

수자직 복합재료 단위구조의 마크로요소해석

Unit Cell Analysis of Satin Weave Composites Using Macroelements

우 경 식*
Woo, Kyeongsik

ABSTRACT

Unit cell analyses were performed to study the engineering properties of satin weave textile composites. Two 5-harness satin weave layers with fiber tow shifts were modeled by unit cells and repeating boundary conditions were applied at the outer surface of the unit cells. Multi-field macroelements were employed to consider the microstructural details and to effectively reduce computer memory requirements. Preliminary results indicated that the engineering properties of 5-harness satin weave textile composites can vary significantly according to the manner how the adjacent fiber tows were arranged in stacking.

1. 서론

최근 항공우주와 자동차, 그리고 건설산업분야에서 평직 및 수자직 복합재료의 사용이 급증하고 있다. 수자직 텍스타일 복합재료는 섬유가 일방향으로 배열된 테이프 복합재료와는 달리 그림 1에 나타난 바와 같이 경사(warp tow)와 위사(fill tow)가 서로 꼬여 있는 미세구조를 가지고 있는데 이 섬유다발의 각 층은 수지를 먹인 후 사전에 결정된 각도에 따라 형위에 적층된 후 양생되어 구조물을 이루게 된다. 수자직 복합재료는 거시적으로는 일방향 복합재료와 같이 단순한 2차원 평면 구조를 가지고 있으나 자세히 살펴보면 그림 1에 나타난 바와 같이 서로 꼬여 있는 굴곡된 경사/위사다발과 이들 사이에 채워진 수지로 된 매우 복잡한 3차원 미세구조를 가지고 있다. 또한 이 미세구조의 상대적 크기는 작지 않은 경우가 많아 미세구조가 거시구조물의 거동에 많은 영향을 미치게 된다.

평직 복합재료의 경우에는 단위구조의 물성치에 대하여 상대적으로 많은 연구가 지속적으로 진행되고 있으며(예: 참고문헌 [1-4]), 미세구조를 이루고 있는 변수들인 섬유다발의 굴곡도와 적층수(섬유다발 두께의 구조물에 대한 상대적 크기)가 재료의 물성치에 큰 영향을 가지고 있음이

* 충북대학교 구조시스템공학과 조교수

확인된 바 있다^{[5][6]}. 수자직에 대해서는 대표 단면에 대한 2차원 유한요소해석이 Avery 등^[7]에 의해 수행되었고 Chapman 등^[8]에 의해 3차원 해석이 수행되어 있는 정도로 평직 복합재료에 비해 연구가 미미한 정도이며 미세구조에 대한 체계적인 연구는 아직 수행된 것이 없는 상태이다. 이는 복잡한 섬유다발의 3차원 모델링을 정확하게 수행하기가 어렵고 또한 단위구조자체의 해석에도 많은 전산기의 용량이 요구되기 때문으로 추정된다.

본 연구에서는 5-매 수자직 복합재료의 섬유다발의 배열에 따른 물성치의 변화를 규명하기 위하여 단위구조해석을 수행하였다. 경사방향으로 일정거리가 밀려나 적층된 두장의 수자직 복합재료의 단위구조를 파악하여 모델하였고 단위구조의 외곽 경계에는 반복 구속조건을 가하였다. 계산용량을 감소시키기 위하여 마크로요소를 사용하였고 내부의 미세구조는 마크로요소의 부메쉬에서 상세히 고려하였다.

2. 단위구조해석

수자직 복합재료의 각 장은 그림 1에 나타난 것과 같다. 여기서는 미세구조에 대한 이해를 돕기 경사와 위사다발만 나타내었는데 섬유와 섬유사이, 그리고 섬유다발과 섬유다발 사이에 수지가 채워지게 된다. 이 그림에 나타난 부분을 복사하여 x-, y-방향으로 붙여나가면 전체 수자직 한 장을 얻게 되므로 이를 단위구조라 할 수 있다. 그러나 이 그림을 좀더 자세히 관찰하면 더 작은 반복부분이 있음을 알 수 있는데 그림 2는 이를 나타내고 있다. 그림 3에서 보는 것과 같이 5-매 수자직 섬유다발의 굴곡된 주기를 λ 라 하고 굴곡되는 부분이 다시 $(\lambda/2) \times 5$ 만에 나타 나타나게 되는데 (따라서 5-매 수자직), 그림 2에서 가늘게 표시된 선은 x-, y-방향으로 $\lambda/2$ 만큼과 z-방향으로 한층의 두께(h) 부분 만큼을 표시하고 있으며 굵은 선은 최소 단위구조를 표시하고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 단위구조는 여러 형태를 취할 수 있으며 이들 중 어느것을 사용하여도 무방하나 본 연구에서는 마크로요소 메쉬와 부메쉬의 모델링 편의상 그림 2(c)의 단위구조 모델을 사용하여 해석을 수행하였다.

