

직물 복합재료의 물성치 특성화 기법 및 실험적 계측

문영규* · 구남서** · 김 철* · 우경식**

Material Property Characterization Method and Experimental Measurement of the Effective Thermal Conductivities of Woven Fabric Composite Materials

Young Kyu Moon, Nam Seo Goo, Cheol Kim, Kyungsik Woo

Key Words: Plain-Weave, Woven Fabric Composite, Thermal Conductivity

ABSTRACT

In general, laminate effective orthotropic thermal conductivities are dependent on fiber and matrix material properties, fiber volume fraction and fabric geometric parameters. This paper deals with the predicting method of the transverse and the in-plane thermal conductivities of plain weave fabric composites based on the three dimensional series-parallel thermal resistance network. Thermal resistance network was applied to unit cell model that characterizes the periodically repeated pattern of plain weave. Also, an experiment apparatus is setup to measure the thermal conductivities of composite material. The numerical and experimental results of carbon/epoxy plain weave are compared.

1. 서 론

열전도도는 복합재료의 중요한 물리적 특성 중의 하나이다. 복합재료의 열전달 문제를 해석하기 위해서는 복합재료의 열전도도가 필요하다. 이는 궁극적으로 실험을 통하여 결정되어야 하나, 복합재료의 구성을 조정하여 필요한 성질을 얻기 위해서는 미시역학적 해석이 유용하다. 즉 구성재료의 물성으로부터 복합재료의 물성을 예측할 수 있다면 재료 설계의 관점에서 최적화를 이루어 낼 수 있다. 특히 열전도도의 경우, 복합재료의 각 라미나(lamina) 내 섬유(fiber)와 기지(matrix)의 구별하여 각각의 열전도도로부터 복합재료의 유효 열전도도를 계산한다[1-5].

직물 복합재료는 여러 가닥의 섬유로 이루어진 경사(warp yarn)와 위사(fill yarn)가 서로 교차하여 꼬여 있는 복잡한 구조로 되어있다.

직물 복합재료는 위사와 경사의 꼬임 및 그에 따른 섬유의 굴곡 등 기하학적 형상이 복잡하여 열-기계학적 물성치 산출에 어려움이 있다.

본 연구에서는 평직 직물 복합재료의 열전도도를 예측하기 위하여 단위구조에 대한 열저항 네트워크를 도출하여 섬유와 기지의 열전도도로부터 면내 방향 및 두께 방향의 열전도도를 계산하였다. 또한, 1차원적인 열전달을 만들어 두 점 사이의 온도를 계측한 후 참고 시편의 열전도도와 비교하여 재료의 열전도도를 계측할 수 있는 실험 장치를 제작하여 탄소/에폭시 평직 복합재료의 열전도도를 계측하였다. 계측된 열전도도와 예측된 열전도도를 비교하여 해석의 타당성을 보이고자 한다.

2. 이론적 해석

본 연구에서는 참고문헌[2, 3]의 방법에 따라 직물 복합재료의 열전도도를 예측하고자 하며 주된 내용은 다음과 같다.

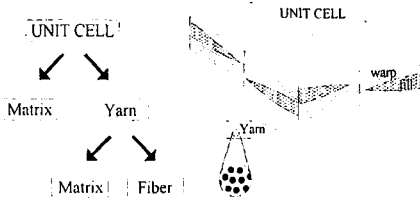
* 경북대학교 기계공학부

** 경북대학교 기계공학부, 교신저자
(E-mail: nsgoo@knu.ac.kr)

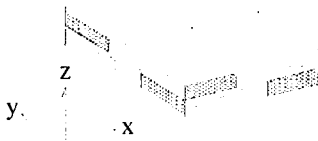
** 충북대학교 구조시스템공학과

2.1 단위 구조(unit cell)

라미나 내의 기하학적 형상이 경사와 위사의 양 방향으로 섬유다발(yarn)의 꼬임이 반복되어 있으므로 가장 최소의 단위 구조를 해석하여 구한 해는 라미나 전체를 통해 구한 결과와 동일하게 나타난다는 기본 개념을 이용한 것이다.

