

실험계획법과 순차적 반응표면법을 이용한 선형 모터의 다중 목적 형상최적설계

류 태 형* · 유 정 훈†

(2009년 5월 14일 접수, 2009년 7월 6일 수정, 2009년 7월 6일 심사완료)

Multi-Objective Geometric Optimal Design of a Linear Induction Motor Using Design of Experiments and the Sequential Response Surface Method

Taehyung Ryu and Jeonghoon Yoo

Key Words : Linear Induction Motor(선형 유도 모터), Multi-Objective Optimal Design(다중목적 최적설계), Geometric Optimal Design(형상최적설계), Design of Experiments(실험계획법), Response Surface Method(반응표면법)

Abstract

In many industries, the linear motor replaces the existing framework for linear transportation. Similar to other conventional motors, it is important to minimize the ripple of thrust and to maximize the thrust force of the linear motor. Because the two objectives are associated to each other, the multi-objective design process is necessary considering all objectives. This paper intends to optimize geometric parameters of the linear motor with two design objectives using design of experiments and sequential response surface method.

1. 서 론

선형운동을 하는 운송기구로 지금까지 많은 산업에서 기존의 일반적인 동기화 모터에 볼 베어링을 적용하여 사용해 왔으나 회전 운동을 직선 운동으로 변환하는 과정에서 생기는 힘의 손실이나 진동의 문제가 발생하였다. 그에 따라 기어 등으로 인한 손실이 없이 빠른 속도와 정확한 위치제어가 가능한 선형 유도 모터(linear induction motor)가 많은 산업에서 사용되고 있고, 그 활용범위가 소형 정밀 제품에까지 확대되고 있다.

Takorabet 등⁽¹⁾은 공기층과 레일(rail) 사이의 경계 면에 합성방정식(convolution equation)을 이용

해 효율과 추력(thrust)의 각각의 최대화를 위한 연구를 진행하였으며, Hassanpour 등⁽²⁾은 최적화 방법 중 유전자 알고리즘을 이용하여 추력을 최대화 하는 연구를 진행하였다. 기존의 연구 경향이 추력의 크기나 효율을 높이는 것이 대부분이었으나 선형 유도 모터의 특성상 어쩔 수 없이 발생하게 되는 추력의 변화, 즉 추력의 리플(ripple)이 커지면 모터 자체의 제어가 힘들어 질 뿐만 아니라 제대로 된 운송 시스템의 역할을 하기 힘들어 진다. 이러한 리플의 문제는 추력의 최대화 문제와 같이 생각해야 한다. 인가되는 전류나 선형 유도 모터의 재료를 바꾸지 않고, 힘의 집중으로 개선이 가능한 추력의 증가와 힘의 분산으로 개선이 가능한 리플의 감소는 일반적으로 동시에 만족시키기 어렵다.

본 연구에서는 이러한 선형 유도 모터의 추력의 리플 발생을 고려하여, 모터의 형상최적화에 기반을 두고 선형 유도 모터의 추력의 리플을 최소화 하면서 그에 따른 추력의 감소를 최소화 하는 설계 방법을 제시한다. 이를 위해 선형 유도 모터의 추력을 유한요소해석(finite element analysis) 프로그램

[이 논문은 2009년도 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회 (2009. 5. 14.-15., 한국관광공사 T2 아카데미) 발표논문임]

* 연세대학교 기계공학과 대학원

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : yoojh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2859 FAX : (02)362-2736

램을 통해 구하고 설계 변경 가능한 형상 설계 변수를 정해 실험계획법(design of experiments, DOE)을 통해 설계변수의 민감도를 파악하고 민감도가 높은 설계변수를 선정해 순차적 반응표면법(response surface method, RSM)을 통해 최적화된 형태의 선형 유도 모터의 형상을 제시한다.

2. 최적설계 문제설정

인가되는 전류의 크기가 정해진 선형 유도 모터에서 힘의 집중으로 개선이 가능한 추력의 증가와 힘의 분산으로 개선이 가능한 리플의 감소는 일반적으로 둘 다 만족시키기 어렵다. 특히, 나노 단위의 정밀도로 구동되는 초정밀 생산 기기에서 사용되는 선형 유도 모터에서는 추력의 증가보다는 리플의 감소가 더 중요한 요소가 되기 때문에 본 연구에서는 추력의 감소를 최소화하면서 리플을 개선하는 방향으로 연구방향을 설정하였다.

