

횡축형 선형 액츄에이터의 2D FEM에 의한 특성해석과 설계

이지영, 하경호, 홍정표, 강도현*
 창원대학교 전기공학과, *한국전기연구소

Characteristics Analysis and Design of
 Transverse Flux Linear Actuator

Ji-Young Lee, Kyung-Ho Ha, Jung-Pyo Hong, and *Do-Hyun Kang
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University and *KERI

Abstract - This paper deals with the design of transverse flux linear actuator based on the proposed design procedure. To satisfy requirement specifications, the initial model is designed by the equivalent magnet circuit and then the detailed design is achieved by Finite Element Method(FEM) using the equivalent reluctance 2D model. The effects of the design parameter on the static characteristics are investigated to increase the thrust.

1. 서 론

적은 전동기 중량이 요구되는 전기자동차, 철도관련 차량, 자기부상 열차와 같은 교통수단의 추진장치나 액츄에이터로서 고효율 전동기인 횡축형 전동기가 현재 개발되고 있는 추세이다[1].

횡축형 전동기는 극간격의 크기를 적게 설계 가능하므로 높은 출력밀도를 얻을 수 있고, 오버행이 없는 링 형태의 권선으로 동의를 절감함으로써 효율이 높다. 특히 영구자석 여자 횡축형 전동기를 기존의 코일을 이동자로부터 액츄에이터에 적용시킬 경우, 동일한 주파수에 대해 이동자의 경량화, 지지구조의 경량화는 물론, 전체적인 체적 감소의 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다[1-2].

영구자석 여자 내부 이동자형은 횡축형 선형 전동기 중에서도 추력 외의 안내력 또는 흡입력이 서로 상쇄되고, 보다 경량화된 이동자를 가진다. 그러나 횡축형 전동기는 전류의 방향과 이동자의 방향이 일치하는 구조적 특징을 가지므로 기기의 제반 특성을 분석하기 위해서는 3차원 해석이 필요하다[1-3].

따라서, 본 논문에서는 액츄에이터 사용에 적합한 내부 이동자형 횡축형 선형 전동기의 설계과정을 제시하고 이 방법을 이용하여 요구사항을 만족하는 액츄에이터를 설계하였다.

횡축형 선형 액츄에이터를 등가자기 회로법에 의해 초기 설계를 하고, 가정자료를 이용하여 실제 3차원 모델을 2차원 등가 모델로 치환하여 유한요소 해석을 하였다. 유한 요소 해석결과로부터 공극자속, 추력, 역기전력과 같은 파라미터를 산정하여 세부 설계에 반영함으로써 사양을 만족시키는 설계를 하였다.

2. 설계 및 해석 이론

2.1 설계 모델 및 사양

이동 변위 ± 3 [mm]의 스트로크에서 100[N]의 추력을 발생시키는 횡축형 선형 액츄에이터의 설계 사양은 표 1과 같다. 그림 1은 횡축형 선형 액츄에이터의 형상과 주요 설계 변수를 기입한 것이다. 영구자석이 x 방향으로 이동하며, 코일이 고정자의 극에 감겨 있어 전기자 기자력과 영구자석의 기자력에 의한 자속 경로는 이동자의 방향과 수직함을 알 수 있다.

표 1. 설계 사양

전 류	잔류자속밀도	최대 추력	스트로크
1 [A]	1.1 [T]	100 [N]	0~±3 [mm]

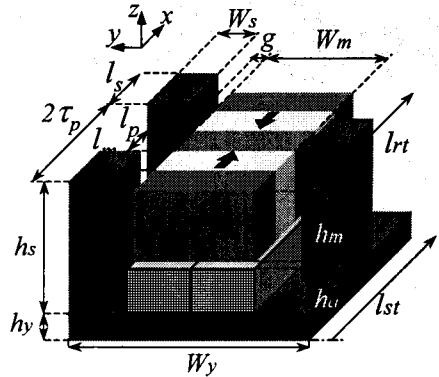


그림 1. 내부 이동자형 횡자속 선형 액츄에이터 구조

2.2 설계 과정

그림 2는 요구 사양을 만족하는 액츄에이터를 등가자기 회로법과 유한요소법을 사용하여 설계하는 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 횡축형 액츄에이터의 등가자기 회로로부터 전기자 기자력과 주요 치수를 결정하고 가정 자료를 이용한 2차원 등가모델로부터 설계 파라미터 변화에 따라 추력 특성을 분석하여 세부 설계 치수를 결정하였다.

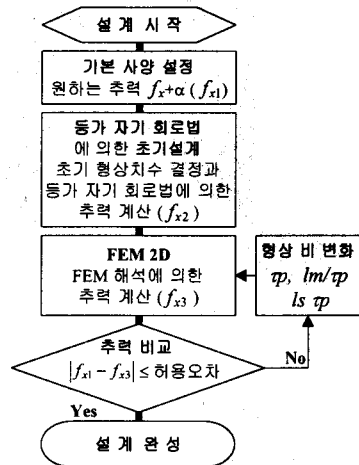


그림 2. 설계 과정 흐름도

2.3 등가자기 회로법에 의한 기초 설계

누설자속과 치 부분의 프린징 현상, 철심에서의 포화 와 기자력 강하를 무시했을 때, 공극에서 자기에너지의 변화량, 또는 형상 치수의 함수로 표현되는 추력 수식을 이용하여 제반 치수를 결정하였다.

가) 이동자의 무게 계산

구동 주파수와 요구 추력으로부터 이동자 너비와 두께를 결정하기 위해, 식 (1)과 같은 기계계의 운동 방정식으로부터 이동자의 질량을 계산할 수 있다.

$$M_I = \frac{F_x}{a_{\max}} \quad [kg] \quad (1)$$

$$a_{\max} = r_{\max} \omega^2 \quad [m/s^2] \quad (2)$$

여기서, M_I 는 이동자의 전체질량, F_x 는 요구추력, a_{\max} 는 가속도, r_{\max} 는 스트로크, ω 는 각속도를 나타낸다. 부하를 고려하여 이동자의 무게는 계산된 전체 질량의 10 [%] 정도가 되도록 이동자 치수를 결정하였다.

나) 영구자석에 의한 공극자속 밀도 계산

영구자석에 의한 공극에서의 기자력을 영구 자석 기자력 θ_m 의 80 [%] 정도로 보았을 때, 공극에서의 무부하시 자속밀도 B_0 에 대한 계산 수식은 다음과 같다.

$$B_0 = \frac{0.8 \times \theta_m}{\frac{2g}{\mu_0} + \frac{l_m(l_s - l_m)}{2b_m \mu_0 \mu_m}}, \quad \theta_m = H_c l_m = \frac{B_r}{\mu_0 \mu_m} l_m \quad (3)$$

여기서, H_c 는 자석의 보자력, B_r 은 잔류자속밀도이다.

다) 전기자 기자력 계산

전기자에 의한 기자력 θ_o 는 공극에 집중된다고 본다. 이 때, 전기자 기자력에 의한 공극에서의 자속밀도를 나타낸 식 (4)와 추력에 관한 식 (5)에 의해서 식 (6)과 같이 전기자 기자력을 계산할 수 있다. 점적률을 60 [%]로 했을 때, 권선의 총 높이는 식 (7)에 의해 계산할 수 있다.

$$B_o = B_{o1} = \frac{\theta_o}{\frac{2g}{\mu_0} + \frac{l_m(l_s - l_m)}{2\mu_0 \mu_m b_m}} \quad (4)$$

$$F_x = \frac{-4yB_o B_0}{\mu_0} (h_m - z) \quad (5)$$

$$\theta_o = \frac{F_x}{4gB_o h_m} \times (2g + \frac{l_m(l_s - l_m)}{2\mu_m b_m}) \quad (6)$$

$$h_o = \frac{NI}{b_m \times 0.6 \times J} \quad (7)$$

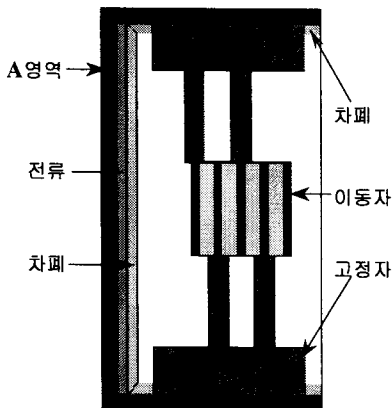


그림 3. 가정자료를 이용한 2차원 해석 모델

2.4 유한요소법에 의한 세부 설계

그림 3은 2차원 유한요소 해석을 위한 등가해석 모델로서 고정자 경로의 자료를 구성하기 위하여 A영역과 같이 가정자료를 두어 무한대의 투자율을 가지도록 하였고, 이 자료가 실제 해석모델에 미치는 영향을 제거하기 위하여 자기 차폐를 하였다.

영구자석과 전류영역에 의한 횡축형 액츄에이터의 유한요소해석을 위한 전자기 지배방정식은 식 (9)와 같다.

$$\nabla^2 \vec{A} = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (9)$$

여기서, A 는 자기벡터 포텐셜, J_0 는 입력전류밀도, J_m 은 영구자석의 등가자화전류밀도이다.

3. 설계 결과 및 특성해석

3.1 기초 설계

요구사양의 추력은 100 [M]이나 몇 가지 가정으로부터 사용되는 등가자기회로 해석과 2D FEM에 의한 해석의 오차를 감안하여 경험적으로 실제 구동 시 최대추력 보다 40 [%] 높게 설계하였다. 최대 변위가 3 [mm]이므로, 극간격은 적어도 6 [mm] 이상 되어야 한다. 따라서, 부하의 가변에 따른 안정된 구동을 위해서 극간격 τ 는 9 [mm]로 설정하였고, 자석의 폭 l_m 은 3 [mm], 이동자 철심 폭 l_b 는 6 [mm]로 한다. 설계 결과 극수는 4극이나 이동자 형상의 대칭성을 위해서 자석의 수 N_m 은 철심보다 하나 더 많은 5 [개]로 결정하였다. 이동자의 y-z절단면을 정사각형으로 했을 때, 이동자 두께 h_m 과 이동자 너비 b_m 은 동일하게 35.5 [mm]가 되었다. 그리고, 공극에서의 무부하 자속밀도 값은 2.019 [T], 전기자 기자력은 804.312 [AT]로 계산되었다.

이상의 설계 수식으로부터 결정된 초기 치수는 표 2와 같다.

표 2. 초기 치수

극간격 τ 자석의 폭 l_m 이동자 두께 h_m 전기자 권선수			
9 [mm]	3 [mm]	35.5 [mm]	804 [turns]

3.2 세부 설계

등가자기회로법으로부터 기초 설계된 치수를 근거로 주요 설계 파라미터 변화에 따라 유한요소해석을 수행하여 추력을 최대화하고 선형적 특성을 가지도록 세부설계를 진행하였다. 유한요소 해석에서 검토된 주요 설계 파라미터는 고정자극의 폭, 이동자의 영구자석 자화방향 두께와 철심 두께의 비, 기자력, 이동자의 높이이다.

그림 4는 초기설계 형상에 대해, 고정자 극 너비 l_s 를 변화시키면서 해석한 결과이다. 고정자 극 너비가 넓은 경우, 추력 발생이 적은 Dead zone이 발생하는데 반해 극 너비가 좁아질수록 추력은 증가하나 6 [mm] 이상에서는 포화에 의해 그 증가량이 감소한다. 또한 고정자극의 포화를 고려하여 W_g 가 길어져야하므로, 전체적인 부피가 커지게 된다. 따라서, 고정자 극 너비는 6 [mm]로 결정하였다.

그림 5는 그림 4의 결론으로부터 결정된 고정자 극의 너비 6 [mm]는 일정하게 두고, 이동자 자석과 철심 폭의 비에 따른 추력 특성을 나타낸 것이다. 자석과 철심 폭의 비가 4:5일 때, 사용구간에서 가장 선형적이고, 높은 추력특성을 가짐을 알 수 있다.

고정자 극 너비 6 [mm], 자석과 철심 폭의 비가 4:5일 때, 기자력 변화에 따른 추력 특성을 본 것이 그림 6이다. 초기 결정했던 기자력에 의한 추력특성이 사양을 만족하므로, 권선수는 변화시키지 않는다. 또한 그림 6에서 전류가 0일 때 발생하는 추력은 영구자석에 의한 디텐트력으로 토크의 리플로 작용할 것이다.

