

---

# 직교이방성 직물복합재료 구조물에 대한 상세응력 해석

이창성\* · 신현 · 조진연 · 김승조(서울대학교)

## Large-scale stress analysis of orthogonal woven composites

Seung Jo Kim, Chang Sung Lee, Hun Shin and Jin Yeon Cho

---

### 1. 서 론

복합재료(Composite materials)는 기존의 금속재료에 비해 중량비 강성(Specific stiffness)과 중량비 강도(Specific strength)가 우수하여 여러 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 그리고 복합재료를 이용하여 구조물의 설계할 경우에는 구조물의 방향에 따라 강성 및 강도를 조절할 수 있어서, 등방성 재료에 비해 보다 효율적으로 최적설계를 달성할 수 있다. 따라서 중량감소가 성능향상으로 직결되는 항공우주, 자동차, 조선산업 등에서 복합재료는 유망한 1차 및 2차 구조재료로 널리 활용되고 있다. 하지만 복합재료는 앞에서 언급한 장점과 함께 여러 가지 단점도 수반하게 되는데, 대표적인 단점으로는 층간분리(Delamination)와 같은 구조적 파손을 들 수 있다. 층간분리는 일반적으로 많이 사용되는 적층복합재료(Laminated composite)에서 쉽게 관찰된다. 적층복합재료는 섬유(Fiber)가 평행하게 분포된 단층(layer)을 적층각을 고려하여 쌓아서 성형하게 되는데, 단층 사이의 기지(Matrix)부분에서 층간분리가 발생하기 쉽다. 이러한 층간분리현상을 억제할 수 있는 섬유와 기지의 결합형태를 연구한 결과 직물복합재료(textile composite)가 제시되었다. 직물복합재료는 여러 가닥의 섬유를 합친 섬유다발(yarn)을 이용하여 직물과 같은 형태로 직조한 후 기지를 첨가하여 성형하게 되는데, 섬유가 서로 꼬여 있으므로 층간분리와 같은 구조적 파손에 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다[1].

이러한 직물복합재료의 재료적 특성을 이해하기 위하여 다양한 연구가 진행되었는데[2-3], 실험을 통한 연구보다는 단위 구조(Unit cell)의 규칙적인 반복을 통한 직물복합재료 모델링과 유한요소법을 활용한 연구가 최근에 많이 수행되고 있다[4]. 그러나, 3차원 유한요소 모델을 사용하는 경우에는 면내 방향의 기계적 특성뿐만 아니라 면외방향의 특성도 상대적으로 정확하게 예측할 수 있는 반면, 직물복합재료의 복잡한 기하학적 형상을 모델링하기가 힘들고, 일반적인 유한요소법을 이용할 경우에는 대용량의 하드웨어를 요구하기 때문에 해석이 부분적으로만 수행되거나, 단순화된 모델을 사용하여 근사해를 구하는 정도로 수행되었다.

본 연구에서는 3차원 직교이방성(Orthogonal) 직물복합재료 구조물에 대한 상세응력해석을 분산병렬처리기법과 3차원 유한요소 모델링을 사용하여 수행하였으며, 직물복합재료 구조물의 복잡한 기하학적 형상을 모델링한 방법을 살펴보고, 외부 하중조건에 대한 직물복합재료 구조물의 응력분포를 살펴보았다.

### 2. 직교이방성 직물복합재료 구조물의 3차원 유한요소 모델링

Fig. 1 에서와 같이 3차원 직물복합재료 구조물을 나타내는 기본 단위구조(Laminated block)를 참조하였다[5]. 각 방향의 섬유다발은 직육면체로 근사하였으며, 직육면체의 각 방향 길이는 실험을 통해 실제 섬유다발의 재료적 특성을 모사할

수 있도록 결정되었다[6]. Fig. 1의 기본 단위구조를 살펴보면, 먼저 x방향으로 늘어져 있는 섬유다발은 Warp(또는 Stuffer) yarn이 있고, Warp yarn과 직교하는 y방향으로 늘어져 있는 Weft(또는 Filler) yarn이 있다. 그리고 Weft yarn, Warp yarn에 서로 수직하게 만나면서, z방향으로 늘어진 z yarn(또는 Weaver)이 있다. Fig. 1을 참조하여 실제로 작성한 단위 셀은 Fig. 2에 나타나 있는 것처럼, Fig. 1의 기본단위구조 8개로 구성되어 있으며, x, y, z 3방향으로 규칙적으로 반복해서 배치시켜 복합재료 구조물을 모델링할 수 있도록 되어 있다.

