

영구자석 형상비를 고려한 영구자석 매입형 BLDC 전동기 설계 및 특성해석

論 文
55B-1-1

Design and Analysis of Characteristics of Interior Permanent Magnet BLDC Motor That Consider Shape-Ratio of Permanent Magnet

尹 勤 榮[†] · 柳 世 鉉^{*} · 梁 炳 烈^{**} · 權 炳 一^{***}
(Keun-Young Yun · Se-Hyun Rhyu · Byoung-Yull Yang · Byung-Il Kwon)

Abstract - Now a day, owing to high efficiency and easy speed control of brushless DC(BLDC) motor, the demand of BLDC motor that has high power and low noises are increasing. Especially demand of interior permanent magnet(IPM) BLDC with high efficiency and high power in electric motion vehicle is increasing. IPM BLDC motor has permanent magnets in the rotor. Because it has two different flux paths, magnetic reluctance differences are generated in d-axis and q-axis. As the result of the inductance differences that are generated by the saliency(magnetic reluctance differences) in the rotor, the motor has structural advantage that has the additional reluctance torque except a magnet torque and because magnet is situated inside the rotor, the mechanical structure is strong. Therefore IPM BLDC motor makes possible to have high speed and high power. This paper presents a design and characteristics analysis of IPM BLDC motor for electric vehicle. To design IPM BLDC motor, surface mounted permanent magnet(SPM) BLDC motor is used as the initial design model. According to the shape-ratio() of permanent magnet, the characteristic of IPM BLDC motor is analyzed by Finite element method (FEM). Characteristics analysis results of the designed motor are compared with the experimental results.

Key Words : IPM, BLDC, 영구자석, 형상비, 매입형

1. 서 론

오늘날 각종 산업분야에서 환경오염이 심각해짐에 따라 무공해 동력원의 필요성이 대두되어, 공장 및 사무 자동화 기기 그리고 가전기기 등의 여러 분야에서 무공해 동력원의 인식이 변화되고 있으며 그 수요가 높아지고 있다[1]. 이에 따라 무공해 동력원용으로 사용되고 있는 전동기 분야에 있어, 고에너지 밀도를 갖는 영구자석의 개발로 영구자석을 사용하는 전동기의 응용분야가 넓어지고 있으며, 지속적인 연구가 이루어지고 있다[2]. 그 중에서도 높은 출력밀도를 갖는 저소음 특성의 Brushless DC(BLDC) 전동기는 고효율 및 제어방법의 용이성으로 인하여 무공해 동력원으로써 인식과 수요가 증대되고 있다[3].

산업분야에서 사용되고 있는 BLDC 전동기는 회전자 표면에 영구자석이 부착되는 영구자석 표면부착형(Surface mounted Permanent Magnet) BLDC 전동기가 주류를 이루고 있으나, 구조적 형상에 의하여 고속 회전시 영구자석이

회전자 표면으로부터 떨어질 수 있는 위험성 및 영구자석의 감자특성에 따른 출력저하의 단점이 지적되고 있다. 특히 일정용량의 전원을 사용하는 무공해 동력원용 BLDC 전동기의 경우 고속화 및 고출력화가 요구되고 있으므로, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 회전자 부분에 영구자석을 삽입함으로써 d-q축 자기저항의 차를 이용하여 단위전류당 토크를 증가시켜 고출력 및 고속화에 적합하도록 하는 연구가 진행되고 있다[4][5].

회전자에 영구자석을 삽입하는 영구자석 매입형(Interior Permanent Magnet) BLDC 전동기는 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기와 비교하여 회전자의 위치에 따라 d축과 q축 인덕턴스 성분이 다르게 나타난다. 따라서 영구자석 매입형 BLDC 전동기는 자석 토크 성분외에 인덕턴스 차이에 의한 추가적인 릴럭턴스 토크 성분을 얻을 수 있어 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기보다 합성 토크가 상승하는 효과가 있다. 또한 영구자석이 회전자 내부에 삽입이 되는 구조이기 때문에 회전자가 고속회전을 할 경우 원심력에 의해 영구자석 회전자 표면에서 떨어지는 현상을 방지할 수 있어 고속운전에 적합하다. 그리고 영구자석이 고정자 권선에 발생하는 열에 의한 직접적인 영향을 적게 받아 영구자석 감자의 위험이 감소되는 장점이 있어 고속 및 고출력 특성을 유지하기 위한 동력원으로서의 활용도가 높다. 따라서 무공해 동력원으로써, 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 설계기법의 필요성이 요구되고 있으며, 국내에서는 전기자동차

[†] 교신저자, 正 會 員 : Atechsolution 技術研究所 主任研究員
E-mail : khito@lycos.co.kr

^{*} 正 會 員 : 電子部品研究員 選任研究員

^{**} 正 會 員 : Samsung DA研究所 選任研究員

^{***} 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 2月 14日

最終完了 : 2005年 11月 16日

용 전동기 개발과 관련하여 영구자석 매입형 동기전동기의 설계 및 특성해석에 대한 연구 및 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 자기회로 및 특성해석에 대한 연구가 이루어지고 있다. 특히 종래의 연구들은 등가자기회로법과 유한요소법을 통하여 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 d축과 q축의 인덕턴스 차이에 따른 특성해석에 대한 내용이 주된 것으로, 인덕턴스의 변화에 따른 최대 토크 및 효율 특성 그리고, 부하전류의 위상각에 따른 속도 및 토크 특성등에 관한 연구가 이루어졌다[6]. 또한 국외에서는 약계자 제어를 고려하여 운전성능 향상을 위한 회전자 형상 설계에 관한 연구와 릴럭턴스 토크를 최대화하기 위하여 영구자석의 위치를 설계하는 연구가 진행되었다[7][8].

본 논문에서는 영구자석 매입형 BLDC 전동기 설계적 측면에서, 시간적 효율성을 높이고자 등가자기회로법을 이용하여 전동기를 설계하고, 유한요소법을 이용하여 영구자석 형상비에 따른 특성해석을 수행함으로써 설계의 정확성을 높이고자 한다. 특히 영구자석 형상비에 따른 특성해석을 통하여 일정한 영구자석의 체적에서 형상비를 변화시킴으로써, 목표 출력 및 효율에 적합한 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 설계가 가능함을 확인한다.

연구대상은 일정용량의 전원을 사용하는 전동차량용 동력 원으로써의 영구자석 매입형 BLDC 전동기로 한다. 그리고 직류 24[V]의 입력전압 조건에 의해 저전압, 대전류의 특성을 갖는 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 설계하기 위하여, 등가자기회로법의 범용적 설계 정식화가 이루어져 있는 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기의 설계기법을 토대로 전동기의 설계 제원을 결정하고 설계제원과 동일한 기계적 공극 및 영구자석의 체적을 갖는 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 설계한다. 또한 설계되어진 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 제작하고, 제작된 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 역기전력, 토크 그리고, 전류특성 등의 전동기 특성을 유한요소 해석값과 실측값을 비교함으로써 설계의 정확성을 검증한다.

2. 영구자석 매입형 BLDC 전동기 설계

2.1 등가자기회로법을 이용한 전동기의 기본설계

영구자석이 회전자 안에 삽입된 형태의 영구자석 매입형 BLDC 전동기는 d축과 q축의 자속 경로가 다르기 때문에 d축과 q축의 자기저항 차가 발생한다. 또한 d축 자로에 비해 q축 자로의 전기자 반작용 자속에 의한 릴럭턴스가 더 크게 되어, 회전자는 돌극성이 존재하는 구조를 지니게 된다. 이러한 구조는 자로의 릴럭턴스와 고정자의 인덕턴스는 반비례 관계이므로, 돌극성의 차이에 따라서 인덕턴스의 차이가 발생을 하게 되어 자석 토크 이외에 추가적인 릴럭턴스 토크가 발생하는 구조적 장점을 가지고 된다. 그리고 자석이 회전자 내부에 위치함으로써 기계적인 구조가 견고하며, 고속회전시 원심력에 의하여 영구자석이 떨어져 나가는 현상을 방지할 수 있어 고속 및 고출력 특성을 유지하기 위한 전동기로서의 활용도가 높다. 또한 속도제어범위가 넓으며 고속에서의 속도 및 위치 제어특성도 우수하다[9].

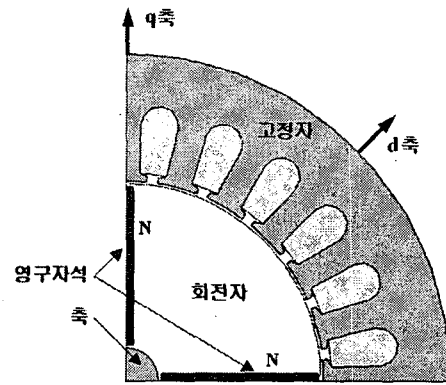


그림 1 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 구조
Fig. 1 The cross-section of IPM BLDC motor

그림 1은 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 단면도이고, 그림 2는 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 전체적인 설계 과정을 나타낸다. 등가자기회로법을 이용하여 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기를 설계한 후에 설계된 회전자 제원으로부터 동일한 영구자석 체적을 유지하면서 출력과 효율을 만족하는 영구자석 형상을 유한요소법을 이용하여 설계함으로써 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 설계한다[10].

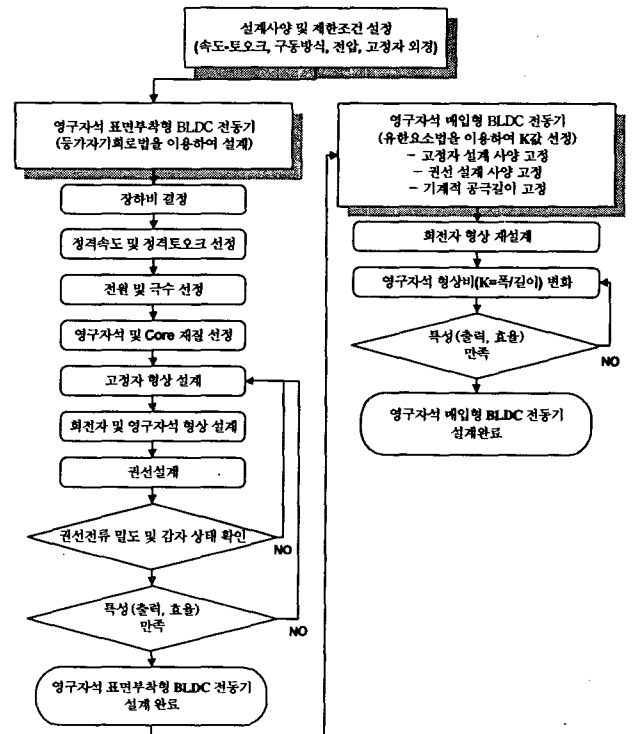


그림 2 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 설계 과정
Fig. 2 Design process of IPM BLDC motor

본 논문에서는 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 설계 목표를 정격전압 24[V-dc], 출력 600[W], 효율 80[%]로

하였다.

전동기 설계에 있어 전기자 설계는 기존의 유도전동기의 전기자를 사용함으로써 설계의 수순을 단순화 하였다. 따라서 전기자는 외경 120[mm], 내경 73[mm]로 하였으며, 전기자 치부분에 대한 형상치의 적합성을 검증하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석을 통해 자속밀도에 의한 손실정도를 확인하였으며, 전기자 및 영구자석에서의 자속 분포를 통해 영구자석의 감자상태를 확인함으로써 전기자 치부분의 형상치가 적합함을 검증하였다. 또한 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 영구자석의 형상은 자속집중화에 유리한 Spoke type을 채택하였다.

영구자석 매입형 BLDC 전동기는 구조적 특징으로 인한 릴럭턴스 토크와 전자기적 토크의 비선형적 발생으로 인하여 출력 및 가변속 범위를 만족하는 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 직접적으로 설계하는 것은 시행 착오의 부담성을 가중시킬 수 있다. 따라서 등가자기회로법의 범용적 설계 정식화가 이루어져 있는 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기의 설계기법을 토대로 영구자석 매입형 BLDC 전동기 전동기를 설계하게 된다[11].

등가자기회로법의 범용적 설계기법인 장하분배법을 이용하여 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기를 먼저 설계한다. 장하분배법이란 토크크식을 전기장하와 자기장하로 분리하여 그 비를 결정하고 전기장하, 자기장하 중 하나를 먼저 결정한 후 나머지를 설계해 나가는 방법을 말하는 것으로, 평형 m상 BLDC 전동기에서 발생되는 토크크식은 다음과 같다[12].

$$\tau = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \cdot 2p\phi_g \cdot 2mK_w \omega l \quad (1)$$

식 (1)에서 p 는 극쌍수, ϕ_g 는 유효자속, m 은 상수, K_w 는 권선계수, ω 는 1상당의 전기자 직렬권수를 의미한다. 전체 토크크식은 전기장하와 자기장하의 곱의 형태를 이루는데 $2mK_w \omega l$ 는 전기장하(전기자의 암페어도체수), $2p\phi_g$ 는 자기장하(공극에서의 전 자속수)를 나타낸다. 전기장하는 전기자의 전류와 권선턴수의 곱, 자기장하는 공극에서의 총자속수를 의미한다. 전기장하 및 자기장하의 비(장하비= M)는 일반적인 전기기기 설계에서 경험적으로 결정되며, 장하비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{2p\phi_g}{2mK_w \omega l} \quad (2)$$

식 (2)에서 장하비를 70으로 놓고[13], 전동차량용 동력원의 용도를 고려하여 정격속도를 3,000[rpm]으로 결정한 후에 장하분배법의 다양한 식을 이용하여 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기를 설계하였을 경우, 설계된 전동기의 설계 사양은 표 1과 같다. 또한 그림 3은 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기의 단면도를 나타낸다.

표 1 SPM type BLDC 전동기 설계사양

Table 1 The specification of SPM BLDC motor

항 목	사 양	항 목	사 양
입력 전압	직류 24[V]	공극길이	0.5[mm]
정격 출력	600[W]	병렬회로수	4[Parallel]
정격 속도	3,000[rpm]	계자극각도	0.83[rad]
상 수	3[Phases]	영구자석	Nd소결[Br=1.2T]
극 수	4[Poles]	영구자석 체적	75.4[mm ²] *40[mm]

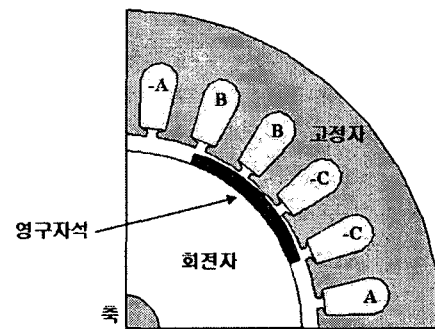


그림 3 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기의 구조

Fig. 3 The cross-section of SPM BLDC motor

설계된 전동기는 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기는 전동차량 구동용으로 저전압, 대전류의 입력전력 조건을 고려하여 병렬회로수를 선정하였으며, 대전류에 따른 고정자 권선에서의 전류밀도를 고려하기 위하여 권선방향을 분포권으로 하였고, 입력전압은 120° 구형과 구동방식을 선택하였다.

2.2 유한요소법을 이용한 영구자석 형상 설계 및 특성 해석

설계 목표에 만족되게 설계된 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기 설계사양을 가지고 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 설계하기 위해서는, 동일한 영구자석의 체적을 유지하면서 목표출력과 효율을 만족하는 영구자석 형상비(K)를 결정하여야 한다. 영구자석 형상비(K)는 영구자석의 폭(a)과 길이(b)의 비를 의미하며, 식 (3)과 같다[14].

$$K = \frac{a}{b} \quad (3)$$

표 1의 설계제원을 갖는 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기로부터 특성의 중요인자로 작용하는 영구자석의 형상변화에 따른 성능고찰을 위하여, 유한요소법을 이용한 특성해석을 수행한다[13].

특성해석을 위하여 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 유한요소 해석하기 위한 지배방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = -J_z - \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_r}{\partial x} + \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (4)$$

여기서, A_z 는 자기벡터포텐셜의 z 축 성분, J_z 는 권선의 전류밀도, M_x, M_y 는 잔류자화량을 나타낸다. 해석대상이 z 축 방향으로 무한하다고 가정하면, A 와 J 는 z 축 방향으로만 존재하게 된다.

영구자석이 회전자 안에 삽입된 형태의 영구자석 매입형 BLDC 전동기는 d축과 q축의 자속 경로가 다르기 때문에 d축과 q축의 자기저항 차가 발생한다. 또한 d축 자로에 비해 q축 자로의 전기자 반작용 자속에 의한 릴럭턴스가 더 크게 되어, 회전자는 돌극성이 존재하는 구조를 지니게 된다. 이러한 구조는 자로의 릴럭턴스와 고정자의 인덕턴스는 반비례 관계이므로, 돌극성의 차이에 따라서 인덕턴스의 차이가 발생을 하게 되어 자석 토오크 이외에 추가적인 릴럭턴스 토오크가 발생하는 구조적 장점을 가지고 된다.

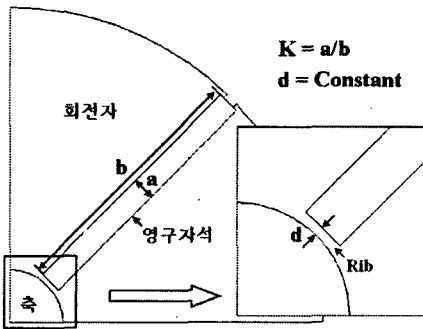


그림 4 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 회전자 단면도
Fig. 4 The rotor structure of IPM BLDC motor

그림 4는 영구자석 매입형 BLDC 전동기 회전자 형상을 나타낸다. 영구자석의 동일 체적을 유지하기 위하여, 그림 4에서 축과 회전자에 삽입되어진 영구자석과의 거리 d 를 일정하게 유지하며 영구자석의 길이와 폭의 비율(K)만을 변화하였다. d 는 Rib의 두께를 나타내며 Rib은 자속이 누설되는 것을 방지하고, 자속 경로를 보장해 주는 역할을 한다.

