

리니어 모터의 유한요소해석과 기하학적 최적설계

이태원[#], 정재한^{*}

The Finite Element Analysis and the Geometric Optimal Design of Linear Motor

Tae Won Lee[#] and Jae Han Jung^{*}

ABSTRACT

Linear motor has been considered to be the most suitable electric machine for high speed and high precision linear motion control. 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 numerical solutions were compared with experiment. The temperature of the conductor was calculated by the thermal resistance which was measured by experiment. The optimum design process was coded by the ADPL of ANSYS which is a commercial finite element analysis software. Design variables and constraints were chosen based on manufacturing feasibility and existing products. As a result, it is shown that temperature of linear motor plays an important role in determining optimum design.

Key Words : Linear motor(리니어모터), Thrust(추력), Temperature(온도), Finite element analysis(유한 요소 해석), Optimal design(최적 설계)

기호설명

F = Thrust
 i = Current
 N = Number of turns
 R = Electric resistance
 R_{th} = Thermal resistance

T = Temperature of conductor
 x = Thickness of conductor
 y = Thickness of permanent magnet

1. 서론

리니어 모터는 기어나 크랭크등의 보조장치가

접수일: 2004년 3월 6일; 게재승인일: 2004년 9월 9일

교신저자: 금오공과대학교 기계공학부

E-mail twlee@kumoh.ac.kr Tel. (054) 467-4225

* 삼익 LMS 기술연구소

필요없이 직접 직선운동을 생성한다. 따라서 이들 변환장치에 의한 손실이나 소음 및 진동이 발생하지 않아 FA나 OA기기에 널리 이용되고 있으며 최근에는 소형화와 고출력화도 가능하여 하드디스크, CD 플레이어 같은 소형 정밀 제품에까지 적용이 확대되고 있다.

일반적으로 리니어 모터의 추력을 해석하는 방법에는 유한요소법, 전체 자기회로를 미소 영역으로 나누어 전기회로와 같은 회로망을 구성하여 해석하는 등가 자기 회로망법, 인가되는 전류가 주기적으로 분포되어 있다고 가정하고 이 분포를 푸리에 급수로 전개하여 푸는 공간 고주파 해석법등이 있다. 이중 유한요소법은 복잡한 자기회로를 그대로 모델링 할 수 있으며 비선형 재질까지 해석이 가능하기 때문에 실제와 가장 가까운 해를 제공한다. 장점이 있다.

이러한 전자기력 해석을 기초로 모터에 대한 이론적인 추력해석 및 추력 특성 향상에 관한 많은 연구가 있었고 최근에는 최적설계 기법을 적용하여 추력 성능 향상을 위한 다양한 연구가 시도되었다. Mizuno¹는 영구자석용 동기형 리니어 모터에 대하여 정추력과 수직력 특성에 미치는 영구자석의 치수 효과에 대한 연구를 수행하였으며 Yamada²등은 코일의 권선수와 자석의 두께를 설계변수로 설정하고 리니어 모터의 두께를 구속조건으로 하여 추력 최대화를 목적으로 하는 최적화 문제의 해를 구하였다. 한편, 국내에서는 Hong³등이 반응표면 방법론을 적용하여 이동자의 무게를 줄이는 최적설계를 하였고 Choi⁴등은 공극 자속 밀도를 증가시키기 위하여 개선된 고정자의 재질 및 치수를 선정하였으며 Joo⁵등은 유전 알고리즘을 이용한 리니어 모터의 최적설계를 통하여 향상된 추력을 얻었다.

