

# 반응표면분석법을 이용한 횡자속 선형전동기의 형상최적설계

論 文

55B-10-2

## Optimal Geometric Design of Transverse Flux Linear Motor Using Response Surface Methodology

洪 到 瑄\* · 禹 炳 哲\* · 姜 道 鉉\*\*

(Do Kwan Hong · Byung Chul Woo · Do Hyun Kang)

**Abstract** - Thrust force of linear motor is one of the important factor to specify motor performance. In this study, we optimized maximizing the thrust force of TFLM(Transverse Flux Linear Motor) using Response Surface Methodology by the table of orthogonal array. The Response Surface Methodology was well adapted to make the analytical model of the maximum thrust force and enable the objective function to be easily created and a great deal of the time in computation to be saved. Therefore, it is expected that the proposed optimization procedure using the Response Surface Methodology can be easily utilized to solve the optimization problem of electric machine.

**Key Words** : Transverse Flux Linear Motor(TFLM), Table of Orthogonal Array, Response Surface Methodology(RSM)

### 1. 서 론

선형전동기는 위치 및 속도 제어기구로 빠른 속도와 강한 추력, 정확한 위치 제어가 가능하다. 선형전동기의 성능 향상 및 소형화를 위해서는 추력의 최대화가 요구되는데 일반적으로 추력을 계산하는 방법에는 유한요소법, 등가자기회로방법, 공간 고추파 해석법 등이 있다. 이러한 자기장 해석을 기초로 선형전동기의 추력 및 특성 향상에 관한 많은 연구가 있었고 최적설계에 관한 다양한 연구가 수행되었다. Arumugam 등은 스위치드 리럭턴스 모터(SRM)에 유한요소법을 이용하여 극각, 극피치, 토크의 관계를 통해 최적값의 범위를 제시하였다[1]. Yamada 등은 코일의 권선수와 자석의 두께를 설계변수로 설정하고 선형전동기의 두께를 구속조건으로 한 추력 최대화 문제의 해를 구하였으며[2], Choi 등은 공극 자속밀도를 증가시키는 고정자의 형상과 재질을 제안하였다[3].

본 연구에서 제안하는 횡자속 선형전동기(Transverse Flux Linear Motor : TFLM)는 자속이 만드는 평면이 이동자의 이동 방향에 대해 횡방향을 나타내며, 이동자와 같은 방향으로 전류가 흐르는 형태로 구성된다. 그리고 극간격의 크기를 작게 설계할 수 있기 때문에 높은 출력밀도를 얻을 수 있으며, 기존의 종축형 전동기에 존재하는 오버행이 없는 링 형태의 권선으로 동력의 양을 줄일 수 있어 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 전동기의 체적을 줄일 수 있는 구

조이다. 회전형 전동기를 이용하여 선형 시스템을 구현하고자 할 경우 원운동에서 직선운동으로 변환하기 위해 스쿠류, 체인, 기어 박스 등의 기계적인 변환장치가 필요하게 된다. 이 때 마찰에 의한 에너지의 손실로 효율이 낮아 질 수 밖에 없다[4],[5]. 그러나 횡자속 선형전동기는 높은 단위체적당 출력과 효율 특성으로 인해 전동기 중량이 적게 요구되는 전기자동차, 자기부상 열차와 같은 교통수단의 추진장치뿐만 아니라 가정의 냉장고나 에어컨과 같은 가전제품의 냉매압축기에도 매우 적합하다. 영구자석 여자 횡자속 선형전동기를 시스템에 적용시킬 경우 일반 선형 유도전동기에 비해 3배 이상 높은 출력밀도를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 경량화도 가능하다[6]. 독일에서는 10년 전부터 영구자석여자 횡축형 전동기 설계 개념을 도입하여 선형시험장치에서 전자계 시스템 설계의 검증을 거쳤으며 전기자동차용 20[kW]급 전동기를 개발 완료하여 고효율, 고풍력을 검증하였다. 또한 횡축형 전동기를 태양광 추진 경비행기의 추진 전동기로 채택하였으며, 배, 고속전철용 견인 전동기, 풍력발전기로 채택하기 위해 계속 연구 중으로 앞으로 일반 산업용 횡축형 전동기의 수요가 확대될 것으로 예상하고 있다.

