디텐트력이 저감된 9극 10슬롯 구조의 영구자석 선형 전동기

황인성, 연승환, 윤희성, 고창섭
충북대학교 전기공학과

Permanent Magnet Linear Synchronous Motor having 9Pole 10 Slots for Detent Force Reduction

In Sung Hwang, Sung Whan Youn, Hee Sung Yoon, Chang Seop Koh
Dept. of Electrical Eng. Chungbuk National University

Abstract - 영구자석 선형 동기 전동기(PMLSM)는 코깅력과 단부력에 의한 큰 추력 리플을 갖는 문제점이 있다. 본 논문에서는 영구자석 선형 동기 전동기의 디텐트력을 줄이기 위해 영구자석의 극수와 전기자의 슬롯수의 비를 변경한 새로운 구조의 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기를 제안하였으며, 단부력을 줄이기 위하여 전기자의 길이 조정 및 챔퍼링을 통하여 영구자석 선형 동기 전동기를 설계하였다.

1. 서 론

현재 많은 분야에서 직선운동을 위하여 회전기를 이용하고 있는데, 이는 스크류, 크랭크, 캠, 체인, 벨트 등의 기구들을 사용하여 구현되기 때문에, 이는 시스템이 복잡해지고 효율 및 정밀도가 저하되는 등의 단점이 있다. 반면에 선형 전동기는 추력을 발생시키므로 회전운동을 직선운동으로 변환하기위한 별도의 동력 변환 장치가 필요 없어, 회전기를 사용하는 경우에 발생하는 단점을 극복할 수 있다. 하지만 영구자석 채용 전동기의 특성상 디텐트력(Detent force)이 발생하는 문제점을 갖고 있다 [1].

디텐트력은 추력 맥동(Thrust ripple)의 원인이 되어 전동기의 성능을 저감시키는 요소이고, 이는 두가지 원인에 의해 발생한다. 하나는 코깅력(Cogging force)으로 전기자의 치(teeth)와 영구자석 사이에서 작용하는 것으로, 회전기에서의 코깅토크(Cogging torque)에 대비되는 힘이며, 다른 하나는 단부력(End effect force)으로 전기자 양 단부와 영구자석 사이에 작용하는 인력에 의하여 발생한다. 디텐트력을 줄이기 위하여 전기자의 슬롯 개구폭 및 치폭 조정[2], 전기자 치에 보조구 생성[3],전기자의 길이 조정 및 챔퍼링(Chamfering)[4][5] 등의 많은 연구가 이루어져 왔으나 디텐트력 감소와 함께 추력 또한 감소하는 문제점을 갖고 있다.

본 논문에서는 PMLSM의 코깅력을 줄이기 위하여 영구자석의 극수와 전기자 슬롯 수의 비가 9:10인 새로운 구조의 단 1차형 구조를 제안하고 단부력을 저감하기 위하여 전기자 양단부의 길이 조정과 챔퍼링 법을 적용하여 영구자석 선형 동기 전동기를 설계하였다.

2. 기본모델

2.1 기본 모델의 형상

표 1과 그림 1은 기본모델의 제원 및 형상을 나타낸다. 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기(Short primary PMLSM)의 디텐트력은 그림 2와 같이 전기자의 치와 영구자석에 의한 코깅력(Cogging force)과 전기자 양단과 영구자석에 의한 단부력(End effect force)의 합으로 표현되는데, 전기자의 치와 영구자석에 의한 코깅력은 회전기의 코깅토크에 대비되는 힘으로, 극 간격(pole pitch)의 2배를 영구자석과 전기자의 슬롯비의 최소공배수로 나눈 값을 주기로 발생한다. 전기자 양단과 영구자석에 의한 단부력은 단 2차형 PMLSM에는 존재하지 않는 단 1차형 PMLSM 고유의 단부효과(End effect)에 의한 힘으로 극 간격의 주기로 발생한다.