추력 특성 향상을 위한 지금까지의 연구들을 보면 이론 해석을 위한 검토나 정추력 실험 등 일부 성능 평가에 국한된 내용들이 대부분이다. 특히 가동 중 나타나는 온도상승이 리니어 모터의 약점이므로 Eun⁶은 이를 해결하고자 열원의 분석과 열특성의 향상을 연구하였다. 이와같이 리니어 모터에서는 발열문제가 중요하므로 Jung⁷등은 온도조건을 고려하여 설계 최적화를 수행하였다. 그러나, 3차원 유한 요소법에 의한 추력 계산이 많은 계산 시간을 요구하여 추력과 이에 상관관계가 있는 변수사이의 신뢰성 있는 근사식을 도출한 다음 이식들에 최적화 기법을 적용하였다. 이는 엄밀한 의미의 최적설

계는 아니며 다른 형태의 리니어모터 설계시 같은 과정을 반복하여 실험식을 찾아야만 하는 어려움이 있다. 이 문제점을 해결하고자 본 연구는 최적화 문제를 수학적으로 정의하고 유한 요소법과 연계하여 직접 추력을 최대화하는 리니어 모터의 최적설계 기법을 제안하고자 한다.

2. 추력 및 온도 해석

2.1 추력

유한요소법에서 추력은 일반적으로 맥스웰 응력이나 가상변위법등에 의하여 계산된다. 가상 변위법은 이동자부근의 유한요소의 형상 및 크기에 따라 해의 정확도가 좌우되는데 본 연구에서는 최적설계 과정 중에 유한 요소의 형상이 바뀌므로 맥스웰 응력을 이용하여 추력을 계산하였고 실험을 통하여 해의 정확성을 비교하였다. 이때 유한요소 해석은 상용 코드 ANSYS를 사용하였다.

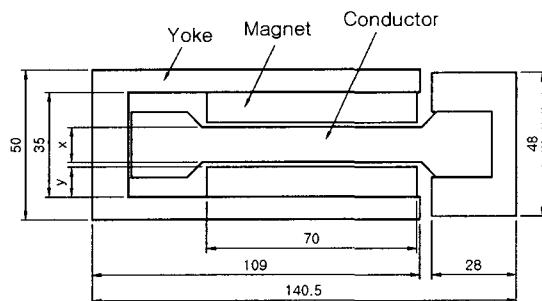


Fig. 1 Cross Section of the Linear Motor

2.1.1 3차원 해석

연구 대상인 무철심형 리니어 DC 모터의 간략화된 모델은 Fig. 1과 같다. 고정자는 기계 구조용 탄소강 S45C인 요크와 회토류(Nd-Fe-B)계 영구 자석으로 구성되는데, 다른 극성이 서로 마주보게 배치되어 있고 이동자는 도선이 적용된 형태로 자속과 직각되는 방향으로 3상의 전류를 흘려준다.

이동자인 도체의 단면폭은 극 피치의 1/3로 고정하였다. 본 연구에서는 25(W) x 70(L) 치수의 영구 자석을 사용하고 극 피치는 30mm로 선정하였다. 이에 따라 도체의 단면폭은 10mm로 자동 결정된다.

해석 모델은 원래 한쌍의 도체 수가 4개이면서 2 병렬 형태이나 하나의 도체에 대한 추력을 구한

다음 8을 곱하면 전체 추력이 되므로 본 연구에서는 도체의 수는 1개, 고정자는 영구 자석이 2 주기가 되도록 모델링 하였다.

추력을 계산하기 위하여 ANSYS의 8절점 3차원 유한 요소인 SOLID96을 사용하였고 요크의 양 끝 단면에서 자속 밀도는 수직방향만 존재한다는 경계 조건만 고려하였다. 이때 각 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 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 |

전자장 해석은 리니어 모터뿐 아니라 그 주위의 공기 영역까지 고려하여야 한다. 그러므로 실제 해석에 적용된 유한요소 모델은 리니어 모터 내부와 요크 외곽에서 전자장의 영향을 무시할 거리만큼 떨어진 외부 공기 영역까지 포함하여 직육면체 형상이고 전체 유한 요소 수는 161,292이다. 참고로 공기영역을 제외한 리니어 모터의 유한 요소 모델링은 Fig. 2와 같다.

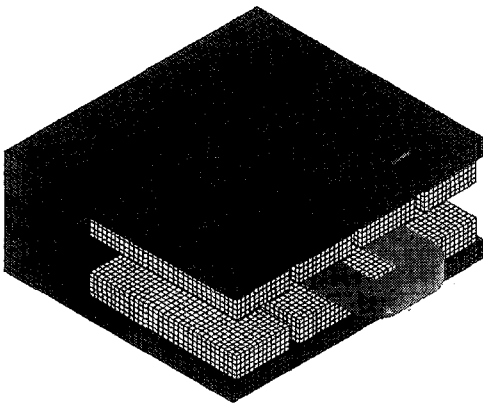


Fig. 2 Three Dimensional Finite Element Model

본 연구에서는 최대추력이 관심사이므로 각 위치에서 추력을 계산한 결과 도체의 위치는 Fig. 2와 같이 해석모델의 중심에 있는 것으로 결정하였다. 이 유한 요소 모델링의 해석 결과를 보면 추력은 도체의 이동방향만 존재하며 자속밀도 역시 영구 자석부분에 대부분 분포한다.

2.1.2 실험에 의한 검증

실험과 수치해를 비교하기 위하여 먼저 이동자인 도체를 코일 선경 0.6mm로 230회 권선하여 제작하였고 이때 도체 두께는 9.41mm가 되었다. 그리고 영구자석의 두께를 10mm로 제작한 다음 유한 요소 해석 결과와 실험에 의한 자속 밀도와 추력을 측정 비교하였다. 자속 밀도의 측정방법은 가우스미터를 이송테이블에 부착하여 마주보는 영구자속 사이를 0.05m/sec의 저속으로 이동하면서 측정하였고 도체의 인가 전류 1.85A에서 최대 자속은 영구 자석의 중앙이 0.63T로 ANSYS를 이용하여 해석한 공극 중심부의 자속 밀도 0.61T와 2.9%의 오차를 보인다.

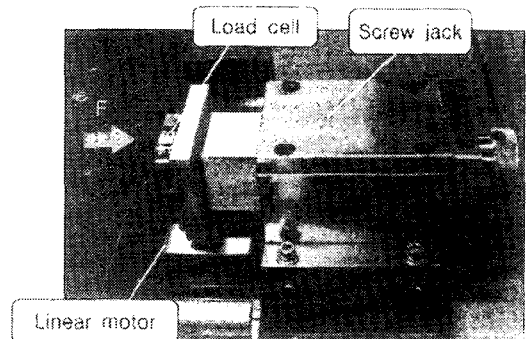


Fig. 3 Measurement of Thrust

추력은 크게 동추력과 정추력으로 나누어지는데 실제 응용되는 상태를 기준으로 보면 동추력이 중요하나 동추력은 변동 부하조건에 대한 추력의 크기를 수식으로 단순화하는 과정에서 오차가 발생하므로 정량적인 비교 분석이 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 로드셀을 장착하고 추력이 최대가 되는 위치에서 정추력을 측정하였고 결과는 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에서 전류는 하나의 도체에 흐르는 인가전류이고 추력은 실제 사용되는 2병렬 4개인

도체에서의 값이다. 그러므로 3차원 유한 요소 해석의 결과에 8를 곱하여 비교하였다. 인가전류 5A에서 최대오차는 약 7.8%이나 본 연구 대상인 제품들의 도체당 인가전류는 대략 2A로 이 부근에서는 오차가 약 3.4%로 유한요소해석 결과와 실험이 잘 일치하고 있다.

