2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

영구자석 선형 동기전동기(PMLSM)의 반응표면법(RSM)을 이용한 다중 반응 최적설계

김성일, 남혁, 김영균, 홍정표, 조한익*
창원대학교 전기공학과, OTIS-LG*

Optimal Design of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM) Considering Multiple Response by Response Surface Methodology(RSM)

Sung-Il Kim, Hyuk Nam, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Han-Ik Cho*
Changwon National Univ., OTIS-LG*

Abstract - This paper deals with the optimal design of a slotless type of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM). Response surface methodology, one of the optimization methods, is used to consider multiple response of the PMLSM. That is, it is applied to obtain more average thrust and less thrust ripple than prototype PMLSM. To analyze quickly, characteristic analysis of the PMLSM is performed by space harmonic method and final results of optimized PMLSM are compare with those of prototype PMLSM through finite element analysis.

1. 서 론

최근 직선 추력이 요구되는 시스템에서 회전형 전동기를 포함하는 동력전달 메카니즘은 점차 선형전동기로 대체되고 있다. 선형전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 전동기 자체의 효율이 낮고 역률이 떨어지는 등의 단점을 가지고 있지만, 직접 직선추력을 발생시킴으로 인해 동력변환 시스템에서 발생되는 문제점을 근본적으로 해결할 수 있어 리니어 시스템의 전체적인 효율 향상 및 성능 향상을 기대할 수 있다.

현재 선형전동기는 많은 연구가 진행되어 그 응용분야가 산업 전반에 확대되고 있으며, 특히 정밀 가공 및 생산성 향상을 위한 공작기계에 점차 적용되어 가고 있다. 그 중에서 공심형(Slotless) 영구자석 선형 동기전동기(PMLSM)는 기존의 코일을 이용한 동기전동기에서 계자원을 영구자석으로 대체한 형태의 선형전동기로 비교적 효율 및 추력/중량비가 높아서 고추력화, 고속화가 가능하며 추력 리플 또한 적어서 정밀 가공에 적합하다는 강점이 있다[1].

본 논문에서는 이미 제작된 prototype 공심형 PMLSM에 최적화 기법인 반응표면법(RSM)을 적용하여 더 큰 평균추력을 얻으면서도 추력 리플은 줄일 수 있는 다중 반응 최적 설계를 수행하였다. 빠른 해석을 위해 특성 해석은 공간고조파법을 이용하였으며 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 통해 이를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델의 구조 및 특성

PMLSM은 치, 슬롯 유무에 따라 철심형(Slotted type)과 공심형(Slotless type)으로 나누어진다.

철심형 PMLSM은 영구자석을 계자로 사용하고 치와 슬롯을 가지는 전기자 철심에 권선이 감긴다. 이러한 구조로 인해 발생 추력이 크고 효율이 높은 반면, 다텐트력이 발생하는 단점이 있다. 전기자 권선의 여자에 관계없이 발생하는 다텐트력은 추력 리플로 작용하여 진동 및 소음의 원인이 되어 제어성능에 나쁜 영향을 줄 수 있는 반면, 공심형 PMLSM은 전기자 권선이 철심에 권선 되지 않기 때문에 치, 슬롯에 의한 다텐트력이 발생하지 않아 추력 리플을 현저히 감소시킬 수 있고, 이로 인해 제어성능 향상에 상당히 유리해진다. 그러나 철심을 사용하지 않으므로 유효 공극이 커져 같은 입력의 철심형보다 추력이 많이 떨어지는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 최적 설계를 통해 prototype 공심형 PMLSM의 추력 리플을 1.01[N]에서 0.5[N]이하로 떨어뜨려 정밀 제어에 더욱더 유리하게 하는 한편, 평균추력은 103.5[N]에서 120[N]이상으로 증가 시켜 PMLSM의 효율을 높이고자 한다[2].

그림 1은 전원이 인가되는 1차측 가동자와 영구자석이 부착된 2차측 고정자가 양쪽으로 위치하는 양측식 단 1차(Short-primary) 구조를 갖는 해석 모델 형상을 나타내었으며, 전동기의 설계 사양은 표 1에 나타내었다. 또한, 영구자석의 제원 및 기타 고려사항을 표 2와 표 3에 각각 표시하였다.

