



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년02월08일
(11) 등록번호 10-2497406
(24) 등록일자 2023년02월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B21F 27/12 (2006.01) B29C 65/00 (2018.01)
B29C 70/08 (2006.01) C04B 38/00 (2006.01)
B29K 105/08 (2014.01)
(52) CPC특허분류
B21F 27/128 (2013.01)
B29C 66/301 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0053021
(22) 출원일자 2021년04월23일
심사청구일자 2021년04월23일
(65) 공개번호 10-2022-0020758
(43) 공개일자 2022년02월21일
(30) 우선권주장
1020200101271 2020년08월12일 대한민국(KR)
(56) 선행기술조사문헌
KR101682992 B1
(뒷면에 계속)
전체 청구항 수 : 총 14 항

(73) 특허권자
연세대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
(72) 발명자
박형호
서울특별시 강남구 압구정로29길 23 현대아파트 208-402
이규형
서울특별시 서초구 동작대로 108, 1505호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
노경규

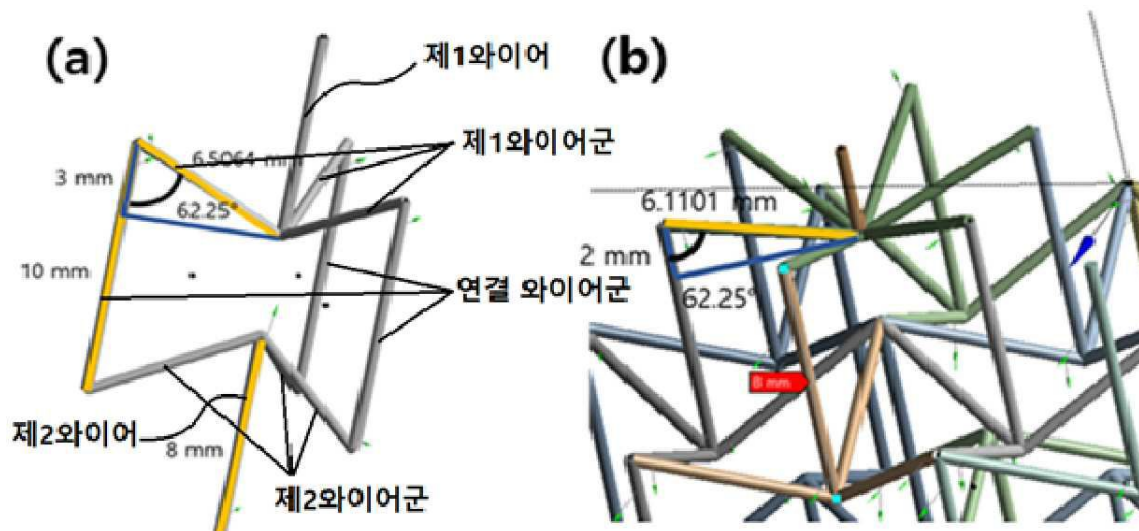
심사관 : 김영훈

(54) 발명의 명칭 3차원 다공성 구조체 및 그의 제조방법

(57) 요약

본 발명은 3차원 다공성 구조체 및 그의 제조방법에 관한 것으로, 오제틱(auxetic) 특성의 준카고메 구조를 갖는 3차원 다공성 구조체 및 그의 제조방법에 대한 것이다. 본 발명의 3차원 다공성 구조체는 신규 구조인 오제틱 특성을 부여한 준카고메 구조를 가져 무게대비 강도가 우수하고, 소성변형 에너지 흡수능력이 탁월하다. 본 발명의 3차원 다공성 구조체의 제조방법을 통해 신규 구조인 오제틱 특성을 부여한 준카고메 구조를 갖는 3차원 다공성 구조체를 제공할 수 있다.

대표도 - 도1



- (52) CPC특허분류
B29C 70/085 (2013.01)
C04B 38/008 (2013.01)
B29K 2105/0872 (2013.01)
- (72) 발명자
강건욱
 경기도 성남시 분당구 산운로 97 한성필하우스APT
 505동 1401호
김태희
 서울특별시 서대문구 신촌로 11길 50, 206호
최하령
 서울특별시 강동구 올림픽로 664 대우한강베네시티
 102동 2204호
유상혁
 서울특별시 광진구 아차산로 552 (극동아파트) 5동
 602호
- (56) 선행기술조사문헌
 JP2007514059 A
 KR1020090092152 A
 KR101029183 B1
 KR1020180079094 A

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711117279
과제번호	2020M3D1A1068610
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	미래소재디스커버리지원(R&D)
연구과제명	차원 조절을 통한 tunable한 기계적 특성의 신개념 계층집합 나노기공 세라믹 소재
기 여 율	50/100
과제수행기관명	연세대학교
연구기간	2020.04.29 ~ 2020.08.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711119462
과제번호	2020R1A5A1019131
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	집단연구지원(R&D)
연구과제명	에어로겔소재연구센터
기 여 율	50/100
과제수행기관명	연세대학교
연구기간	2020.07.01 ~ 2021.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

3차원 다공성 구조체로서,

상기 3차원 다공성 구조체의 단위셀은,

서로 수직한 x축과 y축이 이루는 x-y 평면과, 상기 x-y 평면에 수직한 z축으로 표현되는 공간상에서,

z축 방향으로, 동일선상에서 제1와이어와 제2와이어가 서로 이격되어 형성되어 있고,

제2와이어에 가까운 제1와이어의 일단부에, x-y 평면 상에서 바라볼 때 서로 60도 또는 120도의 사잇각을 갖는 복수의 와이어를 포함하는 제1와이어 군이 접하고, 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각은 0.1 내지 89.9° 이고,

복수의 와이어를 포함하는 제2와이어 군은 제1와이어 군과 X-Y 평면을 기준으로 대칭되고, 제2와이어 군은 제1와이어에 가까운 제2와이어의 일단부에 접하고,

제1와이어와 접하지 않는 제1와이어 군의 일단부와 이에 대응하는 제2와이어 군의 일단부를 z축 방향과 평행하게 연결하는 복수의 와이어를 포함하는 연결 와이어군에 의해 연결되고,

상기 단위셀이 3차원 공간상에서 반복적으로 형성되어, 구조체를 구성하는 것인 3차원 다공성 구조체.

청구항 2

제1항에 있어서, 기준 단위셀을 가상할 때,

상기 기준 단위셀의 연결 와이어군에 포함된 각각의 와이어가 인접한 단위셀들의 제1와이어가 되는 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 기준 단위셀의 제2와이어는 상기 인접한 단위셀들의 연결 와이어군에 포함되는 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체.

청구항 4

제3항에 있어서, x-y 평면 상에서 바라볼 때,

상기 인접한 단위셀들의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각이 상기 기준 단위셀의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각과 상이한 사잇각을 갖는 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체.

청구항 5

제1항에 있어서,

제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각은 60 내지 65° 인 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체.

청구항 6

제1항에 있어서, x-y 평면 상에서 바라볼 때,

제1와이어 군이 서로 60° 의 사잇각을 가질 때, 6개의 와이어를 포함하고,

제1와이어 군이 서로 120° 의 사잇각을 가질 때, 3개의 와이어를 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 와이어들은 금속, 세라믹, 합성수지, 섬유강화합성수지 중에서 선택되는 어느 하나인 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체.

청구항 8

3차원 다공성 구조체의 제조방법으로서,

서로 수직한 x축과 y축이 이루는 x-y 평면과, 상기 x-y 평면에 수직한 z축으로 표현되는 공간상에서,

(a) z축 방향으로, 동일선상에서 제1와이어와 제2와이어가 서로 이격되도록 형성하는 단계;

(b) 제2와이어에 가까운 제1와이어의 일단부에, x-y 평면 상에서 바라볼 때 서로 60° 또는 120° 의 사잇각을 갖는 복수의 와이어를 포함하는 제1와이어 군이 접하도록 형성하고, 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각이 0.1 내지 89.9° 가 되도록 형성하는 단계;

(c) 제1와이어 군과 X-Y 평면을 기준으로 대칭되고, 제1와이어에 가까운 제2와이어의 일단부에 접하도록 복수의 와이어를 포함하는 제2와이어 군을 형성하는 단계;

(d) 제1와이어와 접하지 않는 제1와이어 군의 일단부와 이에 대응하는 제2와이어 군의 일단부를 z축 방향과 평행하게 연결하는 복수의 와이어를 포함하는 연결 와이어군을 형성하여, 단위셀을 형성하는 단계; 및

(e) 상기 단위셀을 3차원 공간상에서 반복적으로 형성하는 단계;를 포함하는

3차원 다공성 구조체의 제조방법.

청구항 9

제8항에 있어서, 기준 단위셀을 가상할 때,

상기 기준 단위셀의 연결 와이어군에 포함된 각각의 와이어가 인접한 단위셀들의 제1와이어가 되도록 형성하는 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체의 제조방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 기준 단위셀의 제2와이어는 상기 인접한 단위셀들의 연결 와이어군에 포함되도록 형성하는 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체의 제조방법.

청구항 11

제10항에 있어서, x-y 평면 상에서 바라볼 때,

상기 인접한 단위셀들의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각이 상기 기준 단위셀의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각과 상이한 사잇각을 갖도록 형성하는 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체의 제조방법.

청구항 12

제8항에 있어서,

제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각이 60 내지 65° 가 되도록 형성하는 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체의 제조방법.

청구항 13

제8항에 있어서, x-y 평면 상에서 바라볼 때,

제1와이어 군이 서로 60° 의 사잇각을 가질 때, 6개의 와이어를 포함하고,

제1와이어 군이 서로 120° 의 사잇각을 가질 때, 3개의 와이어를 포함하도록 형성하는 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체의 제조방법.

청구항 14

제8항에 있어서,

상기 와이어들은 금속, 세라믹, 합성수지, 섬유강화합성수지 중에서 선택되는 어느 하나인 것을 특징으로 하는 3차원 다공성 구조체의 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 3차원 다공성 구조체 및 그의 제조방법에 관한 것으로, 오제틱(auxetic) 특성의 준 카고메 구조를 갖는 3차원 다공성 구조체 및 그의 제조방법에 대한 것이다.

배경 기술

[0002] 가벼우면서 높은 강도를 갖는 소재로서 다공성 소재가 있다. 자연소재인 목재뿐만 아니라 인위적으로 제조된 발포수지, 발포금속(metal foam), 소결(sintered) 세라믹스 등 많은 재료들이 다공성이다. 다공성 재료는 내부의 빈 공간이 서로 통해있느냐 여부에 따라 개방형(open cell type)과 폐쇄형(closed cell type)으로 분류된다. 개방형 다공성 재료는 내부 공간을 물질의 이동 통로나 저장의 목적으로 사용할 수 있다.

[0003] 최근 새로운 다공성 재료로서 주기적인 트러스 구조가 소개되고 있다(H.N.G. Wadley, N.A. Fleck, A.S. Evans, 2003, Composite Science and Technology, Vol.63, pp.2331-2343). 규칙적인 형태를 갖으며 정밀한 계산을 통해 최적의 강도를 갖도록 설계된 트러스 구조는 허니콤(honeycomb) 격자에 버금가는 기계적 물성을 가지면서 내부가 개방되어 공간을 활용할 수 있는 이점이 있다. 가장 일반적인 트러스 형태는 피라미드(pyramid) 트러스이다. 4개의 정삼각형 격자가 경사면을 이루고, 정사각형 격자는 아랫(또는 윗)면을 이루고 있어 사각형 형태의 판구조물을 만들기 유리하다.

