

PMLSM과 LRM의 정추력 및 자계특성 비교

장석명 * 윤인기 이성호 윤기갑*
 충남대학교 한국전력연구원*

Comparison of the magntic field and static thrust of PMLSM and LRM

S.M. Jang. * I.K.Yoon. S.H.Lee. k.k.Yoon
 Chungnam Nat'l Univ. KEPCO.

Abstract - This paper deals with characteristic analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM) and Linear Reluctance Motor(LRM). PMLSM and LRM can be classified into the short primary type and the short secondary type according to their structural features. In this paper, select the short secondary. Thrust and lateral force are evaluated by using Finite Element Method(FEM) and experiments. These characteristics of PMLSM and LRM are compared with each other.

PMLSM과 동일하다.

본 논문에서는 두 모델에 있어 단(短)2차축을 채택하였으며, PMLSM의 2차축에 부착되어 있는 영구자석의 폭은 detent force를 최대한으로 줄이기 위하여 영구자석 자극폭/슬롯간격을 4.25로 하여 제작하였다[2]. 또한 LRM의 2차축 형태에 있어서는 back iron이 부착되어 있는 일반적인 모델을 채택하였다.

1. 서 론

영구자석형 리니어 동기모터(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM이라 함)는 리니어 유도모터에 비해 개루프 제어성능이 떨어지고 제조원가가 높다는 단점에도 불구하고, 제작원으로 영구자석을 사용하기 때문에 상대적으로 효율이 높고 추력/중량비가 높아 고추력화 및 고속화가 가능하며 역률이 높다는 장점이 있다[1]. 또한 PMLSM은 추력/전류비가 높고 제어가 용이하며 직접 직선 추력을 발생하므로 최근 들어 고속 지상수단으로서 뿐만 아니라 고층 빌딩용 고속 엘리베이터, 반송 시스템 및 서보 시스템의 구동원으로 많이 연구되고 있다.

반면, 리니어 릴럭턴스 동기모터(Linear Reluctance Motor : 이하 LRM이라 함)는 PMLSM과 마찬가지로 동기모터이지만, 2차축에 영구자석이 존재하지 않기 때문에 제조원가가 저렴하고 2차축과 전기자의 치, 슬롯구조에 의해 발생하는 디텐트력(detent force)이 존재하지 않기 때문에 제어성능이 우수하다는 장점을 지니고 있다[1]. 또한 2차축에 영구자석을 사용하지 않기 때문에 1차축과 2차축 사이에서 발생하는 수직력이 PMLSM에 비하여 작아서 모터를 지지하는데 들어가는 비용을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 형태가 단(短) 2차축인 PMLSM과 LRM 특성식을 각각 확립하였고, FEM을 이용하여 자계특성 및 부하각에 따른 추력특성을 예측하였으며, 이를 해석적인 결과값과 비교하였다. 그리고 두 모터의 특성을 비교·검토하여 응용분야에 따른 적합성을 제시하였다.

2. PMLSM과 LRM의 개요

2.1 제작 및 실험 모델

PMLSM은 그림1에 나타난 것과 같이 회전형 영구자석 전동기를 직선형으로 펼친 형태로 1차축은 치/슬롯 구조를 가지는 철심에 3상권선이 감겨져 있으며, 2차축은 계자 자속원으로서의 영구자석과 자속의 경로를 만들어 주기 위한 back iron으로 구성되어 있다. 한편 리니어 릴럭턴스 동기모터(LRM)의 구조에 있어서 1차축은

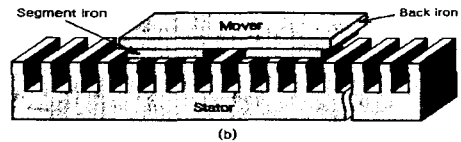
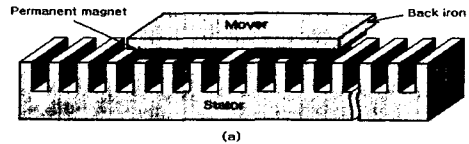


