

# 선형 모터 댐퍼를 이용한 철골 구조물의 진동제어

## Vibration Control of Steel-Frame Structures by a Linear Motor Damper

문석준\*      정태영\*\*      임채욱\*\*\*      정정교\*\*\*\*      박진일\*\*\*\*\*      김두훈\*\*\*\*\*  
Moon, Seok Jun      Chung, Tae Young      Lim, Chae Wook      Jeoung, Jeoung Kyo      Park, Jin il      Kim, Doo Hoon

### 국문요약

본 연구에서는 구조가 간단하고 경제적이며, 보수유지 면에서 능동형 진동제어 장치로서 매우 유리한 장점을 가지고 있는 선형모터 댐퍼(LMD : linear motor damper)를 개발하여 유니슨 기술연구소에 설치된 대형 철골구조물에 적용하였다. 개발된 LMD는 1,500kg의 가동질량을 갖고 있으며, 최대 ±250mm의 변위로 움직일 수 있다. 제어 대상 시험구조물의 최저차 2개 진동형상을 가지는 축소모델을 사용하여  $H_{\infty}$  제어로직을 설계하였다. 일련의 성능 검증시험을 통해 시험 구조물의 1, 2차 진동형에 대해 가속도 레벨이 약 10dB 감소함을 확인하였다. 본 연구를 통해 개발된 LMD가 풍 및 지진하중을 받는 구조물의 진동제어용 제진장치로서 가능성이 있음을 확인하였다.

**주요어** : 선형모터 댐퍼, 진동제어,  $H_{\infty}$  제어, 철골 구조물

### ABSTRACT

The linear motor has not only no backlash and less friction, resulting in very high accuracy, but also mechanical simplicity, higher reliability, and longer lifetime. In this study, a large-capacity hybrid mass damper using linear motor principle has been developed to suppress vibration of large structures. It is designated linear motor damper in this paper. The LMD has been designed to be able to move the auxiliary damper mass of 1500kg up to ±250mm stroke. A series of performance tests for LMD control system with  $H_{\infty}$  robust controller have been carried out on the full-scale steel frame structure. Through the performance tests, it is confirmed that vibration response levels are reduced down 10dB for the first and second modes of the test structure.

**Key words** : linear motor damper, vibration control,  $H_{\infty}$  control, building structure

## 1. 서 론

최근의 건축구조물은 대형화, 고층화, 경량화 및 세장화 추세에 있다. 이러한 대형 고층 건축 구조물에는 구조물 자체의 큰 유연성 및 작은 감쇠비로 인해 바람 및 지진 등 환경하중에 의해 과도한 진동이 쉽게 발생할 수 있다. 이를 억제하기 위하여 여러 제진장치를 이용한 다양한 진동제어연구가 수행되고 있다.<sup>(1)</sup> 가동 질량을 부가적으로 설치하고, 이의 관성력을 이용하는 제진장치로서 TMD(tuned mass damper; 동조 질량 감쇠기), AMD(active mass damper; 능동 질량 감쇠기), HMD(hybrid mass damper; 복합 질량 감쇠기)등이 있으며, 국내·외 건축구조물에 많이 설치되고 있다.<sup>(2)</sup>

AMD와 HMD의 부가 질량을 가동시키는 구동장치로는 주로 유압식 또는 회전형 서보 모터 방식의 시스템이 사용되고 있다. 유압식인 경우에는 유압펌프, 유압모터, 오일탱크, 냉각장치, 각종밸브, 여과기 등 많은 부품이 필요하며, 시스템이 복잡하고 보수·유지비가 많이 드는 단점이 있다. 회전형 서보 모터 방식은 캠, 기어, 클러치, 벨트, 스크루 등

기계적인 변환장치를 이용하여 회전운동을 직선운동으로 변환시키게 되므로, 모터의 효율이 낮고 소음발생, 마모 등이 필수적으로 수반되는 단점을 가진다. 반면에 선형모터는 직선방향으로 작용하는 추력을 전자기력으로부터 직접 발생시키므로 기계적인 변환장치가 필요없다.<sup>(3)</sup> 따라서 시스템이 복잡하지 않으면서도 에너지 손실 및 소음을 발생하지 않고 빠른 응답 속도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러므로 회전형 모터 방식에 비해 시스템의 효율적인 운전과 기능 측면에 있어서 절대적으로 유리하다고 볼 수 있다. 또한 유압식에 비해 구조가 간단하고 소요부품 수가 작아 경제적이며 보수·유지 면에서 유리한 장점을 갖는다.

정태영 등<sup>(4),(5)</sup>은 한 개의 영구자석을 이용한 소형 선형모터를 개발하여 실험실 규모의 구조물 진동제어용 시스템에 활용한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 건축 구조물에 적용이 가능한 대용량 LMD(linear motor damper)를 설계·제작하였다. 개발한 LMD의 성능을 검증하기 위해 유니슨 기술연구소에 설치되어 있는 대형 철골 구조물인 modal testing tower에 설치하여 일련의 실험을 수행하였다. 검증 실험을 통해 LMD가 건축구조물의 진동을 효과적으로 줄일 수 있는 제진장치로서 활용 가능함을 확인하였다.

## 2. LMD의 설계 및 제작

본 연구에서는 시험 대상 철골 구조물인 modal testing

\* 정회원 · 한국기계연구원 구조연구부 선임연구원(대표저자 : sjmoon@kimm.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국기계연구원 구조연구부 책임연구원

\*\*\* 한국기계연구원 구조연구부 위촉연구원

\*\*\*\* 정회원 · 유니슨 산업(주) 기술연구소 주임연구원

\*\*\*\*\* 정회원 · 유니슨 산업(주) 기술연구소 선임연구원

\*\*\*\*\* 정회원 · 유니슨 산업(주) 기술연구소 소장

본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 1. 29 / 심사종료일 : 2003. 3. 13)

tower의 진동 제어를 목적으로 대용량 LMD를 설계하였다. 가동질량은 시험구조물 질량의 약 1.5%(=1,500kg)로 가정하였으며, 최대 ±250mm의 스트로크까지 허용하도록 설계하였다. 설계된 LMD는 보빈에 코일을 감은 전기자(fixed coil), 일련의 영구자석에 의한 계자(permanent magnet) 및 철심 요크(core)로 구성되어 있다(Fig. 1 참조). 가동질량의 양면에 설치되어 있는 스프링을 통해 관성력(추력)이 구조물로 전달되며, 스프링 특성을 변경함으로써 구조물의 고유진동수와 동조시킬 수 있다.

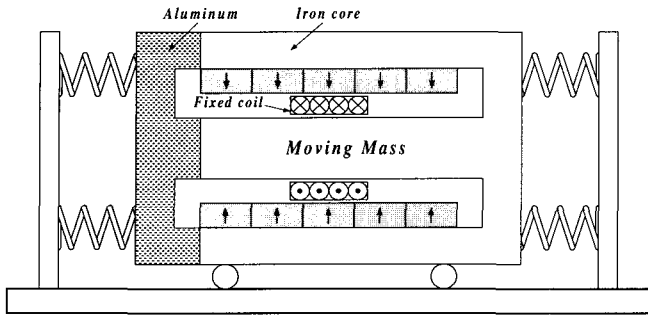


Fig. 1 Schematic diagram of LMD

LMD의 적절한 추력을 얻기 위해 공극 길이, 영구자석의 수, 철심 요크의 두께와 폭 및 코일의 권선수 등을 결정해야 한다. 계자와 철심 요크는 자체가 가동 질량이 되므로 이들의 질량의 합이 1500kg이 되어야 한다. 또한 LMD의 안정성 증가를 위해 가능한 높이는 낮고 폭이 넓은 구조를 갖도록 설계해야 한다. Fig. 2는 전체적인 LMD 설계의 흐름도를 보여주고 있다.

