

직교배열표를 이용한 추력을 최대화하기 위한 횡자속 선형전동기의 최적설계

論 文

54B-11-1

Optimum Design of Transverse Flux Linear Motor for Maximizing Thrust Force Using Table of Orthogonal Array

洪 到 瑄[†] · 禹 炳 哲^{*} · 姜 道 鉉^{**}

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

Abstract - On this study, we optimized maximizing the thrust force at the TFLM(Transverse Flux Linear Motor) using design of experiments by the table of orthogonal array and the analysis of means(ANOM), and classified the most contributive design factor maximizing the thrust force at the TFLM by analysis of variance(ANOVA). From now on, we are going to apply the required technique to design various uses and shapes of the TFLM.

Key Words : Transverse Flux Linear Motor(TFLM), Table of Orthogonal Array, Analysis of Means(ANOM), S/N Ratio, Thrust Force, Analysis of Variance(ANOVA)

1. 서 론

회전형 전동기를 이용한 시스템을 구현하고자 할 경우 원 운동에서 직선운동으로 변환하기 위해 스크류, 체인, 기어 박스 등의 기계적인 변환장치가 필요로 하게 된다. 이 때 마찰에 의한 에너지의 손실로 효율이 낮아 질 수밖에 없다 [1][2]. 본 논문에서는 압축기에 적용 가능한 횡자속 선형전동기(Transverse Flux Linear Motor : TFLM)의 형상을 설계하고 한 피치(pole pitch)를 모델링하여 그 한 상에 대한 극 간격별 추력 특성 등을 분석하여 극 간격을 결정하고 다시 제한된 체적에서의 전체 형상을 결정한다. 횡자속 선형전동기를 제작하는데 있어서 먼저 제한된 체적에서의 전체 형상과 코일의 권선수를 결정하고, 구성요소로서 고정부 코어의 너비, 높이, 길이, 코어와 영구자석이 이루는 극간격, 영구자석 높이인 이동자 코어의 높이, 공극 등을 설계인자로 하였다. 실험계획법의 일종인 직교배열표와 평균분석(ANOM)을 통해서 선형전동기에서 발생하는 추력이 최대가 되는 최적설계를 하였으며, 분산분석(ANOVA)을 통해서 선형전동기에서 발생하는 추력이 최대가 되게 설계하는데 가장 기여도가 높은 설계인자를 분류하였다[3]-[5]. 향후 다양한 용도와 형태의 선형전동기를 설계하는데 필요한 기법으로 활용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 횡자속 선형전동기 이론

횡자속 선형전동기는 자속이 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 집중시킴으로 높은 공극 자속밀도를 얻을 수 있다. 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 이동자에 설치된 영구자석의 자극을 교대로 설치하고, 권선이 감겨 있는 철심은 아래와 위의 간격을 τ_p 만큼 엇갈리게 설계하였다. 이때 발생하는 추력 F_x 는 식 (1)과 같다. ΔW_{co} 는 이동자의 위치에 따라 변화하는 coenergy이며, Δx 는 이동자의 위치에 따라 변화된 이동거리를 나타낸다.

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

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 S23을 사용하였으며, 영구자석은 표준 사용온도 120℃인 Nd계를 사용하였고 코일은 1.1mm×2.2mm인 각 권선을 기준으로 하였다[7].

