

유한요소법에 의한 제어영구자석형 선형동기전동기의 구동 특성 향상

이형우, 이 주, 김영태\*, 이철직\*\*  
 한양대학교 전기공학과, \*원주대학 전기공학과, \*\*대림대학 전기공학과

The Improvement of Force Characteristic in Controlled-PM LSM  
 Maglev Carrier by FEM

Hyung-Woo Lee, Ju Lee, Young-Tae Kim\*, Cheol-Jick Ree\*\*  
 Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University,

\*Dept. of Electrical Eng., Wonju national College, \*\*Dept. of Electrical Eng., Daerim College.

**Abstract** - This paper presents the design schemes for the improvement of force characteristics in Controlled permanent magnet linear synchronous motor (CPMLSM). The dependence of motor performance on various design schemes, such as the slot shapes, magnetizing patterns of PM and skewing, have been investigated in detail by using FEM and experiment. From this study, it is known that in the various design schemes, skewing is most efficient in the aspects of force characteristic, efficiency and force density.

1. 서 론

제어영구자석형 선형동기전동기(CPMLSM)는 무전력 부상제어기법을 사용할 경우 시스템을 부상시키기 위한 전력이 필요하지 않고, 또한 부상력과 추진력을 동시에 얻을 수 있다는 장점을 갖는다[1]. 충분한 부상력 및 추진력을 얻기 위해서는 Nd-Fe-B와 같이 높은 보자력(Hc)을 가지는 영구자석을 사용하여야 하며, 추진력은 LSM에 의하여 얻을 수 있다[2].

CPMLSM의 부상에 사용되는 전력을 최소로 하기 위해서는 일정공극 제어방식이 아닌 부하에 따라 공극이 변화하는 부상 공극 가변 방식을 사용하여야 한다[1]. 영구자석은 본래 불안정한 계이므로 안정된 부상공극을 유지하기 위하여 부상제어전류에 의해서 기자력을 제어하여야 하며 이때 부상력은 영구자석에 감긴 제어권선을 제어하여 부상을 시키게된다. 이때 배터리의 재충전 없인 제로 전력 부상 추진 제어기술이 요구되어진다[3]. 따라서, 본 기기는 무접촉 액츄에이터나 공장 자동화, 사무 자동화, 반도체 공정 등을 위한 반송차에 사용되어 질 수 있으며 이러한 응용을 위하여 힘 특성이 최적화 되어져야한다.

CPMLSM에서는 추진에 필요한 추력, 톨턴스 토크, 디텐트력과 같이 세 가지 독립된 힘이 존재한다. 디텐트력은 추력리플의 주 요인으로서 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라, 기기의 제어성능을 악화시킨다. 따라서, 정확한 위치와 속도제어를 위해서는 추력리플의 주 원인인 디텐트력을 줄여야한다. 이러한 디텐트력은 슬롯형상, 영구자석의 자화방향, 사구와 같은 세 성분을 최적화 함으로써 줄일 수 있다.

본 논문에서는 2차원 유한요소법을 사용하여 각 설계 형태에 따른 제어영구자석형 선형동기전동기의 힘특성을 예측하였다. 슬롯 형태 및 자화가 구동특성에 미치는 영향은 2차원 유한요소법을 사용하여 해석이 가능하지만, 사구를 주는 경우는 본질적으로 모델의 기하학적 구조상 2차원적으로는 해석이 안되므로 정확한 해석을 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 그러나, 3차원 유한요소법은 해석시간과 메모리가 과다하게 요구되며, 이동자의

이동을 고려하여 해석할 경우, 요소재분할이 필요하다는 단점이 있다. 따라서, 영구자석을 잘게 분할함으로써, 사구를 고려한 2차원 동특성해석을 수행하였다.

여러 가지 설계 사양을 고려한 해석결과는 선형 전동기의 시험을 위해 제작된 시험기를 사용하여 측정한 실험결과와 비교 검토하였으며, 본 연구로부터 모터의 힘 특성을 고려한 설계 사양의 여러 가지 효과를 명확히 알 수 있었다.

