

가동자 형태에 따른 원통형 LOA의 특성 비교

장석명, 서정출, 최장영, 이성호\*, 정상섭\*  
 충남대학교, LG D/A 연구소\*

Comparison and Analysis of Tubular LOA According to Mover Type

Seok-Myeong Jang, Jung-Chul Seo, Jang-Young Choi, Sung-Ho Lee\*, Sang-Sub Jeong\*  
 Chungnam National University, LG D/A Research Laboratory\*

**Abstract** - This paper deals with two structures of tubular LOA. One is the moving-coil type LOA and the other is moving-magnet type LOA. We analyze and compare the characteristics of tubular LOA according to mover type. The results of predictions from the analysis are compared with corresponding finite element analysis.

1. 서 론

영구자석을 이용한 에너지 변환 기기들은 산업 자동화, 사무 자동화 그리고 로봇 산업과 같은 분야에 응용을 하기 위한 연구개발이 늘어가는 추세이다. 특히 짧은 스트로크의 직선왕복운동이 요구되는 기기에 직선형 왕복 액추에이터(이하 LOA)가 광범위하게 응용되고 있다[2].

LOA는 형상에 따라 원통형과 평면형, 가동체의 재질에 따라 가동 코일형, 가동 자석형, 가동 철심형 등으로 구분 되는데 성능이 각각 다르므로 응용분야에 따라 적당한 종류를 선정해야만 한다. 가동코일형 LOA는 영구자석에 의해 공극과 철심에서 일정한 자속을 가지므로 철손이 매우 작아, 고정자 요크를 성층 철심으로 하지 않아도 되며 구조가 간단하고 가동자의 관성이 작아 고속의 소 변위 왕복운동에 적합할 뿐만 아니라 가동자에 자성체를 사용하지 않으므로 고정자와 가동자 사이에 자기 흡인력이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 반면에 전원을 공급하는 코일이 가동되므로 전원 리드선의 피로, 유지보수 등을 수반하고 이것을 대용량의 산업용으로 확대 사용할 경우에는 운전주파수의 제한이 되 따르는 단점을 가졌다. 가동 철심형 LOA는 리드 선이 없고 가동자 구조가 단순하고 튼튼하여 유지보수나 제작비 등에서 매우 유리한 장점을 가진 반면, 고정자와 가동자 사이에 공극이 불균일하면 강한 흡인력이 발생하므로 가동자의 지지에 유의해야만 하는 단점이 있다. 가동자석형 LOA는 전원 공급리드 선이 고정부에 위치하므로 전선의 피로나 유지보수 면에서 가동코일형보다 유리한 반면, 영구자석이 고속운동 하므로 가공 시 부력에 크게 유의해야하고 가동자와 고정자 사이에 흡인력이 발생하는 단점을 가졌다[2]. 본 논문에서는 동일 체적을 갖는 원통형 LOA에서 가동자 재질에 따른 자계분포 특성 및 추력 특성을 비교하고자 한다. 해석모델은 가동 코일형과 가동 자석형이며, 해석적 방법과 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

2. 자계 및 추력 특성해석

2.1 해석 모델

그림 1,2는 본 논문에서 해석하고자 하는 원통형 LOA의 모델이다. 영구자석은 Halbach 배열이고 전류분포는 가동 자석형의 경우에는  $r=r_s$ , 가동 코일형의 경우에는  $r=r_c$ 에 전류시트로 분포해 있다고 가정하였다. 또한 영구자석과 코일의 비투자율을 1, 철심의 비투자율과 축

방향 길이는 무한이라 가정하였다.