2.1 리플의 수식화

리플에 대한 정의가 다양하므로 리플을 정의하기 위해 이를 수식화 할 필요가 있다. 리플은 추력의 편차를 나타내므로 모터의 각 위치에서의 추력과 전체 위치에서의 평균 추력을 이용해 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\sum |F_x^2 - F_{x,Avg}^2| \quad (1)$$

여기서, F_x 는 현재 위치에서의 추력, $F_{x,Avg}$ 는 현재 모델의 추력의 평균값을 나타낸다.

이러한 리플값은 모터의 모양이 변함에 따라 모터의 성능이 변해 일정한 기준이 없이 다양한 값을 가지게 된다. 하나의 기준을 바탕으로 리플을 정의하기 위하여 리플을 정의하고자 하는 모델의 리플을 평균화한 뒤, 기본 모델의 리플을 평균화한 것으로 나누어 주면 리플을 정의하는 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum \left| \frac{F_x^2}{(F_{x,Avg})^2} - 1 \right| / \sum \left| \frac{F_{x,Base}^2}{(F_{x,Avg-Base})^2} - 1 \right| \quad (2)$$

2.2 추력의 수식화

리플과 달리 추력은 현재 모델에서의 추력의 평균값으로 쉽게 표현 할 수 있고, 추력 또한 리플과 마찬가지로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F_{x,Avg}}{F_{x,Avg-Base}} \quad (3)$$

2.3 최적설계 목적함수 설정

위에서 정의된 수식을 기준으로 추력의 손실을 최소화하고 리플을 줄이기 위한 최적설계의 목적함수를 다음과 같이 각각 정의 하였다.

$$\text{Ripple: Minimize } f_1 = \frac{\sum \left| \frac{F_x^2}{(F_{x,Avg})^2} - 1 \right|}{\sum \left| \frac{F_{x,Base}^2}{(F_{x,Avg-Base})^2} - 1 \right|} \quad (4)$$

$$\text{Thrust: Maximize } f_2 = \frac{F_{x,Avg}}{F_{x,Avg-Base}} \quad (5)$$

여기서, F_x 와 $F_{x,Base}$ 는 현재 모델과 기본 모델의 한 지점에서의 추력, $F_{x,Avg}$ 와 $F_{x,Avg-Base}$ 는 현재 모델과 기본 모델의 측정된 전 지점에서의 추력의 평균값을 나타낸다.

이러한 두 가지 설계목표는 서로에게 큰 영향을 미치고 따로 적용하는 것은 의미가 없으므로, 가중치(weighting factor)를 적용해 다음과 같이 하나의 함수로 다중설계목표를 설정 하였다.

$$\text{Minimize } f = w_1 \times f_1 + w_2 \times (1/f_2) \quad (6)$$

where $w_1 + w_2 = 1.0$

여기서 가중치 w_1 과 w_2 에 따라서 어떤 설계 목표를 더 비중 있게 다룰지를 결정할 수 있지만 앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 설계목적이 추력의 손실을 최소화함과 동시에 리플을 줄이는 것이므로 $w_1 = 0.6$, $w_2 = 0.4$ 로 설정하였다.

3. 기본 모델 해석

3.1 기본 모델의 구성

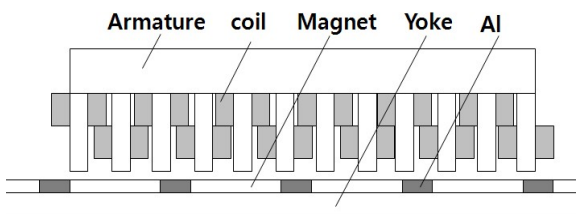
연구대상인 선형 유도 모터는 Fig. 1 과 같이 강자성체의 이동자(armature)와 이동자에 감겨진 코일(coil), 강자성체인 요크(yoke), 회토류(Nd-Fe-B)계 영구자석(permanent magnet, PM), 그리고 영구자석 사이의 알루미늄(Al)으로 구성되는데, 이러한 영구자석은 서로의 극성 방향이 반대로 교차되어 배치되어 있다. 코일은 제각기 상이 다른 사인파(sine wave)의 교류전원이 인가되고, 인가되는 최대 전류의 크기는 열에 의해 강자성체의 성질을 잃지

Table 1 Material properties of the linear motor

	Relative Permeability
Armature	1000
Coil	1.04
Yoke	2000
Al	1.04
PM	1.094

Table 2 Details of the linear motor

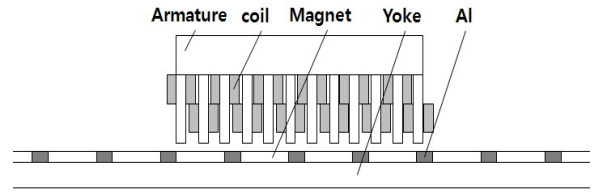
Coercivity force of Magnet	800 A/mm
Max current of coil	0.7 A
Turns of coil	560
Dimension of the armature	214.1 mm(width) x 52 mm(height)
Dimension of the pole	8.4 mm(width) x 4 mm(height)
Dimension of PM	42 mm(width) x 4 mm(height)
Distance between poles	10.3 mm
Air gap distance	2.5 mm
Distance between PMs	14 mm
Yoke thickness	13 mm

**Fig. 1** Cross section of linear induction motor

않도록 감겨진 코일 단면의 전류밀도가 3 A/mm²을 넘지 않도록 0.7 A로 설정하였다. 각 부분의 물성치와 선형 모터의 자세한 사항은 Table 1, Table 2에 나타낸 바와 같다.⁽³⁾

3.2 추력의 해석

Lee 등⁽⁴⁾은 약 3.4% 오차 범위 내에서 실험에 의한 추력과 유한요소법(finite element method)으로 계산된 추력이 잘 일치함을 증명하였다. 이를 바탕으로 하여 본 연구에서는 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS로 선형 유도 모터의 추력을 계산하였다.

**Fig. 2** Modeling of the linear induction motor

본 연구에서는 연구 대상인 선형 유도 모터의 이동자의 추력을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 고정자의 길이를 충분히 길게 해주어 고정자의 끝단에서 발생할 수 있는 영향을 최대한 줄이고자 하였다. 또한 수치적인 전자기장 해석을 위해 선형 유도 모터의 이동자뿐 아니라 그 주위의 공기 영역까지 고려하여 전자기장의 영향을 무시할 거리만큼 떨어진 외부 공기 영역까지 포함하여 해석 영역을 설정하였다.

3.2.1 추력계산방법

ANSYS에서 제공하는 전자기장 해석에서의 힘을 계산하는 방법에는 맥스웰 응력방법(Maxwell stress tensor method)과 가상일 방법(virtual work method)이 있다. 일반적으로 맥스웰 응력방법의 해석시간이 짧으나 해석하고자 하는 형상이 복잡해서 적분 경로가 복잡해지면 그 정확도가 감소한다. 가상일 방법은 비록 해석시간은 상대적으로 길어지지만 적분 경로에 관계없이 높은 정확도를 가진다.⁽⁵⁾ 해석의 결과 본 연구의 모사 대상인 선형 유도 모터의 형상에 적합한 측정방법으로 가상일 방법을 선택하여 본 연구에서 추력을 계산하는 방법으로 사용하였다.

3.2.2 추력 검증

Lee 등⁽⁴⁾이 약 3.4% 오차 범위 내에서 실험에 의한 추력과 유한요소법으로 계산된 추력이 잘 일치함을 증명하였으나 본 연구의 연구대상인 선형 유도 모터와는 구동 방식과 형태의 차이가 있으므로 계산된 추력이 오차범위 내의 값을 지니는지에 대해서 검증할 필요가 있다. Mosebach 등⁽⁶⁾은 본 연구의 연구대상과 같은 형상의 선형 모터의 추력을 계산하는 근사식을 다음과 같이 제안하고 그에 대한 증명을 수행하였다.

$$F_{x,Ag} = \frac{4}{\pi} p \tau L_r B_r A_m \sin\left(\frac{\alpha_r \pi}{2}\right) \frac{\tanh \beta h_m}{\mu_{rel} \sinh \beta g + \tanh \beta h_m \cosh \beta g} \quad (7)$$

