변형에 의한 패턴변화를 활용한 음의 포아송비 다공성 구조

오 명 훈¹ · 최 명 진¹ · 변 태 욱² · 조 선 호^{1*}

¹서울대학교 조선해양공학과, ²호서대학교 벤처대학원 융합공학과

Porous Structures with Negative Poisson's Ratio using Pattern Transformation Triggered by Deformation

Myung-Hoon Oh¹, Myung-Jin Choi¹, Taek Byun² and Seonho Cho^{1*}

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

²Department of Convergence Technology, Graduate School of Venture, Hoseo University, Seoul, 06724, Korea

Abstract

In this paper, using a pattern transformation triggered by deformation, we propose a porous structure that exhibits the characteristic of negative Poisson's ratio in both tension and compression. Due to the lack of torque for rotational motion of ligaments, the existing porous structure of circular holes shows positive Poisson's ratio under tension loading. Also, the porous structure of elliptic holes has a drawback of low durability due to stress concentration. Thus, we design curved ligaments to increase the rotational torque under tension and to alleviate the stress concentration such that strain energy is uniformly distributed in the whole structure. The developed structure possesses better stiffness and durability than the existing structures. It also exhibits the negative Poisson ratio in both compression and tension of 10% nominal strain. Through nonlinear finite element analysis, the performance of developed structure is compared with the existing structure of elliptic holes. The developed structure turns out to be significantly improved in terms of stiffness and durability.

Keywords : negative poisson's ratio, pattern transformation, porous structures, finite element analysis

1. 서 론

양의 포아송 비를 갖는 일반적인 재료의 경우, 수축상태에서는 하중에 수직인 방향으로 재료가 팽창하고, 인장상태에서는 그 반대의 현상이 관찰된다. 포아송 비 ν 는 $-\Delta y/\Delta x$ 로 정의되며, 음의 포아송 비(negative poisson's ratio) 구조는 재료의 물성치가 아닌 구조 형상의 특성으로 인하여 재료가 수축상황에 놓였을 때 하중에 수직인 방향으로 수축하며, 인장 상황에서 팽창하게 되는 구조를 말한다. 음의 포아송비 구조는 Lakes(1987)에 의해 제안된 이래로 다양한 형태로 개발되어 왔다. Mullin 등(2007)은 평면에 원형 구멍이 규칙적으로 배치된 격자구조에 압축하중이 가해지면, 변형에 의해 구멍 사이의 연결선(ligament)의 회전이 발생하게 되고 결과적으로

타원형 구멍들이 직교 배열된 형태로 패턴이 변화함을 발견하였다. 그들은 유한요소해석 및 실험적 검증을 수행하였으며, 이 현상을 가역 불안정성(reversible instability)에 의한 패턴 변화(pattern transformation)라고 명명하였다. Bertoldi 등(2008)은 원형구멍을 갖는 모델에 대해 첫 번째 고유모드(eigenmode) 방향으로 초기결함(initial imperfection)을 부여한 후 비선형 유한요소해석(finite element analysis)을 통해 후-패턴변화(post-transformation) 해석을 수행하였다. 그리고 무한히 반복되는(infinitely periodic) 구조에 대한 해석을 위해 단위 체적요소(RVE: representative volume element)와 주기적 경계조건(periodic boundary condition)을 사용하였다. 또한, Bertoldi 등(2010)은 이러한 패턴 변화가 음의 포아송 비를 유발함을 발견하였다. 그러나 이러한 원형

* Corresponding author:

Tel: +82-2-880-7322; E-mail: secho@snu.ac.kr

Received May 11 2017; Revised July 17 2017;

Accepted July 19 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

구멍을 이용한 구조는 인장하중 하에서는 연결선의 회전이 잘 발생하지 않아서 포아송 비가 양의 값만을 갖게 되는 한계점을 가지고 있었다.

