

이중 여자 방식 가동자석형 LDM의 추력 산정과 파라미터 산출

권혁인\*, 김 용\*, 백수현\*, 조규만\*, 김일남\*\*  
 동국대학교 전기공학과\*, 동서울대학\*\*

The calculation of thrust force and determination of parameters in moving magnet type LDM with double excited

Hyuk-Inn Kweon\*, Yong Kim\*, Soo-Hyun Baek\*, Gyu-Man Cho\*, Il-Nam Kim\*\*  
 Dongguk University\*, East Seoul College\*\*

**Abstract** -The thrust force of moving magnet type linear direct current motors(MM-LDM) is analyzed in this study. A moving magnet-type LDM consists of a stator and a carriage. The stator is composed of two stick shaped electro magnetics and the carriage consists of a movable permanent magnet that is located between the two electromagnets. The method for calculating the thrust force of an MM-LDM is to analyze the energy gradient which is determined by the distribution of magnetic flux. And this paper describes the development of the generalized machine theory for d.c. linear motors and its application to determine the motor parameters.

요동 자석을 이용하였다.

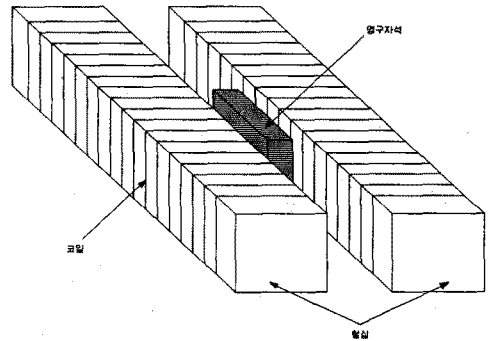


그림 1. 이중 여자 방식 가동자석형 LDM의 구조

1. 서 론

선형 전동기는 구동전원의 종류에 따라서 선형 직류 전동기 및 선형 교류 전동기로 분류되며 선형 직류 전동기의 경우 가동 코일형과 가동 자석형으로 구분된다. 가동 코일형의 경우 가동부에 권선이 있어 전기적 연결이 필요한 단점이 있다. 가동 자석형은 가동부 권선을 영구 자석으로 대체함으로써 전기적 연결과 동손에 의한 발열이 없는 장점이 있고 강자성체의 자석을 사용하면 공극이 큰 구조에서도 높은 자속밀도 값을 얻을 수 있으므로 간단한 구조로 제작할 수 있으며 제어가 용이한 장점이 있다. 본 논문에서는 속속성과 추력 특성이 양호한 고정자 두 개, 가동자(영구 자석)가 한 개인 LDM의 추력 산정과 파라미터 산출 방법을 제시한다. 이러한 형태의 LDM 해석법은 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 측정하여 영구자석을 대 전류가 흐르는 한 턴 변압기 등가 회로로 해석하고 LDM에 축적되는 에너지 기울기를 구한 후 추력을 산정하는 방식이 일반적인 방법이지만 본 연구에서는 자속 경로를 분석하여 추력을 산출하는 방식을 이용하였다. 이 방법은 계산이 복잡하지만 자속의 이동 경로와 각부 자속밀도, 공극의 자속 밀도가 계산되어 비교적 정확한 추력값을 유도해 낼 수 있다. LDM을 효과적으로 제어하기 위해서는 정확한 파라미터 산출이 필수적이며 labVIEW를 이용하여 엔코더 출력 펄스 데이터로 속도 응답 특성을 구하여 LDM의 파라미터를 산출한다.

2.1.2 추력의 계산

영구자석에 의한 추력을 계산하려면 동기 전동기를 영구 자석 회전자에서 발생된 토크를 계산하는 방식과 같이 에너지 항목으로 고려하여 추력을 계산 할 수가 있다. 선형 직류 전동기에서는 식(1)과 같이 추력을 나타낼 수가 있다.

$$F = I \frac{d\Phi_{CM}}{dp} - \frac{dW_M}{dp} + \frac{1}{2} I^2 \frac{dL_C}{dp} \quad (1)$$

여기서, I는 코일에 흐르는 전류,  $\Phi_{CM}$ 은 각각 코일의 길이에 대하여 자석에서 발생한 자속을 적분한 총자속을 의미한다. p는 자석의 위치를 정의하는 직각 좌표계 요소이다. 식(1)에서 우측에서 두 번째 성분은  $W_M$ 이 자석의 위치에 의존하지 않기 때문에 영이 된다. 영구 자석의 비 투자율이 1이라고 가정하면 식(1)의 세 번째 요소는 역시 영이 된다. 식(1)은 식(2)과 같이 요약될 수 있다.

$$F = I \frac{d\Phi_{CM}}{dp} \quad (2)$$

$\Phi_{CM}$ 을 계산하기 위해서 코일의 턴수와 영구 자석의 자속 쇄교수를 적분하면 식(3), (4), (5)와 같이 된다. 본 논문에서는 그림2의 각각의 코일에  $w_1, w_2$ 의 권선이 감겨져 있고  $w_1 = w_2$ 이다. 그림2를 이용하여 식을 전개하면

$$\Phi_{CM1} = \int_{-l}^p [\Phi_{GE} + (l+x)bB_G] - \frac{2w_1}{2l} dx \quad (3)$$

$$\Phi_{CM2} = \int_p^{p+l_M} [\Phi_{GE} + (l+p)bB_G - (x-p)bB_E] - \frac{2w_1}{2l} dx \quad (4)$$

$$\Phi_{CM3} = \int_{p+l_M}^l [\Phi_{GE} + (l+p)bB_G - l_M bB_E]$$

2. 본 론

2.1 구조 및 추력산정

2.1.1 이중 여자 방식 가동자석형 LDM의 구조

본 논문에서 사용하는 이중 여자 방식 가동자석형 LDM은 그림 1과 같은 구조를 가지고 있다. 고정자는 2개의 권선으로 가동자는 한 개의 자석으로 구성되며 전동기는 두 개의 원형 가이드 레일로 지지된다. 가동자는 네

$$+ (x-p-l_M)bB_G] \frac{2w_1}{2l} dx \quad (5)$$

식(3), (4), (5)의 합을 식(2)에 대입하면 식(6)과 같이 표현된다.

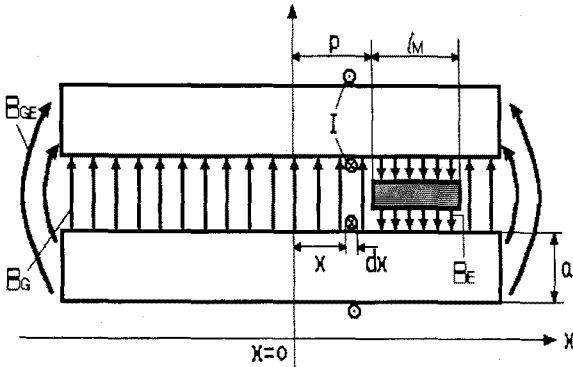


그림 2. 영구자석에 의한 공기중에서의 자속분포

$$F = I(l_M b B_G + l_M b B_E) \frac{2w_1}{2l} \\ = I(B_E + B_G) \frac{2w_1}{2l} l_M b \quad (6)$$

식(6)에서 모터의 총 길이 2l은 영구자석의 길이  $l_M$ 보다 훨씬 더 크므로 유효 자속 밀도  $B_E$ 과 비교하면 자속 밀도  $B_G$ 는 무시할 수 있다. 식(6)은 식(7)과 같이 간략화된다.

$$F = \frac{l_M}{l} w_1 I B_E b \quad (7)$$

식(7)로부터 F를 계산하기 위해서는 유효 자속 밀도  $B_E$ 를 결정하고 총 자속 계산이 용이하도록 자장을 부분별로 나누어서 간략화 시킨다. 그림 3에서 영구자석의 3차원의 자속 밀도는 다수의 2차원 자속 밀도로 구분됨을 나타낸다. 그림 3은 코일에 의한 자속 밀도는 포함되지 않고 철의 투자율이 무한히 크다고 가정하였다.

### 2.1.3 유효 자속 밀도 $B_E$ 의 계산

그림 4는 코일이 여자 되지 않은 상태에서 영구자석에 의한 자기회로를 나타내고 있다. 이 자기회로를 전기회

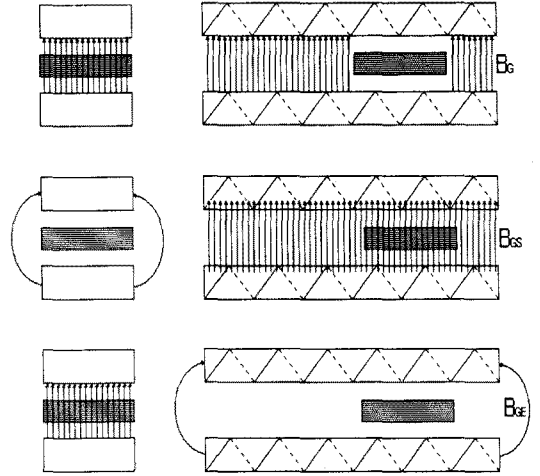
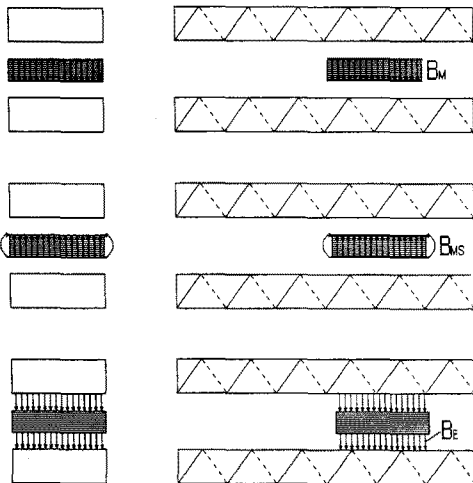


그림 3. LDM의 각 자속 경로

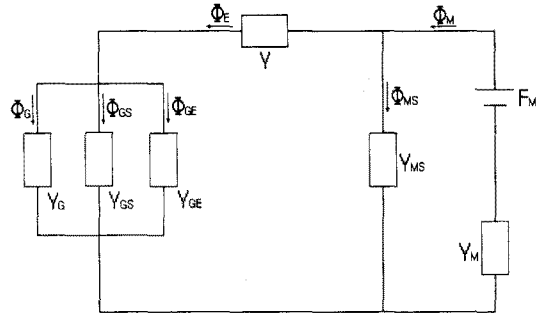


그림 4. 영구자석에 의한 자기회로

로와 비교한다면 영구자석은 정전압원에 해당한다. 기자력  $F_M$ 은 걸보기 보자력  $H_C^*$ 과 자석의 폭  $d_M$ 의 곱이다.

$$F_M = d_M H_C^* \quad (8)$$

균등한 자계에서의 퍼미언스는 식(9)와 같이 표시될 수 있다.

$$Y = \mu_0 \mu_r A / d \quad (9)$$

식(8)과 식(9)를 이용하여 그림 4의 퍼미언스  $Y_E$ ,  $Y_G$ ,  $Y_M$ 과 기자력  $F_M$ 을 구할 수 있다. 미지의 자속들과 구하고자 하는  $\Phi_E$ 는 식(10), (11), (12), (13)으로 구할 수 있다.

$$\Phi_M = \Phi_E + \Phi_{MS} \quad (10)$$

$$\Phi_E = \Phi_G + \Phi_{GS} + \Phi_{GE} \quad (11)$$

$$\frac{\Phi_{MS}}{Y_{MS}} = \frac{\Phi_E}{Y_E} + \frac{\Phi_G + \Phi_{GS} + \Phi_{GE}}{Y_G + Y_{GS} + Y_{GE}} \quad (12)$$

$$\frac{\Phi_{MS}}{Y_{MS}} = F_M - \frac{\Phi_M}{Y_M} \quad (13)$$

위의 식들에서  $\Phi_E = A_M B_E$ 라고 하고 식(8)과 (9)로부터  $F_M Y_M = B_M A_M$ 을 유도할 수 있다. 유효 자속 밀도 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$$B_E = \frac{B_M}{\left( \frac{1}{Y_G + Y_{GS} + Y_{GE}} + \frac{1}{Y_E} \right) (Y_{MS} + Y_M) + 1} \quad (14)$$

위의 식(11)에서  $\Phi_{GS}$ ,  $\Phi_{GE}$ ,  $\Phi_{MS}$ 는 추력에 영향을 미치지

않으므로  $Y_G=Y_{GS}=Y_{GE}=0$ 이라고 할 수 있다. 그러므로 식(14)는 식(15)으로 간략화 될 수 있다.

$$B_E = \frac{B_r}{\left(-\frac{1}{Y_G} + \frac{1}{Y_E}\right)Y_M + 1} \quad (15)$$

### 2.1.4 실험에 위한 추력특성

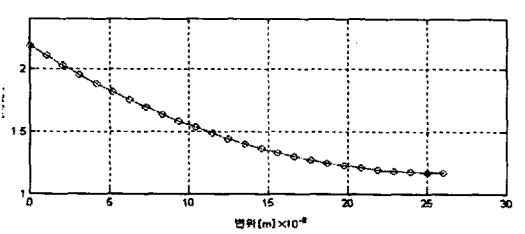


그림 5. 추력-변위 특성(측정치)

## 2.2 모터 파라미터 산출방법

### 2.2.1 LDM에 대한 수학적 모델링

LDM은 전압방정식으로 표현될 수가 있으며, 이중 여자 방식 가동자석형 LDM의 전기자 전압 방정식은 식(16)과 같이 나타낼 수가 있다.

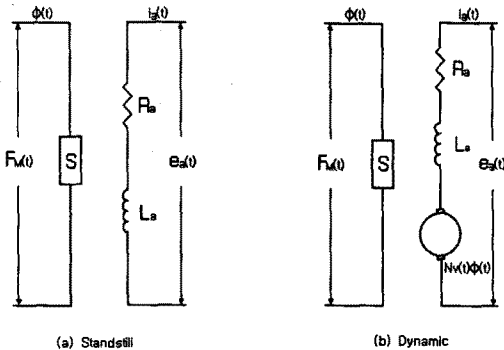


그림 6. 네오뎀-계자 LDM의 등가회로

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + D\psi_a(t) \quad (16)$$

여기서,  $\psi_a(t) = L_a i_a(t)$

권선1과 권선2가 직렬(가극성)로 접속되므로

$R_a = R_{a1} + R_{a2}$ : 전기자 권선 코일의 저항

$L_a = L_{a1} + L_{a2}$ : 전기자 권선 자기 인덕턴스

$i_a$ : 전기자 권선 전류

계자유닛의 자기회로는 식(17)으로 표현될 수 있다

$$F_M(t) = \Phi(t) \cdot S \quad (17)$$

여기서,  $F_M(t)$ : 기자력

$\Phi(t)$ : 작용점의 자속밀도 × 극면적

$S$ : 회로의 릴럭턴스

계자유닛이 가동상태가 되는 즉시 운동시 전압이  $\Phi(t)$ 로 인해 전기자 권선에서 발생된다. 이 전압은 역기전력으로도 알려져 있으며 계자유닛의 속도  $v(t)$ 에 비례하며 식(18)과 같이 표현될 수 있다.

$$e_b(t) = \Phi(t) \cdot N \cdot v(t) \quad (18)$$

여기서,  $N = N_1 + N_2$ : 코일의 턴수/길이[m]

운동시에 전기자 권선 전압의 방정식은 식(19)과 같이 표현될 수 있다.

$$e_a(t) = \Phi(t) \cdot N \cdot v(t) + (R_a + L_a D)i_a(t) \quad (19)$$

식(18)과 (19)을 행렬 형태로 나타내면 식(20)과 같다

$$\begin{bmatrix} F_M(t) \\ e_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S & 0 \\ N \cdot v(t) & R_a + L_a D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

이중 여자 방식 가동 자석형 LDM의 정지시와 운동시의 등가회로는 그림6과 같이 나타낼 수 있다. 가동상태 소비 전력은 식(21)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$P = e_b(t) \cdot i_a(t) = \Phi(t) \cdot N \cdot v(t) \cdot i_a(t) \quad (21)$$

그러므로 LDM의 발생 추력은 식(22)과 같이 표현될 수 있다.

$$F = \frac{P}{v(t)} = \Phi(t) \cdot N \cdot i_a(t) \quad (22)$$

구동력  $F$ 는 질량  $M$ , 마찰력  $F_b$ , 기계적 부하  $f$ 에 의하여 소비된 힘의 합목으로 나타내면 식(23)과 같다.

$$F = (MD + F_b)v(t) + f \quad (23)$$

식(19), (22), (23)를 이용하여 모터의 정상상태 속도는 식(24)과 같이 표현될 수 있다.

$$v_o = \frac{\Phi_a N I_{a0} - f}{F_{eff}} \quad (24)$$

여기서,  $F_{eff} = F_b + \frac{\Phi_a^2 N^2}{R_a}$ : 유효 마찰 계수

첨자  $o$ 는 정상 상태치임을 표시한다. LDM의 과도응답 해석은 더욱 복잡하게 된다. 간략화하기 위해 전기자 권선 인덕턴스 효과를 무시하면 과도응답은 식(25)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(t) = \frac{\Phi_a N I_{a0} - f}{F_{eff}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}}\right) \quad (25)$$

여기서,  $\tau_m = \frac{M}{F_{eff}}$ : 유효 기계적 시정수

전기자 권선의 인덕턴스가 속도 해석 포함되면 응답특성은 더욱 복잡해지게 된다.

### 2.2.2 LDM 파라미터 산출

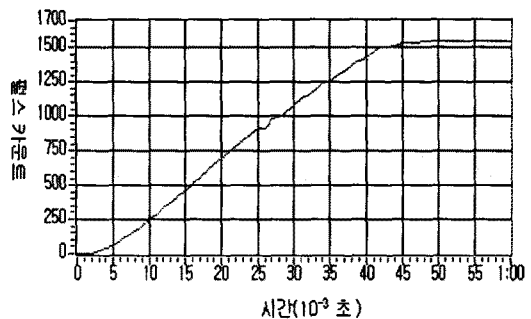


그림 7. 시간에 대한 위치 특성

LDM 파라미터는 속도/시간의 과도 응답 해석으로부터 나타난 특성을 조사함으로써 산출할 수 있다.

그림7은 거리/시간 관계를 나타낸 것이며 y축은 LDM에 연결된 엔코더 펄스의 카운터 수를 나타낸 것이며 1개 펄스는  $0.164405 \times 10^{-3}$  [m]이다. 그림 8은 속도 과도 응답특성을 나타낸다. 과도 응답특성을 이용하여 LDM 파라미터를 구할 수 있다. 구해진 LDM 파라미터는 표 1에 나타내었다

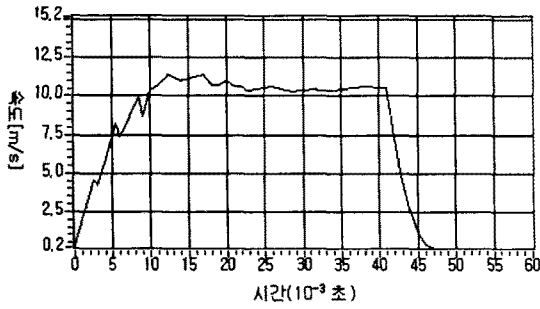


그림 8. 속도의 과도 응답 특성

### 3. 결 론

본 논문에서 실험된 LDM은 퍼미언스법을 기초로 하여 설계 제작한 것이며 가동자는 응답특성을 향상시키기 위하여 네오뎀 자석을 이용하였다. 자속 경로를 고려하여 추력을 산출한 경우는 수식적으로 상당히 복잡하지만 비교적 정확한 추력을 산출할 수 있었다.

정상 상태 특성을 이용하여  $\tau_m$ 을 구한 후 과도 응답과 정상상태 응답을 비교하여  $F_b$ 와  $F_{eff}$ 을 구할 수 있으며 산출된 파라미터를 이용하여 LDM의 효과적인 위치제어 및 속도 제어를 기대할 수 있다.

표 1

Motor	Parameters			
Pole area [cm <sup>2</sup> ]	$\tau_m$ (sec)	$\Phi_p N$	$F_b$	$F_{eff}$
10	0.037	0.5389	0.0493	0.091

#### [참 고 문 헌]

- [1] A. Basak, A. F. Flores-Filho, "Static and Dynamic Characteristics of a Double Armature DC Linear Motor", T. IEE Japan, vol.118-D, No.9, 1998
- [2] L. Honds and K. H. Meyer, "A linear d.c. motor with permanent magnets", Philips tech. Rev. 40, 329-337, 1982
- [3] A. BASAK, "GENERALISED THEORY OF FERRITE-FIELD D.C.LINEAR MOTORS", Int. J. Elect. Enging Educ, Vol.16, pp.43-49, 1979
- [4] MOTOYASU HANAOKA, HIROSHI MIYAJI, YOSHIOKANO, SHINYA HASEBE, KENICHIROO HTA, "Analysis of Moving Magnet Linear DC Motor with Two Straight Stators", Electrical Engineering in Japan, Vol. 112, NO. 5, 1992
- [5] F. J. Anayi and A. Basak, "BRUSHLESS NdFeB PERMANT MAGNET D.C. LINEAR MOTORS"
- [6] AMITAVA BASAK, "PERMANENT-MAGNET DC LINEAR MOTORS", OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS