

# 선형동기전동기의 1차측 슬롯영향을 고려한 특성해석

최거승, 김수철, 한진우, 정군석, 조운현  
 동아대학교

## Characteristic Analysis of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Considering the Slotting Effect of the Primary Core

Geo Seung choi, Su Chel Kim, Jin Woo Han, Koon Seok Chung, Yun Hyun Cho  
 Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University

### ABSTRACT

This paper presents the static characteristics of PMLSM considering the slotting effects of the primary core. To estimate the force ripple, PMLSM is analysed by the theoretical analysis and the F.E.M. The simulation values are compared with experimental ones.

### 1. 서 론

최근 각종 산업기술의 고속화, 고정밀도의 추세에 따라 직선운동을 요구하는 분야가 급증하고 있다. 이에 따라 종래의 회전운동을 주 구동원으로 하는 회전형 전동기에 비하여 선형 전동기의 활용범위가 확대되고 있다. 이것은 직선형 전동기가 별도의 동력 변환 장치 없이 구동부 자체의 직선운동을 이용할 수 있기 때문이다. 선형 동기전동기(PMLSM)는 이러한 직선형 전동기의 한 종류로써, 고 에너지 밀도를 지닌 영구자석을 이용하여 고속, 고추력 운전에 적합하므로 반송시스템을 포함한 공작기계 및 리니어 엘리베이터 등의 응용에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

본 논문에서는 선형 동기전동기의 특성연구의 일환으로 이론적 방법과 유한요소법에 의해 1차측 슬롯을 고려해서 정특성 해석을 하였고 실험적 방법으로 해석의 타당성을 입증하였다.

## 2. PMLSM의 구조와 기본 방정식

### 2.1 PMLSM의 구조

PMLSM은 회전형 동기전동기를 중심축으로 펼쳐놓은 구조로 1차측(이동자)은 슬롯을 낸 강판을 적층하고 슬롯에 코일을 매입한 구조이다. 2차측(고정자)은 회토티 영구자석과 back iron으로 구성되어 있다.

본 연구에서 개발된 PMLSM의 사양은 표 1과 같으며, 3상 4극 12슬롯을 갖는 구조로 되어 있다.

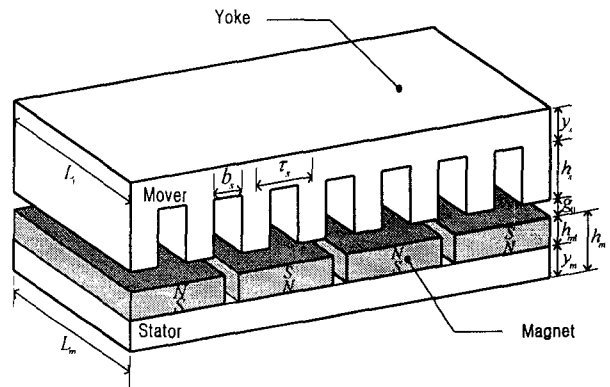


그림 1 PMLSM의 구조

표 1 선형 동기전동기의 제원

구분	제 원		구분	제 원	
1차측	극 수	4	2차측	폭	25[mm]
	슬롯수	12개		(영구 자석)	길이
	적층폭	40[mm]		높이	10[mm]
	길이	120[mm]		공극길이	2[mm]
	매극매상 슬롯수	1		코일지름	0.8[mm]
	턴 수	40			

### 2.2 PMLSM 기본 방정식

PMLSM의 특성 해석을 하기 위한 기본 방정식은 식 (1)과 식 (2)과 같다.

$$V_d = i_d R + \frac{d\lambda_d^{(x)}}{dt} - \omega \lambda_q(x) \quad (1)$$

$$V_q = i_q R + \frac{d\lambda_q^{(x)}}{dt} + \omega \lambda_d(x) \quad (2)$$

여기서

$\lambda_d(x) = L_d(x) i_d + \lambda_f(x)$  :  $d$ 축 쇄교자속

$\lambda_q(x) = L_q(x) i_q$  :  $q$ 축 쇄교자속

$R$  : 이동자 저항

$L_d(x), L_q(x)$  :  $d, q$ 축의 이동자 인덕턴스

$\lambda_f$  : 영구자석에 의한 고정자 권선의 쇄교자속

인덕턴스는 1차측 이동자의 슬롯 영향에 의해 이동 방향  $x$ 축에 의해 변화한다.

