

단부효과를 고려한 철심 삽입형 Slotless PMLSM의 추력 및 디텐트력 최적화 설계

論 文
53B-9-1

Optimal Design for Thrust and Detent Force in Inserted Core Type Slotless PMLSM with Consideration of End Effect

金美鎔* · 金奎卓†
(Mi-Yong Kim · Gyu-Tak Kim)

Abstract - This paper proposes inserted core type of slotless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM) to improve its low thrust density. However, by inserting the core between windings of each phase, detent force is generated and it acts as thrust ripple. Furthermore, linear motors generate end effect making thrust ripple. So, this paper applies the neural network to minimize detent force and to maximize thrust. Also, sub-poles is placed at the end parts of the mover to compensate end effect. To confirm of calculation method's validity, the calculated results are compared with experimental results.

Key Words : Inserted Core Type Slotless PMLSM, Minimization of End-effect, Neural Network, Auxiliary Pole

1. 서 론

영구 자석형 선형 동기 전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 효율 및 추력 밀도가 높고 제어성능이 우수하며 고속, 고효율이 가능하다는 장점을 가진다[1,2].

공심형(slotless) PMLSM은 상대적으로 큰 자기적 공극으로 인해 슬롯형 PMLSM에 비해 추력밀도가 떨어지는 단점을 가지지만, 치-슬롯 구조가 없어 디텐트력이 근본적으로 제거되어 추력리플이 거의 발생하지 않고, 수직력이 작기 때문에 더욱 뛰어난 제어성능을 가진다.

최근 PMLSM의 연구동향으로 큰 추력을 발생시키는 철심형 PMLSM의 장점인 고효율화는 물론 공심형 PMLSM의 장점인 추력 리플을 최소화시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있으며 그 중 공심형 PMLSM의 상 권선 사이에 강대를 삽입하는 철심 삽입형 PMLSM이 각광을 받고 있다[3,4].

이에 따라 본 논문에서 슬롯리스형 PMLSM의 낮은 추력 밀도를 향상시키고자 철심 삽입형 모델을 제안하였으며 이때, 공극 자기 저항의 차에 의해 발생하는 디텐트력 최소화와 동시에 추력 최대화 설계를 위하여 신경 회로망(Neural Network)법을 적용하였다.

디텐트력 최소화와 추력 최대화를 동시에 만족시키기 위해 설계 변수로는 영구자석의 폭, 삽입되는 철심의 높이, 삽입되는 철심의 폭, 코일 폭을 선정하였고 신경회로망에 의해 최적

의 모델을 선정하였다. 단, 여기서 선정된 모델은 양 단부가 존재하지 않고 길이가 무한한 모델로 가정하였고 단부에 의한 효과는 고려되지 않았다.

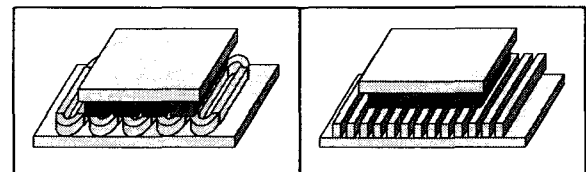
그러나, 직선기는 회전기와 달리 그 길이가 유한하여 단부가 존재하며 단부효과에 의한 detent force가 발생하여 추력 리플로 작용하여 시스템의 운전 특성을 저하시킨다. 이러한 현상은 가동 영구자석형 slotless LSM에서 두드러지게 나타나므로 단부 효과 최소화를 위한 대책이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 편축식 모델의 경우, 단부 효과에 의한 디텐트력을 감소시키기 위해 단부의 양 끝단에 보조극을 설치하여 그 크기와 위치 및 skew를 이용하여 detent force를 최소화 시켰다. 또한, 양축식 PMLSM의 경우에는 보조극 설치와 함께 가동자의 상, 하부의 영구자석을 어긋나게 배치함으로써 detent force를 최소화 시켰다.

2. 해석 모델

2.1 PMLSM의 종류 및 특징

그림 1은 슬롯리스형과 슬롯형 PMLSM의 구조를 나타낸 것이다.



(a)Slotless PMLSM (b)Slotted PMLSM
그림 1 PMLSM의 구조
Fig. 1 Structure of PMLSM

* 學生會員 : (株) 東進電機 研究所 主任研究員
† 교신저자, 正會員 : 昌原大學校 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr
接受日字 : 2004年 2月 28日
最終完了 : 2004年 6月 28日

슬롯리스형 PMLSM은 슬롯형 PMLSM에 비하여 매우 큰 자기적인 공극을 가지며, 공심 형태의 코일 구조를 갖기 때문에 구조가 간단함은 물론 특성 해석이 용이한 장점이 있다.

