유한 요소 해석을 이용한 Tetra Chiral Honeycomb 구조의 등가 물성치에 대한 연구

박 정 훈[1†]

[1]한국과학기술원 기계공학과

Study on equivalent material property of Tetra Chiral Honeycomb structure using finite element method

Jung-Hoon Park[1†]

Abstract

자연에서 안정적이고 경제성이 높은 구조로 벌집 구조가 많이 언급이 된다. 이러한 벌집 구조의 특징으로 인해 많은 공학자들이 그 구조를 모방하여 적용하고 있다. 벌집 구조에도 다양한 종류가 존재하지만 그 중 음의 푸아송 비(Poisson's ratio)를 갖는 Chiral Honeycomb 구조가 많이 연구되고 있다. 푸아송 비는 물질이나 구조의 고유한 물성치로 종, 횡 방향의 변형율로 나타내며 이 값으로 외부 조건으로부터의 변형을 예측 할 수 있게 된다. 흔히 푸아송 비는 양의 값을 가지지만 Chiral Honeycomb 구조는 음의 푸아송 비를 가져 기존의 구조와는 다른 기계적 성질을 가지게 된다. 이 논문에서는 Chiral Honeycomb 구조 중에서도 4개의 관절(ligament)를 가지는 Tetra Chiral Honeycomb 구조에 대해 EDISON용 CASADsovler 프로그램을 통해 유한 요소 해석을 수행하여 등가 물성치를 구해 보았으며 기존 실험의 값들과 비교를 통해 해석을 위해 필요한 적절한 대표 체적에 대해 확인해 보았다.

Keywords : *section optimization, grid search, cross-section analysis, helicopter blade*

1. 서 론

자연의 벌들의 집들에서 유래된 벌집 구조(Honeycomb Structure)는 항공 우주 및 자동차 산업 분야에서 강하고 가벼운 합성물 구조를 위해 널리 이용되고 있다. 벌집 구조는 속이 빈 구조로 힘이 쉽게 분산되는 구조여서 견고하고 안정적이며 최소한의 재료로 최대한의 공간을 확보 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 벌집 구조는 충격에 의한 충격 에너지를 잘 흡수 할 수 있는 특징을 가지고 있어 많은 공학 분야에 쓰이고 있다. 이러한 벌집 구조 중 Chiral Honeycomb 구조는 음의 푸아송 비(Negative Poisson's Ratio)를 가질 수 있다는 것이다. 푸아송 비는 물질이 가지는 대표적인 물성치로 외부 받는 다양한 조건에 따라 구조의 변형을 알 수 있게 해주는 특징이 있다. 이러한 푸아송 비는 종 방향 변형율과 횡 방향 변형율의 비에 음을 취한 것으로 정의 된고 이 값은 -1에서 0.5 사이의 값을 가지게 된다. 음의 푸아송 비를 가지는 Chiral Honeycomb 구조는 양의 푸아송 비를 가지는 기존의 벌집 구조보다 더 향상된 기계적, 물리적 성질을 가지게 된다. 그 예들 중 하나로 음의 푸아송 비를 가지는 구조는 전단 탄성 계수(Shear Elastic Modulus)가 체적 탄성 계수(Bulk Elastic Modulus)보다 더 큰 값을 가지게 된다. 이는 그 구조가 부피 변화에는 쉽지만 전단 응력에 의한 구조의 변화는 잘 나타나지 않아 전단 응력의 항복 및 파손이 덜 일어난다는 것을 말해준다. 또한 그 밖에도 인성(Superior toughness), 탄성력(Resilience) 그리고 인열 저항(Tear resistance)들의 값들이 크며 탄성 응력 집중 계수(Stress Concentration Factors) 값 또한 낮 출 수 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 가지는 구조 자체를 이루는 재료의 물성치(Material Property)는 거의 대부분 알려져 있다.

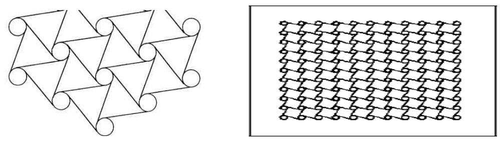
컴퓨터 시뮬레이션의 사용이 증가하면서 유한요소법을 이용한 구조해석 또한 많이 활용되고 있다. 벌집 구조가 포함된

