Slot/Slotless 고정자를 갖는 Tubular형 LOA의 자계특성 비교

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

The comparison of Magnetic Field Distribution in Tubular Type LOA with Slot/Slotless Stator

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

Abstract - This paper deals with comparison of magnetic field distribution in LOA with slotless/slot stator. We derived magnetic field solutions in terms of vector potential and cylinderical coordinates. In particular this paper accounts for slotting effect due to stator slot opening by introducing a 2-D relative permeance function.

The results of predicitions from the analysis are compared with corresponding finite element analysis.

1. 서 론

직선형 왕복 엑추에이터(Liner Oscillatig Actuator, 이하 LOA)는 정현파 또는 펄스형 구형파의 교번전압을 공급하여 일정 스트로크로 왕복 운동을 하는 직선형 기기로서 선형성과 고정밀 제어성 등에서 우수한 장점을 갖는다. 따라서 위치제어시스템, 컴퓨터 플로피 디스크 드라이브 등, 정밀 서보시스템 분야에서 널리 사용되고 있다[1]. 특히, Tubular 형 LOA는 단부 효과가 없는 장점을 갖고 있으며 축 방향 추력에서 직접적인 물리적 구속이 없고 최대속도와 가속 한계가 높다는 특징을 갖는다.

Tubular형 LOA는 고정자의 형상에 따라 슬롯형과 슬롯리스형으로 구분할 수 있으며 고정자에 슬롯이 있는 경우에는 최대 자속밀도와 영구자석 이용률이 높은 반면 고조파 성분이 함유되어 추력리플과 진동을 유발하는 단점을 갖고 있다. 고정자에 슬롯이 없는 경우에는 최대 자속밀도와 영구자석 이용률이 상대적으로 작지만 공극 자속밀도가 치슬롯형상에 의한 고조파 성분이 없으므로 추력 리플이 거의 존재하지 않는다[2][3].

본 논문에서는 슬롯/슬롯리스 고정자를 갖는 Tubular형 LOA 모델을 제시하고, 원통좌표계에서 공간 고조파법을 이용하여 자계 특성식을 도출하였다. 슬롯이 있는 고정자에 대해서는 치슬롯형상을 고려하기위해 2D 비퍼미언스 함수를 도입하여 자속밀도를 해석하였고 유한요소 해석과 비교 검토하였다[4].

2. 슬롯리스 고정자를 갖는 Tubular형 LOA 자계 해석

2.1 해석 모델

그림 1은 슬롯리스 고정자를 갖는 Tubular형 LOA의 해석 모델이다. 영구자석은 Halbach 배열로 되어 있으며 코일은 단상으로 감겨져있고, 샤프트와 요크는 철로 구성되어 있다. 영구자석의 투자율은 공기와 같고, 철심의 투자율과 축방향 길이는 무한이라고 가정하였다.

2.2 영구자석에 의한 자계특성

Halbach 배열을 갖는 영구자석은 식 (1)과 같은 푸리에 급수로 주어진다.

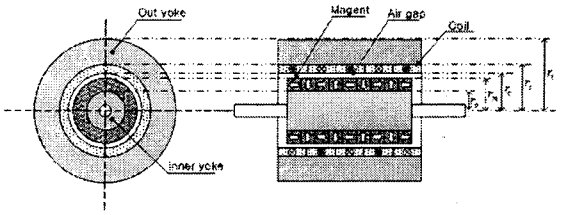


그림 1. 슬롯리스 고정자를 갖는 Tubular 형 LOA 모델

$$\overrightarrow{M_n} = \sum_{n=1,3,5,\cdots}^{\infty} \left[\left(\frac{c_1}{r} + c_2 r \right) M_m \overrightarrow{a_r} + M_{zn} \overrightarrow{a_z} \right] \sin(k_n z) \qquad (1)$$

여기서 M_{rn}, M_{zn} 은 푸리에 전개에 의한 반경방향과 축 방향의 n차 고조파 자화 성분 크기이며 c_1, c_2 는 수직방향 자화 M_m 의 변형을 줄이기 위해 적절하게 선택 되어진 상수이다. $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지며 τ 는 극간격이다.

