

삼차원 평판형태 브레이딩 복합재료의 강성해석

김성준* , 강태진* , 정관수* , 윤재륜*

The mechanical analysis of 3-D flat board shaped braided composites

Sung Jun Kim , Tae Jin Kang , Kwansoo Chung , J.R.Youn

ABSTRACT

To develop an effective geometric modeling is essential in order that precise material properties of the 3-D braided composite can be estimated. in this study RVE(representative volume element) which is the smallest volume element representing whole material properties is developed to estimate the mechanical properties of 3-D flat board shaped braided composite using volume averaging method.

1. 서론

3-D 브레이드는 삼차원 직물을 만들기 용이하며, 여러 다양한 모양을 만들 수 있는 이점이 있다. 3-D 브레이드 복합재료는 적층복합재료보다 두께방향으로 기계적 물성이 월등하며, 충격에도 강한 특성이 있다. 이런 우수한 기계적 물성은 내부구조와 구성물질에 따라 좌우되므로 실제적인 내부구조의 모델링은 필수적이다. 3-D 원형 브레이드 기계를 사용하여 원형의 프리폼을 제작한 후 평판형태의 삼차원 브레이드 복합재료를 제작하였으며, 이 복합재료의 구조를 3-D 원형 브레이드 프리폼의 내부구조를 기반으로 모델링하였다. 실제적인 내부구조를 구현하기 위하여 실경로를 삼차원 스플라인으로 적합시켰다. 구현한 내부구조중 전체 시편의 기계적 물성과 같은 물성을 가지는 RVE(Representative Volume Element)를 사용하여 복합재료의 강성을 등용력 가정과 등변형 가정 두가지를 이용하여 평균법으로 해석하였다.

2. 3-D 원형 프리폼의 내부구조 모델링

내부구조를 모델링 할 때 연속체개념을 도입하는 것은 상당히 편리한 일이다. 즉, 어떤 시편을 적당한 조건에 맞도록 여러 조각들로 나누었을때 그 조각들은 전체시편의 모든 성질을 가지고 있으며, 만약 그 조각들을 조합한다면 전체시편의

구조와 같은 시편을 만들 수 있다고 가정하는 것이다. 삼차원 원형 브레이드 복합재료의 경우 위에서 언급한 조각중 가장 작은 조각을 RVE라고 할 수 있으며, RVE는 다시 더 작은 반복단위 즉 단위구조(이하 UC)들로 나뉘어질 수 있다고 가정하였다. 특히, 원형 브레이드 복합재료의 경우는 이의 구조특성상 1개의 단위구조만으로 나눌 수 없으므로, 시편에서의 단위구조 위치에 따라 내부단위구조(이하 IUC)와 외부단위구조(이하 SUC)로 나누었으며, 외부단위구조는 시편의 표면에 노출되어있는 밖-외부단위구조(이하 ESUC)와 맨드렐에 접하고있는 안-외부단위구조(이하 ISUC)로 나누었다. -본 논문에서는 편의상 단위구조 위치 수(UC NO)를 정의하였다. 즉, 안쪽부터 숫자 매김을 하여, ISUC는 UC(0), 그다음 IUC은 UC(1), 그다음은 UC(2) 이런 방식으로 하여 가장 바깥쪽 ESUC는 UC(RCN¹)-1)으로 정의 하겠다. - 이러한 모델들은 캐리어²⁾의 주기적인 동작으로 인하여 설계가 가능하다. 즉, 캐리어들은 한 사이클동안 동일한 패턴으로 움직이기 때문에 한 사이클동안의 움직인 캐리어의 경로를 이용하여 각각의 단위구조를 모델링할 수 있다. 내부구조를 모델링하기위한 몇가지 가정을 하였다.

가정

1) Radial Direction Carrier NO : 지름방향으로 사용한 실의 개수

2) 브레이드 기계에서 실들이 파지도록 움직여주는 장치

* 서울대학교 재료공학부

1) 시편은 특별한 기준에 따라 부피요소로 나눌 수 있으며 이 부피요소를 전 영역으로 확장하면 시편과 같은 구조를 가진다.

2) 부피요소의 부류가 같을 경우, 실경로의 형태는 모든 부피요소를 통틀어 동일하다.

3) 브레이드 공정으로 만든 시편의 피치길이³⁾는 직물의 길이방향으로 동일하며, 모든 레이어들 간에도 동일하다.

4) 실들은 그의 단면이 타원형태이며, 모든 영역에서 타원의 단축은 변하지 않고, 부피 요소 안에서 실들은 서로간 단축방향으로 접하고 있다.

5) 시편의 물리적인 물성과 같은 물성을 가지는 가장 작은 부피요소는 RVE라고 정의 하였고, RVE 안의 가장 작은 반복단위를 단위구조로 정의하였다.

IUC의 모델링은 위에서 언급한 주기적인 캐리어의 동작을 통하여 설계하는데, 캐리어의 동작중 가장 작은 동작단위를 결정하여 한 사이클동안의 캐리어의 동작을 통해 IUC를 설계할 수 있다. 가장 작은 동작단위는 지름방향과 원주방향으로 1쌍의 캐리어가 마주보고 있는 사각형태의 단위로 할 수 있다.

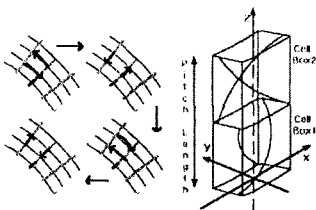


그림 1. Inner carrier motion & IUC modeling

위와같은 동작단위를 통해 모델링할 경우 한 IUC에는 4개의 실이 존재하며, 각 실의 경로는 반사이클을 주기로 대칭형태를 이루게 된다. 복합재료의 단위구조 모델링중 가장 중요한 실경로는 실제와 같은 단위구조의 모델링을 위해 곡선으로 모사하였다. 본 논문에서는 한 개의 실경로를 하나의 3차 스플라인 함수로 모사하였으며 이 스플라인은 3개의 3차 함수로 구성되어있다. 이 3차 스플라인은 실의 접촉조건으로부터 6개의 실경로 데이터 포인트를 얻어 구현 하였다. SUC은 IUC과는 다른 실경로 형태를 지니고 있다. 이는 물론,

3) 한 사이클당 만들어진 직물의 길이.

캐리어 운동이 IUC의 것과 다르기 때문이다.

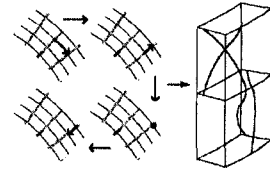


그림 2. Exterior Carrier Motion & SUC modeling

SUC의 경우 단위구조안에 모두 3개의 실이 존재하지만, 반사이클을 주기로 대칭이 되기 때문에 모두 4개의 실이 존재하는것과 같다고 할 수 있다. SUC에서의 실경로도 IUC과 같은 스플라인으로 구현하였다. RVE는 UC들을 캐리어의 운동의 주기성을 통해 적층함으로써 구현할 수 있는데, 캐리어의 운동을 통한 UC들의 적층순서는 안쪽부터 UC(0), UC(1), UC(2)... UC(RCN-1)을 지그-제그 형태로 적층함으로써 구현할 수 있다. 앞의 가정에서와 같이 단위구조를 적층하여 전체구조와 같은 구조를 갖도록 할 수 있으며, 또한 위의 모델링 방법의 타당성을 위해 전체시편의 구조를 UC들을 적층하여 모델링 하였다. 결과적으로 실제 시편과 잘 맞는 구조를 하고 있음을 알 수 있었다. 즉 위의 방법은 타당하다고 결론지을 수 있다.

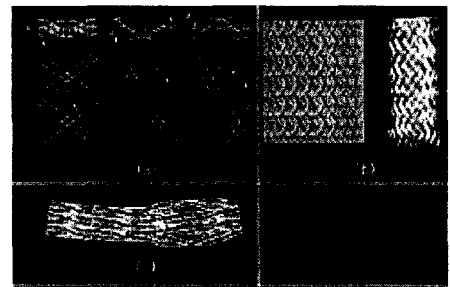


그림 3 Construction of (a) UCs, (b)Preform & Real Preform (c) RVE.