LMD의 추력은 플레밍의 왼손법칙에 따라 영구자석에 의한 공극 자속 밀도와 코일에 흐르는 전류량에 의하여 결정된다. 가동 질량에 작용하는 추력은 다음의 식과 같다.

$$F_T = 2lNB_g i = k_T i \quad (1)$$

여기서  $l$ ,  $N$ 은 각각 공극 자계속에 있는 코일의 유효길이와 유효 권선수를 나타낸다. 또한  $B_g$ 는 영구자석에 의한 공극 자속 밀도,  $i$ 는 코일에 흐르는 전류,  $k_T (=2lNB_g)$ 는 추력 상수이다.

영구자석에 의한 공극 자속 밀도는 다음과 같이 계산된다.

$$B_g = k_c \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_r}{P_t/l_g}} \quad (2)$$

여기서  $B_r$ 은 영구자석의 잔류 자속 밀도,  $\mu_r$ 은 영구자석 비투자율,  $P_t$ 는 영구자석 두께,  $l_g$ 는 공극 길이,  $k_c$ 는 자기 회로 형상에 의한 보정 계수이다. LMD의 자기회로를 구성하기 위한 영구자석은 NdFeB계의 자석으로 제작 시에는 시중에서 판매되고 있는 제품인 50.8mm×50.8mm×25.4mm의 치수를 갖는 MQ30 계열을 사용하였으며, 이의 잔류 자속 밀도는 1.08T, 비투자율은 1.24이다.

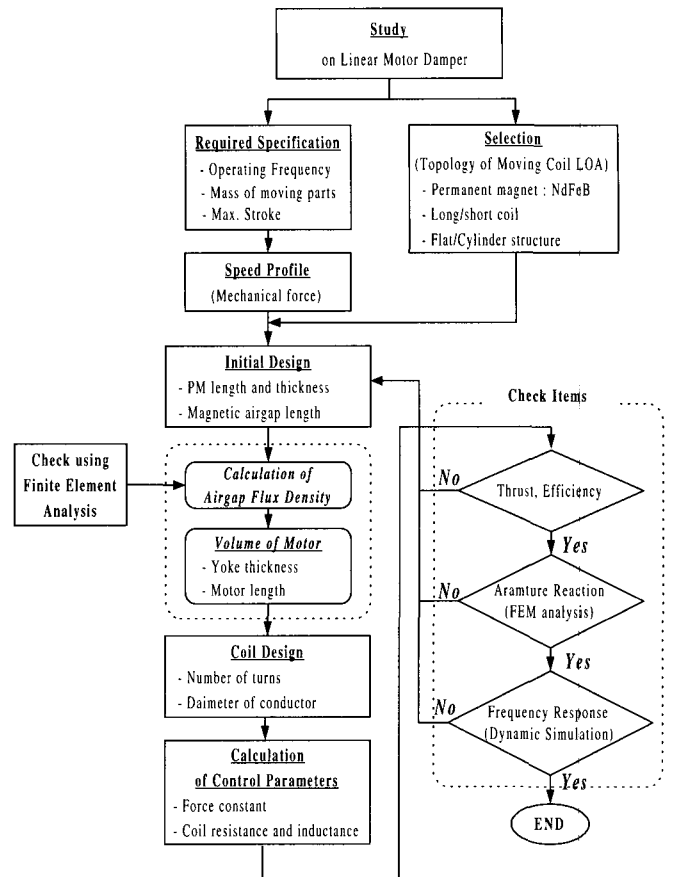


Fig. 2 Flow chart for LMD design

철심 요크에서의 포화 자속 밀도는 약 1.8T로 코일 전류에 의한 자속의 영향, 즉 전기자 반작용을 줄여 응답속도를 빠르게 하기 위하여 철심 요크는 포화시켰다. 따라서 영구자석으로 자기회로를 구성할 때 철심 요크에서의 자속은 누설이 없다고 가정한다면 자성체 철심 요크의 두께는 식 (3)과 같다.

$$t_y = \frac{B_g A_g}{B_s W_y} \quad (3)$$

여기서  $B_s$ 는 철심 요크의 포화 자속 밀도,  $A_g$ 는 공극 자계속에 있는 코일의 유효 단면적,  $W_y$ 는 철심 요크의 폭이다. 코일의 권선수는 코일에 대한 전압 방정식으로부터 얻어진 식 (4)에 의해서 정해진다. 여기서는 전기적인 시정수가 기계적인 시정수보다 상대적으로 작고 LMD는 저주파수에서 운전하므로 코일의 인덕턴스항을 무시하였다.

$$N = \frac{V_c}{\rho_c l_{lc} J_c + 4\pi f B_g l X_m} \quad (4)$$

여기서  $V_c$ 은 코일에 공급되는 전압,  $\rho_c$ 는 도체의 저항률,  $l_{lc}$ 는 코일의 턴당 길이,  $J_c$ 는 전류 밀도,  $f$ 는 가동 주파수,  $X_m$ 은 가동 주파수에서의 최대 스트로크이다.

가동질량이 1500kg이 되어야 한다는 조건과 선정된 추력을 갖기 위한 조건으로부터 모터의 공극 길이, 영구자석의 길이 방향 자석수, 철심 요크의 두께와 폭은 결정된다. Fig. 3은

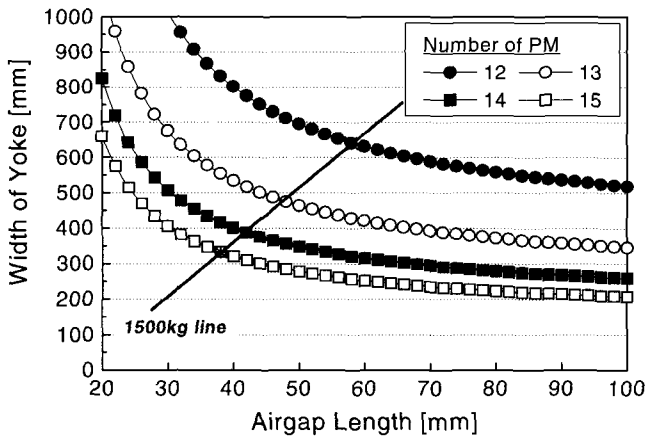


Fig. 3 Changes of width of yoke according to airgap length and number of permanent magnet

요구되는 모터의 추력을 얻기 위해 공극 길이에 따른 철심 요크의 폭의 변화를 보여주는데, 공극 길이가 커질수록 철심 요크의 폭은 작아짐을 확인할 수 있다. 요구되는 질량이 1500kg이므로 Fig. 3에서 설계점을 찾을 수 있다. 본 설계에서는 공극 길이는 50mm, 철심 요크의 폭은 465mm, 영구자석의 길이 방향 자석수는 13개를 선정하였으며, 이 때의 철심 요크의 두께는 95mm이었다. 이 경우 모터의 입력 전압에 따른 코일의 권선수는 식 (4)로부터 결정된다.

