

論文

층내 하이브리드화가 케블라/스펙트라 적층 복합재료의
물성에 미치는 영향

김 철* · 강태진* · 육종일** · 박종규**

Effects of the Intraply Hybridization on the Mechanical Properties
of Kevlar/Spectra Woven Laminated Composite

Cheol Kim*, Tae-Jin Kang*, Jong-Il Yook** and Jong-Kyu Park**

ABSTRACT

The effect of intraply hybridization on the mechanical and impact resistance properties of Kevlar/Spectra woven laminated composite has been studied. The main objective of the intraply hybridization with Kevlar fiber is the enhancement of static properties of Spectra woven laminate composite. Tensile, 3-point bending, short beam shear and drop weight impact test have been performed to investigate the changes of mechanical properties upon the intraply hybridization. The compression after impact test had also been performed to evaluate the residual strength of the composite plate caused by impact. The hybrid composites showed an increase in tensile properties, both strength and modulus, above the rule of mixtures. However the flexural and shear properties did not show any improvement by hybridization.

The total absorbed impact energy of hybrid composites was significantly increased above the rule of mixtures, however it corresponded to a slightly higher value than the homogeneous Spectra fiber reinforced composite, due to the increased delamination area of the composites, which resulted from the reduced interlaminar shear strength by hybridization. The CAI test results showed good agreement with the ILSS test tendency. The absolute value of the compression strength of the hybridized composite plate showed an increase of 46-120% compared with the homogeneous Spectra composite.

초 록

고강도 폴리에틸렌 섬유인 스펙트라와 케블라 섬유를 층내 하이브리드화하여 그에 따른 물성의 변화를 연구하였다. 인장 시험, 3점 굽힘시험, 층간 전단력 시험과 함께 충격시험을 행하여 그 기계적 물성을 비교하였으며, 또한 충격 시험 후에 잔여압축 강도를 측정함으로 재료의 손상 정도를 평가하였다.

인장 실험에서는 하이브리드 복합재료가 인장 강도나 탄성을 면에서 혼합물 법칙보다 약간 증가하는 경향을 보였다. 반면 굽힘 실험에서는 층내 하이브리드화에 의한 물성의 증가를 보이지

* 서울대학교 공과대학 섬유고분자공학과

** 국방과학 연구소

않았다.

충간 전단력의 감소에 다른 결과로서 충격 실험에서는 충간 분리 영역의 확대를 가져왔으며, 결과적으로 하이브리드 복합재료의 충격 흡수 에너지가 스펙트라 복합재료에 비하여 증가하는 결과를 가져왔다. 충격 후 압축 실험에서 잔여 압축 강도를 비교한 결과, 하이브리드 복합재료의 압축강도 감소가 가장 심한 것으로 나타나 충간 분리 영역의 확대를 확인할 수 있었으며, 충간 전단력 실험의 결과와도 일치하는 경향을 보였다. 절대적인 압축 강도는 스펙트라 복합재료에 비하여 하이브리드 복합재료의 압축 성능 46-120% 까지 향상되는 것을 알 수 있었다.

1. 서 론

근래에 와서 많이 쓰이고 있는 복합재료는 종래의 금속재료에 비하여 높은 비강도, 비탄성율, 내부식성, 화학적 안정성 등의 특징을 가지고 있다. 여러 장점과 더불어 또 하나의 중요한 장점은 사용 목적에 맞는 재료를 디자인 할 수 있다는 것이다. 특징의 용도에 필요한 물성의 요구치에 맞추어 재료를 만들어 낼 수 있다는 것이다. 종래의 복합재료에서는 이러한 물성의 요구치가 특정한 점에 편중되어 있었으며, 이에 따른 제작도 그리 어렵지 않았다. 그러나 근래에 와서 복합재료의 사용분야가 광범위하게 확산되고 있을 뿐 아니라, 여러가지 다양한 특성이 요구되고 있어서 이러한 요구에 맞는 재료의 개발이 복합재료의 연구에 있어서 중요한 분야가 되고 있다. 또한 특징의 물성이 뛰어나다고 하더라도 다른 물성이 현저하게 나빠지는 경우에는 사용에 제약을 받게 된다.

일반적인 복합재료는 보강재와 기지물질로 이루어져 있다. 한 가지 보강재를 사용하였을 경우, 특징의 물성은 기대치에 도달하게 되나, 보강재의 특성으로 인한 복합재료의 물성저하가 발생할 수 있게 된다. 예를 들어 탄소 섬유를 보강한 경우, 내열성이나 내마모성은 현저한 증가를 보이지만 충격에는 아주 약하다는 단점을 가지게 된다. 한 가지의 보강재를 사용한 경우의 단점을 보완하기 위한 방법으로 보강재를 2가지 이상의 재료를 사용하여 주는 방법이 있으며, 이런 종류의 복합재료를 하이브리드 복합재료라 부른다[1].

이러한 하이브리드 복합재료에 대한 연구는 Hayashi[2], Bunsell and Harris[3], Aveston and Silwood[4], Zweben[5], Kirk et al.[6], Marom

et al.[7], Arrington and Harris[8], Bader and Manders[9] 등과 같은 사람들에 의하여 연구되어 졌다.

Hayashi는 하이브리드 복합재료의 인장특성에 관한 연구를 보고하였다. 3가지 보강재로 보강한 복합재료의 인장특성에 관한 모델링을 하였으며, 그 이론은 다음과 같다. 즉 보강재 A, B, C 각각의 탄성계수, ultimate strength, strain이 (E_A, E_B, E_C), ($\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C$), ($\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C$)인 경우, 인장에 의한 초기의 기울기는 다음의 혼합률 법칙식에 따르게 된다.

$$E_1 = E_A V_A + E_B V_B + E_C V_C \quad \dots\dots\dots (1)$$

복합재료의 인장이 더욱 진행되어 가장 failure strain이 작은 보강재의 항복이 일어난 후엔 다음의 식을 따르게 된다.

$$E_2 = E_B V_B + E_C V_C \quad \dots\dots\dots (2)$$

충간 정도의 strain을 가진 B 보강재가 항복을 하게 된 후에는 마지막 C 보강재에 의한 보강 효과만이 남게 되어 아래의 식이 성립한다고 하였다.

$$E_3 = E_C V_C \quad \dots\dots\dots (3)$$

그의 연구 결과에서는 하이브리드화 하여준 경우, failure strain이 작은 보강재가 항복을 하고 난 후에도 어느 정도의 강도와 탄성을 유지할 수 있다는 것을 보고하였다.

Bunsell and Harris[3]는 CFRP와 GRP의 interply hybrid를 사용하여 하이브리드화 효과에 관하여 연구하였다. 인장 하에서, CFRP의 항복이 발생한 후, GRP 부분의 bridging 효과에 의하여 multiple cracking이 발생하였다고 보고하였다. 또한 CFRP의 failure strain이 하이브리드화 하지 않은 경우보다

증가하였으며, 이러한 현상은 후 경화시에 탄소섬유가 compressive stress를 받게 되어 일어나는 것으로 보인다.

Aveston and Sillwood[4]는 CFRP에 부피비 20%의 유리섬유를 보강함으로써 catastrophic failure를 막을 수 있음을 보고하였으며, 특히 유리섬유의 bonding이 좋은 경우에는 재료의 effective failure strain을 100% 증가시키는 결과를 얻었다.

Zweben[5]은 ARP/CFRP 하이브리드 복합재료의 경우, 인장에서 하이브리드 효과를 확인하였으며, 이러한 현상은 elongation이 더 큰 섬유가 신장도가 작은 섬유의 항복후에 crack arrestor로서 작용하기 때문이라고 설명하였다. 또한 인장시에 발생하는 CFRP의 failure strain 증가를 후경화시에 발생하는 compressive strength로만 설명하기에는 strain의 증가치가 너무 크다고 지적하였다.

Bader and Manders[9]는 interply 하이브리드의 인장 특성에 관한 연구를 하였으며, CFRP 부분의 failure strain 증가는 thermal mismatch와 constraint mechanism에 기인한 것이라고 주장하였다.

스펙트라 섬유는 gel spinning을 사용하여 생산한 펠친 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 용도에 많이 쓰이고 있는 재료이다. 반면, 이 섬유는 화학적인 안정성과 매끄러운 섬유의 표면 때문에 섬유-기지물질간의 결합이 아주 약하다는 단점을 가지고 있다[10]. 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[11].

이러한 단점을 보완하기 위한 몇가지 방법이 개발되어 사용되고 있으며, 예를 들면 섬유의 표면에 반응기를 도입하여 기지물질과 섬유간의 화학적 결합을 만들어 주거나, 섬유의 표면에 roughness를 만들어 기지물질과의 결합력을 높여 주는 방법

등이다[12]. 그러나, 스펙트럼 섬유의 계면 결합력을 향상시키면, 반대로 스펙트라 섬유강화 복합재료의 가장 큰 장점인 충격 성능이 떨어지는 경향을 보인다.

케블라 섬유는 펠친 사슬 구조를 가지고 있는 폴리아미드계의 섬유로서, 케블라라는 이름은 이 섬유를 생산하고 있는 듀폰사의 상품명이다. 스펙트라와 마찬가지로 고강도, 고탄성율을 지니며, 내충격성도 양호하며 스펙트라에 비하여 계면결합력이 좋은 섬유이다. 이러한 케블라 섬유를 스펙트라 섬유와 함께 보강재로 사용하여, 층내 하이브리드 적층 복합재료를 성형, 인장, 3점 굽힘, 충격 실험을 행하여 물성의 하이브리드화에 따른 물성 변화를 살펴 보고, 충격 후 압축 실험을 행하여 손상 정도를 평가하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실 험

2-1. 사용 재료

본 연구를 위한 적층 복합재료의 보강재료는 4×4 basket 구조의 Kevlar-29 직물과 스펙트라직물을 사용하였다. 4800den/480fil. 케블라29섬유와 3000den/300fil. 스펙트라900 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 직물과, 경사에는 케블라만을 사용하고, 위사로는 스펙트라와 케블라를 한 단위씩 교대로 사용하여 전체적인 부피비는 케블라 : 스펙트라 75 : 25인 두가지의 직물, 케블라 100%, 스펙트라 100%의 직물을 사

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

Properties	Kevlar29	Spectra 900	Vinylester
density(g/cm ³)	1.44	0.97	1.15
tensile modulus (GPa)	62	117.3	3.71
tensile strength (MPa)	2.758	2.587	63.3
elongation(%)	4	3.5	6.3

용 하였다. 기지물질로는 내쇼날합성(주)의 XSR-10 grade Vinylester 수지를 사용하였다. 이들의 기본 물성은 다음의 Table 1에 보인 바와 같다.

2-2. 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 이른 ply들을 각 실험의 종류에 따라 4ply, 6ply, 12ply를 적층하였다. 보강재로 사용한 층내 하이브리드 직물의 경우 방향성을 지니고 있으므로, 0° 방향과 90° 방향으로 번갈아가며 적층하였다. 상온에서 5.5 MPa로 가압한 후, 분당 2°C의 승온 속도로 113°C까지 상승시키고 50분간 유지하였다. 성형 후 적당한 시간의 후경화를 시켜주었다. 최종적인 시편의 부피분율은 보강재가 60%, 수지가 40%가 되도록 조절하였다. 하이브리드 시편의 경우 전체적인 보강 섬유의 부피비가 케블라/스펙트라 3:1인 경우와 1:1인 경우의 두가지 종류로 시편을 제작하였다. 인장 실험과 굽힘 실험용으로는 6ply, 충격 실험용으로는 4, 6ply, 층간 전단력 실험용으로는 12ply를 적층하였다. Table 2에 제작 시편의 종류와 적층 순서, ply 수를 보이고 있다.

