

복셀화기법을 이용한 탄소방적사강화 복합재료의 열전도도 모델링

조영준* · 설인환* · 강태진* · 박종규**

Voxelization-based Model for Predicting Thermal Conductivities of Spun Type Carbon Fabric Composites

Young Jun Cho, In Hwan Sul, Tae Jin Kang and Jong Kyoo Park

Abstract

A thermal model of carbon spun yarn and its composite is presented. Based on voxelization method, the unit cells of spun carbon yarn and its composite are divided into a number of volume elements and the local material properties have been given to each element. By using Finite Difference Method, temperature distribution in the unit cell can be obtained. Effective thermal conductivity of unit cell is calculated using the temperature distribution and thermal conductivities of local elements.

Key Words: Thermal conductivity, Spun carbon yarn, Voxelization, Composite

1. 서 론

고온 내열재의 경우 내삭마성, 내열성과 함께 상대적으로 높은 열/전기 절연성을 요구하는 경우가 많기 때문에 저열전도도 특성을 갖는 탄소섬유 및 복합재료의 개발이 필요하다. 특히 PAN계 탄소 섬유는 레이온계 탄소섬유에 비해 열전도도가 높다는 단점을 갖기 때문에 이를 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다.

저열전도도 특성을 갖는 탄소섬유를 제조하기 위해 상대적으로 낮은 400~1200°C 온도에서 탄화를 진행하는 방법이 있다. 이를 준탄소섬유 또는 부분탄소섬유라 하는데, 준탄소섬유는 분자의 배향도가 떨어지기 때문에 역학적 물성은 떨어지지만, 열/전기 전도도가 낮아 상대적으로 높은 절연성을 나타낸다.

저열전도도 탄소섬유를 얻기 위해 안정화 PAN 섬유를 연속사(continuous yarn)가 아닌 방적사(spun yarn)의 형태로 제조하는 방법이 있다. 방적사는 길이가 짧은 스테이플 파이버(staple fiber)에 적당한 꼬임과 장력을 주어 만든 실(yarn)로 장섬유(filament fiber)로 만든 연속사와 구별된다. 방적사 형태의 섬유를 사용한 탄소/페놀 복합재료의 경우 일반 연속사 형태의 섬유를 사용한 경우보다 섬유방향으로 열전도도가 약 30% 감소한다는 연구결과가 있다 [1].

본 연구에서는 방적사와 이를 이용한 직물 복합재료의 기하학적 형태를 모사하고 복셀화 기법과 수치해석적인 방법을 이용하여 열전도도를 구하는 방법을 제시하였다.

2. 열전도도 모델링

2.1. 복셀화 기법 (Voxelization method)

복셀(voxel)은 2차원 영역에서 픽셀(pixel)을 3차원으로 확장한 개념으로, 부피를 가지고 있는 작은 단위를 의미한다. 구조를 모사함에 있어 전체

* 서울대학교 재료공학부

** 국방과학연구소

구조를 많은 수의 세부 엘리먼트(복셀)로 잘게 나누고 각 물성에 해당하는 복셀을 구분하면 실제 구조에 근접한 모델을 얻을 수 있어 복잡한 형상의 구조체를 실제와 근사하게 묘사하는데 많이 이용되는 방법이다. 복셀을 구분함에 있어 섬유 형태의 복셀과 매트릭스 형태의 복셀로 나눌 수 있다. 그림 1과 같이 복셀의 중심이 타원형 단면을 가진 섬유 내부에 존재하게 되면 이를 섬유형(Fiber-type) 복셀이라 하며 그렇지 않은 경우를 매트릭스형(Matrix-type) 복셀이라 한다. 이를 이용하면 섬유와 매트릭스로 나눌 수 있게 된다. (2-D)

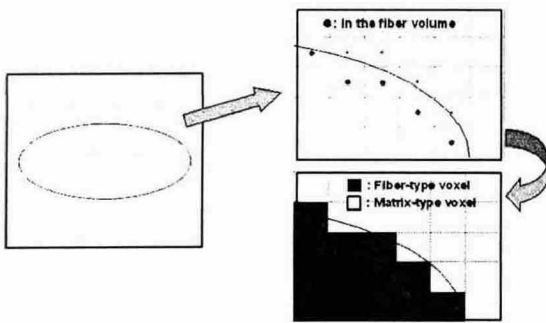


그림 1 복셀의 구분 (2-D)

