2001년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집(2001.4.19~21)

등가자기회로를 이용한 리니어모터의 추력밀도계산

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

Calculation of Force Density in Linear Motor Using Equivalent Magnetic Circuit

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

Abstract - In this paper, the equivalent magnetic circuit and FEM are used to calculate force density of linear BLDC motor.

The equivalent magnetic circuit is hard to exact compose for analysis model and it is just applied to linear system.To flexible design and reducing the calculated and analyzed time, magnetic circuit has to be used for designing the linear BLDC motor and deducing equation of force density. Force density as parameter of permanent magnet and coil-side width that are important to determined force density can be estimated using equation of force density. FEM is used to prove reliability of equation of force density and to consider the nonlinear system. Equivalent magnetic circuit and result of FEM are similar , but it is little different by friction loss at the experiment.

1. 서 론

초정밀 위치제어용 stage 기술은 원하는 방향으로 물체를 정밀하게 이동하는 기술로 산업이 고도화·선진화됨에 따라 전 분야에서 요구되고 있다.

특히 반도체 산업에서 전자소자의 집적도를 높이기 위해 이전에는 상상하기조차 어려웠던 나노급에 이르는 미세한 가공이 현실화되고 있다. 이러한 가공은 위치를 정밀하게 제어하는 위치제어기술에 힘입은 바 크며, 이러한 기술의 보유가 향후 반도체산업의 고부가가치, 고집적도 반도체 소자개발을 가름할 것으로 예상되고 있다.

나노급의 초정밀도를 실현하기 위해서 전동기 구동기술, 측정기술, 진동제어기술 및 온도 습도 등을 조절하기 위한 환경제어기술이 요구된다. 현재의 초정밀 위치제어기술의 구동시스템으로 볼스크루를 사용하는 회전형 전동기 보다 bach-rush가 없고 마찰이 적어 정밀제어가 가능한 선형 BLDC 전동기가 가장 적합하다.

2. 이 론

2.1 해석모델

해석모델은 자기저항이 작은 iron 고정자 양측에 영구자석이 붙어 있으며, 상하로는 같은 방향, 이웃하는 것과는 반대 방향으로 나열되어 있다. 또한 가동자 안에는 세개의 3상 코일(A-B-C-A' -B'-C')이 서로 겹침을 피해 일정한 간격을 두고 놓여져 있다. (그림 1.에서는 1상의 코일만을 표현하였다)

2.2 기본설계 및 자기등가회로

Linear BLDC Motor 설계에서는 사양에 맞는 추력을 얻기 위해서 먼저 영구자석의 자속밀도 B_r과 영구자석의 두께 h_m를 결정하게 되면 영구자석 기자력 Θ_m은 식(1)으로 구해진다.

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

여기서 μ_0는 자유공간에서의 투자율, μ_m은 영구자석의 투자율이 된다.

영구자석의 기자력 Θ_m는 공극과 yoke에서의 자속을 발생시키며 자속의 흐름은 그림2.와 같이 자기회로도로 나타낼 수 있다. 이때 R_m, R_y, R_g는 각각 영구자석과 yoke 그리고 공극에서의 자기저항이다.

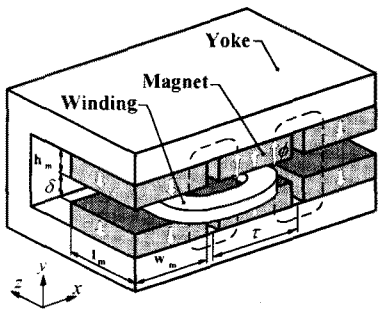


그림 1. 선형 BLDC 전동기 형상

그림 1.에서 단일 영구자석의 기자력 Θ_m을 자속루프에 따라 구성하면 그림 2.와 같은 자기회로를 만들 수 있다. 여기서 ϕ_g는 공극에서의 총 자속이며, ϕ_1, ϕ_2, ϕ_1', ϕ_2'은 yoke 부분에서 각각의 자속이다.

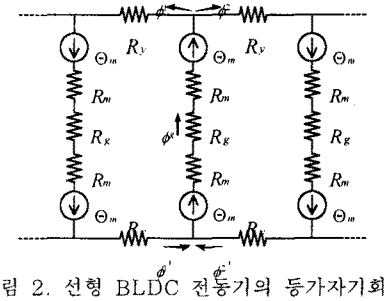
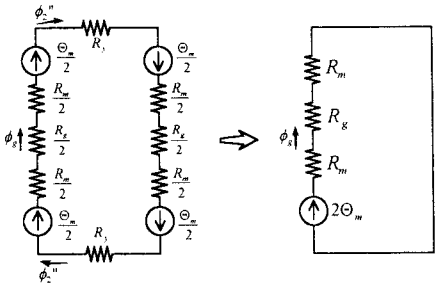


그림 2. 선형 BLDC 전동기의 등가자기회로

해석모델의 등가 자기회로도는 각 극이 서로 병렬로 연결되어 있으나 이를 보다 쉽게 해석하기 위해서는 폐회로로 표현되어야 한다. 먼저 그림 1.에 표시된 하나의 루프만을 그림 2.에서 분리하여 생각하기로 하자. 그러면 다음과 같은 폐회로가 만들어지게 된다.



(a) (b)

그림3. 한 개의 자속루프만을 고려한 등가자기회로

한 개의 루프는 각 극영역의 반만을 점유하고 있으므로 그림 3.(a)와 같이 표현이 되고, 이를 다시 그려보면 (b)와 같이 된다. 일반적으로 yoke의 비투자율 μ_r은 상당히 크므로 R_y은 무시된다. 그림 3.(b)는 각 극의 반만을 거치는 한 개의 폐루프를 표현한 것이기도 하나, 한극만의 독립적인 자기회로라 보아도 무방하다. 왜냐하면 각극은 서로 기하적인 대칭구조를 이루고 있기 때문이다. 위의 자기등가회로를 이용하여 공극자속밀도 B_g를 구해보도록 하자. 먼저, 자기회로에서의 공극 총자속 ϕ_g다음과 같이 구해진다.

$$\phi_g = \frac{2F_m}{2R_m + R_g} = \frac{1}{2R_m + R_g} \cdot \frac{2B_r h_m}{\mu_0 \mu_m} \quad \cdots (2)$$

여기서 $R_m = \frac{h_m}{\mu_0 \mu_m w_m l_m}$, $R_g = \frac{\delta}{\mu_0 \mu_m w_m l_m}$ 이므로 다시 정리하면

$$\phi_g = 2 \cdot \frac{B_r h_m w_m l_m}{2h_m + \mu_m \delta} \quad \cdots (3)$$

이 된다.

이로부터 공극자속밀도 B_g 역시 다음과 같이 구해진다.

$$B_g = 2 \cdot \frac{B_r h_m}{2h_m + \mu_m \delta} \quad \cdots (4)$$

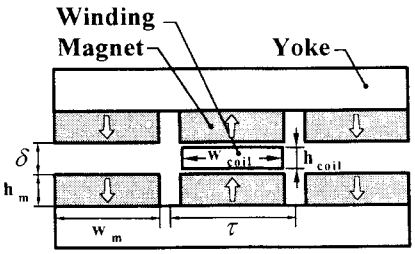


그림 4. 해석모델의 2차원 모델링

이때의 코일의 한쪽변에서의 추력 F_T는

$$F_T = J \cdot A_w \cdot B_g \cdot l_{cond} \quad \cdots (5)$$
$$= J \cdot h_{coil} \cdot w_{coil} \cdot 2 \cdot \frac{B_r h_m}{2h_m + \mu_m \delta} \cdot l_{cond}$$

과 같다. (δ-공극, h_{coil}-코일변높이, w_{coil}-코일변폭, l_{cond}-도체의 길이)

2.3 변위x에 대한 평균추력과 추력밀도

가동코일이 변위 x에 대하여 극간격 τ만큼을 움직일 때 추력은 위치에 따라 변화한다. 왜냐하면 코일의 전류의 방향에 대한 자속의 방향과 쇄교의 양이 변위에 따라 달라지기 때문이다. 이런 사항을 고려하여 식을 유도하면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다.

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

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

2.4 계산영역분할

각 변수 극간격 τ에 대해 $w_m = k_1 \cdot \tau$ $w_{coil} = k_2 \cdot \tau$ 와 같다고 하면 다음과 같이 계산영역을 나눌 수 있다. 각 영역에서의 평균추력을 구하고 추력밀도를 알아냄으로써 설계시 더욱 정밀하고 빠른 예측이 가능하다.

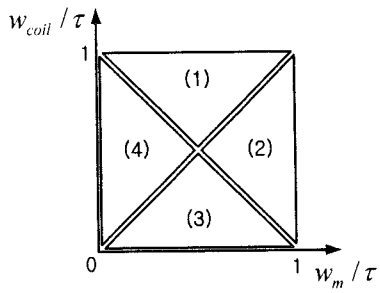


그림 5. 추력계산을 위한 계산영역분할

3. 설계 및 제작모델 해석

3.1 설계 및 제작제원

표 1. 해석모델의 제원

구분	변수	값
영구자석	B_r	1.2 [T]
	w_m	58 [mm]
	l_m	80 [mm]
	h_m	10 [mm]
	μ_m	1.05
코일	$Turn$	162 [turn]
	w_{coil}	10.7 [mm]
	h_{coil}	7.56 [mm]
극피치		60 [mm]
공극		10 [mm]
도체길이	l_{cond}	80 [mm]

3.2 계산결과

3.2.1 공극자속밀도 B_g

1) 자기회로법을 이용한 결과

$$B_g = 2 \cdot \frac{B_r h_m}{2h_m + \mu_m \delta} = 2 \cdot \frac{1.2 \times 0.01}{2 \times 0.01 + 1.05 \times 0.01} \fallingdotseq 0.787$$

2) 유한요소법에 의한 결과

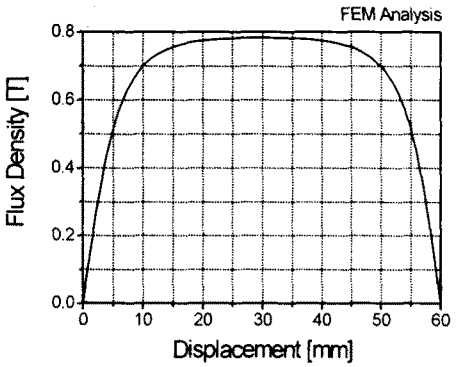


그림 6. 유한요소법을 이용한 공극자속밀도

그림 6.에서 보여지는 것와 같이 자기회로법의 결과와 유한요소법을 통한 결과가 일치함을 알 수 있다. 물론 본 해석 모델에서는 이웃하는 영구자석이 일정간격 벌어져 있으므로 그 빈공간에서 자기회로법에서는 자기밀도를 '0'으로 취급하지만 유한요소법에서는 그렇지 않다. 이런 단점에도 불구하고 자기회로법을 설계에 적용하는 것은 설계변수에 따른 결과를 복잡한 과정을 거치지 않고 빠르고 쉽게 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

그림 7.은 등가자기회로를 이용한 계산 수식에 따라 코일의 변과 영구자석의 폭을 변수로 하여 전류가 1 [A]일 때 추력밀도를 구한 것으로 다음과 같은 그래프를 얻을 수 있다.

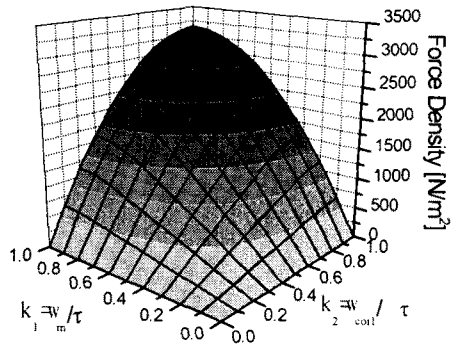


그림 7. 코일변과 영구자석의 폭에 따른 추력밀도

위의 그림에서 보면 힘의 밀도는 계수 k_1, k_2가 각각 '1'일 때 가장 높은 추력밀도를 가진다. 하지만 실제로 3상이 배치되는 본 모델에서는 τ에 대한 코일변폭의 비 k_2가 '1'이 되는 것은 불가능한 일이다. 그래서 k_2는 1/3 이하에서 값을 얻을 수 있다.

해석모델에 대한 유한요소법과 자기회로법 그리고 실험을 통해 얻어진 결과는 그림 8.에 나타나 있다. 극의 경계가 되는 부분에서 자기회로법이 다른 값과 큰 오차를 보이는 것은 이전에서 지적했던 것과 같이 영구자석 사이에서의 벌어진 틈과 공극에서의 정현적으로 분포하는 자속에 대해 고려해 주기 못 했기 때문이다. 현실적으로 영구자석의 정현적인 자속분포를 예측하는 것은 힘든 일이다.

그리고 자기회로법에서는 자기포화에 대한 고려가 되어 있지 않으므로 전류의 증가에 따른 오차율은 증가될 것이다(그림 9.)

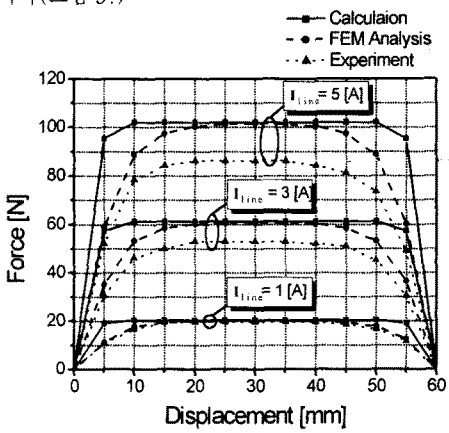


그림 8. 추력 결과 비교

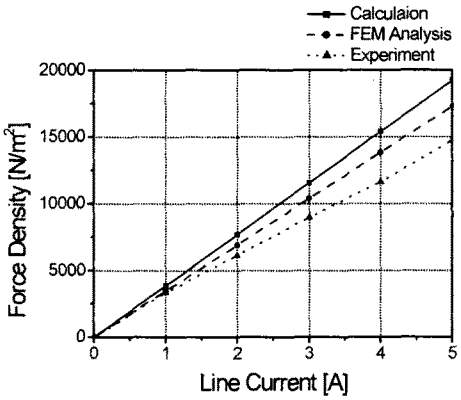


그림 9. 전류에 따른 추력밀도 증가 추이

3. 결 론

본 논문에서는 선형 BLDC 전동기의 설계를 위해 자기회로법과 유한요소법을 이용하였다. 설계변수에 따른 빠른 예측을 위해 등가 자기회로를 구성하였으며, 적용한 해석결과는 유한 요소법을 이용한 결과값과 거의 일치함을 보여 주었다.

향후 자기회로법을 통한 정확한 설계위해서 누설자속과 자기포화에 대해서도 고려되어야 하겠으며, 선형 BLDC 전동기의 최적설계를 위한 많은 연구가 있어야 겠다.

[참 고 문 헌]

[1] Jacek F. Gieras, Zbigniew J.piech, "LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS", CRC Press, 2000