

# Underactuated mechanism 을 이용한 파지력 감지 전동외수 개발

조성<sup>†</sup> · 장대진\* · 백윤수\*\* · 양현석\*\*

## Development of prosthetic hand for detecting grasping force using underactuated mechanism

Seong Jo, Dae Jin Jang, Yoon Su Baek and Hyun Seok Yang

**Key Words :** underactuated mechanism(비구동관절 메커니즘), differential gear(차동기어), prosthetic hand(전동외수), grasping force(파지력)

### Abstract

In this study, the new prosthetic hand which can perform sensory feedback is developed. Although the continuous development of current prosthetic hands, they have some drawbacks. The drawbacks are the low grasping capabilities, the lack of sensory information given to the user, and so on. Despite the improvement of the function of fingers, the sensory information problem still remains undeveloped. By using differential gear and underactuated mechanical design, it can be solved with the minimum additional weight. And it will be applied to all of the prosthetic hands.

## 1. 서 론

### 1.1 현재 외수사용 현황

사회가 고도로 산업화 됨에 따라 산업 현장에서, 혹은 일반 생활주변에서 각종 크고 작은 사고들이 많이 발생하게 되었다. 이에 불행히도 신체의 일부를 잃고, 부득이하게 의지를 착용하는 사람들도 많이 발생하게 되었다. 이러한 경우 중 특히 상지 부분의 상실을 보충해 주기 위해서 그 동안 다양한 종류의 외수들이 부위별, 기능별로 발전을 거듭해 왔다.

기능별로 살펴보자면, 단순히 외관상의 결함을 감추기 위한 미관형 외수, 와이어와 단순한 그리퍼를 조합한 기능형 외수, 모터를 이용하는 전동외수가 있다. 이렇게 다양한 기능별 외수는 장애

인의 상태에 따라 적용되고 있으며, 각 연구 단체들은 보다 가볍고 보다 더 실제 인간의 손에 가까운 자유도를 구사할 수 있는 외수를 만들기 위해서 기구학적인 측면과 제어적 측면에서 많은 노력을 기울이고 있다.

이러한 연구의 한 성과로 상용화된 가장 대표적인 것이 Ottobock 사의 DMC 제어기와 SUVA 센서 시스템을 사용한 외수로, DMC 제어기를 통해서 착용자의 근전도 신호로 외수를 보다 수의적으로 작동시키고, SUVA 센서 시스템을 통해서 파지 대상 물체의 무게중심의 변화를 자동으로 감지하게 되어 다양한 상황의 물체를 적절한 악력으로 파지할 수 있게 해 준다.

### 1.2 현재 외수의 일반적인 문제점들

전술한 바와 같이 현재 외수들이 많은 발전을 해 왔고, 또 해 가고 있음에도 불구하고 아직까지 외수들이 당면하고 있는 문제점들은 다음과 같다.

- 파지 동작의 적은 자유도로 인한 동작제한
- 적은 자유도로 인한 파지동작의 부자연스러움 (미관상의 어색함 포함)

<sup>†</sup> 연세대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : demerol@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-2827 FAX : (02)2123-2736

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계공학과

- 장시간 복잡한 동작 사용을 위한 조작체계의 불편함
- 사용자의 피로력 정도에 대한 감지체계 부족

손동작의 자유도와 관련한 문제는 그동안 로봇 핸드의 개발과 더불어 기구학적인 측면과 더불어 구동방식 측면에서도 많은 발전을 해 왔다. 그러나, 사용자의 피로력 감지에 관한 문제에 있어서는 이렇다 할 발전이 없는 것이 사실이다. 1.1 절에서 언급한 Ottobock 사의 SUVA 시스템의 경우에도 의수 내에서만 피로력을 감지하고 스스로 제어를 하는 것이지, 그 정보를 사용자가 느끼지는 못한다. 보다 실제 손에 가까운 의수를 만들기 위해서는 사용자의 피로력 감지가 필요한데, 이를 위해서는 피로력 감지를 위한 센서와 그 힘을 반향시킬 수 있는 모터 등의 구동장치가 더 필요하다. 그러나 이러한 센서와 모터의 추가는 의수의 무게를 증가시켜 사용자로 하여금 사용상의 큰 불편을 준다. 그렇다고 작고 가벼운 모터를 사용하려고 하면, 원하는 만큼의 힘이 나오기 힘들 뿐더러 의수의 가격이 높아지게 되어, 비장애인에 비해 경제적으로 힘든 의수 사용자들에게 큰 부담이 될 것이다.

따라서 상기한 문제점을 모두 고려할 수 있는 기구학적 구조개선을 통한 문제의 해결이 절실히 필요하다 하겠다.

## 2. Differential Mechanism

### 2.1 Underactuated Mechanism

1 장에서 언급한 문제를 해결하기 위해서는 기존 의수에서 사용하고 있는 하나의 모터에서 피로력 반영을 위해서는 구동장치를 구성해야 하는데, 구현하고자 하는 자유도의 수 보다 더 작은 개수의 구동장치를 사용하는 구조를 일컬어서 “Underactuated Mechanism”이라고 한다. 주로 구동 모터가 수동적인 탄성부품으로 대체되는데, 의수에서는 하나의 모터로 여러 마디의 손가락을 구동하는데 사용되고 있다.

### 2.2 Differential Mechanism

Differential Mechanism은 Underactuated Mechanism의 한 부분으로 한 개의 구동 입력이 두 개의 균등한 출력으로 나누어지는 구조이다. 가장 일반적인 것이 자동차의 조향 장치에 쓰이는 differential gear이다. Fig. 1에서 A에서 입력된 토크( $\tau$ )는 B를 거쳐 축 C와 D로 각각 50%씩 균등하게 나뉘어져 출력된다.

$$\tau_B = \tau_C + \tau_D \quad (\tau_C = \tau_D) \quad \dots\dots\dots (1)$$

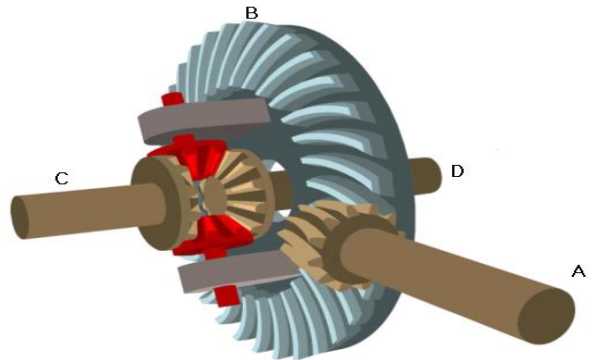


Fig. 1 Differential Gear

또한 토크( $\tau$ )와 각속도( $\omega$ )의 곱인 토크파워의 값도 양쪽으로 균등하게 배분된다.

$$\tau_C \cdot \omega_C = \tau_D \cdot \omega_D \quad \dots\dots\dots (2)$$

따라서 자동차가 양쪽 바퀴에 같은 마찰을 받으면서 직선 주행을 하는 경우에는 식 (1), (2)에 의하여 양쪽 바퀴가 같은 토크와 같은 각속도로 회전하게 된다.

D 방향으로 회전할 때에는 D 축의 바닥마찰에 의해서 회전의 반대방향으로 큰 토크를 받게 된다. 한편 식 (2)에서 C도 회전방향으로 같은 크기의 토크를 가지게 되므로 D 축의 감소한 각속도에 상응하여 C 축의 각속도는 변화하게 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\tau_C}{\tau_D} = \frac{\omega_{D/B}}{\omega_{C/B}} = \frac{\omega_D - \omega_B}{\omega_C - \omega_B} = -1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

결국 축 C의 각속도는 다음과 같다.

$$\omega_C = 2\omega_B - \omega_D \quad \dots\dots\dots (4)$$

마찰을 받은 D 축의 각속도는 감소하게 되므로 식 (4)에서  $\omega_D$ 의 값이 감소하게 되고, 결국 그만큼  $\omega_C$ 가 증가하게 된다.

이러한 원리를 의수에 그대로 적용시켜 볼 수 있다. 축 A가 구동 모터에 연결되어 있고, D에 의수의 손가락부분이 있으며, 축 C는 회전을 압력으로 바꾸어주는 외부의 장치에 연결되어 있다고 하자. 그러면 축 A에서 동력을 전달 받으면

축 B 를 통해서 축 C와 축 D가 같은 토크와 같은 각속도로 회전하게 될 것이다. 다시 말해서, 의수의 손가락은 어떤 물체를 파지하기 위해서 계속 손을 오므릴 것이고, 반대편 장치에서는 손가락과 같은 작동 속도로 손가락의 운동상태를 연결된 외부장치에 알려주는 것이다. 만약 손가락이 전달되는 토크보다 큰 저항을 받게 되면 손가락은 운동을 정지하게 되고, 반대쪽 장치는 손가락 쪽과 같은 크기의 토크를 전달해 주기 전까지 속도를 높여서 작동하게 될 것이다.

이러한 작동방식을 따르게 되면 파지력 감지를 위해서 부차적으로 센서 시스템을 더 추가할 필요가 없다. 또한, differential gear 의 무게가 일반적인 모터의 무게보다 훨씬 가볍다라는 점을 감안해 볼 때, 1 장에서 언급했던 문제점들을 모두 고려할 수 있는 의수를 제작할 수 있다.

### 3. 파지력 감지 의수의 구성

#### 3.1 전체적인 구성 및 작동 원리

본 연구에서 개발하고자 하는 파지력 감지 의수의 전체적인 구성 및 작동 원리는 2 장에서 언급하였듯이 differential gear 를 기본 메커니즘으로 작동하게 되어있다. 구성 요소를 구체적으로 살펴보면, fig. 2 에서 보는 바와 같이 구동 모터, differential gear, 손가락 구동부, 실린더와 피스톤, 커프(cuff) 및 연결튜브로 구성되어 있다.

작동 원리는 다음과 같다. 모터에서 동력을 전달하면, 전달된 동력은 differential gear 를 통해서 손가락 구동부와 실린더의 피스톤을 움직이게 된다. 이에 따라 실린더에서 밀린 공기는 팔에 감긴 커프를 팽창시키게 되고, 팽창된 커프는 사용자의 팔에 일정한 힘으로 압력을 가해 줌으로써 의수가 일정한 힘으로 손가락을 오므리고 있음을 알려주게 된다.

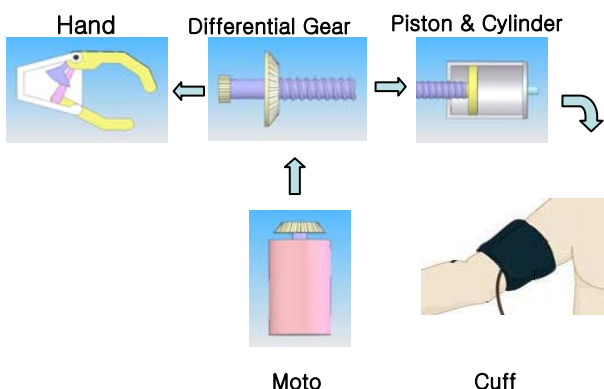


Fig. 2 Schematic of the prosthetic hand

그러다가 손가락이 전달 동력 이상의 강성을 가진 물체를 파지하게 되면, 손가락은 더 이상 오므리지 못하고, differential gear에 의해서 피스톤의 진행이 더욱 빨라지게 된다. 따라서 튜브를 통해서 커프에 전달되는 공기의 양이 갑자기 증가하게 되어 사용자에게 전달되는 압력의 변화 속도를 느껴 손가락의 진행에 변화가 생겼음을 인식하게 된다. 시각적인 정보를 같이 이용한다면, 손가락은 움직이지 않는데, 팔을 조여오는 커프의 압력이 계속 증가한다면, 의수가 단단한 물체를 짊어지고 있음을 쉽게 알 수 있다. 그리고 시각적인 정보가 없다 하더라도 커프의 압박속도가 갑자기 증가하는 것 만으로 손가락이 파지력 이상의 물체를 짊어지고 있음을 알 수 있다.

그렇다고 팔에 감긴 커프가 무한정 팽창을 하는 것은 아니다. 커프의 공기 압력이 튜브를 통해서 실린더의 피스톤에 주는 압력이 손가락이 받은 압력과 같게 된다면 더 이상 커프는 팽창하지 않는다. 정확히 말하자면 모터를 통해서 전달된 동력의 크기만큼의 저항이 손가락 구동부와 피스톤 구동부 양쪽에 발생하게 되면 더 이상 동작을 못하게 되는 것이다.

여기서 파지한 물체를 그 상태로 유지 하려면 그대로 있으면 되고, 만약 더욱 강한 힘으로 파지하고자 한다면, 모터에 전보다 높은 전압을 보내어 손가락 구동부와 피스톤에 전달되는 동력을 높여주면 손가락과 피스톤은 다시 새로이 전달된 동력에 상응하는 저항을 받을 때까지 앞에서 언급한 절차를 통해서 손가락 구동부와 피스톤 구동부가 다시 작동하게 된다.

#### 3.2 각 부분별 세부사항

파지력 감지 전동 의수는 모터, differential gear, 손가락 구동부, 실린더 및 피스톤 구동부로 구성될 수 있고 각 구성별로 세부적으로 살펴보고자 한다

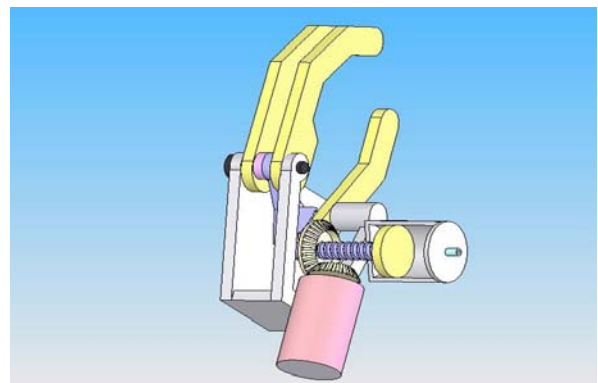


Fig. 3 Isometric view of the prosthetic hand

### 3.2.1 모터

모터는 전체적으로 동력을 전달해 주는 장치이기 때문에 일반적인 의수에 사용되는 것을 그대로 사용할 수 있다. 다만, 모터를 통해서 나온 동력이 손가락 구동부와 피스톤 구동부에 반씩 나눠져 가기 때문에 가능한 강한 동력을 낼 수 있는 모터를 이용하는 것이 바람직하다.

### 3.2.2 Differential gear

파지력 감지 의수에 사용할 differential gear 는 Fig. 4 에 나온 것과 같은 Ball-differential gear 이다. 이것은 Fig. 1에서 설명한 일반적인 differential gear 와 원리와 작동 방식은 같다. 다만 gear B와 축 C, D를 연결해 주는 bevel gear가 작은 ball로 대체되어 있다. 때문에 일반적인 differential gear 보다 전체적인 부피를 줄일 수 있으며, 이미 상용되어 많이 이용되고 있다.

### 3.2.3 손가락 구동부

기본적으로 엄지와 검지, 중지가 같이 움직이는 1 자유도 동작을 구현한다. 검지와 중지는 하나의 강체로 되어 있으며, 엄지와는 링크로 연결되어 있어 검지와 중지가 동력을 받아 움직이게 되면 링크에 의해 엄지가 같이 움직이게 된다. 이는 상용 전동 의수에서 가장 많은 형식이다.

### 3.2.4 실린더 및 피스톤 구동부

Fig. 5 에서 나타난 바와 같이 differential gear 의 오른쪽에 연결된 스크류는 differential gear 와 같이 회전하면서 실린더 내부의 피스톤이 실린더에 대해 상대 운동하게 된다. 피스톤에 의해서 밀려난 공기는 연결된 튜브를 통해서 사용자의 팔에 감겨져 있는 커프를 팽창시키게 된다.

전술한 바와 같이 튜브를 통해서 이동하는 공기는 커프를 팽창 시킴과 동시에 실린더의 피스톤에게도 저항력을 제공하는 역할을 한다. 그 저항력이 손가락이 파지하기 위해 받고 있는 저항

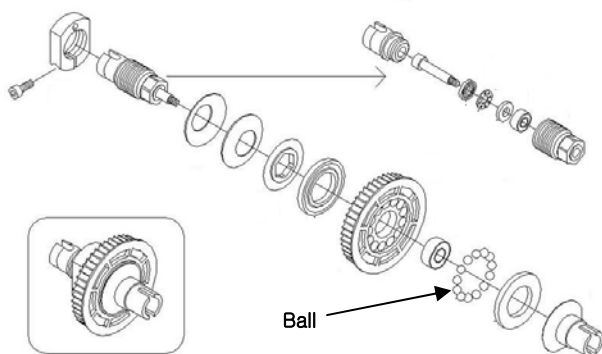


Fig. 4 Ball differential gear

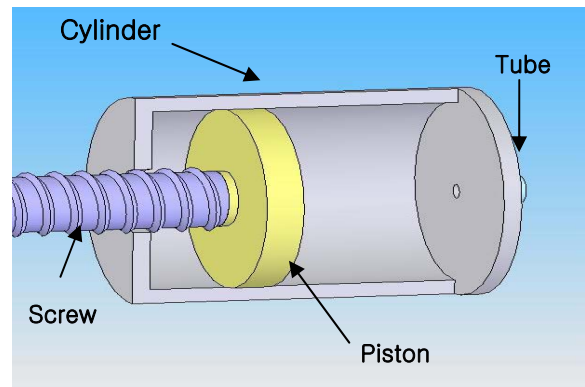


Fig. 5 Cylinder and piston

력과 같아지면 구조적인 특징 때문에 더 이상 피스톤은 움직이지 않게 되는데, 이는 손가락의 파지력 정도를 적절하게 사용자에게 전달해 주는 장치의 역할을 하게 된다. 하지만 이를 위해서는 실린더에 파지력 감지를 위한 적당한 양의 공기가 들어 있어야 한다. 때문에 한정된 공간 내에 압력의 변화를 느끼게 할 정도의 공기를 담아두기 위해서는 의수 내부에 잘 구조화 된 실린더를 배치하던가 팔의 커프와 연결되는 중간의 어느 지점에 이를 위한 다른 장치를 해 두어야 할 것이다. 이는 앞으로 실제 제작함에 있어서 세심히 고려해야 할 요소라 사료된다.

## 4. 손가락 개폐 조작 알고리즘

### 4.1 단계별 파지력 조절

동력을 전달하기 위한 모터의 작동은 일반적인 전동 의수와 마찬가지로 스위치에 의해서 작동한다. 다만 모터에 전달하는 전압의 크기를 다섯 단계로 나누어 전달함으로써 사용자가 수의적으로 파지력의 강약을 조절한다.

스위치가 장착된 부위의 근육에 한번 짧게 힘을 주어서 스위치를 누르게 되면 모터에 가장 낮은 첫 번째 단계의 전압이 10 초간 전달된다. 그러면 모터는 설정상 가장 낮은 동력을 differential gear 를 통해서 손가락과 피스톤에 전달하게 된다. 10 초가 지나게 되면 모터는 정지하게 된다.

만약 10 초안에 다시 한번 근육에 짧게 힘을 주어 스위치를 누르게 되면 첫 번째 단계보다는 높은 두 번째 단계의 전압이 모터에 10 초간 공급되고 손가락은 첫 번째 단계보다 강한 악력으로 사물을 파지하게 된다. 세 번째부터 다섯 번째 단계도 모터가 한 번 작동하는 10 초 이내에 스위치를 통해서 신호를 주면 계속적으로 입력

전압의 단계가 높아지게 된다.

4.2 손가락의 개방 조작

과지한 물건을 놓거나 더 큰 물체의 과지를 위해서 손가락을 개방하기 위해서는 물건을 과지할 때와는 또 다른 신호 체계가 필요하다. 따라서 이번에는 팔에 힘을 주어 스위치를 누르는 시간의 길이에 변화를 줄 필요가 있다. 즉, 스위치를 누르는 시간이 1 초 이상이면 모터에 반대 전압을 주어서 손가락을 개방한다. 한번 개방신호를 보낼 때 마다 손가락을 개방하는 동작 역시 10 초를 기본으로 한다. 그러면 당연히 전술한 물건 과지를 위한 신호는 1 초 미만 이어야 한다.

4.3 손가락의 정지 조작 및 전체 조작

손가락으로 물건의 과지하거나 개방할 때의 동작 이외에 사용자가 손가락의 원하는 정도로 벌리고 있고 싶다면 원하는 위치에서 손가락의 동작을 멈출 수 있어야 한다. 이 역시 스위치를 누르는 신호에서 제어할 수 있다. 이를 위해서는 스위치를 누르는 간격을 이용한다. 마치 컴퓨터의 마우스를 더블 클릭하는 것과 같이 0.5 초 이내에 짧은 신호를 두 번 보내게 되면 과지동작을 하던, 개방 동작을 하던 지에 상관 없이 그 동작을 멈추게 한다.

이제 전술했던 손가락 개폐를 위한 신호체계를 총 정리해 보면 다음과 같다. 사용자가 스위치를 누른다. 만약 스위치를 누르고 있는 시간이 1 초를 기준으로 짧으면 손가락은 현재 위치에서 물건과지를 위해 오므리는 동작을 10 초간 시행한다. 그러나 스위치를 누르고 있는 시간이 1 초 이상이면 손가락은 현재 위치에서 개방하는 동작을 10 초간 시행한다. 그런데, 10 초 이내에 사용자가 다시 한 번 스위치를 누르게 되면 우선 앞 신호와의 시간 간격을 따져본다. 만약 시간차가 0.5 초 이내라면 의수는 동작을 멈춘다. 그리고 0.5 초 이상이라면 신호의 길이를 따져 본다. 신호의 길이가 1 초 미만일 경우 현재의 동작이 개방 중이면, 가장 낮은 단계의 과지력으로 손가락을 오므리고, 현재의 동작이 오므리는 동작이면 현재보다 한 단계 더 높은 과지력으로 손가락을 오므리게 된다. 또한 신호의 길이가 1 초 이상이면 그 신호가 입력된 시점에서 10 초간 손가락 개방하는 동작을 시행한다.

5. 결론

서론 부분에서 언급한 바와 같이 현재 상용되

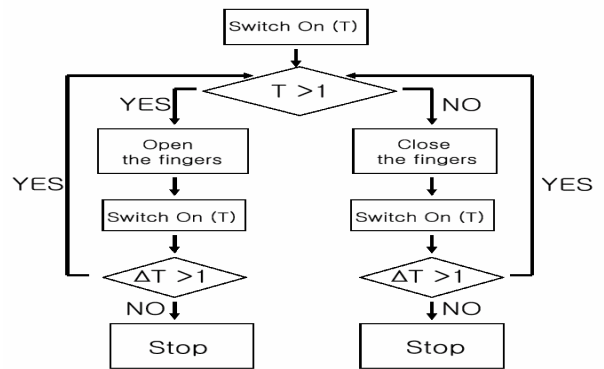


Fig. 6 Signal process for opening and closing fingers (T: Working time of switch, ΔT: working time of switch again)

고 있고 연구되고 있는 많은 의수들은 많은 기능을 가지고 있다. 특히 과지력과 관련해서는 의수가 알아서 적절한 힘으로 물건을 과지하는 정도의 기술까지 나왔을 정도이다. 하지만, 아무리 대단한 기능의 의지들이 나온다 할 지라도, 이 의지들이 착용자와 적절한 상호작용을 하지 않는다면 착용자는 의지에 대해서 몸의 일부라는 느낌을 가지기가 매우 어려울 것이다. 그리고 이를 위한 기술이 의지에 추가됨에 있어서 착용자가 더욱 불편을 느끼게 된다면(착용상의 문제나 이를 구입하기 위한 경제적인 문제에 있어서) 이러한 기능은 추가하지 않는 편이 좋을지도 모른다.

이러한 관점에서 필자가 제시한 differential gear를 이용한 과지력 감지 의수는 최소한의 기구학적 장치의 추가로 과지력을 감지할 수 있게 함으로써 부가적인 무게의 증가나 의수의 가격적인 문제에 있어서 매우 합당한 해결책이라 생각한다. 더욱이 이 장치의 경우, 의수 전체에 대한 구조를 바꾸는 것이 아니라, 기존의 구조에 추가해 가는 기능이므로, 필자가 제시한 모델뿐만 아니라 기존의 과지력을 조정하는 의수 등 기타 다른 형태의 의수들에게도 폭넓게 적용 시킬 수 있는 장점이 있다고 하겠다.

필자가 제시한 과지력 감지 의수의 경우 아직 제작을 하지 않은 순수 개념에 의거한 것이다. 따라서 실제 의수를 제작함에 있어서 예상되는 고려 사항은 다음과 같다.

1. 모터의 선정.

Differential gear의 특성상 모터에서 나오는 동력이 반으로 나뉘어져서 양쪽으로 들어가게 되므로 기존의 의수보다 약한 과지력을 보일 수도 있다. 따라서 이에 대해 모터의 선정이다. 동력 전달시 gear의 크기 등에 대한 고려가 필요하겠다.

## 2. 실린더 및 피스톤 구동부의 구조적 고려.

실린더의 적절한 배치와 더불어 파지시 밀려나는 공기의 양을 단계별로 조절하기 위해 실린더 내부의 압력 조절에 대한 연구가 필요하다. 또한 착용자의 민감한 부위에 커프를 최소한의 크기로 위치시키는 것도 같이 고려해 보아야 할 것이다.

## 3. differential gear의 크기 문제.

Differential gear의 크기를 더욱 줄일 수만 있다면 여러 개를 사용하여 각 손가락의 개폐를 조정하여 보다 자연스러운 손가락 동작을 유도하게끔 하는 것도 필요하다고 본다.

이 외에 실제 제작시 더 많은 고려사항이 나오겠지만, 최소한 이러한 고려사항은 미리 해결하고 실제 제작에 들어가는 것이 바람직하다고 사료된다.

of above elbow body-powered prostheses in visually-guided unconstrained motion tasks”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 42, No. 6, pp. 621~631.

## 참고문헌

- (1) Massimiliano Zecca, 2003, “On the development of a cybernetic prosthetic hand”, the degree of doctor philosophy, Scuola Superiore Sant'Ann
- (2) Massa B., Roccella S., Carrozza M. C. and Dario P., 2002, “Design and development of an underactuated prosthetic hand”, *International Conference on Robotics & Automation*, pp. 3374~ 3379
- (3) Lionel Birglen and Clément M. Gosselin, “On the Force Capability of Underactuated Fingers”
- (4) Thierry Laliberté and Clément M. Gosselin, “Development of a Three-DOF Underactuated Finger”
- (5) SCHULZ S., PYLATIUK C. and BRETTHAUER G., 2001, “A New Ultralight Anthropomorphic Hand”, *International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1~5.
- (6) Otto Bock HealthCare GmbH. [http:// www.ottobock.com](http://www.ottobock.com).
- (7) Li-Ren Lin and Han-Pang Huang, 1996, “Mechanism design of a new multifingered robot hand”, *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, Vol. 2, pp. 1471~1476.
- (8) Kyberd, P. J., Holland, O. E., Chappell, P.H., Smith, S., Tregidgo, R., Bagwell, P. J. and Snaith, M., 1995, “MARCUS: a two degree of freedom hand prosthesis with hierarchical grip control”, *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, Vol. 31, pp. 70~76.
- (9) Guangzhi Wang, Xiaoning Zhang, Jichuan Zhang and Gruver, W. A., 1995, “Gripping force sensory feedback for a myoelectrically controlled forearm prosthesis”, *Systems, Man and Cybernetics*, *Intelligent Systems for the 21st Century*, *IEEE International Conference on*, Vol. 1, pp. 501~504.
- (10) Doeringer, J. and Hogan, N., 1995, “Performance