Slotless 영구자석형 선형 동기전동기의 고추력화를 위한 형상 설계

論 文
52B-7-4

Shape Design of Slotless Type PMLSM for Improving Thrust Density

金 鎔 喆* · 金 奎 卓**
(Yong-Chul Kim · Gyu-Tak Kim)

Abstract - Slotless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM) has good control ability but thrust density is low. So, this paper proposes inserted core type of slotless PMLSM to improve its thrust density. Inserting the core between windings of each phase, detent force is generated by the difference of magnetic resistance in an air gap. To minimize detent force, this paper applies the neural network to inserted core type of slotless PMLSM. The, Magnetic pole ratio, the width of the inserted core and the width of the coil are selected as a design parameter to minimize detent force. In comparison with inserted core type one, thrust ripple greatly decreases by minimizing detent force and also thrust increases in this optimal model.

Key Words : Slotless PMLSM, Minimization of detent force, High Thrust Density, Neural Network

1. 서 론

최근, 선형 전동기는 전기철도 등의 운송 수단, 공장 자동화의 반송 시스템, 빌딩의 엘리베이터와 에스컬레이터, 그리고 반도체 제조장비 및 CNC 등의 직선 추력을 요구하는 분야는 물론 OA 기기 등에 이르기까지 그 응용분야가 확대되고 있다[1-3].

그 중, 영구자석형 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 계자원으로 영구자석을 사용하는 선형 동기전동기로써 크게 철심형과 공심형으로 나눌 수 있다.

철심형 PMLSM은 추력 밀도가 높아 큰 추력을 발생시킴은 물론 효율이 높은 장점이 있다. 그러나, 철심을 사용하므로 인하여 철심에 슬롯을 파 이에 권선을 시행하게 되므로 공극의 자기저항 차에 의한 디텐트력(detent force)이 발생하게 되며, 디텐트력은 전동기의 추력 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동의 원인이 되고 기기의 제어성능을 악화시키게 된다. 이러한 디텐트력을 제거하기 위해 영구자석의 자극폭을 조절하는 방법, 자극배치 조정법, 영구자석 및 전기자 슬롯의 스큐(skew) 구조의 채택, 반폐슬롯(semi-closed slot) 구조 등의 여러 방법들이 보고되고 있다[4-6]. 이와 같은 방법은 디텐트력을 작게 할 수는 있으나 추력이 다소 떨어지게 되거나 누설 리액턴스가 증가하게 되는 단점이 있어 디텐트력 제거를 위한 근본적인 대책이라고 할 수는 없다.

이에 반하여 슬롯리스(slotless)형 PMLSM, 즉 공심형 PMLSM은 철심형 PMLSM에 비하여 자기적인 공극이 매우 커 철심형 PMLSM에 비해 추력밀도가 떨어지는 큰 단점이 있지만, 치-슬롯 구조가 없어 디텐트력이 근본적으로 제거되어 추력 리플이 거의 발생하지 않고 수직력이 작기 때문에 제어성능이 우수한 장점을 가지므로 X-Y Gantry 로봇등과 같은 추력이 그다지 크지 않은 소용량의 정밀급 기기에 주로 이용되고 있다[4-6].

산업사회가 고도화, 정밀화 되면서 이에 필요한 구동용 전동기의 출력 또한 증가되고 있으며 소형, 경량화를 요구하고 있다. 이에따라, 현재의 PMLSM의 연구동향은 큰 추력를 발생시키는 철심형 PMLSM의 장점을 살리면서도 슬롯리스형 PMLSM의 최대 장점인 추력리플을 최소화시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있으며 그 중 하나가 슬롯리스형 PMLSM의 상 권선 사이에 강대를 삽입하는 코어삽입형 PMLSM이 각광을 받고 있다[1,3]. 따라서, 본 논문에서는 제어 성능이 우수한 슬롯리스형 PMLSM의 낮은 추력밀도를 향상시키고자 상(phase) 권선 사이에 강대를 삽입한 코어 삽입형 모델을 제안하으며 이때 공극 자기저항의 차에 의해 발생하는 디텐트력을 최소화 시키기 위하여 신경회로망법을 적용하였다. 디텐트력 최소화를 위한 최적화과정에서 설계변수로는 영구자석의 자극폭, 코일 폭을 선정하였다. 계산방법의 타당성을 검증하기 위해 기본 슬롯리스형 모델의 2차원 유한요소 해석결과와 실험치를 비교하였고, 신경회로망에 의한 최적화 모델의 특성을 단순 코어 삽입모델의 특성과 비교하였다.

