論文

케블라 다축 경편성물 보강 복합재료의 충격 에너지 흡수 기구에 관한 연구

김 철* · 김성민* · 강태진*

Energy Absorption Mechanism of Kevlar Multiaxial Warp Knitted Fabric Composite under Impact Loading

C.Kim*, S.M.Kim* and T.J. Kang*

ABSTRACT

In an effort to study impact damage mechanism of Kevlar multiaxial warp knitted fabric composites, the impact behavior and damage tolerance were characterized based on energy approach and compared with those of Kevlar woven laminates. The total impact energy was classified into four terms of delamination energy, membrane energy, bending energy and rebounding energy. Membrane and bending energy were calculated by the image analysis of deformed shape of the impacted specimen while delamination energy was decided using deplying technique.

Multiaxial warp knitted composites(MWKs) showed higher impact fracture toughness and bending properties, which resulted in delamination energy and bending energy increase, while membrane and delamination energy were dominant factors for woven laminates. Delaminated area of woven laminates was much larger than those of MWKs, while delamination energy absorption was slightly higher since the impact fracture toughness of woven laminate was much smaller than those of MWKs.

1. 서 론

복합 재료 적층판에 대한 충격으로 야기 되는 문제를 해결하기 위하여 그 동안 여러 연구들이 진행되어 왔다. 크게 두 가지 관점의 접근 방법이 연구되어 왔으며, 하나는 내충격성을 가지는 재료를 연구하는 것이며, 또 다른 하나는 기존의 재료가 최대한의 충격 성능을 발휘하도록 만든 구조를 이용하는 것이다. 본 연구에서는 두 번째 관점에서의 접근 방법으로서, 기존의 내 충격용 복합 재료에 많이 사용되는 케블라 섬유를 이용한 다축 경편성물 구조를 보강한 복합재료의 충격 기구에 관한 연구이다.

복합 재료 전체에 파괴가 일어날 정도의 높은 에너지를 가함에 따라 발생하는 파괴 모드는 섬유의 절단이나 변형에 의한 것이 대부분인데 비하여, 낮은 에너지 수준의 충격에 의해서는 층간 분리나 기지재에 발생하는 균열이 주도적인 충격 에너지 흡수모드가 되는 것으로 알려져 있다. 높은 에너지의 충격에 의한 파괴 모드도 보강 섬유의 물성에 따라 양상이 약간씩 달라지게 된다. 예를 들어 유리 섬유나 탄소 섬유 등의 무기질 보강재를 사용하는 경우, 섬유의 절단에 의한 에너지 흡수가 주도적인 파괴 모드로 나타나게 되며, 케블라나 스펙트라 등의 절단 신도가 높은 섬유를 사용하는 경우, 섬유 자체의 변형에 의한 에너지 흡수가 주

*서울대학교 섬유고분자공학과

도적인 현상을 보인다. 탄소 섬유나 유리 섬유를 보강재로 이용한 기존의 연구에서는 고 에너지 충격에 의한 손상 부분을 hole로 가정하여 open hole compression test를 행한 시편의 물성과 비교 검토한 경우가 많이 보고되었으며, 이 경우 brittle 한 성질을 가지는 보강 섬유를 사용하였기 때문에, 충격 부분의 섬유 손상이 많이 발생한 경우, 해석에는 큰 무리가 없었다 [1-6].

근래에 들어 기존의 무기질 섬유 이외의 유기 고성능 섬유를 이용한 내 충격용 복합재료, 예를 들면 본 연구에서 사용한 케블라 보강 복합재료 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 섬유를 보강재로 사용하는 경우, 취성을 나타내는 유리 섬유나 탄소 섬유와 달리 섬유의 파단에 의한 에너지 흡수 보다는 층간 분리나 적층판의 변형에 의한 경우가 대부분이기 때문에, 탄소 섬유복합재료에 적용된 기존의 결과를 가지고는 해석을 하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 충격하중에 의한 에너지 흡수를 에너지 흡수 기구에 따라 정량화 하는 것이 요구된다. 본 연구에서는 케블라 다축 경편성물 보강 복합재료를 이용하여 충격에너지 흡수에 있어서 각 에너지 흡수 기구의 기여를 밝히고 이를 정량화 하고자 하였다.

2. 이론적 배경

복합재료에 충격이 가하여진 경우, 복합재료의 변형 기구는 적층 순서, 층간 전단력, 인장 성질과 굽힘 성질, 충격자의 무게와 속도, 기하학적 구조 등의 여러 가지 요인에 의하여 결정된다. 일반적으로 취성을 가지고 있는 유리 섬유나 탄소 섬유의 경우, 충격 에너지의 흡수 대부분은 섬유의 손상에 의한 것으로써, 상대적으로 적은 층간 분리 영역을 보이면서 관통이 발생하게 된다. 그러나 케블라나 아라미드 섬유와 같은 ductile한 섬유의 경우, 에너지 흡수는 층간 분리나 충격자에 의한 복합재료의 변형에 의하여 주도적으로 일어나게 된다. 낮은 수준의 에너지가 가해진 경우에는 층간 분리가, 높은 수준의 에너지가 가해지는 경우에는 변형이나 섬유의 파단 등이 주도적인 에너지 흡수 기구로서 작용하게 된다[6].

