

論文

CF3327 평직 복합재료의 열전도도

구남서⁺, 문영규^{**}, 우경식^{***}

Effective Thermal Conductivities of CF3327 Plain-weave Fabric Composite

Nam Seo Goo⁺, Young Kyu Moon^{**}, Kyeongsik Woo^{***}

ABSTRACT

The purpose of this study is to measure and predict the thermal conductivity of CF3327 plain-weave fabric composite made by Hankuk Fiber, Co. An experiment apparatus based on the comparative method has been made to measure the thermal conductivities of the composite material. Its accuracy was proved by measuring the thermal conductivity of graphite which is well-known. Micro-mechanical approaches are useful to assess the effect of parameters such as fiber and matrix material properties, fiber volume fraction and fabric geometric parameters on the effective material properties of composites. In this study, prediction was based on the concept of three dimensional series-parallel thermal resistance network. Thermal resistance network was applied to unit cell model that characterized the periodically repeated pattern of a plain weave. The numerical results were compared with experimental one and good agreement was observed. Also, the effects of fiber volume fraction on the thermal conductivity of several composites has been investigated.

초 록

본 연구의 목적은 (주)한국화이바의 CF3327 평직 복합재료의 열전도도를 실험적으로 계측하고 이를 이론적인 예측과 비교하는데 있다. 열전도도 계측을 위하여 비교계측법의 원리를 이용한 실험 장치를 제작하였으며 열전도도가 잘 알려진 그래파이트를 실험함으로써 장비의 정확성을 확인하였다. 미시역학적인 방법은 섬유 및 기지의 물성, 섬유체적비, 직조 형태 등의 변수들이 복합재료의 유효물성치에 미치는 영향을 평가하는데 유용하다. 본 연구에서는 3차원 직-병렬 열저항 개념을 주기적으로 반복되는 평직의 단위구조에 적용하여 열전도도를 예측하였다. 해석 결과를 실험 결과와 비교한 결과 잘 일치함을 확인하였고 섬유체적비가 예측시 수치 복합재료의 열전도도에 미치는 영향을 고찰하였다.

1. 서 론

열전도도는 복합재료 구조물의 열전달 문제를 해석하기 위한 필수 데이터로 복합재료의 중요한 물리적 특성 중의 하나로 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)를

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 (주)한국화이바에서 생산 중인 CF3327 평직 복합재료의 열전도도를 계측하고 이를 이론값과 비교하였다. 1차원적인 열전달을 만들어 두 점 사이의 온도를 계

⁺ 건국대학교 항공우주공학과, 교신저자(E-mail:nsgoo@konkuk.ac.kr)

^{**} 경북대학교 기계공학과 대학원

^{***} 충북대학교 구조시스템공학과

측한 후 표준 시편의 열전도도와 비교하여 재료의 열전도도를 계측할 수 있는 실험 장치를 제작하여 CF3327 평직 복합재료의 열전도도를 계측하였다. 열전도도의 예측을 위하여 단위구조에 대한 열저항 네트워크를 도출하여 섬유와 기지의 열전도도로부터 면내 방향 및 두께 방향의 열전도도를 계산하였다. 예측된 열전도도와 계측된 열전도도를 비교하였고 열전도도에 대한 섬유체적비의 영향을 고찰하였다.

2. 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[6]. 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었고 측정 원리를 Fig. 2에 나타내었다. 여기에서 TC1S, TC2S는 측정시편에 장착된 열전대이며 TC1R, TC2R은 표준 시편에 장착된 열전대이다. 또한, δ 는 열전대 거리, d 는 시편의 지름, 하첨자 r 은 표준시편, s 는 측정시편을 나타낸다.

표준 시편으로는 SUS 304를 사용하였으며 축방향의 열류가 보존된다는 가정으로부터 시편의 열전도도는 다음과 같이 계산된다.

