

멀티스케일 모델링에 의한 복합재료 평판의 충격해석

지국현*·백승훈**·김승조***

Impact analysis of composite plate by multiscale modeling

Kuk Hyun Ji, Seung Hoon Paik, Seung Jo Kim

Abstract

An investigation was performed to study the impact damage of the laminated composite plates caused by a low-velocity foreign object with multi-scale modeling based on the concepts of Direct Numerical Simulation (DNS)[4]. In the micro-scale part, we discretize the composite plates through separate modeling of fiber and matrix for the local microscopic analysis. A micro-scale model was developed for predicting the initiation of the damage and the extent of the final damage as a function of material properties, laminate configuration and the impactor's mass, etc. A macro-scale model was developed for description of global dynamic behavior. The connection between microscopic and macroscopic is implemented by the tied interface constraints of LS-DYNA contact card. A transient dynamic finite element analysis was adopted for calculating the contact force history and the stresses and strains inside the composites during impact resulting from a point-nose impactor. The low-velocity impact events such as contact force, deformation, etc. are simulated in the macroscopic sense and the impact damages, fiber-breakage, matrix cracking and delamination etc. are examined in the microscopic sense.

Key Words: Direct Numerical Simulation(DNS), Impact, multiscale modeling

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 무계비강도 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) 등의 형태로 나타나는데 충격체 질량이나 충격 속도 뿐만 아니라 복합재의 섬유방향이나 두께등의 변수 의해 그 양상이 복잡하게 나타나며 이는 육안으로

쉽게 관찰되지 않아도 구조물의 강도와 강성을 크게 저하시킴이 알려져 있다.[1-2]

이때 복합재료의 저속충격에 의한 손상 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 있을 수 밖에 없다. 또한 이때 발생하는 손상은 미시적인 구성성분의 파괴에서 비롯하기 때문에 이러한 손상을 정확히 예측 및 기술하기 위해서는 충격 부위의 미시적인 구성성분의 손상 패턴을 고려해야 한다.

따라서 본 연구에서는 충격 부위는 복합재료의 구성성분 수준에서 섬유와 기지를 개별적으로 모델링하는 직접 수치 모사 기법(Direct Numerical Simulation)으로 유한요소 모델을 구현하고 충격을 직접 받는 부위를 둘러싸는 부분은 등가의 균질화된 거시기계학적인 모델로 구성하는 멀티스케일 모델을 개발하여 복합재료의 충격 거동을 살펴본다.

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 서울대학교 기계항공공학부

2. 복합재료의 멀티스케일 모델링

2.1 복합재료의 DNS 모델링 기법

일반적으로 복합재료 구조해석 및 거동을 예측하는 방법으로서 크게 거시기계학적 (Macroscopic) 접근 방법과 미소기계학적 (Microscopic) 접근방법이 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 수밖에 없다.

반면, 미소기계학적 방법은 복합재료의 구성성분인 섬유와 기지를 직접 다루며 복합재료를 이들의 혼합체로 간주하는 방법이며 단위 셀 방법(Unit Cell Approach, Aboudi[3]) 등이 있다. 단위 셀 방법은 대상 구조물의 전체를 직접적으로 표현하는 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.

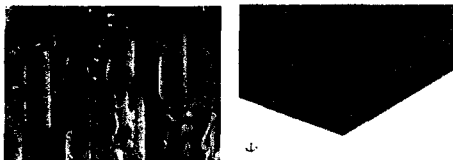


그림 1. DNS model of composite material

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 [4] 이는 향상된 컴퓨팅 파워를 바탕으로 대상 구조물의 미시적인 형상을 모사하여 복합재료의 충격 거

동을 해석하였다.

2.2 Micro/Macro 멀티스케일 모델의 개발 및 검증

보다 효율적인 충격해석을 위하여 충격을 받는 국부지역은 미소기계학적인 직접수치모사기법 (DNS)에 의한 모델링으로 구현하고 충격을 받는 국부를 둘러싸고 있는 부분은 등가의 균질화된 물성치를 사용하여 거시기계학적인 모델링을 하여 2단계의 멀티스케일 유한요소 해석모델을 구현하였다. 이 둘 사이의 경계면에서 이루어지는 변위 및 응력의 전달을 위하여 본 연구에서는 LS-DYNA의 Tied-interface-constraints를 이용하였다. Tied-interface-constraint는 다음과 같은 식에 의하여 경계면 사이에서 힘과 가속도등을 전달하게 된다.[5]

$$\Delta f_m^i = \phi_i(\xi_c, \eta_c) f_s$$

$$a_i = \sum_{j=1}^4 \phi_j(\xi_c, \eta_c) a_j^i$$

이러한 Tied-interface-constraint를 이용한 모델의 효율성 및 검증을 위하여 다음과 같이 간단한 보의 충격문제를 통하여 경계면 사이에서 응력의 전달과정을 살펴보았다. 본 연구에서 고려한 보의 충격문제는 다음의 3가지이다.

- (a) 등방성 재료 + No Tied-interface
- (b) 등방성 재료 + Tied-interface
- (c) 직교이방성재료 + Tied-interface

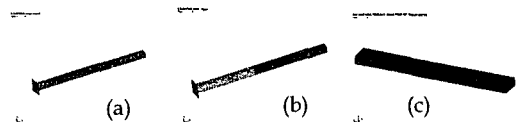


그림 2. multiscale model의 검증 예제

그림2 에서와 같이 (a)와 (b)의 경우 임팩트가 이루어지는 축방향의 응력(axial stress)값의 비교를 통하여 Tied-constraint가 효과적으로 응력을 잘 전달함을 보일 수 있었다.[그림 3] 또한 (c)의 경우 균질화된 모델의 경계면과 DNS 모델의 경계면에서 나타나는 시간에 따른 응력의 시간이력을 비교하여 본 결과, 물성의 차이로 절대값은 차이를 보이나 시간이력의 위상은 그대로 전달되는 것을 확인할 수 있다.[그림 4] 따라서 이들 결과를 바탕으로 Tied-constraint를 도입하여 멀티스케일 모델을 구현하여 복합재료 평판의 저속충격 해석에 도입하였다.

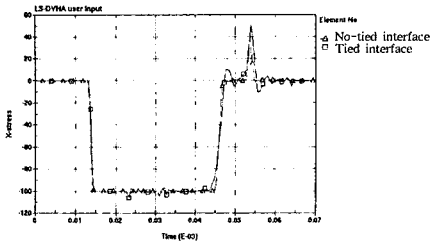


그림 3 등방성 재질에서의 비교

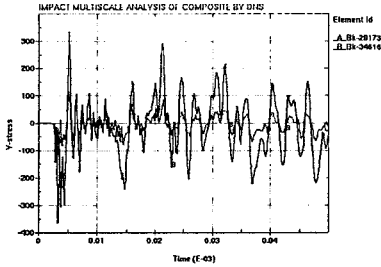


그림 4 직교이방성 재질에서의 비교

3. 가상 충격 실험

3.1 문제 기술 및 유한요소 모델링

본 연구에서 다루고 있는 복합재료는 보론/5505 에폭시 섬유강화 적층 복합재료로서 10층 $[0^2/90^0/0^2]$ 의 적층 형태를 가지고 4번 단순지 지되었으며 크기는 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 1.8\text{mm}$ 의 평판이다. 평판의 유한요소 모델링을 위하여 거시 기계학적 모델과 미시 기계학적 모델을 구성하고 이들을 LS-DYNA의 Tied-interface constraint를 이용하여 멀티스케일 모델을 구현하였다. 이때 거시 기계학적 모델은 직교이방성 물성치를 갖고 미시 기계학적 모델은 섬유, 기지 각각 등방성 물성치를 갖도록 하였으며 구체적인 물성치는 표 1,2에 나타내었다. 이렇게 구현된 거시 기계학적 모델은 31,500개의 8절점 육면체 요소, 117,180개의 자유도를 가지며, 미시 기계학적 모델은 2,191,500개의 8절점 육면체 요소, 6,574,500개의 자유도를 가진다.[그림 5] 충격체로서는 반지름 20mm의 강체구를 모델링하였으며 질량 2.3kg, 초기속도 5m/s로 평판의 중심에 27J의 에너지를 갖고 충격을 가하게 된다.

| Material | E (GPa) | ν | Density (g/cm^3) |
|------------|---------|-------|------------------------------------|
| Boron | 441 | 0.1 | 2.57 |
| 5505 Epoxy | 7.24 | 0.35 | 1.20 |

표 1. micro model의 등방성 물성치

| | E_1 (GPa) | E_2 (GPa) | G_{12} (GPa) | ν_{12} | ν_{21} | Density (g/cm^3) |
|-------------|-------------|-------------|----------------|------------|------------|------------------------------------|
| Boron/Epoxy | 207 | 19 | 4.8 | 0.21 | 0.0019 | 2.007 |

표 2. macro model의 직교이방성 물성치

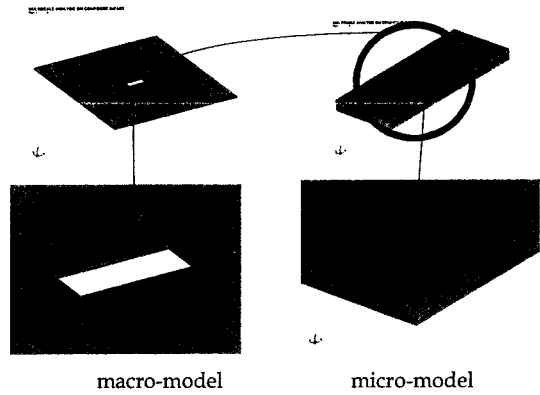


그림 5. 멀티스케일 모델의 구현

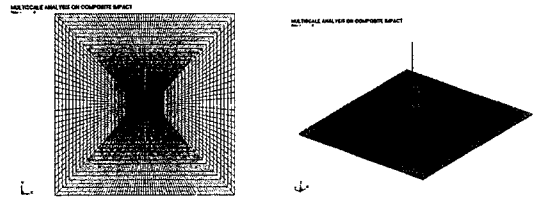


그림 6. 구현된 멀티스케일 모델의 xy 평면도 및 가상 충격 실험

3.2 해석 결과

3.2.1 접촉력의 시간이력

외부 충격체에 의한 접촉력의 시간이력에 대해서 중앙의 DNS 모델을 균질화된 모델로 대체하여 전체 구조물이 모두 이방성으로 균질화된 모델과 멀티스케일 모델의 결과를 비교하여 보았다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 DNS 모델에 의한 방법이 수치 잡음이 더 적은 특성을 보이며 이는 부딪히는 면의 특성이 다름에 기인하는 것으로 보인다.

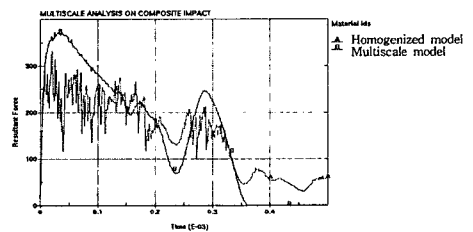


그림 7. 균질화 모델과 멀티스케일 모델의 접촉력 시간이력의 비교

3.2.2 저속 충격현상의 동적 특성

그림 8은 평판이 충격을 받은 지점의 수직 아래 두께 방향으로 Von Mises Stress의 시간 이력을 도시한 것이다. 이로부터 직접적으로 충격을 받은 층과 가장 하층에서 응력이 상대적으로 높게 나타나며, 또한 배향이 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. 이로부터 보다 정확한 파단 이론을 만들 수 있는 데이터를 제공할 수 있다.[6]

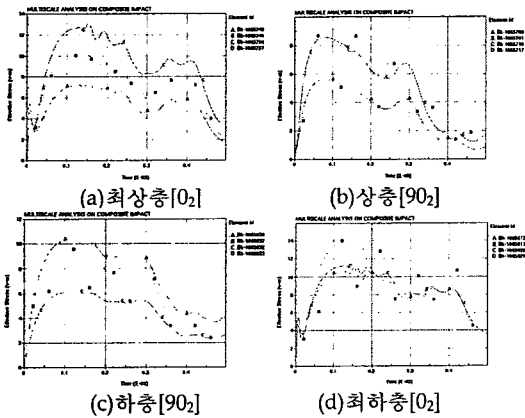


그림 8. 두께에 따른 Von Mises Stress Time History

또한 이러한 시간에 따른 분포 외에도 3차원 공간상에 분포된 응력의 분포양상으로부터 섬유와 기지가 받는 응력상태를 한눈에 알 수 있으며 실제 실험[7]에서 보이는 하층의 섬유의 배향이 바뀌는 경계면에서 나타나는 땅콩모양의 층간분리 패턴도 잘 보여주고 있다. 이는 기존의 거시적인 접근방법에 비하여 각각의 구성성분에 의한 효과를 명시적으로 보여주고 있다.

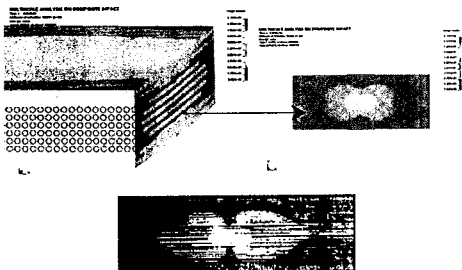


그림 9. 3차원 Von Mises Stress 분포 및 실제 실험에서의 층간분리 현상[7]

4. 결 론

본 연구에서는 복합재료 적층판의 효율적인 저속충격해석을 위하여 DNS 개념을 적용한 멀티스케일 모델을 개발하고 그 효용성을 보였다. 기존의 균질화된 모델에서 보일 수 없었던 충격 부위의 국부적인 동적 거동을 효과적으로 기술할 수 있었으며, 이를 바탕으로 충격시 발생될 수 있는 손상패턴을 효과적으로 예측할 수 있음을 보였다. 추후 3차원 응력상태를 고려한 복합재료 구성성분의 파단을 고려한 새로운 파단 기준 및 파손 이론 정립을 기대할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.(00-N-NL-01-C-026)

참고문헌

1. Abrate, S., Impact on laminated composite materials. Appl. Mech. Rev., 1991, 44(4), 155-190.
2. M.O.W. Richardson and M.J.Wisheart, Review of low-velocity impact properties of composite materials, Composite Part A 27A, 1996, 1123-1131
3. Aboudi, J., Mechanics of Composite Materials A Unified Micromechanical Approach, Elsevier, New York, 1991.
4. S.J. Kim, C.S. Lee, H.J. Yeo, J.H. Kim and J.Y. Cho, Direct Numerical Simulation of Composite Structures, Journal of Composite Materials 36(24), 2765-2785
5. LS-DYNA3D User's Manual ver.936, Livermore Software Technology Corporation, 1995
6. J.Steven Mayes, Micromechanics based Failure Analysis of composite Structural Laminates, NSWCCD-65-TR1999/15, Survivability, Structures, and Materials Directorate Technical Report, 1999
7. F. Collombet, X.Lalbin & J.L.Lataillade, Impact behavior of laminated composites:Physical basis for Finite Element Analysis, Composites Science and Technology, 58 (1998) 463-478