

평판철심 가동형 리니어 액츄에이터의 동특성 시뮬레이션 및 실험

장석명, 조한욱, 이성호, 권철  
충남대학교

Experiments and Dynamics Simulation of a Moving Flat Core Type LOA

S.M. Jang, H.W. Cho, S.H. Lee C. Kweon  
Chungnam Nat'l Univ.

**Abstract** - Moving flat core type LOA consists of iron flat core as a mover and electric magnet as a stator and operated by electromagnetic force between mover and stator. First, this paper describes the voltage equation of coil and the mechanical equation of motion. Secondly, the dynamic simulation algorithm is proposed, and system control constant-inductance, resistance-were carried by exciting coil. Finally, we turned out the driving system and the dynamic characteristics of current, voltage and displacement is confirmed by experiment.

여기서,  $m$ 은 가동자의 질량,  $F_{em}$ 은 자기력,  $k$ 는 스프링 계수,  $(l-x)$ 는 변위이다. 또한 전류코일에서의 전압 방

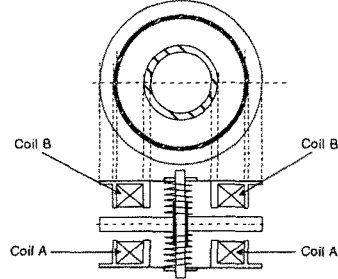


그림 1 평판철심형 LOA의 구조

정식은 인덕턴스  $L$ 이 변위  $x$  와 전류  $i$ 의 함수이므로 식 (2)과 같이 된다.

$$e = Ri(t) + L(x) \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

따라서 식(1)과 식(2)에 의하여  $\dot{x} = Ax + Bu$ 의 상태방정식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}(t) \\ \Delta \dot{x}(t) \\ \Delta \dot{i}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_x - 2k}{m} & 0 & -\frac{K_i}{m} \\ 0 & \frac{K_x}{K_i} & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ \Delta \dot{x}(t) \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{K}{m} \\ \frac{1}{L_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e(t) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $K_x = \frac{\mu_0 N^2 S i_0^2}{2x_0^3}$ ,  $K_i = \frac{\mu_0 N^2 S i_0^2}{2x_0^2}$  이고,

$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 S i_0^2}{2x_0}$  는 임의의  $(i_0, x_0)$ 에서의 인덕턴스이다.

또  $y = Cx + Du$  에서 원하는 시스템의 출력  $y$ 는 가동자의 변위  $x$ 의 함수이므로 식(4)와 같이 표현된다.

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ \Delta \dot{x}(t) \\ \Delta \dot{i}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(3), 식(4)에서 입력전압의 변화량  $\Delta e(t)$ 와 가동자의

1. 서 론

리니어 왕복 액츄에이터(linear oscillatory actuator ; 이하 LOA)는 기존의 유압식 구동시스템이나 회전형 모터를 이용한 방식에 비하여 명령신호에 의하여 입력되는 주파수, 전압, 전류 등에 대한 동작의 선형성 및 제어성에서 매우 뛰어난 특성을 가진다. 또한 구조가 간단하고 부품수가 작아 시스템의 소형 경량화가 가능하고, 생산이나 유지보수 등의 경제적 측면에서도 매우 유리한 액츄에이터이다.[1][2][3] 가동 평판형 LOA는 철심 가동형의 일종인 평판 또는 디스크 철심으로 이루어진 가동자와 고정자철심으로 구성된다. 고정자는 가동자를 중심으로 양측에 위치하여, 각각 코일이 감겨진 철심으로 구성된다. 본 논문에서는 설계·제작된 가동 평판형 LOA의 특성방정식을 도출하여 동특성 시뮬레이션을 수행하고, 구동 드라이버를 구성하여 주파수에 따른 동특성 전류와 전압 그리고 변위 특성을 실시간으로 측정하였다. 이를 시뮬레이션 결과와 비교한 결과 잘 부합됨을 보이므로써 이론적인 결과 동특성 실험방법의 타당성을 보여 실제 시스템에 적용하기 위한 기본자료를 제시하였다.

2. 평판 철심 가동형 LOA와 특성식

2.1 평판철심 가동형 LOA 모델 및 구동원리

평판 철심 가동형 LOA는, 그림 1과 같이 고정자는 가동자를 중심으로 양측에 위치해 있으며 각각의 고정자 슬롯에는 코일 A, 코일 B의 여자코일이 감겨져 있다. 디스크 형태의 가동자는 중심축에 대하여 직선 왕복운동을 하기 위해 베어링 구조로 되어 있으며, 양 측면에는 가동자가 베어링 축의 중심에 위치할 수 있도록 스프링이 받쳐고 있다.

2.2 상태 방정식과 전달함수

마찰계수를 고려하지 않을 경우, 운동방정식은 식(1)과 같다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{em} - 2k(l-x) \quad (1)$$

변위  $\Delta x(t)$ 와와 관계인, 전달함수  $T_{\Delta e-\Delta x}(s)$ 는 식(5)와 같다.

$$T_{\Delta e-\Delta x}(s) = \frac{-\frac{K_i}{mL_0}}{s^3 + \frac{R}{L_0}s^2 + \frac{2k}{m}s - \frac{R(K_x-2k)}{mL_0}} \quad (5)$$

### 3. 구동시스템 및 동특성 측정

LOA의 왕복운동 구동을 위하여 함수발생기와 전력용 MOSFET를 사용한 오픈루프 시스템을 그림 2와 같이 구성하였고, 전압, 전류 및 변위를 검출하기 위해 CT/PT 및 LVDT 센서회로와 Filter 회로로 시스템을 구성하여 GPIB를 이용하여 동특성 데이터를 수집하였다. 또한 각 상에 인가되는 펄스는 HD14049 게이트 소자를 이용하여 A, B상은 서로 inverting 된 펄스가 인가 되도록 한다.

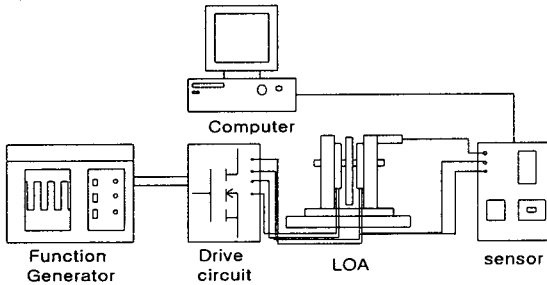


그림 2 시스템 구성도

### 4. 시뮬레이션 및 실험

#### 4.1 시스템 모델링

식(3)의 상태방정식을 기반으로 하여 이 시스템의 블록선도를 그림 3과 같이 구성하였다. 이때 가동자의 베어링에서의 마찰력은 무시하고, 가동자는  $-8\text{mm}$ 부터  $+8\text{mm}$ 의 이동 범위를 갖도록 하였다.

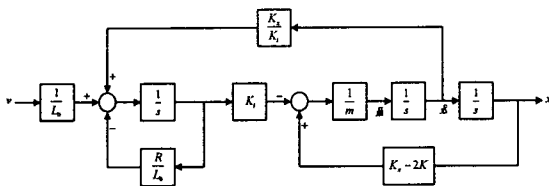


그림 3 시스템 블록선도

#### 4.2 제어정수의 측정

평판 철심가동형 LOA에서 발생하는 자기력은 가동자가 이동함에 따라 공극길이  $x$ 가 변하고, 이것은 인덕턴스  $L(x)$ 의 변화량과 직접 관련되므로 결국 자기력은 인덕턴스의 영향을 받게 된다. 그런데 가동자의 위치를 제어하고자 하는 경우 시정수, 응답속도 등이 인덕턴스에 의해 결정되므로 이것은 제어에서 매우 중요한 변수가 된다. 따라서 인덕턴스를 측정하기 위하여 그림 4와 같이 시스템을 구성하였다.

