

## 論文

### 자동적층 공정에 의한 3차원 직교 섬유배열구조 복합재의 충격특성

송승욱\*, 이창훈\*\*, 변준형\*\*\*, 엄문광\*\*, 황병선\*\*

### Impact Performance of 3D Orthogonal Composites by Automated Tape Placement Process

S-W Song\*, C-H Lee\*\*, J-H Byun\*\*\*, M-K Um\*\*, B-S Hwang\*\*

#### ABSTRACT

In order to characterize the outstanding performance of three-dimensional (3D) composites, the low velocity impact test has been carried out. 3D fiber structures have been achieved by using the automated tape placement (ATP) process and a stitching method. Materials for the ATP and the stitching process were carbon/epoxy prepreg tapes and Kevlar fibers, respectively. Two-dimensional composites with the same stacking sequence as 3D counterparts have also been fabricated for the comparison of damage tolerance. For the assessment of damage after the impact loading, specimens were subjected to C-Scan nondestructive inspection. Compression after impact (CAI) tests were conducted to evaluate residual compressive strength. The damage area of 3D composites was greatly reduced (30-40%) compared with that of 2D composites. Although the CAI strength did not show drastic improvement for 3D composites, the ratio of retained strength was 5-10% higher than 2D samples. The effect of stitching on the impact performance was negligible above the energy level of 35 Joules.

#### 초 록

3차원 복합재료의 뛰어난 특성을 확인하기 위하여 저속충격 시험을 하였다. 복합재료의 3차원 구조는 자동적층 공정(ATP, Automated Tape Placement)과 스티칭(stitching) 방법으로 제조하였다. 이 방법은 일정한 폭을 가지는 탄소섬유/에폭시 프리프레그 테이프를 균일한 간격을 두고 층 별로 서로 직교 적층한 후 비어 있는 공간 사이를 케블라 섬유로 스티칭하는 성형법이다. 새로운 3차원 복합재료와 기존의 프리프레그 시트(sheet)를 사용한 2차원 복합재료와의 충격특성을 비교하기 위하여 저속충격 시험을 하였으며, C-scan에 의한 충격손상 면적 확인 및 충격 후 압축시험을 하였다. 3D 복합재는 스티칭을 하기 위한 간격으로 인하여 복합재료의 전체 섬유 체적율이 낮아졌기 때문에 충격 전 압축 강도는 2D 복합재에 비해 낮았으나 충격 후 파손면적은 약 30-40%의 감소를 보였으며, 충격 전 압축 강도에 대한 충격 후 압축강도 비율은 약 5-10%의 증가를 보였다. 스티칭에 의해 충격 후 압축강도는 전반적으로 향상되었으나, 30J의 충격 에너지부터는 그 효과가 감소하였으며 35J 이상의 충격에서는 스티칭 효과가 없었다.

**Key Words:** 자동적층(automated tape placement), 3차원 복합재료(3D composites), 스티칭(stitching), 충격시험(impact test), C-Scan

\* 부경대학교 고분자공학과

\*\* 한국기계연구원 복합재료그룹

\*\*\* 한국기계연구원 복합재료그룹, 교신저자(E-mail: bjh1673@kmail.kimm.re.kr)

### 1. 서론

복합재료는 제조 중 혹은 운행 중에 발생하는 다양한 형태의 충격에 의하여 심각한 손상을 받게 된다. 두께방향으로 보강섬유가 없는 기존의 2D 적층 복합재료는 이런 충격에 의해 층간분리가 일어날 수 있다.[1-3] 이러한 2D 적층 복합재료의 단점을 극복하기 위하여 여러 방법들이 시도되고 있으나, 가장 효과적인 것은 섬유를 두께 방향으로도 보강하는 3차원(3D, three-dimensional) 복합재료의 사용이다.

두께 방향의 섬유보강은 3D 위빙(waving)이나 3D 브레이딩(braiding)과 같은 3차원 직조 [4,5]에 의해 얻을 수 있으나, 이 방법은 특수한 직조 장비를 사용해야 하고, 제조 시간이 길며, 크기가 대체로 제한되어 있다. 가장 경제적으로 두께방향의 섬유 보강을 할 수 있는 방법은 스티칭(stitching) 기술인데, 이것은 여러 장 적층된 직물을 두께방향의 바늘 관통에 의해 전체를 결속시키는 방법으로서 제품의 크기나 형상에 크게 제한 받지 않는 장점이 있다. 이러한 직조 방법은 주로 유연한 섬유를 사용한 프리폼 제조 기술로서 복합재료화 하기 위해서는 수지충전기술(RTM) 등과 같은 액상성형 과정을 거쳐야 한다.[6] 최근 들어 복합재료 항공기 부품 제조에서도 경제적인 성형법을 요구하고 있기 때문에 기존의 오토클레이브 성형법을 탈피한 새로운 성형 기술로서 수지충전 성형법에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나, 항공기 부품에 사용되는 재료는 여전히 프리프레그가 대부분을 차지하고 있는데 그 이유는 작업의 친숙성 및 용이성, 재료 물성에 대한 신뢰성, 낮은 기공 및 높은 섬유체적률 등의 장점이 있기 때문이다.

3D 위빙이나 3D 브레이딩과 같은 직조 공정을 이용한 3차원 구조의 복합재를 제조하기 위해서는 딱딱한 프리프레그를 사용할 수 없는 반면에 스티칭의 경우에는 바늘이 관통할 수 있는 공간이 있으면 된다. 즉, 프리프레그로 적층된 전체 두께를 관통한 섬유 보강을 하기 위해서 바늘이 관통할 수 있는 공간을 만들어 줄 필요가 있다. 이렇게 공간을 비워 두고 적층을 하기위한 방법으로, 본 논문에서는 일정한 폭을 가지는 프리프레그 테이프를 균일한 간격을 두고 층 별로 서로 직교 적층한 후 비어 있는 공간 사이를 케블라 섬유로 스티칭을 함으로써 3D 섬유배열을 얻는 새로운 방법을 적용하였다.

