

수전동 휠체어용 구동장치 개발

Development of Driving System for Power Add-on Drive Wheelchair

홍응표^{1,✉}, 김용철¹, 김규석¹, 류제청¹, 문무성¹
Eung-Pyo Hong^{1,✉}, Yong-Cheol Kim¹, Gyoo-Suk Kim¹, Jae-Cheong Ryu¹ and Mu-Seong Mun¹

1 재활공학연구소 (Korea Orthopedics & Rehabilitation Engineering Center)

✉ Corresponding author: ephong@korec.re.kr, Tel: 032-500-0584

Manuscript received: 2010.11.22 / Accepted: 2011.6.6

The recent power add-on drive wheelchairs (PADWs) provide greater physical activity and easier transportability and may be an excellent alternative for the typical manual and powered wheelchairs. The driving system consists of a motor and a motor driver is the most important component of the PADW. In this paper, design, implementation, and testing of a driving system for a PADW are presented. To design the output power and torque for the driving system, the equation of motion has been investigated. The motor and driver were fabricated with precise machining and assembled to implement our prototype driving system. The dynamometer test has been carried out using the prototype in order to examine the torque of the system. The experimental results demonstrates that the designed driving system can provide enough output power and efficiency for utilization in a PADW.

Key Words: In-wheel Driving System (휠 내장형 구동장치), Manual to Electric Convertible Wheelchair (수동 전동 전환형 휠체어), Powered Wheelchair (전동휠체어)

1. 서론

수동휠체어는 사용자가 손으로 바퀴를 밀며 주행하는 휠체어로서 구조가 간단하고 상지운동을 수반하므로 사용자의 재활에 유용하다. 전동휠체어는 무겁고 고가이지만 상지가 손상된 장애인이나 근력이 저하된 노약자들이 사용하기 편리하다. 최근에는 세계적으로 복지투자가 확대됨에 따라 수동운전이 가능한 사용자들에게도 전동휠체어 공급이 지속적으로 증가하고 있다. 그러나, 일반적인 전동휠체어는 무겁고 부피가 커 승용차로 이송하기 어려우며 공동주택 등 계단이 많은 우리나라 주택 특성상 실내 보관이 쉽지 않다.

이러한 단점을 극복하기 위해 수동휠체어와 전동휠체어의 장점을 결합한 수전동 휠체어(power

add-on drive wheelchair: PADW)가 개발되고 있다.¹⁻⁴ PADW의 가장 큰 장점은 사용자의 필요에 따라 수동휠체어 기능과 전동휠체어 기능을 선택적으로 사용할 수 있다는 것이다. PADW는 전동운전이 가능하고 간편하게 휠과 배터리 등을 분리하여 승용차로 이송할 수 있으며 수동운전이 가능한 휠체어이다. 이를 위해 PADW는 초경량으로 구현되어야 하며 전동식 구동장치를 갖추고 있어야 하고 사용자의 독립적인 생활지원을 위해 보호자의 도움없이 수동휠체어처럼 휠을 분리하여 승용차 이송이 가능해야 한다.

독일의 알버(Alber)사에서 개발한 E-fix¹는 경량 프레임, 배터리 및 휠 일체형 구동장치로 구성되며 필요할 때는 간단히 구동 휠을 분리할 수 있다. 유사한 기능의 제품으로 일본의 야마하(Yamaha)사

에서 개발한 JW 시리즈²가 있으며, 국내에서는 재활공학연구소 등에서 유사제품에 대한 연구가 이루어졌다.^{3,4,12-14} 이로부터 PADW 는 편의성을 높이기 위해 간단히 구동휠과 차체로 분리되어야 하며, 노약자와 여성 보호자를 위해 경량화가 중요하고 이동거리를 증가시키기 위해 시스템 효율이 높아야 함을 알 수 있다.

PADW 용 구동장치에 사용하는 부품은 소형, 경량 및 고효율화가 요구되며 이를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 또한, 감속기, 모터, 드라이버 등의 핵심부품을 일체형으로 제작하기 위한 여러 구동장치 메커니즘들이 연구되고 있다.^{3,4,10,11} 본 연구에서는 기존의 PADW 들의 성능을 분석하여 새로운 PADW 를 위한 구동장치용 제품사양을 설정하였다. 제품사양으로부터 운동방정식을 통해 구동장치 용량을 결정하고 핵심부품인 모터와 드라이버를 설계 및 구현하였다. 제작된 구동장치는 시험을 통해 PADW 용으로 충분히 사용 가능함을 확인하였다.

