

Halbach 배열과 skew를 갖는 PMSLM의 특성해석 및 실험

장석명, 서정출, 조한욱, 유대준, 최장영, 장원범

충남대학교 전기공학과

Characteristic Analysis and Measurement of PMLSM with Halbach Array and Skew

Seok-Myeong Jang, Jung-Chul Seo, Han-Wook Cho, Dea-Joon You, Jang-Young Choi

Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract – This paper deals with the prediction of characteristic for permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM). The open-circuit field distribution is predicted using a two-dimensional (2-D) analytical solution derived in terms of magnetic vector potential. The slotting and skew effect is considered using the relative permeance function. and than using this result, flux linkage and back EMF is calculated. The results are validated extensively by finite element (FE) analyses and measurement.

1. 서 론

최근 직선추력이 요구되는 시스템에서 회전형 전동기를 포함하는 동력전달 메카니즘은 점차 선형전동기로 대체되고 있다. 선형전동기는 회전형 전동기에 비해 전동기 자체의 효율이 낮은 단점을 가지지만, 직접 추력을 발생시키므로 동력변환 시스템에서 발생되는 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 선형 전동기(PMLSM)는 효율이 높고 추력/중량비가 높아 고추력화 및 고속화가 가능하다는 장점이 있어 각종 FA기기, OA기기 등의 구동원으로 널리 이용되고 있다. 일반적으로 PMLSM은 이동거리가 제한된 구조적인 특성을 갖기 때문에 운전 특성 시험(가속과 감속 실험)에 많은 제약이 따른다. 따라서 본 논문에서는 이러한 PMLSM의 구조적 한계를 보완하기 위한 모델로 회전원판형 PMLSM 시험기를 제작하였다. 또한, 각각 좌표계에서 공간 고조파법을 이용하여 자체 특성식을 계산하였고, 2D 퍼미언스 함수를 이용하여 slotting과 skew 효과를 고려하였다. 구해진 자체특성식을 이용하여 쇄교자속 및 역기전력을 계산하였다. 해석 결과는 유한요소법과 실험을 통하여 검증하였다.

2. 영구자석에 의한 자속밀도 특성식

그림 1은 제작된 PMLSM을 보여주며 그림 2(a)는 skew가 고려되지 않은 해석모델을 보여준다. 치의 안쪽(R_n)과 바깥쪽(R_o)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 극 간격(t)은 250×24t/360(mm), 영구자석 하나의 길이(t_m)와 높이는 $t/2$ (mm)와 30(mm), 공극은 10(mm), 슬롯하나의 길이(z_l)는 $t/3$ (mm), 치폭(t_w)은 6(mm), 슬롯 개구간(z_0)는 z_l-t_w 이다. Slotting은 비퍼미언스 함수를 이용하여 고려하였고

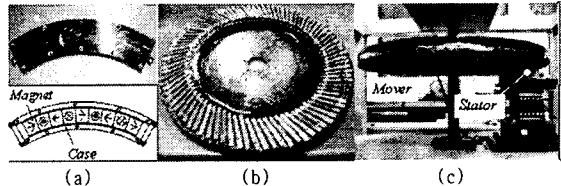


그림 1. 제작된 PMLSM : (a) Halbach 배열을 갖는 고정자, (b) 하나의 슬롯길이 skew를 갖는 이동자, (c) 제작된 초기 PMLSM.

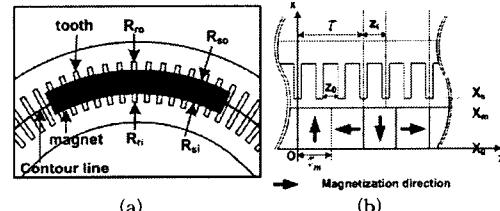


그림 2. (a) Skew가 고려되지 않은 PMLSM, (b) Counter line에서의 2-D 해석모델

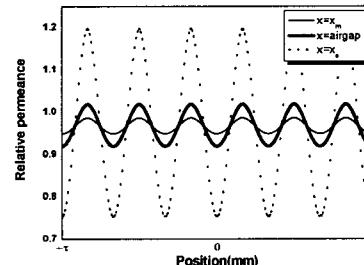


그림 3. x축 변화에 따른 비퍼미언스 변화

식(1)과 같다. 식(1)은 [2]에 자세하게 설명되어 있고, [2]에서 수식과 식(1)의 차이는 극 좌표계과 직각 좌표계의 차이이다.