[0004] 다른 트러스구조로서 정사면체와 정팔면체가 조합된 형태의 옥테트(Octet) 트러스(R. Buckminster Fuller, 1961, US Patent 2,986,241)를 들 수 있다. 트러스의 각 요소가 서로 정삼각형을 이루고 있다. 21세기 들어서 옥테트 트러스를 변형한 카고메(Kagome) 트러스가 발표되었다(S. Hyun, A.M. Karlsson, S. Torquato, A.G. Evans, 2003, Int. J. of Solids and Structures, Vol.40, pp.6989-6998).

- [0005] 대한민국 등록특허공보 10-0566729(강기주, 김남현, 2006, 와이어로 구성된 3차원 다공성 경량구조체와 그 제조 장치)에서는 3차원 공간 내에서 직선 와이어를 6 방향에서 배열하여 옥테드 트러스와 유사한 다층구조를 제조하는 방법을 제시하였다.
- [0006] 다양한 형태의 다공성 구조가 소개되고 있으나, 오제틱(Auxetic) 특성을 갖는 준카고메 구조(quasi-Kagome structure)에 대해서는 아직 발표된 바 없다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0007] 본 발명의 목적은 강도와 인성을 동시에 향상할 수 있는 신규 구조인 오제틱 특성을 부여한 준 카고메 구조를 갖는 3차원 다공성 구조체를 제공하는 데 있다.
- [0008] 본 발명의 또 다른 목적은 오제틱 특성을 부여한 준 카고메 구조를 갖는 3차원 다공성 구조체의 제조방법을 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

- [0009] 본 발명의 일 측면에 따르면, 3차원 다공성 구조체로서, 상기 3차원 다공성 경량 구조체의 단위셀은, 서로 수직인 x축과 y축이 이루는 x-y 평면과, 상기 x-y 평면에 수직인 z축으로 표현되는 공간상에서, z축 방향으로, 동일 선상에서 제1와이어와 제2와이어가 서로 이격되어 형성되어 있고, 제2와이어에 가까운 제1와이어의 일단부에, x-y 평면 상에서 바라볼 때 서로 60° 또는 120° 의 사잇각을 갖는 복수의 와이어를 포함하는 제1와이어 군이 접하고, 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각은 0.1° 내지 89.9° 이고, 복수의 와이어를 포함하는 제2와이어 군은 제1와이어 군과 X-Y 평면을 기준으로 대칭되고, 제2와이어 군은 제1와이어에 가까운 제2와이어의 일단부에 접하고, 제1와이어와 접하지 않는 제1와이어 군의 일단부와 이에 대응하는 제2와이어 군의 일단부를 z축 방향과 평행하게 연결하는 복수의 와이어를 포함하는 연결 와이어군에 의해 연결되고, 상기 단위셀이 3차원 공간상에서 반복적으로 형성되어, 구조체를 구성하는 것인 3차원 다공성 구조체가 제공된다.
- [0010] 기준 단위셀을 가상할 때, 상기 기준 단위셀의 연결 와이어군에 포함된 각각의 와이어가 인접한 단위셀들의 제1와이어가 될 수 있다.
- [0011] 상기 기준 단위셀의 제2와이어는 상기 인접한 단위셀들의 연결 와이어군에 포함될 수 있다.
- [0012] x-y 평면 상에서 바라볼 때, 상기 인접한 단위셀들의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각이 상기 기준 단위셀의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각과 상이한 사잇각을 가질 수 있다.
- [0013] 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각은 바람직하게는 60° 내지 65° 일 수 있다.
- [0014] x-y 평면 상에서 바라볼 때, 제1와이어 군이 서로 60° 의 사잇각을 가질 때, 6개의 와이어를 포함하고, 제1와이어 군이 서로 120° 의 사잇각을 가질 때, 3개의 와이어를 포함할 수 있다.
- [0015] 상기 와이어들은 금속, 세라믹, 합성수지, 섬유강화합성수지 중에서 선택되는 어느 하나일 수 있다.
- [0017] 본 발명의 다른 하나의 측면에 따르면, 3차원 다공성 구조체의 제조방법으로서, 서로 수직인 x축과 y축이 이루는 x-y 평면과, 상기 x-y 평면에 수직인 z축으로 표현되는 공간상에서, (a) z축 방향으로, 동일선상에서 제1와이어와 제2와이어가 서로 이격되도록 형성하는 단계; (b) 제2와이어에 가까운 제1와이어의 일단부에, x-y 평면 상에서 바라볼 때 서로 60° 또는 120° 의 사잇각을 갖는 복수의 와이어를 포함하는 제1와이어 군이 접하도록 형성하고, 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각이 0.1° 내지 89.9° 가 되도록 형성하는 단계; (c) 제1와이어 군과 X-Y 평면을 기준으로 대칭되고, 제1와이어에 가까운 제2와이어의 일단부에 접하도록 복수의 와이어를 포함하는 제2와이어 군을 형성하는 단계; (d) 제1와이어와 접하지 않는 제1와이어 군의 일단부와 이에 대응하는 제2와이어 군의 일단부를 z축 방향과 평행하게 연결하는 복수의 와이어를 포함하는 연결 와이어군을 형성하여, 단위셀을 형성하는 단계; 및 (e) 상기 단위셀을 3차원 공간상에서 반복적으로 형성하는 단계;를 포함하는 3차원 다공성 구조체의 제조방법이 제공된다.
- [0018] 기준 단위셀을 가상할 때, 상기 기준 단위셀의 연결 와이어군에 포함된 각각의 와이어가 인접한 단위셀들의 제1

와이어가 되도록 형성할 수 있다.

- [0019] 상기 기준 단위셀의 제2와이어는 상기 인접한 단위셀들의 연결 와이어군에 포함되도록 형성할 수 있다.
- [0020] x-y 평면 상에서 바라볼 때, 상기 인접한 단위셀들의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각이 상기 기준 단위셀의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각과 상이한 사잇각을 갖도록 형성할 수 있다.
- [0021] 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각이 60° 내지 65° 가 되도록 형성할 수 있다.
- [0022] x-y 평면 상에서 바라볼 때, 제1와이어 군이 서로 60° 의 사잇각을 가질 때, 6개의 와이어를 포함하고, 제1와이어 군이 서로 120° 의 사잇각을 가질 때, 3개의 와이어를 포함하도록 형성할 수 있다.
- [0023] 상기 와이어들은 금속, 세라믹, 합성수지, 섬유강화합성수지 중에서 선택되는 어느 하나일 수 있다.

발명의 효과

- [0024] 본 발명의 3차원 다공성 구조체는 신규 구조인 오제틱 특성을 부여한 준카고메 구조를 가져 무게대비 강도가 우수하고, 소성변형 에너지 흡수능력이 탁월하다.
- [0025] 본 발명의 3차원 다공성 구조체의 제조방법을 통해 신규 구조인 오제틱 특성을 부여한 준카고메 구조를 갖는 3차원 다공성 구조체를 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0026] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 3차원 다공성 구조체(b)와 단위셀(a)을 나타낸 것이다.
- 도 2의 (a)는 본 발명의 일 실시예에 따른 3차원 다공성 구조체를 x-y 평면 상에서 바라본 것이고, (b)는 y-z 평면 상에서 바라본 것이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 3차원 다공성 구조체를 y-z 평면 상에서 바라본 것이다.
- 도 4는 본 발명의 제조예에 따라 제조된 나노와이어의 X-선 분광 시스템(Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS) 측정 결과이다.
- 도 5는 제조예에 따라 제조된 나노와이어의 제조시 온도 조건에 따른 길이와 두께 측정 결과이다.
- 도 6은 실시예에 따라 제조된 3차원 다공성 구조체와 유사한 기공율을 갖는 나노리플렛 구조체의 탄성계수를 비교한 결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0027] 이하, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세히 설명하도록 한다.
- [0028] 그러나, 이하의 설명은 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0029] 본원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다", "함유하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0030] 이하, 본 발명의 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 다만, 이는 예시로서 제시되는 것으로, 이에 의해 본 발명이 제한되지는 않으며 본 발명은 후술할 청구범위의 범주에 의해 정의될 뿐이다.
- [0032] 이하, 본 발명의 3차원 다공성 구조체에 대해 설명하도록 한다.
- [0034] 본 발명의 3차원 다공성 구조체는 신규 구조인 오제틱 특성을 부여한 준카고메 구조를 갖는다.

- [0035] 오제틱 특성은 푸아송 비(Poisson' ratio)가 음의 값을 갖는 것으로, 푸아송 비(ν)는 체적탄성계수(bulk modulus, B)와 전단탄성률(shear modulus, G)에 의해서 결정이 된다. 만약 $B/G \gg 1$ 라면, ν 는 0.5의 값을 갖고 고무(rubbery), 비압축(incompressible) 특성을 나타낸다. $B/G \ll 1$ 라면, ν 는 -1의 값을 갖기 때문에 오제틱 특성, 즉 우수한 압축 특성(highly compressive)을 가진다. 음의 푸아송 비를 갖는 구조 중 푸아송 비가 -1에 가까워질수록 강도(stiffness)는 감소하지만 파괴 인성과 에너지 흡수력은 향상된다.
- [0036] 대부분의 일반 재료는 인장실험을 할 때 단면이 얇아지므로 푸아송 비는 양의 값을 가지고, 이는 원자간 결합이 변형으로 재조정되기 때문으로 알려져 있다.
- [0037] 하지만 음의 푸아송 비를 갖는 구조의 경우 기존의 재료와 다르게 인장 실험 시 단면이 두꺼워지고 압축 시 단면의 부피가 오히려 줄어드는 특성을 나타낸다. 이러한 음의 푸아송 비는 소재 및 조성에 의해 발현되는 특성이 아닌 재료의 구조적 특성에 의해 발현되는 성질이다.
- [0038] 준 카고메 구조는 자연계에 존재하지 않는 가장 강도가 높은 인공 구조 중 하나로 트러스 형태를 구성하는 부재가 한 개의 절점에 모이지 않고 서로 어긋나면서 일종의 틈새를 형성하는 형태를 가지고 있다. 이에 따라 무게 대비 강도와 소성변형 에너지 흡수율 면에서 매우 탁월한 성능을 가지고 있으며, 전단하중 및 압축하중 모두 지지 가능한 이력형 댐퍼의 기능을 가진다. 전단강도가 최대 점에 도달한 후 소성 영역에 진입하면서 강도가 일정하게 유지되며 안정적이고 직사각형에 가까운 이력 거동에 의해 매우 큰 에너지 흡수능력과 강도를 보유한다.
- [0040] 본 연구진은 유한요소법을 이용하여 고인성 특성을 구현하는 음의 푸아송 비의 오제틱 구조와 고강도 특성을 구현하는 준카고메 구조를 기반으로 한 다공성 구조로 기존의 다공성 소재에서 나타나는 기공률과 기계적 강도를 획기적으로 극복한 구조를 제시한다.
- [0041] 유한요소법은 임의의 모양을 가진 3차원 구조를 갖는 복합체 등의 재료에 대한 기계적 물성 해석에 매우 유용한 해석방법이며, 해석영역 내에 매질의 특성이 서로 다른 재료가 임의로 배치되었을 경우에도 정확하게 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이를 위해 안정적인 구조로 잘 알려진 준카고메 구조와 음의 푸아송 비를 갖는 오제틱 구조 및 유사구조들을 바탕으로 디자인 파라미터 후보군을 유추(결합 구조, 최외곽 전자 수, 기공률 등)하여 원하는 물성을 갖는 구조의 디자인이 가능하다.
- [0043] 이하, 도 1 내지 3을 참조하여 좀 더 상세하게 설명하면, 상기 3차원 다공성 경량 구조체의 단위셀은, 서로 수직인 x 축과 y 축이 이루는 x - y 평면과, 상기 x - y 평면에 수직인 z 축으로 표현되는 공간상에서, z 축 방향으로 동일선상에서 제1와이어와 제2와이어가 서로 이격되어 형성되어 있다.
- [0044] 제2와이어에 가까운 제1와이어의 일단부에, x - y 평면 상에서 바라볼 때 서로 60° 또는 120° 의 사잇각을 갖는 복수의 와이어를 포함하는 제1와이어 군이 접한다. 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각은 0.1° 내지 89.9° 이다.
- [0045] 복수의 와이어를 포함하는 제2와이어 군은 제1와이어 군과 X - Y 평면을 기준으로 대칭된다.
- [0046] 제2와이어 군은 제1와이어에 가까운 제2와이어의 일단부에 접하도록 형성된다.
- [0047] 제1와이어와 접하지 않는 제1와이어 군의 일단부와 이에 대응하는 제2와이어 군의 일단부를 z 축 방향과 평행하게 연결하는 복수의 와이어를 포함하는 연결 와이어군에 의해 연결된다.
- [0048] 상기 단위셀은 3차원 공간상에서 반복적으로 형성되어, 구조체를 구성하게 된다.
- [0049] 기준 단위셀을 가상할 때, 상기 기준 단위셀의 연결 와이어군에 포함된 각각의 와이어가 인접한 단위셀들의 제1와이어가 될 수 있다. 여기서, 인접한 단위셀이 상기 기준 단위셀과 평행하게 형성되지 않음은 자명하다.
- [0050] 상기 기준 단위셀의 제2와이어는 상기 인접한 단위셀들의 연결 와이어군에 포함될 수 있다.
- [0051] x - y 평면 상에서 바라볼 때, 상기 인접한 단위셀들의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각이 상기 기준 단위셀의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각과 상이한 사잇각을 가질 수 있다.
- [0052] 상기 기준 단위셀이 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각으로 60° 를 갖는다면, 상기 인접한 단위셀들은 120° 의 사잇각을 갖는다. 만약에 상기 기준 단위셀이 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각으로 120° 를 갖는다면, 상기 인접한 단위셀들은 60° 의 사잇각을 갖는다.
- [0053] 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각은 바람직하게는 60° 내지 65° 일 수 있다.

- [0054] x-y 평면 상에서 바라볼 때, 제1와이어 군이 서로 60° 의 사잇각을 가질 때, 6개의 와이어를 포함하고, 제1와이어 군이 서로 120° 의 사잇각을 가질 때, 3개의 와이어를 포함할 수 있다.
- [0055] 상기 와이어들은 금속, 세라믹, 합성수지, 섬유강화합성수지 중에서 선택되는 어느 하나일 수 있다.
- [0057] 이하, 본 발명의 제조방법을 설명하도록 한다.
- [0058] 먼저, 서로 수직한 x축과 y축이 이루는 x-y 평면과, 상기 x-y 평면에 수직한 z축으로 표현되는 공간상에서 z축 방향으로, 동일선상에서 제1와이어와 제2와이어가 서로 이격되도록 형성한다(단계 a).
- [0059] 다음으로, 제2와이어에 가까운 제1와이어의 일단부에, x-y 평면 상에서 바라볼 때 서로 60° 또는 120° 의 사잇각을 갖는 복수의 와이어를 포함하는 제1와이어 군이 접하도록 형성한다. 이때, 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각이 0.1° 내지 89.9° 가 되도록 형성한다(단계 b).
- [0060] 여기서, 바람직하게는 제1와이어와 제1와이어 군이 이루는 각각의 평면 상에서 바라볼 때 제1와이어와 제1와이어군의 사잇각이 60° 내지 65° 가 되도록 형성한다.
- [0061] 다음으로, 제1와이어 군과 X-Y 평면을 기준으로 대칭되고, 제1와이어에 가까운 제2와이어의 일단부에 접하도록 복수의 와이어를 포함하는 제2와이어 군을 형성한다(단계 c).
- [0062] 다음으로, 제1와이어와 접하지 않는 제1와이어 군의 일단부와 이에 대응하는 제2와이어 군의 일단부를 z축 방향과 평행하게 연결하는 복수의 와이어를 포함하는 연결 와이어군을 형성하여 단위셀을 형성한다(단계 d).
- [0063] 마지막으로, 상기 단위셀을 3차원 공간상에서 반복적으로 형성하여 3차원 다공성 구조체를 제조한다(단계 e).
- [0064] 여기서, 기준 단위셀을 가상할 때, 상기 기준 단위셀의 연결 와이어군에 포함된 각각의 와이어가 인접한 단위셀들의 제1와이어가 되도록 형성한다.
- [0065] 상기 기준 단위셀의 제2와이어는 상기 인접한 단위셀들의 연결 와이어군에 포함되도록 형성한다.
- [0066] x-y 평면 상에서 바라볼 때, 상기 인접한 단위셀들의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각이 상기 기준 단위셀의 제1와이어 군에 포함된 복수의 와이어들 사이의 사잇각과 상이한 사잇각을 갖도록 형성한다.
- [0067] x-y 평면 상에서 바라볼 때, 제1와이어 군이 서로 60° 의 사잇각을 가질 때, 6개의 와이어를 포함하고, 제1와이어 군이 서로 120° 의 사잇각을 가질 때, 3개의 와이어를 포함하도록 형성한다.
- [0068] 상기 와이어들은 금속, 세라믹, 합성수지, 섬유강화합성수지 중에서 선택되는 어느 하나일 수 있다.
- [0069]
- [0070] [실시예]
- [0071] 이하, 본 발명의 바람직한 실시예를 들어 설명하도록 한다. 그러나 이는 예시를 위한 것으로서 이에 의하여 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.
- [0073] 제조예: 3차원 다공성 구조체 형성을 위한 나노와이어의 제조
- [0074] 나노와이어 형성 및 미세크기 제어를 위해 수용성 중합체기반의 고분자인 폴리비닐알콜(Polyvinyl alcohol, PVA)을 소수성 용매인 테트라하이드로퓨란(Tetrahydrofuran, THF)과 1:8 중량비(weight ratio)로 혼합하여 에멀전 반응을 유도하였다.
- [0075] 이후, 나노와이어의 분산성과 성장방향 제어를 위하여 친수성 용매 메탄올(Methanol, MeOH)을 THF대비 10 vol%로 주입하였다.
- [0076] 다음으로, pH조절을 통해 나노와이어의 성장속도 조절을 위해 아세트산(Acetic acid, AcOH)를 THF대비 1 vol%로 소량첨가하여 가수분해를 유도하였다.
- [0077] 다음으로, 나노와이어의 성장길이를 조절하기 위하여 상기 가수분해시킨 혼합물에 테트라메틸 오르토실리케이트(Tetramethyl orthosilicate, TMOS) 용액을 THF대비 10 vol%를 첨가하여 혼합용액을 제조하였다.
- [0078] 상기 혼합용액을 에이징오븐에 넣고 $80\sim 100^\circ\text{C}$ 의 온도에서 5시간 이상 반응시킨 다음 원심분리기를 이용하여 2시

간 이상 원심분리를 진행하였다.

[0079] 원심분리를 마친 후, 메탄올 (MeOH) 및 물을 1:1로 혼합한 용매로 3회 이상 세척한 뒤, 진공오븐에서 50~60°C의 온도로 건조하여 나노와이어를 제조하였다.

[0081] 실시예: 3차원 다공성 구조체 형성

[0082] 제조예에 따라 제조된 나노와이어를 이용하여 3차원 다공성 구조체를 형성하였다. 상술한 바를 참고하여 설명하면, 먼저 서로 수직인 x축과 y축이 이루는 x-y 평면과, 상기 x-y 평면에 수직인 z축으로 표현되는 공간상에서 제 1와이어를 -z 축 방향으로 8 mm 길이로 제작하였다.

[0083] 다음으로, 제1와이어 군의 각 와이어가 x-y 평면상에 120° 각도를 이루도록 하며, z 축 방향으로 62.25° 가 되도록 결정한다. 각 와이어의 길이는 6.5064 mm가 되도록 하였다. 연결 와이어군은 제1와이어 군의 각 와이어 끝에서 -z 축 방향으로 10 mm 와이어를 생성한다. 제2와이어 군은 연결와이어 군의 중간인 5 mm 지점에 x-y 평면을 만들어 거울 대칭을 통해 생성한다.

[0084] 위에서 생성한 도 1의 (a)와 같은 와이어군 집합을 60° 간격으로 배치하여 도 1 (b)와 같이 연결한다. 제1와이어 6개를 연결하기 위하여 중간에 8 mm 와이어를 생성하고, 이 와이어로 연결하기 위한 6.1101 mm의 와이어를 생성한다. 이 때 z축과 이루는 각도는 62.25° 도를 이룬다.

[0085] 마지막으로, 상기와 같은 방법으로 형성된 단위셀을 3차원 공간상에서 반복적으로 형성하여 3차원 다공성 구조체를 제조하였다.

[0087] [시험예]

[0089] 시험예 1: EDS 측정

[0090] 제조예에 따라 제조된 나노와이어의 X-선 분광 시스템(Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS) 측정 결과를 도 4에 나타내었다.

[0091] 도 4를 참고하면, 원소 분석을 통해 Si 피크와 O 피크를 확인하여 최종으로 형성된 상기 나노와이어는 SiO₂ 임을 확인할 수 있었다.

[0093] 시험예 2: 온도 조건에 따른 길이와 두께 측정 결과

[0094] 제조예에 따라 제조된 나노와이어의 제조시 온도 조건에 따른 길이와 두께 측정 결과를 도 5에 나타내었다.

[0095] 반응온도의 조절을 통해서 85°C 일 때 가장 긴 나노와이어를 제조할 수 있었고, 반응온도 90°C 일 때 가장 적은 두께의 나노와이어 제조가 가능함을 확인하였다. 또한, 반응온도 100°C 에서는 반응이 일어나지 않아 나노와이어 형성이 불가능함을 확인하였다.

[0097] 시험예 3: 탄성계수 측정 결과

[0098] 실시예에 따라 산화알루미늄(Al₂O₃) 나노와이어로 구성된 3차원 다공성 구조체 탄성계수의 시뮬레이션 결과를 아래 표 1과 도 6에 나타내었다.

표 1

기공률(%)	밀도(mg/cm ³)	유효 탄성 계수(GPa)	E _{ref} (GPa)	푸아송의 비(ν ₃₁)
85	592.5	2.1675	0.0595	-0.46

[0101] 표 1은 FEM(유한요소법, finite element method)으로 탄성계수를 시뮬레이션 한 결과이다.

[0102] 상기 FEM 시뮬레이션 방법을 좀 더 상세히 설명하면, 실시예에 따라 제조된 3차원 다공성 구조체의 z 축방향으로 압축시험을 진행하였다. 아랫면의 모든 절점들은 z 축 방향의 이동을 제한하고, 윗면의 모든 절점들은 -z 방향으로 0.2% 변형률에 해당하는 변위를 가하였다.

[0103] 실시예에 따라 제조된 3차원 다공성 구조체의 산화알루미늄 탄성계수는 약 380 GPa, 푸아송의 비는 0.24 값을

사용하였다. 원형단면적을 갖는 빔으로 해석하였으며, 이때 상기 원의 반지름은 0.2 mm로 사용하였다.

[0104] 그 결과 바닥면에서 계산되는 반력을 아래의 식 1로 계산하였다. 아래 식의 A_0 는 구조를 담고 있는 시뮬레이션 시스템의 전체의 x축 길이와 y축 길이를 곱한 값을 사용하였다. E_{eff} 는 유효 탄성계수, $f_{reaction}$ 는 바닥면에서 계측되는 반력이다. 0.002는 z 방향으로의 0.2% 변형률을 의미한다.

[0105] 표 1의 푸아송의 비는 구조가 z 축 방향으로 압축이 될 때, x 축 방향으로의 변화를 나타내며, 식 2로 계산하였다. 식 2에서의 ϵ_{11} 은 x 방향으로의 변형률이며, 분모는 z 방향으로의 변형률을 의미한다.

[0107] [식 1]

$$E_{eff} = \frac{1}{0.002} \left(\frac{f_{reaction}}{A_0} \right)$$

[0109] [식 2]

$$\nu_{31} = -\epsilon_{11}/0.002$$

[0112] 상기 식 1의 계산 결과는 표 1의 유효 탄성계수이다. 탄성계수는 2.2 GPa 로 나타났으며, 포아송 비가 음수로 나타남으로부터 해당 구조가 오제틱 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

[0114] 아래 식 3은 실시예의 FEM 측정 결과와 비교하기 위한 나노리플렛(Nanoleaflet) 구조체(Appl. Phys. Lett. 89, 041911 (2006))의 유효탄성 계수 예측 식이다.

[0116] [식 3]

$$E_{ref} = 0.002 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1.34} E_0 [1]$$

[0119] 식 3에 있어서, E_0 은 비교예의 탄성계수이며, ρ_0 는 비교예의 밀도, ρ 은 비교예가 다공성 구조가 되었을 때의 밀도이다. 즉, 식 3의 밀도비 ρ/ρ_0 는 질량이 동일한 경우에 부피의 비로 이해할 수 있다.

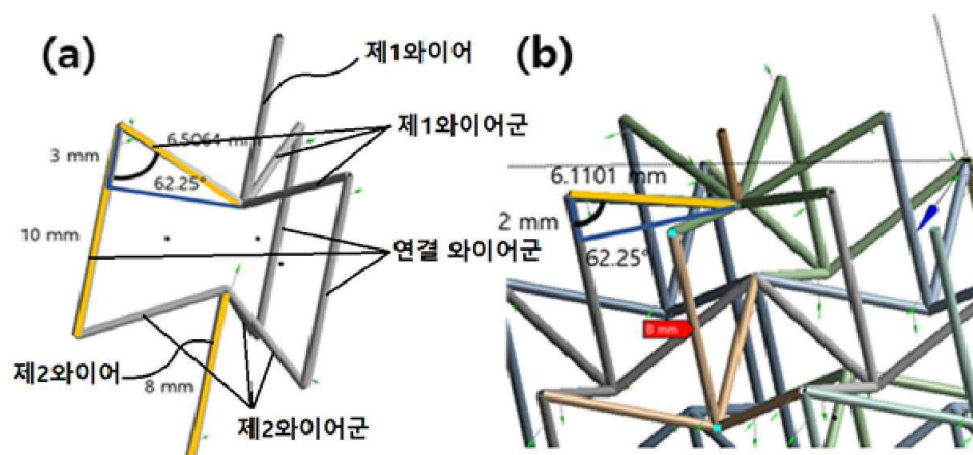
[0120] 식 3의 결과를 도 6의 검은색 x표시와 파란색 선으로 나타냈다. 실시예에 따라 제조된 3차원 다공성 구조체는 도 6에 사각형으로 표시하였다.

[0121] 표 1과 도 6을 참고하면, 실시예에 따라 제조된 3차원 다공성 구조체는 유사한 기공율을 갖는 나노리플렛 구조체에 비하여 탄성계수가 10배 정도 높고, 푸아송 비가 음의 값이 된다는 점에서 강성과 인성을 동시에 갖는 것을 알 수 있었다.

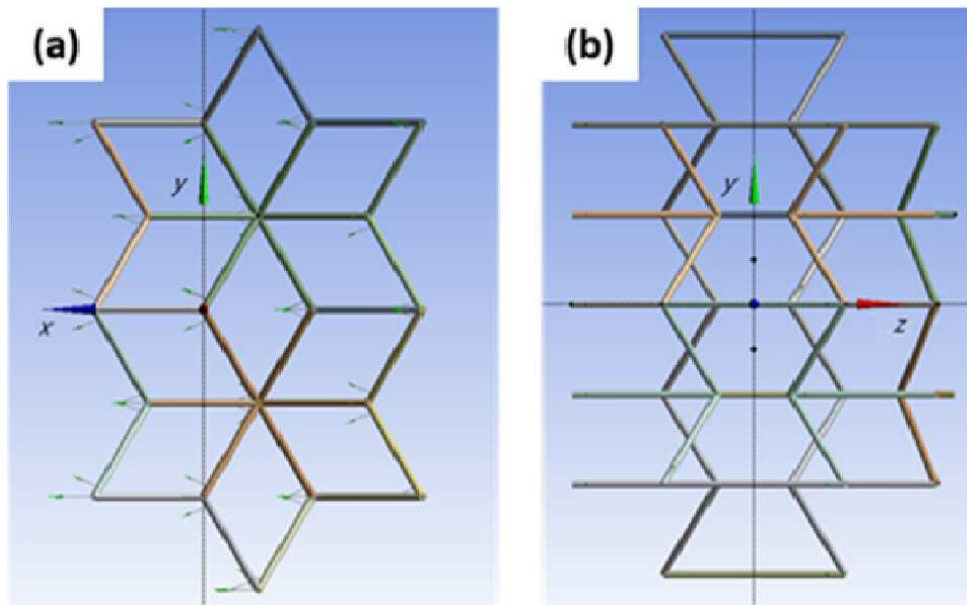
[0122] 또한, 음의 푸아송 비를 갖기 때문에 기계적인 관점에서 충격흡수재로서의 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

도면

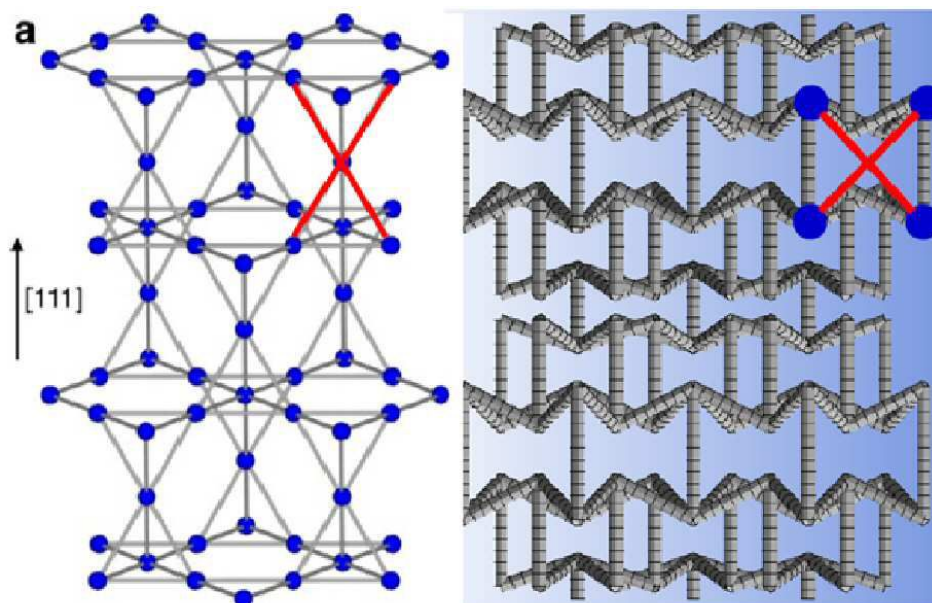
도면1



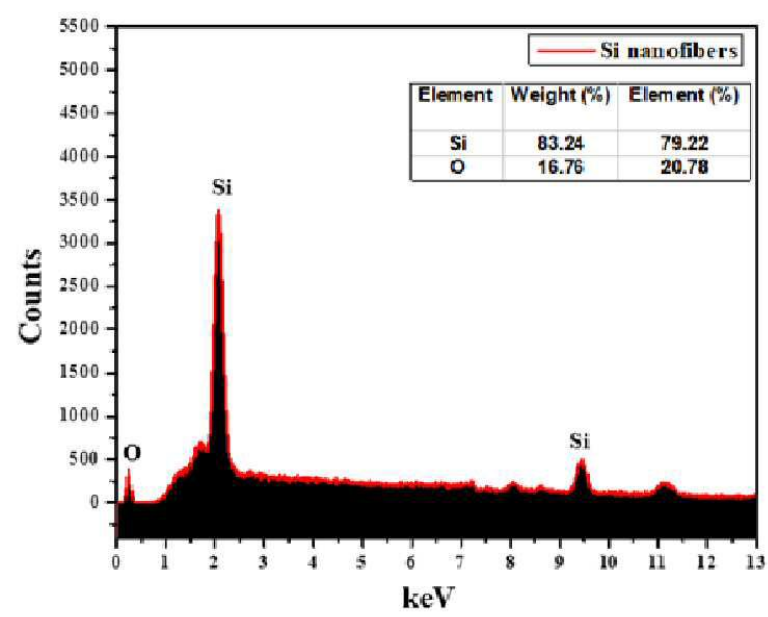
도면2



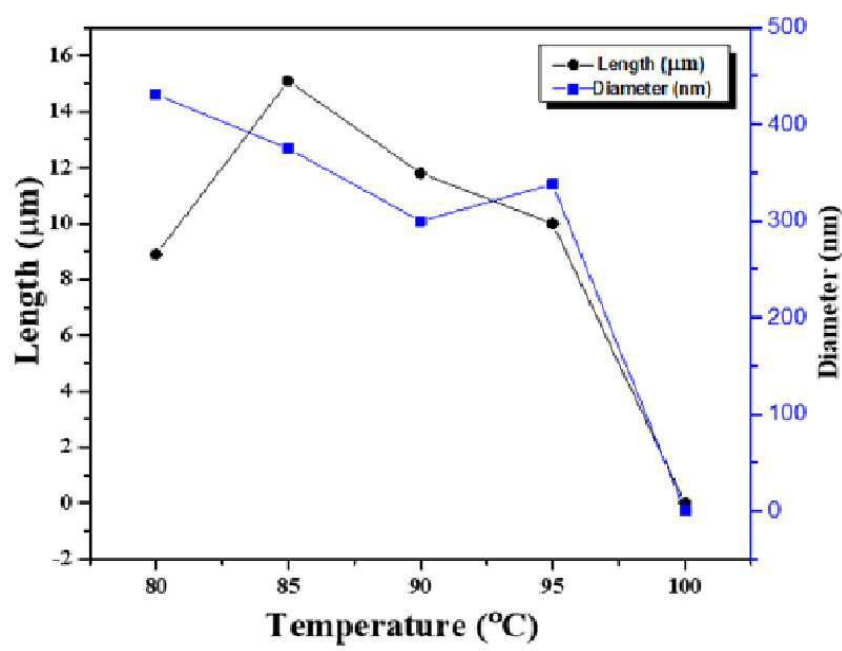
도면3



도면4



도면5



도면6