Table 2. Specimen Types, Stacking Sequence and Ply Numbers

Specimen Test	number of ply	Stacking Sequence			
		kevlar	3/1	1/1	spectra
tensile test	6	[0/90] ₃	[0/90] ₃	[0/90] ₃	[0/90] ₃
flexura test	6	[0/90] ₃	[0/90] ₃	[0/90] ₃	[0/90] ₃
ILSS test	12	[0/90] ₆	[0/90] ₆	[0/90] ₆	[0/90] ₆
impact test	4, 6	[0/90] ₂ , [0/90] ₃	[0/90] ₂ , [0/90] ₃	[0/90] ₂ , [0/90] ₃	[0/90] ₂ , [0/90] ₃
CAI test	4, 6	[0/90] ₂ , [0/90] ₃	[0/90] ₂ , [0/90] ₃	[0/90] ₂ , [0/90] ₃	[0/90] ₂ , [0/90] ₃

2-3. 시험 방법

기계적 물성 평가를 위하여 다음의 실험들을 행

하였다. 각 시험당 6-7개의 시편에 대해 시험하였으며, 실험 조건들은 아래와 같다.

- 인장 시험 :

ASTM D 638-M, crosshead speed 5mm/min

- 굽힘 시험 :

ASTM D 790-84a, span/depth = 16/1, crosshead speed 5.3mm/min

- 층간전단력시험 :

short beam shear test, span/depth = 5/1, crosshead speed 2mm/min

- 충격 실험 : 낙하 하중 충격 시험

- 충격 후 잔여 압축 강도 시험 :

ASTM D 3501-76, 아래 Fig.1과 같은 fixture를 제작하여 압축하중을 가하여 줌으로써 시험하였다.

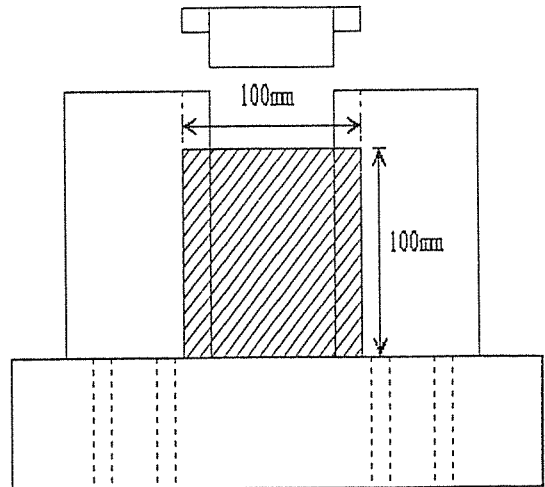


Fig. 1. CAI test fixture

3. 결과 및 고찰

Fig.2에서 인장 시험 결과를 보이고 있다. 결과에 의하면, 인장 강도면에서는 케블라 460 MPa, 하이브리드가 350-370MPa, 스펙트라가 198MPa의 값을 나타냄으로써 대체적으로 산술 평균적인 값을 나타내었다. 인장 방향으로 케블라/스펙트라가 50/50으로 보강되어 있는 시편의 경우, 인장 강도에서 혼합물 법칙에 따른 중간 값보다 10% 정도 더 큰 수치를 나타내었다.

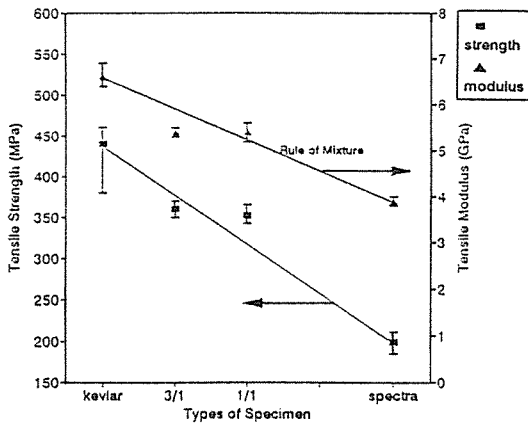


Fig. 2. Tensile Properties of the Specimen

탄성 계수는 케블라 6.9GPa, 스펙트라 3.8GPa 인데 비하여 하이브리드 재료는 5.2-5.5GPa를 나타내어 대체적으로 중간값을 보였으나, 50/50의 시편에서 수직방향으로 케블라가 보강된 경우에는 rule of mixtures에서 예측되는 값보다 10% 정도 높은 수치를 나타내었다.

인장 방향으로 같은 부피분율의 보강재가 포함된 시편의 경우에도, 수직 방향의 보강재 성분에 따라 인장 강도나 탄성계수가 변화하는 경향을 보였다. 예를들어 인장 방향으로 케블라만 보강되어 있는 시편을 시험한 경우, 수직 방향의 보강 섬유가 케블라, 스펙트라, 케블라/스펙트라 50/50의 3가지 경우가 있었으며 각각의 경우 인장 강도가 460MPa, 385MPa, 442MPa를 나타내었다. 다른 시편의 경우에도 대체적으로 비슷한 경향을 보였으며, 인장 방향으로 보강된 섬유 종류가 같다고 할때, 수직 방향으로 케블라가 보강된 경우 가장 높은 인장 강도와 탄성계수를 스펙트라가 보강된 경우는 가장 낮은 값을, 스펙트라와 케블라가 함께 보강된 경우에는 그 사이의 값을 보였다.

Fig. 3은 인장에 따른 각 시편의 응력-변형을 곡선을 보이고 있다.

케블라의 경우, 인장에 따른 초기 변화를 보이지 않다가 항복점에 이르러 급격한 파단이 발생하는 경향을 보였으며, 스펙트라 보강 시편의 경우 인장 초기부터 층간 분리가 활발하게 발생하여 곡선이 점차 옆으로 눕는 경향을 보이다가 항복점 이후에도

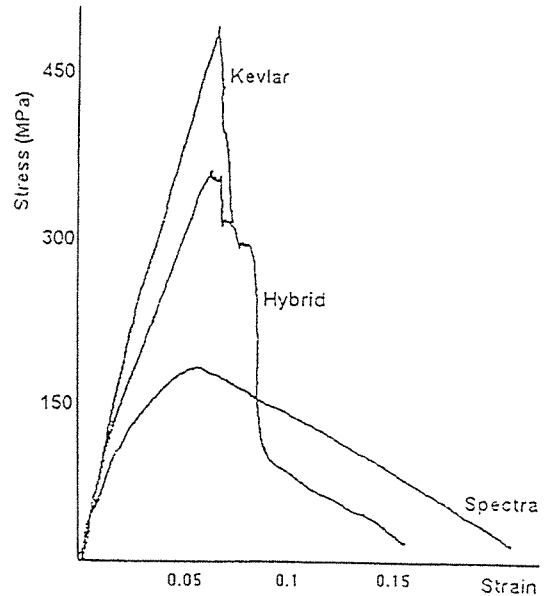


Fig. 3. Stress-Strain Curves of the Specimen Under Tensile Loading

서서히 강도가 저하되는 경향을 보여주었다. 또한 시편의 한 부분에 하중이 집중되어 necking point가 형성되는 것을 관찰할 수 있었으며 necking point 형성 이후에 항복에 도달하는 것을 관찰할 수 있었다. 하이브리드 시편의 경우, 스펙트라 보강 시편과는 다르게 인장 초기에 어느 정도 층간 분리가 억제되다가 항복점에 이르러 파단이 발생하였으며, 시편 전체적으로 균일하게 변형을 보여주었다. 또한 급격한 파단을 보이는 케블라 보강 시편과도 달리 파단 발생 후에도 어느 정도 강도를 유지하며 점차적으로 강도가 저하되는 경향을 보여주었다.

서론에서 설명한 Hayashi의 식과 대체적으로 부합되는 경향을 보였으며, 다만 그 절대값이 예측치보다 10% 정도 더 큰 값을 나타내었다. Hayashi는 그의 연구에서 일차 파단된 성분이 인장 강도에 기여하지 못한다고 가정하였고 또한 성분간의 계면을 전혀 고려하지 않았다. 그러나 실제로 하이브리드화하여 시험한 결과, 약간의 차이가 발생함을 알 수 있다.

인장 성질에 있어서 하이브리드 복합재료가 증가한 값을 보이는 이유는, 일차 파단된 케블라 섬유가 파단된 후에도 수지와 어느정도 계면을 유지

하여 주기 때문에 남은 스펙트라 부분이 전달수 있을 것으로 생각되는 수치보다 더 높은 강도를 나타내는 것으로 생각되어진다. 또한 스펙트라 복합재료에서 생기는 하중이 집중되는 점이 하이브리드 시편에서는 나타나지 않음으로써 전체적으로 하중을 분산할 수 있었기 때문에 인장 강도가 증가하는 것으로 생각되어진다.

Fig. 4는 층간 전단력 시험을 행한 결과를 보이고 있다.

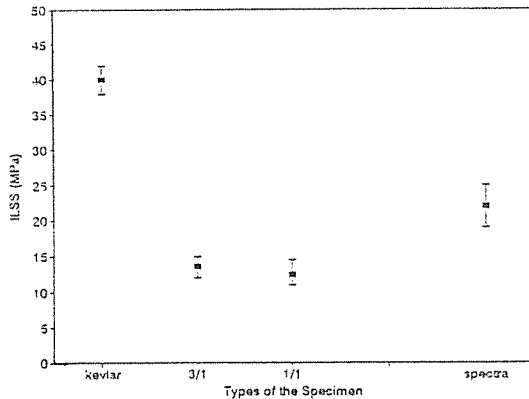
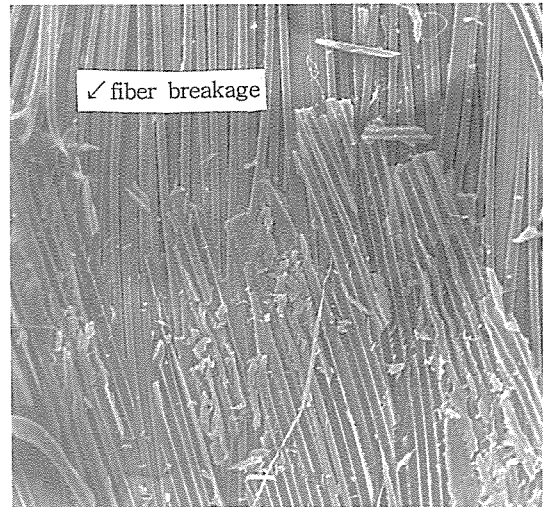


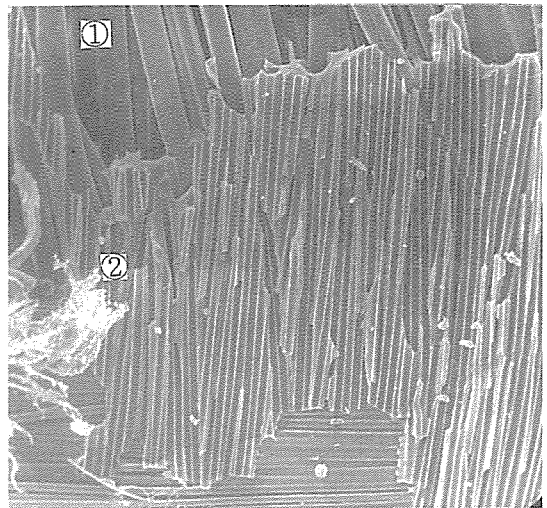
Fig. 4. Interlaminar Shear Stresses of the Specimen under Flexural Loading

대체적으로 보아, 복합재료의 하이브리드화 정도가 클수록 층간 전단력이 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 케블라 보강 시편이 스펙트라 시편보다 더 강한 층간 전단력을 나타내었으며, 이는 케블라의 계면 결합력이 스펙트라 보다 월등히 좋다는 점을 생각하여 보면 쉽게 이해할 수 있다. 또한 하이브리드 시편의 경우, 케블라나 스펙트라의 경우보다도 훨씬 낮은 층간 전단력을 보여주었다. 케블라 보강재 표면간에 접촉하는 경우 가장 큰 층간 전단력을 기대할 수 있으며, 스펙트라 보강재 표면간에 만나는 경우에는 그 절반정도의 층간 전단력을 나타내게 된다. 실제의 하이브리드 복합재료는 케블라표면과 케블라 표면이 만나는 경우는 1/4, 스펙트라표면과 스펙트라표면이 만나는 경우 역시 1/4의 확률을 가지고 있는데 비하여, 스펙트라표면-케블라 표면이 만나는 확률은 전체의 1/2이 되기 때문에, 케블라-스펙트라 표면의 층간 전단력에 의해 전체적인 값이 결정된다. Fig. 5는 층간 전단력 시험에서의 파단면을 SEM으로 관찰한 사진이다.

