

## 다중표면반응법을 이용한 Slotless BLDCM의 열특성 안정화 설계

차현록, 이성호, 백승훈

한국 생산기술연구원

### A thermal safety design of slotless bldcm using MRSIM

Hyun Rok Cha, Sung Ho Lee, Seung hun baek

Korea institute of industrial technology

**Abstract** - 본 논문은 Slotless BLDCM의 발열특성에 고려하여 열 발생을 최소화 하고자 다중 반응표면법을 적용하여 모터의 형상 및 구조 사양의 최적 설정에 관한 연구이다. 본 연구에서는 전류밀도의 최소화를 목적함수로 하여 형상 및 구조 사양의 최적화를 실시하였다. 변수에 대한 영향도의 분석은 전자계 해석을 통한 결과값을 통하여 실시 하였으며, 열적 특성을 파악 하기 위해서 전자계-열계의 해석을 통해서 최적값의 열적 안정성을 파악 하였다.

### 1. 서 론

Slotless BLDC Motor는 슬롯의 부재로 많은 코일을 가진다. 그러나 air-gap의 증가로 인해 자속밀도는 감소하게 된다.[1]이와 같은 문제로 인해 전기장하는 증가되고 자기 장하는 슬롯이 있는 모터 보다 낮아지게 된다. 이러한 구조적 문제로 인해 열 발생이 기존의 슬롯이 있는 모터에 비해서 증가된다.[2] 본 논문에서는 온도 상승 문제를 해결하기 위해 열 발생과 모터 사이의 관계 규명을 통해 열의 발생과 이를 감소하기 위한 방향을 알아보고, 열적 최적화 설계를 진행 하였다. 이를 위해 설계 변수별로 전자계 해석을 통해서 결과 값을 이용하여 반응표면법을 통해서 동일 출력에서 전류밀도를 최소화 하는 최적화 설계를 실시하였다. 또한 본 논문에서는 반응 변수가 다변수일 때 최적화가 용이한 다중 반응표면법을 이용한 다중 반응 최적화를 실시하였다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해서 슬롯리스타입과 슬롯타입 각각에 대해서 검증 하였으며, 전류 밀도를 목적함수로 할 때와 그렇지 않을 때를 비교함으로써 최적화 실효성을 입증코자 하였다. 전류 밀도의 최적화가 열적으로 안정화 되는 것을 보이기 위해서 전자계-열계간의 커플드 해석을 통해서 열적으로 안정화 됨을 보였고, 실제로 시작 품을 제작하여 온도상승 실험을 통해서 최적화 결론에 따른 열적 안정화에 대해서 입증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 Slotless 모터의 구조

그림1은 본 논문에서 고려된 Slotless모터의 구조이다. 그림에서 보듯이 슬롯 리스 모터는 슬롯이 없으므로 Cogging이 전혀 없고, 인덕턴스가 낮아 고속용으로 사용하기에 적합한 구조이다. 그러나 출력이 높아질수록 전기장하가 높아져 열 발생에 취약한 구조를 가지고 있다.[3][4]

#### 2.2 변수의 영향도 분석

본 논문에서는 열적 안정성의 최적화를 위해서 각각의 변수가 미치는 영향도를 전자계 해석을 통해서 분석 하였다. 분석에 사용된 변수는 물리적으로 상용화가 가능

하며 양산이 가능한 범위에서 선정하였으며, 선정된 결과는 표1과 같은 변수 범위를 설정하였다.

각각의 변수에 대한 출력 변수 값은 모터의 출력 (Output Power), 전류 밀도(Current Density), 점적율 (Space Factor)로 선정하였다. 여기서 전류 밀도를 출력 변수로 선정하는 데는 열적 안정성을 최적화하기 위해서이다. 각각의 변수에 대한 특성 변화는 표2와 같았다. 표의 결론을 이용하여 본 논문에서는 최적화를 실시하였으며, 설계 목표인 30W의 전류밀도가 가장 낮으며, 점적율이 양산 가능한 수준인 70%를 넘지 않는 최종 설계 사양을 선정코자 하였다.

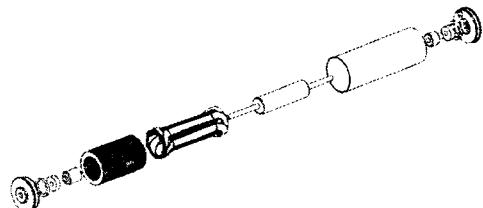


그림1 Slotless 모터의 구조

표1. 설계 파라메터의 범위

parameter	단위	범위
적층	mm	24≤ TS ≤36
선경	φ	0.30≤ CD ≤0.50
턴 수	turns	7≤ NT ≤13
Rotor 외경	φ	10.0≤ MO ≤10.5
Stator core 내경	φ	14.8≤ SI ≤15.5
Stator 적층	mm	24≤ SS ≤36
Rotor 적층	mm	24≤ MS ≤36
Air-gap 깊이	mm	0.6≤ AL ≤1.1
전류	A	2.0≤ Ia ≤2.5

표2. 설계 파라메터에 따른 출력 특성

parameter	역기전압	출력	전류밀도	S/F
적층 증가	일정	감소	감소	일정
선경 증가	일정	증가	증가	일정
턴수 증가	일정	감소	감소	증가
속도 증가	일정	감소	감소	일정
Rotor 외경 증가	일정	감소	감소	일정
Stator core 내경 증가	일정	증가	증가	감소
Stator 적층 증가	일정	감소	감소	일정
Rotor 적층 증가	일정	감소	감소	일정
Air gap 증가	일정	증가	증가	증가
Air gap 증가	일정	증가	증가	일정

### 2.3 다중 반응 표면법을 이용한 최적화

본 논문에서 반응 변수가 여러 개를 고려해야 하므로, 다중 반응 최적화 기법을 사용하였다. 각 반응 변수는 실험 데이터 분석을 위한 일반적 절차에 따라서 분석을 할 수가 있는데, 일반적으로 어떤 반응 변수에 최적인 공정 조건은 다른 반응 변수 측면에서 보면 최적이 아닐 수가 있다. 그러므로, 여러 개의 반응 변수를 동시에 최적화하는 방법이 필요하다. 이 절차를 다중 반응 최적화(multiple response optimization)라고 부르며, 여러 반응 변수들 간의 타협점을 찾는 것이다. 본 논문에서 사용된 다중 반응 표면법의 흐름은 그림2와 같다. 그림에서 보듯이 반응표면식의 추정이 2차례 이상 이루어 진다는 특징을 가진다.

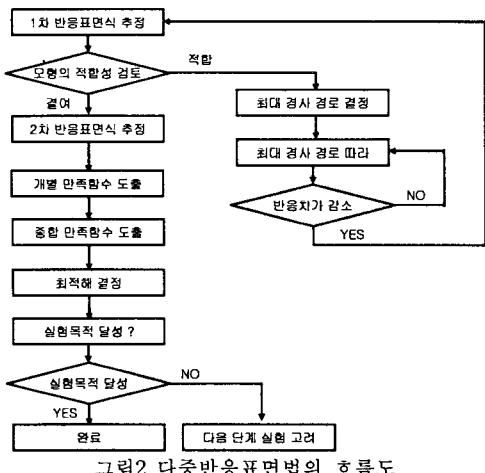


그림2 다중반응 표면법의 흐름도

### 2.4 최적화 값의 결과 비교

최적화된 설계 변수의 열적 안정화가 성립됨을 파악하기 위해서 전자계-열계간의 연성해석을 실시하여 열 발생이 저감됨을 확인하였고, 시작품 구동 평가를 통해서 기존 대비 열적으로 저감됨을 확인 할 수 있었다.

그림3은 열,전자계간의 연성해석을 통해서 얻어진 최종모델의 열적 특성을 비교한 그림이다. Slot형태의 모터와 Slotless모터에 대해서 각각 열적 최적화를 실시한 결과이다. 그림에서 보듯이 열적최적화를 실시한 후 모터의 구동 온도가 기존 대비 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 Slotless모터에서 기존 slot이 있는 형태의 모터 보다 열적으로 최적화가 더 잘됨을 알 수 있었다.

그림4는 최적화 결과대로 시작품을 제작하였때의 온도상승특성을 시험한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 최적화를 실시한 후 기존대비 열적으로 안정화되었음을 알 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 열적으로 취약한 특성을 갖는 슬롯리스 BLDC모터의 열적안정화를 위한 최적화설계에 대한 논문이다. 본 논문에서는 다중 반응 표면법을 사용하여 다변수일 때 열적으로 안정화된 설계를 실시하였다. 또한 최적화 결과를 전자계-열계간의 연성해석을 통해서 열적으로 낮아짐을 확인하였고, 시제작품 제작을 통해서 최적화된 사양에서 열적으로 안정화됨을 알 수 있었다. 향후 다중 반응 표면법을 이용한 열적안정화 설계를 통해서 슬롯리스모터의 열적내성확보에 이득을 줄 것으로 사료되며, 현재 slotless모터를 이용하는 정밀기기의 안정화에 영향을 줄 것으로 사료된다.

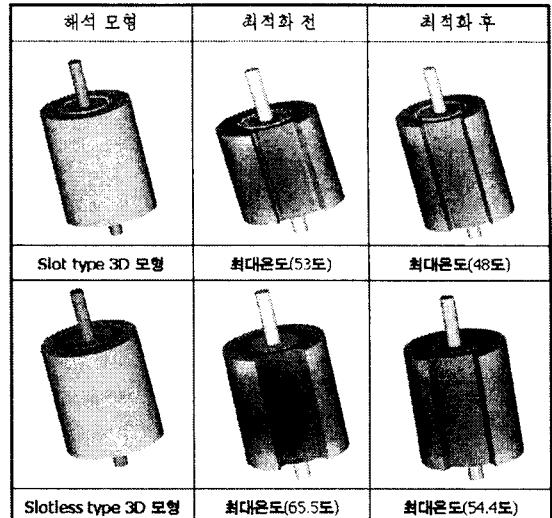
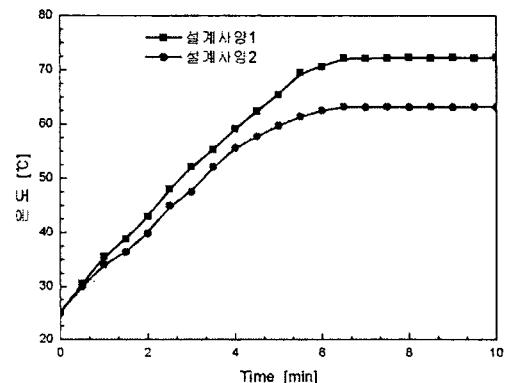


그림3. 열, 전자계 특성 해석 결과



### [참 고 문 헌]

- [1] T.Kenjo and S.Nagamori, Permanent magnet and brushless dc motors, Clarendon press oxford, new york,1985
- [2] Yongxiao Chen, jianxin shen, and zemin fang, topology and preliminary design of slotless brushless dc motor, IEEE. 1997
- [3]T.S. Tan,"Design and Analysis of a Slotless permanent magnet motor". M. Eng. Thesis, National University of singapore, 1993
- [4]J.R. Hendershot Jr and TJE Miller, "Design of Brushless permanent-magnet motor"