

레코더용 LDM의 설계이론 및 추력특성에 관한 연구

강호성* · 백수현 · 김용 · 윤신웅 · 맹인재 · 정계천
동국대학교 전기공학과

The Design Theory and Thrust Characteristics of Recorder type LDM

H. S. Kang · S. H. Baek · Y. Kim · S. Y. Youn · I. J. Maeng · G. C. Jung
Dongguk University

Abstract - The Linear D.C Motor with moving magnet type structured two permanent magnets, three iron bars and winding copper around one of bars. This paper describes the design theory and thrust characteristic analysis of Linear D.C Motor. The design theory is very important to Motor design. Here, The design method be obtained by the design theory equation based the flux distribution and design constant. The propriety for this is established by the experiment results.

1. 서 론

최근에 산업의 수요에 따라 리니어 모터(Linear Motor)의 활용이 두드러지고 있는 추세이다. 리니어 모터는 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 보조장치가 필요없이 직선운동이 가능하므로 비용절감, 구조의 간소화, 중량감소, 마찰력 감소 및 진동역제가 가능한 장점을 지니고 있다. 이 리니어 모우터의 동작원리는 회전형 모우터와 동일하며 구조는 회전형 모우터를 펼쳐놓은 구조로 되어있고 응용범위는 계기용, OA, FA분야 및 운송용등에서 유용하게 활용되고 있다.

본 연구에서는 리니어 모우터 중에서 리니어 DC 모우터(Linear DC Motor)를 연구대상으로 한다. 리니어 DC 모우터는 가동코일형(Moving Coil Type)과 가동자석형(Moving Magnet Type)으로 분류할 수 있으며 본 연구에서는 후자인 가동자석형 리니어 DC 모우터의 설계를 위한 기본이론과 특성해석을 다루고자 한다. LDM의 설계를 위한 이론식은 다음의 3가지로 분류하여 해석하고자 한다.

- ① 자석이 있고 코일에 전류가 흐르지 않는 경우
- ② 자석이 없고 코일에 전류가 흐르는 경우
- ③ 자석이 있고 코일에 전류가 흐르는 경우

위의 3가지 경우에 대한 자속분포를 해석함으로서

전류에 의해서 추력을 발생할 때 자속의 포화없이 정추력을 얻고자 한다. 또한 LDM의 최적설계에 필요한 각각의 설계변수를 구하고자 하였으며 이론에 대한 타당성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 입증하고자 한다.

2. LDM의 구조 및 수식 모델링

그림 1은 계기용 LDM의 기본구조를 나타낸 것이다. 여기서 고정자 중앙부분은 직사각형의 철막대에 코일을 성층하였으며 양쪽에는 보조철막대를 형성하였다. 가동자부분은 영구자석을 양쪽에 설치함으로서 전자력에 의해서 양측식 추력을 발생하며 이동하는 가동자석형 구조로 되어있다.

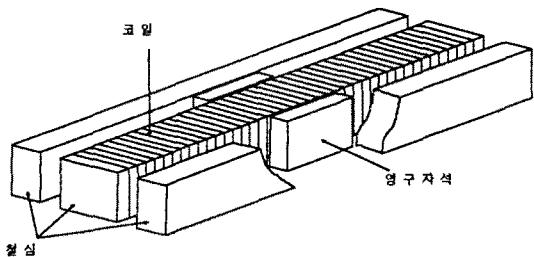


그림 1. LDM의 기본구조

다음의 그림 2는 그림 1의 구조에 대한 공극의 자기저항 분포 구조도이다. 공극의 자기저항은 다섯부분으로 분할 계산하며, 이때 영구자석에 의한 전자속선의 계산이 가능하다. 공극의 각부분은 다음과 같이 분류 가능하다.

- A : 자석 왼쪽의 공극
 - B : 자석 오른쪽의 공극
 - C : 자석과 외부철심 사이의 공극
 - D : 자석과 내부철심 사이의 공극
 - E : 자석부분의 공극
- 이때, 공극의 자기저항은 다음식 (1)~(5)와 같으며

자석의 전도도는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

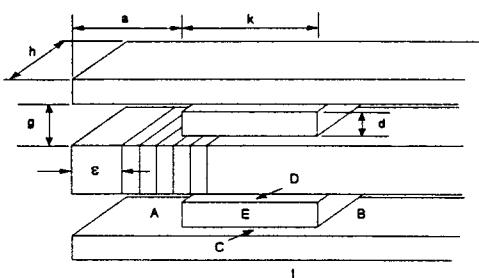


그림 2. 공극의 자기저항 영역

$$R_A = 1/(G_1 a)$$

$$R_B = 1/[G_1(l-k-a)]$$

$$R_C = 1/(G_2 k)$$

$$R_D = 1/(G_3 k)$$

$$R_E = 1/(G_4 k)$$

$$G = \frac{\mu}{\int \frac{dz}{h}} \quad (6)$$

여기서 직렬자기저항과 기자력은 식 (7), (8)과 같다.

$$R_R = R_C + R_D + R_E = 1/(G_5 k) \quad (7)$$

$$e = H_c h \quad (8)$$

고정자 코일에 전류가 흐르지 않는 경우 자석의 자속 ϕ_0 은 다음의 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_0 = e \frac{G_1 G_5 k(l-k)}{G_1(l-k) + G_5 k} \quad (9)$$

$$\mu_{Magn.} \approx \mu_0 \text{ 이면 } G_1 \approx G_5$$

이것은 다음식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_0 = \frac{e G k(l-k)}{l} \quad (10)$$

다음 수식에서 사용된 기호들은 다음과 같다.

M : 자석은 있고 코일에 전류가 흐르지 않는 경우

E : 자석은 없고 코일에 전류가 흐르는 경우

P : 공극의 수직분력

T : 철심의 세로방향 분력

C : 코일

2.1. 자석은 있고 코일에 전류가 흐르지 않는 경우

공극의 수직분력 ϕ_{PM} 은 그림 2의 단면 A 및 B에 대해서 식 (11)과 같으며 단면 C, D 및 E에 대해서는 식 (12)와 같다.

$$\frac{d\phi_{PM}}{dx} = \frac{\phi_0}{(l-k)} \quad (11)$$

$$\frac{d\phi_{PM}}{dx} = \frac{\phi_0}{k} \quad (12)$$

철 속의 선속은 각각의 단면에 대해 X 축에 따라 분포된 모든 분력을 합산하면 식 (13)과 같이 나타낼

수 있다.

$$\phi_{TM} = \int_0^l d\phi_{PM} = \int_0^l \frac{d\phi_{PM}}{dx} dx \quad (13)$$

단위길이당 코일의 수는 식 (14)와 같다.

$$dn/dx = N/(l-2\varepsilon) \quad (14)$$

여기서, N 은 총 코일선수, ε 은 고정자 중 코일이 감겨있지 않은 부분을 나타낸다. 전체코일의 선속은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{CM} &= \int_{\varepsilon}^{2l-\varepsilon} \phi_{TM(x)} dn \\ &= \int_{\varepsilon}^{2l-\varepsilon} \phi_{TM(x)} \frac{dn}{dx} dx \end{aligned} \quad (15)$$

(1) 식 (16)은 식 (13), (14)를 식 (15)에 대입함으로서 얻을 수 있다.

$$(3) \quad \phi_{CM} = \frac{1}{2} \cdot \phi_0 \cdot \frac{Nl}{l-2\varepsilon} \left(\frac{2a}{l-k} - 1 \right) \quad (16)$$

(4) 이때 자석이 이동할 경우 역기전력식은 식 (17)과 같

(5) 으며 식 (10)을 대입하면 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{d\phi_{CM}}{da} = \phi_0 \frac{Nl}{(l-2\varepsilon)(l-k)} \cdot \frac{da}{dt} \quad (17)$$

$$E = \frac{e \cdot G \cdot k \cdot N}{l-2\varepsilon} \cdot \frac{da}{dt} \quad (18)$$

여기서 식 (18)은 전류 I 를 고정자 코일에 제공한 경우 전동기로서 구동됨을 알 수 있으며 이러한 수식은 다음의 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_x I = F_x da/dt \quad (19)$$

식 (18)을 식 (19)에 대입하면 다음식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F}{I} = \frac{E}{da/dt} = \frac{e \cdot G \cdot k \cdot N}{l-2\varepsilon} \quad (20)$$

전류밀도식 (21)로 부터 식 (20)에 따라 식 (22)를 얻을 수 있다.

$$NI/(l-2\varepsilon) = I_x \cdot dn/dx = J \quad (21)$$

$$F = J \cdot e \cdot G \cdot k \quad (22)$$

여기서

$$G = \mu_0 b/k$$

$$e \approx H_c h$$

추력식은 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = J \cdot H_c \cdot \mu_0 \cdot hbc / g \quad (23)$$

여기서 $H_c \mu_0 \approx B_R$ 이므로 최종추력은 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = JB_R V_{Magn.}/g \quad (24)$$

여기서 $V_{Magn.} = kdh$

2.2. 자석은 없고 코일에 전류가 흐르는 경우

LDM의 중앙 고정자 코일에 전류가 흐르는 경우에는 그림 3과 같이 분배상수를 가진 여러개의 부분 단면

으로 나타낼 수 있다.

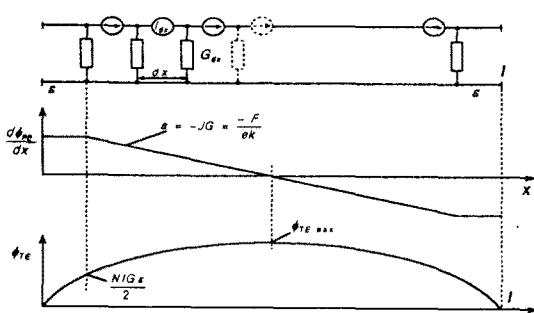


그림 3. 분배상수로된 단면과 자속분포

이러한 전재하에서 공기중과 철 속에 함유된 부분 선속은 다음식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\phi_{TE} &= \int_0^x \frac{d\phi_{EE}}{dx} dx \\ &= \frac{NI \cdot G \cdot \epsilon}{2} + \int_0^x \left(\frac{l}{2} - x \right) \cdot JG \cdot dx\end{aligned}\quad (25)$$

식 (25)은 식 (26)으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{TE} = (JG/2)(lx - \epsilon^2 - x^2) \quad (26)$$

이때 최대자속밀도는 식 (27)과 같다.

$$\phi_{TEmax} = NI \cdot G(l+2\epsilon)/8 \approx JG \cdot l^2 \cdot 1/8 \quad (27)$$

2.3 자석이 있고 코일에 전류가 흐르는 구조

철 속의 최대선속은 다음식 (28), (29)와 같다.

$$\phi_{Fe} = \phi_{TM} + \phi_{TE} \quad (28)$$

$$d\phi_{Fe}/dx = d\phi_{TM}/dx + d\phi_{TE}/dx \quad (29)$$

(그림 3의 곡선 ϕ_{TE} 에서와 같이) ϕ_{Fe} 가 최고치에 도달하는 특정한 점 x_{max} 에서는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$d\phi_{Fe}/dx = 0$$

이러한 관계로부터 다음식 (30)이 가능하며

$$\phi_0/(l-k) = JG \cdot (x_{max} - l/2) \quad (30)$$

여기서 $\phi_0 = e \cdot G \cdot k \cdot (l-k)/l$ 이므로 식 (31)이 얻어진다.

$$x_{max} = l/2 + ek/(Jl) \quad (31)$$

따라서 x_{max} 에서의 ϕ_{Fe} 는 ϕ_{Satt} 이다.

이것은 다음식 (32)로 나타낼 수 있으며, 식 (33)은 식 (10)을 식 (32)에 대입함으로서 얻을 수 있다.

$$\phi_{Satt} = x_{max} \phi_0/(l-k) + (lx_{max} - \epsilon^2 - x_{max}^2) \frac{Jc}{2} \quad (32)$$

$$\phi_{Satt} = \frac{G}{8} \left(4ek + \frac{4e^2 k^2}{Jl^2} + Jl^2 - 4JE^2 \right) \quad (33)$$

$4\epsilon^2 \leq l^2 (\approx 1/900)$ 일 경우 이를 무시하면 다음식

(34)가 성립된다.

$$\phi_{Satt} = \frac{G}{8Jl^2} (2ek + Jl^2)^2 \quad (34)$$

포화자속 ϕ_{Satt} 는 그림 3을 통하여 알 수 있으며 이것은 X축상의 이동변위와 전류의 방향에 따라 발생하게 된다.

2.4 최대추력 및 설계정수

모터의 최대 추력식은 식 (35)와 같지만 이것은 포화자속에 의해서 좌우되며 이에대한 수식은 식 (36)과 같다.

$$F_n = J_n \cdot e \cdot G \cdot k \quad (35)$$

$$\phi_{Satt} = \frac{1}{8} \cdot \left(\sqrt{\frac{F_n l^2}{ek}} + 2e \cdot G \cdot k \sqrt{\frac{ek}{F_n l^2}} \right)^2 \quad (36)$$

설계방법은 식 (35)로부터 모터의 설계수치를 계산할 수 있다. 다음, 고정자 길이가 $l-2\epsilon$ 인 구리선이 높인 볼록다각형이라 가정하면, 코일의 높이는 m , 고정자의 크기는 p , 구리의 고유저항은 ρ , 충전계수는 0.63이다. 전기적인 특성에 의해서 가상의 $\rho' = \rho/0.63$ 을 이용할 수 있다. 여기서,

고정자코일의 부피 : $V_{CU} = m(p+\pi m)(l-2\epsilon)$

전류밀도 : $I/m = J$

구리손실 : $W = \rho' V_{CU} J^2$

저항 : $R = \rho' \cdot (V_{CU}/m^2) (dn/dx)^2$

여기서 다음과 같은 식을 이끌어 낼 수 있다.

$$L = (G/12) (dn/dx)^2 (l-2\epsilon) (l^2 + 2l\epsilon - 8\epsilon^2)$$

$$\frac{F^2}{W} = \frac{e^2 G^2 k^2}{\rho' (\pi + p/m)(l-2\epsilon)}$$

$$\frac{L}{R} = \frac{l^3}{12 e^2 k^2 G} \cdot \frac{F^2}{W}$$

2.5 실험 및 시뮬레이션 결과

본 장에서는 위의 이론을 근거로 하여 표 1을 대상으로 이동시 자체해석한 자속분포와 변위에 대한 추력특성을 나타낸 것이다.

LDM의 사양	
고정자 길이 [mm]	600
고정자 폭 (내부)[mm]	24
고정자 폭 (외부)[mm]	12
가동자석 높이 [mm]	23
가동자석 폭 [mm]	12
가동자석 길이 [mm]	73
코일 턴수 [회]	1475
전류 [A]	0.4
영구자석 잔류자속밀도[KG]	3.4
공극 [mm]	0.3

표 1. LDM의 사양

그림 4 (a), (b), (c)는 유한요소법으로 본 LDM의 구조에 고정 경계조건으로 해석한 자속분포이며, 이때 전류밀도 $J=590[A/T]$, 요소분할수 12639[개]를 조건으로 자석을 3부분으로 이동시킨 경우에 발생된 자속분포도를 나타낸 것이다.

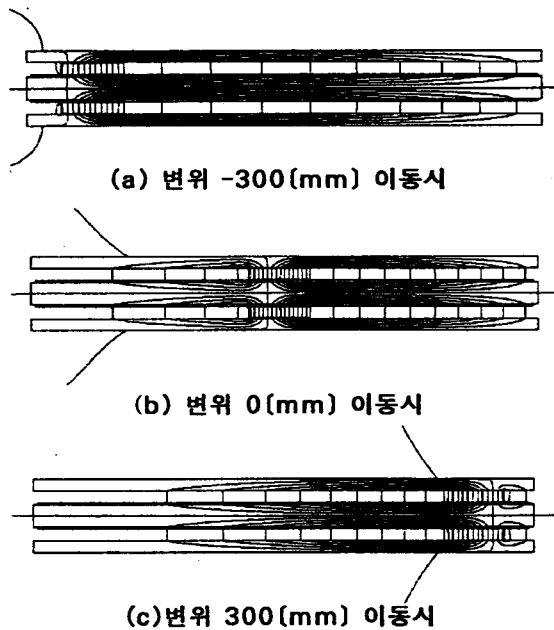


그림 4. 자석의 위치에 따른 LDM의 자속분포

그림 5는 그림 4의 조건과 모델에 대한 공극자속밀도의 크기를 나타낸 것으로 자속밀도가 왜곡없이 잘 분포됨을 보여주어 잘 설계되었음을 알 수 있다.
그림 6은 변위에 대한 추력특성을 나타낸 것이다. 그림 6의 (a), (b)를 통하여 전류 $I=0.8[A]$ 이상에서는 자속의 포화에 따라 추력이 불균형함을 알 수 있다.

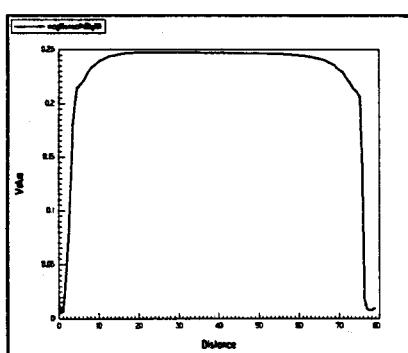
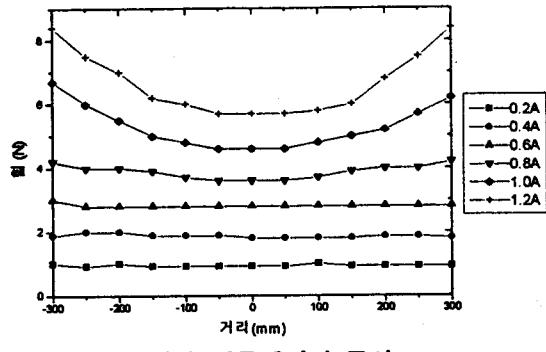
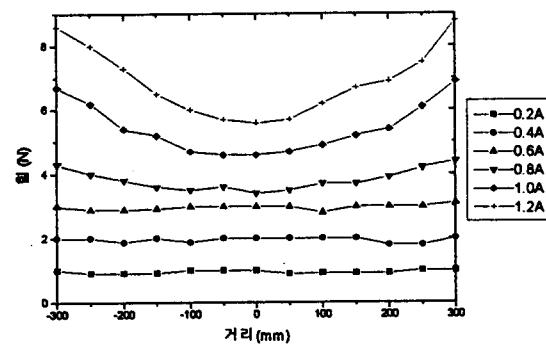


그림 5. 이동변위에 대한 공극의 자속밀도



(a) 시뮬레이션 곡선



(b) 실험곡선

그림 6. 변위에 대한 추력특성

3. 결 론

본 연구에서는 기록제기용으로 활용가능한 가동자석형 리니어 DC 모터의 설계이론 및 특성해석을 통하여 최적의 설계를 구축하고자 하였다. 자석만 존재하는 경우, 전류만 흐르는 경우, 자석과 전류가 존재하는 3가지의 경우에 대해서 자속분포를 해석함으로서 전류의 공급에 따른 포화없이 정추력을 발생할 수 있도록 정추력특성을 알 수 있었다. LDM의 설계를 위해서 정추력을 기준으로 설계변수 이론을 정립하였으며 실험을 통하여 이에 대한 타당성을 입증하고자 하였다.

[참고문헌]

- [1] Amitava Basak, " Permanent Magnet D.C. Linears.", Oxford, 1996
- [2] L. Honds and K. H. Meyer, "A Linear Motor with Permanent Magnets."
- [3] Ben L. Triplett, "D.C. Linear Motor.", Motor-con proceedings, October 1986.
- [4] A. Basak, "Generalised Theory of Ferrite-field D.C. Linear Motors.", IEEE, Vol. 16, pp.43-49, 1979.