구조의 해석을 위해서는 벌집구조를 유한요소로 모델링 하여야 한다. 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 세분화된 요소망을 사용하여야 하지만 벌집구조는 수많은 반복구조로 이루어져 있고, 이를 일일이 유한요소모델링 하는 것은 자유도 수를 상당히 증가시켜 계산 량이 많아지기 때문에 비효율적이다. 반복되는 벌집구조를 대표할 수 있는 대표체적(Representative Volume Elements)을 정하여 그 체적을 연속체(Continuum)로 가정하고, 그 연속체에 대해 유한 요소 모델링을 하면 자유도 수와 모델링에 들어가는 노력을 상당히 줄일 수 있다. 대표 체적으로 가정하여 구조해석을 진행하기 위해서는 영 계수와 푸아송 비 등의 대표 체적의 등가 물성치(Equivalent Material Property)가 필요하다. 기존의 논문(ALDERSON, Andrew, ALDERSON, K.L., ATTARD, D., EVANS, K.E., GATT, R., GRIMA, J.N., MILLER, W., RAVIRALA, N., SMITH, C.W. and ZIED, K 2009)에 따르면 여러 가지의 Chiral Honeycomb 구조 중 Hexa 와 Tetra Chiral Honeycomb 구조만이 음의 푸아송 비를 가진다. Hexa Chiral Honeycomb 구조 같은 경우는 분석적인 공식(Analytical Formular)이 이미 구해져 있으며 그 수식을 통해 푸아송 비가 -1의 값을 가진다는 것을 알 수 있다(D.PRALL and R.S. LAKES 1996). 하지만 Tetra Chiral Honeycomb 구조는 분석적인 공식이 없어 정확한 푸아송 비를 계산 할 수 없다는 제한이 있다.

본 논문에서는 음의 푸아송 비를 가지는 Chiral Honeycomb 구조 중 하나의 원(Node)에서 4개의 관절이 뻗어 나가는 Tetra Chiral Honeycomb 구조의 분석적인 해로 존재하지 않는 등가 물성치를 구하기 위해 유한 요소 해석을 실시하였으며 이를 위해 여러 가지의 대표 체적을 정의하고, 각 대표 체적들의 등가 물성치의 도출을 통해 어떤 대표 체적이 가장 타당한지 고찰한다.

2. Chiral Honeycomb 구조

Fig. 1은 대표적인 Chiral honeycomb 구조를 보여주고 있다. 그림 (a)는 하나의 원(Node)에서 여섯 개의 관절(ligament)이 뻗어 나가는 Hexa Chiral Honeycomb 구조를 가지고 있다. 이 구조는 푸아송 비는 -1의 값을 가진다.



(a) (b)

Fig. 1 (a) Hexa Chiral Honeycomb, (b) Tetra Chiral Honeycomb

(D.PRALL and R.S. LAKES 1996). 그림 (b)는 대표적인 Tetra Chiral Honeycomb 구조의 평면상의 단면을 보여주고 있다. Tetra Chiral Honeycomb 구조 또한 Hexa Chiral Honeycomb 구조와 같이 여러 개의 원들이 대칭적으로 반복 배치되고 있음을 볼 수 있다. Tetra Chiral Honeycomb 구조의 자세한 형상은 Fig. 2와 같다. 하나의 원과 관절들은 서로 한 점에서 접하고 있고, 기하 치수들은 다음과 같다(r = 5mm, l = 25mm, t = 1.5mm). 이러한 Tetra Chiral Honeycomb 구조는 Fig.2 와 같이 육각형의 틀을 이루는 Hexa Chiral Honeycomb 구조 보다 더 간단한 사각형의 이루고 있다.

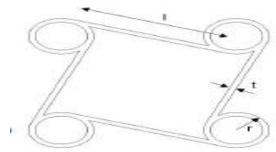


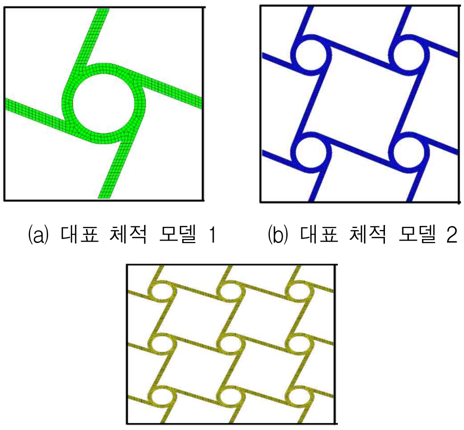
Fig. 2 Dimension of Tetra Chiral Honeycomb

3. 본 론

본 연구에서는 음의 푸아송 비를 가지는 Chiral Honeycomb 구조 중 하나의 원(Node)에서 네 개의 관절(ligament)이 뻗어 나가는 Tetra Chiral Honeycomb 구조의 등가 물성을 도출하여 보고자 한다. 또한 등가 물성 도출 시 필요한 다양한 대표 체적들 중 기존의 실험값들(ALDERSON, Andrew, ALDERSON, K.L., ATTARD, D., EVANS, K.E., GATT, R., GRIMA, J.N., MILLER, W., RAVIRALA, N., SMITH, C.W. and ZIED, K 2009)과 본 연구에서 구한 등가 물성 값들과 비교를 통해 가장 적절한 대표 체적 모델에 대해서도 알아보고자 한다.

3.1 유한 요소 법을 이용한 등가 물성 도출

3.1.1 대표 체적 모델



(a) 대표 체적 모델 1 (b) 대표 체적 모델 2

(c) 대표 체적 모델 3

Fig. 4 대표 체적 모델

위의 Fig. 1의 (b)와 같이 Tetra Chiral Honeycomb 구조 같은 경우는 여러 가지 원들과 관절들로 반복 대칭적으로 이루어 져있다는 것을 볼 수 있다. Tetra Chiral Honeycomb 구조의 유한 요소 해석을 위해서는 모델의 크기(Geometry)나 반복 구조의 배치(Configuration)를 적절하게 제한시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 반복 대칭적인 Tetra Chiral Honeycomb 구조를 하나의 연속체(Continuum)로 이루어져 있다고 가정하고 마주보고 있는 관절들 사이의 거리를 한 변으로 하는 하나의 정사각형으로 대표 체적으로 정의 하였다. 외부 압축 응력에 의해 Tetra Chiral Honeycomb 구조가 얻게 되는 변형에너지는 연속체로 구성된 하나의 정사각형이 갖는 변형에너지로 변환 될 수 있다. 이러한 대표 체적은 Tetra Chiral Honeycomb 구조 전체의 물성치를 대표 할 수 있게 된다. 첫 번째 모델은 하나의 원(Node)에서 4개의 관절들로 구성되며 Fig. 4와 같다. 두 번째 모델은 첫 번째 모델의 원 개수를 4배로 늘린 모델로 Fig. 5와 같다. 또한 세 번째 모델은 첫 번째 모델의 원 개수를 9배를 늘린 것으로 Fig. 6과 같다.

3.1.3 물성 치 대입 및 경계 조건 설정

대표 체적을 만든 후 Tetra Chiral Honeycomb 자체를 이루는 재료의 영 계수(E_s)와 푸아송 비(ν_s)를 지정 하였다(E_s = 1.6GPa, ν_s = 0.35). X, Y 방향의 영 계수를 구하기 위해 순수 압축 응력과 변위 경계 조건을 Table 1과 같이 부여 하였다. 또한 원에서 돌출된 관절의 중점이 원의 중심과 반대 관절의 중점과 연결한 선을 통과 하도록 제약 조건(Constraint)을 부여하였다. 이는 마주보고 있는 관절들이 서로 같은 선상에서 변형이 일어나도록 하기 위함이다.

Table 1 유한 요소 해석을 위한 경계 조건

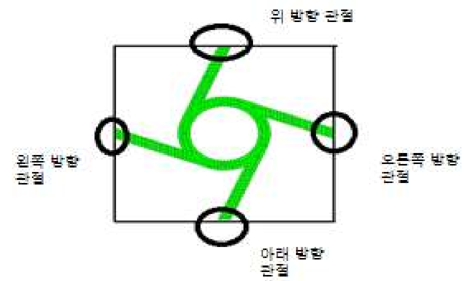


Fig. 5 대표 체적 경계 조건

3.2 등가 물성치를 위한 계산 방법

3.2.1 영 계수를 구하기 위한 방법

Unit : MPa	오른쪽 관절	왼쪽 관절	위 방향 관절	아래 방향 관절
E_{xy}	$\sigma_{xx} = -100$	X,Y 방향 변위 고정	X,Y 방향 변위 Free	X,Y 방향 변위 Free
E_{yx}	X,Y 방향 변위 Free	X,Y 방향 변위 Free	$\sigma_{yy} = -100$	X,Y 방향 변위 고정

모델을 해석하기 위해 기본적인 대표 체적을 구한 후 그 **체**적의 변형 에너지 밀도 공식(Strain Energy Density)을 이용하여 영 계수를 위한 값을 도출 해낼 수 있다.

$$U_1 = \int u dV_1 \tag{1}$$

$$U_2 = V_2 \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon = V_2 \int_0^{\epsilon} E\epsilon d\epsilon = \frac{\sigma^2 V_2}{2E} \tag{2}$$

$$U_1 = U_2 \tag{3}$$

U_1: Tetra Chiral Honeycomb 구조 자체의 변형에너지

U_2: 대표 체적(RVEs)의 변형에너지

V_1: Tetra Chiral Honeycomb 구조의 부피

V_2: 대표 체적(RVEs)의 부피

σ : 압축 응력

3.2.2 푸아송 비(Poisson's ratio)를 구하기 위한 방법

$$\nu_{xy} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$$
(4)

Tetra Chiral Honeycomb 구조에 압축 응력의 경계 조건을 가한 후 나온 해석 결과에서 특정한 절점들의 변형 전 후의 위치 값을 통해 직접 변위(Displacement)를 구한 뒤 푸아송 비를 계산 하였다.

