

## 의료기기용 고속 BLDC 전동기의 특성해석

서영택\* 김형길\*\* 남상석\*\*\* 김철호\*\*\*\* 오철수\*\*\*\*  
구미1대학\* (주)서영테크\*\* 네오다인코리아\*\*\* 경북대\*\*\*\*

### Characteristics Analysis of high speed BLDC motor for Medical instruments

Young-Taek Seo\* Hyoung-Gil Kim\*\* Sang-Seok Nam\*\*\* Chul-Ho Kim\*\*\*\* Chul-Soo Oh\*\*\*\*  
\*Kumi College \*\*SeoYoung Tech \*\*\*Neodyne Korea \*\*\*\*Dept.of Electrical Eng. Kyungpook N. Univ

**Abstract** - Brushless dc motors have been replacing brush type motors in machine tool and robotics applications over the last number of years. This paper deals with the design and application of the slot-less permanent magnet synchronous motor (PMSM). The slot-less PMSM eliminates rotational cogging torque due to permanent magnet preferred positions, decreases core loss and thus increases efficiency, provides excellent torque-to-volume and power-to-volume ratios, and has a linear current versus torque relation. The PMSM with slot-less stator is designed and manufactured, which will be used for high speed and high efficiency application such a medical instruments.

### 1. 서 론

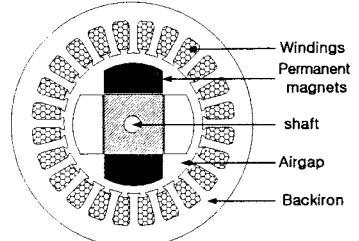
산업의 발달과 더불어 전동기 사용에 대한 수요는 급속히 증대되고 있는 실정이며, 전동기의 사용 목적 및 용용분야 또한 다양화 추세를 보이고 있다. 과거에 속도 제어의 용이성 등으로 인하여 광범위하게 사용되던 직류 전동기는 브러시와 정류자판 사이의 마찰에 의한 보수와 점검을 필요로 하고, 두 접점 사이에서 불꽃이 발생하는 특성 등으로 인하여 폭발성 가스가 있는 지역에서는 사용이 제한되는 단점을 가진다. 이러한 직류전동기의 단점을 보완하여, 회전자에 영구자석을 채용하여 브러시와 정류자를 없앤 BLDC(Brushless DC)전동기의 사용이 증가되고 있다. BLDC 전동기는 여자 측에 기계적 전류를 대신하여, 반도체 소자를 이용한 스위칭이 필요하다. 따라서 전기적, 기계적인 노이즈가 적고 신뢰성이 높아 위치 및 속도 제어용으로 많이 사용되고 있다[1-3]. 최근에 고 에너지밀도를 가진 희토류 자석이 개발되고, 기존의 영구자석에 대한 성능의 개선이 이루어짐으로써 전동기의 소형화, 경량화가 가능해지고, 전동기의 효율도 현저히 개선되었다. BLDC 전동기는 제어용으로 많이 사용하고 있으며, 전동기의 소형 경량화, 고효율, 고출력뿐만 아니라 제어성능 개선에 대한 부분으로 연구가 진행되고 있다. 전동기의 제어 특성을 개선함으로서 전동기의 구동 메커니즘을 간략히 할 수 있게 된다[5-7]. 본 논문에 적용한 Slotless BLDC전동기는 기존에 Slot BLDC전동기와 달리 고정자의 teeth와 slot구조가 없기 때문에 코킹 토크를 제거 할 수 있어 구동부를 순으로 잡고 일하는 치기공용 핸드피스나 공구 또는 특수 정밀연마용 전동기로 아주 적합하다. Slotless전동기는 Slot BLDC전동기에 비해서 특성 향상의 자기회로를 얻기 위해 점적율을 높이고 영구자석의 체적이 증가되어야 하나 고정자의 teeth와 slot이 없기 때문에 상대적으로 철손이 상당히 감소하므로 효율이 높고 고속운전이 가능하여 30,000rpm 이상의 고속을 요구하는 의

료용 핸드피스에 적용하였다. Slotless BLDC 전동기의 자기회로의 시뮬레이션을 통해 특성해석 하였으며, 이를 바탕으로 Prototype BLDC 전동기를 제작하여, 고속용 전동기 구동 드라이브를 설계한다. Slotless BLDC 전동기의 출력 특성 해석을 중점적으로 다루고 의료기기용 핸드피스에 적용 가능성을 검증하고자 한다.

