

슬롯리스 선형 동기전동기의 추력 리플 최소화

이주민, 강규홍, 홍정표, 김규탁  
 창원대학교 전기공학과

Thrust Ripples Minimization of the Slotless Linear Synchronous Motor

Ju-Min Lee, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim  
 Dept. of Electrical Engineering Chang-won Univ.

**Abstract** - This study deals with the characteristic analysis of slotless PMLSM based on the analytical method. Slotless PMLSM produces the thrust ripples due to the harmonic component of back-EMF. Therefore, this paper presents the thrust ripple minimization technique, by modifying the pole ratio and the coil width. The results of the proposed method are compared the ones of FEM.

1. 서 론

최근 에너지 밀도가 높은 영구자석 재료의 발달과 더불어 계자코일을 영구자석으로 대체하여 계자전원을 없애고 구조를 단순화시킨 영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : PMLSM)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그 중 슬롯리스 PMLSM은 수직력이 작고 디텐트력이 발생하지 않기 때문에 추력에 대한 리플성분이 미소하여 공장기계, 공장 및 사무자동화 설비 같은 정밀 제어용 시스템에 적용하기 알맞다[1].

특히, 슬롯리스 PMLSM은 전기자에 있어서 치-슬롯 구조를 가지지 않고 있기에 형상이 간단하여 해석적인 기법(analytical method)으로도 특성 해석이 가능하다. 해석적인 방법은 전동기의 형상변화에 따른 모델링 작업이 요구되지 않으므로 다양한 형상에 따른 전동기의 특성 변화를 빠르고 쉽게 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 슬롯리스형 전동기에서는 철심의 포화현상도 거의 나타나지 않기에, 본 방법을 이용한 해석 결과의 신뢰성은 매우 높다. 따라서, 토크 리플 같은 미소한 특성의 해석이나 형상 변화에 따른 최적 설계 과정에 도입하면 시간 및 노력에 있어서 많은 이점을 확보할 수 있다.

본 논문에서는 해석적인 방법을 적용하여 슬롯리스 PMLSM의 추력 및 역기전력 특성을 해석하였고, 자극 및 전기자 코일의 형상 변화에 따른 역기전력의 고조파 성분을 저감시킴으로서 정상상태 운전 시 추력에 대한 리플성분을 최소화하였다. 그 결과는 수치해석기법인 유한요소법(Finite Element Method : FEM)으로서 비교 분석하였다.

2. 해석 모델

본 연구에 적용된 슬롯리스 PMLSM은 영구자석이 이동하는 방식으로 극수는 4극, 전기자 코일은 30개로 구성되어 있다. 영구자석 대 코일면의 비는 2:3이고, 전기자 권선은 3상 집중권으로 하였다. 자극의 형상은 이동자 철심의 자기적 포화를 방지하고, 철심의 중량을 줄일 수 있도록 5개의 자석으로 배치하였다. 이는 크기가 같은 4개의 자석을 사용할 때보다 이동자 철심 두께를 약 2배정도 작게 가져갈 수 있다. 슬롯리스 PMLSM의 초기 설계 결과는 표 1에 나타내었다.

표 1. 슬롯리스 PMLSM의 초기 설계 결과

Item	Value	
잔류자속밀도	1.2 [T]	
자극비	0.7	
영구자석	극 피치	57 [mm]
	자화방향 두께	12 [mm]
	영구자석 길이	75 [mm]
전기자 코일	도체 직경	0.4 [mm]
	코일 수	30 [개]
	코일당 턴수	650 [턴]
	코일 높이	11 [mm]
	코일 폭	12 [mm]
코일 피치	38 [mm]	
기계적 공극의 길이	2 [mm]	
이동자 철심의 두께	10 [mm]	
전기자 철심의 두께	7.5 [mm]	

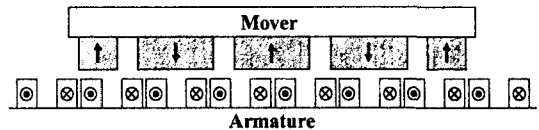


그림 1. 슬롯리스 PMLSM의 형상

3. 해석 이론

해석적인 방법을 적용하기 위한 슬롯리스 PMLSM의 기본 모델은 그림 2와 같다. 여기서 전동기는 x축 방향으로 주기성을 가지고 무한히 분포하며, 철심의 투자율은 무한대이고, 영구자석은 y축 방향으로 균일하게 자화되었다고 가정하였다. 또한 해석 모델이 z축 방향으로로는 변화가 없다고 하면 슬롯리스 PMLSM 모델은 주기성을 갖는 2차원 문제로 근사화할 수 있다[2].

