

論文

케블라 다축경편성물 보강 복합재료의 물성에 관한 연구

김 철* · 강태진* · 이승구** · 육종일**

Study on the Mechanical Properties of Kevlar Multiaxial Warp Knit Composites

Cheol Kim*, Tae-Jin Kang*, Sung-Ku Lee** and Jong-Il Yook**

ABSTRACT

Mechanical properties of multiaxial warp knit composite have been studied. Kevlar fiber was used to fabricate multiaxial warp knit structure. Tensile, flexural, short beam shear, impact and compression after impact test have been performed to investigate the mechanical properties of the multiaxial warp knit composites.

The increase of interlaminar shear strength is the main characteristics feature of the multiaxial warp knit composite compared with that of plain woven laminate. Interlaminar shear strength has increased up to 52% compared with woven laminate composite, and also the delamination has been retarded due to the increase of interlaminar shear strength of the multiaxial warp knit composite. It is believed that the through-the-thickness reinforcing loops resist delamination. The tensile strength of the multiaxial warp knit composite has been increased about 5~12% compared with the theoretical values computed by the classical lamination theory.

Generally, total absorbed impact energy of the composite increases with increase of impact induced delamination area. But in the multiaxial warp knit composites, the impact properties such as total absorbed impact energy decrease with the increase of through-the-thickness reinforcements. The compression after repeated impact strength has retained up to 40% of undamaged specimen.

초 록

다축 경편성물 보강 복합재료의 물성에 관하여 연구하였다. 보강용 섬유로는 케블라 섬유를 사용하였다. 다축경편성물 보강 복합재료의 물성을 연구하기 위하여 인장, 굽힘, 층간 전단력, 충격 시험을 실시하였으며, 충격 후 압축 시험을 실시하였다. 평직물 보강 복합재료와 비교하여 볼 때, 층간 전단력의 상승이 다축경편성물 보강 복합재료의 특징이라 할 수 있다. 일반 평직물을 보강재로 사용한 경우 보다 최대 52%의 상승을 확인하였으며, 층간전단력의 향상으로 인하여 층간 분리가 지연되는 것을 알 수 있었다. 이는 두께 방향으로 보강된 수직 보강 loop가 층간

* 서울대학교 공과대학 섬유고분자공학과

** 국방과학 연구소

분리에 저항하는 것으로 생각된다. 고전 적층판 이론을 이용하여 계산한 인장 강도와 비교하여 볼 때, 인장 강도 또한 5~12%까지 상승하였다.

일반적으로, 충격에 의한 손상 영역과 충격 흡수 에너지는 반 비례관계가 성립하게 되나 다축경편성물 복합재료의 경우, 수직 방향의 보강이 증가됨에 따라 충격 흡수에너지가 감소하는 경향을 보여 주었다. 충격 후 압축 강도의 경우 미손상 시편의 40%까지 유지됨을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

현재의 복합재료 응용 기술은 하중을 받지 않는 2차 구조물에의 복합재료 응용에서 하중을 견디게 되는 1차 구조물로 적용의 범위를 넓혀 가고 있다. 이러한 용도의 확대에 의하여 기존의 복합재료에 새로운 성능의 부가가 요구되고 있는 상황이다. 기존에 사용되고 있는 복합재료 구조물 중 가장 널리 쓰이고 있는 방법은 적층 복합재료를 이용하는 방법이다. 이 방법은 구조물 성형의 용이성으로 인하여 많이 쓰이고 있으나, 두께 방향으로의 물성이 취약한 단점을 가지고 있다. 복합재료가 1차 구조물에 적용되기 위해서는 이러한 3축 방향 물성을 향상시킬 필요성이 발생하게 되며, 이를 만족시키기 위한 방법 중의 하나가 다축경편성물 보강 복합재료이다[1].

3축 방향으로 보강된 구조를 가지는 복합재료 구조물의 제조 방법은 여러 가지가 개발되어 응용되고 있으며, 그 예를 들면 스티칭, z-fiber insertion, 브레이드, 3-D orthogonal nonwoven, 3-D weaving 등[2]이다. 또한 본 논문에서 연구하고자 하는 다축경편성물(이하 MWK : multiaxial warp knit)을 이용하는 방법도 그 중 하나이다.

다축 경편성물은 섬유를 일정 각도를 가지도록 배열하여 적층하고, 각 층을 수직방향으로 보강하는

stitch loop를 이용하여 고정시켜 일정한 구조를 가지도록 만들어 준 재료이다.

다음의 Fig.1에 다축경편성물의 제조 방법을 보이고 있다.

기계의 방향과 평행하게 직물을 만들어 내고 있으며, 각각의 층을 일정한 각도를 가지고 배열하여 주고 있다. 0° 방향과 90° 방향으로 섬유를 배열하여 주면서 사이 사이 층마다 일정한 각도를 가지고 섬유를 직선으로 배열하는 것을 알 수 있다. 또한 섬유의 배열이 끝난 후, 기계의 방향에 석으로 배열된 knitting needle을 이용하여 독립된 loop를 3축 방향으로 생성시키고 있음을 알 수 있다.

다축경편성물의 장점은 여러 가지가 있다. 예를 들어 스티칭과 비교하여 보면 평면 내에 존재하는 섬유의 손상이 없이 3축 방향의 보강이 가능하며, 그에 따라 평면 방향 물성의 감소없이 3축 방향의 물성 향상이 가능하다. 특히 두께가 별로 두껍지 않은 중간 정도의 두께를 갖는 구조를 제작하는 경우 유용하게 사용할 수 있다. 또다른 장점은 다축경편성물 구조의 생산 용이성이다. 브레이딩이나 3-D weaving 등의 방법으로는 생산이 어려운 커다란 구조까지도 생산이 가능하며 생산성 또한 다른 3차원 구조물 제작 방법 보다 뛰어나다[3].

평면에 배열된 섬유가 일반 직물 구조와 비교하여 직선성을 유지하고 있으며, woven laminate와 비교하여 resin rich pocket이 적게 나타난다[4].

다음 Fig.2에서는 다축 경편성물의 구조를 보이고 있다. 수평으로 배열된 섬유의 층 사이를 섬유의 손상없이 수직방향으로 loop를 만들어 보강하여 주는 구조이다.

수직으로 만들어 주는 loop의 종류는 여러가지가 있을 수 있으나, chain, tricot, lock stitch 등이 주로 쓰인다. 이러한 기본 조직 이외에 여러 변형 조직도

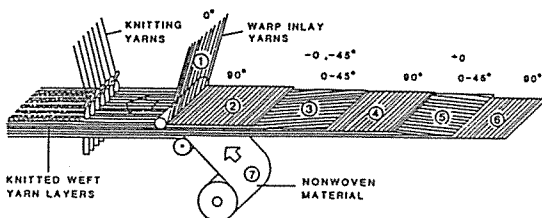


Fig. 1. Schematic Diagram of Multiaxial Warp Knit Fabric Manufacturing Process

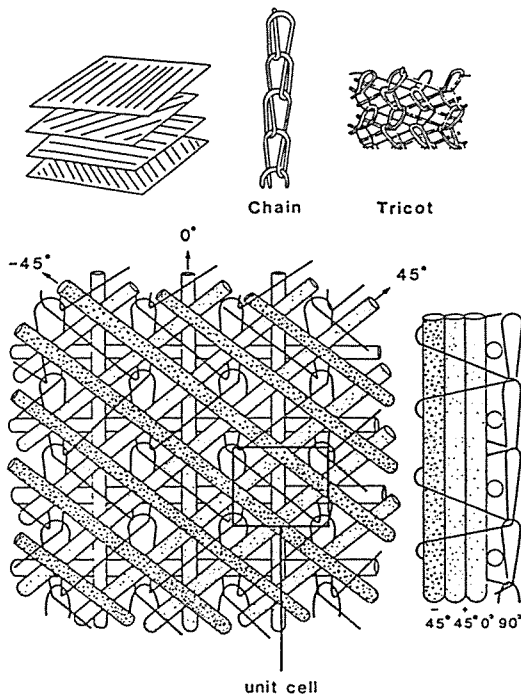


Fig. 2. Structure of Multiaxial Warp Knit Fabric

쓰일 수 있다. 수직 방향으로 loop를 만드는 섬유의 종류, 선밀도, loop 밀도는 다축경편성물의 3축 방향 물성에 영향을 끼치는 중요한 인자이다. 일반적으로 섬유의 굵기가 가늘면서 loop 밀도가 높을 경우에 3축 방향으로 보강효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다.

수평 방향으로 배열되는 섬유는 기본적으로 0°, 90° 방향의 섬유와 기울어진 각도를 가진 섬유로 이루어진다. 일반적으로는 $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 30^\circ$ 의 기울기를 가지고 섬유를 배열하곤 한다. 이러한 수평 방향의 배열 섬유로 인하여 일반적인 직물 보강 복합재료 가지고 있는 이방성을 감소할 수 있으며, 복합재료 설계도 용이하게 만들어 준다. 직물을 보강재로 이용하는 경우에도 적층각도를 조절하여 이방성을 줄일 수 있으나, 다축경편성물의 경우 더욱 용이하게 등방성을 가질 수 있도록 만들 수 있다.

기존의 연구에서는 복합재료의 낮은 생산성과 경제성을 극복하기 위한 방법의 하나로 다축경편

성물을 이용하여 생산성을 높이는 측면으로 연구 되어 왔으며, 그에 따른 연구의 주안점도 물성의 향상 보다는 생산성에 주안점을 두어 왔다. 3축 방향으로 도입해 주는 loop의 경우에도 사용하기 쉬운 나일론이나 폴리에스터를 사용하여 각층별로 배열된 섬유를 고정시켜 주는 데 만족하였다.

본 연구에서는 평면에 배열되는 섬유와 같은 케블라 섬유를 수직 방향의 보강재로 사용하여 줌으로써, 생산성 이외의 3축 방향 물성의 개선을 알아보고자 한다.

2. 사용 재료 및 시편 제작

실험에 사용된 수지와 섬유의 물성을 다음 Table 1에 보인다. 보강 섬유로는 케블라 29섬유를 사용하였으며, 기지 물질로는 비닐에스터 수지를 사용하였다.

Table 1. Properties of Kevlar 29 fiber and Vinylester Resins

property	Kevlar 29	Vinylester
density(g/cm ²)	1.44	1.15
tensile modulus(GPa)	62	3.71
tensile strength(MPa)	2758	63
ultimate elongation(%)	4	6.3

평면방향으로 보강된 섬유로 케블라 29를 사용하였으며, 수직 방향의 보강 섬유도 케블라 29와 nylon을 사용하였다. 다축 경편 직물은 평면 보강 섬유의 기울어진 각도와 수직 방향 loop의 밀도 등에 따라 4가지 종류로 나누었으며, 상세한 것은 다음 Table 2에 보인다.

P1, P2 직물은 plain woven이며, P2직물이 P1 보다 태조직으로 만들어져 있으며, 면밀도 또한 높다. M3-M5는 경편성물이며, M3의 보강 loop 밀도가 가장 높다. U6는 역시 경편성물이지만 수직 방향의 loop가 단지 수평 배열 섬유가 움직이지 않도록 잡아주는 binding yarn이며, 폴리에스터 섬유로 loop를 만들었기 때문에 unidirectional로 생각하는데 무리가 없을 것으로 생각된다. 또한 각각의 경편성물에 보강된 nylon 섬유는 수평으로

Table 2. Geometrical Parameters of Reinforcing Fabrics

	P1	P2	M3	M4	M5	U6
Fabric type	woven	woven	MWK	MWK	MWK	MWK
Stitch type			tricot	chain	chain	chain
Stitch yarn			Kevlar	Kevlar	Kevlar	nylon
Stitch spacing			0.5 cm	1 cm	1.5 cm	1 cm
Pitch length			0.25 cm	0.5 cm	0.5 cm	0.5 cm
Bias angle(degree)			0/45/90/-45	0/45/90/-45	0/45/90/-45	0/45/-45
Fiber fraction(%)			28/23/24/23	28.2/23.1/ 24.1/23.1	28.3/23.2/ 24.2/23.2	33/33/33
Loop fiber fraction(%)			2	1.5	1.1	1
Areal density(g/cm ²)	0.04	0.067	0.082	0.080	0.079	0.05

배열된 섬유들이 움직이지 않도록 잡아주는 binding yarn으로서, 물성에 미치는 영향이 아주 작기 때문에 수직 방향의 보강효과는 거의 없는 것으로 생각할 수 있다.

다음 Fig.3에서는 사용된 비닐에스터 수지의 경화 조건을 보이고 있다. 사용된 비닐에스터 수지 100에 대하여 BPO를 1.2 비율로 첨가, 아세톤으로 점도를 조절하여 spray-up 하였으며, 일정 시간 건조한 후 경화 조건에 따라 성형하여 주었다. 제작된 시편의 섬유 파괴비는 대략 60% 전후였다.

인장 강도 및 탄성계수를 측정하기 위하여 ASTM D-638M의 방법에 따라 인장 실험을 실시하였다. Load cell 용량을 5ton, crosshead speed는 5mm/min으로 하였다. 굽힘 계수와 강력을 측정하기 위

해서 ASTM D-790-84a를 참고하여 3점 굽힘 실험을 실시하였다. crosshead speed는 5.3 mm/min, 지지 거리는 10cm, load cell 용량은 1ton, 한 조건당 6개 시편을 실험하였다. 중간 전단강도를 측정하기 위하여 short beam shear test를 실시하였다. Span-depth ratio는 5 : 1, crosshead speed는 2mm/min이었다.

또한 낙하 하중 충격 시험기를 이용하여 충격 실험을 행하였다. 높이 1m에서 11.2kg의 impactor를 낙하하여 충격을 가하였다. 가한 충격 에너지는 총 110J이었으며 3회 충격을 되풀이 하여 충격 후 압축강도를 측정하여 압축 강도 잔여율을 계산, 충격에 따른 손상 정도를 평가하였다.

3. 결과 및 토의

다음 표 Fig.4에 인장 실험 결과를 보이고 있다. 여섯 가지 보강 구조물을 보강제로 하여 성형한 복합재료의 인장 실험 결과이다. P1 시편이 430 MPa, P2 시편이 400 MPa의 최대 인장 강도를 보였다. 이는 당연한 결과로, 직물의 경우 2방향으로 보강된 섬유의 비율이 다축경편성물의 경우 보다 높기 때문에 나타나는 결과이다. 앞의 표에서 보인 바와 같이, 다축경편성물은 보강 방향이 여러 방향이기 때문에 0°, 90°의 두 방향만 비교한다면 직물을 보강제로 사용한 경우보다 최대 인장 강도 면에서 떨어지는 결과를 보이게 된다.

일반적인 직물 구조물 보강제로 사용하는 경우,

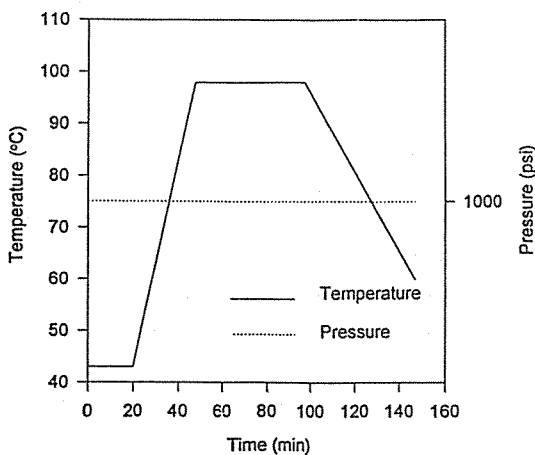


Fig.3. Curing cycle of Vinyl ester Resin

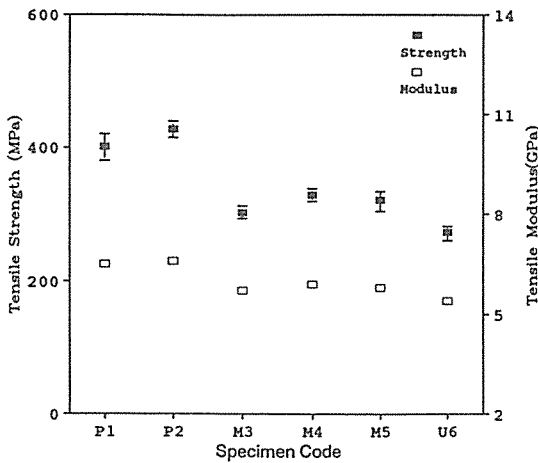


Fig. 4. Tensile Strengths and Modulus of the Tested Specimen(Load cell capacity: 1 ton, Cross-head speed: 5 mm/min)

전단 탄성계수나 평면 내에서의 전단 강도가 경사나 위사방향에 비하여 상당히 낮은 값을 보이는 것이 일반적인 경향이다. 하지만 다축경편성물을 보강재로 사용하는 경우, 이러한 물성의 취약점이 나타나지 않게 된다. 직물을 이용하는 경우에도 여러 방향으로 적층을 하여 주면 이러한 단점을 보완할 수는 있지만, 다축경편성물의 경우 그러한 추가공정이 필요 없이 보강 구조 형성 과정에서 해결할 수 있다는 장점이 있다.

다음 Fig.5는 인장 각도를 달리하여 실험을 실시한 결과를 보이고 있다. P1, 2 시편은 경위사

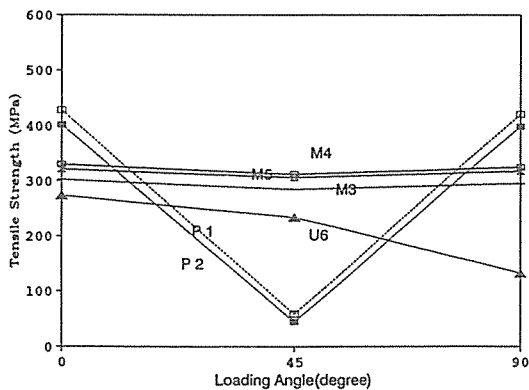


Fig. 5. Tensile Strength of the Specimen with Variations of Loading Directions

방향 이외의 각도에서는 급격한 감소를 보이는데 비하여, M3-5, U6 시편의 경우 방향에 따라 다르기는 하지만 거의 등방성이라고 할 정도의 강도를 나타내었다.

다축경편성물끼리 비교하여 보는 경우, M3 시편이 다른 두가지 시편보다 낮은 값을 보였다. 이는 M3 시편에 스인 보강 구조물이 수직 loop의 밀도가 높아서 다른 시편 보다 두께가 두꺼워서 섬유의 부피분율이 낮기 때문에 나타나는 현상이다. M3 시편의 부피분율은 52%, M4, M5 시편은 각각 60%, 61%를 보임으로써, 이 세 가지 시편의 섬유 부피분율을 이용하여 부피분율 60%로 normalize 하는 경우, M3 시편이 350 MPa로 가장 높은 값을 보이게 되며, M4, M5 시편이 각각 342, 339 MPa의 수치를 보이게 된다. 즉, 수직 방향의 loop 밀도가 높은 시편일수록 인장 강도 면에서 더 높은 수치를 나타내었다고 말할 수 있다.

일반적으로 인장 하중의 가하여지면, 변형이 진행됨에 따라 층간 분리가 발생하게 되며, 층간 분리가 진행됨에 따라 인장 탄성 계수가 점차 감소하게 된다[5]. 두께 방향으로 보강된 loop 밀도가 높아질수록, 인장 초기의 층간 분리가 상당량 억제되기 때문에 인장 강도와 탄성계수의 유지가 가능한 것으로 생각된다. 이는 두께가 두껍거나 경편성물 내부의 layer수가 많은 경우일수록 현저할 것으로 생각된다. 반대로, 두께가 지나 수직 방향 보강 섬유의 강도가 떨어지는 경우에는 구조에 따른 이점이 없을 것으로 생각된다. U6 시편의 경우, 수직 방향의 loop가 폴리에스터이기 때문에 보강에 따른 상승효과가 거의 없고, 일방향 복합재료로 생각해도 무리가 없을 것이다. 수직 방향의 보강에 다른 상승효과를 계산하기 위하여 고전 적층판 이론을 이용하여 복합재료의 강도를 계산 다축경편성물 보강 복합재료의 인장 강도와 비교하였다.

각각의 다축경편성 구조물과 같은 섬유 부피분율을 가지는 일방향 보강 복합재료층을 가정하고, 다축경편성물과 같은 각도를 가지도록 방향을 달리하여 적층한 경우를 생각하자. 예를들어 M3과 같은 경우, 섬유 부피 분율 55%인 일방향 복합재료의 인장 강도를 섬유-수지의 혼합율 법칙을 이

용하여 계산하고, 각각의 층이 $+45/-45/90/0$ 의 각도를 가지도록 4ply를 적층한 경우를 생각하여 4ply 일방향 복합재료의 인장 강도를 계산하여 준다. 다시 인장 시편의 경우 다축 경편성물을 4ply 적층하여 실험하였으므로, 앞에서 계산한 4ply 일방향 복합재료를 4장 적층하여 복합재료의 인장 강도를 계산하여 준다. 다시 말하여, 같은 부피분율과 섬유 배향을 갖는 일방향 복합재료의 인장 성질을 고전 적층판 이론을 이용하여 계산, 다축 경편성물 보강 복합재료의 인장 강도와 비교하였다.

고전 적층판 이론을 이용하여 계산한 수치와 다축 경편성물을 보강한 실제의 경우와 비교한 결과를 Table 3에 보이고 있다.

Table 3. Tensile Strength Comparison between Experimental Results and Theoretical Values Computed by Classical Lamination Theory

Specimen	Experimental value (MPa)	Theoretical value (MPa)	Experimental / Theoretical
P1	398	415	0.95
P2	421	433	0.97
M3	308	277	1.12
M4	331	305	1.08
M5	322	304	1.05
U6	273	269	1.01

M3 시편의 경우 277 MPa와 308 MPa를 나타내었으며, M4 시편의 경우 305 MPa의 계산치와 331 MPa의 실험치를 보임으로써 인장 강도면에서 5~12%의 상승치를 보임을 알 수 있다. 이는 수직 방향으로 보강된 loop에 의한 상승 치로 생각된다. 고전 적층판 이론을 이용한 경우 수직 방향으로 보강된 섬유의 존재를 생각하지 않고 계산한 경우인데 비하여 다축경편성물은 수직 방향으로 loop가 보강되어 있기 때문에 수직 방향 보강 loop의 기여에 의해 상승을 보이는 것으로 생각된다. 이는 폴리에스터 섬유를 수직 보강에 이용한 U6 시편을 보면 확실하게 알 수 있는데, 계산치 269 MPa에 비하여 실험치 273 MPa를 보임으로써 오차를 감안하면 거의 상승효과가 없다고 생각할 수 있다. 결과적으로 U6 시편의 경우 통상의 일방향 복합

재료와 마찬가지로 생각하여도 될 것이다.

다음의 Fig.6은 인장 하중에 따른 하중-변형을 곡선이다. 일반적인 복합재료의 경우와 마찬가지로 인장 초기에 변형이 진행됨에 따라 점차적으로 층간 분리가 일어나고 그에 따라 곡선의 기울기가 옆으로 눕는 경향을 보이고 있다[5]. 또한 P1 시편의 경우 catastrophic한 파괴가 일어나는데 비하여 다축 경편성물 복합재료의 경우 일차적인 파괴가 발생한 후에도 최고 하중의 1/3 정도의 하중을 지지하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 변형이 더욱 진행됨에 따라 응력-변형을 곡선이 계단 모양으로 상승과 하강을 보이며 단계적으로 감소한 것을 확인할 수 있었다. 수직 방향의 보강된 stitch가 하나 하나 풀리면서 인장 하중에 저항하기 때문에 이러한 곡선을 보여주고 있다. 결국 보강된 수직 방향의 loop가 평면 방향으로 가해지는 하중에 대해서도 어느 정도 저항하고 있는 것을 알 수 있다.

또한 수직 방향 loop가 어떤 모양으로 만들어졌는가, loop의 종류에 따라 인장 성질에 미치는 영향이 다를 것으로 생각된다. M3 시편의 경우에는 loop가 zig-zag 형태로 기울어지면서 만들어지는 tricot stitch이며 다른 M4, M5 시편의 경우 0° 방향으로 일직선을 이루는 chain stitch이다. chain

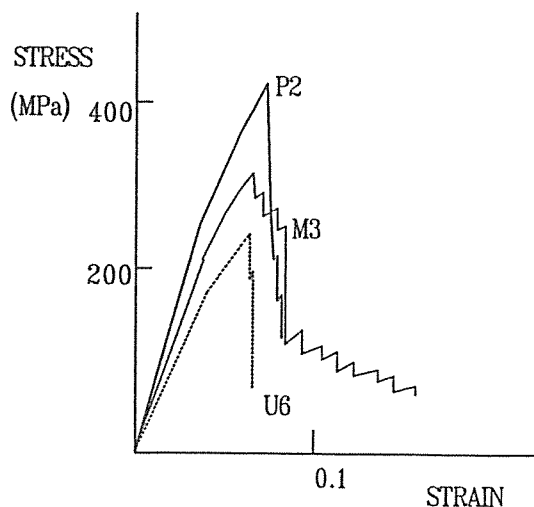


Fig. 6. Stress-Strain Curves under Tensile Loading of Woven Laminates and Multiaxial Warp Knit Composites

Table 4. Flexural Strength and Modulus by 3-Point Bending

	Flexural modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)
P1	11.2	105
P2	11.8	112
M3	12.3	142
M4	11.7	128
M5	11.3	113
U6	9.7	92

stitch로 보강한 경우에 tricot stitch로 보강한 경우보다 상승 정도가 더 많은 것을 알 수 있다.

다음 Table 4에 굽힘 실험을 행한 결과를 보이고 있다.

굽힘 강도는 케블라 woven laminate와 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 탄성 계수 면에서는 거의 비슷한 정도를 보이며, 굽힘 강도 면에서도 마찬가지 경향을 보이고 있다. 즉, 최고치를 나타내는 시편은 직물 보강 복합재료인 것을 알 수 있다. 단지, 한 방향(0°)만을 생각하면, 다축 경편 직물 보강 복합재료가 보강 섬유 부분에서 직물 보강 복합재료 보다 낮은데 비하여 굽힘 강도나 탄성계수면에서 부피 분율 이상의 수치를 보이는 것을 알 수 있다.

특히 M3 시편의 경우, 굽힘 탄성 계수, 굽힘 강도 모두 괄목한 만한 증가를 나타내고 있다. 굽힘 하중시 항복이 일어나는 것을 보면, 거의 모든 시편에서 굽힘 항복과 함께 어느 정도 층간 분리가 일어나는 것을 관찰 할 수 있었다. 반면 M3 시편의 경우, 층간 분리가 상당히 억제되는 것을 관찰할 수 있었으며, 층간 분리가 시편 전체에 걸쳐 발생하지도 않았음을 관찰할 수 있었다. 결과적으로 말하면, loop 밀도가 높을수록 더욱 높은 굽힘 탄성계수와 굽힘 강도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이는 스티칭 등의 방법을 이용하여 3축 보강을 한 경우와 다른 경향으로, 스티칭을 한 경우, 스티칭 밀도가 높아질수록 평면내 섬유의 손상이 많이 발생하여 물성이 떨어지는 결과를 나타내는 것이 보통이다. 다축 경편 직물의 경우, 평면내에 배치되는 섬유의 손상이 전혀 없이 3축 보강을 하여 줌으로써, 물성의 감소 없이 보강이 가

능하기 때문에 굽힘 성능의 향상이 나타나는 듯하다. 다만 수직 방향으로 보강된 loop가 너무 많은 경우 시편의 두께 두꺼워지고 섬유 부피 분율에 제한을 받게되는 문제가 발생할 소지는 있다.

하중-변형률 곡선을 살펴보면 기존의 woven laminate와의 차이를 더욱 확실히 알 수 있었다. 다축 경편 직물 보강 복합재료의 경우, 최초의 항복이 발생한 후에도, 지속적인 하중의 감소가 발생하지 않았으며, 다시 처음의 항복 하중에 가까운 수치까지 하중을 견디다 최종적인 항복이 발생하는 현상을 보여 주었다. 수직 보강 stitch의 종류와 밀도에 따라 다르기는 하지만 전반적으로 비슷한 경향을 보여 주었다. Fig.7에 굽힘 하중 하에서의 하중-변형률 곡선을 보이고 있다.

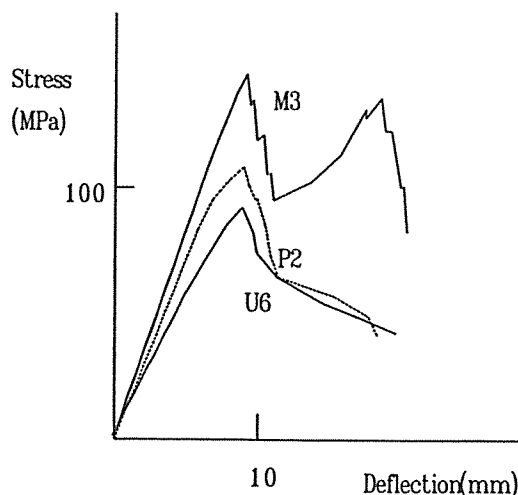


Fig. 7. Load-Deflection Curves under Flexural Load of the specimen

직물을 보강재로 사용한 경우는 굽힘실험의 일반적인 곡선을 보이고 있으나 다축경편성물의 경우 이와는 다른 곡선을 보이고 있음을 알 수 있다. 굽힘 하중이 가하여지는 부분 근처에서 일차적인 균열이 발생하였으며, P1 시편의 경우 이러한 균열이 전체적으로 전파되면서 지속적으로 하중이 감소함을 알 수 있었으나, M3 시편의 경우 이러한 초기 균열이 약간 전파되다가 loop가 보강되어 있는 부분에서 진행이 정지되고 다른 부분에서 다시 균열이 발생되어 전파되기 시작되는 것을 관찰

할 수 있었다. 즉, multiple cracking이 일어나는 것을 확인할 수 있었다[6]. 수직 보강재가 다른 경우에 비하여 약하여 일방향 복합재료(unidirectional laminate)와 유사한 U6 시편의 경우, 이러한 현상이 나타나지 않고 P1, P2와 비슷한 하중 변형을 폭선을 보여주었다.

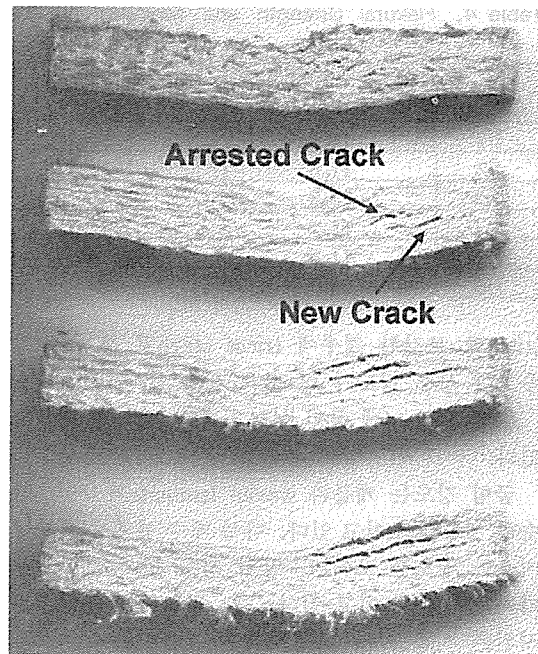
다음 Table 5에 short beam shear test 결과를 보이고 있다.

Table 5. Interlaminar Shear Strengths Measured by Short Beam Shear Test

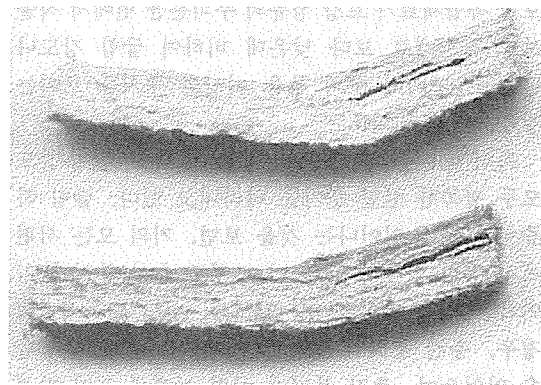
Specimen	ILSS(MPa)
P1	38
P2	40
M3	57
M4	45
M5	44
U6	37

수직 보강 정도가 커질수록 층간 전단 강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. Loop 밀도가 가장 높은 M3 시편의 경우, 앞의 굽힘 실험 결과와 마찬가지로 층간 분리가 상당 부분 억제되는 것을 관찰할 수 있었으며, 그에 따라 층간 전단 강도가 50% 정도 증가하는 결과를 나타내었다. 대체적으로 보아 기존의 적층을 보강재로 사용한 경우와 비교하여 층간 전단강도가 향상되는 결과를 보이고 있다. U6 시편의 경우에는 오히려 감소한 수치를 보여주었다. 이러한 결과는 다축 경편성물의 구조에 따른 특징으로 생각되어진다. 수직 방향으로 보강된 섬유가 존재하기 때문에 균열의 발생이나 전파, 층간 분리에 잘 저항하는 것으로 생각된다. 이러한 특징은 loop 밀도가 높을수록, 수직 보강 섬유의 강도가 클수록 현저한 것을 알 수 있었다.

또한, 굽힘 시험에서의 마찬가지로, 직물 보강 복합재료의 경우 neutral plane에 부근에서 주도적인 균열이 발생하여 전파되는 것을 관찰할 수 있었으며, 다축 경편성물 보강 복합재료의 경우, 일차적인 균열 발생 이후, 변형이 진행됨에 따라 균열의 전파가 억제되어 다른 곳에서 다시 새로운 균열이 생성되어 전파되는 multiple shear failure 현상을 관찰할 수 있었다. 다음 Fig.8은 이러한 균열의 전파



(a) Multiaxial Warp Knit Composite



(b) Woven Composite

Fig.8. Crack Initiations and Propagations under Shear Loading

모습을 보여주고 있다.

다음 Fig.9에서는 낙하 하중 충격 시험기를 이용하여 충격 실험을 행한 결과를 보이고 있다. P1, P2 시편의 경우처럼 직물을 보강재로 이용한 경우가 다축경편성물을 보강재로 한 경우보다 충격 흡수 에너지가 더 큰 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 반복 충격을 준 경우에도 마찬가

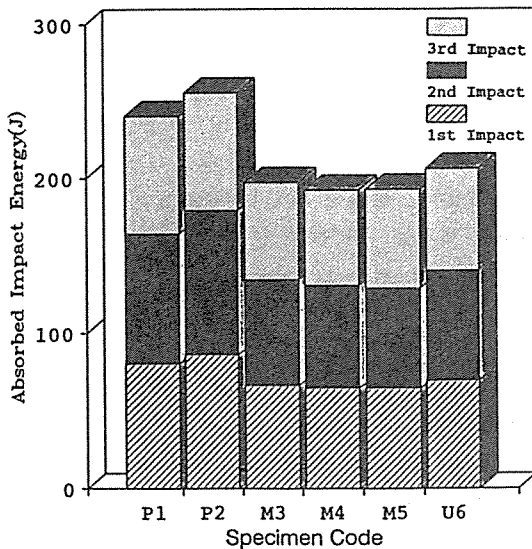


Fig. 9. Total Absorbed Energy under Impact Loading by Drop Weight Impact Tester

지의 경향을 나타내었다. P1, 2 시편이 종류에 관계없이 80J 정도의 충격 흡수에너지를 나타내는 것에 비하여, 다축 경편성물을 보강재로 사용한 경우 60-65J의 에너지를 흡수하였다. 중간 전단 강도나 인장 강도면에서 상승을 보이지 않았던 U6 시편이 충격 시험에서는 다른 경우보다 높은 충격 에너지 흡수를 나타내었다. 단지 충격에 의한 수직 방향의 변형 면에서 다축 경편성물을 보강한 경우 변형이 국소적으로 제한되는 것을 관찰 할 수 있

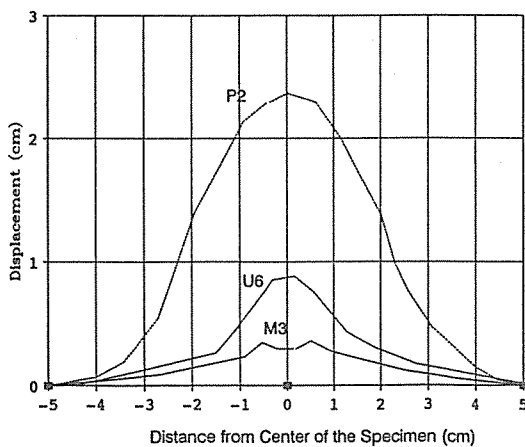


Fig. 10. Vertical Deformations of Impact Damaged Specimen

었다. 이러한 경향은 loop 밀도가 높은 경우 더욱 현저하였다. 다음 Fig. 10은 이러한 충격에 의한 변형 정도를 보이고 있는 그림이다.

다음 Fig. 11에서 충격 후 잔류 압축 강도를 측정된 결과를 보이고 있다. 시편의 섬유 부피 분율과 두께에 대해 normalize한 값을 보이고 있다. 부피 분율은 60%로 맞추어 주었다.

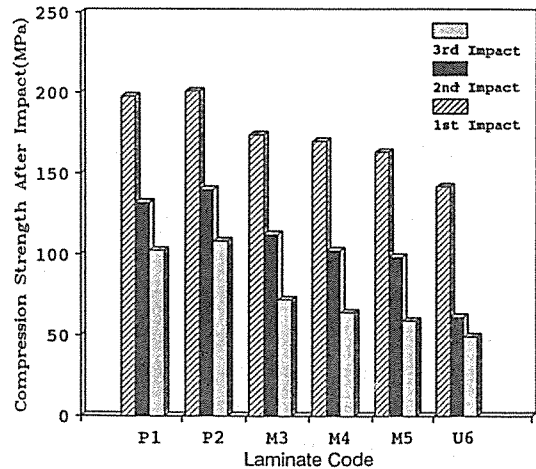


Fig. 11. Compression Strength Retention after Impact Test (Fiber vol. fraction 60%)

다축 경편성물의 경우, 잔류 압축 강도가 적물 보강 복합재료의 경우 보다 작은 값을 보이는 것을 알 수 있었다. 실험에서는 0° 방향으로만 압축하였는데, 이 방향으로는 P1, P2 시편의 경우 가장 보강되어 있는 섬유의 부피 분율이 많기 때문에 당연한 결과이다. 하지만 손상을 받지 않은 시편의 경우, 부피비 이상으로 다축경편성물 보강 복합재료의 압축 강도가 높은 것을 알 수 있다. 압축 강도는 보강 섬유의 waviness에 관계된 것으로, 직선성을 유지할 수록 높은 값을 보이는 것으로 알려져 있다. 직물의 경우 두께 방향으로 crimp가 존재하기 때문에 미손상 시편의 경우 낮은 압축 강도를 보이지만 다축경편성물 복합재료의 경우 보강 섬유가 직선을 유지하고 있기 때문에 압축 강도가 높은 값을 나타내게 된다. 충격을 받은 후에는 변형에 의한 영향이 직물 보강의 경우보다 크기 때문에 큰 감소를 보이는 것으로 생각된다. Fig. 10에서 확인한 바와

값이 수직 방향의 변형은 더 적지만 충격 후 압축 강도가 낮은 값을 보이는 점으로 보아서는 loop가 보강되지 않은 각 층간에서 손상이 넓게 발생하는 것으로 생각된다. 하지만 $0^\circ/90^\circ$ 방향 이외의 다른 방향으로 압축을 하여주면 인장 실험의 결과와 마찬가지로 적물 보강 복합재료 보다 더 높은 값을 보일 것으로 생각된다.

4. 결 론

케블라/비닐에스터 다층 경편 직물 보강 복합재료에 대해 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 인장 실험 결과, 다층경편성물 보강 복합재료는 woven laminate 보다 더 나은 수치를 보였으며, 이는 수평 방향으로 보강된 섬유가 직선상을 유지하고 있기 때문인 것으로 여겨진다. 또한 수직 방향 보강 섬유가 층간 분리에 저항하는 것을 확인할 수 있었으며, 인장 하중도 어느정도 감당하는 것을 알 수 있었다. 고전 적층판 이론을 이용하여 계산한 이론치 보다 5~12%의 상승치를 나타내었다.

(2) Loop 밀도가 가장 높았던 M3 시편의 경우, 굽힘 하중에 의한 층간 분리가 상당히 지연되었으며, 균열의 전파를 수직 보강 loop가 억제하는 것을 관찰할 수 있었다. 그로 인하여 multiple cracking이 발생하였으며 굽힘 강도 면에서 20% 정도의 증가치를 나타내었다.

(3) 층간 전단강도는 loop 밀도가 증가할수록 따라서 증가하는 경향을 나타내었다. 수직 보강 loop density가 가장 높은 M3 시편의 경우 직물을 보강한 경우 보다 50% 정도 상승치를 보였다.

(4) 다층 경편성물을 보강재로 이용한 경우, 미손상 시편의 압축 강도는 섬유의 직선성 때문에 더 높은 값을 나타내었지만, 충격 후 압축 강도가 직물보강 복합재료 보다 감소폭이 더 큼을 알 수 있었다. 또한 충격 흡수에너지면에서 더 낮은 수치를 보여 주었다. 충격에 의한 두께 방향의 변형은 억제되는 결과를 가져옴을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Ko, F. and Pastore, C., "Multilayer Multidirectional Warp Knit Fabrics for Industrial Applications", *Journal of Industrial Fabrics*, Vol. 4, No.2, 1985.
2. Whyte, D., "On the Structure and Properties of 3-D Braided Composites", Ph.D. Thesis, Drexel University, 1986.
3. Wang, Y., Li, J. and Do, P.B., *Journal of Composite Materials*, Vol.29, No.17, p2317, 1995.
4. Dexter, H.B. and Hasko, G.H., *Composite Science and Technology*, Vol.56, pp.367-380, 1996.
5. Schulte, K. and Stinchcomb, W.W., "Application of Fracture Mechanics to Composite Materials" (Ed. by Friedrich, F.), pp.273-325. Elsevier, NY, 1989.
6. Warren, R. and Sarin, V.K., "Application of Fracture Mechanics to Composite Materials" (Ed. by Friedrich, F.), pp.571-644. Elsevier, NY, 1989.