프리프레그 테이프를 사용하여 일정하고 균일한 간격을 유지하면서 적층하기 위해서는 자동화된 정밀 성형이 되어야 하는데, 본 연구에서는 최근 많은 관심을 끌고 있는 성형법인 섬유자동배열·적층(ATP, Automated Tape Placement) 기술을 사용하였다. 이 기술은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 섬유 혹은 프리프레그 테이프를 원하는 방향으로 배열함과 동시에 금형 표면에 압착시키며, 이 과정을 반복하여 일정한 두께가 될 때까지 연속 적층하여 복합재를 제조하는 새로운 성형기술이다. [7]

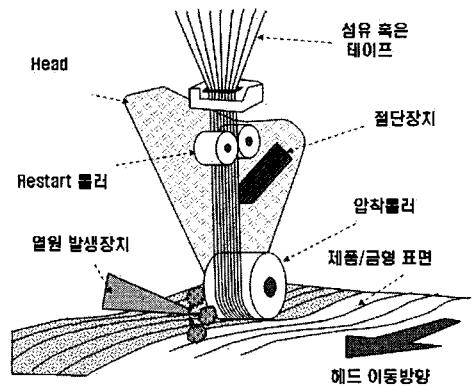


Fig. 1 Automated tape placement process.

ATP 및 스티칭에 의한 복합재료는 다양한 3차원 구조를 보여줄 수 있다. 테이프 배열 각도에 따라 평면상의 직교배열이나 준등방 섬유배열이 가능하며 사용하는 테이프 폭에 따라 두께방향 섬유 밀도(stitching density)를 달리 할 수도 있다. 섬유 방향은 복합재료의 면내 특성이나 충격 특성 등을 좌우하며 두께방향 섬유 밀도는 층간전단이나 충격 특성에 영향을 준다. 기존의 직조형 프리폼에 스티칭하는 복합재료의 경우에는 두께방향 섬유 밀도의 차이에 따른 복합재료 전체 섬유체적률 변화가 거의 없는 반면에 본 연구에서 적용한 3D 구조는 스티칭 밀도를 조절하기 위해서는 테이프 폭을 달리 해야 하므로 복합재료의 섬유체적률이 변화한다. 또, 준등방 섬유배열을 하는 경우, 스티칭이 가능하려면 배열 각도에 따라 테이프 폭을 달리해야 하므로 ATP 기계의 헤드가 두 개이거나 하나의 헤드이나 여러 테이프를 동시에 사용할 수 있는 multi-tape 형태의 기계를 사용할 필요가 있다.

본 논문에서는, ATP 및 스티칭에 의한 다양한 3D 구조 및 기존의 2D 적층 복합재료에 대한 충격특성을 비교하고자 한다. ATP 공정 변수로는 스티칭 밀도와 연관이 있는 사용 테이프의 폭을 변화시키고 섬유 배열은 직교형태이다. 스티칭 변수로는 스티칭 섬유의 추가적인 보강효과와 섬유 루프(loop)의 영향을 보기 위하여 스티칭 기계를 사용한 경우와 수작업에 의한 경우로 변화를 주었다. 충격 후 시편손상을 C-Scan에 의해 확인하였으며 압축시험을 통하여 손상 후 압축강도를 상호 비교하였다.

### 2. 시편제조

#### 2.1 2D 복합재

3D 복합재의 충격특성 변화를 확인하기 위하여, 2D 복합재를 제작하였다. 시편 제조에 사용한 탄소섬유/에폭시 프리

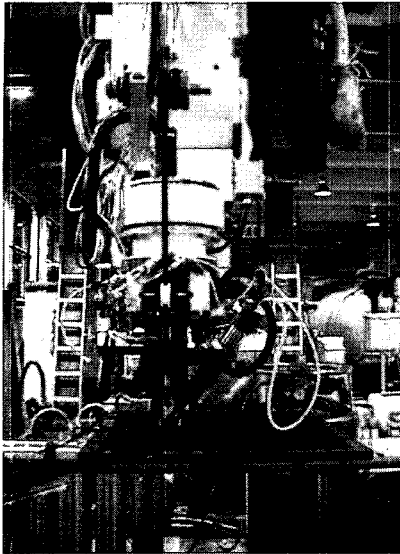


Fig. 2 ATP machine.

Table 1 Specification of USN125BX

| SPEC      | USN125BX                     |
|-----------|------------------------------|
| Fiber     | MISUBISHI TR50               |
| Resin     | Bisphenol A type + DICY base |
| Thickness | 0.125 mm                     |

프레그는 (주)SK 케미칼 제품이며 Table 1에 그 특징을 나타내었다. 적층순서는  $[0/90]_{10S}$ 이며, 오토클레이브 성형하였다.

