

회전원판형 영구자석 선형 동기 전동기의 설계 및 제작

장석명, 서정출, 권정기, 조한욱, 최장영
충남대학교 전기공학과

Design and Manufacture of Rotational round plate type PMLSM

Seok-Myeong Jang, Jung-Chul Seo, Jeong-Ki Kwon, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi
Chungnam National University

Abstract - This paper deals with design and manufacture of rotational round plate type Permanent magnet linear synchronous motor. The magnetic flux density and thrust force characteristics is calculated by using analytical method and 2-D finite element analysis.

1. 서 론

리니어 모터(Linear motor)는 직선 운동이 요구되는 FA기기, 자기기록장치, 프린터등과 같은 OA기기, 운송기관 등을 중심으로 그 응용범위는 날로 증가하고 있다. 특히, 산업의 고도화에 따라 종래의 메카니즘으로는 실현이 곤란한 기술적 이슈가 증가하여 선형 전동기의 서보성은 더욱 더 주목을 받고 있다. 그 중, 영구자석형 리니어 동기 모터(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM 이라 함)는 리니어 유도 모터에 비해 개루프 제어 성능이 떨어지고 제조원가가 높다는 단점에도 불구하고 영구자석을 사용하기 때문에 상대적으로 효율이 높고 추력/중량비가 높고 고 추력화 및 고속화가 가능하며 역률이 높다는 장점이 있다. 또한 PMLSM은 추력/전류비가 높고 제어가 용이하며 직접 직선 추력을 발생하므로 최근 들어 고속 지상 운송수단으로서 뿐만 아니라 고층빌딩의 고속 엘리베이터, 반송시스템 및 서보 시스템의 구동원으로 많이 연구되고 있다. 더욱이 최근 들어 고 에너지밀도를 가지는 고성능 영구자석이 개발되어 강력한 자석을 저가로 구할 수 있어서 제조원가의 하락, 전력전자 및 디지털 제어기술의 발전에 의해 PMLSM의 단점이 많이 보완되었다[1][2].

그러나, 일반적으로 PMLSM은 진행 방향 이동거리가 제한된 구조적 특성 때문에 운전 특성 시험에 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 PMLSM의 구조적 한계를 보완하기 위한 시험적 모델로 회전원판형 PMLSM 시험기를 제안하였다. 회전원판형 PMLSM을 설계하기 위하여 공간고조파법과 유한요소법을 이용하였다.

2. 회전원판형 시험기

회전원판형 시험기는 1차축과 2차축(회전원판)의 형태를 쉽게 변경할 수 있기 때문에 PMLSM 뿐만 아니라 선형 유도전동기 및 선형 동기전동기도 실험할 수 있는 장점이 있다. 또한, 진행 방향 길이가 무한이기 때문에 진행방향으로 장시간 운전 특성시험을 할 수 있는 장점도 있다. 그림 1은 설계된 1차축 영구자석을 보여준다. 영구자석의 재질은 NdFeB이며 Halbach 자화로 배열되어 있다. 그림 2은 회전원판형 PMLSM의 단면을 개략적으로 보여준다. 본 논문에서는 회전원판에 부착되는 코일부를 슬롯리스형과 슬롯형으로 설계하여 각 모델에 대한 자속밀도 특성과 추력 특성을 공간고조파법과 유한요소법을 이용하여 구하였다.

