



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년02월07일

(11) 등록번호 10-2497619

(24) 등록일자 2023년02월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

B25J 9/12 (2006.01) B25J 11/00 (2006.01)

B25J 9/10 (2006.01) H01F 13/00 (2006.01)

B82Y 15/00 (2017.01) B82Y 25/00 (2017.01)

B82Y 30/00 (2017.01) B82Y 40/00 (2017.01)

(52) CPC특허분류

B25J 9/12 (2013.01)

B25J 11/00 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2021-0127440

(22) 출원일자 2021년09월27일

심사청구일자 2021년09월27일

(56) 선행기술조사문헌

KR102005323 B1*

CN111618837 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

인하대학교 산학협력단

인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)

(72) 발명자

위정재

인천광역시 서구 청라루비로 106, 351동 203호

양승재

인천광역시 연수구 아트센터대로97번길 76, 1403동 1102호

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

한윤호

전체 청구항 수 : 총 22 항

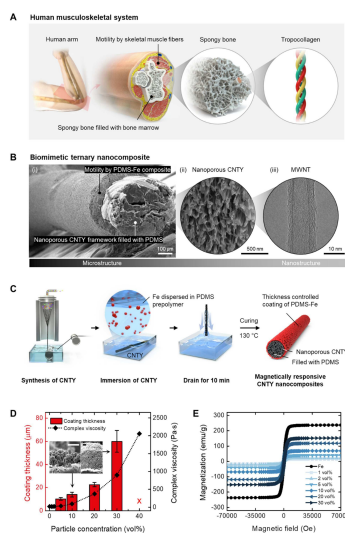
심사관 : 이성수

(54) 발명의 명칭 근골격계-모방 자기 고분자 나노복합체 및 그의 용도

(57) 요약

본 발명은 자석에 의해 구동이 가능한 자성 소프트 로봇에 관한 것으로서, 보다 구체적으로 다공성 탄소 나노튜브 실(CNTY) 표면에 자성입자가 분산된 고분자 탄성체가 코팅된, 자성 소프트 로봇을 제공한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

B25J 9/1075 (2013.01)

H01F 13/003 (2013.01)

B82Y 15/00 (2013.01)

B82Y 25/00 (2013.01)

B82Y 30/00 (2013.01)

B82Y 40/00 (2013.01)

(72) 발명자

원수경

경기도 광명시 가림일로 55, 102동 601호

이희은

인천광역시 부평구 마장로220번길 65, 101동 406호

조영식

경기도 성남시 분당구 중앙공원로 20, 409동 102호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2019121004

과제번호 NRF-2019R1A2C1004559

부처명 과학기술정보통신부

과제관리(전문)기관명 한국연구재단

연구사업명 중견연구

연구과제명 초소형 자성 소프트로봇을 이용한 집단행동 구현

기 여 율 1/1

과제수행기관명 인하대학

연구기간 2021.03.01 ~ 2022.02.28

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

다공성 탄소 나노튜브 실(CNTY) 표면에 자성입자가 분산된 고분자 탄성체가 코팅된, 자성 소프트 로봇.

청구항 2

제1항에 있어서,

1 내지 20의 중형비를 갖는, 자성 소프트 로봇.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 자성입자는 고분자 탄성체 전구체 기준으로 10 내지 35부피%로 적재되는, 자성 소프트 로봇.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 고분자 탄성체는 실리콘계, 우레탄계, 올레핀계, 스타이렌계, 아마이드계 및 에스터계로 구성되는 군으로부터 선택되는 열가소성 고분자 탄성체 또는 열경화성 고분자 탄성체 중 어느 하나 이상을 포함하는 탄성체인, 자성 소프트 로봇.

청구항 5

제4항에 있어서,

열가소성 고분자 탄성체는 열가소성 스타이렌 블록 공중합체(thermoplastic styrene block copolymer), 열가소성 폴리올레핀엘라스토머(thermoplastic polyolefin elastomer, TPO), 열가소성 폴리우레탄(thermoplastic polyurethane, TPU), 열가소성 폴리아마이드(thermoplastic polyamide, TPA), 열가소성 폴리에틸렌(thermoplastic polyethylene, TPE), 열가소성 벌카니제이트(thermoplastic vulcanizate, TPV) 및 이들을 구성하는 단위체의 공중합체인, 자성 소프트 로봇.

청구항 6

제4항에 있어서,

상기 열경화성 고분자 탄성체는 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane), 에코플렉스 실리콘 고무(Ecoflex silicone rubber), 드래곤 스킨 실리콘 고무(Dragon Skin silicone rubber), 아크릴로니트릴 부타디엔 고무(acrylonitrile butadiene rubber), 클로로설포네이트드 폴리에틸렌 고무(chlorosulfonated polyethylene rubber), 에틸렌 아크릴레이트 고무(ethylene acrylated rubber), 플루오로카본 고무(fluorocarbon rubber), 수소화 아크릴로니트릴 부타디엔 고무(hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber), 퍼플루오로엘라스토머(perfluoroelastomer), 열경화성 폴리우레탄 고무(thermoset polyurethane rubber), 열경화성 스타이렌 부타디엔 고무(thermoset styrene butadiene rubber), 열경화성 클로로프렌 고무(thermoset chloroprene rubber), 에피클로로하이드린 공중합체 고무(epichlorohydrin copolymer rubber), 에틸렌 프로필렌 디엔 고무(ethylene propylene diene rubber), 폴리디메틸실록산(PDMS), 플루오로실리콘 고무(fluorosilicone rubber), 천연고무인 폴리이소프렌 고무(polyisoprene rubber), 폴리아크릴레이트 고무(polyacrylate rubber)인, 자성 소프트 로봇.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 자성입자는 강자성 입자(ferromagnetic particle) 또는 한자성 입자(ferrimagnetic particle), 자성 소프트

트 로봇.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 강자성 입자는 코발트, 니켈, 철, 이들의 산화물 및 이들의 합금으로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상의 강자성 물질을 포함하는 자성입자인, 자성 소프트 로봇.

청구항 9

제7항에 있어서,

한자성 입자는 자철석, 및 페라이트로 구성되는 군으로부터 선택되는 한자성 물질을 포함하는 자성입자인, 자성 소프트 로봇.

청구항 10

고분자 탄성체 전구체 용액에 자성입자를 적재하여 고분자 탄성체 전구체-자성입자 복합체를 제조하는 고분자 탄성체 전구체-자성입자 복합체 제조단계;

상기 고분자 탄성체 전구체-자성입자 복합체에 적절한 길이로 절단된 다공성 탄소 나노튜브 실(CNTY)을 담근 후 꺼내서 딥-코팅을 수행하는 딥-코팅 단계;

딥-코팅된 탄소 나노튜브 실을 경화시키는 경화단계; 및

경화된 딥-코팅 탄소 나노튜브-고분자 탄성체-자성입자 복합체를 적절한 종횡비로 절단하는 단계를 포함하는, 제1항의 자성 소프트 로봇의 제조방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 자성입자는 고분자 탄성체 전구체 기준으로 10 내지 35부피%로 적재되는, 제조방법.

청구항 12

제10항에 있어서,

상기 종횡비는 1 내지 20인, 제조방법.

청구항 13

제10항에 있어서,

상기 고분자 탄성체 전구체 용액은 고분자 탄성체 전구체 및 가교제가 포함된 것인, 제조방법.

청구항 14

제1항의 자성 소프트 로봇을 액체-기체 계면에 위치시킨 후 자기 주파수가 조절된 펄스 회전 자기장을 가하는 단계를 포함하는 제1항의 자성 소프트 로봇의 구동방법.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 자기 주파수는 2 내지 20 Hz인, 구동방법.

청구항 16

복수의 제1항의 자성 소프트 로봇을 액체-기체 계면에 위치시킨 후 자기 주파수가 조절된 자기장을 가하는 단계를 포함하는, 복수의 자성 소프트 로봇의 집합 구동방법.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 복수의 자성 소프트 로봇은 사양이 동일하거나 상이한 것인, 복수의 자성 소프트 로봇의 집합 구동방법.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 사양은 중형비 또는 자성입자의 적재율인, 복수의 자성 소프트 로봇의 집합 구동방법.

청구항 19

제16항에 있어서,

복수의 제1항의 자성 소프트 로봇을 액체-기체 계면에 위치시킨 후 펄스 회전 자기장의 자기 주파수를 변경함으로써 상기 복수의 자성 소프트 로봇의 운동모드를 다중모드로 변경하는 단계를 추가로 포함하는, 복수의 자성 소프트 로봇의 집합 구동방법.

청구항 20

제19항에 있어서,

상기 다중모드는 조립 직선 병진 운동, 조립 회전 운동 및 변동 회전 운동으로 구성되는 군으로부터 선택되는, 복수의 자성 소프트 로봇의 집합 구동방법.

청구항 21

제19항에 있어서,

복수의 제1항의 자성 소프트 로봇의 다중모드 운동에 의한 수영을 통해 유체 소용돌이의 방향, 각속도, 크기 제어하는 단계를 추가로 포함하는, 복수의 자성 소프트 로봇의 집합 구동방법.

