

슬롯영향이 고려된 공간고조파법에 의한 PMLSM의 출력 최대화 설계

이 동 업\*, 주 건 배, 황 예, 김 규 탁  
 창원대학교 전기공학과

The Maximum Thrust Design of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor  
 Using Surface Harmonic Method considering slot effect

Dong-Yeup Lee\*, Jian-Pei Zhou, Rui Huang, Gyu-Tak Kim  
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ.

**Abstract** - This paper is proposed maximum thrust design of slotted Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM) using surface harmonic method considering slot effect. The genetic algorithm is used for optimization. The objective functions are the maximum thrust and the minimum detent force. This time, design parameters are set as PM width, PM height and slot width.

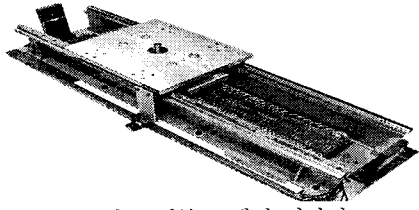


그림 1 기본 모델의 시작기

1. 서 론

영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : PMLSM)는 직접 직선 추력을 발생하므로 제어 성능이 우수하며, 고속, 고효율이 가능하다는 장점이 있으나, 전기자에 치, 슬롯 구조를 가지므로 공극에서의 슬롯 고조파에 의해 디텐트력이 발생하게 된다. 이러한 디텐트력은 전동기의 추력 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어성능을 악화시킨다. 디텐트력의 저감 방법으로는, 자극폭 조절법, 치폭의 변화법, 스류를 주는 방법등을 들 수 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 아직 체계적인 연구는 미흡한 실정이다.

전기기기를 해석하는 방법에는 유한 요소법과 같은 수치해석적 방법과 공간고조파법과 같은 해석적 방법이 있다. 수치해석적 방법의 경우, 복잡한 형상을 그대로 모델링 할 수 있으며, 재료의 비선형성에 대한 고려가 가능하나, 해석 모델의 치수 변화에 따라 전처리, 수치 계산 및 후처리 작업을 반복해야 하는 번거로움이 있다. 이에 반해 해석적 방법의 경우, 복잡한 형상과 재료의 비선형성을 고려하기가 어렵다는 단점이 있으나, 수치해석적 방법에 비해 해석시간이 빠르며, 설계변수의 변화에 따른 특성 파악이 매우 용이하다는 장점이 있다. 특히 PMLSM에서는, 전기자의 형상이 간단하고, 철심의 포화 현상도 거의 나타나지 않으므로 공간고조파법을 이용하더라도 유한요소 해석 결과와 큰 차이가 없는 정확한 결과를 얻을 수 있다[1][2].

따라서, 본 논문에서는 슬롯의 영향을 고려한 2차원 공간고조파법을 이용하여 슬롯형 PMLSM의 특성해석을 수행하였고 이의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소법과 비교하였다. 최적화 기법으로 유전 알고리즘을 사용하였다. 설계 변수로는 영구자석의 폭, 영구자석의 두께, 슬롯의 폭을 두어 각각의 변수 변화에 따른 추력 및 디텐트 특성을 해석하여 최적의 출력을 갖는 전동기의 설계 치수를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1과 표1은 각각 슬롯형 PMLSM의 시작기와 시작기의 설계 사양을 보여준다.

표 1 시작기의 설계 사양

	가동자 사양(단위:mm)		고정자 사양(단위:mm)		
	재 질	Nd-Fe-B	치 폭		
영구자석	마그네트 폭(w)	55	슬롯 폭	5	
	길이(l)	80		슬롯 폭	6.5
	높이(h)	10		슬롯 높이	18
요 크	극간격(t)	69	요크 두께	22	
	두께	20	축방향 길이	78	
	폭	276			
	길이	80			
기계적 공극			5		

2.2 2차원 공간고조파 해석

본 논문에서는 슬롯형 PMLSM의 초기 설계변수의 변화에 따른 특성해석을 행하기 위하여 슬롯효과를 고려한 공간고조파법을 수행하였다.

2.2.1 해석상의 가정

공간고조파법으로부터 자기해석을 위하여 다음과 같은 가정을 두었으며 공극 자속밀도 특성은 영구자석만 존재할때의 공극 자속과 전기자 전류만 여자하였을 때의 공극 자속을 각각 계산하여 중첩하여 해석하였다.