## 2.2 섬유자동배열에 의한 3D 복합재

일반적으로 스티칭은 직물 프리폼을 결속시키기 위해 사용되고 있으나 프리프레그와 같이 비교적 딱딱한 재료는 마찰 저항으로 인해 두꺼운 적층 구조를 스티칭 하는 것이 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 2에 보이는 바와 같은 ATP기계를 이용하여 Fig. 3(a)의 프리프레그 테이프를 1mm 간격을 두고 배열하여 한 층을 깔고, 그 다음 층의 테이프 적층은 아래층과 직각 방향으로 배열함으로써, 전체 두께를 관통하여 일정한 공간이 만들어진  $[0/90]_{10S}$  적층 구조를 제작하였다. 그 다음, 비어있는  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 의 공간에 스티칭하였는데, 섬유는 Kevlar 29 로서 400 데니어 안을 세 가닥 끈 것을 사용하였다. 스티칭 작업은 바늘에서 공급되는 실과 보빈에서 나오는 실이 상하 교차하면서 루프를 만들기 때문에 섬유가 분리되지 않도록 끈 실을 사용해야 한다. 또, 바늘이 관통하는 방향이 직각이고 여러 층의 보강재 프리폼을 지나게 되므로 스티칭 섬유는 인성이 매우 높은 케블라 섬유를 사용하였다.

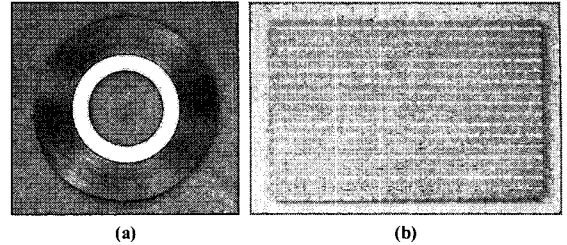


Fig. 3 (a) Carbon/epoxy prepreg tape and (b) stitched sample.

자동적층에 사용한 프리프레그 테이프는 Table 1에 보인 2D 복합재와 같은 재료이며 폭은 5mm 및 10mm 두 종류를 사용하였다. Fig. 3(b)는 적층 후 두께 방향으로 스티칭한 시편 형상이다. 프리프레그 테이프의 적층과 경화방법은 2D 복합재와 같은 조건으로 하였다.

사용한 시편의 종류는 2D 복합재 (ORT-SH)와 3D 시편으로서, 5mm 테이프로 적층하여 기계로 스티칭한 시편 (ORT-05)과 수작업으로 스티칭한 시편 (ORT-05H) 및 10mm 테이프로 적층하여 수작업으로 스티칭한 시편 (ORT-10H) 이다. 시편의 크기는  $100 \times 150\text{mm}$  이며 두께는 약 4-5 mm 이다.

## 2.3 미세조직관찰

Fig. 4(a) 및 (b)는 각각 기계 및 수작업으로 스티칭한 3D 시편의 0도 섬유 방향의 단면 모습으로서 케블라 섬유의 두께 방향 배열 상태를 보여주고 있다. 밝게 보이는 부분이 0도 층이며, 어둡게 보이는 층이 90도 층이다. Fig. 4(a)는 기계를 사용한 interlock 스티칭 방법으로 인하여 보빈에서 공급되는 실과 바늘에서 나오는 실이 만나는 루프가 복합재 두께의 중간에 위치함을 볼 수 있다. 또, 첫 번째 루프에서, 프리프레그의 일부가 루프 내에 갇혀 있는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 기계 작업의 경우, 스티칭 바늘이 강제적으로 관통하기 때문에 주위의 프리프레그 테이프를 같이 끌고 내려갔기 때문이다.

한편, 기계작업의 경우에는 루프를 이루면서 두 가닥의 섬유가 배열되어 있고 섬유의 굴곡이 다소 생긴 것을 볼 수 있는 반면에, 수작업의 경우에는 한 가닥의 섬유가 비교적 직선으로 배열되어 있다. Fig. 4(c)는 길이 방향의 단면에서 스티칭 섬유가 지나지 않은 부분을 보인 것인데, 여기서, 0도 섬유의 직진성을 볼 때 프리프레그 테이프의 배열상태는 매우 우수함을 알 수 있다.

## 2.4 충격시험

각 시편의 충격특성을 평가하기 위해 SACMA SRM 2R-94에 의한 저속 충격시험 (low velocity impact test)을 하였다. 에너지 레벨은 20J, 25J, 30J, 35J의 네 가지로 하였다.

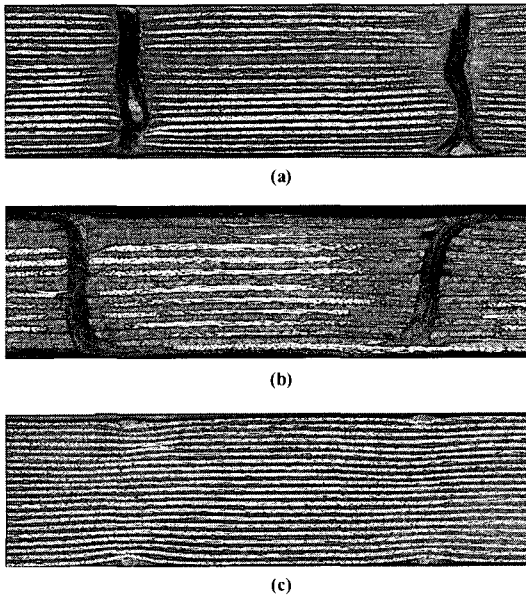


Fig. 4 Microstructures of 3D composites: (a) a section along the 0 fiber direction incorporated with z-fibers by machine-stitching; (b) a section along the same direction with z-fibers by hand-stitching; and (c) a section along the same direction without z-fibers .

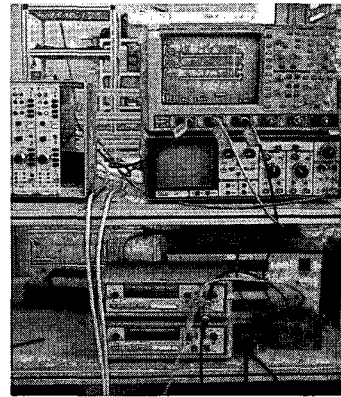
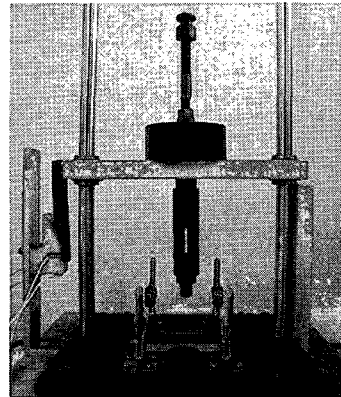


Fig. 5 Low velocity impact test rig: (a) SACMA test fixture; and (b) data aquisition system.

Fig. 5는 충격시험에 사용된 데이터 처리장치와 낙추 충격 시험 장치를 보여주고 있으며, 충격자는 지름 15.75mm의 반구형 팁을 사용하였다.

충격손상을 평가하기 위해 PAC-IPR-90을 사용한 C-Scan 비파괴 검사를 하였으며, 복합재료의 잔류강도는 충격 후 압축시험(CAI, Compression After Impact Test)으로 평가하였다. 시편은 Boeing BSS 7260의 CAI 시험 지그에 고정시켰으며, Instron 8503 (50ton) 에서 압축 시험을 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 충격 전 압축강도

시편의 충격 후 잔류압축 강도를 평가하기 위한 기준치를 구하기 위해 충격을 가하지 않은 시편에 대하여 압축 시험을 하였다. Table 2는 각 시편의 압축강도 및 압축 탄성계수를 나타낸 것인데 ORT-SH는 프리프레그 시트를 적층한 2차원 시편이고, ORT-05와 ORT-10은 5mm, 10mm 폭의 프리프레그 테이프를 적층한 후 스티칭한 3차원 시편이다.

Table 2에서 보면, 3D복합재가 2D 복합재의 압축강도보다 낮게 나왔는데 그 이유는 스티칭을 하기 위한 간격으로 인하여 복합재료의 전체 섬유 체적율이 낮아졌기 때문이다. 테이프 폭이 10mm 인 시편이 폭 5mm 인 시편 보다 압축강도가

Table 2 Compressive test result

| Type                       | ORT-SH | ORT-05 | ORT-10 |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| Maximum Load [N]           | 20900  | 15880  | 19780  |
| Compressive strength [MPa] | 743    | 670    | 728    |
| Compressive modulus [GPa]  | 55.7   | 60.0   | 55.6   |

더 높은 이유도 10mm 폭의 경우가 전체적인 스티칭 공간이 적어서 섬유 체적율이 더 높았기 때문이다. 실제로, 테이프 간의 간격으로 인한 섬유체적율 감소를 계산하면 약 5-10%이다.

그러나, 섬유체적율이 더 낮은 ORT-5 시편이 압축탄성계수가 더 높았는데, 그 이유는 스티칭 섬유량이 ORT-10 보다 2배 많고 또, 스티칭 방향이 압축시험 방향과 같기 때문에 길이 방향으로 보강되었기 때문이다. ORT-05의 경우를 보면

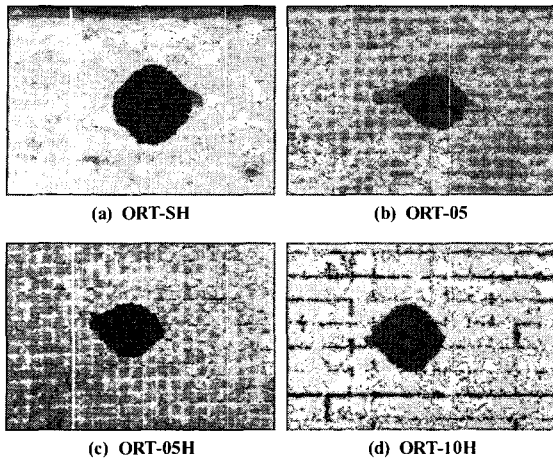


Fig. 6 C-Scan results of 25 Joule impact energy.

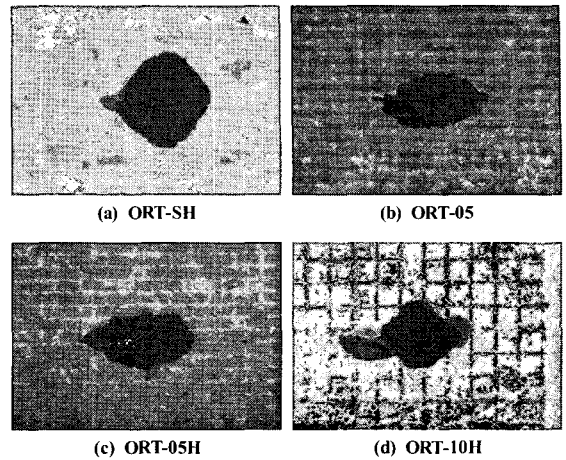


Fig. 7 C-Scan results of 30 Joule impact energy.

스티칭 섬유 량이 2배 더 많음에도 불구하고 강도 값이 향상되지 않은 이유는 케블라 섬유 자체의 압축강도가 낮기 때문에 [8] 섬유량이 많음으로 인한 효과가 없기 때문이다. 즉, 스티칭 용으로 케블라 섬유를 사용할 때 스티칭 밀도가 높을수록 길이 방향의 압축 탄성율은 증가될 수 있으나 압축 강도는 낮아짐을 알 수 있다.

