

3 차원 브레이드 유리섬유/에폭시 복합재료의 열전도도 예측에 관한 연구

정혁진* · 강태진* · 윤재륜*

Prediction of Thermal conductivities of 3-D braided glass/epoxy composites using a thermal-electrical analogy

Hyuk Jin Chung, Tae Jin Kang and J.R. Youn

Key Words : 3-D Braided Composites, thermal-electrical analogy, thermal resistance network model

ABSTRACT

This paper examines the effective thermal conductivity of 3-D braided glass/epoxy composites. 3-D braided composites have a number of advantage over conventional laminate composites, including through-thickness reinforcement, and high damage tolerance and processability. The thermal properties of composites depend primarily on the microstructure of the braided preform and properties of constituent materials. A thermal resistance network model based on structure of the braided preform is proposed by using thermal-electrical analogy. In order to affirm the applicability theses solutions, thermal conductivities of 3-D braided glass/epoxy composites are measured

기호설명

Pitch length: h

Braid angle: γ

1. 서론

최근 자동차, 항공분야 등에서의 섬유복합재료의 이용이 증가하고 있는데 이는 재료의 특성에 의한 상당한 무게 감소와 물성의 우수에 기인한 것이다. 3 차원 브레이드 프리폼을 강화재로 사용한 복합재료는 전통적인 2 차원 적층 복합재료가 두께 방향으로의 층간 분리 현상에 의한 심각한 물성 저하가 있는 것에 비해 3 차원 구조로 층간 분리 현상이 없고, 높은 손상 허용도(damage tolerance)를 가지는 등 구조적 우수성을 가지며,

제작이 용이하고 다양한 형태의 복합재료를 만들 수 있는 공정적인 측면으로도 많은 장점이 있다 [1].

따라서 이에 따른 많은 이전의 연구가 있었는데 대부분 기계적 성질에 중점을 둔 것으로 우수한 열적 재료에 대한 요구가 증대되고 있는 가운데 열전도도에 관한 연구의 필요성이 부각되고 있다. 열전도도의 해석에는 다양한 방법이 있는데, 그 중에서도 열·전기 유사성을 이용한 방법은 상대적으로 단순성과 효율성 등으로 열전도도 해석에 있어 성공적으로 적용되어왔다. 이는 열전달 지배방정식인 Fourier 법칙과 전기전달 지배방정식인 Ohm 법칙이 수학적으로나 현상학적으로 유사함을 이용하는 방법이다[2][3]. 기존의 열전도도 예측에 관한 연구에는 2 차원 구조인 일방향 복합재료와 평직물 복합재료의 열전도도 예측에 관한 연구가 있었다.

본 연구에서는 3 차원 브레이드 복합재료의 열전도도를 단위 구조 모델링을 통한 열·전기 유사성

* 서울대학교

을 이용하여 예측하고 실험을 통하여 측정된 값과 비교, 검증하고 같은 재료의 일방향 복합재료와 평직물 복합재료와 비교하여 구조적 우수성이 열적 성질에도 영향을 끼치는가를 조사하였다.

2. 3 차원 브레이드 프리폼 구조

3 차원 브레이드 구조의 단위구조 모델링에 관한 연구는 Ko 에 의해 처음 수행되어 졌으며 그는 4-스텝 1×1 공정을 기초로 하여 전체 프리폼의 단면과 같은 방향으로의 사각 임방체를 미세 단위구조로 하여 각각의 대각선 방향으로 실이 교차한다고 모델링 하였다. Li 는 Ko 와는 다르게 프리폼의 내부가 평행한 네 그룹의 실이 서로 교차하는 두 개의 평면을 이룬다고 모델링 하였고 프리폼의 내부와 표면의 단위구조가 다르다고 정의 하였다. 교차하는 평면의 각각의 실은 브레이딩 앵글, γ 를 이루고 있고, 내부 단위구조는 브레이딩 축과 45° 로 회전되어있다. Li 는 교차하는 두 개의 평면을 이용하여 내부구조를 좀더 쉽게 모델링 하였고 반복하는 단면의 구조와 최소 반복단위는 Fig. 3 과 같다[4].