2. 해석 모델

2.1 슬롯리스형 PMLSM의 구조 및 특징

그림 1은 자석 이동형 편측식 슬롯리스 PMLSM의 기본구조이다. 전기자측은 치와 슬롯이 존재하지 않고 공심(air-core) 구조의 코일을 직접 강대(back-iron)에 부착시킨

* 準 會 員 : 동진정공(주) 연구소 연구원
** 正 會 員 : 昌原大學校 工大 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 2002年 12月 31日
最終完了 : 2003年 6月 2日

형태로서 영구자석 4극당 3상 코일이 대비되는 구조이며, 전기자 권선은 3상 집중권으로 하였다.

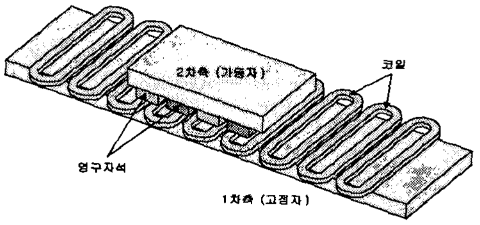


그림 1 슬롯리스형 PMLSM의 구조

Fig. 1 Structure of slotless PMLSM

슬롯리스형 PMLSM은 슬롯형 PMLSM보다 상대적으로 큰 자기적 공극으로 인해 발생 추력(thrust)이 1/3정도로 낮지만, 추력의 맥동으로 작용하여 속도리플을 발생시키고 위치제어 성능에 악영향을 미치는 디텐트력(detent force)을 근본적으로 제거할 수 있다. 또한, 주행시 저항으로 작용하는 수직력(normal force)도 슬롯형 PMLSM에 비해 1/7~8배 정도로 대폭 감소시킬 수 있으므로 정밀 위치제어용으로 아주 적합하다[6-7]. 한편, 최근 높은 에너지 밀도를 가지는 희토류계 영구자석이 계속 개발되고 있어 슬롯리스형 PMLSM의 추력밀도가 슬롯형 PMLSM보다 낮음에도 불구하고 리니어 시스템에서 요구하는 고속성능과 정밀위치제어성능을 동시에 만족하는 구동원으로 평가받고 있으나 보다 소형, 경량화를 위한 설계에는 한계가 있다[7].

2.2 해석모델

그림 2는 슬롯리스형 PMLSM의 측면도이며 주요치수 및 제원은 표 1과 같다.

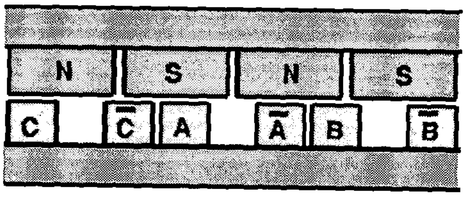


그림 2 슬롯리스 PMLSM 측면도

Fig. 2 Side view of slotless PMLSM

표 1 해석 모델의 주요치수 및 제원

Table 1 Specification of analysis model

항 목	값[단위]	항 목	값[단위]
극 수	12	코일당 턴수	650 [턴]
잔류자속밀도	1.2 [T]	코일 높이	11 [mm]
영구자석 높이	12 [mm]	코일 폭	12 [mm]
영구자석 길이	73.5 [mm]	코일 간격	12 [mm]
영구자석 폭	26 [mm]	상전류(최대)	2.66 [A]
극 간격	28.5 [mm]	공극 길이	2 [mm]

그림 3은 슬롯리스형 모델의 추력밀도를 향상시키기 위해 제안된 모델이다. 그림 3은 추력밀도를 증가시키기 위하여 본 연구에서 적용한 권선 사이에 코어를 삽입한 모델이다.