Fig. 4는 LMD의 1/2 자기장 해석 모델로 영구자석에 의한 공극과 철심 요크에서의 자속 밀도 분포를 보여주고 있으며, 해석결과로서 자속은 공극을 지나 철심 요크로 흐르며 공극 내에서는 Fig. 5와 같이 일정한 자속 밀도 분포를 갖고 있음을 확인하였다. 또한 철심 요크에서의 자속 밀도는 약 1.8T로 코일 전류에 의한 자속의 영향, 즉 전기자 반작용을 줄이기 위해 철심 요크는 포화되어 있음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 코일에 전류가 흐를 때에 형성되는 자기회로는 영구자석에 의해서 형성되는 자기회로에 영향을 준다. 따라서 철심 요크를 포화시켰음에도 불구하고 전기자 반작용에 의한 추력의 비선형성이 발생한다. Fig. 6는 코일의 공극 자속 밀도 내에서의 위치에 따른 LMD의 정적 추력 특성을 입력 전류에 따라 보여주고 있다. ±10A 영역에서는 코일의 위치에 상관없이 거의 선형적인 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

LMD의 제작 시에 계자부의 영구자석은 총 234개가 사용되었는데, 13개의 영구자석을 한 모듈로 제작하였다. 코일부는 재질이 스테인레스 강인 보빈과 지름이 2.6mm인 구리 코

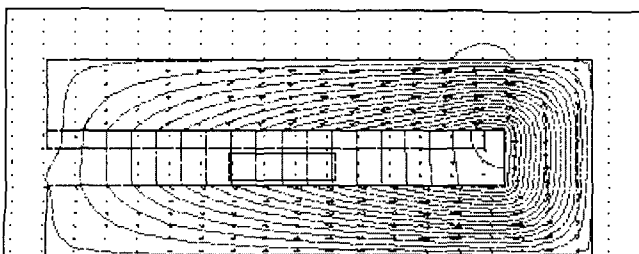


Fig. 4 Magnetic flux density of the motor produced by permanent magnet

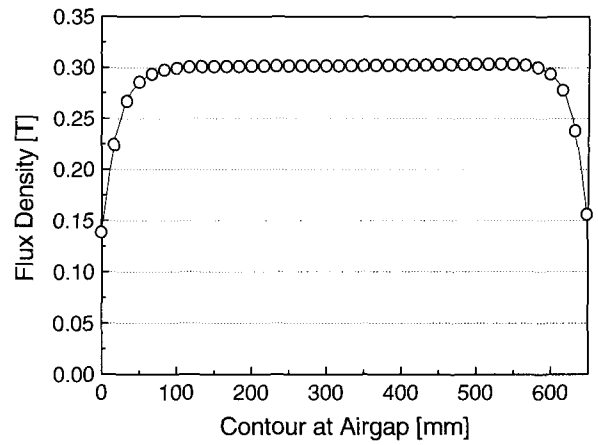


Fig. 5 Magnetic flux density along contour at airgap

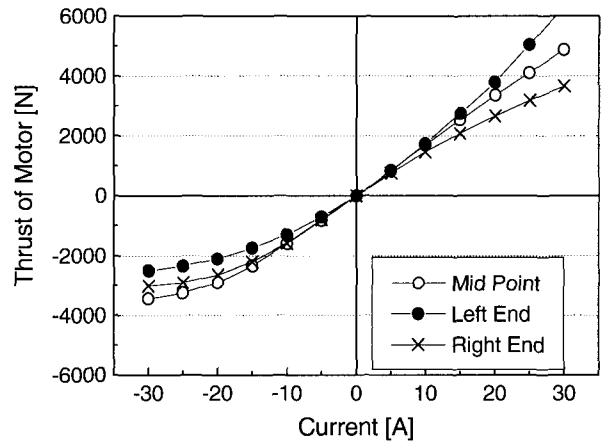


Fig. 6 Thrust of motor according to current and position of coil

일을 사용하였으며, 제작 시의 코일 권선수는 설계치보다 작게 제작되었다. 또한 스프링은 4개씩 2조로 앞쪽과 뒤쪽의 스토퍼에 지지되게 있는데, 선경 5mm, 내경 48mm, 권선수 42, 길이 1m인 스프링을 사용하였다. 가동질량 부분인 철심 요크는 선형가이드 위에 설치되고, 코일이 감긴 전자부는 양편 지지대에 고정 부착된다. 가동질량의 왕복운동시 최대 허용 범위를 초과할 경우를 방지하기 위해 두 개의 기계식 리미트 스위치를 설치하여 입력전압을 차단할 수 있도록 하였다. Fig. 7은 LMD의 완성 사진을 보여주고 있으며, Table 1

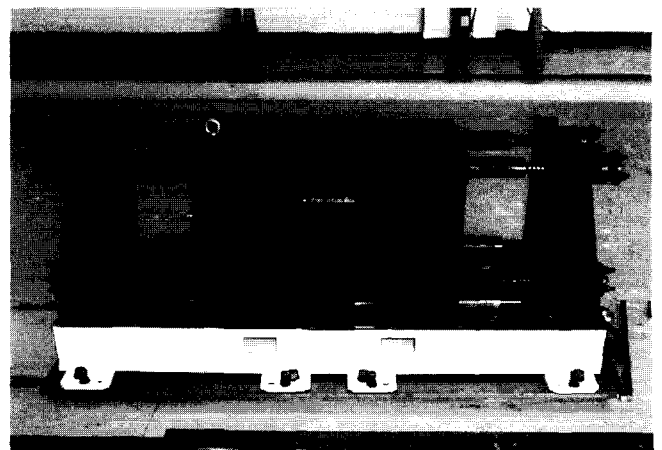


Fig. 7 The fabricated LMD

Table 1 Specifications of the LMD

Item		Design stage	Fabrication stage
Max. input voltage/current		180V/23A	180V/23A
Moving mass		1500kg	1500kg
Permanent magnet	Series	NdFeB	NdFeB
	Residual flux density	1.08T	1.08T
	Dimension	50.8mm×50.8mm×25.4mm	50.8mm×50.8mm×25.4mm
	Total length	650mm(incl. Case)	675mm(incl. Case)
	Total width	472.4mm(incl. Case)	472.4mm(incl. Case)
Coil	Turn	660	630
	Area(diameter)	5.31mm <sup>2</sup> ( $\phi$ 2.6mm)	5.31mm <sup>2</sup> ( $\phi$ 2.6mm)
	Length	160mm	154mm
	Height	37mm	37mm
	Current density	4A/mm <sup>2</sup>	4A/mm <sup>2</sup>
Yoke	Outer thickness	95mm	95mm
	Inner thickness	190mm	190mm
	Width	465mm	474mm
Airgap		50mm	50mm
Stroke		±250mm	±250mm
Total weight		about 2300kg	2352kg(incl. bottom plates)

은 LMD의 제작 사양을 보여주고 있다.

LMD 구동을 위해 PWM 방식의 단상 인버터를 제작하였다. 인버터는 교류를 직류로 바꾸는 정류부와 직류를 원하는 주파수와 전압으로 바꾸는 인버터부로 구성되어있다. 스위칭 소자인 IGBT 모듈 4개를 사용하였으며, 제어시스템(컴퓨터)에서 제어신호가 입력되면 이 신호를 증폭 출력하여 LMD에 입력하게 된다.

### 3. LMD의 동특성

제작된 LMD의 동특성을 실험적으로 파악하기 위해 Fig. 8과 같은 장치를 구성하였다. 신호 발생기(function generator)에서 임의의 정현파 제어신호를 입력하면 인버터를 통해 증폭된 전압이 LMD의 코일에 입력되어 가동질량이 움직이게 된다. 인버터 출력 전압과 전류는 PT와 CT를 통해 측정되며, 가동 질량의 변위를 계속하기 위해 potential meter형 변위계를 설치하였다. 측정된 신호는 signal conditioner에서 필터링과 증폭을 거쳐 A/D 보드를 통해 컴퓨터로 입력된다. LMD의 전압, 전류, 변위 파형을 확인한 결과 약 1사이클 후에 정상상태에 도달함을 확인할 수 있었으며, 초기의 기동전류는 정상상태의 약 2배 정도였다. 제어 전압 0.5V이하에서는 LMD의 응답이 거의 없었다. 제어 입력 전압이 1.5V일 때 LMD 변위의 주파수 응답 특성을 Fig. 9에 보여주고 있다.