### 3.2 C-Scan 비파괴 검사

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 25 Joule 및 30 Joule의 충격 에너지를 가한 후 각 시편의 C-Scan 결과이다. 이 그림은 전체 시편의 일부인 90x130 mm<sup>2</sup>의 크기만을 보인 것이다. 결합이 있는 영역은 중앙의 짙은 색으로 표시되고, 중앙 부분의 결합 주위에 옅은 색으로 표시된 것은 다른 층에서의 층간분리를 나타낸다. Fig. 6 (d) 및 Fig. 7 (d)에서 보이는 격자무늬는 스티칭을 위한 공간을 생성하기 위한 프리프레그 테이프의 빈 간격을 나타낸 것이다. 0도 90도 방향으로 테이프를 적층할 때 1mm 간격의 공간만큼 형성된 수지 영역은 그 주위의 섬유체적율이 높은 영역과는 다른 재료 탄성 특성을 가지고 있기 때문에 음향적 임피던스차이에 의하여 초음파의 반사율이 높다. 따라서 섬유 체적율이 낮은 부위에서는 초음파의 반사 신호가 높게 수신되어 격자무늬가 발생된 것으로 판단된다. 그러나 테이프의 폭이 5mm인 경우에는 Fig. 6 (b) 및 (c) 그리고 Fig. 7 (b) 및 (c)와 같이 그 격자무늬가 희미하게 나타났으며, 이는 격자 위치에서의 초음파 반사가 발생하고 있으나 그 간격이 좁은 반면 초음파의 빔 폭이 넓어 이와 같은 현상을 C-scan 영상에서 세밀하게 구분하지 못하였기 때문이다.[9]

2D 시편의 경우에는 원에 가까운 형상으로 손상이 생긴 데 반하여 3D 시편은 스티칭 섬유로 인하여 한 쪽 방향으로 손상 진전이 제한되어 있음을 알 수 있다. 스티칭 섬유의

배열은 시편의 가로 방향인데, 시편의 상하 표면에 스티칭 섬유가 드러나는 것 이외는 시편의 가로와 세로 방향으로 스티칭 간격이 일정함에도 불구하고 손상 진전이 비대칭 형상을 보이는 것이 특이하다. 그 이유는 3D 시편의 상하 표면은 가로 방향으로 프리프레그 테이프가 일정한 간격을 두고 배열되기 때문에 이 방향으로 손상 진전이 일어났기 때문이라고 볼 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 보면, 2D 복합재료에 비하여 3D 복합재료가 스티칭 섬유의 영향으로 충격 후 손상 면적이 작게 나타나고 있다. 3D 시편의 경우 충격 에너지가 높을수록 0도 테이프가 배열되는 방향으로 더 큰 손상이 생기지만, 손상영역의 세로 방향으로는 층간분리 진전이 상당히 억제되고 있음을 볼 수 있다.

### 3.3 충격특성

#### 3.3.1 충격반응

Fig. 8은 시간에 대한 충격에너지 변화를 보여주는 곡선이며, 충격 완료시점에서의 에너지는 손실에너지로서 시편에 가해진 에너지를 나타낸다. 여기서 보는 바와 같이 모든 에너지 레벨에 대하여 3D 복합재료 (ORT-05)가 2D 복합재료에 비하여 손실에너지가 작다. 그 이유는 2D 복합재료의 경우 충격 에너지는 모두 층간분리의 형태로 흡수되었지만, 3D 복합재료에서는 층간분리뿐만 아니라 스티칭 섬유에 의해 충격에너지가 흡수되었기 때문이다.

Fig. 9는 20 Joule의 충격 에너지에 대한 2D 및 3D 복합재료 (ORT-05)의 하중-시간과 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 하중-시간 그래프에서, 2D 시편의 최대 하중 감소는 약 4000N 임에 비하여 3D 시편의 최대 하중 감소는 그 절반 수준을 보이고 있다. 또, 최대 하중의 크기도 2D 시편은 9000N 이나 3D 시편은 8000N 이하다. 2D 복합재료

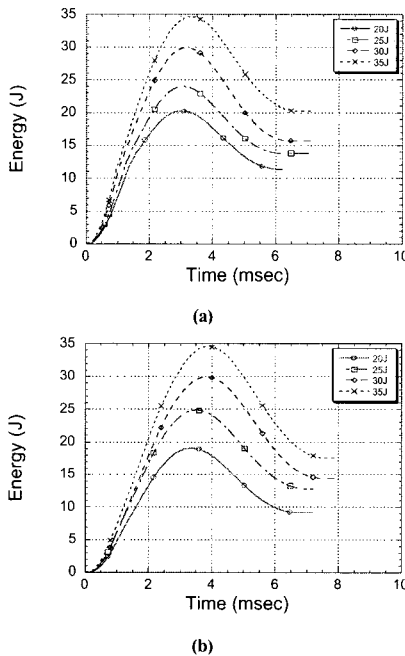


Fig. 8 Energy-time curves: (a) 2D composites; (b) 3D composites.

에서 보이는 하중의 큰 감소는 층간분리에 의해 에너지가 흡수되었기 때문이며, 3D 복합재료는 층간분리가 억제되어 하중감소의 폭이 비교적 적게 나타났다. 하중-변위 곡선에서 보면, 충격 후 시편의 영구 변형량은 2D 및 3D 복합재료 모두 비슷한 값을 보이고 있다.

3.3.2 2D 및 3D 시편 비교

Table 3은 네 가지 충격에너지를 가했을 때 2D 복합재료와 3D 복합재료의 충격시험 결과를 정리한 것이다.[삭제]2D 시편에 비하여 3D 시편의 경우가 대체로 손상크기가 작았고 충격 후 압축강도도 ORT-05H를 제외하고는 높았다. 3D 시편 가운데에는 ORT-05가 가장 충격 성능이 우수하였다. ORT-SH와 ORT-05의 충격시험 결과를 보면, 단위두께 당 충격에너지의 크기는 시편의 두께 차이로 인하여 3D 복합재료가 약 10%정도 더 큰 에너지를 받았다고 볼 수 있으나, 파손 면적은 2D 복합재료에 비하여 30% ~ 40% 감소하였다. 그 이유는 스티칭 섬유로 인하여 층간분리가 억제되었기 때문이다. 그러나 2D 복합재료에 비하여 3D 복합재료의 압축 강도가 현저하게 향상되지 않은 이유는 스티칭 섬유 배열을 위한 공간에 수직만 채워져서 전체적인 섬유 체적율이 감소하였기 때문이다.

ORT-05 복합재의 경우, 25 Joule 이나 30 Joule 에너지보다 35 Joule의 에너지에서 급격한 파손면적 증가와 잔류 압축강도 저하를 볼 수 있다. 이것은 스티칭 섬유의 보강이

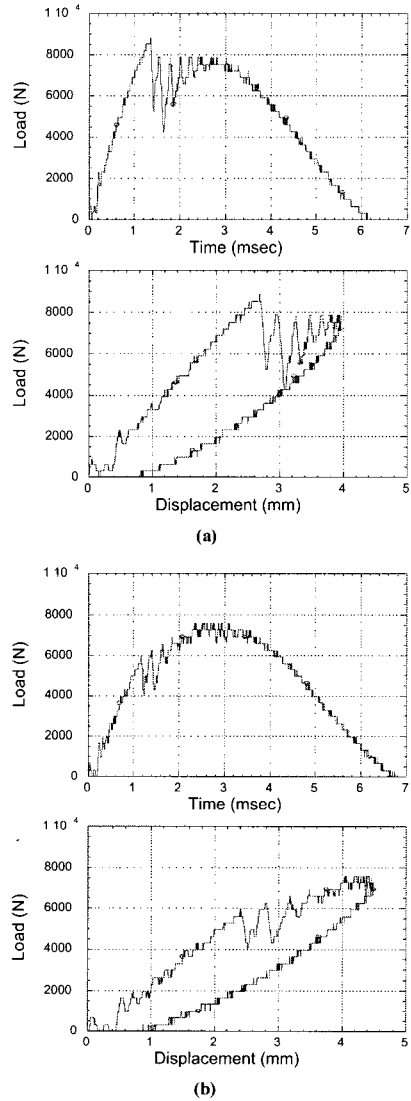


Fig. 9 Load-time and load-displacement curves: (a) 2D composites; (b) 3D composites.

어느 정도의 에너지 수준 이상이면 층간분리 억제효과가 상당히 감소한다는 것을 보여주고 있다.

3.3.3 스티칭 방법

같은 폭의 테이프를 적층 한 후 기계에 의해 스티칭한 시편 (ORT-05)과 수작업으로 스티칭한 시편 (ORT-05H)을 서로 비교하였다. Table 3의 시편 두께를 보면 수작업에 의한 스티치 시편의 두께가 더 얇다. 기계 스티칭의 경우에는 needle 과 bobbin에서 yarn이 공급되어 시편 두께의 중앙부위에서 loop이 생기고 스티칭 섬유가 상하로 지나기

Table 3 Impact test results of 2D and 3D composites

| Type         | Thickness (mm) | Impact energy per unit thickness (J/mm) | Impact energy loss per unit thickness (J/mm) | Damage area (mm <sup>2</sup> ) | Residual compressive strength (MPa) |
|--------------|----------------|---|--|--------------------------------|-------------------------------------|
| ORT-SH (2D)  | 4.77           | 4.18                                    | 2.33   | 994 (±110)                     | 201 (±7)                            |
|              | 4.77           | 5.23                                    | 2.95   | 1366 (±379)                    | 192.6 (±26)                         |
|              | 4.76           | 6.26                                    | 3.39   | 1333 (±97)                     | 187.4 (±12)                         |
|              | 4.75           | 7.32                                    | 4.27   | 1623 (±175)                    | 173.5 (±10)                         |
| ORT-05 (3D)  | 4.23           | 4.57                                    | 2.22   | 656 (±83)                      | 231 (±15)                           |
|              | 4.25           | 5.93                                    | 2.98   | 918 (±28)                      | 202 (±23)                           |
|              | 4.03           | 7.42                                    | 3.66   | 798 (±79)                      | 203 (±12)                           |
|              | 4.07           | 8.40                                    | 4.29   | 985 (±113)                     | 171.0 (±15)                         |
| ORT-05H (3D) | 3.96           | 4.98                                    | 2.51   | 735 (±138)                     | 196.5 (±24)                         |
|              | 3.96           | 6.30                                    | 3.13   | 887 (±284)                     | 177.9 (±2)                          |
|              | 4.01           | 7.56                                    | 4.00   | 988 (±46)                      | 180.6 (±11)                         |
|              | 4.01           | 8.67                                    | 5.10   | 1537 (±120)                    | 170.2 (±19)                         |
| ORT-10H (3D) | 4.50           | 4.39                                    | 2.07   | 798 (±97)                      | 232 (±22)                           |
|              | 4.51           | 5.57                                    | 3.00   | 996 (±213)                     | 198.1 (±13)                         |
|              | 4.49           | 6.77                                    | 3.47   | 1118 (±254)                    | 190.4 (±20)                         |
|              | 4.50           | 7.73                                    | 4.71   | 1293 (±116)                    | 172.4 (±11)                         |

때문에 두께가 증가한 것으로 보인다. 수작업의 경우에는 loop 형성 없이 하나의 스티칭 섬유를 사용하였으므로 두께가 더 얇다고 판단된다.

ORT-05H의 경우 충격 후 손상 면적이 대체적으로 더 크게 나타났다. 그 이유는 이 시편의 얇은 두께로 인하여 단위 두께 당 받은 에너지가 더 크고 또한, 시편 전체 두께를 결속하는 스티칭 섬유가 ORT-05의 경우에 비해 반밖에 되지 않기 때문이라고 볼 수 있다. 충격 후 압축강도는 손상크기와 반비례하여 손상 크기가 더 큰 ORT-05H의 경우가 더 작게 나타났다.

### 3.3.4 스티칭 간격

스티칭 간격의 변화는 사용한 테이프의 폭을 변화시켜 알 수 있다. 일반적인 직물 프리폼에 스티칭하는 경우는 스티칭 간격의 변화에 따라 섬유 체적율을 변화가 거의 없는

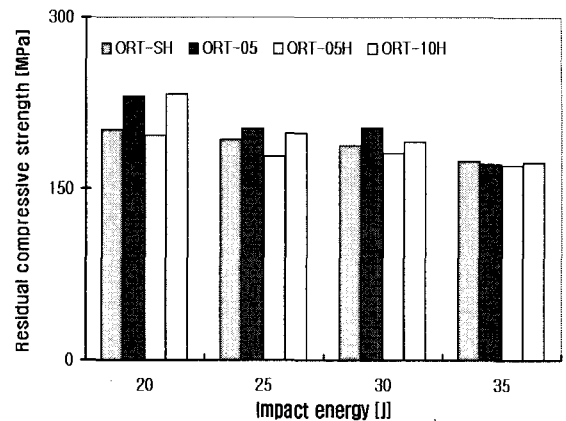


Fig. 10 CAI test results.

반면에 본 연구에서의 3D 시편의 경우에는 테이프 폭의 변화에 따라 복합재료의 섬유 체적율이 같이 변화한다는 점에서 큰 차이가 있다. 즉, 5mm 테이프를 사용하는 경우에는 10mm 테이프를 사용할 때보다 스티칭 섬유량은 증가하나 전체 섬유 체적율은 낮아진다.

Table 3에서, ORT-10H 시편은 ORT-05H 시편보다 섬유 체적율이 높고, 단위 두께 당 에너지가 작용에도 불구하고 손상면적이 크게 나타난 이유는 스티칭 밀도가 낮기 때문에 층간 분리를 억제하는 능력이 떨어지기 때문이라고 볼 수 있다. 그러나 충격 에너지가 가장 큰 35 Joule이 작용했을 때 ORT-10H의 경우가 손상면적이 더 작게 나타났는데 이렇게 큰 에너지가 작용하면 스티칭 섬유의 영향보다는 시편 두께의 영향이 더 크기 때문이라고 생각된다.

충격 후 압축 강도를 보면 ORT-10H가 손상면적이 큼에도 불구하고 강도는 ORT-05H보다 더 높게 나타났다. 그 이유는 ORT-10H 시편이 스티칭 간격이 넓음으로 인하여 전체 섬유 체적율이 더 높기 때문이라고 볼 수 있다. 한편, 35 Joule 에너지의 경우 ORT-10H가 손상면적이 더 작지만 압축잔류강도는 거의 비슷한 값을 보이고 있는 것이 특이하다.

### 3.3.5 스티칭 효과

Fig. 10은 잔류 압축강도를 비교한 것인데, 섬유체적율의 감소가 있지만 ORT-05 시편이 가장 강도가 높지만 수작업으로 스티칭한 ORT-05H 시편은 가장 낮은 값을 보인다. 그 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 시편의 두께와 스티칭 섬유량 때문이다. 10mm 폭의 테이프를 사용한 ORT-10H의 경우 ORT-05와 비슷한 잔류압축 강도를 보이고 있는데 그 이유는 스티칭 효과라기 보다는 섬유 체적율이 더 높기 때문이다. 에너지가 비교적 높은 35 Joule의 경우, 비교한 네 가지 복합재료 모두 거의 비슷한 강도를 보이고 있음을 볼 때 이 에너지 이상의 충격에서는 스티칭 효과가 거의 없음을 알 수 있다.

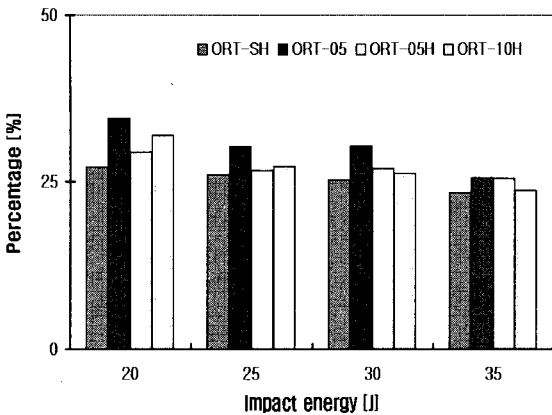


Fig. 11 Comparison of stitching effect.

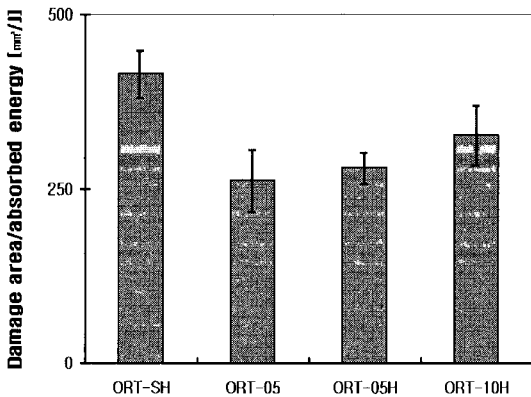


Fig. 12 Comparison of damage area per absorbed energy.

