

Short Stroke 에 적합한 양측식 LDM 의 설계

The Design LDM with Double-Sided Moving Magnets for Short Stroke

백수현* 윤신용⁰ 김 용** 함중걸*** 김철진****

*동국대학교 **대림전문대학 ***생산기술연구원 ****전자부품연구소

Abstract

In this paper, we present the design procedure and analysis the fundamental characteristics for Linear DC motor using permeance method and finite element method. Designed LDM is made of two permanent magnets, three iron core and amateur windings. For the design the LDM, first of all it is necessary to calculate the air gap flux density and thrust force, after that to determine core size, the numbers of winding turns, winding width, motor cross section area and losses in the coil.

Also, we analysis the fundamental characteristics for implemented LDM according to proposed design procedure, and we find that the implemented LDM generated constant thrust force for constant current as long as iron of core is not saturated.

Finally, we find that the proposed design procedure in this paper is effective to design and implementation of LDM.

1. 서 론

종래 직선력을 얻는 수단으로 회전기와 운동량 변환기구를 결합한 시스템이 주로 이용되어 왔으나 전동기와 운동량 변환기구를 결합한 장치의 구성이 복잡하다는 점과 비용이 고가라는 측면에서 단점을 지니고 있으며 마찰에 의한 손실과 오차 및 속도가 느릴 뿐 아니라 소음을 유발하는 문제점을 지니고 있다. 이와 같은 문제점들은 정밀 소형 제어기의 경우 더욱 현저하게 되는 데 이의 개선에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다.

리니어 모터는 이와 같은 연구 결과중의 하나로 소형, 경량화가 가능하며 소음이 없고 구조가 간단하다는 장점에 의해 최근 HA, OA, FA 와 같은 각종 분야에서 널리 실용화되는 추세에 있으며 각종 서보시스템에 있어서 리니어 모터의 응용은 더욱 증대될 것으로 예상된다.[1]~[7]

리니어 모터는 사용목적에 따라 크기는 육상 운송용으로서 자기 부상열차와 같은 장거리 직선운동용에서부터 컨베이어시스템, 승강기, 크레인, 레코더, 하드디스크, 로봇 등 단거리 직선운동용에 이르기까지 다양한 종류가 개발되어 응용되고 있으며, 에너지 공급원에 따라 교류전력을 구동원으로 하는 것(LIM, LSM)과 직류전력을 구동원으로 하는 것(LDM, LPM)등으로 크게 구분된다.[1]~[4]

이중 LDM(Linear DC Motor : 선형 직류전동기)은 여자방식과 급전방식에 따라 가동 자석형(Moving Magnet Type : 이하에서는 MM형)과 가동 코일형(Moving Coil Type : 이하에서는 MC형)으로 구분되는 데 MM형의 경우 자석의 배열방식에 따라 양측식(double-side)과 편측식(single-side)으로 구분되며 양측식의 경우 편측식에 비해 구조가 복잡하게 되는 단점은 있으나 고횘출을 발생시킬 수 있으며 또한 효율이 우수하다는 장점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 여러 형태의 리니어 모터중 양측식 MM형 LDM을 대상으로 설계시 필요로 되는 자기회로의 구성과 특성해석에 필요로 되는 이론을 도출하고 이 이론을 기초로 試作機를 제작한 후 이에 대한 기본 특성을 실험과 시뮬레이션으로 해석하여 비교함으로써 리니어 모터의 효율적인 설계방안을 제시하고자 한다.

2. MM형 LDM의 설계 및 구동 특성

2-1. LDM의 설계

LDM의 설계는 다음과 같은 순서로 할 수 있다. 먼저 영구자석의 치수와 LDM의 사양을 입력하고 퍼미언스법을 적용하여 식(2-1)로부터 실효자속밀도 B_E 를 계산한다.

$$B_E = \frac{B_r}{\left[\frac{1}{\lambda_G} + \frac{1}{\lambda_E} \right] + 1} \quad (2-1)$$

이를 식(2-2)에 대입하여 원하는 추력을 산출할 수 있다.

$$F = \frac{l_M}{l} w l B_E b \quad (2-2)$$

여기서 코일턴수, 코일폭, 전류를 계산할 수 있으며, 또한 유한 요소법 응용 패키지인 Maxwell 2-D를 이용하여 식(2-3)으로부터 철심이 포화되지 않는 철심폭 a 를 결정할 수 있다.

$$B_{l,max} = \frac{w l l \mu_0}{4 a \delta} \quad (2-3)$$

여기서 $B_l = B_{l,max} \left(1 - \frac{x^2}{l^2} \right)$

이에 따라 LDM 시작기의 단면적 $A = (4a + 2dw + 23)b$ [mm²] 및 동손을 구하여 LDM을 설계할 수 있다. 그러나 LDM의 가동부 질량(영구자석의 규격), LDM의 면적 A , 동손 W_L , 코일폭 dw 등 어느 것을 파라미터로 먼저 결정하느냐에 따라 설계 파라미터의 크기가 변화되기 때문에 기준법칙을 정하는 데는 무리가 있다.

본 LDM 시작기의 영구자석으로는 페라이트 자석 MPB 280을

선택하였으며, 영구자석의 높이를 $b = 25 [mm]$, 철심의 길이를 $l = 250 [mm]$, 영구자석의 길이를 $l_M = 40 [mm]$, 코일의 폭을 $dw = 2 [mm]$, 영구자석의 폭 $a = 10 [mm]$ 라 하면 영구자석의 체적은 $A_M = (40 \times 25 \times 10) [mm^3]$ 로 된다.

따라서 본 연구에서는 식 (2-1), (2-2), (2-3)에서 계산된 그림 2.1의 시뮬레이션 결과로부터 $dw = 2 [mm]$, $b = 25 [mm]$, $a = 10 [mm]$, $l = 250 [mm]$ 로 하여 LDM 시작기를 설계 제작하였다. 그림 2.2는 설계 제작된 LDM 시작기의 구조를 나타낸 것이다. 그림 2.1 (a)는 LDM의 스트로크와 영구자석의 높이 b 의 변화에 대한 내부 철심폭 $2a$ 의 변화를 시뮬레이션한 결과이며, 그림 2.1(b), (c), (d), (e)는 영구자석의 높이 $b = 25 [mm]$, $b = 75 [mm]$ 를 기준으로 코일폭 dw 를 1.5 [mm]에서 4.0 [mm] 까지 변화시키는 경우 스트로크변화에 따른 LDM 단면적 A , 동손 W_L 의 설계 파라미터를 나타낸 것이다. 이 경우 영구자석의 높이가 $b = 25 [mm]$ 일 경우 $b = 75 [mm]$ 에 비해 LDM의 단면적은 작지만 동손은 크게 됨을 알 수 있다.

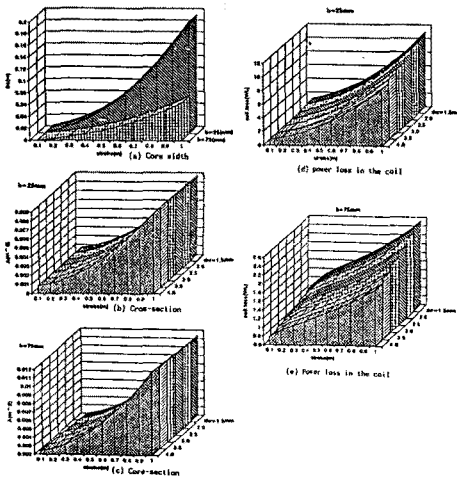


그림 2.1 LDM의 전 스트로크에 대한 철심폭, 단면적 및 동손
Fig. 2.1 Core width, core-section area and power loss in the coil for stroke of Linear DC motor

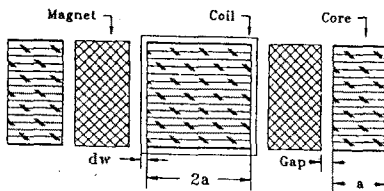


그림 2.2 설계된 LDM 시작기의 치수 구조도
Fig. 2.2 Dimension diagram of designed Linear DC motor

2-2. LDM의 구동 특성

리니어 모터의 응답특성은 식(2-4)의 전압방정식과 식(2-5)의 운동방정식을 연립하여 해석하여야 한다.

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + K_E v \quad (2-4)$$

$$F = M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} = K_F i \quad (2-5)$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2-6)$$

여기서 M : 가동자의 질량, K_E : 역기전력 상수
 B : 점성 계수, v : 가동자의 속도
 K_F : 추력상수, L : 전기자 코일의 인덕턴스
 F : LDM의 발생추력, R : 전기자의 저항
 x : 변위, e : 입력전압
 i : 전류

코일의 직렬저항 R 에 비하여 코일의 인덕턴스 L 이 매우 작다고 가정하면 코일의 인덕턴스 L 은 무시할 수 있으므로 식(2-4)는 식(2-7)과 같이 간략히 표현할 수 있다.

$$e = Ri + K_E v \quad (2-7)$$

$$F = K_F i = M \frac{dv}{dt} + Bv \quad (2-8)$$

가동자가 운동을 시작하면 이동속도 $v(t)$ 에 비례하여 전기자전선의 코일에는 $\phi(t)$ 로 인한 속도기전력이 발생하며 이는 식(2-9)와 같이 표현된다.

$$e_v(t) = \phi(t) N v(t) \quad (2-9)$$

또한 이 때 LDM의 출력전력 및 발생추력은 식(2-10), (2-11)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = e_v(t) i(t) \text{ 또는 } P = \phi(t) N v(t) i(t) \quad (2-10)$$

$$F_d(t) = \frac{P}{v(t)} = \phi(t) N i(t) \quad (2-11)$$

발생추력은 모터의 질량 M , 마찰력 D , 기계적인 부하 F_L 과 평형을 이루게 되므로 운동방정식과 발생추력식은 식(2-12)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_d(t) = M \frac{dv(t)}{dt} + Dv(t) + F_L \quad (2-12)$$

식(2-9), (2-12)로부터 정상상태속도는 식(2-13)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_0 = \frac{\phi_0 N I_0 - F_L}{D_{eff}} \quad (2-13)$$

여기서 실효 마찰계수는 $D_{eff} = F_d + \phi_0^2 N^2 / R$ 이다.

리니어 모터는 실질적으로 전기적 시정수가 기계적 시정수에 비해 작게 설계되어 있으므로 전기적 시정수를 무시할 수 있다. 여기서 초기조건을 $t = 0, v = 0$ 이라 가정하면 가동자의 초기 이동속도는 식(2-14)로 나타낼 수 있다.

$$v_s = V_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}}) \quad (2-14)$$

여기서, v_s : 초기상태속도, V_0 : 정상상태속도

$$\tau_m: \text{기계적인 시정수} (= \frac{M}{D_{eff}})$$

여기서 t_m 은 가동자의 속도가 최대속도의 63 [%]에 이를 때까지의 시간이다.

정상상태에서의 속도에 대한 추력 특성은 식(2-15)와 같다.

$$F_d = \phi_0 N I_0 - v_0 D e f \quad (2-15)$$

3. 이론 및 실험결과의 비교 검토

그림 3.1은 전류 변화에 대한 추력특성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 얻은 결과이며, 시뮬레이션 결과와 측정치가 일정 전류 영역까지는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 전류의 크기가 일정 영역을 초과하는 경우 철심의 포화로 인하여 시뮬레이션 결과와 실측치가 일치하지 않게 됨을 알 수 있다. 이로 인하여 LDM의 설계시 고정자 코일 전류의 정격치는 철심의 포화여부에 따라 결정됨을 알 수 있다.

그림 3.2는 각각의 전류에 대해 전 스트로크의 길이에 따른 추력의 변화를 나타낸 것이다. 전류가 0.6[A]일 경우 전 스트로크 영역에서 일정 추력을 발생하지만 0.6[A]이상으로 증가되는 경우 중앙위치에서의 추력은 양 단부에 비해 작아지게 되어 추력이 불균일하게 발생됨을 알 수 있다.

그림 3.3은 제작된 LDM 실험장치에 대하여 구동회로의 기준신호 변화에 따른 위치제어 실험결과이다. 그림 3.3(a)는 전 스트로크 250[mm]에서 이득 k=10 인 경우 전원신호 가변에 따른 위치제어특성을 나타낸 실험결과이며, 그림 3.3(b)는 이득 k=44 인 경우 기준전압의 가변에 대한 위치제어특성을 나타낸 실험결과를 나타낸다.

그림 3.3(c)는 이득 k=50 인 경우 기준전압의 가변에 대한 위치제어특성의 실험결과로 발진현상이 발생함을 알 수 있었다. 실험결과로부터 이득이 너무 높게 되면 응답속도는 빠르나 발진현상이 심하게 되어 위치제어특성이 악화되며, 이득이 낮을 경우에는 응답속도가 늦게 되어 적절한 이득의 선정이 이루어져야 함을 알 수 있다.

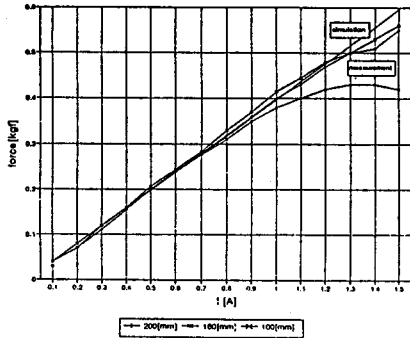


그림 3.1 전류의 변화에 대한 추력특성
Fig. 3.1 Thrust force for variable current

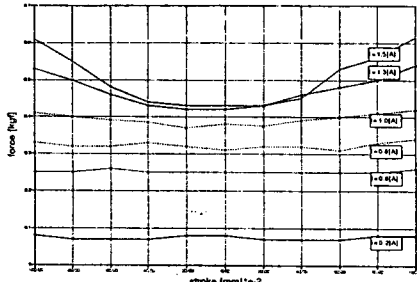
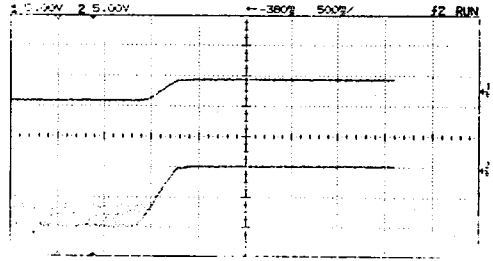
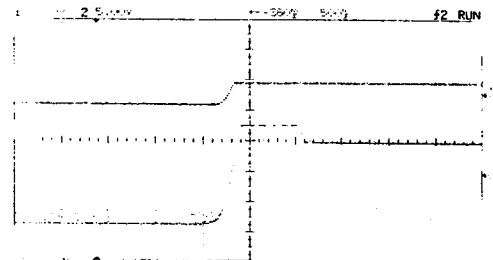


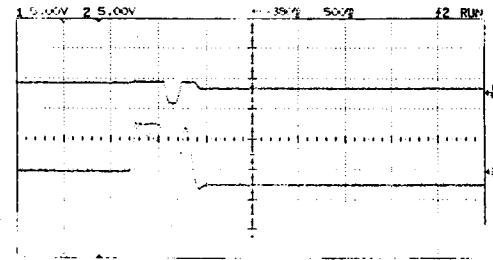
그림 3.2 LDM 가동자의 이동위치에 따른 추력의 측정값
Fig. 3.2 Measurement of thrust force according to LDM moving position



(a) Stroke : 50[mm], gain[k=10], time : 0.6[sec]
X-axis : time[sec], Y-axis : current[1], voltage[2]



(b) Stroke : 50[mm], gain[k=44], time : 0.15[sec]



(c) Stroke : 50[mm], gain[k=50], time : 0.08[sec]

그림 3.3 기준전압 조절에 대한 위치제어

Fig. 3.3 Position control for variable reference voltage

4. 결론

본 연구에서는 양극성 영구자석 가동형 LDM의 설계방법을 제안하고 시작기에 대한 구동특성을 해석하였다. 즉 양극성 영구자석 가동형 LDM을 등가 자기회로로 표현하고 등가 자기회로에 퍼미언스법을 적용하여 각 퍼미언스계수와 영구자석의 기자력을 계산하여 공극의 실효 자속밀도를 구하였으며 이로부터 설계에 필요한 코일턴수, 철심폭, LDM 단면적, 등손을 산출하였다.

구동전류는 유한요소법 응용 패키지를 이용하여 철심이 포화되지 않고 일정 추력을 발생시킬 수 있는 크기로 설정하였으며, 실험을 통하여 확인할 수 있다.

본 모델의 실효자속밀도와 추력에 대한 이론해석의 결과는 유한요소법 패키지를 이용한 결과 및 실험결과와 비교적 잘 일치됨을 알 수 있다.

앞으로 지지기구 및 제어특성의 개선등에 대해 보완이 이루어진다면 더욱 우수한 특성을 지닌 양극성 영구자석 가동형 LDM의 제작이 가능할 것으로 생각되며 공장자동화기기, X-Y 플로터, 레코더, 자동커텐등과 같은 각종 FA, OA, HA 분야에 폭넓게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.