

< 논문 >

반응표면분석법을 이용한 리니어모터의 형상최적설계

이 태 원*

(2005년 5월 9일 접수, 2005년 7월 13일 심사완료)

Optimal Geometric Design of Linear Motor Using Response Surface Methodology

Tae Won Lee

Key Words: Linear Motor(리니어모터), Optimal Design(최적 설계), Analysis of Variance(분산 분석), Second Order Regression Model(2차 회귀식), Response Surface Methodology(반응표면 분석법)

Abstract

Thrust of linear motor is one of the important factor to specify motor performance. Maximum thrust can be obtained by increasing the current in conductor and is relative to the sizes of conductor and magnet. But, the current and the size of conductor have an effect on temperature of linear motor. Therefore, it is practically important to find design results that can effectively maximize the thrust of linear motor within limited range of temperature. Finite element analysis was applied to calculate thrust and the temperature of the conductor was calculated by the thermal resistance. The diameter of copper wire among design variables has discrete value and number of turns must be integer. Considering these facts, special technique for optimum design is presented. To reduce excessive computation time of thrust in optimization, the design variables was redefined by analysis of variance and second order regression model for thrust was determined by response surface methodology. As a result, it is shown that the proposed method has an advantage in optimum design of linear motor.

1. 서 론

리니어 모터는 위치 및 속도 제어기구로 빠른 속도와 강한 추력, 정확한 위치 제어가 가능하다. 따라서 공장 자동화, 자기부상열차, 반도체 장치 등의 분야에 사용되며 특히 최근에는 활용범위가 하드디스크, CD 플레이어 같은 소형 정밀제품까지 적용이 확대되고 있다.

리니어 모터의 성능 향상 및 소형화를 위하여

추력의 최대화가 요구된다. 일반적으로 추력을 계산하는 방법에는 유한요소법, 등가 자기 회로 방법, 공간 고주파 해석법등이 있다. 이중 유한요소법은 복잡한 자기회로를 그대로 모델링 할 수 있으며 비선형 재질까지 해석이 가능하고 실험에 의한 결과와 가장 가까운 해를 제공한다. 이러한 자기장 해석을 기초로 리니어 모터의 추력 및 특성 향상에 관한 많은 연구가 있었고 최적설계에 관한 다양한 연구가 수행되었다. Mizuno⁽¹⁾ 등은 영구자석용 동기형 리니어 모터에 대하여 자석의 폭에 따른 추력과 수직력 특성을 연구하였으며 Yamada⁽²⁾ 등은 코일의 권선수와 자석의 두께를 설계변수로 설정하고 리니어 모터의 두께를 구속 조건으로 한 추력 최대화 문제의 해를 구하였다. 한편 국내에서는 Choi⁽³⁾ 등이 공극 자속밀도를 증가시키기는 고정자의 형상과 재질을 제안하였

* 회원, 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : twlee@kumoh.ac.kr

TEL : (054)478-7375 FAX : (054)478-7319

으며 Hong⁽⁴⁾ 등은 반응표면 방법론을 적용하여 이동자의 무게를 줄이는 최적설계를 연구하였다.

이러한 연구들은 자속밀도 향상에 관한 연구가 대부분이고 실제로 리니어 모터에서 중요한 발열 문제와 동선의 직경 선정문제는 전혀 고려하고 있지 않았다. 발열로 인한 과도한 온도상승은 근접해 있는 영구자석의 감자와 도선의 전기저항 상승으로 리니어 모터의 성능을 저하시킨다. 이 문제를 해결하기 위하여 Eun⁽⁵⁾은 리니어 모터의 열원 분석과 열특성을 연구하였고 Jung⁽⁶⁾ 등은 사용온도까지 구속조건으로 하고 최소자승법에 의한 온도근사식과 추력 근사식을 계산한 후 추력을 최대화하는 최적화를 수행하였다. 그러나, 근사식을 제안하는데 경험적인 방법에 의존하였을 뿐 아니라 규격화된 동선의 직경까지 연속값으로 가정하여 실제 리니어모터의 최적설계에 적용하기에는 무리가 있다. 또한 Lee⁽⁷⁾ 등은 일반적인 최적화 기법을 적용하기에 어려움이 있는 선경의 치수를 설계자가 미리 선정한 후 온도 구속조건까지 고려한 리니어 모터의 형상최적설계방법을 제안하였으나 최적화 과정 중 추력의 과도한 계산 문제가 발생하였다.

