

論文

층간 하이브리드화에 의한 케블라/스펙트라/유리 섬유 강화
복합재료의 물성 변화에 관한 연구

김 철* · 강태진* · 이승구** · 윤영주**

Study on the Mechanical Properties of
Kevlar/Spectra/Glass Interply Hybrid Composites

Cheol Kim*, Tae-Jin Kang*, Sung-Ku Lee** and Young-Ju Yoon**

ABSTRACT

The effect of interply hybridization has been studied to improve the flexural properties of Kevlar/Spectra intraply hybrid woven laminated composites. Tensile, flexural, impact, mode I edge delamination tests have performed with the various types of reinforcement at different degree of dispersion.

The interlaminar properties of the laminated composite have been improved with glass fabric hybridization, and this results in the enhancement of flexural properties of the composite. The initial tensile fracture strain has also been increased with glass fabric hybridization since the bonded glass fiber continued to carry load and retard delamination which occurred at lower strain in the hybrid fabric reinforced composite. Because the glass fabric ply kept good adhesion to the hybrid fabric, the shear failure under flexural loading has been retarded. The flexural property showed its maximum value when the glass fabric has been dispersed evenly through the whole structure.

When the degree of dispersion has been increased, the stress discontinuity has been reduced by interply hybridization with glass fabric.

초 록

케블라/스펙트라 층내 하이브리드 복합재료의 굽힘 성능을 보완하기 위하여 유리 섬유 직물을 함께 층간 하이브리드화하여 주었다. 보강재의 부피분율, 층간 하이브리드화 정도를 달리하여 인장, 굽힘, 충격, Mode I edge delamination test를 실시하였으며, SEM을 이용하여 파단면을 관찰하였다. 유리 섬유 층이 하이브리드 직물층과 뛰어난 결합력을 보임으로써 층간 전단 성질의 향상을 나타내었으며, 굽힘 성질 또한 향상되는 것을 알 수 있었다. 층간 분산 정도가 클수록 인장 성질의 상승효과를 나타내었으며, 이는 유리 섬유 층이 하이브리드 직물층과 좋은 접착력을 보임으로써 변형에 의한 층간 분리를 억제하는 효과를 보이기 때문으로 생각된다. 굽힘 하중 적용시

* 서울대학교 공과대학 섬유고분자공학과

** 국방과학 연구소

압축면에 유리 섬유를 배치한 경우 굽힘 성능의 상승을 가져 오는 것을 알 수 있었다. 또한 층간 분산 정도에 따른 충격 성능 변화도 연구하였다. 하중에 따른 응력 분석을 통하여, 하이브리드화에 따라 재료 전체의 하중이 균일하여짐을 알 수 있었고, 굽힘 하중시 응력의 불연속점도 줄어드는 것을 알 수 있었다.

1. 서 론

충격에 뛰어난 스펙트라 섬유는 gel spinning을 사용하여 생산한 펼친 분자구조를 가진 폴리에틸렌 섬유로서, 고강도, 고탄성율을 지니고 있는 재료이다. 미국의 Allied Signal사에서 주로 생산하고 있으며, 그 상품명인 스펙트라로 통용된다. 특히 충격특성이 뛰어나기 때문에, 방탄재, 방패, 장갑용 보강재등의 내충격용 재료에 많이 쓰이고 있는 재료이다. 반면, 이 섬유는 화학적인 안정성과 매끄러운 섬유의 표면 때문에 섬유-기지물질간의 결합이 아주 약하다는 단점을 가지고 있다[1]. 계면이 약한 경우, 보강재가 지니고 있는 모든 물성을 복합재료에서는 발휘할 수 없게 되며, 이러한 이유로 인하여 스펙트라 섬유가 가지고 있는 물성 전부를 복합재료에서 발휘할 수 없어서 역학적 물성이 떨어지는 결과를 가져오게 된다[2].

이러한 단점을 보완하기 위한 몇 가지 방법이 개발되어 사용되고 있으며, 예를 들면 섬유의 표면에 반응기를 도입하여 기지물질과 섬유간의 화학적 결합을 만들어 주거나, 섬유의 표면에 roughness를 만들어 기지물질과의 물리적 결합력을 높여 주는 방법 등이다[3]. 그러나, 스펙트라 섬유의 계면 결합력을 향상시키면, 반대로 스펙트라 섬유강화 복합재료의 가장 큰 장점인 충격성능이 떨어지는 경향을 보인다.

스펙트라의 장점을 살리면서 단점을 보완하기 위하여 이전의 연구에서는 스펙트라와 마찬가지로 고강도, 고탄성율을 지니며, 내충격성도 양호하며 스펙트라에 비하여 계면결합력이 좋은 케블라 섬유를 층내 하이브리드화하여 주었다. 케블라/스펙트라 층내 하이브리드 복합재료의 경우, 한 층 내에서 서로 다른 열적 성질을 가지는 두가지 보강재의 thermal, elastic mismatch에 의하여 상당량의 잔류응력이 층간에 존재하게 됨으로써 층간 전단력의

감소를 나타내었다. 그로 인해 충격 성능의 향상을 가져오는 반면 층간 분리나 굽힘 하중에는 더 취약한 성질을 보이게 된다[4].

Marshal, Harris, Kalnin, Hancox 등은 복합재료의 하이브리드화를 통하여 굽힘 성질을 향상시키기 위한 연구를 하였다. Marshal은 유리 섬유 강화 복합재료에 탄소 섬유를 첨가함으로써, 굽힘 항복의 지연을 가져오게 되며, 그로 인하여 굽힘 성질의 향상을 가져오게 된다고 보고하였다[5].

Harris와 Bradley는 냉연 고탄소강 wire와 탄소 섬유를 하이브리드화하여 굽힘실험을 행하였는데, 굽힘 강도면에서 탄소강 wire의 기여는 별로 크지 않았지만, 파괴 모드를 바꾸어 주는 역할을 하였다고 보고하였다. 탄소강 wire의 뛰어난 압축 강도가 압축에 의한 항복이 발생하는 것을 훨씬 지연시켜주어 항복이 더 늦게 발생하였으며, 탄소 섬유의 항복이 완전히 일어난 후에도 탄소강 wire는 항복을 일으키지 않고 남아 있어서 어느 정도의 잔여 강도를 유지한다고 보고하였다[6].

Bunsell과 Harris는 탄소/유리 섬유 intraply hybrid를 이용하여 굽힘실험을 행하였다. 최초의 항복은 압축하중을 받는 면에서 발생하였으며, 변형율이 탄소 섬유 100%인 경우 보다는 작은 곳에서 첫번째 항복이 일어났다고 이야기하고 있다. 첫번째 항복이 발생한 후, 탄소 섬유가 아직 유리섬유와 잘 붙어 있기 때문에, multiple cracking이 발생하게 되며, 그에 따라 어느정도 다시 강도가 증가하다가 전체적인 재료의 항복이 발생함을 보여주었다. 결과적인 층변형율은 유리섬유만 있는 경우보다는 작은 값을 나타내었다[7].

최근에 와서 이러한 하이브리드의 굽힘 특성을 향상시키기 위한 여러가지 시도가 있었다. 그 중 널리 연구되고 있는 것은 asymmetric hybrid lamination 개념이다[8].

