

Moving magnet type Slotless PMLSM의 end effect에 의한 detent force 최소화

김미용*, 하태욱, 정춘길, 김규택
 창원대학교 전기공학과

Detent force minimization caused by end effect of moving magnet type Slotless PMLSM

Mi-Yong Kim*, Tae-Wook Ha, Chun-Gil Jung, Gyu-Tak Kim
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

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. Furthermore, linear motors have the feature of structurally limited length. So, it causes the end-effect in actual operation.

So, this paper applies the neural network to this model to minimize detent force and maximize thrust. Also, sub-poles used the to the end parts of the mover for compensating the end-effect.

실제 모델은 단 2차형 Moving magnet type 모델이며 가동자는 12극, 고정자인 1차측은 40극으로 구성되어 있다.
 주요치수 및 제원은 표 1과 같다.

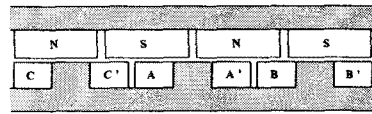


그림 1. 철심 삽입형 slotless PMLSM

표 1. Inserted Core type Slotless PMLSM의 사양

항목	값[단위]	항목	값[단위]
극 수	12	코일당 턴수	650 [턴]
전류저속밀도	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]

1. 서 론

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

본 논문에서는 슬롯리스형 PMLSM의 낮은 추력밀도를 향상시키고자 철심 삽입형 모델을 제안하였으며 이 때, 공극 자기저항의 차에 의해 발생하는 디텐트력을 최소화 시키는 동시에 추력을 최대화시키기 위하여 신경 회로방법을 적용하였다.

디텐트력 최소화와 추력 최대화를 동시에 만족시키기 위해 설계변수로는 영구자석의 폭, 삽입 되는 철심의 높이, 삽입 되는 철심의 폭, 코일 폭을 선정하였고 신경회로망에 의해 최적의 모델을 선정하였다. 여기서 선정된 모델은 양 단부가 존재하지 않고 길이가 무한한 모델로 가정하였고 단부에 의한 효과는 고려되지 않았다.

하지만 직선기는 회전기와 달리 그 길이가 유한하여 단부가 존재하며 단부효과가 발생하게 된다. PMLSM에서는 Moving magnet 양 끝단부의 fringing현상에 의한 디텐트력이 발생하는데 일반적으로 이 효과를 감소시키기 위해 보조극을 채용한다.

따라서 본 논문에서는 단부 효과에 의한 디텐트력을 감소시키기 위해 단부의 양 끝단에 보조극을 사용하여 그 크기와 위치를 조절하였다. 또한 양측식 모델로 등가화 하여 가동자의 상하부의 영구자석을 어긋나게 배치하여 디텐트력을 감소시키고자 하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 철심 삽입형 슬롯리스 PMLSM의 해석모델의 4극분만을 나타내고 있다.

2.2 추력 최대화 및 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력 최소화를 위한 설계

2.2.1 정추력 특성분석

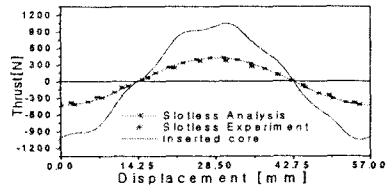


그림 2. 정추력

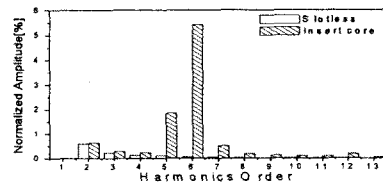


그림 3. 추력 고조파 분석

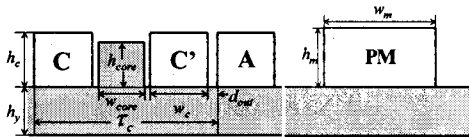
그림 2는 이동자 변위에 따른 슬롯리스 모델과 철심 삽입형 모델의 발생 추력을 나타낸 것이다. 슬롯리스형 모델에서는 최대치가 427.86[N], 철심 삽입 모델에서는 1004.27[N]으로 간단히 철심만을 삽입하는 방법으로 최대 추력이 2.34배 이상 증가함을 확인할 수 있다. 그러나, 그림 3에서 보는 바와 같이 철심 삽입형에서

는 추력의 5, 6, 7 고조파 성분은 각각 1.84, 5.43, 0.51[%]로 나타났으며, 이중 6고조파 성분은 디텐트력에 해당되는데 그 최대치가 56.02[N]으로 크게 나타났다.

