

축방향으로 자화된 영구자석 가동자를 갖는 Tubular형 직선 왕복 액추에이터의 전자기적 특성해석 및 설계

장석명, 서정출, 최장영, 유대준, 조한욱, 장원범

충남대학교 전기공학과

Design and Analysis of Tubular Type Linear Oscillatory Actuator with Axially Magnetized Permanent magnet

Seok-Myeong Jang, Jung-Chul Seo, Jang-Young Choi, Dea-Joon You, Han-Wook Cho

Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - This paper deals with tubular type linear oscillatory actuator with axially magnetized permanent magnet. The magnetic field distribution is predicted using a two-dimensional analytical solution derived in terms of magnetic vector potential and cylindrical coordinate system. Using this result, thrust and flux linkage and back emf are derived. The results of predictions from the analysis are compared with corresponding finite element method.

1. 서 론

전자기력 Linear Oscillatory Actuator (이하 LOA)는 짧은 스트로크의 리니어 왕복운동 시스템인 마이크로폰, 스피커에서부터 우주 공간에서의 전력 시스템에 사용되는 리니어 왕복운동 발전기, 컴프레셔, 기계 장치에서의 슬라이딩 테이블, 펜 캐리어, 피스톤이 없는 고출력 기기, 밸브용 액추에이터, 진동대 및 가진기 등에 다양하게 이용된다. 전자기력 LOA는 가동체의 재질에 따라 가동코일형, 가동철심형, 가동자석형 등으로 구분되는데 성능이 각각 다르므로 용용분야에 따라 적당한 종류를 선정해야만 한다. 본 논문에서 다루는 가동자석형 LOA는 전원 공급선이 고정부에 위치하므로 전선의 피로나 유지보수, 열손실 측면에서 가동코일형보다 유리한 반면, 영구자석이 이동하므로 제작시 부착에 크게 유의해야하고 가동자와 고정자사이에 흡인력이 발생하는 단점을 가졌다. 보통 가동자석형 LOA는 20Hz에서 60Hz의 주파수 범위에서 4mm에서 8mm를 요구하는 사양에 가장 적당한 액추에이터로 알려져 있다[1].

본 논문에서는 축방향으로 자화된 영구자석 가동자를 갖는 Tubular LOA의 자계특성식을 2차원 원통좌표계를 도입하여 계산하였고 이 특성식을 이용하여 쇄교자속, 역기전력 그리고 추력 특성식을 유도하였다. 해석결과는 유한요소 해석법에 의한 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 축방향 자화를 갖는 Tubular형 LOA의 특성식

2.1 해석모델

그림 1은 축방향 자화를 갖는 tubular형 LOA의 해석모델을 보여준다. 영구자석은 축방향으로 자화되어 있으며 코일은 $r=r_s$ 에서 단상 전류시트 가정하였다. 샤프트는 비자성체로 비투자율을 공기와 같고 영구자석의 비투자율은 1, 요크과 영구자석의 사이의 재질은 투자율이 무한인 철이라고 가정하였다.

2.2 영구자석에 의한 자계특성

축방향 자화는 영구자석에 의한 축방향 자속성분 M_z

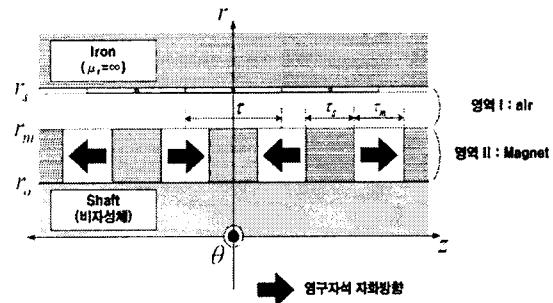


그림 1. 축방향 자화를 갖는 Tubular형 LOA의 해석모델

와 축방향 자화에 의해 나타나는 반경방향 자속성분 M_r 로 표현된다. 축방향 자화성분은 $M_{magz} = B_r / \mu_0$ 의 크기를 가지며, 반경방향 자화성분 M_{magr} 은 식 (1)과 같이 얻어진다.

