

BLDC 모터 고정자 슬롯 형상설계에 관한 연구

(A Study On The Stator Slot Shape Design of BLDC Motor)

한상록* · 이강연 · 정병호**

(Sang-Rog Han · Kang-Yeon Lee · Byeong-Ho Jeong)

Abstract

In this paper, we studied an optimal design and efficiency improvement of the BLCD motor used in home electronic appliance. The number of stator slots is chosen depending on the rotor poles, phase number, and the winding configuration. In general, a fractional slots/pole design is preferred to minimize cogging torque. To reduce the winding resistance, we reduced the coil length and we improved the coil space factor. We proposed three types of stator slot shape design for the optimal BLDC motor design. One of them, U-type slot shape is a best optimal design, it proved by the simulated and tested. Optimal design of essential parameters aiming at high winding factor are presented to create for a high-quality system implementation. Design analysis is verified by testing and building a prototype motor.

Key Words : BLDC Motor, Stator Slot Design, Motor Design Simulation, U-Type Slot Shape

1. 서 론

BLDC(Brushless Direct Current) 모터는 토크생성을 위한 전류(Commutation)를 위해 브러시를 사용하지 않고 제어회로에 의해 전자적인 방식으로 이루어지며 Brushed DC모터나 유도전동기에 비하여 속도 대비 토크, 동적응답특성, 효율, 수명과 소음, 속도제어영역 등의 측면에서 우수한 특성을 가진다. 또한 동

일한 크기의 다른 형태의 모터와 비교하여 상대적으로 큰 토크를 내는 특성으로 인해 공간과 무게에 제약이 있는 응용제품에 유용하게 활용되고 있다[1-2].

다양한 장점으로 인해 높은 활용도를 갖는 BLDC 모터는 에어컨 실외기의 팬모터와 냉장고, 세탁기 등 백색가전 분야에서 에너지 이용효율이 높아 기존의 유도전동기를 대체해나가고 있으며 이러한 백색 가전 기기에 사용되는 모터는 고효율 및 제어의 우수성과 장수명을 통한 제품의 안정성과 신뢰성과 더불어 생산성의 확보가 필수적이다[3-4]. 그러므로 백색 가전 기기용 고효율 BLDC 모터의 대량생산을 위해서는 이론적인 효율증가를 위한 설계방식 뿐만 아니라 생산성, 양품율, 생산단가 등의 다양한 관련요소를 비롯한 생산방법의 용이성과 같은 제반사항이 고려되어야 한

* Main author : Deputy General Manager, Joo Young Jeong Gong Co., Korea
** Corresponding author : Professor, Dept. of Biomedical Engineering, Nambu University, Korea
Tel : 062-970-0254
E-mail : enjoypv@gmail.com
Received : 2014. 9. 14
Accepted : 2015. 2. 26

다[5-6]. 그러나 최근의 연구에서는 모터의 성능최적화를 위해 설계 및 제작방법의 공정기술과 모터의 효율을 상승시키기 위한 설계방법 등이 다양하게 소개되고 있지만 실용화된 제작공정기술을 통해 적용할 수 있는 방법에 있어서는 극히 제한적이다[7-11].

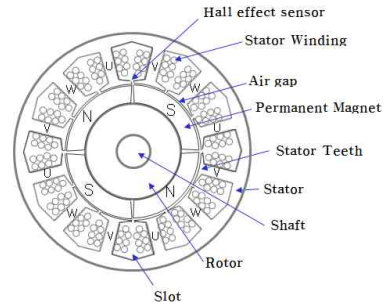
본 연구에서는 세 가지 형태의 최적화된 정렬권선 와인딩을 위한 슬롯형상설계를 제안하였다. 제안된 세 가지 형태의 고정자슬롯형상에 따른 효율분석을 위해 모터설계프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 이 과정을 통해 최적의 슬롯형상설계를 확립하였다. 설계과정을 통해 U-type 슬롯형상설계를 제안하고 최적화된 슬롯형상을 설계 및 제작하고 그에 따른 성능을 분석하였다.

