

Linear Stepping Motor의 추력 특성 개선에 관한 연구

이상호 정도영 신미영 전선근 정중호 정원석\* 오홍석\*\*  
 삼척대학교 제어계측공학과 우창엔지니어링\* (주)이맥스 하이테크\*\*

A Study on The Characteristics Improvement of Linear Stepping Motor

S.H.Lee D.Y.Chung M.Y.Shin S.K.Jeon J.H.Chung W.S.Chung\* H.S.Oh\*\*  
 Dept.of Control & Instrumentation Eng. Samchok National Univ.  
 Woo Chang Engineering Co.\*  
 Emacs H.T.Co, Ltd.\*\*

**Abstract** - We are analyzed the characteristics of maximum thrust and normal force for new model of HB typed LSM by using Finite Element Method and Virtual Work Method. As a result of this paper, it is confirmed that maximum thrust of the enhanced LSM increased 30% without increasing the input energy and the normal force.

1. 서 론

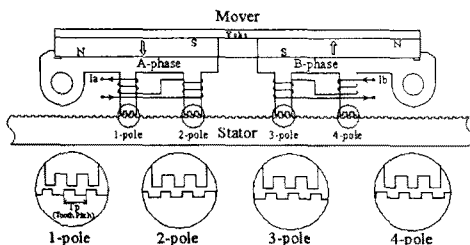
최근 선진 각 국에서 개발된 고 부가치의 리니어 스텝핑 모터(Linear Stepping Motor: 이하 LSM이라 한다.)는 운동 변환기구 없이 입력 신호에 따라 직선적인 변위를 발생시키는 다이렉트 드라이브(Direct Drive) 방식의 전동기이기 때문에 백래쉬(Backlash) 및 기타 기계적인 마찰에 의한 고장도 피할수 있고, 효율이 우수하며, 저소음화 및 소형 경량화 되어 경제적인 측면에서 회전형 전동기(Rotary Stepping Motor)에 비해 훨씬 유리한 장점을 가지고 있다. [1]-[5], [8]-[11]

그러나, 기존의 LSM은 다양한 산업 응용에 있어서 필요한 추력이 매우 부족하고, 추력에 비해 큰 흡인력이 작용함으로써 미소 갭 지지와 소형 경량화의 장애요소가 되고 있으며, 특히 높은 흡인력의 작용으로 인해 전력 손실이 매우 큰 단점이 있다. [6]-[7]

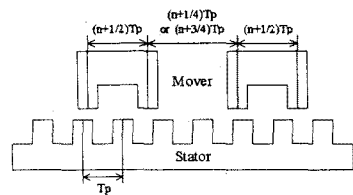
따라서, 본 논문에서는 상기의 단점을 개선하기 위하여 새로운 모델의 LSM을 제시하고, 유한요소법과 가상 변위법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 LSM에서 매우 중요한 추력과 흡인력 특성 개선을 시도하였다.

2. 2상 LSM의 구조

그림1은 LSM의 구조를 나타내고 있다.



(a) LSM의 단면도



(b) 가동자와 고정자의 치 배열  
 그림1. LSM의 구조

그림1(a)에서 가동자는 A상과 B상의 전자석이 이동 방향의 전후로 배치되어 있으며 A상의 코일은 자극1과 자극2의 극성이 서로 반대가 되도록 감겨져 있고, B상의 코일은 자극3과 자극4의 극성이 서로 반대가 되도록 감겨져 있다. 또한, 각각의 전자석에는 두 개의 자극, 즉 자극1(1-pole)과 자극2(2-pole) 및 자극3(3-pole)과 자극4(4-pole)로 되어 있으며, 그림1(b)에 나타난 것과 같이 자극1과 자극2 및 자극3과 자극4는 각각  $(n + 1/2) Tp$ (치피치)만큼 엇갈리고, 자극1과 자극3 및 자극2와 자극4는 서로  $(n + 1/4) Tp$  또는  $(n + 3/4) Tp$ 만큼 엇갈려 배치되어 있다.

3. LSM의 유한요소해석

LSM의 2차원 유한요소해석을 위하여 다음과 같이 가정한다.

- ① 영구자석에서의  $\mu = \mu_0$  이고,  $B_r$  은 일정한 크기를 갖는 벡터량이다.
- ② 영구자석 이외의 자성체에서  $\mu$ 는 일정하고,  $B_r$  은 0 벡터이다.
- ③ 철심부의 자기적 특성은 등방성이고, 자기포화는 무시한다.
- ④ 가동자의 전류밀도와 자기벡터 포텐셜은 z방향 성분만을 갖는다.

그림2는 LSM의 2차원 유한요소해석을 위한 모델을 나타내고 있다. 모든 경계에서의 포텐셜을 Zero(0)로 하였다.

