

Design and Analysis of Permanent Magnet Type LDM for Implementation

金 龍* · 白壽鉉**

(Yong Kim · Soo-Hyeon Baek)

Abstract - This paper is concerned with the design and the construction of a moving magnet type linear DC motor(MM type LDM) for instrumentation. A mathematical model for the design of a LDM is developed and a permeance method is used to calculate the effective flux density in the air gap. The flux distribution in the air gap is analyzed and the width of iron core should be determined in order not to saturate the iron core by calculating maximum flux density. The design data calculated by a permeance method are compared with the analyzed results using FEM(MAXWELL 2D). The errors between two results are corrected. The tested LDM is constructed using the corrected design data. The results of experiment for thrust characteristics are compared with simulation.

Key Words : MM type LDM, Permeance method, finite element analysis.

1. 서 론

선형 전동기(Linear Motor)는 직선 운동량을 필요로 하는 각종 산업분야에서 종래의 회전형 모터를 대신하여 점차 그 응용이 확대되는 추세에 있다. 선형전동기는 구동 전원에 따라 선형직류전동기(LDM)와 선형교류전동기(LSM, LIM)로 구분되며, 특히 LDM의 경우 가동코일(Moving Coil)형과 가동자석(Moving Magnet)형으로 분류된다. 가동코일형은 가동부에 권선을 갖는 구조로 가동부에 전력 공급을 위한 전기적 접속이 필요로 되는 단점이 있다. 그러나 가동자석형은 가동부에 전기적 접속이 불필요하며 이로 인해 가동부에서 열 손실이 발생하지 않고 구조가 간단하며 가격이 저렴한 장점을 지니고 있다[1]~[3]. 따라서 계기용 LDM으로는 가동자석형이 주로 이용되며, 단(短)스트로크 구조가 일반적이라 할 수 있다. 또한 계기용 LDM의 경우 추력 리플이 작고 정추력이 발생되어야 하며, 저진동, 고응답특성을 지녀야 할 뿐 아니라 안정된 동작이 이루어져야 한다. 한편 LDM에 대해 설계를 포함한 다수의 논문이 발표되어 왔으나 아직까지 설계에 관한 명확한 이론이나 방식의 제안은 이루어지지 않은 것으로 생각되며 이에 대한 지속적인 연구가 필요로 된다.[1]~[6]

본 연구에서는 계기용으로 이용될 수 있는 단(短)스트로크 가동 자석형 LDM을 설계 및 제작하고자 한다. 모터의 설계에는 크게 유한요소법과 퍼미언스법과 같은 두가지 해석법이 이용되고 있는 데 이중 유한요소법은 복잡한 수치해석이 이

루어려야 하나 퍼미언스법의 경우 간단한 모델에 대해 비교적 계산이 용이하게 이루어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구결과를 참고로 LDM의 정추력을 얻기 위한 설계데이터를 먼저 퍼미언스법을 이용하여 개략적으로 구한 후 이 데이터의 타당성을 유한요소법으로 확인하여 발생된 오차를 반복적으로 수정하는 설계방식을 적용하였다. 즉 LDM의 설계를 위한 수학적 모델을 구하고 퍼미언스법을 이용하여 공극의 실효자속밀도를 계산한다.[4]. 또한 영구자석과 권선 전류에 의해 발생하는 공극의 자계 분포를 해석하고, 목적하는 추력을 발생시킬 수 있는 전류에 대해 철심이 포화되지 않도록 철심의 폭을 결정한다[5]~[7]. 또한 이러한 과정을 통하여 구해진 설계 데이터를 이용하여 해석한 결과를 유한요소법 패키지 Maxwell 2D의 해석결과와 비교 및 검토하여 시행착오와 같은 반복적인 방법으로 설계 데이터를 보정한 후 시작기를 제작하고, 제작된 시작기의 추력특성에 대한 시뮬레이션과 실험결과를 비교하여 일정 추력을 필요로 하는 계기용 단(短)스트로크 가동 자석형 LDM에 대한 설계방식과 시작기의 유효함을 보이고자 한다.

2. 가동 자석형 LDM의 설계 이론

2.1 가동 자석형 LDM의 구조 및 자계 해석

계기용으로 적합한 LDM의 조건은 다음과 같다.[1][8][9]

- 1) 추력 리플의 저감을 위해 철심은 치(齒)형상이 아닌 편평형 철심으로 하고, 극수는 단극형으로 하며 여자방식은 단상 여자 방식을 적용한다.
- 2) 장스트로크의 경우 코일의 인덕턴스 값이 증가하게 되어 철심의 중앙부분에서 포화가 발생하게 되므로 단스트로크가 적합하다.
- 3) 우수한 응답 특성, 정속도 특성, 저진동 특성을 지녀야 하

* 正 會 員 : 東國大 工大 電氣工學科 助敎授 · 工博

** 正 會 員 : 東國大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博

接受日字 : 1998年 9月 8日

最終完了 : 1998年 12月 14日

며 가동자는 경량이어야 한다.

- 4) 정추력을 발생하기 위한 가이드레일의 선택이 중요하다.
- 5) 동일 변위에서 두배의 추력을 얻기 위해서는 양측식 구조의 LDM이 적합하다.