(where, $A_m = \frac{m_1 N_1 \sqrt{2} I_a}{p \tau}$ $\alpha_r = \frac{\text{width of PM}}{\text{pole pitch}}$ $\beta = \frac{\pi}{\tau}$)

Table 3 에서 나타난 바와 같이 극성 방향이 서로 다른 두 자석을 지나는 것을 기준으로 한 1 주기의 내의 100 곳의 위치에서의 평균값을 식 (7)의 근사식을 이용해 구한 값과 ANSYS 를 이용하여 유한요소법으로 구한 값을 비교하였을 때, 이용된 모델 및 유한요소 해석이 충분히 신뢰할 수 있다고 판단되어 본 연구에서 설정한 모델을 이후의 연구과정에 사용하였다.

4. 최적화 해법

4.1 실험계획법 (Design of Experiments)

현재 정의된 최적설계문제를 위해 앞서 설정한 모델에서 설계 변경 가능한 몇 가지 설계 변수를 Fig. 3 과 같이 설정하였다. b 는 코일이 감기는 끝부분의 이동자의 폭으로써 그 윗부분의 폭은 동일하며, b 에서 c 사이의 간격은 선형적으로 변한다.

앞서 설정된 설계 변수들이 본 연구의 최대 관심사인 추력에 얼마나 영향을 미치는지에 대해 실험계획법을 통해 그 경향성을 알아보기로 하자. 이를 위해 각 변수들의 구조적인 상한 및 하한값을 고려하여 Table 4 와 같이 각 인자들의 수준을 결정하였다.

3수준 직교배열인 $L_{27}(3^{13})$ 직교배열표(orthogonal array)를 사용해 27번의 실험을 계획하였고, 각각의 실험에 따른 인자들의 수준과 그 결과는 Table 5와 같다. 직교배열표에 근거한 실험계획법을 이용해 계산된 추력을 통해 각각의 인자들의 경향성과 인자간의 교호작용을 Fig. 4에 나타내었다.

Table 3 Comparing the average thrust force

method	Force (N)
FEM	66.0687
Theoretical	74.8668

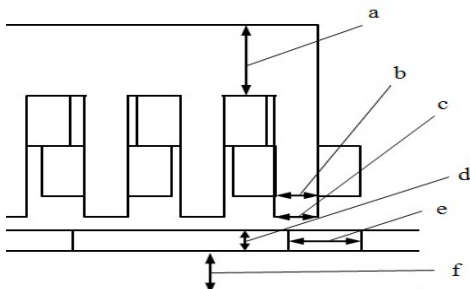


Fig. 3 Design variables of the linear induction motor

Table 4 Level of the design variables for D.O.E

Design Variables	Level		
	0	1	2
a	10	20	30
b	4.4	6.4	8.4
c	2.4	6.4	11.4
d	2	4	6
e	7	14	21
f	7	13	19

(unit: mm)

Table 5 Table of orthogonal array for D.O.E

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Obj. Fn
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.15
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.96
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1.17
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2.71
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1.13
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	1.04
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1	2.30
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	0.96
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0.95
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	1.09
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1.93
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	1	2	0	1	1.28
13	1	1	2	0	0	1	2	1	2	0	2	0	1	0.90
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1.69
15	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	1.14
16	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0	0.86
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1	1.88
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	1.01
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	2.05
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2	2.27
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	0.94
22	2	1	0	2	0	2	1	1	0	2	2	1	0	2.32
23	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	1.88
24	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	1	0	2	0.89
25	2	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2	2.06
26	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1	2	1	0	2.24
27	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2	0	2	1	0.96
	b		c	e		c	b	b			d	a	f	
						e	e	e						

Table 6 Result of D.O.E

	Ripple	Thrust	Objective value
Base model	63.28 N	777.27 N	1
D.O.E result	53.54 N	587.48 N	1.036

