

코깅토크 저감을 위한 BLDC 전동기의 형상 설계 및 특성 분석

Topology Design of BLDC Motor for Cogging Torque Reduction and Characteristic Analysis

서 경 식* · 정 상 용* · 이 철 균†
(Kyung-Sik Seo · Sang-Yong Jung · Cheol-Gyun Lee)

Abstract - This paper presents the shape design for reducing cogging torque and characteristic analysis in Brushless DC (BLDC) motor. In this BLDC motor, Δ (delta)-winding is applied, and in order to obtain the 60° trapezoidal phase back-EMF waveform, permanent magnet shape design is carried out. And then, a method on specifying design parameters to effectively reduce cogging torque is developed. back-EMF, input voltage and input current which are analyzed by the Finite Element Method (FEM) are validated by experimental results. Also, efficiency calculations based on analysis and experimental results are performed and analyzed.

Key Words : Brushless DC (BLDC) motor, Cogging torque, Torque ripple, Shape design, Delta winding, Finite Element Method (FEM)

1. 서 론

브러시리스(Brushless) DC 전동기(BLDC Motor)는 넓은 운전영역, 고 출력 및 토크밀도, 높은 내구성 등 우수한 특성을 가지고 있으며, 구동방식이 간단하고 가격이 저렴하여 항공, 차량, 군용, 컴퓨터, 가전에 이르는 다양한 제품에서 사용되고 있다[1]-[3]. 뿐만 아니라 전장의 고급화가 진행되면서 기존에 사용하던 DC모터의 대안으로 BLDC 전동기가 적용되고 있다.

DC 전동기는 대응성 및 제어성이 우수하지만 기계적 접촉 구조를 갖는 브러시와 정류자로 인해 마찰에 의한 잡음이 발생하고, 고속운전이 불가능하며, 브러시 마모에 의한 정기적인 보수가 필요하다. 그에 반해, BLDC 전동기는 DC 전동기에 사용되는 정류 기구를 제거하고, 회전자 위치를 검출하는 센서와 상전류를 전환시키는 반도체 소자를 사용하기 때문에 고속운전이나 장시간 사용이 가능하다.

BLDC 전동기는 고성능 전동기의 구현을 위한 고 에너지 영구자석의 사용과 슬롯 개구폭의 존재로 인해 필연적으로 큰 코깅토크가 발생하게 된다. 코깅토크는 전동기에 가해지는 가진력으로서 소음과 진동의 원인이 되고, 따라서, 코깅토크의 저감은 전동기 설계 시 필수적으로 고려되어야 할 사항이다. 일반적으로 알려진 코깅토크를 저감할 수 있는 방법으로 공극 길이 증가, 분수 슬롯 또는 극 사용, 다수의 슬롯 또는 극 사용, 치 폭 증가, 슬롯 개구폭 감소, 고정자나

회전자에 스큐 적용, 낮은 자속밀도를 가진 자석 사용, 자석 혹은 고정자 치의 형상 변화 등 다양하게 소개되어 있다[4]. 전동기에 발생하는 코깅토크를 저감하기 위해 아직까지도 많은 기술 연구가 활발히 진행되고 있다[5]-[8].

본 논문에서는 BLDC 전동기의 고정자 치에 설계변수를 지정하여 형상의 변화를 통해 코깅토크를 저감하기 위한 설계를 수행하였고, 비선형 유한요소해석을 통하여 구조적 성능을 분석하였다. 그리고 설계한 BLDC 전동기에 대하여 역기전력 및 전압, 전류 특성 해석을 진행하였고, 해석 결과는 시제품의 실험 결과를 통하여 검증하였다. 또한, 해석 및 실험을 통해 얻어진 결과를 이용하여 BLDC 전동기의 효율을 계산하였고 비교 및 분석을 수행하였다. 본 논문에서 설계하는 BLDC 전동기에는 Δ (델타)-결선법이 적용된다. 따라서, 적용된 결선법에 대응하여 전기각 60° 평평한 구간을 갖는 사다리꼴 역기전력 파형을 얻기 위한 회전자 영구자석 형상 설계가 우선 수행되었다.

2. BLDC 전동기의 전압 방정식

3상 BLDC 전동기의 고정자 전압 방정식은 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $[v_a v_b v_c]^T$ 는 상전압, $[i_a i_b i_c]^T$ 는 상전류, R 는 권선 저항, $[\lambda_a \lambda_b \lambda_c]^T$ 는 권선 쇄교자속을 나타낸다. 식 (1)에서의 권선 쇄교자속은 권선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자속

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Dong-Eui University, Korea.

E-mail : cglee@deu.ac.kr

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.

Received : October 07, 2014; Accepted : October 20, 2014

에서 기인한 쇄교자속과, 회전자 영구자석에서 발생하는 자속에 의한 쇄교자속으로 나눌 수 있고, 이로부터 전압 방정식을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} 는 각 상 권선의 자기 인덕턴스이고, $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$ 는 각 상 권선들 사이의 상호 인덕턴스이고, $[e_a e_b e_c]^T$ 는 회전자 영구자석에서 발생하는 자속에 의한 권선 쇄교자속이 시간에 따라 변화함으로써 발생하는 역기전력이다. 고정자 3상 권선이 대칭인 경우에는 자기 인덕턴스 값이 서로 동일하고, 상호 인덕턴스 또한 같은 값을 가지게 된다. 따라서, 식 (2)에서 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 각각 L_s 와 M 으로 대체하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$i_a + i_b + i_c = 0$ 인 관계를 사용하고, $L_s - M$ 을 L 로 대체하면, 전압 방정식은 식 (4)로 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

3상 전동기의 출력전력 P_{out} 과 토크 T_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (5)$$

$$T_e = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (6)$$

여기서, ω_m 은 회전자의 기계 각속도이다.

3. BLDC 전동기 설계

3.1 목표 성능사양 및 설계 제원

본 논문에서 설계되는 BLDC 전동기는 최대 입력전압 9V인 조건하에서 표 1에 제시되어 있는 운전점 A와 운전점 B에서 구동이 되어야 한다, 각 운전점에서의 출력, 속도, 토크는 전동기 설계에 있어 목표 성능사양이 되고, 이를 고려하여 BLDC 전동기의 고정자 외경과 적층길이를 결정하였다. 설계하는 BLDC 전동기의 외경과 적층길이는 각각 38mm, 35mm로 결정하였고, 4극 6슬롯 구조를 채택하였으며, 영구자석은 Ferrite-9BD를 사용하였다. 자세한 설계 제원은 표 2에 나타내었다.

표 1 BLDC 전동기의 목표 성능사양

Table 1 Target performance of BLDC motor

	Operating Point A	Operating Point B
Torque (Nm)	0.104	0.077
Speed (rpm)	2775	3675
Power (W)	30.22	29.63

표 2 BLDC 전동기의 설계 제원

Table 2 Design specification of BLDC motor

	Design Parameter	Specification	unit
General	No. of Poles and slots	4 / 6	
	No. of Phases	3	
	Air-gap	0.5	mm
	Stack length	35	mm
Stator	Outer Diameter	38	mm
Rotor	Outer Diameter	21	mm
	PM Property	Ferrite-9BD	

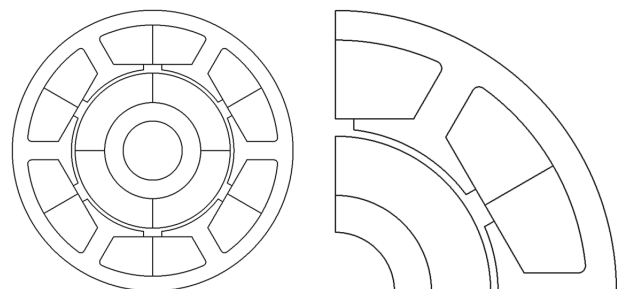


그림 1 초기 모델 단면 형상

Fig. 1 Cross-section shape of initial model

3.2 코깅토크 저감을 위한 형상 설계

그림 1은 설계 제원을 바탕으로 설계한 BLDC 전동기 초기 모델의 2D 단면 형상을 보여준다. 초기 모델에서의 코깅토크는 0.0261Nm이고 평균토크 대비 토크리플은 운전점 A에서 33.9%이고 운전점 B에서는 36.6%이다.

