

RSM(Response Surface Methodology)를 적용한 선형직류전동기(LDM)의 가동자 중량 저감 최적화 설계

남 혁, 김영균, 장기찬, 홍정표, 박재원*
창원대학교 전기공학과, *삼익 LMS 주식회사

LDM Design for Reduction of Mover Mass Using RSM(Response Surface Methodology)

Hyuk Nam, Young-kyoun Kim, Ki-chan Chang, Jung-Pyo Hong, Jae-wan Park*
Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ., *Samick LMS Co., Ltd.

Abstract - This paper presents a magnet circuit design procedure to reduce mover mass of the moving coil type linear direct motor (LDM). The procedure of optimization is based on the response surface methodology (RSM) and Sequential Quadratic Problem (SQP). This procedure of optimization is verified by the comparison of the result of the initial design between the result of the optimum design.

를 계변수로 하는 지배 방정식은 맥스웰 방정식으로부터 식(1)과 같이 유도된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (1)$$

여기서, μ 는 투자율, μ_r 은 영구자석 비투자율, \vec{J}_0 는 외부인가 전류, \vec{J}_m 은 영구자석의 등가화전류를 나타낸다. 전동기의 전자기력은 식 (2)와 같이 맥스웰 응력 법(Maxwell stress tensor)을 이용하여 구할 수 있다.

$$f = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu} [\overline{B_n^{(i)}} \overline{B_t^{(i)}}] \cdot L \quad (2)$$

여기서, n 는 미소 적분 경로의 수, L 는 철심의 적층폭, $\overline{B_n}$ 와 $\overline{B_t}$ 는 각각 자속밀도 B 의 법선성분과 접선성분의 평균치를 나타낸다.

1. 서 론

직선 운동 시스템에 일반 회전형 전동기를 적용할 경우 추가적인 직선 운동 변환 장치가 필요하므로 마찰에 의한 에너지의 손실과 소음 및 진동이 발생하는 비효율적인 단점을 가지고 있다. 이에 비해 선형 전동기는 전동기 자체의 효율이 낮고 역률이 떨어지는 등의 단점은 있지만 직접 직선형의 구동력을 발생시키므로 동력 변환 장치의 부가에 따른 손실, 소음, 진동 등을 제거함으로써 효율성, 생산성, 경제성의 측면에서 회전형에 비하여 우수한 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 제어성이 뛰어나 그 응용 범위가 넓다. 이러한 선형기는 가·감속 상태에서의 운전 특성이 시스템의 성능에 큰 영향을 미치며 전동기의 가동자가 직접 이동하기 때문에 가동자의 중량은 선형기 성능 평가에 중요한 부분을 차지한다.

2.2 동특성 해석 이론

선형 전동기는 전동기가 직접 이동하기 때문에 동특성이 시스템의 성능에 중요한 영향을 미친다. 따라서, 본 장에서는 LDM의 동특성을 평가하기 위하여 전압 방정식, 기계적 운동 방정식 및 추력식을 결합하여 동특성 해석을 수행하였으며 식 (3), (4), (5)는 각각 전압 방정식, 기계적 운동 방정식 및 추력식을 나타내고 있다.

본 논문에서는 설계 및 제작된 철심형 선형직류전동기(이하 LDM)를 대상으로 코일이 권선된 가동자의 가동자중량을 저감하기 위한 자기회로 최적 설계에 대하여 다루었다. 이러한 최적설계기법 중의 하나인 반응표면방법론(이하 RSM)은 일반적인 최적설계기법들과는 달리 설계변수와 응답(출력)에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사 모형을 만들며, 근사화된 모형을 통하여 제약조건을 가지는 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있을 뿐만 아니라 계산시간도 많이 단축할 수 있으며, 설계 공간내의 전반적인 현상을 예측 가능하도록 한다[1,3].

$$v_s(t) = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} + K_e v(t) \quad (V) \quad (3)$$

$$f(t) = M \cdot \frac{dv(t)}{dt} + D \cdot v(t) + F_f \quad (N) \quad (4)$$

$$f(t) = K_f \cdot i(t) \quad (N) \quad (5)$$

따라서, 본 연구에서는 전동기 자기회로 최적 설계를 위하여 RSM을 적용하였으며 전동기의 발생 추력 특성은 초기모델과 동일하게 유지하면서 가동자 중량을 저감하기 위하여 가동자의 요크 두께, 치폭, 그리고 영구자석의 두께를 설계 변수로 설정하였다. 유한요소법을 이용하여 전동기의 추력 특성을 분석하고 초기모델과 비교하였다. 또한, 동특성 평가를 위하여 전압방정식과 기계적인 운동방정식을 결합하여 동특성 해석을 수행하였으며 설계 전·후의 동특성을 비교하였다.

