

분할 다권선형 LDM의 특성 해석

(Characteristics of double sided excitation LDM with multi-separated winding)

안흥기* · 김학련* · 신명호*

(Hong-Gi An · Hak-Lyun Kim · Myoung-Ho Shin)

*서울산업대 전기공학과

Abstract

In this paper, in order to analyzing the thrust force of LDM, it was divided by the vertical force(F_x) and the horizontal force(F_y). The magnet and winding width was determined by analyzing the magnetic flux distribution throughout the airgap of LDM. Using finite-element analysis(FEA), which is the magnetic field analysis, and proved the validity of design process, also the characteristics of LDM according to the variation of the design parameters of LDM was almost in accord with the experiment results.

1. 서론

현대 산업의 발달에 따라 각 분야에서 직접 직선운동력 발생이 가능한 리니어 모터의 수요가 급증하고 있다.

이런 리니어 모터의 종류 중에서 LDM(Linear DC Motor)은 자기디스크, 광 디스크, 각종 액츄에이터, X-Y 테이블, 정밀 조립용 Robot, 의료용 기기, 렌즈 구동용 기기, 자동 커튼, 프린터, 스캐너, 복사기, 기록용 기기, 반송용 기기, 계측기용 기기, 카메라 셔터, 부품 이송 장치 등 다양한 용도로 이용된다.

그러나, LDM의 경우, 고정자 철심을 단일권선으로 성층할 경우에는 고정자 철심 중앙부분에서 자기포화로 인해 정추력 발생이 어렵다는 단점이 있다. 따라서, 자기포화를 억제하면서 정추력을 얻기 위한 적합한 철심 폭을 결정하는 것이 필수적이다[1]~[5]. 그러나, 이 경우 LDM의 무게가 증가하게 됨으로 LDM 자체의 무게가 증가하게 되며 이로 인해 속도의 감소 및 가격면에서 비효율적인 면을 지니게 된다.

따라서, 본 논문에서는 2개의 고정자 구조로 된 양측 가동자석형 LDM을 대상으로, LDM 자체 무게의 증가 없이 철심 중앙부의 포화를 억제하면서 일정 추력을 발생시키기 위한 LDM의 고정자 권선법을 제안하였다. 추력특성을 해석하기 위하여 유한요소해석법을 이용하여, 영구자석 자극과 권선 사이의 공극에서 발생하는 힘(F)중, 수직력(F_y)과 수평력(F_x)을 분석하였다. 이로 부터 일정 추력을 발생시킬 수 있는 영구자석 폭과 권선 폭의 비를 결정하여, 고정자 권선을 분할 권선하였다.

고정자 권선이 다분할된 다권선형 LDM 실험장치를 설계, 제작하여 비교, 검토함으로써 그 타당성을 입증하

였다.

2. LDM의 구조

그림 1은 양측 여자 LDM의 기본 구조를 나타낸 것으로, 고정자는 변위에 대해 큰 추력을 발생하기 위해 양측에 연철로 된 2개의 긴 철심과 단부효과(End Effect)를 고려하기 위한 짧은 직사각형의 전기자 철심을 가지고 있으며, 여기에 여자 권선을 성층한 2중 여자 방식(Double Excite)형태로 구성되어 있다. 또한, 가동부는 고추력을 발생시키기 위해 양측 고정자의 여자 권선에 대해 총 6개의 NdFeB형 자석으로 구성되어 있다.

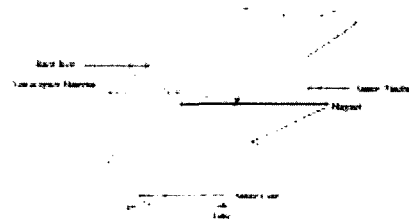


그림 1. 양측 여자 LDM의 구조

Fig. 1. Construction of double excited LDM

양측 여자 LDM의 구동방식은 2개의 전기자 철심에 여자전류를 동시에 인가함으로써 자석에서 발생하는 자속과의 상호작용으로 LDM의 가동자가 움직이게 된다.

또한, 다권선형 LDM은 동일 구조의 고정자 철심에 14

개의 독립된 권선이 감겨져 있으며, 각 권선에 독립적으로 여자전류를 인가함에 따라 가동자가 이동하게 된다.

LDM은 플레밍의 왼손법칙에 의해 구동하지만, 실제 모델을 고려하여, 이를 더욱 구체화하면 로렌츠의 법칙에 따라 다음과 같은 전자기력을 얻을 수 있다. 즉, 자계 $\overline{B_g}$ 내에 위치한 코일의 길이 l_i , 턴수 N 인 전기자 권선에 전류 i 를 인가하면, 자석에서 발생하는 자속과 전기자 권선 사이에서 발생하는 자속과의 상호작용으로 로렌츠 법칙에 의해 전자기력을 발생하게 되며, 이로 인해 추력이 발생한다.

이에 따라 발생하는 전자기력은 다음과 같다[3]~[5].

$$\overline{F} = - \int_0^{3l_c} \left[\frac{N\omega_m}{l_i} \right] \overline{B_g} \times i d\overline{l_c} \quad (1)$$

여기서, \overline{F} : 전자기력 N : 전체 권선수
 ω_m : 자석 폭 l_i : 코일 길이
 $\overline{l_c}$: 유효도체 길이 i : 여자 전류
 $\overline{B_g}$: 공극에서의 자속밀도

식(1)로부터, $3l_c$ 는 LDM의 편측만을 고려할 때, 가동자 자석 3개가 전기자 철심과의 상호작용으로 추력을 발생시키게 되는 유효 도체길이를 의미한다. 식(1)을 스칼라 형태로 나타내면 식(2)와 같다.

$$F = 3 \left[\frac{N\omega_m}{l_i} \right] B_g i l_c \quad (2)$$

따라서, 추력을 발생하는 기본 식은 식(2)를 사용하며, 이로부터 추력은 식(2)의 파라미터들에 영향을 받게 됨을 알 수 있다.

3. LDM의 권선 설계 및 특성 해석

3.1. 다권선형 LDM의 고정자 권선법

다권선형 LDM의 추력에 대한 설계를 하기 위해서는 우선, 힘의 분석이 요구된다.

자석과 권선사이에 작용하는 힘(F)은 수평력(F_x)과 수직력(F_y)의 합성 벡터가 된다. 이때 수직력은 흡인력이며 수평력은 가동자를 이동시킬 수 있는 추력 성분이 된다. 일반적으로, 추력을 크게 하기 위해서는 수평력을 크게 설계하여야 하며, 위치 정밀도를 크게 하기 위해서는 흡인력인 수직력을 크게 하여야 한다. 이를 고려하여 적합한 정추력을 발생하도록 설계하여야 하는데 이때 고

려할 사항은 영구자석 폭 대 권선 폭의 비이다.

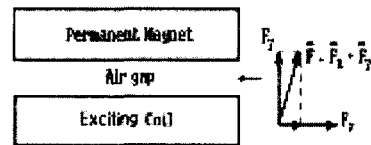
본 연구에서는 일정 추력을 발생하면서 위치결정 능력을 갖는 설계를 위해 영구자석 폭 대 권선 폭의 비를 가변하여 일정 추력을 발생시킬 수 있는 폭 비를 설정하여 설계하였다.

그림 2(a), (b) 및 (c)는 가동자인 영구자석과 고정자인 권선 폭 비에 따라 발생하는 힘의 특성을 분석한 결과로서, 그림 2(a)는 영구자석과 권선 폭의 비가 1:1인 경우로서, 이때 공극에서 발생하는 힘은 추력성분인 수평력에 비해서 흡인력인 수직력이 크게 발생함을 나타낸 것이다.

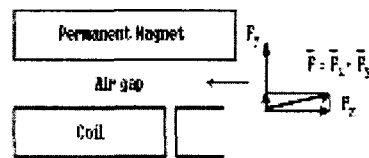
그림 2(b)는 영구자석과 고정자 권선의 폭 비가 1:0.84인 경우로서, 그림 2(a)에 비해서 공극에서 수직력은 다소 작지만 수평력이 증가함으로써 적합한 추력이 발생할 수 있는 구조이다.

그림 2(c)는 영구자석과 고정자 권선의 폭 비가 1:0.5인 경우로서 공극에서 발생하는 수평력과 수직력의 합성 추력이 그림 2(a)와 (b)의 경우보다 작다.

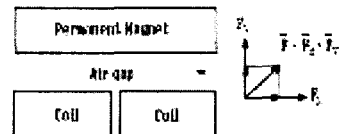
본 연구에서는 추력의 리플이 감소되며 정추력을 발생할 수 있는 힘의 해석을 위해 유한요소법을 적용하였다 [6].



(a) 폭 비 1:1



(b) 폭 비 1:0.84



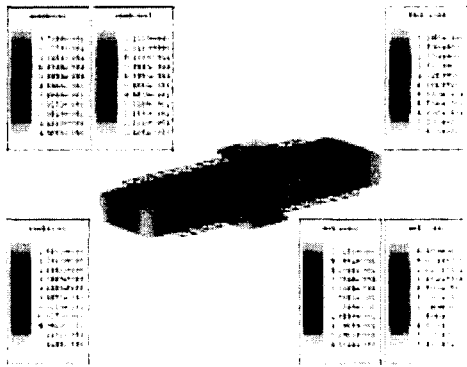
(c) 폭 비 1:0.5

그림 2. 영구자석과 권선 폭 비에 따른 추력 벡터
 Fig. 2. Thrust vector between permanent magnet and coil

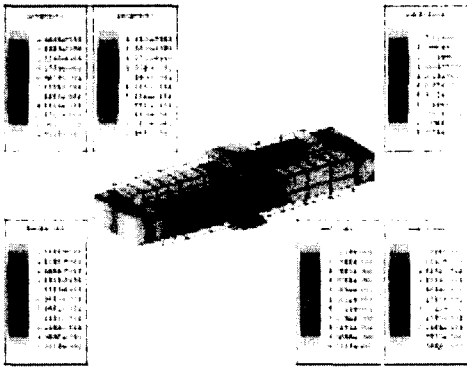
3.2. 유한요소해석

그림 3은 3D 유한요소해석을 통해 추력/질량의 비가 크면서도 일정추력을 발생하도록 설계하기 위해 영구자석 폭 대 고정자 권선 폭 비를 1:1, 1:0.84, 1:0.5로 가변하여 해석한 자속밀도 분포도로서, 그림 3(a)는 자석 폭 대 권선 폭이 1:1, 그림 3(b)는 1:0.84, 그림 3(c)는 1:0.5인 경우를 나타낸다.

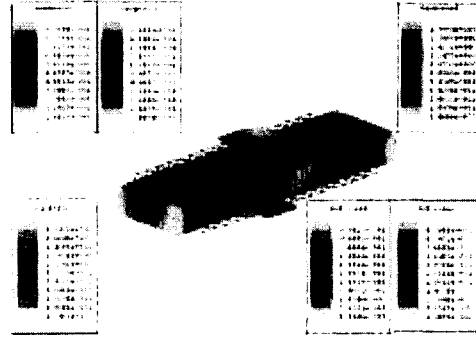
그림 4는 그림 3의 자속밀도 분포도에 따라 영구자석과 여자전류에 의해서 발생하는 공극부 자속밀도의 크기를 나타낸 것으로, 설정 범위 28[mm]대해 그림 4(a)는 자석 폭 대 권선 폭의 비가 1:1인 경우로, 공극 자속밀도는 약 0.28[T]정도이고, 그림 4(b)는 폭 비가 1:0.84일 때 약 0.28[T]정도이며, 그림 4(c)는 폭 비가 1:0.5일 때 약 0.275[T]정도의 크기를 얻을 수 있었다.



