

## 반응표면법을 이용한 수직배열형 양측식 영구자석 선형 동기전동기의 최적설계

(Optimum Design of a Perpendicular Permanent Magnet Double-sided Linear Synchronous Motor using Response Surface Method)

김창업\*

(Chang-Eob Kim)

### Abstract

This paper presented an optimum design of a perpendicular PMDSLSM (Permanent Magnet Double-sided Linear Synchronous Motor) to minimize the detent force. As an optimum method, the response surface method was used and 3D finite element method for the calculation. The design variables of the machine were the primary core width and thickness, and magnet width, thickness and length. Object functions were to minimize the detent force and maximize the thrust of the basic model. The results showed that the thrust force of the optimum design increased from 82.1N to 90.2N and detent force decreased from 15.2N to 2.8N, respectively, compared to the basic model.

Key Words : Perpendicular Permanent Magnet Double-Sided Linear Synchronous Motor, Detent Force, Response Surface Method, Finite Element Method

### 1. 서 론

영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : PMLSM)은 추력/중량비가 높아 고추력과 고속화가 가능하며 시스템 효율이 높은 장점을 지니고 있다. 또한 자성재료와 고에너지 밀도의 영구자석 개발로 인해 전기철도, 반송시스

템, 반도체 제조장비와 같은 FA분야와 사무기기 같은 OA분야 등 여러 응용분야를 지니고 있다[1]. 그러나 구조적인 특성으로 인해 PMLSM은 필연적으로 디텐트력(Detent force)이 발생하게 되는데, 이러한 디텐트력은 추력과 맥동으로 작용하여 제어 성능을 저하시키며 기기의 소음과 진동을 발생시키는 등의 악영향을 끼친다. 이로 인해 기기의 제반 특성을 향상시키기 위한 디텐트력 감소는 필수적이다[2-3]. 디텐트력을 줄이는 방법 중 영구자석 형상의 변화에 의한 방법이 몇가지 발표되었으나 추력이 저하되는 단점을 가지고 있다[4-5].

본 논문에서는 참고문헌[2]에 소개된 수직배열

\* Main author : Dept. of Electrical Engineering at Hoseo University, Professor  
Tel : 041-540-5657, Fax : 041-540-5658  
E-mail : cekim1@naver.com  
Received : 2015. 10. 6.  
Accepted : 2015. 12. 22.

형 양측식 영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Double-Sided Linear Synchronous Motor : PMDSLMSM)의 철심 및 영구 자석의 폭, 길이, 높이를 변화시켜 3D 유한요소법과 반응표면법을 이용하여 디텐트력을 최소로 하는 최적 형상을 구하여 기본 모델과 비교하였다.

## 2. 기본 모델 해석

### 2.1 수직배열형 양측식 영구자석 선형 동기전동기

그림 1은 수직배열형 양측식 영구자석 선형동기전동기의 기본모델 형상이고, 표 1은 기본모델 설계치수와 전기적 사양이다. 고정자의 일부인 영구자석은 선형 동기전동기의 진행 방향에 대해 수직으로 순차적으로 배치된다. 그리고 이동자인 전기자는 양측식으로 9개의 철심모듈의 조합으로 이루어진다. 전기자에 교번하는 3상 전력을 인가하여 일정 방향으로 추력이 발생하도록 되어 있다[2].

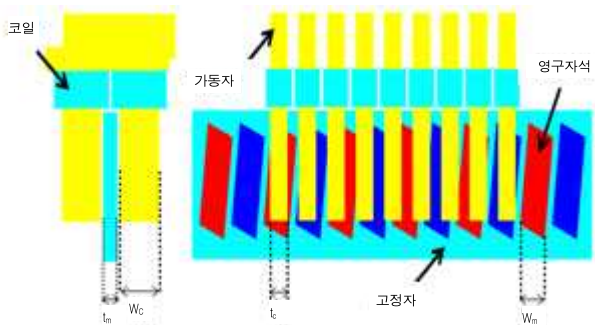


Fig. 1. Perpendicular Permanent Magnet Double-sided Linear Synchronous Motor

### 2.2 유한요소 해석

그림 2는 3D 유한요소 프로그램을 이용하여 기본모델의 3차원 요소 분할도와 자속분포도를 나타낸 것이다. 전체 요소 수는 68만개 내외이다. 기본모델의 전기자 이동에 따른 디텐트력(peak-to-peak)은 15.2N, 3.6A를 인가하였을 때의 추력은 82.1N이다.

Table 1. Specifications of basic perpendicular PMDSLMSM

	항목	값
전기자	모듈	9
	전기자 간격	20mm
	전기자 폭(wc)	14mm
	전기자 길이(tc)	12mm
	전기자 높이	55mm
고정자	영구자석	8
	극 간격	22.5mm
	영구자석 폭(wm)	18mm
	영구자석 두께(tc)	5mm
코일	턴수	200turn
	지름	0.3mm
	정격 전류	3.6A
	최대 전류	10A
	공극	1mm

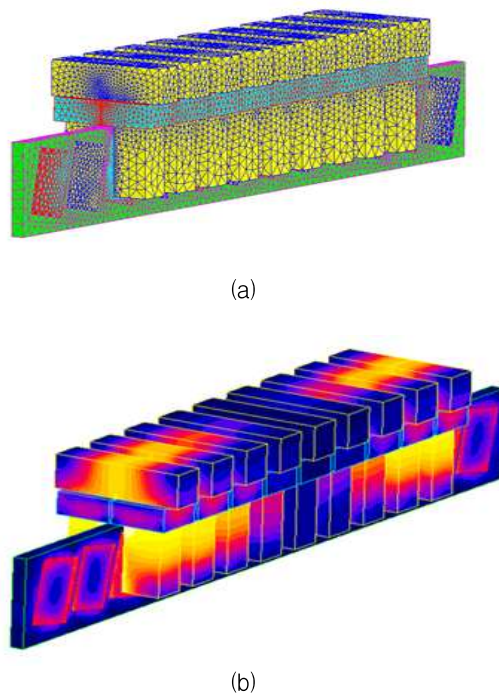


Fig. 2. Mesh and magnetic flux distribution of basic perpendicular PMDSLMSM (a) mesh (b) magnetic flux distribution

### 3. 반응표면법을 이용한 최적설계

#### 3.1 반응표면법

그림 3은 반응표면법을 이용한 최적설계의 최적화 알고리즘을 나타낸 것이다. 초기 샘플링에 대한 설계 변수 데이터틀 형성한 후에 형상에 대한 매개변수를 탐색하고 응답표면을 구성하였다. 그리고 최적점을 탐색한 후에 새로운 형상 매개변수를 응답표면으로 구성하여 새로운 최적점을 탐색하였다. 이 단계에서 목적함수가 만족되면 최적 모델로 선정한다. 그러나 만족하지 않았을 경우에는 다시 최적점 탐색으로 돌아가서 다시 최적 모델이 나올 때 까지 피드백 작용을 하면서 최적 모델을 찾는 방법으로 알고리즘이 진행이 된다[6].

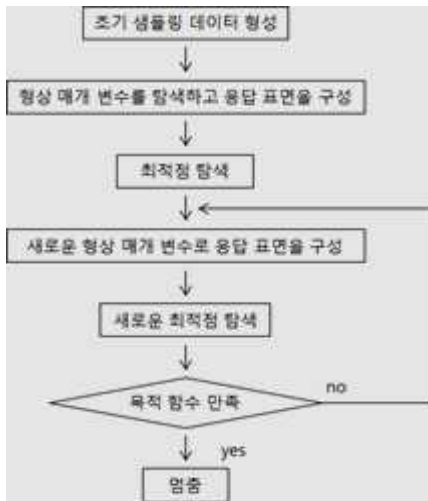


Fig. 3. Flowchart of optimum design algorithm

#### 3.2 설계변수

본 논문에서는 설계 변수에 따라 수직배열형 양극식 영구자석 선형동기전동기의 최적화를 진행하였다. 가동자 부분에 반폐 슬롯을 적용하여 폭과 두께를 설계 변수로 설정하고 고정자 부분에서는 영구자석 형태에 2-stair를 적용하여 폭과 두께를 설계변수로 설정하여 진행하였다.

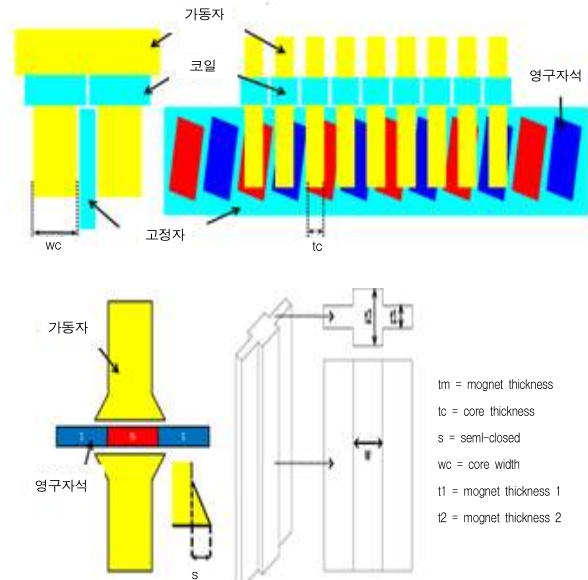


Fig. 4. Design variables

가동자에 반폐 슬롯을 적용하여 반폐 슬롯의 두께 ( $s$ ), 가동자의 폭( $w_c$ )과 가동자의 두께( $t_c$ )를 조절하며, 고정자에서 영구자석에 2-stair를 적용하여 영구자석의 끝단부분의 길이( $t_1$ )과 가운데부분의 길이( $t_2$ ), 그리고 영구자석의 가운데 폭( $w$ )을 설계변수로 설정하였다. 목적함수로는 디텐트력은 최소가 되는 점으로 하고 제약조건으로는 기본모델의 추력을 유지하기 위해서 추력은 90N 이상이 되는 것으로 하였다. 표 2는 최적모델의 설계변수에 따른 목적함수와 제약조건을 나타내었다.

Table 2. Design variables, constraint and object function

목적 함수	디텐트력 : 최소
제약 조건	추력 $\geq$ 90N
설계 변수 (mm)	$8 \leq t_c \leq 16$
	$10 \leq w_c \leq 18$
	$0 \leq s \leq 1.5$
	$2 \leq t_1 \leq 5$
	$2 \leq t_2 \leq 5$
	$10 \leq w \leq 16$

### 3.3 해석 결과 및 검토

표 3은 가중치에 따른 설계변수의 최적화 결과이다. 여기서 T와 D는 각각 기본모델에 비해 최적설계의 추력과 디텐트력의 변화이다. 추력 대 디텐트력의 가중치가 1 : 9일 경우 추력은 90.2N, 디텐트력은 2.8N으로 가장 작은 결과를 보였다.

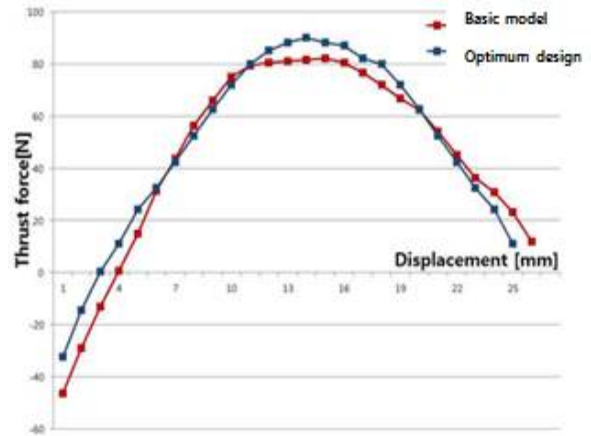
Table 3. Design variables, constraint and object function

가중치	설계변수(mm)						결과(N)	
	wc	tc	s	t1	t2	w	추력	디텐트력
T : D								
5 : 5	18	8	1.5	3.54	3.54	13.45	91.4	3.3
4 : 6	18	8	1.5	3.36	3.57	14.16	91.2	3.2
3 : 7	18	8	1.5	3.39	3.51	14.02	90.9	3.1
2 : 8	18	8	1.5	3.45	3.45	13.87	90.6	2.9
1 : 9	18	8	1.5	3.39	3.42	14.16	90.2	2.8

가중치에 따른 추력 및 디텐트력을 참조하여 유한요소 프로그램인 Flux를 사용하여 반응표면법에서 나온 값과 일치하는지 확인해 보았다. 그리고 최적모델을 새로 형상화하여 그에 따른 자속분포도와 추력 및 디텐트력을 해석해 보았다.

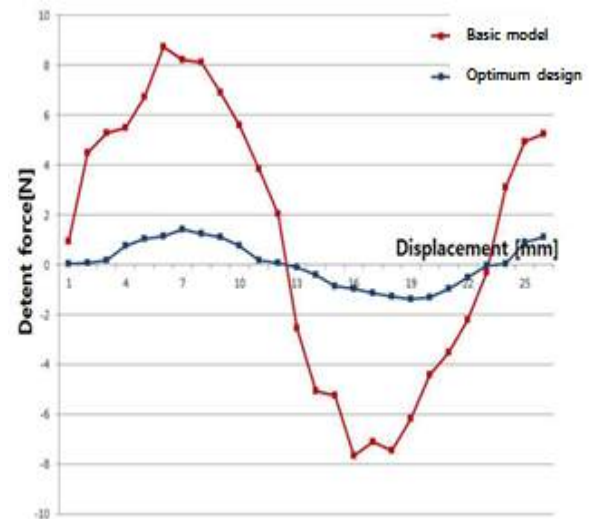
기본모델에 반폐슬롯을 적용하여 영구자석의 폭과 두께 그리고 형상을 조절하여 수직배열형 양극식 영구자석 선형동기전동기이 최적모델을 제시하였다. 기본모델보다 가동자의 두께( $w_c$ )는 4mm 증가하였으며 가동자의 폭( $t_c$ )는 4mm 감소하였다. 그리고 가동자에 1.5mm의 삼각형 모양의 반폐슬롯( $s$ )이 적용되었다. 고정자쪽은 끝단부분( $t_1$ )이 1.61mm 감소하였으며 가운데 부분( $t_2$ )이 1.58mm 감소하였다. 가운데 폭( $w$ )은 14.16mm로 2-stair 형태로 갖추어져 있다.

그림 5는 기본 모델과 최적 모델의 추력을 비교한 것으로 기본 모델에 비해 최대 추력이 9.9% 증가되었다. 그림 6은 기본모델과 최적모델의 디텐트력을 비교한 것으로 기본 모델에 비해 디텐트력이 81.6% 감소되었다.



구분	기본 모델	최적 모델	비교
추력(N)	82.1	90.2	+9.9%

Fig. 5. Thrust force for basic model and optimum design



구분	기본 모델	최적 모델	비교
디텐트력(N)	15.2	2.8	-81.6%

Fig. 6. The detent force for basic model and optimum design

## 4. 결 론

본 논문에서는 수직배열형 양극식 선형동기전동기의 디텐트력을 저감하기 위한 형상최적화에 대해 연

구하였다. 최적설계 방법인 반응표면법을 이용하여 전동기 가동자 및 고정자의 설계변수에 따라 디텐트 력이 최소가 되는 모델을 구하였다. 최적설계 결과 기본모델에 비해 추력은 약 9.9% 상승하였으며, 디텐트 력은 81.6% 저감되었다.

본 연구 결과는 앞으로 다양한 수직배열형 양측식 선형동기전동기의 설계 및 기술 개발에 기초 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

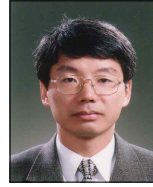
감사의 글

이 논문은 2014년 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2014-0023).

References

- [1] I. Boldea, S.A. Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, John Wiley Sons, Inc, pp. 107-112, 1985.
- [2] Chang-Eob Kim, Seong-Ho Lee, Dong-Hee Lee, and Hwang-joong Kim, The Analysis of Permanent Magnet Double-Sided Linear Synchronous Motor with Perpendicular Arrangement, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 5, 2013.
- [3] In-Cheol Hwang, Dong-Yeup Lee and Gyu-Tak Kim, "A Study on the Reduction of Detent Force and Enhancement of Thrust on Permanent Magnet Linear Synchronous Motor by using 3D FEM", Proceedings of KIEE Summer Conference, pp. 839-840, 2006.
- [4] Hyung-Hwan Ko, Chang-Eob Kim, et. al., "Optimum Design of Tunnel Actuator using Finite Element Method and Response Surface Method", Proceedings of KIEE Summer Conference, pp. 790-791, 2011.
- [5] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, "Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 5, pp. 1259-1265, 2002.
- [6] Jae Ho Shin, A Study on Spindle Shape Design using Design Experiments, Theses of Master's Degree, Changwon University, pp.1-37, 2008.

◆ 저자소개 ◆



김창업(金昌業)

1960년 1월 1일생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983~1997년 (주)효성중공업기술연구소 책임연구원. 2000년 8월~2001년 8월 Southampton University Post Doc. 2009년 8월~2010년 8월 Duke University Visiting Scholar. 1997년 3월~현재 호서대학교 전기공학과 교수.