2. BLDC 모터 특성분석

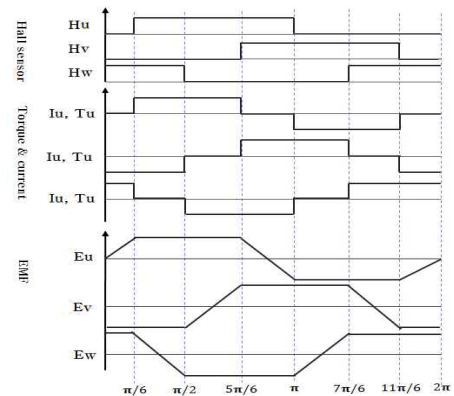
2.1 BLDC모터 기본구조

일반적인 회전계자형 BLDC 모터는 구조적으로 회전자가 영구자석의 형태이고 고정자는 슬롯에 권선을 감는 형태로 구성된다. BLDC 모터의 중심부에 위치한 회전자는 영구자석으로 회전축을 둘러싸는 형태로 이루어진다. 고정자슬롯은 토크발생을 위한 전류를 공급하는 코일을 감을 수 있는 구조로 이루어지며 만약, 이중권선으로 설계될 경우는 톱니가 각각 다른 자기극을 띄게 되므로 각각의 슬롯 권선마다 유입되는 전류에 의한 위상차가 발생한다. 이때 고정자슬롯에 형성되는 자기극이 회전하면서 BLDC 모터의 동특성은 슬롯과 영구자석의 자기극성에 영향을 받는다. 고정자슬롯의 권선에 의해 형성되는 자기장을 전기자반작용장(Armature reaction filed)이라 하며 복수로 차차되어 있는 계자가 회전하는 회전계자형이 성립된다. 그림 1은 기본적인 회전계자형의 BLDC 모터 구조와 회전원리를 나타낸다.

BLDC 모터는 그림 1과 같이 홀센서의 배치에 따라 홀센서 신호가 120°와 60°의 위상차가 있는 형태로 구분되나 구동방식에서는 제어기에서 제어로직을 변환하여 역기전력을 기준으로 동일한 방식을 취하게 된다. 그림 1에서 보는바와 같이 홀센서 출력상태를 조



(a) BLDC motor cross section



(b) Rotation angle direction and EMF waveforms

그림 1. BLDC 모터의 단면구조와 동작파형
Fig. 1. Cross sectional structure and Operation waveforms of BLDC motor

합해 보면 전기각을 60°의 간격으로 나눌 수 있고, 각각의 상태에 따라 BLDC 모터의 U, V, W 각상에 전압을 인가하면 BLDC 모터가 회전하게 된다. 자속에 관한 방정식은 릴럭턴스와 감은수와의 관계에서 결정되며 식 (1)과 같다.

$$\phi = \frac{Ni}{R} \tag{1}$$

드라이브전류와 모터저항에 의한 회전자에 공급되는 전력은 식 (2)와 같다.

$$P_e = k_e h^2 f^2 B^2 \tag{2}$$

여기서 P 는 전력, f 는 주파수이고 k 는 토크상수이다.

2.2 BLDC모터 설계요소

BLDC 모터 최적설계의 의미는 주어진 설계조건 하에서 최적의 비용과 최적의 설계변수 및 생산방식의 효율화를 통한 최적의 설계변수를 조합하는 과정이다. BLDC 모터의 설계 시에 전기적 사양이 결정되면 고정자의 코어의 적층길이와 코어의 치수가 결정되고 그에 따라 권선의 선경과 턴 수가 결정된다. 선경이 결정되면 길이에 따라 저항이 결정된다. 또한 권선은 평균길이를 통해서 권선의 길이를 산출할 수 있다. BLDC 모터의 구조상의 다양한 치수를 통해 모터가 차지하는 공간을 결정하기 때문에 모터의 치수는 시스템구조와 서로 영향을 미치는 변수로 작용한다.

표 1. BLDC 모터 설계조건과 특성결과
Table 1. BLDC motor design condition and result characteristics

구분		전압특성(V)		도체수(Z)	선경(D)
조건	자속	Constant	PxΦ Cont.	Constant	Constant
	도체수	Constant	Constant	-	-
	선경	Constant	Constant	D ² Z에 비례	D ² Z에 비례
결과	Coil 저항	Constant	감소	Z ² 에 비례	D ² 에 비례
	기동전류	V에 비례	증가	Z ² 에 비례	D ² 에 비례
	기동 Torque	V에 비례	증가	Z에 비례	D ² 에 비례
	Torque 상수	Constant	Constant	Z에 비례	Constant
	무부하 회전수	V에 비례	Constant	Z에 비례	Constant
	최대출력	V ² 에 비례	-	-	-

모터의 치수 중에서 회전계자에 장착되는 자석 회전축의 반경, 자석의 두께, 공극의 크기이며 슬롯의 깊이와 고정자의 반경 등 주요 고려 대상이다. 표 1은 BLDC 모터의 설계조건과 그에 따른 특성결과에 따른 반영요소를 정리하여 보여준다.

