

## 저속 고토크용 외전형 BLDC 모터의 설계 및 제작

정인성, 성하경  
전자부품연구원 정밀기기연구센터

### Design and Fabrication of an Exterior Rotor Type BLDC Motor for Low Speed and High Torque Application

In-Sung Jung, Ha-Gyeong Sung  
Precision Machinery Research Center, Korea Electronics Technology Institute

**Abstract** - In this paper, we discuss an in-wheel motor for low-speed high-torque light transportation application. We present the design and fabrication results of an exterior type brushless DC motor, and report the experimental results.

#### 1. 서 론

BLDC 모터는 제어가 용이하다는 DC모터의 장점을 살리면서도 브러시/정류자에 의한 수명 및 신뢰성 감소라는 단점을 없앤 모터로서 전력전자 기술의 발전과 더불어 그 수요 및 적용범위가 지속적으로 증가하고 있다. 최근들어 자전거, 소형운반기 등의 전동화가 시도되고 있으며, 그 시장은 제품의 품질여부에 따라 많은 성장 가능성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

소형 운송기구는 보통 저속에서 고토크로 작동되므로 보통 수천 rpm의 회전수를 가지는 일반 모터를 이용할 경우에는 기어나 풀리/벨트 기구를 이용하여 수배 또는 수십배 감속을 하여 이용하고 있다. 따라서 추가적인 기구의 사용에 따른 부품수의 증가, 동력전달 효율의 감소, 쿨부 공간의 설계적인 면에서의 제약 등이 단점으로 대두되고 있다.

따라서 최근 들어서는 바퀴 직결구동을 위한 저속 고토크의 성능을 가지는 모터가 세계적으로 연구되고 있는 추세이며, 일례로 전기자동차용 바퀴 일체형 모터, 전기자전거용의 hub 타입 BLDC 모터 등이 개발되고 있는 것으로 보고되고 있다[1, 2].

본 논문에서는 이러한 연구의 일환으로 출력 100~200 [W]급의 저속/고토크형 BLDC 모터를 설계하고, 시작품을 제작하여 성능시험한 결과를 제시하고자 한다. 이를 통하여 유사 특성을 구현하기 위한 모터의 설계시 참고자료로 이용될 수 있으리라 사료된다.

#### 2. 저속 고토크용 BLDC 모터의 설계

##### 2.1 설계 사양의 결정

전자자전거, 전동휠체어 등의 소형 전동운반체는 보통 전압원으로 24[V]의 배터리를 사용하고 있다. 또한 출력면에서는 일반적으로 약 150[W]에서 크게는 300~400 [W]까지의 모터가 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 DC 24[V]를 정격전압으로 하며, 정격출력은 150[W]를 목표로 하여 설계를 수행하였다. 또한 설계시 정격속도는 300 [rpm]을 목표로 하였다. 이 경우 정격점에서의 토크는 약 48 [kgcm] 정도가 된다.

##### 2.2 BLDC 모터의 기본 설계

BLDC 모터는 그 구조에 따라 방사방향 공극형(radial gap type)과 축방향 공극형(axial gap type)으로 나눌 수 있으며, 방사방향 공극형의 경우에는 회전자 내부에 존재하는 내전형과 바깥쪽에 회전자가 되는 외전형으로 나뉘어진다. 이러한 구조적인 선택시에는 모터에 요구되는 기계적 크기 및 성능내용에 따라서 달라지는데, 바퀴

일체형의 모터를 위해서는 고토크 특성이 요구되며, 기계적으로도 바퀴와 결합될 수 있는 치수 설계가 요구된다. 일반적으로 박형화를 위해서는 축방향 공극형이 유리한 구조이나, 이 경우 모터 외경이 요구치수 이상으로 커질 우려가 있어 본 연구에서는 방사방향 공극형 외전형 구조를 선택하여 모터의 회전자부와 바퀴부가 직결될 수 있도록 하였다. 그림 1은 이러한 바퀴일체형 BLDC 모터의 개략적 구조도를 나타내고 있다.

