

유한요소법에 의한 선형모터의 설계 변수 최적화

정재한[†] · 신수현^{*} · 이상룡^{**}

(2001년 3월 27일 접수, 2002년 4월 19일 심사완료)

Optimization of the design variables of linear motor by FEM

Jae Han Jung, Soo Hyun Shin and Sang Ryong Lee

Key Words: Linear Motor(리니어모터), FEM(유한요소법), Least Square Method(최소자승법), Taguchi Method(다구찌 기법), Latin Square (직교배열표), Optimization(최적설계)

Abstract

Recently, linear motors are applied to many small precision products. Thus high generating power with small size is required of it. In order to increase the motor efficiency, the design variables need to be optimized. In this study, Vector Fields FEM software, OPERA-3d, was used for simulating linear motor. The thrust and magnetic flux density at the air-gap center were simulated and compared with the experimental results. Taguchi method was applied to investigate the effects of each variables. As a result, the thickness of conductor and magnet was important for the thrust but the thickness of the yoke. The temperature of the conductor was determined by finding the thermal conductivity that was determined by experimentation. Correlation equation relating to the thrust and temperature was proposed by Latin square and Least Square method. The optimum design variables were determined by correlation equation, and compared with simulation results. According to this analysis, thrust force of linear motor was improved about 7% comparing with conventional model.

기호설명

S : 변동량
 ϕ : 자유도
 E' : 풀링 시킨 오차항까지 합한 전체오차
 V : 분산
 V_{factor} : 특정 인자(factor)의 분산
 V_e : 오차항의 분산

$F(\alpha)$: α 유의구간에서의 F분포
 α : 유의구간
 q : 열유속
 k : 열전도 계수
 dT : 도선 온도와 대기 온도의 차
 t_a : 대기의 온도
 t : 도선의 온도
 R : 도체의 전기저항
 x : 전류
 y : 도선두께
 z : 선경
 w : 자석두께
 v : 요크두께

† 책임저자, 회원, 삼익LMS기술연구소

E-mail : jaehan@samicklms.co.kr

TEL : (053)605-3211 FAX : (053)581-1252

* 경북대학교 기계공학부

** 회원, 경북대학교 기계공학부

1. 서론

리니어모터는 직선운동을 필요로 하는 시스템에서 기존의 회전운동을 직선운동으로 변환하는데 필요한 기어나 크랭크 등의 장치가 필요 없다. 따라서 이들 변환 장치에 의한 손실이나 소음, 진동이 발생하지 않아 FA, OA기기에 널리 이용되고 있으며, 앞으로 그 활용 영역은 더욱 확대될 것으로 기대된다. 지금까지의 연구경향은 추력의 크기와 위치제어를 좋게 하기 위한 것이 대부분이었으나, 최근 활용범위가 하드디스크, CD플레이어 같은 소형 정밀 제품에까지 확대되어 소형화, 고출력화가 요구되어지고 있다.

최문석 등⁽¹⁾은 공극 자속밀도를 증가시키기 위해서 개선된 고정자 형태를 제안하였고 공극 자속밀도를 2.7% 향상시키는 고정자의 재질과 치수를 선정하였으며, 정병호 등⁽²⁾은 유전 알고리즘을 이용한 희토류 자석의 BLDC 모터의 최적설계를 통하여 기존의 모터와 같은 토오크 특성을 가지면서 더 좋은 효율과 더 큰 토오크를 가지는 BLDC 모터의 모델을 제시하였다. 그러나 자속밀도의 향상에 대한 연구가 대부분이어서 실제 리니어모터에서 발생하는 문제점 중에 하나인 발열 문제와 선경의 치수선정에 대한 어려움은 여전히 존재하고 있다. 본 논문에서는 이러한 발열문제와 추력의 향상을 동시에 고려하여 설계변수를 최적화하는 방법을 제시한다. 이를 위해 실제 리니어모터의 추력과 자속밀도를 측정하였고 유한요소법으로 실제 수치와 비교하여 유한요소법의 신뢰성을 검증하였다. 여러 변수들을 변화시켜 추력을 얻는다는 실제 모델의 제작이 가장 좋지만 시간과 경비가 너무 많이 소모되므로 신뢰성 있는 유한요소프로그램으로 모델링하는 것이 훨씬 효과적이다.⁽³⁾ 또 여러 설계변수들을 변화시켜 추력에 미치는 영향을 파악하기란 쉬운 일이 아닌데 그 대안으로 다구찌 기법(Tacuchi Method)이 많이 제시하고 있다.⁽⁴⁾