그림 1 제작모델 (a) PMLSM (b) LRM

표 1 PMLSM의 전기자 및 영구자석의 사양

	전기자		전기자
정격전압	220 [V]	상당 권선수	414 [turn]
정격전류	7 [A]	권선저항	1.79[Ω]
극수	6극		영구자석
대상매극수	3	계열	MQ30
슬롯피치	14 [mm]	B_r	1.1[T]
극피치	126 [mm]	보자력	-78 [kOe]
코일직경	1.35 [mm]	자석수	2개

3.1 PMLSM의 특성식

PMLSM의 영구자석에 의한 공극에서의 자속밀도 분포는 1차축에 슬롯이 존재하므로 공간고조파가 포함되어 있다. 따라서 기본과 만을 고려한다면 식(1)과 같이 표현된다.

$$B_p = B_{pm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (1)$$

한편 분포권으로 감긴 전기자 권선에 흐르는 전류에 의하여 발생하는 공극에서의 기자력 분포에서 기본과 만을 고려한다면 식(2)로 표현된다

$$F(x,t) = \frac{1}{2} F_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) \quad (2)$$

여기서 F_m 은 식 (3)으로 표현된다.

$$F_m = \frac{2m_1\sqrt{2}}{\pi p} N_1 I_a k_\omega = \frac{0.9 m_1 N_1 k_\omega}{p} I_a \quad (3)$$

PMLSM의 d, q 축 동기 리액턴스는 식(4)로 표현된다.

$$X_{sd} = X_1 + X_{ad}, \quad X_{sq} = X_1 + X_{aq} \quad (4)$$

여기서 X_1 은 전기자 누설 리액턴스이며, X_{ad}, X_{aq} 는 전기자 반작용 리액턴스이다. 그림 2의 벡터도를 이용하여 추력을 구하면 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$F_{ax} = \frac{m_1}{v_s} \left[\frac{V_1 E_f}{X_{sd}} \sin \delta + \frac{V_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \sin 2\delta \right] \quad (5)$$

2.2 LRM의 특성식

LRM의 d, q 축 동기 리액턴스는 식(6)으로 표현된다.

$$X_d = X_{dm} + X_\sigma, \quad X_q = X_{qm} + X_\sigma \quad (6)$$

여기서 X_{dm}, X_{qm} 는 d, q 축 자화 리액턴스이며, X_σ 는 상당 누설리액턴스이다.

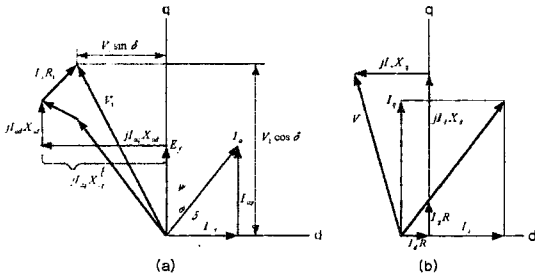


그림 2 PMLSM과 LRM의 벡터도

(a) PMLSM의 벡터도 (b) LRM의 벡터도

그림 1(b)의 LRM의 정상상태 벡터도를 통하여 출력과 추력을 구하면 식(7), (8)로 나타내어진다.

$$P_m = \frac{3}{2} \frac{V^2 (X_d - X_q)}{(X_d X_q)} \cdot \sin 2\delta \quad (7)$$

$$F_x = \frac{\pi P_m}{\tau \omega} \quad (8)$$

3 정특성시험

3.1 FEM을 통한 자계특성 해석

공극 5mm에서의 PMLSM의 정상계 특성시험을 위하여 3상에 해당하는 정전류(5[A])를 1차측에 인가하였다. 그림3, 4는 각각 d, q 축에서의 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 자속밀도계에 의한 측정치와 FEM 해석치를 비교해보면 해석치와 실험치가 약간의 차이를 보이지만 이는 FEM해석에 사용되는 B-H 특성과 실제 영구자석의 착사 상태에 따른 자화특성의 상이함과 제작시 가공오차 등에 의하여 발생한 것으로 추정된다. 그림 3, 4를 비교해 보면 PMLSM의 d, q 축에서의 공극자속밀도 분포는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 1차측에 인가한 전류에 의하여 발생한 자계의 세기가 크지 않기 때문 공극 자속밀도에 큰 영향을 주지 못한다. LRM의 정상계 특성시험에 앞서 PMLSM과 LRM의 정상적 비교를 위하여 공극길이(5mm)와 3상에 해당하는 정전류의 크기(5[A])를 동일하게 놓았다. 그림 4와 5는 d, q 축에서의 LRM의 공극자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 아

래의 그림으로부터 PMLSM의 공극자속밀도가 LRM의 공극자속밀도 보다 약 4.5배정도의 큰값을 갖는 것을 알 수 있다.