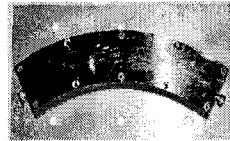


그림 1. Halbach 배열로 자화된 영구자석

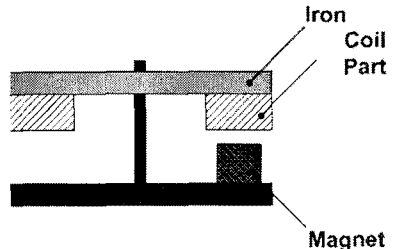


그림 2. 회전원판형 PMLSM의 단면도

3. 해석 모델 및 특성 방정식

3.1 슬롯리스형 PMLSM의 해석모델

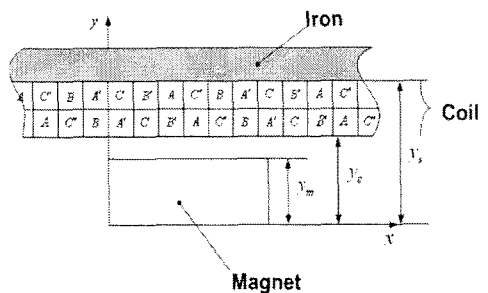


그림 3. 슬롯리스형 PMLSM

그림 3은 슬롯리스형 PMLSM의 해석모델을 보여준다. 해석모델에서 전류는 $y=y_c$ 에서 면전류 밀도로 분포했다고 가정하고, 철심의 투자율과 진행 방향 길이는 무한이라고 가정하였다. 또한, 코일의 투자율과 영구자석의 비투자율을 1로 가정하였다[3].

3.2 자속 밀도 및 추력 특성식

Halbach자화 영구자석 배열은 식 (1)과 같은 푸리에 급수로 주어진다.

$$\mathbf{M} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (M_{xn} e^{jk_n x} \mathbf{a}_x + M_{yn} e^{jk_n x} \mathbf{a}_y) \quad (1)$$

여기서, M_{xn} 과 M_{yn} 은 각각 영구자석의 자화 \mathbf{M} 의 x 방향과 y 방향의 푸리에 계수이며, $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지는 n 차 공간고조파이다.

맥스웰 방정식으로부터 지배방정식은 식 (2)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 A &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_x + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_x + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_x \\ &= -\mu_0 (jk_n M_{xn} e^{jk_n x}) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 지배방정식에서 자기 벡터 포텐셜이 정의되면 자속밀도와 자기 벡터 포텐셜의 관계 $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$ 로부터 자속밀도 특성식이 식 (3)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} B_y^I &= -jk_n (C^I e^{k_n y} + D^I e^{-k_n y}) e^{jk_n x} \\ B_x^I &= k_n (C^I e^{k_n y} - D^I e^{-k_n y}) e^{jk_n x} \\ B_y^{II} &= -jk_n (C^{II} e^{k_n y} + D^{II} e^{-k_n y} + \frac{j\mu_0 M_{yn}}{k_n}) e^{jk_n x} \\ B_x^{II} &= k_n (C^{II} e^{k_n y} - D^{II} e^{-k_n y}) e^{jk_n x} \end{aligned} \quad (3)$$

계수 C^I, D^I, C^{II}, D^{II} 는 경계조건에 의해 계산되며, 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} x = y_0 & \quad H_x^I = -M_{xn} e^{jk_n x} \\ y = y_m & \quad B_y^I = B_y^{II}, \quad H_x^{II} - H_x^I = -M_{xn} e^{jk_n x} \\ y = y_s & \quad H_x^I = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

코일의 전류 분포는 식 (5)와 같다.

$$J = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} J_{\text{slotless}} e^{jk_n x} \mathbf{a}_z \quad (5)$$

추력은 영구자석과 전류에 의한 자계의 상호작용을 고려함으로써 구할 수 있다. 미소 축방향 길이 dx 에 작용하는 추력은 식 (6)로 주어진다.

$$dF_x(x) = -l J_z B_y^I dx \quad (6)$$

여기서, l 은 코일의 유효 길이이다. 전체 추력은 식 (6)를 x 방향에 대해 적분함으로써 구할 수 있다.