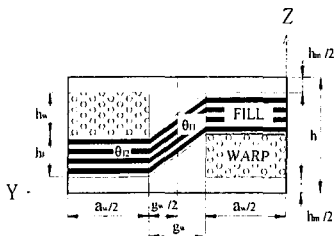


(a) Decomposition of the unit cell

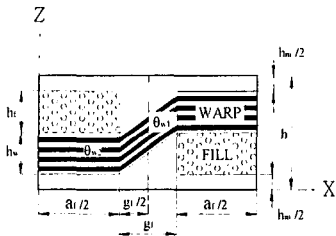


(b) The idealized unit cell

Fig. 1 The unit cell of plain-weave fabric lamina



(a) Section of the unit cell along fill direction



(b) Section of the unit cell along warp direction

Fig. 2 Geometry of the unit cell

2.1.1 단위 구조의 정의

미시역학적 방법에서 평직 직물 라미나의 단

위 구조는 Fig. 1(a)에 나타내었다. X축을 경사 방향과 일치되게 하고 Y축을 위사 방향과 일치시킨다. 단위 구조의 기하학적 매개 변수인 a 와 g 는 각 섬유다발의 너비와 두 섬유다발이 접하고 있는 사이의 간격으로 정의한다. 경사와 위사는 w 와 f 로 표기하고 단위 구조의 두께 h 는 라미나의 두께와 동일하다. 또한, 지지 층과 경사, 위사의 두께는 각각 h_m , h_w , 그리고 h_j 로 나타낸다.

2.1.2 형상의 단순화

Fig. 1(a)의 단위 구조는 복잡하여 그대로 해석하기 어려움으로 Fig. 1(b)와 같이 형상을 단순화한다. 이는 직물 라미나의 실제 미세 구조가 복잡하기 때문에 단순화시키는 것이다. 여기에서, 경사와 위사의 배열 각도는 연속적이지만 다음과 같이 평균값을 사용한다. $\bar{\theta}$ 는 X, Y축에 대해 기울어진 평균 섬유 경사각을 의미한다. Fig. 2에는 단순화된 섬유다발의 배열을 단면에 대하여 나타내었다.

$$\bar{\theta} = \begin{cases} \bar{\theta}_{d1} & \text{for the inclined parts of a yarn} \\ \bar{\theta}_{d2} & \text{for the other parts of a yarn} \end{cases} \quad (1)$$

여기에서

$$\bar{\theta}_{di} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{\theta}_{di}(S_j) \\ (d = w, f, \quad i = 1, 2, \quad S = X, Y)$$

2.2 3차원 열저항 네트워크를 이용한 열전도도

예측

일반적으로 열전달 문제는 전기 전도 문제와 유사시켜 생각할 수 있다. 평면 내 열전도도와 두께 방향 열전도도를 나누어 계산하는데 기본 가정은 다음과 같다.

(1) 섬유와 지지 사이의 열 접촉 저항은 무시할만 하다.

(2) 열은 Z축(두께 방향의 경우) 또는 X축(면내 방향의 경우)을 따라 흐르고 열유동선은 직선이며 서로 평행하다.

(3) 아주 얇은 단열면이 존재하여 열유동 방향으로 단위 구조를 여러 개의 부영역으로 분할할 수 있다.

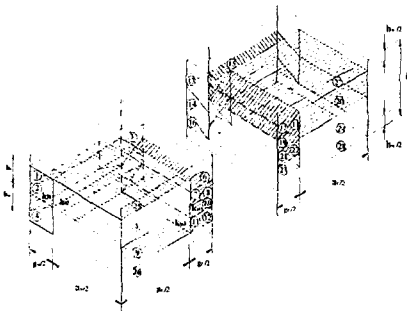
(4) 직물 복합재료 라미나의 열전도도는 단위 구조에서 구한 열전도도와 같다.

2.2.1 열저항 네트워크

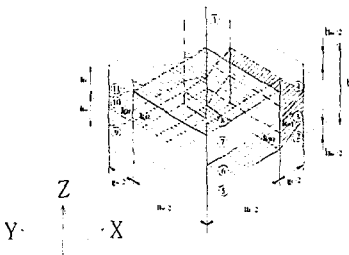
전기저항이 전기의 전도에 관계가 있는 것과 같이 열저항은 열의 전도와 관계 있다. 저항을 구동 포텐셜의 해당하는 전달률에 대한 비로 정의한다면, 전도에 대한 한 요소에 대한 열저항은 다음 식과 같다.

$$R_i = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{L_i}{k_i S_i} \quad (i=1, 2, \dots, n)(2)$$

여기에서 L 은 길이, k 는 유효 열전도도, S 는 단면적이다. 따라서 단위구조에 대한 유효 열전도도는 저항의 직렬 및 병렬 연결을 계산하는 것과 마찬가지로 계산한다. 단위 구조를 구성 재료 및 형상에 따라 여러 개의 부영역으로 분할하여 Fig. 3과 같이 나타내었다. 평직 복합재료의 기하학적인 대칭성으로 인하여 면내 방향의 경우에는 1/2만을, 그리고 두께 방향의 경우에는 1/4만을 고려하면 된다. Fig. 4에는 평직의 열전도도를 계산하기 위한 열저항 네트워크의 예를 나타내었다.

