論文

브레이드 복합재료의 계면결합력에 따른 인장-인장 피로 특성에 관한 연구

김범준* · 강태진*

Effect of Surface Treatment on the Fatigue Properties of Glass Fiber Reinforced 3-Dimensional Braided Composite

Beom-Joon Kim* and Tae-Jin Kang*

ABSTRACT

The effect of surface treatments with silane coupling agent on the static and dynamic fatigue properties of S2-glass fiber reinforced composite have been studied. The dynamic fatigue tests were performed to understand the fracture mechanism of 2-D and 3-D composite by calculating the secant modulus with different structure and interfacial strength. The tension-tension fatigue test results showed that the structure of reinforcement was major factor to increase the fatigue life in the braided composite and the interfacial adhesion strength had a role as the minor factor. From the calculation of secant modulus, the surface treatment is an important factor for the 2-D woven laminate composite for resisting the crack propagation. However, the surface treatment was not as important as in the 3-D braided composite because the 3-dimensionally integrated structure of the reinforcing fiber shares the load more uniformly regardless of the interfacial adhesion condition between the fiber and matrix.

초 록

실란 커플링제로 유리섬유의 표면처리를 처리하여 만든 3차원 브레이드 복합재료의 인장성질 및 인장 피로성질을 2차원 적층 복합재료와 비교하여 연구하였다. 인장피로의 경우 피로특성을 좌우하는 가장 중요한 요소는 구성 보강 섬유의 구조이며, 2차원 복합재료의 경우 유리섬유의 표면처리는 필수적임을 알 수 있다. 3차원 브레이드 복합재료의 경우 보강섬유가 일정한 각을 가지며 interlacing 되어 있으며, 또한 두께 방향으로도 응력을 분산시킬 수 있기 때문에 표면처리에 의한 피로수명이 증가가 덜하며, 유리섬유의 표면처리가 없어도 2차원 적층복합재료 보다 피로특성이 뛰어났다. 그러나 3차원 브레이드 복합재료라도 유리섬유에 표면처리를 한 경우는 재료가 피로를 받는 동안 더 많은 변형을 견디며 파괴에 이르게 되어 피로 특성의 향상을 꾀할 수 있었다.

1. 서 론

실제의 구조물은 사용중 정적인 힘뿐만 아니라 반복응력을 받게 되며 이러한 규칙적 혹은 불규칙적인 응력에 의하여 구조물의 재료는 피로현상을 나타내게 되며, 균열의 생성, 전파에 의하여 파괴에

* 서울대학교 섬유고분자 공학과

이르게 된다. 항공기용 신소재로 등장하고 있는 복합재료의 피로현상은 일반의 플라스틱, 금속, 세라믹 등의 재료와는 균열의 생성, 전파과정이 다르며 매우 복잡한 과정을 거쳐 일어난다. 복합재료의 피로현상을 이해하기 위하여 많은 연구가 진행중이다. 지금까지의 복합재료의 피로현상 연구는 피로수명 예측 및 분포, 복합재료의 손상과정 연구, 잔여 강도(residual strength)의 예측 및 변화, 강성(stiffness)의 변화 및 예측, 다응력(multi-stress) 조건 하에서의 피로현상, 피로파괴의 현상학적 연구등과 같이 분류할 수 있다[1~4]. 또한 복합재료의 피로현상 연구는 단순한 조직의 복합재료 보다는 다양한 응용추세에 맞추어 실제의 형상과 환경에 맞는 재료의 선택과 계면의 영향이 고려되어져야 한다[5~9].

특히 우주항공 분야와 같이 고도의 안정성이 요구되는 구조물의 경우 복합재료의 피로수명과 손상에 대한 저항능력은 매우 중요한 요소로서 외부의 충격에 의한 손상이 발생하였을때 전체 구조물이 catastrophic 파단에 의한 파괴가 이루어지지 않으면서도 높은 피로수명 성질의 부여가 요구된다. 이러한 복합재료의 개발을 위하여 보강 섬유물질의 물성개선 뿐만 아니라 새로운 기지 물질의 개발, 보강섬유물의 재래의 라미네이션(lamination) 구조로 부터 3차원 보강에 의한 구조물의 새로운 프리폼 제조 및 성형기술 개발등의 연구가 활발하게 이루어지고 있다[10~14]. 그러므로 고기능성 복합재료는 bi-, tri-axial, 3축제직(3-dimensional weaving), 편성(knitting), 부직포(non-woven)와 2축-, 3축-브레이딩과 같은 기술로써 복합재료의 프리폼을 구성하여야 한다. 2차원 라미네이트로 만든 복합재료는 층간 분리 현상으로 인해 두께방향의 기계적 성질이 좋지 않으나 3차원 브레이딩으로 만든 복합재료는 두께 방향의 성질이 완전히 개선될 수 있다[15~20]. 층간분리 현상이 없기 때문에 층간의 인장, 전단응력에서 손상에 대한 저항 능력이 우수하고, 균열의 성장이 최소화 될 수 있다.