LMD의 기계적 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_d \ddot{x} = k_T i - k_d x - c_d \dot{x} \quad (5)$$

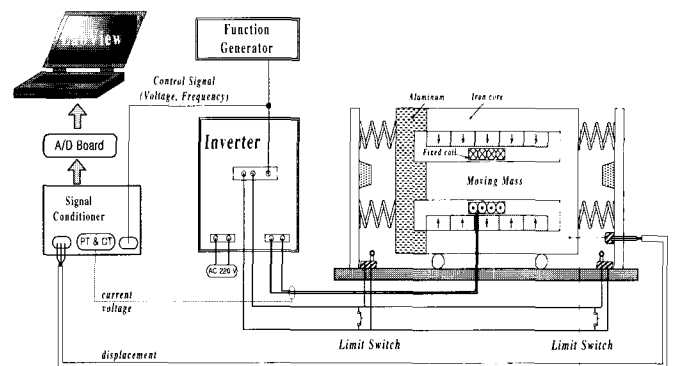


Fig. 8 Schematic view of the test set-up for the LMD

여기서  $m_d$ 는 가동질량,  $k_T$ 는 추력상수,  $k_d$ 는 강성계수,  $c_d$ 는 마찰계수,  $x$ 는 가동질량의 변위이다.

코일에서의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_c = Ri + L \frac{di}{dt} + k_E \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

여기서  $V_c$ 은 인버터를 통해 코일에 공급되는 전압,  $R$ 은 코일 저항,  $L$ 은 코일 인덕턴스이다. 식 (6)에서 오른쪽의 두 번째 항은 전류변화에 따른 기전력항이며, 오른쪽 세번째 항은 자계속에서 코일이 운동함에 의해 발생하는 속도 기전력항이다.

제어 입력전압과 인버터를 통해 코일에 공급되는 전압은

$$V_c = G_i V_{in} \quad (7)$$

여기서  $V_{in}$ 는 제어 입력 전압,  $G_i$ 는 인버터를 통해 증폭되는 전압 증폭 계인이다.

식 (5), (6), (7)에서의 파라미터들은 각종 실험을 통하여 결정되었으며, 그 결과를 Table 3에 해석결과와 비교·정리하였다. 식 (5), (6), (7)을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BV_{in} \quad (8)$$

Table 3 Control parameters

Item	Analysis	Experiment
Voltage constant( $k_E$ )	160V · sec/m	150V · sec/m
Coil resistance( $R$ )	3.20Ω	3.16Ω
Coil inductance( $L$ )	0.863H	1.04H
Moving mass( $m_d$ )	1500kg	
Stiffness( $k_d$ )	15,400N/m	
Damping ratio	0.1	

여기서

$$X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_d}{m_d} & -\frac{c_d}{m_d} & \frac{k_T}{m_d} \\ 0 & -\frac{k_E}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G_i}{L} \end{bmatrix}$$

출력을 LMD의 변위로 두면 출력방정식은 식 (9)와 같다.

$$y = CX + DV_{in} \quad (9)$$

여기서  $C=[1 \ 0 \ 0]$ ,  $D=[0]$ 이다.

식 (8)과 식 (9)로 계산한 제어 입력전압에 대한 LMD의 변위에 대한 주파수 응답을 실험 결과와 비교하여 Fig. 9에 보여주고 있는데, 대체로 잘 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 9를 보면 0.60Hz 근처에서 피크가 발생하며, 제어 입력전압과 변위 사이에 180도의 위상차가 발생함을 확인할 수 있다. 3V, 0.50Hz 정현파 제어 입력전압일때 LMD의 변위는 약 250mm가 계측되었다. 또한 전류의 주파수 응답 특성을 확인

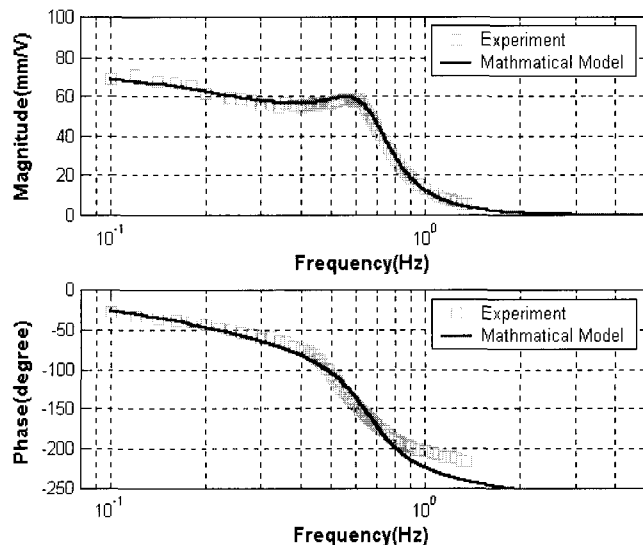


Fig. 9 Comparison of frequency responses of displacement of the LMD

한 결과, LMD의 가동질량과 스프링에 의한 고유 진동수인 약 0.50Hz에서 최소 전류가 모터에 공급됨을 확인할 수 있었다.

#### 4. 제어기 설계

##### 4.1 시험 대상 구조물

LMD를 적용하기 위한 시험 구조물은 유니슨 기술연구소에 설치된 5층 철골 구조물로서 가로 6m, 세로 6m, 총 높이는 30m이며, 총 질량은 약 100ton이다(Fig. 10 참조). 구조물의 기둥은 I형 빔으로 이루어져 있으며, 방향에 따라 다른 강성을 가지고 있다. 본 연구에서 수행된 모든 해석 및 실험은 기둥의 약축방향에 대한 것만을 대상으로 하였다. 구조물의 동특성을 파악하기 위해 3층에 설치된 가진기를 이용하여 구조물을 가진시킨 후 각 층에서 응답 가속도를 측정하였다. 실험으로부터 추정된 구조물의 1차 고유진동수는 0.51Hz, 감쇠계수는 0.2%이다. 이 수치는 유한요소해석에 의한 결과와도 일치한다.

Fig. 11은 구조물의 4층에서의 가속도 측정 결과로부터 구한

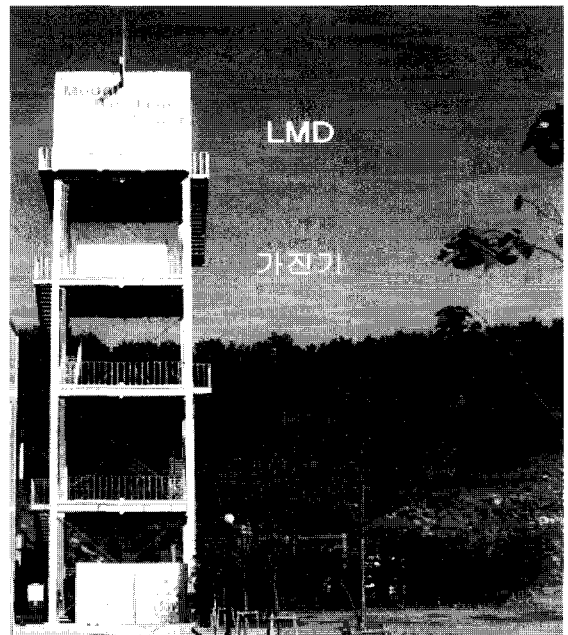


Fig. 10 Test structure

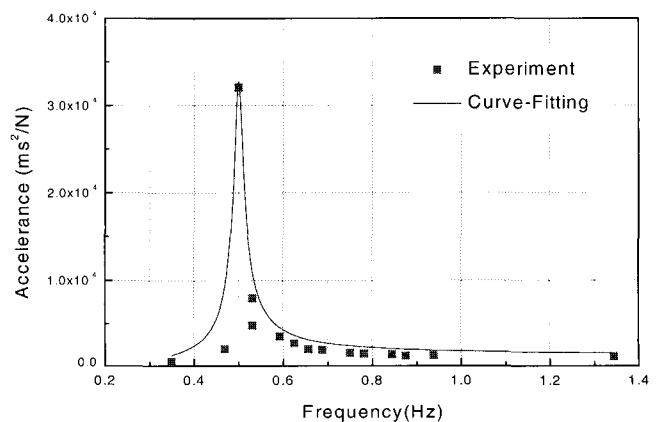


Fig. 11 Accelerance at the 4th floor

accelerance를 커브-피팅한 결과와 실험으로 구한 값을 비교하여 보여주고 있다.