본 논문에서 설계하는 BLDC 전동기는 Δ -결선법이 적용된다. 그러므로, 적용된 Δ -결선법에 적합한 역기전력 파형을 유도하기 위해 회전자 영구자석 형상 개선 설계를 진행해야 한다. 이를 통해, BLDC 전동기의 토크 맥동을 줄일 수 있고, 또한, 불필요한 영구자석 사용을 없애 제작비용을 절감시킬 수 있다.

그림 2는 회전자 영구자석의 형상이 수정된 BLDC 전동기 단면 형상을 보여준다. 영구자석의 폭을 줄임으로써 3상 Δ -결선을 적용한 BLDC 전동기에 적합한 60° 평평한 구간을 갖는 사다리꼴 형태의 역기전력 파형을 유도하였으며, 영구자석에 모서리를 절삭하여 형상에 변화를 주는 챔퍼링을 적용하여 토크리플을 줄이기 위한 설계를 수행하였다. 토크

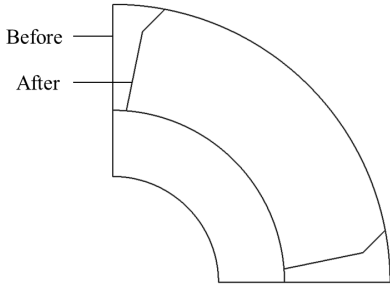


그림 2 회전자 영구자석 형상 개선 설계
Fig. 2 Shape improvement design of permanent magnet of rotor

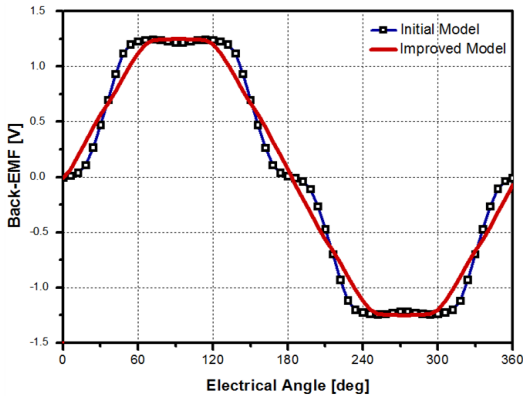


그림 3 초기 모델과 회전자 영구자석 형상 개선 모델의 역기전력 파형 비교
Fig. 3 Back-EMF comparison between initial and improved model

리플은 운전점 A에서 18.5%, 운전점 B에서는 18.4%로 초기 모델에 비해 각각 약 45.4%, 49.7% 저감되었다. 코깅토크는 약 8.1% 감소한 0.0240Nm로, 각 운전점에서의 토크리플에 비해 비교적 작은 변화폭을 보여준다.

그림 3은 속도가 1000rpm으로 회전할 때 초기 모델과 회전자 영구자석 형상 개선 모델에 대한 BLDC 전동기의 역기전력 파형을 보여준다. 회전자 영구자석의 형상 개선을 통하여 토크리플을 감소시켰을 뿐만 아니라 영구자석 사용량을 초기모델에 비해 15.0% 저감시켰다.

일반적으로 전동기에서 발생하는 코깅토크는 고정자 코일에 흐르는 전류에 관계없이 회전자와 고정자 간의 자기 릴럭턴스가 최소로 되려하는 방향으로 발생하는 힘에 의해 야기되는 맥동토크이다.