선형전동기의 최적설계를 위해서 여러 가지 설계변수를 고려하여 최적의 조건을 결정하기위해 노력하고 있지만, 이러한 최적 설계조건을 얻기 위해서는 시행착오를 많이 하게 되어 고비용과 긴 탐색시간으로 인하여 설계의 효율이 떨어지며, 해석결과에 대한 정확한 검증결과와 신뢰성이 없다는 문제점을 가지고 있다. 그래서 적은 횟수의 실험으로 최적해를 구할 수 있는 설계방안이 요구되고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 설계에서 근사화 모델의 사용은 필연적이며, 특히 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 실제의 응답모델을 구하는 것이 비용이나 시간적 측면에서 많은 제약이 있는 실험 및 공정의 최적설계 문제에 통계적 방법론인 실험계획법을 이용한 근사화 최적설계 기법들이 많이 연구되었다.

\* 교신저자, 正會員: 한국전기연구원 Mechatronics그룹 연구원  
E-mail : dkhong@keri.re.kr

\* 正會員 : 한국전기연구원 Mechatronics그룹 팀장

\*\* 正會員 : 한국전기연구원 산업전기연구단 단장

接受日字 : 2006年 6月 16日

最終完了 : 2006年 9月 12日

근사최적설계는 정확하고 복잡한 시뮬레이션 대신에 근사모델을 이용하여 해석을 수행함으로써 최적설계과정의 효율을 높이는 최적설계기법이다. 통계적인 방법을 이용하여 근사적으로 얻어낸 모델인 메타모델은 시뮬레이션 모델을 간단하게 나타낸 모델이며 반응표면 모델이 대표적이다. 반응표면의 개념은 1951년 Box와 Willson에 의하여 제시되었다[7]. 이후 통계 분야에서 반응표면을 구성하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. Allen은 근사된 반응표면의 예측성을 나타낼 수 있는 통계적 파라미터인  $R^2$ 를 제시하였다[8],[9]. 또한 Seber는 반응표면의 근사정도를 나타낼 수 있는  $R_{adj}^2$ 을 제시하였다[10].

본 논문에서는 냉매압축기에 적용 가능한 횡자속 선형전동기의 형상을 설계 및 제작하여 초기모델을 분석하고, 구동추력을 초기모델보다 최대화하기 위하여 횡자속 선형전동기의 형상을 나타내는 고정부 코어의 코일 감는 부 너비, 중간 너비, 높이, 길이, 코어와 영구자석이 이루는 극간격, 영구자석 높이인 이동자 코어의 높이, 공극 등을 설계인자로 하였다. 설계인자에 따른 수준을 결정하고 직교배열표를 이용하여 실험을 통해서 선형전동기에서 발생하는 추력에 대한 반응표면을 나타내는 회귀식을 구하였다[11],[12]. 또한 추력에 대한 중회귀 다항식인 회귀식을 목적함수로 하는 최적설계문제로 다루어, 추력을 최대화하기 위한 설계변수의 최적해를 구하는 알고리즘인 GRG(Generalized Reduced Gradient), RGA(Reduced Gradient Algorithm), SQP(Sequential Quadratic Programming)의 최적화 알고리즘에 대한 최적해와 최적값을 선행연구 결과와 비교, 분석하였다[13].

## 2. 횡자속 선형전동기 이론

### 2.1 횡자속 전동기 기본모델

횡자속 전동기의 원리는 기본적으로 릴럭턴스 전동기와 같다. 권선 전류에 의한 기자력이  $\theta_a$ [AT]일 때, 자속  $\Phi_a$ 가 발생하여 자기저항이 최소화되는 방향인 고정자와 이동자의 치가 일치할 때까지 힘을 발생시키게 된다. 이때, 자속  $\Phi_a$ 의 진행방향과 전동기의 이동방향  $x$ 는 전류의 방향과 전동기의 진행방향이 같은 횡방향이 된다. 이와 같이 횡자속 전동기의 장점은 자기회로와 전기회로가 분리되어 있기 때문에 단위 체적당 높은 출력과 높은 효율이 가능하다는 점이다. 그림 1은 기본형 횡자속 전동기 모델에 대해 전류( $\theta_a$ )와 발생 추력( $F_x$ )의 관계를 이동자의 위치에 따라 나타내고 있다.