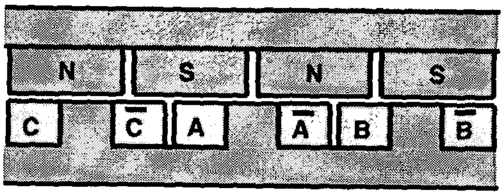


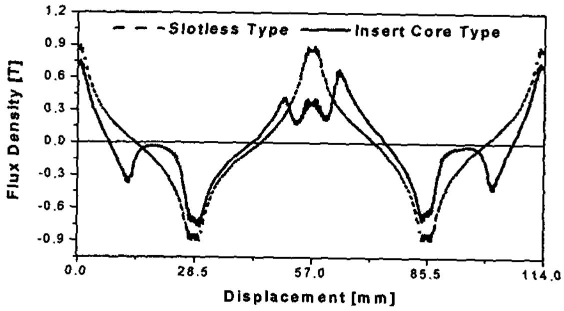
그림 3 코어 삽입 모델

Fig. 3 Insert core model

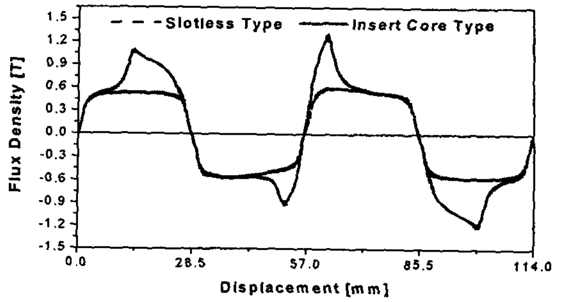
3. 설계변수 도출을 위한 해석

3.1 공극 자속밀도 분포

그림 4는 코어 삽입으로 인한 공극자속밀도의 영향을 고찰하기 위하여 영구자석과 전기자 전류를 동시에 여자시켰을 때 공극부분에서의 자속밀도를 나타낸 것이다. 코어를 삽입함에 따라 코어가 존재하는 부분에 자속밀도의 수직성분이 2배 가량 현저하게 증가하게 된다.



(a) 공극자속밀도 수평성분



(b) 공극자속밀도 수직성분

그림 4 공극자속밀도분포

Fig. 4 Distribution of flux density

3.2 역기전력 및 인덕턴스

3.2.1 역기전력

그림 5와 표 2는 각 해석모델의 역기전력 계산결과이다. 슬롯리스형의 경우 실험결과와 매우 잘 일치하였고, 코어삽입에 의해 역기전력이 2.39배 증가하였다.

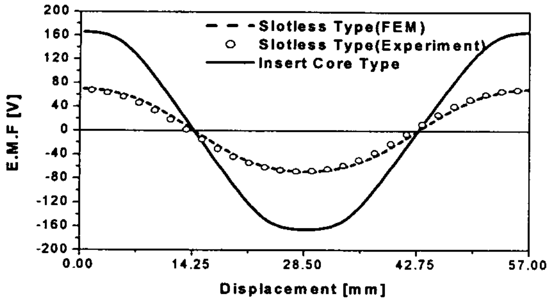


그림 5 역기전력 (v=2m/s)
Fig. 5 Back-EMF(v=2m/s)

표 2 역기전력
Table 2 Back-EMF

	실효치 [V]	상대치 [%]
Slotless 모델	49.03	100
코어 삽입 모델	117.19	239

그림 6은 역기전력의 고조파를 분석한 결과이다. 슬롯리스형의 경우 5, 7고조파 성분이 존재하지 않으나, 코어 삽입모델에서는 공극 자기저항의 불균일로 인하여 역기전력에 고조파가 많이 포함되었다. 슬롯리스형에서 3고조파 성분 역기전력이 크게 나타났으나 추력에는 아무런 영향이 미치지 않는다. 그러나, 코어 삽입모델에서는 3고조파 성부은 다소 감소하였으나 5, 7고조파 성분이 기본파 대비 1.7[%], 0.37[%]로 크게 증가하였으며 이러한 고조파 성분은 소음, 진동 등과 같은 기기의 특성에 악영향을 미치는 원인이 된다. 따라서, 코어 삽입으로 인하여 역기전력은 증가하여 출력은 증가되지만 고조파 성분이 다량 포함되므로 제어 성능은 저하되는 결과를 초래하므로 고조파 성분이 최소화 되는 설계가 요구된다.