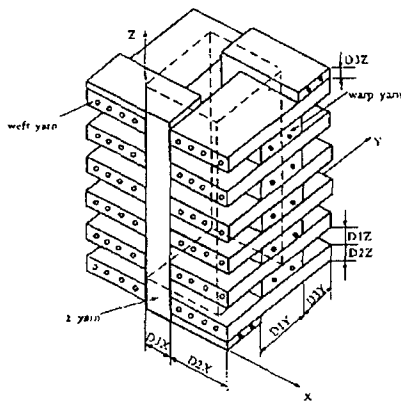


Fig. 1 A Schematic of a simplified 3D orthogonal woven composite

그리고 각 방향 섬유다발의 치수와 물성치는 Table 1과 Table 2에 정리하였다. 실제로 해석에 사용한 모델링은 Fig. 2에 있는 단위 셀을 x, y 방향으로 각각 24개, 4개를 반복시켰으며, 전체 절점의 개수는 모두 890,554이며, 8절점 고체요소 829,440을 사용하였다. 총자유도는 2,686,512가 되는 문제이며, 해석에 사용된 유한요소 모델은 Fig. 3에 나타내었다. 실제 해석에 사용된 모델은 x방향으로는 대략 13cm, y방향으로는 거의 2cm의 길이는 가지며, 두께는 대략 2.79mm가 되는 시편에 해당된다. 한편, 기존의 Band Solver에 비해서 메모리도 훨씬 작게 요구하면서, 탁월한 계산 성능을 보이는 다중프린트 기법을 병렬화시킨 병렬다중프린트 기법을 사용하여 문제를 해석하였다[6].

### 3. 수치해석예제

Fig. 3에 있는 직교이방성 직물복합재료 구조물

에 대해 x방향으로 인장력이 작용하였을 때의 구조물의 변형률 분포와 인장응력분포를 구해 보았다. 경계조건은 변위조건으로 부과하였다. 수치해석은 32대의 컴퓨터를 사용하여 수행되었으며, 해석에 총 요구된 메모리량은 대략 11 GB 정도의 메인메모리를 요구하였으며, 20시간 10분 정도의 시간이 걸렸다. 우선 Fig. 4에 있는 x방향 변형률 분포를 살펴보면, 각각의 단위 셀에서 yarn들에서는 변형률이 대체로 작은 반면, Weaver yarn과 x방향으로 인접한 기지(Matrix) 부분에서 가장 큰 값을 가짐을 볼 수 있다. 이때의 응력분포를 살펴보면 대부분의 하중을 x방향 Stuffer yarn이 담당하는 것을 알 수 있다.

### 4. 결론

직교이방성 직물복합재료의 복잡한 기하학적 형상을 Stuffer yarn, Filler yarn, Weaver Yarn과 기지부분으로 하나의 기본 단위구조로 모델링하고, 8개의 기본 단위구조를 하나의 단위 셀로 하여 반복적으로 배열하여 직물복합재료 구조물을 모델링할 수 있었다. 이러한 3차원 모델링을 통해 직교이방성 직물복합재료 구조물에 대한 상세 응력해석을 수행할 수 있었고, 각각의 섬유다발(yarn)의 응력분포와 변형률 분포를 알 수 있었다. 직교이방성 구조물 전체에 대한 해석을 통해 직물복합재료의 재료적 특성 파악뿐만이 아니라, 여러 가지 하중 조건에 대한 구조적인 특성 파악이 가능해서 설계나 고정밀 해석에 널리 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] Cox, B. N. 1994, "Delamination and Buckling in 3D Composites," *Journal of Composite Materials*, 28(12):1115-1126
- [2] Brandt, J., K. Drechsler, M. Mohamed and P. Gu. 1992. *Manufacture and Performance of Carbon/Epoxy 3-D Woven Composites*, 37th International SAMPE Symposium, 9-12 March, pp. 864-877
- [3] Tan P, Tong L, Steven GP. Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part I. Experimental investigation. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing* 1999;00:000
- [4] Tan, P., L. Tong and G.P. Steven. 1997. A 3D Modeling Technique for Predicting the Linear Elastic Properties of Opened-Packing Woven Fabric Unit Cell, Ninth International Conference on Composite Structure, Paisley, Scotland, 1-3 Sep.
- [5] Tan P, Tong L, Steven GP. Modeling approaches for 3D orthogonal woven composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 1998;17(6):545-577
- [6] Kim, J. H. and Kim, S. J., A multifrontal solver combined with graph partitioners, *AIAA Journal*, Vol 37, No 10, pp.1180-1186, October, 1999.

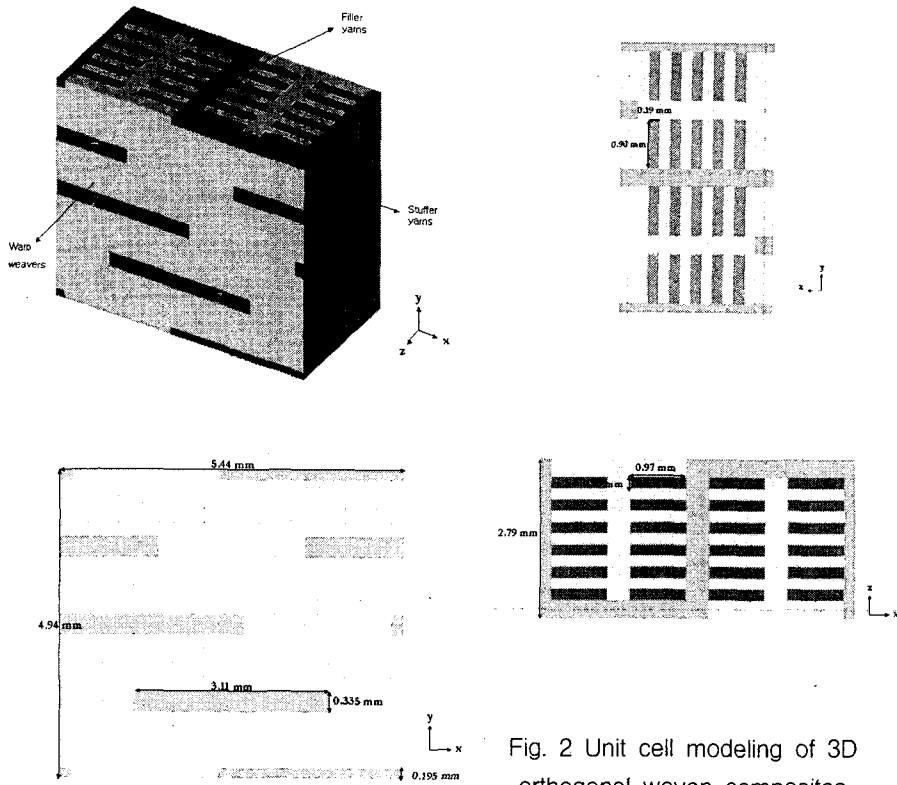


Fig. 2 Unit cell modeling of 3D orthogonal woven composites

Table 1 The geometrical parameter for stuffer yarns, filler yarns and warp weavers

기본블록	Stuffer yarn		Filler yarn		Warp weaver		
	D1Y(mm)	D1Z(mm)	D2X(mm)	D2Z(mm)	D3X(mm)	D3Y(mm)	D3Z(mm)
	0.90	0.19	0.97	0.20	0.39	0.67	0.32

Table 2 The mechanical properties of the stuffer, filler and z-yarns

	Vf	$E_L$ (GPa)	$E_T(=E_z)$ (GPa)	$G_{LT}(=G_{Lz})$ (GPa)	$G_{TZ}$ (GPa)	$\nu_{LT}(=\nu_{Lz})$	$\nu_{TZ}$
Stuffer yarns	80.4	177.31	8.93	4.86	3.45	0.2294	0.2945
Filler yarns	68.2	150.74	7.194	3.49	2.75	0.2477	0.3087
Warp weavers	59.14	131.00	6.22	2.85	2.36	0.2613	0.3167
Matrix		2.2	2.2	0.815	0.815	0.35	0.35

