

LDM의 추력 리플저감에 관한 연구

임달호*, 권병일*, 김학련**, 진병재*
 *한양대학교·전기공학과 **서울산업대학교 전기공학과

A Study on Reducing Thrust Ripple of LDM

Dal-Ho Im*, Byung-Il Kwon*, Hak-Lyun Kim**, Byoung-Jae Jin*
 *HanYang Univ. Electrical Eng. **Seoul Nat'l Polytechnic Univ. Electrical Eng.

Abstract :

LDM, easy to minute position control, is using as X-Y plotter or other recording instruments. Brushless LDM has better properties than the conventional Brush type LDM in many aspects.

This paper presents magnetic flux density distribution by FEM and a way to reduce thrust force ripple particulary in low speed drive. And we apply this method to a real mode of LDM. This LDM is operated by IBM-PC host computer and uses rotary encoder to make position signal.

1. 서론

1960년대 이후 선형전동기에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있으며, 특히 1970년대에 들어서면서 선형전동기를 정밀 서보계에 도입하기 위한 연구가 진행되어 기록계기용 전동기로서 리니어 직류모터(LDM : Linear DC Motor)가 개발되기 시작하였다. 최근에 들어서 정보기기, 자동화기기등에 사용되는 소형 모터 구동시스템의 고성능화가 요구되고 있는 가운데 리니어 직류모터는 추력 대 질량비가 크고, 서보계를 구성할 때 제어 성능이 매우 우수하므로 고성능, 고정밀성을 요구하는 각종 로보트, 레코더, 하드디스크등에 위치제어용 모터로서 주목받고 있다. [1][2]

브러시리스형 LDM은 정밀한 위치제어나 속도조절이 용이하므로 기록기나 X-Y 플로터등에 쓰인다. 본 연구에서는 브러시모터의 추력리플을 줄이기 위한 여러방법[6] 중에서 전류제어방법을 LDM에 도입하기로 한다. 유한요소법(FEM : Finite Element Method)을 이용하여 전기자코일이 위치한 곳의 자속분포를 구하고, 각 상 입력전류를 구하는 방법을 사용하여 저속운전시 더욱 문제되는 추력리플을 감소시키는 방법을 제시한다.

2. 시작기 LDM의 구조

로보트, 반송용등으로 사용되는 LDM은 고정밀 위치제어를 필요로 하며 철심형을 채택할 경우 가동자의 위치에 따른 퍼미언스 변화로 입력전류와 무관한 코깅력이 발생하여 모터의 추력 특성 및 정밀위치제어에 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 정밀서보계에 적용하기 위하여 코깅력을 무시할 수 있는 공철심형(Coreless type)LDM을 모델로 선정 하였으며 그 사양 및 제원은 표 1, 표2와 같다.

표 1 LDM의 사양

Table 1 Specification of LDM

항 목	치 수
정격추력	6 [N]
정격속도	0.2 [m/sec]
정격전압	5 [V]
정격전류	0.5 [A]

표 2 LDM의 주요 제원

Table 2 Design Parameters of LDM

항 목	치 수
영구자석 치수	12 x 50.8 x 5 [mm]
영구자석재질	회토류 (N-33H)
	잔류자속밀도 보 자 력
	1.15 [T] 860 [kA/m]
착자방향 두께	5 [mm]
총 영구자석수	4 [개]
턴 수	145 [Turns]
도체의 단면적	0.12 [mm ²]
코일의 부피	15 x 50.8 x 4 [mm ³]

LDM은 보통 MM형(Moving Magnet type; 가동 자석형)과 MC형(Moving Coil Type; 가동 코일형)으로 나누어진다.

구조적으로 브러시리스형이 되기 위해서는 영구자석 가동형인 MM형이 되어야 하므로 본 연구에서도 MM형으로 하였다. 따라서 가동자에는 어떠한 전원도 인가되지 않는다. 구성과 배치는 그림 1과 그림 2와 같다.

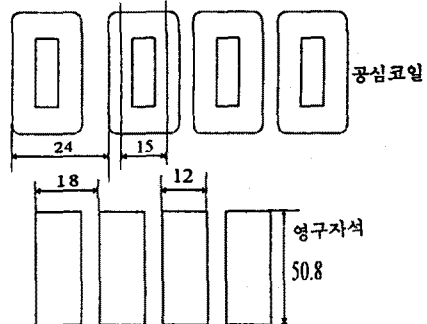


그림 1 코일과 영구자석의 배치
 Fig.1 Distribution of coil & magnetic

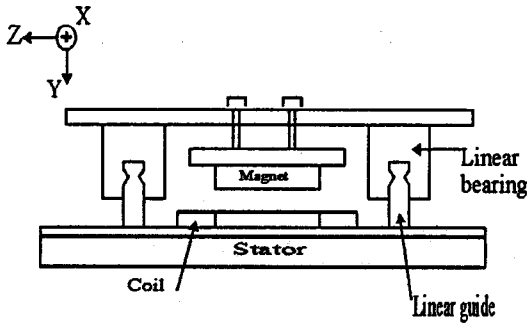


그림 2 LDM 서보시스템의 구성
Fig. 2 Structure of LDM Servo System

3. FEM에 의한 LDM의 자속분포

해석 시작기를 2차원적 FEM으로 해석하기 위해서 다음과 같이 가정하였다. [7]

- 1) 전류밀도는 Z방향만 존재한다.
- 2) 재료의 특성은 등방성이다.
- 3) 영구자석의 재질은 이방성이다.

해석결과 전류인가시의 인가하지 않을때의 자속분포는 그림 3과 그림 4에서 처럼 유사하였다. 그 이유는 공심형의 경우 전류에 의한 자속의 크기는 영구자석에 의한 자속의 크기보다 1/100에서 1/1000배 정도로 작다. 따라서 본 연구에서는 추력계산에 있어서는 영구자석에 의한 자속만을 고려하기로 한다.

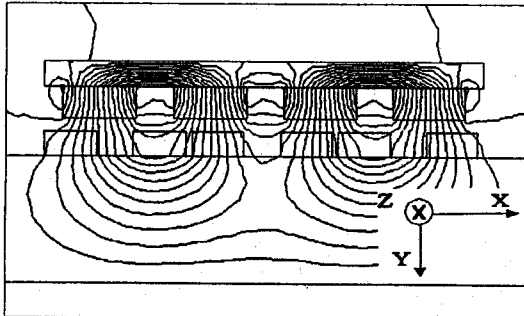


그림 3 코일에 여자전류를 인가하였을 경우 자속분포
Fig. 3 In case of Flux distribution with excitation

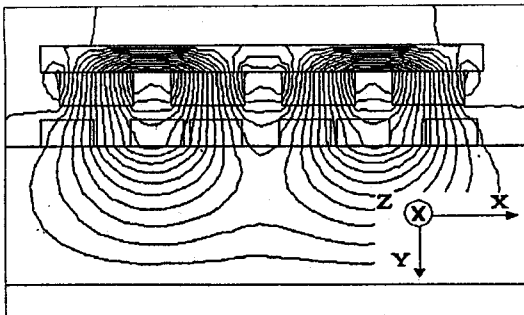


그림 4 코일에 전류를 인가하지 않았을 경우 자속분포
Fig. 4 In case of Flux distribution without excitation

4. LDM의 추력특성

4.1 추력발생의 원리

공결심형의 경우, 자속밀도가 B인 자계중에 전류 I가 흐르는 길이 l인 도체가 있다면, 이 도체에 작용하는 힘은 플레밍의 원

순법칙에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$F = Il \times B \quad (1)$$

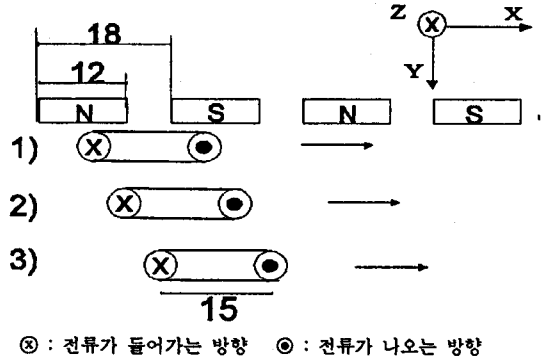
유한요소로 분할된 도체에 작용하는 힘은 x방향의 힘 F_x 와 y방향의 힘 F_y 는 다음과 같이 표현할 수 있다. [4]

$$F_x = \sum_{i=1}^n f_{ix}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_i^{(e)} \cdot \Delta_i^{(e)} \cdot B_{iy}^{(e)} \quad (2)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n f_{iy}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_i^{(e)} \cdot \Delta_i^{(e)} \cdot B_{ix}^{(e)} \quad (3)$$

여기서 $J_i^{(e)}$ 와 $\Delta_i^{(e)}$ 는 유한요소 e의 전류밀도와 면적이며 n은 도체를 구성하는 요소수이다.

