

Skew에 따른 PMLSM의 자계특성 해석

장석명, 서정출, 유대준, 최장영, 조한욱
충남대학교 전기공학과

Analysis on the magnetic field of PMLSM according to skew

Seok-Myeong Jang, Jung-Chul Seo, Dae-Joon You, Jang-Yung Choi, Han-Wook Cho
Chungnam National University

Abstract - This paper deal with the prediction of magnetic field distribution for permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) with infinite operation range. The magnetic field distribution is predicted using a two-dimensional (2-D) analytical solution derived in terms of magnetic vector potential. The slotting and skew is considered using the relative permeance function. The results are validated extensively by finite element (FE) analyses.

1. 서 론

선형전동기는 회전형 전동기에 비해 전동기 자체의 효율이 낮은 단점을 가지지만, 직선 추력을 발생시키므로 동력변환 시스템에서 발생하는 문제점을 근본적으로 제거할 수 있어 리니어 시스템의 전체적인 효율 및 성능향상을 기대할 수 있다. 최근에는 전기철도 등의 운송수단, 공장 자동화의 반송 시스템, 빌딩의 엘리베이터와 에스컬레이터, 그리고 반도체 제조장비 및 CNC 등의 직선 추력을 요구하는 분야는 물론 OA기기 등에 이르기까지 그 응용분야가 확대되고 있다. 그 중 영구자석형 선형동기전동기(PMLSM)는 효율이 높고 추력/중량비가 높아 고속화 및 고속화가 가능하다는 장점이 있어 각종 FA기기, OA기기 등의 구동원으로 널리 이용되고 있다. 일반적으로 PMLSM은 이동거리가 제한된 구조적인 특징을 갖기 때문에 운전특성시험(가속과 감속 실험)에 많은 제약이 따른다. 따라서 본 논문에서는 이러한 PMLSM의 구조적 한계를 보완하기 위한 모델로 무한운전범위를 갖는 PMLSM 시험기를 제안·제작하였다. skew 유무에 따른 자속밀도 특성을 해석적인 방법으로 비교하여 skew가 자속밀도 고조파 성분을 제거하여 정현적인 자속밀도 파형을 얻을 수 있음을 증명한다. 본 논문에서 제시된 해석적인 방법은 유한요소 해석법을 이용하여 타당성을 검증하였다.

2. 영구자석에 의한 자속밀도 특성

그림 1은 제작된 PMLSM을 보여주며 그림 2는 skew가 고려되지 않은 해석모델을 보여준다. 그림 2(a)에서, 치의 안쪽(R_{ri})과 바깥쪽(R_{ro})의 반지름은 225mm와 275mm이며, 영구자석의 안쪽(R_{si})과 바깥쪽(R_{so})의 반지름은 235mm와 265mm이다. 2-D 해석모델의 기준인 contour line의 반지름은 250mm이다. 그림 2(b)에서 극간격(τ)은 $250 \times 24 / 360$ (mm), 영구자석 하나의 길이(t_m)와 높이는 $t/2$ (mm)와 30(mm), 공극은 10(mm), 슬롯하나의 길이(z_1)는 $t/3$ (mm), 치폭(t_w)은 6(mm), 슬롯 개구간(z_0)는 $z_1 - t_w$ 이다. Slotting은 비퍼미언스 함수를 이용하여 고려하였고 (1)과 같다. (1)은 [1]에 자세하게 설명되어 있고, [1]에서 수식과 (1)의 차이는 극 좌표계와 직각 좌표계의 차이이다.

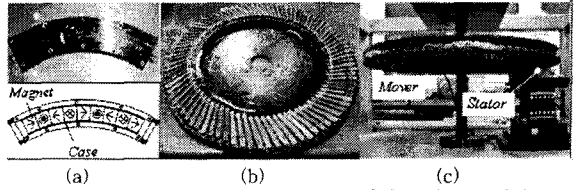


그림 1. 제작된 PMLSM : (a) Halbach 배열을 갖는 고정자, (b) 하나의 슬롯길이 skew를 갖는 가동자, (c) 제작된 초기 PMLSM.