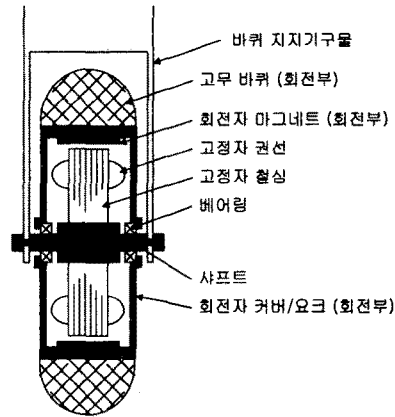


그림 1. 바퀴일체형 BLDC 모터의 개략도

BLDC 모터는 영구자석이 회전자를 구성하게 되는데, 고정자부를 치/슬롯 구조로 설계하는 경우에는 코깁 토크가 발생하게 된다. 코깁 토크가 큰 경우에는 토크리플을 증가시켜 소음진동 특성에 나쁜 영향을 미칠 뿐만 아니라 저속 또는 전원 차단시에 운전자에게 덜컹거림을 느끼게 한다. 코깁 토크의 크기에 영향을 미치는 요소들 중에서 주요하게 영향을 미치는 요소중 하나로 극수와 슬롯수와 조합비를 들 수 있는데, 본 연구에서는 여러 가지 시뮬레이션을 통하여 슬롯수/극수 비를 1.2로 결정하였다[3].

목표사양을 만족하는 BLDC 모터의 설계를 위하여 수식적인 방법에 의한 해석기법을 기반으로 하는 Ansoft사의 RMxprt 라는 상용 프로그램을 사용하였다. 바퀴 직결을 위한 모터 외경은 개략적으로 제한되어 있으므로 다양한 극수 및 슬롯수, 적층폭 및 영구자석의 종류 등에 대한 시뮬레이션을 통하여 결정된 모터의 설계안은 다음의 표 1과 같다.

표 1. BLDC 모터의 주요 설계안

회전자 외경	154 [mm]	고정자 외경	133 [mm]
마그네트 극수	20 극	고정자 적층폭	30 [mm]
마그네트 종류	Nd-bond	권선방식	3상 집중권
마그네트 길이	40 [mm]	권선 결선방식	Y 결선
고정자 슬롯수	24 슬롯	병렬회로수	4 병렬

### 2.3 유한요소법을 이용한 해석결과

2.2절에서 설계한 결과를 기초로 하여 RMXprt에서는 검토하기 힘든 치의 국부적인 포화정도나 코깅토크 특성 등을 검토하기 위하여 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하였다. 그림 2는 전체 모델의 1/4만을 해석영역을 하여 전류를 인가하지 않은 상태에서 해석한 등포텐셜도를 나타내고 있다.

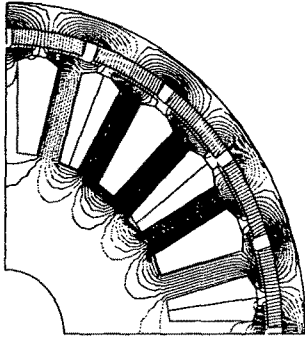


그림 2. 유한요소 해석시의 등포텐셜도

그림 3은 고정자 치 부분에서의 자속밀도 분포를 나타내고 있다. 본 모터 설계안의 경우 치 자속밀도를 1.5 [T] 정도로 하여 코일권선을 위한 슬롯면적을 최대한 확보하였다. 그림 4는 코깅토크 특성을 나타내고 있다. 피크-피크치가 약 2 [kgcm]로서 목표로 하는 정격토크의 약 4[%] 수준으로 매우 작은 것을 예상할 수 있다. 그림 5는 300 [rpm]에서의 선간 역기전력에 대한 해석치로서, 24[V] 구동시 저항손 및 전력용 스위칭소자의 전압강하를 고려할 때 다소 여유있게 설계되었음을 알 수 있다.