본 연구에서는 원공이 있는 브레이드 복합재료의 인장 특성 및 인장-인장 피로특성을 2차원 적층 복합재료와 비교하여 연구하였다. 또한 섬유/수지간의 계면 결합력을 증가시킨 경우의 피로수명을 측정하여 처리하지 않은 복합재료의 피로수명과 비교함으로써 계면특성이 피로에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실 험

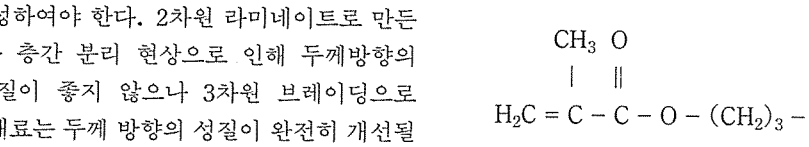
2-1. 재 료

본 연구를 위한 적층 복합재료의 보강재로는 Owens-Corning Fiber Glas사의 S2-glass 섬유직물을 사용하였으며, 기지물질은 불포화 폴리에스터 수지(iso-type)를 사용하였다. 표 1에는 보강섬유와 기지물질의 물성을 보인다.

Table 1. Physical properties of S2-glass fiber and unsaturated polyester resin.

Physical property	S2-glass fiber	Polyester resin
Density(g/cm^3)	2.46	1.25
Tensile modulus(GPa)	86.81	4.50
Tensile strength(GPa)	4.58	0.02
Maximum strain(%)	5.40	1~5

유리섬유와 폴리에스터 수지의 계면 접착력을 증가시키기 위하여 실란 커플링제로 γ-Methacryloxypropyltrimethoxy silane (γ-MPS)을 사용하였으며, 이의 화학구조는 다음과 같다. γ-MPS는 methacrylate기에 있는 이중결합이 불포화 폴리에스터의 이중결합과 반응성이 있으며, 다른 말단은 유리 섬유 표면의 하이드록시기와 결합하려는 성질을 갖고 있는 실란 커플링제이다.



혼합수지는 기지물질인 불포화 폴리에스터수지(iso-type)를 93wt%, 경화제인 Diallylphthalate (DAP) 를 7.0wt%, 개시제로 Benzoylperoxide (BPO) 를 1.0wt%를 사용하였다. 이 혼합수지에 γ-MPS를 직물무게의 1.0wt%로 첨가하여 integral addition 방법으로 직물에 도포하여 상온에서 건조

하였다. 2차원 적층 복합재료 시편은 6장을 hand-lay-up하여 가압 성형하였다. 성형조건은 90℃에서 10분을 dwell time을 주고 압력을 50kgf/mm^{2}으로 준 후 140℃로 승온하여 40분간 성형한 다음 후 경화시켰다. 그 후 15×3×200(mm)의 규격으로 다이아몬드 cutter로 가공하였다. 3차원 브레이드 복합재료는 9×2 slab으로 제조하고 길이와 폭에 맞는 몰드를 제작하여 hot press 상에서 압축성형하였다. 그러므로 3차원 브레이드 복합재료의 시편 준비가 side cutting이 필요없었고, 그 후 시편의 중앙에 3mm의 원공을 부여하였다. 각각의 수지함량은 25wt%로 조절하였다. 그 후 가공된 복합재료의 양끝 5cm는 glass/epoxy tab을 이용하여 100℃에서 50kgf/mm^{2}의 압력을 주어 붙였다.

2-2. 인장 및 피로시험

2차원 및 3차원 복합재료에 대해 계면처리에 의한 인장강도를 Instron 1332를 이용하여 5mm/min으로 측정하였고, 원공의 효과를 보기 위하여 같은 시험기에서 인장강도를 측정하였다. 또한 손상의 전파과정을 살펴보기 위하여 하중을 증가시키면서 초음파검사(Ultrasonic C-Scan Test)를 병행하였다. 이때 초음파의 주파수는 1MHz였다. 피로시험은 하중 제어 방식으로 Mechanical Test System(MTS)을 사용하여 피로수명을 측정하였고, 최대 응력과 최소 응력의 응력비 R은 재료에 압축하중이 걸리지 않도록 0.1로 고정하였고 사용된 주파수는 3Hz로 하였다. 또한 중앙에 extensometer를 달아 각 cycle마다 125개의 응력-변형률 데이터를 받음으로 해서 탄성계수의 감소 및 이력현상을 조사함으로써 재료가 어떤 과정을 거쳐 파괴에 이르는지를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 2차원 적층 및 3차원 브레이드 복합재료의 인장 성질

본 실험에서 사용한 유리섬유강화 복합재료의 정적 인장 성질을 표 2에 나타내었다. 2차원 복합재료의 경우 실란 커플링제로 처리한 경우의 인장강도가 처리하지 않은 경우 보다 21% 향상 되었고, 3차원 브레이드 복합재료의 경우는 10% 향상 되었다. 즉 브레이드 복합재료의 경우 계면 처리에 의한 향상도가 저하됨을 알 수 있다.

Table 2. Tensile properties of S2-glass/polyester composites.

Surface Treatment		Tensile Strength of unnotched composite (MPa)	Tensile Strength of notched composite (MPa)
2-D Woven Laminate Composite	Untreated	560.0	417.4
	γ-MPS (1.0wt%)	678.5	489.2
3-D Braided Composite	Untreated	859.5	702.7
	γ-MPS (1.0wt%)	946.8	838.0

인장 실험에서 미세균열이 발전하는 과정을 보면, 하중의 증가에 따라 보강섬유가 하중을 받다가 기지물질과 보강섬유 사이의 계면에서 탄성계수의 차이로 인해 미세 균열이 발생하게 된다. 이러한 작은 균열은 보강섬유와 기지물질의 계면을 따라 진전을 하며, 계속되는 하중을 분산시키며 에너지를 소비하며 보강섬유의 파괴를 일으킨다. 계속되는 계면의 분리와 보강섬유의 파괴는 계면 결합력이나 섬유표면의 roughness에 따른 마찰력으로 보강섬유를 resin pocket으로 부터 분리시키게 된다. 미세균열의 포화에 의한 coupling이 발생하여 보다 큰 macrocrack이 발전하며, 보다 많은 에너지를 소비할 수 있다. 즉 계면의 결합력의 강약이 인장성질을 좌우할 수 있는 요인이 될 수 있다.