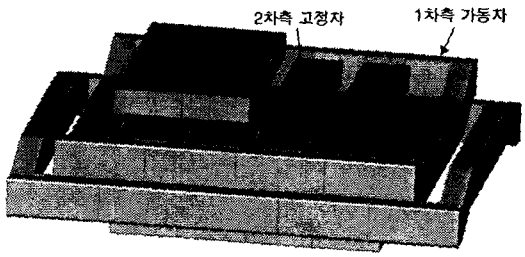

그림 1. 양측식 PMLSM의 모델 형상

표 1. 전동기 설계 사양

항 목	수 치	항 목	수 치
정격추력[N]	100	정격전류[Arms]	2.2
정격속도[m/s]	2	최대추력[N]	300
추력 ripple	1% 이하	Drive 입력	3상 220[V]

표 2. 영구자석의 제원

영구자석 제원			
재 질	Sumitomo NEOMAX 44	B_r 평균	1.33(1.30 ~1.36)[T]
$_iH_c$	1002.5(1043 ~962)[kA/m]	B_r 감자율	-0.11[%/℃]
밀 도	7.5[g/cm^3]	비투자율 μ_r	1.05

표 3. 기타 고려사항

기타 고려사항			
전류밀도 [A/mm^2]	7.0~8.0 (자냉식)	권 선 배 치	-분포권 -자극간격:코일간격 비= 2:3
점적율 [%]	70(나선) 85(피복)	연속운전 온도[℃]	75

2.2 다중 반응 최적설계의 정의

RSM은 여러 개의 독립적인 설계변수가 원하는 반응값에 복합적인 작용을 하고 있을 때, 실험계획에 의해 관측된 샘플 데이터를 통해 설계변수의 변화에 대한 반응값의 변화를 추정하는 통계적인 분석방법이며 최적화 기법이다. 그런데 그 반응값이 여러 개일 경우, 설계변수들의 어느 조건이 한 반응값에서는 최적이 될 수 있으나 다른 반응값에선 최적과 먼 경우가 많다. 다시 말해서, 다중 반응에서는 여러 반응값들을 동시에 최적화 시킬 수 있는 설계조건을 찾을 수 있으면 최상이나 이러한 경우는 별로 없다는 것이다. 따라서, 본 논문에서는 이들 여러 반응값들이 요구하는 특정 영역을 설정하여 이를 만족시키는 설계변수들의 조건을 찾음으로써 다중 반응 최적설계를 하고자 한다[3].

2.2.1 설계변수와 실험계획

최적설계에 앞서 설계변수와 실험계획의 선택은 매우 중요하다. 그림 2는 해석 모델로서 주기성을 고려한 양측식 PMLSM의 1/4 형상을 나타내며, 평균추력 및 추력 리플에 영향을 줄 수 있는 설계변수들을 나타내었다. 이 중 영구자석 높이(h_m), 영구자석 폭(w_m), 공극 길이(l_g)를 설계변수로 선택했으며, 그 외 모든 조건은 prototype PMLSM과 같다. 표 4는 곡면적인 변화를 고려한 2차 반응표면 모델을 얻기 위해 쓰이는 중심합성계획(Central composite design)을 나타내며, y1과 y2는 그 계획에 의해 공간고조파법을 사용하여 얻은 결과로 각각 평균추력과 추력 리플을 나타낸다. 표 4에서는 설계범위를 코드화 시켜 표현하였으며, 실제 설계범위는 표 5에 나타내었다.

표 4에서 얻은 결과를 바탕으로, 시스템의 응답특성은 식 (1)과 같이 하나의 수식으로 표현된다.

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

위의 식을 y에 대한 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{X\beta} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (2)$$

여기서, $\boldsymbol{X}$는 설계변수들의 조합, $\boldsymbol{\beta}$는 미지수로서 회귀계수벡터, $\boldsymbol{\epsilon}$은 오차항을 나타낸다.

2.2.2 최소제곱법에 의한 회귀계수의 추정

식 (2)에서 오차항이 0에 가까울수록 반응표면은 실제 시스템을 잘 반영한다고 할 수 있다.

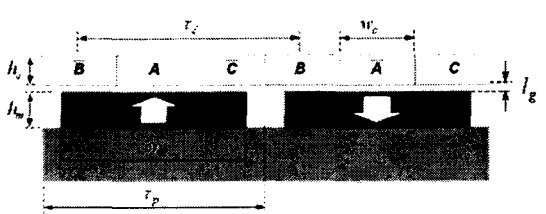

그림 2. 양측식 PMLSM의 1/4 형상 및 설계변수

따라서, 최소제곱법에 의해 오차항의 제곱 합을 최소가 되게 하는 회귀계수벡터를 구할 수 있으며, 일반식은 다음과 같다.

$$\boldsymbol{b} = (\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{y} \quad (3)$$

여기서, $\boldsymbol{b}$는 $\boldsymbol{\beta}$의 추정된 회귀계수벡터, $\boldsymbol{X}^T$는 $\boldsymbol{X}$의 전치행렬을 나타낸다. 따라서 fitting된 2차 다항식 모형은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다

$$\hat{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{Xb} \quad (4)$$

위 식에 의해 구해진 y1, y2에 대한 추정된 회귀계수들을 표 6에 나타내었다[4].

표 4. 중심합성계획

실험 순서	영구자석 높이[mm]	영구자석 폭[mm]	공극 길이 [mm]	y1 [N]	y2 [N]
1	-1.0	-1.0	-1.0	102.98	1.71
2	1.0	-1.0	-1.0	121.86	1.71
3	-1.0	1.0	-1.0	115.94	0.7
4	1.0	1.0	-1.0	137.19	0.7
5	-1.0	-1.0	1.0	86.06	0.69
6	1.0	-1.0	1.0	102.47	0.69
7	-1.0	1.0	1.0	96.89	0.3
8	1.0	1.0	1.0	115.36	0.3
9	-1.682	0.0	0.0	86.37	0.47
10	1.682	0.0	0.0	122.62	0.47
11	0.0	-1.682	0.0	98.99	1.13
12	0.0	1.682	0.0	121.16	0.99
13	0.0	0.0	-1.682	131.7	1.06
14	0.0	0.0	1.682	98.17	0.21
15	0.0	0.0	0.0	113.64	0.47

여기서, 영구자석 높이(x_1), 영구자석 폭(x_2), 공극 길이(x_3)

표 5. 설계범위

Coded values		-1.682	-1.0	0	1.0	1.682
Real values	h_m [mm]	2.48	3.5	5.0	6.5	7.52
	w_m [mm]	8.85	9.8	11.2	12.6	13.55
	l_g [mm]	0.53	0.8	1.2	1.6	1.87

표 6. 추정된 회귀계수

회귀 계수	추정된 값	
	y1	y2
β_0	-56.21	22.692
β_1	19.14	-0.105
β_2	18.40	-3.132
β_3	-15.16	-5.110
β_{11}	-1.41	0.011
β_{22}	-0.62	0.118
β_{33}	3.17	0.511
β_{12}	0.26	0.0
β_{13}	-1.09	0.0
β_{23}	-1.02	0.277

2.2.3 최적설계

각각의 최적설계를 통해 평균추력(y1)을 최대로, 추력리플(y2)은 최소로 하는 설계변수들의 조건을 표 7에 나타내었다. 이 표에서 알 수 있듯이 서로의 최적조건이 다른 것을 확인할 수 있으며, 특히 공극 길이는 상대적으로 그 차이가 매우 크다. 따라서, 다중 반응 최적 조건을 찾기 위해 각각의 반응값에 대한 적절한 목표 영역을 설정하였고 설계변수는 지정된 범위 내에서 정의되었다.

