

3차원 원형 브레이드 유리섬유 강화 복합재료의 구성방정식

신헌정, 정관수*, 강태진*, 윤재륜*
LG화학 테크센터, *서울대학교 재료공학부

Constitutive Equations of 3D Circular Braided Glass Fiber Reinforced Composites

Heon-Jung Shin, Kwansoo Chung*, Tae Jin Kang* and Jae Ryoun Youn*

LG Chem Tech Center, 84, jang-dong, yusung-ku, Daejeon, South Korea

*School of Materials Science and Engineering, College of Engineering, Seoul National University,
56-1, Shinlim-dong, Kwanak-ku, Seoul 151-742, South Korea

1. 요약

본 연구에서는 3차원 브레이딩 기계를 이용하여 제작된 6 layer의 3차원 원형 형태로 브레이드된 유리 섬유 강화 복합재료의 프리프레그를 이용하여 에폭시 수지를 모체로 하는 RTM(Resin Transfer Molding) 공정을 통해 직교 이방성 복합재료를 제작하였다. 또한 단성한계 내에서의 구성방정식을 얻기 위해 unit cell 모델링을 통해 복합재료의 기하를 모사하고 method of cells 이론과 homogenization technique를 이용하여 복합재료의 구성방정식을 나타내는 수치해석 코드를 개발하였다. 이처럼 얻어진 복합재료의 구성방정식을 실제 실험 결과와 비교하기 위해 여러 부피 분율을 갖는 복합재료의 인장 실험을 수행하였다. 실험 결과 얻어진 구성방정식에 의한 수치 해석 결과와 잘 일치 한다는 것을 알 수 있었고 부피 분율에 따른 물성의 변화도 예측할 수 있었다.

2. 서론

최근 들어 자동차 산업, 항공 우주 산업 및 건축 토목 산업 분야 등에서 다축 섬유구조 복합재료의 연구 개발 및 응용이 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 그러나 이에 국내에서는 복합재료의 연구나 응용이 크게 떨어져 있는 실정이다. 본 연구에서는 3차원 원형 유리 섬유 강화 복합재료에 대한 구조적인 모델링과 더불어 이를 직접 제작해 보고 그에 따른 구성방정식을 유도해보고자 한다. 이를 위해 복합재료 내부에서의 반복단위인 unit cell의 기하학적 모델링을 한 뒤 method of cells와 homogenization을 통해 unit cell의 구성방정식을 얻는다. 이러한 구성방정식에 의한 수치적인 결과와 실제 제작된 복합재료의 실험 결과를 비교 분석해 보고자 한다.

3. 본론

3.1. Geometrical modeling of 3D circular braided glass fiber reinforced composite

복합재료의 전체 구조는 복합재료 내의 반복적인 cell들로 구성되어 있는데 이 반복적인 cell을 unit cell(이하 UC)라 한다. 이 UC는 기하학적 구조가 동일한 여러 개의 basic cell(이하 BC)로 구성되어 있는데 이 BC의 형태는 BC내에 지나가는 yarn의 path에 따라 달라진다. 그리고 yarn이 지나간 path 외의 나머지 부분은 resin으로 채워지고 yarn의 단면은 보다 yarn의 단면의 형태에 가까운 elliptical shape으로 가정하였다. 이러한 UC의 기하를 모사하기 위해 B spline curve 함수[1]를 이용하였다. 본 논문에서 B spline curve 함수는 10개의 control point를 가지며 order가 3차인 함수로 정의하였다. BC에서 yarn이 접촉하면서 지나가는 contact region과 지나간 후 직선이 되는 straight region으로 나누어 control point를 기하를 고려하여 정의하였고 yarn 단면에서의 local coordinate은 curved theory의 yarn path를 나타내는 tangent vector t , 단면에서 수직을 이루는 normal vector n , binormal vector b 를 이용하여 설정하였다.

3.2. Mechanical modeling of 3D circular braided glass fiber reinforced composite

직교 이방성 3차원 복합재료의 구성방정식을 만들기 위해 method of cells(이하 MC)를 이용한다. MC는 복합재료가 하부 cell들에 적용되는 응력과 그 응력으로 발생하는 변위가 연속된다는 연속체 이론에 근거한 이론[2,3]으로 이를 적용하기 위해서는 두 가지 가정이 필요하다.

