(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0152343
(43) 공개일자 2023년11월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F03G 7/06 (2006.01)
(52) CPC특허분류
F03G 7/064 (2021.08)
F03G 7/06114 (2021.08)
(21) 출원번호 10-2022-0051974
(22) 출원일자 2022년04월27일
심사청구일자 2022년04월27일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
김태성
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
우 롱후이
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
배주열
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(74) 대리인
전용준

전체 청구항 수 : 총 15 항

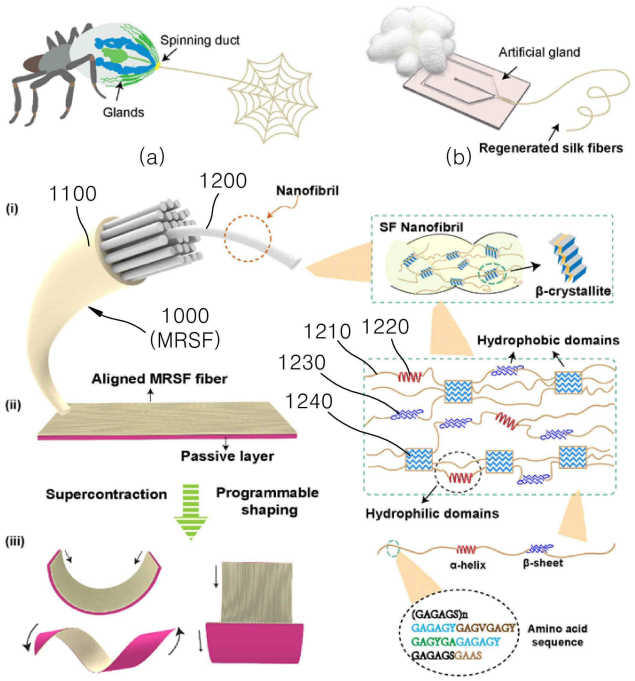
(54) 발명의 명칭 **누에 실크 섬유 기반의 액추에이터, 그 액추에이터의 제작방법 및 누에 실크 섬유 기반의 습도 감지 장치**

(57) 요 약

본 발명은 누에로부터 추출되고, 내부에 길이 방향으로 나노 피브릴이 배치되어 있는 천연 누에 실크 피브로인 중에서, 상기 나노 피브릴의 구조를 변형시킨 가공 나노 피브릴이 구비되어 있는 가공 실크 피브로인을 포함하고, 상기 가공 나노 피브릴은, 상기 길이 방향으로 정렬되어 연장되어 있는 복수 개의 코일들, 상기 코일

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도1



(c)

들 각각에 이격되어 복수 개가 배치되어 있는 나선부, 상기 코일들 각각에 상기 나선부와 교번하여 배치되는 시트부, 및 상기 코일들 각각에 상기 나선부 및 상기 시트부와 교번하여 배치되되 상기 코일 복수 개에 각각 배치되어 있는 상기 시트부가 서로 결합해서 하나의 단위체를 구성하여 형성되는 결정형 구조부를 포함하며, 상기 가공 실크 피브로인은, 상기 가공 나노 피브릴이 설정 습도 이상의 습도에 처음으로 노출될 때 상기 길이 방향으로 비 가역적 수축을 하고, 상기 비 가역적 수축 이후에는 습도가 감소하면 상기 길이 방향으로 가역적 수축을 하고, 습도가 증가하면 상기 길이 방향으로 가역적 팽창을 함으로써 습도의 변화에 따라 수축력 또는 팽창력에 의해 힘을 전달하는 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터를 제공한다.

따라서 야생 거미줄에서 나타나는 습도 변화에 따른 초수축 특성을 가지므로 습도에 반응하는 다양한 장치에 이용 가능한 장점이 있다.

(52) CPC특허분류
F03G 7/0616 (2021.08)
F03G 7/066 (2021.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711134026
과제번호 2020R1A4A2002728
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 집단연구지원(R&D)
연구과제명 급속·정밀 냉각 기반 신경 신호전달 모델링 및 제어 기초연구실
기 여 율 1/2
과제수행기관명 울산과학기술원
연구기간 2021.03.01 ~ 2022.02.28
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711128400
과제번호 2020R1A2C3003344
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명 Soft/Hard 나노풀루이딕스 플랫폼 기반의 다중물리 전달현상 제어 및 모델링
기 여 율 1/2
과제수행기관명 울산과학기술원
연구기간 2021.03.01 ~ 2022.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

누에로부터 추출되고, 내부에 길이 방향으로 나노 피브릴이 배치되어 있는 천연 누에 실크 피브로인 중에서, 상기 나노 피브릴의 구조를 변형시킨 가공 나노 피브릴이 구비되어 있는 가공 실크 피브로인을 포함하고,

상기 가공 나노 피브릴은,

상기 길이 방향으로 정렬되어 연장되어 있는 복수 개의 코일들, 상기 코일들 각각에 이격되어 복수 개가 배치되어 있는 나선부, 상기 코일들 각각에 상기 나선부와 교번하여 배치되는 시트부, 및 상기 코일들 각각에 상기 나선부 및 상기 시트부와 교번하여 배치되되 상기 코일 복수 개에 각각 배치되어 있는 상기 시트부가 서로 결합해서 하나의 단위체를 구성하여 형성되는 결정형 구조부를 포함하며,

상기 가공 실크 피브로인은,

상기 가공 나노 피브릴이 설정 습도 이상의 습도에 처음으로 노출될 때 상기 길이 방향으로 비 가역적 수축을 하고, 상기 비 가역적 수축 이후에는 습도가 감소하면 상기 길이 방향으로 가역적 수축을 하고, 습도가 증가하면 상기 길이 방향으로 가역적 팽창을 함으로써 습도의 변화에 따라 수축력 또는 팽창력에 의해 힘을 전달하는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 코일 및 상기 나선부는,

상기 가공 실크 피브로인이 습도에 따라 팽창 또는 수축될 수 있도록, 습도가 증가하면 팽창하고 습도가 감소하면 수축하는 친수성 영역인,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 결정형 구조부는,

소수성 영역인,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터.

청구항 4

청구항 1에 있어서,

상기 결정형 구조부는,

설정 습도 이상의 환경에 상기 가공 실크 피브로인이 처음으로 노출될 때, 상기 코일들, 상기 나선부 및 상기 시트부가 재배열되어 수가 증가하는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터.

청구항 5

청구항 4에 있어서,

상기 결정형 구조부는,

습도의 변화에 따라 팽창되거나 수축되지 않는,

누에 실크 섬유 기반의 액츄에이터.

청구항 6

청구항 1에 있어서,

상기 비 가역적 수축에 의한 힘은,

상기 가공 실크 피브로인 자체 무게의 85배 내지 90배의 물체를 움직일 수 있는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터.

청구항 7

청구항 1에 있어서,

상기 가공 실크 피브로인은,

상기 천연 누에 실크 피브로인을 미세 유체 칩을 통해서 방사함으로써 형성되는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터.

청구항 8

청구항 7에 있어서,

상기 미세 유체 칩은,

상기 천연 누에 실크 피브로인이 포함되어 있는 제1용액이 유동하는 제1유로가 형성되어 있는 코어 채널; 및

상기 코어 채널의 둘레 방향을 따라 복수 개의 위치들에서 상기 코어 채널과 교차하는 방향으로 배치되되, 상기 코어 채널과 연통되어 있고, 상기 경화제가 유동하는 제2유로가 형성되어 있는 쉘 채널을 포함하고,

상기 경화제는 상기 제1용액이 상기 미세 유체 칩의 내부 표면에 부착되지 않도록 상기 제1용액을 둘러싸는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터.

청구항 9

천연 누에 실크 피브로인을 포함하는 제1용액, 경화제 및 미세 유체 칩을 준비하는 소재 준비단계;

상기 제1용액을 상기 미세 유체 칩을 통해 유동시키고, 상기 미세 유체 칩의 배출구를 통해 배출시켜서 가공 실크 피브로인을 형성하는 단계를 포함하고,

상기 가공 실크 피브로인은,

내부에 길이 방향으로 배치되는 복수의 가공 나노 피브릴들이 배치되어 있고,

상기 가공 나노 피브릴들은,

상기 길이 방향으로 정렬되어 연장되어 있는 복수 개의 코일들, 상기 코일들 각각에 이격되어 복수 개가 배치되어 있는 나선부, 상기 코일들 각각에 상기 나선부와 교번하여 배치되는 시트부, 및 상기 코일들 각각에 상기 나선부 및 상기 시트부와 교번하여 배치되되 상기 코일 복수 개에 각각 배치되어 있는 상기 시트부가 서로 결합해서 하나의 단위체를 구성하여 형성되는 결정형 구조부를 포함하며,

상기 가공 실크 피브로인은,

상기 가공 나노 피브릴들이 설정 습도 이상의 습도에 처음으로 노출될 때 상기 길이 방향으로 비 가역적 수축을 하고, 상기 비 가역적 수축 이후에는 습도가 감소하면 상기 길이 방향으로 가역적 팽창을 하고, 습도가 증가하면 상기 길이 방향으로 가역적 수축을 함으로써 습도의 변화에 따라 수축력 또는 팽창력에 의해 힘을 전달하는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터 제작방법.

청구항 10

청구항 9에 있어서,

상기 제1용액을 준비하는 과정은,

천연 누에 실크 섬유를 준비하는 단계;

상기 천연 누에 실크 섬유를 절단하고 탈검해서 천연 누에 실크 피브로인을 준비하는 단계;

상기 탈검하여 준비된 천연 누에 실크 피브로인을 용해시키고 투석하여 천연 누에 실크 피브로인 용액을 준비하는 단계; 및

상기 천연 누에 실크 피브로인 용액의 천연 누에 실크 피브로인을 펼쳐서 정돈하는 단계를 포함하는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터 제작방법.

청구항 11

청구항 9에 있어서,

상기 미세 유체 칩은,

상기 천연 누에 실크 피브로인이 포함되어 있는 제1용액이 유동하는 제1유로가 형성되어 있는 코어 채널; 및

상기 코어 채널의 둘레 방향을 따라 복수 개의 위치들에서 상기 코어 채널과 교차하는 방향으로 배치되되, 상기 코어 채널과 연통되어 있고, 상기 경화제가 유동하는 제2유로가 형성되어 있는 쉘 채널을 포함하고,

상기 경화제는 상기 제1용액이 상기 미세 유체 칩의 내부 표면에 부착되지 않고 상기 제1용액 둘러싸이도록 분사됨으로써, 상기 제1용액이 상기 경화제에 의해 둘러싸인 상태로 상기 제1유로를 통과하여 방사되게 하는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터 제작방법.

청구항 12

청구항 9에 있어서,

수집 장치를 이용하여 상기 미세 유체 칩으로부터 방사되는 가공 실크 피브로인을 수집하는 섬유 수집 단계를 더 포함하고,

상기 수집 장치는,

상기 가공 실크 피브로인이 감겨서 수집되는 롤러;

상기 롤러에 결합되고, 상기 롤러를 수평 방향으로 왕복 운동시키는 제1모터;

상기 롤러에 결합되고, 상기 롤러를 회전시키는 제2모터를 포함하며,

상기 제2모터에 의해 상기 가공 실크 피브로인이 상기 롤러에 감길 때, 상기 제1모터에 의해 상기 롤러가 수평 방향으로 왕복 운동하면서 상기 가공 실크 피브로인이 상기 롤러의 수평 방향을 따라 균등하게 감기는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터 제작방법.

청구항 13

천연 누에 실크 피브로인의 나노 피브릴에 포함되어 있는 코일이 정렬되어 연장되도록한 가공 나노 피브릴들이 구비되어 있는 가공 실크 피브로인을 포함하고,

상기 가공 실크 피브로인은,

주변 습도에 따라 수축 또는 팽창에 의하여 변형을 수행하는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터.

청구항 14

누에로부터 추출된 나노 피브로인의 나노 피브릴에 포함되어 있는 물질이 정렬되어 연장되도록한 하나 또는 복수 개의 가공 나노 피브릴들을 포함하고, 주변 습도에 따라 수축 또는 팽창에 의하여 변형하는 가공 실크 피브

로인; 및

상기 가공 실크 피브로인의 주변 습도를 제어하여, 상기 가공 실크 피브로인의 변형을 제어하는,

누에 실크 섬유 기반의 액추에이터.

청구항 15

누에로부터 추출된 나노 피브로인의 나노 피브릴에 포함되어 있는 물질이 정렬되어 연장되도록한 하나 또는 복수 개의 가공 나노 피브릴들을 포함하고, 주변 습도에 따라 수축 또는 팽창에 의하여 변형하는 가공 실크 피브로인; 및

상기 가공 실크 피브로인의 변형 상태를 감지하여, 상기 가공 실크 피브로인의 주변 습도를 감지하는,

누에 실크 섬유 기반의 습도 감지 장치.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터, 그 액추에이터의 제작방법 및 누에 실크 섬유 기반의 습도 감지 장치에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 야생 거미줄에서 나타나는 습도 변화에 따른 초수축 특성을 갖는 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터, 그 액추에이터의 제작방법 및 누에 실크 섬유 기반의 습도 감지 장치에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 환경의 주변 습도에 의한 수축이나 팽창은 인공 근육 및 소프트 로봇 등을 위한 소프트 액추에이터 개발에 참고할 수 있다. 예를 들어 천연 거미줄은 습도 변화에 따라 독특한 초수축 및 가역적 수축/팽창 거동을 보인다. 그러나 이러한 천연 거미줄은 국내에 존재하지 않는 거미에서만 얻을 수 있는 희소 자원에 의존하므로 산업 및 실제 응용에 사용할 수 없거나 불충분하다.

[0003] 이와 관련하여 누에 실크 섬유는 강력한 기계적 특성으로 인해 실크 기반 단백질 마이크로 액추에이터를 개발하기 위한 대안이 될 수 있다. 거미줄 단백질과 유사하게 누에 실크 피브로인(SF)은 친수성 영역과 소수성 영역을 포함한다. 누에 실크 피브로인의 친수성 영역은 수소 결합을 통해 물 분자와 쉽게 결합하여 실크 단백질이 수분에 반응할 수 있도록 하여 습도에 반응하는 액추에이터로 이용할 수 있는 가능성을 갖는다. 그러나 천연 누에 실크 피브로인은 거미줄에서 유래한 실크 피브로인과 달리 초수축 특성이 부족하여 작동 방식이 제한되는 문제가 있다. 종래 누에 실크 피브로인을 이용한 연구는 천연 누에 실크 섬유를 그대로 이용한 것으로써 거미줄에서 유래한 실크 피브로인이 갖는 초수축 특성을 재현하지 못하는 한계가 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 대한민국등록특허 제10-1768550호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명은 야생 거미줄에서 나타나는 습도 변화에 따른 초수축 특성을 갖는 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터, 그 액추에이터의 제작방법 및 누에 실크 섬유 기반의 습도 감지 장치를 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 발명의 일 측면에 따르면, 본 발명은 누에로부터 추출되고, 내부에 길이 방향으로 나노 피브릴이 배치되어 있는 천연 누에 실크 피브로인 중에서, 상기 나노 피브릴의 구조를 변형시킨 가공 나노 피브릴이 구비되어 있는 가공 실크 피브로인을 포함하고, 상기 가공 나노 피브릴은, 상기 길이 방향으로 정렬되어 연장되어 있는 복수

개의 코일들, 상기 코일들 각각에 이격되어 복수 개가 배치되어 있는 나선부, 상기 코일들 각각에 상기 나선부와 교번하여 배치되는 시트부, 및 상기 코일들 각각에 상기 나선부 및 상기 시트부와 교번하여 배치되되 상기 코일 복수 개에 각각 배치되어 있는 상기 시트부가 서로 결합해서 하나의 단위체를 구성하여 형성되는 결정형 구조부를 포함하며, 상기 가공 실크 피브로인은, 상기 가공 나노 피브릴이 설정 습도 이상의 습도에 처음으로 노출될 때 상기 길이 방향으로 비 가역적 수축을 하고, 상기 비 가역적 수축 이후에는 습도가 감소하면 상기 길이 방향으로 가역적 수축을 하고, 습도가 증가하면 상기 길이 방향으로 가역적 팽창을 함으로써 습도의 변화에 따라 수축력 또는 팽창력에 의해 힘을 전달하는 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터를 제공한다.

[0007] 본 발명의 다른 측면에 따르면, 본 발명은 천연 누에 실크 피브로인을 포함하는 제1용액, 경화제 및 미세 유체 칩을 준비하는 소재 준비단계, 상기 제1용액을 상기 미세 유체 칩을 통해 유동시키고, 상기 미세 유체 칩의 배출구를 통해 배출시켜서 가공 실크 피브로인을 형성하는 단계를 포함하고, 상기 가공 실크 피브로인은, 내부에 길이 방향으로 배치되는 복수의 가공 나노 피브릴들이 배치되어 있고, 상기 가공 나노 피브릴들은, 상기 길이 방향으로 정렬되어 연장되어 있는 복수 개의 코일들, 상기 코일들 각각에 이격되어 복수 개가 배치되어 있는 나선부, 상기 코일들 각각에 상기 나선부와 교번하여 배치되는 시트부, 및 상기 코일들 각각에 상기 나선부 및 상기 시트부와 교번하여 배치되되 상기 코일 복수 개에 각각 배치되어 있는 상기 시트부가 서로 결합해서 하나의 단위체를 구성하여 형성되는 결정형 구조부를 포함하며, 상기 가공 실크 피브로인은, 상기 가공 나노 피브릴들이 설정 습도 이상의 습도에 처음으로 노출될 때 상기 길이 방향으로 비 가역적 수축을 하고, 상기 비 가역적 수축 이후에는 습도가 감소하면 상기 길이 방향으로 가역적 팽창을 하고, 습도가 증가하면 상기 길이 방향으로 가역적 수축을 함으로써 습도의 변화에 따라 수축력 또는 팽창력에 의해 힘을 전달하는, 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터 제작방법을 제공한다.

[0008] 본 발명의 또 다른 측면에 따르면, 본 발명은 천연 누에 실크 피브로인의 나노 피브릴에 포함되어 있는 코일이 정렬되어 연장되도록한 가공 나노 피브릴들이 구비되어 있는 가공 실크 피브로인을 포함하고, 상기 가공 실크 피브로인은, 주변 습도에 따라 수축 또는 팽창에 의하여 변형을 수행하는 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터를 제공한다.

[0009] 본 발명의 또 다른 측면에 따르면, 본 발명은 누에로부터 추출된 나노 피브로인의 나노 피브릴에 포함되어 있는 물질이 정렬되어 연장되도록한 하나 또는 복수 개의 가공 나노 피브릴들을 포함하고, 주변 습도에 따라 수축 또는 팽창에 의하여 변형하는 가공 실크 피브로인 및 상기 가공 실크 피브로인의 주변 습도를 제어하여, 상기 가공 실크 피브로인의 변형을 제어하는, 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터를 제공한다.

[0010] 본 발명의 또 다른 측면에 따르면, 본 발명은 누에로부터 추출된 나노 피브로인의 나노 피브릴에 포함되어 있는 물질이 정렬되어 연장되도록한 하나 또는 복수 개의 가공 나노 피브릴들을 포함하고, 주변 습도에 따라 수축 또는 팽창에 의하여 변형하는 가공 실크 피브로인 및 상기 가공 실크 피브로인의 변형 상태를 감지하여, 상기 가공 실크 피브로인의 주변 습도를 감지하는 누에 실크 섬유 기반의 습도 감지 장치를 제공한다.

발명의 효과

[0011] 본 발명에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터, 그 액추에이터의 제작방법 및 누에 실크 섬유 기반의 습도 감지 장치는 다음과 같은 효과가 있다.

[0012] 첫째, 야생 거미줄에서 나타나는 습도 변화에 따른 초수축 특성을 가지므로 습도에 반응하는 다양한 장치에 이용 가능한 장점이 있다.

[0013] 둘째, 소재가 되는 누에 실크 섬유는 주변에서 쉽게 구할 수 있고, 그 양이 풍부한 장점이 있다.

[0014] 셋째, 습도 변화만으로 작동이 가능하므로 제어가 용이한 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0015] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터에 포함되는 가공 실크 피브로인의 구조 및 그 가공 실크 피브로인의 제작방법을 나타내는 모식도이다.

도 2는 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터에 포함되는 가공 실크 피브로인을 제작하기 위한 방사용액을 준비하는 과정을 나타내는 모식도이다.

도 3은 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터에 포함되는 가공 실크 피브로인을 제작하기 위한 가공

실크 피브로인 제작장치를 나타내는 모식도이다.

도 4는 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터에 포함되는 가공 실크 피브로인을 제작하기 위한 가공 실크 피브로인 제작장치 중에서 미세 유체 칩의 구조를 구체적으로 나타내는 모식도이다.

도 5는 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터에 포함되는 가공 실크 피브로인의 초수축 특성과 관련된 실험 결과이다.

도 6은 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터에 포함되는 가공 실크 피브로인의 습도에 대한 주기적인 반응 작동에 관한 실험 결과이다.

도 7은 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터에 포함되는 가공 실크 피브로인의 배치 방향에 따라 변형 형태가 달라지는 모습을 나타내는 모식도이다.

도 8은 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터를 이용한 화물 운송 가능성에 관한 실험 자료이다.

도 9는 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터에 포함되는 가공 실크 피브로인을 제작하기 위해 천연 누에 실크 피브로인 용액을 미세 유체 칩의 코어 채널을 통해 유동 시킬 때 발생하는 변화 모습을 나타내는 실험 자료이다.

도 10은 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터의 성능 측정 실험 결과이다.

도 11은 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터가 습한 환경, 메탄올 용액 및 에탄올 용액에서 수축되는 능력을 비교한 실험 자료이다.

도 12는 도 1에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터가 시간의 변화에 따른 습도 변화에 대해 주기적으로 반응하고 복구되는 모습을 나타내는 실험 자료이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 이하 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 설명함으로써, 본 발명을 상세히 설명한다.

[0017] 도 1 내지 도 3을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터는 가공 실크 피브로인(MRSF, 1000)을 포함한다. 그리고 상기 가공 실크 피브로인(1000)은 하우징(1100) 및 가공 나노 피브릴(1200)을 포함한다. 상기 가공 실크 피브로인(1000)은 누에로부터 추출된 천연 누에 실크 피브로인을 가공하여 제작한다. 본 실시예에서 상기 천연 누에 실크 피브로인의 가공은 상기 천연 누에 실크 피브로인 내부에 길이 방향으로 배치되어 있는 나노 피브릴의 구조를 변형시켜서 수행한다. 상기 나노 피브릴의 구조 변경은 상기 나노 피브릴들을 도 3의 b에서와 같이 정렬시키고 직경을 제어함으로써 수행한다. 상기 가공 실크 피브로인(1000)은 천연 누에 실크 피브로인과 달리 습기 또는 유기 용매에 노출되면 친수성 영역과 소수성 영역 사이의 메조스코픽 계층 구조 전이(mesoscopic hierarchical structural transition)로 인해 방향성을 갖는 초수축 특성을 나타낸다. 본 실시예에서 가공 실크 피브로인(1000)은 상기 천연 누에 실크 피브로인을 미세 유체 칩을 통해서 방사함으로써 형성한다.

[0018] 본 실시예에서 상기 가공 실크 피브로인(1000)은 상기 가공 나노 피브릴(1200)이 설정 습도 이상의 습도에 처음으로 노출될 때 상기 길이 방향으로 비 가역적인 수축(초수축, supercontraction)을 한다. 상기 초수축에 의한 힘은 상기 가공 실크 피브로인(1000) 자체를 파괴시킬 수 있는 힘의 22%에 이를 수 있다. 그리고 상기 비 가역적인 초수축 이후에는 주변 습도가 감소하면 상기 길이 방향으로 가역적 수축을 하고, 주변 습도가 증가하면 상기 길이 방향으로 가역적 팽창을 한다. 즉, 본 실시예에 따른 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터는 상기 가공 실크 피브로인(1000)이 주변 습도 변화에 따라 수축될 때 발생하는 수축력 또는 팽창할 때 발생하는 팽창력에 의해 힘을 전달한다.

[0019] 도 1의 c를 참조하면, 상기 하우징(1100)은 상기 가공 나노 피브릴(1200) 복수 개를 둘러싸서 하나의 번들로 만드는 부분이다. 상기 하우징(1100)은 상기 가공 나노 피브릴(1200)이 연장되어 있는 길이 방향을 따라 연장되어 있다. 본 실시예에서 상기 하우징(1100)은 세리신(sericin) 단백질로 형성된다.

[0020] 상기 가공 나노 피브릴(1200)은 상기 하우징(1100) 내부에 복수 개가 배치된다. 상기 가공 나노 피브릴(1200)은 코일(1210), 나선부(1220), 시트부(1230) 및 결정형 구조부(1240)를 포함한다. 상기 코일(1210)은 상기 길이 방향으로 정렬되어 연장되어 있다. 상기 코일(1210)은 복수 개가 배치된다. 본 실시예에서 상기 코일(1210)은 펩티드 결합에 의해 만들어지는 폴리펩디드 체인을 형성하는 아미노산들이 서열을 이루고 있는 단백질 1차 구조에

해당한다. 상기 코일(1210)은 무정형(amorphous, 비결정성) 구조를 갖고, 친수성을 갖는다. 따라서 상기 코일(1210)은 주변 습도가 증가하면 팽창하고, 주변 습도가 감소하면 수축한다. 본 실시예에서 상기 코일(1210)은 천연 누에 실크 피브로인에 포함되어 있는 천연 코일들이 일정한 방향성이 없이 랜덤 방향으로 배치되어 있는 것과 비교할 때 일정한 방향성을 갖도록 상기 길이 방향으로 정렬되어 있는 차이가 있다. 즉, 상기 천연 코일들이 무질서 하게 서로 엉켜 있는 구조라면, 상기 가공 나노 피브릴(1200)에 포함되어 있는 코일(1210)은 상기 길이 방향으로 펼쳐져서 정렬되어 있는 구조를 갖는다. 이렇게 상기 코일(1210)이 정렬된 구조를 가짐으로써 상기 나선부(1220) 및 시트부(1230)도 정렬된다.

[0021] 상기 나선부(1220)는 상기 코일(1210)들 각각에 이격되어 복수 개가 형성된다. 상기 나선부(1220)는 상기 코일(1210)이 수소 결합에 의해서 나선형으로 꼬여 있는 부분이다. 상기 나선부(1220)는 무정형 구조를 갖고, 친수성을 갖는다. 따라서 상기 나선부(1220)는 주변 습도의 변화에 따라 팽창 또는 수축될 수 있다. 상기 나선부(1220)는 단백질 2차 구조 중에서 알파 나선구조(α-helix)에 해당한다.

[0022] 그리고 상기 시트부(1230)는 상기 코일(1210)들 각각에 이격되어 복수 개가 형성된다. 상기 시트부(1230)는 상기 코일(1210) 복수 개가 차곡차곡 쌓여서 이루어진다. 상기 시트부(1230)는 일부는 평행(parallel)하게 배치되고, 다른 일부는 역평행(antiparallel)하게 배치되어 거의 완전하게 펼쳐지되, 주름이 잡힌 지그재그 평면 구조로 형성되는 부분이다. 상기 시트부(1230)는 상기 코일(1210)에서 상기 나선부(1220)와 교번하여 배치된다. 상기 시트부(1230)는 소수성을 갖는다. 상기 시트부(1230)는 단백질 2차 구조 중에서 베타 병풍구조(β-sheet)에 해당한다.

[0023] 상기 결정형 구조부(1240, β-crystallite)는 상기 코일(1210)에서 상기 나선부(1210) 및 상기 시트부(1230)와 교번하여 배치된다. 상기 결정형 구조부(1240)는 상기 코일(1210) 복수 개에 각각 배치되어 있는 상기 시트부(1230)가 서로 결합해서 정렬(assembly)되어 하나의 단위체를 구성함으로써 형성된다. 상기 결정형 구조부(1240)는 소수성을 갖는다. 상기 결정형 구조부(1240)는 단백질 3차 구조에 해당한다. 상기 코일(1210) 및 상기 나선부(1220)와 같은 무정형 영역은 친수성인 반면 상기 결정형 구조부(1240)는 소수성이다. 그리고 도 1의 c(iii)을 참조하면, 상기 가공 실크 피브로인(1000)이 평평한 소수성 기판에 방향성을 갖도록 정렬되고, 습도가 증가하면 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 초수축력은 상기 길이 방향을 따라 상기 소수성 기판을 구부리거나 비틀어서 다양한 변형을 초래하는 것을 알 수 있다.

[0024] 이하에서는 상기 가공 실크 피브로인(1000)을 포함하는 누에 실크 섬유 기반의 액추에이터 제작방법을 설명한다.

