

세가지 형태의 영구자석 배열에 따른 직선형 동기 전동기의 특성해석

장석명, 유대준, 이성호
충남대학교 전기공학과

Characteristic Analysis of Iron-cored PM Linear Motor in Three Types Synchronous Motor in Three Types

Seok- Myeong Jang, Dae-Joon You Sung- Ho Lee
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - The Slotless Permanent-magnet linear synchronous motors (PMLSM) have been developed for factory automation, transportation applications, wafer steppers, conveyance system, and so on [1]. The current analysis and design are treated in air-cored PMLSM.

The main purpose of this paper is to provide a general design and analysis framework for the iron-cored linear permanent-magnet machines. Based on field solution using two dimensional analytical technique the magnetic field, required magnet volume size, optimal winding thickness size, winding flux linkage and thrust will be discussed.

1. 서 론

최근 회전형 전동기에 비해 직선운동을 직접 발생할 수 있는 리니어 모터의 사용이 증가하고 있다. 직선형 영구자석형 동기식 모터(PMLSM)는 리니어 유도 모터에 비해 고-추력화 및 고속화가 가능하며 역률이 높다는 장점이 있다. 본 논문은 현재의 공심형 PMLSM에 대한 분석 및 설계 와는 달리 철심을 갖는 직선형 영구자석 선형 동기 전동기에 대해 다루고 있다. 즉 2개의 직각 좌표계로 이루어진 가동자와 고정자에 있어서 벡터 자위에 의한 단일한 방법으로 back iron-cored PMLSM의 해석을 통해 요구사항에 따른 설계에 대해 다룰 것이다 [2]. 따라서 본 논문은 PMLSM의 특성을 알기 위해 철심을 고려한 자석의 제작, 권선 코일의 높이 및 공극의 길이 등을 가지고 있는 가동자와 고정자의 2차원 정자계 해석을 통한 자속밀도와 추력에 대해 Halbach 배열을 중심으로 설계해 나가고 있다. 또한 이 해석적 방법은 유한 요소법(FEM)을 이용하여 해석에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 직선형 동기 전동기의 해석

2. 1 해석 모델

특성 해석을 위한 모델의 단순화된 기하학적인 구조는 그림.1과 같다. 철심을 갖는 영구자석으로 구성된 가동자의 두께는 Δ 이고, 고정자 코일 권선의 두께는 Γ 이다. 고정자의 좌표계에 대해 영구자석 가동자는 수직방향으로 $x_0 + \Gamma$, 수평방향으로 z_0 변위되는 좌표계를 갖는다. 또한 제시된 해석모델은 y 방향으로 깊이 w 를 갖으며, 철심의 투자율은 ∞ 로 가정하고 단부효과는 무시된다. 철심을 포함한 가동자와 고정자의 정자계 해석 구조 및 배열에 대해 그림. 2 와 그림. 3은 제시하고 있다. 일정한 극간격 τ 로 이루어진 세가지 형태의 배열

에 대해 영구자석과 코일의 길이가 각각 τ_m , $\tau/3$ 로 주어졌으며 영구자석 및 코일의 투자율은 공기와 같다고 가정하였다. 또한 영구자석 표면의 전체 자속밀도를 얻기 위해 영구자석과 코일에 의한 자속밀도는 높이 X 에 따른 일반화가 이루어져야 한다.

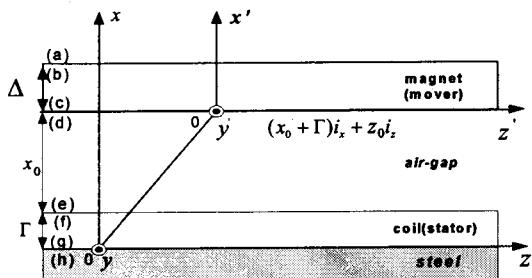
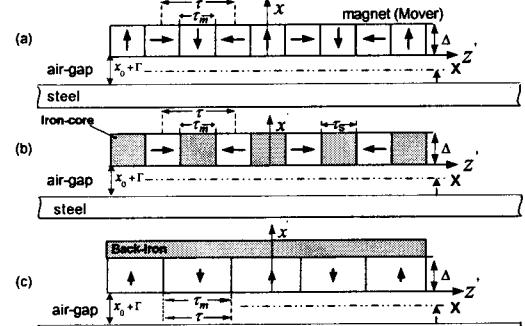


그림. 1 직선형 영구자석 동기 모델



(a) Halbach 배열, (b) 수평방향 배열, (c) 수직방향 배열
그림. 2 영구자석 가동자의 해석 구조 및 배열

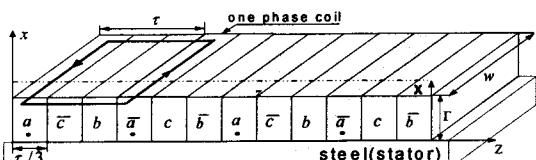


그림. 3 고점자 코일의 해석 구조 및 배열

2. 2 영구자석 및 코일 모델링

그림. 2(a)의 Halbach 배열을 갖는 영구자석 영역의 자화는 식(1)로 표현할 수 있다[1].