자속밀도는 자기포텐셜로 표현한 지배방정식을 이용하여 구할 수 있으며 공극과 영구자석 내에서 발생하는 자속밀도 B는 $B = \mu H$ 로부터 회전자의 자속밀도 B_r 과 식 (3)의 관계가 있다.

$$B_m = B_r + \mu_r \mu_0 H_m \tag{3}$$

여기서 μ_0 는 공극의 투자율, μ_r 은 자석의 비투자율이며 아래첨자 m 은 자석영역을 의미한다. 또한 기자력(Magneto motive force, At)는 자속의 크기와 자기저항(Reluctance)에 비례한다. 코일에 의한 자속쇄교에 대한 토크방정식은 식 (4)와 같고 영구자석의 자속은 식 (5)와 같다.

$$F = \phi R \tag{4}$$

$$\phi = B_m A_m = B_r A_m + \mu_{Rl} \mu_0 A_m H_m \tag{5}$$

공극에서의 인덕턴스는 식 (6)과 같고 토크방정식과 같다.

$$L_g = \frac{2\pi \mu_0 L_{st} R_{ro}}{g + \frac{l_m}{\mu_R C_\phi}} N^2 \tag{6}$$

그림 2는 BLDC 모터의 속도와 토크사이에서 선경의 크기(D), 전압(V), 도체수(Z), 극수(P)의 관계를 그래프로 나타냈다. 그래프에서 나타낸 바와 같이 전압이 증가하면 속도와 토크가 높아지며, 도체수가 증가할 경우는 속도와 토크가 동시에 높아진다. 또한 도체수(Z)와 선경(D)이 증가하면 속도와 토크출력특성이 모두 상승한다.

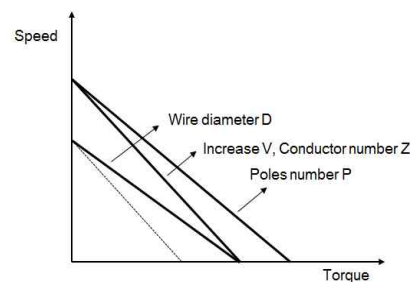


그림 2. 속도와 토크 그래프
Fig. 2. Graph of the relation between speed and torque

2.3 BLDC모터에 적용된 영구자석 특성

소형 BLDC 모터에 사용되는 영구자석은 그 대부분이 성능과 가격을 고려하여 페라이트가 주로 사용하

지만 최근에는 성능이 우수한 플라스틱 네오디뮴을 사용하여 체적을 경박, 탄소화하는 경향이 있다. 그림 3은 네오디뮴과 페라이트자석의 B-H 특성곡선의 비교이다.

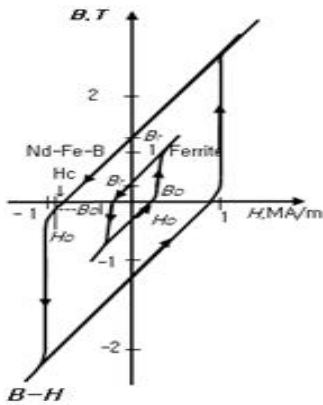


그림 3. 네오디뮴과 페라이트자석의 B-H 특성곡선
Fig. 3. B-H characteristic curve for the neodymium and ferrite magnets

표 2는 페라이트와 네오디뮴의 잔류자속밀도, 보자력 및 온도특성을 비교한 것이다. 페라이트계가 네오디뮴보다 보자력은 낮지만 최고허용온도가 300°C로 페라이트 영구자석이 네오디뮴 최고사용온도 120°C와 비교할 때 상대적으로 우수한 특성을 갖는다. BLDC 팬모터의 고정자 최고온도가 환경조건에 따라 130°C를 넘는 경우는 보자력이 높은 네오디뮴보다는 페라이트계의 적용이 유리하다.

