

# 토크센서 기반 사용자의도 파악이 가능한 보행보조기용 인휠 구동기 개발

## Development of In-wheel Actuator for Active Walking Aids Equipped with Torque Sensor for User Intention Recognition

임승환<sup>1</sup>, 김태근<sup>3,✉</sup>, 김동엽<sup>3</sup>, 황정훈<sup>3</sup>, 김봉석<sup>3</sup>, 박창우<sup>3</sup>, 이재민<sup>3</sup>, 홍대희<sup>2</sup>  
Seung-Hwan Lim<sup>1</sup>, Tae-Keun Kim<sup>3,✉</sup>, Dong Yeop Kim<sup>3</sup>, Jung-Hoon Hwang<sup>3</sup>,  
Bong-Seok Kim<sup>3</sup>, Chang Woo Park<sup>3</sup>, Jae-Min Lee<sup>3</sup>, and Daehie Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학부 대학원 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University)

<sup>2</sup> 고려대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Korea University)

<sup>3</sup> 전자부품연구원 (Korea Electronics Technology Institute)

✉ Corresponding author: [taekeunkim17@gmail.com](mailto:taekeunkim17@gmail.com), Tel: +82-32-621-2843

Manuscript received: 2014.7.9 / Revised: 2014.10.16 / Accepted: 2014.10.20

*As life expectancy becomes longer, reduction of human muscular strength threatens quality of human life. Many robotic devices have thus been developed to support and help human daily life. This paper deals with a new type of in-wheel actuator that can be effectively used for the robotic devices. BLDC motor, drive board, brake, ARS (Attribute Reference System), and torque sensor are combined in the single actuator module. The torque sensor is used to recognize human intention and the in-wheel actuator drives walking aids in our system. Its feasibility was tested with the active walking aid device equipped with the in-wheel actuator. Based on it, we designed an admittance filter algorithm to react on uphill and downhill drive. By adjusting mass, damping, and spring parameters in accordance with the ARS output, it provided convenient drive to the old on uphill and downhill walks.*

Key Words: Intension recognition (의도파악), Gravity compensation (중력보상), In-wheel actuator (인휠 구동기), Brake module (브레이크모듈)

### 기호설명

$\tau_e$  = Torque measured with torque sensor

$\tau_{en}$  = Torque caused by walking aid mass

$\theta$  = Angle between ground and walking aids

$q$  = In-wheel actuator position

$e$  = Position error

$q_{cmd}$  = Target velocity

$M$  = Mass constant

$D$  = Damping constant

$K$  = Spring constant

### 1. 서론

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의학 기술과 의료 기기의 발달로 인간의 수명은 급속도로 증가하고 있으며, 2014년 현재 우리나라도 65세 이상의 인구가 전체 인구의 10% 이상인 고령화 사회로 진입하였다. 일반적으로 고령 인구는 신체기능의 저하가 나타나며, 그 중 일상 생활과 가장 밀접한 부분은 다리 근육의 저하이다. 이로 인하여 고령인구의 외부 활동량이 감소하고 결과적으로 사회 참여율의 저하와 생활 전반에 문제가 발생한다.<sup>1</sup> 더 나아가 국가적인 측면에서도 노동인구가 줄어들게 되고, 이는 사회기반의 부재로 이어질 수 있다. 이러한 추세에 따라 최근 다리 근육의 기능 저하를 보조하기 위한 능동 보행 보조기에 대한 관심이 증가하고 있다.

대표적인 능동 보행보조기의 연구로는 Hapica사의 Guido<sup>2</sup>와 IPA사의 Care-O-bot<sup>3</sup>이 있으며, 이 보행보조기는 자이로센서와 초음파 센서 등을 이용하여 장애물을 자동으로 인식하고 회피할 수 있다. Carnegie Melon 대학의 Robotic Walker<sup>4</sup>는 네비게이션 기반의 자율주행에 대한 연구를 진행하였다. 그러나 이러한 연구들은 보행보조기의 이동성 및 안전성을 고려한 자율 주행 기능 개발에 집중하였으며, 많은 센서와 복잡한 시스템으로 인하여 사용자가 보행보조기를 사용함에 있어서 기능 숙지와 조작의 어려움이 발생하였다.