#### 4.2 $H_\infty$ 제어 알고리즘 및 수치 실험

본 연구에서는 구조물 진동제어용 LMD의 제어로직으로서  $H_\infty$  제어 알고리즘을 적용하였다. 불확실성이 있는 시스템에 일반적인 LQG/ $H_2$ 제어를 적용할 경우 시스템 전체가 불안정해질 수 있으며, 시스템의 안전성을 향상시키기 위해 개발된 강인제어 방법 중 하나가  $H_\infty$  제어이다. 시스템의 모델링 파라미터와 외부 입력에 불확실성이 존재하는 경우 시스템의 성능 및 안정성을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

$H_\infty$  제어를 설계하기 위해 먼저 가장 지배적인 최저차 2개 모드형상을 제어 대상으로 하여 모델 축소를 수행하였다. 축소된 모델을 바탕으로 제어를 설계할 때 발생하는 고려되지 않은 3차 이상의 고차 모드형상에 대한 모델 불확실성과 제어 대상 모드형상인 1, 2차 모드형상의 고유 진동특성(고유진동수 및 감쇠비)의 변화에 대해 강건한 제어를 설계하였다.

시험 구조물을 전단 집중질량 모델로 모델링하면, 운동 방정식은 식 (10)과 같이 표현될 수 있다.

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = fF_d(t) \quad (10)$$

여기서  $\mathbf{x}(t) = [x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$ 로 지반에 대한 각층의 상대 변위를 나타내며,  $F_d(t)$ 는 외란을 나타낸다.

실제 건물을  $n$ 개의 자유도를 가지는 집중질량으로 모델링 하였을 때에, 실제 제어기의 설계 시에는  $n$ 개의 모드형상의 수만큼 큰 차원을 갖는 모델을 사용할 수는 없다. 즉 제어 대상 구조물의 차수 축소의 필요성이 대두된다. 이 때 사용되는 가장 일반적인 방법은 가장 쉽게 가진이 되는 구조물의 저차 모드형상만을 고려하고 그 이상의 모드형상은 절단해 버리는 것이다.

시험 구조물은 5자유도의 집중 질량으로 모델링 되었으며, 제어기 설계를 위해 2자유도 모델로 축소하였다. 즉, 구조물의 1, 2차 모드형상을 제어하도록 제어기를 설계하였다. Seto와 Mitusta<sup>(6)</sup>가 제시한 방법을 적용하고, 물리적 의미를 가지도록 LMD가 설치된 5층과 3층에 각각 집중질량을 가지는 2자유도 모델로 축소하였다. 식 (10)으로부터 축소된 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_r \ddot{\mathbf{x}}_r(t) + C_r \dot{\mathbf{x}}_r(t) + K_r \mathbf{x}_r(t) = f_r F_d(t) \quad (11)$$

여기서,  $\mathbf{x}_r(t) = [x_3 \ x_5]^T$ 은 지반에 대한 3층과 5층의 상대 변위를 나타낸다.

식 (9)와 식 (10)으로 각각 모델링 된 원래의 모델과 축소된 모델을 주파수 영역에서 비교해 보면 Fig. 12와 같다. Fig. 12는 3층에서의 외력 입력에 대한 5층에서의 가속도 응

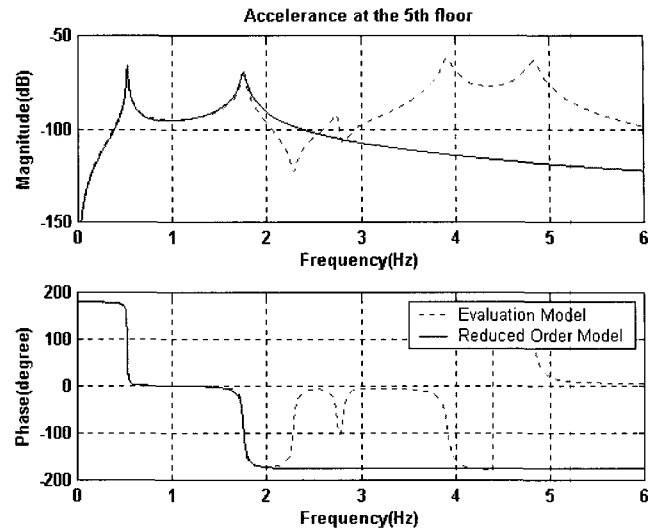


Fig. 12 Reduced-order model vs. Full-order model

답의 전달함수를 보여주고 있는데, 2차 모드형상까지는 거의 일치함을 확인할 수 있다.

축소된 모델 식 (11)과 LMD 모델의 운동방정식 (8) 및 (9)를 결합하여 상태 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{X}_r(t) = A_r X_r(t) + B_r V_{in}(t) + E_r F_d(t) \quad (12)$$

여기서 상태 변수  $X_r = \{x_3 \ x_5 \ \dot{x}_3 \ \dot{x}_5 \ \ddot{x}_3 \ \ddot{x}_5 \ i\}^T$ 이다.

$H_\infty$  제어를 설계하기 위해서 Glover와 Doyle이 제시한 방법<sup>(7),(8)</sup>을 적용하였다. Fig. 13은 구조물에 적용된  $H_\infty$  제어 모델이다. 실제 제어 시에 구조물의 5층에서의 가속도 신호만을 이용할 것이므로, 구조물의 5층에서의 가속도 신호를 출력으로 두었다.  $H_\infty$  제어 문제를 풀기 위해서는 Fig. 14와 같은 표준  $H_\infty$  제어 문제에서 먼저 전달함수 P를 결정해야 한다. P는 표준 플랜트를 표현하는 전달함수로서 모델링된 시스템과 더불어 강인성과 성능향상을 위해 가중치 함수를 포함하고 있는데, 이는 식 (13)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} W_y G_d W_d & W_y W_n & W_y G_u \\ 0 & 0 & W_{add} \\ 0 & 0 & W_u \\ G_d W_d & W_n & G_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_d \\ S_n \\ V_{in} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

여기서  $G_d$ 는 식 (12)에서 외력에 대한 시스템의 출력을 나타내는 전달함수이고,  $G_u$ 는 식 (12)에서 제어 입력에 대한 시스템의 출력을 나타내는 전달함수이다.

표준 플랜트 P는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{21}$ ,  $P_{22}$ 는 Fig. 14에서 각 입력에 대한 출

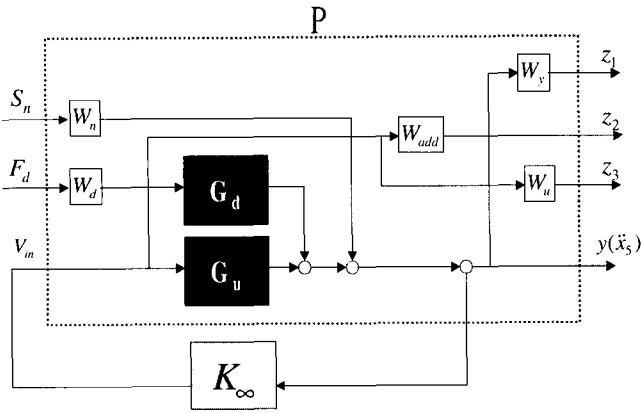


Fig. 13 Block diagram for  $H_\infty$  controller design

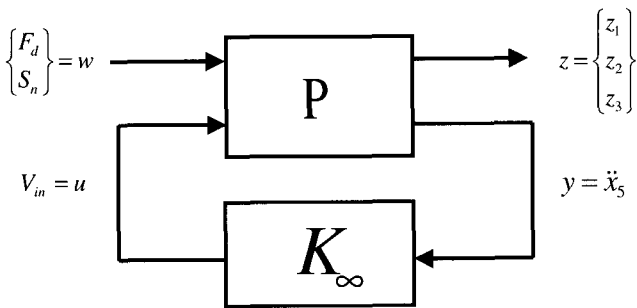


Fig. 14 Standard  $H_\infty$  control problem

력의 전달함수를 나타내고,  $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ 는 전달함수  $P$ 를 상태방정식으로 나타내기 위한 시스템 행렬이다. 전체 시스템의 입·출력사이의 관계는 아래와 같이 된다.

