

건축 구조물 제진용 대용량 하이브리드형 리니어 모터 댐퍼의 개발

Development of a Large Capacity Hybrid-type Linear Motor Damper for the Vibration Control of Building Structures

⁰정태영* 임채욱* 허영철* 장석명** 정상섭** 김두훈*** 박해동***

Tae-Young Chung, Chae-Wook Lim, Young-Cheol Huh, Seok-Myeong Jang, Sang-Sub Jeong, Doo-Hoon Kim, Hae-Dong Park

ABSTRACT

A large capacity hybrid-type linear motor damper was designed and fabricated for the application to the vibration control of a large building structure model. It has been designed to be able to move the damper mass, 1,500kg up to ± 250 mm strokes at the first mode natural frequency of the building structure model, 0.51Hz. Dynamic response characteristics of the fabricated damper were investigated by experimentally and analytically.

1. 서론

최근의 건축 구조물은 대형화, 고층화, 경량화 및 세장화 되는 추세에 있다. 이러한 대형 고층 건축 구조물에는 구조물의 큰 유연성 및 작은 감쇠비로 인해 바람 및 지진 등에 의해서 과도한 진동이 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 이를 억제하기 위하여 여러 장치들을 이용한 다양한 제진 연구가 이루어지고 있다⁽¹⁾. 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 설치되어 지고 있다^(1,2).

AMD나 HMD의 가동 질량을 움직이는 구동기 시스템은 주로 유압식이나 회전형 서보 모터식의 진동 제어 시스템이 사용되었다. 유압식의 경우에는 유압펌프, 유압모터, 오일탱크, 냉각장치, 압력계, 각

종밸브, 여과기 등 많은 요소가 필요하게 되어 시스템이 복잡하고 보수유지비가 많이 드는 단점을 가진다. 또한 회전형 서보 모터식은 캠, 기어, 클러치, 벨트, 스크류 등 기계적인 변환장치를 이용하여 회전운동을 직선운동으로 변환시키게 되므로 모터의 효율이 낮고 소음발생, 마모 등이 필수적으로 수반되는 단점을 가진다. 반면에 리니어 모터는 직선방향으로 미는 힘인 추력을 전자기력으로부터 직접 발생시키므로 스크류, 체인, 기어시스템 등의 기계적인 에너지 변환장치가 필요치 않아 복잡하지 않으면서도 에너지 손실이나 소음을 발생하지 않고 빠른 응답 속도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 회전형 모터에 비해 시스템의 효율적인 운전과 기능에 있어서 절대적으로 유리하다고 볼 수 있다. 또한 유압식에 비해 구조가 간단하고 부품수가 작아 경제적이며 보수유지 면에서 유리한 장점을 갖는다.

이전 연구들에서는 한 개의 영구자석을 이용한 실험실 규모의 소형 리니어 모터에 관한 연구가 진행된 바 있다^(3,4,5). 본 연구에서는 대형 건축 구조물에 적용이 가능한 HMD 형태의 대용량

* 정회원 · 한국기계연구원 구조시스템 연구부
** 중남대 전기공학과
*** 정회원 · 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

LMD(Linear Motor Damper)를 개발하였다. 이를 위해 2inch×2inch×1inch의 치수를 갖는 NdFeB의 영구자석이 총 234개로 구성된 계자와 스테인레스강 재질의 보빈에 감겨진 코일로 이루어지는 리니어 모터를 설계 및 제작하였다. 또한 이의 동특성 실험과 해석을 통해 제어 정수를 산정하고 이를 수학적으로 모델링하였다.