청구항 22

복수의 제1항의 자성 소프트 로봇을 액체-기체 계면에 위치시킨 후 펄스 회전 자기장의 자기 주파수를 변경함으로써, 상기 복수의 자성 소프트 로봇을 다중 운동모드로 수영하게 하는 단계; 및

상기 복수의 자성 소프트 로봇의 수영에 생성된 유체 소용돌이를 이용하여, 상기 액체-기체 계면 또는 고체-액체 계면에 위치한 미세 또는 소형 화물을 수송하는 단계를 포함하는, 계면 상의 미세 또는 소형 화물을 수송하는 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 고분자 복합체 기반의 자성 소프트 로봇(magnetic soft robot) 및 그 제조방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 직선 병진 운동, 회전 운동 및 변동 회전 운동이 가능한 고분자 복합체 기반의 자성 소프트 로봇 및 그의 제조방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 자성 소프트 로봇은 외부에서 가하는 자기장의 방향, 세기 구배, 변동 주파수 등을 조절하여 원격으로 조종이 가능하다. 이러한 자성 소프트 로봇은 고분자-자성입자 복합체의 몰드 성형, 3D 프린팅, 포토리소그래피 등의 공정을 통해 제조가 가능하며, 자연의 생물체 형상과 움직임을 모방한 다양한 디자인이 개발되어졌다. (P. Cabanach *et al.*, *Adv. Mater.*, 32: 2003013, 2020; H. Gu *et al.*, *Nat. Commun.* 11: 2637, 2020; Y. Kim *et al.*, *Nature* 558: 274-279, 2018; Z. Ren *et al.*, *Nat. Commun.* 10: 2703, 2019).

발명의 내용

해결하려는 과제

[0003] 그러나, 상기 선행문헌들을 포함하여 현재까지 개발된 자성 소프트 로봇은 단일 객체 시스템 위주로 진행이 되었다. 다중 객체 시스템의 경우 여러 대의 자성 소프트 로봇을 개별적으로 움직이는 연구에 국한되어 왔으며, 자성 소프트 로봇 간 인력 제어를 통한 집단행동 연구는 미비하다. (G. Go *et al.*, *Adv. Healthcare Mater.*, 6: 1601378, 2017; S. Won *et al.*, *Nat. Commun.*, 10: 4751, 2019) 이는 자성 소프트 로봇 간에 발생하는 상호 인력과 개별 소프트로봇의 관성력의 균형을 조절하는 것이 어렵기 때문이다.

[0004] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 포함하여 여러 문제점들을 해결하기 위한 것으로서, 액체-기체 계면에서 매우 빠른 속도로 유연하고, 다중 유연 구동이 가능한 고분자 나노복합체 기반의 자성 소프트 로봇 모듈 및 자기적 인력에 의해 자성 소프트 로봇 모듈 여러 대가 자가 조립된(self-assembly) 집합체를 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0005] 본 발명의 일 관점에 따르면, 다공성 탄소 나노튜브 실(carbon nanotube yarn, CNTY) 표면에 자성입자가 분산된 고분자 탄성체가 코팅된, 자성 소프트 로봇이 제공된다.

[0006] 본 발명의 다른 일 관점에 따르면, 고분자 탄성체 전구체 용액에 자성입자를 적재하여 고분자 탄성체 전구체-자성입자 복합체를 제조하는 고분자 탄성체 전구체-자성입자 복합체 제조단계; 상기 고분자 탄성체 전구체-자성입자 복합체에 적절한 길이로 절단된 다공성 탄소 나노튜브 실을 담근 후 꺼내서 딥-코팅을 수행하는 딥-코팅 단계; 딥-코팅된 탄소 나노튜브 실을 경화시키는 경화단계; 및 경화된 딥-코팅 탄소 나노튜브 실-고분자 탄성체-자성입자 복합체를 적절한 중형비로 절단하는 단계를 포함하는, 제1항의 자성 소프트 로봇의 제조방법이 제공된다.

[0007] 본 발명의 다른 일 관점에 따르면, 상기 자성 소프트 로봇에 전자기장에 의해 유도된 펄스 회전 자기장을 가하는 단계를 포함하는 상기 자성 소프트 로봇의 구동방법이 제공된다.

[0008] 본 발명의 다른 일 관점에 따르면, 복수의 상기 자성 소프트 로봇을 액체-기체 계면에 위치시킨 후 자기 주파수가 조절된 펄스 회전 자기장을 가하는 단계를 포함하는, 복수의 자성 소프트 로봇의 집합 구동방법이 제공된다.

발명의 효과

[0009] 상기한 바와 같이 이루어진 본 발명의 일 실시예에 따르면, 졸-겔 경화가 가능한 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMS) 탄성체(elastomer)를 이용함으로써, 나노-마이크로 계층적 구조를 갖는 복잡한 형태의 자성 소프트 로봇의 제조를 용이하게 하며, 딥코팅 공정으로 공정의 단순화가 가능하다. 또한 제조된 자성 소프트로봇 여러 대를 자기 조립 집합체를 구현하여 그리퍼(gripper)로는 이송이 어려운 미세 화물의 이송을 가능하게 한다. 그러나 이러한 효과는 예시적인 것으로, 이에 의해 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

도면의 간단한 설명

[0010] 도 1은 자기 조립이 가능한 자성 소프트로봇을 위한 생체-모사 삼원 나노복합체를 나타내는 것으로서, 인간의 근골격계를 개략적으로 나타낸 개요도(A), CNTY 나노복합체의 계층적 구조 (i) 주사전자현미경을 이용하여 저배율로 촬영한 생체-모사 나노복합체의 횡단면을 촬영한 사진, (ii) 주사전자현미경을 이용하여 고배율로 촬영한 CNTY의 나노공극, 및 (iii) 투과 전자현미경으로 확인된 단일 다중벽 탄소나노튜브(multi-wall carbon nanotube)에 대한 일련의 사진(B), 졸-겔 딥-코팅 공정으로 자기 반응성 CNTY 나노복합체를 제조하는 과정을 개략적으로 나타낸 공정도(C), PDMS 혼합물의 복합 점도에 따른 자성 입자의 코팅 두께를 나타내는 그래프(D) 및 진동 시료 자화율측정기로 측정된 자성 고분자 나노복합체의 포화 자화를 측정한 결과를 나타내는 그래프(E)를 나타낸다.

도 2는 다공성 CNTY의 단면에 대한 주사전자현미경 촬영 사진(A) 및 상기 주사전자현미경 촬영에 의해 확인된 딥-코팅 과정 이후 모세관 작용에 의해 나노공극으로 침투된 PDMS를 촬영한 사진(B)이다.

도 3은 CNTY에 PDMS 자성 복합체가 코팅된 표면을 주사전자현미경으로 촬영한 이미지를 나타낸다.

도 4는 자성 소프트 로봇의 이중모드 수영을 나타낸 것으로서, 4개의 코일에 의해 4개의 자기 극을 형성하는 전자기장 및 펄스 회전 자기장 유도(A), 펄스 회전 자기장의 주파수에 따라 (i) 반시계 방향(counterclockwise, CCW)으로의 직선 병진 운동, (ii) 시계 방향(clockwise, CW)으로의 회전 운동이 가능한 자성 소프트 로봇(B)을 보여준다. 자성 소프트로봇은 최대 초당 180 체장(BL/s) 이동이 가능하여 수상 및 수중에서 수영하는 생명체 및

인공적 수영체 속도를 증가하는 차트(D)를 보여준다.

도 5는 자성 소프트 로봇의 회전 수를 분석한 결과를 나타내는 것으로서, 회전 자기 주파수와 일치한다. 반면, PDMS에 10 부피%로 로딩된 자성 입자를 덤코팅하여 제조한 종횡비(aspect ratio) 13의 자성 소프트로봇은 회전 자기 주파수 속도를 따라가지 못한다.

도 6은 수영 모드에 영향을 끼치는 (i) 회전 자기장의 자기 주파수, (ii) PDMS에 로딩되는 자성입자의 농도, 및 (iii) 자성 소프트 로봇의 종횡비를 달리했을 경우 수영하는 자성 소프트 로봇의 모습을 중첩한 이미지(A), (i) 회전 자기장의 자기 주파수, (ii) PDMS에 로딩되는 자성 입자의 농도, 및 (iii) 자성 소프트 로봇의 종횡비 조건에 따른 자성 소프트 로봇의 y-축 좌표(B), 및 PDMS에서 자성입자의 농도가 10 부피%(C), 20 부피%(D), 및 30 부피%(E)에 대한 수영 모드의 요약 그래프를 나타낸다.

도 7은 직선 병진운동을 분석한 결과로서, 자성입자 농도를 10 부피%, 20 부피%, 30 부피%로 적재하였을 때 AR-2.5(A), AR-6(B), AR-13(C)의 자성 소프트 로봇이 수영하는 대각선 거리를 측정한 그래프, 및 직선 병진 운동 상에서 자기 주파수(D), 입자 농도 (E), 및 종횡비(F)의 효과를 x-축 좌표 및 y-축 좌표로 나타낸 것이다.

도 8은 다중 소프트 로봇의 자기적 상호작용 관절을 이용해 재구성 가능한 조립을 나타내는 것으로서, 조립 직선 병진(A), 조립 회전(B), 및 변동 회전 운동(C)을 하는 AR-2.5, AR-6 및 AR-13 의 세 대의 소프트 로봇의 (i) 중첩 이미지 및 (ii) x-y 축 좌표 그래프를 나타내며, 자성입자와 자기 주파수에 따라 AR-2.5, AR-6 및 AR-13 의 세 대의 소프트 로봇의 조립 모드(D), 2.5 내지 6 사이로 유사한 종횡비를 갖는 다섯 대의 소프트 로봇의 조립 모드(D)를 나타낸다.

도 9는 다섯 대의 자성 소프트로봇이 조립 직선 병진 운동에서 조립 회전 운동으로 변환되는 과정의 중첩 이미지(A) 및 시간의 경과에 따른 y-축 좌표를 기록한 그래프(B)이다.

도 10은 여러 대의 소프트 로봇의 조립 수영에 의한 유체 소용돌이 생성을 보여주는 것으로서, 열적외선 카메라로 관측한 가열된 다중 소프트 로봇(10 부피%)의 (i) 직선 모드 (3.3 Hz), (ii) 회전 모드 (10 Hz)에 의해 생성되는 물의 소용돌이(A), 수영 모드의 변경을 통해 255 μm 의 직경을 가진 850개의 마이크로비드 응집체의 수송(B)를 나타낸다.

도 11은 단일 소프트 로봇이 마이크로비드를 수송하지 못하는 실험 결과를 나타내는 사진이다. 단일 소프트 로봇(AR-6/10 부피%)은 3 Hz와 6 Hz 모두에서 물 위의 마이크로비드를 운반할 수 없었다.

도 12는 여러 대의 수영하는 다중 소프트 로봇(30 부피%)으로부터 야기된 물의 소용돌이를 열적외선 관측으로 나타낸 이미지(A), 조립 회전 모드(13.3 Hz)에서 나타나는 소용돌이의 디지털 카메라 이미지(B), 4 mm 직경의 반-잠수한 네 개의 실리카 겔을 운송하는 과정(C)과 실리카 겔의 속도를 측정한 그래프(D)를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0011]

용어의 정의:

[0012]

본 문서에서 사용되는 용어 "소프트 로봇(soft robot)"은 유연성이 낮은 금속재질의 단단한 소재로 이루어진 경질 로봇(hard robot)과 반대되는 개념의 로봇으로서 금속 대비 낮은 영률(Young's modulus)을 갖는 고분자 탄성체(polymeric elastomer)를 기반으로 하며 금속 관절의 움직임을 프로그래밍해야 하는 경질 로봇 과 달리 유연한 몸체를 이용해 연속적인 궤적을 그리며 구동이 가능하다.

[0013]

고분자 탄성체에는 열가소성 탄성체와 열경화성 탄성체가 존재하는데 열가소성 탄성체에는 열가소성 스타이렌 블록 공중합체(thermoplastic styrene block copolymer)와 같은 스타이렌계 탄성체, 열가소성 폴리올레핀엘라스토머(thermoplastic polyolefin elastomer, TPO)와 같은 올레핀계열 탄성체, 열가소성 폴리우레탄(thermoplastic polyurethane, TPU)와 같은 우레탄계 탄성체, 열가소성 폴리아마이드(thermoplastic polyamide, TPA)와 같은 아마이드계 탄성체, 열가소성 폴리에틸렌(thermoplastic polyethylene, TPE) 및 이들을 구성하는 단위체의 공중합체가 포함되며, 열경화성 탄성체에는 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane), 에코플렉스 실리콘 고무(Ecoflex silicone rubber), 드래곤 스킨 실리콘 고무 (Dragon Skin silicone rubber), 아크릴로니트릴 부타디엔 고무(acrylonitrile butadiene rubber), 클로로설폰에이트드 폴리에틸렌 고무(chlorosulfonated polyethylene rubber), 에틸렌 아크릴레이트 고무(ethylene acrylated rubber), 플루오로카본 고무(fluorocarbon rubber), 수소화 아크릴로니트릴 부타디엔 고무(hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber), 퍼플루오로엘라스토머(perfluoroelastomer), 열경화성 폴리우레탄 고무(thermoset polyurethane

rubber), 열경화성 스타이렌 부타디엔 고무(thermoset styrene butadiene rubber), 열경화성 클로로프렌 고무(thermoset chloroprene rubber), 에피클로로하이드린 공중합체 고무(epichlorohydrin copolymer rubber), 에틸렌 프로필렌 디엔 고무(ethylene propylene diene rubber), 플루오로실리콘 고무(fluorosilicone rubber), 천연고무인 폴리이소프렌 고무(polyisoprene rubber), 폴리아크릴레이트 고무(polyacrylate rubber) 등이 존재한다.

[0014] **발명의 상세한 설명:**

[0015] 본 발명의 일 관점에 따르면, 다공성 탄소 나노튜브 실(CNTY) 표면에 자성입자가 분산된 고분자 탄성체가 코팅된, 자성 소프트 로봇이 제공된다.

[0016] 상기 자성 소프트 로봇은, 1 내지 20의 중형비를 가질 수 있고, 2 내지 10, 바람직하게는 4 내지 8의 중형비를 가질 수 있다.

[0017] 상기 자성 소프트 로봇에 있어서, 상기 자성입자는 고분자 탄성체 전구체 기준으로 10 내지 39부피%로 적재될 수 있고, 20 내지 35 부피%로 적재될 수 있으며, 25 내지 35 부피%로 적재될 수 있다.

[0018] 상기 자성 소프트 로봇에 있어서, 상기 고분자 탄성체는 우레탄계, 올레핀계, 스타이렌계, 아마이드계 및 에스테르계로 구성되는 군으로부터 선택되는 열가소성 고분자 탄성체 또는 열경화성 고분자 탄성체 중 어느 하나 이상을 포함할 수 있고, 상기 열가소성 고분자 탄성체는 열가소성 스타이렌 블록 공중합체(thermoplastic styrene block copolymer), 열가소성 폴리올레핀엘라스토머(thermoplastic polyolefin elastomer, TPO), 열가소성 폴리우레탄(thermoplastic polyurethane, TPU), 열가소성 폴리아마이드(thermoplastic polyamide, TPA), 열가소성 폴리에틸렌(thermoplastic polyethylene, TPE), 열가소성 벌카니제이트(thermoplastic vulcanizate, TPV) 및 이들을 구성하는 단위체의 공중합체일 수 있으며, 상기 열경화성 고분자 탄성체는 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane), 에코플렉스 실리콘 고무(Ecoflex silicone rubber), 드래곤 스킨 실리콘 고무(Dragon Skin silicone rubber), 아크릴로니트릴 부타디엔 고무(acrylonitrile butadiene rubber), 클로로설포네이트드 폴리에틸렌 고무(chlorosulfonated polyethylene rubber), 에틸렌 아크릴레이트 고무(ethylene acrylated rubber), 플루오로카본 고무(fluorocarbon rubber), 수소화 아크릴로니트릴 부타디엔 고무(hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber), 퍼플루오로엘라스토머(perfluoroelastomer), 열경화성 폴리우레탄 고무(thermoset polyurethane rubber), 열경화성 스타이렌 부타디엔 고무(thermoset styrene butadiene rubber), 열경화성 클로로프렌 고무(thermoset chloroprene rubber), 에피클로로하이드린 공중합체 고무(epichlorohydrin copolymer rubber), 에틸렌 프로필렌 디엔 고무(ethylene propylene diene rubber), 폴리디메틸실록산(PDMS), 플루오로실리콘 고무(fluorosilicone rubber), 천연고무인 폴리이소프렌 고무(polyisoprene rubber), 폴리아크릴레이트 고무(polyacrylate rubber)일 수 있다.

[0019] 상기 자성 소프트 로봇에 있어서, 상기 자성입자는 강자성 입자(ferromagnetic particle) 또는 한자성 입자(ferrimagnetic particle)일 수 있고, 상기 강자성 입자는 코발트, 니켈, 철, 이들의 산화물 및 이들의 합금으로 구성되는 군으로부터 선택되는 하나 이상의 강자성 물질을 포함하는 자성입자일 수 있으며, 상기 한자성 입자는 자철석, 및 페라이트로 구성되는 군으로부터 선택되는 한자성 물질을 포함하는 자성입자일 수 있다.

[0020] 본 발명의 다른 일 관점에 따르면, 고분자 탄성체 전구체 용액에 자성입자를 적재하여 고분자 탄성체 전구체-자성입자 복합체를 제조하는 고분자 탄성체 전구체-자성입자 복합체 제조단계; 상기 고분자 탄성체 전구체-자성입자 복합체에 적절한 길이로 절단된 다공성 탄소 나노튜브 실(CNTY)을 담근 후 꺼내서 딥-코팅을 수행하는 딥-코팅 단계; 딥-코팅된 탄소 나노튜브 실을 경화시키는 경화단계; 및 경화된 딥-코팅 탄소 나노튜브-고분자 탄성체-자성입자 복합체를 적절한 중형비로 절단하는 단계를 포함하는, 제1항의 자성 소프트 로봇의 제조방법이 제공된다.

[0021] 상기 제조방법에 있어서, 상기 자성입자는 고분자 탄성체 전구체 기준으로 10 내지 35부피%로 적재될 수 있다.

[0022] 상기 제조방법에 있어서, 상기 중형비는 1 내지 20일 수 있다.

[0023] 상기 제조방법에 있어서, 상기 고분자 탄성체 전구체 용액은 고분자 탄성체 전구체 및 가교제가 포함된 것일 수 있다.

[0024] 본 발명의 다른 일 관점에 따르면, 상기 자성 소프트 로봇에 자기 주파수가 조절된 자기장을 가하는 단계를 포함하는 상기 자성 소프트 로봇의 구동방법이 제공된다.

- [0025] 상기 구동방법에 있어서, 상기 자기 주파수는 2 내지 10 Hz일 수 있다.
- [0026] 본 발명의 다른 일 관점에 따르면, 상기 자성 소프트 로봇을 액체-기체 계면에 위치시킨 후 자기 주파수가 조절된 펄스 회전 자기장을 가하는 단계를 포함하는 자성 소프트 로봇의 구동방법이 제공된다.
- [0027] 상기 방법에 있어서, 상기 자기 주파수는 2 내지 20 Hz일 수 있다.
- [0028] 본 발명의 다른 일 관점에 따르면, 복수의 상기 자성 소프트 로봇을 액체-기체 계면에 위치시킨 후 자기 주파수가 조절된 자기장을 가하는 단계를 포함하는, 복수의 자성 소프트 로봇의 집합 구동방법이 제공된다.
- [0029] 상기 방법에 있어서, 상기 복수의 자성 소프트 로봇은 사양이 동일하거나 상이한 것일 수 있고, 상기 사양은 중형비 또는 자성입자의 적재율일 수 있다.
- [0030] 상기 방법은 상기 복수의 자성 소프트 로봇을 액체-기체 계면에 위치시킨 후 펄스 회전 자기장의 자기 주파수를 변경함으로써 상기 복수의 자성 소프트 로봇의 운동모드를 다중모드로 변경하는 단계를 추가로 포함할 수 있다.
- [0031] 상기 방법에 있어서, 상기 다중모드는 조립 직선 병진 운동, 조립 회전 운동 및 변동 회전 운동으로 구성되는 군으로부터 선택될 수 있고, 상기 조립 직선 병진 운동은 자기 주파수를 2 내지 5 Hz의 저주파수로 설정할 경우 발생하고, 상기 조립 회전 운동은 자기 주파수를 5 내지 15 Hz의 중주파수로 상승시킬 경우 발생하며, 상기 변동 회전 운동은 주파수를 15 Hz 이상의 고주파로 상승시킬 경우 발생한다. 상기 자기장 자기 주파수는 상기 소프트 로봇의 중형비와 자성 입자의 적재율에 따라 달라질 수 있으나, 주파수를 증가시킴으로써 운동모드가 바뀌는 경향은 달라지지 않는다.
- [0032] 상기 방법은 상기 복수의 자성 소프트 로봇의 다중모드 운동에 의한 수영을 통해 유체 소용돌이의 방향, 각속도, 크기 제어하는 단계를 추가로 포함할 수 있다.
- [0033] 이러한, 복수의 자성 소프트 로봇의 다중모드 운동에 의한 수영 현상을 활용하면 액체 표면에 떠있는, 즉, 기체-액체 계면 상의 미세 화물이나, 반잠수 상태 즉, 액체-고체 계면 상의 미세 또는 소형 화물을 특정 방향으로 수송하는데 활용할 수 있다.
- [0034] 이런 관점에서 본 발명은, 상기 자성 소프트 로봇을 액체-기체 계면에 위치시킨 후 펄스 회전 자기장의 자기 주파수를 변경함으로써, 상기 복수의 자성 소프트 로봇을 다중 운동모드로 수영하게 하는 단계; 및 상기 복수의 자성 소프트 로봇의 수영에 생성된 유체 소용돌이를 이용하여, 상기 액체-기체 계면 또는 고체-액체 계면에 위치한 미세 또는 소형 화물을 수송하는 단계를 포함하는, 계면 상의 미세 화물을 수송하는 방법을 제공한다.
- [0035] 본 발명자들은 종래의 소형 로봇들의 문제점을 해결하기 위해 예의 노력한 결과, 인간의 근골격계로부터 영감을 받아서 인간의 근골격계-모사 자성 고분자 나노복합체를 제조하였다. 인체는 뼈에 붙어 있는 골격근의 작용에 의해 활성화되는 적절한 힘으로 다양한 움직임을 수행한다. 본 발명자들은 나노다공성 탄소나노튜브 실(carbon nanotube yarn, 이하, 'CNTY'로 약칭함) 표면에 고분자-자성입자 복합체가 코팅된 코어-셸 섬유 구조를 도입함으로써 뼈-근육 구조를 모사하였고, 생체모방 복합체로 제조한 다중의 소프트 로봇은 자기적 인력에 의한 동적 관절을 만들어 다양한 움직임을 수행할 수 있었다.
- [0036] 본 발명자들은 전자기장에 의해 유도되는 펄스 회전 자기장을 이용해 삼원 고분자 나노복합체로 구성된 자성 소프트 로봇이 종래기술보다 47배 빠른 초당 180 체장(BL/s)의 속도로 물 위를 헤엄칠 수 있었다. 단일 및 다중 생체모방 자성 소프트 로봇은 전자기장의 회전 주파수 속도와 동일한 속도로 헤엄칠 수 있어 민첩한 속도를 유지한다. 다중의 소프트 로봇은 자기적 인력에 의한 동적 유연 관절로 연결되어 유연한 조립식 수영이 가능하였다. 펄스 회전 자기장의 주파수를 다르게 하여 다중 소프트 로봇의 조립 직선 병진 운동과 조립 회전 운동, 변동 회전 운동 3가지 멀티모드 수영을 유도하여 유체 소용돌이의 방향, 각속도, 크기 제어가 가능하였다. 다중 소프트 로봇의 수영에 의해 생성된 유체 소용돌이를 이용하면 액체-기체 계면에 존재하거나 고체-액체 계면에 존재하는 미세 화물 수송을 용이하게 한다. 소프트로봇의 구동 방식을 멀티 모드를 프로그램 가능한 구동 방식은 초소형 단일 소프트 로봇의 제어 가능한 움직임을 제한해 왔던 도전을 극복할 수 있는 가능성을 보여준다.
- [0037] 이하 본 발명을 첨부되는 실시예를 통해 보다 상세하게 설명하고자 한다. 다만, 본 발명의 실시예들은 당해 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명을 더욱 완전하게 설명하기 위하여 제공되는 것이며, 하기 실시예는 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다. 오히려 이들 실시예들은 본 개시를 더욱 충실하고 완전하게 하고, 당업자에게 본 발명의 사상을 완전하게 전달하기 위하여 제공되는 것이다. 또한, 도면에서 각 층의 두께나 크기는 설명의 편의 및 명확성을 위하여 과장된 것이다.

[0038] **일반적인 방법**

[0039] **CNTY 합성**

[0040] 탄소 나노튜브 실(CNTY)은 부유 촉매 화학증착법(CVD) 방법으로 제조하였다(J. Choi *et al.*, *ACS Nano*. 11: 7608-7614, 2017). 탄소원으로 메탄(Singin Gstech Co., Ltd., 99.999%), 프로모터로 티오펜(Sigma Aldrich, USA, ≥99%), CNT 합성을 위한 촉매 전구체로 페로센(Sigma Aldrich, USA, 98%)을 사용하여 1,200℃에서 소성하였다. 반응로에서 CNT는 탈염수에 이어 아세톤(Daejung Chemical and Metals, Korea) 욕조를 거쳐 실의 형태로 지속적으로 인출되었다. 100 가닥의 CNTY 실을 물러 상에서 5 m/min의 감는 속도로 꼬아서 제조하였다. 100 가닥을 꼬아 나선형의 특징을 이루는 실과 가닥 사이에 공극을 가진 내부를 형성하였다.

[0041] **CNTY의 딥 코팅**

[0042] PDMS(Polydimethylsiloxane)-철 입자 혼합물을 PDMS 전구체와 가교제(Sylgard 184, Dow Corning, USA)를 10:1의 비율로 혼합하고 철 입자(CC 등급, BASF, Germany)를 적재율 1, 2, 10, 20, 30, 또는 40%로 적재시켰다. CNTY를 6 cm의 일정한 길이로 잘라 수평 방향으로 PDMS 전구체-철 입자 혼합물에 1분 동안 담갔다. 실온에서 10분간 수직으로 세워서 과량의 PDMS-철 입자 혼합물을 제거한 후, 복합체 혼합물로 코팅된 CNTY를 130℃ 오븐에서 3시간 동안 완전히 경화시켰다. 3차 나노복합체는 2.5, 6, 13의 중형비(AR)로 절단하였다.

[0043] **삼원 나노복합체의 특성 분석**

[0044] CNTY를 둘러싸고 있는 PDMS-철 입자 복합체의 코팅 두께는 단면 SEM(S-4300SE, Hitachi)로 측정했다. PDMS-철 입자 복합체의 복합 점도(complex viscosity)는 플레이트 간격이 5 mm인 평행 플레이트 시스템을 가진 유동계(rheometer, MCR302, Anton Paar, Germany)로 측정했다. 온도 조건은 23.8℃였고 각주파수는 1 Hz~100 Hz까지 적용되었다. 삼원 고분자 나노복합체의 포화 자화 값(saturation magnetization, M_s)은 진동시료 자화율측정기(VSM, MPMS3-Evercool, Quantum Design Inc.)를 이용하여 측정하였다.

[0045] **자기 구동 분석**

[0046] 전자기장 스테러의 펄스 회전 자기장의 자기 주파수를 3.3, 6.7, 10, 13.3, 16.7, 또는 20 Hz로 바꾸면서 액체-기체 계면에서 수영하는 자성 소프트 로봇의 움직임을 분석 하였다. 수영 궤적은 각 소프트 로봇의 질량 중심을 기준으로 추적하였다.

[0047] **유체 내 소용돌이 생성 및 비드 운반**

[0048] 소용돌이의 시각화와 비드 운반 등을 위해 중형비 2.5 내지 6을 가진 여러 대의 자성 소프트 로봇을 준비하였다. 소프트 로봇은 0.47 W/cm^2 의 근적외선(NIR) 조명(UIM-250, UNIX, Korea)에 3분간 노출되었다. 근적외선 노출에 의해 열을 발산하는 소프트 로봇은 열적외선 카메라(FLIR-E64501, FLIR Systems, Inc., USA)에 의해 확인되었다. 물 위의 마이크로비드의 지름은 평균 255 μm 이었다. 반-잠수 비드 운송에 사용된 실리콘겔의 직경과 중량은 각각 4 mm와 52 mg으로 측정되었다.

[0049] **실시예 1: 생체 모방형 자성 소프트 로봇 제조**

[0050] 자성 소프트 로봇의 구조는 인간의 근골격계 시스템(도 1A와 1B)의 채골 해부학에서 영감을 얻었다. 팔의 팔꿈치 관절에는 더 긴 치밀골의 끝에 해면골을 구성하는 다공성 네트워크가 위치한다. 뼈는 콜라겐 섬유, 즉 트로포콜라겐으로 구성되어 있으며 골수가 채워졌음에도 불구하고 가벼운 상태를 유지하고 있다. 이러한 요소들 때문에 팔의 팔꿈치 관절은 수많은 자유도로 민첩하게 회전하고 구부리는 운동을 한다. 팔의 강한 힘은 근육량에 비례하여 긴 뼈를 둘러싸고 있는 골격근에 의해 발휘된다.

[0051] 본 발명자들은 삼원 나노복합체를 이용한 계층적 생체모방 구조를 쉽게 제조하기 위해 CNTY에 대한 폴리디메틸실록산(PDMS)-철 입자 복합체의 딥-코팅 공정을 수행하였다. 다공성 뼈로 사용되는 CNTY의 나노다공성 골격을 7 nm 두께의 다중벽 탄소나노튜브(MWNT) 100 가닥을 직경 340 μm 로 꼬아서 제조하였다. 자기 반응성 나노복합체를 PDMS 전구체와 철 입자의 혼합물에 CNTY를 딥코팅하여 수득하였다(도 1B와 1C). 5 μm 철 입자는 나노기공을 함유하는 CNTY의 표면에만 선택적으로 코팅이 가능하였다. 30도에서 열경화를 하여 PDMS 전구체를 고분자화한 후, PDMS-철 입자 복합체의 코팅 두께와 포화 자화도(saturation magnetization, M_s)는 PDMS 내 함유된 철 입자의 부피%에 따라 결정되었다(도 1의 D와 E). 철 입자 사이의 낮은 응집력으로 인해 코팅이 어렵기 때문에 PDMS를 고분자 바인더로 사용하여 철 입자를 코팅하였는데, PDMS 전구체는 모세관 현상(도 2)을 통해 나노기공에 선

택적으로 침투하면서 CNT와 철입자를 바인딩하는 역할로 작용한다. 효율적인 자기이동(magnetomotility)을 위해 높은 포화 자화도(M_s)를 달성하기 위해서는 철 입자를 많이 적재하는 것이 필수적이긴 하나, 중력 하에 낮은 점도의 용액은 아래로 처지게 되고, 그에 의해 딥-코팅 공정에서 자성 복합체 레이어 형성을 방해한다. 보다 심층적으로 조사하기 위해, 소형 진폭 진동 전단(SAOS)에서 복합체 용액의 유동학적 특성을 조사하였다. 낮은 각 주파수(angular frequency)에서 저장 계수와 손실 계수는 액체에서 대표적인 유동학적 거동인 전단 속도에 대해 각각 2와 1의 기울기를 나타낸다. 철 입자가 분산되지 않은 PDMS 전구체의 복합 점도는 3 rad/s 각 주파수에서 18 Pa·s로 측정된다. 5, 10, 및 20 부피%의 철 입자 적재율에서는 PDMS 전구체-철입자 혼합물의 복합 점도가 각각 33, 90, 및 371 Pa·s로 증가하여 중합 이후 CNT 상에 각각 10, 14, 및 21 μm 두께의 자기 복합체 층을 생성할 수 있었다 (도3). 그 결과 M_s 는 각각 40, 69, 및 118 emu/g로 측정되었다. 무작위적으로 분산된 구형 입자는 전형적으로 20에서 30 부피% 사이의 유변학적 퍼콜레이션(rheological percolation) 임계값을 나타내며, 예상대로 30 부피%의 철 입자 적재율에서 점도와 코팅 두께는 각각 897 Pa·s와 60 μm 으로 급격히 증가하였고, 152 emu/g의 M_s 이 측정되었다. 40 부피%의 철 입자 적재율의 경우, PDMS 전구체-철 입자 혼합물의 2056 Pa·s이라는 높은 복잡 점도로 균일한 코팅이 형성되지 못했다. PDMS 전구체-철 입자 복합체에 철 입자를 10, 20, 및 30 부피%의 비율로 적재하여 제조한 자기 중합체 나노복합체로부터 자성 소프트 로봇을 각각 2.5, 6, 13, 및 20의 중형비(AR)으로 제조하였다. 각각의 소프트 로봇은 PDMS 전구체 내 철 입자의 농도와 중형비(예: AR-2.5/30 부피%)로 명명하였다.

[0052] **실시예 2: 펄스 회전 전자기장에 의한 생체모방 소프트 로봇의 이중모드 수영**

[0053] 생체모방 나노복합체 기반 자성 소프트 로봇은 전자기장 교반기에 의해 액체-기체 계면에서 수영을 한다(도 4). 자기 교반기의 치수는 48 mm $\times$ 48 mm $\times$ 17 mm이다. 두 쌍으로 이루어진 2개의 구리 코일의 스위치를 교대로 켜고/끄면 시계방향의 회전 자기장을 유도할 수 있다(도 4의 A). 펄스 회전하는 자기 주파수에 따라 자성 소프트 로봇은 반시계방향의 직선 병진 운동과 시계방향의 회전 운동이 가능하다(도 4의 B). 예를 들어, 3.3 Hz의 자기 주파수에서 AR-6/10 부피%의 소프트 로봇은 자기장의 구배에 의해 반시계 방향으로 직선 병진 운동을 할 수 있다. 궤적 꼭지점에서는 시계방향으로 회전하는데, 이는 회전 자기장의 방향이 시계방향으로 진행되기 때문이다. 직선 병진운동 주기는 소프트 로봇의 회전 주파수와 동일하다. 결론적으로, 민첩한 수영속도는 직선 병진 운동에 의해 달성이 된다(도 4의 C, 도 5). 최고 속도는 수상에서 수영하는 생명체(D. L. Hu *et al.*, *Nature*. 424: 663-666, 2003; S. T. Hsieh *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 101: 16784-16788, 2004; I. Rubinoff *et al.*, *Mar. Biol.* 91: 181-191, 1986; T. Aigeldinger *et al.*, *J. Exp. Biol.* 198: 1567-1574, 1995), 수중에서 수영하는 생명체(J. T. Enright *et al.*, *Limnol. Oceanogr.* 22: 118-125, 1977; S. A. Arnott *et al.*, *J. Exp. Biol.* 201: 1771-1784, 1998; M. J. Perry *et al.*, *J. Exp. Biol.* 212: 673-683, 2009; T. G. Lang *et al.*, *Science*. 151: 588-590, 1966; F. E. Fish *et al.*, *J. Exp. Biol.* 201: 2867-2877, 1998), 물 위에서의 인공 수영체(N. Bassik *et al.*, *Langmuir*. 24: 12158-12163, 2008; G. Zhao *et al.*, *Chem. Eur. J.* 17: 12020-12026, 2011; I. L. Liakos *et al.*, *Adv. Mater. Interfaces*. 3: 1500854, 2016; J. P. Gong *et al.*, *J. Phys. Chem.* 100: 11092-11097, 1996). 그리고 수중에서의 인공 수영체(Z. Ren *et al.*, *Nat. Commun.* 10: 2703, 2019; C. Huang *et al.*, *Sci. Rep.* 5: 17414, 2015; S.-H. Song *et al.*, *Bioinspir. Biomim.* 11: 036010, 2016; B. Kim *et al.*, *Smart Mater. Struct.* 14: 1579-1585, 2005; M. Cianchetti *et al.*, *Bioinspir. Biomim.* 10: 035003, 2015; R. K. Katzschmann *et al.*, *Sci. Robot.* 3: eaar3449, 2018)와 비교하였을 때 본 발명에서 AR-6/30 부피%의 자성 소프트 로봇은 6.7 Hz의 자기 주파수 하에서 초당 180 체장(BL/s)이라는 매우 높은 속도를 달성할 수 있었다. 본 발명의 연성 수영체는 수영 생명체의 수영속도의 한계를 극복할 수 있는 가능성을 제시한다.

[0054] 직선 병진운동은 자기 주파수가 증가함에 따라 전환 상태에 놓이게 된다. 자기 주파수가 증가하면 기관의 중심으로부터 소프트 로봇까지의 거리가 감소하게 되고 결국 중심에서 시계방향으로 회전운동을 한다. 반면 소프트 로봇이 초당 회전하는 속도는 교반기의 자기 주파수에 상응하는 것으로 확인되었다(도 5). 10 부피%의 철 입자 농도와 관련하여, AR-13/10 부피%의 소프트 로봇은 13.3 Hz의 자기 주파수를 따르지 못하고 결국 20 Hz에서 멈춘다. 본 발명자들은 자성 소프트 로봇의 수영 모드에 영향을 끼치는 (i) 회전 자기장의 자기 주파수, (ii) PDMS에 로딩되는 자성입자의 농도, 및 (iii) 자성 소프트 로봇의 중형비를 조사하였다(도 6). 자기 주파수의 상승은 직선 병진운동의 대각선 거리와 주기를 감소시킨다(도 7). 그러나 10 Hz 초과와 고-배율 주파수에서는 AR-2.5/20 부피%의 자성 소프트 로봇의 직선 병진운동을 위한 충분한 시간이 확보되지 않았고, 결국, 소프트 로봇은 중앙에서 회전 운동을 하였다. 자성입자의 농도가 커지면 소프트 로봇은 큰 대각선 거리를 갖으며 직선 병진

운동을 하였다. 소프트 로봇의 중형비는 커질수록 직선 병진 운동이 어렵고 회전 운동이 지배적으로 나타났다.

[0055] **실시예 3: 모듈화된 소프트 로봇의 집단 수영**

[0056] 다중 객체 시스템에서의 수영 모드를 분석하였을 때 반시계 방향으로 움직이는 조립 직선 병진 운동, 시계방향으로 회전하는 조립 회전 운동, 복합형태의 변동 회전 운동의 3가지 수영 모드가 관찰된다(도 8). 도 8의 A(i)에서 3.3 Hz의 자기 주파수에서 AR-2.5/20 부피%, AR-6/20 부피% 및 AR-13/20 부피% 총 3 대의 소프트 로봇을 수영시키면 상기 소프트 로봇을 연결하는 자기적 인력에 의해 사슬-유사 구조로 정렬할 수 있다. 세 개의 단위 소프트 로봇으로 구성된 조립된 AR-21.5/20 부피%의 소프트 로봇은 자기적 양방향성 동적 유연 관절 덕분에 직선 병진 운동을 달성하는 반면, 단일 AR-20/20 부피% 소프트 로봇은 직선 병진 운동이 불가능했다. 회전자유도를 나타내는 유연 관절은 꼭지점 회전 시 주기적으로 파도모양을 나타낸다. 그 결과, 도 8의 A(ii)의 궤도의 꼭지점 상에서 대칭적인 형상이 나타난다. 이는 여러 대의 자성 소프트 로봇을 연결하는 동적 관절이 자기적 상호작용에 의해 조립 상태를 유지하다가 꼭지점 회전 시 자기적 인력에 대한 에너지 소실을 일으키면서 궤도의 변이를 유발한다. 도 8의 B에 나타나는 조립 회전 운동의 경우 세 대의 자성 소프트 로봇 궤도에는 진폭이 다른 동일한 사인파형 파동(sinusoidal wave)이 나타난다. 자성 소프트 로봇은 AR-2.5/30 부피%, AR-6/30 부피%, 및 AR-13/30 부피%를 사용한 대표 이미지를 추가하였다. 변동 회전 운동의 경우(도 8의 C), 소프트 로봇들의 조립과 분해 과정이 반복된다. 중형비가 다른 세 대의 소프트 로봇의 모듈형 조립 수영과 중형비가 유사한 다섯 대의 수영모드 분석은 도 8의 D 및 E에 요약되어 있다. 5개의 소프트 로봇을 2.5 내지 6의 유사한 중형비로 분석하였다. 상기 모듈형 소프트 로봇들의 조립 직선 병진 운동은 조립 회전 운동으로 재구성이 가능하다(도 9).

[0057] **실시예 4: 유체 소용돌이 제어**

[0058] 모듈형 소프트 로봇의 조립은 자기 주파수에 맞게 조정되므로 자성 소프트 로봇의 수영 모드를 선택할 수 있다(도 10). 다중모드의 수영은 유체의 소용돌이의 강도와 비대칭성에 대한 조절을 가능하게 한다. 7개의 소프트 로봇(10 부피%)은 10 Hz의 자기 주파수에서 조립 회전운동을 통해 소용돌이 생성이 가능하다(도 10의 A). 해당 유체 와류는 회전하는 자성 소프트 로봇에 의한 강제 와류와, 주변에 형성되는 자유 와류로 이루어진 란킨 와도(Rankine vortex) 형태이다(C. Eloy and S. Le Dizes, *Phys. Fluids*, 13: 660-676, 2001). 소용돌이를 시각화하기 위해, 물의 표면 온도를 열적외선 카메라로 분석하였다. 소용돌이 치는 곳의 온도 구배는 수영용 소프트 로봇이 열 에너지를 방출할 때 관찰된다. 소프트 로봇은 0.47 W/cm^2 의 근적외선(NIR)에 노출되었다. 소프트 로봇이 3.3 Hz의 낮은 자기 주파수로 조립 직선 병진운동으로 헤엄칠 때 유체의 소용돌이는 미미하다. 수영 운동을 제어함으로써, 이 다중 소프트 로봇은 물 위에 떠 있는 850개의 마이크로 비드를 원하는 위치로 운반할 수 있다(도 10의 B). 3.3 Hz에서의 직선 병진운동은 수백 개의 마이크로 비드가 분할된 공간의 입구로 향하는 것을 방지한다. 주파수를 10 Hz로 증가시킬 경우 조립 회전운동과 직선 병진운동이 순차적으로 반복되면서 마이크로 비드의 이동, 구속, 방출, 차단 순차적 구현이 가능했다. 반면 단일 소프트 로봇을 회전시키는 것은 소용돌이 생성을 위해 불충분하며, 마이크로 비드를 운반할 수 없었다(도 11). 소프트 로봇과 전자기장 사이의 자기장 인력이 강해지면 소용돌이가 강해진다(도 12). 따라서 철 입자 농도를 30 부피%로 증가시키면 직선 모드에서도 유체의 소용돌이가 뚜렷해지는 것이 확인 가능하다(도 12의 A). 이는 물 위에 있는 여러 개의 소프트 로봇(30 부피%)들이 자기장이 없을 때 물 표면에서 완전히 떠다니다가 전자기장을 사용하는 조건에서 아래로 당겨지면서 회전 운동을 하여 소용돌이를 형성하는 것을 통해 알 수 있다(도 12의 B). 시계방향 소용돌이는 소프트 로봇의 조립/분해가 반복적으로 일어나는 변동 회전 모드에서도 눈에 띄게 나타났다. 강한 와류의 형성을 통해 30 부피%의 다중 소프트 로봇은 반잠수된 무거운 화물의 이송을 가능하게 하였다(도 12의 C와 D). 4 mm의 지름을 갖는 비드의 무게는 52 mg으로 개별 소프트 로봇보다 82배 더 무겁다. 조립 회전 운동을 하는 소프트 로봇은 밀리미터 규모의 비드에 부딪히면서 변동 회전 운동이 유도되지만 유체에 소용돌이를 형성할 수 있으므로 반잠수된 비드는 시계 방향으로 움직일 수 있다. 따라서 소프트 로봇을 특정 위치로 움직이면 반잠수된 비드를 특정 위치까지 이송이 가능하였다. 화물은 부력에 의해 의도치 않은 움직임이 발생하는 것을 막기 위해 물에 완전히 채워지지 않고 반만 잠수되도록 하였다.

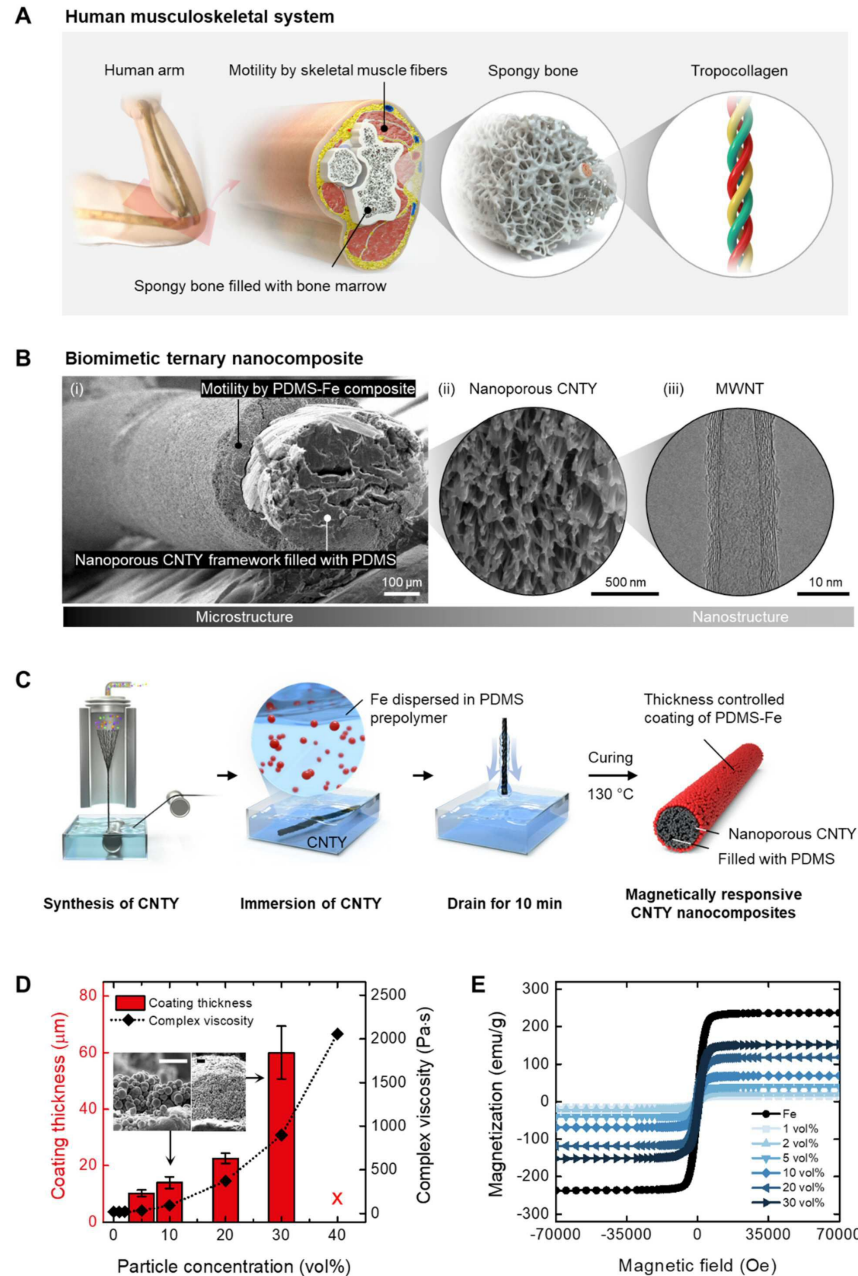
[0059] 본 발명의 일 실시예에 따른 소프트 로봇 및 소프트 로봇의 조립체는 인체의 골격근계를 생체-모사함으로써 수상에서 직선 병진 운동, 회전 운동 및 변동 회전 운동과 같은 다양한 모드의 구동을 가능케 하였고, 자기 주파수, 중합체 내에 포함되는 자기입자의 농도 및 로봇의 중형비를 조절함으로써 운동 양상과 속도를 조절할 수 있을 뿐만 아니라, 소프트 로봇 모듈의 조립에 의한 집합체 역시 다양한 모드의 운동이 가능함을 입증하였다. 이러한 특성으로 인해 본 발명의 일 실시예에 따른 소프트 로봇 및 소프트 로봇 집합체는 약물 전달과 같은 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[0060]

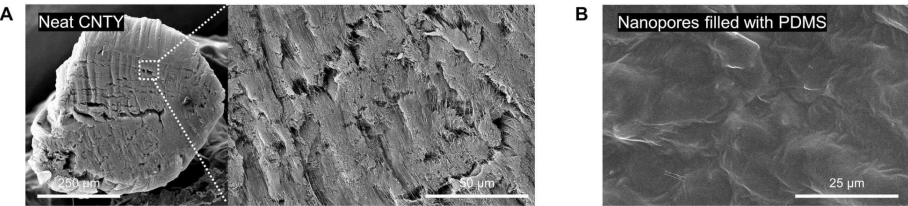
본 발명은 상술한 실시예 및 실험예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 당해 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시예 및 실험예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

도면

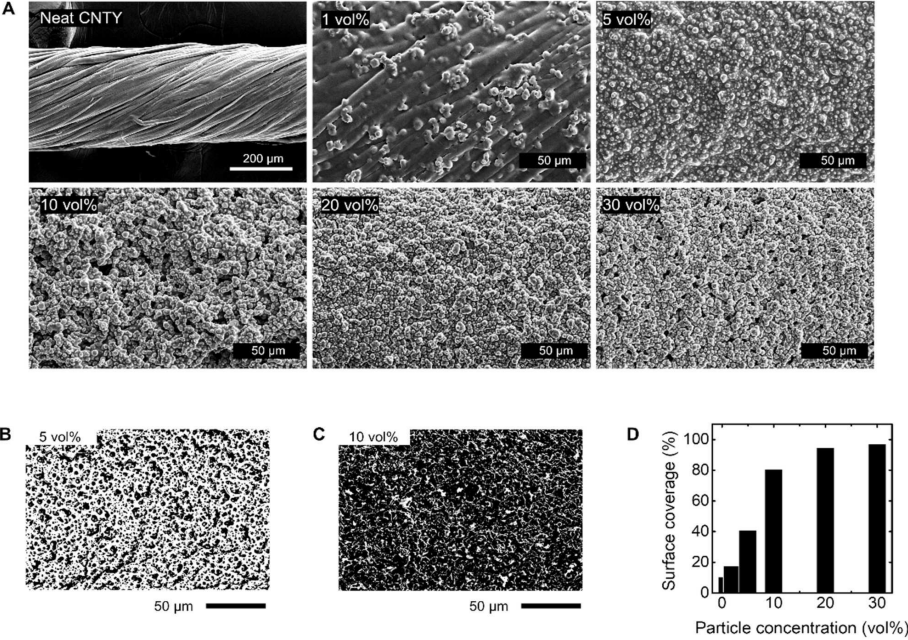
도면1



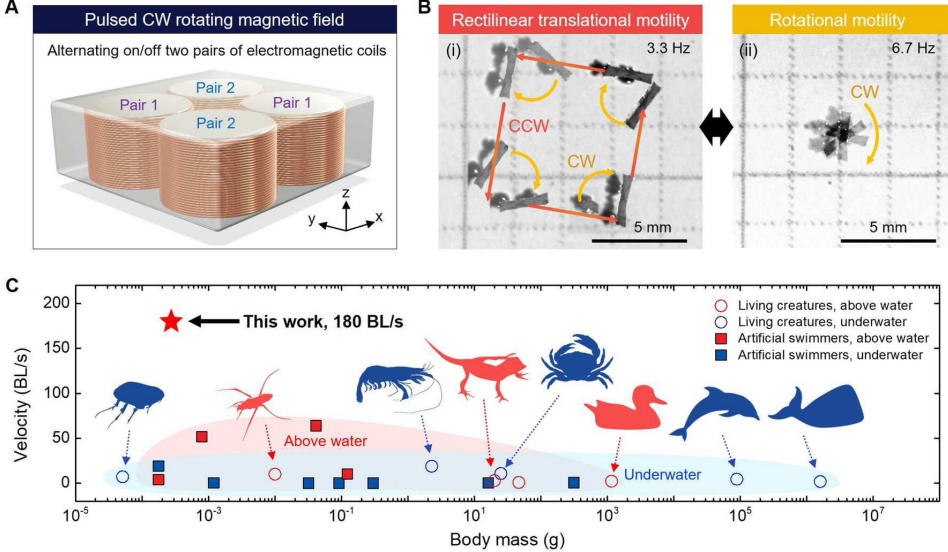
도면2



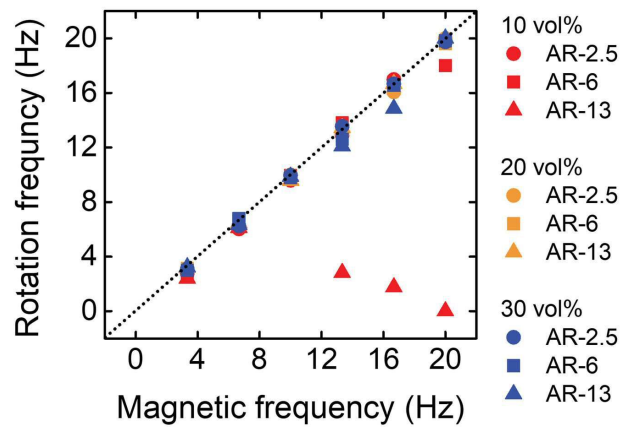
도면3



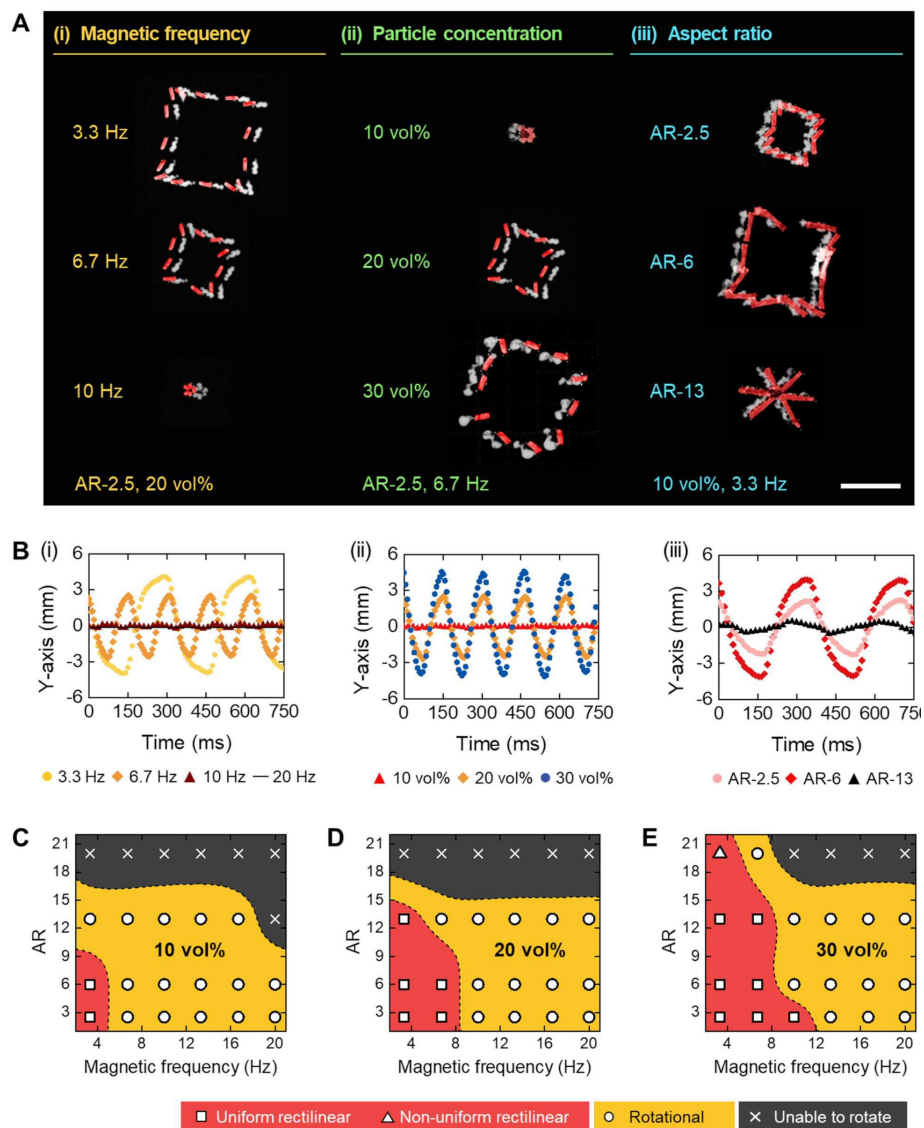
도면4



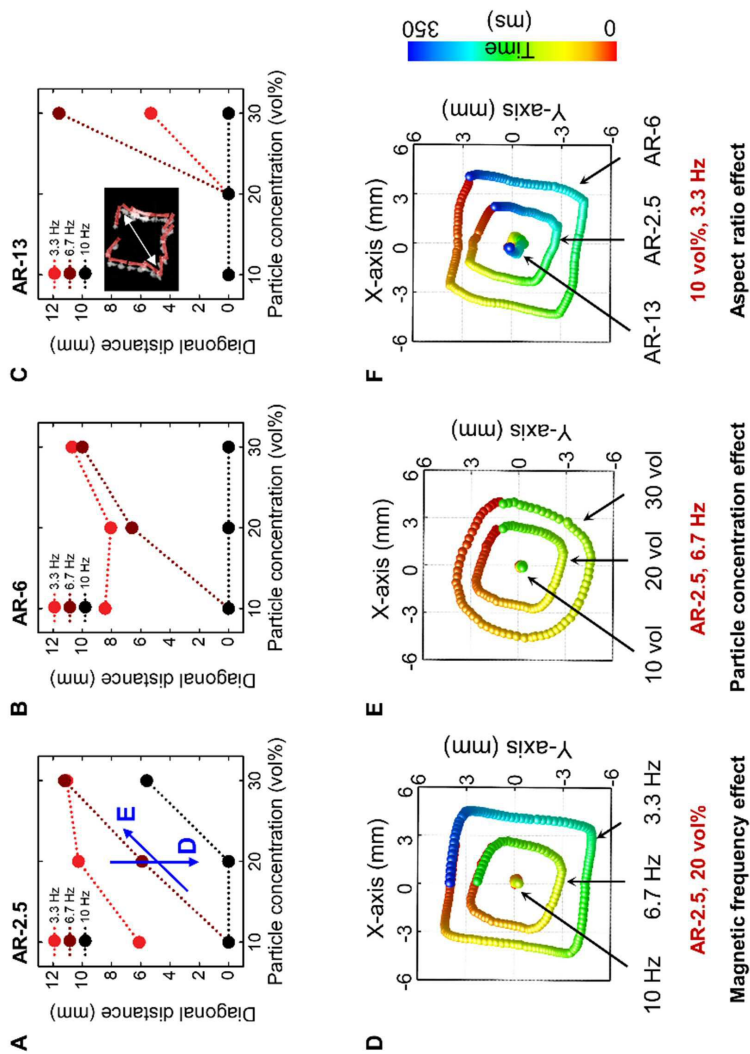
도면5



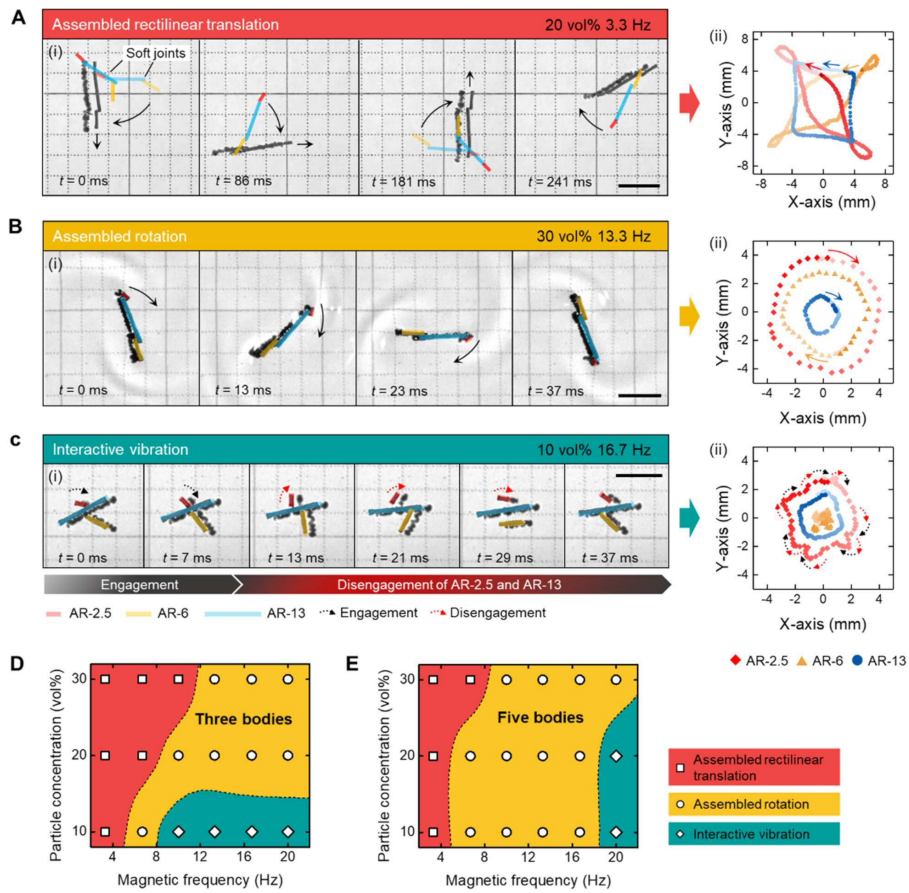
도면6



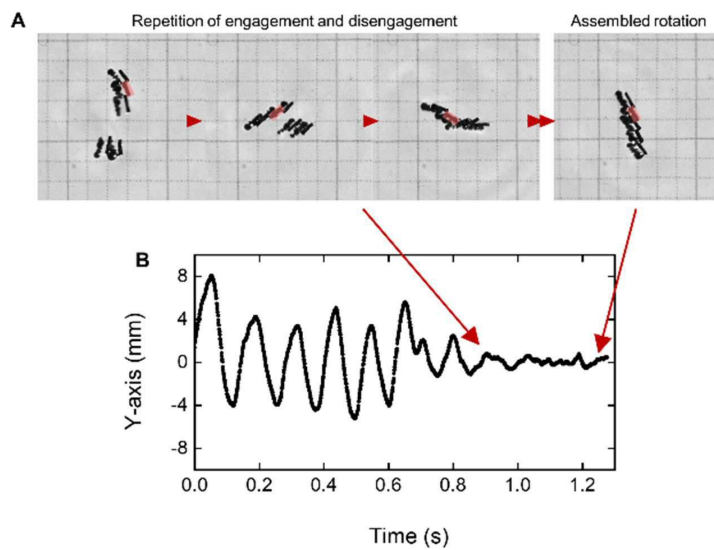
도면7



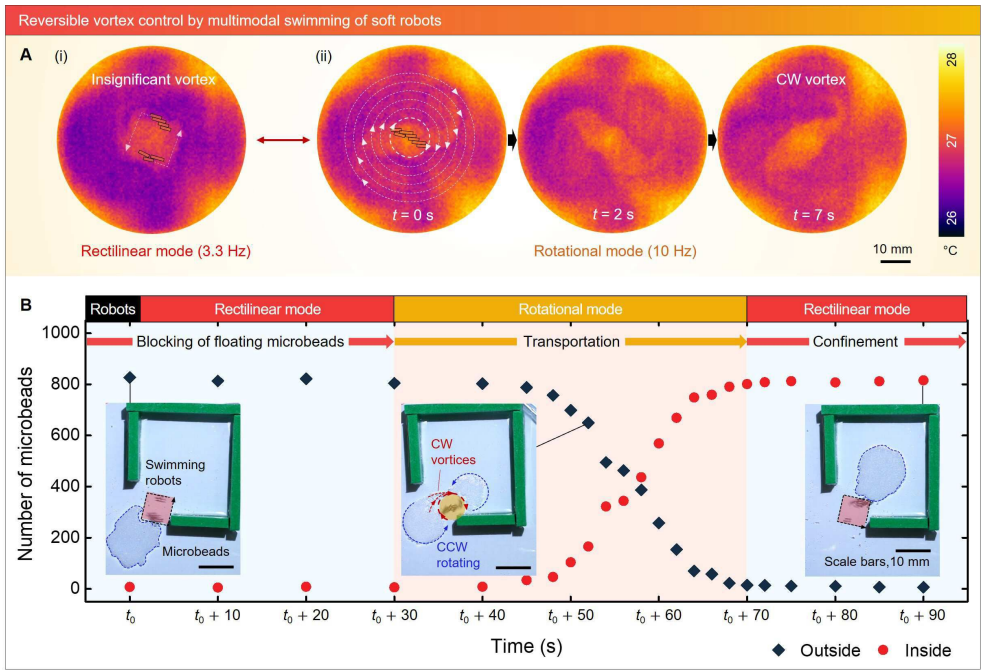
도면8



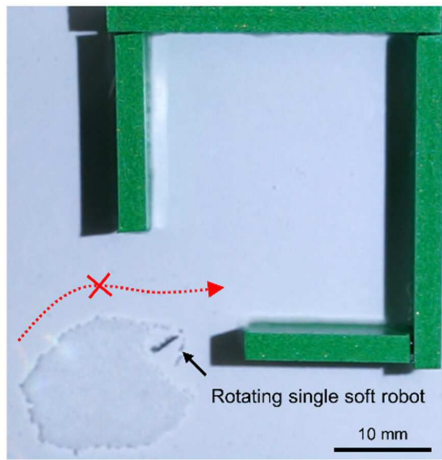
도면9



도면10



도면11



도면12