그림 2는 3차원일 경우의 복셀화를 설명하고 있다. 복셀의 중심이 섬유 내부에 위치하게 되면 이는 섬유형 복셀이며 그렇지 않은 경우는 매트릭스형 복셀이다(a). 같은 섬유형 복셀이라 할지라도 복셀이 어떤 섬유 내부에 위치하느냐에 따라 섬유형 복셀도 나뉘지게 된다(b).

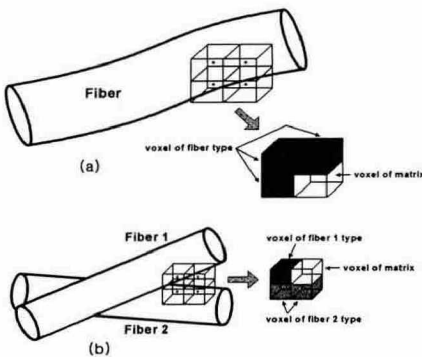


그림 2 복셀의 구분 (3-D)

그림 2(b)에서 섬유형 복셀이 두 가지 경우로 나누어지게 되며 이에 따라 복셀은 이에 해당되는 섬유의 물성을 갖게 된다. 특히 같은 섬유라면 복셀의 물성은 공간상에 분포하고 있는 섬유의 배향각에 의존하게 된다. 각 복셀의 중심점에서 섬유의 배향각을 결정하여 이를 복셀의 배향각으로 정의하고 이에 상응하는 물성을 부여하게 된다. 그림 3과 4는 방적사의 꼬임 전후의 구조와 이를 복셀화 한 모습을, 그림 5는 8매 주사적 복합재료의 구조를 묘사한 것을 보여주고 있다.

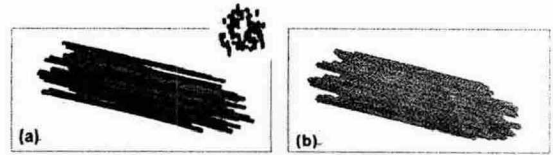


그림 3 꼬임 전 방적사 구조 (a) 방적사, (b) 복셀 구조

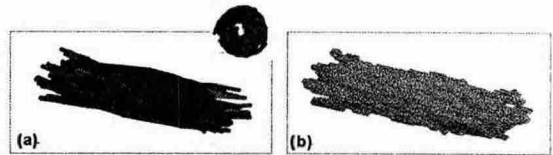


그림 4 꼬임 후 방적사 구조, (a) 방적사, (b) 복셀 구조

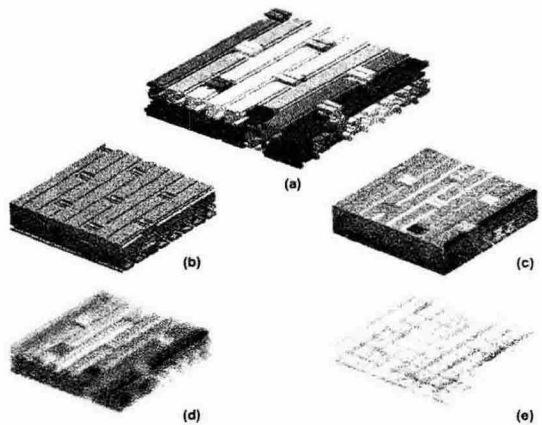


그림 5 8매 주사적 모사 (a) 실제 구조, (b) 복셀화된 매트릭스, (c) 복셀화된 섬유와 매트릭스, (d) 복셀화된 섬유, (e) 섬유의 방향벡터 성분

2.2. 지배방정식 구성

방적사 단위구조 내에서 열은 다음의 Laplace 방정식을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

여기서 q_i 는 i -방향으로의 열유동(heat flux)을 나타낸다. 비등방성 물질의 경우 열전도도는 방향성에 영향을 받게 되는데, 일반 직교좌표계에서 비등방성 물질의 열전도 현상은 x-y-z 세 방향에 따라 다음 식(2)와 같이 세 개의 일반화된 식으로 표현할 수 있다.