2. 시험 대상 구조물

LMD를 적용하기 위한 시험 대상 구조물은 Fig. 1의 5층 첩골 구조물로서 총 질량은 100톤(5×20ton), 가로 6m, 세로 6m, 총 높이는 30m이다. 이 구조물의 기둥은 I형 빔이어서 약축 및 강축 방향을 가지게 되는데, 제어 실험의 대상 방향은 기둥의 약축 방향이다. 동특성 실험은 3층에 설치된 가진 모터를 회전하여 모터에서 발생하는 불평형 가진력을 이용하여 첩골 구조물을 가진한 후, 각 층에서의 가속도를 측정하였다. 실험으로부터 이 구조물의 약축 방향의 1차 모드의 고유 진동수는 0.51Hz, 감쇠 계수는 0.2%로 추정되었다. Fig. 2는 시험 대상 첩골 구조물의 4층에서의 가속도 측정 결과로부터 구한 Accelerance를 커브-피팅한 결과와 비교하여 보여주고 있다.



Fig. 1 Test Structure(Unison Tower)

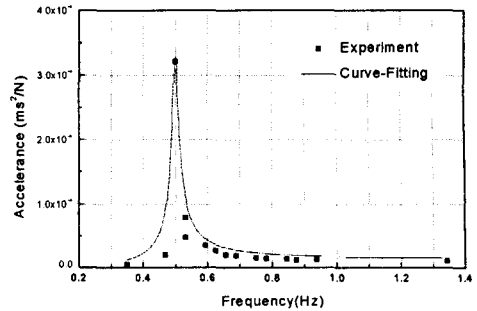


Fig. 2 Accelerance at the 4th Floor

3. LMD의 설계 및 제작

3.1 LMD의 설계

시험 대상 첩골 구조물의 진동을 제어하기 위하여 Fig. 3과 같이 영구자석에 의한 계자와 보빈에 코일을 감은 전기자로 구성된 LMD를 설계하였다. 설계한 LMD는 첩골 구조물의 총 질량의 1.5%인 1500kg의 가동 질량을 가지며, 코일이 고정되어 있고 영구자석과 철심 요크가 가동 질량의 역할을 하는 구조를 갖는다. 또한 가동자의 양편에 스프링이 존재함으로써 수동 댐퍼의 역할도 함께 수행할 수 있어 HMD로 간주될 수 있다.

LMD는 1차 모드의 고유 진동수가 0.51Hz인 시험 대상 구조물을 대상으로 스프링이 없는 경우에 대하여 1500kg의 질량을 최대 ±250mm의 스트로크까지 가동시킬 수 있도록 설계하였다. 이에 해당하는 모터의 추력을 얻기 위해 모터의 공극 길이, 영구자석의 길이 방향 자석수, 철심 요크의 두께와 폭, 코일의 턴수 등을 결정해야 한다. 영구자석과 철심 요크는 자체가 가동 질량이 되므로 이들의 질량의 합이 1500kg이 되어야 하며, 댐퍼의 안정도를 고려하여 가능한 높이는 낮고 폭이 넓은 구조를 갖도록 설계한다.

LMD의 추력은 플레밍의 왼손법칙에 따라 영구자석에 의한 자속 밀도와 코일의 전류에 의하여 발생한다. 이때 가동자에 작용하는 추력은 식 (1)과 같다.

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

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, $k_T (= 2INB_g)$ 는 추력 상수로 정상상태에서는 유기전압 상수 k_B 와 같은 값을 갖는다.

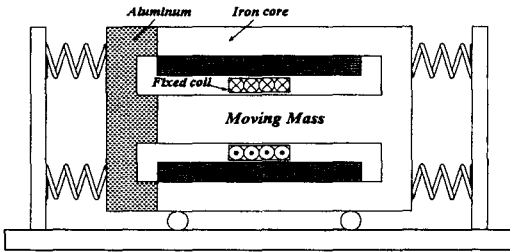


Fig. 3 Schematic Diagram of LMD

1) 영구자석과 철심 요크의 설계

LMD의 영구자석에 의한 공극 자속 밀도는 식 (2)와 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, μ_r 은 영구자석 비투자율, P_t 는 영구자석 두께, l_g 는 공극 길이, k_c 는 자기회로 형상에 의한 보정 계수이다. LMD의 자기회로를 구성하기 위한 영구자석은 NdFeB계의 자석으로 제작 시에는 시중에서 판매되고 있는 제품인 2inch×2inch×1inch의 치수를 갖는 MQ30 계열을 사용하였으며, 이의 잔류 자속 밀도는 1.08T, 비투자율은 1.24이다.

