

유전 알고리즘과 3차원 공간고조파법을 이용한 slotless type PMLSM의 최적설계에 관한 연구

論 文

53B-8-1

A Study on the Optimum Design of Slotless Type PMLSM Using Genetic Algorithm and 3-D Space Harmonic Method

李 東 燁* · 金 奎 卓**

(Dong-yeup Lee · Gyu-Tak Kim)

Abstract - This paper was applied space harmonic method as a characteristic analysis technique for slotless PMLSM. There is advantages of active response to the change of design parameters as well as reduction of the calculation time. The method can be overcome disadvantages of finite element analysis that needs long times calculation, repetitions of pre and post-process.

In this paper, 3D-space harmonic method was applied to consider the precise description of end turn coil shape and the changes of characteristic according to changes of length of z-axis direction. The thrust of optimal design was performed using genetic algorithm to enhance the thrust which is the disadvantage of slotless type PMLSM. For design parameters, width of permanent magnet, width of coil, width of coil inner and lengths of z-axis direction were selected. For objective functions, thrust per weight, thrust per volume, multi-objective function was selected.

Key Words : Slotless type PMLSM, 3-D space harmonic analysis method, Genetic algorithm, Multi-objective function

1. 서 론

회전형 전동기를 직선운동을 필요로 하는 분야에 사용하기 위해서는 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위한 기계적 동력 전달 메커니즘이 반드시 필요하다. 이러한 회전-직선 변환 메커니즘에 의한 구동 시스템은 고속화, 제어시의 위치결정의 정밀도, 진동, 소음, 소형, 경량화, 비접촉 구동 등의 여러 가지 문제점으로 인하여 선형전동기(linear motor)에 관심이 고조되고 있다. 즉, 고속, 급가속 및 고정밀도를 요구하는 시스템에 선형전동기를 채용한다면, 다이렉트 드라이브(direct drive) 구동은 물론 백래쉬 현상의 제거, 에너지 변환 메커니즘에 의한 손실 제거 등의 장점을 살릴 수 있으므로 공작기기를 위시한 메카트로닉스 분야는 물론 차량용 기기, 산업용 기기, 사무자동화 기기 등에 널리 응용되고 있다[1,2].

선형 전동기중 특히 슬롯리스형(slotless type) 영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 큰 자기적 공극으로 인하여 출력밀도가 떨어지는 단점이 있지만, 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력이 완전히 제거되고 수직력이 작기 때문에 추력 리플은 거의 발생하지 않아서, 정확한 제어 특성이 요구되는 정밀 제어 시스템에 널리 적용되고 있다. 특히, 최근엔 에너지 밀도가 높은 영구자석 재료의 발달과 더불어 슬롯리스형 PMLSM에 대한 관심이 더욱 증가하고 있는 실정이다[3-5].

따라서, 본 논문에서는 슬롯리스형 PMLSM의 추력을 향상시키기 위하여 최적화 설계를 수행하였다. 특성 해석 방법으로는 해석 모델의 치수 변화에 따라 특성 해석 시간을 줄이고 코일 end turn부의 정밀묘사를 위하여 3-D 공간고조파법을 이용하였다. 슬롯리스형 PMLSM은 전기자의 형상이 간단하고, 철심의 포화 현상도 거의 나타나지 않으므로 공간고조파법을 이용하더라도 유한요소 해석 결과와 큰 차이가 없는 정확한 결과를 얻을 수 있었다[6].

또한, 영구자석의 폭, 코일의 폭, 코일 사이 간격과 z-축 방향 길이를 설계변수로 두어 3차원 공간고조파법과 유전알고리즘을 결합하여 최적화를 수행하였다. 목적함수로는 추력/무게, 추력/체적, 다중목적함수를 선택하였으며, 최적의 추력 조건을 만족하는 전동기의 설계 치수를 제시하였다.