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (i, j = x, y, z) \quad (2)$$

따라서 식(1)는 다음 식(3)과 같이 일반화된 Laplace 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{xz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yx} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{yz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zx} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{zy} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

그러나 섬유의 경우 열전도도는 그 방향성 때문에 위치마다 변하게 되므로 위 식에서 열전도도 성분도 함께 미분해야 하며 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial k_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial k_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial k_{xz}}{\partial z} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \\ & + \left(\frac{\partial k_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial k_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial k_{yz}}{\partial z} \right) \frac{\partial T}{\partial y} + \left(\frac{\partial k_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial k_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial k_{zz}}{\partial z} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \\ & + 2 \left(k_{xy} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + k_{yz} \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} + k_{zx} \frac{\partial^2 T}{\partial z \partial x} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

위의 편미분 방정식을 풀기 위해서 7-point 유한차분법(FDM)을 도입하였다. 미분방정식의 각 항을 근사화(discretization)시켜 이를 행렬 형태로 표현하면 식(5)와 같다.

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (5)$$

여기서 $[K]$ 는 열전도도 매트릭스, $\{u\}$ 는 온도 벡터, $\{F\}$ 는 경계조건을 각각 나타낸다. 이때 각 점에서 섬유배향각에 따라 달라지는 열전도도 k_{ij} 값은 로컬 좌표계를 글로벌 좌표계로 식(5)을 풀어 $\{u\}$ 에 해당하는 해를 구하여 복셀에서의 온도 분포를 얻게 되면 전체 단위구조의 온도평균 유효 열전도도 k^{eff} 는 다음 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$k^{eff} = \frac{\sum_{ijk} k_{ijk} u_{ijk}}{\sum_{ijk} u_{ijk}} \quad (6)$$

3. 결과

복셀을 이용해 방적사와 직물 복합재료의 기학적 구조를 모사하고 유한차분법을 이용하여 열전도도를 예측하였다. 그림 6은 꼬임각에 따른 방적사 섬유방향으로의 열전도도 값의 변화를 나타낸 것이다. 방적사의 꼬임각이 증가할수록 열전도도 값이 작아짐을 볼 수 있다. 이는 꼬임으로 인해 섬유방향으로의 열전달 기여도가 적어지기 때문이다. 꼬임을 주지 않은 연속사와 비교를 하면, 연속사의 열전도도가 방적사에 비해 높음을 볼 수 있다.

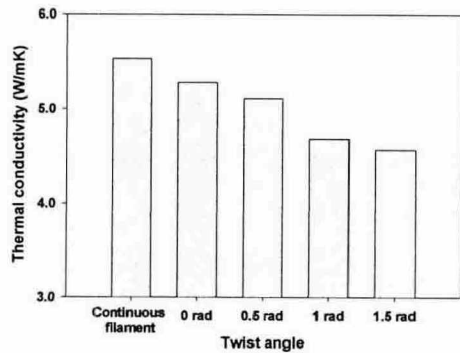


그림 6 꼬임각에 따른 방적사 섬유방향으로의 열전도도 변화 (섬유 부피분율 0.51)

그림 7은 평직 복합재료에 있어서 강화재료 사용되는 방적사의 꼬임각과 이에 따른 평면방향 (in-plane) 열전도도 변화를 나타낸 것이다. 이때 복합재료의 섬유부피분율은 0.5이다. 그림에서 보는 바와 같이 방적사의 꼬임각이 증가할수록 복합재료의 평면방향 열전도도는 작아짐을 볼 수 있다. 또한 방적사를 사용하면 연속사를 사용했을 때보다 열전도도 값이 떨어진다. 그림 8은 방적사의 꼬임각에 따른 평직 복합재료의 두께방향 (out-of-plane)의 열전도도 변화를 나타낸 것이다. 두께방향의 열전도도 역시 방적사 꼬임각에 따라 감소하는 경향을 보이고 있지만 평면방향의 경우에 비해 감소폭이 매우 작음을 볼 수 있다. 그림 9-10은 8매 주사직 복합재료의 열전도도 변화를 나타낸 것이며 경향은 평직일 경우와 유사하다.

