

평판 가동철심형 LOA의 동특성해석

정석명*, °김형규**, 서진호*, 정상섭*, 박희창***, 문석준**,
 정종인***, 박찬일***, 정태영***

충남대학교 전기공학과*, 한국원자력연구소**, 한국기계연구원***

Analysis of Dynamic Characteristic of Flat Moving Core Type LOA

S.M.Jang*, °H.G.Kim**, J.H.Seo*, S.S.Jeong*, H.C.Park***,
 S.J.Moon***, J.A.Chung***, C.I.Park***, T.Y.Chung***

Chungnam Nat'l Univ.*, KAERI**, KIMM***

Abstract

In the case of need for reciprocating motion, the study for application of Linear Oscillating Actuator(LOA) is being accomplished. LOA is the simpler and more efficient than other linear apparatus using the rotary motor because LOA produce the thrust force without any converter such as cam, clutch, rack, pinion and belt, etc. We designed the flat moving core type LOA and manufactured for trial. This paper shows the structure and dynamic characteristics of LOA.

1. 서론

직선운동을 필요로 하는 경우에 일반적으로는 회전형 모터에 캠, 클리치, 래, 피니언, 벨트 등의 기계적 변환장치를 이용하여 회전운동을 직선운동으로 변환시키게 되므로 마찰손실, 부품의 마모, 소음발생등이 필수적으로 수반되어 전체 시스템의 효율이 저하된다. 그런데 지금까지 국내의에서 개발된 액츄에이터는 유압식으로서 시스템의 구성이 복잡하고, 비효율성, 유지보수등에서 매우 불리하다. 따라서 직선구동력을 직접 발생하는 간접하고 효율적인 전기 시스템으로 구성 할 수 있는 특성을 갖는 리니어 진동 액츄에이터(Linear Oscillating Actuator, 이하 LOA)로 대체하고자 하는 연구의 필요성이 대두되어 국내외적으로 설계 및 해석, 응용에 관한 연구가 이루어지고 있다.[1][2][3].

LOA는 리니어 모터에 정현파 또는 구형파의 교번전압을 공급하여 가동체 자체가 직접 직선적인 스트로크를 반복하여 왕복운동을 가능하도록 하는 장치라 할 수 있다. 그런데 LOA의 구성은 가동체의 재질 및 여자 코일의 수에 따라 분류될 수 있다. 그 종류는 가동체의 재질에 따라서 가동체가 철심으로 이루어진 철심 가동형, 코일로 이루어진 반발형의 코일 가동형, 영구자석으로 이루어진 영구자석 가동형 그리고 철심과 영구자석을 병용한 하이브리드형으로 분류된다. 또한 여자코일의 수에 따라 단일여자 LOA, 이중여자 LOA로 분류 하기도 한다. [2]

본 논문에서는 전자기에너지 변환 이론을 적용한 이중여자 LOA의 추력의 일반식을 구하였다. 평판형 철심으로 구성된 이중여자 LOA의 시제품을 제작하였으며, 구동 드라이브를 제작하여 LOA의 동특성 해석을 하였다.