2차원 적층 복합재료는 보강섬유가 인장을 받는 방향(경사방향)과 인장 방향의 90° 방향(위사방향)으로 제직이 된 상태이므로 인장력을 받게되면 경사방향으로 배열된 섬유에 의해 대부분의 하중이 전파된다. 경사방향으로 전달된 하중은 기지물질과 경·위사의 교차점에서의 contact force에 의해 transverse방향(위사방향)으로도 하중을 전달하지만 이는 계면결합력에 전적으로 의존된다. 이러한 위사방향의 보강섬유는 Poisson 효과에 의해 압축력을

받게되며 결국 층간분리 현상을 초래한다. 층간분리 현상은 2차원 적층 복합재료의 가장 큰 단점이 된다. 또한 경사방향으로 배열된 섬유분율은 최대 50%에 이르지만 구조특성 시료의 준비시에 side cutting이 이루어지므로 실제 하중을 견딜 수 있는 연속 섬유 분율은 50%가 되지 않게 된다. 이러한 이유로 해서 하중의 증가에 따라 free end로 남아 있는 경·위사방향의 보강섬유의 파괴가 선행되고, 층간분리에 의해 변위가 늘어나며 점차로 파괴에 이르게 된다. 그러므로 적층 복합재료의 경우 보강섬유/기지물질의 계면결합력은 균열의 성장억제를 할 수 있는 중요한 요인이 된다.

3차원 브레이드 복합재료의 인장특성은 2차원 적층 복합재료의 경우와는 완전히 다르다. 3차원 브레이드 복합재료는 프리폼의 제조부터 층간분리 현상을 배제한 재료로 인장력을 모든 보강섬유가 균등히 분담하여 효과적으로 대응할 수 있다. 또한 side cutting에 의한 시료의 준비가 이루어지는 것이 아니라 시험 규격이나 end use에 맞게 compression molding에 의해 성형이 되기 때문에 2차원 복합재료에서 초기 발생할 수 있는 edge delamination이 배재된다. 그리고 하중-변위 곡선은 초기에 상당히 비선형관계를 나타내는데, 이는 브레이드 프리폼의 구조가 보강섬유가 일정한 배향각을 가지며 보강되므로 natural crimp를 가지기 때문이다. 그러므로 초기 하중에 의해 decrimping되며 발생된 변위로 미세균열이 발생되나 하중을 골고루 분산시킬 수 있는 구조로 인해 macrocrack으로의 진전은 억제시킨다. 모든 보강섬유가 주어진 하중을 균등히 분담하며 변위는 직선적으로 계속 늘어나 최대하중에 이르면 strain energy가 방출되며 갑작스런 파괴에 이른다. 계면처리 효과가 2차원 적층복합재료에 비해 3차원 복합재료가 낮은 것은 3차원 브레이드 복합재료는 3차원 net-structure로 이루어져 실란 처리를 하지 않은 경우라도 상당히 안정한 구조이기 때문에 계면처리에 의해 결합력이 증가하여 하중 전파 능력이 증가하여도 구조의 영향으로 좌우되는 인장 파괴의 특성상 2차원 적층복합재료보다 향상도가 떨어지는 것으로 여겨진다.

3mm원공이 있는 경우의 인장 강도는 원공이 없는 경우 보다 응력집중 현상과 free edge의 증가로 인해 강력저하가 발생한다. 2차원 적층복합재료의 경우 계면처리에 관계없이 약 28%의 강력감소가 일어나나 3차원 브레이드 복합재료의 경우는 계면처리에 따라 11~18%의 강력감소가 일어난다. 일반적으로 2차원 복합재료의 경우가 강력감소가 심하게 일어나는데 이의 이유는 다음과 같다.

Mallick등에 의하면, 유리섬유강화 적층복합재료에 원공을 준 경우 응력집중계수(K_t)를 측정하여 본 결과 0° 방향의 unidirectional 적층복합재료의 경우가 가장 큰 K_t를 가지며, ±45°의 방향을 가진 층이 많아질수록 K_t값이 떨어진다고 보고하였다[21-22]. [0/90/±45]s 적층 복합재료의 경우 등방성 재료에서 가질 수 있는 K_t 값(3)을 가지며 [±45]s 복합재료의 경우 등방성재료 보다 낮은 K_t값을 보인다. 이는 원공 주위의 응력집중을 ±45° 방향으로 분산시킬 수 있기 때문이다.

본 실험에서 사용된 적층 복합재료는 평직으로 구성되어 있기 때문에 [0/90]s의 cross-ply 복합재료와 비슷하여 원공주위의 응력집중이 많이 일어남을 생각할 수 있다. 그러나 3차원 브레이드 복합재료의 경우 응력집중이 많이 발생할 수 있는 0° 방향의 보강섬유가 없고 보강섬유가 일정한 각을 가지며 보강되어 있으며, 또한 두께 방향으로도 응력을 분산시킬 수 있기 때문에 [±45]s 보다도 상당히 낮은 K_t값을 보일 것으로 사료된다. 이러한 이유로해서 표 2에서 보는 것과 같이 원공에 의한 강력의 감소가 2차원 재료보다 덜 일어난 것으로 보인다.

그림 1은 2차원 적층 복합재료에 원공을 준 후 하중을 증가시키면서 손상의 전파 정도를 C-Scan을 이용하여 관찰한 결과이다. 그림 1(a)에서 보듯이 원공 주위의 응력집중으로 손상이 발생하며 side 부분으로 쉽게 전파된다. side delamination도 단계적으로 발생하며 $q = 0.95$의 하중에서는 원공 주위에 집중되는 손상영역이 관찰된다(여기서 q는 인장강도에 대한 주어진 하중비를 의미한다). 그러나 실란 처리 시편의 경우 초기의 손상은 적으나 $q = 0.59$부터 손상이 관찰되기 시작한다. 그러나 $q = 0.81$의 경우에는 원공주위의 응력집중도 발생

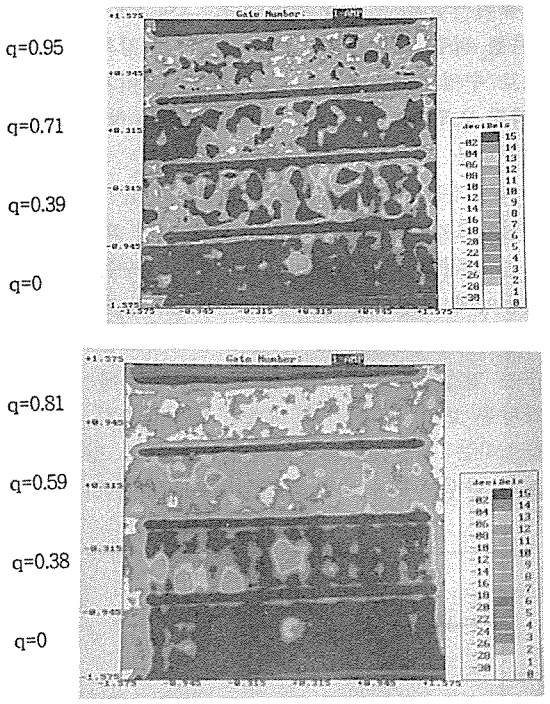


Fig. 1. C-Scan of untreated(a) and silane treated(b) 2-D woven laminate composites, increasing the stress level during the tensile test.

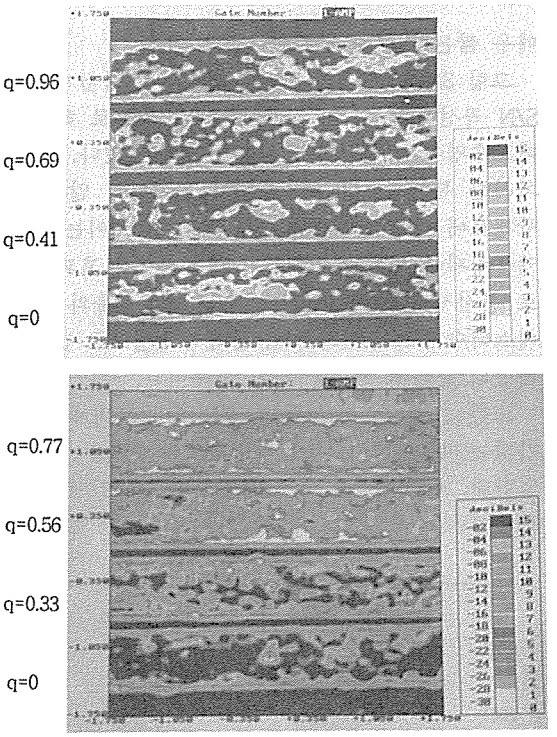


Fig. 2. C-Scan of untreated(a) and silane treated(b) 3-D braided composites, increasing the stress level during the tensile test.

하며, 보강섬유 전체가 하중전파에 기여한 것을 관찰할 수 있다. 이는 섬유/수지간의 강한 계면결합력으로 인해 멀리 떨어진 곳까지도 하중을 전달할 수 있다는 것을 알려준다. 또한 이 재료는 19%의 하중을 더 견딜 수 있는 능력을 가지고 있다.

그림 2는 3차원 브레이드 복합재료에 원공을 준 후 하중을 증가시키면서 damage의 전파 정도를 C-Scan을 이용하여 관찰한 결과이다. 브레이드의 경우도 2차원 복합재료에서 보이듯이 계면처리에 의한 하중 전파능력의 향상으로 인해 더 많은 영역의 손상부위를 보이고 섬유축 방향으로 손상이 전파되는 것을 보이나, 2차원 복합재료에서 보이던 원공 주위의 응력집중은 덜 보인다. 그러나 계면처리하지 않은 브레이드 복합재료의 경우 손상부위가 원공 주위로 집중되는 경향이 있으며, 이 주위에서 변위의 대부분이 발생하므로 낮은 강력을 보이나 계면처리한 재료는 하중의 분산 능력이 뛰어나 원공주위에서의 변위 뿐만 아니라 섬유를 따른 하중 전파가 효과적으로 일어난 것으로 보인다.