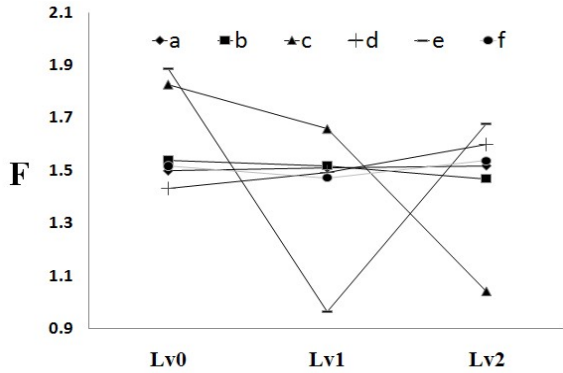


Fig. 4 Sensitivity of design variables

Table 5 에서 a, b, c, d, e, f 는 각 인자의 효과를, c-e, b-c, b-e 는 인자간의 교호작용을 나타내고 목적함수의 값은 앞서 정의한 목적 함수에 따라 기본모델의 값이 1 로 정의되고 앞서 정의한 설계 목적에 따라 그 값이 작을수록 설계 목적에 부합한다고 할 수 있다.

Table 5 의 결과를 바탕으로 실험계획법에 의한 최적 모델과 기존의 모델의 결과를 Table 6 에 나타내었다. Table 6 에서 볼 수 있듯이 실험계획법에 의해 구해진 각 인자들의 최적 수준을 기준으로 유한요소법을 시행하여 나온 목적함수의 값이 기존의 모델에 비해 증가한다. 최적설계의 목적에 따라 추력 면에서 감소를 보이고 리플 면에서는 향상된 결과를 나타내었지만, 실험계획법에 의거한 결과는 목적함수의 값이 증가했으므로 실험계획법에 의한 최적 설계는 앞서 언급한 바와 같이 추력의 감소를 최소화하고 리플을 낮추는 설계목적에 부합된다고 볼 수 없다.

실험계획법에 의해 목적함수에 영향을 미치는 인자들의 민감도를 알 수 있다. Fig. 4 에 나와 있는 a, b, c, d, e, f 의 각 인자가 목적함수에 미치는 영향을 바탕으로 a, b, f 의 영향이 미미하고 나머지 b, c, d 의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 이 변수들을 이용하여 추력의 감소를 최소화하고 리플을 낮추는 최적 설계 목적에 부합하는 최적 설계를 위해, 정해진 수준을 기준으로 수준 사이의 값들을 고려할 수 없는 실험계획법 대신 최적설계 문제에서 한정된 범위 내의 국부 최소해(local minimum) 찾기 위한 반응표면법을 통해 최적해를 찾고자 하였다.

4.2 순차적 반응표면법

반응표면법을 사용하기에 앞서 실험계획법의 결과, 목적 함수에 영향이 큰 b, c, d 를 설계변수로 재설정 하고 설계변수에서 제외된 a, b, f 를 Fig. 4

Table 7 Level of design variables for 1st RSM

Design variables	Level				
	-1.73	-1	0	1	1.73
a	-	-	10	-	-
b	-	-	10.3	-	-
c	10.5	10.88	11.4	11.92	12.3
d	1.15	1.509	2	2.491	2.85
e	11.2	12.382	14	15.618	16.8
f	-	-	13	-	-

(unit: mm)

Table 8 CCD array for 1st RSM

No	Design variable			Obj. Fn.
	c	d	e	
1	1	1	-1	0.95
2	1	-1	1	1.15
3	-1	1	1	0.72
4	-1	-1	-1	1.19
5	-1.73	0	0	1.01
6	1.73	0	0	0.91
7	0	-1.73	0	1.71
8	0	1.73	0	0.89
9	0	0	-1.73	1.03
10	0	0	1.73	0.81
11	0	0	0	0.97
12	1	-1	-1	1.06
13	1	1	1	0.76
14	-1	-1	1	1.20
15	-1	1	-1	1.13

에 따라 목적 함수가 최소가 되는 수준으로 고정하였다.

4.2.1 첫 번째 반응표면법

본 연구에서는 중심합성계획법 (central composite method, CCD)을 적용해 반응표면법을 사용하였다. 반응표면법에 앞서 실험계획법에서 재설정된 인자들의 수준을 구조적인 제한을 기준으로 Table 7 과 같이 정의했다. 그리고 재 설정된 설계변수가 3 개이므로 3 차원 중심합성계획을 Table 8 과 같이 구성하고 시행하였다.

