

진동제어용 리니어 모터 댐퍼의 설계 및 특성

장석명*, 정상섭*, 박해동**, 함상웅***, 김병인***
 *충남대 전기공학과 **유니슨(주) ***한국기계연구원

Design and Characteristics of Llinear Motor Damper for Vibration Control

S.M. Jang*, S.S. Jeong*, C. Kweon*, S.J. Moon**, T.Y. Jung**
 *Chung-Nam National Univ. **KIMM

Abstract - A moving-coil-type linear oscillatory actuator 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 inductance of moving coil and the push/pull effect is obtained from the permeance model of LOA with the open magnetic circuit. The analytical method are verified using the 2D finite element method.

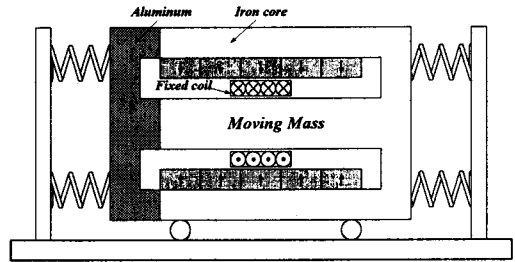


그림 1 리니어 모터 댐퍼의 개념도

1. 서 론

가동코일형 리니어 왕복운동 액추에이터는 영구자석으로 이루어지는 계자와 보빈에 코일을 감은 가동체로 구성되며, 선형성과 피정밀제어성 등에서 특별히 우수한 장점을 갖는 액추에이터이다. 따라서 스피커 등은 물론이고 컴퓨터 드라이브, 위치제어 시스템 등의 조정밀 서보시스템 분야에서 구동원으로 널리 사용되고 있다. 그러나 최근 잔류자속밀도가 1.0T이상의 합금재료인 NdFeB가 개발됨에 따라 고밀도 영구자석을 이용한 고출력 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 계자축으로 그 자체가 1500kg의 능동 질량으로 0.6Hz로 왕복 운동시킨다. 따라서 계자축을 1500kg로 설계하고 시스템이 성능을 파악하고자 동특성시뮬레이션을 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 양면에 스프링이 존재함으로써 수동 댐퍼로서의 역할도 함께 수행할 수 있다.

그림 1의 코일에 정현파 또는 구형파의 교번전류를 인가하면 가동자는 일정 스트로크로 왕복운동을 하게 된다. 만일 가동자가 x 방향으로만 운동한다면 가동자에 작용하는 추력은 식(1)과 같다.

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

여기서 I , 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 주요 설계식

가동코일형 LOA의 고정자 영구자석에 의한 공극자속 밀도는 식(12)과 같다.

$$B_g = k \times \frac{B_r}{1 + \frac{g\mu_r}{t_m}} \quad (2)$$

여기서 B_r :잔류자속밀도, μ_r :자석 비투자율, t_m :자석 두께, g 는 공극길이, k 는 자기회로 형상에 의한 보정 계수이다.

한편, 코일 전압방정식으로부터 코일 턴수를 결정하는 식(16)을 얻는다.

$$N = \frac{V}{\rho_c a J_c + 4\pi f B_g l X_m} \quad (3)$$

여기서 ρ_c : 도체의 저항률, a : 턴당 길이, J_c : 전류밀도, S :도체의 단면적이다.

2.3 시스템 모델링

LOA 시스템의 기계적인 운동방정식은 식(4)와 같다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = k_T i - kx - C_d \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

여기서 M : 가동부 질량, k_T : 추력 상수, k :동기 스프링 상수, C_d :마찰계수, d^2x/dt^2 :가동자 가속도이다. 또한 코일에서의 전압방정식은 식(5)와 같다.

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_E \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

여기서 R , L , dx/dt 는 각각 코일저항, 코일 인덕턴스, 가동자의 속도이다. 식(5)에서 오른쪽의 두 번째

항은 전류변화에 따른 변압기 기전력항이며, 오른쪽 세 번째 항은 자계속에서 코일이 운동함에 의해 발생하는 속도 기전력항이다. 식(4)와 식(4)의 $\dot{x} = Ax + B\dot{u}$ 를 이용하고 마찰력을 무시한다면 식(6)과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{M} & 0 & \frac{k_T}{M} \\ 0 & -\frac{k_E}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V \quad (6)$$

여기서 상태변수는 변위와 전류이다. 시스템 출력은 가동자의 속도 $y = Cx + D\dot{u}$ 를 이용하면 식(7)과 같이 표현된다.

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3 설계 요소와 사양

설계하고자 하는 리니어 모터 댐퍼는 1500kg의 부하질량으로 높이 30m, 100톤의 5층 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 시스템에 응용을 하기 위한 것이다. 구조물의 1차 모드 질량과 주파수는 84톤, 약 0.6Hz를 갖는다. 또한 리니어 모터의 계자 시스템을 구성하기 위한 영구자석의 사이즈는 2×2×1inch이다. 한편, 능동 부하 질량이 되는 영구자석과 철심은 자체가 능동 질량이 되므로 1500kg이 되어야 하며 댐퍼의 안정도를 고려하여 가능한 높이는 낮고 폭이 넓은 구조를 갖게 설계되어야 한다. 그림 2는 길이방향 자석수를 고려한 공극에 따른 능동질량, 즉 철심요크와 영구자석의 질량을 나타내 준다. 모터의 길이가 증가할수록 질량은 감소하는데, 요구하는 질량이 1500kg이므로 그림 3에서 설계점을 찾을 수 있다. 본 설계에서는 공극 50mm, 자석수 13개를 선정하였다. 표 1은 설계 요구사항 및 결과를 제시한 것이다.

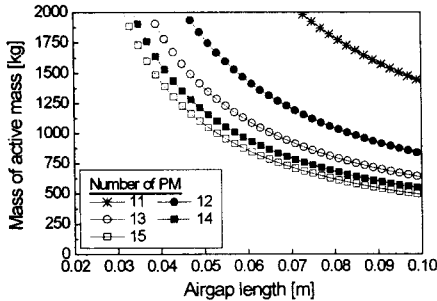


그림 2 공극에 따른 고정자 능동질량 변화

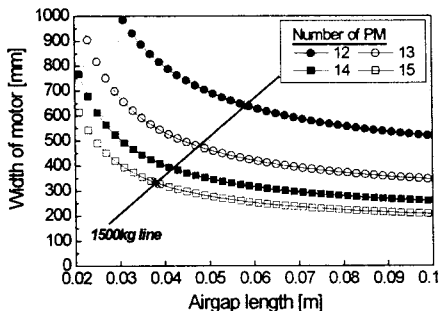


그림 3 공극에 따른 모터의 폭 변화

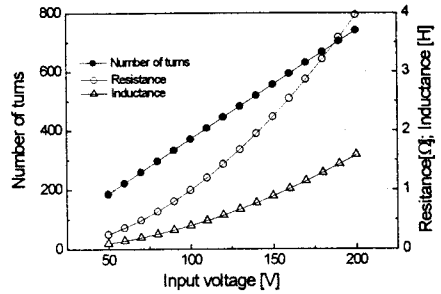


그림 4 입력전압 vs. 코일 턴수, 저항, 인덕턴스 변화

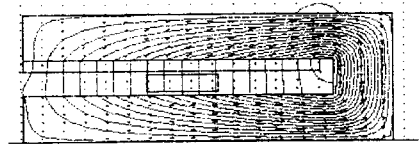
표 1 리니어 모터 댐퍼의 사양
Table 1 Specifications

항 목	사 양	
정격 전압/전류	180[V]/23 [A]	
부 하 질 량	1500 [kg]	
모 터 폭	450 [mm]	
영구 자 석	계 열	NdFeB
	잔류자속밀도	1.1 [T]
	자 석 치 수	2×2×1 [inch]
코 일	총 자석길이	650 [mm]
	턴 수	660 [turn]
	코일 단면적	5.4 [mm ²]
	코일 길이	160 [mm]
	코일 높이	37 [mm]
	전류 밀도	4 [A/mm ²]
공 극	50 [mm]	
스 트 로 크	±250 [mm]	

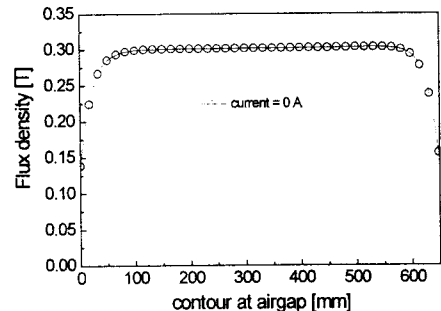
3. 자계 특성과 제어정수 산정

3.1 자계 특성

그림 5는 영구자석에 의한 자속과 공극자속밀도 분포로 공극내에서 일정한 자속밀도를 갖는다. 또한 전기가 반작용을 줄이기 위해 요크는 포화시켰다.



(a) 자속분포



(b) 공극 자속밀도 분포

그림 5 영구자석에 의한 자계 특성

3.2 제어정수와 상태변수 행렬

표 2는 산정된 제어정수를 보여주는데, 전기자 반작용 및 코일 위치에 따른 인덕턴스 변화는 고려하지 않았다. 따라서 상태변수 행렬은 식 (7)과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1.0 & 0 \\ -10.27 & 0 & 0.11 \\ 0 & -63.99 & -1.29 \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.40 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0], \quad D = [0] \quad (7)$$

또한, 제작된 모터의 입력전압 e 에 따른 변위 x 와의 전달함수를 식 (7)로부터 완성하면 식 (8)과 같다.

$$G_{s-e}(s) = \frac{0.04266}{s^3 + 1.287s^2 + 17.08s + 13.22} \quad (8)$$

표 2 해석에 의한 제어 정수

항 목	값
추력 및 유기기전력 상수	160 [V · sec/m]
코일 DC 저항	3.2 [Ω]
코일 인덕턴스	2.5 [H]
가동체 질량	1500 [kg]
스프링 상수	25,400 [m/N]

3.3 주파수 응답특성

전달함수에 의한 가동코일형 LOA의 주파수 응답 특성을 그림 6에서 보인다. 시스템 특성을 보면 0.66Hz에서 최대 응답을 보인다.

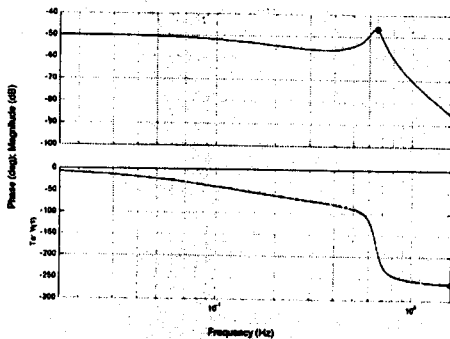


그림 6 보드선도

4. 동특성 시뮬레이션

4.1 모델링

정현적인 가변주파수 전압원에 의해 구동되는 LOA 시스템의 시뮬레이션 블록도는 그림 7과 같다. 이 때 다음과 같은 가정과 조건을 두었다.

- ① 전기자 반작용과 코일 위치에 따른 인덕턴스 변화를 고려하지 않았다.
- ② 기동시 정지마찰력과 운동마찰력은 고려하지 않았다 ($C_d = 0$). 따라서 부하로써 작용하는 것은 가동체 질량뿐이다.
- ③ 가동자는 전기자 코일이 영구자석에 의한 자계속에서 왕복운동 하도록 스톱퍼로 제한을 두었다. 따라서 최대 이동 범위는 (-)250[mm]부터 (+)250[mm]이다.

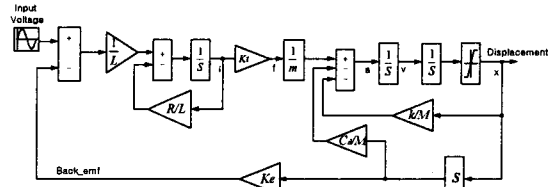
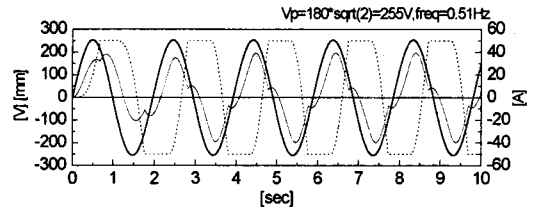


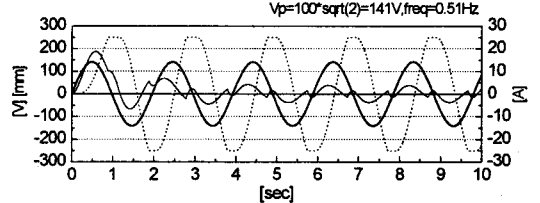
그림 7 시뮬레이션을 위한 블록다이어그램

4.2 시뮬레이션 결과

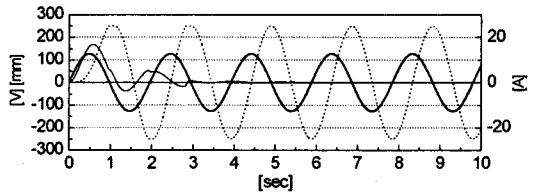
그림 8은 입력 전압에 따른 전압, 전류 및 변위의 동특성을 보여준다. 입력전압이 90V인 경우 가동자는 스톱퍼에 부딪치지 않고 왕복운동을 하였다. 그리고 스프링에 의해 운동에너지가 저장되므로 공진이 발생하여 전류는 0에 가깝게 줄어들음을 알 수 있다.



(a) V=180V



(b) V=100V



(c) V=90

그림 8 입력전압에 따른 동특성

5. 결 론

구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 시스템의 구동원으로 가동코일형 LOA를 적용하였으며, 가동자는 철심과 자석, 즉 계자축으로 그 자체가 1500kg의 능동 질량으로 하여 설계되었다. 또한, LOA 시스템의 동특성 시뮬레이션을 통하여 진동 능동 제어기로서 성능을 확인하였다. 앞으로 기기의 대형화에 따른 자석 부착방법, 전기자 반작용 등의 연구가 진행될 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.A. Nasar, I. boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Application", Prentice-Hall, 1987
- [2] 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영, "리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수 도출", 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp241-248, 1999.