본 논문에서는, 다구찌 기법으로 추력에 큰 영향을 미치는 변수를 찾고 가장 좋은 수준을 알아내어 보다 신뢰성 있는 추력을 산출한다. 그리고 추력과 온도를 최소자승법을 써서 추력과 온도의 근사식을 도출하고 특정 온도를 넘지 않는 범위 내에서 최대 추력을 낼 수 있는 변수를 구하였다.

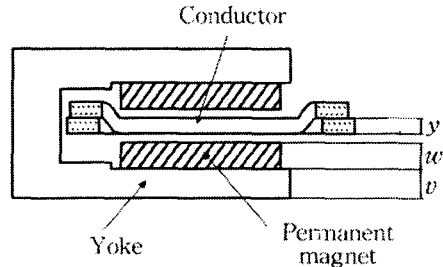


Fig. 1 The section of linear motor

2. 해석모델

리니어모터의 간략화한 모델은 Fig. 1과 같다. 고정자는 기계 구조용 탄소강 S45C인 요크(Yoke)와 영구자석(Permanent magnet, 이하 “자석”)으로 구성되는데, 자석은 희토류(Nd-Fe-B)계 영구자석으로 다른 극성이 서로 마주보게 배치되어 있다. 이동자는 도선(Conductor)이 적층된 형태인데 자속과 직각되는 방향으로 3상의 전류를 흘려준다.

본 논문은 Fig. 1과 같이 리니어모터의 단면의 형상에서 각 부품의 두께를 최적화하여 추력을 향상시키는데 중점을 두고 있다. 하지만 자석, 도선, 요크는 두께가 두꺼울수록 추력이 증가하는 방대특성을 가지게 된다. 그러나 리니어모터를 무한정 두껍게 할 수는 없으므로, 실제 제작되어 있는 리니어모터의 두께를 기준으로 하여 그 높이를 제한하였다.

본 논문에서는, 추력 계산을 위한 유한요소 해석프로그램으로 Vector Fields사의 전자기장 해석 프로그램인 OPERA-3d를 사용하였다. OPERA-3d는 Poisson, Laplace, Helmholtz 방정식에 의해 계산되는 유한요소법(FEM)을 이용하여 전기기기의 완벽한 해석을 제공한다. 또 정전기장, 정자기장, 안정상태 및 과도상태, 속도에 의한 와전류문제, 회전기기, 고주파문제, 공간전하문제 등 전기 기기 전반에 관한 문제를 해석할 수 있고 전자기장 해석 결과를 이용하여 응력해석 및 온도해석까지 다룰 수 있다.

유한요소 해석프로그램의 신뢰성을 검증하기 위해 실제 제작된 리니어모터의 자속밀도와 추력을 측정하고, 이론해석으로 구한 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