표 2 형상비(K)에 따른 영구자석 매입형 BLDC 전동기 성능비교

Table 2 The comparison of characteristics by shape-ratio(K)

$K(=a/b)$	B_g [T]	전류 [A]	토오크 [Nm]	속도 [RPM]	출력 [W]	효율 [%]
0.083(2.5/30.16)	0.93	32.57	1.98	2983.37	618.16	79.09
0.090 (2.6/29.00)	0.93	32.32	1.96	2998.97	616.65	79.50
0.097 (2.7/27.93)	0.94	33.12	1.99	3012.73	628.73	79.10
0.104 (2.8/26.93)	0.95	32.98	1.96	3029.79	622.46	78.65
0.112 (2.9/26.00)	0.96	34.07	1.99	3047.42	637.95	78.01
0.119 (3.0/25.13)	0.98	33.96	1.97	3064.92	632.83	77.61

또한 포화정도 및 기계적 가공성을 고려하여 Rib의 두께를 0.5[mm]로 고정하였다. 형상비에 따른 특성해석은 유한요소법을 이용하였으며, 특성결과는 표 2와 같다.

위의 표 2는 동일한 부하토오크(1.91[Nm])가 주어졌을 경우의 해석결과를 나타내며, 전류 값은 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 선간전류를 의미한다. 표 2의 특성해석 결과를 통하여 영구자석의 형상비가 커질수록 전동기의 속도 대역은 커지나, 효율은 작아지는 경향으로 나타남을 확인할 수 있다. 또한 설계목표인 출력 600[W], 효율 80[%]의 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 특성을 동시에 만족하기 위해서는 K 값이 0.09인 경우임을 알 수가 있다. 따라서 등가자 회로법을 통한 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기의 설계사양으로부터 설계목표에 적합한 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 설계하기 위하여, 표 2에서 K 값이 0.09인 폭 2.6[mm], 길이 29[mm]의 영구자석 형상을 선택한다.

3. 영구자석 매입형 BLDC 전동기 특성해석

3.1 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 특성

유한요소법을 이용하여 $K=0.09$ 의 영구자석 치수를 갖는 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 대상으로 유한요소해석을 통한 세부적인 특성을 분석함으로써, 설계모델의 타당성을 검토한다.

그림 5, 6은 유한요소법에 의한 역기전력 및 코강 토오크 특성을 나타낸다. 자속이 회전자극 표면에 집중되어 역기전력 파형에 심한 슬롯 고조파 특성이 발생됨을 알 수 있으며, 상당 역기전력의 크기가 약 10.53[V]로 유기되므로 권선설계가 타당함을 확인할 수 있다.

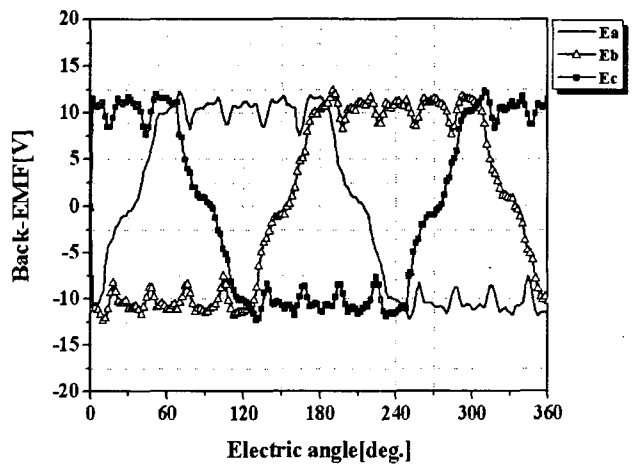


그림 5 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 역기전력(3,000 [rpm])
Fig. 5 The Back-EMF of IPM BLDC motor(at 3,000rpm)

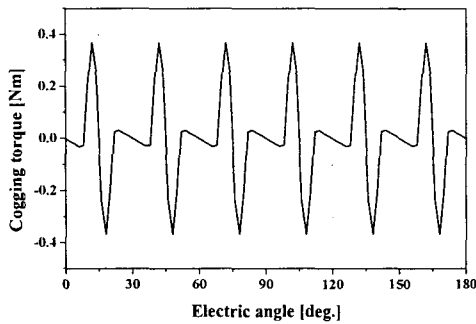


그림 6 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 코깅 토크
Fig. 6 The cogging torque of IPM BLDC motor

그림 7, 8은 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 전류 및 토크 특성을 나타낸다. 그림 7의 전류파형에서 상당 평균 전류값이 약 30.82[A]로 나타나고 있으며, 또한 그림 8에서 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 토크 특성을 통하여 평균 토크는 약 1.89[Nm]로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

