

論文

다방향으로 입체 보강된 복합재의 열전도계수 예측

이상의*, 유재석*, 김천곤***, 홍창선**, 김광수***

Prediction of Thermal Conductivity of Spatially Reinforced Composites

Sang-Eui Lee*, Jae-Seok Yoo*, Chun-Gon Kim***, Chang-Sun Hong**, and Kwang-Soo Kim***

ABSTRACT

This paper predicted the thermal conductivity of spatially reinforced composites(SRC) by applying the volume averaging method and the thermal resistance method. The former method employs existing micro-mechanical theories and conventional transformation rules to obtain the constitutive relations for the unit cells of the composites and the latter one uses the analogy between the diffusion of heat and electrical charge. To verify the theoretical predictions, the thermal conductivity of 4-D(dimensional) SRC was examined experimentally. The comparison of the numerical results with those measured by the experiment showed good agreement.

초 록

본 연구에서는 체적평균 개념과 열저항 개념을 적용하여 공간적으로 보강된 복합재료의 열전도계수를 예측하였다. 체적평균 개념을 적용한 방법은 기존의 미소기계적 이론들과 좌표변환관계를 이용하고, 열저항 개념을 적용한 방법은 열과 전자의 확산에 대한 유사성을 이용하여 SRC의 단위구조의 열전도계수에 대한 구성방정식을 얻었다. 이론적 예측을 검증하기 위해 4-D SRC에 대해 실험을 수행하였으며, 예측결과와 실험결과가 잘 일치함을 보였다.

1. 서 론

공간적으로 보강된 복합재료는 입체적으로 보강이 이루어진 복합재료로서, 섬유 다발로 이루어진 보강 로드(rod)의 특정방향으로의 체적비(volume fraction)와 방향에 따라 물성이 변하므로 이들을 조절하여 원하는 물성을 가지는 복합재 구조물을 설계할 수 있다. 그리고 2차원적으로 보강이 이루어진 복합재 적층판(laminate)과는 달리 두께방향

으로 보강이 이루어져 파손의 주원인으로 나타나는 층간분리현상을 방지할 뿐만 아니라, 이 방향으로의 충격 강도나 질 뿐만 열전도 특성도 우수하다. 또한 이 SRC가 노즐목(nozzle throat)의 환경을 견딜 수 있는 기계적, 열적, 전기적 특성을 가지고 있고, 내열성과 하중지지능력(load-carrying capability)이 뛰어날 뿐만 아니라, 구조물에 치명적인 파손도 적은 것으로 알려져 있는 탄소/탄소로 제작되어 재진입 로켓의 노즈 팁(nose tip)이나 노즐에 적용

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

**+한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

*** 한국항공우주산업 주식회사

되고 있는 실정이므로, 이런 구조물에 사용되기 위해서는 먼저 설계요구조조에 부합하는 물성치를 가지는 SRC구조의 설계가 요구되어진다. 따라서 본 연구는 이 SRC의 여러 물성치 중 열전도계수의 예측과 실험에 초점을 맞추어 수행되었다.

Ning[1]과 Dasgupta[2]는 열저항(thermal resistance) 개념과 균질화 개념(homogenization scheme)을 이용하여 woven fabric 복합재의 열전도계수를 예측하였다. 보강 섬유와 모재 간의 기하학적 형태를 정확하게 알아야 하며, 수식이 복잡하여 사용하기에 까다로운 단점이 있으나, 실험 결과와 비교하여 예측이 잘 이루어짐을 보였다. Teters[3]는 한 평면 내에서 곡선적(curvilinear)으로 보강이 되고, 그 평면에 수직한 방향으로 직선형으로 보강된 복합재에 대해 체적평균개념을 이용하여 열전도계수를 예측하였으며, 직선형으로 보강된 방향으로의 예측은 비교적 정확하나, 곡선형으로 보강이 이루어진 섬유들에 대해 수직한 방향으로 잘 맞지 않음을 보였다. Tai[4]는 3-D SRC의 열전도계수에 대해 열저항개념을 이용한 예측식을 제안하였으나, 실험과의 비교 검증은 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 SRC 중 3-D 및 4-D SRC에 대해 체적평균개념과 열저항개념을 다 적용하여 열전도계수를 예측하였으며, 두 예측 결과를 비교하였다. 그리고 열전도계수를 3차원적으로 나타내어 구조의 변화에 따른 특성을 살펴보고, 예측 모델의 타당성을 검증하기 위하여 4-D SRC에 대해 예측결과와 실험결과를 비교하였다.

본 연구에서는 일방향 복합재와 공간적으로 보강된 복합재료를 구성하는 라드는 횡방향 등방성을 가지며, 모재는 등방성을 가진다고 가정하였다. 그리고 공간적으로 보강된 복합재의 열전도계수를 구하기 위해 라드와 모재 사이의 열접촉저항(thermal resistance)은 무시하였으며, 특정방향으로의 열전도계수를 구할 때 열유동(heat flux)은 주어진 방향으로 평행하게 흐른다고 가정하였다.

2. 체적평균 개념을 이용한 열전도계수의 예측

2.1 체적평균법의 기본 개념

체적 평균법은 공간적으로 보강된 복합재의 모든 특성을 포함하면서 가장 작은 크기의 단위구조(unit cell) 개념을 이용하여 실제 구조물이 이 단위구조가 계속적으로 반복되면서 이루어진다고 생각한다. 이런 단위구조를 이용한

해석기법은 복잡한 해석 모델을 피하면서도 구성성분의 공간적 분포를 고려하며 비교적 정확하다는 장점이 있다. 이 단위 구조가 n개의 일방향(unidirectional) 복합재 블록으로 되어있다고 가정한다. 그리고 국부좌표계에서 일방향 복합재의 열전도계수를 먼저 예측하여 이것을 전체좌표계로 변환하고, 이 변환된 물성치에 각 방향에 대한 체적비로 가중치를 준 후, 이들을 더하여 단위 구조의 열물성치를 얻게된다.

이런 체적평균법의 정의상 먼저 일방향 복합재의 열전도계수에 대해 알아본다.

2.2 일방향 복합재의 열전도계수

일방향 복합재의 열전도계수는 Hashin[5]에 의해 제안된 식을 사용하였다.

$$k_{ud,1} = k_{r,1}V_r + k_mV_m \quad (1)$$

$$k_{ud,2} = k_m \frac{k_m V_m + k_{r,2}(1 + V_r)}{k_m(1 + V_r) + k_{r,2}V_m} \quad (2)$$

여기서 밑첨자 ud 는 일방향 복합재료, r 은 라드, 그리고 m 은 모재를 나타낸다. Islam[6]은 이 식이 FEM 해석 및 실험결과와 잘 일치함을 보였다.

2.3 SRC의 열전도계수 예측

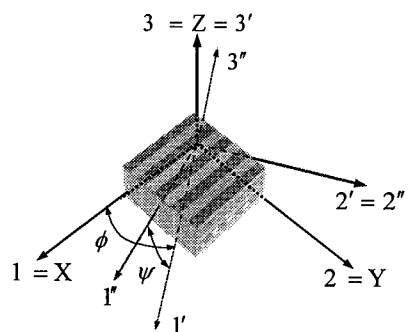


Fig. 1 Local and global coordinate system of unit cell.

Fig. 1에서 보듯이 하나의 Cartesian 좌표계를 정의하고, 각 축을 1-2-3축으로 잡으며, 라드의 길이방향을 1축으로 잡는다. 물론 이 좌표계는 오른손법칙이 적용된다. 먼저

열유동(heat flux) 벡터는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\vec{q} = q_1 \vec{e}_1 + q_2 \vec{e}_2 + q_3 \vec{e}_3 \quad (3)$$

여기서 q_i 와 \vec{e}_i ($i=1,2,3$)은 각각 축방향에 대한 열유동과 단위벡터를 나타낸다. 그리고 각 축방향에 대한 열유동 q_i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q_i &= -k_{i1} \frac{\partial T}{\partial x_1} - k_{i2} \frac{\partial T}{\partial x_2} - k_{i3} \frac{\partial T}{\partial x_3} \\ &= k_{i1} G_1 + k_{i2} G_2 + k_{i3} G_3 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 k_{ij} ($i,j=1,2,3$)는 j 방향의 온도 구배가 i 의 열유동에 미치는 가중치이며, 물리적으로 열전도계수를 의미한다. 식 (4)를 행렬로 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{Bmatrix} \quad (5a)$$

$$\{q\} = [k]\{G\} \quad (5b)$$

$[k]$ 는 대칭행렬이며, 일방향 복합재가 횡방향 등방성(transverse isotropic, $k_{22}=k_{33}$)을 보일 경우, 열전도도 행렬은 다음과 같이 단순화된다.

$$\begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & k_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

이제 라드의 국부좌표계에서의 열전도도 행렬을 $[k']$ 이라하면, 그 좌표계에서의 $\{q'\}$, $\{G'\}$ 와 열전도도 행렬은 다음의 관계를 가진다.

$$\{q'\} = [k']\{G'\} \quad (7)$$

그리고 그 좌표계에서의 열유동 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{q}' = q'_1 \vec{e}'_1 + q'_2 \vec{e}'_2 + q'_3 \vec{e}'_3 = \underline{e}'^T \{q'\} \quad (8a)$$

$$\vec{G}' = G'_1 \vec{e}'_1 + G'_2 \vec{e}'_2 + G'_3 \vec{e}'_3 = \underline{e}'^T \{G'\} \quad (8b)$$

여기서 \underline{e}' 은 라드(혹은 국부) 좌표계에서의 단위 벡터를 원소로 가지는 행렬이며, 윗첨자 T 는 전치행렬을 나타낸다. 전체 좌표계에 대해서도 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{q} = \underline{e}^T \{q\} \quad (9a)$$

$$\vec{G} = \underline{e}^T \{G\} \quad (9b)$$

공간적으로 보강된 복합재의 전체좌표계에서의 유효 열전도계수를 얻기 위해서는 국부좌표계에서 전체좌표계로의 좌표변환관계가 필요하다. 즉, 국부좌표계($1'-2'-3'$)와 전체좌표계($1-2-3$)사이의 각(ϕ, ψ)을 고려하여 각 좌표계의 단위 벡터들 사이의 관계를 알아야만 한다.

Fig. 1에서 보듯이 전체좌표계를 3축에 대해 ϕ 만큼 회전시키면 \vec{e}'_i ($i=1,2,3$)을 기저벡터로 하는 좌표계가 되며, 이 좌표계에서 다시 2축에 대해 ψ 만큼 회전시키면 \vec{e}''_i ($i=1,2,3$)를 기저벡터로 하는 라드좌표계가 얻어진다고 하자. 여기서 라드의 길이방향은 \vec{e}''_1 의 방향과 일치한다. 각각의 기저벡터는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\vec{e}'_i = b_{ij} \vec{e}_j, \quad \vec{e}''_i = a_{ij} \vec{e}'_j \quad (10)$$

여기서 $b_{ij} = \cos(x'_i, x_j)$, $a_{ij} = \cos(x''_i, x'_j)$ 로서 각 축 사이의 방향여현(directional cosine)을 나타낸다. 이 방향여현들을 성분으로 하는 행렬을 각각 B, A 라 하면,

$$[A] = \begin{bmatrix} m & 0 & n \\ 0 & 1 & 0 \\ -n & 0 & m \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} p & q & 0 \\ -q & p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

가 되며, $p = \cos \phi$, $q = \sin \phi$, $m = \cos \psi$, 그리고 $n = \sin \psi$ 이다. 식 (10)으로부터 $\vec{e}'_i = a_{ij} b_{jk} \vec{e}_k$ 임을 알 수 있으며,

$T_{jk} = a_{ij} b_{jk}$ 라 하면 $[T]$ 행렬은 다음과 같아진다.

$$[T] = [A][B] = \begin{bmatrix} m & 0 & n \\ 0 & 1 & 0 \\ -n & 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p & q & 0 \\ -q & p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mp & mq & n \\ -q & p & 0 \\ -np & -nq & m \end{bmatrix} \quad (12)$$

따라서 국부좌표계의 단위벡터와 전체좌표계에서의 단위벡터는

$$\underline{e}'' = [T] \underline{e} \quad (13)$$

과 같이 나타내어진다. 이 식을 전치행렬의 관계로 나타내면 다음과 같다.

$$\underline{e}''^T = \underline{e}^T [T]^T \quad (14)$$

식 (14)를 식 (8)에 대입하고, 어느 좌표계에서든 벡터는 동일하다는 사실을 이용하면,

$$\bar{q}'' = \underline{e}^T [T]^T \{q''\} = \underline{e}^T \{q\} = \bar{q} \quad (15a)$$

$$\bar{G}'' = \underline{e}^T [T]^T \{G''\} = \underline{e}^T \{G\} = \bar{G} \quad (15b)$$

이 되고, 따라서

$$\{q\} = [T]^T \{q''\} \quad (16a)$$

$$\{G\} = [T]^T \{G''\} \quad (16b)$$

이 됨을 알 수 있다.

전체 좌표계에서 열유동 벡터와 온도 구배 벡터 그리고 열전도도 행렬(식 (5))을 고려하여, 식 (16)을 나타내면 다음과 같다.

$$[T]^T \{q''\} = [k][T]^T \{G''\} \quad (17a)$$

그리고 $[T]^{-1} = [T]^T$ 인 성질을 이용하면,

$$\{q''\} = [T][k][T]^T \{G''\} \quad (17b)$$

이 되며, 식 (7)과 식 (17b)를 비교하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$[k''] = [T][k][T]^T \quad (17c)$$

그리고 $[T]^{-1} = [T]^T$ 인 성질을 다시 한번 이용하면,

$$[k] = [T]^T [k''] [T] \quad (18)$$

가 된다.

이렇게 전체좌표계에 대한 열전도계수가 얻어지면, 이것에 각 방향에 대한 라드의 체적비(V_r)을 전체 라드의 부피분율(V_r)로 나눈 값으로 가중치를 준 다음, 더함으로써 n 방향으로 보강된 복합체의 열전도계수를 얻는다.

$$[K] = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V_r} [T]_i^T [k''] [T]_i \quad (19)$$

여기서 $V_r = \sum_{i=1}^n V_i$ 이다.

3. 열저항 개념을 이용한 열전도계수 예측

3.1 열저항의 기본 개념

1차원 정상 상태(steady state)에서의 열전도는 다음의 관계식을 따르며,

$$q = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2) \quad (20)$$

저항을 전달률(transferr rate)과 기동 전위(driving potential)의 비로 정의함으로써 열저항을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{L}{kA} \quad (21)$$

이 열저항은 전기저항과 같이 직렬(series)저항과 병렬(parallel) 저항으로 나눌 수 있다.

Fig. 2에서 보듯이 직렬의 경우는 열유동의 방향과 복합재료의 접합면의 방향이 평행하고, 병렬의 경우는 열유동의 방향과 재료의 접합면의 방향이 수직하며, 다음과 같은 관계로 유도되어진다.

$$R_{series} = R_a + R_b \quad (22a)$$

$$\frac{1}{k_{series}} = \frac{V_a}{k_a} + \frac{V_b}{k_b} \quad (22b)$$

$$\frac{1}{R_{parallel}} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \quad (23a)$$

$$k_{parallel} = k_a V_a + k_b V_b \quad (23b)$$

여기서, V 는 각 접합 재료의 체적비이다.

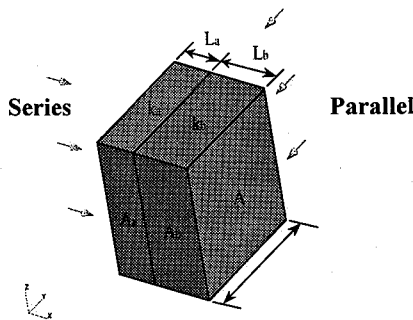


Fig. 2 The concept of the thermal resistance.

3.2 3-D SRC에 대한 열저항 개념의 적용

3-D SRC에 대해서는 Tai[4]가 제안한 식을 적용하되 일방향 복합재료의 열전도계수를 얻기 위해 사용되는 Springer[7]의 식을 Hashin[6]이 제안한 식으로 대체하여 사용하였으며, 단위구조를 Fig. 3과 같이 하부단위구조로 나누어 열저항 개념을 적용하였다.

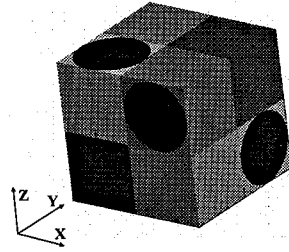


Fig. 3 A concept of the application of thermal resistance to 3-D SRC.

3.3 4-D SRC에 대한 열저항 개념의 적용

4-D SRC에 대해서는 일반적으로 단위구조를 가장 작은 단위의 정삼각형이나 정육각형으로 취하나 본 연구에서는 열저항 개념을 적용하기 위해 단위구조를 다르게 취하였다. 일반적인 식의 유도를 위해 일단 각 보강 방향 라드의 열전도계수는 서로 다르다고 가정하여 식을 유도하였다.

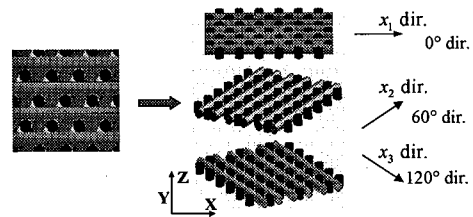


Fig. 4 A concept of the application of thermal resistance to 4-D SRC.

Fig. 4에서 보듯이 전체 좌표계의 X축과 x_1 축의 방향

은 일치되어 있어서, x_1 축 방향은 0° 방향, x_2 , x_3 축 방향은 60° , 120° 방향으로 향하고 있다고 가정한다. 이 연구에서는 한 평면 내에서 0° , 60° , 120° 방향과 이 평면에 수직 한 방향(z 방향)으로 보강이 된 4-D SRC를 고려하였으며, 열저항 개념을 적용하기 위해 4-D SRC가 0° , 60° , 120° 방향의 세 개의 층으로 구성되어진다고 가정하였다.

그리고 Fig. 5에 나타낸 것처럼 각 층의 국부좌표계에 대해 단위구조를 정삼각형이나 정육각형 형상이 아닌 사각형 형상으로 취하여, 이 단위구조에 대해 열저항 개념을 이용하여 열전도계수를 구한 후, 이 값을 그 층 전체의 열전도계수로 가정하였다.

그리고 나서 각 층의 열전도계수를 좌표계의 변환 관계를 이용하여 전체 좌표계에 대해 얻은 후, 다시 한번 열저항 개념을 이용하여 4-D SRC의 유효 열전도계수를 얻었다. 국부좌표계에서 전체좌표계로의 각 층의 열전도계수의 변환관계는 체적 평균법에서와 같다.

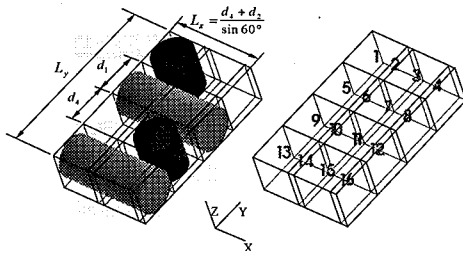


Fig. 5 A unit cell of a lamina of 4-D SRC.

3.3.1 한 적층판에서의 단위구조의 열전도계수

먼저 Fig. 5에 있는 단위구조의 열전도계수에 대해 알아보자. 열저항 개념을 도입하기 위해 단위구조를 하부단위구조(subunit)로 나눈다. 라드와 모제가 함께 포함되어 있는 하부단위구조의 라드 체적비는 모두 $\pi/4$ 이다.

$$V_{r_1} = V_{r_2} = V_{r_3} = V_{r_4} = \pi/4 \quad (24)$$

국부 좌표계 x_1 축 방향의 열전도계수는 정정상 하부단위구조(subunit) 1~8과 9~16의 열저항이 같으므로 하부단위구조 1~8의 열저항을 이용하여 구한다. 열저항이 같은 두 물체가 열유동 방향에 대해 병렬로 연결되어 있을 때, 두

물체 전체의 열저항은 한 물체의 열저항과 동일하기 때문이다. 라드와 기지가 함께 포함되어 있는 하부단위구조의 열전도계수는 식 (1)과 (2)로 구할 수 있다. 각 하부단위구조의 열전도계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k^{e1,x_1} &= k_m \frac{k_m V_{r_4} + k_{r_4,2}(1 + V_{r_4})}{k_m(1 + V_{r_4}) + k_{r_4,2} V_m} \\ k^{e2,x_1} &= k^{e3,x_1} = k^{e4,x_1} = k_m = k^{2-4,x_1} \\ k^{e5,x_1} &= k^{e6,x_1} = k^{e7,x_1} = k^{e8,x_1} \\ &= k_{r_1} V_{r_1} + k_m(1 - V_{r_1}) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 윗첨자 e 는 하부단위구조(element)를 나타내며, k^{i-j,x_1} 는 x_1 방향으로의 i 에서 j 까지의 하부구조 전체의 열전도계수를 나타낸다. 그리고 열저항의 개념을 이용하면 k^{1-4,x_1} 다음과 같이 구해지며 k^{5-8,x_1} 은 k^{e5,x_1} 와 같다.

$$\frac{1}{k^{1-4,x_1}} = \frac{d_4}{k^{e1,x_1} L_x} + \frac{L_x - d_4}{k^{2-4,x_1} L_x} \quad (26a)$$

$$k^{1-4,x_1} = \frac{L_x k^{e1,x_1} k^{2-4,x_1}}{(L_x - d_4) k^{e1,x_1} + d_4 k^{2-4,x_1}} \quad (26b)$$

여기서 d_i 는 i 방향 라드의 직경을 나타낸다. 식 (25), (26)에 의해 국부좌표계 x_1 방향의 열전도계수 k^{x_1} 는 식 (22b)에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$k^{x_1} = \frac{1}{L_y/2} (d_4 k^{1-4,x_1} + d_1 k^{5-8,x_1}) \quad (27)$$

나머지 y_1 , z_1 방향의 열전도계수도 유사한 방식으로 구할 수 있다.

3.3.2 전체좌표계에 대한 4-D SRC 열전도계수

각 층의 열전도계수를 좌표계의 변환 관계를 이용하여 전체 좌표계에 대한 각 층의 열전도계수를 얻은 후, 열저항 개념을 이용하여 4-D SRC의 전체 좌표계에 대한 열전

도계수를 얻는다.

국부 좌표계에서 전체 좌표계로의 변환은 열전도계수가 2차 텐서(2nd order tensor)이므로 체적 평균법에서와 마찬가지로 식 (18)이 적용되어질 수 있다. 이 관계를 이용하여 구한 전체 좌표계에 대한 각 층의 열전도계수를 k_i^x , k_i^y , k_i^z 라고 하자.

먼저 전체좌표계 X축과 Y축 방향에 대한 열전도계수는 이 방향들에 대해 세 층이 열저항 개념에서 병렬 연결된 것과 동일하므로, 식 (23b)로 부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$k_{xx} = \frac{1}{d_1 + d_2 + d_3} (d_1 \cdot k_1^x + d_2 \cdot k_2^x + d_3 \cdot k_3^x) \quad (28)$$

$$k_{yy} = \frac{1}{d_1 + d_2 + d_3} (d_1 \cdot k_1^y + d_2 \cdot k_2^y + d_3 \cdot k_3^y) \quad (29)$$

Z축 방향에 대한 유효 열전도계수는 각 층이 직렬로 연결된 것과 같으므로 식 (22b)를 적용하면,

$$\frac{1}{k_{zz}} = \frac{1}{d_1 + d_2 + d_3} \left(\frac{d_1}{k_1^z} + \frac{d_2}{k_2^z} + \frac{d_3}{k_3^z} \right) \quad (30a)$$

와 같이 나타낼 수 있으므로, k_{zz} 는

$$k_{zz} = \frac{(d_1 + d_2 + d_3) k_1^z k_2^z k_3^z}{d_1 k_2^z k_3^z + d_2 k_3^z k_1^z + d_1 k_2^z k_3^z} \quad (30b)$$

와 같이 유도되어진다.

3.4 SRC 열전도계수의 3차원적 분포

위에서 설명한 개념을 사용하여 공간적으로 보강된 복합재의 열전도계수에 대한 3차원적 특성을 살펴볼 수 있다. 예측 프로그램의 입력값은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 6와 7은 Table 1의 물성치를 사용하여 각각 모든 방향으로 동일한 물성치와 크기를 가지는 라드로 보강된 3-D SRC와 4-D SRC에 대한 열전도계수의 분포이다. 그럼 으로부터 모든 방향으로 동일한 보강이 이루어질 경우 3-D SRC는 등방성을 보이며, 4-D SRC는 횡방향 등방성(transversely isotropy)을 보임을 알 수 있다.

Table 1 A unit cell of a lamina of 4-D SRC

Constituent	Unit	fiber	matrix	rod
Material		T300	carbon	T300/carbon
k_1	W/mK	8.3648	25	14.02
k_2	W/mK	0.8365	25	5.92

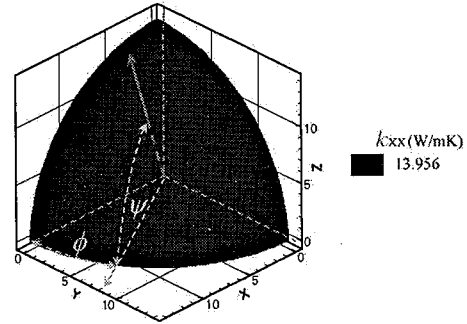


Fig. 6 A distribution of the thermal conductivity of 3-D SRC.

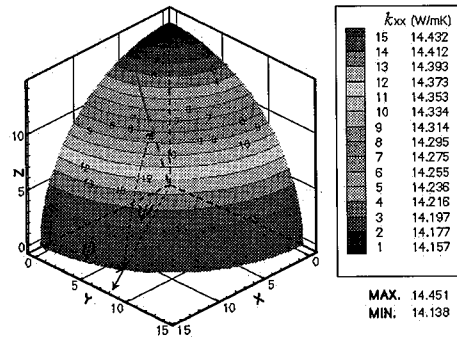


Fig. 7 A distribution of the thermal conductivity of 4-D SRC.

4. SRC의 열전도계수 실험

본 연구에서는 예측 결과를 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 보강 라드는 미국 CST(composite structures technology)의 제품을, 그리고 에폭시는 국도화학의 제품을 사용하여 SRC를 제작하였다. SRC의 열전도계수를 예측하기 위해 $k_{r,1}$, $k_{r,2}$, k_m 이 필요하며, $k_{r,1}$ 는 CST사에서 받은 데이터를 사용하였으며, $k_{r,2}$ 와 k_m 은 실험을 통하여 구하였다.

4.1 라드의 횡방향 열전도계수의 실험

4.1.1 라드의 횡방향 열전도계수의 측정방법

CST사에서 구입한 직경이 0.67mm와 1.33mm인 라드는 직경과 장비의 분해능을 고려해볼 때 라드 자체를 가지고 실험을 할 경우, 실험이 어려울 뿐만 아니라 실험에서 얻은 결과도 큰 오차를 포함할 가능성이 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 라드로 일방향 복합재 시편을 제작한 후, 이것의 열전도계수()와 수지의 열전도계수 그리고 라드와 기지의 체적비를 안 상태에서 라드의 횡방향 열전도계수를 역추적하는 방법을 사용하였다. 역추적에 사용된 식은 다음과 같다.

$$k_{r,2} = k_m \frac{k_m V_m - k_{ud,2}(1+V_r)}{k_{ud,2} V_m - k_m(1+V_r)} \quad (30)$$

4.1.2 일방향 복합재 시편의 제작 및 실험

시편은 50×40×10(mm)의 크기로 제작되었으며, 제작된 시편의 프리폼의 단면 형상은 Fig. 9와 같다. 일방향 복합재에 있어서 섬유나 라드가 정육각형 형상의 배열을 가질 경우 단면 내에서 횡방향 등방성을 가진다고 알려져 있으며, Lee[8]는 정육각형 배열이 사각형 배열보다는 예측식의 결과나 실험결과와 더 잘 일치함을 보이고 있어, 정육각형 배열을 이루도록 라드를 적용하였다. 각 라드 사이의 간격은 일정한 두께의 종이와 접착필름을 사용하여 유지되게 하였다

프리폼의 제작은 CST사에서 구입한 라드로 제작하였다. 먼저 라드를 다이아몬드커터를 이용하여 시편 제작에 적당한 크기로 잘랐다. Fig. 8에서 일방향 복합재료 옆에 나란히 놓여진 작은 시편과 같이 한쪽면에 CAD를 이용하여 정확하게 라드의 위치를 표시한 종이를 접착필름(adhesive film)에 붙여 두께가 2mm가 된 종이 위에 0.99mm의 간격으로 일정하게 유지하면서 라드를 붙였다. 접착 필름의 반투명성으로 인해 필름에 종이를 붙이더라도 종이 위에 그려진 선들은 반대쪽 면에서 그대로 보이게 되어 라드 사이의 간격을 일정하게 유지하면서 라드를 붙일 수 있었다. 본 연구를 위해 제작한 일방향 복합재료가 Fig. 9에서 보는 것처럼 공간 확보를 위한 종이와 접착필름이 삽입되지 않은 곳에서도 0.2mm의 간격이 유지되어 라드가 육각형 배열을 이루고 있다. 이렇게 제작된 작은 시편들을 60°방향으로 경사지게 적층함으로써 일방향 복합재의 프리폼을 완성하였다. 적층할 때는 Fig. 8에서 보는 것처럼 작은 시편의 한쪽 끝을 접착필름을 이용하여 고정시키는 동시에 다

른 끝은 수직방향으로 구속을 가하여 라드가 적층 후에도 고정되어있게 하였다.

이와 같이 프리폼을 제작한 후, 국도화학의 수지(YD114)와 경화제(H4198)를 부피비 40:60로 섞은 에폭시에 함침시켜 일방향 복합재를 제작하였다. 기포를 제거하기 위해 BYK사의 탈포제 BYK 515를 부피에 대해 0.5%를 에폭시에 첨가하는 동시에 진공을 잡아주었다.

보통의 복합재료의 성형 과정과는 달리 에폭시가 액상으로 되어 있어 진공과 압력을 동시에 가할 수가 없었다.

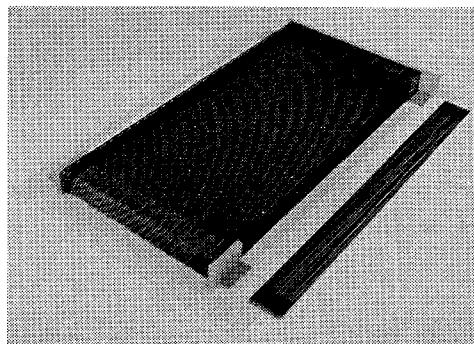


Fig. 8 A preform of unidirectional composite.

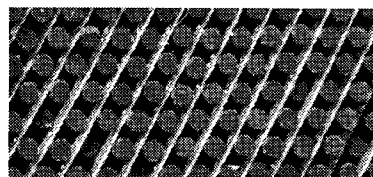


Fig. 9 A cross section of a preform of unidirectional composite.

그래서 Fig. 10에 보여지는 지그 내부에 일방향 복합재 프리폼을 넣어 에폭시에 함침시킨 후, 30분동안 진공을 잡아준 다음, 이 진공 지그를 제거한 후에 Autoclave에 넣어, Fig.11와 같은 성형사이클을 따라 성형하였다. Fig. 10의 오른쪽에 보이는 진공펌프와 지그 사이의 연결부를 지그 뚜껑의 홈부분에 올린 후 모든 결합부를 실링테이프(sealant)으로 막아 진공을 잡아주었다. 진공을 30분만 잡아준 것은 사용한 에폭시가 수지와 경화제를 섞은 후 25분 정도부터 공기와 맞닿은 에폭시 부분에서 경화가 일어나면서 막을 형성하였기 때문에 그 이후로 진공을 잡아주는 것은 의미

가 없다고 보았기 때문이다.

실험은 천이열선법(transient hot-wire method)을 이용하여 수행되었으며, 온도는 $22 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도는 55% RH 이하로 유지하였다. 이 방법은 $50 \times 40 \times 10(\text{mm})$ 크기의 두 개의 시편 사이에 백금선을 넣어 이것을 통해 열을 가하는 동시에 온도를 감지하여 시간의 변화에 따른 온도의 변화를 측정하여 열전도계수를 측정하는 방법이며, 다음과 같은 식에 의해 구하여진다.

$$k = \frac{\text{Power} / L}{4\pi \delta T / \delta \ln(t)} \quad (31)$$

여기서 L 은 열선의 길이, δT 는 온도의 변화량이며, $\delta \ln(t)$ 는 log scale로 나타내어진 시간 변화량을 나타낸다.

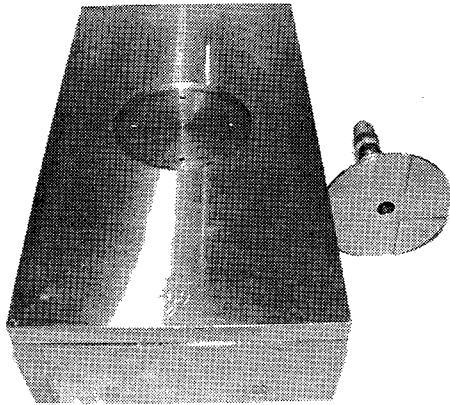


Fig. 10 Vacuum jig of unidirectional and SRC.

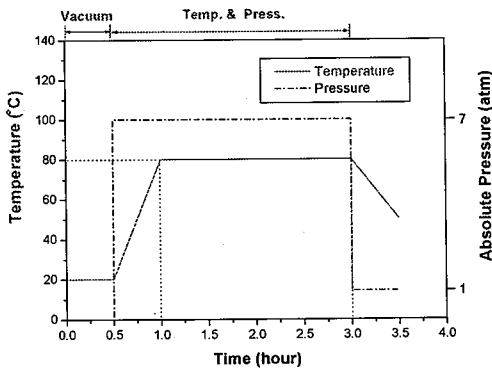


Fig. 11 Curing cycle for unidirectional and SRC.

4.1.3 일방향 복합재 시편의 열전도계수 측정결과

라드의 횡방향 물성치를 측정하기 위해 일방향 복합재 시편은 2쌍을 제작하였다. 본 연구에서 천이열선법을 적용함에 있어 4-D복합재의 열물성치를 측정하는 데는 큰 문제가 없었으나, 일방향 복합재의 횡방향 열물성치를 측정할 때는 백금 열선이 시편 상에 놓이는 위치에 따라, 측정되는 백금의 저항이 다르게 측정되었으며, 그런 이유로 인해 측정되어진 열전도계수의 표준편차가 크게 나타났다. 그래서 본 연구에서는 일방향 복합재 시편의 횡방향 열전도계수의 측정 시에는 시편 각 쌍에 대해 8번의 실험을 수행하였다. 그리고 각 실험 수행시 5번씩 데이터를 받아 처리하여 열전도계수를 구하였다. 따라서 각 시편 쌍 당 40개의 실험데이터가 나오며 이를 평균하여 각 시편 쌍의 열전도계수를 구한 다음, 두 쌍에 대한 평균을 취함으로써 일방향 복합재의 횡방향 열전도계수를 얻었다. 이렇게 구하여진 실험결과를 Table 2에 나타내었다.

국도화학의 에폭시의 열전도계수도 동일한 방법으로 구하였으나, 백금의 저항이 큰 영향을 받지 않아 각 시편 쌍에 대해 4번의 실험을 수행하여 20개의 실험데이터를 구하였으며, 실험결과는 마찬가지로 Table 2에 나타내었다. 일반적으로 알려진 에폭시의 열전도계수($0.17 \sim 0.20 \text{ W/mK}$)와 유사한 값을 가졌다.

이 실험 결과를 바탕으로 식 (30)을 이용하여 라드의 횡방향 열전도계수 $k_{r,2} = 0.338 \text{ W/mK}$ 를 얻었다.

Table 2 Thermal conductivity of rod and matrix

Unit	$k_{ud,2}$	k_m
W/mK	0.240	0.189
Stand. Dev.	± 0.020	± 0.005

4.2 SRC 시편의 열전도계수 실험

시험에 필요한 시편의 크기는 $50 \times 40 \times 10(\text{mm})$ 이므로, 각 방향의 열전도계수를 구하기 위해서는 그 방향의 두께가 10(mm)가 되는 시편을 제작하여야 하며, 정확한 데이터를 얻기 위해서는 가능한 많은 시편을 필요로 한다. 그러나 제작 시간이 많이 소요되기 때문에 본 연구에서는 Z방향의 열전도계수만을 실험을 통하여 구하였으며, 3쌍의 시편을 제작하였다. 0° , 60° , 120° 방향은 직경이 0.67mm인 라드를 사용하였고, Z방향으로는 1.33mm의 라드를 사용하였다. 먼저 CAD를 이용하여 정확하게 단면구조가 그려진 종이

위에 접착필름을 붙인다. 이렇게 접착필름에 붙여도 이 필름이 반투명성을 가져, 종이에 그려진 CAD단면이 그대로 보이게 된다. 여기에 수직 방향의 라드를 먼저 일정 간격으로 꽃아서 고정시킨다. 그 후 고정된 수직방향 라드 사이에 0°, 60°, 120°방향으로 순서대로 적층을 하여 4-D 프리폼을 제작하였다.