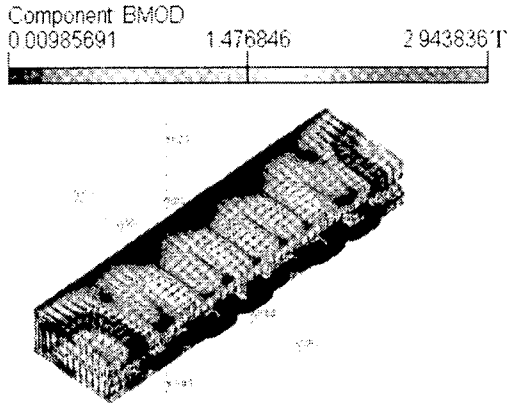


Fig. 2 Magnetic flux density distribution of linear motor

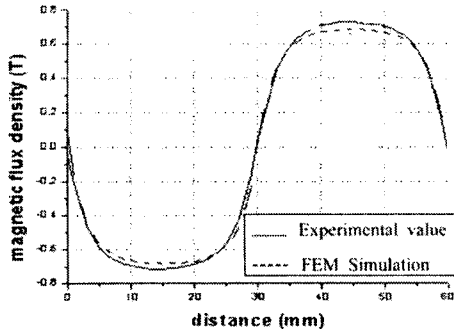


Fig. 3 Magnetic flux density variation for 1 cycle of magnet

Fig. 2는 리니어모터 자속밀도 분포의 3차원 해석도이다. 고정자의 양단 끝부분에서는 자속의 집중현상이 일어나서 자속밀도가 높게 나타나며, 고정자에서는 자속의 방향이 N극 부분에서는 나오고 S극 부분에서는 들어가는 방향으로 나타난다. 그리고 도체가 들어가는 요크의 개방된 부분에서 자속의 밀집현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3은 실제 리니어모터와 시뮬레이션에서 나온 공극에서의 자속밀도를 비교한 그래프이다. 실제 리니어모터의 자속밀도 측정은 가우스 메타기를 이동자에 고정시켜 1mm씩 이동하면서 자속의 1주기를 측정하였다.

Table 1 Thrust comparison of real thrust with simulated thrust

Real thrust	Simulated thrust
176.57 N	177.99 N

Table 2 Experimental number comparison

Level 2			Level 3		
Factor	Latin square	Full exp.	Factor	Latin square	Full exp.
3	4	8	4	9	81
7	8	128	13	27	1594323
11	12	2048	40	81	infinity
15	16	32768			
19	20	524288			

두 그래프를 비교해 보면 실제 자속밀도가 시뮬레이션한 자속밀도보다 약간 크게 나타난다. 그러나 크기와 형태가 거의 일치하기 때문에 시뮬레이션한 자속밀도는 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

실제 리니어모터를 정지상태에서 전류를 인가하여 측정된 추력과 시뮬레이션한 추력을 비교해 보면 Table 1과 같고 오차는 0.8%이다. 이 수치는 시뮬레이션이 실제와 잘 일치한다고 볼 수 있으므로 OPERA-3d에 대한 해석결과는 신뢰할 수 있다고 생각된다. 따라서 직접 실물을 제작하지 않고 전자기장 유한요소 프로그램으로 신뢰성 있는 데이터를 구할 수 있다.

3. 최적설계

3.1 다구찌 기법의 적용

다구찌 기법은 일본의 다구찌가 구현한 구체적인 제품 최적화 기법이다. 다구찌 기법에서 직교배열표를 쓰는 이유는 요인간의 직교성을 갖도록 실험계획하여 데이터를 구하면 같은 실험횟수라도 검출력이 좋은 검정을 할 수 있고 정도가 높은 추정을 할 수 있다.

Table 2는 완전요인 실험계획법과 직교배열표의 실험수를 비교한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 완전요인 실험법은 인자수가 늘어날수록 기하급수적으로 실험량이 많아지는 반면 직교배열

Table 3 Level of the design variables

Factor	Level	Size(mm)
Conductor thickness(<i>y</i>)	0	3.60
	1	7.00
	2	10.00
Magnet thickness(<i>w</i>)	0	6.00
	1	9.00
	2	12.00
yoke thickness(<i>v</i>)	0	3.85
	1	7.70
	2	11.55

Table 4 Latin square $L_9(3^4)$

No.	Cond. level	Mag. level	Yoke level	Err. level	Thrust(N)
1	0	0	0	0	81.37
2	0	1	1	1	90.22
3	0	2	2	2	94.14
4	1	0	2	1	128.06
5	1	1	0	2	144.54
6	1	2	1	0	152.50
7	2	0	1	2	153.94
8	2	1	2	0	176.16
9	2	2	0	1	185.65

