

## 효율 개선을 위한 헤어 드라이기용 이중권선형 2상 BLDC 전동기의 형상 최적 설계

이진희, 권병일  
한양대학교

### The shape optimal design to improve efficiency of double winding 2-phase BLDC motor for Hairdryer

Jin-Hee Lee, Byung-Il Kwon  
Hanyang University

**Abstract** - This paper proposes a structure optimal design of 2-phase BLDC motor. In order to improve the characteristics of the BLDC motor such as the efficiency, average torque, the Kriging method and genetic algorithm are utilized. In addition, the result of the optimal model were compared with the initial model and verified by 2D FEM.

#### 1. 서 론

최근 각종 산업분야에서 에너지 저감 및 환경오염에 대한 인식이 커짐에 따라 고효율, 고효율의 특성을 갖는 영구자석 BLDC 전동기의 수요가 증가하고 있다. BLDC 전동기는 기존의 DC 전동기에서의 브러시에 의한 기계적 정류구조를 홀(hall) 소자와 같은 반도체 소자를 사용하여 전자화한 것으로 회전자에는 영구자석을 사용한다. 따라서 DC 전동기에 비하여 소음이 적을 뿐만 아니라 브러시에 의한 마찰손실이 없기 때문에 장시간 사용이 가능하여 가전기기 및 산업용기기에 적용되어 사용량이 증가하고 있다 [1][2].

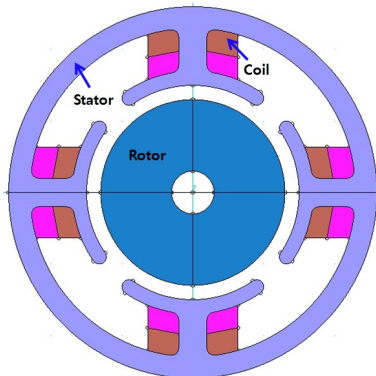
2상 BLDC 전동기는 3상 BLDC 전동기에 비하여 적은 수의 스위칭 소자를 사용하기 때문에 가격 저감의 효과가 있으나, 전동기의 구동을 방해하는 dead-point의 발생으로 인하여 3상 BLDC 전동기에 비하여 낮은 토크와 낮은 효율 특성을 갖는다 [3]. 이러한 단점을 보완하기 위하여 전동기의 형상 최적 설계에 관한 연구가 수행되어져 왔다 [4],[5]. 그러나 기존의 방법으로는 전동기의 비선형 특성을 정확히 표현하는 것이 어렵다. 크리깅 기법은 보간법을 이용하는 것으로서, 얻어진 데이터에 강한 의존성을 갖는 특징이 있고, 민감도 정보 없이 적은양의 데이터만으로도, 근사모델링을 만들 수 있는 특징을 가지고 있다 [6],[7].

본 논문에서는 Latin Hypercube Sampling (LHS)을 기반한 크리깅 근사모델링을 적용하여 헤어 드라이기용 이중권선형 2상 BLDC 전동기의 효율을 개선 하기위하여 최적 설계를 수행하였다. 최적 점은 유전 알고리즘을 이용하여 찾았으며, 유한요소 해석을 통하여 검증 하였다.

#### 2. 크리깅 기법을 이용한 2상 BLDC 전동기의 최적 설계

##### 2.1 헤어 드라이기용 2상 BLDC 전동기

그림 1은 4극 4슬롯의 구조를 갖는 2상 BLDC 전동기의 형상을 나타낸다. 헤어 드라이기 팬용으로써 적용되는 반파 구동 방식의 2상 BLDC 전동기로서 영구자석은 Bonded 타입의 NdFeB가 사용되었다. 또한 일반적인 전동기의 권선방식과는 다르게 이중권선법을 적용하여 전파구동과 비교하였을 때, 스위칭소자의 사용량을 줄였고 고정자 슬롯의 사용률을 높이는 특징을 갖는다. 표 1은 전동기의 사양을 나타내었다.



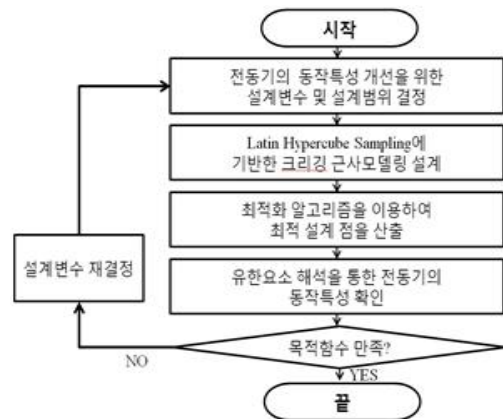
〈그림 1〉 헤어 드라이기용 2상 BLDC 전동기 형상

〈표 1〉 헤어 드라이기용 2상 BLDC 전동기 사양

항목	사양	단위	항목	사양	단위
고정자 외경	28	[mm]	상당 턴수	220	[turn]
회전자 외경	13	[mm]	저항	24.5	[ohm]
적층 길이	24	[mm]	공극	1	[mm]

##### 2.2 2상 BLDC 전동기 최적 설계 과정

그림 2는 헤어 드라이기용 2상 BLDC 전동기의 최적설계 과정을 나타내었다. 전동기의 초기모델을 해석 후, 특성 개선을 위하여 설계변수 및 설계 범위를 결정한다. 그리고 LHS를 사용하여 sampling point들을 산출하고, 크리깅 기법을 이용하여 sampling point에서의 결과들로부터 근사 모델링을 생성한다. 유전알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하고 유한요소해석을 통하여 최적설계의 타당성을 검증한다. 목적함수 및 제약함수를 만족하지 못하면 설계변수의 민감도 해석을 통하여 변수를 재조정한다.



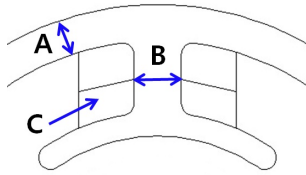
〈그림 2〉 최적 설계 과정

##### 2.2.1 Latin Hypercube Sampling (LHS) [8]

본 연구에서는 실험계획법으로 LHS를 사용하였다. 만약, 정확하게 각각 하나씩만 존재하고 중복되는 경우가 없는 난수를 가지는 배열이 존재하면 우리는 그 배열을 Latin Square이라고 부른다. "Hypercube"는 다차원 변수를 위한 고차원 공간으로의 확장 개념을 지닌다. 따라서 LHS는 적은 Sample을 주어진 설계 영역에 골고루 배치하는 공간 배치 개념으로 겹치지 않는 설계를 보장한다. n개의 동일한 확률 구간으로 영역을 나눈 다음에 해당 분포를 따르는 랜덤 변수를 배치한다.

##### 2.2.2 최적 설계를 위한 전동기 설계변수 선정

최적 설계를 위하여 그림 3과 같이 세 개의 설계변수를 지정하였다. 각각의 설계 변수는 요크폭 A, 치폭 B, 턴수 C이다. 요크와 치폭은 자속밀도의 포화를 고려하여 변수를 지정하였고, 증가한 슬롯면적을 고려하여 턴수를 산정한 후, 상당 저항 값을 재계산 하였다.



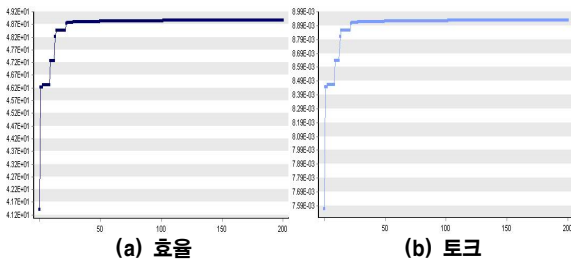
〈그림 3〉 설계 변수

지정된 설계 변수 및 변수의 범위에 따라 전동기의 특성이 변화하기 때문에 최적 설계의 목적이 효율 증가와 동시에 다른 특성 또한 저감할 수 있다. 따라서 제약함수를 지정하여 출력이 감소하거나 토크리플이 증가하지 않도록 하였다. 최적 설계의 목적함수, 제약함수 및 설계변수의 범위는 다음과 같이 지정하였다.

- 목적함수 : 효율 최대화
- 제약함수 : 평균토크 > 0.0099[Nm], 코깅토크 < 0.01328[Nm]
- 설계변수 :  $1.5 > A > 1$ ,  $2 > B > 1.8$ ,  $130 > C > 110$

### 2.3 최적 설계 결과

설계 변수를 만족하면서 목적함수 및 제약함수가 최적 점에 수렴하는 그래프는 그림 4에 나타내었다.

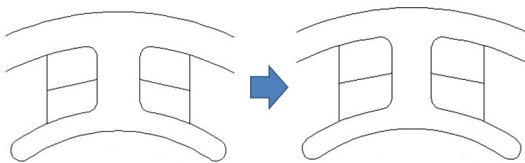


〈그림 4〉 목적함수 및 제약함수의 수렴 이력

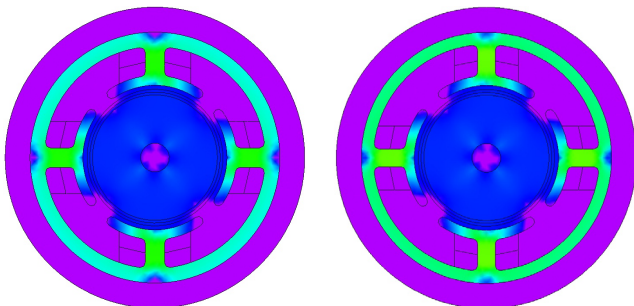
표 2는 초기 모델의 설계 변수와 최적화 알고리즘을 이용하여 산출된 최적 모델의 설계 변수를 나타내었다. 설계 변수에 따른 초기 모델과 최적 모델의 형상을 그림 5에 나타내었다. 그림 6에서는 초기모델과 기준 모델에서의 자속 밀도 분포를 나타낸다. 초기모델 대비 최적모델의 전동기의 공극 및 코어에서의 자속밀도분포가 높은 것을 확인할 수 있다.

〈표 2〉 초기 모델과 최적 모델 설계변수 비교

	A	B	C
초기 모델	1.5[mm]	2[mm]	110[turn]
최적 모델	1.256[mm]	1.81[mm]	129[turn]



(a) 초기 모델 (b) 최적 모델  
〈그림 5〉 초기 모델과 최적 모델의 전동기 형상

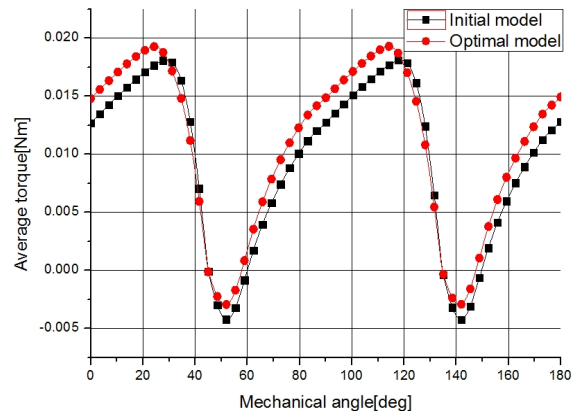


(a) 초기 모델 (b) 최적 모델  
〈그림 6〉 초기 모델과 최적 모델의 자속 밀도

표 3에서는 초기 모델의 실험치와 유한요소해석을 통한 초기모델 결과와 최적모델 결과를 각각 비교하였다. 그림 7에서는 유한요소해석을 통한 초기모델과 최적모델의 토크 특성을 나타내었다. 최적설계 결과 정격 8000[rpm]에서 효율은 4.7[%] 증가하였고, 평균 토크는 5.66[%] 증가하였다. 코깅 토크 및 토크 리플은 초기 모델과 비슷한 수준을 유지하였다.

〈표 3〉 특성 해석 비교

	초기 모델 (실험치)	초기 모델 (FEM)	최적 모델 (FEM)
평균 토크	0.0099[Nm]	0.00935[Nm]	0.01056[Nm]
코깅 토크	-	0.0206[Nm]	0.01825[Nm]
토크 리플	-	0.0224[Nm]	0.0223[Nm]
효율	53.1[%]	51.2[%]	57.8[%]



〈그림 7〉 초기 모델과 최적 모델의 토크 특성

### 3. 결 론

본 논문에서는 크리깅 기법과 LHS을 이용하여, 헤어드라이기용 2상 BLDC 전동기의 효율 및 평균토크 개선을 위한 최적 설계를 수행하였다. 출력과 효율에 큰 영향을 미치는 고정자 요크, 치, 턴수를 선정하여 최적화를 수행하였으며, 유한요소해석을 통하여 초기 모델대비 효율 및 평균토크 특성이 개선되었음을 확인하였다. 추후 최적 설계된 모델을 제작하여 시뮬레이션에서 얻은 특성과 실험특성과의 비교를 통하여 설계방법의 타당성을 검증 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motor, Clarendon press, Oxford, 1994.
- [2] Peter Campbell, "Permanent magnet materials and their application", Cambridge Press, 1994.
- [3] B. I. Kwon, B. Y. Yang, S. C. Park, and Y. S. Jin, "No vel topology of unequal air gap in a single-phase brushless dc motor," IEEE Trans. Magnetics., Vol. 37, No.5, pp. 3723-3726, Sep. 2001.
- [4] Markovic, M. et al., "Determination of tooth cogging for hard-disk Brushless DC motor", IEEE Trans. Magnetics., Vol. 41, pp. 4421-4426, Dec. 2005.
- [5] J. Lee, et al., "Optimal design of a Magnetization Fixture for Cogging Torque Reduction of ODD Spindle Motor", Tel ecommunications Energy Conference, pp. 1-3, Oct. 2009.
- [6] Lebensztajn. L, et al., "Kriging: a useful tool for electromagnetic device optimization", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 2, pp. 1196-1199, March. 2004.
- [7] Vazquez. E, et al., "Kriging for indirect measurement with application to flow measurement", IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Volo. 55, No. 1, pp.343-349, Feb. 2006.
- [8] 최규선, "Reliability-Based Design Optimization Using Kriging Metamodel with Latin Hypercube Sampling, 한양 대학교 석사학위 논문, Feb. 2008.