(a)는 케블라-케블라 표면을 관찰한 그림이며, (b)는 하이브리드 시편의 파단면을 관찰한 그림이다. (a)의 케블라 단일 보강재 강화 시편의 경우, 파단면에 복잡하게 발생된 균열등을 관찰할 수 있으며, 섬유가 뽑혀져 나온 현상등을 관찰할 수 있다. 이에 비해 (b) 시편의 경우, 스펙트라 표면에서는 깨끗하게 수지가 뜯겨져 나온 것을 볼 수 있으며(1번



(a)



(b)

Fig. 5. Micrographs of Fractured Surface after Shear Failure(X 100) (a) kevlar fractured surface (b) hybrid fabric fractured surface

구역), 케블라-케블라 표면이 만났던 2번 구역에서도 (a)의 균열과는 다르게 파단이 급격히 진행된 것을 알 수 있다. 케블라 섬유만이 존재하는 경우, 파단의 균열이 cohesive하게 발달함을 알 수 있으나, 스펙트라와 하이브리드화 하여주는 경우, 케블라-케블라 표면의 파단도 adhesive하게 바뀌어 짐을 알 수 있다. 일반적으로 cohesive한 파단이 adhesive 보다 더 많은 에너지를 필요로 한다는 점을 생각하면, 스펙트라의 존재에 의한 케블라 표면의 파단 현상의 변화로 인하여 층간 결합력이 떨어진다고 생각할 수 있다.

결과적으로는 스펙트라 표면만이 존재하는 경우 보다 하이브리드 시편의 경우 더 낮은 층간 전단력을 나타내게 되는 것이다. 하이브리드화에 의해서 섬유와 기지물질간의 계면 결합력 자체는 변하지 않는다는 사실을 고려하면, 이러한 층간 전단력의 변화는 각 layer간의 interaction에 의한 것으로 생각된다. 열적 성질이 다른 복합재료를 하이브리드화 하여 성형하는 경우, thermal mismatch에 의하여 층간에서 shear force를 받게된다. 특히 보강재간의 열적성질에 차이가 날수록 그 값이 커지게 된다 [13].

Fig.6은 3점 굽힘 시험 결과를 보이고 있는 그림이다.

보강 섬유의 파괴분율과 굽힘 강도와 굽힘 탄성계수의 관계를 보였다. 굽힘 강도는 하이브리드화 하여짐에 따라 다소 증가하는 현상을 보였으며,

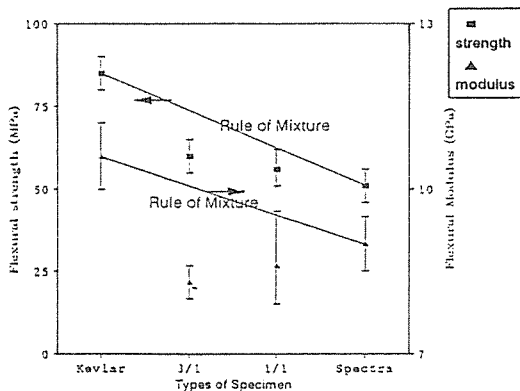


Fig.6. Flexural Strength and Modulus of the Specimen by 3-point Bending Test

굽힘탄성계수는 케블라와 스펙트라 보다 하이브리드가 약간 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 굽힘 강도나 탄성계수 어느쪽도 혼합물 법칙과 비교하여서는 상당히 감소한 수치를 나타내었다.

파단 현상을 관찰하여 보면, 하중 부분에서의 층간 분리를 관찰할 수 있었으며, 하중에 의한 층간 분리의 상단 부분에서 압축에 의한 것으로 생각되는 섬유와 기지물질의 손상을 관찰할 수 있었다. 반면에, 섬유의 인장으로 인한 fiber breakage 등은 관찰할 수 없었다. 굽힘 실험시, 중심부에 가해지는 하중으로 인하여 shear failure가 일어나는 면의 하단부에서는 인장력이 가하여지며, 상단부에서는 재료에 압축이 가해지게 된다. 결국 굽힘실험은 이상 3가지의 복합적인 작용에 의한 재료의 파괴를 가져오는 현상이다. 본 연구에서 보강재로 사용한 케블라나 스펙트라의 경우, 압축 성질이 인장 성질에 비하여 상당히 열악하기 때문에, 압축에 의한 항복이 재료의 파단에 있어서 주요한 역할을 하게 된다.

또한 관찰한 바에 따르면, 항복이 일어난 부분이 압축하중을 받게 되는 재료의 윗부분, 그리고 층간 분리가 일어난 것이 대부분이었으므로, 굽힘 시험에 있어서 파괴현상은 층간 전단력과 압축에 의한 항복이 주된 요인으로 보인다. 본 연구에서 사용한 재료인 케블라나 스펙트라는 압축성질이 매우 좋지 않은 재료이다. 특히 스펙트라는 케블라와 비교하여서도 50% 정도의 압축 강도를 지니고 있다. 하이브리드화 하여줄 경우, 압축강도가 어느정도 향상될 것으로 생각되며, 이러한 관점에서 생각해보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

굽힘 하중에서의 두가지 주된 파단 요인인 압축과 층간 전단력 중에서, 압축강도는 하이브리드하여짐에 따라 증가하게 되고, 층간 전단력은 감소하는 결과를 보임으로써 굴곡 강도나 탄성율이 스펙트라 보강 시편과 거의 비슷한 정도를 보이는 것이다. 또한 이 결론은 층간 전단력 면에서는 비슷한 3/1 시편과 1/1 시편을 비교해 보면 확실해진다. 두 시편의 층간 전단력은 각각 13.6, 12.4MPa로서 비슷하지만, 3/1 시편의 경우, 비교적 압축강도가 뛰어난 케블라 섬유가 더 많이 보강됨으로써 스펙

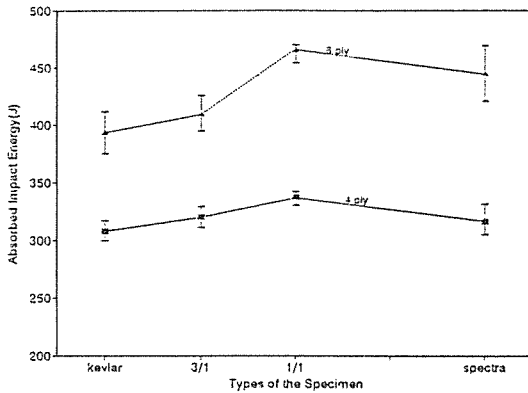


Fig. 7. Total Absorbed Impact Energy under Impact Loading

트라 100%의 시편과 비교하여 굴곡 강도에서는 45%, 탄성계수에서는 17%의 향상을 가져오는 결과를 보이고 있다.

Fig. 7은 낙하 하중 충격 시험 결과를 보이고 있다.

낙하 하중 충격 시험기를 이용하여 실험하였으며, 4ply, 6ply의 두가지 두께에 대하여 각각 실험하였다. 수차에 걸친 예비 실험을 통하여 시편에 심각한 손상이 오거나 관통이 일어날 정도의 에너지 수준을 결정하였으며, 이 에너지 수준으로 충격을 가하여 실험을 하였다. 4ply 시편의 경우 가하여준 에너지는 350J이었으며, 6ply 시편의 경우 가하여준 에너지는 500J이었다.

스펙트라의 함량이 많을수록 최대하중은 줄어들었으며, 반대로 하중에 의한 변위는 커져서 최종적인 흡수 에너지가 줄어드는 경향을 나타내었다. 특히 1/1 하이브리드 시편의 경우 케블라와 비교하여 10-20%, 스펙트라 보다도 5-7%의 총 흡수 에너지가 늘어나는 결과를 보였다.

Fig. 8은 각 시편들의 최대하중-최대변위를 나타내는 그림이다. 수평에 가깝게 누울수록 적은 하중에도 많은 변형을 보이는 것이므로, 좀 더 ductile한 특성을 나타내는 것이 된다.

손상 영역이나 변형 정도를 보면, 같은 에너지 수준의 충격에 대하여, 스펙트라가 케블라 보다 더 많은 충격에너지를 흡수하는 반면, 더 넓은 손상 부위와 심한 변형을 일으킴을 알 수 있었다. 반면에,

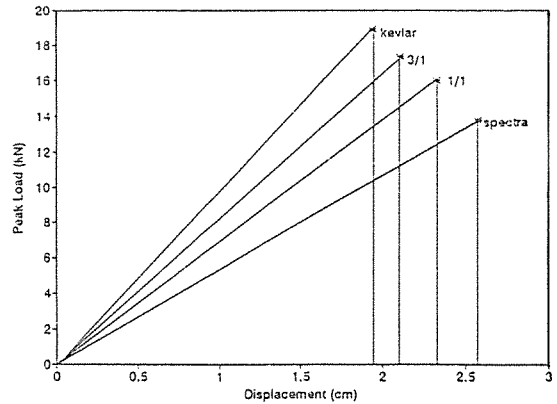


Fig. 8. Peak Load-Displacement Plots under Impact Loading

케블라는 흡수 에너지는 더 작지만 손상 영역이나 변형은 스펙트라 보다 훨씬 적음을 관찰할 수 있었다. 하이브리드 시편의 경우, 앞의 두가지 재료에 비하여 최대 하중은 중간보다 약간 큰정도, 변형도 중간 보다 약간 큰 정도를 보여 결과적인 충격 에너지 흡수량은 더 늘어나는 것을 보였다.

또한 이러한 수직 방향의 변위 이외에 층간 분리 영역을 관찰하면, 하이브리드 시편의 스펙트라나 케블라 시편에 비하여 훨씬 넓은 손상 영역을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 앞의 층간 전단력 시험에서 확인하 바와 같이 층간 전단력이 약하기 때문에 오는 현상으로 생각되며, 같은 정도의 충격에도 더 많은 부분의 손상이 일어나며 에너지를 흡수하고, 스펙트라만이 아닌 케블라가 함께 보강되어 있음으로 인하여 최대 하중의 증가를 가져오기 때문에 결과적으로는 총 흡수 에너지의 증가를 가져오는 것으로 보인다.

또한 두꺼운 판의 경우에서 하이브리드 효과가 확실한 경향을 알 수 있다. 두꺼운 판의 경우, 얇은 판과 비교하면 층간 분리에 의한 에너지 흡수가 더 많을 수 있기 때문에 더 많은 에너지 흡수량의 증가가 가능한 것으로 생각된다.

복합재료에 충격을 가하는 경우, 보강재의 물성과 섬유-기지물질간의 계면 결합력 차이에 의해서 파괴 모드가 결정이 된다. 충격에 의한 충격에너지는 흡수는 2가지 영역으로 나눌수가 있다. crack이 만들어지기까지의 initiation 영역과 major crack이

생성된 후의 propagation 영역이다. 복합재료의 충격 에너지 흡수량은 이 두가지 영역에서 흡수한 에너지의 양으로 나타내어지게 된다.

몇몇의 연구자들[14~16]은 충격 성능에 영향을 주는 인자들에 관한 연구를 하였다. 그들에 따르면, 섬유와 기지물질간의 계면에 따른 영향이 상당히 크다고 하였다. 표면 처리등을 하여 계면 결합력을 향상시킨 복합재료의 충격 성능이 오히려 떨어진다고 보고한 것이다. 계면 결합력이 매우 좋은 복합재료의 경우, 매우 brittle 한 파괴 모드를 보이며, 에너지 흡수가 줄어든다고 보고하였으며, 반대로 계면 결합력이 나쁘면 층간 분리가 발달하고, 그에 따라 충격 에너지 흡수가 늘어난다고 하였다.