2. 구동장치 설계

2.1 기존의 PADW

수동휠체어 차체에 탈착하는 전동보조이동장치(Add-on drive)는 PADW 와 유사한 기능을 수행하는 장치이지만 본 연구에서는 사양 분석대상에서 제외하였다. 표 1 은 알버사의 E-fix 25, 야마하사의 JWX-1, 오토복(Otto bock)사의 Z50 사양을 나타낸다. 표 1 에서 속도, 등반가능 경사, 이동거리는 전동휠체어 성능시험 공인검사 항목이며, 무게, 분리할 경우 구성품 최대무게, 부하, 배터리 등은 휠체어의 사용성을 결정하는 주요사양이다.

Table 1 Commercial PADW descriptions

| Specification | unit | E-fix 25 | Z 50 | JWX-1 |
|---------------------------|--------|----------|--------|----------|
| Weight/heaviest component | kg/kg | 26.5/9 | 27.2/9 | 17.6/8.6 |
| Speed | km/h | 6 | 6 | 6 |
| Loading | kg | 120 | 125 | 125 |
| Climbing gradient | degree | 10 | 6 | 6 |
| Battery | V/Ah | 24/12 | 24/12 | 24/6.7 |
| Range | km | 16 | 12 | 18 |

휠 크기도 전동휠체어 사양에 많은 영향을 미친다. PADW 용 휠 크기는 22 인치, 혹은 24 인치를 주로 사용한다. 개발하고자 하는 PADW 는 24 인치 휠을 적용하였다. 휠 크기가 감소하면 구동에 필요한 휠 토크도 감소하므로 24 인치용 구동장치는 22 인치용으로 사용 가능하다.

2.2 PADW 모델링

그림 1 은 사람이 타고 있는 PADW 가 경사를 등반할 때를 형상화한 것이다. PADW 는 완전히 좌우대칭이며 전륜은 이동방향을 조정하는 역할을 하고 축으로 연결된 후륜구동에 의해 주행한다고 가정한다. 휠체어와 사용자의 중량을 m 이라고 하면 V 의 속도로 움직이는 PADW 는 다음과 같은 운동방정식에 따라 움직인다.

$$F_r = m \frac{dV}{dt} \tag{1}$$

여기서, F_r 은 휠체어의 운동을 일으키는 주행력이다.

PADW 의 중요한 설계변수는 최대로 등반할 수 있는 도로경사와 이동속도이다. 이를 위해 구동장치의 사양을 설정할 필요가 있으며 표 2 와 같은 PADW 의 설계사양을 고려해야 한다. 표 2 의 설계사양은 표 1 의 E-fix 25 의 구동장치 성능과 JWX-1 의 배터리 성능을 기준으로 설정하였다. 표 2 의 설계 사양으로 PADW 를 설계한 후 이동거리에 따른 배터리 선택이 가능하다.

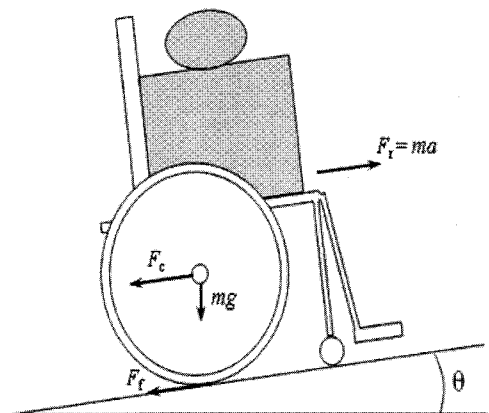


Fig. 1 External and driving forces acting on PADW along a slope

Table 2 Specifications of designed PADW

| Specification | Unit | Designed value |
|--------------------|--------|----------------|
| Weight | kg | 25 |
| Loading | kg | 115 |
| Heaviest component | kg | 8 |
| Wheel radius | inch | 24 |
| Climbing gradient | degree | 10 |
| Speed | km/h | 6 |
| Battery | V | 24 |
| Gear ratio | - | 1/22 |

2.3 PADW 용 구동장치 용량 산출

그림 1로부터 PADW가 경사면에 정지하기 위한 조건식은 다음과 같다.^{5,6}

$$F_r = F_c + F_f \tag{2}$$

여기서, F_f 는 바퀴와 도로면의 마찰력을, F_c 는 노면 경사에 의한 휠체어에 작용하는 힘 성분을 나타낸다. 경사면 θ 의 경사로에서 중력가속도 g , 도로면의 마찰계수를 μ 라 할 경우 F_f 와 F_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_f = \mu mg \cos \theta \tag{3}$$

$$F_c = mg \sin \theta \tag{4}$$

식 (1)에서 (4)로부터 휠체어가 경사면에서 정지하기 위해 아래식이 만족되어야 함을 알 수 있다.

