

추력 리플 저감을 위한 PMLSM 의 최적설계

김성일*, 홍정표*(창원대 전기공학과), 조한익** (OTIS-LG)

Optimal Design of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Reducing Thrust Ripple

S. I. Kim*, J.P. Hong* (Electrical Eng. Dept. CNU), H. I. Cho** (OTIS-LG)

ABSTRACT

This paper deals with the optimal design of a permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) with the analysis of prototype PMLSM. In the PMLSM, thrust ripple is one of the causes disturbing high-precision position control. Therefore, Response surface methodology (RSM), one of the optimization methods, is applied to obtain the shape decreasing thrust ripple of the prototype PMLSM. In the end, characteristic analysis of the PMLSM is performed by space harmonic method for shortening of a computation time, and final results is verified by finite element analysis.

Key Words : Optimal design (최적설계), PMLSM (영구자석 선형 동기전동기), Thrust ripple (추력 리플), High-precision position control (고정밀 위치제어), RSM (반응표면론법)

1. 서론

직선 운동을 필요로 하는 제어 시스템 분야에서 회전기기를 사용할 경우 회전 운동을 직선 운동으로 변환하기 위하여 기어, 볼스크류, 벨트등과 같은 기계적 동력 전달 메커니즘이 반드시 필요하게 된다. 이러한 동력 전달 메커니즘은 진동과 소음을 발생시킬 뿐만 아니라 접촉 구동에 따른 고속화와 위치 제어를 어렵게 만든다. 따라서 직선 운동이 요구되는 시스템 분야에 선형전동기를 사용한다면 이러한 문제점들을 해결할 수가 있다. 현재 선형전동기는 많은 연구가 진행되어 전기철도의 운송수단, 공장 자동화의 반송 시스템, 그리고 반도체 제조장비 및 CNC 등의 직선 추력을 요구하는 분야는 물론이고 OA 기기 등에 이르기까지 그 응용분야가 확대되고 있다 [1].

공심형(Slotless-type)의 영구자석 선형 동기전동기(PMLSM)는 상대적으로 큰 자기적 공극으로 인해 철심형(Slotted)에 비해 추력밀도가 떨어지는 단점을 가지지만, 치슬롯 구조에 의한 디텐트력이 발생하지 않아 정밀 제어를 요구하는 분야에 많이 사용되고 있다. 하지만 영구자석에 의해 발생하는 공극 자속은 많은 고조파를 포함하고 있으며, 이는 추력 맥동으로 이어져 추력 리플의 원인이 된다

[2]. 따라서 본 논문에서는 prototype PMLSM의 분석과 함께 초정밀 구동에 보다 적합하도록 최적설계를 수행하였다. 최적화 기법으로는 현재 전기기기 설계에 있어서 효과적인 방법으로 많이 사용되고 있는 반응표면론법(RSM)을 적용하였다. 마지막으로 해석 시간의 단축을 위해 공간고조파법을 이용하였으며 최종 최적화 결과는 유한요소해석을 통해 검증하였다.

2. 최적설계

2.1 Prototype PMLSM 의 분석

본 논문은 prototype PMLSM의 분석을 통해 다음 세 가지 사항을 고려하면서 최적설계를 수행하였다.

- 운전 상태에서의 발열문제
- 영구자석 및 코일의 크기
- 추력 확보 및 추력 리플의 저감

우선, 운전 상태에서 발생하는 열을 조금 더 감소시키기 위해 코일 선경을 늘려 전류밀도를 낮추었다. 이는 코일에서 발생하는 동손, 즉 열은 I^2R 의 형태로 발생하므로 동일 전류가 흘렀을 때 코일의

선경이 늘어나면 그 만큼 전기저항이 감소하므로 열이 적게 발생하게 된다. 하지만 코일 선경의 증가에 따른 턴 수 확보가 어려워지므로 코일 내폭 (G)을 제작상 한계인 4[mm]까지 줄였다. 마지막으로 일정한 추력 확보를 위해 공극을 1.3[mm]로 하였고, 최적설계를 수행하는데 있어서 영구자석의 치수 변화를 고려하여 극피치를 33[mm]로 가져갔다. 표 1과 그림 1은 각각 prototype PMLSM의 치수와 1/2형상을 나타내었다.

2.2 반응표면론법

반응표면론법은 여러 개의 설계변수 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수 η 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 즉, 임의의 시스템으로부터 관측된 자료를 근거로 하여 실제 응답과 k 개의 설계변수들 사이의 인과관계를 규명하게 된다. 여기서 설계변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 말하고, 반응변수는 설계변수의 영향을 받아서 어떤 반응을 나타내는 종속변수를 말한다. 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻어지며, 본 논문에서는 설계변수와 출력값의 대응관계를 공간고조파법을 이용하여 자료를 확보하였다. k 개의 설계변수에 대한 실제 응답 η 는 식 (1)과 같다.

$$\eta = f(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k) \quad (1)$$

실제로 식 (1)과 같은 반응함수(Response function) f 는 미지의 함수로 취급되며, 설사 알려져 있다 하더라도 매우 복잡한 함수의 형태로 표현되거나 표현하기가 매우 어려워진다. 따라서 반응함수로 가정되는 간편하고 실용적인 반응표면모형은 k 개의 설계변수에 대한 중회귀 모형(Multiple regression model)으로 나타내고, 이 가정은 실험자가 흥미를 가지고 있는 설계영역에서만 만족하면 된다.

많은 경우에 실제 응답함수 f 의 근사함수인 y 는 Taylor 급수전개를 기본으로 하여 1차 또는 2차 다항 모형으로 근사하게 된다. 본 논문에서는 선택한 대상의 반응표면이 곡면으로 표현될 것이라고 예측할 수 있으므로 근사함수를 2차 모형으로 사용하였다. 따라서 실제 응답함수 f 와 근사함수 y 와의 관계는 식 (2)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Table 1 Comparison of measured roughness data

Design variables	Description	Values [mm]
A	극피치	29.1
B	영구자석 폭	23.4
C	영구자석 높이	7.1
C	공극	2.2
E	코일 폭	4.8
F	코일 높이	8
G	코일 내폭	9.8
H	적층 길이	53

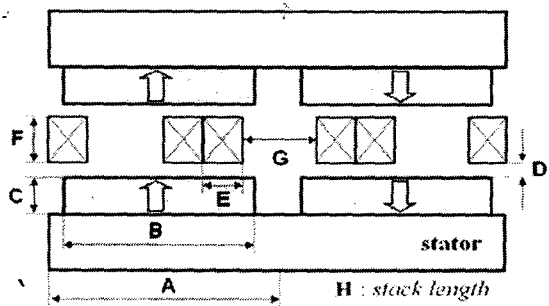


Fig. 1 1/2 configuration of prototype PMLSM

여기서 x_1, x_2, \dots, x_k 는 설계 변수, β 는 회귀계수 ε 은 응답의 통계적인 오차항으로, 일반적으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다.

따라서 근사함수로부터 n 개의 샘플 자료에서 추정된 출력값 y 는 행렬의 형태로써 식 (3)과 같이 정리된다.

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

여기서 X 는 설계변수의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터 ε 은 오차항을 나타낸다.

한편, 식 (3)에서 회귀계수의 벡터는 임의의 오차 제곱합을 최소화 하는 최소제곱법을 이용하여 추정한다. 최소제곱 함수는 식(4)와 같다.

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (y - X\beta)' (y - X\beta) \quad (4)$$

추정된 벡터 b 의 미지 벡터는 식 (5)를 만족해야 하며, 그 값은 식 (6)과 같이 표현된다. 또한 추정된 벡터 b 에 의하여 근사함수로 추정된 \hat{y} 은 식 (7)과 같다.

$$\frac{\sigma L}{\sigma \beta_b} = -2X'y + 2X'Xb = 0 \quad (5)$$

$$b = (X'X)^{-1} X'y \quad (6)$$

$$\hat{y} = Xb \quad (7)$$

여기서 b 는 β 의 추정된 회귀계수벡터, 행렬 X' 는 행렬 X 의 전치행렬을 나타낸다 [3].

2.3 반응표면론법의 적용

본 논문의 최적설계 목적은 100[N]이상의 평균추력을 확보하면서 추력 리플은 prototype보다 적게 나오게 하는 것이다. 설계변수는 영구자석 폭(B)과 높이(C)로 설정하였으며, 설계영역은 표 2에 나타내었다. 각 목적함수에 대한 2차 근사 다항식을 만들기 위해 필요한 자료는 중심합성계획법을 이용하였으며 표 3에 나타내었다. 이렇게 해서 구한 각 목적함수의 근사 다항식은 다음과 같다 [4].

$$\hat{y}_{T_{ave}} = -91 + 8.2B + 16.1C - 0.13B^2 - 0.94C^2 + 0.04BC$$

$$\hat{y}_{T_r} = 185.1 - 12.1B - 0.34C + 0.2B^2 + 0.04C^2 - 0.005BC$$

Table 2 Design area

Coded value		-1.414	-1.0	0	1.0	1.414
Real value	B[mm]	29.8	30.0	30.5	31.0	31.2
	C[mm]	4.9	5.0	5.3	5.6	5.7

Table 3 Central Composite Design (CCD)

Experiment No.	B	C
1	1.0	-1.0
2	-1.0	1.0
3	0.0	1.414
4	0.0	0.0
5	0.0	-1.414
6	1.0	1.0
7	-1.0	-1.0
8	1.414	0.0
9	-1.414	0.0

3. 최적설계 결과

3.1 다중 반응

그림 2와 그림3은 각각 평균추력과 추력 리플의 반응표면을 나타내며, 이것을 참고로 반응표면론법을 통해 구한 근사 다항식을 이용하여 다음과 같은 영역을 동시에 만족하는 최적점을 구하였으며, 그 결과를 표 4와 그림 4에 나타내었다.

$$106 \leq \hat{y}_{T_{ave}} \leq 107$$

$$0.1 \leq \hat{y}_{T_r} \leq 0.15$$

표 4는 최적점에서의 반응표면론법에 의한 예측값과 공간고조파법에 의한 해석값에 거의 차이가 없음을 보여준다.

3.2 Prototype PMLSM과 비교 및 분석

표 5에서는 prototype PMLSM과 optimized PMLSM의 영구자석 및 코일 단면의 크기를 비교하였으며 표 6에는 단부효과를 고려한 유한요소해석 결과를 나타내었다.

Table 4 Results in optimal point

Design variables	Values [mm]	RSM		공간고조파법	
		T _{ave} [N]	T _r [%]	T _{ave} [N]	T _r [%]
B	30.3	106.4	0.13	106.4	0.14
C	5.3				

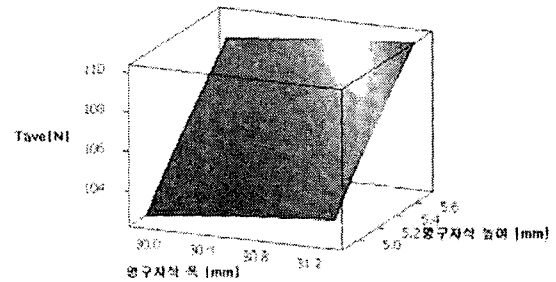


Fig. 2 Response surface of average thrust

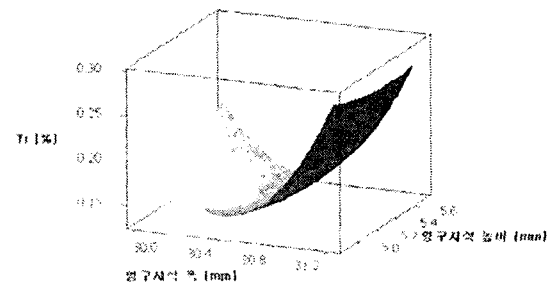


Fig. 3 Response surface of thrust ripple

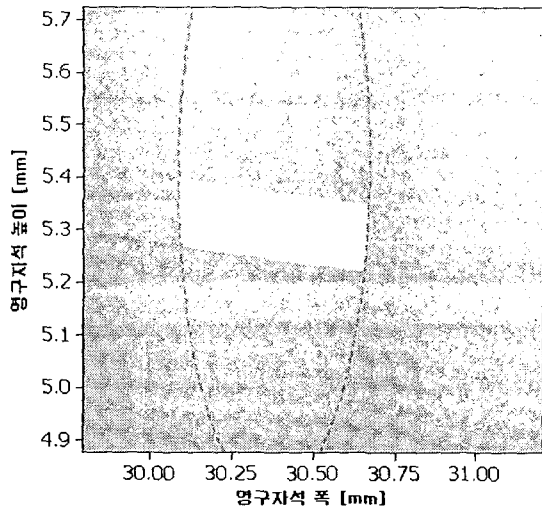


Fig. 4 Region of multiple responses

Table 5 Comparison of permanent magnet and coil

	Prototype PMLSM	Optimized PMLSM
PM [mm^3]	23.4*7.1*53	30.3*5.3*53
coil [mm^2]	19.4*8	22*6

Table 6 Results of finite element analysis

Prototype PMLSM		Optimized PMLSM	
$T_{ave}[N]$	$T_r[\%]$	$T_{ave}[N]$	$T_r[\%]$
109.92	0.5	106.4	0.28

최적설계를 수행한 결과 optimized PMLSM은 prototype PMLSM와 비교했을 때, 영구자석의 부피, 코일의 단면적 그리고 추력 리플이 각각 3.3[%], 15[%], 44[%]씩 감소하였다. 즉, 평균추력을 제외한 모든 부분에서 특성이 개선되었음을 보여준다.

4. 결론

본 논문은 반응표면론법을 이용하여 prototype PMLSM의 최적설계를 수행하였으며, 그 결과 반응표면론법의 유용성을 확인할 수 있었다. 또한 공심형 PMLSM의 최적설계 시 공간고조파법을 이용한 다면 매우 효과적일 것이다.

참고문헌

1. 하재평, 김영균, 하경호, 강규홍, 홍정표, 강규홍,

- 조한익, "영구자석 선형 동기전동기의 디텐트력 저감을 위한 자기회로 설계," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 924-944, 2003.
2. 이주민, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "3 차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 자계 및 추력특성 해석," 대한전기학회 논문지, Vol. 50, No. 6, pp. 252-262, 2001.
3. Y. K. Kim, Y. S. Jo, J. P. Hong, and J. Lee, "Approach to the shape optimization of racetrack type high temperature superconducting magnet using response surface methodology," Cryogenics, Vol. 41, No. 1, pp. 39-47, 2001.
4. R. H. Myers, D. C. Montgomery, *Response surface methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, 1995.