

마이크로 모터 핸드피스를 위한 BLDC 전동기 제어시스템 개발

(A Development of the Control System of BLDC Motor for Micro Motor Handpiece)

백원식^{1*} · 송현직¹ · 김민희¹ · 김동희² · 이현욱³ · 황돈하⁴

(Won-Sik Baik · Min-Huei Kim · Hyun-Jig Song · Dong-Hee Kim, Heon-Uk Lee, Don-Ha Hwang)

영남이공대학¹, 영남대², 대영정밀³, 한국전기연구원⁴

Abstract

The permanent magnet BLDC motors are increasingly being used in high performance applications due to the high torque density and simplicity in their control. In this paper, the control system of the BLDC motor is developed which can be used for the micro motor handpiece, and position sensorless control is realized using back EMF measurement scheme. The validity and practical applications of the developed slotless BLDC motor and drive system are verified through the experimental results.

1. 서 론

최근 산업기술의 발전에 힘입어 산업 전반적인 분야에서 주요 동력원으로 전동기가 널리 적용되고 있으며, 가전이나 의료기기 분야로도 다양하게 활용되고 있다.

마이크로 모터 핸드피스(micro motor hand piece)는 전동기 축에 대상물의 재질이나 작업의 종류에 따라 다양한 형태의 바(bar)를 장착하여 절삭, 연마, 광택 등의 작업을 하기 위해 사용된다. 최고 50,000[rpm]의 고속으로 회전하는 핸드피스는 귀금속 공예나 네일아트 및 금형과 전자부품산업 등에 다양하게 적용되고 있다.

핸드피스를 위한 전동기로는 속도제어가 용이하고 제작비용이 비교적 저렴한 직류전동기가 적용되고 있으나, 정류자와 브러쉬로 인한 분진발생과 정기적인 유지보수의 필요성 등으로 인한 문제점으로 최근 브러쉬리스 직류전동기(BLDC motor)를 적용한 핸드피스 제품이 선진국을 중심으로 개발되어 시판되고 있다.

본 논문에서는 치과기공용 마이크로 모터 핸드피스를 위한 BLDC 전동기 제어시스템 개발에 관해 연구하였으며, 소형 전동기에 적합한 슬롯리스 BLDC 전동기와 제어 드라이브를 제작하여 실험을 통해 성능을 검증하였다.

2. 핸드피스용 BLDC 전동기

2.1. BLDC 전동기의 수학적 모델

BLDC 전동기는 토크밀도가 높고 속도제어가 용이하기 때문에 가변속 제어용 전동기로의 적용이

점차적으로 확대되고 있다. 3상 BLDC 전동기의 고정자 권선의 전압방정식은 다음과 같다[1][2].

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)의 R , L , M 은 각각 고정자 권선의 저항, 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스를 나타내고, e_a , e_b , e_c 는 역기전력을 나타낸다. BLDC 전동기의 출력 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

식 (2)의 ω_r 은 전동기의 회전속도를 나타낸다. BLDC 전동기의 토크-속도 특성은 직류전동기와 동일하며, 식 (2)로부터 토크는 전압과 전류의 곱에 비례함을 알 수 있다. 부하토크 T_L 이 인가된 경우 전동기의 속도는 다음과 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (3)$$

식 (3)의 J 는 전동기와 부하의 관성(inertia)을 나타내고, B 는 베어링 등에서의 마찰계수를 의미한다.

그림 1과 같이 역기전력이 사다리꼴 형태인 BLDC 전동기는 역기전력이 정현파 형태인 영구자석형 동기전동기(PMSM)와 구분된다. BLDC 전동기는 자속의 최대

값이 동일한 경우 PMSM에 비해 자속의 실효값이 높기 때문에 토크밀도가 약 15[%]정도 높은 장점이 있다[2].

BLDC 전동기는 회전자 자극위치에 동기된 전류가 고정자 권선에 흐름으로써 회전력을 발생하며, 그림 1은 이상적인 역기전력과 전류 및 스위칭 시퀀스를 나타내고 있다. 그림과 같은 회전자 위치에서 고정자 권선에 맥류파 형태의 전류가 흐를 경우 일정한 회전력이 발생한다.