- ① 모든 해석영역은  $\pm x$  방향으로 무한하며 주기성을 가짐
- ② 영구자석은  $\pm y$  방향으로만 자화되어 있으며,  $\pm x$  방향으로 주기적으로 분포
- ③ 철심의 투자율은 무한대이며 자기포화현상은 무시
- ④ 슬롯구조의 1차측 철심은 카터계수를 도입하여 평할한 철심으로 보정
- ⑤ 자기벡터포텐셜  $A$ 는  $z$  방향으로 일정한 값을 가짐

2.2.2 영구자석에 의한 자기

그림 2는 그림 1의 슬롯구조를 가진 1차측 철심을 카터계수로 보정하여 평할철심(코어)으로 본 해석모델로 영구자석이  $\pm x$  방향으로 주기적으로 배치되어 있고 철심, 공기, 및 영구자석으로 구성된 세부 영역으로 나누어져 있다. 여기서, 주기적으로 배치된 영구자석은 자석 양

쪽 끝에서 미소한 두께  $\delta$ 를 가지는 등가자화전류로 나타낼 수 있다.

$$K_{cm} = \frac{1}{\mu_0} [\nabla \times (B_{t,III}^p - B_{t,IV}^a)]^y = g_e \cdot \delta$$

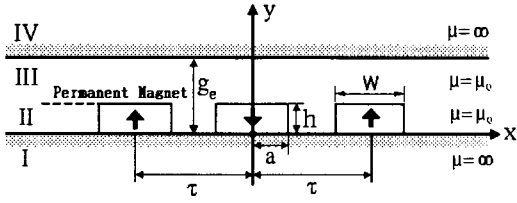


그림 2. 영구자석에 의한 자계 해석모델

각 영역의 지배방정식을 자기벡터포텐셜  $A$ 를 계변수로 하는 식으로 나타내어 미분 방정식의 일반해를 구하여 각 영역의 지배방정식에 대입하고 각 영역 경계에서 자기벡터포텐셜의 연속조건과 자계강도의 접선성분과 자속밀도의 법선 성분에 대한 경계조건을 적용하여 미정계수를 결정하면  $A$ 를 구할 수 있다.

따라서,  $\nabla \times A = B$ 의 관계로부터 자속 밀도를 구할 수 있다.

### 2.2.3 1차측 전류에 의한 자계

1차측 전류에 의한 자계를 고려하기 위해 1차측 철심을 평활하다고 보면 1차측 전류는 각 슬롯 영역에서 폭이  $w_s$ 이고 두께가  $\delta$ 로 매우 얇은 면전류의 형태로 존재한다고 가정할 수 있다. 1차측 전류도체에 의한 자속밀도의 일반해는 영구자석에 적용한 동일한 방법으로 쉽게 얻을 수 있다. 3상 권선을 행하면 A상을 기준으로 각 상의 공간적인 위상은 슬롯피치  $\tau_s$ 의 배수로서 각 상모두가 표현되며 시간적인 위상은 B, C상이 전기각으로  $2/3\pi$ ,  $4/3\pi$ 의 위상차를 가지게 표현하면 된다.

### 2.2.4 슬롯의 영향에 의한 자계

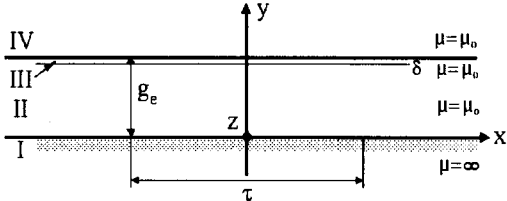


그림 3. 평활철심 표면의 등가자화전류 모델

슬롯의 영향을 고려하기 위해 1차측을 평활철심으로 본 경우 평활철심 표면에서의 등가자화전류를 산정하고 이를 바탕으로 철심표면의 슬롯영역에서 영구자석에 의한 자속을 상쇄시킬 수 있는 자속을 만드는 가상의 등가자화전류가 존재한다는 가정을 하고 이를 계산하였다. 그림 3은 평활철심에 의한 등가자화전류 모델을 보여주고 있다. 먼저, 코어와 같이 비투자율이 공기보다 큰 매질이 자계내에 있을 경우 그 매질의 자화의 세기  $M$ 은 등가자화전류로 치환될 수 있으므로 1차측 철심표면에 영구자석의 자계에 의한 자화의 세기  $M$ 이 존재함을 생각할 수 있다. 한편, 철심의 투자율이 무한대로 가정하였으므로 영역 IV는 철심표면에서의 등가자화전류로 치환이 가능하며 이는 영역 IV가 공기와 철심인 각각의 경우에 대하여 영구자석의 영향에 의한 자계를 계산하고 철심표면에서 두 자계에 의한 자화의 세기  $M$ 의 변화량을 구하는 것과 같다. 따라서, 카터계수로 등가화된 철심표면에 다음 식의 표면전류 밀도  $K_{cm}$ 을 분포시키면 영역 IV를 공기로 치환할 수 있다.

