

섬유 자동 배열에 의한 새로운 3D 복합재의 충격특성

송승욱**·이창훈*·송재은***·변준형*·엄문광*

Impact Properties of New 3D Composites by Fiber Placement Processing

S-W Song**, C-H Lee*, J-E Song***, J-H Byun*, M-K Um*

Abstract

In order to improve the damage tolerance of the conventional laminated composites, three-dimensional fiber structures incorporated with stitching yarns have been utilized in this study. From the newly developed process termed as TAPIS(Tape Placement Incorporated with Stitching), carbon/epoxy composites have been fabricated. Two-dimensional composites with the same stacking sequence as 3D counterparts have also been fabricated for the property comparison. To examine the damage resistance performance the low speed drop weight impact test has been adopted. For the assessment of damage after the impact loading, specimens were subjected to C-scan nondestructive inspection compression after impact(CAI) were also conducted to evaluate residual compressive strength. Although the damage area of 3D composites was greatly reduced(30-40%) compared with that of 2D composites, the CAI strength did not show drastic improvement.

Key Words: Automated tape placement, stitching, 3D composites, impact, C-scan

1. 서 론

항공 우주 구조물에 사용되는 복합재료는 제조 중 혹은 운행 중에 발생하는 다양한 형태의 충격에 의하여 심각한 손상을 받을 수 있다. 특히, 기존의 2D 복합재료는 두께방향으로 보강섬유가 없기 때문에 충격 손상에 의한 층간분리현상이 쉽게 일어난다.[1] 이런 이유로 인하여 적층복합재료는 하중을 많이 받지 않는 2차구조물에 주로 사용되고 있다. 2D 적층복합재료의 단점을 극복하고 1차구조물에 복합재료의 적용을 확대하기 위하여 여러 방법들이 시도되고 있으나, 가장 효과적인 것은 섬유를 두께 방향으로도 보강한 3차원(3D, three-dimensional) 복합재료의 사용이다.

두께 방향의 섬유보강은 일반적으로 3차원 직조에 의해 얻을 수 있는데, 대표적인 기술로서 3D braiding, 3D weaving 및 스티칭 (stitching)이

있다. 이 중 스티칭 기술은 2차원 섬유배열의 직물을 여러 장 적층한 것을 두께방향의 바늘 관통에 의해 전체를 결속시키는 방법이다. 이 기술은 제품의 크기나 형상에 크게 제한 받지 않으며 생산성이 매우 높은 반면에 바늘의 관통으로 인하여 섬유 손상이 생기고 복합재료 성형 시 수지침이 불완전할 수 있다는 단점이 있다.[2] 이 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 프리프레그 테이프를 일정한 간격으로 가로, 세로로 적층한 후에 비어있는 공간에 스티칭 함으로써 3D 섬유배열을 얻는 새로운 방법을 적용하였다. 사용재료는 카본/에폭시 프리프레그이며 정확하고 일정한 간격을 주기 위하여 FPS (Fiber Placement System)를 이용한 섬유자동적층 (ATP, Automated Tape Placement) 기술을 사용하였다.

기존의 2D 복합재료에 대한 새로운 형태의 3D 복합재료의 충격특성을 확인하기 위하여 각 시편에 대한 충격시험을 실시한 후 충격 후 시편손상을 C-scan에 의해 확인하였으며 압축시험을 통하여 손상 후 압축강도를 상호 비교하였다.

* 한국기계연구원 복합재료 그룹

** 부경대학교, 고분자공학과

*** 창원기능대학, 컴퓨터 응용 기계과

2. 시편제조

2.1 2D 복합재

3D 복합재의 충격특성을 비교하기 위하여, 2D 복합재를 제작하였다. 시편 제조에 사용된 탄소/에폭시 프리프레그는 (주)SK 케미칼 제품이며 Table 1에 그 특징을 나타내었다. 적층순서는 $[0/90]_{10s}$ 이며, 오토클레이브 성형하였다.

Table 1 Specification of USN125BX

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

2.2 섬유자동배열에 의한 새로운 3D 복합재

일반적으로 스티칭은 직물 프리폼을 결속시키기 위해 사용되고 있다. 그러나, 프리프레그처럼 비교적 딱딱한 재료는 마찰저항으로 인해 두꺼운 적층 구조를 스티칭 하는 것이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 테이프 형태의 프리프레그를 1mm 간격을 두고 가로, 세로로 적층한 후 비어있는 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 의 정사각형 공간에 케블라 섬유로 스티칭하였다. 일정한 간격의 테이프 배열을 위해 위치 및 이동 제어 정밀도가 우수한 FPS 기계를 사용하였다. 섬유자동배열에 사용된 프리프레그 테이프는 2D 복합재와 같은 재료이며 폭은 5mm이다. Fig. 1은 프리프레그 테이프의 사진이다. Fig. 2는 섬유자동배열에 의한 적층 장면과 적층 후 스티칭된 시편 형상이다. 프리프레그 테이프의 적층 순서와 경화방법은 2D 복합재와 같은 조건으로 하였다.

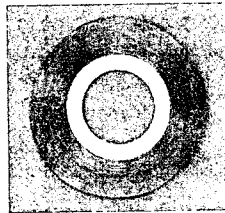


Fig. 1 Prepreg tape.

2.3 미세 조직 관찰

Fig. 3(a) 및 (b)는 3D 시편의 단면 모습을 보인 것이다. Fig. 3(a)는 z-섬유의 두께방향 배열 상태를 보여주고 있는데 밝게 보이는 부분이 0도 층이며, 어둡게 보이는 층이 90도 배열의 테이프이다. 사용한 Interlock 스티칭 방법으로 인하여 bobbin 실과 needle 실이 만나는 루프(loop)가 복합재 두께의 중간에 위치함을 볼 수 있다.

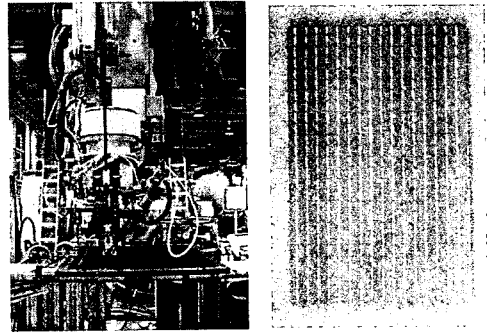
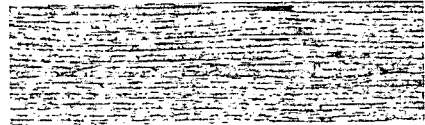


Fig. 2 FPS and stitched sample.



a)



b)

Fig. 3 Microstructure of 3D composites.

Fig. 3(b)는 길이방향의 단면에서 z-섬유가 지나지 않은 부분으로서 밝게 보이는 것은 0도 층이며, 어둡게 보이는 것은 90도 층이다. 여기서, 0도 섬유의 직진성을 볼 때 프리프레그 테이프의 배열상태는 매우 우수하다고 볼 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. 4는 충격시험에 사용된 데이터 처리장치와 낙추 충격시험 장치를 보여주고 있으며, 충격자는 지름 15.75mm의 반구형 팁을 사용하였다.

충격손상을 평가하기 위해 PAC-IPR-90를 사용한 C-scan 비파괴 검사를 하였으며, 충격 후 복합재료의 압축 특성을 평가하기 위해 충격 후 압축 (CAI, Compressive After Impact) 시험을 하였다. 시편은 Boeing BSS 7260의 CAI 시험장치에 고정시켰으며, Instron 8503 (50ton) 에서 압축시험을 하였다.

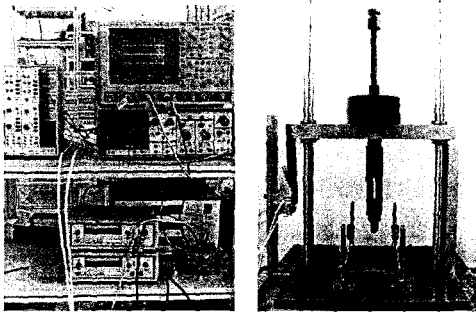


Fig. 4 SACMA test fixture.

3. 결과 및 고찰

3.1 압축강도

Table 2는 각 시편의 압축강도 및 압축 강성을 나타낸 것인데 ORT-SH는 프리프레그 sheet를 적층한 2차원 시편이고, ORT-05는 5mm 폭의 프리프레그 테이프를 적층한 3차원 시편이다. 3D복합재가 2D 복합재의 압축강도보다 낮게 나왔는데 그 이유는 stitch 공간을 형성하기 위한 간격으로 인하여 전체적인 섬유체적율이 낮아졌기 때문이라고 생각된다. 실제로, 테이프 간의 간격으로 인한 섬유체적율 감소를 계산하면 약 6%이다.

Table 2 Compressive test result

Type	Max load(N)	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (GPa)
ORT-SH	20942	743.222	62.404
ORT-05	15878	670.322	59.997

3.2 C-scan 비파괴 검사

Fig. 5는 충격시험 후 시편의 C-scan 결과이다. 파손형상을 보면 2D 복합재는 파손 부위가 전체적으로 퍼진 것에 비하여 3D 복합재는 길이 방향으로 퍼진 것을 볼 수 있다. 파손크기는 2D 복합재에 비해 3D 복합재의 파손 부위가 작은 것을 알 수 있는데, 그 이유는 두께방향의 스티치 섬유로 인하여 층간분리가 억제되었기 때문이다.

3.3 충격특성

Fig. 6은 시간에 충격에너지 변화를 보여주는 곡선으로서, 충격 완료 시점에서의 에너지는 손실 에너지를 나타낸다.

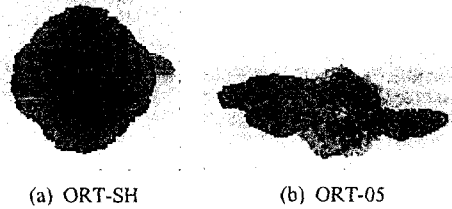
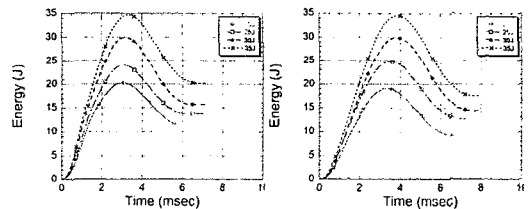


Fig. 5 C-scan results.

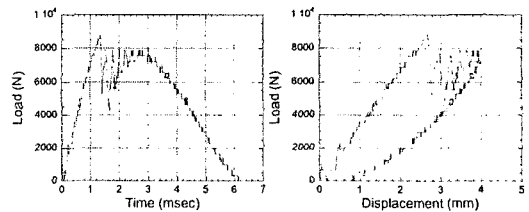
여기서 3D 복합재료가 2D 복합재료에 비하여 손실에너지가 작은 이유는 z-섬유에 의해 층간분리가 감소되기 때문이다.

Fig. 7은 20J에 대한 2D 및 3D 복합재료의 하중-시간과 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 2D 복합재료에서 보이는 하중의 큰 감소는 층간분리에 의해 에너지가 흡수되기 때문이며, 3D 복합재료는 층간분리가 억제되어 하중감소의 폭이 비교적 작게 나타났다.

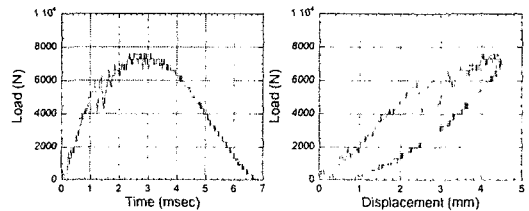


(a) 2D composites (b) 3D composites

Fig. 6 Energy vs. time curves.



(a)



(b)

Fig. 7 Load-time and load-displacement curves: (a) 2D composites; (b) 3D composites.

Table 3은 네 가지 충격에너지를 가했을 때 2D 복합재료와 3D 복합재료의 충격시험 결과를 보인 것이다. 단위두께 당 충격에너지의 크기를 보면 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 z-섬유로 인하여 층간분리가 억제되었기 때문이다. 그러나 2D 복합재료에 비하여 3D 복합재료의 강도가 현저하게 향상되지 않은 이유는 z-섬유 배열을 위한 공간에 수지만 채워져서 전체적인 섬유체적율이 감소하였기 때문이다.

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

Type	Impact energy per unit thickness (J/mm)	Impact energy loss per unit thickness (J/mm)	Damage area (mm ²)	Residual compressive strength (MPa)
ORT-SH	4.177	2.333	993.9(±110)	201.3(±7)
	5.226	2.948	1366(±379)	192.6(±26)
	6.261	3.391	1333(±97)	187.4(±12)
	7.320	4.270	1623(±175)	173.5(±10)
ORT-05	4.572	2.219	656.1(±83)	230.5(±15)
	5.934	2.983	918.3(±28)	202.2(±23)
	7.424	3.658	797.6(±79)	203.2(±12)
	8.396	4.287	985.4(±113)	171.0(±15)

잔류압축강도의 절대 값을 비교하더라도 35J의 충격에너지를 제외하면 3D 복합재료의 강도가 전반적으로 더 높다. ORT-05 복합재료의 경우, 25J 이나 30J 에너지 보다 35J의 에너지에서 급격한 파손면적 증가와 잔류 압축강도 저하를 볼 수 있다. 이것은 z-섬유의 보강이 어느 정도의 에너지 수준 이상이면 층간분리 억제효과가 상당히 감소한다는 것을 시사하고 있으며, 이에 대한 더 깊은 연구가 필요하다.

3.5 스티치 효과

Fig. 8은 충격 전-후의 압축시험 결과에 따라 2D 및 3D 복합재료의 압축강도 손실을 계산하고, 스티치 효과를 비교한 것이다. 여기서 보는 바와 같이 스티칭을 함으로서 강도가 전반적으로 향상되나, 30J 이상의 에너지를 가한 경우에는 그 효과가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 적층배열 순서, 스티칭 밀도 등과 밀접한 관계가 있으므로 상관관계 규명을 위하여 추가 연구가

필요하다.

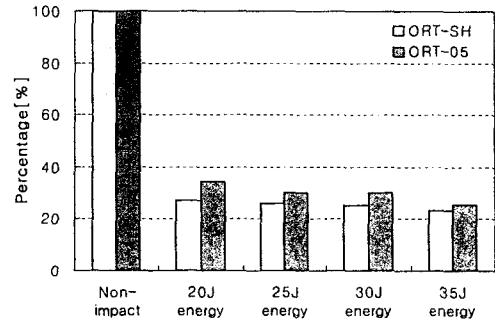


Fig. 8 Comparison of stitching effect.

4. 결론

탄소섬유/에폭시 프리프레그 sheet로 제조한 2D 복합재료와 5mm 폭을 가지는 같은 재료의 프리프레그 테이프를 이용한 3D 복합재료의 충격특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 스티치에 의한 3D 복합재료는 2D 복합재료에 비해 충격 전 압축 특성은 저하되었으나 충격 후 파손 부위는 3D 복합재료가 약 33-40%의 감소하였으며, 충격 후 압축강도는 약 5-10%의 증가를 보였다.
- 3D 구조의 복합재료의 경우 스티칭에 의해 충격 후 압축강도는 전반적으로 향상되었으나, 30J 이상의 에너지의 경우에는 그 효과가 감소하였다.

후기

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

참고문헌

- (1) A.P. Mouritz, K.H. Leong and I. Herszberg, "A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites", Composite Part A, 28A, 1997, pp. 979~991.
- (2) J. H. Byun and T. W. Chou, "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.