$$M_{magr} = \frac{(r_m^2 - r_o^2)}{\sqrt{(r_m^2 - r_o^2)^2 + 4r_m^2 r_s^2}} \frac{B_r}{\mu_0} \quad (1)$$

따라서 영구자석은 축방향 자화성분과 반경방향 자화성분으로 모델링되며 식 (2)와 같은 푸리에 급수로 주어진다.

$$\vec{M} = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \left(\frac{c_1 + c_2 r}{r} \right) M_m \cos(k_n z) \hat{a}_r + M_m \sin(k_n z) \hat{a}_z \quad (2)$$

여기서 M_m 과 M_m 은 각각 반경방향 및 축방향 자화성분의 n차 고조파 성분의 크기이며 c_1, c_2 는 수직방향 자화 M_m 의 변형을 줄이기 위해 적절하게 선택된 상수이다[2].

영구자석에 의한 자계는 등가 전류밀도로 표현할 수 있고 자기벡터 포텐셜의 정의와 쿨롱의 조건을 이용하여 식 (3)과 같은 지배방정식을 유도할 수 있다[1].

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{\theta n} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_{\theta n} - \left(k_n^2 + \frac{1}{r^2} \right) A_{\theta n} &= 0 && \text{in air} \\ \frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{\theta n} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_{\theta n} - \left(k_n^2 + \frac{1}{r^2} \right) A_{\theta n} &= \mu_0 k_n \left(\frac{c_1 + c_2 r}{r} \right) M_m && \text{in magnet} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $A_{\theta n}$ 은 자기벡터 포텐셜 A 의 θ 성분이고 Tubular형 LOA의 구조적 특성에 의해 $A_{\theta n}$ 만 존재한다. 각 영역에 대한 경계조건은 식 (4)으로 주어진다[1].

$$\begin{aligned}
r = r_o & \quad B_z''(r_o, z) = \mu_0 M_{zn} \\
r = r_s & \quad B_z'(r_s, z) = 0 \\
r = r_m & \quad B_z''(r_m, z) - B_z'(r_m, z) = \mu_0 M_{zn} \\
B_r''(r_m, z) & = B_r'(r_m, z)
\end{aligned} \tag{4}$$

자기벡터 포테셜의 정의와 지배방정식으로부터 영역 I (공기영역)과 영역 II (영구자석영역)의 반경방향과 축방향 자속밀도 특성이 계산되며 식 (5)과 같다[1].

영역 I (air)의 자속밀도 특성식

$$\begin{aligned}
B_r' & = -k_n \left(A_n' I_1(k_n r) + B_n' K_1(k_n r) \right) \cos(k_n z) \\
B_z' & = k_n \left(A_n' I_0(k_n r) - B_n' K_0(k_n r) \right) \sin(k_n z)
\end{aligned} \tag{5}-1$$

영역 II (magnet)의 자속밀도 특성식

$$\begin{aligned}
B_r'' & = -k_n \left(A_n'' I_1(k_n r) + B_n'' K_1(k_n r) - \frac{\mu_0}{k_n} \left(\frac{c_1}{r} + c_2 r \right) M_m \right) \cos(k_n z) \\
B_z'' & = k_n \left(A_n'' I_0(k_n r) - B_n'' K_0(k_n r) - \frac{2\mu_0}{k_n^2} c_2 M_m \right) \sin(k_n z)
\end{aligned} \tag{5}-2$$

여기서 $I_1(k_n r)$ 와 $K_1(k_n r)$ 은 각각 수정된 1차 제 1종 및 제 2종 Bessel 함수이고, $I_1(k_n r)$ 와 $K_1(k_n r)$ 은 각각 수정된 0차 제 1종 및 2종 Bessel 함수이다. 식 (5)의 계수 (A_n' , B_n' , A_n'' , B_n'')는 식 (5)을 경계조건에 대입하여 얻을 수 있다.