그러므로, 본 연구에서 규격화된 선경의 선경을 포함한 영구자석 크기 및 코일에 흐르는 전류 등 모든 인자를 설계변수로 하고 온도 구속조건 하에서 추력을 최대화하는 리니어 모터의 최적설계 기법을 제안하였다. 뿐만 아니라, 반응표면분석법을 적용하여 유도한 추력 회귀식을 사용하여 최적화 과정 중 리니어 모터의 형상 변화에 따른 추력 계산시간을 상당히 단축하였다.

2. 최적설계 문제

연구 대상인 무철심형 리니어 DC 모터는 고정

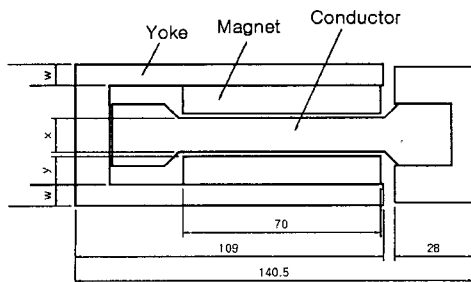


Fig. 1 Cross section of the linear motor

자가 탄소강 S45C인 요크와 희토류(Nd-Fe-B)계 영구 자석으로 구성되는데, 다른 극성이 서로 마주보게 배치되어 있다. 이동자인 도체는 동선이 적층된 형태로 자속과 직각되는 방향으로 3상의 전류를 흘려준다. 제품의 구성상 이동자인 도체의 단면폭은 극 피치의 1/3이 되어야 하는데 극 피치를 30mm로 설정하여 도체의 단면폭은 10mm로 결정하였다. 그리고 영구 자석은 25(W) x 70(L)의 단면을 갖고 영구 자석간의 간격은 5mm로 정의하였다. 이와 같은 기본 설계 조건외에 나머지 기본치수는 Fig. 1과 같고 전체 단면 높이는 50mm, 자석과 도체 사이의 공극은 2.5mm 이상으로 설정하였다.

결국 변경 가능한 설계변수는 요크두께(w), 도체두께(x), 선경(y), 자석두께(z) 및 인가전류(i)이고 도체 온도가 80°C가 넘지 않는 범위내에서 추력 F 를 최대화하고자 한다. 이를 수식화한 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } F(w, x, y, z, i) \\
 & \text{Subject to } 20^\circ\text{C} \leq T(x, y, i) \leq 80^\circ\text{C} \\
 & 6\text{mm} \leq w \leq 9\text{mm} \\
 & 6\text{mm} \leq x \leq 12\text{mm} \\
 & 0.4\text{mm} \leq y \leq 0.6\text{mm} \\
 & 6\text{mm} \leq z \leq 12\text{mm} \\
 & 1\text{A} \leq i \leq 3\text{A} \\
 & 18\text{mm} \leq x+2y \leq 30\text{mm}
 \end{aligned} \tag{1}$$

위 최적화 문제는 규격화된 선경의 선정 때문에 일반적인 최적화 방법으로 적용하기에는 무리가 있다. 그러므로, 각 설계변수가 추력 및 온도에 미치는 영향을 먼저 분석한 후 타당한 설계변수를 정의하고 이를 토대로 추력의 회귀함수를 이용하여 최적설계를 하고자한다. 회귀함수를 유도하기 위하여 추력과 권선수, 온도에 대한 특성을 살펴보기로 한다.

2.1 도체의 권선수

도체의 단면폭(a)은 10mm로 결정되어 있으므로 도체의 두께와 동선의 직경만으로 권선수와 단면적이 결정된다. 실제 모양은 이보다 복잡하나 수치적인 계산의 편의를 위하여 Fig. 2와 같이 도체를 단순화하였다.

