

촉각센싱기반 거칠고 젖은 표면 파지가 가능한 생체모사 로봇용 그리핑 기술 개발

Development of Bioinspired Robotic Gripping Technology for Gripping Rough & Wet Surfaces based on Tactile Sensing

김 다 완[†]
Da Wan Kim[†]

Abstract: High shear adhesion on wet and rough surfaces and tactile feedback of gripping forces are highly important for realizing robotic gripper systems. Here, we propose a bioinspired robotic gripper with highly shear adhesion and sensitive pressure sensor for tactile feedback systems. To achieve them, we fabricated multi-walled carbon nanotube sensing layer on a thin polymeric adhesive layer of polydimethylsiloxane. With densely hexagonal-packed microstructures, the pressure sensor achieved 9 times the sensing property of a sensor without microstructures. We then assembled hexagonal microstructures inspired by the toe pads of a tree frog, giving strong shear adhesion under both dry and wet surfaces such as silicon (42 kPa for dry and ~30 kPa for underwater conditions) without chemical-residues after detachment. Our robotic gripper can prevent damage to weak or smooth surfaces that can be damaged at low pressure through pressure signal feedback suggesting a variety of robotic applications.

Keywords: Robotic System, Tactile Feedback, Shear Adhesion, Biomimetics

1. 서 론

건조 및 수중 환경에서 부착, 감지 및 자동 의사 결정을 제어할 수 있는 지능형 생체 모방 그리퍼는 산업 제조, 서비스 로봇, 우주/해양 탐사 및 수술 장비를 포함한 광범위한 분야에 응용되고 있다^[1]. 그러나 생체모사 구조를 통한 점착에도 불구하고^[2], 수중 환경에서 물 분자와의 접촉 시, 기존의 연성 점착 장치의 건조한 상호작용(예: 전단 마찰력, 반 데르 발스 상호작용 및 정전기력)은 심각하게 약화될 수 있다. 특히, 수중 환경에서 제어 기능을 상실하고 긴밀한 부착 및 운송 기능이 떨어지게 된다^[3,4]. 이를 극복하기 위해 젖은 표면 및 수중 부착 기능을

수행할 수 있는 다양한 그리퍼가 연구되고 있다^[5-8]. 그럼에도 불구하고, 이러한 그리퍼는 민감한 유기체를 다루기 위해 전문화되어야 하며, 관련된 물체의 크기, 형태 및 형태 면에서 제한적이다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 그리퍼와 물체와의 긴밀한 접촉을 위한 표면 연구와 표면에 전달되는 힘을 센싱할 수 있는 센서 시스템이 필요하다^[9-11]. 최근에 다양한 멀티스케일 구조를 가진 생물에서 영감을 받은 독특한 패턴의 점착제가 확인되었다^[12-16]. 도마뱀 발바닥에서 영감을 받은 점착제는 밀도가 높고 가지가 많은 털로 구성되어 있으며, 반 데르 발스 힘에 의해 강한 점착력을 보이는 것으로 보고되었다^[17]. 그러나 점착제는 액체에서 반 데르 발스 힘의 손실로 인해 습한 환경에 취약하다^[18]. 문어 빨판의 돌기 또는 누두부에서 영감을 받은 건조 점착 패치는 건조한 표면 뿐만 아니라 인간 피부에 대한 높은 습윤 내성 점착을 생성할 수 있다고 보고되었다^[19]. 그러나 이러한 점착제는 흡입 응력 기반으로 하기 때문에 박리 시 점착력을 유지하기 어렵다^[19]. 최근 연구가 진행되고 있는 생체모사 점착제 중 하나는 청개구리 발바닥 구조의 독특한 육

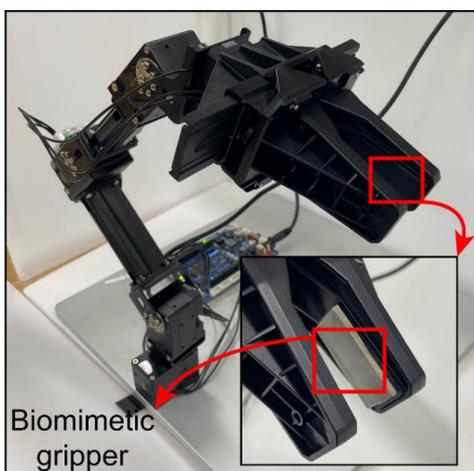
Received : Jun. 14. 2022; Revised : Jul. 18. 2022; Accepted : Jul. 18. 2022

※ This project was funded by the National Research Foundation of Korea (NRF-2022R1A4A3032923) and is currently supported by the publication grant

† Principal Researcher, Corresponding author: Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea; Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea; Mechanical Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea (nsloth10@skku.edu)

각형 패턴을 사용한다. 조밀하게 분포된 케라틴 나노섬모 구조가 교차하는 상피 세포의 규칙적인 육각형 배열은 습하고 흐르는 물 환경에서 마찰의 향상으로 인해 매우 높은 박리 점착을 가진다²⁰. 하이드로젤 기반의 육각채널구조 기반 수증 점착패치가 개발되었으나²¹, 물에 의해 swelling 되는 성질로 인하여, 소재의 물성이 불안정하고, 상대적으로 반복적인 부착시 성능이 떨어지는 특성을 가지고 있다. 또한 일부 연구는 매끄러운 표면에서 개구리의 육각형 패턴의 강력한 점착 특성을 확인했지만^{20,22}, 수분환경에서의 점착력과 물 배수성, 통기성 특성을 가진 촉각 센싱을 위한 로봇용 그리퍼 구현에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 거칠고 젖은 표면에서 고정착을 유지하며, MWCNT (Multi-walled Carbon Nanotube) 기반으로 제작된 고감도 압력 센서 통한 고감도 촉각 센싱이 가능한 로봇용 그리퍼를 제시한다[Fig. 1]. Polydimethylsiloxane (PDMS) 기반에 spray coating을 통해 MWCNT를 필름에 도입하여 MWCNT가 온전한 전도성 센싱 필름으로 작용할 수 있도록 하였다. MWCNT 센서는 압력증폭 마이크로필러 구조를 조립하여 미세 압력 범위(< 10 kPa)에서 증폭 구조가 없는 센서보다 약 9배 높은 감도를 달성하였다. 또한 MWCNT가 코팅된 PDMS의 반대편에는 개구리 모양의 육각형 구조가 형성되어 있으며, 이 구조는 건조하고 습하며 거친 표면에 강한 박리 저항성을 제공할 뿐만 아니라 마이크로 채널로 인해 높은 공기 투과성과 물 배출성을 제공하였다. 위의 특성을 사용하여 압력 센서를 통해 물체에 가해지는 힘을 추정할 수 있음을 보여준다. 압력 센서가 내장된 그리퍼는 물체 파지시 표면 촉감을 센싱 하여 표면 손상을 줄이고 정확한 파지를 유도할 수 있으며, 이를 통해 로봇용 그리퍼 응용에 유용할 것이다.



[Fig. 1] A bio-inspired robotic gripper with pressure sensor for tactile feedback applied to the gripper system

2. 실험방법 및 재료

2.1 MWCNT 압력 센서 제작

Sigma-Aldrich에서 구입한 poly (3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT)와 함께 분산된 MWCNT(평균적으로 직경 35 nm, 길이 90 μm)를 사용하였다. 클로로포름에 MWCNT와 P3HT를 넣고 원심분리를 포함하는 여과 과정을 통해 정제하여 사용하였다. 해당 용액은 spray coating 공정을 통해 상단 패널의 센서층 표면에 코팅하였다. 하단 패널은 PDMS 기관의 양면에 미세 구조를 포함한다. 상부 미세기둥 패턴의 경우 PDMS 몰드 (Sylgard 184, DOW Corning)가 실리콘 마스터 몰드에서 복제되었다. 5:1 엘라스토머 대 가교제 비율의 PDMS 혼합물을 사용한 다음 10분간 동안 교반 했다. 혼합물을 실리콘 마스터에 붓고 층 후 초음파 처리(1시간)를 수행했다. 진공 데시케이터를 사용하여 PDMS 혼합물을 2시간 동안 탈기했다. PDMS 혼합물을 베이킹 오븐에서 85 °C에서 열경화한 후 PDMS 기반 압력 증폭 구조 어레이가 완성되었다. 기둥 패턴 어레이의 직경은 30 μm, 간격은 30 μm, 높이는 15 또는 30 μm이다. 하부 점착층의 경우, 포토레지스트(SU-8 2025 및 2075, MicroChem Co.)를 사용하여 광학 리소그래피에 의해 육각형 패턴(폭 200 μm, AR: 1.5, 공간비(SR): 3)을 갖는 실리콘 몰드를 준비했다. PDMS 몰딩 기술을 적용하여 점착층을 제작했다. MWCNT 필름과 압력 증폭 구조 어레이가 서로 마주보도록 미세하게 정렬된 하부 패널과 상부 패널을 결합하여 압력 증폭 구조 기반 촉각 센싱을 위한 압력 센서와 생체모사 점착 표면 구조가 결합된 로봇용 그리퍼를 제작하였다.

2.2 전기적 응답 측정

정적으로 가해진 압력에 대한 압력 센서의 압저항 응답은 일정한 면적(~1 cm²)에 가중치를 두어 측정했다. z축 스테이지 압력 인덕터가 장착된 맞춤형 측정 장치는 동적 압력에 대한 수직 변형을 제공했다. NI 정밀 시스템 SMU (PXIe-4139)를 사용하여 디바이스의 두 접점 채널에서 전기 데이터를 수집했다.

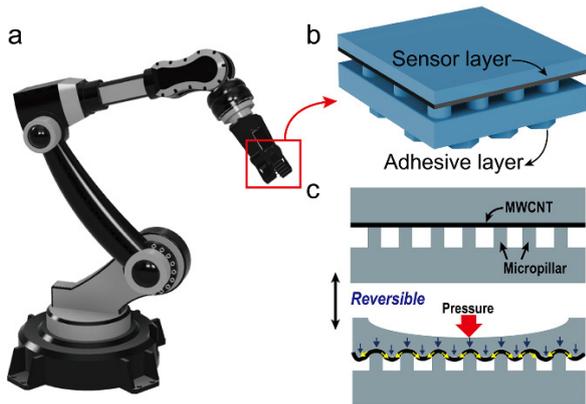
2.3 점착 특성 측정

점착력 시험을 위해 샘플을 건조(상온 25도 및 상대 습도 ~ 50%) 및 습윤 조건(액체 면적의 평균 적용 범위 ~ 42%)에서 실리콘 웨이퍼 기반 표면을 대상으로 다목적 박리 분석기(Kyowa VPS-3S, 일본)를 통해 점착 특성을 분석하였으며, 점착력 시험의 측정은 10회 이상 반복하여 실시하였다.

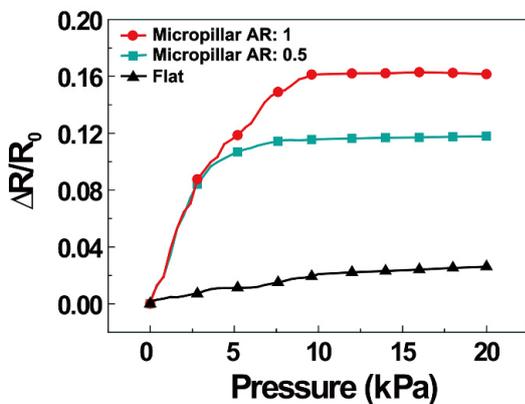
3. 실험 결과

3.1 로봇 그리퍼를 위한 생체모사 압력 센서 및 점착 구조 원리 분석

미세기둥 기반 압력 증폭 구조는 동일한 힘 하에서 미세기둥의 면적의 합으로 정의되는 접촉면적의 감소로 인해 미세기둥과 막 사이의 접촉면적에서 국부적인 압저항면에 대한 압력을 증가시킨다. 전체 필름 면적(A)에 가해진 힘(F)은 $A' = na$ 로 접촉된 유효 면적(A')에 전달되었으며, 여기서 n은 미세 기둥의 수, a는 미세 기둥 사이의 총 표면적 접촉을 나타낸다. 압력 증폭 구조는 MWCNT 코팅 필름에 증폭된 변형을 유도하여 국부 면의 상당한 변형을 초래할 수 있다[Fig. 2]. 또한 MWCNT 코팅 필름은 탄성 고분자 표면에 형성되어 있기 때문에 반복적인 변형을 민감하게 감지할 수 있다.



[Fig. 2] The principle of the pressure-sensitive MWCNT sensor in a bio-inspired robotic gripper. A. Schematic of bio-inspired robotic gripper. B. The surface of the gripper assembled sensor layer and adhesive layer. C. Principle of reversible pressure-sensitive micropillars



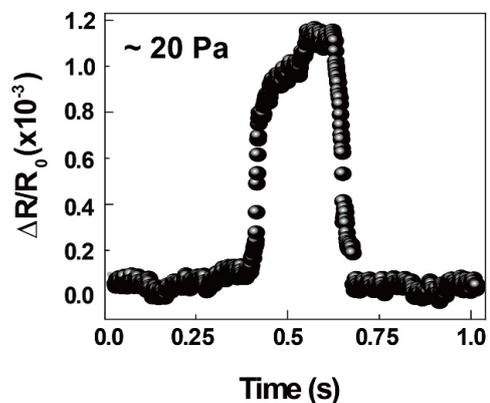
[Fig. 3] Piezoresistive response at statically applied vertical pressure (0.2-20 kPa)

3.2 압력 증폭 구조 기반 압력 센서의 성능 측정

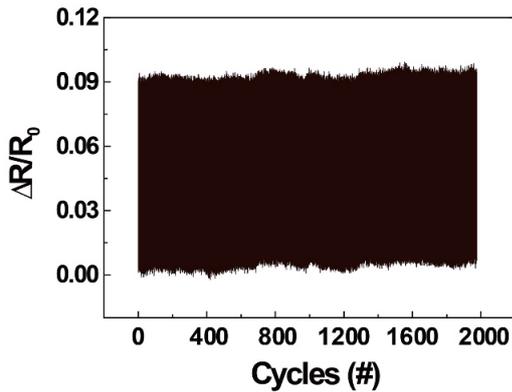
[Fig. 3]은 정적으로 적용된 수직 압력(~0.2-20 kPa)에 대한 저항의 전기적 응답을 보여준다. 압력 증폭 구조가 없으면 센서는 낮은 압력 감도를 나타내며 이는 MWCNT 필름의 변형이 상대적으로 적기 때문이다. 압력 감도(S)는 $(\Delta R/R_0)/P$ 로 정의되며, 여기서 $\Delta R = R - R_0$ 은 압력이 있는 경우와 없는 경우의 저항 차이(P)이므로 감도는 선형을 통해 $\sim 0.0012 \text{ kPa}^{-1}$ 로 측정되었다. 여기에서 우리는 직경 $30 \mu\text{m}$ (간격 길이 $30 \mu\text{m}$)의 육각형 배열을 선택했는데, 그 이유는 국부적인 변형률이 미세 구조의 팁과 가장자리 접촉 영역 사이의 경쟁에 의해 최대화될 수 있기 때문이다²³. 감도는 0.5의 종횡비(AR)에서 0.01 kPa^{-1} (0-6 kPa) 및 0.0002 kPa^{-1} (6-20 kPa^{-1})이며, 1의 종횡비에서 각각 0.016 kPa^{-1} (0-8 kPa) 및 0.0003 kPa^{-1} (8-20 kPa)이다. 여기서 AR은 압력 증폭 구조의 높이/직경 비율이다. 향상된 감도는 압력 증폭 구조의 미세 기둥에 의한 접촉 면적 감소로 인해 상호 작용 압력 증가에 기여한다. MWCNT 필름에 힘이 가해지면 미세기둥은 접촉된 MWCNT 필름에 대한 압력이 높아져 국부 변형이 증가한다. 그 결과 MWCNT 필름에 큰 변형이 가해지면 감도가 향상된다. MWCNT 필름의 센서층은 압력 증폭 구조에 의해 유도된 대부분의 변형을 흡수하며, 이는 압력 증폭 구조의 도입이 효율적인 MWCNT 압력 센서를 생성함을 나타낸다. 압력 증폭 구조 패턴의 적용에서 높은 AR 압력 증폭 구조(~1)를 가진 센서는 압력 증폭 구조가 MWCNT 필름의 변형을 유도하는 넓은 범위 때문에 낮은 AR 압력 증폭 구조(~0.5)를 가진 센서에 비해 높은 감도를 유지하면서 더 넓은 압력 범위를 나타낸다.

3.3 정밀 압력 측정 실험 및 압력 센싱 시스템

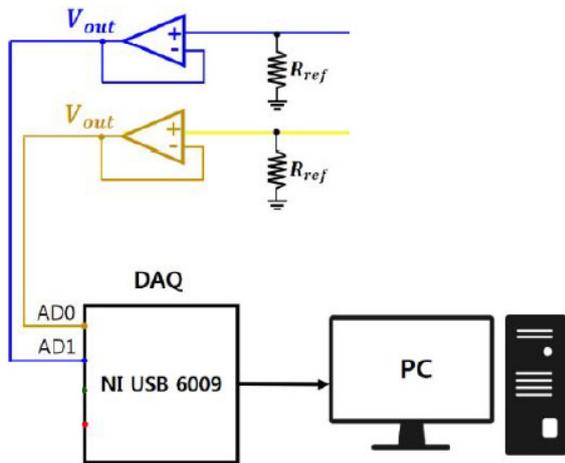
또한 압력 센서는 1 cm^2 에 0.2 g 무게로 극도로 낮은 압력(20 Pa)을 안정적으로 측정할 수 있다[Fig. 4]. 이를 통해, 적은 압



[Fig. 4] An extremely low pressure of ~20 Pa applied as 0.2 g/cm^2 measured by the pressure sensor



[Fig. 5] Repeatable operation of the sensor during 2,000 loading-unloading cycles under the vertical pressure of 2.5 kPa



[Fig. 6] DAQ system that receives 2 channel sensor output signals deposited on the surface of the robotic gripper. Herein, distinct outputs of voltage signals are labeled with two colors (blue, and yellow)

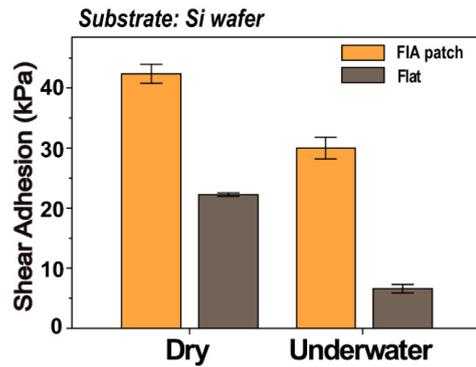
력에서 손상이 될 수 있는 약하거나 부드러운 표면을 파지할 때, 발생하는 미세한 압력 측정이 가능하며, 압력 신호 센싱을 통하여 표면에 가해지는 손상을 최소화할 수 있다.

압력센서의 코팅 특성이 반복적인 물리적 자극에도 특성이 유지되는지 확인하기 위해, 2,000번의 반복적인 압력(~2.5 kPa)을 주었을 때에도 일정한 전기적 특성이 나오는 것을 확인할 수 있었다[Fig. 5].

뿐만 아니라, 파지되는 샘플의 모양이 불규칙적일 경우, 양쪽의 두개의 센서를 통하여 압력이 동시에 측정이 되기 때문에, 특정면에 압력이 물리는 현상이 발생하더라도, 파지 힘을 조절할 수 있도록 센싱을 해주는 시스템으로 구성되어 있다[Fig. 6].

3.4 개구리 발바닥 모사 미세 점착 구조의 점착 성능 분석

개구리 발바닥 모사 미세 육각 구조는 건조 및 습윤 환경에



[Fig. 7] The shear adhesion under dry and wet conditions with and without micropatterned channel structures, on silicon substrate. (n=10)

서 높은 박리 점착력을 가진다. 이는 미세 육각 구조는 균열 전파에 대한 저지 효과를 통해 박리 점착력을 극대화할 수 있기 때문이다. 개구리 발바닥 모양의 미세 채널(w: 200 μm, h: 300 μm, 미세 채널 간격 g: 600 μm)을 형상으로 점착층을 설계하였다^{24,25}. 박리 실험은 평평한 실리콘 웨이퍼에서 샘플이 일정한 속도(v ~ 5 mm/s)로 박리하는 방식으로 점착력을 측정하였다.

웨이퍼에서 미세 채널 구조의 박리 저항 강도는 미세 채널 구조의 가장자리에서 크랙 억제 효과로 인해 향상된다²⁶. 점착 강도는 균열이 시작되는 지점에서 최대 강도에 도달할 때까지 증가한다. 그 후 패치가 완전히 박리될 때까지 균열 전파를 재개하고 저지하는 반복으로 강도가 유지된다. 미세 채널 구조가 있는 패치 센서의 결과 전단 점착력은 건조 환경에서 ~42 kPa, 수중환경에서 ~30 kPa로, 미세 채널 구조가 없는 구조(건조환경 ~22 kPa, 수중환경 7 kPa) 보다 높은 점착력을 가진다[Fig. 7].

이러한 높은 전단 점착력은 균열 재초기화의 응력이 균열 전파의 응력보다 높기 때문에 박리 강도의 향상을 가져오고, 균열 전파의 저지에 기인할 수 있기 때문이다²⁶.

4. 결론

본 연구에서는 로봇 그리퍼 표면에 높은 점착력을 가지는 개구리 모사 미세 점착 구조를 도입하여 거칠거나 젖은 표면에서도 높은 점착력을 가진다. 또한, MWCNT 기반 센서층에 압력 증폭 구조를 도입하여, 약 20 Pa의 미세한 압력을 감지할 수 있을 뿐만 아니라, 압력 증폭 구조가 없는 센서와 비교하여 약 9배의 높은 센서 성능 향상을 보였다. 그리고, 압력 센싱을 통해 파지 힘을 조절하여 부드럽고 약한 표면 파지가 가능하게 하였다. 불규칙한 모양의 샘플일 경우에도, 양쪽의 두개의 센서로 압력이 동시에 측정하여 특정면에 물리는 압력을 측정

할 수 있다. 로봇 그리퍼에 적용한 이러한 센싱 및 접촉층을 활용하면, 파지 힘을 조절할 수 있도록 센싱을 해주는 시스템을 통해 민감하고 정밀한 샘플 표면을 손상하지 않고도 이송이 가능하기 때문에 다양한 로봇 그리핑 시스템에 활용할 수 있을 것이다.

References

- [1] A. Ghosh, C. Yoon, F. Ongaro, S. Scheggi, F. M. Selaru, S. Misra, and D. H. Gracias, "Stimuli-responsive soft untethered grippers for drug delivery and robotic surgery," *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2017, DOI: 10.3389/fmech.2017.00007.
- [2] S. Baik, H. J. Lee, D. W. Kim, J. W. Kim, Y. Lee, and C. Pang, "Bioinspired adhesive architectures: from skin patch to integrated bioelectronics," *Advanced Materials*, vol. 31, no. 34, 2019, DOI: 10.1002/adma.201803309.
- [3] G. Huber, H. Mantz, R. Spolenak, K. Mecke, K. Jacobs, S. N. Gorb, and E. Arzt, "Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements," *National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 102, no. 45, 2005, DOI: 10.1073/pnas.0506328102.
- [4] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, and H. Shea, "Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators," *Advanced Materials*, vol. 28, no. 2, 2016, DOI: 10.1002/adma.201504264.
- [5] S. Licht, E. Collins, M. L. Mendes, and C. Baxter, "Stronger at depth: Jamming grippers as deep sea sampling tools," *Soft Robotics*, vol. 4, no. 4, 2017, DOI: 10.1089/soro.2017.0028.
- [6] Z. E. Teoh, B. T. Phillips, K. P. Becker, G. Whittredge, J. C. Weaver, C. Hoberman, D. F. Gruber, and R. J. Wood, "Rotary-actuated folding polyhedrons for midwater investigation of delicate marine organisms," *Science Robotics*, vol. 3, no. 20, 2018, DOI: 10.1126/scirobotics.aat5276.
- [7] N. R. Sinatra, C. B. Teeple, D. M. Vogt, K. K. Parker, D. F. Gruber, and R. J. Wood, "Ultragentle manipulation of delicate structures using a soft robotic gripper," *Science Robotics*, vol. 4, no. 33, 2019, DOI: 10.1126/scirobotics.aax5425.
- [8] Y. Wang, X. Yang, Y. Chen, D. K. Wainwright, C. P. Kenaley, Z. Gong, Z. Liu, H. Liu, J. Guan, T. Wang, J. C. Weaver, R. J. Wood, and L. Wen, "A biorobotic adhesive disc for underwater hitchhiking inspired by the remora suckerfish," *Science Robotics*, vol. 2, no. 10, 2017, DOI: 10.1126/scirobotics.aan8072.
- [9] C. Pang, J. H. Koo, A. Nguyen, J. M. Caves, M.-G. Kim, A. Chortos, K. Kim, P. J. Wang, J. B.-H. Tok, and Z. Bao, "Highly skin-conformal microhairy sensor for pulse signal amplification," *Advanced Materials*, vol. 27, no. 4, 2014, DOI: 10.1002/adma.201403807.
- [10] H. J. Lee, S. Baik, G. W. Hwang, J. H. Song, D. W. Kim, B. Park, H. Min, J. K. Kim, J. Koh, T.-H. Yang, and C. Pang, "An Electronically Perceptive Bioinspired Soft Wet-Adhesion Actuator with Carbon Nanotube-Based Strain Sensors," *ACS Nano*, vol. 15, no. 9, 2021, DOI: 10.1021/acsnano.1c05130.
- [11] S. Y. Kim, S. Park, H. W. Park, D. H. Park, Y. Jeong, and D. H. Kim, "Highly sensitive and multimodal all-carbon skin sensors capable of simultaneously detecting tactile and biological stimuli," *Advanced Materials*, vol. 27, no. 28, 2015, DOI: 10.1002/adma.201501408.
- [12] T. Kim, J. Park, J. Sohn, D. Cho, and S. Jeon, "Bioinspired, highly stretchable, and conductive dry adhesives based on 1D-2D hybrid carbon nanocomposites for all-in-one ECG electrodes," *ACS Nano*, vol. 10, no. 4, 2016, DOI: 10.1021/acsnano.6b01355.
- [13] C. Pang, G.-Y. Lee, T. Kim, S. M. Kim, H. N. Kim, S.-H. Ahn, and K.-Y. Suh, "A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibers," *Nature Materials*, vol. 11, 2012, DOI: 10.1038/nmat3380.
- [14] S. Sethi, L. Ge, L. Ci, P. M. Ajayan, and A. Dhinojwala, "Gecko-inspired carbon nanotube-based self-cleaning adhesives," *Nano Letters*, vol. 8, no. 3, 2008, DOI: 10.1021/nl0727765.
- [15] S. Hu, Z. Xia, and X. Gao, "Strong adhesion and friction coupling in hierarchical carbon nanotube arrays for dry adhesive applications," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 4, no. 4, 2012, DOI: 10.1021/am201796k.
- [16] D. Brodoceanu, C. T. Bauer, E. Kroner, E. Arzt, and T. Kraus, "Hierarchical bioinspired adhesive surfaces—a review," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 11, no. 5, 2016, DOI: 10.1088/1748-3190/11/5/051001.
- [17] L. F. Boesel, C. Greiner, E. Arzt, and A. del Campo, "Gecko-inspired surfaces: a path to strong and reversible dry adhesives," *Advanced Materials*, vol. 22, no. 19, 2010, DOI: 10.1002/adma.200903200.
- [18] G. Huber, H. Mantz, R. Spolenak, K. Mecke, K. Jacobs, S. N. Gorb, and E. Arzt, "Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements," *National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 102, no. 45, 2005, DOI: 10.1073/pnas.0506328102.
- [19] S. Baik, D. W. Kim, Y. Park, T.-J. Lee, S. H. Bhang, and C. Pang, "A wet-tolerant adhesive patch inspired by protuberances in suction cups of octopi," *Nature*, vol. 546, 2017, DOI: 10.1038/nature22382.
- [20] L. Xue, B. Sanz, A. Luo, K. T. Turner, X. Wang, D. Tan, R. Zhang, H. Du, M. Steinhart, C. Mijangos, M. Guttman, M. Kappl, and A. del Campo, "Hybrid surface patterns mimicking the design of the adhesive toe pad of tree frog," *ACS Nano*, vol. 11, no. 10, 2017, DOI: 10.1021/acsnano.7b04994.
- [21] P. Rao, T. L. Sun, L. Chen, R. Takahashi, G. Shinohara, H. Guo, D. R. King, T. Kurokawa, and J. P. Gong, "Tough Hydrogels with Fast, Strong, and Reversible Underwater Adhesion Based on a Multiscale Design," *Advanced Materials*, vol. 30, no. 32, 2018, DOI: 10.1002/adma.201801884.
- [22] J. Iturri, L. Xue, M. Kappl, L. G.-Fernández, W. J. P. Barnes, H.-J. Butt, and A. del Campo, "Torrent frog-inspired adhesives: attachment to flooded surfaces," *Advanced Materials*, vol. 25, no. 10, 2015, DOI: 10.1002/adfm.201403751.

- [23] S. Chun, Y. Choi, D. I. Suh, G. Y. Bae, S. Hyun, and W. Park, "A tactile sensor using single layer graphene for surface texture recognition," *Nanoscale*, vol. 29, 2017, DOI: 10.1039/C7NR03748A.
- [24] J. K. A. Langowski, D. Dodou, M. Kamperman, and J. L. van Leeuwen, "Tree frog attachment: mechanisms, challenges, and perspectives," *Frontiers in Zoology*, vol. 15, no. 32, 2018, DOI: 10.1186/s12983-018-0273-x.
- [25] D. W. Kim, S. Baik, H. Min, S. Chun, H. J. Lee, K. H. Kim, J. Y. Lee, and C. Pang, "Highly permeable skin patch with conductive hierarchical architectures inspired by amphibians and octopi for omnidirectionally enhanced wet adhesion," *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 13, 2019, DOI: 10.1002/adfm.201807614.
- [26] A. Majumder, A. Ghatak, and A. Sharma, "Microfluidic adhesion induced by subsurface microstructures," *Science*, vol. 318, no. 5848, 2007, DOI: 10.1126/science.1145839.



김 다 완

2016 성균관대학교 화학공학/고분자공학부 (공학사)

2022 성균관대학교 화학공학과(공학박사)

2022~현재 성균관대학교 화학공학과 (박사후연구원)

2022~현재 성균관대학교 전자전기공학과 (박사후연구원)

2022~현재 한국표준과학연구원(객원연구원)

관심분야: 바이오-의료 로봇, 고분자기반 센서 및 액추에이터, 생체모사 공학