

소프트 그리퍼를 위한 저압 구동 소프트 액추에이터의 설계

Design of Low Pressure Driven Soft Actuators for Soft Gripper

윤진 곤¹ · 윤동원[†]

Jingon Yoon¹, Dongwon Yun[†]

Abstract: The gripper with a soft pneumatic actuator uses a soft material, unlike the gripper that uses a rigid body, so it is safer and lighter to interact with objects without advanced control technology. Among the soft pneumatic actuators that have been studied, PneuNets actuators have bellows shape, which enable quick operation and complete bending with only small material deformation at low pressure. In this study, we suggested improved form of PneuNets actuators to obtain the performance of the soft actuator that a larger bending angle and larger bending force at a small pressure. An experiment was designed and conducted to measure the bending angle and bending force according to the pressure. As a result, it was confirmed through experiments that the improved model has a maximum bending angle at a pressure of 5 kPa lower than that of the previous model, and a maximum bending force of 1.97 times at the same pressure.

Keywords: Soft Robotics, Soft Actuator

1. 서 론

소프트 공압 액추에이터를 사용한 그리퍼는 강체를 사용한 그리퍼와 달리 부드러운 소재($E < 100$ MPa)를 사용하여 더 안전하고 가볍게 고급제어 기술 없이 물건의 상호작용이 가능하다^[1]. 기존 연구되고 있는 소프트 공압 액추에이터에는 공압 네트워크 액추에이터(PneuNets actuators), 섬유 강화 액추에이터(fiber-reinforced actuators), 직물 강화 액추에이터(fabric-reinforced actuators)의 세 종류로 분류할 수 있다^[2].

공압 네트워크 액추에이터는 [Fig. 1]의 (a)와 같이 공압 챔버 위쪽이 주름진 벨로우 형태로 되어있어 압력을 가하면 벨로우(공압 채널)부분이 다른 부분에 비해 많이 팽창하여 굽힘 동작을 하게 된다. 이 때문에 낮은 압력에서 작은 재료의 변형만으로 빠른 작동과 완전한 굽힘이 가능하다^[3-8].

섬유 강화 액추에이터는 공압 네트워크 액추에이터에 비해 단순한 반원기둥^[9-11], 원기둥^[12-14]의 형상을 가지며 그 주위에

섬유를 일정한 패턴으로(이중나선, 그물 형태, 단일 나선, 불균일 나선) 감아 팽창을 제한함으로써 원하는 방향으로 길이 팽창, 폭 팽창, 비틀림, 굽힘 동작 등 다양한 동작이 가능하다^[12,13]. 하지만 반원기둥형 섬유강화 액추에이터의 경우 완전 굽힘 동작을 위해 207 kPa^[9]에서 243 kPa^[11]의 큰 압력을 주어야 하며, 원통형에 경우에도 같은 재료를 사용한 공압 네트워크 액추에이터에 비해 높은 압력에서 완전 굽힘 동작을 하는 것을 보여주었다^[12]. 또한 탄성체 주위에 감아주는 섬유의 각도와 간격에 따라 많이 성능이 달라지므로^[10,12] 섬유를 부드러운 탄성체 주위에 일정한 간격과 각도로 감아야 하는 번거로움이 있다.

직물 강화 액추에이터는 탄성체를 직물로 감싸서 직물의 이방성^[15,16] 혹은 늘어나지 않은 직물과 잘 늘어나는 직물의 조합^[17], 주름진 면과 그렇지 않은 면의 팽창 차이^[18-20] 등을 이용하여 굽힘 혹은 비틀림^[15,17-19]과 같은 동작을 수행할 수 있다. 직물의 이방성은 직물의 방향에 따라 잘 늘어나는 방향과 그렇지 않은 부분이 있는 성질로 이를 조합해 탄성체의 팽창을 조절, 굽힘, 비틀림과 같은 의도한 동작을 만들어 낼 수 있다. 이 경우 172 kPa~260 kPa가량의 높은 압력에서 완전 굽힘 동작이 가능하다^[15,16]. 늘어나지 않은 직물과 잘 늘어나는 직물

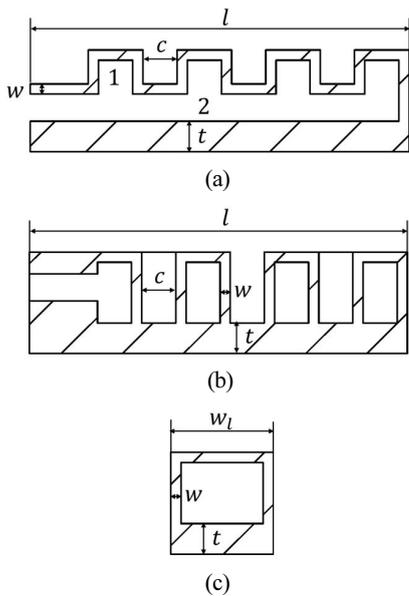
Received : Nov. 23. 2020; Revised : Jan. 7. 2021; Accepted : Jan. 11. 2021

1. PhD Students, DGIST, Techno jungang-daero, Hyeonpung-eup, Dalseong-gun, Deagu, Korea (y1k1000@dgist.ac.kr)

† Assistant Professor, Corresponding author: DGIST, Techno jungang-daero, Hyeonpung-eup, Dalseong-gun, Deagu, Korea (mech@dgist.ac.kr)

의 조합하여 탄성체의 팽창을 조절할 경우도 138 kPa의 높은 압력에서도 완전 굽힘이 360도 일 경우 120도 정도로 굽혀져 완전 굽힘은 못 하는 것을 보여주었다^[17,19]. 주름진 면과 그렇지 않은 면의 팽창 차이를 이용한 경우 주름진 면은 작은 힘에도 변형하는 데 반해 그렇지 않은 면은 변형이 작아 굽혀지게 된다^[15,18]. 혹은 평면의 공압 챔버를 접어 주름진 면을 만들어 굽힘 동작을 수행하도록 한다^[20]. 이 두 경우 모두 낮은 압력(30 kPa~103 kPa)^[15,18,20]에서 완전 굽힘을 수행할 수 있지만, 이를 이용하기 위해 평면의 두 필름을 붙이거나 평평한 라텍스 풍선을 챔버로 사용하여 공압을 빼더라도 처음 위치로 돌아갈 수 없어 항상 2개의 공압 챔버(굽힘, 펴)가 필요하다.

본 연구에서는 다른 직물강화, 섬유강화 액추에이터에 비해 낮은 압력(125 kPa 이하)에서 완전 굽힘이 가능하고 반복적인 동작(굽힘과 펴)을 위해 추가적인 챔버가 필요 없는 공압 네트워크 액추에이터의 성능, 즉 더 낮은 압력에서 더 큰 굽힘 각도, 더 큰 굽힘 힘을 얻는 개선된 형상의 액추에이터를 제시한다. 기존 공압 네트워크 액추에이터^[1]와 제시한 공압 네트워크 액추에이터의 압력에 따른 굽힘 각도를 비교하여 제시한 액추에이터가 더 큰 굽힘 각을 얻는지를 보이기 위해 실험을 진행하였다. 두 공압 네트워크 액추에이터를 같은 재료의 실리콘을 사용한 몰딩 방식으로 제작하여 압력에 대한 굽힘 각도를 측정하였다. 또한 그리퍼의 잡는 힘과 관련된 굽힘 힘의 측정, 두 액추에이터의 성능을 비교하였다.



[Fig. 1] Cross section of PneuNets actuators: (a) is conventional PneuNets actuators of length direction, (b) is PneuNets actuators suggested in this study, (c) is cross section of width direction from both PneuNets actuators

2. 개선된 공압 네트워크 액추에이터 모델

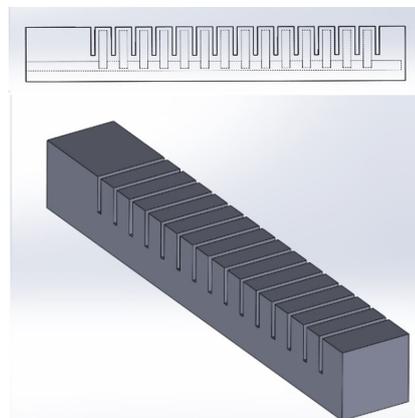
2.1 모델링

기존 공압 네트워크 액추에이터의 모델은 Hu Weiping et al. 이 제안한 공압 네트워크 액추에이터의 형상 최적화에 대한 논문의 모델을 차용하였다. 이 논문은 액추에이터 형상에 관한 파라미터에 따라 같은 압력에서 굽힘 각도의 변화를 시뮬레이션 및 실험을 통해 최대의 굽힘 각도를 얻는 최적의 파라미터의 값을 제시하였다. 공압 네트워크 액추에이터의 굽힘 각도 최적화에 관한 파라미터는 [Fig. 1]과 [Table 1]과 같다. 기존 공압 네트워크 액추에이터에 최대 굽힘 각도를 얻기 위한 최적의 파라미터는 4.5 mm 하단 레이어 두께, 1.5 mm 벽 두께 및 챔버 사이의 간격이 1.5 mm 인 공압 채널, 전체 길이 140 mm, 폭 20 mm이다^[1]. [Fig. 2]는 기존 액추에이터의 최적화된 모델을 나타낸 것이다.

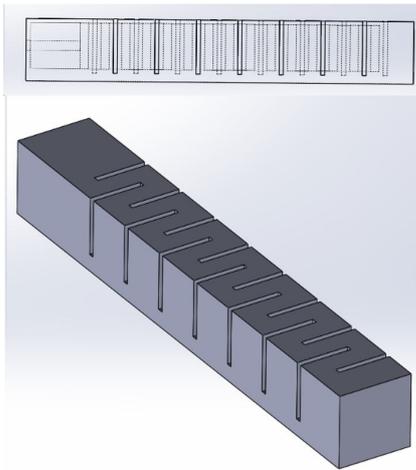
본 연구에서 제시한 공압 네트워크 액추에이터는 공압 채널의 모양을 직선이 아닌 지그재그의 형상을 가지고 있다. 지그재그 모양의 형상을 선택한 이유는 기존 공압 네트워크 액추에이터는 각 공압 채널([Fig. 1]의 1 부분)에 압력을 가하는 바닥면의 통로 부분([Fig. 1]의 2 부분)이 굽힘 변형에는 관여하지 않고 부피를 차지하는 데 반해, 지그재그 모양일 경우 공압이

[Table 1] Parameter of PneuNets actuators ^[1]

parameter	
w	wall thickness
c	gap between sequential chambers
t	bottom layer thickness
l	the overall length of actuator
w _l	the width length of actuator



[Fig. 2] Optimization PneuNets actuators, a pneumatic channel with a 4.5 mm bottom layer thickness, 1.5 mm wall thickness, and 1.5 mm gap between sequential chambers



[Fig. 3] PneuNets actuators suggested in this study, it has same value that a pneumatic channel, bottom layer thickness, wall thickness, and gap between sequential chambers

가해지는 모든 면이 굽힘 변형에 관여할 수 있다. 또한 공압 채널에 의한 굽힘 변형의 방해를 최소화하고 길이 방향 공압 채널의 변형을 최대화하기 위해 양 끝 부분에 위치시켰다.

기존 액추에이터와 비교를 위해 기존 모델의 최적 파라메터인 4.5 mm 하단 레이어 두께, 1.5 mm 벽 두께 및 챔버 사이의 간격이 1.5 mm 인 공압 채널, 총 길이 140 mm, 폭 20 mm와 같게 제시한 액추에이터를 설계하였다. [Fig. 3]은 본 연구에서 제시한 공압 채널을 지그재그 형상으로 설계된 액추에이터의 모델을 나타낸 것이다.

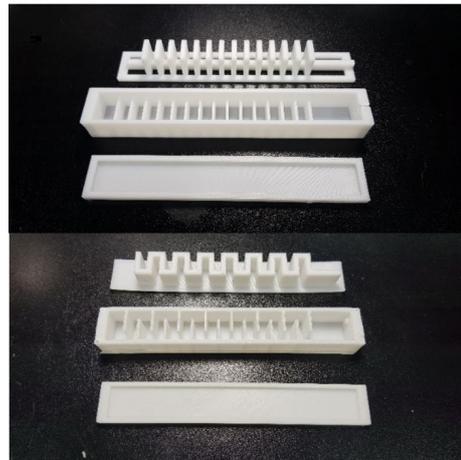
3. 소프트 액추에이터의 제작

공압 네트워크 액추에이터는 몰딩을 통해 제작하였다. 3D 프린터를 이용해 몰드를 제작하고, 실리콘 고무(Dragon skin 10, Smooth-On, Inc.)를 사용하여 액상 상태의 실리콘 고무 1A와 1B를 1:1 비율로 섞은 후 탈포 과정을 거쳐 몰드에 부은 후, 오픈에 80도에서 10분정도 가열하여 경화시키는 것으로 공압 네트워크 액추에이터의 각 파트를 제작하였다. 각 파트의 접착은 같은 재질의 액체상태의 실리콘 고무를 사용하여 접착하였다. 실리콘 고무의 물성치는 [Table 2]와 같다.

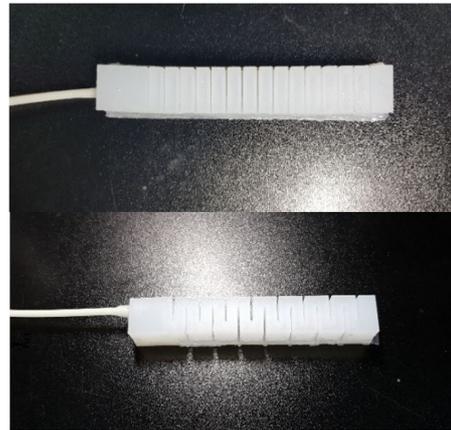
기존 공압 네트워크 액추에이터와 개선한 모델은 각각 총 2 파트를 몰딩하여 제작하였다. 파트 개수로 보았을 때 제작의

[Table 2] Dragon skin 10 property

Specific Gravity	1.07 g/cc
Shore A Hardness	10 A
Tensile Strength	3.27 Mpa
Elongation at Break %	1000%



[Fig. 4] Mold of PneuNets actuators: The top is the conventional PneuNets actuators, and the bottom is the PneuNets actuators presented in this study



[Fig. 5] PneuNets actuators: The top is the conventional PneuNets actuators, and the bottom is the PneuNets actuators suggested in this study

난이도는 기존 공압 네트워크 액추에이터와 비슷하다. [Fig. 4]는 3D프린트(M300, Zortrax S.A.)로 제작한 몰드이다. 완성된 공압 네트워크 액추에이터는 [Fig. 5]와 같다.

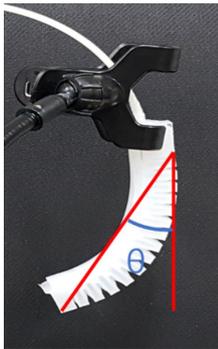
4. 압력에 따른 굽힘 각도 및 굽힘 힘 측정

4.1 압력에 따른 굽힘 각도

두 공압 네트워크 액추에이터에 0~17.5 kPa의 압력을 가하였을 때 굽힘 각도를 측정하였다. 공압을 가하기 위해 최대 400 kPa를 가할 수 있는 에어 펌프(DAP-8849 /DC 24V, motorbank)와 에어펌프의 공압을 일정하게 유지 및 제어 하기위해 전자식 공압레귤레이터(IVT1031- 21N2BL4, SMC Corporation)를 사용

하였다. 굽힘 각도의 정의는 [Fig. 6]과 같이 스탠드에 고정된 액추에이터의 모퉁이를 기준으로 한 수직선으로부터 움직이는 액추에이터 끝 부분과의 각도로 하였다. 측정방식은 사진을 찍은 후 이미지 분석 프로그램(ImageJ)를 사용하여 액추에이터의 굽힘 각도를 측정하였다.

[Fig. 7]과 [Fig. 8]은 기존 액추에이터와 제시한 액추에이커에 대해 각각 0~17.5 kPa, 0~12.5 kPa 압력 범위에서 2.5 kPa 간격으로 촬영한 것이다.



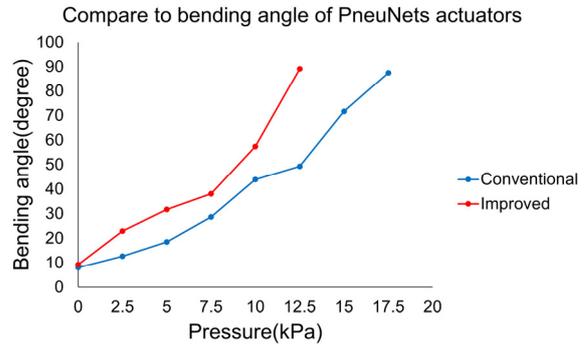
[Fig. 6] Definition of PneuNets actuators bending angle



[Fig. 7] Bending angle of conventional PneuNets actuators: The actuator was captured between 0 to 17.5 kPa in 2.5 kPa increments



[Fig. 8] Bending angle of improved PneuNets actuators: The actuator was captured between 0 to 12.5 kPa in 2.5 kPa increments



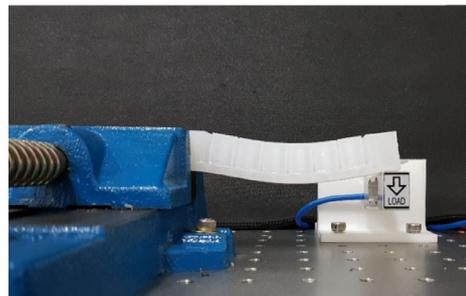
[Fig. 9] Compare to bending angle of improved PneuNets actuators with conventional PneuNets actuators

[Fig. 9]는 이미지 분석 프로그램을 통해 측정한 각도를 그래프로 표시하였다. 그래프와 같이 공압에 비례하며 선형으로 추정할 경우 결정계수 R^2 은 기존 모델과 개선 모델이 각각 0.85, 0.92로 나타났다. 개선 모델과 기존 모델은 각각 7.5 kPa 이후, 12.5 kPa 이후에서 급격하게 굽힘 각도가 증가하였으며 5~7.5 kPa, 10~12.5 kPa 구간에서 굽힘 각도 증가폭이 작았다. 기존 모델은 개선한 모델이 기존의 모델보다 최대각도인 90도에 5 kPa 낮은 압력에서 도달한 것을 볼 수 있다.

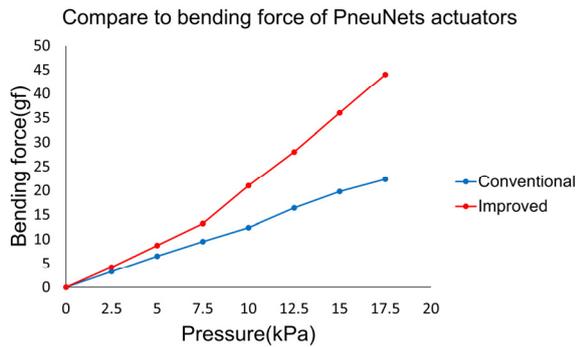
4.2 압력에 따른 굽힘 힘

소프트 그리퍼를 이용하여 물건을 잡을 경우, 잡을 수 있는 물체의 무게는 소프트 공압 액추에이터의 굽힘 힘에 비례한다. 따라서 이 힘이 클수록 소프트 액추에이터의 성능이 더 좋다고 볼 수 있다. 굽힘 힘을 측정하기 위해 [Fig. 10]과 같이 액추에이터를 바이스에 고정하고 액추에이터의 다른 쪽 끝에 로드셀(BLC-3L, CAS Corporation)을 방진 테이블에 고정한다.

[Fig. 11]은 기존 모델과 제시한 개선한 모델의 압력에 대한 굽힘 힘을 비교한 그래프이다. 두 모델 모두 압력에 대해 선형으로 증가함을 볼 수 있다. 선형으로 추정할 경우 결정계수 R^2 은 두 모델 모두 0.99로 나타났다. 단지 개선 모델의 경우 7.5 kPa



[Fig. 10] Experiment setting of bending force measurement: fix the PneuNets actuators in a vise and set the loadcell on the other side of the PneuNets actuators



[Fig. 11] Compare to bending force measurement of improved PneuNets actuators with conventional PneuNets actuators

에서 기울기가 변하는 것을 볼 수 있다. 17.5 kPa에서 기존 모델이 22.3 gf, 개선한 모델이 44 gf를 보여 같은 압력에서 1.97 배 높은 굽힘 힘을 보이는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

소프트 공압 액추에이터를 사용한 그리퍼는 강제 그리퍼와 달리 복잡한 고급 제어가 없이도 물체를 안전하게 잡고 옮길 수 있다. 현재 연구되고 있는 소프트 공압 액추에이터의 종류 중 낮은 압력에서 큰 굽힘 각과 빠른 작동을 얻을 수 있는 공압 네트워크 액추에이터의(PneuNets actuators) 성능을 올리기 위해 기존 공압 네트워크 액추에이터와 다른 형상을 본 논문에서 제시하였다.

이때 공압 네트워크의 성능은 압력에 대한 굽힘 각도와 굽힘 힘으로 평가할 수 있다^[1]. 기존 공압 네트워크 액추에이터의 모델은 Hu Weiping et al.의 논문에서 제안한 형상으로 선정하였다. 공압 네트워크 액추에이터의 성능에 영향을 미치는 파라미터는 하단 레이어 두께, 벽 두께 및 챔버 사이의 간격으로 제안하였다. 성능을 비교하기 위해 본 연구에서는 제안한 파라미터는 같고 형상만 다른 모델을 설계, 제작하였다.

성능의 검증을 위해 압력에 따른 굽힘 각도를 이미지 분석을 통해 측정, 굽힘 힘은 로드셀로 측정하였다. 실험 결과, 최대 굽힘 각에 도달하는 압력이 5 kPa 더 낮아 28.6% 빨리 도달하였다. 또한 굽힘 힘은 최대 1.97배 크게 나타났으며 압력에 대해 증가하는 굽힘 힘은 선형으로 추정하였을 때 1.79배 크게 나왔다. 따라서 제시한 형상이 성능을 개선시켰다고 보인다.

하지만 굽힘 힘이 최대 44 gf 밖이 되지 않아 무거운 물건을 들기 힘들다는 단점이 존재한다. 이로 인해 중력의 영향으로 굽힘 각도가 특정 구간에서 증가폭이 작아지는 것으로 보인다. 또한 17.5 kPa 이상의 압력을 주면 최대 굽힘 각도를 넘어가므로 더 이상의 압력을 줄 수 없어 굽힘 힘의 증가가 어려워진다.

향후 본 연구에서 사용한 Dragon skin 10이 가진 낮은 강성으로 인해 낮은 압력에서 큰 변위를 가져 높은 압력에서의 굽힘 범위가 제한되었다. 따라서 소프트 액추에이터에 대해 낮은 압력에서 높은 힘을 가지게 하는 연구가 필요하다.

References

- [1] W. Hu, R. Mutlu, W. Li, and G. Alici, "A structural optimisation method for a soft pneumatic actuator," *Robotics*, vol. 7, no. 2, 2018, DOI: 10.3390/robotics7020024.
- [2] H. K. Yap, P. M. Khin, T.-H. Koh, Y. Sun, X. Liang, J. H. Lim, and C.-H. Yeow, "A Fully Fabric-Based Bidirectional Soft Robotic Glove for Assistance and Rehabilitation of Hand Impaired Patients," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 1383-1390, Jul., 2017, DOI: 10.1109/LRA.2017.2669366.
- [3] B. S. Homberg, R. K. Katzschmann, M. R. Dogar, and D. Rus, "Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper," *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Germany, pp. 1698-1705, 2015, DOI: 10.1109/IROS.2015.7353596.
- [4] H. K. Yap, J. H. Lim, F. Nasrallah, J. C. H. Goh, and R. C. Yeow, "A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness," *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, pp. 4967-4972, 2015, DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139889.
- [5] K. Suzumori, S. Iikura, and H. Tanaka, "Flexible microactuator for miniature robots," *Micro Electro Mechanical Systems*, Nara, Japan, pp. 204-209, 1991, DOI: 10.1109/MEMSYS.1991.114797.
- [6] A. D. Marchese, R. K. Katzschmann, and D. Rus, "Whole arm planning for a soft and highly compliant 2d robotic manipulator," *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, IL, USA, pp. 554-560, 2014, DOI: 10.1109/IROS.2014.6942614.
- [7] K. C. Galloway, K. P. Becker, B. Phillips, J. Kirby, S. Licht, D. Tchernov, R. J. Wood, and D. F. Gruber, "Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs," *Soft Robotics*, vol. 3, pp. 23-33, 2016, DOI: 10.1089/soro.2015.0019.
- [8] T. Giffney, M. Xie, A. Yong, A. Wong, P. Mousset, A. McDaid, and K. Aw, "Soft pneumatic bending actuator with integrated carbon nanotube displacement sensor," *Robotics*, vol. 5, no. 7, 2016, DOI: 10.3390/robotics5010007.
- [9] P. Polygerinos, Z. Wang, J. T. B. Overvelde, K. C. Galloway, R. J. Wood, K. Bertoldi, and C. J. Walsh, "Modeling of Soft Fiber-Reinforced Bending Actuators," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 3, pp. 778-789, 2015, DOI: 10.1109/TRO.2015.2428504.
- [10] Z. Wang, P. Polygerinos, J. T. B. Overvelde, K. C. Galloway, K. Bertoldi, and C. J. Walsh, "Interaction forces of soft fiber reinforced bending actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, pp. 717-727, 2017, DOI: 10.1109/TMECH.2016.2638468.

- [11] K. C. Galloway, P. Polygerinos, C. J. Walsh, and R. J. Wood, "Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators," *2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Montevideo, Uruguay, pp. 1-6, 2013, DOI: 10.1109/ICAR.2013.6766586.
- [12] F. Connolly, C. J. Walsh, and K. Bertoldi, "Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching," *National Academy of Sciences*, vol. 114, no. 1, 2017, DOI: 10.1073/pnas.1615140114.
- [13] J. Bishop-Moser, G. Krishnan, C. Kim, and S. Kota, "Design of soft robotic actuators using fluid-filled fiber-reinforced elastomeric enclosures in parallel combinations," *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, Portugal, pp. 4264-4269, 2012, DOI: 10.1109/IROS.2012.6385966.
- [14] G. Singh, C. Xiao, E. T. Hsiao-Wecksler, and G. Krishnan, "Design and analysis of coiled fiber reinforced soft pneumatic actuator," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 13, no. 3, 2018, DOI: 10.1088/1748-3190/aab19c.
- [15] L. Cappello, K. C. Galloway, S. Sanan, D. A. Wagner, R. Granberry, S. Engelhardt, F. L. Haufe, J. D. Peisner, and C. J. Walsh, "Exploiting Textile Mechanical Anisotropy for Fabric-Based Pneumatic Actuators," *Soft Robotics*, vol. 5, no. 5, pp. 662-674, 2018, DOI: 10.1089/soro.2017.0076.
- [16] F. Connolly, D. A. Wagner, C. J. Walsh, and K. Bertoldi, "Sew-free anisotropic textile composites for rapid design and manufacturing of soft wearable robots," *Extreme Mechanics Letters*, vol. 27, pp. 52-58, Feb., 2019, DOI: 10.1016/j.eml.2019.01.007.
- [17] P. H. Nguyen, F. Lopez-Arellano, W. Zhang, and P. Polygerinos, "Design, Characterization, and Mechanical Programming of Fabric-Reinforced Textile Actuators for a Soft Robotic Hand," *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Macau, China, pp. 8312-8317, 2019, DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8968497.
- [18] H. K. Yap, F. Sebastian, C. Wiedeman, and C.-H. Yeow, "Design and characterization of low-cost fabric-based flat pneumatic actuators for soft assistive glove application," *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, London, UK, pp. 1465-1470, 2017, DOI: 10.1109/ICORR.2017.8009454.
- [19] P. H. Nguyen and W. Zhang, "Design and Computational Modeling of Fabric Soft Pneumatic Actuators for Wearable Assistive Devices," *Scientific Report*, vol. 10, no. 9638, 2020, DOI: 10.1038/s41598-020-65003-2.
- [20] J. H. Low, N. Cheng, P. M. Khin, N. V. Thakor, S. L. Kukreja, H. L. Ren, and C. H. Yeow, "A bidirectional soft pneumatic fabric-based actuator for grasping applications," *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 1180-1186, 2017, DOI: 10.1109/IROS.2017.8202290.



윤진곤

2017 부산대학교 기계공학과(학사)
2019 부산대학교 제어자동화(석사)
2020~현재 대구경북과학기술원 로봇공학과 박사과정

관심분야: 소프트 로봇, 소프트 액추에이터



윤동원

2002 부산대학교 기계공학과(공학사)
2004 광주과학기술원 기전공학과(공학석사)
2013 한국과학기술원 기계공학(공학박사)
2014~2015 UC Berkeley EECS(포닥연구원)
2004 국방과학연구소 연구원
2005~2006 한국기계연구원 연구원
2007~2016 한국기계연구원 선임연구원
2016~현재 DGIST 로봇공학과 조교수

관심분야: biomimetic robot, Industrial robot, Military robot