

**유한요소법과 위상제어를 이용한 선형직류전동기의
추력리플 저감에 관한 연구**

최재학, 민병욱, 이주, 임태빈*, 성하경*, 김석태**
한양대학교 전기공학과, *전자부품연구소, **기술표준원

**Thrust Ripples Reduction in the Moving Magnet Type LDM
Using FEM & Phase Control**

Jae-Hak Choi, Byoung-Wook Min, Ju Lee, Tae-Bin Im, Ha-Gyeong Sung, Suk-Tae Kim
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University,

*Precision Motor Center of Korea Electronics, **Agency for Technology and Standards.

Abstract - A brushless and slotless DC linear motor(LDM)employing a movable set of neodymium-iron-boron type of magnets has high performances in advantages of large thrust per weights and accurate position control. But the Moving Magnet LDM produces thrust ripples owing to mainly end-effects, shape and magnetization of permanent magnets and so on. This paper represents the improvements of thrust ripples using the finite elements methods and phase control topology.

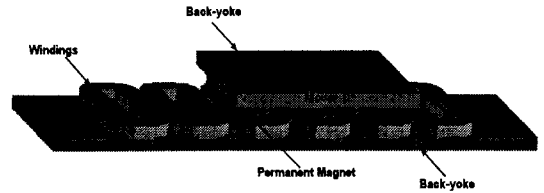


그림 1. MMLDM의 외형도

표 1. 연구모델의 주요사항

항 목	사 양
영구자석	Nd-Fe-B alloy Hc:860 kA/m Br: 1.15 T
극 수	4극
극 간 격	18 mm
영구자석의 높이	5 mm
영구자석의 폭	12 mm
공극의 길이	1.0 mm
가동자의 길이	72 mm
가동자의 폭	60 mm
코일당 턴수	864 mm
코일간격	145 mm
계철의 재질	Iron steel
상 수	3
공극자속밀도	0.3 [T]
코일저항(25℃)	3[Ω]
유기전압상수	5.12[V · S/m]
추력 상수	5.8[N/A]
정격 추력	5[N]
정격 속도	0.25[m/sec]
정격 전류	0.5[A]

1. 서 론

선형직류전동기는 직류전원을 전류시켜 이동자계를 생성하여 계자와의 상호작용에 의해 직선운동을 하는 전동기로서 특히 영구자석이 가동되는 경우 가동자석형 직류선형전동기(Moving Magnet Linear DC Motor : MMLDM)라고 한다. MMLDM은 단위 중량당 추력밀도가 크고 정밀한 위치제어가 가능하여 정밀한 위치제어가 가능한 공작기이용이나 공장이나 사무자동화 설비에 응용될 수 있다[1]. 이와 같은 분야에 응용하기 위해서는 구동 중에 추력변동 및 속도변동을 최소화하여야 한다. LDM의 추력변동은 영구자석의 자화패턴, 프링징자속 및 이동방향의 단부효과에 의해서 발생할 수 있다. 특히 단부효과는 추력변동을 발생시키는 중요한 요인으로 고정밀기기의 응용을 위해서는 단부효과의 영향을 최소화하여야 하며 전동기의 형상을 최적화 하거나 위상제어에 의해 단부효과를 최소화할 수 있다[2].

본 논문에서는 유한요소법과 위상제어알고리즘을 결합한 해석기법을 도입하여 추력리플을 최소화할 수 있는 위상제어에 관한 연구를 수행하였다. 유한요소해석법으로는 2차원적인 방법을 사용하였으며 가동자의 운동을 고려하기 위해 이동요소방법을 도입하였다. 또한 외부의 펄스폭 변조(PWM)인버터와 위상제어계에 의해 전류제어를 수행하므로 정형적인 3상전류를 가정하여 전류원 해석을 수행하였다.

2. 연구모델 및 유한요소정식화

2.1 연구모델

본 연구에서는 영구자석이 이동하는 브러시리스와 DC 선형전동기를 연구모델로 하였다. 그림1은 연구모델의 외형도를 나타내고 있다. 이동자는 4극으로 구성되어 있고 36개의 전기자 코일을 고정자로 하고 코일간격과 극간격의 비는 3/4로 하였다. 영구자석으로는 추력밀도를 높이기 위하여 잔류자속밀도가 1.15T 인 희토류계의 Nd-Fe-B 영구자석을 사용하였다. 또한 전기자는 3상의 평형전류가 흐르도록 제어하였다. 표2는 연구모델의 주요 사항을 나타내고 있다.

2.2 지배방정식

영구자석을 포함한 맥스웰 방정식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu_o [(1 + \chi_m) \vec{H} + \vec{M}] \quad (3)$$

$$\nu = \frac{1}{\mu_o (1 + \chi_m)} \quad (4)$$

$$\mu_o \vec{M} = \vec{B}_r \quad (5)$$

$$\vec{H} = \nu (\vec{B} - \mu_o \vec{M}) \quad (6)$$

자기벡터 포텐셜 \vec{A} 와 등가 자화전류 \vec{J}_m 는 다음과

같다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

$$\vec{J}_m = \nabla \times (\nu \mu_0 \vec{M}) \quad (8)$$

여기서, \vec{H} 는 자화의 세기이며, \vec{M} 는 자화이다. (1)-(8)식으로부터, 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\nu (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (9)$$

2.3 유한요소정식화

식(9)의 지배방정식으로부터 Galerkin법을 적용하면 식(10)의 대수방정식으로 얻을 수 있다.

$$\sum_{e=1}^E [[S^e] \{A^e\} - \{f^e\} - \{g^e\}] = 0 \quad (10)$$

여기서,

$$[S^e] = \frac{\nu^e}{4\Delta} \begin{pmatrix} b_i^2 + c_i^2 & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_i b_j + c_i c_j & b_j^2 + c_j^2 & b_j b_k + c_j c_k \\ b_i b_k + c_i c_k & b_j b_k + c_j c_k & b_k^2 + c_k^2 \end{pmatrix}$$

$$\{f^e\} = \frac{J_o \Delta}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \{g^e\} = \frac{\nu \mu_0}{2} \left(M_x \begin{pmatrix} c_i \\ c_j \\ c_k \end{pmatrix} - M_y \begin{pmatrix} b_i \\ b_j \\ b_k \end{pmatrix} \right)$$

2.4 추력, 자속밀도와 쇄교자속

계자가동형 LDM은 계자자속이 일정하기 때문에 추력과 역기전력은 각각 전자기 전류와 속도에 비례한다. 따라서 발생추력은 전류와 자속의 곱으로 나타낼 수 있으며, 여기서 추력은 맥스웰 응력법을 이용하여 계산하였다.

$$F_x = \int_l \frac{w}{2\mu_0} \{ n_x (B_x^2 - B_y^2) + 2n_y B_x B_y \} dl \quad (11)$$

여기서 n_x 와 n_y 는 단위 법선방향벡터이며, w 는 적층폭과 B 는 자속밀도이다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & A_z \end{vmatrix} = i \frac{\partial A_z}{\partial y} - j \frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (12)$$

여기서,

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta} (d_i A_i + d_j A_j + d_k A_k)$$

$$B_y = \frac{\partial A_z}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta} (c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k)$$

극당 쇄교자속은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\lambda = N \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = N(A_1 - A_2) w \quad (13)$$

여기서, N 은 코일 턴수이고, A 는 평균 벡터포텐셜값이다.

3. 위상제어방법

본 연구에서 사용한 이동마그네트형 LDM은 전기자를 코어리스형으로 구성하였으므로 디텐트 힘(Detent Force)이 발생하지 않으나 가동자의 양단부가 유한한 길이를 가지고 있으므로 단부에서 자기저항이 증가하고 누설자속이 커지게 된다. 이러한 단부에서의 누설자속의 영향의 공극자속밀도가 약간 감소하고 추력에 영향을 준다. 전동기의 상과 극의 분포는 그림 2에 나타내었다.