코깅토크는 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{cog} = \frac{\pi}{4} DL_{stk} \sum_n n \frac{\sin(n\sigma L_{stk})}{n\sigma L_{stk}} A_n f_n \sin(n\xi) \quad (7)$$

여기서, $n = kS, k = 1, 2, \dots$ 이고, S 는 슬롯수와 극수의 최소 공배수, D 는 회전자 외경, L_{stk} 는 적층길이, σ 는 스킴각도, A_n 는 회전자 자석에 대한 공극 피어먼스의 n 차 공간고조파, f_n 는 자석에 의한 자속분포의 n 차 공간고조파, ξ 는 회전자

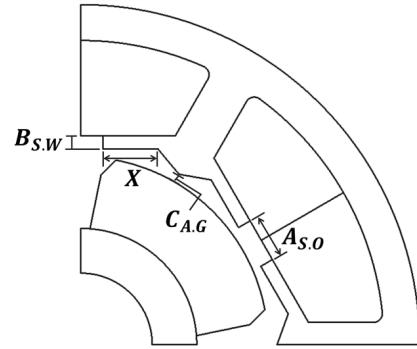


그림 4 고정자 치 형상 설계변수
Fig. 4 Design parameter for shaping stator teeth

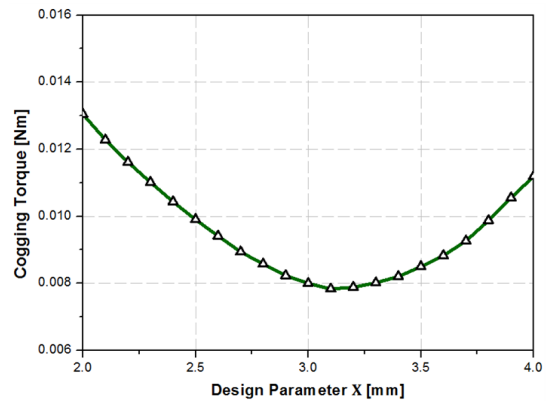


그림 5 설계변수 X에 따른 코깅토크의 변화
Fig. 5 Analysis results of cogging torque according to the design parameter X

의 회전각도를 의미한다. 식 (7)에서 보여 지듯이 코깅토크에 영향을 미치는 요소들은 다양하게 존재하고, 따라서, 전동기를 설계할 때, 최적의 재료를 선정하거나, 고정자나 회전자의 형상 설계 등을 통해 코깅토크를 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 BLDC 전동기의 고정자 치에 설계변수를 설정하여 코깅토크를 저감시키기 위한 형상 설계를 수행하였다.

그림 4는 고정자 치에 설정한 설계변수를 보여주고 있다. 아래는 설계변수의 제한을 나타내었다.

- 고정자 치 설계변수 X : 2.0mm ~ 4.0mm
- 슬롯 개구폭 길이 $A_{S,O}$: 2.5mm
- 슬롯 웨지 두께 $B_{S,W}$: 0.75mm
- 최소 공극 길이 $C_{A,G}$: 0.5mm

슬롯 개구폭 길이는 코일 권선 노즐의 두께를 반영한 최소 길이로 설정하였고, 슬롯 웨지 두께와 공극 길이는 제작 시 허용되는 최소 길이를 적용하였다. 위와 같이 설계변수를 설정하면 전동기 제작 시 제약 조건을 가지는 변수들을 고정자 치 형상을 변형시키는 변수 X 의 영향으로부터 벗어나게 하여 고정시킬 수 있고, 또한 설계변수 X 의 변화만 줌으로써 빠르고 신뢰성 높은 설계를 수행할 수 있다.

