

## 디텐트력 저감을 위한 9극 10슬롯 영구자석 선형 전동기의 최적설계

황인성, 윤희성, 고창섭

충북대학교 전기공학과

## Optimal Design of a PMLSM having 9 Pole 10 Slot for Detent Force Reduction

In Sung Hwang, Hee Sung Yoon, Chang Seop Koh

Chungbuk National University

**Abstract** - 최근 영구자석 선형 동기(PMSLM)는 이동 장치로써 많은 분야에 사용되고 있다. 영구자석 선형 동기 전동기는 구조적으로 간단하며 고속화 고주력화 등의 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기는 매우 큰 디텐트력을 지니고 있어 추력 맥동의 원인이 되며, 이는 소음과 진동을 발생시킨다. 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기의 디텐트력은 전기자 내부의 치와 영구자석 사이에 작용하는 힘과 전기자 양 단부와 영구자석 사이에서 작용하는 힘으로 표현된다. 본 논문에서는 코깅력이 획기적으로 감소한 9극 10슬롯 모델의 단부력을 줄이기 위한 방법으로 양 단부에 전기자 길이 조정법과 챔퍼링 법을 사용하였고, 반응표면법과 ((1+1) evolution strategy)을 이용하여 최적화를 수행하였다.

## 1. 서 론

영구자석 선형 전동기(PMSLM)는 최근 고성능 영구자석의 개발 및 제조 원가의 하락, 전력전자 기술과 디지털 제어기술의 발전으로 인해 초고층 빌딩용 로프리스 엘리베이터, 자기부상열차 등의 고속 지상 운송수단, 항작 기계의 리프트 장치, 반도체 클린룸내에서의 웨이퍼 운송장치 등 그 사용 영역의 폭이 늘어나고 있다. 그러나 영구자석 선형 전동기는 그 특성상 디텐트력이 발생하여 기기의 소음 및 진동을 유발시킬 뿐만 아니라 기기의 재생성능을 저하시키는 문제점을 갖고 있다[1].

단 1차형 영구자석 선형 전동기(short primary PMSLM)에서의 디텐트력은 두 가지 원인에 의해 발생한다. 그 중 하나는 전기자의 치(teeth) 또는 슬롯(slot)과 영구자석 사이에서 발생하는 코깅력(cogging force)으로, 회전형 전동기에서의 코깅토크(cogging torque)에 대비되는 힘이다. 다른 하나는 단부력(end force)으로 회전형 전동기와는 달리 전기자의 유한한 길이로 인하여 영구자석 선형 전동기(PMSLM)의 전기자 양 단부와 영구자석 사이에 작용하는 인력에 의하여 발생한다.

본 논문에서는 코깅력을 줄이기 위해 9극 10슬롯 구조의 PMSLM을 적용하였으며, 단부력을 줄이기 위해서는 전기자 길이 조정에 대응하는 설계 변수와 챔퍼링에 내용하는 설계 변수 2개를 동시에 설정하여 두 설계 변수 간의 상호작용과 자기적 비선형성을 고려하였고 최적화 방법을 한번으로 줄여 최적화에 수행에 필요한 시간을 단축하였다[2,3]. 챔퍼링 방법으로는 단부를 원형으로 설계하는 챔퍼링 방법을 선택하였으며, 반응표면법과 진화 전략을 이용하여 최적화를 수행하였고, 이에 따라 코깅력과 단부력을 최소로 하는 전기자 양단의 치를 설계하였다[4]. 또한 유한요소법(finite element method)을 이용한 해석 방법을 통하여 최적화 설계 변수의 타당성을 검토하였고, 이를 검증하기 위해서 최적화 모델을 실제 제작하여 실험을 수행하였다.

## 2. 본 론

## 2.1 제안된 9극 10슬롯 모델

그림 1은 12극 9슬롯 모델의 형상을 나타내며, 각 치마다 챔퍼링을 함으로써 코깅력을 저감하였다. 그림 2는 제안된 9극 10슬롯 모델의 형상을 나타내고, 표 1은 12극 9슬롯 PMLSM과 9극 10슬롯 PMLSM의 제원을 나타낸 것이다.

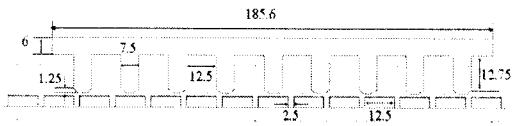


그림 1. 3상 12극 9슬롯 구조의 PMLSM

Fig. 1. Configuration of a 3 phase 12 pole 9 slot PMLSM

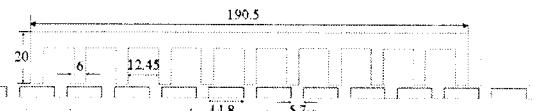


그림 2. 3상 12극 9슬롯 구조의 PMLSM

Fig. 2. Configuration of a 3 phase 12 pole 9 slot PMLSM

표 1. 9p 10s 구조와 12p 9s 구조의 PMLSM의 제원  
Table 1. Specification of 12p 9s PMLSM and 9p 10s

| Item            | Specification           |          |
|-----------------|-------------------------|----------|
|                 | 12p 9s                  | 9p 10s   |
| Number of phase | 3                       | 3        |
| Primary         | Slot width              | 12.5(mm) |
|                 | Slot pitch              | 20(mm)   |
|                 | Laminated height        | 50(mm)   |
| Secondary       | Pole pitch ( $\tau_p$ ) | 15(mm)   |
|                 | Thickness               | 4(mm)    |
|                 | Width                   | 12.5(mm) |
|                 | Material                | NdFeB    |
|                 | Residual flux density   | 1.23(T)  |
| Air gap         | Mechanical tolerance    | 1.0(mm)  |

## 2.2 9p 10s 모델과 12p 9s 모델의 디텐트력 비교

그림 2는 12극 9슬롯 PMLSM과 9극 10슬롯 PMLSM의 전체 디텐트력을 비교한 그래프이다. 그림에서와 같이 9극 10슬롯 PMLSM의 전체 디텐트력이 64.17[N]으로 12극 9슬롯 PMLSM의 전체 디텐트력 47.22[N]과 비교하여 증가하였다. 이는 9극 10슬롯 PMLSM의 코깅력은 현저히 감소하였지만 전체 디텐트력 중 대부분을 차지하

는 단부력으로 인해 9극 10슬롯 모델의 전체 디텐트력을 크게 나타나게 된다. 따라서 제안된 모델에 전기자 길이 조정과 챔퍼링을 통하여 단부력을 저감할 수 있는 설계 변수를 제안하고, 형상 최적화를 통하여 단부력을 저감하면 전체적인 디텐트력을 충분히 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

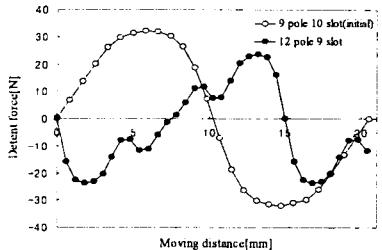


그림 2. 12극 9슬롯과 9극 10슬롯 구조의 디텐트력  
Fig. 2. Detent force of 12 pole 9 slot and 9 pole 10 slot

### 2.3 최적화 결과

디텐트력을 저감하기 위해 설계 변수를 제안하였다. 그림 3은 각 설계 변수 간의 상호작용과 전기자의 자기적 비선형성을 고려하여 디텐트력을 저감하는 방법으로, 전기자 길이 조정에 해당하는 설계 변수  $x_1$ 과 챔퍼링에 해당하는 설계 변수  $x_2$ 를 동시에 설정하여 최적화를 수행하므로 최적화를 수행하는데 필요한 시간을 단축할 수 있다.

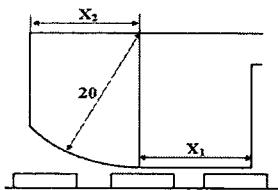


그림 3. 9극 10슬롯 PMLSM의 설계 변수  
Fig. 3. Design parameter of 9 pole 10 slot PMLSM

그림 4는 네 번째 Iteration에 의해 생성된 반응표면과 등고선 그래프이다. 네 번째 Iteration을 통해 얻은 최적 점은 (3.21, 10.94)으로, 최적화 과정을 통해 얻은 목적함수의 값과 유한요소법을 통하여 얻은 목적함수의 값은 각각 2.4(N)과 2.3(N)이다. 본 논문에서는 4회의 Iteration 후 얻어진 준 최적 점을 진해(true solution)로 간주하였다. 그림 5는 최적화모델에서 발생하는 디텐트력을 12극 9슬롯 구조의 종래의 모델과 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 디텐트력은 종래의 기본모델 47.2[N]에서 21.2[N]으로 약 95% 저감함을 알 수 있다. 그림 6은 본 연구에서 제안한 9극 10슬롯 모델의 최종 최적화상을 나타낸 것으로, 기본 모델에 비하여 전체적인 길이가 대략 10% 정도 증가하였다.

