

철심의 유/무에 따른 직선형 영구 자석 동기 모터의 특성 해석

장석명, 유대준, 이성호, 최장영, 장원범
충남대학교

Characteristic Analysis of Linear Permanent Magnet Synchronous Motor according to steel and back iron.

Seok- Myeong Jang, Dae-Joon You Sung- Ho Lee, Jang-Young Chioi, Won Bum Jang
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. The current analysis and design are treated in air-cored PMLSM. This paper presents a design and analysis solutions for the general class of iron-cored Permanent magnet Linear Synchronous motor (PMLSM). In our design and analysis, rotor consisting of permanent magnets and slot less iron-cored coil stator are treated in a uniform way via vector potential. For one such motor structure we give analytical formulas for its magnetic field, optimal permanent magnet and winding coil thickness, trust force. We also provide comparisons of three types in Halbach, vertical, and horizontal magnet array.

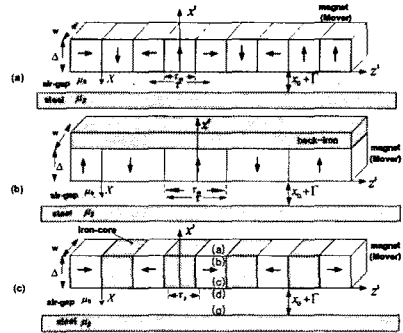


그림 1. 철심을 갖는 영구자석 가동자의 특성해석 모델 (a)Halbach 자화 방향 배열, (b)수직 자화 방향 배열, (c)수평 자화 방향 배열.

1. 서 론

리니어 모터는 직접 직선 추력을 발생하므로, 별도의 동력 변환 장치가 필요 없으며 회전형 모터에 비해 운전 속도에 크게 제한을 받지 않는 등의 이점으로 응용분야가 점점 다양해 지며 광범위해지고 있다[1]. 직선형 영구자석 동기 전동기는 리니어 유도 모터에 비해 고-추력화 및 고속화가 가능하며 역률이 높다는 장점이 있다. 직선형 영구자석 동기 모터는 회전형 영구자석 전동기를 직선형으로 펼친 상태로 계자 자속원인 영구자석으로 가동자를 구성하고 회전 자계를 위한 3상 권선인 전류 코일로 고정자를 구성하고 있다. 본 논문은 고효율을 위한 직선형 영구자석 동기 전동기의 철심의 유무에 따른 특성 해석을 제시하고자 한다. 즉 2개의 직각 좌표계로 이루어진 가동자와 고정자에 있어서 벡터 자위에 의한 동일한 방법으로 iron-cored PMLSM의 해석을 통해 요 구사양에 따른 설계와 자화 배열에 따른 비교에 대해 다룰 것이다. 따라서 철심을 고려한 자석의 체적, 권선 코일의 높이 및 공극의 길이 등에 따른 2차원 정자계 해석을 통해 영구자석 및 코일의 자속밀도, 영구자석과 코일 권선의 높이에 따른 최적 자속밀도, 힘에 대한 설계 특성을 제시하고 세가지 자화 배열에 대해 특성 비교를 할 것이다. 이 분석적 결과는 유한 요소법(FEM)을 통해 설계 및 분석에 대한 타당성을 입증할 것이다.

2. 직선형 영구자석 동기 전동기의 특성 해석

2.1 해석모델

특성 해석을 위한 모델의 기하학적인 구조는 그림1 과 그림2와 같다. 철심을 갖는 영구 자석으로 구성된 가동자의 두께는 Δ 이고, 고정자 코일 권선의 두께는 Γ 이다. 고정자의 좌표계 (x, y, z) 에 대해 영구자석 가동자는 수직 방향으로 $x_0 + \Gamma$, 수평방향으로 z_0 변위되는 좌표계

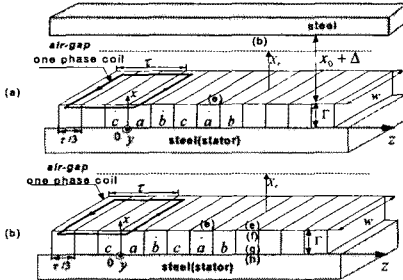


그림 2. 철심을 포함한 코일 고정자의 특성해석 모델 a) 수직 배열 가동자를 갖는 고정자 b)Halbach, 수평 배열 가동자를 갖는 고정자

(x', y', z') 를 갖는다[2]. 또한 제시된 해석모델은 y 방향으로 길이 w 를 갖으며, 철심의 투자율은 ∞ 로 가정하고 단부효과는 무시한다. 철심을 포함한 가동자와 고정자의 정자계 해석 구조 및 배열에 대해 그림1과 그림 2는 제시하고 있다. 일정한 극간격 τ 로 이루어진 세가지 형태의 배열에 대해 영구자석과 코일의 길이가 각각 $\tau_m, \tau/3$ 로 주어졌으며, 영구 자석 및 코일의 투자율은 공기와 같다고 가정하였다. 또한 영구자석과 코일에 의한 전체 자속밀도를 얻기 위해 공극 영역으로의 높이 X, X_c 에 따른 자속밀도 일반화가 이루어 진다.

2.2 영구자석 및 코일 모델링

그림1.(a)의 Halbach 배열을 갖는 가동자 영역의 자화는 지수함수 푸리에 급수 에 의해 식(1)로 표현된다.

$$M = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (M_{zn} e^{-jk_n x} i_x + M_{zn} e^{-jk_n x} i_z) \quad (1)$$

여기서, M_{zn} 과 M_{zn} 은 각각 수직 방향 및 수평 방향 자화이며, $k_n = \pi n/\tau$ 로 주어지는 n 차 공간고조파이고, τ 는 극 길이를 의미한다. 자화의 세기 M_0 는 영구자석의 비투자율 $\mu_r = 1$ 로 가정하면 $M_0 = B_r/\mu_0$ 로 주어진다. 그림1.(b)의 수직방향 자화 배열은 Halbach 배열의 수직 자화 성분만을 갖고, 세가지 자화 배열의 동일성을 위하여 $\tau = \tau_m$ 이 성립한다. 그림1.(c)의 수평방향 자화 배열은 Halbach 배열과 같은 수직, 수평 자화 성분을 갖게 되나 자화의 크기에 있어서 영구자석의 높이 Δ 와 iron-core의 길이 τ_s 에 의해 식(2)의 제한을 받는다.

$$\begin{aligned} |M_{zn}| &= \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + \tau_s^2}} \frac{B_r}{\mu_0} \\ |M_{zn}| &= \frac{\tau_s}{\sqrt{\Delta^2 + \tau_s^2}} \frac{B_r}{\mu_0} \end{aligned} \quad (2)$$

그림2의 (a), (b)는 고정자 부분의 철심을 포함한 코일로서 전류에 의한 자계를 형성한다. 3상 전류밀도에 대한 z 방향의 공간적 분포에 대해 식(3)과 같이 표현된다.

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

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

2.3 영구자석과 코일 자속밀도 전달관계

영구자석 내부의 맥스웰 방정식에 의한 라플라스 방정식의 일반해는 벡터 포텐셜과 자속밀도와와의 전달 관계식을 영구자석 높이 Δ 에 대해 식(4)와 같이 표현할 수 있다(2).

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^b \\ B_{zn}^c \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n \Delta & \frac{-1}{\sinh k_n \Delta} \\ \frac{1}{\sinh k_n \Delta} & -\coth k_n \Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^b \\ A_{zn}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cosh k_n \Delta - 1}{\sinh k_n \Delta} \\ \frac{-\cosh k_n \Delta + 1}{\sinh k_n \Delta} \end{bmatrix} j\mu_0 M_{zn} \quad (4)$$

고정자 코일 부분에 있어서 영구자석과 동일한 유도과정을 적용하여, 벡터포텐셜과 자속밀도 전달 관계식을 코일 높이 Γ 와 코일의 단위 길이 당 체적 전류밀도 J_{yn} 에 의해 표현된다.

2.4 경계조건 및 자속밀도

철심을 고려한 그림1.(a)의 Halbach 배열의 경우 각 경계면에 대한 경계조건을 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{zn}^e = -k_n A_{zn}^e$$

$$\begin{aligned} A_{zn}^a &= A_{zn}^b \\ A_{zn}^c &= A_{zn}^d \end{aligned}$$

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

경계조건 등식 (5)는 $x = +\infty$ 로부터 $x = a$ 까지의 $\gamma_n = |k_n|$ 에 대해 무한 영역에 대한 전자기적 전달관계에 의해 경계면 (a)에서의 자기 벡터 포텐셜과 자속 밀도의 관계로부터 구해지며, 경계면 (a)와 (b)에 대한 자기 벡터 포텐셜의 연속성에 의해 구해진다. 또한 경계면 (a)와 (b), (c)와 (d)에 대한 영구자석 수평방향 자화 성분에 의한 자계의 불연속성과, 철심의 투자율을 무한히 큰 것으로 가정함에 따라 각각 구해진다. 수직, 수평 자화 배열 및 코일에 의한 경계조건은 식(5)의 경계조건 식에 대해 철심의 유무에 의한 철심의 투자율을 고려하여 표현된다. 그림1의 Halbach 자화 배열과 수직 자화 배열 영구자석에 의한 자속밀도는 경계면(d)에 있어서 경계 조건과 자속밀도 전달관계에 의해 수직, 수평 성분에 대해 식(6)과 같이 각각 구해진다.

$$\begin{aligned} B_{zn}^d &= \left(\frac{-\mu_0 M_{zn}}{2} + j \frac{\mu_0 k_n M_{zn}}{2\gamma_n} \right) (1 + e^{-2\gamma_n(x_0+\Gamma)}) (e^{-\gamma_n \Delta} - 1) \\ B_{zn}^d &= \left(\frac{\mu_0 M_{zn}}{2} + j \frac{\mu_0 \gamma_n M_{zn}}{2k_n} \right) (1 + e^{-2\gamma_n(x_0+\Gamma)}) (e^{-\gamma_n \Delta} - 1) \\ B_{zn}^d &= \frac{\mu_0 M_{zn}}{2} \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} + e^{-2\gamma_n \Delta} - 2)(e^{\gamma_n(x_0+\Gamma)} + e^{-\gamma_n(x_0+\Gamma)})}{((e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n(x_0+\Gamma)} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n(x_0+\Gamma)})} \\ B_{zn}^d &= \frac{-j\mu_0 \gamma_n M_{zn}}{2k_n} \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} + e^{-2\gamma_n \Delta} - 2)(e^{\gamma_n(x_0+\Gamma)} - e^{-\gamma_n(x_0+\Gamma)})}{((e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n(x_0+\Gamma)} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n(x_0+\Gamma)})} \end{aligned} \quad (6)$$

그림2.(a), (b)의 3상 코일에 의한 자속밀도는 경계면 (e)에 있어서 경계조건과 자속밀도 전달관계에 의해 식(7)과 같이 각각 구해진다.

$$\begin{aligned} B_{zn}^e &= \frac{j\mu_0}{2k_n} J_{yn} \frac{(e^{2\gamma_n \Gamma} - 1)(e^{2\gamma_n(x_0+\Delta)} + 1)}{(e^{2\gamma_n(x_0+\Delta+\Gamma)} - 1)} \\ B_{zn}^e &= \frac{\mu_0}{2\gamma_n} J_{yn} \frac{(e^{2\gamma_n \Gamma} - 1)(1 - e^{2\gamma_n(x_0+\Delta)})}{(e^{2\gamma_n(x_0+\Delta+\Gamma)} - 1)} \\ B_{zn}^e &= j \frac{\mu_0}{2k_n} J_{yn} (1 - e^{-2\gamma_n \Gamma}) \\ B_{zn}^e &= -\frac{\mu_0}{2\gamma_n} J_{yn} (1 - e^{-2\gamma_n \Gamma}) \end{aligned} \quad (7)$$

2.5 공극 영역으로의 자속밀도 일반화

영구자석에 의한 자속밀도는 경계면(d)의 자속밀도에 대해 공극영역으로의 전달관계식에 의해 식(8)과 같이 일반화가 된다.

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^x \\ B_{zn}^d \end{bmatrix} = \gamma_n \begin{bmatrix} \coth(-\gamma_n X) & \frac{-1}{\sinh(-\gamma_n X)} \\ \frac{1}{\sinh(-\gamma_n X)} & -\coth(-\gamma_n X) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{zn}^x \\ A_{zn}^d \end{bmatrix} \quad (0 \leq X \leq x_0 + \Gamma) \quad (8)$$

코일에 의한 자속밀도는 경계면(e)의 자속밀도에 대해 공극영역으로의 전달관계식에 의해 식(8)과 같이 공극영역으로의 높이 X_c ($0 \leq X_c \leq x_0 + \Delta$)에 대해 일반화가 가능하다.

2.6 힘 특성식

경계면(d)에서의 추력특성식은 맥스웰 응력법에 의해 식(9)로 주어진다[3].

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

$$F_z = -S \langle T_{zz}^d \rangle_z = -S\mu_0 H_x^d H_x^* \quad (9)$$

여기서, S 는 1차측 영구자석의 표면적이며 영구자석 극 쌍수 p 를 고려하여 $S=2prw$ 로 구해진다.

2.7 특성 해석 결과 및 검증

표 1. 설계사양

항목	크기(단위)
영구 자석	$r_m = 25.5(mm)$ $\Delta = 25.5(mm)$
극 간격	$r = 51(mm)$
공극 길이	$x_0 = 5(mm)$
코일 높이	$\Gamma = 6(mm)$
기자력	150(A·turns)
모터 길이	$w = 25.5(mm)$
영구자석 극수	4.5(poles)

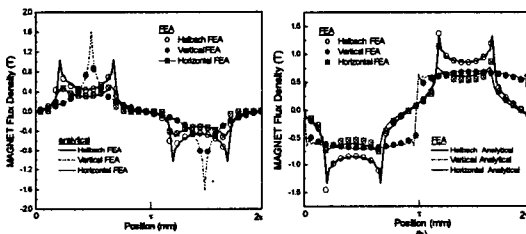


그림 3. 자화 방향 배열에 따른 영구자석 표면 자속 밀도: (a)수평 성분 자속 밀도 (b) 수직 성분 자속 밀도

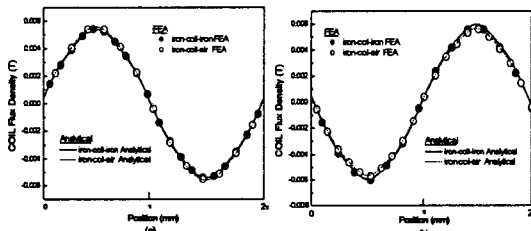


그림 4.철심에 따른 슬롯리스 3상 코일에 의한 공극 자속밀도: (a)수평 성분, (b)수직 성분

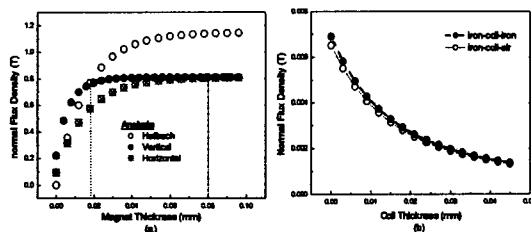


그림 5.영구자석과 코일 높이에 따른 공극 면의 최대 자속밀도: (a)영구자석, (b)슬롯리스 3상 코일

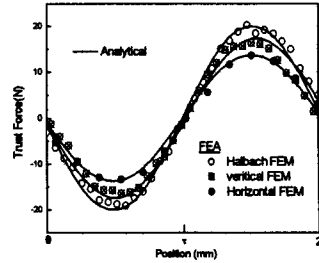


그림 6.자화 방향 배열 모델에 대한 부하각에 따른 추력

그림3과 그림4는 표.1에 제시된 설계사양에 대해 세가지 배열에 있어서 동일한 영구자석 제격을 갖는 가동자면 영구자석 표면에서의 자속밀도와 동일한 기자력,코일면 적에 대해 철심의 유무에 따른 공극 경계면의 자속밀도를 나타낸 것이다.또한 그림5는 해석적 방법을 통해 영구자석의 높이와 코일의 높이를 변화시켜 공극에서의 최대 자속밀도에 있어서 세가지 배열의 최적점을 얻은 것이다.동일 조건 하에서 영구자석의 높이가 18(mm)이하 는 수직자화 배열의 수직 방향 자속밀도가 높으며 18(mm)이상은 Halbach 자화 배열이 높음을 알 수 있다. 또한 영구자석의 높이가 커질수록 수평 자화 배열은 수직 자화 배열보다 높은 자속밀도에서 포화 됨을 알 수 있다.그림6은 표.1의 PMLSM의 설계사양에 대한 Halbach 배열 가동자의 추력에 대해 해석적 방법을 FEM을 통해 검증한 것이다. 영구자석과 코일에 의한 자속밀도 특성과 추력에 있어서 해석적 방법과 FEM의 결과가 매우 잘 부합됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 철심의 유무에 따른 직선형 영구 자석 모터의 특성 해석에 대해 다루었다.세가지 영구자석 제자 시스템 의한 자속밀도와 철심에 따른 코일에 의한 자속 밀도를 FEM과의 검증을 통해 해석상의 타당성을 검증하였다. 또한 영구 자석과 코일의 높이에 따른 자속 밀도의 최적화를 통해 배열상의 특성을 해석 했었고 자속 밀도에 의한 추력을 FEM으로 검증하였다.해석상에 고려된 여러 요소들은 다양한 리니어 모터의 시스템 성능에 맞는 설계와 동특성 회로 정수에 있어 필요한 정보를 제공한다.

(참 고 문 헌)

- [1]Seok-Myeong Jang, Sung-Ho Lee"Comparison 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 Aalysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines"IEEE Transaction Vol.32.No.2,March/April 1996
- [3]David L.Trumper and Mark E. Williams. Halbach Arrays in Precion Motion Control The art and science of magnet design. Vol. 1, Feb 1995