제시된 모델의 일반해는 각각의 분할된 해석 영역에서 자기스칼라포텐셜  $\phi$ 를 계변수로 하는 맥스웰 방정식(Maxwell's equation)을 이용하여 미분방정식 형태의 지배방정식을 유도하고 이에 대하여 각 영역의 경계에서 경계조건을 적용함으로써 구할 수 있다.

3.1 공극 자계 해석

공극 자속밀도는 영구자석과 코일 전류에 의한 자화 분포(magnetization distribution)를 이용하여 계산하였는데, 자화 소스의 존재 유무에 따른 각 영역에서의 지배방정식은 다음과 같다.

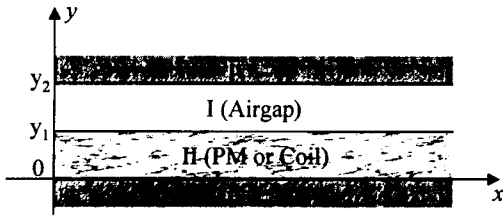


그림 2. 2차원 해석 모델

$$\nabla^2 \varphi_I = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi_{II} = \frac{\nabla \cdot \vec{M}}{\mu_r} \quad (2)$$

식 (1)은 소스가 존재하지 않는 공기 영역, 식 (2)는 영구자석이나 전류 소스가 존재하는 영역에서의 지배방정식이다.  $\vec{M}$ 은 자화벡터,  $\mu_r$ 은 재료의 비투자율을 의미하며, 자화벡터의  $y$ 축 성분은 다음과 같이 푸리에급수 전개를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$M_y = \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(k_n x), \quad k_n = n \frac{\pi}{\tau} \quad (3)$$

여기서,  $M_n$ 은 푸리에계수,  $\tau$ 는 자극 피치를 의미한다. 한편, 그림 2의 공기 영역(II)에서 자속밀도를 계산하는 식은 다음과 같다[3].

$$B_x = \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \sinh(k_n(y-y_2)) \sin(k_n x) \quad (4)$$

$$B_y = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n k_n \cosh(k_n(y-y_2)) \cos(k_n x) \quad (5)$$

여기서, 계수  $\beta_n$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_n = \frac{\mu_0 M_n \sinh(k_n y_1)}{\xi_n} \quad (6)$$

$$\xi_n = \mu \cosh(k_n y_1) \sinh(k_n(y_1 - y_2)) - \mu_0 \cosh(k_n(y_1 - y_2)) \sinh(k_n y_1)$$

### 3.1.1 영구자석에 의한 자계

영구자석의 자화 분포는 식 (3)을 이용하여 표현할 수 있으며, 균일하게 자화된 영구자석일 때 푸리에계수는 다음과 같이 전개된다.

$$M_n = \frac{4 M_{pm}}{n \pi} \sin\left(n \frac{\alpha_b}{2}\right), \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (7)$$

여기서,  $M_{pm} = B_r / \mu_0$ 은 영구자석의 자화량,  $B_r$ 은 잔류자속밀도,  $\mu_0$ 은 공기의 투자율,  $\alpha_b$ 는 자극비를 의미한다. 식 (7)의 푸리에계수를 식 (4), (5), (6)의 자속밀도 계산식에 대입하여 영구자석에 의한 공극의 자속밀도 분포를 구할 수 있다.

### 3.1.2 코일 전류에 의한 자계

전기자 권선에 전류가 흐르면 그 전류에 의해 자계가 유기된다. 이 자계를 코일 영역에서의 가상의 자화량  $M_{\infty}$ 로 치환하면 1상의 전기자 전류에 의한 자화 분포는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다[4]. 이 자화 분포로부터 식 (3)에서의 푸리에계수를 구하면 다음과 같다.

