

공간적으로 보강된 복합재의 기계적 물성치 예측

유재석*·김천곤**·홍창선**·김광수***

Prediction of Mechanical Properties for Spatially Reinforced Composites

Jae-Suk Yoo*, Chun-Gon Kim**, Chang-Sun Hong** and Kwang-Su Kim***

Key Words : Spatially Reinforced Composites, Stiffness Prediction, Strength Prediction

Abstract

This paper predicted the equivalent stiffness of spatially reinforced composites (SRC) using the volume average of a fiber rod and matrix stiffness, and the strength of SRC using the stiffness reduction and the modified Tsai-Wu composite failure theory. Those equivalent engineering constants are used to analyze the mechanical behavior and the failure of SRC structures. Because the distribution of equivalent engineering constants is varying with the change in SRC shape, we made a program that predicts engineering constants of SRC. Both 3-D and 4-D SRC show the smallest tensile modulus and the largest shear modulus at the maximum rotated direction from each rod. Also the strength properties show the same tendency.

1. 서 론

여기에 기존에 사용되어 온 복합재료는 비강도, 비강성이 높아서 여러 구조물들에 적용되어 왔다. 초기에는 이러한 복합재료는 하중을 감당하지 않는 이차구조물(secondary structure)에만 적용되어 왔지만, 점차 항공기 날개, 로켓(rocket) 및 건물의 보(beam)등 주구조물(primary structure)에 그 활용범위가 넓어지고 있다. 공간적으로 보강된 복합재 구조물은 기존의 적용된 복합재료와는 달리 파손의 주원인으로 나타나는 층간분리현상을 두께방향 섬유 보강으로 원천적으로 방지한다. 이러한 공간적으로 보강된 복합재 구조물은 공간적으로 섬유의 배열과 섬유다발의 직경을 어떻게 결정하는가에 따라 각 방향의 강성 및 강도가 바뀌어진다. 이와 같이 공간적으로 보강된 복

합재의 방향에 따라 달라지는 물성을 예측함으로써 구조 설계요구조건에 맞는 공간적으로 보강된 복합재 구조물을 설계할 수 있다. 현재 이러한 3차원 구조물이 적용되고 있는 분야는 제한적이지만 공간적으로 보강된 복합재료의 기계적 특성에 대한 연구가 이루어지면 적용분야가 넓어질 것으로 예측된다. 노즐의 재료로 쓰일 수 있는 공간적으로 보강된 복합재료를 그림 1.1에 나타내었

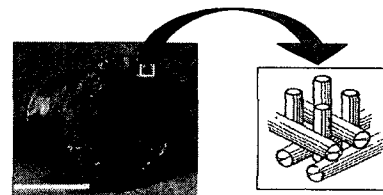


Fig. 1.1. Spatially reinforced composite nozzle.

다. 그림 1.1.과 같이 로드(rod)와 기지(matrix)가 탄소로 이루어진 3차원 직조 복합재 노즐이다. 이와 같은 노즐 설계에 요구되는 노즐의 치수 안

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원
** 정회원 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공
***한국항공우주 주식회사

정성은 그림 1.1.의 오른쪽 그림에서 보듯이 각 라드의 직경과 방향을 바꿈으로써 얻을 수 있다. 치수 안정성관점에서 보면 노즐의 형상이 어느 정도 변형이 이루어지는 것을 예측하는, 즉 노즐의 강성예측을 해야한다.

이와 같은 3차원 복합재에 대한 강성과 강도에 측은 여러 가지 방법으로 시도 되어왔다. Joon-Hyung Byun [1]은 Plain weave와 8-harness satin weave에 대하여 강성예측을 수행하였다. Plain weave와 8-harness satin weave의 단위구조(unit cell)를 정의하여, 이 단위구조를 해석함으로써 강성을 예측하였다. 이와 같은 단위구조의 강성과 강도해석 방법에 대해 Rajiv 등 [2,3,4]은 약간 변화된 해석방법을 도입하였다. 임의의 방향의 섬유와 기지의 일부를 잘라낸 yarn slice에 대한 강성상수 행렬의 체적평균을 통해 단위구조의 강성행렬을 얻었다. 또한 Blacktetter 등 [5]은 인장과 전단 하중응답을 보기 위해 plain weave에 대해 파손을 해석하였다. 상용 유한요소 프로그램 전처리기인 PATRAN을 이용하여 plain weave의 3차원 형상 모델링을 수행하였고, 역시 강성저하모델을 도입하여 파손하중을 예측하였다. 최우철 등 [6]은 3차원 직조 탄소/탄소 복합재 프리폼을 고밀도화 공정을 통하여 제조하였고, 또한 굽힘강도와 층간전단강도를 측정하였다.

