

전자기적 전달관계를 이용한 가동코일형 LOA의 전자기적 특성해석 및 제어정수 도출

장석명*, 최장영*, 조한욱*, 박지훈*, 정삼섭**
 *충남대학교, **LG D/A 연구소

Electromagnetic Analysis and Control Parameter Estimation of Moving-Coil LOA Using Transfer Relations

Seok-Myeong Jang*, Jang-Young Choi*, Han-Wook Cho*, Ji-Hoon Park*, Sang-Sub Jeong**
 Chungnam National University*, LG D/A Lab.**

Abstract - This paper deals with an electromagnetic analysis and control parameter estimation of a moving-coil linear oscillatory actuator (MCLOA). Analytical solutions for electromagnetic characteristics of the MCLOA are obtained from transfer relations derived in terms of a magnetic vector potential and two-dimensional (2-d) rectangular coordinate systems. And then, on the basis of 2-d analytical solutions, control parameters such as the thrust constant, the back-emf constant and winding inductances are estimated. Finally, analytical results for both electromagnetic characteristics and control parameters of the MCLOA are validated extensively by finite element (FE) analyses. In particular, test results such as static thrust, resistance and inductance measurements are given to confirm the analyses.

1. 서 론

산업의 발전에 따라 짧은 스트로크의 선형왕복운동이 요구되는 스텔링 엔진, 공작기기 및 냉장고 컴프레서, 컴퓨터의 디스크 저장장치, 진동발전기, 섬유기기, 연료 펌프, 인공심장 장치, 능동제어, 초정밀 위치제어에 전자기력 직선왕복 액추에이터(이하 LOA)가 광범위하게 응용되고 있다 [1].

전자기력 직선형 왕복 액추에이터는 가동체의 재질에 따라 가동코일형, 가동철심형, 가동자석형 등으로 구분되는데 성능이 각각 다르므로 응용분야에 따라 적당한 종류를 선정해야만 한다. 가동코일형 LOA는 영구자석에 의해 공극과 철심에서 일정한 자속을 가지므로 철심이 매우 작아, 고정자 요크를 성층 철심으로 하지 않아도 되며 구조가 간단하고 가동자의 권선이 작아 고속의 소 변위 왕복운동에 적합할 뿐만 아니라 가동자에 자성체를 사용하지 않으므로 고정자와 가동자 사이에 자기흡인력이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 가동코일형 LOA의 특성을 해석하고 제어정수를 도출하고자 한다. 자체특성식은 전자기적 전달관계를 이용해 2차원적인 해석방법으로 유도했고, 이로부터 추력, 쇄교자속, 역기전력 특성식을 도출했다. 해석결과는 유한요소결과와 비교하여 해석결과와 타당성을 입증했다. 다음으로, 검증된 해석해로부터 추력상수, 역기전력 상수, 인덕턴스 및 저항을 예측하였으며, 특히 이미 제작되어진 가동코일형 LOA의 추력이 최대가 되는 부하 각에서의 전류에 따른 추력특성으로부터 추력 상수를 도출하고, 턴은 시험으로부터 인덕턴스를 얻었으며, 인가전압 대 전류변화로부터 저항을 측정하였다. 예측된 제어정수와 측정된 제어정수는 서로 잘 부합함을 확인하였다.

