

삼차원 프린트된 몰드와 액체 금속을 이용한 웨어러블 힘 센서 개발

김규영 · 최중락 · 정용록 · 김민성 · 김승환 · 박인규[†]

Wearable Force Sensor Using 3D-printed Mold and Liquid Metal

Kyuyoung Kim, Jungrak Choi, Yongrok Jeong, Minseong Kim, Seunghwan Kim, and Inkyu Park[†]

Abstract

In this study, we propose a wearable force sensor using 3D printed mold and liquid metal. Liquid metal, such as Galinstan, is one of the promising functional materials in stretchable electronics known for its intrinsic mechanical and electronic properties. The proposed soft force sensor measures the external force by the resistance change caused by the cross-sectional area change. Fused deposition modeling-based 3D printing is a simple and cost-effective fabrication of resilient elastomers using liquid metal. Using a 3D printed microchannel mold, 3D multichannel Galinstan microchannels were fabricated with a serpentine structure for signal stability because it is important to maintain the sensitivity of the sensor even in various mechanical deformations. We performed various electro-mechanical tests for performance characterization and verified the signal stability while stretching and bending. The proposed sensor exhibited good signal stability under 100% longitudinal strain, and the resistance change ranged within 5% of the initial value. We attached the proposed sensor on the finger joint and evaluated the signal change during various finger movements and the application of external forces.

Keywords: Wearable sensor, 3D printing, Liquid metal, Force sensor

1. 서 론

유연 물리 센서는 힘, 압력과 같은 물리량을 측정할 수 있으면서도 동시에 신축성, 굽힘성 등의 기계적 성질을 갖고 있는 센서를 말한다. 기존의 실리콘 기관의 물리 센서와는 다르게, 잘 구부러지고 유연한 기계적 성질을 갖고 있어 현재 웨어러블 디바이스[1,2], 전자피부[3], 소프트 로보틱스[4] 등 다양한 분야에 활용될 것으로 기대되고 있다. 특히, 실시간 헬스 모니터링과 같은 분야는 개인의 건강에 대한 사회적 관심이 높아짐에 따라 많은 기술적 발전이 요구되고 있는 바이다. 유연 물리 센서가 웨어러블 디바이스 및 다양한 헬스 모니터링 분야에 활용되기 위

해서는 다양한 조건들이 만족되어야 한다. 대표적으로 센서 감도가 높고, 무게가 가볍고, 신체 움직임에 잘 적응하고, 다양한 기계적, 화학적 외부 요인에 대하여 안정적인 센서 신호를 전달하는 것이 중요하다.

최근 이러한 조건들을 만족하기 위하여 다양한 유연 물리 센서가 개발되어왔다. 센싱 감도를 높이기 위하여 나노 입자, 나노 와이어 등의 압저항성[5,6], 압전성[7] 물질을 활용하고 다양한 나노/마이크로 구조 형태의 센서 구조물을 제작하였다. 특히 탄소 나노 튜브, 은 나노 와이어 등의 센싱 물질을 탄성중합체에 도포하거나 임베드시켜 미세 균열[8], 퍼콜레이션 효과[9] 등을 이용하였다. 한편 서펜타인 형태의 금속 박막[10]을 제작하거나 이온성 액체[11]를 활용하여 다양한 기계적 인장, 변형에 대하여 안정적인 전기적 신호를 보이도록 하는 센서 제작의 흐름이 있다. 하지만, 위에 제안된 방법들 또한 웨어러블 디바이스로써의 기계적, 전기적 신호 안정성에 여전히 부족한 면이 존재한다. 특히 유연 힘, 압력 센서가 웨어러블 디바이스로 활용될 때 인장, 굽힘이 반드시 발생하게 되는데 이로 인한 신호 왜곡으로 정확한 계측을 할 수 있는 센서를 제작하는 것이 매우 어려움이 많다.

액체 금속은 상온에서 액체로 존재하며 전도체와 같이 높은 전기 전도도를 갖는 물질을 말한다. 대표적으로 수은, E-gain,

한국과학기술원 기계항공공학부 기계공학과 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology), Department of Mechanical Engineering Bldg. (N7), KAIST, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

[†]Corresponding author: inkyu@kaist.ac.kr

(Received : April 25, 2019, Revised : May. 28, 2019, Accepted : May. 29, 2019)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Galinstan 과 같은 물질이 있고, 수은의 경우 인체에 해로운 성질이 있어 활용되지 않는다. 그 중 Galinstan은 Ga, In, 그리고 Sn의 공용 혼합물(eutectic alloy)로 3.46×10^6 S/m의 높은 전기 전도도를 갖고 있으며, -19°C 의 녹는점, 자기 회복 작용(Self-healing), 무독성, 낮은 점도 등의 성질로 최근 유연 물리 센서 분야에서 다양하게 활용되고 있는 물질이다[12,13]. 액체 금속은 액체로 존재하기 때문에 액체가 포집 되어 있어야 할 마이크로 채널 또는 저장소가 필요하다는 조건이 있어야 하지만, 외부 용기의 변형에 따라 자유롭게 모양과 형태가 변하며 무한대에 가까운 인장율을 갖고 있어 기존 유연 물리 센서에 활용된 기계전기적 한계를 뛰어넘을 수 있는 매우 유망한 물질로 각광받고 있다. 하지만 액체 금속은 표면 장력이 매우 크고 표면에 자연적으로 산화막이 생기는 현상이 있어 패터닝이 어렵다. 전사[14], 열 증착[15], 잉크젯 프린팅[16] 등 다양한 방법이 시도되고 있지만 다양하게 패터닝하여 센싱 물질로 활용하는 점은 어려운 과제로 남아있다.

