

Moving Magnet Type PMLSM의 영구자석 형상 최적화

이 동 업\*, 김 규 탁  
 창원대학교 전기공학과

Optimization of the Permanent Magnet Shape in Moving Magnet Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

Dong-Yeup Lee\*, Gyu-Tak Kim  
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ.

**Abstract** - In this paper, the notch of teeth and skew of permanent magnet are used to reduce the detent force caused by slot-teeth structure. Also, the shape of permanent magnet is optimized to reduce the detent force owing to flux harmonics components of permanent magnet. As a result, thrust is decrease about 2[%]. But, the distortion ratio of thrust is decreased from 1.04[%] to 0.75[%]. And, the ripple ratio of thrust is decreased from 2.6[%] to 1.65[%].

에 의해 발생하는 디텐트력에 의한 추력리플을 무시할 수가 있다.

따라서, 본 논문에서는 추력리플로서 작용하는 3가지의 원인중 단부효과에 의한 리플은 무시했으며, 슬롯-치 구조에 의한 추력 리플과 영구자석의 고조파 자속 성분 에 의한 리플 저감 기법을 적용하였다.

1. 서 론

슬롯형 영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 효율 및 추력 밀도가 높고 제어성능이 우수하며 고속, 고효율이 가능하다는 장점이 있어 각종 FA기기, OA기기 등의 구동원으로 널리 이용되고 있다. 그러나, 슬롯형 PMLSM은 영구자석형 회전기에서의 코깅 토크와 같이 영구자석과 치-슬롯의 상대적인 위치 변화 때문에 필연적으로 디텐트력이 발생하게 된다. 발생한 디텐트력은 구동 시 기기의 추력 맥동으로 작용하여 소음 진동을 유발할 뿐 아니라 제어 성능을 크게 저하시킨다. 따라서, 고속 정밀 제어가 요구되는 분야에서는 추력 리플의 영향을 최소화하는 설계가 반드시 필요하다.

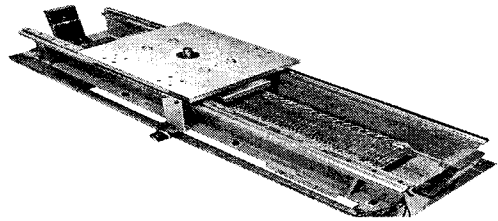


그림 1 기본 모델의 시작기

PMLSM의 추력 리플은 크게 슬롯 - 치 구조 및 단부 효과에 의한 디텐트력 및 영구자석의 고조파 자속에 의하여 발생한다[1,2]. 그 중, moving magnet type PMLSM에서는 단부효과에 의한 디텐트력은 무시할 수 있다. 따라서, 슬롯 - 치 구조에 의한 detent force 및 영구자석의 고조파 자속에 의한 디텐트력만 최소화 시키면 되며, 이들을 최소화 시키기 위한 여러 가지 방법들이 제안되었으나, 기존 제시한 방법들이 효율적이라고 하기에는 무리가 따르는 것이 사실이다.

표 1 시작기의 설계 사양

	항목	단위(mm)
고정자	슬롯 간격	11.5
	슬롯 폭	7
	정격 전류	4
	매극 매상당 슬롯수	2
	축방향 길이	73.5
가동자 (영구자석)	극 간격	69
	높이	10
	폭	61
	재질	Nd-Fe-B
	잔류자속 밀도	1.3[T]
	기계적 공극	1.2
	정격 추력	1000

따라서, 본 논문에서는 슬롯형 PMLSM의 치 - 슬롯 구조에 의한 디텐트력 저감 및 영구자석의 고조파 자속에 의한 추력 리플을 최소화 시키기 위하여 치부분에 노치를 적용하고, 영구자석에 스키의 적용과 영구자석 폭 변화 및 영구자석의 Edge부에 라운딩을 취하는 방법으로 영구자석의 형상을 최적화 하였다. 이때, 최적화 기법으로는 신경회로망을 사용하였다.

