

# 건구동형 의수의 파지력 해석 Analysis of Grip Force for Tendon-driven Prosthetic Hand

정성윤, \*#문인혁

S. Y. Jung, \*#I. Moon(ihmoon@deu.ac.kr)

동대학교 메카트로닉스공학과

Key words : Prosthetic hand, Tendon-driven, Grip force

## 1. 서론

사람 손은 22 자유도(degree of freedom)를 가지고 있으며 다양한 기능을 수행할 수 있는 신체부위의 중요한 부분이다.<sup>1</sup> 그러나 상지 절단 장애인(forearm amputee)들은 손의 기능을 상실하여 일상생활에서 많은 불편함을 겪고 있다. 의수(prosthetic hand)는 상지 절단 장애인들의 결손된 손의 기능을 보상하기 위한 대표적인 기계적 보조 장치(assistive product)이다. 많은 상지 절단 장애인들은 모터의 구동력으로 파지동작이 가능한 전동 의수(electric hand prosthesis)를 사용하고 있으나, 낮은 동작 자유도로 인해 다양한 손의 기능을 수행하기 어렵다.<sup>2</sup> 최근에는 사람 손과 유사하며, 높은 자유도를 가지는 의수에 관한 연구가 있었다.<sup>3</sup> 그리고 손가락 끝에 접촉센서(tactile sensor)를 장착해 파지력을 제어하여 다양한 물건을 파지할 수 있는 의수에 대한 연구도 있었다.<sup>4</sup> 그러나 구동기의 무게 때문에 의수 자체의 무게가 무거워 상지 절단 장애인이 장시간 사용하기에는 어려움이 있는 실정이다.

본 연구에서는 개발한 의수의 손가락 끝단의 파지력 해석 모델을 제안한다. 우리가 개발한 생체모방형 건구동형(tendon-driven) 의수의 손가락은 기구학 해석을 바탕으로 당겨진 건의 길이에 따른 MCP 관절 (metacarpo phalangeal joint)의 각도 변화를 제어하였다.<sup>5</sup> 개발한 손가락의 굽힘 동작은 건(tendon)의 당김에 의해 수행되며, 손가락 내부에는 링크 메커니즘을 채용하여 MCP 관절이 움직일 때 PIP 관절 (proximal interphalangeal joint)도 동시에 움직인다. 손가락의 펴 동작은 복원스프링에 의해 수행된다. 그리고 우리는 MCP 관절의 각도 변화에 따른 손가락 끝단의 파지력을 시뮬레이션으로부터 알 수 있었다. 시뮬레이션 결과로부터 우리는 본 연구에서 제안하는 파지력 해석 모델을 개발한 의수에 적용할 수 있음을 보인다.

## 2. 건구동형 의수

### 2.1 건구동형 의수의 설계

본 연구에서 제안하는 건구동형 의수는 사람 손의 구조를 모방하여 설계되었으며, 개발된 의수의 무게는 약 400g으로 경량화된 구조이다. 손가락의 굽힘 동작을 위한 근육으로는 소형 DC 모터를 사용하였으며, 건으로는 합사 와이어를 사용하였다. 개발한 의수는 엄지와 보통의 4 개의 손가락으로 이루어져 총 5 개의 손가락으로 구성되어 있다. 엄지 외 4 개의 손가락은 2 개의 마디와 하나의 뼈로 구성되어 있고, 각 마디는 2 개의 관절로 연결되어 있어 굽힘과

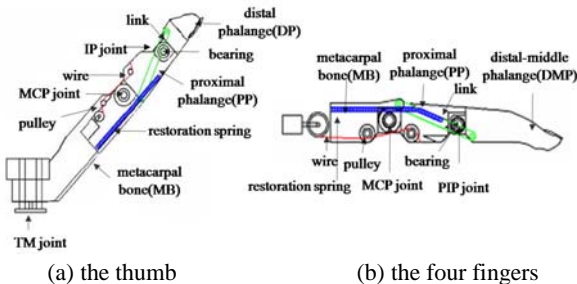


Fig. 1 Cross section of the designed fingers

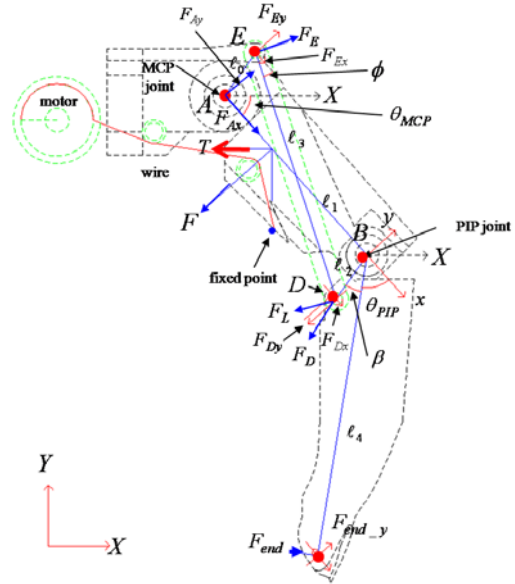


Fig. 2 A grip force model

펴 동작이 가능하다. 그러나 엄지의 경우 나머지 4 개의 손가락과 달리 2 개의 마디와 하나의 뼈로 구성되어 있으며, 굽힘, 펴 동작 이외에 회전동작을 수행하기 위한 TM 관절 (trapezometacarpal joint)이 추가되어 3 개의 관절로 설계하였다. 각 손가락에는 링크 메커니즘을 삽입하여 MCP 관절이 움직일 때 PIP 관절도 동시에 움직이게 됨으로써 하나의 구동기와 건에 의해 굽힘 동작을 수행하도록 설계하였다. 그림 1 은 설계된 건구동형 의수의 손가락 단면도를 보여준다.

### 2.2 파지력 해석

손가락은 4 절 링크로 설계되었으며, 이 링크 구조는 건을 당김으로써 MCP 관절과 PIP 관절을 동시에 굽힐 수 있다. 그리고 건의 장력에 의해 생기는 MCP 관절의 회전토크도 링크를 통해 DMP(distal-middle phalange)의 끝단으로 전달한다 (그림 2 참조). 건의 장력이 일정하다고 하면, 손가락 끝단의 전달힘, 즉 파지력  $F_{end}$  는 MCP 관절의 각도에 따라 변하게 된다. 이것은 다음과 같이 비선형의 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{end} = f(\theta_{MCP}) \quad (1)$$

먼저, 우리는 그림 2 의  $l_1$  과  $l_4$  를 손가락 마디 PP(proximal phalange)와 DMP 의 길이로,  $l_3$  를 MCP 관절과 PIP 관절을 연결하는 링크의 길이로 하고, 각각은 설계 시 고정된 변수로 가정한다. 그리고 DMP 와 링크  $l_2$  가 이루는 각도  $\beta$  도 설계변수로서 고정된 값이라고 한다. 그리고  $l_3$  와 점 A 에서 시작되는  $l_1$  과 평행한 수평선이 이루는 각도  $\phi$  와 PIP 관절 각도  $\theta_{PIP}$  는 MCP 관절 각도로부터 구할 수 있다. 따라서 건의 장력  $T$  가 일정하다고 가정하고,  $\theta_{MCP}$  가 한 지점에서 고정될 때, 손가락에 발생하는 반력으로부터 강체에 대한 평형식(equation of equilibrium for rigid

body)을 이용하여 손가락 끝단의 과지력을 계산할 수 있다. 먼저 장력  $T$ 로부터 발생하는 손가락을 굽히는 힘  $F$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = T \sin \theta_{MCP} \quad (2)$$

그리고 힘의 평형조건에 의해 링크 고정점 A에 발생하는 회전 모멘트  $M_A$ 의 합은 0이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum M_A = dF - \ell_2 F_D + \ell_1 F_D \cos(\beta + \theta_{PIP}) - \ell_4 F_{end} - \ell_1 F_{end} \cos \theta_{PIP} = 0 \quad (3)$$

여기서 힘  $F_{end}$ 는 손가락 끝단의 과지력이며, 힘  $F_D$ 는 링크  $\ell_2$  방향으로 발생하는 힘이다.  $d$ 는 점 A로부터  $F$ 에 내린 수직선이며, 이것은 설계 시 고정된 변수이다. 그리고 x축 방향의 힘 성분  $F_x$ 와 y축 방향의 힘 성분  $F_y$ 의 합은 0이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum F_x = F_{Ax} + F_{Ex} + F_{Dx} + F_{end\_x} = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_y = F_{Ay} + F_{Ey} + F_{end\_y} - F_{Dy} - F = 0 \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서  $F_{Dx}, F_{Dy}$ 는 링크  $\ell_2$ 의 방향으로 발생하는 힘  $F_D$ 를 x와 y축 방향으로 분해한 힘이며,  $F_{Ex}, F_{Ey}$ 는 힘  $F_D$ 를 링크  $\ell_3$ 의 수직된 방향으로 사상시킨 힘  $F_L$ 의 반력 힘  $F_E$ 를 x와 y축 방향으로 분해한 힘이다. 그리고  $F_{end\_x}, F_{end\_y}$ 는 손가락 끝단에 발생하는 과지력을 x와 y축 방향으로 분해한 힘이다. 마지막으로 점 B에 발생하는 회전 모멘트  $M_B$ 의 합은 0이며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sum M_B = F_D \ell_2 \sin(\beta + \theta_{PIP}) \cos(\beta + \theta_{PIP}) + F(\ell_1 - d) - F_D \ell_2 \cos(\beta + \theta_{PIP}) \sin(\beta + \theta_{PIP}) - F_{end} \ell_4 = 0 \quad (6)$$

따라서 손가락 끝단의 과지력  $F_{end}$ 는 식 (3)~(6)으로부터 연립방정식을 이용하여 계산할 수 있다. 그리고 식 (2)와 (6)로부터 식 (1)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{end} = \frac{[F_D \ell_2 \{\sin(\beta + \theta_{PIP}) \cos(\beta + \theta_{PIP}) - \cos(\beta + \theta_{PIP}) \sin(\beta + \theta_{PIP})\} + T \sin \theta_{MCP} (\ell_1 - d)] / \ell_4}{\ell_4} \quad (7)$$

식 (7)을 간략화한 표현은 식 (1)과 같고, 우리는 장력  $T$ 가 일정할 때 MCP관절 각도  $\theta_{MCP}$ 에 따른 손가락 끝단의 과지력  $F_{end}$ 를 구할 수 있다.

### 3. 실험 및 결과

본 연구에서 개발한 건구동형 의수는 엄지에는 2개의 모터, 검지는 1개의 모터, 그리고 나머지 세 손가락의 굽힘 동작을 위해 1개의 모터를 채용하여, 총 4개의 모터를 사용하였다. 각 손가락 굽힘 동작은 기구학 해석을 바탕으로 당겨진 건의 길이에 따른 MCP관절의 각도 변화에 의해 구현된다.<sup>5</sup>

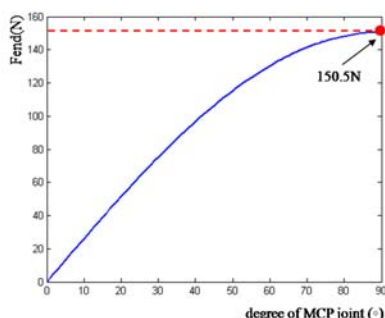


Fig. 3 A simulation result of grip force

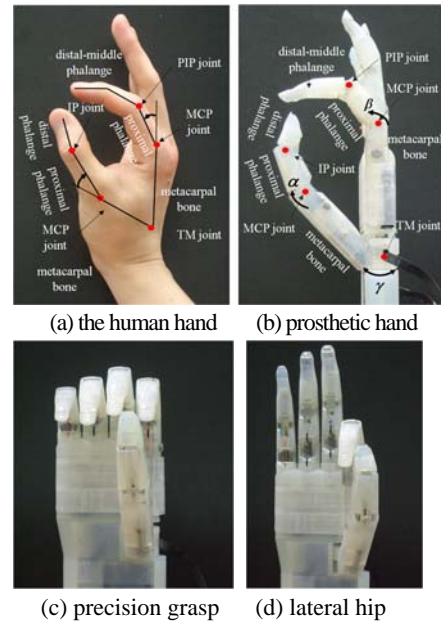


Fig. 4 Developed tendon-driven prosthetic hand

그림 3은 건의 장력이 일정할 때 MCP관절의 각도에 따른 손가락 끝단의 과지력을 시뮬레이션한 결과이다. 본 연구에서 사용한 DC 모터의 사양에 따라 건의 장력  $T$ 는 355N로 일정하다. 시뮬레이션 결과로부터 손가락 끝단에 최대 150.5N 정도의 과지력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 그리고 그림 4는 개발한 건구동형 의수와 의수의 과지동작을 구현한 결과이다. 각 손가락의 굽힘 각도는 미리 정해두고, 건을 구동하는 각각의 모터를 제어하였다.

### 4. 결론

본 논문에서 우리는 사람 손과 유사하며, 무게가 가벼운 건구동형 의수를 제안하였다. 개발된 의수는 총 6자유도를 가지며, 이러한 자유도를 바탕으로 정밀파지, 측면파지, 손끝파지, 구형파지, 원주형파지, 걸기와 같은 과지동작을 구현할 수 있다. 또한 과지력 해석을 통해 MCP관절의 각도에 따른 최대 과지력을 구하였다. 그 결과 최대 과지력은 건의 장력의 약 42.3% 정도 발생하는 것을 확인하였다.

향후에 우리는 손가락 끝단의 과지력을 측정할 수 있는 실험 장치를 개발하여 과지력을 측정해 볼 것이며, 시뮬레이션 결과와 비교할 예정이다.

### 후기

본 연구는 한국 과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-11258-0) 지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

1. M. Carozza, G. Cappiello, S. Micera, B. Edin, L. Beccai, and C. Cipriani, "Design of a cybernetic hand for perceptom and action," *Biological Cybernetics*, pp. 629-644, 2006.
2. M. Carozza, G. Cappiello, G. Stelin, F. Zaccone, S. Micera, and P. Dario, "On the development of a novel adaptive prosthetic hand with compliant joints: experimental platform and EMG control," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1271-1276, 2005.
3. K. Fite, T. Withrow, X. Shen, K. Wait, J. Mitchell, and M. Goldfarb, "A Gas-Actuated Anthropomorphic Prosthesis for Transhumeral Amputees," *IEEE Transactions on Robotics*, pp.159-169, 2008.
4. B. Edin, L. Beccai, L. Ascari, S. Roccella, J.Cabibhan, and M.Carozza, "Bio-inspired approach for the design and characterization of a tactile sensory system for a cybernetic prosthetic hand," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1354-1358, 2006.
5. S.Y. Jung, S.K. Kang, M.J. Lee, and I. Moon, "Design of robotic hand with tendon-driven three fingers," in *Proc. ICCAS International Conference on Control Automation and System*, pp.83-86, 2007.