표는 작은 실험수로도 통계학적으로 완전요인 실험법만큼 인자간의 상호관계를 유추할 수 있는 장점이 있다. 리니어모터의 추력에 대한 설계변수를 도선의 두께, 자석의 두께, 요크의 두께로 하였다. 각 변수의 수준은 제작 가능성을 고려하여 Table 3과 같이 3수준으로 설정한다. 3수준계 직교배열인^(5,7) $L_9(3^4)$ 형은 실험회수는 9회이고 열의수가 4개인데 본 실험에서 설정된 설계변수대로 직교배열표를 만들어 9가지의 조건에 대하여 시뮬레이션을 통해 얻은 추력의 결과는 Table 4와 같다.

Table 5 Dispersion analysis table

Factor	S	ϕ	V	F_0	F(0.05)	F(0.1)
<i>y</i>	10680.7	2	5340.4	221.7	6.94	4.32
<i>w</i>	829.74	2	414.87	17.22	6.94	4.32
E'	96.37	4	24.09			

직교배열표에서 직교성이 있으면 중복된 배치는 일어나지 않고 그만큼 실험횟수를 줄이더라도 효율적인 분석이 가능하다는 것이다. 오차항은 원래 제어 불가능한 인자를 넣어서 나중에 S/N비를 구할 때 쓰이나 특별히 제어할 수 없는 인자를 넣지 않고 직교배열표의 형식에 빈 공간이 생길 때 오차항을 삽입해 주어도 된다. 이럴 때의 오차항의 의미는 직교배열표에서 선형모델을 만들었을 때 실제로 나온 값과의 차이가 되는데 무한대의 실험을 하면 이 오차항은 없어질 것이다.

첫번째는 각 인자의 수준간의 차이가 있는지 없는지의 검정이고, 두번째는 수준간의 차이가 있으면 얼마나 영향을 미치는지, 어느 정도 신뢰구간이 형성되는지의 검정이다. F분포표에서 식 (2)와 같은 조건이 되면 지정한 신뢰구간에서의 그 인자는 유의하다고 할 수 있다.

Table 4를 바탕으로 각 인자의 변동(S), 자유도(ϕ), 분산(V)을 분석분석표를 통해 알아보면 Table 5와 같고 이들의 관계식은 식 (1)과 같다.

$$F_0 = \frac{V_{factor}}{V_e} > F(\alpha) \quad (2)$$

$$V = \frac{S}{\phi} \quad (1)$$

분석표의 도선두께와 자석두께를 F_0 로 보면 F(0.05) 보다 큰 값을 가지는, 즉 둘 다 큰 영향력이 있는 값을 가지고 있으므로 선형모델로 가정하여 추정값을 구하더라도 95%의 신뢰성이 있어 적은 수의 실험으로도 완전요인의 실험과 같은 효과를 나타낼 수 있다.

분산분석표에서 F검정⁽⁸⁾이 있는데 두 가지 F검정이 이루어진다.

각 요인들은 크면 클수록 추력이 크지는 방대 특성을 가지는데, 기여도를 비교해 보면 도선두께(*y*), 자석두께(*w*), 요크두께(*v*)의 순이다. 도선두께는 가장 중요한 설계변수이고 요크두께는 추력에 거의 영향을 미치지 않는다. 그러므로 요크두께에 대한 설계변수는 오차항으로 풀링시켜 전체 오차(E)로 나타내고 설계변수에서 제외시켰다. 여기서는 자석간의 인력과 구조물을 지지시킬 수 있는 최소한의 두께를 적용하였다.

3.2 최소자승법의 적용

최적설계를 통하여 해에 가장 근접한 값을 찾아야하는데 이를 위해 우선 추력에 대한 목적함수(Cost function)가 정의되어야 한다. 목적함수는 먼저 일반식을 만들고 일반식의 값과 실험값의 차이가 최소가 되도록 보간(Curve Fitting)하고 이때의 계수를 구한다.

