

텐던 구동 시스템의 마찰 모델 파라미터 추정

Parameter Estimation of a Friction Model for a Tendon-sheath Mechanism

정해성¹·이정준²·김남욱[†]

Haeseong Jeoung¹, Jeongjun Lee², Namwook Kim[†]

Abstract: Mechanical systems using tendon-driven actuators have been widely used for bionic robot arms because not only the tendon based actuating system enables the design of robot arm to be very efficient, but also the system is very similar to the mechanism of the human body's operation. The tendon-driven actuator, however, has a drawback caused by the friction force of the sheath. Controlling the system without considering the friction force between the sheath and the tendon could result in a failure to achieve the desired dynamic behaviors. In this study, a mathematical model was introduced to determine the friction force that is changed according to the geometrical pathway of the tendon-sheath, and the model parameters for the friction model were estimated by analyzing the data obtained from dedicated tests designed for evaluating the friction forces. Based on the results, it is possible to appropriately predict the friction force by using the information on the pathway of the tendon.

Keywords: Friction Model, Tendon-Sheath Mechanism, Bionic Robot Arm

1. 서 론

기존의 bionic robot arm은 대부분 모터를 이용하여 필요한 동작을 구현하는 방식으로 설계되었다. 이는 일상 생활이 가능한 의수 기능에 요구되는 힘과 정확도 면에서 훌륭한 성능을 보였지만, 동력원인 모터가 각 구동부에 위치하게 되면서 무게가 증가하여 사용자가 의수의 무게로 인한 피로감을 느끼는 단점이 있었다. 이에 따라 증량이 큰 모터를 의수 외부로 이동시키고 그 동력을 tendon을 이용하여 전달하는 구동 방식이 개발되었다.

Tendon-driven이라고도 부르는 이 메커니즘은 구동부에 조

인트가 많으면서도 가벼운 무게를 요구하는 복잡한 시스템에 적합한 구조라는 장점을 가지고 있기 때문에 관련 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 한 예시로 신경 마비 환자를 위한 폴리머 소재 기반의 wearable robotic hand를 개발한 연구에서는 마비 환자의 경우 신체 결손이 없다는 점과 복잡하고 유연한 작동을 요구하는 손가락의 특성을 고려하여 기존의 링크와 모터 구조 대신 폴리머와 tendon 시스템을 이용하였다^[1]. 또한 같은 맥락으로, 좁은 활동 반경에서 세밀한 작업을 요구하는 수술로봇의 구동에 대한 연구에서는 2가지, tendon-driven 방식과 concentric tube 방식을 기구학적인 관점에서 비교하였다^[2].

Tendon-driven 방식을 구현하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 폴리 시스템을 이용한 방식이고 다른 하나는 본 논문에서 다루는 sheath(외피)를 이용한 방식이다. 폴리 시스템을 이용한 tendon 구동 방식은 정해진 위치(라우팅 포인트)에 폴리가 고정되어 있고, tendon이 폴리 표면에서 미끄러지는 대신 폴리가 라우팅 포인트에서 베어링과 함께 회전함으로써 마찰을 대부분 무시할 수 있도록 한다. 이에 따라 tendon의 자유도가 매우 낮고 시스템의 예측이 쉽기 때문에 제어에 용이한 반면 적절한 라우팅 포인트를 정해주어야 한다는 어려움이 있다. 한편, 폴리를 사용하지 않는 tendon-sheath 구동 방식은 공

Received : Feb. 21. 2020; Revised : Mar. 31. 2020; Accepted : Apr. 1. 2020

※ This work was supported in part by the convergence technology development program for bionic arm through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science & ICT (No. 2015M3C1B2052811)

1. Ph.D. candidate, Mechanical Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea (hsjeoung00@gmail.com)

2. M.S. student, Mechanical Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea (jilee298@gmail.com)

† Associate Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea (nwkim21@gmail.com)

간적 이득을 얻을 뿐만 아니라 tendon이 자유롭고 유연하게 움직일 수 있고, 생체학적인 면에서 더 높은 호환성을 가진다는 장점이 있다. 하지만 필연적으로 tendon의 자유도가 높기 때문에 물체가 움직일 때마다 각각 다른 위치에서 다른 반경을 갖는 마찰 시스템을 설정해야 할 뿐 아니라, 매 접촉 지점에서의 마찰과 그에 따른 미끄럼 발생을 고려해야 하므로 시스템의 예측이 매우 어렵다. 따라서 sheath를 이용하여 동력을 전달하는 tendon-driven 시스템의 경우 다양한 형태의 tendon 형상에 대해 마찰 특성을 추정할 수 있는 모델의 개발이 필요하다.