식 (3)의 전압 방정식에서 $v_s(t)$, $i(t)$, $v(t)$ 는 각각 인가전압, 전류 및 전동기의 이송 속도를 나타내며 R 은 권선의 저항, L 은 권선의 인덕턴스, K_e 는 역기전력상수를 나타낸다. 식 (4)와 식 (5)에서 $f(t)$ 는 발생 추력, M 은 가반중량, D 는 마찰계수, F_f 은 부하를 나타낸다. 또한, K_f 는 추력상수를 나타내며 구형과 구동 방식에서 역기전력상수와의 관계를 식 (6)과 같이 나타내었다.

2. 해석 및 최적화 이론

$$K_f = \frac{1.6554}{\sqrt{(2)}} \cdot K_e \quad (6)$$

2.1 유한요소해석이론

위의 식들을 이용하여 동특성 해석을 보다 정확하게 수행하기 위하여 권선의 인덕턴스 L 과 추력상수 K_f 는 유한요소해석을 통하여 산정하였다.

영구자석을 포함하는 해석대상의 자기벡터 포텐셜 \vec{A}

2.3 RSM의 기본이론

그림 2.1에 RSM의 기본 개념도를 나타내었다. RSM은 임의의 시스템으로부터 관측된 자료를 근거로 하여 실제 응답과 k 개의 설계변수들 사이에 인과 관계를 규명한다[1,2]. 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻어지며, 본 논문에서는 실제변수와 출력값의 대응관계를 유한요소법을 이용하여 자료를 확보하였다.

많은 경우에 있어서, 실제적인 응답함수는 Taylor 급수 전개로부터 식(7)과 같이, 2차의 다항식 모델의 형태로 나타낼 수 있다(3).

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7)$$

ε 은 응답의 오차항이고, 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 는 코드 변수이다. 여기서는 ε 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다. 따라서 근사함수로부터 n 개의 샘플 자료에서 추정된 출력값 \hat{y} 는 행렬의 형태로서 식(8)과 같이 정리된다.

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (8)$$

여기서, 기호 \wedge 는 추정값을 나타낸다. 위의 식(7)에서 X 는 다항식 모형의 항을 나타내는 행렬이고, 벡터 $\hat{\beta}$ 는 2차 다항식 모형의 회귀계수이다. 회귀계수는 식(7)에 최소자승법을 적용하여 식(9)와 같이 구할 수 있으며, 식(8)을 일반식이라 한다.

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (9)$$

3. RSM을 이용한 전동기 설계

3.1 전동기 해석모델 및 제한

표 3.1 및 그림 3.1은 LDM의 제한 및 구조를 나타낸다. 이 전동기의 평균 발생 추력은 6,000(N)이고 3상 구형과 구동 방식을 채택하였다. 그림 3.2는 적층 방향 길이에 대하여 4개의 분할된 영구자석 배치 방법을 보여 주고 있다. 이 철심형 전동기의 디텐트력(Detent force)를 최소화 하기 위하여 영구자석을 One slot pitch의 스쿠를 주었으며 제작상의 문제를 고려하여 V자형으로 배치하였다.

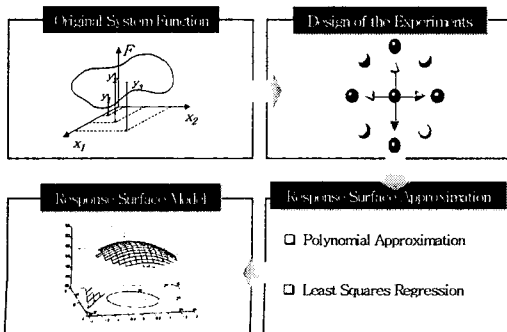


그림 2.1 RSM의 기본 개념도

표 3.1 LDM의 제한

구분	값	구분	값
슬롯수	24	영구자석 종류	Nd-Fe-B
적층길이(mm)	220	잔류자속밀도(T)	1.33
공극의길이(mm)	0.5	영구자석두께(mm)	5.0

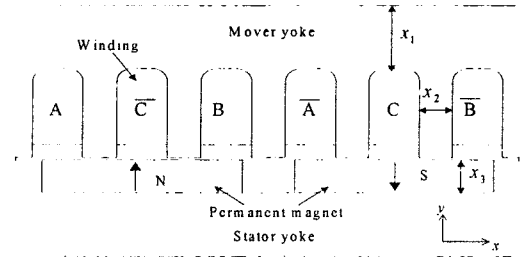


그림 3.1 LDM의 구조

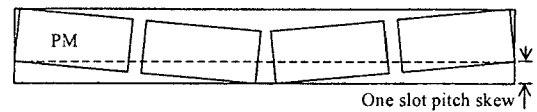


그림 3.2 적층 방향에 대한 영구자석 배치

3.2 자기회로 설계

기존의 제작된 LDM의 평균 발생 추력은 동일하게 유지하면서 이동자의 가동자 중량 저감을 위한 자기회로 설계를 위하여 고려할 설계변수로서 그림 3.2에서와 같이 가동자의 요크 두께(x_1), 치폭(x_2), 영구자석의 두께(x_3)를 각각 선정하였다.

설계변수와 출력변수사이의 관계를 나타내는 응답함수는 중심합성계획법(CCD)을 이용하여, 15번의 유한요소 해석을 통해서 선정하였다. 따라서 각 변수들의 총 레벨은 5가 되는데 본 논문에서는 $\alpha=1.682$ 라고 설정하여 변수들의 총 레벨은 5가 되며, 표 3.2에 변수들의 범위를 레벨에 따라 정리하여 나타내었다.

본 연구에서는 LDM의 가동자 중량을 저감하기 위하여 목적함수로서 설계변수와 가동자 중량과에 관계를 2차 다항식으로 근사한 f_{mass} 로 정의하고, 제약조건으로서 평균 발생 추력에 대한 근사함수 f_{mean} 를 이용하여, 추력의 평균값이 제작된 초기모델의 평균 발생 추력의 해석치 6,437 (N) 이상이 되도록 다음과 같이 정의하였다. 또한, 제약 조건을 가진 최적화 문제의 해를 구하기 위해서 순차 이차계획법(SQP)을 사용하였다.

$$\text{Objective function : } f(x) = f_{mass}(x) \quad (10)$$

$$\text{Subject to : } g_1(x) = f_{mean}(x) \geq 6,437 \quad (11)$$

$$4.0 \leq x_1 \leq 8.0, 3.0 \leq x_2 \leq 4.0,$$

$$5.0 \leq x_3 \leq 6.0$$

표 3.2 설계 변수의 범위

구분	변수레벨				
	1	2	3	4	5
요크 두께 (x_1)	2.636	4	6	8	9.364
치폭 (x_2)	2.659	3	3.5	4	4.341
영구자석 두께 (x_3)	4.659	5	5.5	6	6.341

3.3 최적화 수행 결과

RSM을 이용하여 설계변수와 평균 발생 추력과 가동자 중량에 대한 근사 다항식을 구하고, 식 (10)과 식 (11)에 정의한 목적함수와 제약함수로부터 최적화를 수행한 결과를 표 3.3에 나타내었다.

표 3.3 최적화 수행결과

구 분	초기모델	최적모델	비 고
요크의 두께 (x_1)	10.0	4.5	65(%) ↓
치폭 (x_2)	4.0	4.0	-
영구자석의 두께 (x_3)	5.0	6.35	27(%) ↑
평균 발생 추력(N)	6,437	6,500	1(%) ↑
가동자 중량(kg)	70.0	63.1	10(%) ↓
단위중량당 평균 추력(N/kg)	92.0	103.0	12(%) ↑

표에서와 같이 가동자 중량 저감을 위하여 요크의 두께는 65(%) 감소하였고 이로 인한 포화의 영향으로 감소된 평균 발생 추력 확보를 위하여 영구자석의 두께는 27(%) 증가하였다. 가동자의 중량이 10(%) 감소된 최적설계 모델에 대한 유한요소해석 결과로부터 평균 발생 추력은 6,500(N)으로서 초기 모델에 비해 1(%) 증가함을 확인하였다. 그림 3.3은 초기모델과 최적모델에 대하여 이동 변위에 따른 발생 추력을 나타낸다. 이때, 영구자석의 One slot pitch 스쿠로 인하여 디텐트력은 거의 제거되었으며 3상 구형과 구동 방식에 따른 약간의 추력 리플은 존재하게 되고 평균 발생 추력은 최적모델이 증가하였다. 그림 3.4 및 3.5는 각각 영구자석의 두께 6.35(mm)에 대하여 가동자의 중량 및 평균 발생 추력에 대한 응답표면을 나타낸다. 이 응답표면으로부터 설계변수의 변화에 대한 중량 및 발생 추력을 쉽게 예측할 수 있다.

3.4 동특성 해석

표 3.4는 동특성 해석을 위한 회로정수를 산정한 결과이다. 이때, 추력상수 및 상당 인덕턴스는 유한요소해석을 통하여 산정하였다. 그림 3.6은 표 3.4의 회로정수를 이용하여 동특성 해석을 수행한 결과로서 시간에 따른 전류 및 속도 특성을 나타낸다. 최적모델은 초기모델에 비해 그 특성이 현격한 차이는 보이지 않고 있으나 0.03초까지의 구간에서는 속도가 다소 증가하여 나타나며 최대전류는 약간 감소하고 전류는 빨리 감소하였다.

표 3.4 동특성 해석을 위한 회로정수

구 분	값	구 분	값
정격속도(m/sec)	2.0	가속도(m/sec ²)	20.0
가반중량(kg)	143.1	가동자 중량(kg)	63.1
마찰계수	0.1	부하(N)	0
역기전력상수(V/m/sec)	1119.9	추력상수(N/A)	1070.3
상당 저항(Ω)	54.9	상당 인덕턴스(mH)	167.4

5. 결 론

본 논문에서는 RSM을 적용하여 가동자 중량 저감을 위한 LDM의 자기회로를 설계하였으며 RSM과 유한요소법을 이용하여 최적설계 방안을 제시하였다. 설계된 모델은 평균발생 추력은 1(%) 증가하였고 가동자 중량 10(%) 감소하였다. LDM뿐만 아니라 전기기기의 자기회로 설계시 RSM의 적용하면 설계 공간내에서 전반적

인 설계 양상을 예측할 수 있도록 하므로 자기회로 최적설계에 있어서 효율적인 방법이 될 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 홍정표, 김영근, "반응표면방법론에 의한 BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위한 최적설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 647-649, 7, 2000.
- [2] 홍정표 외 4명, "영구자석 계자형 동기발전기의 고조파 저감을 위한 자기회로 최적설계", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.57-59, 4, 2001.
- [3] Myers의 1명, *Response Surface Methodology*, WILEY INTER SCIENCE, 1995.

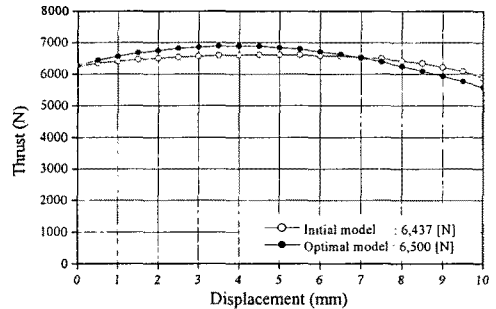


그림 3.3 이동 변위에 따른 발생 추력

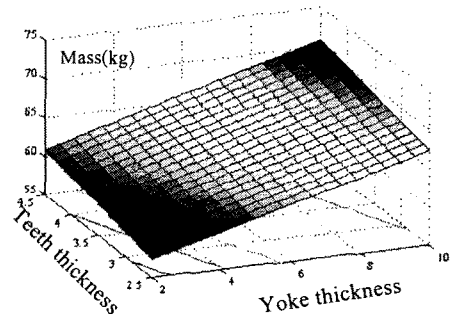


그림 3.4 가동자 중량에 대한 응답표면

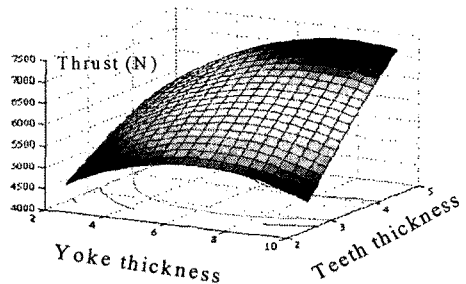


그림 3.5 평균 발생 추력에 대한 응답표면

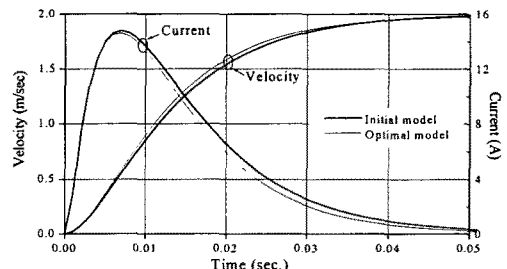


그림 3.4 시간에 따른 속도 및 전류 특성