

자가 변위 측정이 가능한 전기-유압식 소프트 지핑 구동기의 개발

Development of an Electro-hydraulic Soft Zipping Actuator with Self-sensing Mechanism

이 동 영¹ · 곽 보 건¹ · 배 준 범[†]

Dongyoung Lee¹, Bokeon Kwak¹, Joonbum Bae[†]

Abstract: Soft fluidic actuators (SFAs) are widely utilized in various areas such as wearable systems due to the inherent compliance which allows safe and flexible interaction. However, SFA-driven systems generally require a large pump, multiple valves and tubes, which hinders to develop a miniaturized system with small range of motion. Thus, a highly integrated soft actuator needs to be developed for implementing a compact SFA-driven system. In this study, we propose an electro-hydraulic soft zipping actuator that can be used as a miniature pump. This actuator exerts tactile force as a dielectric liquid contained inside the actuator pressurized its deformable part. In addition, the proposed actuator can estimate the internal dielectric liquid thickness by using its self-sensing function. Besides, the electrical characteristics and driving performance of the proposed system were verified through experiments.

Keywords: Soft Actuator, Electrostatic Actuator, Hydraulic Force, Human-Robot Interaction

1. 서 론

유체 압력기반 소프트 구동기(SFA: Soft Fluidic Actuator)는 유연한 소재의 사용 덕분에 움직임이 자유로워 인체 착용형 시스템을 비롯한 다양한 연구에 활용되고 있다^[1]. SFA는 충분히 빠르고 강한 힘을 가졌지만 시스템 구현을 위해 큰 펌프, 다수의 밸브와 튜브들이 자주 사용되기 때문에 전체 시스템의 소형화 및 경량화에 한계가 있다. 특히 손 촉감 전달 동작은 힘을 빠르고 반복적으로 생성해야 하는 소형 구동기의 개발 시, 기존 SFA의 구성 요소 사용만으로는 구현에 어려움이 많다^[2-4]. 따라서 소형 SFA기반 시스템을 보다 편리하게 개발하려면, 주요 구성 요소들이 일체화된 새로운 소프트 구동기의 연구가 필요하다.

기존 SFA기반 시스템이 가지는 한계를 해결하기 위해 실리콘 오일을 활용한 정전기력 기반의 구동기(DFT: Dielectric Fluidic Transducer)가 제안되었다^[5,6]. DFT 기반의 구동기는 유전 탄성체 구동기(DEA: Dielectric Elastomer Actuator)의 특징을 이용해 정전기력을 통해 구동기의 변형을 유도한다. DEA는 얇은 두께와 소형의 디자인을 가져 착용형 시스템으로 적합한 구동기로 알려져 왔다. 하지만 낮은 힘과 변위로 인해 충분히 인지 가능한 수준의 촉각 전달에 한계를 가진다. 또한 DFT 기반의 구동기는 기존 DEA 기반의 구동기^[7,8]와 비교하여 실리콘 오일을 통해 높은 변위와 구동 힘을 구현하였으며 실리콘 오일의 높은 절연 파괴 전압 특성을 통해 고전압에 대한 내구성을 높였다^[9,10]. DFT 기반의 구동기는 전압을 인가함에 따라 구동기에 포함된 실리콘 오일을 외부로 압출할 수 있다. 이러한 특성을 이용해 실리콘 오일을 실리콘 박막으로 압출하여 촉감 전달이 가능한 구동기 제작이 가능하다^[11]. 하지만 3.5 kV의 전압을 인가했을 때 최대 13 mN의 힘을 구현하였으나, 사용자가 촉감 힘을 충분히 인지하기 위해 보다 큰 크기의 힘을 전달할 수 있는 DFT 기반의 구동기가 필요하다.

본 연구에서는 DFT 기반의 구동 원리를 이용하여 촉감 전달을 위한 구동기를 제작하였다. 이 구동기는 유압을 형성하

Received : Nov. 30. 2020; Revised : Mar. 29. 2021; Accepted : Mar. 30. 2021

* This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korean Government (MSIT) (No.NRF-2019R1A2C2084677) and the Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) grant funded by the Korea Government (No. 20008912)

¹ Graduate Student, UNIST, Ulsan, Korea (cvbgt.jeff624@unist.ac.kr)

[†] Associate Professor, Corresponding author: UNIST, Ulsan, Korea (jbae@unist.ac.kr)

