

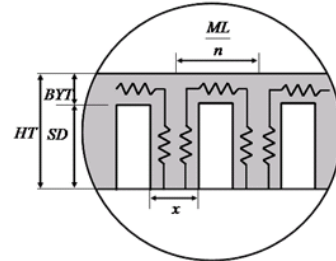
반응 표면법과 유한 요소법을 이용한 편축식 선형 유도 전동기의 형상 최적 설계

송한상*, 이종호*, 이승철*, 이병화**, 김규섭**, 홍정표**
 국립 한밭대학교*, 한양대학교**

Optimum Shape Design of Single-Sided Linear Induction Motors Using Response Surface Methodology and Finite Element Method

Han-Sang Song*, Jung-Ho Lee*, Seung-Chul Lee*, Byeong-Hwa Lee**, Kyu-Seob Kim**, Jung-Pyo Hong**
 Hanbat national University*, Hanyang University**

Abstract - This paper deals with finding the optimal ratio of height and length of Single-Sided Linear Induction Motors (SLIM) using Finite Element Method (FEM) for magnetic field analysis coupled with optimal design methodology. For effective analysis, FEM is conducted in time harmonic field which provides steady state performance with the fundamental components of voltage and current. The ratio of height to length providing the required output power is obtained by Response Surface Methodology (RSM) and optimal values are presented by the variation in output power. When output power is small, the ratio is high and as the power increases, the ratio shows a converged value. Considering the general application of linear motors, using a small ratio can be limiting, however, the shape ratio for maximum thrust can be identified.



<그림 1> Mover의 등가 자기 회로

$$SD = \text{slot area} / ((ML/n) - x) \quad (2)$$

R_{total} 은 총 자기저항 R_{tooth} 는 치의 자기저항, R_{yoke} 는 요크의 자기저항, L_{st} 은 적층 길이, μ 는 투자율, x 는 치의 두께이다.

1. 서 론

선형 전동기는 직선 운동을 필요로 하는 여러 산업 분야에 적용되고 있으며, 특히 편축식 선형 유도 전동기(SLIM)는 산업, 교통, 사무 자동화, 공장 자동화를 위하여 현재 많이 사용되고 있다 [1], [2]. 선형 유도 전동기는 직접 반응물을 벨트, 기어, 풀리 등의 동력 전달 요소가 필요 없이 직접 운동이 가능하기 때문에 시스템의 구조가 간단하다. 또한 비접촉 구동이 가능하기 때문에 소음이 적으며 원심력에 의한 속도 제한이 없기 때문에 고속 반응이 가능한 장점이 있다. 따라서 이와 같은 많은 장점을 가지는 선형 유도 전동기는 현재 다양한 분야에서 활발히 연구되고 있다.

본 논문에서는 반응표면법(RSM)과 유한요소법(FEM)을 이용하여 다양한 출력을 갖는 서보 시스템의 SLIM의 형상 최적화를 진행하였다. 논문에서는 근사함수를 만들기 위한 실험 계획법 중에서 Optimal Latin-Hypercube Design (OLHD)를 사용하였으며 점진적 2차 반응 표면론법인 Progressive Quadratic Response Surface Methodology (PQRS)를 이용하였다.

따라서 최대 출력 밀도를 갖는 SLIM을 설계하기 위하여 다양한 변수를 이용하여 최적화를 진행하였으며, 최적화 설계 결과 각각의 출력에 따른 최대 출력은 mover의 길이와 너비에 따라 달라지는 것을 확인하였다. 마지막으로 최대 출력 밀도를 갖는 mover의 형상 비율을 그래프로 나타내었다.

2. 해석 이론

A. 요크와 치 너비의 결정

최대 출력의 결정에 있어 치와 두께의 결정은 중요하다. 본 논문에서는 요크와 치의 두께는 설계변수로 사용되지 않기 때문에 높은 출력을 얻기 위해서는 요크와 치의 두께에 대한 결정이 중요하다. 이를 결정하기 위해서 등가 자기회로 법이 사용되었다[3].

각 모델에서는 치와 요크 두께는 자기저항을 최소로 하여 결정한다. 등가 자기회로망 방식에 필요한 가정이 다음과 같다.

- a. 치와 요크의 투자율은 일정하다.
- b. 단부효과는 고려하지 않는다.
- c. HT, AL과 슬롯 면적은 초기 설계에 따라 결정된다.
- d. 누설 자속은 고려하지 않는다.

