

# 진동제어기 설계를 위한 실물크기 5층 건물의 시스템 식별 System Identification of a Full Scale Five-story building for Vibration Controller design

민경원\*    이영철\*\*    이상현\*\*\*    박민규\*\*    김두훈\*\*\*\*    박진일\*\*\*\*    정정교\*\*\*\*

Min, Kyung Won    Lee, Young Cheol    Lee Sang Hyun    Park, Min Kyu    Kim, Doo Hoon    Park, Jin Il    Jeoung, Jeoung Kyo

## ABSTRACT

System Identification is carried out for a full scale five-story buling to design a vibration controller. Dynamic characteristics such as natural frequencies, damping ratios, and modes are obtained from the input/output information by both sine-sweep method and white noise method. The active mass driver installed on the five floor is applied as external loading to move the building and each floor acceleration is measured and processed for the system identification. The identified building will be experimentally investigated again with viscoelastic dampers installed at inter-stories to obtain the response behavior. Corresponding result will be presented soon.

**Key Words** : System Identification, Full scale five-story building, Dynamic characteristics

### 1. 서 론

현대의 건축구조물은 구조기술력의 향상, 고강도 콘크리트 및 철골재와 같은 건설재료의 개발 그리고 시공기술의 발달 등의 여러가지 요인에 의하여 점차 고층, 경량, 세장화 되어가는 추세에 있다. 그러나 이러한 특성을 가진 건물은 지진과 같은 외부 불규칙 하중에 매우 취약하여, 구조적인 안전성을 위협하는 파괴는 물론 건물의 과도한 진동으로 인한 거주자의 불편감을 유발시키는 환경적인 문제가 심각하게 등장하고 있다. 따라서 이러한 진동에 의한 건물의 내진성능을 향상시키는 기술이 다양하게 개발되고 있는데, 종래에는 건물이 고층화 되어 갈수록 건물의 구조시스템을 변화시켜 대응하는 이른바 소극적인 의미에서의 내진방법을 적용하였는데, 최근에 이르러서는 구조형식의 변화보다는 건물에 진동제어장치를 설치함으로써, 건물의 내진 성능을 향상시키는 적극적인 의미에서의 기술이 이용되고 있다. 진동제어장치를 건물에 적용

하기 위해서는 적용될 건물의 정확한 동적특성을 파악해야 보다 좋은 제어성능을 구현할수 있고, 정확한 자료일수록 원하는 수준의 제어효과를 구현할 수 있다.<sup>1)</sup>

이번 논문에서는 진동제어기 설계를 위해 실물크기의 5층 건물 각 층에 가속도센서를 달아 조화하중과 백색잡음을 입력신호로 하여 그에 대한 출력 자료를 이용하여 건물의 고유진동수, 감쇠비 등 동적특성을 파악하여 추후 점탄성 감쇠기의 설계와 적용에 대한 자료를 확보하였다.<sup>2),3)</sup>

실험대상 구조물은 5층 철골구조물로 H형강 기둥으로 인해 횡방향거동에 대해 약축방향과 강축방향을 가진다. 가진은 약축방향에 대해 실시하며, 5층에 설치된 HMD(복합형 질량감쇠기)를 사용한 조화하중 가진 실험을 통해 1차 모드의 고유진동수와 감쇠비를 알아내었다. 이 방법은 고차모드를 식별하지 못하고, 다양한 진동수의 조화하중을 가진해야하는 어려움이 있으나, 해석이 용이하고 공진진동수를 확실하게 알 수 있는 장점을 가진다. 조화하중 가진으로 측정되는 입력/출력 자료를 바탕으로 백색잡음을 가진하중으로 사용하여 각 층의 전달함수를 알아 보았다.