(a) 폭 비 1:1



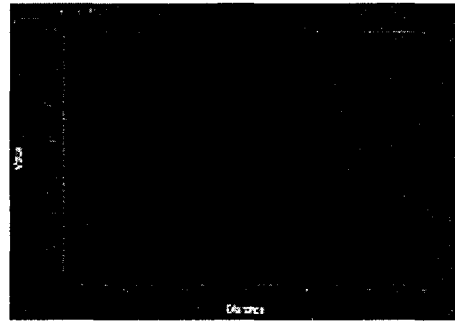
(b) 폭 비 1:0.84



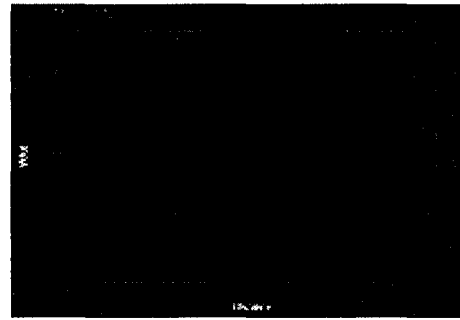
(c) 폭 비 1:0.5

그림 3. 자석 폭 대 고정자 권선 폭에 따른 자속밀도분포
Fig. 3. Flux density distribution according to magnet width vs. coil width

해석 결과로부터 자석 폭 대 권선 폭의 비가 1:0.84인 경우에 공극 자속밀도가 다른 폭 비에 비해서 왜형되지 않는 이상적인 형태로 되기 때문에 본 연구에서는 이 결과를 설계치에 적용하였다.



(a) 폭 비 1:1



(b) 폭 비 1:0.84



(c) 폭 비 1:0.5

그림 4. 자석 대 권선 폭 비에 따른 공극자속밀도 크기
Fig. 4. Flux density of air-gap according to magnet width vs. coil width

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 5에서부터 그림 7은 유한요소법의 해석결과로부터 힘의 분력을 분석한 결과로서 자석 폭 대 권선 폭 비에 따라 발생된 추력 값을 나타낸다.

그림 5는 영구자석 폭 대 고정자 권선 폭 비가 1:1, 1:0.84, 1:0.5인 경우 수평력을 유한요소법으로 해석한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 폭비 1:0.84일 때가 추력을 좌우하는 수평력이 가장 크고, 가동자 위치에 따라 일정 추력이 발생됨을 알 수 있다.

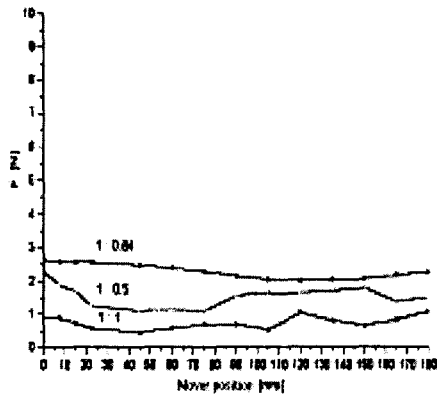


그림 5. 폭 비에 따른 수평력 F_x
Fig. 5. Horizontal Force F_x

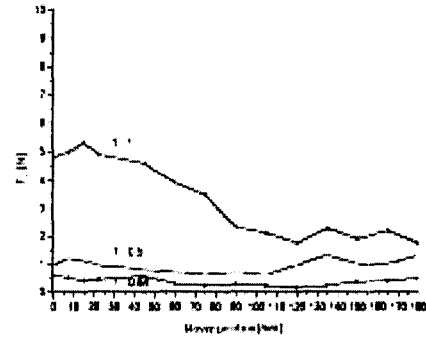


그림 6. 폭 비에 따른 F_y 수직력
Fig. 6. Vertical Force F_y

그림 6은 같은 해석방법으로 3가지 폭비에 대한 수직력(F_y)의 해석결과를 비교한 것이다. 이 경우, 폭비 1:0.84 일 때가 수직력(F_y)가 가장 작음을 알 수 있다.

그림 7은 그림 5와 그림 6을 벡터 합성한 힘의 크기를 나타내며 여기서, 본 논문에서 제안한 폭 비 1:0.84 일 때, 변위에 대해서 합성 힘의 변화가 가장 완만하여 정추력의 발생은 물론, 추력의 리플도 적게 발생함을 알 수 있다.