2.3 전류 모델링

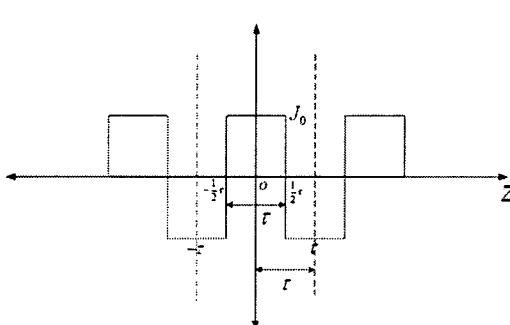


그림 3. $r=r_s$ 에서의 전류분포

고정자 코일의 전류분포는 $r=r_s$ 에서 전류시트로 분포해 있고, 그림 3으로부터 식 (6)과 같이 계산되어진다..

$$J(z) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4J_0}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi}{\tau} z \tag{6}$$

여기서, $J_0=Ni/\tau$ 이며, N 은 턴 수, i 는 전류이다.

2.4 추력특성식

힘은 영구자석에 의한 자속밀도와 전류에 의한 상호작용으로 발생하며 Tubular형 LOA의 미소 축방향 길이 dz 에 작용하는 힘은 식 (7)와 같다.

$$dF = l \cdot p \cdot \vec{J} \times \vec{B} dz \tag{7}$$

여기서 $l=2\pi r_s$, p 는 영구자석의 극 쌍수이다. 추력은 힘의 축방향 성분이며 식 (8)과 같다.

$$dF_z = -2\pi r_s p B_r'(rz) J_n \cos(k_n z) \tag{8}$$

그러므로 전체추력은 식 (9)을 축방향(z 방향)에 대해 적분하여 계산되며 식 (10)로 주어진다.

$$F_z = 2\pi r_s p \tau k_n (I_1(k_n r_s) + K_1(k_n r_s)) J_n \cos(k_n z) \tag{10}$$

2.5 쇄교자속 및 역기전력 특성식

영구자석에 의한 상의 쇄교자속은 식 (11)로부터 구할 수 있다.

$$\Lambda_f = p \times \int_{-z_i}^{z_f} \frac{N}{\tau} \cos(k_n z) dz \int_z^{z_f+\tau} 2\pi r_s B_r(r_s, z) dz \tag{11}$$

여기서, z_i 와 z_f 는 각각 상의 초기위치와 마지막 위치이다. $z_i=-\tau/2$, $z_f=\tau/2$ 라 하면 영구자석에 의한 쇄교자속은 식 (12)과 같다.

$$\Lambda_f = p \times \left(\frac{2N}{\tau} \right) 4\pi r_s [-(A_n' I_1(k_n r_s) + B_n' K_1(k_n r_s))] \cos(k_n z) \tag{12}$$

역기전력은 축방향으로 영구자석이 이동함에 따라 발생하는 쇄교자속의 변화로 정의되며 식 (13)로 계산된다.

$$\begin{aligned}
e & = -\frac{d\Lambda_f}{dt} = \frac{dz}{dt} \frac{d\Lambda_f}{dz} = u \frac{d\Lambda_f}{dz} \\
& = -u \cdot p \times \frac{2N}{\tau} 4\pi r_s [-(A_n' I_1(k_n r_s) + B_n' K_1(k_n r_s))] \sin(k_n z)
\end{aligned} \tag{13}$$

여기서 Λ_f 는 쇄교자속, u 는 영구자석의 이동속도이다.

3. 축방향 자화를 갖는 Tubular형 LOA의 특성해석

표 1은 유한요소 해석과 비교하기 위한 축방향 자화를 갖는 Tubular형 LOA 해석모델이다. 영구자석의 극수는 4.5극이며, 고정자 코일 극수는 6극이다.

표 1. 해석모델의 사양

항목	사양
극간격 (t)	20 (mm)
영구자석 한 편의 길이 (t_m)	10 (mm)
축반경 (r_o)	10 (mm)
영구자석 내반경 (r_o)	10 (mm)
영구자석 외반경 (r_m)	20 (mm)
코일 내반경	23 (mm)
고정자 내반경 (r_s)	27 (mm)
고정자 외반경	37 (mm)
잔류자속밀도 (B_r)	1.1 T
턴 수 (N)	100 turn

그림 4-7은 유한요소 해석결과와 해석결과를 비교한 것이다.

