

The thrust characteristic analysis of multi-separated winding LDM

金一男* · 李相喆* · 具春根** · 姜求洪***

(Il-Nam Kim · Sang-Cheol Lee · Choon-Keun Koo · Gu-Hong Kang)

Abstract - This paper describes for new design method to improve response characteristics of moving-magnet type LDM with volume reduction of slider back iron. To achieve the constant thrust of LDM through restraining saturation at the center core of stator excitation coil, double sided stator winding of LDM is proposed.

We constructed new type LDM to prove the validity of design process. Analysis results through measurement and simulation of proposed multi-separated winding LDM were proved excellent in response characteristics and static thrust

Key Words : LDM, Thrust force, Vertical force, Horizontal force, multi-separated winding.

1. 서 론

최근 산업 기술은 자동화 기법을 이용한 생산 방식의 도입이 확대되고 있고, 다품종 소량생산의 추세에 따라 기술 집약적인 생산 기술의 중요성이 점차 증대되고 있다. 이와 함께 다양한 분야에서 이용되고 있는 기기 들도 점차 고도의 정밀성을 유지하면서 우수한 응답 특성을 얻기 위해 여러 종류의 제어기법이 사용되고 있다[1-9].

산업용 기기의 응용분야가 다양화됨에 따라 직선운동을 필요로 하는 리니어 모터(Linear motor)는 디스크, actuator, Robot, 의료용 기기, 렌즈 구동용 기기, 기록용 기기, 반송용 기기, 계측용 기기, 부품이송장치 등 다양하고 광범위하게 사용되고 있으며 앞으로는 더욱 확대될 전망이다[1-3].

LDM(Linear DC motor)의 구조는 가동 방식에 따라 가동 코일형과 가동 자석형으로 분류된다. 가동 코일형 LDM은 가동자에 여자 코일, 고정자에 영구 자석을 사용하는 구조이며, 가동 자석형 LDM은 가동자에 영구자석, 고정자에 여자 코일을 사용하는 구조이다. 가동자석형 LDM은 구조가 간단하고, 추력 대 질량비가 커서 고속 운전이 가능하다는 장점을 가지고 있지만 위치 결정 능력이 떨어져 위치결정 센서를 결합시켜 폐루프 제어를 행하여야 하고, 또 고정자 철심 중앙 부근에서 자기 포화가 발생되어 이 부근에서 정추력을 유지하기가 어려우며, 큰 추력이 필요한 경우에는 질량이 증가함에 따라 응답특성이 늦어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 보상권선을 설치해야 하며 추력의 리플이나 왜형의 특성을 개선할 수

있는 설계나 제어방식이 필요하다.

M. Honaoka 등은 가동 자석형 LDM을 대상으로 정추력을 위한 LDM의 설계 방법을 제안하였다[1]. 이 방법은 LDM의 철심에서의 최대 자속 밀도를 계산하여 철심의 포화가 이루어지지 않는 전류를 구하여 철심의 폭을 결정함으로써 정추력을 발생하기 위한 설계방법을 수행하였다[1].

LDM의 성능 향상을 위해 D. Casadei 등은 추력 리플을 최소화하는 방안으로 슬롯리스 형태의 양측식 LDM 설계 방법을 제안하였고[2], A. Basak 등은 고정자 권선을 다중 분할함으로써 정추력을 발생시킬 수 있는 설계 방법을 제안하였다[3,4]. 또한 T. Mizuno 등은 LDM의 추력 대 입력비의 관계로부터 전기 및 기계 시정수를 저감시켜 자기회로를 최적화 함으로써 응답 특성을 향상시킬 수 있는 방법들을 제안하였고[5,6], H. Wakiwaka 등은 고속 위치 결정용으로 LDM의 추력 정수와 치수와의 관계식으로부터 설계할 수 있는 방법을 제안하였다[7-9].

LDM의 경우 용도에 따라 다양한 형태를 요구하고 있는 실정에서 기존의 제품에 대한 향상된 제품의 연구가 더욱 절실히 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 LDM의 응답 특성을 향상시키고, 안정된 추력을 유지할 수 있는 방식의 LDM을 제안한 것이다. 응답특성을 향상시키기 위해 자기회로는 포화점에 이르지 않는 범위까지 선형이라는 가정하에 LDM의 가동자 회로를 설계하여 양측 가동 자석형 LDM의 추력 대 체적비를 계산하여 가동자 철심의 체적을 감소시켰다. 또한, 정추력을 발생시키기 위해 LDM 철심 중앙부의 포화를 억제할 수 있는 고정자 다중 분할 권선 기법을 사용하였고 영구자석의 폭 및 고정자 권선 폭의 비를 수직력과 수평력으로 분리하여 해석하였다.

제안한 다중 분할 다중 권선형 LDM(이하 제안형)을 기존의 LDM(이하 기준형)과 가동자 철심의 형상을 변환한

* 正 會 員 : 東 西 京 大 學 電 氣 科 教 授

** 正 會 員 : 城 南 技 能 大 學 教 授

*** 正 會 員 : 城 南 技 能 大 學 光 電 子 科 助 教 授

接 受 日 字 : 2001年 11月 19日

最 終 完 了 : 2002年 2月 6日

사다리형 가동자 LDM(이하 개선형)과 비교, 검토함으로써 제안한 LDM의 성능이 우수함을 알 수 있었다.

2. LDM의 구조 및 동작 원리

그림 1은 본 연구에서 선정한 기준형 LDM의 기본 구조이다. 그림 1에서 고정자는 변위에 대해 큰 추력을 발생하기 위해 양측에 2개의 긴 철심과 단부효과를 고려한 짧은 직사각형의 고정자 철심을 가지고 있으며, 여자권선을 성층한 2중 여자방식형태로 구성되어 있다. 또한, 가동부는 높은 추력을 발생시키기 위해 양측 고정자의 여자 권선에 대해 총 6개의 NdFeB형 영구자석으로 구성하였다.