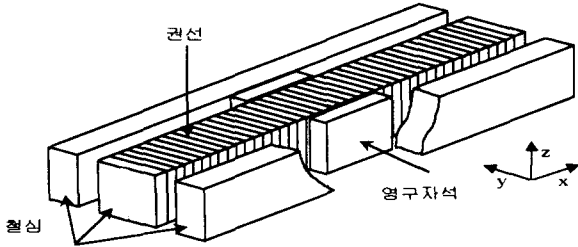


그림 1 MM형 LDM의 기본 구조
Fig. 1 Basic structure of MM type LDM

그림 1은 본 논문에서 설계 및 제작하고자 하는 LDM의 기본구조이다. 고정자는 3개의 고탄소강(S45C)으로 구성되고 가동자는 2개의 페라이트 영구자석으로 구성되며 중앙철심을 기준으로 대칭구조로 된다. 또한 중앙철심에는 스트로크 길이까지 코일을 균일하게 권선하였으며 중앙철심 양쪽에는 보조철심과 자석을 배치하는 양측식 가동자석형 구조로 하였다. 가동자에는 영구자석을 양쪽으로 배치하며, 또한 단극형 코일의 구조로 함으로써 다극형 다상 여자결환에 의한 방식보다 추력리플이 적다는 특징을 지니게 된다.

식(1)은 가상 변위의 원리를 나타내며 이를 이용하여 LDM의 추력을 구할 수 있다.[4]

$$F = - \frac{\partial W_{co}(i, x_m)}{\partial x_m} \quad (1)$$

여기서 $W_{co} = \frac{R \Phi^2}{2}$: 자계에너지

$$F = - \frac{\Phi^2}{2} \frac{dR}{dx_m} : \text{추력}$$

x_m : 자석의 위치, i : 고정자 전류

R : 자기저항 (릴럭턴스: $R = 1/Y$)

따라서 추력을 구하기 위해서는 먼저 자계에 대한 해석이 이루어져야 한다. LDM의 추력 발생에 실질적으로 영향을 미치는 공극에서의 자속밀도는 다음 3가지 경우로 구분하여 해석할 수 있다.

- (1) 영구자석에 의한 공극 자계
- (2) 전류에 의한 공극 자계
- (3) 전류와 영구자석에 의한 공극 자계

2.2 영구자석에 의한 공극 자계

그림 1의 LDM에서 영구자석에 의한 자계만이 존재하는 경우 공극에서의 실효자속밀도는 퍼미언스법을 이용한 자기회로의 해석으로 계산할 수 있다. 또한 자석에 의한 자계는 그림 2와 같이 여러 부분으로 나누어 해석할 수 있으며 그림 2는 그림 3의 자기적인 등가회로로 나타낼 수 있다.

여기서, B_{mo} : 자석내부의 자속밀도(the flux density in the permanent magnets)

B_g : 자석에 의한 철심과 철심사이의 귀환 자속밀도 (the return flux density between the iron cores)

B_{ms} : 자석 주위의 표유 자속밀도(the stray flux density around the magnets)

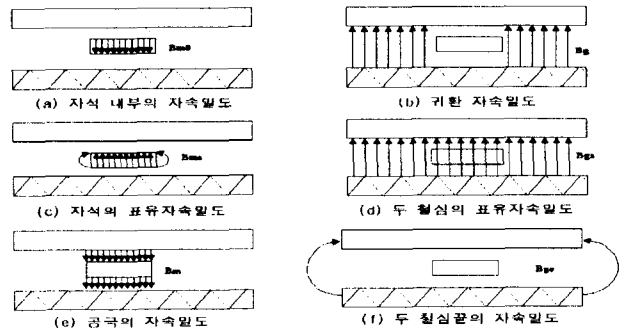


그림 2 LDM의 각 자속 경로

Fig. 2 Each flux path of LDM

B_{gs} : 두 철심 사이의 표유 자속밀도(the stray flux density at the two sides)

B_m : 자석과 내부 철심 사이의 유효 자속밀도 (the effective flux density in the air gaps between the magnets and the inner core)

B_{ge} : 두 철심 끝의 자속밀도(the stray flux density at the two head ends)

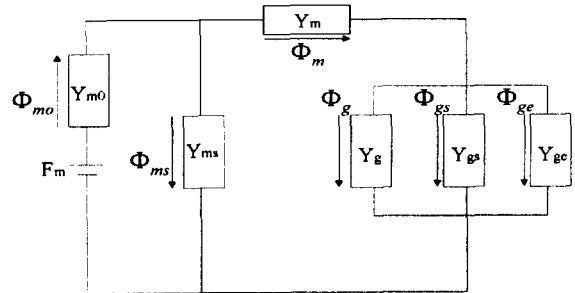


그림 3 LDM의 자기적 등가회로

Fig. 3 Magnetic equivalent circuit of LDM

이상적인 경우, 자기회로의 퍼미언스 Y 는 식(2)와 같이 표현된다.

$$Y = \mu_0 \mu_r \frac{\text{자로의 단면적}}{\text{자로의 길이}} \quad (2)$$

따라서 그림 2의 등가회로로부터 다음의 관계식들을 유도할 수 있다.

$$\Phi_m = \Phi_g + \Phi_{gs} + \Phi_{ge} \quad (3)$$

$$\Phi_{mo} = \Phi_{ms} + \Phi_m \quad (4)$$

$$\frac{\Phi_{mo}}{Y_{mo}} = \frac{\Phi_m}{Y_m} + \frac{\Phi_g + \Phi_{gs} + \Phi_{ge}}{Y_g + Y_{gs} + Y_{ge}} \quad (5)$$

$$F_m = \frac{\Phi_{ms}}{Y_{ms}} + \frac{\Phi_{mo}}{Y_{mo}} \quad (6)$$

S_m 을 영구자석의 극단면적이라 하면 $F_m Y_{mo} = B_r S_m$,

$\Phi_m = S_m B_m$ 이므로, 공극에서의 실효 자속밀도는 식(3)~식(6)로부터 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_m = \frac{B_r}{\left[\frac{1}{Y_g + Y_{gs} + Y_{ge}} + \frac{1}{Y_m} \right] (Y_{mo} + Y_{ms}) + 1} \quad (7)$$

여기서, B_r : 잔류자속밀도[T]

F_m : 기자력(magnetomotive force)

Φ_{mo} : 자석내의 자속(the flux in the permanent magnets)

- Φ_g : 자석으로 인한 두 철심 사이의 귀환 자속
(the return flux between the iron cores)
- Φ_{ms} : 자석(자체)의 표유자속(the stray flux around the magnets)
- Φ_{gs} : 두 철심 사이의 표유자속(the stray flux at the two sides)
- Φ_m : 자석과 철심사이의 공극자속(the effective flux in the air gaps between the magnets and the inner core)
- Φ_{ge} : 두 철심 끝의 누설자속(the stray flux at the two head ends)

식(3) ~ (6)에서 $Y_{mo}, Y_g, Y_{ms}, Y_{gs}, Y_m, Y_{ge}$ 는 각각 $\Phi_{mo}, \Phi_g, \Phi_{ms}, \Phi_m, \Phi_{gs}, \Phi_{ge}$ 에 대응하는 퍼미언스를 나타낸다. 여기서 Y_m, Y_g, Y_{mo} 는 식(2)로부터 계산되며 Y_{ms}, Y_{gs}, Y_{es} 는 추력의 발생에 미치는 영향이 매우 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 식(7)은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_m = \frac{B_r}{\left[\frac{1}{Y_g} + \frac{1}{Y_m}\right] Y_{mo} + 1} \quad (8)$$

식(8)에 퍼미언스 Y_m, Y_g, Y_{mo} 를 계산하여 대입하면 식(8)은 식(9)로 표현된다.

$$B_m = \frac{1}{1 + \mu_r \left[\frac{(g-d_m)}{d_m} + \frac{g}{d_m} \frac{l_m}{(l-l_m)} \right]} B_r$$

$$= k \frac{d_m}{\mu_m} B_r \quad (9)$$

여기서 $\frac{1}{k} = \left[\frac{d_m}{\mu_m} + \frac{g-d_m}{\mu_o} + \frac{g}{\mu_o} \frac{l_m}{(l-l_m)} \right], \mu_m = \mu_o \mu_r$

따라서 식(9)로부터 영구자석에 의한 공극의 실효 자속밀도를 계산할 수 있다.

2.3 전류에 의한 공극 자계

그림 4는 그림 1의 LDM에 대한 해석 모델을 나타낸 것으로, x 축은 가동자의 운동방향, y 축은 자계의 방향, z 축은 전류의 방향을 나타낸다. 또한, 철심의 투자율이 큰 것으로 가정하면 전류에 의한 자계중 공극자계에 영향을 미치는 y 축 성분, 즉 H_e 만을 고려하여 해석할 수 있다.

그림 4에서 z 축 방향의 단부효과를 무시하는 경우 폭 dx 인 점선부분에 암페어의 법칙을 적용하고 이를 적분하면 식(10)을 얻을 수 있으며[5]~[7], 철심의 투자율이 무한대이고, 누설이 없다고 가정한다면 식(10)의 해는 식(11)과 같다.

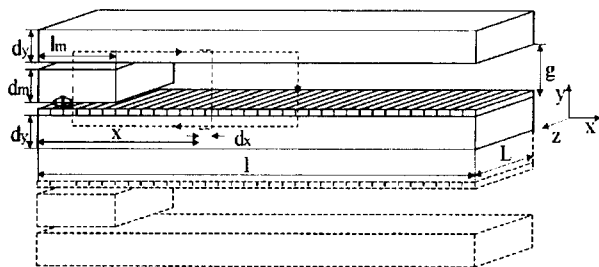


그림 4 해석 모델
Fig. 4 Analysis model

$$\frac{\partial H_e}{\partial x} = \frac{J_l}{g} \quad (10)$$

$$H_e(x) = \frac{J_l}{g} \left(x - \frac{l}{2}\right) \quad 0 \leq x \leq l \text{ 일 경우} \quad (11)$$

따라서, 전류에 의한 공극의 자속밀도는 식(12)로 표현된다.

$$B_e(x) = \mu_o H_e(x)$$

$$= \mu_o \frac{J_l}{g} \left(x - \frac{l}{2}\right) \quad 0 \leq x \leq l \text{ 일 경우} \quad (12)$$

여기서, H_e : 여자전류에 의한 자계의 세기 [A/m]

x : 가동자의 변위 [m], g : 공극 [m]