영구자석에 의한 자계는 등가 전류밀도로 표현 할 수 있고 식 (2)와 같다. 자기 벡터 포텐셜과 자속밀도의 관계는 자기 벡터 포텐셜의 정의로부터 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \overrightarrow{H} = \overrightarrow{J_e} \qquad (2)$$

$$\nabla \times \overrightarrow{A} = \overrightarrow{B} \qquad (3)$$

식 (1), (2), (3)과 쿨롱의 조건($\nabla \cdot \overrightarrow{A} = 0$)으로부터 지배방정식을 유도할 수 있으며 (4)와 같다.

$$\nabla^2 A = \frac{\partial^2 A_{\theta n}}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial A_{\theta n}}{\partial r} - \left(k_n^2 + \frac{1}{r^2} \right) A_{\theta n}$$
$$= \mu_0 k_n \left(\frac{c_1}{r} + c_2 r \right) M_m \qquad (4)$$

Tubular형 LOA의 기하학적인 구조에 의해 전류는 θ 방향으로 흐르고 자기 벡터퍼텐셜 $\overrightarrow{A}$ 는 θ 성분만 존재한다.

식 (5)는 Tubualr형 LOA의 경계조건이다.

$$
\begin{aligned}
&B_{zn}^{II}(r_0,z) = -\mu_0 M_{zn} \\
&B_{rm}^{II}(r_m,z) = B_{rm}^{I}(r_m,z) \\
&B_{zn}^{II}(r_m,z) - B_{zn}^{I}(r_m,z) = -\mu_0 M_{zn} \\
&B_{zn}^{I}(r_s,z) = 0
\end{aligned} \tag{5}
$$

식 (3)과 식 (4)로부터 그림 1의 슬롯리스 Tubular형 LOA의 공극 영역과 영구자석 영역의 자계특성식을 구할 수 있고, 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
&B_{rm}^{I} = k_n\left[C_n^I I_1(k_n r) + D_n^I K_1(k_n r)\right]\sin(k_n z) \\
&B_{zn}^{I} = k_n\left[C_n^I I_0(k_n r) - D_n^I K_0(k_n r)\right]\cos(k_n z) \\
&B_{rm}^{II} = k_n\left[C_n^{II} I_1(k_n r) + D_n^{II} K_1(k_n r) + \frac{\mu_0 M_{rm}}{k_n}\left(\frac{c_1}{r} + c_2 r\right)\right] \\
&\qquad \cdot \sin(k_n z) \\
&B_{zn}^{II} = k_n\left[C_n^{II} I_0(k_n r) - D_n^{II} K_0(k_n r) + \frac{2c_2\mu_0 M_{rm}}{k_n^2}\right] \\
&\qquad \cdot \cos(k_n z)
\end{aligned} \tag{6}
$$

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 C_n^I, D_n^I, C_n^{II}, D_n^{II} 는 경계조건에 의해 결정된다. 윗 첨자 I, II 는 각각 공극과 영구자석 영역을 의미한다.

3. 슬롯 고정자를 갖는 Tubular형 LOA모델에서의 자계 해석

3.1 2D 비퍼미언스 함수를 이용한 슬롯팅 고려

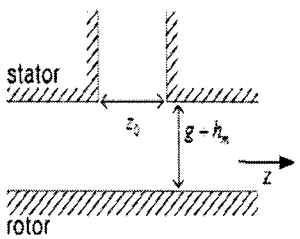


그림 2. 퍼미언스 계산 모델

그림 2는 슬롯이 있는 경우의 2D 퍼미언스 함수를 구하기 위한 단순화된 모델이다. 여기서 z_0는 슬롯 개구간의 폭을 의미한다. 슬롯팅을 고려하기 위하여 하나의 슬롯 모델에 대하여 2D 퍼미언스 함수를 구하고, 이 함수를 여러 슬롯으로 확장하였다. 슬롯이 있는 경우 공극과 영구자석 사이의 퍼미언스 계산은 영구자석을 제거하고 고정자와 회전자 사이의 자기 벡터포텐셜의 변화를 계산하여 구할 수 있으며 2D 퍼미언스 함수는 식 (7)과 같다.