식 (1)은 단순화된 등가 자기 회로의 총 자기저항을 보여준다. 슬롯 면적은 초기 설계에서 미리 결정되기 때문에 총 자기 저항은 치의 두께 x 와 요크의 두께에 의해서 결정된다.

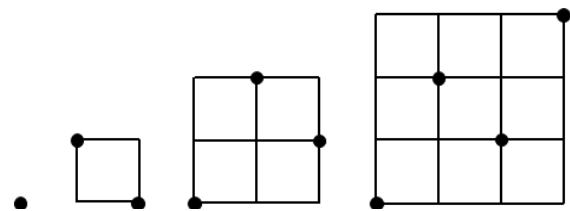
$$R = 2 \times x \cdot L_{st} / \mu (HT + SD) / 2) + ((HT - SD) \cdot L_{st} / \mu ((ML/n) - x)) \quad (1)$$

B. 최적화 해석 이론

본 논문에서는 근사최적설계를 사용하였다. 근사 최적 설계는 실제 모델에 대한 근사 모델을 만든 후 이 모델에 대한 최적 설계를 하는 것을 말한다. 근사 모델을 사용하여 최적설계를 하는 경우 복잡한 최적설계 문제에 대한 간략화 및 그에 따른 계산 시간의 단축이 장점이다. 근사모델을 만들기 위해 실험 계획법을 사용하고 실험 계획법을 통해 얻어진 실험점을 사용하여 근사모델을 만들었다. 마지막으로 이 근사 모델에 대한 최적설계를 수행하였다[4].

1) 실험 계획법 및 반응표면론법

근사 모델을 만들기 위하여 실험계획법을 적용하였다. 설계변수에 대한 최소한의 실험으로 실제 모델에 가장 근접한 모델을 만드는 것이 실험계획법이다. 본 논문에서는 실험 계획법 중에서 Optimal Latin-Hypercube Design(OLHD)를 사용하였다[5]. 모든 설계변수는 같은 수준으로 나누고 이를 설계요소에 따라 동일 축상에 배열한다. 그림 2는 두 가지 설계 변수에 대한 예이다. 실험 계획법을 통해 얻어진 실험 점으로 반응표면론법(RSM)을 사용하여 근사모델을 만들었다.



<그림 2> 두 변수에 대한 설계의 예

2) 점진적 2차 반응 표면론법(Progressive quadratic response surface methodology)

이 논문에서, 위에서 얻어진 실험 계획법과 반응 표면론법을 사용하여 근사모델에 최적화 기법 중 점진적 2차 반응 표면론법을 적용하여 최적 설계를 수행하였다.

점진적 2차 반응 표면론법은 PQRS는 (2n+1)개의 표본점 (sample points)을 선택함으로써 단지 (2n+1)번의 함수 계산을 이용하여 순수 2차항까지로 구성된 근사함수를 생성하고, 상호작용을 나타내는 나머지 항 들은 정규화된 준-뉴턴 개선공식을 적용하여 순차적으로 계산됨으로써 추가적인 함수 계산이 필요치 않는 방법이다[6].

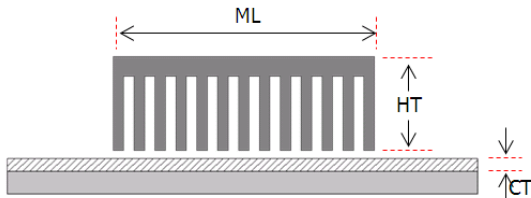
3. 해석 결과

A. 해석 모델

2-pole/12-slot 설계 형상 및 설계 변수가 그림3과 같다. 설계변수는 mover의 길이 및 높이, 도체의 두께가 사용되었다.

설계에 사용된 전동기의 사양은 표 1와 같다.

출력에 따라 형상 비를 산정하기 위해, 5개의 SLIM 모델은 250W, 375W, 500W, 625W, 750W가 설계 되었고, 각각 동일한 극수, 슬롯 수, 접적율, 전류밀도, 공극길이 등은 동일하게 제한하였다. 각각의 출력별로 추력을 목적함수로 두고 구속조건으로는 mover의 체적 및 출력으로 하였고 출력별로 최적설계를 수행하였다. 그림 4는 500W SLIM의 수렴 횟수를 나타낸 것이며, 표 2는 각각의 출력에 따른 대상 전동기의 최적화 변수인 ML, HT, CT 값을 나타내었다.



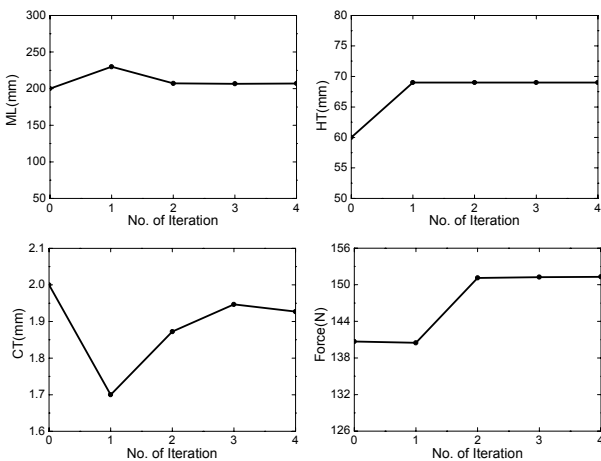
〈그림 3〉 최적의 설계변수

〈표 1〉 SLIM의 설계 사양

	Value
Number of poles	2
Number of phases	3
Number of slots	12
Input voltage	220 V
Frequency	60 Hz
Conductor conductivity	3.12×10^7 S/m
Back iron permeability	0.5×10^7 S/m
Mover material	S23

〈표 2〉 출력에 따른 변수의 최적값

	AL(mm)	HT(mm)	CT(mm)
250W	115.0	25.5	1.15
375W	172.5	51.8	1.28
500W	207.1	69.0	1.90
625W	227.1	78.3	2.13
750W	255.0	87.5	2.55



〈그림 4〉 500W SLIM의 수렴 설계 변수

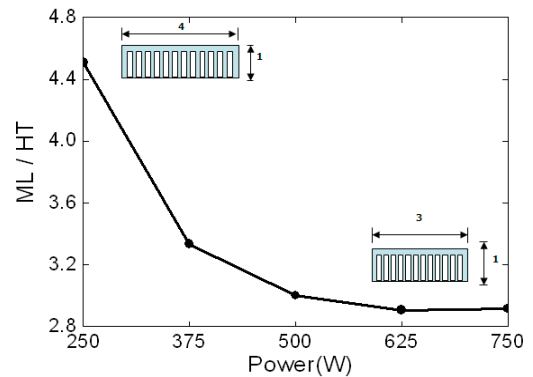
B. 해석 결과

근사모델에 대한 최적 설계 결과 값은 표 2와 같으며 mover의 형상 비율에 따라 출력 밀도가 달라짐을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과에서 우리는 출력의 증가에 따라 mover의 높이에 대한 출력의 비가 초기에는 4와 같지만 점점 줄어들어 2.9에 수렴한다는 것을 알 수 있었다. 즉 출력이 증가할수록 상대적으로 mover의 형상이 길이방향으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 출력에 따른 mover의 형상 비율이 달라지며 각각의 출력에 따른 형상 비율을 그림 5에 나타내었다.

4. 결 론

검토한 출력에 대한 SLIM의 높이와 mover의 길이에 대한 최적 비율이 논문에 설명되었다. 그 결과는 검토한 전동기 출력이 증가함에 따라 비율이 2.9 (ML/HT)에 수렴하는 것을 알 수 있었다.

본 논문의 최적설계 결과는 선형기에 대해서만 제한적으로 사용되어야 한다. 하지만 그 결과는 SLIM에 대해 고출력의 전동기의 설계에 대해 좋은 참고 자료로 사용될 수 있다.



〈그림 5〉 출력에 따른 mover의 형상비율

[참 고 문 헌]

- [1] I. Boldea and S. A. Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, John Wiley & Sons, 1985.
- [2] Hyung-Woo Lee, Chan-Bae Park and Byung-Song Lee, "Thrust Performance of a Linear Induction Motor", JEET, vol. 6, no. 1, pp. 81-85, 2011.
- [3] T.A. Lipo, "Introduction to AC Machine Design Vol. 1", WISCONSIN power electronics research center university of WISCONSIN, 1996
- [4] Bazghaleh, Naghashan and Meshkatoddini, "Optimum design of single-sided linear induction motors for improved motor performance", IEEE Trans. Magn., vol. 46, pp. 3939-3947, 2010.
- [5] Xiaoping Liao, Xuelian Yan, Wei Xia and Bin Luo, "A fast optimal Latin hypercube design for Gaussian process regression modeling", IEEE Conf. IWACI, 2010 Third international workshop, pp. 474-479, 2010.
- [6] Sang-Joon Yoon and Dong-Hoon Choi, "Air-bearing design based on global approximation concepts", IEEE Trans. Magn., vol. 39, no. 5, pp. 2468-2470, 2003.