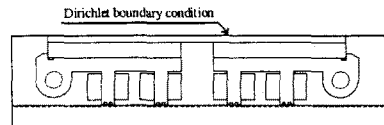


그림2. LSM의 2차원 유한요소해석 모델

#### 4. LSM의 추력과 흡인력 특성 해석

유한요소법을 이용한 추력과 흡인력 특성을 해석하는 방법에는 맥스웰 응력법과 가상변위법이 있다. 본 논문에서는 물체의 미소변위로 인한 전체 자기 수반 에너지 변화량으로부터 힘을 구하는 가상변위법을 이용하였다. [12]-[13] 전체 자기 수반에너지는 그림3의 자기포화곡선으로부터 식(1)과 같다.

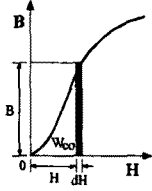


그림3. 자기포화곡선

$$W_{\omega} = \int_v \left( \int_0^H B dH \right) dv$$

$$= \int_v \frac{1}{2} B \cdot H dv \quad (1)$$

식(1)에서 해석 영역을 2차원으로 제한하면 식(2)가 된다.

$$W_{\omega} = \int_s \frac{1}{2\mu} B^2 ds \quad (2)$$

따라서, 힘  $F$ 는 자기 수반 에너지  $W_{\omega}$ 의 변화량으로 주어지므로 식(3)으로 주어진다.

$$F = \frac{\partial W_{\omega}}{\partial x} \quad (3)$$

#### 5. LSM의 추력측정 및 컴퓨터 시뮬레이션

그림4는 추력측정 블록다이어그램을 나타내고 있으며, LSM의 변위는 레이저 측정기(OVF-3001)를 이용하여 정밀한 이동거리를 측정하였고, 추력은 Force Gauge를 사용하였다.

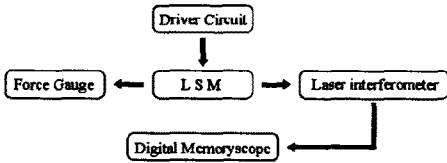


그림4. 추력측정 블록다이어그램

LSM의 추력과 흡인력 계산을 위한 컴퓨터 시뮬레이션에서는 2차원 유한요소해석 Program인 FLUX2D를 사용하였다.

그림5는 기존 LSM의 추력과 흡인력 계산을 위한 자속분포를 나타내고 있다.

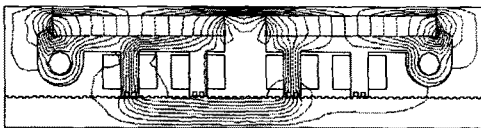


그림5. 기존 LSM의 자속분포

그림6은 기존 LSM의 가동자 변위에 대한 추력 특성을 나타내며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 계산값과 상기에서 제시한 측정방법을 이용한 측정값이 거의 일치함으로서 LSM의 추력해석 이론의 타당성을 입증하였다.

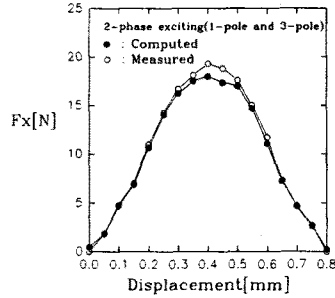


그림6. 선형 변위에 따른 추력특성

그림7은 기존 LSM의 누설자속을 제거하고 자속이 대부분에 집중되도록 가동자의 슬롯에 영구자석을 삽입한 새로운 LSM의 2차원 유한요소모델을 나타내고 있다.

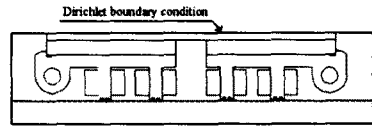


그림7. 새로운 LSM의 2차원 유한요소 모델

그림8은 새로운 LSM의 추력과 흡인력 계산을 위한 자속분포를 나타내고 있다.

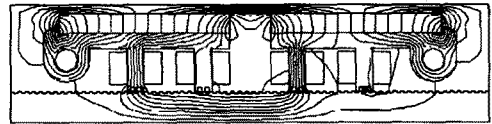


그림8. 새로운 LSM의 자속분포

그림9와 그림10은 각각 가동자 슬롯의 영구자석 값 (sBr)을 변화시키면서 계산한 최대추력과 흡인력을 나타내고 있다.

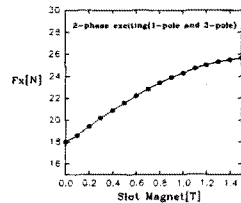


그림9. 영구자석 값(sBr) 변화에 따른 최대추력

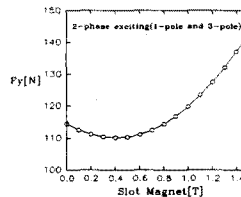


그림10. 영구자석 값(sBr) 변화에 따른 흡인력

본 논문에서는 그림9와 그림10을 비교·검토한 결과 흡인력은 기존의 LSM과 같으며 최대추력이 30% 증가 되는 슬롯의 영구자석 값( $sBr=0.8(T)$ )을 설정하였다.

그림11은 기존 LSM과 가동자의 슬롯에 영구자석 ( $sBr=0.8(T)$ )을 삽입한 새로운 LSM의 추력특성을 나타내고 있으며, 새로운 LSM의 추력이 기존 LSM의 추력에 비해 약 30% 증가 되었다.

