

외경 3mm급 브러시리스 DC 모터의 설계 및 제작에 관한 연구

정인성, 김주한, 최준혁, 허 진, 심하경
전자부품연구원 정밀기기연구센터

Design and Fabrication of a Brushless DC Motor with 3mm Outer Diameter

In-Soung Jung, Joo-Han Kim, Jun-Hyuk Choi, Jin Hur, Ha-Gyeong Sung
Precision Machinery Research Center, Korea Electronics Technology Institute

Abstract - A design and fabrication result of a ultra-small brushless DC motor is presented. The outer diameter of the motor is 3mm. This motor is designed to 3 phase coreless winding, and operated with synchronous type driver. The experimental results for back EMF value, static torque and speed characteristics are presented and discussed.

2. 본 론

1. 서 론

사회 및 기술의 발전에 따라 모터의 종류 및 크기도 매우 다양화되고 있으며, 이러한 모터의 한가지 발전 방향으로 초소형화를 들 수 있다. 모터의 초소형화는 정보통신분야, 의료분야 등의 사회적 신규수요 증가 및 정밀 제작기술의 발전에 따라 지속적으로 발전하고 있다.

현재 외경 4mm급의 브러시 부착형 DC 모터가 휴대폰의 진동모터로서 널리 사용되고 있으며, 의료기기용 특수용도를 겨냥하여 이보다 더 작은 모터의 개발 사례들이 스위스, 일본 등에서 보고되고 있다[1],[2].

초소형 모터의 가장 큰 수요분야로는 우선적으로 정보기기 분야를 들 수 있다. 과거 정보기기의 주된 발전방향은 PC용 HDD, FDD, ODD, VCR, 프린터 등의 정지형 기기들을 중심으로 이루어졌으며, 이러한 기기에 채용되는 모터는 주로 고속화 및 고정밀도화가 주된 기술 흐름이었다. 최근에는 각종 정보기기들이 소형화 및 이동기기화(모바일화) 되면서 모터의 고속/고정밀화와 함께 소형/박형화가 함께 요구되고 있다. 노트북의 각종 정보장치, 디지털 카메라, 캠코더 등의 각종 구동모터들이 그 예로서, 현재 6 ϕ , 4 ϕ 의 모터들까지 채용이 되고 있으며, 초소형화에 대한 기술적 트렌드는 지속될 것으로 예상된다. 또한 카메라 부착 핸드폰의 광학 줌을 위한 구동모터로서 초소형 모터가 검토되고 있으며, 휴대정보기기 연료전지 내의 펌프용 모터 등으로 연구되는 등 향후 휴대폰, 노트북, PDA 등의 정보단말기에 대한 초소형 모터의 요구는 증가할 것으로 예측된다.

이밖에 산업용 정밀기기, 의료기기 분야, NT 관련 산업분야, 엔터테인먼트 분야, 군사 및 우주항공 분야 등 다양한 산업분야에 초소형 모터가 적용될 것으로 예상되고 있다. 인체삽입 내시경, 마이크로 펌프, 마이크로 비행기, 마이크로 로봇 등이 이러한 분야에서의 초소형(극소형) 모터 수요분야의 일례들이다.

초소형 모터 개발을 위해서는 모터 설계기술, 정밀 가공 및 조립기술, 특성평가기술 등이 필요하다. 본 논문에서는 정밀 기계가공 기술로 접근할 수 있는 목표 사양으로서 외경 2mm급의 모터 및 유성치차형 감속 기어헤드 개발을 목표로 하여 진행하고 있는 연구의 중간 결과물로서 외경 3mm급의 브러시리스 DC 모터를 설계, 제작한 결과를 제시하고, 이에 대한 기초적인 성능 평가결과를 제시하고자 한다. 또한 초소형 또는 극소형 모터를 개발하는 과정에서 향후 보완 연구되어야 할 내용들에 대하여 논하고자 한다.

2.1 국외 초소형 모터의 개발사례

현재 크기면에서 가장 작은 모터는 MEMS 기술을 이용한 靜電형 모터로서 회전자 지름이 수백 μ m 수준으로서, 토크는 pNm 수준인 것으로 보고되고 있다[3].

전자기력을 이용한 電磁형 모터로는 외경 1mm 이하의 것은 보고되지 않고 있으며, 현재까지는 약 2mm 수준이 세계 최소의 모터이다. 여러 논문에 발표된 내용들을 보면 지름 수 mm 이하의 모터를 제작하기 위하여 스테핑 방식, wobble 방식, axial BLDC 방식, radial BLDC 방식 등 여러 구조가 시도되고 있으며, MEMS 기술을 이용하여 電磁형 모터(발전기)를 제작한 사례들도 보고되고 있다.

이러한 모터들중 상용화에 근접한 모터들을 살펴보면, 스위스 minimotor (Faulhaber Group)의 외경 1.9mm의 코어리스형 BLDC 모터가 있다. 본 모터는 외경 1.9mm, 길이 5.5mm이며, 무부하 최고속도는 100,000rpm, 최대토크는 7 μ Nm 수준인 것으로 보고되고 있다. 또한 본 모터에는 외경 1.9 ϕ 의 유성치차형 기어헤드가 부착되어 있어 토크의 증대를 꾀하고 있다. 일본의 나미끼(Namiki)社에서는 외경 2.0mm의 모터에 외경 2.4mm의 기어헤드를 부착한 BLDC 모터를 개발하였으며 센서리스 구동방식이다. 이밖에 스위스에서 외경 3.0mm의 코어리스 방식 BLDC모터가 보고된 바 있다.

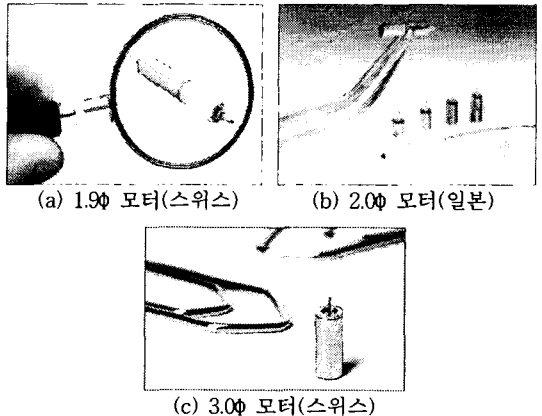


그림 1. 초소형 모터의 개발사례들

2.2 초소형 BLDC 모터의 설계

보통의 모터는 치/슬롯 구조의 철심을 사용하는 슬롯형으로 제작되고 있으며, 코깅토크 등이 문제시되는 경우에는 슬롯리스형으로 제작이 된다. 그러나 모터의 크기가 작아지면 치/슬롯 구조를 구현하기가 매우 어려워지기 때문에 본 연구에서는 슬롯리스형으로 설계를 진행하였다. 코일체를 제작하는 방법으로는 극세선 코일을

사용하여 권선하는 방법과 에칭 등의 방법으로 코일체 형상을 제작하는 방법으로 크게 나눌 수 있으며, 점적을 및 제작성 측면에서는 극세선 코일을 이용하는 것이 유리하다. 극세선 코일을 이용하여 코일체를 제작하는 방법에는 그림 2와 같이 빗살무늬형, 마름모형, 육각형 방식 등의 연속적 권선방법과 이 있다. 본 설계 과정에서는 제작성 및 특성에 대한 다각적 검토 후에 육각형 방식으로 결정하였다.

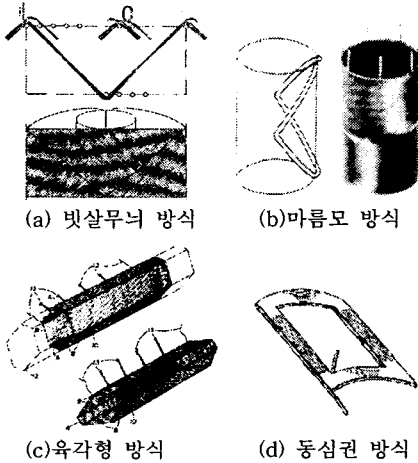


그림 2. 권선형태별 슬롯리스 권선체의 종류

회전자를 구성하는 영구자석은 Nd 소결 재질을 선정하였다. 슬롯리스 구조이기 때문에 가능한 높은 성능의 영구자석을 채용하였으며, 이 경우 다극 착자는 현실적으로 불가능하기 때문에 영구자석의 극수는 2극으로 결정하였다.

본 모터는 권선체의 형태가 3차원적이기 때문에 단순한 2차원적 해석방법으로는 해석의 오차가 크게 된다. 간단한 방법으로는 권선계수를 도입하여 3차원적 형상을 보정할 수 있겠으나, 본 연구에서는 3-D EMCN법[4]을 사용하여 코일체의 3차원적 형상을 고려하였다. 코일체에 흐르는 전류에 의한 발생자속을 해석하기 위하여 각 코일에 대하여 공간적 기자력 분포 함수를 Fourier 급수 형태로 유도하였으며, 전체 코일체에 의한 기자력은 이러한 각 코일들의 합으로서 구하였다. 식(1)은 코일 1개에 대한 기자력(magneto-motive force)을 나타내고 있다.

$$F(\theta, z, t) = \left(\sum_{n=1,3,5} \frac{2NI(t)}{n\pi} \sin \frac{n\theta}{r} \right) \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{2} \left(\frac{l_c}{l_i} + 1 \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2l_i}{(m\pi)^2 (l_i - l_c)} \left(\cos \frac{l_c}{l_i} m\pi - (-1)^m \right) \cos \left(\frac{m\pi}{l_i} z \right) \sin \phi \right)$$

2.3 초소형 BLDC 모터의 제작

그림 3은 설계된 외경 3mm급 초소형 모터의 단면도를 나타내고 있으며, 샤프트를 제외한 모터의 길이는 8mm로 결정하였다.

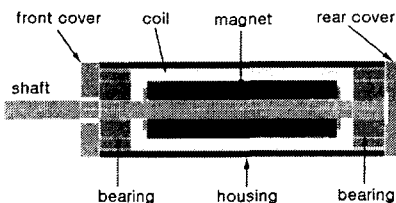
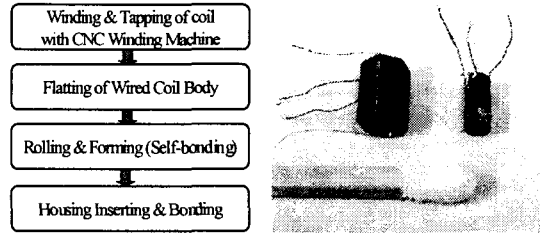


그림 3. 설계된 초소형 모터의 단면도

베어링으로는 함유소결 베어링을 채택하였으며, 샤프트의 경은 0.6mm로 설계하였다. 영구자석은 Nd 소결을 사용하였으며, 공극은 0.1mm 수준이다.

그림 4는 코어리스 권선체의 제작 순서도 및 제작된 권선체의 사진을 나타내고 있다. 권선은 0.035mm 굵기의 에나멜용착선(self-bonding wire)을 사용하였으며, 육각형의 Jig에 권선후 납작하게 하는 공정과 원형으로 말아서 형태를 완성하는 forming 공정을 거친 후에 하우징에 삽입되어 접착제로 접착된다. 3상 코일의 결선은 전기적으로 120도마다 tap을 넣으므로 Δ -결선 방식으로 구성되게 된다. 그림 5는 최종 조립된 외경 3mm, 길이 8mm급 모터의 외관을 나타내고 있다.



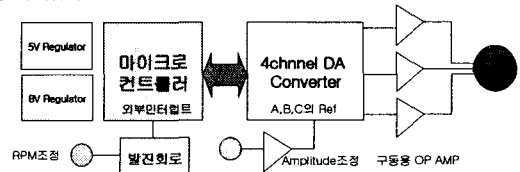
(a) 권선체의 제작순서 (b) 완성된 권선체(우측)

그림 4. 코어리스 권선체의 제작

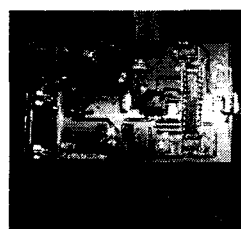


그림 5. 제작 조립된 초소형 BLDC 모터 외관

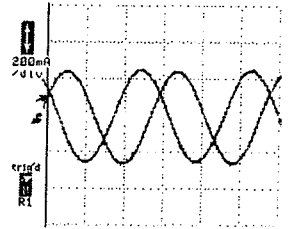
그림 6은 모터의 구동을 위하여 제작된 싱크로너스 방식의 구동 드라이버의 블록도 및 출력 전류파형을 나타내고 있다[5]. 모터의 크기가 매우 작기 때문에 통상의 Brushless 구동을 위한 위치센서를 취부하는 것이 어렵기 때문에 회전자의 탈조에 상관없이 임의의 주파수를 가지는 출력을 발생하여 모터를 구동하는 싱크로너스 방식을 사용하고 있으며, 현재 위치센서 없이 센서리스 알고리즘을 이용한 센서리스 구동방식에 대한 연구를 병행 중에 있다.



(a) 싱크로너스형 드라이버의 블록도



(b) 제작된 드라이버



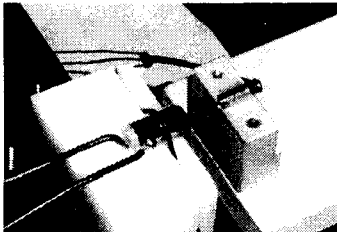
(c) 출력 전류파형(2상분)

그림 6. 제작된 싱크로너스형 구동 드라이버

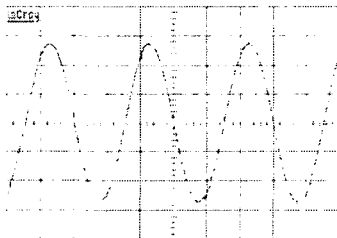
2.4 시작품의 성능평가 결과

제작된 모터의 역기전력 특성을 평가하기 위하여 그림 7(a)와 같이 마이크로 DC 모터를 이용하여 강제 회전을 시켜가면서 역기전력을 측정하였다. 그림 7(b)는 10,000 rpm으로 회전시켰을 경우의 역기전력 파형으로서, 정현적인 형태를 가지며, 계산결과 역기전력 계수는 0.02 mV_{rms}/rpm으로 나타났으며, 이를 이용하여 토크상수를 계산하면 19×10⁻⁶ Nm/A로 나타났다.

그림 8은 시작 모터의 두 단자에 일정 DC 전류를 흘리는 상태에서 회전자를 서서히 회전시켜가며 정토크를 측정하는 결과이다. 사용된 측정장비는 Full Scale 5 mNm 급의 코깅토크 측정기로서, 상용 측정기로는 매우 작은 사양이다. 모터가 작고 발생토크도 작은 관계로 축의 커플링 및 정렬이 쉽지 않아 커플링 손실을 함께 파악하기 위해 DC 전류를 수 초마다 on/off 시켜가면서 측정하였으며, 그 결과를 그림 8(b)에 나타내었다.



(a) DC 모터를 이용한 역기전력 측정장면

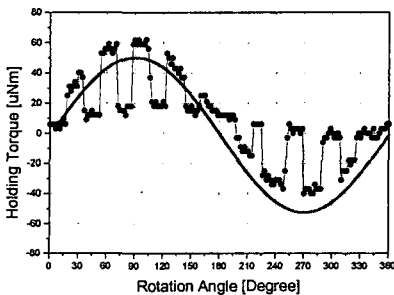


(b) 선간 역기전력 파형(0.02mV_{rms}/rpm)

그림 7. 시작 모터의 역기전력 측정



(a) 미소토크 측정장비를 이용한 정토크 측정장면

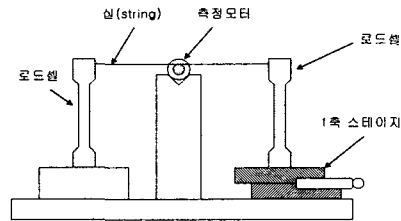


(b) 정토크 측정결과(실선:해석치)

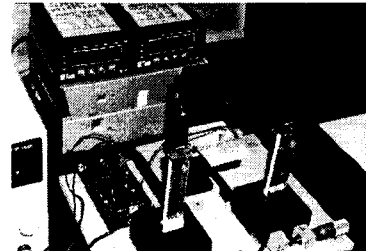
그림 8. 일정전류(180mA) 입력에 대한 정토크 측정

평가결과 역기전력 측정으로부터 유추한 토크상수보다는 다소 큰 값을 얻었는데, 이는 고속회전시 모터 하우징에 발생하는 와전류로 인하여 토크상수가 낮게 평가 되는 것으로 추측되며, 보다 다각적이고 정밀한 평가가 필요한 것으로 판단된다.

그림 9는 회전시의 모터 토크를 평가하기 위한 측정장치를 나타내고 있다[6]. 로드셀과 실을 이용하여 모터에 인가되는 부하력을 측정하는 방식이며, 이를 이용하여 일정 회전속도에서 부하를 서서히 증가시켜가면서 모터가 정지하기 직전의 토크를 계속하는 방법으로 측정하였다. 2.5 V_{max}의 상전압을 인가하여 측정된 무부하 회전속도는 약 50,000rpm으로 나타났으며, 10,000rpm 영역에서 측정된 최대토크는 약 40μNm(0.41gfc_m)로 평가되었다.



(a) 초소형 모터용 N-T-I 측정장치의 개략도



(b) 시작 모터의 N-T-I 측정장치 세트

그림 9. 시작 모터의 N-T-I 특성 측정장면

3. 결 론

본 논문에서는 초소형 Brushless DC 모터의 제작 및 평가기술에 대하여 논하였다. ø3×8mm급의 시작 모터를 제작하여 역기전력, 정특성, 구동특성 등에 대한 기초적 평가 결과를 제시하였다. 향후 모터의 기계적 손실분석, 제작공차에 따른 특성변화, 하우징에서의 와전류에 의한 영향, 모터의 온도상승 특성 및 과도 동특성 등에 대한 보다 상세한 연구 및 분석이 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 정보통신부에서 지원하는 Electro 0580 사업에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] <http://www.minimotor.ch>
- [2] <http://www.namiki.co.jp>
- [3] K. Hameyer, R. Belmans, "Design of very small electromagnetic and electrostatic micro motors," IEEE Trans. on Energy Conv., vol. 14, pp. 1241-1246, 1999.
- [4] J. Hur, I. S. Jung, D. S. Hyun, "Lateral characteristic analysis of PMLSM considering overhang effect by 3D equivalent magnetic circuit network method," IEEE Trans. on Magn., vol. 34, pp. 3142-3145, 1998.
- [5] 이종배, 성하경, 정인성, 임준홍, "위치센서를 갖지 않는 초소형 BLDC 모터의 구동 방법", 대한전기학회 추계학술대회, pp. 240-242, 2002.
- [6] 정인성, 성하경, "마이크로 모터의 미소토크 측정에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회, pp. 27-29, 2002.