2.2 LOA의 동작원리

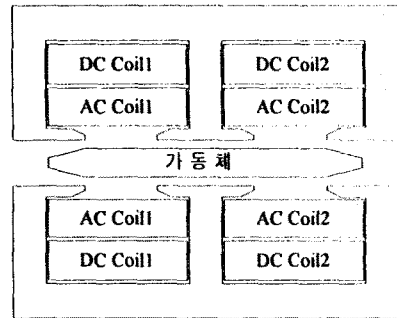


그림 2.1. 바이파일리 권선감기를 한 이중여자 LOA의 단면도

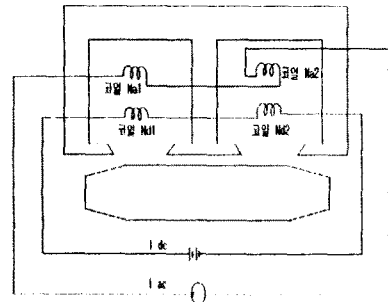


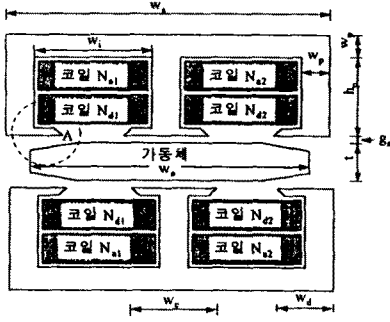
그림 2.2. 코일과 가동철심의 관계 ($N_{1a}=N_{1d}=N_{2a}=N_{2d}$)

그림(2.1)은 여자코일은 한 개의 슬롯에 직류권선과 교류권선을 같이 감는 바이파일리 권선감기를 한 LOA의 구조이며, 그림(2.2)는 여자코일과 가동체와의 관계를 표시한 그림이다. 그림(2.2)에 있어서 직류여자코일 N_{1d} 와 N_{2d} 는 같은방향의 전류를 공급하도록 화동 접속되어 있으며, 항상 자속을 발생 시킴으로써 영구자석과 같은 역할을 한다. 교류여자코일 N_{1a} 와 N_{2a} 는 서로 180°의 위상차를 갖도록 차동접속을 하였다. 그림(2.2)와 같이 직류전류 I_c 와 교류전류 I_a 가 인가될때 기자력으로 인하여 가동체는 좌측으로 운동한다. 다음에 교류전류 I_a 의 극성이 변화하면 가동체는 동일한 원리에 따라 다시 우측으로 운동하게 되어 가동체는 진동을 반복하게 된다.

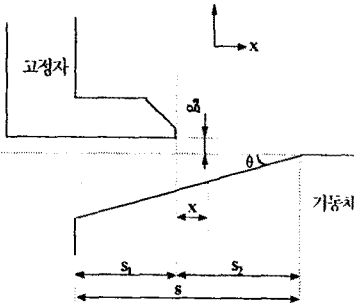
3. 회로정수 및 추력 특성치

3.1 회로정수

LOA의 가동체의 이동에 따른 자속의 분포특성을 항상시킴으로써 추력특성을 개선하기 위하여 가동체의 양 끝에 경사를 주었다[2][4]. 그림(3.1)은 가동체의 양 끝에 경사를 가진 LOA의 구조이다. 가동자의 양 끝에 경사를 준 경우, 경사 부분에서의 공극 및 자로의 유효단면적은 가동체의 이동거리 x 가 변함에 따라 대하여 경사각 θ 의 정현함수로 변화한다.



(a) 경사를 가진 LOA의 단면도



(b) 자극 "A"부분의 상세도

그림 3.1. 경사를 가진 LOA의 구조

따라서 인덕턴스는 식(3.1), (3.2) (3.3)과 같이 표현된다.

$$L_{11} = \frac{2N^2 \mu_0 \{ w_s (D - x \sin \theta) (C - x \cos \theta) + 2g_p (C^2 - x^2 \cos^2 \theta) \} z}{w_s (D^2 - x^2 \sin^2 \theta) + 4g_p (CD + x^2 \cos \theta \sin \theta)} \quad (3.1)$$

$$L_{12} = \frac{2N^2 \mu_0 \{ w_s (D + x \sin \theta) (C + x \cos \theta) + 2g_p (C^2 - x^2 \cos^2 \theta) \} z}{w_s (D^2 - x^2 \sin^2 \theta) + 4g_p (CD + x^2 \cos \theta \sin \theta)} \quad (3.2)$$

$$L_{12} = \frac{2N^2 \mu_0 \{ w_s (D - x \sin \theta) (C - x \cos \theta) + 2g_p (C^2 - x^2 \cos^2 \theta) \} z}{w_s (D^2 - x^2 \sin^2 \theta) + 4g_p (CD + x^2 \cos \theta \sin \theta)} \times \frac{g_p (C + x \cos \theta)}{w_s (D - x \sin \theta) + 2g_p (C + x \cos \theta)} \quad (3.3)$$