여기서,  $B_{t,III}^p$ 는 각각 1차측을 평활철심으로 본 경우의 영역 III에서의 자속밀도의 접선성분이다. 각 영역의 자기벡터포텐셜을 구해 영역 III의 자속밀도를 구할 수 있다.

슬롯의 영향은 평활철심 표면의 등가자화전류에 의한 자속을 슬롯영역에서 상쇄시킬 수 있는 자속을 만드는 가상의 등가자화전류가 그림 4의 슬롯영역에 분포되어 있다고 보고 이를 계산함으로써 고려될 수 있다.

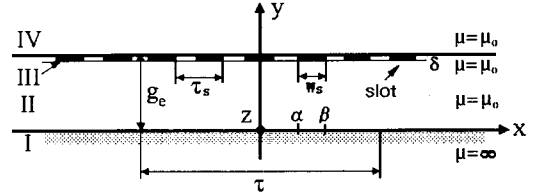


그림 4. 슬롯의 가상등가자화전류 모델

슬롯부분의 가상등가자화전류에 의한 자속의 크기는 1차측 철심표면의 가상등가자화전류에 의한 자속과 같고 방향은 반대로 슬롯이  $\alpha$ 에서  $\beta$ 사이 에 있을 때 다음 식으로 표현된다.

$$\Phi_{slot} = -\Phi_{cm} \quad (\alpha < x < \beta)$$

여기서,  $\Phi_{slot}$ 은 슬롯부분의 가상등가자화전류에 의한 자속이고,  $\Phi_{cm}$ 은 철심표면의 등가자화전류에 의한 자속이다.

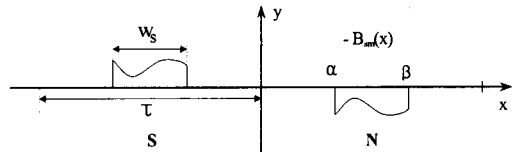


그림 5. 슬롯영역에서의 임의 자속밀도분포

슬롯영역에서의 자속은 평활철심 표면의 등가자화전류에 의한 자속밀도의  $y$ 성분에 대한  $x$ ,  $z$ 방향의 적분으로 슬롯영역의 가상등가자화전류에 의한 자속밀도 분포를 구할 수 있다. 하지만, 평활철심 표면에서의 영구자석에 의한 자계의 영향을 받으므로 각 슬롯마다 동일한 분포를 가지지 못한다. 따라서, 한 극간격  $\tau$ 만큼 떨어진 슬롯들 사이의 자속밀도 분포는 그림 5와 같이 반파 대칭의 구조를 가지게 된다. 이를 푸리에 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$B_{sm}(x) = \sum_{n=1,3}^{\infty} \sum_{m=1,3}^{\infty} [a_m \cdot \cos(mkx) + b_m \cdot \sin(mkx)]$$

단,  $a_m$ 과  $b_m$ 은 슬롯의 위치를 나타내는  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 의한 함수로 표현된다.

슬롯영역의 자속밀도분포에 의해 슬롯영역에 존재하는 가상등가자화전류는 표면전류밀도  $K_{sm}$ 에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_{sm} = \frac{K_{sm}}{\delta} = \frac{1}{\delta \mu_0} \nabla \times \mathbf{B}_{sm}$$

$$= \sum_{n=1,3}^{\infty} \sum_{m=1,3}^{\infty} [a_{nm} \cos(mkx) + b_{nm} \sin(mkx)]$$

단,  $a_{nm} = \frac{mk b_m}{\mu_0 \delta}$ ,  $b_{nm} = \frac{-mk a_m}{\mu_0 \delta}$  이다.

따라서, 슬롯부분의 가상 등가회전류의 분포에 의한 각 영역에서의 자속밀도는 영구자석의 경우와 마찬가지로 각 영역에 대한 지배방정식과 경계조건을 적용하여 동일하게 구할 수 있다.

### 2.3 유전 알고리즘을 이용한 최적화

본 논문에서는 유전알고리즘을 이용하여 슬롯형 PMLSM의 출력을 최대화하는 최적화를 적용하였다. 이때의 설계변수 및 제약조건을 표 2에 나타내었다.

