

# 저속충격을 받는 적층복합재료 평판의 미시구조를 고려한 interlaminar stress 거동 연구

지국현\*·김승조\*\*

## Interlaminar stress behavior of laminated composite plates under Low velocity Impact

Kuk Hyun Ji\* and Seung Jo Kim\*\*

### Abstract

Prediction of damage caused by low-velocity impact in laminated composite plate is an important problem faced by designers using composites. Not only the inplane stresses but also the interlaminar normal and shear stresses play a role in estimating the damage caused. The work reported here is an effort in getting better predictions of damage in composite plate using DNS approach. In the DNS model, we discretize the composite plates through separate modeling of fiber and matrix for the local microscopic analysis. Through comparison with the homogenized model. In the view of microscopic mechanics with DNS model, interlaminar stress behaviors in the inside of composite materials is investigated and compared with the results of the homogenized model which has been used in the conventional approach of impact analysis.

**Key Words:** Direct Numerical Simulation(DNS), Low velocity impact, interlaminar stress

### 1. 서 론

복합재료는 성분이나 형태가 다른 두 종류 이상의 소재가 거시적으로 조합되어 유효한 기능을 갖는 재료로서 구성 소재들 사이에 거시적으로 경계면을 갖는 것을 그 특징으로 한다. 대개 복합재료는 무게비 강도 및 강성도가 우수하여 전투기 등의 항공우주 산업, 자동차 산업 등에 많이 쓰인다.

그런데, 대개 적층 복합재료의 경우 횡 방향 충격 하중에 대해 취약한 특성을 보인다. 특히 저속 충격에 의해 발생하는 손상은 주로 복합재료 내부에서 층간 분리(delamination), 기지 크랙(Matrix crack), 섬유 절단등의 형태로 나타나는

데, 충격체 질량이나 충격 속도뿐만 아니라 복합재의 섬유방향이나 두께등의 변수 의해 그 양상이 복잡하게 나타나며 이는 육안으로 쉽게 관찰되지 않아도 구조물의 강도와 강성을 크게 저하시킴이 알려져 있다.[1-2]

특히 저속충격에 의하여 적층 복합재료 평판에서 생기는 손상중 층간분리는 강성이나 강도를 저하시키고, 진동수나 감쇠계수를 변화시키는 등 [3-4] 구조물 특성의 저하를 가져온다. 층간분리는 항상 섬유 배향이 다른 층 사이에서 생기고 [5], 경계 아래층의 섬유 배향방향으로 생성, 진전되며[6], 그 모양은 섬유 배향 방향을 주축으로 하는 땅콩모양[7]이라는 사실등이 알려져 있다. Chang[8]은 전단 균열에 의한 층간분리가 경계 윗면에서 횡방향 층간 전단응력( $\sigma_{23}$ )과 경계 아랫면에서의 종방향 층간 전단응력( $\sigma_{13}$ )이 층간분리 현상을 지배하며 굽힘 균열에 의한 층간 분리는 경계 아랫면에서의 종방향 층간 전단응력( $\sigma_{23}$ )과 면내 응력이 층간분리의 성장을 촉진한다는 실험

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 기계항공공학부, 교수  
비행체 특화연구센터, 소장

적인 관찰을 기반으로 판정식을 제안한 바 있다.

또한 이러한 복합재료의 저속충격에 의한 손상은 패턴은 상대적으로 충격을 받은 국부 부위에 집중되는 경향이 있다. 그러나 기존의 복합재료 충격해석의 수치모사 기법은 균질화된 물성치를 바탕으로 거시 기계학적 방법을 바탕으로 하기 때문에 충격에 의한 국부적인 손상을 다루기에는 한계가 있다. 또한 이때 발생하는 손상은 미시적인 구성성분의 파괴에서 비롯하기 때문에 이러한 손상을 정확히 예측 및 기술하기 위해서는 충격 부위의 미시적인 구성성분의 손상 패턴을 고려해야 하며 이러한 균질화 모델로부터 얻을 수 있는 충간응력은 필연적으로 한계를 가지게 된다.

