

Detent force를 최소화 하면서 추력을 최대화하기 위한 압축기용 영구자석 여자 횡자속 선형전동기의 형상최적설계

홍도관<sup>1</sup>·우병철<sup>1</sup>·강도현<sup>1</sup>·장정환<sup>1</sup>·김종무<sup>1</sup>·정동훈<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 한국전기연구원 메카트로닉스 연구그룹

The Shape Optimization of PM Excited Transverse Flux Linear Motor for Compressor to Minimize Detent Force and Maximize Thrust force

D.K. Hong<sup>1</sup>·B.C. Woo<sup>1</sup>·D.H. Kang<sup>1</sup>·J.W. Jang<sup>1</sup>·J.M. Kim<sup>1</sup>·D.H. Jeong<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Mechatronics Research Group of Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - On this study, we optimized maximizing thrust force of weight ratio and minimizing detent force of weight ratio at the TFLM(Transverse Flux Linear Motor) using design of experiments by table of orthogonal array, characteristic function and analysis of means(ANOM). For two functions or more, the effectiveness of design change can be evaluated in accordance with change in design parameters. Also, The stator and mover weight of TFLM is reduced by up to 20 percent while its thrust force of weight ratio and detent force of weight improved. From now on, we are going to apply the required technique to design various uses and shapes of the TFLM.

1. 서 론

회전형 전동기를 이용한 시스템을 구현하고자 할 경우 원운동에서 직선운동으로 변환하기 위해 스크류, 체인, 기어 박스 등의 기계적인 변환장치가 필요로 하게 된다. 이 때 마찰에 의한 에너지의 손실로 효율이 낮아 질 수 밖에 없다[1][2]. 본 연구는 냉각기 등에 적용 가능한 압축기용 영구자석 여자 횡자속 선형전동기(Transverse Flux Linear Motor : TFLM)를 제작하는데 있어서 먼저 제한된 체적에서의 전체 형상과 코일의 권수를 결정하고, 구성요소로서 스테이터, 코어, 영구자석의 형상을 나타내는 치수와 코어의 재질을 설계인자로 하였다. 3차원 동가 자기 회로방법을 이용하여 전동기의 특성을 해석하고 실험계획법의 일종인 직교배열표를 이용하여 행렬실험을 수행하였다. 추력이 최대가 되도록 설계하기 전에 고려해야할 detent force를 제한조건 형태의 별칭함수로 정의하고, 새롭게 정의되는 목적함수인 특성함수에 대해서 평균분석으로 최적해를 구하였다[3][5]. 따라서 detent force를 최소화하면서 추력이 최대가 되는 최적설계를 하였으며, 향후 다양한 용도와 형태의 선형전동기를 설계하는데 필요한 기법으로 활용하고자 한다.

2. 본 론

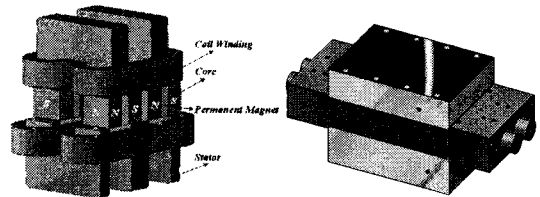
2.1 영구자석여자 횡자속 선형전동기 이론

횡자속 선형전동기는 자석이 형성하는 평면이 이동자의 이동방향에 대해 횡방향이며 전류가 이동자와 같은 방향으로 흐르는 것이 특징이다[6]. 횡자속 선형전동기의 추력 밀도를 증가시키기 위해 영구자석을 삽입한 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 형상은 다양하지만 본 연구에서는 그림 1과 같이 고정부 코어가 수직으로 2단 구조이며 그 사이에 이동자가 움직이는 형상이다.