2. 기본 설계, 해석 및 실험

2.1 기본 설계

본 연구에서는 퍼미언스법에 의하여 CPMLSM을 설계하였다. 영구자석의 기자력은 그 체적에 비례하여 발생하므로 제어영구자석의 치수는 자기회로를 구성하여, 안정된 부상공극에서 제로 전력 부상이 이루어지도록 결정하였다. 본 기기에서는 제어영구자석으로서 잔류 자속 밀도가 1.2(T), 보자력은 11600(Oe)인 Nd-Fe-B를 사용하였다. 퍼미언스법에 의해 얻어진 CPMLSM의 기본 설계 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 기본설계 모델의 주요사양

항 목	값	항 목	값
극간격	37.5 mm	자석재질	Nd-Fe-B
치 폭	5.5 mm	자석치수	20×30×2.5 mm <sup>3</sup>
슬롯피치	12.5 mm	적 층 폭	30 mm

2.2 유한요소 정식화

변위 전류를 무시한 준 정상상태에서 자기벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 를 이용한 CPMLSM의 지배방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (1)$$

여기에서  $\vec{J}_0$ 는 1차측 권선의 전류밀도,  $\vec{J}_m$ 은 등가자화 전류밀도,  $\mu$ 는 재료의 투자율이다.  $\vec{J}_0$ 와  $\vec{J}_m$ 은

$$\vec{J}_0 = \frac{N}{S} I_0, \quad \vec{J}_m = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{M} \quad (2)$$

N은 직렬턴수, S는 슬롯 면적,  $\vec{M}$ 은 영구자석의 자화밀도,  $\mu_0$ 는 공기중의 투자율이다.

해석영역을 1차 삼각형 요소로 분할하고 근사해로 가정한 후, 식 (1)에 가중잔차법의 하나인 Galerkin법을

적용하여 제 방정식을 구하면 식 (3)과 같다.

$$[SS^{(e)}]\{A^{(e)}\} + [SC^{(e)}]\{I_o^{(e)}\} - [J_m^{(e)}] = \{R^{(e)}\} \quad (3)$$

여기에서,  $SS_{ij}^{(e)} = \frac{\nu}{4\Delta^{(e)}}(c_{ie}c_{je} + d_{ie}d_{je})$ ,

$$SC_{ij}^{(e)} = -\frac{\pm N\Delta^{(e)}}{3S} \text{ 이다.}$$

본 논문에서는 다음 식 (4)와 같이 맥스웰 응력법을 사용하여 부상력과 추진력을 구했다.

$$f_n = \frac{1}{2\mu_o}(B_n^2 - B_t^2), \quad f_t = \frac{1}{\mu_o}(B_n B_t) \quad (4)$$

식 (4)에서  $B_n$ 은 적분면에 대해서 수직성분의 자속밀도이고,  $B_t$ 는 접선성분의 자속밀도이다.

### 2.3 정특성 실험장치

그림 1은 CPMLSM의 정특성을 측정하기 위하여 사용된 실험장치이다. 그림에서와 같이 CPM의 이동은 정속도 위치이동 전동기에 의하여 일정 속도로 수행되어질 수도 있고, 바를 수동으로 돌려서 수행할 수도 있도록 되어있다. 또한, 부상력을 측정하기 위하여 고정자측의 각 네 모서리에 로드셀을 부착하였으며, 추진력과 디텐트력을 측정하기 위하여 또다른 로드셀을 CPM 부분의 끝에 부착하였다. 추진방향의 마찰력을 최소화하도록 그림과 같이 리니어 베어링을 사용하였으며, 측정된 데이터들은 베어링의 잔류 마찰을 고려하여 보정하였다.

## 3. 해석 결과

### 3.1 슬롯 형상의 영향

그림 2에 CPMLSM의 3차원 모델을 도시하였다. 그림에서  $\delta$ 는 사구사이며, 사구를 고려한 2차원 해석시 한 슬롯피치인 12.5 mm를 사용하였다.

그림 3은 공극 2.7 mm에서의 한 극간격 (37.5mm)의 개슬롯을 가진 모델과 반폐슬롯을 가진 모델 사이의 디텐트력의 차이를 보여준다. 그림에서 보듯이, 반폐슬롯 모델의 디텐트력이 개슬롯 모델의 디텐트력보다 약 다섯 배정도 작음을 알 수 있다. 디텐트력은 영구자석의 모서리 부분과 고정자 치의 모서리 사이의 상호작용으로

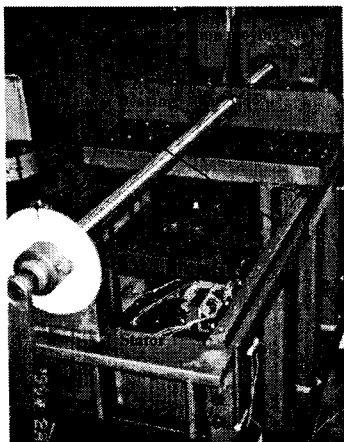


그림 1. 선형모터의 실험장치

부터 생기므로 반폐슬롯을 사용함으로써 디텐트력의 최소화할 수 있다. 그러나, 반폐슬롯을 사용함으로써 누설 리액턴스가 증가하므로 효율은 다소 떨어진다.

### 3.2 자화방향의 영향

영구자석의 자화방향은 크게 사인파, 사다리꼴파, 구형파의 세가지 경우로 나눌 수 있다. 그림 4의 아래에 보인 CPM의 자화방향에 따른 디텐트력의 해석결과에서 알 수 있듯이, 구형파 경우의 디텐트력은 사인파나 사다리꼴파보다 약 두 배정도 크며, 사다리꼴파의 경우는 사인파와 거의 비슷한 크기를 나타냄을 볼 수 있다. 그림 4는 또한, 세 가지 자화방향에 따른 기기의 힘특성도 나타내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이, 사다리꼴파와 사인파가 구형파와 비교하여 디텐트력의 측면에서는 효과적이거나, 힘 밀도면에서는 약 두 배 가량 낫다. 따라서, 본 기기의 실험에서는 제어 영구자석의 자화방향을 구형파로 하였다.

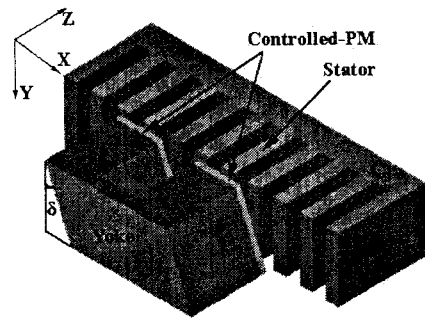


그림 2. CPMLSM의 3차원 모델

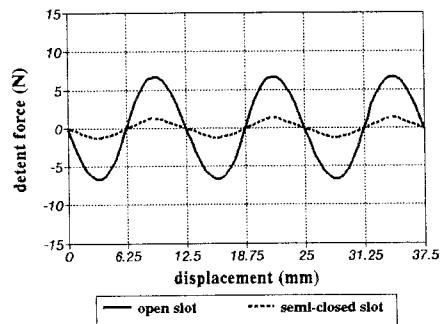


그림 3. 슬롯 형상에 따른 비교

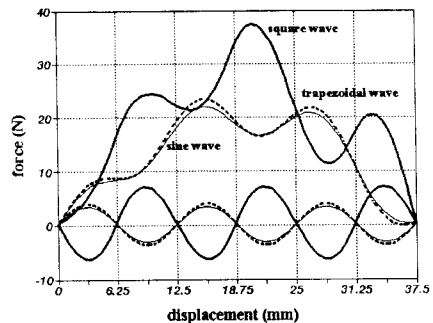


그림 4. 영구자석의 자화방향에 따른 비교

### 3.3 사구의 영향

사구를 주는 방법에는 1차측의 슬롯에 사구를 주는 방법과 2차측의 제어 영구자석에 사구를 주는 방법의 두 가지가 있다. 두가지방법은 동일한 효과를 나타내며, 영구자석에 사구를 주는 것이 슬롯에 주는 것보다 용이하므로 본 연구에서는 제어 영구자석에 사구를 주는 방법을 사용하였다. 사구는 해석모델의 특성상 3차원 유한 요소 해석이 필수적이거나, 3차원 해석시 해석시간과 메모리가 과도하게 요구되며, 이동자의 이동을 고려하여 해석할 경우, 요소재분할이 필요하므로, 본 논문에서는 사구를 고려한 2차원 동특성 해석을 수행하기 위하여 그림 5(b)와 같이 영구자석을 40등분으로 잘게 분할하여 해석을 수행하였다. 그림에서  $\delta$ 는 사구각을 나타낸다. 그림 6은 사구모델에 대하여  $\delta$ 의 크기를 변화시킴에 따른 디텐트력을 해석한 결과이다.  $\delta$ 의 크기가 슬롯피치에 일치함에 따라 디텐트력이 줄어들음을 볼 수 있다.



