

## 論文

## 미시구조를 고려한 3차원 직교직물 복합재료 평판의 저속충격 거동해석

지국현\*, 김승조\*\*\*

Low Velocity Impact Behavior Analysis of 3D Woven Composite Plate  
Considering its Micro-structure

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

## ABSTRACT

In this paper, we developed the direct numerical simulation(DNS) model considering the geometry of yarns which consist of 3D orthogonal woven composite materials, and using this model, the dynamic behavior of under transverse low-velocity impact has been studied. To build up the micromechanical model considering tow spacing and waviness, an accurate unit structure is presented and used in building structural plate model based on DNS. For comparison, DNS results are compared with those of the macromechanical approach which is based on the global equivalent material properties obtained by DNS static numerical tests. The effects with yarn geometrical irregularities which are difficult to consider in a macroscopic approach are also investigated by the DNS model. Finally, the multiscale model based on the DNS concepts is developed to enhance efficiency of analysis with real sized numerical specimen and macro/micro characteristics are presented.

## 초 록

본 논문에서는 3차원 직교 직물 복합재료의 구성성분인 얀(Yarn)의 기하학적인 형상을 고려하여 직접수치모사(DNS) 모델을 개발하고 이를 이용하여 직교 직물 복합재료 평판의 저속충격 현상을 모사하였다. 미시구조를 보다 상세하고 정확하게 고려하기 위하여 토우 간격과 굴곡 등을 고려한 단위 구조를 제시하고 이를 이용하여 DNS기반의 평판모델을 구현하였다. 정적 가상 실험을 통하여 얻은 DNS 모델의 거시적 등가 물성치를 바탕으로 한 거시기계학적 해석과의 비교하였고, DNS 모델을 이용하여 기존의 거시기계학적 모델에서 구현이 어려운 기하학적인 형상 차이에 따른 저속충격 현상의 영향을 고찰하였다. 그리고 보다 실제 실험에 가까운 가상 시편의 크기를 고려하고 해석의 효율성을 높이기 위하여 DNS개념에 기반한 멀티스케일 모델을 개발하여 거시/미시 해석 결과 특성을 함께 고찰하였다.

**Key Words:** 3차원 직교 직물 복합재료(3D orthogonal woven composite material), 직접수치모사(Direct Numerical Simulation, DNS), 저속 충격(Low velocity impact), 멀티스케일 모델(Multiscale model)

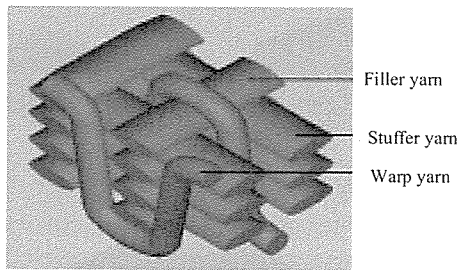
## 1. 서 론

복합재료는 우수한 비강성 및 비강도, 환경에 대한 저항성으로 항공, 우주, 방위산업뿐만 아니라 자동차, 건축, 스포츠, 레저산업에 이르기까지 다양한 분야에서 구조부재료

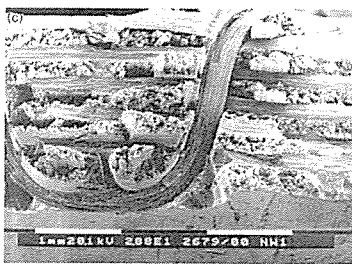
서 많이 쓰이고 있다. 그러나 일반적으로 많이 쓰이는 섬유 강화 적층 복합재료 구조물은 횡방향 충격 하중에는 취약한 면을 보이며 특히 저속 충격으로 인하여 발생하는 손상은 육안으로는 식별이 힘든 특징이 있다. 이는 적층 복합재료의 특성상 면내 하중은 매우 잘 견디는 반면 두께방향

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

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



(a) Schematic view [7]



(b) Micrographs of the cross-section [12]

Fig. 1 3차원 직교직물 복합재료 내부 형상.

으로의 인장 강도가 상대적으로 낮은 것에 기인하며 이로 인하여 층간 분리, 기지 손상, 섬유 파단 등의 손상 패턴이 발생하게 된다. 따라서 섬유강화 복합재료 구조물의 횡방향 충격하중에 대한 손상 저항성을 높이기 위하여 지난 수년간 많은 연구가 이루어져 왔다[1].

그러나 최근에는 이러한 섬유강화 복합재료의 충격하중에 대한 특성을 개선시키기 위한 방법들 중 직물 복합재료를 이용하는 것이 등장하고 있다. 직물 복합재료는 섬유를 면내방향 뿐만 아니라 두께 방향으로 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 3차원으로 직교 직조하는 방법이 일반적으로 널리 쓰이게 되었다. 이러한 3차원 직교 직물 복합재료는 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 스토퍼 얀(stuffer yarn), 필러 얀(filler yarn), 워프 얀(warp yarn or z-yarn)으로 구성되어 있으며 상호 직교하여 직조되어 있다. 현재 3차원 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].

이러한 3차원 직교 직물 복합재료는 3차원 직조법에 따라 얀(yarn) 사이의 거리, 얀의 굵어진 정도, 다발의 크기,

각 보강방향의 섬유의 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 얀을 미소기계학적인 모델링을 통하여 직접 수치모사 기법(Direct Numerical Simulation, DNS)을 적용하고 이를 이용하여 저속충격 현상을 모사하였다.

## 2. 직물복합재료의 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 비등방성 물성을 갖고 있다고 간주하고 이에 직접적으로 비등방성 물질에 대한 구성방정식을 적용하게 된다. 적층판의 기계학적 물성은 적층판 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[8-9]. 단위 셀 방법은 대상 구조물의 전체를 직접적으로 표현하는 것이 아니라 셀이라 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.

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 극복하고자 하는 방법이다[10-11]. 특히 복합재료의 충격 현상은 구조물의 국부적인 손상을 가져오는 대표적인 현상이며 이는 섬유와 기지수준에서 시작되므로 손상이 일어나는 타격지점에서의 미시적인 접근이 필수적이다. 이를 위하여 본 연구에서는 직교직물 복합재료에 대하여 참고문헌[11]에서 제안된 DNS 기법을 적용하였고, 이를 이용하여 대상 구조물의 미시적인 형상을 모사하여 복합재료의 충격 거동을 해석하였다.

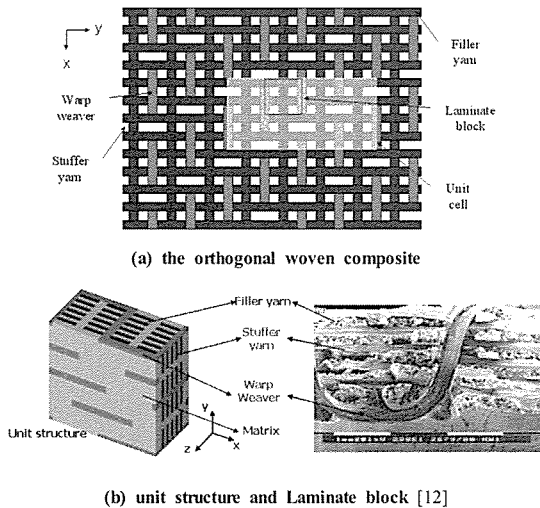


Fig. 2 DNS개념에 의한 직교 직물 복합재료의 개념도.

Table 1 직교직물 복합재료의 구성성분의 물성치[15]

	$V_f(\%)$	$E_L$ (GPa)	$E_T$ $=E_Z$ (GPa)	$G_{LT}$ $=G_{LZ}$ (GPa)	$G_{TZ}$ (GPa)	$\nu_{LT}$ ( $=\nu_{TL}$ )	$\nu_{TZ}$
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

Table 2 DNS모델로부터 얻은 물성치의 실험치의 비교

	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)	$\nu_{12}$
DNS model	40.63	49.00	8.27	2.18	1.97	2.24	0.035
Unit Cell[13]	52.76	60.25	14.00	2.558	2.263	2.243	0.034
Laminate block[13]	39.70	51.09	7.38	2.307	1.863	1.864	0.035
Exp.[13]	40.97	47.30	-	-	-	-	0.037

## 2.2 직물 복합재료의 DNS 모델 구현

본 연구의 대상이 되는 3차원 직교 직물 복합재료는 Torayca T-300(3K) 탄소 섬유와 Epocote 828 에폭시 수지를 그 구성성분으로 한다. 스토퍼 얀과 필러 얀 및 워프 얀의 비율은 1:1.2:0.2이고 전체의 섬유 체적비율은 0.43이다. Fig. 2-(a)는 직교 직물 복합재료의 개념도를 보이고 있고, Fig. 2-(b)는 본 해석에 사용된 복합재료의 단위 구조물과 대응되는 실제 직교직물 복합재료의 SEM 이미지를 보이고 있다[12-13]. 각각의 단위 구조물은 8절점 6면체 요소를 사용하였으며 단위 구조물 당 전체 절점 수는 13,200개, 전체 요소 수는 11,520개이다. 이때 얀은 각각 횡등방성 물성으로 간주되며 이들의 물성치는 Chamis[14]에 의하여 제안된

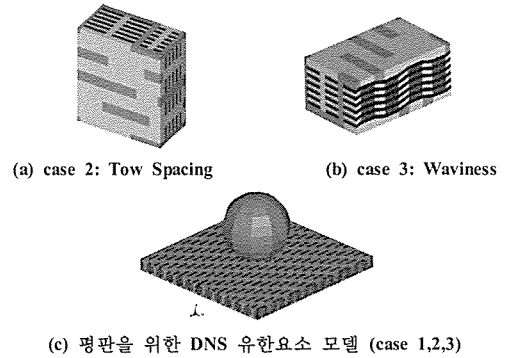


Fig. 3 기하학적 불균일성이 고려된 단위 구조물 형상 및 평판 모델.

미소기계학적 방정식을 사용하여 얻을 수 있다[Table 1.]. 본 연구에서는 실제의 시편을 구현하기 위하여 단위 구조물을  $x$ ,  $y$ ,  $z$  방향으로 일정개수를 조합하여 복합재료 평판을 구성하였다. 참고문헌 [15]에서는 DNS에 기초하여 108개의 단위 구조물 ( $27 \times 4 \times 1$ , 2,671,534 DOFs)을 이용하여 만든 가상 평판 시편으로 수치적인 인장 및 전단 시험을 통하여 각 방향의 물성치를 얻었고, 이를 실제 실험치와 비교함으로써[Table 2.] 다른 수치적인 물성치 획득방법에 비하여 일치하는 결과를 얻을 수 있음을 보였다. 따라서 이로부터 본 연구에서 사용한 모델의 타당성을 얻을 수 있다.

## 3. DNS 모델을 이용한 저속충격해석

### 3.1 문제 기술 및 모델링

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

대개의 직물 복합재료는 제조 공정상 기하학적인 비균일성을 가진다. 여기에는 tow spacing, tow waviness, tow pinching등이 있는데 이러한 비균일성은 구조물의 강성을 저하시키는 요인이 될 수 있다[16]. 본 연구에서는 얀이 서로 일정간격으로 직조하는 경우(case 1), 워프 얀의 간격이 서로 다른 경우(case 2), 필러 얀이 굴곡을 갖는 경우(case 3)에 대하여 나타나는 충격 거동의 특성을 살펴보았다. Fig. 3은 각각의 경우에 대하여 단위구조물을 구성하여  $x$ ,  $y$  방향으로 반복한 가상 시편을 나타낸다. 반지름 8mm의

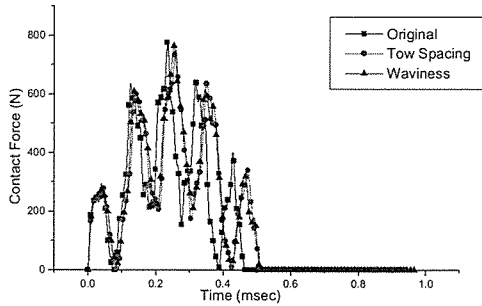


Fig. 4 저속 충격 시 받는 충격이력.

강체가 초기속도 5m/s로 0.21J의 충격에너지와 가지고 4 번 지지된 평판(38.08x37.68x2.79mm)에 저속충격을 가하는 경우를 조사하였으며 이들 시편의 종 자유도 수는 case 1 과 3은 약 153만, case 2는 약 548만이다.

## 3.2 DNS 해석결과

### 3.2.1 충격하중 이력

앞에서 언급한 세 가지 경우에 대한 충격하중 이력을 Fig. 4에 보였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 다른 경우들에 비하여 필러 양의 굴곡(waviness)이 고려된 경우(case 3)가 상대적으로 가장 긴 접촉 지속시간을 보인다. 이는 case 3의 모델이 필러 양의 굴곡으로 인하여 구조물이 상대적으로 낮은 강성을 갖고 있기 때문으로 추론할 수 있다.

### 3.2.2 충격 에너지 해석

충격체에 의한 운동에너지는 접촉 및 충격이라는 현상을 통하여 구조물에 내부 변형 에너지 및 운동에너지로 전달이 되는데 직물 복합재료는 기존 섬유강화 복합재료에 비하여 충격특성이 좋은 편이어서 구조물이 외부로부터 전달되는 에너지를 흡수하는 메커니즘이나 효율적인 흡수 재료로서의 응용에 대한 연구가 최근 활발히 연구되고 있다.

주로 소성 변형에 의하여 충격 에너지를 흡수하는 연성 금속재질에 비하여 복합재료는 주로 섬유 파단이나 기지 파손 및 층간 분리 등의 복합된 기작에 의하여 에너지를 흡수하기 때문에 이러한 파괴 모드에 따른 복합재료의 손상 과정을 이해하는 데 많은 어려움을 던져주고 있다. 본 연구에서는 구조물에 전달되는 운동에너지와 변형에 따른 내부에너지의 시간에 따른 분포를 통하여 직물 복합재료의 내부 기하학적인 구조에 따른 충격 에너지 특성을 Fig. 5, 6에 보였다.

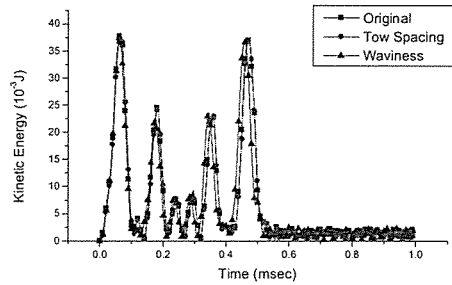


Fig. 5 시간에 따른 구조물의 운동에너지 변화.

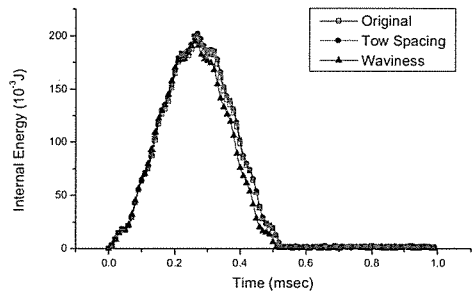


Fig. 6 시간에 따른 구조물 내부에너지의 변화.

Fig. 5는 시간에 따른 구조물의 운동에너지 양상을 보인 것이다. 워프 양을 구성하는 토우(tow)의 간격 여부는 충격특성에 그리 영향을 미치지 않으며 필러 양의 굴곡을 고려한 경우는 다른 두 경우에 비하여 그 특성이 약간 선행되어 나타나고 있음을 보이고 있다. 또한 Fig. 6은 외부 물체로부터 저속충격을 받을 때 평판 구조물이 겪는 변형으로 인한 내부에너지의 시간에 따른 이력을 나타낸 것이다. 세 가지 경우에 대하여 대략 비슷한 경향을 보이거나 필러 양의 굴곡이 있는 경우에 대해서는 대체로 다른 두 가지 경우에 비하여 약간 낮은 값을 보인다.

## 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 DNS에 의한 모델링으로 구현하고 충격을 받는 국부를 둘러싸고 있는 부분은 등가의 균질화된 물성치를 사용한 거시적인 모델링을 구현함으로써 2단계의 멀티스케일 유한요소 해석모델을 구현하였다. 이 두 모델 사이의 경계면에서 이루어지는 변위 및 응력의 효과적인

- (a) 등방성 재료 + without Tied-interface  
 (b) 등방성 재료 + Tied-interface  
 (c) 직교이방성 재료 + Tied-interface

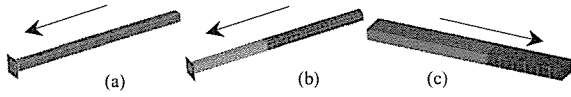


Fig. 7 multiscale model의 검증 예제.

전달을 위하여 본 연구에서는 LS-DYNA의 해석 모듈인 Tied-interface 구속조건을 이용하였다. Tied-interface 구속조건은 다음과 같은 식에 의하여 경계면 사이에서 힘과 가속도들을 전달하게 된다[12].

$$\Delta f_m^i = \phi_i(\xi_o, n_c) f_s^i \quad (1)$$

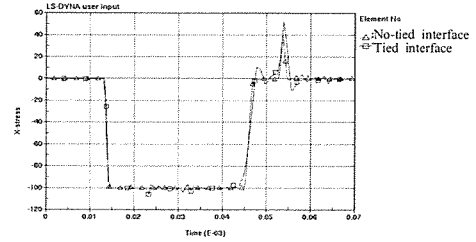
이때  $\xi_o, n_c$ 는 각각 거시모델과 미시모델사이의 접합부분에서의 접촉절점 좌표이고 식 (1)에 의하여 미시모델에서 계산된 외력( $f_s^i$ )이 형상함수  $\phi_i$ 에 의하여 힘의 증분량( $\Delta f_m^i$ )만큼 거시모델로 보간된다. 미시모델의 절점에서 외력의 합산이 끝나면 거시모델에서의 가속도가 계산되며 접촉점 ( $\xi_o, n_c$ )을 포함하는 거시모델의 요소로부터 미시모델에서의 가속도( $a_i$ )가 식 (2)로부터 보간된다.

$$a_i = \sum_{j=1}^4 \phi_j(\xi_o, n_c) a_j^i \quad (2)$$

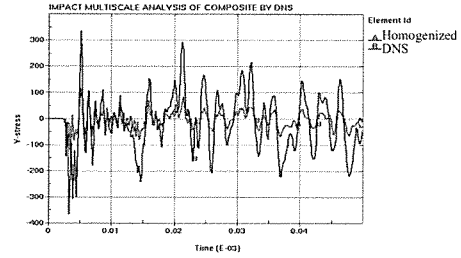
이러한 과정을 통하여 얻어진 가속도를 바탕으로 전체 모델에서의 속도 및 변위를 얻을 수 있다. 이리하여 미시모델과 거시모델사이에서의 경계에서 힘, 가속도, 변위의 전달과정을 거치게 된다.

이러한 Tied-interface 구속조건을 이용한 모델의 효용성 및 검증을 위하여 다음과 같이 간단한 보의 축방향 충돌문제를 통하여 경계면 사이에서 응력의 전달 양상을 살펴본다. 본 연구에서 고려한 보의 충돌문제는 다음의 3가지이다.

Fig. 7에서와 같이 등방성재료 모델인 (a)와 (b)의 경우에 대하여 길이방향으로 가상의 강체 벽에 충돌을 모사하였다. Fig. 8(a)는 발생하는 축방향 응력 이력의 비교를 통하여 두 경우 시간에 따른 이력이 잘 일치함을 보여줌으로써 Tied-interface 구속조건이 효과적으로 응력을 잘 전달함을 보일 수 있었다. 또한 모델 (c)의 직교이방성의 경우 균질화된 모델의 경계면과 DNS 모델의 경계면에서 나타나는 시간에 따른 응력의 시간 이력을 비교하여 본 결과, 물성의 차이로 인하여 응력의 절대값 차이를 보이나 시간이력의

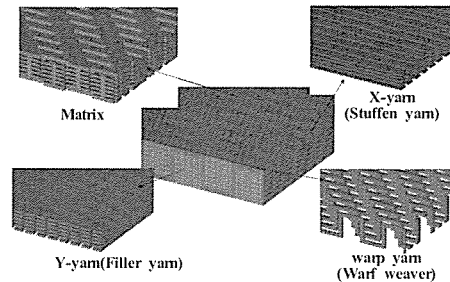


(a) 등방성 재료의 경우

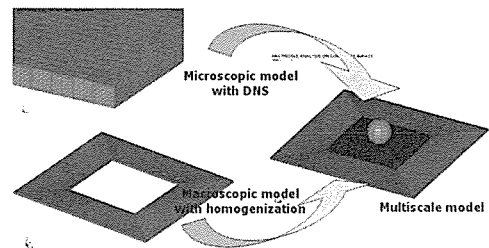


(b) 이방성 재료의 경우

Fig. 8 Tied-interface 경계면에서의 축방향 응력 이력.



(a) 미시스케일 부분의 상세 모델링



(b) 미시 및 거시스케일 모델

Fig. 9 멀티스케일 모델의 구현.

위상은 그대로 전달되는 것을 확인할 수 있다[Fig. 8(b)]. 따라서 이들 결과를 바탕으로 멀티스케일 모델을 구현하여 평판의 저속충격 해석에 도입하였다.

#### 4.1.2 문제 기술 및 유한요소 모델링

본 연구에서 다루고 있는 구조물은 3차원 직교직물 복합재료로 구성된 평판( $195.84 \times 200.96 \times 2.79(\text{mm})$ )이다. Fig.9에서 볼 수 있듯이 이를 위한 미시구조 모델은 DNS개념을 바탕으로 구현되며 이때 각각의 얇은 참고문헌[12-14]에 따라 횡등방성 재료로 간주하였고 앞에서 개발한 단위구조를 1,152개 사용하여 ( $36 \times 32 \times 1$ , 10,662,192 DOFs) 구현되었다. 또한 DNS모델에 의한 가상 인장 및 전단실험을 통하여 얻은 등가의 거시 물성치를 사용하여 거시모델( $60 \times 60 \times 8$ , 330,480 DOFs)을 구현하였고, 미시모델과 거시모델은 Tied-interface로 연결된다. 이때 적용된 거시모델의 물성치는 앞서 언급한 바와 같이 실제 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 검증된 바 있다[15]. 경계조건으로는 평판의 외곽면의 길이방향 중심선을 고정지지하였다. 충격체로서는 반지름 20mm의 강체구를 모델링하였으며 질량 2.3kg, 초기속도 5m/s로 평판의 중심에 27 J의 에너지를 가지고 충격을 가한다.

## 4.2 DNS를 이용한 멀티스케일 해석

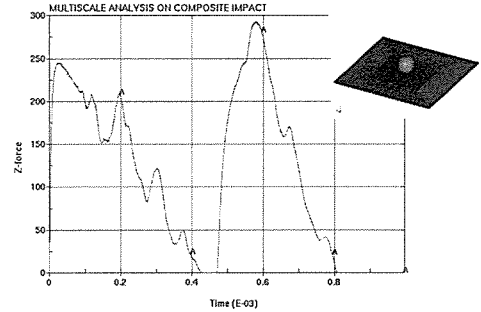
### 4.2.1 Global Behavior

DNS 모델의 거시적인 거동으로서 Fig. 10과 11에 각각 평판 구조물이 충격을 받은 후 발생하는 접촉력과 변위 이력을 도시하였다. Fig. 10-(a)로부터 복합재료 저속충격의 전형적인 특성인 다중충돌현상을 확인할 수 있으며 Fig.10-(b)으로부터 약 0.8ms이후에 판과 분리되는 현상을 볼 수 있다. 또한 Fig. 11은 평판과 충격체의 변위를 시간에 따라 나타낸 것이며 미시모델과 거시모델사이의 경계에서 변위 전달의 연속성을 잘 보여준다.

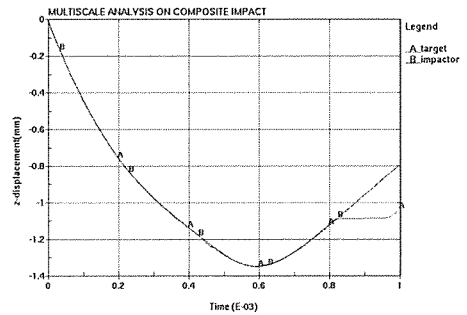
### 4.2.2 Local Behavior

DNS 모델은 복합재료 내의 구성요소를 고려함으로써 다음과 같이 충격하중을 받는 직교직물 복합재료의 구성성분에 따른 고찰이 가능하다. Fig. 12는 충격 직후 각 구성성분에 대한 충격 부위의 시간에 따른 Von Mises 응력 변화를 보여준다. 시간이 지나면서 기지와 Y, Z방향 얇이 받는 거동의 전파양상을 잘 볼 수 있으며, 특히 두께에 따라 각 구성성분이 받는 역할이 서로 다르게 구별되는 것을 볼 수 있다.

또한 Fig. 13은 직물 복합재료의 구성성분이 할당받는 에너지 분포의 시간에 따른 변화를 기술한 것이다. Fig. 13(a)로부터 기지(matrix)가 변형에 의한 내부에너지를 가장 많이 감당하고 있음을 볼 수 있으며, Fig. 13(b)에서 운동에너지는 기지와 x방향 얇이 가장 감당하고 있음을 나타내고 있다. 이로부터 기지가 내부 변형에너지 형태로 외부 충격 에너지를 흡수하는데 주요한 역할을 한다는 것을 추론할 수 있다.



(a) Contact force history & Multiscale model



(b) Displacement history

Fig. 10 접촉력 및 변위 이력 곡선.

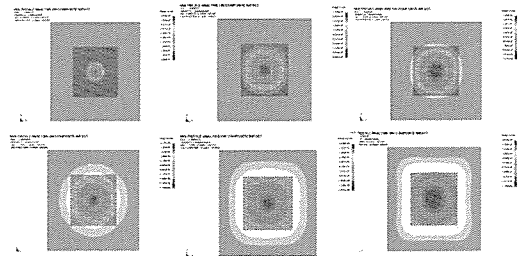


Fig. 11 시간에 따른 횡방향 처짐 변화 양상.

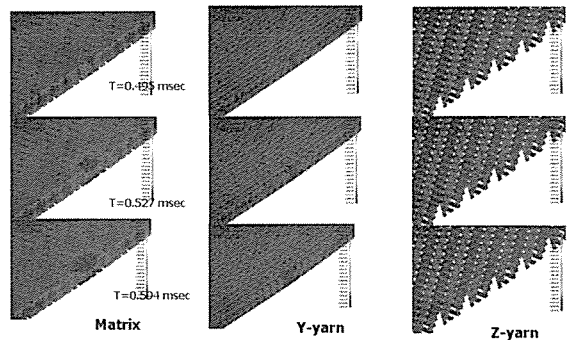
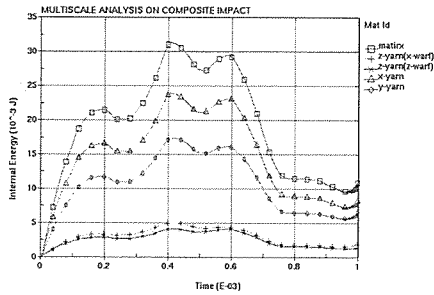
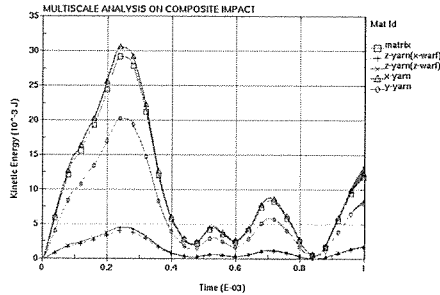


Fig. 12 시간에 따른 Von Mises 응력의 변화.

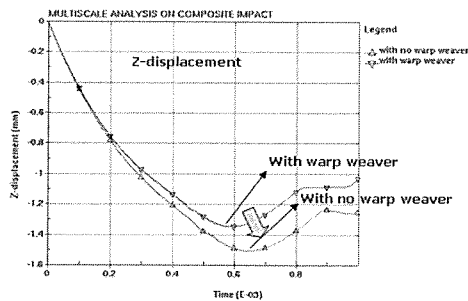


(a) 변형에 의한 내부에너지 변화 이력

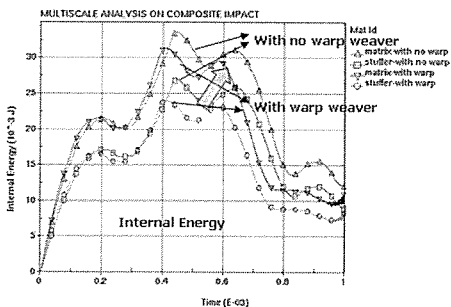


(b) 운동에너지 변화 이력

Fig. 13 구성성분에 따른 에너지 변화 이력.



(a) 횡방향 변위 이력 곡선



(b) 변형에 의한 내부에너지 이력 곡선

Fig. 14 warp yarn에 의한 두께방향 보강효과.

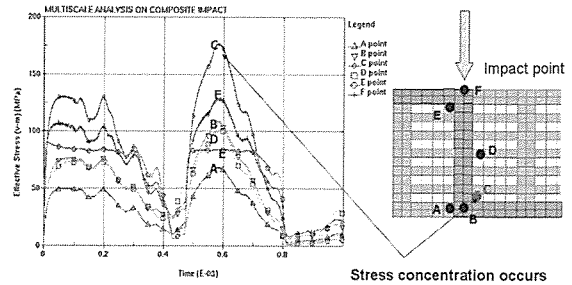


Fig. 15 두께 방향에서의 von-Mises 응력 이력.

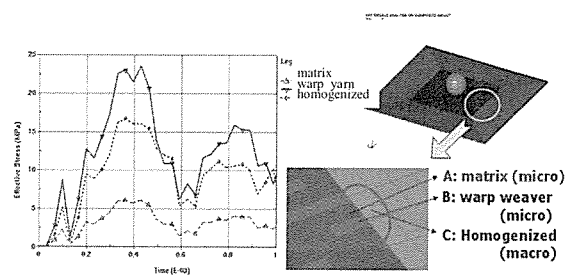


Fig. 16 micro/macro 인접지역의 von-Mises 응력 시간 이력.

Fig. 14에서는 워프 양의 횡방향으로의 보강효과를 보이기 위하여 워프 양이 있는 모델과 없는 모델에 대하여 변위와 변형에 의한 내부에너지 관점에서 서로 비교하였다. 두께방향으로의 워프 양의 보강이 없는 경우 횡방향 변위와 내부에너지의 변형이 약 15% 정도 커지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15는 워프 양의 근방에서 나타나는 Von Mises 응력의 시간에 따른 변화이력을 도시한 것이다. 모델의 기하학적인 특성상 충격을 직접 받는 F점보다는 하층의 C지역에서 응력이 높게 나타남을 보이고 있다. 이와 같이 DNS 모델은 각 구성성분에 따른 모델링이 가능하므로 관심 있는 지역에서의 정보를 바탕으로 보다 바람직한 성능을 갖도록 구성성분 수준에서의 복합재료 해석 및 설계가 가능하다.

Fig. 16에서 멀티스케일 모델의 검증 차원에서 미시적인 부분과 거시적인 부분의 경계에서 시간에 따른 von-Mises 응력 추이의 비교를 나타내었다. 서로 다른 모델에서의 물성치의 차이에 의하여 응력의 크기에는 차이가 있지만 전파되는 응력의 위상이 잘 보존되는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 3차원 직교 직물 복합재료에 대하여 저속 충격 시 구조물 내의 구성요소 수준에서 발생하는 동적 거동

및 3차원 강성 강화 효과 등을 DNS 모델을 이용하여 모사하였다. DNS 모델은 안과 기지 등의 직교 직물 복합재료의 구성성분의 기하학적 요소를 고려하여 보다 미시적인 정보를 가진다. 이를 이용한 충격 해석 결과를 살펴보면, DNS 모델은 기존의 거시적인 균질 물성치를 이용한 결과와 마찬가지로의 거시 거동을 나타낼 수 있을 뿐만 아니라, 안의 불균일 배치에 의한 효과나 워프 안의 3차원 강화 효과 등 기존의 균질 물성치를 이용한 방법에서는 다루기 힘든 구성성분 수준에서의 충격 해석 결과를 보였다. 또한 보다 효율적인 충격해석을 위하여 Tied-interface 구속 조건을 이용하여 DNS 기반의 멀티스케일 모델을 개발하고 해석결과를 보였다. 이로부터 얻은 미시수준의 응력 정보를 바탕으로 추후 다양한 연구를 통하여 3차원 직교 직물 복합재료에서 나타나는 층간 분리 등의 손상패턴을 DNS 모델로부터 얻을 수 있다.

## 참고문헌

- 1) Abrate, S., "Impact on laminated composite supported materials," *Applied Mechanics Review*, Vol. 44, 1991, pp. 155-190.
- 2) Naik, N.K., and Meduri, Sailendra, "Polymer-matrix composites subjected to low-velocity impact: effect of laminate configuration," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, 2001, pp. 1429-1436.
- 3) Naik, N.K., Sekher, Y. Chandra, and Meduri, Sailendra, "Damage in woven-fabric composite subjected to low-velocity impact," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, 2000, pp. 731-744.
- 4) Karaoglan, Levent, Noor, Ahmed K., and Kim, Yong H., "Frictional contact/impact response of textile composite structures," *Composite Structures*, Vol. 37, 1997, pp. 269-280.
- 5) Sutherland, L.S., and Soares, C. Guedes, "Impact tests on woven-roving E-glass/polyester laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, 1999, pp. 1553-1567.
- 6) Sutherland, L.S., and Soares, C. Guedes, "Effects of laminate thickness and reinforcement type on the impact behavior of E-glass/polyester laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, 1999, pp. 2243-2260.
- 7) Miravete, Antonio, and Chiminelli, Agustin, "Mechanical characterization of 3D weaving fabric/organic matrix composites and their application to energy absorption components," *Fifth World Congress on Computational Mechanics*, 7-12, July, 2002, Vienna, Austria.
- 8) Aboudi, J., *Mechanics of Composite Materials A Unified Micromechanical Approach*, Elsevier, New York, 1991.
- 9) Sun, C.T., and Vaidya, R.S., "Prediction of Composite Properties from a Representative Volume Element," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 171-179.
- 10) Kim, Seung Jo, Cho, Jin Yeon and Kim, Jeong Ho, Finite Element Modeling and Analysis of Composite Structures, Proceeding of the First Korea-U.S. Workshop on Composite Material, 1998.
- 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) Tan, Ping, Tong, Liyong, and Steven G.P., "Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part I. Experimental investigation," *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, 2000, pp. 259-271.
- 13) Tan, Ping, Tong, Liyong, and Steven G.P., "Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part II. FEA and analytical modeling approaches," *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, 2000, pp. 273-281.
- 14) Chamis, C.C., "Simplified composite micromechanics equations for hygal, thermal, and mechanical properties," *SAMPE Quarterly*, 1984, April, pp. 14-23.
- 15) Kim, Seung Jo, Lee, Chang Sung, Shin, Heon, and Tong, Liyong, "Virtual Experimental Characterization of 3D Orthogonal Woven Composite Material," *42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, 16-19 April, 2001, Seattle, WA, USA.
- 16) Cox, Brian N., and Flanagan, Gerry, "Handbook of Analytical Methods for Textile Composites," *NASA Contractor Report 4750*.
- 17) *LS-DYNA3D User's Manual ver.936*, Livermore Software Technology Corporation, 1995.
- 18) Kim, Seung Jo, and Ji, Kuk Hyun, "Material and Low-Velocity Impact Characterizations of Textile Composite Plates," 17th Annual Technical Conference, American Society for Composites 2002, October 21-23, 2002, Indiana, USA.
- 19) Ji, Kuk Hyun, Byun, Wan Il, and Kim, Seung Jo, "Multi-Scale Low Velocity Impact Analysis of 3D Woven Composite Plates," 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 18-21 April 2005, Austin, Texas, USA.