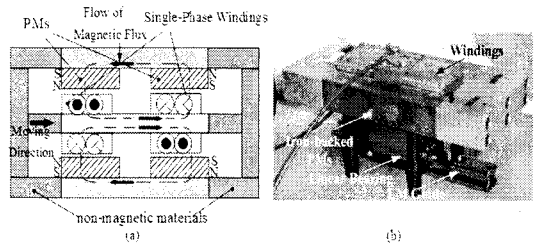


그림 1. 가동코일형 LOA: (a) 구조 및 (b) 실제 제작 모델

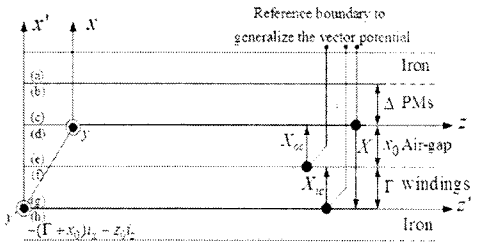


그림 2. 단순화된 해석모델

2. 가동코일형 LOA의 구조 및 해석 모델

그림 1 (a) 및 (b)는 가동코일형 LOA의 구조 및 실제 제작 모델을 보여준다. 그림 2는 그림 1에 보이는 가동코일형 LOA의 대칭성에 의해 단순화된 해석모델을 보여준다. 여기서 (a)~(h)는 각각의 경계면을 나타내고 두께 l , x_0 및 l' 의 영역은 각각 영구자석, 공극 및 코일 영역을 나타낸다. 기본 좌표축은 영구자석 영역을 바탕으로 하고 있으며, 코일영역의 좌표축은 기본 좌표축으로부터 벡터 $(l+x_0)\hat{i}_x + z_0\hat{i}_z$ 만큼 변위되어 있다. 여기서 z_0 는 영구자석에 대한 코일영역의 상대적 변위를 나타낸다. 그림 2의 영구자석의 자화 \mathbf{M} 에 대해, B_{rem} , n 및 μ_0 는 각각 영구자석의 잔류자속밀도, n 차의 고조파 및 공극의 투자율을 각각 나타낸다. 공간고조파 $k_r = n\pi/l'$ 이고 영구자석 극간격비는 $\mu = \mu_0 n l'$ 이다. μ_m 및 μ_r 는 각각 영구자석의 너비 및 액추에이터의 극간격을 의미한다. 그림 2의 코일의 전류밀도 \mathbf{J} 에 대하여, J_0 및 μ_r 은 전류 밀도 \mathbf{J} 의 크기 및 코일 극 간격 비를 나타낸다. 가동코일형 LOA의 전자기적 특성해석을 위하여 사용된 가정은 다음과 같다.

- 가동코일형 LOA의 깊이 w 는 y 방향이고 이 방향으로 단부효과는 무시한다.
- 가동자 및 고정자 축 철심의 투자율은 모두 무한이다.
- 영구자석 및 권선영역의 투자율은 공극의 투자율과 같다.

3. 전자기적 특성해석

3.1 일반화된 자기 벡터 자위

Trumpher [2] 이미 직각좌표계 및 $\mathbf{B} \equiv \nabla \times \mathbf{A}$ 로 정의되는 자기 벡터자위 \mathbf{A} 측면에서 직선형 기기의 전자기적 특성에 대한 해석 해를 제시했다. 그림 2에 보이는 가동 코일형 LOA의 해석모델 구조는 [2]에 제시된 직선형 전동기와 비슷하기 때문에, 그가 제시한 철이 없는 직선형 기기에 대한 전달관계는 본 논문에서 제시된 가동코일형 LOA에 경계조건만 바꾸어 줌으로써 간단하게 적용될 수 있다. 영구자석에 의한 자기 벡터 자위의 유도에 사용되는 경계조건은 다음과 같다.

1. 고정자 및 가동자 철심의 투자율이 무한이라는 가정에 의해 $B_{zn}^{(b)} = 0$ 및 $B_{zn}^{(e)} = 0$,

2. 각 경계면에서 벡터자위의 연속성에 의해 $A_{yn}^{(a)} = A_{yn}^{(b)}$ 및 $A_{yn}^{(c)} = A_{yn}^{(d)}$,

3. 경계면 (b)와 (c)에서의 등각 표면 전류 밀도는 영구자석 자화의 z성분의 부재로 인하여 0이기 때문에 $B_{zn}^{(a)} = B_{zn}^{(b)}$ 및 $B_{zn}^{(c)} = B_{zn}^{(d)}$.