주어진 하중은 최대입력전압 1.5v의 0.5Hz의 조화

\* 단국대 건축공학과 부교수  
\*\* 단국대 건축공학과 석사과정  
\*\*\* 서울대 건축학과 박사수료  
\*\*\*\* 유니슨 산업(주) 기술연구소

하중을 가진하여, 1차모드의 거동 특성을 파악하고, 최대 공진변위를 알아냄으로써, 진동제어기의 설치위치 및 설치량을 결정하기 위한 기본 자료로 사용한다.<sup>6)</sup>

## 2. 통합시스템

HMD는 일반적으로 구조물의 제어에 사용되는 장치로 특정한 질량, 감쇠, 강성을 가지는 TMD(동조질량감쇠기)에 외력을 가하여 원하는 거동을 구현할 수 있는 장치이다. 본 연구에서는 구조물의 동적특성을 파악하기 위한 가진 장치로 사용하였으며, 5층 바닥에 설치하였다.

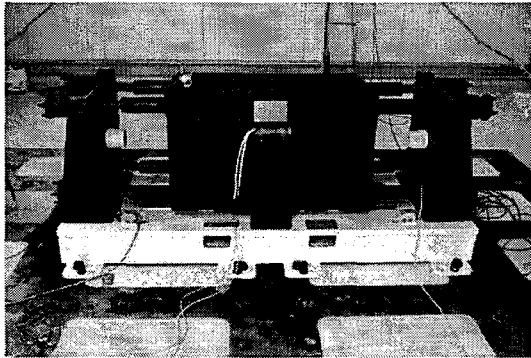


그림 1. 구조물에 설치된 HMD

그림 1에 보이는 HMD의 입력신호는 전압신호이다. 전압신호를 받아 전류를 발생 시키고, 이 전류에 비례하는 힘이 HMD를 가진함으로써 구동하는 원리를 가지고 있다. 따라서 전압신호로부터 발생하는 HMD 가진기의 가진력에 대한 건물의 응답에 관한 수학적 관계를 알고 있어야 원하는 가진력을 줄 수 있다.<sup>4)</sup>

식(1)은 제어 컴퓨터 입력신호에 대한 구조물의 상태방정식이고 그림2는 리니어 왕복 액추에이터를 이용한 HMD가진기를 보여준다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 C_m \\ 0 & A_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ \eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_m \end{bmatrix} e_c \quad (1)$$

여기서  $A_1, B_1$ 는 HMD에 대한 구조물의 시스템행렬이며  $z_1$ 는 상태변수이다.  $A_m, B_m, C_m$  각각 inverter의 시스템행렬이며  $\eta$ 는 상태변수이다.

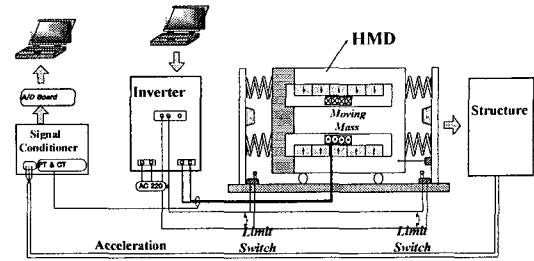


그림 2. 리니어 왕복 액추에이터를 이용한 HMD가진기

## 3. 실험 및 고찰

본 연구는 그림 3에 보이는 30m 실물크기의 5층 철골건물에 대해 수행하였다. 각 층의 가속도 응답을 측정하기 위하여 가속도계를 구조물의 약축 방향으로 1개씩 설치하였고, 시스템의 주파수 전달함수를 얻기 위해 HMD 이동질량에도 가속도계를 설치하였다. 가속도 신호들을 PC와 측정장비 및 소프트웨어를 사용하여 데이터 신호들을 실시간으로 측정하였다.

