

## 영구자석 형상 최적화를 통한 Moving Magnet type PMLSM의 성능 향상

윤강준, 이동엽, 정춘길, 김규탁  
 창원대학교 전기공학과

### The Improvement of Performance for Moving Magnet type PMLSM by Permanent magnet Shape Optimization

Yoon Kang-jun, Lee Dong-yeup, Jung Chun-gil, Kim Gyu-tag  
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won National Univ.

**Abstract** - In this paper, optimum shape design of permanent magnet in slotted type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM) is progressed for minimization of detent force owing to structure of slot-teeth and thrust ripple by harmonic magnetic flux of permanent magnet. The characteristics of thrust and detent force computed by Finite element Analysis are acquired equal effect both skewed basic model and optimum model which is optimization of permanent magnet shape.

성분 자속에 의한 디텐트력만 추력 리플로 존재하게 되므로 이에 대한 저감 대책이 요구된다.

#### 1. 서 론

최근 영구자석형 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor: PMLSM)는 효율이 높고 추력/중량비가 높아 고추력화 및 고속화가 가능하다는 장점이 있어 각종 FA기기, OA기기 등의 구동원으로 널리 이용되고 있다.

PMLSM은 영구자석형 회전기에서의 코깅 토크와 같이 영구자석과 치-슬롯의 상대적인 위치 변화 때문에 디텐트력이 발생하게 된다. 디텐트력은 구동 시 기기의 추력 맥동으로 작용하여 소음 진동을 유발할 뿐 아니라 제어 성능을 저하시킨다. 따라서, 고속 정밀 제어가 요구되는 분야에서는 디텐트력의 영향을 최소화하는 설계가 반드시 필요하다.

PMLSM의 추력 리플은 크게 슬롯 - 치 구조 및 단부 효과에 의한 디텐트력 및 영구자석의 고조파 자속에 의하여 발생한다. 그 중, moving magnet type PMLSM에서는 단부효과에 의한 디텐트력은 무시할 수 있다. 슬롯 - 치 구조에 의한 detent force 및 영구자석의 고조파 자속을 최소화 시키는 방법으로는 다양한 방법이 제안되었으나, PMLSM에서는 기존 제안한 방법들이 효율적이라고 하기에는 무리가 있는 것 또한 사실이다.

따라서, 본 논문에서는 PMLSM의 치 - 슬롯 구조에 의한 디텐트력 저감 및 영구자석의 고조파 자속에 의한 추력 리플을 최소화 시키기 위하여 영구자석 폭 변화 및 영구자석의 Edge부를 컷팅하는 방법을 사용하여 신경회로망을 이용하여 최적화 설계를 진행하였다.

#### 2. Moving Magnet Type PMLSM

표 1에 본 연구에서 적용한 PMLSM의 기본 설계 치수와 전기적 사양 및 설계 파라미터 표시하였고, 그림 1에서는 PMLSM의 자속 분포도를 나타내었다.

영구자석이 이동하는 단 2차형 구조에서는 가동자의 단부에서의 누설자속이 거의 발생하지 않아 단부효과에 의한 추력 리플은 나타나지 않는다. 이것은 영구자석이 이동하는 단 2차형 구조에서만 나타나는 현상으로 가동자의 단부쪽으로 영구자석의 자속 경로가 형성되지 않기 때문이다. 따라서, 치 - 슬롯 구조 및 영구자석의 고조파

표 1. 시작기의 제한

	Item	Symbol	value [unit]
stator	Pole pitch	$\tau$	69.0 [mm]
	Slot pitch	$\tau_s$	11.5 [mm]
	Slot width	$w_s$	6.5 [mm]
	Rated Current	I	2.7 [A]
Mover (PM)	Slot/pole/phase	Q	2
	Height	H	10 [mm]
	Width	$W_{pm}$	Variable
	Material		Nd-Fe-B
	Residual induction	$B_r$	1.2 [T]
	Mechanical airgap	$g_m$	5.0 [mm]
	Rated thrust	F	250 [N]

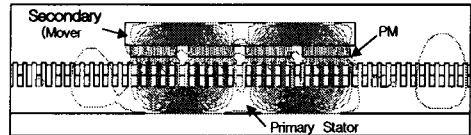


그림 1 PMLSM의 등포텐셜도

PMLSM의 디텐트력은 영구자석의 폭과 고정자 슬롯 피치에 의존하여 크게 변화한다. 따라서, 일정한 슬롯피치에 대하여 영구자석 폭을 적절히 조절함으로써 디텐트력을 효과적으로 제거시킬 수 있다.

