

빔 요소를 이용한 리엔트런트 오그제틱 구조에 대한 전산구조설계

신재광^{1*} · 서동식²

¹서울대학교 기계항공공학부, ²서울대학교 기계항공공학부

초록

푸아송비(Poisson's ratio)는 종방향 변형률에 대한 횡방향 변형률의 비로, 우리 주위 대부분의 재료들은 양의 푸아송비를 지닌다. 그러나 재료가 특정한 격자구조를 이루도록 설계할 경우 구성물질이 양의 푸아송비를 가지더라도 거시적으로는 음의 푸아송비를 구현할 수 있으며, 이러한 극한물성물질(metamaterial)을 오그제틱 물질(auxetic material)이라고 부른다. 이전까지 오그제틱 물질을 구현하기 위한 많은 메커니즘들이 개발되고 역학적, 수치적으로 해석되어 왔다. 이 논문에서는 가장 대표적인 오그제틱 구조인 리엔트런트(re-entrant) 오그제틱 구조를 빔 구조물로 모델링하여 유한요소해석을 수행하고 주요 설계 변수인 리엔트런트 각에 따라서 푸아송비와 유효 탄성계수가 어떻게 변화하는지 확인하였다.

Keywords : auxetic material, negative poisson's ratio, re-entrant honeycomb, beam structure, metamaterial

1. Introduction

물질이 가지는 대표적인 물성 중 하나인 푸아송비(Poisson's ratio)는 종방향 변형률에 대한 횡방향 변형률의 비에 음수를 취한 것으로 정의된다. 대부분의 물질들은 인장력이 가해지게 되면 단면의 넓이가 작아지게 되며, 압축력이 가해지게 되면 단면의 넓이가 커지게 되므로 양의 푸아송비를 가진다. 대표적으로 고무는 0.5, 금속과 유리는 0.3 정도의 푸아송비를 가진다. 일반적인 물질이 가지는 이런 기계적 거동은 부피의 보존이라는 측면에서 물리적인 직관에 부합한다. 하지만 등방성 물질은 -1에서 0.5 사이의 푸아송비를 가질 수 있는 것이 이론적으로 밝혀져 있어(Lempriere, 1968) 음의 푸아송비를 가지는 물질은 존재할 수도 있는 것으로 여겨졌다.

근래에 들어서 물질의 미시적인 구조를 이용하여 구성 물질이 양의 푸아송비를 가지더라도 거시적으로 음의 푸아송비를 구현하는 물질들이 개발되었다.(Lakes, 1987) 이렇게 음의 푸아송비를 가지는 물질들을 오그제틱 물질(auxetic material), 이를 실현하는 구조를 오그제틱 구조(auxetic structure)라고 한다. 오그제틱 물질은 음의 푸아송비를 가지

므로 물리적인 직관과 다르게 인장 시에는 횡방향으로 팽창, 압축시에는 횡방향으로 수축하는 거동을 보인다.(Fig. 1) 이러한 거동의 특징으로 인해서 오그제틱 물질은 일반물질 대비

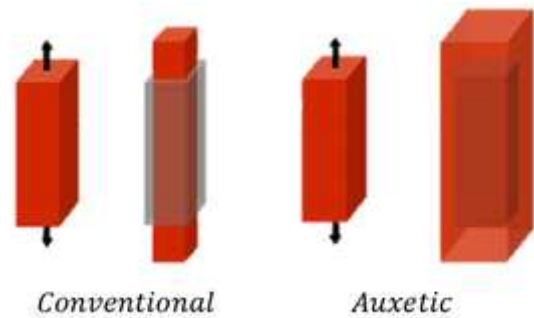


Fig. 1 Conventional and auxetic material on axial load

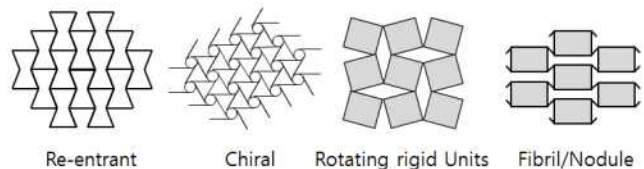


Fig. 2 Geometry and mechanism of several auxetic structure

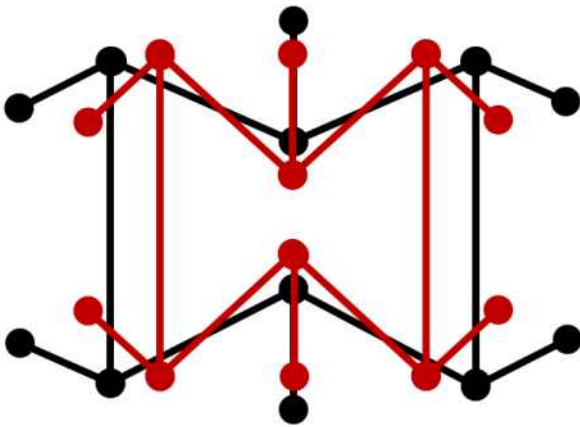


Fig. 3 Auxetic behavior of re-entrant unit shell

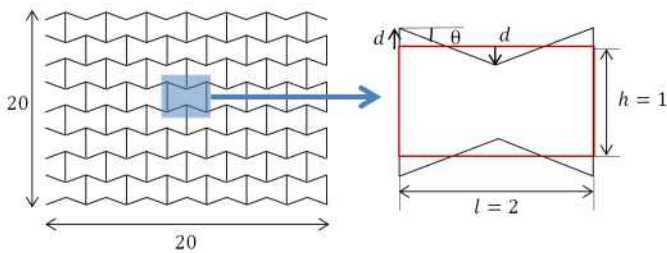


Fig. 4 Geometry of structure

동일 밀도에서 높은 전단계수와 파괴인성, 뛰어난 에너지 흡수 능력을 가질 수 있어 공학적으로 응용할 가치가 있다. (Underhill, 2014)

음의 푸아송비를 구현하는 오그제틱 메커니즘에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으며 현재까지 리엔트런트(re-entrant) 구조 (Lakes, 1987), 키랄(chiral) 구조 (Prall, 1997), 회전강체(rotating rigid unit) 구조 (Grima, 2000), 피브릴/노듈(fibril/nodule) 메커니즘 (Caddock, 1989) 등 여러 오그제틱 메커니즘이 제시되었다. (Fig. 2) 이중 가장 대표적이고 선도적인 오그제틱 메커니즘은 리엔트런트 구조 오그제틱 물질이다. 리엔트런트 구조 오그제틱 물질은 안으로 굽혀진(re-entrant) 변을 가지는 다각형 단위체로 구성된 격자 구조를 가진다. 이런 격자 구조에 하중이 가해지면 안으로 굽혀진 변이 펼쳐지거나 더욱 굽혀지면서 주변 격자와의 거리를 변화시키며 거시적인 오그제틱 거동을 일으킨다. (Fig. 3)

리엔트런트 구조가 가지는 푸아송비를 확인하기 위한 역학적(Grima, 2013), 수치적 해석(Elife, 2012)이 많이 수행되어 왔다. 하지만 역학적 해석의 경우 리엔트런트 구조의 기구학적 거동에 집중하여 리엔트런트 구조를 강체막대와 이를 잇는 힌지로 모델링하여 리엔트런트 구조가 가지는 탄성 변형을 포함하지 못하며 수치적 해석의 경우는 주로 2차원 평면응력요소(plane stress element) 또는 평면변형률요소(plane strain element)를 이용한 유한요소해석에 치중하고 있어 연

산효율적이지 못한 단점이 있다. 본 논문에서는 이에 대한 대안으로 리엔트런트 구조를 빔 구조물로 모델링하여 탄성 변형을 고려하면서도 2차원 요소를 이용한 해석에 비해 연산효율적인 해석을 수행하였다. 뿐만 아니라 리엔트런트 구조의 핵심 설계 변수인 리엔트런트 각을 변화시키면서 리엔트런트 구조의 푸아송비와 유효 탄성계수를 계산하였다.

본 연구에서 수행한 모든 해석은 EDISON CSD에서 제공하는 Linear Static Analysis(CASAD Solver)를 사용하여 진행하였다.

2. 본 론

이 장에서는 수행한 리엔트런트 구조 오그제틱 물질에 대한 수치적 해석에 사용한 방법에 대해서 구체적으로 소개하고 해석 결과에 대한 분석 및 그에 대한 고찰을 하고자한다.