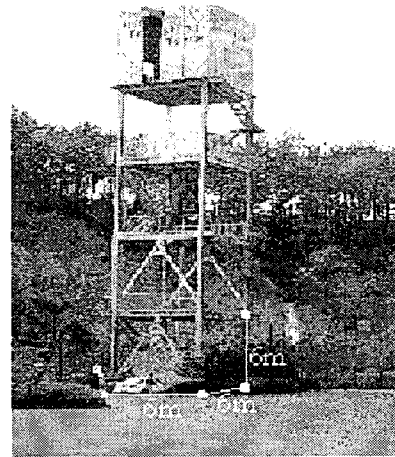


그림 3. 실물크기 5층 철골건물

### 3.1 조화하중 실험

건물의 1차 고유진동수 및 감쇠비를 구하기 위해 5층에 설치된 HMD를 사용하여 0.4Hz~0.8Hz 범위를 0.05Hz 간격으로 조화 하중 실험을 수행하였

고, 예상되는 공진주파수 근처에서 좀더 세밀한 주파수 간격으로 실험하였다. 컴퓨터의 입력신호  $e_c$ 는 식(2)와 같다.

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

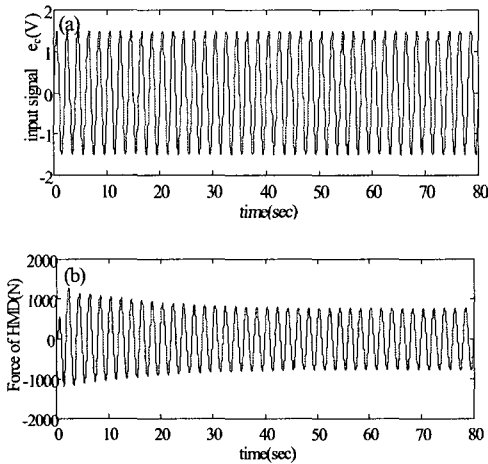


그림 4. 0.5Hz 조화하중과 HMD에 발생하는 힘

그림 4(a)와(b)는 각각 식(2)에 의한 입력신호  $e_c$ 와 그에 따라 발생하는 HMD의 가진력  $m_h \ddot{x}_h$ 의 시간이력을 보여준다. 1.5v 입력신호시 최대 1286N의 힘이 발생하며, 정상상태에서는 최대 800N, 진동수 0.5Hz의 조화하중이 발생함을 알 수 있다.

가진은 구조물이 정상상태에 도달하도록 HMD로 60초 동안 가진한 후 구동을 정지시키고 자유진동 상태에서 여진이 끝날 때까지 시간이력을 측정하였다. 다음 그림은 측정된 5층 응답 가속도 신호로 60초의 가진후 응답이 줄어드는 모습을 보여준다.

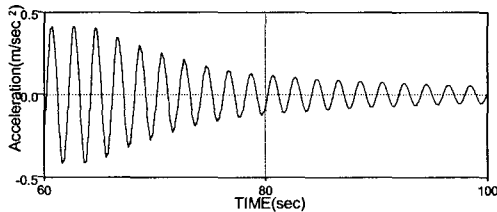


그림 5. 5층 응답 가속도

그림 6은 5층 가속도에 대한 전달함수를 나타내는 것으로 0.5Hz에서 공진현상이 일어나는 것을 볼 수 있다. 즉, 0.5Hz에서 1차 고유진동수가 나타났으며, 조화하중 실험으로 고차 모드는 식별할 수 없었다. 표 1은 조화

하중에 대한 실험결과를 정리해 놓은 것으로 1차 고유진동수에서의 감쇠비는 2.5%였음을 보여준다.

표 1. 구조물의 감쇠비 및 고유진동수

Mode	Frequency(Hz)	Damping Ratio(%)
	No Damper	No Damper
1	0.50	2.5

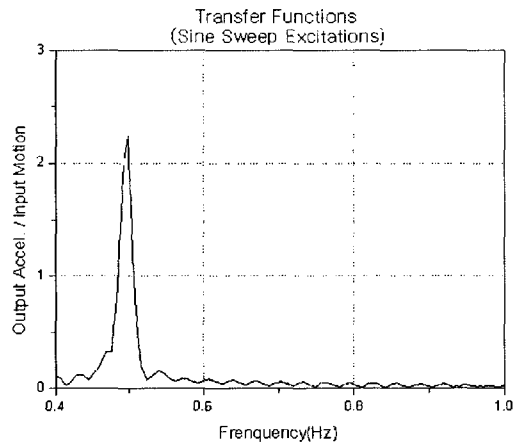


그림 6. 5층 가속도에 대한 전달함수

### 3.2 백색잡음 실험

조화하중 실험을 통해 구조물의 전달함수를 구하기 위해서는 다른 진동수 성분의 조화하중에 대한 실험을 여러 번 수행해야 하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점은 백색잡음이나 구조물의 진동수 대역성분을 가진할 수 있는 가진 신호로 가진시 해결될 수 있다. 가진기로 사용하는 HMD는 자체의 전달함수를 가지고 있으며, 백색잡음으로 컴퓨터 입력전압신호를 설정하는 경우, 이 전달함수에 의해 특정한 진동수 대역의 성분이 강한 신호를 발생하게 된다. 백색잡음 입력에 대한 HMD의 가속도가 구조물의 모든 모드 성분을 가진할 수 있는 진동수 대역을 가질 수 있다면 단일의 실험으로도 구조물의 전달함수를 구할 수 있으며, 이로부터 진동제어기의 성능평가를 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 받

생시켜야 한다. 그러나, 이는 HMD의 성능에 의해 제한될 수 밖에 없으며, 따라서 조화하중 보다 작은 크기의 응답에 대한 성능평가를 수행할 수밖에 없다. 이는 층간응답에 의해 성능을 발휘하는 진동 제어기의 성능평가에 하나의 제한점으로 작용할 것으로 판단된다.

그림 7(a)와 (b)는 각각 백색잡음 입력신호  $e_c$ 와 그에 따라 발생하는 HMD의 가진력  $m_b \ddot{x}_b$ 의 시간 이력을 보여준다.

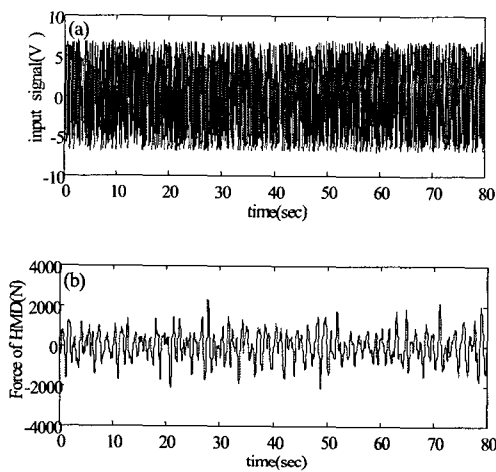


그림 7. 백색잡음 입력과 HMD에 발생하는 힘

조화하중의 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, 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 가속도에 대역통과필터(band pass filter)를 사용하였다. 그림 8은 그림 7(b)의 가속도 신호에 필터를 사용하였을 때의 주파수 성분을 나타낸 것으로 대상 구조물의 주요 고차 모드를 충분히 가진할 수 있을 것으로 추정된다.

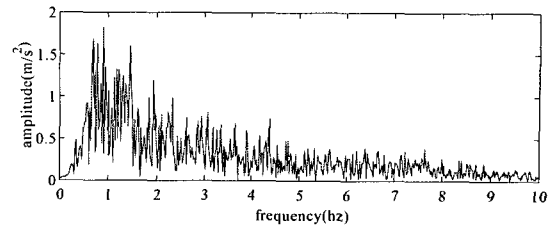


그림 8. 입력신호의 주파수 성분

실험 대상 구조물은 5층 HMD가진에 대한 5개의 가속도 응답을 측정한 1입력 5출력 시스템이라 할 수 있다. 본 연구에서는 주파수 영역에서의 시스템 식별기법을 적용하여 1입력 5출력 구조물의 시스템 행렬을 알아낸 후, 그 행렬의 고유값으로부터 시스템의 진동수와 감쇠비를 계산하였다. 시스템 식별은 실험으로부터 얻어진 전달함수를 가장 잘 모사할 수 있는 극점(pole)과 제로(zero)를 가지는 전달함수를 구하고, 이 전달함수를 상태방정식으로 전환하여 시스템 행렬을 구하는 방법을 사용하였다.(부록참고)