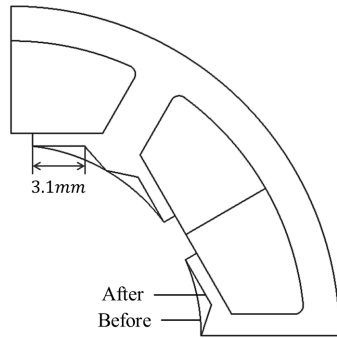


그림 6 코깅토크 저감을 위한 고정자 형상 개선 설계
 Fig. 6 Improvement design of stator shape for reducing cogging torque

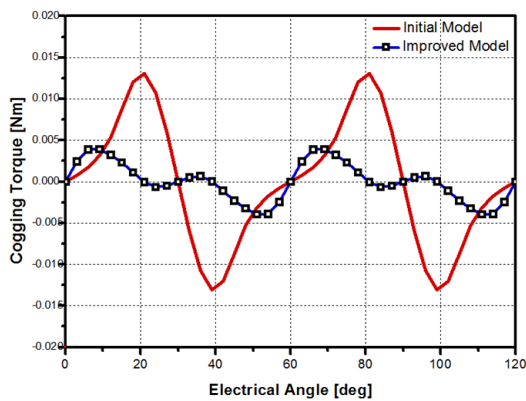


그림 7 초기 모델과 개선 모델의 코깅토크 맥동 비교
 Fig. 7 Cogging torque comparison between initial and improved model

그림 5는 설계변수 X가 2.0mm에서 4.0mm까지 0.01mm 단위로 변화함에 따른 코깅토크의 변화를 보여준다. 이 결과를 보면, 설계변수 X가 3.1mm일 때 코깅토크는 최소값을 갖는다. 이 때 코깅토크는 0.00783Nm이고 초기 모델에 비해 약 70.0% 감소되었다.

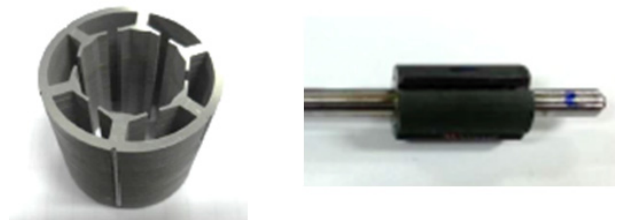
그림 6은 BLDC 전동기의 초기 단계에서 구상 설계한 모델과 코깅토크 저감을 목표로 진행한 개선 설계 최종 모델의 고정자 형상을 비교하여 나타내었다. 개선 모델을 보면, 기존의 고정자 치에 노치(notch)를 적용한 결과가 나타나며, 전동기 출력에는 영향을 적게 주면서 코깅토크를 저감시키는 효과를 얻을 수 있었다. 그림 7은 초기 모델과 개선 모델에서 발생하는 코깅토크의 맥동을 비교하여 보여준다.

4. 특성 해석 및 실험결과 고찰

4.1 역기전력 및 전류, 전압 특성

설계한 BLDC 전동기의 고정자와 회전자 시제품 구조가 그림 8에 나타나 있다. 그림 9는 제작된 BLDC 전동기의 역기전력 파형을 측정하기 위한 시험장비 구성을 보여준다.

그림 10은 BLDC 전동기의 토크리플 저감 개선 설계 모델에 대하여 비선형 유한요소해석을 통해 얻은 역기전력과,



(a) stator (b) rotor
 그림 8 BLDC 전동기 시제품 구조
 Fig. 8 Prototype structure of BLDC motor



그림 9 역기전력 측정 시험장비
 Fig. 9 Test equipment for measuring Back-EMF

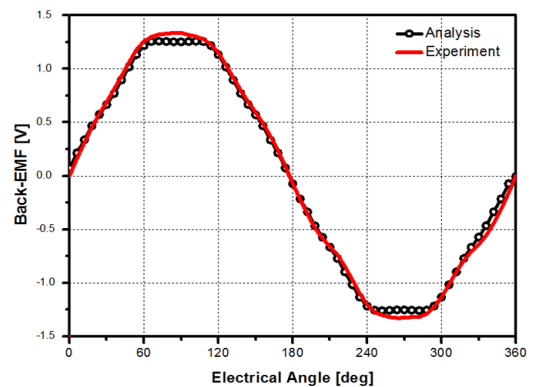
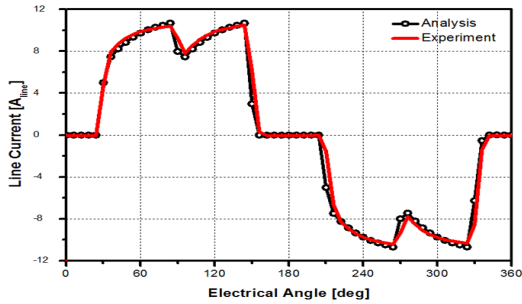