3.3 슬롯형 PMLSM의 해석모델

그림 4는 슬롯형 PMLSM의 해석모델을 보여준다. 해석모델에서 전류는 $y=y_c$ 에서 면전류 밀도로 분포해 있다고 가정하고, 철심의 투자율과 진행 방향 길이는 무한이라 가정하였다. 슬롯형 PMLSM의 경우에는 치슬롯 형상을 고려하여 자속밀도 특성식을 구하여야 하며 치슬롯 형상을 고려하는 방법에는 카터 계수를 이용하는 방법, 퍼미언스 함수를 이용하는 방법, 2D 비퍼미언스 함수를 이용하는 방법 등이 있다. 본 논문에서는 2D 비퍼미언스 함수를 이용하여 치슬롯 형상을 고려하였다. 치슬롯 형상이 고려된 영구자석에 의한 자속밀도는 슬롯리스 모델에서 계산된 자속밀도와 2D 비퍼미언스 함수를 이용하여 계산할 수 있고 식 (7)과 같다[4].

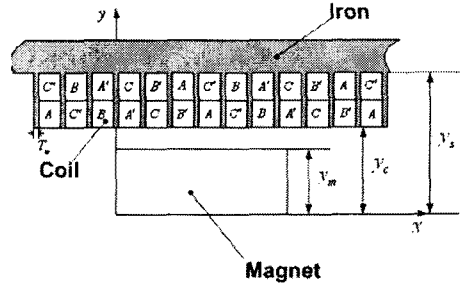


그림 4. 슬롯형 PMLSM

$$B_{\text{slotted}} = \bar{\lambda}(x, y) B_{\text{slotless}} \quad (7)$$

여기서 $\bar{\lambda}(x, y)$ 는 2D 비퍼미언스 함수이다. 슬롯형 PMLSM에서 코일의 전류 분포는 식 (8)과 같다.

$$J = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} J_{\text{slotted}} e^{jk_n x} \mathbf{a}_z \quad (8)$$

여기서, J_{slotted} 는 치슬롯 형상이 고려된 푸리에 계수이다. 슬롯형 PMLSM의 추력은 치슬롯 형상이 고려된 영구자석과 전류에 의한 자계의 상호작용을 고려함으로써 구할 수 있으며 식 (9)와 같다.

$$dF_x(x) = -l J_{\text{slotted}} B_{\text{slotted}} dx \quad (9)$$

4. 해석 결과

4.1 자속밀도 특성

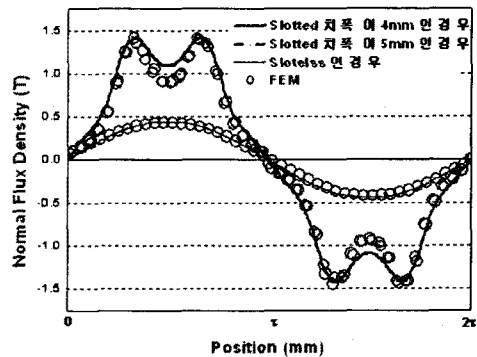


그림 5. 공극에서의 자속밀도

그림 5는 슬롯리스형과 슬롯형 PMLSM의 공극 자속밀도를 보여준다(공극 5mm). 슬롯형의 경우에는 치 폭 (T_w)이 4mm와 5mm인 경우에 대하여 해석하였다. 슬롯리스형의 자속밀도 특성은 정현적인 특성을 가지고 있으나 크기가 슬롯형에 비해 매우 작음을 알 수 있고, 슬롯형의 자속밀도 특성은 그 크기가 슬롯리스 형에 비해 매우 크나 치슬롯 형상에 의해 고조파 성분을 많이 함유하고 있어 파형이 일그러짐을 알 수 있다. 또한 슬롯형의 경우 치 폭의 변화에 의한 자속밀도 특성의 변화는 거의 없음을 알 수 있다.

4.2 추력 특성

그림 6과 그림 7, 그림 8은 슬롯리스형 PMLSM과 슬롯형 PMLSM의 부하각에 따른 추력 특성을 보여준다. 슬롯리스형 PMLSM의 경우 Detent 힘이 거의 발생하지 않는다. 따라서 매우 정현적인 추력 특성을 가짐을 알 수 있다. 그러나, 추력 최대치가 54[N]으로 슬롯형(4mm-150[N], 5mm-110[N])과 비교해 보았을 때 2배 가량의 차이가 발생하였다.

