

# S-2 유리섬유 평직복합재의 기지재료 및 스티칭에 따른 충격 특성 비교

변준형\*·황병선\*·엄문광\*·이정훈\*·남원상\*·송승욱†·이창훈†

## Impact Property of S-2 Glass Woven Composites with Different Matrices and Stitching

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

### Abstract

For the damage tolerance improvement of conventional laminated composites, stitching process has been utilized for providing through-thickness reinforcements. 2D preforms were stacked with S-2 glass plain weave, and 3D preforms were fabricated using the stitching process. For the matrix system, epoxy and phenol resins were considered. To examine the damage resistance performance the low velocity drop weight impact test has been carried out, and the impact damage was examined by scanning image. CAI (Compressive After Impact) tests were also conducted to evaluate residual compressive strength. Compared with 2D epoxy composites, 2D phenol composites showed drastic reduction in the compressive strength prior to impact because of the higher contents of voids. The damage area of 2D phenol composites were also larger than that of 2D epoxy composites. However, by introducing the stitching, the damage area of 3D phenol composites was reduced by 60%, while the CAI strength improvement was negligible.

**Key Words:** S-2 glass, Stitching, 3D composites, Impact, CAI, Damage area.

### 1. 서론

고분자 복합재는 비강도 및 비강성이 우수하고 경량화가 가능하기 때문에 그 사용 범위가 넓어지고 있다. 항공 우주용 구조물과 같이 고강도 및 고강성이 요구되는 부품에는 에폭시 수지가 주로 사용되고 있으며, 공공 안전성이 높게 요구되는 철도차량, 선박 구조물, 건축/해양 구조물 등에는 페놀 수지의 적용이 의무화 되고 있다.

페놀수지는 내열성과 내연성이 우수한 재료로서 그 자체는 강제적인 연소에 의해 타지만 점화가 잘 되지 않고 화재가 발생하더라도 화염이 전파되는 정도가 매우 낮으며, 연기나 유독 가스의

방출이 매우 적은 재료이다. 그러나, 페놀 수지는 경화 시 축압 (condensation) 반응에 따른 수분 발생으로 인하여 제품의 치수 불안정과 균열 등의 문제가 있어 구조용 복합재료의 사용이 제한적이었다. 최근에는 다양한 종류의 페놀 수지가 개발되어 구조용 유리섬유/ 페놀 복합재에 대한 연구가 활발하게 일어나고 있다. 그러나 유리섬유/페놀 복합재는 수분 발생에 따른 기공으로 인하여 크랙이 잘 전파되고, 기존의 2D 적층구조 형태를 사용하는 경우에는 층간 결합력이 약하기 때문에 내 충격 구조용으로는 문제가 있다. [1-2] 이러한 단점을 극복하기 위한 가장 효과적인 방법은 두께 방향으로 섬유를 보강한 3D 구조인 스티치된 복합재료의 사용이다.[3]

다양한 형태의 프리폼 구조 중 평직 구조가 섬유다발 간의 interlocking으로 인하여 충격이 가해

\* 한국기계연구원 소재성형연구센터 복합재료팀

† 대한항공 항공우주사업본부

질 때 크랙이나 층간분리 전파가 많이 일어나지 않기 때문에 충격 후 손상이 적다고 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 S-2 유리섬유를 사용한 평직 복합재료의 충격특성을 상호 비교하였다. 비교를 위한 기준 재료로서 에폭시 수지 및 페놀 수지를 사용한 2D 평직 적층구조를 고려하였고 3D 복합재료 시편은 위의 직물을 적층한 프리폼을 스티칭한 형태의 섬유구조이다.

## 2. 시편 제조 및 시험

### 2.1 시편 제조

본 연구에서 사용한 보강재는 S-2 유리섬유 평직이며 수지는 에폭시 및 페놀 수지 (Cellobond J2027L)를 사용하였다. 스티칭 섬유로는 케블라 섬유를 사용하였다. 사용 수지 및 스티칭 유무에 따른 복합재의 충격 특성을 평가하기 위하여 네 종류의 시편을 제작하였다. 모든 시편은 평직을 5장 적층하여 진공 백을 적용한 SCRIMP 성형법으로 제작하였다. 3D 복합재는 적층된 프리폼에 스티칭 한 후, 2D 복합재와 동일한 방법으로 제조하였다. 스티칭 밀도는 폭 방향, 길이 방향 모두 10mm로 고정하였다.

### 2.2 미세 조직 관찰

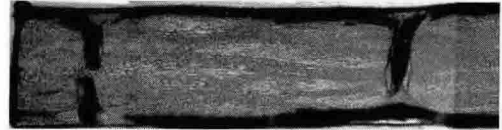
Fig. 1 (a)는 S-2 유리섬유 평직 적층구조에 스티칭을 한 에폭시 복합재인데, 두께방향 단면에서 평직 섬유의 굴곡과 두께 방향의 스티칭 섬유를 확인할 수 있다. Fig. 1 (b)는 스티칭한 페놀 복합재의 단면으로서 수분 발생으로 인한 기공을 볼 수 있다. 이 기공은 주로 섬유 다발과 다발 사이에 비교적 큰 형태로 존재하며 미세 기공이 섬유 다발 내부에 있음을 볼 수 있다.

### 2.3 충격시험 및 충격 후 압축시험

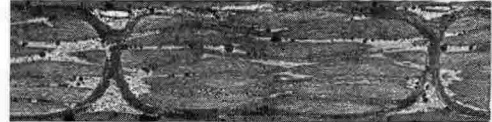
제조된 복합재의 충격특성을 평가하기 위해 SACMA SRM 2R-94를 참조하여 저속충격시험 (low velocity impact test) 을 하였다. 에너지 레벨은 20J, 25J, 30J, 35J의 네 가지로 하였다. Fig. 2은 충격시험에 사용한 데이터 처리장치와 낙추 충격시험 장치를 보여주고 있으며, 충격자의 무게는 7.96kg, 지름 15.75mm의 반구형 팁을 사용하였다.

충격시험 후 시편의 파손부위를 확인하기 위하

여 시편을 밝은 빛에 투사하는 방법을 사용하였으며, 충격 후 복합재료의 압축 특성을 평가하기 위해 충격 후 압축 (CAI) 시험을 하였다.



(a)



(b)

Fig. 1 Microstructure of stitched S-2 glass woven composites:(a) epoxy and (b) phenol matrix.

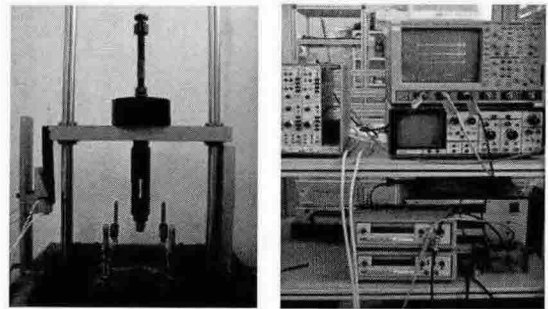


Fig. 2 SACMA test fixture.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 압축강도

복합재의 충격 후 잔류강도를 평가하기 위해 충격을 가하지 않은 시편의 압축시험을 하였다. Table 1은 각 시편의 압축강도 및 압축강성을 나타낸 것이며 표에서 볼 수 있듯이 3D 에폭시 복합재의 압축강도 및 압축 탄성계수는 2D 에폭시 복합재보다 낮게 나온 것을 알 수 있는데, 이는 스티치 섬유 주위의 수지과다 때문으로 생각된다. 페놀 복합재의 경우 강도 값이 에폭시 시편에 비해 상대적으로 낮은 것을 알 수 있는데 이는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 다량의 기포 때문이다. 그러나, 3D 페놀 복합재의 압축 강도가 2D 페놀 복합재 강도보다 높은 것은 섬유 다발 사이의 크랙 진전을 스티칭 섬유가 억제하였기 때문이다.

Table 1. Compressive test results of S-2 glass woven composites prior to impact

Type		Strength (MPa)	Modulus (GPa)
2D	Epoxy	379 (±13)	26.0 (±6)
	Phenol	168.4 (±28)	29.3 (±4)
3D	Epoxy	329 (±62)	22.8 (±9)
	Phenol	182.7 (±29)	26.2 (±13)

### 3.2 파손 부위 측정

Fig. 3은 25J의 충격시험 후 시편의 손상 부위를 보여주고 있다. 2D 평직/에폭시 시편의 경우 섬유 직조형태로 인하여 파손 부위가 0도 90도 방향으로 퍼져있는 것을 알 수 있으며, 3D 평직/에폭시 시편의 경우 스티칭에 의해 손상 진전이 제한되고 있음을 볼 수 있다. 2D 평직/페놀 복합재 손상을 보면 손상면적이 훨씬 크게 나타났는데 그 이유는 페놀 복합재 내부에 광범위하게 존재하는 기공으로 인한 섬유 다발의 분리 때문이다. 그러나, 3D 복합재의 파손 부위가 크게 줄어든 것을 알 수 있는데, 그 이유는 두께방향의 스티칭 섬유로 인하여 손상진전이 억제되었기 때문이다.

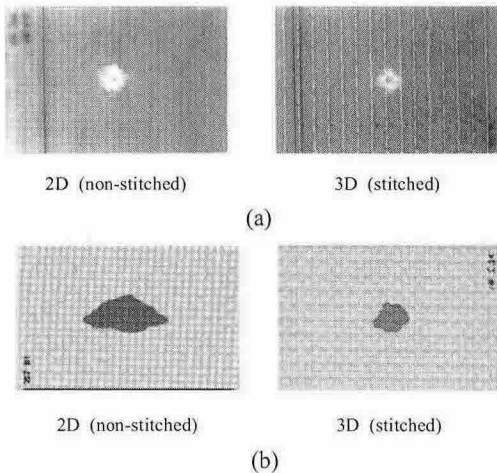


Fig. 3 Scanned damage under 25J impact energy: (a) epoxy system; (b) phenol system

### 3.3 충격특성

Fig. 4 (a) 및 (b)는 충격에너지에 대한 에폭시 및 페놀 복합재의 하중-시간 곡선을 나타낸 것이다. 수지 재료에 관계없이 2D 복합재와 3D 복합재 모두 하중 변화의 폭이 크지 않은 것을 알 수

있는데 이는 S-2 유리섬유 자체의 파손 변형율이 크고 평직 형태의 충격에너지 흡수 능력이 우수하기 때문이다. 이 현상은, 일방향 적층 복합재의 경우 층간분리에 의해 하중 감소가 급격히 일어나는 것과 매우 대조적이다. 따라서, 평직 복합재료의 경우에는 광범위한 층간분리보다는 국부적인 섬유다발 간의 분리가 제한적으로 일어난다는 것이다.

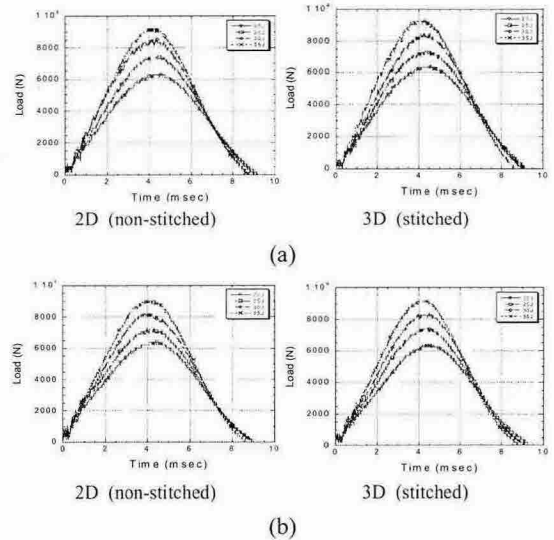


Fig. 4 Load vs. time curves: (a) epoxy system; (b) phenol system.

Table 2는 수지 재료 종류 및 스티칭 유무에 따른 복합재의 충격 시험 결과를 정리한 것이다. 스티칭하지 않은 2D 시편의 수지재료에 따른 충격 특성을 살펴보면, 단위두께 당 흡수된 에너지 크기가 페놀 복합재가 더 크고, 내부에 분포된 기공에 의해 섬유 다발의 분리가 더 광범위하게 나타났기 때문에 2D 페놀 복합재의 손상 면적이 넓게 나타났다.

스티칭된 시편 (3D)의 경우를 보면, 에폭시 수지 복합재료는 단위두께 당 시편에 흡수된 충격 에너지에 다소의 변화가 있지만 손상에너지의 감소가 그리 크지 않다. 그러나, 3D 페놀 복합재의 경우에는 단위두께 당 시편에 흡수된 에너지가 2D 복합재보다 크에도 불구하고 손상면적은 60% 정도로 크게 감소함을 볼 수 있다. 이것은 내부에 분포된 기공에 따른 섬유 다발의 분리가 스티칭 섬유에 의해 감소되었기 때문이다.

충격시험 전-후의 압축시험 결과를 보면 에폭시

복합재의 경우, 스티칭에 의해 잔류 압축강도가 35J을 제외하면 약간 향상되었으나 페놀 복합재료는 스티칭에 의해 잔류 압축강도 변화가 거의 없었다. 그 이유는 S-2 glass 평직/페놀 복합재료의 충격 손상 형태는 층간분리가 아닌 섬유 다발의 국부적인 분리에 의해 일어나기 때문에 스티칭에 의한 층간 결속력이 큰 효과가 없었기 때문으로 보인다.

Table 2. Impact test results of S-2 glass woven 2D and 3D composites

Type	Impact energy per unit thickness (J/mm)	Absorbed energy per unit thickness (J/mm)	Damage area (mm <sup>2</sup> )	Residual compressive strength (MPa)	
2D	Epoxy	5.09	1.779	380(±34)	154.1(±6)
		6.37	1.902	398(±23)	159.8(±6)
		7.50	2.02	496(±61)	134.7(±8)
		8.65	2.57	456(±80)	153.4(±7)
	Phenol	4.99	1.934	667(±46)	116.9(±4)
		6.07	2.41	917(±49)	117.0(±1)
		7.52	2.97	997(±179)	110.4(±1)
		8.56	3.30	1218(±191)	107.9(±2)
3D	Epoxy	5.02	1.614	274(±32)	161.7(±3)
		6.53	2.20	380(±30)	167.7(±6)
		7.87	3.10	487(±68)	150.7(±11)
		8.55	2.39	494(±82)	143.7(±4)
	Phenol	5.70	2.11	285(±18)	114.3(±5)
		7.10	2.60	325(±26)	118.7(±3)
		8.66	3.27	378(±60)	114.5(±2)
		10.07	3.90	415(±53)	110.9(±4)

Fig. 5는 각 시편에 대하여 손상면적을 단위 두께 당 시편에 가해진 에너지로 나눈 값으로서 각 에너지 레벨에 대한 값을 평균한 것이다. 스티칭을 함으로서 파손 면적이 전반적으로 감소하는 것을 볼 수 있으며 3D 페놀 복합재의 손상면적이 가장 작은 것을 알 수 있다.

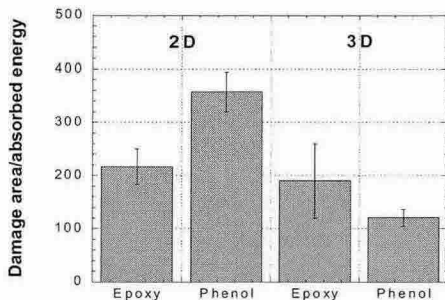


Fig. 5 Comparison of damage area normalized by absorbed energy.

#### 4. 결론

(1) 2D S-2 glass 평직 적층 복합재료에서 에폭시 수지를 사용한 복합재에 비하여 페놀 복합재의 충격 전 압축 강도는 페놀 내부에 존재하는 기포 때문에 압축강도는 매우 크게 감소하였다. 그러나 스티칭에 의한 3D 페놀 복합재의 경우에는 2D 페놀 복합재에 비하여 압축강도가 약간 증가하였는데, 그 이유는 스티칭 섬유에 의하여 기포로 인한 크랙 진전이 제한 받았기 때문이다.

(2) 3D 페놀 복합재의 경우에는 단위두께 당 시편에 흡수된 에너지가 2D 복합재보다 큼에도 불구하고 충격 후 손상면적은 60% 정도로 크게 감소하였다. 이것은 내부에 분포된 기공에 따른 섬유 다발의 분리가 스티칭 섬유에 의해 감소되었기 때문이다. 그러나, 에폭시 수지 복합재료는 단위두께 당 시편에 흡수된 충격에너지에 다소의 변화가 있지만 손상에너지의 감소가 그리 크지 않았다. 그 이유는 S-2 유리섬유의 높은 손상 변형률과 평직 구조 특성으로 인하여 스티칭의 효과가 크지 않기 때문이다.

(3) 충격 후 잔류 압축강도는 에폭시 복합재의 경우는 스티칭에 의해 강도 향상이 약간 있었으나 페놀 복합재는 큰 효과가 없었다.

#### 후 기

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

#### 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) G. A. Schoeppner and S. Abrate, "Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates", Composites: Part A, 31, 2000, pp. 903-915.
- (3) 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, Ch. 22, 2000, pp.719-761.