본 연구에서는 3-D 및 4-D SRC의 기계적 물성치를 예측하여 공간적으로 나타냄으로써, SRC의 기계적 물성치의 공간분포를 파악하였다. 또한 SRC로 구성된 일반구조물의 설계시에 필요한 SRC의 강도를 예측하고, 공간적으로 도시하였다.

2. 3차원 직조 복합재 강성해석

2.1. 강성 및 연성상수 행렬의 좌표변환

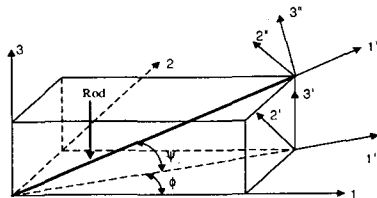


Fig. 2.1. Local and global coordinate system for a rod.

강성 및 연성상수의 좌표변환은 응력과 변형률의 좌표변환을 통하여 할 수 있다.

$$[C] = [K]^T [C'] [K] \quad (2.1)$$

여기서 $[K]$ 는 좌표변환행렬로써 라드좌표계에서의 강성상수행렬($[C']$)을 구조좌표계의 강성상수행렬($[C]$)로 변환시킨다. 또한 $[C'] = [S']^{-1}$ 이고, $[S']$ 는 라드좌표계에서의 연성상수행렬로 라드를 대표하는 5개의 물성치로 이루어진 행렬이다. 같은 방식으로 연성상수행렬의 좌표변환도 아래의 식으로 변환할 수 있다.

$$[S] = [T]^T [S'] [T] \quad (2.2)$$

2.2. 강성상수행렬의 중첩

강성행렬의 중첩(superposition of stiffness matrix)의 대상인 단위구조(unit cell)를 정의하면 다음과 같다. 단위구조란 3차원 직조 복합재에 나타나는 형태적으로 반복되는 구조를 말하며, 그림 2.2.와 2.3.에 나타나 있다. 이와 같은 단위구조 해석은 같은 형태가 반복되는 형상에 대한 일반적인 해석으로, 구조 전체를 해석하지 않고 단위 구조에 대한 해석을 통하여 공간적으로 보강된 복합재(spatially reinforced composite : SRC)의 물성을 예측한다. 여기서 SRC는 제품의 가공하기 전 단계

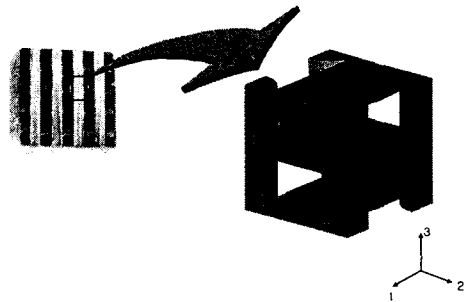


Fig. 2.2. Unit cell of the 3-D SRC.

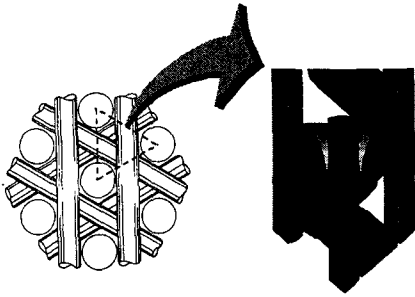


Fig. 2.3. Unit cell of the 4-D SRC.

로 그림 2.2의 왼쪽 사진과 같은 육각 블록을 의미한다. 이와 같이 제조된 SRC를 가공하여 일반 복합재 구조물로 쓰이게 되는데, 한번 가공된 SRC은 다시 구조를 바꿀 수 없기 때문에 SRC의 물성예측은 필수적이다. 그림 2.2의 오른쪽 그림과 같은 단위구조의 해석을 위해 각 방향 라드가 차지하는 체적비(volume fraction)를 아래의 식과 같이 정의한다.

$$VF_i = \frac{\text{ith rod volume}}{\text{unit cell volume}} \quad (2.3)$$

$$i = 1, 2, 3, 4$$

식(2.3)에서 보듯이 i -방향 라드의 체적비는 단위구조 체적에 대한 i -방향 라드의 체적비로 정의한다. 강성행렬의 중첩은 3차원 직조 복합재 구조물의 기본단위인 단위구조가 균일 변형률(iso-strain)을 받는다[1,2,3,4]고 가정하면 단위구조에 대한 강성행렬의 중첩이 가능해진다. 단위구조가 균일 변형률을 받는다는 가정은 전체 SRC에 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 받는다.