본 연구에서는 데이터를 보간하는 방법으로 일반적으로 가장 널리 쓰이고 있는 최소자승법(Least square method)을 적용하였다. 먼저 Table 4의 추력을 최소자승법으로 근사식을 만든다. 이때 사용할 일반식은 다음과 같다.

$$f = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3 \quad (3)$$

여기서,

- x_1 : 도선의 두께
- x_2 : 자석의 두께
- x_3 : 요크의 두께

위 식을 최소자승법을 써서 오차함을 최소화하는 근사식에 의한 추력과 FEM 해석결과를 비교해 보면 Fig. 4와 같이 잘 일치한다.

각 인자는 망대특성이므로 주어진 체적 범위에서 최대 추력을 가지는 설계변수를 구해야 한다. 따라서 초기 설정한 개발품의 외형치수를 기준으로 자석과 도선 사이 공극(Air gap)을 2mm 유지한다고 하면, 자석 2개와 도선의 두께의 합이 15.6mm 이내인 구속조건에서 최대추력을 구하는 최적화 문제로 둘 수 있다. 여기서 사용된 최적 설계 알고리즘은 뉴턴법(Newton's Method)으로, 최적해를 구한 결과 도선은 7.54mm, 자석은 4.02mm 이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 온도근사식

리니어모터의 도선두께를 늘리면 코일에 감긴 수도 늘어나고 도선의 길이가 늘어남에 따라 저항이 커져 발열이 생긴다. 또 발열로 인해 근접해있는 자석의 감자(demagnetization)와 도선의 전기 저항 상승으로 성능이 저하될 수 있다.

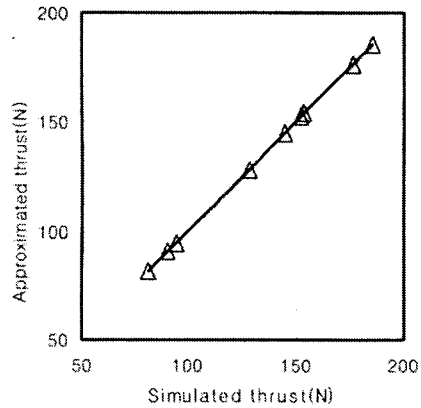


Fig. 4 Comparison of simulated thrust for approximated thrust

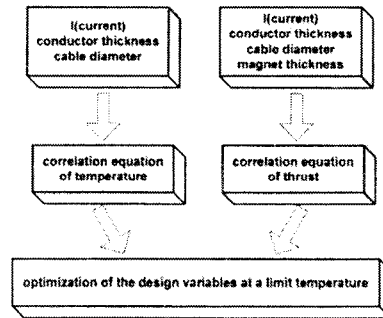


Fig. 5 Optimization process

따라서 추력만 높이려고 도선의 두께를 늘리면 발열문제가 심각해지므로 선경의 문제와 입력전류, 도선두께가 동시에 고려되어야 한다. 그러므로 Fig. 5와 같이 추력의 근사식을 온도의 근사식으로 제한시켜 최대추력을 산출할 수 있도록 설계변수를 결정한다.

우선 각 실험조건에 따른 온도를 측정으로 얻을 수 없기 때문에 발열부인 코일에 전류를 인가하여 온도를 실험하고 관련 변수를 구하여 계산식에 이용한다.

도선의 온도를 구하는 일반식은 식 (4)와 같이 푸리에의 법칙(Fourier's law)으로 정의할 수 있다.

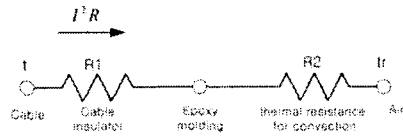


Fig. 6 Thermal resistance of a linear motor

Table 6 Temperature comparison

Current(A)	Real temp.(°C)	Calculated temp.(°C)
2.5	98	98.00
2	68	68.48
1.5	47	45.52
1	30	29.12

$$q = -k \frac{dT}{dx} \tag{4}$$

여기서,

$$dT = t - t_r \tag{5}$$

Fig. 6은 리니어 모터의 발열부인 도선에서 외부로 흐르는 열의 이동경로를 나타낸 개략도이다. 여기서 열유속(heat flux) q 는 도선에 전류 I 가 흐르면 도체저항 R 에 의해 발생하는 Joule열로서 $0.24 I^2 R$ 가 된다.