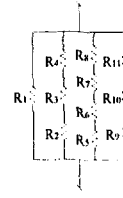


(a) The idealized quarter unit cell

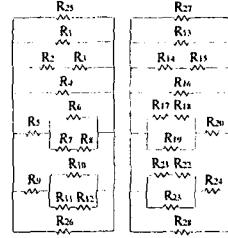


(b) The idealized half unit cell

Fig. 3 Partition of unit cell for thermal network



(a) Transverse resistance thermal network



(b) In-plane resistance thermal network

Fig. 4 3-D thermal resistance network of woven fabric lamina

2.2.2 두께 방향 유효 열전도도

두께 방향의 열전도도는 단위 구조의 1/4 모델로 해석이 가능하다. Fig. 3(a)에서처럼 4개의 단열면이 존재하여 11개의 부영역으로 나누어진다. Fig. 3(a)의 각 부영역의 열저항과 전체 열저항은 참고문헌 [2]를 참조하라. 최종적인 유효 열전도도는 다음과 같다.

$$k_{ef} = \frac{k_m}{\left(1 + \frac{g_w}{a_w}\right)\left(1 + \frac{g_f}{a_f}\right)} \times \left[\frac{\frac{g_w}{a_w} \frac{g_f}{a_f} + \frac{\frac{g_f}{a_f}}{\left(\frac{h_m}{h} + \frac{h_f}{h}\right) + \frac{k_m}{k_{w1}} \frac{h_w}{h}}}{\frac{h_m}{h} + \left(\frac{k_m}{k_{w2}} \frac{h_w}{h} + \frac{k_m}{k_{f2}} \frac{h_f}{h}\right)} + \frac{\frac{g_w}{a_w}}{\left(\frac{h_m}{h} + \frac{h_w}{h}\right) + \frac{k_m}{k_{f1}} \frac{h_f}{h}} \right] \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 k_{ef} 를 계산하기 위해서, 섬유 체적비와 h_m/h , k_{d1} , k_{d2} 의 값이 필요하며 이는 다음과 같다.

$$c_f = c_{fb} \frac{V_f}{V} = c_{fb} \times \frac{a_w \rho_w (h - h_w) + h_w g_w \rho_w + h g_w a_f}{h(a_w + g_w)(a_f + g_f)} \quad (4)$$

$$c_f = c_{fp} \frac{V_p}{V} = c_{fp} \times \frac{a_f a_w (h - h_w) + h_w g a_w + h_f g a_f}{h(a_w + g_w)(a_f + g_f)} \quad (4)$$

$$\frac{h_m}{h} = 1 - \frac{c_f}{c_{fp}} \left(1 + \frac{g_f}{a_f}\right) \left(1 + \frac{g_w}{a_w}\right) + \frac{h_w g_f}{h a_f} + \frac{h_f g_w}{h a_w} \quad (5)$$

$$k_{di} = k_a \sin^2 \bar{\theta}_{di} + k_i \cos^2 \bar{\theta}_{di} \quad (6)$$

($d = w, f, i = 1, 2$)

2.2.3 면내 방향 유효 열전도도

두께 방향의 열전도도는 단위 구조의 1/2 모델로 해석이 가능하다. Fig. 3(b)에서처럼 28개의 부영역으로 나누어 진다. Fig. 3(b)의 각 부영역의 열저항과 전체 열저항은 참고문헌 [3]을 참조하라.