$$F_s \geq mg(\sin \theta + \mu \cos \theta) \tag{5}$$

그림 2는 PADW 용 구동장치의 동력 전달장치 메커니즘을 나타낸다. 휠 허브는 감속기를 통해 모터와 연결되어 모터의 구동력을 전달 받는다. 구동모터의 각속도를 ω_m , 감속비를 n , 구동 휠의 반경을 r_w , 구동 휠에 작용하는 힘을 F_w 라 할 경우 모터의 출력 P 와 구동토크 τ_m 은 각각 다음과 같이 표시된다.

$$P = \tau_m \omega_m \tag{6}$$

$$\tau_m = nr_w F_w \tag{7}$$

식 (6), (7)로부터 2개의 휠을 사용하는 전동휠체어의 주행력은 다음과 같다.

$$F_r = \frac{2}{r_w n w_m} P_m \tag{8}$$

식 (5)와 (8)로부터 전동휠체어가 경사면에서 밀려 내려오지 않기 위한 구동모터의 출력은 다음과 같다.

$$P \geq \frac{1}{2} mgr_w n (\sin \theta + \mu \cos \theta) w_m \tag{9}$$

전동휠체어 시험규격에는 속도에 따른 정지거리가 규정되어 있다. 무게 m kg의 전동휠체어가 V km/h의 속도로 이동할 경우 전동휠체어가 가지고 있는 운동에너지 E_k 는 다음과 같다.

$$E_k = \frac{1}{2} m (V / 3.6)^2 \tag{10}$$

상기의 전동휠체어를 급정거시킬 경우 s m이 통한 후 정지하였다면 이때 필요한 전동휠체어의 제동력 F_s 는 다음과 같다.

$$F_s = \frac{1}{2s} m (V / 3.6)^2 \tag{11}$$

식 (9)와 표 2로부터 10°의 경사각에서 미끄러지지 않는 최소의 모터 출력은 530W이다. 시험검사기준으로부터 최대속도 6 km/h인 전동휠체어의 정지거리는 1m이며 식 (11)로부터 이때 필요한 전동휠체어의 제동력은 195N이다.

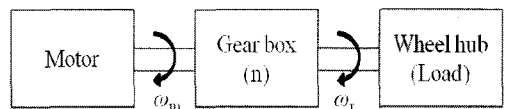


Fig. 2 Driving wheel mechanism

2.4 구동모터 설계

구동모터는 내구성이 높고 정밀한 제어가 가능한 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)을 채택하였다. 모터출력은 530W 이상이며, PADW 가 195N 의 제동력을 내기 위해 필요한 모터 토크는 2.65Nm 이다. 이로부터 본 연구에 사용할 구동모터의 사양을 표 3 과 같이 설정하였다. 구동모터는 24V 배터리를 사용하며 정격출력은 200W 이다. 모터는 정격 토크 1.5Nm, 정격 회전수 1,300rpm 이며, 최대 토크는 4.5 Nm 로써 약 1 초간 출력이 가능하도록 설계하였다. 또한, 설계한 모터는 감속기와 일체형으로 연결되는 구조이므로 양산성을 고려하여 모터 효율은 85%로 설정하였다.

모터는 내부에 고정자(stator)가 있고 외부에 영구자석 계자(field magnet)가 회전하는 외전형 모터(outer rotor motor) 구조로 설계되었고, 구동장치의 공간을 효율적으로 사용하기 위해 브레이크가 모터 내부에 삽입되는 중공(hub) 구조를 채택하였다. 회전자(rotor)는 견고하고 신뢰성이 높은 매입형(IPM: interior permanent magnet)으로 설계하였고 고정자 및 권선(winding)은 점적률을 높여 크기를 최소화 할 수 있는 분할코어(Split core) 정렬 집중권(concentrated winding)으로 설계하였다.^{7,9}

그림 3 은 설계된 모터를 나타낸다. 모터는 고정자를 조립하고 브레이크를 장착한 후 회전자에 고정자를 고정하는 구조이다. 영구자석은 매입형 회전자에 삽입하여 고정시킨다. 회전자의 속도검출을 위해 고정자에 별도의 어댑터를 부착하고 속도검출 센서를 부착하였다. 그림 3 으로부터 모터는 구동 휠(wheel hub)에 회전자가 고정되는 구조이며 모터 중심부를 통해 감속기 축으로 동력이 전달됨을 알 수 있다.