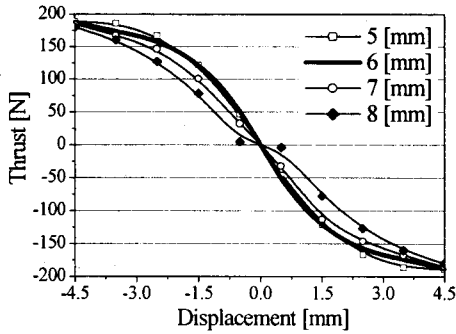


그림 4. 고정자 극 너비에 따른 추력특성

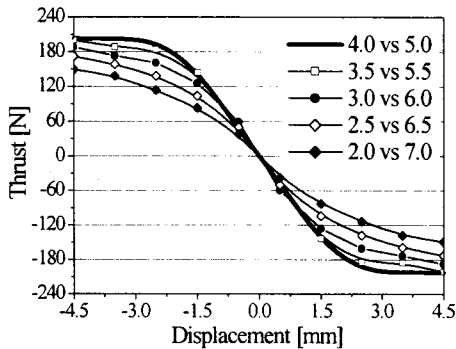


그림 5. 이동자 자석과 철심 폭의 비에 따른 추력특성

이상의 과정에 의해 계산된 최대 추력이, 처음 결정된 최대 스트로크 지점 ± 3 [mm] 에서 140 [N]의 추력발생에 대해 40 [%]이상 높은 값을 가지므로, 오차를 줄이기 위해 이동자 높이를 변화시키면서 계산하였다. 그 결과 그래프 7로써, 이동자 높이를 25 [mm]로 낮추었을 때, 운전 구간에 거의 선형적인 특성을 가지면서, 최대 스트로크 지점에서 141.218 [N]의 추력을 발생시킨다.

그림 8은 유한요소 해석으로부터 최종 선택되어 세부 설계된 액츄에이터의 역기전력 파형을 나타내며 이 결과로부터 입력전압을 결정할 수 있다.

그림 9는 최종 설계모델의 유한요소 해석 결과로 이동자가 최대 추력을 발생하는 위치에서의 등포텐셜 분포도를 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 등가자기회로법과 횡축형 액츄에이터의 2차원 등가모델에 대한 유한요소법을 결합하여 요구 사양을 만족하는 횡축형 선형 액츄에이터를 설계하고 주요 설계 변수가 정추력 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 유한요소 해석시 횡축형 기기의 3차원 형상을 고려하기 위해 가정자료를 이용한 2차원 등가모델로 해석함으로써 해석시간을 단축하고 해석의 신뢰성을 높였다. 앞으로 시작기를 제작하여 본 설계 기법의 타당성을 검증하고 3차원 해석 결과와도 비교 분석할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 강도현, Herbert Weh, "철도 차량용 고출력 횡축형 전동기 설계에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, Vol.48B, P301-308, 1999
- [2] 한국전기연구원, 선형 고출력 추진 시스템 개발 보고서, 과학기술부
- [3] 강길환, 김덕현, 홍정표, 김규탁, "Moving Coil Type L.O.A의 설계 및 동특성해석," 대한전기 학회 하계학술대회논문집, 1998

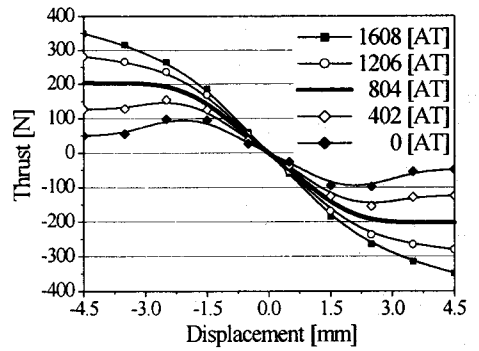


그림 6. 기자력 변화에 따른 추력특성

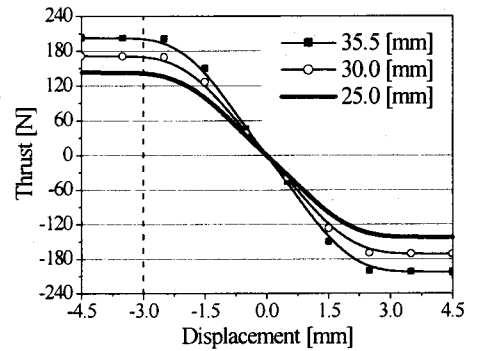


그림 7. 이동자의 높이 h_m 변화에 따른 추력특성

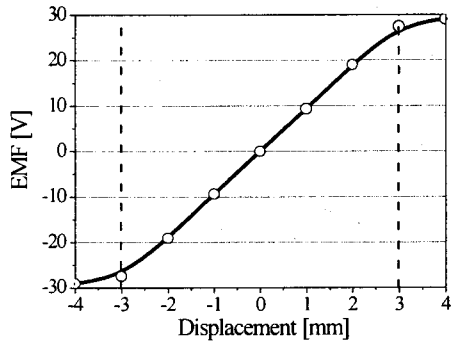


그림 8. 이동자 위치에 따른 역기전력 파형

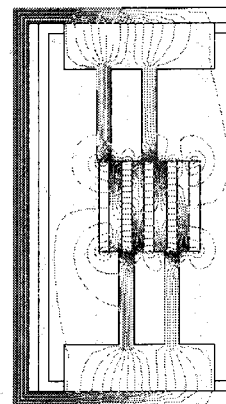


그림 9. 최대 추력 위치에서의 등포텐셜 분포도