표 1. 기본모델의 제원
Table 1. Specification of base model

구분	제원	
1차측(전기자)	상수	3
	슬롯폭	12.5(mm)
	슬롯간격	20(mm)
	적층폭	50(mm)
2차측(영구자석)	극간격(τ_p)	15(mm)
	두께	4(mm)
	폭	12.5(mm)
	재질	NdFeB
	잔류자속밀도	1.23(T)
공극	기계적 공극	1.0(mm)

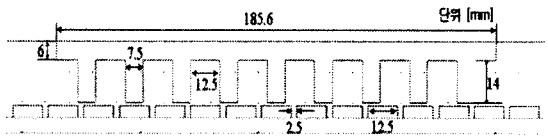

그림 1. 기본모델
Fig. 1. Base model

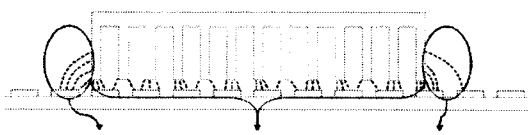

그림 2. 단 1차형 PMLSM의 디텐트력
Fig. 1. Detent force in short primary PMLSM

2.1.1 기본 모델의 챔퍼링

기본 모델의 디텐트력을 줄이기 위해 각 치에 그림 3과 같이 각으로 챔퍼링을 하였으며, 유한요소법을 이용하여 해석한 결과 전체 디텐트력은 28.54[N]에서 12.65 [N]으로 55.6%로 저감되었다. 기본모델의 각 치에 챔퍼링을 함으로써 코깅력을 저감하였고 향후 챔퍼링을 최적화 함으로써 디텐트력을 줄일 수 있다고 판단된다.

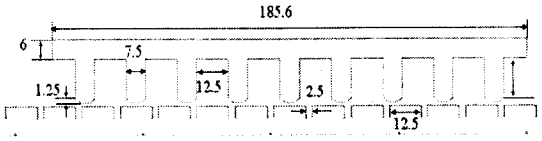

그림 3. 챔퍼링 모델
Fig. 3. Chamfering model

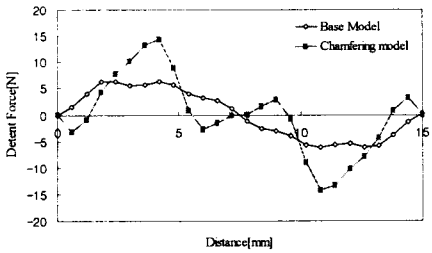

그림 4. 기본모델과 챔퍼링 모델의 디텐트력
Fig. 4. Detent force of Based model and Chamfering model

3. 제안된 모델

3.1 제안된 모델의 형상

PMLSM의 코깅력을 줄이기 위하여 영구자석의 극수와 전기자 슬롯 수의 비가 9:10인 새로운 구조의 단 1차형 구조를 제안하였으며 표 2와 그림 5은 제안된 모델의 제원 및 형상을 나타낸다.

표 2. 제안된모델의 제원
Table 2. Specification of proposed model

구분	제원	
1차측(전기자)	상수	3
	슬롯폭	12.48(mm)
	슬롯간격	19.98(mm)
	적층폭	50(mm)
2차측(영구자석)	극간격(τ_p)	22.2(mm)
	두께	4(mm)
	폭	22.2(mm)
	재질	NdFeB
	잔류자속밀도	1.23(T)
공극	기계적 공극	1.0(mm)

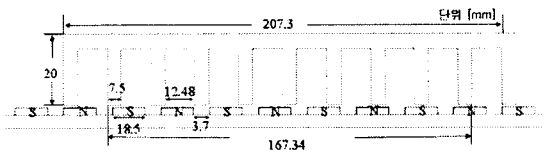

그림 5. 제안된 모델
Fig. 5. Proposed model

3.2 챔퍼링 모델과 제안된 모델의 특성 비교

그림 6은 챔퍼링한 기본모델의 코깅력과 단부력을 나타내다. 코깅력과 단부력이 서로 상쇄되는 구조를 가지고 있어 전체 디텐트력은 작아지게 된다. 하지만 제안된 모델의 경우 그림 7에서 보듯이 코깅력과 단부력이 더해지는 구조로써 전체 디텐트력은 증가하는 것을 알수 있다. 결과적으로 챔퍼링한 기본모델과 제안된모델의 디텐트력을 비교하면 기본모델(4:3 model)의 코깅력과 단부력의 크기는 제안된 모델(9:10 model)보다 크나 기본 모델의 경우 위상이 반대이므로 힘이 상쇄되어 전체 디텐트력은 감소하게 되고, 제안된 모델의 경우 코깅력과 단부력의 위상이 같으므로 힘이 합쳐져 전체 디텐트력은 증가하게 되는 것이다.

