

유한요소법을 이용한 제어 영구자석형 선형동기전동기의 추력특성 개선을 위한 설계

論 文
50B-5-2

Design for the Improvement of Force Characteristic in Controlled-PM LSM Maglev Carrier by FEM

全 衍 度* · 李 柱**

(Yon-Do Chun · Ju Lee)

Abstract - This paper presents the design schemes for the improvement of force characteristics in a controlled permanent magnet liner synchronous motor (Controlled-PM LSM). The dependence of motor performance on the various design schemes, such as the slot shapes, the magnetization patterns of permanent magnet and the skewing, has been investigated in detail by using finite element method (FEM). The analysis results are verified by the experiment that is performed by a testing machine. From this study, it is known that the skewing of the magnet is the most efficient method in the aspects of detent force reduction and higher force density.

Key Words : Controlled-PM LSM, magnetization patterns, skewing, slot shapes, finite element method.

1. 서 론

최근 작업물을 이송하기 위한 반송시스템으로 기존의 회전형 모터 대신 리니어모터를 이용한 반송시스템이 개발되어 실용화되고 있다. 리니어모터를 사용할 경우 회전운동을 직선운동으로 변환시키기 위한 기계적인 장치가 생략됨에 따라 손실, 소음, 진동이 적으며 특히 먼지 등이 발생되지 않는 장점이 있다. 이와 같은 리니어모터의 장점 때문에 국·내외에서 리니어모터를 이용한 자동반송장치의 개발이 활발히 이루어지고 있으며 특히 국내에서는 바퀴지지방식에 의한 자동반송장치의 개발이 있었다[1]. 그러나 먼지가 없는 청정상태가 절대적으로 필요한 반도체 웨이퍼 반송시스템이나 청정실, 병원 등에서는 바퀴접촉에 의한 분진의 영향으로 청정도 유지가 어려울 수 있다. 따라서, 이와 같은 영향을 최소화하기 위해서는 자기부상식 반송시스템이 적절하다. 자기부상방식으로 최근에 시스템의 단순화와 소비전력의 최소화를 위하여 영구자석의 흡인력을 이용하는 Controlled-PM(Permanent Magnet)이라는 신개념의 자기부상방식이 제안되었다[2][3]. Controlled-PM 자기부상방식은 부상에 필요한 전력을 최소화 할 수 있고 부상과 추진을 동시에 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, Nd-Fe-B와 같이 높은 보자력을 가지는 희토류계의 영구자석을 사용할 경우, 충분한 부상력 및 추진력을 얻을 수 있다.

제어영구자석형 선형동기전동기(Controlled-PM LSM)

의 부상에 사용되는 전력을 최소화 하기 위해서는 일정 공극 제어방식이 아닌 부하에 따라 공극이 변화하는 부상 공극 가변 방식을 사용하여야 한다[2].

영구자석은 본래 불안정한 게임으로 안정된 부상공극을 유지하기 위하여 부상제어전류에 의해서 기자력을 제어하여야 하며 이때 부상력은 영구자석에 감긴 제어권선에 흐르는 전류를 제어하여 얻어지고, 추진력은 선형동기전동기에 의하여 얻을 수 있다. 그러나, Controlled-PM LSM에서는 추에 필요한 추력, 부상력, 톨턴스력, 디텐트력(detent force)과 같이 세 가지 독립된 힘이 존재하며, 이 중 디텐트력은 추력 리플의 주요인으로서 소음 및 진동을 유발할 뿐 만 아니라, 기기의 제어성능을 악화시킨다. 따라서, 정확한 위치와 속도제어를 위해서는 추력리플의 주원인인 디텐트력을 줄여야 한다[4].

본 논문은 선형동기전동기의 추진력 특성을 향상시키기 위한 설계 연구로서 기본설계 모델에 대해 2차원 유한요소법을 이용하여 슬롯형상, 영구자석의 자화방향, 영구자석의 사구 등이 추진력 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 슬롯형태 및 영구자석의 자화방향이 구동 특성에 미치는 영향은 2차원 유한요소법을 사용하여 해석이 가능하지만, 사구를 주는 경우는 본질적으로 모델의 기하학적 구조상 3차원 해석이 필요하다. 그러나, 3차원 유한요소법은 해석시간과 메모리가 과다하게 요구되며, 이동자의 이동을 고려하여 해석할 경우 요소재분할이 필요하므로 이를 처리하기 위한 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 2차원 해석영역에 대하여 수직한 방향으로 영구자석을 잘게 분할함으로써, 영구자석의 사구효과를 고려한 2차원 해석을 수행하였다. 여러 가지 설계 사양을 고려한 해석결과는 선형전동기의 실험을 위해 제작된 시험기를 사용하여 측정된 실험결과와 비교 검토하였으며, 본 시스템의 힘 특성을 고려한 설계 사양의 여러 가지 효과를 명확히 알 수 있었다.

* 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 電子電氣컴퓨터工學部 助教授 · 工博

接受日字 : 2001年 2月 22日

最終完了 : 2001年 5月 16日

2. Controlled-PM LSM의 기본설계 및 유한요소 정식화

2.1 기본 설계

본 논문에서는 퍼미언스법에 의한 자계 해석을 통하여 영구자석의 주요치수를 결정하였으며, 안정된 부상공극에서는 전력소모가 없는 것으로 가정하였다. 본 시스템의 반송차 네 모서리에 각각 제어영구자석을 부착하므로, 반송물체를 부상시키기 위하여 필요한 힘을 구한 후, 그에 해당하는 힘을 낼 수 있는 영구자석의 치수를 식 (1) 및 식 (2)로부터 유도된 식 (3)을 사용하여 결정하였다.

$$B_m A_m = k_r B_g A_g \quad (1)$$

$$H_m l_m = k_r H_g l_g \quad (2)$$

$$A_m l_m = \frac{k_r k_r \cdot B_g^2 \cdot A_g l_g}{\mu_o B_m H_m} \quad (3)$$

여기에서 A_m 은 영구자석의 단면적, l_m 은 영구자석 길이, k_r 은 릴럭턴스계수, k_r 은 누설계수, A_g 는 공극단면적, l_g 는 공극길이, B_g 는 공극자속밀도, H_g 는 공극에서의 자계의 세기, B_m 은 자석의 자속밀도를 나타낸다.

프린팅 현상과 누설자속을 무시하면 릴럭턴스계수와 누설계수는 각각 1로 가정할 수 있으며, 이때 공극자속밀도는 0.53(T), 공극의 길이는 3(mm)이다. 식 (3)으로부터 제어자석은 잔류자속밀도 1.2(T), 보자력 145.7(A/m)인 $20 \times 2.5 \text{ mm}^3$ 체적의 Nd-Fe-B를 사용하였다. 추진력을 발생시키는 선형동기전동기의 경우는 전원주파수 $f=60 \text{ Hz}$, 선간전압 $V=50 \text{ [V]}$ 를 설계기준으로 하였으며, 식 (4), (5) 요구 출력식으로부터 기본설계모델의 주요 치수를 산출하였다.

$$\text{Power} = 2\tau f \times F \quad (4)$$

$$\text{Power} = \sqrt{3} V I \cos \theta \cdot \eta = 2\tau f \times F \quad (5)$$

위 식에서 F는 추력, τ 는 극간격, $\cos \theta$ 는 역률, η 는 효율을 나타내며, 속도는 4.5(m/s), 추력은 35(N), 출 165(W), 정격전류는 2.1 [A], 역률은 1, 효율은 0.9로 설계하였다.

기기 전체 시스템의 체적을 고려하여 분포권, 이층권, 전 절권을 사용하였으며, 매극매상 슬롯수를 1로 하여 총 슬롯수는 48개이다. 기본설계 과정에서 얻어진 특성실험 시작기용 Controlled-PM LSM의 설계 사양을 표 1에 나타내었다

2.2 유한요소 정식화

변위 전류를 무시한 준정상상태에서 자기벡터 포텐셜 A 를

이용한 Controlled-PM LSM의 2차원 지배방정식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\vec{J}_o - \vec{J}_m \quad (6)$$

여기서 μ 는 재료의 투자율, \vec{J}_o 는 1차측 권선의 전류밀도 \vec{J}_m 은 영구자석의 등가자화전류밀도를 나타낸다. \vec{J}_o 와 \vec{J}_m 은 다음과 같이 식(7), 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$\vec{J}_o = \frac{N}{S} \vec{I}_o \quad (7)$$

$$\vec{J}_m = \frac{1}{\mu_o} \nabla \times \vec{M} \quad (8)$$

여기서 N 은 슬롯내 직렬 턴수, S 는 슬롯 면적, \vec{M} 은 영구자석의 자화, μ_o 는 공기중의 투자율이다.

해석영역을 1차 삼각형 요소로 분할하고 근사해로 가정한 후, 식 (6)에 Galerkin법을 적용하여 계 방정식을 구하면 (9)와 같다.

$$[SS]\{A\} + [SC]\{I_o\} - [J_m] = 0 \quad (9)$$

여기에서, $[SS]$ 는 투자율 및 좌표치로 구성되는 계수행렬 $[SC]$ 는 권선영역의 면적과 도체수에 의해 결정되는 행렬 $[J_m]$ 은 영구자석의 자화로 표현되는 구동행렬을 나타낸다.

표 1. 기본설계 모델의 주요사양

Table 1. Specifications of the basic design model

항 목	값	
1차측	재료	SS40
	극수	16
	극간격	37.5 [mm]
	치 폭	5.5 [mm]
	슬롯피치	12.5 [mm]
	상당 직렬턴수	118 턴
	전체길이	600 [mm]
	정격입력전압	50 [V]
2차측	영구자석	Nd-Fe-B
	잔류자속밀도	1.2 [T]
	영구자석치수	20×30×2.5 [mm]
	적층폭	30 [mm]
	영구자석당턴수	335턴
	정격추력	35 [N]
	정격출력	165 [W]

또한, 맥스웰 응력텐서 T_x, T_y 를 사용하면 식 (10)과 같이 추진력과 부상력을 구할 수 있다.

$$F_x = h \oint T_x^{(e)} dl, \quad F_y = h \oint T_y^{(e)} dl \quad (10)$$

여기서 h 는 해석모델의 z 축 방향의 길이로서 철심의 적층폭이 되고, 맥스웰 응력텐서 T_x, T_y 는 다음식으로 주어진다.

$$T_x^{(e)} = \frac{1}{\mu_0} B_x^{(e)} B_y^{(e)} n_y \quad (11)$$

$$T_y^{(e)} = \frac{1}{2\mu_0} (B_y^{(e)2} - B_x^{(e)2}) n_y \quad (12)$$

여기서 $B_x^{(e)}, B_y^{(e)}$ 는 한 요소내 자속밀도의 x, y 성분이고 n_y 는 적분경로에 수직인 외향 단위법선 벡터의 y 성분이다.

3. 해석 및 실험결과

3.1 해석 결과

3.1.1 슬롯 형상의 영향

그림 1은 사구를 고려한 Controlled-PM LSM의 3차 모델을 나타내고 있다. 그림에서 권선형태는 도시되지 않았으며, δ 는 사구각을 나타낸다.

그림 2는 슬롯형상이 디텐트력에 미치는 영향을 알아보기 위해서 공극 2.7mm에서의 한극간격(37.5mm)의 개슬롯을 가진 모델과 반폐슬롯을 가진 모델에 대한 디텐트력을 해석한 결과이다. 반폐슬롯 구조인 경우 디텐트력이 현저히 감소하였으며 개슬롯 모델의 디텐트력의 피크치가 반폐슬롯 모델의 디텐트력 피크치보다 약 5.2배 큰 것을 알 수 있었다. 디텐트력은 영구자석의 모서리 부분과 고정자 치의 모서리 사이의 상호작용으로부터 생기므로 반폐슬롯을 사용함으로써 디텐트력의 최소화할 수 있다. 그러나, 반폐슬롯을 사용함으로써 누설 리액턴스가 증가하므로 효율은 다소 떨어지게 된다.

3.1.2 자화 방향의 영향

영구자석은 잔류자속밀도 1.2[T], 보자력 145.7[A/m], 길이 20mm, 높이 2.5mm이며 자화방향은 크게 사다리꼴파, 구형파, 정현파의 세 가지 경우로 나누어 해석하였다. 그림 3은 이동자의 영구자석에 대한 여러 가지 자화방향을 나타내고 있다. 사다리꼴 자화의 경우, θ 는 기울기를 나타내며 본 논문에서는 영구자석 전체길이를 3등분하는 20.6°로 하였다.

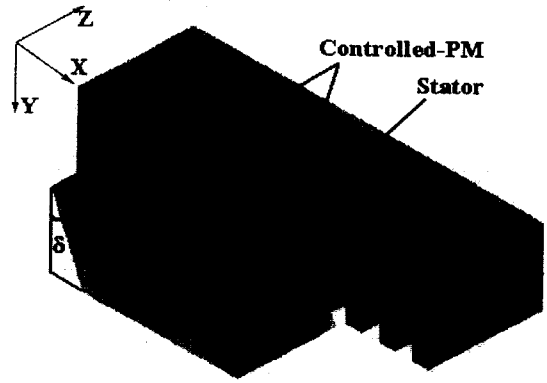


그림 1. Controlled-PM LSM의 3차원 모델
Fig. 1. 3D model of Controlled-PM LSM with the skew

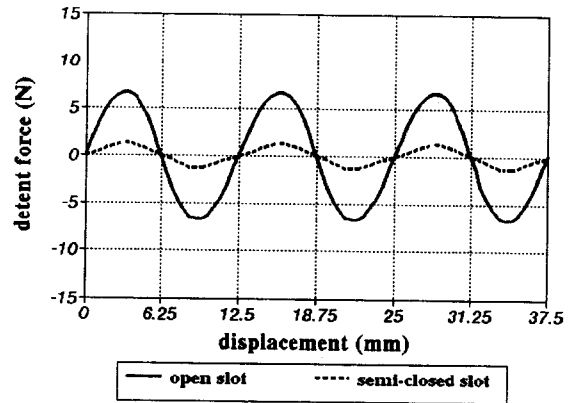
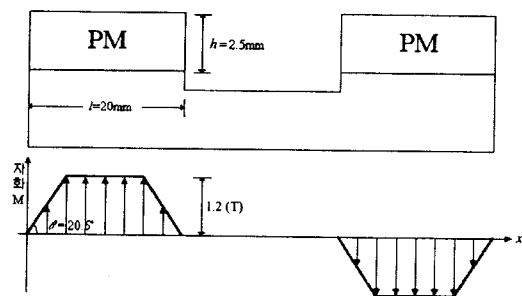
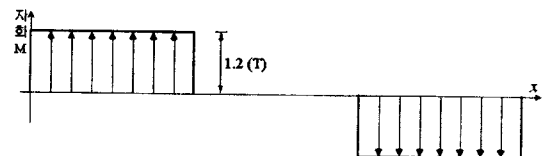


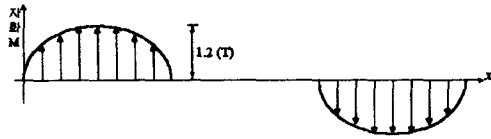
그림 2. 슬롯 형상에 따른 디텐트력 비교
Fig. 2 Comparison of the detent forces according to the slot shapes



(a) 사다리꼴



(b) 구형파



(c) 정현파

그림 3. 영구자석의 자화방향

Fig. 3. Magnetization directions in PM.

구형파는 영구자석의 모든 요소에 일정 자화값을 주면 간단히 해석할 수 있으며 정현파의 경우 사인함수를 사용하여 영구자석의 길이를 기준으로 영구자석의 각 요소별로 자화값을 계산할 수 있다.

그림 4는 제어 영구자석의 자화방향에 따른 디텐트력의 해석결과로서, 사다리꼴파의 경우는 정현파와 큰 차이가 없으며, 구형파 경우의 디텐트력의 피크치는 정현파나 사다리꼴파 보다 약 130% 크다는 것을 알 수 있다. 그러나, 그림 5에서와 같이 구형파로 자화한 경우가 다른 두 가지 경우와 비교하여 힘 밀도 측면에서 약 60%까지 효과적임을 알 수 있다. 따라서, 본 기기의 실험에서는 제어 영구자석의 자화 방향을 구형파로 하였다.