인장 하중을 받는 면과 압축 하중을 받는 면에

서로 다른 물질을 보강재로 사용함으로써 굽힘성능, 또는 충격 성능의 향상을 꾀하는 것으로서 예를 들면 케블라 복합재료의 굽힘 성능을 향상시키기 위해 탄소 섬유층을 압축 하중을 받는 윗부분에 덧대어 만드는 복합재료이다. 복합재료에 사용되고 있는 섬유 강화재료의 대부분을 인장 성질면에서 상당히 뛰어난 것을 보이지만, 압축 성질면에서는 취약한 경향을 보이며, 결과적으로 굽힘 하중을 받을 때 일어나는 항복은 압축에 의해 결정되는 것이 대부분이다. 이러한 압축에 의한 항복을 지연시켜 인장 성질을 최대한 발휘할 수 있도록 만들어 주는 것이 이 방법의 주안점이다. 본 논문에서는 이 방법을 사용하여 보강한 복합재료의 물성에 관하여 연구하였다.

2. 연구 내용

Asymetrical hybridization method를 이용하여 복합재료의 굽힘 성능 향상을 기하기 위해, 케블라/스펙트라 하이브리드 직물과 유리 섬유 직물층의 비율을 결정하여줄 필요성이 있으므로 이를 결정하기 위해 Timoshenko의 beam theory를 이용하였다.

두가지 복합재료가 층간 하이브리드화에 의해 보를 이루고 있는 경우를 가정하면, Timoshenko의 bi-material beam theory에 의해 다음의 식이 성립하게 된다.

$$h_1 = \frac{E_g A_g t_g / 2 + E_h A_h (t_g + t_h / 2)}{E_g A_g + E_h A_h} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 h_1 은 upper skin으로부터 중립면까지의 거리이며, h , g 는 각각 하이브리드 직물 복합재료와 유리섬유 강화 복합재료를 나타낸다. 윗식에 다시 $A = bt$ (b : width)를 대입하면 다음의 식이 성립한다.

$$h_1 = \frac{E_g t_g^2 / 2E_h + t_h (t_g + t_h / 2)}{E_g t_g / E_h + t_h} \dots\dots\dots (2)$$

다음 Fig.1은 이러한 모델을 개략적으로 나타낸 그림이다.

본 연구에서 의도한대로 유리 섬유의 층간 하이

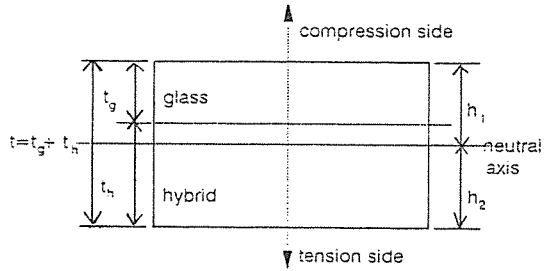


Fig.1. Notations of Bi-Material Model

브리드화로써 굽힘 성능이 극대화를 기하기 위해 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다. 압축면에 배치한 유리섬유가 압축하중에 의해 항복하지 않고, 하이브리드 복합재료의 압축을 받는 면이 최대 압축 하중과 같아야 하며, 인장 면에 위치한 하이브리드 복합재료에 가해지는 인장 하중이 하이브리드 복합재료의 최대 인장 하중과 같아져야 한다. 또한 이러한 조건을 만족하기 위한 여러 조건들을 생각하면 다음의 식들이 성립해야 한다.

$$\sigma_g^x = \frac{MyE_g}{E_g I_g + E_h I_h}, \quad \sigma_h^x = \frac{MyE_h}{E_g I_g + E_h I_h} \dots\dots\dots (3)$$

M 은 굽힘 모멘트이며 I 는 moment of inertia이다. 또한 경계조건을 만족하기 위해 다음의 식이 성립한다.

$$y = +(h_2) \implies \sigma_g^x = \frac{Mh_2E_h}{E_g I_g + E_h I_h} = \sigma_h^{tu}$$

$$y = -(h_1 - t_g) \implies \sigma_g^x = \frac{M(h_1 - t_g)E_h}{E_g I_g + E_h I_h} = \sigma_h^{tu} \dots\dots\dots (4)$$

또한 위의 두가지 복합재료의 계면에서 하이브리드 직물 보강 복합재료에 가해지는 압축하중이 하이브리드 복합재료의 최대 압축 하중을 넘어가서는 안된다.

결과식으로서, 다음의 식이 주어진다.

$$h_1 = \frac{rt_g + t}{1+r} \dots\dots\dots (5)$$

r 은 하이브리드 복합재료의 인장/압축 강도 비이다. $E_g/E_h = 7/5.4 = 1.3$ 을 대입하고, $r = 8$ 을 대입하면 (스펙트라 복합재료 100%) 다음과 같은 식이 성립한다. $T = t_g/t$ 라 하면,

$$2.1T^2 + 16.6T - 7 = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

T를 풀면, T=0.397이 나오게 된다. 또한 r=6을 대입하면(케블라 100%의 경우), T=0.376이 나오게 된다.

결론적으로 말해 r 값은 이 두가지 사이를 지나게 되므로, 유리 섬유를 하이브리드 복합재료의 윗부분에 덧댐으로써 굽힘 성능을 최대한 향상시키기 위해서는 두께비로 37~39%의 보강이 필요하다는 결론을 얻을 수 있다. 다만, 수치로 나온 정도로 많은 비율의 유리 섬유 직물을 첨가하는 경우, 스펙트라 복합재료의 가장 큰 장점인 무게가 지나치게 무거워지므로, 본 연구에서는 35% 정도의 유리 섬유를 보강하여 연구하였다.

층간 하이브리드 복합재료의 경우, 적층 순서와 분산 정도가 복합재료의 물성에 상당히 큰 영향을 미치기 때문에, 그 정도를 평가하기 위해 층간 분산 정도와 적층 순서에 따른 물성의 변화를 고찰하였으며, 유리 섬유층의 존재에 따른 층간 성질의 변화를 확인하기 위해 Mode I edge delamination test를 실시하였다. 또한 굽힘 시험과 인장 시험 후에 응력 분석을 하여 적층 순서에 따른 영향을 분석하였다.

3. 실험

3-1. 사용 재료

본 연구를 위한 적층 복합재료의 보강재료는 4x4 basket 구조의 Kevlar-29 직물과 스펙트라직물을 사용하였다. 4800den/480fil. 케블라 29 섬유와 3000den/300fil. 스펙트라 900 섬유를 사용하여 같은 조직으로 제작하였다. 모든 보강용 직물은 인치당 밀도가 5count가 되도록 하였고, 하이브리드 직물의 경우에는 경사에는 케블라, 위사에는 스펙트라만 사용하여 전체적으로는 부피비가 50 : 50인 직물을 사용하였다. 유리 섬유 직물 또한 같은 구조가 되도록 제작하여 사용하였다. 기지 물질로는 내쇼날 합성(주)의 XSR-10 grade Vinylester 수지를 사용하였다. 이들의 기본 물성은 다음의 Table 1에 보인

Table 1. Material Properties of Kevlar/Spectra/glass Fiber and Vinylester Resin

Property	kevlar 29	spectra 900	S-2 glass	vinylester
density(g/cm ³)	1.44	0.97	2.5	1.15
tensile modulus (GPa)	62	117.3	85	3.71
tensile strength (MPa)	2758	2587	3910	63.3
elongation(%)	4	3.5	4.6	6.3

바와 같다.

3-2. 시편 제작

직물 무게의 50% 비닐에스터 수지에 DAP와 BPO를 100 : 20 : 1.2의 비율로 첨가, 혼합하여 직물에 spray-up하였다. 도포 후 일정시간동안 상온 건조, 수지의 잔류량을 조절하였다. B-stage에 이르는 ply들은 각 실험의 종류에 따라 4ply, 6ply, 12ply를 적층하였다. 보강재료 사용한 층내 하이브리드 직물의 경우 방향성을 지니고 있으므로, 90° 방향으로만 번갈아가며 적층하였다. 5.5MPa로 가압한 후, 분당 2℃의 승온 속도로 113℃까지 상승시키고 50분간 유지하였다. 성형 후 적당히 시간의 후경화를 시켜주었다. 최종적인 시편의 부피분율은 보강재가 60%, 수지가 40%가 되도록 조절하였다.

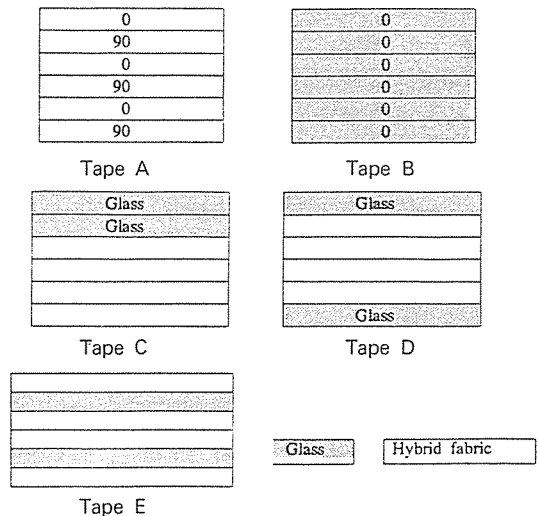


Fig.2. Specimen Type and Degree of Dispersion

층간 분산 정도를 조절하여 분산 정도가 가장 작은 단일 보강재 시편을 A, B로 정의하고, 유리 섬유를 한쪽 표면에만 적층한 경우를 C, 양쪽 표면에 적층한 경우를 D, 시편 전체에 고르게 분산시킨 경우를 E 시편으로 정의하였다.

Fig.2에 분산 정도에 따른 제작 시편의 종류를 보이고 있다.

3-3. 시험 방법

인장 시험은 ASTM D 638-M 방법을 이용하였으며, 시험 기기로는 Instron을 사용하였다. Load cell 용량은 5ton, crosshead speed는 5mm/min의 조건으로 시험하였다.

굽힘 시험은 ASTM D 790-84a을 참조하여 실험하였다. span/depth = 16/1로 맞추어 주었으며, crosshead speed 5.3mm/min, load cell 용량은 1ton이었다.

층간 성질을 측정하기 위하여 Mode I edge delamination test를 실시하였다. 복합재료를 대칭적으로 적층한 후에 중립면에 starter crack을 주고 일방향 인장을 하게 되면, 인장 방향에 수직인 edge 부분에서는 3축 방향으로의 normal stress가 존재하게 된다. 이러한 응력에 의해 이미 존재하던 starter crack이 전파되어지는데, 이때의 변형율, 인장 탄성 계수 등을 이용하여 접착면의 G_{IC} 값을 구할 수 있게 된다.

유리 섬유 직물의 첨가로 인한 충격 성능의 변화를 관찰하기 위하여 낙하 하중 충격 시험기를 이용하여

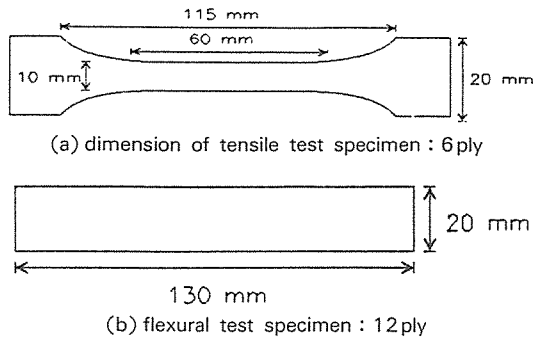


Fig.3. Dimensions and Ply Numbers of the Test Specimen

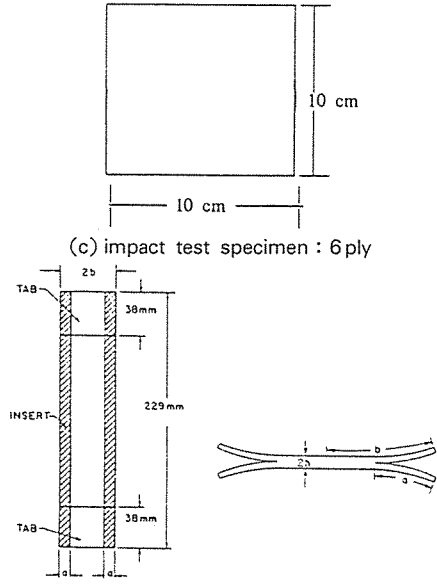


Fig.3. Continued

충격 시험을 행하였다.

다음 Fig.3에 각 실험에 사용된 시편의 규격, ply수를 보이고 있다. 실험의 종류마다 앞에서 설명한 분류대로 층간 분산 정도를 조절하여 5가지 종류의 시편을 제작하였다.

4. 결과 및 고찰

케블라/스펙트라 하이브리드 직물을 이용하여 복합재료를 만드는 경우, 두가지 보강재 간의 열적 성질의 차이로 인하여 층간 전단력이 변하게 되며, 그에 따라 복합재료의 물성이 상당히 달라지게 된다. 특히 적층 복합재료에 있어서는 물성을 좌우하는 아주 큰 요인이 되므로 본 연구에서는 먼저 층간 성질의 변화에 관하여 이야기 하고자 한다.

복합재료에 일축 인장을 가하면, edge 부분에서 3축 방향으로 수직 응력(normal stress)이 발생하게 된다. 이러한 stress에 의해 층간 분리가 free edge 부분에서부터 성장하게 되는데, 이때의 변형율과 탄성계수 변화를 측정하여 층간 성질을 규명하는 실험 방법이 Mode I edge delamination test이다.

시편은 끈게 만들어진 인장 시편의 양 edge 부

분에 starter crack을 준 모양으로 만들어진다. 특별한 적층 순서의 -예를들어 보면 대칭적인 구조로 적층한-시편에 일축 인장하중을 가하게 되면, 인장에 의해 생기는 응력이 중앙면에서는 0에 가까운 값이되고, 3축 방향의 수직응력만이 작용하여 주어진 균열 부분에서부터 delamination이 발생하여 전파되는 것이다.

균열이 시작되어 진행하기 시작할 때의 변형율을 ϵ_c , edge delamination이 없는 경우의 인장탄성계수를 E_x , 완전하게 delamination이 진행된 후의 탄성계수를 E^* 라 하면 다음의 식에 의해 층간 균열이 발생하게 되는 임계 변형에너지 해방율(critical strain energy release rate)을 구할 수 있게 된다.

$$G_{IC} = h\epsilon_c^2 (E_x - E^*) \dots\dots\dots (7)$$

여기서 h는 시편 두께의 1/2이다. 이 식은 온도등에 의한 잔여 응력은 생각하지 않고 만든 식이기 때문에 실제와는 어느 정도 차이가 있게 되지만, 대체적인 경향을 비교하는 경우에 있어서는 상당히 유용한 식으로 생각할 수 있다[9].