단위구조는 단순히 기하적 형상의 반복뿐만 아니라 응력 및 변위의 반복조건을 포함한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다^[8].

$$u_i(x_k + d_k) = u_i(x_k) + d_j \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j}, \quad \sigma_{ij}(x_k + d_k) = \sigma_{ij}(x_k) \quad (1)$$

여기서 d_j 는 단위구조의 각 방향으로 반복주기를 나타내는 벡터이다. 위식에서 변위의 반복은 단위구조의 외곽면에 변위경계조건으로, 그리고 응력의 반복은 다음식을 통하여 하중경계조건으로 가하여 지게 된다.

$$t_i = \sigma_{ij} n_j \quad (n_j \text{ 는 외곽면 수직 벡터의 방향코사인 }) \quad (2)$$

수자직 복합재료 단위구조의 물성치는 수치실험을 통하여 구할 수 있다. 예를 들어 x-방향의 강성계수 E_{xx} 와 포아손비 ν_{xy} 를 구하기 위해서는 실제 실험상황과 같은 x-방향으로 단일 인장하중(uniaxial tension loading)상태를 수치적으로 모사하여야 한다. 이와 같은 상태를 구현하기 위해서는 먼저 (1)식의 변위 반복조건에서 전단 변형도를 모두 '0'이 되도록 하고 나머지 3개의 미지

수 $\frac{\partial \hat{u}}{\partial x}, \frac{\partial \hat{v}}{\partial y}, \frac{\partial \hat{w}}{\partial z}$ 를 3회의 해석을 수행하여 계산한다. 이 결과들은 다시 σ_{xx} 이외의 응력을 모두 '0'이 되어야 하는 조건을 만족하도록 중첩(superpose)하고 이를 이용하여 인장강성계수와 포아손비를 결정할 수 있다. 한편 전단 강성계수 G_{xy} 는 ϵ_{xy} 이외의 모든 변형도가 '0'이되고 따라서 하나의 미지수에 대해 한번의 계산으로 구할 수 있다.

3. 매크로메쉬와 부메쉬

매크로요소란 내부에 존재하는 미세구조를 요소단계에서 거시적으로 고려해 줄 수 있는 요소로 정의된다^[9]. 매크로요소에는 단일변위장 및 다중변위장 매크로요소가 있는데 여기서는 다중변위장 매크로요소를 사용하여 계산을 수행하였다. 다중변위장 매크로요소에 대해서는 참고문헌 [5]에 상세히 기술되어 있으므로 생략하고 여기서는 계산에 사용된 매크로요소와 부메쉬에 대하여 다루었다.

일반적으로 수자직 복합재료는 경사와 위사의 배열각도인 적층각이 같게 적층된다 하더라도 인접한 층에서 굴곡된 섬유다발 부분에 따라서 다른 양상을 보이게 되는데 그림 3에 나타난 바와 같이 두장의 5-매 수자직 복합재료에서 윗층이 아래층에 대해 경사방향으로 Δx 만큼 이동하여 적층될 수 있다. 이와 같은 편이는 위사방향으로도 발생할 수도 있으나 본 연구에서는 경사방향의 편이만을 고려하였다.

그림 4는 본 연구의 해석에 사용된 5-매 수자직 복합재료 단위구조의 매크로요소 메쉬와 부메쉬를 나타내고 있다. 각각의 매크로요소는 면내방향으로는 굴곡된 섬유다발 주기의 반에 해당하는 부분을, 그리고 두께방향으로는 한 층 두께에 해당하는 부분 모델링하였다. 따라서 5-매 수자직 복합재료 2장 주기 반복 단위구조는 10개의 매크로요소로 모델되었으며 이중 서로 다른 유형의 매크로요소는 5개만이 존재하게 된다. 그림에서 매크로요소 번호는 유형 번호로서 각각의 부메쉬 유형 번호에 대응된다. 이 그림에서는 윗층이 아래층에 대하여 x-방향으로 $\lambda/2$ 의 편이를 가지고 적층된 것을 보여주고 있으며 이와 같은 양상은 두께방향으로 반복되고 있다고 가정하였다.