3.1.3 사구를 고려한 2차원 해석

사구를 주는 방법에는 1차축의 슬롯에 사구를 주는 방법과 2차축의 제어 영구자석에 사구를 주는 방법의 두가지가 있다. 두가지 방법은 동일한 효과를 나타내며, 영구자석에 사구를 주는 것이 슬롯에 주는 것보다 용이하므로 본 연구에서는 제어영구자석에 사구를 주는 방법을 사용하였다. 일반적으로 2차원 해석의 경우, 그림 1에서 보면 xz 평면이 y 축방향으로 무한히 연장되어져 있거나, 해석 프로그램상 일정 적층폭을 가진다고 정의한다. 그러나, 제어영구자석이 사구의 구조를 가지는 경우 y 축 방향에 따라서 해석단면의 기하학적 모양이 변화하므로 해석모델의 특성상 3차원 유한요소 해석이 필수적이며, 2차원적으로는 정확한 해석을 수행할 수 없다. 그러나, 3차원 해석은 해석시간과 메모리가 과다하게 요구되며, 이동자의 이동을 고려하여 해석할 경우 요소분할로 인해 더 많은 계산시간이 소요된다. 따라서, 본 논문에서는 사구를 고려한 2차원 해석을 수행하기 위하여 그림 6(b)와 같이 영구자석을 분할하여 해석을 수행하였다. 그림 6에서 δ 는 사구각을 나타낸다.

2차원 해석에서 사구를 고려하는 방법은 다음과 같다. $y=0$ mm(xz 평면상)에서의 영구자석의 한 모서리의 초기 위치를 0으로 잡고 2차원 해석을 수행할 경우, 적층폭 30mm의 정사각형 형태의 영구자석을 놓고 해석한 결과가 나오며, 이를 0.3mm씩 x 축 방향으로 이동하여 41번 해석을 수행하면 기준으로 잡은 영구자석의 초기 위치는 12mm가 된다. 이는 영구자석에 사구를 12mm만큼 주었을 때의 $y=30$ mm(적층폭)에서의 영구자석의 한 모서리의 위치와 일치한다. 따라서, 0mm부터 40mm까지의 각각의 41가지의 영구자석에서 나온 결과를 합하여 다시 그 수 만큼인 41로 나누어주면, 사구를 준 경우와 같은 효과를 얻을 수 있다.

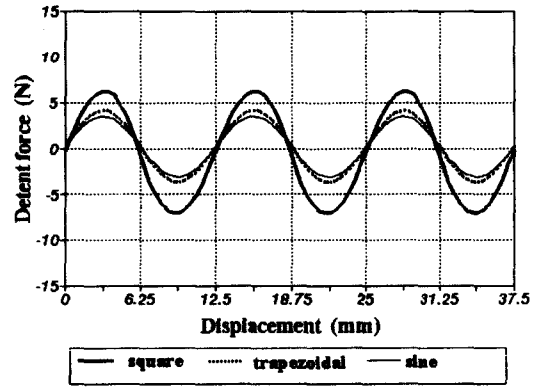


그림 4. 제어영구자석의 자화방향에 따른 디텐트력 비교

Fig. 4. Comparison of detent force according to the magnetization direction.

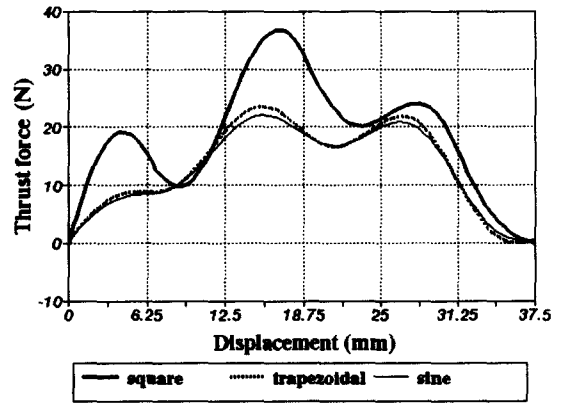


그림 5. 제어 영구자석의 자화방향에 따른 추진력 비교

Fig. 5. Comparison of thrust according to the magnetization direction.



(a) 사구를 고려하지 않은 모델



(b) 사구를 고려한 모델

그림 6. 사구해석 모델의 영구자석 형상

Fig. 6. The shape of permanent magnet in the skew model

이와 같은 방법으로 더욱더 잘게 영구자석을 나누어 해석을 수행할 경우, 더욱 정확한 해석치를 얻을 수 있다. 영구자석의 사구를 고려한 추력 계산식은 식 (10)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{total} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n F_x \quad (13)$$

여기서 n 은 영구자석을 나눈 개수이다.

그림 7은 사구모델에 대하여 δ 의 크기를 0° , 7.6° , 5° , 21.8° 로 변화하였을 때 디텐트력을 위에서 제시한 사구를 고려한 2차원 해석방법으로 해석한 결과이다. δ 의 크기가 슬롯피치에 일치함에 따라 디텐트력이 줄어들음을 볼 수 있다.

3.2 실험 결과

3.2.1 설계 모델 및 정특성 실험 장치

그림 8은 Controlled-PM LSM의 추력특성에서 디텐트를 개선하기 위해 설계 제작된 실험장치이다. 정확한 실험값을 얻기 위하여 이동시 추진방향의 마찰력을 최소화하도록 그림과 같이 리니어 베어링을 사용하였으며, 추력 측정용 로드셀을 내부에 부착하였다. 또한, 부상력 측정을 위하여 위에 두 개의 부상력 측정용 로드셀을 부착하였다. 측정된 데이터들은 베어링의 잔류 마찰을 고려하여 보정하였다.

3.2.2 실험 결과

그림 9는 1차측 입력전류의 실효값이 3[A]일 경우, 공극 길이를 각각 1.7mm, 2.7mm, 3.7mm, 4.7mm로 변화하였을 때 추력의 해석 및 실험결과를 나타낸다. 실험결과는 구속 상태에서 부하각이 90도인 경우의 측정값으로 각 위치마다 로드 셀을 사용하여 추력을 측정하였다. 공극이 증가함에 따라서 쇠교자속의 성분이 작아지므로 추력 또한 감소함을 알 수 있다. 최소오차는 공극이 1.7mm인 경우로 2.6%이며 최대오차는 공극이 4.7mm인 경우로 6.2%이고 평균오차는 4.47%이다.

그림 10은 영구자석의 코일에 입력하는 전류값의 변화에 따라서 각 공극길이(1.7mm, 2.7mm, 3.7mm, 4.7mm)에서 부하각 90도인 경우의 부상력을 측정한 결과이며 그림 11은 그림 10에서의 실험치에 대해서 공극길이의 변화를 x축으로 하여 나타낸 결과이다. 입력 전류값이 증가함에 따라서 부상력 또한 증가하며 공극의 증가에 따라서 부상력이 감소함을 알 수 있다. 안정된 부상공극을 얻기 위하여 제어영구자석 코일의 입력전류를 정(+), 역(-)방향으로 인가하였으며 그때의 부상력을 측정하였다.

그림 12는 기기의 부상 안정 공극이 2.7mm이고, 1차측 입력전류가 3[A]이며 제어영구자석에 사구를 주지 않았을 경우 부하각에 따른 추진력의 해석 및 실험결과에 대한 비교를 나타낸다. 해석치와 실험치의 오차는 최대 6.33%이다.

그림 13은 그림 12에서와 동일한 조건을 주고 제어영구자석에 사구를 주었을 경우 부하각에 따른 추진력의 해석 및 실험

결과에 대한 비교를 나타낸다. 해석치와 실험치의 오차는 최대 7.53%이다. 그림 12, 13으로부터, 사구를 준 모델이 사구를 주지 않은 모델에 비해 전체적인 힘 밀도는 같으나, 슬롯의 각 모서리부분에서 발생하는 디텐트력이 상당히 줄어들음을 알 수 있다.

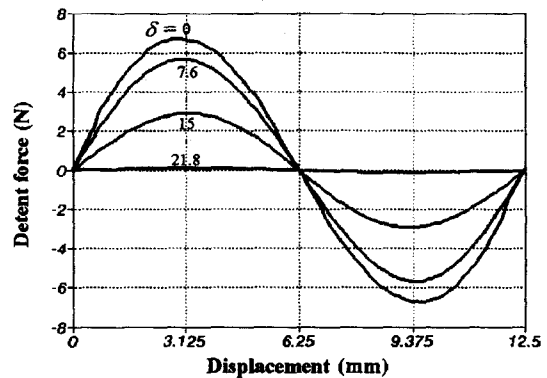


그림 7. 사구모델의 δ 에 따른 디텐트력
Fig. 7. The detent force according to skew angle δ

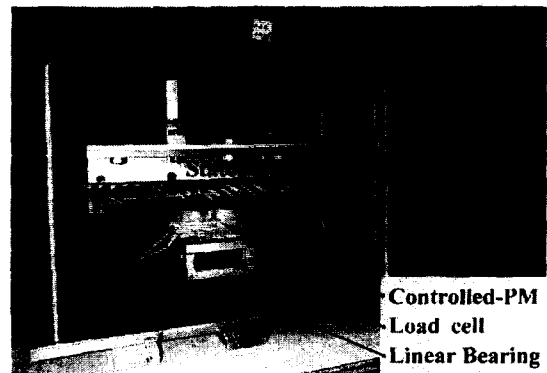


그림 8. Controlled-PM LSM의 정특성 실험장치
Fig. 8. The experimental set for the static characteristic of the controlled-PM LSM

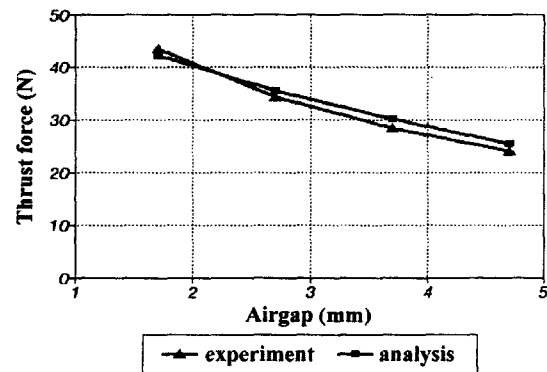


그림 9. 공극의 크기에 따른 추력 특성
Fig. 9. The characteristic of the force according to the airgap

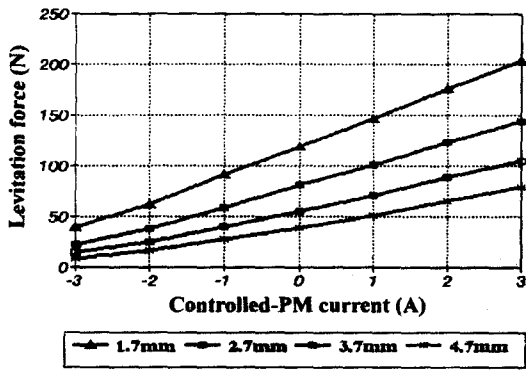


그림 10. 제어영구자석 전류변화에 따른 각 공극에서의 부상력 특성
 Fig. 10. The characteristic of levitation force according to the Controlled-PM currents

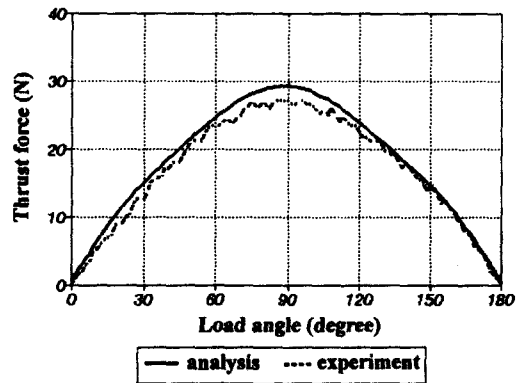


그림 13. 사구를 준 경우 부하각에 따른 추진력 특성
 Fig. 13. The thrust characteristic according to the load angle in skew model

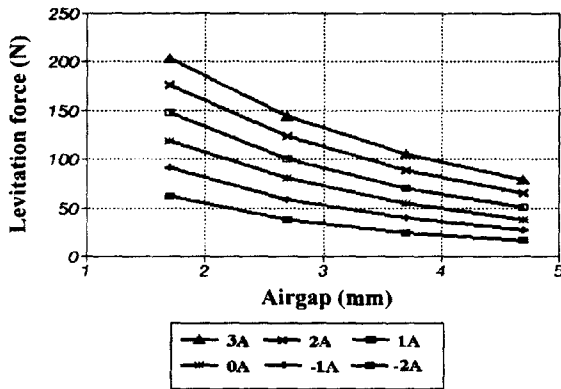


그림 11. 공극 길이 변화에 따른 제어영구자석 전류에 대한 부상력 특성
 Fig. 11. The characteristic of the levitation force according to the airgap length

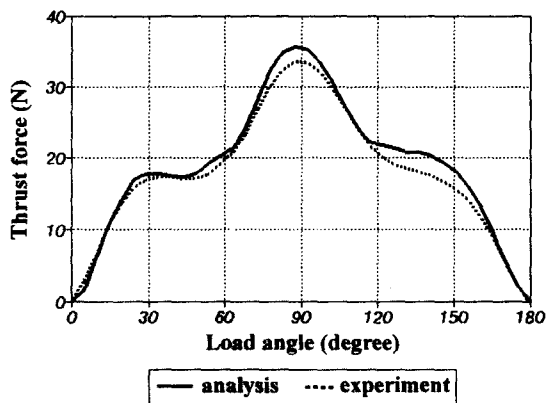


그림 12. 사구를 주지 않은 경우의 부하각에 따른 추진력 특성
 Fig. 12. The thrust characteristic according to the load angle without considering the skew

4. 결 론

본 논문에서는 제어영구자석형 선형동기전동기(Controlled-PM LSM)의 슬롯 형태, 영구자석의 자화방향 및 영구자석 사구가 디텐트력의 저감에 미치는 영향을 살펴보았다. 사구를 가지는 영구자석의 경우 기존의 2차원 해석방법으로 불가능하므로 본 논문에서는 해석단면을 변화시켜 영구자석의 사구를 고려하였다. 기본설계 모델에 대해 2차원 유한요소 해석을 통하여 해석결과와 실험결과를 비교 검토한 결과 해석의 타당성을 검증할 수 있었다. 해석 결과로부터, 슬롯형상과 영구자석의 자화를 각각 반폐슬롯, 구형과 자화로 하였을 경우, 추력리플의 주요 원인이 되는 디텐트력을 줄이고, 힘 밀도를 증가시킬 수 있음을 확인하였으며, 영구자석을 사구로 설계하는 것이 기기의 구동특성을 향상시킬 수 있었다. 본 연구 결과는 Controlled-PM LSM의 설계시 디텐트력 저감 및 성능 향상에 유용한 참고 자료가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Dal-Ho Im, et al, "Development of auto-conveyor system using linear induction motor," *Inter. Session of '90 National Convention Record I.E.E.J.*, pp. 1.85-1.92, 8, 1990.
- [2] K. Yoshida, J. Lee and T. Omura, "Levitation and propulsion motion control of controlled-PM LSM maglev carrier," *Proceedings of ICEM'96*, vol. II, pp. 154-159, 1996.
- [3] G. Henneberger and D. Rodder, "Contactless transportation vehicle with 4 hybrid-excited magnets and an energy saving levitation control," *Proceedings of LDIA'95*, pp. 105-108, 1995.
- [4] T. Yoshimura, H. J. Kim, M. Watada, S. Torri and D. Ebihara, "Analysis of the reduction of detent force in a permanent magnet linear synchronous motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 31, no. 6, pp. 3728-3730, 1995.

저 자 소 개



전 연 도 (全 衍 度)

1970년 3월 4일 생. 1996년 한양대 전기 공학과 졸업. 1998년 한양대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학 원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2290-0342

E-mail : yondo@hotmail.com



이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기 공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구 소 연구원. 1997년 일본 큐슈대 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공학). 1997년 한국 철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전 자전기공학부 조교수.

Tel.: 02-2290-0342.

E-mail : julee@hanyang.ac.kr