그림 1은 횡자속 선형전동기를 구성하고 있는 각 부분의 형상과 명칭을 나타내며, 위쪽에 고정부 코어는 2개를 사용

† 교신저자, 正會員 : 전기연구원 Mechatronics그룹 연구원
E-mail : dkhong@keri.re.kr

* 正會員 : 전기연구원 Mechatronics그룹 팀장

** 正會員 : 전기연구원 Mechatronics그룹 단장

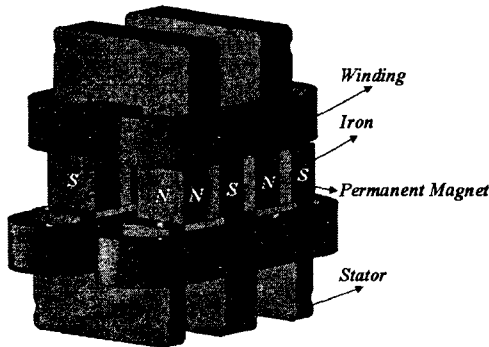
接受日字 : 2005年 6月 4日

最終完了 : 2005年 9月 9日

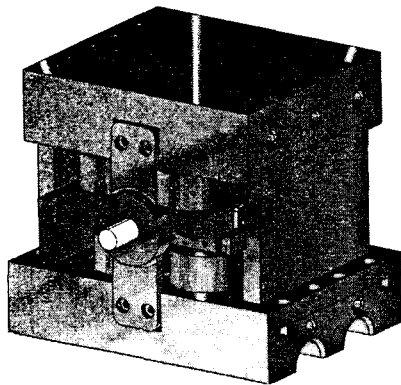
하고 아래쪽에는 고정부 코어를 3개를 사용하여 설계하였으며 아래쪽 코어의 좌우 끝 코어 폭을 위쪽의 고정부 코어의 폭에 1/2로 하여 상부와 하부의 평형을 유지하였다. 일반적으로 3차원을 모델링 하고자 할 때 주기적으로 반복적인 형상의 경우 한 주기($2\tau_p$)만을 주기 경계 조건으로 하여 해석을 수행한다. 하지만 본 논문에서는 압축용 선형 전동기의 이동자의 전체 길이가 한주기 반($3\tau_p$)밖에 되지 않고, 실제적으로 힘이 작용하는 구간의 길이는 이동자의 위치에 따라 한주기 반($3\tau_p$) 구간이 생긴다. 따라서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

표 1 재질 특성
Table 1 Material properties

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



(a) 형상과 명칭
(a) Shape and Name



(b) 조립형상
(b) Assembly

그림 1 압축기용 횡자속 선형전동기의 형상
Fig. 1 TFLM Model for compressor

2.3 코에너지를 이용한 추력

그림 2는 자기회로망해석에 의한 이동자의 위치에 따른 추력의 변화를 나타낸 것이다. 해석모델은 표 2의 모든 설계인자가 2수준이며, 횡자속 선형전동기의 실제 제작형상 조건인 초기모델로 하였다. 2000[AT]일 때, 이동자의 위치에 따른 추력의 평균은 173.92[N]이다.

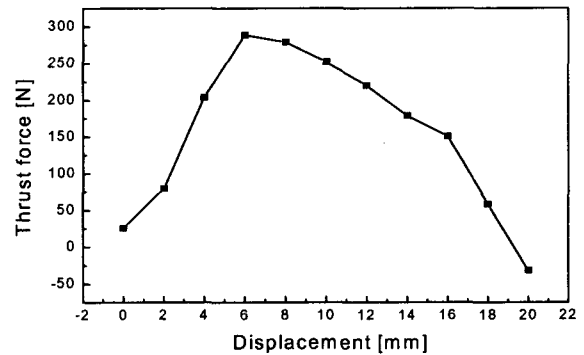


그림 2 이동자의 위치에 따른 추력변화
Fig. 2 Thrust force change according to mover position

그림 3은 이동자의 위치에 따른 코에너지의 변화 형상을 나타낸 것이다. 2000[AT]일 때, 이동자의 위치에 따른 코에너지의 평균은 178.55[N]이다. 그리고 이동자의 변위가 0, 20 mm 위치에서 각각 구한 코에너지를 식 (1)에 대입하여 추력을 구해보면 178.55[N]이 발생한다. 두 값은 같았으며, 이 값은 이동자의 구동스트로크에 따른 추력의 평균인 173.92[N]의 값과 거의 일치한다. 따라서 표 3의 혼합 적교배열표의 모든 실험에 대해서 각각 이동자의 변위가 0, 20 mm 위치의 코에너지를 구해서 식 (1)에 대입하여 추력을 계산하였다.

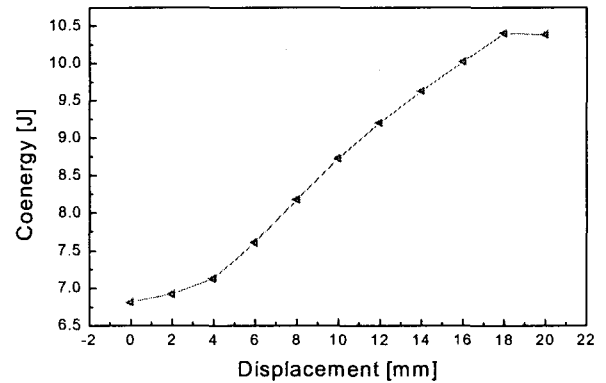


그림 3 이동자의 위치에 따른 코에너지변화
Fig. 3 Coenergy change according to mover position

2.4 적교배열표를 이용한 실험계획법

실험계획법은 실험에 대한 계획 및 얻어지는 데이터의 분

석 방법을 정하여 주는 것으로서, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 방법이다. 데이터의 변화에 영향을 주리라고 생각되는 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 원인을 인자(factor)라고 하고, 인자의 조건을 수준(level)이라고 한다. 인자의 수가 많은 경우(보통 4개)에 주효과(main effect)를 내는 인자 파악과 인자들 간의 교호작용(interaction)을 판단한다. 인자들 간의 교호작용 중에서 기술적으로 보아서 실현가능성 있는 두 개 인자 간의 교호작용을 검출하고, 가능성 없는 두 개 인자 교호작용 및 고차의 교호작용을 회생시켜서, 실험횟수를 적게 할 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표이다. N^m 수준계의 직교배열표의 유형은 다음과 같이 표현된다.

$$L_{N^m} \left(N^{\frac{(N^m-1)}{(N-1)}} \right) \quad (2)$$

여기서, m 은 2이상의 정수이고, N^m 은 직교배열표의 행의 수로서 실험 횟수이고, $(N^m-1)/(N-1)$ 은 직교배열표 열의 수로서 변수의 개수를 나타낸다. $(N-1)$ 은 인자의 자유도이며 인자의 현재 값을 기준으로 큰 쪽과 작은 쪽을 비교하고자 할 때, 즉 자유도가 2일 때에는 3수준계의 직교배열표가 활용된다. 본 연구에서는 여러 설계변수들의 영향과 각 수준들을 분석하고, 교호작용은 구하지 않고 인자만 배치하는 경우에 사용하는 혼합직교배열표를 사용하였다. 3수준 인자의 열들 사이에 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.

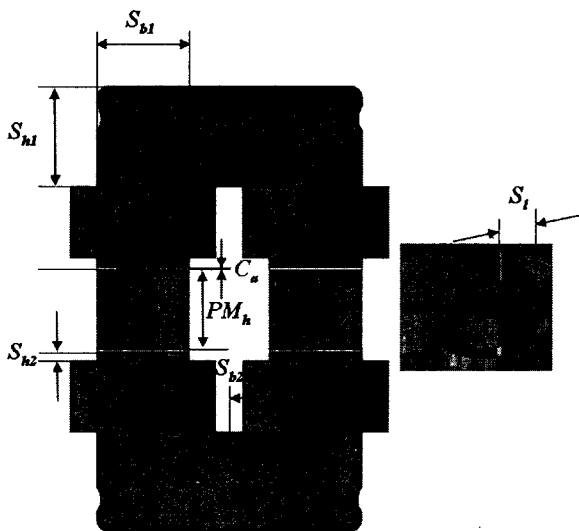


그림 4 횡자속 선형전동기의 설계변수
Fig. 4 Design variables of TFLM

본 연구에서는 이산설계공간에서 보다 효율적인 설계를

수행하기 위하여 직교배열표를 도입하였으며, 직교배열표를 사용하는 경우 인자의 조합에 대해 일부실시법을 사용하여 최소한의 해석 횟수로 전조합실시법과 유사한 계산결과를 얻을 수 있다. 그림 4에서 횡자속 선형전동기의 형상을 나타낸 7개의 변수를 인자로 하고, 인자를 모두 3수준으로 나누어 표 2에 나타내었다.

표 2 인자와 수준에 따른 변수 값
Table 2 Values of factors and levels

Level \ Factor	1	2	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	$e+0.2$
P_{M_h}	$f-2$	f	$f+2$
S_i	$g-2$	g	$g+2$

평균분석을 통해서 최적해를 구하고 행렬실험의 각 행의 결과와 비교하여 우수한 해를 최적해로 선정하였다. 최적수준을 선정하기 위해서는 기본적으로 S/N비를 이용하여 설계 인자가 횡자속 선형전동기의 추력에 미치는 영향을 분석하였다. 신호대 잡음비(Signal/Noise ratio)는 이차식으로 주어지는 품질손실함수(quality loss function)로부터 유도된 값으로서 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도인데, 본 논문에서는 횡자속 선형전동기의 추력이 크면 클수록 좋은 망대특성(larger-then-better type)분석에 준하여 실행하였다. 사용한 신호대 잡음비는 다음과 같다.

$$\text{망대특성} : S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

여기서, n 은 동일한 인자 수준조합에서의 반복측정회수이며, y_i 는 그때의 각각의 해석 값이다. 따라서 직교배열표 상에 특성치의 목적함수를 고려하여 S/N비를 최대화하는 설계변수의 조건, 즉 잡음하에서도 성능 특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 접근하는 설계변수의 조건을 찾았다.

2.5 평균분석

표 2의 인자에 따른 수준과 표 3의 직교배열표를 이용하여 추력해석을 수행하였다. 망대특성을 가지는 추력을 목적함수로 하고 횡자속 선형전동기의 형상을 나타내는 설계변수가 목적함수에 미치는 영향을 알아보기 위해 측정데이터로부터 각 설계변수에 대한 식 (3)의 신호대 잡음비를 계산하고 각 인자의 수준에 대한 실험치 영향을 파악하기 위하여 평균분석을 수행하였다. 예를 들어 S_{b1} 인자의 1수준에 대한 평균을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m = S_{bl} &= \frac{1}{6} [\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6] \\
 &= \frac{1}{6} [44.32 + 44.15 + 43.46 + 43.62 + 43.31 + 44.64] \quad (4) \\
 &= 43.917
 \end{aligned}$$

표 3 혼합직교배열표 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$

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

Exp	S_{bl}	S_{bl2}	S_{hl}	S_{hl2}	C_a	PM_h	S_l	Analysis result	
								Thrust force[N]	S/N
1	1	1	1	1	1	1	1	164.50	44.32
2	1	2	2	2	2	2	2	161.26	44.15
3	1	3	3	3	3	3	3	148.97	43.46
4	2	1	1	2	2	3	3	181.57	45.18
5	2	2	2	3	3	1	1	143.04	43.11
6	2	3	3	1	1	2	2	192.85	45.70
7	3	1	2	1	3	2	3	168.65	44.54
8	3	2	3	2	1	3	1	208.34	46.38
9	3	3	1	3	2	1	2	178.34	45.02
10	1	1	3	3	2	2	1	151.64	43.62
11	1	2	1	1	3	3	2	146.40	43.31
12	1	3	2	2	1	1	3	170.54	44.64
13	2	1	2	3	1	3	2	194.98	45.80
14	2	2	3	1	2	1	3	170.56	44.64
15	2	3	1	2	3	2	1	149.15	43.47
16	3	1	3	2	3	1	2	159.28	44.04
17	3	2	1	3	1	2	3	208.32	46.37
18	3	3	2	1	2	3	1	191.34	45.64

표 4는 신호대 잡음비를 이용하여 각 설계변수에 대한 수준의 효과를 구하기 위하여 망대특성을 가지는 추력에 대한 인자들의 효과와 편차 기여율을 나타내었다.

표 4 평균분석(ANOM)

Table 4 Analysis of means(ANOM)

Factor	Effect			Deviation	PC (%)
	1	2	3		
S_{bl}	43.917	44.651	45.332 *	1.415	30.92
S_{bl2}	44.584	44.660 *	44.656	0.076	1.66
S_{hl}	44.615	44.645 *	44.640	0.030	0.66
S_{hl2}	44.692 *	44.643	44.565	0.127	2.78
C_a	45.536 *	44.708	43.656	1.880	41.08
PM_h	44.296	44.643	44.961 *	0.665	14.53
S_l	44.422	44.672	44.805 *	0.383	8.37
Total				4.576	100

* : 최적수준, PC: 백분율 기여도

식 (4)과 같이 인자 S_{bl} 의 1수준 효과는 실험번호 1, 2, 3, 10, 11, 12에 해당되는 신호대 잡음비의 전체평균으로부터 그 인자 수준에 의한 결과의 편차로 평가된다. 같은 방법으

로 모든 인자와 수준에 그 효과를 계산할 수 있다. 한편 수준차는 인자의 수준별 효과의 최대값과 최소값의 차이를 뜻하며 기여율은 전 수준차의 합에 대한 백분율로 나타낸다. 그림 5는 추력에 대한 신호대 잡음비의 영향도 분석을 나타내었다. 이때의 평균은 다른 네 변수들의 모든 수준에 대해서 균형화된 것이다. 실험결과를 살펴보면 기여율이 가장 높은 것은 인자 C_a 임을 알 수 있으며, 각 인자별 수준의 효과를 비교하여 최적수준을 조합하면 S_{bl} (3수준), S_{bl2} (2수준), S_{hl} (2수준), S_{hl2} (1수준), C_a (1수준), PM_h (3수준), S_l (3수준)가 된다.

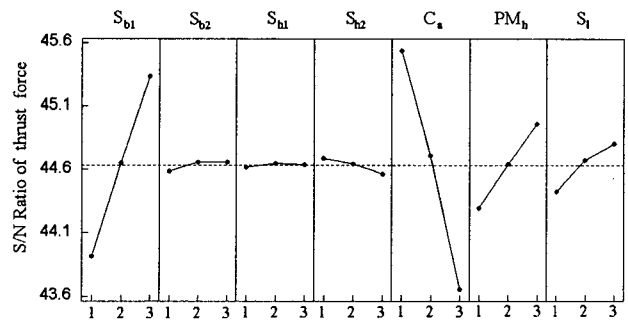


그림 5 추력에 대한 신호대 잡음비의 영향도 분석

Fig. 5 Illustration of factor effect for S/N ratio of thrust force

2.6 분산분석

표 5는 횡자속 선형전동기의 형상을 나타내는 설계변수에 대해서 분산분석을 한 결과를 나타낸 것으로 분석 결과 S_{bl} , C_a , PM_h , S_l 의 P값이 0.05보다 작음으로 분산의 차이가 나타나 추력에 미치는 영향이 아주 크며 수준간의 차이가 있음을 알 수 있으며, S_{bl2} , S_{hl} , S_{hl2} 는 P값이 크게 나타나 추력에 미치는 영향이 아주 작으며 수준간의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

표 5 분산분석(ANOVA)

Table 5 Analysis of variance(ANOVA)

Source	S	ϕ	V	F	P
S_{bl}	2436.91	2	1218.46	374.88	0.000
S_{bl2}	25.38	2	12.69	3.90	0.146
S_{hl}	0.94	2	0.47	0.14	0.871
S_{hl2}	6.76	2	3.38	1.04	0.454
C_a	4188.94	2	2094.47	644.41	0.000
PM_h	608.07	2	304.03	93.54	0.002
S_l	139.73	2	69.86	21.49	0.017
Error	114.70	3	3.25		
Total	7416.48	17			

따라서 횡자속 선형전동기의 추력을 최대화하는 설계 시에 통계적으로 유의한 인자인 S_{bl} , C_a , PM_h , S_l 의 설계 변수를 고려하여 설계하고, 유의하지 않은 인자는 중량이 적게 나가는 치수로 설계를 하면, 다소 추력이 약간 떨어지더라도 경량화 되면서 추력이 최대가 되는 설계가 가능하다.

2.7 최적결과와 초기모델의 비교

표 6에 평균분석을 통해서 구한 최적수준조합의 결과와 초기모델의 수준조합의 결과를 비교하여 나타내었다. 초기 모델의 경우 178.55[N]의 추력이 발생하였으며, 이에 비하여 최적수준을 조합한 경우 212.49[N]의 추력이 발생하였다. 두 모델을 비교해보면 최적수준을 조합한 경우가 초기모델에 비하여 19% 추력이 향상되는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 횡자속 선형전동기 설계 시 detent force의 영향을 체크해 본 결과 초기모델의 최대하중이 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 흡인력은 원형과 같이 서로 상쇄시킬 수 있는 방법을 적용하는 것이 일반적이다. 또한 고정자 및 이동자 코어 폭은 적절히 변화시키면 영구자석의 자력에 의해서 발생하는 detent force를 완화시킬 수 있지만 근본적으로 정상구동 시 얻어지는 최대 힘에 비해서 10% 정도로 작은 것이 일반적이다. 그리고 기본모델의 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
Optimum	212.49

3. 결 론

본 논문에서는 횡자속 선형전동기를 제작하는데 있어서 먼저 제한된 체적에서의 전체 형상과 코일의 권수를 결정하고, 구성요소로서 고정부 코어의 너비, 높이, 길이, 코어와 영구자석이 이루는 극간격, 이동자 코어의 높이, 공극 등을 설계인자로 하였다. 이산설계공간에서 보다 효율적인 설계를 수행하기 위하여 직교배열표를 도입하였으며, 직교배열표를 사용하는 경우 인자의 조합에 대해 일부실시법을 사용하여 최소한의 해석 횟수로 전조합실시법과 유사한 계산결과를 얻을 수 있으며, 또한 평균분석을 통해서 선형전동기에서 발생하는 추력이 최대가 되는 최적설계 하였다. 그리고 분산분석을 통해서 선형전동기에서 발생하는 추력이 최

대가 되게 설계하는데 가장 기여도가 높은 설계인자를 분류하였다.

1. 횡자속 선형전동기의 형상을 나타내는 설계변수들이 추력을 최대로 얻고자 하는 목적에 설계변수 각각 통계적으로 어느 정도의 기여를 하고 있는지와 중량을 줄이는데 어떤 설계변수가 큰 기여를 할 것인지를 알 수 있었다. 또한 설계변수의 수준에서 최적의 수준조합을 찾아내는데 최소한의 해석 횟수로 전조합실시법과 유사한 계산 결과를 얻을 수 있었다.
2. 평균분석을 통해서 구한 최적수준조합의 결과는 초기 모델의 수준조합에 의한 추력에 비해서 19%가 향상된 추력을 얻을 수 있었다.
3. 분산분석을 통해서 횡자속 선형전동기의 형상을 나타내는 변수 중에 공극(C_a), 고정자 코어의 코일감긴부의 너비(S_{bl}), 영구 자석의 높이(PM_h)와 고정부 코어의 길이방향의 치수(S_l) 순으로 추력을 최대화 하는데 통계적으로 가장 중요한 인자임을 알 수 있었다. 따라서 그 이외의 변수들은 추력을 최대화 하는데, 큰 영향을 미치지 않는 인자이므로 중량을 줄이는데 큰 기여를 하는 인자가 된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] K.J. Binns, “Permanent magnet AC generators”, Proc. IEE, 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 천장크레인의 강건최적설계”, 한국정밀공학회지 제21권, 제2호, pp.160-167, 2004.
- [4] 홍도관, 김동영, 안찬우, “엔드밀 가공시 진동, 표면거칠기, 절삭온도에 미치는 최적가공조건에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 논문집 제14권, 제12호, pp.1322-1329, 2004.
- [5] 홍도관, 우병철, 김동영, 안찬우, “마이크로 스피커 다이어램의 형상설계에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 논문집 제15권, 제7호, pp.775-780, 2005.
- [6] Do Hyun Kang, “Transversalflossmaschinen mit permanenter Erregung als Linear antriebe im schienengebundenen Verkehr”, Braunschweig University, 1996.
- [7] 우병철, 강도현, 홍도관, “공진형 선형액추에이터의 스프링 강성변화에 따른 과도응답특성”, 대한전기학회 논문지 제54권, 제3호, B권, pp.134-138, 2005.

저 자 소 개



홍도관 (洪道琯)

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

Tel : 055-280-1632

Fax : 055-280-1547

E-mail : dkhong@keri.re.kr



강도현 (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



우병철 (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