

## 작업자들을 위한 대퇴 근력 보조 로봇의 개발

김정엽<sup>a\*</sup>

## Development of Thigh Muscular Strength Assistance Robot for Workers

Jung-Yup Kim<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	29	March	2013
Revised	13	May	2013
Accepted	14	May	2013

## Keywords:

Worker  
Thigh muscular strength  
Assistance robot

## ABSTRACT

This paper describes the development of a thigh-muscle strength-assistance robot, which is a kind of wearable robot. For practicality and commercialization, we proposed three fundamental concepts: the reduction of the thigh-muscle strength, minimized degree of dependence on a powered actuator, and complete wearer safety. Based on these concepts, a spring and link bar mechanism was conceived as a novel idea. The movement of the thigh is transferred to the spring mechanism through the link bar; hence, the elastic force of the spring assists the thigh muscle. Using force sensing resistor (FSR) sensors and a powered cam mechanism, the muscle assistance is automatically activated and deactivated according to the wearer's movement. The specific mechanisms of the robot are addressed in detail, and the effectiveness is verified by experiments.

## 1. 서론

OECD 주요국들의 연간 노동시간을 비교해봤을 때, 우리나라는 다른 OECD 국가들에 비해 더욱 많은 노동 시간을 할애하고 있다 (Fig. 1 참조). 이러한 분석 결과는 우리나라의 근로자들이 느끼는 피로감이 상대적으로 다른 OECD 국가들에 비해 높다는 것을 의미한다. 이러한, 사실로부터 장시간적으로 신체적인 힘을 필요로 하는 생산 근로자들이나 고령층 근로자들이 느끼는 피로감을 일부 덜어줄 수 있는 근력 보조 기구를 연구할 필요가 있다.

최근에 근력 증강이나 운동 보조용 목적으로 다양한 웨어러블 로봇들이 개발되고 있다. 미국 U.C. Berkeley 대학의 A. Zoss 외 2인은 BLEEK라는 하반신 외골격 근력 증강 로봇을 개발하

였다<sup>[1]</sup>. 각 다리는 7개의 자유도를 갖으며, 그중 4개는 유압 구동기로 작동된다. 로봇 무게를 합쳐서 75 kgf의 가반하중을 들 수 있다. 일본 쓰쿠마 대학의 H. Kawamoto 외 4인은 하반신 마비 환자를 위해 HAL 이라는 하반신 외골격 보행 보조 로봇을 개발하였다<sup>[2]</sup>. 각 다리는 모터로 구동되는 3개의 관절을 가지고 있으며, 착용자의 피부에 bioelectric 센서를 부착하여 모터 토크를 제어하였다. 발바닥에도 압력 센서를 부착하여 보행 운동을 측정하였다. 일본 혼다사는 착용자의 체중을 보조해주는 보행 보조 로봇을 개발하였다<sup>[3]</sup>. 각 다리에 1개의 모터를 장착하였고, 발바닥 압력 센서를 이용하여 적절한 보조력을 계산하여 착용자로 하여금 근육에 전달되는 하중을 저감시켰다. 이외에도, 일본의 Saga 대학의 Y. Hayashi 외 1인은 EMG 센서와 ZMP 개념을

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6355

Fax: +82-2-971-7706

E-mail address: jyk76@seoultech.ac.kr (Jung-Yup Kim).

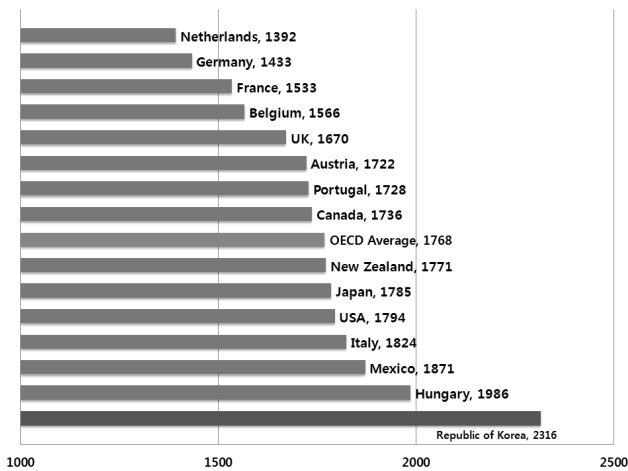


Fig. 1 Working hours of the OECD countries

활용한 하반신 보행 모조 로봇을 개발하였으며<sup>[4]</sup>, 한국 한양대의 신대섭 외 1인은 EMG 신호와 EEG 신호를 활용한 하반 보행 보조 로봇을 개발하였다<sup>[5]</sup>.

