

가동자석형 LDM의 설계 및 특성 해석

장석명 정상섭 윤인기
충남대학교

Design and Characteristic Analysis of a Moving Magnet Type LDM

S.M. Jang, S.S.Jeong, I.K.Yoon
Chungnam Nat'l Univ.

Abstract - In the industrial field the necessity of the linear motion is increasing. We selected a moving magnet coreless type LDM, which have the advantages, such as long stroke, brushless, no cogging force. Actually, the design is accomplished using FEM analysis for the basic configuration of a magnetic circuit, and characteristic equations for coil design. In the course of design, we have estimated airgap flux density and thrust.

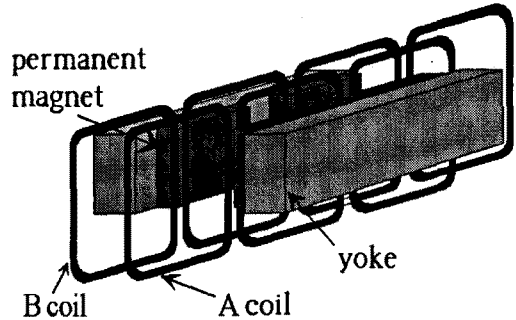


그림 1 Moving magnet coreless LDM

1. 서론

전기에너지를 동력원으로 하는 전동기의 출력은 회전운동이 대부분이나, 선형운동을 필요로 하는 경우가 점차 증가하고 있다. 리니어모터는 회전형 모터에 사용되는 선형운동 변환장치 없이 직선운동을 필요로 하는 곳에 직접 적용 가능하다는 관점에서 필요성이 점차 증가하고 있다. 리니어모터 중에서도 LDM은 구조가 비교적 간단하고 추력/질량비가 크므로, 고속 동작이 가능하며, 또한 서보성이 좋다. LDM에는 가동코일형과 가동자석형이 있는데, 가동코일형의 경우 가동부에 권선을 갖는데 이러한 형태는 가동부 권선에 전력을 공급하기 위한 전기적 연결을 필요로 하는 단점을 지닌다. 한편 가동자석형의 경우 중량당 추력비가 가동코일형보다 나쁘므로 별로 실용화되지 않았지만, 가동부에 급전기구를 필요하지 않고 고정자를 포함한 장치 전체의 경량화가 용이하다는 등의 장점을 갖고 있다. 그리고 고정자에 다수의 코일을 가동자의 이동 방향으로 배치하고, 위치 및 속도의 검출기구를 이용하면 원리적으로는 무한히 긴 스트로크가 가능하다.

LDM의 효용가치는 고속 전자부품 자동삽입장치나 고속조립용 로봇 등의 작업중량이 가볍고 추력은 작아도 되며, 2[m/sec]이상의 이동속도를 요구하는 용도로 개발되어 있다. 본 연구에서는 제품의 반송장치나 운반 등 제조공정에서 필요한 부품 및 각종 대상물의 운송을 위한 장스트로크가 가능한 LDM을 설계하였고, 이를 위하여 유한요소해석을 이용하였다. 특히 설계단계에서 공극과 코일중심의 자속밀도와 추력을 계산하였다. 그리고 정지실험시의 정추력을 예측하기 위해서 가동자의 위치에 따른 추력을 FEM을 통하여 해석하였다.

2. LDM의 설계

2.1 설계모델 및 구동원리

공철심형의 경우, 자속밀도가 B인 자계중에 전류 I가 흐르는 길이 l인 도체가 있다면 이 도체에 작용하는 힘은 플레밍의 왼손법칙에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$F = I l \times B \tag{1}$$

만일 가동자가 일정한 방향으로 운동을 한다면 공극에서 영구자석의 자속과 쇄교하는 권선의 길이 l_e , 공극자속 밀도 B_g , 권선수 N , 그리고 코일에 흐르는 전류 i 등의 설계사양을 고려하면 발생추력은 식 (2)와 같다.

$$F_e = 2 l_e N B_g i = k_E i \tag{2}$$

여기서 k_E 는 유기전압상수로 $k_E = 2 l_e N B_g$ 이다.

2.2 LDM설계를 위한 특성식

(1) 공극자속밀도

가동자석형 LDM의 영구자석에 의한 공극자속밀도는 식 (3)과 같다.

$$B_g = k \times \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_r}{\mu_0 g}} \tag{3}$$

여기서 B_r 은 잔류자속밀도, μ_r 은 자석의 비투자율, μ_0 은 자석의 두께, g 는 공극길이, k 는 자기회로 형상에 의한 보정계수이다.

(2) 요구추력과 기자력 계산

자속밀도 B_g 의 자계속에서 코일에 흐르는 전류에 의한 기자력 M 에 의하여 발생하는 전자기력 F_m 은 앞서 나타낸 식 (2)와 같다. 따라서 마찰손실을 무시할 경우, 요구추력은 전자기 추력과 같아야 한다. 즉, $F_m = F_e$ 이므로 기자력은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$NI = \frac{F_m}{2 B_g l_e} \quad (4)$$

(3) 코일턴수

공심형 코일의 경우 철심형 코일에 비하여 인덕턴스가 상대적으로 매우 작기 때문에 설계 시에는 $L(di/dt) \approx 0$ 으로 가정한다. 따라서 코일에 대한 전압방정식을 이용하여 권선수를 나타내면 식 (5)와 같다.

$$N = \frac{1}{2} \frac{V}{\rho_c (2 l_{ne} + l_e + l_{ine}) J_c + 2 B_g l_e (\alpha + \beta) f} \quad (5)$$

위의 식 (4)와 (5)에 의하여 권선수와 전류를 구하였고, 권선이 차지하는 공극의 유효면적은 식(6)과 같다.

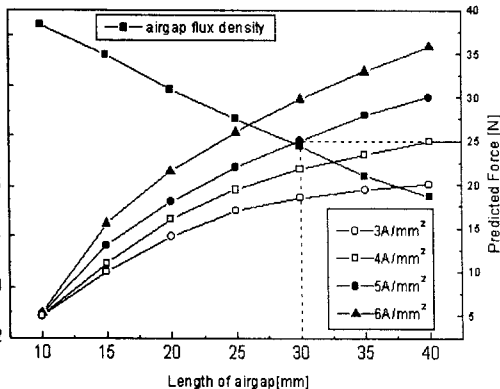
$$S_g = a b k_s \quad (6)$$

여기서 k_s 는 점적율로서 그값은 0.4이다. 공극의 유효면적과 권선수를 고려하여 권선의 직경을 구하면 식(7)과 같다.

$$D = \sqrt{\frac{4 S_g}{\pi N}} \quad (7)$$

2.3 공극길이에 따른 기자력 및 추력

선정된 LDM의 기본모델에서 공극의 크기는 공극자속밀도와 기자력 및 권선수, 코일등을 결정하는 중요한 변수가 된다. 공극의 크기에 따라 공극자속밀도가 결정됨과 동시에 코일의 기자력이 결정된다. 다시 말해 공극이 커지면 자속밀도, 즉 자기장하가 감소되어 추력이 작아지지만, 공극안에 놓여지는 코일이 차지하는 공간이 커지므로 기자력 즉, 전기장하가 증가하여 추력을 크게할 수 있다. 따라서 공극의 크기에 따른 발생추력 및 자기장하의 증감 그리고 공간과 기자력의 증감으로 인한 추력과 전기장하의 영향을 상호 검토하여 적절한 값에서 결정하는 것이 매우 중요하다. 이러한 특성을 검토하기 위하여 공극길이에 따른 공극자속밀도와 추력관계를 FEM해석에 의해 그림1에 나타내었다. 추력 25[N]정도를 발생시키기 위해 그림 2로부터 전류밀도 5 [A/mm²]에서 공극은 30 [mm]이면 적당할 것으로 예상되어 이 값으로 설정하였다. 그림 2는 자기회로와 식 (2)~식(7)까지의 전기자 설계과정을 나타낸 흐름선이다



2.4 LDM의 구조 및 사양

가동자석형 LDM은 그림 1과 같이 영구자석과 요크

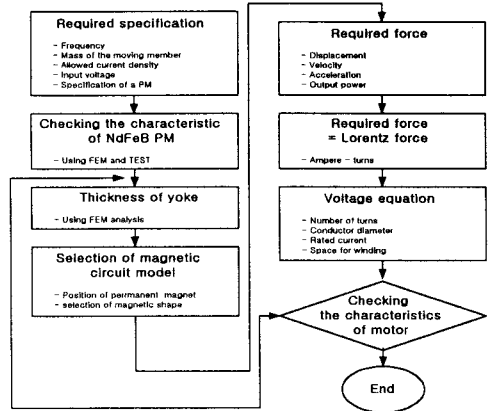


그림 3 LDM설계를 위한 흐름선도

로 구성된 가동자와 비자성체 지지대에 권선을 부착시킨 고정자로 구성된다. 로봇, 반송용 등으로 사용되는 LDM은 고정밀 위치제어를 필요로 하며 철심형을 채택할 경우 가동자의 위치에 따른 퍼미언스 변화로 입력전류와 무관한 코깅력이 발생하여 모터의 추력특성 및 정밀위치제어에 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 코깅력을 무시할 수 있는 공철심형 LDM을 모델로 산정하였으며, 그 사양은 표1과 같다

표 1 LDM 설계사양

정격전압	20[V]	자석높이	50[mm]
정격전류	1.75[A]	권선직경	0.65[mm]
추력	25[N]	턴수	280[turn]
속도	1.4[m/s]	공극자속밀도	0.51[T]
주파수	10[Hz]	계열	MQ30
전류밀도	6 [A/mm ²]	회도류 자석	B _r , 1.1
자석폭	50[mm]	보자력	-78[kOe]
자석두께	25[mm]	총자석수	4[개]

3. 특성해석

3.1 자계특성

FEM 해석결과 전류 인가시와 인가하지 않았을 때의 자속분포는 그림 4의 (a),(b)에서처럼 유사하였다. 그 이유는 공심형의 경우 코일에서의 인덕턴스가 작아서 전류에 의한 자속의 크기는 영구자석에 의한 자속의 크기보다 1/100배 정도로 작다. 따라서 본 연구에서 추력 계산에 있어서는 영구자석에 의한 자속만을 고려하기로 한다.

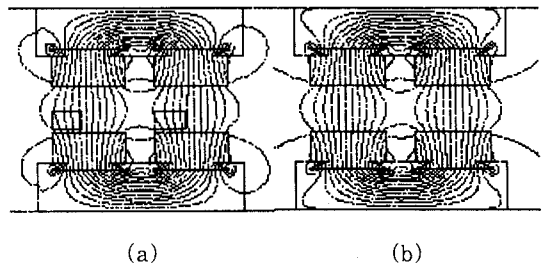


그림4 (a) 전류를 인가하였을 때의 자속분포

(b) 전류를 인가하지 않았을 경우 자속분포

그림 5는 LDM의 공극중에서도 1개의 극피치에 대한

공극자속밀도를 나타내었다. 윗쪽 곡선은 코일에 전류를 인가하지 않았을 때의 공극자속밀도 분포를 나타낸 곡선이고 아래 곡선은 코일에 흐르는 전류에 의하여 공극자속밀도가 감소되었을 때의 공극자속밀도 분포를 나타낸 곡선이다.

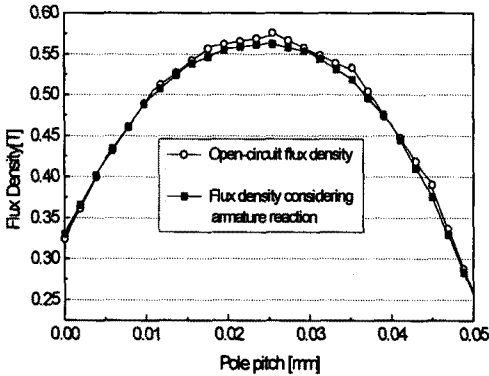


그림 5 공극에서의 자속밀도분포비교

3.2 추력특성

구형과 전류구동의 경우 추력리플을 최소화하기 위해서는 통전구간에서의 공극자속밀도 분포가 일정해야 한다. 그러나 공심코일의 경우, 코일이 차지하는 면적도 공극이므로 그림 6과 같이 공극에서의 자속밀도 분포가 일정하지 않아서 추력리플이 발생한다. 그림 7은 공심형 LDM의 가동자 위치에 따른 추력특성을 나타낸 그림이다. 전류가 그림에서와 같이 흐를 경우 화살표 방향은 코일을 고정시킬 경우 자석이 받는 힘의 방향이다. 플레밍의 왼손법칙으로부터 1)의 위치에 코일이 있을 때 가장 큰 추력을 발생시킨다. 3)의 위치에 있는 코일은 힘을 발생시키지 못한다. 2)의 위치에 있는 코일은 1)과 3)의 중간의 추력을 발생시킨다.

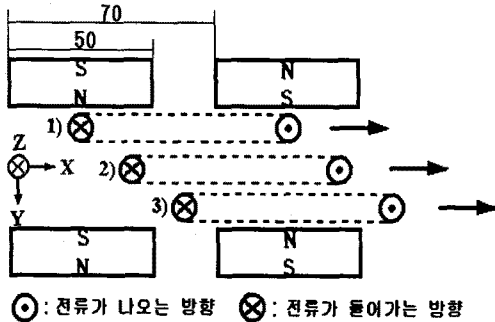


그림 6 가동자 위치에 따른 추력특성

정지실험시 정추력을 예측하기 위하여 가동자의 위치에 따른 추력을 FEM을 통하여 해석하였다. 거기에 따른 해석 결과가 그림 7에 나타나있다. 그림에서 처럼 앞쪽 권선을 coil A라고하고, 뒤쪽 권선을 coil B라고하면 그림 b에서 처럼 두 코일을 번갈아서 스위칭을 하면, 그림 a와 같은 추력특성을 나타내면서 이동하게 된다. LDM의 추력은 항상 일정하지 않고 26(N)근처에서 리플이 생기는 것을 알 수 있다. 추력리플은 다음식과 같다.

$$Ripple = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_{max}} \quad (8)$$

식(8)에서 알 수 있는 바와 같이 지속에서 리플이 커지

며, 따라서 고속일 때 보다 더 문제가 된다. 본 논문에서 LDM의 추력리플을 계산하였을 때 그 값은 약 20%에 이르렀다. 추력리플을 줄이기 위해서는 공극에서의 자속밀도가 일정하게 분포할 수 있도록 자기형상을 배치해야 하며, 또는 전동기의 추력이 큰 곳에서는 전류를 감소시키고 추력이 작은 곳에서는 전류를 증가시켜 추력리플을 감소시킬 수 있다.

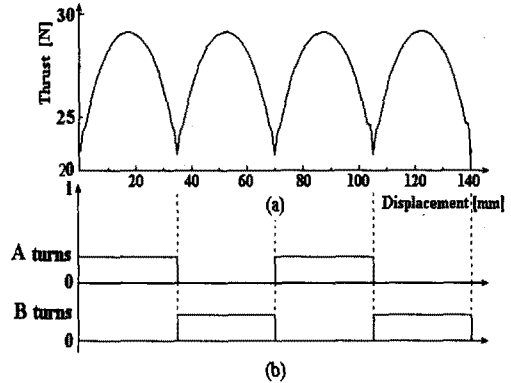


그림 7 가동자 변위에 따른 추력

4. 결 론

본 연구에서 LDM 모델은 제품의 반송장치나 운반 등 제조공정에서 필요한 부품 및 각종 대상물의 운송을 위한 장스트로크용 LDM을 설계하였고, 모델에 있어서 코깅력에 따른 추력리플을 저감시키기 위하여 공심코일형 가동자식형 LDM을 선정하였다. 설계 단계에 있어서 기본 특성식을 통하여 설계법을 확립하였다. 자기회로 모델은 NdFeB영구자석의 효과적인 배치방법을 검토한 후에 이를 선정하였으며, 공극길이에 따른 발생추력과 자력특성을 해석하였다. 또한 FEM을 통하여 가동자의 위치에 따른 추력을 해석하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] J.Hur, S.B. Yoon, D. Y. Hwang and D. S. Hyun, Analysis of PMLSM Using 3 Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method. IEEE. Trans. on Magn., Vol. 33, No. 5, pp. 4143-4145, 1997.
- [2] Domenico Casadei, Giovanni Serra, Angelo Tani, Finite-element Analysis of a Brushless PM DC Linear Motor Taking the Saturation Effects into Account. Vol. 33 NO. 5, pp 4197-4199
- [3] Mizuno, T.Anzai, T. Kitamura, A.Nakamura, T. Miyasheta, H. Yamada, "Static Thrust Characteristics of a Moving-Magnet-Type Linear DC Motor", Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 21, No.4-2, pp. 37-840,1997.
- [4] T.Mizuno, M.Nahara, K.Koyama, T.Anzai, H.Yamada, "Magnetic Circuit Analysis of a Moving Maget type Linear DC Motor", 3rd International Scientific and Technical Conference of Conventional Electromechanical and Electrical systems Vol.1, pp.99-104,1997.