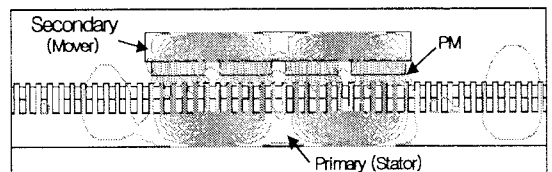


그림 2 자속 분포도

2. 본 론

2.1 해석 모델

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

그림 2에서는 가동 영구자석형 PMLSM의 자속 분포도를 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 가동 영구자석형 PMLSM에서는 가동자의 양쪽 끝단의 자기저항이 매우 크기 때문에 누설되는 자속이 거의 없어 단부효과

2.2 추력 리플 저감 기법

디텐트력은 영구자석과 슬롯구조에 기인한 공극 고조파 성분의 증가에 의한 것으로 회전기의 코깅토크와 동일한 특성을 가진다. 따라서, 회전기에서 적용되었던 많

은 연구들이 직선기에 그대로 적용할 수 있다.

본 논문에서는 추력 리플 저감을 위하여 1차측에 대하여 반폐슬롯 구조와 치부분에 노치를 적용하였으며, 2차측에 대하여 영구자석의 폭 변화와 영구자석의 형상을 변화하였다.

### 2.2.1 슬롯-치 구조에 의한 추력 리플

디텐트력의 기본과 성분은 슬롯 피치에 대한 영구자석 폭을 적절히 조절함으로써 효율적으로 제거가 가능하다[1]. 영구자석 폭이 증가함에 따라 자기력은 다소 증가하나 누설 자속의 증가로 인해 포화현상이 나타난다. 일반적으로 PMLSM의 디텐트력을 최소화하기 위한 일정 슬롯피치  $\tau_s$ 에 대한 영구자석 폭은 정수  $n$ 에 대하여 식  $(n + 0.25) \cdot \tau_s$ 을 만족하면 된다[2]. 본 논문의 해석 모델의 매극대상당 슬롯수가 2이므로 슬롯피치는  $\tau/mq$ 로 11.5[mm]의 슬롯 피치를 가진다. 따라서, 본 논문에서는 영구자석의 폭을 61[mm]로 선정하였다.

본 논문에서는 슬롯-치 구조에 의한 디텐트력의 저감을 위하여 영구자석에 1/2 슬롯피치인 5.75[mm]의 스큐를 적용하였으며 그림 4과 같이 치부분에 노치를 적용하였다. 이때, 적용된 노치는 폭 2[mm], 높이 1[mm]인 사각형의 형태로서 치부분을 균등 3분할한 곳에 2개를 시행하였다.

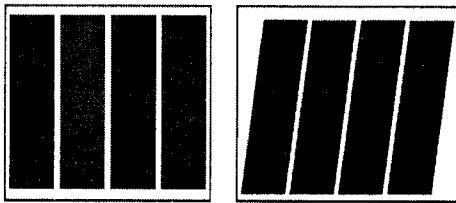


그림 3 영구자석의 스큐 적용

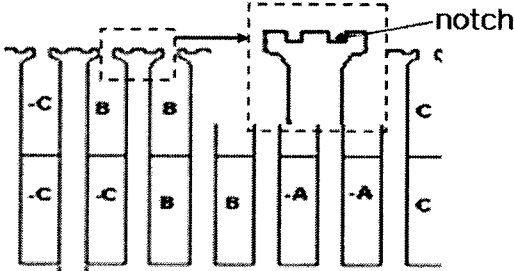


그림 4 노치의 적용

### 2.2.2 영구자석의 형상 변화

영구자석의 고조파 성분에 의한 추력 리플의 저감을 위하여 본 논문에서는 영구자석의 형상을 변화시켰다.

특성 해석 기법으로는 유한 요소법을 사용하였다. 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, 재질정수 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 설계변수 변화에 따른 전처리 데이터를 자동으로 생성하도록 하는 모델절점이동기법을 적용하였다[2].

그림 5는 본 논문에서 적용한 영구자석의 형상 변화에 대하여 나타내었다. 그림 5와 같이 영구자석의 단부쪽에

라운드를 주는 형태로 영구자석의 형상을 최적화 하였다. 라운딩을 주는 이유는 구동 전원의 파형이 정현파이므로 영구자석의 형태도 정현파의 형태로 가져가기 위함이다.