본 연구에서는 적합한 위치 정밀도를 지니면서 빠른 응답의 정 추력을 발생하도록 힘의 분력을 해석하였으며, 이 결과로부터 적합한 영구자석 폭 대 고정자 권선 폭 비를 1:0.84로 선정하였다. 해석 결과, 전 가동자 위치에 따라 추력의 리플이 거의 감소되고 정추력을 가지면서 큰 추력이 발생됨을 알 수 있다.

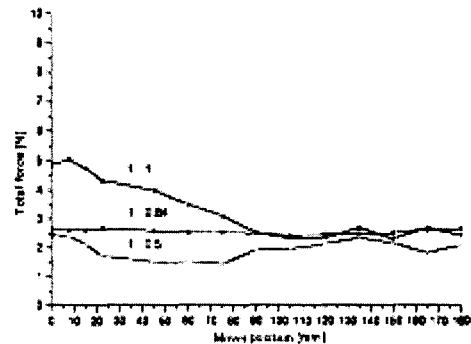


그림 7. 폭 비에 따른 합성력 F
Fig. 7. Total Force F

5. 실험 결과

5.1. 실험 장치의 구성

표 1은 지금까지의 설계 이론에 따라 제작된 다권선형 LDM의 사양을 나타낸 것이다.

그림 8은 본 연구에서 제작한 다권선형 양측 여자 LDM으로, 2중여자방식에 의해서 구동되는 가동자석형 LDM의 구조를 나타낸다. 여기서 가동자는 큰 추력을 발생하기 위해서 두 개의 자로 철심(S45C)과 6개의 NdFeB35 영구자석으로 구성하였다.

이에 따라, 양측에서 약 2배의 추력을 발생시키도록 구성하였으며, 고정자는 독립된 14개의 권선으로 구성되어 있으며, 고정자 권선을 독립적으로 여자함으로써 LDM을 움직이게 된다. 고정자 철심의 양끝에는 보조 철심을 삽입함으로써 단부효과를 고려하도록 구성하였다. 철심에 대한 고정자권선의 성층은 6층으로 하였고, 권선 굵기는 0.5[mm]로 권선하였다.

선형지지구는 LDM의 질량과 부피에 적합하며 마찰 저항이 적은 LM형 가이드레일을 사용하였다.

표 1. 제작된 LDM의 설계 치수 및 사양

Table 1. Specifications and Dimension of LDM

LDM type Specifications		다권선형 LDM
공극자속밀도	[T]	0.29
전류	[A]	1.5
발생 추력	[N]	5
스트로크	[mm]	212
권선 턴수	[Turns]	150×14개
공극	[mm]	5.2
자석 재질 및 치수 가로×세로×폭	[mm]	NdFeB 24×5.2×27.6
철심		S45C
코일 직경	[mm]	0.5



그림 8. 제안된 다권선형 LDM

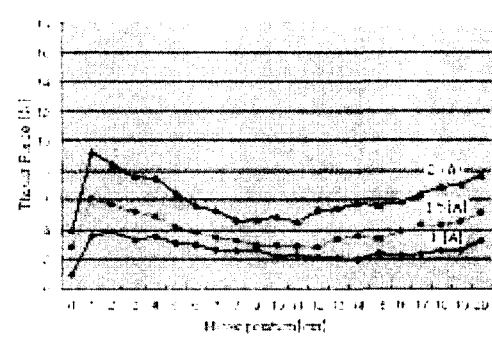
Fig. 8. Proposed LDM

5.2. 변위에 따른 추력 특성

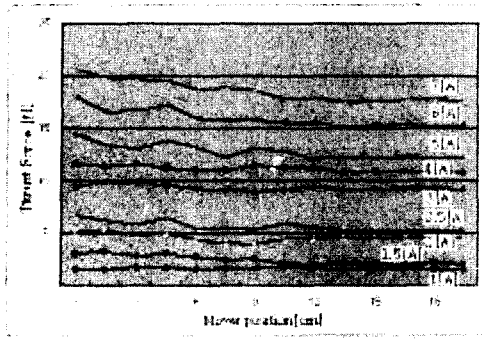
그림 9는 여자 전류를 1[A], 1.5[A], 2[A]로 증가함에 따라 총 이동 변위 212[mm]에 대해 기준형과 가동자 개선형 LDM에서 발생하는 추력 특성을 나타낸 것이다.