그림 2는 위의 두 PMLSM 모델에서 추력과 수직력의 유한요소해석 결과이다. 영구자석과 전기자 입력 기자력이 동일할 때, 추력은 슬롯리스형 PMLSM이 슬롯형 PMLSM에 비하여 대략 1/3에 지나지 않는다. 그러나 슬롯리스형 PMLSM은 디텐트력이 발생하지 않아 추력 리플이 없고, 수직력이 철심형에 비해 7~8배 정도 작기 때문에 고속, 고정밀 용 구동 모터로 많이 이용되고 있다.

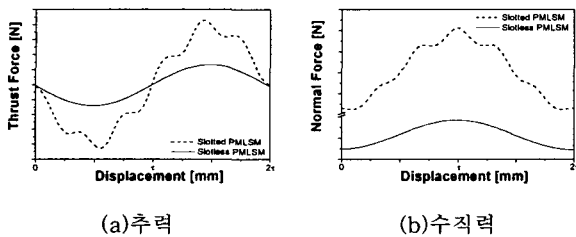


그림 2 PMLSM 모델의 추력 및 수직력 비교
Fig. 2 Comparison of thrust and normal force of PMLSM

2.2 해석 모델

그림 3은 본 연구에서 적용한 슬롯리스형 PMLSM이다. 철심 삽입형 PMLSM은 슬롯리스형 PMLSM의 상 권선 사이에 단순히 철심을 삽입한 모델이며, 삽입된 철심은 back iron과 동일한 재료로 본딩 또는 볼팅을 하거나 back iron과 일체형으로 할 수도 있다. 표 1에 해석 모델의 제원을 나타내었다.

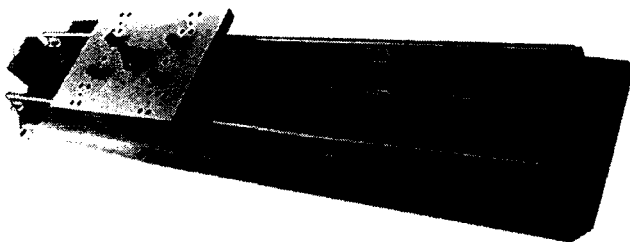


그림 3 슬롯리스형 PMLSM
Fig. 3 Slotless type PMLSM

표 1 해석 모델의 제원

Table 1 Specification of analysis model

항목	값[단위]	항목	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 피치	28.5 [mm]	공극 길이	2 [mm]

2.3. 치 - 슬롯 구조에 의한 디텐트력 최소화 및 추력 최대화 설계

철심 삽입형 슬롯리스 PMLSM은 상 권선 사이에 철심을 삽입하므로써, 추력은 증가하지만, 그림 4에서 보는바와 같이 공극 자기저항이 일정하지 않아 detent force에 의한 추력 리플이 발생하여 슬롯리스 PMLSM의 장점이 사라지게 된다.

즉, 그림 4는 이동자 변위에 따른 슬롯리스 모델과 철심 삽입형 모델의 발생 추력을 나타낸 것이다. 슬롯리스형 모델에서는 최대치가 427.86[N], 코어삽입 모델에서는 1004.27 [N]으로 슬롯리스형에 비해 철심 삽입모델에서는 최대 추력이 2.34배 이상 증가하였다. 이는 철심 삽입에 따른 자기적 공극이 줄어든 결과이다. 슬롯리스형 PMLSM의 발생 추력은 mover를 1[mm]씩 일정 간격으로 이동시키면서 로드셀을 이용하여 측정하였다. 그러나, 그림 5에서 보는 바와 같이 코어 삽입형에서는 추력의 5, 6, 7 고조파 성분은 각각 1.84, 5.43, 0.51[%]로 나타났으며, 이중 6고조파 성분은 디텐트력에 해당되는데 그 피크치가 56.02[N]으로 크게 나타났다. 따라서, 철심 삽입형 PMLSM에서는 디텐트력을 최소화 시키는 설계가 이루어져야 한다.

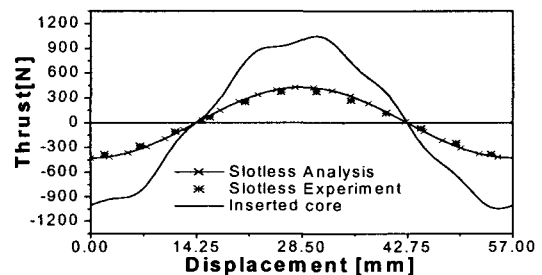


그림 4 정 추력
Fig. 4 Static thrust

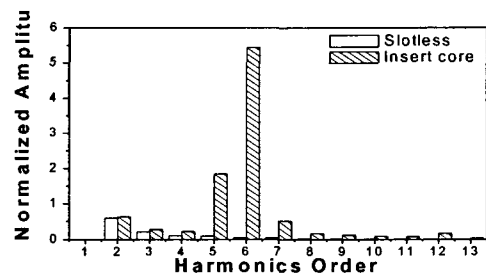


그림 5 정추력의 고조파 성분
Fig. 5 Harmonic component of static thrust

따라서, 본 논문에서는 추력 최대화와 디텐트력 최소화를 동시에 만족시키기 위해 유한요소법과 신경 회로망법을 통해 최적 설계를 진행하였다. 해석 모델의 추력 및 디텐트력의 특성해석은 계변수를 자기 벡터 포텐셜로 하는 2차원 유한요소법(2D-Finite Element Method)으로 수행하였다. 신경 회로망법은 단일 및 다중 목적함수에 대해 최적 설계를 진행하였다.

3. 해석 모델

3.1 최적 설계를 위한 신경 회로망의 적용

상 권선 사이에 단순히 철심만을 삽입한 모델의 추력 및 디텐트력 특성을 나타낸 그림 4 및 5에서 알 수 있는바와 같이 철심 삽입형 PMLSM은 추력은 증가하나 추력 리플이 크게 발생하므로 제어 성능이 떨어지게 된다. 디텐트력을 저감시키는 방법으로는 영구자석의 자극 폭 조절법, 자극배치 조정법, 영구자석 및 전기자 슬롯의 스큐(skew) 구조의 채택, 반폐슬롯(semi-closed slot) 구조 등의 여러 방법들이 보고되었으나 본 논문에서는 디텐트력의 최소화와 추력의 최대화를 동시에 만족하는 최적 설계를 위해 신경회로망을 적용하였다.

목적 함수로는 추력 리플의 주원인인 디텐트력의 최소화, 발생 추력의 최대화, 그리고 디텐트력 최소화와 발생 추력 최대화를 동시에 만족시키는 다중 목적함수를 선정하였다.

설계변수로는 영구자석의 폭(Wm), 삽입되는 코어 높이(hcore), 삽입 되는 코어의 폭(Wcore), 코일 폭(Wc)을 선정하였으며 이를 그림 6에 나타내었다. 신경회로망의 구성은 은닉층을 3층, 각 은닉층의 뉴런 수는 50개로 한 multi-layer perceptron형 신경회로망을 사용하였다. 즉, 신경회로망은 5층 4-50-50-50-3으로 구성하였으며 feed forward error back propagation algorithm을 사용하였다[5].

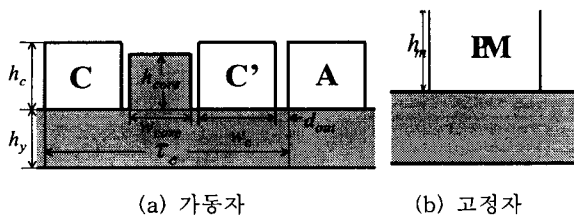


그림 6 설계변수
Fig. 6 Design parameter

표 2 설계변수 변화 범위 및 제약 조건

Table 2 Change range for parameter and restricted conditions

설계 변수	설계 변수 변화 범위
Wc	5[mm] ≤ Wc ≤ 7[mm]
Wm	24[mm] ≤ Wm ≤ 28[mm]
hcore	0mm ≤ hcore ≤ 26.4[mm]
Wcore	22[mm] ≤ Wcore ≤ 26[mm]
제약 조건	추력 ≥ 1000[N] 디텐트력 ≤ 50[N]

목적함수에 대한 제약 조건 및 각 설계변수의 변화 범위는 표 2와 같다. 제약 조건의 선정 기준은 초기 코어 삽입모델 이상의 추력, 즉 1000[N] 이상의 추력으로 설정하였고 디텐트력은 발생 추력의 5[%] 미만으로 설정하였다.

그림 6(a)의 코일에서의 전류 밀도는 항상 동일하게 하기 위해 코일의 단면적 $w_c \cdot h_c$ 은 항상 일정하게 유지하고 코일 간격 d_{out} 도 2[mm]로 고정시켰으며 고정자의 요크 두께 h_y 도 항상 동일하게 설정하였다. 삽입되는 철심 폭 w_{core} 의 변화에 따라서 코일의 높이 h_c 및 코일폭 w_c 의 크기도 변화되도록

하였다. 그림 6(b)의 영구자석은 영구자석의 폭 w_m 만을 변화시켰고, 영구자석의 두께 h_m 은 일정하게 두었다. 이는 영구자석의 두께 증가에 따른 퍼미언스 계수의 변화가 적기 때문에 영구자석 사용량의 증가에 따라 자속 밀도의 증가는 크지 않으므로 설계 변수에서 제외 시켰다.

신경회로망의 학습 데이터 산출을 위한 FEM에 의한 특성 해석 시 형상의 변화에 따른 리모델링 및 전처리를 다시 해야 하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이 단점을 보완하기 위해 모델 절점 이동 기법을 적용하였다. 모델 절점 이동기법은 해석모델의 초기 모델링 데이터인 절점, 선, 영역 등을 이동시킨 후 요소분할을 통하여 각각의 설계변수 변화에 따른 전처리 데이터를 자동으로 생성하도록 하는 방법이다. 따라서, 개체이동 정보의 입력, 요소분할 및 특성해석을 일괄 처리하도록 하여 모델링 및 전처리를 위한 노력 및 시간을 단축시키도록 하였다[5].