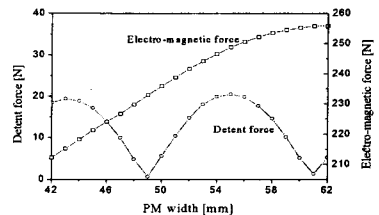


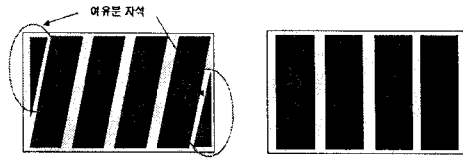
그림 2 영구자석 폭에 따른 전자기력 및 디텐트력 변화

영구자석 폭은 42[mm]에서 62 [mm]까지 변화 시키면서 디텐트력과 전자기력의 변화를 고찰하여 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 디텐트력이 0이 되는 영구자석 폭은 48.875[mm], 60.375[mm]가 된다. 영구자석의 폭이 48.875[mm]인 경우, 추력이 60.375[mm]보다 크게 떨어지므로 본 논문에서는 영구자석 폭을 60.375[mm]로 선택하였으며 제작상의 어려움으로 인하여 그 폭은

60[mm]을 기본모델로 하였다.

### 3. 추력 리플 최소화를 위한 영구자석 형상 최적화

가동영구자석형 PMLSM에서는 영구자석에 스큐를 시행하면 디텐트력이 0이 되어 일정한 추력을 발생하나 다음과 같은 문제점이 발생하게 된다. 스큐를 시행하게 되면 그림 3에서 알 수 있는바와 같이 회전기에서는 나타나지 않으나 선형기에서는 가동자의 단부부분에 모양이 전혀 다른 별도의 자석이 필요하게 됨은 물론 기기의 부피도 스큐를 시행하지 않은 모델에 비해 커지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 영구자석의 형상을 변화시켜서 스큐를 줄 때와 같은 효과를 낼 수 있는 방법을 모색하였다. 즉, 영구자석의 Edge부분의 폭과 높이를 적당히 컷팅하여 디텐트력이 최소화 되도록 영구자석의 형상을 최적화시켰다.



(a) 스큐모델 (b) 일반형

그림 3 가동자 비교

유한요소법의 장점은 해석대상이 복잡한 모델이라도 해석이 쉽고 그 결과도 신뢰성이 높다는 점에 있다. 그러나, 기기의 성능개선을 위한 형상 및 치수 변화에 관련된 설계변수의 변화에 따른 특성해석을 행하는 경우 각각의 설계 변수 변화에 따른 해석모델의 모델링, 재질 정수 입력 및 요소분할등의 전처리 작업이 요구되기 때문에 특성해석에 많은 시간과 노력이 요구된다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 초기 모델링 데이터(절점, 선, 영역 등)를 이동시킨 후 요소분할을 통하여 각각의 설계 변수 변화에 따른 전처리 데이터를 자동으로 생성하도록 하는 모델절점이동기법을 적용하였다.

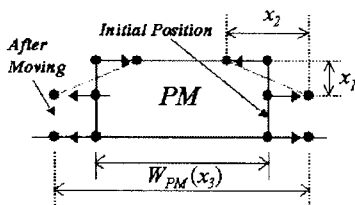


그림 4 영구자석 형상의 모델절점이동기법

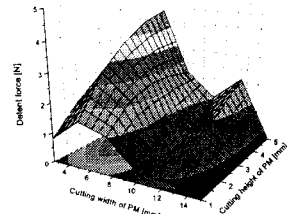
영구자석의 형상 최적화는 모델절점이동기법을 통해서 유한요소 해석을 통한 결과를 샘플데이터로 신경회로망법을 이용하였다. 이때의 설계 파라미터로는 영구자석 Edge부분의 자석 절삭 깊이( $X_1$ ), 절삭 폭( $X_2$ ), 영구자석 폭( $X_3$ )를 설정하였다. 목적 함수로는 추력 리플의 주 원인인 디텐트력 및 발생 추력으로 설정하였으며, 은닉층을 2층, 각 은닉층의 뉴런 수는 40개로 한 multi-layer perceptron형 feed forward error back propagation algorithm을 사용하였다[5,6]. 표 2에 각 설계변수의 변화범위 및 제약조건을 나타내었다. 즉, 평균 학습오차가 1[%] 이내로 수렴할 때까지 오차역전과 학습법에 의하여 반복 학습을 하였다. 그리고 제약조건으로 추력의 변화범위를 기본모델의 추력의  $\pm 3\%$  이내로 설정하였으며 이를 표 2에 나타내었다.

표 2. 설계변수 및 제약 조건

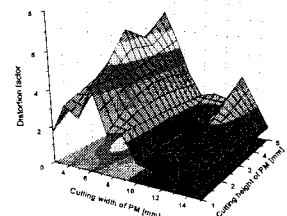
설계 변수	설계 변수 변화 범위
$W_{PM}$	$59[\text{mm}] \leq W_{PM} \leq 63[\text{mm}]$
$X_1$	$0[\text{mm}] \leq X_1 \leq 5[\text{mm}]$
$X_2$	$0\text{mm} \leq X_2 \leq 15[\text{mm}]$
제약 조건	추력변동 $\leq$ 정격추력의 $\pm 3\%$ 미만

### 3.1 신경회로망에 의한 최적 설계 및 특성 고찰

그림 5는 영구자석의 절삭 폭 및 깊이 변화에 따른 디텐트력 및 발생 추력의 왜형율에 대한 신경회로망 해석 결과이다.



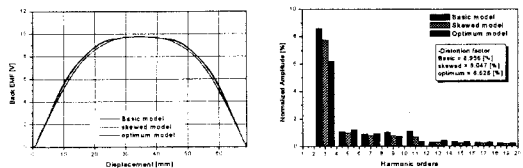
(a) 디텐트력



(b) 추력의 왜형율

그림 5 신경회로망에 의한 계산 결과

영구자석의 절삭 폭 및 깊이가 증가할수록 추력은 감소한다. 그러나 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 영구자석의 절삭 폭 및 깊이에 따라 추력 리플에 크게 영향을 미치는 디텐트력은 감소하지 않았으며 절삭폭이 15[mm]부근에서는 디텐트력은 크게 감소하나 추력도 동시에 크게 감소하여 제약조건을 만족하지 못함을 알 수 있다. 따라서, 제약조건을 만족하는 최적 모델은 영구자석 폭 61[mm], 영구자석의 절삭 폭 10[mm], 절삭 깊이 3[mm]만큼 영구자석의 단부를 절삭한 모델이다.



(a) 역기전력 (b) 고조파 성분분석  
그림 6 역기전력

그림 6은 역기전력 특성을 나타낸 것이다. 그림 6에서 알 수 있는바와 스큐를 시행한 모델의 역기전력 왜형율은 8.05[%]에서 본 연구에서 제안한 영구자석의 형상 최적화 모델에서는 6.63[%]로 감소하였다. 이는 영구자석

의 단방향 작자에 의한 고조파 성분 자속에 의한 영향이 영구자석의 형상을 최적화시키므로서 감소하였기 때문이다. 그러나, 영구자석의 형상 변화에 따라 인덕턴스는 아무런 영향을 받지 않으므로 동일한 값을 얻었다.

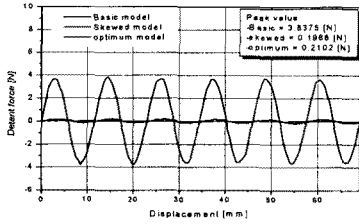
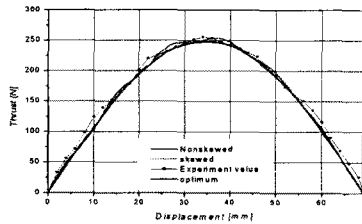
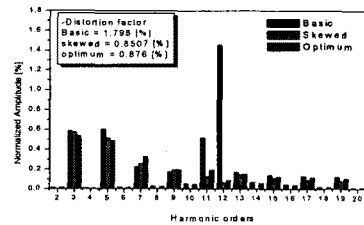


그림 7 디텐트력

그림 7은 최적모델과 기본모델, 스큐를 고려한 기본모델의 디텐트력 유한요소해석 결과를 비교한 것이다. 디텐트력 해석결과 스큐를 시행한 모델과 최적모델의 디텐트력 값은 0.21[N]로 스큐 시행시의 0.2[N]와 대동소이하였다. 즉, 스큐를 시행한 경우와 동일하게 영구자석의 형상을 변화시키므로써도 디텐트력을 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.



(a) 추력 특성



(b) 고조파 성분분석

그림 8 추력 특성 및 고조파 분석

그림 8에서 추력특성 해석결과 최적모델의 추력 피크치는 247.4[N]으로 기본모델에 비해서는 2.6[%] 감소하였으나 스큐 시행모델의 249.92[N]과 비교하면 대동소이하다. 스큐를 시행한 모델과 최적모델의 발생 추력의 왜형을 분석결과에서도 알 수 있는바와 같이 영구자석의 형상을 변화시키므로서 스큐를 시행한 모델과 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 영구자석의 형상을 최적화한 경우에는 슬롯고조파에 해당되는 12고조파 부분에서는 스큐를 준 모델에 비해 고조파 함유율이 크게 나타났다. 그러나 그 왜형율은 0.876[%]로 스큐모델의 0.8507[%]와 대동소이하였다. 스큐를 시행한 모델은 저주파 대역에서의 고조파 함유율이 최적모델에 비해 크게 나타났다.

그림 8(b)에서 알 수 있는 바와 같이 추력 특성을 고조파 분석하면 스큐 시행 및 최적화 모델에서, 발생 추력의 왜형률(Distortion factor)은 기본모델의 1.798[%]에서 0.8507, 0.87[%]로 크게 감소하였다 이는 슬롯고조파 성분인 12고조파 성분이 크게 감소하였기 때문이다.

그러나, Matlab을 이용하여 고조파 분석을 행하는 경우 완전한 정현파(Sine wave)를 분석해도 데이터 개수

가 유한개이면 왜형률이 제로가 나오지 않게 되는 계산상의 오차가 존재하게 된다. 따라서, 추력 특성 분석에서도 유한개의 데이터로 고조파를 분석하였기 때문에 계산상의 오차를 제하면 기본모델에 스큐를 시행하였을 때와 영구자석의 형상을 최적화한 경우 모두 발생 추력 왜형률은 거의 제로가 되는 정현파에 가까운 결과를 얻을 수 있었다.

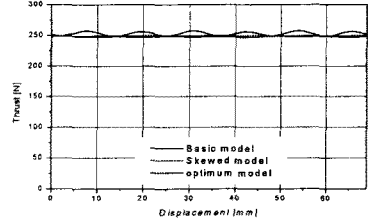


그림 9 정상상태 운전특성 (부하각 90°)

그림 9는 정상상태 운전특성을 나타낸 것으로 기본모델에서는 추력 리플이 크게 나타났지만 스큐를 시행한 모델과 최적모델에서는 일정한 추력이 발생하는 것을 확인할 수 있어 양호한 설계가 이루어졌음을 알 수 있다. 영구자석을 취부한 요크의 두께는 10[mm]이다. 따라서, 가동자 부피는 스큐를 시행할 경우  $1.15 \times 2 \times 7.8 = 17.94[\text{cm}^3]$ 만큼 증가하게 된다. 그러므로 단위 부피당 추력비를 계산하면 최적모델의 경우  $0.59 [\text{N}/\text{cm}^3]$ 으로 스큐 모델의 경우  $0.5665 [\text{N}/\text{cm}^3]$ 에 비해 4.12[%]향상되었다. 즉, 보다 콤팩트한 설계가 이루어졌음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 PMLSM의 운전 특성을 향상시키기 위하여 영구자석의 형상 최적화 설계를 수행하였다. 최적화 기법으로는 뉴럴 네트워크를 적용하였으며, 설계 파라미터로는 영구자석 폭, 영구자석 단부의 커팅 폭 및 깊이를 설정하였다. 즉, 철심형 PMLSM에서 나타나는 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력 및 영구자석의 고조파 성분 자속에 의한 추력 리플을 최소화 시키기 위하여 영구자석의 형상 최적화 설계를 수행하였다. 영구자석의 형상 최적화를 위한 설계 파라미터의 변화에 따른 재 모델링 시간을 단축하기 위하여 모델절점이동기법을 적용하였다.

추력 및 디텐트력 특성은 유한요소해석을 통해 기본모델에 스큐를 주었을 때와 영구자석 형상을 최적화 설계를 진행한 결과 동일한 효과를 얻은 물론 단위 체적당 발생추력이 4.12[%]향상되는 양호한 결과를 얻었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] I. Boldea, S. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", John Wiley and Sons, 1985.
- [2] Ki-Chae Lim, Joon-keum Woo, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 1157-1160, 2002
- [3] 박승찬, "유한요소법과 신경회로망을 이용한 직선형 유도전동기의 설계 및 동특성 해석에 관한 연구", 한양대학교 박사논문, 1995.
- [4] Simon Haykin, "Neural Networks a comprehensive Foundation", Prentice Hall, 1999.