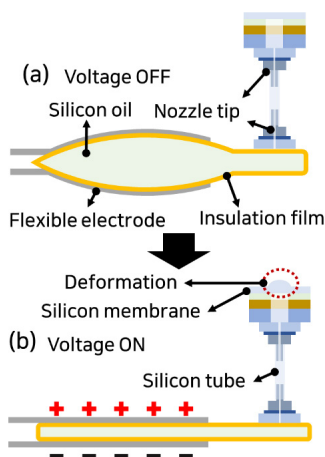
기 위해 정전기력으로 유도된 지핑 현상을 이용하며, 발생된 유압으로 촉감 전달을 위한 실리콘 박막의 변형이 가능하다. 또한 자가 측정 방법을 이용하여 구동기의 인가전압에 따른 정전용량을 측정하였다. 제안된 시스템의 구동 특성 분석, 성능 측정을 위해 다양한 모델링과 함께 실험적 검증을 하였다. 구동기의 압출 압력은 실험적으로 추정하였으며 추정된 압력을 이용해 촉감 전달 힘 및 실리콘 박막의 변위를 추정하였다. 또한, 구동기의 다양한 촉감 전달을 위해서는 주파수에 대한 반응성 분석이 필요하며 이를 위해 인가전압의 주파수에 따른 반응성에 대해 실험하였다. 개발된 구동기는 4.7 kV 전압 인가 시 최대 힘 136 mN을 보였다. 또한 실리콘 박막의 최대 변위는 1.46 mm로 나타나며, 39 ms의 빠른 반응시간을 보였다.

2. 전기-유압식 지핑 구동기의 원리

2.1 소프트 지핑 구동기의 작동원리

전기-유압식 소프트 지핑 구동기는 [Fig. 1(a)]와 같이 유연한 절연 필름 및 전극, 전류가 흐르지 않는 실리콘 오일로 구성된다. 파우치 형태의 절연 필름은 실리콘 오일로 채워져 있고, 전극은 절연 필름의 일부에 부착되어 외부에 드러나 있다. 서로 마주보는 두 전극에 전압을 인가하면 반대 부호를 가지는 전하가 충전되어 정전기력이 발생한다. 이 힘으로 절연 필름이 달라붙는 지핑 현상이 발생하며 [Fig. 1(b)]와 같이 실리콘 오일이 실리콘 튜브로 이동해 실리콘 박막이 부풀게 된다.

본 연구에서 [Fig. 1]의 동일한 구성요소 3개를 이용해 [Fig. 2]의 시작품을 제작하였으며, 이 구동기는 전기-유압식 소프트 지핑 구동기와 촉감 전달을 위한 실리콘 박막으로 구성된다. 전기-유압식 소프트 지핑 구동기는 절연 필름(12.5 μm PI 필름)과 전극(100 μm 알루미늄 증착 PET 필름)과 실리콘 오

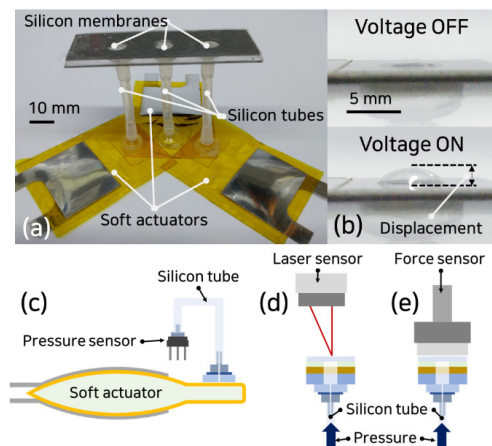


[Fig. 1] The working principle of the proposed actuator. (a): voltage-off state, (b): voltage-on state

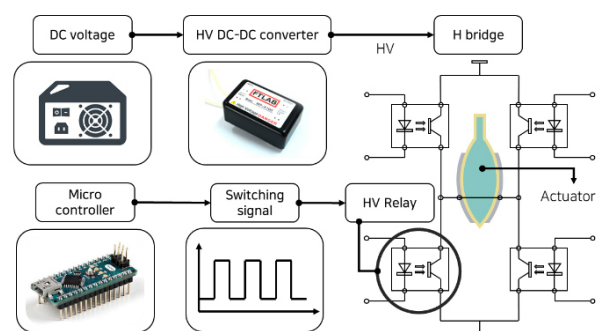
일로 구성된다. 레이저 커팅 된 절연 필름과 전극 필름들은 핫멜트 필름을 사용해 접착된다. 절연 필름의 한면에는 실리콘 오일 주입을 위한 구멍이 뚫려 있으며 이 위에 양면 테이프 (3M VHB)를 사용해 구동기와 노즐 팁사이를 고정한다. 실리콘 튜브를 구동기와 연결하여 실리콘 오일을 구동기 내부에 채워준다. 또한 실리콘 튜브를 실리콘 박막 위 노즐 팁과 연결한다. 구동기의 촉감 전달 기능을 위해 20 μm 두께의 유연한 실리콘 박막(Elastosil)을 [Fig. 2(a)]와 같이 사용하였으며, 구동기의 압출 압력을 통해 촉감 전달이 가능하다. 인가 전압에 따라 실리콘 박막의 반응성이 [Fig. 2(b)]와 같이 변위로 나타난다.

2.2 고전압 회로 구성

구동기에는 인가 가능한 최대 전압이 존재하며, 이는 구동기에 포함된 절연체의 절연 파괴 특성에 따라 그 크기가 달라진다. 현재 최대 인가 전압을 실험적으로 측정하였으며 그 크기는 4.7 kV로 정하였다. 만약 이 이상의 전압이 인가되면 구동기는 손상을 입어, 그 성능이 감소하게 된다.