3.2 신경회로망에 의한 최적 설계 및 특성 고찰

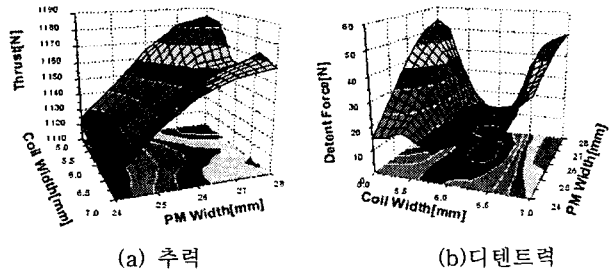


그림 7 신경회로망에 의한 계산 결과
Fig. 7 Calculation results using neural network

그림 7은 코일 폭과 영구자석 폭의 변화에 따른 추력 및 디텐트력의 신경회로망에 의한 해석 결과이다. 제약조건을 만족하는 추력 최대화 모델은 코일 폭 5.2[mm], 영구자석 폭 28[mm]인 모델이고, 디텐트력 최소화 모델은 코일 폭 6.2[mm], 영구자석 폭 26[mm]인 모델이다.

표 3 목적함수에 대한 신경회로망에 의한 해석 결과

Table 3 Analysis result of Neural Network

목적 함수		추력 최대화	디텐트력 최소화	다중 목적함수
설계 변수 [mm]	Wc	5.2	6.2	6
	Wm	28	26	26
	hcore	25.38	21.3	22
	Wcore	25.6	23.6	24
추력 [N]	신경회로망	1183.92	1141.85	1144.99
	유한요소법	1183.64	1141.66	1144.84
디텐트력 [N]	신경회로망	49.95	4.947	4.949
	유한요소법	49.69	4.836	4.838

표 3은 각 목적함수에 따른 최적 모델의 해석 결과 이다. 추력 최대화 모델에서는 코어 삽입 모델에 비해 추력의 최대치가 1004.27[N]에서 1183.64[N]으로 17.86[%]로 증가하였으나 디텐트력이 46.69[N]으로 매우 크고, 디텐트 최소화 모델에서는 추력이 1141.66[N], 디텐트력이 4.836[N]로 나타났으

며, 둘을 동시에 만족하는 다중 목적 함수모델의 경우 디텐트력은 4.838[N]로 다소 증가하나 추력이 1144.83[N]으로 증가하였다.

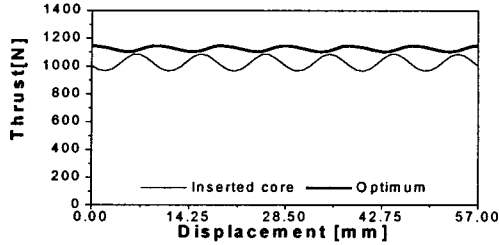


그림 8 정상상태 운전 시 추력 (Load angle 90(deg))
Fig. 8 Thrust in steady state operation

따라서, 추력 최대화와 디텐트력 최소화를 동시에 만족하는 모델을 최적 모델로 선정하였다. 표 3의 결과로부터 신경 회로망에 의한 학습이 올바르게 진행되었음을 알 수 있다.

그림 8은 정상상태 운전 시 추력 특성을 나타낸다. 추력 리플율은 코어 삽입 시 11.4[%]에서 3.9[%]로 대폭 낮아져 양호한 설계가 이루어졌음을 알 수 있다.

4. 단부 효과에 의한 디텐트력 최소화를 위한 설계

앞의 최적화 과정에서는 해석 모델이 무한히 길다는 가정 하에 단부효과를 제외하고 최적화를 진행하였다. 그러나, 선형 전동기는 회전형 전동기와는 달리 그 길이가 유한하므로 단부 효과가 발생한다. 선형 유도기의 경우 단부효과는 슬립에 의해 크게 좌우 되나, PMLSM의 경우에는 단부에서의 누설자속에 의한 디텐트력으로 나타나 추력 리플로 작용한다. 이러한 현상은 영구자석의 길이가 상대적으로 짧은 moving magnet type에서 두드러지게 나타난다[3,5].

따라서, moving magnet type PMLSM에서는 단부효과에 의한 디텐트력을 포함한 전체 디텐트력을 저감시키고자 하는 연구가 필수적이다. 이에 따라, 본 논문에서는 단부효과에 의한 디텐트력은 가동자 양 단부에 보조극을 설치하는 방법으로 저감시키고, 단부효과에 의한 디텐트력과 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력의 독립성을 검증함으로써 최적화 설계의 타당성을 검증하였다.

4.1 단부효과를 고려한 모델의 특성 해석

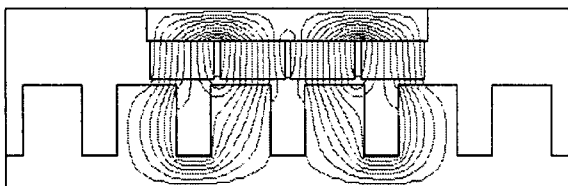


그림 9 단부효과를 고려한 등 포텐셜 라인
Fig. 9 Equi-potential line taking account of end-effect

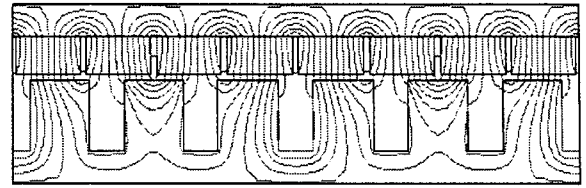


그림 10 주기모델의 등 포텐셜 라인
Fig. 10 Equi-potential line of periodic model

그림 9 및 10은 단부효과에 의한 디텐트력과 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력의 독립성을 검증하기 위해 영구자석 가동자가 고정자보다 짧은 단부가 존재하는 모델과 해석모델의 좌우에 주기 경계조건을 줌으로써 가동자와 고정자가 무한히 길다고 가정한 모델의 등 포텐셜 라인도이다.

그림 11은 각 모델의 공극 중심에서의 자속밀도를 나타낸 것이다. 그림 9, 10에서 알 수 있듯이 flux의 흐름은 두 모델이 상이하지만 그림 11에서 볼 수 있는바와 같이 공극 중심에서의 자속은 단부를 제외한 위치에서 동일하므로 단부에 의한 디텐트력과 치-슬롯에 의한 디텐트력은 독립적으로 고려할 수 있다는 것을 알 수 있다.

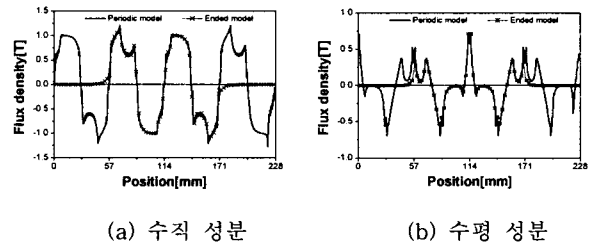


그림 11 공극 자속 밀도
Fig. 11 Air-gap flux density

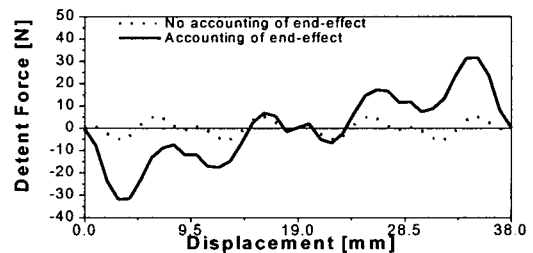


그림 12 디텐트력 비교
Fig. 12 Comparison of detent force

그림 12는 앞서 설계된 최적 모델에 대해 단부효과를 고려한 모델과 고려하지 않은 모델의 디텐트력 특성해석이다. 단부의 존재로 인해 디텐트력의 전체적인 주기가 1 slot 피치로 변화되었고 비 정현적인 디텐트력이 더해졌음을 알 수 있고 최대치가 31.91[N]으로 증가되었으며, 이는 단부효과에 의한 디텐트력이다. 따라서, 단부효과에 의한 디텐트력의 최소화가 이루어져야 됨을 알 수 있다.

4.2 보조극 설치에 의한 단부효과 저감

PMLSM의 경우 단부효과의 저감을 위해 가동자의 양 단부에 주 자극의 영구자석과 반대극성을 가지는 영구자석 보조극이나 철심 보조극을 사용한다. 영구자석 보조극의 경우 주자극의 영구자석과 동일 자석을 사용하거나 다른 재질의 자석을 사용하게 된다. 따라서 본 논문에서는 보조극의 재질로 주자극과 동일한 Nd-Fe-B계열의 자석과 그 보다 잔류자속 밀도가 낮은 Ferrite 자석, 그리고 철심 보조극을 사용해서 단부효과에 의한 디텐트력을 감소시키고자 하였다.

4.2.1 보조극의 설계 변수

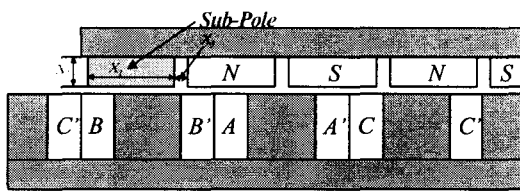


그림 13 보조극의 설계변수
Fig. 13 Design parameter of sub-pole

그림 13은 보조극의 형상에 대한 설계변수를 나타내고 있다. 보조극의 축방향 길이는 주자극과 동일하게 두고 보조극의 폭 X1, 보조극의 높이 X2, 그리고 주극과의 간격 X3을 설계변수로 두었다.

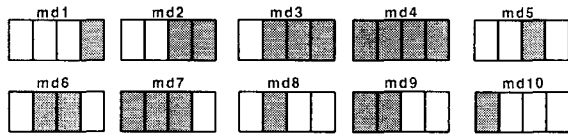


그림 14 제안된 보조극 모델의 형상
Fig. 14 Sub-pole shape of proposed model

그림 14에 설계 변수에 따른 모델 중 대표적인 10가지 모델을 제시하였다. 각 보조극의 폭을 주극의 1/4, 2/4, 3/4, 4/4인 모델들로 위치를 보조극의 1/4간격으로 옮겨간 모델들이다. 표 5는 10가지 모델의 각 설계변수의 값을 나타내고 있다. X2인 보조극의 높이는 모두 동일하게 두었다.

표 5 보조극 모델별 설계변수 값
Table 5 Value of design parameter in each model

Model Type	X1[mm]	X2[mm]	X3[mm]
md1	6.5	12	2.5
md2	13	"	"
md3	19.5	"	"
md4	26	"	"
md5	6.5	"	9
md6	13	"	"
md7	19.5	"	"
md8	6.5	"	15.5
md9	13	"	"
md10	6.5	"	22

4.2.2 보조극 모델에 따른 디텐트력 특성 해석

그림 15는 보조극 재질 및 형태에 따른 각 모델의 디텐트력의 최대치이다. 해석결과, 페라이트 자석 보조극을 사용하면 md3의 형태를 가진 모델의 디텐트력이 11.86[N]으로 가장 작았다. 주 자극과 동일한 Nd 자석을 사용할 경우 전반적으로 디텐트력이 커지는 양상을 보이고 철심 보조극의 경우는 거의 변화가 없으며 주자극과의 간격이 동일하면 디텐트력도 동일한 결과를 얻었다. 주 자극과 동일한 Nd 자석을 사용할 경우 보조극 형상에 따라 디텐트력이 크게 변화하므로 적절한 보조극 높이 및 폭 조절을 통해 디텐트력을 저감시킬 수 있을 것이다.

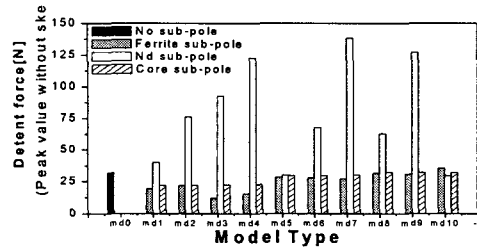


그림 15 각 보조극 모델별 디텐트력
Fig. 15 Detent force of each model

4.2.3 단부효과 저감을 위한 단부자속의 확보 및 각 모델의 디텐트력

그림 16은 디텐트력이 가장 작은 md3 형태의 페라이트 보조극을 사용한 모델과 디텐트력이 가장 크게 나타난 md7 형태의 Nd 보조극을 사용한 모델, md3 형태에서 보조극의 상부와 하부의 절반을 각각 철심과 페라이트로 구성한 모델, md3형태에서 보조극의 높이인 X2를 4.75[mm]로 만든 Nd 보조극을 사용한 모델의 보조극에 의해 발생한 단부에서의 자속을 보여주고 있다.

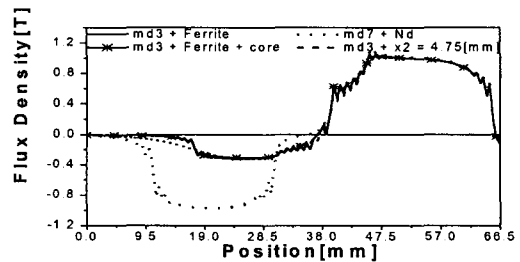


그림 16 보조극 모델별 단부공극 자속밀도
Fig. 16 Air-gap flux density of sub-pole model

그림에서와 같이 단부에서의 자속 밀도가 서로 비슷한 3가지 모델의 디텐트력 역시 각각 11.86[N], 12.58[N], 13.04[N]으로 비슷하였고, 자속 밀도가 높은 Nd보조극 모델은 138.09[N]으로 매우 크게 나타났다. 즉, 보조극의 재질이나 형태에 상관없이 단부에서의 일정 자속 밀도만 확보되면 단부효과에 의한 디텐트력은 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 17은 각 보조극 모델별 디텐트력을 비교한 것이다.