Yeung and Broutman[16]은 충격 에너지 흡수량과 층간 전단력의 관계에 관한 연구를 하였다. 이들의 연구에 따르면, 계면 결합력이 증가함에 따라 충격 초기의 crack initiation 에너지가 증가한다고 하였다. 하지만, crack의 전파에 따라 흡수되는 crack propagation 에너지가 줄어들어서 결과적인 총 흡수 에너지는 줄어드는 경향을 보인다고 하였다. 또한 층간 분리에 의한 에너지 흡수 보다 섬유의 파괴에 의한 에너지 흡수가 주로 일어난다고 하였다.

계면 결합력이 나쁜 경우에는, 층간 분리에 의한 에너지 흡수가 주된 에너지 흡수 기구가 된다고 보았다. crack initiation 에너지는 어느 정도 감소하지만 propagation 에너지는 층간의 분리 증가에 따라 증가하여, 결과적인 총 흡수 에너지의 증가가 나타난다고 하였다.

Fig.9에 복합재료에 심각한 손상이 가지 않을 정도의 낮은 에너지 수준으로 충격을 반복적으로 가하여 충격 특성의 변화를 관찰한 반복하중 충격 시험 결과를 보이고 있다. 가하여준 에너지는 4ply 시편의 경우 100J, 6ply 시편의 경우 150J이었으며, 반복 회수는 3회였다. 1차의 충격에 의한 에너지 흡수 경향은 앞의 고에너지 충격 실험과 같았으며, 충격이 거듭될수록 스펙트라의 파괴분율이 큰 시편의 에너지 흡수가 증가하는 경향을 보인다. 앞서의 실험과 마찬가지로 변형은 스펙트라가 가장 심하였으나, 층간 분리는 하이브리드 복합재료가

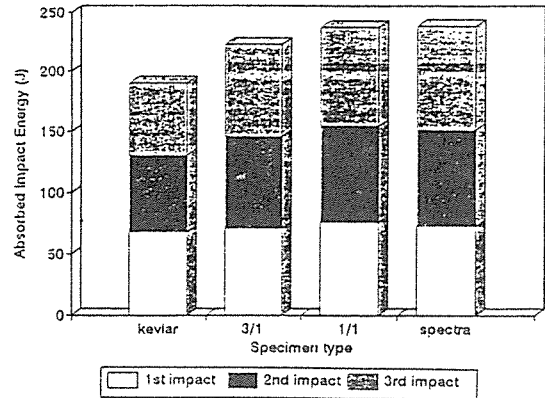


Fig.9. Total Absorbed Impact Energy under Repeated Impact Loading(4ply specimen, 150 J applied)

가장 넓은 영역에서 일어났다. 반복 하중 충격 시험 후에 잔여 압축 강도를 측정하기 위해 panel compression 실험을 행하여 충격에 의한 손상 정도와 층간 분리 정도를 평가하였다.

복합재료에 충격을 가하는 경우, microbuckling과 보강섬유의 kinking, 층간 분리가 발생하게 된다. 이렇게 충격에 의한 손상을 입게 되면, 압축시 하중에 견디는 힘이 상당한 손실을 입게 된다. 특히 층간 분리가 발생하면, 분리된 각 ply들은 층간 분리 이전보다 momemt of inertia가 줄어들기 때문에 압축하중에 약하게 된다. 그러므로 충격에 의한 층간 분리의 평가에 충격 후 압축의 방법이 유용하게 쓰이는 것이다[14].

Table 3에 충격 후 압축 실험 결과를 보이고 있다.

Table 3. CAI Test Results of the Various Specimen

specimen type	number of ply	compressive strength(MPa)		
		undamaged	1st impact	repeated impact
kevlar	4	1.650	0.957	0.606
3/1	4	1.333	0.613	0.400
1/1	4	0.973	0.433	0.280
spectra	4	0.680	0.346	0.213
kevlar	6	1.996	1.058	0.678
3/1	6	1.564	0.646	0.409
1/1	6	1.208	0.406	0.302
spectra	6	0.798	0.390	0.238

실험 결과를 살펴보면, 가하여 준 에너지의 차이에 비하여 두꺼운 판에서의 강도 감소가 얇은 판보다 현저하다는 사실을 알 수 있으며, 또한 하이브리드에서의 강도 감소가 케블라나 스펙트라만 사용한 복합재료 보다 더 심하다는 것을 알 수 있다. 이는 손상 시편의 압축강도를 미손상 시편의 압축강도로 나누어준 감소율을 비교하여 보아도 알 수 있으며, 앞에서의 층간 전단력 시험과도 부합하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 그 감소율을 비교하여 보면 잘 알 수 있다. 하이브리드 복합재료의 감소율은 1차 충격후 54-61%, 반복충격 후 71%로써, 케블라의 47-50%, 65%, 스펙트라의 50-53%, 68% 보다 심한 저하를 보였다. 결과적으로 충격에 의한 층간 분리는 하이브리드 시편에서 가장 현저하다는 것을 알 수 있다. 충격에 의한 층간 분리가 가장 심하기 때문에 최종적인 압축강도의 감소가 가장 심한 것이다. 층간 분리가 가장 활발한 이유는 앞에서 실험결과와 같이, 층간 전단력이 가장 작은 값을 나타내기 때문인 것으로 보인다. 하이브리드화 하여 줌에 따라 층간 전단력이 급격히 감소하기 때문에 충격을 받을 경우의 층간 분리가 더 활발하게 일어나게 되며, 이로 인한 충격 흡수 에너지의 증가가 관찰된다. 반면, 손상은 더 많이 받게 되며, 이로 인하여 잔여 압축강도의 감소를 나타내게 되는 것이다.