본 연구에서는 각각의 보강재 면끼리 만나는 경우를 가정하여 6ply를 적층하여 실험을 행하였다. 실험의 결과는 다음의 Table 2와 같다.

Table 2. Critical Strain Energy Release Rate by Mode I Edge Delamination Test

	spectra	kevlar	glass	hybrid
spectra	1020	728	908	-
kevlar	-	1609	1891	-
glass	-	-	2632	1421
hybrid	-	-	-	687

unit : J/m²

유리섬유-하이브리드 직물간의 실험치가 하이브리드-하이브리드 직물간의 값보다 훨씬 큰 것을 알 수 있었다. 스펙트라가 한쪽면에 존재하는 층의 경우 다른 경우들 -케블라나 유리섬유가 양쪽면에 존재하는- 보다 상당히 작은 값을 나타냄을 알 수 있었다. 스펙트라-스펙트라 층만이 아니라 스펙트라-케블라, 스펙트라-유리 섬유 층에서도 역시 낮은 값을 나타내는 경향을 보였다. 현미경을 이용하여 파단면을 관찰한 결과, 스펙트라가 어느쪽

면이든 존재하는 시편의 경우, 상대편 표면의 종류에는 거의 관계 없이 스펙트라-수지간의 계면에서 거의 파단이 발생한 것을 확인할 할 수 있었다. 스펙트라가 한쪽 표면을 이루고 있는 경우, 스펙트라와 수지가 만나는 부분에서 아주 급격하게 파단이 발생하여 깨끗한 파단면을 이루면서 균열이 발생함을 확인할 수 있었다. 이러한 층간 결합의 경우, 약한 결합에 의해 전체적인 결합력이 영향을 받게 되는 것을 생각해 볼때, 전체적인 층간 결합력은 결국 스펙트라 섬유와 수지간의 결합력에 의해 크게 영향을 받게됨을 알 수 있다. 또한, 같은 종류의 표면, 예를 들어 스펙트라-스펙트라 간에는 아무래도 스펙트라-유리나 스펙트라-케블라 사이 보다는 적은 잔류 열응력이 존재할 것이기 때문에 스펙트라만으로 이루어진 층간은 스펙트라가 한쪽 면에만 배치된 층간 보다는 조금 더 나은 결합력을 가지는 것으로 볼 수 있다.

또한 현미경을 이용하여 파단면을 관찰하면, 유리 섬유나 케블라로만 이루어진 층간의 경우, 균열이 진행된 면이 스펙트라라 들어간 경우와는 상당히 다르게 균열의 진행경로가 복잡하고, 군데 군데 fiber breakage등도 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 결국, 유리섬유나 케블라로만 이루어진 층간의 경우에는 스펙트라 끼어 있는 층에 비해 전체적인 G_{IC} 값이 증가하는 결과를 나타내었다.

케블라-스펙트라 하이브리드 직물을 적층하는 경우, 케블라-케블라 섬유의 수지를 사이에 두고 아래-윗 층으로 만나게 될 확률은 전체적으로 1/4의 확률이 된다. 또한 스펙트라-스펙트라가 만날 확률도 1/4가 된다. 스펙트라-케블라가 만날 확률은 전체의 1/2이 된다. 이렇게 된다고 가정하여 층간의 결합력을 단순히 전체 면적에 대한 비율로 계산해 보면, 케블라-케블라 층간결합력의 기여는 1/4, 스펙트라-스펙트라 층의 기여는 1/4, 스펙트라-케블라의 기여는 1/2이 되는 것이다. 앞의 실험에서 구한 G_{IC} 값을 산술 평균내어 보면 하이브리드 직물간의 G_{IC} 값은 750-770 정도를 나타내어야 한다. 실제로는 이 값보다 10% 정도 작은 값을 보이고 있으며, 이 차이는 적층 방향에 따른 이방성에 의한 것이라고 생각되어진다.

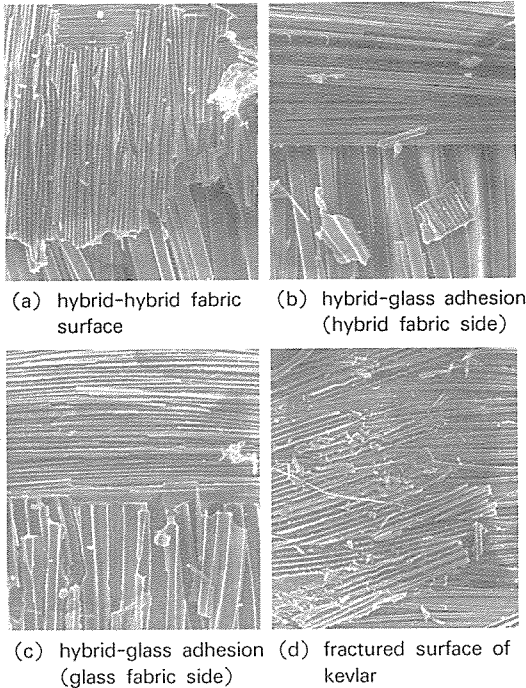


Fig. 4. SEM Photographs of Mode I Fractured Surface($\times 100$)

Fig. 4는 SEM을 이용하여 파단면을 관찰한 결과이다. (a)는 하이브리드 직물간의 파단면을 관찰한 것이고, (b)는 하이브리드 직물-유리 섬유 접촉면에서 하이브리드 직물 면을, (c)는 유리 직물 표면을 관찰한 것이다. (a)를 살펴 보면, 스펙트라 섬유 표면은 아주 깨끗하고 급격하게 균열이 전파되는 것을 알 수 있으며, 케블라 섬유 표면은 약간 더 복잡하게 균열이 전파되어 갔음을 알 수 있다. 케블라 섬유끼리 접촉되는 면은 원래 훨씬 더 복잡한 균열을 보이며, 섬유의 파단이나 뿔쳐 나오는 cohesive fracture를 관찰할 수 있음에 비하여, 하이브리드 직물로 만들어 주었을 경우는, 스펙트라 섬유 표면에서 발생한 균열이 영향을 받아 균열이 그대로 전파되어 adhesive한 파단 현상을 보이는 것으로 생각되어진다. 유리 섬유직물과 하이브리드 직물을 접착한 면의 경우, 수지들은 모두 유리 섬유에 붙어 있으며, 케블라 섬유나 스펙트라 섬유 모두 수지와 깨끗하게 균열을 일으켜 분리가 일어난 것을 알 수 있다. 하지만, (a)와 (b)를 비교할 경우,

후자의 경우에서 특히 케블라 섬유의 파단면이 좀 더 균열 전파가 복잡하게 일어나고 섬유가 뜯겨져 나온 현상과 조금씩 섬유가 끊어져 있는 것을 알 수 있다. (d)의 케블라-케블라 접착면의 파단현상에 접근하는 양상을 보인다.

즉, 하이브리드 직물간의 접착에서는 좀 더 결합이 좋은 케블라 섬유가 homogeneous하게 존재하는 경우 보다 더 쉽게 분리되어 전체적인 층간 성질이 떨어지는데 비하여, 유리-하이브리드 직물이 접촉하는 경우에는 하이브리드 직물의 표면에서 수지가 떨어져 나가면서 수지와의 결합력을 충분히 발휘하는 것으로 생각되어진다.

Fig. 5에 인장 실험 결과를 보이고 있다. 점선은 산술적으로 평균을 가정하였을 경우의 수치를 보여주는 것이다.

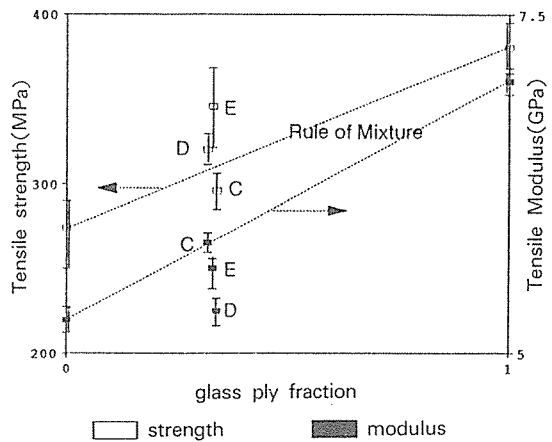


Fig. 5. Tensile Properties of Interply Hybrid Specimen

유리 섬유 복합재료의 인장 강도와 인장 탄성계수가 가장 큰 것으로 나타났으며, 하이브리드 직물만 보강재로 사용한 경우가 가장 낮은 값을 나타내었다. 하이브리드/유리 섬유 직물의 층간 하이브리드화에 따른 인장 성질의 변화는 C, D, E type의 인장 탄성계수와 인장 강도를 살펴보면 알 수 있다. 이종 직물간의 층간 분산 정도가 클수록, 탄성 계수는 감소하는 반면 인장 강도는 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

A type의 하이브리드 직물만 보강재로 사용한 시편이 274MPa, 유리 섬유 직물을 보강재로 사용한

시편이 379MPa인데 비하여, 이 두가지 보강재를 층간 하이브리드화한 type C, D, E의 시편은 296-344MPa를 나타냄으로써 대체적인 중간값을 보였다. 이들 층간 하이브리드 복합재료들은 적층 순서에 따라 인장 강도면에서 큰 편차를 보이고 있으며, 인장 탄성 계수면에서도 역시 큰 편차를 보이고 있다.

다음의 Fig. 6은 시편 각각의 응력-변형을 곡선으로 보이고 있다.

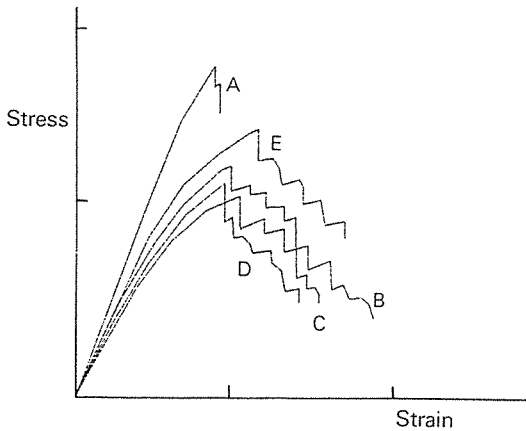


Fig. 6. Tensile Stress-Strain Curves

분산 정도가 더 큰 시편의 경우(type E)에 인장 강도가 가장 큰 것으로 나타나며, 이는 분산정도가 더 크기 때문에, 유리 섬유 양쪽으로 하이브리드 섬유가 존재하여 변형이 발생하였을 경우에도 집착이 더 잘 되어 있어 구속 효과가 더 크기 때문으로 생각되고 있다. 이러한 결과를 Hayashi의 모델을 이용하여 계산한 예측치와 비교하여 보면 최초의 항복 변형율이 확실히 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 또한 강도면에서도 예측치와 비교하여 확실히 상승한 것을 알 수 있다.

인장에 의한 변형, 층간 분리 기구를 관찰한 결과로 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. 하이브리드 직물만을 보강재로 사용한 복합재료는 유리 섬유 직물을 보강재로 사용한 경우보다 적은 변형율에서 층간 분리가 시작되었으며, 유리섬유 직물로 만든 복합재료는 층간 분리가 발생한 후 얼마되지 않아 재료의 파단이 발생한 반면, 하이브리드 직물을 보강재로 사용한 경우는 층간 분리 후에도 어느 정도

변형이 일어난 후 파단이 발생하였다. 또한 층간 분리에 따라 응력-변형을 곡선이 어느 정도 옆으로 높은 경향을 보이게 되며, 그에 따른 탄성계수 저하가 발생하였다.

유리/하이브리드 직물을 함께 보강재로 사용한 경우, 층간 분리는 유리-하이브리드 직물의 사이가 아닌, 하이브리드-하이브리드 직물의 0°/90° 계면에서 먼저 발생하였으며, 유리-하이브리드 직물 계면의 층간 분리가 발행한 뒤에야 유리-유리 섬유 보강층 사이에 층간 분리가 시작되는 것을 관찰하였다.

또한 3축 방향으로 발생하는 수직응력에 의해 인장 초기에서부터 수직방향으로 층간 분리가 발생하기 시작하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 edge delamination test에서 나타난 양상과도 일치하는 것으로서, 특히 하이브리드 직물만을 보강한 시편의 경우 층간 분리가 edge 부분에서 시작되는 하중이나 변형율이 다른 시편들과 비교하여 상당히 작은 값에서부터 시작되는 것을 알 수 있었다.

이러한 사실을 종합하여 보면, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 인장에 따라 하이브리드 직물 사이의 0°/90° 층간에서 먼저 층간 분리가 발생하며, 이에 따른 인장 탄성계수의 저하가 일어나게 된다. 어느 정도 층간 분리가 일어난 후에는 유리-하이브리드 직물 층간에서 층간 분리가 발생하며, 그 이후 유리 섬유 직물 사이의 층간 분리가 발생한다. C 타입과 D 타입의 인장 성질 차이는 바로 이것 때문에 발생하는 것으로 생각된다. 인장에 따라 층간 분리가 발생하는 것은 C 시편이나 D 시편이나 마찬가지로이지만, D 시편에서 층간 분리가 활발하게 일어난 후 다시 유리섬유와 하이브리드 섬유층에서 층간 분리가 발생한 후에도 C 시편의 유리 섬유들은 층간 분리를 일으키지 않기 때문에 어느 정도 인장 강도나 탄성계수의 상승이 가능한 것으로 생각되어진다.

그에 비하여, E 시편은 하이브리드 섬유간의 층간이 거의 존재 하지 않으며, 대부분의 층간은 유리 섬유-하이브리드 섬유간이 되기 때문에, 인장 초기에 D 시편 만큼의 층간 분리가 발생하지 않으며, 그로 인하여 인장 탄성계수를 유지할 수 있게 된

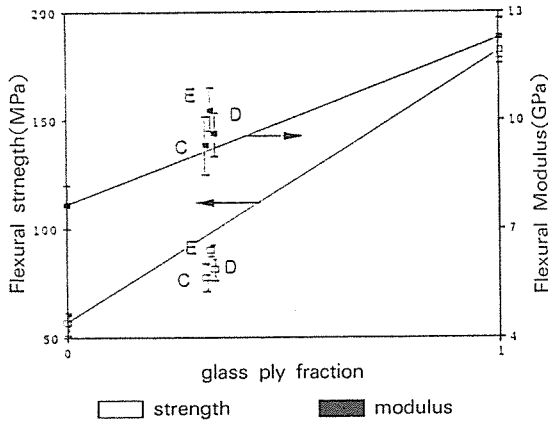


Fig. 7. Flexural properties of Interply Hybrid Specimen

다. 또한 강도면에서도, 구속 효과가 가장 크기 때문에 전체적으로 가장 뛰어난 인장 강도를 유지하는 것으로 생각되어진다.

3점 굽힘 실험을 실시한 결과는 다음의 Fig.7에 보인다.

계면 결합력이나 압축 특성이 훨씬 좋은 유리섬유가 굽힘 성능에서도 훨씬 뛰어난 값을 나타냈으며, 하이브리드 분산 정도가 더 큰 시편일수록 더 큰 굽힘 강도와 탄성계수를 나타내었다. 전체적으로 볼 때, 층간 하이브리드화에 따라 굽힘 강도가 하이브리드 복합재료 100%인 경우와 비교하여 57%까지 증가한 값을 나타내었으며, 탄성계수는 34%까지 증가하는 값을 나타내었다. 단지, C시편에서 하이브리드 복합재료가 윗부분으로 올라가게 한 실험에서는 하이브리드 100%인 경우보다 강도나 탄성계수 모든 면에서 더 좋지 않은 값을 나타내었다. 하지만 어느 경우든 유리섬유가 포함된 혼합물 법칙과 비교하여서는 더 낮은 굽힘 강도를 나타내었다. 다만 굽힘 탄성계수면에서는 하중이 가하여진 초기에 유리 섬유 존재로 인하여 하중-변위 곡선이 급격히 상승함으로써 혼합물 법칙과 비교하여 상승하는 것을 알 수 있었다.

굽힘 하중에 대한 복합재료의 항복을 살펴보면, 층간 하이브리드화한 재료가 너무 층간 전단력이 약하기 때문에, 실제적으로 굽힘 모드에 의한 항복은 거의 관찰할 수 없었으며, 대부분의 시편이

층간 전단력에 의한 전단 파괴 모드로 항복이 발생하였음을 관찰할 수 있었다. 그렇기 때문에, 유리 섬유의 보강에 의한 압축 성질의 개선에 따른 영향은 별달리 연지 못하고 약간의 증가에 그친 것으로 생각된다. 특히 C시편처럼 압축면에 유리 섬유를 배치한 경우, 어느 정도의 강도 증가가 관찰되었지만, 인장 방향에 유리 섬유를 배치한 경우에는 오히려 감소의 결과를 얻었다. 압축 하중에 상대적으로 약한 하이브리드 복합재료가 인장 방향에 보강된 유리 섬유의 기여에 의한 인장 성질의 향상에 비해 약하기 때문에, 하이브리드 직물 100%의 경우 보다 훨씬 일찍 항복이 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 또한 분산 정도가 커지면, 유리 섬유-하이브리드의 계면이 많이 생기게 되고, 이로 인한 층간 분리의 지연으로 인하여 굽힘 강도와 굽힘 탄성 계수가 증가하는 것으로 생각되어진다. 이는 층간 분리가 일어난 면의 관찰에서도 확인 가능한바, 층간 분리는 유리-하이브리드 층간에서 발생한 것이 아니라 거의 대부분 하이브리드 복합재료 사이의 층에서 발생하였다. 굽힘강도나 탄성계수 어떤 면에서도, 별다른 하이브리드화에 따른 변화는 찾아볼 수 없었다. 오히려 단순히 혼합물 법칙을 적용하는 경우보다 어느 정도 감소한 값을 나타내는 경향을 보여 주었다.

복합재료에 하중이 가해질 때, 층간 분리가 발달하게 되면 지속적인 강성의 저하가 발생하게 된다. 인장 하중에 의해 층간 분리가 발생하게 되면, 탄성계수의 지속적인 저하가 일어나게 되며, 그로 인하여 응력-변형을 곡선에서 비선형적인 관계를 보이는 원인이 된다. 굽힘 하중에 의해 층간 분리가 발생하는 경우, 강성의 저하로 인한 탄성계수와 굽힘 강도 감소의 효과는 더 확실하게 나타나게 된다. 분산 정도가 가장 큰 E 타입의 복합재료의 경우, 굽힘 강도와 탄성계수면에서 가장 뛰어난 결과를 보이고 있다. 변위에 따른 복합재료의 항복 현상을 보았을 때, 어느 정도 변위가 있을 때까지 층간 분리가 발달하지 않음을 관찰 할 수 있었다. 하이브리드 보강 직물 끼리 접하고 있는 다른 종류의 시편들은 약간의 굽힘 하중에서도 전단 파괴가 시작되어 층간 분리가 발달함에 비해, E시편은 어느

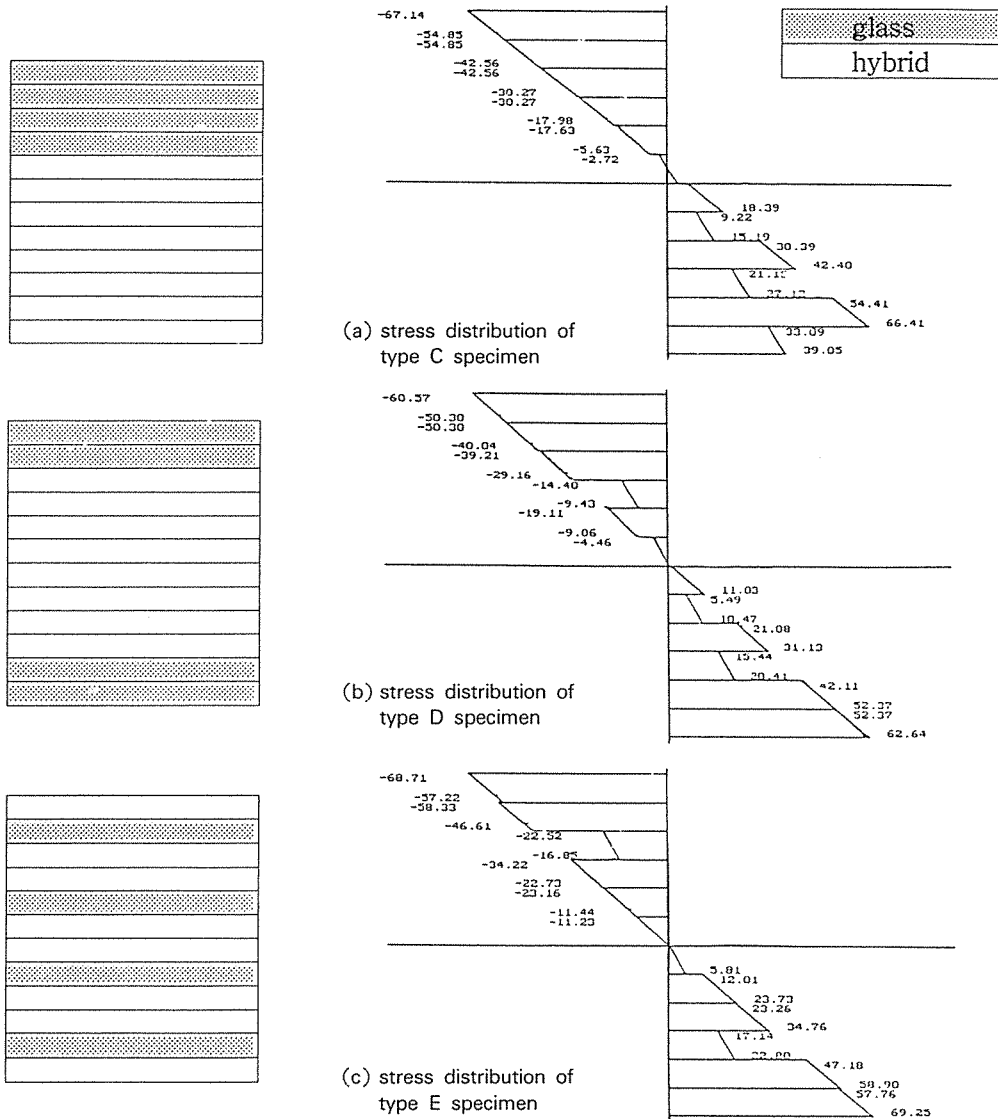


Fig. 8. Stress Distributions along Laminate Axis under Flexural Loading

정도 하중과 변위가 가해진 후에야 층간 분리가 활발하게 일어남을 알 수 있었다. 또한 다른 종류의 시편들은 층간 분리가 여러 층에서 활발하게 진행됨에 비해, 이 경우에는 중간의 하이브리드 직물 사이의 층 한군데에서만 주도적으로 층간 분리 현상이 일어남을 관찰할 수 있었다. 그렇기 때문에, 다른 시편 처럼 층간 분리에 따른 강도와 탄성계수의 저하가 심하게 나타나지 않고 최대의 굽힘 강도를

가지는 것으로 생각할 수 있다. 또한 이러한 강도의 증가를 구속 효과에 의한 것으로 생각할 수도 있을 것이다.

굽힘 하중에 따른 각 층에 걸리는 응력을 고전적층판이론을 사용하여 분석하였다. 하중-변형을 곡선에서 하중에 의한 층간 분리가 발생하기 바로 직전까지의 직선적인 기울기를 가지는 점까지의 하중과 변위를 이용하여 모멘트 계산을 하였다.

Fig. 8의 (a)는 굽힘 하중에 의한 C type 시편의 응력 분포를 보이고 있는 그림이다. 유리섬유를 보강한 윗부분에서는 응력의 불연속점이 거의 보이지 않음을 알 수 있으며, 하이브리드 직물이 보강된 부분에서는 각 층마다 응력의 불연속 점이 생기는 것을 알 수 있다. 또한, 이러한 응력의 불연속점이 하이브리드 직물-하이브리드 직물의 계면에서 발생함으로 인해 활발한 층간 분리가 발생하는 것을 알 수 있다.

(b)는 D type 시편의 응력 분포를 보이고 있는 그림이다. 전체적으로 볼때, C 시편과 비교하여 응력의 불연속이 발생하는 점이 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 또한 C 시편의 경우, 최대 33MPa까지 차이가 발생하는데 비해, 21MPa까지 차이가 줄어든 것을 알 수 있다. 단지, D 시편의 경우, 압축 면에서도 불연속점이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 유리 섬유직물이 아닌 하이브리드 직물의 경우, 특히 압축 성질이 유리섬유에 비해 상당히 떨어지기 때문에, 압축면에서도 불연속 점이 나타나는 점이 재료의 굽힘 하중이 가해질 때 더 취약한 점으로 작용할 수 있게 된다.

(c)는 E type 시편의 응력 분포를 보이고 있는 그림이다. 지금까지 분석한 3가지 시편 가운데 불연속점의 개수가 가장 적은 것을 알 수 있다. 또한 불연속점이 발생한 곳도 유리섬유-하이브리드 직물간의 계면이 되는 것을 알 수 있다. 같은 정도의 응력 불연속이 발생하였다고 하더라도, 유리 섬유-하이브리드간의 층간 전단력이 하이브리드-하이브리드간의 그것보다 2.5배 정도 강하다는 것을 감안하면, 유리 섬유-하이브리드간의 계면에서는 층간 분리가 잘 일어나지 않는다고 생각할 수 있다. E 시편에서 응력 불연속점은 4군데에서 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 또한 응력 불연속이 되는 곳 중에서 2군데는 바로 이러한 유리섬유-하이브리드 직물간의 계면이 된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 인해, 층간 분리가 발생할 가능성이 큰 곳은 압축 면에 하나, 인장 면에 하나 정도로 제한된다는 것을 알 수 있게 된다. 또한 가해진 모멘트의 크기가 E 시편의 경우 가장 크다는 것을 감안하면, 그 효과는 더욱 확실함을 알 수 있다.

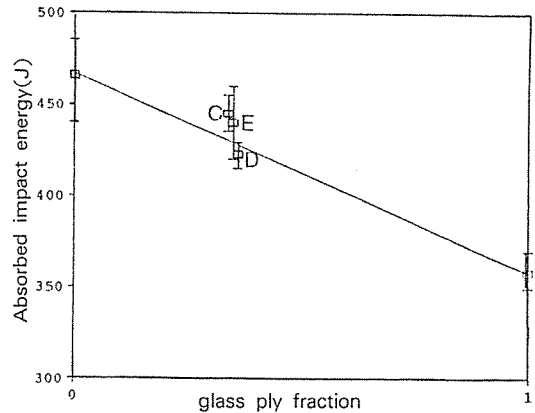


Fig. 9. Total Absorbed Impact Energy under Impact Loading

Fig. 9에 낙하 하중 충격 시험 결과를 보여주고 있다.

다른 시험 결과와 비슷하게, 분산 정도가 가장 큰 시편이 가장 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있다. 또한 인장 시험의 결과와 비슷하게, 층간 하이브리드 복합재료 중에서 D타입 시편이 가장 작은 충격 에너지 흡수를 보였으며, 타입 C, E 시편이 가장 뛰어난 흡수 능력을 보이고 있다. 유리 섬유와 하이브리드 복합재료의 하이브리드화 정도에 따른 충격에너지의 산술적 평균 값은 422J이며, C타입 시편의 경우, 이 중간 값보다 7% 정도의 하이브리드 효과를 보이고 있다.

이러한 하이브리드 효과를 예측하는데 가장 중요한 점은 과연 이 실험이 어떠한 모드로 인하여 항복이나 손상을 일으키는 실험인가 하는 것을 결정하는 문제이다. 어떠한 모드로 인하여 항복을 일으키는지 결정할 수 있다면, 그 관련 모드의 예측치와 비교하여 하이브리드 효과를 예상할 수 있게 되는 것이다.

낙하 하중 충격 시험의 경우, 시편의 끝을 고정 시킨 경우에는 인장에 의한 파단이 일어나는 것으로 알려져 있고, 끝이 고정되어 있지 않은 경우에는 굽힘에 의한 파괴가 일어나는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서의 충격 실험에서는 끝을 고정하였지만 충격에 의해 어느 정도 미끄러지는 현상이 나타났으므로, 이 두가지 모드의 혼합으로 생각할 수 있다.

인장이나 굽힘의 양쪽에서 가장 뛰어난 E타입

시편의 경우, 뛰어난 충격 흡수 에너지를 나타내었으며, C타입은 충격면에 유리 섬유보강 층을 배치하여 굽힘에 의한 변형을 방지하며, 후면에 하이브리드 섬유를 배치하여 변형이 많이 일어나게 한 경우, 충격 흡수 에너지 양이 많아짐을 관찰할 수 있다.

반면, D 타입의 경우 다른 종류의 시편에 비해 충격 흡수 에너지가 그리 크지 않음을 알 수 있었다. C 시편의 충격 흡수 에너지가 크게 나온 이유는 다음과 같이 생각할 수 있다. 일차적인 충격에 의해 표면에 보강된 유리 섬유가 어느 정도 에너지를 흡수하게 되고, 또한 후면에 배치된 하이브리드 섬유는 변형을 많이 일으킬 수 있기 때문에 충격 흡수 에너지가 커지는 것이다. 또한, 하이브리드 섬유 보강재끼리 90°로 엇갈려 적층 되어 있기 때문에, 충간 분리에 의해 에너지 흡수가 훨씬 많아진다고 생각할 수 있다. 반면, 양쪽에 유리 섬유를 댄 D 시편의 경우, 표면에 있는 유리 섬유에 의해서도 어느 정도 흡수 에너지가 줄어들게 되며, 후면에 있는 유리 섬유층에 의해 변형마저도 제약을 받기 때문에. 변형에 의한 충격에너지 흡수도 작으면서 충간 분리도 활발하게 일어나지 않았다고 생각할 수 있다. E 타입 시편의 경우, 충간은 다른 시편들 보다 약하다거나 하지는 않는 것으로 생각되지만, 변형이 어느 정도 가능하며, 변형이 일어날 때의 하중이 다른 복합재료 보다 더 큰 값을 나타내어 결과적인 충격에너지 흡수량이 늘어난 것으로 생각되어진다. 또한 유리 섬유를 한 군데로 모아 댄 경우, 복합재료가 훨씬 brittle한 성질을 나타내게 되며, 충격에 의한 초기 균열 발생 에너지가 더 증가하는 경향을 보이는 것을 관찰 할 수 있었다.

다음의 Fig.10에 반복 하중 충격 실험 결과를 보이고 있다.

대체적인 경향이 고에너지 충격 실험의 결과와 거의 비슷함을 알 수 있다. 전면에 유리 섬유를 배치하고 후면에 하이브리드 섬유를 배치한 경우, 충격 흡수와 그에 의한 변형이 많이 일어남으로 인해 전체적인 충격 에너지의 증가를 확인할 수 있다. 반대로, 전면에 하이브리드 보강재를 대고 후면에

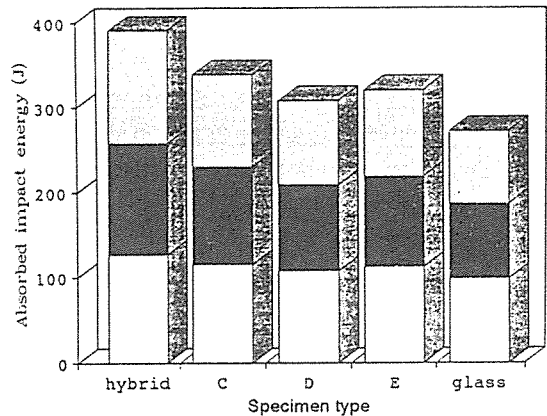


Fig. 10. Total Absorbed Impact Energy by Repeated Impact

유리 섬유를 보강한 경우에는 충분한 변형이 발생할 수 없으며, 변형의 제한으로 인해 충격에너지를 충분히 흡수할 수 없음을 확인할 수 있다. 또한 변형에 제한을 받는 D 타입의 시편도 별로 많이 흡수 하지 못함을 알 수 있으며, 고르게 분산되어 있는 E 타입의 시편은 비교적 많은 충격 에너지를 흡수할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

유리섬유/하이브리드 섬유의 충간 하이브리드화에 의한 복합재료의 물성 변화에 대해 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 충간 하이브리드화에 따른 인장 강도는 대체적인 산술 평균 값을 보였으며, 충간 분리가 활발한 복합재료는 인장 탄성계수의 감소를 보였다.
- (2) 분산 정도가 큰 시편일수록 인장 강도의 증가가 현저했으며, 이는 유리 섬유층의 존재로 인하여 향상된 충간 성질에 의한 constraining effect 인 것으로 생각된다.
- (3) 인장에 의한 항복 변형율이 하이브리드화함에 따라 늘어나는 경향을 확인할 수 있었다.
- (4) 충간 하이브리드화에 의한 굽힘 성질은 산술 평균에서 약간 밀도는 값을 보였으며, 이는 완전한 굽힘에 의한 항복보다 충간 분리에 의한 항복이 지배적이기 때문으로 생각된다. 유리섬유의 존재로

인하여 탄성계수 면에서는 약간 상승하는 결과를 가져왔다.

(5) 충격 실험을 행한 결과, 표면에 유리 섬유를 배치하고 후면에 하이브리드 직물을 배치한 C type의 시편이 가장 큰 충격 흡수 에너지를 나타내었다. 또한 유리 섬유에 의해 변형에 제한을 받는 시편은 충격 흡수 에너지가 감소하는 경향을 나타내었다.

(6) 하이브리드화에 따른 층간 전단력 감소의 원인을 규명하였으며, 그에 따른 층간 분리경향을 확인할 수 있었다. 또한 유리 섬유층이 층간 분리를 억제하는 효과가 있음을 알 수 있었다.

(7) 응력 분석을 행한 결과, 하이브리드화에 따라 응력분포가 비교적 균일해짐을 알 수 있었으며, 그에 따라 층간 분리가 억제됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. B. Harris and A.R. Bunsell, Composites, 6, 1975, pp.190-202.
2. P.K. Mallick and L.J. Broutman, J. Testing and Eval., 5, 1977, pp.1920-2000.
3. C.C. Chamis and R.F. Lark, Hybrid and Select Metal Matrix Composite(ed. W.J.), Repton, AIAA, NY, 1977, pp.13-31.
4. D.F. Adams and A.K. Miller, J. Mat. Sci., 11, 1976, pp.1697-1710.
5. E. Rybicki and M. Kanninen, Hybrid and Select Metal Matrix Composite(ed. W.J.), Repton, AIAA, NY, 1977, pp.53-65.
6. A.R. Bunsell and B. Harris, Composites, 5, 1974, pp.154-164.
7. J. Aveston and J.M. Sillwood, J. Mat. Sci., 11, 1976, pp.1877-83.
8. G. Marom, S. Fischer, F.R. Tuler and H. D. Wagner, J. Mat. Sci., 13, 1978, pp.1419-26.
9. R.B. Pipes and N.J. Pagano, J. Composite Mat., 4, 1970, pp.538-548.
10. T. Hayashi, 8th Int. Reinforced Plastics Conf., Brighton, UK, 1972, pp.142-152.