최종적인 경사 방향 유효 열전도도는 다음과 같다.

$$k_{ew} = \frac{(1 + \frac{g_f}{a_f})}{(1 + \frac{g_w}{a_w})} \times \left\{ \frac{k_m}{1 + \frac{g_f}{a_f}} \left[\left(1 + \frac{g_w}{a_w}\right) \frac{h_m}{h} + \frac{g_w}{a_w} \frac{h_w}{h} \right] + \frac{h_f g_w}{h a_w} \left(\frac{1}{k_f} + \frac{g_f}{a_f} \frac{1}{k_m} \right)^{-1} + \frac{h_f}{h} \frac{1}{\frac{1}{k_f} + \frac{g_f}{a_f} \left[\frac{1}{2} k_m + \left(\frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_w} \right)^{-1} \right]^{-1}} \right\} + \frac{1}{\frac{1}{k_w^2} \frac{h_w}{h} + \frac{g_f}{a_f} \left[k_w \left(\frac{h_w}{h} - \frac{1}{2} \frac{h_f}{h} \right) + \frac{h_f}{h} \left(\frac{1}{k_w} + \frac{1}{k_m} \right)^{-1} \right]^{-1}} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 k_{ew} 를 계산하기 위해서, 섬유 체적비와 h_m/h , k_{di} 의 값이 값이 필요한데, 섬유 체적비와 h_m/h 는 식 (4), (5)와 같고 k_{di} 는 두께 방향과는 달리 다음과 같이 정의된다.

$$k_{wi} = k_a \cos^2 \bar{\theta}_{wi} + k_i \sin^2 \bar{\theta}_{wi}, \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

$$k_{fi} = k_i \quad (9)$$

식 (6), (8), (9)에서 k_a 와 k_i 는 다음과 같다.

$$k_a = c_{fp} k_{fa} + (1 - c_{fp}) k_m \quad (10)$$

$$k_i = \frac{k_m}{4} \left[\sqrt{(1 - c_{fp})^2 \left(\frac{k_{fr}}{k_m} - 1 \right)^2 + \frac{4k_{fr}}{k_m}} - (1 - c_{fp}) \left(\frac{k_{fr}}{k_m} - 1 \right) \right]^2 \quad (11)$$

여기에서 c_{fp} 는 섬유다발의 섬유 체적비를 의미하고 식 (11)은 참고문헌 [6]을 참고한 것이다.

3. 실험적 계측

본 연구에서 사용한 열전도도 계측 방법은 정상상태 하에서 열전도도가 알려진 표준 시편(reference specimen)과 측정 시편의 온도 비교를 통하여 열전도를 계산하는 비교 측정법(comparative method)의 일종이다[7]. 실험 장치를 Fig. 5에 나타내었다.

표준 시편으로는 STS 304를 사용하였으며 시편의 열전도도는 다음과 같이 계산된다.



Fig. 5 Experimental apparatus for thermal conductivity measurement

$$k_{exp} = k_r \times \frac{\Delta T_r}{\Delta T} \frac{\delta}{\delta_r} \frac{d_r^2}{d^2} \quad (12)$$

여기에서 ΔT 는 온도차, δ 는 거리, d 는 지름이며 하첨자 r은 표준시편을 나타낸다.

시험에 사용되는 시편의 크기는 길이 20mm, 지름 12mm의 원통형으로 측면에 15mm 간격으로 중심까지 구멍이 뚫려있는 형상이다. 이 구멍에 K-형의 열전대를 사용하여 온도를 계측한다. 같은 형상으로 제작된 STS 304 재질의 표준 시편이 직렬로 연결되어 있다.

4. 결과

Fig. 6에는 3차원 열저항 네트워크 기법을 사용하여 탄소/에폭시, 케블라/에폭시, E-글라스/에폭시, S-글라스/에폭시 평직 직물 복합재료의 두께 방향 및 면내 방향의 유효 열전도도를 섬유 체적비의 함수로 나타내었다. Table 1에는 섬유와 기지의 열전도도를 나타내었다. 또한, 열저항 네트워크는 n-매 주자직 복합재료에서도 쉽게 적용이 가능하다.

본 연구에서 적용된 단위 구조의 기하학적 매개 변수는 $g/a=0.1$, $a_f=a_w$, $g_f=g_w$, $h_f=h_w=(h-h_m)/2$ 로 밸런스된 평직 직물 복합재료로 가정한다. 섬유다발의 섬유 체적비 $c_{fb}=0.63$ 이다.

일반적으로 섬유 체적비가 증가할수록 열전도도가 커지는 경향을 보여 주지만 케블라/에폭시의 경우 케블라/에폭시의 두께 방향의 열전도도는 미세한 감소를 나타낸다. 이는 케블라 섬유의 횡 방향 열전도도가 에폭시의 열전도도보다 작기 때문에 섬유 체적비가 증가하면 열전도도는 낮아지게 되는 것이다.