섬유의 파단이 일어나지 않는 정도의 낮은 에너지를 가한 경우, 충격자가 시편의 표면에 부딪친 순간, 충격자에 의하여 시편에 전달되어 지는 에너지는 크게 세 요소로 생각할 수 있다. 하나는 탄성 에너지로서 이는 탄성적인 변형에 의하여 시편에 저장되는 것으로 나중에 충격자에 되돌려지게 되는 부분이다. 다른 부분은 시스템에 의하여 손실되는 부분으로서, 실험 장치의 진동, 소음 등으로 인하여 완전히 손실되는 부분이며 나머지 하나는 시편의 변형과 층간 분리, 기타 방법으로 시편이 흡수하는 부분이다, 그러므로, 주어진 충격에 의한 총 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{total} = E_{reb} + E_{abs} + E_{loss} \tag{1}$$

where E_{total}: total applied energy
E_{reb}: rebounded energy to impactor,
E_{abs}: absorbed energy by specimen,
E_{loss}: energy loss due to the inelastic collision

또한 시편이 흡수한 에너지는 3가지의 하위 요소로 나눌 수 있는데, 그것들은 각각 멤브레인 변형에 의한 흡수 에너지E_{mb}, 굽힘에 의한 흡수 에너지E_{bd} 와 층간 분리에 의한 에너지 흡수E_{del} 이다. 결과적으로, 총 에너지의 합은 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$E_{total} = E_{reb} + E_{mb} + E_{bd} + E_{del} + E_{loss} \tag{2}$$

이러한 요소 중에서 가하여진 충격 에너지는 충격자의 속도와 무게를 이용하여 계산할 수 있으며, 충격자에 되돌려진 에너지는 충격 하중 하에서의 하중-변위 곡선을 이용하여 결정 할 수 있다. 또한 손실되어지는 에너지는 충격 시편의 최대 에너지 흡수와 가하여진 에너지와의 차이가 된다. 이들 각 기구에 의한 에너지 흡수를 구하기 위한 방법을 기술하면 다음과 같다.

변형에 의한 에너지 흡수

변형에 의하여 흡수된 멤브레인 에너지를 계산하기 위하여 3각형 요소를 사용하였으며, 각 점의 충격 전과 후의 좌표를 구하여 에너지 계산에 이용하였다. 충격 전의 각 노드의 좌표를 (u, v)라고 하면, 다음과 같은 식에 의하여 areal coordinate로 변환 가능하다.

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ U_1 & U_2 & U_3 \\ V_1 & V_2 & V_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ U \\ V \end{bmatrix} \tag{3}$$

각 삼각형 요소의 표면적은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ U_1 & U_2 & U_3 \\ V_1 & V_2 & V_3 \end{bmatrix} = U_1V_2+U_2V_3+U_3V_1-V_1U_2 \quad -V_2U_3-V_3U_1=2S \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} \tag{5}$$

로컬 (u,v)를 글로벌 (x, y,z) 좌표로 바꾸기 위하여 다음과 같이 정의한다.

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$X_u = \frac{\partial X}{\partial u} = X_1\frac{\partial L_1}{\partial u} + X_2\frac{\partial L_2}{\partial u} + X_3\frac{\partial L_3}{\partial u}$$
$$= \frac{1}{2S}(V_{23}X_1+V_{31}X_2+V_{12}X_3)$$
$$where \;\; V_{23} = V_2-V_3$$

$$X_v = \frac{\partial X}{\partial v} = X_1\frac{\partial L_1}{\partial v} + X_2\frac{\partial L_2}{\partial v} + X_3\frac{\partial L_3}{\partial v}$$
$$= \frac{1}{2S}(U_{32}X_1+U_{13}X_2+U_{21}X_3)$$
$$where \;\; U_{32} = U_3-U_2$$

결과적으로, 각 요소의 변형율은 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon_u = \frac{1}{2}\left[(X_u)^2+(Y_u)^2+(Z_u)^2-1\right]$$
$$\varepsilon_u = \frac{1}{2}\left[(X_v)^2+(Y_v)^2+(Z_v)^2-1\right] \tag{9}$$
$$\varepsilon_{uv} = (X_u)(X_v)+(Y_u)(Y_v)+(Z_u)(Z_v)$$

이를 이용하여 복합재료 판의 변형에 필요한 에너지를 구하면 변형에 의한 에너지 흡수 중 membrane변형에 의한 에너지 흡수는 다음과 같이 표현된다.

$$U_m = \frac{1}{2}\{\varepsilon\}[C_m]\{\varepsilon\}S \tag{10}$$

where $[C_m]$ is a tensile property matrix

Bending strain energy를 구하기 위하여 역시 3각형 node 요소를 사용하며 먼저 coordinate interpolation을 행하기 위해 다음 과정을 거친다.