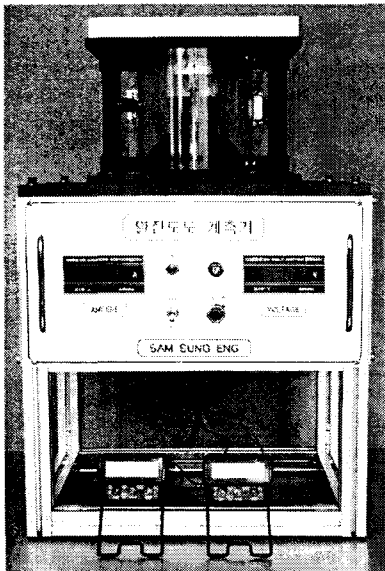


Fig. 1 Experimental apparatus for thermal conductivity measurement.

$$k_{\text{exp}} = k_r \times \frac{\Delta T_r}{\Delta T_s} \frac{\delta_s}{\delta_r} \frac{d_r^2}{d_s^2} \quad (1)$$

여기에서 k 는 열전도도, ΔT 는 측정점 사이의 온도차를 나타낸다.

실험에 사용되는 시편의 크기는 길이 20mm, 지름 12~13 mm의 원통형으로 측면에 15mm 간격으로 중심까지 구멍이 뚫려있는 형상이다. 이 구멍에 K-형의 열전대를 사용하여 온도를 계측한다. 같은 형상으로 제작된 SUS 304 재질의 표준 시편이 직렬로 연결되어 있다.

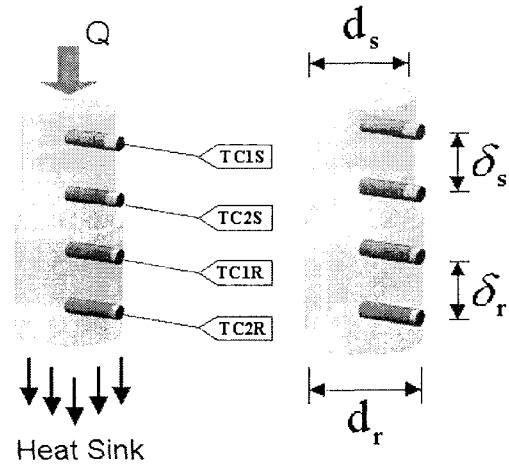


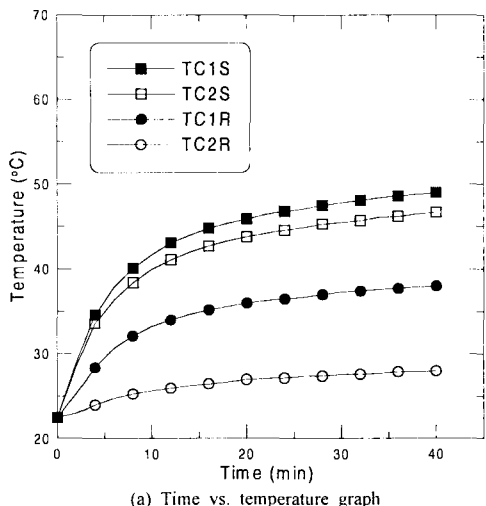
Fig. 2 Principle of TC measurement and specimen.

먼저 열전도도 계측 장치의 정확성을 파악하기 위하여 열전도도가 알려져 있는 ATJ-S 1940급 그래파이트를 계측한 후 탄소/에폭시 복합재료의 열전도도를 계측하였다.

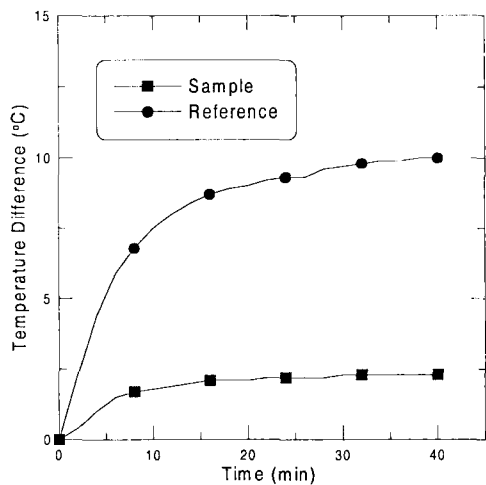
Fig. 3에는 그래파이트의 실험 결과를 나타내었다. 실험 시작 후 약 20분 까지의 온도는 매우 빠르게 증가하지만 그 이후 완만한 속도로 증가하여 정상상태에 이르게 된다. Fig. 3(b)에서 표준 시편의 온도차가 흑연의 온도차보다 더 커 흑연의 열전도도가 표준 시편보다 큼을 알 수 있다.

