

부직포/다축경편성물 하이브리드 복합재료의 역학적 성질에 관한 연구

김태균 · 이경우* · 강태진†

서울대학교 섬유고분자공학과, *동아대학교 의상섬유학부
(2000. 2. 10. 접수)

Mechanical Properties of Hybrid Composite of Nonwoven and Multiaxial Warp Knit

Tae Kyun Kim, Kyung Woo Lee*, and Tae Jin Kang†

Department of Fiber & Polymer Science, Seoul National University, Seoul 151-752, Korea

*Division of Fashion and Textiles, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea

(Received February 10, 2000)

Abstract : The mechanical properties of hybrid composite of glass nonwoven and Kevlar multi-axial warp knit have been studied. The effects of structural changes in hybrid composites were investigated with the focus on the interhybrid structures resulting from changes in the stacking sequence of the two different materials. The hybrid composites showed good flexural properties, because the short staple reinforced fibers in nonwoven fabrics effectively disturbed the propagation of crack path by fiber-bridging and significantly improved interlaminar fracture energy.

1. 서 론

근래에 와서 많이 쓰이고 있는 섬유강화 복합재료는 종래의 금속재료에 비하여 높은 비강도, 비탄성률, 내부식성, 화학적 안정성이 우수하여 사용 목적에 맞는 재료를 디자인하고, 특정의 용도에 필요한 물성의 요구치에 맞추어 재료를 만들어 낼 수 있다는 장점을 가지고 있다.

일반적으로 복합재료는 한가지 보강재를 사용하였을 경우, 특정 물성은 기대치에 도달하게 되나, 보강재의 특성으로 인한 복합재료의 다른 물성의 저하가 발생할 수 있게 된다. 예를 들어 탄소 섬유를 보강한 경우, 내열성이나 내마모성은 현저한 증가를 보이지만 충격에는 아주 약하다는 단점을 가지게 된다. 한가지 보강재를 사용한 경우의 단점을 보완하기 위한 방법으로 보강재를 2가지 이상의 재료를 사용하는 방법이 있으며, 이런 종류의 복합재료를 하이브리드 복합재료라 한다 [1]. 하이브리드 적층 복합재료는 섬유의 보강방법에 따라 크게 3가지의 범주로 나눌 수 있다. 하나의 층안에 2가지, 혹은 그 이상의 섬유를 보강하여 적층한

intraply 하이브리드, 한가지 보강 섬유로 이루어진 층을 번갈아, 혹은 적당한 적층 순서로 바꾸어 가며 적층한 interply, 중심부와 표면을 다른 보강재로 보강한 skin-core 구조 등의 3종류가 그것이다[2].

이러한 재료들에 대한 초기의 연구는 주로 탄소 섬유의 내충격성 보완에 관한 연구가 대부분이었다. 몇몇 연구자들은[3-7] 하이브리드에 의하여 탄소섬유강화 플라스틱의 내충격성에 괄목할만한 향상을 가져온다는 결과를 발표하였다.

보통 일방향 플라이는 각각의 층을 적층하는데 많은 시간과 노력이 필요하고, 생산 단가가 높아진다. 이와 같은 단점을 극복하고자 개발된 것이 다축경편성물로 (multiaxial warp knit(이하 MWK)) 각 층별로 일정한 방향으로 배열된 다층섬유집합체를 두께 방향의 재봉사(stitch yarn)를 이용하여 고정시켜주는 구조이다. 층별로 배열된 섬유들을 knit로 묶어 줌으로써 직물형태로 만들어 주면 배열이 쉽게 변형되지 않으므로, 작업이 빨라지고 더욱 균일한 물성의 제품을 제조할 수 있게 된다. 이와 같은 MWK는 고강도, 고탄성률을 지니며, 내충격성에 뛰어난 장점을 가지고 있지만 적층 복합재료로 제조하면 굽힘성질에 취약한 단점이 있다.

본 논문에서는 케블라 다축경편성물의 단점을 보완하기 위한 방법으로 케블라 제직포에 비해 가볍고 가

† To whom correspondence should be addressed.
taekang@plaza.snu.ac.kr

격이 저렴한 유리섬유 부직포와 MWK를 하이브리드 화하여 굽힘성질을 중심으로 여러 가지 복합재료의 기계적 물성 변화를 검토하였으며, 또한 복합재료 제조 시 부직포 적층 위치를 변화시켜 그에 따른 기계적 물성 변화도 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 시 료

기지재 : 본 연구에서 사용된 기지재는 불포화 폴리에스테르로 세원 화학의 MP-011을 사용하였으며 기계적 물성은 Table 1에 나타내었다. 불포화 폴리에스테르의 개시제로는 benzoyl peroxide(BPO)를, 경화제로는 diallyl phthalate를 사용했으며 polyester:diallyl phthalate: BPO의 비율은 100:97:1로 했다.

보강재 : A. 유리섬유 부직포

본 연구에서 사용된 유리섬유 부직포는 Vetrotex사(독) 제품으로 그 특성을 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Properties of unsaturated polyester resin

Physical properties	Polyester resin
Density (g/cm ³)	1.25
Tensile modulus (GPa)	4.5
Tensile strength (GPa)	0.02
Maximum strain (%)	1~5

Table 2. Specifications of nonwoven fabric

Physical properties	Nonwoven fabric
Fiber type	E-glass
Fabric system	Chemical bonding
Fiber length (cm)	4~5
Density (g/cm ³)	2.54
Areal density (g/cm ²)	600

Table 3. Physical properties of Kevlar MWK fabric

Physical properties	MWK
Fiber density (g/cm ³)	1.44
Fiber tensile modulus (GPa)	2760
Fiber tensile strength (GPa)	58
Fiber ultimate strain (%)	3.6
Fabric system	0/+45/90/-45
Fabric areal density (g/cm ²)	700

B. 다축 케블라(MWK) 경편성물

본 연구에서 사용된 MWK 직물은 Kevlar 29로 제작된 것으로 그 물성을 Table 3에 나타내었다.

2.2. 시편제조공정

케블라 MWK와 유리섬유 부직포 직물을 적당한 크기로 절단한 후 개시제, 경화제와 알맞은 비율로 섞은 폴리에스테르 수지를 그 위에 균일하게 도포한 후 수지의 점도를 조절하기 위해 첨가한 아세톤을 수 시간 동안 휘발시킨 후에 hot press로 90°C에서 약 10분간, 120°C에서 약 1시간동안 15 MPa의 압력으로 가압하여 성형하였다.

2.3. 실험

인장 실험 : 인장강도, 인장계수를 측정하기 위해서 ASTM D-638 M의 방법에 따라 인장실험을 하였다. 시편의 위아래를 대칭으로 하기 위해서 케블라/케블라/케블라/케블라(KKKK), 케블라/유리섬유/유리섬유/케블라(KGGK), 유리섬유/케블라/케블라/유리섬유(GKKG), 유리섬유/유리섬유/유리섬유/유리섬유(GGGG)에 대하여 실험하였다. K와 G는 각각 케블라, 유리섬유 부직포를 나타낸다.

압축 강도 실험 : 굽힘성질에 중요한 영향을 주는 압축 강도를 ASTM D3501-76의 방법에 따라 실험하였다.

굽힘 실험 : 굽힘강도와 굽힘계수를 측정하기 위해서 ASTM D790-84a의 방법을 참고하여 3점 굽힘 실험을 하였다. cross-head speed는 5 mm/min, 지지 거리는 10 cm로 하였으며 굽힘강도와 굽힘계수는 다음 식에 의하여 구하였다.

$$\text{Flexural strength} = \frac{3PL}{2bt^2}$$

$$\text{Flexural modulus} = \frac{L^3m}{4bt^3}$$

여기서, P 는 최대하중, L 은 지지거리, m 은 하중/신장 곡선의 초기 기울기, t 는 시편두께, b 는 시편의 폭을 각각 나타낸다.

Short beam 전단실험 : 시편의 층간 전단력을 측정하기 위해서 ASTM D2344-76법에 의하여 short beam 전단실험을 실시하였다. 시편은 KK, KG, GG를 2배의 scale인 케블라 MWK 4장 유리섬유 부직포 8장으로 평균 두께가 7.4 mm가 되게 하였다. span depth ratio는 4가 되도록 span length를 29.6 mm로, cross-head speed는 2 mm/min으로 하였고 다음 식에 의하여 층간전단력(ILSS)값을 계산하였다.

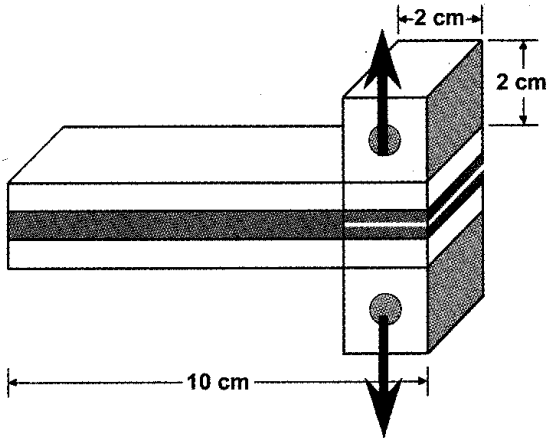


Figure 1. Configuration of double cantilever beam (DCB) specimen.

$$\text{Interlaminar shear strength} = \frac{3P}{4bt}$$

Mode I interlaminar fracture test : Mode I interlaminar fracture energy, G_I 값을 double cantilever beam(DCB)을 제작하여 compliance법으로 계산하였다. 시편의 크기는 $100\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 13.8\text{ mm}$ (tap 두께 포함)이며 시편 끝에 20 mm의 film을 미리 두어 starter crack을 주었으며 시편의 양면에 tap을 3장씩 붙인 후에 봉을 끼우기 위해 구멍이 있는 steel block을 epoxy 접착제로 붙였다. 시편의 모양은 Figure 1과 같다. crack length를 5 mm씩 진행시키면서 load(N)와 crack opening displacement(COD)를 기록했다. mode I fracture energy, G_I 값은 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$G_I = \frac{dU}{dA} = \frac{1}{2} P^2 \frac{dC}{dA}$$

여기서, P 는 하중, U 는 에너지, A 는 면적, C 는 컴플라이언스(compliance)를 각각 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인장 특성

KKKK, KGGK, GKKG, GGGG의 적층이 다른 복합재료에 대한 인장 실험을 한 결과를 Figure 2~4에 나타내었다. 유리섬유 부직포의 경우 인장강도에 있어서 보강 섬유 구조적 원인으로 19%정도 MWK에 비해 감소하였다. 그러나 인장계수에 있어서는 부직포가 MWK에 비해 약 58%정도 높은 값을 나타내었다. 하이브리드화된 KGGK, GKKG의 인장강도와 인장계수는 혼합법칙(rule of mixture)에 의한 평균값 정도를 나타내 별다른 하이브리드 효과를 보이지 않았다. 파

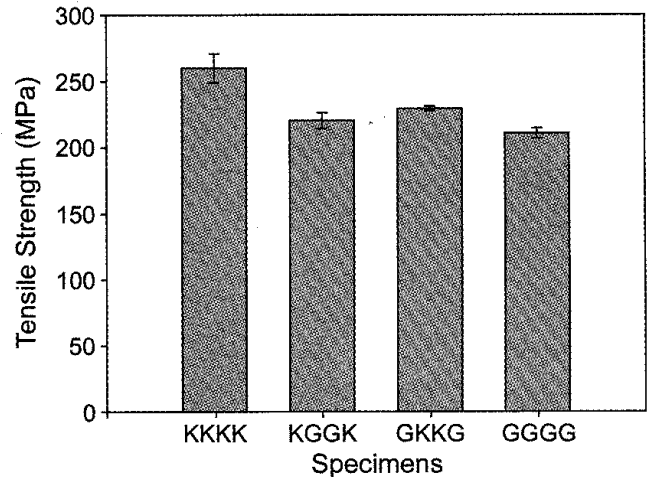


Figure 2. Tensile strength of Kevlar MWK/Glass-nonwoven hybrid composites.

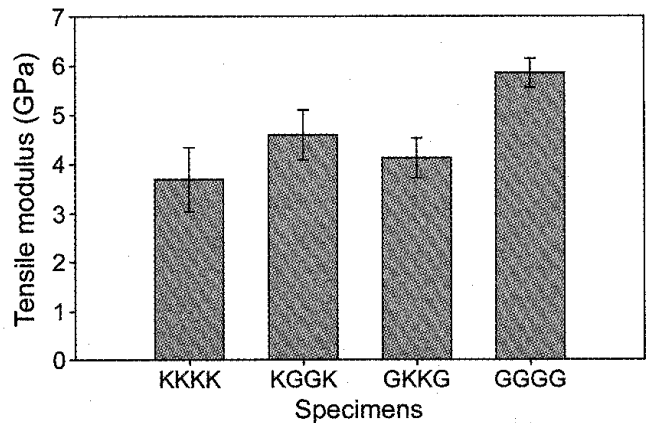


Figure 3. Tensile modulus of Kevlar MWK/Glass-nonwoven hybrid composites.

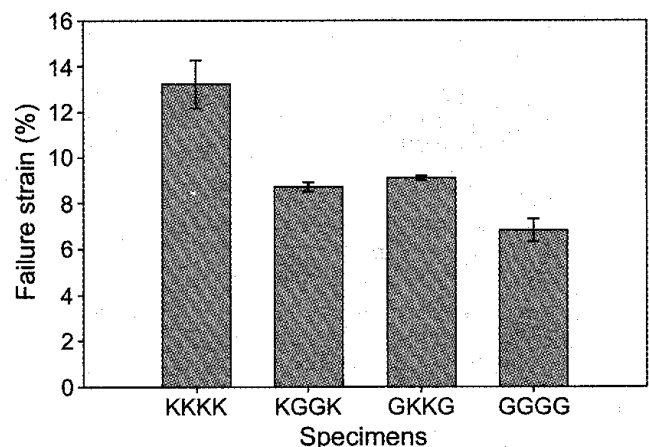


Figure 4. Failure strain of Kevlar MWK/Glass-nonwoven hybrid composites.

단 신장률의 경우 하이브리드 복합재료내의 신장도가 큰 MWK가 신장도가 작은 부직포의 파단후에도 crack

arrestor로 작용해서 KGGK, GKKG의 파단 신장률은 GGGG에 비해 31%정도 상승함을 보였다. Figure 5는 인장 실험 후의 시편을 나타낸 것으로 하이브리드화된 KGGK에서 부직포는 이미 끊어졌지만 crack arrestor의 역할을 하여 파단 신장률의 상승을 돕는 MWK가 여전히 이어져있는 것을 보이고 있다.

3.2. 압축 특성

Table 4에 8가지 시편의 압축강도를 나타내었다. 굽힘성질에 큰 영향을 주는 압축강도는 유리섬유 자체의

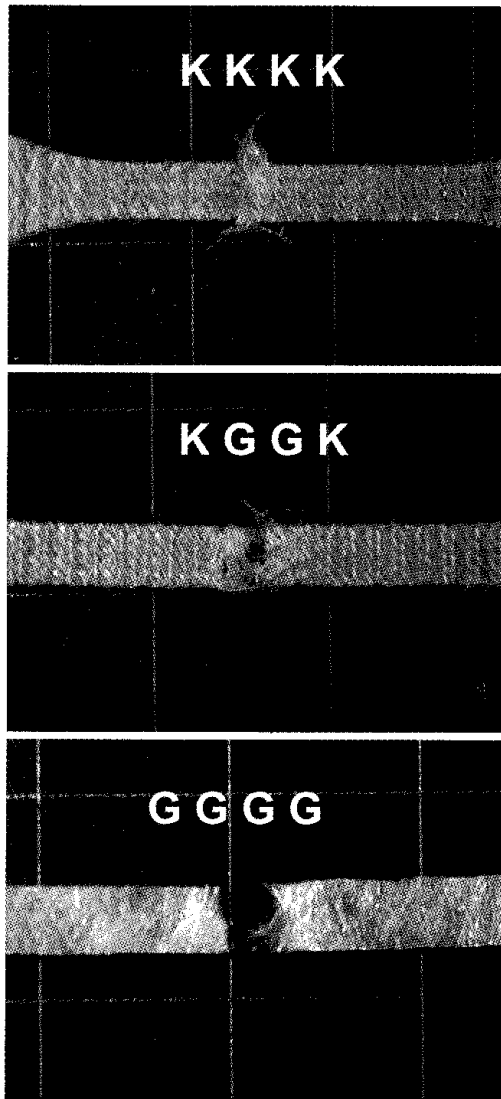


Figure 5. Tensile breakage of Kevlar MWK/Glass-nonwoven hybrid composites.