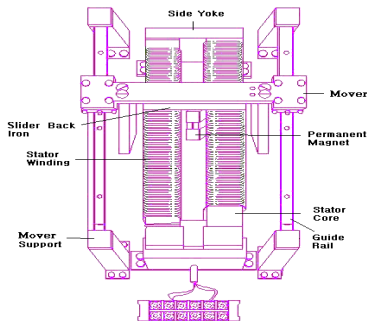


그림 1 기준형 LDM의 구조
Fig. 1 Structure of basic type LDM

LDM은 2개의 고정자 철심에 여자전류를 동시에 인가할 때 자석에서 발생하는 자속과의 상호작용으로 LDM의 가동자가 움직인다. 제안형인 분할다중권선 LDM은 개선형 LDM과 동일한 구조의 고정자 철심에 14개의 독립된 권선으로 분할하여 권선한 것으로 각 권선에 독립적으로 여자전류가 인가되며 가동자는 이 각각의 독립된 권선과의 상호작용으로 이동하게 된다.

LDM의 발생 추력은 로렌츠의 법칙을 이용하여 구하면 식(1)과 같다[3].

$$F = \frac{N\omega_m}{l_t} \int_0^{3l_c} B_g \times i dl_c [N] \quad (1)$$

여기서, N 은 고정자 전체 턴 수, ω_m [mm]은 자석 폭, l_t [mm]는 코일 길이, l_c [mm]는 유효도체 길이, B_g [T]는 공극자속밀도 벡터, i [A]는 여자전류이다. 그리고 $3l_c$ 는 LDM 구조가 대칭구조이므로 반쪽 부분만을 고려할 때, 가동자 자석 3개가 고정자 여자 코일과의 상호작용으로 추력이 발생하는 유효도체의 길이이다. 식(1)은 B_g 와 i 의 수직으로 만나므로 식(2)와 같이 변경할 수 있다.

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

3. LDM 특성 해석 및 설계

3.1 가동자 철심의 형상 개선

LDM의 응답특성의 해석에는 전기적 시정수와 기계적인

시정수를 고려해야 한다. 동특성 해석을 위한 전압방정식은 식(3)과 같다[2-5].

$$v(t) = \frac{V}{k_e} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}} \right) \quad (3)$$

여기서, V [V]은 인가전압, $k_e = NIB$ [V/m/s]는 역기전력 정수, τ_m 은 기계적 시정수이다. 식(3)에서 기계적 시정수는 식(4)와 같다.

$$\tau_m = \frac{MR}{k_f k_e} \quad (4)$$

여기서, R [Ω]은 고정자 저항, M [g]는 가동자 질량 $k_f = NIB$ [N/A]는 추력 정수이다. 식(4)에서 기계적 시정수는 가동자의 질량과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

그림 2는 기준형 LDM인 직사각형 가동자 철심의 구조를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 직사각형 가동자 철심의 자속밀도 분포가 균일하지 않은 점을 착안하여 자속밀도 분포가 추력에 미소한 영향을 주는 부분을 제거하여 추력대 체적비를 최적화 함으로서 LDM의 속도응답 특성을 향상시킬 수 있도록 한 것이다.

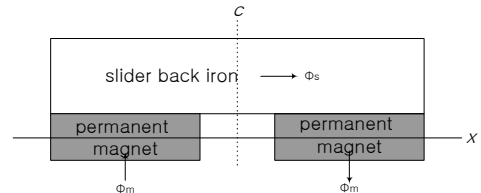


그림 2 기준형 가동자 철심의 구조
Fig. 2 Structure of basic type slider back iron

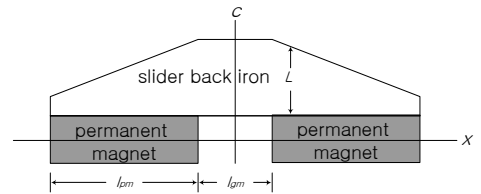


그림 3 개선된 가동자 철심의 구조
Fig. 3 Structure of improved slider back iron

그림 3은 개선형 가동자 철심의 구조이다. 가동자 철심의 형상만 변화시킨 개선형LDM은 기준형 철심에서 가동자 철심에 부착된 자석의 면적 및 가동자 철심 재질의 자속밀도는 자석과 가동자 철심에서는 일정하므로 대칭성을 고려하여 가동자의 편측 부분만을 고려하여 해석하였다.

자속밀도는 가동자 철심의 측면에서부터 중앙까지 형성된다. 가동자 철심 내의 전체 자속 ϕ_s 는 x 축과 같은 방향으로 가동자 철심의 위치에 대해 선형이다. 따라서, 가동자 철심의 전체 자속은 식(5)와 같다[2,5].

$$\phi_s(x) = B_m \left[A_m - \omega_m \left(x - \frac{l_{gm}}{2} \right) \right] \quad (5)$$

여기서, B_m [T]은 가동자 철심의 최대 자속밀도, A_m 은 가동자 철심과 접촉하는 부분의 영구자석 단면적, ω_m 은

영구자석의 폭, l_{gm} 은 영구자석간의 간격이다. 식(5)에서 ϕ_s 는 l_{gm} 전체에 걸쳐 일정하고, 가동자 철심의 자속이 포화점 이하가 되도록 할 경우 포화 자속밀도 B_{sat} [T]은 식(6)과 같다.

$$B_{sat} > \frac{d\Phi_s}{dA} \quad (5)$$

식(6)에서 면적은 식(7)과 같다.