3.3 등가 물성 도출 결과

EDISON 홈페이지에 있는 CASADsolver를 이용하여 유한 요소 해석을 하였으며 위에서 언급한 등가 물성치를 계산하기 위한 수식을 이용하여 Table 2와 같은 등가 물성치를 구할 수 있었다.

Table 2 Tetra Chiral Honeycomb 구조의 등가 물성치

Unit : MPa	Young's Modulus		Poisson's raio	
	E_{xy}	E_{yx}	ν_{xy}	ν_{yx}
대표 체적 모델1	10.6	10.6	-0.690	-0.690
대표 체적 모델2	10.2	10.2	-0.720	-0.720
대표 체적 모델3	10.1	10.1	-0.714	-0.714
실 험 값	7.08	7.08	-0.260	-0.260
FEM 결과	12.01	12.01	-0.830	-0.830

각 모델들에 대한 유한 요소 해석과 등가 물성치 값들을 구할 수 있는 수식을 통해 Tetra Chiral Honeycomb 구조의 수치적인 등가 물성치 값들을 구할 수 있었다. 또한 Tetra Chiral Honeycomb 구조는 음의 푸아송 비를 가진다는 것을 Table 2를 통해 알 수 있었다. Tetra Chiral Honeycomb 구조는 대칭적인 구조로 배치되어 있으므로 Table 2를 통해 X방향의 등가 물성치와 Y방향의 등가 물성치가 서로 일치하는 것을 알 수 있었다. 또한 각 대표 체적 모델들 간의 등가 물성치 값들의 차이가 ±5% 이내임을 볼 수 있다. 따라서 Tetra Chiral Honeycomb 구조의 등가 물성치 값들 구할 때는 가장 간단하며 효율성이 높은 구조를 가진 대표 체적 모델 1이 적절한 대표 체적임을 본 연구를 통해 알 수 있었다. Table 2의 FEM 값은 기존 논문(ALDERSON, Andrew, ALDERSON, K.L., ATTARD, D., EVANS, K.E., GATT, R., GRIMA, J.N., MILLER, W., RAVIRALA, N., SMITH, C.W. and ZIED, K 2009)에서 유한요소 해석법으로 구한 후 제시한 Tetra Chiral Honeycomb의 등가 물성치 결과 값이다. 이를 통해 본 연구의 유한 요소 해석을 통해 구한 등가 물성치 값들이 서로 비교한 결과 더 향상되었음을 관찰할 수 있었다.

4. 결　　론

본 연구는 기존의 일반적인 Honeycomb 구조와 다른 Tetra Chiral Honeycomb 구조의 유한 요소 해석을 통한 등가 물성치를 계산해 보았다. 또한 Tetra Chiral Honeycomb 구조는 많은 원들과 관절들이 반복적으로 배치되어 있고 동시에 대칭적인 구조를 가지고 있으므로 구조의 적절한 해석을 위해 필요한 다양한 대표 체적들에 대해서도 연구해 보았다. 대표 체적은 Tetra Chiral Honeycomb 구조의 원들의 수에 따라 총 3가지의 모델들로 구상하였으며 이러한 각 모델들을 하나의 정사각형으로 정의 하여 해석을 실시하였다. 그 결과 여러가지 대표 체적 모델들의 등가 물성치 값들의 차이가 작았고 모델의 크기가 작으면 작을수록 해석의 효율성이 높아지므로 대표 체적 모델 1이 가장 적절한 모델이라는 결론을 이끌어 낼 수 가 있었다. 또한 이 구조가 음의 푸아송 비 갖게 된다는 관찰 할 수 있었다. 본 연구에서 구한 등가 물성치는 실험값들과는 상당한 차이를 보이고 있지만 기존 논문의 유한요소 방법을 통해 구한 등가 물성치 값들 보다는 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 앞으로의 추후 연구가에 대한 ㅍ 필요성과 기존의 실험값과 더 가까운 결과를 얻을 수 있는 가능성에 대해 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한

국연구재단 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014M3C1A6038344)

참 고 문 헌

D.PRALL and R.S. LAKES (1996), PROPERTIES OF A CHIRAL HONEYCOMB WITH A POISSON'S RATIO OF -1.

ALDERSON, Andrew, ALDERSON, K.L., ATTARD, D., EVANS, K.E., GATT, R., GRIMA, J.N., MILLER, W., RAVIRALA, N., SMITH, C.W. and ZIED, K(2009), Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and antichiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading.