

## 論文

## 공간적으로 보강된 복합재료의 강도예측

유재석<sup>+</sup>, 장영순<sup>\*</sup>, 이상의<sup>\*\*</sup>, 김천곤<sup>\*\*</sup>

## Strength Prediction of Spatially Reinforced Composites

Jae-Seok Yoo<sup>+</sup>, Young-Soon Jang<sup>\*</sup>, Sang-Eui Lee<sup>\*\*</sup>, Chun-Gon Kim<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

In this study, the strength of spatially reinforced composites (SRC) are predicted by using stiffness reduction for each structural element composed of a rod stiffness in each direction and a matrix stiffness proportional to its rod volume fraction. Maximum failure strain criteria is applied to rod failure, and modified Tsai-Wu failure criteria to matrix failure. The material properties composed of the tensile failure strain of a rod, the compressive failure strain of 3D SRC, the tensile and compressive strength of the 3D SRC in the 45° rotated direction from a rod and the shear strength of the 3D SRC are measured to predict the SRC strength. The strength distributions of the 3D/4D SRC in rod and off-rod direction have the largest and the smallest values, respectively. A variable load step is selected to increase an efficiency of strength distribution calculation. Uniform load step is applied when a load history is needed. The results of compressive strength from analysis and experiment show the 18 % difference though the initial slope is coincident with each other.

## 초 록

본 연구에서는 공간적으로 보강된 복합재(SRC)의 강도를 예측하였다. 각 방향의 로드(rod)와 로드와 매트릭스의 체적에 비례하는 기지의 강성으로 표현되는 구조요소(structural element)를 정의하고, 이 구조요소에 파손판단식을 적용하여 SRC의 강도를 예측하였다. 로드와 매트릭스의 파손판단식은 최대파손변형률을, 기지의 경우는 수정된 Tsai-Wu 파손판단식을 각기 적용하였다. 또한 SRC의 강도를 예측하기 위해서 로드와 SRC의 물성치를 측정하였다. 측정된 물성치는 로드의 인장 파손변형률, 3D SRC의 압축 파손변형률, 45° 회전된 방향에서의 인장 및 압축 강도와 전단강도들이다. 3D/4D SRC의 강도분포는 각 SRC의 로드방향에서 크게 나타나고 로드에서 벗어날수록 작은 강도 값을 보였다. 강도의 전체분포를 보다 빠르게 계산하기 위해서 하중증분을 유동적으로 사용하였고, 하중이력을 구할 때는 균일한 하중이력을 사용하였다. 3D SRC의 로드방향 압축실험결과 해석의 비교에서 초기 기울기는 서로 잘 일치하였고, 강도값은 18% 정도의 차이를 보였다.

**Key Words:** 공간적으로 보강된 복합재(spatially reinforced composites, SRC), 강도 예측(strength prediction), 로드(rod), 강성저하(stiffness reduction), 구조요소(structural element)

## 1. 서 론

기존에 사용되어 온 복합재료는 비강도, 비강성이 높아서

여러 구조물들에 적용되어 왔다. 초기의 복합재료는 하중을 감당하지 않는 이차구조물(secondary structure)에 주로 적용되어 왔지만, 점차 항공기 날개, 로켓(rocket) 및 건물의 보

\*+ 한국항공우주연구원 우주발사체 기술실 구조그룹, 교신전자(E-mail:jsyoo@kari.re.kr)

\* 한국항공우주연구원 우주발사체 기술실 구조그룹

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

(beam) 등 주구조물(primary structure)에 그 활용범위가 넓어지고 있다. 그러나 이러한 복합재료를 사용하기 전에 복합재료의 거동 및 파손을 이해하는 것이 필수적이다. 복합재료는 기존의 등방성(isotropic)재료와는 다르게 파손양상이 복잡하게 나타난다. 복합재료는 기지파손(matrix cracking)에 이은 층간분리(delamination), 그 후 하중이 더욱 증가하면 섬유파손(fiber breakage)이 발생하는 복잡한 파손양상을 보인다. 이러한 파손양상은 2차원적으로 적층된 기존의 복합재료에 나타나는 대표적인 파손양상이다. 기지파손은 구조물의 직접적인 파손을 초래하기보다는 층간분리를 유도하는 파손양상이다. 구조물의 파손, 즉 지지 하중이 급격히 줄어드는 파손은 층간분리에 이은 섬유파손이다. 층간분리현상은 적층된 복합재료에 나타나는 파손양상으로 두께방향으로 각 층의 강성 차이 및 두께방향 보강재의 부재로 일어나는 파손현상이다. 이러한 층간분리현상은 복합재 구조물을 설계할 때 심각하게 고려해야 할 사항이다. 공간적으로 보강된 복합재(spatially reinforced composites, SRC) 구조는 두께방향에 대하여 라드(rod)가 보강되어 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.