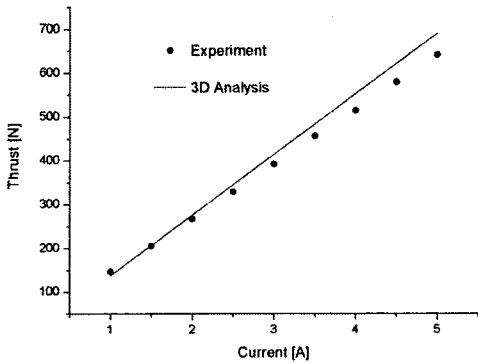


Fig. 4 Thrust According to Current of Conductor

2.1.3 2차원 해석

실험과 비교하여 3차원 해석은 해가 정확하다는 장점이 있으나 반복적인 계산을 하는 최적 설계에는 너무나 많은 계산시간을 요구한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 문제의 특성과 2.1.1절의 3차원 해석 결과를 토대로 2차원 해석을 시도하였다.

리니어 모터의 3차원 모델인 Fig. 2를 보면 요크부의 형상 때문에 2차원 해석이 불가능한 것 같이 보이나 추력과 자속밀도의 3차원 해를 보면 Fig. 5와 같이 리니어 모터의 길이와 높이만 고려한 2차원으로 모델링이 가능하다. 즉, 영구 자석을 기준으로 도체부와 요크부를 절단한 형상을 2차원화 하였다.

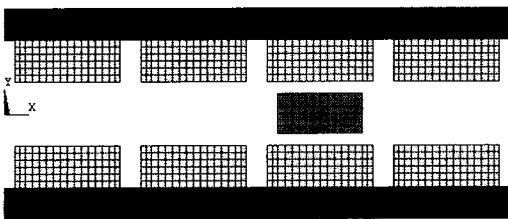


Fig. 5 Two Dimensional Finite Element Model

2차원 해석 역시 상용 코드인 ANSYS를 사용하였으며 사용된 유한요소수는 8절점 2차원 요소인 PLANE53이며 전체 모델의 유한 요소수는 3,520이고 공기부를 제외한 요소수는 1,640이다. 그런데, 실제로 도체부는 Fig. 5와 달리 중심부의 수직선을 기준으로 대칭 위치에 하나 더 존재하나, 전류의 방향이 반대이고 영구 자석의 극이 반대가 되므로 Fig. 5와 같이 하나의 도체만 고려하고 중심면을 기준으로 해석 결과가 대칭이라는 조건을 부여하였다. 이와 같은 유한 요소 모델링을 통한 자속 밀도의 해석 결과는 3차원 해석과 거의 유사하며 추력 역시 도체두께 9.41mm, 영구자석 두께 10mm, 인가전류 1A에서 145.85N으로 3차원 유한요소 해석의 결과 138.30N과 비교하여 5.5%의 적은 오차를 보이고 있다. 물론 2차원 해석은 요크부를 단순화하여 3차원 해석 결과보다 추력이 크게 계산된다. 이를 실험과 비교하면 오차가 확장되어 인가전류 2A의 오차의 크기가 약 7.8% 정도이나 최적설계 관점에서 보면 2차원 해석을 적용하는 것이 더 효율적이다.

2.2. 온도

온도는 크게 2가지 방법으로 해석할 수 있다. 하나는 추력과 같이 유한요소해석을 통하여 얻는 방법이고, 다른 하나는 실험을 통해 열저항 계수를 구한 후 이를 기초로 온도를 계산하는 방법이 있다. 그런데, 도체인 리니어모터의 이동자 구조는 완전한 대칭 형상이 아니고 에폭시안에 몰딩된 코일의 위치도 다소 차이가 있어 유한요소해석으로 정확한 온도를 얻기가 어렵다. 따라서 여기서는 실제 실험을 통해 열저항 계수를 구한 후 발열량으로 온도를 구하는 후자의 방법을 채택하였다.

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

$$T = T_{atm} + i^2 R \times R_{th} \quad [^{\circ}C] \quad (1)$$

여기서 대기 온도와 인가 전류는 측정이 가능하지만 이동자의 고유한 열저항 계수 R_{th} 과 전기저항 R 은 별도의 실험과 계산을 통해서 구해야 한다. 그런데 도체 전기저항 R 은 도체 1개의 전기저항 R_1 를 먼저 구한 후 배선 방식을 고려하여 전체 전

기저항 R 을 계산하므로 현 연구대상의 경우 $R=2R_1$ 이 된다.

2.2.1 상온에서 도체 1개의 전기저항 R_1

현 연구 대상인 무철심형 리니어 모터의 이동자 코일의 형상은 다음과 같다.

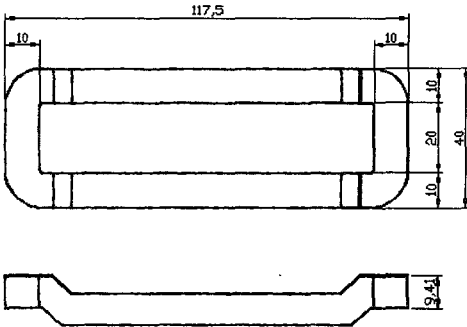


Fig. 6 Configuration of conductor

이 1개 도체의 전기저항을 계산하기 위해서는 코일의 전체 길이 L_c 에 전기저항 계수 k_r 을 곱하면 도체 1개의 전기저항 R_1 이 되는데 관련 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N &= (1-j) \cdot (A_{sec} / A_w) \\ L_c &= L_{mean} \cdot N \\ R_1 &= k_r \cdot L_c \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 N 은 권선수이고 A_{sec} 는 도체의 사각단면으로 아래 그림과 같이 단순화하면 간단히 $a \cdot x$ 가 되며 A_w 는 코팅된 코일 선径의 단면적, L_{mean} 은 도체의 평균 원주 길이를 나타낸다.

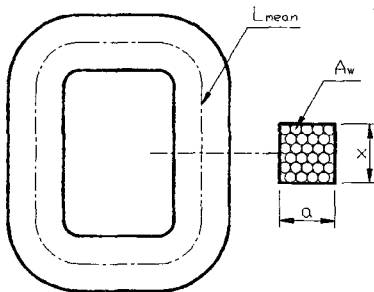


Fig. 7 Schematic of flat conduct and cross section

k_r 은 국제표준 연동의 저항계수 1.7241×10^{-8} (Ω / m)이고 A_w 는 EIW 1종(20℃ KS) 경우 Table 2에서 설명한 최대 제작 허용치를 선정하였다.

Table 2 Class 1 polyester-mide wire [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 |

한편, 공극계수 j 는 사각 단면의 도체에서 코일이 차지하는 면적을 뺀 빈 공간이 차지하는 면적의 비율인데, 일반적으로 제작되는 코일은 0.13 ~ 0.22 범위를 가지나 본 연구에서는 0.13으로 고정된 값을 사용하였다. 공극 계수 0.13으로 실제 제작된 소형 도체를 대상으로 코일 선径 0.55mm, 도체두께 9.68mm 경우 권선수는 295, 테스트기로 측정된 저항은 6.1Ω 으로 식 (2)에 의하여 계산된 코일 저항은 6.07Ω (20℃ 기준)로 약 0.5%의 오차를 보여 이론적인 전기저항 계산결과는 신뢰할 수 있다.

2.2.2 열저항 R_{th}

이동자는 외부 충격으로부터 보호하고 절연을 위해 에폭시 수지로 몰딩한다. 발열원인 도체에 전류 i 가 흐르면 도체저항 R 에 의해 i^2R 의 열이 발생하고, 이 발열량은 에폭시 수지를 통하여 외부 대기로 방출된다. 도체는 리니어 모터의 길이방향으로 연속적으로 배열되고 두께가 얇기 때문에 대부분의 열은 영구자석 방향으로 방출된다고 볼 수 있다. 그리고 도체와 에폭시 수지 사이의 두께는 약 0.5 ~ 1.0mm정도이므로 도체는 1차원 열전달 모델로 볼 수 있다.

외부로 방출되는 총 열전달량은 도체 표면 전체에서 동일하다고 가정하면 열은 에폭시 수지내에서 전도되었다가 외부 대기에 대류로 방출되는 열 경로를 가지게 된다. 열 경로 사이의 중간 매개체에서 생기는 열적 저항을 통칭하여 열저항 계수 R_{th} 로 두면 열저항 계수는 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$R_{th} = \frac{T - T_{atm}}{i^2R} \quad [^\circ C/W] \quad (3)$$

실험 방법은 Fig. 8과 같은데 최대 인가 전류 용량이 60A인 전류전원장치(DC Power Supply)로 이동자에 전류를 인가하면 이동자 내부의 온도가 상승하다가 일정한 시간이 흐르면 대기 온도와 열적 평형이 이루어지는 정상상태에 도달하게 된다. 이때의 도체에서 발생하는 온도는 이동자 내부의 열전대로부터 받아 Data Acquisition Board (HP3470A, 22bits)에서 기록한다.

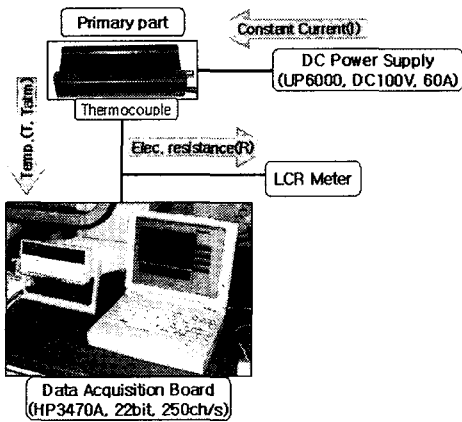


Fig. 8 Temperature Measurement

실험은 전류를 2A, 2.5A, 3A, 3.5A로 인가한 4가지 경우에 대해서 실시하였는데, 측정된 온도가 정상상태에 이르는 시간은 약 2~3시간 정도가 소요된다. 정상상태를 기준으로 인가 전류에 따른 열저항 계수는 Table 3과 같고 평균한 결과는 0.456°C/W이다. 따라서 이 열저항 계수 $R_{th} = 0.456\text{°C/W}$ 를 본 연구에서 도체부 발열 온도를 계산하기 위한 계수로 사용한다.

Table 3 Measured thermal conductivity of linear motor

| i [A] | T_{am} [°C] | T [°C] | R [Ω] | R_{th} [°C/W] |
|---------|---------------|----------|---------|-----------------|
| 2 | 21.0 | 36.1 | 8.3 | 0.455 |
| 2.5 | 21.7 | 47.0 | 8.7 | 0.462 |
| 3 | 21.4 | 59.1 | 9.1 | 0.460 |
| 3.5 | 20.3 | 72.8 | 9.6 | 0.447 |

2.2.3 온도변화에 따른 저항변화와 온도 계산

전기저항 R 과 열저항계수 R_{th} 을 구하였으므로 도체두께와 선경이 정해지면 전류의 변화에 따라 이동자의 발열온도를 식 (1)로부터 계산할 수 있다. 그런데 전기저항은 온도의 상승에 따라 커지는 온도의 함수이다. 상온 T_0 에 대하여 전기저항이 R_0 이었는데, 전류가 인가되어 온도가 T 로 상승하면 전기저항 R 은 다음과 같이 바뀐다.

$$R = \frac{234.5 + T}{234.5 + T_0} R_0 \quad [\Omega] \quad (4)$$

따라서 전류가 인가되면 온도가 상승하고, 온도가 상승하면 전기저항이 커지게 되므로 식 (1)과 (4)는 서로 상관관계를 가진다. 이를 고려하여 실제 제품을 대상으로 인가 전류 2A, 2.5A, 3A, 3.5A에 대해 측정된 온도와 식 (4)를 고려한 식 (1)을 이용하여 계산한 결과는 Table 4와 같이 최대 오차 2.8%로 대체로 잘 일치함을 확인하였다.

