한국정밀공학회지 제 39 권 제 4 호 pp. 307-313 April 2022 / 307
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 39, No. 4, pp. 307-313 http://doi.org/10.7736/JKSPE.021.113
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

Check for updates

신축성 전도 섬유의 소프트 구동기 적용 및 성능 분석

Design and Evaluation of Soft Actuators Including Stretchable Conductive Fibers

이혜원[1], 한예지[1], 강민채[1], 이주희[1], 한민우[1,#]
Hye Won Lee[1], Yeji Han[1], Minchae Kang[1], Ju-Hee Lee[1], and Min-Woo Han[1,#]

1 동국대학교 기계로봇에너지공학과 (Department of Mechanical, Robotics, and Energy Engineering, Dongguk University)
Corresponding Author / E-mail: mwhan@dgu.edu, TEL: +82-2-2260-3997
ORCID: 0000-0003-0461-5136

KEYWORDS: Conductive fiber (전도성 섬유), Soft actuator (소프트 구동기), Textile actuator (텍스타일 구동기), Smart clothing (스마트 의류), Shape memory alloy (형상 기억 합금)

In this study, soft actuators comprising conductive fibers, flexible polymers, and shape memory alloys, which can be used as textile products, are introduced. Conductive fibers play an important role because they can be used as sensors in wearable devices. The conductive fiber introduced in this study is a form that can be combined with a polymer, and it comprises a form wrapped around a flexible polymer. When an electric current is applied to the shape memory alloy embedded in the polymer, macroscopic deformation occurs due to phase transformation from the Martensite to the Austenite phase. Conductive fibers used in soft actuators are affected by resistive heat generated by the shape memory alloy and bending deformation of the actuator. Accordingly, changes in the conduction properties of conductive fibers were observed due to bending deformation and temperature changes. We also fabricated soft actuators with different types of polymers and observed the differences. The soft actuator presented in this study is a one-piece combination of a conductor and an actuator using a textile-type conductor, and it is likely to be used in smart clothing applications.

Manuscript received: October 16, 2021 / Revised: February 11, 2022 / Accepted: February 15, 2022

1. 서론

1.1 신축성 전도체

최근 웨어러블 디바이스들이 주목을 받으면서 텍스타일 구동기에 대한 필요성이 증가하고 있다. 그 중에서도 신축성 전도체가 적용된 텍스타일 구동기는 다양한 형태의 웨어러블 센서 및 구조물에 적용 가능하다는 점에서 유용하다.

근래의 신축성 전도체 관련 연구들은 주로 폴리머를 활용하였으며 폴리머 구조물에 직·간접적으로 전도성을 부여하여 이를 구동체로 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 폴리머가 전도성을 띄게 하는 방법은 본질적으로 전도성을 띄는 폴리머와 비본질적으로 전도성을 띄는 폴리머 두 가지로 나뉠 수 있다. 본질적으로 전도성을 띄는 폴리머는 화학적으로 합성한 폴리머이며, 인조 금속이라 불린다. 이는 뛰어난 전도성을 지니고 있으며, 화학적으로 합성하는 것도 어렵지 않으나 기계적 성질이 좋지 않다는 단점이 있다. 반면, 비본질적으로 전도성을 띄는 폴리머는 일반적인 폴리머에 전도성을 띄는 탄소나 금속 가루와 같은 충전제(Filler)를 섞어서 제작하게 된다. 이의 전도성은 다소 낮은 값을 지니지만 기계적 성질이 우수하다는 장점이 있다[1].

또한 섬유를 기반으로 하여 전도성 재료를 적용한 신축성 전도체도 존재한다. 그 중 하나는 나일론 섬유의 표면에 전도성 미소 탄소 분자들을 부착하여 활용하는 방법이다. 이들 조합은 상대적으로 큰 저항을 갖는다고 발표된 바 있다[2].

1.2 형상 기억 합금(Shape Memory Alloy, SMA)

형상 기억 합금은 온도에 따라서 상이 변화하며 이에 따라

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
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.

결정체의 구조가 달라진다. 상 변화 시 상대적으로 큰 구동력이 변위의 생성과 함께 발생한다는 점 때문에 형상 기억 합금은 구동기[3], 인공근육, 웨어러블 디바이스, 소프트 로봇 등에서 유용한 소재로 주목을 받고 있다[4].