[Fig. 2] The components of proposed actuator. (a): The electro-hydraulic soft zipping actuator, (b): the reaction of silicon membrane, (c-e): the schematics of measurement apparatus [c: pressure (P), d: displacement (h), e: force (F)]



[Fig. 3] Schematic figure of a high voltage circuit

제한한 구동기에 수 킬로볼트의 양방향 구동신호를 인가하기 위해 [Fig. 3]과 같이 H-bridge 회로를 이용하였다. 파워서플라이에서 제공되는 전압은 DC-DC 컨버터(애프터랩, MP-A100)를 통해 고전압으로 변환된다. 4개의 고전압용 리드 릴레이(MEDER, HM24-1A69-03)를 활용하여 인가된 고전압을 마이크로컨트롤러를 통해 제어하였다.

3. 전기-유압식 지평 구동기의 특성

3.1 인가 전압에 따른 압출 압력, 변위, 힘 분석

구동기는 외부로 실리콘 오일을 압출하여 압력을 전달한다. 구동기의 압출 압력 측정을 위해 압력 센서(First-sensor, HDI)를 사용하였다. 해당 센서는 기체의 압력에 대해 측정이 가능하여 직접적인 액체의 유입을 차단하기 위한 공기층을 포함한다. 따라서 구동기의 압출 압력으로 인해 공기의 압축 현상이 발생하며, 압력 센서는 그로 인한 압축된 공기의 압력을 측정한다. [Fig. 2(c)]과 같이 구동기에 고정된 노즐 팁과 압력 센서의 팁 사이 실리콘 튜브를 이용해 연결하였다. 인가전압의 증가에 따라 압출 압력의 상승을 [Fig. 4(a)]와 같이 확인할 수 있으며 4.7 kV 전압을 인가 했을 때 최대 3260 Pa 압출 압력이 측정되었다.

구동기의 압출 압력은 맥스웰 압력 방정식 (1)을 따른다. 여기서 ϵ_0 는 진공의 유전율, ϵ_r 는 상대 유전상수, V 는 인가전압, d 는 두 전극 사이의 거리를 의미한다. 맥스웰 압력 방정식은 두개의 평행한 전극 사이 발생하는 압력을 의미하며 두개의 전극 사이 위치한 실리콘 오일은 정전기력으로 인해 발생하는 압력으로 구동기 외부로 압출된다. 이때 유전 상수는 유전 필름 및 실리콘 오일의 유전 상수를 고려해야 하므로 ϵ_r 는 식 (2)를 따른다. 여기서 ϵ_{liq} 는 실리콘 오일의 유전상수, ϵ_{ins} 는 절연 필름의 유전상수, d_{liq} 는 실리콘 오일의 두께, d_{ins} 는 절연 필름의 두께를 의미한다. 또한 두 전극 사이의 거리 d 는 식 (3)를 따른다.

$$P = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V^2}{d^2} \tag{1}$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{liq} \epsilon_{ins} (d_{liq} + d_{ins})}{(\epsilon_{liq} d_{ins} + \epsilon_{ins} d_{liq})} \tag{2}$$

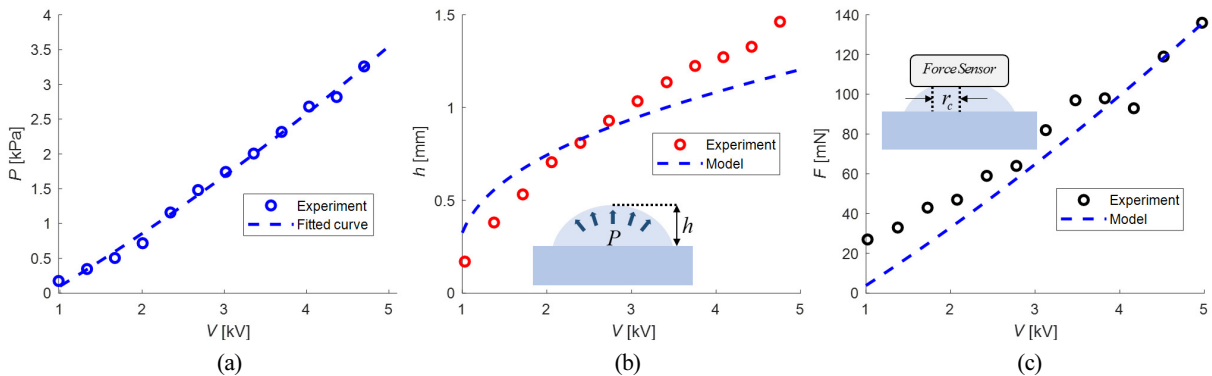
$$d = d_{liq} + d_{ins} \tag{3}$$

구동기의 압출 압력은 실리콘 튜브를 통해 실리콘 박막으로 압력이 전달되며, 실리콘 박막은 압력으로 인해 변형이 일어난다. 실리콘 박막의 변위 측정을 통해 구동기의 다양한 촉감 전달의 가능성을 확인하고자 한다. 실리콘 박막의 변위 측정을 위해 레이저 센서(OMRON, ZX-GT)를 활용하여 [Fig. 2(d)]과 같이 구성하였다. 개발된 구동기의 전압에 따른 변위의 결과는 [Fig. 4(b)]과 같이 나타나며, 실리콘 박막은 4.7 kV의 전압을 인가하였을 때 최대 1.46 mm의 변위가 발생한다.