이러한 가정 하에 단위구조의 강성행렬은 아래의 식과 같다.

$$[C]_c = \sum_{i=1}^4 VF_i [K]_i^T [C''] [K]_i + \left(1 - \sum_{i=1}^4 VF_i\right) [C]_{iso}$$

..... (2.4)

여기서 n 은 3-D SRC 경우에는 3이고 4-D SRC 경우에는 4가 된다. 또한 $[C]_{iso}$ 는 탄소기지의 강성행렬이다.

식(2.4)는 단위구조의 강성행렬, 또는 단위구조가 여러 번 반복된 SRC의 강성행렬로 나타낼 수 있다. 이와 같은 단위구조의 해석은 SRC을 해석하기 위한 유용한 방법으로 단위구조에 대한 강성행렬이 구해지면 임의의 SRC 구조물에 대한 3차원 유한요소해석에 이용되는 재료상수들을 구할 수 있다.

2.3. 임의의 방향에 대한 물성치 예측

먼저 구조좌표계(그림 2.1.)에서의 구조 연성상수행렬($[S]_c$)은 구조 강성상수행렬($[C]_c$)을 역변환($[S]_c = [C]_c^{-1}$)함으로써 구할 수 있다. 구조좌표계 대한 재료상수는 아래와 같다.

$$E_{11c} = 1/S_{11c}, \quad E_{22c} = 1/S_{22c}$$

$$E_{33c} = 1/S_{33c}, \quad G_{23c} = 1/S_{44c}$$

$$G_{31c} = 1/S_{55c}, \quad G_{12c} = 1/S_{66c} \quad (2.5)$$

$$\nu_{12c} = -S_{21c}/S_{11c}, \quad \nu_{31c} = -S_{13c}/S_{33c}$$

$$\nu_{23c} = -S_{32c}/S_{22c}$$

식(2.5)의 재료상수는 구조좌표계, 즉 그림 2.1.에서 1-2-3축에 대한 재료상수이다. 그림 2.4.에서 임의의 방향에 대한 SRC의 재료상수는 구조 연성상수행렬을 임의의 방향에 대하여 좌표변환함으로써 얻을 수 있고, 변환식은 아래와 같다.

$$[S'']_c = [K][S]_c [K]^T \quad (2.6)$$

식(2.6)을 통해서 얻은 공간적으로 보강된 복합재 재료상수의 3차원 공간분포를 얻을 수 있다. 3차원 직물이 공간적으로 대칭을 보이므로 4분의 1만 계산하였다. 그림 2.4.에서 보듯이 ϕ 를 0° 에서 90° 까지 3° 간격으로 또한 ψ 도 0° 에서 90° 까지 3° 간격으로 $[S'']_c$ 를 구하였다. 해석의 입력 자료로 들어간 라드와 기지의 재료상수는 표 2.1과 표 2.2에 나타내었다. 표 2.1에서 나타낸 라드의 물성은 T300 Carbon fiber와 Carbon matrix의

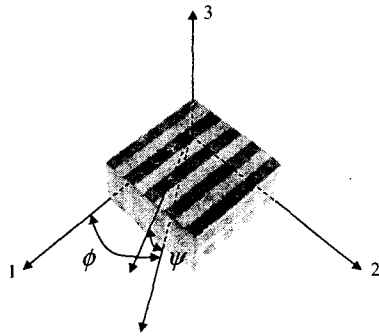


Fig. 2.4. Arbitrary direction of the SRC.

Table 2.1 Material properties of the rod.

Symbol	Rod
$d(\text{mm})$	1
$E_{1r}(\text{GPa})$	166
$E_{2r}, E_{3r}(\text{GPa})$	6.83
$G_{12r}, G_{13r}(\text{GPa})$	2.99
$G_{23r}(\text{GPa})$	2.39
ν_{12r}, ν_{13r}	0.304

Table 2.2 Material properties of the carbon matrix.

Symbol	Carbon matrix
$E_m(\text{GPa})$	3
ν_m	0.35

물성으로 예측한 자료이며, 라드물성에측은 Chamis(1983) [7]가 제안한 예측식을 사용하였다. 먼저 3-D SRC의 E_{xx} 물성치분포는 그림 2.5와 같다. 그림 2.4에서 ϕ 가 45° 회전된방향은 인장강성이 가장 큰 값을 갖는 라드방향에서 가장 많이 벗어나 있기 때문에 라드방향의 물성이 가장 작게 나타나고 라드의 단면방향 물성과 Carbon matrix 물성이 상대적으로 크게 나타난다. 그림 2.8은 4-D SRC의 E_{xx} 물성치분포를 나타낸다. 4-D SRC는 3-D와 다르게 1-2평면에 라드가 60° 간격으로 배열되어 있기 때문에 Quasi-isotropic 성질을 나타낸다. 따라서 1-2평면 방향 물성은 등방성성질을 나타내며 해석 또한 이러한 성질을 잘 묘사하고 있다. 이와 같은 4-D SRC의 경우 인장강성이 가장 약한 부분도 역시 라드에서 가장 많이 벗어난 방향(1-3또는 2-3평면의 45°)에서 가장 작다. 이와 같은 이유는 라드의 강성의 영향이 가장 적게 받는 방향이기 때문이다.

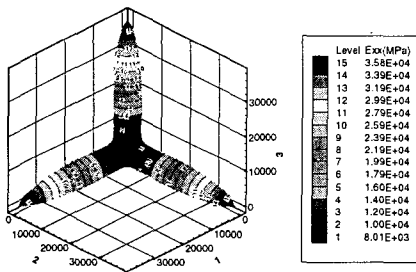


Fig. 2.5. Tensile modulus distribution of the 3-D SRC.

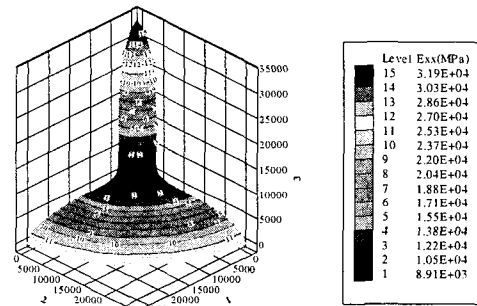


Fig. 2.6. Tensile modulus distribution of the 4-D SRC.

3. 3차원 직조 복합재의 강도해석

SRC를 일반구조물에 적용하기 위해서는 강성뿐만 아니라 강도해석도 중요하다. 본 연구에서는 강도분포를 직접적인 방법으로 예측하여 공간적으로 나타내었다. 먼저 구조요소(structural element)를 도입하여, SRC의 파손을 판단하였다. 정의된 구조요소는 아래의 식과 같다.

$$[C]_{ise} = VF_i [K]_i^T [C''] [K]_i + VF_i / VS [C]_m \quad (3.1)$$

$$i = 1, \dots, n$$

식(3.1)을 살펴보면 각 구조요소의 강성행렬은 그 방향의 라드의 강성행렬에 그 방향 라드에 비례하는 기지 강성행렬로 이루어진다. 이와 같은 구조요소의 파손을 결정하여 SRC의 강도 분포를 얻을 수 있다. 구조요소를 구성하는 라드는 최대 변형률을 이용하여 파손을 결정하고 구조요소의 기지 부분은 수정된 Tsai-Wu 파손판단식으로 파손을 결정할 수 있다. 수정된 Tsai-Wu 파손판단식은 아래의 식과 같다.

$$F_2(\sigma_2 + \sigma_3) + F_{22}(\sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_2\sigma_3) + F_{66}(\sigma_4^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2) = 1 \quad (3.2)$$

여기서 구조요소의 기지파손을 나타내는 강도 텐서들(F_2 , F_{22} and F_{66} : strength tensors)은 SRC의 강도실험을 통해서 얻을 수 있다. 만약 각 구조요소의 응력성분을 식(3.2)에 대입하여 1이 넘으면 그 구조요소의 기지부분이 파손되었다고 판단한다. SRC의 강도를 예측하는 일련의 과정은 아래와 같다.

- step 1 : 강도를 알고 싶은 방향으로 초기 응력을 가한다.
step 2 : 아래의 식으로부터 변형률을 구한다.

$$\{\sigma\} = [C]_c \{\epsilon\} \quad (3.3)$$

step 3 : 식(4.9)에서 얻은 변형률을 각각의 구조요소 강성행렬에 대입함으로써 각 구조요소의 응력들을 구할 수 있다. 구하는 식은 아래와 같다.

$$\{\sigma\}_{ise} = [C]_{ise} \{\epsilon\} \quad (i=1, \dots, n) \quad (3.4)$$

for each structural element)

step 4 : step 2와 step 3에서 구한 변형률과 응력들을 각각 라드의 파손판단식인 식(4.3)과 기

지의 파손판단식인 식(4.5)에 대입한다.

step 5 : 각각의 파손판단식과 비교하여 파손이 일어나면, 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 step5까지 반복한다. 만약 파손이 일어나지 않으면 다음 단계로 간다.

step 6 : 만약 3차원 직조 복합재 강성행렬이 영이 아니면 응력을 증가시키고 step 2로 간다. 만약 강성행렬이 영이면 그때의 응력값이 가해진 방향의 강도가 된다.

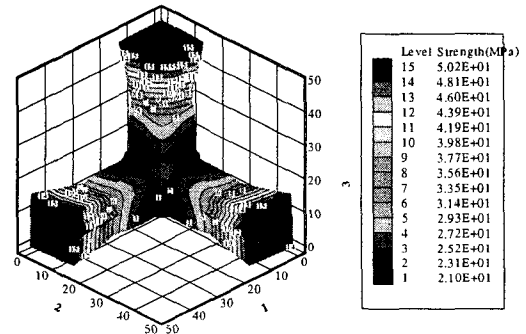


Fig. 3.1. Strength distribution of the 3-D SRC.

그림 3.1은 3-D SRC의 인장강도 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 3-SRC의 인장강성과 비슷한 분포를 보이며, 라드에서 45° 회전한 방향에서 가장 작은 값을 나타낸다. 이와 같은 현상은 라드에서 45° 회전한 방향에서 가해지는 하중이 구조요소의 기지부분에 큰 응력을 유발하여 작은 하중에도 구조요소의 기지파손을 유발하기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 3-D 및 4-D SRC의 기계적 물성치를 예측하여 공간적으로 나타냄으로써, SRC의 기계적 물성치의 공간분포를 파악할 수 있었다. 3-D SRC의 경우, 인장강성은 라드방향에서 가장 큰 값을 나타냈고, 라드에서 가장 많이 벗어난 방향에서 가장 작은 값을 나타내었다. 4-D SRC

의 경우, 3-D SRC에 비하여 4-D SRC는 1-2 평면에 라드가 60° 간격으로 놓여져 등방성 성질을 나타내기 때문에, 1-2 평면방향에서는 인장강성이 동일한 값을 나타내고, 라드에서 가장 많이 벗어난 방향, 즉 1-2평면에서 45° 회전한 방향의 인장강성이 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있었다. 3-D SRC의 인장강도의 경우도 3-D SRC의 인장강성과 유사한 경향을 나타내었다.

참고문헌

1. 변준형, "평직 및 주자직 복합재료의 탄성계수 예측," *대한기계학회논문집(A)*, 제21권, 제11호, 1997, pp. 1757-1764.
2. Rajiv, A., Naik, Pratt and Whitney, "Multiaxial Stiffness and Strength Analysis of Woven and Braided Composites," *AIAA*, 1997, pp. 1148-1158.
3. Rajiv, A., Naik, David, C., Jarmon, and Charles, P., Logan, "Characterization and Modeling of the Strength of Angle Interlock Woven Composites," *AIAA*, 1998, pp. 962-971.
4. Rajiv, A., Naik, "Failure Analysis of Woven and Braided Fabric Reinforced Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 17, 1995, pp. 2334-2363.
5. D., M., Blacketter, D., E., Walrath, and A., C., Hansen, "Modeling Damage in a Plain Weave Fabric-Reinforced Composite Material," *American Society for Testing and Materials*, 1993, pp. 136-142.
6. 최우철, 권승화, 신현규, 이홍범, 김광수, 이진용, 구형희, 윤병일, "3축방향 Pierced Fabric 구조의 프리폼을 이용한 고밀도 탄소/탄소 복합재료 제조," *제 9차 유도무기 학술대회 논문집*, 1999, 7월8일, pp. 552-555.
7. Chou, Tsu-Wei, *Engineering Microstructural design of fiber composites*, Cambridge University