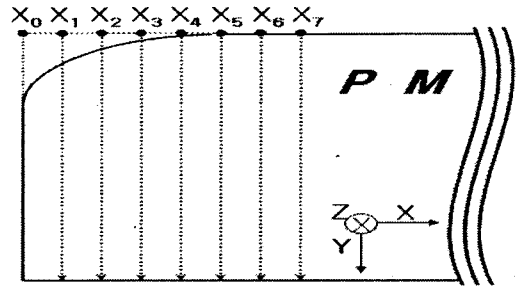


그림 5 영구자석의 형상 변화

영구자석의 형상 최적화는 모델절점이동기법을 통해서 유한요소 해석을 통한 결과를 샘플데이터로 신경회로망법을 이용하였다[3,4]. 이때의 설계 파라미터로는 영구자석 Edge부분을  $X_0$ , 이 점으로부터 X-축 방향으로 1[mm] 간격으로  $X_0 \sim X_7$ 까지 선정하였다. 이 선정된 노드들은 모두 Y-축 방향으로만 이동이 가능하며 그 이동 간격은 1[mm]이고, 이때 나타내는 X의 값들은 모두 Y-축 방향으로 이동 거리를 나타내고 있다. 모든 X는 항상  $X_0 \geq X_1 \geq X_2 \geq X_3 \geq X_4 \geq X_5 \geq X_6 \geq X_7$ 을 만족하여야 한다.

목적 함수로는 추력 리플의 주 원인인 디텐트력 및 발생 추력으로 설정하였으며, 은닉층을 4층, 각 은닉층의 뉴런 수는 50개로 한 multi-layer perceptron형 feed forward error back propagation algorithm을 사용하였다. 평균 학습오차가 1[%] 이내로 수렴할 때까지 오차역전파 학습법에 의하여 반복 학습을 하였다.

그림 6과 표 2는 각각 적용된 신경회로망의 구조와 설계변수 및 제약조건을 나타내고 있다. 표 2의 제약조건은 스큐와 노치를 시행한 기본모델을 기준으로 선정하였으며 디텐트력 12.3[N]은 기본모델의 디텐트력이다.

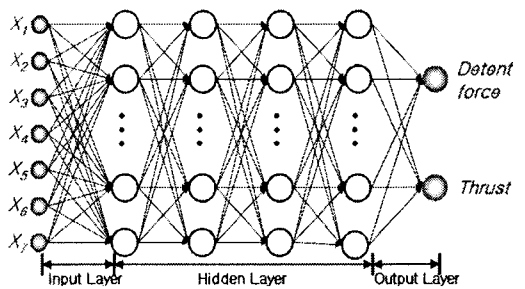


그림 6 신경회로망

표 2 설계 변수 및 제약 조건

설계 변수	변수 범위
$X_{all}$	$0[mm] \leq X_{all} \leq 10[mm]$
제약 조건	$X_0 \geq X_1 \geq X_2 \geq X_3$ $\geq X_4 \geq X_5 \geq X_6 \geq X_7$
	발생 추력 $\geq 1000[N]$
	디텐트력 $\leq 12.3[N]$

### 2.3.2 특성해석 및 검토

신경회로망결과 최적화 모델의  $X_0$ 부터  $X_3$  까지의 각각의 값은 3[mm], 1.15[mm], 0.92[mm], 0.07[mm]이고,  $X_4 \sim X_7$  는 0[mm]로 선정되었다.