외부의 힘이 적용되지 않는 상황에서 실리콘 박막의 변위와 압출 압력 사이의 곡선이 탄성 변형의 영역내에서 발생할 경우 관계식 (4)을 따르게 된다^[12]. 여기서 P_0 는 초기 기압, E 는 실리콘 박막의 신장 탄성률, t 는 실리콘 박막의 두께, ν 는 푸아송 비율, r 은 원형의 실리콘 박막의 반경, h 는 변위를 의미한다. P_0 는 실리콘 박막이 처음으로 부풀어 오르는 시점의 기압으로, 625 V의 전압을 인가 했을 때 350 Pa으로 측정된다.

$$h = \left(\frac{3(1-\nu)r^4}{8Et} (P - P_0) \right)^{\frac{1}{3}} \tag{4}$$

구동기 변위를 압력에 대한 식 (4)을 통해 추정이 가능하며, [Fig. 4(a)]의 압출 압력의 실험식을 통해 전압에 따른 변위는 [Fig. 4(b)]과 같이 나타난다. 전압이 커짐에 따라 추정된 압출 압력과 측정된 값 사이 오차가 점차 커져가는 현상이 발생하였다. 이는 실리콘 박막의 탄성영역에서 비탄성 영역으로 변화함에 따라 발생하는 현상으로 여겨진다^[12].



[Fig. 4] Performances of proposed actuator. (a): pressure (P), (b): displacement (h), (c): force (F) test graph with voltage input (V)

실리콘 박막은 사용자의 피부의 압력점을 자극하여 실제 물건을 만진 것 과 유사한 감각을 유도할 수 있다^[13]. 이로 인해 구동기가 전달할 수 있는 최대 힘 측정을 통해 구동기의 촉감 전달 착용형 시스템으로써 가능성을 확인하고자 한다. 구동기의 촉감 전달 힘 측정을 위해 힘 센서(ATI, F/T Sensor Nano17)를 활용하였다.

구동기에서 나타나는 힘은 힘센서와의 접촉 위치에 따라 변화되기 때문에 [Fig. 2(e)]과 같이 실리콘 박막이 변형되지 않도록 힘센서는 실리콘 박막의 변위가 나타나지 않는 평평한 면에 접촉하여 측정하였다. 구동기는 인가 전압에 따라 힘은 상승하며, 4.7 kV 전압을 인가했을 때 최대 136 mN의 힘이 측정되었다. 실리콘 박막을 통해 전달된 힘은 식 (5)를 따른다. 여기서 r_c 는 힘센서와 접촉한 실리콘 박막의 반경($r_c=3.5$ mm), P 는 구동기의 압출 압력을 의미한다.

$$F = \pi r_c^2 P \quad (5)$$

촉감 전달 힘은 압력을 통해 추정이 가능하며, 압력은 [Fig. 4(a)]의 실험식을 이용하였다. 실제 측정된 압력을 통해 계산된 값과 비교하면 [Fig. 4(c)]과 같이 나타나며 구동기의 힘은 인가된 압력과 선형의 관계를 보인다. 일반적으로 사람이 실제 촉감을 느낄 수 있는 힘은 43.6 mN으로 알려져 있다^[14]. 현재 개발된 구동기는 인지 가능한 충분한 힘의 촉감 전달이 가능하며 기존 DFT 기반의 촉감 전달 구동기 보다 우수한 성능을 보여주었다^[11].