스펙트라에 비하여 압축 강도가 우수한 케블라를 채택하여 하이브리드화 하여 주었으므로, 압축 강

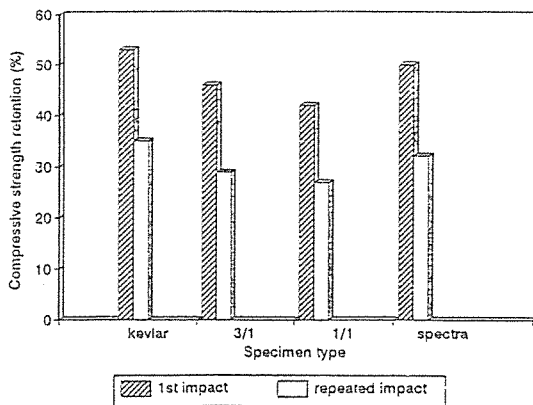


Fig. 10. Compressive Strength Retention after Impact

도의 절대치에 있어서는 스펙트라 복합재료에 비하여 압축 강도가 1.7배 증가하는 값을 보였다. 반복 충격 후에도, 스펙트라 보다 하이브리드 복합재료가 1.2-1.5배의 충격 강도를 가지고 있음을 알 수 있었다. Fig. 10은 충격 후 압축강도의 잔여율은 보여주고 있는 그림이다.

4. 결 론

케블라 섬유 보강 복합재료, 스펙트라 섬유 보강 복합재료, 하이브리드 복합재료의 기계적 물성을 인장, 굽힘, 층간 전단력, 충격, 충격 후 잔여 압축 강도 측정실험을 실시, 결과를 분석하여 하이브리드 복합재료의 물성 변화에 대하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 하이브리드 복합재료의 인장 강도는 케블라와 스펙트라의 산술 평균에 근사하며 약간의 상승 효과를 보였다. 탄성율은 대체적으로 중간값을 보였으며, 적층 순서에 따라 상승 효과를 보인 시편도 존재하였다. 파괴 현상을 보면, 급격한 파단 현상을 보이는 케블라와는 달리, 일차적인 항복후에도 어느 정도 하중을 견디는 현상을 보였다.

(2) 하이브리드화에 의한 층간 전단력에서의 큰 감소가 확인 되었으며, 이로 인하여 굽힘 강도와 탄성계수가 감소하여 스펙트라와 비슷한 정도의 굽힘 성질을 보였다.

(3) SEM을 이용하여 층간 분리가 일어난 파단면을 관찰한 결과, 하이브리드화 하여준 경우, 스펙트라 보강재의 존재로 인하여 케블라표면의 파단양상이 바뀌어 층간 전단력이 변화되는 것임을 알 수 있었다.

(4) 하이브리드 복합재료의 경우, 층간 전단력의 감소 때문에, 충격시에 손상 영역의 확대가 관찰 되었으며, 이로 인하여 전체적인 충격흡수 에너지는 스펙트라와 비슷하거나 조금 나은 정도의 향상된 충격 성능을 보여주었다.

(5) 손상 영역을 확인하기 위하여 잔여 압축강도 시험에서 예상대로 하이브리드의 감소폭이 제일 컸으며, 이로 미루어 볼 때 손상 영역이 가장 넓다는 것을 알 수 있었다. 반면, 절대치로 비교하여 보면,

하이브리드 복합재료의 잔여 압축 강도는 스펙트라에 비하여 충격 후에도 월등한 잔여 압축 강도를 지님을 알 수 있었다.

이와 같은 물성 변화는 하이브리드화 하여줌에 따른 층간 전단력의 변화가 주된 원인으로 생각되며, 계면 결합력의 변화는 특히 충격 성능의 향상에 큰 영향을 미친 것으로 여겨진다. 열적인 mismatch에 의하여 성형시에 층간의 결합이 방해되며, 이로 인하여 하이브리드 복합재료의 층간 전단력이 케블라 적층 복합재료나 스펙트라 적층 복합재료보다도 더 낮은 결과를 가져오는 것으로 생각되어진다. 이러한 층간 전단력의 변화로 인하여 특히 굽힘 성질이 나빠지는 결과를 가져왔으며, 반면 충격 성능이 향상되는 결과를 가져왔다고 생각된다.

또한 케블라 복합재료의 압축 특성이 스펙트라에 비하여 월등하기 때문에 하이브리드 복합재료의 압축 성능은 스펙트라만 사용하여 보강한 경우 보다 월등히 나아지는 결과를 가져왔다.

참 고 문 헌

1. N.L. Hancox, Fiber Composite Hybrid Materials(ed.Hancox), Applied Sci.Publishers LTD., London, 1981.
2. T.Hayashi, K.Koyama, A.Yamazaki and M.Kihara, FukugoZairyo, 1, 1972, pp.21-25.
3. A.R. Bunsell and B.Harris, Composites, 5, 1974, pp.154-164.
4. J.Aveston and J.M.Sillwood, J. Mat. Sci., 11, 1976, pp.1877-83.
5. C.Zweben, J. Mat. Sci., 12, 1977, pp.1325-37.
6. J.N.Kirk, M.Munro and P.W.K, Beaumont J. Mat. Sci., 13, 1978, pp.2197-204.
7. G.Marom, S.Fischer, F.R.Tuler and H. D.Wagner, J. Mat. Sci., 13, 1978, pp.1419-26.
8. H.Arrington B.Harris, Composites, 9, 1978, pp.145-52.
9. M.G.Bader and P.W.Manders, ICCM, II, Toronto, Canada, AIME, NY, 1978, pp.1147-61.
10. A.R.Bunsell, Fiber Reinforcements for Composite Materials, Composite Materials Series V2, Elsevier, New York, 1988.
11. D.Hull, An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, England, 1981.
12. D.F.Adams, J. Reinforced Plastics and Composites, V6, Jan., 1987, pp.-66,88.
13. N.L.Hancox and H.Wells, 33rd SPI Conf., Washington, 1976, 17A1-12.
14. N.L.Hancox, Composites, Vol.3, 1971, p.41.
15. M.G.Bader, J.E.Bailey and I,Bell, J. Phys. D.Appl. Phys., 6, 1973, p.572.
16. P.Yeung and L.J.Broutman, Polymer Eng. Sci., 18, 1978, p.62.