여기서, $C = \frac{s_1}{\cos \theta} + (g_p + s_2 \tan \theta) \sin \theta$

$$D = g_p \cos \theta + s_2 \sin \theta + \frac{1}{\cos \theta} (g_p + s_2 \tan \theta)$$

3.2 추력특성 방정식

자극과 교류의 전류를 동시에 인가할 때 코일1과 코일2에 인가되는 전류의 크기는 다음의 식(3.4)와 같다.

$$\begin{aligned} i_1(t) &= I(1 + k \sin \omega t) \\ i_2(t) &= I(1 - k \sin \omega t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

추력 F 는 식(3.5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F(x, \theta) &= I^2 \left\{ 2 \frac{1}{4} k^2 \left(\frac{dL_{11}}{dx} + \frac{dL_{22}}{dx} \right) + 2 \frac{1}{2} k^2 \frac{dL_{12}}{dx} \right\} \\ &+ I^2 k \left(\frac{dL_{11}}{dx} - \frac{dL_{22}}{dx} \right) \sin \omega t + I^2 k^2 \left\{ \frac{1}{4} \left(\frac{dL_{11}}{dx} + \frac{dL_{22}}{dx} \right) \right. \\ &\left. - \frac{1}{2} \frac{dL_{12}}{dx} \right\} \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (3.5)$$

위 식의 우변의 첫째항은 시간에 관계없이 가동자의 거리만의 함수로 표시되었으며, 둘째항은 가동자를 왕복운동시키는 추력을 발생시키며, 주파수는 전원 주파수와 일치하게 된다[2][3].

4. LOA의 동특성 해석

4.1 LOA의 구조

그림(4.1)은 제작된 LOA의 전경사진이다. 자로의 유효면적을 증가시키기 위해 고정자의 자극에 보극을 설치하였으며, 또한 가동체의 양 끝에서의 자속의 분포특성을 항상시키기 위하여 양 끝에 34°의 경사를 주었다[2]. 고정자 및 가동체의 재질은 순철이며, 고정자 사이에 가동체를 지지하기 위하여 리니어 베어링을 사용하였다. 공극은 0.5mm로 하였다. 가동체가 요구 최대 스트로크인 +5mm를 이탈하지 않도록 양측면에 스톱퍼를 설치하였다. 표(4.1)은 LOA의 기계적 사양을 나타내었다. 여기서 코일은 1mm의 동선용 1개의 슬롯에 직류코일 N_1 과 교류코일 N_2 의 2개의 권선을 각각 770회씩 감아 자극과 교류를 동시에 공급할 수 있도록 바이파일의 권선을 하였다. 표(4.2)에 전기적 사양이 나타나 있다.

표 4.1. LOA의 기계적 사양

	철심	순철
	폭 (w_s)	
고정자	길이 (z)	200 mm
	pole의 폭 (w_p)	15 mm
	side pole shoe의 폭 (w_d)	21 mm
	center pole shoe의 폭 (w_c)	27 mm
	pole의 높이 (h_p)	52 mm
	도체창의 폭 (w_i)	45 mm
	가동체	철심
폭 (w_a)		110 mm
길이 (z)		200 mm
두께 (t)		24 mm
공극 (g_a)		0.5 mm

표 4.2. LOA의 전기적 사양

최대 입력전류 (I)	3.12 A
최대 입력전력 (P)	194 W
도체 굵기	1.0 mm
직류 권선수 (N _d)	770 turns
교류 권선수 (N _a)	770 turns

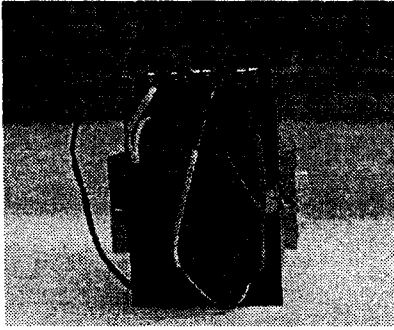


그림 4.1 제작된 LOA의 전경사진

4.2. LOA의 동특성

LOA의 동특성을 실험하기 위하여 그림(4.2)와 같이 실험장치를 구성하였다.