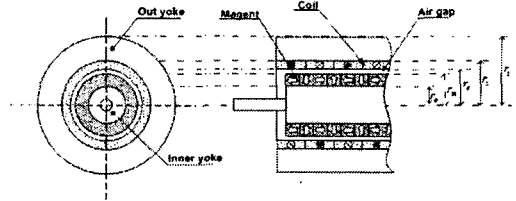


그림 1 원통형 가동자석형 LOA 모델

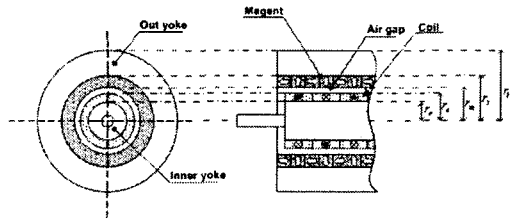


그림 2 원통형 가동코일형 LOA 모델

2.2 영구자석에 의한 자계

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

식 (1)은 Halbach 배열을 갖는 영구자석을 모델링한 것이다. 여기서  $M_{rn}$ ,  $M_{zn}$ 은 반경방향과 축방향의 푸리에 계수이며,  $c_1$ ,  $c_2$ 는 반경방향 자화  $M_{rn}$ 의 변형을 줄이기 위해 적절하게 선택되어진 상수이다.

영구자석에 의한 자계의 지배방정식은 식 (2)와 같다.

$$\nabla^2 \vec{A} = \frac{\partial^2 A_{\theta n}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{\theta n}}{\partial r} - \left( k_n^2 + \frac{1}{r^2} \right) A_{\theta n} = \mu_0 k_n \left( \frac{c_1}{r} + c_2 r \right) M_{rn} \quad (2)$$

원통형 LOA의 기하학적인 구조에 의해 자기 벡터포텐셜  $\vec{A}$ 는  $\theta$  성분만 존재한다.

$$\begin{aligned} H_z^I(r_0, z) &= 0 \\ B_r^I(r_m, z) &= B_r^{II}(r_m, z) \\ B_z^I(r_m, z) - B_z^{II}(r_m, z) &= \mu_0 M_{zn} \sin(k_n z) \\ B_z^I(r_s, z) &= -\mu_0 M_{rn} \sin(k_n z) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
B_r^I &= -k_n [A_n^I I_1(k_n r) + B_n^I K_1(k_n r)] \cos(k_n z) \\
B_z^I &= k_n [A_n^I I_0(k_n r) - B_n^I K_0(k_n r)] \sin(k_n z) \\
B_r^{II} &= -k_n \left[ A_n^{II} I_1(k_n r) + B_n^{II} K_1(k_n r) - \frac{\mu_0}{k_n} M_{rn} \left( \frac{c_1}{r} + c_2 r \right) \right] \\
&\quad \cdot \sin(k_n z) \\
B_z^{II} &= k_n \left[ A_n^{II} I_0(k_n r) - B_n^{II} K_0(k_n r) - \frac{2\mu_0 c_2}{k_n^2} M_{rn} \right] \\
&\quad \cdot \sin(k_n z) \quad (4)
\end{aligned}$$

식 (3)과 (4)는 가동 코일형 LOA의 경계조건 및 자계 특성식이다. 가동 자석형 LOA의 경계조건 및 자계 특성식은 [1]에 있다. 여기서,  $I_1(k_n r)$  과  $K_1(k_n r)$  은 각각 수정된 1차 제 1종 및 제 2종 Bessel 함수이고,  $I_0(k_n r)$  과  $K_0(k_n r)$  은 각각 수정된 0차 제 1종 및 제 2종 Bessel 함수이다. 계수  $A_n^I, B_n^I, A_n^{II}, B_n^{II}$  는 각각의 경계조건에 의해 결정된다. 윗 첨자  $I, II$  는 각각 공극과 영구자석 영역을 의미한다.

### 2.3 코일에 의한 자계

$$J = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} J_n \sin(k_n z) \hat{a}_z \quad (5)$$

식 (5)은 전류시트를 모델링한 것이다. 원통형 LOA의 기하학적인 구조에 의해 전류는  $\theta$  방향으로 흐른다. 여기서  $J_n$  은 전류밀도 푸리에 계수이다. 코일에 의한 자계의 지배 방정식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{d^2}{dr^2} A_{\theta n} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} A_{\theta n} - \left( k_n^2 + \frac{1}{r^2} \right) A_{\theta n} = 0 \quad (6)$$

식 (7), (8)은 각각 가동자석형과 가동코일형의 경계조건이다.

#### 가동자석형

$$\begin{aligned}
B_z^I(r_s, z) &= \mu_0 J_n \sin(k_n z) \\
\mu_r B_z^I(r_o, z) &= B_z^{II}(r_o, z) \\
B_r^I(r_o, z) &= B_r^I(r_o, z) \quad (7)
\end{aligned}$$

#### 가동코일형

$$\begin{aligned}
B_z^I(r_s, z) &= 0 \\
B_r^I(r_o, z) &= B_r^I(r_o, z) \\
\mu_r B_z^I(r_o, z) - B_z^{II}(r_o, z) &= J_n \sin(k_n z) \quad (8)
\end{aligned}$$

여기서, 전원이 전류시트는 가동자석형인 경우  $r = r_s$ , 가동코일형인 경우  $r = r_o$ 의 경계면에서 경조조건으로 고려하였고  $\mu_r$  은 철심의 비투자율이다. 자계특성식은 식 (9)과 같다.

$$\begin{aligned}
B_r^I &= -k_n (E_n^I I_1(k_n r) + F_n^I K_1(k_n r)) \cos(k_n z) \\
B_z^I &= k_n (E_n^I I_0(k_n r) - F_n^I K_0(k_n r)) \sin(k_n z) \quad (9)
\end{aligned}$$

식 (9)는 가동자석형, 가동코일형 모두에 적용되며, 다만 경계조건에 의해 계수  $E_n^I, F_n^I, E_n^{II}, F_n^{II}$  만이 달라진다.

### 2.4 추력 특성식

추력은 영구자석과 전류에 의한 자계의 상호작용을 고려함으로써 구할 수 있다. 미소 축방향 길이  $dz$  에 작용하는 추력은 식 (10), 식 (11)으로 주어진다.

#### 가동자석형

$$dF_z(z) = -2\pi r_s J_\theta(z) B_r^I(r_s, z) dz \quad (10)$$

#### 가동코일형

$$dF_z(z) = -2\pi r_o J_\theta(z) B_r^I(r_o, z) dz \quad (11)$$

### 2.5 각 모델에 대한 해석 결과

그림 3과 그림 4는 각각 가동자석형과 가동코일형 모델의 자속밀도 특성을 보여준다. 또한, 그림 5는 각 모델에서 코일에 의한 자속밀도, 그림 6은 각 모델에 대한 추력 특성을 보여준다. 해석의 타당성을 입증하기 위해 유한요소 해석치와 비교하였다.

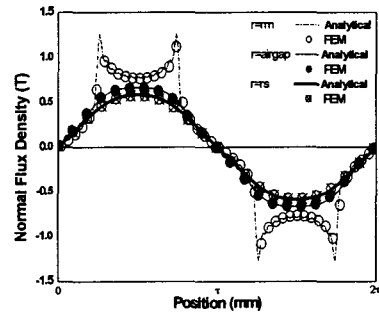


그림 3 가동 자석형 모델의 해석결과와 유한요소해석 결과

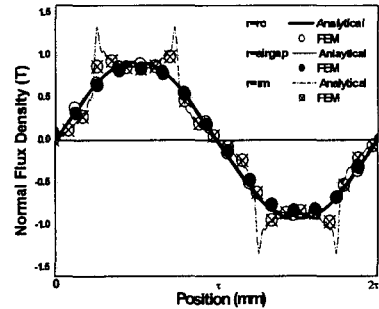
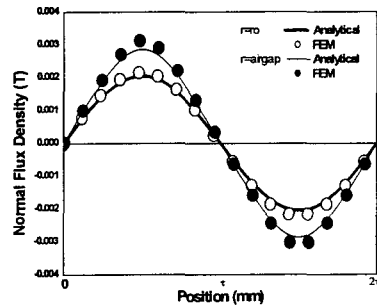
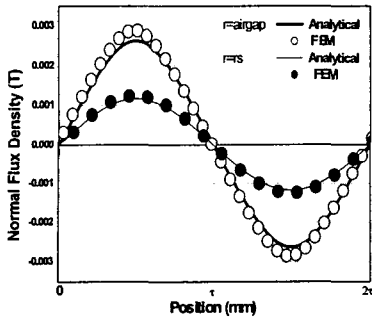