### 3.3 전달함수

전달함수를 구할 때 입력에 대한 출력의 전달함수는 다음 식에 의해 계산된다.<sup>5)</sup>

$$H_{ym}(j\omega) = \frac{S_{wy}(\omega)}{S_{mm}(\omega)} \quad (3)$$

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  $n=0...1...N$ 는 정수이다.

이산시간에 대한 입력의 자기상관스펙트럴 (autospectral) 밀도함수와 입력과 출력의 교차스펙트럴(crossspectral) 밀도함수는 다음과 같이 표현된다.

$$S_{mm}(k\Omega) = cU^*(jk\Omega)U(jk\Omega) \quad (4)$$

$$S_{wy}(k\Omega) = cU^*(jk\Omega)Y(jk\Omega) \quad (5)$$

$c$ 는 변하지 않는 상수로  $c=T/N$ 으로 정의하고 \*

는 결레 변환을 나타낸다.

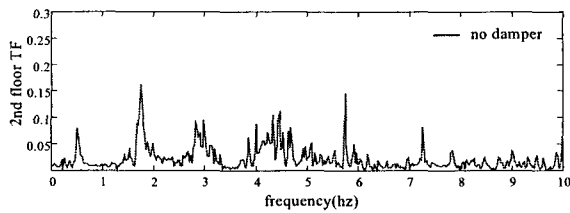
그러나, 실제로 길이 N인 표본들은 정확한 결과를 제시하지 못하며, 보다 정확한 결과는 다음과 같이 동일한 길이의 표본들에 대한 평균에 의해 얻을 수 있다.

$$\bar{S}_{m'}(k\Omega) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_{m'}^i(k\Omega) \quad (6)$$

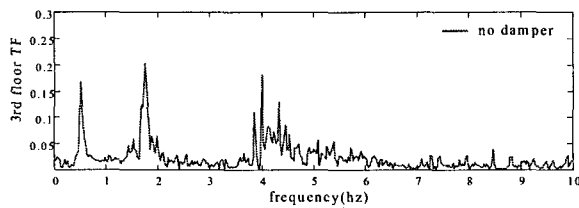
$$\bar{S}_{ny}(k\Omega) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_{ny}^i(k\Omega) \quad (7)$$

$$\bar{H}_{y'}(jk\Omega) = \frac{\bar{S}_{ny}(k\Omega)}{\bar{S}_{m'}(k\Omega)} \quad (8)$$

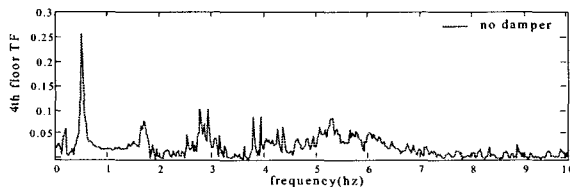
여기서  $S^i$ 는  $i$ 번째 표본들의 스펙트럴 밀도함수를 의미한다.