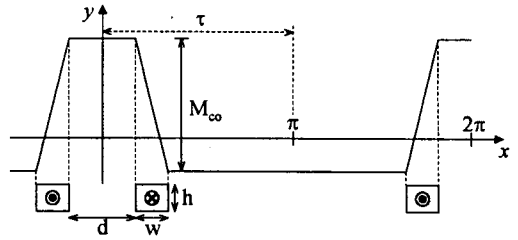


그림 3. 코일 전류에 의한 자화 분포

$$M_n = \frac{4 M_{\infty} k_n}{n^2 \pi \omega} \sin\left(k_n \frac{d+\omega}{2}\right) \sin\left(k_n \frac{\omega}{2}\right) \quad (8)$$

여기서,  $M_{\infty} = J \times w$ 는 코일 전류에 의한 가상의 자화량,  $J$ 는 전류밀도,  $\omega$ 는 코일변의 폭,  $d$ 는 코일 간 거리를 의미한다. 공극 자속밀도는 영구자석에서와 마찬가지로 식 (4), (5), (6)을 이용하여 계산할 수 있다.

### 3.2 특성 해석

영구자석에 의한 자계와 전기자 전류에 의한 자계를 중첩시키면 공극의 합성 자속밀도를 계산할 수 있다. 나아가 공극의 자속밀도로부터 기기의 추력과 역기전력 특성을 예측할 수 있다. 먼저 PMLSM의 발생력은 맥스웰 응력법(Maxwell stress tensor)으로 구할 수 있다.

$$F_x = \frac{h}{\mu_0} \int (B_x B_y) dx \quad (9)$$

여기서,  $F_x$ 는 발생 추력,  $h$ 는 해석 모델의  $z$ 축 방향 길이이다. 또한, 역기전력은 영구자석이 이동할 때 전기자 권선에 채교되는 자속량으로부터 구할 수 있다.

### 4. 해석 결과

표 1의 주어진 기본 사양에서 자극비와 코일 폭을 변화시키면 PMLSM의 추력 및 역기전력 특성은 상이하게 나타난다. 예를 들어 자극비를 크게 가져가면 전체적인 발생 추력은 증가하지만, 역기전력에 있어서 고조파 성분을 많이 함유하게 되어 추력 리플은 더욱 증가하게 된다. 그러므로 PMLSM의 자극비와 코일 폭을 조정하여 리플성분은 최소화시키면서, 발생 추력도 손해를 보지 않는 모델을 선정하여야 한다.

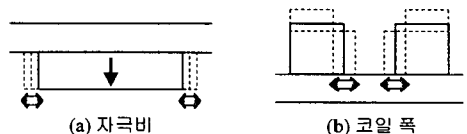


그림 4. 자극비와 코일 폭의 변화

### 4.1 발생 추력과 역기전력

그림 5와 6은 자극비를 변화시킬 때 부하각에 따른 발생 추력과 역기전력을 나타낸 것이다. 자극비를 키울수록 추력의 크기도 같이 증가함을 알 수 있다. 역기전력도 영구자석의 자극비 변화에 따라 민감하게 변화하는 데, 대략 0.65 부근이 가장 정형적임을 확인할 수 있다. 따라서, 최적 형상을 구하기 위해 자극비를 0.6~0.7, 코일 폭을 1.0~1.6[mm]으로 변화시키면서 추력 및 역기전력을 계산하였다.