열전도 계수(thermal conductivity) k 는 에폭시의 전도성에 대한 열저항 $R1$ 과 대기로 방출되는 열저항 $R2$ 가 복합적으로 작용하는데, 이를 열전도 계수 k 로 두었다. 이는 모델의 고유한 계수로서 계산으로 얻기에는 복잡하므로 실제 실험을 통해 가장 근사한 값을 구하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 실내온도가 20°C에서 인가 전류를 가변시켜 실측온도를 측정한 후 가장 근사한 열전도계수를 구한 결과 2.05를 얻었으며, 이를 적용하여 계산한 값은 Table 6과 같다.

위에서 구한 열전도계수를 참고로 하여 적교배 열표를 짜고 설계변수인 전류, 도선두께, 선경, 자석두께를 변화시켜 가면서 온도를 계산하고 추력을 시뮬레이션 하였다.

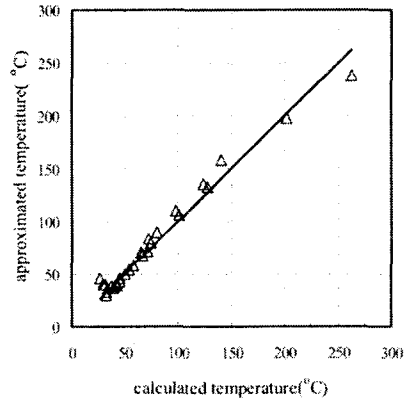


Fig. 7 Temperature of the conductor by general equation

추력과 온도의 데이터를 산출한 뒤 이것을 최소자승법을 써서 근사식을 만들어야 하는데 온도에 대한 일반식을 나타내면 다음과 같다.

$$f_{temp} = c + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6z^2 + a_7xy + a_8xz + a_9yz \tag{6}$$

최소자승법으로 오차를 최소화하는 각 계수를 결정된 후 식 (6)을 정리하면 다음과 같다.

$$f_{temp} = 126.402 + 131.863x + 26.103y - 1043.56z + 13.172x^2 + 0.047y^2 + 1830.169z^2 + 6.484xy - 362.082xz - 66.124yz \tag{7}$$

Fig. 7은 온도의 계산치와 근사식에 의한 수치와 비교한 그래프이다. 어느 정도 잘 일치하고 있으나 좀더 근접한 값을 산출하기 위해 다른 형태의 일반식이 필요하다.

온도는 전류의 제곱과 저항에 비례하고 저항은 코일 단면적의 역수에 비례하므로 이를 일반식에 적용하여 구한 개선된 형태의 일반식은 식 (8)과 같고, 식 (8)을 최소자승법으로 계수를 구하면 식 (9)와 같다.

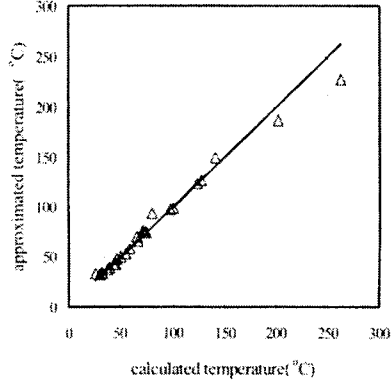


Fig. 8 Temperature of the conductor by advanced equation

$$f_{temp} = c + a_1x^2 + a_2y + a_3\frac{1}{z^2} + a_4x^4 + a_5y^2 + a_6\frac{1}{z^4} + a_7x^2y + a_8\frac{x^2}{z^2} + a_9\frac{y}{z^2} \quad (8)$$

$$f_{temp} = 137.304 - 15.931x^2 - 15.385y - 36.005\frac{1}{z^2} + 0.166x^4 + 0.315y^2 + 2.196\frac{1}{z^4} + 1.257x^2y + 3.793\frac{x^2}{z^2} + 3.163\frac{y}{z^2} \quad (9)$$

Fig. 8은 개선된 근사식으로 나온 값과 계산식에 의한 값을 비교한 그래프이다. 개선된 근사식이 더 근접한 값을 가진다. 평균오차를 비교해보면 Fig. 7은 10.2%이고 Fig. 8은 4.5%이므로 개선된 일반식을 써서 근사식을 찾는 것이 더 좋은 방법임을 알 수 있다.