Table 4 Comparison between measured temperature and simulated temperature

| i [A] | Analysis T [°C] | Measured T [°C] | Error |
|---------|-----------------|-----------------|-------|
| 2 | 36.4 | 36.1 | 0.8% |
| 2.5 | 45.6 | 47.0 | -2.8% |
| 3 | 57.7 | 59.1 | -2.4% |
| 3.5 | 72.9 | 72.8 | -0.1% |

3. 최적설계

3.1 최적화 문제 정의

추력은 리니어 모터의 성능을 결정하는 중요한 사양이고 실험으로 증명하였듯이 유한요소법에 의한 해석은 신뢰성이 있다. 물론 경험적으로 인가 전류와 코일의 권선수 및 영구 자석의 크기를 증가하면 추력이 향상된다. 그러나, 영구 자석의 크기와 인가 전류는 리니어 모터의 규격에 따른 제약이 있

으므로 대부분 코일의 권선수를 증가하는 방법을 선택한다. 권선수가 많아지면 코일의 길이가 늘어나 전기저항으로 인한 발열이 증가하여 모터의 특성을 저하시키므로 무작정 권선수를 늘이는 것은 적절하지 않다. 이러한 이유로 적당한 온도범위 내에서 최대의 추력을 갖도록 권선수, 인가 전류 및 리니어 모터의 치수를 결정하는 최적설계가 필요하다.

본 연구에서는 Fig. 1의 무철심형 리니어모터를 도체 온도가 80℃를 넘지 않도록 하면서 추력을 최대로 설계하고자 한다. 리니어 모터의 전체 단면 높이는 50mm이며 요크 하나의 두께는 7.5mm, 자석과 도체 사이의 공극은 2.5mm로 고정하였다. 그리고 설계 변수는 도체두께(x), 자석두께(y) 및 인가전류(i)로 설정하였다. 도체는 선경 0.6mm인 코일로 제작되었고 공극계수는 0.13을 사용하였다. 추력을 $F(x, y, i)$ 로 표현하여 이를 수식으로 정리하면 주어진 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } F(x, y, i) \\ & \text{Subject to } 6\text{mm} \leq x \leq 12\text{mm} \\ & \quad 6\text{mm} \leq y \leq 12\text{mm} \\ & \quad 1\text{A} \leq i \leq 3\text{A} \\ & \quad 18\text{mm} \leq x + 2y \leq 30\text{mm} \\ & \quad 147 \leq N \leq 295 \\ & \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 80^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (5)$$

위식에서 권선수 N 은 식 (2)로부터, 도체 온도 T 는 식(1)과 식 (4)로부터 계산된다.

3.2 최적설계 방법 및 해석 결과

식 (5)의 최적화 문제에서 온도 제한 조건은 수식이 복잡하고 식 (1)과 식 (4)의 순차 계산이 요구되므로 해석학적인 미분값을 구하기가 어렵다. 또한, 수치미분을 사용하는 경우 최적해의 수렴에 문제가 발생될 소지가 있어 본 논문에서는 미분을 이용하지 않은 최적화기법으로 ANSYS에서 부 최적화 근사방법(Subproblem Approximation Method)을 선택하였다. 한편, 목적함수인 추력은 유한요소법으로부터 계산되는데 설계변수인 도체두께와 자석 두께에 변화에 따라 새로운 유한요소 모델링이 요구된다. 이를 위하여 설계 변경에 따른 새로운 유한요소 생성을 ANSYS의 ADPL로 자동화하였다.

현재의 최적설계 문제에서 초기값은 $x = y = 9\text{mm}$, $i = 1\text{A}$ 로 설정하였다. 이 설계값들로부터 온도 $T = 35.625^\circ\text{C}$, 권선수 $N = 220.77$, 추력 $F = 123.63\text{N}$ 으로 계산된다. 반복 횟수 11번 만에 도달한 최적 설계 값은 $x = 11.9516\text{mm}$, $y = 9.0020\text{mm}$, $i = 1.638\text{A}$ 이고 이 때 최대추력 $F = 266.75\text{N}$ 이고 온도 $T = 79.384^\circ\text{C}$, 권선수 $N = 293.17$ 이 된다. 이 결과는 최적화문제 (5)의 모든 제한조건을 만족한다. 특히 최적해에서 기하학적 제한조건외에 온도제한 조건이 등호로 만족되고 있다.

4. 결론

사용 온도조건까지 포함하여 추력을 최대화하는 리니어 모터의 최적설계를 연구하였다. 최적화에 앞서 유한요소법에 의한 추력해석이 타당함을 실험을 통하여 입증하였고 최적화과정 중 반복적인 추력 계산 시간을 단축하기위하여 3차원 해석보다 2차원 유한요소 모델링을 사용하였다. 그리고 리니어 모터의 성능에 중요한 영향을 미치는 온도는 실험으로부터 실측한 열저항계수를 적용하여 계산하였다.

설계변수는 도체부의 두께와 영구 자석의 두께 및 인가전류로 선정하였고 공극계수를 도입하여 권선수는 선정된 도선의 직경과 도체부의 두께로부터 식 (2)에 의하여 결정하였다. 맥스웰 응력으로부터 계산된 추력을 목적함수로 정의하고 크기 제한조건과 온도제한조건을 ANSYS의 ADPL로 작성하여 최적해를 구하였다. 물론 최적화 과정 중 설계 변경에 따른 유한요소 재생성 역시 고려하였다. 제안된 방법에 의하여 최적설계를 행한 결과 초기값에 비하여 추력이 크게 향상되었고 온도 제한조건이 상당히 중요한 역할을 함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 설계대상인 리니어 DC 모터의 추력을 계산하는데 2차원 자기장 해석을 사용하였으나 3차원 유한요소해석을 적용하여 최적해를 구하여도 별 문제가 없다. 또한, 이론 전개에 특별한 제약이 없으므로 무철심형 리니어모터뿐 아니라 다른 형태의 리니어 모터의 설계도 가능하다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술 연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

참고문헌

1. Mizuno, T. and Yamada, H., "Magnet Circuit Analysis of a Linear Synchronous Motor with Permanent Magnets," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 14, No .4, pp. 3027-3029, 1999.
2. Yamada, H., "Optimum Design of Thin Linear DC Motor with Long Strokes," *T.IEE Japan*, Vol. 116-D, No .4, pp. 384-389, 1996.
3. Hong, J. P., Nam, H. and Kim, K. C., "LDM Design for Reduction of Mover Mass Using RSM," *Proceedings of the KIEE summer annual conference*, pp. 964-966, 2002.
4. Choi, M. S., Kim, Y. Y. and Lee, S. L., "The Optimum Geometric Design Stators for a Brushless DC Linear Motor," *Transactions of KSME, A*, Vol. 23, No. 3, pp. 442-448, 1999.
5. Joo, S. H., Jung, J. H. and Lee, S. R., "A Study on Optimization of the Design Variables of Linear Motor Using Genetic Algorithm," *J. of KSPE*, Vol. 19, No. 5, pp. 110-117, 2002.
6. Eun, I. U., "Improvement of the Thermal Characteristics of Synchronous Linear Motors Through Insulation," *J. of KSPE*, Vol. 19, No. 3, pp. 123-130, 2002.
7. Jung, J. H., Shin, S. H. and Lee, S. R., "Optimization of the Design Variables of Linear Motor by FEM," *Trans. of KSME, A*, Vol. 26, No. 7, pp. 1232-1240, 2002.