

## Box-Behnken법을 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 구조 최적설계

한정호\*, 김원호\*, 장익상\*, 김미정\*, 이기덕\*, 이재준\*, 이 주\*  
한양대\*

### Optimal Design of the Rotor Structure by using Box-Behnken Method for IPMSM

Jung-Ho Han\*, Won-Ho Kim\*, Ik-Sang Jang\*, Mi-Jung Kim\*, Ki-Doek Lee\*, Jae-Jun Lee\*, Ju Lee\*  
Hanyang University\*

**Abstract** - There are various ways of optimizing rotor design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors(IPMSM). In this paper, the best optimized design value was found by varying the Bridge thickness of PM in the rotor and changing Rib. The set design values were torque, 5 harmonics, 7 harmonics, and safety factor. Also, in order to make practical design value easily and quickly for optimization, Box-Behnken of Response Surface Method(RSM) method was used. Therefore, IPMSM resulted an optimized design model with high torque, low harmonics, and constant value of safety factor.

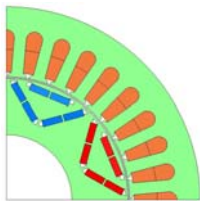
#### 1. 서 론

최근 환경문제 및 에너지 자원의 고갈위기에 따라 고효율, 고성능 전기 기기 등이 주목을 받고 있다. 그 중 친환경 차량에 적용되는 매입형 영구자석 동기전동기의 개발이 진행되고 있다. 매입형 영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자 내부에 매입되는 구조이다. 이러한 전동기는 높은 토크와 낮은 토크리플을 요구하는데, 체계적이고 최적화된 설계방식을 적용하여 이상적인 전동기를 만드는데 목적을 두고 있다.

매입형 영구자석 동기전동기에서 고정자와 회전자가 8극 36슬롯의 구조를 갖는 모델로 선정하였으며, 회전자의 영구자석 배치는 N, S극이 번갈아 가며 놓여 있고, 영구자석 모양은 트라이앵글 타입으로 구성되어 있다.

#### <표 1> 모델의 설계사양

내용	설계 사양
BaseRPM	2843rpm
MaxRPM	10000rpm
토크	2843rpm 436Nm
	10000rpm 206Nm
Core 재질	35PN230(S08)
최대전류	500A
동작온도	170도
회전자/적층/공극	163mm/190mm/1.2mm



<그림 1> IPMSM의 초기 모델

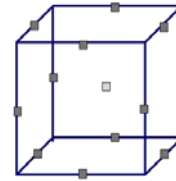
#### 2. 본 론

##### 2.1 반응 표면법(RSM)의 개념

반응표면법은 설계변수와 목적함수의 실험적 관계를 찾아 구하고, 관측된 자료로부터 얻은 치수들로부터 근사적 반응 표면모델을 만들어내는 통계적 기법을 말한다. 이 방법은 함수관계가 확연히 밝혀져 있지 않거나 복잡한 형태를 갖는 최적화 문제를 풀 경우 매우 유용한 방법이라 할 수 있다.[1]

##### 2.2 Box-Behnken법의 특징

반응표면법은 많은 실험적인 설계방법이 있다. 본 논문에서는 1, 2차항을 효율적으로 추정하고자 할 때, 모든 요인들이 동시에 낮은 수준 혹은 높은 수준이 아니라는 것을 확신할 때, 모든 실험이 안정된 공정영역에서 이루어진다고 확신할 때 활용하는 Box-Behnken(박스-벤켄)을 이용하였다. Box-Behnken법은 요인수가 같을 경우 다른 반응표면법 중 하나인 중심합성계획법(Central Composite Design:CCD)보다 실험횟수가 적다. Box-Behnken 설계는 꼭지점의 실험점이 포함되지 않은 실험계획으로 육면체의 모서리들의 중심과 전체 실험영역의 중심에서 실험을 하는 계획이다. 꼭지점에서의 실험이 비용이 너무 많이 들거나 현실적으로 불가능한 경우 유리하게 사용할 수 있다. 그림 2는 설계변수가 3개일 때 실험 점들을 나타내고 있는데, 총 15개점에서 12개점은 정사면체의 각 꼭지점 사이의 선분 중점에 위치하고 3개점은 모두 정사면체의 중심이다.[2]



<그림 2> Box-Behnken법

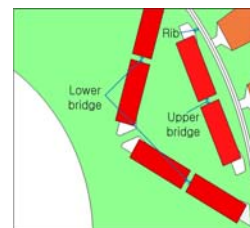
##### 2.3 회전자 최적설계

설계변수의 범위를 입력해서 나온 15개 실험값을 토대로 전자기적 유한요소 해석을 통해 토크, 5고조파, 7고조파를 구하고 기계적 강성해석을 통해 안전율을 구한다. 설계변수의 범위와 목적함수의 범위는 표 2와 같이 적용을 하였다.

또한, 설계변수에서 언급된 Upper bridge, Lower bridge, Rib의 위치는 그림 3을 통해 확인할 수 있다.

#### <표 2> 목적함수와 설계변수 범위

설계변수	Upper bridge	0.5-2[mm]
	Lower bridge	0.5-2[mm]
	Rib	0.5-2[mm]
목적함수	Torque	Maximize
	5 고조파	Minimize
	7 고조파	
Safety factor $\geq 1.3$		



<그림 3> IPMSM의 설계변수

**<표 3> Box-Behnken법을 이용한 설계변수와 전자기적 유한요소 해석과 기계적 강성해석을 이용한 목적함수의 실험결과**

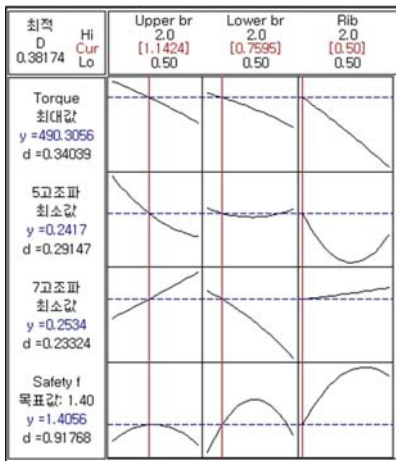
실험 횟수	설계변수			목적함수			
	Upper bridge	Lower bridge	Rib	토크	5고조파	7고조파	Safety factor
1	0.5	0.5	1.25	483.1	0.11	0.23	1.33
2	2.0	0.5	1.25	462.3	0.11	0.38	1.33
3	0.5	2.0	1.25	462.7	0.05	0.02	1.79
4	2.0	2.0	1.25	444.6	0.15	0.17	2.25
5	0.5	1.25	0.5	493.3	0.43	0.11	1.37
6	2.0	1.25	0.5	471.8	0.13	0.29	1.38
7	0.5	1.25	2.0	453.2	0.12	0.17	2.26
8	2.0	1.25	2.0	436.2	0.25	0.33	2.24
9	1.25	0.5	0.5	491.0	0.20	0.30	1.29
10	1.25	2.0	0.5	472.7	0.24	0.04	1.40
11	1.25	0.5	2.0	453.9	0.17	0.34	1.37
12	1.25	2.0	2.0	434.3	0.26	0.12	2.34
13	1.25	1.25	1.25	465.5	0.02	0.22	2.20
14	1.25	1.25	1.25	465.5	0.02	0.22	2.20
15	1.25	1.25	1.25	465.5	0.02	0.22	2.20

**2.4 최종 모델 분석**

표 3은 실험을 토대로 수행한 결과를 나타내고 있다. 여기서 주목할 점은 그림 2에서 보는바와 같이 15개점 중에서 3개점은 정사면체의 중심이어서 설계변수와 결과 값이 1개로 나오기 때문에 총 13개의 결과 값이 나오는 것을 확인할 수 있다. 따라서 위의 결과를 토대로 반응 최적화 도구를 설정한다. 즉, 표 4와 같이 각각의 목적함수의 목표 값을 정하고 그 중 더 중요한 변수를 가중치를 두고 계산한다. 여기서는 토크를 가장 중요한 결과 값으로 보기 때문에 가장 많은 가중치를 두었고, Safety factor를 그 다음으로 가중치를 두었다. 5고조파, 7조파는 가중치를 두지 않았다. 따라서 그림 4와 같은 최적설계 결과 값을 도출하였다.

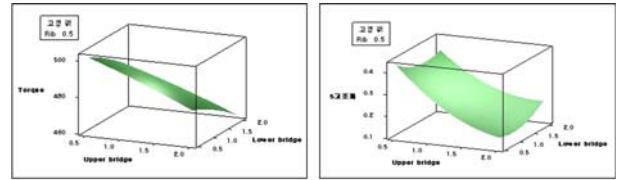
**<표 4> Box-Behnken법을 이용한 반응 최적화 도구 설정**

반응	목적	하한	목표값	상한	가중치	중요도
Torque	최대화	450	500		5	1
5고조파	최소화		0.1	0.3	1	1
7고조파	최소화		0.1	0.3	1	1
Safety factor	목표값	1.3	1.4	1.6	3	1

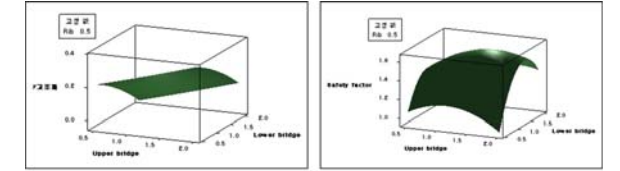


**<그림 4> Box-Behnken법을 이용한 반응표면 최적설계값**

그림 5는 그림 4에서 구해진 각각의 최적설계변수와 최적목적함수를 토대로 나타낸 표면도를 나타낸다. 그림 5의 모든 표면도는 최적설계변수 중에 하나인 Rib를 고정 값으로 두었다. 표 5는 전자기적 유한요소 해석과 기계적 강성해석의 목적함수 실험결과 값을 보여주고 있는데, 그림 4와 비교했을 때 두 개의 결과 값은 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 그림 6은 전자기적 유한요소 해석을 통한 토크 값과 기계적 강성 해석을 통한 안전율을 보여주고 있다.

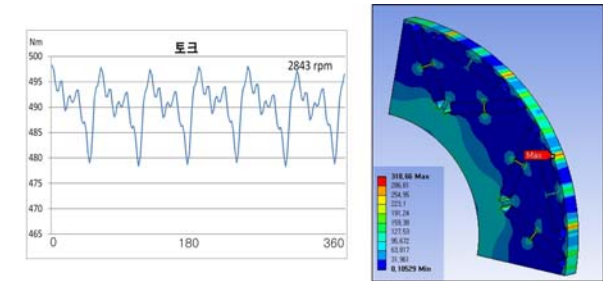


(a) 토크, Lower bridge, Upper bridge에 대한 표면도 (b) 5고조파, Lower bridge, Upper bridge에 대한 표면도



(c) 7고조파, Lower bridge, Upper bridge에 대한 표면도 (d) 안전율, Lower bridge, Upper bridge에 대한 표면도

**<그림 5> 최적목적함수 결과와 최적설계변수들과의 표면도 관계**



**<그림 6> 최적설계 모델의 토크 및 안전율**

**<표 5> 전자기적 유한요소 해석과 기계적 강성해석을 이용한 실험결과**

최적 설계 값	최적설계변수			목적함수			
	Upper bridge	Lower bridge	Rib	토크	5고조파	7고조파	Safety factor
	1.14	0.76	0.5	490.3	0.26	0.26	1.38

**3. 결 론**

본 논문에서는 IPMSM의 매입된 영구자석의 위치에 따라 토크를 최대화하고 고조파를 최소화하며 안전율이 일정치 이상으로 되는 것을 만족시켜야 한다. 먼저 Box-Behnken법을 사용하여, 목적함수를 최소 실험화하는 설계변수를 찾고, 전자기적 유한요소해석과 기계적 강성해석을 통해 목적함수를 계산해서 표본 데이터를 구성하고 반응 최적화 도구를 사용하여 최적설계 결과 값을 구했다. 그 결과, Upper bridge 1.14 mm, Low bridge 0.76mm, Rib 0.5mm 일 때 최적에 가까운 목적함수를 구할 수 있었으며, 전자기적 유한요소 해석과 기계적 강성해석과 비교했을 때, 거의 같다는 걸 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청/민군겸용기술센터의 민군겸용 기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [09-DU-EN-02. 특수임무 차량용 고기동 하이브리드 추진시스템 개발]

**[참 고 문 헌]**

[1] Gil-Sun Choi, Sung-Chin Hahn, "Multiobjective Optimal Double-Layer PM Rotor Structure Design of IPMSM by Response Surface Method and Finite Element Method", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Engineers, VOL.24, NO.6, p123-130, 2010

[2] Ian P. Brown, Robert D. Lorenz, "Response Surface Methodologies for the Design of Induction Machine Self-Sensing Rotor Position Saliencies", Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, p1354-1359, 2007