즉 코일은 유도성 회로의 특성을 가지므로 코일에 흐르는 전류를 On/Off 시킬 경우, 전류 값이 정상상태에 도달하기까지 약간의 시간 지연이 생기게 된다. 실험에서는 오실로스코프에서 나타나는 과도상태의 파형을 분석하여 시정수  $\tau$ 를 구한다.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (6)$$

시정수는 식(6)에 의해 결정되므로 이로부터  $L$ 값을 구한다. 식 (6)에서 시정수  $\tau$ 는 정상상태 전류의 63.2%까지 도달하기까지 걸리는 시간이며,  $R$ 은 직류를 인가하는 경우의 코일 저항이다. 입력 여자 전류의 과도상태에서의 파형을 구하기 위하여  $N=1000$ 의 코일이 감겨진 LOA의 고정자극에 DC 전류를 인가하고 이때 흐르는 전류의 파형을 측정하였다.

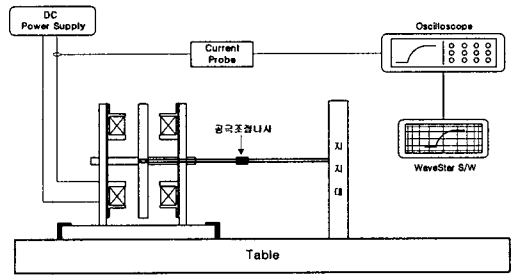


그림 4 인덕턴스 측정을 위한 시험 구성도

DC저항  $R$ 은 코일에 입력한 전류, 전압에 의해 측정할 수 있고, 시정수  $\tau$ 는 GPIB에 의해 입력받은 데이터를 분석하여 구하는데, 인덕턴스  $L$ 은 공극길이  $x$ 의 함수이므로, 공극길이에 따른 인덕턴스의 변화를 살펴보기 위하여 공극길이를 1[mm]단위씩 조정하면서 입력전류의 과도상태응답 파형을 구하였다. 그리고 이것으로부터 시정수  $\tau$ 를 구한 후 최종적으로 식 (6)에 따라 인덕턴스를 구하였다.

표 1 실험에 의해 도출된 제어정수

항목	값
코일 DC저항 $R$	23.1[ $\Omega$ ]
가동자의 질량 $m$	1.06[Kg]
스프링 상수 $k$	2505
$K_x$	1502
$K_i$	13.1
$L_0$	0.296 [H]

$K_x, K_i, L_0$ 는 식(3)에서 제시하였고, 이 값들을 식 (3), 식(4)의 상태방정식에 대입하여 상태행렬을 구하면 식(7)과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -3308.76 & 0 & -12.40 \\ 0 & 114.28 & -78.04 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -0.23 \\ 3.37 & 0 \end{bmatrix}$$

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

식 (7)에 정수값들을 대입하여 전달함수를 완성하면 식(9)와 같이 표현된다.

$$T_{\Delta e-\Delta x}(s) = \frac{-42}{s^3 + 78s^2 + 4726s + 258217} \quad (8)$$

Hall, P.773-776  
 [5]P.k.Sinha "Electromagnetic Suspension Dynamics & Control", Peter Peregrinus Ltd. p.52-p.65, 1987

### 4.3 시스템의 동특성 시뮬레이션 및 실험 결과

#### 가) 전압 및 전류 파형

평판 철심 가동형 LOA의 구동 드라이버는 +12V이고 전력용 MOSFET의 공급전압은 0V에서 24V까지 가변하면서 측정하였다. 또한 구동신호입력은 함수발생기를 이용하여 주파수를 가변하면서 전압 및 전류 파형을 측정하였다. 그림 5는 주파수 1Hz, 입력전압 20V일때의 코일 A와 코일 B에서의 전압, 전류 파형의 검출 결과이다.