(a) 초기 모델



(b) 사구 모델

그림 5. 사구해석 모델의 영구자석 형상

### 3.4 실험 결과

그림 7은 기기의 부상 안정 공극이 2.7mm이고, 1차측 입력전류가 3[A]이며 사구를 주지 않았을 경우의 부하각에 따른 추진력의 해석 및 실험결과에 대한 비교를 나타내고, 그림 8은 그림 7에서와 동일한 조건을 주고 사구를 주었을 경우의 부하각에 따른 추진력의 해석 및 실험결과에 대한 비교를 나타낸다. 그림 7, 8로부터, 사구를 준 모델의 경우가 사구를 주지 않은 모델의 경우에 비하여 힘 밀도는 거의 같으나, 슬롯의 각 모서리부분에서 발생하는 디텐트력이 상당히 줄어들음을 알 수 있다. 또한 CPMLSM과 같이 공극이 큰 전기기기의 해석에서 2차원 해석만으로는 충분한 해석정밀도를 얻을 수 없으나 힘의 정성적인 특성은 정확하게 예측할 수 있어 설계에 유용하게 이용될 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 CPMLSM의 구동특성에 있어서의 슬롯 형태, 영구자석의 자화방향, 사구의 영향을 퍼미언스법을 이용하여 설계한 모델에 대하여 유한요소법을 이용한 해석과 실험을 통하여 검토하였다. 본 연구로부터 슬롯 형태, 영구자석의 자화방향, 사구 등이 기기의 구동특성 향상에 영향을 미치며, 특히 토크리플의 주된 원인이 되는 디텐트력을 줄이고, 효율과 힘 밀도의 측면에서 사구를 주는 것이 가장 효과적임을 알 수 있었다. 기기의 구동특성에 대한 본 검토는 이와 유사한 기기의 설계시 유용하게 사용될 수 있으리라 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] K. Yoshida, H. Takami, A. Hasuike, T.Hirakawa, J. Lee, T. Omura, A. Sonoda, "Levitation and propulsion motion control of controlled PM LSM Maglev carrier", Proc. of ICEM94, p.21, sept, 1994.
- [2] S. Nasar, I. Boldea, 'Motors : Linear Electric Theory, Design and Practical Application', Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [3] Henneberger, G., Rodder, D., "Contactless Transportation Vehicle with 4 Hybrid-Excited Magnets and Energysaving Levitation Control", LDIA95, p.105-108, 1995.
- [4] T. Yoshimura, H. J. Kim, M. Watada, S. Torri, D. Ebihara, "Analysis of the Reduction of Detent Force, in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magn., Vol. 31, No. 6, p.3728-3730, 1995.

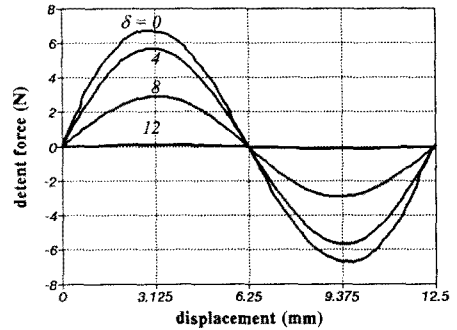


그림 6. 사구모델의  $\delta$ 에 따른 디텐트력

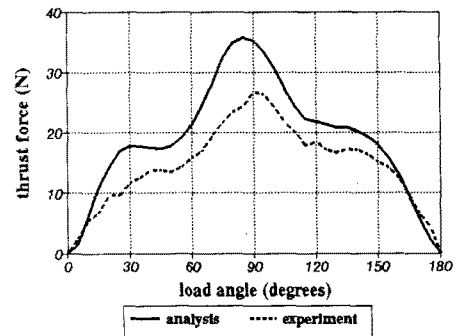


그림 7. 사구를 주지 않은 경우의 부하각에 따른 추진력 특성

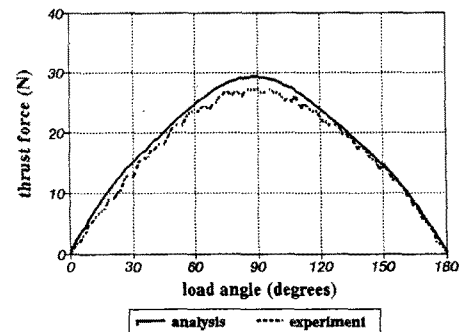


그림 8. 사구를 준 경우의 부하각에 따른 추진력 특성