그림 4 가동 코일형 모델의 해석결과와 유한요소해석 결과

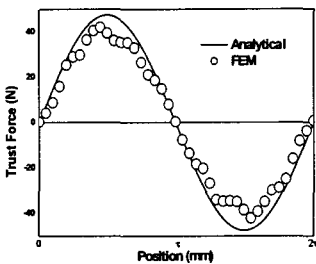


(a)

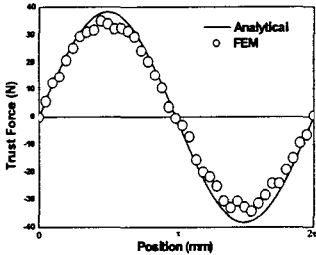


(b)

그림 5 코일에 의한 자속밀도 (a)가동 자석형 (b)가동 코일형



(a)



(b)

그림 6 추력 특성 (a)가동 자석형 (b)가동 코일형

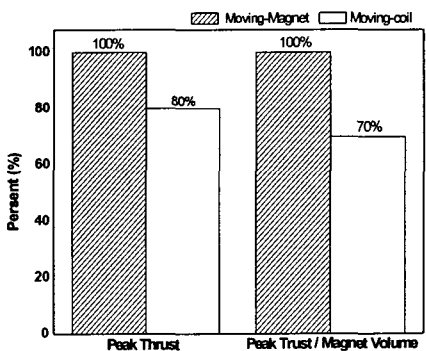


그림 7 두 모델에 대한 추력 특성비교

해석결과 자석 채적밀도가 큰 가동 코일형 LOA의 자속밀도특성이 가동 자석형 LOA보다 좋게 나타났다. 그러나 추력 특성에서는 가동 자석형이 가동 코일형보다 더 좋다는 것을 보여준다. 그림 11에서와 같이, 최대 추력의 경우 가동 자석형이 가동 코일형보다 약 20%정도 더 크고 자석채적당 최대 추력의 경우 가동 자석형이 가동 코일형보다 30% 더 크음을 알 수 있다.

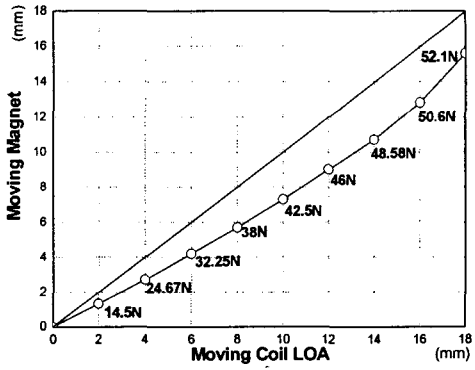


그림 8 영구자석 높이에 따른 특성비교

그림 8은 동일한 채적을 갖는 가동 자석형 LOA와 가동 코일형 LOA에 대하여 공극길이 (1 mm), 영구자석의 극간격 (20 mm), 코일 턴수 (100) 및 전류(1 A)를 일정하게 고정시킨 후 동일한 최대 추력을 갖는 영구자석 두께를 비교한 것이다. 모든 영역에서 가동 자석형의 영구자석 이용률이 가동 코일형 보다 높음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 동일한 채적을 갖는 원통형 가동 자석형 LOA와 가동 코일형 LOA 모델을 제시하였고 각각의 모델에 대하여 영구자석 및 코일에 의한 자계 특성과 추력 특성을 해석적 방법으로 구하였고 유한요소 해석을 통하여 해석적 방법의 타당성을 확인하였다. 해석 결과에 의해 가동 자석형이 가동 코일형보다 추력 특성과 영구자석 이용률이 우수함을 알 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 장석명, 서정출, 최장영, 이성호, 정상섭 "Slot/Slotless 고정자를 갖는 Tubular형 LOA의 자계특성 비교", 춘계 학술대회 논문집, pp68-70, April 2004.
- [2] 정상섭, "진동제어 시스템을 위한 리니어 왕복 액추에이터의 동특성 해석", 충남대학교 박사학위논문 2002
- [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.
- [3] Jiabin Wang, Geraint W. Jewell and David Howe, "A General Frame work for the Analysis and Design of Tubular Linear Permanent Magnet Machines", *IEEE Trans. Magn.*, vol.35. no. 3, pp.1986-299