이러한 웨어러블 로봇들은 대부분 로봇의 동력원을 고가의 대용량 모터나 유압구동기에 크게 의지하고 있고 중량이 무거우며 또한 고가의 센서 및 부속품들을 사용하고 있어 가격이 매우 높고 상용화가 힘들다. 또한, 구동기의 오동작이 발생하게 되면 착용자의 관절에 치명적인 손상을 가할 수 있어 안전성 측면에서 완전하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 단점들을 고려하여 좀 더 가볍고 안정성이 뛰어나고 가격 측면에서 상용화가 가능한 대퇴 근력 보조 로봇을 개발하였다.

## 2. 개념 설계

### 2.1 개발 컨셉

우선, 본 연구에서 제안하고자 하는 근력 보조 로봇의 세 가지



Fig. 2 Development concept

개발 컨셉은 아래와 같다.

- 1) 작업자의 대퇴 근력 피로도 저감
- 2) 소동 소자를 이용한 구동기 의존도 최소화
- 3) 구동기 오작동에 대한 완벽한 안전성

우선, 로봇의 개발 목적을 작업자의 대퇴 근력 보조로 한정을 하였다. 그 이유는 로봇의 단순화와 경량화로부터 좀 더 상용화 가능성을 높이기 위함이다. 또한, 작업자는 보행에 문제가 없으나 대퇴 근력을 반복적으로 사용하는 업무를 수행하는 대상을 뜻한다 (Fig. 2 참조).

본 연구에서의 가장 큰 특징은 기존 연구와 달리 구동기의 의존도를 최소화했다는 것이다. 그 이유는 구동기 동력의 의존도를 높일수록 구동기의 용량이 커지고 이는 로봇의 중량을 증가시키기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 모터와 스프링을 이용하여 스프링 변형에 의한 탄성력을 이용하여 대퇴 근력을 보조할 수 있도록 하고자 한다 (Fig. 2 참조).

마지막으로, 본 연구의 차별화 되는 또 다른 특징은 구동기의 오작동이 착용자의 관절에 손상을 입히지 않는다는 것이다. 본 연구에서 사용되는 모터는 단순히 자동차의 클러치와 같이 스프링의 사용 여부만을 결정하기 때문에 모터의 발진이 발생하더라도 문제가 없으며, 모터의 용량이 작아 로봇의 무게 경량화에도 장점이 있다.

### 2.2 개념 원리

위에서 제시한 개발 컨셉을 가지고 아래와 같은 개념 원리를 도출하였다. 가장 기본적으로 일상생활에서 쓰이는 스테이플러 메커니즘을 응용하였다. Fig. 3과 같이 일반 보행 시에는 대퇴부에 장착된 캠의 노우즈가 링크를 밀어내지 않아 스프링 반력이 발생하지 않는다. 그러나, 작업을 하는 경우는 모터에 의해 캠이 회전하여 노우즈가 하강되고, 캠이 링크를 밀어내게 되어 반발력이 형성된다. 더 나아가, 발목 각도가 접히는 경우, 스프링 하부의 시트가 상승하게 되어, 더욱 스프링 반발력을 높이게 되어 대

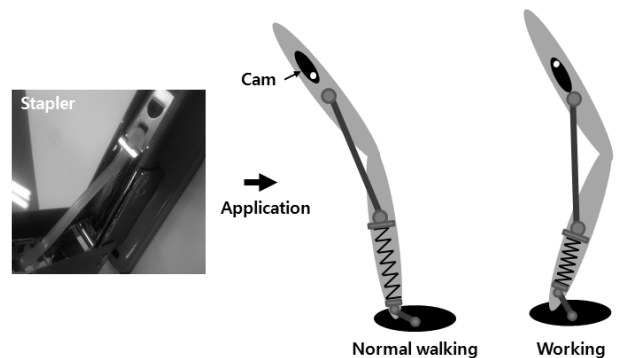


Fig. 3 Conceptual idea

퇴부의 근력을 보조하게 된다. 이러한 원리를 이용하게 되면, 비록 능동식 근력 증강은 불가하지만, 수동식 근력 보조가 가능하며, 시스템이 간단하게 되고 안전성 또한 높일 수 있다. 마지막으로, 작업과 일반 보행의 구분은 양 발바닥에 부착된 압력 센서로부터 판단하게 된다.

### 3. 로봇 제작

#### 3.1 로봇의 전반적인 외형 및 사양

Fig. 4는 제작된 대퇴 근력 보조 로봇의 2D 조립도의 정면도와 측면도를 보여준다. 전체적으로 세 개의 파트(대퇴부, 하퇴부 및 족부)로 이루어져있다. 기본적으로 프레임구조는 무게 경량화를 위해 대부분 알루미늄합금으로 제작되었다. 주요 부품으로써, 대퇴부에는 모터와 캠이 장착되어 있고, 하퇴부에는 압축스프링이 장착되어있으며, 족부에는 신발과의 결합장치가 있다. 또한, 대퇴부와 하퇴부를 연결하는 상부 링크바와 하퇴부와 족부를 연결하는 하부 링크바가 장착되어 스프링에 대한 반발력이 바를 통하여 대퇴 근육으로 전달 될 수 있도록 하였다. 참고로 로봇의 전반적인 사양을 Table 1에 나타내었으며, 각 주요 부위의 기능을

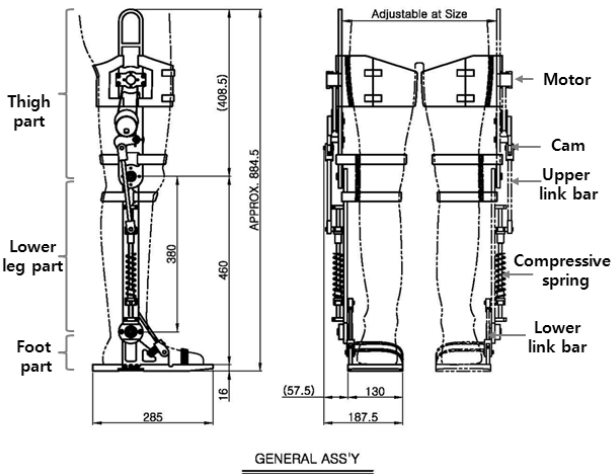


Fig. 4 Overview of thigh muscular strength assistance robot

Table 1 Specifications of the robot

Height	Approx. 884.5 mm
Weight	2 . 5 × 2 = 5 kg
Battery	Li-Polymer 25.9 V @ 20 Ah
Actuator	Maxon BLDC motor (EC-45 flat) 50 W
Controllers	Main Controller : ATmega128, 2-Ch Motor Controller : TMS320F2812
Sensor	4 × FSR sensor, 2 × Photo sensor

아래에 자세하게 소개하였다.

#### 3.2 대퇴부 모터-캠구조

Fig. 5는 대퇴 근력 보조 로봇의 대퇴부에 장착되어 있는 모터와 캠 구조를 보여준다. 위 그림에서 보는 바와 같이 모터는 폴리벨트 메커니즘을 통하여 캠과 연결된다. 즉, 모터가 회전하면 풀리가 회전하게 되고, 캠이 편심을 가지고 풀리에 장착이 되어 있어서 아래 그림의 (1)번, (2)번과 같이 상승 및 하강하게 된다. 만약, (1)번처럼 캠이 상승하게 되면, 아래에 있는 상부 링크바와 접촉을 하지 않게 되어 하퇴부의 운동이 대퇴부에 전달되지 않게 되고, 스프링의 반발력이 전달되지 않는다. 다음으로 (2)번처럼 캠이 하강하게 되면, 상부 링크바와 접촉을 하게 되며, 스프링 변

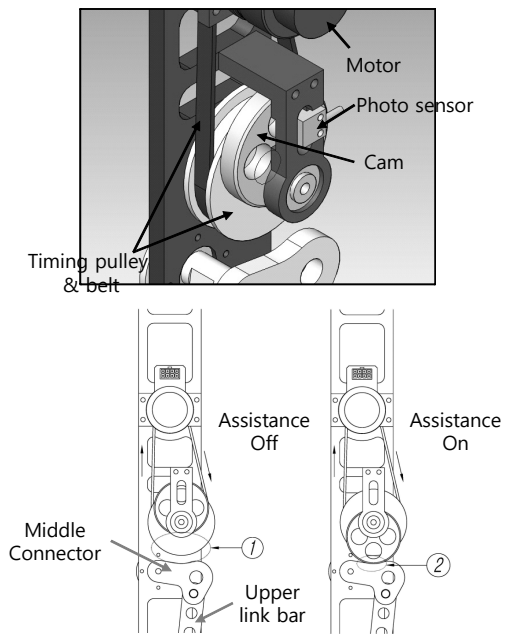


Fig. 5 Thigh motor and cam structure



Fig. 6 Photograph of the thigh part

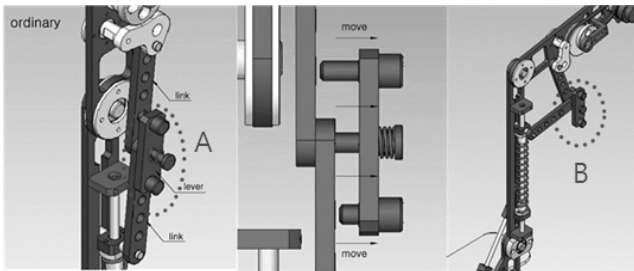


Fig. 7 Upper link bar mechanism

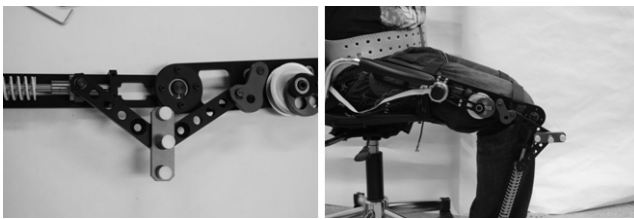


Fig. 8 Photographs of the deactivated upper link bar

위에 따른 반발력이 대퇴부에 전달된다. 즉, 캠의 운동은 스프링의 반발력의 대퇴부 전달을 유무화하는 클러치의 기능을 가지고 있다. 또한, 포토센서는 원점셋팅을 위하여 장착되었으며, Fig. 6은 제작된 로봇의 장착사진을 보여준다. 이러한 구조의 가장 큰 장점은 스프링 반발력을 이용하고 캠 하강시 미들컨넥터에 의한 외부힘이 모터 회전축을 통과하므로 고용량의 모터나 감속기가 필요없어 가볍고 기구가 단순하다는 것이다. 또한, 모터가 급발진을 해도 착용자가 다치지 않는다.

### 3.3 상부 링크 바 구조

스프링 변형에 의한 반발력을 대퇴부에 전달하기 위해서 Fig. 3과 같이 상부 링크 바가 사용되었다. 직립 작업 시 링크 바는 캠의 하강에 의해 힘을 전달하게 되지만, 작업자가 앉게 되거나 작업이 끝나 더 이상 대퇴 근력 보조가 필요 없게 되면, 큰 무릎 관절각도에 의해 상부링크바의 높이가 캠의 높이를 초과하기 때문에 링크바의 기능을 중단할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 7의 A와 같이 상부 링크바의 기능을 기구적으로 유무화할 수 있는 장치를 고안하였다. Fig. 7은 본 장치를 자세하게 보여준다. 평상시에는 스프링에 의해 두 개의 썸이 링크 바에 박혀서 링크바의 형태를 고정해 주지만, 썸을 빼어내어 풀게 되면 B와 같이 링크 바가 꺾이게 되어 기능이 소실된다. 참고로, Fig. 8은 상부 링크바의 기능을 제거했을 경우를 보여준다.

### 3.4 하퇴부 스프링 구조

대퇴부의 캠이 모터에 의해 하강을 하게 되면, 무릎관절의 굽힘에 따라 Fig. 9와 같이 스프링 변위가 가이드에 따라 발생하고

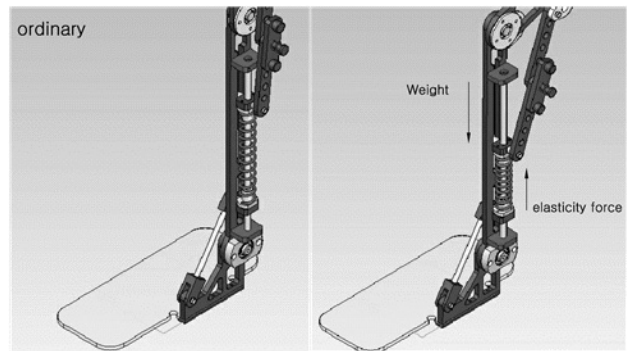


Fig. 9 Spring mechanism in the lower leg

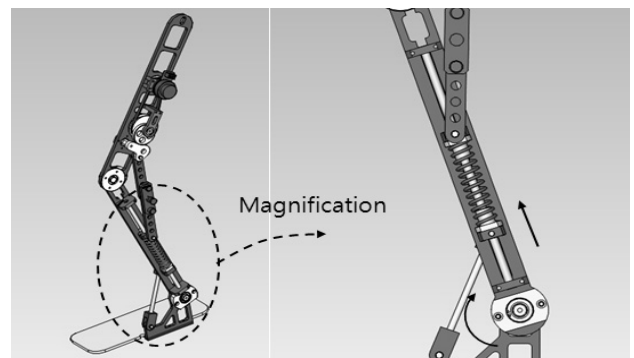


Fig. 10 Lower link bar mechanism



Assistance action Off Assistance action On

Fig. 11 Activation and deactivation of assistance operation

스프링에서는 Hook's law에 기반한 탄성력이 발생하게 된다. 이때 스프링의 선정이 중요하다. 우선, 직립 작업 시 무릎이 굽어짐으로써 스프링이 최대 70 mm가 변형된다고 가정하였다. 다음으로 65 kgf의 체중을 가진 착용자가 한 발로 지지하고 있을 때 50% 이상의 하중을 스프링 탄성력이 보조한다고 가정하였다. 이는 스프링이 약 70 mm 정도가 변형되었을 때 보행 시 간섭이 없고 작업 시 적절한 근력 보조가 가능하기 때문이다. 따라서

5.23 N/mm의 탄성계수를 가진 미스미 사의 SWR26-150 스프링을 사용하였으며, 아래 식과 같이 체중의 최대 57%의 하중을 지지 할 수 있도록 하였다.

$$5.23(N/mm) \cdot 70(mm) = 366.1N \quad (1)$$

$$\frac{366N(\text{최대 스프링 반발력})}{640N(\text{한 발에 작용하는 최대 하중})} = 0.57 \quad (2)$$

다음으로, 족부의 경우에도 Fig. 10과 같이 하부 링크 바가 있어서 발목 접힘 회전에 따라 스프링 시트의 위치가 가이드를 따라 상승된다. 따라서, 무릎과 발목의 접힘은 스프링 변위를 동시에 생성시키고 이는 대퇴 근력 보조를 위한 힘으로 변형된다. Fig. 11은 대퇴 근력 보조 로봇의 작동 유무를 보여준다.

### 3.5 발바닥 입력 센서

대퇴 근력 보조를 위해서는 착용자의 상황이 보행 중인지 작업 중인지를 판단할 필요가 있다. 일반 보행 중 일 경우, 대퇴부의 캠이 상승된 상태를 유지해야 하며, 작업 상황일 경우 캠이 하강하여 상부 링크바와 스프링에 의한 탄성력이 대퇴부 근육을 보조해야 한다. 이러한 일반 보행과 작업을 구분하기 위해서 본 연구에서는 Tekscan사의 압력 센서(FlexiForce A201)를 발에 부착하였다. Fig. 12에서 빨간색으로 표시된 부분과 같이 신발의 깔창 밑에 두 개의 압력센서를 앞꿈치와 뒷꿈치에 부착하였다. 이렇게 두 부분으로 부착하는 이유는 발바닥 압력이 한 쪽으로 치우쳐지는 것을 대처하여, 분포 압력으로부터 디딤 여부를 알아내기 위함이다. 따라서, 아래식 (3)과 같이 오른발과 왼발에 작용하는 하중을 측정한다. RF, LF는 오른발, 왼발을 뜻하며, 1, 2는 압력센서 번호를 나타낸다. 마지막으로, 미끄럼을 방지하기 위한 패드를 밑면에 부착함으로써 보행 안정성을 높였다.

$$F_{RF} = F_{RF1} + F_{RF2}, \quad F_{LF} = F_{LF1} + F_{LF2} \quad (3)$$



Fig. 12 Pressure sensors and anti-sliding pad

### 3.6 제어 시스템 구성

Fig. 13은 대퇴 근력 보조 로봇의 단순한 제어 시스템 다이어그램을 보여준다. ATmega128을 기반으로 한 MCU가 중심에 있고, 4개의 압력 센서로부터 각 발의 하중을 계산하고, 이를 토대로 RS-232 통신을 통하여 오른쪽, 왼쪽 모터의 각도위치 명령을 보낸다. 이때 모터 제어기는 참조 위치 명령으로부터 BLDC 모터의 위치를 제어하게 된다. 모터의 경우, 높은 토크보다도 작고 빠른 반응속도가 중요하므로 관성이 작은 콤팩트사이즈의 50 W급 BLDC 모터가 사용되었다. 주 제어 주파수는 100 Hz이고 하위 모터 서보 제어 주파수는 1 kHz이며, 포토인터럽트 센서는 모터 제어기에 연결되어 초기 모터의 원점 위치 셋팅을 돕는다. 하위 모터 제어기는 2개의 BLDC 모터를 동시에 제어 가능하며 크기가 작은 로보큐브테크사의 100 W급 2채널 제어기를 사용하였다.

Fig. 14는 실제 제어 시스템의 사진을 보여준다. MCU 안에는 압력 센서 신호 민감도 조절할 수 있는 OP Amp.로 구성된 센서 컨디셔너가 준비되어있으며, 배터리에서 공급되는 전압 25.9 V를 5V로 하강시켜주는 DC/DC 컨버터가 역시 장착되어있다. 배터리의 경우는, 제어기들과 모터 및 센서로부터 소모되는 전력이

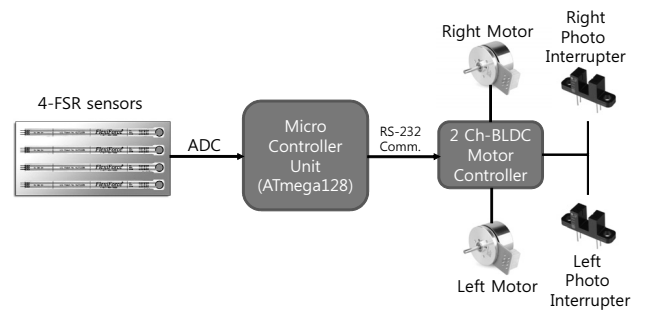


Fig. 13 Control system configuration

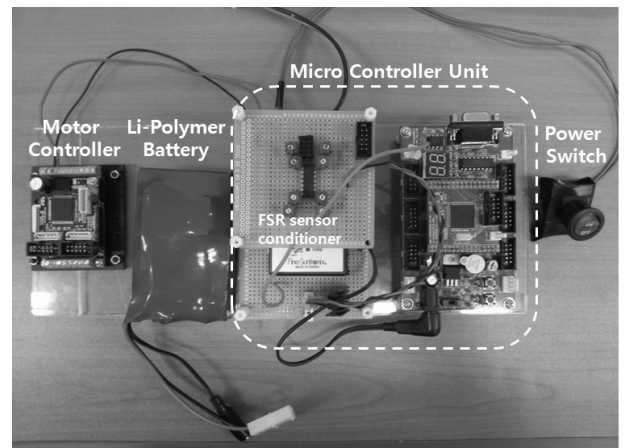


Fig. 14 Photograph of the control system

약 10 W이므로, 5시간정도의 사용이 가능한 50 Wh의 리튬-폴리머 배터리를 사용하였다. 결국, 매우 단순한 제어 시스템 구조와 모터의 낮은 소모 전력으로부터 작업자들이 장시간 사용할 수 있는 대퇴 근력 보조 로봇이 개발 가능하였으며, 이러한 제어 시스템은 넓은 허리 지지 벨트를 이용하여 허리에 장착된다.