2. 슬롯리스형 PMLSM

2.1 슬롯리스형 PMLSM의 구조

그림 1은 편축식 슬롯리스형 PMLSM의 기본구조로서 영구자석이 이동하는 가동자석형(moving magnet type)을 나타낸 것이다. 전기자의 구조를 보면, 치와 슬롯이 존재하지 않고 공심(air-core)구조의 코일을 직접 백아이언(back iron)에 부착시킨 형태이다. 슬롯리스형 PMLSM은 치-슬롯 구조를 갖는 일반적인 PMLSM에 비하여 발생 추력은 떨어지는 단점이 있지만, 정현파 구동 방식의 동기전동기를 채용하는 경우에는 추력 리플이 거의 없이 급가속 및 정확한 속도 제어가 가능할 뿐만 아니라 아주 저속을 필요로 하는 응용분야에서도 유용하게 쓰일 수 있다.

* 正 會 員 : 昌 原 大 學 校 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 正 會 員 : 昌 原 大 學 校 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2004年 2月 18日

最 終 完 了 : 2004年 6月 21日

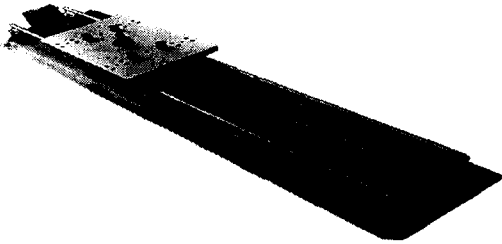


그림 1 슬롯리스형 PMLSM의 기본 구조
Fig. 1 Basic structure of slotless type PMLSM

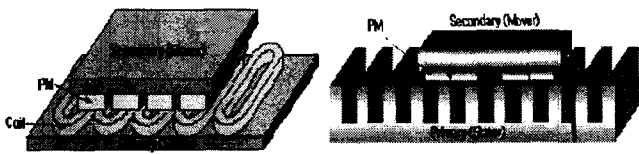


그림 2 PMLSM의 구조
Fig. 2 Configuration of PMLSM

2.2 슬롯리스형 PMLSM의 특성

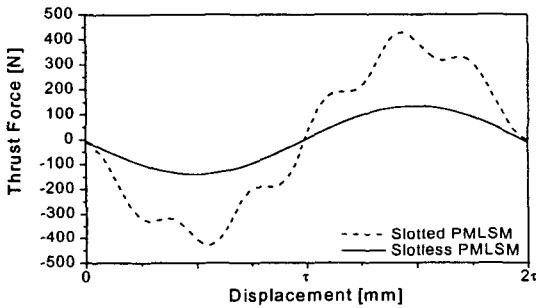


그림 3 PMLSM의 추력 특성 비교
Fig. 3 Comparison of thrust forces in PMLSM

그림 3은 그림 2에 나타낸 두 모델의 유한요소해석을 통한 추력특성을 보여준다. 영구자석과 입력 기자력이 동일할 때, 슬롯리스형 PMLSM은 슬롯형 PMLSM 보다 상대적으로 큰 자기적 공극으로 인해 발생 추력(thrust)이 1/3정도로 낮지만, 추력의 맥동으로 작용하여 속도리플을 발생시키고 위치제어 성능에 악영향을 미치는 디텐트력(detent force)을 근본적으로 제거할 수 있다. 또한, 주행 시 저항으로 작용하는 수직력(normal force)도 슬롯형 PMLSM에 비해 7~8배 정도로 대폭 감소시킬 수 있으므로 정밀 위치제어용으로 아주 적합하다.

한편, 최근 높은 에너지 밀도를 가지는 희토류계 영구자석이 계속 개발되고 있어 슬롯리스형 PMLSM의 추력밀도가 슬롯형 PMLSM보다 낮음에도 불구하고 급가속용 구동원으로서 충분한 성능을 가진다. 따라서 슬롯리스형 PMLSM은 리니어 시스템에서 요구하는 고속성능과 정밀위치제어성능을 동시에 만족하는 최적의 구동원으로 평가받고 있다[4-6].

표 1 해석 모델의 사양

Table 1 Specification of Analysis model

	항 목	기 호	값 [단위]
가동자 (영구자석)	극 수	$2p$	12
	잔류자속밀도	B_r	1.2 [T]
	영구자석 높이	h_p	12 [mm]
	영구자석 길이	l_p	73.5 [mm]
	영구자석 폭	ω_p	26 [mm]
	극 피치	τ	28.5 [mm]
고정자 (전기자 철심)	코일당 턴수	N	650 [턴]
	코일 높이	h_c	11 [mm]
	코일 폭	ω_c	12 [mm]
	코일 사이 간격	d_c	12 [mm]
	상전류(최대치)	I	2.66 [A]
공극의 길이		l_g	2 [mm]

3. 3차원 공간고조파 해석

3.1 영구자석에 의한 자계

영구자석에 의한 자계를 해석하기 위한 모델에서 영구자석의 자화 벡터는 식 (1)과 같으며, M_y 성분만 존재하고 그림 4와 같이 x, z 에 관한 함수의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\vec{M} = M_x \vec{a}_x + M_y \vec{a}_y + M_z \vec{a}_z \tag{1}$$

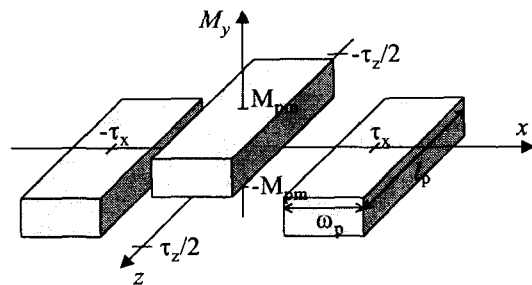


그림 4 영구자석에 의한 3차원 자화 분포
Fig. 4 3D magnetization distribution of permanent magnet

식 (1)에서 x, z 방향의 자화 성분은 "0"이고, 그림 4의 y 축 성분의 자화 분포는 푸리에 급수를 이용하여 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$M_y = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} M_{mn} \cos(mk_x x) \cos(nk_z z) \tag{2}$$

식 (2)에서, 푸리에 계수 M_{mn} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{mn} = \frac{16 M_{pm}}{m n \pi^2} \sin(m a_x \frac{\pi}{2}) \sin(n a_z \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

$$m, n = 1, 3, 5 \dots$$

여기서, 계수 k_x, k_z 는 식 (4)와 같고, α_x 는 x 방향 자극비, α_y 는 y 방향 자극비를 의미하며 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$k_x = \frac{\pi}{\tau_x}, \quad k_z = \frac{\pi}{\tau_z} \quad (4)$$

$$\alpha_x = \frac{\omega_p}{\tau_x}, \quad \alpha_z = \frac{l_p}{\tau_z} \quad (5)$$

여기서, w_p 는 영구자석의 폭, l_p 는 영구자석의 길이, τ_x 는 x 방향 자극피치, τ_z 는 z 방향 자극피치를 의미한다.

각각의 해석 영역에서의 지배방정식은 식 (6)과 (7)에서 z 방향 성분을 고려하여 나타낼 수 있다[6].

$$\nabla^2 \varphi_I(x, y) = 0 \quad (\text{공극 영역}) \quad (6)$$

$$\nabla^2 \varphi_{II}(x, y) = \frac{\nabla \cdot \vec{M}}{\mu_r} \quad (\text{영구자석 영역}) \quad (7)$$

공극 영역과 영구자석 영역에서의 지배방정식은 식 (8)의 라플라스 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

식 (8)의 미분방정식에서 일반해를 계산하면 자기스칼라 포텐셜 값의 공극과 영구자석 영역에서의 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\varphi_I(x, y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [E e^{k_m z} + F e^{-k_m z}] \cos(m k_x x) \cos(n k_z z) \quad (9)$$

$$\varphi_{II}(x, y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [G e^{k_m z} + H e^{-k_m z}] \cos(m k_x x) \cos(n k_z z) \quad (10)$$

여기서, 계수 k_{mn} 은 다음과 같이 나타난다.

$$k_{mn}^2 = m^2 k_x^2 + n^2 k_z^2 \quad (11)$$

이상으로 경계 조건으로부터 일반해의 미정계수를 결정하여 영구자석에 의한 자속밀도를 계산할 수 있다.

3.2 전기자 전류에 의한 자계

해석 모델에서 전기자 코일의 엔드링 부분은 반원의 형상이므로 이는 푸리에 급수를 나타내기가 매우 어렵기 때문에 엔드링의 형상을 직사각형으로 등가화 하여 전기자 전류에 의한 가상의 자화분포를 푸리에 급수로 나타내었다.

그림 5는 전기자 전류에 의한 자화 성분의 3차원 분포를 나타낸 것이고, 1상의 자화 분포를 식 (2)의 푸리에 급수 전개로 나타내면 M_{mn} 은 다음과 같다.

$$M_{mn} = \frac{32 M_{co}}{m^2 n^2 \pi^2} \frac{1}{k_x k_z \omega_c^2} \cdot \sin(m k_x \frac{d_c + \omega_c}{2}) \sin(m k_x \frac{\omega_c}{2}) \quad m = 1, 2, 3 \dots$$

$$\cdot \sin(n k_z \frac{l_c + \omega_c}{2}) \sin(n k_z \frac{\omega_c}{2}) \quad n = 1, 3, 5 \dots \quad (12)$$

위의 자화 분포로부터 영구자석에서와 마찬가지로 전기자 전류에 의한 자계를 계산할 수 있다[6].

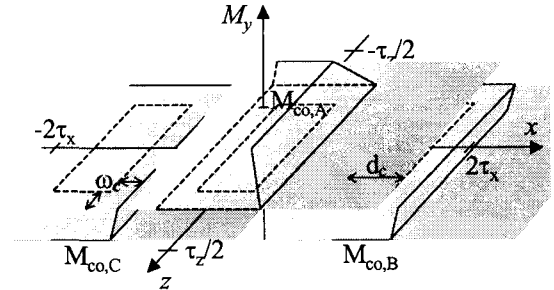


그림 5 전기자 전류에 의한 3차원 자화 분포
Fig. 5 3D magnetization distribution by armature current

3.3 특성 해석

앞서 구한 공극 자속밀도 분포로부터 슬롯리스형 PMLSM의 추력과 수직력 특성을 계산하였다. 자계 내에서 자성체에 발생하는 전자력 \vec{F} 는 그 자성체를 둘러싸는 표면에 대하여 맥스웰 응력 텐서(Maxwell stress tensor)를 폐적분 함으로써 구할 수 있다. 공극 자속밀도 분포가 x, y, z 의 3방향 성분으로 주어질 때 공극에서의 발생력은 각각 다음과 계산된다.

$$F_x = \frac{1}{\mu_0} \iint B_x B_y dx dz$$

$$F_y = \frac{1}{2\mu_0} \iint (B_y^2 - B_x^2 - B_z^2) dx dz$$

$$F_z = \frac{1}{\mu_0} \iint B_y B_z dx dz \quad (13)$$

여기서, F_x 는 추력(Thrust force), F_y 는 수직력(Normal force)을 의미한다.

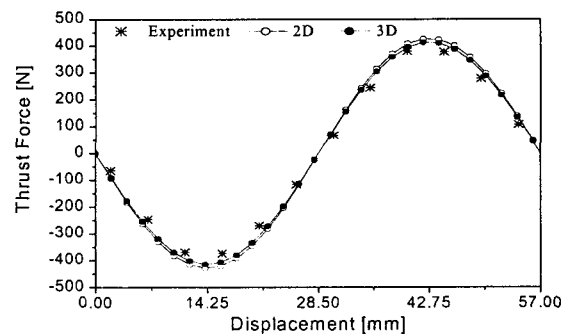


그림 6 이동자 변위에 따른 추력 특성
Fig. 6 Thrust force according to displacement

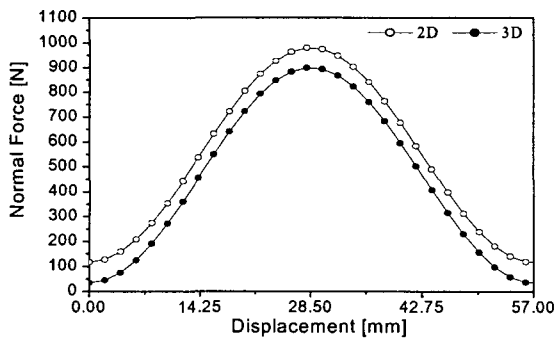


그림 7 이동자 변위에 따른 수직력 특성
Fig. 7 Normal force according to displacement

그림 6은 이동자 변위에 따른 추력 특성, 그림 7은 이동자 변위에 따른 수직력 특성을 각각 2차원 해석과 3차원 해석으로 비교하여 나타낸 것이다. 영구자석의 축방향 길이가 73.5[mm]일 때 3차원 해석 결과가 2차원 해석 결과보다 대략 추력은 3.26[%], 수직력은 8.20[%] 정도 작게 나타남을 확인할 수 있다.

4. 슬롯리스형 PMLSM의 최적화

근래에는 최적화 기법에 대한 이론적인 연구의 진전과 컴퓨터의 발달에 힘입어 비선형 최적화 기법이 발전하였고, 다른 분야에서와 마찬가지로 전동기의 설계에도 최적화 기법을 적용하여 직류전동기, 유도전동기, 및 영구자석형 전동기의 최적설계를 다룬 연구결과들이 발표되었다. 그런데, 비선형 최적화 문제에 대한 고전적인 접근방법은 경사도 감소 방법 등과 같이 Kuhn-Tucker의 최적조건 또는 라그랑제의 쌍대성(duality)에 기초한 결정론적인 방법으로서, 이 방법은 함수의 형상이 불룩한 경사면인 경우 최적해를 정확하게 찾을 수 있다는 보장을 할 수 있지만 그렇지 않은 경우 국소해밖에 찾지 못한다는 단점을 가지고 있다. 그런데, 실제 문제에서 발생하는 최적화 문제의 경우 목적함수가 불룩한 경사면을 가진다는 것을 증명하기 어려우며 대부분의 경우에는 그 성질을 만족하지 못한다고 할 수 있다. 즉, 많은 국소해를 가지고 있는 경우가 대부분이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 유전 알고리즘과 같은 확률론적인 기법들이 사용되고 있다. 이러한 방법들의 특징은 변수의 탐색이 국소해 근방에서 이루어지고 있을 경우 그 곳에서 탈출할 수 있는 방법을 제공함으로써 궁극적인 해가 국소해에 수렴하는 것을 방지한다는 것이다.

따라서, 본 논문에서는 유전 알고리즘을 Matlab를 이용하여 구현하였으며 이를 슬롯리스 PMLSM의 최적화에 적용하였다[7].

4.1 설계 변수 및 제약조건의 선정

본 논문에서는 슬롯리스형 PMLSM의 기본 모델에서 코일의 내부 폭과 영구자석의 폭을 설계변수로 하여 유전알고리즘을 이용한 최적의 모델을 찾아내고자 하였다. 여기서 최적의 모델은 최소의 무게와 체적으로 일정한 추력을 만드는 모델을 말한다.

그림 8은 해석모델의 3차원 형상이다. 그림 8에서 코일에서의 전류 밀도는 항상 동일하게 하기 위해 코일의 단면적 $w_c \times h_c$ 은 항상 일정하게 유지하여야 한다. 단면적을 유지하기 위하여 코일의 폭(w_c)의 변화에 따라서 코일의 높이(h_c)가 정해지므로 설계 변수에서 코일의 높이는 제외하였다. 또, 코일의 폭과 코일의 안 간격(d_c)이 정해지면 코일의 바깥 간격도 결정되므로 제외 시켰다. 가동자에서는 영구자석의 자극 폭(w_p)만을 변화시켰고, 영구자석의 높이(h_m)은 항상 일정하게 두었다. 그리고, 2차원에서는 고려할 수 없는 변수인 z-축 방향 길이(L_z)를 변수로 정하였다.

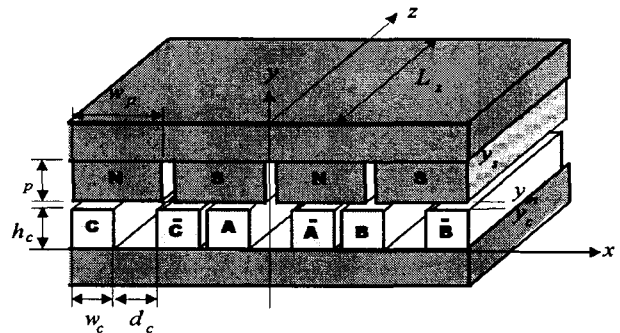


그림 8 3차원 해석모델
Fig. 8 3-dimensional Analysis model

따라서, 입력 설계변수로는 영구자석의 폭(w_p), 코일의 폭(w_c), 코일의 안 간격(d_c), z-축 방향 길이(L_z)로 설정하였고, z-축방향 길이가 늘어남으로써 추력은 계속 증가하기 때문에 제약을 주기 위하여 무게와 체적도 고려하였다. 목적함수로 추력/무게, 추력/체적을 각각 단일 목적함수로 한 경우와 위 두 가지를 결합한 다중목적으로 한 경우로 구분하였다. 제약조건은 운동방정식을 구하여 구한 발생추력을 기준으로 설정하였다.

$$F_x = F_L + m \frac{dv}{dt} + Dv \tag{14}$$

운동방정식은 식 (14)과 같다. 여기서, F_x 는 발생추력, F_L 은 부하력, m 은 가동자의 질량, D 는 점성감쇠계수(viscous damping coeff.)를 나타낸다.

표 2 설계 변수의 범위와 제약조건

Table 2 Range of design parameter and constrain

설계 변수	변수 범위
영구자석 폭(w_p)	$24[mm] \leq w_p \leq 28[mm]$
코일의 폭(w_c)	$8[mm] \leq w_c \leq 16[mm]$
코일의 안 간격(d_c)	$3[mm] \leq d_c \leq 16[mm]$
축방향 길이(L_z)	$66[mm] \leq L_z \leq 80[mm]$
제약조건	$447.25[N] \leq \text{발생추력} \leq 452.$

여기서, 부하력을 산정해 보면 250[N]정도이고 가동자의 무게는 10[kg]정도이므로 마찰력을 고려하여 발생추력을 계산해 보면 약 450[N]정도의 값이 된다. 따라서, 본 논문에서는 발생추력이 447.25[N]와 452.75[N]의 사이가 되도록 제약 조건을 설정하였다.

4.2 유전알고리즘의 흐름도

그림 9는 유전 알고리즘의 흐름도를 나타낸다.

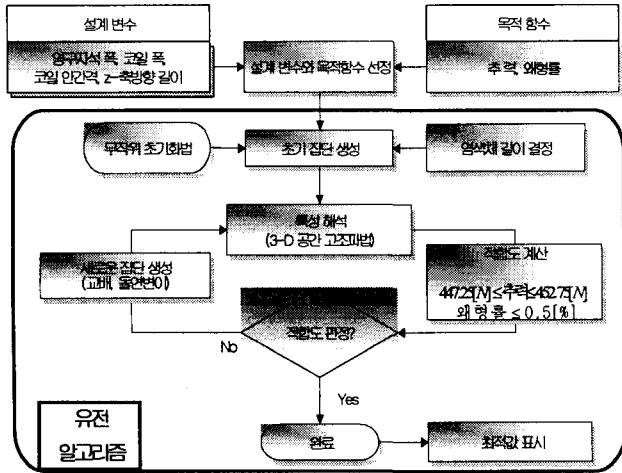


그림 9 유전알고리즘의 흐름도
Fig. 9 Flow chart of genetic algorithm

위에서 선정한 설계 변수들을 이진 string으로 변환시킨 후 결합하여 무작위 초기화법을 통하여 초기 집단을 생성하였다. 재생산 알고리즘으로는 roulette wheel selection을 이용하였다. 다중 목적함수로 최적화 시킨 경우의 목적함수는 추력/무게와 추력/체적에 각각의 초기값(기본모델의 값)을 나누어 주어 가중치가 1 : 1이 되도록 설정하였다.

4.3 최적화 결과

그림 10, 11, 12는 유전알고리즘을 이용하여 목적함수를 각각 추력/무게, 추력/체적, 무게와 체적을 1 : 1로 결합한 다중 목적함수로 한 경우의 최적화 과정을 나타내었다.

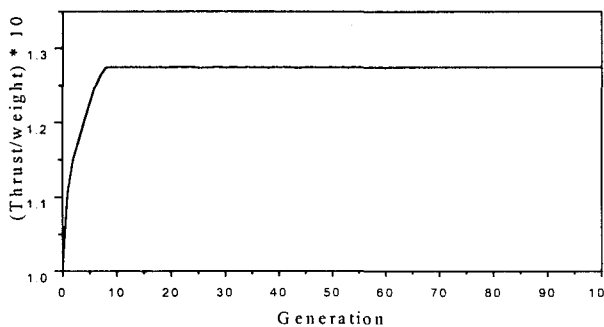


그림 10 추력/무게 최적화
Fig. 10 Optimization of thrust/weight

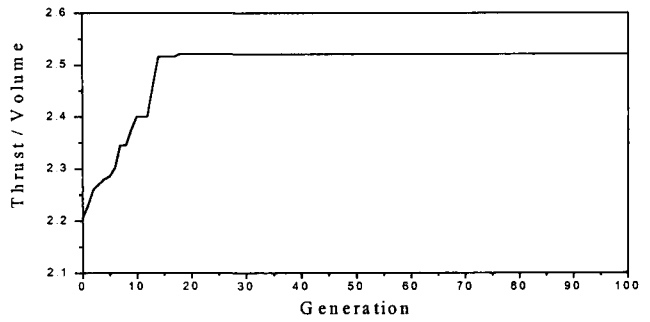


그림 11 추력/체적 최적화
Fig. 11 Optimization of thrust/volume

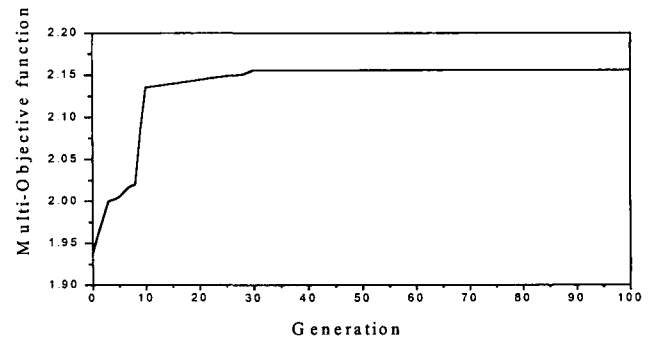


그림 12 다중목적함수를 이용한 최적화
Fig. 12 Optimization using multi-objective functions

표 3은 추력/무게와 추력/체적을 각각 최적화 시킨 모델과 다중 목적함수로 최적화 시킨 모델의 사양 및 최적화 결과를 나타내었다. 단위 무게 당 추력 비를 최적화 시킨 경우에는 초기 모델에 비해서 단위 무게 당 추력은 10.87%가 증가하였으나 단위 체적 당 추력 비는 4.93%가 증가 하였다. 또한 단위 체적 당 추력 비를 최적화 시킨 경우에는 기존 모델과 비교해서 단위 체적 당 추력은 13.10%가 증가하였으나 단위 무게 당 추력 비는 4.96%밖에 증가 하지 않았다. 그러나, 다중 목적함수를 취한 경우에는 초기 모델에 비해 추력/무게, 추력/체적은 각각 7.56[%], 7.98[%] 증가하여 소형화 및 경량화를 동시에 이룰 수 있는 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

표 3 최적화 결과 및 사양

Table 3 Result of optimization and Specification

	기존 모델	추력/무게 최대	추력/체적 최대	최적화 모델
PM 폭 [mm]	26	24.3	28	26.3
PM 축방향길이 [mm]	73.5	76.5	70	73.5
코일 폭 [mm]	12	16	15.5	16
코일 안 간격 [mm]	12	5	5.5	4
발생추력 [N]	417.434	451.8	448.2	450.716
추력/무게 [N/g]	0.115	0.1275	0.1207	0.1237
추력/체적 [N/cm ³]	2.229	2.339	2.521	2.407

4.4 특성해석

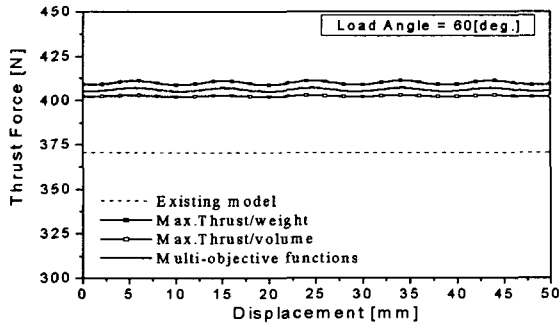


그림 13 정상상태 운전시 슬롯리스형 PMLSM의 추력
Fig. 13 Thrust force of slotless type PMLSM in steady state operation

그림 13은 기본 모델과 변화 모델에서, 영구자석을 이동하면서 부하각이 60 [deg.]가 되도록 1차축 전류의 위상을 동기시켜 계산한 정상상태 운전시의 추력을 나타낸 것이다. 여기서, 전체적인 추력이 증가한 모델일수록 추력의 리플성분도 같이 증가하는 양상을 보인다. 그러나, 추력리플이 가장 큰 모델의 경우, 추력 리플의 peak to peak값은 약 2.5 [N]으로 전체 추력의 0.6 [%]에 지나지 않고 또한 리플율이 1[%]미만 이므로 전동기의 제어 특성의 변화에는 별다른 영향을 미치지 못하리라 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 제어성능이 우수한 슬롯리스 PMLSM의 특성해석 방법으로 자속밀도의 z축 방향 성분을 고려하여 2차원 해석에서 발생하는 오차를 줄일 수 있도록 3차원 공간고조파법을 제안하였고, 영구자석의 폭, 코일의 폭, 코일 사이 간격과 축 방향 길이를 설계변수로 두어 3차원 공간고조파법과 유전알고리즘을 결합하여 최적화를 수행하였다.

슬롯리스형 PMLSM에서 3차원 공간고조파법을 이용한 특성해석 결과는 실험치와 비교하여 오차가 거의 없이 매우 정확한 결과임을 확인할 수 있었으며, 여기에 유전알고리즘을 결합시켜 여러 가지 설계 변수에 따른 최적화를 수행하여 최적화 시간을 대폭 감소 할 수 있었다.

또한, 유전알고리즘의 목적함수를 다중으로 두어 단일 목적함수일 경우에 발생하는 치우침을 해결하고자 하였고, 그 결과 초기 모델에 비해 추력/무게, 추력/체적은 각각 7.56[%], 7.98[%] 증가하여 소형화 및 경량화를 동시에 이룰 수 있는 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

기기의 최적화를 위해 다중 목적함수를 적용한 최적화 기법을 이용한다면 설계변수가 많은 전기기기를 효율적으로 설계 할 수 있을 것이라고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 출연금 등으로 수행한 지역 전략산업 석박사 연구인력 양성 산업 및 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Linear Synchronous Motors-Transportation and Automation Systems, CRC Press, 2000.
- [2] 정인성, “개선된 수치해석 기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석”, 한양대학교 박사학위 논문, 1999.
- [3] 천장성, “급가속용 선형 동기전동기의 특성해석 및 최적 설계”, 서울대학교 박사학위 논문, 1999.
- [4] Ki-Chae Lim, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, “The Novel Technique Considering Slot Effect by Equivalent Magnetizing Current”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 3691-3693, 1999.
- [5] 이주민, 강규홍, 홍정표, 김규탁, “3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 자계 및 추력특성 해석”, 대한전기학회 논문지, vol. 50, no. 6, pp. 255-262, 2001.
- [6] 안호진, 강규홍, 김규탁, “3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 기동특성 해석”, 대한전기학회 논문지, Vol. 51-B, No. 7, pp. 379-386, 2002. 7.
- [7] 진강규, “유전알고리즘과 그 응용”, 교우사, 2002. 3.

저 자 소 개



이 동 업(李東燁)

1976년 3월 29일생. 2001년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 055-279-7519
E-mail : dongyeuplee@changwon.ac.kr



김 규 탁(金奎卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~1997년 일본 早稻田大 客員研究員. 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.
Tel : 055-279-7515
Fax : 055-263-9956
E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr