

3D 직교 직물 복합재료 평판의 미시구조를 고려한 손상 거동 연구

지국현* · 양정식* · 김승조**

A Study of damage behaviors of 3D orthogonal woven composite plates under Low velocity Impact

Kuk Hyun Ji* and Seung Jo Kim**

Key Words: 3 차원 직교 직물 복합재료, 직접수치모사, 유한요소법, 저속충격

ABSTRACT

In this study, the material characterization and the dynamic behavior of 3D orthogonal woven composite materials has been studied under transverse central low-velocity impact condition by means of the micromechanical model using finite elements. To build up the micromechanical model considering tow spacing and waviness, an accurate unit structure is stacked in x-y-z direction repeatedly. First, the mechanical properties of 3D orthogonal woven composites are obtained by means of virtual experiment using full scale Finite Element Analysis based on the DNS concepts, and the computed elastic properties are validated by comparison to available experimental results. Second, using the implementation of this validated micromechanical model, 3D transient finite-element analysis is performed considering contact and impact, and the impact behavior of 3D orthogonal woven composite is investigated. A comparison study with the homogenized model will be carried out in terms of global and local behaviors.

1. 서론

복합재료는 우수한 비강성 및 비강도, 환경에 대한 저항성으로 항공, 우주, 방위산업뿐만 아니라 자동차, 건축, 스포츠, 레저산업에 이르기까지 다양한 분야에서 구조부재로서 많이 쓰이고 있다. 그러나 일반적으로 많이 쓰이는 섬유 강화 적층 복합재료 구조물은 횡방향 충격 하중에는 취약한 면을 보이며 특히 저속 충격으로 인하여 발생하는 손상은 육안으로는 식별이 힘든 특징이 있다. 이

는 적층 복합재료의 특성상 면내 하중은 매우 잘 견디는 반면 두께방향으로의 인장 강도가 상대적으로 낮은 것에 기인하며 이로 인하여 층간 분리, 기지 손상, 섬유 파단등의 손상 패턴이 발생하게 된다. 따라서 섬유 강화 복합재료 구조물의 횡방향 충격하중에 대한 손상 저항성을 높이기 위하여 지난 수년간 많은 연구가 이루어져 왔다. [1]

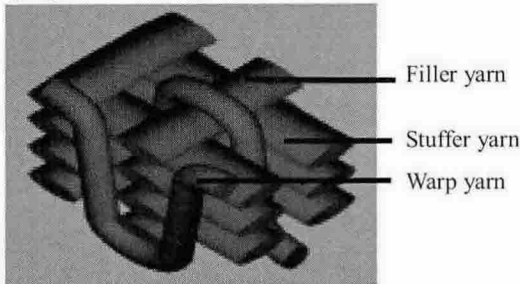
이러한 섬유강화 복합재료의 충격하중에 대한 특성을 개선시키기 위한 방법들 중 직물 복합재료를 이용하는 것이 등장하고 있다. 직물 복합재료는 섬유를 x-y 방향 뿐만 아니라 z 방향으로도 서로 직조하여 구성한 것으로서 두께방향의 강화를 통하여 층간분리에 대한 저항성을 높였다.[2-3] 또

* 서울대학교 기계항공공학부

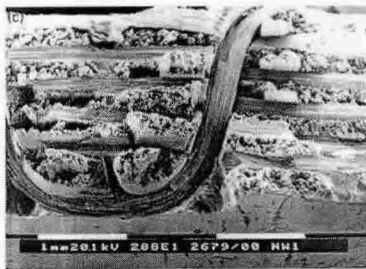
** 서울대학교 기계항공공학부, 비행체 특화센터

한 기존의 단방향 복합재료보다 높은 횡방향 인장 강도를 가짐으로써 충격하중에 보다 강한 특성을 갖는다.

이러한 직물 복합재료는 제조 기술의 발달에 따라 3 차원으로 직교 직조하는 방법이 일반적으로 널리 쓰이게 되었다. 이러한 3 차원 직교 직물 복합재료는 그림 1 에서 보여지는 것처럼 스토퍼 안(Stuffer Yarn), 필러 안(Filler Yarn), 워프 안(Warp Yarn or Z Yarn)으로 구성되어 있으며 상호 직교하여 직조되어 있다. 현재 3 차원 직교 직물 복합재료는 항공우주 산업분야에서 전통적인 적층 복합재료의 충격하중에 대한 층간분리 및 면내 압축 응력에 대한 국부 좌굴에 의한 손상에 대한 약점을 개선하기 위하여 개발이 활발히 진행되고 있다.[4-6]



(a) Schematic view [7]



(b) Micrographs of the cross-section [4]

Fig. 1. 3 차원 직교직물 복합재료의 미시구조

이러한 3 차원 직교 직물 복합재료는 3 차원 직조법에 따라 안(yarn) 사이의 거리, 안의 굵어진 정도, 다발의 크기, 각 보강방향의 섬유 비율 등에 따라 그 특성이 다른 특징을 보인다. 따라서 본 논문에서는 직조되는 기하학적 형태에 따른 직교 직물 복합재료 평판 구조물의 충격 거동의 특성을 비교 분석하였다. 이를 위해서 유한요소법에 기반하여 각각의 안을 미소기계학적인 모델링을 통하여 직접 수치 모사기법(DNS, Direct Numerical Simulation)을 적용하였다.

2. DNS 및 미소기계학적 모델링

2.1 직접 수치모사 기법

일반적으로 복합재료 구조해석 및 거동을 예측하는 방법으로서 크게 거시기계학적 (Macroscopic) 접근 방법과 미소기계학적 (Microscopic) 접근 방법이 있다. 거시기계학적 방법은 복합재료를 균질화된 비등방성 물성을 갖고 있다고 간주하고 이에 직접적으로 비등방성 물질에 대한 구성방정식을 적용하게 된다. 라미나의 기계학적 물성은 라미나 전체에 대하여 이상적으로 균일한 강도와 강성을 갖는다는 가정에 기초하므로 구조물의 전체적인 거동이나 물성에 관련되는 문제의 경우에는 잘 적용될 수 있다. 그러나 충격 등에 의하여 발생하는 손상의 경우 기지의 내부 또는 기지와 섬유사이 등 복합재료의 구성성분 내부의 상호 작용에 의하여 손상이 시작되므로 이러한 경우 거시기계학적 접근방법은 그 한계를 가질 수 밖에 없다.

반면, 미소기계학적 방법은 복합재료의 구성성분인 섬유와 기지를 직접 다루며 복합재료를 이들의 혼합체로 간주하는 방법이며 단위 셀 방법 (Unit Cell Approach, Aboudi[7]) 등이 있다. 단위 셀 방법은 대상 구조물의 전체를 직접적으로 표현하는 것이 아니라 셀이라 부르는 대표 체적 요소를 이용하여 해석하는 방법이다. 그러나 이러한 방법은 또다른 균질화의 방법일 뿐이며 복잡한 기하학적 형상을 표현할 수 없고 경계조건을 적용하는데도 많은 어려움을 가진다.

한편, DNS는 섬유나 기지 등 복합재료의 구성성분 수준까지 직접 모델링하여 전체 구조물을 구성하고 해석하는 방법으로서 컴퓨팅 능력의 급격한 발전을 기반으로 하여 거시적인 방법 및 미소기계학적 방법이 갖는 한계를 극복할 수 있다.[9-10] 특히 복합재료의 충격 현상은 구조물의 국부적인 손상을 가져오는 대표적인 현상이며 이는 섬유와 기지수준에서 시작되므로 손상이 일어나는 타격지점에서의 미시적인 접근이 필수적이다. 이를 위하여 본 연구에서는 복합재료의 직접수치모사 기법을 제안하였으며 이는 향상된 컴퓨팅 파워를 바탕으로 대상 구조물의 미시적인 형상을 모사하여 복합재료의 충격 거동을 해석하였다.

2.2 직교 직물 복합재료의 모델링

본 연구의 대상이 되는 3 차원 직교 직물 복합재료는 Torayca T-300(3K) 탄소 섬유와 Epicote 828 에폭시 수지를 그 구성성분으로 한다.[4-5] 스토퍼 안과 필러 안 및 워프 안(z yarn)의 비율은

1:1.2:0.2 이고 전체의 섬유 체적비율은 0.43 이다. 그림 2 에 직교 직물 복합재료의 개념도를 도시하였다. 그림 2-(b) 에서는 해석에 사용된 복합재료의 단위구조물이 나타나 있으며 실제의 시편을 구현하기 위하여 이러한 단위 구조물을 x,y,z 방향으로 일정개수를 쌓아서 복합재료 평판을 구성하였다.[8]

각각의 단위 구조물은 8 절점 6 면체 요소를 사용하였으며 단위 구조물당 전체 절점 수는 13,200 개, 전체 요소 수는 11,520 개이다 (Fig.2-b). 이를 구성하고 있는 구성성분의 물성치 및 Chamis[9-10]에 의하여 제안된 미소기계학적 방정식을 사용하여 얻은 스토퍼 얇과 필러 얇, 워프 얇의 탄성계수는 참고문헌 8 에 실린 값에 기초하였다.

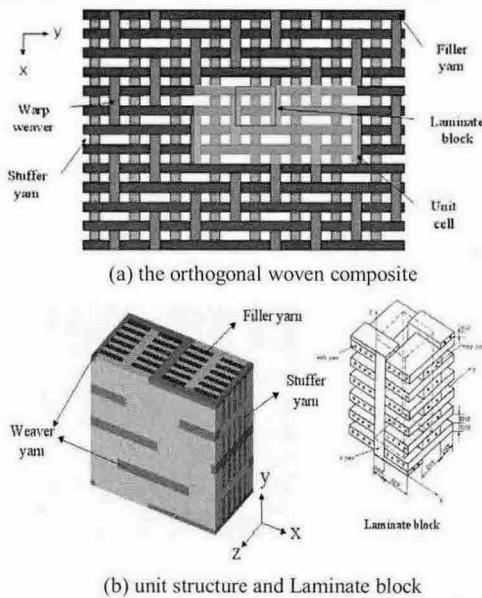


Fig. 2 직교직물 복합재료의 단위구조모델

Table 1. 직교직물복합재료의 구성성분의 물성치

	V _f (%)	E _L (GPa)	E _T = E _Z (GPa)	G _{L,T} = G _{L,T} (GPa)	G _{TZ} (GPa)	V _{LT} (= ν _{LZ})	ν _{TZ}
Stuffer yarn	80.4	177.31	8.93	4.86	3.45	0.2294	0.2945
Filler yarn	68.2	150.74	7.194	3.49	2.75	0.2477	0.3087
Warp yarn	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

본 연구에서의 각각의 얇은 횡등방성 재료로 간주되며 108 개의 단위 구조물 (27x4x1, 자유도 2,671,534)을 이용하여 만든 가상 시편으로 인장 시험 및 전단 시험을 구현하였고 각 방향의 물성치를 구한 것과 실제 실험치를 비교함으로써 본

연구에서 사용한 모델의 타당성을 얻을 수 있었다.[8]

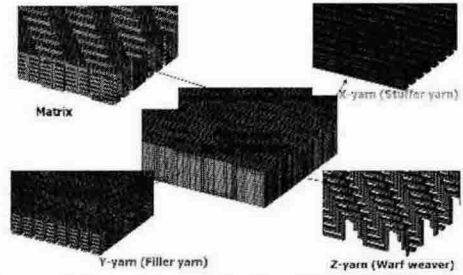


Fig. 3. 미시구조를 고려한 직교직물 복합재료 평판의 유한요소 상세 모델

3. 수치 해석 결과

3.1 저속충격 수치모사를 위한 유한요소 모델링
본 연구에서의 각각의 얇은 횡등방성 재료로 간주되며 42 개의 단위 구조물(7x6x1, 자유도 1,565,922)로 크기가 38.08x37.68x2.79mm 인 가상 시편으로 충격 실험을 수행하였다. 평판의 물성치는 Table.1 에 보였으며 평판은 4 변 단순지지되었다. 충격체로서는 반지름 20mm 의 강체를 모델링하였다. 충격체는 문제의 평판에 질량 2.3kg, 초기속도 5m/s 로 평판의 중심에 27J 의 에너지를 가지고 충격을 가하도록 하였다

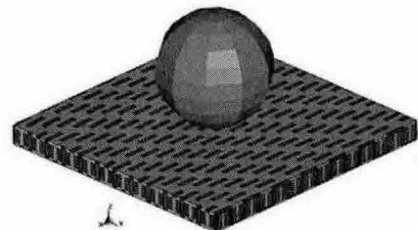


Fig. 4 저속의 구형 충격체에 의한 직교직물 복합재료 평판의 유한요소 모델

3.2 충격 거동 해석

3.2.1 거시 거동 이력

Fig.4-5 는 균질 모델과 DNS 모델의 거시적인 측면에서의 거동을 각각 비교하였다. 여기에서 거시 거동은 충격 하중을 받는 중심에서의 두께방향 변위와 평판이 받는 접촉력에 대하여 기술하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 거시 거동의 측면에서 볼 때 DNS 모델과 균질 모델의 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 각각의 물성치를 고려한 DNS 모델 역시 거시거동을 적절히 기술할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 3 차원 직교직물 복합재료를 미 소기계학적 모델링을 구조물 전체에 적용시켜 향상된 컴퓨팅 파워를 바탕으로 가상의 복합재료 시편의 저속충격 거동의 특성을 살펴보았다. DNS 에 기반한 모델링을 이용하여 기존의 거시적인 균질화 모델에 비하여 미시적인 응력 분포를 잘 묘사할 수 있으며 구성성분별 보다 상세한 응력 해석 및 예측할 수 있음을 보였다. 추후 3 차원 응력상태를 고려한 복합재료 구성성분의 파단을 고려한 새로운 파단 기준 및 파손 이론 정립을 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Abrate S. "Impact on laminated composite supported materials", *Applied Mechanics Review* 44 (1991) pp. 155-190
2. N.K. Naik, Sailendra Meduri, "Polymer-matrix composites subjected to low-velocity impact: effect of laminate configuration", *Composites Science and Technology* 61 (2001) pp. 1429-1436
3. N.K. Naik, Y. Chandra Sekher, Sailendra Meduri, "Damage in woven-fabric composite subjected to low-velocity impact", *Composites Science and Technology* 61 (2000) pp. 731-744
4. Ping Tan, Liyong Tong, G.P. Steven, "Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part I. Experimental investigation" *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing* 31 (2000) pp. 259-271
5. Ping Tan, Liyong Tong, G.P. Steven, "Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part II. FEA and analytical modeling approaches" *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing* 31 (2000) pp. 273-281
6. Antonio Miravete, Agustin Chiminelli, "Mechanical characterization of 3D weaving fabric/organic matrix composites and their application to energy absorption components", *Fifth World Congress on Computational Mechanics*, July 7-12 2002, Vienna, Austria
7. Aboudi, J., *Mechanics of Composite Materials – A Unified Micromechanical Approach*, Elsevier, New York, 1991.
8. Seung Jo Kim, Chang Sung Lee, Heon Shin, and Liyong Tong, "Virtual Experimental Characterization of 3D Orthogonal Woven Composite Material", *SDM Conference 2001*, USA
9. Chamis CC., "Simplified composite micromechanics equations for hygal, thermal, and mechanical properties," *SAMPE Quarterly* (1984) April pp. 14-23

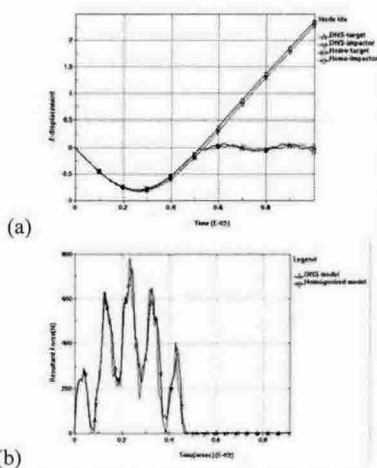


Fig.5 DNS 모델과 균질모델의 (a)변위 및 (b)충격이력

그러나 균질 모델은 그 모델의 구조적인 한계로 인하여 재료 내부의 미시적인 응력 상태등을 기술하기 어렵다. 반면 DNS 모델은 앞서 기술한 것과 같이 미시적인 구조를 충분히 고려한 모델이므로 재료 내부의 미시적인 수준에서 시작되는 크랙이나 층간분리등의 손상을 더욱 잘 기술할 수 있는 특징이 있다.

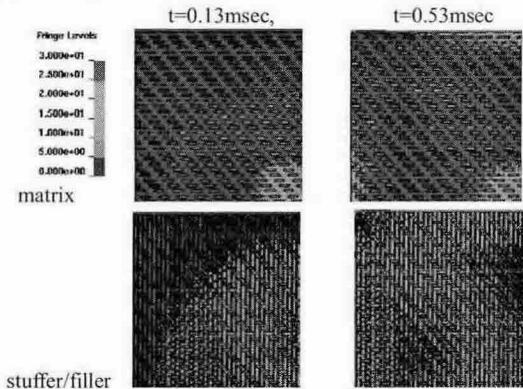


Fig.6 구성성분 및 시간대별 Von Mises 응력 분포

Fig.6 은 DNS 모델에 대하여 Von Mises 응력의 시간대별 전파양상을 보인 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 주어진 평판 모델에 대하여 기지와 안에서 받는 응력 양상은 서로 다르게 나타난다. 응력의 전파는 기지보다는 안에서 보다 빠르게 진행되며 이러한 차이로 인하여 기지와 안 사이에서의 물성치의 불연속면에서 크랙등의 손상에 취약해짐을 알 수 있다. 보다 정확한 손상특성을 예측하기 위하여 이러한 불연속면에서의 보다 세밀한 모델링이 요구된다.