

리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수 도출

論 文
48B-5-3

Design and Extraction of Control Parameters of a Moving-Coil-Type Linear Actuator for Driving of Linear Reciprocating Motion Control Systems

張錫明*, 鄭相變**, 朴喜昌***, 文碩俊§, 朴贊一§§, 丁泰榮§§§
(S.M.Jang, S.S.Jeong, H.C.Park, S.J.Moon, C.I.Park, T.Y.Chung)

Abstract - Recently, many linear motion generators and motors are rapidly finding applications that ranges from short stroke linear motion vibrators, such as dynamic cone type loudspeakers to stirling engine driven linear reciprocating alternators, compressors, textile machines etc. The stroke-length may go up to 2m, and the maximum speed is in the range of 5 to 10m/s with oscillating frequency as high as 15 kHz. Therefore, the linear oscillating actuators(LOAs) may be considered as variable speed drivers of precise controller with stroke-length and reversal periods during the reciprocating motion.

In this paper, the design, fabrication, experiments, and extraction of control parameters of a moving coil type LOA for driving of linear reciprocating motion control systems, are treated. The actuator consists of the NdFeB permanent magnets with high specific energy as the stator produced magnetic field, a coil-wrapped nonmagnetic hollow rectangular bobbin structure, and an iron core as a pathway for magnetic flux. Actually, the design is accomplished by using FEM analysis for the basic configuration of a magnetic circuit, and characteristic equations for coil design.

In order to apply as the drivers of a linear motion reciprocating control system, the control parameters and circuit parameters, such as input voltage-stroke, exciting frequency-stroke, coil inductance and so on, are extracted from the analysis and experiments on concerning a fabricating LOA.

Key Words : Reciprocating motion, Moving-coil-type LOA, NdFeB, Control parameter

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 스텔링 엔진, 콤프레서, 섬유기기, 능동제어, 초정밀 위치제어와 같이 짧은 스트로크의 리니어 왕복운동 시스템이 광범위하게 응용되고 있다. 따라서 구동력 발생장치로 리니어 왕복구동용 액츄에이터가 반드시 필요하며, 최근 구동개념 및 종류, 방법이 다양하게 국내외적으로 응용 개발되고 있다[1-4].

지금까지는 유압이나 가스터빈에 의한 실리더, 회전형 모터와 기계적 변환 보조기구에 의한 리니어 왕복운동시스템이 응용 개발되어왔다. 그러나 많은 부품이 필요하고 시스템이 복잡하여 중량이나 부피가 커지므로 생산비나 유지관리비 등 경제성 측면에서 매우 불리하므로 대폭 개선해야만 한다[4]. 이러한 점을 극복할 수 있는 가장 효과적인 방안으로 전자기

력 리니어 왕복운동 액츄에이터(Linear Oscillating Actuator: 이하 LOA)가 있다. 이는 영구자석 또는 전자석에 의한 자계와 전류코일의 상호작용에 의해 구동력을 직접 발생하므로, 리니어 구동시스템에 응용하는 경우 기계적 부품수를 대폭 저감된다. 따라서 시스템의 콤팩트성, 경량성, 생산비나 유지관리비 저감에 따른 경제성 등에서 단연 우수해진다[1-4].

전자기력 LOA는 개념과 구조 및 제작방법 등에 따라 종류가 다양하다. 즉 가동자의 구성방법에 따라 가동철심형, 가동코일형, 가동자석형 등이 있는데 각각에 대한 특성이 다르므로 응용분야에 따라 종류를 결정한다. 그 중에서도 가동코일형은 영구자석 계자와 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성된 전자기력 액츄에이터이며, 전류의 크기나 방향에 따라 가동코일이 2m/s이상의 속도로 정확하게 명령신호에 응답하므로 미세성, 선형성이 특히 우수하다. 그러나 지금까지는 영구자석재료로 페라이트, 사마륨코발트 등이 사용되었기 때문에 2~5kgf 이하의 경량물의 고속이동 등 소형시스템으로만 응용개발이 되어 왔다. 그러나 최근 잔류자속밀도가 1.0T이상의 NdFeB가 개발됨에 따라 고밀도 영구자석을 이용한 고회력 대형 시스템의 제작이 가능해졌다[2-5]. 따라서 최근에는 항공기, 인공위성, 선박, 차량 등의 탑재 부품을, 실제 환경과 동일한 조건을 갖춘 모의상황에서 성능시험을 하는 경우에 필요한 진동 발생장치[1,3,4], 건축구조물이나 선박 등의 대형 구조물 진동을 능동적으로 제어하는 시스템[4] 등

* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 ** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程
 *** 非 會 員 : 韓國機械研究院 責任研究員
 § 非 會 員 : 韓國機械研究院 先任研究員
 §§ 非 會 員 : 韓國機械研究院 裝備開發室長
 §§§ 非 會 員 : 韓國機械研究院 研究部長
 接受日字 : 1998년 11월 20일
 最終完了 : 1999년 3월 16일

에서 고밀도 구동력 발생장치로도 널리 개발이 되고 있으며 장차 그 응용분야는 더욱 확대될 전망이다[1-4].

저자들은 가동코일형 LOA의 정특성을 해석하고 시험하여 응용하기 위한 기본자료를 얻어 이미 제시한 바가 있으며 [7,8], 또한 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 시스템의 구동력발생장치로 응용한 예도 있다[4]. 그러나 빈번한 가속, 감속, 정지동작을 고속으로 반복하는 서보 액츄에이터로서 시스템의 정밀구동장치로 응용하기 위해서는, 과도상태를 포함한 운전특성의 정밀한 파악이 매우 중요하다. 이를 위해서는 정특성 및 동특성의 기본특성 해석과, 저항, 인덕턴스, 시정수 등의 제정수를 산정하고 이를 바탕으로 한 전기적, 기계적인 전달함수의 도출이 필수적이다.