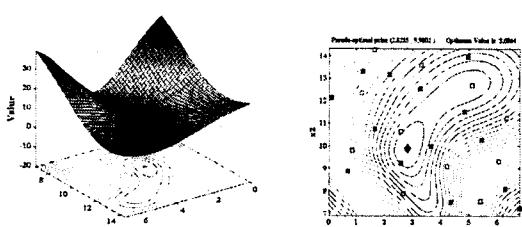


그림 4. 네 번째 반응표면과 최적 점 위치  
Fig. 4. Response surface and a pseudo optimal point

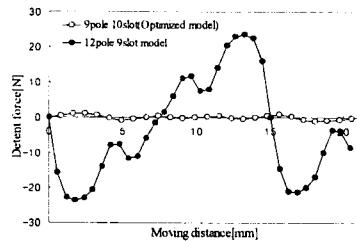


그림 5. 디텐트력 비교  
Fig. 5. Comparison of detent force

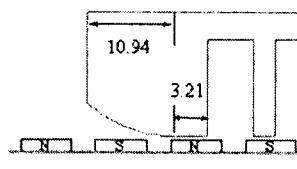


그림 6. 9극 10슬롯 PMLSM의 최적화 모델  
Fig. 6. Optimized model of 9 pole 10 slot PMLSM

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 코킹력과 디텐트력을 배제된 상태에서 3상 동기기로 구동되는 경우 전기자 전류에 의하여 발생하는 추력을 계산하고 비교하였다. 전기자 전류는 12극 9슬롯 모델과 9극 10슬롯 모델 공히 각상에 최대치가 709.37[A·turn]인 정현파 전류가 흐르는 것으로 하였으며, 코킹력과 디텐트력이 동시에 영이 되는 영구자석과 전기자의 상대위치에서 계산하였다. 그림 7은 전기자 전류의 위상 변화에 따라 계산된 추력을 비교한 것으로, 본 논문에서 제안한 9극 10슬롯 모델의 최대 추력은 246.6[N]으로 종래의 12극 9슬롯 모델의 최대 추력 230.7[N]에 비하여 대략 6.4% 정도 증가하였음을 알 수 있다. 한편, 그림 8은 3상 12극 9슬롯과 9극 10슬롯 구조의 PMLSM에 대하여 유한요소법을 이용하여 계산한 유기기전력을 비교한 것으로, 12극 9슬롯의 경우 back-emf가 57.4[V]에서 9극 10슬롯인 경우 65[V]로 약 13% 증가하였다.

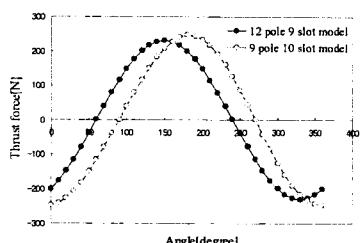


그림 7. 12극 9슬롯과 9극 10슬롯 PMLSMs의 추력  
Fig. 7. Thrust forces of the 12 pole 9 slot and 9 pole 10 slot PMLSMs

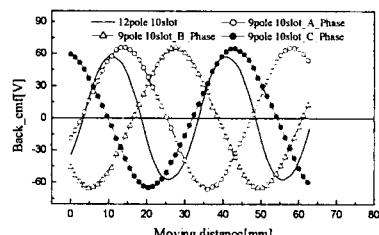


그림 8. 12극 9슬롯과 9극 10슬롯 PMLSMs의 유기기전력  
Fig. 8. Back-emf of PMLSMs

#### 2.4 실험 및 고찰

그림 9(a)는 완성된 9극 10슬롯 쇠적화 모델의 명칭과 형상을 나타내고 그림 9(b)는 구동 서보기구로는 일본 히다찌사의 ADAX-08LL2를 사용하였다. 아마추어 코어가 3(m/s)의 속도로 운전할 때 유기기전력을 측정한 결과 그림 10과 같이 유한요소법에 의해 측정된 값과 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

그림 11과 12는 로드셀에 의해 측정된 두 모델의 디텐트력과 추력을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 디텐트력은 쇠적화 모델이 14.42(N)이고, 12극 9슬롯 모델은 24.9(N)이다. 또한 추력은 입력전류 3.8(A)에서 12극 9슬롯 모델의 추력은 224.3(N)이고, 쇠적화 모델은 240(N)으로 약 6.5%정도 증가하였다.

