

# 가동자석형 선형 직류모터의 최적설계

## Optimal Design for a Moving Magnet Type Linear D.C. Motor

손 동 설  
(Dong-Seol Son)

**Abstract** : This paper proposes an optimal design method for the weight and cost of a moving magnet type linear DC motor (MM-LDM). The optimal design condition such as type and size of MM-LDM were determined by the trinary search algorithm after adjusting a standard function and its related parameters. In order to verify results of the optimal design by the computer simulation, the designed values such as a thrust, a current, a velocity, and etc. of the fabricated MM-LDM were measured. And the measurement results are in good agreement with the designed ones.

**Keywords**: moving magnet type linear DC motor, optimal design, trinary search algorithm, objective function

### 1. 서론

최근의 정보기기, 자동화기기에 사용되는 소형모터 구동 시스템에는 고성능화가 요구되고 있으며, 직진 구동 시스템이 많이 이용되고 있다.

직진 구동 방식으로는 회전형 모터와 직선 교환 기구등으로 얻어지는 간접구동방식이 있으나 이 방식은 한계가 있으므로, 고속화, 장치의 소형화, 소음레벨의 감소, 백래쉬(backlash) 나 불감대가 작은 직접 구동방식이 점차적으로 이용되고 있다[1,2,3].

직접 구동형의 직진 구동장치는 선형 전자 액츄에이터(Linear Electromagnetic Actuator)라고 불리우며 종류도 다양하지만 그 중의 하나인 선형 직류 모터(Linear D.C. Motor : LDM)는 추력 / 질량비가 큰 서보 시스템을 구성했을 때 제어성능이 우수하므로 컴퓨터 주변기기, 반송장치, 집적회로 제조구동용, 각종 로봇 등의 고속 동작을 필요로 하는 위치 제어 장치로써 실용화가 기대되고 있다[4].

또한 회로설계에 의해 저속에서 고속까지 자유롭게 설정할 수 있으므로 순시에 저속 / 고속의 절환을 빈번하게 행하는 경우에도 유용하다.

선형 직류모터는 가동전자자형(moving armature type : MA), 가동자석형 (moving magnetic : MM), 가동코일형 (moving coil type : MC) 으로 분류되는데, 이 중에서 고정밀성 위치제어, 장 스트로크(stroke), 최대 추력에 가장 큰 장점을 갖고 있는 가동자석형 선형 직류 모터는 고정자와 가동자 사이에 작용하는 자기흡입력으로 인하여 지지기구가 증가되므로 경제성이 나쁘고, 중량에 대한 최적화가 확립되어 있지 않아서 실용화가 늦어지고 있다[5,6].

가동자석형 선형 직류모터의 전기적, 자기적, 물리적 특성을 포함하는 최적설계에 알맞는 수학적 모델은 N. Bouies 에 의해서 연구되었으나[7] 경제성이나 중량에 대한 연구는 거의 없다.

본 논문에서는 보조 방정식이 필요없고, 처리속도가 빠른 직접 탐색법인 3분 탐색법[8]을 이용하여 가동자석형 선형 직류모터의 경제성과 중량의 극소화를 위한 최적 설계법을 제안한다. 최적 설계에서는 가격과 무게를 목적으로 하는 적합한 설계방식으로, 사양에서 주어진 전력 용량에 적당한 크기를 결정하기 위하여, 사양과 기타 설계조건에 관계가 큰 기준함수를 택해서 목적함수를 정의한다. 기준함수와 형태등을 결정하는 요소들과의 파라미터를 설정해서, 이것들

을 변수로 하는 목적함수가 최소값이 되는 파라미터의 최적치를 3분 탐색법을 이용하여 구한다. 최적 설계에 의한 결과치로 MM-LDM 을 제작하고, 성능을 측정하여 주어진 사양과 일치함을 확인한다.

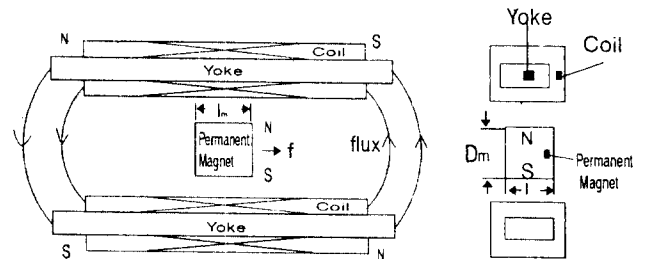


그림 1. MM-LDM의 구조도.  
Fig. 1. A schematic of the MM LDM.

### II. MM-LDM의 개요와 동작 원리

MM-LDM의 기본구조는 그림 1과 같이 두개의 전자석을 평행으로 배치하고, 이것을 고정자로 한다. 이 고정자 사이에 가동자로서 영구자석의 자극이 고정자에 대면하도록 배치한다. 이와같이 여자전류와 자극이 동시에 존재하는 기기의 추력은 전류력과 자기력이 합성된 추력을 얻을수 있는 것이 일반적이다[5]. 그러므로 MM-LDM의 전자력에 의한 추력 F는

$$F = N_1 l B I = K_f I \tag{1}$$

이며,  $N_1$ 은 가동자와 쇄교하는 코일의 권선수[회],  $l$  은 영구자석의 폭(가동자의 영구자석과 대면되는 고정자 코일의 유효길이)[m],  $B$  는 영구자석의 자속 밀도 [ $Wb/m^2$ ],  $I$  는 전류 [A],  $K_f$ 는 선형직류 전동기의 추력상수 [N/A] 이다. 그리고 가동자의 속도 S 는

$$S = \frac{V - R I}{N_1 l B} \tag{2}$$

가 되고[2], V는 전원전압, R은 고정자코일의저항이다. 가동자의 추력 F 는 속도 S 의 함수로 나타내면

$$F = \frac{K_f (V - K_e S)}{R} \tag{3}$$

가 되며,  $K_e$ 는 역기전력상수[V · sec / m]로  $K_e = K_f$ 의 관

접수일자 : 1995. 5. 20., 수정완료 : 1995. 11. 5.  
손 동 설 : 유한 전문대학교 전자과  
\* 본 논문은 유한전문대학 학술 연구비에 의하여 연구되었습니다.  
연구비를 지원해 준 유한전문대학에 감사드립니다.

계가 성립된다[5]. 이상과 같은 (1),(2),(3)에 의한 MM-LDM의 특성곡선은 그림 2와 같다.

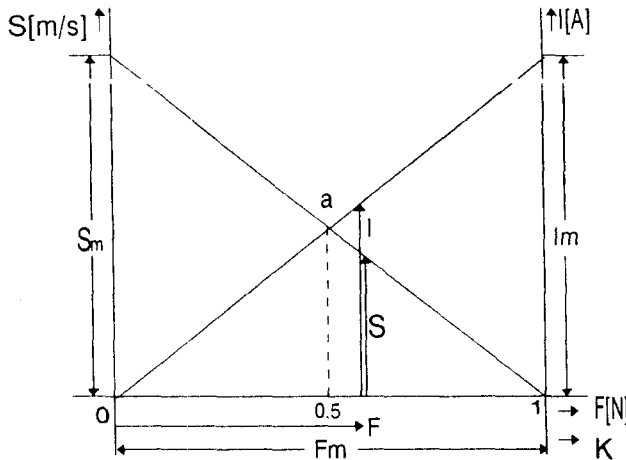


그림 2. MM-LDM의 특성곡선.  
Fig. 2. Characteristic curve of MM-LDM.

그림 2의 특성곡선은 추력-속도곡선과 추력-전류곡선을 나타낸 것으로서  $S_m$ 은 최대속도,  $F_m$ 은 최대추력,  $I_m$ 은 최대전류를 나타낸다. 사양에서 주어진 MM LDM의 동작점 (F,S,I)을 그림 2에서와 같이 점 a로 정한다. 점 a는 MM-LDM의 최대 출력을 나타내는 점이며[9], 최대추력, 최대속도, 최대전류의 1/2인 점이고, 최대추력을 1로 하는 동작점 수 K를  $F/F_m$ 로 정의하면 K가 1/2인 점이다.

### III. 영구 자석의 동작점 설정

모터는 소형, 경량, 고효율이 되도록 설계해야 하므로 고성능 영구자석을 사용하여야 한다. 영구자석의 활용방법으로는 자석의 에너지 적(HB)이 최대인 점에서 동작하도록 자기회로를 구성해야 한다.

그림 3은 사마륨코발트( $SmCo_5$ )와 같이 보자력이 큰 영구자석의 감자곡선이다[5].

그림 1과 그림 3에서 누설자속을 무시하고, 영구자석의 단면적  $A_m$ 과 공극의 단면적  $A_g$ 가 같다고 가정하면 공극의 자속밀도  $B_g$ 는  $\mu_0 H_g$ 이므로 자속밀도  $\varphi$ 는

$$\varphi = B_g A_g = B A_m \quad (4)$$

가 되며,  $\mu_0$ 는 공기중의 투자율,  $H_g$ 는 공극의 기자력, B는 영구자석의 자속밀도이다.

영구자석의 기자력과 부하에 걸리는 기자력과의 관계는 (5)로

$$H_g l_g + H D_m = 0 \quad (5)$$

나타낼 수 있으며,  $l_g$ 는 공극의 길이,  $H$ 는 영구자석의 기자력,  $D_m$ 은 영구자석의 두께이다. (4),(5)에 의해서 자속밀도 B는

$$B = -\mu_0 H \frac{A_g D_m}{A_m l_g} \quad (6)$$

가 되며, 그림 3의 감자곡선에서 퍼미언스 계수 P는

$$P = \frac{A_g D_m \sigma}{A_m l_g f} \quad (7)$$

이므로[5], 기자력 손실계수 f와 누설계수  $\sigma$ 가  $f \approx \sigma$ 이라면 자속밀도 B는 (6),(7)에 의해서

$$B = -\mu_0 H P \quad (8)$$

가 된다. 그림 3에서 잔류자속밀도  $B_r$ , 보자력  $H_c$ , 자기에너지가 최대일때 영구자석 동작점의 자속밀도  $B_k$ , 자

계의 세기  $H_k$ 라 하면 각도  $\alpha, \beta$ 는

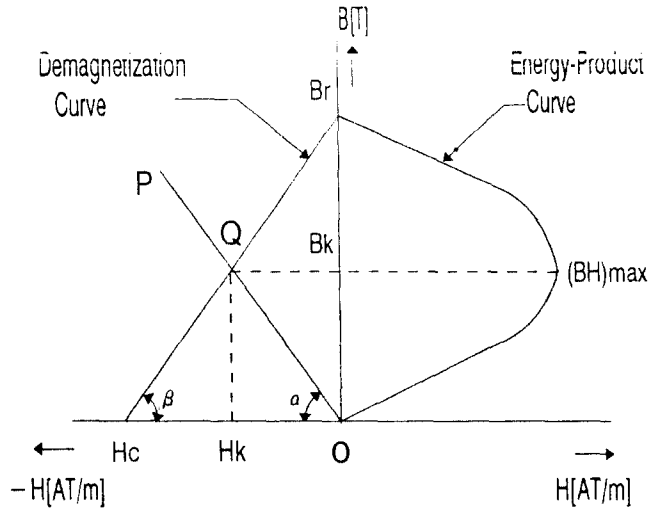


그림 3. 영구자석의 감자곡선과 에너지 적 곡선.  
Fig. 3. Demagnetization curve and energy prod curve for permanent magnet.

$$\tan \alpha = \frac{B_k}{H_k} = -\mu_0 P$$

$$\tan \beta = \frac{B_r}{H_c} \div \mu_0 \quad (9)$$

가 되며,  $B_k$ 와  $H_k$ 는 근사적으로  $B_k \approx B_r / 2, H_k \approx H_c / 2$ 이므로 각도  $\alpha, \beta$ 는 동일하다. 그림 3과 (7),(9)에 의해서  $B_k$ 는

$$B_k = \mu_0 H_k + B_r = -\mu_0 P H_k = -\frac{D_m}{l_g} \mu_0 H_k \quad (10)$$

가 된다. (10)에서  $H_k$ 는

$$H_k = \frac{-B_r}{\mu_0(1 + D_m/l_g)} \quad (11)$$

가 되며, (10),(11)에 의해서  $B_k$ 는

$$B_k = \frac{B_r}{l_g/D_m + 1} \quad (12)$$

가 된다. 따라서 MM LDM의 최적 설계에서는 그림 3의 감자곡선과 유사한 특성을 갖는 웨라이트 영구자석을 사용하므로, (12)에 의해 공극에서의 자속밀도  $B_g$ 는  $B_g = B_k$ 로 계산한다.

또한 고정자 코일의 폭은 구조상 영구자석의 폭과 같게 하며, 코일의 두께  $D_v$ 는 포화 자속밀도  $B_v$ 를 고려하고, 코일의 자로에 누설자속을 무시해서

$$D_v = \frac{B l_m}{2 B_v} \quad (13)$$

가 되며,  $l_m$ 은 영구자석(가동자)의 길이이다.

