

햅틱 피드백 극대화를 위한 오리가미 펌프 기반의 소프트 구동기 시스템

A Soft Actuation System with Origami Pump for Maximizing Haptic Feedback

정 평 국¹ · 장 혁 준¹ · 차 영 수[†]

Pyeong-Gook Jung¹, Hyukjoon Jang¹, Youngsu Cha[†]

Abstract: Traditional actuation system such as electric and pneumatic actuator has obvious advantages and disadvantages. To combine advantages and compensate disadvantages of the traditional actuation, a pneumatic actuation system with an internal air pressure source is noteworthy approach. In this paper, a soft pneumatic actuation system based on origami pump is described for haptic feedback glove. To improve wearability, an origami pump is introduced because the origami pump is much lighter than air compressor. The miniaturized electric actuation system is also designed with 3D printed planetary gear in order to reduce the volume of the system. To figure out the performance of the system, shrinkage distance of origami pump was measured with vision camera. The pressure in the origami pump was also estimated to understand the performance of the system.

Keywords: Soft Actuation System, Origami Pump, Pneumatic Actuator

1. 서 론

기존의 로봇들은 강체(Rigid body)로 이루어져 있기 때문에 외부의 환경에 맞춰 모양이 변형되지 않는다. 또한 다른 물체와의 상호 작용이 있을 때 다른 물체에 손상을 줄 수 있다. 이러한 문제로 인해 근로자 보호를 위한 산업용 로봇의 안정성 향상^[1], 착용형 로봇에 대한 관심 증대^[2], 물체에 손상을 주지 않는 그리퍼(gripper)의 필요성 및 생체 모방형 로봇 등과 같은 유연한 로봇에 대한 수요가 증가하고 있으며 이에 맞춰 소프트 구동기(soft actuator)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^[2-5].

이러한 연구들 중 소프트 공압 구동기에 대한 연구가 공기압력에 의해 작동되며 확장성과 적응성이 뛰어나 주목할 만하다. 소프트 공압 구동기는 압력이 가해진 후에 추가적인 에너지 소비없이 그 위치를 유지할 수 있고 공기의 넓은 가용성으

로 인하여 값싸고 효율적인 소프트 구동기의 이용이 가능하다^[6]. 하지만 컴프레셔와 같이 무겁고 부피가 큰 외부 공기압력원이 필요하다는 단점을 보인다^[6].

이러한 단점을 극복하기 위해 최근에는 전기식 구동기를 통해 공기압력원을 제공하는 전기-공압 구동기를 이용한 소프트 구동기 연구가 활발하다^[7-9]. 전기-공압 구동기는 전기모터와 공압 펌프로 이루어지며 전기적으로 작동하는 모터가 펌프를 움직이게 하여 압력 발생시킨다는 점에서 보다 빠르고 효율적인 힘을 발생시킬 수 있다^[7].

최근에는 플라스틱 필름을 접어서 만든 오리가미 펌프를 이용하여 공기압력을 가해주는 연구가 활발하다^[8]. 이를 구동하기 위해 케이블 구동이 제안되기도 했지만 오리가미 펌프를 케이블로 구동하였을 때 케이블을 통해서만 한 방향으로만 컨트롤 가능하고 다른 방향은 펌프 재료의 탄성에 의해서만 구동되는 단점이 있어 적용 가능한 어플리케이션이 한정적이다^[9,10].

따라서 본 논문에서는 크레슬링(Kresling) 패턴을 이용한 오리가미 펌프와 전기-공압 구동기를 결합하여 양방향으로 움직일 수 있도록 직동으로 구동하는 시스템을 제안하였다. 제안된 구동기는 가압 및 감압이 가능하고, 또한 기어 비를 통해 자유롭게 토크 조절이 가능하며 케이블을 사용하지 않아

Received : Nov. 23. 2020; Revised : Dec. 23. 2020; Accepted : Jan. 7. 2021

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT). (No. 2020R1A2C2005252)

1. Researcher, KIST, Seoul, Korea (pgjung, t20476@kist.re.kr)

† Principal Researcher, Corresponding author: KIST, Seoul, Korea (givemong@kist.re.kr)

케이블 마모에 의한 수명 감소가 없다는 장점이 있다. 또한 호스를 통해 공기 압력이 전달되기 때문에 전기 구동부와 소프트 구동부가 붙어 있을 필요가 없어 착용형 장비에 적합하다.

따라서 제안된 구동기 시스템을 햅틱 피드백 극대화를 위한 글러브에 적용하였다. 사람은 새로운 자극에 더 예민하게 반응하기 때문에 소프트 구동기를 통해 자극을 가해줘야 할 때만 햅틱 피드백 시스템을 손가락에 접촉시켜 감각 전달을 더 극적으로 전달할 수 있다.

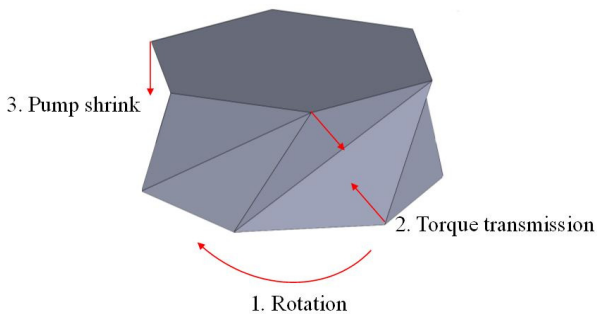
제안된 구동기의 특성을 파악하기 위해 다양한 주파수를 가진 sinusoidal 입력을 전기 구동기에 가하고 그에 따른 오리가미 펌프의 변위량을 측정하여 시스템의 특성을 파악하였다. 오리가미 펌프의 변위량은 펌프 내 압력 변화와 직접적으로 연관이 있어 펌프의 변위량으로 펌프 내 압력 또한 계산되었다. 오리가미 펌프의 변위는 카메라를 통해 측정되었고 펌프 커버에 표시된 1 mm 간격의 홈을 기준으로 픽셀 값으로 환산했다. 남은 논문의 구성은 2장 시스템 구성, 3장 시스템 분석, 4장 결론으로 구성되어 있다.

2. 시스템 구성

2.1 오리가미 펌프

2.1.1 펌프의 구동 원리

오리가미 펌프는 기존의 공압 시스템에서 컴프레셔와 같은 공기 압축기를 대체해 공압을 생성 해주기 위해 사용되었다. 오리가미 펌프는 펌프가 접히면서 공압을 가해주기 때문에 유연한 필름에 접히는 모양의 패턴을 입혀 만들어진다. 오리가미 패턴에는 크레슬링, 미우라, 요시무라 패턴 등이 있지만 미우라, 요시무라 패턴 등 대부분의 패턴은 펌프를 수축시키기 위해서는 펌프에 수직인 방향으로 힘을 가해줘야 한다. 하지만 크레슬링 패턴의 경우 펌프가 회전을 하는 힘으로도 펌프를 수축시킬 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 전기 모터의 회전하는 토크를 직동으로 오리가미 펌프에 전달하기 위해 크레슬링 패턴을 이용하여 펌프를 제작하였다[Fig. 1].



[Fig. 1] Origami pump with Kresling pattern and shrinkage mechanism of the origami pump

크레슬링 패턴은 [Fig. 1]과 같이 회전 축과 대각선을 이루고 있는 패턴이 회전하는 힘을 수직 방향의 압축 힘으로 변환할 수 있기 때문에 구동기의 토크를 직동으로 오리가미 펌프의 수축 힘으로 전달하는데 적합하다. 펌프의 수축 힘은 크레슬링 패턴의 층을 쌓아 증가시킬 수 있으며 펌프의 수축은 펌프 내 공기의 압력 증가로 이어진다. 이러한 압력 증가를 통하여 소프트 구동기 내의 공기 압력을 증가시키고 소프트 구동기를 작동시키게 된다.

본 논문에서는 오리가미 펌프의 내부 부피를 계산하기 쉽도록 6각형 모양의 오리가미 펌프를 사용했고 6각형의 펌프를 총 5층으로 쌓았다. 옆면의 패턴을 일정하게 출력하기 위해 100 um 두께의 PET 필름에 패턴을 출력한 뒤 펌프의 내구성을 위해 캡톤 테이프로 펌프 전체를 감싸 붙였다. 펌프 한 층의 높이는 12 mm, 펌프 한 변의 길이도 12 mm로 펌프의 단면적은 다음과 같다.

$$A = \frac{6\sqrt{3}}{4} l^2 \quad (1)$$

여기서 l 은 펌프 한 변의 길이이며 펌프가 정육각형 이므로 펌프 한 변의 길이와 같은 변의 길이를 갖는 정삼각형 6개의 합으로 단면적을 구할 수 있다. 또한 펌프 한 층의 높이가 12 mm이므로 펌프 내 단면적이 일정하다고 가정하면 펌프의 초기 부피는

$$V_0 = 5hA \quad (2)$$

가 된다. 여기서 h 는 펌프 한 층의 높이이고 h 가 변하게 되면 펌프의 부피 또한 변하게 된다.

2.1.2 오리가미 펌프 내 압력 추측

오리가미 펌프 내 압력을 추측하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 펌프 내 초기 압력은 1기압이다.
2. 펌프 내 압력이 이상기체 방정식을 크게 벗어날 만큼 올라가지 않는다.
3. 펌프 내 단면적은 일정하다
4. 펌프는 완벽하게 밀폐되어 공기가 새지 않는다.

위의 가정과 통해 얻은 오리가미 펌프 변위와 압력 사이의 관계를 계산하면 다음과 같다.

먼저 이상기체 방정식에 의해

$$P_0 V_0 = k \quad (3)$$

가 되고 P_0 는 1기압을, k 는 값이 일정한 상수가 된다. 따라서 오리가미 펌프의 변위에 의해 변한 부피 V 는

$$V = A(5h - dh) \quad (4)$$

가 되고 여기서 dh 는 펌프의 변위량이다. 따라서 펌프내 압력은

$$P = k/V \tag{5}$$

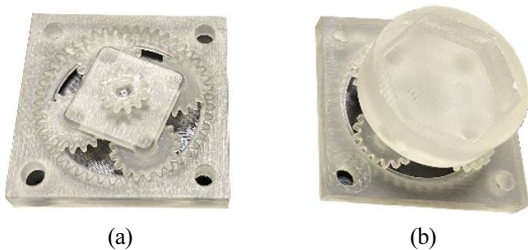
가 된다.

2.2 구동기 시스템

2.2.1 전기 구동기

전기 구동기는 햅틱 피드백 글러브에 사용하기 위해 Jinlong machinery & electronics 사의 Q7AL2BX180003를 사용하였다. 이 모터는 직경 7 mm, 길이 16.5 mm의 크기를 가지고 있어 착용형 장치에 사용하기 적합하다. 또한 3V의 전압으로 구동되기 때문에 1셀의 Li-Po 배터리로도 구동이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 소형 DC 모터인만큼 최대 토크가 0.11mNm로 낮다.

따라서 본 논문에서는 Projet사의 3D 프린터인HD3500을 이용하여 총 1:216의 기어비를 갖는 기어 시스템을 적용하였다. 기어 시스템은 총 3개의 층으로 이루어져 있고, 각 층은 1:6의 기어비를 갖는다. 기어 시스템의 부피를 최소화하기 위해 유성기어 시스템을 설계하였다[Fig. 2(a)]. 맨 마지막 층의 유성기어 캐리어에는 [Fig. 2(b)]와 같이 오리가미 펌프 브라켓을 부착하여 전기 구동기가 오리가미 펌프를 직동으로 구동하도록 구성하였다.

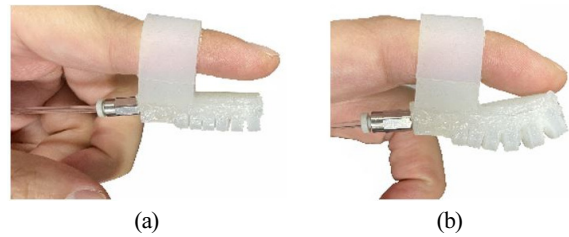


[Fig. 2] 3D-printed planetary gear system; (a) the first and second layer, (b) the last layer with bracket for origami pump

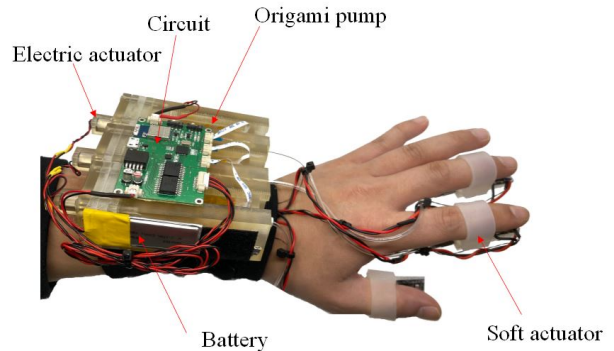
2.2.2 소프트 구동기

전기 구동기에 의해 오리가미 펌프 내의 공기 압력이 높아지게 되고, 이 압력은 호스를 통해 소프트 구동기로 전달되게 된다. [Fig. 3]은 소프트 구동기를 보여준다. 소프트 구동기는 햅틱 피드백을 극대화하기 위해 평상시에는 손가락과 떨어진 상태를 유지하다가 압력이 가해지면 손가락과 닿게 된다. 이때 평상시에는 일정한 모양을 유지하면서 구동 시에는 유연하게 휘어지게 하기 위해 소프트 구동기의 재질은 실리콘의 한 종류인 dragon skin 20을 사용하였다.

소프트 구동기의 한쪽 면은 사람 신체 내에 소장의 용털과 같이 단면적을 극대화하여 다른 면과의 면적 차이를 만들어왔다. 이 면적 차이는 소프트 구동기가 높아진 압력에 의해 팽창



[Fig. 3] Soft Actuator; (a) before actuation, (b) after actuation



[Fig. 4] Haptic feedback system

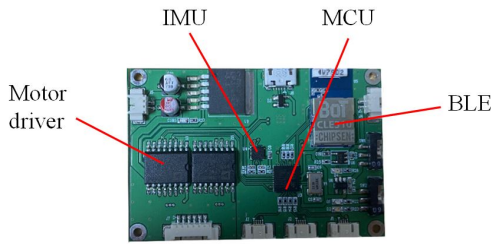
할 때 양 면의 길이 변화를 일으키고 이로 인해 소프트 구동기가 한 쪽 방향으로 휘어지게 된다. [Fig. 3(b)]는 구동기가 작동되었을 때의 모습이다. 아래쪽 면의 돌기가 압력에 의해 팽창되며 돌기 간격이 벌어지게 되고, 이로 인해 아래쪽 면의 길이가 위쪽 면의 길이보다 길어지게 되어 손가락과 접촉이 일어나게 된다.

[Fig. 4]는 전체 시스템 구성을 나타낸다. 손목에 있는 전기 구동기를 구동시키면 오리가미 펌프가 수축하거나 팽창하게 된다. 오리가미 펌프의 수축과 팽창에 의해 오리가미 펌프 내 공압은 증가하거나 감소하게 된다. 이 압력은 호스를 통해 손 끝에 있는 소프트 구동기로 전달되게 된다.

2.3 센서 및 회로

회로는 마이크로 프로세서인 stm32f103, 전기 구동기 제어를 위한 2채널 H-bridge가 내장되어 있는 소자 2개, 무선 통신을 위한 블루투스 모듈, 압력 센서인 MS5637, 관성 측정 장치인 ICM-20948 등으로 이루어져 있다[Fig. 5]. 전기 구동기 구동 시 발생할 수 있는 노이즈에 의한 영향을 최소화하기 위해 센서 및 통신의 전원부와 구동기의 전원부는 커플러에 의해 완전히 분리 되어있다.

압력 센서는 오리가미 펌프 및 소프트 구동기 내의 공기 압력을 모니터링 하여 전기 구동기에 피드백을 주기 위해 오리가미 펌프 내에 설치하였다. 또한 중력에 의해 착용자의 손 각도에 따라 소프트 구동기가 손가락에 접촉되기 위해 필요한



[Fig. 5] Main controller and sensor system

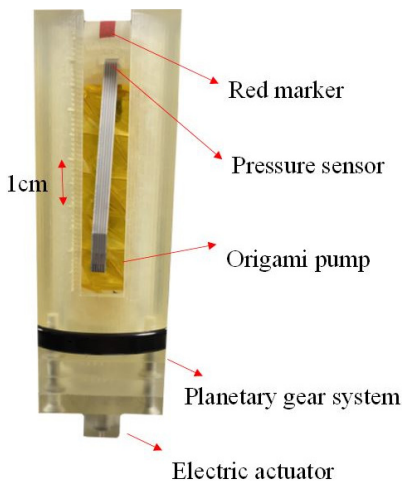
힘이 다르기 때문에 이를 보상하기 위한 관성 측정 장치가 회로에 포함되었다.

마이크로프로세서는 FreeRTOS를 사용하여 정확하게 100 Hz의 sampling rate을 유지하게 하여 제어 성능을 높였고, 센서부와 제어부, 통신부는 각각 multi-tasking을 통해 시스템이 real-time을 유지할 수 있도록 하였다. 전기 구동기는 노이즈로 인한 영향을 최대한 피하기 위해 H-bridge에 10 kHz의 주기를 갖는 pulse width modulation (PWM) 디지털 신호를 통해 제어하였다.

3. 시스템 분석

3.1 실험장치 구성

제안된 시스템의 성능을 분석하기 위해 전기 구동기에 주파수 별 sinusoidal 신호를 가해 오리가미 펌프가 수축되는 변위를 측정하였다. 오리가미 펌프가 수축되는 변위를 측정하기 위해 펌프의 끝 부분에 그림 [Fig. 6]와 같이 빨간색 마커를 부착하고 펌프 하우징에 1 mm 간격의 홈을 표시했다. 이를 카메라로 측정한 뒤 1 mm 간격의 홈 픽셀 수 대비 빨간색 마커가 이동한 픽셀 수를 측정하여 펌프의 수축 변위를 측정하였다. 각각의 주파수에 대해 10번의 왕복 실험 후 변위를 측정하였다.



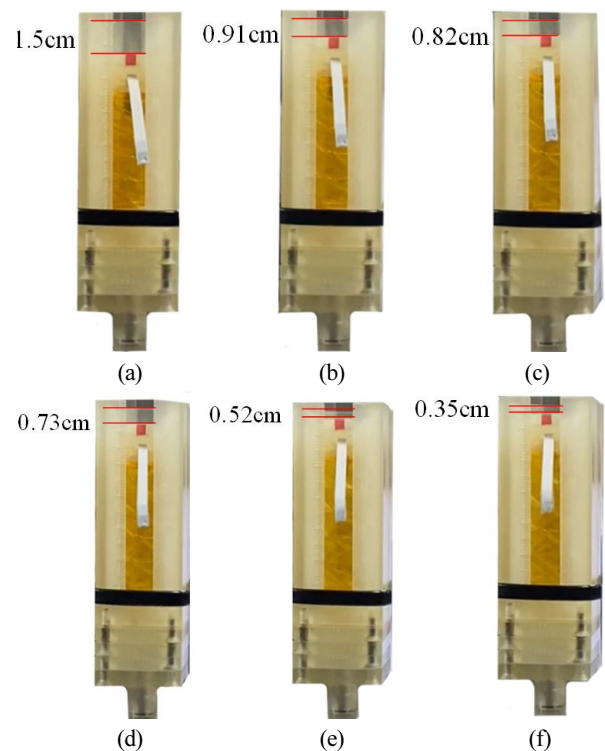
[Fig. 6] Experimental setup

마커는 Matlab을 통해 비디오를 RGB 배열로 변환한 뒤 R 값이 일정 값보다 큰 픽셀들 중 일정 거리 이하에 묻혀있는 점들의 평균을 통해 마커의 위치를 측정하였다. 시스템이 카메라 화면 상에서 직사각형에 가깝기 때문에 시스템이 포함되지 않는 픽셀들은 쉽게 제거하였고, 시스템에서 마커 외에는 빨간색을 띄고 있지 않기 때문에 간단한 알고리즘으로 신뢰도 있는 마커의 위치를 얻을 수 있다.

3.2 구동기 주파수에 따른 오리가미 펌프 변위

오리가미 펌프의 수축되는 변위량은 펌프 내의 부피 변화에 직결되고 오리가미 펌프 내의 부피가 감소하게 되면 오리가미 펌프 내의 압력은 증가하게 되어 소프트 구동기가 구동되므로 전기 구동기와 오리가미 펌프의 변위를 보는 것이 매우 중요하다.

따라서 전기 구동기에 가해지는 주파수에 따른 오리가미 펌프의 특성을 보기 위해 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4[Hz]의 sinusoidal 입력 신호를 전기 구동기에 가해줬다. [Fig. 7]는 각 주파수 별 오리가미 펌프의 최대 변위일 때의 사진이다. 각각의 주파수 별로 최대 변위는 대략 1.5, 0.93, 0.82, 0.73, 0.52, 0.35cm였고 10번의 실험 동안의 평균과 표준편차는 [Table 1]에 자세히 기술되어 있다.



[Fig. 7] Snapshot when the origami pump is fully shrink with (a) 0.25 Hz, (b) 0.5 Hz, (c) 1 Hz, (d) 2 Hz, (e) 3 Hz, and (f) 4 Hz input, respectively

[Table 1] Shrink displacement with respect to the sinusoidal input for various frequency

Frequency [Hz]	Average [cm]	Std.
0.25	1.375	0.0574
0.5	0.897	0.0465
1	0.761	0.0364
2	0.682	0.0452
3	0.465	0.0227
4	0.297	0.0194

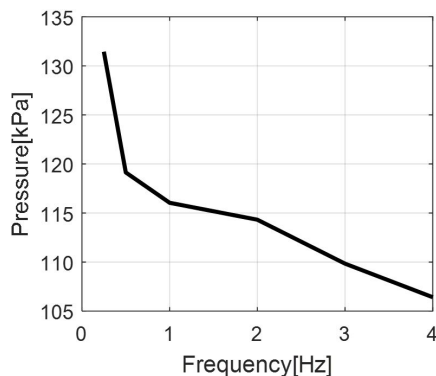
3.3 구동기 주파수에 따른 압력 변화

[Fig. 8]은 식 (1)~(5)를 통해 추측한 오리가미 펌프 내 압력이다. 가장 많은 변위량을 보인 저주파 입력 값에서 가장 큰 압력 변화를 보였고, 가장 적은 변위량을 보인 고주파 입력 값에서는 가장 적은 압력 변화를 보였다.

주파수-압력 사이의 관계를 도출한 이유는 추후에 본 논문에서 구한 주파수-압력 사이의 관계를 통해 전기 구동기부터 압력 센서 측정 값까지의 전달함수를 구하고 이 전달함수를 이용하여 외란 관측기를 설계하고자 한다. 손과 접촉하는 순간 전달함수를 통해 예측한 주파수-압력 관계보다 큰 압력이 측정되고 이 압력은 외란 관측기에 의해 외란으로 측정되게 된다. 이를 통해 소프트 구동기 내의 압력 변화만으로 손과 소프트 구동기의 접촉 여부를 판단 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 햅틱 피드백을 극대화하기 위한 소프트 구동기 시스템이 제안되었다. 이를 위해 오리가미 펌프와 전기식 구동기가 사용되었으며, 햅틱 피드백을 가해주는 손가락 부분에는 실리콘으로 제작한 소프트 구동기를 통해 착용성을 증가시켰다. 제안된 시스템은 자극이 없을 때에는 손가락과 접촉을 하지 않고 자극이 가해질 때에만 손가락과 접촉해 햅



[Fig. 8] Estimated pressure with respect to the applied frequency

틱 피드백을 더 극적으로 전달하도록 하였다.

전기식 구동기가 구동되면 오리가미 펌프는 수축되고 이로 인해 펌프 내 공기압력이 올라가게 되어 소프트 구동기를 작동시키게 된다. 전기식 구동기의 입력에 따른 펌프의 수축 정도를 측정하기 위해 빨간색 마커를 부착하여 카메라 프레임을 통해 수축 정도를 측정하였고 이 결과를 통해 오리가미 펌프 내 압력이 계산되었다.

향후에는 유추한 시스템의 압력을 토대로 시스템의 모델을 파악하고 회로에 내장된 압력 센서를 이용하여 검증할 예정이다. 이를 기반으로 외란 관측기를 설계하고 외란을 측정하여 손가락과의 접촉 유무를 판단할 예정이다.

References

- [1] M. Mokhinabonu and Y. Choi, "Review of wearable device technology and its applications to the mining industry," *Energies*, vol. 11, no. 3, 2018, DOI: 10.3390/en11030547.
- [2] C. Lee, M. Kim, Y. J. Kim, N. Hong, S. Ryu, H. J. Kim, and S. Kim, "Soft robot review," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 3-15, 2017, DOI: 10.1007/s12555-016-0462-3.
- [3] J. Walker, T. Zidek, C. Harbel, S. Yoon, F. S. Strickland, S. Kumar, and M. Shin, "Soft Robotics: A Review of Recent Developments of Pneumatic Soft Actuators," *Actuator*, vol. 9, no. 1, 2020, DOI: 10.3390/act9010003.
- [4] J.-H. Choi, D.-Y. Lee, and K.-J. Cho, "Dual-Stiffness by Combined Structures for Rigidity-Tuning of Soft Robot," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 12, no. 3, pp. 263-269, Sept., 2017, DOI: 10.7746/jkros.2017.12.3.263.
- [5] D. S. Choi, S. Y. Moon, and M. J. Hwang, "Improved Design for Enhanced Grip Stability of the Flexible Gripper in Harvesting Robot," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 15, no. 2, pp. 107-114, Jun., 2020.
- [6] L. Paez, G. Agarwal, and J. Paik, "Design and analysis of a soft pneumatic actuator with origami shell reinforcement," *Soft Robotics*, vol. 3, no. 3, pp. 109-119, 2016, DOI: 10.1089/soro.2016.0023.
- [7] U. Gupta, L. Qin, Y. Wang, H. Godaba, and J. Zhu, "Soft robots based on dielectric elastomer actuators: a review," *Smart Materials and Structures*, vol. 28, no. 10, 2019, DOI: 10.1088/1361-665X/ab3a77.
- [8] K. K. Ahn, D. N. C. Nam, and M. Jin, "Adaptive backstepping control of an electrohydraulic actuator," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 987-995, 2013, DOI: 10.1109/TMECH.2013.2265312.
- [9] Y. Kim and Y. Cha, "Soft Pneumatic Gripper with a Tendon-Driven Soft Origami Pump," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, DOI: 10.3389/fbioe.2020.00461.
- [10] S. Kim, M. Kim, J. Kang, S. Son, and D. H. Kim, "Design and Control of Wire-driven Flexible Robot Following Human Arm Gestures," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 14, no. 1, pp. 50-57, Mar., 2019, DOI: 10.7746/jkros.2019.14.1.050.



정 평 국

2013 서강대학교 기계공학과(학사)
2015 서강대학교 기계공학과(석사)
2019 서강대학교 기계공학과(공학박사)
2019~2020 L'Université Paris-Est Créteil,
Créteil, France(박사 후 과정)
2020~현재 KIST 박사 후 연구원

관심분야: 재활로봇, 착용형 로봇, 제스처 인식, 소프트 로봇, 소프트 구동기



장 혁 준

2016~현재 국민대학교 기계공학부
2020~현재 KIST 학생연구원

관심분야: 소프트 로봇, 소프트 구동기, 착용형 로봇



차 영 수

2004 고려대학교 전기전자공학부(공학사)
2007 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자
공학부(공학석사)
2015 Mechanical Engineering, New York
University (NYU), New York. (공학박사)
2007~2011 KIST 연구원
2015~2016 KIST 연구원
2016~2020 KIST 선임연구원
2020~현재 KIST 책임연구원

관심분야: Smart materials, Energy harvesting, Flexible sensors and actuators, Soft robotics