두께 방향의 열전도도는 S-클라스/에폭시, 탄소/에폭시, E-글라스/에폭시, 케블라/에폭시의 순이었으며, 면내 방향의 경우는 경우 탄소/에폭시, S-클라스/에폭시, 케블라/에폭시, E-글라스/에폭시 복합재료의 순이다. 이 경향은 섬유체적비가 변하여도 같은 결과를 나타내었다.

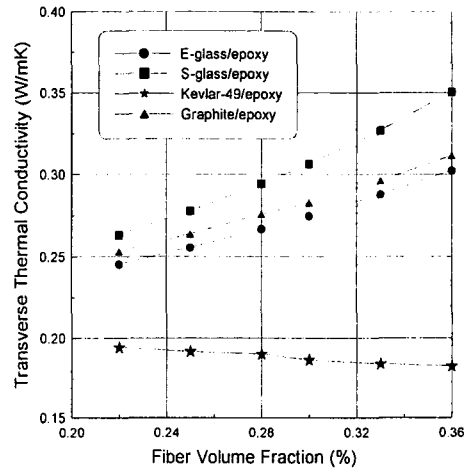
Table 1. Thermal conductivities of constituent materials

구성 재료		$k_{fa}(W/m \cdot K)$ (axial)	$k_{fr}(W/m \cdot K)$ (radial)
기지	FR-4(epoxy)	0.19	
섬유	E-glass	1.03	
	S-glass	3.03	
	Kevlar-49	2.96	0.11
	Graphite	8.40	0.84

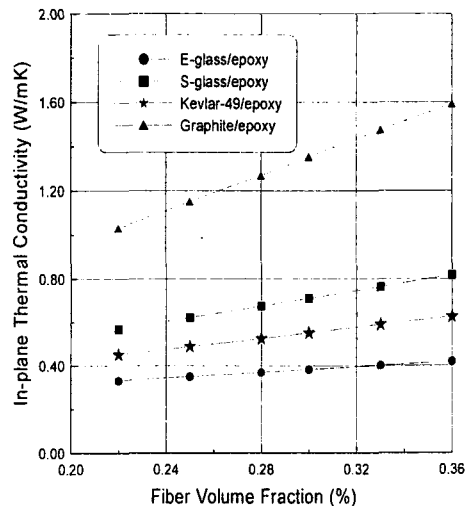
5. 결론

본 논문에서는 평직 직물 복합재료의 열전도도를 열저항 네트워크의 개념을 사용하여 예측하고 실험을 통한 계측과 비교하였다.

평직 복합재료의 열전도도는 섬유의 체적비와 섬유 및 기지의 물성에 의하여 지배받으며 복합재료의 열전도도는 섬유다발의 열전도도가 기지의 열전도도보다 클 경우에 섬유의 체적비가 클수록 크며, 평면내의 열전도도가 두께 방향보다 더 큰 영향을 받는다.



(a) transverse direction



(b) In-plane direction

Fig. 6 Effective thermal conductivities of plain woven fabric lamina

참고문헌

- (1) A. Dasgupta and R. K. Agarwal, "Orthotropic Thermal Conductivity of Plain-Weave Fabric Composites Using a Homogenization Technique," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 18, 1992, pp. 2736~2758.
- (2) Q. G. Ning and T. W. Chou, "A Closed-Form Solution of the Transverse Effective Thermal Conductivity of Woven Fabric Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 17, 1995, pp. 2280~2294.
- (3) Q. G. Ning and T. W. Chou, "Closed-Form Solutions of the In-plane Effective Thermal Conductivities of Woven-Fabric Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 55, 1995, pp. 41~48.
- (4) A. Dasgupta, R. K. Agarwal and S. M .Bhandarker, "Three-dimensional Modelling of Woven-Fabric Composites for Effective Thermo-Mechanical and Thermal Properties," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 209~223.
- (5) Q. G. Ning and T. W. Chou, "A General Analytical Model for Predicting the Transverse Effective Thermal Conductivities of Woven Fabric Composites," *Composites Part A*, Vol. 29, 1998, pp. 315~322.
- (6) W. A. Clayton, "Constituent and Composite Thermal Conductivities of Phenolic-Carbon and Phenolic-Graphite Ablators," The 12th SDM Conference, *AIAA Paper No. 71-380*.
- (7) "Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique," *ASTM Standard E 1225-87*.