교정 실험 결과로 얻어진 그래파이트의 열전도도는 식 (1)에 의해 81.6W/mK는 명목값인 81W/mK과 잘 일치하여 계측 장비의 열전도도 특성 평가가 매우 우수하게 나타남을 검증하였다.(자세한 제원은 Table 1 참조) 이는 발열체에서 전달된 열이 열 손실 없이 축방향으로 원활히 흐르고 있음을 알 수 있다.

실험시 발생할 수 있는 실험오차를 최소화하기 위해서는 단열재의 사용, 시편의 배치, 열전대의 접촉 상태에 주의하여 수행하였다.



(a) Time vs. temperature graph



(b) Time vs. temperature difference graph

Fig. 3 The experimental result of graphite.

3. 이론적 해석

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

3.1 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

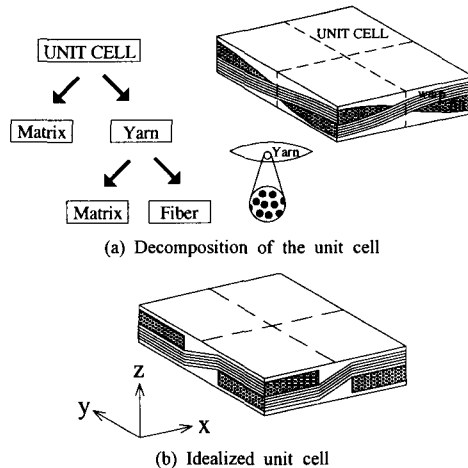


Fig. 4 Unit cell of plain-weave fabric lamina.

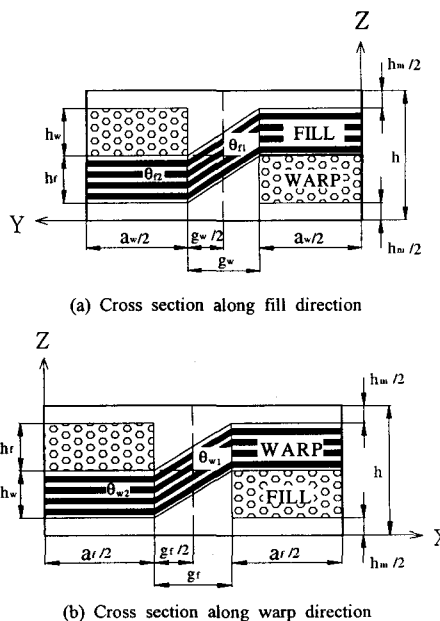


Fig. 5 Geometry of the unit cell.

구한 결과와 동일하게 나타난다는 기본 개념을 이용한 것이다.

미시역학적 방법에서 평직 라미나의 단위 구조는 Fig. 4(a)에 나타내었다. x축을 경사 방향과 일치되게 하고 y축을 위사 방향과 일치시킨다. 단위 구조의 기하학적 매개변수인 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 같다.

또한, 기지 층과 경사, 위사층의 두께는 각각 h_m, h_w, h_f 로 나타낸다.

Fig. 4(a)의 단위 구조는 복잡하여 그대로 해석하기 어려우므로 Fig. 4(b)와 같이 형상을 단순화한다. 이는 직물 라미나의 실제 미세 구조가 복잡하기 때문에 단순화시키는 것이다.

경사와 위사의 배열 각도는 연속적이지만 단순화된 모델에서 다음과 같이 평균값을 사용한다. $\bar{\theta}$ 는 X, Y축에 대해 기울어진 평균 섬유 경사각을 의미한다. Fig. 5에는 단순화된 섬유다발의 배열을 단면에 대하여 나타내었다.

$$\bar{\theta} = \begin{cases} \bar{\theta}_{d1} : \text{섬유 다발의 경사 부분} \\ \bar{\theta}_{d2} : \text{섬유 다발의 나머지 부분} \end{cases} \quad (2)$$

여기에서

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

3.2 3차원 열저항 네트워크를 이용한 열전도도

일반적으로 열전달 문제는 전기 전도 문제와 상사시켜 생각할 수 있다. 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.

$$R_i = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{L_i}{k_i S_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

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 나타낼 수 있으며 이로부터 열저항 네트워크를 구성할 수 있다. 이에 대한 자세한 설명을 참고문헌을 참조하고 여기서는 그 결과만을 이용한다.

3.2.1 두께 방향 유효 열전도도

두께 방향의 열전도도는 단위 구조의 1/4 모델로 해석이 가능하며, 최종적인 유효 열전도도는 다음과 같다.

$$k_{el} = \frac{k_m}{\left(1 + \frac{g_w}{a_w}\right)\left(1 + \frac{g_f}{a_f}\right)} \times$$

$$\left[\frac{\frac{g_w}{a_w} \frac{g_f}{a_f} + \frac{\frac{g_f}{a_f}}{\left(\frac{h_m}{h} + \frac{h_f}{h}\right) + \frac{h_m}{k_{w1}} \frac{h_w}{h}}}{1 + \frac{h_m}{h} + \left(\frac{k_m}{k_{w2}} \frac{h_w}{h} + \frac{k_m}{k_{f2}} \frac{h_f}{h}\right)} + \frac{\frac{g_w}{a_w}}{\left(\frac{h_m}{h} + \frac{h_w}{h}\right) + \frac{k_m}{k_{f1}} \frac{h_f}{h}} \right] \quad (4)$$

식 (4)을 이용하여 k_{el} 를 계산하기 위해서, 섬유 체적비와 $h_m/h, k_{d1}, k_{d2}$ 의 값이 필요하며 이는 다음과 같다.

$$c_f = c_{fb} \frac{V_f}{V} = c_{fb} \times \frac{a_f a_w (h - h_m) + h_w g_f a_w + h_f g_w a_f}{h(a_w + g_w)(a_f + g_f)} \quad (5)$$

$$\frac{h_m}{h} = 1 - \frac{c_f}{c_{fb}} \left(1 + \frac{g_f}{a_f}\right) \left(1 + \frac{g_w}{a_w}\right) + \frac{h_w}{h} \frac{g_f}{a_f} + \frac{h_f}{h} \frac{g_w}{a_w} \quad (6)$$

$$k_{di} = k_e \sin^2 \bar{\theta}_{di} + k_l \cos^2 \bar{\theta}_{di} \\ (d = w, f, \quad i = 1, 2) \quad (7)$$

여기에서 k_w 와 k_f 는 섬유 다발의 축방향 및 횡방향 열전도도이다.

3.2.2 면내 방향 유효 열전도도

두께 방향의 열전도도는 단위 구조의 1/2 모델로 해석이 가능하며 최종적인 경사 방향 유효 열전도도는 다음과 같다.

$$k_{ew} = \frac{\left(1 + \frac{g_f}{a_f}\right)}{\left(1 + \frac{g_w}{a_w}\right)} \times \left\{ \frac{k_m}{1 + \frac{g_f}{a_f}} \left[\left(1 + \frac{g_w}{a_w}\right) \frac{h_m}{h} + \frac{g_w}{a_w} \frac{h_w}{h} \right] + \frac{h_f}{h} \frac{g_w}{a_w} \left(\frac{1}{k_{f1}} + \frac{g_f}{a_f} \frac{1}{k_m} \right)^{-1} + \frac{h_f}{h} \frac{1}{\frac{1}{k_{f2}} + \frac{g_f}{a_f} \left[\frac{1}{2} k_m + \left(\frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_{w1}} \right)^{-1} \right]} + \frac{1}{\frac{1}{k_{w2}} \frac{h_w}{h} + \frac{g_f}{a_f} \left[k_{w1} \left(\frac{h_w}{h} - \frac{1}{2} \frac{h_f}{h} \right) + \frac{h_f}{h} \left(\frac{1}{k_{w1}} + \frac{1}{k_m} \right)^{-1} \right]} \right\} \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여 k_{ew} 를 계산하기 위해서, 섬유 체적비와 $h_m/h, k_{d1}$ 의 값이 값이 필요한데, 섬유 체적비와 h_m/h

는 식 (5), (6)과 같고 k_{di} 는 두께 방향과는 달리 다음과 같이 정의된다.

$$k_{wi} = k_a \cos^2 \bar{\theta}_{wi} + k_t \sin^2 \bar{\theta}_{wi} \quad (i=1,2) \quad (9)$$

$$k_{fi} = k_t \quad (10)$$

식 (7), (9), (10)에서 k_a 와 k_t 는 다음과 같다[7].

$$k_a = c_{fp}k_{fa} + (1 - c_{fp})k_m \quad (11)$$

$$k_t = \frac{k_m}{4} \left[\sqrt{(1 - c_{fp})^2 \left(\frac{k_{fr}}{k_m} - 1 \right)^2 + \frac{4k_{fr}}{k_m}} - (1 - c_{fp}) \left(\frac{k_{fr}}{k_m} - 1 \right) \right] \quad (12)$$

여기에서 c_{fp} 는 섬유다발의 섬유 체적비이고 k_{fa} 와 k_{fr} 는 섬유의 축방향 및 반경 방향 열전도도이다.

4. 결 과

4.1 실험 결과

3개의 시편을 준비하여 실험하였으며 Fig. 6과 7에 두께 방향 및 면내 방향의 전형적인 시간-온도 및 시간-온도차 결과를 나타내었다. 실험 초기에는 온도 증가가 크지만, 약 40분이 지나면서 일정한 값을 가지면서 정상 상태에 도달하게 된다. 두께 방향의 온도차가 면내 방향보다 크게 나타나며 이로부터 면내 방향의 열전도도가 더 큼을 알 수 있다. 대략 1시간 정도가 지나면 온도차의 비가 일정해지는 정상상태를 도달한다.

Table 1 Summary of experimental results

	그라파이트	탄소/에폭시		
		두께	면내	
d_i (mm)	12	13		
d_r (mm)	13	13		
δ_i (mm)	15	15		
δ_r (mm)	15	15		
ΔT_i (°C)	#1	2.3	36.7	32.8
	#2	2.3	42.5	28.8
	#3	2.3	42.5	29.4
ΔT_r (°C)	#1	10.1	0.8	3.2
	#2	10.0	0.9	3.3
	#3	9.9	0.8	3.3
실험값 (W/mK)	#1	82.5	0.349	1.561
	#2	81.6	0.339	1.833
	#3	80.8	0.301	1.988
	평균	81.6	0.33	1.73
예측값 (W/mK)	81	0.36	1.79	
오차	1%	9%	4%	

*: 데이터 시트에 기록된 명목값

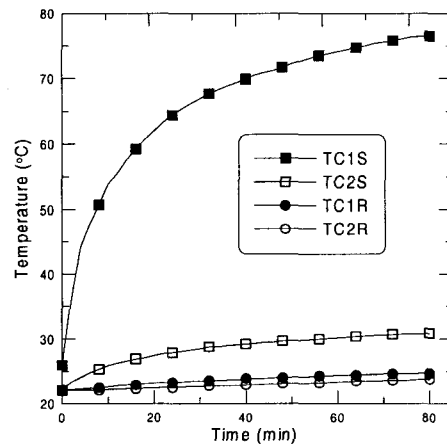
Table 1에는 그라파이트와 탄소/에폭시의 실험 결과를 요약하였다. 표에서 예측값은 식 (4)와 (8)을 이용하여 계산한 것으로 다음 절에서 설명한다.

