

건축 구조물의 진동 제어용 하이브리드형 대용량 리니어 모터 댐퍼의 개발

論文

51B-11-1

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

鄭相燮* · 張錫明** · 李成浩*** · 尹仁基§
(S. S. Jeong · S. M. Jang · S. H. Lee · I. K. Yoon)

Abstract - As recent trends in structural construction have been to build taller and larger structures than any time in the past, they have had high flexibility and low damping that can cause large vibration response under severe environmental loading such as earthquakes, winds, and mechanical excitations. The damper with mass and spring is one approach to safeguarding the structure against excessive vibrations. In this paper, a large capacity hybrid-type linear motor damper(LMD) 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, 1,500 kg up to ± 250 mm strokes at the first mode natural frequency of the building structure model, 0.51 Hz. Linear motor is consisted of the fixed coil and the movable NdFeB permanent magnets field part. The PM field part composed magnet modules and iron yoke, is the damper mass itself, 1500 kg. LMD therefore has a simplified structure and requires a few elements in the driving system, being compared with a rotary motor damper and a hydraulic damper. However, the manufacture of large PM linear actuator is difficult because of the limit of PM size and the attraction and repulsion at the assembly of PM. Therefore, large damper system is manufactured and tested for dynamic characteristics and frequency response.

Key Words : vibration control, hybrid mass damper(HMD), linear motor damper(LMD)

1. 서론

최근의 건축 구조물은 대형화, 고층화, 경량화 및 細長화 되는 추세에 있으며, 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],[2]. 이 중 가동 질량을 부가적으로 설치하여 이의 관성력을 이용하는 TMD(Tuned Mass Damper ; 동조 질량 制振機), AMD(Active Mass Damper ; 능동 질량 制振機), HMD(Hybrid Mass Damper; 복합 질량 制振機)와 같은 장치들은 실제 많은 건축 구조물에 설치되어 지고 있다[3]-[5].

한편, 구조물의 진동제어는 1970년대 이후 디지털 신호처리 및 컴퓨터 기술의 발전에 힘입어 고층빌딩이나 교량 등의 대형 구조물의 진동을 액추에이터를 이용하여 능동적으로 제어하는 것이 가능하게 되었다. 그리고 대부분의 대형 구조물의 경우에는 복수주파수 성분 및 과도하중이 작용하고 있으므로, 이에 대한 제진성 및 신뢰성이 높은 대용량 능동

제어 시스템의 개발이 필요하다. 이 분야의 연구는 미국 및 일본 등 국내외에서 활발하게 이루어지고 있다[2],[5].

그러나 지금까지 진동 제어의 가동 질량을 움직이는 구동 시스템으로 유압이나 회전형 서보 모터를 사용하였다. 유압식의 경우에는 유압펌프, 유압모터, 오일탱크, 냉각장치, 압력계, 각종밸브, 여과기 등 많은 요소가 필요하므로 시스템이 복잡하고 보수유지비가 많이 든다. 또한 회전형 서보 모터식은 캠, 기어, 클러치, 벨트, 스크류 등 기계적인 운동 변환장치를 이용하여 회전운동을 직선운동으로 변환시키므로 시스템의 효율이 낮고 소음발생, 마모 등이 필수적으로 수반되는 단점을 가진다. 반면에 리니어 모터는 직선방향으로 미는 힘을 직접 발생시키므로 기계적인 운동 변환장치가 필요치 않고 빠른 응답 속도를 얻을 수 있는 장점이 있다 [6]-[12]. 따라서 유압이나 회전형 모터식에 비해 시스템의 효율적인 운전과 기능에 있어서 절대적으로 유리하다.

따라서 본 저자들은 가동코일형 리니어 모터를 구조물의 진동 제어에 적용하여 우수한 성능을 확인한 바가 있다 [6]-[8]. 그러나 이전 연구들에서는 실험실 규모의 소형 리니어 모터에 관한 연구가 진행된 바 있으나, 본 연구에서는 대형 건축 구조물에 적용이 가능한 HMD인 대용량 리니어 모터를 이용한 制振機(Linear motor damper : 이하 LMD)를 개발하였다[19]. 특히 본 연구 모델은 일반적인 가동코일형 리니어 모터와 달리 코일이 고정되어 있고 영구자석과 철심이 가동되므로 제자부의 역할과 가동질량의 역할을 동시에 함으로써 스프링과 함께 수동 댐퍼로도 사용될 수 있도록 설계·제작되었다. 따라서 이를 위해 영구자석과 철심

* 正會員 : LG 電子 DA研究所 Comp. 그룹 選任研究員

** 正會員 : 忠南大學校 電氣工學科 教授 · 工學博士

*** 正會員 : 忠南大學校 電氣工學科 博士課程 修了

§ 正會員 : 忠南大學校 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2002年 1月 15日

最終完了 : 2002年 8月 28日

요크는 자체가 가동 질량하므로 1500 kg이 되도록 설계하였으며 NdFeB의 영구자석이 총 234개로 구성된 계자와 스테인레스 강 재질의 보빈에 감겨진 코일로 이루어지는 리니어 모터를 제작하였다. 또한 시스템의 주파수 응답, 동특성 등을 전체적으로 파악하고자 전압·운동 방정식을 이용하여 LMD의 동특성 시뮬레이션 알고리즘을 개발하였다. 한편, 특성 및 성능 실험시 전기량과 기계량을 온-라인으로 획득할 수 있는 자동 계측 시스템을 구축하고 이를 토대로 제어 정수를 도출하였으며 동특성 실험과 주파수 응답 특성 실험을 통해 스트로크와 위상 특성을 얻었다. 그리고 이를 시뮬레이션 결과와 비교 검토함으로써 대형 구조물의 진동 제어를 위한 기초 자료를 얻었다.

2. 시험 구조물과 리니어 액추에이터의 설계

2.1 시험 구조물

하이브리드형 LMD를 이용한 진동제어 대상 구조물은 그림 1(a)와 같은 5층 철골 구조물로서 총 질량은 100 ton, 가로 6 m, 세로 6 m, 총 높이는 30 m이다. LMD는 5층에 설치되어 구조물 진동에 따른 제어력을 발생시킨다. 그리고 구조물 기동은 I형 빔이므로 약축 및 강축 방향을 가지는데, 제어 실험의 대상 방향은 약축이다. 구조물의 주파수 응답 특성을 얻고자 3층에 설치된 불평형 부하를 갖는 회전형 모터를 이용하여 철골 구조물을 0.35~1.35 Hz까지 주파수별로 가진 시킨 후에 각 층에서의 가속도를 측정하였다. 그림 1(b)는 구조물의 4층에서의 가속도 측정 결과와 이를 최소자승법에 의해 커브-피팅한 결과를 비교한 것이다. 실험 결과로부터 구조물은 약축 방향으로 1차 모드의 고유 진동수는 0.51 Hz, 감쇠 계수는 0.2 %를 가짐을 알 수 있다.

2.2 설계 모델

LMD 설계 모델은 시험 구조물의 총 질량의 1.5%인 1500kg의 가동 질량과 0.51Hz의 공진 주파수를 얻기 위한 스프링으로 그림 2와 같이 구성하였다. 따라서 구조물이 외력에 의해 약한 진동이 있는 경우에는 액추에이터를 구동시키지 않고도 수동 댐퍼의 역할을 할 수 있다. 또한 영구자석과 철심, 코일로 구성된 액추에이터는 구조물에 과도한 진동이 있는 경우에 가동 질량을 구동시켜 제어력을 발생시킨다. 따라서 수동 제진기와 능동 제진기의 역할을 동시에 수행할 있으므로 하이브리드형 댐퍼(HMD)라 정의한다.