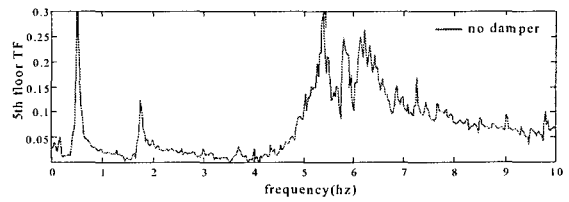
(a) 2층 가속도 전달함수



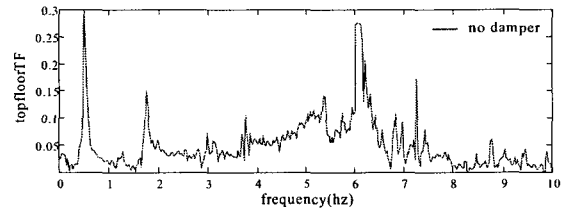
(b) 3층 가속도 전달함수



(c) 4층 가속도 전달함수



(d) 5층 가속도 전달함수



(e) Top층 가속도 전달함수

그림 9. 각 층의 가속도 전달함수

그림 9은 5층 가속도에 대한 각층의 전달함수를 나타낸 것으로 0.51Hz에서 구조물의 1차 고유진동수를 보여주고 1.74Hz에서 2차 고유진동수가 나타났음을 보여준다. 그러나 3Hz 밖에서 3차 모드 이상의 고차 모드는 알아낼 수 없었다. 이는 대상 구조물이 3차 모드 이상의 고차 모드에 대한 영향이 미미함과 동시에 실험 중 발생한 잡음때문인 것으로 추정된다.

특히 5층과 옥상 층의 전달함수는 3Hz 이상의 범위부터 잡음의 영향이 나타나는데 이는 5층에 설치된 가속도계에 HMD를 구동하기 위해 발생하는 전자기파가 영향을 주었고, 옥상 층에 설치된 가속도계에는 대상 구조물의 구축에 사용된 크레인 추의 거동이 잡음으로 작용했기 때문인 것으로 판단된다.

표 2. 백색잡음 실험을 통한 구조물의 모드파라미터

Mode	Frequency(Hz)	Damping Ratio(%)
	No Damper	No Damper
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

백색잡음 실험을 통해 얻는 결과로 표 2를 보면 1차 고유진동수가 0.5Hz이고, 이 때의 감쇠비는

3.61%이다. 이는 조화하중 가진 실험을 통해 얻어진 2.5% 감쇠비와 차이가 있는데, 공진현상을 이용해 큰 응답을 얻을 수 있는 조화하중 가진의 경우에 비해 작은 응답에서 성능평가를 해야하는 백색잡음의 한계에서 비롯된 것이라 생각된다.

**4. 결론**

실험대상 구조물은 30m 높이의 5층 철골건물로 H형강 기둥으로 인해 횡방향거동에 대해 약축방향과 강축방향을 가진다. 본 연구는 약축방향에 대해 가진하였으며 예상 되는 1차 고유진동수 범위에서 0.05Hz 간격으로 수행하였고, 공진주파수 근처에서 좀더 세밀한 주파수 간격으로 실험하였다.

조화하중 실험으로 구조물의 1차고유진동수가 약 0.5Hz이고 감쇠비가 2.5%임을 알아내었고, 백색잡음 실험을 통하여 5층 가속도에 대한 각 층의 전달함수를 알아내어 추후 진동제어기 설계의 자료로 활용하도록 하였다.

**감사의 글**

본 연구는 한국 과학재단 특정기초연구 과제(과제번호: R01-1999-000298-0)의 일환으로 수행되었으며, 과학재단의 연구비 지원에 대해서 감사드립니다.

**부 록**

구조물의 시스템 행렬

-1.053	-20.97	0	0	0	0	0	0	0	0
20.97	-1.053	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1.481	-33.399	0	0	0	0	0	0
0	0	33.399	-1.481	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.116	-3.209	0	0	0	0
0	0	0	0	3.209	-0.116	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-0.123	-10.913	0	0
0	0	0	0	0	0	10.913	-0.123	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.724	-38.306
0	0	0	0	0	0	0	0	38.306	-0.724

**참고문헌**

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. 정상섭, "진동제어시스템을 위한 리니어 왕복액추에이터의 동특성 해석", 박사학위논문, 충남대학교, 2002.
5. TT.Soong, "Seismic Behavior and Design Guidelines for Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers", Technical Report NCEER-93-0009, 1993
6. 이상현, 손동인, "건축구조물에서 고유치지정에 의한 점탄성 감쇠기 최적설계", 지진공학회, Vol 5. No.2, 2001