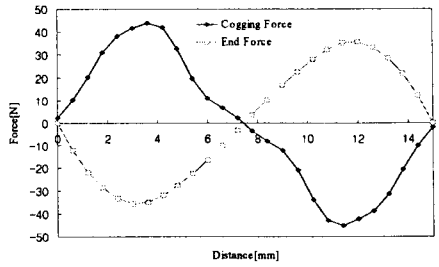

그림 6. 기본모델의 코깅력과 단부력
Fig. 6. Cogging force and end force of based model

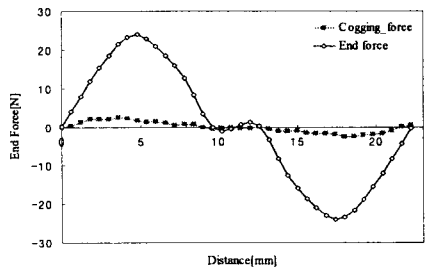

그림 7. 제안된 모델의 코깅력과 단부력
Fig. 7. Cogging force and end force of proposed model

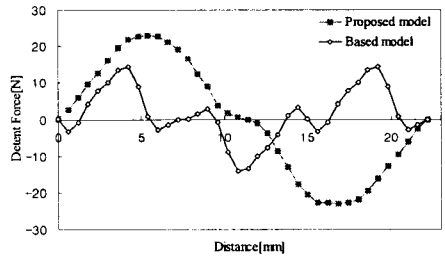

그림 8. 기본모델과 제안된 모델의 디텐트력 비교
Fig. 8. Detent force of based model and proposed model

3.3 전기자 길이조정과 챔퍼링에 의한 단부력저감

그림 7에서 보듯이 제안된 9극 10슬롯 모델의 경우 코깅력은 기본모델에 비해 매우 작지만 단부력이 코깅력에 비해 크고 또한 두 힘이 더해지는 구조이기 때문에 전체 디텐트력이 기본 모델에 비해 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 따라서 제안된 모델에 전기자 길이 조정과 챔퍼링을 통하여 디텐트력을 저감시켜야 한다.

디텐트력을 저감하기 위해 그림 9와 같은 설계 변수를 제안하였다. 그림 9는 각 설계 변수 간의 상호작용과 전기자의 자기적 비선형성을 고려하여 디텐트력을 저감하는 방법으로, 챔퍼링에 해당하는 설계 변수와 전기자 길이 조정에 해당하는 설계 변수를 동시에 설정하여 최적화를 수행하므로 최적화를 수행하는데 필요한 시간을 단축할 수 있다. 영구자석과 전기자 사이에서 발생하는 디

텐트력은 특히 전기자 밑면의 형상에 따라 그 크기가 크게 좌우된다. 따라서 원형으로 챔퍼링을 하는 경우 각지게 챔퍼링을 하는 경우보다 전기자의 높이에 따라 밑면에 작용하는 디텐트력의 영향이 다르게 나타나고 이에 따라 디텐트력의 변화가 적을 것으로 예상되어져 설계변수를 설정하였다.

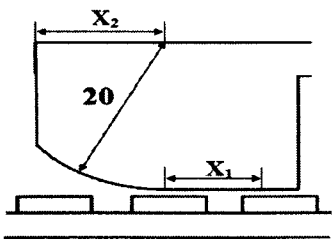

그림 9. 제안된 모델의 설계 변수
Fig. 9. Design parameter of proposed model

3.4 최적화 모델

단부력 저감을 위하여 영구자석 선형 동기 전동기의 전기자 양 단부의 길이 조정과 챔퍼링을 동시에 수행하는 PMLSM을 설계하였다. 그림 10은 제안된 모델의 최적화된 형상이며 그림 11은 최적화된 모델과 챔퍼링한 기본모델의 디텐트력의 변화를 비교한 것이다. 이러한 방법을 통하여 최적화 모델의 디텐트력은 챔퍼링한 기본모델의 디텐트력에 비해 12.65[N]에서 3.38[N]으로 73%로 저감하였다.