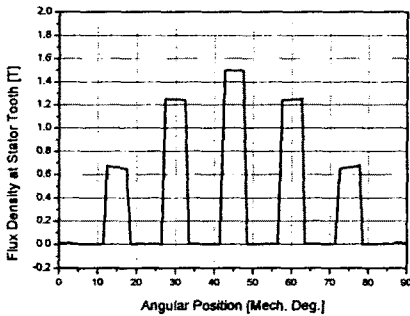


그림 3. 치 부분에서의 자속밀도 특성

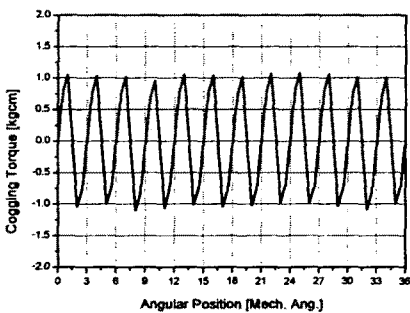


그림 4. 코깅토크 특성

그림 6은 A-B상 권선에 10 [A]의 일정 전류를 인가한 상태에서 모터를 회전시켰을 경우의 정토크 특성을 나타낸다. 토크는 정현적인 파형을 나타내고 있으며, 이 경우 최대치는 약 50 [kgcm]가 됨을 알 수 있다.

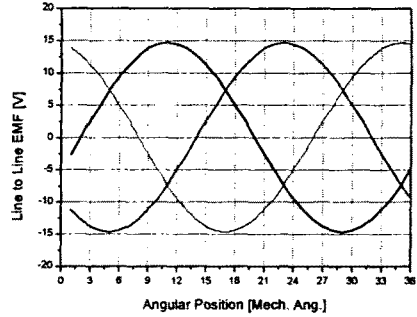


그림 5. 선간 역기전력 특성 (300 [rpm] 회전시)

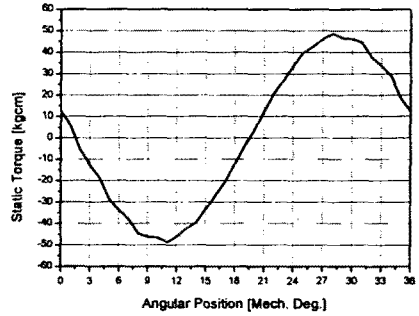


그림 6. 정토크 특성 (lab = 10 [A] 인가시)

### 3. 시작품 제작 및 성능시험 결과

설계된 모터는 외전형으로서, 내측의 샤프트가 회전하는 일반적인 모터와 반대로 외측의 케이스부가 회전하고 가운데의 샤프트는 정지해 있게 된다. 따라서 제작후 특성평가를 위하여 범용의 토크 측정기를 이용하기 위해서는 별도의 기구설계가 요구된다. 본 연구에서는 그림 7과 같은 기구구성을 통하여 토크 측정기를 이용할 수 있게 하였다. 그림 8은 조립된 모터의 내부 모습을 나타내고 있으며, 그림 9는 제작된 모터의 외관과 외측 고정지 그를 나타내고 있다.

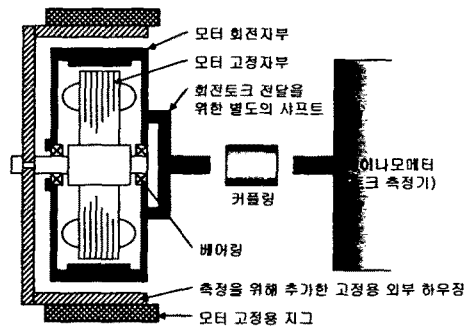


그림 7. 모터의 토크측정을 위한 기구 구성

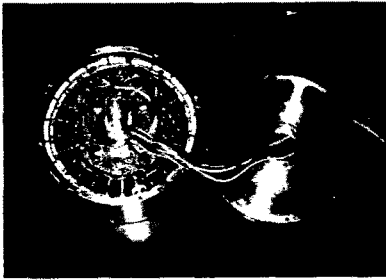


그림 8. 조립된 고정자, 회전자, 센서부

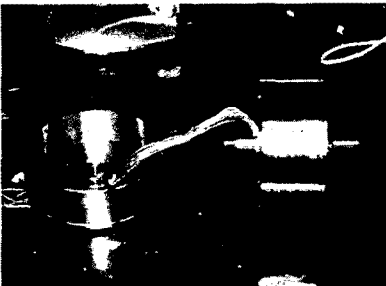


그림 9. 시작모터 및 외측 고정지그

그림 10은 모터를 300 [rpm]으로 회전시키면서 측정한 순간 역기전력 파형이다. 정현적인 형태를 가지면서 최대치는 약 13 [V]를 나타냄으로써, 그림 5에 나타난 해석치의 14.5 [V]와 비교할 때 다소 작은 값을 나타내었다. 그림 11은 코킹토크의 실험치를 나타내었고, 피크-피크치가 1 [kgcm] 이내로 나타났다.

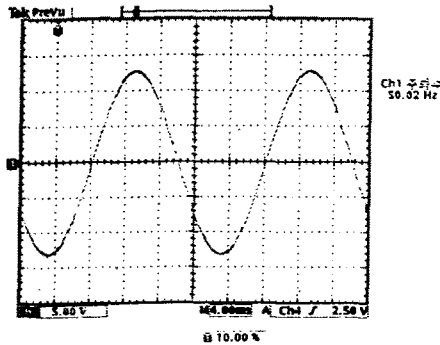


그림 10. 순간 역기전력 파형

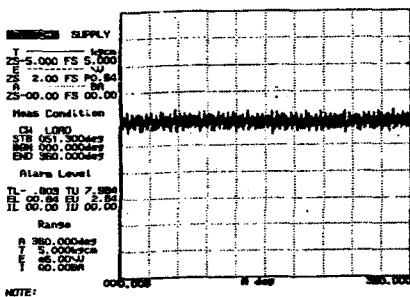


그림 11. 코킹토크 특성

그림 12는 모터를 최대 50 [kgcm] 용량의 토크 측정에 장착하여 측정한 입출력 특성시험 결과를 나타내고 있다. 모터효율은 출력 100 [W] 부근에서 최대 78 [%]를 나타내었으며, 200 [W] 출력점에서는 약 70 [%]의 효율을 나타내었다.

그림 13은 모터의 전 운전구간에 대하여 시뮬레이션치와 실험치를 비교한 것으로서 값들이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

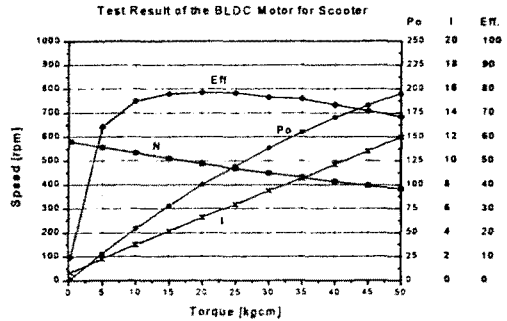


그림 12. 시작모터의 입출력 특성시험결과

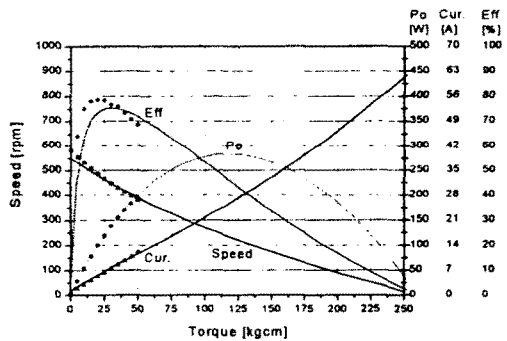


그림 13. 시뮬레이션치와 실험치의 비교

#### 4. 결 론

본 논문에서는 배터리로 구동되는 소형 운송기구 구동용으로 바퀴 일체형을 위한 저속 고토크 특성의 외전형 BLDC 모터의 설계 및 제작 결과에 대하여 기술하였다. 시제작을 통한 기본성능 시험결과 최대효율은 78 [%]를 나타내었으며, 50 [kgcm]의 토크 발생점에서 효율 70 [%]로 200 [W]의 출력을 나타냄을 확인하였다.

향후 부하시험을 통한 온도상승 특성을 확인한다면 본 모터의 정확한 정격을 판단할 수 있으리라 사료되며, 향후 관련 연구자들이 유사 사양의 모터를 설계하는 데에 참고가 될 것으로 예상된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] H C Lovatt, V S Ramsden, and B C Mecrow, "Design of an In-Wheel Motor for a Solar-Powered Electric Vehicle", EMD97, September, pp. 234-238, 1997.
- [2] 서영택, 김철호, 김형길, 오철수, "저속-고토크용 AFPM 전동기의 특성해석", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 641-643, 2001.
- [3] J. R. Jendershot, and TJE Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Clarendon Press, Oxford, 1994.