고정자 코일 일회권(一回巻)의 평균길이  $l_c$ 를 근사적으로 구하면

$$l_c = 2(l + \frac{B l_m}{2 B_v} + \frac{\pi l_g}{4}) \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다[9].

### IV. MM-LDM의 최적 설계법

최적 설계법에서 목적함수의 설정과 계산방법은 설계사양에 따라 결정되며, 여러가지 형식으로 나타내지만 2차형식이 많이 사용되고 있다[10].

목적함수 J는 제품의 가격  $C_i$ , 무게  $W_i$ , 또는 부피  $V_i$  기타 설계자가 요구하는 함수를 최소로 하는 요구조건에 따라

$$J = W_p C_i^2 + W_w W_i^2 + W_v V_i^2 + \dots \quad (15)$$

등으로 설정하며,  $W_p, W_w, W_v$ 는 가격,무게,부피의 하중상수 (Weight constant)이다.

본 논문에서는 MM-LDM의 최적 설계조건으로 가격 및 무게에 적합한 최적 설계법을 제안한다. 제안한 설계법은 목적함수 J를 정하고, 목적함수 안에는 사양에서 주어진 전력용량에 알맞는 크기와 형태를 결정하기 위해서 기준함수  $l$  과 파라미터 K 를 설정해서, 이것들을 변수로 하는 목적함수 J가 최소값이 되는 최적치  $K^*$ 를 구한다.

최적치를 구하는 방법으로는 직접 탐색법인 3분 탐색법 (Trinary Search Algorithm)을 사용하며[8], 가격과 무게를 최소로 하는 목적에 적합한 최적 설계방법은 다음과 같다. 사양에서 추력 F,가동자 속도 S,인가전압 V, 그리고 가동거리 X를 주고, 동작정수 K 를 0.5로 설정하면, 목적함수 J는

$$J = W_1 C_i^2 + W_2 W_i^2 \quad (16)$$

로 정하였으며,  $W_1$ 은 가격의 하중상수,  $W_2$ 는 무게의 하중상수이다.

그리고 MM-LDM의 무게  $W_i$ 는

$$\begin{aligned} W_i &= l_m D_m l S_{wm} + 2 l l_y D_y S_{wy} + A_{ci} l_c N S_{wc} \\ &= W_m + W_y + W_c \end{aligned} \quad (17)$$

가 되고,  $S_{wm}$ 은 영구자석의 비중,  $S_{wy}$ 는 요크의 비중,  $S_{wc}$ 는 코일의 비중,  $W_m$ 은 영구자석의 무게,  $W_y$ 는 요크의 무게,  $W_c$ 는 코일의 무게이며, 가격  $C_i$ 는

$$C_i = P_m W_m + P_y W_y + P_c W_c \quad (18)$$

가 되며,  $P_m$ 은 영구자석의 단가,  $P_y$ 는 요크의 단가,  $P_c$ 는 코일의 단가이며, 이것은 MM-LDM의 재료비이고,가공비는 편의상 제외한 것이다.

기준함수  $l$  은 일반적으로 MM-LDM에서 무게 및 재료비에 가장 큰 비중을 차지하는 영구자석의 폭을 택하였으며, 설계 기준이 되는 목적함수의 변수이다. 기준함수에는 사양의 요소(F,V,S,X등)와 매개 변수( $K_1, K_2$ )및 동작정수 K가 재질 및 기타 구속조건에 직접 또는 간접적으로  $l$ 의 변수로 작용되도록 함수화해야한다.

기준함수  $l$  과 매개변수  $K_1, K_2$ 와의 관계는

$$K_1 = \frac{l_m}{l}, \quad K_2 = \frac{l_g}{l} \quad (19)$$

로 택하였으며, 여기서  $K_1$ 은 영구자석의 폭  $l$  과 가동자의 길이  $l_m$  과의 비이며,  $K_2$ 는 영구자석의 폭  $l$  과 공극의 길이  $l_g$  와의 비이다. 기준함수  $l$  의 유도과정은 다음과 같다.