$$X=L_1X_1+L_2X_2+L_3X_3+[L_1(L_1-1)\;L_2(L_2-1)\;L_3(L_3-1)][T]^{-1}\begin{bmatrix} X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} l_1^4(l_1^4-1) & l_2^4(l_2^4-1) & l_3^4(l_3^4-1) \\ l_1^5(l_3^5-1) & l_2^5(l_3^5-1) & l_3^5(l_3^5-1) \\ l_1^6(l_3^6-1) & l_2^6(l_3^6-1) & l_3^6(l_3^6-1) \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_1^4 & l_2^4 & l_3^4 \\ l_1^5 & l_2^5 & l_3^5 \\ l_1^6 & l_2^6 & l_3^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} X_{uu} \\ X_{vv} \\ X_{uv} \end{bmatrix} = \frac{1}{2S^2} \begin{bmatrix} V_{23}^2 & V_{31}^2 & V_{12}^2 \\ U_{32}^2 & U_{13}^2 & U_{21}^2 \\ V_{23}U_{32} & V_{31}U_{13} & V_{12}U_{21} \end{bmatrix} [T]^{-1} \begin{bmatrix} X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} \tag{14}$$

[P] 행렬을 다음과 같이 정의하면 bending energy의 식은 (16)번 식과 같이 된다.

$$[P] = \begin{bmatrix} X_{uu} & X_{vv} & X_{uv}+X_{vu} \\ Y_{uu} & Y_{vv} & Y_{uv}+Y_{vu} \\ Z_{uu} & Z_{vv} & Z_{uv}+Z_{vu} \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$U_B = \frac{1}{2}Tr\{[P][C_b]'[P]\}S \tag{16}$$

이와 같은 방법을 이용하여 에너지를 구하기 위해서는, 3차원적으로 변형된 시편 각 점의 정확한 좌표를 구하는 것이 필요하다.

층간 분리에 의한 에너지 흡수

본 연구에서 사용한 케블라 복합재료의 경우, 섬유의 파단 등에 의한 것보다는 섬유의 변형이나 층간 분리에 의하여 에너지 흡수가 일어나며 이를 분석하기 위한 가정은 다음과 같다.

1. 케블라 복합 재료에 저속 충격을 가한 경우, 섬유의 파단은 발생하지 않는다.
2. 저속 충격을 가한 경우, 평판으로 가정할 수 있을

정도의 작은 변형이 발생하며, 대부분의 에너지 흡수는 층간 분리에 의한 것이다.

충격 후 손상 부분의 면적에 ply number를 곱하고 다시 fracture toughness를 곱하면, 충격에 의해 새로운 surface를 만드는 데 필요한 에너지를 구할 수 있다.

$$E_{del} = K \cdot \sum_{i=1}^{n-1} A_i \qquad (17)$$

E_{del} : surface energy
K : fracture toughness
A_i : delaminated area
n : ply number of sites, which can be delaminated

충격에 의한 손상 영역을 평가하기 위한 방법으로, 충격에 의하여 층간 분리가 발생한 부분의 면적을 deply technique을 이용하여 구하고, 다시 이 data를 이용하여 층간 분리에 의하여 흡수되는 에너지를 구하도록 한다.

결과적으로 앞에서 말한 충격에 의한 에너지 흡수 기구 중 멤브레인 에너지, 굽힘에너지, 층간 분리에 의한 3가지를 정량화 하는 것이 가능하게 된다.

3가지 정량화가 가능한 부분이외에도 실험에 의하여 손상되는 부분이나, 보강 섬유 자체의 변형이나 손상에 의하여 흡수되는 에너지도 있을 것으로 생각되지만, 가한 에너지 수준이 관통이 발생하지 않을 정도의 낮은 수준이기 때문에 충분히 무시할 수 있을 정도의 낮은 수준이라고 가정하였다.

3. 실 험

시편 제작

복합 재료 보강용 섬유로는 케블라 29를 사용하였으며, 기지재로는 국도 화학의 범용 epoxy 인 YD-128을 사용하였다. 경화제로는 4,4 -diamino diphenyl methane(DDM) 을 수지와 무게 비 60:40으로 혼합하여 사용하였으며, 60도에서 30분간의 pre-cure, 120도에서 90분의 경화 시간을 주었으며, 5 MPa 의 압력으로 평판 press를 사용하여 성형하였다.

복합 재료 보강용 섬유 구조물로서는 2종류의 다축경편성 구조물(Multiaxial Warp Knitted Preform)과 일방향 prepreg, 한 종류의 직물을 이용하였다. 다축경편성 구조물은 보강되어있는 섬유의 구조에 따라 BTC(biaxial/tricot/chain)와 QTC(quadriaxial/tricot/chain)의 두 종류를 사용하였으며, 일방향 prepreg을 이용한 적층 복합 재료는 UD, 직물 보강 복합재료의 경우 Woven으로 통칭 하기로 한다. 아래의 표1에 사용된 섬유 구조물의 구성과 다축경편성물의 구조를 보이고 있다.

Table 1. Preform configurations and stacking sequences for laminate manufacturing

Fabric Code	BTC	QTC	UD	Woven
Knitting Type	Tricot/Chain	Tricot/Chain	none	none
Yarn	Kevlar29	Kevlar29	Kevlar29	
Bias Angle (degree)	0/90	0/45//0/-45	0	0/90
Insertion Fiber Volume Fraction (%)	36.8/36.8	20.2/19.7/6.9/19.7	100	50/50
Knitting Yarn Fraction(%)	26.4	13.5	0	0
Areal Density (g/cm^2)	0.044	0.077	0.022	0.044
Total Fiber Volume Fraction	0.51	0.55	0.60	0.61
Stacking Sequence	$[(0/90)_3]_s$	$[(0/90)_2]_s$	$[(0/45/-45/90)_3]_s$	$[(0/90)_3]_s$
Thickness(mm)	5.1	5.2	5.1	5.0

충격 시험

충격을 가하기 위하여 사용된 충격 시험기는 Radmana ITR-2000 instrumented Impact Tester였다. 압축 공기를 이용하여 충격자를 가속, 시편에 충격을 가하는 구조로 되어 있는 실험 장치이며, LVDT와 force transducer를 이용하여 충격 도중에 발생하는 변위와 하중을 기록하게 된다.