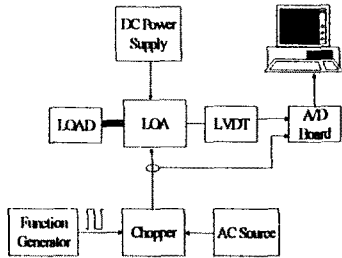


그림 4.2. 실험장치의 블록선도

4.2.1 전류 및 스트로크의 계측

(1) 교류전류의 계측

DC Power Supply로부터 공급되는 직류전류는 정전류 운전모드로 1A를 공급하였다. 그러나 쇼퍼로부터 공급되는 교류전류는 전압을 PWM방식에 의하여 변조된 전원을 공급하기 때문에 추력의 계산을 위하여 전류의 측정이 필요하다. 전류의 측정엔 출력이 1mV/1A인 전류 프로브를 이용하여 전압신호로 변환한 후 A/D Board를 이용하여 초당 2000개의 샘플을 입력받았다. 그림(4.3)은 실제 인가된 전류 및 이때 가동체가 이동한 스트로크에 대한 그림이다. 그림(4.3)에서 LOA를 구동하기 위한 교류 공급 전원인 쇼퍼의 전류 파형이 일정하지 않고, 따라서 가동체의 스트로크도 일정하지 않음을 보여준다. LOA의 추력을 계산하기 위하여 그림(4.3)에서 비교적 스트로크가 일정한 "Fitting area"를 선택하여 교류 전류의 실효치를 구하였다. 그림(4.4)는 교류전류의 실효치를 구하기 위하여 근사화한 전류를 나타내며, 교류 전류의 실효치는 식(4.1)과 같이 표현된다.

$$i = 1.2787 \sin(2\pi ft) - 0.2784 \text{ (A)} \quad (4.1)$$

(2) 스트로크의 계측

스트로크를 최대 ±5mm로 유지하기 위하여 LOA의 양끝에 스토퍼를 설치하였으므로 LVDT의 측정범위도 ±5mm 인것을 선정하였다. LOA에 직류와 교류가 동시에 여자되면 가동체에 연결된 LVDT도 가동체의 변위에 따라 좌우로 움직이고, 스트로크는 DC 전압값으로 출력되며 샘플링 시간은 초당 2000개의 샘플을 A/D 보드를 통하여 입력받았다. 인가전류에 대한 스트로크는 그림(4.3)에 나타나 있다.

4.2.2 속도, 가속도 및 추력

Fitting area에서의 속도 및 가속도는 그림(4.4)에 나타나 있다. 그림(4.3)과 그림(4.4)에서 가동체의 속도 및 가속도는 실제로 공급된 교류 전류가 침투치에 도달할 무렵 급격히 증가했음을 알 수 있다. 그림(4.5)는 직류를 합성한 전류와 추력분포를 비교한 그림이다. 그림(4.6)은 실측된 추력과 식(4.1)의 근사화된 전류를 이용하여 계산된 스트로크에 대한 추력 및 전류에 대한 그래프이다. 그림에서 스트로크의 좌우 중단에서 추력은 계산값과 마찬가지로 최대값을 가지나 4H5H6I, 가동체의 스트로크 내에서는 오차가 있음을 알 수 있다. 이는 그림(4.3)의 전류 파형 그래프에서 보여준 바와 같이 쇼퍼에서의 출력전류가 규칙적이지 않기 때문에 발생한다고 할 수 있다.