또한 본 모델은 가동 코일형 리니어 액추에이터와 구동원리는 가동부가 반대이다. 즉, 코일이 고정되고 영구자석과 철심이 가동되므로 영구자석과 철심 요크가 액추에이터의 계자 역할과 가동 질량의 역할을 동시에 수행함으로써 시스템의 경량화와 컴팩트화를 얻어낼 수 있다. 따라서 가동자가 x 방향으로만 운동하고 모터의 스택 길이(z 방향), 코일 턴수 등의 설계사양을 고려하면 발생 추력은 식 (1)과 같다.

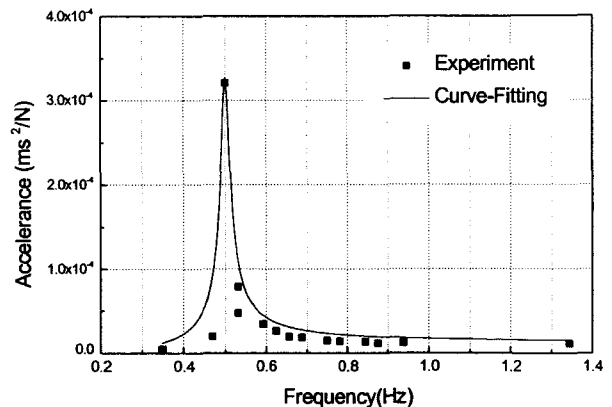
$$F_x = 2WNB_g i = k_E i \tag{1}$$

여기서 W : 모터의 폭, N 은 코일 턴수, B_g 는 영구자석에

의한 공극자속밀도, i 는 코일 전류, k_E 는 추력 및 유기전압 상수로 $2WNB_g$ 이다.



(a) Test structure



(b) Accelerance at the 4th Floor

그림 1 시험 구조물과 공진 주파수

Fig. 1 Test Structure and resonance frequency

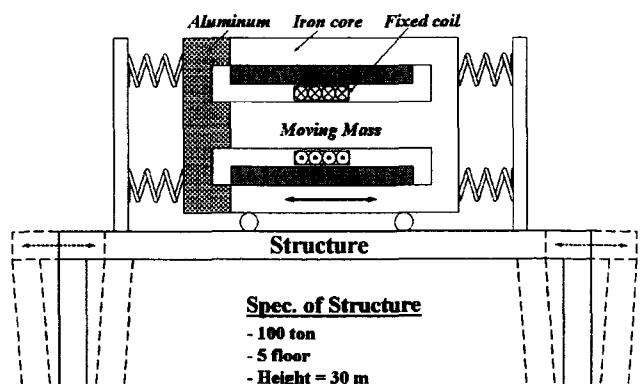


그림 2 리니어 모터 댐퍼의 개략도

Fig. 2 Schematic of linear motor damper

2.3 설계 특성 및 결과

LMD는 스프링이 없는 경우를 가정하여 1500 kg의 질량을 0.51 Hz에서 최대 스트로크 ±250 mm까지 왕복 운동시켜야 하며, 제자부인 영구자석과 철심은 자체 질량이 되므로 1500 kg이 되도록 설계해야 한다. 또한 NdFeB 영구자석의 크기는 제작의 용이성을 고려하여 상품화된 제품, 50.8×50.8×25.4 mm으로 선정하였다. 그리고 제작과정에서 영구자석의 컷팅에 따른 가공비와 착자 비용을 줄이기 위해 설계시 영구자석은 정수개로 고려하였다. 또한 LMD의 안정도를 고려하여 모터는 가능한 높이는 낮고 폭이 넓은 구조를 갖게 설계하였다.

LMD의 설계는 가동코일형 리니어 모터와 동일하므로 참고문헌 [13]의 설계 특성방정식과 알고리즘을 사용하였다. 그림 3은 모터의 길이방향 영구자석수를 고려한 공극 길이에 따른 능동 질량, 즉 철심 요크와 영구자석의 총 질량을 나타내 준다. 공극 길이와 영구자석수가 증가할수록 질량은 지수 함수적으로 감소한다. 그림 4는 길이방향 영구자석수를 고려한 공극 길이에 따른 모터의 폭을 보여준다. 그림 3을 토대로 그림 4의 특성곡선 위에 설계 목표 질량 1500 kg 선을 그리면 자석수에 따른 여러 개의 설계점을 찾을 수 있다. 본 설계에서는 스테인레스 스틸 재질을 갖는 코일 보빈의 제작 및 강도 등을 고려하여 공극은 50 mm, 자석수는 13개로 선정하였다. 따라서 설계 요구사항과 결과는 표 1에서 제시하였다.

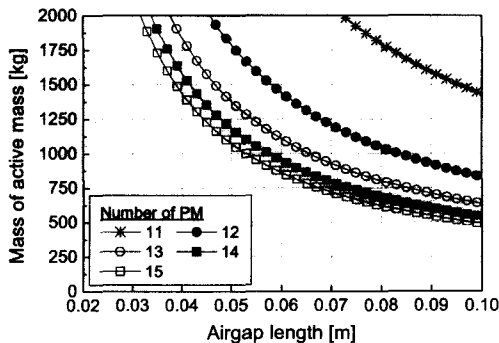


그림 3 공극길이에 따른 고정자 능동질량 변화
Fig. 3 Mass of moving part(PM and yoke) according to airgap length

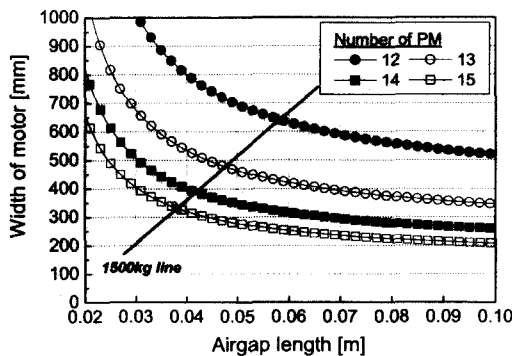


그림 4 공극에 따른 모터의 폭 변화
Fig. 4 Width of motor according to airgap length

표 1 리니어 모터 댐퍼의 설계 사양

Table 1 Design specification of hybrid LOA damper

항 목		사 양
최대 입력 전압 [V]		180
최대 입력 전류 [A]		23
최대 스트로크 [mm]		±250
영구자석 (NdFeB)	밀도 [kg/m ³]	7300
	잔류자속밀도[T]	1.1
	총 자석길이 [mm]	650(13개)
코일 (단코일형)	턴 수 [turn]	660
	단면적 [mm ²]	5.4
	길이×높이 [mm]	160×37
요크	두께 [mm]	100
	자속밀도 [T]	1.8
	폭 [mm]	450
공극 [mm]		50
공극자속밀도 [T]		0.3
발생력 [kN] at 10 A		1.9

2.4 전압 · 운동방정식과 상태방정식

그림 2와 같은 리니어 모터로 구동되는 질량/스프링 시스템의 기계적인 운동방정식은 식 (2)와 같다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = k_T i - kx - C_d \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

여기서 M : 가동부 질량, k_T : 추력 상수, k : 등가 스프링 상수, C_d : 마찰계수, d^2x/dt^2 : 가동자 가속도이다. 또한 리니어 모터의 전압방정식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_E \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

여기서 R , L , dx/dt 는 각각 코일저항, 코일 인덕턴스, 가동자의 속도이다. 식 (3)에서 오른쪽의 두 번째 항과 세 번째 항은 각각 변압기 기전력항과 속도 기전력항이다. 따라서 식 (2)와 (3)을 이용하여 식 (4)와 같은 상태방정식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{M} & -\frac{C_d}{M} & \frac{k_T}{M} \\ 0 & -\frac{k_E}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V \quad (4)$$

여기서 상태변수는 변위와 전류이다. 시스템 출력은 가동자 속도 $y = Cx + Du$ 를 이용하면 식 (5)와 같이 표현된다.

