(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0065646
(43) 공개일자 2021년06월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F16S 3/08 (2006.01) *C08K 3/10* (2018.01)
C08L 101/00 (2006.01) *H01F 1/147* (2006.01)
(52) CPC특허분류
F16S 3/08 (2013.01)
C08K 3/10 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0154640
(22) 출원일자 2019년11월27일
심사청구일자 2019년11월27일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
김지윤
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원
이하준
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인지원

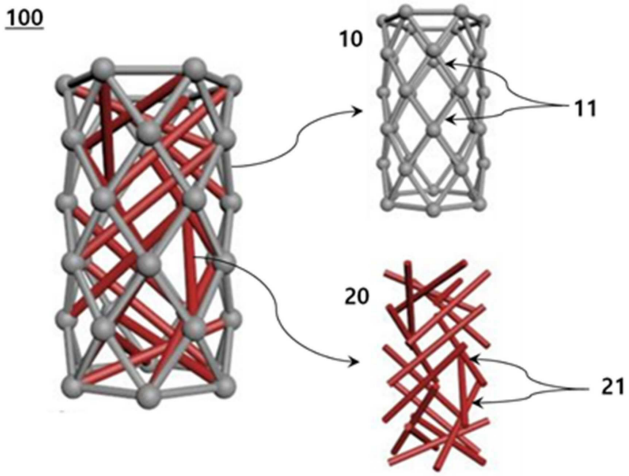
전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 발명의 명칭 **텐서그리티 구조 복합재 및 이의 제조방법**

(57) 요 약

유연성 및 강성을 동시에 요구하는 다양한 기술 분야에 적용할 수 있는 재료로서 텐서그리티 구조를 적용한 복합재로서 제1 구조체 및 제2 구조체를 포함하고, 상기 제1 구조체는 복수의 제1 구조 부재를 포함하고, 상기 복수의 제1 구조 부재의 각 말단점이 서로 직접 연결된 3차원 망상 구조체이며, 상기 제2 구조체는 상기 제1 구조 부재의 말단점 중 적어도 일부의 말단점과 직접 연결된 말단점을 갖는 복수의 제2 구조 부재를 포함하며, 상기 복수의 제2 구조 부재가 서로 직접 연결되지 않거나, 부분적으로 서로 직접 연결 배열된 3차원 구조체이고, 상기 제2 구조체는 상기 제1 구조체의 내부에 위치하며, 상기 제1 구조 부재는 제1 수지 및 자성 입자를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재와 이를 제조하는 방법을 제공한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
C08L 101/00 (2013.01)
H01F 1/14733 (2013.01)
C08K 2201/01 (2013.01)
(72) 발명자
송현서
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원
이수우
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원
최준규
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345293985
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(교육부)(R&D)
연구과제명	형태 변형 특성이 프로그래밍 된 원격 제어 연성 액츄에이터 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2019.03.01 ~ 2020.02.29

명 세 서

청구범위

청구항 1

제1 구조체 및 제2 구조체를 포함하고,

상기 제1 구조체는 복수의 제1 구조 부재를 포함하고, 상기 복수의 제1 구조 부재의 각 말단점이 서로 직접 연결된 3차원 망상 구조체이며,

상기 제2 구조체는 상기 제1 구조 부재의 말단점 중 적어도 일부의 말단점과 직접 연결된 말단점을 갖는 복수의 제2 구조 부재를 포함하며, 상기 복수의 제2 구조 부재가 서로 직접 연결되지 않거나, 부분적으로 서로 직접 연결 배열된 3차원 구조체이고,

상기 제2 구조체는 상기 제1 구조체의 내부에 위치하며,

상기 제1 구조 부재는 제1 수지 및 자성 입자를 포함하는,

텐서그리티 구조 복합재.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제1 수지는 실리콘 수지, 폴리디메틸실록산(PDMS, Polydimethylsiloxane) 수지, 에폭시 수지, 겔(gel) 수지, 테플론(Teflon) 수지, 불화실리콘(FKM) 수지, 폴리아크릴 고무(Polyacrylic rubber) 수지 및 이들의 조합으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나를 포함하는,

텐서그리티 구조 복합재.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 자성 입자는 순철, 산화철(Fe3O4), Nd-Fe-B 합금, 니켈, 코발트, Fe-Nd 합금, Fe-Si합금, Fe-Al합금, Fe-Si-Al합금, Ni-Zn페라이트, Cu-Zn페라이트, Mn-Zn페라이트 및 이들의 조합으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나를 포함하는,

텐서그리티 구조 복합재.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 제2 구조 부재는 제2 수지, 저융점합금(LMPA, Low Melting Point Alloy) 또는 이들의 조합을 포함하는,

텐서그리티 구조 복합재.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 제2 수지는 아크릴로니트릴-부타디엔-스티렌(ABS, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 수지, 폴리락트산(PLA, Poly Lactic Acid) 수지, 열가소성 폴리우레탄(TPU, Thermoplastic Polyurethane) 수지, 폴리프로필렌

(PP, Polypropylene) 수지, 폴리에틸렌(PE, Polyethylene) 수지, 폴리카보네이트(PC, Polycarbonate) 수지, 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET, Polyethyleneterephthalate) 수지, 나일론(Nylon) 수지, 실리콘 수지, 폴리디메틸실록산(PDMS, Polydimethylsiloxane) 수지, 니트릴-부타디엔 고무(NBR) 수지, 카르복실화 NBR(X-NBR) 수지, 이소프렌 수지, 클로로프렌 수지, 부틸 고무 수지, 불소 고무 수지, 우레탄 수지, 스티렌 부타디엔 고무(SBR) 수지, 세라믹; 금속; 또는 목재가 포함된 복합재 수지 및 이들의 조합으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나를 포함하는,

텐서그리티 구조 복합재.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 제1 구조체와 상기 제2 구조체는, 상기 복수의 제1 구조 부재가 서로 연결된 말단점; 상기 복수의 제2 구조 부재가 서로 연결된 말단점; 및 상기 제1 구조 부재와 상기 제2 구조 부재가 서로 연결된 말단점을 유지한 상태로, 동시에 인장 또는 수축 운동 가능한

텐서그리티 구조 복합재.

청구항 7

제6항에 있어서,

자기장을 인가하여 상기 인장 또는 수축운동이 가능한,

텐서그리티 구조 복합재.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 제1 구조 부재 및 상기 제2 구조 부재는 각각의 길이 방향에 수직한 단면 직경이 300㎛ 내지 30㎜인,

텐서그리티 구조 복합재.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 제1 구조체가 원통형 구조체이고,

상기 제1 구조체의 직경 30㎜ 및 높이 50㎜ 기준 상기 제1 구조 부재가 6개 내지 240개 포함되고, 상기 제2 구조 부재가 3개 내지 60개 포함되는

텐서그리티 구조 복합재.

청구항 10

제1 구조 부재의 목적하는 형상에 대응하는 유로와 제2 구조 부재를 갖는 몰드를 준비하는 단계;

제1 수지 및 자성 입자를 포함하는 제1 구조 부재 형성용 조성물을 준비하는 단계;

상기 몰드의 유로에 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 주입하는 단계;

상기 몰드에 주입된 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 경화시키는 단계; 및

상기 몰드를 제거하는 단계를 포함하는,

텐서그리티 구조 복합재의 제조방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 몰드는 3D 프린팅 방법으로 제조되는,

텐서그리티 구조 복합재의 제조방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 유연성 및 강성을 동시에 요구하는 다양한 기술 분야에 적용할 수 있는 재료로서 텐서그리티 구조를 적용한 복합재 및 이를 제조하는 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 최근 로봇 공학 기술이 발달함에 따라, 기계적인 로봇의 구성 요소에 생체 모방 시스템을 적용하여 보다 자연스러운 형태학적 운동을 구현하는 기술에 대한 관심이 높다. 이러한 생체 모방 시스템은 기본적으로 소프트한 재료를 기반으로 가능할 수 있으나, 지금까지는 로봇의 설계에 있어서 원하는 규모로 적합한 행동을 생성하는 환경을 구현하기에는 실제 생체 시스템의 내재적인 복잡성으로 인해 생물학적 유사성을 확보하는 데 어려움이 많았다.

[0004] 재료의 관점에서, 자극에 대한 반응 물질은 하나의 형태의 에너지를 다른 형태의 에너지로 변형시키는 기술을 기반으로 인공적인 시스템에 가역적인 성질과 적응력을 부여하기 위해 여러 유형으로 개발되어 왔다. 그러나 이러한 목적의 대부분의 기존 재료들은 고유의 분자 구조 등에 의해 제한적인 규모의 특성 부여만이 가능한 실정이다. 즉, 목적하는 구조적인 특성과 재료의 본질적 특성을 모두 고려하여 체계적인 기능을 수행할 수 있게 하면서, 더 나아가 실제 살아 있는 유기체와 일부 공통적인 특성을 공유할 수 있는 다중 재료 자체 및 이를 활용한 구조적 형태의 개발은 앞으로도 연구가 필요한 분야이다.

[0005] 또한, 재료의 개발과 함께 소프트 재료의 잠재력을 완전하게 활용하기 위해서는 복잡한 구조의 부품을 제조할 수 있는 단순한 제조 경로의 개발도 절실하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명의 일 구현예는 소프트 재료로서 활용 가능성이 높으며, 생체 모방 시스템에 적용되어 유기체와 높은 유사성을 갖는 시스템 구현이 가능한 텐서그리티 구조의 복합체를 제공하고자 한다.

[0008] 본 발명의 다른 구현예는 상기 텐서그리티 구조의 복합체의 활용 잠재력을 극대화할 수 있는 방법으로서 복잡한 구조의 단순 제조가 가능한 텐서그리티 구조 복합재의 제조방법을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명의 일 구현예에서, 제1 구조체 및 제2 구조체를 포함하고, 상기 제1 구조체는 복수의 제1 구조 부재를 포함하고, 상기 복수의 제1 구조 부재의 각 말단점이 서로 직접 연결된 3차원 망상 구조체이며, 상기 제2 구조체는 상기 제1 구조 부재의 말단점 중 적어도 일부의 말단점과 직접 연결된 말단점을 갖는 복수의 제2 구조 부재를 포함하며, 상기 복수의 제2 구조 부재가 서로 직접 연결되지 않거나, 부분적으로 서로 직접 연결 배열된 3

차원 구조체이고, 상기 제2 구조체는 상기 제1 구조체의 내부에 위치하며, 상기 제1 구조 부재는 제1 수지 및 자성 입자를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재를 제공한다.

[0011] 다른 구현예에서, 제1 구조 부재의 목적하는 형상에 대응하는 유로와 제2 구조 부재를 갖는 몰드를 준비하는 단계; 제1 수지 및 자성 입자를 포함하는 제1 구조 부재 형성용 조성물을 준비하는 단계; 상기 몰드의 유로에 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 주입하는 단계; 상기 몰드에 주입된 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 경화시키는 단계; 및 상기 몰드를 제거하는 단계를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재의 제조방법을 제공한다.

발명의 효과

[0013] 상기 텐서그리티 구조 복합재는 소프트 재료로서 활용 가능성이 높으며, 생체 모방 시스템에 적용되어 유기체와 높은 유사성을 갖는 자극-반응 시스템 구현이 가능한 이점을 갖는다.

[0014] 상기 텐서그리티 구조 복합재의 제조방법은 상기 텐서그리티 구조의 복합체의 활용 잠재력을 극대화할 수 있는 방법으로서 복잡한 구조의 단순 제조가 가능한 수단을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0016] 도 1은 일 구현예에 따른 상기 텐서그리티 구조 복합재와 이의 세부 구성을 분해 도시한 개념도이다.

도 2는 일 구현예에 따른 상기 텐서그리티 구조 복합재의 운동 방향을 화살표로 도시한 것이다.

도 3 (a) 내지 (d)는 다른 구현예에 따른 텐서그리티 구조 복합재(200, 300, 400, 500)의 형상을 도시한 것이다.