그림 6과 7은 각각 유전 알고리즘을 이용한 최적화 과정과 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

표 2 설계 변수 및 제약조건 및 목적함수

설계 변수	변수 범위
영구자석 폭	$55 \leq x_1 \leq 67$ [mm]
영구자석 두께	$8 \leq x_2 \leq 12$ [mm]
슬롯의 폭	$3.5 \leq x_3 \leq 8.5$ [mm]
제약조건	$270[N] \leq$ 추력
목적 함수	디텐트력 최소화

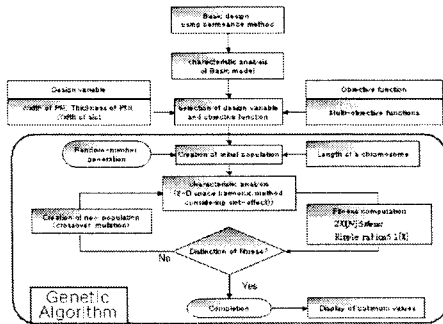


그림 6. 최적화를 위한 흐름도

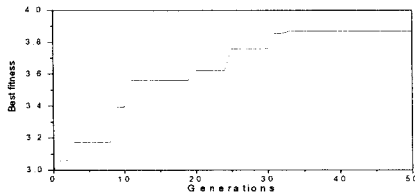


그림 7. 시뮬레이션 결과

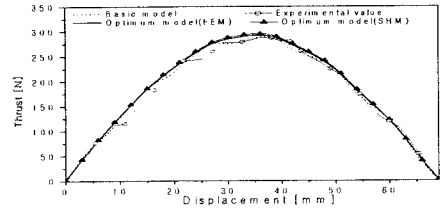
유전 알고리즘을 이용한 최적화 결과 최적 모델의 사양은 영구자석의 폭 61.2[mm], 영구자석의 두께 10.1[mm], 슬롯 폭 5.4[mm]이다.

### 2.4 특성 비교

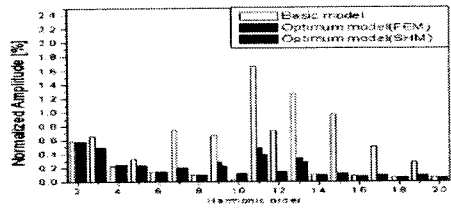
그림 8은 기본 모델과 최적 모델의 추력과 추력의 고조파 분석, 디텐트력의 특성을 나타내고 있다. 추력의 최대치는 기본모델인 경우 270[N]정도이나 최적 모델인 경우 295[N]로 크게 증가하였다. 디텐트력은 50[N]에서 2.7[N]으로 대폭 감소하여 추력의 고조파 성분은

3.43[%]에서 1.35[%]로 크게 감소하였다.

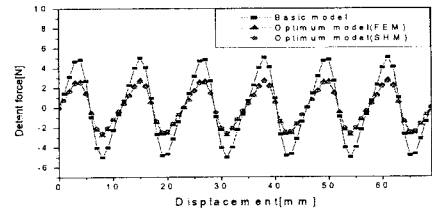
그림 9는 초기 모델과 최적 모델의 부하각 60[deg.]에서 정상상태 운전시의 추력을 나타낸 것으로 추력 리플이 거의 없음을 확인할 수 있다.



(a) 추력



(b) 추력의 고조파 분석



(c) 디텐트력

그림 8. 특성해석 결과

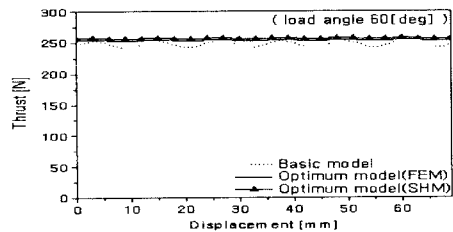


그림 9. 정상상태 운전 특성

## 3. 결론

본 논문에서는 슬롯형 PMLSM의 자계 및 특성해석을 슬롯 영향을 고려한 공간 고조파법으로 수행하였고 최적화 기법으로 유전 알고리즘을 사용하였다. 최적화 결과 추력은 270[N]에서 295[N]으로 증가하였고, 디텐트력은 50[N]에서 2.7[N]으로 대폭 감소하였다. 유전알고리즘을 이용한 최적화 방법으로 해석 시간을 단축시킬 수 있었다.

### [참고 문헌]

- [1] 임거재, "수치해석법을 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 특성해석 및 제어기 구현", 국립창원대학교박사학위논문, 2000
- [2] Ki-Chae Lim, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "The Novel Technique Considering Slot Effect by Equivalent Magnetizing Current", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 3691-3693, 1999.