첫째, Displacement continuity condition.

둘째, Iso stress condition.

이 조건들로부터 internal strain과 external strain의 관계는 sub cell 각 element의 strain을 각 방향 x, y, z로 평균화 시켜주는 localization matrix를 통해 유도할 수 있으며 이 관계를 이용하여 전체의 stiffness matrix를 계산, 전체 구성방정식을 유도할 수 있게 된다. 이를 식으로 표현하면,

$$[R]\{(\varepsilon_{mn})_{i,j,k}\}=[G]\{E_{mn}\} \quad (1)$$

$(m,n) \in [x,y,z]; (i,j,k) \in [1..N_x, 1..N_y, 1..N_z]$

$[G]$ is $6N_xN_yN_z$ by 6 geometrical localization vector.

$\{E_{mn}\}$ is 6 by 1 vector.

$\{(\varepsilon_{mn})_{i,j,k}\}$ is $6N_xN_yN_z$ by 1 vector.

$[R]$ is $6N_xN_yN_z$ by $6N_xN_yN_z$ matrix.

$N_xN_yN_z$ is the number of sub element

식 (1)과 stress와 strain의 관계식의 정의에 의해 stiffness matrix를 구할 수 있다.

4. 실험

복합재료를 제작하기 위해 사용된 3D braiding machine은 4 step 수직 형태로 총 2016개의 carrier를 가지고 104개의 피스톤을 사용하며 one by one 패턴으로 설계되어 있다.

4.1. 3D circular braided glass fiber reinforced composite의 제작

4 step이 하나의 cycle을 이루는 step 운동과 비팅 운동에 의해 mandrel을 중심으로 yarn의 꼬임을 형성하여 총 6 layer를 이루는 prepreg를 제작하여 RTM(Resin Transfer Molding)을 이용하여 제작하였다. RTM 공정시 사용된 수지는 Epoxy로 경화제로 100/56의 비율로 계량하여 사용하였으며 금형은 15cm X 16cm의 크기로 4개의 resin 주입 밸브와 1개의 air vent가 있다. resin 주입시간은 약 10시간, 압력은 60psi정도로 유지하였고 열풍 순환식 오븐 내에서 epoxy의 경화 cycle에 맞추어 경화시킨 후 상온에서 서냉하였다.

4.2. Determination of basic material properties

3D circular braided glass fiber reinforced composite의 탄성 한계 내에서의 물성을 예측하기 위해 필요한 기본적인 물성은 다음과 같다.

Young's modulus in the fiber direction, E_1

Young's modulus transverse to the fiber direction, E_2

Poisson' ratio, ν_{12}

Shear modulus, G_{12}

Volume fraction, ν_f

4.3. Tensile test

인장시험은 ASTM D3039에 따라 UTM(Universal Testing Machine)에서 수행하였으며 crosshead 속도는 3mm/min으로 하였다. 시험시 grip force에 의한 시편의 failure를 방지하기 위해 fiber/epoxy tab을 시편 양끝에 부착하였다. 시편의 strain은 전기적 저항 strain gauge를 이용하여 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1. 시험치와 이론치의 결과

시험은 각각 fiber axial과 fiber transverse 방향으로 시행하였으며 그림(1)과 (2)에 시험치의 범위와 평균값, 그리고 이론상의 구성방정식에 의해 얻어진 값을 각각 표시하였다.

5.2. 결과 분석 및 고찰

시험치와 이론상의 구성방정식에 의해 얻어진 값을 분석하였을 때 fiber axial direction에서는 volume fraction의 변화에 크게 영향 받지 않고 일치하였으나 fiber transverse direction의 경우에 volume fraction이 낮은 경우에는 비교적 큰 오차를 보였다. 그러나 값의 order가 거의 일치하여 앞서 제시한 구성방정식이 실제 복합재료의 탄성 거동을 어느 정도 잘 모사하고 있는 것을 알 수 있다.