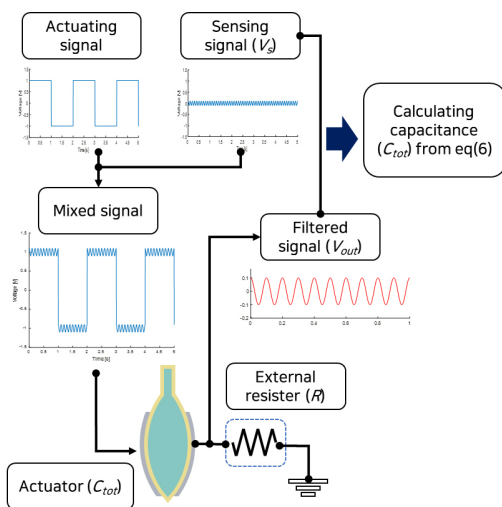
3.2 실리콘 오일 변위 추정을 위한 자가 변위 측정

구동기 내부에 존재하는 실리콘 오일 두께(d_{liq}) 통해 실리콘 박막의 변위 추정이 가능하다. 이를 위해 구동기 내부의 전기

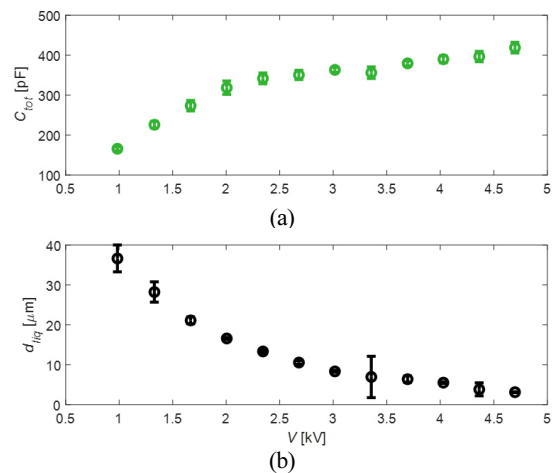
적 특성을 이용한다. 구동기 사이의 실리콘 오일은 두 전극 사이 균일하게 분포되어 있다는 가정을 적용하며 구동기를 축전기 모델로 적용한다. 절연 필름, 실리콘 오일 두가지 유전체를 고려한 구동기의 정전 용량(C_{tot})은 구동 전압이 인가된 상태에서 직접 측정하는 것이 어려워 자가 변위 측정(Self-sensing)을 사용하여 추정하였다. 자가 측정은 구동기의 변형에 따라 변화하는 전기적인 특성을 추가적인 센서 없이 읽는 과정이다. 이는 [Fig. 5]와 같이 구동기에 인가된 고주파의 신호와 구동기의 변형에 따른 변화된 신호의 차이를 통해 구동기의 상태를 추정하는 것이다^[15]. 자가 측정을 위해서 구동기에 구동 신호와 센서 신호가 인가된다. 구동 신호는 저주파의 고전압 신호로 인가되어 구동기의 작동을 위해 사용되며 센서신호는 고주파의 저전압 신호로 인가되어 정전용량 측정을 위해 사용된다. 두가지 형태의 신호를 하나의 신호로 합쳐주는 과정이 필요하며, 이는 [Fig. 5]의 혼합된 신호(Mixed signal)로 표현된다. 혼합된 신호는 구동기에 인가되며 이는 필터 신호(Filtered signal)로 변환된다. 구동기의 정전용량을 계산하기 위해서는 센서 신호(Sensing signal), 필터 신호(Filtered signal) 크기의 차이를 이용한 계산이 필요하며 이는 식 (6)과 같이 표현된다. 여기서 f 는 센서신호의 주파수, V_s 는 센서 신호의 전압, V_{out} 는 혼합된 신호가 구동기를 거쳐 나온 필터 신호의 전압, R 는 외부 저항을 의미한다. 구동기의 정전 용량 값을 측정하여 이어서 식 (7)을 이용해 실리콘 오일의 두께 추정이 가능하다. 여기서 C_{ins} 는 절연 필름의 정전 용량 값, A 는 전극의 면적을 의미한다.

$$C_{tot} = \frac{1}{2\pi f R \sqrt{(V_s/V_{out})^2 - 1}} \quad (6)$$

$$d_{liq} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{liq} A (C_{ins} - C_{tot})}{C_{tot} C_{ins}} \quad (7)$$



[Fig. 5] Concept of self-sensing function



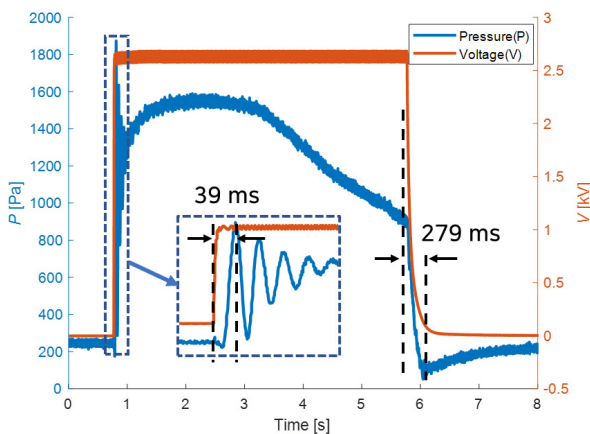
[Fig. 6] Results of self-sensing function (a): capacitance (C_{tot}), (b): silicon oil thickness (d_{liq}) (a), (b), (c)

자가 측정을 통해 계산된 정전용량 값은 [Fig. 6(a)]과 같이 전압에 따라 점차 상승하며 4.7kV 전압을 인가 시 419 pF의 정전용량이 측정된다. 측정된 정전용량 값을 기반으로 식 (7)을 이용해 실리콘 오일의 두께를 [Fig. 6(b)]와 같이 추정하였다. 실리콘 오일의 두께는 전압에 따라 점차 감소하며 4.7kV 전압 인가 시 3.1 μm 으로 추정된다.

3.3 전기-유압식 지평 구동기의 구동 특성, 성능 분석

이 장에서는 구동기의 전기적 특성으로 구동기의 반응 시간, 소모전력, 최대 전류에 대해 분석하고자 한다. 구동기는 축전기와 같이 전하가 축적되어 작동하는 원리를 가져, 압출 압력을 생성하기 위해 전하의 충전시간이 필요하다. 전압을 인가했을 때 [Fig. 7] 과 같이 구동기의 압출 압력의 반응시간은 39 ms으로 측정된다. 또한 초기 반응에서 압력이 감쇄진동하는 현상을 관찰할 수 있었고, 이는 순간적으로 압축된 실리콘 튜브 안의 공기로 인해 발생한 것으로 여겨진다. 구동기의 압출이 끝나고 전압이 해제됨에 따라 압출되었던 실리콘 오일이 유입된다. [Fig. 7]의 5.7초 부근에서 실리콘 오일의 유입이 시작되며 279 ms의 시간이 소요된다. [Fig. 7]의 3초 부근의 압력의 반응성을 확인하면 최대 압력 값을 지나 점차 압출 압력이 낮아지는 경향이 존재한다. 이는 두 절연필름 사이 축적되는 잔류전하로 인해 고전압 구동기에서 자주 발생하는 현상이다¹⁶⁾.

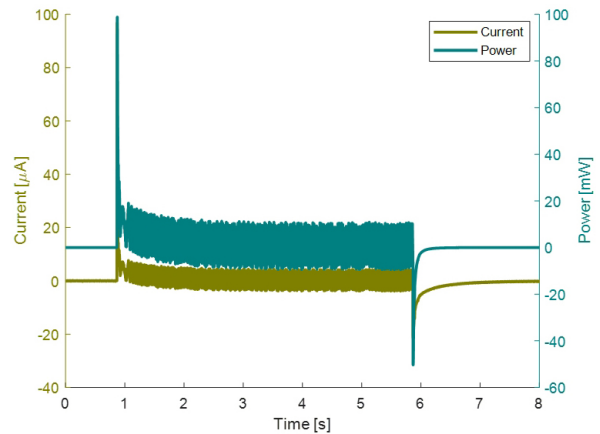
구동기의 최대 소모 전력은 [Fig. 8]와 같이 0.8초 부근의 순간적인 충전과정에서 발생하며 99 mW으로 측정된다. 충전 및 방전 이외의 구간에서는 소모전력이 15 mW 미만으로 측정된다. 구동기에 사용되는 절연 필름 및 실리콘 오일은 전류가 흐르지 않지만 고전압을 인가 할 경우 미세 전류가 흐르기 때문에 미량의 소모 전력이 발생한다. 구동기에 흐르는 전류는 충전 및 방전에서 발생하며 최대전류 값은 [Fig. 8]과 같이 0.8초 부근의 순간적인 충전 과정에서 최대 97 μA 으로 측정된다.



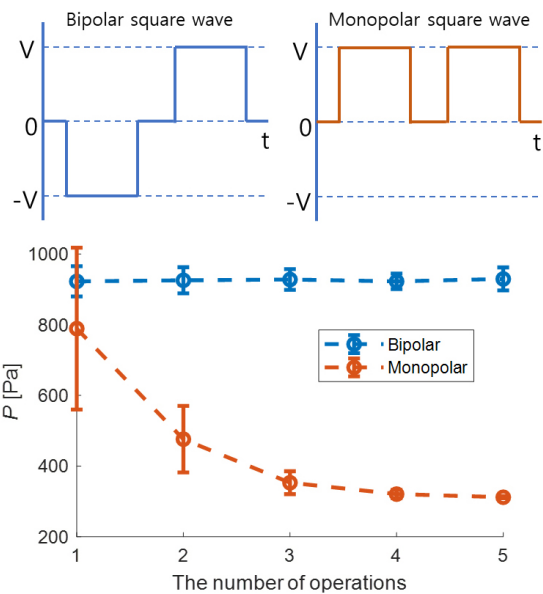
[Fig. 7] Pressure (P) response to voltage input (V)

일반적으로 1 mA이내의 전류에 대해서는 사람이 감지하기 힘든 것으로 알려져 있으며 제안된 구동기는 충분히 낮은 전류 값을 사용하여 안전하다¹⁷⁾. 위와 같이 작은 전력소모량과 미세전류의 특성을 미루어 보아 제안한 구동기는 촉감 전달을 위한 착용형 시스템으로써 사용가능성이 충분하다.

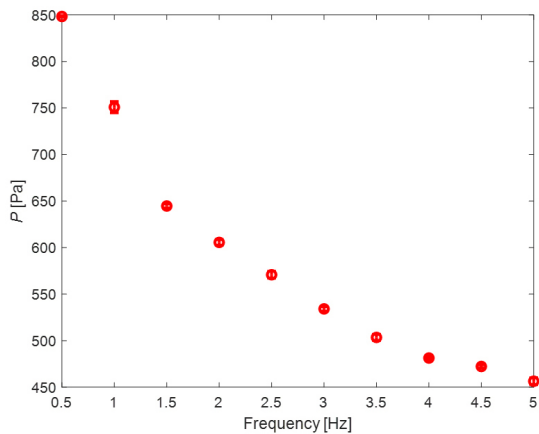
구동기는 잔류전하의 영향으로 지속적인 압출압력의 감소 현상을 [Fig. 7]과 같이 관찰할 수 있다. 이와 같이 잔류전하는 전압의 인가 시간에 따라 압출 압력에 영향을 준다. 또한 잔류전하는 반복적인 구동에 대해 영향을 주며 구동전압의 방향성에 따른 압출 압력 변화에 대한 분석이 필요하다. [Fig. 9]와 같이 2 kV의 단방향의 구동신호(Monopolar square wave)를 인가할 경우 789 Pa의 압출압력이 두 번째의 구동부터 압출 압력이 476 Pa으로 감소하며 311 Pa으로 수렴한다. 하지만 양방향의 구동신호(Bipolar square wave)를 인가할 경우 구동기의 압출



[Fig. 8] Power and current response to voltage input (V)



[Fig. 9] Pressure (P) test result graph with different type of voltage



[Fig. 10] Pressure (P) test result graph with frequency

압력은 구동 횟수와 관계없이 [Fig. 9]와 같이 925 Pa로 유지된다. 첫 번째 구동 전압이 인가될 경우 잔류 전하가 지속적으로 쌓여 [Fig. 7]과 같이 압출 압력이 감소되며 전압이 해제되더라도 잔류 전하는 유전체 위에 존재한다. 같은 방향으로 두 번째의 전압이 인가될 경우 기존 잔류 전하에 의해 감소된 압출 압력이 나타나며 전압 인가 시간이 길어지며 더 많은 잔류 전하가 쌓인다. 하지만 반대 방향의 전압이 인가될 경우 기존의 잔류 전하는 반대 극성의 잔류 전하와 상쇄되어 사라진다. 이로 인해 첫 번째 구동 전압이 인가되었을 때와 동일한 압출 압력이 나타난다. 따라서 양방향 구동신호를 사용함으로써 구동기의 압출 압력을 일정하게 유지할 수 있다.

빠른 주파수에 반응하는 구동기는 진동에 대한 촉감 전달이 가능하며 구동기의 압출압력 반응시간을 기준으로 구동기에 인가 가능한 주파수 영역을 알아보았다. 고전압의 빠른 스위칭 과정은 회로에 손상을 주어 구동 전압을 2 kV로 설정하였다. 2 kV 전압을 인가함에 따라 [Fig. 10]과 같이 구동기의 최대 압출 압력은 848 Pa로 측정된다. 인가 전압의 주파수에 따라 점차 압출압력이 감소하는 경향성을 보인다.

구동기의 압출 압력이 줄어드는 이유는 구동기의 작동원리와 관련있다. 구동기는 실리콘 튜브를 통해 실리콘 오일을 외부로 압출한다. 이로 인해 실리콘 오일에서 유체의 흐름에 따른 저항이 발생한다. 저항으로 인해 구동기는 충분한 시간이 할애되지 않을 경우 감소된 구동성능을 보이게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 전기-유압식 소프트 구동기를 통해 촉감 전달 기능을 분석하였다. 개발된 구동기는 기존에 촉각 전달 구동 모듈로 활용되었던 SFA 및 DEA 기반의 구동기와 비교하여 우수성을 보였다. 개발된 구동기는 4.7 kV 전압을 인가 할 경우 3260 Pa의 압출 압력, 136 mN의 촉감 전달 힘, 1.46 mm의

변위를 생성하며 기존 DFT 기반의 구동기와 비교하여 우수한 성능을 보인다. 또한 개발된 구동기의 반응시간은 39 ms로 측정되며 촉각 전달 착용형 시스템으로써 가능성을 보여주었다.

구동기의 압력 변화로 인해 발생하는 실리콘 박막의 변위와 구동기에서 나타나는 힘을 예측하였다. 하지만 사람이 손으로 구동기를 눌렀을 경우를 고려하여 변위 예측이 가능한 모델 구성을 위한 후속 연구가 필요하다.

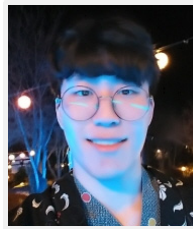
이용해 압출 압력을 추정하기 위해자가 측정을 통한 구동기의 정전용량을 측정하여, 구동기 내부의 실리콘 오일의 두께를 추정하였다. 하지만 압출 압력은 구동기의 사이즈 및 디자인에 따라 변화하기에 정확한 압출 압력 추정이 어렵다. 따라서 구동기 디자인에 대한 추가 분석이 필요하여 구동기 형상을 고려한 압출 압력 추정 모델 선정에 관한 후속 연구가 필요하다.

고전압을 사용하는 구동기는 잔류 전하에 영향을 받는다. 개발된 구동기 역시 잔류 전하에 의해 지속적으로 압출 압력이 감소되었으며, 일정한 압출 압력을 제공하기 위해 양방향의 구동신호를 인가하였다. 하지만 잔류 전하의 영향을 근본적으로 해결하지 못하며 전압 인가 시간이 길어질 경우 압출 압력이 감소한다. 따라서 잔류 전하에 대한 근본적인 해결을 위해 절연 재료 분석에 대한 후속 연구가 필요하다.

References

- [1] P. Polygerinos, N. Correll, S. A. Morin, B. Mosadegh, C. D. Onal, K. Petersen, M. Cianchetti, M. T. Tolley, and R. F. Shepherd, "Soft robotics: Review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction," *Advanced Engineering Materials*, 2017, DOI: 10.1002/adem.201700016.
- [2] S. Biswas and Y. Visell, "Emerging Material Technologies for Haptics," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 4, 2019, DOI: 10.1002/admt.201900042.
- [3] M. Cruz, K.-U. Kyung, H. Shea, H. Böse, and I. Graz, "Applications of Smart Materials to Haptics," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 1, 2018, DOI: 10.1109/TOH.2018.2809058.
- [4] H. Ishizuka and N. Miki, "MEMS-based tactile displays," *Displays*, vol. 37, pp. 25-32, Apr., 2015, DOI: 10.1016/j.displa.2014.10.007.
- [5] N. Kellaris, V. Gopaluni 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, Jan., 2018, DOI: 10.1126/scirobotics.aar3276.
- [6] M. Taghavi, T. Helps, and J. Rossiter, "Electro-ribbon actuators and electro-origami robots," *Science Robotics*, vol. 3, no. 25, 2018, DOI: 10.1126/scirobotics.aau9795.

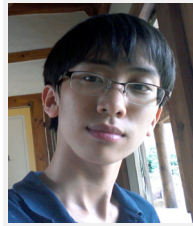
- [7] I. M. Koo, K. Jung, J. C. Koo, J.-D. Nam, Y. K. Lee, and H. R. Choi, "Development of Soft-Actuator-Based Wearable Tactile Display," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 3, pp. 549-558, Jun., 2008, DOI: 10.1109/TRO.2008.921561.
- [8] S. Mun, S. Yun, S. Nam, S. K. Park, S. Park, B. J. Park, 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.
- [9] M. Duranti, M. Righi, R. Vertechy, and M. Fontana, "A new class of variable capacitance generators based on the dielectric fluid transducer," *Smart Materials and Structures*, vol. 26, no. 11, 2017, DOI: 10.1088/1361-665X/aa8753.
- [10] G. Moretti, M. Duranti, M. Righi, R. Vertechy, and M. Fontana, "Analysis of dielectric fluid transducers," *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 2018, DOI: 10.1117/12.2297082.
- [11] A. K. Han, S. Ji, D. Wang, and M. R. Cutkosky, "Haptic Surface Display based on Miniature Dielectric Fluid Transducers," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 4021-4027, Jul., 2020, DOI: 10.1109/LRA.2020.2985624.
- [12] A. K. Katiyar, A. A. Davidson, H. Jang, Y. Hwangbo, B. Han, S. Lee, Y. Hagiwara, T. Shimada, H. Hirakata, T. Kitamura, and J.-H. Ahn, "Ultrasoft silicon nanomembranes: thickness-dependent effective elastic modulus," *Nanoscale*, vol. 11, no. 32, 2019, DOI: 10.1039/C9NR03995C.
- [13] S. Biswas and Y. Visell, "Emerging Material Technologies for Haptics," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 4, Apr., 2019, DOI: 10.1002/admt.201900042.
- [14] H. H. King, R. Donlin, and B. Hannaford, "Perceptual thresholds for single vs. multi-finger haptic interaction," *2010 IEEE Haptics Symposium*, Waltham, MA, USA, 2010, DOI: 10.1109/HAPTIC.2010.5444670.
- [15] M. Landgraf, U. Zorell, T. Wetzel, S. Reitelshöfer, I. S. Yoo, and J. Franke, "Dielectric elastomer actuators as self-sensing devices: a new method of superimposing actuating and sensing signals," *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 2015, DOI: 10.1117/12.2083572.
- [16] T. Nakamura and A. Yamamoto, "Modeling and control of electroadhesion force in DC voltage," *Robomech Journal*, vol. 4, no. 18, 2017, DOI: 10.1186/s40648-017-0085-3.
- [17] R. M. Fish and L. A. Geddes, "Conduction of electrical current to and through the human body: a review," *Eplasty*, vol. 9, 2009, [Online]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2763825/>.



이 동 영

2018 울산과학기술원 기계공학과(학사)
2018~현재 울산과학기술원 기계공학과
(석박통합과정)

관심분야: 유연 구동기, 착용형 시스템



곽 보 건

2015 울산과학기술원 기계공학과(학사)
2015~현재 울산과학기술원 기계공학과
(석박통합과정)

관심분야: 생체 모방 로봇



배 준 범

2006 서울대학교 기계항공공학부(학사)
2008 Mechanical Engineering, University
of California, Berkeley(석사)
2010 Statics, University of California,
Berkeley(석사)
2011 Mechanical Engineering, University
of California, Berkeley(박사)
2012~현재 울산과학기술원 부교수

관심분야: Modeling, design, and control of human-robot interaction
systems, Soft robotics, Biologically inspired robots