$$z = P_{11}w + P_{12}u \tag{15}$$

$$y = P_{12}w + P_{22}u \tag{16}$$

$$u = K_\infty y \tag{17}$$

식 (15), (16) 및 (17)을 정리하여 외부 입력  $w$ 에 대한  $z$ 의 관계를 구하면 식 (18)과 같다.

$$F_l(P, K_\infty) = \frac{z}{w} = [P_{11} + P_{12}K_\infty(I - P_{22}K_\infty)^{-1}P_{21}] \tag{18}$$

따라서  $H_\infty$  제어 문제는 외부 입력에 대한  $w$ 에 대한  $z$ 의  $H_\infty$  놈(norm)을 최소화하는 것으로 전달식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\|F_l(P, K_\infty)\|_\infty \leq \gamma \tag{19}$$

즉,  $H_\infty$  제어 문제는 식 (19)를 만족시키면서 시스템을 안정화시키는 제어기  $K_\infty$ 를 찾는 문제로 귀결된다.  $\gamma$ 는 물리적으로 시스템이 안정성을 유지할 수 있는 모델링 오차의 상한값의 역수를 나타낸다. 실제 시스템의 전달함수를  $G$ , 수학적으로 모델링된 시스템의 전달함수를  $G_m$ 이라고 하면, 모

델링 오차  $\Delta$ 는 식 (20)으로 나타낼 수 있는데,  $\Delta$ 의  $H_\infty$  놈은  $1/\gamma$ 보다 작게 된다. 즉, 주어진 제어기에 대하여 시스템이 안정화를 이룰 수 있는 모델링 오차의 범위를  $\gamma$ 로 표시할 수 있다.

$$\Delta = G - G_m \tag{20}$$

$$\|\Delta\|_\infty \leq \frac{1}{\gamma} \tag{21}$$

시스템의 성능 조건을 만족하는 제어기를 구현하기 위해서 가중치 함수를 선택해야 한다. 각각의 가중치 함수들은 다음과 같다.

$W_{add}$ 는 실제 구조물과 제어기의 설계시에 고려된 구조물 모델과의 오차를 보상해 주는 것으로, 주파수 영역에서 이 오차를 포함하도록 선정한다. 본 제어기의 설계시에는 구조물의 1, 2차 모드형상만을 고려하였으므로,  $W_{add}$ 는 제어입력에 대하여 구조물의 3차 이상의 모델링되지 않은 고차 모드형상의 응답특성을 보상해 준다.  $W_{add}$ 를 식 (22)와 같이 가정하였다.

$$W_{add} = \gamma_{add} \frac{s^2 + 2\zeta_a \omega_a s + \omega_a^2}{s^2 + 2\zeta_d \omega_d s + \omega_d^2} \tag{22}$$

여기서 이에 대한 파라미터들의 값을 식 (23)과 같이 두었고, 이 때의 제어 입력에 대한 5층에서의 가속도 응답에 대하여 원래의 모델과 축소 모델 사이의 오차의 경계를 표현하면 Fig. 15와 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_{add} &= 0.04 & \zeta_a &= 0.5 & \omega_a &= (2 \times \pi) \times 2 \\ \zeta_d &= 0.2 & \omega_d &= (2 \times \pi) \times 3.8 \end{aligned} \tag{23}$$

$W_y$ 는 외란 제거와 낮은 주파수에서 모델 불확실성에 대한 강인성을 향상시키기 위한 가중치 함수로, 일반적으로 저주파 영역에서 높은 계인을 가지며 sensitivity function의 형태로 결정한다.

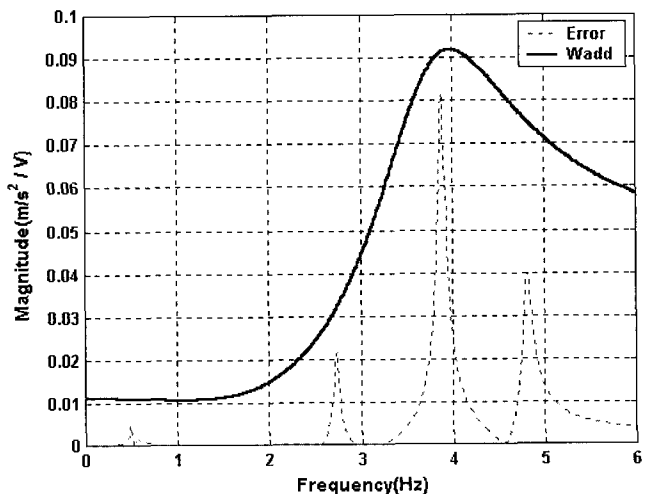


Fig. 15 Higher modes errors for control input

$$W_y = \gamma_y \frac{1}{s+a} \quad (24)$$

여기서  $\gamma_y = 30$ ,  $a = (2\pi) \cdot 2$ 로 두었다.

$W_u$ 는 제어 입력에 대한 가중치 함수로, 값이 작아질수록 제어입력이 커지게 된다. 일반적으로 주파수에 관계없이 상수로 표현하며, 구동기의 포화를 방지하도록 설정한다.

$$W_u = \gamma_u \quad (25)$$

여기서  $\gamma_u = 0.001$ 로 두었다.

$W_d$ 는 외란이 시스템에 미치는 영향을 줄여주는 가중치 함수로, 값이 클수록 제어입력이 커지거나 너무 크게두면 제어가 불안정해진다. 일반적으로 주파수와 관계없는 상수로 표현한다.

$$W_d = \gamma_d \quad (26)$$

여기서  $\gamma_d = 300$ 으로 두었다.

$W_n$ 는 센서 잡음이 시스템에 미치는 영향을 줄여주는 가중치 함수이다. 일반적으로 주파수와 관계없는 상수로 표현한다.

$$W_n = \gamma_n \quad (27)$$

여기서  $\gamma_n = 0.01$ 로 두었다.

설계된 제어기 게인의 전달함수는 다음과 같다.

$$K_\infty = \frac{a_9s^9 + a_8s^8 + a_7s^7 + a_6s^6 + a_5s^5 + a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}{s^{10} + b_9s^9 + b_8s^8 + b_7s^7 + b_6s^6 + b_5s^5 + b_4s^4 + b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0} \quad (28)$$

여기서

$$\begin{aligned} a_9 &= 1.7821e2, a_8 = 5.9120e3, a_7 = 1.8388e5, a_6 = 2.9991e6, \\ a_5 &= 2.7025e7, a_4 = 1.2624e8, a_3 = 6.9456e8, a_2 = 1.6922e9, \\ a_1 &= 5.5962e9, a_0 = 7.1583e9 \\ b_9 &= 3.2292e1, b_8 = 1.1106e3, b_7 = 1.9588e4, b_6 = 2.3832e5, \\ b_5 &= 2.3093e6, b_4 = 1.2737e7, b_3 = 6.0355e7, b_2 = 1.4965e8, \\ b_1 &= 2.9670e8, b_0 = 2.8008e8 \end{aligned}$$

위의 파라미터에 대한 제어기의 설계 결과  $\gamma = 0.00952$ 였다.  $\gamma$ 은 물리적으로 시스템이 안정성을 유지할 수 있는 모델링 오차의 상한값의 역수를 나타내는데, 설계된 제어기는 매우 강건함을 확인할 수 있다. Fig. 16은 외력에 대한 5층에서의 가속도 응답에 대한 전달함수를 개루프(비 제어시)와 비교하여 보여주고 있다.  $H_\infty$ 제어기에 의해서 1, 2차 모드형상 모두에서 가속도레벨이 약 10dB의 감소를 보임을 확인할 수 있다.