동일한 방식으로, 단상권선에 의한 자기벡터자위의 예측에 사용된 경계조건은 $B_{zn}^{(b)} = 0, B_{zn}^{(g)} = 0, A_{yn}^{(e)} = A_{yn}^{(f)}$, $A_{yn}^{(g)} = A_{yn}^{(h)}, B_{zn}^{(e)} = B_{zn}^{(f)}$ 및 $B_{zn}^{(g)} = B_{zn}^{(h)}$ 이다. 위에서 언급한 경계조건 및 [2]에 제시된 전자기적 전달관계를 이용하면 임의의 위치 X에서 영구자석에 의한 일반화된 벡터자위 및 임의의 위치 X_{ic} 및 X_{oc} 에서 단상권선 전류에 의한 일반화된 벡터자위는 식 (1)로 주어진다.

$$A_{yn_PM}^X = \frac{\mu_0 M_{yn}}{2j k_n} \left[\frac{(e^{-2k_n(x_0+\Gamma)} e^{k_n X} + e^{-k_n X}) (e^{2k_n \Delta} + e^{-2k_n \Delta} - 2)}{(e^{2k_n \Delta} - 1) + (e^{-2k_n \Delta} - 1) e^{-2k_n(x_0+\Gamma)}} \right] \quad (1.a)$$

$$A_{yn_Coil}^{X_{ic}} = \frac{\mu_0 J_{yn}}{2k_n^2} \left[2 - e^{-2k_n \Gamma} (e^{k_n X_{ic}} + e^{-k_n X_{ic}}) \right] \quad (1.b)$$

$$A_{yn_Coil}^{X_{oc}} = \frac{\mu_0 J_{yn}}{2k_n^2} \left[\frac{(e^{2k_n \Gamma} - 1) (e^{k_n X_{oc}} + e^{2k_n (\Delta + x_0 - X_{oc}/2)})}{e^{2k_n (\Delta + x_0 + \Gamma)} - 1} \right] \quad (1.c)$$

여기서 $0 \leq X \leq \Gamma + x_0, 0 \leq X_{ic} \leq \Gamma$ 및 $\Gamma \leq X_{oc} \leq \Gamma + x_0 + \Delta$.

3.2 추력

영구자석 및 권선전류사이의 상호작용에 의해 권선에 작용하는 추력은 맥스웰 응력 법으로부터 유도되어질 수 있다. [3]에 제시되었듯이, 응력 T_{ij} 자기적으로 신행적인 물질에 대하여 Korteweg-Helmholtz 힘 밀도로 식 (2)와 같이 표현가능하다.

$$T_{ij} = \mu H_i H_j - \delta_{ij} \mu H_k H_k / 2 \quad (2)$$

여기서 크로넬커 델타 δ_{ij} 는 $i=j$ 인 경우 1이고 $i \neq j$ 인 경우 0이다. 한편 단상권선의 폐곡면에 작용하는 추력은 식 (3)으로 표현가능하다.

$$F_z = -S \langle T_{xz}^e \rangle_z = -S \mu_0 \langle H_x^e H_z^e \rangle_z = -S \mu_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_x^e \cdot (H_z^e) \quad (3)$$

여기서 권선영역의 위쪽 경계 e 는 폐곡면 $S = 2pnw$ 에 의해 둘러싸여 있고, p 는 극 쌍수를 의미한다. H_{xe} 및 H_{ze} 는 경계면 e 에서의 영구자석 및 고정자권선 모두에 의한 수직 및 수평 자속밀도를 나타낸다. 뒀 첨자 *는 복소수 쉼표를 나타낸다.

3.3 쇄교자속

스톡스 정리에 의해, 단상권선의 폐곡면 면적 S 를 지나는 자속 Φ 는 폐곡면을 구성하는 폐곡선에 대해 벡터자위를 선 적분함으로써 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{s} = \oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (4)$$

따라서, 영구자석 및 고정자권선 전류에 의해 단상권선에 쇄교하는 자속은 식 (1.a) 및 (1.b)를 (4)에 대입한 후 $\Phi = N\Phi_e$ 에 의해 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda^{PM} = w n_0 p \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^{\Gamma} 2e^{-jk_n(z'+z_0)} dz' \int_{x_0}^{x_0+\Gamma} A_{yn_PM}^X dX \quad (5.a)$$

$$\lambda^{coil} = w n_0 p \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^{\Gamma} 2e^{-jk_n z'} dz' \int_0^{\Gamma} A_{yn_Coil}^{X_{ic}} dX_{ic} \quad (5.b)$$

여기서 λ_0 는 단위 면적당 코일 턴 수를 의미한다.