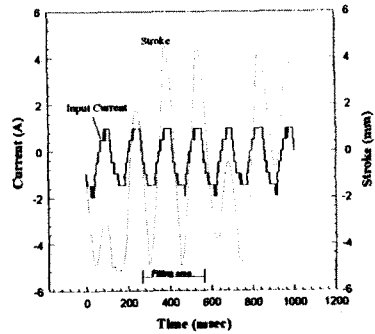


그림 4.3. 교류전류 및 스트로크의 실측파형

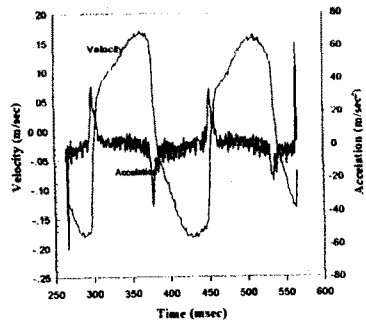


그림 4.4. 근사화를 위한 fitting area에 대한 속도 및 가속도

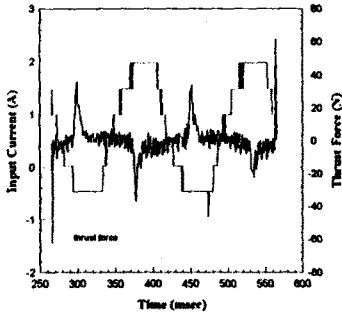


그림 4.5. 전류와 추력분포의 비교

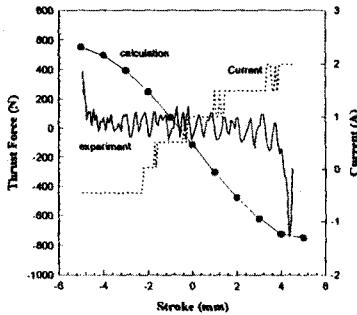


그림 4.6. 측정추력과 계산추력의 비교

5. 결론

LOA를 실제 산업 및 진동 시험장비 등에 응용을 위한 기본을 확립하기 위하여 평판형 가동철심형 이중여자 LOA를 설계, 제작 및 실험을 하였다. 교류 공급 전원의 미확보로 인하여 설계용량에 대한 실험, 전류 및 주파수의 변화에 대한 특성 실험을 수행하지 못하였으나, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평판 가동철심형 LOA의 시작품을 설계, 제작하고 실험장치를 구성하여 동특성 해석을 하였다. 그러나 실험을 통한 동특성 해석에서는 교류 공급전원의 신뢰성 약화로 정확한 추력을 구하지 못하였으나, 최대 스트로크에서 최대추력이 발생됨은 컴퓨터에 의한 시뮬레이션과 실험에서의 결과가 동일함을 보였다.

2. 본 연구를 통하여 LOA를 실제 환경에서 응용할 수 있는 기본을 확립하였으며, 정밀한 교류 공급전원을 구비하여 여러범위의 전류 및 주파수에 대한 정확한 동특성을 해석하고 이의 응용분야를 개발해야 할것이다.

Reference

- [1] S.A. Nasar, I. Boldin, "Linear Electric Motors : Theory, Design and Practical Applications", Prentice-Hall, 1987.
- [2] H. Yamada, et al. "Linear Motor Application Handbook", Kogyo Chosakai, 1986.
- [3] Magnetic Actuator Technical Committee. "Linear Motor and there Application", IEE of Japan, 1984.
- [4] H. Yamada, et al. "Performance Analysis of Cylindrical Moving Core Type Linear Oscillatory

Actuator with a Long Stroke", T.IEE Japan, Vol. 108-D, No. 5, p.503-p.508, 1992.

[5] D. Ebihara, M. Watada, "Development of A Single-winding Linear Oscillatory Actuator", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.28, No.5 p.3030-p.3032, 1992.

[6] H. Yamada, et al. "Static Thrust Analysis of a Cylindrical Moving Core Type Linear Oscillatory Actuator", T.IEE Japan, Vol. 112-D, No. 7, p.657-p.662, 1992.