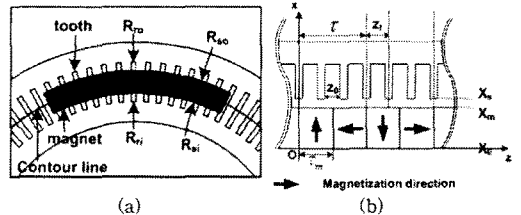


그림 2. (a) Skew가 고려되지 않은 PMLSM, (b) Contour line에서의 2-D 해석모델

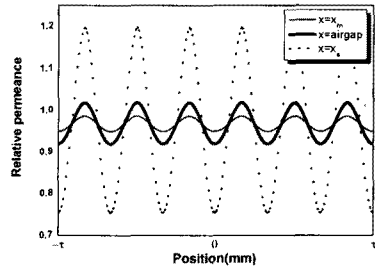


그림 3. x축 변화에 따른 비퍼미언스 변화

$$\chi(z, x) = \alpha_0 + \sum_{k=1,2,3...} \alpha_k \cos\left(\frac{2\pi}{z_1} k(z + z_{0k})\right) \quad (1)$$

그림 3은 x축의 변화에 따른 비퍼미언스 변화이다. 가동자에 가까워질수록 Slotting의 영향이 커져 비퍼미언스의 진폭이 증가함을 알 수 있다. 그림 4는 skew를 고려하기 위한 해석모델이다. y는 가동자 깊이 방향이며, Y_s 는 y의 변화에 따른 skew 비율이며, S_s 는 skew의 정도를 의미한다. 만약 $S_s=1$ 이면 슬롯 하나만큼의 skew를 의미한다. y와 Y_s , S_s 의 관계는 (2)와(3)과 같다[2].

$$Y_s = \frac{2S_s \tau}{Q_s L_d} y = \xi \frac{y}{L_d}, \quad -\frac{L_d}{2} \leq y \leq \frac{L_d}{2} \quad (2)$$

$$S_s = \frac{2AB}{z_1}, \quad 0 \leq S_s \leq 1, \quad \xi = \frac{2S_s \tau}{Q_s} \quad (3)$$

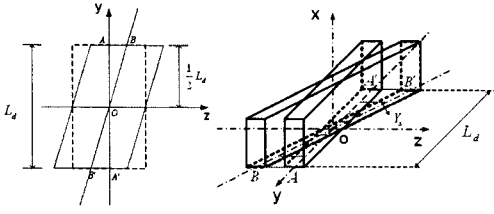


그림 4. skew를 고려하기 위한 해석모델

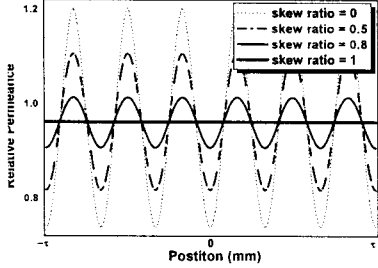


그림 5. 가동자 표면에서 skew 정도의 변화에 따른 비퍼미언스의 변화

여기서 L_d 는 가동자의 깊이방향 길이 이고, Q_s 는 두 극 사이의 슬롯수이다. $f(z)$ 가 skew가 고려되지 않은 함수 라고 하면 skew가 고려된 함수 $F_s(z)$ 는 (4)과 같다.

$$F_s(z) = \frac{1}{\xi} \int_{z-\frac{\xi}{2}}^{z+\frac{\xi}{2}} f(s_L) ds_L \quad (4)$$

(4)에 퍼미언스 함수를 대입하면 skew가 고려된 퍼미언스 함수를 계산할 수 있고 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_s(z, x) &= \frac{1}{\xi} \int_{z-\frac{\xi}{2}}^{z+\frac{\xi}{2}} \left[\alpha_0 + \sum_{k=1,2,3}^{\infty} \alpha_k \cos(k_{n1}s_L) \right] ds_L \\ &= \alpha_0 + \sum_{k=1,2,3}^{\infty} \alpha_k \frac{\sin\left(k_{n1} \frac{\xi}{2}\right)}{k_{n1} \frac{\xi}{2}} \cos(k_{n1}(z+z_{sz})) \quad (5) \end{aligned}$$

그림 5는 가동자 표면에서 skew의 변화에 따른 비퍼미언스의 변화를 보여준다. skew의 정도에 따라 비퍼미언스의 진폭이 변화함을 알 수 있고 특히 Sr=1인 경우에는 진폭이 없다.

Slotting과 skew가 고려된 자속밀도는 slotting과 skew의 영향을 무시한 자속밀도를 계산한 후 slotting과 skew가 고려된 비퍼미언스 함수를 이용하여 계산할 수 있다. 공극과 영구자석 영역에서의 지배방정식과 각 경계에서의 경계조건으로 자속밀도 특성식을 구할 수 있으며 (6), (7), (8)과 같다.

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_y = 0 & (\text{inside the air}) \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_y = \mu_0 k_y M_{ym} & (\text{in the PM}) \end{cases} \quad (6)$$

경계조건

$$\begin{aligned} H_{zn}''(x, z)|_{x=x_0} &= M_{zn} \\ B_{xn}''(x, z)|_{x=x_m} &= B_{xn}'(x, z)|_{x=x_m} \\ H_{xn}''(x, z)|_{x=x_m} - H_{xn}'(x, z)|_{x=x_m} &= M_{zn} \\ H_{zn}'(x, z)|_{x=x_1} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

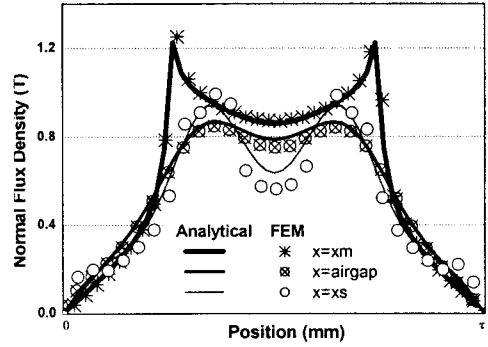


그림 6. x방향의 변화에 의한 수직 자속밀도의 변화

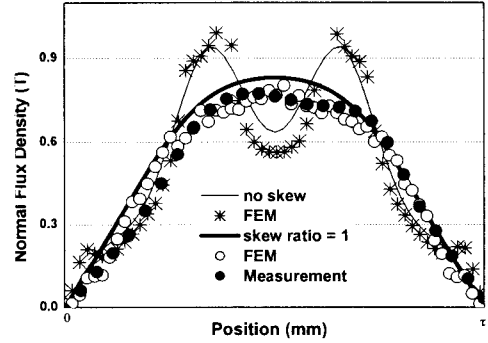


그림 7. 가동자 표면에서 skew 정도의 변화에 따른 수직 자속밀도의 변화

공극에서의 수직 자속밀도 특성식

$$B_x' = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\mu_0}{2} \left[\frac{(M_{zn} + M_{zn})e^{-k_n y_m} - 2M_{zn}e^{k_n y_0} + (M_{zn} - M_{zn})e^{k_n y_m} e^{-2k_n y_0}}{e^{-2k_n y_0} - e^{-2k_n y_s}} \right] \times \left[e^{-2k_n x_s} e^{k_n x} + e^{-k_n x} \right] \cos(k_n z) \quad (8)$$

Slotting과 skew가 고려된 자속밀도 특성식은 (9)과 같다.

$$\begin{aligned} B^P_{without\ skew} &= \tilde{\lambda}(z, x) B_x' \quad (\text{without skew}) \\ B^P_{with\ skew} &= \tilde{\lambda}_s(z, x) B_x' \quad (\text{with skew}) \end{aligned} \quad (9)$$

그림 6은 skew가 고려되지 않은 수직성분 자속밀도를 x의 변화에 따라 보여준다. $x=x_m$ 와 공극에서는 해석적 방법에 의한 결과와 유한요소 해석결과가 잘 일치함을 보여준다. 그러나 가동자 표면에서는 치의 자속집중현상 때문에 10%정도의 오차가 있다. 그림 7은 가동자 표면에서 skew 유무에 따른 수직 자속밀도의 변화를 보여준다. 가동자에 하나의 슬롯 길이만큼 skew를 주었을 경우 정현적인 자속밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3. 가동자 코일에 의한 자속밀도 특성

그림 8은 contour line에서의 해석모델을 보여준다. 코일은 그림 8에서 보여진 것과 같이 2층된 2/3 단결권으로 구성되어 있으며 각 코일의 턴수는 88턴이다. 또한, 코일 하나의 지름은 0.85 ϕ 이다. 가동자 코일에 의한 자속밀도 특성은 영구자석에 의한 자속밀도 특성을 구한 방법과 비슷한 방법으로 계산할 수 있다. 우선, 영구자석이 제거되고 slotting 효과가 고려되지 않은 모델로 가능

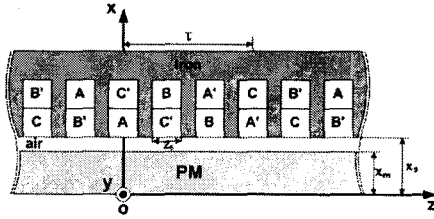


그림 8. Contour line에서의 해석모델

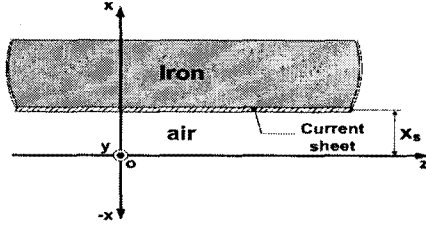


그림 9. 가동자 코일에 의한 자속밀도를 구하기 위해 Slotting 효과가 무시된 모델

자 코일에 의한 자속밀도를 계산한다. 영구자석이 제거되고 slotting 효과를 무시한 해석모델은 그림 9와 같다. 그림 9에서 전류분포는 $x=x_s$ 에서 전류시트로 분포해 있다고 가정하였고, 또한 iron의 투자율과 축방향 길이는 무한이라고 가정하였다. $x=x_s$ 에서 전류시트의 전류밀도 분포는 A상을 푸리에 전개한 후 120도 간격으로 B상과 C상을 위치시켜 얻을 수 있다. A상의 전류 분포는 (10)과 같다.