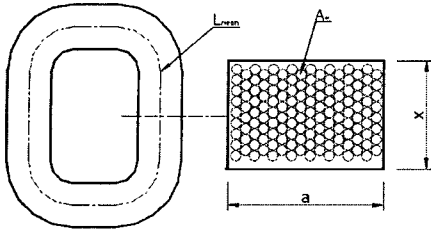


Fig. 2 Schematic of flat conduct and cross section

Table 1 Class 1 EIW [unit:mm]

Coil Dia.	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
Max. Coated Coil Dia.	0.456	0.508	0.560	0.620	0.672
Min. film thickness	0.015	0.016	0.017	0.017	0.017

그런데 도체를 구성하는 동선은 코팅된 것을 사용하여 적층하므로 설계변수인 동선의 직경보다 약간 크다. 즉, 코팅된 동선의 직경을 기준으로 도체의 단면적에 따른 권선수가 결정되는데 EIW 1종(20℃ KS) 경우 코팅된 동선의 직경은 Table 1에 보는 바와 같다.

표에서 보듯이 동선의 직경과 도체의 단면적에 관한 상관관계를 수식으로 표현하기는 불가능하여 본 연구에서는 코팅된 동선의 평균 직경을 기준으로 각 규격화된 동선의 직경에 해당하는 도체의 권선수를 계산하였다.

Fig. 2의 적층 방식을 보면 도체의 두께에 의한 열당 동선의 수가 정해지고 이를 기준으로 도체의 폭 방향으로 지그재그 방식으로 동선의 권선수가 계산된다. 먼저 고정된 값 a 를 갖는 도체 폭방향의 동선의 수 n 은 양의 정수이면서 코팅된 동선의 평균 직경 d 와 다음의 관계를 갖는다.

$$a = d + \frac{\sqrt{3}}{2}(n-1)d \quad (2)$$

그리고 도체 두께 방향으로의 동선 수 m 은 양의 정수이면서 아래 식으로부터 구해진다.

$$x = md \quad (3)$$

Table 2 Turn number of conductor according to coil diameter and thickness of conductor

$y \backslash x$	6 mm	9 mm	12 mm
0.4 mm	313	488	638
0.5 mm	200	295	390
0.6 mm	145	213	298

식 (2)와 (3)들은 엄밀한 의미의 등호는 아니고 오른쪽 항이 왼쪽 항보다 항상 작으면서 0에 근접한 양의 정수가 되도록 m 과 n 이 계산되어야 한다. n 과 m 이 결정되면 도체의 단면에 적층된 전체 권선수 N 은 n 이 홀수인지 짝수인지에 따라

$$N = \frac{mn}{2} + \frac{(m-1)n}{2} \quad \text{even } n$$

$$N = \frac{m(n+1)}{2} + \frac{(m-1)(n-1)}{2} \quad \text{odd } n \quad (4)$$

로 계산된다. 이 방법에 따라 도체의 폭이 10mm 일 때 도체의 두께(x)와 코팅되지 않은 동선 직경(y)에 따른 권선수는 Table 2와 같다.

제안된 방법은 Lee⁽⁷⁾ 등의 연구에서 제작된 시제품인 동선직경 0.6mm, 도체 두께 9.41mm의 경우 권선수 230을 정확히 계산한다.

2.2. 온도

도체인 리니어모터의 이동자 구조는 완전한 대칭 형상이 아니고 예폭시간에 몰당된 동선의 위치도 다소 차이가 있어 이론적인 방법이나 유한요소해석으로 정확한 온도를 얻기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 Lee⁽⁷⁾의 방법과 동일하게 열저항 계수 $R_{th} = 0.456\text{℃/W}$ 를 적용하여 온도를 구하였다.

도체의 발열온도 T 는 대기온도 T_{amb} 과 도체의 열저항 계수 R_{th} , 도체의 전기저항 R 및 인가전류 i 의 함수인데 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T = T_{amb} + i^2 R \times R_{th} \quad [^\circ\text{C}] \quad (5)$$

위 식에서 도체 전기저항 R 은 도체 1개의 전기저항 R_1 를 먼저 구한 후 배선 방식을 고려하여 전체 전기저항 R 을 계산하는데 현 연구에서 $R=2R_1$ 이 된다.