이에 본 논문에서는 사용자가 보다 쉽고 편안하게 조작할 수 있는 보행보조기를 개발하고자 한다. 별도의 조작기 없이 사용자의 의도를 파악할 수 있도록 인휠 구동기 내부에 토크센서를 장착하였고,<sup>5</sup> 경사도에 의한 영향을 보상할 수 있도록 자이로센서를 장착하였다. 또한, 토크센서와 자이로센서를 이용하여 사용자가 보다 안전하고 편안하게 보행보조기를 구동할 수 있도록 제어 알고리즘을 개발하였으며, 기존의 보행보조기에 쉽게 적용할 수 있도록 구동기, 센서, 제어기가 일체화된 인휠 구동기(in-wheel actuator)를 개발하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 인휠 구동기의 설계 및 구성 부품 개발에 대해서 설명하고, 3장에서는 토크센서 및 자이로센서를 이용한 인휠 구동기 제어 알고리즘에 대해서 설명한다. 4장은 제어 알고리즘을 적용한 실험을 수행하며, 마지막으로 5장에서 결론을 도출한다.

## 2. 인휠 구동기의 구성

쉽고 편안한 조작이 가능한 보행보조기 개발을

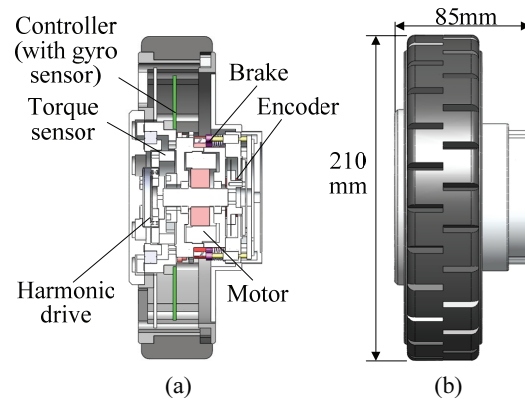


Fig. 1 Developed in-wheel actuator: (a) Structure, and (b) Size of in-wheel actuator

위한 인휠 구동기의 구성은 Fig. 1(a)와 같다. 모터와 감속기로 구성된 구동부는 보행보조기의 동력을 발생시키며, 토크센서는 사용자가 보행보조기에 가하는 힘을 측정한다. 보행보조기의 안전한 구동을 위해서 브레이크를 장착하였으며, 토크센서 및 자이로센서 등의 신호 처리와 모터 및 브레이크 구동을 위한 제어기를 인휠 구동기 내부에 일체화 하였다.

### 2.1 구동부

인휠 구동기를 보행보조기에 쉽게 적용하기 위해서는 무게와 크기를 고려해야 한다. 보행보조기의 휴대성을 위해서 가벼워야 하며, 회전 반경을 고려하여 보행보조기 전체의 폭은 650mm 이하로 개발되어야 한다.<sup>6</sup> 가벼우면서도 큰 힘을 낼 수 있으며, 박형으로 설계가 가능하도록 풀모멘 모터와 하모닉 드라이브를 사용하여 구동부를 구성하였으며, 설계된 인휠 구동기의 크기는 Fig. 1(b)와 같다. 본 인휠 구동기는 일반적인 보행보조기의 폭이 460~480mm 임을 고려할 때, 별도의 수정 없이 보행보조기에 쉽게 적용할 수 있다. 100kg의 사용자가 6° 이상의 경사도에서 사용할 수 있도록 10Nm 이상의 연속 부하 토크를 가지며, 평지에서 최대 2km/h 이상의 속도로 구동할 수 있도록 개발하였다.

### 2.2 토크센서

보행보조기의 구동기는 일반 머니플레이터의 구동기와는 다르게 무한 회전이 필요하다. 일반적인 머니플레이터와 같이 출력단에 토크센서를 위

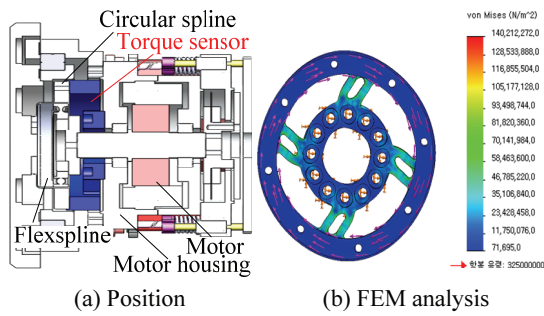


Fig. 2 Torque sensor

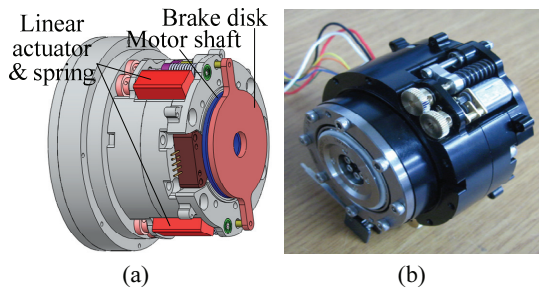


Fig. 3 Brake module: (a) Design, and (b) Assembled in driving module

치시키면 출력 신호선의 꼬임으로 인하여 무한 회전을 할 수 없게 된다. 이를 해결하기 위해서 슬립 링(slip ring)을 사용하게 되면 출력 신호선의 외란 문제가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 토크센서를 Fig. 2(a)와 같이 모터 하우징과 하모닉 드라이브의 서클러-스플라인(circular-spline) 사이에 구성하여 토크센서가 회전하지 않으면서도 출력단의 토크를 측정할 수 있도록 설계하였다. 토크센서를 경량, 박형으로 개발하기 위해서 Fig. 2(b)와 같이 허브-스포크 타입으로 설계하였으며,<sup>7</sup> 유한요소해석을 통하여  $\pm 30\text{Nm}$ 의 토크를 측정할 수 있도록 센서 구조물을 최적화 하였다.

### 2.3 브레이크

기존의 전자식 브레이크를 인휠 구동기에 적용하기 위해서 모터 축에 직렬로 연결하면, 인휠 구동기의 폭이 커지며 무게도 증가한다. 본 연구에서는 Fig. 3(a)와 같이 선형 구동기와 스프링을 이용하여 브레이크 구동부를 구성하였으며, 이를 모터 하우징을 감싸도록 설계하여 인휠 구동기의 축방향 길이 증가를 최소화 하였다. Fig. 3(b)는 제작된 브레이크 모듈의 조립 모습이다.

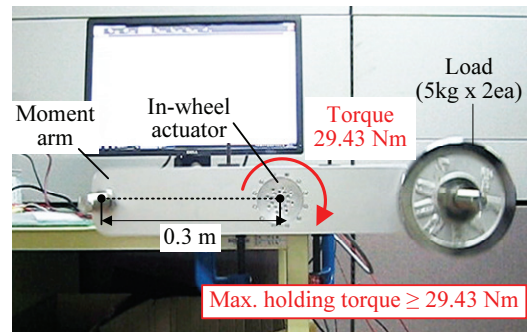


Fig. 4 Brake holding torque test

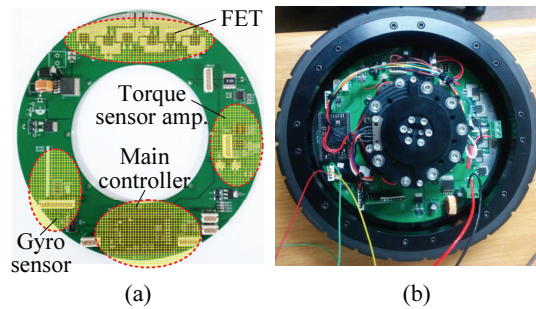


Fig. 5 Controller for in-wheel actuator: (a) Controller board, and (b) Installed controller board in actuator

식약청의 전동스쿠터 안정성 규정을 참조하면,  $6^\circ$  경사로에서 100 Kg의 사람이 약 20 Kg의 보행보조기를 정적인 상태에서 안정적으로 정지시키기 위해서는 13.5Nm 이상의 토크가 요구되며, 각 인휠 구동기에는 6.75Nm 이상의 정지 토크가 필요하다.<sup>8</sup> 브레이크의 정지력을 검증하기 위하여, Fig. 4와 같이 실험 장치를 구성하였다. 인휠 구동기 출력단에 모멘트 암을 결합하였으며, 무게추를 이용하여 토크를 발생시키면서 정지 토크를 측정하였으며, 29.43Nm 이상의 부하 토크를 버틸 수 있음을 확인하였다.

### 2.4 제어기

인휠 구동기의 제어기는 Fig. 5(a)와 같이 원형 모양으로 개발하였으며, Fig. 5(b)와 같이 인휠 구동기 내부에 장착하였다. 제어기는 엔코더, 자이로센서, 토크센서 등의 각종 신호를 처리하는 신호처리부, 브레이크를 제어하는 브레이크 구동부, 각종 제어 신호를 이용하여 인휠 구동기를 동작시키는 메인 제어부 등으로 구성된다.

### 3. 인휠 구동기의 제어 알고리즘

인휠 구동기의 제어 원리는 Fig. 6과 같이 사용자가 구동기에 가하는 외력을 토크센서의 변형을 이용하여 측정 한 후에 어드미턴스 필터(admittance filter)를 통하여 목표 속도 값으로 변환하여 인휠 구동기를 구동하는 것이다. 사용자가 보행보조기를 사용하는 상태에서 앞으로 나아가고자 한다면 보행보조기를 앞으로 밀게 되며, 이때 사용자의 외력으로 인한 힘이 인휠 구동기의 토크센서에 가해진다. 따라서 인휠 구동기의 토크센서 값을 통해 사용자의 의도를 파악할 수 있으며, 사용자의 의도가 반영된 토크와 어드미턴스 필터를 사용하여 인휠 구동기 제어 입력인  $\dot{q}_{cmd}$  를 계산 할 수 있다. 이때 사용된 어드미턴스 필터는 다음의 식으로 표현된다.

$$M\ddot{e} + D\dot{e} + Ke = \tau \tag{1}$$

여기서,  $\ddot{e}$  은 가속도 오차,  $\dot{e}$  는 속도 오차,  $e$  는 위치 오차이며,  $M$  은 질량 계수,  $D$  는 댐핑 계수,  $K$  는 강성 계수이다. 본 연구에서는 사용자가 쉽게 보행보조기를 사용하기 위하여 어드미턴스 필터의 강성 항은 제외되었다. 식(1)을 정리하면 가속도 오차를 식(2)와 같이 제어기에서 취득되는 위치, 속도 그리고 토크센서의 토크 값으로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{e} = \frac{\tau - D\dot{e} + Ke}{M} \tag{2}$$

$$\ddot{q} = \ddot{e} + \ddot{q}_d \tag{3}$$

식(2)에서 얻은 가속도 오차를 궤적 생성기로부터 생성한 목표 가속도 ( $\ddot{q}_d$ ) 와 합한 후, 적분하면 어드미턴스 효과로 인해 변형된  $\dot{q}_{cmd}$  를 도출할 수 있다.

보행보조기를 사용함에 있어서 경사면에서의 운용은 주의가 필요하다. 보행보조기의 자중으로 인하여 오르막길에서는 추가적인 힘이 필요하며, 내리막길에서는 사용자 보행의 안전에 문제가 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 경사로 동작 시에 인휠 구동기에 내장된 자이로 센서를 이용하여 경사로를 감지하고 적절하게 어드미턴스 필터의 댐핑 값을 조절하여 사용자의 보행을 효율적으로 보조하도록 어드미턴스 필터를

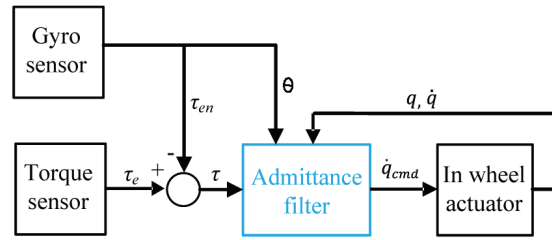


Fig. 6 Control algorithm

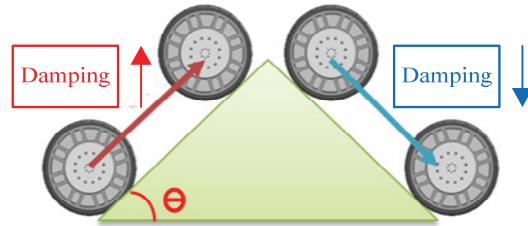


Fig. 7 Damping parameter adjustment depending on uphill/downhill

설계하였다. 오르막 경사로에서는 어드미턴스 필터의 댐핑 계수를 낮추어 사용자가 오르막길을 쉽게 올라가도록 하였으며, 내리막 경사로에서는 계수를 높여서 사용자의 보행 안전을 확보하였다.

### 4. 실험 및 결과

#### 4.1 실험 결과

제안한 인휠 구동기의 제어 알고리즘이 실제로 경사로에서 사용자의 편의성과 안전을 보장할 수 있는지를 확인하기 위해 실험을 수행하였다. 사용자가 보행보조기를 이용하여 주행할 때, 경사로에 따라 댐핑 계수 값을 변화시켜 실험을 수행하였다. Fig. 8과 같이 인휠 구동기에 시계 방향으로 동일한 힘을 가할 때, 어드미턴스 필터의 댐핑 계수 값에 의한 인휠 구동기의 구동 속도와 이동 위치의 차이를 비교하였다.

#### 4.2 실험 결과

Fig. 9(a)는 질량 계수 값은 0.001 kg, 댐핑 계수 값은 0.02 Ns/m, 그리고 강성 계수 값은 0 N/m으로 설정 하고 시험을 수행하였을 때, 인휠 구동기에 가해진 토크와 이에 따른 인휠 구동기의 위치와 속도를 나타낸다. 이 계수 설정 값은 오르막 상황에서 보행보조기를 운용할 때를 가정하여 낮은 댐핑 값을 설정한 것이다. 또한 내리막길에서의 보

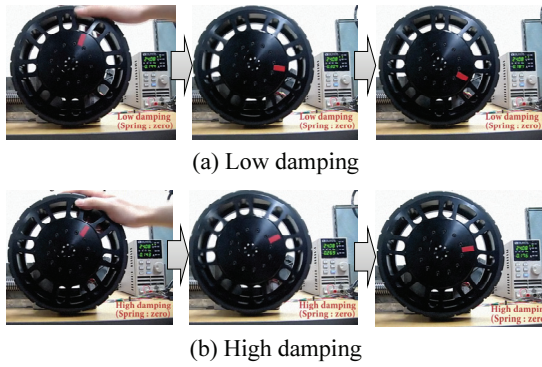


Fig. 8 Algorithm test

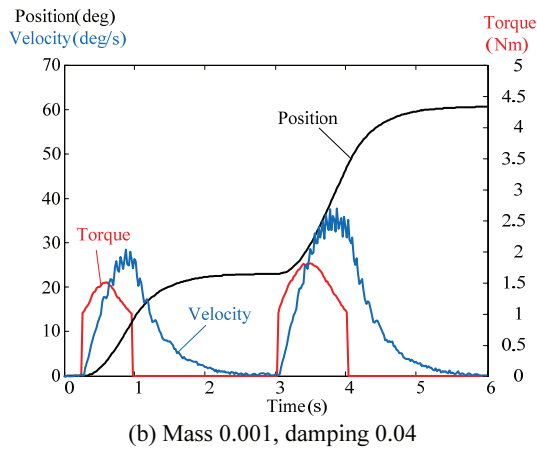
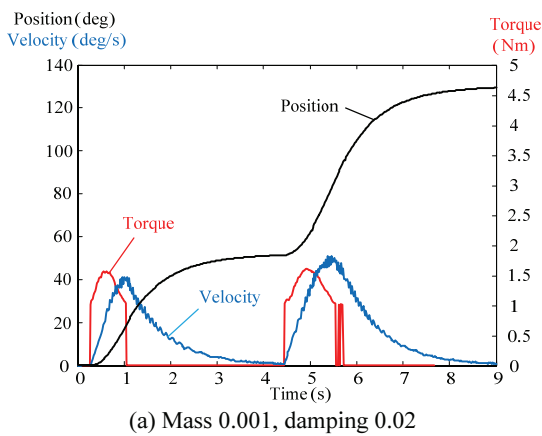


Fig. 9 Test result

행보조기 운용을 가정하여 댐핑 값을 두 배 증가시켜 실험을 수행하였고 그 결과를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 같은 힘을 주었을 때, 오르막길로 설정된 인휠 구동기와 내

리막길로 설정된 인휠 구동기의 속도 값은 큰 차이를 보이지 않았으나 최종 위치 값은 50% 이상 차이를 보였다. 이를 통해서 제시된 제어 알고리즘이 오르막 및 내리막 경사로에서 사용자에게 요구되는 힘의 차이를 줄이고 보행보조기의 주행 속도도 큰 차이가 없도록 제어한다는 것을 알 수 있다. 오르막 경사로에서 인휠 구동기의 위치 값의 증가는 보행보조기를 이용하여 사용자가 오르막을 등반할 때 사용자의 부담 저하를 위해 주행 방향으로 인휠 구동기가 추가적인 동작을 한다는 것을 뜻한다. 또한, 내리막 경사로에서는 안전한 주행을 위해 댐핑 값이 높아졌으므로 인휠 구동기의 위치 값이 50% 정도 작은 값이 도출된 것이다. 이 결과들을 통해 본 논문에서 제시한 인휠 구동기의 제어 알고리즘이 사용자가 보행보조기를 이용하여 경사로를 주행할 때 효율적으로 사용자를 보조할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 토크센서 기반의 사용자 의도 파악이 가능한 보행보조기용 인휠 구동기를 개발하였다. 사용자의 편의성에 집중하여, 사용자가 보다 쉽고 편안하게 보행보조기를 조작할 수 있도록 보행보조기를 위한 인휠 구동기를 제시하였다. 사용자의 의도를 측정하기 위해 인휠 구동기에 토크센서를 내장하였고, 어드미턴스 필터를 이용하여 사용자의 의도에 따라 인휠 구동기가 제어 되도록 하였다. 또한 내장된 자이로 센서를 이용하여 경사면에 따른 어드미턴스 필터의 댐핑 계수 값 조절을 통해 사용자가 손쉽게 경사면에서 보행보조기를 운용할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 실험을 통해 개발된 인휠 구동기와 제어 알고리즘이 실제로 사용자의 의도를 반영하여 동작하며, 또한 경사로에서 효율적으로 사용자의 보행 편리성과 안전을 보장함을 확인 하였다. 개발된 인휠 구동기와 구동 알고리즘은 다양한 상황에서 보행보조기의 성능을 극대화 시켜 줄 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업원천기술 개발 사업 “노약자/ 장애인을 위한 근력 보조 시스템 개발”(10035201)의 연구 결과로 수행되었음.

**REFERENCES**

1. Lee, Y. K., "In Preparation for the Arrival of Aging Society, Development of Robot for Assisting Elderly Mobility," *Embedded world*, No. 3, pp. 56-59, 2008.
2. Rodriguez-Losada, D., Matia, F., Jimenez, A., Galan, R., and Lacey, G., "Implementing Map based Navigation in Guido, the Robotic Smartwalker," *Proc. of the IEEE in Robotics and Automation*, pp. 3390-3395, 2005.
3. Hans, M. and Graf, B., "Robotic home assistant Care-O-bot II," in: *Advances in Human-Robot Interaction*, Prassler, E., Lawitzky, G., Stopp, A., Grunwald, G., Hägele, M., et al., (Eds.) Heidelberg, Springer, pp. 371-384, 2004.
4. Yu, K. T., Lam, C. P., Chang, M. F., Mou, W. H., Tseng, S. H., and Fu, L. C., "An Interactive Robotic Walker for Assisting Elderly Mobility in Senior Care Unit," *ARSO*, pp. 24-29, 2010.
5. Kim, I. M., Kim, H.-S., and Song, J. B., "Hub Spoke Type Joint Torque Sensor with Slits for Sensitive Torque Sensing," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 233-234, 2010.
6. Ministry of Food and Drug Safety, "Electric Motor-Driven Wheelchairs and Medical Scooter," 2004.
7. Nam, K. H., "Joint Torque Sensor based on Hub-Spoke Type Structure for a Service Robot," *Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineering Spring Annual Meeting*, pp. 247-249, 2009.
8. Hong, E. P., "Development of in-Wheel Motor for Power add-on Drive Wheelchair," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 28, No. 8, pp. 992-999, 2011.