#### 4. 대퇴 근력 보조 로봇의 구동 실험

##### 4.1 구동 알고리즘

대퇴 근력 보조 로봇의 구동 알고리즘은 Fig. 15와 같다. 최대한 단순한 순서도를 구성함으로써 오동작의 가능성을 최소화하고 강건성을 높였다. 가장 핵심적인 조건부들을 보면, 오른쪽 발과 왼쪽 발 모두 10 kgf 이상 일정시간(1초)이상 감지가 되어야 모터가 180° 회전을 하여 캠이 하강을 하게 된다. 10 kgf로 Threshold를 설정한 것은 착용자의 다리 무게가 약 12 kgf이므로, 다리 무게 정도의 하중이 가해졌을 경우 작업자가 작업 의도를 가지고 직립했다고 가정했기 때문이다. 또한, 양 발의 하중이 모두 10 kgf 이상 그리고 1초 이상 되어야 하는 것은 일반 보행 시 양발 지지 순간과 한발지지 순간에 캠이 하강하는 것을 방지하기 위함이다. 따라서, 작업자가 양 발을 지면에 접촉하고 직립하여 안정적인 작업을 수행할 때만이 대퇴 근력 보조를 수행하며, 만일 한 발이라도 지면에서 떨어지거나 의자에 앉아서 양 발에 하중이 모두 작아질 경우 대퇴 근력 보조를 수행하지 않는다.

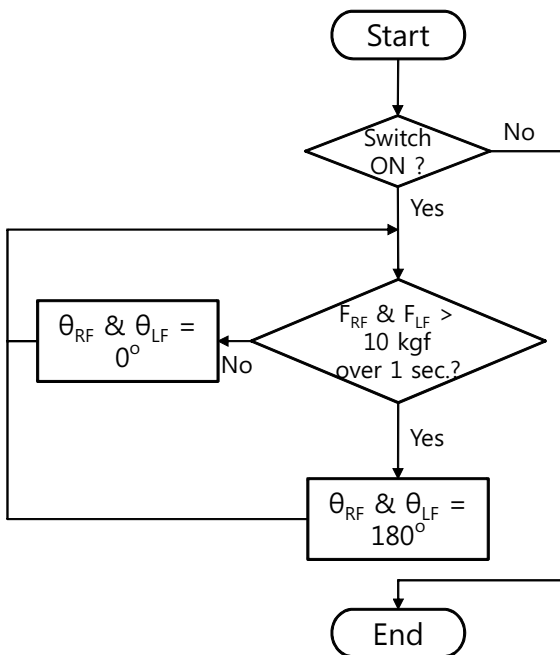


Fig. 15 Flow chart of the operation

##### 4.2 구동 실험

위에서 제안된 구동 알고리즘을 대퇴 근력 보조 로봇에 적용한 후 두 가지 구동 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 일반 보행 실험으로써, 착용자가 작업을 하지 않을 경우 보행에 문제가 없는지를 확인해보았다. Fig. 16은 착용자의 일반 보행에 대한 스냅샷을 보여준다. 사진에서 보는 바와 같이 착용자가 일반 보행을 원활하게 수행하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 일반 보행 시에는 제안된 구동 알고리즘에서 조건부를 통과하지 못하여 캠이 하강하지 않았음을 알 수 있다. 두 번째 실험은 작업 실험으로써,

