

## 드론용 영구자석 BLDC 전동기의 출력특성 향상에 대한 연구

박예지\*, 민영근\*, 함상환\*\*, 김솔\*\*\*, 이호준\*\*\*\*, 이주\*  
한양대\*, 경일대\*\*, 유한대\*\*\*, 부산과학기술대\*\*\*\*

### A study on Improvement of Power Characteristics of Permanent Magnet BLDC for Drone

Ye-Ji Park\*, Young-Geun Min\*, Sang-Hwan Ham\*\*, Sol Kim\*\*\*, Ho-Joon Lee\*\*\*\*, Ju Lee\*  
Hanyang University\*, Kyungil University\*\*, Yuhan University\*\*\*, Busan Institute of Science and Technology University\*\*\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 드론용 외전형 영구자석 브러쉬리스 직류 전동기 (Brushless Direct Current Motor, 이하 BLDC)의 출력특성을 향상시키기 위하여 Halbach magnet array 구조를 적용함으로써 출력밀도, 효율 등의 출력특성을 향상시켰다. 외전형 BLDC 전동기에 Halbach magnet array 구조를 적용하면 누설자속을 감소시킬 수 있고, 전동기의 철손을 감소시킴으로써 효율을 개선할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Halbach magnet array 구조를 적용한 BLDC 전동기를 설계하고 유한요소해석(FEA)을 통하여 출력특성이 개선되는 효과를 확인하였다.

#### 1. 서 론

BLDC 전동기는 일반적인 직류 전동기의 특성을 유지하면서 브러쉬와 정류자를 사용하지 않으므로 고신뢰성을 가지고, 유지보수에 따른 비용을 절감할 수 있다. 또한 직류 전동기에 비하여 고효율, 고출력밀도, 고속의 운전이 가능하고, 가감속 제어에 용이할 뿐만 아니라 구동방식도 간단하여 자동차, 항공기, 가전기기, 서보 구동에 이르기까지 다양한 분야에서 폭넓게 사용되고 있다.[1]

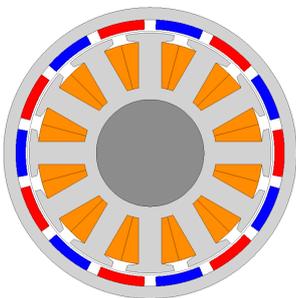
BLDC 전동기의 출력밀도는 향상시키기 위하여 장하비를 변경하거나 영구자석의 재질을 변경하는 방법들이 연구되었다. 그러나 전동기의 사이즈나 회도류 자석의 가격 불안정성 등의 제약 조건을 감안할 때 출력밀도 향상의 한계점이 존재한다.[2]

따라서 본 논문은 BLDC 전동기의 출력밀도 향상을 위해 Halbach magnet array 구조를 적용하였다. FEM을 이용하여 Halbach magnet의 비율에 따른 출력 특성을 분석하고, 기존 BLDC 전동기 모델의 요구 출력 특성을 만족하는 전동기 모델을 설계하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 BLDC 전동기 설계 제한 및 기본모델

<그림 1>과 <표 1>에 기존 비교 전동기 모델의 사양을 나타내었다. 본 논문에서는 현재 시판중인 촬영용 드론에 적용되는 BLDC 전동기를 선정하여 개선 설계를 진행 하였다.



<그림 1> 기존 BLDC 전동기 모델

<표 1> 기존 BLDC 전동기 모델의 설계 제한

극수 / 슬롯수	14p 12s
회전자 / 고정자 외경 [mm]	23.94 / 20
적층길이 [mm]	8
정격속도 [rpm]	5500
상저항 [Ω]	0.36
DC 전압 [V]	6.2

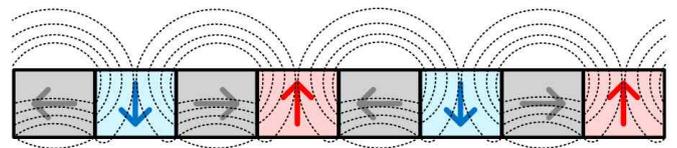
<표 2>는 기존 BLDC 전동기의 FEM 해석 결과를 나타내었다.

<표 2> 기존 BLDC 전동기 모델의 해석 결과

토크 [mNm]	출력 [W]	전류밀도 [Arms/mm <sup>2</sup> ]	효율 [%]
30.1	17.3	19.6	78.8

##### 2.2 Halbach Magnet array 구조를 적용한 BLDC 회전자

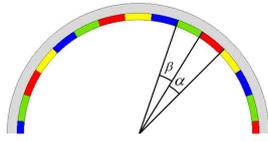
<그림 2>에 Halbach magnet array 구조의 자속 흐름을 나타내었다. <그림 2>에서 알 수 있듯이 Halbach magnet을 적용하면 한쪽으로 자속이 집중되어 반대쪽으로는 자속이 적게 발생하게 된다. Halbach magnet array 구조를 적용하여 자속밀도와 입력전류를 낮춰 손실을 감소시키는 설계를 진행하였다.



<그림 2> halbach magnet array 자속 흐름

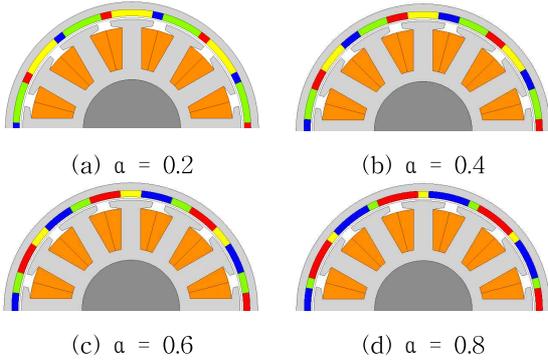
Halbach magnet array 구조를 외전형 BLDC 전동기에 적용하면 자속을 고정자 쪽으로 집중 시키고 회전자 외측의 철심 쪽으로 흐르는 자속 량을 감소시켜 철손을 감소 시킬 수 있다. 또한, 계자자속이 상승하면서 전기자 반작용에 대한 영향을 줄임으로써 영구자석의 와전류 손실을 감소시킬 수 있다. 따라서, 전동기의 철손을 감소시킴으로써 효율을 향상시킬 수 있다.

<그림 3>은 외전형 BLDC 전동기에 Halbach magnet array 구조를 적용하고 회전자 영구자석 간의 pole ratio의 관계를 나타내었다. N극과 S극의 pole ratio를  $\alpha$ 라 하고, halbach magnet의 pole ratio를  $\beta$ 로 설정하였다.  $\alpha$ 를 설계변수로 설정하여  $\alpha$ 의 값이 (영구자석 N극의 각도) / (영구자석 N극의 각도 + halbach magnet array 영구자석의 각도)를 만족하도록 하였다.  $\beta$ 는  $\alpha$ 의 종속변수로 설정하여  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 합을 1로 고정시킴으로써 자석배열이 연속적으로 이루어지도록 설계하였다.[3]



〈그림 3〉 Halbach magnet array 구조 극호율

2.2.1 극호율 변화에 따른 Halbach magnet array 구조 전동기의 출력 특성

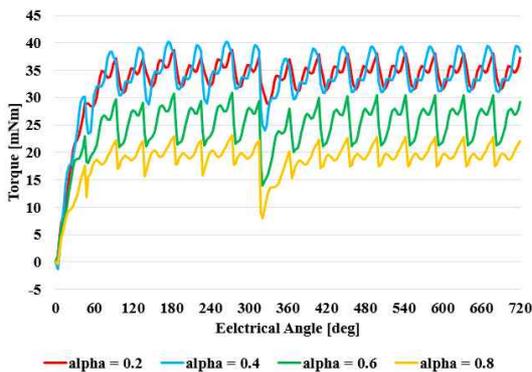


〈그림 4〉 Halbach magnet array 구조 극호율

〈그림 4〉에서는  $\alpha$ 를 0.2부터 0.8까지 변화를 주어 해석을 진행한 각 모델의 영구자석 배열을 나타내었으며, 〈표 3〉과 〈그림 5〉는  $\alpha$ 의 변화에 따른 해석 결과와 토크 파형을 나타내었다. 해석 결과  $\alpha$ 의 값이 증가할수록 토크와 출력은 감소하지만 전류 밀도와 손실 및 효율 면에서는 개선되는 현상을 확인할 수 있다.

〈표 4〉  $\alpha$ 에 따른 BLDC 전동기 모델의 해석 결과

$\alpha$	토크 [mNm]	출력 [W]	전류밀도 [Arms/mm <sup>2</sup> ]	효율 [%]
0.2	38	21.5	46.5	49.9
0.4	39.1	21.9	26.7	75.4
0.6	29.7	16.3	20.5	87.7
0.8	22.4	12	11.4	90

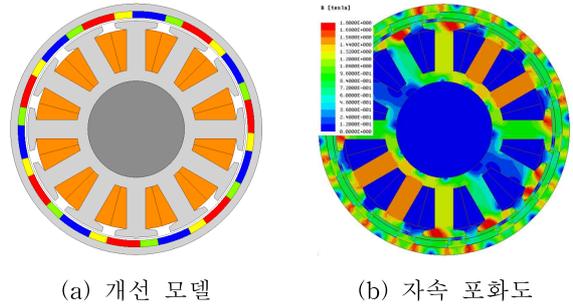


〈그림 5〉  $\alpha$ 에 따른 토크 파형

2.3 Halbach Magnet array 구조를 적용한 개선 모델 설계

해석 결과를 바탕으로 동등한 수준의 출력을 유지하면서 전류 밀도와 손실을 저감하고, 높은 효율을 낼 수 있는  $\alpha$ 값을 선정하였다.

또한, 자속밀도의 포화도를 분석하여 회전자 외측 철심, 치 폭 등의 사이즈를 저감하는 설계를 추가 진행하였다. 〈그림 6〉는 추가 설계를 진행한 개선 모델과 자속포화도를 나타내었다.



〈그림 6〉 개선 모델과 개선 모델의 자속 포화도

〈표 5〉에는 개선모델의 출력특성을 나타내었다. 기존 모델과 비교하여 토크는 약 5%의 향상하였고, 전류밀도는 약 11%를 저감하였다. 또한 효율도 약 8% 향상된 것을 확인할 수 있다.

〈표 5〉 개선 모델의 해석 결과

토크 [mNm]	출력 [W]	전류밀도 [Arms/mm <sup>2</sup> ]	효율 [%]
31.7	17.5	17.5	84.9

3. 결 론

본 논문에서는 드론용 외전형 BLDC 전동기의 출력 특성을 향상시키기 위하여 Halbach magnet 구조를 적용한 개선 모델 설계를 진행하였다. Halbach 배열을 적용하고 극호율에 따라 출력특성을 비교 분석 한 후 최적의 극호율을 선정하여 출력특성을 향상시켰다. 또한, Halbach magnet array 구조의 자기적 특성을 이용하여 회전자 외측의 철심 두께를 약 0.3mm 감소시켰고, 고정자 치 폭도 약 0.25mm 저감한 개선 모델을 도출하였다. 향후 설계된 전동기의 실제 제작품을 이용하여 부하 실험 및 온도포화실험을 진행하여 설계 모델의 신뢰성을 향상시킬 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201750)  
본 연구는 2017년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1D1A1B03028427)

참고 문헌

[1] 정재훈, 조한욱, 최장영, 장석명, “외전형 BLDC 전동기의 회전자 영구자석 형상에 따른 특성 비교”, 대한전기학회 학술대회 논문집, (), 56-58, 2013  
[2] 이기덕, 전현우, 이주, 이형우, “Halbach magnet array 구조를 이용한 철도차량용 구동 전동기의 출력밀도 향상 설계 방법”, 전기학회논문지, 63(12), 1732-1736, 2014  
[3] 장석명, 유대준, 고정진, 최상규, “Halbach 자화 배열 회전자를 갖는 영구자석 동기 전동발전기의 전자기적 해석 및 성능 특성”, 대한전기학회 학술대회 논문집, (), 86-88, 2008