고속왕복운동을 고속으로 제어하는 시스템이므로 구동력, 속도, 전력, 전류-전압-주파수 동특성의 실시간 계측이 매우 어렵다. 따라서 저자들은 설계, 제작을 한 후, 제작된 LOA 시스템을 대상으로 LVDT 등의 센서와 실시간 모니터링을 통한 특성의 계측 및 자료처리 등에 관한 know-how를 축적하며 시험을 수행하였다. 즉 가동자 코일의 위치에 따라 전압 및 전류의 턴-온 파형을 디지털 오실로스코프와 컴퓨터 및 자료획득 전문소프트웨어에 의하여 측정하여 시정수, 인덕턴스, 저항의 회로정수와 명령신호의 전압, 전류, 주파수에 따른 응답특성을 획득하여, 제어시스템의 설계알고리즘 작성에 필요한 전달함수를 얻어 제시하였다. 이로써 가동코일형 리니어 왕복운동 액츄에이터 설계기술 확립과 서보제어시스템에 효과적으로 응용하기 위한 기본자료를 제시하게 되었다.

2. 가동코일형 리니어 왕복운동 액츄에이터

2.1 가동코일형 LOA 모델

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 하게된다[1-4]. 이때 가동자 코일에 작용하는 단위길이당의 힘 F [N/m]은 다음 식(1)과 같다.

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \quad \text{[N/m]} \quad (1)$$

만일 가동자가 x 방향으로만 운동하고 LOA의 길이, 권선수

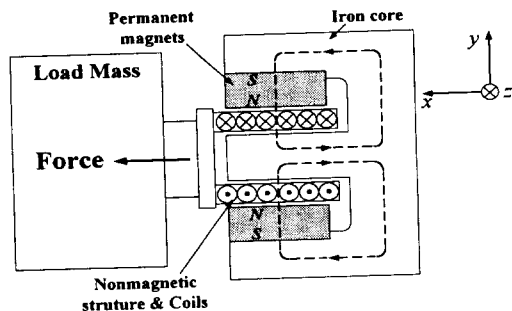


그림 1 가동코일형 LOA
Fig. 1 Moving-coil-type LOA

등의 설계사양을 고려하면 발생 추력은 식(2)와 같다.

$$F_x = 2lNB_g i = k_E i \quad (2)$$

여기서 l 은 공극자계속에 있는 가동코일의 축방향 유효길이, N 은 공극자계속에 있는 가동자 코일에서의 유효 권선수, B_g 은 영구자석 동작점에서의 자속밀도, i 는 가동자 코일에 흐르는 전류, k_E 는 추력 및 유기전압 상수로 $2lNB_g$ 이다.

2.2 특성 방정식과 속도 프로파일

2.2.1 특성 방정식

가동코일형 LOA의 전류코일에서의 전압방정식은 식(3)과 같다.

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + k_E \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

여기서 R :코일 저항, L :코일 인덕턴스, dx/dt :가동자의 속도이며, 오른쪽 세번째 항은 자계속에서 코일의 운동에 의한 유기 기전력이다.

기계적인 운동방정식은 식(4)와 같다.

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

여기서 M : 가동부 질량, C_d :마찰계수, d^2x/dt^2 :가동자 가속도이다. 만일 가동자의 마찰력에 의한 제동을 무시($C_d \approx 0$)하면 식(4)를 식(3)에 대입하여 식(5)를 얻을 수 있다.

$$M \frac{L}{k_E} \frac{d^3x}{dt^3} + M \frac{R}{k_E} \frac{d^2x}{dt^2} + k_E \frac{dx}{dt} = e \quad (5)$$

2.2.2 속도 프로파일

가동자의 왕복운동은 진자운동과 유사하므로 그림 2와 같은 정현파 모양의 속도 프로파일을 검토하였다. 이로부터 시간에 따른 변위, 속도, 가속도, 추력 등 모터의 특성값을 얻게 되며, 제작을 위한 설계 파라미터를 구할 수 있다.

X_m 이 왕복운동에서의 스트로크라 하면, 시간에 대하여 정현적인 변화를 하므로 변위 $x(t)$ 는 식(6)과 같다.

$$x(t) = X_m \sin \omega t \quad (6)$$

여기서 X_m 은 최대변위 또는 스트로크, ω 는 왕복운동에 따른 각주파수이다. 따라서 시간에 따른 속도 $v(t)$, 추력

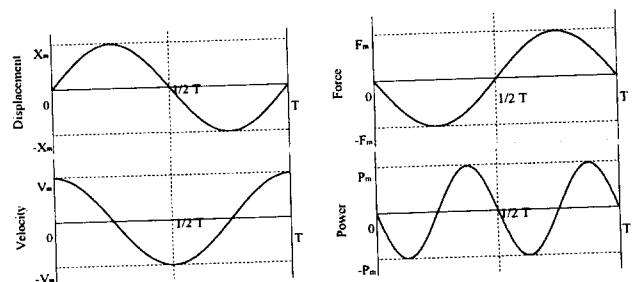


그림 2 변위, 속도, 힘, 출력의 프로파일

Fig. 2 Displacement, velocity, force and power profiles

$F(t)$, 출력 $P(t)$ 는 각각 식(7) 및 식(8), 식(9)와 같다.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X_m \omega \cos \omega t \quad (7)$$

$$F(t) = -MX_m \omega^2 \sin \omega t \quad (8)$$

$$P(t) = F(t) \cdot v(t) = -\frac{1}{2}MX_m^2 \omega^3 \sin 2\omega t \quad (9)$$

여기서 M 은 부하 중량이다.