표 2. 네오디뮴과 페라이트자석의 B_r 과 H_c 의 특성비교
Table 2. B_r and H_c characteristics for comparison neodymium and ferrite magnets

규격	잔류자속밀도 B_r (gauss)	보자력 H_c (oersted)	퀴리온도 (°C)	최고허용온도 (°C)
페라이트 (Sr계)	3,600~4,400	2,800 ~5,000	460	300
네오디뮴 (Nd-Fe-B)	10,000~13,000	11,000 ~25,000	320	120

3. BLDC모터의 고정자슬롯 형상설계

3.1 BLDC모터의 고정자슬롯형상 최적설계

BLDC 모터를 설계함에 있어 극수와 슬롯 수의 조합은 모터의 사용 목적 및 구동 방식 등에 따라 초기 설계 단계에서 결정되어야 하는 중요한 요소이다. BLDC 모터 설계에 있어 가장 중요한 파라미터 중의 하나는 역기전력으로써 모터의 출력 및 성능에 큰 영향을 준다. BLDC 모터가 동일한 도체수와 영구자석 체적을 가진다고 할 때 극 수와 슬롯 수의 조합에 따라서 역기전력은 각각 다른 값을 가진다. BLDC 모터의 힘은 권선자체가 아닌 철고정자의 코어에서 발생하고 권선은 자기장으로부터 보호되며 자석과 고정자코일이 직접적으로 상호작용할 때 최대토크가 발생된다. 이때 토크상수는 식 (7)과 같다.

$$K_m = \frac{2NB_g L_{st} R_{ro} I}{\sqrt{I^2 (2R_{slot})}} = \frac{2NB_g L_{st} R_{ro}}{\sqrt{2\rho L_{st} N/A_{wb}}} = \frac{B_g R_{ro}}{\sqrt{\rho}} \sqrt{V_{wb}} \quad (7)$$

여기서 N 은 총유효 턴수, L 은 고정자 적층의 유효 길이, R 은 공극의 반지름, B 는 자속밀도로 네오디뮴의 경우 B_r 이 1.2~1.4T이다. 토크상수는 고정자슬롯 형상설계에 따라 BLDC 모터의 특성에 영향을 미칠 수 있다. 토크는 전류의 크기와 권선의 감은 수에 비례하고 저항에 반비례한다. 토크에 대한 방정식을 풀이하면 식 (8)과 같다.

$$T = kD^2 L = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} \phi^2 \frac{dR}{d\theta} + \frac{d\phi}{d\theta} \quad (8)$$

여기서 D 는 회전자의 직경, L 은 고정자 적층의 유효길이, i 는 전류의 크기, B_g 는 자속밀도를 각각 의미한다. 또한 코깅토크는 식 (9)와 같다.

$$T_{cog} = -\frac{1}{2} \phi^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (9)$$

자석이 장착되는 회전축의 반경, 자석의 두께, 공극의 크기와 치수, 극의 수, 슬롯의 수, 보자력, 전류의

크기, 전류의 위상 수, 권선 수 등이 모터설계에 영향을 미친다.

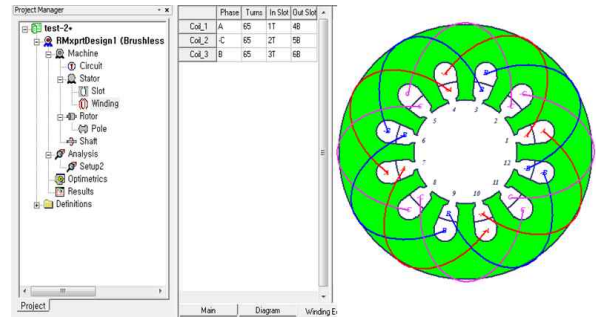
3.2 다양한 고정자형상 설계

	CAD drawing	Simulation drawing
U-type		
D-type		
S-type		

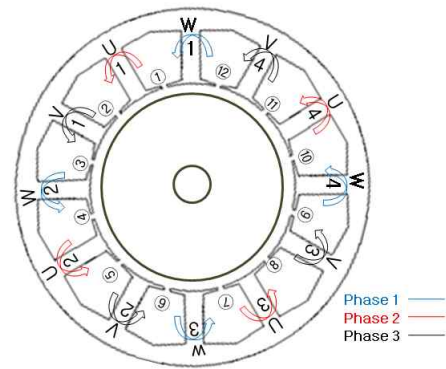
그림 4. 제안된 형태의 슬롯형상 설계
Fig. 4. Proposed slot shape design

이번 연구에서는 최적의 고정자 슬롯의 형상을 설계하기 위해 U-type, D-type, S-type의 세 가지 형상에 대한 고정자슬롯형상에 대해 제안하고 각각의 형상에 대해 모터효율을 분석하였다. 이를 위해 각각의 형태에 대해 CAD설계된 고정자슬롯형상과 모터설계프로그램으로 표현된 코어의 슬롯형상을 도시하였으며 각각의 형상에 대한 CAD도면과 이를 시뮬레이션하기 위한 설계는 그림 4에 나타내었다.