$$M = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (M_{xn} e^{-jk_n z} i_x + M_{zn} e^{-jk_n z} i_z)$$

$$M_{xn} \begin{cases} = \frac{M_0}{jn\pi} [e^{jnx\frac{\alpha}{2}} - e^{-jnx\frac{\alpha}{2}}] & : odd \\ = 0 & : even \end{cases}$$

$$M_{zn} \begin{cases} = \frac{M_0}{2jn\pi} [e^{jnx(1-\frac{\alpha}{2})} - e^{-jnx\frac{\alpha}{2}}] & : odd \\ = 0 & : even \end{cases}$$

(1)

여기서, M_{xn} 과 M_{zn} 은 수직방향 및 수평방향 자화이며, k_n 은 n 차 고조파의 공간적 주파수로써 $k_n = \pi n / \tau$ 이고, τ 는 극 당 길이를 의미한다. $\alpha = \tau_m / \tau$, 자화의 세기 M_0 는 영구자석의 비투자율 $\mu_r = 1$ 로 가정하면, 전류자속밀도 B_r 과 자유공간 투자율 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m의 비에 의해 $M_0 = B_r / \mu_0$ 로 주어진다. 그림2.(b)의 수직방향 자화 배열은 Halbach 배열의 수직 자화 성분만을 갖으며 $\alpha = 1$ 이 된다. 그림2.(c)의 수평방향 자화 배열은 Halbach과 같은 수직, 수평 자화 성분을 갖게 되지만 자화의 크기에 있어서 영구자석의 높이 Δ 와 iron-core의 길이 τ_s 에 의해 식(2)의 제한을 받는다.

$$|M_{xn}| = \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + \tau_s^2}} \frac{B_r}{\mu_0}$$

$$|M_{zn}| = \frac{\tau_s}{\sqrt{\Delta^2 + \tau_s^2}} \frac{B_r}{\mu_0}$$

(2)

고정자 부분의 철심을 포함한 코일은 전류에 의한 자제를 형성한다. 3상 전류밀도의 z방향의 공간적 분포에 대해 식(3)과 같이 표현된다.

$$J_{3\phi} = Re \left\{ \sum_{n=-\infty, odd}^{\infty} \frac{1}{jn\pi} (e^{jnx/\phi} - 1) (J_a e^{-jk_n z} + J_b e^{-jk_n(z+2\pi/3)} + J_c e^{-jk_n(z+4\pi/3)}) \right\}$$

여기서, ϕ 는 상(Phase) 수이며 J_a, J_b, J_c 는 극 면적당 기자력을 나타낸다.

2. 3 영구자석과 코일에 의한 자속밀도 특성식

그림. 1의 해석 모델에서 가동자 영구자석에 의한 자속밀도 특성식은 벡터 포텐셜에 의한 자속밀도를 고려함으로서 공기영역과 영구자석 영역에서 식(4)와 같이 영구자석 경계면에서의 자기적 현상에 관한 전달식을 이끌어 볼수 있다[2].

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^d \\ B_{zn}^g \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n(x_0 + \Gamma) & \frac{-1}{\sinh k_n(x_0 + \Gamma)} \\ \frac{1}{\sinh k_n(x_0 + \Gamma)} & -\coth k_n(x_0 + \Gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{yn}^d \\ A_{yn}^g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^b \\ B_{zn}^c \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n \Delta & \frac{-1}{\sinh k_n \Delta} \\ \frac{1}{\sinh k_n \Delta} & -\coth k_n \Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{yn}^b \\ A_{yn}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cosh k_n \Delta - 1}{\sinh k_n \Delta} \\ \frac{-\cosh k_n \Delta + 1}{\sinh k_n \Delta} \end{bmatrix} j\mu_0 M_{xn}$$

(4)

철심을 고려한 그림. 1의 각 경계면에 대한 경계조건을 Halbach 배열의 경우 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{zn}^a = -k_n A_{yn}^a$$

$$\begin{aligned} A_{yn}^a &= A_{yn}^b \\ A_{yn}^c &= A_{yn}^d \\ -B_{zn}^a + B_{zn}^b &= \mu_0 M_{zn} \\ -B_{zn}^c + B_{zn}^d &= -\mu_0 M_{zn} \\ B_{zn}^g &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

수평방향 배열은 Halbach Array와 동일한 경계조건을 가지며 수직 방향 배열의 경우 자속 경로에 의해 back-iron을 고려하여 나타내어 진다. 자속 밀도 특성식과 경계조건식을 이용하여 벡터포텐셜에 의한 Halbach 모델에 대한 자속밀도를 식(6)과 같이 일반화 시킬 수 있다.

$$A_{yn}^X = \left[e^{-r_n(x_0 + \Gamma + X)} + e^{r_n(-x_0 + \Gamma + X)} \right] \left(\frac{j\mu_0 M_{xn}}{2k_n} + \frac{\mu_0 M_{zn}}{2\gamma_n} \right) (e^{-r_n \Delta} - 1) \quad (0 \leq X \leq x_0 + \Gamma)$$

$$B_{xn}^X = \left(\frac{-\mu_0 M_{xn}}{2} + j \frac{\mu_0 k_n M_{zn}}{2\gamma_n} \right) (e^{-r_n \Delta} - 1) [[e^{-r_n(x_0 + \Gamma + X)} + e^{-r_n(x_0 + \Gamma - X)}]$$

$$B_{zn}^X = \left(\frac{\mu_0 M_{zn}}{2} + j \frac{\mu_0 \gamma_n M_{xn}}{2k_n} \right) [[(e^{-r_n \Delta} - 1)] [-e^{-r_n(x_0 + \Gamma + X)} + e^{-r_n(x_0 + \Gamma - X)}]] \quad (6)$$

그림. 1의 고정자 코일 부분에 있어서 자속밀도 특성식은 식(7)과 같이 나타나며 철심을 고려한 경계조건에 의해 벡터포텐셜과 자속밀도 식을 식(8)과 같이 일반화 시킬 수 있다[2].

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^{(f)} \\ B_{zn}^{(g)} \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n \Gamma & \frac{-1}{\sinh k_n \Gamma} \\ \frac{1}{\sinh k_n \Gamma} & -\coth k_n \Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{yn}^{(f)} \\ A_{yn}^{(g)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\cosh k_n \Gamma - 1}{\sinh k_n \Gamma} \\ \frac{\cosh k_n \Gamma - 1}{\sinh k_n \Gamma} \end{bmatrix} \frac{\mu_0}{k_n} J_{yn} \quad (7)$$

$$A_{yn}^X = \frac{\mu_0}{2k_n^2} J_{yn} (1 - e^{-2r_n \Gamma}) e^{-r_n X} \quad (0 \leq X \leq x_0)$$

$$B_{zn}^X = -\frac{\mu_0}{2\gamma_n} J_{yn} (1 - e^{-2r_n \Gamma}) e^{-r_n X}$$

$$B_{xn}^X = j \frac{\mu_0}{2k_n} J_{yn} (1 - e^{-2r_n \Gamma}) e^{-r_n X} \quad (8)$$

2. 4 힘 특성식

맥스웰의 stress tensor를 이용하면 식(9)와 같이 힘을 구할 수 있다[2].

$$T_{ij} = \mu H_i H_j - \delta_{ij} \frac{\mu}{2} H_k H_k$$

$$F_x = -S \langle T_{xx}^d \rangle_z = -\frac{S\mu_0}{2} (H_x^d H_x^{d*} - H_z^d H_z^{d*})$$

$$F_z = -S \langle T_{zz}^d \rangle_x = -S\mu_0 H_x H_z^*$$

영구자석 표면을 지나가는 전체 자속에 대해 부하각 Z_0 를 고려하여 표현하면 전체 자속은 식(10)과 같으며 $n = \pm 1$ 기본파에 대해 2상 전류 밀도 J_a, J_b 로 표현된 부하각에 따른 수직, 수평력은 식(11)과 같다.

$$H_{zn}^d = \frac{j}{2k_n} J_{yn} e^{-\gamma_n z_0} (1 - e^{-2\gamma_n l}) e^{-ik_n z_0} + [-\frac{jk_n}{2\gamma_n} M_{zn} + \frac{1}{2} M_{xn}] (1 - e^{-\gamma_n l}) (1 + e^{-2\gamma_n (z_0 + l)})$$