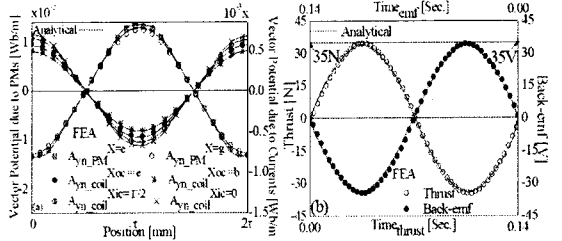


그림 3. 해석결과 및 유한요소해석결과와의 비교: (a) 벡터자위 및 (b) 역기전력 및 추력.

4. 해석결과 및 유한요소해석결과와의 비교

제작된 LOA의 사양은 다음과 같다. 영구자석 두께 $\Delta = 10\text{mm}$; 코일영역 두께, $\Gamma = 8\text{mm}$; 공극길이, $x_0 = 2\text{mm}$; 액추에이터의 극 간격, $\tau = 70\text{mm}$; 영구자석 너비, $\tau_m = 50\text{mm}$; 권선영역의 너비의 비 $\alpha_1 = 4/7$; 액추에이터 깊이, $w = 25\text{mm}$; 극당상당 턴수, $N = 700$ (도체 지름 = 0.3mm); 극 쌍수, $p = 1$. 그림 3(a) 및 (b)는 각각 자기벡터 자위와 역기전력 및 추력에 대한 해석결과 및 유한요소해석결과와의 비교를 보여준다. 특히, 역기전력 및 추력은 각각 가동자 속도가 1m/s 및 권선전류가 1A 인 경우에 얻어졌다. 자기 벡터자위에 대한 해석결과 및 유한 요소결과와의 비교가 잘 일치하므로 역기전력 및 추력에 대한 해석결과 및 유한요소 해석결과 역시 잘 일치함을 확인할 수 있다.

5. 가동코일형 LOA의 제어정수 도출

표 1은 해석, 유한요소 해석 및 실험결과로부터 얻어진

가동코일형 LOA의 제어정수를 보여준다. 예측된 값은 인덕턴스를 제외하고 측정된 값과 잘 일치함이 보이고 인덕턴스의 예측 값과 측정값과의 오차는 후후에 논의하기로 한다.

표 1 원통형 Halbach 배열 영구자석을 갖는 가동자석형 LOA의 제어정수

항목	해석	유한요소해석	실험 값
추력 상수: K_T [N/A]	35	35	32.5
역기전력 상수: K_E [V.sec/m]	35	35	
코일 저항: R [Ω]	18.7	18.3	17.8
코일 인덕턴스 L [mH]	41.3	43.1	71.2

5.1 해석적 방법

영구자석에 의한 쇄교자속으로부터 식 (6)으로 주어지는 역기전력을 얻을 수 있다 [4].

$$e_h = \frac{d\lambda^{PM}}{dt} = \frac{dz_0}{dt} \frac{d\lambda^{PM}}{dz_0} = v \frac{d\lambda^{PM}}{dz_0} = vK_E \quad (6)$$

역기전력 상수 K_E 는 식 (5.a)를 식 (6)에 대입함으로써 얻을 수 있다. 추력상수 K_T 및 인덕턴스 L 은 각각 $F_c=K_T i$ 및 $\lambda_{coil} = Li$ 로부터 구할 수 있기 때문에, 이것들은 식 (3)과 (5.b)로부터 구할 수 있다. 마지막으로 권선의 저항은 가동코일형 LOA가 낮은 주파수로 운전될 때 AC 저항은 DC저항과 같다고 볼 수 있으므로 식 (7)을 이용해 구할 수 있다 [4].

$$R = 4\rho_c N l_c / (\pi d_c^2) \quad (7)$$

여기서 ρ_c , d_c , N 및 l_c 는 각각의도선의 저항율, 반경, 턴 수 및 길이를 나타낸다.

5.2 실험적 방법

이번 절에서, 본 논문은 제어정수를 실험적으로 산정하기 위해 그리고 해석의 타당성을 입증하기 위해 추력, 저항 및 인덕턴스 측정에 대한 실험결과를 제시한다. 그림 4는 추력 및 인덕턴스 측정을 위한 실험장치 구성도를 보여준다. 그림 5 (a)에 보이는 정추력은 추력이 최대가 되는 위치에서 전류를 가변시켜서 얻은 결과이다. 해석결과는 실험결과와 매우 잘 일치함을 보인다. 그림 5(b)는 가동자의 등 속도에 따른 역기전력의 변화에 대한 해석결과 및 유한요소 해석결과와의 비교를 보여준다. 제작된 가동코일형 LOA의 최대토크가 등속도를 측정하기에 너무 짧아서 여러 번의 실험에도 불구하고 타당한 역기전력 상수 값을 얻지 못했다. 그러나, 그림 3 (b)로부터 단상권선을 갖는 기기의 경우 역기전력 상수와 추력 상수가 같다고 예측할 수 있기 때문에, 역기전력 상수의 측정값은 그림 5(b)의 측정된 추력상수로부터 대략적으로 유추할 수 있다 [5]. 그림 5(c)는 가동코일형 LOA의 예측된 그리고 측정된 저항을 보여준다. 예측된 저항 값은 측정된 저항 값과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 5(d)는 인덕턴스 측정을 위해 '턴 온 시험'으로부터 얻어진 전압 및 전류 파형을 보여준다. 전류 파형의 시정수가 4ms 이고 자기인덕턴스 $L = \tau R$ 이므로 실제 측정된 인덕턴스 값은 71.2mH이다. 그러나 표 1에서 보이듯이 예측된 인덕턴스는 41.3mH이다. 이 42%의 오차에도 불구하고 해석이 단부 권선(전체 권선 길이의 약 40%)을 고려하지 않은 것을 감안할 때 예측 값은 측정값과 잘 일치한다고 볼 수 있다.

치한다고 볼 수 있다.

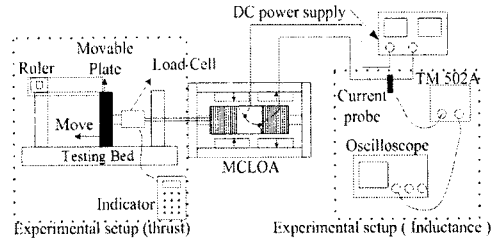


그림 4. 인덕턴스 및 추력측정을 위한 실험장치.

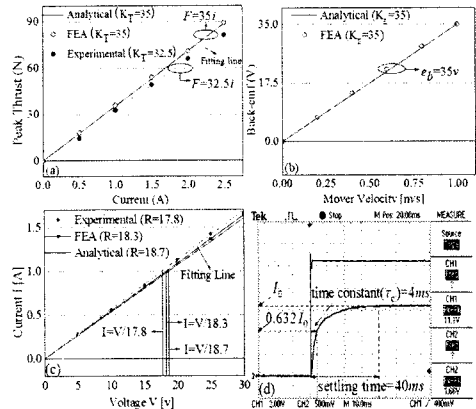


그림 5. 제어정수의 도출: (a) 추력상수, (b) 역기전력 상수, (c) 저항 및 (d) 인덕턴스.

6. 결론

본 논문은 전달관계에 의해 유도된 일반화되어진 자기 벡터 자위를 사용하여 가동코일형 LOA의 역기전력, 추력 및 인덕턴스에 대한 해석 해를 제시하였다. 해석결과 는 유한요소해석결과와 잘 일치함을 확인하였다. 다음으로, 유도된 해석 해를 바탕으로 추력상수, 역기전력 상수, 인덕턴스 및 저항과 같은 제어정수를 산정하였다. 특히 추력, 인덕턴스, 저항 측정과 같은 실험결과가 해석을 입증하기 위하여 주어졌다. 향후 연구에서는 본 논문에서 산정된 제어정수를 이용하여 가동코일형 LOA의 동특성을 수행할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Sang-Sub Jeong, Dynamic analysis of linear oscillatory actuator for vibration control system, Ph.D. dissertation, Chungnam Nat'l Univ., Korea, 2002.
- [2] David L. Trumper, Won-jong Kim and Mark E. Williams, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 2, pp.371-379, 1996.
- [3] J. R. Melcher, *Continuum Electromechanics*. MIT Press, 1981.
- [4] Duane Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. The Writer's Collective, 2003.
- [5] J. R. Hendershot and TJE Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors," Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994.