

전기자전거용 BLDC 전동기 설계 및 제어기 개발

\*김상욱, 김보열  
 인하공업전문대학 전기과

Design of BLDC Motors for an Electric Bicycle and Development of their Controller

\*Sang-Uk Kim, Bo-Youl Kim  
 Inha Technical College, Department of Electrical Engineering

**Abstract**-The aim of this paper is twofold: The one is to design BLDC motors for an electric bicycle and the other is to develop a controller of the BLDC motors. A new BLDC Motor has a permanent magnet rotor in which the magnetic arrangement is radial to the shaft and integral to the rotor laminations instead of mounted on the perimeter of the rotor. This technique concentrates flux, giving a higher flux density than a surface-mounted PM motor and has the increase of reluctance torque. The stator of BLDC motor has parallel winding instead of inter-connected wye-connection winding, allowing multi-phase separate independent controllability. It gets much more high power than wye-connection at same low voltage. The proposed controller has a technique of excited with modulation(EWM) and one H-bridge and two photo sensors per phase. Experimental results show the performance of the proposed BLDC motors for an electric bicycle.

1. 서론

공작기계, 전기수송용 등 고정도 속도제어가 요구되는 산업용기기의 구동을 위해 종래에는 직류전동기가 널리 사용되어 왔다. 직류전동기는 제어가 매우 용이하고 제어범위도 넓어서 제어성능이 뛰어나다. 그러나 직류전동기는 브러시 등의 보수점검이 필요하고, 고속화·고압화·대용량화에 한계가 있으며, 소음 등을 가지는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 브러시없는 전동기로의 전환이 활발히 진행되고 있다.

브러시 없는 전동기 중에는 영구자석 동기전동기가 가변속 구동용으로 가장 많이 사용되고 있다. BLDC 전동기가 갖고 있는 뛰어난 특성을 그대로 갖고 있음과 동시에 직류전동기의 최대 결점인 브러시와 정류자로 구성된 기계적 정류기구를 제거함으로써 직류전동기와 교류전동기의 장점만을 갖는 방향으로 발달되어 왔다. BLDC 전동기는 신뢰성이 높고, 회전자에서는 동손에 의한 발열이 없으며, 고정된 전기자 철심의 철손과 전기자 권선의 동손에 의한 발열뿐이어서 효율이 높고 역률이 뛰어나다. 제어측면에서도 토크제어가 매우 용이하다.

이와 같은 BLDC 전동기의 장점 때문에 전기자전거용으로 BLDC 전동기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 기존의 전기자전거로 사용되는 직류전동기나 BLDC 전동기의 경우 속도 비율의 감소를 위해 감속기를 사용하거나 기어 및 체인을 이용하여 속도를 줄이는 방식이 채택되고 있다. 따라서 이 경우 감속기 등에 의한 소음은 사용자에 대한 거부감을 유발하고, 감속기 및 체인 등으로 인한 손실을 동반하여 한정된 배터리 전원으로 구동되는 경우 사용시간을 단축시키는 단점 등을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이들의 단

점을 극복하기 위하여 감속기를 사용하지 않고 고효율로 운전되는 BLDC 전동기 및 제어기를 설계하였다.

본 논문에서는 전기자전거용 전동기로서 다상의 독립권선으로 구성된 고정자와 규소강판 적층내에 마그네틱을 방사형으로 매입한 회전자 및 자속을 측정할 수 있는 센서로 구성한다. 제어기의 구현은 여자폭 변조(Excited Width Modulation), 양방향 제어(Bidirection Control), 부분 구형파 제어 (Partial Square Wave Control) 등으로 확립된다. 따라서 본 전동기의 특징은 저전압(DC) 구동에 매우 유리하며, 토크 리플의 감소(저진동), 발열 감소, 고 토포크, 초고속 및 저속 구동 등에 매우 우수한 특징을 가지고 있다. 본 논문에서는 제어기의 특성을 바탕으로 드라이버를 구성하였으며, 이를 토대로 전동기를 설계하고, 설계된 전동기의 특성은 미국 Ansoft사의 Maxwell 자계 해석 프로그램을 이용하여 보았다. 설계된 프로그램을 바탕으로 전동기의 최적화를 확보하였다. 속도제어 시스템을 구현하기 위한 하드웨어 및 소프트웨어를 설계 제작하였고, 실험을 실시하여 전동기의 성능을 보았다.

2. BLDC 전동기의 구조

BLDC 전동기는 계자에 영구자석을 사용하는 동기전동기로 브러시를 없애기 위해 계자가 회전자로 되어 있다. 계자의 구조에 따라 돌극형과 원통형이 있으나 제어를 쉽게 하도록 하기 위하여 본 전동기는 돌극형 BLDC 전동기중에서 매입형 BLDC 전동기를 사용하였다. 매입형 BLDC 전동기는 리턴스 토포크를 이용할 수 있어 작은 회전자의 체적으로 큰 토포크를 낼 수 있어, 효율이 높은 특징을 가지고 있다. 그리고 자석을 회전자 안에 매입함으로써 기계적으로 견고하며, 일반적인 수송용 BLDC 전동기에 적합하다.

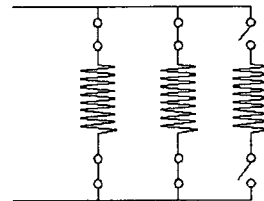


그림 1 고정자 권선의 구조

매입형 BLDC 전동기는 구조적으로 회전자에 얇은 링크부를 가지고 있기 때문에 영구자석의 자속이 고정자의 권선과 쇄교하지 못하고 링크부의 자로를 통해 누설된다. 이 누설을 작게하기 위하여 링크부의 폭을 되도록 작게하는 것이 바람직하지만 전동기 제작시의 제작상 어려움이 있고, 고속 회전시 기계적 취약성으로 영구자석의 비산을 일으킬 수도 있으며, 영구자석에 의한 normal force 가진력으로 진동과 소음을 일으킬 수 있는 원인이 될 수 있다. 이러한 점을 고려하여 기계적 신뢰성의 안정성과 누설을 줄이기 위한 적절한 폭의 링크부를 설정하였다.

BLDC 전동기 설계시에는 영구자석 자기회로를 등가 회로로 바꾸어 공극의 자속 밀도와 기자력을 계산하였다. 즉, 영구자석에 의한 자기회로를 등가 전기회로로 표현한 다음 고정자 권선은 정현파에서 구형파로 분포하여, 링크부를 제외한 철심의 투자율을 무한대로 가정하여, 철심표면이 등자위면을 이루고 있다고 보고 공극 자속 밀도를 계산한다.

전동기의 고정자는 상별, 극별로 병렬권선을 취함으로서 저전압으로 고출력의 전동기가 가능하게 하며, 권선을 병렬권선으로 구성하여 상당 권선 저항을 적게 함으로서 저항 성분에서 발생하는 저항손을 줄일 수 있다. 따라서 이로 인한 권선의 발열을 줄일 수 있는 특징을 가지고 있다. 그림 1은 고정자 권선저항을 보여주고 있다.

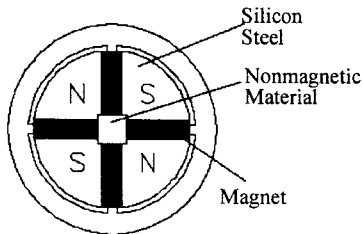


그림 2 회전자의 구조

회전자의 자석은 자속 집중을 가능하게 할 수 있도록 회전자코아에 매입하며, 이로 인한 릴렉턴스토오크를 극대화하며, 회전자 코아의 표면을 정밀하게 가공할 수 있으므로 공극(air gap)을 최소화할 수 있는 장점을 가질 수 있다. 또한 자석이 막대자석과 같은 형상을 가지므로 회전자의 극수, 크기, 모양을 제약 없이 구성할 수 있으므로, 길이방향 전동기나 팬케이크형 전동기를 용도에 맞게 자유로이 설치할 수 있다. 그림 2는 회전자 구조를 보여주고 있다. 전기자전거용으로 설계된 BLDC 전동기는 16극, Outer 회전자형, 허브(Hub)형, 3상 2여자 방식으로 구성되어 있으며 구조는 다음과 같다.

