

셀방법과 유한요소법을 이용한 하이브리드 삼차원 브레이드 섬유강화복합재료의 역학적 성질 예측

김지훈·류한선·이명한·정관수

Prediction of Mechanical Properties of Hybrid 3D Braided Fiber Reinforced Composites Using Method of Cells and Finite Element Method

Ji-Hoon Kim, Hansun Ryou, Myung-Han Lee, Kwansoo Chung

Abstract

A procedure of predicting mechanical properties of braided composites was developed. Mechanical behaviors of yarns and resin in the composites were represented by elastoplastic constitutive relations. The mechanical properties of the hybrid braided composites were calculated using Method of cells and finite element method. Predictions of finite element method showed good agreement with experimental data but Method of cells predicted lower values than those of the experiment.

Key Words: homogenization, 3D braided hybrid composites, Method of Cells, finite element method

1. 서 론

브레이드 복합재료는 강성이 크고 무게가 가벼워서 자동차 산업, 항공 우주 산업 등에서 수요가 증가하고 있으며, 특히 기존의 적층복합재료의 단점을 보완한 브레이드 복합재료와 서로 다른 둘 이상의 섬유를 섞어서 섬유의 단점을 보완하는 하이브리드 복합재료에 대한 관심이 커지고 있다.

그러나 브레이드 복합재료는 구조가 복잡해서 적층 복합재료 등에 사용되던 해석방법으로는 역학적 성질을 예측하기가 힘들다. 브레이드처럼 복잡한 구조를 가진 복합재료를 해석할 수 있는 대표적인 방법에는 셀방법(Method of cells, [1-3]) 과 유한요소법이 있다.

본 연구에서는 복합재료의 섬유다발을 일방향(unidirectional) 복합재료로 보고 역학적 거

동을 탄소성 구성방정식으로 구현했다. 하이브리드 복합재료를 등격자 모델링 방법으로 모델링한 뒤 앞에서 구현한 섬유다발의 물성을 이용하여 셀방법과 유한요소법으로 역학적 거동을 예측해보고 장단점을 비교해보았다.

2. 제조 및 인장실험

2.1 프리폼 제조 및 수지이송성형

본 연구에 사용된 하이브리드 삼차원 브레이드 프리폼은 4-스텝 원형 브레이드 기계로 제작되었다. 유리섬유다발은 대각선 방향으로 진행하며 서로 엇갈려서 브레이드를 구성하며, 한쪽면에 케블라섬유다발이 축방향으로 지나가는 구조를 가지고 있다.

제작된 프리폼을 수지이송성형 공정을 통하여 에폭시 수지를 입힌 뒤, 이를 130℃에서 90분 동안 경화시켰다. Fig. 1 은 제작된 복합재료의 사진이다.

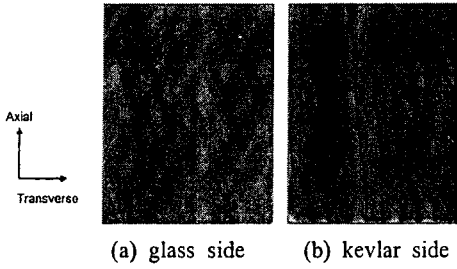


Fig. 1. Hybrid 3D braided composite

유리섬유, 케블라섬유의 체적율은 각각 43.1%, 9.5%로 측정되었다.

2.2 인장실험

복합재료의 인장성질을 인장 실험 장치인 Instron 8516을 이용하여 표준적인 실험방법인 ASTM D3039-76을 따라 측정하였다. 복합재료의 방향별 성질을 파악하기 위해 축방향과 가로방향을 따라 시편이 제작되었다.

3. 기하학적 모델링

등격자 모델링은 복합재료의 단위구조를 많은 수의 직육면체 격자로 나누어서 모델링하는 방법이다. 등격자 모델링은 섬유의 경로와 단면형상만을 필요로 하기 때문에 빠른 모델링이 가능하며, 별도의 격자생성이 필요 없는 것이 장점이다. 본 연구에서는 등격자 모델링을 사용하여 삼차원 브레이드 복합재료의 단위셀을 나타내었으며 Fig. 2 에 모델링한 결과나 나와 있다. 이때 사용된 격자의 수는 8000개이다.

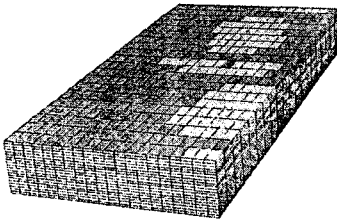


Fig. 2. Geometric modeling of hybrid 3D braided composite unit-cell

4. 역학적 모델링

4.1 섬유다발의 물성

브레이드 복합재료내의 섬유다발은 작은 스케일에서 봤을 때 섬유가 일방향으로 배향된 가로등방성의(transverse isotropic) 복합재료로 볼 수 있다. 일방향 복합재료의 탄성물성을 예측하는 모델인 Hashin과 Rosen의 모델[4]을 적용하여 섬유다발의 탄성물성을 계산하였다(Table 1). 섬유다발내의 섬유 체적률은 85%로 가정하였으며, 본 연구에 사용된 기본 재료의 물성은 유리섬유 (S2, $E=86.9$ GPa, $\nu=0.22$), 케블라 섬유 (Kevlar 29, $E=62.0$ GPa, $\nu=0.36$), 에폭시 수지 ($E=2.13$ GPa, $\nu=0.37$) 이다.