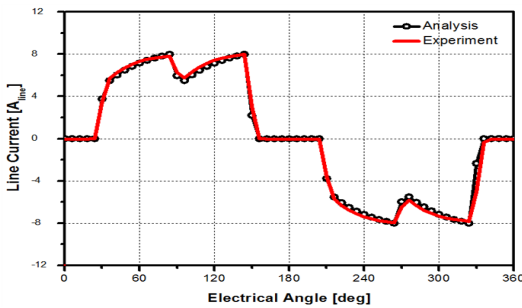
그림 10 해석 결과와 실험 결과의 역기전력 파형 비교
 Fig. 10 Back-EMF comparison between analysis and experiment result

시제품의 실험을 통해 얻은 역기전력의 파형을 나타낸다. 이 때, 전동기는 1000rpm으로 회전을 하며, 해석 결과에서 역기전력의 최대값은 1.26V이고, 실험 결과에서는 약 4.0% 높은 1.31V가 측정되었다.

그림 11, 12는 운전점 A와 B에 대하여 6-step 인버터에 의해 모터 입력단에 인가되는 선전류와 선간전압을 각각 보여준다. Δ-결선이 적용된 모델에서 선간전압은 상전압과 같은 값을 가진다.

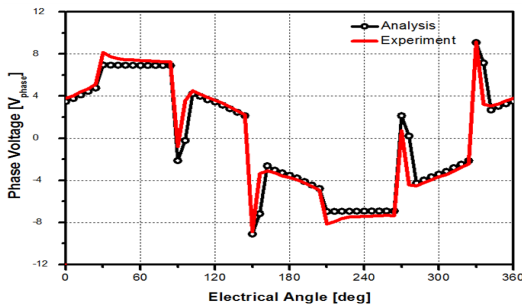


(a) Operating Point A (0.104Nm@2775rpm)

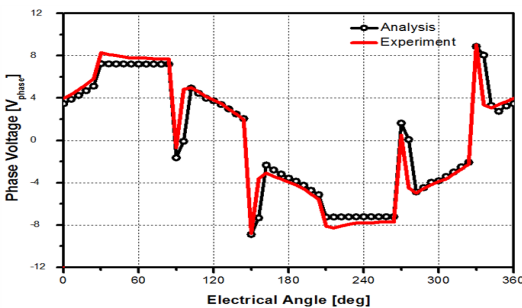


(b) Operating Point B (0.077Nm@3675rpm)

그림 11 해석 결과와 실험 결과의 선전류 파형 비교
Fig. 11 Line current comparison between analysis and experiment result



(a) Operating Point A (0.104Nm@2775rpm)



(b) Operating Point B (0.077Nm@3675rpm)

그림 12 해석 결과와 실험 결과의 상전압 파형 비교
Fig. 12 Phase voltage comparison between analysis and experiment result

4.2 효율 특성 해석

BLDC 전동기의 입력 소비전력을 계산하는 방법은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = \left[\sum_{n=1}^{N/6} v_n \times i_n \times \left\{ \left(\frac{120}{rpm \times p} \right) / N \right\} \right] \times 6 \times \left(\frac{rpm \times p}{120} \right) \quad (8)$$

여기서, N은 과도상태 해석 시 전기각 360° 구간동안 해석되는 데이터의 개수이다. 또한 실험 결과로부터 입력 소비전력을 계산할 때에도 전기각 360° 구간동안의 샘플링 데이터 개수를 N에 대입하면 된다. 본 논문에서 설계된 BLDC 전동기는 6-step 제어 및 Δ-결선을 사용하므로, 전동기 Δ-결선방식의 권선에 인가되는 선간전압 및 선전류는 전기각 60°구간마다 반복적인 패턴으로 인가된다. 따라서 특정한 전기각 60° 구간을 설정하여 선간전압 및 선전류 값을 구하면 식 (8)을 사용하여 입력 소비전력을 계산할 수 있다. 그림 13은 실험 시에 운전점 A에서 인가되는 선간전압 및 선전류 파형과, 식 (8)을 사용한 입력 소비전력 계산을 도식적으로 나타내었다.

전동기의 출력전력은 식 (9)와 같이 토크와 속도로 계산할 수 있고, 효율은 계산된 입력 소비전력과 출력전력으로 식 (10)과 같이 계산된다.

$$P_{out} = T^e \times \omega_m = T^e \times 2\pi \left(\frac{rpm}{60} \right) \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (10)$$

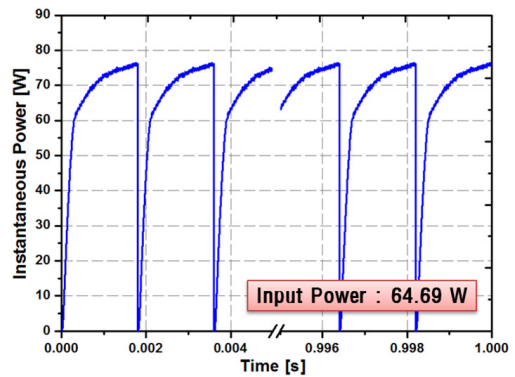
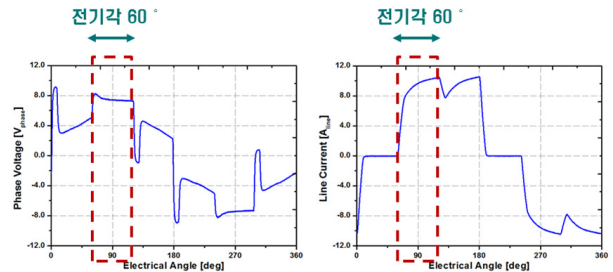


그림 13 운전점 A에서의 입력 소비전력 계산
Fig. 13 Input power calculation at operating point A

표 3 BLDC 전동기의 해석 및 실험 결과 효율 비교
Table 3 Efficiency comparison between analysis and experiment result of BLDC motor

	Operating Point	Input Power [W]	Output Power [W]	Efficiency [%]
Analysis Result	Operating Point A	60.95	30.22	49.59
Experiment Result	0.104Nm @ 2775rpm	64.69		46.72
Analysis Result	Operating Point B	47.01	29.63	63.03
Experiment Result	0.077Nm @ 3675rpm	49.07		60.39

표 3은 설계한 BLDC 전동기 개선모델의 해석 결과와 시제품의 실험 결과를 바탕으로 입력 소비전력 및 출력전력, 효율을 운전점별로 나타낸 것이다. 먼저, 초기모델과 개선모델의 해석결과를 통해 효율을 계산하여 비교해보았을 때, 개선모델에서의 효율이 초기모델 효율에 비해 동손의 증가로 인하여 운전점 A와 B 운전 시 각각 약 2.10%, 2.79% 감소하였다. 전체적으로 비교를 하면, 운전점 A에서의 효율이 운전점 B에서의 효율보다 낮은 결과를 나타내는데, 이 결과는, 비교적 고 토크의 구동으로 인한 높은 입력전류의 인가와 그로 인한 동손의 증가가 원인이라 할 수 있다. 해석결과와 실험결과간의 효율 차이는 운전점 A와 B에서 각각 약 2.87%, 2.64%로 나타나는데, 이 차이는 풍손 및 기계적 마찰손 등이 해석단계에서 고려되지 않았기 때문이라 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위한 고정자 치의 형상 설계를 수행하였다. 그리고 역기전력, 전류, 전압에 대해 전자기적 특성 해석을 수행하였으며, 시제품의 실험 결과를 통해 검증하였다. 또한, 해석 및 실험 결과를 이용하여 효율을 계산하고 비교 및 분석을 수행하였다.

BLDC 전동기 설계 시, 적용된 Δ-결선법에 따라 전기각 60° 평평한 구간을 갖는 사다리꼴 역기전력 파형을 얻기 위한 회전자 영구자석 형상 설계를 우선 수행하였고, 코깅토크를 저감하기 위해 고정자 치에 설계변수를 설정하여 형상 설계를 수행하였다. 그 결과, 형상 개선 모델에서 발생하는 코깅토크는 초기 모델에 비해 약 70%가 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

설계한 BLDC 전동기에 발생하는 역기전력과 주위진 운전점에서 인가되는 전압 및 전류의 전자기적 특성에 대한 유한요소 해석결과와 시제품 실험결과가 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 효율 특성 분석에 있어서도 해석치와 실험치가 비교적 잘 일치하였고, 약간의 오차가 발생하는 것은 풍손 및 기계적 마찰손 등의 영향에 의한 결과라 사료된다. 전동기에 발생한 동손은 효율 증감에 주요한 영향을 미쳤는데, 코일 집적율 향상, 공극 자속밀도 증가 등

의 방안을 전동기 설계 시에 추가적으로 고려한다면 동손을 줄이고 효율을 높일 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업 통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원과(No. 20134010200550) 2013년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음 (2013AA131).

References

- [1] P. Ragot, M. Markovic, and Y. Perriard, "Optimization of Electric Motor for a Solar Airplane Application," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 42, no. 4, pp. 1053-1061, July/August 2006.
- [2] X. Huang, A. Goodman, C. Gerada, Y. Fang, and Q. Lu, "Design of a Five-Phase Brushless DC Motor for a Safety Critical Aerospace Application," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 59, no. 9, pp. 3532-3541, September 2012.
- [3] N. P. Shah, A. D. Hirzel, and B. Cho "Transmissionless Selectively Aligned Surface- Permanent-Magnet BLDC Motor in Hybrid Electric Vehicles," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 57, no. 2, pp. 669-677, February 2010.
- [4] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Hillsboro, OH: Oxford: Magna Physics Pub. ; Clarendon Press, 1994.
- [5] J. H. Choi, J. H. Kim, D. H. Kim, and Y. S. Beak, "Design and Parametric Analysis of Axial Flux PM Motors With Minimized Cogging Torque," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 45, no. 6, pp. 2855-2858, June 2009.
- [6] P. S. Shin, H. D. Kim, G. B. Chung, H. S. Yoon, G. S. Park, and C. S. Koh, "Shape Optimization of a Large-Scale BLDC Motor Using an Adaptive RSM Utilizing Design Sensitivity Analysis," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 43, no. 4, pp. 1653-1656, April 2007.
- [7] M. Fazil, and K. R. Rajagopal, "A Novel Air-Gap Profile of Single-Phase Permanent-Magnet Brushless DC Motor for Starting Torque Improvement and Cogging Torque Reduction," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 46, no. 11, pp. 3928-3932, November 2010.
- [8] H. S. Kim, Y. M. You, and B. I. Kwon, "Rotor Shape Optimization of Interior Permanent Magnet BLDC Motor According to Magnetization Direction," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 49, no. 5, pp. 2193-2196, May 2013.

저 자 소 개



서 경 식(Kyung-Sik Seo)

2013년 성균관대학교 전자전기공학부 졸업, 2013년 ~ 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사과정



정 상 용(Sang-Yong Jung)

2003년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업, 공학박사, 2003년 ~ 2006년 현대자동차 연구개발본부 선임연구원, 2006년 ~ 2011년 동아대학교 전기공학과 조교수, 2011년 ~ 현재 성균관대학교 전자전기공학부 부교수



이 철 균(Cheol-Gyun Lee)

1988년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업, 공학박사, 1993년 ~ 1999년 현대중공업 중앙연구소 선임연구원, 1999년 ~ 현재 동의대학교 전기공학과 교수