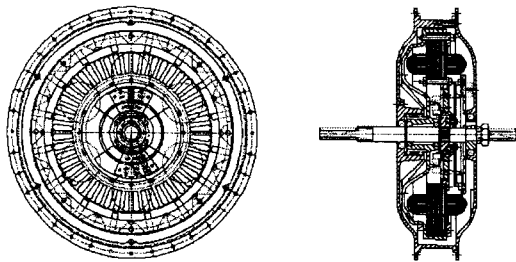


그림 3 전기자전거용 BLDC전동기의 구조

### 3. BLDC 전동기의 구동원리

BLDC 전동기의 구동 제어는 여자폭 변조(Excited Width Modulation), 양방향 제어(Bidirection Control), 부분 구형파 제어 (Partial Square Wave Control) 등으로 확립하기 위하여 구성된다. 그림 4와 같이 기존 방식과는 다르게 여자폭 변조 및 부분 구형파 제어를 얻기 위하여 제어기가 구동되어야 하는데, 만일 이들 제어기가 성립된다고 한다면, 토크리플의 감소(자진동) 등의 특성을 얻을 수 있다. 왜냐하면 일반적으로 회전자에 부착된 자석의 N극과 S극이 접촉된 부분에서 고정자의 코일 형태 및 위치가 회전자의 해당극성과 정확히 일치하지 않으므로, 이 부분에 토크분 전류가 반발 작용이 일어날 수 있으며, 또는 필요없는 토크분 전류가 인가되는 경우가 있다. 따라서 그 기간동안에는 부정확한 토크분 전류를 차단하고, 고 토크를 위하여 다여자 방식을 적용한다. 따라서 본 제어기를 구동하기 위해서는 H 브리지형태의 제어기를 통하여 양방향제어가 확보되어 진다.

Classification	Input Electric Waveform	Torque Scheme and Copper Loss	Sum of Torque
Conventional Motor	Square Wave (full wave)	Trapezoidal Torque Scheme	[Graph showing trapezoidal torque]
Conventional Motor	Sine Wave (full wave)	Sinusoidal Torque Scheme	[Graph showing sinusoidal torque]
Constant-Power BLDC Motor	Square Wave (Partial wave)	Square Torque Scheme	[Graph showing constant torque]
Electric Angle	0 30 150 180	0 30 150 180	

그림 4 토크 특성

여자폭 변조(Excited Width Modulation), 양방향 제어 (Bidirection Control), 부분 구형파 제어를 확립하기 위하여 전동기에 그림 5와 같이 엔코더 및 센서를 부착하여야 한다. 그림 5는 본 논문에서 적용한 H 브리지 방식의 3상 2여자 방식을 보여주고 있으며, 편리상 16극이 아닌 4극의 경우를 나타내었다.

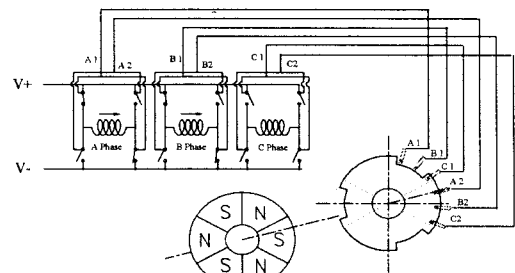


그림 5 전동기의 구동원리

또한 배터리(+24V)로 구동되는 전동기는 일반적으로 사용되는 전원에 비해 저전압 구동해야 하는 어려운 점이 있다. 따라서 본 BLDC 전동기를 감속기 없이 구동하기 위하여 우선 회전자의 극을 16극으로 설계하였으며, 고정자 권선을 그림 6과 같이 병렬로 구성하였다. 병렬로 권선을 구성할 경우 각 상당 코일을 직렬로 연결할 경우보다 코일의 저항 성분에서 감소하기 때문에 코일에서 발생하는 저항손( $I^2R$ )을 줄임으로서 코일의 발열을 줄일 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 직렬로 코일을 구성할 경우 저전압 고토크를 확보하기 위하여 많은 전류를 인가하여야 하며, 또한 이를 위하여 코일의 지름이 크게 하여야 하므로, 전동기의 설계상 상 당 코일 턴수는 결국 적어지게 되고, 이로 말미암아 전동기는 고속회전이 불가피하다. 따라서 배터리로 구동되는 BLDC 및 직류전동기는 반드시 감속기 등이 요구되어진다. 본 전동기에서의 병렬 권선의 형태는 그림 6과 같다.

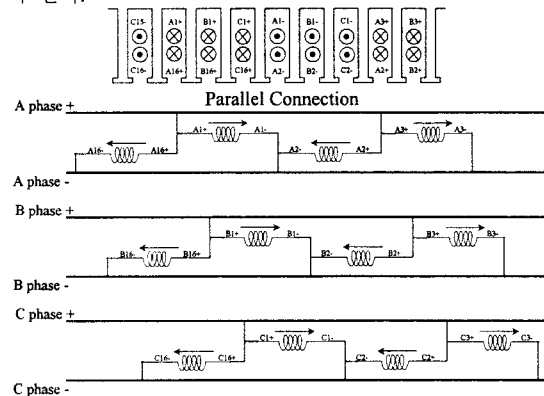


그림 6 권선의 구조

회전자 및 고정자 권선의 위치, 센서의 각도는 그림 7과 같다.

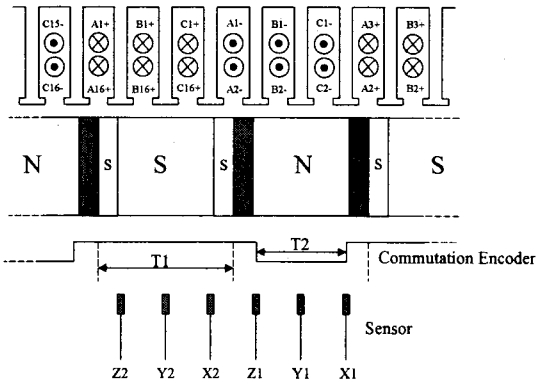


그림 7 회전자, 고정자, 센서의 구조

각 상당 2개의 센서가 필요하며, 본 논문에서는 3상이므로 6개의 센서가 부착되었다. 센서의 각도는 다음과 같다.

$$T1 = \frac{2\pi}{극수} \quad (1)$$

$$T2 = \frac{2\pi}{극수} \times \frac{여자상수}{총상수} \quad (2)$$

$$\text{센서당간격} = \frac{2\pi}{극수} \times \frac{1}{총상수} \quad (3)$$

위의 센서 각도로 구성된 엔코더 및 이를 측정하여 각 H 브리지의 스위칭 소자가 동작된다고 한다면, 그림 8과 같이 구동되며, 그림과 같이 토크크리플을 최소화할 수 있다.

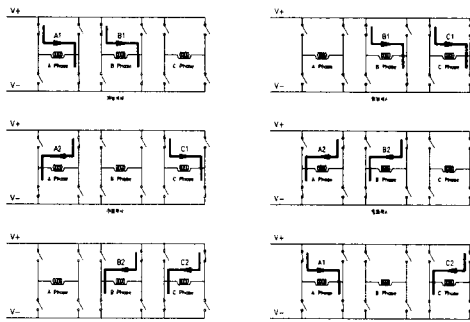
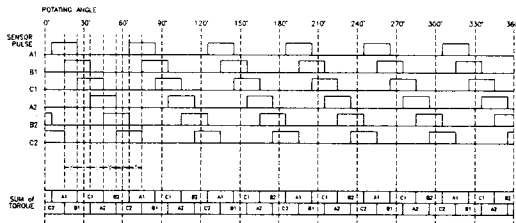


그림 8 BLDC 전동기의 구동 특성

#### 4. BLDC 전동기의 설계

BLDC 전동기의 등가 회로는 저항, 인덕턴스, 전압원으로 구성되며, 저항은 회전자 권선의 권선저항을, 인덕턴스는 각 상에 흐르는 전류로부터 생성된 자속에 의한 인덕턴스 성분을, 전압원은 회전자의 자속이 공간적으로 회전하여 회전자 권선에 자속 변화를 일으켜 유기되는 전압을 각각 모델링 한다. 각상에 인가되는 전압과 전류의 관계를 나타내는 전압식은 아래식과 같다.

$$\begin{aligned} V_a &= R_a \times I_a + L_a(dI_a / dt) + EMF_a \\ V_b &= R_b \times I_b + L_b(dI_b / dt) + EMF_b \\ V_c &= R_c \times I_c + L_c(dI_c / dt) + EMF_c \end{aligned} \quad (4)$$

전동기가 정상상태 운전중이고, 인덕턴스가 작다고 가정하면

$$V_{ab} = I_a \times (R_a + R_b) + EMF_{ab}$$

$$= I_a \times R_{ab} + EMF_{ab} \quad (5)$$

식(5)와 같고, 또한 EMF가 일정한 영역에서 전동기를 구동하면 통전각 내에서의 EMF는 일정함으로 EMF는 식 (6)으로 표현된다.

$$EMF_{ab} = K_e \times \omega \quad (6)$$

상기(6)식을 (5)식에 대입하면

$$\omega = (V_{ab} - I_a \times R_{ab}) / K_e \quad (7)$$

이다. 한편 BLDC 전동기의 토크는 전기자 권선의 권선 전류에 비례 한다. A, B상에 의해서 발생하는 전동기 토크는

$$T_e = K_t \times I_{ab} \quad (8)$$

이고, 전동기의 특성식은 다음과 같다.

$$\omega = (V_{ab} - T_e \times R_{ab} / K_t) / K_e \quad (9)$$

전동기의 특성을 그래프로 나타내면 그림9와 같다.

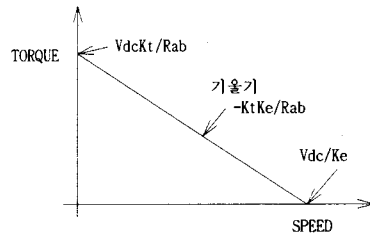


그림 9 BLDC 전동기의 특성 그래프

본 전동기의 최적설계를 위하여 미국 Ansoft사의 Maxwell 자계 해석 프로그램을 이용한다. 자계해석 프로그램 중 RMxprt와 EMPulse를 이용한다. EMPulse는 유한 요소법을 기초로 한 2차원 Time-stepping software로 전기자기장과 전기 회로 그리고 물체의 회전이나 이동 등의 Motion이 복합적으로 연계된 문제를 풀 수 있다. 또한 임의의 전류 전압 파형을 Source로 입력 할 수 있고, 이와 같은 Dynamic Motion 해석을 통하여 실제의 물리현상을 모델링 할 수 있다. 아래 식은 시변 전자기해석을 위한 기본 식이다. 또한 동적 매쉬 방법은 그림 17과 같다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} &= \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V + \\ &\nabla \times \mathbf{H}_c + \sigma \nabla \times \mathbf{A} \end{aligned} \quad (10)$$

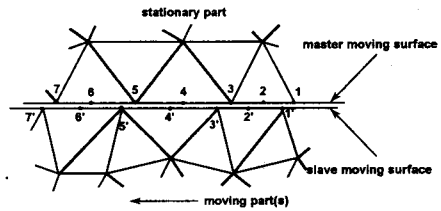


그림 10 동적 Mesh 방법

전동기가 설계된 회로정수(파라메타)로부터 전동기를 Maxwell Tool Program으로 해석하였으며, 그 결과는 그림 11-13과 같다.

#### 5. 실험결과

본 BLDC 전동기는 다상의 독립권선으로 구성된 고정자와 규소강판 적층내에 페라이트자석을 방사형으로 매입한 회전자 및 자속을 측정할 수 있는 센서로 구성되었다. 전동기 구동을 위하여 여자폭 변조, 양방향 제어, 부분 구형파 제어를 실시하였다. 전동기의 특성을 측정하기 위하여 다음의 실험을 하였다. 실험 장비는 아래 그림14와 같다. 본 측정을 위하여 다이 나모메타는 스위스 바이프로메타사의 PB25를 사용하였으며 3상 전력분석기는 오스트리아 노르마사의 D6000을 사용하였다.

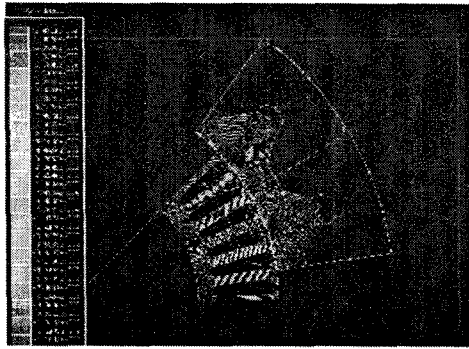


그림 11 자속선 분포도  
Airgap Flux den of No current

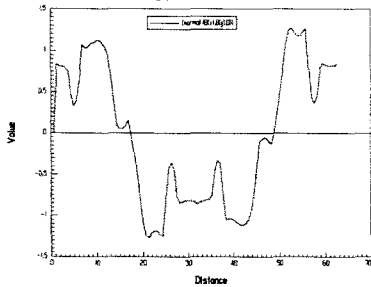


그림 12 무부하시 에어갭자속밀도  
Normal B of Rotor Only

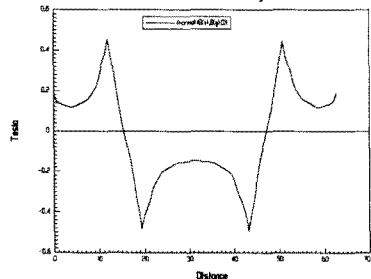


그림 13 회전자만의 자속밀도

그림 15는 제작된 실제 전동기 외형도이다. 그림 16은 제어기가 부착된 BLDC전동기의 내부를 보여주고 있다. 그림 17-18은 전동기 및 시스템(인버터)을 포함한 토크, 속도, 효율 곡선을 보여주고 있다. 그림 19는 PWM 제어 구동을 하지 않은 경우 무 부하시 회전속도, A상 전압, A상 전류를 보여주고 있다. 그림 20은 PWM 전류제어를 통한 속도 가변 지령을 하였을 경우 동작 특성을 보여주고 있다. 파형에서 볼 수 있듯이 전동기 구동 특성이 양호함을 볼 수 있다.

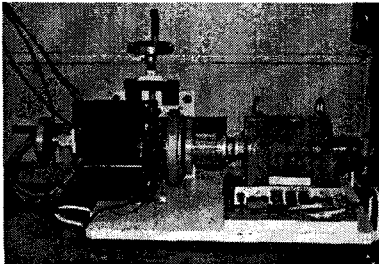


그림 14 전동기 및 다이내모메타 실험 세트

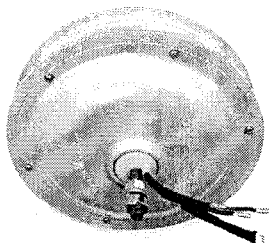


그림 15 개발된 BLDC 전동기의 외형도

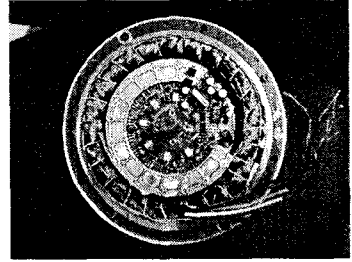


그림 16 전동기에 장착된 제어기

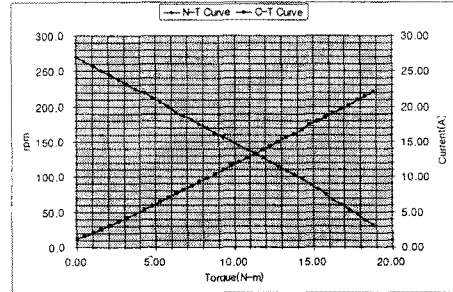


그림 17 속도, 토크, 전류특성곡선

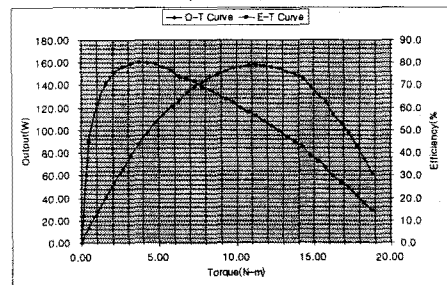


그림 18 토크, 출력, 효율 특성곡선

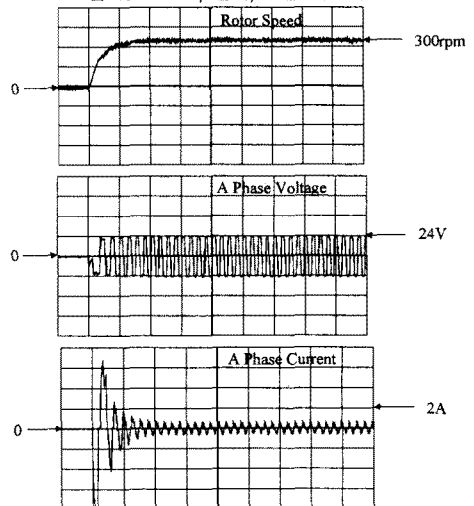
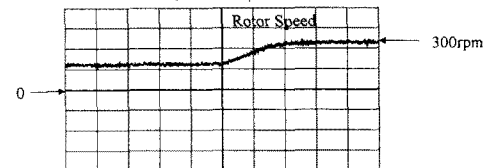


그림 19 회전속도, A상 전압, A상 전류(무부하시, PWM 전류제어를 하지 않은 경우, 0.1sec/div)



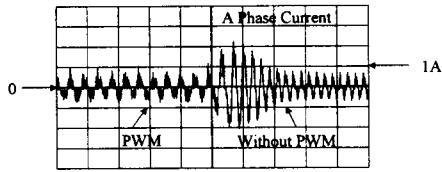


그림 20 회전속도, A상 전류(무부하시, PWM 전류제어를 이용한  
가변속 저령시, 0.1sec/div)

## 6. 결론

본 논문은 전기자전거 구동용 BLDC 전동기를 설계하였으며, 성능 특성을 개선하기 위하여 전동기의 회전자 및 고정자 권선의 구조를 새롭게 설계하였다. 또한 고 효율 및 토오크 리플을 개선하기 위하여 여자폭 변조 (Excited Width Modulation), 양방향 제어(Bidirection Control), 부분 구형파 제어 (Partial Square Wave Control) 등을 구현하였으며, 이를 제어기를 통하여 확립하였다. 따라서 본 BLDC 전동기는 저전압(DC) 구동에 매우 유리하며, 토크리플의 감소(저진동), 발열 감소, 고 토오크, 저속 구동 등의 특성을 볼 수 있었다. 본 논문에서는 제어기의 특성을 바탕으로 드라이버를 구성하였으며, 이를 토대로 전동기를 설계하고, 설계된 전동기의 특성은 미국 Ansoft사의 Maxwell 자계 해석 프로그램을 이용하여 전동기의 최적화를 확보하였다. 속도제어 시스템을 구현하기 위한 하드웨어 및 소프트웨어를 설계 제작하였고, 실험을 실시하여 전동기의 우수한 성능을 보았다.

### [참고문헌]

- [1] "Brushless DC Motor Provides High Power Density and High Efficiency at Low Cost for Electric Transportation", PCIM, pp. 1-6, 1996, January.
- [2] J.R. Hendershot Jr and Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Clarendon Press, 1994.
- [3] "Motor Application Note", Ansoft, 2000.