

전완의 회외 및 회내를 보조하는 유연한 착용형 로봇 개발

Development of Soft Wearable Robot for Assisting Supination and Pronation of Forearm

김규범¹·박지훈²·조규진[†]

Kyu Bum Kim¹, Jihun Park², Kyu-Jin Cho[†]

Abstract: In order to fully utilize the functions of the hand which is the end effector of the upper limb, other parts of the upper limb have to perform their own roles. Among them, the pronation and supination of the forearm, which allows the hand to rotate along the longitudinal direction of the forearm, play an important role in activities of daily living. In this paper, a soft wearable robot that assists the pronation and supination of the forearm for individuals with weakened or lost upper limb function is proposed. The wearable robot consists of an anchoring part with polymer (wrist strap, elbow strap), a tendon with a belt and wire, and an actuation module. It was developed based on the requirements with respect to friction of anchoring part, forearm compression, and friction of the tendon. It was confirmed that these requirements were satisfied through literature review and experiments. Since all components exist within the forearm when worn, it is expected to be easy to combine with the already developed soft wearable robots for the hand, wrist, elbow, and shoulder.

Keywords: Upper Limb, Forearm, Soft Wearable Robot, Assistive Robot

1. 서 론

사람의 신체기관 중 상지는 어깨, 상완, 전완, 손목, 손 등으로 이루어져 있으며 일상생활을 영위하는 데 있어서 중요한 역할을 수행하는 기관이다. 손을 제외한 상지의 주요한 기능은 손이 몸 주변에서 움직일 수 있도록 하는 것이다¹⁾. 어깨 관절은 상지 전체를 움직여 손이 닿을 수 있는 영역을 넓혀주고 팔꿈치와 전완은 손을 몸 쪽으로 움직이도록 하며 손목은 팔의 움직임으로 위치를 잡은 손의 자세를 최적화한다¹⁾. 손은 실질적으로 동작을 수행하는 상지의 말단장치로서(end effector) 기능하지만 손을 제외한 상지가 제 역할을 수행하지 못한다면 손 기능을 모두 활용하기 어렵게 된다.

상지의 구성요소 중 전완은 회외(supination), 회내(pronation)를 통해 손을 길이 방향으로 회전시킬 수 있다[Fig. 1]. 길이 방향의 회전 덕분에 물체를 잡거나 지지할 때 손이 어느 위치에나 존재할 수 있게 된다²⁾. 그렇기에 회외와 회내는 일상생활에서 매우 중요하다. 밥을 먹기 위해 음식을 입에 가져올 때, 드라이버를 돌릴 때, 손잡이를 돌릴 때, 파지 시 원하는 부분을 잡으려 할 때, 등 파지 준비와 파지 이후에도 전완은 끈임없이 회전해야 한다.

위와 같은 이유로 상지의 움직임은 일상생활에서 중요한 역할을 수행하기 때문에 상지의 기능이 약화되거나 기능을 상실한 사람들을 위해 착용형 로봇(robot)은 꾸준히 개발되어왔다. 단단한 소재를 이용하여 외골격을 만들어 움직임을 정밀

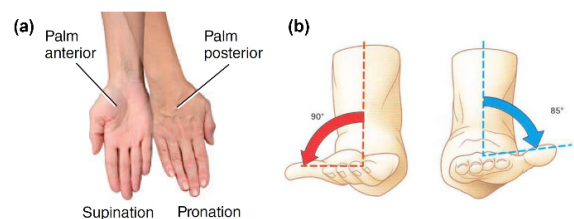
Received : Aug. 7. 2023; Revised : Nov. 2. 2023; Accepted : Nov. 15. 2023

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korean Government (MSIT) (RS-2023-00208052), and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Korea). [Project Number: 20014480]

1. Principal Researcher, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea (kbum34@snu.ac.kr)

2. Principal Researcher, Advanced Mechanical R&D Group, Samsung Electronics, Suwon, Korea (jihun1.park@samsung.com)

† Professor, Corresponding author: Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea (kjcho@snu.ac.kr)



[Fig. 1] (a) Supination, pronation of forearm, (b) range of motion of supination and pronation

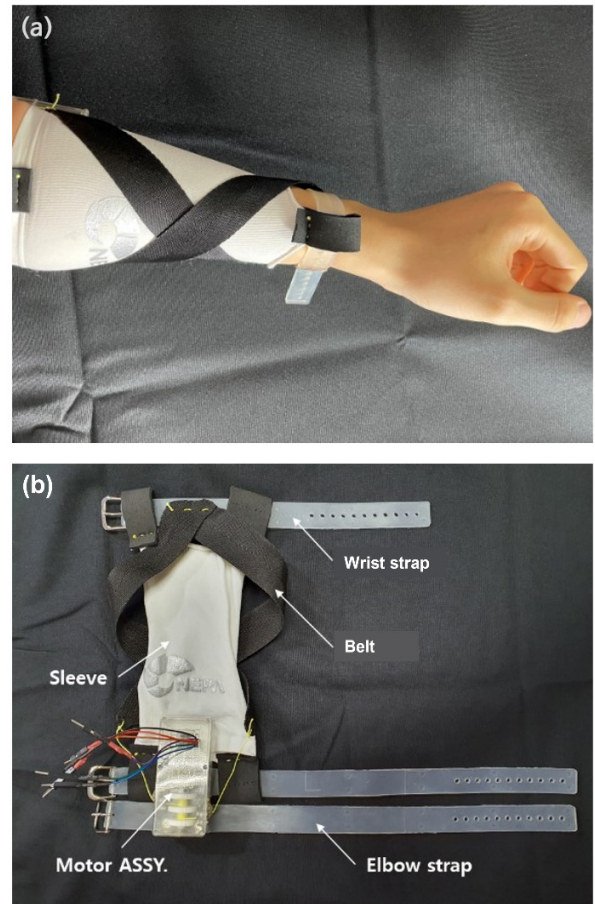
하게 보조하는 로봇에서부터 유연한 소재를 사용하여 가벼우면서도 사용성이 좋은 로봇까지 다양한 종류의 로봇들이 개발되어왔다. 특히, 유연한 소재의 착용형 로봇들은 소재의 특성 덕분에 로봇을 사람의 관절과 정렬하는 것이 용이해 착용성이 좋다는 특징을 가지고 있어 기존의 단단한 소재의 로봇들이 가지고 있던 문제점을 해결할 수 있어 많은 관심을 끌고 있다. 어깨에서부터^{3,4} 팔꿈치^{5,6}, 손목^{7,8}, 그리고 손^{9,10}까지 다양한 종류의 유연한 착용형 로봇이 개발되었다.

개발된 로봇 중에서도 전완의 회외, 회내를 보조 혹은 재활하기 위한 착용형 로봇은 최근 들어서 개발되기 시작했다^{11,12}. 공압 구동기, 형상기억 합금, 혹은 텐던(tendon) 구동 등과 같은 다양한 종류의 구동 방식을 차용하여 여러 로봇들이 개발되었다. 공압 구동 방식을 활용하여 인공 근육을 제작한 로봇은 단위 근육(muscle cell)의 조합을 통해 다양한 방식으로 구동을 할 수 있는 장점이 있지만 공압 구동을 위한 공압 펌프(pump)가 필수적으로 필요하여 소음이 문제점으로 지적되고 있다. 형상기억합금을 이용한 로봇의 경우 시스템(system)을 가볍게 구성할 수 있고 소음이 적은 장점이 있지만 구동의 비선형성으로 인해 제어의 어려움이 있다¹³. 텐던 구동을 이용한 경우 구동부를 착용부로부터 떨어뜨릴 수 있고 간단히 구동할 수 있다는 장점이 있지만 기존에 제시된 회외, 회내 보조를 위한 착용형 로봇은 추가적인 단단한 소재의 구조를 활용하여 착용성이 떨어지거나^{11,14} 형상기억합금을 구동원으로 사용하여 제어의 어려움을 가지고 있다¹⁵.

본 논문에서는 마찰이 적은 소재와 유연한 소재들을 활용하여 하나의 모터로도 회외 및 회내를 보조할 수 있는 텐던 구동 유연한 착용형 로봇을 제안한다. 벨트를 사용하여 전완 압박을 줄이고 나일론 슬리브(sleeve)를 사용하여 구동시 벨트와 전완사이의 마찰을 줄여 소형 모터로도 회외, 회내 움직임을 보조할 수 있도록 하였다. 소형 모터(motor)를 이용하여 구동부를 제작하였기 때문에 로봇 시스템은 작고 가벼워졌으며 슬리브, 폴리머 스트랩 등을 이용하여 착용부가 얇게 설계되어 착용성 또한 증대되었다. 폴리머(polymer)를 이용한 손목 스트랩(strap)은 제작하여 착용자에 맞게 고정할 수 있으며 전체 시스템에 유연성을 부가한다. 사람의 전완을 모사한 시험대를 제작하여 시험대에 제작한 로봇을 착용시키고 압력패드 및 모션캡처(motion capture)장비를 이용하여 전완에 가해지는 압력 및 로봇의 가동범위를 측정하였다.

2. 로봇의 설계 및 특징

[Fig. 2]는 로봇을 착용한 모습과 로봇의 구성요소를 보여준다. 로봇은 손목 스트랩, 팔꿈치 스트랩, 벨트, 텐던, 슬리브, 모터 구동부로 구성되며 회로를 제외한 착용부의 무게는 110 g



[Fig. 2] Overview of the proposing soft wearable robot. (a) donned view of the robot (in neutral position) (b) range of motion of supination and pronation

이다. 아두이노 UNO를 이용하여 모터를 제어하며 P제어를 통해 원하는 위치로 로봇을 제어할 수 있다. 스트랩은 폴리머 시계줄 형태로 손목과 팔꿈치를 감싼다. 텐던은 폭이 25 mm인 폴리에스터 벨트와 다이니마 와이어(dyneema wire)가 결합된 형태이고 전완을 한 번 감아 손목의 스트랩까지의 장력 손실을 줄였다. 슬리브는 나일론 재질의 쿨토시를 재단하여 제작하였다. 모터 구동부는 모터, 스펴(spool), 풀리(pulley)로 구성되어 텐던을 구동한다. 모든 설계는 연구자 본인의 전완을 기준으로 하였으며, 손목둘레 150 mm, 팔꿈치 둘레 250 mm, 손목-팔꿈치간 간격은 250 mm이다.

2.1 스트랩

손목 스트랩은 시계줄이 한 개 있는 형태이고 텐던을 박음질해 고정할 수 있도록 지름 0.5 mm 구멍들이 뚫려있다. 팔꿈치 스트랩은 모터 구동부에서 작용하는 강한 돌림힘에도 변형되지 않도록 시계줄이 두 개 있는 형태이고 중간에 모터 구동

부를 고정할 수 있도록 지름 2 mm 구멍들이 뚫려 있다.

구동부의 동력을 효율적으로 전달하기 위해서는 고정부의 고정력을 증가시켜야 한다. 충분한 고정력을 위해서 고정부와 신체사이의 마찰을 증가시키려면 마찰계수를 키우거나 고정부가 신체에 가하는 수직 항력을 키워야 한다. 그리고 착용형 로봇의 특성상 사람이 착용해야 하므로 고정부가 적절히 신체에 힘을 가해 착용성을 떨어뜨리지 말아야 한다. 이 요구조건들을 만족시키기 위해 폴리머(Shinetsu, KE-1300T)를 사용하였다. 이 폴리머는 면에 비해 피부트러블을 일으키지 않아 사용자 친화적인 고정부 소재임이 확인되었고, Exo Glove Poly II에서 폴리머 시계줄의 안정적인 성능을 확인하였다⁹⁾. 또한 실제 사람이 착용하여 구동할 경우 착용자의 안전을 위해 구조의 유연성이 필요한데 이는 폴리머는 구동시 변형이 될 수 있기에 시스템에 유연성을 부가할 수 있다.