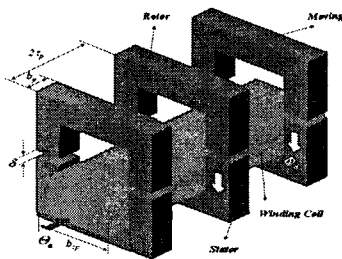


그림 1 횡자속 선형전동기의 기본형상  
Fig. 1 Basic Shape of TFLM

$0 \sim \tau_p$  구간에서는 한쪽 방향으로 힘을 발생시키고  $\tau_p \sim 2\tau_p$  구간에서는 다른 방향으로 힘을 발생시키므로 일정한 방향의 힘을 얻기 위해서  $\tau_p \sim 2\tau_p$  구간에서는 전류를 흘리지 않는다.

$$F_{xd} = \frac{\mu_0}{32\delta\tau_p} \theta_a^2 \quad (1)$$

여기서  $\mu_0$ 는 공기의 투자율,  $\theta_a$ 는 기자력,  $\delta$ 는 공극,  $\tau_p$ 는 극간격이다. 식(1)은 횡자속 선형전동기 힘밀도로 전동기 설계 시 기본식으로 이용하고 있다.

발생 힘밀도  $F_{xd}$ 는 공극과 극간격에 반비례하고 기자력의 자성에 비례함을 알 수 있다. 고휘력 전동기를 설계 시 공극은 기계적인 구조 때문에 한정되어 있고 기자력은 자기회로의 포화와 권선의 온도상승 때문에 제한을 받고 있다. 따라서 주어진 이동자의 크기에서 극간격을 적게 설계하면 발생 힘 밀도를 증가시킬 수 있다.

### 2.2 영구자석여자 횡자속 전동기 모델

횡자속 전동기의 다른 형태로 이동자에 영구자석을 삽입하여 출력밀도를 증가시킨 영구자석여자 횡자속 전동기가 있다. 구조적으로 그림 2와 같이 영구자석에서 발생하는 자계가 공극에서의 자계를 집중시키므로 높은 공극자속밀도를 얻을 수 있다. 그림 2의 형상에서 이동자의 영구자석은 자속을 일정한 방향으로 발생시키도록 교대로 설치되며, 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 권선이 있는 고정자 철심은 양측 극면에서  $\tau_p$ 만큼 엇갈리게 설계되었다. 물론 권선을 이동자에 설치하여도 무방하다.

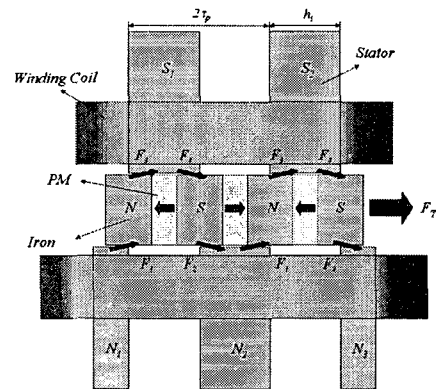


그림 2 영구자석여자 횡자속 선형전동기 힘 발생원리  
Fig. 2 Force generation principle of PM excited TFLM

그림 2에 도시한 바와 같이 고정자 권선에  $\theta_a$ 방향의 전류를 흘리면 암페어의 주회법칙에 의하여 고정자 철심의 위쪽 자극에는  $S_i$ 극, 아래쪽 자극에는  $N_i$ 극의 자속이 발생한다. 따라서 고정자의 자극과 이동자의 자극 상호작용에 의하여 자극의 방향이 같으면 반발력, 자극의 방향이 다른 흡인력이 발생하며, 힘  $F_1 \sim F_4$ 가 생겨 우측 방향의 합성된 힘  $F_7$ 가 발생한다. 영구자석여자 횡자속 전동기의 발생 가능한 힘밀도  $F_{xd}$ 를 구하면 식(2)와 같다.

$$F_{xd} = B_0 \frac{\Theta_a (h_i - y)}{2\tau_p h_i} \quad (2)$$

영구자석여자 횡자속 선형전동기에서 철심의 포화와 누설을 무시하고, 무부하 공극자속밀도  $B_0$ , 기자력  $\Theta_a$ , 극간격  $\tau_p$ , 고정자 철심 두께  $h_i$ , 안내방향 변위  $y$ 이며 영구자석여자 횡자속 전동기의 힘밀도는 식(1)의 횡자속 기본모델에서 발생하는 힘보다 약 3배로 많다[6].

### 2.3 영구자석여자 횡자속 선형전동기 설계

본 연구에서 설계된 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 발생 가능 힘밀도는 다음과 같다.

$$F_{xd} = kB_0 \frac{\Theta_a}{2\tau_p} \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 설계상수,  $B_0$ 는 무부하 공극자속밀도,  $\Theta_a$ 는 기자력,  $\tau_p$ 는 극간격이다.

또한 코에너지를 이용하여 추력  $F_x$ 을 구하는 식은 식(4)와 같다.  $\Delta W_\omega$ 는 이동자의 위치에 따라 변화하는 코에너지를 나타내며,  $\Delta x$ 는 이동자의 위치에 따라 변화된 이동거리를 나타낸다. 본 연구에서는 3차원 등가자기회로망해석에 의한 이동자의 위치에 따른 평균추력을 구하였다. 초기모델은 표 1의 모든 설계인자가 2수준일 때이며, 2000[AT]일 때, 이동자의 위치에 따른 추력의 평균은 173.92[N]이다.

$$F_x = \frac{\Delta W_\omega}{\Delta x} \quad (4)$$

### 3. 반응표면의 구성 및 적합성

반응표면법을 이용하여 최적화를 수행하는 과정은 설계영역에서 결정된 실험점을 바탕으로 반응표면을 구성하는 단계와 앞에서 얻어진 반응표면을 통하여 최적화를 수행하는 과정으로 분류할 수 있다. 반응표면을 구성하는 단계에서는 설계점에 대해서 얻은 결과를 바탕으로 최소자승법(least square method)을 적용함으로써 반응표면을 구성하게 된다.

최소자승법은 다중선형회귀분석(multiple linear regression analysis)에서 회귀계수를 구하기 위하여 사용하는 가장 보편적인 방법이다. 그 과정은 관심을 가지고 있는 반응에 대하여 영향을 미치는 인자를 설계변수로 정의한다. 그리고 설계변수에서 제외된 인자들은 오차로 고려한다. 마지막으로 설계변수로 고려된 인자에 관하여 적절한 실험이나 해석을 반복하고, 여기서 얻어진 결과에 최소자승법을 적용하여 다음 식과 같이 반응표면을 결정하게 된다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \epsilon_i \quad (5)$$

여기서  $y_i$ 는  $i$ 번째 반응값,  $\beta_i$ 는 회귀계수,  $x_{ij}$ 는 설계변수,  $\epsilon_i$   $i$ 번째 반응값의 오차항이다.

회귀계수는 식(6)과 같이 결정된다.

$$\min L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = (y - X\beta)^T (y - X\beta)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = -2X^T y + 2X^T X \beta = 0$$

$$\therefore \beta \cong b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (6)$$

따라서 근사된 반응표면은 식(7)과 같다.

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

여기서  $\hat{y}$ 는 추정치이며,  $b$ 는 회귀계수이다.

최소자승법을 통하여 얻어지는 반응표면의 모델은 다항식의 차수에 따라서 다양하게 결정될 수 있다. 따라서 최소자승법을 통하여 얻어진 반응표면 중에서 실제의 결과를 가장 잘 표현하는 동시에 오차의 영향이 가장 적은 반응표면을 선정하기 위하여 반응표면의 근사정도를 평가하여야 한다. 본 논문에서는 통계적 매개 변수인 결정계수(coefficient of determination)로서  $R^2$ 와  $R_{adj}^2$ 는 식(8)과 같이 정의되고, 0과 1사이의 값을 가지며 반응표면의 근사도가 좋아질수록 1에 가까운 값을 가진다. 그리고  $R_{adj}^2$ 는 반응표면의 구성에 있어서 새로 추가된 항이 전체의 반응표면에 나쁜 영향을 미치는 경우에는 이전보다 나쁜 결과를 보이는 특성이 있다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \left( \frac{N-K}{N-1} \right) (1 - R^2) \quad (8)$$

여기서  $y_i$ 는  $i$ 번째 실제 반응값,  $\hat{y}_i$   $i$ 번째 추정치이며,  $\bar{y}$ 는 평균값,  $N$ 은 총 실험횟수,  $K$ 는 설계변수의 개수이다. 실제 반응값  $y_i$ 와 추정치  $\hat{y}_i$ 의 차를 잔차(residual)라고 하며 식(9)와 같다.

$$e = y_i - \hat{y}_i \quad (9)$$

### 4. 반응표면법을 이용한 추력성능 향상

#### 4.1 추력의 최대화

본 논문에서는 횡자속 선형전동기를 이용한 왕복형 액추에이터를 압축기용으로 설계하였다. 횡자속 선형전동기에 사용된 재질은 코어 재료의 경우 0.5t 무방향성 규소강판인 S23을 사용하였고 영구자석은 허용 사용온도 120°C인 Nd계를 사용하였으며, 코일은 1.1mm×2.2mm인 각권선을 기준으로 하였다.