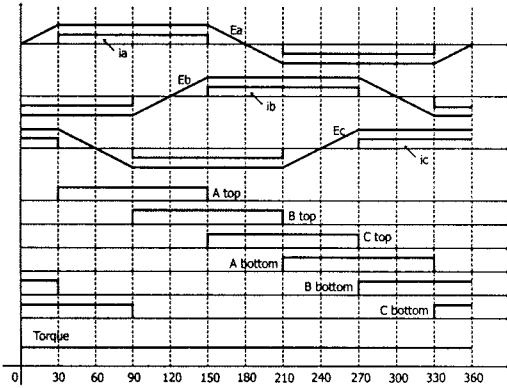


그림 1. BLDC 전동기의 스위칭 시퀀스
Fig. 1. Switching sequence for a BLDC motor

2.2. 핸드피스용 BLDC 전동기

마이크로 모터 핸드피스는 사용자가 손에 쥐고 정밀 가공 작업을 하는 공구이므로 소형으로 제작되어야 하며, 치과 기공용 핸드피스의 경우 50,000[rpm]의 고속 운전에서 0.02[Nm]이상의 토크를 발생시킬 수 있어야 한다[3]. 그림 2와 같은 슬롯리스 타입의 BLDC 전동기는 고정자 권선이나 회전자의 영구자석을 장착하기 위한 공간이 보다 많이 확보되므로, 요구특성에 부합되는 전동기를 소형 경량으로 제작할 수 있다[4][5].

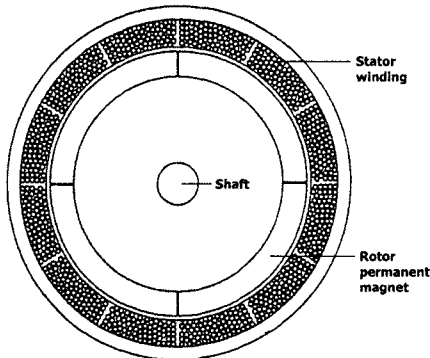


그림 2 슬롯리스 BLDC 전동기
Fig. 2 Slotless BLDC motor

슬롯리스 BLDC 전동기는 슬롯이 있는 일반적인 BLDC 전동기에 비해 응답속도가 빠르고, 고속에서 와전류 손실이 적어 열이 적게 발생하는 장점이 있으며, 중량을 54[%]정도 저감할 수 있는 것으로 알려져 있다[4].

2.3. BLDC 전동기의 센서리스 제어

BLDC 전동기는 회전자 자극위치에 동기된 전류가 고정자 권선에 흐름으로써 회전력을 발생하므로, 회전자 위치정보를 필요로 한다. 홀센서나 레졸버 등과 같은 회전자 위치검출장치는 전동기의 크기와 제작비용을 증가시키는 요인이 되고, 전동기와 구동드라이브 간에 부가적인 리드선을 필요로 한다. 또한 주위 온도 등과 같은 사용 환경이나 접점 불량 등으로 인해 신뢰성이 저감되는 단점이 있다. 핸드피스의 경우에는 작업의 용이성을 위해 전동기와 구동 드라이브 간의 케이블의 길이가 비교적 길고, 작업 중에 케이블이 움직이므로 센서리스 제어방식을 적용함으로써 제작비용의 절감과 제품의 신뢰성 향상이 가능하다.

회전자 위치검출장치로 인한 이러한 단점을 극복하기 위해 회전자 위치센서 없이 전동기를 구동하기 위한 다양한 센서리스 제어기법이 제안되고 있다. 본 논문에서는 고정자 권선에 유기된 역기전력을 통해 회전자 위치를 추정하는 기법을 구현하였다[6]. 구현된 센서리스 제어기법은 그림 3과 같이 고정자 권선의 상전압과 중성선 전압을 비교하여, 상전압이 중성선 전압과 같아지는 지점을 통해 회전자 위치를 추정하였다.

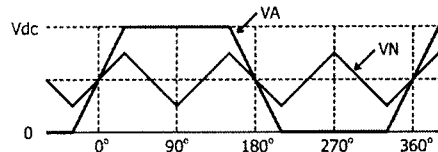


그림 3 회전자 위치 추정 기법
Fig. 3 Rotor position estimation scheme

3. 시제품 제작 및 실험결과

3.1. BLDC 전동기 제어시스템 제작

그림 4는 기존의 마이크로 모터 핸드피스에 적용되는 직류전동기의 회전자 형상을 나타내고 있으며, 회전자 코어에 권선이 감겨있고 정류자가 장착되어 있다. 그림 5와 6은 슬롯리스 BLDC 전동기의 고정자와 회전자를 나타내고 있으며, 그림 7은 제작된 BLDC 전동기의 제어보드를 나타내고 있다. 그림 8은 BLDC 전동기 제어시스템의 블록도를 나타내고 있으며, Microchip 사의 PIC16F877A를 적용하여 제어시스템을 구성하였다.