LSM에 발생하는 힘은 전류  $i_d, i_q$ 에 의한 전력 식에 의해 구할 수 있으며 식 (3)과 같다.

$$V_d i_d + V_q i_q = i_d^2 R + i_q^2 R + i_d \frac{d\lambda_d(x)}{dt} + i_q \frac{d\lambda_q(x)}{dt} + \omega \lambda_d(x) i_q - \lambda_q(x) i_d \quad (3)$$

식 (3)에서 LSM의 추력을 발생하는 성분은 마지막 항으로써 식 (4)과 같다.

$$F_x(x, i) = \frac{\pi}{\tau} (\lambda_d(x) i_q - \lambda_q(x) i_d) \quad (4)$$

여기서  $F_x$ 는 추력이다.

매개변수  $L_d, L_q$ 는 유한 요소법으로 구할 수 있으며 자기 인덕턴스는 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_a(x) = \frac{\int \int H \cdot dB \cdot dg(x)}{0.5 I^2} \quad (5)$$

여기서  $L_a(x) = L_d(x) = L_q(x)$

식 (5)를 정리하여 풀면 식 (6)과 식 (7)으로 나타낼 수 있다.

$$L_d(x) = 4m \mu_0 \frac{(k_w N)^2}{\pi P g(x)} \tau L_i k_{fd} \quad (6)$$

$$L_q(x) = 4m \mu_0 \frac{(k_w N)^2}{\pi P g(x)} \tau L_i k_{fq} \quad (7)$$

여기서 전기자 반작용 형상계수  $k_{fd} = k_{fq} = 1$  이고

$P$ : 극수

$k_w$ : 권선계수

$m$ : 상수

$N$ : 권선수

$\tau$ : 극 피치

$L_i$ : 1차측 적층길이

또한 LSM에 발생하는 흡입력은 공극에 저장된 에너지에 대한 공극  $g(x)$ 의 변화분으로 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_n(x, i) = i_d \frac{\partial \lambda_d}{\partial g(x)} + i_q \frac{\partial \lambda_q}{\partial g(x)} \quad (8)$$

여기서  $F_n$ 는 흡입력이다.

### 3. 정특성 고찰

#### 3.1 실험장치

본 논문에서는 정특성 해석내용의 타당성을 입증하기 위하여 실험치와 비교하였다.

그림 2는 측정장치의 블록 다이어그램을 나타내며, 그림 3은 본 연구에 개발한 PMLSM과 특성실험 장치를 나타낸다.

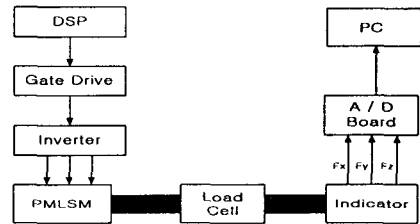


그림 2 측정장치 블록 다이어그램

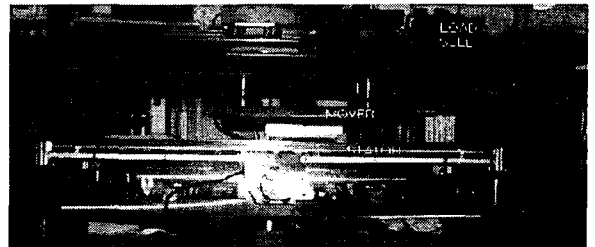


그림 3 실험장치의 사진

#### 3.2 정특성 고찰

그림 4는 이론적 해석방법에서 X축 방향을 따라 1차측(이동자)이 이동했을 때 계산한 공극자속밀도를 곡선을 나타내었다. 그림 4에서 공극길이를 2[mm], 3[mm], 4[mm], 5[mm] 변화 시켰을 때 최대 0.8[T] 최소 0.4[T]로 변화하는 것을 볼수있다. 자속밀도는 1차측 슬롯에 존재하므로 공극이 작아질수록 공간고조파의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