다공성 재료(porous material)에서 연결선의 회전을 이용하여 인장하중 하에서 음의 포아송 비를 구현하고자 하는 노력이 계속되어 왔다. Taylor 등(2014)는 얇은 타원형 구멍을 인접한 타원끼리의 장축이 수직이 되도록 배치하여 인장하중 하에서의 음의 포아송 비 구조를 제안하였으며, 타원의 종횡비(aspect ratio)에 따른 포아송 비의 변화를 관찰하였다. Poźniak 등(2016)은 빈 공간이 아닌 타원형 봉입물(inclusion)을 도입하였으며, 봉입물과 모체(matrix)의 영률(young's modulus) 비율 및 봉입물의 종횡비에 따른 포아송 비의 변화를 관찰하였다. Shan 등(2015)은 Kagome-cut과 같은 여러 가지 주기적 절개(cut) 패턴 구조를 활용하여 인장하중 하에서 음의 포아송 비 구조를 제안하였다. Gatt 등(2015)는 기존에 널리 알려진 회전 사각판(rotating square) 모델이 길이등급(length scale)에 걸쳐 계층적으로(hierarchically) 배열된 구조를 제안하였다. 그러나 이러한 구조들은 모두 짧은 연결선에 변형 에너지(strain energy)가 집중되고, 나머지 영역은 거의 강체회전(rigid body rotation)에 가까운 변형을 나타낸다. 이로 인하여, 구멍 주변부에 응력집중 현상이 심각하게 발생하므로 내구성(durability)이 매우 좋지 않은 문제점이 있었다. 다시 말해, 기존의 연구들은 음의 포아송 비를 구현하는 것 자체에만 집중하여 구조물 전반의 내구성 및 강성(stiffness)이 저하되는 한계점을 갖고 있었다.

본 논문에서는 휘어진 연결선 형상을 도입하여 압축과 인장 모두에서 음의 포아송 비를 나타내는 구조를 제안한다. 이러한 구조는 단위 질량당 변형에너지 흡수량을 높여 전반적인 강성을 개선 시킬뿐만 아니라 연결선의 면적을 증대하여 응력집중 현상을 완화하여 내구성의 증가 역시 기대할 수 있다. 향후 형상최적화를 통해 더욱 개선될 여지가 있으며 의공학 분야의 스텐트(stent)와 같은 다양한 분야에서 널리 활용될 수 있을 것이다.

2. 휘어진 연결선(ligament) 기반의 제안 모델

Mullin 등(2007)은 원형 구멍을 갖는 다공성 구조에 압축 하중 가해지면, 좌굴(buckling)에 의해 연결선의 회전 모멘트가 발생함을 관찰하였다. 이러한 좌굴, 즉 불안정성(instability)에 의한 패턴 변화는 두 가지 단점을 갖는다. 첫째, 연결선의 회전 방향을 예측하기 힘들기 때문에 시뮬레이션 및 실험에서 일관된 방향의 패턴 변화를 얻기 위해서는 특정 방향으로 어느 정도 크기의 초기 결함을 부여하여야 한다. 둘째, 인장 하중 하에서는 불안정성이 없으므로 연결선의 회전이 발생하지

(a) Rotational mechanism by eccentric loads

(b) Proposed design for porous materials

Fig. 1 Porous material structure

않는다. 이러한 단점들을 극복하기 위하여 본 논문에서는 Fig. 1(a)과 같이 초기 설계에서 어느 정도 회전된 형태의 연결선을 사용하였다. 이를 통해 압축 및 인장 시에 연결선의 중심을 기준으로 편심 하중(eccentric load)이 작용하여 불안정성 없이 연결선의 회전이 발생할 수 있다. 이러한 연결선들을 반복구조로 사용하여 얻은 다공성 구조의 최종 설계형상은 Fig. 1(b)와 같으며, 인접한 구멍들이 서로 직교하도록 배열되었다.