중심합성계획에 의한 결과를 바탕으로 반응표면법을 적용하여 목적함수의 3 차 회귀식(regression function)을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f = & 0.00540c^3 - 0.05345d^3 + 0.00111e^3 \\
 & - 0.0096c^2 + 0.1022d^2 - 0.02396e^2 \\
 & + 0.00558c \cdot d + 0.03798c \cdot e - 0.08735d \cdot e \\
 & - 0.04592c - 0.07722d - 0.06542e + 0.96830
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

위 식의 정확도는 99.04%로 중심합성계획에 의해 구성된 모든 점을 만족한다고 볼 수 있다. 그러므로 실험계획법에서와 같이 각각의 설계변수를 변경하고 다시 계산하는 것보다 위의 식을 최소화하는 것이 훨씬 효과적이다. 위 식은 각각의 설계변수의 범위가 $-1.73 \leq x \leq 1.73$ 로 제한되어 있으므로 이 구간 내에서 위의 식을 최소화하는 해를 찾으면 $c = -1.73, d = 1.73, e = 1.73$ 의 결과를 나타낸다.

첫 번째 반응표면법에 의해 나타난 결과를 기존의 모델과 실험계획법에 의한 최적 모델의 결과를 비교하여 Table 9에 나타내었다. Table 9을 통해서 목적함수가 기존의 실험계획법에 의한 목적함수보다 더 감소된 것을 확인할 수 있다. 그러나 반응표면법에 의한 설계 변수의 결과가 모두 함수의 경계 면에 존재하기 때문에 아직 국부 최소해에 근접할 수 있는 여지가 있다. 그러므로 첫 번째 반응표면법으로 나온 결과를 기준으로 다시 한 번 반응표면법을 적용할 필요가 있다.

4.2.2 두 번째 반응표면법

앞서 시행된 반응표면법에 의한 결과가 $c = -1.73, d = 1.73, e = 1.73$ 으로 나타났고 이 값은 Table 7에서 알 수 있듯이 각각 $c = 10.5mm, d = 2.85mm, e = 16.8mm$ 인 실제 설계치수로 치환될 수 있다. 다시 한번 반응표면법을 시행하기 위해 앞서 시행한 반응표면법의 결과를 기준으로 선형 유도 모터의 구조적인 한계를 고려한 인자들의 새로운 상한 및 하한가의 수준을 Table 10과 같이 정의하였다. 치환된 이 값들을 기준으로 다시 한번 3차원 중심합성계획을 구성하였다.

중심합성계획에 의한 결과인 Table 11을 바탕으로 반응표면법을 적용하여 목적함수의 3차 회귀식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f = & 0.00491c^3 - 0.00243d^3 + 0.00615e^3 \\
 & + 0.0033c^2 + 0.00828d^2 + 0.03819e^2 \\
 & - 0.00048798cd - 0.00765ce + 0.00959de \\
 & - 0.01087c - 0.01014d - 0.03037e + 0.71626
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Table 9 Result of 1st RSM

	Ripple	Thrust(N)	Obj. Fn.
Base model	63.28	777.27	1
D.O.E result	53.54	587.48	1.036
1 st RSM	31.83	672.76	0.764

Table 10 Level of design variables for 2nd RSM

Design variables	Level				
	-1.73	-1	0	1	1.73
a	-	-	10	-	-
b	-	-	10.3	-	-
c	9.98	10.2	10.5	10.8	11.02
d	2.359	2.566	2.85	3.134	3.341
e	9.582	10.265	11.2	12.135	12.818
f	-	-	13	-	-

(unit: mm)

Table 11 CCD array for 2nd RSM

No	Design variable			Obj. Fn.
	c	d	e	
1	1	1	-1	0.77
2	1	-1	1	0.74
3	-1	1	1	0.76
4	-1	-1	-1	0.81
5	-1.73	0	0	0.72
6	1.73	0	0	0.73
7	0	-1.73	0	0.77
8	0	1.73	0	0.71
9	0	0	-1.73	0.85
10	0	0	1.73	0.81
11	0	0	0	0.72
12	1	-1	-1	0.82
13	1	1	1	0.73
14	-1	-1	1	0.76
15	-1	1	-1	0.77

위 식의 정확도는 99.33%로 중심합성계획에 의해 구성된 모든 점을 만족한다고 볼 수 있다. 위 식은 각각의 설계 변수가 $-1.73 \leq x \leq 1.73$ 으로 제한되어 있으므로 이 구간 내에서 위의 식을 최소화하는 해를 찾으면 $c = 0.7737, d = 0.5477, e = 0.3738$ 의 결과를 나타낸다.