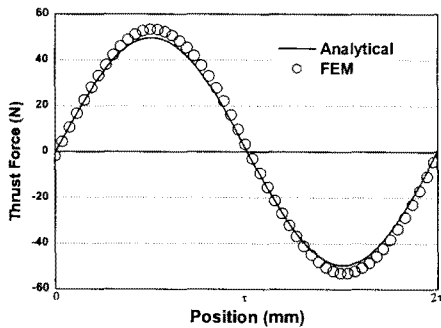


그림 6. 슬롯리스형 PMLSM의 추력특성

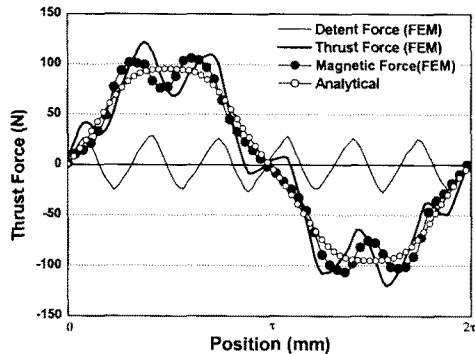


그림 7. 슬롯형(치폭 4mm) PMLSM의 추력특성

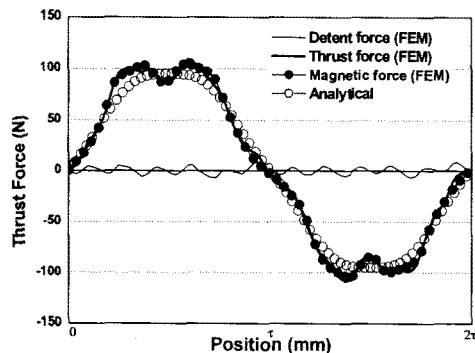


그림 8. 슬롯형(치폭 5mm) PMLSM의 추력특성

그림 7과 그림 8에서 나타난 바와 같이 슬롯형 PMLSM에서는 치슬롯 형상에 의해 Detent 힘이 발생함을 알 수 있다. 그러므로 전체적인 추력은 Magnetic 힘과 Detent 힘의 합으로 나타난다. 그림 5의 자속밀도 특성에서는 치 폭의 변화에 따라 큰 변화가 없었으나 추력 특성에서는 치 폭의 변화에 따라 힘의 변화가 나타난다. Magnetic 힘은 치 폭 변화에 따른 변화가 작으나 Detent 힘은 치 폭의 변화에 따라 크게 변화함을 알 수 있다. 추력 최대치는 치 폭이 4mm인 경우가 크나 5mm인 경우가 더 정현적인 추력특성을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 회전원판형 PMLSM의 설계·제작을 위해 공간고조파법과 유한요소법을 이용하여 슬롯리스형과 슬롯형 PMLSM의 자계특성 및 추력특성을 확인하였다. 향후, 본 논문의 결과를 참고하여 회전원판형 PMLSM을 제작하고 실험을 통하여 그 타당성을 확인하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김규탁, "분할자석형 편축식 리니어 동기 모터의 정특성 및 제동도체 효과," 전기학회논문지, 제 48권, 제6호, pp 756-762, 1998.
- [2] 윤인기, "PMLSM의 정특성 해석 및 디텐트력 저감방안에 관한 연구," 충남대학교 석사학위논문, 2001.
- [3] 이성호, "자로 구성 조건에 따른 직선형 전자 기기의 정특성 해석," 충남대학교 박사학위논문, 2003.
- [4] Z.Q. Zhu, D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in permanent magnet brushless dc motors, Part II : Effect of stator slotting," IEEE Trans Magn., vol. 29, pp 143-151, 1993.