예로부터 Stribeck friction이나 LuGre friction과 같은 마찰 모델 등을 기초로 하여 더 상세한 마찰의 특성을 설명할 수 있는 마찰 모델을 정립하는 연구가 진행되어 왔다^{3,4}. 그 이후 특정한 구조에서 발생하는 마찰을 표현하는 다양한 연구가 진행되었으며 본 연구에서 활용하는 capstan problem에 대한 마찰 모델이 한 예시이다⁵. Capstan equation은 풀리 시스템에 대한 마찰을 고려한 방정식으로, 흔히 오토바이에 사용되는 CVT (Continuously Variable Transmission) 개발을 위해 벨트의 장력에 따른 미끄러짐과 접촉 각도에 대한 특성을 고찰하거나^{6,7} 본 연구와 같이 tendon-sheath actuator의 관점에서 마찰 특성을 연구하는데 활용되어 왔다⁸.

본 연구에서는 Bionic robot arm에 tendon-driven 메커니즘이 적용되고 서로 별개의 tendon들 간의 간섭을 피하기 위해 tendon을 sheath로 감싸는 방식을 채택하였다. 이러한 경우 위에서 언급한 것처럼 tendon과 sheath와의 마찰이 제어에 큰 영향을 준다. Tendon-sheath 사이의 마찰력을 예측하기 위하여 capstan equation에 기반하여 임의의 곡선 형상을 표현하는 플랫폼을 MATLAB으로 구현하였다. 또한 다양한 곡률과 접촉 각도에 대한 테스트 벤치를 설계 및 제작하였고, 마찰 발생 전후에 따른 tendon의 장력 변화로부터 마찰 계수를 특징하는 실험을 진행하였다. 그리고 이를 통해 얻은 실험 결과값을 바탕으로 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교함으로써 이를 검증하는 과정을 가졌다.

2. 텐던 구동 메커니즘 모델링

2.1 Capstan equation

Tendon이 임의의 곡선 형태를 가질 때 sheath와의 마찰이 발생하고 이는 tendon의 장력에 영향을 준다. 이 때 곡률에 따른 마찰력에 의해 가하는 힘과 전달된 힘 사이의 관계식을 capstan equation으로 알려진 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{in} = T_{out}e^{\mu\phi} \quad (1)$$

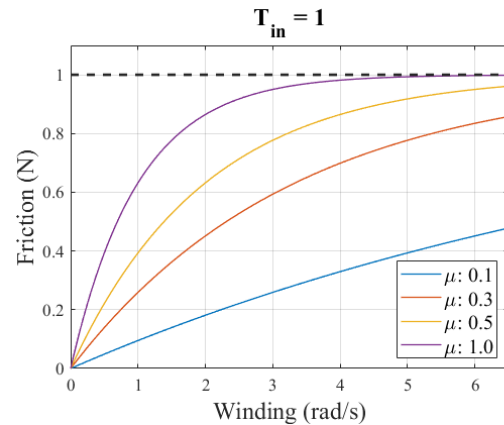
이 때 μ 는 tendon과 sheath 간의 마찰 계수, ϕ 는 tendon과 sheath가 접촉하고 있는 호의 각도를 의미한다. 식 (1)을 통해 제어가 마찰력을 고려하여 실제 모델이 얼마나 더 많은 힘을 필요로 하는지를 알 수 있으며, T_{in} 와 T_{out} 값의 차가 바로 tendon과 sheath 사이에서 발생하는 마찰력이 된다. 이에 따라 마찰력의 값을 f 라 정의하고 이를 T_{in} 값에 대해 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f = T_{in} - T_{out} \quad (2)$$

$$f = T_{in} - T_{in}e^{-\mu\phi} \quad (3)$$

$$f = T_{in}(1 - e^{-\mu\phi}) \quad (4)$$

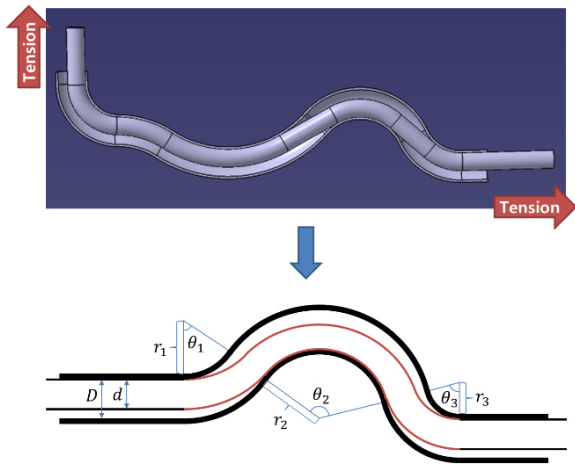
아래 [Fig. 1]은 식 (5)를 기반으로 $T_{in} = 1N$ 인 경우에 대해서 임의의 마찰계수에 따른 마찰력을 그래프로 나타낸 그림이다. Tendon의 곡률이 클수록 또는 마찰계수가 커질수록 마찰력 크기가 증가하게 되며, 결국에는 가해지는 장력과 동일해져서 최종적으로 힘이 전혀 전달되지 않는 것을 확인할 수 있다. 한편, 식 (1)을 통해 마찰이 발생하는 전후의 장력 값과 tendon의 곡률을 알고 있을 경우 해당 지점에서의 tendon과 sheath 사이에 발생하는 마찰계수를 도출해낼 수 있다.



[Fig. 1] Friction force according to friction coefficients

2.2 등가 모델 선정

2.1장에서 tendon과 sheath 사이의 마찰계수를 구하기 위해 사용한 capstan equation에 대해 설명하였다. 본 연구에서는 tendon이 manipulator를 작동하는 과정에서 tendon끼리의 간섭 등의 현상에서의 문제를 피하고자 tendon-sheath 방식을 채택하였다. 다음 [Fig. 2]는 sheath 내의 tendon의 형상을 나타낸 그림이다.



[Fig. 2] Generalized model of curved tendon in sheath

[Fig. 2]과 같이 tendon에 곡률이 존재할 때 tendon과 sheath 사이에는 직경 차로 인한 유격이 존재하게 된다. tendon-driven 시스템은 인체 근육의 작동을 모사한 방법이기 때문에 근육과 마찬가지로 장력만이 작용하고 이에 따라 tendon은 sheath 내부에서 곡률 중심 쪽의 면과 접촉하는 현상이 발생한다. [Fig. 2]를 살펴보면 tendon이 각각 현재 연결된 폴리에서 다음 폴리 로 연결될 때 tendon이 감기게 될 방향을 시계방향과 반시계 방향 두 가지 경우로 나눌 수 있는 것을 알 수 있다. 3장에서는 이러한 현상을 일반화하고 시뮬레이션으로 구현하는 내용을 자세하게 다룬다.

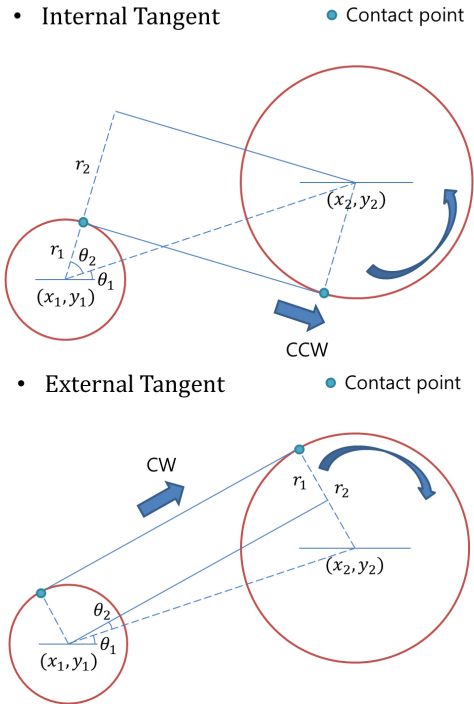
3. MATLAB을 이용한 모델 구축

임의의 곡률을 가진 tendon의 형상은 각 지점에서의 곡률 중심과 곡률 반경을 통해 표현할 수 있으며 곡률이 변하는 지점마다 마찰력이 발생한다. 또한 현재 곡률 지점에서 다음 곡률이 발생하는 지점으로 넘어갈 때 마치 직선이 원에 접하는 형태로 나타나는 것을 알 수 있다. 결과적으로 이는 외접(external tangent)과 내접(internal tangent)하는 2가지 경우의 수가 있음을 말해준다.

3.1 Tendon-sheath의 마찰 모델 일반화

[Fig. 3]과 같이 일반화를 통해 임의의 곡률을 가진 tendon을 구현할 수 있는 시뮬레이션 플랫폼을 구축하였다.

Tendon의 형상을 표현하기 위해 필요한 정보는 다음 두 가지로 생각해 볼 수 있다. 하나는 현재 곡률 중심과 다음 곡률 중심의 상대적 위치이며, 나머지 하나는 tendon이 감기는 방향이다. [Fig. 3]은 여러 경우들 중 하나의 형태에 대해 나타낸 그림



[Fig. 3] Definition of winding direction of tendon

이며 x_1, y_1, r_1 과 x_2, y_2, r_2 는 각각 현재와 다음 곡률 중심의 위치와 tendon과 sheath의 두께를 고려한 곡률 반경을 의미한다. 시뮬레이션으로 위와 같은 현상을 구현하기 위해서는 contact point의 위치를 알아야 하며 내접하며 반시계방향(CCW)으로 감기는 경우는 다음 식을 통해 이를 계산할 수 있다.

$$x_1 \leq x_2 \text{ and } y_1 \leq y_2 \tag{5}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right)$$

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \tag{6}$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{r_1 + r_2}{d} \right) \tag{7}$$

$$CP_1 = \begin{bmatrix} r_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ r_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$CP_2 = \begin{bmatrix} r_2 \cos(\pi + \theta_1 + \theta_2) \\ r_2 \sin(\pi + \theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \tag{9}$$

마찬가지 방식으로 외접하며 시계방향(CW)으로 감기는 경우는 다음 식을 통해 contact point를 계산할 수 있다.

$$x_1 \leq x_2 \text{ and } y_1 \leq y_2 \tag{10}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right)$$

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (11)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{r_2 - r_1}{d}\right) \quad (12)$$

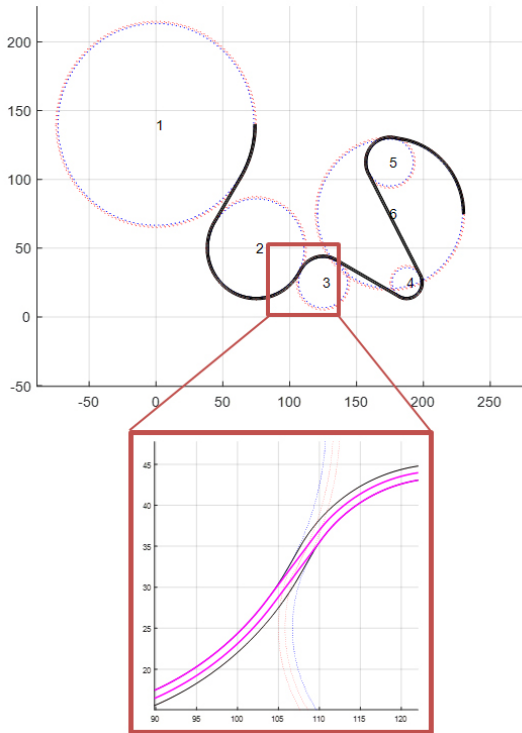
$$CP_1 = \begin{bmatrix} r_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 + \theta_2\right) \\ r_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 + \theta_2\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$CP_2 = \begin{bmatrix} r_2 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 + \theta_2\right) \\ r_2 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 + \theta_2\right) \end{bmatrix} \quad (14)$$

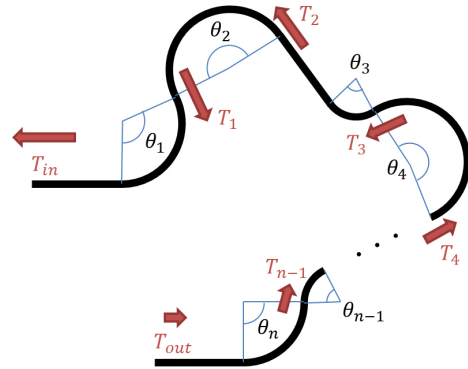
같은 방식으로 현재 곡률 중심과 다음 곡률 중심의 상대적 위치를 나머지 2, 3, 그리고 4사분면에 대해서 표현할 수 있고 이를 바탕으로 [Fig. 4]와 같은 시뮬레이션을 구현할 수 있다.

마지막으로 식 (4)를 적용하면 sheath로 감싸진 tendon이 임의의 형상을 가질 경우 발생하는 마찰력을 식 (15)으로 정리할 수 있다. 이를 그림으로 나타내면 [Fig. 5]와 같다.

$$\begin{aligned} T_{in} &= T_1 e^{\mu \theta_1} \\ T_1 &= T_2 e^{\mu \theta_2} \\ &\vdots \\ T_{n-1} &= T_{out} e^{\mu \theta_n} \\ \therefore T_{in} &= T_{out} e^{\mu \sum_{i=1}^n \theta_i} \end{aligned} \quad (15)$$



[Fig.4] Modeling of tendon shape in sheath

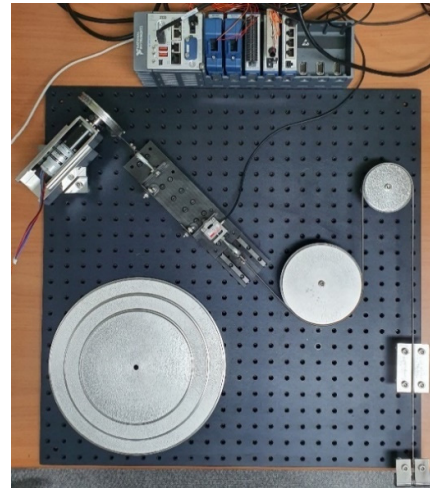


[Fig.5] Generalized model of friction in curved tendon

4. 실험

4.1 실험 구성 및 진행

Tendon-driven 메커니즘이 작동되는 과정에서 발생하는 마찰을 보다 정확하게 측정하기 위해서 일정한 기준을 가지고 반복 실험을 할 수 있도록 테스트 벤치를 구성하였고 [Fig. 6]은 하나의 예시를 보여준다. MATLAB과 National Instruments (NI)의 LabVIEW를 이용하여 모터 제어와 신호 측정을 진행하였다. 이외에 실험에 사용된 나머지 부품들의 제원은 [Table 1]에 표기하였다.



[Fig. 6] Experiment set example

[Table 1] Test equipment settings

Base Table	Size (mm)	600*600
	Number of holes	24*24
Circular Plates	Diameter (mm)	75/125/175/225/275
Motor	Power (W)	50
External Mass	Weight (g)	1000



[Fig. 7] Layout of tendon-sheath

일정한 외력에 따른 마찰 데이터를 얻기 위해 1000g의 추를 사용하였다. 모터가 tendon을 통해 추를 감아 올리거나 내리는 작동은 손에 물체를 올려놓고 이두근을 이용하여 전완을 위로 들어 올리거나(pull up) 내리는(pull down) 움직임에 해당한다.

[Fig. 7]과 같이 마모를 방지하기 위해 폴리머 재질의 외피인 sheath 안에 tendon을 넣고 다른 tendon끼리의 간섭을 최소화하기 위해 한 번 더 스프링 형태의 관 안에 sheath를 넣는다. 이 때 스프링 안에 들어간 sheath가 움직이는 상황을 방지하기 위하여 sheath의 외경과 비슷한 내경을 가진 스프링을 사용한다. 이렇게 구성된 Tendon은 원판을 감긴 이후의 반대쪽 tendon에는 load cell과 모터를 연결하여 모터의 pull up/down에 따라서 외력에 마찰이 더해진 힘을 측정할 수 있도록 하였다. 또한 이 때 데이터 측정 과정에서 측정하고자 하는 곡선 형상에 따른 tendon과 sheath 사이의 마찰 이외의 base plate와의 마찰, 또는 모터 작동으로 인한 진동 등의 외란 요소를 최대한 제거하기 위하여 슬라이드 위에 load cell을 설치하였다.

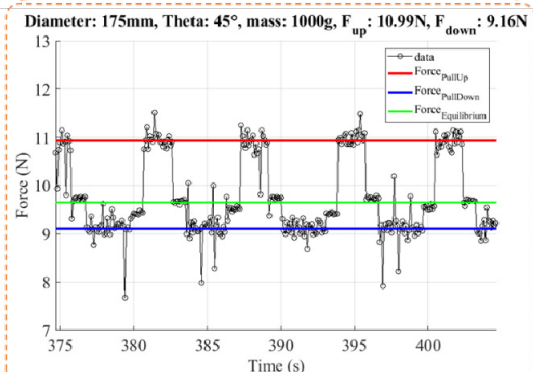
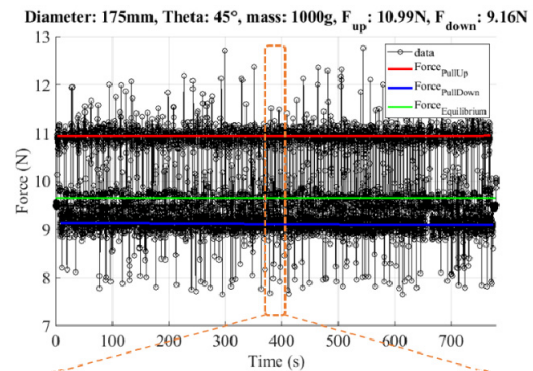
실험은 각각 6가지 접촉 각도(45, 90, 135, 180, 225, 270)와 서로 다른 직경의 5가지 원판을 이용하여 총 30가지의 기본적인 경우에 대한 마찰 측정으로 진행되었다. Base plate 상의 적절한 위치에 각 부품들을 결합할 수 있도록 설계하였고, 이에 따른 다양한 각도와 위치에 대해 모터가 tendon에 연결될 수 있도록 rotating과 sliding이 가능한 2자유도의 motor bracket을 설계하였다.

실험 후 먼저 load cell에서 얻어지는 신호 값을 뉴턴 단위로 치환하는 1차 선형식으로 보정 작업을 진행하였다. 이후 각 조건들은 NI 장비와 MATLAB을 이용하여 load cell과 결합된 슬라이드를 100회 왕복하고 등속 운동을 하도록 모터를 제어하였다. 또한 LabView를 이용하여 실험 데이터를 수집하고 해당 결과 데이터들은 Excel로 저장한 뒤 해당 결과의 평균값을 사용하였다. 저장된 결과 데이터들은 MATLAB에서 곡률이 발생한 지점을 통과한 전과 후의 장력 차이를 비교함으로써 마찰력을 추정하는 후처리 과정을 거쳤다. 위 모든 과정은 30

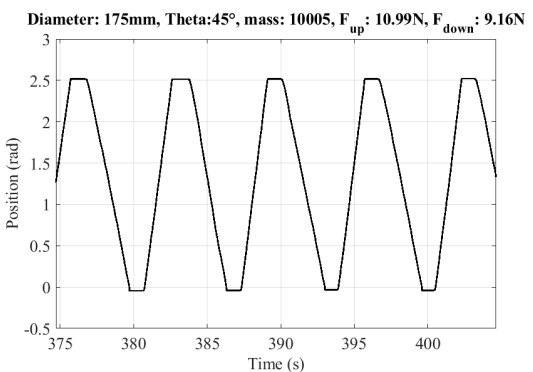
가지의 경우에 맞게 하드웨어 위치를 설정하는 수작업 이후부터는 자동화 프로세스에 의해 진행되었다.

4.2 실험 결과

[Fig. 8(a)]는 접촉 각도 45도, 곡률 반경 87.5mm에 대한 실험 결과를 보여주는 그림으로 평형 상태의 1000g의 추에 대한 tendon의 장력은 9.65N으로 측정되었으며, 이를 녹색 선으로 표기하였다. 마찰의 영향으로 해당 기준선의 위아래로 측정값이 9.65N보다 큰 값과 작은 값을 반복하여 나타내는 것을 확인할 수 있는데, 이는 모터를 이용해 tendon을 감고 풀때마다 원판을 기준으로 T_{in} 과 T_{out} 이 되는 쪽이 바뀌기 때문이다.



(a)



(b)

[Fig. 8] Experiment data in case of D: 175 mm / θ : 45°

[Table 2] Measured tension

Contact Angle	T_{up}	T_{down}
45	10.9350	9.1125
90	11.8079	8.4494
135	12.3484	8.0863
180	13.3911	7.4190
225	13.6383	7.2646
270	14.4246	6.8067

예를 들어 [Fig. 8(a)]에서 빨간 선으로 표기된 측정 값은 모터가 tendon을 감아 일정한 속도로 추를 끌어올릴 때의 값이다. 따라서 모터가 내는 힘이 T_{in} 이 되어 추의 무게에 마찰력이 더해지므로 추의 무게인 9.65N보다 높은 값이 요구된다. 반대로 파란 선으로 표기된 측정 값은 모터가 tendon을 감아 일정한 속도로 추를 끌어내릴 때의 값이다. 따라서 중력이 추를 잡아당기는 힘이 T_{in} 이 되어 모터 입장에서는 마찰력을 제외하여 추의 무게인 9.65N보다 작은 값이 요구된다. 한편 [Fig. 8(b)]는 동시간대에 모터의 움직임을 나타낸 그래프로 부호의 방향을 감아 올릴 때를 (+) 감아 내릴 때를 (-)로 설정하였다. 일정 길이를 왕복하면서 각각 최대로 움직였을 때 방향의 변화를 주지 않기 위해 1~2초 정도 정지 상태를 유지하도록 설정하였다.

결론적으로 각 접촉 각도에 대해 flexion과 extension 과정에서의 장력을 나타내면 [Table 2]와 같다.

4.3 등가 모델과 비교 및 분석

4.1에서 언급한 것처럼 6가지 접촉 각도(45, 90, 135, 180, 225, 270)와 서로 다른 직경의 5가지 원판을 이용하여 총 30가지의 경우에 대한 실험을 진행하였다. 그러나 2.1의 식 (1)에서 알 수 있듯이 원판의 직경은 형상만 다르게 보이게 할 뿐 접촉 각도만이 마찰력에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다. 이를 확인하기 위해 2.1의 식 (1)을 식 (16)과 같이 변형한 후, tendon을 감고 푸는 경우에 따라 T_{in} 또는 T_{out} 의 값은 1000g의 추에 의해 발생하는 힘이기 때문에 그 값은 9.65N(이하 gN)이 되며 아래와 같이 정리할 수 있다.

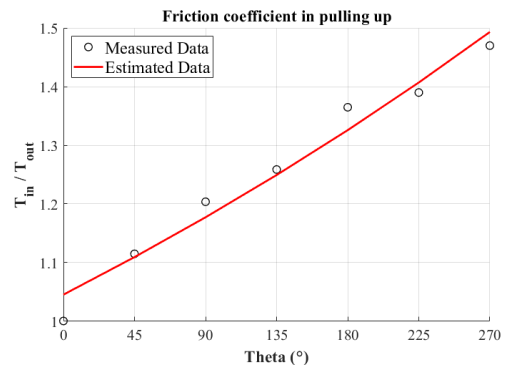
$$\frac{T_{in}}{T_{out}} = e^{\mu\phi} \tag{16}$$

$$\frac{T_{up}}{g} = e^{\mu\phi}, \quad \frac{g}{T_{down}} = e^{\mu\phi} \tag{17}$$

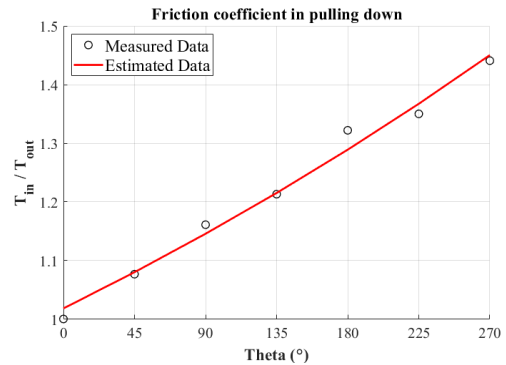
식 (17)과 [Table 2]의 장력 및 접촉 각도 값을 이용하여 회귀 계수 추정으로 마찰 계수를 도출하면 다음과 같다.

[Table 3] T_{in}/T_{out} value for contact angle

Contact Angle	for Pull up	for Pull down
0	1.0000	1.0000
45	1.1147	1.0765
90	1.2037	1.1610
135	1.2588	1.2132
180	1.3650	1.3223
225	1.3902	1.3504
270	1.4704	1.4412



[Fig. 9] Friction Estimation from the test results (pull up)



[Fig. 10] Friction Estimation from the test results (pull down)

[Table 3]은 식 (17)의 감고 풀 때의 T_{in}/T_{out} 값을 나타낸 것이며, [Fig. 9]와 [Fig. 10]은 [Table 3]의 값을 이용하여 각각 감아 올릴 때와 내릴 때의 마찰계수를 회귀계수 추정을 통해 도출해낸 것이다. 실제 데이터의 접촉 각도 단위는 radian으로 저장되어 있으나 그래프의 가독성을 위하여 x축을 degree(°)로 단위 변환하였다. 회귀계수 추정에 사용한 식은 실험 오차를 고려하여 다음의 식 (18)과 같이 선정하였다.

$$\frac{T_{in}}{T_{out}} = ae^{\mu\phi} \tag{18}$$

결과적으로 실험을 통해 도출한 tendon을 감아 올리고 내릴 때의 a는 각각 1.045, 1.018이었으며 마찰계수는 각각 0.001323, 0.001312의 값을 가짐을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 tendon-sheath 구동 방식을 이용하여 bionic robot arm을 제어할 때 tendon 경로의 굴곡 혹은 곡률에 의해 발생하는 마찰력을 capstan equation을 기반으로 추정할 수 있음을 보여주었다. Tendon 경로의 형상을 각각의 곡률 중심과 곡률 반경을 활용하여 접촉 각도를 계산함으로써 정의하였으며 이를 바탕으로 마찰력을 추정할 수 있는 일반화 모델을 제시하였다. 한편, 서울대학교 바이오로보틱스 연구팀은 저비용으로 곡률을 측정할 수 있는 센서를 개발한 바 있으며^[9], 이와 관련된 센서 연구 결과들을 활용하여 실제 tendon-sheath 시스템의 마찰을 예측하는 연구를 진행할 예정이다. 모델 상수를 추정하기 위해 다양한 tendon 경로의 굴곡 형상에 따라 flexion과 extension을 반복 실험할 수 있도록 테스트 벤치를 설계하였고, 시험에서 얻어진 데이터를 분석하여 생성된 모델 상수를 제시하였다.

결과 분석 과정에서 capstan equation에서 추론할 수 있듯이, tendon 경로에 곡률이 존재할 때 발생하는 마찰력은 접촉각도에 의해 주로 결정되며 곡률 반경과는 작은 상관 관계를 가진다는 사실을 확인하였다. 본 논문은 다양한 조건에서 수행한 시뮬레이션 모델을 통해 계산된 마찰력과 실제 테스트에서 얻어진 마찰력을 비교함으로써 tendon-sheath 마찰 모델의 유효성을 검증하였을 뿐만 아니라, 시스템 제어에서 re-tension의 영향으로 pull-up과 pull-down 사이에 일정한 힘의 차이가 있음을 시험적으로 보여줌으로써 실제 tendon-sheath 구동기를 제어할 때 모델 기반 예측 기법을 통해 힘 제어를 할 수 있는 근거를 제시하고 있다.

References

[1] B. B. Kang, H. Lee, H. In, U. Jeong, J. Chung, and K.-J. Cho, "Development of a polymer-based tendon-driven wearable robotic hand," *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, pp. 3750-3755, 2016, DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487562.

[2] Z. Li, L. Wu, H. Ren, and H. Yu, "Kinematic comparison of surgical tendon-driven manipulators and concentric tube manipulators," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 107, pp. 148-165, Jan., 2017, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.09.018.

[3] C. C. de Wit, H. Olsson, K. J. Astrom, and P. Lischinsky, "A new model for control of systems with friction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, no. 3, pp. 419-425, Mar., 1995, DOI: 10.1109/9.376053.

[4] J. Swevers, F. Al-Bender, C. G. Ganseman, and T. Projogo, "An integrated friction model structure with improved presliding behavior for accurate friction compensation," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, no. 4, pp. 675-686, Apr., 2000, DOI: 10.1109/9.847103.

[5] J. H. Jung, N. Pan, and T. J. Kang, "Generalized capstan problem: Bending rigidity, nonlinear friction, and extensibility effect," *Tribology International*, vol. 41, no. 6, pp. 524-534, Jun., 2008, DOI: 10.1016/j.triboint.2007.11.005.

[6] L. Kong and R. G. Parker, "Mechanics and sliding friction in belt drives with pulley grooves," *J. Mech. Des.*, pp. 494-502, Mar., 2006, DOI: 10.1115/1.2168469.

[7] B. Supriyo, S. Ariyono, B. Tjahjono, and B. Sumiyarso, "Electro-mechanical Transmission Ratio Shifter of Rubber Belt Continuously Variable Transmission for Motorcycle Applications," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1273, no. 1, 2019, DOI: 10.1088/1742-6596/1273/1/012071.

[8] T. N. Do, T. Tjahjowidodo, M. W. S. Lau, and S. J. Phee, "A new approach of friction model for tendon-sheath actuated surgical systems: Nonlinear modelling and parameter identification," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 85, pp. 14-24, Mar., 2017, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.003.

[9] U. Jeong and K.-J. Cho, "A novel low-cost, large curvature bend sensor based on a Bowden-cable," *Sensors*, vol. 16, no. 7, pp. 961, 2016, DOI: 10.3390/s16070961.



정해성

2017 한양대학교 기계공학과(공학사)
2017~현재 한양대학교 기계설계공학과
(석박사통합과정)

관심분야: 동역학시스템 모델링, 시스템 최적 제어



이정준

2020 한양대학교 기계공학과(공학사)
2020~현재 한양대학교 기계설계공학과
(석사과정)

관심분야: 차량 연비 최적화, 교통 시스템 제어



김남욱

2003 서울대학교 항공우주공학과(공학사)
2009 서울대학교 기계공학과(공학박사)
2009~2012 미국 아르곤 국립연구소 박사후
연구원
2012~2015 미국 아르곤 국립연구소 연구원
2015~현재 한양대학교 부교수

관심분야: 동역학시스템 최적 제어, 친환경 자동차 모델링 및 제어