3-2. 2차원 및 3차원 복합재료의 인장-인장 피로 특성

원공이 있는 2차원 복합재료에 인장력을 반복적으로 주게 되면 하중의 증가로 인해 원공이 타원형으로 변화하며 응력 집중에 의해 미세균열이 경사 및 위사 방향으로 발생하고 하중 제거시에 균열은 다시 닫히게 된다. 계속되는 반복하중에 의해 미세균열은 열리고 닫히면서 서서히 계면을 따라 균열의 전파하고 또한 이의 coupling이 일어난다. 원공에 의한 균열의 발생과 더불어 side 부분에서도 경사 위사의 free edge에서의 층간 분리가 발생하여 재료의 손상을 진행시킨다. 미세균열이 포화상태에 이르면 이의 coupling으로 인해 macrocrack이 발생하여 더 많은 strain energy를 분산시키나, 이러한 균열 전파범위는 원공주위의 응력집중으로 인하여

매우 짧은 거리에 국한된다.

그림 3과 그림 4는 2차원 및 3차원 복합재료의 S/N 곡선을 semi-log scale로 그린 것으로 하중과 피로수명이 직선관계에 있음을 알 수 있다. 계면처리한 복합재료의 피로수명이 처리하지 않은 복합재료에 비해 증가되는 경향을 보이며, 이는 실란 커플링제에 의한 계면처리가 반복하중을 효과적으로 분산시키고 커플링제에 의한 유리섬유와 폴리에스터수지 사이의 화학적, 물리적 결합으로 인하여 계면의 분리에 저항을 하기 때문이다.

또한 그림 4에서 보듯이 계면처리에 의해서 증가되는 피로수명이 2차원 복합재료의 증가율 보다는 덜한데, 이는 3차원 구조의 인장피로에 있어서 피로특성을 좌우하는 가장 중요한 요소는 구성 보강섬유의 구조라는 것을 의미한다. 그림 3에서 보듯이 2차원 적층 복합재료의 계면결합력의 강화로 인해 피로 수명이 상당히 향상된 경향을 보이기는 하나 3차원 브레이드 복합재료의 경우 보다는 상대적으로 열등함을 알 수 있다.

그림 5는 계면 처리하지 않은 3차원 브레이드 복합재료가 탄성계수의 감소를 보이며 파괴에 이르는 과정을 보여준다. 여기서 탄성계수는 피로실험동안에 발생하는 원공을 포함한 25mm의 변형을 측정하여 계산하였다. 그림 5의 그래프는 탄성계수는 일정하게 유지되다가 갑자기 파괴에 이르는 경향을 보인다. 여기서 재료의 탄성계수가 갑자기 감소하는 점을 threshold modulus라고 정의하고 초기 탄성계수에 대한 비를 threshold level이라고

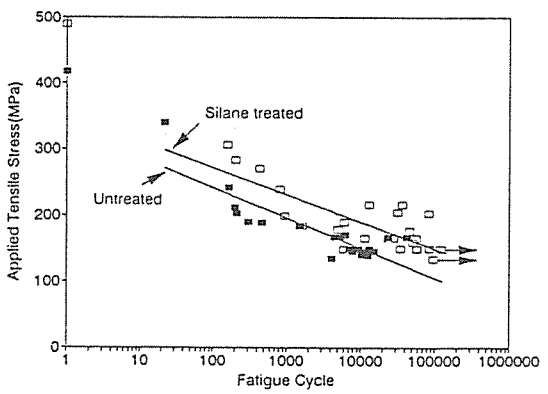


Fig. 3. S/N curves for untreated and silane treated 2-D woven laminate composites.

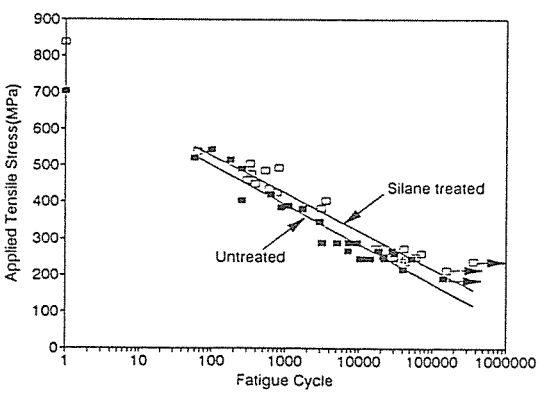


Fig. 4. S/N curve for untreated and silane treated 3-D braided compsoite.

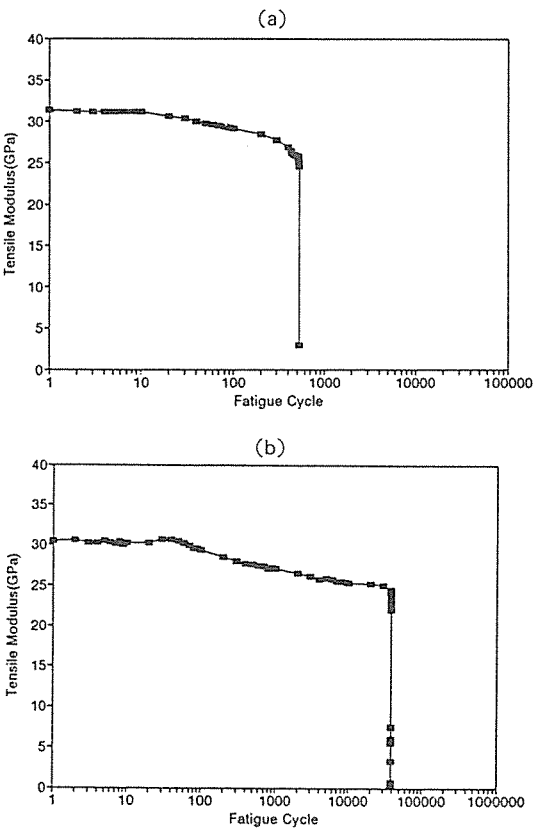


Fig. 5. Modulus degradation of untreated 3-D braided composite during 647 fatigue cycling at 406MPa (a) and 38719 fatigue cycling at 229 MPa (b).

하여 이를 계산하면 표 3과 같다.

표 3에서 보듯이 threshold level의 평균은 약 82% 의 값을 보이는데 이는 초기 탄성계수의 82% 정도가 되면 계면처리하지 않은 브레이드 복합재료는 파괴에 이르게 된다는 뜻이다. 또한 그림 6은 실란 처리한 경우의 3차원 브레이드 복합재료의 탄성계수의 감소를 보인다. 이 그래프도 그림 5와 유사한 형태로 진행되지만 threshold modulus가 많아 낮아지는 것이 보이며, threshold level을 계산한 표 3의 결과를 보면 실란 처리하지 않은 재료

Table 3. Fatigue life of 3-D braided composites.

Surface Treatment	Applied Stress (MPa)	Initial Modulus (GPa)	Modulus at Threshold Point(GPa)	Threshold Level (%)	Fatigue Life
Untreated 3-D braided composite	520.2	26.6	24.3	91.4	59
	543.4	30.9	25.0	81.0	101
	515.6	30.3	25.4	83.8	181
	405.7	29.1	23.6	81.0	257
	490.2	30.2	24.8	82.1	258
	406.0	31.4	25.8	82.1	647
	386.6	30.6	25.4	83.0	888
	389.3	31.7	21.1	66.6	1104
	381.4	30.3	23.1	76.2	1749
	347.2	30.4	22.2	73.0	2940
	238.0	31.3	26.0	83.1	37475
	229.0	30.7	25.0	81.5	38719
	238.0	29.7	24.2	81.6	42729
	244.0	35.8	28.2	78.9	44487
	250.0	34.4	27.5	80.1	59226
	240.0	31.9	26.9	84.4	166807
1.0wt% γ-MPS treated 3-D braided braided composite	459.8	31.0	21.8	70.3	307
	505.1	30.7	19.0	61.9	331
	476.2	28.7	17.3	60.3	346
	449.3	32.1	16.4	51.1	393
	486.1	32.2	22.6	70.3	537
	435.9	32.4	25.2	77.9	602
	425.5	31.0	20.0	64.7	764
	493.6	29.2	18.8	64.4	832
	383.1	27.0	17.1	63.2	3130
	402.9	33.0	19.8	60.0	3617
	289.0	35.1	23.2	65.9	3716
	289.0	35.5	22.1	62.3	5091
	267.0	39.8	29.8	74.8	7190
	246.0	39.0	27.7	71.1	11192
	252.0	37.2	26.9	72.5	21030
	250.0	43.1	31.3	73.0	21910
	249.0	32.5	20.7	63.8	29508
	246.0	39.9	28.8	72.1	52493
	260.0	31.7	17.3	54.7	71377

보다 이 값이 상당히 낮음을 알 수 있다. 이 값의 평균은 약 65% 로 이는 계면처리 재료가 피로에 의한 파괴에 이를때 더 많은 변형이 일어난다는 것을 의미한다. 즉 계면결합력의 향상으로 인해 균열의 전파를 억제하며 반복하중에 의한 응력이 재분산을 효과적으로 시킴으로써 어느 정도의 영구변형이 생겨도 응력을 견딜 수 있다는 것을 나타낸다. 이는 정적 인장 성질의 손상영역관찰의 결과와 일치하는 결과로, 강한 결합력으로 인해 응력 집중 영역을 넓히며 균열이 전파될 수 있으므로 많은 손상영역을 보이게 되는 것이다. 그림 7은 3차원 브레이드 복합재료의 피로 주기 동안의 응력-변형률곡선으로 같은 정도의 응력을 가한 경우, 계면처리 시편의 경우 더 많은 변형이 이루어진 후 파괴가 일어난

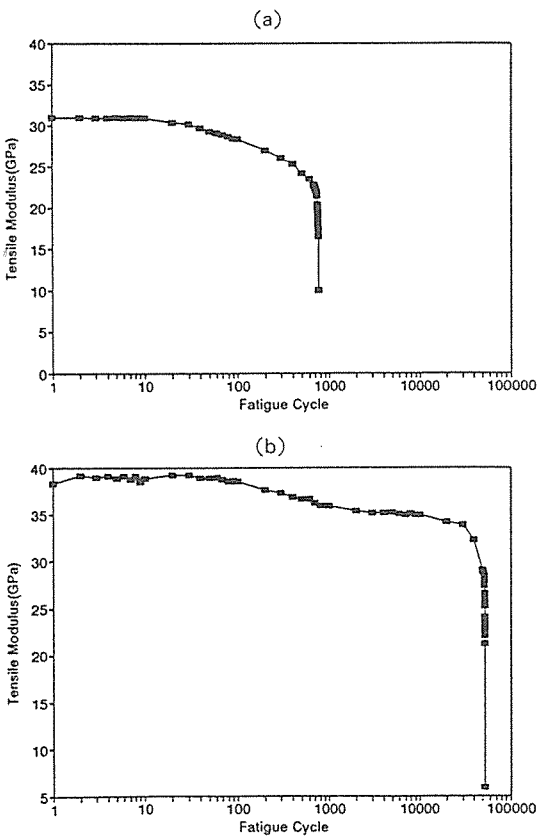


Fig. 6. Modulus degradation of silane treated 3-D braided composite during 764 fatigue cycling at 426MPa (a) and 52493 fatigue cycling at 246 MPa(b).

것을 관찰할 수 있다.

그림 8은 그림 7의 응력-변형률 곡선을 적분하여 각 cycle마다 이력현상을 계산한 값이다. 하중제어방식의 피로를 주기 때문에 응력수위는 일정하게 유지되며, 반복하중에 따라 영구변형은 증가하기 때문에 total energy는 증가되는 경향을 보이며, 균열의 전파나 층간분리에 의한 loss energy의 증가에 따라 elastic energy는 점점 증가율이 감소되는 경향을 보인다. 여기서 손실에너지는 바로 균열의 전파의 driving energy로 볼 수 있다. 실란 미처리 복합재료의 total energy는 그림(a)에서 보듯이 반복하중에 따라 영구변형이 적게 일어나기 때문에

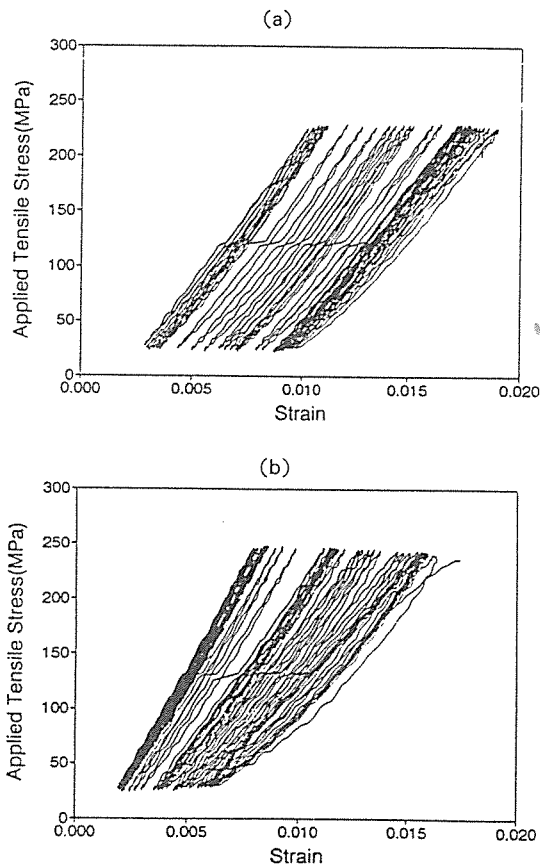


Fig. 7. Stress vs. strain curves of untreated 3-D braided composite during 38719 fatigue cycling at 229 MPa(a) and of silane treated 3-D braided composite during 52493 fatigue cycling at 246 MPa(b).

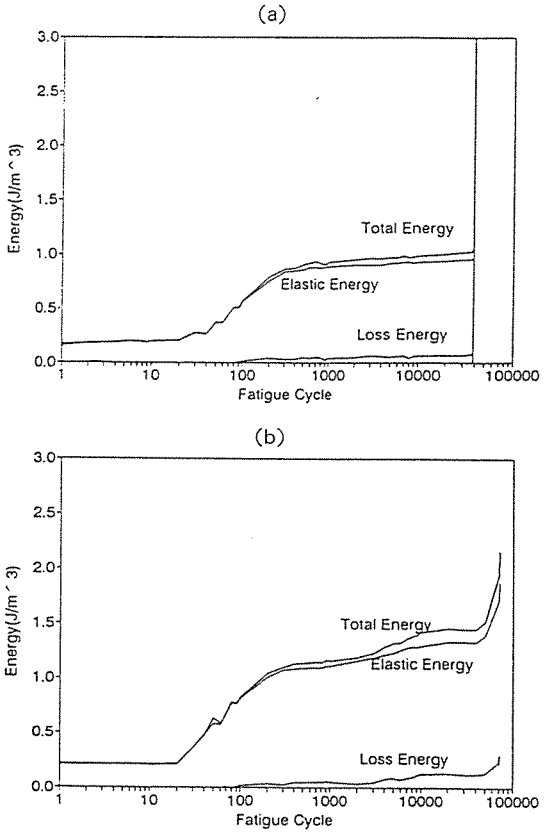


Fig. 8. Hysteresis calculation results of untreated 3-D braided composite during 38719 fatigue cycling at 229 MPa(a) and of silane treated 3-D braided composite during 52493 fatigue cycling at 246 MPa(b).

일정하게 유지되는 경향이 있으며, elastic energy와 loss energy도 파괴에 이를 때까지 일정히 유지되며 catastrophic failure가 일어난다.

4. 결 론

실란 커플링제로 유리섬유의 표면을 처리하여 만든 3차원 브레이드 복합재료의 인장성질 및 인장피로성질을 2차원 적층 복합재료와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2차원 복합재료의 경우 γ-MPS 1.0wt%로 처리한 경우의 인장 강도가 처리하지 않은 경우 보다 21% 향상되었고, 3차원 브레이드 복합재료의 경

우는 10% 향상되었다. 즉 3차원 브레이드 복합재료의 경우 계면 처리에 의한 향상도가 2차원 적층 복합재료 보다 저하됨을 알 수 있다.

2. 원공이 있는 2차원 적층 복합재료의 인장강도는 보강섬유의 구조가 평직으로 구성되어 있기 때문에 원공주위의 응력집중으로 인하여 강력의 감소가 많이 일어나나, 3차원 브레이드 복합재료의 경우 보강섬유가 일정한 각을 가지며 interlacing 되어 있으며, 또한 두께 방향으로도 응력을 분산시킬 수 있기 때문에 응력집중이 적어 원공에 의한 강력의 감소가 덜 일어났다.

3. 계면처리한 2차원 복합재료의 인장-인장 피로의 경우, 점차 응력수위를 낮추게 되면 층간분리나 debonding을 억제시켜 피로수명을 증가시켰다. 즉 계면처리로 인해 피로파괴에 이르게 되는 균열의 성장 및 층간 분리를 상당히 억제함을 알 수 있다.

4. 3차원 브레이드 복합재료의 인장-인장 피로의 경우, threshold level은 계면처리에 의해 82%에서 65%로 떨어지는데, 이는 실란 처리시편의 복합재료가 피로를 받는 경우 더 많은 변형이 발생하며 피로수명이 증가된 것으로 관찰된다. 즉 계면 결합력의 향상으로 인해 균열의 전파를 억제하며 반복하중에 의한 응력의 재분산을 효과적으로 시킴으로써 어느 정도의 영구변형이 생겨도 주어진 응력을 견딜 수 있다는 것을 의미한다.

후 기

본 연구는 1991년도 한국 과학재단 특정 기초연구 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H.T. Hahn and R.Y. Kim, Fatigue Behavior of Composite Laminates, J. Composite Material, 10, 1976, 156.

2. Z. Hashin and A. Rotem, A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials, J. Composite Material, 7, 1973, 448.

3. L. Lorenzo and H.T. Hahn, Fatigue Failure Mechanisms in Unidirectional Composites, Composite Materials-Fatigue and Fracture, ASTM STP 907, 1986, 210.

4. L.H. Miner, R.A. Wolfe and C.H. Zweben, Fatigue, Creep and Impact Resistance of Kevlar 49 Reinforced Composites, Composite Reliability, ASTM STP 580, 1975.

5. P.G. Pape and E.P. Plueddemann, Methods for Improving the Performance of Silane Coupling Agents, J. Adhesion Sci. Technol., Vol.5, No.10, 1991, pp.831-842.

6. E.P. Plueddemann, Reminiscing on Silane Coupling Agents, J. Adhesion Sci. Technol., Vol.5, No.4, 1991, pp.261-277.

7. J.C. Gong and B.V. Sankar, Impact Properties of Three-Dimensional Braided Graphite/Epoxy Composites, J. Composite Materials, Vol. 25, 1991, pp.715-731.

8. P. Marshall and J. Price, Fibre/matrix Interface Property Determination, Composites, Vol. 22, No.1, 1991, pp.53-57.

9. S.M. Lee, Influence of Fiber/matrix Interfacial Adhesion on Composite Fracture Behavior, Composites Science and Technology, Vol.43, 1992, pp.317-327.

10. F.K. Ko, Tensile Strength and Modulus of a Three-Dimensional Braid Composite, Composite Materials(Seventh Conference).

11. R.A. Florentine, Magnaweave-The "Ultimate Reinforcement System", for High Performance Composite Materials and Shapes, J. Industrial Fabrics.

12. J.C. Halpin, K. Jerine and J.M. Whitney, The Laminate Analogy for 2 and 3 Dimensional Composite Materials, J. Composite Materials, Vol.5, 1971, pp.36-49.

13. P. Popper and R. McConnell, A New 3D Braid for Integrated Parts Manufactured and Improved Delamination Resistance-The 2-Step Pro-

cess, 32th International SAMPE Symposium, 1987, pp.92-103.

14. R.T. Brown, Through-The-Thickness Braiding Technology, 30th National SAMPE Symposium, 1985.

15. A.P. Majidi, J. Yang, R.B. Pipes and T. Chou, Mechanical Behavior of Three-Dimensional Woven Fibre Composites, Proceedings of the Fifth International Conference on Composite Materials, pp.1247-1265.

16. J.C. Bittence, Strengthening in Three Dimensions, Advanced Materials & Processes, pp. 46-50.

17. C. Christianson, 3-D Fabrics Enhance End Product Performance, Industrial Fabric Products Review, 1984, pp.50-52.

18. A.P. Majidi, J. Yang and T. Chou, Mechanical Behavior of Three-Dimensional Braided Metal Matrix Composites, ASTM 1st Symposium on Testing Technology of Metal Matrix Composites, 1985.

19. Structural Mechanics of 3-D Braided Preforms for Composite Part 1.

20. W. Li and A.E. Shiekh, Structural Mechanics of 3-D Braided Preforms for Composites Part 2 : Geometry of Fabrics Produced By The 2-Step Process

21. P.K. Mallick, Fiber Reinforced Composites, Marcel Dekker, 1988.

22. R.J. Nuismer and J.M. Whitney, Uniaxial Failure of Composite Laminate Containing Stress concentrations, In Fracture Mechanics of Composites, ASTM STP 593, American Society of Testing and Materials, 1975, pp.117-142.