가동자의 길이  $l_m$ 은 매개변수  $K_x$ 을 도입하여  $K_x = X / l_m$ 으로 할 때 고정자 코일의 전체 권선수  $N$ 은

$$N = (K_x + 1)N_1 \quad (20)$$

가 되고, (14)의 코일 일회권(一回捲)  $l_c$ 을 매개변수  $K_1, K_2$ 를 포함하는 식으로 나타내면

$$l_c = 2K_1 + \frac{B}{2B_y} K_1 + \frac{\pi K_2}{4} \quad (21)$$

가 되며, MM-LDM의 출력은  $F \cdot S$  이므로[5], 동작정수 K 를 1/2 로 할 때 코일의 역기전력  $V_c$ 로 나타내면

$$FS = V_c I = (1 - K) I = IBN_1 S \quad (22)$$

가 된다. 고정자 코일의 권선수를 코일 단면적  $A_{ci}$  와 점적율  $K_c$ 로 표현하면 근사적으로

$$N_1 \approx \frac{2 l_g l_m K_c}{A_{ci}} = \frac{2 K_1 K_2 l^2 K_c}{A_{ci}} \quad (23)$$

로 되며, 직류 전기기기에서는 임피던스가 저항이므로 교류 저항을 고려하여 코일의 크기를 결정해야 하므로 코일의 저항 R은

$$R = \rho N \frac{l_c}{A_{ci}} \quad (24)$$

가 된다. (1),(20),(21),(24)에 의해서 코일의 단면적  $A_{ci}$  를 구하면

$$A_{ci} = \frac{2 \rho F}{IBR} \left(1 + \frac{B}{2B_y} K_1 + \frac{\pi K_2}{4}\right) \left(\frac{X + l_m}{l_m}\right) \quad (25)$$

가 되며, (22)와 (25)에 의해서 기준함수  $l$  은

$$l^3 = \frac{A_{ci}(1 - K)V}{2 K_c K_1 K_2 B S} \quad (26)$$

가 되고, 이 식에 (25)를 대입하여 기준함수  $l$  을 구하면

$$l^3 = \frac{(1 - K)VF\rho}{K_c K_1 K_2 B^2 SRI} \left(1 + \frac{B}{2B_y} K_1 + \frac{\pi K_2}{4}\right) \left(l + \frac{X}{K_1}\right) \times 10^6 \quad (27)$$

가 된다. (27)은 MM-LDM 설계에 필수적인 설계변수들이 고려되었으며, 기준함수  $l$  값에 따라 매개변수의 값이 설정되고, 사양요소들의 크기 및 형태가 결정되도록 기준함수  $l$  의 변수로 함수화시켰다.

표 1. MM-LDM의 사양.

Table 1. Specification of the MM-LDM.

전원전압	V	12	[V]
추력	F	1	[N]
속도	S	1.2	[m/s]
자속밀도	B	0.26	[Wb/m <sup>2</sup> ]
가동거리	X	0.1	[m]
요크의 포화자속 밀도 $B_y$		1.5	[Wb/m <sup>2</sup> ]
코일의 점적률 $K_c$		0.5	
영구자석의 비중 $S_{wm}$		5	
코일의 비중 $S_{wc}$		8.9	
연철의 비중 $S_{wy}$		7.6	
영구자석의 단가 $P_m$		13	[won/g]
연철의 단가 $P_y$		1	[won/g]
코일의 단가 $P_c$		4	[won/g]

이와 같이 함수화된 기준함수에 의해 목적함수의 최적치를 구하기 위한 MM-LDM의 최적 설계 프로그램 함수 구성은 다음과 같다.

1. 입력 : 사양, 설계조건, 재질(재료특성)을 준다.
2. 초기계산: 최적치계산에 필요한 반복계산에는 무관한 1회의 계산으로 결정되는 제원의 값이다.
3. 반복계산: MM-LDM의 기준함수와 이것에 의한 제원의 계산 및 목적함수를 위한 무게, 가격 등을 Newton Raphson 법으로 반복계산 한다.
4. 목적함수: 하중상수를 갖는 목적함수를 설정하며, 반복계산 함수로 탐색함수(search function)를 사용한다.
5. 3분 탐색(header file): 목적함수를 사용하여 최적치의 탐색과정(round calculation)과, 1회에 탐색범위를 1/3로 축소할것을 다시 계산하여 목적함수를 최소로 하기 위한

최적치의 탐색을 한다.

- 6. 출력 : MM-LDM의 사양,제원,기타 설계결과의 내용 및 최적치 계산 과정의 목적함수 및 매개변수의 변화과정을 기록한다.
- 7. 주 함수(main function): 초기 매개변수의 탐색범위 설정을 주함수 내에 삽입하였다.

MM-LDM의 최적설계를 위해 표 1 의 사양과 앞에서 열거한 식들을 사용하고, K를 1/2 로 주고 프로그램 함수 구성을 이용하여 프로그램을 작성하였다.

프로그램에서 매개변수  $K_1, K_2$ 의 값은 MM-LDM의 구조 및 형태에 제한 되므로 3분 탐색알고리즘의 탐색범위가 벗어나지 않게  $K_1$ 의 범위는  $2 \pm 1.5$ ,  $K_2$ 는  $1 \pm 0.75$  로 하고 반복횟수 Rp 는 10 회로 하였으며, 가격을 최소로 하기 위해 목적함수의 하중상수를  $W_1=1, W_2=0$  로 출력의 결과치는 표 2 와 같다.

표 2. 가동자석형 선형직류모터의 최적설계 결과.  
Table 2. The results of an optimal design for the MM-LDM.

```

itc      perform      K1      K2
1        3527.97745      3.0000  0.5000
2        1931.68647      3.3333  0.3333
3        1672.97692      3.2222  0.2778
4        1601.34366      3.1852  0.2593
5        1578.32407      3.1728  0.2531
6        1570.66984      3.1687  0.2531
7        1569.59755      3.1701  0.2531
8        1569.59755      3.1701  0.2531
9        1569.59755      3.1701  0.2531
10       1569.59755      3.1701  0.2531
<< LDM data >>
DC V [volt] V = 12.00
current [A] I = 0.20
powre [W] Po = 1.20           Pi = 2.40
force [N] F = 1.00
speed [m/s] S = 1.20
stroc [mm] X = 100.00
param K=I/In K = 0.50
parameter K1=Lm/H= 3.17
parameter K2=Lg/H= 0.25
efficiency [o/o] =50.00
length [mm] Lt=160.04
width [mm] Dt=35.69
weight [gr] Wt=412.68
cost [won] Pr=1570.55

<< Magnet circuit data >>
PM-B [T] = 0.26
M-height Hm [mm] = 15.79
M-length Lm [mm] = 50.04
M-depth Dm [mm] = 15.00
M-weight Wm [Gr] = 59.24
costm [won] = 770.17

<< York circuit data >>
york-t Dy [mm] = 4.35
york By [T] = 1.50
air gap Lg [mm] = 3.99
weight Wy [Gr] = 204.45
costy [won] = 204.45

<< coil data >>
turn N = 3638.92
coil dia d [mm] = 0.35
coil aria Ac [mm] = 0.10
dencity [A/mm] = 2.02
coil-length l [mm] = 169.40
coil-R [ohm] = 30.00
weight [gr] = 148.98
cost [won] = 595.92
    
```

표 2 에서 최적치를 탐색하기 위한 반복횟수를 10 회로 했을때 목적함수와 매개변수의 결과치가 7회에서 최소값을 가지며 이후에는 거의 변화가 없었고, 반복횟수에 따라 최적치 탐색 축소범위가  $1/3n$  이므로 10 회 이면 3-10 으로 축소되므로 대단히 정확한 최적치 임을 알수있다[8].

최적 설계 프로그램에서 가격과 무게의 하중상수 변화에 대한 목적함수, 매개변수, 가격, 무게의 최적치는 표 3 과 같다.

표 3에서  $K_1, K_2$ 의 변화된 값으로 가격을 최소로 하였을 때가 무게를 최소로 하였을 때 보다 형태면에서 MM-LDM의 전체 길이가 길어짐을 확인하였다.

**V. MM-LDM 의 제작 및 실험검토**

최적설계 결과치를 이용하여 제작한 MM-LDM의 사양은

표4 와 같으며, 실제의 모습은 그림4 에 제시 하였다.

표 3. 하중상수에 따른 최적치.  
Table 3. Optimal values by weight constants.

하중상수	J	C <sub>i</sub> [원]	W <sub>i</sub> [g]	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>
W <sub>1</sub> = 1 W <sub>2</sub> = 0	1569.597	1570.55	412.68	3.17	0.25
W <sub>1</sub> = 0 W <sub>2</sub> = 1	426.789	1694.19	405.24	3.26	0.33

표 4. 가동자석형 선형 직류전동기 제작기의 사양.  
Table 4. Specifications of the moving magnet type linear DC motor.