영구자석에서 발생하는 자계는 공극에서 자계를 집중 시킴으로 높은 공극 자속밀도를 얻을 수 있다. 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 이동자에 설치된 영구자석의 자극을 교대로 설치하고, 권선이 감겨 있는 철심은 아래와 위의 간격을  $\tau_p$ 만큼 엇갈리게 설계하였다. 이 때 발생하는 추력  $F_x$ 는 식(1)과 같다.  $\Delta W_{co}$ 는 이동자의 위치에 따라 변화하는 coenergy이며,  $\Delta x$ 는 이동자의 위치

에 따라 변화된 이동거리를 나타낸다.

$$F_x = \frac{\Delta W_{co}}{\Delta x} [N] \quad (1)$$



(a) 각 부 형상과 명칭 (b) 전체 조립형상  
 그림 1 압축기용 횡자속 선형전동기의 형상

2.2 압축기용 횡자속 선형전동기 모델

본 논문에서는 횡자속 선형전동기를 이용한 왕복형 액추에이터를 압축기용으로 설계하였다. 횡자속 선형전동기에 사용된 재질들을 표 1에 나타내었으며, 코어 재료는 일반 구조용 탄소강인 S23와 SMC를 사용하였으며, 영구자석은 표준 사용온도 120℃인 Nd계를 사용하였고 코일은 1.1mm×2.2mm인 각 권선을 기준으로 하였다.

표 1 재질 특성

Material	Characteristic	Note
Stator-core	S23	-
Mover-core	S23, SMC	-
Permanent magnet	$B_r=1.23T$ , $\mu_r=1.1$	NdFe35
Coil	Copper	48×4 turns

그림 1은 횡자속 선형전동기를 구성하고 있는 각 부분의 형상과 명칭을 나타내었으며, 위쪽에 고정부 코어는 2개를 사용하고 아래쪽에는 고정부 코어를 3개를 사용하여 설계하였으며 아래쪽 코어의 좌우 끝 코어 폭을 위쪽의 고정부 코어의 폭에 1/2로 하여 상부와 하부의 평형을 유지하였다. 일반적으로 3차원을 모델링 하고자 할 때 주기적으로 반복적인 형상의 경우 한 주기( $2\tau_p$ )만을 주기 경계 조건으로 하여 해석을 수행한다. 하지만 본 논문에서는 압축용 선형 전동기의 이동자의 전체 길이가 한주기 반( $3\tau_p$ )밖에 되지 않고, 실제적으로 힘이 작용하는 구간의 길이는 이동자의 위치에 따라 한주기 반( $3\tau_p$ ) 구간이 생긴다. 따라서 이동자의 위치에 따라 힘이 작용하는 구간의 길이가 변하기 때문에 한 주기만을 해석하였을 경우 오차가 생길 수 있다. 그러므로 해석모델 전체를 3차원 모델링하여 해석을 수행하였다.

### 2.3 특성함수를 이용한 제한조건의 문제

제한조건이 있는 문제의 경우 제한조건을 고려하기 위하여 벌칙함수  $P(x)$ 를 고려하여 원래 반응치와 제한조건의 위배량을 포함하는 벌칙함수로써 새로운 목적함수인 특성함수  $\Psi(x)_{new}$ 가 정의된다. 직교배열표의 실험으로부터 얻어지는 특성치는 최적설계에 취급되는 제한조건을 포함하고 있지 않다. 횡자속 선형전동기의 최적설계의 문제를 정식화로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize : } W(S_{b1}, \dots, S_{lc}) \quad (1)$$

Subject to :

$$\frac{|(T_f/W_t)_{at}|}{(T_f/W_t)_{max}} - 1 \leq 0 \quad (2)$$

$$\frac{|(D_f/W_t)_{max}|}{(D_f/W_t)_{at}} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

식(1)의  $W(S_{b1}, \dots, S_{lc})$ 는 횡자속 선형전동기의 형상을 변수로 하여 나타낸 모델의 중량을 나타내며, 식(2), 식(3)의  $(T_f/W_t)_{at}$ ,  $(D_f/W_t)_{at}$ 은 허용 중량 대 추력비, 허용 중량 대 detent force비를 나타낸다. 직교배열표의 각 실험에서 제한조건의 유용성이 포함될 수 있도록 특성함수를 정의한다. 먼저 식(4), 식(5)과 같이 제한조건함수의 유용성을 처리할 수 있는 벌칙함수를 정의한다.

$$P_1(S_{b1}, \dots, S_{lc}) = \alpha \cdot \text{Max} \left[ 0, \frac{|(T_f/W_t)_{at}|}{(T_f/W_t)_{max}} - 1 \right] \quad (4)$$

$$P_2(S_{b1}, \dots, S_{lc}) = \beta \cdot \text{Max} \left[ 0, \frac{|(D_f/W_t)_{max}|}{(D_f/W_t)_{at}} - 1 \right] \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 제한조건에 대한 목적함수 및 벌칙함수의 기여도를 조절하는 벌칙계수를 의미한다. 즉, 식(5)에서 중량 대 추력비를 예로 들면, 제한조건을 만족시킬 경우에는 벌칙함수가 최대값인 0을 가지게 되며, 제한조

건을 위배할 경우  $\alpha \left( \frac{|(T_f/W_t)_{at}|}{(T_f/W_t)_{max}} - 1 \right)$ 만큼의 최대값을

갖게 된다. 이 값이 너무 크게 되면 반응치의 최소화 의미가 없고, 반대로 너무 작게 되면 구한 최적수준이 불용영역에 있을 확률이 높다. 따라서 원래 목적함수에 비해 벌칙항을  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 계수로 벌칙함수의 영향도를 조절해야 하며 이것으로부터 특성함수는 다음과 같이 정의할 수 있다. 여기서,  $W_0$ 는 횡자속 선형전동기의 초기모델의 중량을 나타낸다.

$$\Psi(S_{b1}, \dots, S_{lc})_{new} = \frac{W(S_{b1}, \dots, S_{lc})}{W_0} + \sum_{i=1}^2 P_i(S_{b1}, \dots, S_{lc}) \quad (6)$$

### 2.4 신호 대 잡음비를 이용한 민감도해석

직교배열표는 재현성, 바람직한 최적조건 결정 및 안정성에 대한 평가와 함께 설계변수간에 교호작용을 기술적으로 생각하여 무시될 수 있는 것을 주요효과와 교차시켜 실험의 크기를 줄일 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 기본적으로 신호 대 잡음비를 이용하여 설계인자가 설계값에 미치는 영향을 분석하였다. 다루려는 성능 특성의 종류에 따라 여러 가지의 신호 대 잡음비를 정의하였으며 이차식인 품질손실함수로부터 유도된 값으로서 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도라고 할 수 있다. 중량 대 detent force는 작으면 작을수록 좋은 망소특성이며, 중량 대 추력비는 크면 클수록 좋은 망대특성이다. 각각 신호 대 잡음비는 다음과 같다.

·망소특성(smaller-the-better type)

$$\eta_s = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (7)$$

·망대특성(larger-the-better type)

$$\eta_l = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (8)$$

여기서,  $n$ 은 동일한 제어인자 수준조합에서의 반복 측정 회수이며,  $y_i$ 는 그 때의 각각의 측정치이다.

### 2.5 직교배열표 이용한 실험계획법

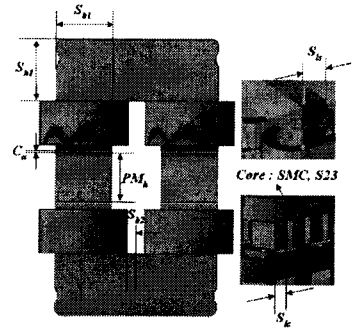


그림 2 영구자석여자 횡자속 선형전동기

본 연구에서는 이산설계공간에서 보다 효율적인 설계를 수행하기 위하여 직교배열표를 도입하였으며, 직교배열표를 사용하는 경우 인자의 조합에 대해 일부실험을 사용하여 최소한의 해석 횟수로 전조합실험법과 유사한 계산결과를 얻을 수 있다. 그림 2에서 코어의 재료를 나타내는 인자를 2수준으로 하고, 횡자속 선형전동기의 형상을 나타낸 7개의 변수를 인자를 모두 3수준으로 나누어 표 2에 나타내었다.

표 2 인자와 수준에 따른 변수 값

Level	1	2	3
<b>Factor</b>			
Material(Core)	S23	SMC	-
$S_{b1}$	$a-3$	$a$	$a+3$
$S_{b2}$	$b-3$	$b$	$b+3$
$S_{h1}$	$c-3$	$c$	$c+3$
$C_o$	$d-0.2$	$d$	$d+0.2$
$P M_h$	$e-3$	$e$	$e+3$
$S_{l1}$	$f-2$	$f$	$f+2$
$S_{l2}$	$g-2$	$g$	$g+2$

표 3의 직교배열표는 교호작용은 구하지 않고 3수준의 열들 사이의 교호작용을 3수준의 다른 열들에 고르게 나누어져 있는 혼합직교배열표  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 를 사용하였으며, 설계변수의 후보값들 중에서 초기 설계값을 기준으로 수준값을 선정하여 행렬실험을 수행하였다. 평균분석을 통해서 최적해를 구하고 행렬실험의 각 행의 결과와 비교하여 우수한 해를 최적해로 선정하였다. 최적수준을 선정하기 위해서는 기본적으로 S/N비를 이용하여 설계인자가 횡자속 선형전동기의 중량 대 추력비와 중량 대 detent force비에 미치는 영향을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 직교배열표를 이용한 실험결과

표 2의 인자에 따른 각 수준과 표 3의 직교배열표를

이용하여 중량 대 추력비와 중량 대 detent force비를 각 실험마다 해석을 통해서 결과를 구하였다. 결과를 살펴보면 각 실험에서 중량 대 추력비가 큰 것은 중량 대 detent force비도 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 중량 대 추력비를 최대화 하면서 detent force비를 줄일 수 있는 설계인자를 찾는 것을 설계 목표로 하였다.

표 3 혼합 직교배열표  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$

Exp	Thrust_force[N] weight[kg]	Detent_force[N] weight[kg]	Characteristic function
1	330.73	99.55	0.8416
2	281.24	23.37	0.8779
3	193.50	28.45	1.2868
4	260.92	24.70	1.0546
5	217.42	63.11	1.3767
6	368.36	38.54	0.8396
7	253.95	15.57	1.4243
8	334.49	71.88	0.9877
9	237.30	40.12	1.2408
10	205.50	29.77	1.0225
11	195.77	50.97	1.2965
12	246.55	28.29	0.7793
13	262.18	57.79	0.8927
14	218.93	39.11	1.1832
15	184.64	35.68	1.4302
16	180.61	42.78	1.6505
17	226.47	22.64	1.0306
18	229.94	87.57	1.3256

총 고정자 중량은 1.381 kg으로 약 19%의 총 고정자 중량을 줄일 수 있었다. 그리고 영구자석과 코어가 포함된 이동자의 중량은 최적수준조합의 경우 0.521 kg으로 초기모델의 0.663 kg에 비해서 약 22%의 이동자 중량을 줄일 수 있었다. 그림 3은 초기모델과 최적모델의 detent force를 위치에 따라 나타내었다.

표 5 최적수준조합과 초기모델의 비교

Model	Thrust_force[N] weight[kg]	Detent_force[N] weight[kg]
Initial	269.31	19.44
Optimum	275.31	13.69

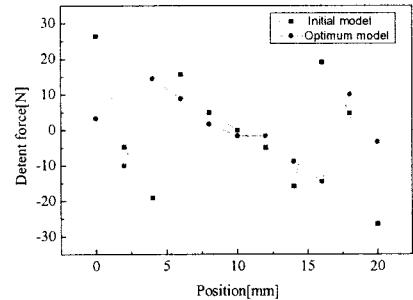


그림 3 초기모델과 최적모델의 detent force 비교

### 3.2 특성함수 평균분석

표 4는 특성함수에 대한 신호 대 잡음비를 이용하여 평균분석을 수행하여 나타내었다. 중량을 줄이면서 중량 대 추력비가 초기모델에 비해서 커지고, 중량 대 detent force비가 초기모델에 비해서 작아지는 코어 재질, 선형전동기의 형상을 나타내는 인자들의 최적 조합을 구하였다. 표 2의 2수준인 초기모델 인자들에 비해서, 최적조합의 경우 고정부 코어의 코일감은 부의 너비( $S_{b1}$ )와 영구자석의 높이( $PM_h$ )인자는 각각 1수준으로 나타났으며, 코어의 구동방향 길이( $S_{c1}$ )는 초기모델에 비해서 3수준으로 크게 설계됨을 알 수 있다.

표 4 특성함수의 신호 대 잡음비 평균분석

Factor	Effect		
	1	2	3
Material(Core)	-1.041*	-1.434	-
$S_{b1}$	-0.191*	-1.169	-2.353
$S_{b2}$	1.267	-1.201*	-1.245
$S_{b1}$	1.472	0.939*	1.302
$C_a$	1.416	0.939*	1.359
$PM_h$	0.799*	-1.135	-3.376
$S_{is}$	-1.632	0.706*	-1.375
$S_{ic}$	-1.702	-1.077	-0.933*

\* : 최적수준

### 3.3 최적결과와 초기모델의 비교

표 5는 표 4의 평균분석을 통해서 구한 최적수준조합의 결과와 초기모델의 수준조합의 결과를 비교하여 나타내었다. 초기모델에 비하여 중량 대 추력비는 커지면서 중량 대 detent force비가 작아지는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 횡자속 선형전동기를 설계하는데 있어서 중요한 고려사항인 경량화 측면에서 분석해보면 최적수준조합일 경우 총 고정자 중량은 1.123 kg, 초기모델일 경우

## 4. 결 론

본 논문에서는 횡자속 선형전동기의 구성요소로서 스테이터, 코어, 영구자석의 형상을 나타내는 치수와 코어의 재질을 설계인자로 하였다. 직교배열표, 제한조건이 고려되는 특성함수, 평균분석, 분산분석 기법 등을 통해서 초기모델에 비해서 중량 대 추력비를 최대화하고, 중량 대 detent force비를 최소화할 수 있었으며, 횡자속 선형전동기를 제작하는데 있어서 중요한 고려사항인 경량화 측면에서 영구자석과 코어가 포함된 이동자는 초기모델에 비해서 약 22% 줄이고, 총 고정자 중량도 초기모델에 비해서 약 19% 경량화 시킬 수 있었다.

## [후 기]

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

## [참 고 문 헌]

- [1] K.J. Binns, "Permanent magnet AC generators", Proc. IE E, Vol.126, No.7, pp.690-696, 1979.
- [2] T. Alasuvanto, "Comparison of Four Different Permanent Magnet Rotor Constructions", Int. Conf. on Electrical Machines, pp.1034-1039, 1990.
- [3] 홍도관, 최석창, 안찬우, "특성함수를 이용한 제한조건이 있는 전장크래인의 강건최적설계", 한국정밀공학회지 제21권, 제2호, pp.160-167, 2004.
- [4] 홍도관, 우병철, 김동영, 안찬우, "마이크로 스피커 다이아프램의 형상최적설계에 관한 연구", 한국소음진동공학회지 제15권, 제7호, pp.775-780, 2005.
- [5] 홍도관, 우병철, 강도현, 장정환, 김종부, 박건우, "추력을 최대화하기 위한 횡자속 선형전동기의 최적설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1159-1161, 2005.
- [6] Do Hyun Kang, "Transversalfussmaschinen mit permanenter Erregung als Linearantriebe im schienengebundenen Verkehr", Braunschweig University, 1996.