

# 촉감 피드백을 위한 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터 연구 개발

## HASEL Actuator Study for Tactile Feedback Device

송가혜<sup>†</sup>  
Kahye Song<sup>†</sup>

**Abstract:** Attempts are being made to provide various tactile feedbacks to user. In particular, a variety of soft actuators are being inserted into the tactile feedback device to give a more flexible, soft and strong stimulation. In this study, a basic study was performed to utilize a hydraulically amplified self-healing electrostatic (HASEL) actuator as a tactile feedback actuator. The HASEL actuator showed great displacement and force with a simple circuit configuration. In particular, by making the actuator in a circular shape, the angle was reduced and the electrode was arranged in a ring shape to maximize the displacement of the central part. As a result, the HASEL actuator showed a displacement difference according to the input waveform. In addition, in order to use it safely as an actuator for tactile feedback, we covered the surface with silicone and confirmed that the actuator works well. Using these actuators, it will be possible to manufacture a lightweight, portable tactile feedback device.

**Keywords:** Soft Robotics, Hydraulically Amplified Self-Healing Electrostatic Actuator (HASEL Actuator)

### 1. 서 론

가상 현실(VR)을 직접 체험하고 느끼기 위해 VR과 현실 세계를 잇는 다양한 기술이 개발되었다<sup>1-4</sup>. 특히 촉각 피드백을 위해 다양한 액추에이터가 개발 및 응용되었다<sup>5-7</sup>. 기계적 자극을 제공하는 액추에이터는 물리적 촉감을 정확하게 재현할 수 있기 때문에 일반적으로 사용된다<sup>8</sup>. 기계적 자극을 제공하는 액추에이터는 주로 휴대폰과 호출기에 적용되며 물체의 접촉력, 질감 및 거칠기에 대한 정보를 제공 할 수 있다. 그러나 진동 촉각 자극 및 측면 변형 자극의 주요 한계는 액추에이터가 물체의 실제 표면 모양에 대한 정보를 제공 할 수 없다는 것이다<sup>9</sup>. 또한 대형 시스템이 필요한 기계식 액추에이터는 무게와 휴대성 측면에서 문제가 있다<sup>10</sup>.

때문에 부드럽고 유연한 촉각 피드백을 제공하는 소프트 액추에이터는 이러한 문제를 해결하는 대안이 될 수 있다<sup>11-15</sup>. 소프트 액추에이터는 가벼운 무게와 유연성을 포함하여

다양한 기능적 이점을 가지고 있다. 소프트 액추에이터는 일반적으로 유연한 재료로 만들어지기 때문에 변형 밀도가 높고 원하는 모양에 따라 쉽게 제작할 수 있다<sup>16,17</sup>. 또한 상대적으로 간단한 메커니즘을 가진 유연한 액추에이터는 여러 높은 자유도의 동작을 수행한다<sup>18-21</sup>.

그 장점으로 인해 소프트 액추에이터는 의료 및 웨어러블 애플리케이션을 포함한 다양한 분야에서 이미 활용되었다<sup>11,17</sup>. 따라서 본 연구에서는 촉각 피드백을 위해 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터를 연구하였다.

기존 소프트 액추에이터는 강도가 약하고 응답 속도가 느린 문제가 있어 강력하고 고속이며 효율적이며 견고한 소프트 트랜스듀서에 대한 필요성이 강조되었다<sup>22</sup>. 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터는 고성능, 다목적, 근육 모방 소프트 트랜스듀서로써 이러한 문제를 해결할 수 있는 액추에이터로 부상하였다<sup>23</sup>. 이 액추에이터는 전자 유압 메커니즘을 활용하여 부드러운 유체 액추에이터의 다기능성과 유전체 엘라스토머 액추에이터의 근육과 같은 성능 및 자체 감지 기능을 결합하여 모든 부드러운 유체 구조를 활성화하였다. 채널 시스템을 통한 유체 수송으로 인해 비효율성과 손실이 발생하는 소프트 유체 액추에이터와 달리 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터는 소프트 구조 전체에 분포된 액체 유전체에 작

Received : Nov. 4. 2020; Revised : Nov. 26. 2020; Accepted : Nov. 27. 2020

\* This work was supported in part by Korea Institute of Science and Technology Institutional Program under grant number 2K02580

† Senior Researcher, Corresponding author: Center for Intelligent & Interactive Robotics KIST, Seoul, Korea (k.song@kist.re.kr)

용하는 정전기력을 통해 국지적으로 유압을 생성한다. 또한 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터에 액체 유전체를 사용하면 유전체에 breakdown 문제가 생기더라도 즉시 기능을 복구하여 자가 치유가 가능하다.

본 연구에서는 이러한 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터를 검증함으로써 훗날 촉감 피드백을 위한 디바이스에 적용해보고자 한다.

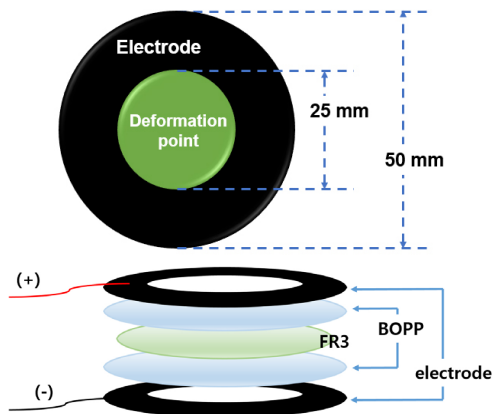
## 2. 실험 방법 및 재료

### 2.1 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터 제작

원형 HASEL actuator를 제작하기 위하여 지름 50 mm 크기의 원형 본을 제작하였다. 두 장의 Biaxially Oriented Polypropylene (BOPP) 사이에 미리 제작해둔 원형 본을 삽입한 후 열 프레스기(DK20SP, Geo Knight & Co, INC, USA)를 이용하여 약간의 틈을 두고 접착하였다. BOPP film 양표면에 링 형태로 카본 페인트(DAG-T-502, Ted Pella, USA)를 칠하여 전극을 형성하였다[Fig. 1]. 틈 사이로 유전 유체(FR3, Cargill, USA)를 주입하였다. 마지막으로 열 프레스기를 활용하여 봉합해 주었다.

### 2.2 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터 실험 셋업 및 검증

6kV의 출력을 제공하는 고전압 컨버터(AGH 60P-5, XP Power, Singapore)가 액추에이터 작동에 사용되었다. 고전압 컨버터는 전원 공급 장치(MK3003P, MK power, 한국)에 연결되었고 제어 핀은 구형파를 출력 할 수 있는 파형 발생기(33500Bseries, Keysight Technologies, USA)에 연결되었다. 방



[Fig. 1] Schematic for HASEL actuator: The HASEL actuator consists of a deformation point where the shape is deformed and a ring-shaped electrode where a potential difference occurs. The total diameter of the actuator is 50 mm and the diameter of the deformation point is 25 mm

전을 위해 이 컨버터의 출력 핀 사이에 저항(50 MΩ, Ohmite, USA)을 연결했다. 고전압 컨버터의 (+) 및 (-) 포트는 액추에이터 각면에 부착된 구리 테이프와 각각 연결되었다.

액추에이터의 움직임은 고속 포인트 레이저 스캐너(IL-100, Keyence, Japan)로 실시간으로 감지되었으며 데이터는 초당 1000 개씩 수집되었다.

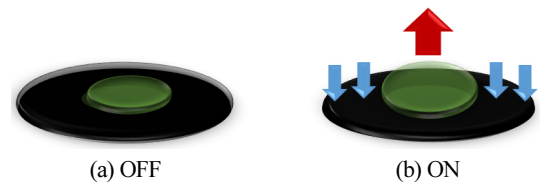
## 3. 실험 결과

### 3.1 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터 매커니즘

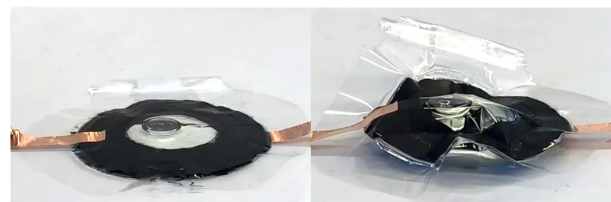
액추에이터는 정전기 인력이 작용하는 링 전극 부분과 변형 부분인 중앙 부분으로 나눌 수 있다. 링 전극에 다른 극성 전압이 적용되면 링 전극은 정전기 인력에 의해 서로 달라 붙는다[Fig. 2]. 액추에이터가 밀봉되어 있기 때문에 링 전극 부분에 분포되어 있던 오일이 중앙으로 이동하게 되고 중앙 변형 지점의 높이가 팽창한다.