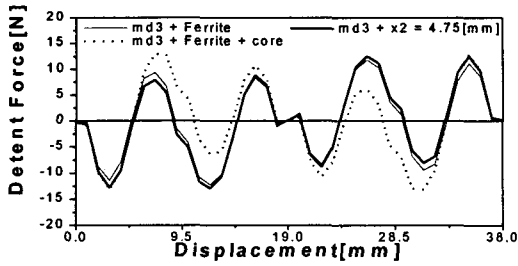


그림 17 보조극 모델별 디텐트력
Fig. 17 Detent force of sub pole model

4.2.4 보조극 및 skew에 의한 전체 디텐트력 저감

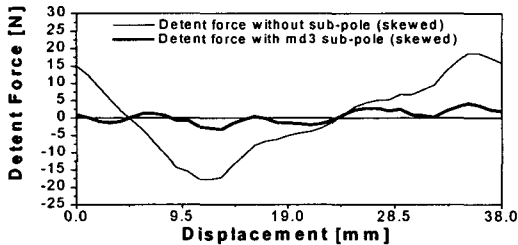


그림 18 보조극의 유무에 따른 디텐트력 (skew 9.5[mm]시행)
Fig. 18 Detent force according to existence of sub-pole

그림 18은 md3 형태의 페라이트 보조극을 사용한 모델과 보조극이 없는 모델의 디텐트력이다. 두 모델 모두 9.5[mm]의 영구자석 skew를 준 모델이다. 해석 결과 보조극을 둔 모델에서는 디텐트력의 최대치가 4.1[N]으로 거의 제거되었음을 확인할 수 있다.

4.2.5 정상상태 운전 시 추력 특성

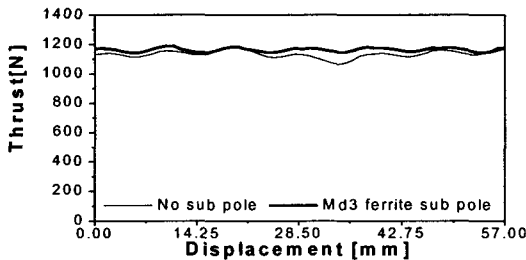


그림 19 정상상태 운전 시 추력 (Load angle 90[deg])
Fig. 19 Thrust in steady state operation

그림 19는 보조극이 없는 모델과 md3형태의 보조극이 있는 모델의 정상상태 운전 시 추력 특성을 나타낸다. 추력 리플율은 보조극을 삽입함으로써 10.2[%]에서 3.8[%]로 대폭 감소하였다. 추력 리플의 성분은 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력, 단부효과에 의한 디텐트력, 그리고 영구자석에 의한 자속의 고조파성분에 의해 발생한 추력리플 성분이 포함된 것으로 영구자석에 의한 추력리플 성분이 가장 크게 나타난다.

4.3 양측식 모델의 디텐트력 해석 결과

4.3.1 양측식 모델

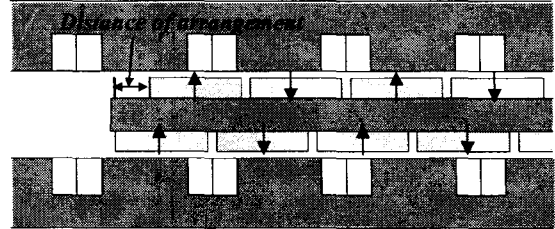


그림 20 양측식 PMLSM 모델
Fig. 20 Double sided PMLSM model

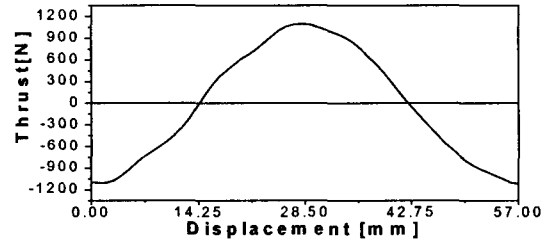


그림 21 정 추력
Fig. 21 Static thrust

그림 20은 양측식 PMLSM 모델을 나타내고 있다. 양측식 모델의 경우 편측식 모델에 비해 수직력을 제거할 수 있다는 장점이 있다. 양측식 모델에서는 그림과 같이 가동자의 상하부 영구자석의 극을 반대로 함으로써 전체적인 flux가 상하 자석과 요크를 일자로 통과하게 설계하였다. 상하부의 자석을 동일 극성으로 놓게 되면 요크의 두께가 증가되어야 요크에서의 포화를 예방할 수 있다. 그림 20의 모델은 앞의 편측식 모델과 동일한 추력을 발생시키기 위해 한쪽편의 슬롯의 높이를 반으로 줄여 전체 슬롯 면적이 동일하게 하고 영구자석의 높이도 반으로 줄여 영구자석 사용량을 동일하게 하였다.

그림 21은 해석 모델의 정추력 특성을 나타내었으며, 최대치는 1115.3[N]으로 편측식의 1144.84[N]과 비슷하다.

4.3.2 디텐트력

그림 22에 양측식 PMLSM의 detent force 특성을 나타내었다. 양측식 모델에서는 가동자의 상하부의 영구자석을 어긋나게 배치함으로써 슬롯 - 치 구조에 의한 detent force는 제거시킬 수 있다. 그러나, 영구자석을 어긋나게 배치하는 것만으로는 단부효과에 의한 detent force를 제거시킬 수는 없으므로 편측식 모델에서의 md3 형태의 Ferrite 보조극을 사용하였다. 단순히 영구자석을 어긋나게 배치한 경우에는 슬롯 - 치 구조에 의한 detent force를 상쇄시키기 위하여 영구자석을 19[mm] 어긋나게 배치하였으며, 보조극을 설치한 모델에서는 4.75[mm] 어긋나게 배치하였다. 가동자의 상하부의 영구자석배열을 단순히 어긋나게 함으로써 skew와 동일한

효과를 얻을 수 있지만 본 연구에서와 같이 단부효과에 의한 디텐트력이 정현파 형태가 아닌 왜형파의 형태를 가지면 단순한 자석의 어긋난 배치만으로는 상, 하부에서의 detent force가 서로 상쇄되지 않아 슬롯 - 치구조에 의한 디텐트력도 완전히 상쇄되지 않았다. 그러나, 보조극을 채용한 경우에는 단부효과에 의한 디텐트력을 저감은 물론 영구자석의 어긋난 배치로 skew와 같은 효과를 얻을 수 있어 슬롯 - 치구조에 의한 detent force도 제거되었다.

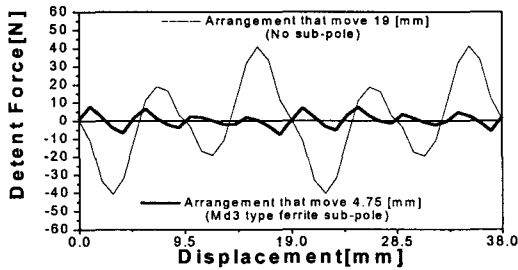


그림 22 양측식 PMLSM의 detent force
 Fig. 22 Detent force of Double sided PMLSM

5. 결론

본 논문에서는 슬롯리스형 PMLSM의 낮은 추력밀도를 향상시키고자 철심 삽입형 모델을 제안하였으며 철심 삽입에 따라 발생한 디텐트력 최소화화 추력 최대화를 위하여 신경회로망을 적용하여 최적 모델을 선정하였다. 신경회로망 학습을 위한 데이터는 2D-FEM을 통해 구하였고 모델 절점 이동 기법을 사용함으로써 해석 시간 및 노력을 대폭 감소시켰다.

신경회로망을 통해 선정된 모델은 단부에 의한 효과를 고려하지 않았기 때문에 단부 효과에 의한 디텐트력을 감소시키기 위해 단부의 양 끝단에 보조극을 사용하여 그 크기와 위치를 조절하여 단부에 의한 디텐트력을 감소시켰다. 단부에 의한 디텐트력을 최소화시키기 위해서는 보조극의 형상이나 재질에 상관없이 단부에서 동일 자속량만 확보하면 됨을 알 수 있었다. 또한 양측식 모델에서는 가동자의 상하부의 영구자석을 어긋나게 배치하여 디텐트력을 감소시키고자 하였으나 단순한 영구자석의 어긋난 배치만으로는 효과를 볼 수 없었고 보조극을 채용하는 방법을 병행함으로써 디텐트력을 저감시킬 수 있었다.

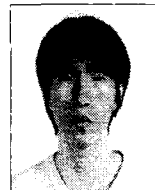
감사의 글

본 연구는 2003년도 창원대학교 연구비 및 공작기계 기술 연구센터(MTRC)의 지원에 의한 연구 결과임

참 고 문 헌

- [1] I. Boldea, S. A. Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, John Wiley and Sons, 1985.
- [2] Jack F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Linear Synchronous Motor : Transportation and Automation System, CRC press, 1999.
- [3] 김용철, 김규탁, "Slotless 영구자석형 선형 동기전동기의 고추력화를 위한 형상 설계", 대한전기학회 논문지 Vol. 52-B, No.7, pp. 320~326, 2003.
- [4] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-tak Kim, "A Novel Design of an Air-Core Type Permanent Magnet Linear Brushless Motor by Space Harmonics Field Analysis", IEEE Trans. Magnetics. Vol. 37, No. 5, pp. 3732 - 3736, 2001. 9.
- [5] 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.
- [6] 박승찬, "유한요소법과 신경회로망을 이용한 직선형 유도전동기의 설계 및 동특성 해석에 관한 연구", 한양대학교 박사논문, 1995.

저 자 소 개



김 미 용(金美鎔)

1976년 5월 1일생. 2002년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 (주)동진전기 주임 연구원

Tel : 055-279-7519

E-mail : miyongkim@changwon.ac.kr



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 客員研究員. 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.

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

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