

Moving Coil Type L.O.A의 설계 및 동특성 해석

강 길환*, 김 덕현**, 홍 정표*, 김 규탁*

* 창원 대학교 전기공학과, ** 안동 공업전문대학 전기 공학과

Design and Dynamic Characteristic Analysis of Moving Coil type L.O.A

Kil-Whan Kang*, Duk-Hun Kim**, Jung-Pyo Hong*, Gyu-Tak Kim*

*Chang-won Nat'l Univ, **Andong Tech. College

Abstract - The Moving Coil type Linear Oscillatory Actuator(MC-LOA) is widely used in system needed reciprocation of short stroke.

MC-LOA is suitable for high speed operation and correctness stroke control.

This paper designed a MC-LOA to combine mechanical dynamic equation with electric dynamic equation. Electric dynamic equation was obtained from equivalent circuit and the parameters were obtained using Finite Element Method (FEM). Then, we analyzed the dynamic and steady state characteristics of the designed MC-LOA.

1. 서 론

선형전동기는 구조가 간단하고, 소형화, 경량화가 가능할 뿐만 아니라, 회전기와 비교하여 직접 직선추력을 발생하므로 기계적 변환장치로 인한 손실과 소음을 줄일 수 있다는 장점 등을 가지고 있다. 그 중 LOA는 소변위의 왕복운동에 적합한 특성을 가지고 있으며, 특히, MC-LOA는 가동체의 관성이 적으므로 고속 운전과 변위가 일정한 부하에 적합하다. 또한 영구자석(Permanent Magnet)을 포함하고 있으므로 에너지 절약의 장점을 가지고 있다.[1]

본 논문에서는 기계계 운동방정식과 전기계 회로방정식을 결합하여 변위가 일정한 MC-LOA를 설계하고 설계된 기기의 정상특성 및 동특성을 해석하였다. 그리고, FEM을 이용한 기기의 설계 및 특성 해석시 계산시간이 오래 걸린다는 단점을 보완하기 위해서 등가회로를 이용하였으며 등가회로의 파라메타는 FEM을 통하여 구하였다.

2. 본 론

2.1 Dynamic Equation

LOA의 운동방정식은 1자유도 운동과 동일하다. 1자유도운동의 운동방정식을 식 (1)에 나타내었다.[2]

시간에 따른 변위가 정현적으로 변화한다고 보았다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + K_s x = F \quad (1)$$

$$x = -r_{\max} \cos wt$$

$$\frac{dx}{dt} = v = r_{\max} w \sin wt$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a = r_{\max} w^2 \cos wt$$

M :부하질량[kg] D :마찰계수 x :변위[m]
 r_{\max} :최대 변위[m] F :추력[N] v :속도[m/s]

K_s :스프링 상수 a :가속도[m/s²]

식(1)로 부터 기기에서 요구되는 추력은 스프링이 존재하지 않은 경우 식(2)와 같이 표현된다.

$$F = Ma + Dv \quad (2)$$

그리고 MC-LOA의 경우 발생하는 코일에서의 힘은 식(3)과 같으므로, 설계 대상 기기에서 요구되는 추력은 식(4)로부터 구해진다.[3]

$$F_m = K_f I \quad (3)$$

$$= NB_g l_c I$$

K_f : 추력 상수 N : 코일턴수

B_g : 코일과 쇠교하는 지점의 자속밀도[T]

l_c : 쇠교되는 코일 1Turn의 길이[m]

$$F_m = F \quad (4)$$

2.2 MC-LOA의 설계

MC-LOA의 설계과정을 그림1에 나타내었다.

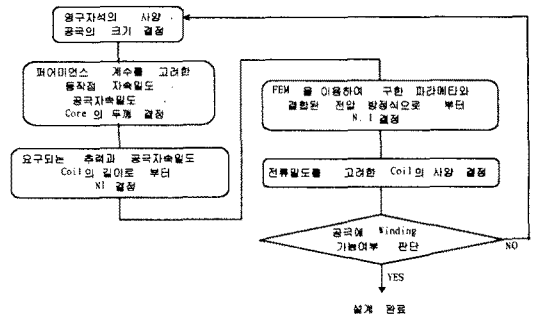


그림 1. MC-LOA의 설계과정

2.2.1 자기 회로 설계

설계 대상 기기의 자기회로 형태를 그림2에 나타내었다.

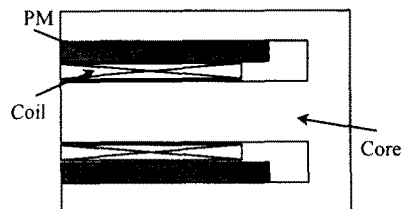


그림 2. MC-LOA

퍼어미언스법을 이용하여 자기회로의 초기설계를 행하였다.

자기회로의 설계에서 영구자석과 공극이 동시에 존재하므로 영구자석의 잔류 자속밀도와 동작점 자속밀도 값이 다르다. 따라서, 영구자석이 포함된 기기의 설계에 있어서는 퍼어미언스 계수를 고려하여 설계하여야 한다. 퍼어미언스 계수와 잔류자속밀도, 동작점 자속밀도와의 관계를 그림3에 나타내었다. 그리고, 퍼어미언스 계수와 동작점 자속밀도는 다음 식 (5)에 나타내었다.

$$P_c = \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{t_r}{g_e} \cdot \frac{\sigma}{f_m} \quad (5)$$

$$B_d = \frac{p_c}{p_c + \mu_{rec}} \cdot B_r$$

$$A_g = \tau \times h, \quad A_m = w \times h$$

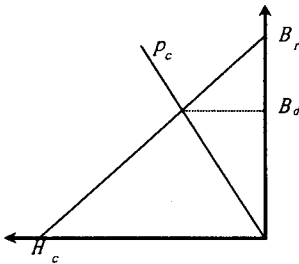


그림 3. 동작점 자속밀도

여기서, μ_{rec} 는 recoil permeability, B_r 은 잔류자속밀도(G), σ 는 누설계수, f_m 은 기자력손실계수, A_m 은 영구자석 단면적[cm²], A_g 는 유효공극 단면적[cm²], H_c 는 보자력[Oe], τ 는 극간격[cm], w 는 영구자석 자극폭[cm], h 는 기기의 폭[cm]이다. 그리고, 공극자속밀도는 식 (6)와 같이 표현된다.

$$B_g = \frac{A_m B_d}{\sigma A_g} \quad (6)$$

자기회로 설계에서 기기의 폭은 유효도체의 길이와 동일하다고 보아 식(3)과 식(6)으로 부터 기자력 NI 를 구하였다.

Core의 두께는 포화를 고려하여 설정하였다.

2.2.2 구동 회로 설계

식 (2)에서 마찰계수와 속도는 아주 작은 값으로 추력에 대한 영향은 아주 미약하므로 무시한다. 따라서, 시간에 따라 정현적으로 변화하는 변위를 가지기 위한 전류는 식 (7)과 같다.[3]

$$I = \frac{F}{K_f} \quad (7)$$

K_f 는 초기 설계된 자기회로를 FEM으로 coil과 영구자석을 여자시켰을 때의 추력을 구하여 계산하였다. 따라서, 공급되는 전압은 그림4의 등가회로의 회로방정식으로부터 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.[1]

$$V = RI + L \frac{dI}{dt} + e_b \quad (8)$$

$$\begin{aligned} e_b &= \frac{d\phi}{dt} \\ &= \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \\ &= \alpha \cdot v \end{aligned}$$

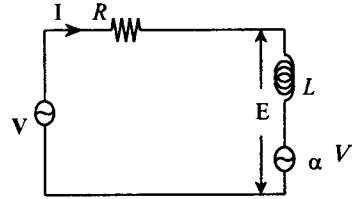


그림 4. 등가 회로

여기서, 우변의 두 번째항은 변압기 기전력항, 세 번째항은 속도 기전력항이고, α 는 전자유도 계수[V·m/sec]로 추력상수와 동일하다.

변압기 기전력항과 속도 기전력항은 FEM을 이용하여 구하였다. 변압기 기전력항은 coil을 여자시킨 상태에서 coil과 쇠교하는 자속량을 구하여 계산하였으며 속도 기전력항은 추력상수에 속도를 곱하여 계산하였다.

그림5는 FEM을 이용하여 계산된 변위에 따른 추력상수, 전자유도 계수 및 코일 인덕턴스변화를 나타내고 있다.

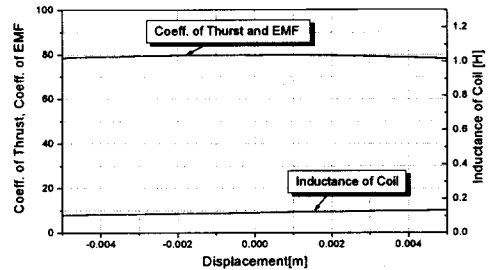


그림 5. 산출된 등가회로의 파라메타

구해진 파라메타와 회로방정식으로 부터 N 값과 I 값의 산정이 가능하다. 그리고 Coil은 발열을 고려하여 사양을 선정하였다. 이러한 과정에 의해 설계된 기기의 주요 치수와 주요 사양을 다음의 그림6과 표1에 나타내었다.

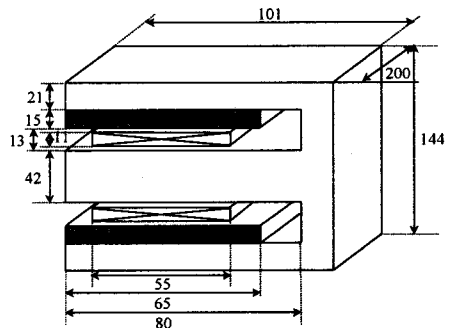


그림 6. 기기의 주요 치수

표 1. 기기의 사양

항목		값	단위
Core	두께	2.1	cm
	폭	20	cm
영구자석	크기	1.5*6.5*20	cm ³
	잔류자속밀도	1.15	T
	Recoil permeability	1.05	
코일	Turn수	392	회
	저항	4.058	Ohm
	피복포함지름	1.204	mm
	도체의 단면적	0.9503	mm ²
	중량	1.823	kg
공극의 크기	1	mm	
마찰계수	0.003	Nsec/m	

3 특성 해석

설계된 기기는 최대변위 ±5 [mm], 부하중량과 가동 자중량의 합이 10.5 [kg], 요구 주파수 15 [Hz]에 만족하도록 설계되었다. 이러한 요구 사항을 만족 하기 위해서는 기계계의 운동방정식에서 최대 속도 0.47 [m/s], 최대 가속도 44.4 [m/s²], 최대 추력 466.4 [N]의 값들을 가져야 한다.

3.1 시간 차분법의 적용

특성해석을 위해 식(2)와 식(8)의 시간 미분항을 처리해야 함으로 미분 방정식을 시간에 대해 이산화시켜 계산하는 시간차분법을 이용하였다.

임의의 시각 t 에서 전류 i_t 의 값은 이미 구해져 있다고 하고 Δt 시간 후에 근사치 $i_{t+\Delta t}$ 를 구하는 관계식을 만든다.

시각 t_θ 을 식(9)과 같이 정의한다.

$$t_\theta = t + \theta \Delta t \quad (0 \leq \theta \leq 1) \quad (9)$$

전류값 t_θ 의 미분값과 근사값은 식(10), 식(11)와 같다.

$$\frac{di_\theta}{dt} = \frac{i_{t+\Delta t} - i_t}{\Delta t} \quad (10)$$

$$i_{t_\theta} = i_t + \theta(i_{t+\Delta t} - i_t) \quad (11)$$

여기서 i_{t_θ} 는 풀어야 할 미지수이다.

시각 $t = 0$ 에서의 초기조건으로부터 출발하여 Δt 시간후의 전류값을 차례로 구하기 위해 각 시간 간격마다 풀어 나가며 해를 구한다.

3.2 동특성 및 정상상태 해석

그림.7은 시간에 따른 변위이다. 과도 상태는 0.28초 정도의 시간동안 발생되고 곧 정상상태로 안정된 운전이 이루어 짐을 알 수 있다. 또한 정상상태에서 변위의 최대값은 5[mm]정도로 안정됨을 볼 수 있다.

그림.8에는 과도상태의 전류 특성을 나타내었다. 전류의 과도 상태 또한 0.2초 정도 발생하였다.

그리고, 그림9에는 부하중량에 따른 정상상태 변위의 최대값을 나타내었다. 그림에서 변위는 부하질량에 반비

례함을 확인할 수 있었다.

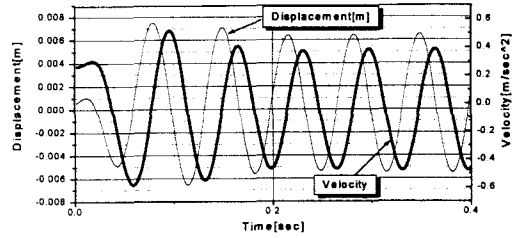


그림 7. 시간에 따른 속도, 변위 특성

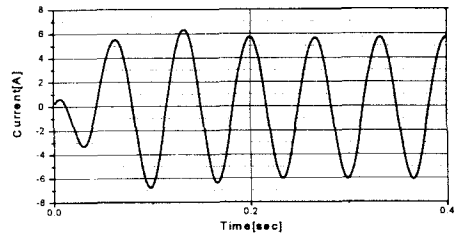


그림 8. 시간에 따른 전류 특성

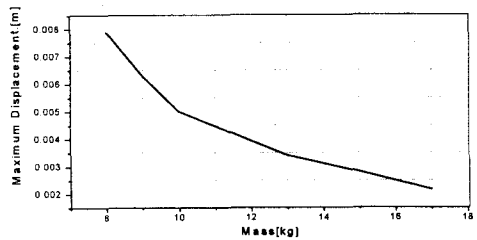


그림 9. 부하 질량에 따른 변위

4. 결 론

본 논문에서는 FEM과 등가회로의 구성을 통한 기계계의 운동 방정식과 전기계의 전압 방정식을 결합하여 Moving Coil type LOA를 설계하였고, 정상특성 및 동특성을 해석하였다.

유한요소법에 의한 기기의 설계 및 특성 해석시 계산 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 등가회로를 구성 하여 설계를 행하였으며, 등가회로의 파라미터는 유한요소법을 이용하여 구하였다.

그리고, 특성 해석시간을 줄이기 위해 시간 차분법을 이용하여 설계된 기기의 정상특성 및 동특성을 해석하여 설계의 타당성을 검증하였다.

본 연구는 한전의 지원으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] Naila Mikhaei-Boules, "Design and analysis of linear actuator for active vibration cancellation.", General Motors Corporation, 1995.
- [2] 장 석명 외, "보이스 코일형 LOA의 정상특성실험", 대한전기학회 하계학술대회, 1996.
- [3] H. Wakiwaka, H. Yajima, S. Senoh and H. Yamada, "Simplified Thrust Limit Equation of Linear DC Motor", IEEE, Vol. 32, pp. 5073-5075, 1996.