4.2 추력근사식

실계변수와 추력과의 일반식은 식 (10)이고, 이를 최소자승법으로 근사화 시키면 식 (11)과 같다.

$$f_{thrust} = c + a_1x + a_2y + a_3z + a_4w + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7z^2 + a_8w^2 + a_9xy + a_{10}xz + a_{11}xw + a_{12}yz + a_{13}yw + a_{14}zw \quad (10)$$

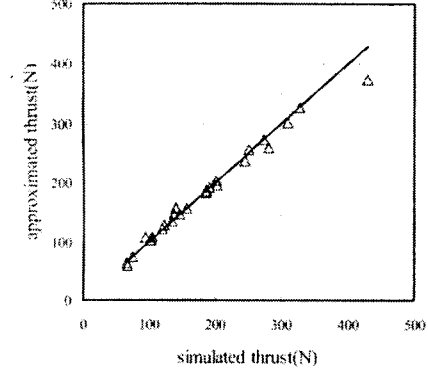


Fig. 9 Thrust of a linear motor by general equation

$$f_{thrust} = -136.053 + 86.142x + 42.088y + 74.617z + 22.757w + 9.541x^2 - 2.722y^2 + 162.153z^2 - 1.374w^2 + 6.71xy - 223.42xz + 3.111xw - 35.316yz + 1.54yw - 21.048zw \quad (11)$$

Fig. 9는 시뮬레이션과 근사식에 의한 추력을 비교한 것인데, 개선된 형태의 일반식을 제시하여 오차를 최소화 할 필요가 있다. 추력은 전류와 감긴 수에 비례하고 감긴 수는 코일 단면적의 역수에 비례하므로 일반식은 식 (12)와 같고 이를 최소자승법으로 계수를 구하면 식 (13)과 같다

$$f_{thrust} = c + a_1x + a_2y + a_3\frac{1}{z^2} + a_4w + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7\frac{1}{z^4} + a_8w^2 + a_9xy + a_{10}\frac{x}{z^2} + a_{11}xw + a_{12}\frac{y}{z^2} + a_{13}yw + a_{14}\frac{w}{z^2} \quad (12)$$

$$f_{thrust} = 110.631 - 110.563x - 12.543y - 9.618\frac{1}{z^2} + 3.997w + 7.126x^2 - 1.432y^2 - 2.353\frac{1}{z^4} - 1.740w^2 + 9.553xy + 15.937\frac{x}{z^2} + 4.987xw + 3.634\frac{y}{z^2} + 1.731yw + 1.708\frac{w}{z^2} \quad (13)$$

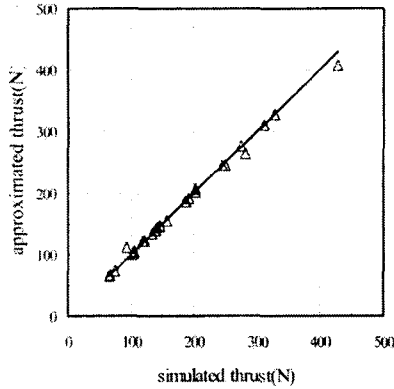


Fig. 10 Thrust of linear motor by advanced equation

Table 7 Optimum design variables at the limit height ($w*2+ y=15.6\text{mm}$)

Design variable	Optimal value
Current(x)	2.79 (A)
Conductor thickness(y)	5.30 (mm)
Cable diameter(z)	0.46 (mm)
Magnet thickness(w)	5.15 (mm)

Table 8 Thrust comparison

Thrust [N]	Optimization Model	Conventional Model
Approximated thrust	230.20	214.70
Simulated thrust	229.90	211.80
Reference	7% improvement	