2.3 전달 함수와 제어정수

서보 액츄에이터로써 구동을 하기 위한 가동코일형 LOA는 가/감속 및 정지동작을 빈번하게 반복하므로, 발생 추력은 물론 과도상태에서의 제어정수가 매우 중요한 의미를 갖는다. 따라서 가동코일형 LOA의 전달함수와 응답성능을 결정하는 전기적, 기계적 시정수를 구하기 위하여 식(3), 식(4)와 식(5)를 라플라스 변환하여 인가전압 e 와 속도 v 사이의 전달함수 $G_{v-e}(s)$ 를 구하면 식(10)과 같다.

$$G_{v-e}(s) = \frac{v(s)}{e(s)} = \frac{k_E}{s^2 LM + s(RM + LC_d) + k_E^2} \approx \frac{k_E}{s^2 LM + sRM + k_E^2} \quad (10)$$

여기서 마찰저항은 매우 작다고 가정($C_d \approx 0$)하면, 전달함수는 식(11)과 같다.

$$G_{v-e}(S) = \frac{1/k_E}{\left(1 + \frac{sRM}{k_E^2}\right)\left(1 + \frac{sL}{R}\right)} \quad (11)$$

여기서 RM/k_E^2 : 기계적 시정수, L/R : 전기적 시정수이다. 즉 LOA에 전압 e 를 스텝모양으로 인가했을 때 L/R 의 시정수에서 모터 전류값이 확립된 후, RM/k_E^2 의 시정수이며 모터 속도가 상승된다는 것을 의미한다. 따라서 L, R, M, k_E 의 정수가 모터의 응답성을 결정하게 된다.

3. 가동 코일형 LOA의 설계

3.1 설계를 위한 기본식

3.1.1 공극자속밀도

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

$$B_g = k \times \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_r}{P_d/g}} \quad (12)$$

여기서 B_r :잔류자속밀도, μ_r :자석 비투자율, P_d :자석두께, g 는 공극길이, k 는 자기회로 형상에 의한 보정계수이다.

3.1.2 발생추력과 전자기력식을 통한 기자력 계산

중량 M 의 부하를 스트로크 X_m 과 각주파수 ω 로 구동하기 위한 최대치 추력 F_{mp} 은 식(8)로부터 식(13)을 얻는다.

$$F_{mp} = MX_m \omega^2 [N] \quad (13)$$

한편, 자속밀도 B_g 의 자계속에서 기자력 NI_p 의 전류코일에 의하여 발생하는 최대치 전자기 추력 F_{ep} 은 식(2)로부터 식(14)를 얻는다.

$$F_{ep} = 2B_g l NI_p \quad (14)$$

여기서 I_p : 입력전류의 최대치이다. 따라서 마찰손실을 무시할 경우 요구 추력은 전자기 추력과 같아야 한다. 즉 $F_{mp} = F_{ep}$ 이므로 식 (13)과 식(14)로부터 기자력을 식(15)와 같이 계산할 수 있다.

$$NI_p = \frac{MX_m(2\pi f)^2}{2B_g l} \quad (15)$$

3.1.3 코일 턴수

전기적인 시정수가 기계적인 시정수보다 상대적으로 작기 때문에 설계시에는 $L(di/dt) \approx 0$ 으로 가정한다[1]. 따라서 코일에 대한 전압방정식 식(3)으로부터 식(16)을 얻는다.

$$V = \rho_c a N J_c S + 2l NB_g X_m (2\pi f) \quad (16)$$

여기서 ρ_c : 도체의 저항률, a : 턴당 길이, J_c : 전류밀도, S :도체의 단면적이다. 따라서 코일 턴수는 식(17)에 의해 정해진다.

$$N = \frac{V}{\rho_c a J_c + 4\pi f B_g l X_m} \quad (17)$$

3.1.4 코일당 전류

식(15)로부터 구해진 기자력 NI_p 는 식(18)을 통해 전류와 턴수를 분리할 수 있다.

$$I_p = \frac{NI_p}{N} \quad (18)$$

3.2 자기회로 설계

3.2.1 NdFeB 영구자석

자기회로를 구성하기 위한 영구자석은 최근 응용되고 있는 네오디뮴계열의 자석이며, 실제 LOA를 적용한 구조물 진동의 능동 제어 시스템에서 요구하는 사양, 즉 형상, 크기 등의 구조적 제약이 없었기 때문에 기존의 제품을 사용하였다. 영구자석의 $5 \times 5 \times 2.5$ [cm]의 치수를 갖는 MQ30 계열로 그림 3과 같은 B-H특성을 갖는다.

3.2.2 고정자 자로의 폭 결정

영구자석으로 자기회로를 구성할 때 정밀설계에 앞서 자성체의 두께를 개략적으로 결정한다. 즉, 영구자석이 감자되지 않는다고 가정하면 그림 3과 같이 잔류자속밀도가 약 1.1[T]가 된다. 따라서 자성체의 두께는 포화자속밀도를 1.8[T]로 볼 때, 폭 50[mm]의 영구자석으로부터 유입되는 자속을 받아 포화가 되지 않는 자기회로를 구성하기 위해서는 자성체의 최소폭은 30[mm]정도가 된다.

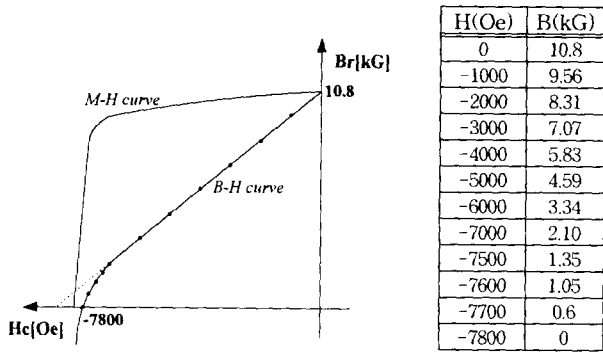


그림 3 제작에 사용될 NdFeB 영구자석의 감자특성
Fig. 3 Magnetic characteristics of NdFeB PM for fabrication

3.2.3 자기회로와 영구자석 배치법

영구자석과 자성체로 구성된 자기회로는 기본형상에 따라 자기특성이 결정되므로 영구자석의 배치방법과 함께 효율적인 형상의 검토가 우선된다. 즉 그림 4와 같이 영구자석의 배치가 서로 다른 세 가지 모델을 정하고, FEM 해석을 통하여 공극자속밀도 특성이 가장 양호한 모델을 선정하였다. 영구자석과 자성체 두께 및 공극 단면적은 동일한 조건을 갖도록 해석하였다. 그림 5는 그림 4의 각 모델에 대한 공극자속밀도 분포특성으로 모델 C가 가장 양호한 특성을 나타내므로 자기회로의 기본형상으로 선정하였다.