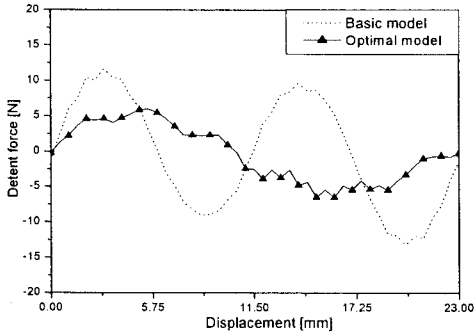
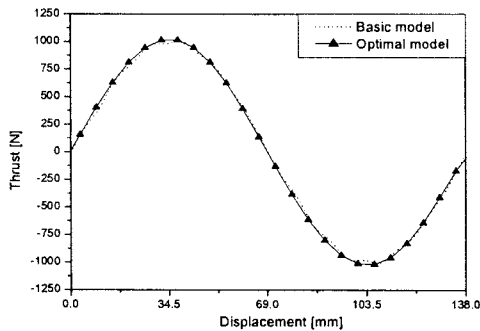
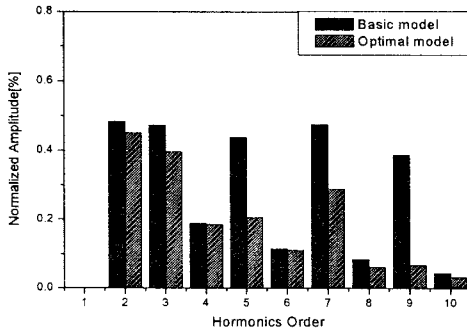


그림 7 디텐트력

그림 7은 기본 모델과 최적모델의 디텐트력에 대한 유한요소해석 결과를 비교한 것이다. 디텐트력 해석결과 스큐와 노치만 적용한 기본모델의 디텐트력은 12.3[N]이고, 영구자석의 형상까지 변화시킨 최적화 모델의 경우는 5.32[N]이었다. 영구자석의 형상 변화로 약 7[N]정도의 디텐트력을 저감하였음을 확인할 수 있다.



(a) 추력 특성



(b) 고조파 성분분석

그림 8 정추력 특성 및 고조파 분석

그림 8에는 정추력 및 추력의 고조파성분을 분석하여 나타내었다. 그 결과 정추력의 피크치가 982.66[N]에서 1011.39[N]으로 증가하였고, 추력의 왜형률은 1.04[%]에서 0.75[%]로 감소하였다.

추력의 피크치가 증가한 원인은 제동력으로 작용하는 추력의 5고조파 성분 이 크게 감소하였기 때문이다.

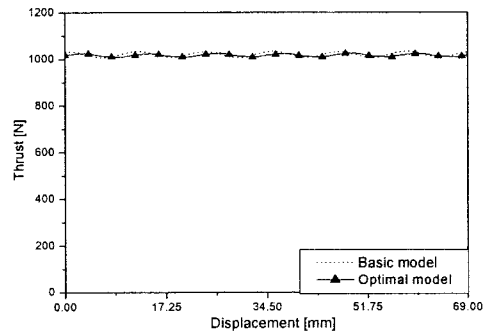


그림 9 정상상태 운전특성 (부하각 90°)

그림 9는 부하각 90°인 경우 정상상태 운전특성을 나타내었다. 운전상태의 리플율이 2.6[%]에서 디텐트력의 저감으로 인하여 1.65[%]로 감소하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 슬롯형 PMLSM의 치 - 슬롯 구조에 의한 디텐트력 저감 및 영구자석의 고조파 자속에 의한 추력 리플을 최소화 시키기 위하여 치부분에 노치를 적용하고, 영구자석에 스큐의 적용과 영구자석 폭 변화 및 영구자석의 Edge부에 라운딩을 취하는 방법으로 영구자석의 형상을 최적화 하였다. 최적화 기법으로는 신경회로망을 적용하였다. 신경회로망의 학습 데이터는 유한요소해석을 통하여 획득하였으며, 빠른 학습 데이터 확보를 위하여 모델절점이동기법을 적용하였다.

그 결과 스큐와 노치만 적용한 기본모델에 비하여 영구자석의 형상까지 변화시킨 최적화 모델의 디텐트력은 7[N]이 저감된 5.32[N]이었으며, 이때 추력은 조금 증가한 1011.39[N]이었다. 디텐트력의 저감으로 인하여 부하각 90°인 경우 정상상태 운전특성의 리플율이 1.655[%]로 저감하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] T. Yoshimura, H. J. Kim, Watada, S. Torii, D. Ebihara, "Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magn., Vol. 31, No.6, pp.3737-3739, 1995.
- [2] Ki-Chae Lim, Joon-keun 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. 1157-160, 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.