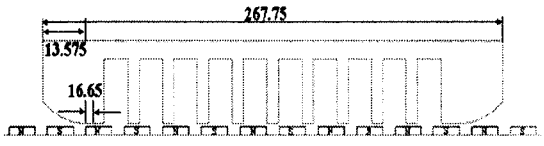

그림 10. 최적화 모델
Fig. 10. optimization model

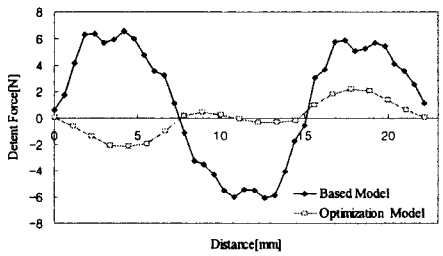

그림 11. 디텐트력 비교
Fig. 11. Comparison of the detent forces

3.5 추력

유한요소법을 이용하여 코깅력과 단부력이 배제된 상태에서 3상 동기기로 구동되는 경우 전기자 전류에 의하여 발생하는 추력을 계산하고 비교하였다. 전기자 전류는 기본모델과 9극 10슬롯 모델 각상에 최대치가 501.6[A·turn]인 정현파 전류가 흐르는 것으로 하였으며, 코깅력과 단부력이 동시에 영이 되는 영구자석과 전기자의 상대위치에서 계산하였다. 그림 12는 전기자 전류의 위상 변화에 따라 계산된 추력을 비교한 것으로, 본 논문에서 제안한 9극 10슬롯 모델의 최대 추력은 180[N]으로 종래의 기본 모델의 최대 추력 141[N]에 비하여 대략 26% 증가함을 알 수 있다.

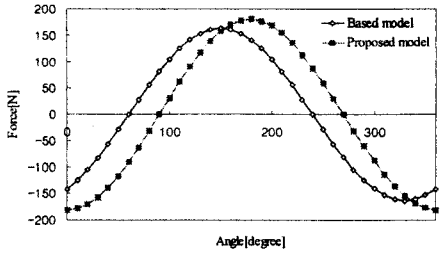

그림 12. 기본모델과 제안된 모델의 추력 비교
Fig. 12. Thrust force of based model and proposed model

4. 결 론

본 논문에서는 단 1차형 선형 동기 전동기에 대하여 디텐트력을 해석하고, 영구자석의 극수와 전기자의 슬롯수 비를 조절하여 9 pole 10 slot 의 제안된 모델을 통해 코깅력을 저감하였다. 또한 전기자 길이와 챔퍼링을 동시에 적용함으로써 단부력을 저감함으로써 챔퍼링한 기본 모델에 비해 전체 디텐트력을 73% 감소하였다. 또한, 동일기자력 조건하에서 추력은 26% 증가함을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] 정인성, "개선된 수치 해석 기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석", 한양대학교 박사학위논문, 1999. 12

[2] 임기채, "영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 저감법", 대한전기학회논문지, Vol.49B, no.11, pp.749 - 756, 2000. 11

[3] 이동엽, "PMLSM의 디텐트력 최소화를 위한 Notch의 적용에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.40 - 42, 2005. 4

[4] 가와시마낀지, "돌극치를 가지는 전기자와 계자자석을 가지는 모터", 대한민국특허청, 제2290호, pp.95 - 116, 1991. 5

[5] Masaya Inoue, "An Approach to a Suitable Stator Length for Minimizing the Detent Force of Permanent Magnet Linear Synchronous Motors", IEEE Transactions On Magnetics, vol.36, no. 4, pp. 1890 - 1893, 2000. 7

[6] T. Yoshimura, H. J. Kim, M. Watada, S. Torii and 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. 3042-3044, November 1995.

[7] I. S. Jung, S. B. Yoon, J. H. Shim and D.S. Hyun, "Analysis of forces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1265-1270, December 1999.