

가동코일형 리니어 액츄에이터의 동특성

장석명, 권철, 정상선, 성소영, 류동완, 윤인기
충남대학교

Dynamic Characteristics of Moving Coil type Linear Oscillatory Actuator(LOA)

S.M. Jang, C. Kweon, S.S Jeong, S.Y. Sung, D.W. Ryu I.K. Yoon
Chungnam National University

Abstract - A voice-coil-type LOA consists of the NdFeB permanent magnets with high specific energy as the stator, a coil-wrapped nonmagnetic hollow rectangular structure. We have to obtain the back-EMF constant k_E from 3D FEA and experiments, precisely. The k_E and other parameters provide the transfer function, through which is derived the frequency response characteristics. Inverter-fed LOA is examined aiming to compare with results of simulation.

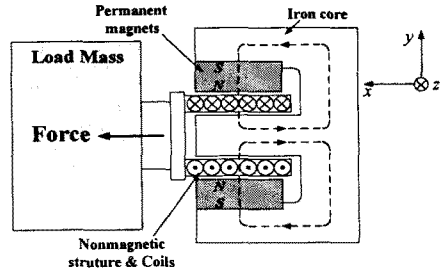


그림 1 가동코일형 LOA

1. 서 론

리니어 진동 액츄에이터(이하 LOA)는 정현파 또는 펄스형 구형파의 교번전압을 공급하여 일정 스트로크로 왕복구동을 하는 리니어모터이다. 그 중에서도 가동코일형 LOA는 영구자석으로 이루어지는 계자와 코일을 같은 가동체로 구성되며, 선형성과 피정밀제어성 등에서 특별히 우수한 장점을 갖는 액츄에이터이다. 따라서 스피커, 마이크로 폰 등은 물론이고 컴퓨터 드라이브, 위치제어 시스템 등의 초정밀 서보시스템 분야에서 구동원으로 널리 사용되고 있다. 그러나 지금까지는 영구자석 재료로 페라이트, 사마륨코발트 등이 사용되었기 때문에 소형 시스템으로 만 응용 개발이 되었으나, 최근 잔류자속밀도가 1.0T이상의 합금재료인 NdFeB가 개발됨에 따라 고밀도 영구자석을 이용한 고출력 대형 시스템의 제작이 가능해졌다.

본 논문에서는 가동코일형 LOA의 3D FEM 해석을 통해 자계분포 특성 및 제어정수를 정밀하게 산정하고 이를 바탕으로 전달함수를 도출하였다. 그리고 도출된 전달함수를 이용하여 주파수 응답 특성을 얻었다. 또한 인버터에 의한 정현파 입력시 가동자 변위의 과도 및 동특성을 센서 필터와 A/D 보드를 이용하여 실시간 계측하였다. 특히 동적인 상태에서의 LOA 발생 추력을 직접 측정하기는 어려우므로 변위 센서인 LVDT를 이용하여 추정하였다. 따라서 개루프 제어 상태에서의 특성 추이를 살펴봄으로써 제어시스템에의 응용을 위한 기초자료를 얻을 수 있었다.

2. 가동코일형 LOA와 3D FEM 해석을 통한 제어정수의 정밀 산정

2.1 가동코일형 LOA

가동코일형 LOA는 그림 1과 같이 영구자석에 의한 고정자와 플라스틱 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성된다. 그리고 코일에 정현파 또는 구형파의 교번전류를 인가하면 가동자는 일정 스트로크로 고속 왕복운동을 하게 된다. 만일 가동자가 x 방향으로만 운동한다면 가동자에 작용하는 추력은 식(1)과 같다.

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

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_E 는 추력 및 유기전압 상수이다.

본 논문에서의 가동코일형 LOA를 구조물의 능동진동 제어 등에 응용하기 위해 설계·제작되었다[2]. 또한 LOA의 제어를 위한 특성방정식이 유도되었으며, 유한요소해석과 시험을 통해 제어정수를 도출하였다[2].