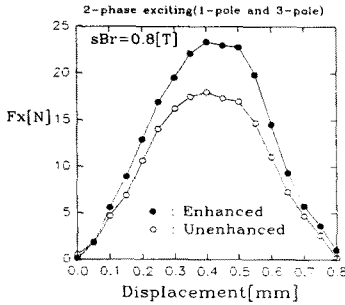


그림11. 새로운 LSM과 기존 LSM의 추력특성

그림12는 새로운 LSM과 기존의 LSM의 흡인력 특성을 나타내고 있으며, 흡인력 특성은 거의 일치하고 있다.

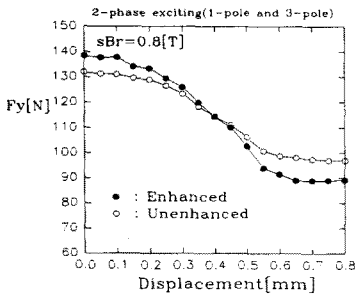


그림12. 새로운 LSM과 기존 LSM의 흡인력 특성

## 6. 결 론

본 논문에서는 새로운 모델의 LSM을 제시하고, 유한 요소법과 가상변위법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 LSM에서 매우 중요한 추력과 흡인력 특성 개선을 시도한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존의 LSM의 2차원 유한요소 모델을 설정한 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 계산값과 본 논문에서 제시한 추력 측정방법을 이용한 측정값이 잘 일치함으로써 LSM의 추력해석 이론의 타당성을 입증하였다.

2. LSM 가동자 슬롯의 영구자석 값( $sBr$ ) 변화에 따른 최대추력을 컴퓨터 시뮬레이션한 결과,  $0.8(T)$ 의 영구자석 값( $sBr$ )에서 흡인력의 변화없이 최대추력이 30% 증가하였다. 따라서, 입력 에너지 증가없이 추력을 더욱 더 강하게 할 수 있기 때문에 고효율의 LSM이 가능할 것으로 기대된다. 상기의 결과가 보여주는 것처럼, 향후 본 논문에서 제시한 추력 및 흡인력 계산을 위한 컴퓨터 시뮬레이션과 추력측정 시스템은 LSM의 설계에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

[1] Ding Zhi-Gang, "A Novel Electromagnetic Spiral Linear Step Motor", IEEE Trans. on Industry Appl., Vol.1, pp. 329-336, 1994.  
 [2] J. P. Pawletko and H. D. Chai, "LINEAR STEP MOTORS", IMCSD, Incremental Motion Control Systems and Devices, pp.V-1 ~V-11, 1973.  
 [3] S. A. Nasar, "LINEAR ELECTRIC MOTORS", IMCSD, Incremental Motion Control Systems and Devices, pp.1-6, 1987.  
 [4] Yokozuka, Baba, "Force-displacement characteristics of linear stepping motors", IEE proceeding-B, Vol.139, No.1, pp. 37-43, 1992.  
 [5] Jin-Ho Bae, Do-Young Chung, Sang-Ho Lee, "A DOUBLE 1-2 PHASE EXCITING OF LINEAR STEPPING MOTOR", SMIC'93, 1993.  
 [6] Yamaguchi, Yamada, "Reliability Evaluation of a Linear Pulse Motor for a Total Artificial Heart Driving", T. IEE Japan, pp 94-100, 1994.  
 [7] Yamaguchi, Kano, Kobayashi, Yamada, "Design Investigation of Linear Motor for Artificial Heart Driving", T. IEE Japan, pp 603-608, 1997.  
 [8] Sang-Ho Lee, Hong-Seok Oh, etc., "TWO-DOUBLE 1-2-PHASE DRIVE OF 4-PHASE STAPING MOTOR", Power Electronics & Motion Control Conference(PEMC'96), Vol.2, pp.637~639, 1996.  
 [9] Sang-Ho Lee, Hong-Seok Oh, etc., "NEW MICROSTEPPING DRIVE OF 2-PHASE LINEAR STEPPING MOTOR", Power Electronics & Motion Control Conference(PEMC'98), Vol.3, pp.3-189~3-192, 1998.  
 [10] 배진호, 이상호, 정도영, 오홍석, "V. R형 Linear Step Motor의 치형상에 따른 정추력 특성에 관한 연구", 92년 추계종합학술대회 논문집, pp. 124-126, 1992.  
 [11] 배진호, 이상호, 정도영, "자속방향형 리니어 스텝모터의 추력특성에 관한 연구", 89년 하계종합학술대회 논문집, pp. 34-36, 1989.  
 [12] M. Marinescu and N. Marinescu, "Numerical Computation of Torques in Permanent Magnet Motors by Maxwell Stress and Energy Method", IEEE Trans. on MAG, Vol.24, No.1, pp 463-466, 1988.  
 [13] T. Tarnhuvud and K. Reichert, "Accuracy Problems of Force and Torque Calculation in FE-Systems", IEEE Trans. on MAG, Vol.24, No.1, pp 443-446, 1988.