

### 3상 9극 10슬롯 영구자석 선형 전동기의 디텐트력 저감 연구

황인성, 윤희성, 고창섭  
충북대학교 전기공학과

## A Study on Detent Force Reduction of 3 Phase 9 Pole 10 Slot Permanent Magnet Linear Motor

In Sung Hwang, Hee Sung Yoon, Chang Seop Koh  
Chungbuk National University

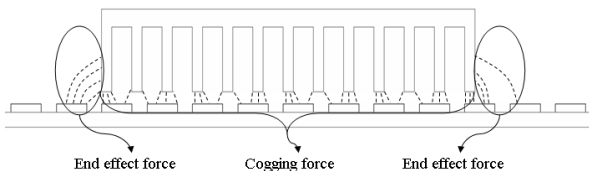
**Abstract** - 최근 영구자석 선형 동기 전동기(PMSLM)는 이동 장치로써 많은 분야에 사용되고 있다. 영구자석 선형 동기 전동기는 구조적으로 간단하며 고속화 고추력화 등의 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기는 매우 큰 디텐트력을 지니고 있어 추력 맥동의 원인이 되며, 이는 소음과 진동을 발생시킨다. 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기의 디텐트력은 전기자 내부의 치와 영구자석 사이에 작용하는 힘과 전기자 양 단부와 영구자석 사이에서 작용하는 힘의 합으로 표현된다. 본 논문에서는 코깅력을 줄이기 위한 방법으로 영구자석의 극 수와 전기자의 슬롯 수의 비를 변경한 새로운 구조의 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기(PMLSM)를 제안하였고, 단부력을 줄이기 위하여 전기자 양 단부에 전기자 길이 조정법과 챔퍼링 법을 사용하였고, 반응표면법과 ((1+λ) evolution strategy)[14]을 이용하여 최적화를 수행하였다.

#### 1. 서 론

영구자석 선형 전동기는 회전자와 비교하여 구조가 간단하고 단위체 적당 고추력 등의 많은 이점으로 인해 직선운동을 요하는 많은 운송 분야에 이용되고 있다. 그러나 일반적으로 널리 이용되는 단 1차형 8극 12 슬롯 영구자석 선형 전동기의 경우 큰 디텐트력을 지니고 있어 그 특성 상 추력에 맥동을 발생하고, 이로 인한 소음과 진동이 발생함은 물론 저속으로 움직일 때의 속도제어의 정밀도 특성을 저하시키는 단점이 있다. 영구자석 선형 전동기의 디텐트력은 그림 1과 같이 두 가지 원인에 의해 발생한다. 그중 하나는 단부력으로 영구자석과 전기자의 양 단부에서의 자기적 상호작용에 의해 발생하며, 또 다른 하나는 코깅력으로 영구자석과 전기자의 치(teeth) 또는 슬롯(slot)의 자기적 상호작용에 의해 발생한다.

영구자석 선형 전동기의 단부력 저감을 위해 전기자 길이 조정법, 챔퍼링 등의 연구가 있어 왔으며[1], 또한 영구자석 선형 전동기의 코깅력 저감을 위해 영구자석의 폭 조정, 영구자석의 스쿼, 슬롯폭 조정 또는 치폭 조정, 반폐슬롯 및 보조구 설치 등의 많은 연구가 있어왔다. 그러나 이러한 방법들은 디텐트력의 저감에 대한 관점에서 보면 매우 효과적이나 추력 또한 감소하는 특성을 보이고 있다[2].

본 논문에서는 영구자석 선형 전동기의 코깅력을 줄이기 위해 새로운 구조의 3상 9극 10슬롯 영구자석 선형 전동기를 제안하였다. 한편 단부력을 저감하기 위해 전기자 길이 조정에 대응하는 설계 변수와 챔퍼링에 대응하는 설계 변수 2개를 동시에 설정하여 두 설계 변수 간의 상호작용과 전기기기의 자기적 비선형성을 고려하였고 최적화 방법을 한 번으로 줄여 최적화 수행에 필요한 시간을 단축하였다. 챔퍼링 방법으로는 단부를 원형으로 설계하는 챔퍼링 방법을 선택하였으며, 반응표면법(response surface method) 과 ((1+λ) evolution strategy)을 이용하여 최적화를 수행하였고, 이에 따라 코깅력과 단부력을 최소로 하는 전기자 양단의 치를 설계하였다.



〈그림 1〉 단 1차형 PMLM의 디텐트력

#### 2. 본 론

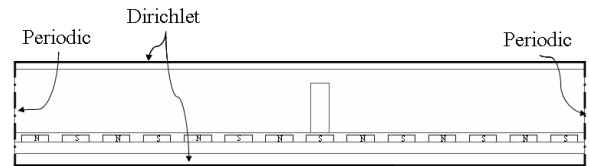
##### 2.1 코깅력의 발생원리

영구자석 선형 전동기의 코깅력은 아마추어 코어의 슬롯과 영구자석 사이에 작용하는 힘이다. 하나의 슬롯에서 발생하는 코깅력을 해석하기

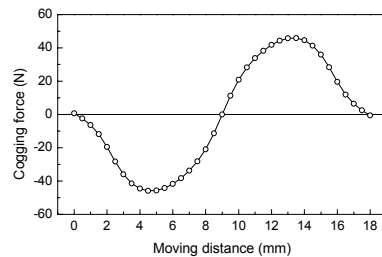
위하여 그림 2(a)와 같은 모델을 제안하였다. 영구자석의 폭( $w_p$ )과 극 피치( $\tau_p$ )가 각각 14.8[mm], 20.5[mm]이고, 슬롯 폭( $w_s$ )이 6[mm]인 경우, 아마추어 코어의 비선형성을 고려하여 유한요소법을 이용하여 계산한 코깅력의 파형은 그림 2(b)와 같다.

하나의 슬롯에서 발생하는 코깅력을  $f(x)$ 라 하고 이동거리를  $x = \omega t$ 로 표현하면, 각속도( $\omega$ )는 영구자석의 극 피치( $\tau_p$ )를 전기자 각  $2\pi$ 로 정의할 때  $\omega = 2\pi/\tau_p$ 로 표현된다. 이를 Fourier 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin(\omega t + \alpha_i) \quad (1)$$



(a) 코깅력 계산 모델



(b) 코깅력 파형

〈그림 2〉 하나의 슬롯에서 발생하는 코깅력

##### 2.1.1 9극 10슬롯 구조의 PMLSM의 코깅력

그림 3은 9극 10슬롯 구조의 PMLM이다. 영구자석의 극 피치  $\tau_p$ 는 아마추어 코어 길이를 영구자석의 개수로 나눈  $184.5/9=20.5$ [mm]에 의해 계산되어지고, 같은 방법으로 슬롯 피치 또한  $184.5/10=18.45$ [mm]와 같이 계산되었다.

앞에서와 같이 3상 9극 10 슬롯 구조의 코깅력은 극 피치( $\tau_p$ ), 20.5[mm]를 갖는 함수가 된다.  $i$  번 슬롯에서 발생하는 코깅력을  $f_i(x)$  라고 하면, 전체 코깅력은 다음 식으로 표현된다.

$$F(x) = \sum_{i=1}^9 f_i(x) \quad (4)$$

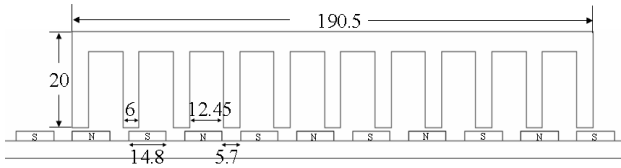
9극 10슬롯 PMLM의 슬롯은 각각 아마추어의 슬롯 피치( $\tau_s$ ), 18.45[mm]만큼 떨어져 위치한다. 이를 Fourier 급수로 전개하면 다음과 같이 표현된다.

$$f_i(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + n\theta_i + \alpha_n) \quad (5)$$

식 (5)을 이용하여 9극 10슬롯 PMLM의 전체 코깅력을 계산하면 다음과 같이 된다[3].

$$F(\omega t) = \sum_{i=1}^{10} f_i(\omega t) \quad (6)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sum_{i=1}^{10} \sin(n\omega t + n\theta_i + \alpha_n)$$

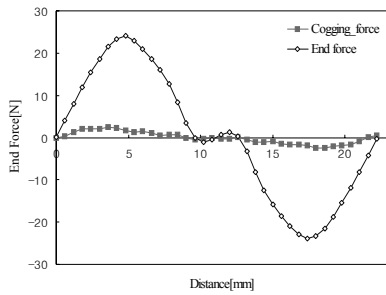


〈그림 3〉 9극 10슬롯 구조의 PMLM

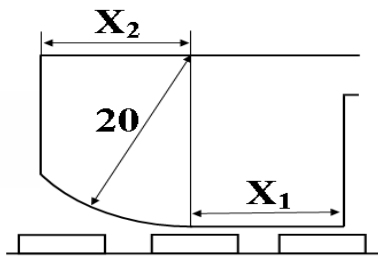
### 2.2 전기자 길이 조정과 챔퍼링에 의한 단부력 저감

9극 10슬롯 모델의 경우 코깅력은 감소하였지만 단부력이 코깅력에 비해 크고 또한 두 힘이 더해지는 구조이다. 따라서 제안된 모델에 전기자 길이 조정과 챔퍼링을 통하여 디텐트력을 저감시켜야 한다.

디텐트력을 저감하기 위해 그림 5와 같은 설계 변수를 제안하였다. 그림 5는 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 디텐트력은 특히 전기자 밀면의 형상에 따라 그 크기가 크게 좌우된다. 따라서 원형으로 챔퍼링을 하는 경우 각 지게 챔퍼링을 하는 경우보다 전기자의 높이에 따라 밀면에 작용하는 디텐트력의 영향이 다르게 나타나고 이에 따라 디텐트력의 변화가 적을 것으로 예상되어서 설계 변수를 설정하였다[4].



〈그림 4〉 9pole 10 slot PMLSM의 코깅력과 단부력



〈그림 5〉 제안된 모델의 설계 변수

### 2.3 최적화 모델

반응표면법을 이용하여 최적화를 하기 전에 먼저, 설계 변수의 범위와 목적함수를 정한다. 변수 범위와 목적함수는 표 1과 같다.

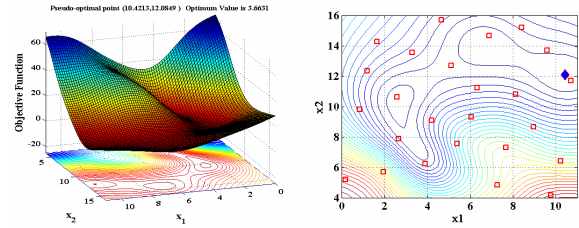
첫 번째 Iteration에서의 샘플 포인트는 Latin Hypercube Method를 사용하여 총 25개를 발생하였으며, 그림 6(a)와 (b)는 반응표면법에 의해 생성된 표면 그래프와 등고선 그래프이다. 목적함수를 최소화하는 최적점은 그림 6에서 마름모형으로 굵게 표시된 부분으로 그 값은 (10.42, 12.08)이다.

두 번째 Iteration에서는 앞서 구해진 최적점을 중심으로 샘플 포인트를 추가로 16개를 생성시킨다. 그림 7(a)와 (b)는 두 번째 Iteration에 의해 생성된 표면 그래프와 등고선 그래프이다. 목적함수를 최소화하는 최적점은 (10.26, 12.12)으로 최적점이 이동했음을 볼 수 있다.

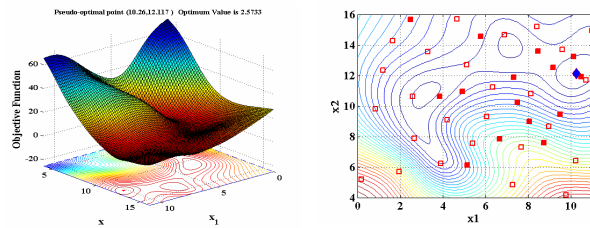
그림 8은 9p 10s PMLSM 모델의 최적화된 형상이며 그림 9는 최적화된 모델과 기본모델의 디텐트력의 변화를 비교한 것이다. 최적화 방법을 통하여 최적화된 모델의 디텐트력은 기본모델의 디텐트력에 비해 64.17[N]에서 1.95[N]으로 97%로 저감하였다.

〈표 1〉 설계 변수 범위와 목적함수

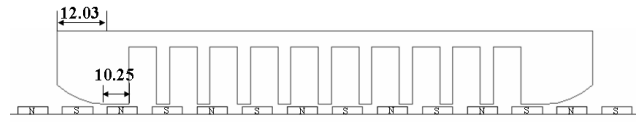
x1	x2	Objective Function
0~11[mm]	4~16[mm]	디텐트력[N]



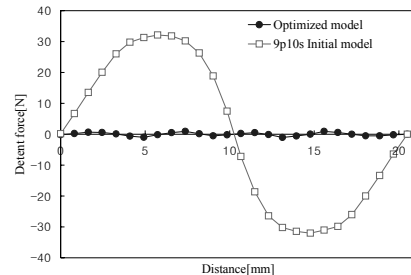
(a) 표면 그래프 (b) 등고선 그래프  
〈그림 6〉 반응표면과 최적점 위치 - 1st iteration



(a) 표면 그래프 (b) 등고선 그래프  
〈그림 7〉 반응표면과 최적점 위치 - 2st iteration



〈그림 8〉 최적화 모델



〈그림 9〉 디텐트력 비교

## 3. 결 론

본 논문에서는 디텐트력을 감소시키기 위해서 9p 10s 모델을 제안하고 전기자 길이와 챔퍼링을 동시에 적용하는 설계변수를 제시함으로써 최적화를 수행하는데 필요한 시간을 단축시켰다. 반응 표면법과 (1+λ) evolution strategy 이용하여 형상 최적화를 수행하였고, 유한요소법을 이용하여 결과를 검증하였다. 두 번의 Iteration을 통해 전체 디텐트력을 초기의 모델에 비해 97% 감소시킬 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 임기채, "영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 저감법", 대한전기학회논문지, Vol.49B, no.11, pp.749 - 756, 2000. 11
- [2] 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.
- [3] 정인성, "개선된 수치 해석 기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석", 한양대학교 박사학위논문, 1999. 12
- [4] M. Inoue and K. Sato, "An approach to a suitable stator length for minimizing the detent force of permanent magnet linear synchronous motors," IEEE Trans. on Magn., vol. 36, no. 4, pp. 1890-1893, July 2000.