$$dA = \omega_m dL \quad (7)$$

여기서, B_{sat} [T]는 가동자 철심의 포화 자속밀도, L 는 가동자의 두께이다. 식 A_m (5), (6) 및 (7)로부터 면적 A 를 구하기 위해 L 의 변위를 x 함수로 하면 가동자 철심에서 포화를 발생시키지 않는 가동자의 최소 두께는 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} L(x) &= \int_{l_{pm} + \frac{l_{gm}}{2}}^x \left(\frac{1}{\omega_m B_{sat}} \right) \frac{d\Phi_s}{dx} dx \\ &= \frac{B_m}{B_{sat}} \left[\left(l_{pm} + \frac{l_{gm}}{2} \right) - x \right] \end{aligned} \quad (8)$$

이때 가동자 철심의 체적 V_s 은 식(9)와 같다.

$$V_s = (2l_{pm} + l_{gm})L\omega_m \quad (9)$$

여기서, l_{pm} [mm]는 영구자석의 길이이다.

그림3의 개선형의 경우에서 포화가 발생되지 않도록 가동자의 상부의 단면적을 제거할 경우 가동자 철심의 체적 V_{so} 은 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{so} &= (2l_{pm} + l_{gm})L\omega_m - l_{pm}l_{gm}\omega_m \\ &= (l_{pm} + l_{gm})L\omega_m \end{aligned} \quad (10)$$

직사각형 가동자 철심의 체적 V_s 와 개선형 가동자 철심의 체적 V_{so} 의 비는 식(11)과 같다.

$$\frac{V_s}{V_{so}} = 1 + \frac{l_{pm}}{l_{pm} + l_{gm}} \quad (11)$$

본 연구에서는 식(11)을 이용하여 가동자 철심을 개선시켰으며, 기존형 모델과 가동자가 개선된 모델을 제작하였다. 표 1은 설계 이론에 따라 개선된 LDM의 가동자 철심 사양이며, 가동자 철심의 재질로 연철 S45C를 사용하였다.

표 1. 가동자 철심의 사양

Table1. Specification of slider iron

B_{sat} [T]	B_m [T]	t_c [mm]	ω_m [mm]	l_{gm} [mm]	v_s [mm]	v_{so} [mm]
1.57	1.32	27.6	24.0	20.8	22.787	16.163

3.2 다중 권선형 LDM의 고정자 권선법

본 연구에서는 정추력을 유지하면서 위치결정 능력을 갖는 설계를 위해, 영구자석의 폭 대 가동자 권선의 폭 비율을 가변하면서 정추력을 발생하는데 근접한 값을 선정하여 설계하였다.

그림 4는 가동자인 영구자석과 고정자인 권선 폭 비에 따라 발생하는 힘의 특성을 분석한 결과로, (a)는 비를 1:1로 설정한 것으로 공극에서 발생하는 힘은 추력 성분인 수

평력에 비해서 흡인력인 수직력이 크게 발생하고 있다. 그러나, 위치에 대한 정밀도는 높지만 여자절환시 가동자의 변위에 따라 추력 발생이 어렵고 리플이 크게 발생하는 단점이 있다. (b)는 비를 1:0.84로 설정한 것으로 (a)에 비해 공극에서 수직력은 다소 작지만 수평력이 증가함으로서 적합한 추력이 발생할 수 있는 구조이다. 또한, 여자절환시 추력의 리플도 감소시킬 수 있다. (c)는 비를 1:0.5로 설정한 것으로 공극에서 발생하는 수평력과 수직력의 합성 추력이 앞의 두 경우에 비해 작게 발생됨에 따라 에너지 이용 효율이 낮고 여자 절환에 따른 이동거리가 작으므로 고속제어가 어려워지는 단점이 있다.

추력의 리플을 감소시키면서 정추력을 발생할 수 힘은 식(12)와 같다[7].

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \frac{1}{\mu_0} \left[\int_D \mathbf{B}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{n})dD - \int_D \frac{1}{2} \mathbf{B}^2 \mathbf{n}dD \right] \\ &= \oint_s \mathbf{P}dD \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, \mathbf{P} 는 Maxwell의 응력 텐서, D 는 물체의 표면적, \mathbf{n} 는 D 에 수직인 외향 단위 법선 벡터이다.

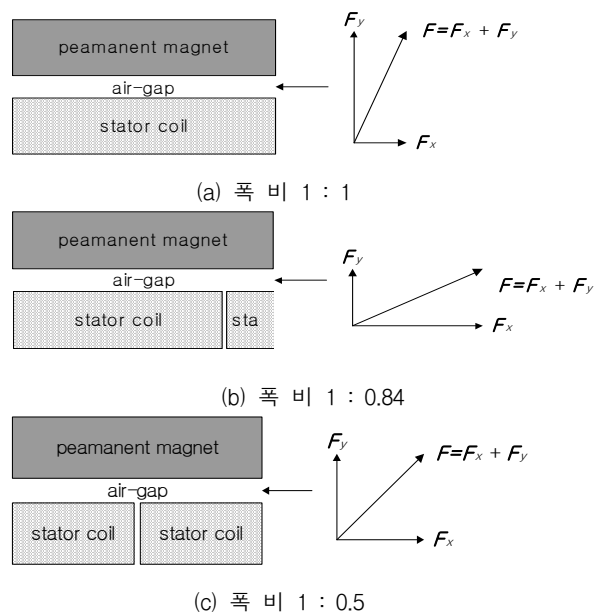


그림 4 영구자석과 고정자 권선 폭비에 따른 추력 벡터

Fig. 4 Thrust vectors according to permanent magnet vs. stator coil width

식(12)에서 물체에 작용하는 힘은 그 물체를 둘러싸고 있는 표면에 작용하는 응력 텐서 \mathbf{P} 의 면적분과 같으므로, 요소내에서 발생하는 Maxwell의 응력텐서 x, y 성분인 P_x, P_y 는 식(13) 및 (14)와 같다.

