

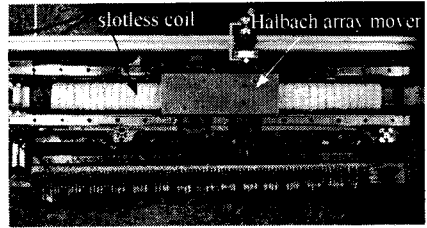
영구 자석 Halbach 배열 가동자로 구성된
철심형 직선 영구자석 동기 전동기의 특성 해석

장 석명, 유 대준, 이 성호, 장 원범, 권 정기
충남대학교

Characteristic Analysis of
Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Halbach Array and Iron Core

Seok- Myeong Jang, Dae-Joon You, Sung- Ho Lee, Won-Bum Jang, Jeong-Ki Kwon
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

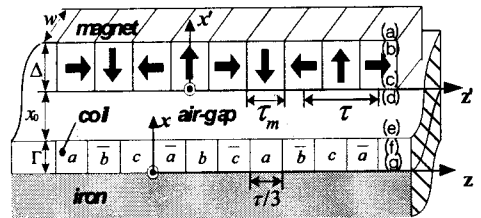
Abstract - This paper presents a design and analysis solutions for the general class of iron-cored permanent magnet linear synchronous motor with Halbach (PMLSM). In our design and analysis, rotor consisting of permanent magnets rotor and slot less iron-cored coil stator are treated in a uniform way via vector potential. For one such motor structure, we give analytical formulas for its magnetic field, back electromotive force, inductance of winding coil, and trust force. We also provide performance comparisons of three types according to iron-cored and PM array.



a) 제작되어진 철심형 PMLSM

1. 서 론

직선형 영구자석 동기 전동기(PMLSM)는 직선형 유도 전동기에 비해 영구자석을 사용하기 때문에 상대적으로 효율이 높고 추력 대 중량비가 높아 고 추력화 및 고속화가 가능하며 역률이 높다[1]. 그러나 개루프 제어 성능이 떨어지고 제조원가가 높다는 단점을 가지고 있다. 본 논문은 일반적인 자화 배열과 공심형으로 구성된 직선형 동기 전동기에 비해 고 추력, 고 성능을 얻기 위한 Halbach 배열과 철심으로 구성된 제작 모델에 대해 특성 해석을 제시한다. 특성 해석을 위한 모델로는 3상 슬롯리스 코일과 철심으로 구성된 고정자와 Halbach 배열로 구성된 가동자를 갖는 모델을 제시한다. 설계 모델의 해석적 분석에 있어서, 영구 자석으로 구성된 가동자 부분과 3상 슬롯리스 코일로 구성된 고정자 부분은 2개의 직각 좌표계에 의한 벡터 퍼텐셜의 단일한 방법으로 제시한다[2]. 본 논문은 철심형 Halbach 배열을 갖는 제작된 모델에 대해 공극 자속 밀도 일반화, 역 기전력, 인덕턴스, 추력에 대한 해석적 방법을 제시하고 유한 요소법을 통해 해석 결과를 검증한다.



(b) Halbach 배열을 갖는 철심형 PMLSM 해석 모델

그림 1. 직선형 영구 자석 동기 전동기의 해석 모델

2.2 영구 자석과 코일에 의한 자속 밀도

그림 1.(b)의 Halbach 배열을 갖는 영구자석 자화와 코일의 분포는 지수함수 푸리에 급수에 의해 식(1)으로 표현된다.

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

$$J = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{yn} e^{-jk_n z} i_y \tag{1}$$

2. Halbach 배열 철심형 PMLSM의 특성 해석

2.1 해석 모델

특성 해석을 위한 모델의 기하학적인 구조는 그림 1과 같다. 영구 자석으로 구성된 가동자의 두께는 Δ 이고, 고정자 코일 권선의 두께는 Γ 이다. 고정자의 좌표계 (x, y, z) 에 대해 영구자석 가동자는 수직 방향으로 $x_0 + \Gamma$ 의 높이를 갖으며, 수평방향으로 z_0 변위되는 좌표계 (x', y', z') 를 갖는다. 또한 제시된 해석모델은 y 방향으로 길이 w 를 갖으며, 일정한 극 간격 τ 로 이루어진 형태의 배열에 대해 영구자석과 코일의 길이가 각각 $\tau_m, \tau/3$ 로 주어졌으며, 영구 자석 및 코일의 투자율은 공극과 같고 철심의 투자율은 ∞ 로 가정한다. 공극과 단부의 누설 자속은 무시한다.

여기서, M_{xn} 과 M_{zn} 은 각각 수직 방향 및 수평 방향 자화 푸리에 계수이며, $k_n = \pi n / \tau$ 로 주어지는 n 차 공간 고조파이고, τ 는 극 간격을 의미한다. 자화의 세기 M_0 는 영구자석의 비투자율 $\mu_r = 1$ 로 가정하면 $M_0 = B_s / \mu_0$ 로 주어진다[3]. 또한 고정자 영역의 자화는 3상 전류에 의한 z 방향 분포에 대해 y 방향의 크기를 갖는다.

영구자석 내부의 자속 밀도 특성식은 y 방향의 벡터 퍼텐셜에 의해 영구자석 높이 Δ 와 수직 자화 M_{xn} 에 의해 식 (2)로 표현 된다[2]. 코일 내부의 자속밀도 특성식은 코일 높이 Γ 와 코일의 단위 면적 당 전류밀도 J_{yn} 에 의해 표현되며, 공극 내부의 자속밀도 특성식은 자화량을 가지지 않으므로 $M_{xn}, J_{yn} = 0$ 을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^{(b)} \\ B_{zn}^{(c)} \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n \Delta & \frac{-1}{\sinh k_n \Delta} \\ \frac{1}{\sinh k_n \Delta} & -\coth k_n \Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{yn}^{(b)} \\ A_{yn}^{(c)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cosh k_n \Delta - 1}{\sinh k_n \Delta} \\ -\frac{\cosh k_n \Delta + 1}{\sinh k_n \Delta} \end{bmatrix} j\mu_0 M_{zn} \quad (2)$$

그림 1.(b)의 각각의 경계면에 대해 영구자석과 철심만을 고려한 경계 조건 식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} B_{zn}^{(a)} &= -\gamma_n A_{yn}^{(a)} \\ A_{yn}^{(a)} &= A_{yn}^{(b)} \\ A_{yn}^{(c)} &= A_{yn}^{(d)} \\ B_{zn}^{(a)} - B_{zn}^{(b)} &= -\mu_0 M_{zn} \\ B_{zn}^{(c)} - B_{zn}^{(d)} &= \mu_0 M_{zn} \\ B_{zn}^{(e)} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

경계 조건 등식 식 (3)은 각각의 경계면이 갖는 특성에 대해 $x' = \infty$ 로부터 $x' = a$ 까지의 $\gamma_n = |k_n|$ 로 무한 영역에 대한 전자기적 전달관계와 벡터 퍼텐셜의 연속성으로 구해지며, 영구자석 수평방향 자화 성분에 의한 자계의 불연속성과 철심의 투자율을 무한히 큰 것으로 가정함에 따라 각각 구해진다. 영구자석 표면으로부터 철심으로의 높이 X 에 대해 영구자석에 의한 y 방향 벡터 퍼텐셜의 일반화는 식 (4)와 같다.

$$A_{yn}^X = \left(\frac{-j\mu_0 M_{zn}}{2k_n} - \frac{\mu_0 M_{zn}}{2\gamma_n} \right) [1 - (e^{-\gamma_n X})] [e^{-2\gamma_n(x_0 + l)} e^{\gamma_n x} + e^{-\gamma_n X}] \quad (0 \leq X \leq x_0 + l) \quad (4)$$

철심을 포함한 슬롯리스 코일부의 경계 조건식을 고려하여 코일 표면으로부터 공기 중으로의 높이 X_c 로의 전류 밀도에 의한 y 방향 벡터 퍼텐셜의 일반화는 식(5)와 같고 코일 내부에 있어서 코일 밀면으로부터의 벡터 퍼텐셜의 일반화는 식(6)과 같다.

$$A_{yn}^{X_c} = \frac{\mu_0}{2k_n^2} J_{yn} (1 - e^{-2r_n \Gamma}) e^{-r_n X_c} \quad (0 \leq X_c \leq \infty) \quad (5)$$

$$A_{yn}^{X_c} = \frac{\mu_0}{2k_n^2} J_{yn} [2 - e^{-r_n \Gamma} (e^{r_n X_c} + e^{-r_n X_c})] \quad (0 \leq x_c \leq \Gamma) \quad (6)$$

2.3 회로 방정식

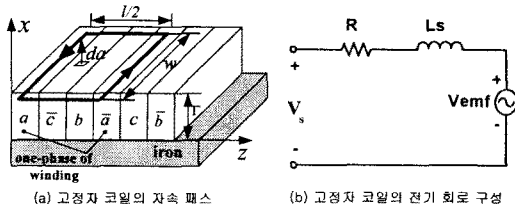


그림 2. 고정자 구조에 따른 회로 방정식

그림 2의 전기적 회로 방정식을 구하기 위한 설계 변수에 있어서 식(6)에 의한 코일 내부의 벡터 퍼텐셜에 의해 한상 코일에 의한 상당 쇄교 자속과 자기 인덕턴스는 식(7)과 식(8)에 의해 구해진다.

$$\Phi = \int_S B \cdot da = \int_S (\nabla \times A) \cdot da = \oint_C A \cdot dl \quad (7)$$

$$L_s = \frac{w \rho \eta_0^2 \mu_0 l^3}{4\pi^4} \sum_{n=\infty, \text{odd}}^{\infty} \frac{1}{n^4} (1 - \cos \frac{n\pi}{3}) [2\Gamma - \frac{e^{-r_n \Gamma} (1 - e^{-2r_n \Gamma})}{r_n}] \quad (8)$$

여기서, η_0 는 단위 면적당 턴 수이며, $l=2r$, ρ_s 는 코일의 극 쌍 수이다. 영구자석이 직선 운동을 함에 따라 부하 각 x_0 에 따라 코일에 유도되는 역기전력 또는 속도 기전력은 식 (9)와 식(10)으로 표현된다.

$$V_{emf} = N \oint_C (-u_x B_{zm} + u_z B_{xm}) i_y \cdot dl \quad (9)$$

$$V_{demf} = \rho_m w \eta_0 \sum_{n=\infty, \text{odd}}^{\infty} \left[\left(\frac{j\mu_0 M_{zn}}{\gamma_n} - \frac{\mu_0 M_{zn}}{k_n} \right) \left(\frac{j\mu_z}{\gamma_n} \right) (1 - e^{-2r_n \Gamma}) + \left(\frac{j\mu_0 M_{zn}}{k_n} - \frac{\mu_0 M_{zn}}{\gamma_n} \right) \left(\frac{u_x}{\gamma_n} \right) (e^{-r_n \Gamma} - 1)^2 (1 - e^{-\gamma_n \Delta}) (1 - e^{-\frac{inx}{3}}) e^{-r_n x_0} e^{jk_z x} \right] \quad (10)$$

여기서, ρ_m 은 영구자석 극 쌍수이다.

2.4 작용력 특성식

영구자석 및 코일 각각의 자속밀도의 함에 의해 영구자석 표면에 작용하는 힘을 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_z &= -S \langle T_{zz}^d \rangle_z = -S \mu_0 \langle H_x^d H_x^d \rangle_z \\ F_x &= -S \langle T_{xz}^d \rangle_z = -\frac{S \mu_0}{2} \langle H_x^d H_x^d - H_z^d H_z^d \rangle_z \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, S 는 가동자 영구자석의 표면적이며 $S=2\rho_m r w$ 로 구해진다[2].

3. 특성 해석 결과

3.1 자계, 역 기전력 및 추력 특성

표 1. 설계 사양 및 회로정수

항목	크기(단위)
영구자석	$\Delta = 25.5$ (mm)
	$\tau_m = 25.5$ (mm)
	$w = 25.5$ (mm)
	$B_p = 1.1$ (T)
극 간격	$r = 51$ (mm)
공극	$x_0 = 5$ (mm)
코일 높이	$\Gamma = 6$ (mm)
코일 턴수	$N = 150$ (turns)
고정자 상당 self 인덕턴스	$L_s = 8.8$ (mH)
역기전력 수평 속도 상수	$K_{emf} = 11.65$
한 상당 최대 전류(특성 해석)	$i_a = 1$ (A)
영구자석 극 쌍수	$\rho_m = 2 + 1/4$
코일 상당 극 쌍수	$\rho_s = 7$

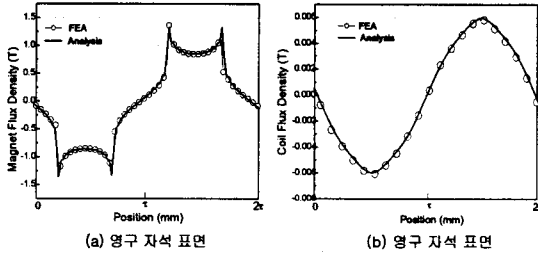


그림 3. 영구 자석과 3상 코일에 의한 수직 자속밀도

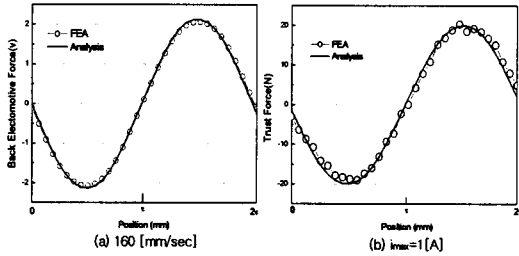


그림 4. 해석 모델에 대한 역기전력과 추력

표 1은 그림 1.(a)의 설계 사양과 회로 정수를 나타내고 있다. 그림 3.(a),(b)는 각각 영구 자석과 3상 코일에 의한 수직 방향 자속밀도 분포 특성을 보여준다. 그림 4는 회로 방정식을 통해 얻어진 역 기전력 및 추력 특성 결과를 나타낸다. 그림 3과 4는 유한 요소 해석 결과에 의 해 검증된다.

3.2 가동자와 고정자 철심 구성에 따른 성능 비교

표 2. 가동자와 고정자 구성에 따른 비교 모델

	model 1	model 2	model 3
Back iron	existence	absence	absence
Rotor	Vertical array	Horizontal array	Halbach array
Air gap	5 (mm)	5 (mm)	5 (mm)
Stator	slot less coil	slot less coil	slot less coil
Iron core	existence	existence	absence

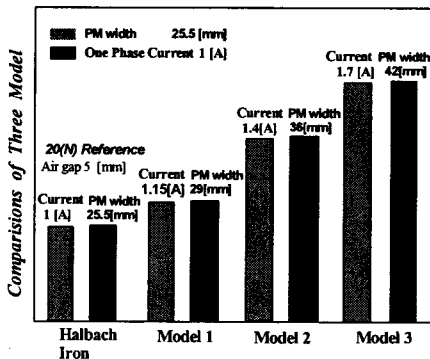


그림 5. 기준 추력 20(N)에 대한 세 가지 모델의 영구 자석 깊이와 전류 비교

표 2는 가동자 영구 자석 배열과 고정자 철심 구성에 따른 세 가지 모델을 제시하고 있다. 가동자 영구자석의 배열에 있어서 모델 2와 모델 3은 자기 회로 특성상 Back iron을 필요로 하지 않으며 철심의 특성을 비교하기 위해 모델 3을 공심형으로 하였다. 또한 성능 비교를 위해 세 가지 모델의 모든 설계 변수는 Halbach 배열 철심형 모델과 동일하다.

그림 5는 표 2에 대한 세 가지 모델에 대해 영구 자석 깊이와 전류의 성능 비교를 보여 준다. 20(N) 기준 추력 시 Halbach 배열 철심형 모델 구조 보다 모델 1, 2, 3은 필요한 상당 전류의 크기와 영구자석의 체적이 더 요구된다. 따라서 PMLSM의 가동자와 고정자 구성에 있어서 각각 Halbach 배열과 철심의 구성이 고 성능, 고 추력을 얻기 위해 유리하다.

4. 결 론

본 논문은 Halbach 배열과 철심을 갖는 직선형 영구 자석 동기 전동기를 전자기적 전달관계를 이용하여 자속 밀도, 추력 등을 특성 해석하였고 유한 요소법을 이용하여 해석 결과를 검증하였다. 또한 고정자 구조에 따른 회로 방정식을 이용하여 해석모델의 인덕턴스 및 역기전력을 도출하였다. 마지막으로, 앞서 제시된 해석적 방법을 이용해 가동자와 고정자의 자로 구성에 따른 모델들의 성능을 비교함으로써 Halbach 배열 가동자를 갖는 철심형 PMLSM이 기준 추력을 내기 위한 영구자석과 필요 전류량의 측면에서 성능이 우수함을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [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 Trans. Magn. Vol.38, No.5, pp. 3264-3266, Sept. 2002
- [2] David L. Trumper, Won-jong kim, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines." IE EE Trans. Magn, Vol.32, No.2, pp.371-379, March/April 1996
- [3] David L, Trumper and Mark E, Williams. "Halbach Arrays in Precision Motion Control" The art and science of f magnet design, Vol. 1, Feb. 1995