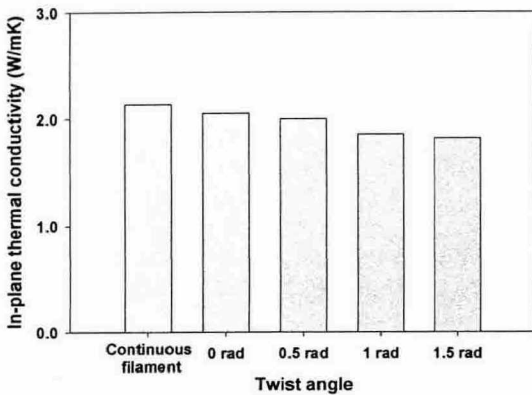


그림 7 방적사 꼬임각에 따른 평직 복합재료의 평면방향 열전도도 변화

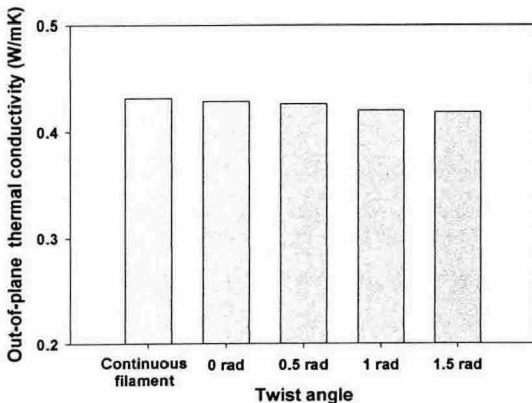


그림 8 방적사 꼬임각에 따른 평직 복합재료의 두께방향 열전도도 변화

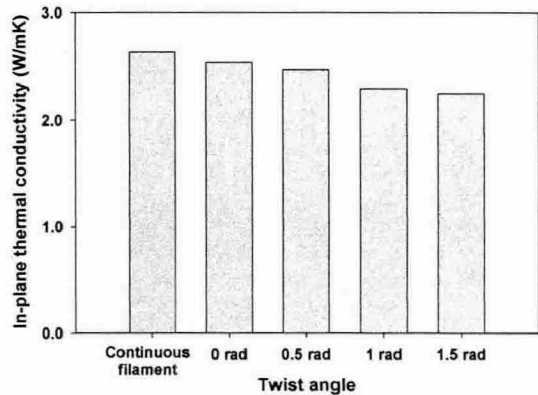


그림 9 방적사 꼬임각에 따른 8매 주사직 복합재료의 평면방향 열전도도 변화

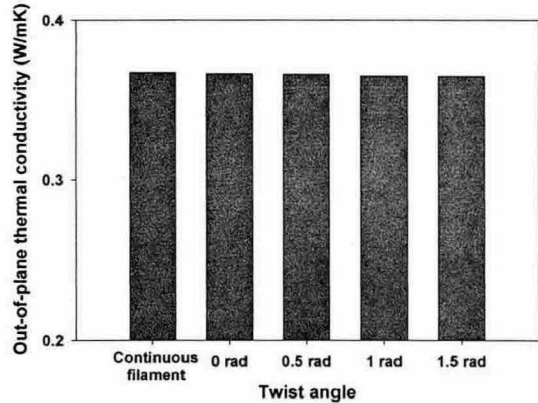


그림 10 방적사 꼬임각에 따른 8매 주사직 복합재료의 두께방향 열전도도 변화

후 기

본 연구는 2000년 과학기술부 지정 국가지정연구 실 사업의 과제 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) R.L.Noland, Ablative and insulative structures and microcellular carbon fibers forming same, US Patent 5298313, 1994.
- (2) A. Dasgupta, RK Agarwal. Orthotropic thermal conductivity of plain-weave fabric composites using a homogenization technique. Journal of Composite Materials 1992;26(18):2736-2758