Fig. 1과 같은 제안 모델은 다양한 방식의 설계변수 매개화(design parameterization)를 고려하기 위하여 두 가지 방식으로 표현되었다. 첫째는 원호(circular arc)를 활용하였고, 설계 변수는 원호의 반지름으로 설정하였다. 두 번째는 NURBS(non-uniform rational b-spline) 곡선을 활용하였으며, 설계변수는 조정점의 위치로 하였다(Ahn and Cho, 2010).

2.1 원호(circular arc)를 활용한 형상 매개화

Fig. 2에 나타난 것과 같이 구멍의 형상은 원호를 사용하여 구현하였으며, 각 구멍은 반지름(R) 6mm를 가지는, 4개의 사분(quarter) 원호로 구성되어 있다. 각 원호의 교점에서 첨점이 나타나지 않도록 반지름(r) 1mm의 작은 원호 형상의 이음부를 도입하여 응력집중 현상을 방지하였다. 이러한 원호의 반지름 R의 변화에 따른 구조물의 포아송 비의 변화를 관찰하게 된다.

Fig. 2 Shape design of hole using circular arcs

상용 유한요소 해석코드인 ANSYS를 이용하여 인장과 압축 해석을 수행하였으며, 2차의 형상함수 기반의 6-절점 삼각형 요소(plane183)를 이용하였다. Neo-Hookean 모델 기반의 초탄성 재료(hyper-elastic material)를 사용하였으며, 해당 변형에너지 함수(strain energy function)는 식 (1)과 같다 (Ansys Inc.; Mase and Mase, 1999).

$$\Psi = \frac{\mu}{2} \{tr(\mathbf{C})\} - \mu \ln J + \frac{K}{2} (\ln J)^2 \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{C} \equiv \mathbf{F}^T \mathbf{F}$ 그리고 $J \equiv \det \mathbf{F}$ 이며 $\mathbf{F}$ 는 변형구배(deformation gradient)이다. 전단강성(shear modulus) μ 는 38461(Pa), 비압축성(incompressibility) 매개변수 d 는 $2.4 \times 10^{-5} (\text{Pa}^{-1})$ 를 사용하였다.

전체 모델은 Fig. 1(b)와 같이 9×9의 구멍 배열을 갖고, 유한요소해석에서는 대칭성을 활용하여 사분 모델에 대해서만 해석을 수행하였다. 구멍의 중심간 간격은 10mm이며, 하중이 가해지는 우측 경계에는 과도한 변형을 방지하기 위하여 2mm 두께를 추가하였다. 압축과 인장하중 각각에서 4.7mm 크기의 변위하중을 50회에 걸쳐 점진적으로 가하였다.

Fig. 3 Hole shapes in proposed and existing designs

기존의 원형 또는 타원형 구멍 모델의 경우 연결선의 면적이 매우 작을 뿐만 아니라 대부분의 변형에너지가 연결선에서 발생하였다. 이로 인해 응력집중 현상이 발생하고 구조물의

내구성이 저하되었다. 반면에 제안된 모델에서는 연결선의 두께가 균일하고 그 길이 역시 비교적 길기 때문에 변형 에너지와 응력을 분산시킬 수 있는 이점이 있다. 제안 모델의 성능을 검증할 비교 대조군으로서, 기존 논문(Taylor *et al.*, 2014; Poźniak *et al.*, 2016)에서 제안된 타원형 구멍 모델을 사용하였다. 제안 모델과 기존 모델의 형상을 Fig. 3에서 비교하였다. 기존 타원 모델의 장축과 단축 길이는 Fig. 2에 표시된 제안 모델의 R값과 다음과 같은 관계를 갖는다

$$a = R, b = (\sqrt{2} - 1)R \quad (2)$$

2.2. NURBS 곡선을 활용한 형상 매개화

원호 기반 모델에 비하여 연결선의 곡률 변화를 더 크게 하기 위해 NURBS 곡선을 활용하여 제안모델의 구멍 형상을 매개화하였다. Fig. 4(a)와 같이 2차 NURBS 기저함수와 3개 조정점을 사용하여 구멍 형상을 구성하는 곡선을 표현하였다.