설계된 제어기에 대하여 Fig. 17은 1차 모드형상을 정형파로 가진했을 때의 제어 전·후의 5층에서의 가속도와 LMD의 변위를 보여주고 있는데, 가속도의 피크 값은 제어 전  $0.15\text{m/sec}^2$ 에서 제어 후  $0.05\text{m/sec}^2$ 로 2/3정도 줄어들었다. 또한 Fig. 18은 2차 모드형상을 정형파로 가진했을 때의 제어 전·후의

5층에서의 가속도와 LMD의 변위를 보여주고 있는데, 가속도의 피크 값은 제어 전  $0.06\text{m/sec}^2$ 에서 제어 후  $0.02\text{m/sec}^2$ 로 2/3정도 줄어들었다.

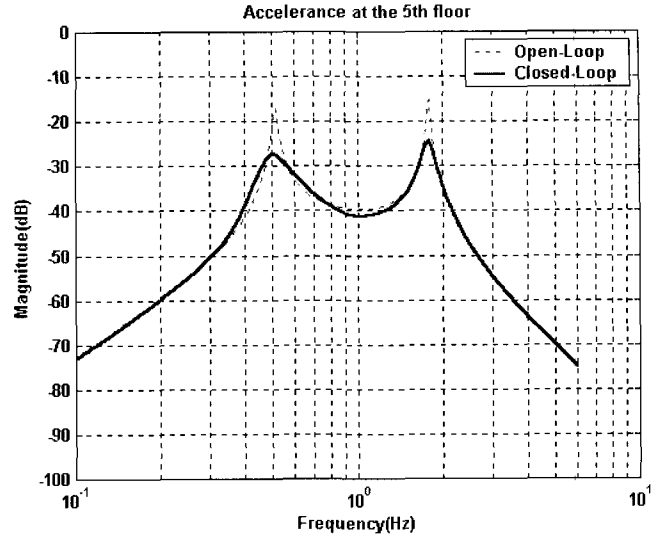


Fig. 16 Transfer function( $H_\infty$  control vs. no control)

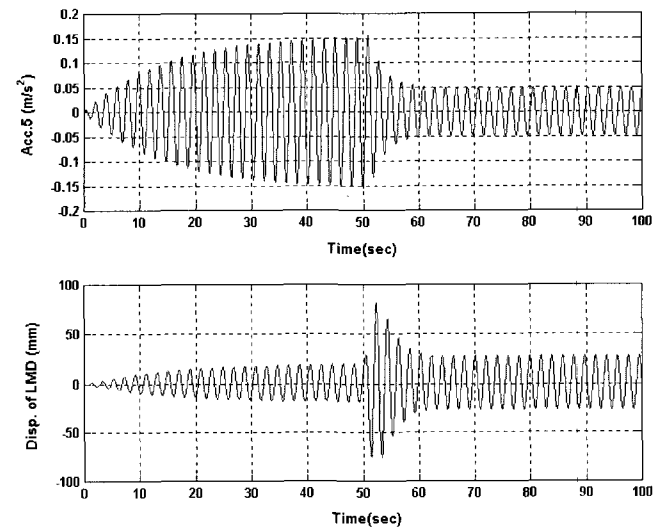


Fig. 17 Control performance against the 1st mode excitation

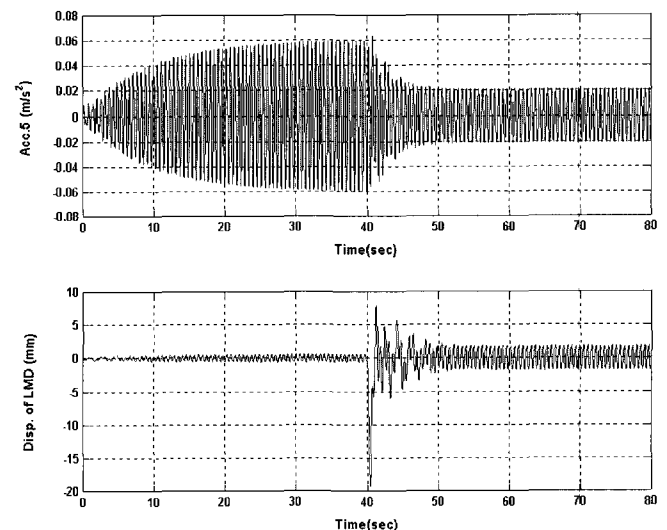


Fig. 18 Control performance against the 2nd mode excitation



### 5. 성능 검증시험

성능 검증시험 수행을 위하여 시험 대상구조물인 modal testing tower 5층에 LMD를 설치하였다. 기존에 개발된 active mass driver를 4층에 설치하여 구조물 진동발생용 가진기로 사용하였다. 각 층에는 가속도계를 설치하여 각 층에서의 구조물 응답을 계측할 수 있도록 하였다. 단, 설계된 제어알고리즘은 5층에서의 가속도 신호만을 이용하여 제어신호를 출력하게 된다. LMD의 가동질량 변위 및 가속도를 계측하기 위해 계측기를 설치하였으나, LMD에서 발생하는 자기장의 영향으로 취득된 정보에 대한 신뢰성을 보장할 수 없었다.

성능시험은 가진기를 이용하여 0.2Hz부터 3.0Hz까지 약 0.1Hz간격으로 구조물을 약 20초씩 정현파 가진하면서 수행되었다. 자료취득 및 분석을 위해서 National Instrument사의 NI6062E<sup>®</sup> 자료취득용 보드, Samsung Sense<sup>®</sup> Notebook PC 및 MATLAB<sup>®</sup>등이 사용되었다. 취득 주파수(sampling frequency)는 200Hz로 설정하였다.

가진 가속도에 대한 5층에서 계측된 가속도 응답함수를 Fig. 19에 보여주고 있으며, 비제어시, 수동 제어시 및 능동 제어시의 결과를 비교하였다. Fig. 19(작은 그림 참조)에서 보듯이 1차 공진 주파수에서 진동제어 효과가 매우 큼을 알 수 있으며, 2차 공진 주파수에서도 좋은 진동제어 효과를 얻을 수 있었다. 1차 공진 주파수에서의 제어 효과를 명확히 비교·확인하기 위해 제어를 안했을 경우, 수동 제어할 경우 및 능동 제어할 경우의 구조물 5층 가속도 응답을 Fig. 20에 보였다.

구조물을 가진기로 1차 모드형상을 가진시킨 후 LMD를 능동 가동하여 제어성능을 확인하는 시험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 21에 보이고 있다. Fig. 21은 구조물의 5층에서의 가속도와 LMD에 입력되는 제어신호를 보여주고 있으며, 비 제어시의 응답 및 제어신호가 입력된 후 구조물의 진동레벨의 변화를 명확하게 살펴 볼 수 있다.

또한 구조물을 가진기로 1차 모드형상을 가진시킨 후 LMD를 수동 가동한 다음 능동 가동으로 변환시킬 경우 제

어성능을 확인하는 시험을 수행하였다. Fig. 22는 성능시험 결과로서 5층에서 계측된 구조물의 가속도 신호와 LMD에 입력되는 제어신호를 보여주고 있다. Fig. 21과 비교해 볼 때 큰 차이는 없는 것으로 확인되었다. 수동에서 능동으로 변환할 때 또는 정지에서 능동으로 변환할 때 초기에 큰 제어신호가 입력되지만 고려된 영역안에 있음을 알 수 있으며, 그 영향은 크지 않음을 확인할 수 있다.

