

해석적 방법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 전동기의 특성 해석

안호진*, 강규홍, 홍정표, 김규탁
창원대학교 전기공학과

Characteristic Analysis of a Slotless PM Linear Motor Using Analytical Method

Ho-Jin Ahn*, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim
Department of Electric Engineering, Changwon National University

Abstract - This paper deals with characteristic analysis of a slotless PM linear motor using analytical method. In order to calculate voltage equations, back-EMF waveform and winding inductance are calculated by PM's magnetic field and winding's magnetic field respectively.

1. 서 론

선형 전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 자체 효율이 낮고 역률이 떨어지는 단점이 있음에도 불구하고 직선추력을 직접 발생시키므로 직선운동이 요구되는 메카트로닉스 분야를 비롯하여 교통차량용 기기, 산업용 기기, 사무자동화 기기 등에 응용되고 있다. 특히 영구자석 선형 전동기는 구조가 단순하고, 고속, 고효율이 가능하다는 장점 때문에 설계 및 특성 해석에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1].

그러나 영구자석 선형 전동기는 치-슬롯 구조에 의하여 필연적으로 디렌트력(detent force)이 발생하게 되는데, 이러한 디렌트력은 전동기의 추력 맥동으로 작용하여 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 제어성능을 악화시킨다. 디렌트력을 저감시키기 위한 많은 방법들이 연구되고 활용되고 있으나 근본적인 디렌트력의 제거를 위해서는 치-슬롯이 없는 슬롯리스형(slotless type)으로 제작하는 것이 타당하다. 이러한 구조의 채택은 큰 자기적 공극으로 인하여 출력밀도가 떨어지는 단점이 있으나, 디렌트력이 제거되고 수직력이 작아지기 때문에 고도의 제어특성이 요구되는 정밀 시스템에 적합하다.

한편, 슬롯리스형 선형 전동기는 구조가 매우 간단하고 큰 자기적 공극으로 인하여 포화현상이 거의 발생하지 않으므로 해석적 방법(analytical method)으로도 유한요소 해석결과와 큰 차이가 없는 정확한 특성해석결과를 보다 빨리 얻을 수 있다[1-2].

따라서 본 논문에서는 2차원 공간고조파법을 이용하여 영구자석 선형 전동기의 공극 자계를 계산하고, 이로부터 역기전력, 인덕턴스와 같은 파라미터들을 계산하여 정상상태 특성 해석을 수행하였다. 파라미터의 정확도를 검증하기 위해 2차원 유한요소 해석결과와 비교하였다.

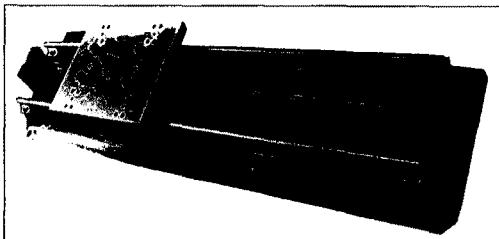


그림 1. 영구자석 선형 전동기

2. 본 론

2.1 공극 자계의 계산

그림 2는 본 논문에서의 정상상태 특성 해석 과정을 나타낸 것이다. 특성 해석에 필요한 역기전력 파형과 인덕턴스는 각각 영구자석에 의한 자계와 전기자 전류에 의한 자계로부터 계산할 수 있다[2].

2.1.1 영구자석에 의한 자계

영구자석을 자화분포로 등가화 시키면 자기스칼라펜셜 φ 를 도입하여 공극과 영구자석 영역에서의 지배방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \varphi_I(x, y) = 0 \quad (\text{공극}) \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi_H(x, y) = \frac{\nabla \cdot \mathbf{M}}{\mu_r} \quad (\text{영구자석영역}) \quad (2)$$

식(2)에서 \mathbf{M} 은 영구자석의 자화벡터를 나타내며, 균일하다고 가정하면 식(2)의 우변도 0이 되며 자화는 경계조건으로 적용된다. 자화분포는 다음과 같이 푸리에 급수로 나타낼 수 있다.

$$M(x) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} M_n \cos\left(\frac{n\pi x}{\tau}\right) \quad (3)$$

$$M_n = \frac{4B_r}{\mu_0 n \pi} \sin\left(\frac{n\pi \tau}{2w_b}\right) \quad (4)$$

식(1)과 식(2)의 지배방정식을 풀이한 결과 우리가 관심을 가지는 공극 자속밀도는 식(5), 식(6)과 같으며, 계수는 식(7)과 같다. 여기서 $k_p = \pi / \tau_p$ 이며, τ_p 는 영구자석의 극간격을 나타낸다.

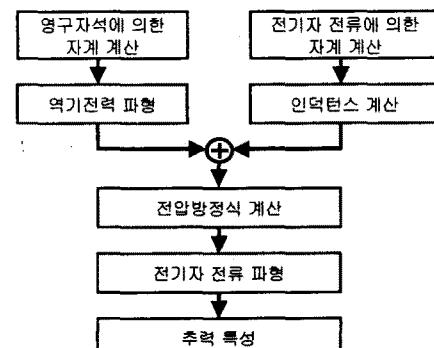


그림 2. 정상상태 운전특성 해석 과정

$$B_{xI}^{pm} = - \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \beta_{2I}^{pm} \sin(nk_p x) \sinh(nk_p y) \quad (5)$$

$$B_{yI}^{pm} = + \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \beta_{2I}^{pm} \cos(nk_p x) \cosh(nk_p y) \quad (6)$$

$$\beta_{2I}^{pm} = \frac{\mu_0 M_n \sinh(nk_p(y_m - y_s))}{[\mu, \cosh(nk_p y_m) \sinh(nk_p(y_m - y_s))] - \cosh(nk_p(y_m - y_s)) \sinh(nk_p y_m)]} \quad (7)$$

2.1.2 전기자 전류에 의한 자계

전기자 전류의 분포를 자화분포로 치환하게 되면 영구자석의 자계 계산과 마찬가지로 자기스칼라�텐셜을 계수변수로 두고 자속밀도를 계산할 수 있다. 이렇게 되면 지배방정식이 영구자석에 의한 지배방정식과 동일하므로 계산의 번거로움이 없어지는 장점이 있다. 그러나 실제 전기자 전류의 분포가 그대로 묘사되지 않으므로 다소 오차를 수반하는 단점이 있으나, 일반적으로 영구자석 기기에서 전기자 전류에 의한 자속은 영구자석에 의한 자속에 비해 20%정도에 지나지 않으므로 기기 전체의 특성해석에 큰 오차를 수반하지는 않는다. 전기자 전류에 의한 자속밀도 중 파라미터 계산을 위해 관심을 가지는 공극-코일 영역에서의 자속밀도는 식(8), 식(9)과 같으며, 식(10)은 계수를 나타낸다.

$$B_{xII}^o = + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{2II}^o \sin(nk_c x) \sinh(nk_c y) \quad (8)$$

$$B_{yII}^o = - \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{2II}^o \cos(nk_c x) \cosh(nk_c y) + \sum_{n=1}^{\infty} \mu_0 M_n^o \cos(nk_c x) \quad (9)$$

$$\beta_{2II}^o = \frac{\mu_0 M_n^o \sinh(nk_c(y_c - y_s))}{[\cosh(nk_c y_c) \sinh(nk_c(y_c - y_s))] - \cosh(nk_c(y_c - y_s)) \sinh(nk_c y_c)]} \quad (10)$$

여기서, $k_c = \pi/\tau_c$ 이며, τ_c 는 전기자 권선의 극간격이다. 한편, 전기자 전류에 의한 자화분포 M_n^o 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식(11)에서 J 는 입력전류밀도를 나타낸다.

$$M_n^o = \frac{4J}{n^2 \pi k_c} \sin(nk_c \frac{d_c + w_c}{2}) \sin(nk_c \frac{w_c}{2}) \quad (11)$$

그림 3은 식(5), 식(6) 및 식(8), 식(9)로부터 계산한 공극자속밀도의 y-성분과 2차원 유한요소법으로 구한 공극자속밀도를 비교한 것으로 매우 잘 일치하고 있다. 전기자 전류에 의한 자계는 a상만 여자시켰을 때의 자계를 나타낸다.

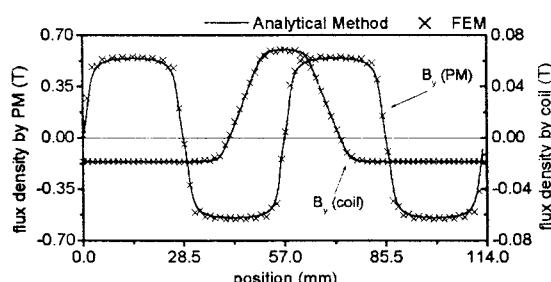


그림 3. 공극자속밀도 분포

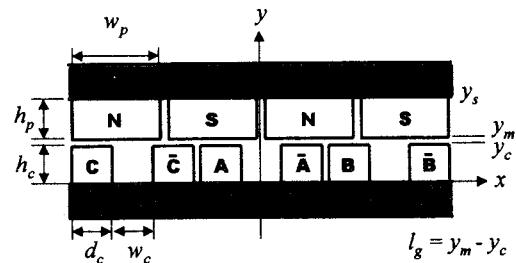


그림 4. 해석모델의 주요 치수

표 1. 해석 모델의 사양

제품	기호	값(단위)	제품	기호	값(단위)
극 수	$2p$	12	코일당 턴수	N	650[번]
잔류자속밀도	B_r	1.2 [T]	코일 높이	h_c	11[mm]
영구자석 높이	h_o	12 [mm]	코일 폭	w_c	12[mm]
영구자석 길이	l_b	73.5 [mm]	코일 간격	d_c	12[mm]
영구자석 폭	w_p	26 [mm]	상전류(최대)	I	2.66[A]
극 피치	τ_p	28.5 [mm]	공극 길이	l_g	2[mm]

2.2 역기전력

역기전력은 영구자석에 의한 자계 중에서 y-성분만을 적분하여 쇄교자속을 구한 뒤 그 변화량으로 계산할 수 있다. 그럼 5와 같이 코일이 그 중심에 집중으로 분포한다고 가정하고 적분 구간을 코일 중심에 두었다. 그럼 6은 유한요소법으로 구한 역기전력 파형과 비교한 것으로 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} B_{yI}^{pm} dx \quad (12)$$

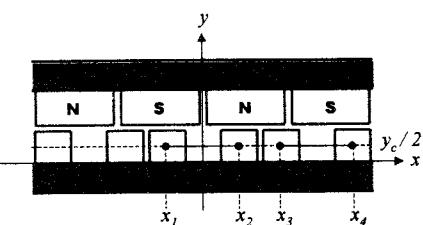


그림 5. 쇄교자속 계산을 위한 적분구간

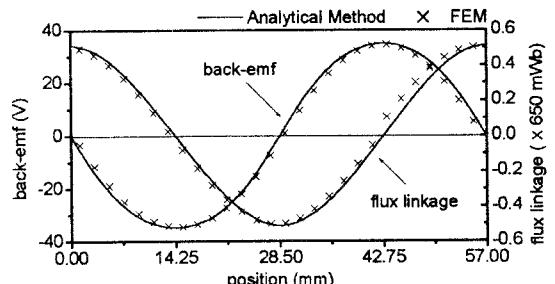


그림 6. 역기전력 파형 (1 m/s)

2.3 인덕턴스

인덕턴스는 한 상의 전기자 전류에 의한 자계 중에서 y-성분만을 적분한 쇄교자속으로부터 계산할 수 있다. 역기전력의 계산과 마찬가지로 적분구간을 그림 5와 같이 두었다. 표 2는 유한요소법으로 구한 인덕턴스와 비교한 것이다.

$$L = N\Phi / I = N \int_{x_1}^{x_2} B_{yH}^{\infty} dx / I \quad (13)$$

$$M = N\Phi' / I = N \int_{x_3}^{x_4} B_{yH}^{\infty} dx / I \quad (14)$$

표 2. 인덕턴스 비교

	Anal. (2차원)	M(0.016 mH)	SIM (mH)
self	34.25	30.86	10.99
mutual	9.07	9.08	-0.11

자기 인덕턴스의 경우 유한요소해석결과와 11% 정도의 차이가 나는데 이것은 전기자 전류에 의한 자계를 계산할 때 전기자 전류의 분포를 직접 고려하지 않고, 자기스킬라퍼텐셜을 계변수로 도입하기 위해 전기자 전류의 분포를 자화분포로 등가화시키면서 오차가 발생한 것으로 판단된다.

2.4 정상상태 특성해석

정상상태 운전시 추력특성을 해석하기 위해 전압방정식으로부터 전기자 전류의 파형을 도출하여 식 (15)와 같은 전기적 출력과 기계적 출력의 관계로부터 추력을 구했다[3]. 정상상태에서는 전동기가 일정한 속도 v 로 운전되고 있다고 가정한다.

$$F = \frac{1}{v} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (15)$$

한 상에 대한 전압방정식은 식 (16)과 같으며 Y-결선 시 각 상전류의 관계는 식 (17)과 같다.

$$v_a = R i_a + \frac{d}{dt} (L i_a + M i_b + M i_c) + e_a \quad (16)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (17)$$

2.4.1 정현파 구동

그림 7과 그림 8은 일정전압의 정현파 구동시 추력과 전류파형을 나타낸 것이다. 그림 6과 같이 슬롯리스형의 전동기는 역기전력이 정현파에 가깝기 때문에 정현파 구동시 추력파들이 거의 발생하지 않는다[3].

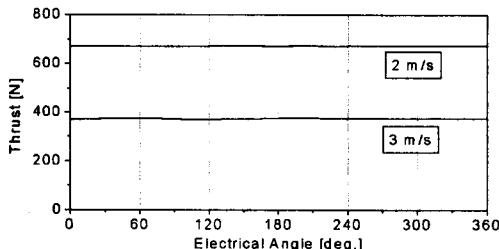


그림 7. 정현파 구동시 추력특성

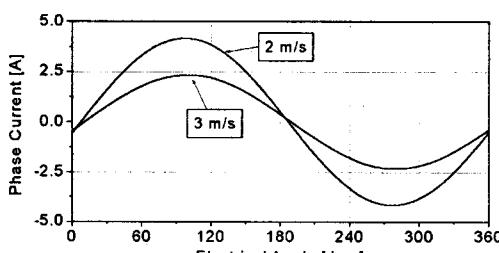


그림 8. 정현파 구동시 상전류파형

2.4.2 구형파 구동

구형파 구동시 정류(commutation)구간에서 3상이 모두 통전되기 때문에 이 구간에서는 각 상의 전류를 모두 구해야 한다. 정류구간에서 각 상의 전류는 다음과 같이 구할 수 있다. c상 전류는 식 (17)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = -\frac{R}{L-M} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \frac{1}{3(L-M)} \begin{bmatrix} 2v_{ac} - v_{bc} - 2e_a + e_b + e_c \\ 2v_{bc} - v_{ac} + e_a - 2e_b + e_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

그림 9에 나타낸 바와 같이 디텐트력이 없음에도 불구하고 역기전력이 정현파 형태이므로 구형파 구동시 큰 토크리플이 발생하게 된다.

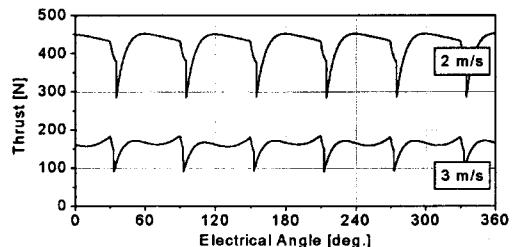


그림 9. 구형파 구동시 추력특성

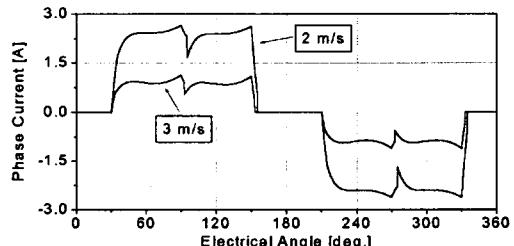


그림 10. 구형파 구동시 상전류파형

3. 결론

본 논문에서는 해석적인 방법으로 영구자석 슬롯리스형 선형 전동기의 공극 자계를 계산하고 이로부터 전동기의 역기전력과 인덕턴스를 산정하여 전압방정식으로부터 정상상태 특성을 해석하였다. 파라미터의 정확도를 평가하기 위해 2차원 유한요소법과 비교한 결과 역기전력은 매우 정확하나 인덕턴스는 11%의 오차가 발생했다. 이것은 전기자 전류에 의한 자계 계산시 전류의 분포를 직접 고려하지 않고 자화분포로 치환하여 계산했기 때문인 것으로 판단된다.

선형전동기는 일정속도로 운전되며 보다는 항상 과도적으로 운전되고 있거나 때문에 운동방정식과 결합된 과도 특성해석에 대한 연구가 앞으로 필요하다.

(참고문헌)

- [1] 이주민, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 자계 및 추력특성 해석", 전기학회논문지, 제50권 6호, 255-262, 2001.
- [2] Z.Q.Zhu, D.Howe, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Permanent Magnet Brushless dc Motors", IEEE Trans. on MAGNETICS, vol.29, no.1, p152-158, 1993.
- [3] T.J.E. Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", MAGNA physics publications - OXFORD science publications, 1994