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

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

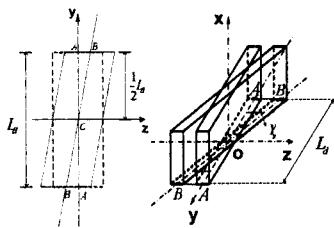


그림 4. skew를 고려하기 위한 해석모델

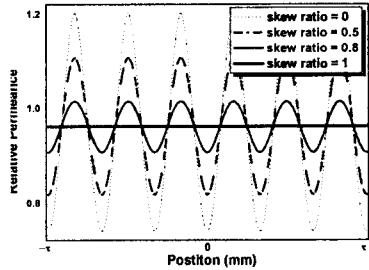


그림 5. 이동자 표면에서 skew 정도의 변화에 따른 비퍼미언스의 변화

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

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

여기서 L_d 는 이동자의 두께이고, Q_s 는 두 극사이의 슬롯 수이다. $f(z)$ 가 skew가 고려되지 않은 함수라고 하면 skew가 고려된 함수 $F_s(z)$ 는 식(4)과 같다.

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

식(4)를 퍼미언스 함수에 고려하면 skew가 고려된 비퍼미언스 함수는 식(5)와 같다.

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

그림 5는 이동자 표면에서 skew의 변화에 따른 비퍼미언스의 변화를 보여준다. skew의 정도에 따른 비퍼미언스의 진폭이 변화함을 알 수 있고 특히 $S_r=1$ 인 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 식(6), 식(7), 식(8)과 같다.

지배방정식

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

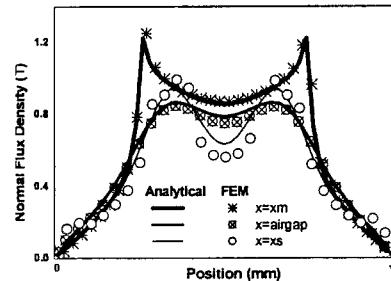


그림 6. x방향의 변화에 의한 수직 자속밀도의 변화

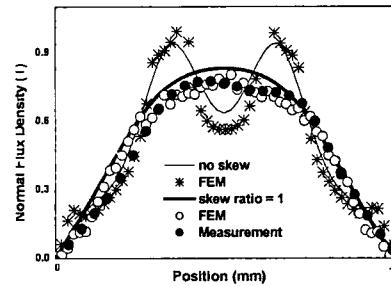


그림 7. 이동자 표면에서 skew 정도의 변화에 따른 수직 자속밀도의 변화

경계조건

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

공극에서의 수직 자속밀도 특성식

$$\begin{aligned} B_x' &= \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\mu_0}{2} \left[\frac{(M_{zn} + M_{xn}) e^{-k_n x_m} - 2M_{zn} e^{k_n x_m} + (M_{xn} - M_{zn}) e^{k_n x_m} e^{-2k_n x_0}}{e^{-2k_n x_0} - e^{-2k_n x_s}} \right] \\ &\times \left[e^{-2k_n x_s} e^{k_n x} + e^{-k_n x} \right] \cos(k_n z) \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 Slotting과 skew가 고려된 자속밀도 특성식은 식(9)과 같다.

$$B_{\text{without skew}} = \mathcal{Y}(z, x) B_x' \quad (\text{without skew})$$

$$B_{\text{with skew}} = \mathcal{Y}(z, x) B_x' \quad (\text{with skew}) \quad (9)$$

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

3. 영구자석에 의한 쇄교자속 및 역기전력 특성식

영구자석에 의한 한 상의 쇄교자속은 식(10)으로부터 구할 수 있다.

$$\eta_{PM}^{PM} = -\frac{4Nl\alpha_0}{b_0} \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{k_n} \sin\left(k_n \frac{b_0}{2}\right) (A' e^{k_n z_i} + B' e^{-k_n z_i}) + \frac{Nl}{b_0} \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \sum_{k=1,2,3..}^{\infty} -a_k \sin\left(k_n \frac{b_0}{2}\right) (A' e^{k_n z_i} + B' e^{-k_n z_i}) \\ \times \frac{1}{2} \left[\frac{\tau}{(6k-n)\pi} \left(\sin\left((6k-n)\pi + \frac{n\pi}{2}\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right) + \frac{\tau}{(6k+n)\pi} \left(\sin\left((6k+n)\pi - \frac{n\pi}{2}\right) + \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right) \right] \cdot \left[\cos(k_n z) + \cos(k_n \left(z - \frac{2}{3}\tau\right)) + \cos(k_n \left(z - \frac{4}{3}\tau\right)) \right] \quad (11)-1$$

$$\eta_s^{PM} = -\frac{4Nl\alpha_0}{b_0} \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{k_n} \sin\left(k_n \frac{b_0}{2}\right) (A' e^{k_n z_i} + B' e^{-k_n z_i}) + \frac{Nl}{b_0} \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \sum_{k=1,2,3..}^{\infty} -a_k \frac{\sin\left(k_n \frac{\xi}{2}\right)}{k_n \frac{\xi}{2}} \sin\left(k_n \frac{b_0}{2}\right) (A' e^{k_n z_i} + B' e^{-k_n z_i}) \\ \times \frac{1}{2} \left[\frac{\tau}{(6k-n)\pi} \left(\sin\left((6k-n)\pi + \frac{n\pi}{2}\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right) + \frac{\tau}{(6k+n)\pi} \left(\sin\left((6k+n)\pi - \frac{n\pi}{2}\right) + \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right) \right] \cdot \left[\cos(k_n z) + \cos(k_n \left(z - \frac{2}{3}\tau\right)) + \cos(k_n \left(z - \frac{4}{3}\tau\right)) \right] \quad (11)-2$$

