

## 진동소음을 고려한 드론용 BLDC전동기의 출력밀도 향상 설계

채수황\*, 조수영\*, 고성현\*, 함상환\*\*, 김솔\*\*\*, 이주\*  
 한양대학교\*, 경일대학교\*\*, 유한대학교\*\*\*

### Power density improvement design of drone BLDC motor considering noise and vibration

Soohwang Chae\*, Sooyoung Cho\*, Seong-Hyeon Go\*, Sang-Hwan Ham\*\*, Sol Kim\*\*\*, Ju Lee\*  
 Hanyang University\*, Kyungil University\*\*, Yuhan University\*\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 촬영용 드론에 장착된 BLDC(Brushless DC) 전동기의 중량당 출력밀도 향상 설계 및 진동특성 분석을 진행하였다. 외전형 기존 모델의 중량당 출력밀도를 높이기 위해 Halbach magnet array를 적용하였다. 영구자석 형상 및 백요크 두께, 축방향 길이, 치 폭을 설계 파라미터로 설정한 다음 실험계획법을 이용하여 최적의 값으로 설계하였다. 이를 FEM(Finite Element Method)를 통해 기존 모델과 출력특성을 비교하였다. 또한 진동특성 분석을 위해 BLDC 전동기의 고정자 기저력 식으로부터 계산한 라디얼 포스의 진동주파수와 진동모드를 정리하였다. 계산된 라디얼 포스와 FEM결과를 비교하여 계산결과의 신뢰성을 검증하였다.

할 수 있게 된다. 설계 파라미터인 회전자 백요크 두께( $W_{ro}$ ), 전체 자석의 극호율( $pole\ ratio1$ ), 할박 자석의 비율( $pole\ ratio2$ ), 자석 두께( $T_{mag}$ ), 축방향 길이( $L_{stk}$ ), 치 폭( $W_t$ )을 그림 1.(b)에 나타냈다.

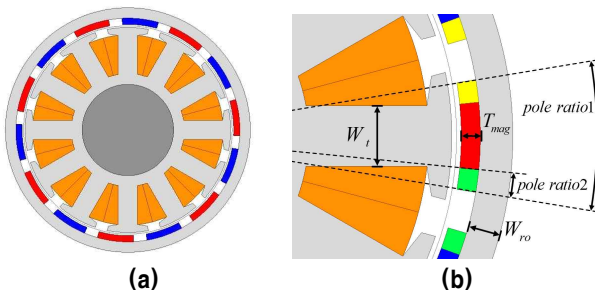
### 1. 서론

UAV(Unmanned Aerial Vehicle)나 EV(Electric Vehicle)에 사용되는 전동기는 전체 시스템의 효율 개선과 운전시간 증가를 위해 무게를 낮추면서 동일한 출력을 갖는 성능이 요구된다. Halbach magnet array 구조는 자속을 공극단으로 집중시키면서 자기차폐효과를 통해 백요크의 자속 포화도를 낮추게 된다. Halbach magnet array의 극호율과 두께를 조절하여 공극자속밀도를 최대화하면서 회전자의 백요크, 축방향 길이, 치 폭을 줄여 중량당 출력밀도를 높였다.

전동기에서 발생하는 진동의 원인으로 기계역학적 진동원, 전자기적 진동원, 기계적 진동원이 있다. 전동기는 고효율 고토크를 만족하기 위해 높은 공극자속밀도를 갖게 되면서 전자기적 진동원의 비중이 커지므로 이에 관한 진동특성 분석이 필수적이다. 현재 전자기적 진동원에 관한 연구는 주로 영구자석 동기전동기와 같은 BLAC(Brushless AC) 전동기에 대해 수행되었다. BLDC 전동기의 경우 코깅토크, 토크리플 저감에 관한 연구가 진행되었지만 진동특성을 파악하기 위해서는 라디얼 포스의 진동주파수와 진동모드를 분석해야 한다.

