

양측여자형 LDM의 특성해석을 위한 고정자 권선법

우영수\*, 백수현\*, 맹인재\*, 홍순찬\*\*  
 동국대학교\*, 단국대학교\*\*

Stator Winding for Characteristic Analysis of Double Sided Excitation LDM.  
 Y.S.Woo\*, S.H.Baek\*, Y.Kim\*, S.Y.Yoon\*, I.J.Maeng\*, S.C.Hong\*\*

DonggukUniversity\*, DankookUniversity\*\*

**Abstract** - In this paper, by designning the width of the stator coil, double sided excitation LDM with multi-separated winding which is possible to obtain the constant thrust force is proposed. Using Maxwell 2D,Empulse, we were proved the characteristic analysis of LDM according to ratio magnet width venus coil width of LDM. Though designning for double sided excitation LDM with multi-separated winding, we could be achieved the constant thrust and rapidly time responses within the operating region.

1. 서 론

영구자석의 발달에 의하여 고속, 고추력 운전이 가능한 가동자석형 선형전동기는 회전기로부터 직선운동을 얻을 때와는 달리 별도의 변환장치가 필요없이 직선 추진이 가능하므로 산업현장에서 물류반송시스템이나 공작지게 및 리니어 엘리베이터등의 선형 서보 시스템에 이용되고 있다. 리니어 DC모터는 가동자에 따라 가동 코일형과 가동 자석형으로 분류되어진다.

본 논문에서는 양측 가동자석형 LDM을 대상으로 고정자 철심 중앙부의 자기포화에 의해 일정추력을 발생하기 어렵다는 단점을 보완하기 위해 철심 중앙부의 포화를 억제하고 추력리플을 감소시켜 일정추력을 발생하기 위한 방법으로써 고정자 권선을 다분할하는 고정자 권선법을 제시한다. 또한 상용자계해석 프로그램을 이용하여 영구자석 폭 대 여자코일의 폭비를 가변하는 시뮬레이션 및 시작기를 통한 실험 결과를 통해 그 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 양측 여자형 LDM의 구조와 동작원리

그림 1은 본 논문에서 제안된 양측 여자 LDM의 구조이다. 고정자는 양측 여자(Double Sided)를 취할 수 있는 구조의 연철로 된 2개의 직사각형 모양으로 구성되고 비자성체의 자기적인 특성을 고려하여 고정자 철심과 짧은 보조 철심 사이 및 주 자석과 Back iron의 사이에 삽입하였다. 또한, 가동부는 고추력을 발생시키기 위해 6개의  $N_4F_6C$ 계열 자석으로 구성하였다. 정 추력에 의한 등속도 이동을 실현하기 위하여 고정자 권선을 고정자 철심에 대하여 같은 비율로 다분할하였고 독립 권선에 여자 전류를 인가함으로써 가동자가 이동하게 된다.

LDM의 추력은 영구자석에 의한 자속밀도  $B_g$ 내에 위치한 길이  $l_c$ , 턴수  $N$ 인 고정자 권선에 전류  $i$ 를 흘리면 자석에서 발생하는 자속과 고정자 권선에서 발생하는 자속과의 상호작용으로 전자력이 발생하며 이 전자력의 크

기를 로렌츠의 법칙을 이용하여 구하면 식(2.1)과 같다.

$$\vec{F} = \int_0^{3l_c} \vec{B}_g \times \vec{i} \left[ \frac{N\omega_m}{l_t} \right] d\vec{l}_c \quad (2.1)$$

여기서,  $\vec{F}$  : 전자력 벡터       $N$  : 고정자 전체 턴수  
 $\omega_m$  : 자석 폭       $l_t$  : 코일 길이  
 $\vec{l}_c$  : 유효도체 길이       $\vec{i}$  : 여자 전류  
 $\vec{B}_g$  : 공극에서의 자속밀도 벡터

식 (2.1)에서,  $3\vec{l}_c$ 는 LDM의 1/2구조를 고려할 때, 가동자 자석 3개가 고정자 여자 코일과의 상호작용으로 추력을 발생시키게 되는 유효도체 길이이다. 식 (2.1)은  $\vec{B}_g$ 와  $\vec{i}$ 가 수직으로 만나므로 식 (2.2)로 나타낼 수 있다.

$$F = 3 \left[ \frac{N\omega_m}{l_t} \right] B_g i l_c \quad (2.2)$$



그림1 양측 여자형 LDM의 시작기

2.2 정추력 발생을 위한 설계

본 연구에서는 LDM 철의 부피 및 중량을 감소시켜 경량화 및 저 비용화 할 수 있는 개선된 다분할 여자형 LDM의 설계방법을 제안한다.

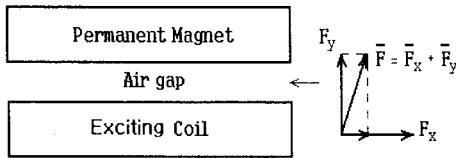
이 경우에 중요한 것은 가동자의 선형동작구간내의 위치에 따라 철심의 포화와 리플없이 일정한 추력을 발생할 수 있는 권선법이 필요하다.

즉, 가동자 위치에 따라 일정추력이 발생되어야 한다. 본 연구에서는 영구자석 폭과 권선 폭의 비를 최적화시켜 추력특성을 분석하는 기법을 이용하였다.

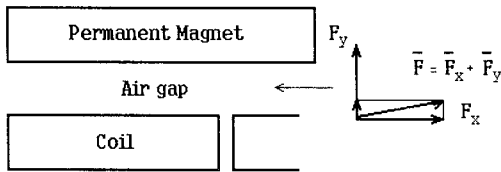
자극과 코일 사이에 작용하는 힘( $F$ )는 수직력( $F_y$ )과 수평력( $F_x$ )의 합이 된다. 이때 수직력  $F_y$ 은 흡인력이며 수평력  $F_x$ 은 가동자를 이동시킬 수 있는 추력 성분이다. 추력을 크게 하기 위해서는 수평력  $F_x$ 을 크게 설계하여야 하며 위치 정밀도를 크게 하기 위해서는 흡인력인 수직력  $F_y$ 를 크게 하여야 한다.

본 연구에서는 추력/질량의 비가 크면서도 일정추력을 발생하도록 설계하기 위해 영구자석 폭 대 여자코일의 폭 비를 가변하여 최적의 값을 찾도록 하여 1:1, 1:0.8, 1:0.5를 유한요소법을 사용하여 해석한 결과로부터 선택하여 설계, 제작하였다.

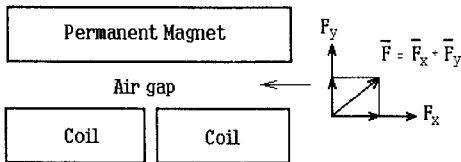
여기서 추력의 리플을 더욱 저감하기 위한 또 다른 방법으로는 양측 고정자의 여자권선을 가동자 진행 방향으로 지그재그 형태로 분할 성층하는 것이다. 이는 한 코일이 여자될 때 다른 쪽 코일은 탈자되는 원리를 이용함으로써 결과적으로 고정자와 가동자 사이에 치(齒)없는 구조로 추력의 리플이 억제되면서 유연한 동작이 이루어지기 때문이다. 그림 (a), (b) 및 (c)는 가동자인 영구자석의 폭을 기준으로 한 고정자 여자코일의 폭 비에 따라 발생하는 추력특성을 분석한 결과이다. 이때 해석 조건은 한 개의 영구자석에 대해서 한 개의 코일만 여자되어 절환될 경우의 추력특성을 나타낸다.



(a) Width ratio of magnet to g stator coil (1 : 1)



(b) Width ratio of magnet to g stator coil (1 : 0.8)



(c) Width ratio of magnet to g stator coil (1 : 0.5)

그림2 영구자석 폭과 고정자 코일 폭에 따른 추력 벡터

## 2.3 동특성 해석

### 2.3.1 동특성 해석의 모델링

동특성 해석을 위한 전압방정식과 기계방정식은 다음과 같다.