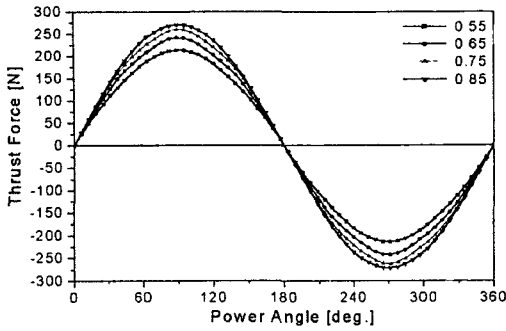


그림 5. 부하각에 따른 추력 특성

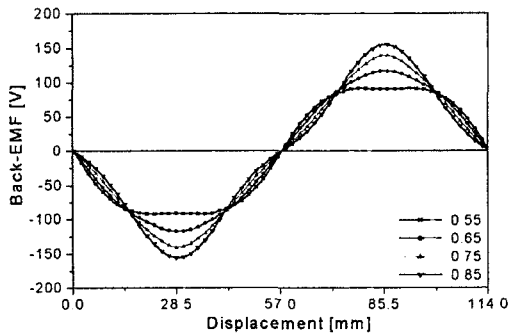


그림 6. 자극비 변화에 따른 역기전력

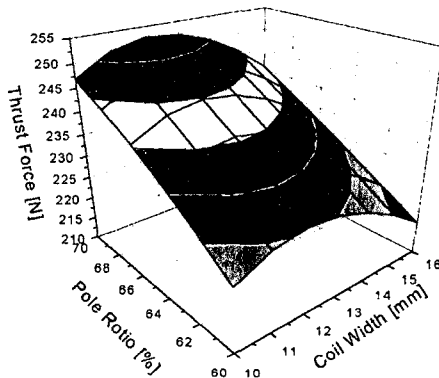


그림 7. 발생 추력의 최대값 분포

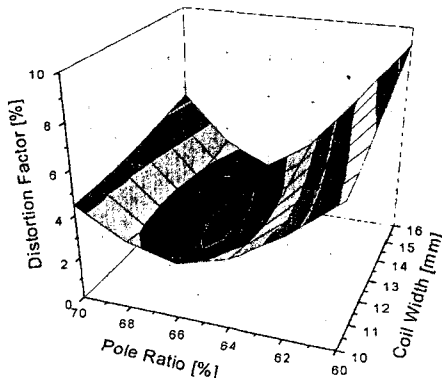


그림 8. 역기전력의 고조파 해석 결과

그림 8은 역기전력의 고조파 해석 결과로써, 역기전력이 가장 정현파에 가까운 형상은 자극비 0.66, 코일 폭 13(mm)로 초기 설계치와 다르게 나타났다. 이때 고조파 성분에 의한 왜형률은 1.4648[%]로 최소의 값을 가지고 발생 추력의 최대값은 243.38[N]이다.

#### 4.2 정상상태 추력 특성

그림 9는 제안 모델에서 해석적인 방법으로 구한 역기전력을 이용하여 부하각 60도 일 때 계산한 추력 특성이다. 평균 추력에 대한 리플 성분은 2.6474[%]로 매우 작은 값으로 나타났다. FEM 해석 결과는 영구자석을 이동하면서 1차측 전류위상에 동기시켜 계산한 정상상태 추력 특성을 의미한다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 해석적인 기법으로 슬롯리스 PMLSM의 특성 해석을 수행하여 정상상태 운전 시 추력 리플이 거의 없는 안정된 모델을 제시하였다. 본 특성 해석에 적용된 방법은 FEM과 비교하여 계산 시간과 노력에 대한 비용이 단축됨은 물론 슬롯리스 전동기 해석 시 그 결과의 신뢰성 또한 매우 높음을 확인할 수 있었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Linear Synchronous Motors, CRC Press, 2000
- [2] 임기채, 홍정표, 김규탁, "공간고조파법을 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 슬롯을 고려한 정특성 해석", 전기학회 논문지, 제48권, 4호, pp.145-151, 1999
- [3] S.L. Ho, et. al, "Two-Dimensional Analytical Method to Predict the Electro-Magnetic Field of Disc-Type Permanent Magnet Machines", Electric Machines & Power Systems, Vol.26, No.6, pp.649-658, 1998
- [4] 임달호, 김학련, "등가자기회로방법에 의한 자계해석에 관한 연구", 전기학회 논문지, 제42권, 8호, pp.14-21, 1993

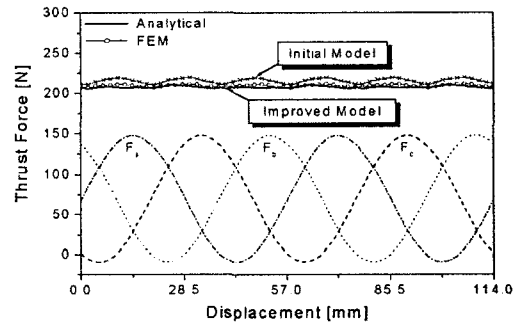


그림 9. 정상상태 운전 시 발생 추력

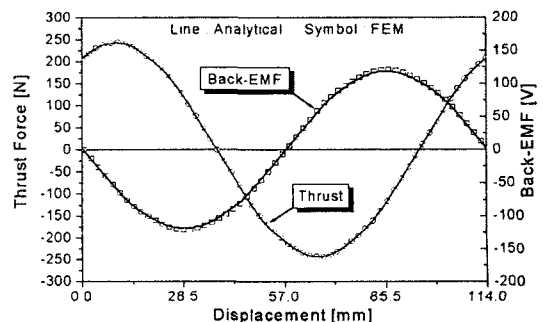


그림 10. 제안 모델의 추력과 역기전력 특성