표 1은 설계변수와 설계변수에 따른 인자를 나타내고 최적화를 수행하기 위하여 표 2의 횡자속 선형전동기의 추력에 대하여 형상을 나타내는 설계변수로 하는 반응표면을 구성하였다. 표 2의 혼합적교배열표  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 는 교호작용은 구하지 않고 3수준의 다른 열들에 고르게 나누어져 있는 직

교배열표이며 아주 널리 사용되고 있다. 표 3은 표 2를 이용하여 구한 추력에 대한 중회귀 다항식의 분산분석표를 나타낸다. 2차 반응표면의 계수까지 나타내었으며 P-value를 통해서 유의함을 검증할 수 있다. 표 2의 결과를 잘 표현할 수 있는 반응표면을 구성하기 위해 2차로 반응표면을 구성하여 식(10)에 나타내었으며, 반응표면의 적합도  $R^2$ 와  $R^2_{adj}$ 는 0.999, 0.993이다. 그림 3은 횡자속 선형전동기의 설계변수를 나타내고 있다.

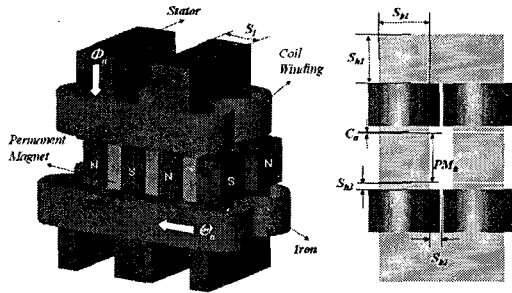


그림 3 횡자속 선형전동기의 설계변수  
Fig. 3 Design variables of TFLM

표 1 인자와 수준에 따른 변수 값  
Table 1 Values of factors and levels

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
$S_{b1}$	$a-2$	$a$	$a+2$
$S_{b2}$	$b-2$	$b$	$b+2$
$S_{h1}$	$c-2$	$c$	$c+2$
$S_{h2}$	$d-1$	$d$	$d+1$
$C_a$	$e-0.2$	$e$	$e+0.2$
$PM_h$	$f-2$	$f$	$f+2$
$S_l$	$g-2$	$g$	$g+2$

표 2 혼합직교배열표  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$   
Table 2 Table of mixed orthogonal array  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$

Exp.	$S_{b1}$	$S_{b2}$	$S_{h1}$	$S_{h2}$	$C_a$	$PM_h$	$S_l$	Thrust force[N]
1	1	1	1	1	1	1	1	164.50
2	1	2	2	2	2	2	2	161.26
3	1	3	3	3	3	3	3	148.97
4	2	1	1	2	2	3	3	181.57
5	2	2	2	3	3	1	1	143.04
6	2	3	3	1	1	2	2	192.85
7	3	1	2	1	3	2	3	168.65
8	3	2	3	2	1	3	1	208.34
9	3	3	1	3	2	1	2	178.34
10	1	1	3	3	2	2	1	151.64
11	1	2	1	1	3	3	2	146.40
12	1	3	2	2	1	1	3	170.54
13	2	1	2	3	1	3	2	194.98
14	2	2	3	1	2	1	3	170.56
15	2	3	1	2	3	2	1	149.15
16	3	1	3	2	3	1	2	159.28
17	3	2	1	3	1	2	3	208.32
18	3	3	2	1	2	3	1	191.34

그림 4는 표 2의 직교배열 실험에서의 시뮬레이션과 식(10)의 반응표면으로부터 나온 결과를 나타내었다. 이 결과는 반응표면에 의하여 예측된 결과보다 최대 0.6% 오차로 이를 통하여 2차로 구성된 반응표면이 실제 값을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

표 3 추력에 대한 중회귀 다항식의 분산분석  
Table 3 Variance analysis of multiple regression polynomial for thrust force

Factor	Coef	SE. coef.	T-ratio	P-value	
Const.	175.04	1.6458	1.6458	106.356	0.000
$S_{b1}$	14.25	0.5205	0.5205	27.374	0.000
$S_{b2}$	0.88	0.5205	0.5205	1.691	0.189
$S_{h1}$	0.28	0.5205	0.5205	0.537	0.629
$S_{h2}$	-0.75	0.5205	0.5205	-1.441	0.245
$C_a$	-18.67	0.5205	0.5205	-35.874	0.000
$PM_h$	7.11	0.5205	0.5205	13.666	0.001
$S_l$	3.38	0.5205	0.5205	6.496	0.007
$S_{b1}^2$	-0.56	0.9015	0.9015	-0.620	0.579
$S_{b2}^2$	-2.01	0.9015	0.9015	-2.224	0.113
$S_{h1}^2$	0.02	0.9015	0.9015	0.026	0.981
$S_{h2}^2$	-0.06	0.9015	0.9015	-0.064	0.953
$C_a^2$	-1.20	0.9015	0.9015	-1.330	0.275
$PM_h^2$	-0.49	0.9015	0.9015	-0.544	0.626
$S_l^2$	-0.80	0.9015	0.9015	-0.888	0.440
Model	DOF	Sum of Square	Mean Square	F-ratio	
Regression(Linear)	7	7380.19	1054.31	324.35	
Regression(Square)	7	26.63	3.80	1.17	
Residual	3	9.75	3.25		
Total	17	7416.57			

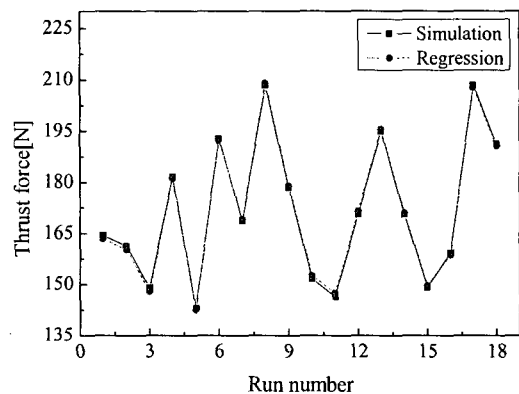


그림 4 회귀식의 추정식과 해석값의 비교  
Fig. 4 Comparison between regression and simulation

$$Y_T = 175.04 + 14.25S_{b1} + 0.88S_{b2} + 0.28S_{h1} - 0.75S_{h2} - 18.67C_a + 7.11PM_h + 3.38S_l - 0.56S_{b1}^2 - 2.01S_{b2}^2 + 0.02S_{h1}^2 - 0.06S_{h2}^2 - 1.20C_a^2 - 0.49PM_h^2 - 0.80S_l^2 \quad (10)$$

4.2 최적화 계산

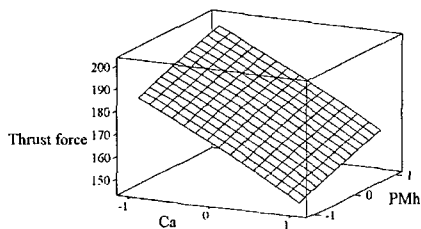
횡자속 선형전동기의 성능 향상 및 소형화를 위하여 추력의 최대화가 요구된다. 따라서 추력을 최대화 할 수 있는 형상설계변수를 결정하기 위해 식(11)과 같이 최적화의 정식화를 하였다.

Maximize:

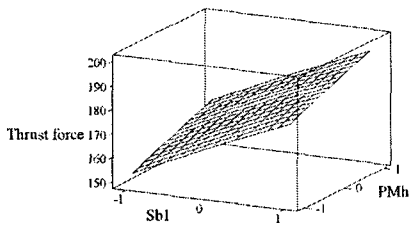
$$f(x) = Y_T \quad (11)$$

$$-1 \leq S_{b1}, S_{b2}, S_{h1}, S_{h2}, C_a, PM_h, S_l \leq 1$$

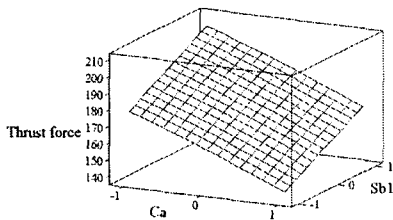
목적함수인 추력을 최대화하고 설계변수의 범위를 고려하여 최적화 계산을 수행하였다. 최적화 계산 알고리즘으로는 단일 목적의 최적화를 반복적으로 실행하는 SQP법, RGA과 GRG를 사용하여 3가지 알고리즘에 대하여 비교하였다. 그리고 선행연구결과인 직교배열표를 이용한 추력을 최대화하는 최적설계문제에서 나온 최적결과와 비교하여 나타내었다 [13]. 그림 5는 선행연구에서 분산분석(ANOVA)을 통해서 구한 통계적으로 가장 유의한 인자( $C_a$ ,  $S_{b1}$ ,  $PM_h$ )에 대한 정추력의 반응표면을 나타내었다. 표 4와 표 5는 반응표면인 식(10)에 최적화 알고리즘 SQP, GRG, RGA를 적용하여 구한 최적해와 최적값을 나타내었다. 알고리즘에 따라서 최적해와 최적값은 SQP와 GRG가 거의 동일하며, RGA가 약간 우수한 최적해를 찾았음을 알 수 있었다.



(a) according to variation between  $C_a$  and  $PM_h$



(b) according to variation between  $S_{b1}$  and  $PM_h$



(c) according to variation between  $C_a$  and  $S_{b1}$

그림 5 설계변수에 대한 정추력의 반응표면  
Fig. 5 Response surface of thrust force versus design variables

표 4 설계변수 최적해

Table 4 Optimal design parameter

Result		DV	$S_{b1}$	$S_{b2}$	$S_{h1}$	$S_{h2}$	$C_a$	$PM_h$	$S_l$
SQP	Optimum level		1	0.2189	1	-1	-1	1	1
	Optimum size		25	10.437	27	1.4	0.3	22	19
GRG	Optimum level		1	0.2189	1	-1	-1	1	1
	Optimum size		25	10.437	27	1.4	0.3	22	19
RGA	Optimum level		1	0.2191	1	-1	-1	1	1
	Optimum size		25	10.438	27	1.4	0.3	22	19

표 5 최적값

Table 5 Optimal solution

Method	SQP	GRG	RGA
Objective			
Thrust force	216.486	216.486	216.498

4.3 최적결과와 초기모델의 비교

표 6은 선행연구 결과인 직교배열표와 평균분석을 통해서 구한 최적수준조합의 결과와 초기모델의 수준조합의 결과 및 반응표면분석법을 비교하여 나타내었다. 초기모델의 경우 178.55[N]의 추력이 발생하였으며, 직교배열표와 평균분석을 통해서 최적수준을 조합한 경우 212.49[N]의 추력이 발생하였다. 또한 반응표면분석법을 이용한 결과는 추력이 216.48[N]로 가장 뛰어난 결과를 얻을 수 있었다. 초기모델과 반응표면분석법을 이용한 두 모델을 비교해보면 반응표면분석법을 이용한 결과가 초기모델에 비하여 19%, 직교배열표와 평균분석에 비해서 19% 추력이 향상되는 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과는 선행연구에 사용된 기법인 직교배열표와 평균분석을 이용한 경우는 설계변수에 대한 수준의 전조합 실시에 의한 최적결과와 유사한 최적해를 얻는 방법이다. 이는 설계변수의 각 수준에 맞는 이산적인 값으로 최적조합을 위한 결과인 반면에 반응표면분석법에 의한 결과는  $S_{b2}$  설계변수의 경우 수준의 경계 값이 아니라 수준 사이의 값이 최적해로 나왔으며 대부분의 변수가 수준의 경계값에서 최적해가 나왔기 때문이다. 따라서 설계변수의 수준값을 적절히 조절하여 수준 사이에 최적해를 구할 경우 아주 효율적인 기법임을 알 수 있다. 본 논문의 횡자속 선형전동기의 경우도 두 가지 최적설계 기법인 이산적인 설계공간에서의 최적설계와 연속적인 설계공간에서의 최적설계의 기법 모두가 횡자속 선형전동기 설계 시 효율적인 기법임을 확인할 수 있었다.

횡자속 선형전동기 설계 시 디텐트력의 영향을 체크해 본 결과 초기모델의 디텐트력이 26.45[N]이었으나, 최적모델의 경우 34.68[N]으로 다소 증가하였다. 하지만 이것은 1 pole pitch를 움직이는 액추에이터의 경우 큰 추력을 얻는 것이 더 큰 영향요소이기 때문에 추력의 수직면에 작용하는 흡인

력은 원형과 같이 서로 상쇄시킬 수 있는 방법을 적용하는 것이 일반적이다. 또한 고정자 및 이동자 코어 폭은 적절히 변화시키면 영구자석의 자력에 의해서 발생하는 디텐트력을 완화시킬 수 있지만 근본적으로 정상구동 시 얻어지는 최대 힘에 비해서 10% 정도로 작은 것이 일반적이다. 초기모델의 경우 정추력 실험을 통해서 얻어진 최대 정추력이 이론치에 비해서 약 5% 오차가 발생하였고 최적모델을 선정하여 액추에이터 제작에 적용하려고 한다.

**표 6** 최적수준조합과 초기모델의 비교  
**Table 6** Comparison of initial model with optimal model

Model	Thrust force[N]
Initial	178.55
ANOM	212.49
RSM	216.48

### 3. 결 론

본 논문에서는 횡자속 선형전동기를 제작하는데 있어서 먼저 제한된 체적에서의 전체 형상과 코일의 권수를 결정하고, 구성요소로서 고정자 코어의 코일 감는 부 너비, 중간 너비, 높이, 길이, 코어와 영구자석이 이루는 극간격, 영구자석 높이인 이동자 코어의 높이, 공극 등을 설계인자로 하였다. 설계변수의 변경에 따른 추력 계산을 단순화하기 위하여 반응표면분석법을 이용한 추력 회귀식을 유도하여 목적함수로 사용하였다. 추력이 최대가 되기 위한 횡자속 선형전동기의 형상을 나타내는 설계변수에 대한 추력의 중회귀다항식에 대한 최적화 알고리즘인 SQP, GRG, RGA를 적용하여 구한 최적해와 최적값은 거의 동일하게 나타났다. 또한 이는 선행연구 결과인 이산설계공간에서 보다 효율적인 설계를 수행하기 위하여 직교배열표와 평균분석을 통해서 선형전동기에서 발생하는 추력이 최대가 되는 최적조합을 얻은 결과와 거의 일치하였다[13].

### 감사의 글

본 연구는 국무총리산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 “차세대 냉각시스템 기술개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. Arumugam, J. F. Lindsay, and R. Krishnan, "Sensitivity of Pole Arc/Pole Pitch Ratio on Switched Reluctance Motor Performance", IEEE IAS Annual meeting, pp.50-54, 1998.
- [2] Yamada, H., "Optimum Design of Thin Linear DC Motor with Logn Strokes", T.IEE Japan, Vol.116-D, No.4, pp.384-389, 1979.
- [3] Choi, M. S., Kim, Y. Y. and Lee, S. L., "The Optimum Geometric Design Stators for a Brushless DC Linear Motor", Trans. of KSME A, Vol.23, No.3, pp.442-448, 1999.
- [4] K. J. Binns, "Permanent magnet AC generators", Proc. IEEE, Vol.126, No.7, pp.690-696, 1979.
- [5] T. Alasuvanto, "Comparison of Four Different Permanent Magnet Rotor Constructions", Int. Conf. on Electrical Machines, pp.1034-1039, 1990.
- [6] 방덕제, 김호중, 강도현, "횡자속 선형전동기 추진모듈 개발", 한국반도체및디스플레이장비학회 춘계학술대회 논문집, pp.138-146, 2004.
- [7] G. E. P. Box and K. B. Willson, "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions", Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol.13, pp.1-14, 1951.
- [8] D. M. Allen, "Mean Square Error of Prediction as a Criterion for Selecting Variables", Technometrics, Vol.13, pp.469-475, 1971.
- [9] D. M. Allen, "The Relation Between Variable Selection and Data Augmentation and a Method for Prediction", Technometrics, Vol.16, pp.125-127, 1974.
- [10] G. A. F. Seber, "Linear Regression Analysis", John Willey, New York, 1977.
- [11] F. Gillon, P. Brochet, "Screening and Response Surface Method Applied to the Numerical Optimization of Electromagnetic Devices", IEEE Trans. Mag., V.36, 4, pp.1163-1167, 2000.
- [12] Ruowen Rong et al., "Applying Response Surface Methodology in the Design and Optimization of Electromagnetic Devices", IEEE Trans. Mag., Vol.33, No.2, pp.1916-1919, 1999.
- [13] 홍도관, 우병철, 강도현, "직교배열표를 이용한 추력을 최대화하기 위한 횡자속 선형전동기의 최적설계", 대한전기학회 논문지 제54권, 제11호, B권, pp.505-510, 2005.

## 저 자 소 개



### 홍 도 관 (洪 到 琯)

1972년 2월 22일생. 1998년 동아대 기계공학과 졸업. 2004년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사), 2004년~현재 한국전기연구원 Mechatronics그룹 연구원.

Tel : 055-280-1395

Fax : 055-280-1547

E-mail : dkhong@keri.re.kr



### 우 병 철 (禹 炳 哲)

1963년 7월 22일생. 1989년 영남대 기계공학과 졸업. 2000년 경북대학교 기계공학과 졸업(박사), 1991년~현재 한국전기연구원 Mechatronics그룹 팀장.

Tel : 055-280-1632

Fax : 055-280-1547

E-mail : bcwoo@keri.re.kr



### 강 도 현 (姜 道 鉉)

1958년 9월 21일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 독일 Braunschweig대학 졸업(박사), 1986년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 단장.

Tel : 055-280-1480

Fax : 055-280-1547

E-mail : dhkang@keri.re.kr