형상 기억 합금을 활용하여 생체 모사 로봇의 구동기로 적용한 연구들이 다수 발표되었으며, 특히 로봇시스템의 구동기로써 활용되어 크롤러(Crawler), 점퍼(Jumper), 워커(Walker) 뿐만 아니라 물고기, 곤충, 식물 등 다양한 종류의 생체 모사 로봇에 적용된 바 있다[5]. 또한, 형상 기억 합금은 경량화된 구조물로의 적용이 용이하여 웨어러블 디바이스의 능동형 구조물에도 다수 적용된 바 있다. Chernyshov 등[6]은 형상 기억 합금을 활용하여 웨어러블 디바이스의 구동기를 제작하여 발표하였다. 해당 연구에서는 기존 햅틱 인터페이스의 대체제로 형상 기억 합금을 사용하였으며 이를 활용한 가볍고, 유연하며 조용한 햅틱 구동기를 소개하고 있다.

1.3 전도성 섬유

웨어러블 디바이스의 수요 증가와 함께 전도성 섬유에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다[7,8]. 전도성 섬유를 사용하면 금속의 성질을 보이면서도 가볍고, 신축성을 가지며, 착용감이 좋은 기기를 개발할 수 있다는 장점이 있다. 이번 연구에 사용한 전도성 섬유는 나일론에 은 나노 코팅 처리를 한 원단을 사용하였다. 이의 기본 성질로는 일정 범위의 인장력을 가했을 때 저항이 감소하고, 온도가 증가하였을 때 저항이 증가한다.

1.4 신축성 전도체의 필요성

신축성 전도체가 활용되는 대표적인 사례로서 인간-로봇 상호작용을 위한 데이터 글로브에 사용되는 센서를 들 수 있다. 사용자가 데이터 글로브를 착용한 뒤 손가락을 움직이게 되면, 신축성 전도체에 작용하는 정전 용량(Capacity)의 차이에 따라 손가락의 움직임을 감지한다[9,10].

반면 신축성 전도체를 이용한 구동기를 의류에 활용하는 방법도 있다. Jing 등[11]은 산화 그래핀과 탄소 나노튜브를 이용하여 얇은 필름 구동기를 개발하였다. 이 구동기는 사용자의 땀 흘림 여부를 온도에 따라 파악할 수 있도록 설계되어 차후 스마트 의류에 활용될 수 있음을 보여주었다. 이 밖에도 다양한 형태의 신축성 전도체가 스마트 의류에 활용되었으며, 스마트 의류에 신축성 전도체 및 웨어러블 전자 장치가 도입될 경우 건강 상태 추적, 환경 안전성 추적, 스트레스 레벨 관리, 물리적 힘 도모 등의 역할을 수행할 수 있다[12,13].

본 연구에서는 형상 기억 합금의 상변화로 기인되는 변위 발생을 활용하여 구동이 가능한 소프트 구동기에 신축성 전도체를 더하여 전도체-구동기 일체형 구조물을 제시하였다. 개발된 신축성 전도체를 포함한 소프트 구동기의 성능 특성을 관찰하기 위하여 형상 기억 합금에 인가되는 전류량에 따른 전도체의 저항 변화, 온도 변화, 힘 변화를 측정하였으며, 또한 전도체의 온도에 따른 저항 변화 특성을 관찰하였다.

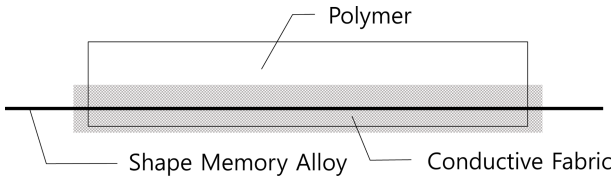


Fig. 1 Conceptual view of specimen

Table 1 Properties of materials [14-16]

Properties	Smooth Sil 950	PDMS	SMA
Density [g/cm^3]	1.24	0.97	6.45
Thermal conductivity [W/M·K]	0.26	0.15	0.18
Viscosity [cps]	30,000	35,000	-
Shore A hardness [A]	50	54	-
Tensile strength [Mpa]	5.00	2.24	-
Thermal expansion coefficient [^{o}C]	-	-	Martensite 6.6 × 10^{-6}
			Austenite 11.0 × 10^{-6}
Electrical resistivity [μΩ·cm]	-	-	Martensite 80
			Austenite 100