항목	수치		
가동자석형 선형직류전동기의 크기	260×80×60 [mm <sup>3</sup> ]		
영구자석의 크기	55×15.5×15 [mm <sup>3</sup> ]		
영구자석의 재료(페라이트, F-32)	잔류자속 밀도 Br [Gauss]	보자력 Hc [Oersted]	최대 에너지적 (BH) max Mega [Gauss Oersted]
	4,000~4,200	3,500~4,000	3.80~4.00
영구자석의 갯수	1 [개]		
공극길이	4.00 [mm]		
공극의 자석밀도	2600 [Gauss]		
고정자 코일직경	0.35[mm]		
고정자 코일권스	3485[회]		
최대스트로크	100 [mm]		
요크재료	연철 ss41		
전질량	1200 [g]		
가동부 질량	380 [g]		

가동자석형 선형 직류전동기의 성능을 측정하기 위하여 전원전압을 12[V]로 하고 추력 측정기로 추력을 측정했을 때 표5 와 같이 최대 추력은 1.93[N] 이며, 정지 했을때의 최대 전류는 0.37[A]로 설계치에 근접함을 알 수 있다.

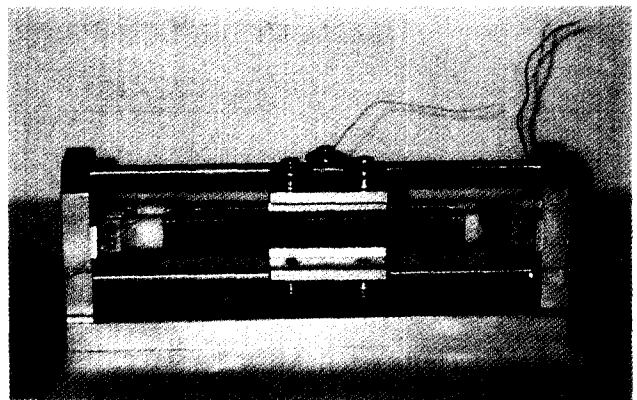


그림 4. 제작된 가동자석형 선형 직류전동기.  
Fig. 4. A photograph of the fabricated a moving magnet type linear DC motor.

속도를 측정하기 위하여 그림 5와 같은 실험장치를 구성하였다. 그림 5에서 IBM- PC 486에서 나오는 제어입력신호는 인터페이스 카드를 거쳐 모터 구동회로로 가해지며 모터 구동회로는 PWM 방식을 사용하였다. 위치 센서로는 적외선 센서(EL492)를 사용하였고 적외선 센서로 부터 검출된 신호는 Sample and Hold(LF398)를 거쳐 A/D 컨버터(ADC 0802)를 통해 인터페이스 카드로 간다. 이와 같이 속도는 일정시간 마다 위치 센서를 사용하여 가동자의 이동 거리에 대한 시간의 변화량을 컴퓨터로 계산하여 측정하였다. 그러나 제작과정의 오차에 의한 마찰력과 가동거리가 짧아서 정상속도에 도달하기 전에 정지하므로, 가동거리 0.1[m] 까지 측정된 값을 비교하기 위하여 MM-LDM의 운동방정식[9]에 설계사양을 주고 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 응답 곡선과 속도 측정값이 그림 6과 같이 설계치에 근접함을 알 수 있다.

표 5. 사양과 측정값의 비교.

Table 5. The comparison of the measured values with the specifications.

항 목	사양	측정값
전원전압 U[V]	12.0	12.0
최대추력 F <sub>m</sub> [N]	2.0	1.93
가동거리 X[m]	0.1	0.1
최대전류 I <sub>m</sub> [A]	0.4	0.37

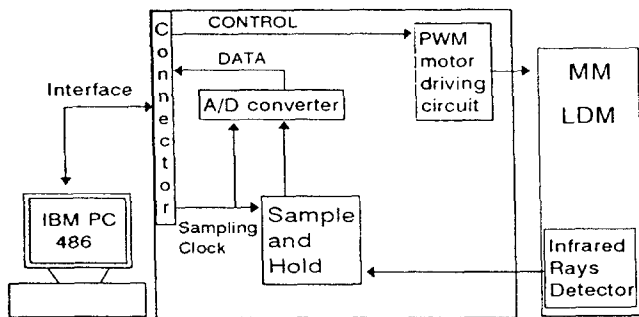


그림 5. 실험장치도.

Fig. 5. A block diagram of an experimental circuit.

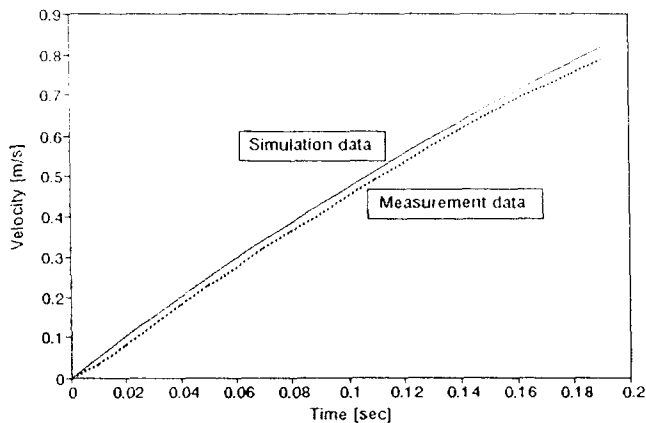


그림 6. MM LDM 속도 측정치와 설계치의 곡선.

Fig. 6. Curves of measured velocity and designed velocity.

VI. 결론

가동자식형 선형 직류모터의 가격과 무게를 최소로 하는

최적설계법을 제안하여 설계치에 의해 제작된 MM-LDM의 성능을 측정한 결과는 다음과 같다.

제한한 최적 설계법은 가격과 무게에 직결되는 형태와 크기를 최적 설계 조건으로 기준함수를 하고, 이에 관련된 파라미터를 설정하여 목적함수를 정의하였다. 목적함수의 최소값을 구하기 위한 파라미터의 최적치는 처리속도가 빠른 직접탐색법인 3분 탐색법을 이용하여 구하였다.

최적설계된 설계치로 MM-LDM을 제작하여 추력, 속도, 전류 등의 특성을 측정한 결과 설계치와 거의 일치하므로, 가격과 무게의 최소치가 목적함수에 부합된 방법임을 확인하였다.

그러므로 MM-LDM을 반송 시스템과 같은 대형기기에 사용할 때는 가격을 최소화하고, 카메라 렌즈 구동과 같은 소형기기에서는 무게가 최소화 되도록 설계하여 사용하면 경제성과 중량에 대한 문제가 해결될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] T.Takahashi, S. Hasegawa, "Development and Future Trend of Linear DC Motor," *Sowwa Wire and Cable Rev.*(Japan) vol. 35, no. 2, pp. 49-53, 1985.
- [2] 白木 學, 宮尾 修, 리ニア 서보 모터와 시스템 설계, 종합電子出版社, pp. 1-191, 1986.
- [3] 白木 學, *DC Brushless Linear Servo Motor*, 日本電氣學會 産業應用部門, pp. 855-858, 1988.
- [4] M.Jufer and G. Heine "Linear DC Motor Optimization used Disc Drives," *Proceedings of the Fifteenth Annual Symposium, Incremental Motion Control Systems and Devices*, vol. 4, pp. 39-44, 1986.
- [5] 磁氣, ACTUATOR 調査専門委員會, *Linear Motors and Their Application*, 日本電氣學會, pp. 1-14, pp. 179-197, 1983.
- [6] 海老原大樹, 鹿野央男, "리ニア 모터의 FA への應用," 日本電氣學會, 112卷 4號, pp. 223-227, 1992.
- [7] N.Bouies, "Design optimization of permanent magnet DC motors," *IEEE Trans on Industry Applications*, vol. 26, No. 4, pp. 186-192, 1990.
- [8] 孔徽植, "3點 探索 알고리즘을 擴張한 最適 設計 및 制御," 博士學位論文, 東國大學校, 1992.
- [9] 孫東高, "線形 直流電動機의 最適設計 및 制御," 博士學位論文, 東國大學校, 1993.
- [10] J.S. Arora, *Optimum Design*, McGraw-Hill, pp. 278-513, 1989.



손 동 설

1952년 8월 18일 생. 1978년 2월 동국대학교 전자공학과(학사). 1981년 2월 동국대학교 전자공학과(석사). 1994년 동국대학교 전자공학과(박사). 1989년 ~ 현재 유한전문대학 전자과 교수. 주관심분야는 제어기기설계 및 제어기기설계.