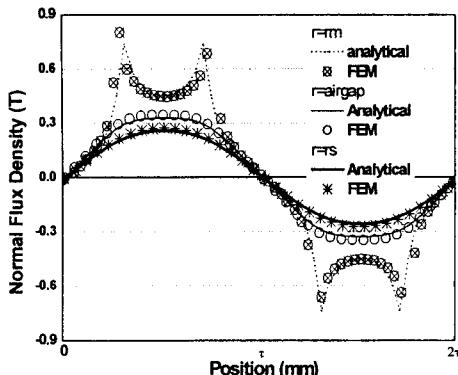


그림 4. 반경방향에 따른 자속밀도 특성

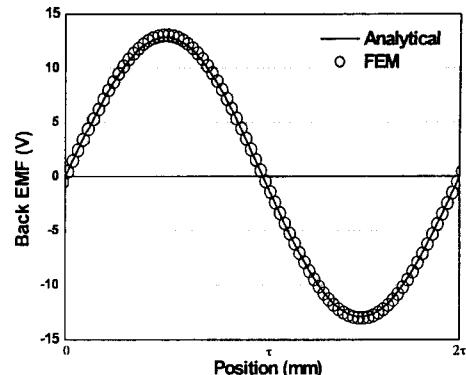


그림 7. 역기전력 특성 ($u=1 \text{ m/s}$)

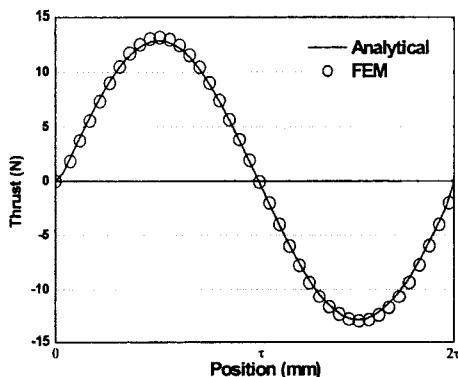


그림 5. 추력 특성 ($i=1 \text{ A}$)

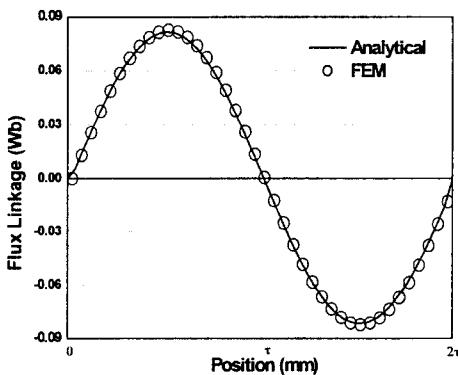


그림 6. 영구자석에 의한 쇄교자속 특성

그림 4는 반경방향 변화에 따른 수직 자속밀도를 비교한 것이다. $r=r_c$ 에서의 자속밀도 분포는 halbach 배열 자속밀도 분포와 비슷하다. 그림 5는 전류가 1A인 경우의 추력특성을 나타내고 있고 그림 6는 쇄교자속, 그림 7은 이동자가 1 m/s로 움직이고 있을 때의 역기전력을 나타낸다. 모든 결과들로부터 해석결과가 요한요소 해석 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 축방향 자화를 갖는 Tubular형 LOA의 자속밀도, 추력, 쇄교자속, 역기전력에 대해 해석적인 특성식을 유도하였고 해석결과는 해석모델을 통하여 유한요소해석 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 본 논문의 해석방법은 설계 및 동특성 해석을 수행하기 위한 변수 결정에 도움이 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Sung-ho Lee, Wo-n-Bum Jang, "Analysis and experimental verification of moving-magnet linear actuator with cylindrical Halbach Array", *IEEE Trans.*, vol. 40 no 4, pp. 2068-2070, July 2004.
- [2] Nicola Bianchi, "Analytical computation of magnetic fields and thrusts in a tubular PM linear servo motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol.1, pp21-28, 2000.