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 자계 속에 있는 코일의 유효 단면적, W_y 는 철심 요크의 폭이다.

2) 코일의 턴수 계산

코일의 턴수는 코일에 대한 전압 방정식으로부터 얻어진 식 (4)에 의해서 정해진다. 여기서는 전기적인 시정수가 기계적인 시정수보다 상대적으로 작고 LMD는 저주파수에서 운전하므로 코일의 인덕턴스항을 무시하였다.

$$N = \frac{V_c}{\rho_c l_{1c} J_c + 4\pi f B_g l X_m} \quad (4)$$

여기서 V_c 은 코일에 공급되는 전압, ρ_c 는 도체의 저항률, l_{1c} 는 코일의 턴당 길이, J_c 는 전류 밀도, f 는 가동 주파수, X_m 은 가동 주파수에서의 최대 스트로크이다.

3) LMD의 설계 사양

영구자석과 철심 요크의 질량의 합은 1500kg이 되어야 한다는 조건과 선정된 추력을 갖기 위한 조건으로부터 모터의 공극 길이, 영구자석의 길이 방향 자석수, 철심 요크의 두께와 폭은 결정된다. Fig. 4는 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. 4에서 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 턴수는 식 (4)로부터 결정된다. Table 1은 LMD의 설계 사양을 정리한 것이다.

3.2 특성 해석

Fig. 5는 LMD의 1/2 해석 모델로 영구자석에 의한 공극과 철심 요크에서의 자속 밀도 분포를 보여준다.

자속은 공극을 지나 철심 요크로 흐르며 공극 내에서는 Fig. 6과 같이 일정한 자속 밀도 분포를 갖는다. 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.

Fig. 7은 코일의 공극 자속 밀도 내에서의 위치에 따른 LMD의 정추력 특성을 입력 전류에 따라 보여 주고 있다. 코일에 전류가 흐를 때에 이에 의해서 형성되는 자기회로는 영구자석에 의해서 형성되는 자기회로에 영향을 준다. 따라서 철심 요크를 포화시켰음에도 불구하고 전기자 반작용에 의한 추력의 불평형이 발생한다. 그러나 $\pm 10A$ 영역에서는 코일의 위치에 상관없이 거의 선형적인 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

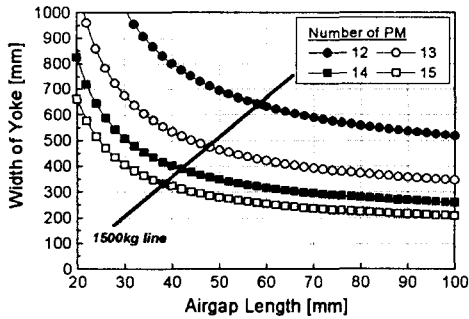


Fig. 4 Changes of Width of Yoke According to Airgap Length and Number of Permanent Magnet

Table 1 Designed Specifications of the LMD

항 목	사 양	
정격 전압/전류	180[V]/23 [A]	
가 동 질 량	1500 [kg]	
영구 자석	계 열	NdFeB
	잔류자속밀도	1.08 [T]
	자 석 치 수	2×2×1 [inch]
	총 자석길이	650 [mm]
코일	턴 수	660 [turn]
	코일 단면적	5.31 [mm ²] ($\phi 2.6$ mm)
	코일 길이	160 [mm]
	코일 높이	37 [mm]
	전류 밀도	4 [A/mm ²]
요크	외측요크두께	95 [mm]
	내측요크두께	190 [mm]
	폭	465 [mm]
공극 길이	50 [mm]	
스트로크	± 250 [mm]	