본 연구에서는 액체 금속과 삼차원 프린팅으로 제작한 마이크로 채널 몰드를 이용하여 만든 유연 물리 센서와 이를 이용한 웨어러블 디바이스로써의 활용을 소개한다. Fused deposition modeling (FDM) 삼차원 프린팅을 통해 액체 금속이 삽입될 마이크로 채널 몰드를 제작하고 이를 탄성 중합체에 임베드 시키고 난 후에 제거하여 액체 금속을 삽입하여 유연 힘 센서를 제작하였다. 삼차원 프린팅을 통해 제작한 마이크로 채널 몰드는 다양한 형태와 크기로 제작이 가능하여 목적에 따라 채널을 다양한 크기와 모양으로 패터닝 할 수 있고, 클린룸 공정없이 경제적이고 간단하게 액체 금속을 이용한 센서를 제작할 수 있다. 다층 채널 제작을 통해 보다 기계적 변형에 신호 변화가 매우 적게 나타나고 외력에 의해서만 신호가 크게 변화하는 안정적인 센서를 제작할 수 있었다. 제작된 센서는 손가락에 부착되어 손가락 굽힘 등과 같은 물리적 변형과 힘을 가하였을 때에 대한 신호 변화를 탐지하여 웨어러블 물리 센서로써 활용도를 살펴보았다.

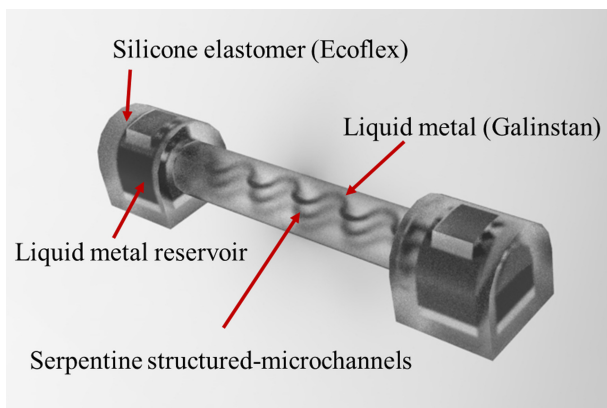


Fig. 1. Schematic design of wearable force sensor using 3D printed mold and liquid metal.

2. 연구 방법

2.1 액체 금속과 삼차원 프린팅을 통한 유연 물리 센서 제작

본 연구에서 제안하고자 하는 유연 물리 센서는 센서부에 외력이 가해지게 되면 액체 금속이 차 있는 마이크로 채널의 단면적이 작아지며 채널의 저항이 증가하게 되는 원리를 통해 힘을 측정한다. 이와 같이 저항의 변화를 통해 물리량을 측정하는 센서는 정전용량 방식의 센서보다 센서 신호의 측정이 간단하고 온도나 전도체 등의 외부 환경 요소에 의한 영향이 적어 웨어러블 디바이스에 활용되기 매우 적합한 방식이다. 본 센서는 크게 세가지 요소로 구성되어 있다. 서펜타인 형태의 다층 액체 금속 마이크로 채널, 이를 감싸고 있는 탄성 중합체, 그리고 외부 전극과 연결되는 액체 금속 저장소(reservoir)가 있다 (Fig. 1). 서펜타인 형태의 경우 센서가 웨어러블 디바이스로 활용될 시 사용자의 움직임에 의해 센서에 인장이 발생하게 되는데, 이로 인한 센서 신호의 변화를 최소화하여 외력을 측정하고자 할 시에 신호의 왜곡이나 변화없이 안정적인 측정이 가능하도록 한다.

서펜타인의 구조는 굽힘의 정도가 커질 수록 인장에 대한 변화량이 적게 나타나는데, 그 정도는 제작하고자 하는 센서의 크기, 제작 방식이 지닌 패터닝 해상도 등에 의해 결정되게 된다.