2. 설계 및 제작

2.1 설계

본 연구에서의 소프트 구동기는 신축성 전도체와 형상 기억 합금이 결합된 형태로 설계되었다. 형상 기억 합금은 전류 인가에 의해 발생되는 저항 열로 인하여 수축 구동을 하게 되며, 이러한 구동 특성을 활용하여 신축성 전도체가 신축되도록 설계하였다. 구동기는 신축 발생의 역할을 하는 내피, 전류가 통할 수 있도록 전도 역할을 하는 외피로 구성되었다. 내피의 제작을 위하여 Fig. 1과 같이 전류를 가하면 수축하는 형상 기억 합금을 신축성을 위한 폴리머로 감싸 제작하였다. 이때, 폴리머는 형상 기억 합금의 변형에도 찢어지지 않고 버틸 수 있도록 쇼어 경도 43에 해당하는 Polydimethylsiloxane (PDMS)와 쇼어 경도 50에 해당하는 Smooth Sil 950(Smooth On)을 사용하였다. 외피는 일반 섬유 구조로 이루어져 있으며, 신축성 전도체의 기판 역할을 할 수 있는 은 나노 입자로 코팅된 나일론 전도성 원단(ZZB-2, Soitex)을 사용하였다. 형상 기억 합금은 지름이 0.02 mm인 와이어 형상으로 상 변화에 의한 변형량이 5-7% 재료를 사용하였다. 그 외의 사용한 재료의 기본 물성은 Table 1과 같다.

2.2 제작

제작의 순서는 Fig. 2와 같이 몰드 제작, 형상 기억 합금 삽입, 폴리머 경화 과정으로 진행되며 아래의 네 단계로 구분할 수 있다. 1단계는 Fig. 2(a)와 같이 몰드를 설계하고 이를 제작한다. 몰드는 5 × 5 × 150 mm의 직사각 외형에 0.5 mm 편심된 지름 4.5 mm의

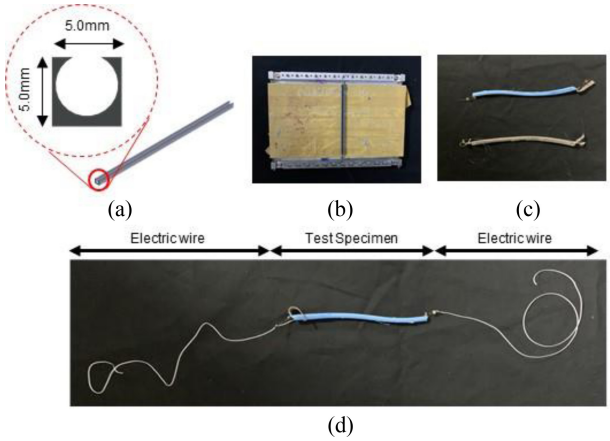


Fig. 2 Manufacturing process of the soft actuator, (a) Mold modeled by 3D CAD tool, (b) Positioning conductive fabric and SMA before pouring polymer, (c) Completed specimen, and (d) Electric wire connection to the actuator

관통원이 배치된 형상으로 설계되었다. 이를 PLA를 사용하여 3D 프린팅하였다. 2단계는 제작된 몰드에 5 × 20 mm의 직사각형 전도성 섬유를 중심축이 맞도록 삽입한다. 형상 기억 합금 3가닥을 꼬아서 양 끝단을 나사로 고정한 뒤 몰드의 양단을 막아주어 다음 제작 단계에서 폴리머가 새지 않도록 처리해 준다. 3단계는 몰드에 액상 폴리머를 붓고, 오븐에 넣은 뒤 80ºC에서 8시간 동안 경화 과정을 거친다. 4단계는 경화된 폴리머가 손상되지 않도록 몰드를 제거하고 완성된 시편을 몰드로부터 분리시킨다.