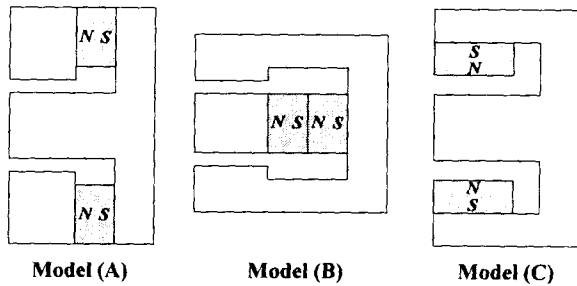


그림 4 가동코일형 LOA를 위한 자기회로 모델
Fig. 4 Magnetic circuit models for LOA

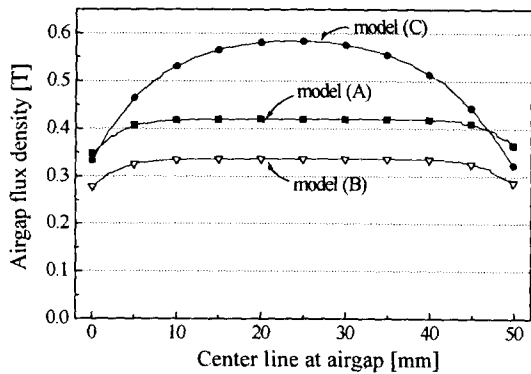


그림 5 그림 4 (A)(B)(C) 모델에 따른 공극자속밀도 비교
Fig. 5 Airgap flux density of model (A)(B)(C) of Fig.4

3.3 공극길이에 따른 기자력 및 추력 특성

선정된 기본모델에서 공극의 크기는 공극자속밀도와 기자력 및 권선수, 코일 등을 결정하는 중요한 변수가 된다. 즉, 공극이 커지면 자속밀도, 즉 자기장하가 감소되어 추력이 작아진다. 그러나 공극 안에 놓여지는 가동코일을 시행할 수 있는 공간이 커지므로 기자력, 즉 전기장하가 증가하여 추력을 크게 할 수 있다.

따라서 공극 길이에 따른 발생추력 및 자기장하의 증감과, 공간과 기자력의 증감으로 인한 추력과 전기장하의 영향을 상호 검토하여 적절한 값에서 결정하는 것이 매우 중요하다. 이러한 특성을 검토하기 위하여 공극길이에 따른 공극자속밀도와 추력 관계를 FEM 해석에 의해 그림 6에서 나타냈다. 즉 공극이 증가함에 따라 자속밀도는 감소하지만 기자력의 증가로 인하여 추력이 증가함을 볼 수 있다. 제어시스템 설계자로부터 요구된 추력 250[N]정도를 발생시키기 위해 그림 6으로부터 전류밀도 5[A/mm²]에서 공극은 15[mm]이면 적합할 것으로 예상되어 이 값으로 설정하였다.

3.4 계자와 전기자 설계 과정

제작하고자 하는 LOA는 23kg의 부하중량으로 500kg급 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 시스템에 응용을 하기 위한 것이다[4]. 따라서 전체시스템의 설계자가 부피, 중량 등을 종합적으로 감안하여 설정한 기계적 사양은 대략 150mm×100mm×200mm 이다. 이러한 요구사항과 3.2절과 3.3절에서 결정된 자기회로를 바탕으로 가동코일 사양 및 권선수를 결정해야 한다. 그림 7은 자기회로와 식(12)~식(18)까지의 전기자 설계 과정을 나타낸 흐름선도이다. 설계 결과 코일 직경은 1[mm]이고 영구자석이 만든 유효자장내의 코일 턴수는 380[turns]이 된다. 표 1은 결정된 설계 파라미터를 포함한 모터 사양이며, 그림 8은 제작된 영구자석 계자 시스템과 가동코일로 구성된 LOA의 사진이다[4,5].

4. 제어정수 도출과 특성 시험

4.1 추력 및 유기기전력 상수

2.1절 식(2)의 추력 및 유기기전력 상수 k_E 는 코일 길이 $2l$ 과 턴수 N , 영구자석에 의한 평균 공극자속밀도 B_g 에 의

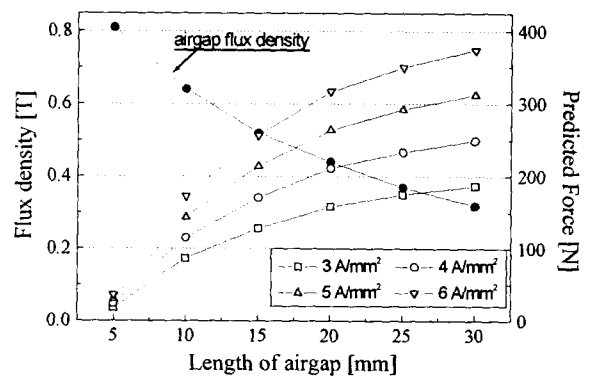


그림 6 공극길이에 따른 공극자속밀도와 예상 추력
Fig. 6 Flux density and predicted thrust vs. airgap

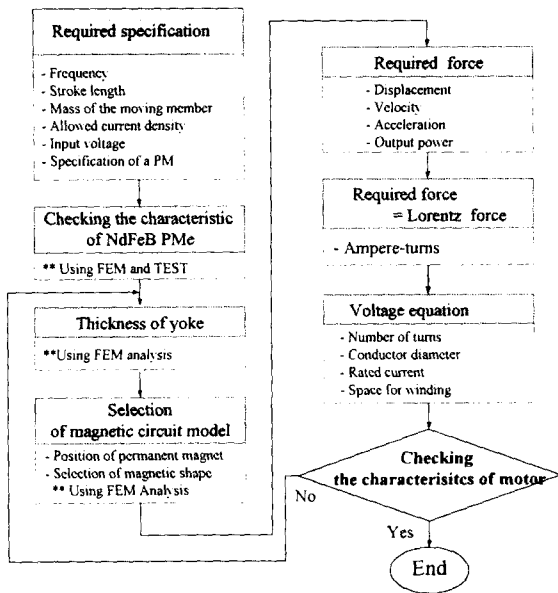


그림 7 설계를 위한 흐름선도
Fig. 7 Outline of flow-chart for a design

표 1 제작된 모터의 사양

Table 1 Specifications of the fabricated motor

항 목	사 양	
정 격 전 압	25[V]	
정 격 전 류	4[A]	
부하질량(가동자 포함)	23 [kg]	
코일당 턴수	55×9	
코일 직 경	1.0 [mm]	
유 효 길 이	150 [mm]	
영구 자석	계 열	NdFeB(MQ30)
	잔류자속밀도	1.1 [T]
	자 석 치 수	5×5×2.5 [cm]
전 류 밀 도	5 [A/mm ²]	
공 격	15 [mm]	
스트 로 크	±5 [mm]	

하여 결정된다. 본 모델의 경우, 코일의 턴당 유효길이는 영구자석 계자의 길이의 2배와 같다. 하지만 실제 공극이 매우 크기 때문에 누설이나 fringing에 의해 공극자속이 자석의 양끝에서 다소 감소하므로 식(2)에 의해 계산된 값과는 약간 차이가 난다. 따라서 이를 고려한 추력 및 유기기전력 상수와 관련된 파라미터와 그 값을 표 2에서 보여주고 있다.

4.2 시정수

그림 9는 디지털 오실로스코프로 계측된 인가 전압과 전류의 턴-온 파형으로 가동코일의 인덕턴스에 의해 전류파형이 지연됨을 알 수 있다. 그런데 전류 파형의 지연시간은 코일 위치에 따라 달라지는데, 이를 위해 그림 10에서 가동코일의 위치를 정의하였다. 즉, 가동코일의 위치 x 는 영구자석과

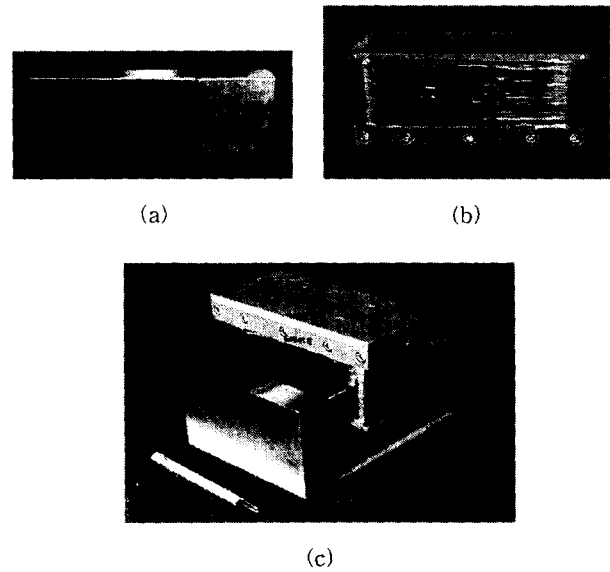


그림 8 제작된 가동자 및 계자의 실제 사진

- (a) 영구자석 NdFeB의 계자
- (b) 플라스틱 보빈과 코일로 구성된 가동자
- (c) 계자와 가동코일의 조립도

Fig. 8 Photograph of a manufactured moving coil and Permanent Magnet

- (a) Permanent magnet
- (b) moving parts(bobbin and coil)
- (c) Assembling view

표 2 LOA의 추력 및 유기기전력 상수

Table 2 Force and emf constant of a LOA

항 목	기 호	값
코일 1턴당 유효길이	$2l$	0.28 [m]
코일 유효 턴수	N	380 [턴]
영구자석에 의한 공극자속밀도	B_m	0.44 [T]
추력 및 유기기전력 상수	k_E	46.816

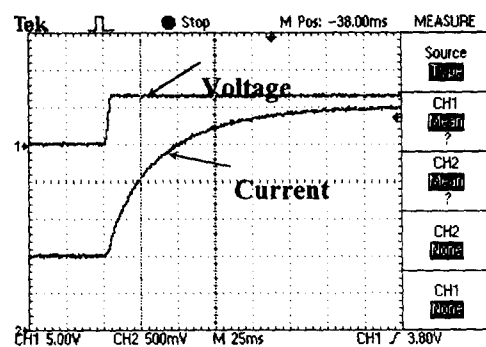


그림 9 전압과 전류의 턴-온 파형

Fig. 9 Turn-on waveform of voltage and current

가동코일의 중심축 사이의 변위를 말한다. 그림 11은 가동코일의 위치에 따른 전류의 턴-온 파형으로 가동자의 위치가 (+) x 에 위치할수록 전류가 빠르게 상승한다. 이는 가동코일에 쇠교하는 자속이 작아지므로 인덕턴스와 시정수의 감소를 가져오기 때문이다.