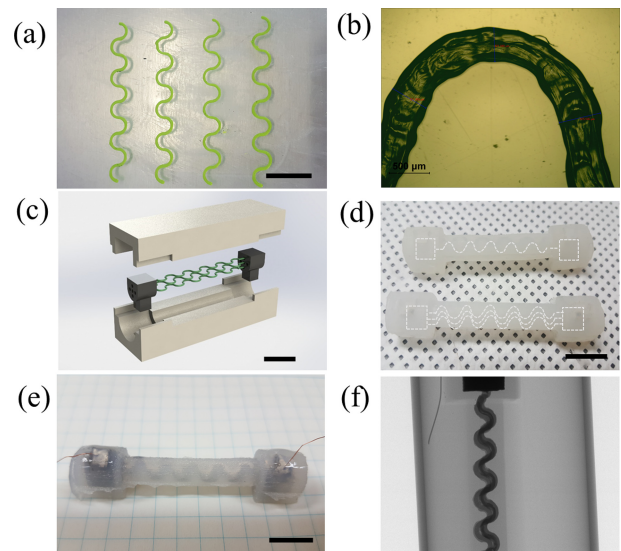


Fig. 2. Fabrication process (a) 3D Printing of microchannel molds with ABS and the sensor mold with TPU. The width and the thickness of the microchannel mold are designed as $400 \mu\text{m}$. (b) A microscopic image of 3D printed microchannel mold with serpentine pattern. (c) Schematic design of assembly of the components for the silicone elastomer casting (d) Removal of the molds for empty microchannel fabrication. Dash curves indicate the fabricated microchannels and the empty space for the reservoir. (e) Injection of the liquid metal and sealing of the holes after wiring. (Scale bar = 10 mm) (f) A micro-CT image of the fabricated sensor.

액체 금속 채널의 다층 구조는 기존 리소그래피나 스크린 프린팅과 같은 제작 방법으로는 구현하기 힘들고 여러 층을 제작하여 붙이는 형태로 제작이 되어야 하지만, 삼차원 프린팅을 통해 제작한 몰드를 삼차원으로 배열하여 간단하게 3층의 마이크로 채널 액체 금속을 제작할 수 있었다. 액체 금속을 둘러싸고 있는 탄성 중합체 (Ecoflex, Smooth-on)는 피부와 같이 신축성과 복원력이 뛰어난 물질로, 외부 기계적 변형에 쉽게 적응할 수 있는 장점이 있다. 이를 통해 웨어러블 디바이스로 활용하였을 시, 신체의 움직임을 방해하거나 불편하게 하지 않고 높은 착용감을 줄 수 있는 센서로 제작할 수 있다. 마지막으로 액체 금속의 경우 다른 단단한 기관의 전자 회로와 연결되기 위하여 이러한 공간을 제공할 수 있는 저장소가 필요하다. Galinstan은 다양한 금속과 낮은 접촉 저항을 가져 구리 도선 등을 이용하여 외부 측정부와 연결할 때 안정적인 전기적 연결을 유지할 수 있게 된다.

유연 물리 센서의 제작 방법은 다음과 같다. 첫째로 서펜타인 채널을 삼차원 모델링을 통해 제작한다. 본 연구에서 활용하는 삼차원 프린터(Ultimaker 3)의 경우 0.4 mm 지름의 노즐을 사용하였기 때문에 선폭과 두께는 0.4mm, 서펜타인 굽힘도 180°로 설계하였다. 제작된 모델링 파일을 삼차원 프린팅을 위하여 stl 파일로 변환하여 삼차원 프린터에서 제공하는 소프트웨어 (Cura)로 읽어 프린팅을 진행한다. 삼차원 프린터에서는 사용하는 물질에 따라 기본 프린팅 세팅값을 제공하게 되는데, 본 연구에서는 빌드 플레이트 베드 온도를 제외하고 이를 그대로 사용하였다. 빌드 플레이트 베드 온도의 경우 60°C 값을 그대로 사용하면 마이크로 채널 몰드를 제작한 후 이를 베드로부터 떼어낼 때 어려움이 있어 빠르게 상온에서 경화할 수 있도록 30°C로 내려 진행하였다. 본 실험에서는 삼차원 프린팅에서 주로 활용되는 열 경화성 중합체 acrylonitrile butadiene styrene (ABS)를 활용하여 채널을 제작하였다 (Fig. 2 (a)). 제작된 마이크로 채널 몰드의 경우 약 420~500 μm 두께로 제작됨을 알 수 있다 (Fig. 2(b)). FDM 방식 삼차원 프린팅의 경우 노즐 부의 국부적 열에너지를 통해 열가소성 중합체를 사출 시키며 제작하는 원리를 활용하기 때문에 만들어지는 채널의 두께가 프린팅의 조건 및 히팅 베드와의 레벨링 정도에 따라 차이가 나타나는 현상이 있다.

삼차원 프린팅으로 제작하여야 할 부품의 경우 마이크로 채널 몰드 말고도, 마이크로 채널 몰드가 배열 되어야할 서포트, 그리고 이를 모두 감싸고 센서의 외형을 결정지를 커버를 제작하여야 한다. 서포트의 경우에는 마이크로 채널 몰드의 끝단을 고정하여 다층으로 배열될 수 있도록 만들고, 커버는 센서와 저장소가 제작될 크기를 고려하여 역상으로 제작되었다. 커버는 추후 탄성 중합체를 떼어내야 하기 때문에 잘 뒤틀 수 있는 thermoplastic polyurethane (TPU) 재질로 제작하였다. 이렇게 제작된 각 부품을 순서에 맞게 조립을 하여 유연 물리 센서가 제작될 몰드를 완성시킨다 (Fig. 2(c)).