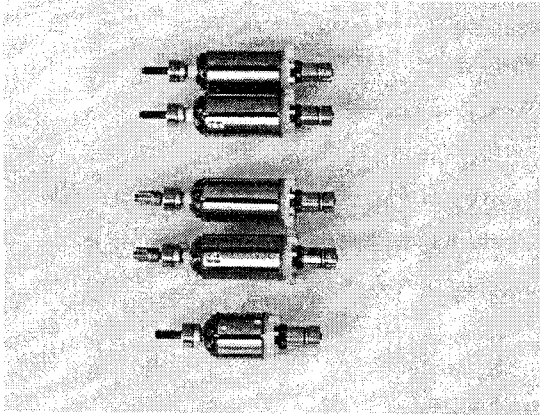


그림 4. 핸드피스용 직류전동기의 회전자 형상
Fig. 4. Rotor shape of the DC motor for hand piece

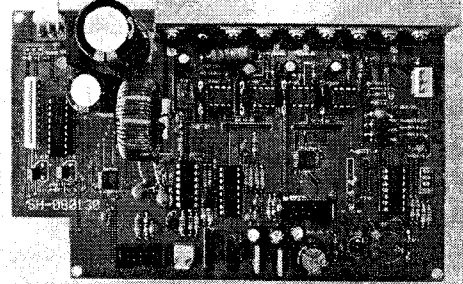


그림 7. BLDC 전동기 제어 보드
Fig. 7. Control board of the BLDC motor

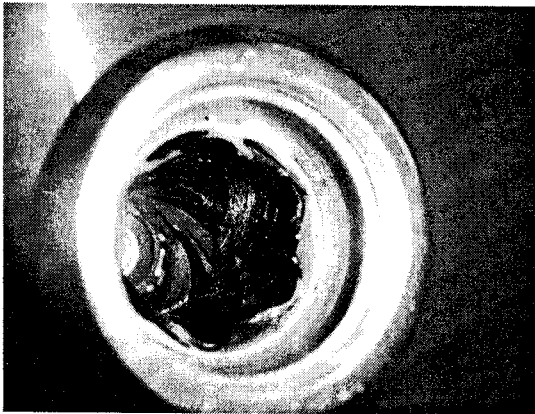


그림 5. 슬롯리스 BLDC 전동기의 고정자 형상
Fig. 5. Stator shape of the slotless BLDC motor

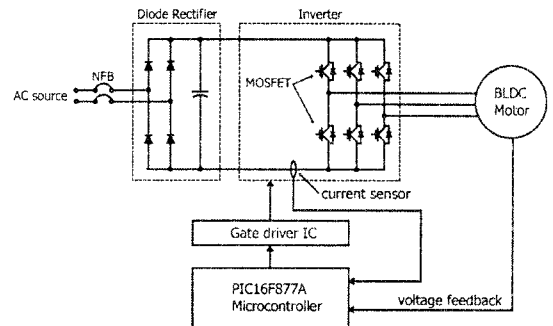


그림 8. BLDC 전동기 제어시스템의 블록도
Fig. 8. Block diagram of the BLDC motor control system



그림 6. BLDC 전동기의 회전자 형상
Fig. 6. Rotor shape of the BLDC motor

3.2. 실험결과

그림 9는 사다리꼴 형태의 고정자 권선의 역기전력 파형을 나타내고 있으며, 그림 10은 추정된 회전자 위치의 동기신호를 나타내고 있다. 그림 11은 3상 인버터의 상단 MOSFET의 스위칭 제어신호를 나타내고 있으며, Active-low로 동작된다. 그림 12는 BLDC 전동기의 입력전압 파형을 나타내고 있으며, 그림 13은 속도에 따른 DC-link 전압의 변화를 나타내고 있다. 핸드피스는 고속으로 구동하기 때문에 PWM 방식을 적용하지 않고, 전동기의 회전속도에 따라 입력전압의 크기를 가변시키는 PAM 방식을 적용하였다.

4. 결론

본 논문에서는 마이크로 모터 핸드피스에 적용하기 위한 BLDC 전동기 제어시스템 개발에 관해 연구하였다. 소형 경량의 슬롯리스 타입의 BLDC 전동기와 마이크로 컨트롤러를 적용한 제어 드라이브를 제작하였으며,

센서리스 방식의 제어시스템을 구현하였다. 개발된 제어시스템을 바탕으로 핸드피스의 고속운전과 새로운 센서리스 제어기법에 대해 연구할 계획이다.