도 4는 또 다른 구현예에 따른 텐서그리티 구조 복합재(600)의 형상을 도시한 것이다.

도 5의 (a) 내지 (c)는 도 4의 텐서그리티 구조 복합재(600)와 동일한 텐서그리티 구조 유닛(700)을 가지면서 상기 텐서그리티 구조 유닛(700)들의 연결 구조가 상이한 3가지 경우를 도시한 것이다.

도 6은 일 구현예에 따른 상기 텐서그리티 구조 복합재를 제조하는 방법의 순서를 개략적으로 도시한 것이다.

도 7은 실시예 2-1 내지 2-5에 따라 제조된 텐서그리티 구조 복합재와 이에 대한 실험예 2의 평가 결과를 도시한 것이다.

도 8은 실시예 5에 따라 제조된 텐서그리티 구조 복합재와 이의 텐서그리티 구조 유닛을 도시한 것이다.

도 9의 (a) 내지 (d)는 실험예 1에 따라 실시예 1-2 내지 1-5의 각 텐서그리티 구조 복합재의 자기장 인가에 따른 운동 변위의 방향 선택성 평가 결과를 도시한 것이다.

도 10은 실험예 3에 따라 실시예 3-1 내지 3-6의 자성 입자의 함량에 따른 자기장 자극-반응 평가 결과 그래프를 도시한 것이다.

도 11의 (a) 내지 (c)는 실험예 4에 따라 실시예 4-1 내지 4-3의 텐서그리티 구조 복합재에 자기장을 인가하여 인장 운동시킨 평가 결과를 나타낸 것이다.

도 12의 (a) 내지 (c)는 실험예 4에 따라 각각 상기 실시예 4-1 내지 4-3의 텐서그리티 구조 복합재에 자기장을 인가하여 굴곡 운동시킨 평가 결과를 나타낸 것이다.

도 13은 실험예 5에 따라 실시예 5의 격자형 텐서그리티 구조 복합재에 대하여 외부 자극을 가했을 때의 운동 특성 평가 결과를 나타낸 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0017] 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 후술하는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다 그러나, 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예들에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 것이며, 단지 본 실시예들은 본 발명의 개시가 완전하도록 하며, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이며, 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다.

[0018] 도면에서 여러 층 및 영역을 명확하게 표현하기 위하여 두께를 확대하여 나타내었다. 그리고 도면에서, 설명의 편의를 위해, 일부 층 및 영역의 두께를 과장되게 나타내었다. 명세서 전체에 걸쳐 동일 참조 부호는 동일 구성 요소를 지칭한다.

[0019] 또한, 본 명세서에서 층, 막, 영역, 판 등의 부분이 다른 부분 "위에" 또는 "상부에" 있다고 할 때, 이는 다른 부분 "바로 위에" 있는 경우뿐 아니라 그 중간에 또 다른 부분이 있는 경우도 포함한다. 반대로 어떤 부분이 다른 부분 "바로 위에" 있다고 할 때에는 중간에 다른 부분이 없는 것을 뜻한다. 아울러, 층, 막, 영역, 판 등의 부분이 다른 부분 "아래에" 또는 "하부에" 있다고 할 때, 이는 다른 부분 "바로 아래에" 있는 경우뿐 아니라 그 중간에 또 다른 부분이 있는 경우도 포함한다. 반대로 어떤 부분이 다른 부분 "바로 아래에" 있다고 할 때에는 중간에 다른 부분이 없는 것을 뜻한다.

[0020] 일 구현예에 따른 텐서그리티 구조 복합재에 대하여 도 1 내지 ( )를 참고하여 설명한다. 도 1은 일 구현예에 따른 텐서그리티 구조 복합재와 이의 세부 구성을 분해 도시한 개략도이고, 도 2는 ~~~

[0021] 도 1을 참조할 때, 일 구현예에서, 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)는 제1 구조체(10) 및 제2 구조체(20)를 포함하고, 상기 제1 구조체(10)는 복수의 제1 구조 부재(11)를 포함하고 상기 복수의 제1 구조 부재(11)의 각 말단점이 서로 직접 연결된 3차원 망상 구조체이며, 상기 제2 구조체(20)는 상기 제1 구조 부재(11)의 말단점 중 적어도 일부의 말단점과 직접 연결된 말단점을 갖는 복수의 제2 구조 부재(21)를 포함하며 상기 복수의 제2 구조 부재(21)가 서로 직접 연결되지 않거나, 부분적으로 서로 직접 연결 배열된 3차원 구조체이고, 상기 제2 구조체(20)는 상기 제1 구조체(10)의 내부에 위치하며, 상기 제1 구조 부재(11)는 제1 수지 및 자성 입자를 포함하는 텐서그리티(Tensegrity) 구조 복합체를 제공한다.

[0022] 상기 제1 구조체(10)는 상기 텐서그리티 구조 복합재의 외곽 구조체로서, 상기 제2 구조체(20)가 상기 제1 구조체(10)의 내부에 위치한다. 상기 제1 구조체(10)는 복수의 상기 제1 구조 부재(11)들이 상호 연결되어 형성된 망상 구조의 측벽을 갖는다. 상기 제1 구조체(10)의 내부는 상기 제1 구조체(10)를 이루는 상기 제1 구조 부재(11)로 둘러싸여 형성된 공간을 의미하고, 상기 제2 구조체(10)는 이 공간에 배치된다. 상기 제1 구조체(10)는 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)에서 인장 부여 구조체 역할을 하며, 상기 제2 구조체(20)는 강성 부여 구조체 역할을 할 수 있다.

[0023] 상기 제1 구조체(10)는 복수의 제1 구조 부재(11)를 포함하며, 상기 제1 구조 부재(11)들이 조합되어 형성된 3차원 망상 구조체이다. 또한, 상기 제2 구조체(20)는 복수의 제2 구조 부재(21)를 포함하며, 상기 제2 구조 부재(21)들이 조합되어 형성된 3차원 구조체이다.

[0024] 상기 제1 구조체(10)는 복수의 상기 제1 구조 부재(11) 각각의 말단점들이 서로 직접 연결되어 3차원의 망상 형상으로 구조화된 것이다. 도 1을 참조할 때, 일 구현예에서, 상기 제1 구조체(10)는 원통 형태 또는 다각기둥 형태일 수 있다. 또한, 상기 제1 구조체(10)의 원통 또는 다각기둥 형상의 벽면은 다각형들이 연속 배열된 망상 형태일 수 있다. 이때, 상기 복수의 제1 구조 부재(11)들의 말단점이 상호 직접 연결된 연결점들은 구조체(10)의 외곽 벽면을 구성하는 3각 이상의 연속된 다각형들의 꼭지점에 위치할 수 있다.

[0025] 일 구현예에서, 상기 제1 구조체(10)는 원통(cylinder) 형상일 수 있다. 상기 제1 구조 부재(11)의 말단점들이 연결된 연결점들이 상기 원통 형상의 외곽 벽면의 4각형 또는 3각형의 꼭지점에 위치하면서 상기 4각형 또는 3각형이 연속 배열된 망상 구조를 이룰 수 있다. 상기 제1 구조체(10)가 이와 같은 연속 구조를 가짐으로써 자성 인가에 의한 인장 운동이 용이할 수 있다.

[0026] 일 구현예에서, 상기 제2 구조체(20)는 복수의 상기 제2 구조 부재(21)가 서로 직접 연결되지 않도록 배열된 3차원 구조체일 수 있다. 상기 복수의 제2 구조 부재(21)는 상호 직접 연결되지 않으면서 상기 제1 구조 부재(11)의 말단점 중 적어도 일부의 말단점과 연결된 형태로 배치될 수 있다. 구체적으로, 상기 제2 구조 부재(21)의 양 말단점이 각각 상기 제1 구조 부재(11) 간의 연결점에 결합된 형태로 상기 제1 구조체(10) 내부에 위치할 수 있다.

[0027] 도 1을 참조할 때, 일 구현예에서, 상기 제2 구조 부재(21)는 양 말단점이 상기 제1 구조 부재(11)의 복수의 말단점 중 2개의 말단점과 각각 연결되어 배치될 수 있다. 즉, 복수의 상기 제2 구조 부재(21)의 연결 구조는 상호 직접 연결되지 않고, 상기 제1 구조 부재(11)를 매개로 상호 간접적으로 연결된 불연속 구조일 수 있다. 상기 제2 구조체(20)가 이와 같이 불연속 구조를 가지면서 상기 제1 구조체(10)의 내부 공간에 위치함으로써 강성 부여 기능이 향상될 수 있다.

[0028] 전술한 바와 같은 상기 제1 구조체(10)와 상기 제2 구조체(20)의 조합 구조에 의하여 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)는 인장 및 강성이 모두 우수할 수 있고, 소정의 방향으로 수축 및 연신이 가능함과 동시에 일정 수준 이상의 지지성을 확보하는 이점을 갖는다.

[0029] 상기 제1 구조체(10) 중의 상기 제1 구조 부재(11)는 제1 수지 및 자성 입자를 포함한다. 일 구현예에서, 상기 제1 구조 부재(11) 상기 제1 수지 및 상기 자성 입자를 포함하는 탄성 자기 복합재(Eastomeric magnetic composite)로 이루어질 수 있다. 상기 탄성 자기 복합재는 고무성 수지를 매트릭스로 하여 자성 충진재를 포함하는 복합 물질로서, 상기 제1 수지가 고무성 수지일 수 있고, 상기 자성 입자가 자성 충진재일 수 있다.

[0030] 상기 제1 수지는 실리콘 수지, 폴리디메틸실록산(PDMS, Polydimethylsiloxane) 수지, 에폭시 수지, 겔(gel) 수지, 테플론(Teflon) 수지, 불화실리콘(FKM) 수지, 폴리아크릴 고무(Polyacrylic rubber) 수지 및 이들의 조합으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나를 포함할 수 있다. 일 구현예에서, 상기 제1 수지는 PDMS 수지 또는 실리콘 수지를 포함할 수 있다. 일 구현예에서, 상기 제1 수지는 상기 PDMS 수지 대 상기 실리콘 수지를 10:0 내지 0:10의 중량비, 예를 들어, 9:1 내지 1:9의 중량비, 예를 들어, 5:4 내지 1:9의 중량비, 예를 들어, 5:5 내지 1:9의 중량비, 예를 들어, 3:7 내지 1:9의 중량비로 포함할 수 있다.

[0031] 상기 자성 입자는 순철, 산화철(Fe_3O_4), Nd-Fe-B 합금, 니켈, 코발트, Fe-Nd 합금, Fe-Si합금, Fe-Al합금, Fe-Si-Al합금, Ni-Zn페라이트, Cu-Zn페라이트, Mn-Zn페라이트 및 이들의 조합으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나를 포함할 수 있다. 일 구현예에서, 상기 자성 입자는 산화철(Fe3O4)을 포함할 수 있다.

[0032] 상기 자성 입자는 단위 질량 당 포화 자기모멘트가 30emu/g 이상, 예를 들어, 30emu/g 내지 220emu/g일 수 있다. 이와 같은 단위 질량 당 포화 자기 모멘트를 갖는 자성 입자를 사용함으로써 상기 텐서그리티 구조 복합재의 자성 인가에 의한 수축 및 연신 변위가 생체 모방 시스템에 적용하기에 적합한 이점을 가질 수 있다.

[0033] 상기 자성 입자의 평균 입경은 100nm 내지 100㎛일 수 있고, 예를 들어, 약 100nm 내지 약 90㎛일 수 있고, 예를 들어, 약 100nm 내지 약 80㎛일 수 있고, 예를 들어, 약 100nm 내지 약 70㎛일 수 있고, 예를 들어, 약 1㎛ 내지 약 50㎛일 수 있다. 상기 범위의 자성 입자를 사용함으로써 상기 제1 수지 중의 우수한 분산성을 확보할 수 있으며, 이와 동시에, 상기 텐서그리티 구조 복합재에 대한 자기장 인가에 의한 수축 및 연신 변위가 생체 모방 시스템에 적용하기에 적합한 이점을 가질 수 있다.

[0034] 상기 제1 구조 부재(11)는 상기 자성 입자 및 상기 제1 수지 총 중량 100 중량부에 대하여, 상기 자성 입자를 1 중량부 내지 40 중량부 포함할 수 있고, 예를 들어, 5 중량부 내지 35 중량부 포함할 수 있고, 예를 들어, 5 중량부 내지 30 중량부 포함할 수 있다. 상기 함량의 자성 입자를 사용함으로써 상기 제1 수지 중의 자성 입자의 분산성을 우수하게 구현할 수 있고, 자기장 인가에 의한 상기 텐서그리티 구조 복합재의 인장 운동성을 목적 수준으로 확보할 수 있다.

[0035] 상기 제2 구조 부재(21)는 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)에 구조적 강성을 부여하는 역할을 하는 것으로서, 상기 제2 수지, 저융점 합금(LMPA, Low Melting Point Alloy) 또는 이들의 조합을 포함할 수 있다. 상기 제2 수지는 상기 제1 수지와 동일하거나 상이할 수 있다.

[0036] 상기 제2 수지는 아크릴로니트릴-부타디엔-스티렌(ABS, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 수지, 폴리락트산(PLA, Poly Lactic Acid) 수지, 열가소성 폴리우레탄(TPU, Thermoplastic Polyurethane) 수지, 폴리프로필렌(PP, Polypropylene) 수지, 폴리에틸렌(PE, Polyethylene) 수지, 폴리카보네이트(PC, Polycarbonate) 수지, 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET, Polyethyleneterephthalate) 수지, 나일론(Nylon) 수지, 실리콘 수지, 폴리디메틸실록산(PDMS, Polydimethylsiloxane) 수지, 니트릴-부타디엔 고무(NBR) 수지, 카르복실화 NBR(X-NBR) 수지, 이소프렌 수지, 클로로프렌 수지, 부틸 고무 수지, 불소 고무 수지, 우레탄 수지, 스티렌 부타디엔 고무(SBR) 수지, 세라믹; 금속; 또는 목재가 포함된 복합재 수지 및 이들의 조합으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나를 포함할 수 있다.

[0037] 상기 저융점 합금은 융점이 235℃ 미만인 합금으로서, 예를 들어, 비스무트(Bi), 주석(Sn), 납(Pb), 인듐(In), 카드뮴(Cd) 및 이들의 조합으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나를 포함하는 합금일 수 있다.

[0038] 상기 종류의 재질을 제2 구조 부재(21)에 적용함으로써 후술하는 상기 텐서그리티 구조 복합재의 제조 과정에서 3D 프린팅 공법을 이용해 제2 구조 부재를 제조함에 있어서 높은 공정 효율성을 확보할 수 있고, 상기 제1 구조 부재(11)와의 구조적 상용성이 우수할 수 있다. 일 구현예에서, 상기 제2 구조 부재(21)는 폴리락트산(PLA) 수지를 포함할 수 있다. 일 구현예에서, 상기 제2 구조 부재(21)는 자성 입자를 포함하지 않을 수 있다.

[0039] 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)는 상기 제1 구조체(10)와 상기 제2 구조체(20)가 조합된 상태로 인장 운동이 가능한 특성을 갖는다. 구체적으로, 상기 제1 구조 부재(11)끼리 연결된 말단점, 상기 제2 구조 부재(21)끼리 연결된 말단점 및 상기 제1 구조 부재(11)와 상기 제2 구조 부재(21)가 연결될 말단점의 연결 상태를 유지하면서 동시에 수축 또는 인장 운동이 가능할 수 있다. 상기 제1 구조 부재(11) 및 상기 제2 구조 부재(21) 각각이 소정의 탄성 및 유연성을 갖는 재질로 이루어짐으로써 이러한 운동 특성을 나타낼 수 있고, 그 결과, 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)는 생체 모방 시스템에 있어서 근육 및 골격의 운동 영역에 적용될 수 있다.

[0040] 일 구현예에서, 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)는 소정의 자기장을 인가하여 인장 또는 수축 운동이 가능할 수 있다. 예를 들어, 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)의 자기 작동을 위한 자기장은 50mT 내지 400mT 범위의 자기장일 수 있다. 이는 상기 제1 구조 부재(11)가 자성 입자를 포함함으로써 가능할 수 있으나, 보다 구체적으로 상기 제1 수지와 자성 입자 각각의 종류 및 이들의 적절한 함량비 등을 통하여 상기 범위의 자기장 인가 조건 하에서 생체 모방 시스템에 적합한 운동 변위를 구현할 수 있다.

[0041] 도 2는 일 구현예에 따른 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)의 운동 방향을 화살표로 도시한 것이다. 상기 텐서그리티 구조 복합재의 일 방향에 대한 인장 운동 최대 변위는 상기 일 방향과 수직한 방향에 대한 인장 운동 최대 변위보다 클 수 있다. 일 구현예에서, 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)의 제1 구조체(10)는 원통형 구조체일 수 있다. 이때, 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)의 운동 변위에 있어서, 상기 원통의 높이 방향의 인장 운동 최대 변위가 상기 원통의 직경 방향의 인장 운동 최대 변위보다 클 수 있다. 상기 '인장 운동 최대 변위'는 상기 텐서그리티 구조 복합재가 파단되거나 끊어지지 않으면서 더 이상 늘어나거나 수축되지 않고 최대로 움직일 수 있는 변위를 의미한다. 도 2를 참조할 때, 상기 원통의 높이 방향은 Z축 방향을 의미하며, 상기 원통의 직경 방향은 X축 또는 Y축 방향을 의미한다. 상기 제1 구조체(10)와 상기 제2 구조체(20)에 있어서, 상기 복수의 제1 구조 부재(11) 상호 연결의 확장 방향은 상기 원통의 높이 방향에 대응되고, 상기 제2 구조 부재(21)와 상기 제1 구조 부재(11)의 연결 확장 방향은 상기 원통의 직경 방향에 대응된다. 이와 같이, 상기 제1 구조 부재(11) 간 연결 확장 방향과 상기 제 구조 부재(11) 및 상기 제2 구조 부재(21) 간 연결 확장 방향이 서로 수평보다 수직에 가까운 배열을 가짐으로써 상기 제2 구조체가 상기 원통의 직경 방향으로 구조적 강성을 부여하게 되고, 그 결과 상기 제1 구조체의 탄성에 기인한 운동 변위가 상기 원통의 높이 방향으로 더 크게 나타날 수 있다. 이러한 인장 운동 특성은 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)가 생체 모방 시스템에 있어서 골격 및 근육 모방 구조로 사용되기에 큰 이점을 부여할 수 있다.

[0042] 상기 제1 구조 부재(11) 및 상기 제2 구조 부재(21)는 각각 소정의 종횡비를 갖는 막대(rod) 형상으로서, 상기 제1 구조 부재(11) 및 상기 제2 구조 부재(21)의 각각은 길이 방향에 수직한 단면의 직경이 300㎛ 내지 30㎜일 수 있고, 예를 들어, 500㎛ 내지 3㎜일 수 있고, 예를 들어, 1㎜ 내지 3㎜일 수 있다.

[0043] 상기 제1 구조 부재(11) 및 상기 제2 구조 부재(21)의 각각에 대하여 길이 대 직경으로 정의되는 종횡비는 약 5 : 1 내지 약 100 : 1일 수 있다. 이때, 상기 직경은 상기 길이 방향에 수직한 방향의 단면 직경을 의미한다.

[0044] 상기 제1 구조 부재(11) 및 상기 제2 구조 부재(21)의 단면 직경 및 종횡비가 모두 상기 범위를 만족함으로써 상기 텐서그리티 구조 복합재의 자성 인가에 의한 인장 운동이 생체 모방 시스템에 적용하기 용이한 수준으로 구현될 수 있다.

[0045] 일 구현예에서, 상기 제1 구조체(10)는 원통형 구조체일 수 있고, 상기 제1 구조체(10)의 원통 형상의 직경 30㎜ 및 높이 50㎜ 기준, 상기 제1 구조 부재(11)가 6개 내지 240개 포함되고, 상기 제2 구조 부재(21)가 3개 내지 60개 포함될 수 있다. 상기 원통 형상의 직경은 높이 방향에 수직한 단면의 직경을 의미한다. 예를 들어, 상기 영역에 상기 제1 구조 부재(11)는 40개 내지 120개, 예를 들어, 50개 내지 110개, 예를 들어, 60개 내지 100개 포함될 수 있고, 상기 제2 구조 부재(21)는 10개 내지 30개, 예를 들어, 10개 내지 25개 포함될 수 있다. 상기 제1 구조 부재(11)와 상기 제2 구조 부재(21)가 동시에 상기 범위의 개수로 사용됨으로써 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)의 인장 운동을 위한 유연성 및 지지 성능을 위한 강성이 동시에 목적하는 수준으로 구현될 수 있다.

[0046] 도 3은 다른 구현예에 따른 텐서그리티 구조 복합재(200, 300, 400, 500)의 형상을 도시한 것이다. 도 3을 참조할 때, 상기 텐서그리티 구조 복합재(200, 300, 400, 500)는 복수의 제1 구조 부재(211, 311, 411, 511)를 포함하고, 상기 복수의 제1 구조 부재(211, 311, 411, 511)의 각 말단점이 서로 직접 연결된 3차원 구조체인 제1 구조체(210, 310, 410, 510); 및 상기 제1 구조 부재(211, 311, 411, 511)의 말단점 중 적어도 일부의 말단점과 직접 연결된 말단점을 갖는 복수의 제2 구조 부재(221, 321, 421, 521)를 포함하며, 상기 복수의 제2 구조 부재(221, 321, 421, 521)가 서로 직접 연결되지 않도록 배열된 3차원 망상 구조의 제2 구조체(220, 320, 420,

520);를 포함한다. 도 3을 참조할 때, 상기 텐서그리티 구조 복합재(200, 300, 400, 500)의 제1 구조체는 이십면체형(210), 육각기둥 프리즘형(310) 육팔면체형(410) 또는 계층형 삼각 프리즘형(510)일 수 있다. 또한, 상기 제2 구조체(220, 320, 420, 520)는 상기 제1 구조체(210, 310, 410, 510)의 내부에 위치한다.

[0047] 도 4는 또 다른 구현예에 따른 텐서그리티 구조 복합재(600)의 형상을 도시한 것이다. 도 4를 참조할 때, 상기 텐서그리티 구조 복합재(600)는 복수의 제1 구조 부재(611)를 포함하고, 상기 복수의 제1 구조 부재(611)의 각 말단점이 서로 직접 연결된 3차원 구조체인 제1 구조체(610); 및 상기 제1 구조 부재(611)의 말단점 중 적어도 일부의 말단점과 직접 연결된 말단점을 갖는 복수의 제2 구조 부재(621)를 포함하며, 상기 복수의 제2 구조 부재(621)가 서로 직접 연결 배열된 3차원 망상 구조의 제2 구조체(620);를 포함한다. 도 4를 참조할 때, 상기 텐서그리티 구조 복합재(600)는 복수의 텐서그리티 구조 유닛(700)을 포함한다. 상기 텐서그리티 구조 유닛(700)은 사면체 제1 구조체 유닛(710)과 상기 제1 구조체 유닛(710)과 연결 배치된 제2 구조체 유닛(720)을 포함한다. 상기 제1 구조체 유닛(710) 및 상기 제2 구조체 유닛(720)은 각각 상기 제1 구조 부재 및 상기 제2 구조 부재를 포함한다.

[0048] 도 5는 도 4의 텐서그리티 구조 복합재(600)와 동일한 텐서그리티 구조 유닛(700)을 가지면서 상기 텐서그리티 구조 유닛(700)들의 연결 구조가 상이한 3가지 경우를 도시한 것이다. 도 5의 (a)는 상호 인접한 상기 텐서그리티 구조 유닛(700)의 연결수(Coordination number)이 4개인 경우, (b)는 5개인 경우, (c)는 6개인 경우를 도시한 것이다. 상기 연결수(Coordination number)란 인접한 상기 텐서그리티 구조 유닛(700)이 결합하면서, 그 연결 부분에 있어서 상기 제2 구조체 유닛(720) 중의 제2 구조 부재의 일 말단점에 연결되는 제1 구조 부재의 수를 의미한다.

[0049] 상기 텐서그리티 구조 복합재는 후술하는 제조 공정에 따라 이와 같이 다양한 형상으로 제조 가능하며, 용도에 따라 적절한 형상으로 가공 가능할 수 있다.

[0050] 상기 텐서그리티 구조 복합재는 상기 제1 구조체 및 상기 제2 구조체의 구조적 조합을 통하여 자기장 인가에 따른 인장 및 굴곡 운동성을 확보함과 동시에 일정 수준의 지지 강성을 구현하여 생체 모방 시스템의 골격 및 근육 대응 구조에 적용되기 우수한 효과를 구현할 수 있다. 이로써, 상기 텐서그리티 구조 복합재(100)는 예를 들어, 로봇 시스템 등에 적용 가능한 메타물질 (metamaterial)로서 기능할 수 있다.

[0052] 다른 구현예에서, 상기 텐서그리티 구조 복합재를 제조하는 방법으로서 제1 구조 부재의 목적하는 형상에 대응하는 유로(Channel)와 제2 구조 부재를 갖는 몰드를 준비하는 단계; 제1 수지 및 자성 입자를 포함하는 제1 구조 부재 형성용 조성물을 준비하는 단계; 상기 몰드의 유로에 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 주입하는 단계; 상기 몰드에 주입된 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 경화시키는 단계; 및 상기 몰드를 제거하는 단계를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재의 제조방법을 제공한다.

[0053] 상기 텐서그리티 구조 복합재의 제조방법에 따라, 전술된 바와 같은 제1 구조체 및 제2 구조체를 포함하고, 상기 제1 구조체는 복수의 제1 구조 부재를 포함하고, 상기 복수의 제1 구조 부재의 각 말단점이 서로 직접 연결된 3차원 구조체이며, 상기 제2 구조체는 상기 제1 구조 부재의 말단점 중 적어도 일부의 말단점과 직접 연결된 말단점을 갖는 복수의 제2 구조 부재를 포함하며, 상기 복수의 제2 구조 부재가 서로 직접 연결되지 않거나, 부분적으로 서로 직접 연결 배열된 3차원 망상 구조이고, 상기 제2 구조체는 상기 제1 구조체의 내부에 위치하며, 상기 제1 구조 부재는 제1 수지 및 자성 입자를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재를 제조할 수 있다.

[0054] 도 6은 일 구현예에 따른 상기 텐서그리티 구조 복합재를 제조하는 방법의 순서를 개략적으로 도시한 것이다. 도 6을 참조할 때, 상기 몰드를 준비하는 단계(a)에서 상기 몰드(101)는 제1 구조 부재의 목적하는 형상에 대응하는 유로(111)와 제2 구조 부재(121)를 포함한다. 또한, 상기 몰드(101) 내에 상기 유로(111)와 상기 제2 구조 부재(121)를 제외한 영역의 바탕재(131)를 포함한다. 상기 제2 구조 부재(121)는 상기 몰드(101)의 일부로서, 상기 몰드(101)의 제조 과정에서 텐서그리티 구조 복합재 내의 최종적 위치에 배치된 상태로 제조된다.

[0055] 일 구현예에서, 상기 몰드는 3D 프린팅 방법으로 제조될 수 있다. 구체적으로, 상기 몰드는 2개의 프린트코어(print core)를 갖는 3D 프린터를 이용하여 제조될 수 있다. 즉, 상기 제2 구조 부재(121) 형성용 원료 및 상기 바탕재(131) 형성용 원료를 각각 별도의 주입 노즐을 통해 주입한 후, 상기 제1 구조 부재의 목적하는 형상이 유로(111)로 인쇄되는 동시에, 상기 제2 구조 부재(121)가 목적하는 형상으로 인쇄되도록 3D 프린팅 함으로써 수행될 수 있다.

[0056] 상기 제2 구조 부재 형성용 원료는 제2 수지, 저융점 합금(LMPA, Low Melting Point Alloy) 또는 이들의 조합

을 포함할 수 있다. 상기 제2 수지 및 저융점 합금에 관한 사항은 전술한 바와 같다.

[0057] 상기 제2 구조 부재 형성용 원료를 주입하기 위한 주입 노즐의 직경은 특별히 제한되지 않지만, 예를 들어, 약 0.1mm 내지 약 1mm일 수 있고, 예를 들어, 약 0.1mm 내지 약 0.8mm일 수 있고, 예를 들어, 약 0.1mm 내지 약 0.5mm일 수 있고, 예를 들어, 약 0.1mm 내지 0.4mm 일 수 있고, 예를 들어, 약 0.1mm 내지 약 0.3mm일 수 있다.

[0058] 일 구현예에서, 상기 제2 구조 부재 형성용 원료는 제2 수지로서 직경이 약 1mm 내지 약 3mm인 필라멘트 형태의 폴리락트산(PLA) 수지를 포함하고, 동시에 상기 제2 구조 부재 형성용 조성물을 주입하기 위한 3D 프린터의 주입 노즐이 직경이 약 0.1mm 내지 약 1mm일 수 있다. 이로써, 상기 몰드 내에 상기 제2 구조 부재로 이루어진 제2 구조체의 형상이 균일하게 인쇄될 수 있다.

[0059] 상기 바탕재 형성용 원료는 열가소성 수지를 포함할 수 있다. 상기 열가소성 수지는 열에 의해 경화되고 소정의 조건 하에서 용해되는 수지이면 제한 없이 사용할 수 있으나, 예를 들어, 폴리비닐알콜(PVA, Polyvinyl Alcohol) 수지, 부텐디올 비닐알콜(BVOH, Butene-diol vinyl alcohol), 폴리아크릴산(PAA, Polyacrylic acid), 폴리아크릴아미드(PAM, Polyacryl amid), 폴리에틸렌글리콜 (PEG, Polyethylene glycol), 폴리비닐피롤리돈(PVP, Polyvinyl pyrrolidone), 폴리에틸렌옥사이드(PEO, Polyethylene oxide), 폴리프로필렌(PP, Polypropylene) 수지, 폴리염화비닐리덴 (PVDC, Polyvinylidene Chloride), 아크릴로니트릴-부타디엔-스티렌(ABS, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 및 이들의 조합으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나를 포함할 수 있다.

[0060] 상기 바탕재 형성용 원료를 주입하기 위한 주입 노즐의 직경은 특별히 제한되지 않지만, 예를 들어, 약 0.1mm 내지 약 1mm일 수 있고, 예를 들어, 약 0.1mm 내지 약 0.8mm일 수 있고, 예를 들어, 약 0.3mm 내지 약 0.8mm일 수 있고, 예를 들어, 약 0.3mm 초과, 약 0.6mm 이하일 수 있다.

[0061] 일 구현예에서, 상기 바탕재 형성용 원료는 직경이 약 1mm 내지 약 3mm인 필라멘트 형태의 폴리비닐알콜(PVA) 수지를 포함하고, 3D 프린터에서 상기 바탕재 형성용 원료를 주입하기 위한 노즐의 직경이 약 0.3mm 초과, 약 0.6mm 이하일 수 있다. 이로써, 상기 몰드 내에 상기 제1 구조 부재의 목적 형상에 대응되는 형상을 갖는 유로(Channel)가 균일하게 인쇄될 수 있다.

[0062] 도 6을 참조할 때, 상기 제조방법은 제1 수지(212) 및 자성 입자(222)를 포함하는 제1 구조 부재 형성용 조성물(202)을 준비하는 단계(b)를 포함한다. 상기 제1 수지(212) 및 상기 자성 입자(222)에 관한 사항은 상기 텐서그리티 구조 복합재와 관련하여 전술한 바와 같다.

[0063] 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물(202)은 액상 형태로서, 상온에서의 점도가 약 1cps 내지 약 30,000cps일 수 있고, 예를 들어, 약 1cps 내지 약 15,000cps일 수 있고, 예를 들어, 약 1cps 내지 약 10,000cps일 수 있다. 이러한 점도 범위를 가짐으로써 상기 몰드 내 유로(Channel)에 투입되어 보이드(void) 없이 균질한 제1 구조체를 형성할 수 있다.

[0064] 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 준비하는 단계는, 상기 제1 수지 및 상기 자성 입자의 혼합물을 제거하는 단계; 및 상기 혼합물을 탈기(degassing) 하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 탈기는 상기 혼합물을 상온의 진공 상태에 배치함으로써 수행될 수 있다. 상기 탈기 과정을 통하여 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물이 상기 몰드 내 유로(Channel)에 주입되어 보이드(void) 없이 균질한 제1 구조체를 형성할 수 있다.

[0065] 상기 제조방법은 상기 몰드(101)의 유로(111)에 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물(202)을 주입하는 단계(c)를 포함한다. 상기 몰드(101)의 유로(111)는 상기 제1 구조 부재의 목적하는 최종 형상에 대응되도록 형성된 빈 공간이다. 따라서, 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 여기에 주입하여 경화시킴으로써 목적하는 형상의 제1 구조 부재를 제조할 수 있다.

[0066] 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물은 상기 몰드에 약 0.06L/min 내지 약 0.6L/min의 주입 속도로 주입될 수 있다. 일 구현예에서, 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물의 점도가 상온 조건 하에서 전술한 범위이고, 이와 동시에 이를 상기 범위의 주입 속도로 몰드 내에 주입함으로써 상기 제1 구조체가 균일하게 형성될 수 있다.

[0067] 상기 제조방법은 상기 몰드(101)에 주입된 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 경화시키는 단계(d)를 포함한다. 상기 경화는 핫-플레이트(Hot-plate, 303) 상에서 수행될 수 있다.

[0068] 상기 경화 조건은 상기 제1 수지의 종류에 따라 적절히 설정될 수 있으나, 예를 들어, 상기 제1 수지가 실리콘 수지 또는 폴리디메틸실록산(PDMS) 수지를 포함하고, 상기 경화는 약 25℃ 내지 약 100℃, 예를 들어, 약 25℃

내지 약 80℃, 예를 들어, 약 50℃ 내지 약 100℃, 예를 들어, 약 60℃ 내지 약 90℃의 온도에서 약 0.5시간 내지 약 10시간, 예를 들어, 약 1시간 내지 약 10시간, 예를 들어, 약 1시간 내지 약 8시간, 예를 들어, 약 4시간 내지 약 8시간, 예를 들어, 약 5시간 내지 약 8시간 동안 수행될 수 있다. 이로써 사전 장착되어 있는 제2 구조 부재 등이 상기 경화 공정 중에 손상되지 않도록 방지할 수 있고, 상기 경화 형성된 제1 구조 부재가 자기장 인가에 의한 인장 운동이 가능한 유연성을 확보하면서도 일정 수준 이상의 연신에도 끊어지지 않는 강성을 확보하기 유리할 수 있다.

[0069] 상기 제조방법은 상기 몰드를 제거하는 단계(e)를 포함한다. 상기 몰드를 제거하는 단계는, 상기 몰드 중의 상기 제2 구조 부재를 제외한 바탕재(131) 부분을 제거하는 단계로서, 상기 바탕재(131)의 재질에 따라 적절한 방법을 선택할 수 있다. 일 구현예에서, 상기 바탕재(131)는 폴리비닐알콜(PVA) 수지를 포함할 수 있고, 이 경우, 상기 몰드의 제거는 약 10℃ 내지 약 80℃ 온도의 수중 챔버(404)에 약 15시간 내지 약 30시간 침지하는 방법으로 수행될 수 있다.

[0070] 상기 몰드 중의 상기 바탕재 부분을 제거하여 복수의 제1 구조 부재로 이루어진 제1 구조체 및 복수의 제2 구조 부재로 이루어진 제2 구조체를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재(100)를 제조할 수 있다.

[0072] 이하에서는 본 발명의 구체적인 실시예들을 제시한다. 다만, 하기에 기재된 실시예들은 본 발명을 구체적으로 예시하거나 설명하기 위한 것에 불과하며, 이로서 본 발명이 제한되어서는 아니된다.

[0074] **<제조예>**

[0075] 제조예 1: 몰드의 제조

[0076] 3D 모델링 도구(3DS MAX, AUTODESK Inc.)를 사용하여 몰드의 구조를 설계하고 오픈 소스 슬라이싱 엔진(Ultimaker Cura, Ultimaker B.V.)을 사용하여 몰드의 스테레오 골격(STL) 파일을 G-cord 형식으로 변환했다. 몰드 제조를 위한 3D 프린터 (Ultimaker 3, Ultimaker B.V.)는 직경 2.85mm의 폴리라틱산(PLA, Ultimaker B.V) 필라멘트를 위한 0.25mm 직경 노즐을 가진 코어 AA와 직경 2.85mm의 폴리비닐알코올(PVA, Ultimaker B.V) 필라멘트를 위한 0.40mm 직경 노즐을 가진 코어 BB를 구비한 이중 노즐 프린터였다. 사전 설정된 프로파일("Fine-0.1mm", 레이어 높이 분해능 0.1mm, 라인 폭 0.23mm)을 사용하여 PVA의 경우 10% 주입 밀도로 주입하였고, PLA의 경우 190℃의 기본 인쇄 온도 조건 하에서 주입하였다. 이로써, PLA 수지로 이루어진 제2 구조 부재를 포함하고, 제1 구조 부재의 목적 형상을 빈 공간인 유로(Channel)로 두도록 PVA가 이외의 영역에 채워진 몰드가 제조되었다.

[0078] **실시예 1: 텐서그리티 구조의 기계적 이방성 설계를 위한 형상 변형**

[0079] 실시예 1-1: 원통형

[0080] 상기 제조예 1에서 제1 구조 부재가 상기 도 1의 제1 구조체와 같은 원통 형상을 이루도록 유로(Channel)가 설계되고, 상기 제2 구조체가 상기 제1 구조체와 상기 도 1과 같은 연결점을 갖도록 상기 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다.

[0081] 폴리디메틸실록산(PDMS) 수지(Dow Corning, Sylgard 184) 및 실리콘 수지(Ecoflex 00-30)을 준비하고, 상기 PDMS 수지 대 상기 실리콘 수지를 2:8의 중량비로 혼합하여 수지 혼합물을 제조하였다. 자성 입자와 수지 혼합물 총 중량 100 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe3O4, Sigama Aldrich, 310069)가 30 중량부가 되도록 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 진공 오븐에서 5분 동안 보관하여 탈기시키고, 주입 장비(A NORM-JECT syringe, Henke Sass Wolf)를 이용하여 상기 몰드 내의 유로(Channel)에 주입하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물의 주입이 완료된 몰드는 알루미늄 호일(foil)로 포장되어 80℃에서 6시간 동안 경화되었다.

[0082] 이어서, 상기 몰드를 수중 챔버(water chamber)에서 24시간 동안 보관하여 PVA 영역을 용해시킴으로써 도 1과 같은 원통형 제1 구조체와 제2 구조체를 갖는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다.

[0083] 실시예 1-2: 이십면체형

[0084] 상기 제조예 1에서 제1 구조 부재가 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(200)의 제1 구조체와 같은 이십면체형 형상을 이루도록 유로(Channel)가 설계되고, 상기 제2 구조체가 상기 제1 구조체와 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(200)와 같은 연결점을 갖도록 상기 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다. 이러한 몰드를 사용한 것을 제외하고, 상기 실시예 1-1과 동일한 방법으로 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(200)를 제조하였다.

[0085] 실시예 1-3: 육각기둥 프리즘형

[0086] 상기 제조예 1에서 제1 구조 부재가 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(300)의 제1 구조체와 같은 육각기둥 프리즘형 형상을 이루도록 유로(Channel)가 설계되고, 상기 제2 구조체가 상기 제1 구조체와 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(300)와 같은 연결점을 갖도록 상기 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다. 이러한 몰드를 사용한 것을 제외하고, 상기 실시예 1-1과 동일한 방법으로 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(300)를 제조하였다.

[0087] 실시예 1-4: 육팔면체형

[0088] 상기 제조예 1에서 제1 구조 부재가 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(400)의 제1 구조체와 같은 육팔면체형 형상을 이루도록 유로(Channel)가 설계되고, 상기 제2 구조체가 상기 제1 구조체와 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(400)와 같은 연결점을 갖도록 상기 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다. 이러한 몰드를 사용한 것을 제외하고, 상기 실시예 1-1과 동일한 방법으로 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(400)를 제조하였다.

[0089] 실시예 1-5: 계층형 삼각 프리즘형

[0090] 상기 제조예 1에서 제1 구조 부재가 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(500)의 제1 구조체와 같은 계층형 삼각 프리즘형 형상을 이루도록 유로(Channel)가 설계되고, 상기 제2 구조체가 상기 제1 구조체와 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(500)와 같은 연결점을 갖도록 상기 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다. 이러한 몰드를 사용한 것을 제외하고, 상기 실시예 1-1과 동일한 방법으로 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(300)를 제조하였다.

[0092] **실시예 2: 수지 재료에 따른 자기장 인가에 의한 운동 변위 변화**

[0093] 실시예 2-1

[0094] 상기 제조예 1에서 제1 구조 부재가 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(200)의 제1 구조체와 같은 이십면체형 형상을 이루도록 유로(Channel)가 설계되고, 상기 폴리락트산(PLA) 수지 대신에 상기 폴리디메틸실록산(PDMS) 수지를 사용하여 제2 구조 부재를 제조하되, 상기 제2 구조체가 상기 제1 구조체와 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(200)와 같은 연결점을 갖도록 상기 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다.

[0095] 자성 입자 및 폴리디메틸실록산(PDMS) 수지(Dow Corning, Sylgard 184) 총 중량 100 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe3O4, Sigama Aldrich, 310069)를 30 중량부가 되도록 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 진공 오븐에서 5분 동안 보관하여 탈기시키고, 주입 장비(ANORM-JECT syringe, Henke Sass Wolf)를 이용하여 상기 몰드 내의 유로(Channel)에 주입하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물의 주입이 완료된 몰드는 알루미늄 호일(foil)로 포장되어 80℃에서 6시간 동안 경화되었다.

[0096] 이어서, 상기 몰드를 수중 챔버(water chamber)에서 24시간 동안 보관하여 PVA 영역을 용해시킴으로써 도 7의 (a)와 같은 이십면체형 제1 구조체와 제2 구조체를 갖는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다. 상기 제1 구조체와 상기 제2 구조체는 모두 PDMS 수지를 포함한다.

[0097] 실시예 2-2

[0098] 상기 제조예 1에서 제1 구조 부재가 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(200)의 제1 구조체와 같은 이십면체형 형상을 이루도록 유로(Channel)가 설계되고, 상기 폴리락트산(PLA) 수지를 사용하여 제2 구조 부재를 제조하되, 상기 제2 구조체가 상기 제1 구조체와 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(200)와 같은 연결점을 갖도록 상기 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다.

[0099] 자성 입자 및 폴리디메틸실록산(PDMS) 수지(Dow Corning, Sylgard 184) 총 중량 100 중량부에 대하여, 자성 입

자(Fe3O4, Sigama Aldrich, 310069)가 30 중량부 혼합되도록 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 진공 오븐에서 5분 동안 보관하여 탈기시키고, 주입 장비(A NORM-JECT syringe, Henke Sass Wolf)를 이용하여 상기 몰드 내의 유로(Channel)에 주입하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물의 주입이 완료된 몰드는 알루미늄 호일(foil)로 포장되어 80℃에서 6시간 동안 경화되었다.

[0100] 이어서, 상기 몰드를 수중 챔버(water chamber)에서 24시간 동안 보관하여 PVA 영역을 용해시킴으로써 도 7의 (b)와 같은 이십면체형 제1 구조체와 제2 구조체를 갖는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다. 상기 제1 구조체는 PDMS 수지를 포함하고, 상기 제2 구조체는 모두 PLA 수지를 포함한다.

[0101] 실시예 2-3

[0102] 상기 실시예 1-2와 동일한 방법으로 도 7의 (c)와 같은 이십면체형 제1 구조체와 제2 구조체를 갖는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다. 상기 제1 구조체는 실리콘 수지 대 PDMS 수지가 5:5의 중량비로 혼합된 수지 혼합물을 포함하고, 상기 제2 구조체는 PLA 수지를 포함한다.

[0103] 실시예 2-4

[0104] 자성 입자 및 실리콘 수지(Ecoflex 00-30) 총 중량 100 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe3O4, Sigama Aldrich, 310069)를 30 중량부가 되도록 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조하여 적용한 것을 제외하고, 상기 실시예 2-2와 동일한 방법으로 도 7의 (d)와 같은 이십면체형 제1 구조체와 제2 구조체를 갖는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다. 상기 제1 구조체는 실리콘 수지를 포함하고, 상기 제2 구조체는 PLA 수지를 포함한다.

[0105] 실시예 2-5

[0106] 상기 제조예 1에서 제1 구조 부재가 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(200)의 제1 구조체와 같은 이십면체형 형상을 이루도록 유로(Channel)가 설계되고, 상기 폴리락트산(PLA) 수지 대신에 상기 실리콘 수지(Ecoflex 00-30) 를 사용하여 제2 구조 부재를 제조하되, 상기 제2 구조체가 상기 제1 구조체와 상기 도 3의 (a)의 텐서그리티 구조 복합재(200)와 같은 연결점을 갖도록 상기 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다.

[0107] 이러한 몰드를 사용한 것을 제외하고, 상기 실시예 2-4와 동일한 방법으로 도 7의 (e)와 같은 이십면체형 제1 구조체와 제2 구조체를 갖는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다. 상기 제1 구조체 및 상기 제2 구조체는 모두 실리콘 수지(Ecoflex 00-30)를 포함한다.

[0109] **실시예 3: 자성 재료에 따른 자기장 인가에 의한 운동 변위 변화**

[0110] 실시예 3-1

[0111] 상기 실시예 1-2에 있어서, 상기 PDMS 수지 대 상기 실리콘 수지를 2:8의 중량비로 혼합한 수지 혼합물 95 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe3O4, Sigama Aldrich, 310069)를 5 중량부 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조한 것을 제외하고 동일한 방법으로 이십면체형 제1 구조체를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다.

[0112] 실시예 3-2

[0113] 상기 수지 혼합물 90 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe_3O_4, Sigama Aldrich, 310069)를 10 중량부 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조한 것을 제외하고 상기 3-1과 동일한 방법으로 이십면체형 제1 구조체를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다.

[0114] 실시예 3-3

[0115] 상기 수지 혼합물 85 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe_3O_4, Sigama Aldrich, 310069)를 15 중량부 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조한 것을 제외하고 상기 3-1과 동일한 방법으로 이십면체형 제1 구조체를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다.

[0116] 실시예 3-4

[0117] 상기 수지 혼합물 80 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe_3O_4, Sigama Aldrich, 310069)를 20 중량부 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조한 것을 제외하고 상기 3-1과 동일한 방법으로 이십면체형 제1 구조체를 포함하

는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다.

[0118] 실시예 3-5

[0119] 상기 수지 혼합물 75 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe_3O_4, Sigama Aldrich, 310069)를 25 중량부 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조한 것을 제외하고 상기 3-1과 동일한 방법으로 이십면체형 제1 구조체를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다.

[0120] 실시예 3-6

[0121] 상기 수지 혼합물 70 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe_3O_4, Sigama Aldrich, 310069)를 30 중량부 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조한 것을 제외하고 상기 3-1과 동일한 방법으로 이십면체형 제1 구조체를 포함하는 텐서그리티 구조 복합재를 제조하였다.