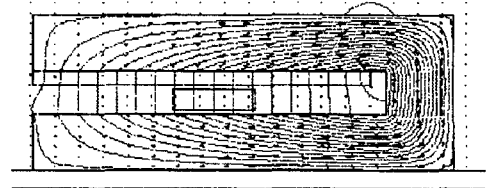


Fig. 5 Magnetic Flux Density of the Motor Produced by Permanent Magnet

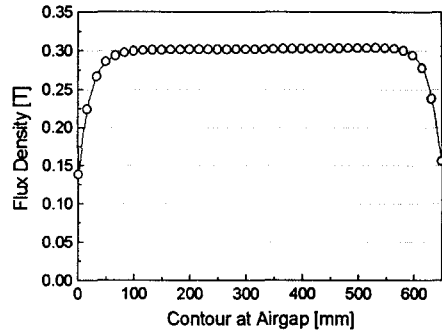


Fig. 6 Magnetic Flux Density along Contour at Airgap

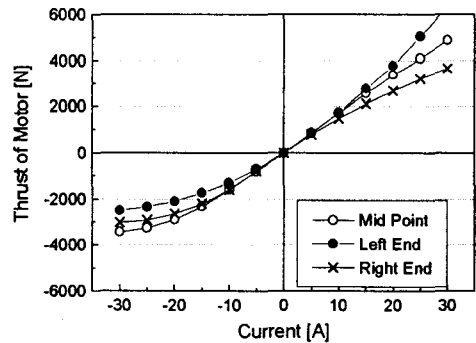


Fig. 7 Thrust of Motor According to Current and Position of Coil

3.3 LMD의 제작

LMD의 제작 시에 계자부의 영구자석은 총 234개가 사용되었는데, 13개의 영구자석을 한 모듈로 제작하였고 이의 영구자석 케이스는 자성체 케이스를 사용하였다. 코일부는 재질이 스테인레스 강인 보빈과 지름이 2.6 mm인 구리 코일을 사용하였으며, 제작 시의 코일 턴수는 설계치보다 약간 작

은 630턴이었다. 또한 스프링은 4개씩 2조로 앞쪽과 뒤쪽의 스트로퍼에 지지되게 있는데, 선경 5mm, 내경 48mm, 권선수 42, 길이 1m인 스프링을 사용하였다. Fig. 8은 LMD의 완성 사진을 보여주고 있으며, Table 2는 LMD의 제작 사양을 보여주고 있다.

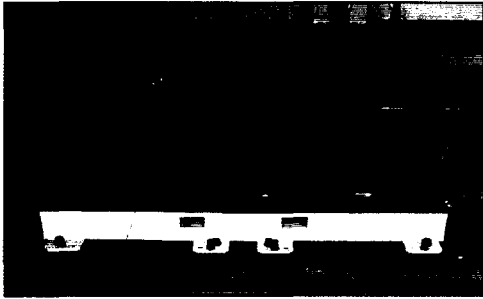


Fig. 8 The Fabricated LMD

Table 2 Specifications of the Fabricated LMD

항 목		사 양
정격 전압/전류		180[V]/23 [A]
가 동 질 량		1500 [kg]
영구 자석	계 열	NdFeB
	잔류자속밀도	1.08 [T]
	자석 치수	2×2×1 [inch]
	총 자석길이	675 [mm] (케이스 포함)
코일	총 자석폭	472.4 [mm] (케이스 포함)
	턴 수	630 [turn]
	코일 단면적	5.31 [mm ²] (φ2.6 mm)
	코일 길이	154 [mm]
	코일 높이	37 [mm]
요크	전류 밀도	4 [A/mm ²]
	외측요크두께	95 [mm]
	내측요크두께	190 [mm]
	폭	474 [mm]
공극 길이		50 [mm]
스트로크		±250 [mm]
총 질 량		2352kg (하판 포함)

4. LMD의 동특성 실험

Fig. 9는 제작된 LMD의 동특성 실험을 위한 장치 구성도이다. 함수 발생기에서 임의의 정현파의 제어 전압을 입력하면 인버터를 통해 증폭된 전압이 리니어 모터에 입력되어 LMD는 움직이게 된다. 인버터 출력 전압과 전류는 PT와 CT를 통해 측정되며 가동 질량의 변위는 위치센서 Potential meter에

의해 측정된다. 측정된 신호는 signal conditioner에서 필터링과 증폭을 거쳐 A/D 보드를 통해 컴퓨터로 입력된다.

함수 발생기로 전압을 입력한 후 모터의 전압, 전류, 변위 파형을 확인한 결과 약 1 사이클 후에 정상상태에 이르는 확인할 수 있었으며, 초기의 기동전류는 정상상태의 약 2배 정도였다. 그리고 제어 전압 0.5V이하에서는 LMD의 응답이 거의 없었다.

Fig. 10은 제어 입력 전압이 1.5V일 때 LMD 변위의 주파수 응답 특성을 보여 주고 있는데, 약 0.60Hz에서 피크가 발생하며 이 때의 제어 입력 전압과 변위 사이에 180도의 위상차가 발생함을 확인할 수 있었다. 그리고 3V, 0.50Hz 정현파 제어 입력 전압에서 LMD의 변위는 약 250mm이었다. 또한 전류의 주파수 응답 특성을 확인한 결과, LMD의 가동질량과 스프링에 의한 고유 진동수인 약 0.50Hz에서 최소 전류가 모터에 공급됨을 확인할 수 있었다.

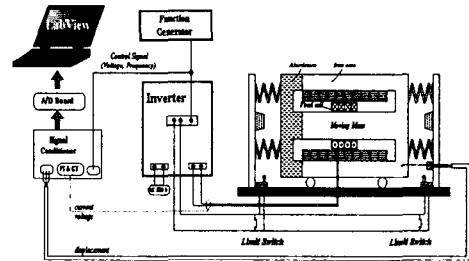


Fig. 9 Schematic View of the Test Set-up for the Dynamic Tests of the Designed LMD

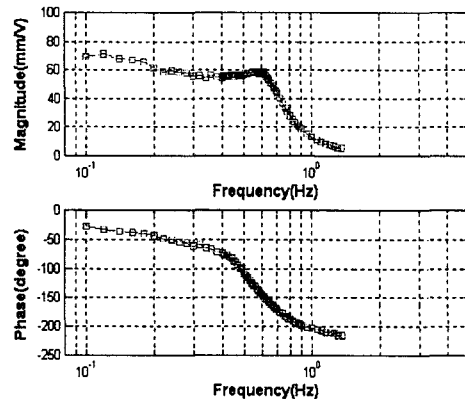


Fig. 10 Frequency Response of Displacement of the LMD to Input Control Voltage

5. LMD의 수학적 모델

LMD의 기계적인 운동방정식은 식 (5)와 같다.

$$m_d \frac{d^2 x}{dt^2} = k_T i - k_d x - c_d \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

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

코일에서의 전압방정식은 식 (6)과 같다.

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

여기서 V_c 은 인버트를 통해 코일에 공급되는 전압, R 은 코일 저항, L 은 코일 인덕턴스, dx/dt 는 가동 질량의 속도이다. 식(6)에서 오른쪽의 두 번째 항은 전류변화에 따른 모터의 기전력항이며, 오른쪽 세번째 항은 자계속에서 코일이 운동함에 의해 발생하는 속도 기전력항이다.

제어 입력 전압과 인버트를 통해 코일에 공급되는 전압은 식 (7)과 같은 관계가 있다.