두 번째 반응표면법에 의해 나타난 결과를 기존의 모델, 실험계획법에 의한 최적 모델, 그리고 첫

Table 12 Result of 2nd RSM

	Ripple	Thrust(N)	Obj. Fn.
Base model	63.28	777.27	1
D.O.E result	53.54	587.48	1.036
1 st RSM	31.83	672.76	0.764
2 nd RSM	32.71	693.12	0.758

번째 반응표면법의 결과를 비교한 것이 Table 12와 같다. 결과적으로 첫 번째 반응표면법에 비해서 리플의 성능은 미세하게 저하된 반면에 추력의 크기가 높아진 것을 확인할 수 있다. 설계 목표 중 하나인 리플 성능은 저하되었으나 목적함수 값이 감소하였고, 그 차이가 미세하다 할지라도 두 번째 반응표면법의 경우 첫 번째 반응표면법의 결과와 달리 회귀함수의 최소해가 함수의 내부에 정해지므로 국부 최소해에 도달하였다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기본적인 선형 유도 모터의 형상을 모델링하고 모델링 된 선형 유도 모터의 적합성을 판단한 뒤, 각 부분의 크기를 설계 변수로 설정하여 추력을 최대화하고 추력의 리플을 최소화 하는 다목적 최적 설계를 연구하였다.

본 연구에서 최적 설계를 위해 제안된 방법은 우선 처음에 제시된 설계 변수들 중에서 실험계획법을 통해 목적 함수에 영향이 미미한 설계 변수들을 최적 수준으로 고정 시켰다. 남은 변수들을 새로운 설계 변수로 재 설정하고 실험계획법을 이용해 찾아낸 최적해를 기준으로 중심합성계획을 이용한 반응표면법을 사용하여 새로운 최적해를 찾아내었다. 이렇게 찾아낸 최적해가 반응표면법에 의한 목적 함수의 3 차 회귀식의 경계 면에 존재하기 때문에 새로운 최적해를 기준으로 다시 한번 중심합성계획을 이용한 반응표면법을 사용하였다. 이러한 방법에 의하여 최적설계를 수행한 결과 기존에 제시된 모델에 비해서 추력의 평균값이 10.83% 감소하면서 리플이 48.31%로 대폭 감소하

는 결과를 확인할 수 있었다. 이로써 선형 유도 모터의 형상최적설계를 통해 추력의 감소를 최소화하면서 리플을 최소화하는 설계목적에 부합하는 설계 결과를 도출할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D00026).

참고문헌

- (1) Takorabet, N., Laporte, B. and Vinsard, G., 1997, "On the Optimization of Linear Induction Devices," *Electrical Engineering*, Vol. 80, pp. 221-226.
- (2) Isfahani, A. H., Ebrahimi, B. M. and Lesani, H., 2008, "Design Optimization of a Low-Speed Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Efficiency and Power Factor," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, Issue 2, pp. 266-272.
- (3) Gieras, J. F. and Z. J. Piech, 2000, *Linear Synchronous Motors*, CRC press, New York.
- (4) T. W. Lee and J. H. Jung, 2004, "The Finite Element Analysis and the Geometric Optimal Design of Linear Motor," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 12, pp. 67-74.
- (5) Chang, L., Eastham, A. R. and Dawson, G. E., 1989, "Permanent Magnet Synchronous Motor: Finite Element Torque Calculations," *Conference Record of the 1989 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Vol. 1, pp.79-73.
- (6) Mosebach, H. and Cander, W.R., 1998, "Average Thrust of Permanent Magnet Excited by Linear Synchronous Motors for Different Stator Current Waveforms," *Machines ICEM'98*, Vol. 2, pp. 851-865.
- (7) Hung, J. H., Shin, S. H. and Lee, S. R., 2002, "Optimization of the design variables of linear motor by FEM," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 26, No. 7, pp. 1232-1240.