3차원 직물 복합재에 대한 강성과 강도예측은 여러 가지 방법으로 시도되어 왔다. 이와 같은 단위구조의 강성과 강도해석 방법에 대해 Rajiv 등[1-3]은 임의의 방향의 섬유와 기지의 일부를 잘라낸 yarn slice에 대한 강성상수 행렬의 체적평균을 통해 단위구조의 강성행렬을 얻었다. 단위구조의 강도예측은 fully Newton-Raphson 방법이 사용되었다. 각 yarn slice에 대해 파손이 발생하면 yarn slice의 강성행렬을 정정하는 방법이 사용되었다. 또한 기하학적으로 곡선부위에 대해서는 cracked bending 모델을 도입하여 해석하였다. 그러나 여기서 강성행렬 요소들의 저하 방법이 실험적인 관찰과 약간의 공학적인 판단에 의한 것이어서, 예측된 강도의 신뢰성이 떨어진다. 또한 임의의 방향의 강도를 계산해야 될 때, 정확한 강성저하 규칙이 없기 때문에 일련의 강도해석에 어려움이 나타난다. Nagai 등[4,5]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 단순화된 혼합법칙(rule of mixture)을 이용하여 공간적으로 보강된 복합재료의 강성을 예측하고, 각 방향 섬유의 체적에 대하여 제한된 탄성계수를 구속조건으로 갖는 최소 무게 최적화를 수행하였다. Blacketter 등[6]은 인장과 전단 하중응답을 보기 위해 plain weave에 대해 파손을 해석하였다. 상용 유한요소 프로그램 전처리기인 PATRAN을 이용

하여 plain weave의 3차원 형상 모델링을 수행하였고, 역시 강성저하모델을 도입하여 파손하중을 예측하였다. 하중증가단계에서 기지부분의 물성에 의해서 단위구조가 비선형 거동을 보일 수 있다고 주장하였다. Bogetti 등[7]은 3차원 직물 복합재의 강성해석시에 섬유의 곡선부위의 비선형 전단 영향을 고려하였다. 단위구조의 강도계산시 역시 점진적인 하중증가로 강도를 예측하였다. 위의 연구[6,7]에서도 강성과 강도의 단위구조 각 방향에 대한 예측이 이루어지지 못했고, 여러 가지 단위구조에 대한 물성치 예측을 하기 위해서는 단위구조 모델링을 다시 해야 하는 어려운 점이 있다. Ladeveze 등[8]은 노즐목 재료로 쓰이는 4D 탄소/탄소 복합재료에 대한 파손 거동과 비탄성 현상을 연구하였다. 여기서 다루는 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.

이상의 참고문헌에서는 강성저하모델을 도입하였으나, 적용모델의 모델링을 매번 반복하거나, 파손판단식에 적용되는 파손인자를 실험적 판단으로 결정하고 있어 일괄적인 강도해석에 어려움이 있다. SRC 구조는 기존의 복합재 적층판과 달리 공간적으로 라드가 보강되어 있어서 각 방향의 강도와 파손거동이 복잡하게 나타난다. 본 연구에서는 SRC의 강도를 모든 방향에 대해서 계산하여, SRC 강도의 공간분포를 얻고자 한다. 또한 이렇게 얻은 강도분포를 바탕으로 SRC를 일반 구조물에 적용할 때 설계자료로 이용할 수 있다. SRC에 대한 강도를 유한요소법을 이용하여 각 방향의 강도를 계산할 수 있지만, 얼마나 타당성 있고 빠른 시간에 강도를 구할 수 있는 것도 중요한 설계조건이 된다. 이를 위해 개발된 강도예측 프로그램은 라드와 기지에 대해 각각 파손판단식을 적용하여 SRC의 파손강도를 예측하는 프로그램이다. 라드와 기지 파손판단에 필요한 인자들은 실험을 통해서 얻고, 이렇게 얻어진 인자들을 이용하여 SRC 구조에 따른 임의의 방향에서 강도를 계산하였다.

## 2. SRC의 강도해석

### 2.1 구조요소(structural element)도입

구조요소란 판손판단식을 적용할 대상으로 각 방향의 라드 강성행렬과 그에 비례하는 기지 강성행렬의 합으로 표현된다. 즉 라드의 개수가 세 개이면 구조요소도 세 개로 나타낼 수 있다. Fig. 1은 3D SRC의 단위구조를 나타낸 그림으로 이후 구조요소에서 기지 강성행렬의 결정하는데 참고한다. Fig. 2는 구조요소를 개념적으로 나타낸 것이다.

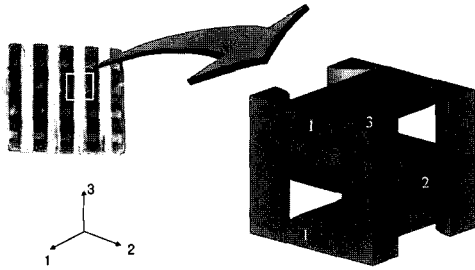


Fig. 1 Unit cell of the 3D SRC.

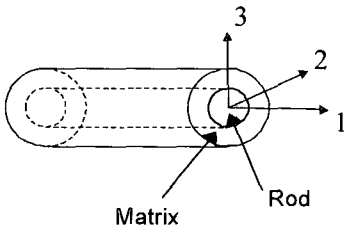


Fig. 2 Structural element.

해석에 사용된 라드의 직경은 그림 1의 1,2,3-방향이 0.689 mm인 경우와 3-방향이 1.31인 경우 2가지에 대해서 수행하였다. 여기서 사용된 라드와 기지의 강성행렬은 참고문헌[9]을 참고하였다. 구조요소의 강성행렬은 아래의 식과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 [C]_{1se} &= VF_1 [K]_1^T [C''] [K]_1 + VF_1 / VS [C]_m \\
 [C]_{2se} &= VF_2 [K]_2^T [C''] [K]_2 + VF_2 / VS [C]_m \\
 [C]_{3se} &= VF_3 [K]_3^T [C''] [K]_3 + VF_3 / VS [C]_m
 \end{aligned} \tag{1}$$

where  $VS = VF_1 + VF_2 + VF_3$

여기서 라드의 강성행렬을 Fig. 1의 전체좌표계로 바뀌 주는  $[K]$ 행렬은 아래와 같다. 또한  $VF_i$ 는  $i$ -방향 라드의 부피분율을 나타내는 것으로 전체 부피 중  $i$ -방향 라드의 부피비를 나타낸다. 그리고 등방성재료인 기지성분의 강성행렬  $[C]_m$ 은 아래의 식과 같다.

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

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

$$[C]_m = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}$$

where  $\lambda = \frac{E_m \nu_m}{(1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)}$ ,

$\mu = G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}$

여기서 아래첨자 번호는 Fig. 1의 방향과 같다. 식(1) 중 맨 위의 식, 즉 1-방향 구조요소식에서 우변의 첫 항은 단위구조에 대한 1-방향 라드 강성행렬을 나타낸 것이고, 두 번째 항은 1-방향 구조요소의 기지 강성행렬을 나타낸 것이다. 즉 각 방향의 기지요소는 그 방향의 라드의 체적비 ( $VF_i$ )에 비례한다. 이것은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 1-방향을 라드의 직경이 커지면 ( $VF_1$ ) 1-방향 라드와 같이 거동하는 기지의 체적비도 역시 커지게 된다. 왜냐하면 1-방향 라드가 커지면 1-방향 라드의 단면적이 증가하면서 1-방향 라드 단면에 붙어 있는 기지의 양도 증가하게 된다. 반대로 나머지 라드의 단위구조에 대한 체적비가 줄어들면 이에 따르는 기지의 체적비도 줄어든다. 따라서 구조요소의 기지 강성행렬은 그 방향 라드의 체적비에 비례한다고 말할 수 있다. 또한 각 방향의 구조요소 강성행렬의 합이 단위구조의 강성행렬을 이뤄야하므로 비례상수는  $1/VS$ 가 된다. 이 관계를 식으로 표현하면 아래 식(2)과 같다.

$$[C]_c = [C]_{1se} + [C]_{2se} + [C]_{3se} \tag{2}$$

이렇게 정의된 구조요소에 대하여 파손해석을 수행한다. 여기서 Fig. 2의 1-방향, 즉 라드 방향 파손판단은 라드의 최대변형률로 파손을 판단하며, 2,3-방향 즉, 라드의 단면방향 파손판단은 기지의 파손판단식으로 결정한다.

## 2.2 구조요소의 파손판단식

### 2.2.1 구조요소의 라드 파손판단기준

라드의 파손판단기준은 최대변형률을 도입한다. 인장과 압축실험을 통해서 파손변형률을 측정하여 구조요소중 라드의 파손판단 기준으로 사용한다. 파손판단식은 아래 식(3)과 같다.

$$\epsilon_1^t < \epsilon_1 \quad \text{or} \quad \epsilon_1 < \epsilon_1^c \tag{3}$$

여기서 아래첨자 번호는 Fig. 2의 방향과 같고, 위 첨자  $c$ 는 압축,  $t$ 는 인장을 의미한다. 즉 각 방향의 라드가 받는 변형률이 최대 압축변형률보다 작거나 최대 인장변형률보다 크면 라드가 파손되었다고 판단하여 각 라드가 속해 있는 구조요소의 강성행렬 중, 라드 강성행렬을 저하시킨다. 여기서 사용되는 인장 파손변형률은 라드의 인장실험을 통하여 측정하였고, 압축 파손변형률은 3D SRC의 라드방향 압축실험을 통하여 측정하였다. 라드방향 압축실험시 라드의 파손이 먼저 일어나기 때문에 3D SRC의 파손변형률이 라드의 압축 파손변형률로 생각할 수 있다.

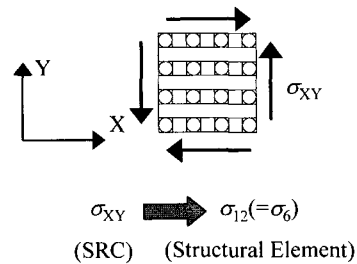


Fig. 3 Pure shear test for the structural element.

2.2.2 구조요소의 기지 파손판단기준

구조요소중 기지의 파손판단은 수정된 Tsai-Wu 파손판단식을 도입하였다. 일반적인 Tsai-Wu 파손판단식은 아래와 같다.

$$F_i \sigma_j + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (4)$$

( $i, j = 1, 2 \dots 6$ )

Fig. 2에서 보듯이 1-방향 응력은 라드가 전적으로 담당하기 때문에 기지의 파손판단식에서 1-방향 응력성분은 무시하였다. 즉  $\sigma_1 = 0$  로 가정하였다. 또한 순수 전단응력에 의한 강도는 부호에 무관하므로 전단응력의 1-차항은 모두 사라진다[9]. 이와 같은 사항을 고려하여 식 (4)를 전개하면 아래의 식과 같다.

$$F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 + F_{44} \sigma_4^2 + F_{55} \sigma_5^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 = 1 \quad (5)$$

여기서 기지성분은 등방성 성질을 갖는다. 따라서  $\sigma_2$  에 의해 파괴되는 강도와  $\sigma_3$  에 의해 파괴되는 강도가 같으므로  $F_2 = F_3, F_{22} = F_{33}$ 과 같다. 또한 기지에 작용하는  $\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$  각각의 응력에 의해 파손되는 강도 역시 같기 때문에  $F_{44} = F_{55} = F_{66}$  과 같다.  $F_{23}$ 을 정확히 구하려면 2-축 응력실험을 하여야 하나, 많은 경우 전체 파손판단식에서 차지하는 영향이 크지 않고,  $F_{23} \cong -\frac{1}{2}(F_{22}F_{33})^{1/2}$ 와 같이 근사할 수 있다[10]. 이와 같은 내용을 식(5)에 적용하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F_2(\sigma_2 + \sigma_3) + F_{22}(\sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_2 \sigma_3) + F_{66}(\sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2) = 1 \quad (6)$$

여기서 아래첨자 방향은 Fig. 2와 같다. 식(6)에서  $F_2, F_{22}, F_{66}$ 는 실험을 통해서 구해야 하는 값들이다. 먼저  $F_{66}$ 는 SRC의 순수전단응력을 가하여 구할 수 있다. 순수전단응력이 걸리면 3D SRC에서는  $\sigma_{XY}$  성분만 남고, 나머지 응력성분들은

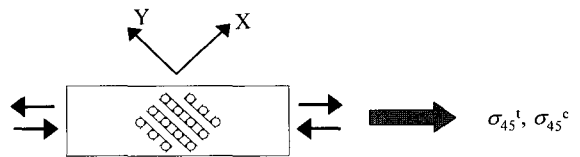


Fig. 4 Tension and compression test at the 45°rotated direction from a rod.

모두 없어진다. 3D SRC에서  $\sigma_{XY}$ 는 Fig. 3에서 보듯이 X-Y 평면에 있는 라드입장에서 보면  $\sigma_{12}(=\sigma_6)$ 가 걸리게 된다. 따라서 식(6)의  $F_{66}$ 을 식(7)로 구할 수 있다. 이것은 X-Y 평면에 있는 구조요소 중 기지성분이 파괴되면 더 이상 SRC 구조는  $\sigma_{XY}$ 에 대한 저항을 하지 못하고 파괴됨을 의미한다.

$$F_{66} = \frac{1}{\sigma_6^2} \quad (7)$$

여기서  $\sigma_6$ 는 SRC의 전단파손응력이다. 기지 파손판단식인 식(6)에서 구해야 하는 나머지 강도 텐서값은  $F_2$ 와  $F_{22}$ 이다. Fig. 4에서 보듯이 기지 파손판단식에서 라드의 영향을 최대 배제하기 위해 라드방향에서 45°회전된 방향, 즉 최대 외곡각(maximum disoriented angle)에서 인장(압축) 강도를 측정하여  $F_2$ 와  $F_{22}$ 를 계산한다. 라드방향에서 45°회전된 방향에서 구한 강도값들의 좌표변환과 각 구조요소의 강성행렬을 통하여 각 구조요소의 응력분포를 구할 수 있다. 3D SRC의 경우에는 이렇게 구한 인장-압축 응력분포에 대해 구조요소의 파손판단식이 각 구조요소에 대하여 2개씩 6개가 생긴다. 이 중에서 인장과 압축에 대해 가장 큰 두 개 식을 선택하여  $F_2$ 와  $F_{22}$ 를 구할 수 있다. 구체적인 절차는 아래와 같다.