4.3 코일저항 및 인덕턴스

코일 인덕턴스는 제어시스템 설계에 있어서 중요한 파라미터가 된다. 즉 가동코일형 LOA를 진동제어나 서보제어 시스템의 구동력발생장치로 이용하는 경우, 속응성이 양호하도록 시정수를 작게 하기 위하여 인덕턴스를 적게 한다. 따라서 LOA를 진동 제어 시스템에 응용하기 위하여 그림 11과 같은 전류의 턴-온 파형으로부터 시정수 τ 를 구하고 이를

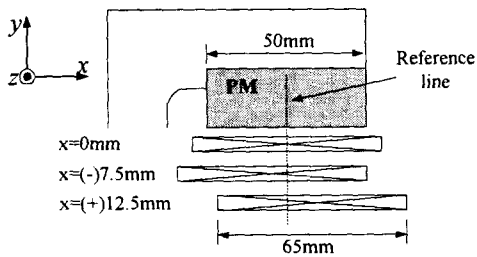


그림 10 영구자석을 기준으로 한 가동코일의 위치 설정
Fig. 10 Definition of the position of moving coils

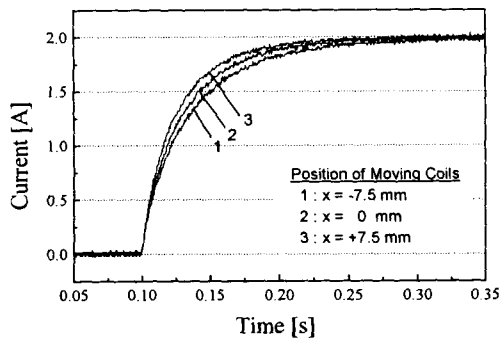


그림 11 가동코일 위치에 따른 전류의 턴-온 파형
Fig. 11 Turn-on waveform at the variation of the position of moving coils

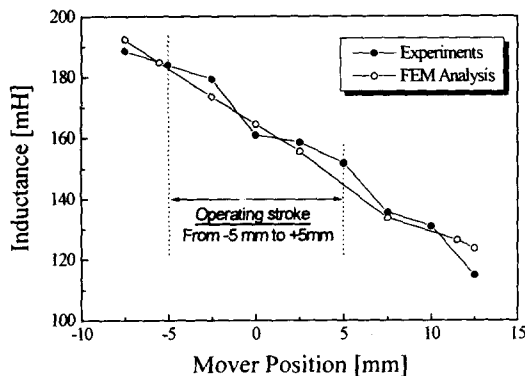


그림 12 가동코일 위치에 따른 코일의 인덕턴스
Fig. 12 Inductance vs. position of moving coils

식(19)에 대입하여 코일 인덕턴스 L 을 계산하였다.

$$L = \tau R \tag{19}$$

여기서 R : 코일 DC 저항으로 측정값은 5.8 [Ω]이다. 그림 12는 식 (19)와 FEM 해석에 의해 계산된 인덕턴스를 가동코일의 위치에 따라 나타낸 것이다. 코일 인덕턴스는 실험치와 FEM 해석치가 잘 부합되는 것을 보이며, 운전 범위 ± 5 [mm] 이내에서 150 ~ 180 [mH]를 갖는다. 그리고 4.2절에서 언급하였듯이 가동코일이 중심위치에서 멀어질수록 인덕턴스는 감소하는 경향을 갖는다.

4.4 LOA 응답특성 및 제어를 위한 전달함수도출

4.4.1 LOA 구동 및 계측 시스템 구성

그림 13은 LOA 구동 및 계측 시스템의 구성도이다[4]. 가동자 위치는 보조질량의 중심축에 LVDT를 부착하여 센싱하였으며, 그 신호는 서보앰프의 입력단에 궤환신호로 입력된다. 서보앰프에서는 함수발생기 신호와 가동자 위치에 따른 LVDT의 궤환신호를 비교·연산하여 LOA를 제어신호에 따라 구동하게 된다. 이때 LOA의 가동코일에 직접 인가되는 주파수는 제어신호와 같으며, 입력전압은 제어 전압에 비례한다. 한편, LVDT 출력신호와 제어전압은 A/D보드를 통하여 컴퓨터로 계측되어 LabView로 자료를 획득하여 처리한다.

4.4.2 제어전압과 주파수에 따른 스트로크 특성

그림 14는 5~20Hz의 제어 신호를 구동 드라이버에 인가하였을 때, 제어 전압에 따른 가동자의 스트로크를 보여준다. 스트로크는 전압이 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 이를 통해 가동코일형 LOA는 선형성이 매우 뛰어나며 전압에 의한 가동자의 스트로크 제어를 효과적으로 할 수 있음을 알 수 있다.

그림 14의 각 주파수에 따른 제어전압-스트로크의 곡선의 기울기를 근사화(fitting)시킨 그래프와 식이 그림 15와 식 (20)에서 각각 보여진다. 식 (20)은 실제의 시스템을 제어하기 위한 알고리즘의 작성에 매우 유효한 자료가 된다.

$$slope = 2.135 e^{-\frac{f-4.672}{5.996}} + 3.569 e^{-\frac{f-4.672}{1.241}} \tag{20}$$

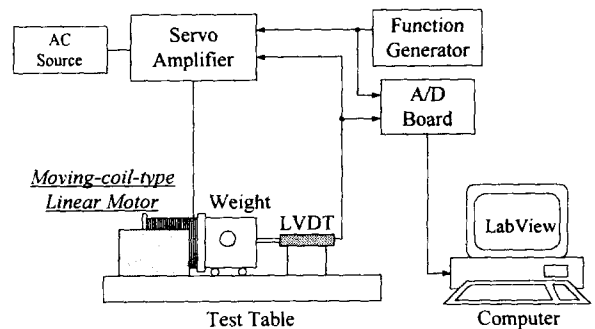


그림 13 LOA 구동 및 계측 시스템 구성도
Fig. 13 Driving and measurement system

여기서 slope는 그림 14의 직선 기울기, f 는 입력주파수이다.