일방향 복합재와 동일한 성형사이클을 적용하였고 실험도 동일하게 천이열선법을 수행하였으나, 백금의 저항이 큰 영향을 받지 않아 예폭시와 마찬가지로 4번의 실험을 수행하였다. 제작된 4-D SRC는 Fig. 12와 같다. 실험을 통하여 얻은 Z방향의 열전도계수는 $k_{zz} = 1.735 \text{ W/mK}$ 이며, 표준편차는 ± 0.068 이었다.

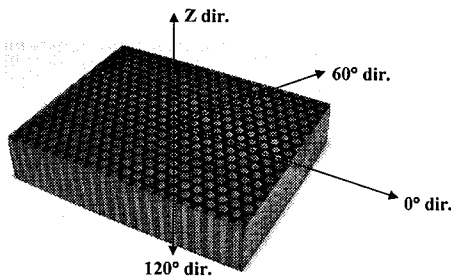


Fig. 12 A 4-D specimen after curing and cutting.

5. 예측 결과와 실험 결과의 비교

본 연구에서는 일방향 복합재의 횡방향 열전도계수를 측정하여 라드의 횡방향 열전도계수를 역추적하여 구하였으나, 앞서 설명한 것과 같이 백금 저항선이 삽입되는 위치에 따라 백금의 저항값이 다르게 측정되어 실험결과의 표준편차가 크게 나타났다. 측정한 일방향 복합재의 열전도계수가 오차를 수반할 경우 역추적하여 얻어진 라드의 횡방향 열전도계수는 일방향 복합재의 열전도계수가 가지는 오차보다 훨씬 더 큰 오차를 보인다고 알려져 있다[9]. 물론 일방향 복합재의 열전도계수가 정확하게 측정이 되어진다면 이런 문제점이 발생하지 않았지만, 실제로 오차를 수반한 역추적값들을 적층판(laminate)에 적용할 경우에는 실제거동과 상당히 벗어나는 잘못된 해석을 수행하게 된다. 따라서 4-D SRC의 열전도계수가 이런 역추적 방법으로 얻어진 라드의 횡방향 열전도계수를 사용하여 얻을 경우 어떤 영향을 받는 지를 고찰할 필요가 있다.

5.1 역추적 방법에 의한 데이터를 SRC 열전도계수의 예측에 사용하기 위한 타당성 검증

본 연구에서는 역추적 방법의 공간적으로 보강된 복합재료의 적용에 대한 타당성을 검증하기 위해 측정되어진 일방향 복합재의 횡방향 열전도계수($k_{ud,2}$)로부터 얻어진 라드의 횡방향 열전도계수($k_{r,2}$)와 4-D 복합재의 열전도계수(k_{zz})를 공칭값(nominal value)로 두고, 실제 $k_{ud,2}$ 가 공칭값의 $\pm 10\%$ 오차 내에 존재한다고 보았을 때 $k_{r,2}$ 와 k_{zz} 의 변화량을 살펴보았다. 실험에서 구하여진 일방향 복합재의 횡방향 열전도계수에 대한 표준 편차를 측정 오차로 간주하여 이들 값보다 좀 더 큰 값인 $\pm 10\%$ 를 가정하였다. Fig. 13에 $k_{ud,2}$ 와 $k_{r,2}$ 의 관계를 나타내었으며, $k_{ud,2}$, $k_{r,2}$ 그리고 k_{zz} 의 관계를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Relation between $k_{ud,2}$, $k_{r,2}$ and k_{zz}

	$k_{nominal}$		
$k_{ud,2} \text{ (W/mK)}$	0.216 (-10%)	0.240	0.264 (+10%)
$k_{r,2} \text{ (W/mK)}$	0.259 (-23%)	0.338	0.435 (+29%)
$k_{zz} \text{ (W/mK)}$	1.858 (-0.9%)	1.874	0.891 (+0.9%)

Fig. 13에서 보면 알 수 있듯이 $k_{ud,2}$ 가 가지는 오차에 대해 $k_{r,2}$ 는 더 큰 오차를 보이므로 역추적하여 얻은 열전도계수를 복합재 적층판의 해석에 그대로 사용할 경우 문제점을 야기시킬 수 있다. 하지만 Table 3에서 알 수 있듯이 $k_{ud,2}$ 가 가지는 오차가 $k_{r,2}$ 에서 더 큰 오차로 나타나더라도 4-D SRC의 열전도계수를 측정하는 데는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 이런 현상의 원인은 라드의 길이방향과 횡방향 열전도계수의 비가 크며, 4-D SRC가 복합재 적층판과는 달리 평면에 수직인 방향으로 보강이 되어 $k_{r,2}$ 의 영향이 상대적으로 적어지기 때문이다.

4-D 복합재는 기계적열적 물성치를 고려하여 Z방향의 라드의 직경이 다른 방향의 라드의 직경보다 동일하거나 더 크게 제작되고 있다. 본 연구에서 제작한 4-D 복합재의 직경의 비는 약 1:1:1.2로 제작이 되어 직경이 동일한 경우보다 라드의 횡방향 열전도계수의 영향이 상대적으로 더 적다. 그래서 본 연구에서는 실험을 통하여 구한 $k_{ud,2}$ 를 공칭값으로 두고, 이 값을 $\pm 10\%$ 를 변화시켜 $k_{r,2}$ 를 구한 다음, 직경비가 1:1:1:1인 4-D 복합재의 k_{zz} 의 변화를 살펴보고, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

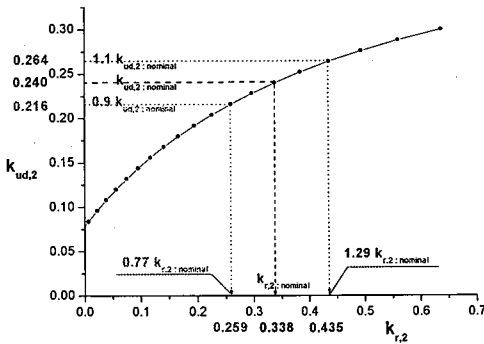


Fig. 13 Variation in $k_{r,2}$ with uncertainty in $k_{ud,2}$.

