

추력정수에 의한 가동코일형 LDM의 특성해석과 설계

류종상<sup>u\*</sup>, 백수현<sup>\*</sup>, 김 옹<sup>\*</sup>, 윤신용<sup>\*</sup>, 맹인재<sup>\*</sup>, 정계천<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>동국대학교 전기공학과

The Design and Characteristic Analysis of Moving Coil Type LDM by thrust constant

J. S. Ryu<sup>u\*</sup>, S. H. Baek<sup>\*</sup>, Y. Kim<sup>\*</sup>, S. Y. Yoon<sup>\*</sup>, I. J. Maeng<sup>\*</sup>, G. C. Jung<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>Department of Electrical Engineering, Dongguk University.

Abstract-LDM(Linear DC Motor) are used in high speed, high-precision position control system. Because of these advatages, LDM has already used in the motor of pen-recorder, magnetic-disk devices. Under the limited dimension, we propose the design method of LDM by magnetic circuit. In this paper, a relation between the thrust constant and size of a LDM that is moving coil type with unipolar is described, which is defined as a simple relational equation. To maximize the rate of thrust to the volume of LDM, the magnetic flux density in the yoke is adjusted to the value of magnetic equation. By the magnetic field analysis(FEM), the validity of the equation is confirmed.

I. 서 론

리니어 모터(Linear Motor)는 회전운동을 직선운동으로 변환하는 변환기구를 사용하지 않고, 직접 선형운동을 하므로, 제작시 부품수가 적고, 보수가 용이하며, 구동원을 박형화, 소형화 할 수 있다. 특히 가동코일형 LDM은 단순한 구조와 고속응답이고 제어가 용이하다. 그러므로 OA나 FA에 널리 응용되고 있다. 하지만, 장 스트로크화와 추력의 증가에는 어려움이 있다. 리니어 모터에 대한 시스템을 설계할 때, 설계의 초기단계로서 목적하는 추력에 대하여 모터는 어느 정도의 체적을 필요로 하는가와 목표사양으로 하는 추력과 스트로크를 만족할 수 있는 모터의 치수를 추정해야만 한다. 이에 따라 목표사양을 만족하는 리니어 모터의 치수, 추력 등의 여러 정수를 간단히 구하는 것이 가능하도록 최적의 LDM(Linear D.C Motor)을 설계할 수 있다. [1]~[5]

본 연구에서는, 리니어 모터 중에서도, 가동코일형 리니어 직류 모터(Moving coil type LDM)의 형태에서 자속의 흐름을 기준으로하여, LDM의 치수, 특히 가동자코일 권수, center요크의 두께와 재질에 따른 포화 자속밀도의 관계로부터 추력정수 관계식(Thrust constant Equation)을 구할 수 있다. LDM의 체적 대 추력의 비를 최대로 하기 위해서, 요크내의 자속밀도를 포화자속밀도(Saturation Flux density)이내에 가깝게 설정하면 최대 추력정수 관계식은 성립된다. 이 관계식은 간단한 가동코일형 LDM의 자체해석(유한요소법을 이용한 응용 패키지 Maxwell 3D)과 설계를 통해 추력정수의 관계로 타당성을 확립한다. 따라서 본 연구에서는 가동코일형 LDM의 설계를 위해서 다음의 3가지 사항을 연구하고자 한다.

- [1] 추력정수와 요크의 치수 및 포화 자속 밀도에 대한 관계식의 정립
- [2] 설정된 치수의 LDM에 대한 자체해석을 통한 관계식의 평가.
- [3] 관계식의 실증을 통한, LDM의 설계와 추력 특성의 평가.

II. 본 론

1. 가동코일형 LDM의 구조와 동작원리

가동코일형 LDM은 가동자석형(Moving Magnet type) LDM에 비해 추력은 작지만 가동부의 질량이 작기 때문에 응답성이 좋다. 그림 1에 단극형 가동코일 LDM의 구조와 동작원리를 보인다. z축 방향으로 자화된 영구자석은 center요크와 bottom요크 사이에 놓인다. 공극에서 자속밀도의 흐름은 z축 방향으로 흐르고 전류가 가동자코일에 흐를 때 추력은 플레밍의 왼손법칙에 의해서 스트로크(stroke)방향으로 발생된다.

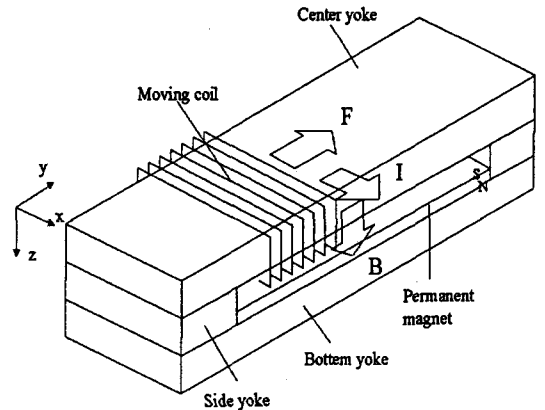


그림 1. 가동코일형 LDM의 구조 및 추력발생원리

영구자석으로부터 가동자코일에 작용하는 자속밀도가 코일에서 발생하는 자속밀도에 비해 충분히 클 때, LDM의 추력 F는 식(1)로 근사화될 수 있다.

$$F = k_f I \quad [N] \quad (1)$$

$$k_f = n l_c B \quad [N/A] \quad (2)$$

여기서,  $k_f$  : 추력정수[N/A],  $I$  : 코일에 흐르는 전류[A],  $n$  : 코일 권수,  $l_c$  : 자속밀도가 작용하는 코일의 길이[m],  $B$  : 코일에 작용하는 자속밀도 이다. 이 때 코일에서 발생하는 자속밀도가 크게 되면 스트로크 방향에 자기구배가 일어날 수 있기 때문에 자기에너지의 편력을 고려할 필요가 있다. 이 편력은 LDM에 제동력으로 작용한다. LDM의 가동자 코일이 이동하면 가동자코일의 이동 속도에 비례하는 역기전력을 발생한다. 역기전력 정수  $k_e$  [V · s/m]는 추력정수와 같고, LDM의 기계적 시정수  $\tau_m$ 은 다음식으로 주어진다.

$$\tau_m = \frac{m\tau}{k_e^2} \quad (3)$$

$m$  : 가동부의 질량[kg],  $\tau$  : 가동자코일의 저항[ $\Omega$ ]  
이 식은 LDM의 응답성이 추력정수에 의존하는 것을 보여준다.

## 2. 추력정수와 치수사이의 관계식 유도

LDM의 요크내의 자속의 흐름에 착안하여, LDM의 추력정수와 스트로크, center요크의 두께의 관계식을 유도한다. 관계식을 유도하기 전에 먼저, 자기회로를 간단히 하기 위해 다음의 조건을 설정한다.

- [1] 자기회로는 이상적이며, 자속은 영구자석과 center요크 사이의 공극을 제외하고는 누설되지 않는다.
- [2] 가동자 코일의 발생자계는 영구자석의 자계와 비교하여 충분히 작고 LDM의 추력과 추력정수는 식(1)과 식(2)로 주어진다.
- [3] 요크내의 자속밀도는 요크의 재질에 따른 포화자속밀도 이하에서만 적용된다.

조건[1]로부터 자속이 작용하는 코일의 길이  $l$  은 center요크의 폭  $w_c$ 와 같고, 코일에 작용하는 자속밀도  $B$ 는 공극내의 자속밀도  $B_g$ 와 같게 되어 다음식이 얻어진다.

$$l_c = w_c \text{ (m)} \quad (4)$$

$$B = B_g \text{ (T)} \quad (5)$$

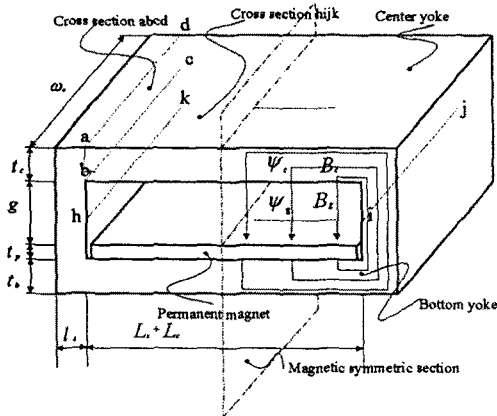


그림 2. 가동코일형 LDM의 자속흐름 개념도

그림 2에 나타낸 것 처럼 영구자석으로부터 발생한 자속은 모두 bottom요크, center요크, side요크를 통해 center요크와 영구자석 사이의 공극을 두고 영구자석으로 귀환된다. 그림 2에서 단면 abcd를 통과하는 자속과 공극의 단면 hijk를 통과하는 자속은 다음식(6),(7)과 같이 주어진다.

$$\Psi_c = w_c t_c B_c \text{ (wb)} \quad (6)$$

$$\Psi_g = w_c (L_s + L_c) B_g \text{ (wb)} \quad (7)$$

여기서,  $B_c$ 는 center요크의 단면 abcd의 자속밀도,  $B_g$ 는 공극의 단면 hijk의 자속밀도,  $t_c$ 는 center요크의 두께,  $L_s$ 는 스트로크,  $L_c$ 는 스트로크 방향에서의 코일의 길이 이다. 또한 조건[1]로부터 side요크에 인접한 center요크의 단면을 통과하는 자속과 공극을 통과하는 자속은 같으므로

$$2 \Psi_c = \Psi_g \quad (8)$$

조건[3]으로부터  $B_c$ 의 값은 요크의 포화자속밀도  $B_s$ 보다 훨씬 작다. 그러므로 이상의 관계로부터 추력정수와 치수의 관계가 다음 식(9)로 표현될 수 있다.

$$k_f \leq n w_c \frac{2 t_c}{L_s + L_c} B_s \text{ [N/A]} \quad (9)$$

$$B_s : \text{요크의 포화자속밀도[T]}$$

영구자석에 의한 기자력을 충분히 크게하여 center요크의 단면abcd에서 자기포화시킬 때 식(9)에 있어서 등호가 성립되어 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$k_{\max} = n w_c \frac{2 t_c}{L_s + L_c} B_s \text{ [N/A]} \quad (10)$$

$$k_{\max} : \text{최대추력정수[N/A]}$$

위의 식(10)에서 추력정수는 요크의 치수와 자기특성에 의존함을 나타낸다.

## 3. 자계해석 및 관계식의 평가

추력정수 관계식의 평가를 위해 자계해석 응용 패키지인 MAXWELL 3-D FIELD SIMULATOR를 이용하여, 표1의 LDM 초기사양을 근거로 자계해석을 하였다.

표 1. LDM의 초기사양표

사 양	치 수
center요크 두께	$t_c$ [mm] 3.0 - 7.0
bottom요크 두께	$t_b$ [mm] 6.0
공극 길이	$g$ [mm] 2.5 - 10.0
영구자석 두께	$t_p$ [mm] 0.5 - 1.5
요크 폭	$w_c$ [mm] 46.0
스트로크	$L_s + L_c$ [mm] 110
코일 권수	$n$ [회] 500
재 질	
요크(s10c/s15c)의 포화자속밀도[T]	1.62
영구자석(NdFe30)의 보자력[kA/m]	838

먼저, 요크의 두께와 공극의 길이를 변경하여 추력정수를 구했다. 그림 3은 자계해석에 의해 구한 추력정수 특성을 나타낸다.

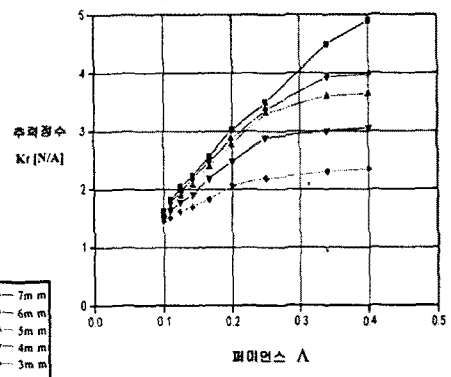


그림 3. 자계해석(FEM)에 의한 추력정수( $t_p=1.0\text{mm}$ )

여기서 퍼미언스 계수( $\Lambda$ )는 다음 식(11)로부터 구한다.

$$\Lambda = \frac{t_p}{g} \quad (11)$$

공극의 길이가 작게 되면 퍼미언스 계수(permeance coefficient)는 증가하고, 추력정수도 증가한다. 그런데 요크내에서 자기포화가 일어나면 추력정수도 포화하는 경향을 보이고 있다. 또한 포화한 추력정수값은 center요크의 두께에 의존적이다.

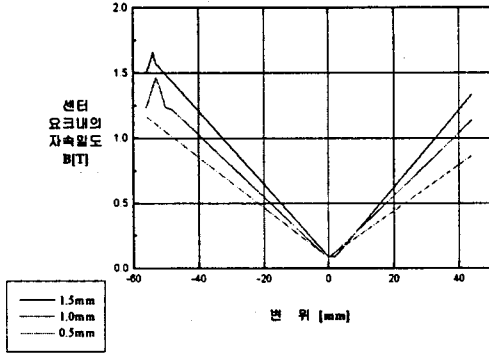


그림 4. center요크내의 자속밀도분포( $t_c=6.0\text{mm}$ )

다음으로 영구자석의 두께를 변화시켜 포화하는 추력정수를 구한다. 또한 그림 4는 center요크내의 자속밀도를 보이며, 이 그림에서 센터요크의 두께는 일정하지만 영구자석이 두꺼워질수록 센터요크내의 자속밀도는 커진다. 어느 경우에도 센터요크내의 자속밀도는 스트로크 단부에서 최대치로 되고 중앙근처에서는 선형적으로 감소하는 것으로 확인되었다.

그림5는 관계식에 의한 계산치와 자체해석에 의한 계산치를 비교하여 나타내었다. center요크가 얇아질수록 오차가 크게 나타나는데 이것은 center요크내의 자속밀도의 크기가 포화 자속밀도 보다 크게 되기 때문이다. 이상으로 식(10)의 정당성이 확인되었다. 또한 추력정수 관계식은 다음과 같음을 알 수 있다.

- [1] 최대 추력정수는 center요크의 자로 단면적과 요크의 재질에 따른 포화 자속밀도에 비례하며, 스트로크와 스트로크 방향의 코일 길이에 반비례한다.
- [2] center요크의 두께는 LDM전체의 두께에 큰 영향을 주어 LDM이 얇아질수록, 스트로크의 길이가 길수록 추력정수는 작게된다.

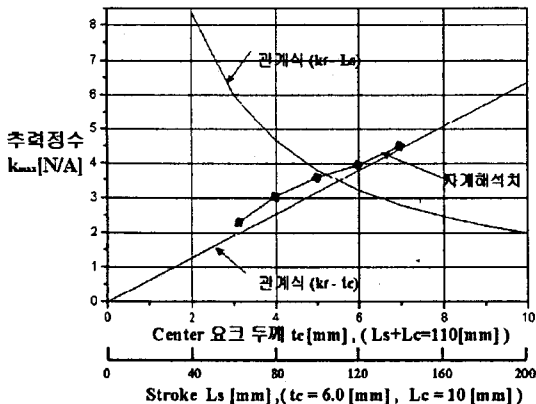


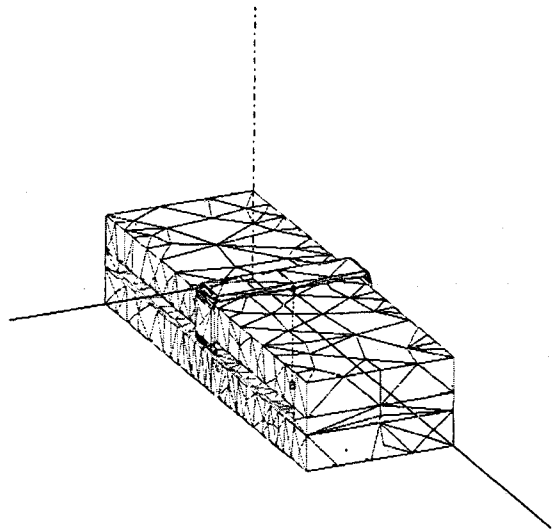
그림5. 추력정수에 대한 center요크 두께와 stroke의관계

#### 4. LDM의 설계

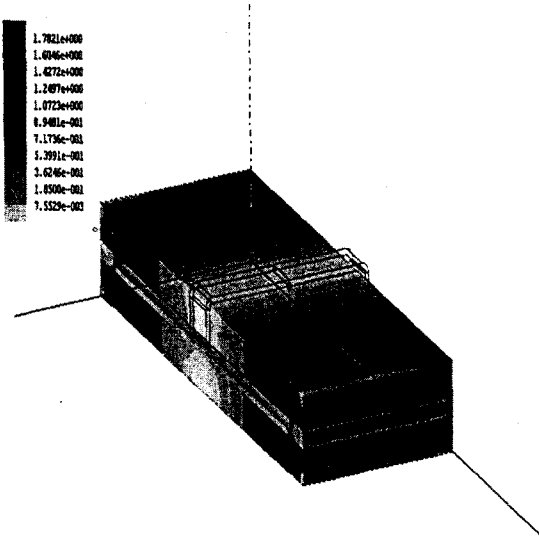
추력정수 관계식을 이용하여 스트로크 100mm이상, LDM두께 20mm이내의 계기용 가동코일형 LDM을 설계하였다. 본 연구에서는 사양을 만족하는 스트로크나 추력정수의 값을 근거로 하여 여러 설계 파라미터 치수를 식(10)에 대입하여 센터요크의 치수를 구하였으며, 공극의 길이와 영구자석의 두께는 퍼미언스법 및 자체해석에 의한 결과치인 그림3과 그림4를 근거로 하였다. 따라서 이에 대한 최적 설계사양표를 표2와 같이 얻을수 있었다. 그림6은 본 LDM의 설계에 사용된 3차원 유한요소 해석을 위한 요소망과 자속밀도분포도 및 포화자속밀도의 위치에 대한 크기를 나타낸 결과이다.

표2. LDM 최적설계 사양표

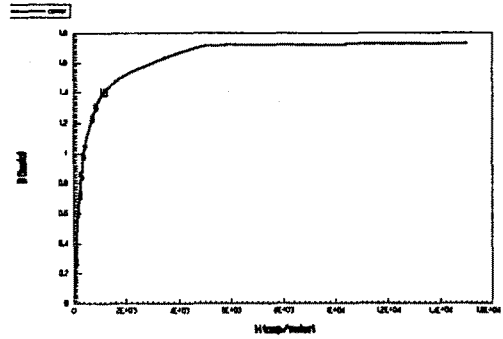
사	양	치 수
center요크 두께	$t_c$ [mm]	6.0
bottom요크 두께	$t_b$ [mm]	6.0
공극 길이	$g$ [mm]	3.0
영구자석 두께	$t_p$ [mm]	1.0
요크 폭	$\omega_c$ [mm]	46.0
LDM 전체 두께	[mm]	19.0
스트로크	$L_s+L_c$ [mm]	110
코일 권수	$n$ [회]	500
코일의 스트로크방향 길이		10
추력정수 (관계식)	$k$ , [N/A]	4.06
(FEM)	$k$ , [N/A]	3.93
계 질		
요크(S10C/S15)의 포화자속밀도	$B_s$ [T]	1.62
영구자석(NdFe30)의 보자력	$H_c$ [kA/m]	838



(a) LDM의 절점 및 요소망(요소:9274, 절점:1736)



(b) LDM의 자속밀도 분포도



(e) LDM 철심내 선형자속밀도의 크기

그림6. LDM의 자속밀도와 지정된 선형 자속밀도크기

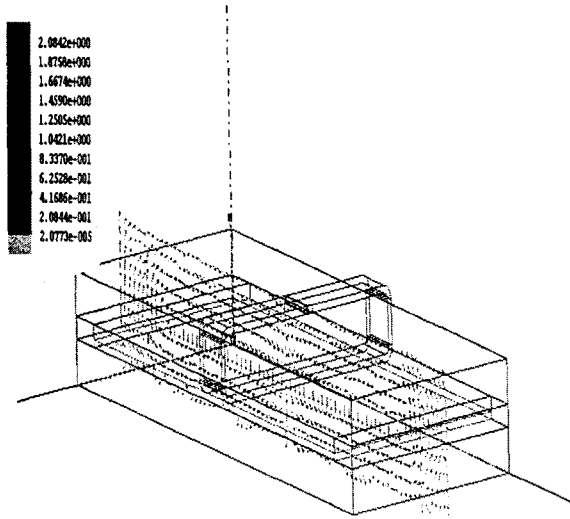
### III. 결론

본 연구에서는 가동코일형 LDM의 설계를 위한 이론 수식과 자계해석 및 설계검증을 위한 유한요소법 패키지 (Maxwell 3D)를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- [1] 추력정수와 치수의 관계식을 유도하였다.  
LDM의 체적당 추력의 분할합을 최대로 하기 위해 스트로크 단부 부근의 센터요크내의 자속밀도를 포화 자속밀도에 가깝게 할 때, 본 관계식은 성립한다. 추력 정수의 한계치는 코일이 감긴 센터요크의 단면적, 요크재질에 따른 포화 자속밀도에 비례하고, 가동자코일의 스트로크 방향의 길이에 반비례한다.
- [2] 관계식의 합당성을 자계해석에 의해 평가하였다.
- [3] 계기용 가동코일형 LDM을 자계해석 응용 패키지 Maxwell 3D에 의해 설계하였다.
- [4] 관계식에 의한 계산치와 자계해석에 의한 계산치 사이의 오차는 약 2%이다.
- [5] 앞으로 위의 설계사양에 근거하여 제작 및 추력특성의 측정이 요구된다.

### [참고문헌]

1. J.Oad, H. Yajima, T. Ninomiya, and H. Yamada, "Design of LDM with Thin and Long Stroke.", 日本電氣應用磁氣學會誌, Vol. 19. No. 2. 1995, pp 509 - 512
2. H. Wakiwake, S. Senoh, and H. Yamada, "Consideration of the Thin Limit of Multipolar-Type Linear dc Motor's Yoke.", 日本電氣應用磁氣學會誌, Vol. 20, No. 2, 1996, pp 593 - 596
3. A. Basak, "Permanent magnet DC Linear.", Oxford, 1996
4. Syed A. Nasar, "Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Applications.", Prentice Hall, Inc., 1987
5. 編輯部, "Linear Motor Application Handbook.", 細畫出版社, 198



(c) LDM의 자속밀도 흐름단면도



(d) LDM 철심내의 자속밀도 지정위치 단면도