일반적인 회전형 브러시리스 전동기에서 쇄교자속이 정현적으로 변하면 3상 정현파 전원에 의한 2상 또는

단상구동방식은 토크리플을 최소화할 수 있다. 그러나 본 기기와 같이 단부의 영향이 있을 경우에는 쇄교하는 코일변이 1개인 구간이 발생하므로 발생추력이 변동을 하게 된다. 따라서 정밀한 위치제어나 속도제어의 응용이 어렵게 된다. 본 연구에서는 이러한 추력변동을 최소화시키기 위해서 5상여자 방식을 제안하였다.

4. 해석결과

4.1 요소분할 및 자속선도

그림 3은 해석모델의 요소분할도로서 절점수는 3118개이며, 요소수는 5948개이다. 본 연구에서는 이동요소기법을 사용하여 해석을 수행하였다. 그림 4는 가동자가 초기위치에서 10mm이동하였을 경우의 공간 자속분포 계산결과이다. 그림에서와 같이 단부에서의 자속은 프링징과 누설자속이 있음을 알 수 있다. 그림 5는 일정한 가동자의 위치에서 공극자속밀도의 분포도를 보이고 있다. 그림에서와 같이 가동자안에서의 공극자속밀도보다 단부에서의 자속밀도가 누설자속의 영향으로 작아짐을 알 수 있다.

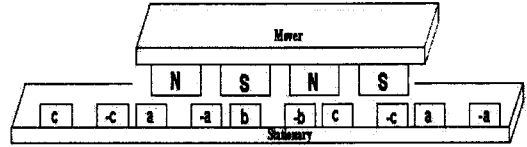


그림 2. 전기자 코일의 상과 극 분포도

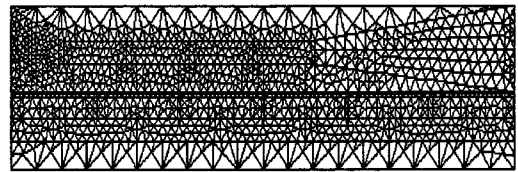


그림 3. 해석모델 요소분할도

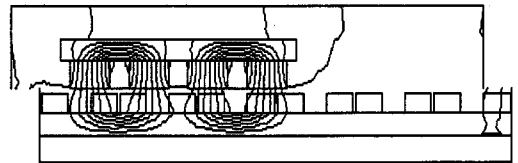


그림 4. 이동을 고려한 해석모델의 자속선도

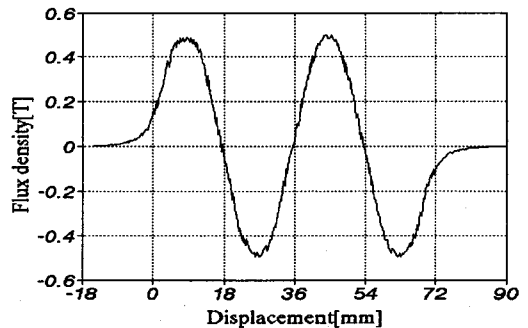


그림 5. 영구자석의 자속밀도 분포도

5. 결 론

본 논문에서는 정밀위치제어에 사용될 수 있는 이동마그네트형 선형직류전동기의 추력특성 개선에 대하여 검토하였다. 본 연구결과 3상 평형전류에 의한 발생추력은 단부의 영향에 의해 변동율이 큼을 알 수 있었으며 이러한 추력변동을 보상하기 위해서 5상 구동방식을 채용할 경우 단부의 추력을 보상하여 추력변동율이 크게 개선됨을 해석적으로 확인할 수 있었다. 앞으로 추력변동율의 감소를 위하여 최적의 착자조건 및 구동전류조건 및 정상등의 연구를 수행할 경우 LDM의 정밀제어에 유용한 데이터를 얻을 수 있을 것으로 판단한다.

(참 고 문 헌)

- [1] L. Honds and K. H. Meer, "A linear D.C. motor with permanent magnets", Philips Tech. REV. (Netherlands), Vol. 40, No. 11-12, pp. 329-337, 1982.
- [2] Y. Akiama, "Current situation and problems of industrial linear DC motors", Vol. MAG-84-97, pp. 9-18, 1984.
- [3] Magnetic Actuators Technical Committee, "Linear Motors and Their Applications", I.E.E. of Japan, pp6-14, 1987

그림 6은 구형파로 착자된 영구자석을 속도 0.25 m/sec로 8극피치(144mm) 이동시킬 경우의 a상에 유기되는 역기전력 파형을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 초기에는 역기전력이 0이고 코일변이 자속과 쇄교하기 시작하는 위치부터 역기전력이 유기 된다. 이때 초기에는 쇄교하는 코일변이 1개이므로 코일이 가동자부분에 완전히 들어갈 때까지 유기 되는 기전력에 비하여 약 1/2의 유기기전력이 유기 된다. 이와 같은 현상은 가동자가 유한하여 생기는 현상(단부효과)이다.

그림 7은 전류원 제어에 의해 3상 평형 전류가 흐를 경우의 해석에 사용된 전류곡선을 나타내고 있다.

그림 8은 평형 3상전류에 대한 3상 구동방식과 5상 구동방식의 추력 특성곡선을 보이고 있다. 그림에서와 같이 3상 구동방식은 단부에서 쇄교하는 코일변의 수가 1개인 부분이 존재하므로 인하여 추력변동폭이 크게 될 수 있다. 그러나 5상 구동방식의 경우 단부에서의 추력감소분을 추가된 2상 회로에서 보상하여 주기 때문에 추력변동율이 극히 작아짐을 알 수 있다.

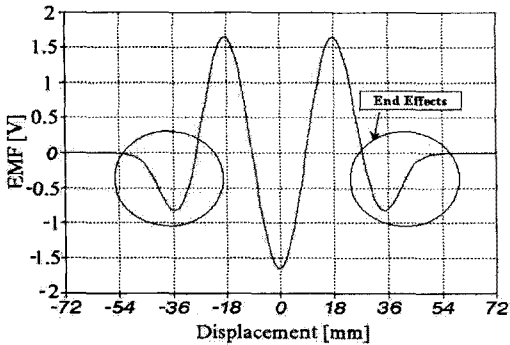


그림 6. 역기전력의 분포도

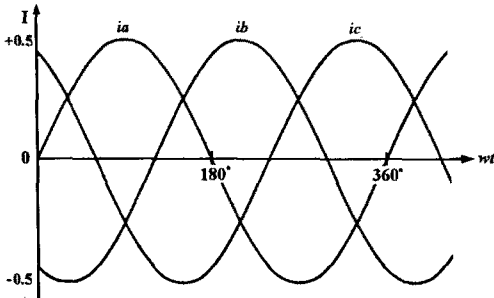


그림 7. 구동전류파형

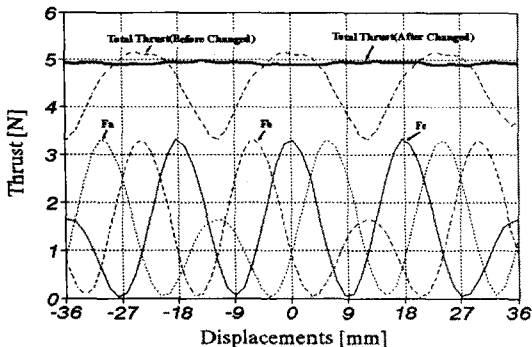


그림 8. 전체 추력의 분포도