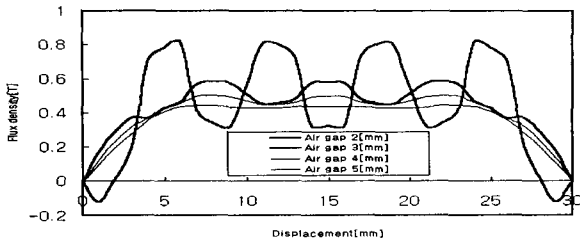


그림 4 공극변화에 따른 자속밀도

그림 5는 이론치와 유한요소법(FEM), 실험치를 비교한 추력곡선을 나타내며, 그림 6은 흡입력을 나타낸다. 공극 2[mm]에서 정특성 시험을 위하여 3상에 해당하는 정전류[2A]를 1차측에 인가하였다. 그림 5의 추력곡선에서 이론치, 유한요소법(FEM), 실험치의 최대치가 각각 91[N], 95[N], 100[N]이다. 모두 차이를 보이는 것은 이론치와 유한요소법(FEM) 해석에 사용되는 B-H특성과 실제 영구자석의 착자상태에 따른 자화특성의 상이함과 제작시 가공오차 등에 의하여 발생한 것으로 추정된다. 또한 그림 5와 그림 6에서 추력과 흡입력이 정현적으로 나타나지 않고 맥동이 큰 이유는 슬롯 영향과 영구자석의 자화분포 및 권선의 기자력 파형에 포함된 고조파 성분과 1차측 치/슬롯 구조에 의한 detent force 등의 영향 때문이다.

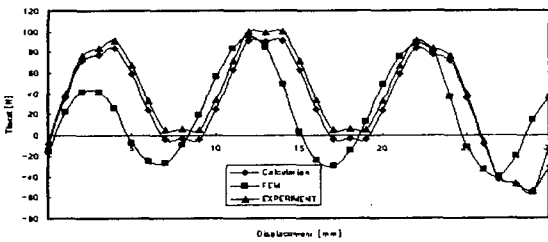


그림 5 추력(Thrust)

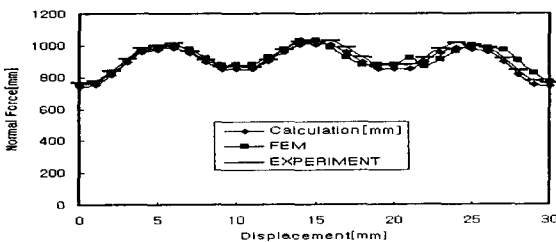


그림 6 흡입력(Normal Force)

그림 7과 그림 8은 전류변화에 따른 추력과 흡입력 곡선을 나타내고 있다. 그림 7에서 전류가 1[A], 2[A], 3[A], 4[A]를 증가시켰을 때, 추력과 흡입력이 전류에 따라 증가함을 알 수 있다.

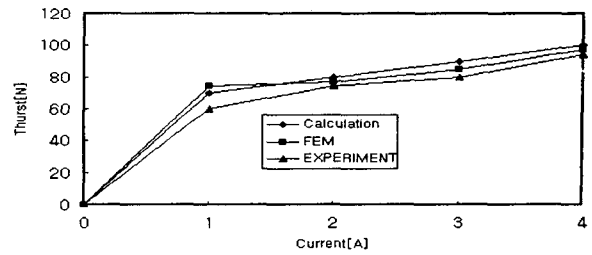


그림 7 전류 변화에 따른 추력(Thrust)

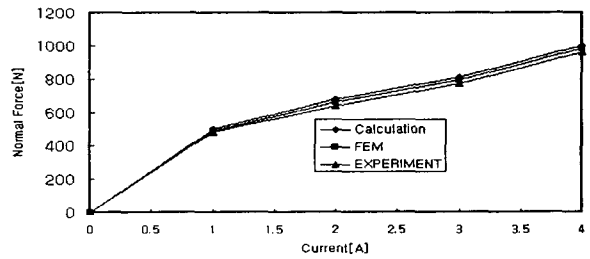


그림 8 전류 변화에 따른 흡입력(Normal Force)

#### 4. 결 론

본 논문에서는 이러한 영구자석형 선형 동기전동기(PMLSM)의 특성 연구의 일환으로 이론적 해석 방법과 유한요소법을 이용하여 1차측 슬롯을 고려한 특성 해석을 수행하였고, 측정치와 비교하였다. 이를 통하여 이론적 해석방법과 유한요소법의 특성 해석을 검증하였으며, 또한 공극이 작아질수록 1차측 슬롯의 고조파 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Jacek F. Gieras and Zbigniew J. Piech, "LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS", CRC Press LLC, 2000.
- [2] Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent - Magnet Motor Design", McGraw-Hill, Inc, 1994. [728-3730.1995]
- [3] E. Favre, L. Cardoletti, and M. Jufer. "Permanent - Magnet Synchronous Motors : A Comprehensive Approach to Cogging Torque Suppression IEEE Transaction on Industry Applications Vol. 29 p. 1141-1149. 1993