전완은 자체적으로 회전할 수 있는 구조를 가지고 있기 때문에 전완 내에 두 스트랩을 모두 고정시켜도 기능 구현이 가능하다. 두 고정부는 각각 손목과 팔꿈치에 가까운 위치에 고정하여 장력 대비 장력의 성분 중 전완을 회전시키는 성분의 크기를 키워 효율적인 힘 전달을 가능하게 하였다. 충분한 고정력을 제공하기 위해서는 고정부에서의 충분한 수직 항력을 가해줘야 하지만 고정부 위치에 압력이 지속적으로 가해지는 불필요한 압력을 최소화해야 한다. 착용자마다 적정한 압력의 정도가 달라 시계줄 형태를 모방하여 사람에게 맞게 압력 강도를 조절할 수 있도록 하였다.

2.2 벨트와 텐던

텐던 구동은 텐던을 당겨 텐던의 장력으로 구동하는 방식이므로 텐던은 최단거리로 움직이려 한다. 전완 위의 텐던이 당겨지면 필연적으로 전완과 간섭이 발생하여 전완을 압박하게 되므로 통증을 줄이기 위해 전완 압박을 최소화해야 한다. [Fig. 3(a)]처럼 전완을 간단한 원기둥으로 가정하고 텐던을 thin-walled cylinder로 모델링하면 텐던 수축에 의한 압박정도 (P_r)를 hoop stress, radial stress의 관계를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

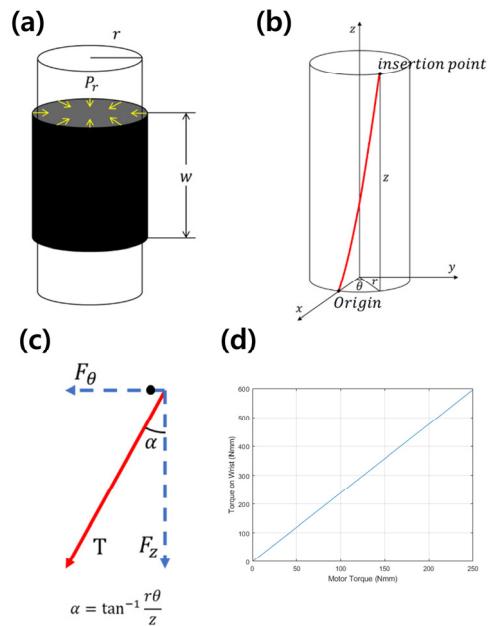
$$\int_0^\pi P_r w r \sin \theta d\theta = 2T \tag{1}$$

$$P_r w r = T \tag{2}$$

$$P_r = \frac{T}{w r} \tag{3}$$

장력 T는 모터에 의해 결정되며 r은 전완의 기하학적 형상에 의해 결정되므로 설계 변수는 텐던의 폭 w이다. 식 (3)에 따르면 w와 P_r 은 반비례 관계이므로 w를 증가시키면 전완 압박은 감소한다. 와이어는 가볍고 잘 늘어나지 않아 텐던으로 많이 사용하지만 w가 작아 전완과 간섭이 있을 경우 전완에 가해지는 압력이 크다. 따라서 일반적으로 사용하는 와이어가 아닌 폭이 25 mm인 폴리에스터 벨트를 텐던으로 사용하였다.

텐던 구동에서 중요한 설계 변수는 텐던의 부착 지점이다 [Fig. 3(b)]. 이 점의 위치에 따라 장력이 같아도 힘의 관계가 달라지기 때문이다. [Fig. 3(c)]는 전완을 간단한 원기둥으로 가정하고 벨트를 감은 상황에서 부착 지점에서 작용하는 힘들을 나타낸 자유 물체도이다. 서로 다른 방향으로 감기는 두 벨트가 겹치지 않기 위해서는 감은 수가 0.5이하로 제한되어야 한다. 그러나 힘 전달 측면에서 보면 F_z 는 전완이 버텨주어 상쇄되기 때문에 감은 수를 크게 해 F_z 를 0에 가깝게 하고 F_θ 를 최대화해야 한다. 감은 수가 커질수록 벨트와 전완과의 마찰, 벨트끼리의 마찰이 증가하여 구동 효율이 감소하게 된다. 또한, 감은 수가 커지면 전완 압박의 총량 또한 증가한다. 따라서 감은 수는 0.5보다 약간 큰 1로 선정했고 이 때의 α 는 약 30°이다. 감은 수가 1이기 때문에 벨트의 겹침이 1회 발생하는데, 벨트끼리의 마찰이 작은 원단을 벨트로 사용해 구동시 벨트간 겹쳐진 부분의 마찰을 줄였다. 벨트의 폭이 와이어에 비해 넓기 때문에 모터 구동의 용이함을 위해 벨트의 끝을 와이어로 연결하여 모터 구동 시 와이어를 당겼을 때 벨트가 당겨지도록 하였다.



[Fig. 3] Forearm compression model due to tendon on the forearm

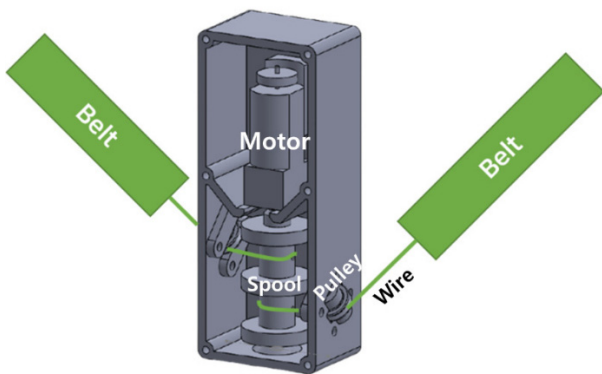
[Fig. 3(d)]는 감은 수를 1로 선정하고 사용한 모터(Pololu, 기어 비 1000:1, 최대출력 약 2.4 W)의 토크에 따라 이론적으로 손목부위에 토크가 얼마나 걸리는지 [Fig. 3(b)]의 원기동 모델을 이용하여 계산한 결과를 보여준다. 텐던과 원기동 사이의 마찰은 려하지 않고 단순히 장력에 의해 회전한다고 가정하였다. 모터의 축과 연결된 스펴의 반지름은 5 mm이고 전완의 지름은 손목부위의 둘레를 원주율로 나눈 값인 47.7 mm로 계산하였다. 이 때, 손목에 작용하는 최대 토크는 0.6 Nm이다.

2.3 슬리브

전완과 접촉하는 텐던은 대부분 벨트로 구성되는데, 피부 위에서 벨트가 움직이면 쓸림으로 인해 착용성이 떨어지고 벨트와 피부사이의 마찰로 구동효율이 떨어지게 된다. 구동마찰이 크면 원하는 동작이 구현이 어려울 뿐 만 아니라 모터에 가해지는 부담이 커지기 때문에 이를 줄이는 것이 중요하다. 그래서 나일론 재질의 쿨토시 소매로 전완을 감싼 뒤에 그 위에서 벨트를 구동해 구동마찰을 최소화하였다. 소매가 벨트로 인해 움직이지 않도록 별도의 천을 박음질해서 스트랩을 소매의 천 속으로 넣어 결합하는 방식으로 제작하였다.

2.4 구동부

[Fig. 4]는 구동부를 보여주며, 모터, 스펴, 폴리로 구성되어 텐던을 구동한다. 벨트와 스펴을 와이어가 이어주고 있어 스펴과 폴리를 작게 만들 수 있어 구동부의 크기를 줄일 수 있었다. 즉, 텐던의 일부를 와이어로 만들어서 구동부의 폭을 최대한 작게 설계했다. 폴리는 축과 베어링으로 이루어져 있고, 텐던이 구동부를 드나들 때 최소한의 구동마찰로 방향을 전환할 수 있게 해준다. 폴리 각도는 텐던이 당겨질 때 텐던이 폴리에서 이탈하지 않도록 설계하였다.



[Fig. 4] One end of the wire is connected to the belt and the other is wound around the spool

3. 평가 및 실험

본 연구에서 제안하는 전완을 위한 착용형 로봇은 다음의 요구조건을 고려하여 개발되었다.

1. 고정부는 충분한 마찰을 제공해야 한다.
2. 텐던에 의한 전완 압박을 최소화해야 한다.
3. 구동마찰을 최소화해야 한다.

위의 요구조건을 충족하는지 평가하기 위해 다음의 네가지 사항에 대해 측정, 문헌 조사 및 평가를 진행하였다.

1. 고정부 마찰: 면과 실리콘 비교
2. 전완 압박: 와이어와 벨트 비교
3. 텐던과 전완간의 마찰: 피부와 소매 비교
4. 텐던끼리의 마찰: 텐던 겹침이 없을 때와 있을 때 비교

3.1 고정부 마찰

고정부 마찰을 최대화하기 위해 면 대신 실리콘을 사용하였다. 최대정지 마찰력은 수직 항력과 마찰계수에 비례하는데, 시계줄 방식의 고정방식을 사용하기 때문에 사용자에게 원하는 크기의 수직 항력을 전완에 가할 수 있다. 고정부 마찰에서 설계적으로 결정되는 요소는 마찰 계수이므로 피부와 면의 마찰 계수와 피부와 폴리머의 마찰계수를 비교하였다.

Zhang 외 1 인은 10 명을 대상으로 손의 앞뒤, 팔의 앞뒤, 다리의 앞뒤 피부와 알루미늄, 나일론, 실리콘, 면, Pelite과의 마찰계수를 측정하였고, 전체에 대해 평균을 취한 결과는 [Table 1]과 같다^[16]. [Table 1]을 보면 피부와 실리콘의 마찰계수는 0.61로 가장 높게 측정되었고, 피부와 면의 마찰계수는 0.51임을 알 수 있다. 따라서 실리콘은 면에 비해 피부와의 마찰계수가 19.6% 크기 때문에 고정부에 더 적합한 소재이다.

3.2 전완 압박

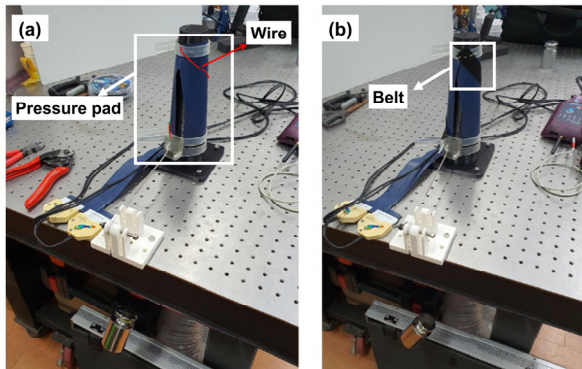
개발된 로봇은 전완 압박의 정도를 줄이기 위해 와이어 대신 폭이 25 mm인 벨트를 사용하였으며, 실험을 통해 와이어와 벨트에 의한 전완 압박을 비교하였다. [Fig. 5]는 실험에 사

[Table 1] Average of friction coefficient between skin and material^[16]

Material	Al	Nylon	Silicone	Cotton	Pelite
Coefficient of friction	0.42	0.37	0.61	0.51	0.45

용한 실험 세팅을 보여준다. 실험 세팅은 광학 브레드보드에 전완을 모사한 구조물을 고정시키고 그 구조물에 압력 패드를 둘렀다. 모형은 재료간 특성 비교를 위해 전완의 형태를 모사하여 제작되었다. 전완을 모사한 구조물은 실제 사람의 전완의 치수를 바탕으로 3D 프린터를 이용하여 제작하였다. 압력 패드를 두른 상태에서 개발한 로봇을 실제 착용하듯이 구조물에 고정시키고 텐던 끝에 1 kg 추를 묶어 1 kgf의 힘이 일정하게 작용하도록 하였다. 이 때, 구조물에 착용시킨 로봇은 [Fig. 4]의 구동부 중 모터를 제외한 부분을 모두 착용시키고 구동부의 도르레 역할을 하는 구조를 사용하여 텐던이 바깥에 위치시킬 수 있게 하였기에 실제 착용시와 동일한 조건으로 실험을 진행하였다.

[Fig. 6(a)]는 추를 늘어뜨리고 압력을 측정한 결과를 시각적으로 보여준다. 텐던이 전완을 한 바퀴 감싸기 때문에 압력 패드를 손목 부분인 왼쪽 위부터 팔꿈치 부분인 오른쪽 아래까지 대각선으로 가로지르고 있다. 관찰할 수 있는 점은 다음과 같다. 첫째, 와이어보다 벨트의 압력이 훨씬 작다는 것을 직관적으로 확인된다. 둘째, 텐던이 팔꿈치 쪽으로 가까워지면



[Fig. 5] Testbed for measuring pressure on forearm model by wire and belt. (a) wire setup (b) belt setup

전완과의 접촉이 사라지는 것이 확인된다. 이를 통해 벨트와 와이어로 이루어진 텐던이 구동할 때, 폭이 좁은 와이어 부분이 전완에 과도한 압박을 가하지 않을 것임을 알 수 있다. 셋째, 팔꿈치 스트랩에 부착된 케이스에서 텐던을 고정해주는 힘이 전완에 작용하여 이 또한 전완 압박으로 작용하고 있다.

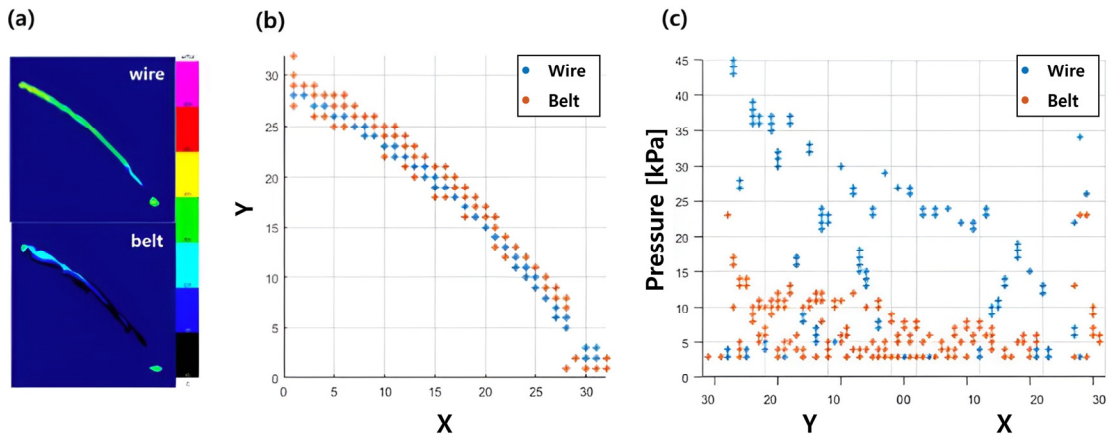
[Fig. 6(b)], [Fig. 6(c)]는 추를 늘어뜨리고 충분한 시간이 흐른 뒤 5초 동안의 센서데이터를 취합하여 산점도로 나타내 두 경우를 비교한 것이다. [Fig. 6(b)]는 압력이 작용하는 위치를 보여주며, 테스트베드와 텐던의 접촉면을 관찰할 수 있다. 둘을 비교해 보면 벨트가 와이어보다 접촉면의 폭이 2배 이상 크다는 것이 확인된다.

[Fig. 6(c)]는 텐던의 각 위치에 대해 압력을 나타낸 그래프이다. 벨트가 와이어보다 폭이 크므로 벨트 압력이 와이어 압력의 50% 이하 수준으로 측정되었다. 또한 팔꿈치에 가까워질수록 전완의 반지름이 증가하여 두 텐던에 의한 압력이 모두 감소하였다. 최대 압력은 와이어와 벨트 모두 전완의 반지름이 가장 작은 손목 부분에서 발생하였고, 각각 45 kPa, 23 kPa로 측정되었다. 팔꿈치 스트랩에 부착된 케이스에서 텐던을 고정해주는 힘이 전완에 작용하여 전완 압박으로 작용했는데, 손목 부분에서 작용하는 압력보다는 작게 측정되었다.

앞서 전완에 가해지는 압력을 식 (3)으로 유도하였는데, 측정된 압력값이 접촉면의 폭과 전완의 반지름에 반비례하다는 것이 실험을 통해 확인되었다.

3.3 텐던과 전완 사이의 마찰

텐던과 전완 사이의 마찰을 최소화하기 위해 피부에 바로 구동하는 것이 아니라 나일론 재질의 쿨도시 위에서 구동하는 방식을 사용하였다. 최대정지 마찰력 및 운동 마찰력은 수직 항력과 마찰계수와 연관되는데, 수직 항력은 텐던의 장력 및



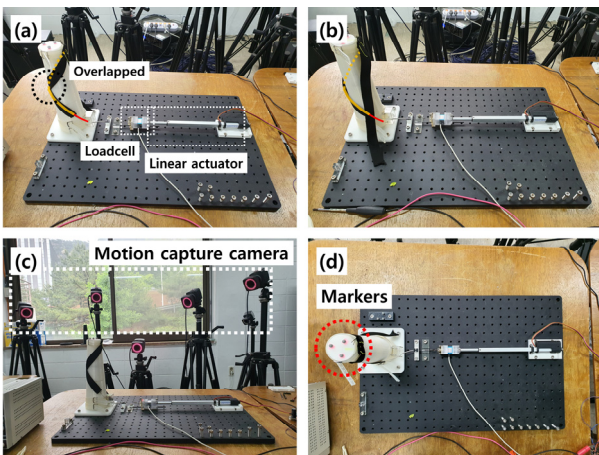
[Fig. 6] Experimental result of forearm compression test. (a) compression comparison between wire and belt (b) compressed area comparison (c) compression with respect to tendon

전완의 기하학적 형상에 의해 결정된다. 따라서 텐던과 피부 사이의 마찰계수와 텐던과 나일론 사이의 마찰계수를 비교하여 마찰이 낮은 것으로 선택하여 제작하였다.

Savescu의 2인은 12명을 대상으로 손가락과 면, 폴리에스터, 레이온, 사포, 실크와의 마찰계수를 측정하였고, 전체에 대해 평균을 취한 결과 손가락과 폴리에스터의 마찰계수는 0.43으로 측정되었다^[7]. Robins의 2인은 폴리에스터의 다양한 마찰 특성에 대해 연구하였고, 실험 결과 폴리에스터와 나일론의 마찰계수는 0.38로 측정되었다^[8]. 즉, 폴리에스터와 피부의 마찰계수에 비해 폴리에스터와 나일론의 마찰계수가 11.6% 작다. 따라서 나일론 재질의 쿨토시 위에서 구동하면 구동마찰을 줄일 수 있을 것으로 생각되어 나일론 재질로 선정하여 제작하였다.

3.4 텐던 간의 마찰

감은 수를 1로 선정하였기 때문에 회의를 위한 텐던과 회내를 위한 텐던은 겹칠 수밖에 없다. 실제 구동 시에 겹쳐진 부분에서 마찰로 인한 손실이 발생할 수 있기에 실험을 통해 텐던 겹침이 있을 때와 없을 때에 마찰 손실을 비교하였다. [Fig. 7]은 실험에 사용한 실험 세팅을 보여준다. 텐던 겹침의 유무에 따른 장력 대비 회전정도를 비교하기 위해 전완의 형상을 원뿔대 형태로 모사하였다. 하단의 구조와 상단의 구조를 핀으로 연결하였고 베어링을 사용하여 구조가 회전할 때 핀과 구조물 사이의 마찰을 최소화하고자 하였다. 광학 브레드보드에 전완을 모사한 모형을 고정시킨 뒤 손목 스트랩, 팔꿈치 스트랩을 이용해 구조물에 로봇을 착용시킨다. 모형에 적외선 반사 마커(marker)를 고정시켜 모션 캡처 장비(Vicon)로 마커의 위치를 측정할 수 있도록 한다. 선형 구동기의 끝에 로드셀



[Fig. 7] Testbed for measuring tension of tendon and rotation angle (a) tendons are overlapped (b) tendons are not overlapped (c) front view of testbed (d) top view of testbed

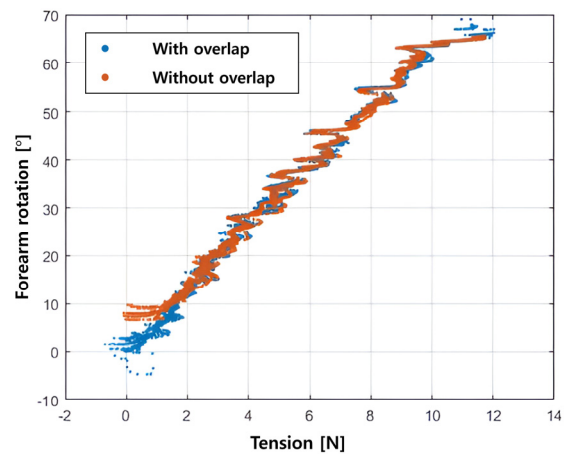
(loadcell)을 고정하고 로드셀과 텐던을 연결하여 장력을 측정할 수 있도록 하였다. 실험을 위한 구성을 한 뒤, 선형 구동기를 5회 반복 구동하여 텐던의 장력과 마커의 움직임을 측정하였다.

[Fig. 8]은 텐던의 장력에 대한 전완의 회전 변위를 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 알 수 있듯이 텐던 겹침이 있는 경우와 없는 경우가 거의 동일한 응답을 보이고 있다. [Table 2]를 보면 텐던 겹침이 있을 때와 없을 때 같은 장력에 대해 전완의 회전 변위가 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 만약 텐던 간의 마찰이 우세하다면 선형 구동기에 연결된 로드셀에서 측정되는 장력이 같아도 마찰 손실로 인해 힘전달이 원활히 이루어지지 않아 텐던 겹침이 있는 경우에 회전이 덜 회전했을 것이다. 또한 장력이 커질수록 수직항력 이 증가되어 마찰 영향이 커지므로 둘의 차이는 더 벌어졌을 것이다. 그러나 둘의 데이터가 유의미한 차이 없이 거의 동일한 응답을 보여주고 있으므로 텐던 간의 마찰로 인한 손실은 무시할 수 있다.

4. 논 의

요구조건을 충족했는지 확인하기 위해 고정부 마찰, 전완 압박, 텐던과 전완 간의 마찰, 텐던 간의 마찰에 대해 평가하였다.

고정부 마찰에 대한 문헌을 조사한 결과, 피부와 실리콘의 마찰계수는 0.61인데 피부와 면의 마찰계수는 0.51이다. 따라



[Fig. 8] Rotational angle of forearm model according to the tension of the tendon. Red line shows a result when the tendons are not overlapped. Blue line shows a result when the tendons are overlapped

[Table 2] Rotation angle of forearm model with respect to the tension of the tendon

		Tension [N]				
		2	4	6	8	10
Rotation [°]	With overlap	13	26	39	51	62
	Without overlap	13	26	39	51	63

서 실리콘은 면에 비해 피부와의 마찰계수가 19.6% 커 고정부 마찰을 크게 할 수 있어 실리콘으로 선정하였다.

전완 압박을 평가한 결과, 벨트가 와이어보다 접촉면의 폭이 2배 이상 크고 벨트 압력이 와이어 압력의 50% 이하 수준임이 확인되었다. 또한 텐던이 팔꿈치에 가까워지면 전완과의 접촉이 사라져 와이어로 인한 영향이 사라지는 것이 확인되었다. 따라서 벨트와 와이어가 혼합된 형태의 텐던은 전완 압박을 최소화할 수 있다고 판단된다. 한편, 팔꿈치 스트랩에 부착된 케이스에서 텐던을 고정해주는 힘이 전완에 전가되어 전완 압박으로 작용했는데, 손목 부분에서 작용하는 압력보다는 작게 측정되었지만 개선이 필요하다.

텐던과 전완 사이의 마찰에 대한 문헌을 조사한 결과, 손가락과 폴리에스터의 마찰계수는 0.43인데 폴리에스터와 나일론의 마찰계수는 0.38이다. 즉, 폴리에스터와 피부의 마찰계수에 비해 폴리에스터와 나일론의 마찰계수가 11.6% 작다. 따라서 전완 위에서 벨트를 바로 구동하는 것이 아니라 사이에 나일론 재질의 쿨토시를 넣음으로써 텐던과 전완간의 마찰을 최소화할 수 있을 것이라 생각된다.

텐던 간의 마찰을 평가한 결과, 텐던 겹침이 있는 경우와 없는 경우가 거의 동일한 응답을 보였다. 따라서 본 졸업연구에서 텐던 겹침이 1회 존재해도 텐던간의 마찰로 인한 손실은 무시해도 될 것으로 판단된다.

본 논문에서는 착용형 로봇의 재료 선정과 디자인에 대한 내용을 담고 있어 실제 사람을 대상으로 진행한 실험이 부족하다. 추후 연구에서 사람을 대상으로 구동 실험을 진행한 뒤 가동범위, 전완에 가해지는 토크, 회외 및 회내 구현 속도 등에 대한 평가지표 측정이 필요하다.

5. 결 론

상지의 말단장치의 손의 기능을 충분히 활용하기 위해서는 손 이외의 상지 구성요소들이 제 역할을 수행해야 한다. 그 중에서도 전완의 회외, 회내는 손을 전완의 길이 방향으로 회전하도록 하여 어느 위치에나 존재할 수 있게 하므로 중요한 역할을 수행한다. 본 연구에서는 상지의 기능이 약화되었거나 기능을 잃어버린 사람들을 위해 전완의 회외, 회내를 보조할 수 있는 착용형 로봇을 제안하였다.

전완을 위한 착용형 로봇은 폴리머를 활용한 고정부(손목 스트랩, 팔꿈치 스트랩), 벨트와 와이어를 이용한 텐던, 그리고 구동부로 이루어져 있다. 유연한 재료들을 사용하여 시스템에 유연성이 존재하지만 착용자의 전완 상태에 따라 유연성이 부족할 수 있다. 이는 벨트와 와이어에 탄성요소를 적절히 활용한다면 착용자에 맞는 유연성을 부여할 수 있을 것으로 생각된다. 전완을 위한 착용형 로봇은 고정부 마찰, 전완 압박, 구동시 발

생할 수 있는 마찰에 관한 요구조건을 바탕으로 개발되었으며 문헌 조사 및 실험을 통해 그 조건들이 충족됨을 확인하였다. 다만, 본 연구에서 제작한 모형은 재료간 특성을 비교하는 실험에 사용하기 위해 사람의 전완의 특성을 모두 반영한 모형을 만들기도한 형태와 움직임을 간단히 모사한 모형을 제작하였다. 사람의 전완의 특성을 완벽히 대변한다고 하기는 어렵기 때문에 추후에 실제 임상실험을 통해 성능을 확인할 필요가 있다.

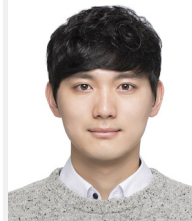
본 연구에서 개발한 로봇은 전완의 회외, 회내 움직임만 보조한다. 착용시 전완 내에 모든 구성요소가 존재하도록 제작하였기 때문에 기 개발된 손, 손목, 팔꿈치, 그리고 어깨를 위한 유연한 착용형 로봇과 결합하는데 용이할 것이라 생각된다. 상지의 다른 부위와 결합되어 사용된다면 상지의 기능을 활용하지 못하는 사람들이 착용하여 일상생활을 더 영위할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] A. A. Amis, "Part 1. Upper limb function, shoulder and elbow," *Current Orthopaedics*, vol. 4, no. 1, pp. 21-26, Jan., 1990, DOI: 10.1016/0268-0890(90)90028-E.
- [2] I. A. Kapandji, "Rotation (Pronation and supination)," *The physiology of the joints, Volume I*, 5th ed. Churchill. Livingstone, 1983, ch. 3, sec. 1, pp. 98, [Online], <https://www.amazon.com/Physiology-Joints-Upper-Limb/dp/0443025045>, Accessed: Nov. 16, 2023.
- [3] C. Simpson, B. Huerta, S. Sketch, M. Lansberg, E. Hawkes, and A. Okamura, "Upper Extremity Exomuscle for Shoulder Abduction Support," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 2, no. 3, pp. 474-484, Jul., 2020, DOI: 10.1109/TMRB.2020.3012471.
- [4] T. Abe, S. Koizumi, H. Nabae, G. Endo, K. Suzumori, N. Sato, M. Adachi, and F. Takamizawa, "Fabrication of 18 weave muscles and their application to soft power support suit for upper limbs using Thin McKibben Muscle," *IEEE Robotic Automation Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 2532-2538, Jul., 2019, DOI: 10.1109/LRA.2019.2907433.
- [5] M. Irshaidat, M. Soufian, A. Al-Ibadi, and S. Nefti-Meziani, "A Novel elbow pneumatic muscle actuator for exoskeleton arm in post-stroke rehabilitation," *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, Seoul, Korea, 2019, DOI: 10.1109/ROBOSOFT.2019.8722813.
- [6] N. Lotti, M. Xiloyannis, G. Durandau, E. Galofaro, V. Sanguineti, L. Masia, and M. Sartori, "Adaptive model-based myoelectric control for a soft wearable arm exosuit: A new generation of wearable robot control," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 27, no. 1, pp. 43-53, Mar., 2020, DOI: 10.1109/MRA.2019.2955669.
- [7] H. Choi, B. B. Kang, B.-K. Jung, and K.-J. Cho, "Exo-Wrist: a soft tendon-driven wrist-wearable robot with active anchor for dart-throwing motion in hemiplegic patients," *IEEE Robotic Automation Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 4499-4506, Oct., 2019,

DOI: 10.1109/LRA.2019.2931607.

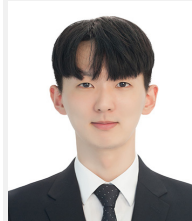
- [8] N. Li, T. Yang, Y. Yang, P. Yu, X. Xue, X. Zhao, G. Song, I. H. Elhajj, W. Wang, N. Xi, and L. Liu, "Bioinspired Musculoskeletal Model-based Soft Wrist Exoskeleton for Stroke Rehabilitation," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 17, no. 6 pp. 1163-1174, Nov., 2020, DOI: 10.1007/s42235-020-0101-9.
- [9] B. B. Kang, H. Choi, H. Lee, and K.-J. Cho, "Exo-glove poly II: A polymer-based soft wearable robot for the hand with a tendon-driven actuation system," *Soft robotics*, vol. 6, no. 2, pp. 214-227, Apr., 2019, DOI: 10.1089/soro.2018.0006.
- [10] D. H. Kim, Y. Lee, and H.-S. Park, "Bioinspired high-degrees of freedom soft robotic glove for restoring versatile and comfortable manipulation," *Soft robotics*, vol. 9, no. 4, pp. 734-744, Aug., 2022, DOI: 10.1089/soro.2020.0167.
- [11] H. Su, K.-S. Lee, Y. Kim, and H.-S. Park, "A Soft, Wearable Skin-Brace for Assisting Forearm Pronation and Supination With a Low-Profile Design," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 12078-12085, Oct., 2022, DOI: 10.1109/LRA.2022.3211783.
- [12] S.-H. Park, J. Yi, D. W. Kim, Y. Lee, H. S. Koo and Y.-L. Park, "A Lightweight, Soft Wearable Sleeve for Rehabilitation of Forearm Pronation and Supination," *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, Seoul, Korea, 2019, DOI: 10.1109/ROBOSOFT.2019.8722783.
- [13] E. Bardi, M. Gandolla, F. Braghini, F. Resta, A. L. G. Pedrocchi, and E. Ambrosini, "Upper limb soft robotic wearable devices: a systematic review," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 19, no. 87, Aug., 2022, DOI: 10.1186/s12984-022-01065-9.
- [14] H. H. Cheng, T. M. Kwok, and H. Yu, "Design and Control of the Portable Upper-limb Elbow-forearm Exoskeleton for ADL Assistance," *2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Seattle, WA, USA, pp. 343-349, 2023, DOI: 10.1109/AIM46323.2023.10196165.
- [15] J. Jeong, K. Hyeon, S.-Y. Jang, C. Chung, S. Hussain, S.-Y. Ahn, S.-K. Bok, and K.-U. Kyung, "Soft Wearable Robot With Shape Memory Alloy (SMA)-Based Artificial Muscle for Assisting With Elbow Flexion and Forearm Supination/Pronation," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 6028-6035, Jul., 2022, DOI: 10.1109/LRA.2022.3161700.
- [16] M. Zhang and A. F. Mak, "In vivo friction properties of human skin," *Prosthetics and orthotics International*, vol. 23, no. 2, pp. 135-141, Aug., 1999, DOI: 10.3109/03093649909071625.
- [17] A. V. Savescu, M. L. Latash, and V. M. Zatsiorsky, "A technique to determine friction at the fingertips," *Journal of applied biomechanics*, vol. 24, no. 1, pp. 43-50, Feb., 2008, DOI: 10.1123/jab.24.1.43.
- [18] M. M. Robins, R. W. Rennell, and R. D. Arnell, "The friction of polyester textile fibres," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 17, no. 7, pp. 1349, Jul., 1984, DOI: 10.1088/0022-3727/17/7/009.



김 규 범

2017 서울대학교 기계공학부(학사)
2017~현재 서울대학교 기계공학부(박사과정)

관심분야: 재활로봇, 착용형 로봇, 텐던 구동



박 지 훈

2021 서울대학교 기계공학부(학사)
2021~현재 삼성전자 MX사업부

관심분야: CAE, 로봇



조 규 진

1998 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
2000 서울대학교 기계항공공학부(공학석사)
2007 Mechanical Engineering, MIT (공학박사)
2008~현재 서울대학교 기계공학부 교수

관심분야: 생체 모사 로봇, 소프트 로봇, 의료용 로봇, 웨어러블 로봇 등