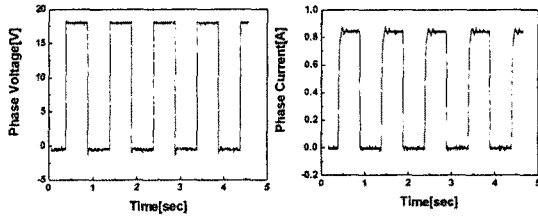


그림 5 코일 A, B에서의 전압, 전류 파형

#### 나) 가동자의 변위 특성

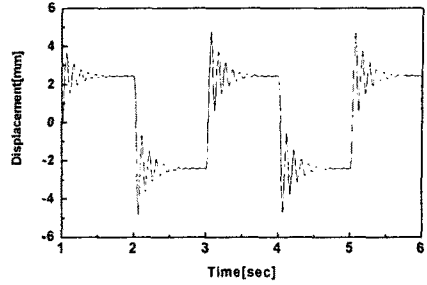
그림 6, 그림 7은 입력주파수에 따른 가동자의 변위 특성을 나타낸 것이다. 시뮬레이션과 실험에서 입력전압은 구형파를 사용하였고, 가동자는 LOA의 중심점을  $x=0$ 로 하였다. 1[Hz]에서 시스템의 진동이 감쇠하면 안정영역으로 접어드는 현상이 눈에 띄며, 특히 0.5(Hz)에서는 더욱 안정화된 특성을 보인다. 그러나 만일 주파수를 2Hz이상의 크기를 인가하게 되면 시스템이 안정화 되기 전에 다음단계의 펄스가 입력되므로 불안정한 특성을 보이고, 이러한 특성은 주파수가 높을수록 더욱 심화되어 20V 6.5Hz 이상에서는 정현적인 변위특성을 보이게 된다.

### 5. 결론

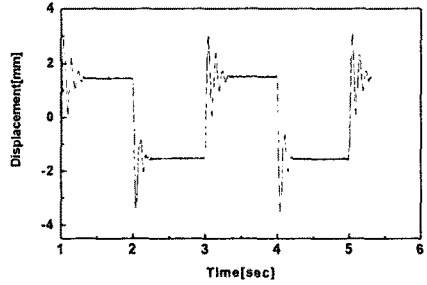
철심가동형 LOA는 가동코일형에 비해 선형성 및 제어 응답성이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 전자석을 고정자로, 철심을 가동자로 하는 구조이기 때문에 가동자에 별도의 전원을 공급하는 리드선이 없어 구조가 단순하고 튼튼한 장점을 갖는다. 본 논문에서는 평판 철심 가동형 직선 왕복 액츄에이터에 대하여 전압 및 운동 방정식, 상태 방정식, 전달함수 해석을 통해 특성을 분석하고, 구동드라이버와 계측회로를 제작하여 전압 및 전류, 주파수 가변에 따른 가동자의 변위특성을 측정하였다. 본 논문에서 도출된 자료는 앞으로, 평판 철심가동형 LOA의 페루프 제어시스템을 갖는 시스템의 응용연구까지로 그 범위를 확장시킬 수 있는 토대를 마련하였다.

#### [참고 문헌]

- [1]Syed A. Nasar and I.Boldea, "LINEAR ELECTRIC MOTORS: Linear Electric Theory, Design, and Practical Applications", Prentice-Hall, Inc. p.242 - p.248,1987
- [2]정상섭, "진동제어 시스템을 위한 리니어 왕복 액츄에이터의 동특성 해석", 충남대 박사학위논문, 2002
- [3]박노희, "평판철심 가동형 왕복운동 액츄에이터의 동특성해석", 석사학위 논문, 2001
- [4]Robert Boylested, Louies Nashelsky, "Electronic Devices and Circuit Theory Fifth Edition" Prentice

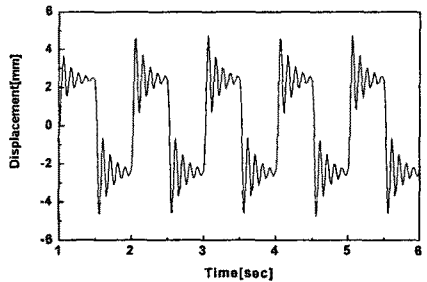


a) 시뮬레이션

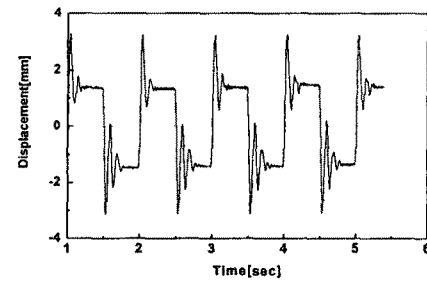


b) 실험

그림 6 가동자 변위특성 (0.5Hz)



a) 시뮬레이션



b) 실험

그림 7 가동자의 변위 특성 (1 Hz)