3. 실험 및 결과

형상 기억 합금에 전원 인가 시 발생하는 구동 변위를 측정하고, 이에 따른 전도성 섬유의 특성 변화를 관찰하고자 실험을 수행하였다. 구동 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 2(d)와 같이 시편의 양 끝단에 난연성 전선을 연결하였다. 이는 전원 공급을 위한 보조 장치들로 인하여 발생할 수 있는 외력을 최소화하기 위함으로 시편의 양 끝단에 극세성 난연성 전선 약 500 mm를 연결하고, 그 끝에 전원공급기를 연결하여 전류를 흘려주었다. 저항 측정을 위하여 외피의 전도성 원단에 저항 측정기를 연결하였으며, 형상 기억 합금에 2.2, 2.4 A의 전류를 각각 흘려주었다. 형상 기억 합금에서 발생하는 저항 열이 폴리머로 전달되어 전도성 원단에 열을 가하는 과정에 따른 시편 특성 변화를 관찰하였다. 설정된 전류 인가 시간이 경과된 이후에는 전원 공급을 중단하고 형상 기억 합금의 온도가 낮아질 수 있도록 하였다. 이 과정을 쿨링(Cooling)이라 하였다. 쿨링 시 제작된 시편은 폴리머의 탄성력으로 인하여 시편의 초기 상태로 돌아오려 한다. 쿨링 과정 동안 발생하는 저항 변화량을 측정하였다. 쿨링 이후에도 각 시편이 초기 상태로 회복되게 하기 위해서 1시간 이상의 시간 간격을 두고 실험을 진행하였다. 실험의 구성은 Fig. 3과 같다.

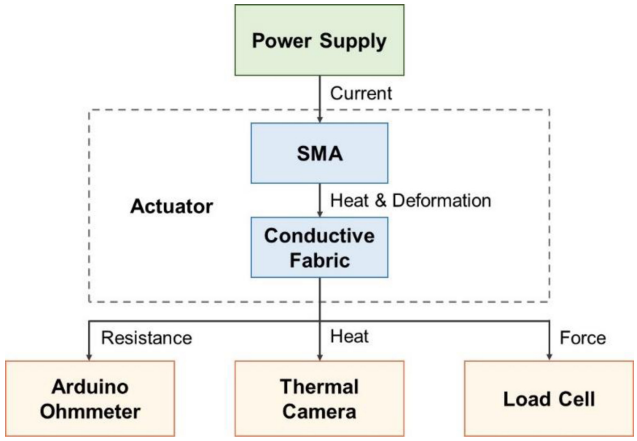


Fig. 3 Schematic diagram of experiments

3.1 저항 측정 실험 결과

형상 기억 합금 와이어가 삽입되는 폴리머의 재료를 PDMS와 Smooth Sil로 달리하여 구동기를 제작한 뒤 각 시편의 굽힘 변형에 의한 저항을 측정하였다. 시편의 한쪽 끝을 스탠드에 고정하고 다른 쪽은 굽힘 운동이 방해되지 않도록 한다. 형상 기억 합금과 연결된 전선 양끝을 전원 공급기에 연결하여 전류를 보내주었고, 전도 섬유의 양끝을 저항 측정기에 연결하여 저항 변화를 관찰하였다.

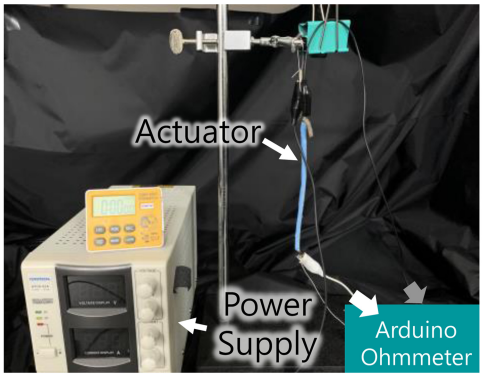
실험에 사용된 각 폴리머의 재료 성질은 Table 1과 같다. Smooth Sil은 약 180초, PDMS는 약 270초 동안 2.2, 2.4 A의 전류를 각각 인가하면서 저항을 측정하였으며, 쿨링 시의 저항 변화를 알아보기 위하여 전류를 차단한 이후에도 Smooth Sil 약 180초, PDMS 약 240초 동안 저항 변화를 관찰하였다. 실험 결과는 Fig. 4와 같다.