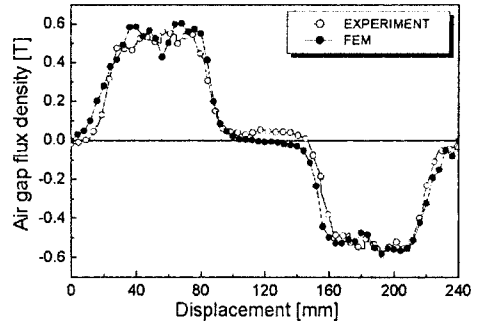


그림 3 PMLSM의 d축 공극자속밀도

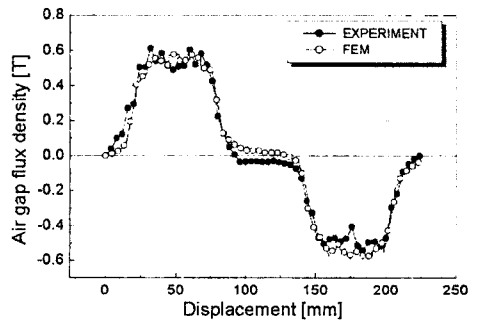


그림 4 PMLSM의 q축 공극자속밀도

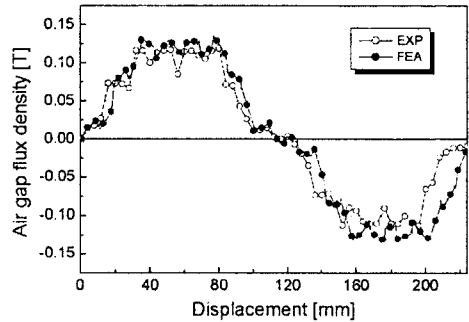


그림 5 LRM의 d축 공극자속밀도

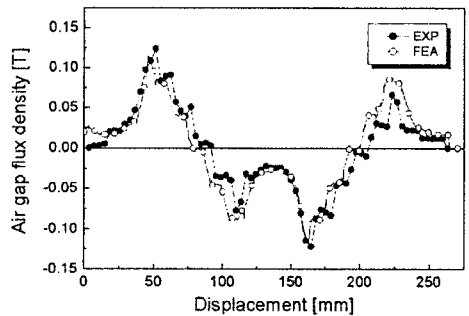


그림 6 LRM의 q축 공극자속밀도

3.2 정추력 및 안내력 시험

그림 7과 8은 PMLSM과 LRM 두 모터의 부하각에 따른 정추력 특성시험 결과와 각각의 특성식을 이용한 정추력 해석 결과 그리고 FEM을 이용한 정추력 해석 결과를 나타내고 있다. 여기서 특성식을 이용한 PMLSM의 정추력 해석에서는 detent force를 고려하지 않았다. 그림 7과 8에서 알 수 있듯이 동일한 입력 전류 하에서 PMLSM의 추력이 LRM에 비해 약 10배 정도가 큼을 알 수 있다. 반면, PMLSM의 경우는 영구자석의 자화분포 및 권선의 기자력 파형에 포함된 고조파성분과 1차축의 치/슬롯 구조에 의한 detent force에 의해 공극자속밀도가 정현적으로 분포하지 않게 된다. 그림 7에서 보듯이 부하각에 따른 추력이 완전한 정현적 특성을 나타내지 못하고 맥동을 포함하게 된다. 따라서 추력 제어에 있어서는 LRM이 PMLSM보다 용이하다는 장점을 갖는다.