전류의 방향은 $\pm z$ 방향이며 자속은 x와 y의 방향으로 존재하게 되는데 x성분은 전기자코일과 영구자석 사이에 작용하는 흡인력 및 반발력으로 작용하기 때문에 추력과는 무관하다. 따라서 추력을 발생시키는 B_y 성분만을 고려하기로 한다.



⊗ : 전류가 들어가는 방향 ⊙ : 전류가 나오는 방향

그림 5 추력발생의 원리
Fig. 5 The principle of thrust force

그림 5는 공심형LDM의 추력원리에 대한 그림이다. 전류가 흐를경우 화살표 방향은 코일을 고정시킬 경우 자석이 받는 힘의 방향이다. 코일 1개가 보는 바와 같이 코일과 자석이 배치되어 있을때 플레밍의 왼손법칙으로부터 1)의 위치에 있는 코일은 최대추력을 발생한다. 3)의 위치에 있는 코일은 아무런 힘을 내지 못하며 2)의 위치에 있는 코일은 1)과 3)의 중간의 추력을 내게 된다. 한 개의 코일은 두개의 코일변을 갖는다. 이 때 흐르는 전류의 방향은 폐회로를 이루기 때문에 서로 반대이다. 이와 같은 원리로 FEM으로 구한 자속밀도 통해 1상분 코일에 정격 DC전류를 인가할 때 발생하는 추력을 나타내면 그림 6과 같다.

여기서 U_a 와 U_b 는 U상 코일의 각변을 나타낸다.

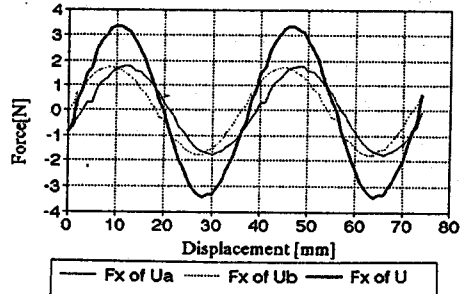


그림 6 1상분 추력
Fig. 6 Thrust Force of 1 Phase

4.2 DC전원인가시의 LDM의 추력리플

LDM에 DC전원을 인가할때의 추력은 위에서 알아본 1상분의 추력을 공간적으로 120도 위상차를 갖는 3상분의 합성으로 이된다. 따라서 코일 3개의 추력분포는 그림 7과 같이 된다.

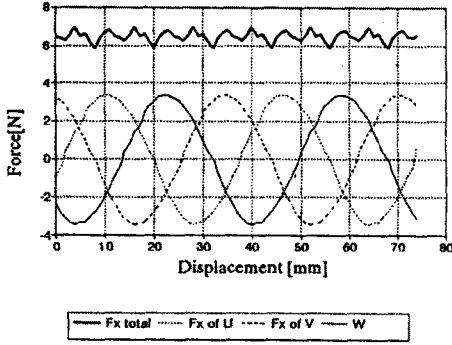


그림 7 DC 전원인가시의 추력
Fig. 7 Thrust Force of DC input

그림 7에서 추력은 항상 일정하지 않고 6[N] 근처에서 리플이 생기는 것을 알 수 있다.

추력리플은 다음 식으로 정의된다. [6]

$$Ripple = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_{max}} \quad (4)$$

식 4에서 알 수 있는 바와 같이 저속에서 리플이 더 커지며, 따라서 고속일때 보다 더 문제가 됨을 알 수 있다.

4.3 LDM의 추력리플 저감

두개의 코일변으로 구성되는 코일의 중앙에서의 자속밀도 B_y 와 각상분 전류 I_x 는 고조파를 포함하고 있다면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} B_u &= \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin kx \\ B_v &= \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k(x-120) \\ B_w &= \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k(x-240) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_u &= \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin kx \\ I_v &= \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin k(x-120) \\ I_w &= \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin k(x-240) \end{aligned} \quad (6)$$

자속밀도와 각상분전류가 기본파 성분만 존재할 경우 각 상의 추력의 합 F_x 는 식(1)로부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_x &= F_u + F_v + F_w \\ &= K \sin^2 x + K \sin^2(x-120) + K \sin^2(x-240) \quad (7) \\ &= 1.5 K \end{aligned}$$

따라서 이론적인 추력리플은 0이 된다.

그런데 전류의 크기와 위상은 하드웨어적으로 임의의 전류파형을 구현할 수 있지만 자속밀도는 공극과 기계적인 제약 때문에 정현적인 분포를 임의적으로 만들기 어렵다. 따라서 FEM으로 코일중앙에서의 자속밀도 B_y 의 주기 T와 기본파의 최대치 B_m 를 구한후 식 (5)로 가정하고 F_x 를 구한후

$$[F_x] = [I_x][B_y] \quad (8)$$

의 관계로부터

$$[I_x] = [F_x][B_y]^{-1} \quad (9)$$

를 이용하여 FEM으로 구한 실제 $[B_y]$ 를 대입해서 이상적인 추력을 낼 수 있는 $[I_x]$ 를 얻는다. 위와 같은 과정을 통해 그림 8을 구할 수 있다.

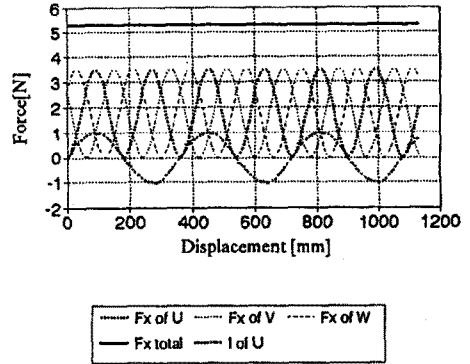


그림 8 개선된 추력특성
Fig. 8 Improved thrust force characteristics

그림 8에서 보는 바와 같은 전류를 인가해주면 리플이 거의 없는 이상적인 추력을 얻을 수 있다. 그림 8에서는 추력을 개선시키는 1상분의 전류를 나타내었으며 다른 상에 입력될 전류는 각각 120도와 240도의 위상차를 가지며, 이는 자속밀도 파형과 같은 위상이다.

5. 결론

본 연구에서는 임의의 여자자속에 대하여 일정추력을 발생시키는 전류값을 구하므로써 LDM의 추력리플을 저감하였다. 먼저 FEM에 의해 리니어 직류모터의 자속밀도를 구하였다. 이 자속에 DC 전원을 인가하였을 때의 추력특성을 구하였다. 또 같은 자속분포에서 일정추력을 발생시키는, 즉 고조파생성을 억제하는 3상 교류전류를 구하여 각각의 추력 특성을 비교하여 보았다. 그 결과 일정한 추력을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 제시한 방법을 사용하여 LDM의 저속운전시의 문제가 되는 추력리플을 감소시킬 수 있을 것이다.

6. 참고문헌

- [1] 白木學, 圖解リニア-サーボモータとシステム設計, 綜合電子出版社, 1986
- [2] Y.Kano, S.Hasebe, "MM形 LDM可動子の位置信號を光傳送する試み", 日本電氣學會, pp.59-68, 平成元年
- [3] S.A.Nasar, Iboldea Linear Motion Electric Machines, John Wiley & Sons, 1976
- [4] 任達鎮, 電氣界의 有限要素法, 東明社, 1987
- [5] Y.Dote, S.Kinoshita, Brushless Servomotors, Oxford University Press, 1990
- [6] 任泰彬, "偏平劑 브러시리스直流通電機의 特性改善을 위한 設計製作研究", 漢陽大學校 電氣工學科 博士學位論文, 1990
- [7] 崔榮峻, "리니어직류모터의 설계와 특성해석", 漢陽大學校 電氣工學科 碩士學位論文, 1992