

Halbach/수직 자화 영구자석을 갖는 Tubular 모터의 특성해석

장 석명, 최장영, 이성호, 이승원*
충남대학교 전기공학과, 충남도청*

Characteristic Analysis of Tubular Linear Motor with Halbach and Vertical Magnetized PMs

Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Sung-Ho Lee, Seung-Won Lee*
Chungnam National University, Chungnam Provincial Office*

Abstract - In the machine tool industry, direct drive linear motor technology is of increasing interest as a means to achieve high acceleration, and to increase reliability [1]. In this paper, we analyze and compare the characteristics of tubular motor with halbach and vertical magnet array respectively. We derive magnetic field solutions due to the PMs and to the currents. Motor thrust is then derived. The results are shown in good conformity with those obtained from the commonly used finite element method.

1. 서 론

본 논문은 기기 응용 산업에 널리 쓰이는 직접 구동 리니어 액튜에이터를 발전시키기 위한 목적에서 시작했다. 이러한 모터의 응용은 반도체 웨이퍼 스테핑 모터에서 디아이폰 세공 기기류와 다양한 정밀기기까지 넓은 범위의 응용 처를 갖고있다[1]. 본 논문에서 해석하려는 Tubular 모터는 단부효과가 없기 때문에 평면 리니어 모터에 비해 매우 큰 장점을 가졌다. 이러한 장점 외에도, 튜브러 모터는 다음과 같은 여러 가지 장점을 가졌다.: 1) 높은 최대속도와 가속 한계를 갖고, 2) 반동 억제 장치 없이 높은 위치제어 정밀성이 있으며, 3) 축방향 추력에서 직접적인 물리적 구속이 없으며, 4) 회전-직선 전력 변환에서 전력손실이 없고, 5) 무게를 지탱하는 볼베어링 외에는 마찰력이 없다[1].

본 논문에서 우리는 Halbach자화 영구자석 배열을 갖는 Tubular 모터와 수직자화 영구자석 배열을 갖는 Tubular모터의 특성을 해석하고, 비교하고자 한다. Tubular모터의 자계특성식 및 추력특성은 2차원 원통 좌표계를 이용한 해석적인 방법을 통하여 도출하고 유한요소법을 통해 결과를 비교 검토하고자 한다.

2. 자계 및 추력 특성해석

2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 직선형 Tubular 모터를 보여준다. 그림 2 (a)와 (b)는 각각 Halbach 자화된 영구자석과 수직방향 자화된 영구자석을 갖는 Tubular 모터의 단면을 보여주며, 그림3 (a)와 (b)는 각각 단상과 삼상의 전류분포를 나타내는데, 전류분포가 $r = r_s$ 에 시트전류로 분포해 있다고 가정한다. 한편, 그림 2와 그림 3은 각각 그림 1에서 제시된 Tubular 모터의 단면을 고정자 코일부분과 영구자석을 제외하고 표현했는데, 그 이유는 코일의 투자율은 공기

의 투자율과 같고, 영구자석의 상대 투자율을 1이라 가정하면, 고정자 코일부분과 영구자석을 따로 분리해서 해석이 가능해지기 때문이다. 또한, 그림 2와 그림 3에서 철심의 투자율과 축방향 길이는 무한이라 가정한다.

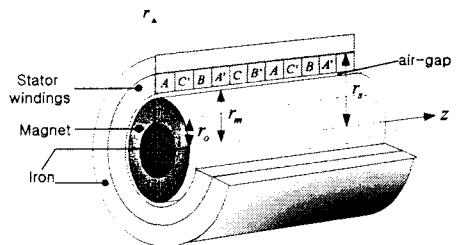


그림. 1 Tubular 모터의 구조

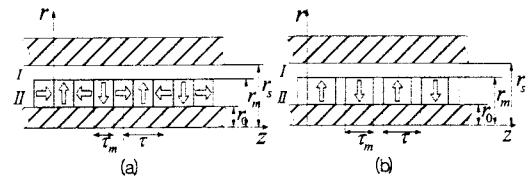


그림 2. 2 영역 Tubular 모터 해석 모델: (a) Halbach 자화 모델, (b) 수직방향 자화 모델

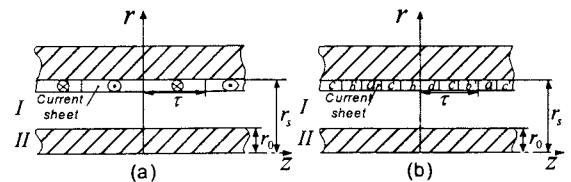


그림. 3 전류밀도 분포: (a) 단상, (b) 삼상

2.2 영구자석에 의한 자계

(1) 지배방정식
맥스웰방정식으로부터 식 (1)이 도입된다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

또, 자기 벡터포텐셜은 식(2)로 정의된다.

$$\nabla \times A = B \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 이용, 쿨롱 게이지 $\nabla \cdot A = 0$ 를 적용하면, 식 (3)과 같은 지배방정식이 유도된다 [2].

$$\begin{aligned}\nabla^2 A &= \frac{d^2 A_{\theta n}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{\theta n}}{dr} - \left(k_n^2 + \frac{1}{r^2} \right) A_{\theta n} \quad (3) \\ &= -\mu_0 k_n \left(\frac{c_1}{r} + c_2 r \right) M_m\end{aligned}$$

여기서, $A_{\theta n}$ 은 자기벡터포텐셜 A 의 θ 성분이며, 투블러모터의 가하학적인 구조에 의해 $A_{\theta n}$ 만 존재한다. M_m 은 Halbach 및 수직방향 자화된 영구자석의 자화 M 의 r 방향 푸리에 계수이며, $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지는 n 차 공간고조파이고, μ_0 는 진공의 투자율이다. c_1, c_2 는 수직방향 자화 M 의 변형을 줄이기 위해, 적절하게 선택 되어진 상수로써, 이 상수로부터, 정확한 M , 을 얻을 수 있다. 한편, 수직자화와 Halbach자화 모델은 모두 식 (3)의 지배방정식을 갖으며, $M_m = 0$ 일 때 공기영역에서의 특성식이 된다.

(2) 경계 조건

그림 2의 Halbach자화 모델과 수직방향 자화모델의 경계조건은 각각 식 (4)와 식 (5)로 주어진다.

Halbach자화모델

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

수직방향 자화모델

$$\begin{aligned}B_z^H(r_o, z) &= 0 \\ B_r^H(r_m, z) &= B_r^I(r_m, z) \\ B_z^H(r_m, z) &= B_z^I(r_m, z) \\ B_z^I(r_s, z) &= 0 \quad (5)\end{aligned}$$

식(4)에서 M_{zn} 은 Halbach자화 M 의 z 방향 푸리에 계수이다.

(3) 자계 특성식

식 (2)와 식(3)을 이용하면 그림 2와 3에 제시된 영역 I 즉 공기영역과 영역II 즉 자석영역의 r 방향 및 z 방향 자계 특성식은 각각 식 (6)와 식 (7)로 표현된다.

영역 I

$$\begin{aligned}B_r^I &= k_n [A_n^I I_1(k_n r) + B_n^I K_1(k_n r)] \sin(k_n z) \\ B_{zn}^I &= k_n [A_n^I I_0(k_n r) - B_n^I K_0(k_n r)] \cos(k_n z) \quad (6)\end{aligned}$$

영역 II

$$\begin{aligned}B_r^H &= \left[A_n^H I_1(k_n r) + B_n^H K_1(k_n r) + \frac{\mu_0 M_m}{k_n} \left(\frac{c_1}{r} + c_2 r \right) \right] \\ &\times k_n \sin(k_n z) \\ B_{zn}^H &= k_n \left[A_n^H I_0(k_n r) - B_n^H K_0(k_n r) + \frac{2c_2 M_m \mu_0}{k_n^2} \right] \cos(k_n z) \quad (7)\end{aligned}$$

여기서, $I_1(k_n r)$ 과 $K_1(k_n r)$ 은 각각 수정된 1차 제 1

종 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 [3]. 자계특성식 (6)과 (7)는 Halbach자화와 수직방향 자화 모델 모두에 해당되며, 다만, 경계조건에 의하여, 계수 $A_n^I, B_n^I, A_n^H, B_n^H$ 만이 달라질 뿐이다.