$$
\lambda(z,r) = \begin{cases}
\Lambda_0 \left[1 - \beta(r) - \beta(r)\cos\dfrac{\pi}{0.8 z_0} z\right] \\
\quad \text{for } 0 \le z \le 0.8 z_0 \\
\Lambda_0 \quad \text{for } 0.8 z_0 \le z \le \dfrac{\tau}{2}
\end{cases} \tag{7}
$$

여기서, $\Lambda_0 = \mu_0 / g'$ 이고 $g' = g + h_m$ 이다. Λ_0 는 치에서의 퍼미언스이고 g 는 기계적 공극길이, h_m 은 자석의 높이이다. $\beta(r)$은 반경 방향의 변화에 따른 2D 퍼미언스의 변화를 고려한 것이다. $\beta(r)$은 식 (8)로 정의된다.

$$
\beta(r) = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{z_0}{2g'}\right)^2 (1 + v^2)}}\right] \tag{8}
$$

식 (8)에서 v 는 식 (9)로부터 얻어진다.

$$
\begin{aligned}
y\frac{\pi}{z_0} = \frac{1}{2}\ln\left[\frac{\sqrt{a^2 + v^2} + v}{\sqrt{a^2 + v^2} - v}\right] \\
+ \frac{2g'}{z_0}\arctan\frac{2g'}{z_0}\frac{v}{\sqrt{a^2 + v^2}}
\end{aligned} \tag{9}
$$

여기서, $a^2 = 1 + (2g'/z_0)^2$ 이고 $y = r - R_s + g'$ 이다. 식 (7)로부터 2D 비퍼미언스 함수가 얻어진다.

$$
\bar{\lambda}(z,r) = \frac{\lambda(z,r)}{\Lambda_0} \tag{10}
$$

식 (10)을 푸리에 급수로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$
\bar{\lambda}(z,r) = \sum_{n=0}^{\infty} \overline{\Lambda_n}(r)\cos(2k_n(z + z_{sa})) \tag{11}
$$

여기서 z_{sa} 는 코일 피치에 의해 결정되는 상수이다.

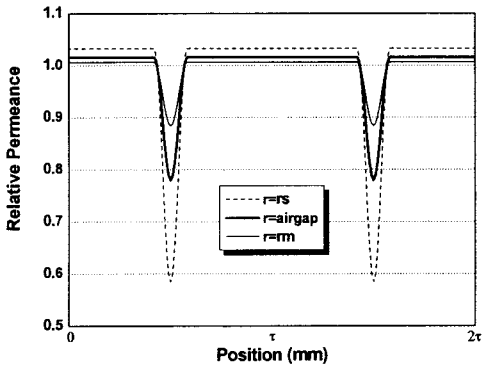


그림 3. 반경방향 변화에 따른 2D 비퍼미언스 변화

그림 3은 슬롯 개방 영역을 일정하게 할 때 고정자 내반경(r_s), 공극, 그리고 영구자석 표면(r_m) 일 때의 비퍼미언스의 변화를 나타낸다. 고정자에 가까워 질수록 2D 비퍼미언스의 변화가 커짐을 확인할 수 있다.

3.2 치슬롯이 고려된 영구자석에 의한 자계특성

치슬롯 형상이 고려된 영구자석에 의한 자속밀도는 슬롯리스 모델에서 계산된 자속밀도와 2D 비퍼미언스 함수를 이용하여 계산할 수 있고 식 (12)와 같다.