2.2.2 최적 설계를 위한 신경 회로망의 적용

본 논문에서는 신경회로망을 이용하여 고 추력화와 동시에 추력 리플 최소화를 위한 최적설계를 진행하였다. 목적 함수로는 추력 리플의 주원인인 디텐트력 최소화, 발생 추력 최대화, 그리고 디텐트력 최소화와 발생 추력 최대화를 동시에 만족 시키는 다중 목적함수를 선정하였다.

설계변수로는 영구자석의 폭(W_m), 삽입되는 철심 높이(h_{core}), 삽입 되는 철심의 폭(W_{core}), 코일 폭(W_c)을 선정하였고 그림4에 나타내었다.



(a) 가동자 (b) 고정자
그림 4. 설계 변수

표 2. 설계변수 및 제약조건

설계 변수	설계 변수 변화 범위
W_c	$5[\text{mm}] \leq W_c \leq 7[\text{mm}]$
W_m	$24[\text{mm}] \leq W_m \leq 28[\text{mm}]$
h_{core}	$0[\text{mm}] \leq h_{core} \leq 26.4[\text{mm}]$
W_{core}	$22[\text{mm}] \leq W_{core} \leq 26[\text{mm}]$
제약 조건	추력 $\geq 1000[\text{N}]$ 디텐트력 $\leq 50[\text{N}]$

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

2.2.3 신경회로망에 의한 해석결과

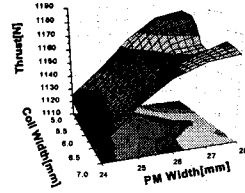
표 3. 신경회로망에 의한 최적 모델

목적 함수		추력 최대화	디텐트력 최소화	다중 목적함수
설계 변수 [mm]	W_c	5.2	6.2	6
	W_m	28	26	26
	h_{core}	25.38	21.3	22
	W_{core}	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

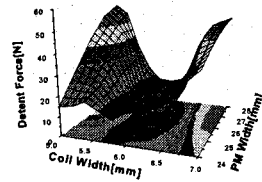
그림 5는 코일 폭과 영구자석 폭의 변화에 따른 추력 및 디텐트력의 신경회로망에 의한 해석 결과이다. 제약 조건을 만족하는 추력 최대화 모델은 코일 폭 5.2[mm], 영구자석 폭 28[mm]인 모델이고, 디텐트력 최소화 모델은 코일 폭 6.2[mm], 영구자석 폭 26[mm]인 모델이다.

표3은 각 목적함수에 따른 최적 모델의 해석 결과이다.

본 논문에서는 추력 최대화와 디텐트력 최소화를 동시에 만족하는 다중 목적함수 모델을 최적 모델로 선정하였다.



(a) 추력



(b) 디텐트력

그림 5. 신경 회로망에 의한 해석결과

2.3 단부효과에 의한 디텐트력 최소화 설계

2.3.1 단부효과를 고려한 모델의 해석



그림 6. 단부효과가 고려된 모델과 고려되지 않은 모델의 Flux 분포도

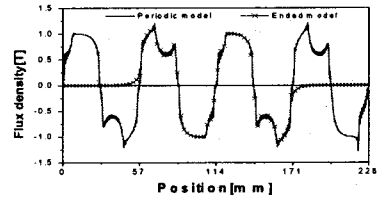


그림 7. 공극 자속밀도(수직 성분)

그림 6은 단부가 존재하는 모델과 존재하지 않는 모델의 flux 분포도이고 그림 7은 각 모델의 공극 중심에서의 자속밀도를 나타낸다. 그림에서 보듯이 flux의 흐름은 두 모델이 상이하지만 공극 중심에서의 자속은 단부를 제외한 위치에서 동일하므로 단부에 의한 디텐트력과 치-슬롯에 의한 디텐트력은 독립적으로 고려할 수 있다.

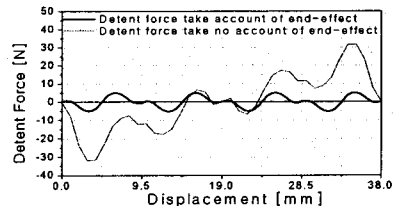


그림 8. 디텐트력 특성

그림 8은 단부효과를 고려한 모델과 고려하지 않은 모델의 디텐트력 특성해석이다. 단부의 존재로 인해 디텐트력의 전체적인 주기가 1 slot 피치로 변화되었다.

2.3.2 보조극에 따른 디텐트력 특성

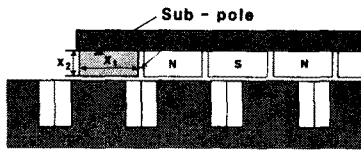


그림 9. 단부효과 저감을 위한 보조극의 설계 변수

표 4. 보조극의 형태에 따른 모델

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

그림 9 및 표4는 보조극의 형상에 따른 모델형태를 나타내고 있다. 예를 들면, md4는 보조극 재질과는 상관없이 주자극과 동일한 크기와 위치에 보조극을 둔 형태를 나타낸다.

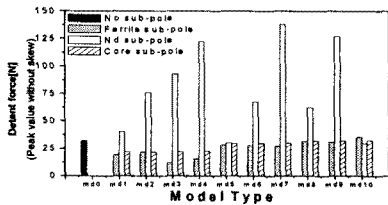


그림 10. 각 모델의 디텐트력 해석결과

그림 10은 보조극 재질 및 형태에 따른 각 모델의 디텐트력의 최대치를 나타내고 있다. 해석결과 페라이트 자석 보조극을 사용하면서 md3의 형태를 가진 모델의 디텐트력이 11.86[N]으로 가장 작았다. 주 자극과 동일한 Nd 자석을 사용할 경우 전반적으로 디텐트력이 크지는 양상을 보인다.

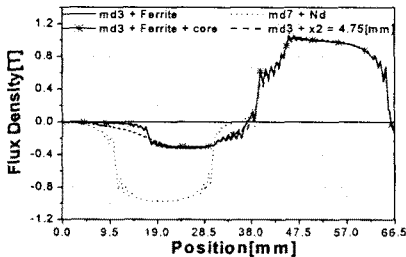


그림 11. 단부에서의 보조극에 의한 자속(수직 성분)

그림 11은 디텐트력이 가장 작은 md3 형태의 페라이트 보조극을 사용한 모델과 md7 형태의 Nd 보조극을 사용한 모델, md3 형태에서 보조극의 상부와 하부의 철반을 각각 철심과 페라이트로 구성한 모델, md3 형태에서 보조극의 높이인 X2를 4.75[mm]로 만든 Nd 보조극을 사용한 모델의 보조극에 의해 발생한 단부에서의 자속을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 단부에서의 자속 밀도가 서로 비슷한 3가지 모델의 디텐트력 역시 각각 11.86[N], 12.58[N], 13.04[N]으로 비슷하였

고, 자속 밀도가 높은 나머지 모델은 138.09[N]으로 매우 크다. 결과적으로 보조극의 재질이나 형태에 상관없이 단부에서의 일정 자속 밀도만 확보하면 단부효과에 의한 디텐트력을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

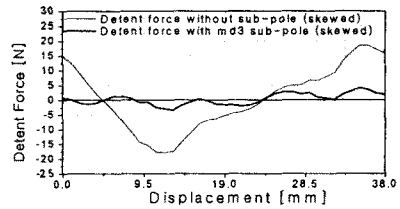


그림 12. 보조극을 둔 모델과 두지 않은 모델의 디텐트력

그림 12는 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.

2.3.2 양측식 모델의 디텐트력 특성

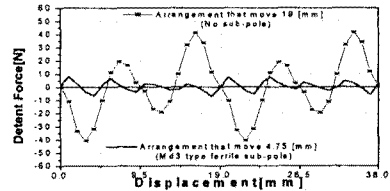


그림 13. 양측식 모델의 디텐트력

그림 13은 편측식 모델을 양측식 모델로 증가화한 모델에 대한 디텐트력 해석 결과이다. 양측식 모델에서 가동자의 상하부의 영구 자석배열을 어긋나게 함으로써 skew와 동일한 효과를 얻을 수 있다. 하지만 본 모델과 같이 단부에 의한 디텐트력이 정현파형태가 아닌 왜형파의 형태를 가지면 그림과 같이 큰 효과를 얻을 수 없다. 따라서 본 논문에서는 양측식에서도 역시 보조극을 채용함으로써 단부에 의한 디텐트력을 저감시켰다.

3. 결 론

본 논문에서는 슬롯리스형 PMLSM의 낮은 추력밀도를 향상시키고자 철심 삽입형 모델을 제안하였으며 디텐트력을 최소화하고 추력을 최대화를 위하여 신경 회로방법을 적용하여 최적 모델을 선정하였다.

여기서 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. 또한 양측식 모델로 증가화 하여 가동자의 상하부의 영구 자석을 어긋나게 배치하여 디텐트력을 감소시키고자 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [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