[0025] 먼저 천연 누에 실크 피브로인을 포함하는 제1용액, 가공 실크 피브로인 제작장치(2000) 및 경화제를 준비한다. 도 2에는 상기 제1용액을 얻는 과정이 도시되어 있다. 상기 제1용액을 준비하기 위해서 Bombyx mori 누에로부터 천연 누에 실크 섬유를 얻는다. 그리고 상기 천연 누에 실크 섬유를 자르고 탈검(degumming)하여 천연 누에 실크 피브로인을 준비한다. 다음으로 상기 탈검된 천연 누에 실크 피브로인을 용해시키고 투석하여 천연 누에 실크 피브로인 용액을 준비한다. 그리고 상기 용해 및 투석된 천연 누에 실크 피브로인 용액을 농축시킨다. 다음으로 상기 농축된 천연 누에 실크 피브로인 용액의 천연 누에 실크 피브로인을 펼쳐서 정돈하여 상기 제1용액을 준비한다.

[0026] 도 3 및 4를 참조하면, 상기 가공 실크 피브로인 제작장치(2000)는 주사기 펌프(2100), 미세 유체 칩(2200) 및 수집 장치(2300)를 포함한다. 상기 주사기 펌프(2100)는 상기 제1용액 및 상기 경화제를 상기 미세 유체 칩(2200)에 주입하는 역할을 한다. 상기 주사기 펌프(2100)는 상기 미세 유체 칩(2200)과 연통되어 있다. 상기 주사기 펌프(2100)는 상기 제1용액 및 상기 경화제의 주입 속도를 제어 가능하다.

[0027] 상기 미세 유체 칩(2200)은 코어 채널(2210) 및 쉘 채널(2220)을 포함하는 이중 구조로 형성된다. 상기 미세 유체 칩(2200) 폴리디메틸실록산(PDMS)으로 형성된다. 상기 미세 유체 칩(2200)은 상기 코어 채널(2210) 및 쉘 채널(2220)의 크기와 높이를 제어할 수 있는 소프트 리소그래피 방법을 통해 제작한다. 상기 코어 채널(2210)에는 상기 천연 누에 실크 피브로인이 포함되어 있는 제1용액이 유동하는 제1유로가 형성되어 있다. 상기 미세 유체 칩(2200)은 상기 제1용액에 포함되어 있는 천연 누에 실크 피브로인을 정렬시키고 직경을 정밀하게 제어하는 역할을 한다.

[0028] 상기 쉘 채널(2220)은 상기 코어 채널(2210)의 둘레 방향을 따라 복수 개의 위치들에서 상기 코어 채널(2210)과 교차하는 방향으로 배치된다. 상기 쉘 채널(2220)은 상기 코어 채널(2210)과 연통되어 있다. 상기 쉘 채널(2220)은 상기 경화제가 유동하는 제2유로가 형성되어 있다.

[0029] 본 실시예에서 상기 제1용액의 농도는 종래 사용된 습식 방사 방법의 용액 농도보다 훨씬 낮아도 되는 장점이 있다. 이는 상기 미세 유체 칩(2200)을 따라 흐르는 층류와 전단 효과로 인해 섬유가 방적 과정에서 잘 조립되고 제어되기 때문이다. 도 4의 d 및 e를 참조하면, 쉘 채널(2220)을 통해 분사되는 경화제의 유속이 100㎕/min에서 175㎕/min으로 증가하면 더 강한 전단 효과로 인해 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 직경은 2.5㎛에서 1.6㎛로 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 상기 제1용액의 농도가 2.9%에서 10%로 증가하면 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 직경이 2.3㎛에서 6.8㎛로 증가하는 것을 알 수 있다.

[0030] 상기 수집 장치(2300)는 스태핑 모터(2310) 및 롤러(2320)를 포함한다. 상기 스태핑 모터(2310)는 제1모터(2311) 및 제2모터(2312)를 포함한다. 상기 스태핑 모터(2310)는 상기 롤러(2320)를 제어하는 역할을 한다. 상기 제1모터(2311)는 상기 롤러(2320)에 결합되어서 상기 롤러(2320)가 수평 방향으로 왕복하도록 한다. 상기 제2모터(2312)는 상기 롤러(2320)에 결합되어 있고, 상기 롤러(2320)를 회전시켜서 상기 미세 유체 칩(2200)으로부터 방사되는 가공 실크 피브로인(1000)이 상기 롤러(2320)에 감길 수 있도록 한다. 상기 제2모터(2312)에 의해 상기 가공 실크 피브로인(1000)이 상기 롤러(2320)에 감길 때, 상기 제1모터(2311)에 의해 상기 롤러(2320)가 수평 방향으로 왕복 운동하면서 상기 가공 실크 피브로인이 상기 롤러(2320)의 수평 방향을 따라 정렬되어 균등하게 감길 수 있도록 한다. 상기 롤러(2320)는 상기 미세 유체 칩(2200)으로부터 방사되는 가공 실크 피브로인(1000)을 감아서 수집하는 역할을 한다.

[0031] 상기 경화제는 상기 미세 유체 칩(2200)으로 공급되는 상기 제1용액이 상기 미세 유체 칩(2200)의 내부 표면에 부착되지 않고 상기 제1용액이 둘러싸이도록 상기 쉘 채널(2210)로 분사된다. 이를 통해 상기 제1용액은 상기 경화제에 둘러싸인 상태로 상기 제1유로를 통과하여 방사된다. 본 실시예에서 상기 경화제는 황산 암모늄((NH4)2SO4) 용액인 것을 예로 든다.

[0032] 상기 제1용액, 상기 경화제 및 상기 가공 실크 피브로인 제작장치(2000)가 준비되면, 상기 제1용액을 상기 미세 유체 칩(2200)을 통해 유동시키고, 상기 미세 유체 칩(2200)에서 방사하여 가공 실크 피브로인(1000)을 형성한다. 도 1을 참조하면, 거미 섬유 마이크로 액추에이터를 모방하여 누에의 실크 피브로인을 상기 미세 유체 칩(2200)으로 만들어진 인공 분비선을 이용해서 가공 실크 피브로인(1000)으로 만드는 모습이 나타나 있다.

[0033] 구체적으로 상기 주사기 펌프(2100)를 이용하여 상기 코어 채널(2210)에 상기 제1용액을 주입하고, 상기 쉘 채널(2220)에 상기 경화제를 주입한다. 이 때 상기 제1용액의 유속은 10㎕/min이고 상기 경화제의 유속은 100㎕/min로 설정한다. 상기 제1용액의 유속 및 상기 제2용액의 유속은 상기 가공 실크 피브로인의 필요한 직경에 따라 변경 가능하다. 도 9의 b를 참조하면 상기 쉘 채널(2210)로부터 분사되는 경화제에 의해 상기 제1용액의 흐름 윤곽은 라운드 형상에서 뾰족한 형상으로 변형된다. 이는 제1용액의 흐름이 경화제에 의해 전단된다는 것을 의미한다. 그리고 상기 경화제의 유량이 증가함에 따라 와류 유도 정렬 효과(the vorticity-induced alignment effect)는 상기 제1용액의 흐름을 강화시켜서 상기 미세 유체 칩(2200)으로부터 방사되는 가공 실크 피브로인(1000)의 직경을 감소시킨다.

[0034] 도 1의 g를 참조하면 상기 미세 유체 칩(2200)을 통해 방사된 가공 실크 피브로인(1000)은 원형 단면의 매끄러운 표면을 갖는다. 그리고 도 1의 h 및 I를 참조하면 상기 가공 실크 피브로인(1000)은 직경이 약 38㎜이고 길이 방향을 따라 정렬되어 있는 가공 나노 피브릴(1200)로 구성된다.

[0035] 상기 가공 실크 피브로인(1000)이 설정 습도 이상에 처음 노출될 때 발생하는 초수축에 대해 간략히 설명하면, 기체 입자(증기)가 상기 나선부(1220)의 친수성 영역을 따라 머금어지면 천연 누에 실크 피브로인 내부의 폴리머 체인 네트워크가 유연해진다. 상기 유연해진 폴리머 체인 네트워크를 상기 미세 유체 칩(2200)으로 늘려가며 펼쳐서 정렬함으로써 상기 가공 실크 피브로인(1000)을 생성된다. 이 때 상기 펼쳐진 폴리머 체인 네트워크는 유연한 상태에서는 무질서한 상태로 돌아갈 수 있다. 그리고 상기 가공 실크 피브로인(1000)이 설정 습도 이상에 노출되면, 상기 폴리머 체인 네트워크의 움직임이 자유롭기 때문에 상기 체인의 구조가 재배열 될 수 있고, 이 때 상기 결정형 구조부(1240)가 증가하면서 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 초수축이 일어난다. 상기 결정형 구조부(1240)는 습도에 반응하지 않는 소수성 영역이므로 상기 가공 실크 피브로인(1000)이 설정 습도 이상에서 처음 수축된 상태를 유지할 수 있도록 한다.

[0036] 도 5를 참조하면, 푸리에 변환 적외선 분광법(Fourier transform infrared spectroscopy)으로 조사한 다양한 상태에서 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 2차 구조 분석결과를 알 수 있다. 상기 미세 유체 칩(2200)을 통해서 방사되기 이전의 실크 피브로인 필름은 상기 코일(1210) 및 상기 나선부(1220)와 같은 무정형 영역이 지배적인 것을 알 수 있다. 하지만 상기 미세 유체 칩(2200)을 통한 방사 후에는 결정형 β-sheet의 농도가 증가하는데, 이는 상기 미세 유체 칩(2200)을 통한 방사 공정이 결정형 구조부(1240)의 형성을 촉진하기 때문이다. 상기

가공 실크 피브로인(1000)이 처음 습한 환경에 10분 동안 노출되면 습윤 프로세스는 결정형 구조부(1240)의 형성을 더욱 촉진하여 가공 실크 피브로인이 39%의 β-sheet 농도를 갖게 된다. 이러한 측면에서 상기 가공 실크 피브로인(1000)은 소수성 결정질 영역과 친수성 비결정질 영역으로 구성된 반결정질로 볼 수 있다.

[0037] 상기 가공 실크 피브로인(1000)은 습한 환경에 처음 노출될 때 초수축 특성을 나타낸다. 이는 거미줄에서 관찰되는 것과 유사하다. 초수축력으로 인해 상기 가공 실크 피브로인(1000)은 자체 무게의 약 85배 내지 90배에 달하는 무게를 갖는 물체를 들어올리거나 움직일 수 있다. 도 5의 e 및 f를 참조하면, 가공 실크 피브로인 번들(중량 01.5㎎)은 실시간으로 무게를 측정하는 분석 저울과 함께 습도가 제어되는 환경에 고정한다. 그리고 25% 상대 습도 환경에서 상기 가공 실크 피브로인이 저울과 접촉하는 화물을 운반할 때 13.8㎎의 무게가 측정된다. 상대습도가 25% 내지 60% 범위 내인 경우에는 측정되는 무게의 변화가 거의 없지만 상대습도가 60%에서 감소하기 시작하면 상기 가공 실크 피브로인 번들이 수축하고 화물을 들어올리기 시작한다. 그 후 무게는 상대 습도가 90%에서 상기 가공 실크 피브로인 번들에 의해 화물이 완전히 들어올려질 때까지 계속 감소한다. 즉, 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 비가역적인 초수축이 일어나기 위해서는 60% 내지 80%의 습도가 필요하다. 이후에 상대 습도가 낮아지면 상기 가공 실크 피브로인 번들에서 물 분자가 빠져나와 분자간 수소 결합이 재구축되어 가공 실크 피브로인(1000)에 포함되어 있는 가공 나노 피브릴(1200)을 더욱 수축시킨다. 이후 다시 상대 습도가 높아지면 물 분자는 상기 가공 나노 피브릴(1200)의 무정형 영역으로만 들어가 수소 결합을 끊어 상기 가공 나노 피브릴(1200)의 팽창을 일으킨다. 즉, 초수축이 일어난 이후에 일어나는 수축 및 팽창은 가역적으로 일어난다.

[0038] 도 6 및 7을 참조하면, 상기 가공 실크 피브로인(1000)을 포함하는 습도 구동 액추에이터가 나타나 있다. 상기 습도 구동 액추에이터는 소수성 기판에 상기 가공 실크 피브로인(1000)을 방향성을 갖도록 정렬함으로써 제작한다. 본 실시예에서는 상기 가공 실크 피브로인(1000)을 상기 소수성 기판에 대해 0。, 45。 및 90。로 배치한다. 그리고 습도가 증가하면 상기 습도 구동 액추에이터는 각각 수평 굽힘, 비틀림 및 수직 굽힘 변형을 나타낸다. 이를 통해 상기 가공 실크 피브로인(1000)을 이용하여 굽힘 제어가 가능함을 알 수 있다.

[0039] 도 6의 c를 참조하면, 상기 습도 구동 액추에이터의 굽힘 곡률이 상대 습도가 20%에서 90%로 증가함에 따라 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 상기 가공 실크 피브로인(1000)이 다습한 환경에서 팽창하기 시작하여 팽창력에 의해 휘어져서 변형되기 ??문이다. 그리고 도 6의 g를 참조하면, 상기 습도 구동 액추에이터가 습도 변화에 대해 빠르게 반응하는 것을 알 수 있다.

[0040] 도 8은 상기 가공 실크 피브로인(1000)을 포함하는 습도 구동 액추에이터가 주변 습도를 변경하여 화물 적재, 운반 및 하역에 이용될 수 있음을 보여준다. 먼저 상기 습도 구동 액추에이터는 높은 습도로 인한 초수축으로 인하여 구부러진다. 그런 다음 상대 습도가 60% 미만으로 유지될 때 자연 굽힘 상태를 유지한다. b에 따르면 상기 습도 구동 액추에이터(10㎜ X 4㎜, 7㎎)는 구조 변경 없이 150㎎의 화물을 운반 가능하다. 즉, 상기 습도 구동 액추에이터 자체 무게의 20배 이상의 화물을 들어 올릴 수 있다.

[0041] 위에서는 상기 가공 실크 피브로인(1000)을 액추에어터의 일 구성으로 이용하는 것에 대해 설명하지만, 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 수축력 또는 팽창력을 이용하여 습도를 감지하는 센서 장치로 활용도 가능하다. 즉, 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 변형 상태를 감지하여, 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 주변 습도를 감지 가능하다. 이는 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 습도에 따른 수축력 및 팽창력에 대한 데이터베이스(DB)를 구축한 후에, 상기 가공 실크 피브로인(1000)이 배치된 환경에서 나타내는 수축력 또는 팽창력을 측정하고, 상기 측정된 값을 상기 데이터베이스에 미리 저장되어 있는 값과 비교하여 상기 가공 실크 피브로인(1000)의 주변 습도를 측정하는 것이다.

[0042] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허 청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

부호의 설명

[0043] 1000: 가공 실크 피브로인

1100: 하우징(세리신)

1200: 가공 나노 피브릴

1210: 코일

1220: 나선부

1230: 시트부

1240: 결정형 구조부

2000: 가공 실크 피브로인 제작장치

2100: 주사기 펌프

2200: 미세 유체 칩

2210: 코어 채널

2210: 쉘 채널

2300: 수집 장치

2310: 모터

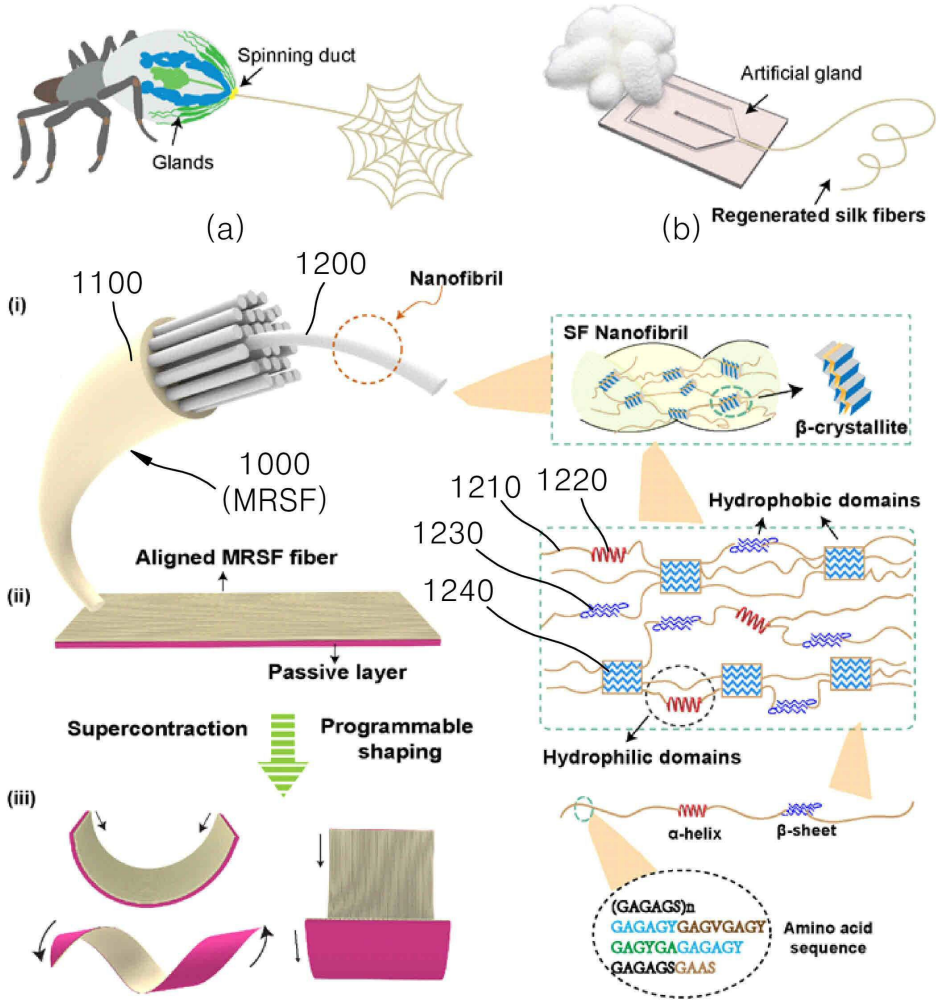
2311: 제1모터

2312: 제2모터

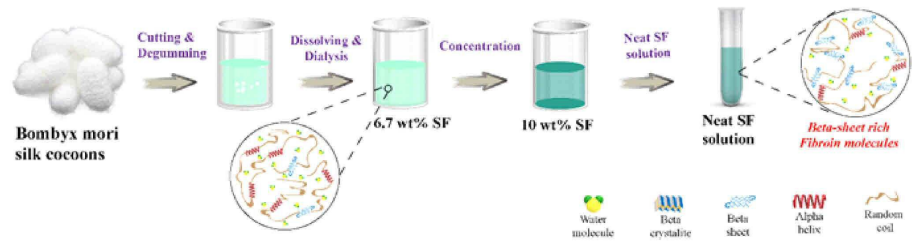
2320: 롤러

도면

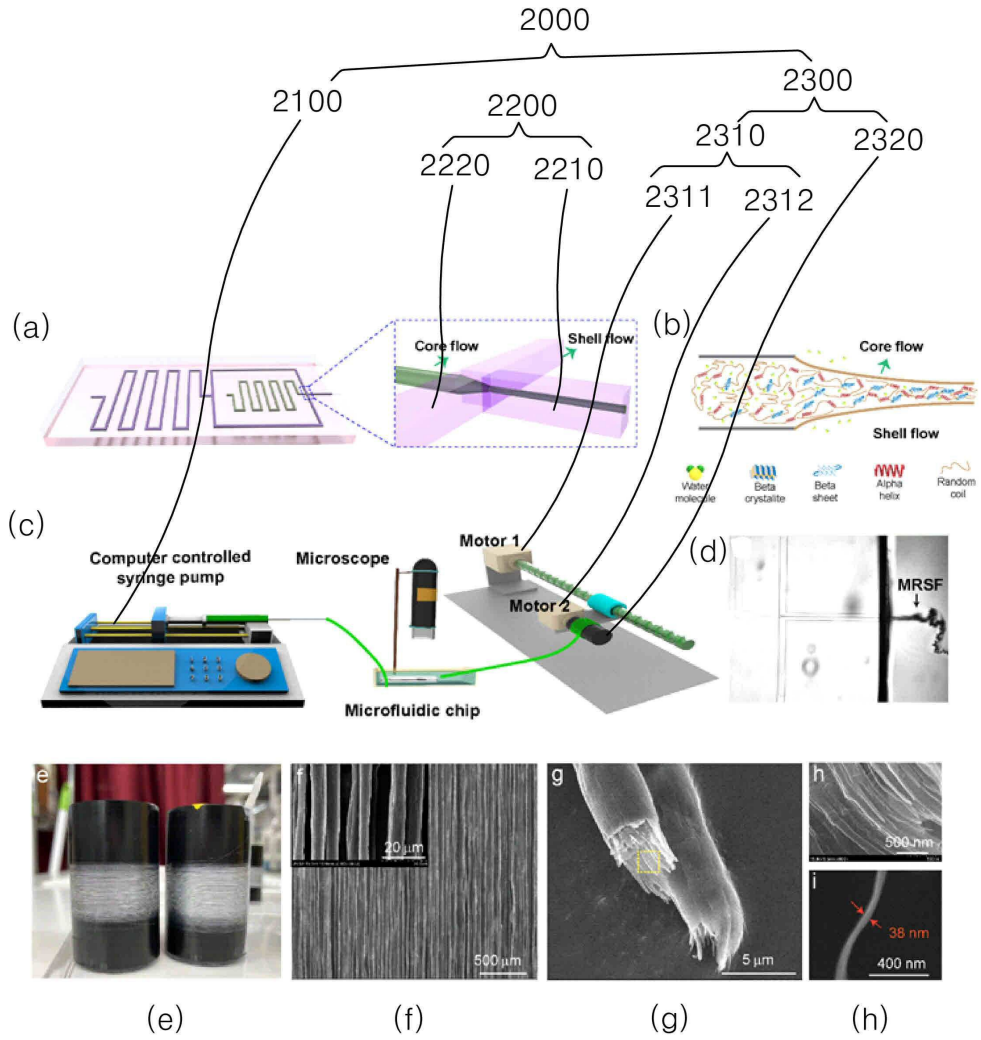
도면1


Spinning duct
Glands
(a)
Artificial gland
Regenerated silk fibers
(b)
1100
1200
Nanofibril
(i)
SF Nanofibril
β-crystallite
1000
(MRSF)
1210
1220
Hydrophobic domains
1230
1240
Aligned MRSF fiber
(ii)
Passive layer
Supercontraction
Programmable shaping
Hydrophilic domains
(iii)
α-helix
β-sheet
(GAGAGS)n
GAGAGYGAGVGAGY
GAGYGAGAGAGY
GAGAGSGAAS
Amino acid sequence
(c)

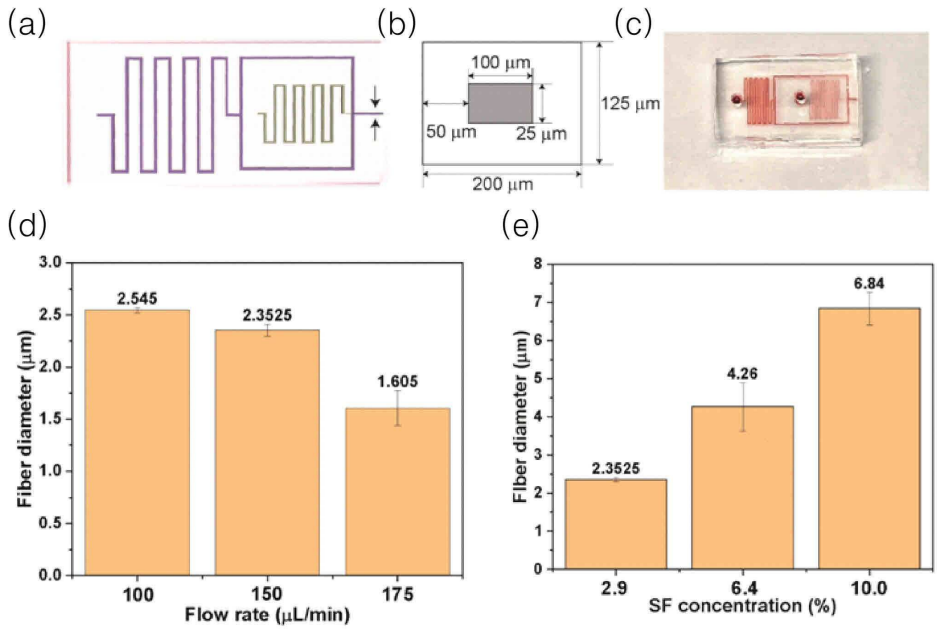
도면2


Bombyx mori silk cocoons
Cutting & Degumming
Dissolving & Dialysis
6.7 wt% SF
Concentration
10 wt% SF
Neat SF solution
Neat SF solution
Beta-sheet rich Fibroin molecules
Water molecule
Beta crystallite
Beta sheet
Alpha helix
Random coil

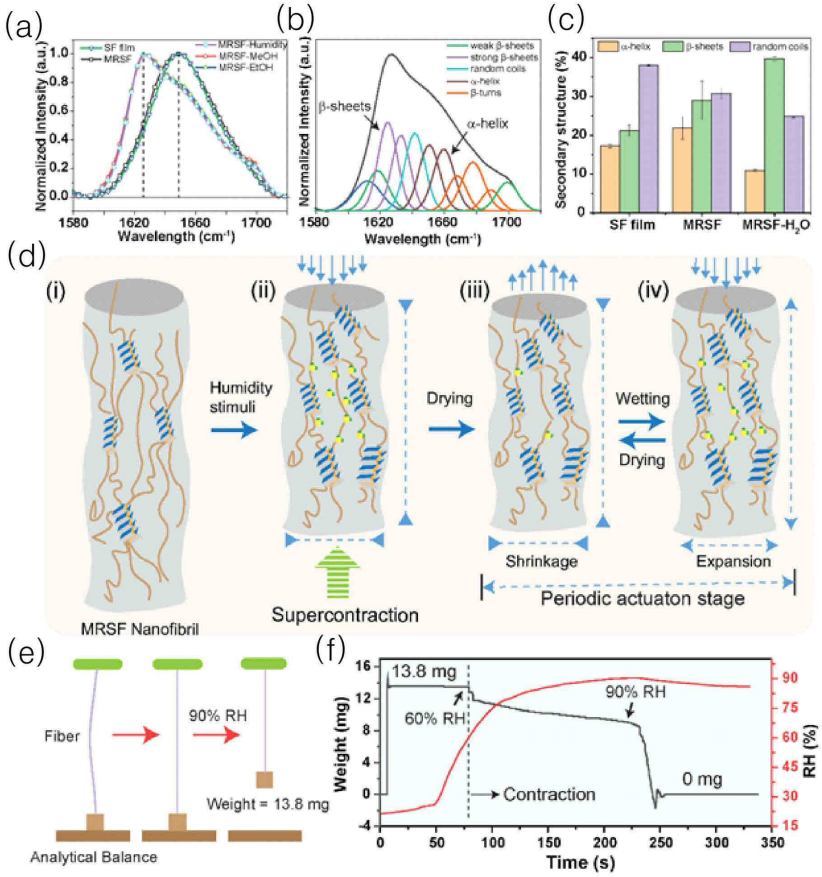
도면3


2000
2100
2200
2220
2210
2300
2310
2311
2312
2320
(a)
Core flow
Shell flow
(b)
Core flow
Shell flow
Water molecule
Beta crystallite
Beta sheet
Alpha helix
Random coil
(c)
Computer controlled syringe pump
Microscope
Motor 1
Motor 2
Microfluidic chip
(d)
MRSF
e
f
20 μm
500 μm
g
5 μm
h
500 nm
i
38 nm
400 nm
(e)
(f)
(g)
(h)

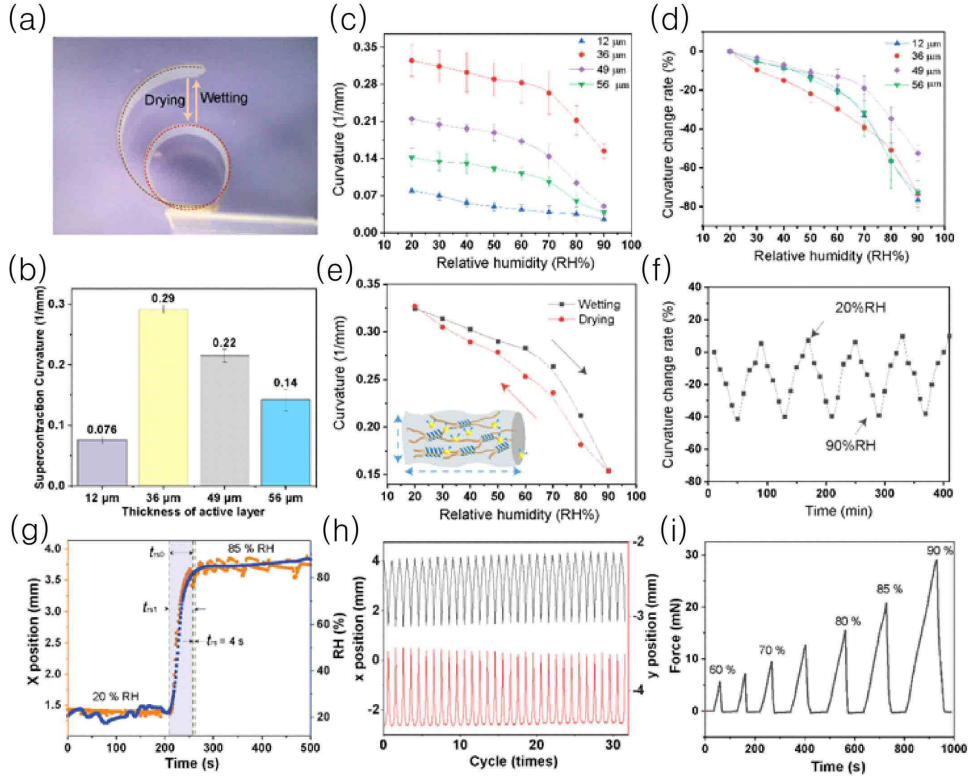
도면4


(a)
(b)
100 μm
50 μm
25 μm
125 μm
200 μm
(c)
(d)
Fiber diameter (μm)
2.545
2.3525
1.605
100
150
175
Flow rate (μL/min)
(e)
Fiber diameter (μm)
2.3525
4.26
6.84
2.9
6.4
10.0
SF concentration (%)

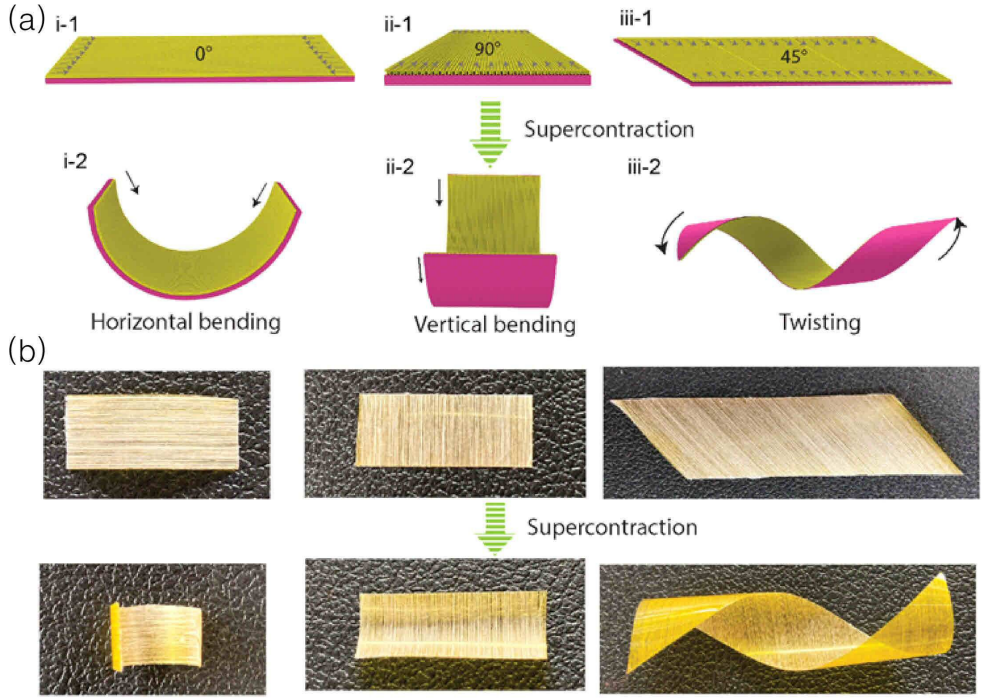
도면5


(a)
SF film
MRSF
MRSF-Humidity
MRSF-MeOH
MRSF-EtOH
Normalized Intensity (a.u.)
Wavelength (cm⁻¹)
(b)
weak β-sheets
strong β-sheets
random coils
α-helix
β-turns
β-sheets
α-helix
Normalized Intensity (a.u.)
Wavelength (cm⁻¹)
(c)
α-helix
β-sheets
random coils
Secondary structure (%)
SF film
MRSF
MRSF-H2O
(d)
(i)
(ii)
(iii)
(iv)
Humidity stimuli
Drying
Wetting
Drying
Shrinkage
Expansion
Supercontraction
Periodic actuaton stage
MRSF Nanofibril
(e)
Fiber
90% RH
Weight = 13.8 mg
Analytical Balance
(f)
13.8 mg
60% RH
90% RH
Contraction
0 mg
Weight (mg)
RH (%)
Time (s)

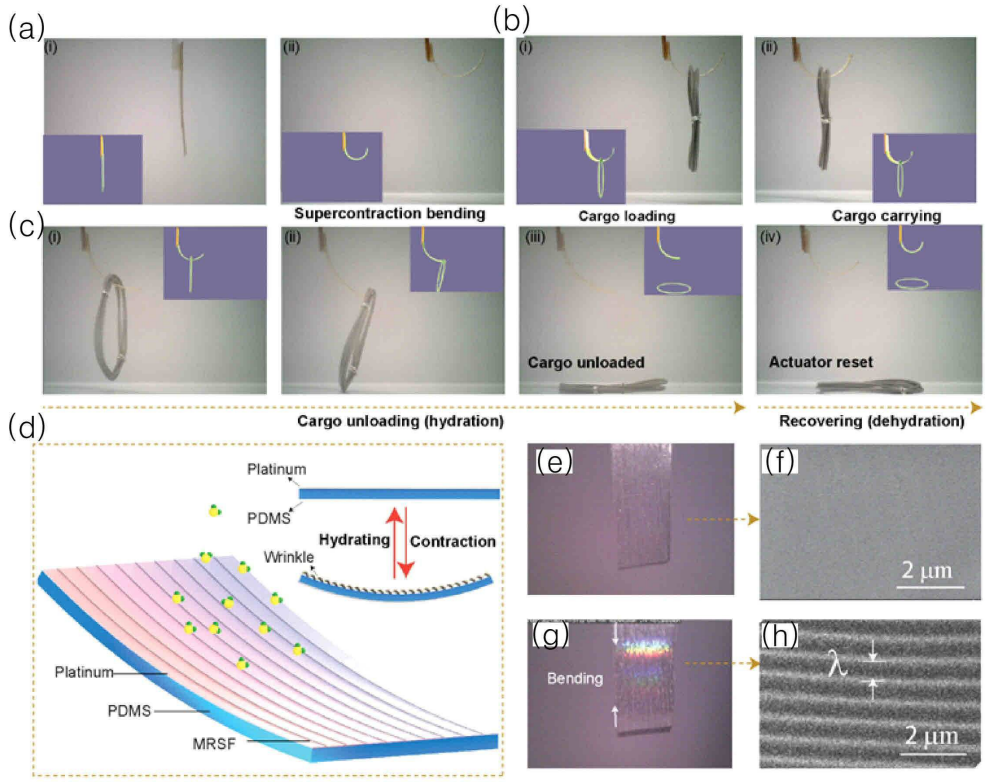
도면6


(a)
Drying
Wetting
(c)
12 μm
36 μm
49 μm
56 μm
Curvature (1/mm)
Relative humidity (RH%)
(d)
Curvature change rate (%)
Relative humidity (RH%)
(b)
Supercontraction Curvature (1/mm)
0.076
0.29
0.22
0.14
12 μm
36 μm
49 μm
56 μm
Thickness of active layer
(e)
Wetting
Drying
Curvature (1/mm)
Relative humidity (RH%)
(f)
20%RH
90%RH
Curvature change rate (%)
Time (min)
(g)
85 % RH
20 % RH
X position (mm)
RH (%)
Time (s)
(h)
x position (mm)
y position (mm)
Cycle (times)
(i)
60 %
70 %
80 %
85 %
90 %
Force (mN)
Time (s)