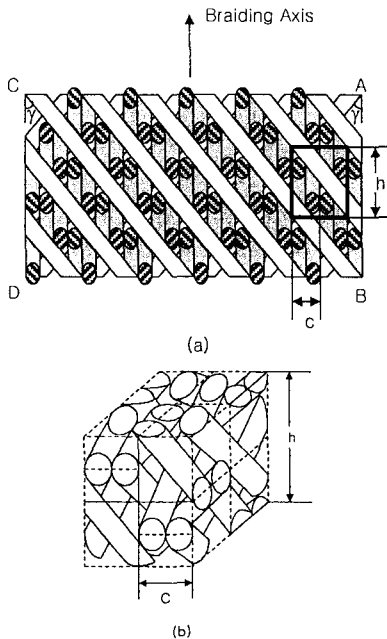


Fig. 3. Schematics of interior yarn structure and the unit cell(identified by Li). (a) Yarn arrangement viewed from cross section-ABCD of Fig. 4 (b) the unit cell.

3. 단위구조 모델링

3.1 단위구조

열전도도를 예측하는데 있어 시편의 크기가 충분히 두껍다고 가정하면 표면과 모서리의 단위구조는 무시할 수 있으므로 내부의 단위구조만 고려하여 Fig. 4.(a)와 같이 내부의 단위구조를 나타낼 수 있다. 단위구조는 다시 2 개의 셀로 나누어져 서로 반복되면서 전체 브레이드 복합재료의 내부가 이루어진다.

실은 복합재료 길이방향으로 γ 만큼 기울어져 있고 단위구조는 표면과 45° 를 이루고 있으므로 2 단계 좌표변환을 통해 복합재료의 길이방향과 두께 방향으로의 열전도도에 실이 기여하는 정도를 알 수 있다. 이것을 열흐름 방향에 수직인 단면적과 열흐름이 지나가는 길이를 부피분율로 고려하여 기지재와의 저항연결로 만들어 전체 단위구조의 열전도도를 예측할 수 있다.

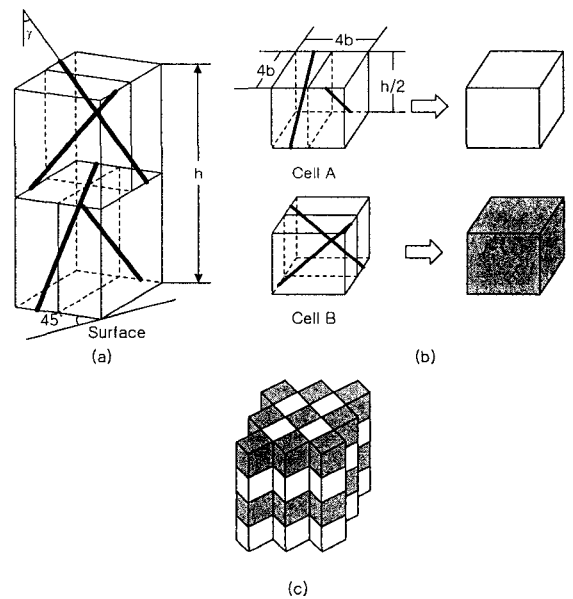


Fig. 4. Yarn topology in the perform interior(identified by Wang and Wang[5]); (a), (b) yarn topology in cells A and B; (c) cell arrangement in the perform interior.

3.2 복합재료 길이방향 열전도도 예측

실의 부분 좌표계를 좌표변환을 통해 전체 좌표계로 바꾸는 행렬식은 아래와 같다.

$$[K] = [T]^T [K^*] [T] \quad (1)$$

$$[T] = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi \\ \sin \theta & \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 K 는 전체 좌표계에서의 실의 열전도도, K'' 는 부분 좌표계에서의 실의 열전도도, θ 는 γ 이고 ϕ 는 45° 이다.

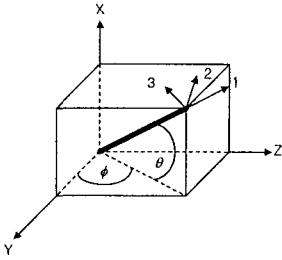


Fig. 5. Coordinate system of a yarn located spatially.