$$126 \leq y1 \leq 126.5$$
$$0.49 \leq y2 \leq 0.5$$

여기서, 설계변수 중 공극 길이는 각 반응의 최적 조건에서 중간 값인 1.2[mm]로 고정시켰다. 최적설계 결과는 표 8에 나타내었다. 그림 3은 두 부분의 최적화된 설계영역을 보여주고 있는데 이 중 영구자석의 증가량을 고려하여 아랫부분을 최적영역으로 선정하였다. 표 9는 최적설계조건에서의 FEA 결과와 비교하여 다중 반응 최적설계의 신뢰성을 검증하였다. 여기서 발생한 오차를 보면, RSM과 공간고조파법에 의한 결과 사이에는 오차가 크지 않지만 RSM과 FEA 결과와는 그 차이가 큰 것을 알 수 있는데 이는 대부분이 공간고조파법과 FEA 사이의 오차라 볼 수 있겠다. 왜냐하면 표 10에서 최적화된 PMLSM과 prototype PMLSM을 비교하면서 두 해석법 사이의 오차를 확인할 수 있기 때문이다.

3. 결 론

본 논문에서는 RSM을 이용하여 두 가지 이상의 반응을 최적화 시키는 다중 반응 최적설계를 공심형의 양측식 PMLSM에 적용하였다. 영구자석의 부피가 증가했지만 최적화된 모델이 prototype PMLSM에 비해 성능 향상을 가져왔으므로, 이는 다중 반응 최적설계가 유용하다는 것을 입증해 준다. 다만, 공간고조파법과 유한요소해석 시, PMLSM의 단부효과를 고려하지 않은 점과 정확한 코일 모델링을 하지 않았다는 점에서 오차가 더 발생할 수 있겠지만 공간고조파법의 빠른 해석에 의한 시간 단축이 가능하므로 공심형 PMLSM 초기 설계 시 다중 반응 최적설계와 결합하면 효과적일 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] 하재평, 김영균, 홍정표, 강규홍, 조한익, 하경호, "영구자석 선형 동기전동기의 디텐트력 저감을 위한 자기회로 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, PP.942-944, 2003.

[2] 이주민, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 자계 및 추력 특성 해석", 대한전기학회논문지, Vol.50, No.6, pp.252 262, 2001.

[3] 이상복, minitab을 활용한 예제 중심의 실험계획법, 이레테크, pp.316 323, 2002.

[4] Y. K. Kim, Y. S. Jo, J. P. Hong, J. Lee, "Approoach to the shape optimization of racetrack type high temperature superconducting magnet using response surface methodology", Cryogenics, Vol. 41, No. 1, pp.39 47, 2001.

표 7. 각 반응의 최적조건

	영구자석 높이[mm]	영구자석 폭[mm]	공극 길이 [mm]	최적설계 값
평균추력 [N]	7.53	13.55	0.53	151.87
추력리플 [N]	5	11.2	1.87	0.17

표 8. 다중 반응 최적조건

	영구자석 높이[mm]	영구자석 폭[mm]	공극 길이 [mm]
Prototype	5	9.8	1.2
최적 조건	6.5	12.6	1.2

표 9. 다중 반응 최적설계의 신뢰성 검증

	최적설계 값	공간고조파법	유한요소법
평균추력 [N]	126.29	125.79	123.04
추력리플 [N]	0.5	0.46	0.45

표 10. Optimized PMLSM과 Prototype PMLSM 비교

	평균추력[N]		추력 리플[N]	
	공간고조파법	FEA	공간고조파법	FEA
Opimized PMLSM	125.79	123.04	0.46	0.45
Prototype PMLSM	105.7	103.5	1.02	1.01

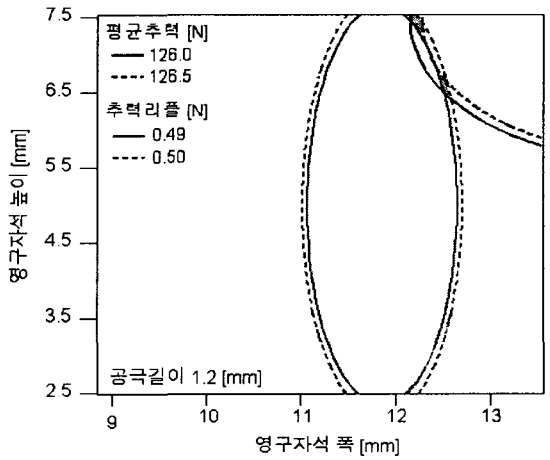

그림 3. 최적설계영역