

유전알고리즘을 이용한 리니어모터의 설계변수 최적화에 관한 연구

주상현*, 정재한**, 이상룡***

A study on Optimization of the Design Variables of Linear Motor Using Genetic Algorithm

Sang Hyun Joo*, Jae Han Jung**, and Sang Ryong Lee***

ABSTRACT

This paper proposes a optimization of the design variables of linear motor for the improvement of thrust. Especially, this paper treats the shoe, which can be good to flow of a magnetic flux in linear motor.

Firstly, this paper uses a space harmonic analysis method(SHAM) based on Fourier series, for analyzing the characteristics of core type linear motor, including slot structure and shoe. And compare the magnetic flux densities of linear motor at air gap with the results of the SHAM and the Finite Element Method(FEM). Secondly, this paper uses a genetic algorithm, which is good to find the global solutions. The design variables are the pole pitch of magnet, the pitch of slot, the height of slot, the width of shoe and the width of magnet. The maximum thrust with optimum design variables is about 247 N which is improved about 16%.

Key Words : Linear motor(선형전동기), Space harmonic analysis method(SHAM, 공간고조파해석법), FEM(유한요소법), Genetic algorithm(유전자 알고리즘), Optimization(최적설계)

1. 서론

지금까지 회전형 전동기는 산업용 기계의 동력 원으로 가장 널리 이용되어 왔다. 또한 전력전자 기술의 발달에 의하여 회전형 전동기의 서보 성능이 크게 향상되어 그 분야는 날로 발전하고 있다. 하지만, 산업현장에는 직선운동을 하는 경우가 많은데 회전형 전동기를 이용하여 회전력을 직선운동으로 변환하기 위해서는 기어, 볼스크류, 벨트, 와이어 등의 동력전달 기구가 필요하다. 이러한 직선

변환 기구를 이용한 시스템은 백래쉬에 의한 위치 결정 정밀도 저하, 진동, 소음, 이동부 경량화 등에 문제가 있다. 이러한 문제점으로 인하여 선형전동기에 대한 관심이 고조되고 있는데, 특히 고속, 급가속 및 고정밀도를 요구하는 시스템에 선형전동기를 사용한다면 백래쉬 현상과 기계적 마찰에 의한 에너지 손실을 제거할 수 있어 메카트로닉스 분야를 비롯하여 산업용 기기, 사무용 기기 등에 널리 이용할 수 있다.⁽¹⁾

2002년 1월 7일 접수

* 경북대학교 대학원 기계공학과

** 삼익LMS 기술연구소

*** 경북대학교 기계공학과

선형전동기는 회전형 전동기에 비해 자체 효율이 낮고 역률이 떨어지는 단점이 있다.⁽²⁾ 하지만, 고속의 직선 추력을 직접 발생시키고, 고속, 급가속 및 고정밀의 직선 운동이 가능하므로 메카트로닉스 분야를 비롯하여 산업용 기기, 사무자동화에 널리 응용되고 있다. 최근 고추력과 고정밀도 및 고속이동을 요구하는 공작기계에 선형전동기를 적용하기 위한 연구가 시작되고 있다. 하지만 기기의 제반특성 변화에 대한 면밀한 검토와, 체계적인 연구가 미흡한 실정이다.⁽³⁾⁻⁽⁶⁾

본 연구는 공작기계 등 고추력을 가지는 철심형 선형전동기의 추력을 극대화 할 수 있는 설계변수의 최적화를 목표로 한다.

선형전동기의 모델은 철심형이면서 추력의 리플을 줄이기 위해 철심의 하단부에 슈(shoe)를 끼운 구조로써 이동자(primary parts) 가동형 구조이다.

주어진 구속조건하에서 추력이 최대가 되는 설계변수를 구하기 위해 푸리에 급수 전개를 이용한 공간고조파법을 이용하였고 슬롯에 대한 영향을 등가자화전류를 이용하여 보정하였다. 공간고조파법은 유한요소법에 의한 해석보다 해석시간이 빠르고 설계변수 변화에 따른 특성 파악이 용이하여 초기 설계시 효율적인 방법이다. 본 논문은 공간고조파법으로 구해진 추력식을 이용하여 유전알고리즘으로 최적해를 구하였다.