$$P_x = \frac{1}{2\mu_0} \{ (B_x^2 - B_y^2) n_x + 2 B_x B_y n_y \} \quad (13)$$

$$P_y = \frac{1}{2\mu_0} \{ (B_y^2 - B_x^2) n_y + 2 B_x B_y n_x \} \quad (14)$$

적분경로를 x 축에 수평으로 취하면, $n_x=0$ 이므로 식 (13), (14)는 식(15) 및 (16)과 같다.

$$P_x = \frac{1}{\mu_0} B_x B_y n_y \quad (15)$$

$$P_y = \frac{1}{2\mu_0} (B_y^2 - B_x^2) n_y \quad (16)$$

또한 LDM의 수평력 및 수직력 F_x, F_y 는 식(17), (18)과 같다.

$$F_x = \int_l \frac{h_e}{\mu_0} B_x B_y n_y dl \quad (17)$$

$$F_y = \int_l \frac{h_e}{2\mu_0} (B_y^2 - B_x^2) n_y dl \quad (18)$$

여기서, h_e 는 철심의 유효 적층폭이며, l 은 적분경로이다.

3.3 유한요소해석

본 연구에서는 유한요소법(finite element method)을 이용하여 LDM의 자계분포의 해석과 힘을 구하였다. 먼저 대상모델을 적응요소분할법에 의해 삼각요소로 분할하여 자계해석을 하였다. 이 경우, 절점 수가 많아지면 정확도는 높지만 무한히 증가하기가 어렵고, 요소 수가 많아지면 해석시간도 급수적으로 증가되므로 해석 모델을 적합하게 분할한다. 이를 위해 다음과 같은 기준으로 요소 수를 결정하였다.

- (1) 요소크기의 변화에 따라 해석결과의 정확도는 크게 변화한다.
- (2) 대상모델이 기하학적 형상이 복잡하고 응력의 변화가 심한 부분에서는 요소의 크기를 작게 한다.
- (3) 동일한 모델에 대해 요소의 크기를 변화하면서 결과의 정확도를 미리 평가한다.

이상과 같은 요소의 최적선정을 위해 반복적인 요소설 정과정이 필요하다. 즉, 해석하고자 하는 대상모델의 고정자와 가동자의 공극부분을 많이 요소분할하여 해석하며 나머지 부분은 단순하게 요소 수를 줄여야 해석시간의 단축과 해석상의 오차를 줄이면서 정확한 해석을 할 수 있다. 본 연구에서는 요소수를 22,100, 절점수 45,200으로 요소분할을 하여 오차가 없도록 반복계산을 통하여 해석하였다.

그림 5, 그림 6은 기준형과 개선형 가동자 철심의 자속 밀도 분포 특성을 나타낸 것이다. 그림 5의 기준형 LDM의 가동자 철심의 경우, 자속밀도 분포가 가동자의 모서리 부분에서는 무시할 정도로 작고 중심부분에 가까울수록 밀도가 높은 것을 알 수 있다. 이에 비해 가동자 철심의 형상을 개선한 그림 6의 개선형은 가동자 철심의 자속밀도 분포가 전체영역에 고르게 분포함을 알 수 있다.

그림 7은 자속밀도 분포에 따라 영구자석과 여자전류에 의해서 발생하는 공극부 자속밀도의 크기를 나타낸 것으로, 설정 범위 280[mm]에 대해 영구자석 폭 대 권선 폭의 비가 1 : 1인 경우의 공극 자속밀도는 약 0.28[T], 폭비가 1 : 0.84일 때 약 0.28[T], 폭 비가 1 : 0.5일 때 약 0.25[T] 정도의 크기를 얻을 수 있었다. 이 결과로부터 자석 폭 대 권선 폭의 비가 1 : 0.84인 경우에 공극 자속밀도가 다른

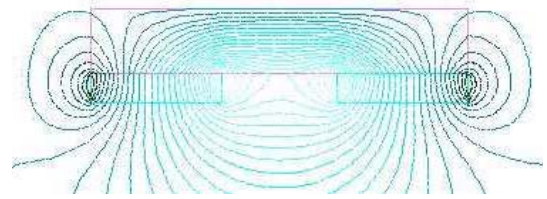


그림 5 기준형LDM의 자속분포

Fig. 5 Flux distribution of basic type LDM

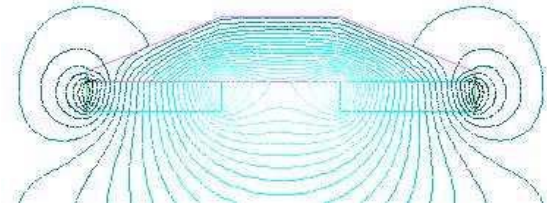


그림 6 개선형 LDM의 자속분포

Fig. 6 Flux distribution of improved type LDM

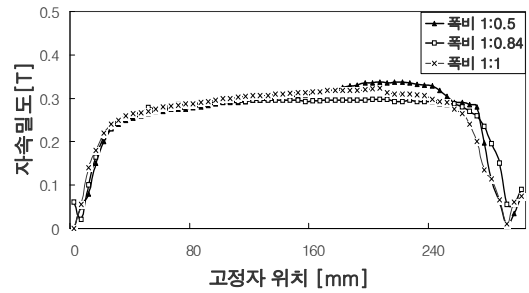


그림 7 자석과 고정자 권선 폭 비에 따른 공극 자속밀도

Fig. 7 Flux density of air-gap according to PM and stator coil width

폭 비에 비해서 왜형이 되지 않는 이상적인 형태로 되기 때문에 본 연구에서는 이 결과를 설계에 적용하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과

4.1 LDM의 동특성 해석

그림 8, 9는 가동자의 질량이 486[g]에서 373[g]으로 감소되었을 경우의 전류, 추력에 대한 시뮬레이션 결과이다.