[0123] **실시예 4: 텐서그리티 구조 유닛의 조합에 의한 선형 복합체**

[0124] 실시예 4-1

[0125] 상기 제조예 1에서, 도 5의 (a)의 텐서그리티 복합 구조체와 같이 정사면체 형상의 제1 구조체를 포함하는 텐서그리티 구조 유닛 6개가 선형 연결되되, 연결수(coordination number)가 4인 형상을 이루도록 제1 구조 부재를 위한 유로(Channel)의 형상이 설계되고, 상기 도 5의 (a)와 같이 상기 제2 구조체와 상기 제1 구조체가 상호 연결점을 가지면서, 상기 제2 구조 부재 간의 연결점도 존재하는 형상을 이루도록 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다. 상기 연결수(coordination number)는 인접한 두 유닛의 연결점에서 제2 구조 부재의 말단점 두 곳 중 한 곳에 연결된 제1 구조 부재의 개수로 정의된다.

[0126] 폴리디메틸실록산(PDMS) 수지(Dow Corning, Sylgard 184) 및 실리콘 수지(Ecoflex 00-30)을 준비하고, 상기 PDMS 수지 대 상기 실리콘 수지를 2:8의 중량비로 혼합하여 수지 혼합물을 제조하였다. 상기 수지 혼합물 70 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe_3O_4, Sigama Aldrich, 310069) 30 중량부를 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 진공 오븐에서 5분 동안 보관하여 탈기시키고, 주입 장비(A NORM-JECT syringe, Henke Sass Wolf)를 이용하여 상기 몰드 내의 유로(Channel)에 주입하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물의 주입이 완료된 몰드는 알루미늄 호일(foil)로 포장되어 80℃에서 6시간 동안 경화되었다.

[0127] 이어서, 상기 몰드를 수중 챔버(water chamber)에서 24시간 동안 보관하여 PVA 영역을 용해시킴으로써 도 5의 (a)와 같은 형상의 텐서그리티 구조 선형 복합체를 제조하였다.

[0128] 실시예 4-2

[0129] 도 5의 (b)의 텐서그리티 복합 구조체와 같이 정사면체 형상의 제1 구조체를 포함하는 텐서그리티 구조 유닛 6개가 선형 연결되되, 연결수(coordination number)가 5가 되도록 연결된 형상을 이루도록 제1 구조 부재를 위한 유로(Channel)의 형상이 설계되고, 상기 도 5의 (b)와 같이 상기 제2 구조체와 상기 제1 구조체가 상호 연결점을 가지면서, 상기 제2 구조 부재 간의 연결점도 존재하는 형상을 이루도록 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 이용한 것을 제외하고, 상기 실시예 4-1과 동일한 방법으로 도 5의 (b)와 같은 형상의 텐서그리티 구조 선형 복합체를 제조하였다.

[0130] 실시예 4-3

[0131] 도 5의 (c)의 텐서그리티 복합 구조체와 같이 정사면체 형상의 제1 구조체를 포함하는 텐서그리티 구조 유닛 6개가 선형 연결되되, 연결수(coordination number)가 6인 형상을 이루도록 제1 구조 부재를 위한 유로(Channel)의 형상이 설계되고, 상기 도 5의 (c)와 같이 상기 제2 구조체와 상기 제1 구조체가 상호 연결점을 가지면서, 상기 제2 구조 부재 간의 연결점도 존재하는 형상을 이루도록 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 이용한 것을 제외하고, 상기 실시예 4-1과 동일한 방법으로 도 5의 (c)와 같은 형상의 텐서그리티 구조 선형 복합체를 제조하였다.

[0133] **실시예 5: 텐서그리티 구조 유닛의 조합에 의한 격자형 복합체**

[0134] 상기 제조예 1에서, 도 8의 텐서그리티 복합 구조체(900)와 같이 이십면체 형상의 제1 구조체 유닛(810)과 그 내부의 제2 구조체 유닛(820)를 포함하는 텐서그리티 구조 유닛(800)이 격자형으로 연결되되, 가로, 세로 및 높이 각각 5개의 텐서그리티 구조 유닛이 연결되어 전체적으로 육면체 형상의 제1 구조체(910)를 위한 제1 구조 부재용 유로(Channel)가 설계되고, 제2 구조체(920)가 상기 제1 구조체(910)와 상기 도 8과 같이 상호 연결점을 가지도록 제2 구조 부재가 배치된 몰드를 준비하였다.

[0135] 폴리디메틸실록산(PDMS) 수지(Dow Corning, Sylgard 184) 및 실리콘 수지(Ecoflex 00-30)을 준비하고, 상기 PDMS 수지 대 상기 실리콘 수지를 2:8의 중량비로 혼합하여 수지 혼합물을 제조하였다. 상기 수지 혼합물 70 중량부에 대하여, 자성 입자(Fe_3O_4, Sigama Aldrich, 310069) 30 중량부를 혼합하여 제1 구조 부재 형성용 조성물을 제조하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물을 진공 오븐에서 5분 동안 보관하여 탈기시키고, 주입 장비(A NORM-JECT syringe, Henke Sass Wolf)를 이용하여 상기 몰드 내의 유로(Channel)에 주입하였다. 상기 제1 구조 부재 형성용 조성물의 주입이 완료된 몰드는 알루미늄 호일(foil)로 포장되어 80℃에서 6시간 동안 경화되었다.

[0136] 이어서, 상기 몰드를 수중 챔버(water chamber)에서 24시간 동안 보관하여 PVA 영역을 용해시킴으로써 도 8과 같이 가로, 세로 및 높이가 각각 8.9cm인 육면체 격자 형상의 텐서그리티 구조 복합재(900)를 제조하였다.

[0138] **<평가>**

[0139] **실험예 1: 기계적 이방성 평가**

[0140] 상기 실시예 1-2 내지 1-5의 텐서그리티 구조 복합재들은 모두 전체적인 형상은 상이하지만 6개의 제2 구조 부재로 이루어진 제2 구조체 및 24개의 제1 구조 부재로 이루어진 제1 구조체로 이루어져 있다.

[0141] 도 9의 (a) 내지 (d)에는 상기 실시예 1-2 내지 1-5의 각 텐서그리티 구조 복합재의 자기장 인가에 따른 운동 변위의 방향 선택성이 나타나 있다. 도 9을 참조할 때, 상기 실시예 1-2 및 1-4의 텐서그리티 구조 복합재는 각각 이의 제1 구조체가 이십면체형인 경우 및 육팔면체인 경우로서 X축 자기장 인가와 Z축 자기장 인가에 대한 운동 변위의 차이가 크기 않으나, 상기 실시예 1-3 및 1-5의 텐서그리티 구조 복합재는 제1 구조체가 각각 육각기둥 프리즘형인 경우와 계층형 삼각 프리즘형인 경우로서 Z축 방향에 대한 자기장 인가의 인장 운동 변위가 X축 방향에 대한 자기장 인가의 인장 운동 변위보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 즉, 상기 실시예 1-3 및 1-5의 텐서그리티 구조 복합재는, 상기 실시예 1-2 및 1-4의 텐서그리티 구조 복합재와 동일 재질 및 동일 개수의 제1 구조 부재와 제2 구조 부재를 사용한 경우지만, 형태적 차이에 의하여, 상기 실시예 1-2 및 1-4의 텐서그리티 구조 복합재와 달리, 기계적 이방성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

[0143] **실험예 2: 선형 복합체의 연결점에 따른 운동 특성**

[0144] 상기 실시예 2-1 내지 2-5의 텐서그리티 구조 복합재 각각에 대하여, 도 7에 도시된 바와 같이 250mT의 자기장을 인가하여 형태 변형을 확인하였다. 도 7의 (a) 내지 (e)는 각각 상기 실시예 2-1 내지 2-5의 변형 결과를 나타내고 있다. 상기 PDMS 수지의 본질적 탄성 모듈러스가 2420 KPa이고, 상기 실리콘 수지의 탄성 모듈러스(elastic modulus)가 140 KPa임을 참조할 때, 상기 제1 구조체와 상기 제2 구조체의 매트리스 수지로서 모두 상기 실리콘 수지만 사용한 실시예 2-5의 텐서그리티 구조 복합재는 자기장은 인가하기 전부터 형태 유지가 불가능한 것을 확인할 수 있었고, 자기장 인가 후에는 형태가 완전히 무너진 것을 확인할 수 있었다. 반면, 상기 제1 구조체와 상기 제2 구조체의 매트리스 수지로서 모두 상기 PDMS 수지를 사용한 실시예 2-1의 텐서그리티 구조 복합재는 자기장 인가에 의해서도 약 28% 정도의 형태 변형만 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 형태 변형도는 하기 식 1과 같이 자기장 인가 전의 텐서그리티 구조 복합재의 높이(Hi)에 대한 자기장 인가 후의 텐서그리티 구조 복합재의 높이(Hf) 변화 정도의 백분율로 나타낸다.

[0145] [식 1]

[0146] 형태 변형도(%) = (Hi - Hf)/Hi x 100

[0147] 나아가, 상기 제2 구조체로서 PLA 수지를 적용하면서 상기 제1 구조체의 매트리스 수지로 각각 PDMS 수지, PDMS 수지와 실리콘 수지의 혼합 수지(5:5의 중량비) 및 실리콘 수지를 적용한 실시예 2-2, 2-3 및 2-4의 경우 전술한 탄성 모듈러스의 경향성에 상응하는 자기장 자극-반응을 나타냄을 확인할 수 있었다.

[0148] 즉, 상기 실시예 2-2 내지 2-4의 경우, 약 30% 내지 약 80%, 예를 들어, 약 30% 내지 약 60%의 형태 변형도를 나타내었다.

[0150] **실험예 3: 자성 입자 함량에 따른 자기장 자극-반응 평가**

[0151] 도 10은 상기 실시예 3-1 내지 3-6의 자성 입자의 함량에 따른 자기장 자극-반응 평가 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 상기 실시예 3-1 내지 3-6의 텐서그리티 구조 복합재는 동일한 재질의 매트리스 수지를 적용한 제1 구조체와 제2 구조체를 각각 동일한 개수 및 동일한 형태로 적용한 것으로서, 상기 제1 구조체 중의 자성 입자의 함량을 자성입자 및 수지 총 중량 100 중량부 대비 5, 10, 15, 20, 25, 30 중량부로 증가시킨 것이다. 이때 상기 식 1에 의한 형태 변형도는 자성 입자의 함량이 증가함에 따라 커지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 형상은 동일하더라도 자성 입자의 함량에 따라 자극의 반응 정도를 조절 가능함을 확인할 수 있었다.

[0153] **실험예 4: 선형 복합체의 연결점에 따른 운동 특성**

[0154] 도 11의 (a) 내지 (c)는 각각 상기 실시예 4-1 내지 4-3의 텐서그리티 구조 복합재에 자기장을 인가하여 인장 운동시킨 사진을 도시한 것이고, 도 12의 (a) 내지 (c)는 각각 상기 실시예 4-1 내지 4-3의 텐서그리티 구조 복합재에 자기장을 인가하여 굴곡 운동시킨 사진을 도시한 것이다. 도 11 및 도 12을 참조할 때, 상기 텐서그리티 구조 유닛(unit)들의 연결점이 많아질수록 구조적 강성이 강해져 인장 운동 변위와 굴곡 운동 변위가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

[0156] **실험예 5: 격자형 복합체의 운동 특성**

[0157] 도 13는 상기 실시예 5의 격자형 텐서그리티 구조 복합재에 대하여 외부 자극을 가했을 때의 운동 특성에 대해 나타낸 것이다. 보다 구체적으로, 도 13는 무응력(a), 압축 응력(b), X축 전단 응력(c), X축 및 Y축 전단 응력(d), 비틀림 응력(e)을 가했을 때의 측면(side) 및 상면(top)에서 관측한 변형을 사진으로 나타낸 것이다. 도 13을 참조할 때, 상기 격자형 텐서그리티 구조 복합재는 압축 응력에 대해서는 어느 정도 강성을 갖지만, 전단 응력 및 비틀림 응력에 대해서는 큰 변형을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

부호의 설명

[0159] 100, 200, 300, 400, 500, 600, 900: 텐서그리티 구조 복합재

10, 210, 310, 410, 510, 610, 910: 제1 구조체

11, 211, 311, 411, 511, 611: 제1 구조 부재

20, 220, 320, 420, 520, 620, 920: 제2 구조체

21, 221, 321, 421, 521, 621: 제2 구조 부재

700, 800: 텐서그리티 구조 유닛

710, 810: 제1 구조체 유닛

720, 820: 제2 구조체 유닛

101: 몰드

111: 유로

121: 제2 구조 부재

131: 바탕재

202: 제1 구조 부재 형성용 조성물

212: 제1 수지

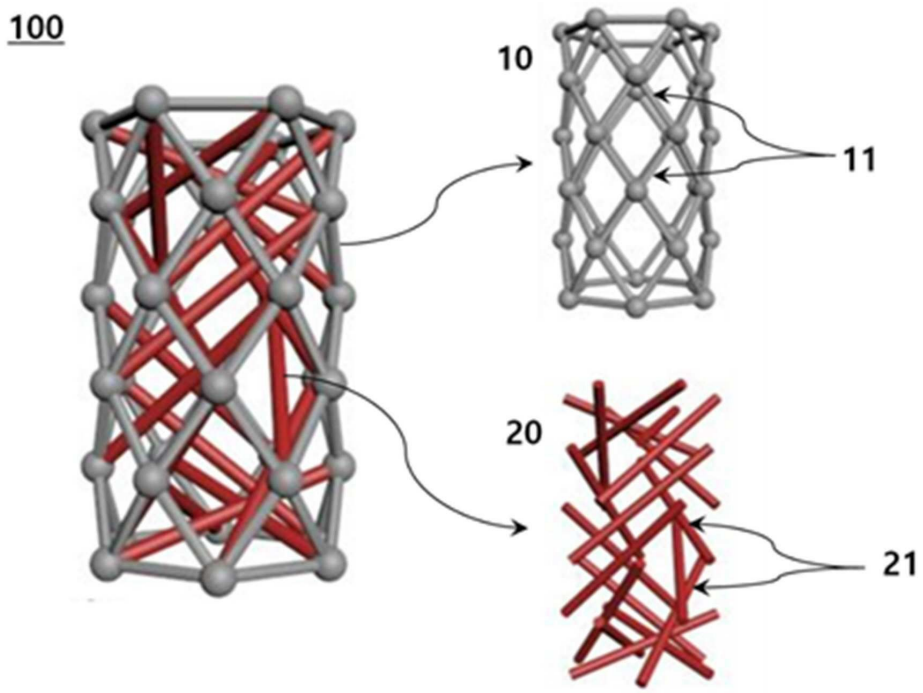
222: 자성 입자

303: 핫-플레이트

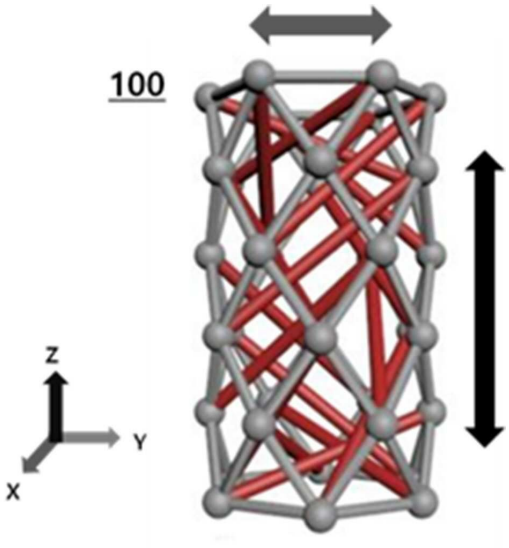
404: 수중 챔버

도면

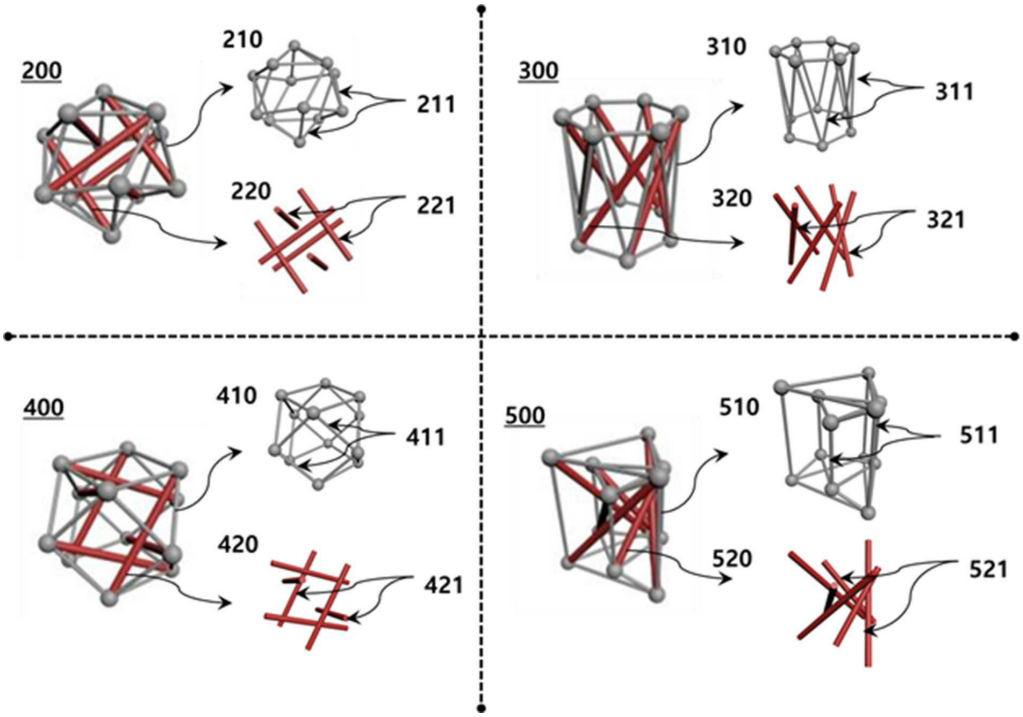
도면1



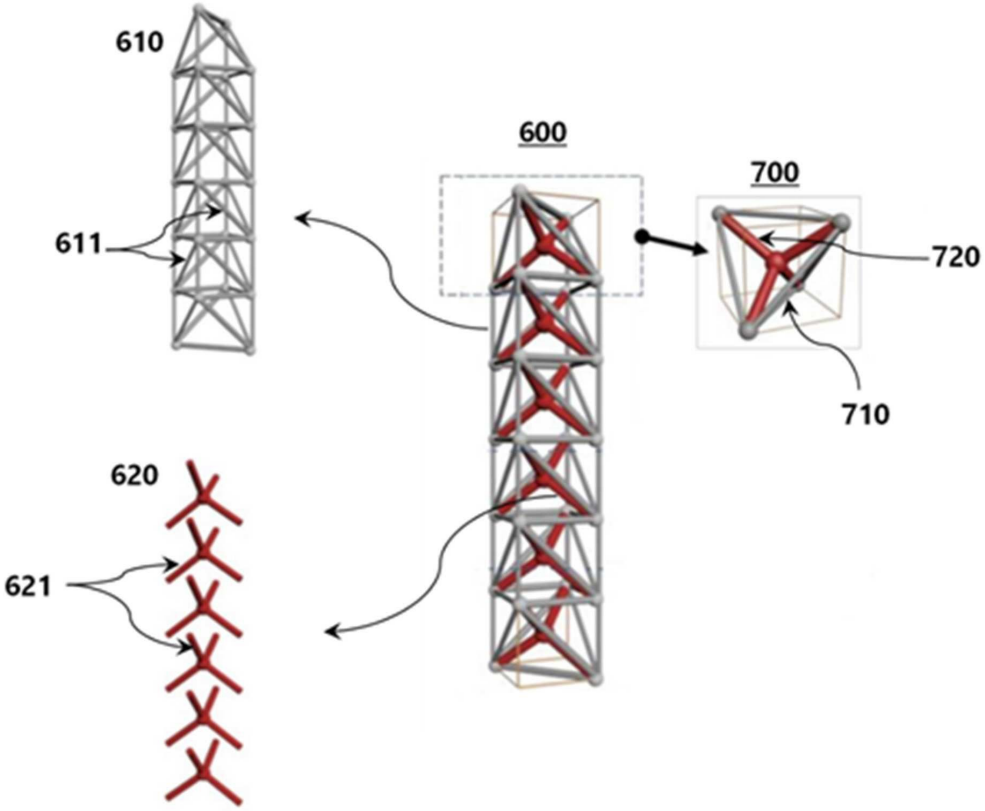
도면2



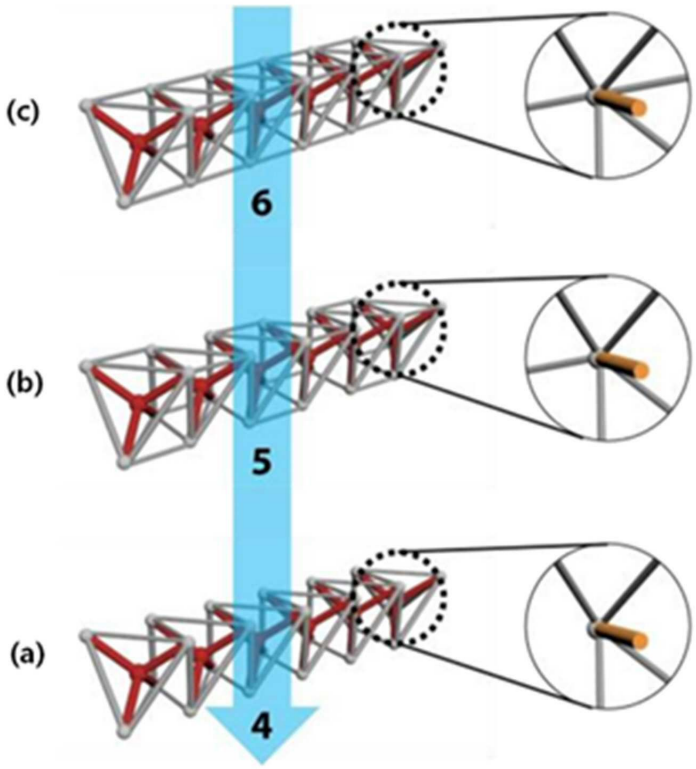
도면3


200
210
211
220
221
300
310
311
320
321
400
410
411
420
421
500
510
511
520
521

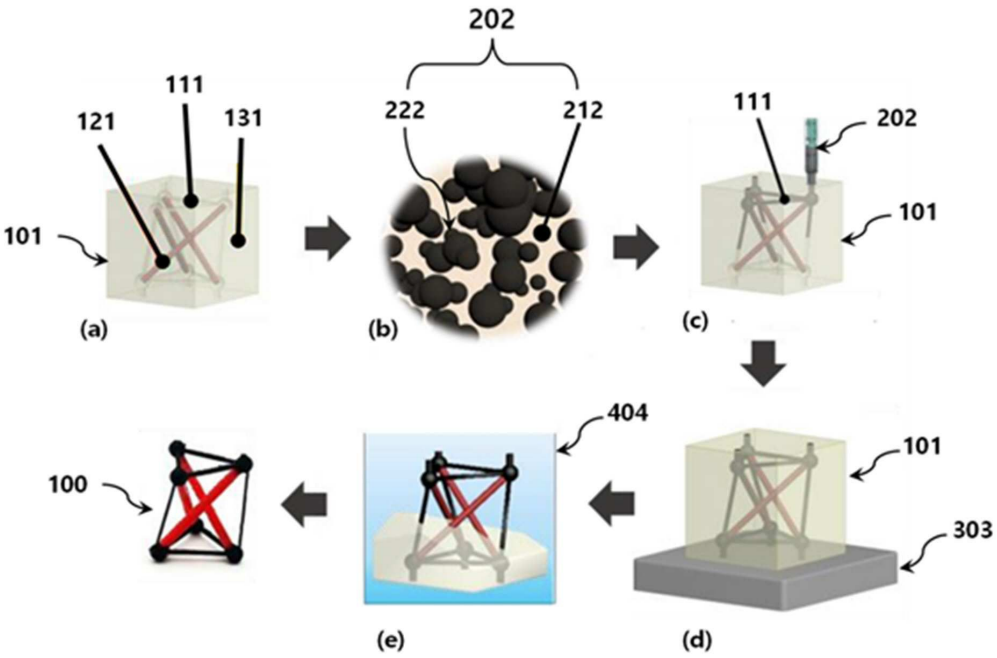
도면4


610
611
600
700
720
710
620
621

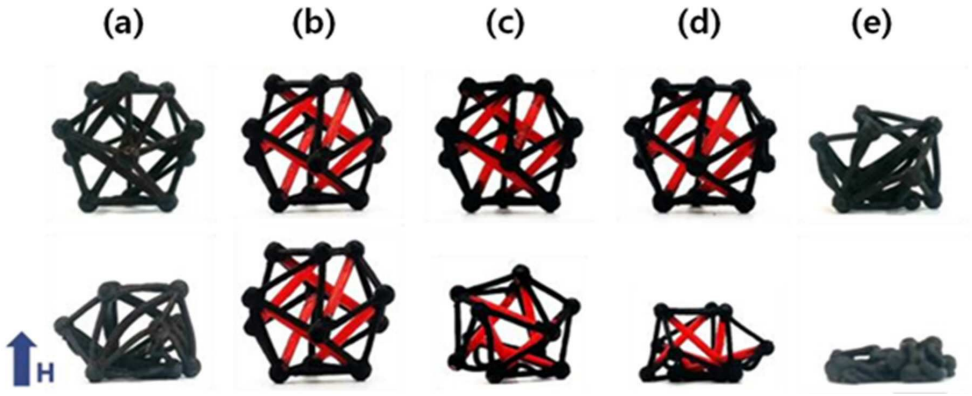
도면5


(c)
6
(b)
5
(a)
4

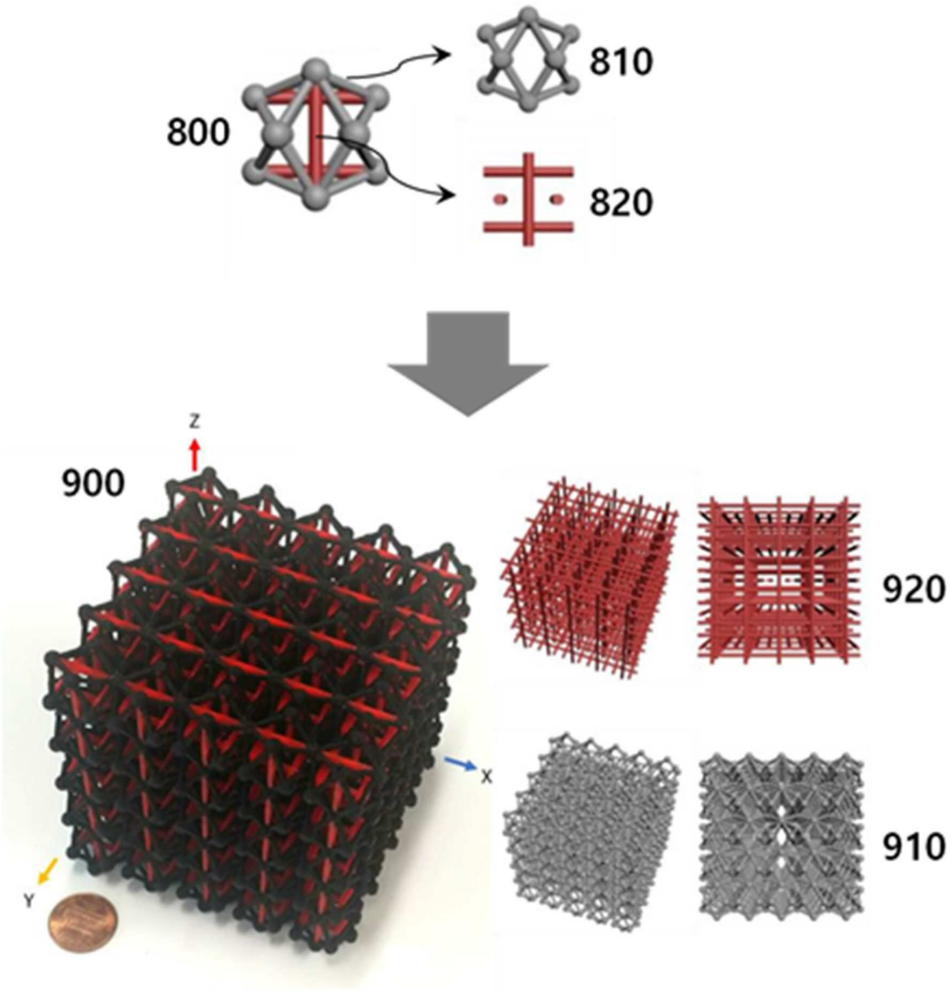
도면6


202
111
121
131
222
212
111
202
101
101
(a)
(b)
(c)
404
101
100
303
(e)
(d)

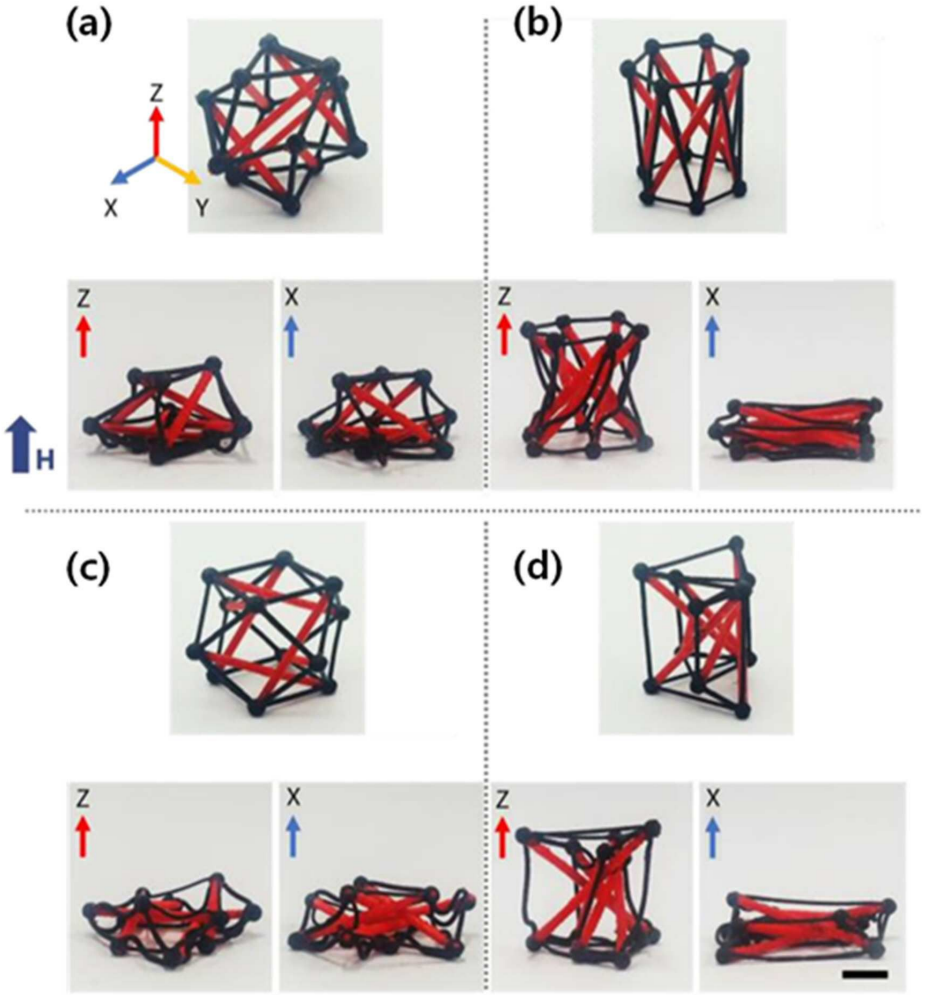
도면7



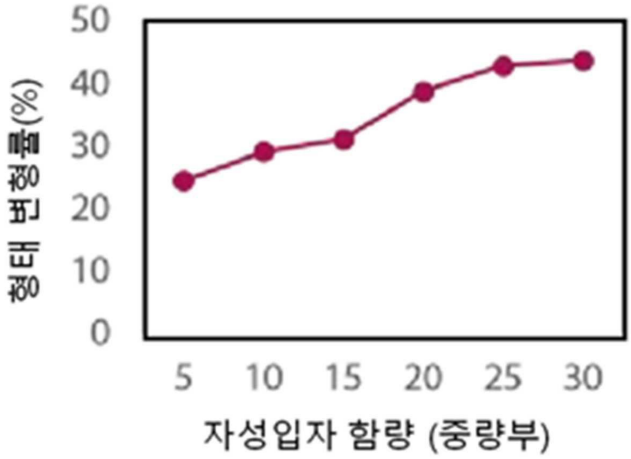
도면8



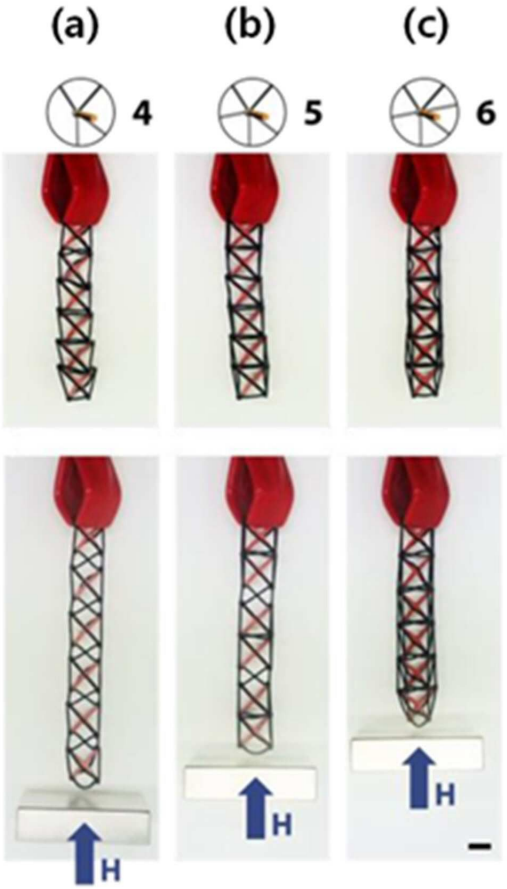
도면9



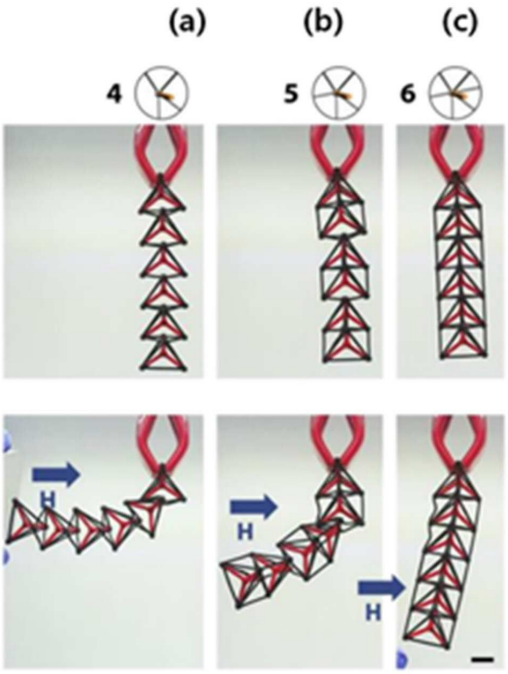
도면10



도면11



도면12



도면13