$$\vec{J}_A = J_0 J_{nn} \cos(k_n z) \vec{a}_y \quad (10)$$

여기서

$$J_0 = \frac{N}{z_0}, \quad J_{nm} = \frac{4}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi z_0}{2}\right), \quad k_n = \frac{n\pi}{\tau}$$

N 은 턴수, i_a 는 A상의 전류이다. 3상 권선은 (11)과 같이 정의된다.

$$J^1_{3p} = J_n \left(i_a \cdot \cos(k_n z) + i_b \cdot \cos\left(k_n \left(z - \frac{2}{3}\tau\right)\right) + i_c \cdot \cos\left(k_n \left(z - \frac{4}{3}\tau\right)\right) \right) \vec{a}_y \quad (11)$$

해석 모델의 권선은 2층권 2/3 단결권이므로 (11)의 3상 권선을 1층의 권선이라고 하면 2층의 권선은 (12)와 같다.

$$J^2_{3p} = J_n \left(i_a \cdot \cos\left(k_n \left(z - \frac{1}{3}\tau\right)\right) + i_b \cdot \cos\left(k_n \left(z - \frac{3}{3}\tau\right)\right) + i_c \cdot \cos\left(k_n \left(z - \frac{5}{3}\tau\right)\right) \right) \vec{a}_y \quad (12)$$

그러므로 전류는 (13)과 같이 정의된다.

$$J = J^1_{3p} + J^2_{3p} \quad (13)$$

지배 방정식과 경계조건으로부터 가동자 코일에 의한 자속밀도 특성식을 얻을 수 있으며 (14), (15), (16)과 같다.

지배방정식

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_y = 0 \quad (14)$$

경계조건

$$A_y(x, z)|_{x=-\infty} = 0$$

$$H_x(x, z)|_{x=x_s} = J_n \quad (15)$$

공극에서 가동자 코일에 의한 수직 자속밀도 특성

$$B_x^{air} = -\mu_0 J_n e^{k_n x_s} \cdot e^{k_n x} \sin(k_n z) \quad (16)$$

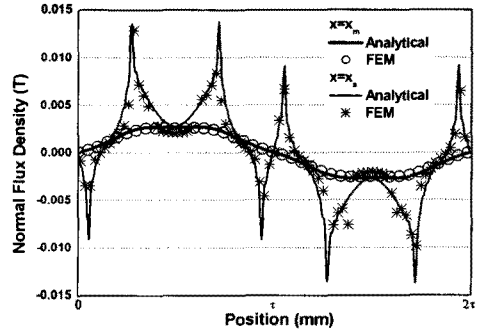


그림 10. x의 변화에 따른 수직 자속밀도 변화

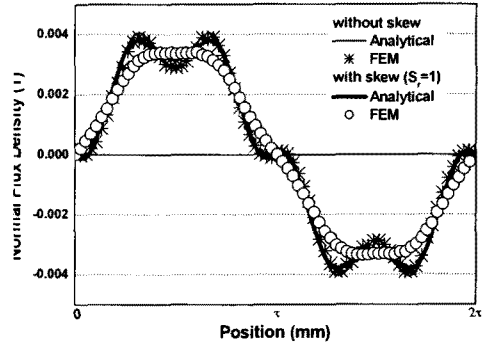


그림 11. 공극에서 skew 유무에 따른 수직 자속밀도 변화

그러므로 slotting과 skew가 고려된 자속밀도 특성식은 (17)과 같다.

$$B_x^{coil, without skew} = \sum_n \vec{a}_x(z, x) B_x^{air} \quad (without skew)$$

$$B_x^{coil, with skew} = \sum_n \vec{a}_s(z, x) B_x^{air} \quad (with skew) \quad (17)$$

그림 10은 skew가 고려되지 않은 수직성분 자속밀도를 x의 변화에 따라 보여준다. 해석적 방법에 의한 결과와 유한요소 해석결과가 잘 일치함을 보여준다. 그림 11은 $(x_s+x_m)/2$ 에서 skew 유무에 따른 수직 자속밀도의 변화를 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 무한운전범위를 갖는 PMLSM을 제시하였고 가동자 skew에 따른 자계특성을 해석하였다. 2-D 비퍼미언스를 이용하여 slotting 및 skew를 고려한 자속밀도 특성식을 계산하였다. 해석결과는 유한요소 해석을 이용하여 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part III : effect of stator slotting," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 1, pp. 143-151, Jan. 1993.
- [2] Kwang-Heon Kim, Dong-Joon Sim, Jong-Soo Won, "Analysis of skew effects on cogging torque and BEMF for BLDCM," *Industry applications society annual meeting*, vol. 1, pp. 191-197, Sept. 1991.