설계된 고정자 슬롯형상에 고정자 코일의 결선을 수행하고 모터의 출력과 효율을 산출한다. 또한 이를 위해 코일의 선경, 종류, 권선방법, 권선 턴 수 등 고정자의 제작에 필요한 각 항목을 변경하여 목표하는 결과값을 도출하도록 하였다. 그림 5는 모터설계 시뮬레이션을 통한 3상 Y결선 결선방법을 도시하였다.



(a) Stator coil winding



(b) Rotation direction

그림 5. 시뮬레이션 프로그램에 의한 Y 결선방법
Fig. 5. Y Winding using the simulation program

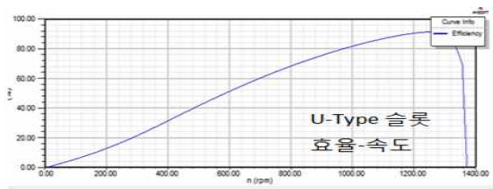
4. 시뮬레이션 및 제작실험 결과

4.1 시뮬레이션 결과

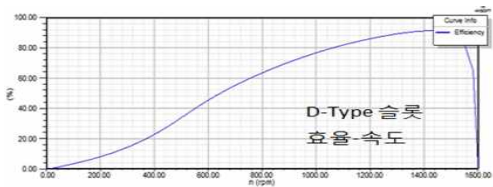
그림 6과 그림 7은 각각 제안된 세 가지 형상에 대해 각각의 모델에 대한 효율-속도, 출력-속도를 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸다. 슬롯형상 최적화설계를 수행한 결과 U-type 슬롯형상의 효율이 가장 높게 나타났다.

그림 8과 그림 9는 각각 세 가지 형상 모델에 대한 출력 380W, 속도 3,000rpm일 때의 코킹토크와 전류파형에 대한 시뮬레이션 결과이다. 토크리플이 큰 경우 모터가 구동할 때 소음 및 떨림이 발생할 수 있으므로 토크리플이 작을수록 모터의 성능은 우수하다.

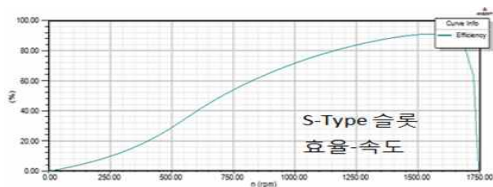
BLDC 모터 고정자 슬롯 형상설계에 관한 연구



(a) U-type slot efficiency vs. speed

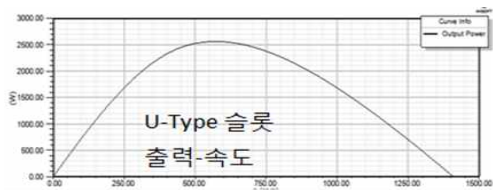


(b) D-type slot efficiency vs. speed

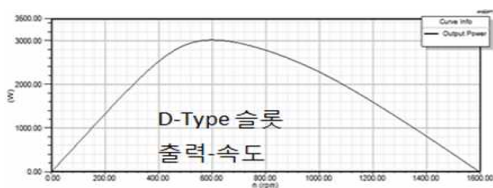


(c) S-type slot efficiency vs. speed

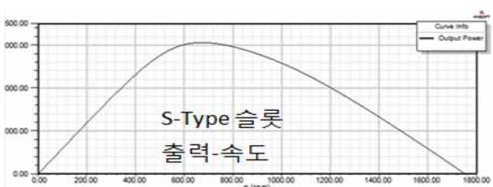
그림 6. 세가지 모델에 대한 효율대 속도곡선
Fig. 6. Efficiency vs. speed curve of three type models



(a) U-type slot output power vs. speed curve

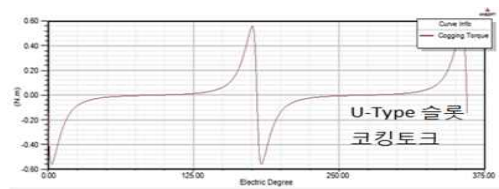


(b) D-type slot output power vs. speed curve

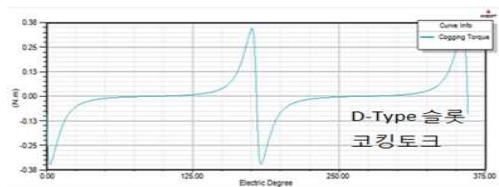


(c) S-type slot output power vs. speed curve

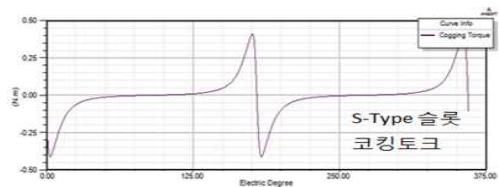
그림 7. 세가지 모델에 대한 출력대 속도곡선
Fig. 7. Output power-speed curve of three type models



