論文

탄소/페놀릭 8-매 주자직 복합재료의 열전도도

우경식*, 구남서**

Thermal Conductivity of Carbon-Phenolic 8-harness Satin Weave Composite

Kyeongsik Woo* and Nam Seo Goo**

ABSTRACT

In this paper, thermal conductivities of carbon-phenolic 8-harness satin weave composite, ACP302, were measured and predicted. In the analysis, the satin weave unit cell was identified and modeled discretely by 3-dimensional finite elements, considering the interlaced fiber tow architecture microscopically. At the unit cell boundary, the corresponding periodic boundary conditions were applied. The results were analyzed to investigate the effect of microstructural parameters such as stacking phase shifts, waviness ratio, and fiber volume fraction. The conductivities were also obtained by experiments and compared with the numerical results.

초 록

본 연구에서는 탄소/페놀릭 8-매 주자직 복합재료인 ACP302의 등가열전도계수를 단위구조해석을 통하여 계산하였고 또한 실험적으로 측정하였다. 먼저 8-매 주자직 복합재료의 직조섬유다발구조를 3차원 유한요소를 사용하여 미세역학적으로 상세히 모델링하였으며, 단위구조 경계면에는 주기경계조건을 가하고 해석을 수행하였다. 계산결과로부터 적층 형상 및 굴곡도, 섬유 체적비 등이 등가열전도도에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 실험을 수행하여 열전도도를 계측하였으며 그 결과를 계산결과와 비교하였다.

Key Words : thermal conductivity(열전도도), carbon-phenolic(탄소/페놀릭), 8-harness satin weave(8-매 주자직), micro-mechanics(미시역학), unit cell(단위구조)

1. 서 론

열전도도(thermal conductivity)는 구조물의 열전달 문제를 해석하는데 반드시 요구되는 필수 데이터로서 복합재료의 중요한 성질 중의 하나이다. 복합재료의 등가열전도 계수는 실험에 의하여 결정되는 것이 보통이나, 복합재료의 구성에 따른 변화를 연구하려면 이론적 접근이 필요하며

특히 복합재료를 구성하는 내부의 미세구조(microstructure)의 형상과 구성재료의 특성을 정확히 반영하여야 한다.

최근 복합재료에 대한 관심이 점차 증가하면서 복합재료의 등가열전도 계수에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔는데, 여기에는 실험적인 연구뿐만 아니라 미시역학적(micromechanics) 기법에 의한 이론적 및 수치적 연구도 상당수 포함되어 있다. 미시역학적 방법에 의한 연구들은 주로 일방향 복합재료에 대해 등가열전도계수를 예측하였는데, 대표적인 사례로는 Thornburg 등[1]의 복합재혼합이론(rule of mixtures), Springer 등[2]의 Thermal Model, Clayton[3]의 Mixture

† 2003년 5월 22일 접수 ~ 2003년 8월 13일 심사완료

* 정회원, 충북대학교 구조시스템공학과
연락처자, E-mail : kw3235@chungbuk.ac.kr
충북 청주시 흥덕구 개신동 산48번지

** 정회원, 건국대학교 기계항공공학부

Equation, 그리고 Islam 등[4]의 유한요소법을 사용한 연구를 들 수 있다. 그러나 직물복합재료의 경우에는 상대적으로 그 연구가 많지 않은데, Dasgupta 등[5]은 열저항 네트워크 방법과 유한요소해석을 사용하여, 그리고 Ning 등[6-7]이 열저항 네트워크법을 사용하여 평직복합재료의 열전도계수를 계산한 정도이다.

저자들은 이전 연구[8-9]에서 탄소/에폭시 평직 복합재료의 열전도도를 실험으로 측정하고 열저항 네트워크법 및 유한요소법을 사용하여 예측한 결과와 비교하였다. 열저항 네트워크법은 미시역학적 방법의 일종이라 할 수 있으나 직물의 형상이 복잡한 경우나 적층 효과를 해석하는 데는 어려움이 있으며 유한요소법의 경우에는 다양하게 적용가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 8-매 주자직 탄소/페놀릭 복합재료인 ACP302의 열전도도를 미세구조를 고려한 유한요소법을 이용하여 계산하고 실험 결과와 비교하였다. SEM 사진으로부터 ACP302의 기하학적 형상을 도출한 후 단위구조에 대해 유한요소 모델링을 수행하였다. 내부의 미세구조의 변화 효과를 고찰하기 위하여 임의의 위상차를 가지는 2장 적층 모델을 사용하여 해석을 수행하였고, 단순적층(simple stack)과 동일면 적층(reversed stack)의 두가지 적층형상을 고려하였다. 또한 섬유체적비와 굴곡도가 등가열전도계수에 미치는 영향도 고찰하였다. 한편 비교 측정법에 기반을 둔 실험 장치치를 사용하여 등가열전도계수를 측정하고 이를 해석 결과와 비교하였다.

II. 유한요소해석

2.1 균질화 기법

열전도 문제에 대한 지배 방정식은 열원이 없는 경우 다음과 같다.

$$h_{i,j}=0 \quad (1)$$

여기서, h_i 는 열유량(heat flux)벡터로 직교이방성 재료에 대해 열전도계수와 온도구배로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_i = -k_{ij}T_{,j} \quad (2)$$

여기서, k_{ij} 는 열전도계수이고 T 는 온도이다.

서로 다른 열전도계수를 가지는 섬유다발(warp, fill)과 기지(matrix)로 이루어진 직물복합재료의 등가열전도계수는 최소기본 단위구조에 대해 먼저 미시역학적으로 열전도 문제를 풀고,

내부의 열유량과 온도구배를 체적평균하고 이의 관계식으로부터 다음과 같이 구하게 된다.

$$\langle h_i \rangle = -\overline{k_{ij}} \langle T_{,j} \rangle \quad (3)$$

여기서,

$$\overline{k_{ij}} : \text{등가열전도계수} \quad (4)$$

$$\langle h_i \rangle = \frac{1}{V} \int h_i dV, \quad \langle T_{,j} \rangle = \frac{1}{V} \int T_{,j} dV$$

2.2 단위구조 해석

Fig. 1은 본 연구의 대상인 탄소/페놀릭 8-매 주자직 복합재료 ACP302의 단면 사진을 보여주고 있다. 이 그림은 8-매 주자직 복합재료를 4장 적층한 구조를 나타낸 것으로, 섬유 다발의 굴곡 형태 등 미세구조가 비교적 잘 나타나 있음을 볼 수 있다. 이 그림으로부터 섬유다발의 폭(a)과 한 층의 두께(h)를 측정하였고, 섬유다발의 굴곡도($h/2a$)를 0.1563으로 결정하였다 (Fig. 2 참조).

Fig. 2는 2장으로 적층된 8-매 주자직 복합재료의 단위구조(unit cell)를 나타내고 있다. 섬유

(a) 0°(Warp) 단면

(a) 90°(Fill) 단면

Fig. 1. Cross-sectional micro-photographs of ACP302

Fig. 2. FE mesh of 2-layer 8-harness satin weave unit cell

다발은 $0 \sim \pi$ 사이의 사인파형을 서로 엮어놓은 볼록렌즈형(lenticular) 단면을 가지고 있으며 굴곡된 부분의 중심선 경로는 사인파형을 따른다고 가정하였다. 이 그림은 아래층이 위층에 대하여 $\Delta x = a/2$, $\Delta y = 3a/4$ 만큼 엇갈려 적층된 것을 보여주고 있고, 기지재료에 대한 요소는 섬유다발구조를 명확히 보여주기 위하여 나타내지 않았다. 본 연구에서 2장 적층 모델을 사용한 이유는 제작 과정 중에 발생하는 층간 적층 위상차가 전체 구조물 특성에 미치는 영향을 미시역학적으로 고려하고자 함이다.

단위구조해석을 통해 등가열전도계수를 구하기 위해서는 Fig. 2의 단위구조에 대해 기하학적 형상뿐만 아니라 온도 및 열유량의 관점에서 실험시편을 모사하도록 단위구조의 경계면에 주기경계조건을 적용하게 된다.

8-매 주자직 복합재료 단위구조는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 주기벡터(periodicity vector)를 사용하여 정의할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 주기경계면 상에서 하나의 점(P)은 반드시 다음 식과 같이 주기벡터로 연결되는 대응점(Q)을 가져야 한다.

$$\vec{r}_p + \vec{r}_a = \vec{r}_q \quad (a=1,2,3,4) \quad (5)$$

본 연구에서 사용한 단위구조의 주기벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 &= 3ae_1 - ae_2 \\ \vec{r}_2 &= ae_1 - 3ae_2 \\ \vec{r}_3 &= 2a(e_1 + e_2) \\ \vec{r}_4 &= 2he_3 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 a 와 h 는 각각 섬유다발의 폭과 한 층의 두께이다. 단순히 2장으로 적층된 경우에는 두께 방향으로 주기경계조건을 가하지 않게 되고 따라서 $\vec{r}_4$ 는 적용되지 않는다.