그림 8, 9에서 알 수 있듯이 기본형과 개선형은 2[s] 부근에서 안정된 특성을 나타내고 있으나, 제안형은 0.5[s]에서 이미 안정상태를 유지하고 있다. 즉, 기동시에 각 분권에는 가속도의 증가에 의해 큰 과도전류가 흐르는 하나 빠르게 응답함을 알 수 있다.

그림 10, 11은 시간에 따른 속도 및 가속도 특성을 나타낸 것이다. 그림 8, 9의 특성과 같이 기본형과 개선형은 2.0[s] 부근에서 안정된 특성을 나타내고 있으나, 제안형은 0.5[s]에서 이미 안정 상태를 유지하고 있다. 즉, LDM의

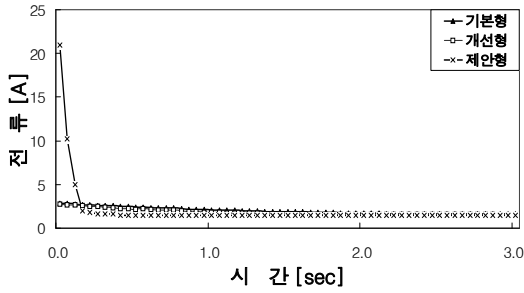


그림 8 전류특성
Fig. 8 Current characteristics

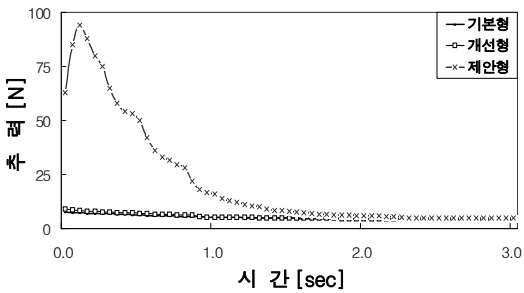


그림 9 추력특성
Fig. 9 Thrust characteristics

기계적 시정수는 가동자의 질량과 밀접한 관계가 있으므로 LDM의 속도 응답 특성을 향상시키기 위해서는 가동자 철심이 포화되지 않는 최적의 철심 구조인 분권형으로 설계함으로써 동특성을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

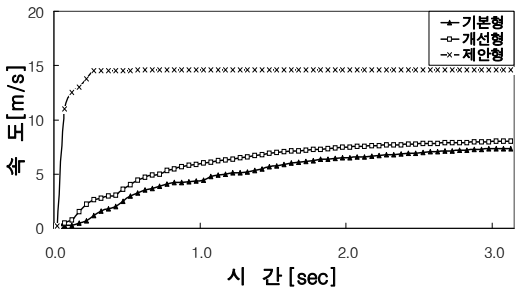


그림 10 속도 특성
Fig. 10 Speed characteristics

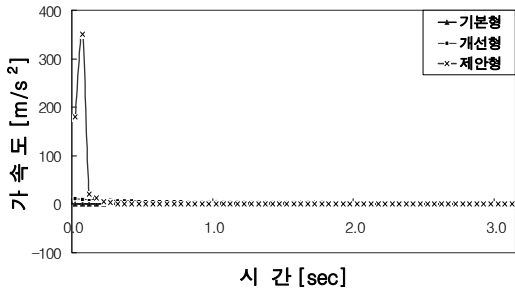


그림 11 가속도 특성
Fig. 11 Acceleration characteristics

그림 12~14는 유한요소법의 해석결과로부터 힘의 분력을 분석한 결과로서 영구자석 폭 대 고정자 권선 폭 비가 1:1, 1:0.84 및 1:0.5인 경우 수평력, 수직력 합성력을 유한요소법으로 해석한 결과이다.

그림 12에서 영구자석 폭 대 고정자 권선 폭 비에 따른 수평력(F_x)에 대한 추력으로 폭의 비가 1:0.84 일 때 추력을 좌우하는 수평력이 가장 크며 가동자 위치에 따라 정추력이 발생됨을 알 수 있다. 그림 13에서도 영구자석 폭 대 고정자 권선 폭 비의 수직력(F_y) 해석 결과를 비교한 것이다. 이 경우에도 폭의 비가 1:0.84 일 때 수직력이 가장 작음을 알 수 있다력의 리플도 적게 발생함을 알 수 있다.

본 연구에서는 적절한 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 14는 영구자석 폭 대 고정자 권선 폭 비에 대한 수평력과 수직력을 합성한 추력의 크기를 나타낸 것이다. 위 결과를 고찰한 결과 본 논문에서 제안한 형은 영구자석 폭 대 고정자 권선 폭 비가 1:0.84인 경우의 변위에 대해서 합성력의 변화가 가장 완만하여 정추력의 발생은 물론 추력의 리플도 적게 발생함을 알 수 있었다.

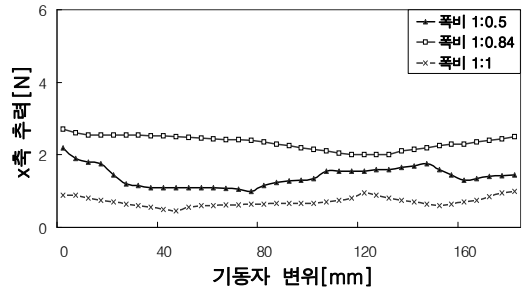


그림 12 폭 비에 따른 수평력 F_x
Fig. 12 Horizontal thrust F_x with width ratio

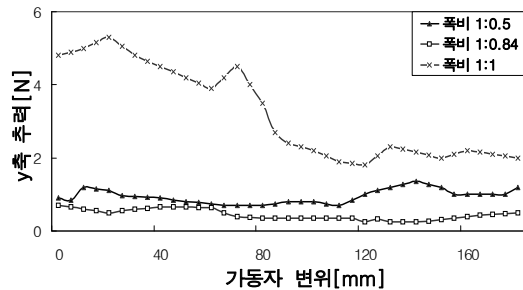


그림 13 폭 비에 따른 수직력 F_y
Fig. 13 Vertical thrust F_y with width ratio

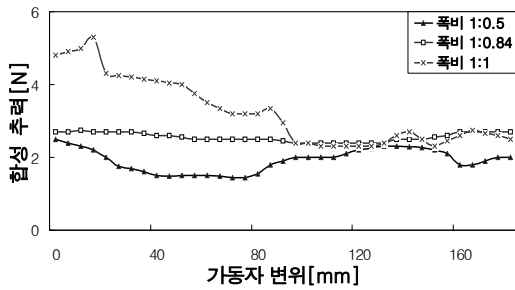
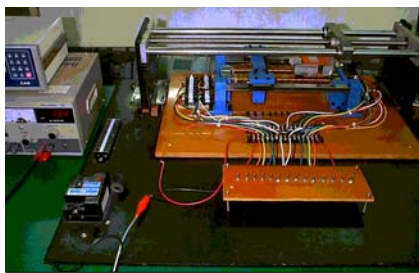


그림 14 폭 비에 따른 합성력 F
Fig. 14 Total thrust F with width ratio

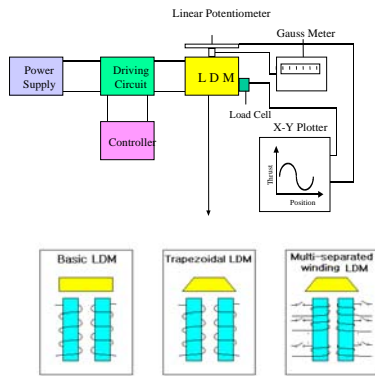
4.2 실험 및 결과 분석

4.2.1 실험장치의 구조 및 구성

그림 15(a)는 본 연구에 대한 실험장치도, 그림 15(b)는 계통도로 설계 제작한 기본형, 개선형 및 제안형이다. 추력은 Load cell, 이동 변위는 linear potentiometer를 결합한 x-y plotter, 공극의 자속밀도는 gauss meter(9900 series)를 이용하여 측정하였다.



(a) 장치도



(b) 계통도

그림 15 실험장치도
Fig. 15 Experiment device diagram

그림 16은 실제 제작한 기준형 LDM으로 2중 여자방식에 의해 구동되는 가동자석형 LDM의 구조이다. 두개의 자로에 사용된 철심으로는 S45C, 6개의 영구자석은 NdFeB35를 사용하였다. 이에 따라, 이 기준형의 고정자 철심은 가동자가 약 2배의 추력을 발생시키도록 2중 단일 권선으로 성층하였으며, 단부효과를 고려하여 철심의 양끝에 보조 철심을 삽입하였다. 고정자 권선의 성층은 6층으

로 하였으며, 사용한 권선의 굵기는 0.5[mm]로 하였다. 양측 여자 권선은 병렬로 연결하여 동시 여자가 되도록 하였고, 양측 여자 권선의 끝부분은 단부효과에 의한 추력의 상승을 억제하도록 끝에서 7.5[mm]부분부터 성층하였으며, 또 다른 끝부분은 4.5[mm]부터 성층하였다.

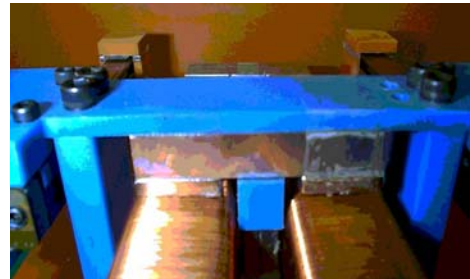


그림 16 기준형 LDM
Fig. 16 Standard LDM

그림 17은 개선형 LDM의 구조로 기본형 LDM과 동일한 구조이나 가동자만 자속의 경로를 고려하여 형상을 개선한 구조이다. 그림 18은 제안형 LDM을 나타낸 것으로서 가동자의 응답특성을 향상시키기 위해 형상이 개선된 사다리형 가동자를 지니고 있을 뿐만 아니라 기본형 LDM의 한계를 극복하기 위해 고정자 철심에는 독립된 14개의 고정자 권선을 분할 배치하였다. 제안형 LDM의 여자방식은 독립된 14개의 권선을 독립적으로 여자 함으로써 LDM을 움직이게 된다. 또한, 선형 지지기구로는 LDM의 질량과 부피에 적합하며 마찰저항이 적은 LM형 가이드레일인 SR15W형을 사용하였다. 표 2는 기본형, 개선형 및 제안형 LDM의 제작 사양을 나타낸 것이다.

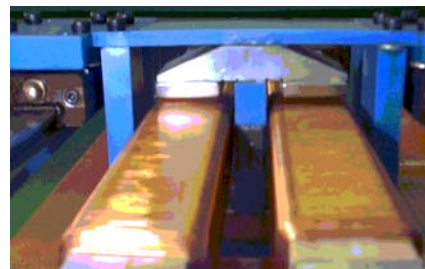


그림 17 개선형 LDM
Fig. 17 Improved LDM

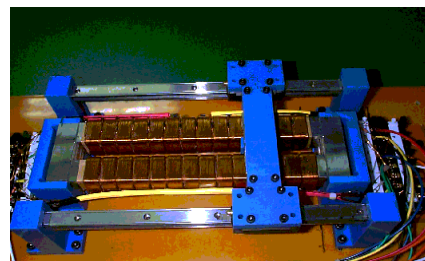


그림 18 제안형 LDM
Fig. 18 Proposed LDM

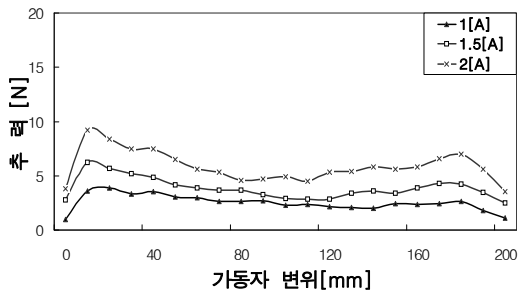
표 2 제작된 LDM의 설계 사양

Table 2 specifications of LDM

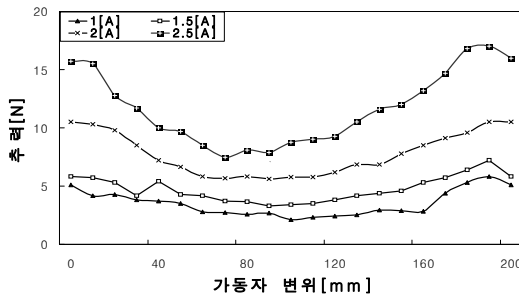
사 양	LDM 형	기준형 LDM	개선형 LDM	제안형 LDM
공극자속밀도[T]		0.285	0.285	0.29
전류[A]		1.5	1.5	1.5
발생 추력[N]		4.0	4.5	5.0
스트로크[mm]		212.0	212.0	212.0
권선 턴 수[Turns]		2,207.0	2,207.0	2,100.0
가동자 질량[g]		486.4	373.0	373.0
코일 직경[mm]		0.5		
철심		S45C		
자석재질 및 치수[mm]		NdFeB 24.0×27.6×5.2		

4.2.2 변위에 따른 추력특성

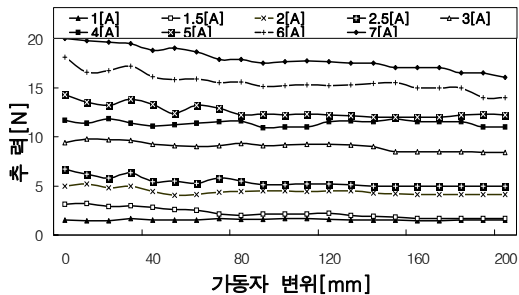
그림 19는 여자 전류를 1[A], 1.5[A] 및 2[A]로증가시킬 때 이동 변위에 대한 기준형, 개선형 및 제안형 LDM



(a) 기준형 LDM



(b) 개선형 LDM



(c) 제안형 LDM

그림 19 변위에 대한 추력 특성

Fig. 19 Thrust characteristics to mover position

에서 발생하는 추력 특성을 나타낸 것이다. (a)는 기본형 LDM의 추력 특성으로 각 변위에 따라 일정한 추력이 발생하지 않음을 알 수 있다. (b)는 가동자의 체적과 질량이 감소된 개선형 LDM의 추력 특성을 나타낸 것으로 기본형 LDM과 거의 유사하며, 전류의 증가에 따라 스트로크의 중앙부분에서 추력의 감소가 나타나고 있다. 또한, 가동자의 중량을 가볍게 개량하여 기계적 시정수를 개선한 관계로 2.5[A]까지도 포화 없이 측정이 가능하였다. 즉, 개선형은 기준형에 비해 응답특성이 향상되고 추력도 약 10[%] 정도로 향상되었음을 알 수 있다. (c)는 제안형 LDM의 추력 특성을 나타낸 것으로 전류의 범위를 1[A], 1.5[A] 및 2[A]이외에도 포화점에 이르는 점인 7[A]까지 증가시키면서 위치에 따른 추력을 측정된 결과 전체 이동 변위에 대해 거의 일정한 추력이 발생함을 알 수 있다.

4.2.3 전류에 따른 추력 특성

그림 20은 변위에 대한 추력 특성 결과를 토대로 전류 1.5[A]를 각 LDM에 가해질 때 추력 특성을 분석한 결과이다. 그림 20에서 철심의 포화를 고려하지 않고 고정자철심을 단일 권선으로 성층한 기준형 LDM은 추력의 불균형과 왜형이 발생한 것에 비해 가동자의 체적과 질량을 감소시킨 개선형 가동자의 추력 특성은 향상되었음을 알 수 있다. 특히, 고정자 철심의 양 끝부분에는 보조철심만을 밀착 시킴으로써 자속의 증가에 의해 추력이 더욱 증가하였다. 그러나 제안형인 양측 다분할 여자형 LDM은 개선형에서 다중 분할됨으로서 전체 이동변위에 대해 거의 일정한 추력이 발생함을 알 수 있다.

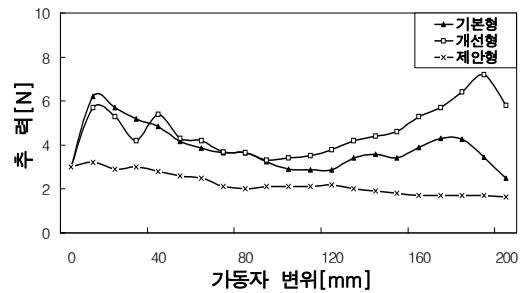


그림 20 LDM의 추력특성 비교

Fig. 20 Comparison with thrust characteristics of LDM

그림 21은 LDM의 스트로크 중앙부분에서의 전류 증가에 따른 추력의 변화를 표시한 것으로, 기준형과 개선형 LDM은 2.5[A]에서 더 이상의 추력이 증가되지 않고 철심이 포화상태에 이른다는 것을 알 수 있었다. 그러나 제안형 LDM의 경우는 7.0[A]까지 전류를 증가시켜도 추력이 포화되지 않고 일정하게 상승함을 확인할 수 있었다.

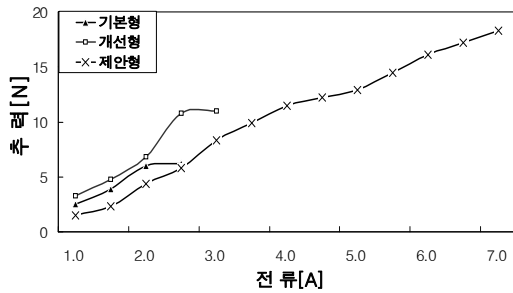


그림 21 고정자 전류 변화에 대한 추력 변화
 Fig. 21 Variation of thrust by stator current

5. 결 론

본 연구에서는 2중 여자 방식의 가동자석형 LDM을 대상으로 LDM의 응답 특성의 향상을 위해 가동자 철심의 체적을 감소시킬 수 있는 기법, 정추력의 유지를 위해 영구자석의 폭 대 고정자 권선 폭의 비를 결정하여 여자시 추력의 리플이 억제하며 위치 정밀성을 유지하는 분할 다중 권선형 LDM을 제안한 것이다.

정추력을 유지하기 위해 LDM의 영구자석의 자극과 고정자 권선 사이의 공극에서 발생하는 힘을 수직력과 수평력으로 나누어 분석하여 영구자석 폭과 권선 폭의 비를 결정할 수 있었다.

또한, 가동자 철심이 포화되지 않는 철심구조의 설계로 약 41[%] 정도의 가동자 질량의 감소를 이룰 수 있었고 응답 특성을 개선시킬 수 있었으며 발생 추력도 약 10[%] 정도 증가시킬 수 있었다. 즉, 제안한 다중 권선형 LDM은 기존의 단권선형 LDM에 비해 우수한 정추력 특성을 지니고 있음을 실험을 통해 입증할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] M. Honaoka, et al, "Analysis of Moving Magnet LinearDC Motor with Two Straight Stators", Electrical Engineering in Japan, vol. 112, no. 5, pp. 100-107, 1992.
 [2] D. Casadei, et al, "Design and Control of a Slotless PM DC Linear Actuator Servo System", Proc. of ICEM'92, Manchester, pp. 132-136, 1992.
 [3] A Basak, A. F. Filho, "Investigation of a Novel Double Armature Brushless DC Linear Motor", IEEE Trans. on Mag., vol. 31, pp. 789-795, 1995.
 [4] A Basak, et al, "Static and Dynamic Characteristics of a Double Armature Brushless D. C. Linear Motor," T. IEE Japan, vol. 118-D, no. 9, pp. 1050-1055, 1998.
 [5] T. Mizuno, "Consideration on Thrust-Input Ratio of a Cylindrical Moving Coil Type Linear DC Motor", T. IEE Japan, vol. 118-D, no. 4, pp. 444-449, 1998.
 [6] T. Mizuno, "Electrical Time Constant of a Moving-magnet-Type Linear DC Motor", T.IEE Japan, vol. 119-D, no. 3, pp. 327-332, 1999.
 [7] H. Wakiwaka, et al, "Consideration of High-speed

Positioning of Linear DC Motor," IEEE Trans. on Mag., vol. 33, no. 5, pp. 3880-3882, 1997.

[8] H. Wakiwaka, et al, "Relation between Thrust Constant and Size for Design of Moving Coil Type Linear DC Motor", T.IEE Japan, vol. 117-D, no. 7, pp. 863-8649, 1997.
 [9] 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.
 [10] 백수현, 김용, "계기용 영구자석형 LDM의 설계 제작 및 기본특성연구", 대한전기학회 논문지, 제48B권, 제2호, pp. 56-62. 1999.
 [11] 윤신용 외, "브러시리스 직류전동기의 정속도 운전을 위한 디지털 PI 제어," 대한전기학회 논문지, 제49B권, 제6호, pp. 395-402, 2000. 6.
 [12] 김일남 외, "정현파 역기전력 특성을 갖는 브러시리스 동기 전동기의 모델링 및 특성해석," 대한전기학회 논문지, 제49B권, 제6호, pp. 380-386, 2000. 6.

저 자 소 개



김 일 남(金 一 男)
 1942년 12월 10일 생, 1967년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1981년 동국대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1978년~현재 동서울대학 전기제어정보과 교수. 현재 당학회 전문대학위원회 회장.

Tel : 031-720-2062
 Fax : 031-720-2062
 E-mail : ilnam@haksan.dsc.ac



이 상 철(李 相 喆)
 1952년 8월 13일 생, 1997년 숭실대 공대 전기공학과 졸업, 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1981년~현재 동서울대학 전기제어정보과 교수.

Tel : 031-720-2065
 Fax : 031-720-2060
 E-mail : sclee@haksan.dsc.ac.kr



구 춘 근(具 春 根)

1960년 1월 14일 생, 1989년 서울산업대 전기공학과 졸업, 1991년 숭실대학원 전기공학과 졸업(석사), 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1997년~ 현재 성남 기능대학 전기과 교수.

Tel : 031-739-4071
Fax : 031-739-4071
E-mail : chkkoo@snp.ac.kr



강 구 홍(姜 求 洪)

1960년 5월 29일 생, 1996년 광운대학교 산업정보대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 2001년 강원대학교 대학원 전자공학과(박사), 현재 성남기능대학 광전자과 재직(조교수)

Tel : 031-739-4012
Fax : 031-739-4055
E-mail : kgh33@kopo.or.kr