다. 그림 10은 5층 가속도에 대한 각 층의 전달함수를 나타낸 것으로 0.51Hz에서 구조물의 1차 고유진동수를 보여주고 1.74Hz에서 2차 고유진동수가 나타났음을 보여준다. 그러나 3Hz 밖에서 3차 모드 이상의 고차모드는 알아낼 수 없었다. 이는 대상 구조물이 3차 모드 이상의 고차모드에 대한 영향이 미미함과 동시에 실험 중 발생한 잡음 때문인 것으로 추정된다.

특히 5층과 지붕층의 전달함수는 3Hz이상의 범위부터 잡음의 영향이 나타나는데 이는 5층에 설치된 가속도계에 HMD를 구동하기위해 발생하는 전자기파가 영향을 주었고, 지붕층에 설치된 가속도계에는 대상 건물의 구축에 사용된 크레인 추의 거동이 잡음으로 작용했기 때문인 것으로 판단된다.

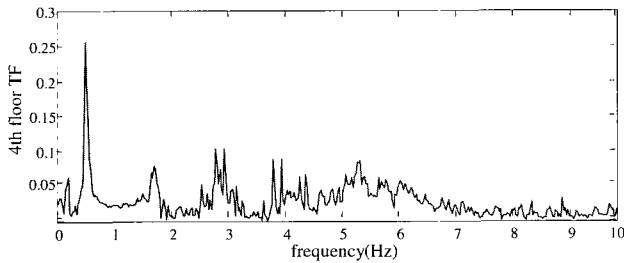
실험 대상 건물은 5층 HMD가진에 대한 5개의 가속도 응답을 측정 한 1입력 5출력 시스템이라 할 수 있다. 본 연구에서는 점탄성 감쇠기에 의한 구체적인 건물의 진동수와 감쇠비 변화를 알기 위해, 주파수 영역에서의 시스템 식별 기법을 적용하여 1입력 5출력 구조물의 시스템 행렬을 알아낸 후, 그 행렬의 고유값으로부터 시스템의 진동수와 감쇠비를 계산하였다. 시스템 식별은 실험으로부터 얻어진 전달함수를 가장 잘 묘사할 수 있는 극점(pole)과 제로(zero)를 가지는 전달함수를 구하고, 이 전달함수를 상대방정식으로 전환하여 시스템 행렬을 구하는 방법을 사용하였다. 이를 위해 Matlab 내장함수 fitsys function을 이용하였다.<sup>(4),(10)-(12)</sup>



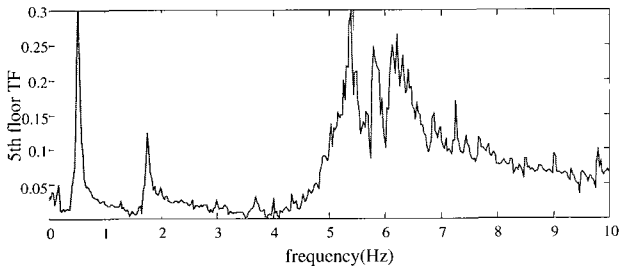
(a) 2층 전달함수



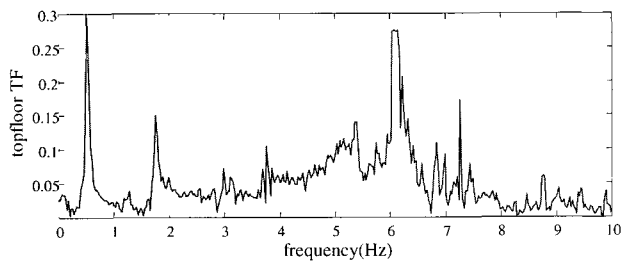
(b) 3층 전달함수



(c) 4층 전달함수



(d) 5층 전달함수



(e) 지붕층 전달함수

그림 10 각 층의 가속도 전달함수

백색잡음 실험을 통해 얻는 결과로 표 3을 보면 1차 고유진동수가 0.51Hz이고, 이 때의 감쇠비는 3.61%이다. 이는 조화하중 가진 실험을 통해 얻어진 1.98% 감쇠비와 차이가 있는데, 공진현상을 이용해 큰 응답을 얻을 수 있는 조화하중 가진의 경우에 비해 작은 응답에서 성능평가를 해야하는 백색잡음의 한계에서 비롯된 것이라 생각된다.

표 3 백색잡음 실험을 통한 건물의 모드파라미터

Mode	Frequency(Hz)	Damping Ratio(%)
1	0.51	3.61
2	1.74	1.12
3	3.34	5.02
4	5.32	4.43
5	6.10	1.89

#### 4. 결 론

본 논문은 점탄성 감쇠기를 설치하여 진동제어 효과를 파악하기 위한 실물크기의 5층 건물의 가진방법과 시스템 식별에 관한 것이다. 능동제어기로 개발된 HMD를 5층 바닥에 설치하여 조화하중과 백색잡음 가진력을 건물에 가하였다. HMD는 전자기력 리니어 왕복 액츄에이터 시스템으로 입력전압으로 제어가 되며 건물에 HMD의 관성력으로 가진을 하게 된다. 건물의 탄성거동을 유도하기 위한 적정 입력전압을 구하였으며 이에 따른 가진력을 결정하였다. 점탄성 감쇠기의 설치위치, 설치량 등을 예측하기 위하여 가진력에 대한 건물의 응답을 해석적으로 구하였다. 이와 같이 구한 자료들은 점탄성 감쇠기의 설계를 위하여 이용이 되었으며 동반 논문에서 건물에 설치하여 제어효과를 검증하였다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구 과제(R01-1999-000298-0) 및 과학기술부 국가지정연구실사업(M1-0203-00-0068)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 유니스산업(주)의 연구지원에 대해 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 호경찬, "점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 지진 거동에 관한 실험 및 해석 연구", 석사학위논문, 인천대학교, 1999.
2. 이성경, "건축구조물의 진동제어에 관한 실험적 연구", 석사학위논문, 인천대학교, 1998.
3. 손동인, "건축구조물에서 지진하중에 대한 점탄성 감쇠기의 최적설계", 석사학위논문, 서울대학교, 2001.
4. 최 현, 박건록, 김두훈, 이상조, "점탄성 재료의 동적특성 측정에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 제7권 제6호, 1997.
5. Lennrt Ljung, *System identification TOOLBOX for Use with MATLAB*, The Mathworks Inc., 1993.
6. 민경원, 이상현, 김진구, 이영철, 이승준, 김두훈, "점탄성 감쇠기가 설치된 실물크기 5층 건물의 진동실험: 감쇠기의 설계 및 응답실험", 한국지진공학회논문집, Vol. 7. No. 3, 2003.
7. Soong, T. T., "Seismic Behavior and Design Guidelines for Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers,"

- Technical Report NCEER-93-0009, 1993.
8. 정상섭, "진동제어시스템을 위한 리니어 왕복액추에이터의 동특성 해석", 박사학위논문, 충남대학교, 2002.
  9. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S. T., and Lai, M. L., "Seismic Response 2/5 Scale Steel Structures with Added Viscoelastic Dampers," Technical Report NCEER-91-0012.
  10. Jer-Nan Juang, *Applied System Identification*, Prentice Hall PTR, 1994.
  11. 이상현, 손동인, "건축구조물에서 고유치지정에 의한 점탄성 감쇠기 최적설계", 지진공학회, Vol. 5. No. 2, 2001.
  12. John N. Little, *Signal Processing TOOLBOX for Use with MATLAB*, The Mathworks Inc., 1993.