3.1.1 Smooth Sil

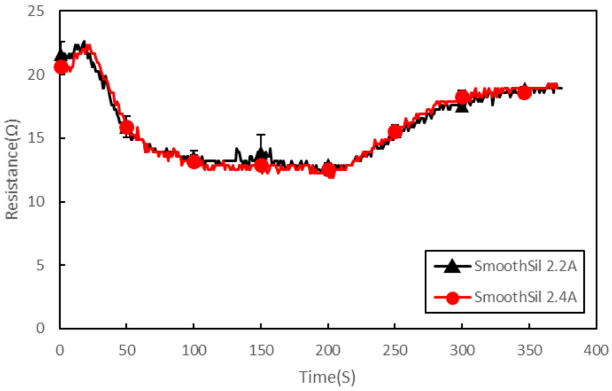
Fig. 4(b)는 Smooth Sil 시편에서 관찰된 저항 변화량을 보여주고 있다. 시편의 저항은 형상 기억 합금에서 발생되는 저항 열과 시편의 굽힘 변형에 영향을 받으며, 초기값에서 최댓값까지 저항이 증가한 이후 다시 감소하여 최솟값에 도달하는 경향을 보였다. 그 이후 전류 인가를 종료할 때까지 최솟값을 유지하며, 전류 인가를 중단한 후 쿨링이 시작되면 다시 초기값으로 저항이 복원되는 것을 관찰하였다. 이러한 경향은 폴리머의 종류와는 관계없이 동일하였으며, 폴리머의 종류에 따라 최댓값, 최솟값과 그 값들에 도달하는 시간에는 차이가 발생하였다. Smooth Sil은 약 11초에 걸쳐 4.7%의 저항값이 증가하였다가 78초에 걸쳐 56.8% 감소한다. 전류 중단 이후 쿨링하는 237초 동안 초기의 저항값으로 돌아와 최솟값보다 약 147.0% 증가함을 알 수 있었다.

3.1.2 PDMS

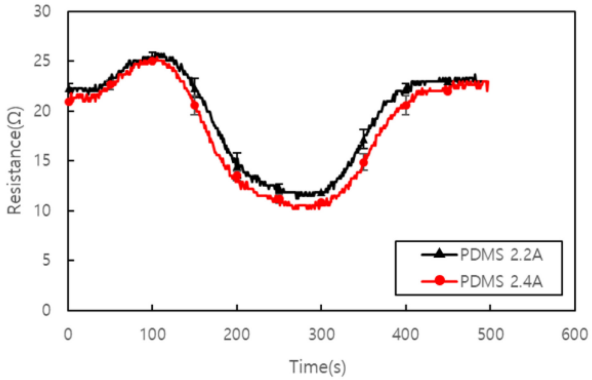
저항 변화의 추이는 Smooth Sil 시편과 유사하며, 실험 결과는 Fig. 4(c)와 같다. 전류를 인가하면 초기값에서 약 105초에



(a) Measurement of the resistance

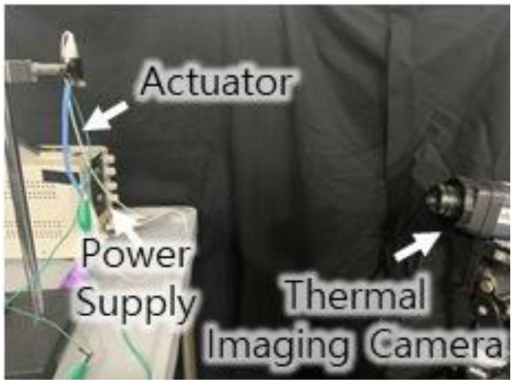


(b) Smooth Sil-matrix based soft actuators

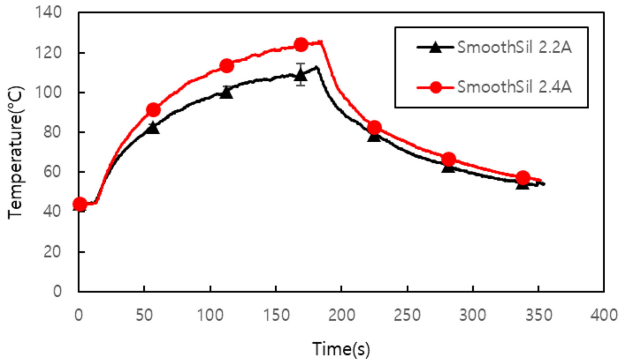


(c) PDMS-matrix based soft actuators

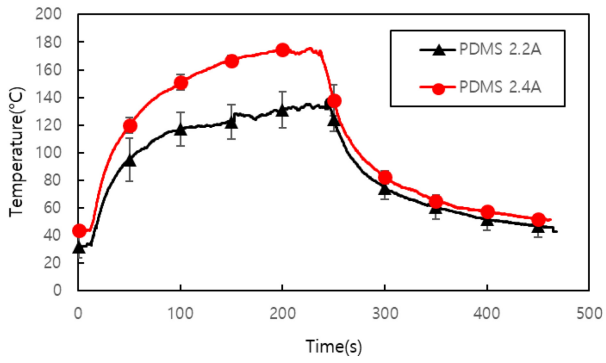
Fig. 4 Changes in resistance over time with respect to current application



(a) Measurement of the temperature using thermal imaging camera



(b) Smooth Sil-matrix based soft actuators



(c) PDMS-matrix based soft actuators

Fig. 5 Temperature changes over time with respect to current application

걸쳐 15.3% 증가하였다가 165초에 걸쳐 43.5% 감소한다. 저항의 최솟값은 전류 인가를 중단한 시점이며, 전류 중단 이후 쿨링하는 212초 동안 초기의 저항값으로 돌아와 약 211.4% 증가함을 알 수 있었다.

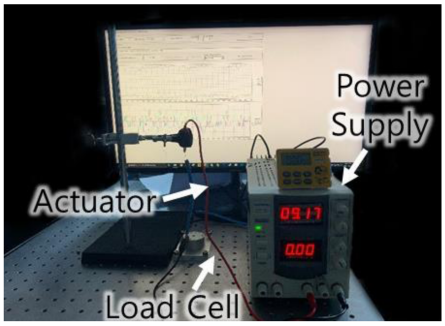
3.2 열화상 카메라를 이용한 열 측정 실험 결과

각 시편에 전원을 인가하였을 때 시편의 온도 변화를 측정하였다. 실험은 굽힘 운동과 동일하게 스탠드에 시편을 고정하고, 열화상 카메라(CX640, COX Thermal Imaging/Thermography)를 이용하여 시편의 최고온도를 측정하였다.

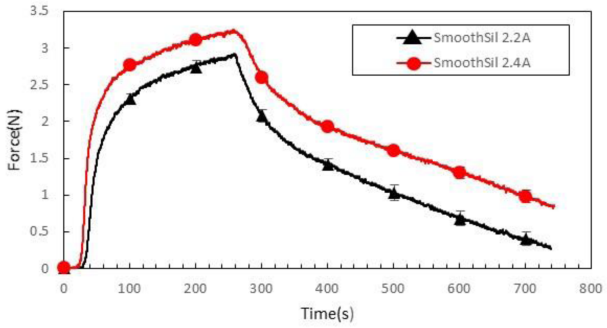
실험 셋업은 Figs. 5(a), 결과는 5(b)와 5(c)와 같으며, Smooth Sil 시편의 경우 2.2 A에서 최대 113.0°C, 2.4 A에서 125.8°C까지 전류 인가에 따라 시편의 온도가 상승함을 확인하였다. PDMS는 2.2 A에서 최대 132.8°C, 2.4 A에서 최대 175.3°C까지 시편의 온도가 상승하였다. 높은 전류를 공급할수록 시편 온도의 최댓값 또한 높게 나타남을 알 수 있다.

3.3 로드셀을 활용한 힘 측정 실험 결과

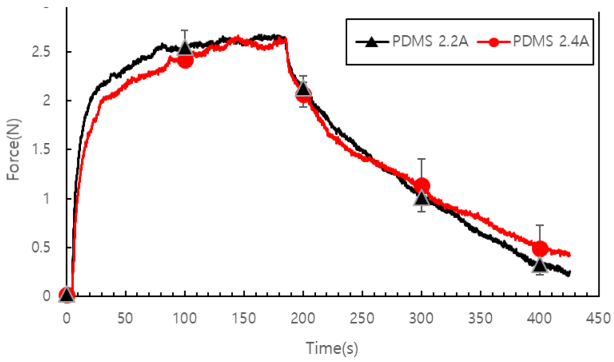
형상 기억 합금의 상변화 거동으로 인한 시편 구동력을 측정하였다(Fig. 6). 이를 위하여 제작된 시편을 로드셀(RFT40-SA01,



(a) Experimental setup for measuring blocking force



(b) Smooth Sil-matrix based soft actuators



(c) PDMS-matrix based soft actuators

Fig. 6 Results of the force measurement experiment using a load cell

Robotous)에 고정한 뒤 전류를 인가함에 따라 발생하는 구동력의 변화량을 관찰하였다. 마찬가지로 각 실험 사이에 충분한 시간 간격을 두어 초기값 혹은 최댓값에 영향을 미치지 않도록 하였다. Smooth Sil 시편의 경우 2.4 A의 전류를 245초 동안 인가할 때에 힘의 최댓값 3.2 N이 측정되었다. 또한 PDMS 시편의 경우에는 2.6 N의 최대 구동힘이 측정되었다. 실험 결과는 Figs. 6(b)와 6(c)와 같다.