Table 1. Predicted elastic properties of fiber bundles

	Glass fiber	Kevlar fiber
	bundle	bundle
E_{11} (GPa)	74.2	53.0
E_{22} (GPa)	24.0	21.4
G_{12} (GPa)	7.59	6.77
G_{23} (GPa)	9.28	8.00
ν_{12}	0.22	0.36
ν_{23}	0.29	0.34

섬유다발의 비선형 거동을 표현하기 위하여 탄소성 구성방정식을 이용하였다. 항복함수는 Mises 항복함수를 변형하여 축방향과 가로방향의 초기항복응력을 다르게 할 수 있도록 하였다.

$$\bar{\sigma}^2 = (\xi_{11} - p\xi_{22})^2 + (p\xi_{22} - p\xi_{33})^2 + (p\xi_{33} - \xi_{11})^2 + 3\xi_{12}^2 + 3\xi_{23}^2 + 3\xi_{31}^2 = \bar{\sigma}_{iso}^2 \quad (1.a)$$

$$\xi = \sigma - \alpha \quad (1.b)$$

$$p = \frac{-y}{\frac{\sigma_1}{-y} - \sigma_2} \quad (1.c)$$

여기서 p 는 축방향과 가로방향의 비대칭성을 표현하는 계수이고 α 는 이동응력이다. $\bar{\sigma}_1^y$ 와 $\bar{\sigma}_2^y$ 는 각각 축방향과 가로방향의 초기항복응력

이다. $\bar{\sigma}_{iso}$ 는 항복합수의 크기를 나타내는 변수로 이동경화를 사용할 경우 $\bar{\sigma}_1^Y$ 와 같다. 축방향과 가로방향의 다른 경화거동을 나타내기 위해 이동경화를 이용하였다 [5].

초기항복응력과 이동경화에 필요한 계수들은 일방향 복합재료의 인장 실험을 통해 구할 수 있으나 섬유체적률이 85%인 복합재료를 제조하는데 어려움이 있어서 본 연구에서는 실험과 가정을 사용하여 일방향 복합재료의 비선형 거동을 나타내었다. 축방향 성질은 섬유의 성질이 많이 좌우하므로 섬유체적률이 낮은 일방향 복합재료의 응력-변형률을 섬유체적률 만큼 보정하여 축방향 성질을 구하였다. 가로방향의 경우에 에폭시수지의 성질이 크게 작용하므로 에폭시수지의 초기항복응력과 경화곡선을 이용하여 가로방향의 성질을 구하였다.

Fig. 3 에는 유리, 케블라 일방향 섬유복합재료의 축방향, 가로방향 응력-변형률 거동을 앞에서 가정한 탄소성 구성방정식을 이용해 나타낸 결과가 나와있다.

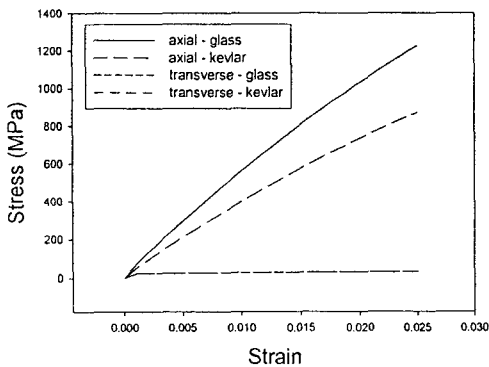


Fig. 3. Assumed tensile properties of unidirectional glass fiber composites and unidirectional kevlar fiber composites

4.2 균질화 방법

복잡한 구조를 가진 복합재료를 균질화할 수 있는 방법에는 셀방법과 유한요소법이 있다.

셀방법에서는 각각의 셀이 하나의 변형률을 가질 수 있다. 그리고 변위연속조건과 응력연속조건을 평균적으로 적용하여 주어진 변형률에 대한 전체의 응력을 구하게 된다.

유한요소법은 형상을 유한한 요소로 나누고 주어진 경계조건에 대해 평형방정식을 근사적으로 만족시키며 해를 구하는 방법이다.

셀방법은 N 개의 셀에 대해 $O(N^2)$ 개의 실수 저장단위가 필요하며, 유한요소법은 bandwidth 최적화를 할 경우 $O(N)$ 개의 실수 저장단위만으로도 충분하다. 그러므로 같은 수의 셀을 사용했을 때 유한요소법이 빠른 시간에 결과를 낼 수 있으며, 같은 메모리를 사용해서 더 많은 셀을 계산할 수 있기 때문에 계산효율 측면에서 유한요소법이 유리하다.

셀방법과 유한요소법 모두 탄소성과 같은 비선형 거동을 보이는 재료에 적용할 수 있으나 셀 방법의 경우 주어진 변형률에 대해 응력을 구하기 때문에 인장실험과 같이 응력이 주어진 문제를 풀기 힘들다. 본 연구에서는 셀방법은 탄성성질 예측에만 사용되었다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 4 에는 셀방법, 유한요소법에 의한 예측과 실험결과의 탄성 성질을 비교한 것이다. 유한요소법은 실험오차범위내로 예측하였지만 셀방법은 축방향의 경우 실험값보다 낮게 예측하는 것으로 나타났다. 이는 셀방법이 변위연속조건을 엄밀하게 만족시키지 못하고 평균적으로 만족시키기 때문이다.

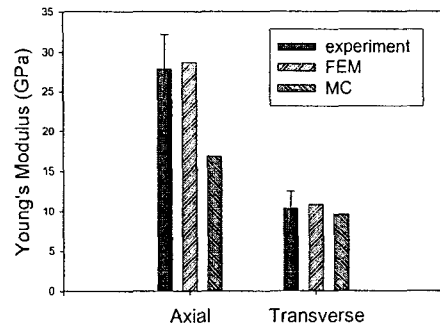
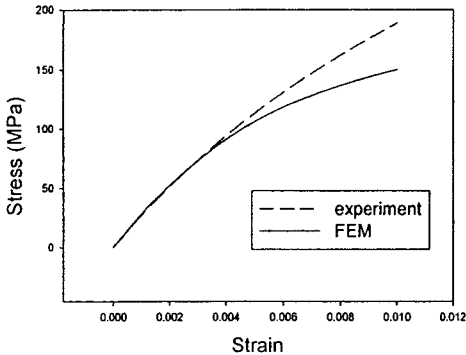


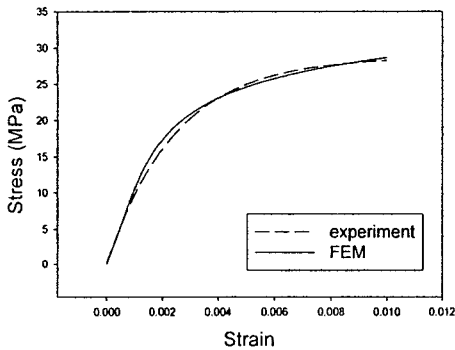
Fig. 4. Predicted elastic properties based on finite element method and Method of cells

Fig. 5 는 복합재료의 인장실험결과와 유한요소법에 의한 예측을 응력-변형률 그래프로 나타

낸 것이다. 응력-변형률 그래프는 작은 변형률구간에서는 선형거동을 보이다가 탄성한계를 넘어서면 비선형거동을 보이는 것을 확인할 수 있다.



(a) Axial direction behavior



(b) Transverse direction behavior

Fig. 5. Prediction of the stress-strain behavior of hybrid 3D braided composite based on the finite element method

축방향은 초기에는 비교적 정확하게 맞다가 변형이 커지면 낮게 예측되었다. 앞에서 가정한 경화곡선과 항복함수등이 실제와 차이가 있음을 보여준다. 그에 비해 가로방향은 상당히 정확하게 예측되었다. 보다 정확한 예측을 위해서는 단방향 섬유유의 물성에 대한 자세한 실험이 필요하다.

6. 결론

하이브리드 삼차원 브레이드 유리, 케블라 섬유

유강화 복합재료를 제조하여 역학적 거동을 측정하였으며 등격자 모델링과 셀방법, 유한요소법 그리고 탄소성 구성방정식을 이용하여 역학적 거동을 예측해보았다.

유한요소법에 의해 예측된 값은 실험결과와 오차범위내에서 일치함을 보였으나 셀방법은 실제보다 낮게 예측하였다. 셀방법은 유한요소법에 비해 정확성과 속도면에서 떨어져서 효율적이지 못한 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 과학기술부 지정 국가지정연구실 사업의 과제 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Aboudi J., *Mechanics of Composite Materials - A Unified Micromechanical Approach*, Elsevier, Amsterdam, 1991.
- (2) Paley, M. and Aboudi, J., "Micromechanical Analysis of Composites by the Generalised Cells Method," *Mechanics of Materials*, Vol. 14, 1992, pp. 127-139.
- (3) Bigaud, D. and Hamelin, P., "Modeling of 2D and 3D Textile-reinforced Composites by Means of Imbricate-type Elements Approaches," *Computational Techniques for Materials, Composites and Composite Structures*, 2000, pp. 73-81.
- (4) Hashin, Z., and Rosen, B. W., "The Elastic Moduli of Fiber Reinforced Materials," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 31, 1964, pp. 223-232.
- (5) Myoung-Gyu Lee, Daeyong Kim, Kwansoo Chung, Jae Ryoun Youn, and Tae Jin Kang, "Combined Isotropic-Kinematic Law for Orthotropic Fiber-Reinforced Composites", *Polymer and Polymer Composites*, Vol. 12, No. 3, 2004, pp. 225-234