높은 압축 성질과 강한 계면 결합력의 영향으로 GGGG가 KKKK보다 약 4.5배 가량 높았으며, KKKK는 약한 계면 결합력으로 delamination에 의한 buckling 현상을 보이며 낮은 압축 강도를 보였다. 하이브리드 복합재료중 높은 압축 강도를 나타내는 부직포 층이 양 바깥에 위치한 GKKG층이 가장 높은 압축 강도 값을 나타냈다.

3.3. 굽힘 특성

Figure 6,7에 8가지 sequence에 대한 굽힘 실험 결과를 나타내었다. 유리섬유 부직포는 중간 파단 인성이 커서 굽힘시 인장과 압축을 억제하여 주며, 압축강도에 있어서 MWK보다 약 4.5배 가량 큰 값을 나타내기 때문에 MWK 보다 굽힘강도에 있어서도 약 3.2배 가량 높은 값을 보였다. 하이브리드화한 것을 살펴보면, GGGG가 KKKK보다 인장강도에 있어 약 19%정도 떨어지는데 반해 압축 강도에 있어서는 약 4.5배 이상 큰 값을 나타내므로 부직포 층이 압축을 받는 위층에 적층될 때 굽힘강도에 있어 좋은 하이브리드 효과를 나타냈다. 그 중에서도 GKKG에 대해서는 약 48%의 가장 좋은 하이브리드 효과를 나타냈는데 이것은 압축을 받는 안쪽에 부직포 층이 있고 인장을 받는 바깥 면에 케블라 층이 있는 이유도 있지만 특히 GKKG의 모든 층간의 계면 결합력이 높아서 거의 one-phase로 작용한 결과 인장과 압축을 억제하는 힘이 강해서 나타나는 결과로 볼 수 있다. GKKG 시편의 경우 압축 강도가 높은 부직포 층이 안쪽에 위치하고 있지만 가운데

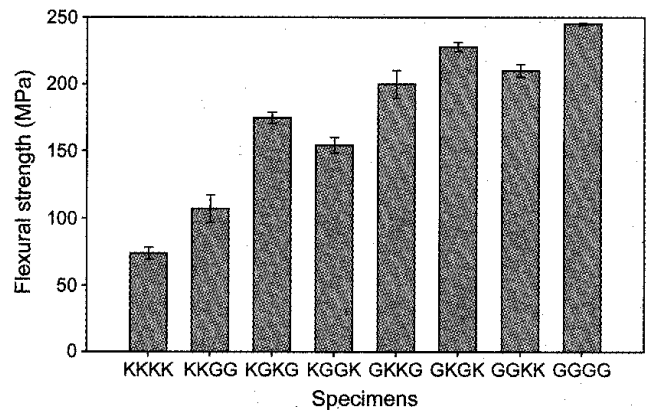


Figure 6. Flexural strength of Kevlar MWK/Glass-nonwoven hybrid composites.

Table 4. Compressive properties of Kevlar MWK/glass-nonwoven hybrid composites

Specimens	KKKK	KKGG	KGKG	KGGK	GKKG	GKKK	GGKK	GGGG
Compressive Strength(MPa)	21.03	57.20	62.10	55.20	66.70	62.10	57.20	95.20

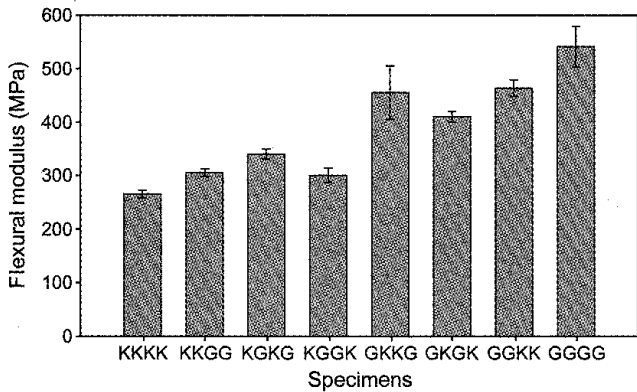


Figure 7. Flexural modulus of Kevlar MWK/Glass-nonwoven hybrid composites.

