

2D 및 3D 직조형 복합재료의 충격특성

변준형**, 엄문광*, 황병선*, 송승욱*, 강 형**

Impact Properties of 2D and 3D Textile Composites

Joon-Hyung Byun⁺, Moon-Kwang Um^{*}, Byung-Sun Hwang^{*}, Seung-Wook Song^{*}, Hyung Kang^{**}

Key Words: Three-dimensional (3D) textile, Impact, Orthogonal weave, C-scan, CAI

Abstract

Laminated composites are liable to fatal damage under impact load due to the fact that they have no reinforcement in the thickness direction. To overcome the inherent weakness, three dimensional (3D) textile reinforcements have drawn much interests. In this paper, impact performance of 2D and 3D textile composites has been characterized. For 2D composites, fiber bundle size and fiber pattern have been varied. For 3D composites, orthogonal woven preforms of different density and type of through-thickness fibers have been studied. To assess the damage after the impact loading, specimens were subjected to C-scan nondestructive inspection. Compression after impact (CAI) were also conducted in order to evaluate residual compressive strength.

1. 서론

여러 복합재료 산업에서 널리 사용되고 있는 프리프레그 적층 복합재료는 두께 방향으로 보강 섬유가 없기 때문에 충격 하중 하에서 심각한 손상을 감수해야만 한다[1]. 이러한 적층 복합재료의 구조적 취약성을 극복하기 위해 3D (three-dimensional) 직조에 대한 관심이 증가하고 있다 [2-4]. 3D 섬유 프리폼은 스티칭, 니들편칭, 3D 브레이딩과 3D 위빙 같은 여러 방법으로 제조될 수 있다 [5].

본 논문에서는 2D (two-dimensional)와 3D 직조형 복합재료의 구조적 유효성을 확인하기 위하여 충격거동에 대해 다루고자 한다. 2D 복합재료에 대해서는 섬유 bundle 크기와 섬유 패턴에 변화를 주었으며 3D 복합재료는 직교직물 (orthogonal

interlock woven)의 두께방향 섬유 종류 및 섬유 밀도를 변화시켰다. 충격 하중 후의 손상을 평가하기 위해서 C-scan 비파괴 검사를 했으며, 충격 후 압축 (CAI) 시험을 통하여 잔류 압축강도를 구하였다.

2. 실험

2-1. 시편 준비

본 연구에서는 3D woven 복합 재료와 2D woven 복합재료를 시편으로 사용하였다. Fig. 1은 3D woven 복합재료의 개략도이다. 길이 방향과 폭 방향으로 배열되는 stuffer와 filler는 12K의 일 방향 탄소 섬유이고, 두께 방향 섬유인 weaver는 더 작은 크기의 bundle을 사용하였다. Weaver의 섬유 종류와 밀도를 변화시킨 세 종류의 프리폼으로서 single density의 3K 탄소섬유 (SWC), double density의 3K 탄소섬유 (DWC)와 single density의 Kevlar weaver (SWK)의 프리폼을 제작하였다. Fig. 2는 SWC와 DWC를 보여주고 있다.

* 한국기계연구원

⁺ 한국기계연구원 교신저자

^{**} 국방과학연구소

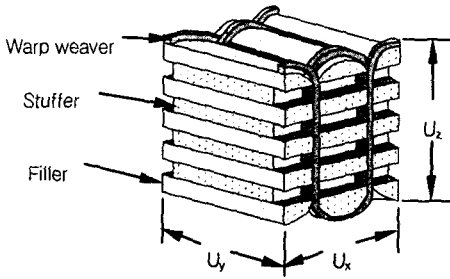


Fig. 1 Unit cell of orthogonal 3D woven preform.

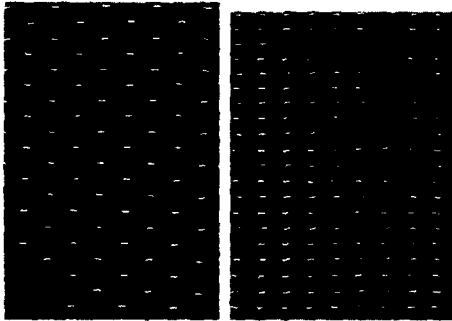


Fig. 2 Surface pattern of SWC and DWC.

2D 복합재료에 대해서는 6K 탄소섬유 평직 (P6K), 3K 탄소섬유 평직 (P3K)과 3K 탄소섬유 8매 주자직 (S3K)을 사용하였다. 모든 시편은 진공 RTM 공정에 의해 제조되었으며 에폭시 수지와 경화제는 각각 국도화학의 KBR1729와 KBH1089를 사용하였다.

제작된 평판의 치수는 320×215×2.5mm 이고 SACMA SRM 2R-94 시험 설명서에 따라 150×100mm로 절단하였다 [6]. 프리폼에 대한 규격과 섬유 체적율은 Table 1에 명시되어 있다.

2-2. 충격 시험 및 충격 후 압축 시험

복합재료의 손상 저항 능력을 측정하기 위해 저속 충격시험을 하였다. 충격시험 장치는 Fig. 3에 나타내었다. 시편에 가해진 에너지 레벨은 일정한 무게의 impactor의 높이로 조정하였다. Impactor 무게는 3.605kg이며, 지름 15.88mm의 반구형 tip을 사용하였다. 시편은 SACMA에 명시된 시험 장치를 사용하였고, 각 모서리에는 고무 tip 클램프로 고정하였다.

Table 1 Specifications of composite specimens

Index	Stuffer (Warp)	Filler (Fill)	Weaver	Volume Fraction	
3D Woven Textile	SWC	C 12K	C 12K	C 3K	62%
	DWC	C 12K	C 12K	C 3K	64%
	SWK	C 12K	C 12K	K29	61%
2D Woven Textile	P6K	C 6K	C 6K	-	52%
	P3K	C 3K	C 3K	-	54%
	S3K	C 3K	C 3K	-	54%

(Note) C: Carbon fiber; K: Kevlar fiber

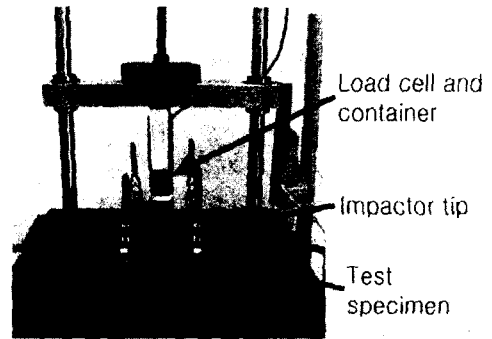


Fig. 3 Drop weight impact test system.

충격을 받은 복합재료 시편의 압축강도를 측정하기 위해 충격 후 압축 (CAI) 시험을 실시하였다 [7]. 시편은 SACMA CAI 시험 장치에 고정시켰으며, 시편의 네 면은 국부적 손상 또는 힘을 방지하도록 하였다. Fig. 4는 CAI 시험 장치를 보여주고 있으며 압축하중의 크로스 헤드속도는 1mm/min로 고정하였다.

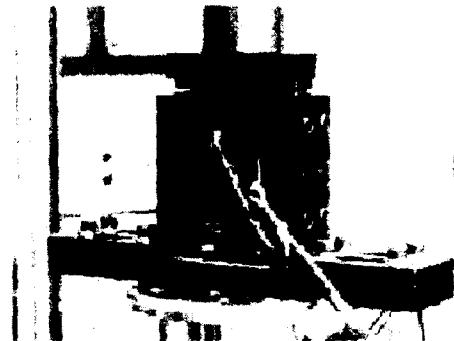


Fig. 4 SACMA CAI test.

3. 결과

15J의 충격에너지를 3D 복합재료에 가한 결과, 눈에 보이는 표면의 손상은 매우 적었으나 2D 복합재료는 같은 충격에너지를 가했을 때 Fig. 5에 보인 것처럼 시편이 관통되었다. 이것은 3D 복합재료의 충격 성능이 더 뛰어나다는 것을 보여준다. 2D 복합재료의 경우는 시편을 관통하지 않는 에너지 레벨로서 7J의 충격 에너지를 가하였다.

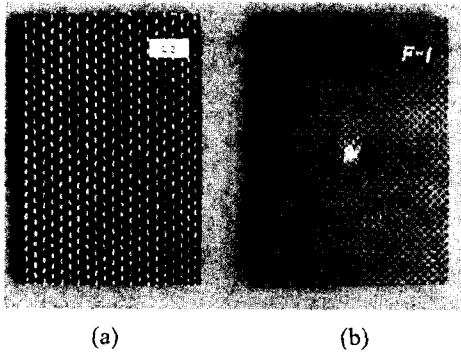


Fig. 5 Damage comparison under impact energy of 15J: (a) 3D woven composite; (b) 2D woven composite.

Fig. 6과 7은 각각 3D 복합재료 (SWC)와 2D 복합재료 (P6K)의 하중-에너지 곡선을 보여주고 있다. 3D 복합재료는 갑작스런 하중 값의 변동 없이 최대 하중에 도달하는 반면, 2D 복합재료는 층간분리로 인하여 하중 값이 급격하게 변함을 알 수 있다.

Table 2는 2D와 3D 복합재료의 C-scan 충격시험과 CAI 강도 결과를 정리한 것이다. 2D 복합재료는 층간분리로 인하여 3D 복합재료보다 더 높은 에너지 흡수율을 보인다. 3D 복합재료의 경우, double density weaver 시편이 single density weaver 시편보다 에너지를 더 많이 흡수함을 알 수 있다.

2D 복합재료를 보면, 6K 평직(F6K)은 3K 평직(P3K)보다 섬유 bundle이 더 크므로 더 높은 에너지를 흡수했다. 같은 3K 섬유 복합재료 중 8매 주자직이 평직보다 더 많은 에너지를 흡수하였는데, 이것은 8매 주자직이 일직선 배열의 섬유를 더 많이 포함하고 있기 때문이다.

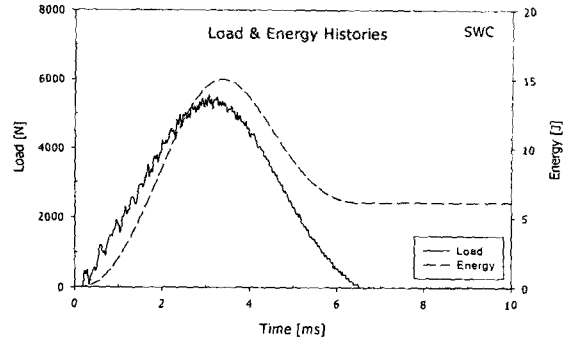


Fig. 6 Load and energy histories of SWC.

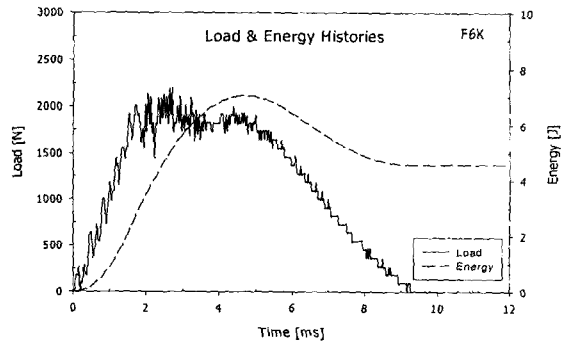


Fig. 7 Load and energy histories of P6K.

Table 2 Summary of impact test, C-scan, and CAI test result.

Index		Impact Energy (J)	Absorbed Energy (J)	Damage Size (mm ²)	Residual compressive Strength (MPa)
3D Woven Textile	SWC	14.8	6.0	512.7	172.3
	DWC	14.9	6.9	762.2	184.6
	SWK	14.8	5.7	454.0	164.3
2D Woven Textile	P6K	7.0	4.4	381.7	150.7
	P3K	7.0	2.8	197.5	172.0
	S3K	7.1	3.0	250.2	175.4

Fig. 8은 각 시편의 C-scan 결과로서 파손 부위는 두께방향으로 손상이 누적된 모습을 보여준다. 3D 복합재료의 표면 손상 크기는 작으나, 내부 손상은 상당히 큼을 알 수 있다.

시편의 잔류 압축강도는 3D 복합재료의 경우 DWC 시편은 손상 면적이 크에도 불구하고 SWC 복합재료보다 더 높은 잔류 압축강도를 보이고 있다.