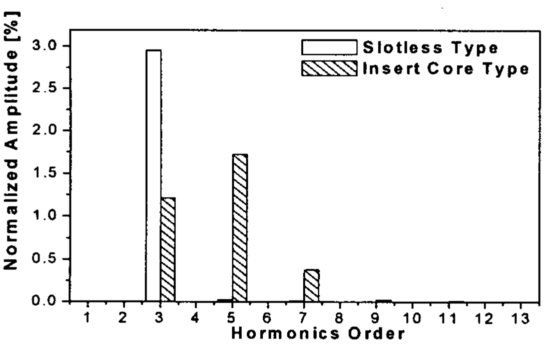


그림 6 역기전력의 고조파 성분
Fig. 6 Harmonic components of back-EMF

3.2.2 인덕턴스

인덕턴스는 식 (1)과 (2)와 같이 저장에너지와 여자전류로부터 계산할 수 있다. 식 (2)로부터 자기 인덕턴스를 계산하였고, 식 (3)을 이용하여 상호 인덕턴스를 계산하였다.

$$W_m = \int_0^B H \cdot dB = \int_0^\lambda i(\lambda) \cdot d\lambda \qquad (1)$$

$$L = \frac{\lambda i}{i^2} = \frac{2W_m}{i^2} \qquad (2)$$

$$W_{m(a,b)} = \frac{1}{2} L_a i_a^2 + \frac{1}{2} L_b i_b^2 + M i_a i_b \qquad (3)$$

표 3은 슬롯리스 모델과 코어삽입 모델의 인덕턴스 계산결과이다. 슬롯리스형의 경우 계산치와 실험치가 잘 일치하는 만족스러운 결과를 얻었다. 자기 인덕턴스 측정은 상용주파수의 정현파 전압을 인가했을때의 측정된 역률각과 전류로부터 계산하였으며, 상호인덕턴스는 전류를 인가하지 않은 상에 유기된 전압을 측정하여 계산하였다. 코어삽입에 따른 자기적 공극의 감소로 자기 및 상호 인덕턴스가 2배 이상 증가하였다.

표 3 인덕턴스 비교
Table 3 Comparision of inductance 단위[mH]

	자기인덕턴스(*실험치*)	상호인덕턴스(*실험치*)
Slotless 모델	30.86 (*29.36*)	9.08 (*9.07*)
코어삽입 모델	69.45	39.93

3.3 디텐트력

제어 성능에 악영향을 미치는 디텐트력은 그림 7과 같이 슬롯리스 모델에서는 거의 존재하지 않고 코어삽입 모델에서는 56.02[N]로 크게 나타났다. 이는 코어 삽입으로 인한 공극부에서의 자기저항이 균일하지 않기 때문에 나타난 현상이다.

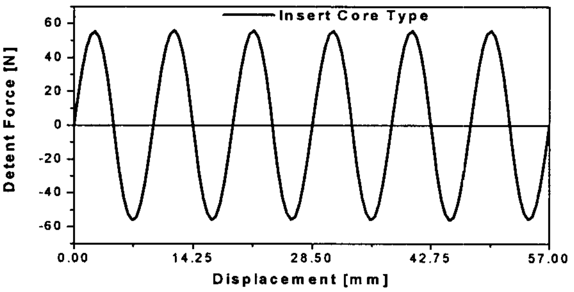


그림 7 디텐트력
Fig. 7 Detent force

3.4 추력

그림 8은 이동자 변위에 따른 각 해석 모델의 발생 추력을 나타낸 것이다.실험치와 이론치가 일치하는 만족스러운 결과를 얻었다. 표 4와 같이 슬롯리스형에 비해 코어 삽입모델에서는 추력이 2.34배 이상 증가하였으나 그림 9에서 보는바와 같이 코어 삽입형에서는 추력의 5, 6, 7 고조파 성분은 각각 1.84, 5.43, 0.51[%]로 나타나 운전 시 추력 리플이 발생하게 되어 제어 성능이 저하되므로 고조파 성분의 최소화 설계가

이루어져야 됨을 알 수 있다. 고조파 성분 중 6고조파 성분이 가장 크게 나타난 것은 코어 삽입으로 인하여 공극 자기저항 차가 발생하였으며, 이로 인하여 디텐트력이 크게 발생하였기 때문이다.

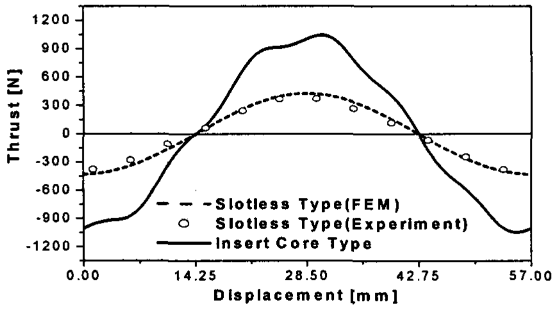


그림 8 추 력

Fig. 8 Thrust

표 4 추력의 기본파 크기 비교

Table 4 Comparision of fundamental component of thrust

	최대치 [N]	상대치 [%]
Slotless 모델	427.86	100
코어삽입 모델	1004.27	234

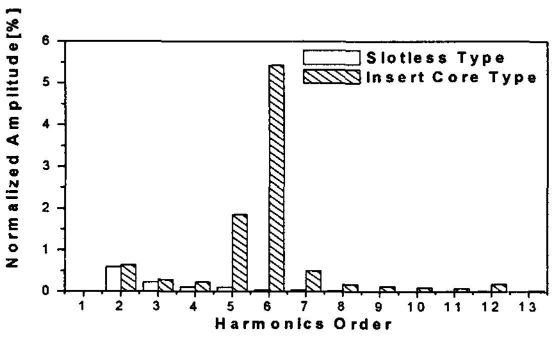


그림 9 추력의 고조파 성분

Fig. 9 Harmonic components of thrust

그림 10은 영구자석과 전기자의 부하각을 60도로 유지시킨 경우의 정상 운전 특성이다. 정상운전시 추력의 리플율을 계산하면 표 5와 같이 슬롯리스형은 추력 리플이 발생하지 않으나 코어 삽입형에서는 11.7[%]로 나타났다.

즉, 코어삽입형 모델의 추력은 크게 증가 하였지만 이와 동시에 디텐트력 등에 의한 추력의 리플도 크게 나타나므로 제어시 큰 문제점으로 작용하게 된다. 즉, 각 상의 코일변 사이에 코어를 삽입하므로서 자기저항이 감소되어 추력은 크게 증가하였으나, 코어 삽입으로 인하여 공극의 자기저항이 일정하지 않게 되어 디텐트력의 발생, 각 고조파 성분 추력의 발생으로 인하여 토크 리플이 크게 되어 슬롯리스형 PMLSM의 장점이 사라지게 되므로 토크 리플을 감소시키기 위한 최적 설계가 필요하다.

표 5 추력의 리플비교

Table 5 Comparision of thrust ripple

	추력의 리플율 [%]
슬롯리스형	0
코어삽입형	11.7

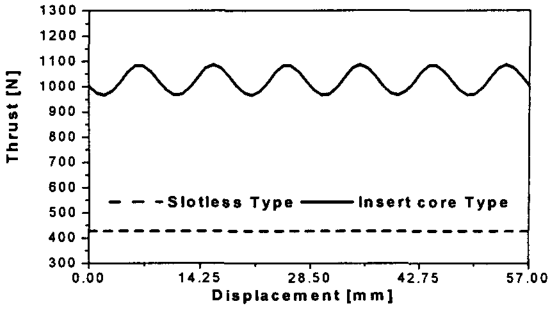


그림 10 부하각 60도의 정상상태 운전시 추력

Fig. 10 Thrust in steady state at load angle 60 °.

4. 디텐트력 최소화를 위한 최적 설계

코어 삽입형 모델은 추력은 크게 증가하나 큰 추력 리플이 발생하므로 제어 성능이 크게 떨어지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 추력에 가장 큰 영향을 미치는 설계 파라메터 중 코일의 폭, 영구자석의 폭을 설계변수로 하여 신경회로망을 이용하여 추력 리플을 최소화 시키는 최적설계를 진행하였다. 추력 리플의 주원인은 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 자기저항 차에 의한 디텐트력이다. 따라서, 본 연구에서는 목적함수로서 디텐트력을 설정하였다. 신경회로망의 구성은 그림 11에서와 같이 은닉층을 3층, 또한 각 은닉층의 뉴런수는 50개로 한 MLP (multi-layer perceptron)형 신경회로망을 사용하였다. 즉, 신경회로망은 그림 11과 같이 5층 2-50-50-50-1으로 구성하였으며 오차 역전(back-propagation) 알고리즘을 사용하였다[9]. 이때의 제약 조건은 표 6과 같다.

그림 12 (a)의 코일에서의 전류 밀도를 항상 동일하게 하기 위해 코일의 단면적 $w_c \times h_c$은 항상 일정하게 유지하고 코일 간격 d_{out}도 2mm로 고정시켰다. 그리고 고정자의 요크 두

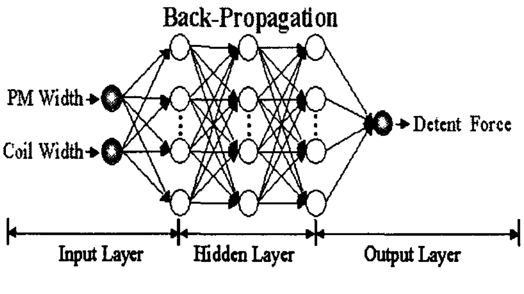


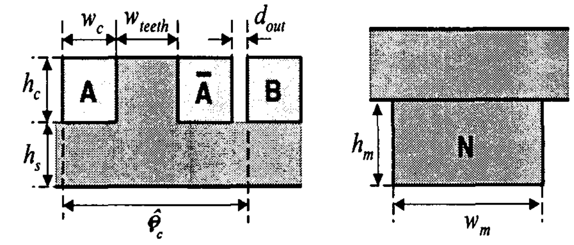
그림 11 신경회로망의 구조

Fig. 11 Construction of Nueral network

표 6 설계변수와 제약조건

Table 6 Design parameters and constraints

설계변수	제약 조건
w_c(코일 폭) w_m(영구자석 폭)	① 4[mm] ≤ w_c ≤ 18[mm] ② 22[mm] ≤ w_m ≤ 28[mm] ③ 추력 ≥ 990[N] ④ 추력의 고조파함유율≤ 0.5[%]



(a) 고정자측의 설계변수 (b) 이동자측의 설계변수

그림 12 설계변수

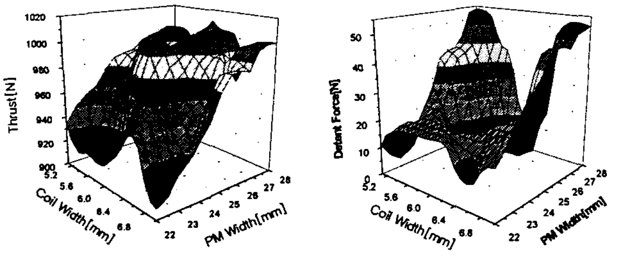
Fig. 12 Design parameter

께 h_s도 항상 동일하다. 따라서, 코일의 내부 폭 w_c의 변화에 따라서 코일의 높이 h_c가 같이 변화하게 되고, 치폭 w_{teeth}의 크기도 변화하게 된다. 그림 12 (b)의 영구자석은 영구자석의 자극폭 w_m을 변화시켰고, 영구자석의 높이 h_m은 항상 일정하게 두었다.

4.2 신경회로망에 의한 학습결과

그림 13은 코일폭과 영구자석 폭의 변화에 따른 추력 및 디텐트력을 나타낸다. 신경 회로망에 의해 계산된 최적모델은 코일 폭 6[mm], 영구자석 폭 26[mm]이며 이를 그림 14에 나타내었다.

신경회로망에 의한 학습이 올바르게 진행되었는가를 비교하기 위하여 유한요소 해석 결과와 비교하여 표 7나타내었다. 표 7에서 보는 바와 같이 신경회로망에 의한 학습이 올바르게 진행되었음을 알 수 있다.



(a) 추력 (b) 디텐트력

그림 13 신경회로망에 의한 해석결과

Fig. 13 Analysis results by Neural network

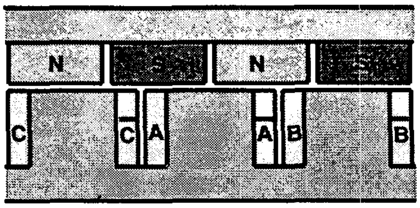


그림 14 최적모델

Fig. 14 Optimum model

표 7 최적모델의 추력 비교

Table 7 Thrust comparision of optimum model

	신경회로망 계산결과	유한요소 해석결과
추력	993.6[N]	993.7[N]
디텐트력	5.2[N]	4.996[N]

4.3 최적화 모델과 코어삽입 모델의 결과 비교

본 장에서는 3장에서 제시된 코어 삽입 모델과 최적 설계 모델의 특성을 비교, 검토하므로서 최적설계의 타당성을 검증하였다.

4.3.1 역기전력 및 인덕턴스

그림 15와 표 8은 코어 삽입모델과 최적모델의 역기전력을 비교하여 나타내었다. 계산결과 최적모델에서 역기전력의 실효치가 117.2[V]에서 132.7[V]로 13.2[%]증가하였다. 이는 코일 사이의 간격이 증가하여 코일상이에 강대를 삽입하므로서 공극의 자기저항이 감소하였기 때문이다.

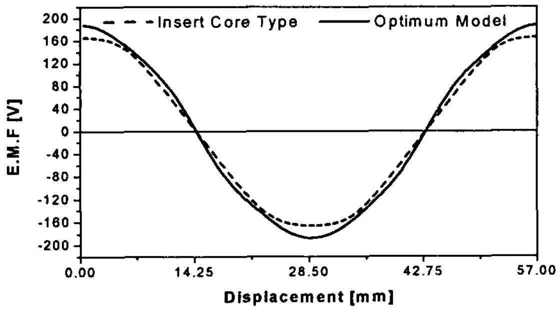


그림 15 최적 모델의 역기전력 (v=2m/s)

Fig. 15 Back-EMF of optimal model(v=2m/s)

표 8은 인덕턴스 계산결과이다. 최적모델의 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스가 1.722배 및 1.37배 증가 하였다. 이는 코일 사이에 강대를 삽입하므로서 자기저항의 감소로 인한 자속 증가에 기인한다. 그러나, 정상상태 운전(v=2m/s)시 리액턴스값으로 환산할 경우 저항에 비해 크기가 작으므로 역율 및 속응성 저하에 크게 영향을 미치지 않는다.

표 8 인덕턴스
Table 8 Inductance

Inductance[mH]	자기인덕턴스 [mH]	상호인덕턴스 [mH]
코어삽입모델	69.45	39.93
최적 모델	119.89	54.76

4.3.2 디텐트력 및 추력

그림 16은 디텐트력 계산 결과이다. 코어 삽입형에 비하여 디텐트력 최대치가 56.02[N]에서 4.996[N]으로 대폭 감소하였다.

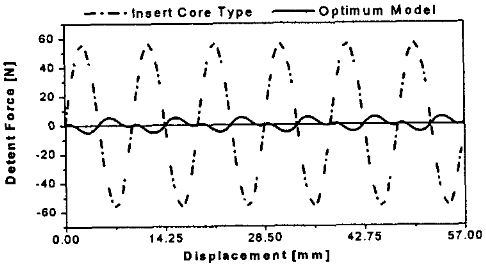


그림 16 최적 모델의 디텐트력
Fig. 16 Detent force of optimal model

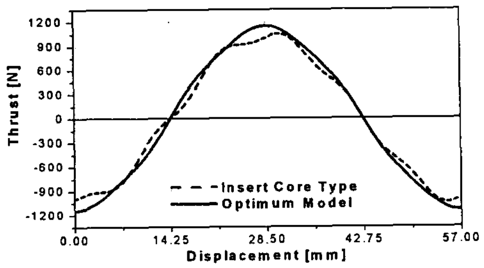


그림 17 최적 모델의 추력
Fig. 17 Thrust of Optimal model

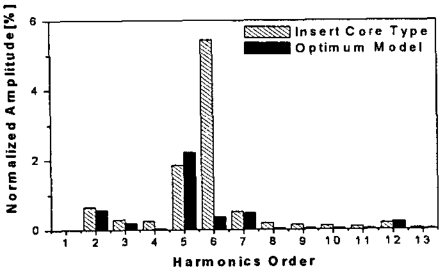


그림 18 추력의 고조파 성분
Fig. 18 Harmonic components of thrust

추력 특성은 그림 17에서 보는 바와 같이 최적모델에서는 최대치가 1004.27[N]에서 1147.32[N]으로 14.24[%] 증가하였다. 이때의 고조파 성분 분석은 그림 18과 같다. 즉, 최대 추력은 14.24[%] 증가하였으나 디텐트력을 최소화 시키므로서 발생추력의 고조파중 최대로 나타나는 6고조파 성분은 기본파 대비 5.43[%]에서 0.36[%]로 크게 낮아졌으며, 5, 7고조파 성분도 동시에 감소되어 추력리플이 거의 발생하지 않게 되는 양호한 설계가 이루어졌다.