이후 경화제와 주제를 1:1로 섞은 Ecoflex에 담가 진공 챔버에서 공기를 제거해주면 조립된 몰드 빈 공간에 모두 탄성 중합체가 자리하게 된다. 이후 60°C에서 2시간 동안 경화를 시키고, 차례로 몰드를 제거하여 주면 서펜타인 형태의 다층 마이크로 채널과 저장소가 설계된 모양대로 제작할 수 있다 (Fig. 2(d)). 제작된 센서의 센싱부는 30 mm, 6.5 mm의 길이 및 폭, 그리고 저장소는 10 mm, 10 mm의 길이와 폭으로 제작되었다. 센서의 크기는 목적에 따라 조절이 가능하다. 그리고 제작된 탄성 중합체 구조에 액체 금속을 채우고 구리 전선을 연결하고 구멍을 막아 센서를 완성하게 된다 (Fig. 2(e)). 액체 금속의 경우 탄성 중합체 내부 빈 공간에 빠곡히 채우는 것이 매우 중요한데, 이는 공기 방울이 마이크로 채널 내부로 삼입될 시에 단선을 일으켜 센서 신호를 방해하기 때문이다. 이를 위해 액체 금속을 저장소에 넣고 진공을 잡아 마이크로 채널 내부에 빈 공간 없이 채울 수 있도록 제작하였다[17]. 이는 엑스선 컴퓨터 단층 촬영기 (SkyScan 1272, Bruker AXS) 를 통해 촬영된 이미지를 통해 채널 내부에 Galinstan이 잘 채워져 있음을 확인할 수 있었다 (Fig. 2(f)).

3. 결과 및 고찰

3.1 유연 힘 센서의 특성 평가

3.1.1 유연 힘 센서의 특성 평가

위에서 제작된 유연 힘 센서의 성능을 측정하기 위하여 세가지 실험을 고안하였다. 먼저 유연 힘 센서에 로드를 가하며 이에 따른 저항 변화를 살펴보았다. 제작된 센서를 평판에 두고 로드셀에 탐을 연결하여 3 mm 깊이 아래로 센서를 누르도록 변위를 조정하였다 (Fig. 3(a)). 3 mm 내려온 상태에서 머무는 시간을 t_1 , t_2 , 그리고 t_3 로 다르게 하고, 각각 0, 10, 20초씩 머물러 원래 상태로 돌아오도록 하였다. 그 결과, 약 0.9N의 힘에 대하여 t_1 의 경우 저항 변화가 45%, t_2 는 70%, t_3 는 80%의 저항 변화가 나타났다 (Fig. 3(b)). 이는 힘을 지속하는 시간에 따라 신호의 최종 값에 차이가 있음을 알 수 있었다. 기본적으로 탄성 중합체에는 점탄성적 성질이 있어, 짧은 시간 동안 힘을 가하면 응력이 분산되어 평형 상태까지 되는 시간이 필요하다. 본 센서 역시 센서의 점탄성적 성질로 인해 힘을 가하는 시간에 따른 차이가 나타남을 알 수 있었다. 이는 센서의 저항 값에서만 아니라 상용 힘 센서에서 측정된 값이 응력 완화되는 현상을 통해서도 확인할 수 있다. 이러한 현상은 실험처럼 순간적인 힘이 아닌 충분한 시간을 두고 힘이나 압력이 가해져 점탄성적 성질이 나타나지 않는 경우에는 일어나지 않게 된다.

유연 힘 센서가 웨어러블 디바이스로써 활용되기 위해서는 오랜 기간 동안 안정적인 성능을 보여야 하기 때문이 이를 파악하는 것은 중요하다. 다음은 센서 신호의 안정성을 확인하기 위한 반복 로딩 테스트를 진행하였다. 3 mm의 변위를 1 mm/s의

속도로 반복적으로 가하였을 때 저항 변화가 변위 변화처럼 반복적으로 나타남을 확인할 수 있었다. 센서가 반복 테스트 초기에는 35% 정도의 저항 변화를 나타내다가 점차 28%의 저항 변화로 줄어들며 이 값이 계속 지속되었다 (Fig. 3(c)). 이는 센서

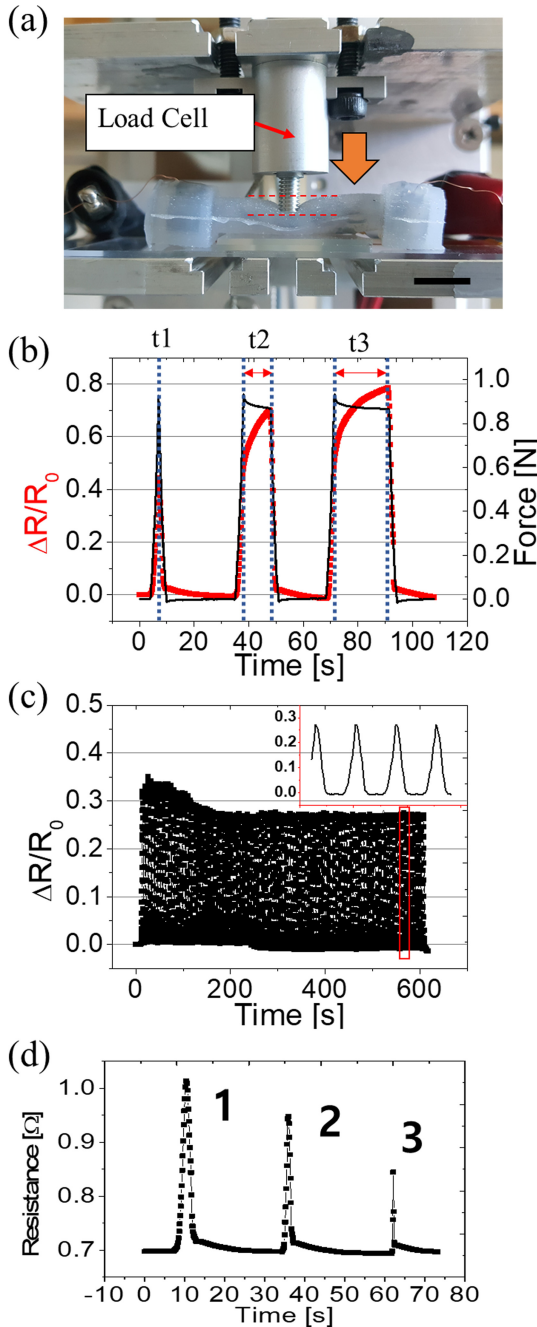


Fig. 3. (a) Experimental setup for testing resistance change vs force (b) Loading and unloading using the force tip and the linear stage. The tip was inserted 3 mm down from the sensor surface. Resting time t_1 , t_2 and t_3 were 0, 10, and 20 seconds, respectively. (Scale bar = 10 mm) (c) Cyclic test, the number of cycle was 100 times ($v = 1$ mm/s displacement = 3 mm). Inset magnified the red rectangle area. (d) Input speed dependency. 1: 1 mm/s, 2: 2 mm/s, and 3: 5 mm/s. Input displacement was 2 mm.

초기에 가해지던 변위로 인한 변형이 초기 이후에 일정하게 자리 잡혀 계속 지속된 것으로 해석할 수 있다. 액체 금속의 경우 점성이 매우 작고, 피로로 인한 균열이 나타나지 않는 고유한 물리적 성질때문에 100회 이상의 반복 테스트에도 안정적인 신호를 보여줄 것으로 예상된다.

유연 물리 센서의 로딩 속도에 따른 반응을 확인하기 위해 2 mm의 일정한 변위를 다른 속도로 로딩을 하며 신호를 확인하는 실험을 진행하였다. 속도는 각각 1 mm/s, 2 mm/s, 그리고 5 mm/s로 진행하였다. 속도가 1 mm/s 인 경우, 저항이 0.7 Ω 에서 1 Ω, 2mm/s는 0.95 Ω, 5 mm/s는 0.85 Ω이 최대값으로 나타났다. 이는 위에서 설명한 바와 같이 탄성 중합체의 점탄성적 성질로 인해 저항 변화가 평형 상태에 도달하기에 충분한 시간이 필요한 것으로 파악이 된다. 하지만 충분히 빠른 신호에 대해서도 저항 변화가 나타나기 때문에 맥박 변화와 같은 작고 빠른 생체 신호를 측정할 수 있을 것으로 예상된다.

3.1.2 인장과 굽힘에 대한 안정성 평가

유연 물리 센서가 웨어러블 디바이스로 활용될 때 신체의 움직임에 의해 다양한 인장과 굽힘에 변형이 나타나게 된다. 이때 힘 센서의 신호값이 함께 달라지게 된다면 정확한 힘 센서의 값을 측정할 수 없어진다. 웨어러블 디바이스로 활용되는 유연 물리 센서는 측정하고자 하는 변수에만 종속적으로 신호가 달라지게 하고 다른 요인에는 독립적이게 설계하여야 하는데, 이는 여전히 해결 되어야할 중요한 문제이다. 그렇기 때문에 유연 힘 센서의 경우 인장이 가해졌을 때나 굽힘 현상이 나타날 때 센서 신호의 변화값이 일정 수준 이상으로 크게 나타나게 되면 안된다.

본 실험에서는 인장과 굽힘에 대한 안정성 평가를 위해 두 가지 실험을 진행하였다. 첫째로 서펜타인 형태의 액체 금속 마이크로 채널로 제작된 센서와 선형 형태의 마이크로 채널 센서의 인장에 대한 저항 변화를 평가하였다. 센서의 양단을 지그에 고정하고 표점 거리(Gauge length)에 대하여 길이 방향으로 1 mm/s의 속도로 100% 인장(또는 +30 mm)이 가해졌으며 이에 따른 저항 변화를 동시에 측정하였다 (Fig. 4(a)). 그 결과 선형 패턴의 마이크로 채널 센서의 경우 저항이 최대 20% 증가하였고 큰 신호 이력 현상이 나타났지만, 서펜타인 패턴 센서의 경우 인장이 일어남에도 불구하고 저항 변화가 $\pm 5\%$ 이내로 안정적으로 나타났다. 선형 패턴의 센서의 경우 인장이 일어남에 따라 내부 마이크로 채널의 단면적이 감소하게 되어 저항이 커지게 되는데, 서펜타인 형태는 인장이 발생되면 굽혀 있는 마이크로 채널이 펴지게 되면 단면적 감소를 보상해주는 효과가 나타나 저항 변화가 크게 나타나지 않게 된다. 이를 통해 인장에 대해 저항 변화가 크게 나타나지 않는 안정적인 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