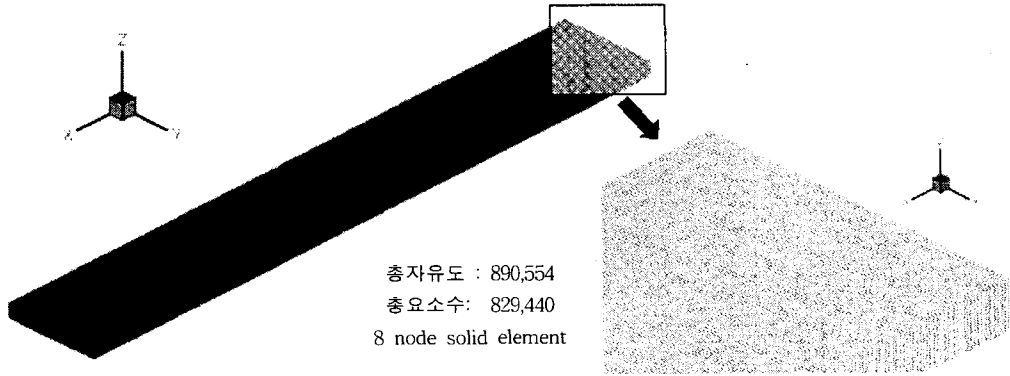


Fig. 3 직교이방성 직물복합재료 구조물의 유한요소 모델링

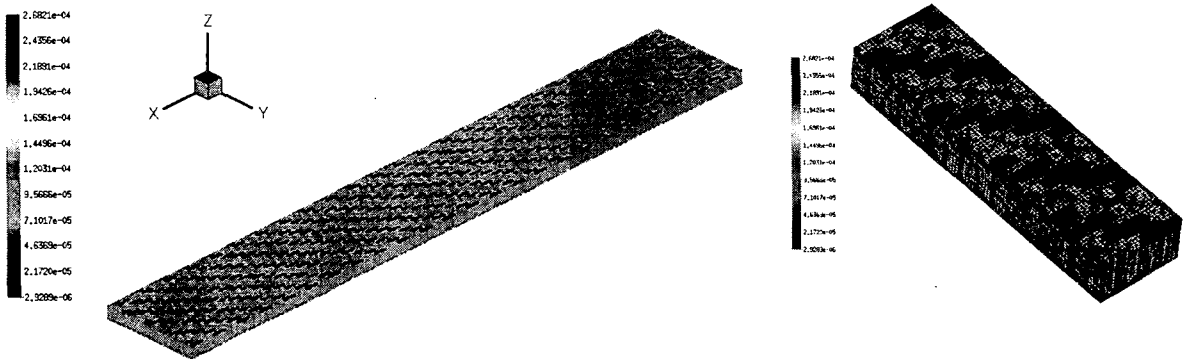


Fig. 4 직교이방성 직물복합재료 상세해석결과  
 ( x방향 인장 테스트시의  $e_{xx}$  분포)

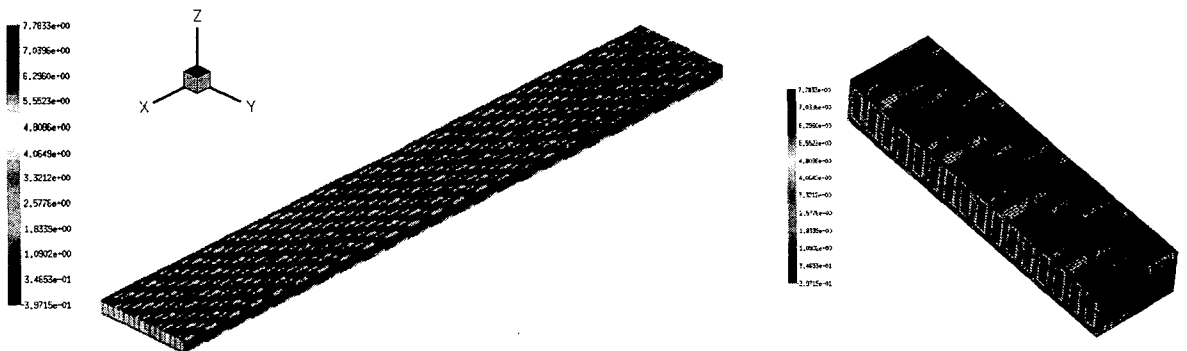


Fig. 4 직교이방성 직물복합재료 상세해석결과  
 ( x방향 인장 테스트시의  $\sigma_{xx}$  분포)