

리니어 진동 액튜에이터의 동특성 해석 및 실험

장석명, 정병수, 이성호, 정상섭*
충남대학교 전기공학과, (주)LG전자 디지털 어플라이언스 연구소*

Dynamic Analysis and Experiment of Linear Oscillatory Actuator

S.M. Jang, B.S. Jeong, S.H. Lee, S.S. Jeong*, C. Kwon**
Chung-Nam National Univ, LG Digital Appliance Research Laboratory

Abstract - Recently, many linear motion generators and are rapidly finding applications that ranges from short stroke linear motion vibrators, such as dynamic cone type loud speakers tostirling engine driven linear reciprocatings, alternators, compressors, textile machines etc. In this paper the dynamic performance with load is computed by a general purpose method, which the equation of electromagneticfield, the equation of electric circuit and the equation of motion are coupled together. We turned out the driving system and the dynamic characteristics of current, voltage and displacement is confirmed experiment.

1. 서 론

리니어 진동 액튜에이터(Linear Oscillating Actuator, 이하 LOA)는 정현파 또는 펄스형 구형파의 교변전압을 공급하여 스프링 없이 일정 스트로크로 왕복구동을 하는 리니어모터이며 선형설과 가제어성 등에서 특별히 우수한 장점을 갖는 액튜에이터이다. 따라서, 위치제어시스템, 컴퓨터 플로피 디스크 드라이브, 등 정밀 서보시스템 분야 널리 사용되어지고 있다. 이러한 가동코일형 LOA는 직류 서보 액튜에이터로써 범용과는 달리 빈번한 가속, 감속, 정지에 사용되므로 이를 효과적으로 제어하기 위해서는 구동시에 정밀한 특성파악이 중요하다[1][2].

본 논문에서는 LOA의 정밀 위치제어를 위해 시스템의 특성을 오픈루프에서 측정하여 여러 가지 제어정수들을 도출하고 시스템의 전달함수를 구하여 시뮬레이션을 수행하고, 오픈루프 구동 드라이버를 구성하여 구동실험을 한 결과 일치함을 확인할 수가 있었다. 따라서, 이러한 과정들을 통해 스트로크 및 정밀위치제어를 하기 위한 기반을 다질 수가 있었다.

2. 가동코일형 LOA의 제어정수 및 전달함수

2.1 가동코일형 LOA

그림 1은 영구자석에 의한 고정자와 플라스틱 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성된 가동코일형 LOA를 나타내고 있다. LOA는 코일에 정현파나 구형파로 이루어진 교변전류를 인가하게 되면 식(1)과 같은 추력이 발생하게 된다.

$$F_x = 2INB_x i = k_E i \quad (1)$$

여기서 I , N 은 각각 공극자계속에 있는 가동코일의 축 방향 유효길이[m]와 유효 원선수를 나타낸다. 또한 B_x 는 영구자석에 의한 공극자속밀도[T], i 는 가동자 코일에 흐르는 전류[A], k_E 는 추력 및 유기전압 상수이다.

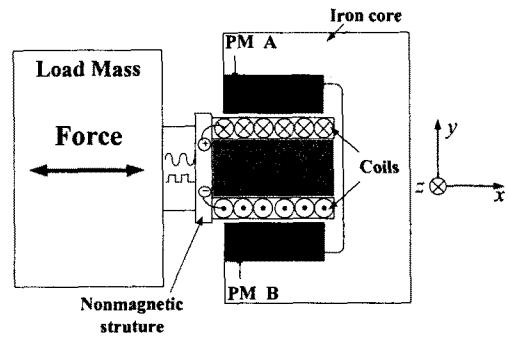


그림 1 가동코일형 LOA

2.2 제어 정수 산출

유기전압 및 추력상수는 오픈루프 구동 시스템을 이용하여 코일에 구동전원을 인가하여 구동시키고 코일의 개방단 유기전압을 측정하여 변위에 따른 유기전압의 평균치($V \cdot sec/m$) 즉, 유기기전력상수를 구하였다. 코일에 전압을 인가하면 전류가 그림 2와 같이 선형적으로 증가하게 되는데 그 기울기로부터 저항을 측정한다.

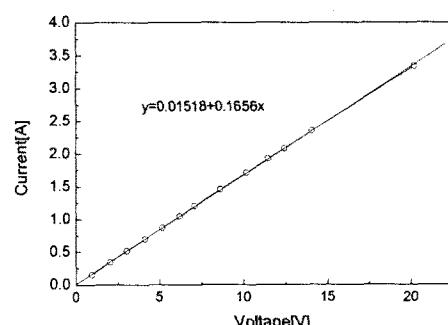


그림 2 전압-전류 기울기

인덕턴스 L 을 계산하기 위하여 코일에 직류전원을 인가하여 전류의 Turn-on 과정으로부터 시정수 τ 를 구하고 이를 식(2)에 대입하여 코일 인덕턴스 L 을 계산하였다.

$$L = \tau H [H] \quad (2)$$

표 1은 위 실험 결과 도출된 제어정수 표이다.