따라서 본 연구에서는 충격 부위는 복합재료의 구성성분 수준에서 섬유와 기지를 개별적으로 모델링하는 직접 수치 모사 기법(Direct Numerical Simulation)으로 유한요소 모델을 구현하고 이로부터 구조물 내의 충간응력을 기존의 전통적인 균질화 모델을 이용한 결과와 비교하여 복합재료의 충격 거동을 살펴보기로 한다.

## 2. 복합재료의 DNS 모델링

### 2.1 복합재료의 DNS 모델링 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 상호작용에 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[9])등이 있다. 단위 셀 방법은 대상 구조물의 전체를 직접적으로 표

현하는 것이 아니라 셀이라 부르는 대표 체적 요소를 이용하여 해석하는 방법이다. 그러나 이것은 또다른 균질화의 방법일 뿐이며 복잡한 기하학적 형상을 표현할 수 없고 경계조건을 적용하는데도 많은 어려움을 가진다.

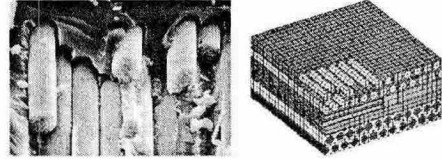


그림 1. 섬유-기지 적층 복합재료의 DNS 모델

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.[] 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(Direct Numerical Simulation; DNS) 기법을 제안하였으며[10] 이는 향상된 컴퓨팅 파워를 바탕으로 대상 구조물의 미시적인 형상을 모사하여 복합재료의 충격 거동을 해석하였다.

### 2.2 DNS 모델에서의 충간응력

복합재료 적층 구조물은 면내방향의 강성에 비하여 수직방향 강성이 상대적으로 작다. 이는 면내 섬유 방향에 비하여 적층면의 횡방향 강도가 상대적으로 매우 작기 때문이다. 따라서 횡방향 전단응력과 수직응력의 정확한 예측은 복합재료 적층구조물의 강도 평가에 매우 중요하다. 특히 저속충격과 같은 동적인 문제에서는 충간분리는 야기시키는 횡전단응력과 횡수직응력이 매우 중요한 응력성분임이 알려져 있다.

이러한 복합재료에 있어 충간응력은 근본적으로 각 층의 탄성계수의 차이에 의해 발생한다. 충간응력은 본질적으로 단힌 형태의 해석적인 해가 쉽지 않은 3차원 문제로서 충간응력을 예측하기 위하여 지금까지 유한요소법과 같은 수치기법에 의존하여 왔다. 지금까지 충간응력은 구성방정식을 통하거나 3차원 응력평형 방정식의 두께 방향으로의 적분을 통해 계산되어왔는데 이는 고

차 다항식 전개 또는 고차 미분값이 요구되므로 중간응력의 산출에 어려움이 많다.

본 연구는 3차원 고체요소를 이용하여 섬유와 기지를 개별적으로 모델링하는 DNS 모델을 구성하고 외부로부터의 저속충격시 복합재료 내부에 발생하는 중간응력을 계산하고 이를 균질화된 모델의 응력 값과 비교하여 중간응력의 양상을 미시적인 관점에서 살펴보고자 한다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 문제 기술 및 모델링

본 연구에서 다루고 있는 복합재료는 보론/알루미늄 금속기지 적층 복합재료로서 6층  $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ 의 적층 형태를 가진다. 경계조건은 4변의 중립면만 고정시켰으며 모델의 크기는  $2.4\text{mm} \times 2.4\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ 이다. 유한요소 모델링을 위하여 단위 셀을 섬유 방향을 고려하여 반복적으로 쌓아서 DNS 모델을 구성하였다. 이들의 섬유, 기지는 각각 등방성 물성치를 갖도록 하였으며 균질화된 모델은 참고문헌 [10]으로부터 DNS 모델의 정적 해석 결과를 이용하여 실험 결과와 잘 일치함을 검증한 바 있다. 이들의 비교를 위한 구체적인 물성치는 표 1.에 나타내었다. 이렇게 구현된 DNS 모델은 82,944개의 8절점 육면체 요소, 263,865개의 자유도를 가진다.[그림2] 충격체로서는 반지름 3.5mm의 강체구를 모델링하였으며 질량 2.3kg, 초기속도 10m/s로 평판의 중심에 충격을 가하게 된다.

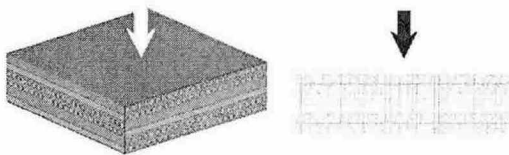


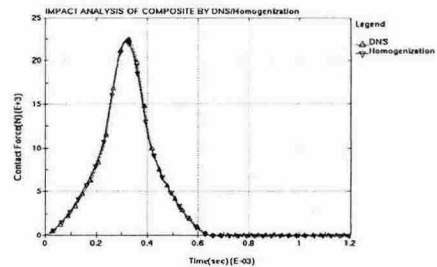
그림 2. DNS 유한요소 모델 및 단면도

Elastic constants	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Fiber (Boron)	379.3	379.3	172.41	172.41	0.1	0.1	2.5
Matrix (Aluminum)	68.3	68.3	26.27	26.27	0.3	0.3	2.7
Homogenized model	215	134	54.0	51.7	0.20	0.32	2.636

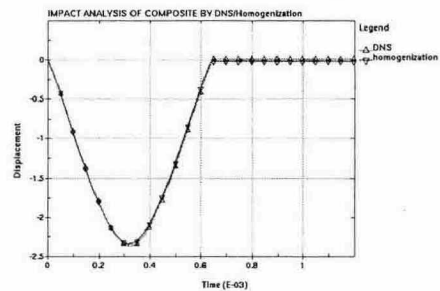
표 1. Material property for the model [10]

#### 3.2 해석 결과

그림 3은 앞서 기술한 충격 하중조건을 DNS 모델과 균질 모델에 동일하게 추가하여 각각의 모델에서 나타나는 충격하중(contact force) 및 그에 의한 z 방향의 횡방향 변위 이력을 나타낸 것이다. 이로써 그림에서 볼 수 있듯이 DNS 모델과 이를 바탕으로 균질화된 물성치를 가지는 균질화 모델은 같은 전체적인 거동(global behavior) 양상을 보임을 알 수 있다.



(a) contact force history



(b) displacement at the impacted node

그림 3. DNS 모델과 균질 모델의 충격거동이력

그러나 그림 4-5에서 볼 수 있듯이 각각의 물성치를 고려한 DNS 모델과 이를 균질화한 모델 내부에서 나타나는 로컬 응력 양상은 매우 다르다. 그림 4,5는 각각 최대 충격력을 보이는 0.35msec에서의 두께방향 면내응력 및 중간응력을 도시한 것이다. DNS 모델은 각각의 구성성분의 물성치를 반영하였기 때문에 기지와 섬유사이의 응력 경계가 비교적 뚜렷하게 보인다. 특히 굽힘에 의해 면내 x,z방향 변위가 커지는 하층으로 갈수록 균질 모델에 비하여 나타나는 응력의 차이가 확연히 나타난다. 특히 그림 5에서 보이는 중간응력의 두께에 따른 구배 양상으로부터 저속충격에 의한 층간분리현상을 설명할 수 있는 단서를 얻을 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 저속충격시 발생하는 대표적인 손상 패턴인 층간분리를 보다 자세하게 기술하기 위하여 DNS 모델을 제시하였다. DNS 모델로부터 얻은 층간응력 양상으로부터 기존의 균질 모델에서는 얻을 수 없는 두께방향 응력 분포를 얻을 수 있으며 이로부터 층간분리의 메커니즘을 얻을 수 있는 단서를 확보하였다. 추후 다양한 연구를 통하여 적층 복합재료에서 나타나는 손상패턴을 DNS 모델로부터 얻고자 한다.

#### 참고문헌

- (1) S.Abrate, "Impact on Laminated Composite Materials" Applied Mechanics Reviews, Vol.44, No.4, 1991, pp.155-190
- (2) W.J.Cantwell, and J.Morton, The impact resistance of composite materials-a review, Composites, 22(5), 1991: 347-362
- (3) D.Liu, C.T.Sun, and L.E.Malvern, "Structural Degradation of Impacted Graphite/Epoxy Laminates", the 56th Shock & Vibration Bulletin, 1986, pp.51-60
- (4) R.C.Madan, "Influence of Low-Velocity Impact on Composite Structures", Composite Materials: Fatigue and Fracture (Third Volume), ASTM STP 1110, 1991, pp.457-475
- (5) N.Cristescu, L.E.Malvern and R.L.Sierakowski, "Failure Mechanics in Composite Plates Impacted by Blunt-Ended Penetrator", ASTM STP 568, 1975, pp.159-172
- (6) Clark, G. "Modeling of Impact Damage in Composite Laminates" Composites, Vol.20, 1989, pp.209-214
- (7) D.Liu, "Impact-Induced Delamination - A view of Bending Stiffness Mismatching", Journal of Composite Materials, Vol.22, July 1988, pp.674-692
- (8) Chang, F.K., Choi, H.Y. and Jeng, S.T. (1990), Study on impact damage in laminated composites, *Mechanics of Materials*, 10:83-95
- (9) Aboudi, J. (1991), *Mechanics of Composite Materials: A Unified Micro-Mechanical Approach*, Elsevier, New York.
- (10) Kim, S.J., Lee, C.S., Yeo, H.J., Kim, J.H. and Cho, J.Y. (2002), Direct Numerical Simulation of Composite Structures, *Journal of Composite Materials*, 36(24), 2765-2785

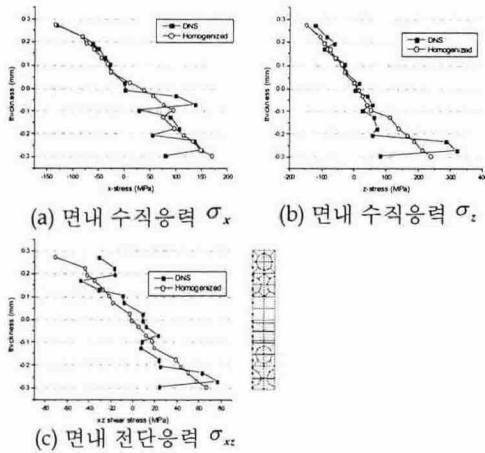


그림 6. DNS 및 균질 모델의 면내응력 두께방향 변화

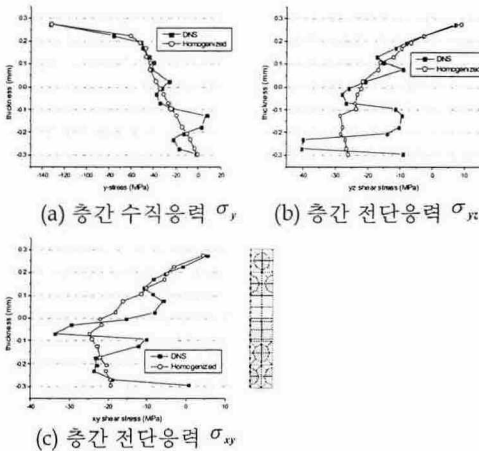


그림 7. DNS 및 균질 모델의 층간응력 두께방향 변화

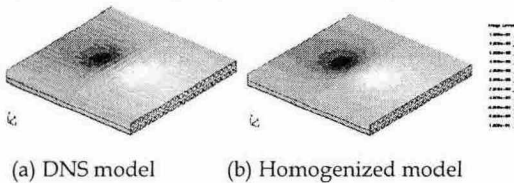


그림 8. 하층 0/90 경계층 내의 층간 전단응력  $\sigma_{yz}$  의 면내 contour

그림 8은 제시된 모델의 하층 0/90 경계층 내의 층간 전단응력  $\sigma_{yz}$  의 면내 분포를 보인 것이다.  $\sigma_{yz}$ 은 섬유 배향이 다른 경계층 내의 기지에서 나타나며 저속충격시 나타나는 땅콩 모양의 층간 분리 양상의 주요한 원인으로 알려져 있다. DNS 모델 및 균질 모델 모두 비슷한 모양을 보여주고 있으나 DNS 모델의 경우 섬유 배향에 일치하는 보다 뚜렷한 땅콩 모양을 나타내고 있다.