### 3.2 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터 동작

본 연구에서는 5 ml의 유전 유체를 주입한 후 6 kV의 전압을 인가해 주었다. 초기의 유체 주입시 두께는 가장 두꺼운 부분을 중심으로 약 2.5 mm에 달하였다. 전원이 인가 됨에 따라 두 링 전극은 서로 달라붙게 되고 유전 유체가 중앙으로 이동하였다[Fig. 3]. 본 액추에이터의 특성을 알아보기 위하여 다양한 파형과 주기의 실험을 수행하였다.



[Fig. 2] Schematic for HASEL actuator mechanism: When different polarity voltages are applied to the ring electrodes, the ring electrodes stick together by electrostatic attraction. As the actuator is sealed, the oil in the ring electrode moves to the center, and the central deformation point rises upward



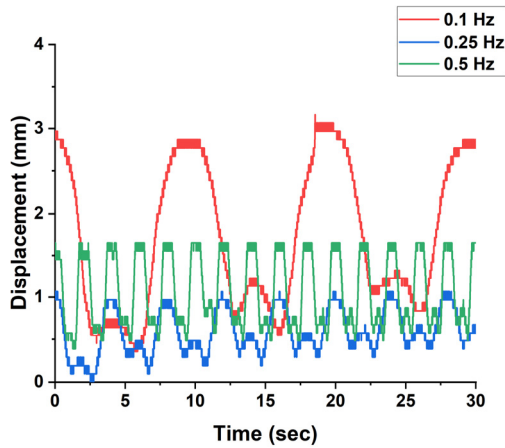
[Fig. 3] Ring shaped HASEL actuator operation: The on (a) and off (b) state of the actuator. When different polarity voltages are applied to the ring electrodes, the central deformation point rises upward

### 3.2.1 다양한 주기의 사인파 반응 실험

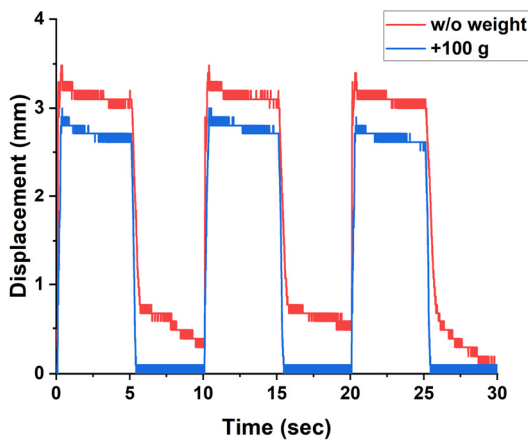
우리는 6 kV의 전압을 0.1 Hz, 0.25 Hz, 0.5 Hz의 사인파 형태로 액추에이터에 공급하였다. 액추에이터의 피크 값은 입력 전원의 피크 값의 주기에 맞추어 주기적으로 증가하였으며 공급 전압이 줄어들면 피크 값도 함께 줄어드는 양상을 보였다 [Fig. 4]. 각각의 주파수에서 액추에이터의 변위는 사인의 모습을 보였으며 특히 0.1 Hz의 느린 주파수에서는 더 사인에 잘 부합하는 모습이 보였다. 다만 모든 파형에서 완벽히 이전의 상태로 모양이 복원되지 않았다.

### 3.2.2 무게 증량 및 사각파에서의 액추에이터 반응 실험

6 kV의 전압을 0.1 Hz의 사각파 형태로 액추에이터에 공급하였다. 액추에이터의 피크 값은 입력 전원의 피크 값의 주기에 맞추어 주기적으로 증가 혹은 감소하였다 [Fig. 5]. 액추에이



[Fig. 4] Peak displacement according to sine waves of various frequency: When the 6 kV of voltage was applied in the form of a sine wave of 0.1Hz, 0.25 Hz, and 0.5 Hz, the actuator showed a difference in displacement



[Fig. 5] Peak displacement according to weight: The 6 kV of voltage was applied in the form of a square wave of 0.1 Hz. The actuator showed a difference in displacement depending on weight

터는 ON 상태에서 일정 높이에서 변형이 잘 유지 되었으며 사인파에 비하여 약 0.5mm 더 큰 변위를 보였다.

한편 액추에이터의 위에 100 g의 무게추를 올려 두고 같은 사각파 입력 실험을 수행하였다. 액추에이터는 무게추가 올라간 상태에서 약 0.5 mm의 변위가 줄어들음을 확인할 수 있었으나 무게추의 무게 덕분에 완벽한 형태 복구를 보였다. 또한 무게추의 무게에도 불구하고 사각파의 입력 전압에 따라 변위가 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 500 g의 무게추를 올려둔 상태에서도 액추에이터가 잘 움직일 수 있음을 확인하였다.

### 3.2.3 무게가 증량된 액추에이터의 인가 전압별 반응 실험

6 kV와 7.5 kV의 전압을 0.1 Hz의 사각파 형태로 액추에이터에 공급하였다. 액추에이터의 피크 값은 입력 전원의 피크 값의 주기에 맞추어 주기적으로 증가 혹은 감소하였다. 액추에이터에 공급되는 전압의 크기가 25% 증가함에 따라 변위차는 약 0.6 mm 증가하였다 [Fig. 6].

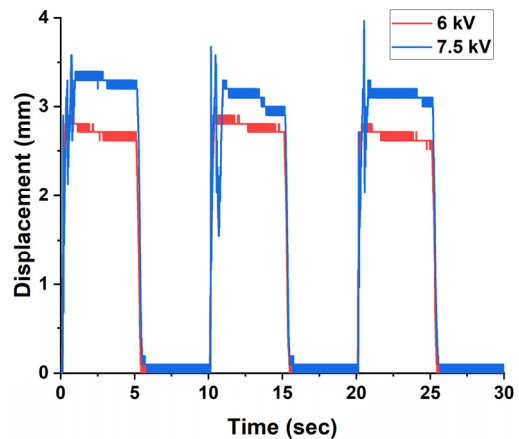
이는 전압이 증가함에 따라 전압차가 증가하였고 이에 따라 정전기적 인력이 증가하였기 때문으로 설명할 수 있다 [24,25].

$$F = qE = \frac{A\epsilon_0}{2d^2} (\Delta V)^2 \quad (1)$$

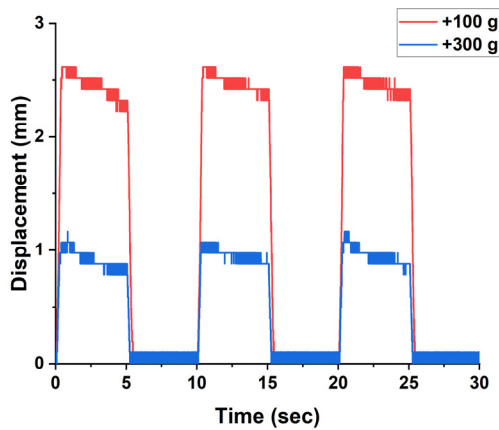
이 식에 따르면 정전기적 인력은 전압 차이의 제곱에 비례하며 때문에 25%의 증가는 정전기적 인력이 약 64% 증가하였다고 볼 수 있다.

### 3.2.4 실리콘으로 커버된 액추에이터의 증량별 반응 실험

한편 본 연구는 액추에이터를 활용하여 촉감피드백을 주기



[Fig. 6] Peak displacement according to voltage difference: The 6 and 7.5 kV of voltages were applied in the form of a square wave of 0.1 Hz. The actuator with 100g of weight showed a difference in displacement depending on voltage magnitude



[Fig. 7] Silicone covered actuator peak displacement according to weight: The 6 kV of voltage was applied in the form of a square wave of 0.1 Hz. The actuator showed a difference in displacement depending on different weights

위한 기초 연구로써 사용자가 액추에이터의 고전압에 감전되는 것을 방지하는 것이 매우 중요하다. 따라서 우리는 액추에이터의 표면을 실리콘(Ecoflex 0030, Smooth-On, Inc., USA)으로 커버하였다. 실리콘이 감전을 막아주는 데는 효과가 있지만 실리콘이 가진 탄성이 액추에이터의 움직임을 방해한다. 그 효과를 알아보기 위하여 실험을 진행하였다.

실리콘으로 커버된 액추에이터의 효과를 알아보기 위하여 우리는 액추에이터 상단에 100 g짜리 추를 올려두었다. 실리콘이 없을 때 비하여 액추에이터의 피크 변위차는 줄어들었으나 사각파에 의해 변위가 잘 이루어짐을 확인 하였다 [Fig. 7].

또한 추의 무게를 300 g으로 증량한 이후에도 1 mm 이상의 변위가 발생하였으며 입력 파형인 사각파에 맞추어 잘 움직이는 것을 확인하였다.

#### 4. 결론 및 토론

본 연구에서는 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터를 촉감 피드백 액추에이터로 활용하기 위한 기반 연구를 수행하였다. 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터는 단순한 회로 구성만으로도 큰 변위차와 힘을 보여주었다. 특히 액추에이터의 원형으로 제작함으로써 각을 줄이고 링 모양으로 전극을 배치함으로써 중심 부위의 변위를 최대화 하고자 하였다. 그 결과 500 g의 무게 추에서도 액추에이터가 잘 동작함을 확인 하였다. 이러한 단순한 회로 구성과 큰 출력은 추후 액추에이터를 포함한 휴대용 디바이스 장치를 제작하는데도 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

또한 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터는 입력하는

파형에 맞추어 변위차를 보여주었으며 더 세밀한 장비를 통해 빠른 주파수의 전압을 인가해 주어도 섬세한 반응을 보여주리라 기대한다.

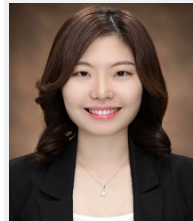
한편 유압증폭자기치유형 정전식 액추에이터를 촉감 피드백 장치로 활용하는데 가장 문제가 될 수 있는 것이 고전압을 활용한다는 것이다. 건강에 더 큰 문제가 되는 것은 전압이 아닌 전류이나 그럼에도 큰 전압을 활용하는 데에는 섬세한 주의가 필요하다. 따라서 우리는 그 표면을 실리콘으로 커버하였고 그럼에도 액추에이터는 잘 동작함을 확인하였다.

이러한 액추에이터를 활용하면 경량의 휴대용 촉감 피드백 용 디바이스를 제작해 볼 수 있을 것이다.

#### References

- [1] W. R. Sherman and A. B. Craig, *Understanding virtual reality: Interface, application, and design*, 1<sup>st</sup> ed., Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2002, [Online], <https://www.amazon.com/Understanding-Virtual-Reality-Interface-Application/dp/1558603530>.
- [2] K. Song, S. H. Kim, S. Jin, S. Kim, S. Lee, J.-S. Kim, J.-M. Park, and Y. Cha, "Pneumatic actuator and flexible piezoelectric sensor for soft virtual reality glove system," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1-8, 2019, DOI: 10.1038/s41598-019-45422-6.
- [3] M. Kim, C. Jeon, and J. Kim, "A study on immersion and presence of a portable hand haptic system for immersive virtual reality," *Sensors*, vol. 17, no. 5, pp. 1141, 2017, DOI: 10.3390/s17051141.
- [4] D. Pyo, S. Ryu, B.-K. Han, and D.-S. Kwon, "Development of a New Miniature Actuator providing both Kinesthetic and Vibrotactile Feedback for Haptic Interface," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 8, no. 3, pp. 143-149, Sept., 2013, DOI: 10.7746/jkros.2013.8.3.143.
- [5] T. Hachisu and M. Fukumoto, "SpiroSurface: A Repulsive and Attractive Force Display for Interactive Tabletops Using a Pneumatic System," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 54-70, 2018, DOI: 10.1109/Mcg.2018.042731659.
- [6] M. Benali-Khoudja, M. Hafez, J.-M. Alexandre, and A. Kheddar, "Tactile interfaces: a state-of-the-art survey," *Int. Symposium on Robotics*, vol. 31, pp. 23-26, 2004, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.105.2158>.
- [7] M. Culjat, C.-H. King, M. Franco, J. Bisley, W. Grundfest, and E. Dutson, "Pneumatic balloon actuators for tactile feedback in robotic surgery," *Industrial Robot*, vol. 35, no. 5, pp. 449-455, 2008, DOI: 10.1108/01439910810893617.
- [8] M. Grunwald, *Human Haptic Perception: Basics and Applications*, 1<sup>st</sup> ed., Birkhäuser Basel, 2008, DOI: 10.1007/978-3-7643-7612-3.
- [9] I. Sarakoglou, N. Garcia-Hernandez, N. G. Tsagarakis, and D. G. Caldwell, "A high performance tactile feedback display and its integration in teleoperation," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 5, no. 3, pp. 252-263, 2012, DOI: 10.1109/TOH.2012.20.

- [10] J. H. Killebrew, S. J. Bensaïa, J. F. Dammann, P. Denchev, S. S. Hsiao, J. C. Craig, and K. O. Johnson, "A dense array stimulator to generate arbitrary spatio-temporal tactile stimuli," *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 161, no. 1, pp. 62-74, 2007, DOI: 10.1016/j.jneumeth.2006.10.012.
- [11] H. A. Sonar and J. Paik, "Soft pneumatic actuator skin with piezoelectric sensors for vibrotactile feedback," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 2, 2016, DOI: 10.3389/frobt.2015.00038.
- [12] 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.
- [13] S. Mun, S. Yun, S. Nam, S. K. Park, S. Park, B. J. Park, J. M. Lim, and K.-U. Kyung, "Electro-active polymer based soft tactile interface for wearable devices," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 1, pp. 15-21, 2018, DOI: 10.1109/TOH.2018.2805901.
- [14] R. K. Cheedarala, J.-H. Jeon, C.-D. Kee, and I.-K. Oh, "Bio-Inspired All-Organic Soft Actuator Based on a  $\pi$  -  $\pi$  Stacked 3D Ionic Network Membrane and Ultra-Fast Solution Processing," *Advanced Functional Materials*, vol. 24, no. 38, pp. 6005-6015, 2014, DOI: 10.1002/adfm.201401136.
- [15] I. Koo, K. Jung, J. Koo, J.-d. Nam, Y. Lee, and H. R. Choi, "Wearable Tactile Display Based on Soft Actuator," *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006 (ICRA 2006)*, Orlando, FL, USA, 2006, DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642033.
- [16] A. Miriyev, K. Stack, and H. Lipson, "Soft material for soft actuators," *Nature Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 1-8, Sept., 2017, DOI: 10.1038/s41467-017-00685-3.
- [17] J. C. Yeo, H. K. Yap, W. Xi, Z. Wang, C.-H. Yeow, and C. T. Lim, "Flexible and stretchable strain sensing actuator for wearable soft robotic applications," *Adv. Mater. Tech.*, vol. 1, no. 3, 2016, DOI: 10.1002/admt.201600018.
- [18] F. Ilievski, A. D. Mazzeo, R. F. Shepherd, X. Chen, and G. M. Whitesides, "Soft robotics for chemists," *Angew. Chem.*, vol. 123, no. 8, pp. 1930-1935, 2011, DOI: 10.1002/ange.201006464.
- [19] R. V. Martinez, J. L. Branch, C. R. Fish, L. Jin, R. F. Shepherd, R. M. D. Nunes, Z. Suo, and G. M. Whitesides, "Robotic tentacles with three-dimensional mobility based on flexible elastomers," *Advanced Functional Materials*, 2013, DOI: 10.1002/adma.201203002.
- [20] H.-J. Cha and B.-J. Yi, "Design of a new 4-DOF soft finger mechanism," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 3, no. 4, pp. 315-322, Dec., 2008, [Online], <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200823736027649.page>.
- [21] N. Oh, H. Lee, and H. Rodrigue, "Manufacturing 2DOF Inflatable Joint Actuator by Pneumatic Control," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 13, no. 2, pp. 92-96, Jun., 2018, DOI: 10.7746/jkros.2018.13.2.092.
- [22] N. Kellaris, V. G. Venkata, G. M. Smith, S. K. Mitchell, and C. Keplinger, "Peano-HASEL actuators: Muscle-mimetic, electrohydraulic transducers that linearly contract on activation," *Science Robotics*, vol. 3, no. 14, 2018, DOI: 10.1126/scirobotics.aar3276.
- [23] E. Acome, S. K. Mitchell, T. G. Morrissey, M. B. Emmett, C. Benjamin, M. King, M. Radakovitz, and C. Keplinger, "Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance," *Science*, vol. 359, no. 6371, pp. 61-65, 2018, DOI: 10.1126/science.aao6139.
- [24] J. M. Crowley, "Electrostatic fundamentals," *Handbook of Electrostatic Processes*, 1<sup>st</sup> ed., CRC Press, 2018, DOI: 10.1201/9781315214559.
- [25] K. Song, H. Lee, and Y. Cha, "A V-Shaped actuator utilizing electrostatic force," *Actuators*, vol. 7, no. 2, p. 30, 2018, DOI: 10.3390/act7020030.



### 송 가 혜

2017 포항공과대학교 공학박사  
 2019 한국과학기술연구원 박사후 연구원  
 2020 Harvard University Postdoc.  
 2020~ 한국과학기술연구원 선임연구원

관심분야 웨어러블 로봇틱스, 소프트 로봇틱스, 햅틱스, 소프트 액추에이터