Fig. 3. Periodicity vectors

단위구조의 각 경계면에 가해지는 주기경계조건은 주기벡터를 사용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{k}_{xx} : T(\mathbf{x}_p) + \Delta T \cdot r_{ax} = T(\mathbf{x}_q) \quad (7)$$

$$\vec{k}_{zz} : T(\mathbf{x}_p) + \Delta T \cdot r_{az} = T(\mathbf{x}_q)$$

여기서, r_{ax} , r_{az} 는 각각 주기벡터의 x , z 방향의 성분을 나타낸다.

2.3 물성치

ACP302 8-매 주자직 복합재료는 섬유다발지역과 기지지역으로 이루어져 있고, 섬유다발지역은 다시 섬유와 기지로 이루어져 있다. 섬유는 태양산업에서 제조한 PAN계 T300 등급의 3k로 된 TZ307이며, 기지는 강남화성에서 제조한 레졸타입 페놀릭 수지 KC-98이다. 섬유와 기지의 열전도계수는 각각 다음과 같다[10].

$$\text{Carbon} : k_{fa} = 8.4 \text{ W/mK}, k_{fr} = 0.84 \text{ W/mK} \quad (8)$$

$$\text{Phenol} : k_m = 0.42 \text{ W/mK}$$

섬유다발의 등가열전도계수는 위 식의 열전도계수와 섬유다발내의 섬유 체적비를 사용하여 계산할 수 있다. ACP302 직물복합재료 전체 섬유 체적비는 ASTM D3171의 방법[11]으로 실험하여 46.38%로 계측되었다. Fig. 2의 모델에서 섬유다발 체적비는 63.66%이므로 섬유다발 내의 섬유 체적비는 $46.38/63.66 \times 100 = 72.85\%$ 로 계산되었다. 섬유다발의 등가열전도계수는 이들로부터 섬유방향은 복합재혼합이론(rule of mixtures)으로, 그리고 섬유에 수직한 방향은 참고문헌 [3]에 제시된 방법으로 계산하였다. 계산된 섬유다발의 열전도계수는 다음과 같다.

$$k'_{11} = 6.2334 \text{ W/mK} \quad (9)$$

$$k'_{22} = k'_{33} = 0.6935 \text{ W/mK}$$

섬유다발의 물성치는 물성축의 방향각에 따라서 변환되어야 하는데, 굴곡된 지역에서 섬유다발의 방향각은 하나의 유한요소 내에서도 크게 변할 수 있으므로 매 적분점마다 방향각을 계산하여 물성치 변환을 수행하였다[12].

III. 실험적 계측

본 연구에서는 참고문헌 [8-9]에서 사용한 것과 동일한 실험장치를 사용하였다. 열전도계수의

계측 방법은 정상상태 하에서 열전도도가 알려진 참고 시편(reference specimen)과 측정 시편의 온도 비교를 통하여 열전도도를 계산하는 비교 측정법(comparative method)의 일종이다. 기존의 등방성 재질에 대한 열전도 계측 장비의 경우 계측 시편의 지름이 작아 8매 주자직의 단위구조가 포함되지 못하는 단점이 있다. 본 연구에서 사용된 계측 장비는 이러한 단점을 보완한 것으로 8매 주자직의 단위 구조가 포함되도록 제작하였다. 실험 장치의 정확성은 이전 연구인 탄소/에폭시 평직 복합재료의 열전도도 계측[8-9]에서 확인되었으므로 여기에서는 기본 수식만을 간단히 설명한다.

표준시편으로는 SUS 304를 사용하였으며 측정 방향의 열류가 보존된다는 가정으로부터 시편의 열전도도는 다음과 같이 계산된다.

$$k_{\text{exp}} = k_r \times \frac{\Delta T_r}{\Delta T} \frac{\delta}{\delta_r} \frac{d_r^2}{d^2} \quad (10)$$

여기에서 k 는 열전도도, ΔT 는 측정점 사이의 온도차, δ 는 열전대 거리, d 는 시편의 지름, 하첨자 r 은 표준시편, s 는 측정시편을 나타낸다.

실험에 사용되는 시편의 크기는 길이 20mm, 지름 13mm의 원통형으로 측면에 15mm 간격으로 중심까지 구멍이 뚫려있는 형상이다. 이 구멍에 K-형의 열전대를 삽입하여 원통 중앙 부분의 온도를 계측한다. 길이 20mm, 지름 13mm 원통형상으로 제작된 SUS 304 재질의 참고 시편이 직렬로 연결되어 있다.

실험시 발생할 수 있는 실험오차를 최소화하기 위해서 단열재의 사용, 시편의 배치, 열전대의 접촉 상태에 주의하여 수행하였다. (시편의 형상 및 계측장치도는 참고문헌 [8-9] 참조.)

(a) Time history of temperature

(b) Time history of temperature difference

Fig. 4. Experimental results in the thickness direction for ACP302

(a) Time history of temperature

(b) Time history of temperature difference

Fig. 5. Experimental results in the in-plane direction for ACP302

IV. 결과 및 분석

4.1 실험 결과

3개의 시편을 준비하여 실험하였으며 Fig. 4와 Fig. 5에 두께 방향 및 면내 방향의 시간-온도 및 시간-온도차 결과를 나타내었다. 그림에서 TC1S, TC2S는 측정시편 상하의 온도이며, TC1R, TC2R은 참고시편 상하의 온도이다. 실험 초기에는 온도 증가가 크지만, 두께 방향은 약 80분, 면내 방향은 약 60분이 지나면서 일정한 값을 가지면서 정상 상태에 도달하게 된다. 두께 방향의 온도차가 면내 방향보다 크게 나타나며 이로부터 면내 방향의 열전도도가 더 클을 알 수 있다. 열전도계수는 시편의 치수와 각 시편에서 측정한 온도차를 이용하여 식 (10)으로 계산하였다. Table 1에 ACP302 탄소/페놀릭 8-매 주자직 복합재료의 실험 결과를 요약하였다.

Table 1. Summary of experimental results

		Thickness	In-plane
d_s (mm)		13	
d_r (mm)		13	
δ_s (mm)		15	
δ_r (mm)		15	
ΔT_s (°C)	#1	39.6	23.0
	#2	40.1	25.6
	#3	40.6	24.1
ΔT_r (°C)	#1	1.5	4.2
	#2	1.5	4.1
	#3	1.5	4.1
k (W/mK)	#1	0.617	2.980
	#2	0.610	2.611
	#3	0.602	2.773
	Mean	0.61	2.79

4.2 해석 결과

해석에서는 먼저 메쉬의 상세도에 따른 결과의 수렴성을 조사하였다. 이에 대한 계산은 1장짜리 단위구조에 대해 수행되었는데, Table 2는 사용된 메쉬의 절점수와 요소수를 나타내고 있다. (표에서 Mesh II는 Fig. 2의 위층 부분의 메쉬에 해당한다.) 20-절점 고체요소가 사용되었으며, 모든 방향으로 무한히 반복하는 주기경계조건을 가하고 해석을 수행하였다.

Table 2. Meshes for convergence check

	Mesh I	Mesh II	Mesh III	Mesh IV
절점수	707	3,041	13,013	23,385
요소수	176	704	3,168	5,632

Fig. 6. Convergence of k_{zz}

Fig. 6은 메쉬에 따른 두께방향의 등가 열전도계수(k_{zz})의 변화를 보여주고 있는데, 메쉬의 상세도가 증가함에 따라서 해는 잘 수렴하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Mesh II~IV의 차이는 미미하므로 Mesh II의 해는 충분히 수렴한 것으로 판단되었고, 따라서 이후의 계산은 해당 정도의 상세도를 가지는 메쉬를 사용하여 수행하였다.

Fig. 7은 2장단위로 반복하는 8-매 주자직 복합재료의 적층 위상차에 대한 두께방향의 등가 열전도계수(k_{zz})의 변화를 나타내고 있다. Mesh II의 상세도를 가지는 단위구조 모델링으로 가능한 위상차의 경우의 수는 주기경계면상에서 중복되는 것을 제외하고 모두 128개이며, 이에 대해 해석을 수행하였다. 그림에 나타난 바와 같이 등가열전도계수는 위상차에 따라서 일정한 패턴으로 최대값과 최소값을 반복하여 가짐을 보였다. k_{zz} 는 위층과 아래층의 섬유다발이 동일선상으로 배열될 때 최대값을 가지며, 섬유다발이 엇갈려 배열될 때 ($\Delta x, \Delta y = a/2, 3a/2, 5a/2$) 최소값을 가짐을 알 수 있다. (참고로 Fig. 7에서 A로 표시된 곳은 $\Delta x = \Delta y = 0$ 이고, B로 표시된 곳은 $\Delta x = \Delta y = a/2$ 이다.) 즉, 전자의 경우 두께방향으로 열전도도가 높은 섬유다발들은 서로 접촉한 상태로 단순한 열전도경로를 가지나, 후자의 경우 상대적으로 열전도도가 낮은 기지가 섬유다발

Fig. 7. Variation of k_{zz} versus phase shift

Table 3. Comparison between numerical and experimental results

		k_{zz}	k_{xx}
FEM (W/mK)	Min	0.5797	2.3420
	Max	0.5866	2.3425
	Mean	0.5829	2.3422
	St.Dev	1.468×10^{-3}	2.527×10^{-4}
Experiment (W/mK)		0.61	2.79
Error (%)		4.44	16.1

사이에 보다 많이 분포하여 열전달을 막고 있기 때문에 생각된다. 한편 면내방향의 등가열전도계수(k_{xx})의 경우에는 위상차에 따라서 거의 변화를 보이지 않았으므로 여기서는 그림으로 나타내지 않았다.

Table 3은 위상차를 고려한 ACP302의 열전도도 계산결과와 실험결과를 비교한 것을 보여주고 있다. 표에 나타난 바와 같이 계산결과와 실험결과와 비교적 잘 일치하였다. 평균값을 비교하였을 때 계산결과는 실험결과와 두께 방향으로 약 4.44%, 그리고 면내방향으로 16.1% 정도의 오차를 나타내었다.

주자적 복합재료는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 다른 면들로 적층되기도 하지만 (simple stack), 동일한 면들이 적층되는, 즉, 아래층은 그대로 두고 위층을 뒤집어서 경사면과 경사면이, 그리고 위사면과 위사면이 접촉하도록 적층되기도 한다 (reversed stack, like-faces-together). 본 연구에서는 후자와 같은 적층형상도 고려하였는데, Fig. 8은 해석을 위한 메쉬와 주기벡터를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 동일면 적층시의 단위구조는 단순 적층시에 비해 훨씬 큰 지역을 포함하게 된다. 해석에 사용된 메쉬는 Fig. 2와 동일한 상세도를 가지고 있으며 11,264개의 20-절점 요소와 41,917개의 절점수로 이루어져 있다.

Fig. 8. FE mesh and periodicity vectors of reversely stacked 2-layer unit cell

Fig. 9. Effect of reversed stack on k_{zz}

Fig. 9는 계산결과 단순적층과 동일면 적층에 대해 두께방향의 등가물성치의 차이를 보여주고 있다. 여기서는 위상차가 없는 경우와 위상차가 $\Delta x = \Delta y = a/2$ 인 두가지 경우를 고려하였는데, 이들은 Fig. 7에서 각각 A와 B로 표시된 곳으로 단순 적층시 최대 및 최소값을 가지는 위상차에 해당한다. 그림에서 보는 바와 같이 동일면 적층시의 두께방향의 등가열전도계수는 단순 적층에 비하여 더 큰 최대값과 더 작은 최소값을 가짐을 알 수 있다. 그러나 최대최소의 차이는 최대값을 기준으로 1.5% 정도에 그쳐 그 변화의 폭은 크지 않았다.

Fig. 10은 섬유다발의 굴곡도에 따른 열전도계수의 변화를 나타내고 있다. 8-매 주자적 복합재료는 섬유다발은 일부지역에서만 굴곡되어 있으므로 이 부분의 형상변수에 굴곡도는 $h/2a$ 로 정의된다. 본 연구에서 고려한 굴곡도의 범위는 0.067~0.333 이다. 그림에서 알 수 있듯이 열전도도는 굴곡도가 커짐에 따라 면내방향으로는 감소하나 면외방향으로는 증가함을 볼 수 있다. 이는 굴곡도가 커짐에 따라 열전도도가 큰 섬유의 배향이 면외방향을 향하게 되기 때문으로 판단된다. 또한 고려된 굴곡도의 범위에서는 면외

Fig. 10. Variation of thermal conductivities versus waviness ratio

Fig. 11. Variation of thermal conductivities versus fiber volume fraction

방향의 열전도도가 면내방향보다 굴곡도에 더 민감하게 변하고 있음을 알 수 있다.

섬유체적비와 열전도도에 미치는 영향도 조사하였다. Fig. 11은 전체 섬유체적비(overall fiber volume fraction)에 대한 열전도도의 변화를 나타내고 있다. 고려된 전체 섬유체적비의 범위는 40~56% 인데, 단위구조의 기하학적 형상은 그대로 두고 섬유다발 내의 섬유체적비를 조절하는 방식으로 변화시켰으므로 섬유다발 내의 섬유체적비의 범위는 62.8~89.0%의 범위에 해당한다. 그림에서 보는 바와 같이 열전도도는 섬유체적비가 증가함에 따라서 거의 선형적으로 증가함을 나타내고 있다. 또한 면내방향의 열전도계수가 면외방향에 비하여 변화의 기울기가 더 크므로 섬유체적비에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 탄소/페놀릭 8-매 주사직 복합재료의 등가열전도계수를 유한요소 단위구조 해석을 사용하여 예측하였다. 또한 비교 계측법에 기반을 둔 실험 장치를 사용하여 등가열전도계수를 계측하고 이를 계산결과와 비교하였다.

단위구조해석에 의해 계산된 등가열전도계수는 실험결과와 비교적 잘 일치하였다. 적층위상차와 적층방법은 주로 면외방향의 열전도도에 영향을 미치나 그 정도는 크지 않았다. 또한 섬유체적비가 커짐에 따라 열전도도는 거의 비례하여 증가하였고, 굴곡도가 커지는 경우에는 면외방향은 증가, 면내방향은 감소하는 경향을 나타내었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구(과제번호: ADD-00-5-4)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Thornburg, J. D. and Pears, C. D., "Prediction of the Thermal Conductivity of Filled and Reinforced Plastics", ASME Paper 65-WA/HT-4, 1965.
- 2) Springer, G. S. and Tsai, S. W., "Thermal Conductivities of Unidirectional Materials", Journal of Composite Materials, Vol. 1, pp. 166-173, 1967.
- 3) Clayton, W. A., "Constituent and Composite Thermal Conductivities of Phenolic- Carbon and Phenolic-Graphite Ablators," The 12th SDM Conference, AIAA Paper No. 71-380, 1971.
- 4) Islam, MD. R. and Pramila, A., "Thermal Conductivity of Fiber Reinforced Composites by the FEM", Journal of Composite Materials, Vol. 33, No. 18, pp. 1699-1715, 1999.
- 5) Dasgupta, A. and Agarwal, R. K. Agarwal, "Orthotropic Thermal Conductivity of Plain-Weave Fabric Composites Using a Homogenization Technique", J. of Composite Materials, Vol. 26, No. 18, 1992, pp. 2736~2758.
- 6) Ning, Q. -G. and Chou, T. -W., "Closed-Form Solutions of the In-Plane Effective

Thermal Conductivities of Woven-Fabric Composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 55, 1995, pp. 41-48.

7) Ning, Q. -G. and Chou, T. -W., "A Closed-Form Solution of the Transverse Effective Thermal Conductivity of Woven Fabric Composites", *J. of Composite Materials*, Vol. 29, No. 17, 1995, pp. 2280~2294.

8) 구남서, 문영규, 우경식, "CF3327 평직 복합재료의 열전도도," *한국복합재료학회지*, 제 15권 제 5호, 2002, pp.27~34.

9) Goo, N. S. and Woo, K., "Measurement

and Prediction of Effective Thermal Conductivities for Woven Fabric Composites," *International J. of Modern Physics B*, Vol. 17, No. 8&9, 2003, pp. 1808~1813.

10) <http://www.matweb.com>

11) ASTM D 3171 Standard Test Method for Fiber Content of Resin Matrix Composites by Matrix Composite Materials, 1998.

12) Avery, W. B. and Herakovich, C. T., "A Study of the Mechanical Behavior of a 2-D Carbon-Carbon Composite", *Interim Report 66*, NASA Grant NAG-1-343, 1987.