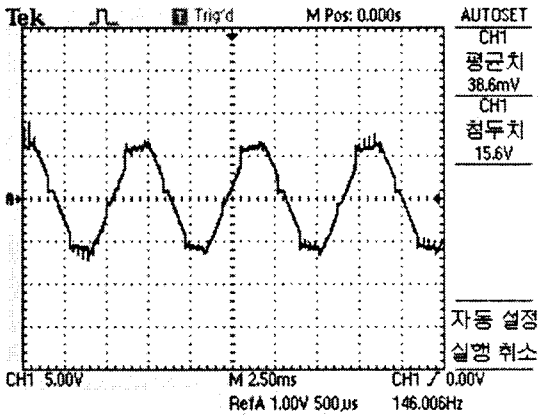


그림 9. 고정자 권선의 역기전력 파형
Fig. 9. BEMF waveform of the stator winding

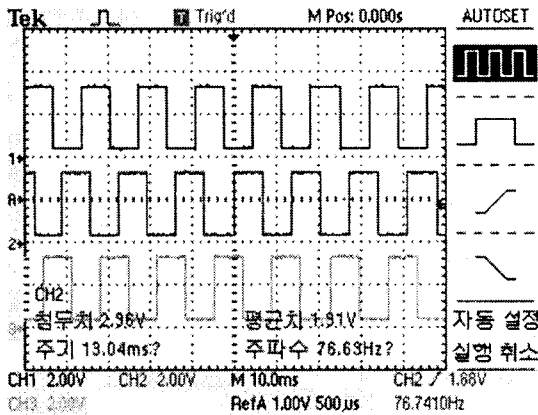


그림 10. 추정된 회전자 위치 동기 신호
Fig. 10. Estimated rotor position synchronous signal

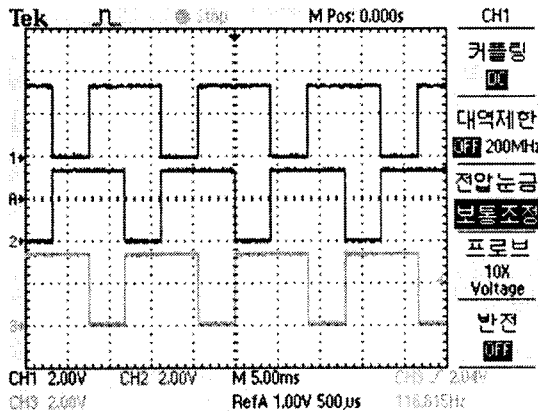


그림 11. 3상 스위칭 제어신호
Fig. 11. 3-phase switching control signal

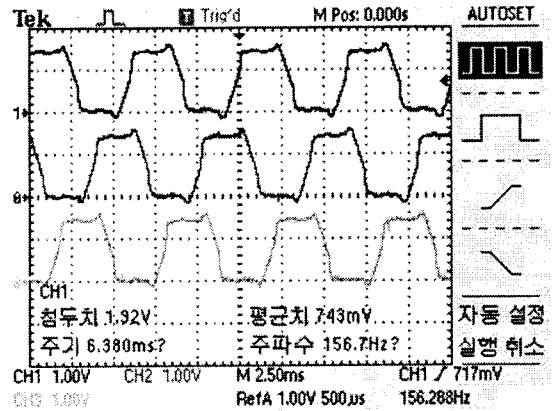


그림 12. BLDC 전동기의 입력전압 파형
Fig. 12. Input voltage waveforms of the BLDC motor

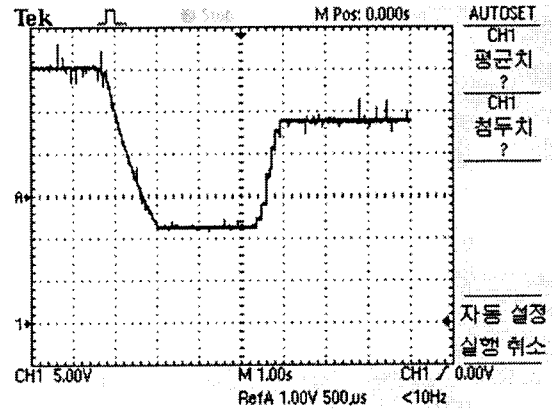


그림 13. 속도에 따른 DC-link 전압의 변화
Fig. 13. DC-link voltage variation according to speed

본 논문은 영남이공대학교 전력응용기술연구센터의 연구 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Brushless Servo-motors, Y. Dote, S. Kinoshita, Clarendon press, 1990.
- [2] L. Parsa, "Performance Improvement of Permanent Magnet AC Motors", Doctoral Dissertation, Institute of Electrical Engineering, Texas A&M University, 2005.
- [3] 치과용 핸드피스 - 치과용 저전압 전기모터, KSPISO 11498, 한국산업규격, 산업자원부 기술표준원, 2007.
- [4] 브러시리스 PM 모터 기본설계 및 권선법, 전기기기산업 인력양성센터(HCEM) 전동기 설계 분야 교육 교재, 한양대학교, 2003.
- [5] N. Bianchi, S. Bolognani, F. Luise, "High Speed Drive Using a Slotless PM Motor", IEEE Trans. on P.E., Vol., 21, No. 4, pp. 1083~1090, July, 2006.
- [6] K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo, K. Mohri, "Micro-computer Control for Sensorless Brushless Motor", IEEE Trans. on I.A., Vol., IA-21, No. 4, pp. 595~601, May/June, 1985.