3. 3-D 평판 복합재료의 내부구조 모델링

3-D 평판 브레이드 복합재료는 3-D 원형 브레이드 프리폼의 한 면을 절단하여 이를 RTM 성형법으로 성형하였으므로 3-D 평판 브레이드 복합재료의 내부구조 모델은 3-D 원형 브레이드 프리폼 모델링을 기반으로 하여 구현하였다. 이들 서로간 실경로

의 형태는 비슷하나, 원형 프리폼의 UC와는 다르게 평판 UC들의 단면은 사각형태라고 할 수 있다.

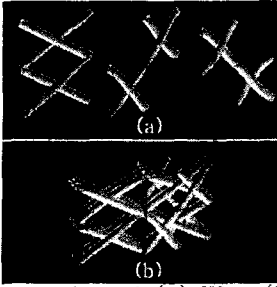


그림 4. Construction of (a) UCs (b) RVE

4. 3-D 평판 복합재료의 강성해석

3-D 평판 브레이드 복합재료의 강성해석은 전체 시편의 물성과 같은 물성을 가지는 RVE의 강성해석을 통해 예측하였다. RVE의 강성해석은 등응력과 등변형 두가지 가정을 사용하여 평균법으로 해석하였다. RVE의 in-plane 강성은 등변형 가정을 하여 4차 텐서인 6×6 강성행렬을 이용하였으며, RVE의 out-of-plane은 등응력 가정을 하여 4차 텐서인 6×6 연성행렬을 이용하였다. RVE는 UC들로 구성되어있으므로, UC들 각각의 강성을 해석하여 UC들의 조합으로 구성되는 RVE의 강성을 예측하였다. 각각의 구성 UC들의 강성은 구성요소인 실의 배향성과 실부피비 그리고 매트릭스의 기본 물성치를 사용하여 예측하였다. UC안의 실 로컬축(Local Coordinate system)을 실축방향 11, 그리고 수직방향을 각각 22, 33으로 정의하면, 그림 5와 같이 실들의 미세 단면의 강성은 준등방성 물질이기 때문에 다음과 같은 연성행렬로 정의될 수 있다. 연성행렬의 역행렬은 강성행렬이 된다.

$$\begin{pmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & -\nu_{31}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -\nu_{23}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_{11} & -\nu_{23}/E_{22} & 1/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} \end{pmatrix}$$

실 전체의 강성은 UC안의 실들이 서로간 공간적으로 꼬여있기 때문에 실경로에 수직인 미세단면들의 배향각으로부터 변환행렬을 사용, UC 또는 RVE의 글로벌축(Global Coordinate system) XX, YY 그리고 ZZ 각각의 축에 각 단면들의 강성

요소들이 기여하는 값의 평균값으로 예측할 수 있다.

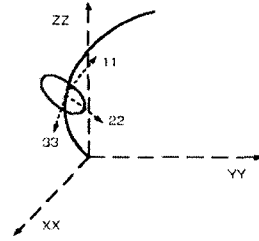


그림 5. Global Coordinate System & Local Coordinate System

각 미세단면에서 글로벌축으로의 강성값은 변환행렬 T를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[S'] = [T]^T [S] [T]$$

$$[C'] = [T]^T [C] [T]$$

여기서 $[S]$ 는 강성행렬이며, $[C]$ 는 연성행렬이고 $[S']$ 와 $[C']$ 는 변환후의 강성과 연성행렬이다. 본 연구에서는 실경로를 3차원 스플라인으로 구현하였으므로, 실전체의 강성값은 수치해석적 방법 즉, 실경로를 따라 단면을 많은 수로 나누어 이들 변환 강성값의 평균값으로 예측하였다.

$$\overline{[S']} = \frac{\sum_i^N [S']_i}{N}$$

$$\overline{[C']} = \frac{\sum_i^N [C']_i}{N}$$

여기서 $\overline{[S']}$ 과 $\overline{[C']}$ 는 각각 실의 강성행렬과 연성행렬이며, N은 실경로를 따라 나눈 미세단면의 수이다. 각 UC의 강성은 실의 강성과 매트릭스의 강성의 부피비율로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[S]_{UC} = \overline{[S']} V_{YARN} + [S]_{MAT} (1 - V_{YARN})$$

$$[C]_{UC} = \overline{[C']} V_{YARN} + [C]_{MAT} (1 - V_{YARN})$$

여기서 $[S]_{UC}$ 와 $[C]_{UC}$ 는 각각 UC의 강성행렬과 연성행렬이며, $[S]_{MAT}$ 와 $[C]_{MAT}$ 는 각각 등방성 물질인 매트릭스의 강성행렬과 연성행렬이다. V_{YARN} 는 UC에서 실의 부피분율이다. RVE의 강성은 UC들의 조합으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[S]_{RVE} = \sum_{i=1}^M [S]_{UC,i} V_{UC,i}$$

$$[C]_{RVE} = \sum_{i=1}^M [C]_{UC,i} V_{UC,i}$$

여기서 $[S]_{RVE}$ 와 $[C]_{RVE}$ 는 각각 RVE의 강성행렬과 연성행렬이고 $V_{UC,i}$ 는 RVE에서 각 UC들의 부피분율이다. 위의 방법으로 시편의 화이버 부피비가 0.25인 경우 화이버와 매트릭스의 기본 물성값(표 2)을 대입하여 예측한 강성값은 아래 표와 같다.

<표 1 RVE의 강성 예측값 (단위 GPa)>

E_{ZZ}	E_{XX}	E_{YY}	G_{XZ}	G_{XY}	G_{YZ}
24.04	14.09	9.69	2.16	2.16	2.23
Fiber Volume Fraction			Average Yarn Orientation Angle		
0.25			41.15		

<표 2 기본 물성값 (단위 GPa)>

	화이버 물성값 (S-Glass)	매트릭스 물성값 (Epoxy)	실의 예측 물성값 (fp=0.75)
E_{11}	85	3.45	72.36
E_{22}	85		19.88
G_{12}	35.5	1.26	4.55
G_{23}	35.5		4.55
ν_{12}	0.2	0.37	0.35
ν_{21}	0.2		0.35
ν_{23}	0.2		0.35

5. 실험

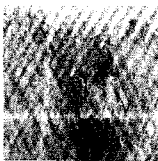


그림 6. 3-D 평판 브레이드 복합재료

3-D 원형 브레이드 기계로 제작한 3-D 원형 브레이드 프리폼의 한 면을 절단하여 RTM 성형법으로 3-D 평판 브레이드 시편을 제작하였다. 3-D 평판 시편으로부터 4개의 실험 시편을 제작하여

화이버 부피비와 시편의 길이 방향으로의 영율을 각각 연소법과 ASTM D3039에 의거 인장테스트를 통해 측정하였다. 4개의 시편의 물성 평균값은 표 3과 같다.

<표 3 평판 시편의 평균 물성값>

E_{ZZ}	Fiber Volume Fraction
22.6 GPa	0.25

6. 결과 및 비교

본 연구에서 모델링한 3-D 평판 브레이드 복합재료의 내부구조를 통해 예측한 강성값은 실제 시편의 강성값보다 크게 산출되었으나 표에서 볼 수 있듯이 예측값과 실측값이 잘 일치한다고 할 수 있다.

7. 결론

본 연구에서 3-D 평판 브레이드 복합재료의 실제적인 내부구조를 모델링하기 위해 단위구조를 2가지로 나누어 모델링 하였으며, 실경로를 3차원 스플라인으로 적합시켰다. 구현한 내부구조를 통해 3-D 평판 복합재료의 강성값을 평균법으로 예측하였으며, 실측값과 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

후기

본 연구는 2000년 과학기술부 지정 국가지정연구실 사업의 과제 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. R. Pandey and H. T. Hahn, "Visualization of representative volume elements for three-dimensional four-step braided composites" composites science and technology, 56(1996)161-170
2. M.Hammad, M. EL-Messery*, and A. EL-Shiekh, "Structural mechanics of 3-D braided preforms for composites PART4" SAMPE, (1991)114-128
3. L.Chen,X.M. Tao*,C.L. Choy, "On the microstructure of three-dimensional braided preforms" Composites Science and Technology, 59(1999)391-404