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

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

식 (5), (6), (7)에서의 제어 파라미터들을 해석 및 실험을 통하여 산정하였다. 해석에서는 추력 및 유기 기전력 상수를 식 (1)에서, 코일 인덕턴스는 철심 포화를 고려하기 위하여 유한요소법을 통해 해석하였다. 실험에서는 개방회로 실험을 통해 얻은 가동질량의 속도와 코일에 유기되는 전압 파형에서 추력 및 유기기전력 상수를 산정하였으며, 감쇠계수는 자유진동시의 대수감쇠율을 통해 설정하였다. Table 3은 해석 및 실험을 통해 얻은 제어 파라미터를 비교하여 보여주고 있다.

식 (5), (6), (7)을 식 (8)의 상태방정식으로 표현할 수 있다.

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

$$\text{여기서 } X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K}{M} & -\frac{C_d}{M} & \frac{k_T}{M} \\ 0 & -\frac{k_E}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G_i}{L} \end{bmatrix} \text{이다.}$$

출력을 LMD의 변위로 두면 출력방정식은 식 (9)와 같다.

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

여기서 $C = [1 \ 0 \ 0]$, $D = [0]$ 이다.

Fig. 11은 식 (8)과 식 (9)로 계산한 제어 입력전압에 대한 LMD의 변위에 대한 주파수 응답을 실험 결과와 비교하여 보여주고 있는데, 대체로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Table 3 Control Parameters

항 목	해석값	실험값
유기 기전력 상수	150 [Vsec/m]	120 [Vsec/m]
코일 DC 저항	3.20 [Ω]	3.16 [Ω]
코일 인덕턴스	0.863 [H]	1.04 [H]
가동 질량	1500 [kg]	
강성 계수	14,200 [N/m]	
감쇠 계수	0.1	

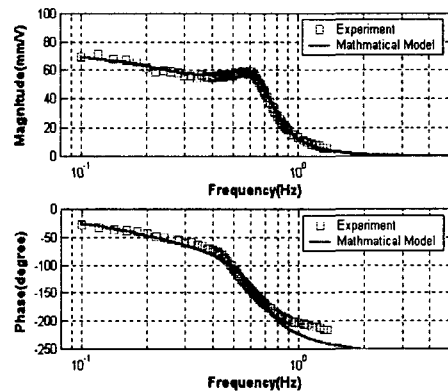


Fig. 11 Comparison of Frequency Responses of Displacement of the LMD to Input Control Voltage

6. 결론

고층 건축 구조물의 진동 제어에 실제로 이용될 수 있는 대용량의 하이브리드형 리니어 모터 댐퍼를 설계 및 제작하였다. 제작된 리니어 모터 댐퍼는 1,500kg의 가동질량을 갖고 있으며, 시험대상 철골구조물의 1차 모드 고유 진동수인 0.51Hz에서 250mm의 변위로 움직일 수 있다. 또한, 제작된 리니어 모터 댐퍼의 동적 응답 특성을 실험과 이론적으로 조사하였다.

본 연구를 통하여 대용량의 리니어 모터 댐퍼의 설계 및 제작 기법이 확립되었으며, 제작된 리니어 모터 댐퍼는 앞으로 시험 대상 철골 구조물인 유니스 타워에 탑재되어 이의 진동 제어 실험에 이용될 것이다.

후 기

본 연구는 산업 기반 기술 개발 사업 중 “초고층 철골 구조물의 진동 제어 장치 실용화에 관한 연구”사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사사를 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.T.Y.Chung, S.J.Moon and S.M.Jang (1999), “Active Control on the structural vibration under base excitations using a linear oscillatory actuator”, Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.10, pp.203-214
- 4.정태영, 문석준, 정종안, 박희창, 장석명 (1997), “Linear Oscillatory Actuator를 이용한 구조물 진동의 능동제어 연구”, 한국소음진동공학회지, 제7권 2호, pp.311-317

- 5.장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영 (1999), “리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수도출”, 전기학회 논문지, 제48B권 5호, pp.241-248