표 1 제어정수

항 목(unit)	값	시뮬레이션 설정값*
유기기전력 상수 k_E [V·sec/m]	58-68	$k_E = k_T =$ 65
추력상수 k_T [N/A]	Pull effect Push effect	
코일DC저항 R [Ω]	6.04	6.04
코일인덕턴스 L [mH]	125-190	161
가동체질량 M [kg]	23	23

*코일 위치 $x=0[\text{mm}]$, 인가 전류 $I=0[\text{A}]$ 에서 제어정수

2.3 LOA 시스템 전달함수

마찰계수를 고려한 LOA의 운동방정식은 식(3)으로 표현된다.

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = K_E i - C_d \frac{dy}{dt} \quad (3)$$

여기서 M 은 가동자질량, C_d 는 마찰계수, K_E 는 유기기전력상수, y 는 변위이다. 그럼 3은 LOA의 등가회로를 나타낸다. 이 등가회로를 통해 식(4)와 같은 전압방정식을 유도할 수 있다.

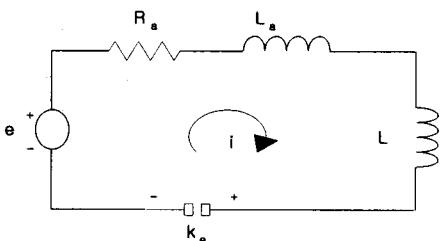


그림 3 LOA 등가회로

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + K_E \frac{dy}{dt} \quad (4)$$

LOA 시스템의 특성을 알아보기 위해 상태방정식으로 표현하면 식(6)과 같다. 여기서 \dot{x}_1 , \dot{x}_2 는 속도와 전류의 상태값이고, $u(t)$ 는 입력전압이며 Y 는 속도와 전류의 출력값이다.

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ x_1 \\ \cdot \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_d}{M} & +\frac{K_E}{M} \\ -\frac{K_E}{M} & -\frac{R}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u(t)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + Du(t) \quad (6)$$

상태방정식과 전달함수의 관계를 이용하여 속도를 출력으로 하였을 때와 전류를 출력으로 하였을 때의 시스템

전달함수는 각각 식(7)과 식(8)로 표현된다. 변위는 속도를 적분함으로써 얻을 수가 있다.

$$T_{v-\epsilon(s)} = \frac{\frac{K_E}{LM}}{(S^2 + \frac{RS}{L} + \frac{K_E^2}{ML})} \quad (7)$$

$$T_{i-\epsilon(s)} = \frac{\frac{S}{L}}{(S^2 + \frac{RS}{L} + \frac{K_E^2}{ML})} \quad (8)$$

그림 4는 LOA 시스템의 주파수 응답을 나타낸다. 10~20Hz 사이에서 공진이 일어남을 알 수 있으며 대역폭은 20Hz 정도까지 나타남을 알 수 있다. 또한 안전하게 정상적으로 운전할 수 있는 영역은 10Hz 이내에서 가능하다. 따라서 20Hz 전후에서 위상차를 줄이기 위해서는 제어기가 반드시 필요함을 알 수 있다.

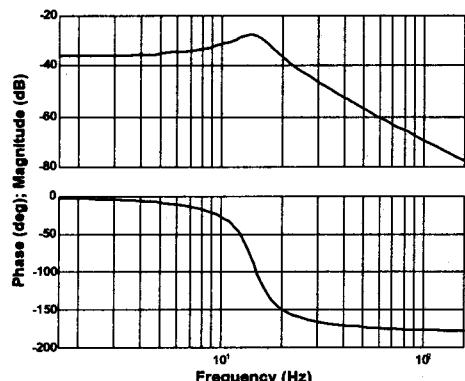


그림 4 보드선도

3. 동특성 시뮬레이션 및 실험

3.1 LOA 시뮬레이션 블록다이어그램

그림 5는 산출된 제어정수를 바탕으로 시뮬레이션하기 위해 Simulink 블록다이어그램을 구성한 것이다.

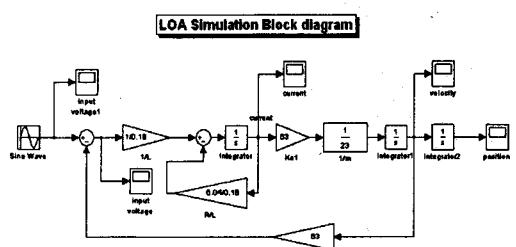


그림 5 오픈루프 블록다이어그램

3.2 하드웨어 구성 및 실험

LOA의 동특성 실험을 위한 하드웨어 구성은 그림 6과 같이 마이크로 컨트롤러부, 전력변환부, 그리고 변위 측정을 위한 LVDT센서부로 이루어진다.

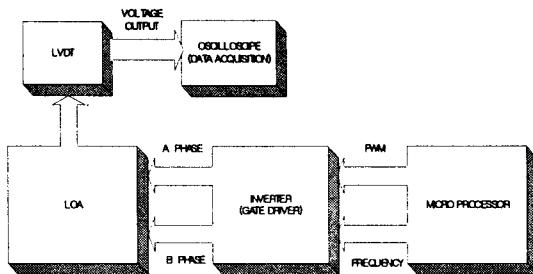


그림 6 LOA 구동 시스템 블록도

그림 7은 PWM으로 구동전압을 조정하며 원하는 주파수대의 교변 전류를 공급하기 위한 Gate Logic, LOA의 구동 전원을 변환하는 Bridge 회로를 블록다이어그램으로 나타낸 것이다.

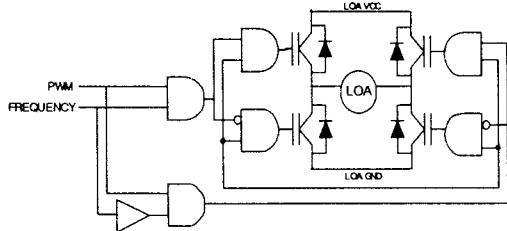


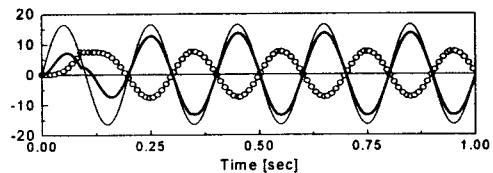
그림 7 GATE DRIVER

3.3 시스템의 동특성 시뮬레이션 및 실험 결과

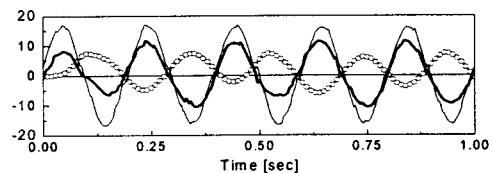
주파수 변화에 따른 시뮬레이션 및 실험결과를 분석해 보면 그림 8-(a),(b)에서는 5Hz를 가했을 때의 전압, 전류, 변위 파형으로써 가동자가 편위 없이 가동자의 중심에서 왕복 운동함을 알 수 있다. 그러나 그림 8-(c),(d)에서는 10Hz를 가했을 때의 파형으로 (+)방향으로 편위하여 진동하는 것을 볼 수 있다. 이는 전압과 변위의 위상차가 5Hz 이내에서는 180° 를 넘지 않으나 5Hz 이상 부터는 180° 이상 위상차가 발생하여 가동자의 편위가 발생하게 되는 것이다. 이러한 현상으로 시스템이 불안정해지고 입력주파수에 정확히 추종하지 못함을 알 수 있다.

4. 결 론

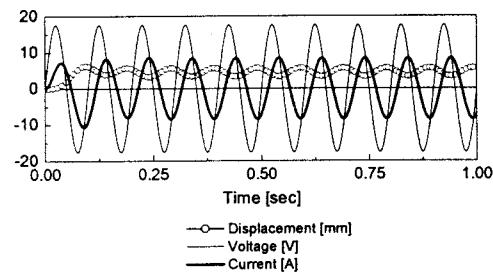
본 논문에서는 가동코일형 LOA의 제어정수를 산출하고 시스템 전달함수를 도출하여 시스템의 특성을 파악하였으며 도출된 제어정수를 바탕으로 LOA의 동특성을 시뮬레이션하고 실험을 수행하였다. 이러한 결과들을 비교하고 검토함으로서 이를 통해 앞으로의 스트로크 정밀위치제어응용에의 기반을 다지게 되었다.



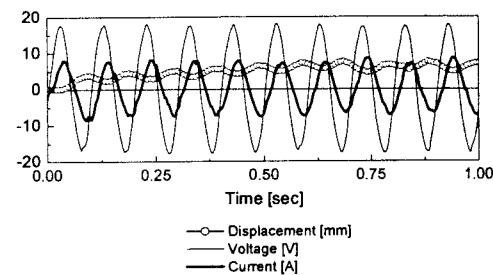
(a) 시뮬레이션(5Hz)



(b) 실험(5Hz)



(c) 시뮬레이션(10Hz)



(d) 실험(10Hz)

그림 8 주파수 변화에 따른 전압, 전류, 변위 파형

(참 고 문 현)

- [1] 장석명 외, “리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수 도출”, 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp241-248, 1999.
- [2] 장석명 외, “가동코일형 리니어 액튜에이터의 동특성”, 대한전기학회 전기기기연구회 추계학술대회 논문집, 1997, 719