그림 9(a)는 각 변위에 따라 일정한 추력이 발생하지 않음을 알 수 있다. 그러나, 장 스트로크에서 정추력과 빠른 응답특성을 얻기 위해서는 다권선형 LDM이 가장 양호하다는 사실을 그림 9(b)에서 알 수 있다.

다권선형 LDM의 추력 특성을 나타낸 그림 9(b)에서, 전류를 1[A]에서 7[A]까지 증가시키면서 위치에 따른 추력을 측정된 결과, 전체 이동변위에 대해 거의 일정한 추력이 발생함을 알 수 있다.



(a) 기준형 LDM



(b) 다권선형 LDM

그림 9. 변위에 대한 추력 특성

Fig. 9. Thrust characteristics to mover position

그림 10은 양측 다분할 여자형 LDM의 정추력 특성을 실측한 결과로 분할 권선에 따른 여자 절환 시점에서 추력에 리플이 다소 포함되어 있지만 거의 일정함을 알 수 있다. 여기서 여자전류 5[A]로 여자절환시 약 12[N]의 정추력에 대해서 미소한 추력의 리플이 발생됨을 알 수 있다.

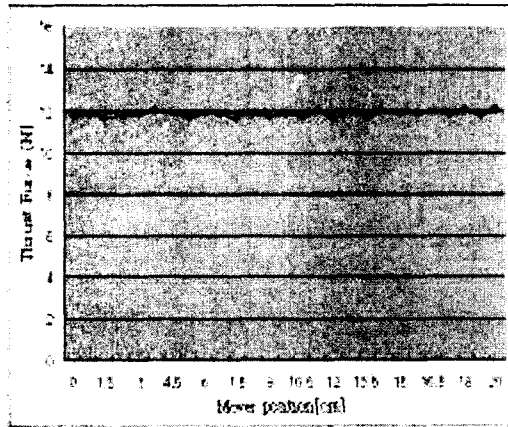


그림 10. 다권선형 LDM의 추력 리플

Fig. 10. Thrust ripple of LDM with multi-separated winding

6. 결론

본 논문에서는 2중 여자방식의 가동자석형 LDM을 대상으로, 적합한 자석 폭 대 권선 폭의 비를 결정하여 여자시 추력의 리플이 억제되며, 큰 정추력과 고응답성 및 위치정밀도를 지닐 수 있는 양측 다권선형 LDM을 설계하였다.

이를 위해, LDM의 영구자석 자극과 고정자 권선사

이의 공극에서 발생하는 힘(F)을 수직력(F_y)과 수평력(F_x)으로 나누어 분석함으로써 일정 추력을 발생시킬 수 있는 영구자석 폭과 권선 폭의 비를 결정하여, 고정자 권선을 분할 권선하였다.

제안한 다권선형 LDM의 경우는 단권선형 LDM에 비해 전 변위 200[mm]에 대해서 상당히 큰 전류인 7[A]에서도 추력이 포화되지 않는 정추력이 발생됨을 알 수 있었다. 따라서, 제안한 다권선형 LDM은 단권선형 LDM에 비해서 우수한 정추력 특성을 지니고 있음을 실험을 통해 입증할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 김학련, "장 스트로크 가동자석형 LDM의 설계 및 해석에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문, 1993.
- [2] A Basak, "Permanent Magnet d.c. Linear motors," Oxford University Press, 1996.
- [3] L. Honds and K. H. Meyer, "A Linear d.c. motor with permanent magnets," Philips Tech. Rev. Vol. 40, No. 11/12, pp. 329~337, 1982.
- [4] 백수현, 김용, "가동자석형 선형 직류전동기의 설계 및 특성", 대한전기학회 논문지, 제48권, 2호, pp.56~62, 1999, 2.
- [5] 배성식, "계기용 LDM의 설계 제작 및 특성해석에 관한 연구", 동국대학교 석사학위 논문, 1998.
- [6] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1987.