2.1 해석 방법

EDISON CSD에서 제공하는 Linear Static Analysis(CASAD Solver) 프로그램을 사용하여 리엔트런트 오그제틱 구조에 대한 선형 정적 유한요소해석을 수행하였다. 리엔트런트 구조를 구성하는 각 변들을 하나의 빔 요소 또는 두 개의 빔 요소로 모델링하고 두 가지 케이스에 대해서 해석을 수행하였다.

우선 유한요소해석을 수행하기 이전에 해석하고자하는 리엔트런트 오그제틱 구조물의 형상을 결정하고(Fig. 4) 이에 따라 Linear Static Analysis 프로그램에 입력되는 유한요소 절점(node) 및 요소(element) 정보를 자동으로 생성하는 프로그램을 MATLAB을 이용하여 작성하였다. 또한 생성된 절점 및 요소 정보를 Linear Static Analysis에 사용되는 구문으로 바꾸어주는 자동화 프로그램을 구성하여 MATLAB 상의 정보를 쉽게 해석프로그램 구문으로 옮길 수 있도록 하였다.

완성된 자동화 코드를 이용해서 핵심 설계 변수인 리엔트런트 각에 대한 파라미터 스터디 수행했다. 리엔트런트 변위(d)를 조절하는 것으로 리엔트런트 각(θ)을 조절하였으며 리엔트런트 변위와 리엔트런트 각의 관계는 다음과 같다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{4d}{l}\right) \quad (1)$$

리엔트런트 변위를 0에서 0.4까지 0.01 간격으로 변화시켜 리엔트런트 각을 0에서 1.446 rad까지 변화시켜 해석을 수행

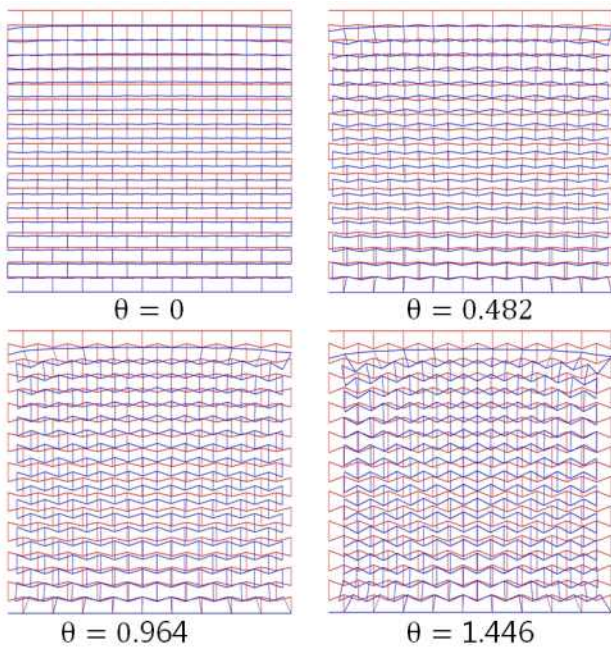


Fig. 5 Deformed shape of 1 element case
 했다. 해석이 수행된 조건은 리엔트런트 구조물의 하면에 고정 조건을 주고 상면에 수직방향 압축하중을 부가하였다. 사용된 빔요소의 탄성계수는 10^7 이며 푸아송비는 0.3, 단면의 두께는 0.1 단면의 넓이는 0.02이다.

2.2 해석 결과

해석결과를 확인하기 위해서 결과파일에서 노드별 변위를 자동으로 읽어오는 프로그램을 작성하였다. 이를 통해서 얻어진 변위를 처리하여 변형 전후의 구조물 형상을 도시해본 결과 Fig. 5, 6과 같은 변형형상을 확인할 수 있다. 변형 전후의 형상 결과를 통해서 리엔트런트 구조가 음의 푸아송비를 가지는 것을 정성적으로 확인해 볼 수 있다.