(a) U-type slot cogging torque waveform

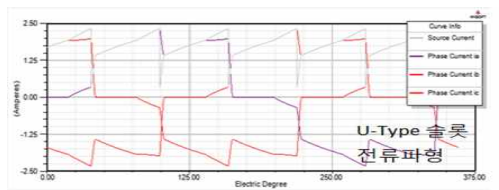


(b) D-type slot cogging torque waveform

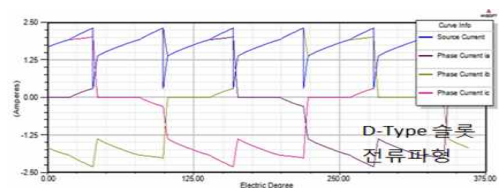


(c) S-type slot cogging torque waveform

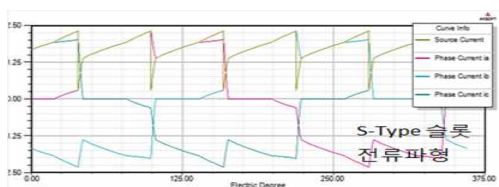
그림 8. 세가지 모델에 대한 코깅토크곡선
Fig. 8. Cogging torque of three type models



(a) U-type slot current waveform



(b) D-type slot current waveform



(c) S-type slot current waveform

그림 9. 세가지 모델에 대한 전류파형
Fig. 9. Current waveform of three type models

표 3은 시뮬레이션의 결과로 고정자슬롯의 세 가지 모델의 성능을 비교한 결과, 출력 380W시 U-type의 효율이 D-type대비 1.1%, S-type 대비 1.7% 높게 나타났다.

표 3. 세 가지 모델의 시뮬레이션을 통한 성능비교
Table 3. Comparison of the simulation data

	Input power (W)	Output power (W)	efficiency (%)
U-type	420.8	380	90.3
D-type	426.1	380	89.2
S-type	428.8	380	88.6

4.2 U-type 슬롯형상의 자속밀도 시뮬레이션

시뮬레이션 결과 가장 효율이 높게 나타난 U-type 모델에 대해 최적화 설계를 위한 분석조건에 따라 3상 BLDC 모터를 8극으로 설계한 파라미터를 표 4에 나타내었다.

표 4. 설계조건에 따른 파라미터
Table 4. Parameter of design condition

Parameter	Value
Poles number	8
Slot number	12
Phases	3-phase
Voltage(V)	DC 310
Current(A(Peak))	1.07
Core materials	35PN230
Magent materials	Ferrite TDK_FB5B
Lamination(mm)	46
Rated speed(rpm)	2700
Winding condition	0.8 × 1reel × 125TC

그림 10은 자속밀도 시뮬레이션으로 자속이 밀집되는 위치는 적색부분 4군데에 자속이 집중되는 것을 확

인할 수 있었다. 모터 설계사양에서 자속밀도는 1.6T 이상일 때 자속포화현상이 나타나고 자속 포화영역에서 전류가 집중되며 이는 효율 저하의 요인이 됨을 확인할 수 있었다. ①②③④모두 근소한 차이가 있지만 자속밀도가 1.1T 정도에서 자속밀도의 분포가 비교적 고르게 형성되었음을 확인하였다.

