

論文

저속충격을 받는 적층복합재료 평판의 직접 수치모사

지국현*, 김승조**

**Direct Numerical Simulation of Composite laminates
Under low velocity Impact**

Kuk Hyun Ji*, 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. But it is well known that the conventional approach based on the homogenization has the limit in description of damage. The work reported here is an effort in getting better predictions of dynamic behavior and 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. In the view of microscopic mechanics with DNS model, interlaminar stress behaviors in the inside of composite materials are investigated and compared with the results of the homogenized model which has been used in the conventional approach to impact analysis. Also the multiscale model based on DNS concept is developed in order to enhance the effectiveness of impact analysis, and we present the results of multiscale analysis considering micro and macro structures simultaneously.

초 록

적층 복합재료에 가해지는 저속충격에 의한 동적 거동 및 손상의 예측은 복합재 구조물의 설계에 중요한 문제가 되고 있다. 특히 저속충격에 의한 손상을 기술하기 위하여 적층판 내의 면내응력 뿐만 아니라 층간응력이 중요한 역할을 하는데, 기존의 전통적인 접근 방법은 이들을 효과적으로 기술하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 동적 거동 및 손상을 기술하기 위한 수치해석 모델로서 내부 미구조를 고려한 직접수치모사(DNS)방법을 이용하여 DNS 모델을 구성하였다. 그리고 이를 저속충격 문제에 적용하여 저속충격에 의한 동적 거동 및 재료내의 층간응력 해석을 미시적으로 접근하였다. 이때 기존의 거시적인 접근 방법에 따른 균질모델의 결과와 비교 해석을 보였다. 한편 복합재료 적층판의 효율적인 저속충격해석을 위하여 DNS 개념을 적용한 멀티스케일 모델을 개발하여 기존의 균질화된 모델에서 보일 수 없었던 충격 부위의 국부적인 동적 거동을 효과적으로 기술하였다.

Key Words : 적층복합재료(Laminates), 직접수치모사(Direct Numerical Simulation), 층간분리(Delamination), 멀티스케일 모델(Multiscale Model)

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

**+ 서울대학교 기계항공공학부, 비행체특화센터, 교신저자(E-mail:sjkim@snu.ac.kr)

1. 서론

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 나타나는데, 충격계 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 손상 중 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, 전진되며[6], 그 모양은 섬유 배향 방향을 주축으로 하는 땅콩모양[7]이라는 사실 등이 알려져 있다. Chang[8]은 전단 균열에 의한 층간분리가 경계 뒷면에서 횡방향 층간 전단응력(σ_{23})과 경계 아랫면에서의 종방향 층간 전단응력(σ_{13})이 층간분리 현상을 지배하며 굽힘 균열에 의한 층간 분리는 경계 아랫면에서의 종방향 층간 전단응력(σ_{23})과 면내 응력이 층간 분리의 성장을 촉진한다는 실험적인 관찰을 기반으로 판정식을 제안한 바 있다.

이러한 복합재료의 저속충격에 의한 손상은 상대적으로 충격을 받은 국부 부위에 집중되는 경향이 있다. 그러나 기존의 고전 적층이론에 기반하는 복합재료 충격해석의 수치모사 기법은 균질화된 물성치를 바탕으로 거시 기계학적 방법을 바탕으로 하기 때문에 충격에 의한 국부적인 손상을 다루기에는 한계가 있다. 그리고 이때 발생하는 손상은 미시적인 구성성분의 파괴에서 비롯하기 때문에 이러한 손상을 정확히 예측 및 기술하기 위해서는 충격 부위의 미시적인 구성성분의 손상 기작을 고려해야 하므로 균질화 모델로부터 얻을 수 있는 결과는 필연적으로 한계를 가질 수밖에 없다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 복합재료의 내부 미시 구조를 고려한 직접수치모사(Direct Numerical Simulation, DNS) 모델을 이용하여 저속충격현상을 모사하고자 한다.

2. 복합재료의 DNS 모델링

2.1 복합재료의 DNS 모델링 기법

일반적으로 복합재료 구조해석 및 거동을 예측하는 방법으로서 크게 거시적(Macroscopic) 접근 방법과 미시적(Microscopic) 접근 방법이 있다. 거시적 방법은 복합재료를 균질화된 이등방성 물성을 갖고 있다고 간주하고 이에 직접적으로 이등방성 물질에 대한 구성방정식을 적용하게 된다. 단층의 기계학적 물성은 단층 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 거시적 접근방법은 그 한계를 가질 수밖에 없다.

반면, 미시적 방법은 복합재료의 구성성분인 섬유와 기지를 직접 다루며 복합재료를 이들의 혼합체로 간주하는 방법이며 단위 셀 방법(Unit Cell Approach)등이 있다[9-10]. 단위 셀 방법은 대상 구조물의 전체를 직접적으로 표현하는 것이 아니라 셀(Cell)이라 부르는 대표 체적 요소를 이용하여 해석하는 방법이다. 그러나 이것은 또 다른 균질화의 방법일 뿐이며 전체 구조물의 복잡한 기하학적 형상을 표현할 수 없고, 임의의 구조물에 가해지는 일반적인 하중 및 변위 경계조건을 적용하는데도 많은 어려움을 가진다.

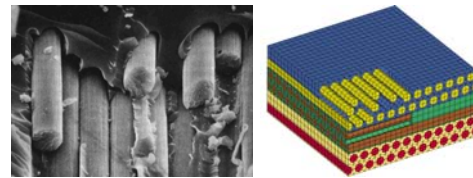


Fig. 1 섬유-기지를 고려한 적층복합재료 DNS 모델.

본 논문에서 사용된 DNS는 섬유 및 기지 등 복합재료를 구성하고 있는 성분 수준까지 그대로 직접 모델링하고 이를 이용하여 구조물 전체를 구성하여 해석하는 방법으로서 최근 급격한 발전을 보이는 컴퓨팅 능력을 최대한 이용하여 기존의 거시적인 방법 및 미소기계학적 방법이 갖는 한계를 극복할 수 있는 방법이다.[11] 특히 복합재료의 충격 현상은 구조물의 국부적인 손상을 가져오는 대표적인 현상이며 이는 섬유와 기지수준에서 시작되므로 손상이 일어나는 타격 지점에서의 미시적인 접근이 필수적이다. 이를 위하여 본 연구에서는 적층 복합재료에 대하여 참고문헌[11]에서 제안된 DNS 기법을 적용하였고, 이를 이용하여 대상 구조물의 미시적인 형상을 모사하여 복합재료의 충격 거동을 해석하였다.

2.2 DNS 모델에서의 층간응력

복합재료 적층 구조물은 면내방향의 강성에 비하여 수직 방향 강성이 상대적으로 작기 때문에 층간 손상에 취약한 특성이 있다. 그러나 복합재료 적층구조물이 횡방향 변형을 받는 경우에는 횡전단응력과 횡수직응력의 정확한 예측이 필수적이다. 그러나 일반적으로 복합재료 적층구조물의 특성상 서로 상이한 물성치를 갖는 계면에서 횡전단, 횡수직 응력이 연속으로 변해야 하는 층간응력 연속조건이 만족되어야 하고, 횡전단응력과 횡수직응력은 면내 응력에 비하여 크기가 매우 작아서 횡방향응력을 정확히 예측하는 것은 쉽지 않다. 특히 저속충격과 같은 동적인 문제에서는 층간 분리를 야기시키는 횡전단응력과 횡수직응력이 매우 중요한 응력성분임이 알려져 있다.

이러한 복합재료에 있어 층간응력은 근본적으로 각 층의 탄성계수의 차이에 의해 발생한다. 층간응력은 본질적으로 단힌 형태의 해석적인 해가 쉽지 않은 3차원 문제로서 층간응력을 예측하기 위하여 지금까지 유한요소법과 같은 수치기법에 의존하여 왔다. 이러한 층간응력을 구하기 위하여 구성방정식을 통하거나 3차원 응력 평형방정식을 두께방향으로 적분하여 계산되어왔다.

구성방정식으로부터 층간응력을 얻는 방법으로서 Pagano와 Hatfield[12]는 적층 이방성 복합재료에 대하여 층간 전단응력에 대해 단힌 형태의 탄성해를 제시하였다. 이후 Lajczok등이 유한차분법을 이용한 결과를 발표하였다[13]. Tolson등은 손상진전을 예측하기 위한 층간응력 계산에 2D 유한요소를 이용하였고[14], Lo 등은 횡방향 응력성분을 구하기 위하여 고차 전단변형 이론을 사용하였는데[15] 이렇게 변위장에 기초한 고차이론을 사용하는 경우는 두께 방향으로 고차의 다항식 전개가 필요하다.

한편, 평형방정식을 두께방향으로 적분하여 층간응력을 산출할 때는 주변수의 고차미분이 요구된다. 예를 들어 등매개 유한요소로 구현하는 경우 형상함수로서 선형 또는 2차함수를 사용시 횡전단응력을 위해서는 2차 미분치, 횡수직응력을 위해서는 3차 미분치가 요구된다. 이렇게 고차 미분값을 계산하기 위해서는 1개의 요소 안에서 필요로 하는 모든 고차 미분값을 도출할 수 없으므로 이를 위해서는 인접하는 요소의 절점 또는 가우스 적분점에서의 정보를 이용해야 하는 번거로움이 있다. 그리고 Lo등은 평형방정식을 적분하여 얻은 횡방향 응력성분들이 구성방정식으로부터 얻은 결과보다 더 정확함을 밝히기도 하였으며[15], Reddy등도 3차원 탄성이론에 기반한 평형 방정식으로부터 구한 횡방향 전단응력이 더 정확함을 밝혔다[16].

DNS 모델은 3차원 고체요소를 이용함으로써 두께방향의 변위장을 위한 고차다항식이나 층간응력을 위한 추가적인 고차미분이 필요치 않는다. 따라서 보다 간편하게 모델링이 가능하며 섬유와 기지를 개별적으로 모델링함으로써 재료 내의 미시구조를 고려한 저속충격모사를 가능하게 하

였다. 이때 필요한 해석 소프트웨어는 상용 비선형 동적해석 코드인 LS-DYNA를 사용하였으며 충격해석시 발생하는 접촉력, 변형 등의 거시적인 거동뿐만 아니라 복합재료 내부에 발생하는 면내응력 및 층간응력을 계산하고 이를 균질화된 모델의 응력값과 비교하여 층간응력의 양상을 미시적인 관점에서 살펴보고자 한다.

3. DNS 모델을 이용한 저속충격해석

3.1 문제 기술 및 모델링

여기에서 다루고 있는 복합재료는 보론/알루미늄 금속기지 적층 복합재료로서 6층[90°/0°/90°]의 적층 형태를 가진다. 경계조건은 4변의 중립면만 고정시켰으며 모델의 크기는 2.4×2.4×0.6(mm)이다. 유한요소 모델링을 위하여 단위셀을 섬유 방향을 고려하여 반복적으로 구성하여 DNS 모델을 구성하였다. 이들의 섬유, 기지는 각각 등방성 물성치를 가지며 섬유체적비는 0.47이다. 한편 균질화된 모델의 물성치는 참고문헌[11]으로부터 DNS 모델을 이용하여 얻은 것인 것인 실험으로부터 얻어진 실제 물성치[18]와 잘 일치됨이 검증된 바 있다. 이들의 비교를 위한 구체적인 물성치는 Table 1에 나타내었다. 이렇게 구현된 DNS 모델은 82,944개의 8절점 육면체 요소, 263,865개의 자유도를 가진다.(Fig. 2) 충격체로서는 검증에 필요한 접촉면적을 넓게 하기 위하여 반지름 3.5mm의 강체구로 모델링하였고 질량 2.3kg, 초기속도 10m/s로 평판의 중심에 충격을 가하게 된다.

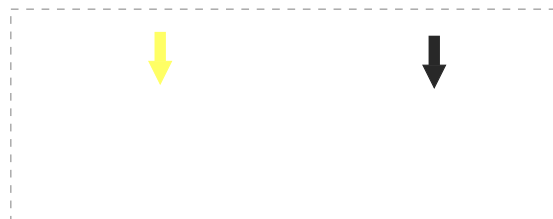


Fig. 2 DNS 유한요소 모델 및 xy 단면.

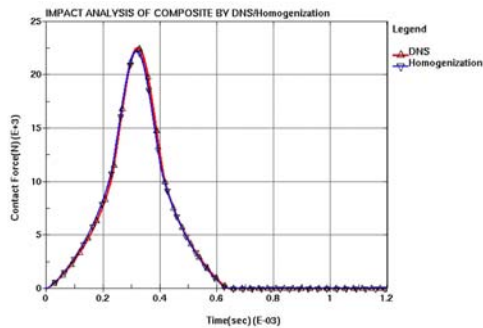
Table 1 해석 모델의 재료 물성치 [10]

| Elastic constants | E ₁ (GPa) | E ₂ (GPa) | G ₁₂ (GPa) | G ₂₃ (GPa) | ν ₁₂ | ν ₂₁ | Density (g/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 |
| Homogenize dmodel(DNS) [11] | 215 | 134 | 54.0 | 51.7 | 0.20 | 0.32 | 2.636 |
| Exp[18] | 216 | 140 | 52 | - | 0.29 | - | - |

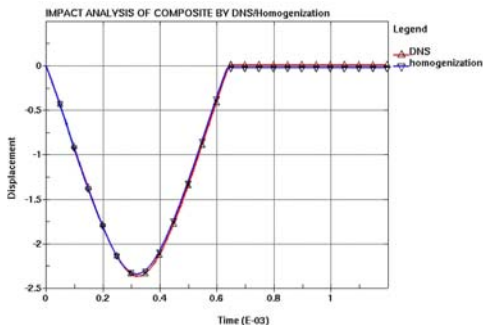
3.2 DNS 해석결과

3.2.1 거시 거동 해석

Fig. 3은 앞서 기술한 충격 하중조건을 DNS 모델과 균질 모델에 동일하게 부가하여 각각의 모델에서 나타나는 충격하중(contact force) 및 그에 의한 횡방향 변위 처짐 이력을 나타낸 것이다. 두 모델의 결과 비교로부터 충격력이나 처짐량 등을 고려해볼 때, DNS 모델과 균질화 모델 모두 동일한 거시적인 거동(global behavior) 양상을 보임을 알 수 있다.



(a) 접촉력의 시간이력(N)



(b) 접촉점의 처짐의 시간이력(x10-1mm)

Fig. 3 DNS 모델과 균질 모델의 충격 거동 이력.

3.2.2 미시 거동 해석

Fig. 4, 5는 각각 최대 충격력을 보이는 0.35msec에서의 두께방향 면내응력(Fig. 4) 및 층간응력(Fig. 5)에 대하여 DNS모델과 균질 모델을 함께 비교하여 도시한 것이다. DNS 모델은 각각의 구성성분의 물성치를 반영하였기 때문에 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 기지와 섬유사이의 응력 경계가 균질 모델에 비하여 비교적 뚜렷하게 보인다. 특히 굽힘에 의해 면내방향 변위가 커지는 하층으로 갈수록 균질 모델에 비하여 나타나는 응력의 차이가 확연히 나타난다. 특히 Fig. 5에서 보이는 층간응력의 경우, 층간 수직응력보다는 층

간 전단응력에서 기지와 섬유사이에서 보이는 응력구배가 더욱 심하게 나타난다. 이것은 균질모델에서는 얻기 어려운 결과이며, 재료 적층부위에서 생기는 층간 분리 등의 손상은 대개 미시균열에서부터 시작되므로 이러한 응력 구배를 충분히 기술할 수 있는 방법이 반드시 필요하다.

또한 Fig. 6은 제시된 모델의 하층의 0°/90° 경계층 내의 층간 전단응력 σ_{yz} 의 면내 분포를 보인 것이다. σ_{yz} 은 섬유 배향이 다른 경계층 내의 기지에서 나타나며 저속충격시 나타나는 땅콩 모양의 층간 분리 양상의 주요한 원인으로 알려져 있다[8]. DNS 모델 및 균질 모델 모두 비슷한 모양을 보여주고 있으나, DNS 모델의 경우 섬유 배향에 일치하는 보다 뚜렷한 땅콩 모양을 나타내고 있다.

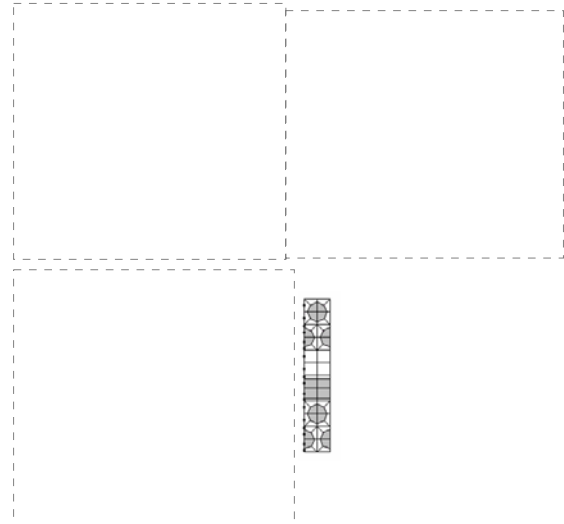
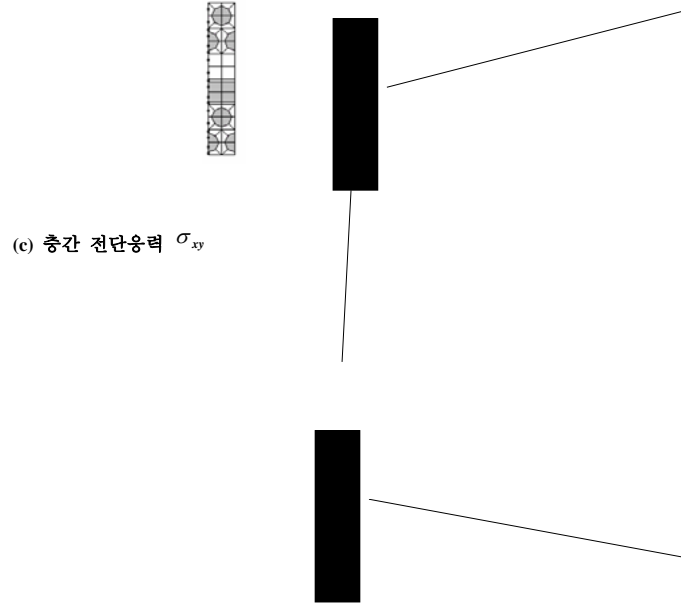


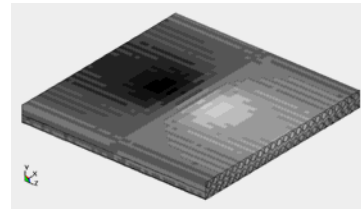
Fig. 4 DNS 및 균질 모델의 면내응력 두께방향 변화.



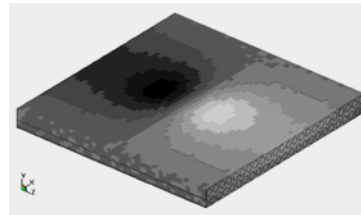
(a) 층간 수직응력 σ_y (b) 층간 전단응력 σ_{yz}

Fig. 5 DNS 및 균질 모델의 층간응력 두께방향 변화.

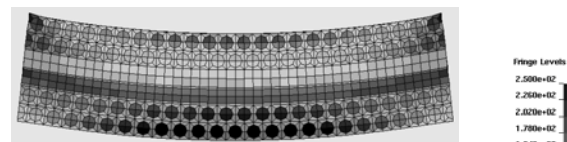
Fig. 7은 최대 변형이 일어나는 순간($t=350 \mu \text{sec}$) 평판의 단면에서의 횡방향 Von Mises 응력변화 양상에 대하여 DNS 모델과 균질 모델을 비교하여 나타낸 것이다. 두 경우 평판의 횡방향 단면에서의 거시적인 응력분포는 유사하게 나타난다. 그러나 미시적으로 살펴보면 각각의 구성성분을 고려한 DNS 모델의 경우에서 섬유에 집중되는 응력양상이 뚜렷이 보인다. 또한 균질 모델에 비하여 섬유와 섬유사이 또는 섬유의 배향이 바뀌는 층간사이에서 나타나는 Von Mises 응력의 분포를 더욱 명확히 보여주고 있다.



(a) DNS 모델



(b) 균질 모델

Fig. 6 하층 0/90 경계층 내의 층간 전단응력 σ_{yz} 의 면내 분포.

(a) DNS 모델



(b) 균질 모델

Fringe Levels
 2.500e+02
 2.260e+02
 2.020e+02
 1.780e+02
 1.540e+02
 1.300e+02
 1.060e+02
 8.20e+01
 5.80e+01
 3.40e+01
 1.00e+01

0.3

Fig. 7 평판 단면에서의 시간에 따른 횡방향 Von Mises 응력 변화 양상 ($t=350 \mu \text{sec}$, MPa).

4. DNS를 이용한 멀티스케일 해석

4.1 DNS를 이용한 멀티스케일 모델

4.1.1 멀티스케일 모델 및 검증

보다 효율적인 충격해석을 위하여 충격을 받는 국부지역은 미소기계학적인 직접수치모사기법(DNS)에 의한 모델로 구현하고 충격을 받는 국부를 둘러싸고 있는 부분은 등가의 균질화된 물성치를 사용하는 거시적인 모델로써 2단계의 멀티스케일 유한요소 해석모델을 구현하였다. 이 두 모델 사이의 경계면에서 이루어지는 변위 및 응력의 전달을 위하여 본 연구에서는 LS-DYNA의 해석 모듈인 Tied-interface 구속조건을 이용하였다. Tied-interface 구속조건은 다음과 같은 식에 의하여 경계면 사이에서 힘과 가속도등을 전달하게 된다[17].

$$\Delta f_m^i = \phi_i(\xi_{cs}, n_c) f_s \quad (1)$$

이때 ξ_{cs}, n_c 는 거시모델과 미시모델사이의 접합면에서 발생하는 접촉점 좌표이다, 식 (1)로부터 미시모델의 접합면에서 계산된 외력(f_s)이 적절한 보간함수(ϕ_i)에 의하여 보간되어 거시모델의 접합면에 전달된다. 이때 하나의 거시모델의 요소는 다수의 미시모델의 요소를 접하게 되므로 Δf_m 은 해당 미시모델의 기여도만큼 거시모델에 전달된다. 미시모델로부터 전달된 힘은 거시모델에서 가속도가 계산되며, 식 (2)에 의하여 미시모델에서의 가속도(a_{i_s})가 보간되어 얻어진다. 이러한 과정으로 거시/미시모델은 힘과 가속도를 주고받는다.

$$a_{i_m} = \sum_{s=1}^4 \phi_s(\xi_{cs}, n_c) a_{i_s} \quad (2)$$

이러한 과정을 통하여 얻어진 가속도를 바탕으로 속도 및 변위를 얻을 수 있다. 이리하여 미시모델과 거시모델사이에서의 힘, 가속도, 변위의 전달과정을 거치게 된다. 이러한 Tied-interface 구속조건을 이용한 모델의 효용성 및 검증을 위하여 다음과 같이 간단한 보의 축방향 충돌문제를 통하여 경계면 사이에서 응력의 전달 양상을 살펴보았다. 본 연구에서 고려한 보의 충돌문제는 다음의 3가지이다.

- (a) Tied-interface가 없는 등방성 재료 모델
- (b) Tied-interface가 있는 등방성 재료 모델
- (c) Tied-interface가 있는 직교이방성 재료 모델



Fig. 8 멀티스케일 모델의 검증 예제.

Fig. 8에서와 같이 등방성 재료 모델인 (a)와 (b)의 경우에 대하여 길이방향으로 가상의 강체 벽에 충돌을 모사하였다. 이때 발생하는 축방향 응력 이력을 Fig. 9(a)에 비교를 보였다. 두 경우 시간에 따른 이력이 잘 일치함을 보여 줌으로써 Tied-Interface 구속조건이 효과적으로 응력을 잘 전달함을 보일 수 있었다. 또한 모델 (c)의 직교이방성 모델의 경우 균질화된 모델의 경계면과 DNS 모델의 경계면에서 나타나는 시간에 따른 응력의 시간 이력을 비교하여 본 결과, 물성의 차이로 인하여 나타나는 응력의 절대값의 차이를 보이나 시간이력의 위상은 그대로 전달되는 것을 확인할 수 있다.[Fig. 9(b)] 따라서 이들 결과를 바탕으로 멀티스케일 모델을 구현하여 복합재료 평판의 저속충격 해석에 도입하였다.

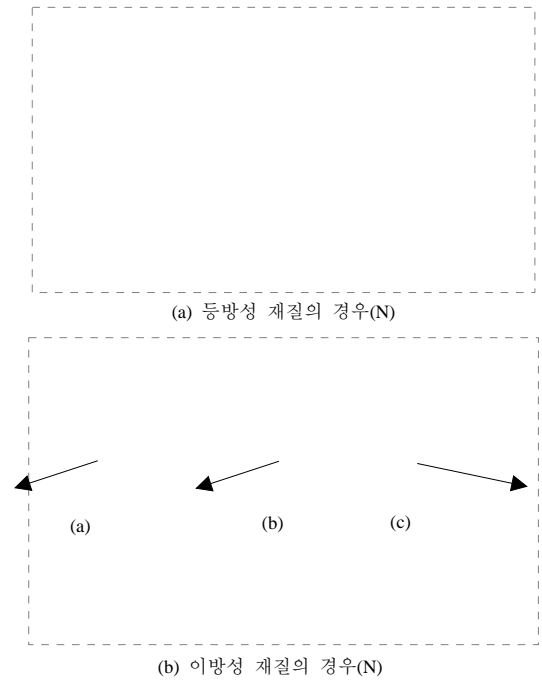
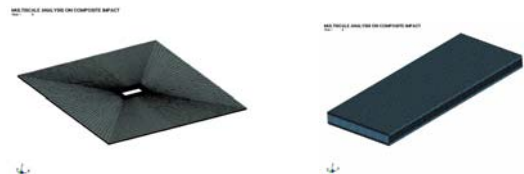


Fig. 9 Tied-interface 경계면에서의 축방향 응력의 시간 이력.



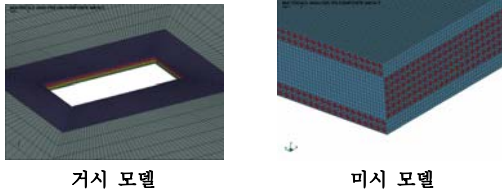


Fig. 10 멀티스케일 모델의 구현.

4.1.2 문제 기술 및 유한요소 모델링

본 연구에서 다루고 있는 복합재료는 보론/5505 에폭시 섬유강화 적층 복합재료로서 10층[0°/90°/0°]의 적층 형태를 가지며 크기는 200×200×1.8(mm)의 평판이다. 가상 시편의 멀티스케일 유한요소 모델링을 위하여 거시스케일 모델과 미시스케일 모델을 구성하고 이들을 LS-DYNA의 Tied-interface 구속조건을 이용하여 멀티스케일 모델을 구현하였다[18].

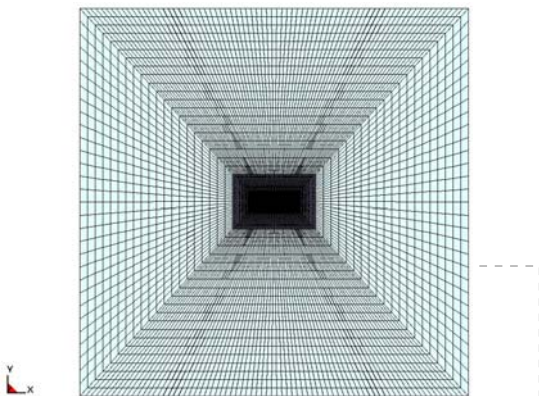


Fig. 11 멀티스케일 모델의 xy 평면도 및 가상 충격 실험.

Table 2 해석 모델의 물성치

| Elastic constants | E ₁ (GPa) | E ₂ (GPa) | G ₁₂ (GPa) | G ₂₃ (GPa) | ν ₁₂ | ν ₂₁ | Density (g/cm ³) |
|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| Epoxy | 4.41 | 4.41 | 2.0045 | 2.0045 | 0.1 | 0.1 | 2.57 |
| Matrix (5505) | 7.24 | 7.24 | 2.68 | 2.68 | 0.35 | 0.35 | 1.20 |
| Homogenized | 207 | 19 | 4.8 | 4.8 | 0.21 | 0.0019 | 2.007 |

이때 거시스케일 모델은 직교이방성 물성치를 가지고 미시스케일 모델은 DNS 개념에 기반하여 섬유 및 기지의 등방성 물성치를 가지도록 하였으며 구체적인 물성치는 표 2에 나타내었다. 이때 충격 하중에 의하여 실제 손상을 입는 부위를 고려하여 미시스케일 모델로 구현하였고 그 외

곽을 둘러싸고 있는 부분은 미시스케일 모델로부터 충격 하중 및 변위를 전달받을 수 있도록 거시스케일 모델로 구현하였다. 이렇게 구현된 거시스케일 모델은 31,500개의 8절점 육면체 요소 및 117,180개의 자유도를 가지며, 미시스케일 모델은 2,191,500개의 8절점 육면체 요소 및 6,574,500개의 자유도를 가진다[Fig. 11]. 충격체는 반지름 20mm의 강체구로 모델링하였으며 질량 2.3kg, 초기속도 5m/s로 평판의 중심에 27J의 에너지를 갖고 충격을 가하게 된다.

4.2 DNS를 이용한 멀티스케일 해석

4.2.1 거시 거동 해석

Fig. 12는 앞에서 개발한 멀티스케일 모델을 이용하여 횡방향 처짐 분포를 시간대별로 평면상에 도시한 것이다. 멀티스케일 DNS 모델이 보여주는 거시적인 거동으로서 변위장의 분포 양상을 볼 수 있으며, 앞서 식(1-2)로부터 전달되는 변위의 연속성을 보장하도록 하는 Tied-Interface 구속조건이 성공적으로 부가되어 미시 모델과 거시 모델 사이의 경계에서 부드러운 변위장 분포를 확인할 수 있다.

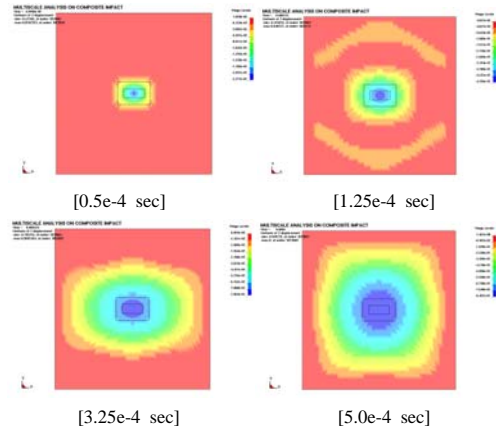
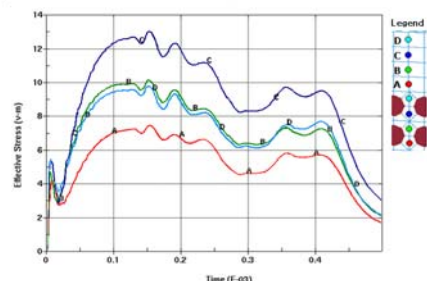


Fig. 12 시간에 따른 횡방향 처짐 분포 변화.



(a)최상층[0₂]

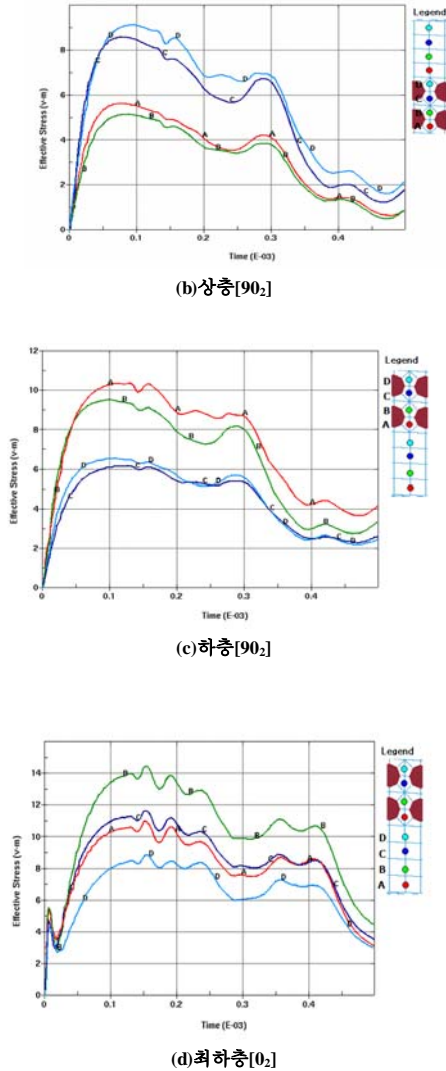


Fig. 13 두께에 따른 Von Mises 응력의 시간 이력(MPa).

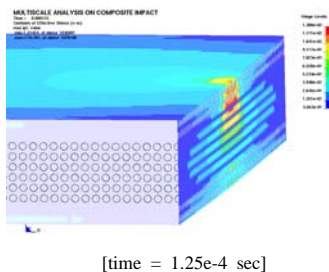


Fig. 14 Von Mises 응력의 3차원 분포 양상.

4.2.2 미시 거동 해석

Fig. 13은 평판이 충격을 받은 지점의 수직 아래 두께 방향으로 기지(Matrix)에서 받는 Von Mises 응력의 시간 이력을 부위별로 도시한 것이다. 직접적으로 충격을 받은 최상층[Fig.13(a)]과 그 아래쪽의 최하층[Fig.13(d)]에서 응력이 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 특히 섬유방향이 바뀌게 되는 지역에서 응력의 차이가 뚜렷하게 나타나고 특히 아래쪽에서 배향이 바뀌는 층간에서의 차이가 가장 큼을 보여준다. 이는 저속 충격시 직접 충격을 받은 부위보다 두께방향으로 반대편에서부터 층간 분리 등의 파괴양상이 나타나는 것을 잘 설명해주고 있다.

또한 이러한 시간에 따른 분포 외에도 Fig. 14에서 보이는 것처럼 일정 순간에서의 3차원 공간상에 분포된 Von Mises 응력의 분포양상으로부터 섬유와 기지가 받는 응력 상태를 한눈에 알 수 있으며 원하는 층간에서의 응력 분포도 쉽게 구할 수 있는 장점이 있다. 이는 기존의 거시적인 접근방법에 비하여 각각의 구성성분에 의한 DNS 모델의 효과를 명시적으로 보여주고 있는 것이다.

5. 결론

본 연구는 적층 복합재료의 저속충격시 구조물 내의 구성요소 수준에서 발생하는 동적 거동과 이로 인한 대표적인 손상 패턴인 층간분리를 보다 자세하게 기술하기 위하여 DNS 모델을 제시하였다. 저속충격에 따르는 거시적인 거동은 기존의 균질화 모델과 동일한 결과를 보여주지만 기존의 방법에서 보일 수 없었던 미시적인 거동과 두께방향으로의 면내응력 및 층간응력 양상의 차이를 DNS 모델을 통하여 얻을 수 있다. 또한 보다 효율적인 충격해석을 위하여 LS-DYNA의 Tied-Interface 구속조건을 이용하여 DNS 기반의 멀티스케일 모델을 개발하고 이로부터 거시/미시적인 해석결과를 함께 보였다.

이로부터 층간분리등의 적층판에서 나타날 수 있는 다양한 손상의 메커니즘을 얻을 수 있는 단서를 확보할 수 있으며, 추후 재료 내부에서 미시적으로 시작되는 손상을 정확하게 기술할 수 있도록 다양한 연구를 통하여 적층 복합재료에서 나타나는 손상패턴을 DNS 모델로부터 얻고자 한다. 한편, DNS는 기하학적인 모델링 특성상 직교적층판에 적용이 용이하며 임의의 적층각을 갖는 적층판에는 DNS 적용이 어려운 단점이 있다. 이러한 기하학적인 제약을 극복할 수 있는 방안을 연구중이며, 이로부터 보다 다양한 적층판에 DNS 기법을 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) Abrate, S., "Impact on Laminated Composite Supported

- materials," *Applied Mechanics Review*, Vol. 44, 1991, pp. 155-190.
- 2) Cantwell, W.J. and Morton, J., "The Impact Resistance of Composite Materials - a Review," *Composites*, Vol. 22, No. 5, 1991, pp. 347-362.
 - 3) Liu, D., Sun, C.T., and Malvern, L.E., "Structural Degradation of Impacted Graphite/Epoxy Laminates," *The 56th Shock & Vibration Bulletin*, 1986, pp. 51-60.
 - 4) Madan, R.C., "Influence of Low-Velocity Impact on Composite Structures," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, Vol. 3, ASTM STP 1110, 1991, pp. 457-475.
 - 5) Cristescu, N., Malvern, L.E., and Sierakowski, R.L., "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., "Study on Impact Damage in Laminated Composites," *Mechanics of Materials*, Vol. 10, 1990, pp. 83-95.
 - 9) Aboudi, J., *Mechanics of Composite Materials: A Unified Micro-Mechanical Approach*, Elsevier, New York, 1991.
 - 10) Sun, C.T. & Vaidya, R.S., "Prediction of Composite Properties from a Representative Volume Element," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 171-179.
 - 11) Kim, S.J., Lee, C.S., Yeo, H.J., Kim, J.H. and Cho, J.Y., "Direct Numerical Simulation of Composite Structures," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No. 24, 2002, pp. 2765-2785.
 - 12) Pagano, N.J. and Hatfield, S.J., "Elastic Behavior of Multilayered Bidirectional Composites," *AIAA Journal*, Vol. 10, 1972, pp. 931-933.
 - 13) Lajczok, M.R., "New Approach in the Determination of Interlaminar Shear Stresses from the Results of MSC/NASTRAN," *Computers and Structures*, Vol. 24, 1986, pp. 651-656.
 - 14) Tolson, S. and Zabar, N., "Finite Element Analysis of Progressive Failure in Laminated Composite Plates," *Computers and Structures*, Vol. 38, 1991, pp. 361-376.
 - 15) Lo, K.H., Christensen, R.M. and Wu, E.M., "Stress Solution Determination for Higher Order Plate Theory," *IJSS*, Vol. 14, 1978, pp. 655-662.
 - 16) Redd, J.N., "A Refined Nonlinear Theory of Plates with Transverse Shear Deformation," *IJSS*, Vol. 20, 1984, pp. 881-896.
 - 17) LS-DYNA3D User's Manual ver.936, *Livermore Software Technology Corporation*, 1995.
 - 18) Ji, K.H., Paik, S.H. and Kim, S.J., "Impact and Failure Analysis of Composite Plates by Multiscale modeling," *14th ICCM*, July 2003, San Diego, CA, USA.