$$\begin{Bmatrix} 0.5\sigma_{45}^t \\ 0.5\sigma_{45}^t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.5\sigma_{45}^t \end{Bmatrix} = [C]_c \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

- step 1 : 식(8)을 역 변환함으로써 SRC의 변형률들을 구할 수 있다.
- step 2 : 아래의 식에 step 1에서 얻어진 변형률들을 각각의 구조요소의 강성행렬에 대입함으로써 각 구조요소의 응력들을 구할 수 있다.

$$\{\sigma\}_{ise} = [C]_{ise} \{\epsilon\} \quad (9)$$

$(i=1,2,3 \text{ for each structural element})$

- step 3 : 여기서 구한 응력들을 식(6)에 대입함으로써 세 개의 파손판단식을 얻을 수 있다. 압축파손응력( $\sigma_{cb}$ )에 대해서도 같은 방법으로 세 개의 파손판단식을 얻을 수 있다.
- step 4 : 전부 여섯 개의 인장(압축) 파손판단식을 얻을 수 있는데, 얻어진 여섯 개의 파손판단식의  $F_{2i}$ 와  $F_{22i}$  ( $i=1,2 \dots 6$ )에 초기치를 부여한다.
- step 5 : 초기치가 부과된 여섯 개의 파손판단식 중 인장과 압축에 대하여 각각 최대치를 갖는 두 개의 파손판단식을 고른다.
- step 6 : 위의 두 식으로부터  $F_2$ 와  $F_{22}$ 를 구한다.

위 과정을 순서대로 나타내면 Fig. 5와 같다. step 5에서 초기치가 부과된 여섯 개의 파손판단식 중에서 가장 큰식을 고른 이유는 동일한 초기치가 부과된 식 중에서 가장 큰 값을 갖는 구조요소의 기지부분이 제일 먼저 파손이 일어나기 때문이다. 이제까지 기지 파손판단식의 파손인자( $F_2, F_{22}, F_{66}$ )를 구하는 방법에 대하여 논의하였다.

### 2.3 임의의 방향에 대한 기계적 강도 예측

위와 같은 방법으로 구조요소의 파손을 판단하는 5개의 인자 즉  $\epsilon'_r, \epsilon'_c, F_2, F_{22}, F_{66}$ 가 결정되면 SRC에 대하여 임의의 방향의 강도를 예측할 수 있다. 이와 같은 파손인자를 구하는데 필요한 라드와 SRC의 측정결과를 Table 1에 나타내었다. 임의의 방향의 SRC의 강도를 구하는 절차는 다음과 같다.

- step 1 : 임의의 방향으로 초기 응력을 가한다.
- step 2 : 아래의 식을 역변환하여 변형률을 구한다.

$$\{\sigma\} = [C]_c \{\epsilon\} \quad (10)$$

- step 3 : 식(10)에서 얻은 변형률을 각각의 구조요소 강성행렬에 대입함으로써 각 구조요소의 응력들을 아래의 식(11)으로 구한다.

$$\{\sigma\}_{ise} = [C]_{ise} \{\epsilon\} \quad (11)$$

$(i=1,2,3 \text{ for each structural element})$

- step 4 : step 2와 step 3에서 구한 변형률과 응력을 각각 라드의 파손판단식인 식(3)과 기지의 파손판단식인 식(6)에 대입한다.
- step 5 : 각각의 파손판단식과 비교하여 파손이 일어난다면, 파손이 일어난 라드 또는 기지의 강성행렬에 영을 곱한다. 각 구조요소 중 라드 또는 기지성분이 파손이 발생하면 전체 구조의 강성행렬이 바뀌게 되고, step 2로 다시 가서 바뀌어진 강성행렬에 대해 step 5까지 반복한다. 만약 파손이 일어나지 않으면 다음 단계로 간다.
- step 6 : 만약 SRC의 강성행렬이 영이 아니면 응력을 증가시키고 step 2로 간다. 만약 강성행렬이 영이면 그때의 응력값이 알고 싶은 방향의 강도가 된다.

이와 같은 강도예측 과정은 강성저하모델의 도입으로 구조요소의 라드와 기지의 파손판단을 통하여 각각의 강성행렬을 저하시킴으로써 강도를 예측할 수 있다. 위의 강도예측 흐름을 순서대로 나타내면 Fig. 6과 같다. 이상의 과정으로 SRC의 강도를 구할 수 있는 방법을 도출하였다.

크랙진전과 같은 미세한 파손관점으로 접근하기보다는 라드와 기지의 파손을 근거로 하여 SRC의 강도를 예측하

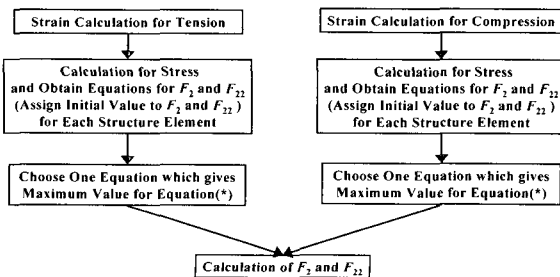


Fig. 5 Flow chart to get the F2 and F22.

Table 1 Failure properties of the carbon rod and the 3D SRC

Property	Symbol	Value
Tensile failure strain(%)	$\epsilon'_r$	1.40
Compressive failure strain(%)	$\epsilon'_c$	0.98
Tensile strength at the maximum disoriented angle(MPa)	$\sigma'_{45}$	15.1
Compressive strength at the maximum disoriented angle(MPa)	$\sigma'_c$	187
Shear strength in X-Y plane(MPa)	$\sigma_{XY}$	26.3

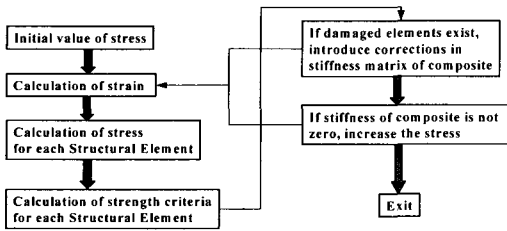


Fig. 6 Flow chart to get the strength in an arbitrary direction.

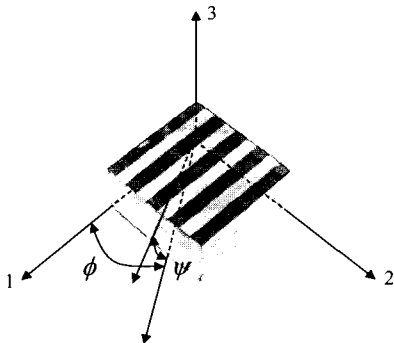


Fig. 7 Arbitrary direction of the SRC.

였다. 강도를 계산하는 과정에서 응력증분에 대한 변형률을 계산할 수 있기 때문에 임의의 방향에서의 응력-변형률 곡선을 해석적으로 얻을 수 있다. 응력의 증분을 정해놓고 강도를 계산하는 것은 비교적 시간이 많이 걸리므로 응력-변형률곡선이 필요하지 않으면 응력증분을 유동적으로 정의하여 계산시간을 단축할 수 있다. 강도 역시 라드의 방향과 직경의 함수로 나타나기 때문에 라드의 방향과 직경에 따라 SRC의 강도분포가 어떻게 변화하는지 전체분포를 예측할 수 있다.

2.4 해석결과 및 고찰

SRC의 강도해석은 강성해석과 마찬가지로 공간적으로 대칭으로 인하여 상반부의 4분의 1만 계산하였다. 즉  $\phi$ 를 0°에서 90°까지 3° 간격으로 또한  $\psi$ 도 0°에서 90°까지 3° 간격으로 강도분포를 구하였다. 여기서  $\phi$ 와  $\psi$ 는 Fig. 7에서 표시한 것과 같다. 본 해석에서 사용한 라드와 기지성분은 강성해석에서와 같은 CST 사의 탄소라드와 국도화학에서 제공한 에폭시를 사용하였다[9]. Fig. 8은 3D SRC의 인장강도분포를 나타낸 것으로 각 방향의 라드의 직경을 같게 하여 해석한 결과로서, 각 라드방향에서 동일한 강도를 나타낸다. 3D SRC의 Young's modulus 분포와 유사하게

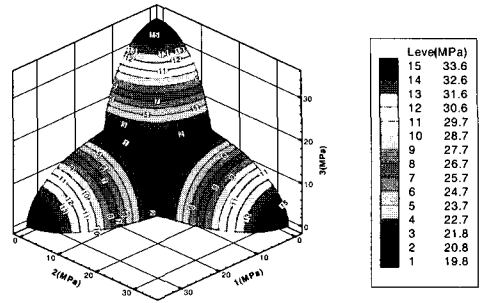


Fig. 8 Tensile strength distribution of the 3D SRC (1,1,1 diameters).

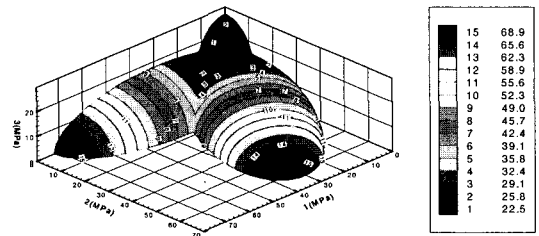


Fig. 9 Tensile strength distribution of the 4D SRC (1,1,1,1 diameters).

라드방향에서 큰 값을 나타내고[11], 라드에서 45°회전된 방향, 즉 기지물성이 지배적인 방향에서는 작은 강도값을 나타낸다. Fig. 9는 4D SRC의 인장강도분포를 나타낸 것이다. 4D SRC의 강성분포는 1-2평면방향에서 준등방성을 나타내지만[9], 강도분포에서는 각 라드방향에서 크게 나타나고, 라드에서 벗어난 각이 클수록 강도는 작아진다.

파손해석에서는 각 라드개수에 해당하는 구조요소를 정의한 후, 각각의 구조요소에 파손판단식을 적용하여 강도를 예측하기 때문에 강성해석과 다른 경향을 나타낸다. 강성해석에서는 라드와 기지의 강성행렬의 체적평균을 이용하여 전체적으로 구하지만, 강도해석은 가해진 하중을 각각의 구조요소에 작용하는 응력과 변형률로 변환하여 구조요소를 구성하는 라드와 기지에 대하여 파손을 판단한다. 거시적인 하중을 미시적으로 각 구조요소에 적용함으로써 단위구조에 대해 구체적인 파손하중을 구할 수 있다. 여기서 사용된 파손판단식은 라드 또는 각 구조요소의 기지부분이 모두 파손됐을 때를 기준으로 파손을 정의하였다. 강도값을 예측하는 방법은 Fig. 6에서와 같이 초기하중을 부과하고 파손이 발생하지 않으면 계속적으로 하중을 증가시키는 방법이다. 한 방향에 대한 강도를 구할 때, 하중 증가치가 작아도 계산시간이 크게 소요되지 않지만, 각 방향의 강도를 공간적으로 구하는데 있어서, 하중 증가치를 너무

작게 잡으면 계산시간이 너무 많이 소요되게 된다. 본 연구에서는 초기 하중 증가치를 크게 잡고, 만약 파손이 발생되었다면 하중 증분의 전 단계로 돌아가서 하중 증가치를 10분의 1로 줄여서 다시 강도를 계산하는 방법을 사용

단면방향에 관여하므로 구조요소의 지지성분들 가운데 가장 나중에 파손된다. Fig. 13에서 각각의 구조요소의 지지 부분이 파손 후에도 기울기의 차이가 별로 없는 것은 지지의 강성 194 MPa이 라드의 강성 136 GPa 보다 훨씬 작기 때문에 그림에서는 강성의 저하가 눈에 띄게 나타나지 않는다.

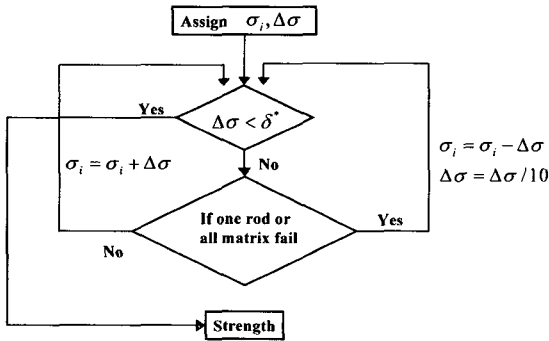


Fig. 10 Flow chart to get strength rapidly.

하여 계산시간을 단축하였다. 이와 같은 방법의 흐름도를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 11은 실험에 사용한 3D SRC의 인장강도분포를 나타낸다. 그림에서 1-2평면에 대해 라드에서 45° 회전된 방향에서의 인장강도는 해석값이 48.2 MPa, 실험값이 15.1 MPa로 차이를 보인다. 이와 같이 차이를 보이는 이유는 강도결정의 대상이 되는 각각의 구조요소 역시 3D SRC의 전체 강성행렬에서 정의된 것이기 때문에 라드에서 벗어난 방향일수록 등변형률(iso-strain)가정이 부적절하게 나타나기 때문인 것으로 사료된다. 45° 회전된 방향에서의 인장강도는 강성행렬의 체적평균 보다는 연성상수의 체적평균 (등응력상태)을 통해서 강성행렬을 구성해서 강성저하를 시키는 방법을 도입하면 좀더 나은 해석을 얻을 수 있을 것이라 사료된다. 그러나 또한 1-3평면과 2-3평면에 대해 라드에서 45°회전된 방향의 인장강도가 1-2평면과 다른 이유는 3-방향 라드의 직경이 1,2-방향 라드에 비해서 크기 때문에 라드의 면적에 비례하는 구조요소의 지지 체적비도 커지게 된다. 특히 45° 방향의 지지 압축강도가 187 MPa로 아주 크기 때문에 Fig. 11에서와 같이 1-3평면과 2-3평면에 대해 라드에서 45° 회전된 방향의 인장강도가 크게 나타난다. Fig. 12는 라드방향 압축시편그림이다. Fig. 13은 라드방향 압축실험과 해석결과에 대한 응력-변형률선도를 나타낸 것이다. 해석의 그래프에서 사각형점은 아래에서부터 차례로 3,2,1-방향의 구조요소 중 지지부분의 파손시점을 나타낸 것이다. 1-방향으로 하중을 가하였을 때 2,3-방향 구조요소 중 지지부분이 직접적으로 하중을 받기 때문에 취약하게 된다. 반대로 1-방향 구조요소 중 지지부분의 파손은 하중의 수직방향, 즉 1-방향 라드의

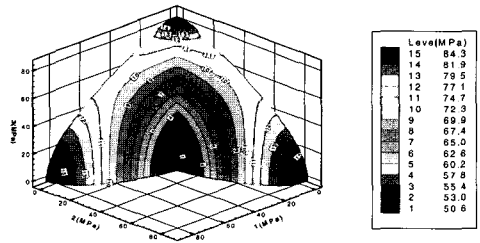


Fig. 11 Tensile strength distribution of the 3D SRC (0.689, 0.689, 1.312 diameters).

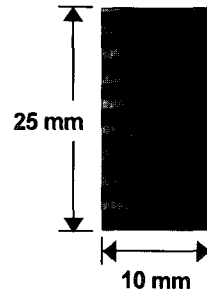


Fig. 12 3D SRC compressive specimen in the rod direction.

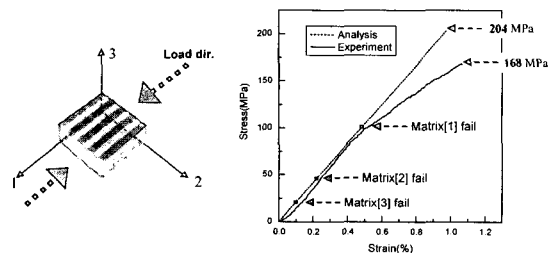


Fig. 13 Stress-strain curves for the 3D SRC compression test and the failure analysis.

그러나 실험에서는 이와 같은 지지성분의 파손은 전체 시편의 편심 또는 라드의 미소좌굴 같은 파손강도를 저하시키는 영향을 주기 때문에 해석보다 작은 강도값이 측정되었다. 이상의 그림에서 보듯이 라드방향은 라드에서 45°

회전된 방향과 달리 비교적 해석과 실험이 일치함을 알 수 있다. 강도분포 역시 라드방향에서는 경향과 값이 잘 일치함을 알 수 있었지만 라드에서 벗어난 방향에서는 정량적인 값은 일치하지 않았다. 그러나 강도분포의 경향은 라드 방향과 라드에서 벗어난 방향 모두가 실험과 일치함을 알 수 있었다.

### 3. 결론 및 요약

SRC의 강도를 예측하기 위하여 각 라드방향의 라드와 기지로 구성된 구조요소(structural element)를 도입하였다. 각각의 구조요소중 라드에는 최대변형을 파손판단식을, 기지에는 수정된 Tsai-Wu 파손판단식을 적용하여 각각의 강성을 저하함으로써 임의의 방향의 강도 예측하였다. 3D/4D SRC 경우 모두 라드방향에서 큰 강도값을 나타내고, 라드에서 벗어날수록 강도값이 작아짐을 알 수 있었다. 3D/4D 전체강도분포를 유동적인 하중증분치를 사용하여 빠르게 구하였다. 라드방향 압축강도의 경우, 실험과 해석이 비교적 일치하였으나, 하중이 점차 증가하면서 실험값이 좀더 작게 측정되었다.

### 참고문헌

- 1) 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.
- 2) Rajiv A. Naik, "Failure Analysis of Woven and Braided Fabric Reinforced Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 17, 1995, pp. 2334-2363.
- 3) 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.
- 4) Kanehiro Nagai, "Strength Analysis for Three-Dimensional Fiber Reinforced Composites," *Advanced Performance Materials*, Vol. 2, 1995, pp. 161-176.
- 5) 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.
- 6) D. M. Blacketter, D. E. Walrath, and A. C. Hansen, "Modeling Damage in a Plain Weave Fabric-Reinforced Composite Material," *Journal of Composites Technology & Research*, Vol. 15, No. 2, 1993, pp. 136-142.
- 7) Travis A. Bogetti, John W. Gillespie, JR., and Mark A. Lamontia, "The Influence of Ply Waviness with Nonlinear Shear on the Stiffness and Strength Reduction of Composite Laminates," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 7, April, 1994, pp. 76-90.
- 8) Pierre Ladeveze, Laurent Guitard, Laurent Champany, and Xavier Aubard., "Debond modeling for multidirectional composites," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 185, 2000, pp. 109-122.
- 9) 유재석, "다방향으로 입체 보강된 복합재료의 기계적 물성치 예측," 한국과학기술원 박사학위논문, 2002.
- 10) Isaac M. Daniel, and Ori Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford, New-York, Toronto, 1994.
- 11) Jae-Seok Yoo, Sang-Eui Lee, and Chun-Gon Kim, "Prediction of mechanical behavior of spatially reinforced composites for kick motor nozzle," *Composite Structures*, Vol. 54, 2001, pp. 57-65.