J_l : 여자 선전류 밀도 [A/m]

B_e : 여자 전류에 의한 자속밀도 [T]

2.4 전류와 영구자석에 의한 공극 자계

전류에 의한 자계내에 영구자석이 존재할 경우, 암페어 주회 적분법칙으로부터 식(13)을 유도할 수 있다.

$$H_{mo} d_m + H_m(g - d_m) = H_e(x) g \quad (13)$$

여기서, H_{mo} : 자석 내부 자계의 세기

d_m : 자석의 높이, g : 두 철심사이의 공극

식(13)으로부터 식(14)와 같이 전류 및 영구자석에 의해 공극에 발생하는 자속밀도를 계산할 수 있으며, 이와 같은 자속밀도로부터 영구자석에 작용하는 추력을 계산할 수 있다.

$$B_m = k \left\{ g H_e(x) + B_r \frac{d_m}{\mu_m} \right\} \quad (14)$$

2.5 철심 폭의 선정

LDM이 전 스트로크에 걸쳐 일정추력을 발생하기 위해서는 전류 및 영구자석에 의한 철심의 포화를 방지하여야 한다. 따라서 포화에 이르지 않는 전류의 크기 및 철심의 폭이 결정되어야 하며, 철심의 폭 d_y 를 결정하기 위해 먼저 전류와 영구자석에 의해 발생하는 철심의 최대 자속밀도를 구한다.

식(15)는 임의의 위치에서 영구자석에 의한 철심의 최대 자속밀도를 나타내며, 식(15)에 식(9)를 대입하여 정리함에 따라 식(16)을 유도할 수 있다[4].

$$B_{c, \max} = \frac{l_m}{d_y} B_m \quad (15)$$

$$= \frac{l_m d_m B_r}{d_y g l} (l - l_m) \quad (16)$$

식(16)으로부터 공극의 자속밀도가 일정하면 가동자의 변위에 따라 철심의 자속밀도 B_c 는 $B_{c, \max}$ 에 도달한 후 선형적으로 감소하게 됨을 알 수 있다. 또한, 고정자 권선에 전류를 인가하는 경우 철심에서의 자속밀도 B_l 와 최대 자속밀도 $B_{l, \max}$ 는 식(17), (18)로 나타낼 수 있다.

$$B_l = \frac{\mu_o J_l}{2g d_y} (lx - x^2) \quad (17)$$

$$B_{l, \max} = \frac{\mu_o J_l}{8g d_y} l^2 \quad (18)$$

식(16)과 식(18)을 합산함으로써 전체 자속밀도 $B_{T, \max}$ 는 식(19)로 표현할 수 있다.

$$B_{T, \max} = \frac{l_m d_m B_r}{d_y g l} (l - l_m) + \frac{\mu_o J_l}{8g d_y} l^2 \quad (19)$$

식(19)로부터 철심의 자속밀도는 자석이 스트로크의 중앙부분에 위치했을 때 최대가 된다는 것을 알 수 있으며, 전체 자

속밀도 $B_{T,max}$ 가 결정되면 식(19)를 d_v 에 대해 계산함으로써 포화에 이르지 않는 철심의 폭을 결정할 수 있게 된다.

2.6 추력 산출

식(1)의 추력은 식(20)과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$F = 2LJ_1B_r l_m \frac{d_m}{\mu_m} k + 2L J_1^2 \frac{l_m}{g} \left(x_m - \frac{l-l_m}{2} \right) (gk - \mu_o) \quad (20)$$

식(20)에서 우측 제1항은 자석과 전류의 상호작용에 의해 발생하는 추력을 나타낸다. 제2항은 전류밀도의 제곱에 비례하며, 영구자석의 변위에 대한 함수로 표현된다. 또한 제2항은 $(gk - \mu_o)$ 에 비례하며, $g = d_m$ 일 경우 $\mu_m = \mu_o$ 로 간략히 표현될 수 있다. 추력은 변위 $x_m = 0$ 인 지점에서 부(-)의 최대값을 나타내며, $x_m = l - l_m$ 인 지점에서 정(+)의 최대값을 나타내게 된다. 따라서 전체 추력은 가동자가 정의 방향으로 움직일 때 증가하게 됨을 알 수 있다.

만약 $\mu_m = \mu_o$ 이면 식(20)은 식(21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = 2LJ_1 l_m B_r \frac{d_m}{g l} (l - l_m) \quad (21)$$

또한 식(9)에서 $\mu_m = \mu_o = B_r \frac{d_m}{g l} (l - l_m)$ 일 경우

$$B_m = k \frac{d_m}{\mu_o} B_r \quad (22)$$

이므로 식(20)은 식(23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = 2LJ_1 l_m B_m \quad (23)$$

식(22)으로부터 계산된 실효 자속밀도와 식(23)을 이용하여 LDM의 추력을 결정할 수 있다.

3. MM형 LDM의 설계 및 설계사양

본 논문에서는 단극형, 단상 여자방식, 편평형 구조를 지니며 계측용(유량, 수량, 공압) 계기에 적용하기 위한 단(短)스트로크 가동자석형 LDM을 설계 및 제작하였다.