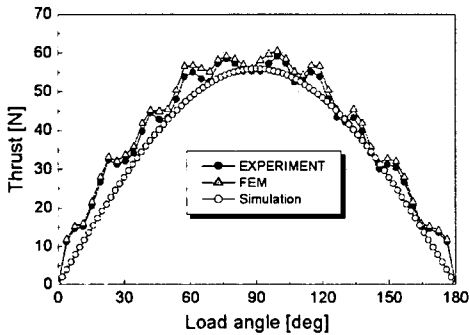


그림 7 PMLSM의 부하각에 따른 추력

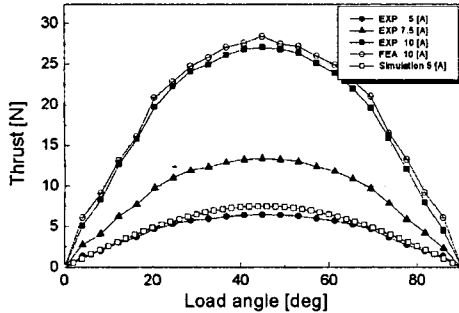


그림 8 LRM의 부하각에 따른 추력

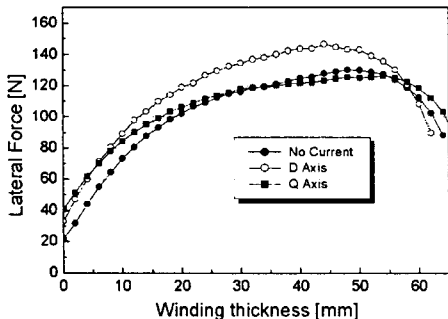


그림 9 PMLSM의 안내력 시험

그림 9와 10은 PMLSM과 LRM의 d,q축에 따른 안

내력을 나타낸 것이다. PMLSM은 d,q축에 따른 안내력의 차이가 LRM보다 작음을 알 수 있다. 이는 PMLSM은 그림3,4에서 알 수 있듯이 d,q축에 따른 공극자속밀도의 차이가 크지 않기 때문이다.

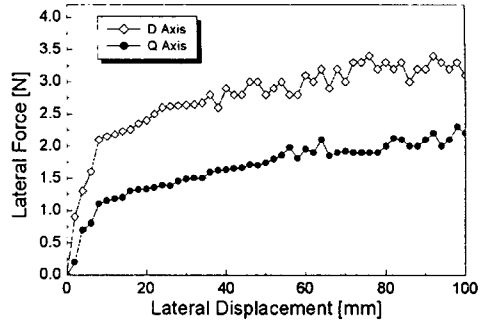


그림 10 LRM의 안내력 시험

4. 결 론

본 논문에서는 FEM을 통하여 PMLSM과 LRM의 자체해석을 수행하였으며 측정치와 비교하였다. 또한 두 모델의 이론적 특성식을 통하여 부하각에 따른 추력을 예측하였으며, 이를 시험치 그리고 FEM을 통한 해석치와 상호 비교하였다. 이를 통하여 고속화 및 고추력화에 있어서는 PMLSM이 LRM 보다 우수하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 LRM이 상대적으로 PMLSM 보다 수직력이 작아 제작에 있어 모터를 지지하는데 소요되는 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 기계적인 공극을 줄일 수 있어 효율을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 추력 특성을 향상시킬 수 있다. 또한 디텐트력이 존재하지 않기 때문에 제어가 보다 용이하다는 것을 알 수 있었다. 이를 통하여 두 모터의 특성을 고려하여 적절한 응용분야에 선택적으로 사용할 수 있음을 알았다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.A.NASAR, I.BOLDEA 'Linear motion electric machines' 1976
- [2] 정인성 '개선된 수치해석 기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석' 2000,2 한양대학교 박사논문
- [3] A.M.EL-ANTABLY 'Lateral forces in linear reluctance motors' 1984
- [4] T.yoshimura, H.J.kim, et al 'Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor' IEEE Trans.Mag. vol.31,pp 3728-3730. 1995.
- [5] Jacek F. Gieras, Zbigniew J.Piech 'LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS' 1999, July