1개 도체의 전기저항 R_1 은

$$R_1 = k_r \cdot L_{mean} \cdot N \quad (6)$$

으로부터 계산된다. 여기서 L_{mean} 은 도체의 평균 원주 길이를 나타낸다. 그리고 k_r 은 동선의 재질로부터 결정되는데 경동으로 정의하여 저항계수가 $1.7774 \times 10^{-8}(\Omega/\text{m})$ 이다.

그런데 전기저항은 고정값이 아니라 온도의 변화에 따라 변하는 특성이 있다. 상온 T_0 에서 전기저항이 R_0 이라면 전류가 인가되어 온도가 T 로 상승하고 전기저항 R 역시 아래와 변경된다.

$$R = \frac{234.5 + T}{234.5 + T_0} R_0 [\Omega] \quad (7)$$

즉, 식 (5)와 (7)은 서로 연성되어 있다.

2.3 추력

Lee⁽⁷⁾ 등은 약 3.4%의 오차 범위 내에서 실험에 의한 추력과 유한요소법으로 계산된 추력이 잘 일치함을 증명하였다. 그러므로, 본 연구에서도 상용 유한요소 코드인 ANSYS에서 맥스웰 응력 방법을 사용하여 추력을 계산하기로 한다.

각 재료의 물성치는 Table 3과 같다. 물성치를 보면 요크의 투자율이 공기나 영구자석에 비해 상당히 크므로 요크의 두께는 추력에 별 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또 영구자석의 보자력이 상당히 커 선형 해석이 가능하다. 그러므로, 본 연구 대상인 리니어 모터의 추력은 권선수와 인가전류에 정비례한다.

$$F \propto Ni \quad (8)$$

즉, 도체의 두께, 영구자석의 크기 및 요크의 변화에 따른 단위 권선수와 단위 전류에 대한 추력만 계산되면 동일 조건에서 권선수와 전류가 변화하여도 추가 계산없이 간단히 정확한 추력을 계산할 수 있다.

연구 대상인 무철심형 리니어 DC 모터는 원래 한쌍의 도체 수가 4개이면서 2 병렬 형태이므로 이를 모두 고려한 유한 요소 모델링보다 하나의 도체에 대한 추력을 구한다음 8을 곱하면 전체 추력을 얻을 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 도체의 수가 1개, 고정자인 영구자석이 2주기가 되도록 모델링하여 추력을 계산하였다. 이를 위하여 ANSYS에서 8절점 3차원 유한 요소인 SOLID96을 사용하였고 요크의 양 끝 단면에서 자속 밀도는 수직방향만 존재한다는 경계 조건만 고려하였다. 또한 단위 전류 1A하에서 추력만 계산하였고 임의의 인가전류에 대한 추력은 식 (8)의 특성을 이용하였다. 한편, 추력은 도체의 위치에 따라 달라지는데 본 연구의 관심사는 최대추력이므로 도체의 위치는 Fig. 3와 같이 해석모델의 중심에 있는 것으로 설정하였다.

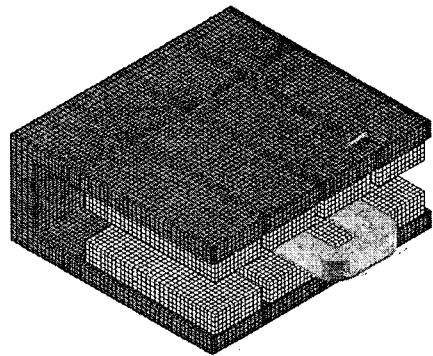


Fig. 3 Three dimensional finite element model

Table 3 Material properties for numerical analysis of linear motor

Relative permeability of air and conductor	1
Relative permeability of permanent magnet	1.034
Relative permeability of yoke	1000
Coercive force of magnet	1006000 A/m

수치적인 전자장 해석은 리니어 모터뿐 아니라 그 주위의 공기 영역까지 고려하여야 하므로 실제 해석에 적용된 유한요소 모델은 리니어 모터 내부와 요크 외곽에서 전자장의 영향을 무시할 거리만큼 떨어진 외부 공기 영역까지 포함하여 직육면체 형상으로 정의하였다. 이 때 전체 유한요소 수는 161,292이나 설명의 편의를 위하여 공기영역을 제외한 리니어 모터의 유한 요소 모델을 도시하였다. 이러한 모델링의 전자장 해석 결과를 보면 추력은 도체의 이동방향으로만 존재하며 자속밀도는 영구 자석부분에 대부분 분포한다.

3. 설계변수 선정과 최적화 해법

현재 정의된 최적설계문제에서 선경은 이산값이므로 일반적인 최적화기법을 적용하기 불가능하다. 이에 따라 분산분석을 통하여 중요한 설계변수를 정의하고 이산값인 선경을 미리 선정하여 일반적인 최적화 문제로 재 정의하기로 한다.

3.1 분산분석

최적화 문제에서 설계변수의 함수로 표현된 것은 추력과 온도이다. 그런데 온도는 단지 선경과 도체의 두께에 대한 함수이므로 먼저 추력의 분산분석을 통하여 중요한 설계변수들을 설정하기로 한다.

앞서 설명하였듯이 추력은 전류와 권선수에 비례한다. 그러므로 추력은 결국 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$F(w, x, y, z, i) = f(x, y, z, w) \cdot i \tag{9}$$

이식으로부터 추력 $F(w, x, y, z, i)$ 보다는 단위 전류 1A에 대한 $f(x, y, z, w)$ 를 살펴보기로 한다.

단위 전류에 대한 추력에서 4개의 설계 변수들이 실제로 유의한 인자인지, 어느 정도 영향력이 있는지를 분산분석을 통하여 알아보기로 하자. 이를 위하여 3수준 $L_{27}(3^{13})$ 형 직교 배열표를 이용하기로 한다. 먼저 제한조건의 상하한값을 고려하여 도체두께 6-12mm, 선경 0.4-0.6mm, 자석 두께 6-12mm, 요크의 두께 6-9mm의 범위내에서

Table 4 Level of the design variables for thrust

Design variables	Level		
	0	1	2
Conductor Thickness(x)	6	9	12
Coil diameter(y)	0.4	0.5	0.6
Magnet thickness(z)	6	9	12
Yoke thickness(w)	6	7.5	9

Table 5 Table of orthogonal arrays for thrust

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	F
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	198.8
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	225.6
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	238.9
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2	127.0
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	144.2
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	152.7
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1	92.1
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	104.5
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	110.7
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	260.7
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	299.5
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	1	2	0	1	319.2
13	1	1	2	0	0	1	2	1	2	0	2	0	1	157.6
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2	181.1
15	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	192.9
16	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0	113.8
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1	130.7
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	139.3
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	299.2
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2	338.8
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	362.4
22	2	1	0	2	0	2	1	1	0	2	2	1	0	178.7
23	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	207.1
24	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	1	0	2	221.5
25	2	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2	136.5
26	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1	2	1	0	158.2
27	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2	0	2	1	169.3
	x	y	xy	xy	z	xz	xz	yz	w	e	yz	e	e	

각 인자들의 수준을 아래 Table 4와 같이 설정하였다. 이때 선정된 수준의 도체 두께와 선경에 따라 권선수는 자동 결정된다.

3수준 직교배열인 $L_{27}(3^{13})$ 형은 실험수가 27이고 열의수가 13개인데 본 연구에서 설정된 설계변수대로 직교배열표를 만들어 27가지의 조건에 대하여 계산된 추력은 Table 5와 같다. 이 직교배열표에서 95% 신뢰도를 적용하여 분산분석 결과

Table 6 Analysis of variance table for thrust

Factor	S	DOF	V	F ₀	F(0.05)
x	25427.4	2	12713.7	2266.8	5.14
y	112147.4	2	56073.7	9997.6	5.14
z	7126.9	2	3563.4	635.3	5.14
w	14.6	2	7.3	1.3	5.14
xy	3171.9	4	793.0	141.4	4.53
xz	302.6	4	75.7	13.5	4.53
yz	744.0	4	186.0	33.2	4.53
error	33.7	6	5.6		
T	148968.5				

는 Table 6에 있다. 표들에서 x, y, z, w 는 각 인자의 주 효과를, xy, yz, xz 는 각인자의 교호작용을, e 는 오차를 의미한다. 그리고 F_0 는 지정된 신뢰구간에서 오차에 대한 분산비로 $F_0 > F(0.05)$ 라면 그 인자는 유의하다는 것을 의미한다. F 검정결과 요크두께(w)는 다른 설계 변수들에 비하여 추력에 미치는 영향이 미미하므로 설계변수로서 제외하기로 하고 앞으로 요크두께는 7.5mm로 고정하기로 한다.

3.2 선경 결정

3.1절의 분산분석을 통하여 설계변수는 도체와 영구자석의 두께, 동선의 직경으로 결정되었다. 그 중 동선의 직경이 추력에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 즉, 가장 작은 직경인 동선을 선정하면 동일 도체 두께에서 권선수가 증가해 추력이 향상된다. 그러나, 권선수가 많아지면 동선의 길이가 늘어나 전기저항으로 인한 발열이 증가하여 모터의 특성을 저하시키므로 무작정 권선수를 늘리는 것은 적절하지 않다. 이러한 이유로 적당한 선경을 선택하여야 한다.

도체를 구성하는 동선은 규격이 있고 각 규격에 따라 코팅된 전체 선경이 달라 일반적인 최적화 기법을 적용하기는 불가능하다. 물론 각 동선 직경에서 도체 및 영구 자석의 두께의 최적해와 최대 추력을 계산한 다음 비교하여 선경을 결정할 수 있으나 너무 많은 계산 시간이 요구되므로 본 연구에서는 분산 분석 결과를 이용하여 먼저 적절한 선경을 결정하기로 한다.

추력에 관한 분산분석은 3.1절에서 다루었으므로 이제 온도에 관한 분산 분석을 하기로 하자.

Table 7 Level of the design variables for temperature

Design variables	Level		
	0	1	2
Conductor Thickness(x)	6	9	12
Coil diameter(y)	0.4	0.5	0.6
Current(i)	1	2	3

Table 8 Table of orthogonal arrays for temperature

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	T
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73.6
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	601.9
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	NA
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2	39.5
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0	121.2
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	472.8
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1	29.5
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	62.5
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	141.0
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	114.7
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	NA
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	1	2	0	1	NA
13	1	1	2	0	0	1	2	1	2	0	2	0	1	49.8
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2	204.0
15	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	433.0
16	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0	34.1
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1	87.8
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	248.8
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	159.8
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2	NA
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	NA
22	2	1	0	2	0	2	1	1	0	2	2	1	0	61.0
23	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	337.2
24	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	1	0	2	NA
25	2	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2	40.2
26	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1	2	1	0	126.2
27	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2	0	2	1	519.3
	x	y	xy	xy	i	xi	xi	yi	e	e	yz	e	e	

도체의 온도는 도체두께, 선경, 전류의 함수로 $T(x, y, i)$ 형태인데 식 (5)에서 보듯이 전류의 제곱에 비례한다. 이에 따라 온도에 관한 직교배열표 역시 $L_{27}(3^{13})$ 을 사용하기로 하고 아래 Table 7과 같이 각 인자들의 수준을 결정하였다.

온도 계산이 불가능한 부분을 NA로 표현하여 해석 결과는 Table 8과 같다. 온도 해석 결과 도체의 온도는 선경이 0.4mm인 경우 도체 두께가 6mm, 전류가 1A인 경우를 제외하고 모두 80℃를 넘었으며 동선 선경이 0.6mm라 하여도 전류가 3A면 80℃을 크게 초과하였다. 뿐만 아니라 식 (5)와 (7)로부터 온도 계산이 불가능한 경우도 있었다. 그러므로 분산분석을 통하여 어떠한 유의한 해석도 얻을 수 없다. 실제로 제작되는 동선의 사용범위는 약 150℃까지 이므로 이 온도 상한을 넘는 범위에서의 온도 계산은 무의미하다.