$$\eta_{PM}^{PM} = \int_{z_i}^{z_f} \frac{N}{b_0} \cos(k_n z) dz \int_z^{z+r} l \tilde{\Lambda} \tilde{B} dz \\ \eta_s^{PM} = \int_{z_i}^{z_f} \frac{N}{b_0} \cos(k_n z) dz \int_z^{z+r} l \tilde{\Lambda}_s \tilde{B} dz \quad (10)$$

여기서 z_i 와 z_f 는 각각 한 상 코일의 초기위치와 마지막 위치이다. $z_i = -b_0/2$, $z_f = b_0/2$ 라 하면 영구자석에 의한 쇄교자속은 식(10)과 같다.

역기전력은 이동자가 이동함에 따라 발생하는 쇄교자속의 변화로 정의되면 식(11)에 의해 계산된다.

$$V_{emf} = \frac{d\eta^{PM}}{dt} = \frac{dz}{dt} \frac{d\eta^{PM}}{dz} = u \frac{d\eta^{PM}}{dz} \quad (11)$$

여기서 η^{PM} 은 영구자석에 의한 쇄교자속, u 는 이동자의 속도이다. 그림 8와 그림 9는 이동자의 속도가 1 m/s인 경우의 쇄교자속 및 역기전력이다.

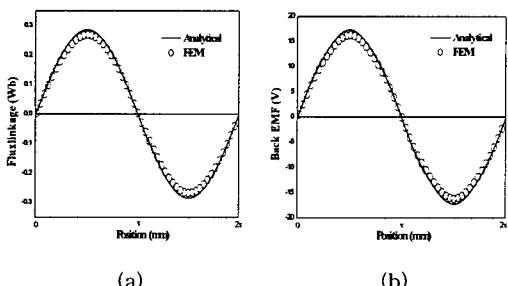


그림 8. skew가 고려되지 않는 경우 : (a) 쇄교자속, (b) 역기전력

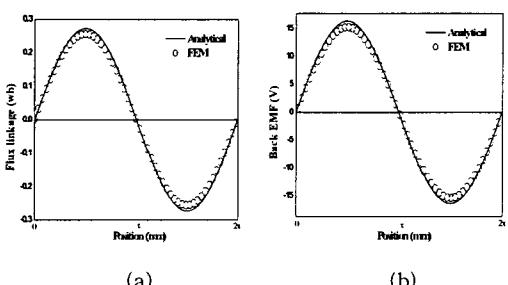


그림 9. skew가 고려된 경우 : (a) 쇄교자속, (b) 역기전력

그림 10은 정속도 운전시 PMLSM의 선간 역기전력을 나타내며, DC 모터를 이용하여 이동자의 속도를 일정하

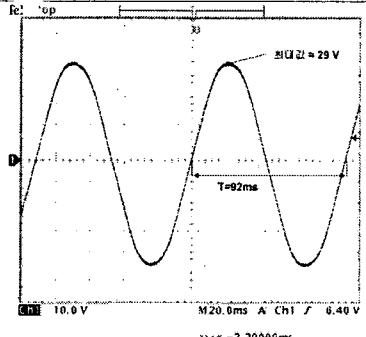


그림 10. DC 모터를 사용하여 측정된 역기전력

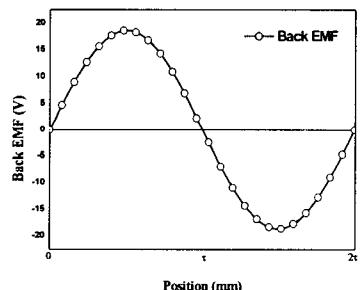


그림 11. 1138mm/s인 경우의 역기전력 (상전압)

계 유지하였다. 과정으로부터 속도를 계산하면 1138 mm/s이다. 이 속도를 이용하여 해석적으로 구해진 역기전력은 그림 11에서 보여준다. 해석적으로 구해진 역기전력은 상전압이므로 선간전압으로 환산하면 약 32.3V로 측정전압과 대략 10%정도의 오차를 가진다.

4. 결 론

본 논문에서는 Halbach 배열과 skew를 갖는 PMLSM의 자속밀도, 쇄교자속, 역기전력에 대해 해석적인 특성식을 구하였고 유한요소 해석결과 및 실험을 통하여 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kwang-Hieon Kim, Dong-Joon Sim, Jong-Soo Won, "An analysis of skew effects on cogging torque and BEMF for BL DCM," *Industry applications society annual meeting*, vol. 1, pp. 191-197, Sept. 1991.
- [2] 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, p. 143-151, Jan. 1993.