

줄 꼬임 구동기의 가변 반지름 모델과 강성 모델에 대한 실험적 검증

Experimental Verification of Variable Radius Model and Stiffness Model for Twisted String Actuators (TSAs)

박지혁¹·김경수¹·김수현[†]

Jihyuk Park¹, Kyung-Soo Kim¹, Soohyun Kim[†]

Abstract: Twisted string actuators (TSAs) are tendon-driven actuators that provide high transmission ratios. Twisting a string reduces the length of the string and generates a linear motion of the actuators. In particular, TSAs have characteristic properties (compliance) that are advantageous for operations that need to interact with the external environment. This compliance has the advantage of being robust to disturbance in force control, but it is disadvantageous for precise control because the modeling is inaccurate. In fact, many previous studies have covered the TSA model, but the model is still inadequate to be applied to actual robot control. In this paper, we introduce a modified variable radius model of TSAs and experimentally demonstrate that the modified variable radius model is correct compared to the conventional variable radius string model. In addition, the elastic characteristics of the TSAs are discussed along with the experimental results.

Keywords: Twisted String Actuator, Variable Radius Model, Compliance, Antagonistic Robot Joint

1. 서 론

줄 꼬임 구동기는 2개 이상의 줄이 서로 꼬임으로써 선형의 수축 힘을 발생시키는 원리를 이용하는 구동기이다. 줄 꼬임 메커니즘은 매우 큰 감속 효과를 구현할 수 있기 때문에 로봇 구동기로 사용이 가능하다. 특히 감속 시스템을 구현하기 위해 필요한 재료가 오직 줄 뿐이기 때문에 기존 로봇 시스템에서 감속을 위해 사용되는 하모닉드라이브에 비해 무게가 매우 가벼우며 가격 또한 획기적으로 저렴하다.

기존의 줄 꼬임 구동기 연구는 주로 소형의 로봇 핸드에 적합하도록 진행되어 왔다. Dexmart 로봇 핸드^[1]는 줄 꼬임 구동기를 적용한 가장 대표적인 로봇 핸드로서, 간소화된 기구학적 모델을 개발하여 실험 데이터와 비교하였다. 하지만 수축

를 10%이내에서 모델의 정확성이 보장된다. 또한 KAIST에서 제안한 듀얼모드 줄 꼬임 메커니즘^[2]은 외력이 작을 때는 빠르게 움직이고 외력이 클 경우에는 큰 힘을 낼 수 있다. KAIST는 이 메커니즘을 이용하여 빠른 속도로 움직이면서 큰 과지력을 갖는 로봇 손을 개발하였다. 또한 Sonoda^[3] 역시 줄 꼬임 구동기 기반의 로봇 손을 개발하였다. 이와 같이 줄 꼬임 구동기는 소형이며 가벼운 특징으로 인해 로봇 핸드 개발에 많이 적용되어 왔다.

로봇 핸드에 적용되는 줄 꼬임 구동기와 비교하여 로봇 매니퓰레이터에 적용하기 위한 줄 꼬임 구동기는 더 강한 힘을 내야하며 양방향으로 움직일 수 있어야 한다. 로봇 손의 경우는 힘을 가하는 방향이 한쪽 방향이지만 매니퓰레이터의 경우는 양방향으로 모두 힘을 가할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 줄 꼬임 구동기를 이용한 1축 로봇 관절 시스템을 이용하여 기존 간소화된 줄 꼬임 메커니즘 모델의 부정확성에 대해 고찰하고 이를 보완하기 위한 가변 반지름 모델을 제시한다. 또한 줄 꼬임 구동기의 강성 모델을 유도하고 이를 실험적으로 비교 분석한다.

Received : Jun. 2, 2017; Revised : Sep. 18, 2017; Accepted : Nov. 13, 2017

※ This research was supported by the KHNP (Korea Hydro & Nuclear Power Co.,Ltd)

1. Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (jihpark@kaist.ac.kr, kyungsookim@kaist.ac.kr)

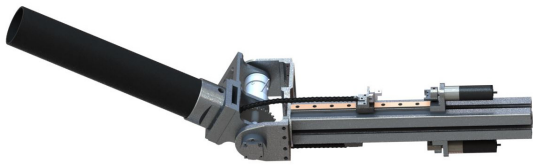
† Corresponding author: Soohyun Kim, Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daehak-ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Korea (soohyun@kaist.ac.kr)

2. 줄 꼬임 구동기를 적용한 길항적 로봇 관절 시스템

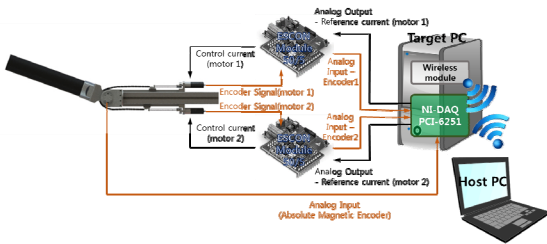
먼저, 이 장에서는 줄 꼬임 메커니즘의 모델을 검증할 수 있는 줄 꼬임 기반 로봇 관절 시스템을 소개한다.

2.1 로봇 설계

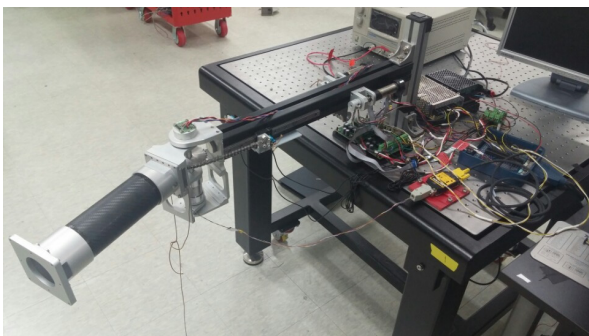
길항적으로 양방향 구동이 가능한 로봇 관절은 Fig. 1과 같이 2개의 줄 꼬임 구동기로 구성되어 있다. 1축의 로봇 관절 시스템을 구현하기 위해 2개의 BLDC 모터와 3개의 엔코더를 사용하였다. 2개의 엔코더는 BLDC모터의 회전수를 측정하고 나머지 하나는 로봇 관절의 회전 각도를 측정한다. 그리고 줄 꼬임 구동기의 구동력을 전달하기 위해 체인과 스프로킷을 사용하였다. 또한 로봇 관절에 걸리는 토크를 측정하기 위해 1축 토크 센서를 부착하였다. 로봇은 90 W BLDC 모터와 마그네



[Fig. 1] Rendering design of antagonistic robot joint driven by TSAs



[Fig. 2] Configuration of the control system



[Fig. 3] Experimental set-up

틱 엔코더(500CPT), 유성기어(5.4:1), 그리고 케블라 와이어로 구성되어 있다.

2.2 로봇 제어 시스템

길항적 로봇 관절의 제어 시스템의 도식도는 Fig. 2와 같다. 제어 시스템은 호스트 PC, DAQ 보드(National Instrument M6251)를 탑재한 타겟 PC, 그리고 두 개의 BLDC 모터 드라이버로 구성된다. 제어 프로그램은 실시간 프로토타이핑에 유용한 MathWork사의 xPC Target과 시뮬링크를 사용하여 구현되었다. 실제 로봇 구동 실험 장치는 Fig. 3과 같다.

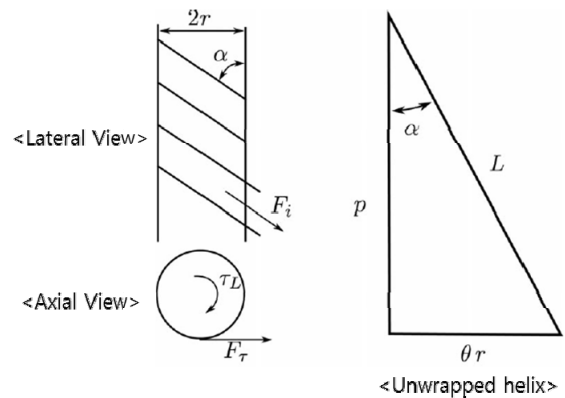
3. 줄 꼬임 구동기의 기구학적 모델

본 장에서는 기존에 발표되었던 줄 꼬임 구동기의 기구학적 모델을 소개하고 가변 반지름 모델을 통해 더 정확한 모델링이 가능함을 보인다.

3.1 기존의 줄 꼬임 구동기의 기구학적 모델

기존의 줄 꼬임 메커니즘의 기구학적 모델은 Fig. 4와 같이 줄에 의해 형성되는 나선형 모델로 나타낼 수 있다. G. Palli^[3]는 두 줄이 평행하게 연결된 상태에서 꼬일 경우 모든 회전 양에 대하여 두 줄은 일정한 반지름을 갖는 이상적인 나선 형태를 형성한다고 가정하였다. 모터의 회전 수와 끝 단의 위치 사이의 기구학적인 관계는 나선형의 기구학적 특성에 따라 피타고라스 정리를 이용해 아래와 같이 간단히 구할 수 있다.

$$P = \sqrt{L^2 - \theta^2 r^2} \quad (1)$$

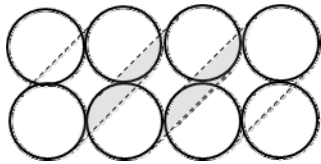


[Fig. 4] Ideal geometric model of TSA

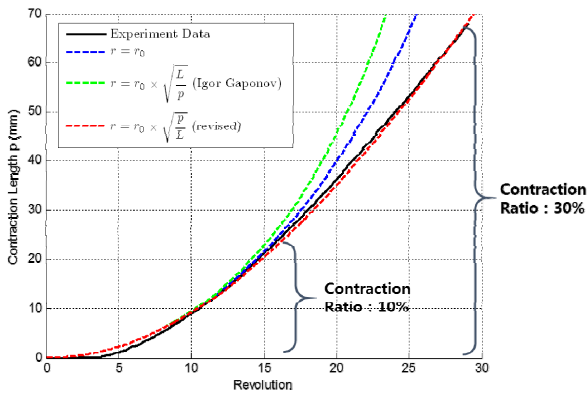
여기서 L 은 줄의 길이, θ 는 모터의 회전 각도, 그리고 r 은 줄의 반지름이다.

하지만 실제 실험 데이터를 비교해보면 기존의 모델과 실제 실험 데이터와는 줄이 꼬일수록 차이가 발생한다. 이를 보완하기 위해 Igor Gaponov^[4]는 줄을 일정한 부피를 갖는 실린더로 가정하고 줄 끝 단의 길이가 짧아질 경우에 반지름이 그에 맞게 커진다는 아래와 같은 가변 반지름 모델을 제시하였다.

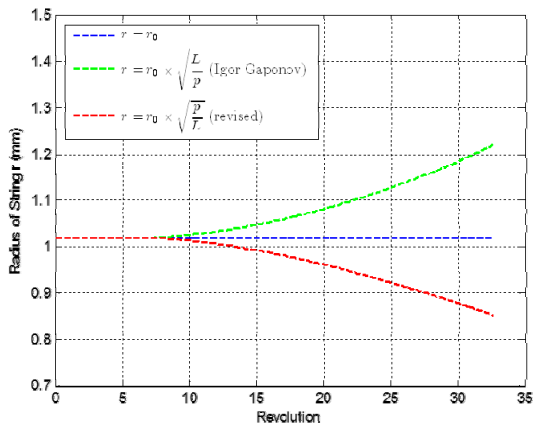
$$r_{var} = r_0 \sqrt{\frac{L}{P}} \quad (2)$$



[Fig. 5] Cross section of TSA



[Fig. 6] Experiment results of variable radius model



[Fig. 7] Variable radius of string

그러나 Dmitry Popov의 실험은 10% 수축 량에 대해서 수행하였다. 이는 실제로 30%이상 수축이 가능한 줄 꼬임 구동기의 모델을 정확히 표현했다고 할 수 없다.

3.2 축소 반지름 모델의 기구학 모델에 적용

줄이 꼬일 때 Fig. 5와 같이 일정한 반지름으로 가정하면 줄과 줄 사이가 겹쳐져야만 줄이 꼬일 수가 있다. 이 겹친 양은 결국 줄과 줄이 서로 압축되는 힘으로 나타나게 되고 이는 결국 줄 반지름을 감소시키게 된다. 하지만 이 반지름 감소 모델은 줄의 밀도나 강성 특징에 따라 달라지기 때문에 정확하게 모델링 하기 어렵다. 따라서 실제 구동기 구동 실험을 통해 반지름의 변화를 측정하고 다양한 외력에 따른 데이터를 수집하여 뉴럴 네트워크 모델을 이용하는 방법이 실용성이 크다.

우리는 반지름이 작아지는 임의의 모델을 아래와 같이 가정하고 실험을 수행하였다.

$$r_{var} = r_0 \sqrt{\frac{P}{L}} \quad (3)$$

Fig. 6의 그래프를 보면 수축 량 10%까지는 일정한 반지름 모델, Igor Gaponov의 모델, 그리고 수정된 모델 모두 큰 차이가 없다. 실제 반지름 변화 량이 크지 않기 때문이다(Fig. 7). 하지만 수축 량이 30%까지 증가했을 경우에는 실험 데이터와 기존의 모델 간에 큰 오차가 발생한다. 본 연구에서 제안하는 반지름 감소 모델을 적용 하였을 경우에는 실제 실험 데이터와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 이를 통해 실제 줄이 꼬이면서 줄의 실질적인 반지름은 감소함을 확인할 수 있었다.

3.3 기존의 줄 꼬임 구동기의 감속 모델

줄 꼬임 구동기의 정역학 모델을 통해 감속 모델은 아래와 같은 방법으로 구할 수 있다.

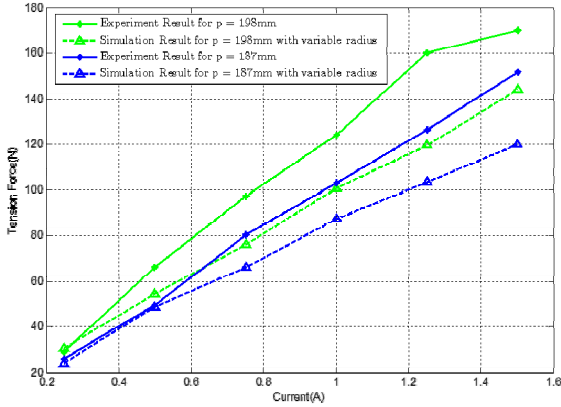
모터 토크로 인해 줄을 꼬는 방향으로의 힘은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$F_r = \frac{\tau_L}{r} \quad (4)$$

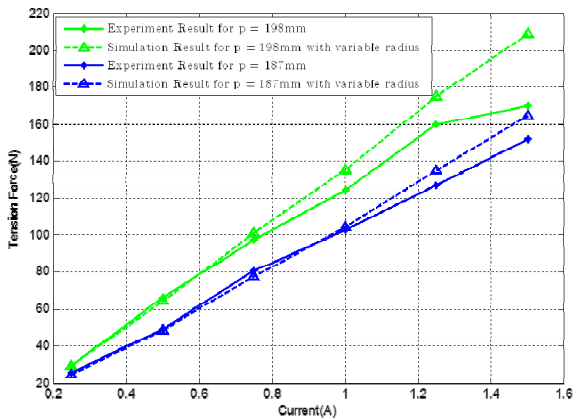
가해지는 외력이 n개의 줄에 일정하게 배분되었다고 하면 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{F_r}{n} = F_i \sin \alpha \quad (5)$$

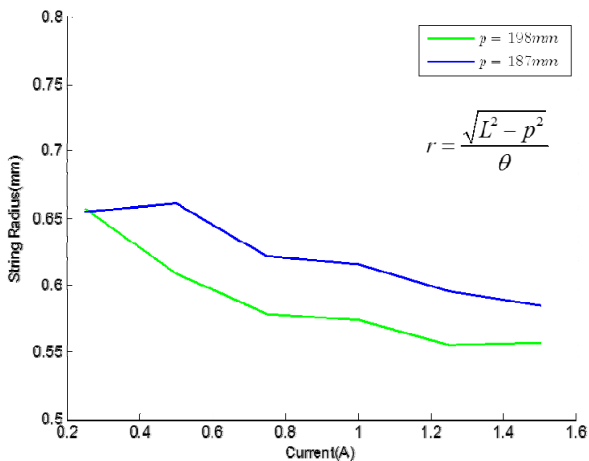
위 두 식을 연립하여 τ_L 에 관한 식으로 유도하면 아래와 같다. 여기서 F_i 는 줄의 축 방향으로 가해지는 힘을 의미한다.



[Fig. 8] Tension force comparison between simulation result and experiment result at constant radius



[Fig. 9] Tension force comparison between simulation result and experiment result at variable radius



[Fig. 10] The change of radius of string

$$\tau_L = r n F_i \sin \alpha \tag{6}$$

전체 축 방향 힘은 아래와 같다.

$$F_z = n F_i \cos \alpha \tag{7}$$

식 (6)과 식 (7)을 연립하여 줄 꼬임 구동기의 감속 모델을 구할 수 있다.

$$F_z = \tau_L \frac{\sqrt{L^2 - \theta^2 r^2}}{\theta r^2} \tag{8}$$

3.4 축소 반지름 모델의 감속 모델에 적용

식 (8)에서 확인할 수 있듯이 감속 모델에도 줄의 반지름 크기가 모델 파라미터이다. 따라서 앞서 사용한 반지름 감소 모델을 사용한 경우와 반지름이 일정하게 유지하였을 때를 비교하는 실험을 수행하여 가변 반지름 모델의 정확성을 실험을 통해 확인하고자 하였다. 실험은 임의의 위치를 정하여 고정하고 BLDC 모터에 일정한 전류를 인가하여 측정되는 줄의 장력을 비교하는 방법으로 수행되었다. 전류는 0.25A에서부터 1.5A까지 0.25A 차이로 총 6번 수행하였다. 가해지는 모터 토크는 인가한 전류에 모터 토크 상수와 유성기어의 감속비를 곱하여 시뮬레이션에 사용하였다.

실험은 임의의 위치 2군데($P=187\text{ mm}, 198\text{ mm}$)에서 수행되었다. Fig. 8은 줄의 반지름이 일정하게 유지된다는 가정하에 수행한 시뮬레이션 결과와 실험 데이터를 비교한 것이다. 줄에 걸리는 장력이 실험 데이터와 시뮬레이션 결과 사이에 차이가 있음을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 10과 같이 줄의 반지름이 변화한다는 가정을 토대로 줄의 장력에 대한 시뮬레이션을 수행할 경우 실험데이터와 시뮬레이션 데이터가 유사함을 Fig. 9의 그래프를 통해 확인할 수 있다. 이와 같이 외력이 가해지는 상태에서 줄 꼬임 메커니즘의 모델링을 정확히 하기 위해서는 줄의 반지름이 작아지도록 모델링을 수행할 필요가 있다.

4. 줄 꼬임 구동기의 탄성 특징

본 장에서는 줄 꼬임 구동기의 자체 탄성을 유도하고 줄 꼬임 구동기가 가지고 있는 탄성 특징을 소개한다.

4.1 줄 꼬임 구동기 자체 탄성 유도

줄 꼬임 구동기의 탄성은 Ivan Godler^[5]가 기존 줄 꼬임 메커니즘의 정역학 모델을 이용하여 아래와 같이 유도하였다.

$$\frac{\partial F}{\partial P} = \frac{\partial F}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial P} \tag{9}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = \frac{L^2 T}{r^2 \theta^2 \sqrt{L^2 - r^2 \theta^2}} \tag{10}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{r^2 \theta}{\sqrt{L^2 - r^2 \theta^2}} \tag{11}$$

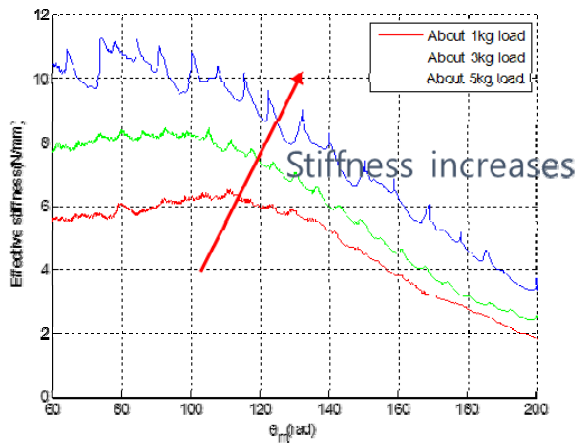
식 (9), (10), (11)을 이용하여 아래와 실제 힘이 작용하는 방향으로의 탄성은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$K_{effective} = \frac{\partial F}{\partial P} = \frac{L^2 T}{r^4 \theta^3} \tag{12}$$

4.2 줄 꼬임 구동기 자체 탄성 실험

이와 같이 줄 꼬임 구동기의 탄성은 작용하는 토크에 비례하여 증가하는 특징을 가지고 있다. 본 연구팀은 실제 외력을 증가시키면서 줄의 강성의 변화를 관찰하였다. Fig. 11과 같이 외력이 증가할수록 줄의 강성이 커지는 것을 확인할 수 있다.

외력이 클수록 강성이 커지는 줄 꼬임 메커니즘의 강성 특징은 실제 외부 환경과 상호작용을 하는 로봇 매니퓰레이터에 적용 되었을 때 안전한 로봇을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.



[Fig. 11] Experiment data of increasing stiffness with high load

5. 결론

본 연구에서는 기 개발된 줄 꼬임 기반 길항적 로봇 관절을 이용하여, 줄의 반지름이 일정하다고 가정한 기존의 줄 꼬임 모델의 부정확성을 보이고 줄의 반지름이 감소하는 가변 반지름 모델이 실제 줄 꼬임 메커니즘을 더 정확히 표현함을 보였다. 또한 줄 꼬임 구동기 자체가 가지고 있는 탄성을 유도하고 외력이 강할수록 탄성이 강해지는 줄 꼬임 메커니즘의 특징을 실험을 통해 확인하였다. 향후에는 줄 꼬임 구동기의 탄성 모델을 정확히 모델링 하여 추가적인 토크센서 없이 엔코더를 이용한 각도 정보만을 이용하여 관절에 걸리는 토크를 예측하고 이를 이용해 토크 제어를 수행하는 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] G. Palli, C. Melchiorri, G. Vassura, U. Scarcia, L. Moriello, G. Berselli, A. Cavallo, G. De Maria, C. Natale, S. Pirozzi, C. May, F. Ficuciello, and B. Siciliano, "The DEXMART hand: Mechatronic design and experimental evaluation of synergy-based control for human-like grasping," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 5, pp. 799-824, 2014.
- [2] T. Sonoda and I. Godler, "Multi-fingered robotic hand employing strings transmission named 'Twist Drive'," *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2733-2738, 2010.
- [3] T. Wurtz, C. May, B. Holz, C. Natale, G. Palli, and C. Melchiorri, "The twisted string actuation system: Modeling and control," *2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.1215-1220, 2010.
- [4] I. Gaponov, D. Popov, and J.H. Ryu, "Twisted string actuation systems: A study of the mathematical model and a comparison of twisted strings," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 4, pp.1331-1342, 2014.
- [5] I. Godler, T. Sonoda, and K. Sakurai, "Modeling and Evaluation of a Twist Drive Actuator for Soft Robotics," *Advanced Robotics*, vol. 26, no. 7, pp. 765-783, 2012.



박 지 혁

2011 한국과학기술원 기계공학과 (공학사)
2012~현재 한국과학기술원 기계공학과 석
박사 통합과정

관심분야: 매니플레이터, 안전 로봇 개발 등



김 경 수

1993 한국과학기술원 기계공학과 (공학사)
1995 동 대학원 기계공학과(공학석사)
1999 동 대학원 기계공학과(공학박사)
2007~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수

관심분야: 강인제어, 로봇핸드, 재활로봇 등



김 수 현

1978 서울대학교 기계공학과 (공학사)
1980 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
1991 Imperial College of London(공학박사)
1991~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수

관심분야: 생체모방로봇, 안전 로봇, 응용광학 등