Table 8을 보면 현재 설계변수의 범위 내에서 온도조건까지 고려한 최적설계 결과는 인가 전류가 2A보다 작은 값이 됨을 알 수 있다. 또한, 2A의 전류에서 동선의 선경이 0.4mm라면 도체의 두께가 6mm인 경우를 제외하고 온도 계산이 불가능하다. 1A를 기준으로 살펴보면 동선의 직경이 0.4mm에서 0.6mm로 증가할 때 도체의 단위 두께당 온도변화는 2.25-3.97배 감소하나 단위 두께당 추력은 2.14-2.29배 감소함을 알 수 있다. 이는 동일 도체 두께에서 작은 선경을 선정한다면 추력이 향상되는 것보다 온도 상승이 더 크다는 것을 의미하므로 80℃의 온도제한조건 내에서 최대 추력을 얻기 위해 선경을 0.6mm로 결정하기로 한다.

3.3 최적화 해법

분산 분석을 통하여 요크의 두께는 설계변수에서 제외되었고 가장 중요하며 이산값을 갖는 선경은 0.6mm로 결정되어 결국 설계변수가 3개인 아래의 최적화 문제로 재정의된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } F(x, z, i) \\
 & \text{Subject to } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 80^\circ\text{C} \\
 & \quad 6\text{mm} \leq x \leq 12\text{mm} \\
 & \quad 6\text{mm} \leq z \leq 12\text{mm} \\
 & \quad 1\text{A} \leq i \leq 3\text{A} \\
 & \quad 18\text{mm} \leq x+2z \leq 30\text{mm}
 \end{aligned} \tag{10}$$

이 최적화문제를 ANSYS를 이용하여 직접 풀 수도 있으나 3차원 추력 계산에 과도한 시간이 요구되므로 본 연구에서는 반응표면법을 적용하여 추력의 회귀식을 이용하기로 한다.

추력 회귀식을 구하기에 앞서 권선수를 검토하

Table 9 Thrust according to thickness of conductor and thickness of magnet

$x \backslash z$	6 mm	9 mm	12 mm
6 mm	94.1 N	106.8 N	113.1 N
9 mm	120.9 N	138.9 N	148.0 N
12 mm	139.5 N	161.6 N	172.9 N

기로 하자. 설계관점에서 정수인 권선수가 정의 되면 도체두께는 자동 결정되므로 권선수와 도체 두께를 연속값으로 보고 최적해를 구한다음 그 근처의 정수인 권선수로부터 최종해를 구하면 된다. 이를 위하여 먼저 권선수 N 과 도체두께의 관계는 다음과 같이 정의한다.

$$N = \frac{x}{0.653} * 17 - 8 \tag{11}$$

식 (11)의 권선수를 이용하여 단위 전류당 추력을 계산하면 Table 9와 같다.

Table 9의 결과에 수준 3² 요인배치법을 적용하여 단위전류당 추력의 2차회귀식에 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f(x, z) = & -29.99 + 14.44x + 9.55z \\
 & - 0.5092x^2 - 0.4855z^2 + 0.4013xz
 \end{aligned} \tag{12}$$

위 식의 결정계수는 0.9996으로 회귀식에 의한 추력이 실제 추력과 상당히 잘 맞는다. 그러므로 목적함수인 추력을 설계변수 변경 마다 재 계산하는 것 보다 이 식을 사용하여 최적해를 구하였다. 최적화 기법은 IMSL의 DNCONF를 사용하였다. 초기값을 $x=6.0\text{mm}$, $z=6.0\text{mm}$, $i=1.0\text{A}$ 로 하여 반복횟수 11번만에 도달한 최적해는 $x=8.74\text{mm}$, $z=10.63\text{mm}$, $i=1.876\text{A}$ 이다. 이 때 추력은 93.68N에서 266.83N으로 변경되었고 최적해에서 권선수는 219.5이다.

현재의 최적해는 권선수가 정수가 아니므로 최적설계 결과가 권선수를 정수로 결정하는 2단계 과정이 필요하다. 도체두께 8.74mm의 근처인 도체두께 8.489mm은 권선수가 213이고 도체두께

9.142mm는 230이다. 이 두가지 경우에 대하여 온도제한조건을 80℃로 만족하면서 계산된 최대 추력은 권선수 213의 경우 266.47N, 권선수 230의 경우 266.33N로 권선수 213의 경우가 약간 더 큰 추력을 얻을 수 있었다. 결국 최종해는 $x=8.489\text{mm}$, $z=10.756\text{mm}$, $i=1.904\text{A}$ 이 된다. 이 최종해에서 도체의 온도제한조건과 기하학적 제한조건이 등호로 만족되고 있다.

4. 결론

설계변수를 도체와 영구 자석의 두께, 인가전류, 동선선경 및 요크의 두께로 정의하여 추력을 최대화하는 리니어 모터의 최적설계를 연구하였다. 설계 변수 중 동선의 직경은 규격화되어 있어 이산값을 갖고 도체 두께와 관계되는 권선수도 정수로 정의되었다.

제안된 방법은 최적화에 앞서 실험계획법에 의한 분산분석을 통하여 요크의 두께를 설계변수에서 제외하였고, 이산값을 갖는 선경은 추력과 온도의 민감도분석을 통하여 미리 선정하였다. 또한, 권선수는 정수라는 조건 때문에 먼저 일반적인 최적화 기법을 통하여 최적해를 구한 다음 도체두께 최적해 근처에서 2개의 정수인 권선수를 선정하여 최종적인 최적해를 결정하는 2단계 방법을 사용하였다. 그리고 설계변수의 변경에 따른 추력 계산을 단순화하기 위하여 반응표면분석법을 이용한 추력 회귀식을 유도하여 목적함수로 사용하였다. 이 방법에 의하여 최적설계를 행한 결과 효율적으로 최적해를 구할 수 있었다.

본 연구에서는 목적함수인 리니어 DC 모터의 추력을 회귀식으로 단순화하였으나 Lee⁽⁷⁾ 등과 같이 최적화 과정 중 직접 유한요소 재생성을 통한 추력을 계산하는 방법을 적용할 수도 있다. 이 방법은 최적해를 정확히 구한다는 장점이 있으나 최적화 과정 중 반복적으로 3차원 추력 해석이 필요하며 방대한 계산시간이 요구되는 문제

점 때문에 현재의 방법이 추천된다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술 연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

참고문헌

- (1) Mizuno, T. and Yamada, H., 1999, "Magnet Circuit Analysis of a Linear Synchronous Motor with Permanent Magnets," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 14, No. 4, pp. 3027~3029.
- (2) Yamada, H., 1996, "Optimum Design of Thin Linear DC Motor with Long Strokes," *T.IEE Japan*, Vol. 116-D, No. 4, pp. 384~389.
- (3) Choi, M. S., Kim, Y. Y. and Lee, S. L., 1999, "The Optimum Geometric Design Stators for a Brushless DC Linear Motor," *Trans. of KSME A*, Vol. 23, No. 3, pp. 442~448.
- (4) Hong, J. P., Nam, H. and Kim, K. C., 2002, "LDM Design for Reduction of Mover Mass Using RSM," *Proceedings of the KIEE summer annual conference*, pp. 964~966.
- (5) Eun, I. U., 2002, "Improvement of the Thermal Characteristics of Synchronous Linear Motors Through Insulation," *J. of KSPE*, Vol. 19, No. 3, pp. 123~130.
- (6) Jung, J. H., Shin, S. H. and Lee, S. R., 2002, "Optimization of the Design Variables of Linear Motor by FEM," *Trans. of KSME A*, Vol. 26, No. 7, pp. 1232~1240.
- (7) Lee, T. W. and Jung, J. H., 2004, "The Finite Element Analysis and the Geometric Optimal Design of Linear Motor," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 12, pp. 67~74.