6. 결론

3D braiding machine을 통해 복합재료의 prepreg를 제작, RTM공정을 통해 시편을 제작 인장 시험을 실행하여 얻은 복합재료 물성의 시험치와 수치 해석치를 비교해 보았다. 이를 통해 전체적으로 volume fraction이 증가함에 따라 물성 또한 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 volume fraction이 낮은 경우에는 이론치에 비해 물성 값이 낮게 나왔는데 이는 시편에 비해 UC의 상대적인 크기가 크고 시편의 제작 과정에서 UC구조의 변형에 기인하였다. 이에 시편 제작시, 특히 volume fraction이 낮은 경우에 대한 공정의 개선이 요구되며 좀더 정확한 결과를 얻기 위해 volume fraction에 따른 yarn의 geometry와 UC의 정확한 크기를 고려하는 계산법이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 지정 국가지정연구실 사업을 통하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) K. Lee, Principles of CAD/CAM/CAE systems, Addison-Wesley, 1999.
- 2) D. Bigaud and P. Hamelin, Computational Techniques for Materials, Composites and Composite Structure, Civil-Comp Press, Edinburgh., 73(2000).
- 3) D. Bigaud and P. Hamelin, Sci. Eng. Comp. Mat., 7, 291(1998).

Young's modulus in fiber axial direction for tensile test

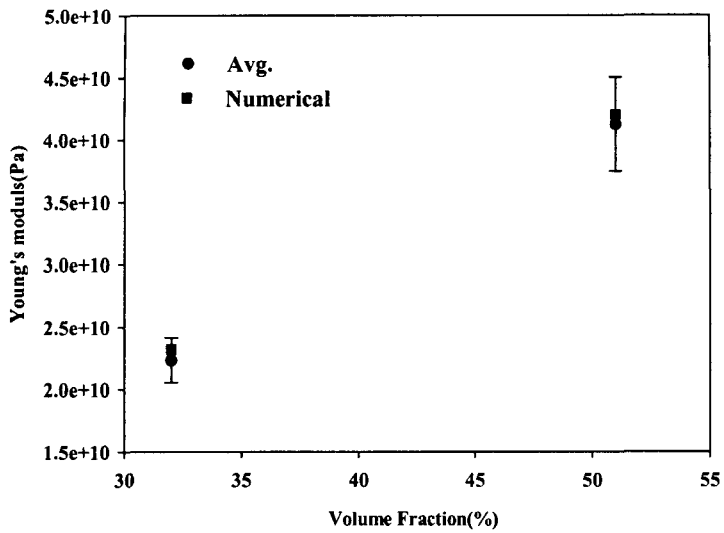


Fig. 1 Young's modulus in fiber axial direction for tensile test.

Young's modulus in fiber transverse direction for tensile test

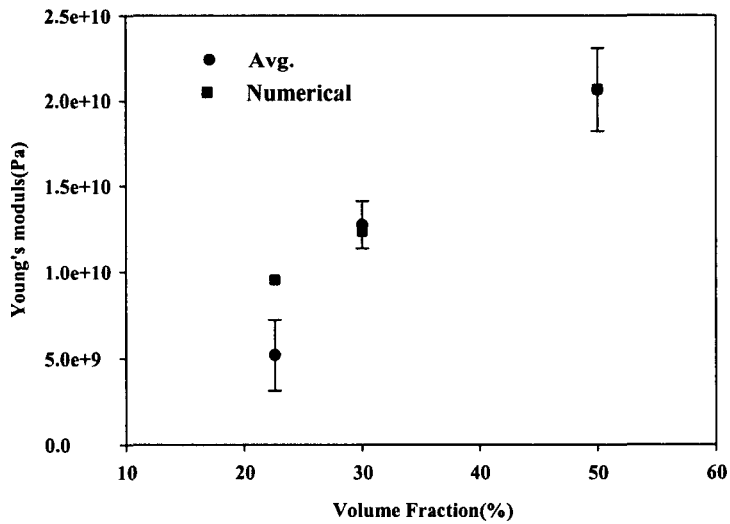


Fig. 2 Young's modulus in fiber transverse direction for tensile test.