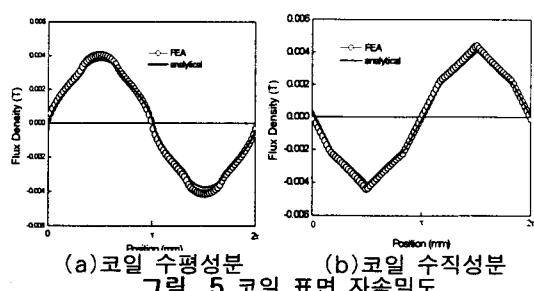
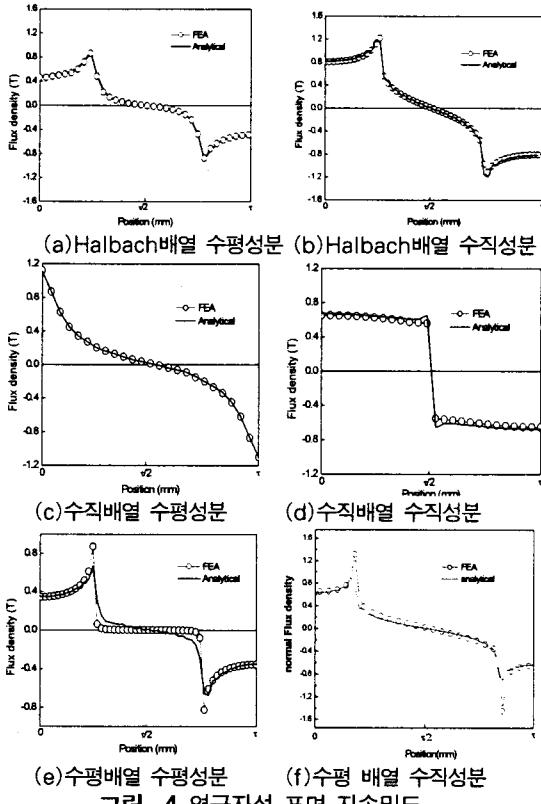
$$H_{zn}^d = -\frac{1}{2\gamma_n} J_{yn} e^{-\gamma_n z_0} (1 - e^{-2\gamma_n l}) e^{-ik_n z_0} + [-\frac{1}{2} M_{zn} - \frac{jk_n}{2k_n} M_{xn}] (1 - e^{-\gamma_n l}) (1 + e^{-2\gamma_n (z_0 + l)}) \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = \mu_0 M_0 G e^{-\gamma_1 z_0} \begin{bmatrix} -\sin k_1 z_0 & \cos k_1 z_0 \\ \cos k_1 z_0 & \sin k_1 z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_a \\ J_b \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{\sqrt{2} w p \mu_0 l^2}{\pi^2} e^{-\gamma_1 z_0} (1 - e^{-2\gamma_1 l}) (1 - e^{-\gamma_1 l}) (1 + e^{-2\gamma_1 (z_0 + l)}) \quad (11)$$

여기서, p 는 극 쌍수이고 wl 은 한 주기당 영구자석의 단면적이다.

2. 5 해석결과



| 항목 | 크기(단위) |
|---------|-----------------|
| 영구자석 체적 | 25.5 (mm^3) |
| 극간격 | 50 (mm) |
| 공극 길이 | 5 (mm) |
| 코일 높이 | 6 (mm) |
| 코일턴수 | 150(turns) |
| 상당최대전류 | 1 (A) |
| 영구자석극수 | 4.5(poles) |

표 1 설계사양

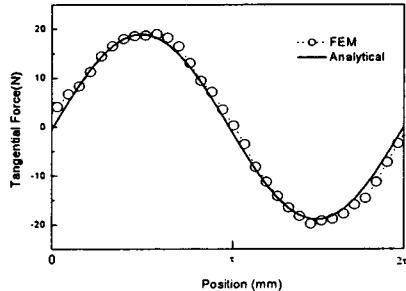


그림. 6 부하각에 따른 추력

그림.4는 세가지 배열에 있어서 동일한 영구자석 체적 $1.2(cm^3)$, 철심으로 부터의 공극 높이 $0.5(cm)$ 를 갖는 가동자인 영구자석 표면에서의 자속밀도를 나타내었다. 또한 그림.5는 기자력 $80(A \cdot turns)$, 코일 면적 $0.8(cm^2)$ 을 갖는 3상 코일 면의 자속밀도를 나타내었다. 영구자석과 코일면의 자속밀도 특성과 크기에 있어서 해석적 방법과 FEM의 결과가 매우 잘 부합됨을 알 수 있다. 그림.6은 표1의 PMLSM의 설계사양에 대한 Halbach 배열 가동자의 추력에 대해 해석적 방법을 FEM을 통해 검증한 것이다. 해석적 방법과 FEM의 결과가 매우 잘 부합됨을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문은 철심을 갖는 직선형 영구 자석 선형 모터의 기본적인 해석에 대해 다루는 것이다[2]. 세가지 영구자석과 코일의 자속밀도를 FEM과의 검증을 통해 해석상의 타당성을 검증하였으며 또한 자속밀도에 의한 추력을 FEM으로 검증하였다. 해석상에 고려된 여러 요소들은 다양한 리니어 모터의 시스템 성능에 맞는 설계와 해석에 있어 도움을 줄 것이다.

참고문헌

- [1] Seok-Myeong Jang, Sung-Ho Lee "Comparision of Two Types of PM Linear Synchronous Servo and Miniature Motor With Air-Cored Film Coil" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.38, No.5, September 2002
- [2] David L.Trumper, Won-jong kim, Mark E.williams "Design and Aanalysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines" IEEE Trannsaction Vol.32, No.2, March/April 1996