

論文

공간적으로 보강된 복합재료의 강성예측

유재석⁺, 장영순^{*}, 이상의^{**}, 김천곤^{**}

Stiffness Prediction of Spatially Reinforced Composites

Jae-Seok Yoo⁺, Young-Soon Jang^{*}, Sang-Eui Lee^{**}, Chun-Gon Kim^{**}

ABSTRACT

In this study, the stiffness of spatially reinforced composites (SRC) are predicted by using superposition of a rod and matrix stiffnesses in an arbitrary direction. To confirm the predicted values, the material properties of SRC are measured. The predicted values from the volume average of stiffness matrix are consistent with the tested values in a rod direction, but are inconsistent in an off-rod direction while reverse is true for the volume average of compliance matrix. Therefore, the harmony function from superposition of stiffness and compliance matrix is introduced. The predicted values from the harmony function are consistent with the tested values in both the rod and the off-rod directions.

초 록

본 연구에서는 라드와 기지의 강성행렬의 중첩을 통해서 임의의 방향에서 공간적으로 보강된 복합재(SRC)의 강성을 예측하였다. 예측치를 실험과 비교하기 위하여 SRC의 물성치를 측정하였다. 라드방향에서는 강성행렬의 중첩을 통해서 예측된 물성치가 실험치와 일치하였고, 라드에서 벗어난 방향에서는 연성행렬의 중첩을 통해서 예측된 물성치가 실험치와 비교적 일치하였다. 이런 이유로 강성행렬과 연성행렬의 중첩을 공간적으로 조합한 물성치 조화함수를 이용하여, SRC의 모든 방향에서 물성치를 예측하였다. 이러한 물성치 조화함수를 이용한 결과, 예측치와 실험치가 라드방향과 라드에서 벗어난 방향 모두에서 일치하였다.

Key Words: 공간적으로 보강된 복합재료(spatially reinforced composites, SRC), 강성예측(stiffness prediction), 라드(rod), 단위구조(unit cell), 강성행렬(stiffness matrix), 연성상수행렬(compliance matrix)

1. 서 론

공간적으로 보강된 복합재(spatially reinforced composites, SRC)의 여러 가지 모양을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서와 같이 SRC 구조는 두께방향에 대하여 라드(rod)가 보강되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 SRC는 적층 복합재의 층간분리현상을 두께방향 섬유보강으로 원천적으로 방지한다. 이러한 SRC는 공간적으로 섬유의 배열과 섬유다발의

직경을 어떻게 결정하는가에 따라 각 방향의 물성치가 바뀌어진다. 이와 같이 SRC의 방향에 따라 달라지는 물성치를 예측함으로써 구조 설계요구조건에 맞는 SRC를 설계할 수 있다. 현재 이러한 SRC가 적용되고 있는 구조물의 분야는 제한적이지만 SRC의 물성치 해석이 이루어지면 적용 분야가 넓어질 것으로 예측된다.

3차원 직물 복합재에 대한 강성과 강도예측은 여러 가지 방법으로 시도 되어왔다. Joon-Hyung Byun [1,2]은 plain

⁺ 한국항공우주연구원 발사체 기술실 구조그룹, 교신저자(E-mail:jsyoo@kari.re.kr)

^{*} 한국항공우주연구원 발사체 기술실 구조그룹

^{**} 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

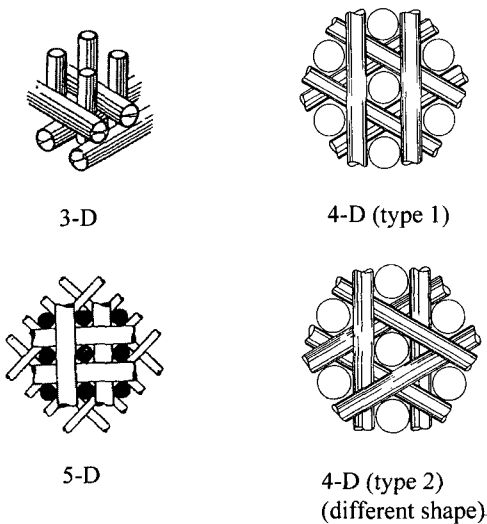


Fig. 1 Various shapes for spatially reinforced composites.

weave와 8-harness satin weave에 대하여 강성예측을 수행하였다. plain weave와 8-harness satin weave의 단위구조를 정의하여, 단위구조의 강성을 예측하였다. 또한, 3차원 직물 복합재가 복잡한 양상을 보이는 구조에 대해서 여러 개의 단위구조로 구성된 macro cell을 정의해서 3차원 직물 복합재의 강성을 예측하였다. 이와 같은 단위구조의 강성과 강도해석 방법에 대해 Rajiv 등[3-6]은 약간 변화된 해석방법을 도입하였다. 해석과 실험에 사용된 시편은 plain weave와 2×2 triaxial braid이다. 임의의 방향의 섬유와 기지의 일부를 잘라낸 yarn slice에 대한 강성상수 행렬의 체적평균을 통해 단위구조의 강성행렬을 얻었다. 강성행렬의 체적평균에 있어 각각의 yarn slice는 균일한 변형률을 받는다고 가정하였다. 이와 같은 yarn slice 강성행렬의 체적평균을 도입함으로써 곡선부분의 강성행렬을 보다 효과적으로 계산할 수 있었다. Nagai 등[7,8]은 orthogonal weave와 5-axial weave로 짜여진 탄소/에폭시 시편에 대해 인장, 압축, 전단 강성 및 강도를 계산하였다. 사용된 해석방법은 단위구조에 대해 섬유-보, 기지-보, 기지-라드 요소를 정의한 유한요소법을 사용하였다. 또한 단순화 된 혼합법칙(rule of mixture)을 이용하여 공간적으로 보강된 복합재료의 강성을 예측하고, 각 방향 섬유의 체적에 대하여 제한된 탄성계수를 구속조건으로 갖는 최소 무게 최적화를 수행하였다. Chamis[9]는 일방향 복합재의 물성을 예측할 수 있는 micro-mechanics 방정식을 제안하였다. Ladeveze 등[10]은 노즐목 재료로 쓰이는 4D 탄소/탄소 복합재료에 대한 파손 거동과 비탄성 현상을 연구하였다. 여기서 다루는

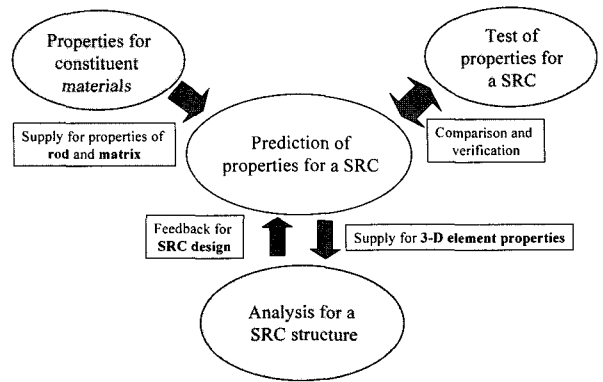


Fig. 2 Design procedure of SRC structures.

4D는 본 논문의 것과 기하학적으로 다른 모델로, 각 라드 사이의 각도를 최소화하는 구조를 갖는 것으로 보인다. 여러 하중방향에 대하여 변형거동을 실험하였고, 단면적 변화에 따른 변형거동을 실험하였다. 단면적이 증가할수록 파손강도가 증가하였다. Young's modulus를 공간적으로 나타냈고, 경계면 근처에서의 섬유의 분리현상을 연구하였다. J. C. Halpin 등[11]은 적층판 이론을 도입하여 short fiber 복합재와 woven fabric 복합재에 대한 3차원 물성치를 구하였다. short fiber 복합재의 경우는 실험치와 잘 일치했고, woven fabric 복합재의 경우는 비교적 실험과 일치했다.

SRC 구조물의 사용범위를 넓히기 위해서는 SRC 구조물을 이루고 있는 기본 단위인, 단위구조에 대한 기계적 거동해석이 필수적이다. Fig. 1에서 보듯이 단위구조는 여러 가지 형태를 보이는데 이러한 여러 가지 형태에 따라 기계적 거동이 다르게 나타난다. 뿐만 아니라 각 방향 라드의 직경변화에 따라서도 단위구조 각 방향에 대한 변형이 변화하게 된다. 이와 같이 단위구조의 거동에 관여하는 인자(라드의 방향과 직경)에 따른 물성치를 임의의 방향에 대해 얻어내는 것이 본 연구의 목적이다. 단위구조의 물성치를 얻어내기 위해서는 먼저 단위구조를 이루고 있는 라드와 기지의 물성을 측정·예측하는 것이 우선적으로 필요하다. 또한 라드와 기지물성을 이용하여 예측한 SRC의 물성치에 대한 검증도 필요하다. 예측된 물성치의 비교·검증을 위하여 3D SRC를 제작하여 물성치 예측결과와 비교하였다. 물성치 예측으로부터 나온 SRC의 물성은 SRC로 구성된 구조물을 해석하기 위한 기본자료로 쓰여지고, 또한 SRC 구조물의 해석을 통하여 설계요구조건에 맞는 SRC를 찾을 수 있다. 일련의 SRC 구조물의 설계과정을 Fig. 2에 나타냈다.

2. 공간적으로 보강된 복합재의 강성해석

2.1 라드(rod)의 물성치 예측

SRC는 라드와 기지로 구성되어 있다. SRC의 물성을 예측하기 위해서는 우선적으로 라드와 기지의 물성이 필요하다. 본 연구에서 사용한 라드(T310)는 CST사에서 구입한 것으로 T300 계열 섬유가 사용되었다. 라드를 구성하고 있는 섬유의 체적비는 $v_f = 0.66$ 으로 CST사에서 제공되었다. 라드의 길이방향 강성은 실험을 통하여 측정된 결과, $E_{1r} = 136$ (GPa)로 측정되었다. 이와 같은 결과로 섬유의 길이방향 강성을 아래의 식으로 역추적 할 수 있다[9].

$$E_{1r} = E_{1f} \cdot v_f + E_m \cdot v_m \tag{1}$$

위 식에서 $E_{1f} = 204.5$ (GPa)로 계산할 수 있다. T300계열의 섬유의 전형적인 물성은 Table 1에 나타내었고[9], 본 실험에 쓰인 섬유의 나머지 물성은 T300계열의 전형적인 물성으로부터 비례하여 유추하였다. 이렇게 유추된 T310 fiber 물성을 이용하여 본 해석에 사용되는 물성을 아래의 식으로 구할 수 있다. 식(2)는 1984년 chamis[9]가 제안한 식으로 일방향 복합재 물성을 예측하는데 널리 사용되어져 왔다.

Table 1 Material properties of the carbon fiber

Property	T300	T310
Elastic modulus in fiber direction (GPa)	220.6	204.5
Elastic moduli in transverse directions (GPa)	13.79	12.87
Shear moduli in 1-2 and 1-3 planes (GPa)	8.96	8.30
Shear modulus in 2-3 plane (GPa)	4.82	4.47
Poisson's ratios	0.2	0.2

$$E_{2r} = \frac{E_m}{1 - \sqrt{v_f} \cdot (1 - \frac{E_m}{E_{2f}})} = E_{3r}$$

$$G_{12r} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{v_f} \cdot (1 - \frac{G_m}{G_{12f}})} = G_{13r}$$

$$G_{23r} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{v_f} \cdot (1 - \frac{G_m}{G_{23f}})}$$

$$v_{12r} = v_{12f} \cdot v_f + v_m \cdot v_m = v_{13r}$$

여기서 $E_m = 3.03$ (GPa), $v_m = 0.3$ 으로 CST사에서 제공하였다. 식(2)에 Table 1의 T310 fiber 물성을 대입하여 라드물성을 예측할 수 있다. 예측된 물성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Material properties of the CST rod

Property	CST rod
Elastic modulus in fiber direction (GPa)	136.0
Elastic moduli in transverse directions (GPa)	7.97
Shear moduli in 1-2 and 1-3 planes (GPa)	3.86
Shear modulus in 2-3 plane (GPa)	2.92
Poisson's ratios	0.234

2.2 강성 및 연성상수 행렬의 좌표변환

여기서 사용되는 방법은 응력과 변형률의 좌표변환을 통하여 강성 또는 연성상수행렬의 좌표변환을 수행한다. 식(3)은 라드좌표계에서의 강성행렬을 전체(또는 구조)좌표계에서의 강성행렬로 좌표변환을 나타낸 식이다.

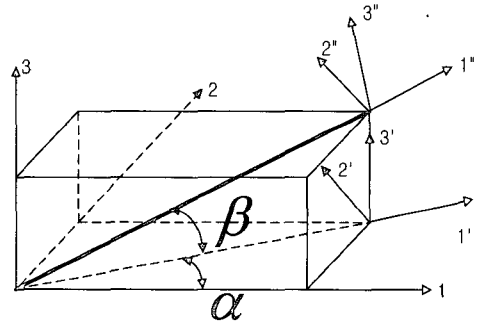


Fig. 3 Local and global coordinate system for the rod.

$$[C] = [K]^T [C'] [K] \tag{3}$$

여기서 국부좌표계를 전체좌표계로 전환하는 행렬 $[K]$ 는 아래의 식과 같다. 또한 $[C'] = [S']^{-1}$ 이다. 라드의 연성상수행렬인 $[S']$ 은 아래의 식과 같다.

$$[K] = \begin{bmatrix} m^2 p^2 & m^2 q^2 & n^2 & mnq & mnp & m^2 pq \\ q^2 & p^2 & 0 & 0 & 0 & -pq \\ n^2 p^2 & n^2 q^2 & m^2 & -mnq & -mnp & n^2 pq \\ 2npq & -2nqp & 0 & mp & -mq & -n(p^2 - q^2) \\ -2mn p^2 & -2mn q^2 & 2mn & (m^2 - n^2)q & (m^2 - n^2)p & -2mn pq \\ -2mpq & 2mpq & 0 & np & -nq & m(p^2 - q^2) \end{bmatrix}$$

where $m = \cos \beta$, $n = \sin \beta$, $p = \cos \alpha$, $q = \sin \alpha$

$$[S''] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{1r}} & -\frac{\nu_{12r}}{E_{1r}} & -\frac{\nu_{13r}}{E_{1r}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12r}}{E_{1r}} & \frac{1}{E_{2r}} & -\frac{\nu_{23r}}{E_{2r}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13r}}{E_{1r}} & -\frac{\nu_{23r}}{E_{2r}} & \frac{1}{E_{3r}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23r}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13r}} \end{bmatrix}$$

위 식에서 보듯이 라드좌표계에서의 강성상수행렬 ($[C'']$) 은 좌표변환행렬($[K]$)에 의해 구조좌표계에서 강성상수행렬로 변환되었다. 같은 방식으로 연성상수행렬의 좌표변환도 아래의 식으로 변환할 수 있다.

$$[S] = [T]^T [S''] [T] \quad (4)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 p^2 & m^2 q^2 & n^2 & 2mnq & 2mnp & 2m^2 pq \\ q^2 & p^2 & 0 & 0 & 0 & -2pq \\ n^2 p^2 & n^2 q^2 & m^2 & -2mnq & -2mnp & 2n^2 pq \\ npq & -npq & 0 & mp & -mq & -n(p^2 - q^2) \\ -mnp^2 & -mnq^2 & mn & (m^2 - n^2)q & (m^2 - n^2)p & -2mnpq \\ -mpq & mpq & 0 & np & -nq & m(p^2 - q^2) \end{bmatrix}$$

where $m = \cos \beta$, $n = \sin \beta$, $p = \cos \alpha$, $q = \sin \alpha$

2.3 강성상수행렬의 중첩

강성행렬의 중첩(superposition of stiffness matrix)의 대상인 단위구조(unit cell)를 정의하면 다음과 같다. 단위구조란 SRC에 나타나는 형태적으로 반복되는 구조를 말한다. Fig. 4는 3D SRC의 단위구조를 나타내며, Fig. 5는 4D SRC의 단위구조를 나타낸다. 이와 같은 단위구조 해석은 같은 형태가 반복되는 형상에 대한 일반적인 해석으로, 구조 전체를 해석하지 않고 단위 구조에 대한 해석을 통하여 SRC의 물성을 또한 각 방향의 라드 체적비는 단위구조의 체적과 각 방향 라드의 체적비로 정의한다. 강성행렬의 중첩은 SRC의 기본단위인 단위구조가 균일 변형률(iso-strain)을 받는다고 가정하면[1-6] 단위구조에 대한 강성행렬의 중첩이 가능해진다. 단위구조가 균일 변형률을 받는다는 가정은 전체 SRC 구조물에 대해서 단위구조가 작고, 단위구조가 변형을 받는 동안 라드와 기지가 떨어지지 않는다는 가정이 있어야 한다. 이와 같은 가정에 의해, 구조물이 임의의 방향의 하중을 받을 때 단위구조는 균일 변형률을 받는

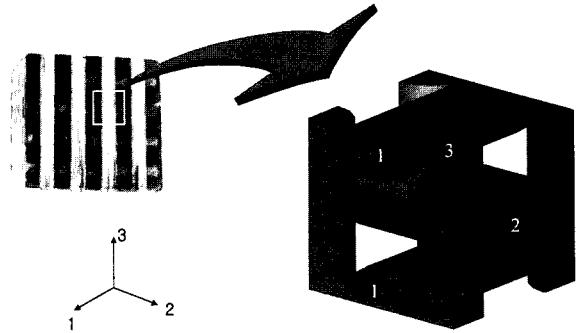


Fig. 4 Unit cell of the 3D SRC.

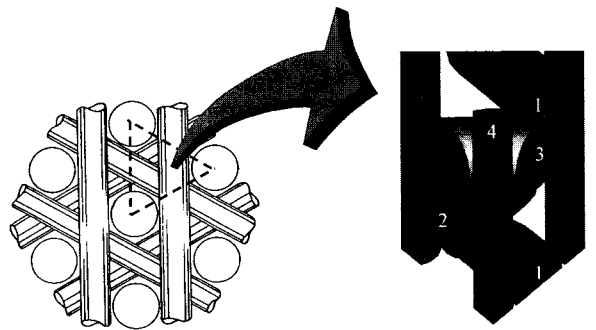


Fig. 5 Unit cell of the 4D SRC.

다고 가정할 수 있다. 이와 같은 가정하에 SRC의 강성행렬은 아래의 식(5)와 같이 강성행렬의 체적평균을 통해서 구할 수 있다.

$$[C]_c = \sum_{i=1}^n VF_i [K]_i [C''] + \left(1 - \sum_{i=1}^n VF_i\right) [C]_{iso} \quad (5)$$

여기서 $n=3, 4$ 는 각각 3D, 4D SRC의 단위구조의 강성행렬을 나타낸다. 또한 VF_i 는 전체 부피 중의 i -방향 라드의 부피를 나타낸다. 식(5)는 단위구조의 강성행렬, 또는 단위구조가 여러 번 반복된 SRC의 강성행렬로 나타낼 수 있다. 이와 같은 단위구조의 해석은 SRC를 해석하기 위한 유용한 방법으로 단위구조에 대한 강성행렬이 구해지면 SRC 구조물의 3차원 유한요소해석에 필요한 물성치를 구할 수 있다.

2.4 임의의 방향에 대한 재료상수의 예측

먼저 구조좌표계에서의 구조 연성상수행렬($[S]$)은 SRC 강성행렬($[C]_c$)을 역변환($[S]_c = [C]_c^{-1}$)함으로써 구할 수 있다. 구조좌표계 대한 재료상수는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 E_{11c} &= 1/S_{11c}, \quad E_{22c} = 1/S_{22c}, \quad E_{33c} = 1/S_{33c} \\
 G_{23c} &= 1/S_{44c}, \quad G_{31c} = 1/S_{55c}, \quad G_{12c} = 1/S_{66c} \\
 \nu_{12c} &= -S_{21c}/S_{11c}, \quad \nu_{31c} = -S_{13c}/S_{33c} \\
 \nu_{23c} &= -S_{32c}/S_{22c}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

식(6)의 재료상수는 구조좌표계, 즉 Fig. 3에서 1-2-3축에 대한 재료상수이다. Fig. 6에서 임의의 방향에 대한 SRC의 재료상수는 SRC 연성상수행렬을 임의의 방향에 대하여 좌표변환함으로써 얻을 수 있고, 식(7)에 나타내었다.

$$[S'']_c = [K][S][K]^T \tag{7}$$

식(7)을 이용하여 SRC 재료상수의 3차원 공간분포를 얻을 수 있다. 해석에 사용된 모든 방향의 라드 직경은 3D/4D SRC 모두 0.689 mm이다. 3D/4D SRC가 공간적으로 대칭을 보이므로 8분의 1만 계산하였다. 즉, Fig. 6에서 ϕ 를 0°에서 90°까지 3°간격으로 또한 ψ 도 0°에서 90°까지 3°간격으로 $[S'']_c$ 를 구하였다. 식(6)을 이용해 $[S'']_c$ 에서 3차원 재료상수를 모두 구할 수 있다. 본 해석에 사용된 라드를 제외한 기지부분은 국도화학에서 구입한 에폭시를 사용하였다. 먼저 3D SRC의 E_{xx} 물성치분포는 Fig. 7과 같다. Fig. 6에서 ϕ 가 45°회전된 방향은 인장강성이 가장 큰 값을 갖는 라드방향에서 가장 많이 벗어나 있기 때문에 라드 방향의 물성이 가장 작게 나타나고, 라드의 단면방향 물성과 기지 물성이 상대적으로 크게 나타난다. 라드의 단면방향 물성과 기지물성은 라드의 길이방향 물성에 비하여 아주 작은 값을 가진다. 따라서 Fig. 7에서 보듯이 라드에서 가장 많이 벗어난 곳(ϕ 가 45°회전된 방향)에서 강성이 가장 작은 값을 가진다.

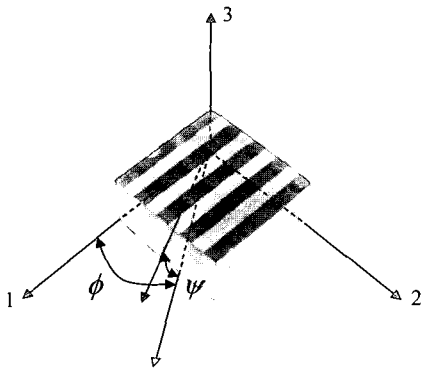


Fig. 6 Arbitrary direction of the SRC.

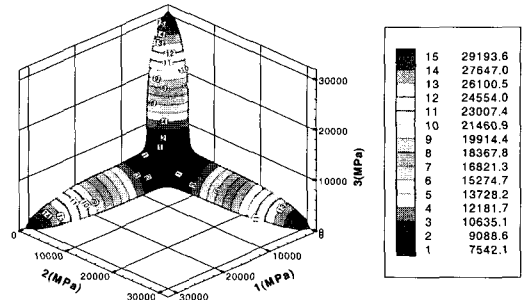


Fig. 7 Young's modulus distribution of the 3D SRC.

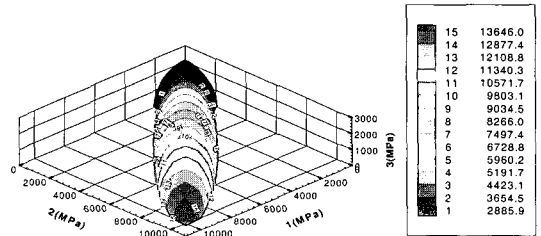


Fig. 8 Shear modulus distribution of the 3D SRC.

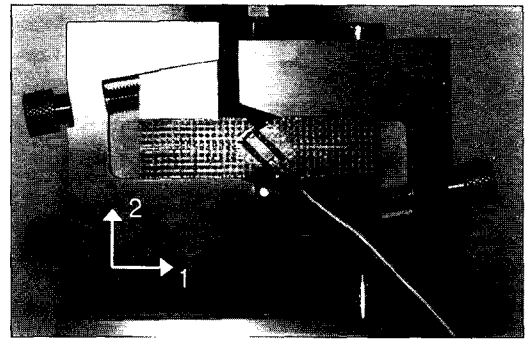


Fig. 9 Shear test fixture for the 3D SRC.

Fig. 8은 3D SRC의 G_{xy} 물성분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 라드방향에서 가장 작은 값을 나타내고, ϕ 가 45°회전된 방향에서 가장 큰 값을 나타낸다. 이것은 라드가 수직으로 서있는 상태에서 전단력을 가하게 되면 라드가 전단에 대한 저항이 작고, 반대로 ϕ 가 45°회전된 방향에서는 라드가 각각 45°회전된 방향에서 전단력을 지지하기 때문에 큰 값을 나타낸다. 이와 같은 현상은 3D SRC의 전단실험에서도 나타난다. Fig. 9는 G_{12} 를 구하기 위한 V-notch 실험장치이다. 그림에서

하중이 가해지면 하중방향에서 반시계방향으로 45°회전된 방향이 최대인장 변형을 받으며, 또한 하중방향에서 시계방향으로 45°회전된 방향이 최대압축 변형을 받는다. 3D SRC의 경우에는 하중방향에서 45°회전된 방향에는 라드가 보강되어

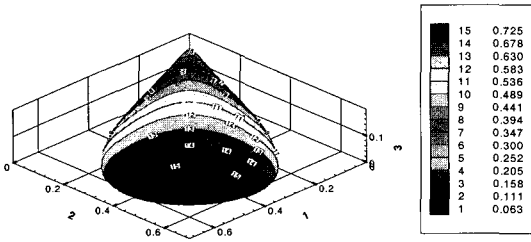


Fig. 10 Poisson's ratio distribution of the 3D SRC.

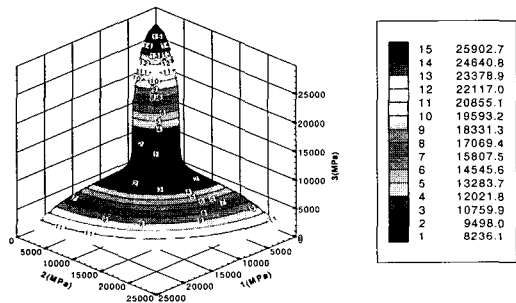


Fig. 11 Young's modulus distribution of the 4D SRC.

있지 않기 때문에 작은 하중에도 큰 변형을 일으킨다. 즉, G_{12} 가 아주 작은 값을 나타낸다. 반대로 라드에서 45°회전된 방향의 G_{33} 는 하중방향에서 45°회전된 방향에 라드가 보강되어 있기 때문에 큰 전단강성값을 가진다. Fig. 10은 3D SRC의 프아송비 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 라드 방향이 가장 작고 라드에서 45°회전된 방향에서 가장 큰 값을 나타낸다. 이것은 라드방향으로 변형을 주었을 때, 라드의 단면방향에는 또 다른 라드가 보강되어 있기 때문에 라드의 단면방향의 변형은 매우 작다. 그러나 라드에서 가장 많이 벗어난 방향에서 변형을 주었을 때는 라드에 비해 상대적으로 강성이 매우 작은 기지가 지배적인 영향을 받으므로 프아송비가 크게 나타난다.

Fig. 11은 4D SRC의 E_{xx} 물성치분포를 나타낸다. 4D SRC는 3D와 다르게 1-2평면에 라드가 60°간격으로 배열되어 있기 때문에 Quasi-isotropic 성질을 나타낸다. 따라서 1-2평면방향 물성은 등방성성질을 나타내며, 해석 또한 이러한 성질을 잘 묘사하고 있다.

이와 같은 4D SRC의 경우 인장강성이 가장 약한 부분도 역시 라드에서 가장 많이 벗어난 방향(1-3또는 2-3평면 내에서 45°회전된 방향)에서 가장 작다. 이 같은 방향에서 강성이 작은 이유는 라드의 영향을 가장 작게 받는 방향이기 때문이다. Fig. 12는 4D SRC의 G_{33} 물성분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 1-2평면은 등방성성질을 나타내고 라드사이 간격이 60°이기 때문에 다른 방향보다 전단물성이

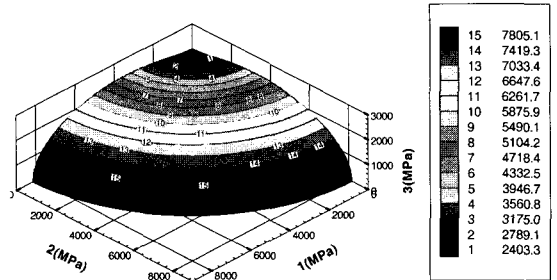


Fig. 12 Shear modulus distribution of the 4D SRC.

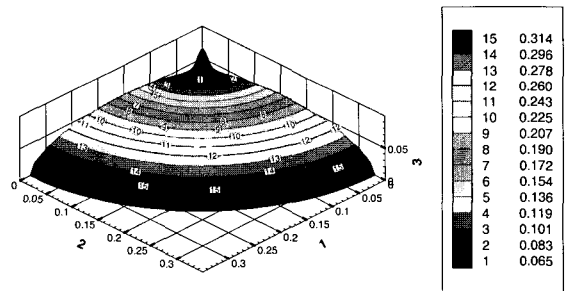


Fig. 13 Poisson's ratio distribution of the 4D SRC.

크게 나타난다. 전단물성이 가장 작게 나타나는 방향은 3방향으로, 전단력 방향과 라드방향이 서로 90°를 이루기 때문에 3D SRC에서 같이 가장 작은 값을 나타낸다. Fig. 13은 4D SRC의 프아송비 분포를 나타낸다. 이 그림도 역시 1-2평면방향은 등방성을 나타내고 라드가 보강된 3방향의 프아송비가 가장 작게 나타나는데 이는 라드방향으로 변형을 가하게 되면 기지에 비해 상대적으로 큰 강성을 가지는 라드 때문에 라드 단면방향으로 변형이 작게 나타나기 때문이다.

3. SRC 물성치 실험

SRC에 대한 물성치실험을 하기 전에 강성해석에 필요한 라드(rod)와 에폭시(epoxy)의 물성실험이 필요하다. 단면에 대해서 횡등방성(transversely isotropic)을 가지는 라드의 기계적 거동을 묘사하기 위해서는 다섯 개의 독립적인 재료상수를 얻어내야 한다[12]. 다섯 개의 독립상수는 각각 E_{1r} , E_{2r} , G_{12r} , G_{23r} , ν_{12r} 이다. 이 중에서도 SRC 강성해석시 가장 큰 영향을 미치는 라드방향 탄성계수의 측정이 필수적이다. 에폭시는 등방성 재료이므로 두 개의 독립적인 재료상수(E_m , ν_m)를 측정해야 한다. 본 연구에서는 라드의 길이 방향 물성과 에폭시의 물성을 측정하였다. 이렇게 실험을 통해서 얻어진 라드와 에폭시의 물성을 바탕으로, SRC의 강성해석을 수행해서 SRC의 전 방향에 대한 재료상수를 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 재료상수의 검증을 위해서 3D SRC를 제작하였다. SRC 물성치실험은 모든 방향에 대한 물성치 실험을 할 수 없으므로, 라드방향과 라드에서 가장 많이

본 연구에 사용된 라드는 미국 CST(Composite Structures Technology)에서 구입한 카본 라드로, SM(standard modulus) 계열의 라드이다. 물성치는 Table 2와 같다. 라드인장실험에 사용된 시편은 SM 계열의 라드로 Fig. 14에 나타내었다. 라드 끝에 접착필름을 이용하여 탭을 붙이고, 90°C에서 두 시간동안 경화하였다. 또한 라드 인장 실험장치는 그림 15에 나타내었다. 또한 라드의 인장실험절차는 아래와 같다.

- (1) 하중률을 2mm/min으로 가한다.
- (2) Fig. 15에서 보듯이 시편 중앙에 extensometer를 장착한다.
- (3) 파단이 일어날 때까지 실험을 수행한다.
- (4) 총 5개의 시편에 대해 인장실험을 수행하였다.

측정 결과는 Table 3에 나타내었다. 라드의 인장강성은 초기의 약간의 비선형구간을 제외한, 변형률 0.2에서 0.8 %

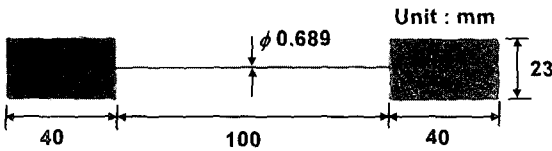


Fig. 14 Rod tension specimen.

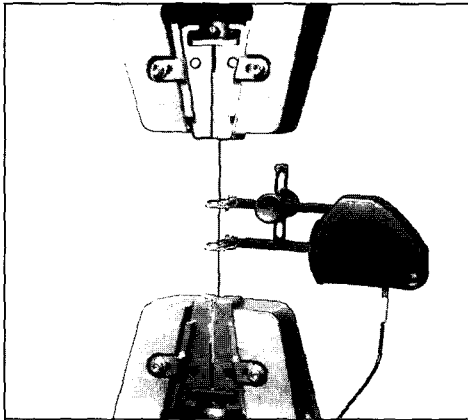


Fig. 15 Rod tension test.

벗어난 45°회전된 방향에 대해 실험을 수행하였다. SRC의 강성을 해석결과와 비교하기 위해 라드방향 압축실험, 전단 실험 및 라드에서 45°회전된 방향에서의 인장압축실험을 수행하였다.

3.1 강성해석에 필요한 기초 물성치 측정

Table 3 Results of the rod tension test

	Strength(MPa)	Fail. strain(%)	Stiffness(GPa)
1	1930	1.22	143
2	2052	1.42	136
3	2415	1.62	141
4	2002	1.46	127
5	1740	1.30	133
Ave.	2028	1.40	136
Std. dev.	247	0.15	6.3

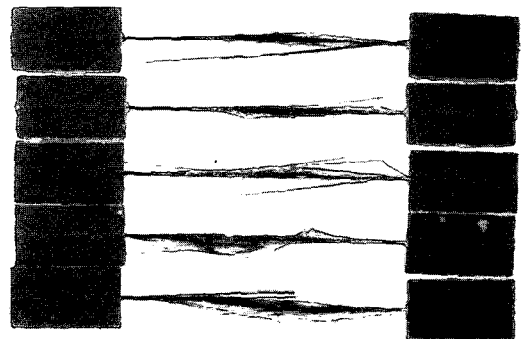


Fig. 16 Rod specimens after fracture.

구간에서 계산하였다. Table 3에서 보듯이 인장강성 및 강도와 인장 파손변형률을 측정하였다. CST사에서 제공하는 라드 물성치와 크게 차이는 없으나 강도의 표준편차가 약간 큰 것으로 나타났다. Fig. 16은 라드인장 실험 후의 파

손사진이다. 사진에서 보듯이 전체적으로 섬유가 파손되는 거동을 보였다. 탭 근처에서 파손이 없는 것으로 보아 올바른 파손형태라고 생각된다.

3.2 SRC의 제작

SRC의 시편제작은 CST사에서 제공하는 카본라드로 제작하였다. 먼저 길이가 1.5 m정도 되는 카본라드를 다이아몬드 커터를 이용하여 적당한 길이로 자른다. 이렇게 잘려진 카본라드로 육각블럭을 쌓아야 하는데 각각의 방향이 고정되어 있지 않으면 적층하기가 곤란하다. 따라서 Fig. 17과 같이 CAD를 이용하여 일정 간격이 인쇄된 종이 위에 접착필름을 덮는다. 접착필름이 투명성 재질이기에 때문에 인쇄된 CAD 밑그림이 보이고, 보이는 밑그림을 따라서 라드를 접착필름에 고정시킨다. 그 후 고정된 카본라드 사이로 각 방향의 라드를 집어넣어서 3D 라드블록을 만든다. 이렇게 만들어진 라드블록을 새지 않는 비닐형틀에 넣고 에폭시를 분는다. 라드블록에 에폭시가 함침된 비닐형틀을

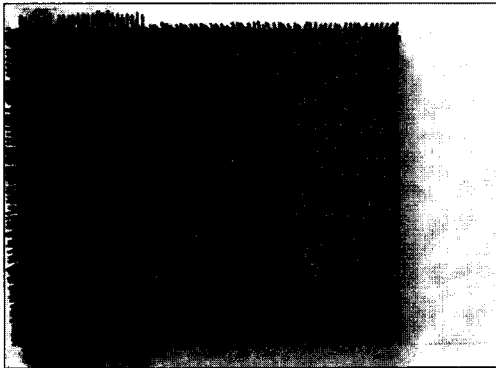


Fig. 17 Construction step of the 3D SRC.

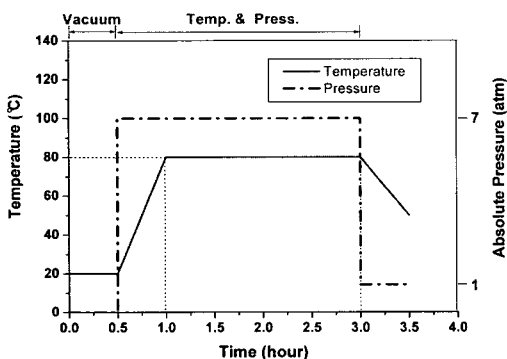


Fig. 18 Curing cycle.

분리 가능한 지그에 넣어서 경화한다. Fig. 18과 같은 경화 사이클로 3D SRC를 제조 하였다. 처음 30 분 동안 진공을 잡는 이유는 에폭시 사이에 기포를 제거하기 위해서이다. 진공을 잡은 이후, 지그 뚜껑을 제거하고 Fig. 18과 같은 경화 사이클로 압력과 온도를 가하였다. 이와 같은 경화 사이클로 3D SRC 블록을 제조하였다. 제조된 SRC블록을 각 물성치 실험에 맞는 크기로 가공하였다. 가공의 정밀도를 높이기 위하여 연삭 가공하였다. 연삭 가공의 장점은 높은 회전수로 가공하기 때문에 표면의 잔류응력이 비교적 적게 나타나고, 마이크로 미터 단위까지 정확하게 가공할 수 있다.

3.3 3D SRC의 라드방향 압축실험

3.3.1 실험절차

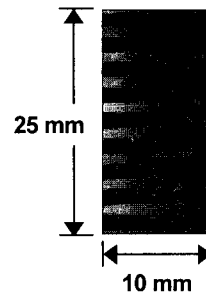


Fig. 19 3D SRC compressive specimen in the rod direction.

3D SRC의 압축실험은 라드방향의 압축강성 및 강도를 구하기 위한 실험이다. 본 실험은 ASTM C695-91을 참조하여 수행하였고, 사용한 시편은 Fig. 19와 같다. 단면형상은 10 mm×10 mm의 정사각형이고, 높이는 25 mm이다. SRC는 반복되는 단위구조가 약 1.38 mm×2 mm×2 mm로 일반 적층형 복합재료에 비하여 아주 크기 때문에 SRC의 거동을 잘 묘사하기 위해서는 gage length가 큰 스트레인 게이지가 필요하다. 본 실험에 서는 gage length가 7 mm인 CAS사의 스트레인 게이지를 사용하였다. 또한 하중률은 ASTM을 근거로 0.5 mm/min으로 하였고, 하중을 더 이상 지지하지 못할 때까지 실험을 수행하였다.

3.3.2 실험결과 및 검토

본 실험에서는 총 7개의 3D SRC 시편에 대하여 압축실험을 수행하였다. 실험결과는 Table 4에 나타내었다. 압축 실험에서 압축강성은 초기 비선형 부분을 제외한, 변형률이 0.1 %에서 0.5 % 부분을 선택하였다. 처음부분을 제외

한 이유는 압축시편이 초기 하중을 받을 때 약간의 국부적인 접촉이 일어난 후 압축시편 전체에 걸쳐 균일한 압축변형이 일어나기 때문이다. 실험 결과에서 보듯이 압축강성 17.2 GPa, 압축강도 167 MPa, 파손변형률 0.98 %로 나타났다. 해석결과는 라드방향 강성이 19.4 GPa로 약 11.3 %정도 오차를 나타냈다.

3.4 3D SRC의 45°방향의 압축실험

3.4.1 실험절차

45°방향의 3D SRC 압축실험시편은 Fig. 20과 같다. 그림에서 보듯이 하중방향이 라드방향이 아닌, 라드방향에서 45°회전된 방향이다. 하중률은 1 mm/min으로 라드방향 압축실험의 두배로 설정하였다. 이는 라드방향에서 보다 45°회전된 방향에서의 시간당 변위가 훨씬 크기 때문에 하중률을 높여서 파손까지 측정하였다. 시편크기는 라드방향

Table 4 Results of the 3D SRC compression test

	Stiffness (GPa)	Strength (MPa)	Fail. strain (%)
1	16.8	168	1.00
2	17.4	175	1.00
3	15.0	160	1.07
4	16.7	168	1.01
5	15.4	174	1.13
6	19.3	148	0.77
7	19.7	173	0.87
Average	17.2	167	0.98
Std. dev.	1.8	9.6	0.12

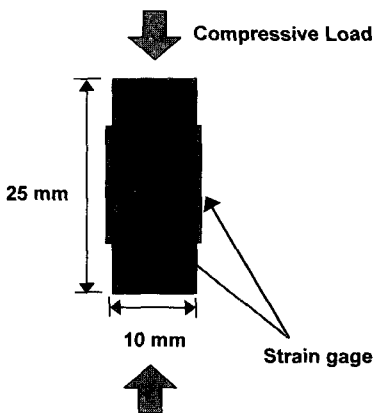


Fig. 20 3D SRC compressive specimen in the 45°rotated direction from a rod

압축실험시편과 동일하고, 양면에 스트레인 게이지를 부착하여 두 개의 스트레인 게이지에서 나오는 변위를 평균함으로써 굽힘현상을 보상하였다.

3.4.2 실험결과 및 검토

본 실험에서는 총 5개의 3D SRC 시편에 대하여 압축실험을 수행하였다. 실험결과는 Table 5에 나타내었다. 압축실험에서 압축강성은 초기 비선형 부분을 제외한, 변형률이 0.1 %에서 0.5 % 부분을 선택하였다. 압축강성과 파손강도는 각각 171 MPa과 187 MPa로 나타났다. 그림 21은 한 평면에 대한 강성분포를 나타낸 것으로 해석과 실험결과를 함께 도시하였다. 라드에서 45°회전된 방향에서의 압축강성은 기지의 물성이 지배적으로 영향을 미친다.

Table 5 Results of the 3D SRC compression test in the 45°rotated direction

	Stiffness(MPa)	Strength(MPa)
1	191	-
2	163	-
3	172	174
4	177	201
5	151	-
Average	171	187
Std. dev.	15.2	-

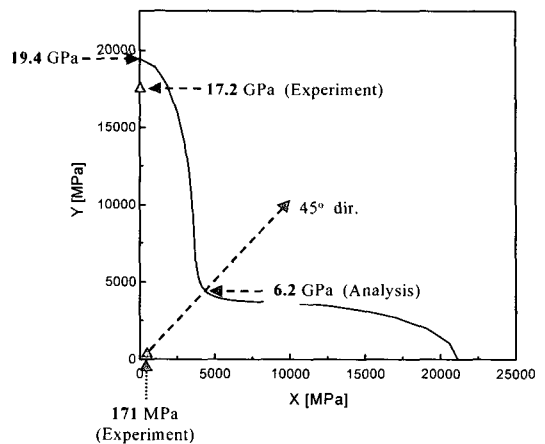


Fig. 21 Comparison of stiffness volume average analysis with experiment for Young's modulus.

본 실험에 사용된 에폭시의 물성이 194 MPa로 라드 136 GPa에 비하여 아주 작은 값을 가지고 있다. 특히 이와 같이 라드와 기지의 물성이 현격하게 차이가 날 경우, 라드와 기지가 같이 움직이지 않고 각기 다른 거동을 나타낸다. 이와 같은 라드와 기지의 다른 거동은 해석에서 가정한 등변형률(iso-strain)을 위배해서 해석과 비교하여 오차가 큰 값을 나타낸다. 이와 같이 라드와 함께 거동하지 않은 방향에서는 등변형률 가정보다는 등응력(iso-stress)가정이 더 타당하다. 즉 하중이 라드에서 45° 회전된 방향으로 작용할 때, 라드와 기지가 서로 구속되지 않고 각각 받는 하중만큼 변형이 이루어지는 등응력분포로 보는 것이 타당하다. 등응력이 작용할 때는 일방향 복합재의 횡방향물성을 예측하는 식(inverse rule of mixtures for the transverse modulus)과 같이 연성상수(compliance matrix)의 체적평균을

사한 물성치 분포를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 각 라드 방향에서는 1이 되고 라드에서 45° 회전된 방향에서는 0이 되는 λ 함수(function of cosine)를 정의하여 아래의 식으로 물성치분포를 계산하였다.

$$E_{xx} = E_{xx\ Stiff} \lambda + E_{xx\ Compl} (1 - \lambda) \tag{8}$$

$$\lambda = |\cos(2\phi)\cos(2\psi)|$$

여기서 $E_{xx\ Stiff}$ 는 강성행렬의 체적평균을 통하여 얻은 Young's modulus이고, $E_{xx\ Compl}$ 은 연성상수행렬의 체적평균을 통하여 얻은 Young's modulus이다. 또한 ϕ, ψ 는 그림 6에 나타나 있는 것과 같다. 이와 같은 강성행렬과 연성상수행렬의 체적평균으로 구한 물성치의 조합으로 전체 물성치 분포를 Fig. 23과 같이 구하였다. 그림에서 보듯이 라드방향과 라드에서 45° 회전된 방향에서 모두 해석과 실험이 비교적 일치함을 볼 수 있다. 본 연구에서는 등변형률과 등응력

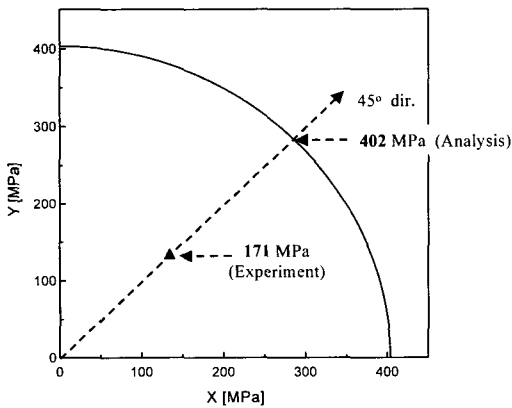


Fig. 22 Comparison of compliance volume average analysis with experiment for Young's modulus.

통하여 물성치를 예측할 수 있다. Fig. 22는 연성상수의 체적평균을 통하여 구한 강성분포이다. 라드방향에서는 큰 차이를 보이고 라드에서 45° 회전된 방향에서는 비슷한 차수(order)의 값은 보인다. 그러나 라드방향으로 큰 차이를 보이는 이유는 라드방향에서 라드와 기지가 등응력이 아닌 등변형률을 받기 때문에 연성상수행렬의 체적평균값이 부적절한 가정이기 때문이다. 따라서 각 라드방향에서는 일방향 복합재의 섬유방향 물성을 예측하는 식(rule of mixtures for the longitudinal modulus)과 같이 등변형률 가정을 통한 강성행렬의 체적평균을 통해 구하는 것이 바람직하다. 이와 같은 강성행렬과 연성상수행렬의 체적평균값을 각 방향에 따라 적절하게 분포시킴으로써 보다 실험과 유

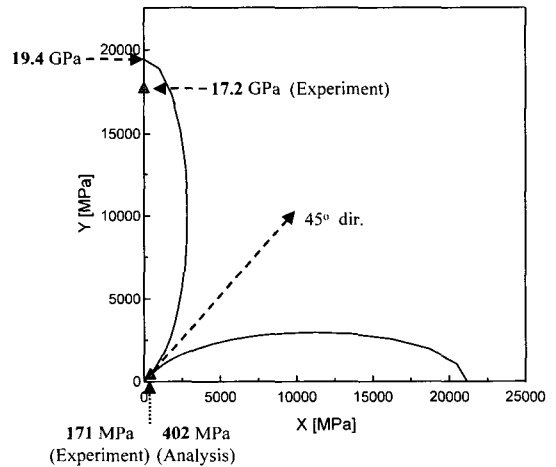


Fig. 23 Comparison of stiffness and compliance volume average analysis with experiment for Young's modulus.

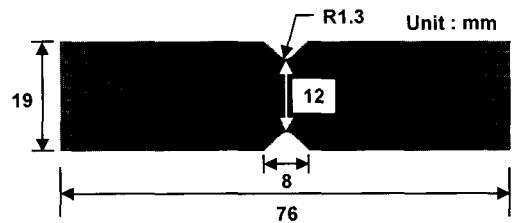


Fig. 24 3D SRC shear specimen in the rod direction.

상태를 각 방향에 대해 코사인분포로 가정하여 계산하였다. 좀 더 많은 방향에의 물성치 실험을 통하여 해석과 비교하는 것이 바람직하지만, 등변형률 가정을 통한 물성치예측은 라드방향에서 실험과 비슷한 값을 보이고 라드에서 벗어난 방향에서는 정성적으로 같은 경향을 보인다. 라드에서 많이 벗어날수록 등변형률이 줄어들고 등응력상태가 되기 때문에 기지의 물성이 지배적으로 나타난다. 라드에서 많이 벗어난 방향에서의 물성치값을 비교적 정확하게 얻기 위해서는 등응력상태를 가정한 물성치 예측이 필요하다.

3.5 3D SRC의 라드방향 전단실험

3.5.1 실험절차

라드방향의 전단물성을 알아보기 위해서 ASTM D5379 를 바탕으로 한 V-notched beam 실험을 수행하였다. 시편크기는 Fig. 24에 나타내었다. 전단시편 두께는 12 mm이다. 두께 역시 ASTM 규격보다 크게 하였는데, 이는 좀더 단위 구조가 많이 반복된 시편을 제작해서 전단물성의 정밀도를 높이기 위해서이다. 실험장치 구성은 Fig. 9와 같다. 하중률은 ASTM을 참고해서 2 mm/min으로 하였다. 전단강성의 계산식은 아래와 같다.

$$G_{chord} = \Delta\tau / \Delta\gamma \tag{9}$$

$$\Delta\gamma = |\epsilon_{+45}| + |\epsilon_{-45}| \tag{10}$$

여기서 G_{chord} = 전단강성, $\Delta\tau$ = 전단응력, $\Delta\gamma$ = 전단 변형률을 나타낸다.

3.5.2 실험결과 및 검토

라드방향 전단실험은 총 5개의 전단시편을 사용하여 수행하였다. 실험결과는 Table 6에 나타내었다. 전단강성은 전단변형률이 0.2 ~ 2 %의 범위에서 계산하였다. 초기 접촉에 의한 지그효과를 배제하기 위하여 0 ~ 0.2 % 부분을 제외하였고, 기지의 연성성질로 인하여 기존의 변형률 범위보다 계산범위를 크게 설정하였다. 강도값은 기지부분의 연성성질로 인하여 시편이 지그에 닿을 때까지 파손이 일어나지 못해서 측정하지 못하였다. 그러나 전단시편이 지그에 닿는 순간의 응력을 전단강도로 설정하면 3D SRC의 강도예측을 수행할 수 있다. 이는 기지의 연성으로 인하여 전단시편이 완전히 파손되지 않았지만, 이와 같이 아주 큰 변형을 설계제한조건으로 제안한 것이다. Fig. 9에서 보듯이 전단실험시 하중방향에서 시계방향으로 45° 회전된 방

향에서는 최대 압축변형이 걸리고, 반시계방향으로 45° 회전된 방향에서는 최대 인장변형이 생긴다. 이와 같은 전단 실험에서 45° 회전된 방향은 기지성분의 물성이 가장 영향을 많은 주는 방향이다. 또한 본 실험에 사용된 기지성분인 에폭시는 큰 연성을 가지기 때문에 파손변형률이 아주 크게

Table 6 Results of the 3D SRC shear test

	Stiffness(E, MPa)	Estimated strength(MPa)
1	135	26
2	170	27
3	149	26
4	-	26
5	151	26
Average	151	26.3
Std. dev.	14	0.50

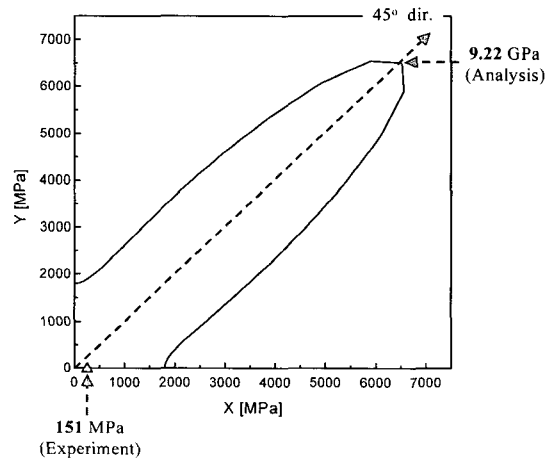


Fig. 25 Comparison of stiffness volume average analysis with experiment for shear modulus.

나타났다. 만약 하중방향에서 45° 회전된 방향이 라드가 보강된 방향이었다면 라드의 강성으로 인하여 상대적으로 아주 작은 변형이 일어날 것으로 예측된다. 이는 해석의 경향과 일치한다. Fig. 25는 강성행렬의 체적평균법으로 구한 전단물성의 분포를 나타낸다. 전단실험도 역시 기지의 물성이 지배적으로 나타나는 G_{xy} 는 해석과 많은 차이를 보인다. 즉 기지와 라드가 서로 구속되어서 같이 움직이지 않고 각각 받는 하중에 비례하여 변형되는 등응력상태를

보인다. 이러한 등응력상태를 고려하여 연성상수행렬의 체적평균을 이용하여 전단강성분포를 구하였고, Fig. 26에 나타내었다. 그림에서 보듯이 기지의 물성이 지배적인 G_{xy} , G_{yx} 에서는 실험과 일치함을 보인다. 그리고 최대인장·압축 변형방향과 라드방향이 일치하는 방향(하중방향에서 45°회전된 방향)에서는 대부분의 하중을 라드가 지지하므로 아주 큰 전단강성을 보이고, 이 방향에서는 등변형률 가정이 더 타당하다. Fig. 26은 기지의 물성이 지배적인 방향에서만 유용하다. 전체적인 전단강성 분포를 얻기 위해서 강성행렬과 연성상수행렬을 아래의 식과 같이 조합함으로써 3D SRC의 전단분포를 좀더 정확하게 예측할 수 있다.

$$G_{xy} = G_{xy\ Stiff} (1 - \lambda) + G_{xy\ Compl} \lambda \tag{11}$$

$$\lambda = abs(\cos(2\ \phi)\cos(2\ \psi))$$

여기서 $G_{xy\ Stiff}$ 는 강성행렬의 체적평균을 통하여 얻은 전단계수이고, $G_{xy\ Compl}$ 은 연성상수행렬의 체적평균을 통하여 얻은 전단계수이다. 또한 ϕ , ψ 는 Fig. 6에 나타나 있는 것과 같다. 이와 같은 강성행렬과 연성상수행렬의 체적평균으로 구한 물성치의 조합으로 전체 물성치 분포를 Fig. 27과 같이 구하였다. 이 그림도 마찬가지로 등변형률과 등응력상태를 적절히 조합시킴으로써 보다 정확한 전단계수분포를 얻을 수 있었다. 좀더 많은 방향에 대한 전단 실험이 필요하나 시편제작의 한계로 인하여 많은 방향에서의 전단실험을 수행하지 못하였다. 그러나 강성행렬의 체적평균법은 라드의 물성이 지배적으로 작용하는 방향에서는 전단물성의 경향과

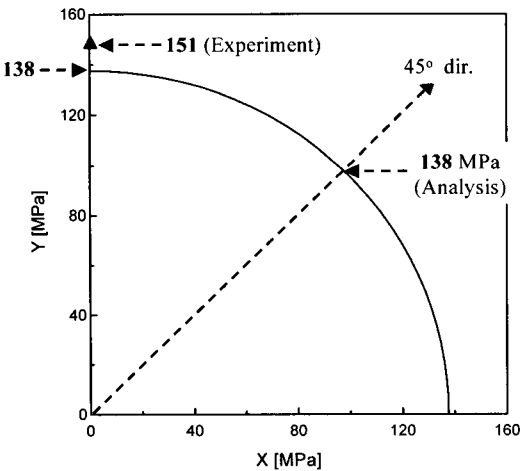


Fig. 26 Comparison of compliance volume average analysis with experiment for shear modulus.

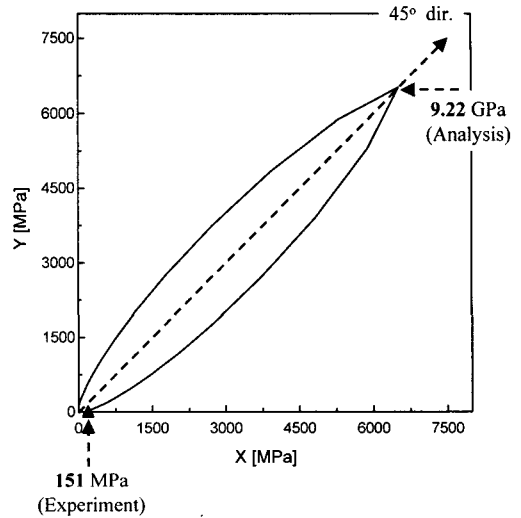


Fig. 27 Comparison of stiffness and compliance volume average analysis with experiment for shear modulus.

값이 일치할 것이라 사료되고, 기지의 물성이 지배적인 곳에서도 전단물성의 경향이 일치하는 것을 알 수 있었다. 기지의 물성이 지배적인 방향에서 좀더 정확한 예측값을 얻기 위해서, 본 연구에서 연성상수행렬의 체적평균을 수행하여 전단물성분포를 예측하였다. 예측결과와 실험결과가 잘 일치하였다.

3.6 3D SRC의 45°방향의 인장실험

3.6.1 실험절차

3D SRC의 인장물성을 알기 위해 라드에서 45° 회전된 방향에서 인장실험을 수행하였다. 시편크기는 Fig. 28과 같다. 시편의 두께는 10 mm이고, 시편폭은 기존의 ASTM D638에서 제시하는 폭보다 10 mm가 더 크다. 이와 같은 시편폭을 크게 한 이유는 3D SRC의 단위구조가 기존의 적층된 복합체에 비하여 크기 때문에, 좀더 많은 단위구조를 포함하도록 Fig. 28과 같이 가공하였다. 본 실험에 사용한 3D SRC 인장시편의 폭은 7번의 단위구조 반복으로 이루어진다. 프아송비를 측정하기 위하여 횡방향으로 스트레인 게이지를 부착하였고, 하중방향으로는 extensometer를 장착하였다. 라드방향에서 가장 많이 벗어난 방향의 인장실험이기 때문에 하중방향 변형이 크게 일어난다. 이와 같은 큰 변형을 측정하기 위하여 본 실험에서는 extensometer를 사용하였다. 하중률은 ASTM D638을 참고로 1 mm/min으로 정하였다.

3.6.2 실험결과 및 검토

본 실험에서는 4개의 3D SRC 인장시편에 대하여 인장 실험을 수행하였다. 실험결과는 Table 7에 나타내었다. 압축 실험보다 강도와 강성이 모두 작게 측정되었다. 인장실험시 에폭시와 라드의 표면분리현상으로 인하여 에폭시에 받는 단위면적당 하중이 증가하여 큰 변형을 일으켰다. 따라서 에폭시의 원래 물성보다 더 적은 값이 나왔다. 그림에서 보듯이 에폭시의 연성이 크게 작용하여 약 18 %의 파손변형률을 나타냈다. 이와 같이 큰 파손변형률을 나타내는 이유는 에폭시로 된 기지부분의 연성이 크게 나타나, 마치 고무처럼 늘어나는 현상이 발생했기 때문이다. Fig. 29는 프아송비를 나타낸 그림으로 실험치가 약간 크게 나타났다. 라드에서 45° 회전된 방향에서 하중이 가해지면 하중의 수직방향으로도 큰 변위가 발생한다. 하중의 수직방향 또한 라드에서 가장 많이 벗어난 방향이므로 큰 변위가 발생한다.

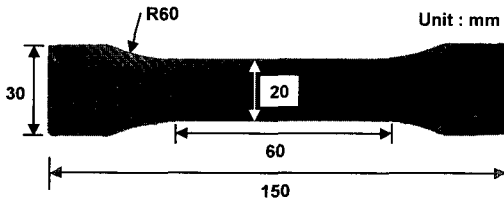


Fig. 28 3D SRC tensile specimen in the 45°rotated direction from rod.

Table 7 Results of the 3D SRC tension test

	Stiffness(MPa)	Strength(MPa)	Poisson's ratio
1	77.0	20.6	0.71
2	65.1	13.2	0.88
3	59.8	13.5	0.87
4	53.2	13.2	0.82
Average	63.8	15.1	0.82
Std. dev.	10.1	3.65	0.077

4. 결론 및 요약

SRC를 구성하고 있는 라드와 기지의 강성행렬을 체적 평균하여 단위구조의 강성행렬을 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 단위구조 강성행렬을 좌표변환하여 단위구조의 각 방향에 대한 재료상수를 공간적으로 도시하였다. 3D SRC의 경우, Young's modulus는 라드방향에서 가장 크고, 라드방향에서 벗어날수록 작아지는 것을 알 수 있었다. 전단강성의 경우에는 라드방향에서 작고, 라드방향에서 벗어날수록

크고 큰 값을 가짐을 알 수 있었다. 프아송비도 전단강성과 비슷한 분포로 라드방향에서 작고, 라드방향에서 벗어날수록 커짐을 알 수 있었다.

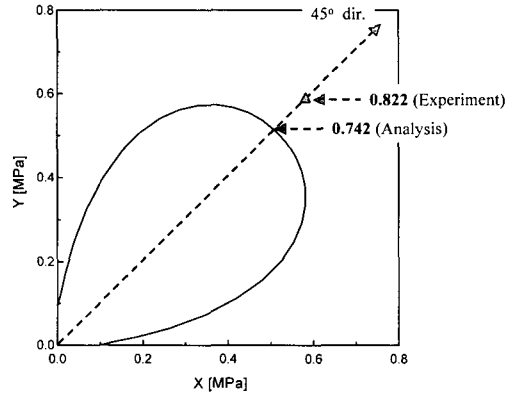


Fig. 29 Comparison of analysis with experiment for Poisson's ratio.

4D SRC의 경우, Young's modulus는 3D SRC와 다르게, 0°, 60°, 120°방향으로 라드가 보강된 평면이 등방성성질을 나타내고, 이 평면에서 45° 회전된 방향의 Young's modulus가 가장 작게 나타난다. 전단강성과 프아송비는 유사한 분포를 나타내며, 0°, 60°, 120° 방향으로 라드가 보강된 평면이 등방성을 나타내고 이 평면에서 수직인 방향에서 가장 작은 값을 나타낸다. 또한 실험을 통하여 강성예측에 필요한 라드와 기지의 물성치를 측정하였다. 3D SRC를 제작하고, 실험과 비교하기 위해서 인장, 압축 및 전단실험을 수행하였다. 라드방향 강성실험에서는 실험과 해석이 일치하였다. 기지물성이 지배적으로 작용하는 방향에서는 연성상수행렬의 중첩을 통해 물성치를 구하고 실험과 비교하였다. 전단계수의 경우는 해석과 실험이 일치하였고, 라드에서 45° 회전된 방향의 Young's modulus의 경우는 강성행렬의 중첩을 통한 해석보다 실험치와 비교적 일치하였다. 또한 프아송비도 실험과 해석이 일치하였다. 강성상수행렬의 중첩에 의한 물성치예측은 라드의 길이방향 물성치가 지배적인 곳에서는 실험과 잘 일치하고, 그 외의 방향에서는 경향은 일치했지만, 정량적인 값은 차이를 보였다. 이에 본 논문에서는 연성상수와 강성상수의 중첩을 코사인함수형태로 조합하여 수정된 물성치 분포를 얻어냈다. 수정된 물성치 분포는 라드방향 뿐만 아니라, 라드방향에서 벗어난 곳에서도 해석과 실험결과가 비교적 일치하였다.

참고문헌

- 1) 변준형, "평직 및 주사직 복합재료의 탄성계수 예측."

- 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제11호, 1997, pp. 1757-1764.
- 2) Joon-Hyung Byun, "Mechanical Model of 3-Dimensional Multi-Step Braided Composites," *Proceedings of ICCM-11*, Gold Coast, Australia, 14th-18th, Vol. 5. July, 1997, pp. 356-365.
 - 3) Rajiv A. Naik, "Multiaxial Stiffness and Strength Analysis of Woven and Braided Composites," *Proceedings of the 38th AIAA/ ASME/ASCE/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit and AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum-Part 2*, Florida, USA, 1997, pp. 1145-1158.
 - 4) Rajiv A. Naik, David C. Jarmon, and Charles P. Logan, "Characterization and Modeling of the Strength of Angle Interlock Woven Composites," *Proceedings of the 39th AIAA/ ASME/ASCE/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit and AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum-Part 2*, Long Beach, USA, 1998, pp. 962-971.
 - 5) Rajiv A. Naik, "Failure Analysis of Woven and Braided Fabric Reinforced Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 17, 1995, pp. 2334-2363.
 - 6) Rajiv A. Naik, Peter G. Ifju, and John E. Masters, "Effect of Fiber Architecture Parameters on Deformation Fields and Elastic Moduli of 2-D Braided Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, No. 7, 1994, pp. 656-681.
 - 7) Kanehiro Nagai, "Strength Analysis for Three-Dimensional Fiber Reinforced Composites," *Advanced Performance Materials*, Vol. 2, 1995, pp. 161-176.
 - 8) Kanehiro Nagai, Atsushi Yokoyama, Zen'ichiro Maekawa, and Hiroyuki Hamada, "The Stress Analysis Method for Three-Dimensional Composite Materials," *Applied Composite Materials*, Vol. 1, 1994, pp. 197-216.
 - 9) Christois C. Chamis, "Simplified Composite Mircromechanics Equations for Hygral, Thermal, and Mechanical Properties," *SAMPE Quarterly*, April 1984, pp. 14-23.
 - 10) Pierre Ladeveze, Laurent Guitard, Laurent Champaney, and Xavier Aubard., "Debond modeling for multidirectional composites," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 185, 2000, pp. 109-122.
 - 11) J. C. Halpin, K. Jerine, and J. M. Whitney, "The Lamiate Analogy for 2 and 3 Dimensional Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, 1971, pp. 36-49.
 - 12) Isaac M. Daniel, and Ori Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford, New-York, Toronto, 1994.