부분좌표계의 실의 열전도도 값을 구하기 위해 섬유방향 실의 열전도도, K_{ya} 는 식(3)와 같이 혼합률 법칙에 의해 구할 수 있고 섬유횡방향의 실의 열전도도, K_{yt} 는 식(4)과 같이 Clayton[6]의 식으로 표현할 수 있다.

$$K_{ya} = c_{fp} K_{fa} + (1 - c_{fp}) K_m \quad (3)$$

$$K_{yt} = \frac{K_m}{4} \left[\sqrt{(1 - c_{fp})^2 \left(\frac{K_{ft}}{K_m} - 1 \right)^2 + \frac{4K_{ft}}{K_m} - (1 - c_{fp}) \left(\frac{K_{ft}}{K_m} - 1 \right)} \right] \quad (4)$$

회전변환 행렬 T 를 통하여 전체 좌표계로 전환된 실의 열전도도 값을 기지재의 열전도도와 함께 열저항 네트워크에 이용된다.

셀 A 와 B 는 다시 2 개의 미세 셀로 나타낼 수 있고 각각의 셀에서 부분 좌표계 실의 열전도도를 좌표 변환하여 얻은 복합재료 길이방향 실의 열전도도를 얻는다. 이 값을 기지재의 열전도도와 함께 열흐름 방향에 수직인 미소 단면적을 고려하면 Fig. 6(a)과 같이 저항 셀의 병렬연결로 표현할 수 있다. 복합재료 길이방향의 열 흐름에서 저항 셀에의 길이는 l 로 같고 보강재와 기지재의 단면적이 다르므로 단면적의 상대적인 비를 복합재료 내의 실의 부피분율로 나타낼 수 있다.

i 번째 저항 셀의 열저항은 다음과 같이 표현된다.

$$R_i = \frac{l_i}{k_i A_i} \quad (5)$$

l_i : 셀의 길이

k_i : 열전도도

A_i : 열 흐름에 수직인 셀의 단면적

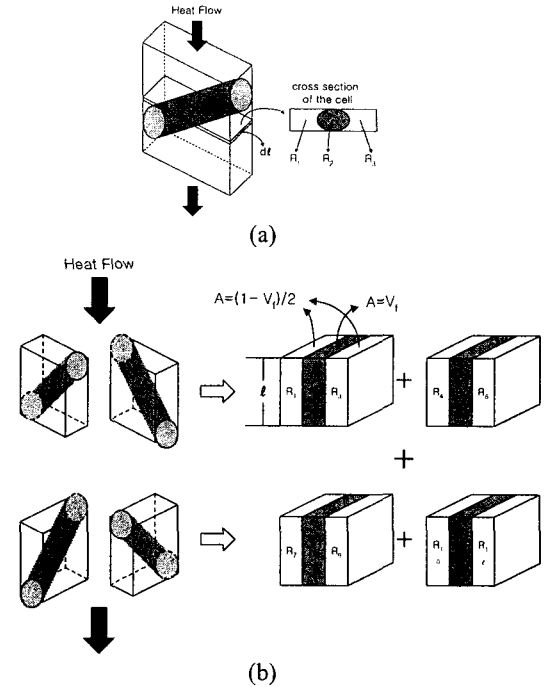


Fig. 6. (a) Area of finite element.; (b) Thermal resistance cell network of longitudinal direction of composites.

따라서 모든 저항 셀에서 열 흐름의 길이는 같고 단면적을 실의 부피분율로 나타내어 열전도도는 보강재의 경우, 방향에 따라 다르며 기지재는 등방성 물질이므로 각각의 값들을 대입하여 열저항을 계산할 수 있다. Fig. 6의 전체 단위 구조의 저항 셀들을 열저항 네트워크로 나타내면 Fig. 7과 같고 각 저항 셀의 열저항 값의 합으로 전체 단위구조의 열전도도를 예측할 수 있다.

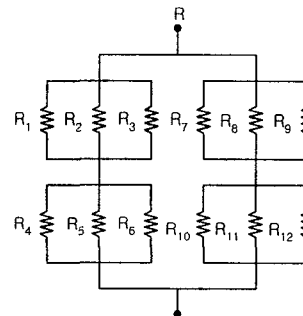


Fig. 7. Entire thermal resistance network of longitudinal direction of composites.