그리고 센서의 중간에 굽힘을 가하며 신호 변화를 살펴보았다. 센서의 양단을 고정하고 센서의 중간 부위를 접히도록 지그

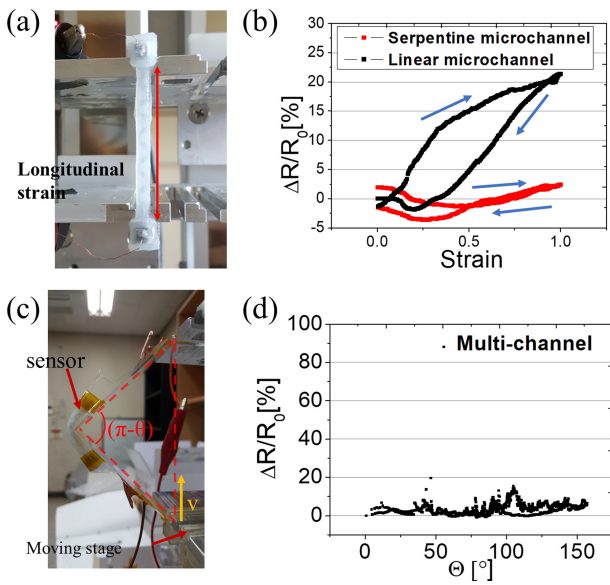


Fig. 4. (a) Experiment setup for longitudinal strain test. (b) Resistance change from strain 0% to 100% compared with the result of the linear microchannel sensor. Blue arrows indicate the loading and unloading paths. ($v=1$ mm/s) (c) Experiment setup for bending test. The resistance of the sensor was monitored while the bending angle, θ was decreased. Red dash lines indicate the triangle need to obtain the bending angle, θ . Yellow arrow indicates the direction of the stage movement ($v=1$ mm/s) (d) Resistance change vs the bending angle, θ .

를 설계하여 중심각 Θ 값을 0° (굽힘이 없는 상태)에서 160° (굽힌 상태)까지 변화를 주었다 (Fig. 4(c)). 지그는 수직으로 1mm/s의 속도로 움직여 각도를 조절하였고, 양 지그 사이의 거리를 통해 Θ 를 계산하였다. 센서 저항 값은 약 40° 까지 8% 이내의 저항 변화값이 나타났고 160° 의 큰 굽힘이 일어나는 동안 최대 20% 이내로 저항 변화가 나타났다. 굽힘각이 커질수록 저항변화가 커지는 상관관계가 뚜렷이 나타나지 않았으며 굽힘 실험 후 센서의 초기값으로 잘 복원되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 특성을 통해 손가락과 같이 굽힘이 많이 발생하는 관절 부위에도 웨어러블 디바이스로써 활용될 수 있음을 알 수 있다.

3.2 웨어러블 디바이스로의 활용

유연 물리 센서는 재료의 고유한 신축성, 유연성으로 인장과 같은 물리적 변형이 다양하게 나타나는 웨어러블 디바이스로의 활용에 큰 장점을 지니고 있다. 이로 인해 최근 이러한 유연 물리 센서를 신체에 부착하여 힘, 압력 등 다양한 물리량을 측정하고자 하는 시도가 나타나고 있다. 특히 힘 센서의 경우 신체에 부착될 시에 다양한 역할을 할 수 있다. 화상으로 인해 피부의 감각 세포가 기능을 하지 못할 경우, 유연 힘 센서의 부착으로 피부의 감각을 대신해 줄 수 있고, 또한 인장 등이 일어나는 다양한 관절 부에 부착하여 운동, 재활 시 부착 부위에 가해지는

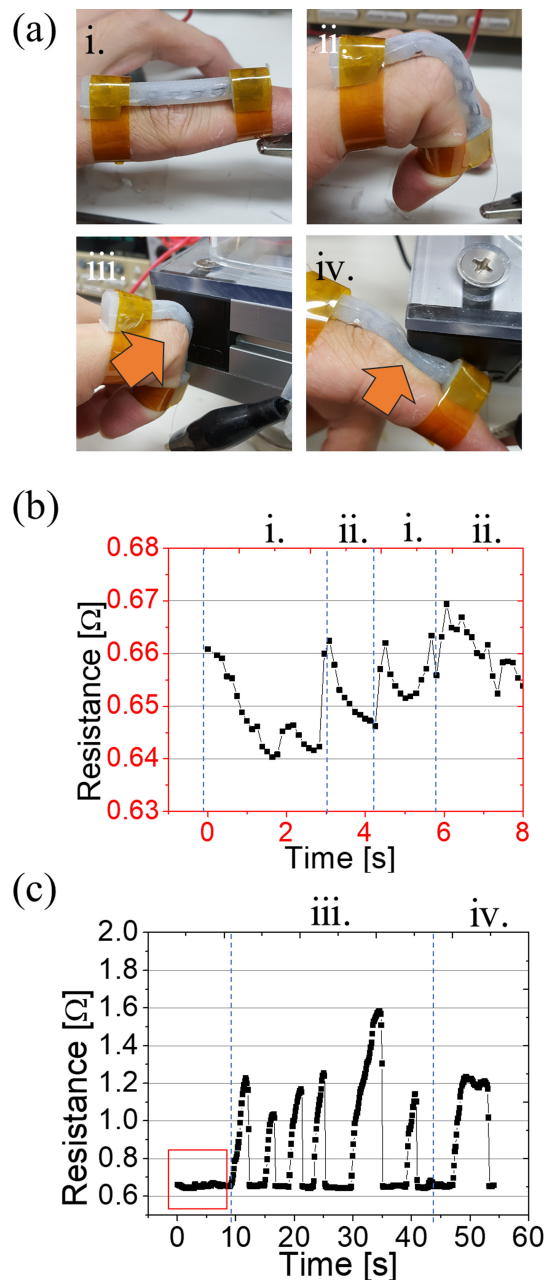


Fig. 5. Wearable force sensor on the finger joint. (a) Various finger actions. i. Straight ii. Bending iii. Applying force while bending iv. Applying force with straight finger. Arrows indicate the force direction. (b, c) Real-time resistance monitoring during various actions. (b) is the red rectangle in (c).

는 힘을 모니터링 하여 운동 능력, 재활 정도 등을 파악할 수 있는 기기로 활용할 수 있다. 또한 소프트 로보틱스와 같이 신축성 기관에 부착하여 소프트 로봇의 액츄에이션으로 발생하는 힘, 압력 등을 감지 할 수 있는 기능을 부여할 수도 있다.

본 연구에서는 유연 힘 센서를 손가락 관절 부에 부착하여 관절 움직임에 따른 센서 신호 변화를 살펴보고 관절을 굽히거나 펴는 상태에서 외력을 가했을 때 달라지는 저항 변화를 관찰하여,

개발된 센서가 웨어러블 디바이스로서 활용 가능성이 있는가를 파악하고자 한다. 먼저 손가락의 움직임 및 행동을 네 가지로 분류하였다 (Fig. 5(a)). 손가락을 편 상태(i), 손가락을 굽힌 상태(ii), 손가락을 굽히고 힘을 가하는 상태(iii), 그리고 손가락을 펴고 힘을 가하는 상태(iv)로 경우를 나누었다. 이는 일상 생활에서 손가락을 굽혔다 펴는 행동을 할 때 나타나는 신호 변화와, 어떠한 상태에서도 힘이 가해지는 상태를 측정할 수 있는지를 알아보기 위함이다.

먼저 힘을 가하지 않고 i와 ii를 반복하는 실험을 진행하였다 (Fig. 5(b)). 손가락을 굽힐 경우 인장과 굽힘이 발생하기 때문에 순간적으로 저항이 증가하지만 다시 평형 상태로 떨어지게 되고, 손가락을 펼 경우에도 액체 금속의 내부 유동에 따라 저항이 약간 커지고 작아지고 하는 현상이 나타나게 되었다. 손가락 위에 센서가 부착될 경우 회전 중립축(neutral axis)이 손가락 중심에 존재하기 때문에 센서는 인장과 굽힘이 동시에 나타나는 복합 변형이 일어나게 된다. 이 경우에 앞의 특성 평가 실험에서 나타난 것처럼 저항이 꾸준히 증가하거나 하는 현상이 나타나는 것이 아님을 인지하여야 한다. 하지만 이 저항 변화의 정도가 3% 이내로 매우 작은 수준으로 나타났다.

이 후 외부에 힘을 가하는 iii과 iv의 실험을 진행하였다 (Fig. 5(c)). 손가락을 굽힌 채 외부에 힘을 가하였을 때 저항 변화가 100% 수준으로 나타났고, 힘을 반복적으로 가하여도 매 초기 값으로 저항이 잘 회복되고, 저항 변화가 사용자가 의도한 대로 잘 나타남을 확인할 수 있었다. 손가락을 편 상태로 힘을 가하여도 마찬가지로 저항 변화가 안정적으로 나타남을 확인할 수 있었다. 이를 통해 제작된 유연 힘 센서가 반복적인 인장, 굽힘에 대하여 영향을 받지 않고 센서가 오롯이 외력에 의해서만 저항이 커지게 되는 것을 확인하고, 웨어러블 디바이스로서 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 삼차원 프린팅을 통해 제작한 몰드와 액체 금속을 활용하여 제작한 유연 물리 센서를 소개하였다. 삼차원 프린팅을 통해 패터닝이 어려운 액체 금속을 쉽게 원하는 크기와 모양의 마이크로 채널에 삽입할 수 있었고, 액체 금속의 고유한 기계전기적 특성을 이용하여 높은 인장율과 굽힘각에도 신호 변화가 나타나지 않고 외력에 의해서만 신호가 변화하는 안정적인 성능을 보이는 웨어러블 유연 센서를 제작할 수 있었다. 제작된 센서의 경우 다양한 로딩 조건에 따른 결과에 대하여 고찰하였고, 반복 테스트를 통해 안정적인 성능을 보임을 알 수 있었다. 그리고 손가락 관절에 센서를 부착하여 다양한 손가락 움직임과 행동에 대하여 실시간 측정을 진행하여 인장과 굽힘에 독립적이고 안정적인 성능을 보이는 센서를 제작하였음을 확인할 수 있었다. 탄성 중합체 내 액체 금속을 안정적으로 포집

하고 저항 측정을 위한 인터커넥션 및 패키징의 개선이 있다면 적극적으로 인장과 굽힘이 많이 발생하는 관절부의 힘을 측정할 수 있는 웨어러블 디바이스로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1A2B2004910).

REFERENCES

- [1] C. Pang, C. Lee, and K. Y. Suh, "Recent advances in flexible sensors for wearable and implantable devices", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 130, No. 3, pp. 1429-1441, 2013.
- [2] M. Amjadi, K. U. Kyung, I. Park, and M. Sitti, "Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: a review", *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 26, No. 11, pp. 1678-1698, 2016.
- [3] S. Bauer, S. Bauer-Gogonea, I. Graz, M. Kaltenbrunner, C. Keplinger, and R. Schwödinger, "25th anniversary article: A soft future: From robots and sensor skin to energy harvesters," *Adv. Mater.*, Vol. 26, No. 1, pp. 149-162, 2014.
- [4] 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," *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 19, No. 12, p. 1700016, 2017.
- [5] Z. Wang, S. Wang, J. Zeng, X. Ren, A. J. Chee, B. Y. Yiu, W. C. Chung, Y. Yang, A. C. Yu, and R. C. Roberts, "High sensitivity, wearable, piezoresistive pressure sensors based on irregular microhump structures and its applications in body motion sensing," *Small*, Vol. 12, No. 28, pp. 3827-3836, 2016.
- [6] K. Kim, J. Park, J.-h. Suh, M. Kim, Y. Jeong, and I. Park, "3D printing of multiaxial force sensors using carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) filaments," *Sens. Actuators A Phys.*, Vol. 263, pp. 493-500, 2017.
- [7] D. Kwon, T.-I. Lee, J. Shim, S. Ryu, M. S. Kim, S. Kim, T.-S. Kim, and I. Park, "Highly sensitive, flexible, and wearable pressure sensor based on a giant piezocapacitive effect of three-dimensional microporous elastomeric dielectric layer," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 8, No. 26, pp. 16922-16931, 2016.
- [8] X. Wu, Y. Han, X. Zhang, Z. Zhou, and C. Lu, "Large-area compliant, low-cost, and versatile pressure-sensing platform based on microcrack-designed carbon Black@ polyurethane sponge for human-machine interfacing," *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 26, No. 34, pp. 6246-6256, 2016.
- [9] S. Yao, P. Swetha, and Y. Zhu, "Nanomaterial-Enabled Wearable Sensors for Healthcare," *Adv. Healthc. Mater.*, Vol. 7, No. 1, p. 1700889, 2018.
- [10] J. Kim, S.-J. Park, T. Nguyen, M. Chu, J. D. Pegan, and M.

- Khine, "Highly stretchable wrinkled gold thin film wires," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 108, No. 6, p. 061901, 2016.
- [11] D. Y. Choi, M. H. Kim, Y. S. Oh, S.-H. Jung, J. H. Jung, H. J. Sung, H. W. Lee, and H. M. Lee, "Highly stretchable, hysteresis-free ionic liquid-based strain sensor for precise human motion monitoring," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 9, No. 2, pp. 1770-1780, 2017.
- [12] T. Jung and S. Yang, "Highly stable liquid metal-based pressure sensor integrated with a microfluidic channel," *Sensors*, Vol. 15, No. 5, pp. 11823-11835, 2015.
- [13] B. Zhang, L. Zhang, W. Deng, L. Jin, F. Chun, H. Pan, B. Gu, H. Zhang, Z. Lv, and W. Yang, "Self-powered acceleration sensor based on liquid metal triboelectric nanogenerator for vibration monitoring," *ACS nano*, Vol. 11, No. 7, pp. 7440-7446, 2017.
- [14] Q. Wang, Y. Yu, J. Yang, and J. Liu, "Fast fabrication of flexible functional circuits based on liquid metal dual-trans printing," *Adv. Mater.*, Vol. 27, No. 44, pp. 7109-7116, 2015.
- [15] A. Hirsch, H. O. Michaud, A. P. Gerratt, S. De Mulatier, and S. P. Lacour, "Intrinsically stretchable biphasic (solid-liquid) thin metal films," *Adv. Mater.*, Vol. 28, No. 22, pp. 4507-4512, 2016.
- [16] G. Li, X. Wu, and D.-W. Lee, "A galinstan-based inkjet printing system for highly stretchable electronics with self-healing capability," *Lab Chip*, Vol. 16, No. 8, pp. 1366-1373, 2016.
- [17] Y. Lin, O. Gordon, M. R. Khan, N. Vasquez, J. Genzer, and M. D. Dickey, "Vacuum filling of complex microchannels with liquid metal," *Lab Chip*, Vol. 17, No. 18, pp. 3043-3050, 2017.