표 1 LDM 제작 사양

Table 1 Specifications of LDM

항 목	기호[단위]	A 형 수 치	B 형 수 치
영구 자석의 두께	d_m [mm]	10.0	10.0
영구 자석의 길이	l_m [mm]	40.0	47.0
영구 자석의 폭	L [mm]	25.0	22.0
철심의 두께	d_v [mm]	10.0	12.0
철심의 길이	l [mm]	200.0	220.0
철심 사이의 간격	g [mm]	14.0	14.0
코일의 턴 수	N [회]	1920	2128
정격 전류	[A]	0.6	0.55
정격 추력	[N]	1	1.25
기 자 력	[AT]	1152	1170
가동자 질량	[kg]	0.523	0.163
코일의 두께	[mm]	0.5	0.45

그림 5는 설계 파라미터를 구하기 위한 설계 순서도를 나타낸다. 먼저, 영구자석과 추력을 설정한 후 영구자석의 기자력을 기준으로 실효자속밀도와 전자석에 의한 기자력을 결정할 수 있도록 권선의 두께와 턴수를 결정한다. 또한 영구자

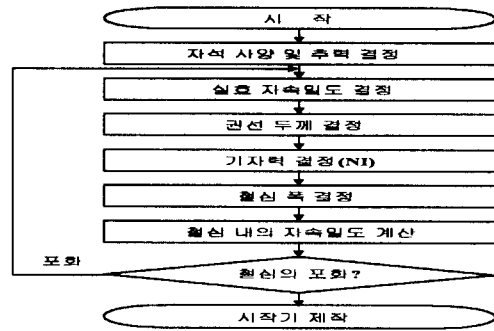


그림 5 LDM의 설계 순서도
Fig. 5 Flowchart of LDM design

석과 전자석에 의한 합성자속밀도가 철심의 포화 자속밀도를 초과하지 않도록 철심의 폭을 결정한다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 6은 고정자 전류의 크기를 가변할 때 자석의 변위에 따른 추력의 변화를 나타낸 것으로 스트로크의 시작부분에서 끝부분으로 이동할수록 추력이 감소한다는 것을 알 수 있다.

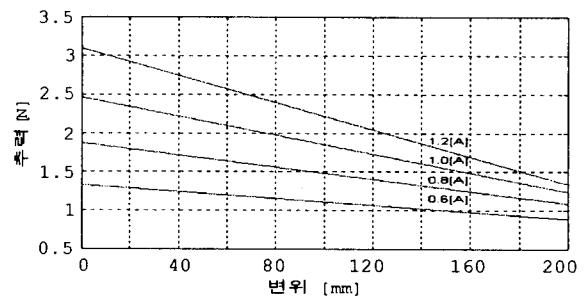


그림 6 전류 가변시 영구자석의 이동에 따른 추력(A형)
Fig. 6 Thrust force versus magnet displacement for current variation

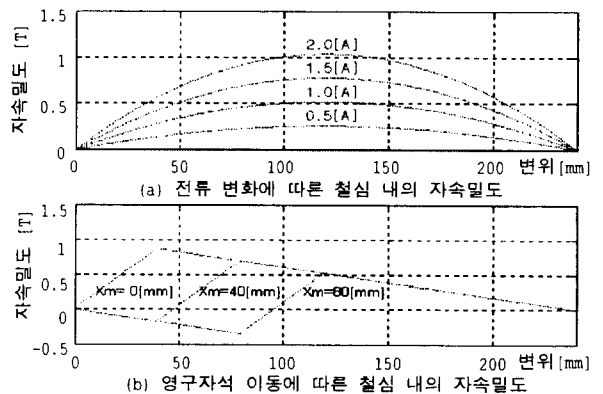


그림 7 철심의 자속밀도(A형) [X_m =자석의 위치]
Fig. 7 Flux density in iron core

그림 7의 (a)는 전류의 변화에 대한 철심 자속밀도의 변화를 나타낸 것으로 전류의 증가에 따라 철심 중앙 부분의 자속밀도가 다른 부분보다 높아지는 경향을 지니게 됨을 알 수 있

으며, 그림 (b)는 無여자시 자석의 위치 변화에 따른 철심 자속밀도를 나타낸 것으로 철심 자속밀도는 최대값에 도달한 후 선형적으로 감소한다는 것을 알 수 있다.

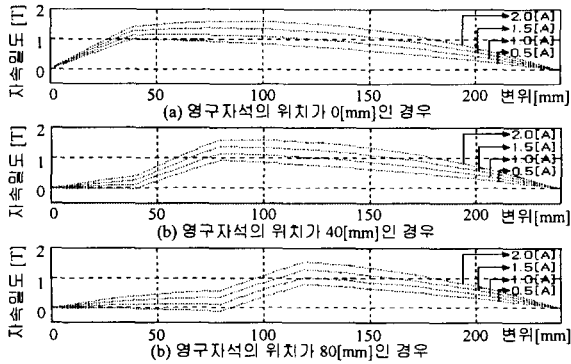


그림 8 철심의 전체 자속밀도(A형)
Fig. 8 Total flux density in iron core

그림 8은 전류에 의한 자속밀도와 영구자석에 의한 자속밀도를 합성한 철심의 자속밀도를 나타낸 것으로 LDM의 설계시 그림 8로부터 얻어진 철심 내부자속밀도의 최대값이 철심 재질의 최대 자속밀도보다 높지 않도록 철심의 두께를 결정해야 한다. 본 논문에서는 철심의 최대 자속밀도를 1.6[T]로 하였다.

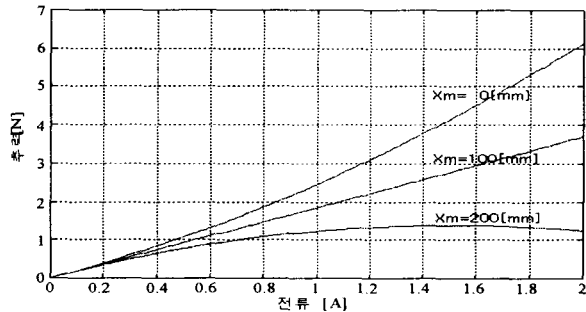
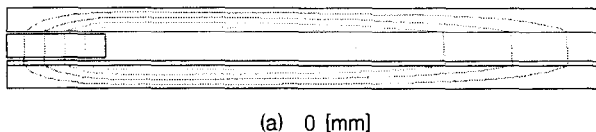


그림 9 여자전류에 대한 변위-추력 특성 (A형)
Fig. 9 Thrust characteristics for stroke versus current

그림 9는 가동자의 시작부분 0[mm], 중앙부분 100[mm]와 끝부분 200[mm]에서 전류의 가변에 따른 추력특성을 나타낸 것이며, 고정자 전류의 증가에 따라 세개의 곡선사이에는 현저한 차이가 있음을 알 수 있다. 또한, 가동자의 위치에 따른 추력은 스트로크의 길이에 의해 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 스트로크 길이의 증가에 따라 추력은 더욱 현저하게 감소되며, 이는 철심의 포화로 인하여 쇄고 자속이 감소하기 때문이다.

그림 10은 여자전류를 0.5[A]로 고정하고 가동자의 위치를 0[mm], 40[mm], 80[mm]로 하는 경우 유한 요소법으로 해석한 자속밀도의 분포를 나타낸 것이다.



(a) 0 [mm]

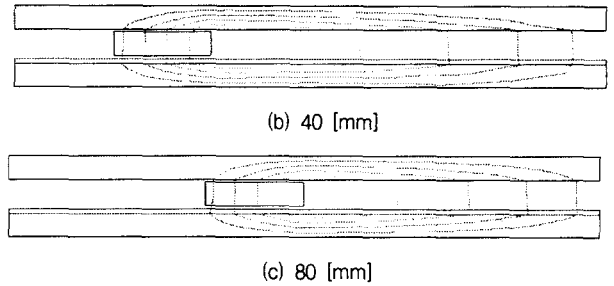
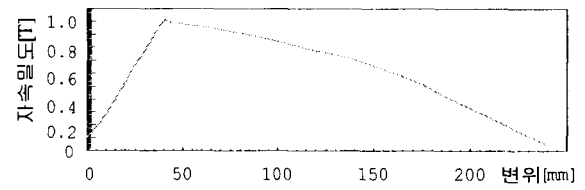
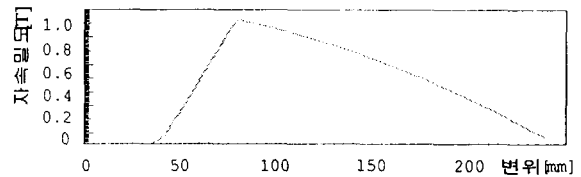


그림 10 영구자석 위치에 따른 자속 분포(A형, 0.5[A])
Fig. 10 Flux density according to displacement

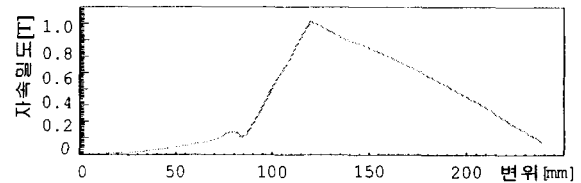
또한 그림 11은 유한 요소법으로 해석한 철심의 최대 자속밀도를 나타낸 것으로 그림 8과 거의 일치함을 알 수 있다.



(a) 0 [mm]



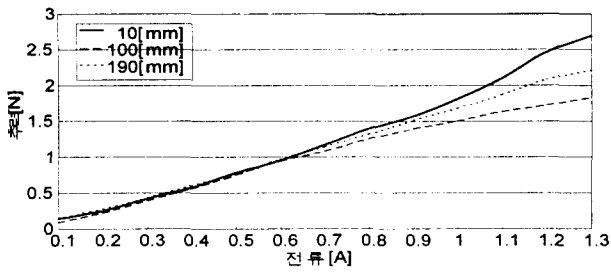
(b) 40 [mm]



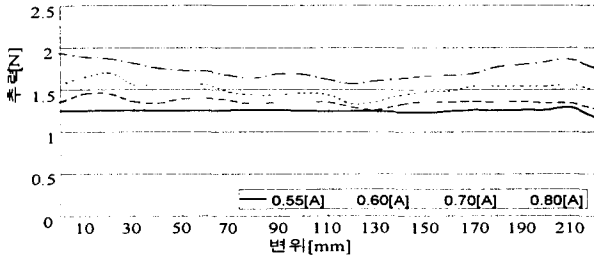
(c) 80 [mm]