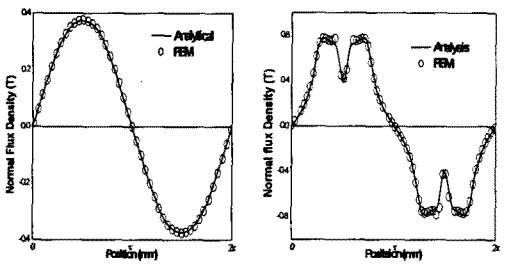
$$
B_{slotted} = \bar{\lambda}(z,r)\, B_{slotless} \tag{12}
$$

4. 고정자의 슬롯 유무에 따른 Tubular형 LOA의 자계특성 비교

표 1은 슬롯 유무에 따른 LOA 해석모델의 사양을 나타내고 있다. 해석 모델에서 영구자석의 극수는 $4\frac{1}{2}$ 극이고, 고정자 코일의 극수는 6극을 갖는다.. 그림 4, 5와 6은 슬롯형과 슬롯리스형에 대하여 반경방향의 변화에 따른 법선 성분 자속밀도를 유한요소해석과 비교한 것이다.

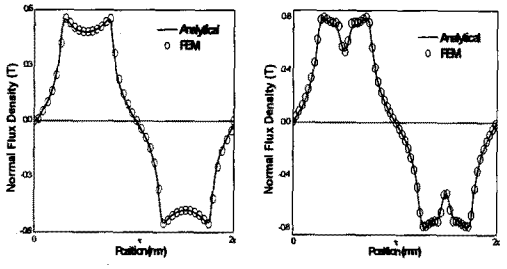
표 1. 해석모델의 사양

항목	슬롯리스형	슬롯형
극간격 (τ)	20 (mm)	20 (mm)
영구자석 1편의 길이 (τ_m)	10 (mm)	10 (mm)
축반경 (r_0)	10 (mm)	10 (mm)
영구자석 외반경 (r_m)	20 (mm)	20 (mm)
고정자 내반경(r_s)	25 (mm)	21 (mm)
고정자 외반경(r_i)	35 (mm)	35 (mm)
슬롯오프닝(z_0)	-	2 (mm)
공극길이(g)	1 (mm)	1 (mm)
잔류자속밀도(B_r)	0.7 (T)	0.7 (T)



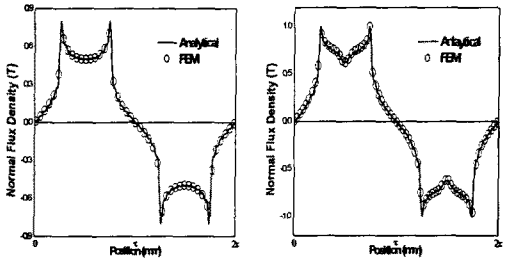
(a) slotless (b) soltted

그림 4. 고정자 내반경에서의 자속밀도



(a) slotless (b) slotted

그림 5. 공극에서의 자속밀도



(a) slotless (b) slotted

그림 6. 영구자석 표면에서의 자속밀도

그림 4, 5와 6으로부터 해석 결과가 유한요소 해석의 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 슬롯형의 경우 고정자에 가까워질수록 2D 비퍼미언스의 변화가 커져 그림 4(b)와 같이 자속밀도가 더 많이 일그러짐을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 Tubular형 LOA에 대하여 고정자의 슬롯 유무에 따른 자계 특성을 해석하였고 유한요소 해석을 통하여 해석의 타당성을 입증하였다. 슬롯형의 최대 자속밀도가 슬롯리스형보다 우수한 특성을 보이지만, 치 슬롯 형상의 영향에 의한 슬롯팅 효과를 확인할 수 있다. 이것은 자속밀도에 고조파 성분을 함유시키므로 기기의 손실을 증가시키는 단점을 갖고 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 장석명 외. "리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액추에이터의 설계제작 및 제어정수 도출," 전기학회 논문지. 제 48B권 제 5호. pp241-248. 1999.

[2] 장석명, 최장영, 이성호, 이승원, "Halbach/수직 자화 영구자석을 갖는 Tubular 모터의 특성해석," KIEE. EMECS. 춘계학술대회 논문집, pp119-121, April 2003.

[3] Nicola Bianchi, "Analytical computation of magnetic fields and thrusts in a tubular PM linear servo motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol.1, pp21-28, 2000.

[4] Z.Q. Zhu, D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in permannet magnet brushless dc motors, Part Ⅲ : Effect of stator slotting," *IEEE Trans. Magn.*, vol.29, pp143-151, 1993.