4. 계산결과 및 고찰

수자직 복합재료는 섬유다발(경사, 위사)과 수지로 이루어져 있는데 섬유다발은 다시 섬유와 수지로 되어 있다. 다음은 섬유다발과 수지의 물성치를 나타내고 있다^[10].

$$\begin{aligned} \text{Fiber (Graphite/Epoxy):} \quad & E_{11}=206.9 \text{ GPa}, E_{22}=E_{33}=5.171 \text{ GPa}, \nu_{12}=\nu_{13} \nu_{23}=0.25, \\ & G_{12}=G_{13}=G_{23}=2.386 \text{ GPa} \\ \text{Resin (Epoxy):} \quad & E=3.45 \text{ GPa}, \nu=0.35 \end{aligned}$$

섬유다발은 굴곡되어 있으므로 물성치는 굴곡각에 따라서 변환되었다. 물성치는 보통 부메쉬를

구성하고 있는 요소내에서 물성치는 같다고 하는 가정에 따라 요소중앙에서 구한 굴곡각으로 변환되나 수자직 복합재료와 같이 심한 굴곡각을 가지고 있는 경우에는 큰 오차를 발생할 수도 있으므로^[7] 본 연구에서는 요소의 매 적분점마다 변환을 수행하였다. 한편 수자직의 경우 섬유다발의 굵은 정도는 굴곡도(waviness ratio)나 굴곡각(crimp angle)으로 표시하는 것이 보통이며 여기서는 굴곡도를 사용하였으며 이는 다음과 같이 수자직 한 장의 두께를 섬유다발의 굴곡된 부분의 주기로 나눈 것으로 정의된다.

$$\text{Waviness ratio} = \frac{h}{\lambda} \quad (3)$$

섬유다발은 다양한 굴곡도를 가질 수 있으나 여기서는 1/3의 값을 가진다고 가정하였다.

그림 5는 2장을 주기로 반복 적층된 5-매 수자직 복합재료 단위구조에 대하여 x-방향의 섬유다발의 편이 정도에 따른 물성치의 변화를 보여주고 있다. 여기서 x-축은 편이량을 나타내고 있는데 단위 Δx 는 $\lambda/2$ 의 편이를 나타내고 있으며 5-매 수자직의 반복주기는 $5 \times (\lambda/2)$ 이므로 Δx 가 5일 때 처음의 배열로 돌아가게 된다. 이 그림에서 보면 인장강성계수 E_{xx} 와 E_{yy} , 그리고 포아손비 ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} 는 섬유다발의 편이 정도에 따라서 큰 변화를 보이고 있으나 E_{zz} 는 약간의 변화만을 보이고 있다. 이는 x-방향의 섬유다발의 편이에 따른 미세구조 배열의 변화가 x-z, y-z 평면에서 발생하고 있고 x-y 평면에서는 근본적인 차이가 없기 때문으로 생각된다. 포아손비의 경우에는 인장강성계수의 변화와 밀접하게 연결되어 있는데 예를들어 ν_{xy} 의 경우 E_{xx} 값에 역비례하는 분포를 가지게 된다. 한편 전단강성계수는 위에서 설명한 이유로 인하여 유사한 변화양상을 보이나 그 변화정도는 인장강성계수나 포아손비의 정도에 비하여 매우 작게 나타났다. 표 1은 섬유다발의 편이에 따른 물성치를 편이가 없는 경우의 물성치로 나눈 값을 나타내고 있는데 인장강성계수 및 포아손비의 경우에는 기준치에 비해 각각 최대 29%의 증가와 41%의 감소를 보이고 있다. 반면 전단강성계수는 그 변화량이 미미하여 최대 6%의 증가만을 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 2장을 주기로 하여 적층된 5-매 수자직 복합재료에 대하여 x-방향의 섬유다발의 배열에 따른 등가 물성치의 변화를 단위구조해석을 통하여 고찰하였다. 경사방향으로 일정거리가 밀려나 적층된 두장의 수자직 복합재료의 단위구조를 파악하여 모델하였고 단위구조의 외곽 경계에는 반복 구속조건을 가하였다. 계산용량을 감소시키기 위하여 매크로요소를 사용하였고 내부의 미세구조는 매크로요소의 부메쉬에서 상세히 고려하였다.

계산결과 5-매 수자직 복합재료의 미세구조는 등가 물성치에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 두장을 주기로 하는 수자직 복합재료에서 한 장이 다른 장에 비하여 경사방향으로 일정거리가 밀려나 적층된 경우 면의 방향으로의 섬유다발의 배열변경에 따라서 면내방향의 인장강성계수와 포아손비는 크게 변화하였다. 반면 면외방향의 인장강성계수와 전단강성계수는 미세구조의 변화에 큰 영향을 받지 않았다.

참 고 문 헌

- [1] Ginty, C. and Chamis, C., ICAN: A versatile code for predicting composite properties, NASA TM 87334, 1986.
- [2] Ishikawa, T. and Chou. T., One-dimensional micromechanical analysis of woven fabric composites, AIAA Journal, Vol. 21, No. 12, 1983.
- [3] Kriz, R., Influence of damage of mechanical properties of woven composites at low temperature, Journal of Composite Technology Research, Vol. 7, No. 2, 1985.
- [4] Foye, R., Finite element analysis of the stiffness of fabric reinforced composites, NASA Contractor Report 189597, 1992.
- [5] Whitcomb, J. and Woo, K., Enhanced direct stiffness method for finite element analysis of textile composites, Composite Structures, Vol. 29, 1994.
- [6] Woo, K. and Whitcomb, J., Effects of fiber tow misalignment on the engineering properties of plain weave textile composites, Accepted for publication in Composite Structures, 1997.
- [7] Avery, W. and Herakovich, C., A study of the mechanical properties of a 2-D carbon-carbon composite, CCMS-87-13, VPI-E-87-15.
- [8] Chapman, C. and Whitcomb, J., Thermally induced damage initiation and growth in carbon-carbon composites, Proceedings of the 38th SDM conference, 1997.
- [9] Woo, K. and Whitcomb, J., Macro finite element using subdomain integration, Communications in numerical methods in engineering, Vol. 9, 1993.
- [10] Jones, R., "Mechanics of Composite Materials", Scripta Book Co., Washington D.C., 1975.

Table 1. Normalized engineering properties for two-layer 5-harness satin weave composite unit cells. Properties were normalized by that with no fiber tow shift.

<i>Shift</i> ($\lambda/2$)	<i>E_{xx}</i>	<i>E_{yy}</i>	<i>E_{zz}</i>	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	<i>G_{xy}</i>	<i>G_{xz}</i>	<i>G_{yz}</i>
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	1.12	1.29	1.00	0.59	1.09	1.24	1.00	1.06	1.05
2	1.29	1.12	1.00	0.68	1.24	1.09	1.00	1.05	1.06
3	1.29	1.12	1.00	0.68	1.24	1.09	1.00	1.05	1.06
4	1.12	1.29	1.00	0.59	1.09	1.24	1.00	1.06	1.05

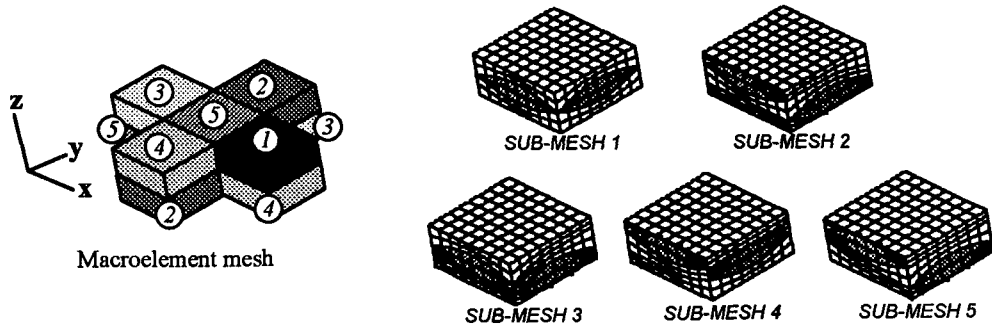


Figure 4. Macroelement mesh and sub-meshes for two-layer repeating 5-harness satin weavetextile composites. Circled numbers in the macroelement mesh indicate the sub-mesh types. The present configuration is for the case when the two layers were stacked with the shift of $\lambda/2$ in the x-direction.

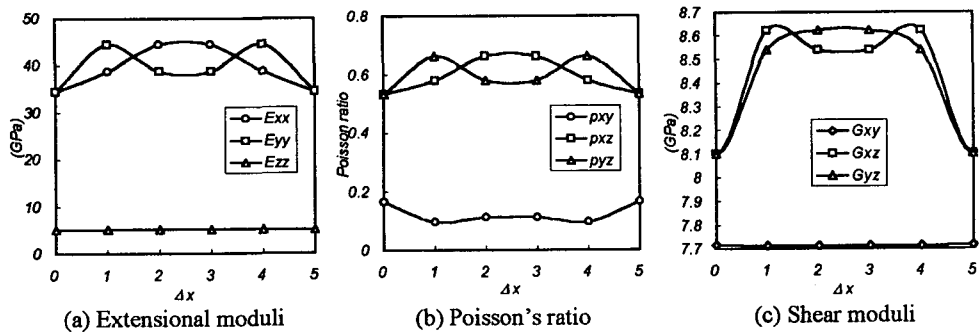


Figure 5. Distribution of effective properties versus the warp tow shifts for two-layer repeating unit cells of 5-harness satin weave textile composites. The amount of shift in the graph was scaled so that it would recover the original configuration at $\Delta x=5$.

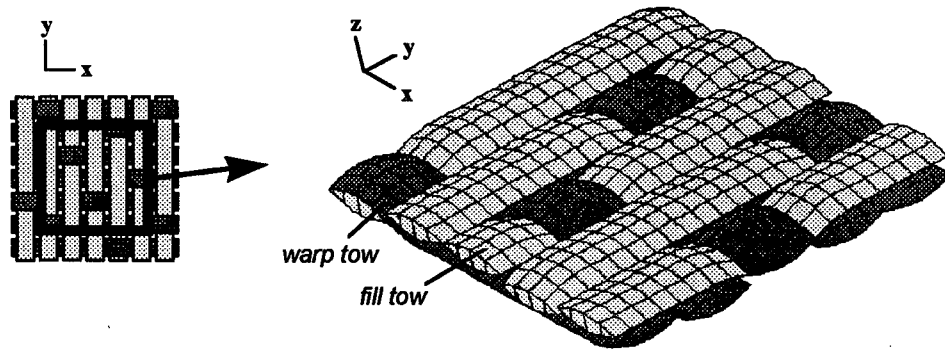


Figure 1. Schematic of fiber tow architecture of 5-harness satin weave composites.

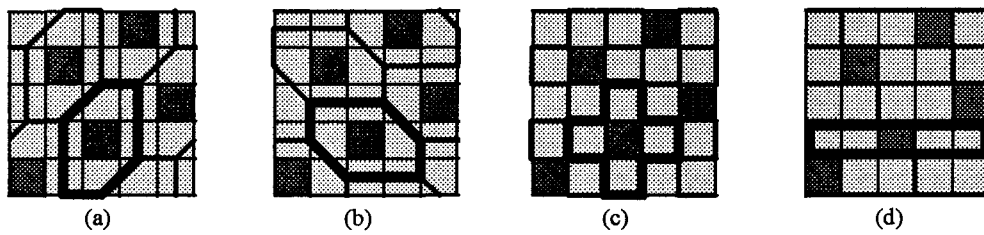


Figure 2. Identification of unit cells.

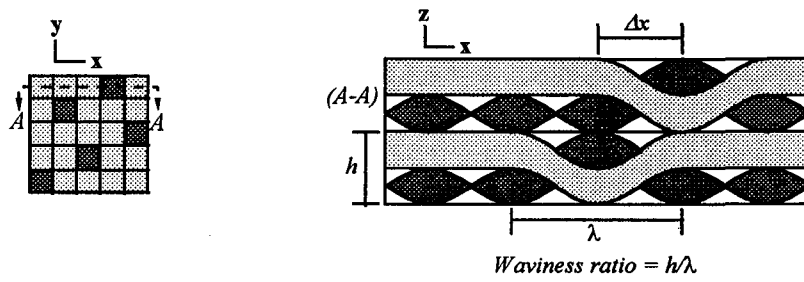


Figure 3. Typical cross-section of a two-layer repeating 5-harness satin weave composite.