정량적으로 리엔트런트 각에 따른 푸아송비의 변화를 확인하기 위해서 구해진 결과를 적절하게 후처리하였다. 경계 조건에 의해서 구조물 상하면에서 경계효과가 일어나므로 구조물 전체에서 일관된 푸아송비를 얻을 수는 없다. 따라서 구조물의 상면의 절점들이 가지는 변위의 평균을 이용해서 종방향 유효 변형률을 결정하고 좌우면의 가운데 12개 절점의 변위의 평균을 이용해서 횡방향 유효 변형률을 결정하였다. 얻어진 변형률의 비로 유효 푸아송비를 정의하고 리엔트런트 각의 변화에 따라 이를 계산하였다. (Fig. 7)

이와 더불어 가해진 하중 정보와 종방향 변형률을 이용하여 오그제틱 구조물의 유효 탄성계수를 계산하였다. 계산된 구조물 전체의 거시적 유효 탄성계수를 구성 물질의 미시적 탄성계

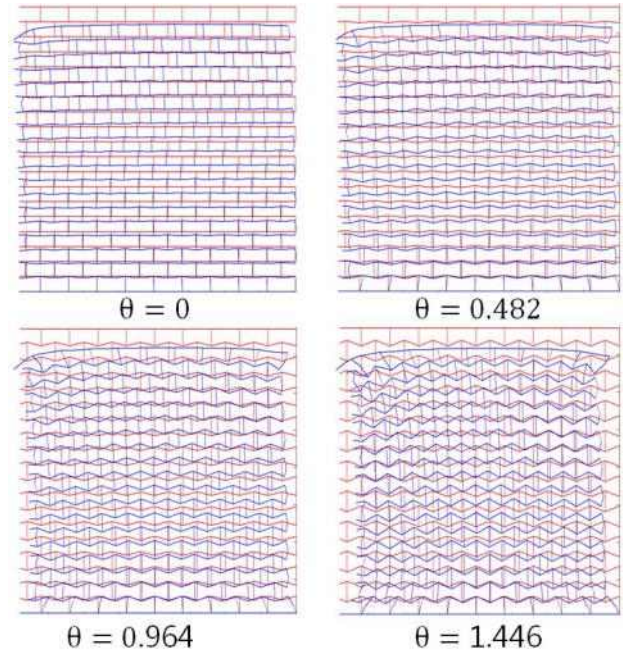


Fig. 6 Deformed shape of 2 element case

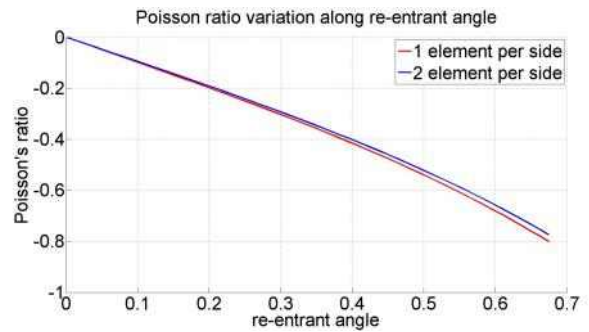


Fig. 7 Poisson's ratio

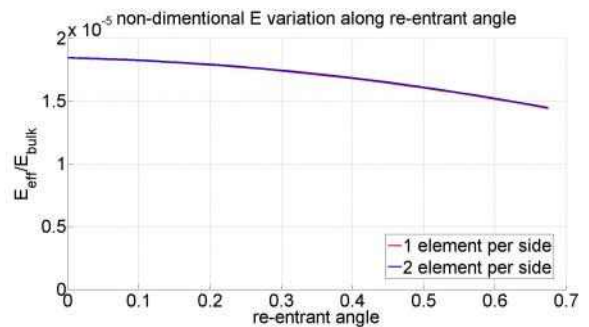


Fig. 8 non-dimensional elastic modulus

수로 나누어 무차원화 하여 리엔트런트 각에 따른 변화를 계산하였다.(Fig. 8)

2.3 고찰

빔 모델을 이용한 유한요소해석을 통해서 리엔트런트 구조가 음의 푸아송비를 가진다는 사실을 정성적으로 확인할 수 있었고 정량적으로는 최대 -0.8 의 푸아송비를 구현할 수 있음을 확인하였다. 뿐만 아니라 리엔트런트 각에 따른 푸아송비 변화를 확인해보면 리엔트런트 각이 리엔트런트 구조의 오그제틱 거동에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있고 이를 통해 리엔트런트 각이 주요한 설계 변수임을 확인할 수 있었다.

구체적으로는 리엔트런트 각이 커지면 커질수록 리엔트런트 구조의 푸아송비는 더 큰 음의 값을 가지게 되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 동시에 무차원 탄성계수는 리엔트런트 각이 커지면 커질수록 작아지게 되어 큰 푸아송비를 구현하기 위해서 리엔트런트 각을 크게 하면 리엔트런트 구조의 강성이 떨어져 하중지지 능력을 상실할 수 있다. 뿐만아니라 리엔트런트 각이 커지면 커질수록 리엔트런트 된 변들이 작은 변형률에도 컨택이 일어나게 되므로 작동범위를 축소시키는 문제가 있다. 즉, 푸아송비와 강성, 작동범위 사이에 트레이드오프(trade off)가 존재하며 리엔트런트 오그제틱 물질을 사용하는 상황에 따라 적절한 수준의 리엔트런트 각을 설정할 필요가 있다는 사실을 알 수 있다.

한 변을 구성하는 요소의 수가 하나인 경우와 두 개인 경우를 비교해보면 무차원 탄성계수의 경우는 두 경우에서 큰 차이를 보이지 않았지만 푸아송비의 경우 요소수가 하나인 경우가 둘인 경우보다 절대값이 더 크게 추정하는 것을 확인할 수 있다. 이는 요소수가 적을수록 변에서 일어나는 굽힘을 잘 해석할 수 없게 되므로 전체 해석결과가 기구학해석 결과와 비슷해지는 것으로 생각할 수 있다. 좀 더 정확한 푸아송비 계산을 위해서는 단위체를 구성하는 변들을 좀 더 많이 나누어 해석을 진행해 볼 필요가 있다.

3. 결 론

빔 요소를 이용해서 리엔트런트 구조 오그제틱 물질을 전산구조해석한 결과 리엔트런트 구조 오그제틱 물질을 빔 구조체로 모델링하여도 리엔트런트 구조 오그제틱 물질이 가지는 음의 푸아송비가 나타남을 확인할 수 있었다. 기존의 기구학적 해석이 나타내지 못하는 리엔트런트 구조 단위체의 탄성변형을 포함하면서도 동시에 적은 연산제원만으로 리엔트런트 구조 오그제틱 물질을 해석할 수 있었다. 구조체가 가지는 구체적인 구조를 단순한 빔, 판, 셸로 모델링하여 해석하는 작업은 해석 효율성 측면에서 중요한 일이며 컴퓨터가 할 수 없고 공학자만이 할 수 있는 일일 것이다. 이번 연구를 통해서 리엔트런트 오그제틱 구조를 단순한 빔 구조체로 모델링 할 수 있음을 확인했고 이를 이용하면 3차원 혹은

2차원 고체 모델로는 해석하기 힘든 거대한 규모의 오그제틱 구조나 다중계층(multi scale)에서 계층적으로 오그제틱 구조를 가지는 계층적 오그제틱 구조(hierarchical auxetic structure)와 같은 구조들에 대해서 쉽게 전산해석 할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014M3C1A6038344)

참 고 문 헌

- Caddock B. D., Evans K. E.** (1989) Microporous materials with negative Poisson's ratios. II. Mechanisms and interpretation. *Journal of Physics D: Applied Physics* 22.12 pp.1883.
- Elipe, J. C. Á., Lantada, A. D.** (2012) Comparative study of auxetic geometries by means of computer-aided design and engineering. *Smart Materials and Structures* 21.10 105004.
- Grima, J. N., Evans K.E.** (2000) Auxetic behavior from rotating squares. *Journal of Materials Science Letters* 19.17 pp.1563-1565.
- Grima, J. N., Joseph, N.,** (2013) Smart hexagonal truss systems exhibiting negative compressibility through constrained angle stretching. *Smart Materials and Structures* 22.8, 084015.
- Lakes, R.** (1987) Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science* 235.4792 pp.1038-1040.
- Lempriere, B. M.** (1968) "Poisson's ratio in orthotropic materials." *AIAA Journal* 6.11, pp.2226-2227.
- Prall D., Lakes, R.** (1997) Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of -1 . *International Journal of Mechanical Sciences* 39.3 pp.305-314.
- Underhill, Royale S.** (2014) Royale S. Defense Applications of Auxetic Materials.