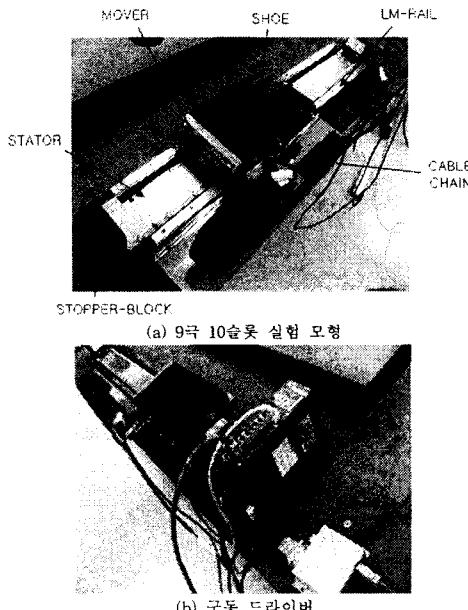


그림 9. 9극 10슬롯 실험 모형  
Fig. 9. The experiment model of 9 pole 10 slot PMLSM



그림 10. 유기기전력 및 홀센서 파형  
Fig. 10. The waveform of back-EMF and hall sensor output with velocity of 3m/s.

### 3. 결 론

본 논문에서는 현재 많은 분야에 이용되고 있는 12극 9슬롯 영구자석 선형 동기전동기의 성능 개선을 위하여 영구자석 선형 동기전동기의 문제점인 디텐트력을 줄여 코킹력을 감소하기 위해서 9극 10슬롯 모델로 제안하였으며 코킹력에 비해 큰 비중을 차지하는 디텐트력을 최소화하기 위해서 설계변수들 사이의 상호작용과 자기적인 비선형성을 고려하여 전기자 길이 조정법과 챔퍼링을 동시에 수행하였으며, 이로 인해 쇠적화 과정을 단축시킴으로써 쇠적화에 걸리는 수행 시간을 단축하였다. 유

한한요소법을 이용한 해석을 통하여 얻어진 전체 디텐트력은 2.12[N]으로 기존의 12극 9슬롯 영구자석 선형 동기 전동기의 전체 디텐트력 47.2[N]과 비교하여 95.5%까지 감소함을 확인하였다. 또한, 이를 검증하기 위하여 실제 쇠적화 모델을 제작하여 실험을 수행한 결과 디텐트력은 저감되고 추력은 증가하여 구동하는데 있어서 정밀한 제어가 필요한 분야에 이용이 가능함을 확인할 수 있었다.

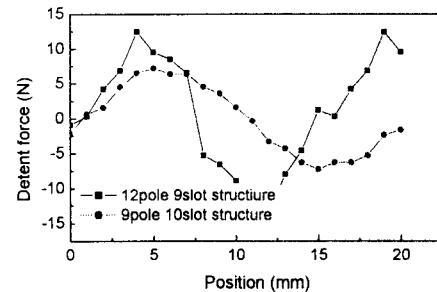


그림 11. 쇠적화 모델과 12 pole 9 slot 모델의 디텐트력.  
Fig. 11. Comparison of the detent force.

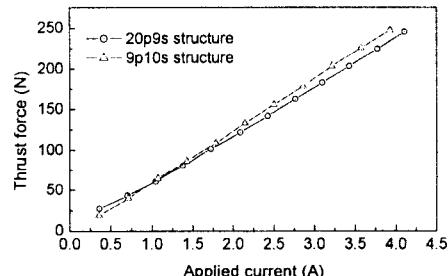


그림 12. 쇠적화 모델과 12 pole 9 slot 모델의 추력  
Fig. 12. Comparison of thrust force.

### [참 고 문 헌]

- [1] 정인성, “개선된 수치해석 기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석,” 한양대학교 박사학위논문, 1999. 12
- [2] M. 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. 07
- [3] G. Martinez, “Reduction of detent force in flat permanent magnet linear synchronous machines by means of three different methods,” IEMDC'03, Vol. 2, pp. 1105 - 1110, 2003. 06
- [4] I. Hwang, S. Youn, S. Homg, and C. Koh, “Shape optimization of a PMLSM with 9 pole 10 slot structure for detent force reduction,” COMPUMAG 2007, Aachen, Germany, pp. 189-190, June 24-28, 2007
- [5] M. 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. 07
- [6] M. 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. 07