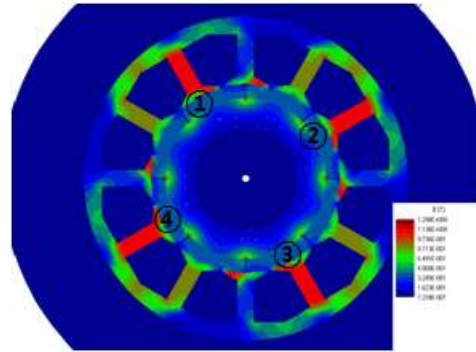


그림 10. 자속밀도 시뮬레이션
Fig. 10. Magnetic flux density simulation

4.3 U-type 슬롯형상의 설계제작 및 실험결과

시뮬레이션결과를 통해 나타난 U-type형상의 최적설계를 검증하기 위해 U-type 고정자 슬롯형상을 갖는 BLDC 모터를 직접 제작하였다. 모터의 최적화 설계를 위한 U-type 슬롯형상의 전류밀도는 권선코일에 전류가 흐를 때 전류의 집중을 의미하고 전류밀도가 3~5A/mm²일 때 최적화 설계되었음을 확인할 수 있었다. 따라서 전류밀도를 3A/mm²로 하였으며 권선의 권선방식은 한 슬롯에 2개의 상이 감기는 2층 권의 구조를 갖도록 하였다. 2층권은 단층권보다 구조적으로 코일이 슬롯에 감기는 면적이 줄어드는 장점이 있어 충진율(Fill Factor)의 최대치를 40%로 설정하였다.

그림 11은 시뮬레이션을 바탕으로 설계된 시제품으로 총중량은 5.2kg, 3상 BLDC 모터로 출력용량이 380W이고 적층 46mm, 고정자 외경 140mm, 내경 60mm, 슬롯수 12슬롯, 선경 0.8mm, 영구자석은 페라이트 5.0mm으로 제작하였다.



그림 11. U-type BLDC모터 시제품
Fig. 11. U-type BLDC motor prototype

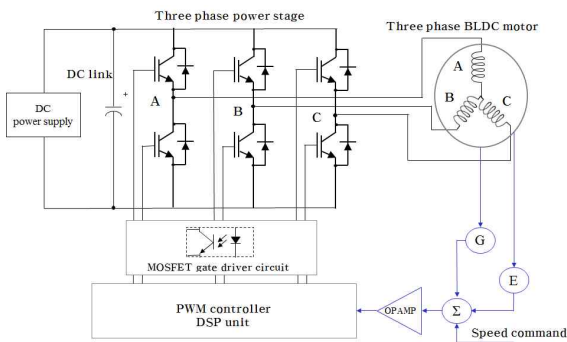


그림 12. 3상 BLDC모터에 대한 IGBT기반 인버터회로
Fig. 12. Schematic of IGBT-based inverter for three-phase BLDC motor

그림 12는 실험에 적용된 3상 BLDC 모터 드라이브 회로와 전력공급스테이지 및 DSP제어유닛을 나타낸다. BLDC 모터가 구동하기 위해 가변 주파수가 3상 전파브리지 인버터에 의해 공급되었다.

BLDC 모터에 전기자 반작용을 발생시키기 위해 영구자석이 부착된 회전자를 고정시키고 고정자에 회전자의 영구자석 극성과 같은 극성이 발생하도록 직류전류를 공급하였다. 고정자에 공급되는 직류전류는 0~5A 범위에서 1A씩 증가시키면서 영구자석의 자속분포를 측정하였다. 모터의 정격전류는 1.5A이지만 전기자 반작용에 의한 감자특성은 5A까지 인가하여 가속시험을 수행하였다. 그림 13은 전기자 반작용에 의한 감자현상은 거의 발견되지 않음을 보여준다.

그림 14는 출력 380W, 속도 3,000rpm, 전압 130V를 인가하여 토크와 효율을 측정한 결과 최고효율 91.3%일 때 전류 1.44A, 토크 1.23Nm임을 알 수 있었다.

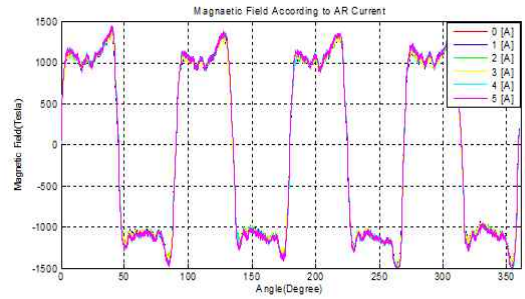


그림 13. U-type BLDC모터의 전류파형
Fig. 13. Current waveform of U-type BLDC motor prototype

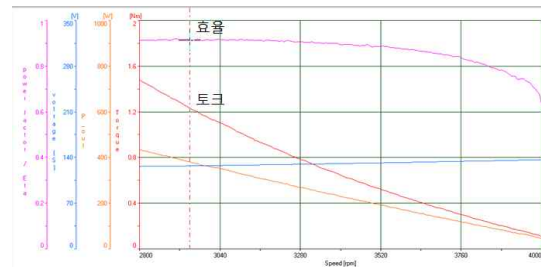


그림 14. 속도에 대한 효율과 토크 특성곡선
Fig. 14. Efficiency vs. Speed & torque vs. Speed characteristics

5. 결론

본 연구에서는 BLDC 모터의 효율을 높이기 위한 방법으로 고정자슬롯의 형상설계를 다양화하여 그에 따른 최적화 설계를 유도하는 과정을 통해 U-type 슬롯형상을 제안하였다. 제안된 형상모델과 함께 제작사양은 고정자의 슬롯 수 12, 극수 8, 적층 46mm, 영구자석은 페라이트자석을 적용하였으며 선경 굵기는 $\Phi 0.8$ 로 와인딩 125턴으로 3상 Y결선으로 설계하였다.

최적화 슬롯형상설계 시제품으로 시험 측정한 결과 효율상승은 약 2% 정도 개선되었으며 슬롯형상을 변경 하였을 때 와인딩작업의 개선으로 인해 효율이 향상된 것으로 파악된다.

본 연구를 통해 확보된 설계기술은 에어컨실외기에 적용되는 팬모터용 영구자석모터의 효율향상을 위한 원천기술 확보와 세탁기, 냉장고등 가전용 전기기기에 적용할 모터설계기술 향상에 기여할 것으로 사료된다.

References

- [1] Byeong-Ho Jeong, A Study on Stator Slot Design for the High Efficiency BLDC Motor, Journal of Advanced Engineering and Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 73-78, Dec. 2013.
- [2] Jung-Moo Seo, Jung-Hwan Kim, Se-Hyun Rhyu, Jun-Hyuk Choi, and In-Soung Jung, A Study on Brushless DC Motor for High Torque Density, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 58, pp 896-900, Oct. 2011.
- [3] B. P. Amuliu, K. Ali, F. Ahmed, L. Wenzhe, D. Min, Analytical model for permanent magnet motors with surface mounted magnets, IEEE Trans. on energy Conversion, Vol. 18, no. 3, pp. 386-391, Sep. 2003.
- [4] Taro Genda, Ismet Rahmad Kartono, Makoto Yoneda, "Basic Performance of Inset Type PMSM", ICEMS, 18th international conference, pp.1-6, 2008.
- [5] Wang, J., Atallah, K., Zhu, Z.Q., Howe, D. Modular three-phase permanent-magnet brushless machines for in-wheel applications. IEEE Trans. Veh. Technol. Vol. 57, pp. 2714-2720, 2008.
- [6] Chung, S. U., Kim, J. M., Koo, D. H., Woo, B. C., Hong, D. K., Lee, J. Y. Fractional slot concentrated winding permanent magnet synchronous machine with consequent pole rotor for low speed direct drive. IEEE Trans. Magn. Vol. 48, pp. 2965-2968, 2012.
- [7] Ishak, D., Zhu, Z.Q., Howe, D. Permanent-magnet brushless machines with unequal tooth widths and similar slot and pole numbers. IEEE Trans. Ind. Vol. 41, pp. 584-590, 2005.
- [8] C-E Kim, M-H Jeon, Optimum Design of BLDC Motor Magnet Using Genetic Algorithm and Response Surface Method, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 18. No. 6, pp. 152-157, 2004.
- [9] Lee, K. S., Kim, K. Y. and Samad, A. Design optimization of low-speed axial flow fan blade with three-dimensional RANS analysis, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, pp.1864-1869, 2008.
- [10] Tae-Kyung Chung, A Study on the Desing of BLDC Motor Replacing Ferrite Magnet with Rare Earth Magnet, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 22. No.4, pp. 121-129, 2008.
- [11] Jun-Hee Han, Su-Min Kang, Tea-Uk Jung, Economical Design of BLDC Pump Motor for Washing Machine, The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 2012 Spring Conference, pp. 243-245, 2012.

◇ 저자소개 ◇



한상록 (韓祥祿)

1966년 1월 19일생. 2014년 남부대학교 디지털정보경영학 졸업(석사). 1986년 3월 ~1996년 4월 삼성전자(주) 선임연구원. 2002년 10월 ~2012년 10월 하남전기(주) 연구소 팀장. 2013년 10월 ~ 현재 (주)주영정공 총괄부장.



이강연 (李康淵)

1970년 3월 2일생. 1997년 조선대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(석사). 2005년 동 대학원 졸업(박사). 2014년 ~ 현재 조선이공대학교 전기과 조교수.



정병호 (鄭炳湖)

1971년 5월 28일생. 1999년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 졸업(박사). 2009년 남부대신·재생에너지기술연구소장. 2011년 ~ 현재 남부대학교 의료공학과 조교수.