이것은 파손의 대부분이 매트릭스가 많은 부위이기 때문이며, 더 많은 수의 weaver 배열로 인해 강도가 증가했다고 생각된다. SWK와 SWC를 비교하면, 압축강도가 낮은 Kevlar 섬유로 인하여 SWK의 잔류 압축강도가 더 작게 나타났다.

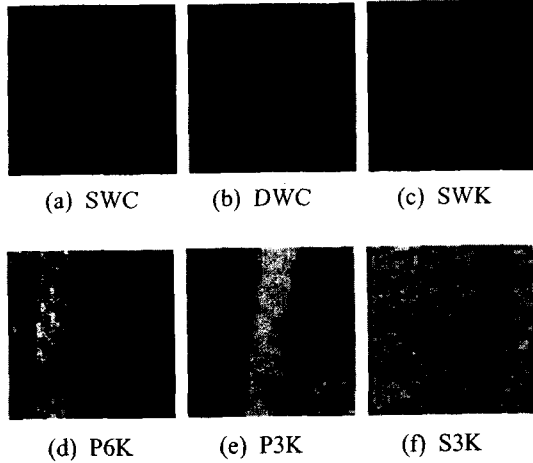


Fig. 8 C-scanned images of impacted panels.

2D 복합재료의 경우 6K 평직 (P6K)은 예상했던 바와 같이 가장 큰 충격 손상부위와 가장 낮은 잔류 압축강도를 보였다. 같은 섬유 bundle 크기에 대하여, 8매 주자직 (S3K) 시편은 더 큰 손상부위를 보였으나, 3K 평직 (P3K) 보다 더 높은 잔류 압축강도를 보여주고 있는데 그 이유는 주자직 직물이 일직선 배열의 섬유를 더 가지고 있어서 압축강도의 향상에 기여하기 때문이다.

4. 결론

- (1) 15J의 충격에너지를 가했을 때 3D 복합재료의 표면은 손상 면적이 매우 작았으나, 2D 복합재료에서는 관통되었다. 따라서 3D 복합재료의 충격 저항특성이 더 우수함을 알 수 있다.
- (2) 3D 복합재료 중 double density weaver 시편이 가장 많은 에너지를 흡수했으며, 손상부위가 가장 넓다. Kevlar weaver 시편은 흡수 에너지가 더 낮았으며, 탄소 weaver 시편보다 더 작은 손상 면적을 보였다.
- (3) 2D 복합재료 중 3K 평직은 6K 평직보다 더 작은 손상을 보였다. 같은 섬유 bundle 크기에 대해 8매 주자직은 더 큰 손상부위를 보였으나 평직 복합재료보다 잔류 압축강도는 더 높았다.

후기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 “차세대 소재성형 기술개발”사업과 국가지정연구실 사업에서 수행된 연구 결과임.

참고 문헌

- [1] Gao SL, Kim JK. Cooling rate influences in carbon fiber/PEEK composites. Part III: impact damage performance. *Composites* 2001;32:775-785.
- [2] Tan P, Tong L, Steven GP, Ishikawa T. Behavior of 3D orthogonal woven CFRP. Part I. experimental investigation. *Composites Part A* 2000;31:259-271.
- [3] Callus PJ, Mouritz AP, Bannister MK, Leong KH. Tensile properties and failure mechanisms of 3D woven GRP composites. *Composites Part A* 1999;30:1277-1287.
- [4] Kuo WS, Fang J. Processing and characterization of 3D woven and braided thermoplastic composites. *Composites Science and Technology* 2000;60:643-656.
- [5] Byun JH, Chou TW. Mechanics of Textile Composites. In: Kelly A, Zweben C, editors. *Comprehensive Composite Materials*. Amsterdam: Elsevier; 2000. chapter 22.
- [6] SACMA recommended test method for CAI properties of oriented fiber-resin composites. SRM 2R-94.
- [7] Ishikawa T, Sugimoto S, Matsushima M, Hayashi Y. Some experimental findings in compression-after-impact (CAI) tests of CF/PEEK(APC-2) and conventional CF/Epoxy flat plates. *Composites Science and Technology* 1995;55:349-363.