Fig. 11은 충격 전 압축강도에 대한 2D 및 3D 복합재의 잔류 압축강도 비율을 계산한 것이다. 충격을 가하지 않은 상태를 100으로 했을 때 각 시편의 에너지에 대한 잔류 압축강도 비율을 보면, 스티칭을 함으로써 그렇지 않은 경우에 비하여 잔류강도가 전반적으로 향상됨을 볼 수 있다.

Fig. 12는 손상면적을 단위 두께 당 시편에 가해진 에너지로 나눈 값으로서 각 에너지 레벨에 대한 값을 평균한 것이다. 이 그래프는 시편의 두께나 가한 충격에너지 차이에 관계없이 단위 에너지에 대한 복합재료의 손상크기를 보여주는 것으로서 각 재료의 충격저항을 직접 비교할 수 있다. 막대그래프 위에 표시한 선은 표준편차를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면, 스티칭을 한 3D 시편이 2D 시편에 비해 손상 크기가 작음을 알 수 있다. 3D 시편 중에서는 기계에 의해 스티칭을 한 ORT-05가 가장 낮은 값을, 수작업에 의해 스티칭 간격을 2배로 늘인 ORT-10H가 가장 높은 손상 면적을 보였다.

#### 4. 결론

탄소섬유/에폭시 프리프레그 시트로 제조한 2D 복합재와 5mm 및 10mm 폭을 가지는 같은 재료의 프리프레그 테이프를 적층한 후 스티칭한 3D 복합재의 충격특성에 대한 비교 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 20, 25, 30, 35 Joule의 네 가지 에너지 레벨에 대하여 충격 시험을 한 결과 2D 시편에 비하여 3D 시편의 경우가 손상크기가 작았다. 충격 전 압축강도 및 압축탄성율은 3D 복합재가 더 낮게 나왔는데 그 이유는 스티칭을 하기 위한 간격으로 인하여 복합재료의 전체 섬유 체적율이 낮아졌기 때문이다. 그럼에도 불구하고 충격 후 압축강도는 ORT-05H를 제외하고는 3D 시편이 더 높았으며, 충격 전 압축강도에 대한 충격 후 잔류 압축강도 비율을 보면 스티칭을 함으로써 7% 이상 향상되었다.
- (2) 3D 시편 중에서는 기계의 의해 5mm 간격으로 스티칭한 ORT-05 복합재료가 손상 면적이 가장 작고 잔류압축강도는 가장 높았다. 또, 2D 복합재에 비해 충격 후 파손 부위는 약 33-40%의 감소하였으며, 충격 후 압축강도는 약 5-10%의 증가를 보였다.
- (3) 5mm 폭의 테이프를 적층한 후 기계로 스티칭한 시편 (ORT-05)과 수작업으로 스티칭한 시편 (ORT-05H)을 비교하면, 시편 전체 두께를 결속하는 스티칭 섬유량이 더 적은 ORT-05H가 손상면적이 더 크고 잔류압축 강도는 더 작았다.
- (4) 서로 다른 폭의 테이프를 적층하여 스티칭 밀도를 달리한 시편을 비교하면, 10mm 테이프를 적층하여 스티칭 밀도가 ORT-05H 시편의 반 수준인 ORT-10H 경우가 섬유 체적율이 높고, 단위 두께 당 에너지가 작음에도 불구하고 손상면적이 크게 나타났는데, 그 이유는 스티칭 밀도가 낮기 때문에 층간 분리를 충분히 억제하지 못했기 때문이다.
- (5) 3D 구조의 복합재의 경우 스티칭에 의해 충격 후 압축강도는 전반적으로 향상되었으나, 30 Joule 부터는 그 효과가 감소하였으며 35 Joule의 경우, 비교한 네 가지 복합재료 모두 거의 비슷한 강도를 보이고 있었다. 따라서, 이 에너지 이상의 충격에서는 스티칭 효과가 거의 없었다.

#### 후기

본 연구는 21C 프론티어 사업(차세대 소재성형 기술 개발사업)과 기본연구사업의 연구비 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.



## 참고문헌

- 1) Abrate, S., *Impact on composite structures*, Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- 2) Schoeppner, G.A. and Abrate, S., "Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates," *Composites: Part A*, Vol. 31, 2000, pp. 903-915.
- 3) Mouritz, A.P., Leong K.H., and Herszberg, I., "A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites," *Composites Part A*, Vol. 28 1997, pp. 979-991.
- 4) Byun, J-H. and Chou, T-W., "Mechanics of Textile Composites," *Comprehensive Composite Material*, A. Kelly and C. Zweben (Eds), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, Vol. 1, Chapter 22, 2000, pp. 719~ 761.
- 5) 홍순곤, 변준형, 이상관, "3차원 직조형 열가소성수지 복합 재료 제조 및 특성화," 한국복합재료학회지, 제16권 제2호, 2003, pp. 33-40
- 6) 변준형, 엄문광, 이우일, 강문구, "복합재료의 액상성형 공정의 현황과 전망," 한국복합재료학회지, 제16권 제1호, 2003, pp. 58-67.
- 7) 김진현, 엄문광, 변준형, 이상관, 전영준, "FPS 공정에 의한 열경화성 복합재 유효성 검증연구," 한국복합재료 학회, 추계학술발표대회, 10. 15, 부산대학교, 2004, pp. 241-245.
- 8) Hull, D., *An introduction to composite materials*, Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- 9) 최상우, 개인 의견 교환.