(a) Variation of control point (b) Comparison of designs

Fig. 4 Shape representation of hole using NURBS

설계변수는 3개의 조정점 중 가운데 점의 위치(d)로 설정하였으며, 구멍을 구성하는 4개의 곡선이 동시에 변화하도록 매개화하였다. 따라서 Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이 d가 증가할수록 구멍 형상은 더 얇고 길어지며, 연결선은 더욱 휘게 된다.

3. 비선형 유한요소해석 결과

제안 모델이 음의 포아송 비를 나타냄을 검증하기 위하여 원호 기반 매개화 모델을 구성하였으며, 비선형 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 초기 형상과 변형 후 형상을 비교하였을 때, X-방향 압축 하중에 대하여 Y-방향으로 수축이 지배적으로 발생하였고, 또한 X-방향 인장하중에 대하여 Y-방향 팽창이 지배적으로 발생하였음을 알 수 있다. 이는 제안된 모델이 음의

Fig. 5 Nonlinear FEA results for proposed model

포아송 비 거동을 효과적으로 잘 나타내고 있음을 의미한다. 압축의 경우에는 연결선이 회전하면서 그 곡률이 커짐을 알 수 있으며 인장에서는 연결선이 압축의 경우와는 반대방향으로 회전하며 퍼지게 되는데, 이로 인해 구멍의 형태가 사각형에 가까워지는 패턴 변화가 발생하게 된다.

전체 구조의 포아송 비는 Bertoldi 등(2008)에서 제시된 간이식을 활용하였다. 경계의 영향을 피하기 위하여 Fig. 2에 빨간색 동그라미로 표시한 9개의 구멍의 중심 좌표의 변화를 활용하여 포아송 비를 예측하게 된다. 각 구멍의 중심 간의 X -방향 거리와 Y -방향 거리($i, j=1, 2$)를 이용하여 식 (3)과 같이 4개의 구멍 쌍(pair)의 포아송 비를 구하였다.

$$v_{i,j} = \frac{\Delta Y_{i,j} - \Delta Y_{i,j}^0}{\Delta X_{i,j} - \Delta X_{i,j}^0}, (i, j=1, 2) \quad (3)$$

그리고 이 4개의 $v_{i,j}$ 의 평균값으로써 전체 구조의 포아송 비를 구하였다. 이를 통해 각 하중 단계별로 전체 구조의 포아송 비를 얻을 수 있다.

3.1. 원호 매개화 모델과 타원형 구멍 모델과의 비교

이 절에서는 원호 기반으로 형상을 매개화된 제안 모델과 기존 연구(Taylor *et al.*, 2014; Poźniak *et al.*, 2016)에서 제시된 타원형 구멍 모델의 성능을 비교한다. 비교 기준이 되는 성능은 식 (3)을 이용하여 얻은 포아송 비, 그리고 구조물의 내구성과 관련이 있는 폰-미세스(von-Mises) 응력 분포이다. 2.1절에서와 같이 설계변수는 원호의 반지름(R)으로 설정하였으며, R 이 클수록 구멍의 크기가 커지고 연결선의 두께가 얇아지게 된다. Fig. 6을 보면 제안 모델과 타원 모델 모두 R 값이 커짐에 따라 압축 하중에서의 포아송 비의 절대값이 커짐을 알 수 있다. 이는 구멍이 커지면서 연결부위가 얇아짐에 따라 연결선의 회전이 쉽게 발생하기 때문이다. 또한, 공칭 변형률이 증가할수록 포아송 비의 절대값이 증가하는데, 이는 Bertoldi 등(3)에 제시된 원형 구멍 모델에 대한 해석 결과와 일치된 경향이다. 제안 모델과 타원형 구멍 모델의 포아송 비의 크기는 식 (3)이 간이식임을 고려하였을 때 유사한 수준이다.