2. 선형전동기의 자계해석

2.1 선형전동기의 구조

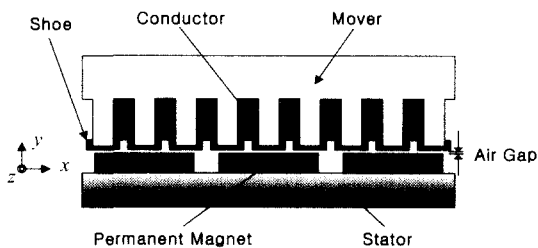


Fig. 1 Structure of core type linear motor

Fig. 1은 고추력용 철심형 선형전동기의 2차원 모델이다. 이동자의 슬롯 부분에 코일이 감겨진 형태로서 가동코일형(moving coil type)이다. 코일에

전류를 흘려주면 철심의 치(teeth) 끝부분에서 강한 전자기력이 발생하여 추력을 얻게 된다. 이동자는 철심이 z축 방향으로 적층된 구조로 이루어져 있어 와전류에 의한 영향을 최소화 하고 철심의 끝부분에 슈(shoe)를 장착하여 디텐트력(detent force)의 영향을 감소시키고 있다. 철심형 선형전동기의 해석에 있어 다음과 같은 가정을 두었다.

- ① 선형전동기는 $\pm x$ 방향으로 무한히 길다.
- ② 영구자석은 y방향으로만 착자되어 있으며, x방향으로 주기적으로 분포해 있다.
- ③ 철심과 고정자의 투자율은 무한대로 자기적 포화는 없다.
- ④ 재질은 자기적으로 선형적인 특성을 가진다.
- ⑤ 슬롯구조의 이동자 철심은 카터계수(Carter's coefficient)를 도입하여 평활한 철심으로 보정한 후 계산한다.
- ⑥ z방향의 변화는 없다.

2.2 기존 연구

2.2.1 영구자석의 자계해석

자기스칼라포텐셜(Magnetic scalar potential) ϕ 를 도입하여 공극과 영구자석 영역에서의 일반해를 구한다. 먼저 Fig. 2와 같이 각 영역으로 나누고, I 영역과 IV영역에서의 경계조건과 주기조건을 대입하면 각 영역에서의 일반해는 식 (1)과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

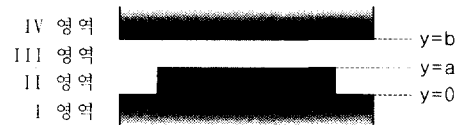


Fig. 2 Field analysis model of permanent magnet

$$\begin{aligned}
 \phi_I(x, y) &= \sum A_n e^{nky} \cos(nkx) \\
 \phi_{II}(x, y) &= \sum (C_n e^{nky} + D_n e^{-nky}) \cos(nkx) \\
 \phi_{III}(x, y) &= \sum (E_n e^{nky} + F_n e^{-nky}) \cos(nkx) \\
 \phi_{IV}(x, y) &= \sum B_n e^{-nky} \cos(nkx)
 \end{aligned} \tag{1}$$

이때의 각 영역에서의 자계의 세기 \overline{H} 는 식 (2)와 같이 계산할 수 있고, 자속밀도는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$H_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad H_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{영역 I} : & B_x = \mu H_x, \quad B_y = \mu H_y \\ \text{영역 II} : & B_x = \mu_m H_x, \quad B_y = \mu_m H_y + \mu_0 M_y \\ \text{영역 III} : & B_x = \mu_0 H_x, \quad B_y = \mu_0 H_y \\ \text{영역 IV} : & B_x = \mu H_x, \quad B_y = \mu H_y \end{aligned} \quad (3)$$

2.2.2 전기자의 자계해석

이동자의 슬롯 부분에 감겨져있는 권선에 전류를 흘려주면 기자력이 발생한다. 이것을 영구자석을 해석한 방법과 마찬가지로, 전기자에 의한 자계를 계산하여 직교좌표계로 표현한다. 카터계수를 도입하여 슬롯구조의 이동자 철심을 평활한 철심으로 보정한다.

영구자석의 해석과 같은 방법으로, 전기자에 의한 각 영역에서의 자계의 세기 \overline{H} 와 자속밀도 \overline{B} 를 계산할 수 있다. 각 영역에서의 자속밀도 분포는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{영역 I} : & B_x = \mu H_x, \quad B_y = \mu H_y \\ \text{영역 II} : & B_x = \mu_m H_x, \quad B_y = \mu_m H_y \\ \text{영역 III} : & B_x = \mu_0 H_x, \quad B_y = \mu_0 H_y \\ \text{영역 IV} : & B_x = \mu H_x, \quad B_y = \mu H_y \end{aligned} \quad (4)$$

2.2.3 슬롯의 자계해석

자속의 투자율이 공기보다 큰 물질이 자기장 내에 있을 경우, 그 물질의 자화강도 M 은 경계면에서 면전류 형태로 존재하는 등가의 자화전류로 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾ 이동자의 슬롯부분을 카터계수를 이용하여 평활 철심으로 가정을 한다면 영역IV는 영구자석의 자계로 인한 자화강도 M 으로 치환할 수 있다. 전기자에 의한 자계를 해석한 것과 같이 평활 철심에 의한 등가자화전류를 가지고 공극에서의 자속밀도를 구하면 식 (5)와 같다.⁽¹³⁾

$$B_x = -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[\frac{\sinh(nky)}{e^{nkb}} - \frac{\sinh(nk(b-\delta))}{e^{nky}} \right] \cdot \frac{\sinh(nka)}{\sinh(nkb)} \frac{b_m}{nk\delta} \frac{\sin(nkx)}{nk}$$

$$B_y = -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[1 - \left\{ \frac{\cosh(nky)}{e^{nkb}} + \frac{\sinh(nk(b-\delta))}{e^{nky}} \right\} \right] \cdot \frac{\sinh(nka)}{\sinh(nkb)} \frac{b_m}{nk\delta} \frac{\cos(nkx)}{nk} \quad (5)$$

이동자에 있어서 슬롯 부분의 투자율은 공기와 같은 반면에 치 부분의 투자율은 무한대로 가정하였으므로 영구자석의 모든 자속은 치부분으로 집중하게 되고, 슬롯 부분의 자속은 이론상 0이 된다. 그러므로 평활 철심부의 등가자화전류에 의한 자계를 슬롯 부분에서 상쇄시킬 수 있는 가상의 등가자화전류가 슬롯 부분에 있어야 한다.⁽¹²⁾

전기자에 의한 자계를 해석한 것과 마찬가지로, 슬롯 영역에 의한 등가자화전류를 가지고 공극에서의 자속밀도를 구하면 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} B_x &= -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[\frac{\sinh(nky)}{e^{nkb}} - \frac{\sinh(nk(b-\delta))}{e^{nky}} \right] \cdot \left[\frac{b_{nm}}{nk} \sin(nkx) + \frac{a_{nm}}{nk} \cos(nkx) \right] \\ B_y &= -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[1 - \left\{ \frac{\cosh(nky)}{e^{nkb}} + \frac{\sinh(nk(b-\delta))}{e^{nky}} \right\} \right] \cdot \left[\frac{b_{nm}}{nk} \cos(nkx) - \frac{a_{nm}}{nk} \sin(nkx) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } a_{nm} = \frac{mkb_m}{\mu_0\delta}, \quad b_{nm} = -\frac{mkb_m}{\mu_0\delta}$$

2.3 슈(shoe)에 의한 자계

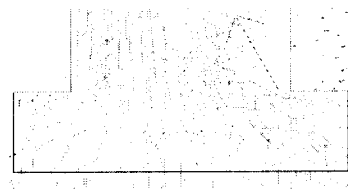


Fig. 3 Magnetic flux distribution at shoe

철심형 선형전동기의 디텐트력(detent force) 감소를 위해 철심의 치 끝부분에 Fig. 3과 같이 슈(shoe)를 장착한다. 디텐트력은 외부 입력과 관계없이 영구자석과 철심의 슬롯 위치 관계에 의한 상대적인 힘으로서 추력 리플 성분으로 작용하여 제어

성능을 저하시킨다. 따라서 디텐트력의 특성을 충분히 파악하고 초기 설계시 디텐트력을 고려한 설계와 해석이 요구된다.

디텐트력 저감을 위한 방법으로 영구자석에 스큐(skew)를 주거나 슈를 장착하기도 한다. 슈는 철심과 동일한 재질로 이루어져 있으며, 슈가 없으면 이송방향으로 방해하는 자속이 생기는데, Fig. 3과 같이 슈가 부착되면 투자율이 높은 슈를 통해 이송방향의 자속 상당량이 수직방향으로 흐르게 되어 영구자석과 철심사이에 생기는 불균형적인 힘이 줄어든다.

슈에 의한 자속밀도 계산은 슬롯의 가상 자계에 의한 공극내 자속밀도를 이용한다. 먼저 슈의 높이와 슬롯의 높이의 비에 따라 발생하는 자속의 크기가 달라지므로 식 (6)의 B_x 와 B_y 에 높이비 R_s 를 나누어 준다. 또한 슈의 폭과 슬롯의 폭에 대한 비율이 바뀌게 되어, 극간격 τ 가 바뀌게 된다. 식 (7)과 같이 각각의 슬롯과 슈의 비를 곱하여 새로운 계수를 구하는데, 여기서 첨자 s는 슬롯의 약자이고, ss는 슈를 의미한다.

$$\tau_{ss} = \tau_s \times \frac{w_{ss}}{w_s}, \quad k_{ss} = \frac{\pi}{\tau_{ss}}, \quad R_s = \frac{h_{ss}}{h_s} \quad (7)$$

w_{ss} : 슈의 폭

τ_{ss} : 슈의 극간격

h_{ss} : 슈의 높이

식 (7)을 슬롯의 가상자계에 의한 자속밀도에 적용하면 식 (8)과 같은 공극내 자속밀도를 계산할 수 있다.

$$B_{x,ss} = -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[\frac{\sinh(nk_{ss}y)}{e^{nk_{ss}b}} - \frac{\sinh(nk_{ss}(b-\delta))}{e^{nk_{ss}y}} \right] \cdot \left[\frac{b_{nm}}{nk_{ss}} \sin(nk_{ss}x) + \frac{a_{nm}}{nk_{ss}} \cos(nk_{ss}x) \right] \cdot R_s$$

$$B_{y,ss} = -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[1 - \left\{ \frac{\cosh(nk_{ss}y)}{e^{nk_{ss}b}} + \frac{\sinh(nk_{ss}(b-\delta))}{e^{nk_{ss}y}} \right\} \right] \cdot \left[\frac{b_{nm}}{nk_{ss}} \cos(nk_{ss}x) - \frac{a_{nm}}{nk_{ss}} \sin(nk_{ss}x) \right] \cdot R_s \quad (8)$$

2.4 발생 추력의 계산

자기력의 밀도는 합성자계의 전류밀도와 자속 밀도에 의한 로렌츠 힘(Lorentz force)으로 변환된다. 그리고 전류의 변화를 무시할 수 있는 정상상태에서는 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁴⁾

$$f = J \times B = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times B) \times B \quad (9)$$

총 발생 추력을 Maxwell stress tensor method로 표현하면 다음과 같다.

$$F_x = \frac{1}{\mu_0} \int (B_x B_y) dx \quad (10)$$

$$F_y = \frac{1}{2\mu_0} \int (B_x^2 - B_y^2) dx \quad (11)$$

여기서, 선형전동기의 경우 F_x 는 추력, F_y 는 수직력이다.

3. 해석결과 및 최적설계

3.1 해석모델

실제 제작된 철심형 직류 선형전동기를 본 연구의 해석모델로 선정하였다. 본 연구 모델은 서보 제어성능이 우수하고 질량대비 추력이 높은 직류 선형전동기로서 코일 이동형(moving coil type)이다. 이동자(primary part)는 와전류(eddy current)에 의한 자속의 손실을 막기 위해 0.5mm의 규소강판이 Z축 방향으로 적층된 구조로 되어있고 철심의 치 끝부분에 철심과 동일한 재질의 슈를 장착하였다. 철심의 슬롯에는 3상의 전기코일이 감겨져 있다. 아래의 고정자(secondary part)는 구조용 탄소강(S45C)으로 이루어진 요크 위에 N극, S극의 네오디움 영구자석(Nd-Fe-B)이 주기적으로 놓여있다. 이동자와 고정자 사이에는 0.5mm의 공극을 유지하도록 직선 가이드 베어링으로 체결된다.

이 선형전동기는 정격추력이 1391 N 이며, 최대 속도가 1.2 m/s, 최대 가속도가 1.2 G 이다. 위치 정밀도는 $\pm 1\mu\text{m}$ 까지 제어가 가능하다. 이러한 선형전동기를 복수로 설치하면 3000 N 이상의 추력을 얻을 수 있어 머시닝 센터와 같은 공작기계에 쓰일 수 있다.

본 연구에서 실제 제작된 선형전동기 모델의 기본 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of linear motor

division	specification	
primary	phase number	3-phase
	pole pitch	30 mm
	slot pitch	10 mm
	slot width	5 mm
	core width	110 mm
	shoe width	7 mm
	shoe thickness	1 mm
	material	50PN1650
	coil diameter	0.4 mm
	turn number	238
secondary	width	110 mm
	magnet	Nd-Fe-B
	residual mag.	1.2 T
	air gap	0.5 mm

앞 절에서 소개한 공간고조파법(SHAM)에 의한 선형전동기의 해석 결과를 이용하여 Fig. 4와 같은 반주기 모델에 대한 공극의 자속밀도를 계산하고, 그 결과를 유한요소법과 비교하여 신뢰성을 평가하였다.

본 논문에서 사용한 유한요소해석 프로그램은 CMS Technologies, Inc.에서 개발한 EMF를 사용하였는데, EMF는 영구자석 및 DC/AC를 소스로 하는 정자계 및 시변자계 문제, 정상상태 및 과도상태, 동특성문제를 해석할 수 있다.

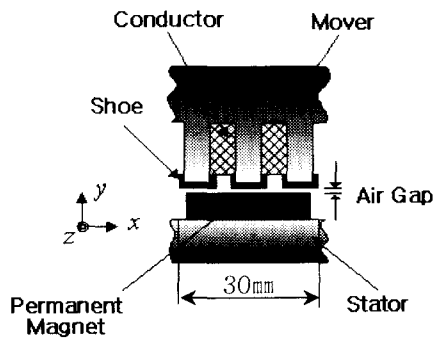


Fig. 4 FEM analysis model(half model)

3.2 해석결과

영구자석만 있을 때 공극내 자속밀도를 x방향과 y방향으로 구분하여 나타내면 Fig. 5, Fig. 6과 같다. 공간고조파법에 의한 결과는 유한요소법과 유사한 경향을 보이지만 추력에 영향을 미치는 y방향에 대한 자속밀도에서 약 6% 가량 높게 나타나 추력치도 더 큰 값을 가짐을 예상할 수 있다. 코일만 있을 때 공극에서 자속밀도를 x방향과 y방향으로 구분하여 나타내면 Fig. 7, Fig. 8과 같은데, 해석 결과는 다소 차이를 보이고 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 슈의 유무에 따른 공극내 자속밀도를 나타내는데 슈가 장착된 공극에서 자속밀도는 비교적 고르게 분포함을 알 수 있다. 그러므로 슈를 장착하면 철심의 치 끝부분에 자속집중 현상을 감소시켜 보다 부드러운 작동을 가능하게 하는 반면에 전기자에 대한 공극이 상대적으로 넓어져 최대 자속밀도의 감소현상이 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 2는 선형전동기의 전기자 한 개당 추력을 나타낸 것이다. 먼저 실험에 의해 실제 추력을 측정하고 유한요소법과 공간고조파법에 의한 해석결과와 비교하였다. 추력 실험은 정지상태에서 전류를 인가하여 그때 발생하는 추력을 로드셀(Load cell)로 측정한 정추력이다. 실험값에 대하여 유한요소법과 공간고조파법의 해석한 결과는 각각 8%와 9%정도의 오차가 발생함을 알 수 있다. 이것은 이론해석에서는 yoke와 영구자석 그리고 core의 자기특성을 선형으로 가정하였기 때문이다. 또 이동자는 가이드에서 생기는 마찰에 의한 영향을 고려하지 않았기 때문이라고 생각된다.

Table 2 Comparison of measured thrust with respect to analysis

division	thrust [N]
experiment	193.83
FEM	209.25
SHAM	211.73

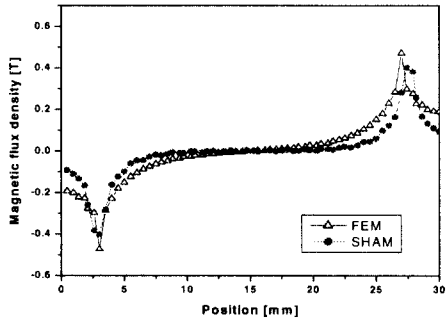


Fig. 5 The effect of permanent magnet position on magnetic flux density (x-direction)

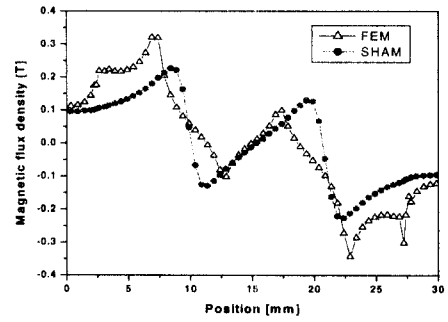


Fig. 8 The effect of conductor position on magnetic flux density (y-direction)

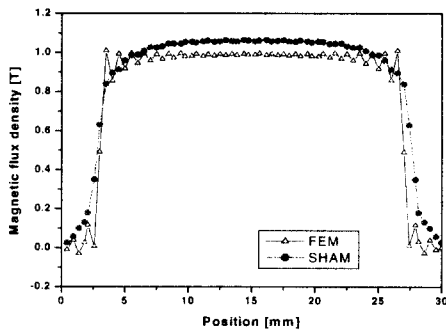


Fig. 6 The effect of permanent magnet position on magnetic flux density (y-direction)

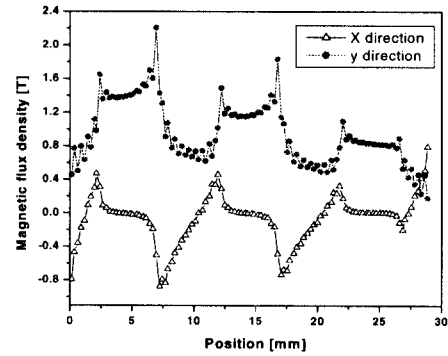


Fig. 9 Magnetic flux density at air gap without shoe

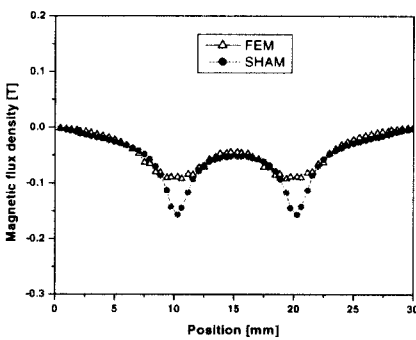


Fig. 7 The effect of conductor position on magnetic flux density (x-direction)

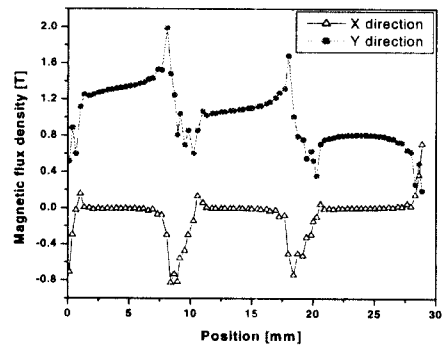


Fig. 10 Magnetic flux density at air gap with shoe

3.3 최적설계

유전자 알고리즘을 이용하여 최적설계^{(16),(17)}를 하였다. 먼저 목적함수로는 최대화하고자하는 추력, 설계변수는 영구자석의 극피치, 슬롯의 극피치, 영구자석의 폭, 슈의 폭, 그리고 슬롯의 높이로 하였다. 슬롯의 단면과 권선의 공극율을 계산하여 선경의 단면적으로 나누면 이상적인 권선의 감김 수를 계산할 수 있다. 이것은 슬롯 폭 변화에 대해 권선 수가 바뀌어 계산해야 하기 때문이다.

유전자 알고리즘의 연산자 중에서 선택 연산자는 룰렛휠⁽¹⁵⁾ 방식을 사용했다. 교차 연산자는 수렴속도가 빠른 산술적 교차⁽¹⁸⁾ 방식을 사용했다. 변이 연산자는 수렴속도가 비교적 빠른 비균등 변이연산자⁽¹⁸⁾를 사용했다.

식 (12)는 목적함수와 제한조건이고, Table 3은 설계변수의 제한 조건이다. 설계변수의 제한조건은 실제 선형전동기의 설계시 사용하는 크기를 고려하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } F = \text{Thrust Force} \\
 & \text{Subject to } 24\text{mm} \leq \tau \leq 30\text{mm} \\
 & \quad 5\text{mm} \leq \tau_c \leq 15\text{mm} \\
 & \quad 5\text{mm} \leq w_{ss} \leq 10\text{mm} \quad (12) \\
 & \quad 8\text{mm} \leq h_s \leq 12\text{mm} \\
 & \quad 20\text{mm} \leq w \leq 30\text{mm}
 \end{aligned}$$

Table 3 Variables constraints for optimization

variables		min[mm]	max[mm]
pole pitch of PM	τ	24	30
slot pitch	τ_c	5	15
width of shoe	w_{ss}	5	10
height of slot	h_s	8	12
width of PM	w	20	30

초기 발생해는 20개로 하였고, 각 세대별 발생해의 수는 40개 이다. 종료 조건은 세대수 100으로 하였다. 설익은 해를 방지하기 위해 변이의 발생비율을 0.6로 했다. Fig. 11은 유전자 알고리즘을 적용한 결과이다. 각 세대별 최대값을 나타낸다. 100세대 경과 후 최대의 추력은 약 247 N 정도이다.

유전자 알고리즘을 적용한 최적설계 변수의 결과는 Table 4와 같고 이에 따른 추력은 약 247 N이다.

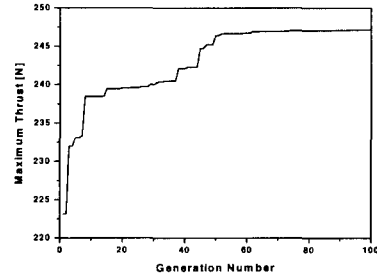


Fig. 11 Maximum thrust at each generation

Table 4 Optimization variables

variables		optimum sol.[mm]
pole pitch of PM	τ	28.90
slot pitch	τ_c	8.79
width of shoe	w_{ss}	7.61
height of slot	h_s	11.99
width of PM	w	28.91

유전자 알고리즘으로 얻은 최적설계 변수로 유한요소법과 공간고조파법으로 계산한 추력은 Table 5와 같은데, 유한요소법에 의한 해석 결과는 실제 제작된 선형전동기에 비해 13%가 향상된 것으로 나타났고 그때의 자속 흐름은 Fig. 12와 같다.

Table 5 Comparison of thrusts

division	before	after	improvement
FEM	209.25 N	238.96 N	13 %
SHAM	211.73 N	247.18 N	16 %

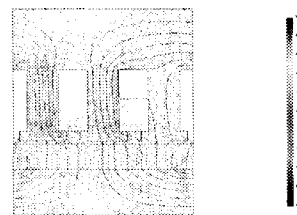


Fig. 12 Magnetic flux density by FEM

4. 결 론

본 논문에서는 슈를 가진 철심형 선형전동기의 최적 설계 변수를 설정하기 위하여 자계 해석을 하였으며, 기존의 유한요소해석 프로그램의 단점인 시간단축을 위해 푸리에 급수 전개를 이용한 해석식을 사용하였다. 또 최적설계를 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 최적의 설계변수를 구하였고, 최적치와 실제 제작된 선형전동기와 성능을 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 슈를 가진 철심형 선형전동기를 푸리에 급수 전개에 의한 공간고조파법을 사용하여 해석하였고, 자속밀도를 계산하였다.

둘째, 공간고조파법과 실제 제작된 선형전동기의 추력에 대한 오차는 약 9% 미만이었다. 또한 슈의 장착 유무에 따라 추력의 크기 변화는 약 3~4N 정도로 큰 차이는 없었다.

셋째, 계산된 식을 목적함수로 두고 유전자 알고리즘을 이용하여 최대추력을 가지는 설계변수의 최적치를 구하였다.

넷째, 유전자 알고리즘을 이용하여 구한 최적치를 공간고조파법으로 계산한 결과 제작된 선형전동기에 비해 약 16%, 유한요소법에 의한 추력은 약 13% 향상됨을 확인하였다.

후기

본 연구는 2001년도 삼익LMS(주)와 경북대학교 기계공학과 BK21 산학협동 연구과제로 수행되었으며, 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 최문석, 김용일, 이상락, "브러시 없는 직류 선형 모터의 고정자 형상 최적 설계," 대한기계학회지 제 23권 3호, pp. 442-448, 1999.
2. 백수현, "소형모터설계 편람," 세화, 서울, 1988.
3. 신관석, 안진우 역, "전기기기/Stephen J. Chapman 원저," 한국맥그로힐, 서울, 2001.
4. S.A. Nasar, "Linear Electric Motors : Theory, Design and Practical Applications," Prentice-Hall, 1987.
5. 장명석, "리니어 모터 기술," KIEE. Vol. 48, No. 2, FEB. 1999.
6. J.S. Chun, H.K. Jung, S.K. Hong, "Shape Optimization of Electromagnetic Devices Using Immune Algorithm," Trans. Magn., Vol. 33, no. 2, 1997.
7. 홍정표, "리니어 모터 해석기술," 대한전기학회지 48권 2호, pp. 9-14, 1999.
8. J.S. Chun, J.P. Lim, S.Y. Jung, H.K. Jung, "Multiresolution optimization of permanent magnet linear synchronous motor for high thrust and acceleration operation," Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD '99, 1999.
9. 강길범, "최신 전자기학," 21세기사, 1999.
10. Z.Q. Zhu, D. Howe, Ekkehard Bolte and Bernd Ackermann, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnetic dc Motors, Part I : Open-Circuit Field," Trans. Magn., Vol. 29, No. 1, 1993.
11. Z.Q. Zhu, D. Howe, Ekkehard Bolte and Bernd Ackermann, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnetic dc Motors, Part II : Armature-Reaction Field," Trans. Magn., Vol. 29, No. 1, 1993.
12. 임기채, "수치해석법을 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 특성해석 및 제어기 구현," 창원대학교 박사학위논문, 2000.
13. S.A.Nasar and L.del Cid, "Certain Approachs to the Analysis of Single-Sided Linear Induction Motors," Proc. of IEE, Vol. 120, No. 4, 1984.
14. J.R. Hendershot JR, TJE Miller, "Design of brushless permanent-magnet motors," Clarendon Press, Oxford, 1994.
15. 문병로, "유전알고리즘," 다성출판사, 서울, 2001.
16. 박성수, 박혜영, "C++로 구현한 유전자 알고리즘," 한울출판사, 서울, 2001.
17. Christopher R. Houck, Jeffery A. Joines, Michael G. Kay, "A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation," NCSU-IE TR 95-09, 1995.
18. Zbigniew Michalewicz, "Genetic algorithms + data structures = evolution programs," 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1994.