시편의 크기는 12.5cm X 12.5cm 이며, 두께는 5 mm 였다. 역시 압축 공기를 이용하여 치구에서 압력을 주어 고정시키게 되어 있으며, 본 연구에서는 600KPa의 압력을 가하여 시편을 고정시켰다. 충격실험을 위한 시편은 각각의 조건 당 5종류이며, 섬유 부피 분율은 60%로 조절하였다.

기본 물성 측정

에너지 계산에 필수적인 몇 가지 물성을 측정하기 위하여 인장, 굽힘, 층간 전단력 등의 기본 물성 측정 실험을 행하였다. ASTM D 638-M의 방법에 의하여 인장 실험을 행하였으며, crosshead speed는 분당 2 mm, loadcell은 50 kN이었다. 굽힘 실험은 4점 굽힘 실험으로 하였으며, crosshead speed는 분당 2 mm, span - depth ratio는 16:1로 하였다. 층간 전단력은 short beam shear test로 측정하였으며 crosshead speed는 2 mm, span - depth ratio는 4:1이었다. 모든 조건에서 각각 5개의 시편에 대하여 실험을 행하였다.

충격에 의한 변형좌표 구하기

CCD 카메라를 사용하여 변형된 시편을 5방향에서 화상을 얻었으며, 이렇게 얻어진 화상을 image analysis 방법을 이용하여 3차원 적으로 재구성하여 변형된 시편 각 점의 좌표를 획득하였다. 변형 전과 변형 후의 각 점을 1:1 대응 시키기 위해서, 충격 하중을 가하기 전에 시편 후면에 격자점을 프린팅하여 주었으며, 이렇게 격자점이 프린팅된 시편에 충격을 가하여 변형 후에 좌표를 측정하였다[7-9]. Figure 1에 이러한 방법의 개략적인 순서도를 보인다.

시편의 각 방향에서 얻은 화상들은 카메라의 곡률, 카메라와 시편의 거리, 시편의 변형 정도에 따라 실제 변형된 각 점이 위치하고 있는 장소에서 어느 정도 벗어나서 이미지상에 위치하게 된다. 이미지와 실제 좌표와의 관계를 이용하여 각 점들의 실제 위치를 구하는

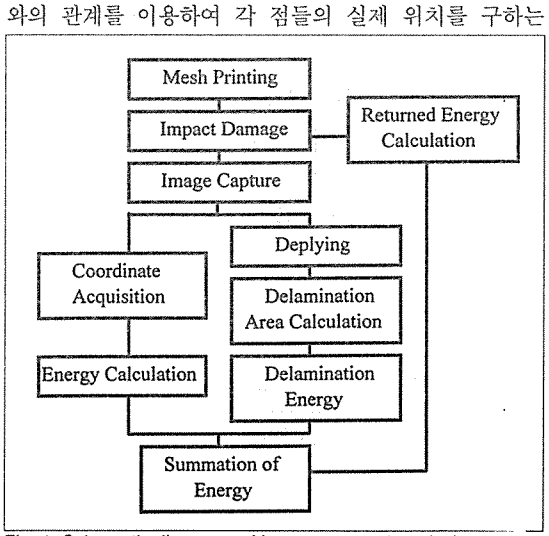

Fig. 1. Schematic diagrams of impact test and analysis procedure

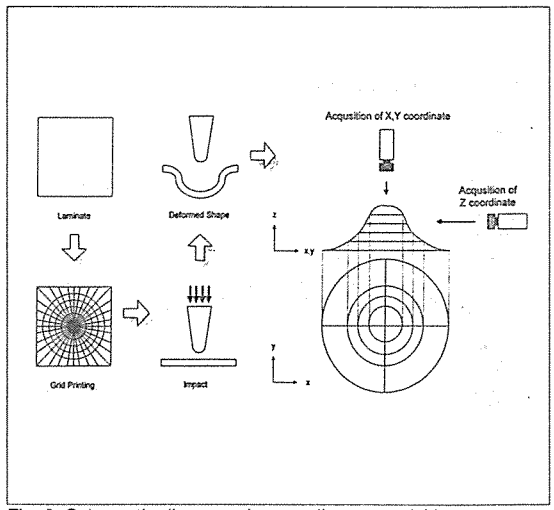

Fig. 2. Schematic diagrams for coordinate acquisition process by impact test

데 이용하였다.

변형된 좌표를 구하는 방법은 기존의 금속가공 분야에서 많이 연구되어 왔으며, 주로 Moire pattern을 이용하여 좌표를 구하는 경우가 많았다. 그러나 본 연구의 경우, 시편의 표면이 금속 표면처럼 매끈하지 않고, 보강 재료의 종류에 따라 약간의 요철이 존재하기 때문에 그러한 방법으로 좌표를 구하는 것이 불가능하였다. 따라서 직접 각 점들을 시편의 후면에 프린팅하여 좌표를 구하는 방법을 선택하였다. 옆면 사진은 총 4장을 찍게 되므로, 중심점을 제외한 각각의 점들은 평균 3회씩 측정되며, 이를 3차원적으로 재구성 할 때는 각각의 평균을 구하여 실제의 위치를 구하였다. 또한 각각의 점을 구한 후, 이들을 연결하여 에너지 계산에 필요한 삼각형 요소를 생성하여 주었다. 복합재료 전체의 표면적 변화나 변형 정도는 상당히 많은 편이지만, 각각의 요소 내에서의 변화는 그리 크지 않았으며, 그에 따라 요소 내에서는 선형성을 잃지 않는 것으로 생각할 수 있다고 가정하여 주었다.

이와 같은 과정의 모식도를 Figure 2에 보인다. Figure 2에서 보이는 바와 같이 충격을 받게 되는 점을 중심으로 간격 0.5cm의 동심원을 그려 주었으며, 각각의 동심원상에 16개의 점들을 변형율을 구하는 점으로 이용하였다. 제일 바깥쪽에 위치하는 원의 반지름이 4.5cm였으며, 측정된 점들의 총수는 129개였다.

다음 Figure 3는 이러한 방법을 이용하여 시편의 변형된 좌표를 구하는 프로그램의 실행 예를 보이고 있는 그림이다. 각 방향에서 찍은 사진들의 경우, 먼저 축

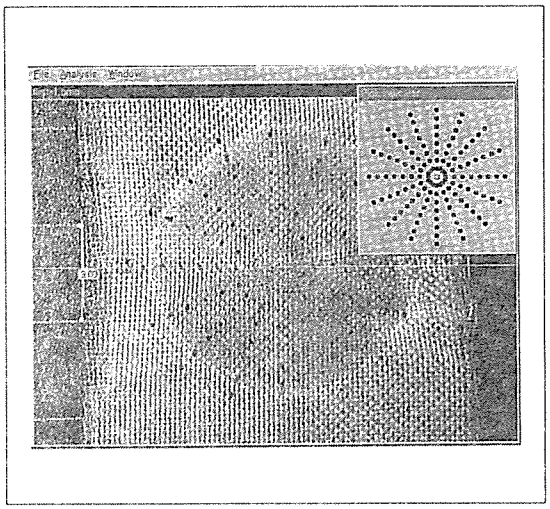

Fig. 3. Example of coordinate acquisition process

적을 결정하기 위하여 같이 찍힌 자의 길이를 결정하고, 사진에서 충격을 받은 중심 부분을 지정하여 주면 자동적으로 각 점의 중심점들을 찾아 좌표를 계산해 낸다. 프로그램은 Borland C++을 이용하여 작성하였으며, Silicon Graphics의 open GL library를 이용하여 3차원적으로 좌표를 구할 수 있었다.

4. 결과 및 토의

기본 물성

Table 2에 실험에 사용된 복합재료 시편의 기본 물성을 보인다.

다축 경편성물 적층판의 인장 탄성계수가 QTC의 경우에는 UD보다 낮은 값을 보이며, BTC의 경우에는 UD보다 높은 값을 보인다. BTC의 경우에는 섬유의 배열 방향이 0도와 90도 두 방향이기 때문에 상대적으로 많은 섬유가 보강 되기 때문이며, QTC와 UD는 비교를 위해 같은 방향으로 적층을 하였지만, QTC의 경우, 수직 방향의 loop fiber fraction만큼 물성이 떨어지는 결과를 보이게 된다. 보강 섬유가 두 방향으로만 배열되어 있는 BTC와 woven을 비교한 경우, 보강되어 있는 섬유의 부피분율은 직물쪽이 좀 더 높은 것을 알 수 있으나, 직물에 보강되어 있는 섬유들은 다축경편성물에 보강되어 있는 섬유들보다 더 큰 크림프가 있기 때문에 탄성계수가 감소하는 현상을 보이게 된다.

Table 2. Mechanical properties of multiaxial warp knitted fabric composite, UD and woven laminate

Property	BTC	QTC	UD	Woven
Tensile Modulus				
E_1(GPa)	8.53	6.48	6.87	7.38
E_2(GPa)	8.42	6.41	6.89	7.24
Shear Modulus				
G_{12}(GPa)	2.31	3.15	1.42	1.03
Poisson's Ratio				
V_{12}	0.25	21	0.27	0.12
Flexural Modulus				
(MPa)	104	126	85	65
ILSS (MPa)	46	54	32	30
Vol. Fraction	0.53	0.55	0.61	0.60

기본 물성에서 가장 특징적인 것은, 다축 경편성물의 층간 전단력이 직물이나 일방향 복합 재료에 비하여 월등히 향상한 결과를 나타낸다는 것이다. 이는 보강되어 있는 다축경편성물 표면의 roughness가 크기 때문에 접착 면적이 증가되어 나타나는 결과일 것으로 생각되어 진다.

층간 분리에 의한 에너지 흡수

Figure 4.는 충격을 받은 시편을 deply하여 층간 분리가 발생된 부분을 측정, 3차원 적으로 재구성한 그림이다. Deply technique을 적용하기 위하여 시편의 제작 시 끝 부분에 테플론 필름을 삽입하였으며, 충격을 가한 후 중심 부분에 직경 1mm 의 원공을 도입한

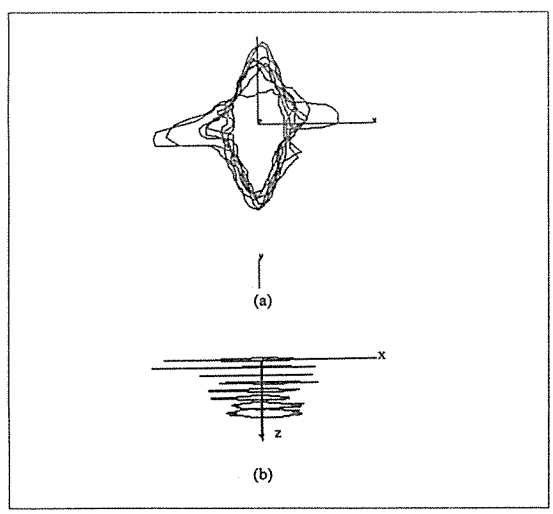

Fig. 4. Vertical(a) and side views(b) of delaminated patterns

후 iodine solution을 침투시켜 층간 분리가 일어난 부분에 착색하였다. 침투 후 일정한 시간이 지난 후 각 층을 분리, CCD camera를 이용하여 화상을 획득하였다.

직물 보강 시편의 경우, 충격을 받게 되는 중심 부분에서 층간 분리가 시작되며, 경위사 방향으로 보강되어 있는 섬유를 따라 층간 분리가 성장하게 된다. 직물 보강 복합재료의 경우 12 층이 적층 되어 있기 때문에, 8 군데의 층간 분리 발생 가능 장소가 존재하게 된다.

UD의 경우에는 24층이 적층 되어 있으며,층간 분리는 언제나 아래층에 위치하고 있는 보강 섬유의 방향에 의존하게 된다. 예를 들어, -45°/+45° 계면에서는 +45° 방향으로 층간 분리가 성장하게 된다.

Figure 5는 시편에 변형이 나타나지 않을 정도의 낮은 에너지 수준의 충격을 가한 후, 충격 에너지 흡수량과 층간 분리 영역의 관계를 나타낸 그림이다.

일정한 수준 이상의 에너지가 가해진 경우에 층간 분리가 나타나기 시작하는 것을 알 수 있으며, 이는 기본 물성에서 확인한 층간 전단력의 경향과도 일치한다. 즉, 층간 전단력이 높은 수치를 나타내는 시편의 경우, 층간 분리의 시작에 많은 에너지가 필요하였으며, 층간 전단력이 약한 UD나 직물 보강 복합재료의 경우 낮은 에너지 수준에서도 층간 분리가 발생하는 것을 알 수 있다. 다축경편성물의 경우, 11-12J 정도의 에너지에서 층간 분리가 나타나기 시작하였으며, UD나 직물 보강 재료의 경우 6-7J에서부터 층간 분리가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

또한 그래프에서 보이고 있는 각 시편들의 기울기는 층간 분리 일정 면적 당 필요한 에너지이기 때문에, impact fracture toughness로 생각할 수 있으며, 층간 분리 면적을 알 경우, impact fracture toughness와 곱하여 층간 분리로 인하여 흡수된 에너지를 구할 수 있을 것이다. Figure 5에서 구한 fracture toughness 의 값은 QTC 3.84 kJ/m^2 , BTC 1.87 kJ/m^2 , UD 1.22 , 직물 보강 재료의 경우 1.39의 값을 나타내었다.

Figure 6에 앞에서 행한 실험의 경우보다 상당히 높은 수준의 에너지를 가한 경우의 하중-변위 곡선을 보인다. 관통이 일어나지 않을 정도의 에너지를 가하도록 충격자의 속도를 조절하여 주었기 때문에, 최대 변위에 도달한 후 반동에 의하여 반대 방향으로 가속이 일어난다. 최대 변위에 도달한 경우, 충격자가 가지고 있는 역학적 에너지가 완전하게 시편에 전달 되었다고 가정하며, 가해진 에너지는 탄성 변형과 소성변형, 층간 분리에 의하여 흡수된다. 이중 탄성 변형에 의하여 흡수된 부분이 다시 충격자에 되돌려지게 되며, 이에 의하여 충격자의 반동이 발생하게 된다.

Figure 6의 하중-변형 곡선을 이용하여 에너지를 계산한 결과, 최고 변위에 도달한 후 흡수된 에너지 중 일부가 회복되는 것을 확인할 수 있다. 흡수된 에너지와 되돌려진 에너지의 비율은 물체의 특성에 따라 좌우되며, 얼마나 탄성체에 가까운가의 기준으로 삼을 수 있다. UD 의 경우 35%, 직물 보강 복합 재료는 17%, BTC와 QTC는 각각 19%와 18%의 에너지 회복을 보여 주었다. 결과적으로 UD가 다른 재료보다 더 탄성 거동을 보이는 것으로 생각할 수 있다. 앞에서 구한 impact fracture toughness를 이용한 층간 분리에 의한 충격에너지 흡수량을 구하면 fracture toughness값이 상당히 다름에도 불구하고, 층간 분리에 의해 흡수

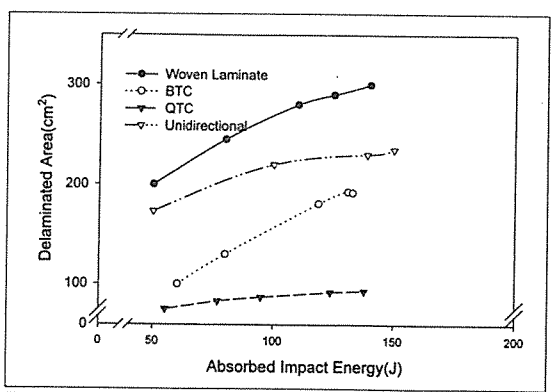

Fig. 5. Delaminated area versus absorbed impact energy with the increase of applied impact energy

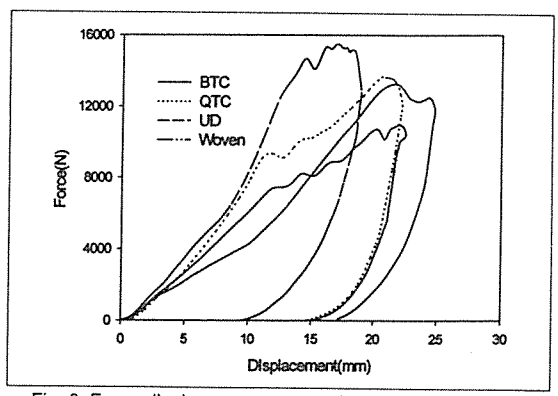

Fig. 6. Force-displacement curves of the impact specimen

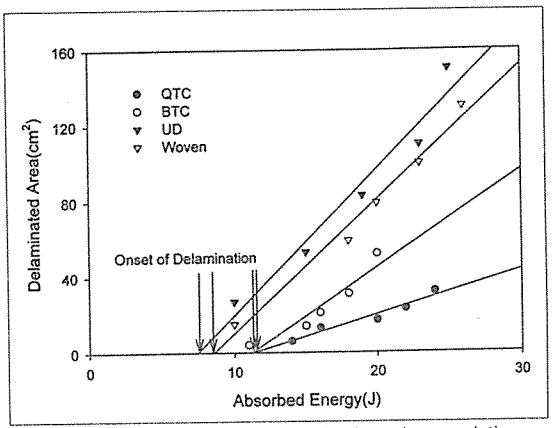

Fig. 7. Absorbed impact energy-delaminated area relations

한 에너지는 QTC, BTC가 각각 34, 36 J을 나타내었으며, UD와 직물 보강 재료는 각각 27, 38J의 에너지 흡수량을 보였다. 이는 전체 충격 에너지 흡수의 각각 28%(QTC), 27%(BTC),24%(UD), 28%(Woven)에 해당하는 것이다. Impact fracture toughness의 차이보다는 얼마나 탄성 거동을 보이는 가에 따라 층간 분리에 의한 에너지 흡수가 차이를 보이는 것으로 생각된다. 즉, 비교적 탄성체에 가까운 거동을 보이는 UD의 경우는 전체 에너지의 24%에 해당하는 에너지를 층간 분리 기구로 흡수하였고, 나머지 세 시편의 층간 분리에 의한 비율은 비슷한 값을 보였다. 물론, impact fracture가 다른 시편들보다 많이 낮은 직물 보강 재료는 훨씬 증가한 층간 분리 영역이 발생하는 결과를 가져오게 된다.

Figure 7은 충격 흡수 에너지와 층간 분리가 일어난 면적과의 관계를 보여주고 있는 그림이다. 선행했던 충격 실험에서 가한 수준보다 높은 수준의 에너지를 가하여 실험한 결과인데, 에너지가 일정 수준 이하인 경우는 층간 분리 영역과 흡수 에너지의 관계가 직선적임을 알 수 있지만 어느 한도 이상의 에너지가 가해지면 층간 분리 영역이 더 이상 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 충격자의 속도가 빨라질수록 충격이 전달되는 범위가 좁아져서 손상의 집중이 일어남을 의미하며, 그에 따라 층간 분리 보다는 다른 기구, 예를 들어 membrane deformation이나 bending deformation의 기여가 커지는 것을 의미한다.