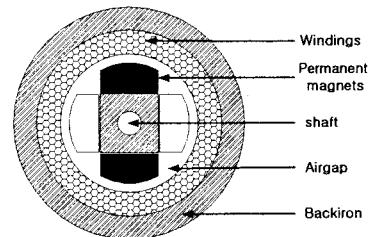
### 2. 본 론

#### 2.1 Slotless BLDC 전동기 구조

BLDC(Brushless dc)전동기는 3상 동기모터와 구조가 같으며 회전자는 영구 자석으로 구성 되어 있다. 따라서 영구 자석형 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM)라 부르기도 하며, 크게 고정자(stator), 회전자(rotor), 그리고 회전자의 위치 센서(rotor position sensor)등으로 구성되어 있다. 고정자는 철심(stator core)과 고정자 권선으로 구성되어 있으며 고정자 3상 Y결선 또는 Δ결선으로 이루어져 있다.



(a) 슬롯(slot)형



(b) 슬롯리스(slotless)형

그림 1 BLDC 전동기 구조

회전자는 축과 영구자석으로 구성되어 있으며 축에 영구자석을 고정시키는 방법에 따라 surface mount형과

interior형으로 구분된다. surface mount형의 회전자는 축 표면에 영구자석을 부착한 것으로 interior형보다 기계적인 강성이 떨어지나 돌출 효과(saliency effect)에 의한 영향을 무시할 수 있으므로 interior형의 경우 보다 토오크 제어가 용이하다. BLDC 전동기의 우수한 제어성능, 즉 높은 토오크 대 관성비와 큰 전류 밀도는 고성능의 영구자석을 사용함으로써 가능하게 되었다. 그림 1은 표면부착(surface mount)형 BLDC 전동기로써 슬롯형(a)과 슬롯리스형(b)을 나타내고 있다. 일반적으로 슬롯형은 고속에서 토크 리플(torque ripple)과 전자기적 손실인 코킹 토크(cogging torque)에 대한 영향으로 전동기 속도 제어에 문제점이 발생 할 수 있다. 슬롯리스형은 공극 길이가 슬롯형보다 상대적으로 높지만 권선 체적비를 높게 설계 할 수 있다. 또한 코킹 토크가 무사할 정도로 낮아지므로 전동기의 고속 제어시 발생되는 문제점을 제거할 수 있다. 일반적으로 고정자 권선에 순차적으로 3상 중 2상 도통방식으로 전동기를 구동한다. 그럼 2는 전동기 구동 인버터 회로이며, 각상에 순차적인 전류 도통구간을 나타낸다. BLDC 전동기는 회전자의 위치를 검출하는 소자와 이 위치 정보에 따라 인버터를 통해 전기자 권선에 순차적으로 전압이 인가된다. 위치 검출용 소자로는 홀센서, 엔코더등이 사용되며, 최근에 센서리스형 BLDC 전동기가 부분적으로 사용되고 있다.

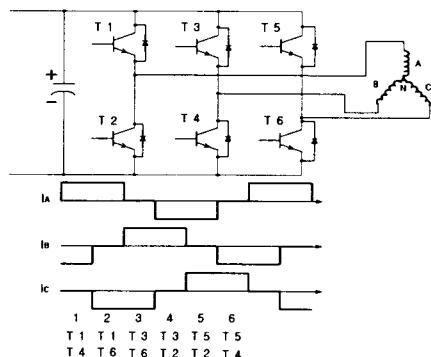


그림 2 120° 도통형 인버터 구동회로

## 2.2 전동기의 특성방정식

BLDC 전동기의 특성은 일반적인 정류자형 브러시 전동기의 특성과 다르지 않다. 따라서 BLDC 전동기의 특성은 잘 알려진 직류전동기의 일반적인 특성으로부터 알 아낼 수 있다. 그림3은 BLDC 전동기의 회전자 영구자석과 권선 위치를 나타내고 있다. 이때 영구자석의 극 피치는 전기각 180이며, 코일의 피치는 최소 120에서 최대 240사이에 있게 된다. 그림에서 2극 영구자석형 회전자가 회전할 때  $a_1 \bar{a}_1$ 도체의 쇄교자속(  $\Psi_1$  )을 고려 할 수 있다.

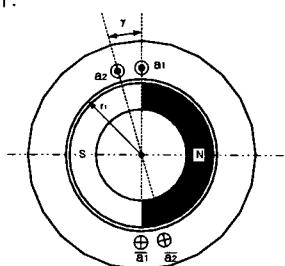


그림 3 BLDC 전동기의 영구자석과 코일의 위치

만약 공극에서의 자속 밀도가 균일하다면 각 코일과 쇄교하는 자속은 영구자석이 회전함에 따라 선형적으로 변

하여, 패러데이 법칙에 의해 코일  $a_1 \bar{a}_1$ 에 유기 되는 유기기전력은 식(2.1)과 같이 된다[1-3].

$$e_{al} = \frac{d\Psi}{dt} = \omega \frac{d\Psi}{d\theta} \quad (2.1)$$

여기서  $\omega$ 는 기계적인 회전각속도이며,  $\theta$ 는 기계적 회전각,  $B_g$ 는 공극자속 밀도, 그리고  $\Psi$ 는 코일과의 쇄교 자속을 나타낸다. 영구자석의 자속 밀도가 원주 방향에 관계없이 공극내에서 일정하다면, 즉 영구자석의 프린징 효과나 영구자석 자화 과정의 불균일성을 무시 할 수 있다면 BLDC 전동기의 권선당 유기기전력은 기준 위치에서  $\theta$ 로 회전할 때 최대 쇄교 자속은 공극 자속 밀도를 적분함에 의해 식(2.2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_1 = N_1 \int B(\theta) r_1 d\theta l = N_1 B_g \pi r_1 \quad (2.2)$$

전동기의 표면에 놓인 두 권선 변을 따라 적분한다는 것을 나타낸다. 만약 자속 밀도가 원주방향에 대하여 독립적이고 극이 균일하면, 이 전압에 상당 권선수를 곱하여 전체 유기기전력을 구할 수 있다. 유기기전력의 과정은 구형파이지만, 실제 유기기전력 과정은 공극에서의 누설자속에 의해 사다리꼴 형상으로 나타난다. 이와 같은 과정에서 한상의 전체 유기기전력은 식(2.3)과 같다.

$$e = 2 N_{ph} B_g l r_1 \omega \quad (2.3)$$

여기서,  $N_{ph}$  상당 코일 턴수를 나타낸다. 일반적으로 브러시리스 직류전동기는 2상, 120도통형 인버터를 이용하여 구동되므로 권선에는 구형과 형태의 전류가 흐른다고 전제한다. 따라서 전동기 순시 출력은 앞서 설명한 사다리꼴 형상의 유기기전력과 구형과 전류에 의해 생성되게 된다. 전동기 결선 방식이 Y결선이고, 2상 도통형이므로 전동기의 전기적 순시 출력  $P$ 은 식(2.4)과 같이 나타난다.

$$P = 2e I = \omega T \quad (2.4)$$

따라서 전동기에 발생하는 토크  $T$ 은 식(2.5)과 같이 나타난다.

$$T = \frac{2eI}{\omega} \quad (2.5)$$

앞서 구한 전동기의 유기기전력의 식(2.3)를 식(2.5)에 대입하면 BLDC 전동기의 한 상의 토크 식을 구할 수 있다.

$$T = 4N_{ph} B_g / r_1 I \quad (2.6)$$

## 2.3 FEM을 이용한 자기 회로 해석

전동기 설계와 특성해석 시뮬레이션에 이용되는 프로그램은 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 그 신뢰성이 입증되어 현재 많이 쓰이고 있는 유한요소해석법(Finite Element Method)을 사용하였다. 유한요소해석법(FEM)은 다양한 형태의 자로 해석에 특히 장점을 가진다. 전동기의 자속 해석에는 주로 2차원 유한요소해석이 사용된다. 슬롯리스 BLDC 전동기의 경우 회전자 영구자석 및 고정자 권선이 대칭적 구조를 가지므로 2차원 해석법을 적용할 수 있다. 2차원 해석법은 계산시간이 짧고, 자속을 표현하기 쉽기 때문에, Slotless BLDC 전동기의 원주방향 대칭성을 이용하여 2차원 해석법을 적용하여 전동기 자속 해석을 수행하였다. 본 논문에서 사용한 2차원 유한요소법은 Ansoft 사의 Maxwell 2D 프로그램이다. 그림4는 전동기 해석영역 단면도로써 2차원 해석법을 적용하여 전동기의 전영역에 대하여 자속 및 자로를 해석하였다.

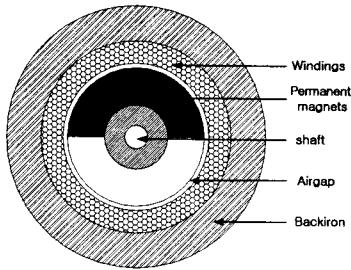


그림 4 Slotless BLDC 전동기의 단면도

2극 BLDC 전동기의 회전자인 영구자석을 이 N-S로 대응되는 위치에서부터 시작하여 회전자 영구자석의 위치를 원쪽으로 회전시켜가면서 각 경우에 대하여 자로 해석을 수행하였다.

유한요소해석법(FEM)을 이용하여 Slotless 전동기 자로를 해석한 결과가 그림 5는 공극의 자속 분포를 나타내고 있는데, 이 그림에서 공극에서의 전자속은 N극에서 나와 고정자 권선이 위치한 공극을 거쳐 S극으로 들어가는 것을 볼 수 있으며, 공극내의 누설 자속을 확인 할 수 있다. 그림6은 그림4의 모델에 대하여 공극에서의 자속 밀도를 나타내고, 파형이 구형파와 비슷한 사다리꼴형인 것을 알 수 있다.

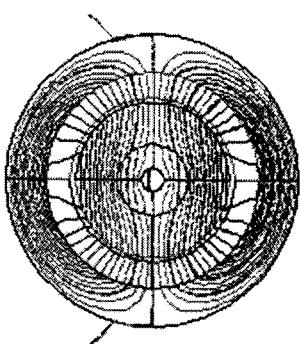


그림 5 공극내의 자속 분포

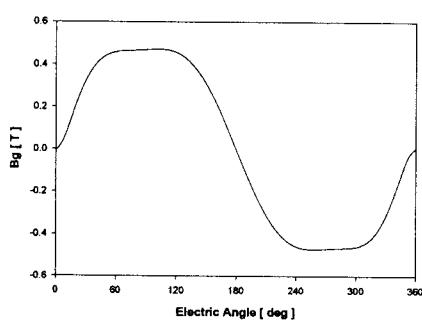


그림 6 공극(Air gap) 자속밀도

#### 2.4 전동기제작과 특성실험

Prototype BLDC 전동기는 규소 강판으로 적층된 고정자와 영구자석형 회전자로 구성되었으며, 그림6은 Slotless BLDC 전동기를 의료용 핸드피스에 적용용 조립도를 나타내고 있다.

Prototype 전동기의 제조관련 제원은 표1과 같다.

표1. Prototype 전동기의 제조관련 제원

상 수	3	[phase]
극 수	2	[pole]
코일 도체의 직경	0.37	[mm]
코일수	6	
코일당 턴수	10	[turn]
한상의 인터턴스	0.032	[mH]
한상의 저항	0.202	[Ω]
고정자의 외경	20.5	[mm]
고정자의 내경	15	[mm]
공극의 길이	4.2	[mm]
전체 축방향 길이	62.5	[mm]

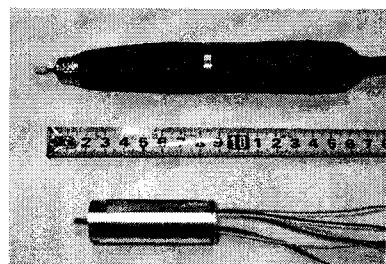


그림 7 핸드피스용 prototype 전동기

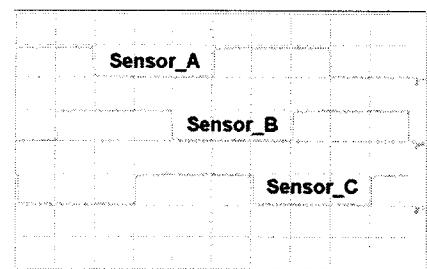


그림 8 120° Hall sensor 파형

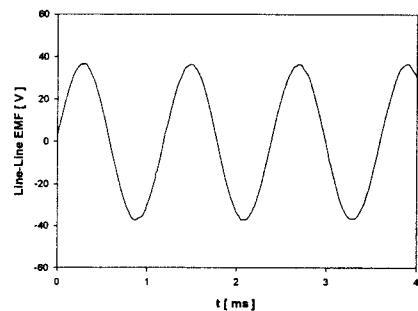


그림 9 선간의 유기기전력 파형

Prototype Slotless BLDC 전동기의 특성 실험을 통하여 선간 유기기전력 특성을 측정하였다. 유기기전력은 전동기 회전속도를 5,000에서 50,000rpm 까지 속도를 변화시켜 가면서 그 파형과 실효값을 측정하였다. 그림 8은 전동기가 50,000 rpm으로 회전하고 있을 때의 홀센서의 회전자 위치 신호가 120도 위상차의 신호를 나타내고 있다. 그림 9는 전동기의 속도가 50,000rpm

회전시 선간의 유기기전력 파형 나타내며, 그림10은 전동기의 속도에 따른 유기기전력을 나타내고 있다. 전동기의 유기기전력은 속도에 비례하여 증가한다. 그림11은 무 부하시 전동기의 인가전압과 속도와의 관계를 나타내고 있다. 전동기의 속도가 50,000rpm에서 무 부하시 전동기의 DC 인가 전압은 36V이며, 전류는 0.532A가 측정되었다.

그림 12는 전동기의 속도가 30,000rpm 일 때 부하시 선간 전압 및 전류 파형을 나타내고 있다. 그림에서 전동기 한상에 흐르는 전류의 파형을 나타내고 있는데, 120도 도통형 3상 전압형 인버터를 통하여 전선에 구형파 전압을 인가하였을 경우이다. 전류 파형은 전기각 60°를 주기로 백등 현상을 보이는데, 이것은 인버터 스위칭시 전류 현상에 의한 영향이며, 백등 토크가 발생하게 되는 원인이 된다. Prototype 전동기의 부하 실험 결과 출력은 정격 부하에 대하여 약 58(W)로 나타나며, 정격토크는 14.78(mNm)이고 정격 속도는 35,000rpm으로 측정되었다.

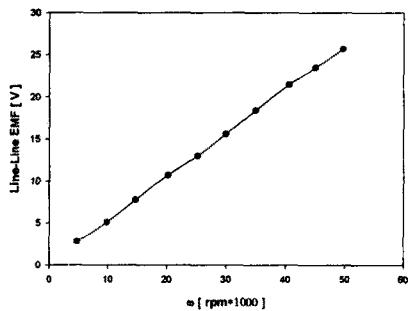


그림 10 전동기 속도에 대한 유기기전력

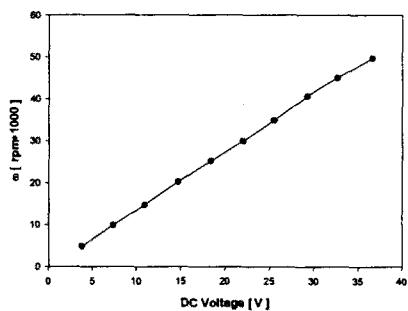


그림 11 무 부하시 인가전압 vs 속도 특성

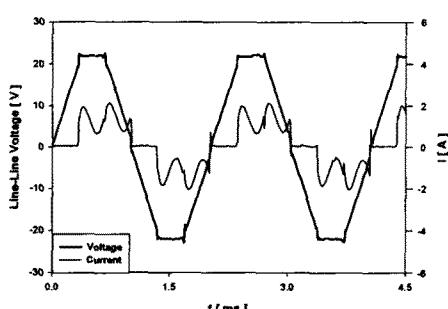


그림 12 부하시 인가전압과 전류

### 3. 결 론

본 논문에서는 슬롯리스 BLDC전동기를 설계하고 설계한 데이터를 이용하여 prototype 전동기를 제작하여 특성을 해석하였다. BLDC 전동기에 사용되는 넓은 동작속도 계어법위를 갖는 구동 드라이브를 설계하였으며, 전동기의 고속 회전시 발생되어지는 문제점을 개선하고 이에 대한 이론적인 고찰과 실험을 통하여 검증하였다. 소형 BLDC 전동기의 고정자 형태를 슬롯리스 방식을 채택하여 전자기적 손실인 코킹 토크(cogging Torque)를 최소화하였으며, 이로 인해 고속에서의 전동기 효율을 증가시킬 수 있었다. Prototype Slotless BLDC 전동기를 의료기기용 핸드피스에 적용하여 실부하 운전 시험을 시행한 결과 양호한 전동기 특성을 나타내었다. 소형 정밀 BLDC 전동기를 용융함에 있어서 적용 대상에 따라 재어기에 대한 설계는 앞으로 지속적인 연구가 요구된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] J. R. Hendershot Jr, TJE Miller, "Design of Brushless Permanent - Magnet Motors", Clarendon press. Oxford, pp. 1 ~ 25, 1994.
- [2] T. Kenjo, S. Nagamoti, "Permanent - Magnet and Brushless DC Motors", Clarendon press. Oxford, pp. 59 ~ 78, 1985.
- [3] Duane C. Hanselman, "Brushless permanent - magnet motor design". McGraw-Hill Inc. pp. 41 ~ 60, 1994.
- [4] Peter Campbell, "Permanent Magnet Materials and Their Application", Cambridge university press, pp. 1 ~ 24, 1994.
- [5] Shailesh Waikar, et. al., "Evaluation of Multiphase Brushless Permanent Magnet(BPM) Motors Using Finite Element Method(FEM) and Experiments". Proceedings of the 1999 IEEE 14th applied Power Electronics Conference, Vol. 1, 396-402, 1999.
- [6] S. M. Hwang, D. K. Lieu, "Reduction of Torque Ripple in Brushless DC Motor", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 31, NO 6, pp. 3737-3739, 1995.
- [7] Duane C. Hanselman, "Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of Brushless Permanent Magnet Motor", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol 41, NO 3, pp. 292-300, 1994.
- [8] J. Y. Hung, Z. Ding, "Design of currents to reduce torque ripple in Brushless permanent magnet motors", IEE Proceedings-B, Vol. 140, No. 4, pp.260-266, 1993.
- [9] Yilmaz Sozer, David A. Torrey, "Adaptive Torque Ripple Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor", IEEE Transaction on Industrial Electronics, pp. 86-92, 1998.