4.2 열전도도 예측 결과

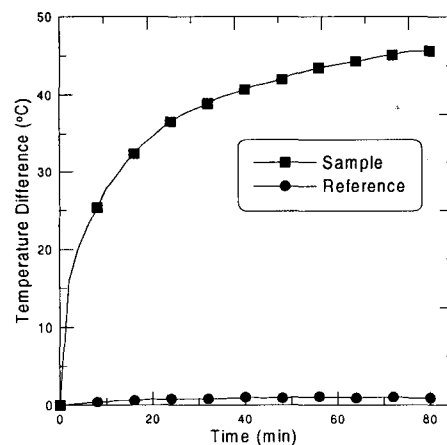
Fig. 8에는 실험에 사용된 탄소/에폭시 복합재료의 SEM (scanning electron microscope) 사진을 나타내었다. 섬유다발의 굴곡 형태 및 레진의 분포가 대체적으로 잘 나타나 있으며 이로부터 CF3327 평직의 기하학적인 특성값들을 다음과 같이 추출하였다.

$$g/a = g_w/a_w = g_f/a_f = 0.25, \quad h_m/h = 0.121$$

$$\theta_{w1} = \theta_{f1} = 13.0^\circ, \quad \theta_{w2} = \theta_{f2} = 4.4^\circ$$



(a) Time vs. temperature graph

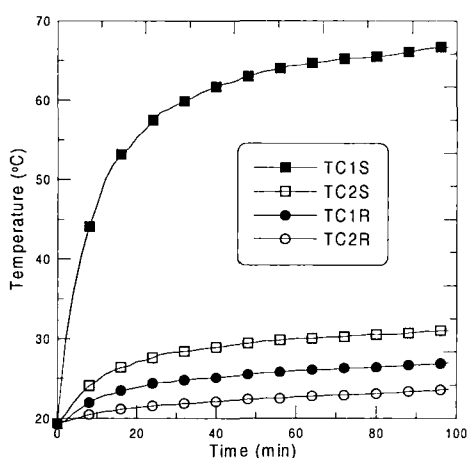


(b) Time vs. temperature difference graph

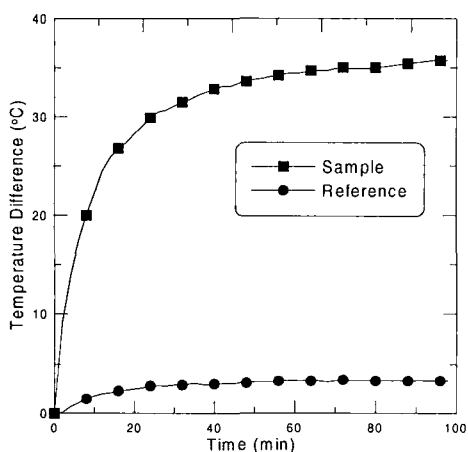
Fig. 6 The experimental result of CF3327 carbon/epoxy composite (thickness direction).

실제 직물에 있어서는 경사와 위사의 섬유 밀도가 다를 수 있으나 한국화이버에서 제공한 검사 성적서를 보면 경사와 위사의 수자가 13 count/inch로 같으므로 밸런스된 평직이라고 할 수 있다.

탄소/에폭시의 섬유 체적비(fiber volume fraction)는 ASTM D 3171-76의 방법으로 구하였으며 45%로 계측되었다. 섬유다발의 섬유 체적비는 참고문헌 [2]와 같이 $c_{fb}=0.63$ 으로 가정하였다.



(a) Time vs. temperature graph



(b) Time vs. temperature difference graph

Fig. 7 The experimental result of CF3327 carbon/epoxy composite (in-plane direction).

Table 2에는 여러 복합재료의 구성 재료인 섬유와 기지의 열전도도를 나타내었다[2,3]. 탄소와 그래파이트는 탄화 정도에 따라 구분하는 경우도 있으나 보통 혼용하여 사용하는 것이 일반적이다.

이상의 값을 식 (4)과 (8)에 대입하여 구한 면내방향의 열전도도는 1.79 W/mK 이며, 면외 방향의 열전도도는 0.36 W/mK이다.

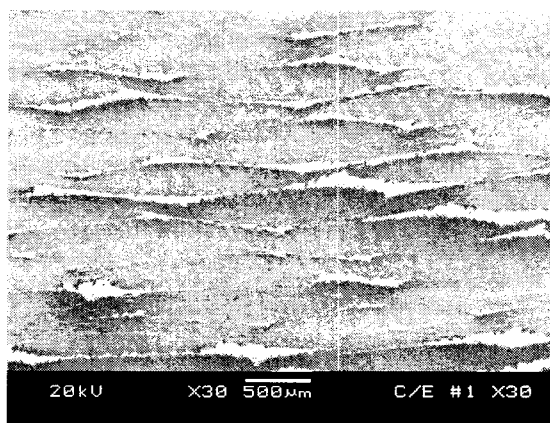


Fig. 8 The SEM photograph of CF3327 carbon/epoxy composite.

이를 실험 결과와 비교해 보면 10% 내외의 오차를 보이고 있어 잘 일치하였다. 참고문헌 [2,3]에서는 주로 섬유체적비가 낮은 경우를 비교하였는데, 본 연구의 결과 섬유체적비가 높은 경우에도 이론식이 잘 적용됨을 알 수 있다.

실험값과 이론값의 차이는 복합재료 성형 상의 불균일성과 실험 상의 오차, 섬유와 기지 재료 물성의 차이 등에서 기인된다고 생각된다.

Table 2 Thermal conductivities of constituent materials

구성 재료		k_a (W/m·K) (axial)	k_r (W/m·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

4.3 섬유 체적비에 대한 열전도도의 변화

Fig. 9에는 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. 이는 이전 연구[2-4]에서도 수행되었으나 본 연구에서는 구조 재료용 복합재료의 섬유 체적비인 48%까지 고찰하였다. 섬유와 기지의 열전도도는 Table 2에 나타내었다.

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

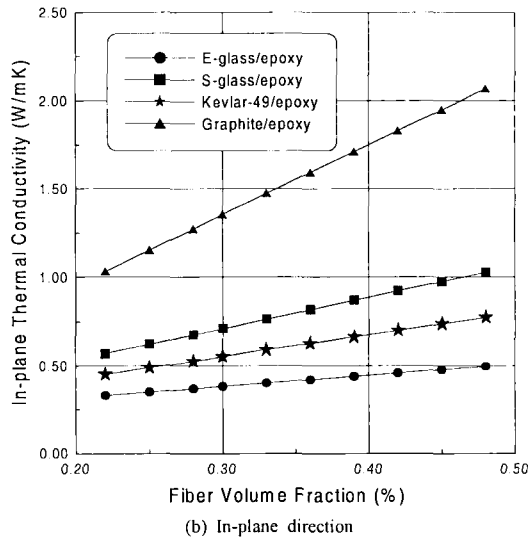
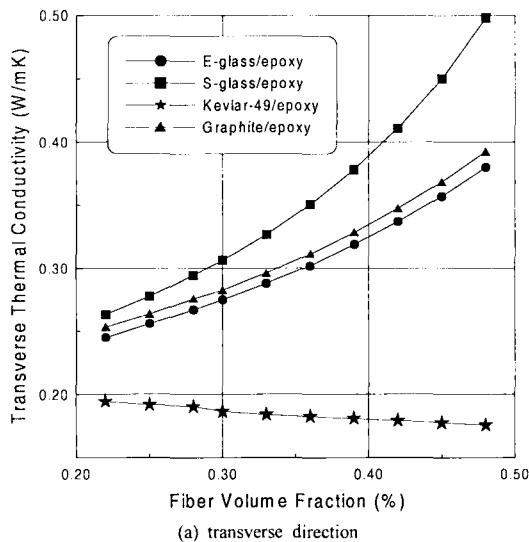


Fig. 9 Effective thermal conductivities of plain woven fabric lamina.

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

열전도도는 섬유 체적비와 거의 비례관계에 있음을 알 수 있다.

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.

결론

본 논문에서는 (주)한국화이바의 CF3327 평직 복합재료의 열전도도를 실험적으로 계측하고 열저항 네트워크의 개념을 사용한 예측값과 비교하였다. 예측 모델에 의한 결과는 실험 결과와 잘 일치하였다.

예측 모델을 사용하여 계산한 결과, 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 받는다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소 목적기초사업(과제번호 ADD-00-5-4)에 의해 지원받았으며 이에 감사드립니다.

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 Composit-

-
- es 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) "Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique," *ASTM Standard E 1225-87*.
 - 7) W. A. Clayton, "Constituent and Composite Thermal Conductivities of Phenolic-Carbon and Phenolic-Graphite Ablators," *The 12th SDM Conference*, AIAA Paper No. 71-380.