2.2 3D FEM 해석을 통한 제어정수 도출

설계 제작된 LOA의 2D FEM 해석은 모터 길이방향의 누설자속이나 프링징 효과를 고려할 수 없다. 따라서 3D FEM 해석과 정밀한 자속계를 통해 정밀하게 제어정수를 도출하였다. 그림 2는 3D FEM 해석을 위한 모델의 요소망으로 실제의 1/2모델이다. 해석 및 실험 시 기준좌표 및 가동코일의 위치 정의는 그림 3과 같다. 즉, 50[mm] 영구자석의 중심을 $x=0$ (zero)으로 한다.

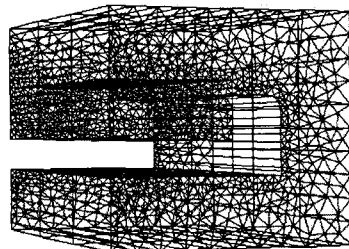


그림 2 3D FEM 모델의 요소망

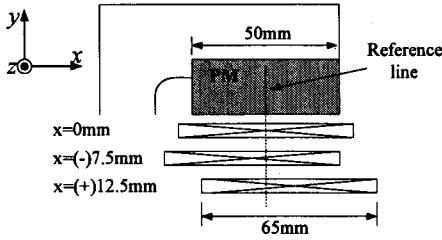


그림 3 기준좌표 및 가동코일의 위치 정의

그림 4와 그림 5는 3D FEM 해석결과와 자속밀도에 의한 측정치이다. 해석치와 측정치는 모두 공극(15mm)의 중간에서의 값으로 해석결과의 최대치가 측정치보다 0.1[T] 정도 크다. 특히 그림 5의 경우 영구자석 개개의 자화정도가 달라 LOA 중간에서 0.15[T]정도 낮게 나타났다. 따라서 그림 4와 5의 해석치와 실험치의 차이는 FEM 해석에 요구되는 B-H 특성과 실제 영구자석의 착상상태에 따른 자화특성의 상이함, 제작시 가공오차 등에 의하여 발생한 것으로 추정된다.

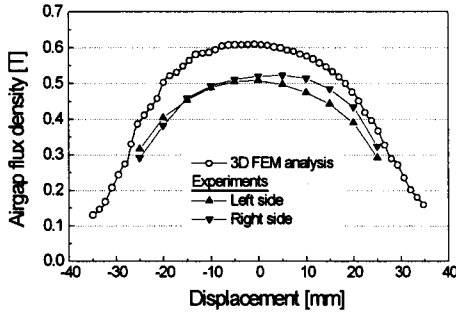


그림 4 공극자속밀도 분포

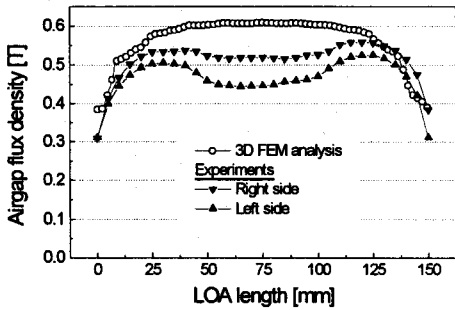


그림 5 LOA 길이방향 공극자속밀도 분포

2.3 실험에 의한 유기전압 및 추력 상수 측정

식(1)의 유기전압 및 토크 상수는 설계 파라미터의 타당성 검증뿐만 아니라 과도 및 정상상태 특성에 매우 중요한 상수가 된다[2]. 그림 6은 가동자의 이동변위와 유기전압의 순시치를 나타냈으며, 그림 7과 같이 가동자를 이동시켜 그 변위와 코일 단자에서 유기되는 전압을 계측하여 이동변위에 따른 유기전압 상수를 측정하였다. 그림에서 보듯이 유기전압 상수 평균치는 약 62[V·sec/m] 정도가 되었다. 또한 그림 8은 유기전압 및 추력 상수를 가동코일의 이동변위에 따라 측정함으로써 두 상수 모두 가동자가 밖(+x방향)으로 이동할수록 감소함을 알 수 있다. 그리고 유기전압 상수는 추력상수의 Pull과 Push effect의 중간에 위치하였다. 이는 추력상수의 경우 전기자 전류에 의한 자계에 크게

영향을 받을 수 있다[1]. 표 1은 3D FEM과 실험에 의해 계산 및 측정된 제어정수를 보여주고 있다.

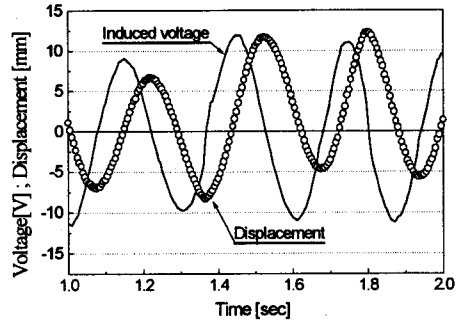


그림 6 가동자의 이동변위와 유기전압

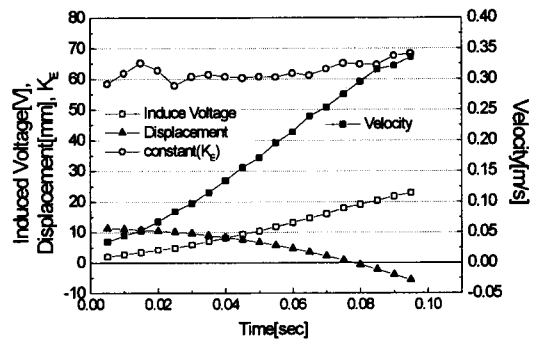


그림 7 실험에 의한 유기기전력 상수 산정

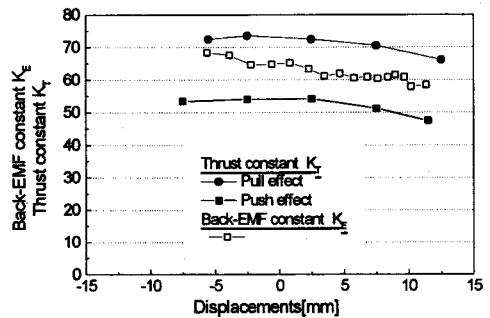


그림 8 실험에 의해 구해진 유기기전력 및 추력 상수

표 1 제어 정수

항 목	값	
유기기전력 상수	58~68[V·sec/m]	
추력 상수	Pull effect	66~74[N/A]
	Push effect	47~54 [N/A]
코일 DC 저항	5.8 [Ω]	
코일 인덕턴스	150~180[mH]	
가동체 질량	23 [kg]	

2.4 전달함수에 의한 주파수 응답 특성

제어전압 e 에 따른 속도 v 와의 관계는 전달함수에 의하여 표현된다. 제작된 LOA의 각 제어정수를 적용하여 전달함수를 완성하면 식(2)와 같다[2].

$$G_{v-e}(s) = \frac{1/k_E}{\left(1 + \frac{sRM}{k_E^2}\right)\left(1 + \frac{sL}{R}\right)}$$

$$= \frac{0.0161}{(1 + 0.0347s)(1 + 0.0276s)} \quad (2)$$

결과적으로 위의 전달함수를 통해 모터의 응답성능뿐만 아니라 구동 및 제어 시스템의 구성과 그 알고리즘을 작성하는데 중요한 자료를 얻고자 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 9는 식(2)에 의한 주파수 응답특성으로 5~6Hz에서 -3dB를 갖는다. 실제 5.0~5.7Hz 입력 시 실험을 수행하였는데, 5.7Hz이상부터는 쏠림현상이 발생하는 것을 확인하였다

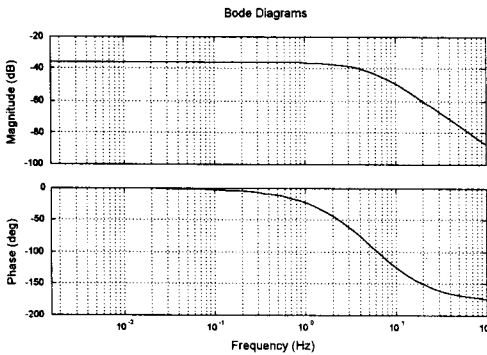


그림 9 주파수 응답특성

3. 동특성 시험

3.1 구동 및 계측 시스템 구성

그림 10은 동특성 시험시 입력전류와 전압, 변위를 실시간으로 계측하기 위한 시험 구성도를 보여준다. LOA는 단상 인버터로 구동되며 입력 전압과 전류는 각각 LEM사의 LV25-P와 LA55-P를 사용하였고, 가동자의 이동변위는 LVDT 센서를 이용하였다. 센서로부터 출력되는 신호는 A/D 보드로 입력될 수 있도록 필터와 앰프를 중간에 삽입하였다. 세 신호는 그림 11과 같이 Matlab을 이용하여 실시간으로 자동 계측하였다.

3.2 인버터 구동시 과도특성

그림 12와 13은 각각 5Hz와 10Hz의 인버터 구동시 입력전압과 전류 및 가동자 변위의 과도특성을 보여주며, 가동자는 영구자석의 중앙인 x=0에서 출발하였다. 그림에서 보듯이 5Hz 입력시에는 가동자가 쏠림현상이 없이 ±0.8mm 이내에서 정현적으로 왕복운동을 하였다. 반면, 10Hz에서는 일정시간 이후 -0.8mm 위치에서 진동하였다. 이는 공극자계의 불평형과 입력초기에 입력주파수에 정확히 응답하지 못하기 때문이라 사료된다.

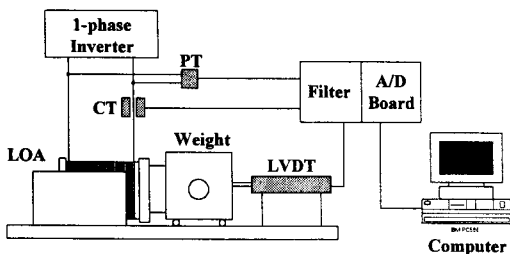


그림 10 계측 시스템 구성도

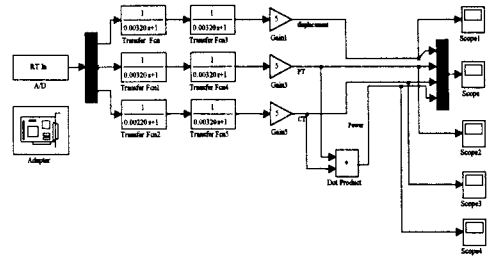


그림 11 자동 실시간 계측을 위한 Matlab 블럭도

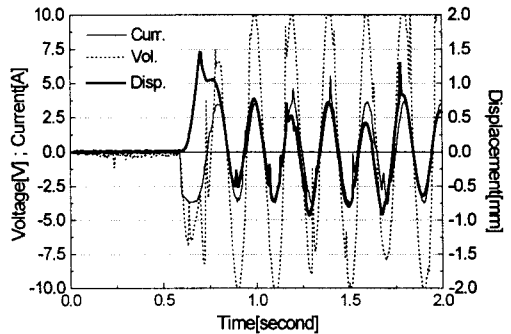


그림 12 5Hz 입력시 과도특성(출발점 x=0mm)

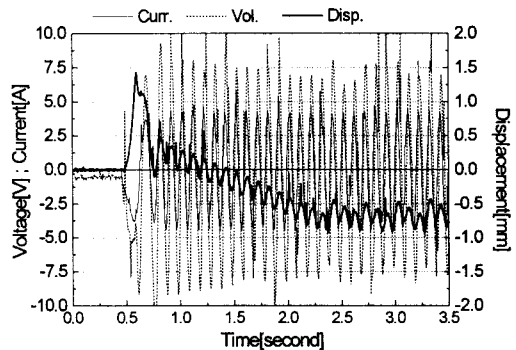


그림 13 10Hz 입력시 과도특성(출발점 x=0mm)

4. 결론

본 논문에서는 가동코일형 LOA의 3D FEM 해석과 실험에 의하여 자계분포 특성 및 제어정수를 정밀하게 산정하고 이를 바탕으로 전달함수를 도출하였다. 그리고 도출된 전달함수를 이용하여 주파수 응답 특성을 얻었다. 또한 인버터 구동시에 가동자 변위의 과도 및 동특성을 실시간 계측하였다. 따라서 이를 통해 제어시스템에의 응용을 위한 기초자료를 얻을 수 있었다

[참고 문헌]

- [1] 장석명 외, "영구자석 계자와 전기자 자속의 상호작용효과를 고려한 가동코일형 리니어모터의 정특성", 전기학회 논문지 48B권 1호, pp19~26, 1999. 1
- [2] 장석명 외, "리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수 도출", 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp241-248, 1999.