Fig. 7에서는 인장 시에도 압축과 마찬가지로 구멍의 크기가 커짐에 따라 포아송 비의 절대값이 증가하였고 이는 연결선의 두께가 얇아짐에 따른 현상이다. 압축과는 달리 인장에서는 공칭 변형률이 증가할수록 포아송 비가 점차 양의 값으로 변화하는

(a) Circular arc parameterization model

(b) Elliptic hole model

Fig. 6 Poisson ratio v , hole size(compression)

(a) Circular arc parameterization model

(b) Elliptic hole model

Fig. 7 Poisson ratio v. hole size(tension)

Fig. 9 Von-Mises stress distribution in tension

Fig. 8 Von-Mises stress distribution in compression

경향을 보인다. 이는 Pozniak 등(2016)에서 제시된 경향과 일치한다. 제안 모델과 타원 모델의 포아송 비의 크기는 식 (3)이 간이식임을 고려하였을 때 유사한 수준을 보인다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 압축과 인장 시 폰-미세스 응력 분포를 제안 모델과 타원 모델에 대하여 동일한 스케일에서 도시한 결과이다. 압축과 인장 모두에서 타원 모델은 연결선에 응력이 집중된 형태로 나타났으며 이로 인하여 반복적인 하중이 가해질 경우 연결선에서의 파괴가 발생할 수 있다. 반면에 제안 모델의 경우 연결선이 타원에 비해 길어지면서 응력이 전반적으로 분산된 것을 알 수 있다. 즉, 제안 모델이 구조물의 내구성 측면에서 훨씬 개선된 결과를 나타냄을 알 수 있다.

3.2 NURBS 매개화 모델과 타원형 구멍모델과의 비교

이 절에서는 NURBS 곡선 기반 형상 매개화된 제안 모델과 기존의 타원형 구멍 모델의 성능을 비교하고자 한다. 비교 기준이 되는 성능은 식 (3)을 이용해 계산된 포아송 비와 구조물의 강성과 관계된 변형에너지, 그리고 폰-미세스 응력분포이다. 2.2절에서 언급한 바와 같이 설계 변수는 제안 모델의 경우에는 구멍의 각 면의 가운데 조정점의 위치(d)이고, 타원 모델은 종횡비이다. 제안 모델과 타원 모델의 면적, 즉 재료량이 거의

(a) NURBS curve parameterization model

(b) Elliptic hole model

Fig. 10 Poisson ratio v. hole shape(compression)

동일하도록 하였으며, 두 모델 모두 설계 변경 시 전체 면적은 일정한 상태에서 구멍의 형상만 변화하도록 하였다.

Fig. 10의 압축 하중의 경우에서 볼 수 있듯이 조정점의 위치를 나타내는 d 값이 증가할수록, 즉 구멍의 형상이 얇고 길어질수록 포아송 비의 절대값이 증가한다. 타원 모델에서도 종횡비가 작아질수록(1에서 멀어질수록), 즉 타원이 얇고 길어질수록 포아송 비의 절대값이 증가한다. 타원 모델의 경우 $A=0.8$ 과 $A=0.9$ 인 경우 구멍의 형상이 원에 가까워지면서 낮은 공칭 변형률 영역에서 양의 포아송 비가 나타난다. 반면에 제안모델은 모든 d 값에 대하여 음의 포아송 비를 나타낸다.

Fig. 11의 인장의 경우에서도 압축과 마찬가지로 제안 모델의 경우 d 값이 증가할수록, 타원 모델의 경우 종횡비가 감소할수록(1에서 멀어질수록), 구멍의 형상이 얇고 길어지면서 포아송 비의 절대값이 커진다. 제안 모델의 경우에 원호로 매개화된 경우와 달리 변형률 증가에 따른 포아송 비의 변화율이 완만해지며 높은 공칭 변형률 영역에서도 비교적 큰 절대값의 음의 포아송 비가 나타났다. 이는 연결선의 곡률 증가에 따라 높은 공칭 변형률 범위에서도 여전히 편심 하중에 의한 회전 모멘트가 유지되어 연결선의 회전이 계속 발생하기 때문이다.

다음으로 Fig. 12에서는 변형에너지의 변화를 계산하여 제안 모델과 타원 모델의 결과를 비교하였다. 두 모델의 면적(사용

(a) NURBS curve parameterization model

(b) Elliptic hole model

Fig. 11 Poisson ratio v. hole shape(tension)

(a) Compression

(b) Tension

Fig. 12 Strain energy in proposed and elliptic hole models

Fig. 13 Von-Mises stress distribution in compression

Fig. 14 Von-Mises stress distribution in tension

재료량)이 거의 동일한 상태이고, 변위 하중을 가하였으므로, 변형에너지가 클수록 구조물이 더 많은 에너지를 흡수할 수 있는 높은 강성을 가진 구조라고 생각할 수 있다. Fig. 12는 공칭 변형률에 대한 전체 구조의 총 변형에너지 변화를 나타낸다. 압축과 인장 모든 경우에 대하여 제안 모델이 타원 모델에 비해 더 많은 변형에너지를 흡수할 수 있다. 이는 제안 모델의 강성이 기존 타원형 구멍 모델보다 더 크다는 것을 의미하며 개선된 내구성을 기대할 수 있음을 시사한다.

또한 내구성 측면에서의 비교를 수행하기 위해 제안 모델과 타원형 모델의 폰-미세스 응력 분포를 동일한 스케일에서 관찰하였다. Fig. 13에서는 압축 하중의 경우인데 타원형 모델에서는 장축 부근에서 높은 응력이 발생되고 있음을 알 수 있다. 반면에 제안 모델에서는 구조물에서 전체적으로 고른 응력 분포를 보인다. 이는 변형에너지를 효율적으로 흡수하는 최적 구조임을 시사한다. Fig. 14의 인장 하중의 경우에서도 제안 모델의 경우 타원 모델에 비해 연결선의 면적이 넓어지면서 응력이 전체적으로 골고루 분포하는 것을 알 수 있다. 타원 모델의 경우 짧은 연결선에서의 응력 집중 현상이 두드러진다.

5. 결 론

본 논문에서는 변형에 의한 패턴변화를 이용하여 압축과 인장 하중 모두에서 음의 포아송 비를 나타내는 다공성 구조를 제안하였다. 기존의 논문에서 제시된 모델이 갖는 불안정성의 한계점을 극복하기 위하여 휘어진 연결선을 도입함으로써 편심 하중이 가해지도록 하였다. 이를 통해 불안정성 없이 일관된 패턴변화를 압축과 인장 모두에서 구현할 수 있었다. 이러한 제안 모델은 원호와 NURBS 곡선 두 가지에 의해 형상 매개화 되었으며, 변형에 따른 포아송 비의 변화 양상은 기존 논문에서 제시된 타원형 모델과 유사한 형태로 나타났다. 본 논문에서 제안하는 모델은 크게 두 가지 측면에서 이점을 갖는다. 첫째, 압축과 인장 양방향 모두에서 10%의 공칭 변형률 내에서 안정적인 음의 포아송 비를 나타낸다. 특히, NURBS 곡선으로 매개화된 제안 모델에서 연결선이 곡률이 증대됨에 따라 인장 하중 시 높은 공칭 변형률에서도 편심 하중에 의한 회전 모멘트가 높게 유지되어 포아송 비의 절대값이 크게 나타났다. 둘째, 휘어진 연결선의 도입을 통해 연결선의 면적이 증대됨에 따라 응력집중 현상이 완화되었고 동일한 재료량과 변위 하중량에서 변형에너지를 구조물 전반에서 균일하게 더 많이 흡수할 수 있다. 이는 변형에너지 계측 및 폰-미세스 응력분포 관찰을 통해 검증되었으며, 기존 타원형 구멍을 이용한 모델에 비해 제안 모델이 현저히 개선된 강성과 내구성을 가짐을 의미한다.

References

- Ahn, S.H., Kim, M.G., Cho, S.H. (2010) Isogeometric Shape Design Optimization of Structures under Stress Constraints, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 23(3), pp.275~281.
- ANSYS version 5.7 - User's Manual, ANSYS Inc.
- Bertoldi, K., Boyce, M.C., Deschanel, S., Prange, S.M., Mullin, T. (2008) Mechanics of Deformation-Triggered Pattern Transformations and Superelastic behavior in Periodic Elastomeric Structures, *J. Mech. & Phys. Solids*, 56, pp.2642~2668.
- Bertoldi, K., Reis, P.M., Willshaw, Stephen, Mullin, T. (2010) Negative Poisson's Ratio behavior Induced by an Elastic Instability, *Adv. Mater.*, 22, pp.361~366.
- Gatt, R., Mizzi, L., Azzopardi, J.I., Azzopardi, K.M., Attard, D., Casha, A., Briffa, J., Grima J.N. (2015) Hierarchical Auxetic Mechanical Metamaterials, *Scientific Reports*, 5.
- Lakes, R.S. (1987) Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio, *Sci.*, 235, pp.1038~1040.
- Mase, G.T., Mase, G.E. (1999) Continuum Mechanics for Engineers, CRC Press.
- Mullin, T., Deschanel, S., Bertoldi, K., Boyce, M.C. (2007) Pattern Transformation Triggered by Deformation, *Phys. Rev. Lett.*, 99, 084301.
- Poźniak, A.A., Wojciechowski, K.W., Grima, J.N., Mizzi, L. (2016) Planar Auxeticity from Elliptic Inclusions, *Compos. Part B: Eng.*, 94, pp.379~388.
- Shan, S., Kang, S.H., Zhao, Z., Fang, L., Bertoldi, K. (2015) Design of Planar Isotropic Negative Poisson's Ratio Structures, *Extreme Mech. Lett.*, 4, pp.96~102.
- Taylor, M., Francesconi, L., Gerendas, M., Shanian, A., Carson, C., Bertoldi, K. (2014) Low Porosity Metallic Periodic Structures with Negative Poisson's Ratio, *Adv. Mater.*, 26, pp.2365~2370.

요 지

본 논문에서는 변형에 의해 유발된 패턴변화(pattern transformation)에 기반하여 압축(compression)과 인장(tension) 하중 모두에서 음의 포아송 비(negative poisson's ratio)를 나타내는 다공성(porous) 구조를 제안한다. 기존에 개발된 원형 구멍을 이용한 구조는 연결선(ligament)의 회전 모멘트 부족으로 인해 인장 시 양의 포아송 비를 나타내는 한계점이 있었으며, 타원형 구멍을 이용한 구조는 응력집중 현상으로 인하여 내구성(durability)이 약한 문제점이 있었다. 이에 본 연구에서는 휘어진 연결선의 배열을 통하여 인장하중 하에서의 회전 모멘트를 증가시키는 동시에 응력집중 현상을 완화하고 변형에너지(strain energy)를 구조물 전반에서 고르게 흡수하도록 설계하였다. 이를 통해 10%의 공칭 변형률(nominal strain) 범위 내의 압축과 인장 모두에서 음의 포아송 비를 가지며, 기존 모델에 비하여 강성(stiffness)과 내구성이 개선된 구조를 개발하였다. 비선형 유한요소해석을 통하여 기존 타원형 구멍 모델과의 비교를 수행하였으며 제안된 모델이 구조의 강성과 내구성 측면에서 현저히 개선됨을 확인하였다.

핵심용어 : 음의 포아송 비, 패턴변화, 다공성 구조, 유한요소해석