3.4 열에 의한 저항 변화 측정 실험 결과

전도성 섬유의 저항은 시편의 변형과 더불어 온도 변화에도 영향을 받는다[17]. 본 실험에서 사용된 형상 기억 합금은 전류 인가에 의한 저항 열을 발생시키며[18,19], 구동기 시편의 온도 상승에 영향을 미친다. 본 실험에서 사용된 전도성 섬유는 은 나노 입자를 포함하고 있다. 은과 같은 금속은 온도에 반응하여

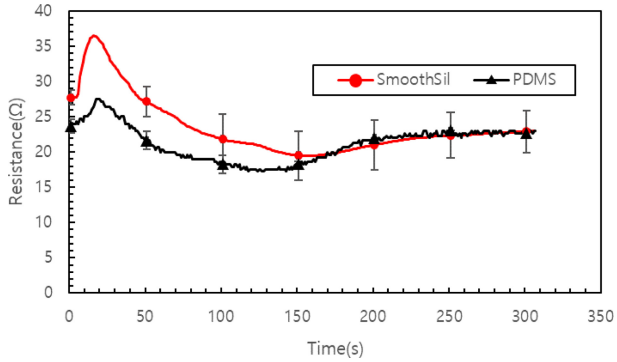


Fig. 7 Changes in resistance due to heat over time at Smooth Sil and PDMS specimen

저항값의 변화가 발생하며, 온도가 상승함에 따라 저항도 증가하는 경향을 보인다. 이에 은 나노 입자를 포함한 전도성 섬유의 온도에 따른 저항 변화를 측정하였다.

온도 영향을 살펴보기 위하여 동일한 형상의 구동기에서 형상 기억 합금을 제거한 형태로 시편을 준비하였다. 시편을 바닥에 고정한 후 히팅건을 사용하여 120초 동안 가열하였다. 시편의 양끝을 저항 측정기에 연결하여 전도성 섬유의 저항 변화를 관찰하였다. 또한 가열을 중단한 뒤 180초 동안 쿨링하면서 시편의 온도가 낮아짐에 따라 변화하는 저항을 관찰하였다.

결과는 Fig. 7과 같다. Smooth Sil 시편의 경우 열을 가한 시작부터 약 10초 동안 저항값이 32.1% 증가하여 최댓값에 도달하였다가 약 133초 동안 45.9% 감소하여 최솟값에 도달하였다. 가열을 중단할 때까지 저항은 계속 감소하였으며, 가열을 중단하고 쿨링이 시작되면서 108초 동안 20%의 저항값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. PDMS 시편의 경우 열을 가하기 시작하면 약 20초 동안 15.9%의 저항값이 증가하여 최댓값에 도달하였다가 약 98초 동안 62.8% 감소하여 최솟값에 도달하였다. 가열을 중단할 때까지 저항은 계속 감소하였으며, 가열을 중단하고 쿨링이 시작되면서 115초 동안 33.4%의 저항값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서 제시하는 신축성 전도 텍스타일을 포함한 소프트 구동기는 폴리머, 형상 기억 합금, 전도성 원단으로 구성되어 있다. 형상 기억 합금은 구동원으로써 폴리머 구조체에 변형을 발생시키는 역할을 수행한다. 폴리머는 탄성 구조 재료로써 활용되며, 전도성 원단은 능동형 소프트 구동기의 외피에 적용되어 전도도 변화 신호를 외부에 전달하는 역할을 한다.

개발된 구동기의 특성을 살펴보기 위하여 형상 기억 합금에 전류 인가로 인한 전도성 원단의 저항 변화, 시편의 온도 변화, 구동 힘을 측정하였다. 뿐만 아니라, 전도성 원단에 열을 가하여 이에 따른 저항 변화 특성을 관찰하였다.

본 연구에서 개발된 신축성 전도 텍스타일을 포함한 소프트 구동기는 소프트 로봇, 웨어러블 디바이스, 인체 친화 로봇 등에 적용이 가능하다. 일례로 웨어러블 디바이스의 형태로 의복에 결합하여, 착용자의 건강 상태 확인 및 물리적 힘 증강 등의 기능 구현을 위한 기초 기술로써 활용이 가능할 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (Nos. 2018R1A5A7023490 and NRF-2021R1F1A1063485) by the Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM) funding (No. NK230C), and by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE) and the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) through the International Cooperative R&D program (No. P0016173).

REFERENCES

1. Grancarić, A. M., Jerković, I., Koncar, V., Cochrane, C., Kelly, F. M., Soulat, D., Legrand, X., (2018), Conductive polymers for smart textile applications, Journal of Industrial Textiles, 48(3), 612-642.
2. Gibbs, P., Asada, H. H., (2004), Wearable conductive fiber sensors for measuring joint movements, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. 4753-4758.
3. Ikuta, K., Tsukamoto, M., Hirose, S., (1988), Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope, Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 427-430.
4. Rodrigue, H., Wang, W., Han, M.-W., Kim, T. J., Ahn, S.-H., (2017), An overview of shape memory alloy-coupled actuators and robots, Soft Robotics, 4(1), 3-15.
5. Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M. A., (2014), A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, Materials & Design, 56, 1078-1113.
6. Chernyshov, G., Tag, B., Caremel, C., Cao, F., Liu, G., Kunze, K., (2018), Shape memory alloy wire actuators for soft, wearable haptic devices, Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers, 112-119.
7. Chung, J.-Y., (2017), An ECG monitoring system using a conductive thread-based wearable antenna, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 18(5), 10-15.
8. Choi, C. H., Kim, G. S., (2018), Design and fabrication of wearable walking assist robot using tendon-driven method, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 35(9), 861-866.
9. Atalay, A., Sanchez, V., Atalay, O., Vogt, D. M., Haufe, F., Wood, R. J., Walsh, C. J., (2017), Batch fabrication of customizable silicone−textile composite capacitive strain sensors for human motion tracking, Advanced Materials Technologies, 2(9), 1700136.
10. Chen, S., Lou, Z., Chen, D., Jiang, K., Shen, G., (2016), Polymer-enhanced highly stretchable conductive fiber strain sensor used for electronic data gloves, Advanced Materials Technologies, 1(7), 1600136.
11. Jing, Y., Shi, Q., Hou, C., Zhang, Q., Li, Y., Wang, H., (2020), Carbon-based thin-film actuator with 1D to 2D transitional structure applied in smart clothing, Carbon, 168, 546-552.
12. Scataglini, S., Andreoni, G., Gallant, J., (2015), A review of smart clothing in military, Proceedings of the 2015 Workshop on Wearable Systems and Applications, 53-54.
13. Sanchez, V., Walsh, C. J., Wood, R. J., (2021), Textile technology for soft robotic and autonomous garments, Advanced Functional Materials, 31(6), 2008278.
14. Smooth-On, Smooth-Sil™ 950. https://www.smooth-on.com/products/smooth-sil-950/
15. Kuo, A. C., (1999), Poly (Dimethylsiloxane), Polymer Data handbook, 411-435.
16. DYNALLOY, Inc., Flexinol® actuator wire technical and design data. https://www.dynalloy.com/tech_data_wire.php
17. Ding, J. T. F., Tao, X., Au, W. M., Li, L., (2014), Temperature effect on the conductivity of knitted fabrics embedded with conducting yarns, Textile Research Journal, 84(17), 1849-1857.
18. Han, M.-W., Song, S.-H., Chu, W.-S., Lee, K.-T., Lee, D., Ahn, S.-H., (2013), Fabrication of shell actuator using woven type smart soft composite, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 30(1), 39-46.
19. Kim, M.-S., Song, S.-H., Han, M.-W., Chu, W.-S., Ahn, S.-H., (2017), Fabrication of miniature high-speed actuator capable of biomimetic flapping motions, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 34(9), 597-602.

Hye Won Lee
B.S. candidate in the Department of Mechanical, Robotics and Energy Engineering, Dongguk University. Her research interest is soft robot.
E-mail: lhw2202@dgu.ac.kr

Yeji Han
M.S. candidate in the Department of Mechanical, Robotics and Energy Engineering, Dongguk University. Her research interest is soft robot.
E-mail: phy_han@dgu.ac.kr

Minchae Kang
Combined B.S. & M.S. course in the Department of Mechanical, Robotics and Energy Engineering, Dongguk University. Her research interest is soft robot.
E-mail: trishakang@dgu.ac.kr

Ju-Hee Lee
Ph.D. candidate in the Department of Mechanical, Robotics and Energy Engineering, Dongguk University. Her research interest is soft robot.
E-mail: ljh92@dgu.ac.kr

Min-Woo Han
Assistant Professor in the Department of Mechanical, Robotics and Energy Engineering, Dongguk University. His research interest is soft robot.
E-mail: mwhan@dgu.edu