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x \\ x \\ i \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. LMD 제작과 전달함수 도출

3.1 LMD 시스템의 제작

(1) 대형 영구자석 계자부와 코일부

대용량 영구자석형 리니어 모터를 제작하기 위해서는 영구자석과 철심 요크로 구성된 대형 계자부의 제작이 필요하다. 그런데 이를 위해 대형 영구자석을 단일체로 제작하고 착자시키는 것은 불가능하므로 여러 개의 자석편을 조립하여 계자를 구성해야 한다. 그러나 여러 개의 자석편을 대형 철심 요크에 조밀하게 직접 부착시키는 작업은 두 자석 사이의 반발력과 흡인력 때문에 매우 어렵다. 특히, 본 모델의 경우에 표 1의 설계 사양에서 보는 바와 같이 코에너지 밀도를 갖는 50.8mm×50.8mm×25.4mm 크기의 NdFeB 자석편이 사용되므로 반발력과 흡인력은 더욱 클 것이다. 그림 5는 두 자석편을 철심 요크에 10 mm와 30 mm의 간격으로 부착된 상태에서 자석편사이의 반발력을 유한요소법으로 해석한 결과이다. 두 자석편이 10 mm 간격 상태에서 반발력은 200 N 정도이며 간격이 작아질수록 반발력은 크게 증가하였다. 따라서 이러한 자석을 대형 철심 요크에 총 234 개를 부착시키는 것은 더욱 어려울 것이다. 따라서 대용량 가동 자석형 리니어 왕복 액추에이터의 제작을 용이하게 하기 위해서는 ① 여러 개의 자석을 모듈로 제작해야 하며, ② 이를 위해 영구자석 케이스를 사용하고, ③ 반발력을 최소로 하여 조립하기 위해 임의의 자로를 형성시키고, ④ 모든 공구는 비자성체로 제작해야만 한다. 그림 6은 영구자석 모듈과 스테인레스 스틸 보빈을 갖는 코일부를 보여준다.

(2) 보호장치

가동부의 왕복 운동시 최대 범위는 ±250 mm로 이 범위를 초과할 경우 스프링부, 요크 등을 충격한다. 따라서 이를 방지하기 위해 ±210 mm 범위에 두 개의 기계식 리미트 스위치를 설치하여 가동부가 스위치에 닿을 때 인버터를 OFF 시킨다. 또한, 가동부의 관성으로 인한 충격을 방지하기 위해 양쪽 스톱퍼에 댐퍼를 설치하였다.

(3) LMD 조립 사진

그림 7은 스프링과 보호장치, 변위 센서는 부착된 리니어 모터 댐퍼의 조립 완성 사진이다.

3.2 구동 및 계측 시스템 구성

그림 8은 리니어 모터 댐퍼를 구동하고 성능실험하기 위한 시스템 구성도이다. 인버터는 단상 60 Hz, 220 V를 입력 받고 5 Hz 이하의 PWM 전압을 출력하며 인버터는 외부에서 제어신호(±5V)가 입력되고 이 신호를 증폭하여 리니어 모터에 공급하게 된다. 인버터 출력 전압과 전류는 PT와 CT를 통해 센싱되며 가동자 변위는 위치센서인 Wire형 전위차계에 의해 계측된다. 제어 신호와 계측된 세 신호는 신호조정기(signal conditioner)에서 필터링과 증폭을 거쳐 A/D 보드를 통해 컴퓨터로 입력된다.

한편, 제정수 산정과 동특성 실험 등 LMD 성능실험을 위한 자동계측 시스템은 상용 소프트웨어인 LabVIEW에 의해 프로그래밍 되었으며 그림 9와 같은 그래픽 프로그램과

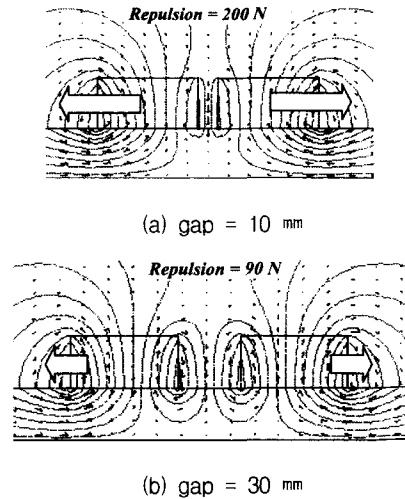


그림 5 영구자석편 사이의 반발력
Fig. 5 Repulsion between permanent magnets

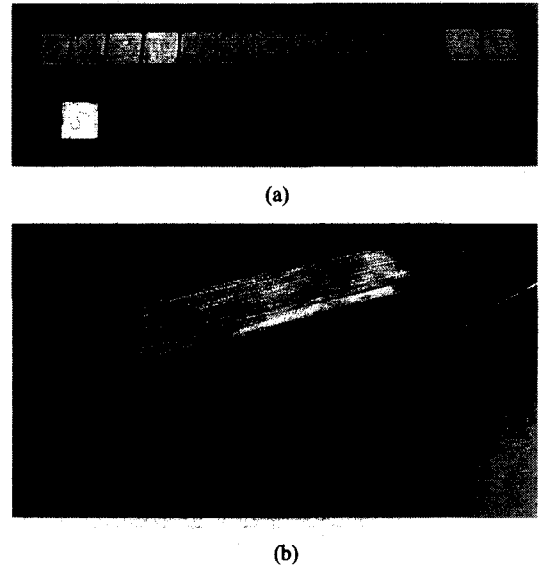


그림 6 영구자석 모듈(a)과 코일부 사진(b)
Fig. 6 Photograph of PM module(a) and coil part(b)

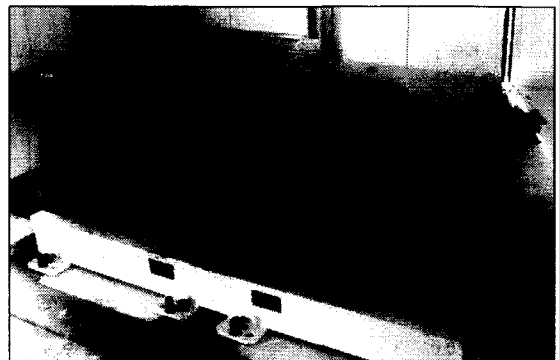


그림 7 리니어 모터 댐퍼 사진
Fig. 7 Photograph of linear motor damper

모니터링 패널로 구성된다[14]-[16]. 모니터링 패널에서는 전류, 전압을 비롯하여 역률, 전력 등의 전기량과 스트로크 크기, 각 신호의 위상차가 실시간으로 수집된다. 모든 신호는 인버터의 노이즈의 영향을 줄이고 정확한 신호를 얻기 위해 프로그램상에서 소프트웨어 저주파수 대역 필터를 사용하였다. 이러한 자동계측 시스템은 데이터 수집 후 수작업으로 이루어진 각종 물리량을 자동으로 분석할 수 있다.

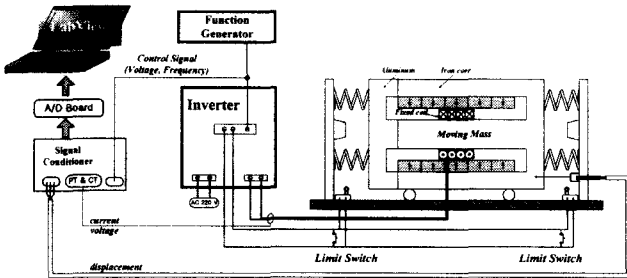
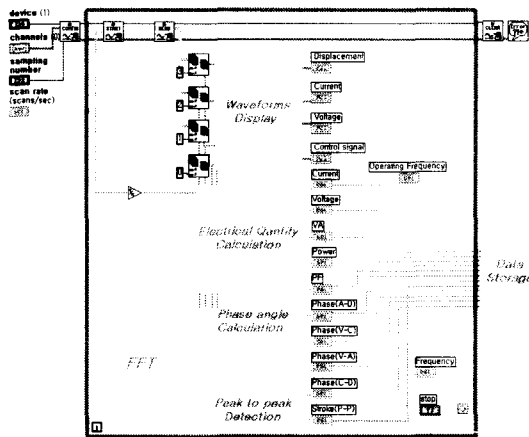
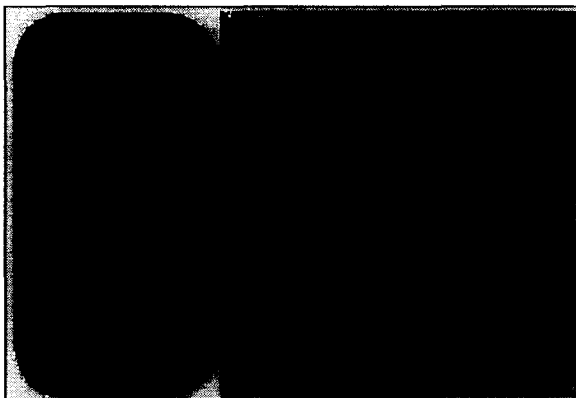


그림 8 동특성 실험 구성도
Fig. 8 Configuration for dynamic test



(a) graphic program



(b) monitoring panel

그림 9 자동계측을 위한 모니터링 패널
Fig. 9 Monitoring panel for automatic measurements

3.3 제어 정수 도출과 전달함수

제어 정수 중 코일 인덕턴스는 유한요소 해석과 턴-온 실험을 통해 인덕턴스를 구하였고 유기전압 상수는 가동자를 외력에 의해 왕복 운동시킨 후 코일 개방단에서 유기되는 전압과 가동자 변위의 변위의 미분치, 즉 속도를 통해 산정하였다[13]. 그림 10은 개방회로 실험에 의한 유기전압 파형과 가동자의 변위를 보여준다.

그림 11은 가동자의 감쇠 파형으로 이를 통해 구한 감쇠계수를 구할 수 있다. 즉, 감쇠계수는 대수 감수율 δ 를 통해 얻을 수 있는데, 대수 감수율은 식 (6)과 같다.

$$\delta = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (6)$$

여기서 x_i 는 i 번째 감쇠 파형의 스트로크의 크기이다. 따라서 감쇠계수 ζ 는 식 (7)과 같다.

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (7)$$

그리고 감쇠 주파수는 식 (8)과 같다.

$$f_d = (t_{i+1} - t_i)^{-1} \quad (8)$$

여기서 t_i 는 i 번째 감쇠 파형의 최대 변위의 시간이다. 따라서 식 (2)의 마찰 계수 C_d 는 식 (9)와 같다.

$$C_d = 4M\zeta\pi f_d \quad (9)$$

표 2는 유한요소해석과 실험에 의해 도출된 LMD의 제어 정수이다. 그리고 이를 통해 식 (4)의 상태 행렬을 구하고 입력전압과 LMD 출력 변위와의 전달 함수를 계산하면 식 (10)과 같다[17].

$$G(s) = \frac{0.1159}{s^3 + 4.148s^2 + 27.97s + 32.27} \quad (10)$$

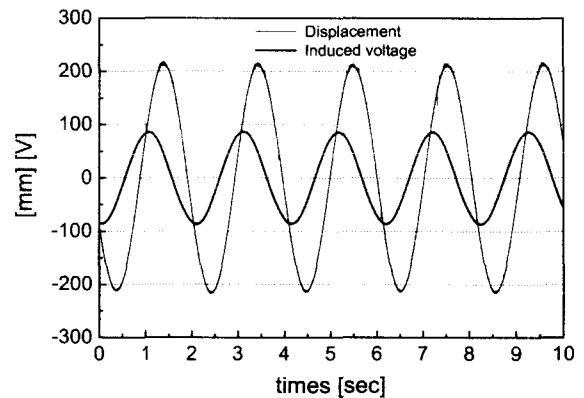


그림 10 개방회로 실험에 의한 변위와 유기전압 파형
Fig. 10 Waveform of displacement and induced voltage at open test

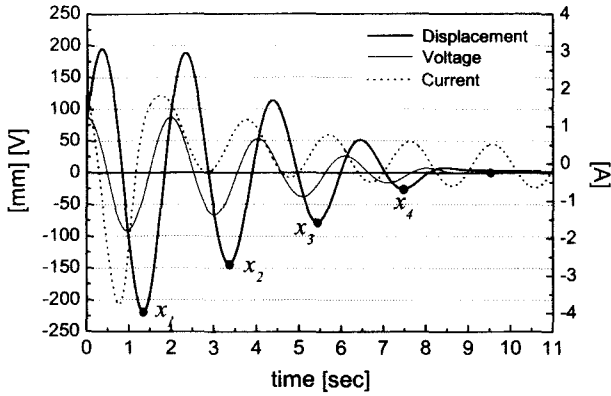


그림 11 감쇠 파형
Fig. 11 Damping waveform

표 2 LMD의 제어 정수와 전달함수
Table 2 Control parameters of LMD

항 목	해석값	실험값
유기기전력 상수 [V · sec/m]	160	150
코일 DC 저항 [Ω]	3.20	3.16
코일 인덕턴스 [H]	0.863	1.04
가동체 질량 [kg]	-	1500
스프링 상수 [N/m]	-	15,402
감쇠 계수 [%]	-	7.9

4. 동특성과 주파수 특성

4.1 동특성 시뮬레이션과 실험

4.1.1 동특성 시뮬레이션 블록도

정현적인 가변주파수 전압원에 의해 구동되는 LMD의 시뮬레이션 블록도는 식 (4)의 상태방정식에 근거하여 그림 12와 같이 구성하였고 다음과 같은 가정과 조건을 두었다.

- ① 액추에이터의 PWM 단상 인버터 전원은 고조파 성분이 함유되어 있으나 본 시뮬레이션에서는 기본파만을 고려한 정현적인 가변 주파수 전압원으로 모델링하였다.
- ② 동특성 실험시 자석길이보다 짧은 단코일형이며 비교적 저전류가 흐르므로 전기자 반작용과 코일 위치에 따른 인덕턴스 변화는 고려하지 않았다.
- ③ 가동자는 리미트 스위치에 의해 최대 이동범위인 ±210 mm로 제한하였다.

그리고 시뮬레이션 알고리즘과 동특성 시뮬레이션은 MATLAB SIMULINK를 이용하였다[18].

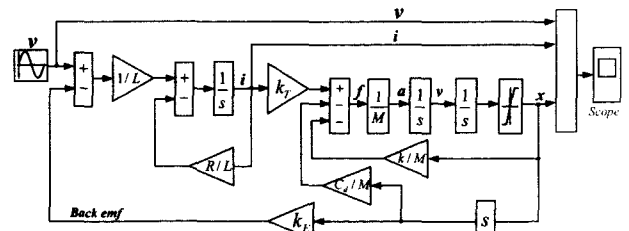


그림 12 동특성 시뮬레이션을 위한 블록도
Fig. 12 Block diagram of dynamic simulation

4.1.2 입력 주파수에 따른 동특성

본 절에서는 동특성 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 제어 정수 도출의 타당성과 위상 특성 등을 검토하였다. 그림 13에서 그림 16까지는 주파수에 따른 정상상태에서의 전압과 전류, 가동자 변위의 순시 파형을 보여준다. 그림 13은 0.4 Hz에서의 순시 파형으로 전류와 변위의 크기, 전류의 뒤짐 현상은 시뮬레이션과 실험 결과가 일치하였다. 그러나 전압과 전류의 위상차이는 시뮬레이션 결과가 좀 더 크게 나타났다. 그림 14는 0.45 Hz에서의 순시파형으로 실험 결과에서 전압과 전류의 위상 차이는 매우 작으며 실제 0.47 Hz에서 동상이 된다. 그러나 시뮬레이션 결과에서는 전압과 전류의 위상차는 여전히 크게 나타났다.

그림 15는 0.6 Hz에서의 순시파형으로 실험결과에서 전류는 전압에 비해 약 75° 정도의 앞서는 진상이 되었다. 또한 가동자 스트로크는 0.4 Hz의 그림 13과 0.45 Hz의 그림 14와 비교해 볼 때 가장 크게 나타났다. 그러나 스트로크 크기를 보면 실험과 시뮬레이션 결과는 50 mm이상의 차이를 보였다. 그림 16은 1.0 Hz에서의 특성 파형으로 전압과 전류의 위상은 거의 동상이 되었으며 스트로크는 매우 작아졌으며 전류는 좀 더 증가하는 특성을 보였다.

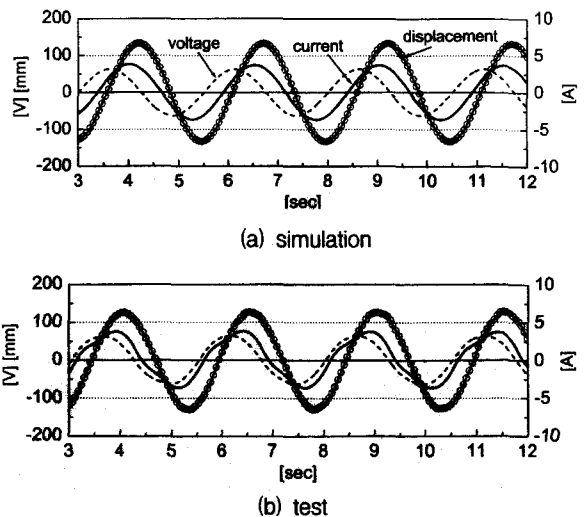


그림 13 동특성 시뮬레이션 및 실험 결과(주파수=0.4Hz)
Fig. 13 Results of dynamic simulation and test

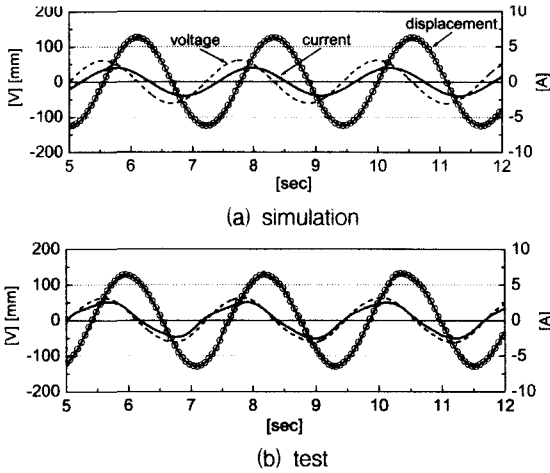


그림 14 동특성 시뮬레이션 및 실험 결과(주파수=0.45Hz)
Fig. 14 Results of dynamic simulation and test

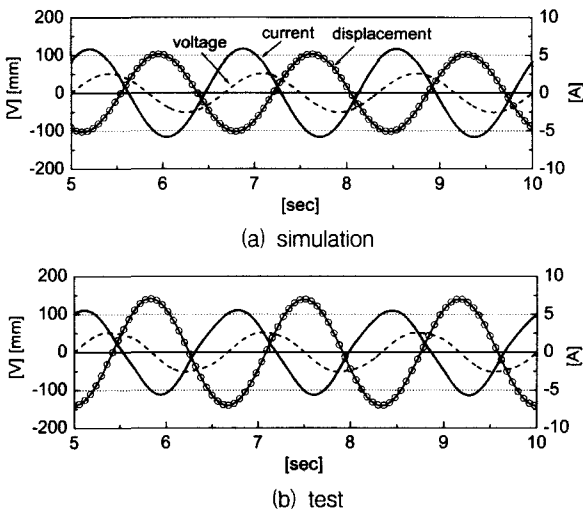


그림 15 동특성 시뮬레이션 및 실험 결과(주파수=0.60Hz)
Fig. 15 Results of dynamic simulation and test

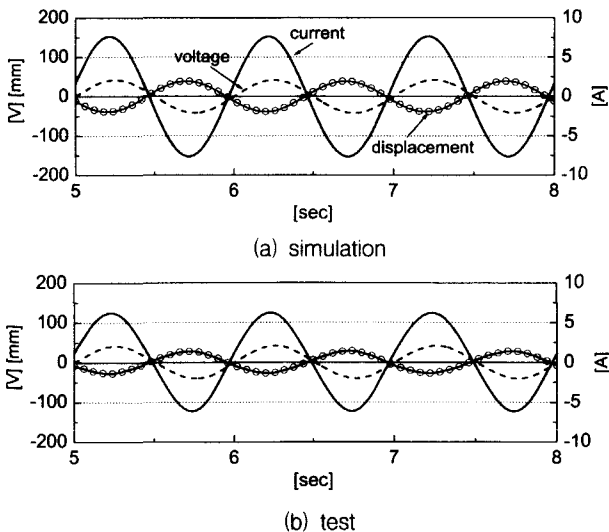
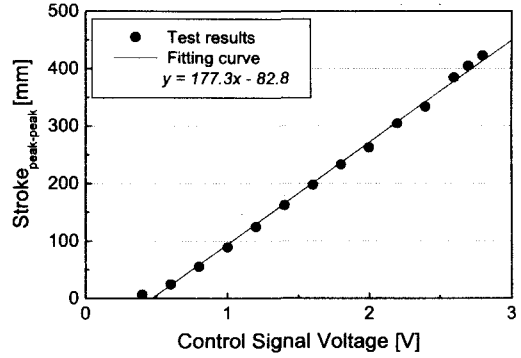


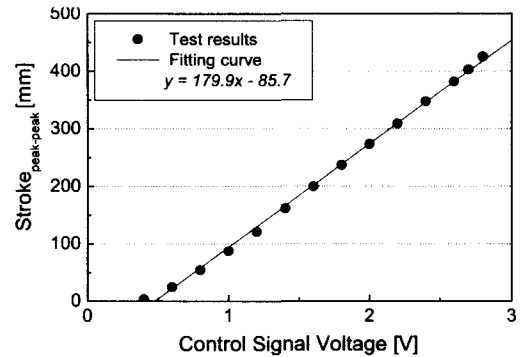
그림 16 동특성 시뮬레이션 및 실험 결과(주파수=1.00Hz)
Fig. 16 Results of dynamic simulation and test

4.2 제어 전압에 따른 스트로크의 선형 특성

그림 17은 0.4 Hz와 0.51 Hz에서 제어신호의 입력 전압에 대한 스트로크 특성으로 제어 전압 0.5 V이하에서는 응답이 거의 없으며, 입력에 대한 출력 스트로크의 직진성은 매우 뛰어나며 다른 주파수 입력시에도 동일한 특성을 가짐을 확인하였다.



(a) 0.4 Hz



(b) 0.51 Hz

그림 17 제어 전압에 따른 스트로크 특성
Fig. 17 Stroke according to control voltage

4.3 주파수 응답 실험 결과

4.1절에는 0.40 Hz, 0.45 Hz, 0.6 Hz, 1.0 Hz에서의 전압과 전류, 가동자 변위의 순시 특성을 살펴보았으나 주파수에 따른 시스템의 전반적인 응답 특성은 알 수가 없다. 따라서 본 절에서는 주파수에 따른 시스템 응답의 크기와 위상 특성을 살펴보았으며, 이는 LMD의 시스템 모델링과 제어기 설계에 중요한 자료가 된다.

주파수 응답실험은 그림 8의 동특성 실험 구성도에서 함수 발생기의 입력 전압의 크기를 1.0 V, 1.5 V, 2.0 V, 2.5 V로 각각 고정시키고 주파수를 변화시키면서 모터에 입력되는 전압과 전류의 실효치, 유효·무효 전력, 역률을 측정하였다. 또한 제어 신호와 인버터 출력 전압, 전류와 가동자 변위 사이의 위상차를 측정하였다. 그리고 이러한 많은 양의 주파수별, 전압별 동특성 실험은 그림 9의 모니터링 시스템에 의해 자동으로 계측되고 데이터 파일로 저장된다.

(1) 인버터의 출력 특성

그림 18은 입력 주파수에 따른 인버터의 출력 특성의 전압의 크기와 제어신호와의 위상차를 보여준다. 0.4 Hz이하에서는 출력 전압이 일정하다가 0.47 Hz까지 급격히 감소하였다. 그리고 다시 0.52 Hz까지 일정하다가 0.7 Hz까지는 급격히 전압은 감소하였으며, 0.7 Hz 이상에서는 좀 더 서서히 감소하는 경향을 갖는다. 또한, 그림 18(b)와 같이 주파수가 증가함에 따라 위상차는 증가하였으며 0.62 Hz에서는 최대 50° 까지 위상차를 갖는다.

(2) 가동자 변위 특성

그림 19는 입력 주파수에 따른 가동자의 변위 특성 곡선이다. 그림 19(a)는 피크-피크 스트로크 특성으로 제어전압에 따라 비슷한 경향을 보이지만 제어전압이 클수록 특이점이 확실히 나타난다. 피크-피크 스트로크는 0.47 Hz까지는 서서히 감소하다가 다시 증가하여 0.58 Hz에서 최대값을 갖고 그 이상의 주파수에서는 응답이 급격히 감소하였다. 그림 19(b)는 입력 주파수에 따른 제어신호와 출력 변위 사이의 위상차이를 보여준다. 입력 제어신호와 최종 출력인 변위 사이는 0.47 Hz와 0.7 Hz에서 각각 90° 와 180° 의 위상차를 갖는다.

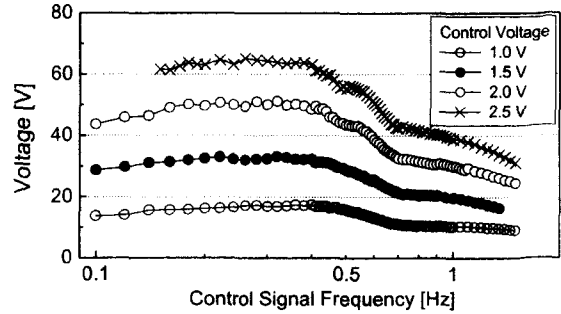
(3) 입력 전류 특성

그림 20은 주파수에 따라 액추에이터에 입력되는 전류 특성곡선이다. 그림 20(a)의 주파수에 따른 실효치 전류의 크기는 공진점 근처인 0.49 Hz에서 모터에 최소 전류가 입력되다가 0.74 Hz까지 전류는 급격히 다시 증가한다. 그리고 0.74 Hz 이상에서는 코일 인덕턴스에 의한 유도성 리액턴스의 증가로 다시 서서히 감소하는 경향을 갖는다. 그림 20(b)는 모터의 입력 전압과 전류와의 위상차로 0.47 Hz에서 전류는 지상에서 진상으로 바뀌고 0.58 Hz까지 위상차는 급격히 커져 최대가 된다. 그리고 다시 감소하는 경향을 갖는다.

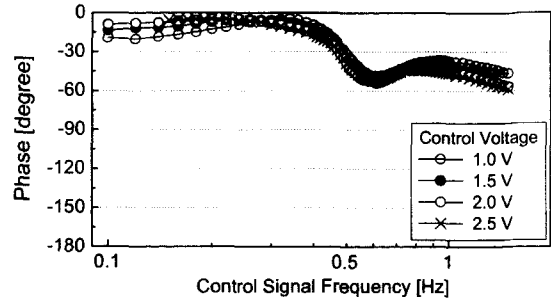
(4) 유효·무효 전력 특성

그림 21은 주파수에 따라 모터에 입력되는 유효·무효 전력 특성이다. 그림 21(a)는 유효전력 곡선으로 0.57 Hz에서 리니어 모터를 포함한 질량/스프링 진동 시스템은 최소 전력을 소비한다. 그리고 0.8 Hz 부근에서 다시 최대 전력을 소비하는 특이점을 갖는다. 그림 21(b)는 주파수에 따른 무효전력 곡선으로 0.47 Hz에서 유도성에서 용량성 무효전력으로 바뀌고 0.62 Hz 부근에서 용량성 전력은 최대값을 갖는다. 이와 같이 공진 주파수를 기점으로 유도성에서 용량성으로 바뀌는 것은 질량/스프링 시스템에서 질량을 갖는 가동자에 저장된 운동에너지와 스프링에 저장된 위치에너지 사이의 수수관계에 따라 가동자를 구동하는 모터의 전압과 전류의 결정되기 때문이다.

그림 22는 주파수에 따른 질량/스프링 진동 시스템의 역률 특성으로 0.47 Hz에서 지상에서 진상으로 바뀌고 0.6 Hz 근방에서 가장 역률이 낮다. 이러한 역률 특성은 그림 20(b)의 전압과 전류의 위상차와 그림 21(b)의 무효전력 특성 곡선을 통해서 재확인할 수 있다.

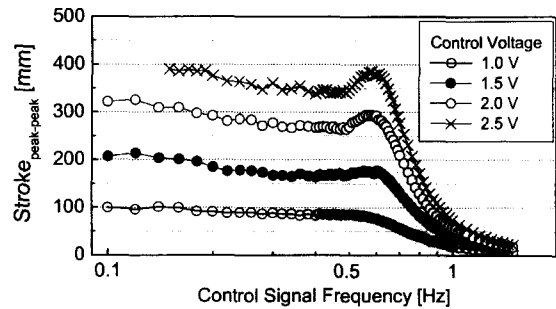


(a) RMS voltage

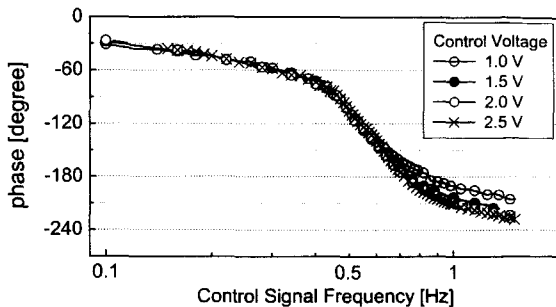


(b) phase between control signal and voltage

그림 18 주파수에 따른 인버터의 출력 특성
Fig. 18 Output voltage of inverter vs. frequency

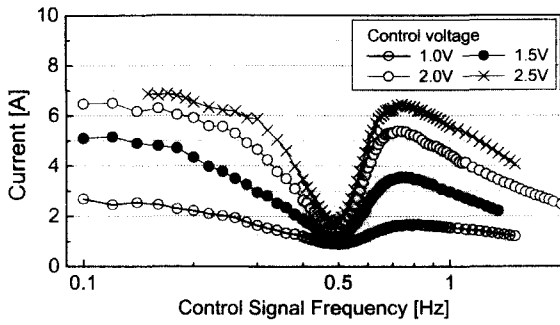


(a) peak-peak stroke

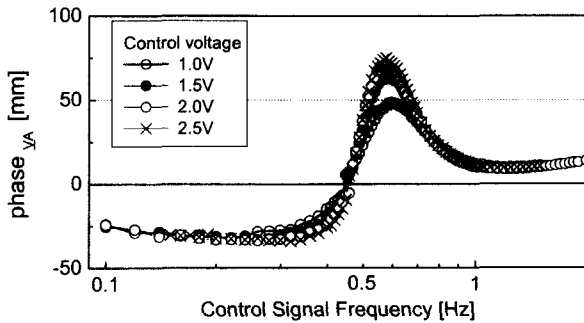


(b) phase between control signal and displacement

그림 19 주파수에 따른 출력 변위 특성
Fig. 19 Displacement of mover vs. frequency

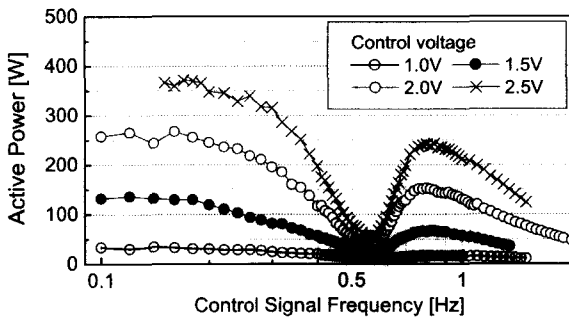


(a) RMS current

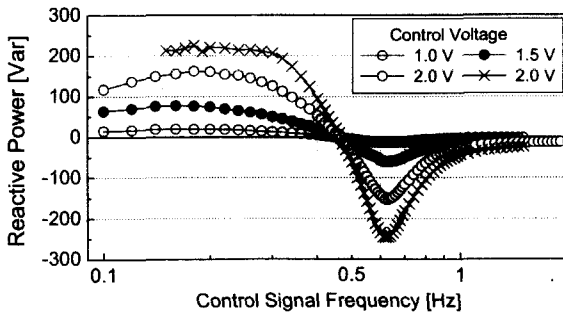


(b) phase between input voltage and current

그림 20 주파수에 따른 입력 전류 특성
Fig. 20 Input current of motor vs. frequency



(a) active power



(b) reactive power

그림 21 주파수에 따른 유효·무효 전력 특성
Fig. 21 Active and reactive power vs. frequency

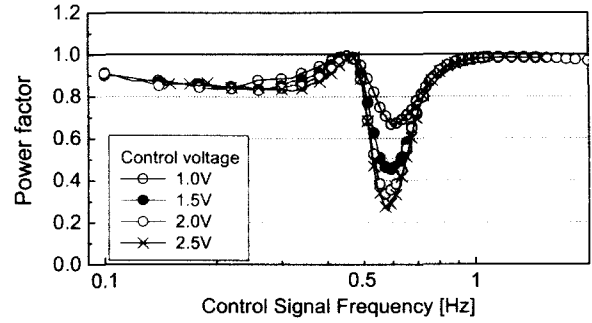


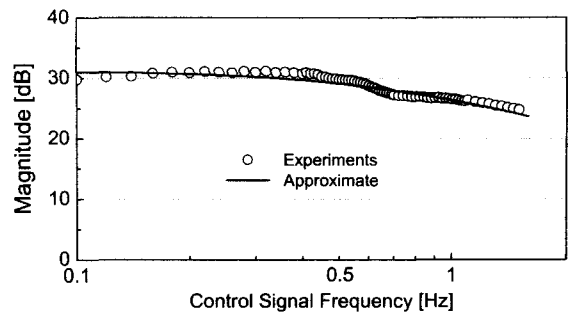
그림 22 주파수에 따른 역률 특성
Fig. 22 Power factor vs. frequency

4.4 인버터와 LMD 시스템의 보드 선도

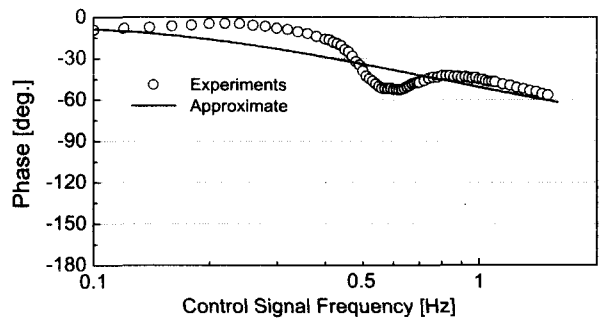
그림 23은 그림 18의 주파수에 따른 제어신호 전압과 인버터 출력 전압을 측정하여 얻어진 인버터의 보드선도이다. 실험에 의해 얻어진 보드 선도는 MATLAB을 이용하여 근사화 하였으며 이를 전달함수로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$G(s)_{in} = \frac{177s + 780}{s^2 + 10s + 22} \quad (11)$$

근사화된 보드선도의 위상관계에서 실험결과와 일치하지 않는 이유는 실험 결과의 위상이 짧은 주파수 범위에서 변화하므로 근사화 과정에서 점근선으로 표현되었기 때문이다.



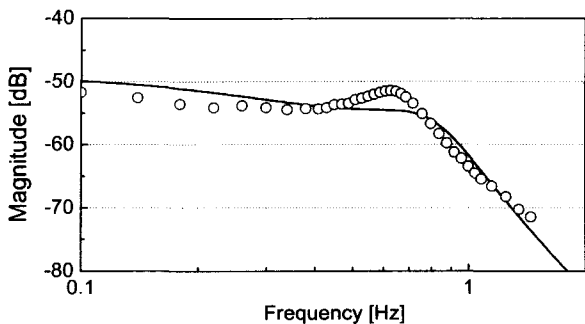
(a) magnitude



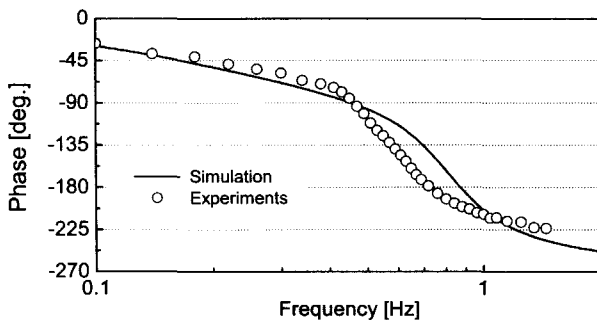
(b) phase

그림 23 실험에 의한 인버터의 보드 선도
Fig. 23 Bode plot of the inverter through experiments

그림 24는 질량/스프링 진동계를 포함한 LMD의 보드선도로 식 (10)의 전달함수와 그림 19의 주파수 응답 실험 결과를 비교하여 나타내었다. 그림 24(a)에서 모터의 입력 전압에 대한 스트로크의 이득은 초기값과 감소비는 시뮬레이션값과 실험값이 유사한 특성을 보이거나 피크치는 다르게 나타났다. 또한 그림 24(b)의 입력전압과 변위와의 위상차는 90° 까지는 거의 일치하였으나 90° 이상에서는 감소율이 실험 결과와 약간 다르게 나타났다. 이는 부하에 따른 인버터의 출력 특성의 변화, 스프링과 제동 계수의 비선형 등의 문제로 생각되며 좀 더 정확한 제어정수 도출이 필요함을 알 수 있다.



(a) magnitude



(b) phase

그림 24 시뮬레이션과 실험에 의한 LMD의 보드 선도
 Fig. 24 Bode plot of LOA damper through simulation and experiments

5. 결 론

본 논문에서는 대형 구조물의 하이브리드형 진동제어 시스템인 LMD의 설계 및 제작과 동특성 및 주파수 특성에 대해 다루었다. 이를 정리하면 다음과 같다.

① 진동제어 대상은 100톤의 5층 구조물로 리니어 모터 제진기(LMD)의 가동질량 1500 kg이며 이를 구동시키기 위해 대형 리니어 모터를 설계하였다. 특히, 본 연구 모델은 가동코일형 리니어 모터의 고정자인 철심과 영구자석을 능동질량으로 대체함으로써 시스템의 컴팩트화와 경량화를 이루었다.

- ② 영구자석을 갖는 대용량 리니어 모터 제작부를 제작함으로써 대형 구조물의 진동제어에의 응용 가능성을 제시하였다. 즉, 영구자석 제작부는 50.8mm×50.8mm×25.4mm 크기의 NdFeB 자석편 234개를 사용하였으며 자석 사이의 반발력과 흡인력을 최소화시키고 조립의 용이성을 위해 임의의 자로를 형성시켜 여러 개의 자석을 모듈로 제작하였다.
- ③ LabVIEW를 이용하여 자동계측 시스템을 구성하여 LMD의 제어 정수 도출과 동특성 실험을 수행하였다. 그리고 동특성 시뮬레이션을 통해 제어정수 도출의 타당성과 위상 특성 등을 검토하였다.
- ④ 0.1 Hz부터 1.5 Hz까지 주파수 응답 특성 실험을 수행하여 주파수에 따른 인버터 출력과 가동자 변위, 입력 전류와 전력 특성 등을 얻을 수 있었다. 그리고 이를 통해 리니어 모터로 구동되는 질량/스프링 진동계의 공진주파수와 전력의 수수관계를 확인할 수 있었다.
- ⑤ 주파수 응답 실험 결과를 통해 시스템 모델링과 제어기 설계에 필요한 인버터와 LMD의 전달함수와 보드선도를 얻었다.

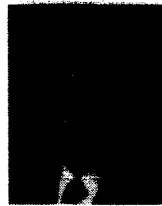
따라서 이상의 연구 내용과 결과는 리니어 모터를 건축구조물이나 선박 등의 대형 구조물 진동 제어에 응용 가능성을 확인하였으며 본 연구는 이를 위한 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] B.F.Spencer, Jr. and M.K.Saint, "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, 1997
- [2] "관제탑 사용성 개선을 위한 제진장치 타당성 조사," 연구결과보고서, 서울대학교 공학연구소, 1997
- [3] A. M. Reinhorn, "Full-Scale Implementation of Active Control. II: Installation and Performance," Journal of Structural Engineering, vol.119, no. 6, 1993
- [4] Salloway, A. J., Miller, C. E., "Active vibration and noise control," GEC Review, vol. 11, pp.138-145, 1996
- [5] M. C. Constantinou, T. T. Soong, G. F. Dargush, "Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit," Monograph series, Mutidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1998
- [6] T. Y. Chung, S. J. Moon and S. M. Jang, "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, 1999
- [7] 정태영, 분석준, 정중안, 박희창, 장석명, "Linear Oscillatory Actuator를 이용한 구조물 진동의 능동제어 연구," 한국소음진동공학회지, 제7권 2호, pp.311-317, 1997
- [8] 장석명 외 "능동 진동제어 시스템에의 보이스코일형

- LOA응용”, 전기학회 논문지, 제 46권 제 6호, pp. 862-868, 1997.6
- [9] Naila Mikhaeil-Boules, “Design and analysis of linear actuator for active vibration cancellation,” 30th IAS annual meeting, vol. 1, pp.469-475, 1995
- [10] T. Fujita, S. Fukuhisa, N. Murai, Y. Takahashi, K. Katayama, “Active microtremor isolation system using linear motors,” Tran. of Japan society of mechanical engineering, vol. 56, no. 523, pp. 102-107, 1990
- [11] Y. Okada, K. Matsuda, H. Hashitani, “Self-sensing active vibration control of using the moving-coil-type actuator,” Transactions of the ASME, Journal of vibration and acoustics, vol.117, no.4, pp. 411-415, 1995
- [12] L.R.Miller, M.Ahmadian, C.M.Nobles, D.A.Swanson, “Modelling and performance of an experimental active vibration isolator,” Transactions of the ASME, Journal of vibration and acoustics, vol. 117, no. 4, pp.272-278, 1995
- [13] 장석명 외, “리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동 코일형 리니어 액추에이터의 설계제작 및 제어정수 도출”, 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp. 241-248, 1999
- [14] Donald R. Zrudsky and James M. Pichler, “Virtual instrument for instantaneous power measurements,” IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 41, no. 4, pp. 528-533, 2000
- [15] LabVIEW User Manual, National Instruments, 1996
- [16] 장석명, 이성호, 장건우, 정상섭, “유도형 리니어모터 성능의 온·라인 모니터링을 위한 가상계측시스템 구현”, 대한전기학회 논문지 제 50B권 5호 pp205-213, 2001
- [17] 김용수, “MATLAB 입문과 활용”, 높이깊이, 2001
- [18] Chee-Mun Ong, “Dynamic simulation of electric machinery; using MATLAB/SIMULINK,” Prentic Hall, 1998
- [19] 정상섭, “진동제어 시스템을 위한 리니어 왕복 액추에이터의 동특성 해석,” Ph. D. Thesis, University of Chungnam, 2002

저 자 소 개



정상섭(鄭相燮)

1971년 1월 29일생, 1996년 충남대 전기공학과 졸업(공학사), 1998년 동 대학원 석사 졸업, 2002년 충남대 대학원 박사과정 졸업(공학박사), 현재 LG 전자 디지털 어플라이언스(DA) 연구소 컴프레서 그룹 선임연구원

Tel : 019-488-9137

e-mail : jsangsub@lge.com



장석명(張錫明)

1949년 7월 3일생, 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업(공학박사), 1989년 미국 Univ. of Kentudy(Post-doc), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 평의원, 편집이사

Tel : (042) 821-5658

e-mail : smjang@ee.chungnam.ac.kr



이성호(李成浩)

1971년 11월 1일생, 1997년 충남대 전기공학과 졸업(공학사), 1999년 동 대학원 석사 졸업, 현재 충남대 대학원 박사과정 수료

Tel : 042-822-4933

e-mail : shlee@ee.cnu.ac.kr



윤인기(尹仁基)

1971년 5월 29일생, 1999년 충남대 전기공학과 졸업(공학사), 2001년 동 대학원 석사 졸업, 현재 충남대 대학원 박사과정

Tel : 042-822-4933

e-mail : ikyoon-ee@hanmail.net