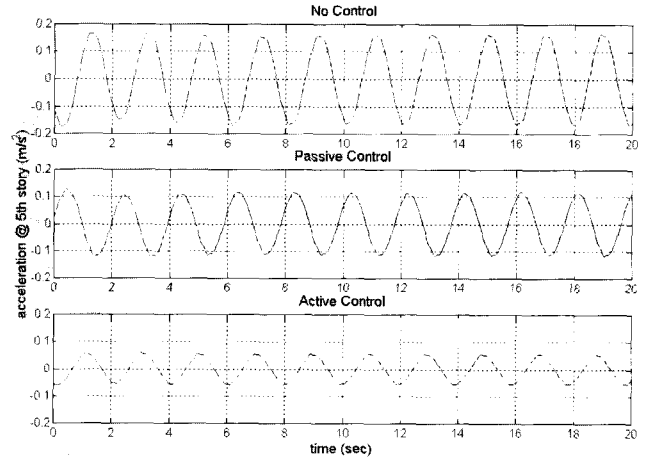


Fig. 20 Acceleration responses at 5th story under first resonant frequency excitation

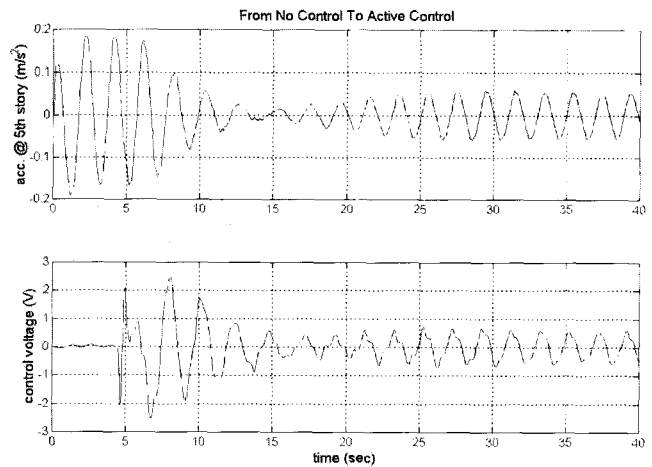


Fig. 21 Responses with active control starting from no control

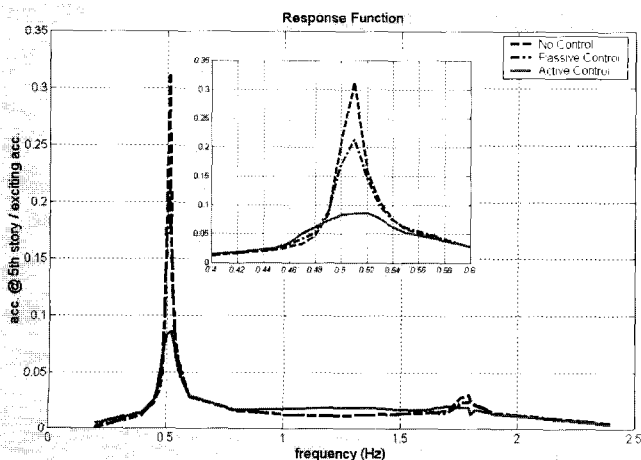


Fig. 19 Acceleration response at 5th story under steady state excitations

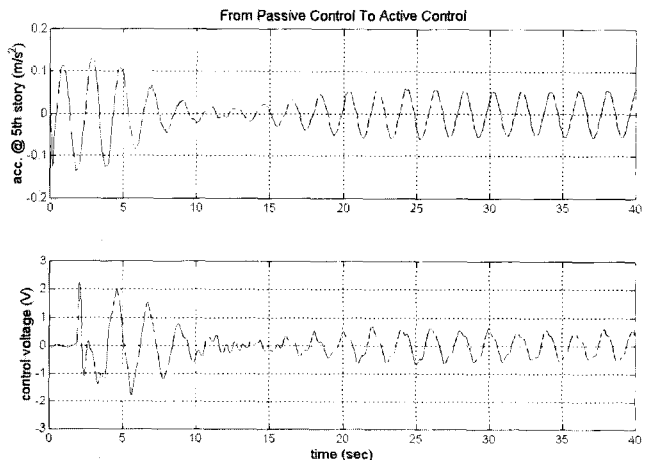


Fig. 22 Responses with active control starting from passive control

제어시험결과 비제어시와 수동제어시, 그리고 복합제어시의 진동 저감량을 Table 3에 정리하여 나타내었다. 능동제어시 1차 모드형상의 진동레벨이 약 10dB 저감되었으며 이는 시뮬레이션 결과와 유사하며 외란이 있는 경우에도 제어기가 잘 작동함을 확인할 수 있었다.

실험 여건상 transient 하중에서의 성능검증 시험을 수행하지 못한 점을 아쉽게 생각하며, 참고로 자유진동 실험에서 감쇠비가 약 1.0%에서 약 14.9%로 향상되었음을 밝혀둔다.

Table 3 Transmissibility loss for vibration control types

	Without control	Passive control	Active control
Acceleration(m/s <sup>2</sup> )	0.145	0.103	0.046
Loss Ratio	0	3dB	10dB

## 6. 결 론

본 연구에서는 고층 건축 구조물의 진동 제어에 실제로 이용될 수 있는 대용량의 하이브리드형 선형모터 댐퍼를 설계 및 제작하였다. 제작된 선형모터 댐퍼는 1,500kg의 가동 질량을 갖고 있으며, 최대 ±250mm의 변위로 움직일 수 있다. 제작된 LMD의 동적 응답 특성을 실험과 이론적으로 파악하였다.

제어 대상 구조물을 저차의 2개 모드형상만을 가지는 축소된 모델로 만들기 위하여 모델 축소를 수행하였고, 이 모델로  $H_{\infty}$  제어 방법을 이용하여 강건한 제어기를 설계하였다. 이를 위해 가중치 함수들을 설계하였는데, 3차 이상의 고차 모드형상에 대한 불확실성과 저주파수에서의 고유진동수와 감쇠비와 같은 모델 불확실성에 대한 강건성과 외란 제어 성능을 향상시키기 위하여 각각의 가중치 함수를 선정하였다.

일련의 성능검증 시험 결과 시험 구조물의 1, 2차 모드형상 모두에 대하여 가속도 레벨이 약 10dB 감소함을 확인하였다. 본 연구를 통해 개발한 LMD가 풍 및 지진 하중을 받는 구조물의 진동제어용 제진장치 중 하나로 유용함을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 산업기반기술개발 사업 중 “초고층 철골 구조물의 진동 제어 장치 실용화에 관한 연구”, 사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다. 또한 국가지정연구실 사업인, “제진장치를 활용한 제진설계기술 개발”에서 연구비 일부를 지원 받았습니다. LMD를 설계·제작에 협력해 주신 충남대학교 전자파기술연구소 장석명 교수님 팀 및 한국기계연구원 첨단산업기술연구부 기전응용그룹팀에 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. Nasar, S. A. and Boldea, I., *Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
4. Chung, T. Y., Moon, S. J., and Jang, S. M., "Active control on the structural vibration under base excitations using a linear oscillatory actuator," *Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 10, 1999, pp. 203-214.
5. 정태영, 문석준, 정종안, 박희창, 장석명, "Linear oscillatory actuator를 이용한 구조물 진동의 능동제어 연구", 한국소음진동공학회지, 제7권, 제2호, 1997, pp. 311-317.
6. Seto, K. and Mitsuta, S., "A new method for making a reduced-order model of flexible structures using observability and controllability and its application in vibration control," *JSME, Series C*, Vol. 37, No. 3, 1994, pp. 444-449.
7. Glover, K. and Doyle, J. C., "State space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an  $H_{\infty}$ -norm bound and relations to risk sensitivity," *System and Control Letters*, Vol. 11, 1998, pp. 167-172.
8. Zhou, K. and Doyle, J. C., *Essentials of Robust Control*, Prentice Hall, 1998.