그림 16은 제어전압을 일정하게 유지하고 주파수를 5[Hz]로부터 20Hz까지 변화시키는 경우 각 주파수에서의 스트로크 크기를 측정한 결과이다. 즉 전류 및 전압을 고정시킨 경우, 주파수의 변화에 따라 스트로크는 지수함수적으로 감소함을 볼 수 있다.

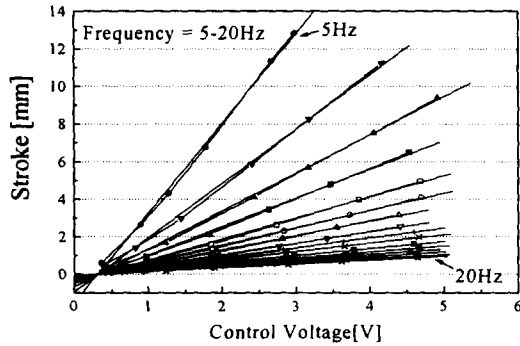


그림 14 주파수에 따른 제어전압-스트로크 특성
Fig. 14 Stroke vs. input voltage with variation of input frequency

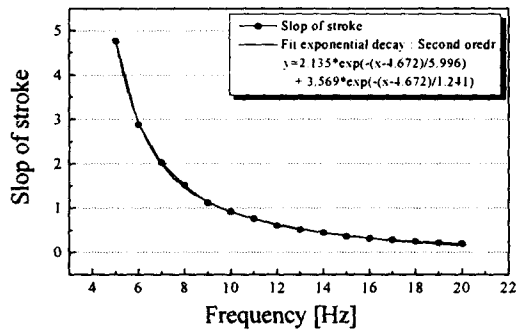


그림 15 그림 14에서의 각 주파수에서의 기울기 특성
Fig. 15 Slope of fig. 14 with each frequency

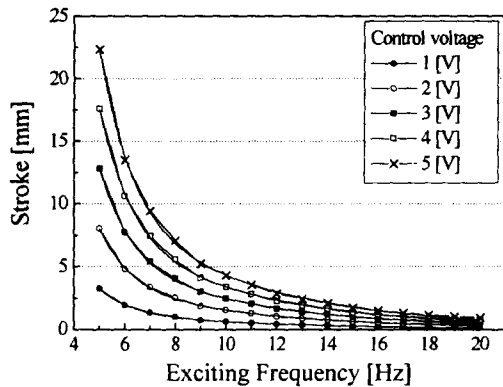


그림 16 입력전압에 따른 주파수-스트로크 특성
Fig. 16 Stroke vs. exciting frequency with variation of control voltage

4.4.3 시스템의 전달함수

제어전압 e 에 따른 속도 v 와의 관계는 식(11)과 같은 전달함수에 의하여 표현된다. 제작된 LOA의 각 회로정수를 적용하여 식(11)의 전달함수를 완성하면 식(21)과 같다.

$$G_{e-v}(s) = \frac{0.0214}{(1+0.0609s)(1+0.0276s)} \quad (21)$$

결과적으로 이러한 LOA의 전달함수는 모터의 응답성능뿐만 아니라 구동 및 제어 시스템의 구성과 그 알고리즘을 작성하는데 중요한 자료가 된다.

4.4.4 명령신호와 출력변위와의 응답 지연시간 특성

입력신호인 제어전압과 기계적인 응답출력과의 전달함수인 식 (11)에서 전기·기계적 원인에 의하여 응답까지는 일정한 시간지연이 있다. 이러한 시간지연은 전기적 시정수 δ_E 와 기계적 시정수 δ_M 에 의하여 결정되는데, 이는 전달함수인 식 (11)로부터 식 (22)와 식 (23)과 같이 얻게 된다.

$$\delta_E = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (22)$$

$$\delta_M = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \frac{\omega RM}{k_E^2} \quad (23)$$

그림 17은 2.3절, 4.2절, 4.4절의 시정수 및 제어정수로부터 얻어진 전기·기계적 응답 지연시간을 보여준다. 이로부터 동작 주파수 영역에서는 기계적인 응답 지연시간이 전기적인 것보다 길고, 주파수가 증가할수록 그 차이는 작아짐을 볼 수 있다. 또한 전기적 응답 지연시간에서 인덕턴스를 변화시킨 것은 4.3절의 그림 12에서 보는 바와 같이 가동자 위치에 따라 코일 인덕턴스가 140~200 [mH]사이에서 변화하고 있기 때문에 이를 고려하기 위한 것이다.

그림 18은 응답 지연시간의 실험치와 이론치를 나타낸 것이다. 실험치와 계산치 모두 주파수가 클 수록 지연시간은 짧아지는 경향을 보인다. 이는 주파수가 클수록 왕복횟수가 빨라지므로 스트로크가 작아지기 때문이다. 그러나 실험치가 다소 큰 값을 보이는 것은 LVDT 위치센서에 의한 지연시간이 포함되었기 때문에 발생하는 차이라고 추정된다.

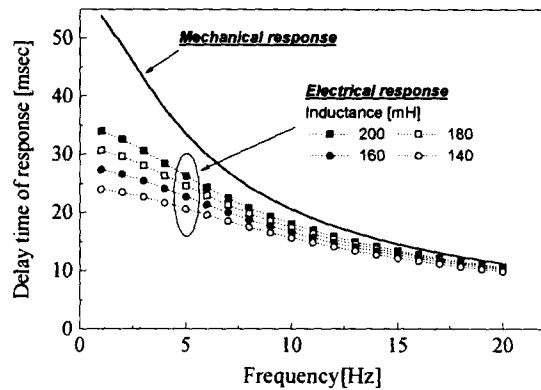


그림 17 전달함수에 의한 전기·기계적인 응답 지연시간
Fig. 17 Electrical and mechanical delay time of response obtained from control parameter

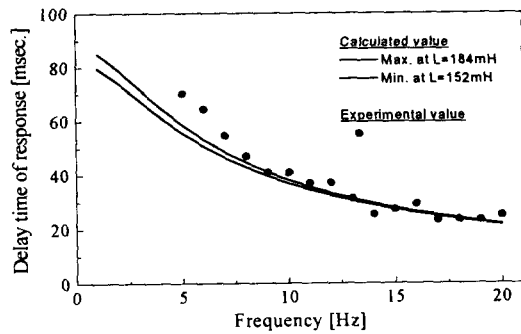


그림 18 응답 지연시간의 이론치와 실험치 비교
 Fig. 18 Comparison between the calculated and experimental value on the delay time of response

5. 결론

電磁氣力형 액츄에이터인 가동코일형 LOA는 NdFeB 영구자석 계자를 갖는 자기회로와 보빈 및 가동코일로 이루어지며, 리니어 왕복운동을 위한 추진력 발생장치이다. 기존의 유압식 구동시스템이나 회전형 모터를 이용한 방식에 비하여 명령신호에 의하여 입력되는 주파수, 전압, 전류 등에 대한 동작의 선형성 및 꺾어제어성에서 매우 뛰어난 특성을 갖을 뿐만 아니라, 구조가 간단하고 부품수가 작아 시스템의 소형경량화가 가능하고, 생산이나 유지보수 등의 경제적 측면에서 매우 유리한 액츄에이터이다.

그런데 LOA는 정확한 제어특성을 갖는 서보 액츄에이터로서가·감속 및 정지 운동을 빠른 속도로 반복하므로, 추력 특성 뿐만 아니라 과도상태특성 및 각종 정수의 정밀한 파악이 가장 중요하다. 본 논문에서는 설계법을 확립하여 제작을 한 후, 실제 실험을 통하여 제어시스템에의 응용을 위한 인덕턴스, 저항, 시정수를 포함한 전달함수 등을 도출하여 제시하였다. 즉

- 가동자의 왕복운동의 정현파 속도프로필을 통해 제어시스템에 필요한 요구 추력과 정상 특성을 예측할 수 있었고, 이러한 속도 프로파일과 기본 특성식을 통해 설계법을 확립하였다. 또한 LOA 자기회로 모델은 NdFeB 영구자석의 효과적인 배치방법을 검토한 후에 이를 선정하였으며, 공극길이에 따른 발생 추력과 기자력 특성을 해석하여 가동코일을 설계하였다.

- 제작된 LOA를 대상으로 시험법을 확립하여 추력 및 유기기 전력 상수는 물론, 가동코일의 위치에 따른 전압 및 전류의 턴-온 파형을 통한 시정수를 파악하였다. 그리고 이를 통해 저항, 인덕턴스 등의 회로정수를 얻었으며, 결과적으로 제어시스템에 응용하기 위한 기본특성인 전달함수를 도출하여 제시하였다.

- 제어신호 전압과 주파수에 따른 응답시험을 통하여 가동코일형 LOA가 선형성 및 꺾어제어성이 매우 뛰어난 특성을 갖는 것을 확인하였으며, 제어신호 전압과 주파수에 따른 응답변위와 지연 시간 특성을 얻었다.

이로써 영구자석과 가동자코일을 갖는 LOA를 빈번한 속도로 리니어 왕복 운동하는 서보제어시스템의 가장 효과적인 전자기력형 액츄에이터로 응용하기 위한 기반을 확립하였다.

참고 문헌

[1] S.A. Nasar, I.boldea, "Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Application", Prentice-Hall, Inc., 1987
 [2] S.A. Nasar, I.boldea, L.E. Unnewehr, "Permanent

magnet, reluctance, and self-synchronous motors", CRC press, 1993

[3] Hi-Dong Chai, "Present status of voice coil motor, various design techniques and key performance parameters", Intelligent Motion, sept. 1991, proceedings.
 [4] 장석명 외 "능동 진동제어 시스템에의 보이스코일형 LOA 응용" 전기학회 논문지, 제 46권 제6호, pp. 862-868, 1997.6
 [5] 장석명 외, "전자장이론 적용 FEM해석에 의한 보이스코일 평판형 LOA의 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, Part A, pp. 216-218, 7. 22-23, 1996
 [6] 水野 勉의 "원통형 코일가동형 리니어직류모터의 추력/입력비에 관한 고찰" 일본전기학회논문지 D(산업응용부문 논문지), vol. 118-D-4, pp. 444-449, 1998.4
 [7] 장석명 외 "영구자석 계자와 전기자 자속의 상호작용효과를 고려한 가동코일형 리니어모터의 정특성", 전기학회 논문지 48B권 1호, pp19-26, 1999. 1
 [8] 장석명 외 "보이스코일형 LOA의 제어정수 산정을 위한 특성해석 및 시험", 대한전기학회 하계학술대회 경주, pt. A-EMP56, pp 278-280, 1998.

저 자 소 개

장석명(張錫明)
 전기학회논문지 48B권 1호 참조
 Tel : (042) 821-5658
 E-mail : smjang@ee.chungnam.ac.kr

정상섭(鄭相燮)
 전기학회논문지 48B권 1호 참조
 Tel : (042) 822-4933
 E-mail : sangsub@ee.chungnam.ac.kr

박희창(朴喜昌)
 전기학회논문지 48B권 1호 참조
 Tel : (042) 868-7612
 E-mail : HCpark@mailgw.kimm.re.kr

문석준(文碩俊)
 전기학회논문지 48B권 1호 참조
 Tel : (042) 868-7428
 E-mail : SJmoon@mailgw.kimm.re.kr

박찬일(朴贊一)
 전기학회논문지 48B권 1호 참조
 Tel : (042) 868-7610
 E-mail : CIpark@mailgw.kimm.re.kr

정태영(丁泰榮)
 전기학회논문지 48B권 1호 참조
 Tel : (042) 868-7420
 E-mail : TYchung@mailgw.kimm.re.kr