2.3 고정자 코일에 의한 자계

고정자 코일의 전류 분포는 식 (8)으로 표현된다.

$$J_\theta(z) = \sum_{n=1, odd}^{\infty} J_n \sin(k_n z) \quad (8)$$

여기서, J_n 은 전류밀도 푸리에 계수이다.

(1) 지배 방정식

영구자석에 의한 지배 방정식과 동일한 유도 과정을 적용하면, 식 (9)와 같은 공기영역과 철심영역에서의 라플라스 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2}{dr^2} A_{\theta n} + \frac{1}{r} \frac{dA_{\theta n}}{dr} - \left(k_n^2 + \frac{1}{r^2} \right) A_{\theta n} = 0 \quad (9)$$

(2) 경계 조건

그림3에 제시된 모델에 대한 경계조건은 식(10)으로 표현되며, $r = r_s$ 경계 면에 대한 경계조건에서 $J_\theta(z)$ 이 고려된다.

$$\begin{aligned}B_z^I(r_s, z) &= \mu_0 J_\theta(z) \\ \mu_r B_{zn}^I(r_0, z) &= B_{zn}^H(r_0, z) \\ B_r^H(r_s, z) &= B_r^I(r_s, z) \quad (10)\end{aligned}$$

여기서, μ_r 은 철심의 상대 투자율이다.

(3) 자계 특성식

식 (2), 식 (8)과 식 (9)로부터 고정자 코일에 의한 공극 자속밀도는 식 (11)로 표현된다.

$$\begin{aligned}B_r^I &= \mu_0 k_n [-I_1(k_n r) + \chi_n K_1(k_n r)] \nu_n J_n \cos(k_n z) \\ B_{zn}^I &= \mu_0 k_n [I_0(k_n r) + \chi_n K_0(k_n r)] \nu_n J_n \sin(k_n z) \quad (11)\end{aligned}$$

여기서, $\nu_n = \frac{1}{k_n [I_0(k_n r_s) + \chi_n K_0(k_n r_s)]}$
 $\chi_n = -\frac{I_0(k_n r_o)}{K_0(k_n r_o)}$ 으로 주어진다.

2.4 추력 특성식

추력은 영구자석과 전류에 의한 자계의 상호작용을 고려함으로써 구할 수 있다. 모터의 미소 축방향 길이 dz 에 작용하는 추력은 식 (12)로 주어진다.

$$dF_z(z) = -2\pi r_s J_\theta(z) B_r^I(r_s, z) dz \quad (12)$$

모터에 작용하는 전체 추력은 식 (12)를 z 방향에 대해 적분함으로써 구할 수 있다.

3. 해석결과의 검증

그림 4와 그림 5는 각각 Halbach자화 모델과 수직방향자화모델의 자속밀도에 대한 유한요소 결과와 해석치

를 보여준다. 그림 6은 단상과 삼상 코일여자에 따른 자속밀도에 대한 유한요소결과와 해석치를 보여준다. 그림 7은 단상과 삼상에서 Halbach자화 모델과 수직방향 자화모델의 힘에 대한 유한요소결과와 해석치를 보여준다.

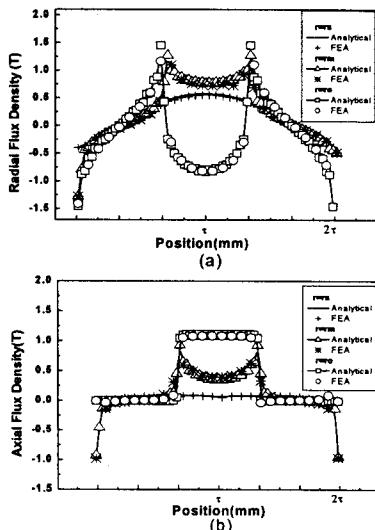


그림. 4 Halbach자화 모델에 대한 해석치와 유한요소 해석 결과: (a) 반경방향 및 (b)축방향 자속밀도

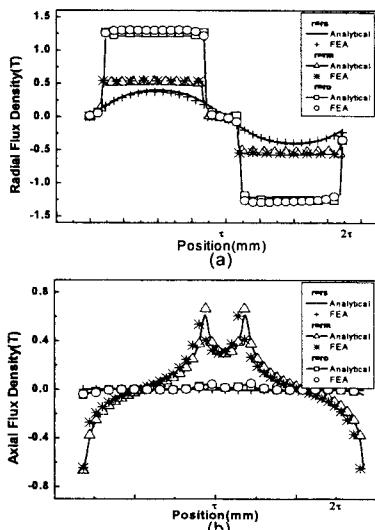


그림. 5 수직방향 자화 모델에 대한 해석치와 유한요소 해석결과: (a) 반경방향 및 (b) 축방향 자속밀도

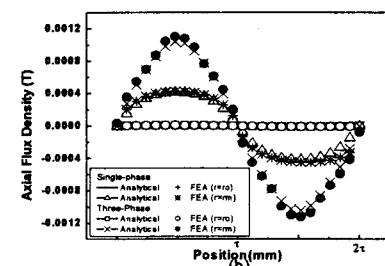
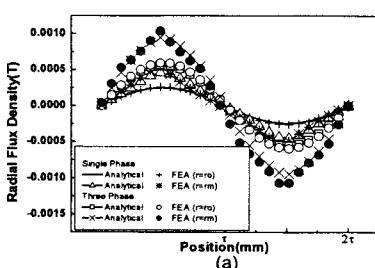


그림. 6. 단상과 3상 코일여자에 따른 고정자 코일의 해석치와 유한요소 해석결과: (a) 반경방향 및 (b) 축방향 자속밀도

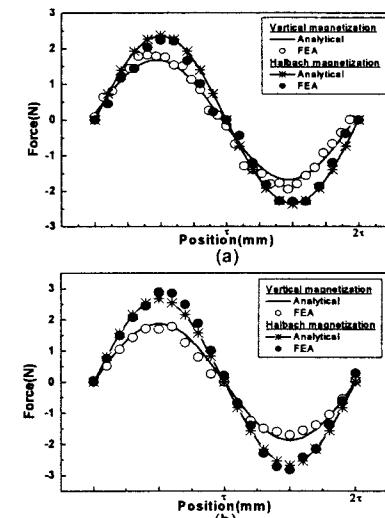


그림. 7 Halbach자화 모델과 수직 자화모델에 대한 힘 특성 (a) 단상 $i=1\text{A}$ 와 (b) 삼상 $i_a=1\text{A}$, $i_b=i_c=-0.5\text{A}$

4. 결 론

본 논문에서는 Halbach자화와 수직방향 자화 영구자석을 갖는 Tubular모터 모델의 영구자석에 의한 자계, 단상과 삼상코일 여자에 따른 자계 및 힘이 제시되었고, 해석 결과는 유한요소해석을 사용함으로써, 타당성을 확인했다.

(참 고 문 현)

- [1] W.-J. Kim, M. T. Berhan, D.L. Trumper and J.H. Lang, "Analysis and Implementation of a Tubular Motor with Halbach magnet array", *IEEE, Trans. Magn.*, vol.1, pp.471-478, Oct 1996.
- [2] 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.1986-2000, May 1999.
- [3] Murray R. Spiegel, John Liu, "Mathematical Handbook of Formulas and Tables", Schaum's Outline Series, 2nd Edition, pp.152-153, 1999.