그림 19는 부하각 60도의 정상상태 운전시 두 모델의 추력 특성을 나타낸다. 추력 리플율은 코어 삽입시 11.4[%]에서 3.9[%]로 대폭 낮아졌다.

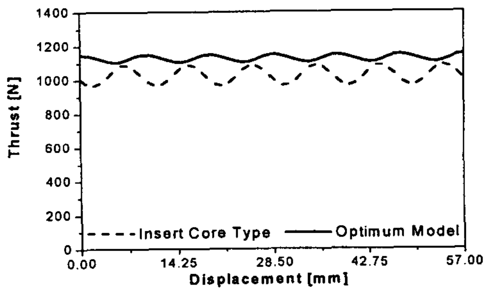


그림 19 부하각 60도의 정상상태 운전시 추력
Fig. 19 hrust in steady state in load angle 60 deg.

4.3.3 추력밀도 비교

추력밀도는 이동자와 고정자의 중량당 발생추력의 비로 정의된다. 해석모델의 철심 재질은 무방향성 규소강판으로 밀도는 7.85[g/cm^3]로써 단순 코어 삽입모델보다는 최적화 모델이 코일 사이의 안간격이 넓어져 중량은 10[%]가량 증가하였으나 추력 증가로 인하여 추력 밀도는 최적화 모델이 다소 크게 나타났으나 대동소이하다.

표 9 추력밀도 비교
Table 9 Comparison of thrust density

	중량 [kg]	추력밀도 [N/kg]
코어 삽입 모델	40.97	24.51
최적모델	45.167	25.4

5. 결 론

본 논문에서는 제어성능이 우수한 슬롯리스 PMLSM의 낮은 추력밀도를 향상시키고자 코어삽입모델을 제안하였고, 코어삽입에 따라 발생되는 고조파 성분 중 디텐트력에 의한 6고조파 성분을 제거하기 위해 신경회로망법을 이용하여 최적화 설계를 진행하였다. 단순 코어 삽입모델과 비교하여 최적화 모델은 추력 리플에 영향을 미치는 디텐트력을 최소화 시키므로서 추력 리플을 대폭 감소시키는 양호한 결과를 얻었다.

향후, 전동기의 특성에 영향을 미치는 설계변수 변화에 따른 특성해석시 유한요소법만에 의한 설계보다는 최적화 기법을 도입함으로써, 수치 해석 모델에 대한 전처리 및 해석시간의 단축을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] I. Boldea, S. A. Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, John Wiley and Sons, 1985.

[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] Jack F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Linear Synchronous Motor : Transportation and Automation System, CRC press, 1999.

[4] 임기채, "수치해석법을 이용한 영구자석 선형동기전동기의 특성해석 및 제어기 구현", 창원대학교 박사논문, 2000년.

[5] 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.

[6] 강규홍, 홍정표, 김규탁, 박정우, "직접 구동 슬롯리스형 영구자석 동기전동기의 설계", Trans. KIEE. Vol. 49B, No. 12., pp. 797-806, 2000..

[7] 안호진, "3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석형 선형 동기전동기의 기동특성 해석", Trans. KIEE. Vol. 51B, No. 7. pp. 379-386,. 2002.

[8] 김규탁, "분할자석형 편측식 리니어 동기 모터의 정특성 및 제동도체 효과", Trans. KIEE. Vol. 47, No. 6. pp. 756-762, 1998.

[9] 박승찬, "유한요소법과 신경회로망을 이용한 직선형 유도전동기의 설계 및 동특성 해석에 관한 연구", 한양대학교 박사논문, 1995.

감사의 글

본 연구는 2002년도 창원대학교 연구비 및 공작기계 기술 연구센터(MTRC)의 지원에 의한 연구결과임

저 자 소 개

김 용 철 (金 鎔 喆)

1975년 9월 19일생. 2001년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동진정공 연구소 연구원.

Tel : 051-304-1860, Fax : 051-304-1862

E-mail : ychkim@dongjinco.com

김 규 탁 (金 奎 卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1997년 일본 早稻田大 客員硏究員. 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 055-279-7515, Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr