

3D 직교 직물 복합재료의 충격 거동 및 특성에 관한 수치해석

지국현* · 김승조**

Low-Velocity Impact Characterizations of 3D Orthogonal Woven Composite Plate

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[9]. 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 will be carried out in terms of energy absorption capabilities.

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. 이는 적층 복합재료의 특성상 면내 하중은 매우 잘 견디는 반면 두께방향으로의 인장 강도가 상대적

으로 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. [1,5-6]

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] 또한 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 일반적으

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

로 널리 쓰이게 되었다. 이러한 3 차원 직교 직물 복합재료는 그림 1 에서 보여지는 것처럼 스토퍼 양(Stuffer Yarn), 필러 양(Filler Yarn), 워프 양(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.[4-7]

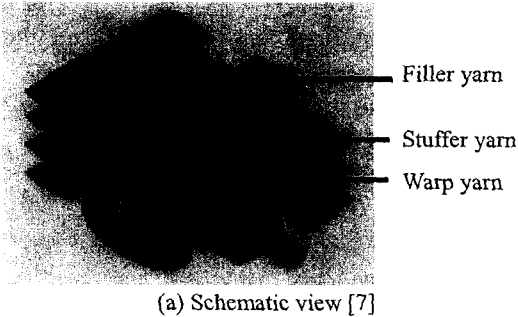


Figure 1. 3 차원 직교직물 복합재료

이러한 3 차원 직교 직물 복합재료는 3 차원 직조법에 따라 양(yarn) 사이의 거리, 양의 굵기, 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 양을 미소기계학적인 모델링을 통하여 직접 수치 모사기법(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) 접근방법

이 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[8]) 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.

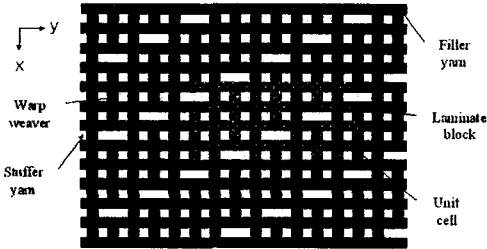
한편, DNS 는 섬유나 기지 등 복합재료의 구성성분 수준까지 직접 모델링하여 전체 구조물을 구성하고 해석하는 방법으로서 컴퓨팅 능력의 급격한 발전을 기반으로 하여 거시적인 방법 및 미소기계학적 방법이 갖는 한계를 극복할 수 있다.[9-10] 특히 복합재료의 충격 현상은 구조물의 국부적인 손상을 가져오는 대표적인 현상이며 이는 섬유와 기지수준에서 시작되므로 손상이 일어나는 타격지점에서의 미시적인 접근이 필수적이다. 이를 위하여 본 연구에서는 복합재료의 직접수치모사 기법을 제안하였으며 이는 향상된 컴퓨팅 파워를 바탕으로 대상 구조물의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

2.2 직교 직물 복합재료의 모델링

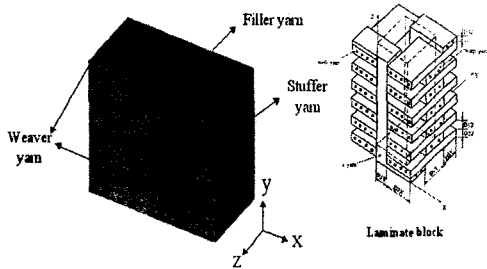
본 연구의 대상이 되는 3 차원 직교 직물 복합재료는 Torayca T-300(3K) 탄소 섬유와 Epicote 828 에폭시 레진을 그 구성성분으로 한다. 스토퍼 양과 필러 양 및 워프 양(z yarn)의 비율은 1:1.2:0.2 이고 전체의 섬유 체적비율은 0.43 이다. 그림 2 에 직교 직물 복합재료의 개념도를 도시하였다. 그림 2-(b) 에서는 해석에 사용된 복합재료의 단위구조물이 나타나 있으며 실제의 시편을 구현하기 위하여 이러한 단위 구조물을 x,y,z 방향으로 일정개수를 쌓아서 복합재료 평판을 구성하였다.

각각의 단위 구조물은 8 절점 6 면체 요소를 사

용하였으며 단위 구조물당 전체 절점 수는 13,200 개, 전체 요소 수는 11,520 개이다(그림 2-b). 이를 구성하고 있는 구성성분의 물성치 및 Chamis[11]에 의하여 제안된 미소기계학적 방정식을 사용하여 얻은 스토퍼 안과 필러 안, 워프 안의 탄성계수는 Reference 10 에 실린 값에 기초하였다.



(a) the orthogonal woven composite



(b) unit structure and Laminate block

Figure. 2 DNS 개념에 의한 직교 직물 복합재료의 개념도

본 연구에서의 각각의 안은 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.[10]

3. 수치 해석 결과

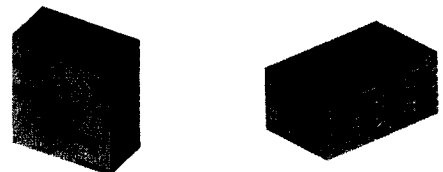
3.1 기하학적 효과를 고려한 유한요소 모델링

대개의 직물 복합재료는 기하학적인 비균일성을 갖고 있다. 여기에는 tow spacing, tow waviness, tow pinching 등이 있는데 본 연구에서는 yarn 들이 서로 일정간격으로 직교하는 경우(case 1), 안들의 간격이 다른 경우(case 2), 서로 굴곡을 갖는 경우(case 3) 이렇게 세가지 경우에 대하여 나타나는 충격 거동의 특성을 살펴보았다. 그림 3 에서 보여지는 것처럼 각각의 경우는 해당 단위구조물을 구성하여 x,y 방향으로 반복하여(7x6x1) 가상 시편을 얻을 수 있었다. 이들 시편의 총 자유도 수는

case 1,3 은 약 300 만, case 2 는 약 548 만이다.

3.2 충격 거동 해석

대개의 일반적인 일방향 섬유강화 복합재료는 횡방향 충격하중에 대하여 손상 저항성이 취약하다. 충격에 의한 강성 저하가 나타나는 유형중에 가장 많이 발생하는 것이 층간분리 현상인데 3 차원으로 직조되는 3D 직교직물 복합재료의 경우 앞서 기술한 바와 같이 두께 방향으로도 직조되기 때문에 횡방향 충격에 대하여 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 직교 직물복합재료에 대하여 직조되는 기하학적 패턴에 따라 나타나는 충격 거동을 비교 분석하여 그 특성을 알아보려고 한다.



(a) case 2: Tow Spacing (b) case 3: Waviness
Figure. 3 Geometric Effect 가 고려된 woven composite

3.2.1 충격 하중 이력

각각의 경우에 대한 충격하중 이력이 그림 4 에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 다른 경우들에 비하여 상대적으로 Waviness 가 고려된 경우(case 3)가 가장 접촉 지속시간이 가장 길었는데 이는 굴곡(waviness)을 가진 모델이 상대적으로 낮은 강성을 갖고 있기 때문으로 예측할 수 있다.

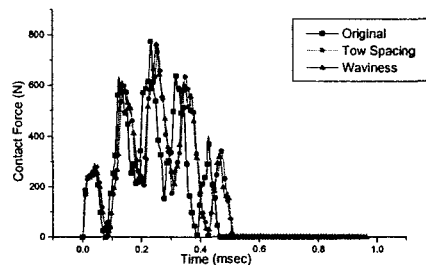


Figure. 4 Contact Force History

3.2.2 에너지 흡수

충격체에 의한 운동에너지가 접촉 및 충격이라는 현상을 통하여 구조물에 내부 변형 에너지 및 운동에너지로 전달이 되는데 이때 복합재료 구조물이 외부로부터 전달되는 에너지를 흡수하는 때 커니즘이나 효율적인 흡수 재료로서의 응용에 대

한 연구가 최근 활발히 연구되고 있다.

주로 소성 변형에 의하여 충격 에너지를 흡수하는 연성 금속재질에 비하여 복합재료는 주로 섬유 파단이나 기지 파손 및 층간 분리등의 복합된 기작에 의하여 에너지를 흡수하는데 이러한 파괴 모드에 따른 복합재료의 손상 과정을 이해하는데 많은 어려움을 던져주고 있다. 본 연구에서는 구조물에 전달되는 운동에너지와 변형에 따른 내부 에너지의 시간에 따른 분포를 그림 5,6에 보였다.

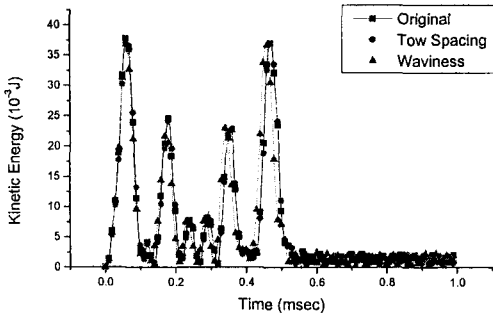


Figure 5. 시간에 따른 구조물의 운동에너지 변화

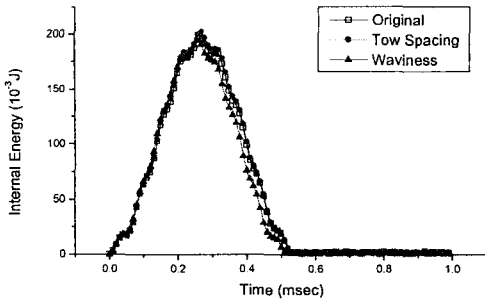


Figure 6. 시간에 따른 구조물 내부에너지의 변화

그림 5-6에서 볼 수 있는 바와 같이 세가지 경우에 대하여 대략 비슷한 경향을 보이나 굴곡이 있는 경우에 대해서는 대체로 다른 두가지 경우에 비하여 약간 낮은 값을 보인다.

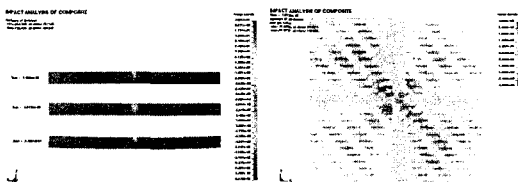


Figure 7 두께방향 σ_{33} 및 xy 평면상의 σ_{12} 의 분포

3.2.3 두께에 따른 응력의 분포

그림 7에서는 두께방향으로 z 방향 응력이 시간에 따라 전파되어져 가는 양상과 xy 평면상에서 면내 전단 응력 분포를 보여주고 있다. 응력이 전파되어 가면서 기존의 일방향 섬유강화 복합재료에서 보여주는 땅콩모양의 응력분포 양상이나 타격 반대편 지점에서 보이는 응력집중양상은 보이지 않음을 볼 수 있으며 기존의 거시적인 접근방법에 비하여 각각의 구성성분에 의한 효과를 명시적으로 보여주고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 3 차원 직교직물 복합재료를 미소기계학적 모델링을 구조물 전체에 적용시켜 향상된 컴퓨팅 파워를 바탕으로 기하학적 형상이 다른 복합재료 시편의 저속충격 거동의 특성을 살펴 보았다. DNS를 통하여 국부적인 응력 분포현상을 잘 모사할 수 있는 가능성을 확인하였으며 추후 3 차원 응력상태를 고려한 복합재료 구성성분의 파단을 고려한 새로운 파단 기준 및 파손 이론 정립을 기대할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업(00-N-NL-01-C-026.)에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

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
4. Levent Karaoglan, Ahmed K. Noor and Yong H.

Kim, "Frictional contact/impact response of textile composite structures", *Composite Structures* 37 (1997) pp.269-280

5. L.S. Sutherland, C. Guedes Soares, "Impact tests on woven-roving E-glass/polyester laminates", *Composites Science and Technology* 59 (1999) pp. 1553-1567

6. L.S. Sutherland, C. Guedes Soares, "Effects of laminate thickness and reinforcement type on the impact behavior of E-glass/polyester laminates", *Composites Science and Technology* 59 (1999) pp. 2243-2260

7. 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

8. Aboudi, J., *Mechanics of Composite Materials – A Unified Micromechanical Approach*, Elsevier, New York, 1991.

9. Seung Jo Kim, Jin Yeon Cho and Jeong Ho Kim, *Finite Element Modeling and Analysis of Composite Structures*, Proceeding of the First Korea-U.S. Workshop on Composite Material, 1998

10. Seung Jo Kim, Chang Sung Lee, Heon Shin, and Liyong Tong, "Virtual Experimental Characterization of 3D Orthogonal Woven Composite Material", SDM Conference 2001, USA

11. Chamis CC., "Simplified composite micromechanics equations for hygal, thermal, and mechanical properties," *SAMPE Quarterly* (1984) April pp. 14-23

12. Brian N. Cox, Gerry Flanagan, "Handbook of Analytical Methods for Textile Composites" NASA Contractor Report 4750.

13. Seung Jo Kim, Chang Sung Lee and Jeong Ho Kim, "Large-Scale Structural Analysis by parallel multifrontal solver through Internet Based PCs", *AIAA Journal*, vol. 40, No. 2 (2002) Feb. pp.359-367