$$V = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + k_e v(t)$$

$$F = k_f i(t) = M \frac{dv(t)}{dt} + Dv(t)$$

여기서,  $R$  : 고정자 저항 [ $\Omega$ ]  
 $k_e$  : 역기전력 정수 [ $V/(m/s)$ ]  
 $v$  : 가동자 이동속도 [ $m/s$ ]  
 $F$  : 추력 [ $N \cdot m$ ]  
 $M$  : 가동자의 질량 [ $kg$ ]  
 $D$  : 점성 마찰계수  
 $k_f$  : 추력정수 (=  $NIB$ ) [ $N/A$ ]

점성 마찰계수  $D$  는 고정자 저항  $R$  [ $\Omega$ ]에 비해 매우 작으므로 무시하면, 식 (3.1)과 식 (3.2)로부터 식 (3.3)을 구할 수 있다.

$$T_e T_m \frac{d^2 v(t)}{dt^2} + T_m \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = \frac{V}{k_e} \quad (3.3)$$

여기서, 기계적시정수  $T_m = \frac{MR}{k k_e}$  (3.4)

전기적시정수  $T_e = \frac{L}{R}$  (3.5)

$k_e$  : 역기전력정수,  $k_f$  : 추력정수

식 (3.4)로부터 LDM의 기계적 시정수는 가동자의 질량  $M$ , 전기적 시정수는 식 (3.5)로부터 고정자 코일의 인덕턴스  $L$  과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 초기속도  $v(t=0)$ 를 0으로 하여 식(3.3)의 미분방정식을 풀면, 식 (3.6)과 식 (3.7)과 같이 시간에 따른 가동자의 속도  $v(t)$ 와 전류  $i(t)$ 를 구할 수 있다.

$$v(t) = \frac{V}{k_e} (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) \quad (3.6)$$

$$i(t) = \frac{V}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T_e}}) \quad (3.7)$$

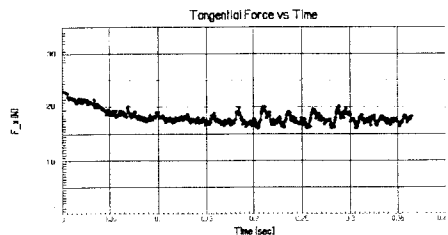
표 3. 동특성 해석을 위한 파라미터(1:0.8)

Parameter [단위]	Vaule
Input current I[A]	4
Inductance L[mH]	0.27
Mass [g]	373
Resistance R[ $\Omega$ ]	1.7
Thrust force constant $k_f$ [N/A]	6.25
Back-EMF constant $k_e$ [V/(m/s)]	5.25

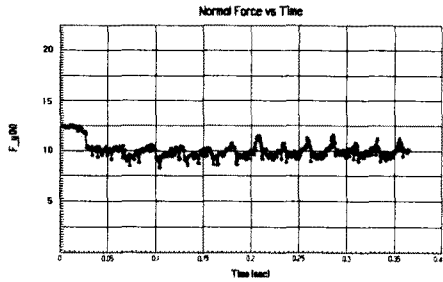
## 3. 시뮬레이션 및 실험결과

다음 그림은 EMpulse를 이용한 유한요소법의 해석결과로부터 동특성을 분석한 결과이다.

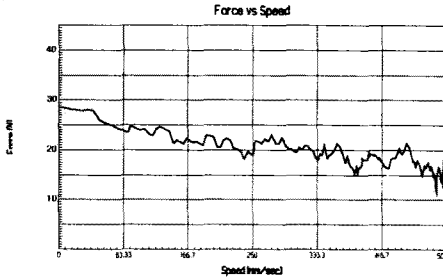
### 3.1. 영구자석 대 권선 폭비 (1:0.8)인 경우



< 순시추력 >

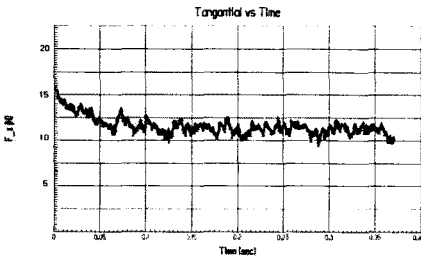


< 수직력 >

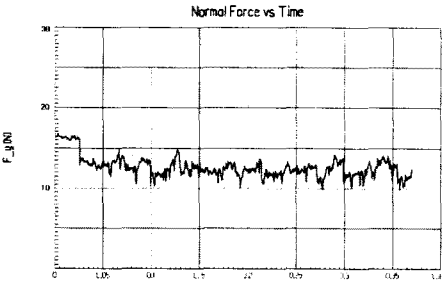


< 추력 대 속도 >

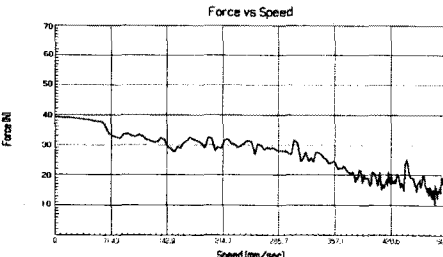
### 3.2. 영구자석 대 권선 폭비 (1:0.5)인 경우



< 순시추력 >

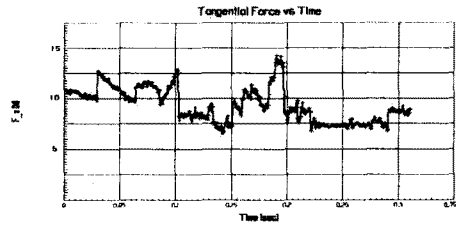


< 수직력 >

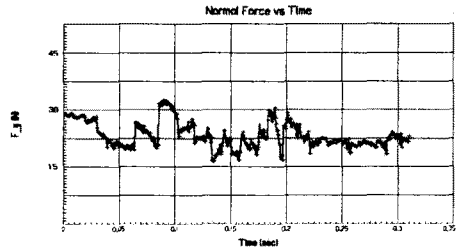


< 추력 대 속도 >

### 3.3. 영구자석 대 권선 폭비 (1:1)인 경우

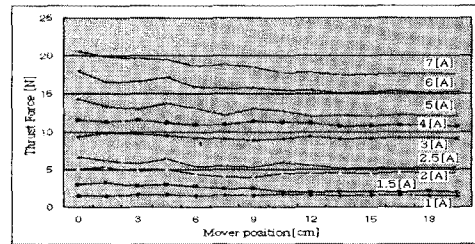


< 순시추력 >



< 수직력 >

그림 3 FEM에 의한 추력 특성결과  
다음은 변위 15mm당 전류에 따른 추력 분포를 측정  
한 결과이다. 실험치로부터 4[A]인가시 정추력에 도달함을  
알 수 있다.



< 변위에 따른 추력 측정결과(1:0.8일때) >  
그림 4. 변위에 따른 추력 측정결과(1:0.8)

## 4. 결 론

본 논문에서는 양측 여자형 LDM의 정추력을 발생시키  
기 위한 고정자 권선법과 그 설계에 적합한 LDM의 동특  
성을 수행하였다. 설계된 LDM의 정추력에 대한 해석은  
상용자기 프로그램(Maxwell 2D)으로 수행하였으며 동  
특성은 전압 방정식과 운동방정식의 결합으로부터 FEM  
을 이용한 EMPULSE로써 시간 변화에 따른 순시추력과  
수직력 및 속도 대 추력의 특성을 해석하였다. 본 논문  
에서 제안하고자 하는 LDM은 영구자석과 권선의 폭 비가  
1:0.8인 경우로서 1:1인 경우보다 공극의 수직력은 다소  
작지만 추력 성분인 수평력이 일정하게 증가하면 여자  
절환시 추력 리플이 더욱 감소하게 될수 있었다. 따  
라서 본 연구에서는 추력이 크게 발생하면서 추력의 리플  
을 억제할 수 있는 영구자석과 권선의 폭 비가 1:0.8 양  
측여자형 LDM의 형태를 제안하게 되었다.

### [참 고 문 헌]

- (1) A Basak, "Permanent Magnet d.c. Linear motors," Oxford University Press, 1996.
- (2) A Basak and A. F. Flores Filho, "Investigation of A Novel Double Armature Brushless DC Linear Motor," IEEE Trans. on Mag., Vol. 31, pp. 789~795, 1995.
- (3) H. Wakiwaka, et al., "Consideration of High-speed Positioning of Linear DC Motor," T. IEE Japan, Vol. 119-D, No. 3, pp. 315~320, 1999.
- (4) 임달호, "전기계의 유한요소법," 동명사, 1987.