최소자승법으로 구한 온도, 추력의 근사식으로 부터 온도의 제한 조건을 100°C 이내로 하고 리니어모터의 도선과 자석 2개를 합한 높이가 15.6mm 가 넘지 않는 범위 내에서 최고 추력을 가지는 설계변수를 구한다. 설계변수를 최적화하는 최적설계 문제를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\text{Maximize } f_{\text{thrust}}(x, y, z, w) \quad (14)$$

Subject to

$$f_{\text{temp}}(x, y, z) \leq 100 \quad (15)$$

$$y + 2w \leq 15.6$$

식 (15)의 제한된 조건에서 최대 추력을 가지는 설계변수들을 뉴턴법으로 구한 최적해의 결과는 Table 7과 같다.

최적설계변수의 값을 근사식에 대입한 결과와 FEM해석에 의한 시뮬레이션의 결과는 Table 8에서와 같이 잘 일치함을 알 수 있으며, 기존 시제품에 비해 추력성능이 약 7% 향상되었다.

5. 결론

본 논문에서는 리니어모터의 최적 설계 변수를 구하기 위해 먼저 유한요소 프로그램의 신뢰성을 검증하였고, 다구찌 기법으로 추력에 영향을 미치는 설계변수를 찾아 직교배열표를 만들고 각 경우에 대해서 추력은 시뮬레이션으로 구하고, 온도는 실측한 열저항을 적용하여 계산하였다. 온도와 추력 값들을 최소자승법으로 근사시켜 근사식을 만들고, 온도와 리니어모터의 크기를 제한 조건으로 근사식에서 추력이 최대가 되는 설계변수를 찾았다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 상용 리니어모터의 설계변수대로 유한요소 프로그램으로 시뮬레이션 한 결과 실제 추력과의 오차가 0.8%정도였다. 이로써 유한요소프로그램으로 설계변수를 바꾸어 시뮬레이션을 해도 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있었다.

(2) 다구찌 기법으로 설계변수의 추력에 대한 영향을 살펴본 결과, 도선두께가 가장 크고, 그 다음이 자석두께였으며 요크두께는 추력에 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

(3) 추력과 온도의 근사식을 적용하여 최적 설계 변수를 찾을 수 있었고, 이로써 기존 모터보다 7%의 추력 성능이 향상되었다.

(4) 리니어모터 설계에 있어, 본 논문의 접근방식은 중요변수들에 대한 최적치를 구하는데 유용한 방법이 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 삼익LMS주와 경북대학교 기계공학과
 의 BK21 산학협동 연구과제로서 수행되었습니다.
 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, M. S., Kim, Y. Y. and Lee, S. L., 1999, "The Optimum Geometric Design of stators for a Brushless DC Linear Motor," *Transactions of the KSME, A*, Vol.23, No.3, pp. 442~448.
- (2) Chung, B. H., Chung, T. K. and Jin, Y. S., 2000, "An Optimal Design of BLDC Motor Using Rare Earth Magnet By Niching Genetic Algorithm" *Proc. of the KIEE Summer Annual Conference 2000*, pp. 717~719.
- (3) Domenico Casadei, Giovanni Serra, Angelo Tani, 1997, "Finite-element Analysis of a Brushless PM DC Linear motor Taking the Saturation Effect into Account," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 4197~4199.
- (4) Yi, J. W, Park, J. S, Lee, K. H and Park G. J., 2001, "Development of an Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Design Space," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1621~1626.
- (5) Ginichi Taguchi, 1993, *Taguchi on Robust Technology Development*, ASME Press.
- (6) Peace, G.S., 1995, *Taguchi Methods: A hands-on approach*, Addison-Wesley, Massachusetts.
- (7) Fowlkes, W.Y. and C.M. Creveling, 1995, *Engineering methods for robust product design*, Addison-Wesley.
- (8) Lee, S. B., 2000, *Easy to Known Taguchi Method*, Sangjosa, Seou, pp. 94~101.