그림 11 유한요소법에 의한 철심의 자속밀도(A형, 0.5[A])
Fig. 11 Flux density of iron core by finite element method

그림 12는 본 연구에서 설계 제작한 두 종류의 MM형 LDM의 일정 스트로크에 대해 전류의 가변에 따른 추력의 변화를 실측한 결과이다. 추력은 스트로크의 중앙 부분에서 감소하는 경향을 나타내며, 이러한 경향은 전류의 증가에 따라 더욱 두드러지게 됨을 확인할 수 있다. 그림 12(a)로부터 A형 LDM에 대해 전류를 1.2[A]까지 가변하는 경우 2.5[N]까지의 추력이 발생하며, 0.6[A]에서 1[N]의 정추력이 발생됨을 알 수 있다. 그림 (b)로부터 B형 LDM에 대해 전류를 0.8[A]까지 변화시키는 경우 2[N]까지의 추력이 발생되며 0.55[A]에서 1.25[N]의 정추력이 발생함을 알 수 있다. 따라서 LDM의 발생추력은 가동자 위치가 변할 때 고정자 권선과 쇄고하는 자속의 변화량에 비례한다는 것을 알 수 있다. 한편, 스트로크의 중앙 부분에 가동자가 위치하는 경우 자석에 의한 자속과 전류에 의한 자속이 철심을 포화시키게 되며 그결과 추력이 감소함을 알 수 있다.



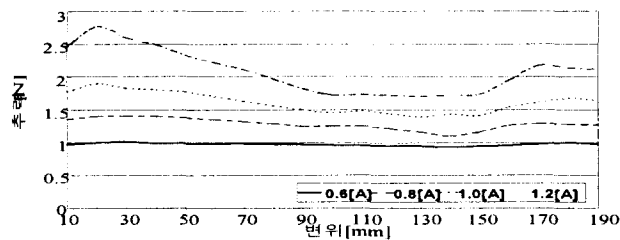
(a) A형(스트로크 200[mm])



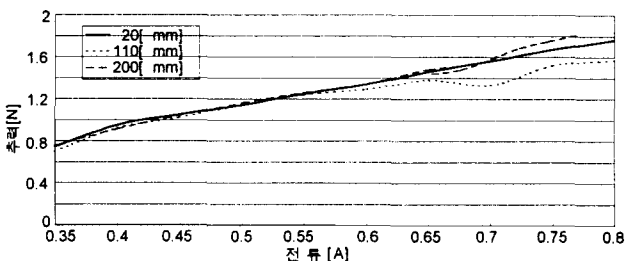
(b) B형(스트로크 220[mm])

그림 12 전류 가변에 따른 추력-변위 특성
Fig. 12 Thrust versus displacement characteristics according to current variation

그림 13은 설계 제작한 두 종류의 LDM에 대해 가동자의 위치를 시작부분(10, 20[mm]), 중앙부분(100, 110[mm]), 끝부분(190, 200[mm])으로 하고, 각각의 위치에서 전류를 가변하는 경우 LDM의 발생추력을 측정하여 가동자가 전 스트로크의 시작부분과 끝부분에 위치하는 경우에 비해 중앙부분에 위치할 때 전류의 증가에 대한 추력의 증가율이 낮아짐을 알 수 있다.



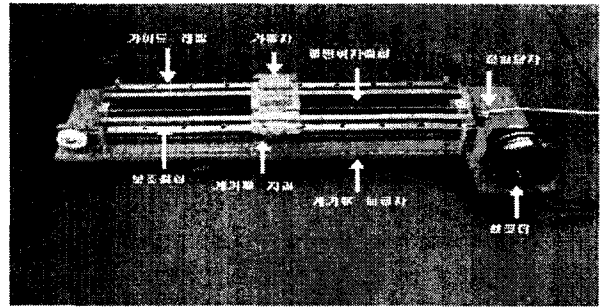
(a) A형(스트로크 200[mm])



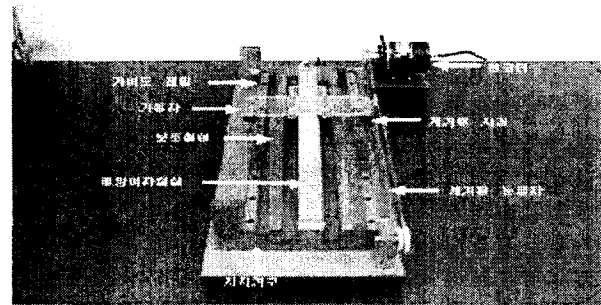
(b) B형 (스트로크 220[mm])

그림 13 전류에 대한 스트로크 변화에 따른 추력 특성
Fig. 13 Thrust versus current according to stroke variation

그림 14(a), (b)는 본 연구에서 설계·제작한 LDM의 정면도와 측면도를 나타내며, 그림 15(a)와 (b)는 추력 측정 장치, 구동회로, 위치 및 속도 측정 시스템을 나타낸다.

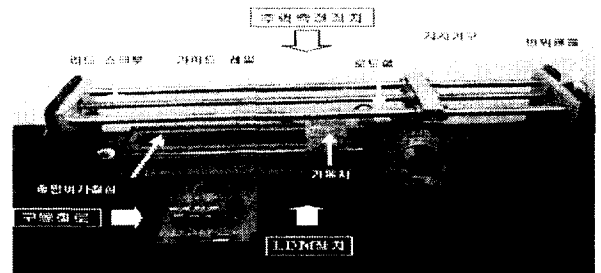


(a) 정면도

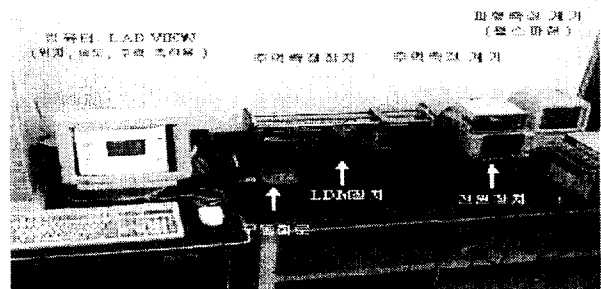


(b)측면도

그림 14 설계 제작된 LDM 시작기
Fig. 14 Tested LDM



(a)추력측정시스템



(b) 전 시스템

그림 15 LDM 추력측정 및 전 시스템

Fig. 15 LDM thrust implementation and total system

5. 결 론

본 연구에서는 각종 산업 분야에서 계측 및 기록 계기용 기기에 적합한 단극형 단스트로크 LDM을 설계·제작하였다. 정추력을 얻기 위한 설계 데이터를 먼저 퍼미언스법을 이용하여 개략적으로 구한 후, 이 데이터의 타당성을 유한요소법으로 확인하여 그 오차를 수정하는 일종의 반복적인 설계방식을 적용하였다. 유한요소법을 이용하여 설계 데이터를 직접적으로 구할 수 있지만 이는 적지 않은 시간을 필요로 하므로 비교적 용이한 퍼미언스법을 이용하여 먼저 설계 데이터를 개략적으로 구한 후, 이 데이터에 대한 자체해석을 유한요소법으로 확인하여 원하는 특성을 얻을 때까지 설계데이터를 반복적으로 수정함으로써 비교적 용이하게 LDM의 설계데이터를 구할 수 있었다.

또한 본 연구의 설계방식을 확인하기 위해 가동자의 중량과 스트로크가 0.523[kg]·200[mm], 0.163[kg]·220[mm]인 두 종류의 LDM을 설계·제작하였으며 시작기에 대한 시뮬레이션과 실험결과로부터 일정 추력을 필요로 하는 계기용 단(短)스트로크 가동 자석형 LDM의 설계방식과 시작기의 유효함을 알 수 있었다. 즉 가동자의 중량이 0.523[kg]이고 가동자의 스트로크가 200[mm] LDM의 경우 0.6[A]에서 1[N]의 정추력을 발생하였으며, 가동자의 중량이 0.163[kg]이고 가동자의 스트로크가 220[mm] LDM의 경우 0.55[A]에서 1.25[N]의 정추력을 발생하였다. 또한 정격 전류에 대해서는 전 스트로크에 걸쳐 일정한 추력이 발생하는 반면, 정격이상의 큰 전류에 대해서는 스트로크의 중앙부분에서 철심의 포화로 인하여 추력이 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 장스트로크를 요하는 LDM의 경우 다극형 권선 기법을 적용함으로써 철심의 포화를 줄일 수 있을 것으로 예견되며, 앞으로 이 분야에 대한 연구가 지속적으로 이루어진다면 계기용(유량, 공압, 유압측정)시스템, 혈압 기록기 및 펜레코더 등과 같은 많은 응용분야에서 필요로 되는 다양한 스트로크를 지닌 LDM의 설계에 적용 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 수행되었음.(과제번호:1997-0129-0)

참 고 문 헌

[1] 편집부, "Linear Motor Application Handbook", 세화출판사, 1988.
 [2] I. Boldea, S.A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", John Wiley & Sons, 1985.
 [3] A. Basak, "Permanent Magnet DC Linear Motors", Oxford Press, 1996.
 [4] L. Hond, K.H. Meyer, "A linear DC motor with permanent magnets", Philips tech. Rev. 40, pp. 329-337, 1982
 [5] B. Brunelli, D. Casadei and G. Serra, "Analysis of a Slotless Permanent Magnet Brushless DC Linear Motor", Proc. of ICEM'90, Boston, pp. 173-178, 1990.
 [6] D. Casadei, G. Grandand and G. Serra, "Design and Control of a Slotless PM DC Linear Actuator for

Servo System", Proc. of ICEM'92, Manchester, pp. 132-136, 1992.

[7] D. Casadei, "Comparative Analysis of Slotless PM DC Linear Actuators with Different Magnetic Cores", Proc. of UPEC'93, Stanford, vol. 1, pp. 425-428, 1993.
 [8] 正田英介, "리아드라이브 技術と その 應用", 오ーム社
 [9] 岩間, 若林, 他, "리아 直流 모ータ의 情報機器·OA 機器·計測機への 應用", 電氣學會 마그네틱스 硏究會 資料 MAG-86-31, 1987.

저 자 소 개



김 용(金 龍)

1957년 3월 20일생. 1981년 동국대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과(공박). 1988~1995년 대림전문대학 제어계측과 부교수. 1995~현재 동국대 공대 전기공학과 조교수.



백 수 현(白 壽 鉉)

1947년 5월 2일생. 1972년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1977~현재 동국대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 학술이사