

인공근육개발을 위한 소프트 액추에이터 연구

Soft Actuator Development for Artificial Muscle

강경지¹·송가혜[†]

Gyeongji Kang¹, Kahye Song[†]

Abstract: Soft robot research has been actively conducted due to the advantages of soft materials that have less motion restrictions and higher energy efficiency compared to rigid robots. In particular, soft robots are being applied in more and more diverse fields, and the need for soft robots is increasing, especially when dealing with soft or deformable objects that rigid robots cannot perform. Various soft robots are being developed, and studies on artificial muscles with versatility, seamless integration with sensing, and self-healing capabilities are being proposed. In this study, we propose one of the most simple rectangular shaped HASEL (Hydraulically amplified self-healing electrostatic) actuators and compare the performance according to shape deformation such as the size or ratio of actuators and electrodes. Developing these actuators can be used in many ways for artificial muscles in soft robotics.

Keywords: Soft Robotics, Soft Actuator, Electrostatic Actuator, Hydraulic Force

1. 서론

소프트 로보틱스는 의료, 로봇 산업 등에 광범위하게 응용되어 급속도로 부상하고 있는 분야이다¹⁻³. 수년동안 로봇분야의 핵심이 되었던 강체로봇은 단단한 관절 구조로 인해 적응성이 부족하고 섬세한 작업을 하는데 제한적이었던 데에 반해, 소프트 로보틱스는 유연한 재료를 사용하여 복잡한 동작 수행 뿐만 아니라^{4,5} 인체와 직접적으로 상호작용하는 장치에 사용할 수 있다는 강점을 지닌다⁶⁻⁸. 신축성이 있는 재료로 만들어진 소프트 로봇은 적응성이 뛰어나며, 저비용, 다기능성의 이점 또한 지닌다⁹⁻¹¹.

현재 다양한 생체모방 소프트 로봇이 연구되고 있으며^{12,13}, 그 중에서도 자연근육의 다용성과 센싱과의 매끄러운 통합¹⁴, 자가 치유 능력을 복제한 인공근육에 대한 연구가 많은 연구자들의 연구대상이 되어왔다¹⁵. 인공근육과 같은 다양한 작동 모드를 달성하기 위해 정전력과 유압력을 결합하여 우수한

성능과 변형 상태를 스스로 인식하는 능력, 전기적 손상으로 부터 자가 치유하는 능력을 갖춘 인공 근육의 새로운 종류인 HASEL (hydraulically amplified self-healing electrostatic) 액추에이터의 개발이 이루어지고 있다¹⁵⁻¹⁷.

이에 따라 본 논문에서는 기본적인 직사각형 형태의 HASEL 액추에이터 프로토타입을 제작하고, 형태 변형에 따른 성능을 비교하여 인공근육 형태로 응용할 수 있는 소프트 액추에이터를 제안하고자 한다.

다방면으로 활용 가능한 기본적인 액추에이터의 형태와 조건을 찾고자 테스트를 진행하고, 액추에이터 크기, 전극의 비율, 주파수에 변화를 주어 가장 이상적인 변위를 발생시키는 액추에이터의 형태를 찾기 위한 실험을 진행하고자 한다. 본 연구를 통해 쉽고 간단하게 제작할 수 있으면서도, 다방면으로 소프트 로보틱스 분야에서 활용될 수 있는 액추에이터를 개발하고자 한다.

2. 컨셉 디자인

2.1 액추에이터 구조 및 제작

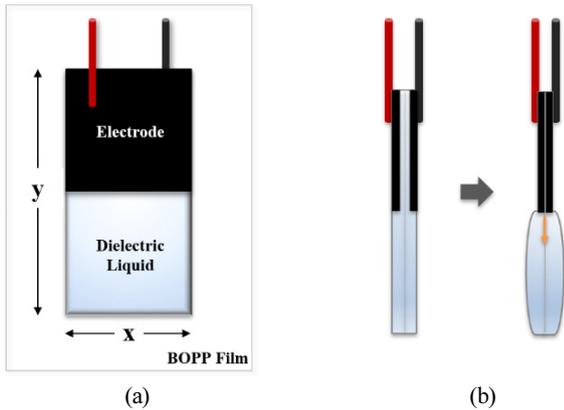
본 소프트 액추에이터는 가장 기본적인 직사각형 형태로, 가로 x (mm)와 세로 y (mm)에 의해 크기가 결정된다[Fig. 1]. 먼저 실험하고자 하는 크기의 직사각형 본을 제작하여 두 장의

Received : Nov. 19. 2020; Revised : Dec. 9. 2020; Accepted : Dec. 28. 2020

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

1. Undergraduate Researcher, Center for Intelligent & Interactive Robotics KIST, Seoul, Korea; Undergraduate Student, Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (t20469@kist.re.kr)

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



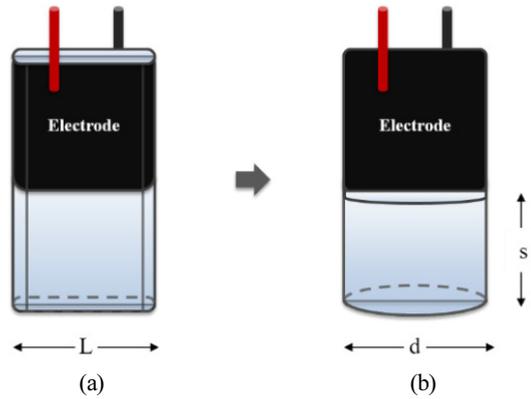
[Fig. 1] Schematic for rectangular shape HASEL soft actuator: (a) front side view, (b) operation from side view

Biaxially Oriented Polypropylene (BOPP) 필름 사이에 넣고, 주 입구를 제외한 부분을 열프레스기 (HP3805, XINHONGMECH & ELEC CO, LTD, CHINA)로 접착하였다. 해당 본을 제거한 후, 내부에는 액추에이터를 가득 채울 수 있는 부피의 50%에 해당하는 유전 유체(TSF451-50E, TOSHIBA, JAPAN)를 마이크로 피펫으로 주입하였다. BOPP 필름의 양쪽 면에는 전도성 양면 카본 테이프를 부착하여 전극을 형성하였고, 이때 전극의 크기는 액추에이터 크기의 50%로 설정하였다. 또한, 각각의 전극에는 전원을 공급할 (+), (-) 전선을 연결함으로써 유전체에 정전기력이 작용하면 그에 따라 발생하는 유압을 통해 팽창하도록 설계하였다. 마지막으로 유전체가 새어 나오지 못하도록 접착한 BOPP 필름은 접합부로부터 약 1 mm의 여유를 주었고, 쇼트를 방지하기 위해 전극이 부착된 양면에는 BOPP 필름을 한 장씩 더 부착하였다. 본 실험은 액추에이터의 x와 y의 길이를 달리하여 총 7개의 샘플 타입을 제작하여 진행하였다.

2.2 액추에이터 작동원리

액추에이터 내에 유전 유체를 채우고 양전극에 각각 (+), (-) 극을 연결하여 전압을 인가하면 맥스웰 변형력에 의해 지평되면서 전극 부분이 수축하고, 두 전극 사이에 위치하던 액체 유전체가 반대영역으로 흐르면서 유압에 의해 팽창하게 된다. 이때, E. Acome et al.(2018)이 작성한 이전 논문에 따르면, 액추에이터가 정전기력을 받아 최대 팽창했을 때의 형태가 원기둥이 된다. 그 가정에 따라 부피를 계산하였고[Fig. 2]^[16,17], 해당 부피의 50%에 해당하는 양의 유전체 액체를 주입하여 실험을 진행하였다[Table 1].

액추에이터가 팽창하기 전 초기상태의 가로 길이를 L, 팽창 후 전극이 부착된 면적을 제외한 즉, 액추에이터 전체 길이의 절반에 해당하는 세로 길이를 s라 한다. 이때, 액추에이터가



[Fig. 2] Concept of calculating volume of expansion part of HASEL actuator: (a) pre-expansion condition, (b) post-expansion condition

[Table 1] Required dielectric liquid amount for volume (Vc) change

L (mm)	s (mm)	d (mm)	Vc (ml)	0.5 Vc (ml)
10	5	6.4	0.2	0.1
10	10	6.4	0.3	0.2
10	20	6.4	0.6	0.3
20	5	12.7	0.6	0.3
20	10	12.7	1.3	0.7
20	20	12.7	2.5	1.3
40	20	25.5	10.2	5.1

정전기력을 받아 최대 팽창했을 때의 원기둥 지름을 d라 하고, 다음과 같이 구한다.

$$d = \frac{2L}{\pi} \tag{1}$$

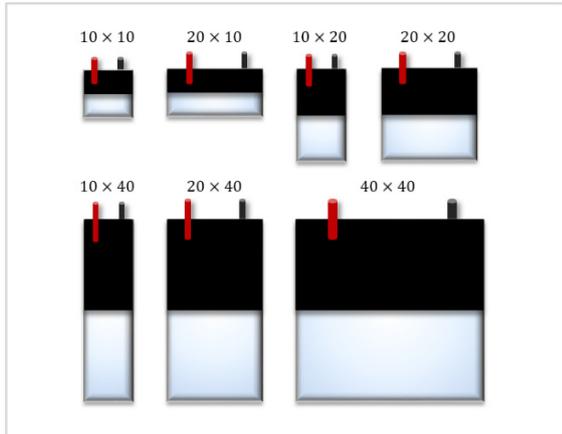
한편 최대 팽창하기 위해 필요한 유전체의 양(Vc)을 구하는 식은 식 (2)와 같다.

$$V_c = \frac{\pi d^2}{4} \times s \tag{2}$$

3. 실험 및 결과

3.1 실험 방법

전원 공급 장치(MK3003P, MKPOWER, 한국)로 고전압 컨버터(AGH60P-5, XPPower, Singapore)에 5 V를 인가 하고, 최종적으로 6 kV의 전압을 출력시켜 액추에이터를 작동시켰다. 과형 발생기(UTG1005A, UNI-T, CHINA)를 이용하여 1 Hz, 2 Hz 두 가지 주파수의 사각파를 입력하였고, 액추에이터 양쪽



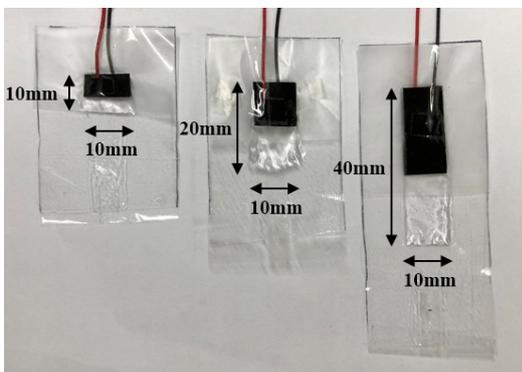
[Fig. 3] 7 types of HASEL actuator prototypes

면의 전극에 고전압 컨버터의 (+), (-) 단자를 각각 연결하여 전원을 공급하였다. 마지막으로, 포인터 레이저 센서(IL-100, Keyence, Japan)를 이용하여 액추에이터의 변위 변화량 측정을 통해 데이터를 얻었다.

전체 액추에이터의 크기 대비 전극의 비율은 50%로 동일하게 유지하고, 가로(x)와 세로(y)길이에 변화를 주며 총 7가지 형태의 액추에이터에 대한 변위 변화 반응 실험을 하였다. 액추에이터 크기는 가로 $x = 10$ mm를 기준으로 설정하고, $x:y = 1:1, 1:2, 1:4, 2:1, 2:2, 2:4, 4:4$ 비율로 액추에이터를 설계하였다. 이에 따라 각각 액추에이터 크기의 50%에 해당하는 크기를 전극 크기로 설정하여 실험을 진행하였다[Fig. 3].

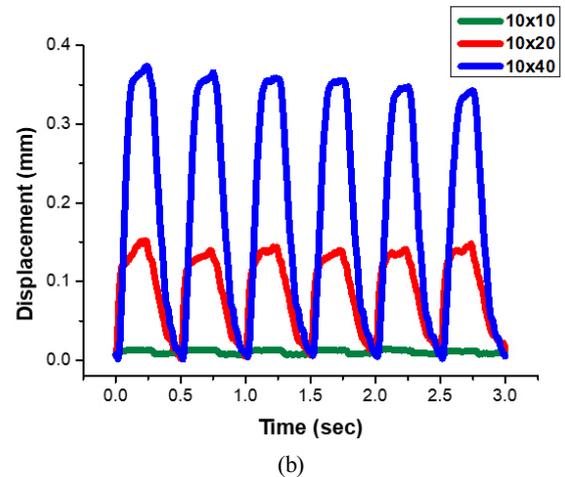
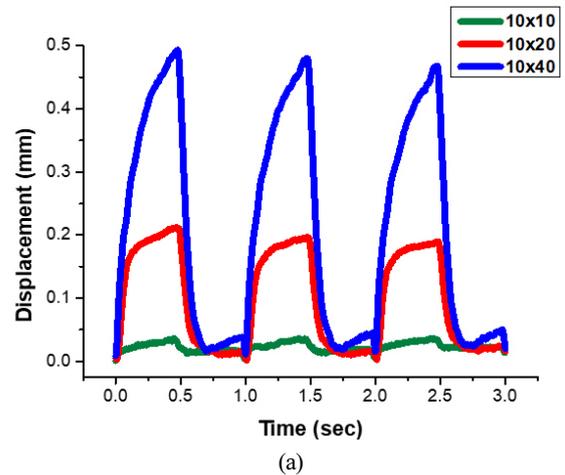
3.2 전극 세로 길이 변화에 따른 반응 실험

액추에이터의 세로 길이와 변위의 상관관계를 확인해보고자 액추에이터의 가로 길이 x 는 10 mm로 동일하게 설정하고, 세로 길이 y 를 10 mm, 20 mm, 40 mm로 2배씩 늘려가며 실험을 진행하였다[Fig. 4].

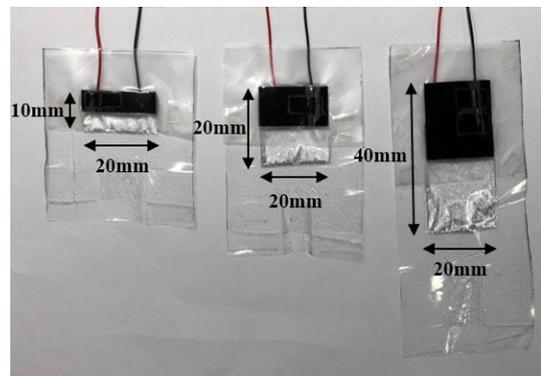


[Fig. 4] HASEL actuator prototypes with different vertical length: 10 × 10 mm, 10 × 20 mm, 10 × 40 mm

6 kV의 전압을 1 Hz, 2 Hz의 사각파 형태로 액추에이터에 인가하였고, 액추에이터의 크기와 형태에 상관없이 동일한 파형의 주기에 맞춰 일정하게 peak값에 도달하였다[Fig. 5]. 전극의 세로 길이와 넓이가 일정하게 2배씩 증가하지만, 이와 달리 peak값은 2배로 동일하게 증가하지 않는 것을 확인했다.



[Fig. 5] Peak displacement for $x = 10$ mm according to square wave: (a) 1 Hz, (b) 2 Hz

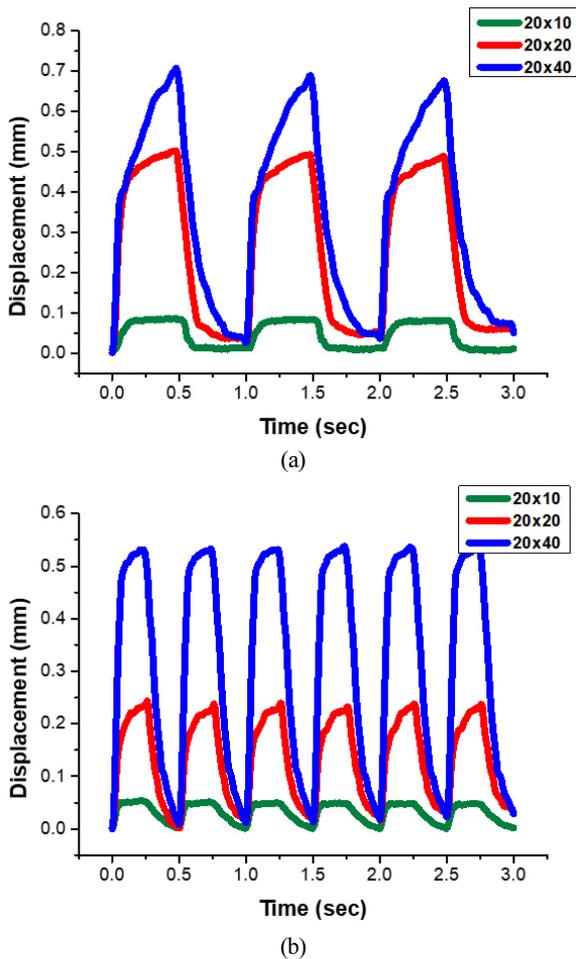


[Fig. 6] HASEL actuator prototypes with different vertical length: 20 × 10 mm, 20 × 20 mm, 20 × 40 mm

1 Hz의 경우, $y = 10\text{ mm}$ 와 20 mm 간의 변화량은 약 5.5배가 발생했고 20 mm 와 40 mm 의 경우 약 2.3배의 변화량을 보였다. 2 Hz의 경우, 각각 약 8배, 2.3배의 변화량을 보였다.

동일한 방법으로 액추에이터의 가로 길이 x 를 20 mm 로 고정하고, 세로 길이를 10 mm , 20 mm , 40 mm 로 2배씩 늘려가며 실험을 진행하였다[Fig. 6].

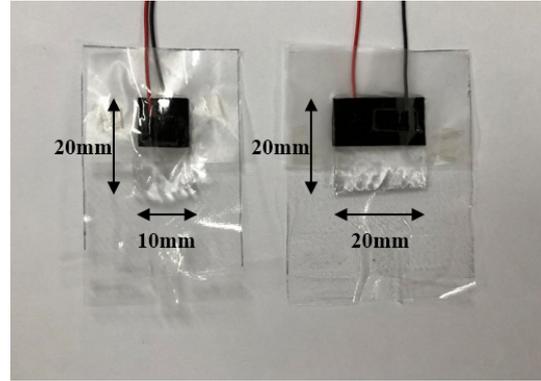
6 kV의 전압을 1 Hz, 2 Hz의 사각파 형태로 액추에이터에 인가하였고, $x = 10\text{ mm}$ 비교실험과 동일하게 세로 길이는 일정하게 2배 증가하지만, 이와 달리 피크값은 상이하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 1 Hz의 경우, $y = 10\text{ mm}$ 와 20 mm 간의 변화량은 약 5.6배가 발생했고, 20 mm 와 40 mm 의 경우 약 1.5배의 변화량을 보였다. 2 Hz의 경우, 각각 약 4배, 2.7배의 변화량을 보였다. 이에 따라 액추에이터의 크기가 일정치를 넘어가면 변화량이 적은 것을 확인할 수 있으며, 액추에이터 크기 대비 전극의 비율은 동일해도, 전체 크기가 클수록 더 높은 변화량을 보임을 알 수 있다. 또한 2 Hz를 입력할 시 1 Hz만큼의 peak 값에 도달하지 못하고 회복 되는 것을 확인할 수 있다[Fig. 7].



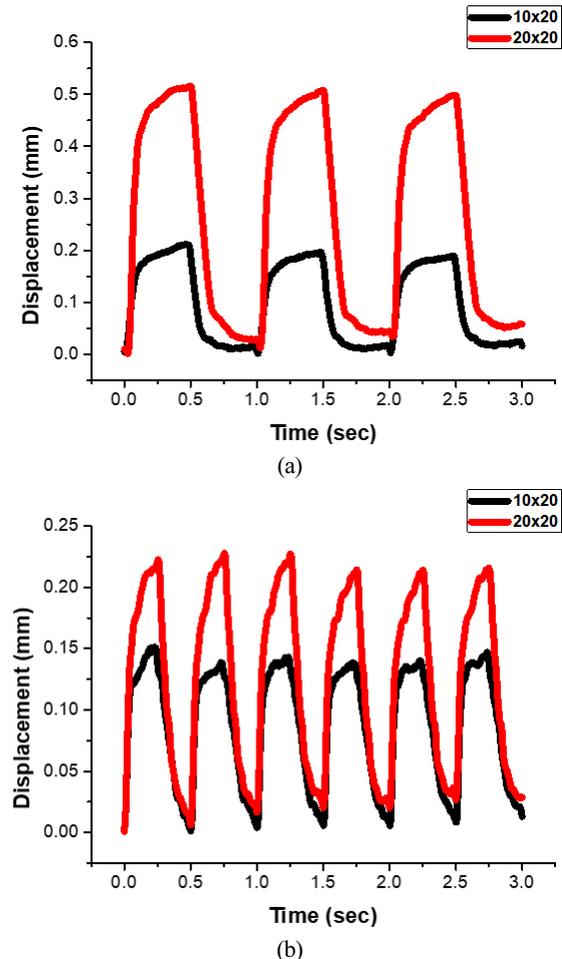
[Fig. 7] Peak displacement for $x = 20\text{ mm}$ according to square wave: (a) 1 Hz, (b) 2 Hz

3.3 전극 가로 길이 변화에 따른 반응 실험

액추에이터의 가로 길이와 변위의 상관관계를 확인해보고자 액추에이터의 세로 길이를 동일하게 설정하고, 가로 길이를 2배씩 증가하여 실험을 진행하였다[Fig. 8].



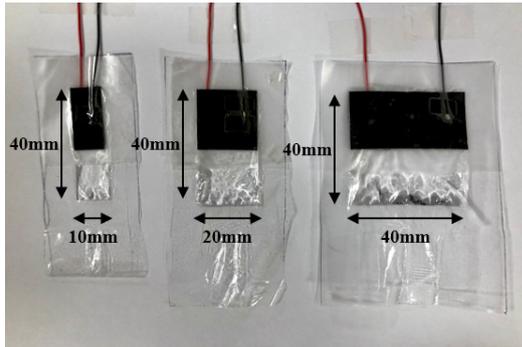
[Fig. 8] HASEL actuator prototypes with different vertical length: $10 \times 20\text{ mm}$, $20 \times 20\text{ mm}$



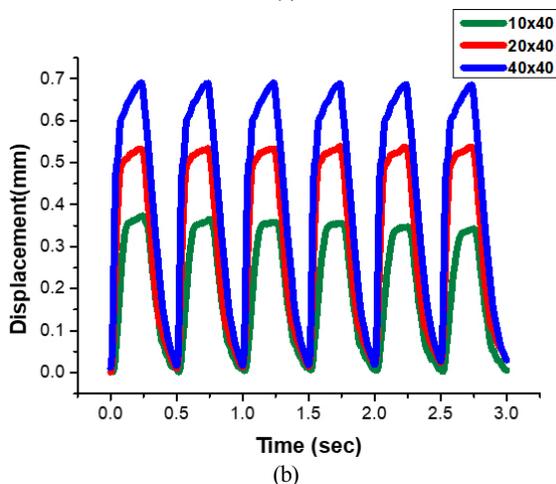
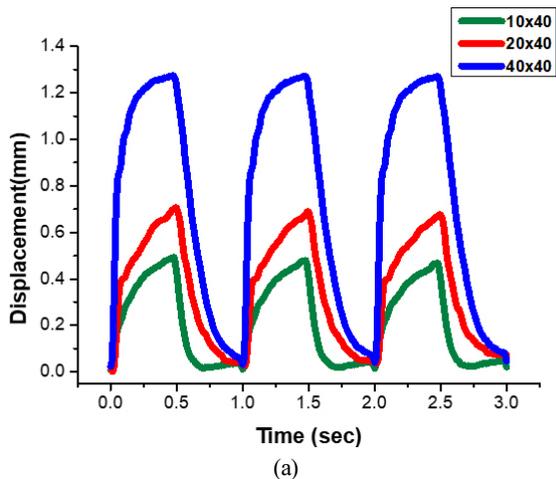
[Fig. 9] Peak displacement for $y = 20\text{ mm}$ according to square wave: (a) 1 Hz, (b) 2 Hz

6 kV의 전압을 1 Hz, 2 Hz의 사각파 형태로 액추에이터에 인가하였다. 가로 길이가 일정하게 2배 증가하지만, 이와 달리 피크값은 1 Hz에서는 약 2.4배, 2 Hz에서는 약 1.5배가 증가하는 것을 확인할 수 있다[Fig. 9].

동일한 방법으로 전극의 세로 길이는 40 mm로 유지하고, 가로 길이를 10 mm, 20mm, 40mm로 2배씩 증가하여 액추에



[Fig. 10] HASEL actuator prototypes with different vertical length: 10 × 40 mm, 20 × 40 mm, 40 × 40 mm



[Fig. 11] Peak displacement for $y = 40$ mm according to square wave: (a) 1 Hz, (b) 2 Hz

이터의 변화량을 비교하였다[Fig. 10].

6 kV의 전압을 1 Hz, 2 Hz의 사각파 형태로 액추에이터에 인가하였다. 가로 길이가 일정하게 2배 증가하지만, 이와 달리 피크값은 1 Hz의 경우 $x = 10$ mm와 20 mm 간의 변화량은 약 1.4배가 발생했고, 20 mm와 40 mm의 경우 약 1.8배의 변화량을 보였다. 2 Hz에서는 각각 약 1.5배, 1.3배가 증가하는 것을 확인할 수 있다[Fig. 11].

4. 결론 및 토론

본 논문에서는 직사각형 형태의 HASEL 액추에이터 크기 변화에 따른 변위 변화량 연구를 수행하였다. 액추에이터의 가로와 세로 모두 길이 변화에 따른 반응량의 차이를 보여줬으며, 액추에이터의 크기와 상관없이 모두 입력된 파형의 주기대로 일정하게 peak에 도달하는 모습을 보였다. 단, 액추에이터의 크기가 일정한 배수로 커지는 데에 반해 반응 값은 그렇지 않음을 알 수 있었다. 또한, 액추에이터의 형태가 세로보다는 가로로 길 때 더 큰 변화량을 보여주었다. 이에 따라 액추에이터의 가로가 장축이 되었을 때 더 나은 동작을 보여줄 수 있다.

액추에이터의 크기가 증가함에 따라 대체적으로 변위량의 차가 줄어들어 현상을 확인할 수 있는데, 이는 유체의 양과 전극 사이의 거리 관계를 통해 유추할 수 있다. 부피가 증가하면 유체의 양도 증가하는 동시에 반대로 두 전극 사이의 거리는 멀어지게 된다. 그 결과, 액체에 양이 증가함에 따라 변위량이 함께 증가하지만, 멀어지는 전극 사이의 거리에 의해 정전력이 약화되면서 그 증가량이 근소해짐을 알 수 있다.

본 연구의 데이터 결과는 부피 계산을 위한 모델링 설정을 보완해 준다면 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

전압을 인가했을 때 액추에이터의 형태가 이상적인 원기둥의 형태가 된다는 기존 연구에 기반하여 주입할 절연유의 부피 값을 계산하였다. 하지만 실험 결과 실제로는 타원형에 가까운 형태로 부풀기 때문에 유전체 양을 결정하는 과정에서 액추에이터마다 오류가 발생했을 것으로 생각된다. 이는 추후에 부피를 계산하는 모델링을 새로 설정하여 실제 작동했을 때의 부피값에 근사하는 식을 설립하고 적용한다면 더 예측 가능한 연구 결과를 얻을 수 있을 것이다.

본 실험은 7가지 형태의 액추에이터를 이용한 비교 실험을 진행하였지만, 더 세밀한 조건으로 여러 형태의 프로토타입을 비교해보고, 변위량을 측정하는 방식을 더 정밀하게 설정해준다면, 액추에이터의 크기와 변위량의 상관관계가 더 분명하게 보일 것이다. 또한, 변위 뿐만 아니라 액추에이터가 작동하면서 발생하는 힘도 함께 측정한다면, 보다 큰 에너지효율을 갖는 이상적인 직사각형 형태의 소프트 액추에이터 조건을 찾을 수 있을 것이다. 오차의 원인들을 개선하여 최적화 한다면 본 액

추에이터를 조건에 따라 적절한 크기의 액추에이터를 선정할 수 있으며, 더 나아가 소프트 그리퍼 뿐만 아니라 인공근육 개발과 같은 고성능의 소프트 로보틱스에서도 응용될 수 있을 것이다.

References

- [1] M. Cianchetti, C. Laschi, A. Menciassi, and P. Dario, "Biomedical applications of soft robotics," *Nature Reviews Materials*, vol. 3, no. 6, pp. 143-153, 2018, DOI: 10.1038/s41578-018-0022-y.
- [2] C. Majidi, "Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future," *Soft Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 5-11, 2014, DOI: 10.1089/soro.2013.0001.
- [3] C. Laschi and M. Cianchetti, "Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control," *Front Bioeng Biotechnol*, 2014, DOI: 10.3389/fbioe.2014.00003.
- [4] S. Bauer, S. Bauer-Gogonea, I. Graz, M. Kaltenbrunner, C. Keplinger, and R. Schwödiauer, "25th anniversary article: a soft future: from robots and sensor skin to energy harvesters," *Advanced Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 149-162, 2014, DOI: 10.1002/adma.201303349.
- [5] M. A. Devi, G. Udupa, and P. Sreedharan, "A novel underactuated multi-fingered soft robotic hand for prosthetic application," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 100, pp. 267-277, Feb., 2018, DOI: 10.1016/j.robot.2017.11.005.
- [6] X. Wang, S. K. Mitchell, E. H. Rumley, P. Rothemund, and C. Keplinger, "High-Strain Peano-HASEL Actuators," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 30, no. 7, 2020, DOI: 10.1002/adfm.201908821.
- [7] E. Leroy, R. Hinchet, and H. Shea, "Multimode Hydraulically Amplified Electrostatic Actuators for Wearable Haptics," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 36, 2020, DOI: 10.1002/adma.202002564.
- [8] 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," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 8, no. 3, pp. 143-149, Sept., 2013, DOI: 10.7746/jkros.2013.8.3.143.
- [9] C. Schunk, L. Pearson, E. Acome, T. G. Morrissey, N. Correll, C. Keplinger, M. E. Rentschler, and J. S. Humbert, "System identification and closed-loop control of a hydraulically amplified self-healing electrostatic (hasel) actuator," *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain, 2018, DOI: 10.1109/IROS.2018.8593797.
- [10] 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.aa06139.
- [11] H.-J. Cha and B.-J. Yi, "Design of a new 4-DOF soft finger mechanism," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 3, no. 4, pp. 315-322, Dec., 2008, [Online], <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200823736027649.page>.
- [12] K.-J. Cho, J.-S. Koh, S. Kim, W.-S. Chu, Y. Hong, and S.-H. Ahn, "Review of manufacturing processes for soft biomimetic robots," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 10, no. 3, pp. 171-181, 2009, DOI: 10.1007/s12541-009-0064-6.
- [13] W.-S. Chu, K.-T. Lee, S.-H. Song, M.-W. Han, J.-Y. Lee, H.-S. Kim, M.-S. Kim, Y.-J. Park, K.-J. Cho, and S.-H. Ahn, "Review of biomimetic underwater robots using smart actuators," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 7, pp. 1281-1292, 2012, DOI: 10.1007/s12541-012-0171-7.
- [14] K. Elgeneidy, N. Lohse, and M. Jackson, "Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors—a data-driven approach," *Mechatronics*, vol. 50, pp. 234-247, Apr., 2018, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2017.10.005.
- [15] P. Rothemund, N. Kellaris, S. K. Mitchell, E. Acome, and C. Keplinger, "HASEL Artificial Muscles for a New Generation of Lifelike Robots—Recent Progress and Future Opportunities," *Advanced Materials*, 2020, DOI: 10.1002/adma.202003375.
- [16] 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.aa06139.
- [17] T. Park, K. Kim, S.-R. Oh, and Y. Cha, "Electrohydraulic Actuator for a Soft Gripper," *Soft Robotics*, vol. 7, no. 1, pp. 68-75, Feb 2020, DOI: 10.1089/soro.2019.0009.



강 경 지

2016~ 서울과학기술대학교 기계시스템
디자인공학과(학사 재학중)

관심분야: 로보틱스, 소프트 로보틱스, 소프트 액추에이터



송 가 혜

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

관심분야: 웨어러블 로보틱스, 소프트 로보틱스, 햅틱스, 소프트 액추에이터