### 2. 중량당 출력밀도 개선

#### 2.1 Halbach magnet array 적용



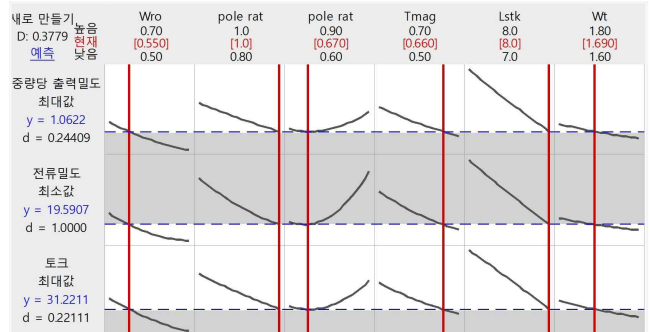
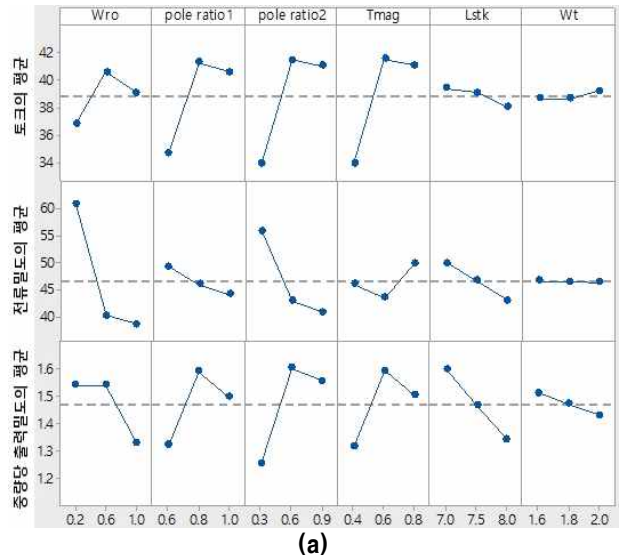
〈그림 1〉 외전형 BLDC 전동기 (a) 형상 (b) 설계 파라미터

드론용 BLDC 전동기의 형상은 그림 1.(a)와 같고 그 제원을 표 1에 나타내었다. Halbach magnet array를 적용하면서 회전자의 백요크를 통과하는 자속량이 줄어들게 되어 백요크 두께를 절감

〈표 1〉 외전형 BLDC 전동기의 제원

항목	값	단위
고정자 외경	20	mm
상저항	0.36	Ω
턴수	15	-
DC 전압	6.2	V
정격 속도	5500	rpm

#### 2.2 다구찌 기법과 반응표면법을 이용한 개선 설계



〈그림 2〉 다구찌 기법과 반응표면법 (a) 주효과도 (b) 최적 설계 파라미터 값

먼저 그림 2.(a)의 다구찌 기법을 통해 각 설계 파라미터 값의 범위를 지정하였다. 각 파라미터의 범위를 그림 2.(b)와 같이 반응표면법에 대입하여 최적 설계 파라미터 값을 찾았다. 이 값들을 적용한 최종 개선 모델과 기존 모델의 출력특성을 FEM을 통해 비교한 결과 표 2에서 볼 수 있듯이 중량당 출력밀도가 약 0.1[W/g] 상승한 것을 확인하였다.

〈표 2〉 기존 모델과 최종 개선 모델의 출력특성

	Base model	최종 개선 모델
토크 [mNm]	30.08	30.16
전류밀도 [ $A_{rms}/mm^2$ ]	19.64	<b>19.27</b>
효율 [%]	80.97	<b>81.83</b>
중량당 출력밀도 [W/g]	0.92	<b>1.02</b>

### 3. BLDC 전동기의 진동특성 분석

#### 3.1 BLDC 전동기의 라디얼 포스

전자기적 진동원인 라디얼 포스는 기자력과 비퍼미언스로부터 공극자속밀도를 구한 다음 전체 자속밀도에 tangential성분의 제곱을 뺀 값이 된다. 이때 자속밀도의 tangential성분은 매우 작으므로 무시하게 되고 시간과 공간에 대한 함수로 정리하게 되면 식 (1)과 같이 나타난다[1].

$$p(\theta^m, t) = \frac{1}{2\mu_0} [B^2(\theta^m, t) - B_t^2(\theta^m, t)] \approx \frac{1}{2\mu_0} B^2(\theta^m, t) \quad (1)$$

$$= \sum_{r=0}^{\infty} P_{mr} \cos(\omega_r t \pm r\theta^m)$$

여기서  $B^2(\theta^m, t)$ 는 전체 자속밀도,  $B_t^2(\theta^m, t)$ 는 tangential성분,  $r$ 은 진동모드의 차수이며  $P_{mr}$ 은  $r$ 차 모드의 크기,  $\omega_r$ 은  $r$ 차 모드의 각속도를 의미한다. BLDC 전동기는 식 (2)에서 볼 수 있듯이 고조파가 포함된 전류가 인가되기 때문에 고정자의 기자력은 식 (3)과 같이 나타난다.

$$i_a = \sum_u I_u \cos[u(p\omega_m t) + \theta_u]$$

$$i_b = \sum_u I_u \cos[u(p\omega_m t - 2\pi/3) + \theta_u] \quad (2)$$

$$i_c = \sum_u I_u \cos[u(p\omega_m t - 4\pi/3) + \theta_u]$$

$$F_s(\theta^m, t) = \frac{6}{\pi} \frac{N_{ph}}{2T} \sum_u I_u \sum_{n=1}^{\infty} K_{mn} \cos(up\omega_m t - k_n^u n T\theta^m + \theta_u) \quad (3)$$

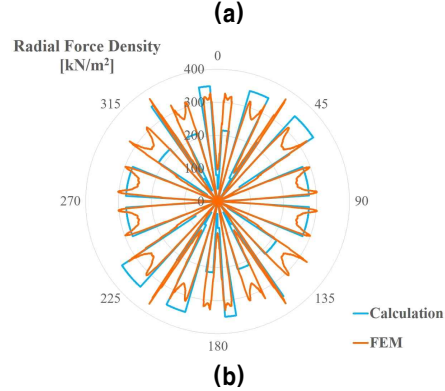
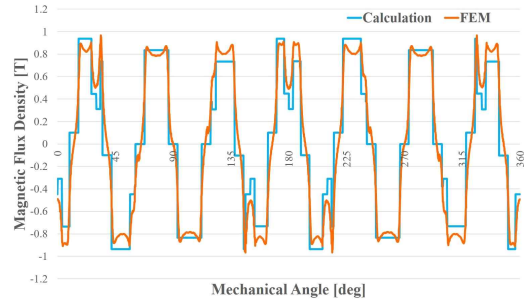
$$K_{mn} = \frac{1}{n} k_n^p k_n^d k_n^u, k_n^u = \frac{4}{3} \sin\left(\frac{2n\delta_q \pi}{3}\right) \sin\left(\frac{u\pi}{3}\right)$$

여기서  $u$ 는 전류의 고조파 차수(1,5,7,11,13...),  $\theta_u$ 는 고조파 차수에 따른 위상,  $N_{ph}$ 는 상당 직렬턴수,  $T$ 는 모델의 주기,  $p$ 는 극쌍수,  $k_n^p$ 는 분포계수,  $k_n^d$ 는 단절계수,  $k_n^u$ 는 3상 합성기자력의 고조파 계수,  $\delta_q$ 는 스포크당 슬롯수를 의미한다[2]. 식 (3)을 통해 라디얼 포스의 진동주파수와 진동모드를 표3에 정리하였다.

〈표 3〉 라디얼 포스의 진동주파수와 진동모드

발생원	진동주파수	진동모드
고정자	$(u \pm v)f_e$	$(n_s \pm m_s)T$
고정자+슬롯	$(u \pm v)f_e$	$(n_s \pm m_s)T \pm l_g Q$
회전자	$(n_r \pm m_r)f_e$	$(n_r \pm m_r)p$
회전자+슬롯	$(n_r \pm m_r)f_e$	$(n_r \pm m_r)p \pm l_g Q$
고정자+회전자	$(n_r \pm u)f_e$	$n_r p \pm n_s T$
고정자+회전자+슬롯	$(n_r \pm v)f_e$	$n_r p \pm n_s T \pm l_g Q$

여기서  $u$ 와  $v$ 는 전류의 고조파 차수,  $n_s$ 와  $m_s$ 는 고정자의 고조파 차수,  $n_r$ 과  $m_r$ 은 회전자의 홀수 고조파 차수,  $l_g$ 는 슬롯의 고조파 차수,  $\ell$ 는 전기적 주파수,  $Q$ 는 슬롯수를 의미한다.



〈그림 3〉 최종 개선 모델 (a) 공극자속밀도 (b) 라디얼 포스

그림 3은 식 (3)으로부터 계산된 공극자속밀도와 라디얼 포스를 FEM결과와 비교한 것이다. 이를 통해 BLDC 전동기의 고정자 기자력 식으로부터 구한 계산결과의 신뢰성을 검증하였다.

### 4. 결 론

본 논문은 BLDC 전동기의 중량당 출력밀도를 향상시키기 위하여 Halbach magnet array 구조를 적용하였다. 실험계획법을 통해 설계 파라미터 값을 선정하였고 개선된 출력특성을 확인하였다. 또한 BLDC 전동기의 고정자 기자력 식을 세워 극수 슬롯수 조합에 따른 진동주파수와 진동모드를 분석하였다. 최종 개선 모델의 공극자속밀도와 라디얼 포스를 FEM결과와 비교하여 계산결과를 신뢰성을 검증하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임(19TBIP-C143153-02)

본 연구는 2017년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1D1A1B03028427)

#### [참고 문헌]

[1] Ik-Sang Jang, Sang-Hwan Ham, Won-Ho Kim, Chang-Sung Jin, Su-Yeon Cho, Ki-Deok Lee, Jae-Jun Lee, Dongwoo Kang, and Ju Lee, "Method for Analyzing Vibrations Due to Electromagnetic Force in Electric Motors", IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 2, Feb. 2014.  
 [2] Z. Q. Zhu, D. Howe, and C.C. Chan, "Improved analytical model for predicting the magnetic field distribution in brushless permanent magnet machines", IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 1, pp. 229-238, Jan. 2002.