브레이드 앵글, γ 를 30° 라 가정하고 부피분율에 따른 3 차원 브레이드 복합재료의 길이방향의 열전도도를 예측한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

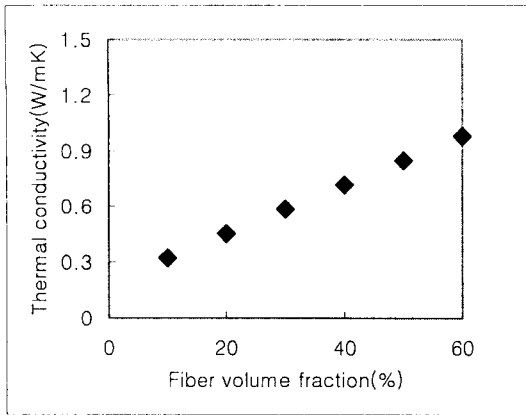


Fig. 8. Effective Thermal conductivity of longitudinal direction of 3-D braided composites.

3.2 복합재료 두께방향 열전도도 예측

복합재료 두께방향의 열전도도는 위와 같은 방법으로 예측할 수 있다. 셀 A 와 B 에서 열흐름 방향에 대해 길이는 l 로 같고 단면적의 상대적인 비는 보강재의 부피분율로 나타낼 수 있다.

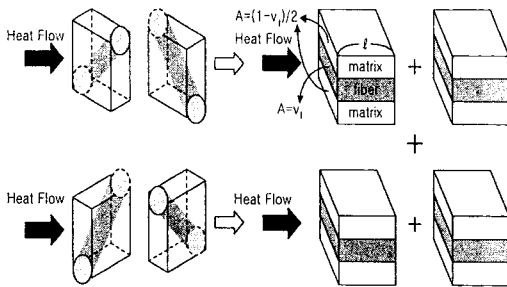


Fig. 9. Thermal resistance network of transverse direction of composites.

브레이드 앵글, γ 를 30° 라 가정하고 부피분율에 따른 3 차원 브레이드 복합재료의 길이방향의 열전도도를 예측한 결과를 Fig. 10 에 나타내었다.

4. 실험

보강재는 미국 Owens-corning 사의 S-glass roving 사와 기지재는 국도화학 YD-114 에폭시, 경화제는 국도화학 TH-432 를 사용하여 구조에 따른 열전도도를 비교하기 위해 각기 RTM 과 Hot press molding 법으로 3 차원 브레이드 복합재료와 일방향 복합재료, 평직물 복합재료를 제조하였다(열전도도 시편의 제작과정, 크기 및 측정장비는 자세

한 기술을 필요).

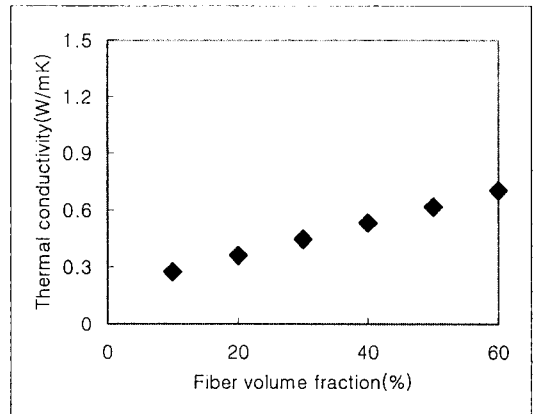


Fig. 10. Effective Thermal conductivity of transverse direction of 3-D braided composites.

후 기

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

참고문헌

1. A.P. Mouriz, M.K. Bannister, P.J. Falzon, K.H. Leong, "Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites", Composites., 1999.
2. Qiong-Gong Ning &Tsu-Wei Chou, "Close-form solutions of the in-plane effective thermal conductivities of woven-fabric composites", Composites Science and Technology, 1995.
3. Qiong-Gong Ning &Tsu-Wei Chou, "Close-form solutions of the transverse effective thermal conductivities of woven-fabric composites", Journal of Composites Materials, Vol. 29, 1995.
4. Wei Li, "On the structural mechanics of 3-D braided preforms for composites", Fiber and Polymer Science, 1990.
5. Y.Q. Wang and A.S.D Wang, "On the topology yarn structure of 3-D braided rectangular and tubular braided preforms", Composites Science and Technology", Vol. 51, 1994.
6. Clayton W.A, "Constituent and composites thermal conductivities of phenolic-carbon and phenolic-graphite ablators", AIAA, No. 71-380, 1971.