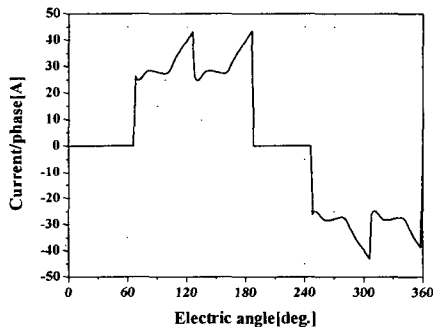


그림 7 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 전류 특성
Fig. 7 The characteristic of the current

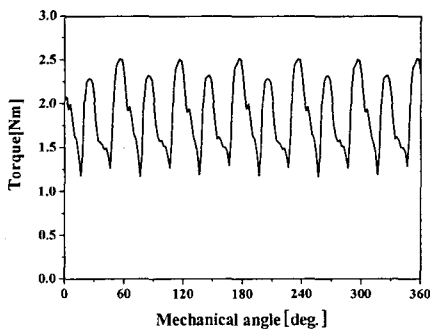


그림 8 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 토크 특성
Fig. 8 The characteristic of the torque

3.2 시제품 제작 및 특성 실험

영구자석의 형상비인 $K=0.09$ 를 갖는 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 시제품을 제작하였고, 제작된 시제품의 사양은 표 3과 같다.

표 3 시제품의 사양

Table 3 The specification of sample motor(IPM BLDC motor)

항목	사양	항목	사양
입력 전압	직류 24[V]	회전자 외경	72[mm]
상 수	3[Phases]	적층 길이	40[mm]
극 수	4[Poles]	축 직경	12[mm]
병렬회로수	4[Parallel]	영구자석	Nd소결 [Br=1.2T]
공극 길이	0.5[mm]	영구자석체적	2.3*29 *40[mm ³]

그림 9는 영구자석을 삽입한 회전자 구조를 나타내며, 그림 10은 고정자와 회전자를 조립하여 완성된 시제품을 나타낸다. 그림 11은 제작된 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 속도, 토크 및 전류에 대한 특성을 측정하기 위한 실험장치를 보여주고 있다.

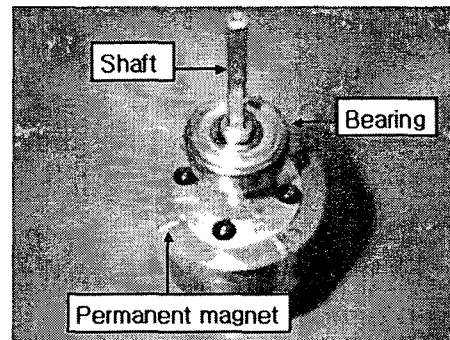


그림 9 영구자석이 삽입된 회전자
Fig. 9 The rotor inserted permanent magnets

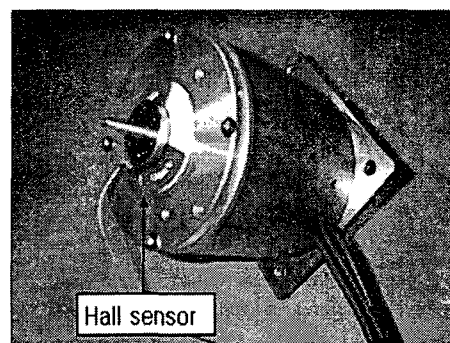


그림 10 완성된 시제품
Fig. 10 Sample motor

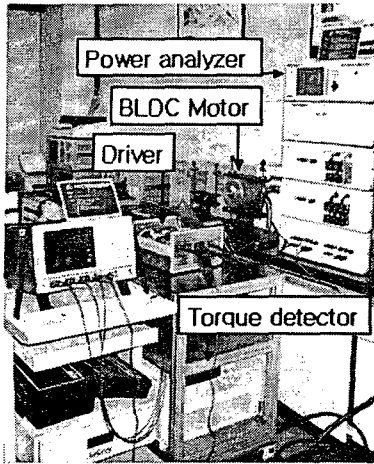


그림 11 속도-토크-전류 실험 장치도
Fig. 11 Measuring instruments for experiment

그림 11의 실험장치를 통하여 제작된 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 코깅 토크 및 역기전력을 측정하였고, 다이내모미터를 이용하여 부하에 따른 출력특성실험을 하였다. 그림 12는 회전속도 1,000[rpm]에서 역기전력 파형을 나타내며, 그림 13은 측정된 코깅 토크이다.

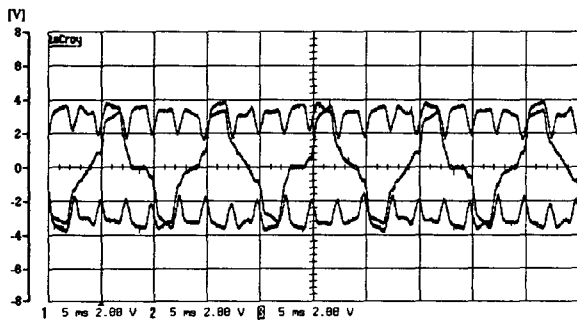


그림 12 시제품의 역기전력(1,000rpm)
Fig. 12 The Back-EMF of the sample motor(at 1,000rpm)

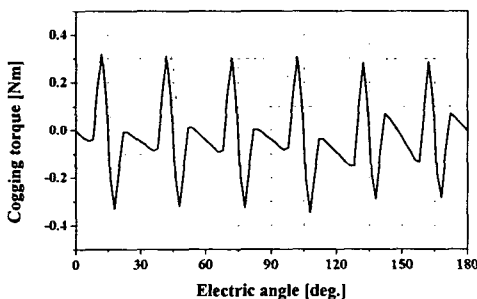


그림 13 시제품의 코깅 토크
Fig. 13 The cogging torque of the sample motor

역기전력 파형 및 코깅 토크 결과값의 해석값인 그림

5, 6과 실측값인 그림 12, 13을 비교하였을 경우, 유사함을 확인 할 수 있다. 또한 실측된 코깅 토크는 커플링의 상태 및 영구자석의 착자 상태로 인하여 해석치보다 다소 차이가 발생함을 볼 수 있다. 그림 14, 15는 운전시 발생하는 부하특성을 측정된 결과를 나타내는데, 부하를 가변하며 이에 따른 출력 및 효율특성을 실측하였고 또한 파워미터를 통하여 전류 및 입력전력 특성을 계측하였다. 그림 14, 15를 통하여 정격부하지점(1.89[Nm])에서 실험결과의 출력과 효율이, 유한요소법을 이용하여 해석한 결과인 표 2(592[W])와 비슷하게 나오고 있음을 확인할 수 있다.

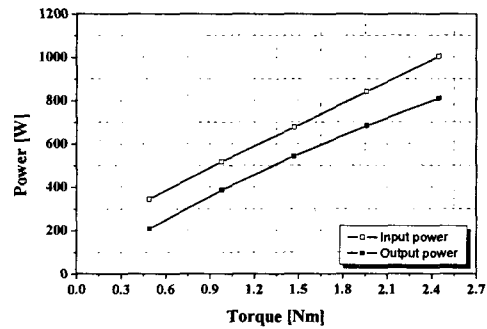


그림 14 부하 토크에 따른 출력특성
Fig. 14 Power characteristics according to load torque

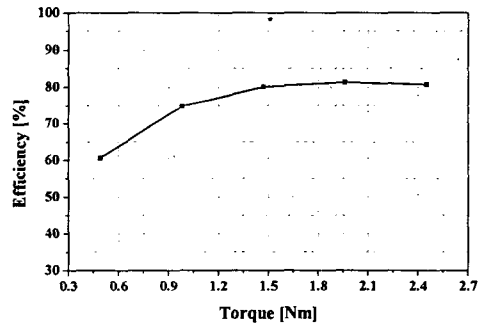


그림 15 부하 토크에 따른 효율특성
Fig. 15 Efficiency characteristics according to load torque

3. 결 론

본 논문에서는 등가자기회로법과 유한요소법을 이용하여 고속 및 고출력의 동력원에 적합한 영구자석 매입형 BLDC 전동기를, 영구자석의 형상비를 고려하여 설계하였다.

영구자석 매입형 BLDC 전동기를 설계하기 위해, 등가자기회로법의 범용적 설계 정식화를 통하여 설계목표를 만족하는 영구자석 표면부착형 BLDC 전동기를 설계한 후, 설계된 전동기 사양으로부터 제한된 영구자석 체적을 유지하면

서 동시에 목표출력 및 효율 등 설계목표를 만족하는 영구자석 형상비를 결정하기 위하여 영구자석의 형상 변화에 따른 특성해석을 유한요소법을 통하여 수행하였다. 이로부터 동일체적의 영구자석을 유지하면서, 형상변화에 따라 출력 밀도를 높일 수 있는 설계가 가능함을 확인 할 수 있었다. 또한 유한요소법을 통하여 해석된 특성결과와 제작된 시제품의 특성 실험결과의 비교를 통하여 출력 및 효율측면에서 잘 일치됨을 확인함으로써 영구자석 형상비에 따른 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 설계가 타당함을 검증하였다.

고속화 및 고출력에 유리한 영구자석 매입형 BLDC 전동기는 영구자석이 회전자 내부에 있으므로 회전자 내부의 일정 부위에 자속이 밀집되어 자속이 포화되고, 높은 자속밀도에 의하여 코강 토오크가 표면부착형 전동기와 비교하여 높다는 단점을 가지고 있다. 이러한 코강 토오크는 전동기의 운전시 진동 및 소음의 발생 원인이 되는데, 코강 토오크 저감에 대한 연구가 추후에 이루어져야 할 것으로 사료된다. 이와 같은 연구를 통하여 고출력 및 고속화에 적합하면서 소음과 진동문제 등에 유리한 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 활용도가 더욱 높아지리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] T.J.E Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motor, Clarendon press, Oxford, 1994
- [2] S.A. Nasar, I. Boldea, L.E.Unnewehr, Permanent Magnet, Reluctance, and Self-synchronous Motors, CRC press, 1993
- [3] Kyung-Tae Kim, Kwang-Suk Kim, Sang-Moon Hwang, Tae-Jong Kim, Yoong-Ho Jung, "Comparison of magnetic forces for IPM and SPM motor with rotor eccentricity," IEEE Transactions on , Vol 37, pp3448-3451, September 2001
- [4] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, Mauro Zigliotto, "High-performance PM synchronous motor drive for an electrical scooter," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, pp. 1348-1355, September 2001
- [5] T. Ohnishi, N. Takahashi "Optimal Design of Efficient IPM Motor Using Finite Element Method," IEEE Transactions on Motor Using Finite Element Method," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, pp. 3537-3539, September 2000
- [6] 박정우, 구대현외, "전기자동차용 바퀴일체형 전동기 및 제어기 개발", 한국전기연구소 보고서, 1998. 보고서
- [7] F. Rahman, R. Dutta "A new rotor design of interior permanent magnet machine suitable for wide speed range." Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE, vol. 1, pp. 699-704, November 2003
- [8] S. Kawano, H. Murakami, N. Nishiyama, Y. Ikkai, Y. Honda, T. Higaki "High performance design of an interior permanent magnet synchronous reluctance motor for electric vehicles." Power Conversion Conference - Nagaoka 1997. vol 1, pp. 33-36, august 1997
- [9] 조동혁, "Auto-Tuning 니칭 유전 알고리즘을 이용한 매입형 영구자석 전공기의 설계" 서울대학교 박사학위 논문. 2001
- [10] S. Wang, J. Kang, "Shape Optimization of BLDC Motor Using 3-D Finite Element Method." IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 36, No. 4, pp 11119-1123, July 2000
- [11] 大天光吉, 永久磁石磁氣回路の設計・特性計算法 II活用編, 綜合電子リサーター, 1987
- [12] 大天光吉, 페라이트 磁石回轉機의 設計, 東逸出版社, 2002
- [13] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1986
- [14] 강규홍, 이병국, 허진, "자속 집중형 Spoke Type 영구자석 BLDC 전동기의 자기회로 및 특성 해석" 전기의 세계, 제53권3호, pp 135-142, 2004

저 자 소 개



윤근영 (尹勤榮)

1977년 9월 15일생. 2003년 한양대 전자 컴퓨터공학부 졸업. 2005년 한양대 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(석사) 2005년~현재 Atechsolution 기술연구소 주임연구원

Tel : 031-350-8174

Fax : 031-350-8190

E-mail : khito@lycos.co.kr



양병렬 (梁炳烈)

1973년 6월 21일생. 1999년 한양대 전기 공학과 졸업. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 동 대학원 전자전기제어계측공학과 박사과정, 삼성전자 가전연구소 선임연구원

Tel : 031-218-5178

Fax : 031-218-5196

E-mail : yangcom@hanmail.net



류세현 (柳世鉉)

1970년 11월 16일생. 1996년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 박사 수료. 1999년 1월~현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 선임연구원.

Tel : 032-621-2848

Fax : 032-621-2855

E-mail : rhyush@keti.re.kr



권병일 (權炳一)

1956년 2월 1일 생. 1981년 한양대 전기 공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 동경대 대학원 졸업(공학박). 1990년 도시바(주) 시스템 소프트웨어 연구소 연구원. 1991년 한국 기계연구소 자기 부상 열차 사업단 선임연구원. 1991년~ 현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수

Tel : 031-400-5165

Fax : 031-406-5073

E-mail : bikwon@hanyang.ac.kr