의 케블라와 케블라층 사이에서 굽힘시 기지재의 절단이 발생하여 굽힘강도에 있어 GKGK보다 작은 값을 보였다. 굽힘계수에 있어서도 같은 경향을 나타냈지만 다른 점은 압축 강도가 높고, 인장계수가 큰 부직포 층이 양 바깥쪽 층에 위치했을 때 혼합법칙에 의한 평균값의 13% 높게 가장 좋은 하이브리드 효과를 나타냈다.

3.4. Short beam shear test

MWK층과 부직포층 사이의 전단력을 MWK층 사이의 층간 전단력과 비교하기 위해서 KK, KG, GG의 층간 전단력을 측정하였는데 KK 시편의 케블라 MWK층 사이에서는 층간 전단이 일어나 4.71 MPa로 층간 전단력이 측정되었지만, GG 시편의 유리섬유 부직포층 사이와 KG 시편의 MWK층과 부직포층 사이에서는 층간 전단이 일어나지 않고 MWK층 사이에서 전단이 일어나 부직포층 사이와 MWK층과 부직포층 사이의 층간 전단력을 측정할 수 없었다. 이것은 MWK층 사이에서는 주로 기지재의 파단에 의해 층간 전단이 일어나지만, 부직포와 부직포층 사이, 부직포층과 MWK사이에서는 층간 파단 이동을 부직포의 단섬유가 방해하여 층간 전단력에 있어 큰 값을 나타내기 때문이다. 이러한 이유로 뒤의 mode I fracture test를 실시하여 부직포층과 부직포층 사이, 부직포층과 MWK층 사이의 층간 파괴 인성을 측정하였다. 세가지 시편의 파괴양상을 Figure 8에 나타내었다.

3.5. Mode I interlaminar fracture toughness

KK, KG, GG에 대하여 mode I interlaminar fracture test를 실시하여 균열길이의 변화를 Figure 9에 나타내었으며 GG와 KG의 계면간의 파단인성이 KK에 비해 약 40% 높음을 알 수 있었다. 이것은 적층 복합재료의 층과 층 사이에는 섬유가 존재하지 않고

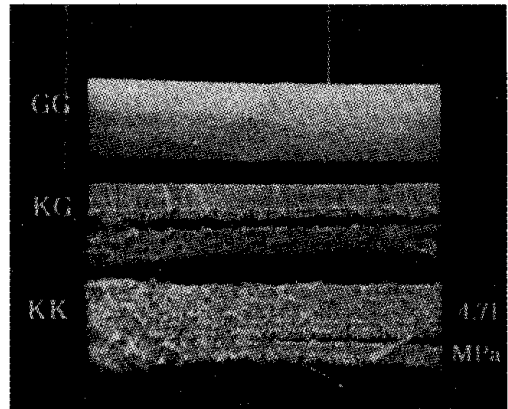


Figure 8. Side view of specimens after short beam shear test.

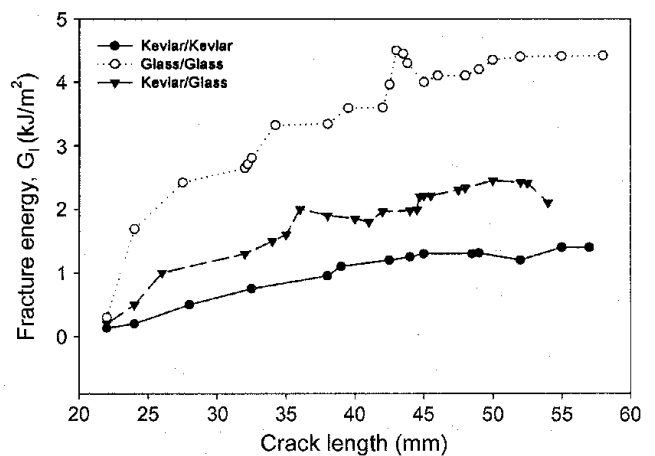


Figure 9. Mode I fracture energy(GI) of Kevlar MWK/glass-nonwoven hybrid composites.

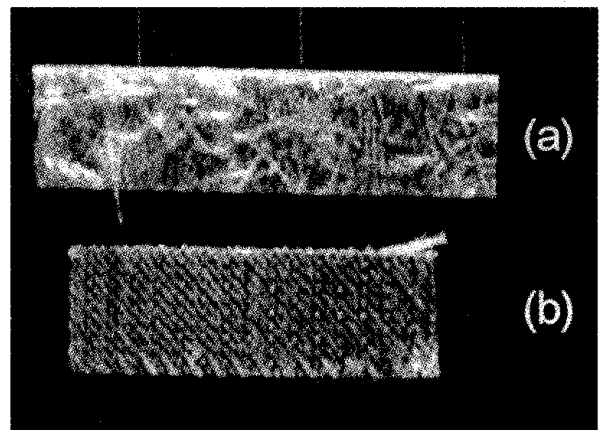


Figure 10. Surface of layer after mode I interlaminar fracture test. (a) Glass-nonwoven/Kevlar MWK, (b) Kevlar MWK/Kevlar MWK.

기지재만으로 지지되나 이 층에 유리섬유 부직포의 단섬유가 보강됨으로써 층간 파괴 인성이 향상되었다. Figure 10은 mode I test 후의 파단면을 현미경으로

11확대한 사진으로, KK 계면에서는 주로 기지재에서만 파단이 일어남을 확인할 수 있었고, GG, KG의 계면에서는 기지재의 파단이 일어남과 동시에 부직포를 구성하는 단섬유들의 pull-out 현상과 파단이 일어남을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 케블라 다축 경편성물과 유리섬유 부직포의 하이브리드 복합재료에 관한 것으로 충격 성질에는 뛰어난 성질을 보이나 굽힘성질에 있어서는 취약점을 보이는 케블라 MWK와 유리섬유 부직포를 폴리에스테르 수지로 하이브리드화하여 이것이 인장, 압축, 굽힘 등 기계적 성질과 층간 파단인성에 미치는 영향에 대하여 살펴보았고, 적층순서가 물성에 미치는 영향에 대해서도 살펴보았다. KKKK, KGGK, GKKG, GGGG의 경우 GGGG가 KKKK보다 약 58% 높은 인장계수를 보이지만, 인장강도에 있어서는 섬유 구조적인 원인으로 약 19% 낮은 값을 나타냈다. 하이브리드화했을 경우에는 혼합법칙에 의한 평균값 정도를 나타냈을 뿐 하이브리드 효과는 나타나지 않았다. 파단 신장률은 KKKK가 crack arrestor로 작용해서 하이브리드 복합재료의 경우 GGGG에 대해 31% 큰 값을 보였다. 8가지 종류의 sequence에 대한 압축강도는 GGGG가 KKKK보다 약 4.5배 높게 나타났으며 굽힘성질의 경우에는 부직포 하이브리드화에 의한 층간 파단 인성 증가와 부직포 자체의 높은 압축 강도가 굽힘성질에 있어서 좋은 하이브리드 효과를 나타냈다. 특히 GKGK

는 압축을 많이 받는 위치인 맨 위층에 부직포 층이 있고 모든 계면이 파단 인성이 큰 GK 계면에서 인장과 압축 억제효과로 굽힘강도가 약 48% 향상되었으며 가장 좋은 하이브리드효과를 보였다. 굽힘계수는 굽힘강도와 비슷한 경향을 보였다. KK, KG, GG에 대하여 실행한 short beam shear test의 경우 KK에 비해 KG, GG가 층간 전단력이 매우 커 전단이 일어나지 않아 mode I fracture toughness test를 실행하였는데 부직포와 MWK층간의 층간 파괴인성이 MWK층간의 층간 파괴 인성보다 약 40%가량 크다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. N. L. Hancox(Ed.), "Fiber Composite Materials", Applied Sci. Publishers LTD., London, 1981.
2. D. R. Lovell in "Fiber Composite Hybrid Materials" (N. L. Hancox Ed.), Applied Sci. Publishers, London, 1981.
3. D. F. Adams, *J. Mater. Sci.*, **10**, 1591(1975).
4. G. Dorey, G. R. Sidney, and J. Hutshins, *Composites*, **9**, 25(1978).
5. H. Wells and N. L. Hancox, *Composites*, **2**, 145 (1971).
6. J. Summerscale and D. Short, *Composites*, **9**, 57 (1978).
7. P. K. Mallick and L. J. Broutman, *J. Testing and Eval.*, **5**, 1920(1977).