Table 3 Designed motor specification

| Specification | Unit | Design value |
|-----------------|------|--------------|
| Dimension | mm | Φ110 x 80 |
| Supply Voltage | Vdc | 24 |
| Current rating | Arms | 10±10% |
| Rated Power | W | 200 |
| Rated Torque | Nm | 1.5 |
| Max. Torque | Nm | 4.5 |
| Rated. Speed | Rpm | 1,300 |
| Max. Efficiency | % | 85 |
| Rotor type | - | Outer rotor |

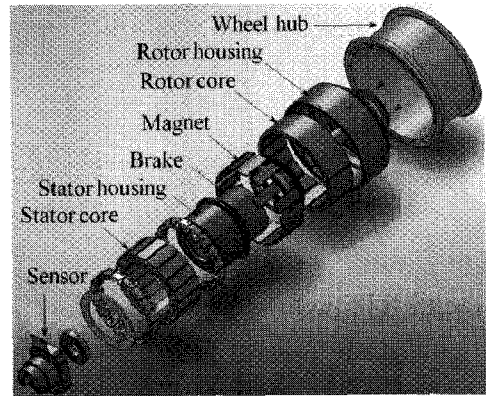


Fig. 3 Deal drawing of the motor

Table 4 Specification of motor driver for the PADW

| Specification | Unit | Design value |
|----------------------|-------|---|
| Topology | - | Current controlled voltage source dual inverter |
| Input voltage | Vdc | 24~33 |
| Max. output power | kVA | 1.4 |
| Max. output current | Wpeak | 50 (1sec) |
| Max. efficiency | % | 93 |
| Rated power | VA | 353 |
| Rated output current | Arms | 12 |
| Speed sensor input | - | 2ch encoder |
| Communication | - | CAN |

2.5 구동모터 드라이버 설계

표 3 과 같은 사양의 모터를 구동하기 위한 드라이버 사양은 표 4 와 같다. 드라이버는 배터리의 일정한 직류전압을 이용하고 인버터로 주파수를 가변하는 PWM(pulse width modulation) 방식의 전압형(voltage source) 인버터 구조로 설계하였다. 표 3 의 모터를 구동하기에 충분한 전류 공급이 가능하도록 사양을 설정하였고 조종기 지령을 수신하기 위해 CAN(controller area network) 통신을 적용하였다.

전동휠체어용 구동장치는 감속기, 모터, 드라이버, 조종기 및 배터리로 구성된다. 전동휠체어는 조종기의 신호에 따라 2 개의 드라이버를 구동하여 사용자가 원하는 속도 및 방향으로 이동하는 이동기기로써 가장 기본적인 제어변수는 속도이다. 일반적인 속도제어 알고리즘은 사용자에게 의해 설

정된 속도 프로파일에 속도 과형을 맞추는 것이다. 이를 위해 조종기의 방향 및 속도신호와 모터에서 피드백 받은 속도검출 센서 값을 비교하고 그 차를 최소화하도록 구동모터를 제어하게 된다. 그림 4는 표 4의 사양을 만족할 수 있는 PADW 용으로 설계한 모터 드라이버를 나타낸다.

PMSM의 발생토크는 영구자석의 자속과 쇄교하는 고정자의 전류를 제어함으로써 실현할 수 있다. 영구자석의 자속은 일정하기 때문에 고정자 전류성분만을 제어하면 출력 토크를 제어할 수 있고 회전속도도 제어 가능하다. 3상 입력 전압 및 전류가 대칭이라 가정하면 모터의 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, R 은 상 저항, L 은 상 인덕턴스, V_a, V_b, V_c 는 상 전압, i_a, i_b, i_c 는 상 전류, e_a, e_b, e_c 는 역기전력을 나타낸다. 이때 발생하는 모터 토크는 식 (13)과 같다.

$$\tau_m = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (13)$$

일반적인 PMSM의 속도제어는 그림 5와 같이 지령속도 ω_{ref} 와 실제 속도 ω_r 의 오차를 비례적분 (proportional integral) 제어하여 지령 전류 i_{xref} 를 얻고, 지령전류와 실제 전류 i_x 의 오차로부터 비례적분 제어기를 사용하여 식 (12)의 모터로 공급해야 하는 V_a, V_b, V_c 상전압 출력을 얻을 수 있다. 이러한 전류 및 속도 제어기는 모터 및 부하의 시정수와 전기적 시정수에 따라 그 이득을 설정함으로써 안정적인 속도 제어를 실현할 수 있다.

휠체어의 운전제어는 장애인의 안전을 위해 운행속도, 가감속 시간, 회전속도 등을 고려해야 한다. 속도제어의 시정수 결정을 위해 전동휠체어의 상황에 따른 모터의 속도 프로파일을 검토하고 최적의 속도와 프로파일을 적용하여 모터의 기동 제어, 운전속도 제어, 가감속 제어 등을 실현해야 한다. 시동과 정지시에는 사용자의 안전을 위해 적절한 시간의 가속 및 감속이 필요하다.

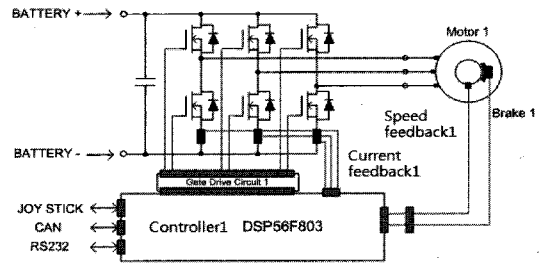


Fig. 4 Driver circuit for PADW

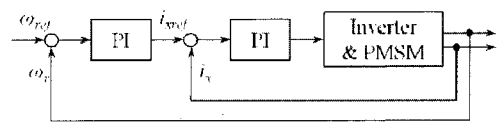


Fig. 5 Speed and current control scheme of PMSM

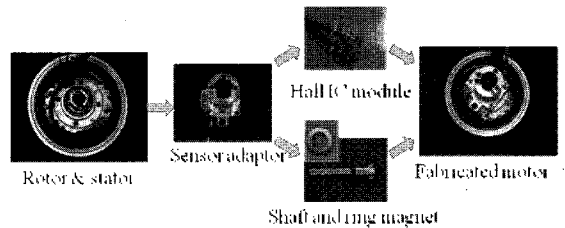


Fig. 6 Construction of motor assembly using hall IC module attached to the stator

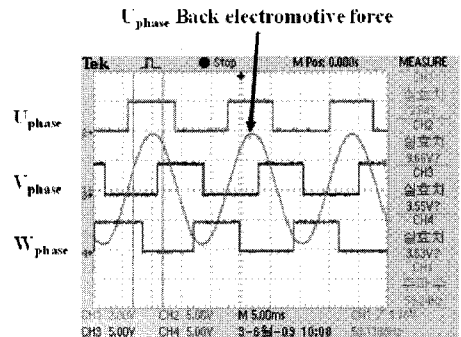


Fig. 7 Output signals of motor sensors. The sensor signal U_{phase} synchronize with U_{phase} rising edge of back electromotive force signal

3. 제작 및 시험

3.1 모터 제작 및 시험

제작된 PADW 용 구동모터의 회전자와 고정자 모듈은 직경 110mm, 두께 80mm 였다. 그림 6은 제작된 회전자와 고정자 모듈에 속도검출 센서를

조립하는 과정을 나타낸다. 센서 고정용 어댑터를 고정자에 부착하고 홀 센서를 구동축에 연결되어 있는 속도감지용 자석과 맞추어 적절한 센서출력을 얻을 수 있도록 조정한다. 센서출력의 U 상은 그림 7 과 같이 역기전력 U 상 상승기에 맞추어지도록 센서를 장착하였다. 제작된 모터는 다이내모미터(dynamometer)를 이용하여 부하시험을 시행하였고 시험결과는 표 5 와 같다. 표 5 로부터 제작된 모터는 설계사양을 충분히 만족함을 알 수 있다. 부하시험시 모터 권선과 표면에 서미스터(thermistor)를 부착하여 온도변화를 측정하였고 모터 정격에서 연속 운전시 모터 권선의 온도가 60°를 넘지 않음을 확인하였다.

3.2 드라이버 제작 및 시험

그림 8 은 제작된 드라이버를 나타낸다. 인버터는 방열특성이 우수한 메탈 PCB 를 적용하고 셉트 저항을 사용하여 인버터 상전류를 검출함으로써 소형·경량화를 실현하였다. MosFET 의 게이트 신호는 단 전원 게이트 구동을 위하여 차지 펌프(charge pump)를 사용하여 구성하였고 10 kHz 의 스위칭 주파수를 가진다. 10 kHz 의 스위칭 주파수는 전력용 소자의 원활한 스위칭 동작과 제어기의 연산능력에 따라 결정되었다. 사용한 MosFET 는 IR (International Rectifier)사의 IRFP8020 이었다.

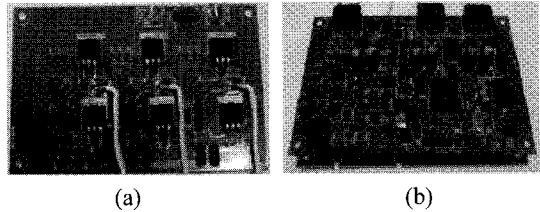


Fig 8 Implemented motor driver for PADW; (a) MosFET inverter module with metal PCB and (b) control part

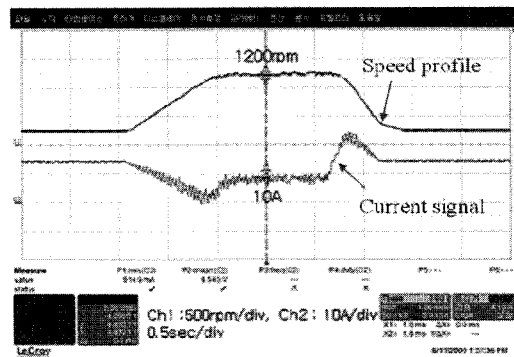


Fig. 9 Controlled current signal for smooth speed profile. The speed profile consists of rise time of 1 second and fall time of 0.5 second

Table 5 Measured results of implemented motor

| Item | Unit | Designed value | Measured value |
|-----------------|------|----------------|----------------|
| Driving voltage | Vdc | 24 | 24 |
| Rated output | W | 200 | 204 |
| Rated Torque | Nm | 1.5 | 1.5 |
| Max. Torque | Nm | 4.5 | 4.5 |
| Rated speed | Rpm | 1300 | 1300 |
| Rated current | Arms | 10±10% | 10.5 |
| Efficiency | % | 85 | 82 |

Table 6 Measured results of the motor driver

| Item | Unit | Designed value | Measured value |
|----------------------|------|----------------|----------------|
| Input voltage | Vdc | 24-33 | 24-33 |
| Rated power | VA | 353 | 329 |
| Rated output current | Arms | 12 | 12 |
| Max. efficiency | % | 93 | 90 |

DC 링크 커패시터는 배터리로부터 안정적인 DC 전압을 유지하기 위해 온도사양 105° 의 22μF/100V 로 선정하였다. 제어용 프로세서는 3 상 인버터를 제어하기 위해 6 개의 PWM 포트를 내장하고 있고, 인버터의 전류 검출 등을 위한 AD 컨버터 기능이 있으며, 홀센서 입력 등의 디지털 I/O 를 내장하고 있는 16bit DSP(digital signal processor)인 Freescale 사의 DSP56F80 을 채택하였다. 이 프로세서는 통신을 위한 CAN 채널과 컴퓨터와의 에뮬레이션이 가능한 RS232C 통신 기능도 내장하고 있다. 제작된 드라이버는 부하시험으로부터 표 6 과 같은 드라이버 특성을 확인하였다.

시험을 위해 개발한 드라이버를 휠체어에 장착하고 모터를 구동하였다. 휠체어의 주행속도는 조이스틱의 변위량을 제어기로 입력하여 모터의 속도를 제어함으로써 조절할 수 있다. 모터의 속도 제어에는 급발진과 급정지에 의한 사고가 발생하지 않도록 적절한 가감속 시간기준이 필요하다. 본 연구에서 모터의 가속시간은 1~3 초, 감속시간은 속도에 따라 1m 이내 정지 가능한 시간으로 제한하였다.

그림 9 는 모터 속도에 대한 전류제어 파형을 나타낸다. 전동휠체어의 안정성과 가속 및 정지할 때 승차감을 향상시키기 위해 가속 시작부분과 종결 부분은 특히 완만한 곡선을 가질 수 있도록 해야 한다. 본 연구에서는 상승시간 및 하강시간 등을 결정하고 전체적인 속도 프로파일이 'S'자 형태를 가질 수 있도록 하였다. 그림 9 의 전류 파형은 가속시간을 1 초, 감속시간을 0.5 초로 하고 상승시작 시간 0.2 초, 상승 종결 시간 0.2 초, 감속 시작 시간 및 감속 종결 시간을 각각 0.2 초로 하였을 때 전동기의 실제속도를 나타낸다. 6km/h 의 속도로 가속할 때 가속시간은 1~3 초이며, 6km/h 의 속도에서 감속시간은 약 1.5 초이다.¹² 그림 9 로부터 가속 및 감속 시간은 짧으나 S 자 형태의 프로파일을 가지므로 유연하고 빠른 가감속 제어가 가능함을 확인하였다.

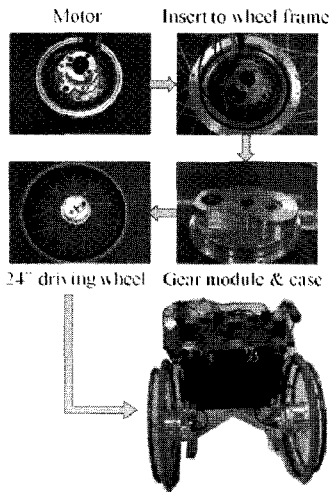


Fig. 10 PADW assembly. Motor insert into wheel frame and gear module connect onto motor shaft. Then the wheels and drivers attached to the manual wheelchair

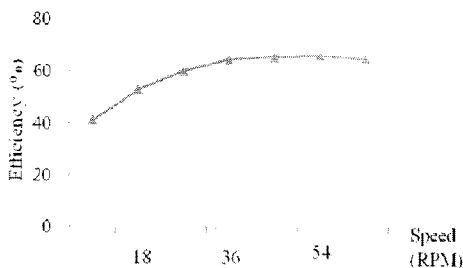


Fig. 11 Efficiency of the driving wheel

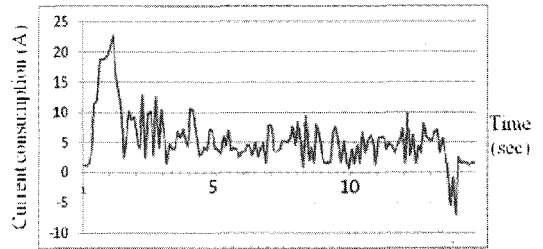


Fig. 12 Current consumption of the PADW under 70kg user load

3.3 구동장치 제작 및 시험

그림 10 은 구동장치를 휠에 조립하는 과정과 조립된 PADW 시제를 나타낸다. 제작된 모터를 휠 허브에 삽입한 후 감속기를 장착하여 구동 휠을 제작하였다. 모터와 센서 등의 배선은 커넥터를 통해 드라이버 및 배터리 측과 연결된다. 구동 장치의 효율을 확인하기 위해 부하시험을 시행하였고 그림 11 과 같은 측정결과를 획득하였다. 그림 11 로부터 제작된 구동 휠은 36 rpm 이상에서 약 65%의 높은 효율을 보임을 알 수 있다. 모터, 감속기, 드라이버 등 구동장치의 핵심부품이 시제작품임을 감안한다면 안정된 양산공정 확보를 통해 구동장치 효율을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

그림 12 는 그림 10 과 같이 조립된 구동 휠을 장착한 전동휠체어를 70kg 의 사용자가 평지에서 6km/h 의 속도로 운전하며 측정한 휠체어 전체의 소모전류를 나타낸다. 실험에 사용한 구동장치용 드라이버의 가속 및 감속시간은 1 초였으며, 그림 과 같이 가속할 때 피크 전류가 20A 이상 큰 전류가 필요함을 알 수 있다. 또한, 빠른 속도로 정속 주행할 때에도 피크 전류의 변화가 많음을 알 수 있다. 정속 주행할 때 평균소모전류는 4.3A 였다. 그림 12 에서 휠체어 정지 후 소모전류는 약 1.2A 인데 브레이크가 동작하고 있고 드라이버의 프로세스도 슬립모드로 진입하지 않은 상태를 의미한다. 구동장치에 사용한 브레이크는 정마찰토크가 1.5 Nm 이며 이를 위한 소모전류 는 0.4A 였다.

4. 고찰

PADW 의 핵심장치인 구동장치는 다양한 메커니즘으로 구성 가능하다. 알버사의 E-fix 25, 야마하사의 JWX-1 는 차별화된 메커니즘으로 구성되어 있다.^{10,11} 본 연구에서는 기존의 메커니즘과 차별화

를 위해 동력전달 체계, 클러치 메커니즘, 구동 휠 탈착구조 등에 독창적인 메커니즘을 적용하였다. 이로 인해 모터 형상과 방식에 제약이 발생하였고 브레이크를 모터 내부로 밀어 넣어 구동장치 두께를 최적화 하였다.

그림 3 과 같이 모터를 제작하고 센서를 부착하기 위해 별도의 어댑터를 사용하였다. 이 어댑터는 모터 고정자를 지지하는 역할에도 사용된다. 제작된 센서는 그림 7 과 같은 신호를 출력하였고 구동방향 혹은 시제품에 따라 센서 출력의 변동률은 약 5% 였다. PADW 의 경우 좌우의 구동 휠이 바뀔 수 있으므로 센서를 더욱 안정화시켜야 정밀한 제어가 가능하다. 그림 12 에서 정상 운전할 때 전류피크의 큰 변화는 센서출력의 오차에 기인한 것으로 판단된다. 센서의 정교화를 위해 홀센서 고정장치의 금형제작이 필요하며 센서 어댑터 등 부품의 정밀가공이 요구된다. 저속에서의 정밀한 제어를 위해 홀센서가 아닌 자기식 인코더(magnetic encoder) 적용을 검토하고 있다.¹⁴

E-fix 는 정상 운전에서 70kg 사용자가 탑승할 때 소모전류는 약 3A 이며, JWX-1 은 소모전류는 약 2.2A 이다. 제작한 PADW 는 E-fix 혹은 JWX-1 에 비해 많은 전류를 소모함을 알 수 있다. 그 원인은 센서 신호의 오차로 그림 12 와 같이 리플이 크고, 구동모터의 용량이 200W 이며, 브레이크 등 주변장치의 소모전류가 높다는 것 등이다. 소모전류는 배터리용량 및 이동거리 결정에 중요한 요소이며 휠체어 무게, 가격 등에 영향을 미치므로 소모전류를 최적화하는 추가적인 제품화 연구가 요구된다.

일반적인 전동휠체어는 소모전류를 최적화하기 위해 최고속도에서 최고효율을 가지도록 시스템을 구성한다. 그림 11 에서 측정된 시스템 효율은 45 RPM 에서 최대 65%였고, 휠의 최고속도인 59RPM 에서 64%였다. 45RPM 에서 모터 효율 82%, 드라이버 효율 90%, 감속기 효율 89%일 때 구동 휠의 효율이 최대였다. 최고속도에서 약간의 효율감소가 있었으나 개발한 시스템은 설계와 유사하게 구현되었음을 알 수 있다. 감속기, 모터, 센서 등 정밀가공과 양산공정이 필요한 부품들은 시제품으로써의 효율개선에 한계가 존재한다.

국내의 일반적인 보급형 전동휠체어 효율은 40%이하로 개발한 PADW 에 비해 매우 낮은 수준이다. 그러나, 국외의 옥외용 고급 휠체어들 가운데 매우 높은 시스템 효율을 가지는 휠체어들이

소개되고 있다. 알버사의 Adventure¹ 는 시스템 효율 80%의 고효율 전동휠체어이며 가격도 천만원대의 고급제품이다. 개발한 PADW 도 시스템 효율을 개선하기 위해 감속기, 모터, 드라이버 등의 핵심부품 정교화와 부품간 인터페이스 개선이 진행 중이다. 효율개선은 부품가격과 밀접한 관계가 있으며 전동휠체어 가격과 트레이드-오프를 요구한다.

5. 결론

본 연구에서는 초경량 휠체어인 PADW 용 구동장치를 설계 및 구현하였다. 구동모터, 모터 드라이버를 설계 및 제작하였고 구동 휠을 제작하여 휠체어에 부착한 후 구동시험을 통해 특성을 확인하였다. 제작한 구동장치는 초경량 휠체어에 적용이 가능하였고 65%의 높은 시스템 효율을 보였다. 제품화를 위한 정교화 및 소모전류를 개선하는 연구가 진행 중이다.

후 기

이 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 지원(과제번호: 10032055)으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Ulrich Alber, <http://www.alber.de>
2. Yamaha Motor, <http://www.yamaha-motor.jp>
3. Ryu, J. C., "The Convertible Wheelchair System," J. of KSPE, Vol. 20, No. 2, pp. 14-18, 2003.
4. Choi, Y. C., Rhee, K. M., Choi, H. S. and Seo, Y. T., "Development of the Foldable Manual/Power Hybrid Wheelchair," J. of KSPE, Vol. 23, No. 2, pp. 172-180, 2006.
5. Yang, Y. P., Huang, W. C. and Lai, C. W., "Optimal design of rim motor for electric powered wheelchair," IET- Electric Power Applications, Vol. 1, No. 5, pp. 825-832, 2007.
6. Kim, B. H., "Analysis on Climbing Capability of Wheel Drive Robotic Mechanisms," J. of KIIS, Vol. 18, No. 3 pp. 329-334, 2008.
7. KOMOTEK, <http://www.komotek.com>
8. Cho, J. H., Oh, H. S., Cho, S. G., Kim, D. K., Lee, S. W., Kim, H. O. and Park, J. W., "Rotor core shape

- design for high power of Hybrid electric vehicle driving motor," Proc. of KSAE Autumn Conference, Vol. 3, pp. 1653-1657, 2006.
9. Cho, J. H., Lee, H. Y., Oh, H. S., Cho, S. G., Yoon, J. S. and Kim, D. K., "Trend of Technology for the driving motor of hybrid electric vehicle," Proc. of KSAE Autumn Conference, Vol. 2, pp. 1449-1452, 2005.
 10. Ulrich Alber, "Small vehicle, particularly rolling chair with foldable chair frame," Alber, US Patent, No. 5246082, 1993.
 11. Naitou, S. and Hino, H., "Rotary electric machine and electric wheelchair mounted with rotary electric machine," Yamaha, US Patent, No. 7592733, 2009.
 12. Hong, E. P., Oh, H. S., Ryu, J. C. and Mun, M. S., "Development of In-wheel motor for powered Wheelchair," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 649-650, 2010.
 13. Kim, Y. C., Hong, E. P., Kim, K. S., Ryu, J. C. and Mun, M. S., "Development of In-wheel driving mechanism for Electric Wheelchairs," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 983-984, 2010.
 14. Hong, E. P., Hwang, J. H., Ryu, J. C. and Mun, M. S., "Application of linear hall sensor for powered-wheelchair motor," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 1021-1022, 2010.