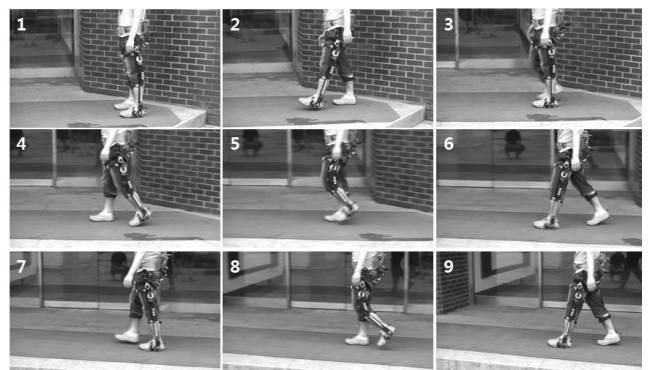


Fig. 16 Snapshots of normal walking

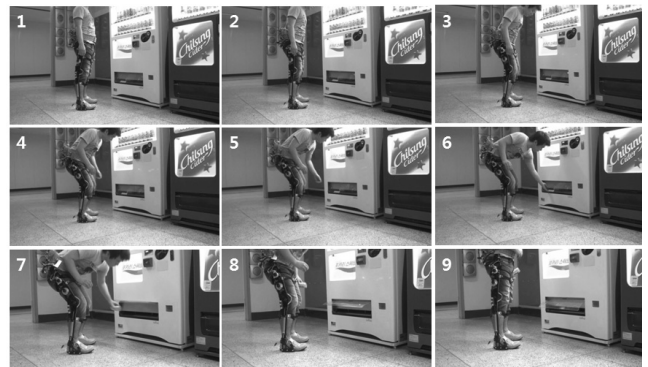


Fig. 17 Snapshots of bent knee working



Fig. 18 Magnified photograph of the robot during working

착용자가 양 발을 지면에 붙이고 무릎을 굽히면서 특정 작업을 수행할 때, 캠이 하강하여 대퇴 근력을 보조하는 지를 확인해 보았다. Fig. 17은 본 실험의 스냅샷을 보여주며, Fig. 18은 근력 보조 로봇의 확대 사진을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 모터에 의해 캠이 하강하였고 이로부터 상부 링크바가 스프링을 누르고 있다. 또한, 발목의 접힘으로부터 역시 하부 링크바가 스프링 시트의 높이를 상승시킴으로써 스프링의 변형량이 좀 더 커졌음을 알 수 있다. 두 개의 스프링이 변형된 양은 각각 약 30 mm로 스프링상수를 고려하면 약 32 kgf의 힘이 대퇴 근력 보조로 사용되었으며, 착용자는 무릎을 굽힐수록 체중이 점점 더 가벼워지며 퍼질수록 근력 보조가 감소하는 느낌을 경험하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 작업자들을 위한 대퇴 근력 보조 로봇을 개발하였다. 기존의 설계 방식에서 벗어나, 좀 더 단순화되고 경량화되며 안전성이 뛰어난 설계 방식을 도입하였다. 이를 위한 핵심 전략으로써 스프링의 탄성력을 이용하는 방안을 제안하였으며, 그 결과 단순성, 경량성 및 안전성을 모두 만족시키는 로봇을 개발할 수 있었다. 특히, 클러치 기능을 가진 캠과 링크 바를 도입하여 작업자의 대퇴 근력 보조 기능을 손쉽게 유무화할 수 있도록 하였으며, 압력 센서를 이용하여 작업자의 보행과 작업을 판단하여 지능적인 대퇴 근력 보조가 수행될 수 있도록 하였다. 최종적으로, 개발된 대퇴 근력 보조 로봇은 일반 보행 시 불편하지 않고 작업 시 적절한 대퇴 근력보조가 이루어지며 무릎의 굽힘량이 많은 작업일수록 근력 보조 효과가 뛰어난을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

그런데, 한편으로는 개발된 로봇은 능동식 관절 구동 방식이 아니기 때문에 근력을 증강시킬 수 없다는 단점이 존재한다. 사

실, 근력 증강은 본 연구에서 제안한 세 가지 개발 컨셉과 정반대의 성격을 지닌다. 따라서, 본 연구에서 근력 보조의 개념은 중력에 의한 하중이 대퇴부에 가해지는 것을 일부 피동적으로 보상하는 개념을 가지고 있다. 이러한 개발 컨셉으로부터 보행중에 능동적인 근력 보조 역시 불가한 한계점이 존재하지만, 향후 이러한 점을 보완할 수 있는 새로운 전략을 구상할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었음.

## References

- [1] Zoss, A., Kazerooni, H., Chu, A., 2005, On the Mechanical Design of the Berkely Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX), IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 3132-3139.
- [2] Kawamoto, H., Hayashi, T., Sakurai, T., Eguchi, K., Sankai, Y., 2009, Development of Single Leg Version of HAL for Hemiplegia, IEEE Int. Conf. on EMBS, 5038-5043.
- [3] Ikeuchi, Y., Ashihara, J., Hiki, Y., Kudoh, H., Noda, T., 2009, Walking Assist Device with Bodyweight Support System, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 4073-4079.
- [4] Hayashi, Y., Kiguchi, K., 2011, A Lower-Limb Power-Assist Robot with Perception-Assist, IEEE Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, 1-6.
- [5] Shin, D. S., Lee, H., 2011, A Study on Precognition of Walking Patterns for a Power Assist Robot Legs, Int. Conf. on Control, Automation and Systems, 1045-1047.