Table 4 Relation between $k_{ud,2}$, $k_{r,2}$ and k_{zz} of 4-D SRC of same rod reinforcement

	$k_{nominal}$		
$k_{ud,2}$ (W/mK)	0.216 (-10%)	0.240	0.264 (+10%)
$k_{r,2}$ (W/mK)	0.259 (-23%)	0.338	0.435 (+29%)
k_{zz} (W/mK)	1.148 (-2.1%)	1.172	1.198 (+2.2%)

지름이 1:1:1:2인 것에 비해서는 영향을 더 많이 미치는 것으로 나타났으나, 오차는 발생하지 않아 일방향 복합재의 횡방향 열전도계수가 오차를 수반하더라도, 4-D 복합재의 열전도계수를 예측하는 데는 큰 문제가 없음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 라드의 길이방향과 횡방향 열전도계수의 비가 컸기 때문에 4-D 복합재의 열전도계수를 예측하는 데 있어 큰 오차를 수반할 수 있는 라드의 횡방향 열전도계수에 큰 영향을 받지 않았으나, 본 연구에서와 같이 라드의 횡방향 열전도계수를 직접 측정하여야 하는 상황이나 라드의 길이방향과 횡방향 열전도계수의 비가 작을 가능성이 있다고 판단되는 경우에는 어떤 구조물이든 오차를 수반할 수 있는 $k_{r,2}$ 대한 영향을 살펴볼 필요가 있다고 사료된다.

5.2 예측결과와 실험결과의 비교

실험에서 구한 라드와 에폭시의 열전도계수를 이용하여 체적평균법과 열저항법으로 SRC의 Z방향 열전도계수를 구하였다. 예측을 위한 입력값들을 Table 5에 나타내었다. 라

드의 길이방향의 열전도계수는 CST사에서 얻은 데이터이고, 라드의 횡방향 열전도계수는 일방향 열전도계수와 역추적법으로 얻은 값이며, 모재의 열전도계수는 실험을 통하여 얻어진 값이다.

Table 5 Input properties for prediction of k_{zz} of 4-D SRC

d_1, d_2, d_3	d_4	$k_{r,1}$	$k_{r,2}$	k_m
mm	mm	W/mK	W/mK	W/mK
0.67	1.33	5.675	0.338	0.189

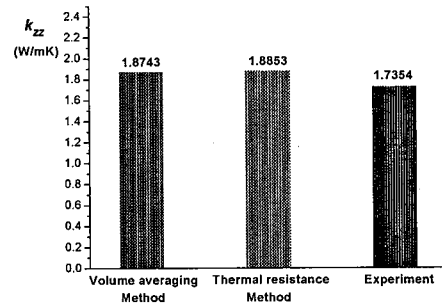


Fig. 14 Comparison between the predictions and the experiment.

실험을 통하여 얻은 결과와 두 이론식의 결과를 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

예측결과와 실험결과가 차이를 보이는 것의 주요 원인은 시편 내에 존재하는 기공량과 그 분포로 인한 것으로 보인다. 시편 내에 있을 수 있는 기공을 제거하기 위해 탈포제를 사용하였고, 진공도 잡아주었으나 기공을 완전히 제거하지는 못하였다. 그리고 라드의 직경이 균일하지 못하여 예측에 사용된 각 방향의 체적비와 실제 시편에서의 각 방향으로의 체적비가 다른 것도 이런 차이의 원인인 것으로 보이며, 서론에서 설명한 예측식을 구성할 때 사용한 두 가정도 실제를 이상화한 것이어서, 이것에 대한 오차도 존재한다. 하지만 예측 방법의 차이는 있으나, 예측결과와 실험결과는 10%정도에서 일치함을 보여주었다.

결론

본 연구에서는 체적평균 개념과 열저항 개념을 사용하

여, 공간적으로 보강된 복합재의 열전도계수를 예측하였으며, 열저항 개념을 적용하여 4-D SRC의 열전도계수에 대한 예측식을 제안하였다. 이를 실험과 비교하여, 예측결과가 실험결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 3-D 및 4-D SRC의 열전도계수를 예측하여 이를 3차원적으로 나타냄으로써, SRC가 가지는 열전도 특성을 알아보았다. 동일한 직경의 라드로 보강된 3-D SRC는 등방성을 가지는 것을 알 수 있었으며, 4-D SRC는 횡방향 등방성을 가짐을 알 수 있었다.

공간적으로 보강된 복합재는 적용에 있어 탄소/에폭시 복합재로 제작되는 경우도 있으나, 주로 탄소/탄소 복합재로 제작되어진다. 탄소 소재가 가지는 이방성과 그로 인한 물성치 측정의 어려움이 있으나, 정확한 측정이 이루어지면 탄소/탄소 SRC의 열전도계수의 예측에도 유용하게 적용되어지리라 사료된다.

후 기

본 연구는 한국항공우주산업 주식회사(KAI)가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 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. 29, 1995, pp. 2280-2294.
- 2) A. Dasgupta, "Three-dimensional modeling of woven-fabric composites for effective thermo-mechanical and thermal properties," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 209-223.
- 3) G. Teters and A. Kregers, "Effective Thermal Properties of Spatially Reinforced Fibrous Composite Materials," *Proceedings of the Second Baltic Heat Transfer Conference 1995*, 1995, pp. 493-502.
- 4) H. Tai, "Equivalent Thermal Conductivity of Two- and Three-Dimensional Orthogonally Fiber-Reinforced Composites in One-Dimensional Heat Flow," *Journal of Composites Technology & Research*, Vol. 18, No. 3, 1996, pp. 221-227.
- 5) M. R. Islam and A. Pramila, "Thermal Conductivity of

Fiber Reinforced Composites by the FEM," *Journal of Composite materials*, Vol. 33, No. 18, 1999, pp. 1699-1715.

- 6) Z. Hashin, "Analysis of Properties of Fiber Composites with Anisotropic Constituents," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 46, 1979, pp. 543-550.
- 7) Springer and Tsai, "Thermal Conductivities of Unidirectional Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 1, 1967, pp. 166-173.
- 8) C. S. Lee and S. J. Kim, "Investigation on the validity of the rule of mixtures," *Proceeding of 99 Korean Society for Composite Materials*, 1999, pp. 111-117.