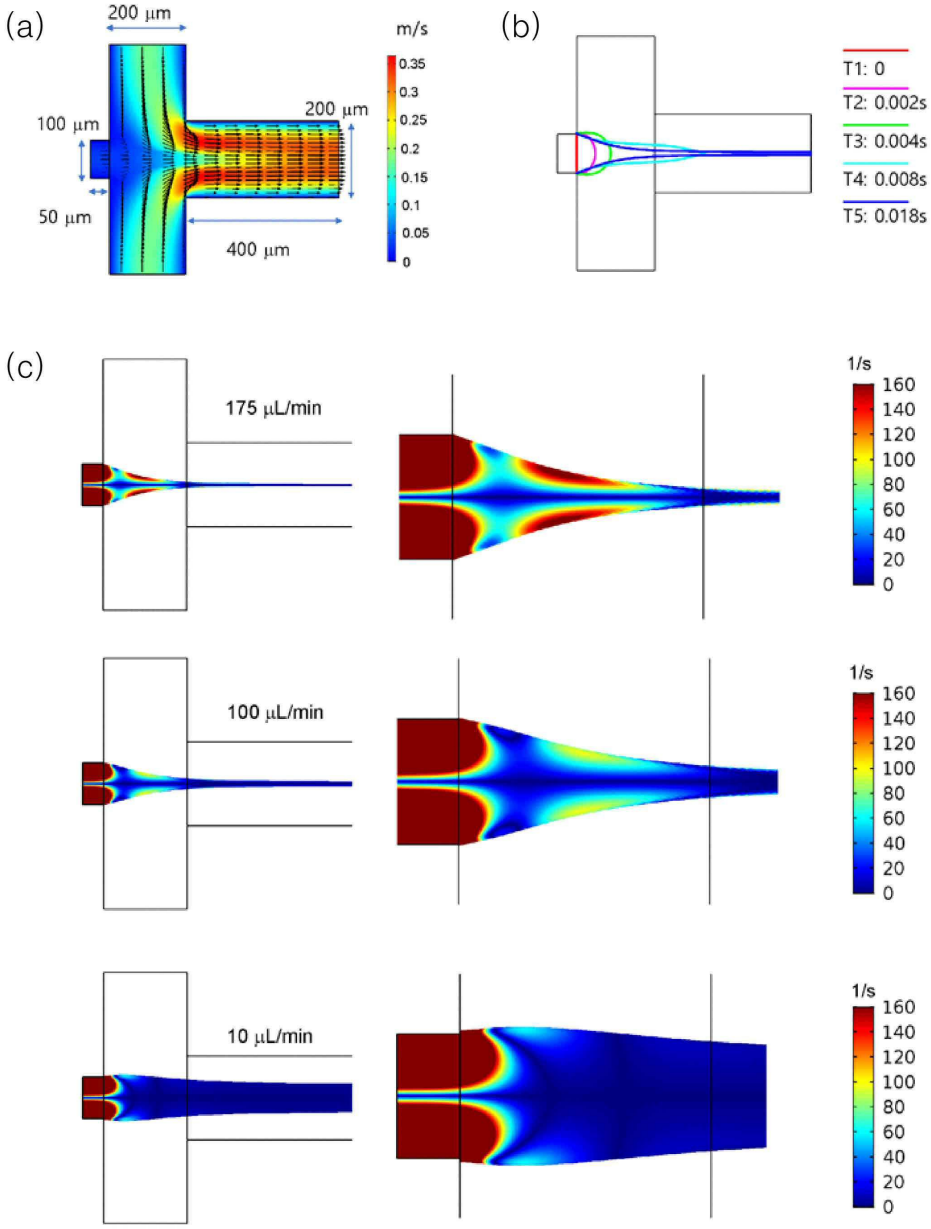
도면7


(a)
i-1
0°
ii-1
90°
iii-1
45°
Supercontraction
i-2
ii-2
iii-2
Horizontal bending
Vertical bending
Twisting
(b)
Supercontraction

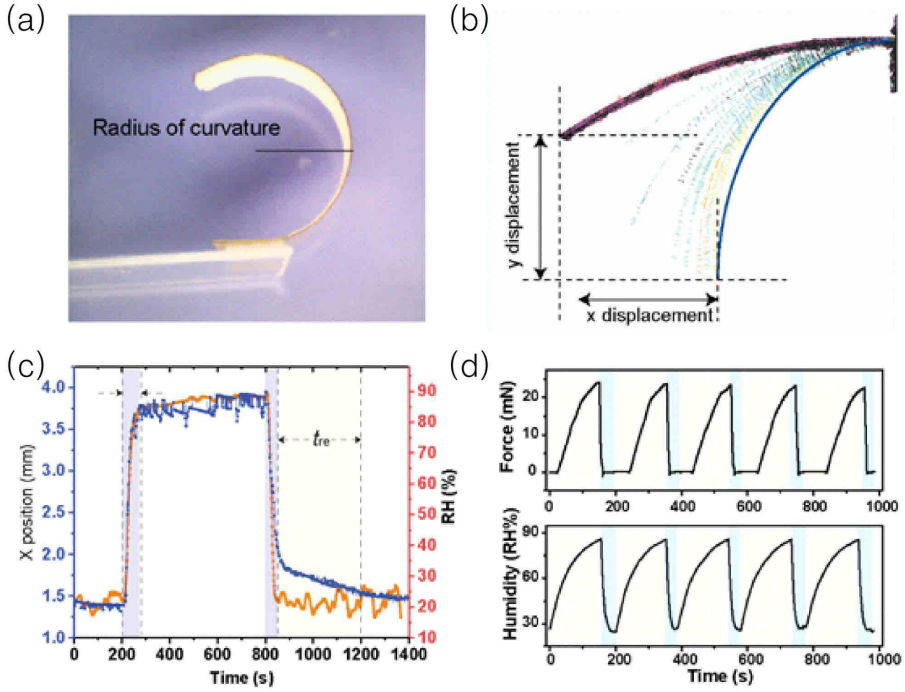
도면8


(a)
(b)
Supercontraction bending
Cargo loading
Cargo carrying
(c)
Cargo unloaded
Actuator reset
Cargo unloading (hydration)
Recovering (dehydration)
(d)
Platinum
PDMS
Hydrating
Contraction
Wrinkle
Platinum
PDMS
MRSF
(e)
(f)
2 μm
(g)
Bending
(h)
λ
2 μm

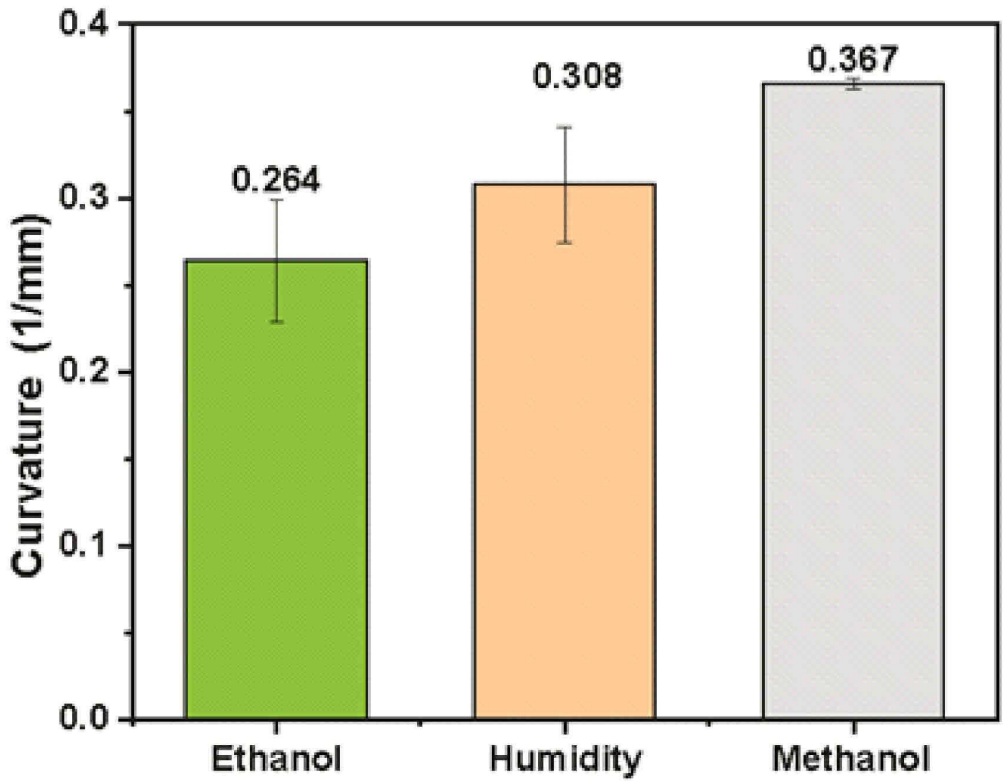
도면9


(a)
200 μm
100 μm
200 μm
50 μm
400 μm
m/s
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
(b)
T1: 0
T2: 0.002s
T3: 0.004s
T4: 0.008s
T5: 0.018s
(c)
175 μL/min
100 μL/min
10 μL/min
1/s
160
140
120
100
80
60
40
20
0

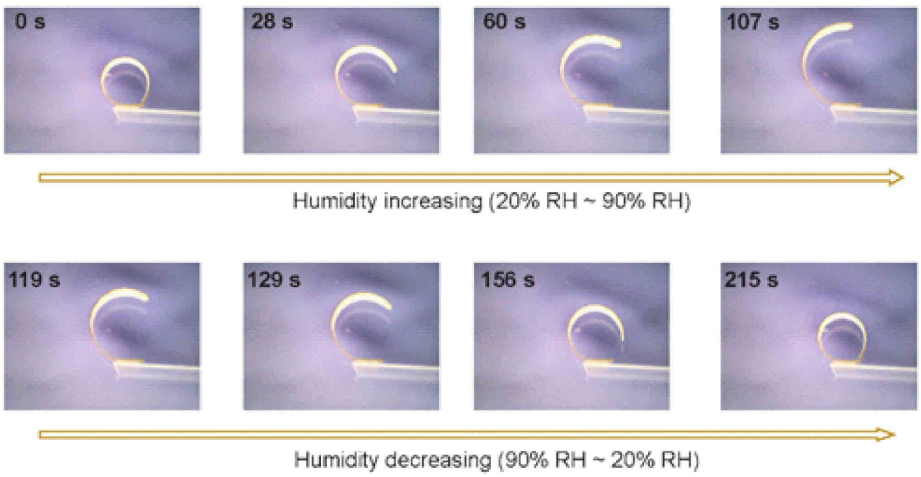
도면10


(a)
Radius of curvature
(b)
y displacement
x displacement
(c)
X position (mm)
RH (%)
Time (s)
(d)
Force (mN)
Humidity (RH%)
Time (s)

도면11


Curvature (1/mm)
0.264
0.308
0.367
Ethanol
Humidity
Methanol

도면12


0 s
28 s
60 s
107 s
Humidity increasing (20% RH ~ 90% RH)
119 s
129 s
156 s
215 s
Humidity decreasing (90% RH ~ 20% RH)