

양축 고정자형 LDM의 추력산정에 관한 연구

*백수현, *배성식^o, *김용, *윤신용, **김철진, ***김일남
 동국 대학교 전기공학과, **한라공과대학, ***대유공업전문대학

A Study on The Thrust Force Accumulation of Double Stator-LDM

*S.H, Baek , *S.S, Bae , *Y, Kim , *S.Y, Youn , **C.J, Kim , ***I.N, Kim ,
 *DongGuok Univ, **Halla Institute of Technology , ***Daeyu Jr College

Abstract

The study is analyzed the thrust force of moving type Linear DC Motor(MM-LDM). The MM-LDM consists of a stator (platen) and mover (forcer). One of the method for calculating the thrust of an MM-LDM is to analyze the energy gradient which is determined by the distribution of magnet flux. However, this method is vvery difficult when used to caculate the thrust force of this kind of LDM. The stored energy in the MM-LDM can be obtained by measuring the self-inductance and mutual-inductance of equivalent circuit of the MM-LDM and this energy gradient gives the thrust. The caculation of thrust force included in this motor shows that the mutual inductance has large influence on the generation of thrust force.

1. 서 론

산업의 발달에 따라 FA, OA, 정밀기기 등의 분야에서 모터에 대한 수요가 급속도로 증가하고 있다. 특히, 리니어 모터의 응용분야는 더욱더 확대되고 있는 추세이다. 리니어 모터(Linear motor)는 직선운동을 하는데 있어서 회전형 모터와 같이 직선운동 변환을 위한 보조기구가 불필요하므로 기계적인 에너지 손실, 진동과 소음 및 저가력 등의 장점을 지니고 있다. 또한 전자제어 장치에 페루프를 구성하는 위치, 속도 검출기구를 부착함으로써 정밀한 위치, 속도 및 추력제어를 실현할 수 있다. 리니어 모터의 종류는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 리니어 직류모터를 연구대상으로 한다.

리니어 직류 모터(Linear DC Motor :LDM)는 MM형(Moving Magnet Type :가동자석형)과 MC형(Moving Coil Type:가동코일형)으로 분류할 수 있다. LDM은 고정자(platen)와 가동자(focer)로 구성된다. 고정자는 양축에 2개의 전자석 철막대로 구성되어 있으며, 가동자는 고정자인 두 철막대 사이를 영구자석이 이동하는 가동자석형 LDM의 구조로 되어있다. LDM은 제어신호의 가변에 따라 발생하는 공극자속의 변화로 추력을 발생하므로 정확한 자체해석은 매우 중요하다. 이러한 자체해석 방법으로는 유한 요소법, 퍼미언스법등이 있지만, 복잡성과 계산의 오차로 인하여 정확한 해석은 어렵다. 본 연구에서는 자기 에너지 해석에 따라 추력특성을 연구하고자 한다. 이를 위해서 본 LDM의 동가회로를 변압기 동가회로로 변환하여 해석하고자 한다. 이때 축적된 자기 에너지는 LDM에서 자체 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 측정함으로써 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고정자와 가동자 사이의 상호인덕턴스로부터 계산된 이동변위의 자체에너지에 따른 추력특성을 연구하고자 한다.

2. MM형 LDM의 구조 및 구동 원리

그림 1은 본 연구에서 제작한 MM형 LDM의 기본 구조를 나타낸 것이다. 고정자는 양축 영구자석에서 여자할 수 있도록 철심에 코일을 성층하였으며, 가동자인 영구자석은 직선운동이 가능하도록 양축 고정자 사이에 위치하면서 추력을 발생시킬 수 있도록 구성되었다. 가동자석에 의해서 발생된 자속분포를 나타내면 그림 1과 같다.

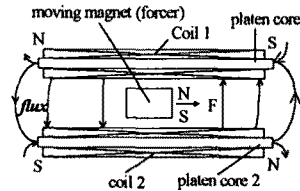


그림 1. MM-LDM의 자속분포와 구조

여기서, 자속 분포는 자기저항이 작도록 양축철심을 통하여 자기회로를 구성하였다. 전자력은 양축여자코일의 자속과 가동자의 영구자석 사이의 공극자속에 의하여 추력을 발생한다. 본 MM형 LDM의 경우 발생 추력은 강한 기자력을 지닌 자석원을 사용하기 때문에 영구자석의 기자력은 코일의 기자력을 능가하도록 구성되어 있다. 그러나 만약 자석의 힘만을 기준으로 추력을 계산한다면 큰 오차를 발생시킬 것이다. 따라서 이러한 오차를 감소하기 위해 자기 에너지의 변화로부터 추력을 계산하여야 한다. 다음의 그림 2, 3은 MM형 LDM의 정면도와 측면도를 나타낸 것이다.

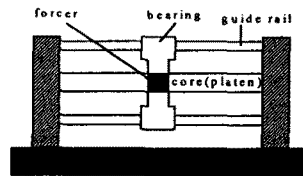


그림 2. MM-LDM의 정면도

그림 2의 정면도에서 가동자석의 상·하측에는 원통형 guide rail이 지지되어 있으며, 고정자의 철심은 영구자석과 같은 높이로 중앙에 위치하도록 구성 하였다.

그림 3은 MM형 LDM의 측면도로서 고정된 양축 고정자와 가동 자석 사이의 공극을 나타낸 것이며 상·하 guide rail은 영구 자석을 지지하도록 하였다.

표1은 본 연구에서 적용한 MM형 LDM에 대한 기계적인 사양을 나타낸 것이다.

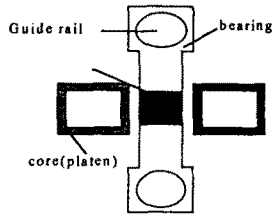


그림 3. MM-LDM의 측면도

표 1. MM-LDM의 사양

항 목	수 치
전체길이	80 mm
영구자석치수	20×20×15 mm
영구자석재료	페라이트(MPB280)
공극	0.5 mm
코일수	2 조
코일 두께	0.35 mm
코일turn수	500회
코일 치수	230×22×22
가동자 중량	0.2 Kg
공급전류	1 [A]
정추력	1 [N]

3. MM-LDM의 자기회로 해석

본 MM-LDM에서는 고정자인 각형철심의 전자석에 대한 여자 권선을 1차측 코일로 하고, 영구 자석(forcer)은 큰 전류가 흐를 수 있는 2차측 코일로 가정 할 경우, MM-LDM은 변압기로 간주할 수 있다. 2차측 영구 자석의 기자력은 I_2 로 생각할 수 있는데, 이 때 전류 I_2 는 1번 감긴 2차측 코일에 흐른다. 본 LDM의 모델에 대한 등가회로는 그림4와 같이 나타낼 수 있다.

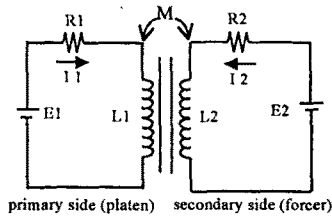


그림 4. MM-LDM의 전기회로

여기서,

- L_1 : 고정자의 1차측 코일의 자기-인덕턴스
- L_2 : 영구자석을 2차측 코일로 간주할 때의 자기인덕턴스
- M : 1차코일과 2차코일로 할 때의 상호-인덕턴스
- R_1 : 1차측 코일의 저항
- R_2 : 2차측 코일의 저항
- I_1 : 1차측 여자전류
- I_2 : 2차측 전류
- E_1 : 1차측 전원
- E_2 : L_2 에 대한 전원

본 전기회로에 축적된 자제에너지 W 는 다음식(1)과 같이 표현된다.

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2 \quad (1)$$

본 MM-LDM에서, 선형 운동은 가동자의 수평방향(x축방향)이므로, 각각 요소가 선형이라고 가정하면, 추력(F)는 식(2)와 같다.

$$F = - \frac{dw}{dx} \quad (2)$$

여기서, I_1 , I_2 , L_1 , L_2 , M 을 결정하려면, I_1 은 MM-LDM의 고정자로 흐르는 여자 전류이고, 일정하다고 가정한다. I_2 는 MM-LDM 가동자의 영구자석의 기자력으로부터 결정되지만, 다음과 같이 계산하자. 일반적으로, 퍼미언스(wb/AT)P인 자기회로는 전류I가 흐를때 N번 감긴코일에 적용한다면, 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi = BS = NIP \quad (3)$$

여기서, Φ : 자기회로에서 자속

B : 자속밀도

S : 자기회로의 단면적

본 MM-LDM에서, 영구자석에 의한 자기회로의 퍼미언스(P)는 영구 자석의 극면과 두 고정자 사이의 공극에 의해 결정되며, 또한, 영구자석 측면의 자기누설에 기인한 퍼미언스로 결정된다. 그러나 누설에 기인한 퍼미언스는 무시하기로 한다. 여기서 영구자석의 자극 면적을 S 라 하고, $\Phi(x)$ 에 대해서 임의의 면적 S 에서의 자속 및 자속밀도 $B(x)$ 는 다음식(4)으로 표현된다.

$$\Phi(x) = B(x)S = N_2 I_2 P(x) \quad (4)$$

영구 자석은 등가전류 I_2 를 흘리는 1번 감긴 코일로 표현되기 때문에 자속은 다음식처럼 된다.

$$\Phi(x) = B(x)S = I_2 P(x) \quad (5)$$

여기서, 영구자석으로 부터 발생하는 퍼미언스(P)의 실제적인 측정이나 계산은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 퍼미언스의 실제적인 계산을 하도록 한다. 먼저, 영구자석의 측면에 n 번 코일을 감고, x 의 함수에 대한 인덕턴스 $L(x)$ 를 실제로 측정할 수 있다. 만약, MM-LDM의 영구 자석에 등가 전류 I_2 를 흘릴수 있는 한 턴 코일의 인덕턴스로 변환한다면, 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_2 = \frac{L(x)}{N^2} \quad (6)$$

일반적으로, 퍼미언스 P와 n 번 감긴 코일의 인덕턴스 L 사이에는 다음의 관계가 존재한다.

$$L = n^2 P \quad (7)$$

여기서, $L_2(x) = P(x)$

$$(8)$$

따라서,

$$I_2(x) = \Phi(x)/P(x) = \Phi(x)/L_2(x) \quad (9)$$

일반적으로, L_1 , L_2 및 결합계수 K에 대해서, 상호 인덕턴스 M은 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$M = K \sqrt{L_1 L_2} \quad (10)$$

여기서, K는 결합계수를 의미하며, 상호 인덕턴스(M)은 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

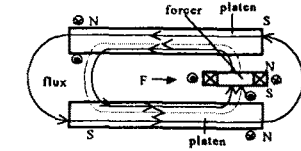
2차측의 $L_2(x)$ 계산에서처럼, 영구자석에 n 턴의 코일로 감겨놓고, 1차측에 교류전원을 공급하면, 2차 코일의 양끝에서 발생된 전압(V_2)을 전압계로 측정할 수 있다. 그 때, $M(x)$ 도 다음 방정식에 의해 계산될 수 있다.

$$M(x) = \frac{V_2}{\omega n} = \frac{V_2}{2 \pi n} \quad (11)$$

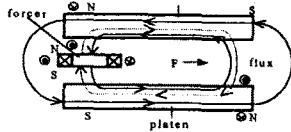
여기서, I_1 : 1차코일을 흐르는 전류

f_n : 교류전원의 주파수

그림 5는 1차측 코일에 전류가 흐를 경우 추력발생에 따른 자속 분포를 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서, 전류가 1차측 코일에 흐르



(a) 오른쪽 끝에 가동자가 위치할 경우



(b) 왼쪽 끝에 가동자가 위치할 경우

그림 5. 자속의 경로도

고, 자속분포가 그림5(a)와 같이 가동자가 오른쪽 끝에 있을 경우 가동자의 2차측 코일에 의한 자속분포는 밀로부터 위로 발생할 것이다. 그림 5(b)에서, 이동자가 왼쪽 끝에 있을 경우의 자속분포는 위에서 밀로 발생한다.

그림 7은 가동자의 각 위치에 대한 자속 밀도 $B(x)$ 의 특성을 나타내고 있고, 거의 일정한 값을 가지고 있다. 그림 7, 8에 따라, $B(x)$ 즉 $\phi(x)$ 와 $L_2(x)$ 가 거의 일정한 것으로 간주될 수 있기 때문에, $L_2(x)$ 는 방정식 (9)로부터 거의 일정하다고 생각될 수 있으며, 여기서 $R_2=0$, E_2 는 전류 전원으로 간주될 수 있다. 따라서, 그림 4는 그림 6의 전기 회로로 표현 가능하다.

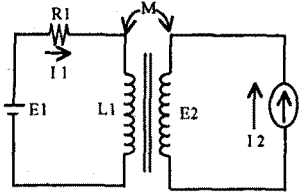


그림 6. MM-LDM의 전기회로

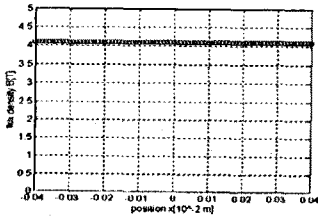


그림 7. 자속밀도의 특성

따라서 식 (1)과 (2)로부터, 위치에 대한 정(static)추력의 실험 방정식은 (12)과 같이 된다.

$$F(x) = \frac{1}{2} \frac{dL_1(x)}{dx} I_1^2 + \frac{1}{2} \frac{dL_2(x)}{dx} I_2^2 + \frac{1}{2} \frac{dM(x)}{dx} I_1 I_2 \quad (12)$$

여기서, 식 (5)로부터 다음과 같은 값을 얻을 수 있다.

$$I_1 = 1[A], I_2 = 3.2 \times 10^{-3}[A], I_2 = \frac{BS}{P} \text{이며,}$$

$$L_2(x) = P(x), P = 3.835 \times 10^{-8}, B = 0.41, S = 3 \times 10^{-4}$$

4. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 8은 가동자의 위치가 변화할 경우 고정자의 자기-인덕턴스 $L_1(x)$ 의 위치특성을 보여준다. $L_1(x)$ 는 대략 일정하나, 고정자의 중심 부근에서 거의 최대가 된다. 이러한 현상은 가동자가 중심에 있는 경우, 가동자의 자속이 오른쪽과 왼쪽으로 분산되기 때문이다. 그러나, 자속은 고정자 부분으로 집중되고, 점점 포화되기 시작한다. 따라서, 고정자 전체의 자기 인덕턴스는 가동자가 고정자의 끝에 있을 때 약간 커지고, 가동자가 중심에 있을 때는 약간 작아지기 때문에, $L_1(x)$ 는 그림8과 같은 특성을 가질 수 있다.

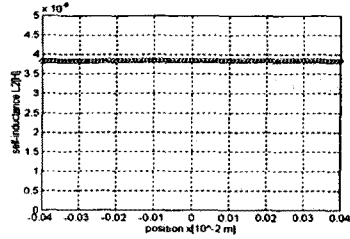


그림 8. 고정자의 자기-인덕턴스 분포

그림 9는 가동자의 자기-인덕턴스 $L_2(x)$ 의 위치특성이고, 대략 일정한 값을 가지고 있다. 이것은 앞에서 언급된 것처럼, 가동자의 영구 자석으로부터 발생하는 영구 자석의 자기회로에 의해 결정된다.

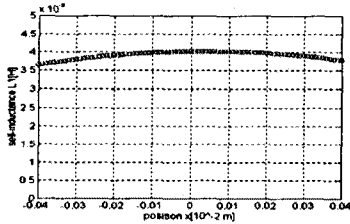


그림 9. 가동자의 자기-인덕턴스 분포

그림 8, 9, 10에서 인덕턴스의 측정 결과에 대한 근사방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$L_1(x)$ 의 근사 방정식은

$$L_1(x) = -0.1938 x^2 + 1.0433 \times 10^{-3} x + 4.0210 \times 10^{-3} (H) \quad (13)$$

$L_2(x)$ 의 근사방정식은

$$L_2(x) = -1.73937 \times 10^{-8} x^2 + 2.2328 \times 10^{-10} x + 3.8357 \times 10^{-8} (H) \quad (14)$$

$$M(x) = 2.7263 \times 10^{-3} x^3 - 2.8620 \times 10^{-4} x^2 + 2.4775 \times 10^{-4} x + 6.3865 \times 10^{-7} (H) \quad (15)$$

그림 10은 상호 인덕턴스 $M(x)$ 의 위치 특성을 보여준다. 그림 8에서 설명한 것처럼, 발생한 추력의 방향에 따라 상호인덕턴스의 값은 음(negative)에서 양(positive)으로 바뀐다. 여기서, 본 해석 모델을 이용하여 추력을 계산하도록 하자.

그림 11은 $L_1(x)$, $L_2(x)$, $M(x)$ 가 발생할 때 추력을 나타내고 있다. 이 그림으로부터, $M(x)$ 에 의한 추력은 본 MM-LDM의 전체 추력 $f(x)$ 에서 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

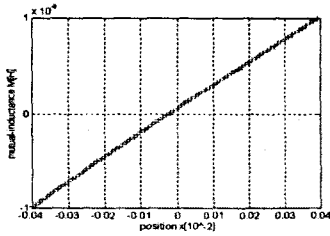


그림 10. 상호-인덕턴스의 위치특성

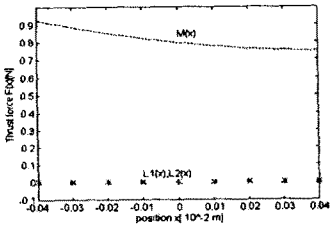


그림 11. L_1 , L_2 , $M(x)$ 변화에 대한 추력값

그림 12은 실험 방정식과 측정된 값에 따른 전체 추력 $F(x)$ 의 분포를 보여준다. 식 (13), (14), (15)를 식 (12)에 대입함으로써, 실험 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F(x) = 2.6229 \times 10^{-2} x^2 - 2.2139 x + 0.7935 \text{ [N]} \quad (16)$$

본 그림으로부터 계산된 값은 측정값들과 거의 일치한다는 것을 보여준다. 더욱이, 이 그림은 추력 $F(x)$ 가 오른쪽으로 향할 때 오른쪽 편에서 약간의 하강을 보여준다. 만약 I_1 의 방향을 변화시키려면, 전류를 오른쪽, 왼쪽 방향으로 변화시키므로써 분포특성을 쉽게 얻을 수 있다. 추력이 오른쪽부터 왼쪽까지 비대칭이 되는 이유는 고정자와 자석의 자속이 함께 더해지고, 그림 4에서처럼 자석이 오른쪽 끝에 있는 경우에 더욱 포화된다는 사실이 기인하기 때문일 것이다.

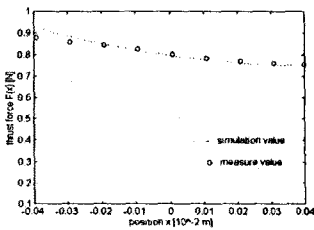


그림 12 실험 방정식과 측정된 값의 추력분포

5. 결론

LDM의 추력 특성을 해석하는 방법은 여러 가지 방법이 있지만, 이론적인 모델에 의한 수리적인 계산상의 오차등으로 추력산정에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 MM-LDM의 추력 특성해석을 다음과 같은 방법으로 하였다. 추력의 산정을 위해서, 본 LDM의 등가회로를 변압기 등가회로로 변환하여 해석하였으며, 이때 $L_1(x)$, $L_2(x)$ 및 $M(x)$ 의 파라미터는 실험을 통해 측정하였다. 특히, $M(x)$ 의 파라미터는 이동자석의 위치에

따라 음(-)에서 양(+)으로 변환함을 알 수 있었다. 고정자에 여자전류를 공급하였을 때 측정된 에너지와 추력을 구할 수 있었으며, 이에 대한 타당성은 이론적인 추력과 실제 추력 측정된 추력값을 비교 검토한 결과 거의 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 추력에 실질적인 큰 영향을 미치는 상호인덕턴스의 특성을 알 수 있었다. 본 LDM은 플로터 X-Y 등의 응용장치에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

[참고 문헌]

- [1] Magnetic Actuator Survey Special Committee. Linear Motors their Applications, p. 3, 65, I.E.E. Japan, 1984.
- [2] Ohkawa. Permanent magnet rotation machinery. Soso Denshi Shippansha, p. 20, 62, 1975.
- [3] S. Seely. Elwtromechanical Energy Conversion. McGraw-Hill, p41, 1962.
- [4] Ueda. Electrical Apparatus and Energy Conversion Engineering Shokodo, p. 17, 1972.