Membrane and Bending Energy Absorption

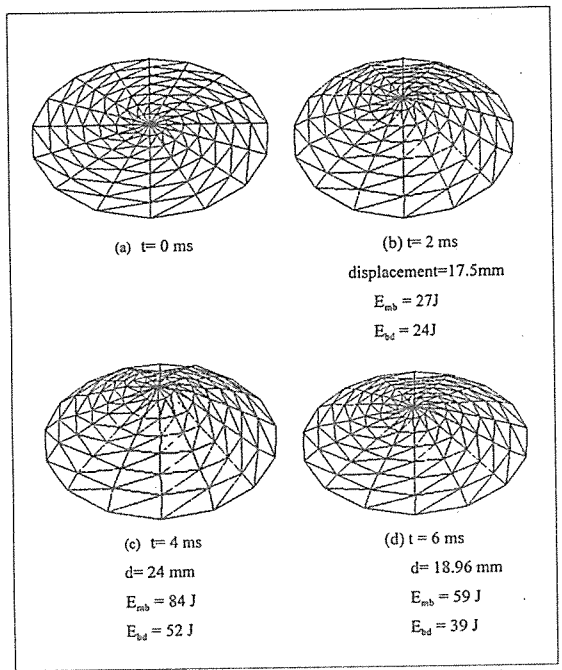

Fig. 8. Reconstructed 3-Dimensional deformed shape of impact specimen

앞에서 기술한 화상 처리법을 이용하여, 충격 시편의 3차원 좌표 정보를 획득하고, 시간에 따라 bending에 의한 것과 멤브레인 변형에 의한 에너지를 계산하였다. 앞에서 구한 기본 물성과 3차원 좌표들이 입력치로 사용되었으며 다음 Figure 8는 이러한 3차원 좌표를 재구성하여 시간에 따라 나타낸 것이다.

입력치로 사용되는 좌표는 충격을 받기 전과 충격을 받아서 변형된 좌표이며, 중간 단계의 좌표는 충격자의 변위에 따라 모든 점마다 같은 정도의 비율로 이동한다고 가정하였다. 즉, 초기 위치가 (1,0,0)인 점이 (1.2,0,-10)으로 이동한 경우, 중간 단계에서 각점의 좌표는 동시간대에서 충격자의 최종 위치에 대한 현재의 이동 비율과 곱하여 계산하였다. 즉, 시간에 따른 충격자의 이동비율과 같은 정도로 모든 점들의 변형이 발생한다고 가정하였다. 또한 시간에 따른 충격자의 변위는 실제 충격 실험을 행하여 얻은 시간-변위 곡선을 이용하였다.

Figure 9는 이러한 결과를 계산하기 위하여 제작한 프로그램의 결과를 보이고 있다. 왼쪽에 보이고 있는 그림은 변형된 충격 시편의 모양이며, 오른쪽 하단의 값들은 시간 간격에 따른 굽힘과 멤브레인 에너지를

가하여진 경우, 일정한 정도의 에너지 수준이 넘어서면서 층간 분리가 발생하기 시작한다고 하였으며, 본 연구에서의 결과도 이와 마찬가지의 경향을 보이는 것으로 생각할 수 있다. 특히, 다축경편성물을 보강재로 사용한 경우, 이러한 층간 분리의 발생이 억제되어 낮은 수준의 충격을 많이 받는 경우, 물성의 저하 가능성이 줄어들 것으로 생각 되어진다.

5. 결 과

케블라 다축경편성물 보강 복합재료의 충격 하중하에서의 에너지 흡수 기구에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 충격에 의하여 흡수되는 에너지를 4가지 성분으로 정의하였으며, 시간에 따른 각 기구의 에너지 흡수 기여를 계산하였다. 케블라와 같이 변형량이 많은 섬유를 보강재로 이용한 복합재료 적층판에 충격을 가한 경우, 복합재료판이 평면을 유지하지 않고 두께 방향으로의 변위가 크기 때문에, 이를 감안하여 에너지 계산을 하였으며, UD angle ply laminate는 가장 탄성체에 가까운 거동을 보였으며, 그에 따라 충격자에 되돌려 주게 되는 에너지량이 가장 컸다. Woven laminate의 경우, 층간 분리 영역의 확대로 인하여 층간 분리에 의하여 흡수된 에너지 부분이 가장 컸으며, 다른 재료에 비하여 멤브레인 변형에 의한 에너지 흡수가 컸음을 알 수 있었다. 다축경편성물 보강 복합재료의 경우, impact fracture toughness의 증가로 인한 층간 분리의 지연과 층간 분리 영역의 감소를 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Kinsey,A., Saunders,D.E. and Soutis,C., "Post-impact compressive behavior of low temperature curing woven CFRP laminates", Composites, Vol. 26, 1995, pp.661-667.

2. Clark, G., "Modeling of impact damage in composite laminates", Composite, Vol. 20, 1989, pp.209-314.

3. Nuismer, R.J. and Labor, J.D., "Applications of the average stress failure criterion : Part II.Compression", J.Comp.Mater., Vol. 13, 1979, pp.46-60.

4. Delfosse,D. and Poursartip,A., "Energy-based approach to impact damage in CFRP laminates", Composites, Vol. 24, 1997, pp.647-655.

5. Poe,C.C.Jr, "Simulated impact damage in a thick graphite/epoxy laminate using spherical indenters", Nasa TM-100539, Nasa Langley Research Center, VA,1988.

6. Sun,C.T. and Grady,J.E., "Dynamic delamination fracture toughness of a graphite/epoxy laminate under impact", Composite Science and Technology, Vol. 31, 1988, pp.55-72.

7. Ayres,R., Brewer,E.G. and Holland,S.W., "Grid circle analyzer; Computer aided measurement of deformation", Transactions SAE, Vol. 88, 1979, pp.2630-2634.

8. Miyoshi,A., Yoshioka,A. and Yagawa,G., "Strain measurement of structures with curved surface by means of personal computer-based picture processing", Engineerings with Computers, Vol. 3, 1988, pp.149-156.

9. Vogel,J.H. and Lee,D., "An automated two-view method for determining strain distributions on deformed surfaces", Journal of Materials Shaping Technology, Vol. 6, 1989, pp.205-216.