

자기에너지법을 이용한 선형 BLDC전동기의 최적설계

홍정표\*, 강도현\*, 주수원\*\*, 한성진\*\*  
 한국전기연구원\*, 동아대학교\*\*

Optimal Design of Linear BLDC Motor  
 Using Magnetic Energy Method

Hong, Jung-Pyo\*, Kang, Do-Hyun\*, Joo, Soo-won\*\*, Hahn, Sung-chin\*\*  
 Korea Electrotechnology Research Institute\*, Dong-A University\*\*

**Abstract** - It must be able to calculate thrust to design and manufacture linear BLDC motor by required specification. If magnetic energy with respect to displacement of mover of linear BLDC electric motor be obtained, thrust can be calculated. It can decide optimal design factor of linear BLDC motor through change of thrust by design variable using magnetic energy method. It can predict variation of thrust by pitch of pole and design optimally using coenergy that is attained from FEM.

1. 서 론

초정밀 위치제어용 stage 기술은 물체를 정밀하게 이동하는 기술로 산업이 고도화·선진화됨에 따라 전 분야에서 요구되고 있다. 특히 반도체 산업에서는 전자소자의 집적도를 높이기 위해 수십 나노급의 정밀도가 요구된다. 제작구동장치의 정밀도가 반도체 제작의 기본이 되는 만큼, 적합한 구동장치의 선택과 설계기술은 고집적도 반도체 제작에서 중요한 부분을 차지한다.

구동장치 중 선형 BLDC 전동기는 볼스크루를 사용하여야 하는 회전기와 비교하면 bach-rush가 없고 마찰이 적어 초정밀제어에 가장 적합하다. 그리하여 본 논문에서는 선형 BLDC 전동기의 설계·제작을 위해 코에너지법을 이용하여 최적의 설계변수를 결정하기로 한다.

2. 해석모델 및 방정식

2.1 해석모델

본 선형 BLDC 전동기는 고정자 양측에 영구자석이 놓여있다. 영구자석의 자화 방향은 상하로는 같은 방향이며, 이웃하는 것과는 반대 방향이다. 공극에 놓여진 가동자 안에는 세개의 3상 코일(A-B-C-A' -B'-C')이 서로 겹침을 피해 일정한 간격을 두고 놓여져 있다.(단, 그림1.에서는 한상의 코일만을 표현하였다)

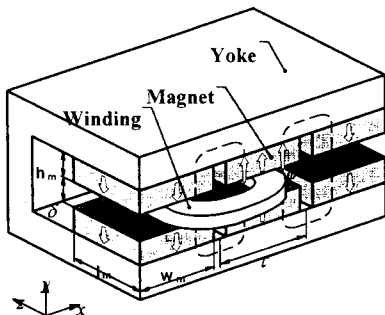


그림 1. 선형 BLDC 전동기 형상

2.2 기본 방정식

2.2.1 영구자석의 기자력

Linear BLDC Motor의 설계시 영구자석의 자속밀도( $B_r$ )와 두께( $h_m$ )가 결정되면 영구자석의 기자력( $\Theta_m$ )이 결정된다.

$$\Theta_m = \frac{B_r h_m}{\mu_0 \mu_m} \dots (1)$$

여기서  $\mu_0$ 는 자유공간에서의 투자율,  $\mu_m$ 은 영구자석의 투자율이다.

2.2.2 추력방정식

가동자 코일이 극간격( $\tau$ )만큼을 움직인다고 가정할 때 공극에서는 자속의 방향과 쇠교자속의 양이 달라지기 때문에 추력은 위치에 따라 달라지게 된다. 가동자의 이동에 따른  $\tau$ 에서의 평균추력과 추력밀도는 다음식으로 구할 수 있다.

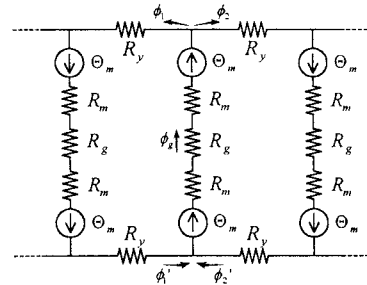


그림 2. 등가자기회로

• 평균추력

$$F_{xavg} = k \cdot \tau \cdot J \cdot h_{coil} \cdot 2 \cdot \frac{B_r h_m}{2h_m + \mu_m \delta} \cdot l_{cond} \quad (4)$$

• 추력밀도

$$F_{xd} = \frac{F_{xavg}}{\tau \cdot l_{cond}} = k \cdot J \cdot h_{coil} \cdot 2 \cdot \frac{B_r h_m}{2h_m + \mu_m \delta} \quad (5)$$

식(4),(5)는 선형 BLDC 전동기를 자기회로로 등가화하여 얻을 수 있으며, 유한 요소법을 이용한 자기 에너지법은 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

1. 전류와 재질이 주어지면 유한 요소법을 이용해 자기 코에너지( $W_{coil}$ )를 계산한다.
2. 힘을 구하려는 물체를 힘을 받는 방향으로 미소 변위( $\Delta s$ )만큼을 이동시켜서 같은 전류원으로서 재

계산한다. 여기서 자기 코에너지 ( $W_{co2}$ )를 구해낸다.

3. 변위  $s$ 에 대한 자기 코에너지의 변화로부터 힘을 구한다.

$$F_s = \frac{W_{co2} - W_{co1}}{\Delta s}$$

평균추력을 구할 때 자기회로법에서는 각 위치에서의 추력을 구하고, 변위  $s$ 에 대한 평균값을 구해야 했으나, 위와 같은 자기에너지법을 이용하게 되면 이동자의 시작 위치에서의 자기 코에너지와 정지한 위치에서의 자기 코에너지만을 알면 이동변위에 대한 평균추력을 구할 수 있다.

자기회로에 의한 추력계산법은 빠르고 정확한 추력을 계산할 수 있지만 평균추력을 구하는데 있어서는 다소 비효율적이다. 선형 BLDC 전동기의 경우 극간격에 따라 평균추력이 달라지게 되고 그 변화에 대한 평균추력을 쉽게 계산하기 위해서는 자기에너지법이 매우 유용하다.

### 3. 제작모델과 단면도

#### 3.1 제작모델

시작제작모델은 행정길이가 400 [mm]이며 평균추력은 120 [N], 정격시 전류는 1.2 [A] 이다.

표 1. 해석모델의 제원

| 구분    | 변수         | 값          |            |
|-------|------------|------------|------------|
| 영구 자석 | 자속밀도       | $B_r$      | 1.2 [T]    |
|       | 폭          | $w_m$      | 58 [mm]    |
|       | 길이         | $l_m$      | 80 [mm]    |
|       | 높이         | $h_m$      | 10 [mm]    |
|       | 투자율        | $\mu_m$    | 1.05       |
| 코일    | 권선수        | Turn       | 162 [turn] |
|       | 변의 폭       | $w_{coil}$ | 10.7 [mm]  |
|       | 높이         | $h_{coil}$ | 7.56 [mm]  |
| 극피치   | $\tau$     | 60 [mm]    |            |
| 공극    | $\delta$   | 10 [mm]    |            |
| 도체길이  | $l_{cond}$ | 80 [mm]    |            |

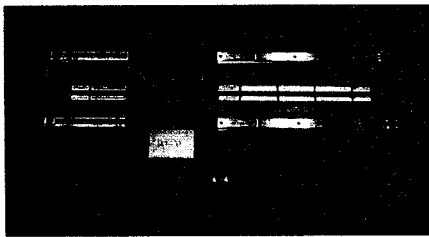


그림 3. 시작모델

#### 3.2 단면도

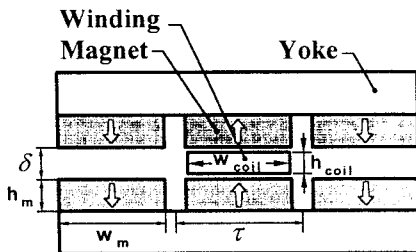


그림 4. 2차원 단면도

그림 4은 유한요소모델링을 위한 모델의 단면도이다. 위와 아래에 yoke가 있으며 공극사이에 한쌍의 코일한 변만이 놓여져 있다. 영구자석에 있는 화살표는 자화 방향을 나타낸 것이다. 실제 모델은 고정자 한쪽면에 8 개의 영구자석이 놓여져 있으나 대칭구조를 가지므로 유한요소법을 이용한 해석에서는 좌·우측에 주기경계조건을 주어 간략화하여 해석하였다.

### 4. 해석결과

이동자의 코일전류를 '0'으로 하고 영구자석만으로 공극에 형성되는 자속밀도값은 극중심에서 최대 0.78 [T]가 된다. 그림 5는 극간격이 60 mm이고 코일전류가 5 A 일때의 등자속선을 나타낸 것이다.

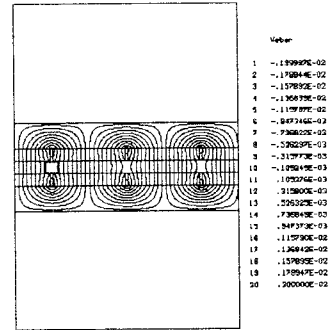


그림 5. 선형 BLDC 전동기의 등자속선 (Pole pitch=60 [mm],  $I_{coil}=5$  [A])

최적의 극간격을 찾기 위해서 유한 요소법을 이용하여 이동자의 각 변위에서의 자기 코에너지를 구하였다. 그림 6는 각 위치에서의 코에너지의 변화를 표현한 것이다. 실제 설계자가 이동자의 극간격에서의 평균추력을 구하고자 할 때 시작점과 끝점에서의 코에너지만을 알면 구할 수 있기 때문에 그림 6에서 보이는 모든 위치에서 자기 코에너지가 필요한 것은 아니다.

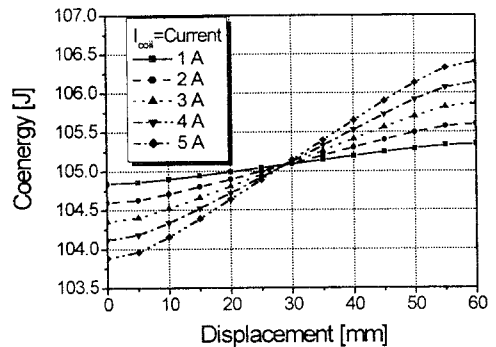


그림 6. 이동자의 변위에 따른 코에너지변화

그림 8은 코일전류에 따른 평균추력과 추력밀도를 나타낸 것이다. 자기에너지법을 이용하여 구한 추력값(그림 7)과 일치하였다. 그림 7는 각 위치에서의 추력을 나타낸 것이고 그림 8은 극간격 전체에서의 평균추력을 구한 것이므로 대략적으로 살펴볼 때 추력값이 조금 차이를 보이지만 실제 두 그래프는 동일한 결과임을 알 수 있다. (여기에서는 한쌍의 코일 한변만을 고려하였기 때문에 본 논문에서 추력을 나타낸 값은  $F_s$ 을 2배한 값이다)

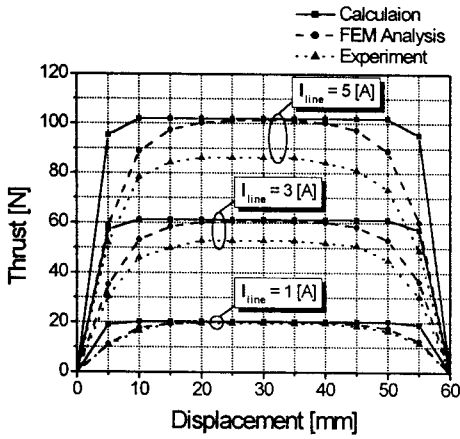


그림 7. 변위에 따른 추력분포

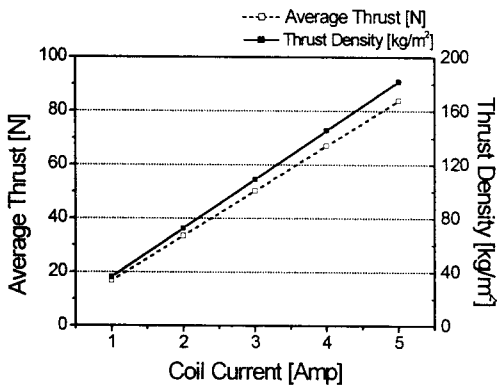


그림 8. 코일전류에 따른 평균추력과 추력밀도 (pole pitch=60 [mm])

그림 8에서 보는 것과 같이 코일전류에 따라 평균추력과 추력밀도는 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있는데, 실제 인가 전류의 크기는 장기시간 운전시에도 온도 상승에 의한 권선의 절연파괴 등의 손실이 안 되도록 결정하여야 한다.

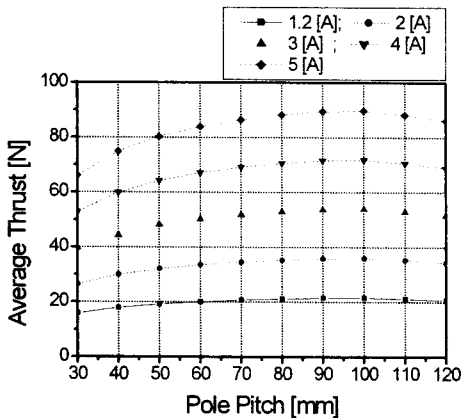


그림 9. 극간격의 변화에 따른 평균추력

위의 그래프에서는 본 모델의 정격전류가 1.2 [A]임을 고려하여 1 [A] 대신에 1.2 [A]의 특정 전류를 주어 해석하였다. 그림 9은 극간격( $\tau$ )의 변화에 따른 평균추력을

계산한 것이다. 극간격이 100 mm가 되는 부분에서 평균추력이 최대의 값을 가졌다. 코일전류의 크기에 따라서도 최대 평균추력 위치는 바뀌지 않았다. 이때의 추력밀도를 구해보면 그림 10과 같이 된다.

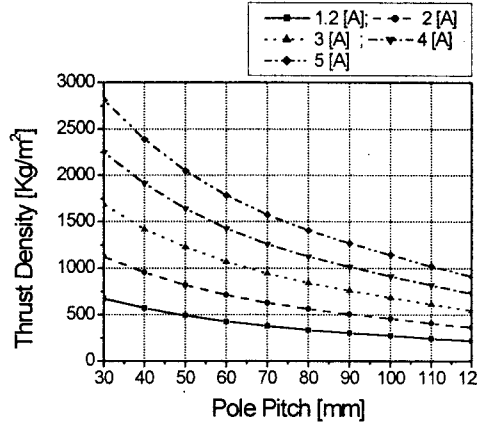


그림 10. 극간격의 변화에 따른 평균추력

극간격이 증가할수록 추력밀도는 감소하지만 극에 배치할 수 있는 코일의 수를 증가시킬 수 있으므로 추력밀도는 코일의 증가개수만큼 증가된다. 예를 들어 극간격 60 [mm]에서는 극밀에 한상의 코일이 한 개만 놓이지만 100 [mm]로 증가시켰을 때는 한상의 코일을 두 개를 놓을 수 있으므로 추력밀도의 감소분에 대한 보상이 충분이 이루어 질뿐더러 오히려 더 높은 추력을 발생하게 된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 자기에너지법을 이용하여 선형 BLDC 전동기의 이동자가 변위를 가질 때 평균추력을 계산하였으며 평균추력이 최대가 되는 극간격을 구하였다. 극간격이 100 [mm]에서 최대의 평균추력을 나타내었지만 제작과 제어의 관점에서는 극간격이 일정 이상의 값을 가질 때에는 어려움이 있으므로 이 또한 고려되어야 한다. 앞으로 극간격뿐만 아니라 코일간격(coil pitch)와 배치, 영구자석간의 gap, 공극에 대한 추력의 변화도 연구되어야 할 것이다.

## (참 고 문 헌)

- [1] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech, *LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS*, CRC Press, 2000
- [2] Akmes, R. and Eastham, J.F., Design of Permanent Magnet Flat Linear Motors for Standstill Application, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, 1992, No. 5, pp. 3042-3044
- [3] K.Hirata, Y.Kagami, M.Yanosaka, Y.Ishihara, T.Todaka, Thrust calculation of linear pulse motors using a combined technique employing the finite element method and the permeance analysis method, *IEEE Trans. magnetics*, vol.28, No.2, 1394-1397, march 1992
- [4] S.Nonaka and N.Fuji, Simplified Two-Dimensional Analysis of Linear Induction Motors, *IEEE Trans. on magnetics*, vol.23, No.5, pp3002-3004, September 1987