

구조물 진동제어용 리니어 모터 댐퍼의 제작 및 특성 실험

장석영*, 정상섭*, 이성호*, 함상웅**, 김병인**, 박해동***, 정태영**
 *충남대 전기공학과 **한국기계연구원 ***유니슨산업(주)

Manufacture and Dynamic Test of Linear Motor Damper for Vibration Control of

S.M. Jang*, S.S. Jeong*, S.H. Lee*, S.Y.Ham**, B.I. Kimm**, H.D.Park***, T.Y. Jung*
 *Chung-Nam National Univ. **KIMM ***Unison

Abstract - Linear motor damper(LMD) for vibration control of structure is consisted of the NdFeB permanent magnets with high specific energy as the stator, a coil-wrapped nonmagnetic hollow rectangular structure and an iron core as a pathway for magnetic flux. The active mass of LMD is 1.5 ton and consisted of permanent magnet and iron yoke. In this paper, LMD system is manufactured and tested for dynamic characteristics and frequency response.

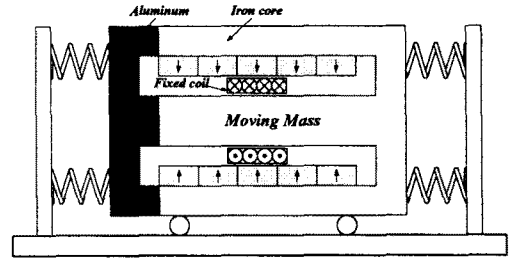


그림 1 리니어 모터 댐퍼의 개념도

1. 서 론

가동코일형 리니어 왕복운동 액추에이터는 영구자석으로 이루어지는 계자와 보빈에 코일을 감은 가동체로 구성되며, 선형성과 고정밀제어성 등에서 특별히 우수한 장점을 갖는 액추에이터이다. 따라서 스피커 등은 물론이고 컴퓨터 드라이브, 위치제어 시스템 등의 초정밀 서보시스템 분야에서 구동원으로 널리 사용되고 있다[1] 그러나 최근 잔류자속밀도가 1.0T이상의 합금재료인 NdFeB가 개발됨에 따라 고밀도 영구자석을 이용한 고속 대형 시스템의 제작이 가능해졌다.

따라서 본 연구에서는 건축구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 시스템의 구동원으로 가동코일형 LOA를 적용하였다. 즉 액추에이터는 NdFeB의 영구자석 계자와 SUS 보빈에 감겨진 코일로 이루어지는데, 가동자는 철심과 자석, 즉 계자측으로 그 자체가 1500kg의 능동 질량으로 0.6Hz로 왕복 운동시킨다[2]. 따라서 계자측 1500kg로 제작하고 제정수 산정과 시스템이 성능을 파악하고자 동특성 실험을 수행하였다. 또한 리니어 모터 댐퍼를 구동할 수 있는 저주파수 인버터를 개발하였고 전기량과 기계량을 측정할 수 있는 계측 시스템을 개발하여 주파수 응답 특성 실험을 수행하였다. 이로써 많은 장점을 갖는 전자기력 LOA를 이용하여 대형 선박, 건물 등 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 효과적인 시스템을 실용화 할 수 있는 기반을 확고히 하였다.

2. 진동제어용 리니어 모터 댐퍼

2.1 진동제어용 리니어 모터 댐퍼

진동제어용 리니어 모터 댐퍼는 그림 1과 같이 영구자석에 의한 계자와 보빈에 코일을 감은 전기자로 구성된다. 일반적으로 그림 1의 리니어 모터 구조를 가동코일형 LOA라 부르는데, 본 연구 모델에서는 코일이 고정되어 있고 영구자석과 철심이 능동 질량의 역할을 동시에 수행하면서 가동되는 구조를 갖는다. 또한 가동자의 양편에 스프링이 존재함으로써 수동 댐퍼로서의 역할도 함께 수행할 수 있다.

그림 1의 코일에 정현파 또는 구형파의 교번전류를 인가하면 가동자는 일정 스트로크로 왕복운동을 하게된다. 만일 가동자가 x 방향으로만 운동한다면 가동자에

작용하는 추력은 식(1)과 같다.

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

여기서 l , N 은 각각 공극자계속에 있는 가동코일의 축방향 유효길이와 유효 권선수를 나타낸다. 또한 B_g 는 영구자석에 의한 공극자속밀도, i 는 가동자 코일에 흐르는 전류, k_T 는 추력 상수로 유기전압 상수와 같다.

2.2 시스템 모델링

LOA 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 코일에서의 전압방정식은 식 (3)과 같다.

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

여기서 R , L , dx/dt 는 각각 코일저항, 코일 인덕턴스, 가동자의 속도이다. 식 (3)에서 오른쪽의 두 번째 항은 전류변화에 따른 변압기 기전력항이며, 오른쪽 세 번째 항은 자계속에서 코일이 운동함에 의해 발생하는 속도 기전력항이다. 식 (2)와 식(3)의 $\dot{x} = Ax + B\dot{u}$ 이용하고 마찰력을 무시한다면 식 (4)와 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

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

여기서 상태변수는 변위와 전류이다.

3. 리니어 모터 댐퍼의 제작 및 제정수 산정

3.1 제작 사진과 사양

(1) 코일부 제작

그림 2는 코일부 제작 사진으로 코일 재질은 구리, 보빈 재질은 스테인레스 스틸이다.

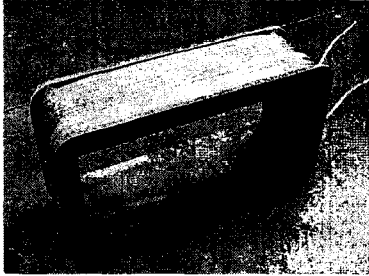


그림 2 코일부 제작 사진

(2) 영구자석 계자부 제작

대형 영구자석 계자부를 제작하는 경우에 대형 영구자석을 단일체로 제작하고 착자시키는 것은 불가능하므로 기본 자석을 여러 개를 조립하여 계자를 구성해야 한다. 본 연구에서는 계자부에 영구자석(2×2×1 inch)이 234개가 사용되는데, 이를 철심 요크에 직접 부착시키는 작업은 매우 어렵고 위험하다. 즉, 자석 옆에 또 하나의 자석을 붙일 경우에는 두 사이의 반발력 때문에 쉽게 가까이 조립하지 못한다. 따라서 자석 조립을 용이하게 하기 위해서는 ① 234개의 자석을 몇 개의 모듈로 제작해야 하며, ② 이를 위해 영구자석 케이스 사용해야 하며, ③ 반발력을 최소로 하여 조립하기 위해 임의 자로를 형성시키고, ④ 작업의 용이성을 위해 모든 공구는 비자성체로 제작되어야 하며, ⑤ 작업 시간을 단축하기 위해 급속·강력 접착제 사용해야 한다.

그림 3은 영구자석 모듈의 제작 사진으로 한 개의 모듈은 13개의 영구자석으로 만들어진다. 그리고 제작의 용이성, 즉 반발력을 줄이기 위해 임의 자로용 철봉과 철편을 사용하였다.

(3) 조립 완성 사진

그림 4는 스프링과 보호장치, 변위센서는 부착된 조립 사진이다. 표 1은 리니어 모터 댐퍼의 제작 사양이다.

(4) 인버터 제작

리니어 모터를 구동하기 위한 PWM 단상 인버터를 제작하였는데, 4개의 스위칭 소자가 쓰이며 본 연구에서는 IGBT 모듈을 사용하였다. 본 연구에서의 인버터는 외부에서 제어신호(±5V)가 입력되면 이 신호를 증폭하여 리니어 모터에 입력되게 된다. 그림 5는 제작된 인버터의 사진이다.

(5) 보호장치 및 변위 센서

가동부의 왕복 운동시 최대 범위는 ±250 mm로 이 범위를 초과할 경우 스프링부, 요크 등을 충격하게 된다. 따라서 이를 방지하기 위해 ±210 mm 범위에 두 개의 기계식 리미트 스위치를 설치하였다. 또한, 인버터의 출력 전압이 OFF 되더라도 가동부의 관성으로 인한 더 이상의 운동을 막기 위해 양쪽 스트퍼에 댐퍼를 설치하였다. 한편, 가동부의 변위를 측정하고자 Potential meter형 위치 센서를 설치하였다.

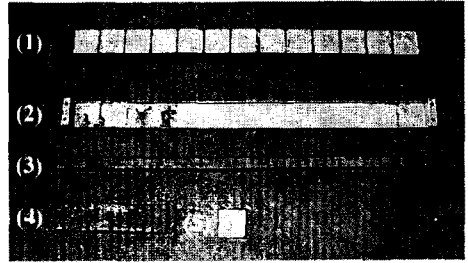


그림 3 영구자석 모듈 사진

(1) 제작된 자석 모듈, (2) 자성체 케이스
(3),(4) 임의 자로용 철심, (5) 자석편

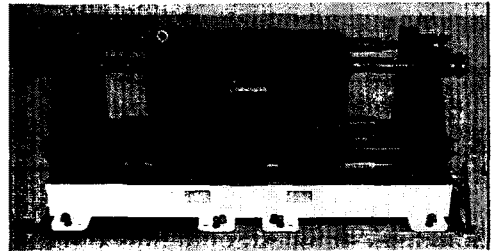


그림 4 리니어 모터 댐퍼 완성 사진

표 1 리니어 모터 댐퍼의 제작 사양

항 목	사 양	
정격 전류	180[V]/23 [A]	
부 하 질 량	1500 [kg]	
모터 폭	474 [mm]	
영구 자석	총 자석 폭/길이	472.4 [mm] / 675 [mm]
	케이스 두께	1.2 [mm]
코일	턴 수	630 [turn]
	도체 단면적	5.31 [mm ²] (φ2.6 mm)
	코일부 길이/높이	154 [mm] / 37 [mm]
요크	외측 요크 두께	95 [mm]
	내측 요크 두께	190 [mm]
스프링 자유 길이	1 m (φ5 mm)	
유효 왕복 길이	420 [mm]	
총 중량	2,352 kg · 중	

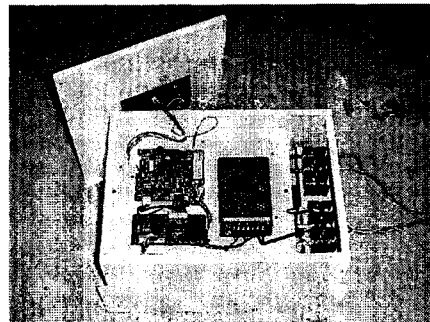


그림 5 인버터 제작 사진

3.2 제어 정수 산정

(1) 코일 저항 및 인덕턴스

코일 저항은 DC 전압을 인가후 전류를 측정하여 DC 저항을 측정하였다. 코일 인덕턴스의 경우 철심 포화를 고려하기 위하여 유한요소법을 통해 해석하였다.

(2) 유기전압 및 추력 상수

그림 6은 개방회로 시험을 통해 얻은 가동자의 이동 변위와 코일에 유기되는 전압의 순시치를 보여준다. 유기전압이 가동자 변위보다 전기각 90°의 앞선 위상차를 가짐을 알 수 있다. 따라서 측정된 가동자의 변위와 유기전압으로 그 기율기를 속도로 산정하여 계산된 유기전압 상수는 약 150 [V·sec/m] 정도가 되었다(3).

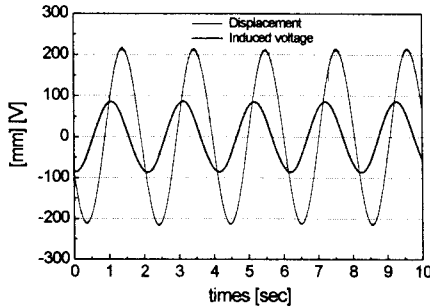


그림 6 개방회로 시험시 변위와 유기전압 파형

(3) 댐핑 계수

그림 7은 댐핑 파형으로 대수 감수율은 식 (5)와 같다

$$\delta = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (5)$$

여기서 ζ 는 감쇠계수이다.

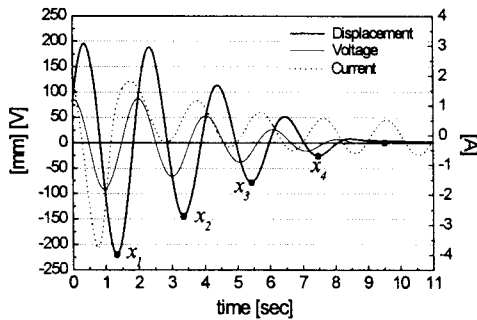


그림 7 댐핑 파형

표 2 해석 및 실험에 의한 제어 정수

항 목	해석값	실험값
추력 및 유기기전력 상수 [V·sec/m]	160	150
코일 DC 저항 [Ω]	3.20	3.16
코일 인덕턴스 [mH]	863	-
가동체 질량 [kg]	1500	
스프링 상수	15,402 [N/m] at 0.51 Hz	
댐핑 계수	$\zeta = 0.4t \quad \omega_n = 0.49Hz$	

4. 주파수 응답 시험

그림 8은 출력 스트로크의 주파수 응답 특성 곡선으로 제어 전압에 따라 비슷한 경향을 보인다. 스트로크의 피크는 대략 0.59 Hz에서 발생하였고 그 이상의 주파수에서는 응답이 급격히 감소하였다. 그림 9는 입력 주파수에 따른 입력 제어 신호와 출력 변위 사이의 위상 차이를 보여준다. 그래프에서 0.46 Hz에서 제어 신호와 변위 사이의 90°의 위상차이를 갖고 0.7Hz에서 180°의 위상차이를 갖는다.

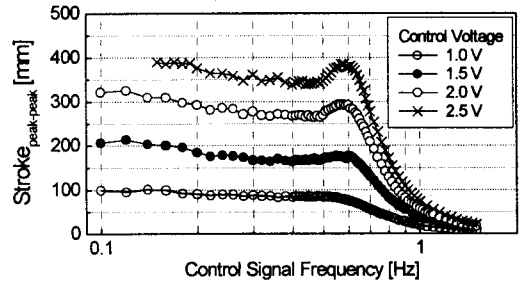


그림 8 입력 주파수에 따른 스트로크(pp) 특성

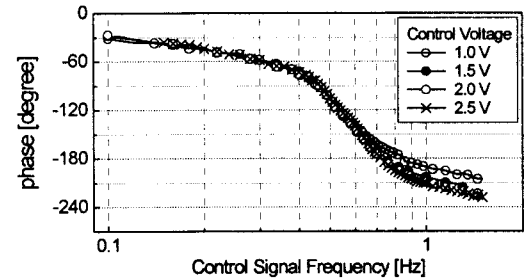


그림 9 입력 주파수에 따른 위상 특성

5. 결론

구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 시스템의 구동 원인으로 가동코일형 LOA를 적용하였으며, 가동자는 철심과 자석, 즉 계자축으로 그 자체가 1500kg의 능동 질량으로 하여 제작되었다. 또한, 개방회로 시험, 댐핑 시험 등을 통해 LMD 시스템의 제정수를 구하고 주파수 응답 시험을 통해 주파수에 따른 스트로크와 위상 특성을 얻을 수 있었다. 스트로크는 0.51 Hz보다 높은 주파수에서 피크치를 가지며 제어신호와 변위와는 0.46Hz에서 90도 위상차를 가졌다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.A. Nasar, I.boldea, "Linear Electric Motors: Design, and Practical Application", Prentice-Hall.
- [2] 장석명, 정상섭, 박해동, 함상용, 김병인, "진동제어용 리어 모터 댐퍼의 설계 및 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp880-882, 2001
- [3] 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영, "리니 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수 도출", 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp241-248, 1999