

고성능 Textile Composite의 개발과 응용 현황

강태진¹ · 김 철¹ · 박태건¹

1. 서 론

최근 소재 공업의 발달과 더불어 재료성능에 대한 기대치 또한 높아져 가고 있다. 산업과 과학기술이 발달함에 따라 재료에 요구되어 지고 있는 특성이 더욱 다양화 되어가고 있으며, 또한 하나의 재료가 여러 재료의 장점을 동시에 가질 것을 요구하는 경우도 많아져 가고 있다. 이러한 다양한 성능과 기능을 만족시켜 주는 고분자 복합재료 분야에서의 새로운 재료 중의 하나가 textile composite이며 textile composite은 고인성, 내피로성, 내충격성 등이 월등히 우수한 신소재 복합재료이다.

복합재료란 원래 두 가지 이상의 서로 다른 특성을 가지는 재료를 거시적으로 결합하여 하나의 특징을 갖는 구조로 만들어준 것을 말하며 구성성분의 특징이 복합재료에서 모두 발휘되는 것이 특징이다. 일반적으로 섬유강화 복합재료는 일차적인 하중을 견디는 성분인 보강섬유와 보강재간에 하중을 전달하면서 구조재의 형태를 유지시키는 기지재의 두부분으로 나눌 수 있다. 일반적으로 보강재의 성분과 기지재의 종류에 따라 몇 가지로 분류할 수 있다. 이를 복합재료에 가장 광범위하게 응용하고 있는 것이 섬유 강화 복합재료이다. 보강재가 섬유상을 하고 있기 때문에 이러한 명칭으로 불리고 있다. 보강재는 유기물, 무기물, 금속 등 여러 가지가 쓰일 수 있으며, 예를 들면 유기물로는 아라미드섬유, 고강도 polyethylene, 무기물로는 알루미나, 탄소, 유리 섬유, 금속 물질로는 텅스텐, 철 등이 쓰이고

있다. 보강재의 형태에 따라 단결정이나 단 섬유, 장섬유, 기타 섬유 구조물 등으로 나누어 볼 수 있다. 일반적으로 가장 널리 쓰이는 형태는 단섬유를 보강한 경우인데, 이것은 일반 구조재의 물성을 요구하는 경우에 쓰이며, 또한 가장 경제적이기 때문이다. 기지 물질로는 고분자 수지, 세라믹, 금속 등이 쓰인다.

일반적인 기존의 복합재료는 항공우주 분야에서 2차 구조물에 주로 사용되어 왔으나, textile composite 등의 개발에 힘입어 현재는 일차적인 하중을 받게 되는 1차 구조재로 쓰이고 있다. 현재에도 이들 복합재료를 1차 구조재로 더욱 확대 사용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 textile composite는 이러한 연구의 큰 가닥을 이루고 있다. Textile composite은 보강재를 특별한 모양의 섬유 구조물로 만들어 보강하여 줌으로써, 기존의 복합재료 제조 방법으로는 얻을 수 없는 뛰어난 성능의 복합재료를 생산하는 기술이다. 이러한 섬유 구조 보강 방법에는 여러 가지가 있으며, 상당 수가 기존의 제작이나 편직, 브레이딩 기술을 응용하여 preform을 제작하고 있으며 다음 Table 1에는 이러한 textile preform의 종류와 분류를 보이고 있다.

Textile composite은 우주항공, 자동차, 공장 설비 등의 경량화가 필요한 분야에서 그 적용이 확대되어 가고 있으며, 사용량도 기하급수적으로 늘어가고 있다. 다음 Figure 1은 1960년대부터 현재에 이르기까지 항공기 구조용 textile composite의 적용 추세를 보여준다. 최근 수년간 군사용이나 상업용 비행기 모두 복합재료 부품이

Development and Application of Advanced Textile Structural Composites /

Tae Jin Kang¹, Cheol Kim¹, and Taegon Park¹

¹대표저자: 서울대학교 공과대학 섬유고분자공학과 교수, (151-742) 서울 관악구 신림동 산 56-1, Tel: (02)880-7193, Fax: (02)885-1748, e-mail: taekang@alliant.snu.ac.kr

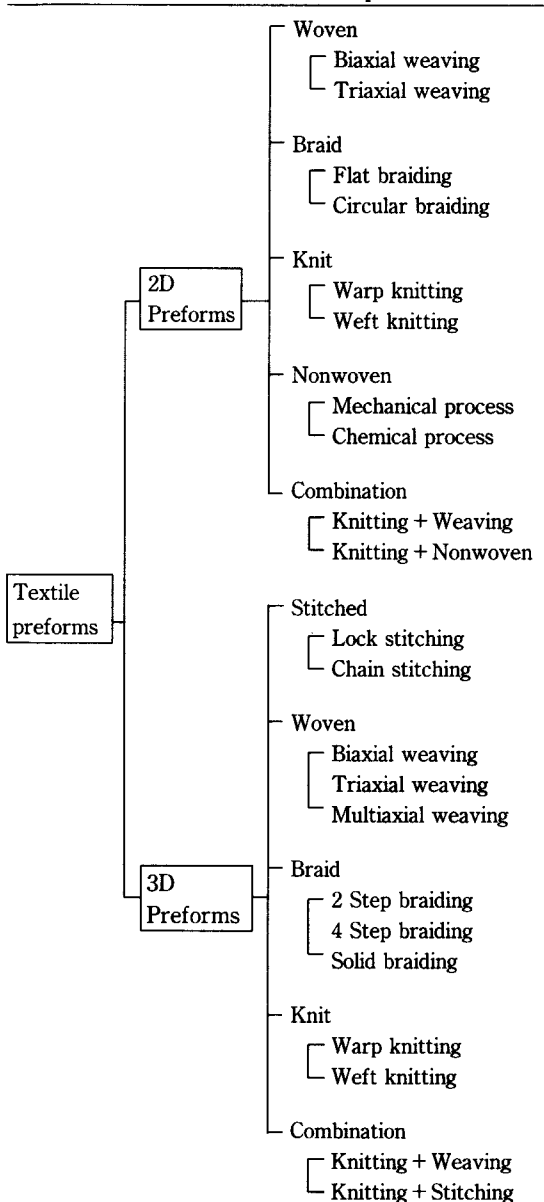
¹서울대학교 공대 섬유고분자공학과

차지하는 비중이 증가하고 있는 추세이며, 또한 앞으로는 더욱 증가할 것으로 사료된다.

2. Textile Composite의 응용

과학 문명이 고도로 발달한 현대 사회의 산업, 특히 우주 항공 분야에 있어서 고성능 복합재료

Table 1. Classifications of textile preforms



의 활발한 개발은 고성능 복합재료가 가지는 우수한 장점들을 이용하여 고성능 항공기의 소재 개발에 적용하기 위해서이다. 근래의 항공기에서 요구되고 있는 특징을 살펴보면, 2차 구조물의 절감으로 동체의 경량화, 고인성 소재 적용, 동체 제작 비용 절감 등이다. 고성능 복합재료의 경우, 기존 금속재료의 고강도를 유지하면서도 경량화가 가능하고, 금속재료가 가지고 있지 않은 고인성을 지니고 있기 때문에 구조보지성이 우수하고 안정이 개선되어 더욱 각광을 받고 있다[1]. 이러한 고성능 섬유 복합재료를 제작하기 위하여서는 연구 및 고려되어야 하는 몇가지 사항들이 있으며, 이것들을 다음 Figure 2에 보인다.

Textile composite를 개발하기 위하여 선행되어야 하는 연구로는 제조 공정 분야에서는 textile composite의 구조, 기지재의 거동, preform 물성, 투공성 등을 고려해야 한다. 기지재의 유동 및 함침거동을 preform 구조에 따른 함수로 나타내기 위한 여러 연구가 진행되고 있다. 이러한 제조 공정 분야의 연구와 더불어 복합재료의 물성 해석을 위한 복합재료 역학과 물성평가 분야의 연구도 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 복합재료의 구조는 연속성이 없기 때문에 연속체로 취급을 할 수 없어 그 역학적 거동을 해석하기가 어렵다. 이를 해결하기 위한 방법으로 여러가지 모델들이 각각의 보강구조마다 제시되고 있으며, 또한 정확한 물성의 특징, 예를 들어 고성능 textile composite의 특징인 면외강도(out-of-plane strength), 내충격성, 피로특성, 구조 보지성 등을 평가하기 위한 실험방법 등이 연구되고 있다. 다

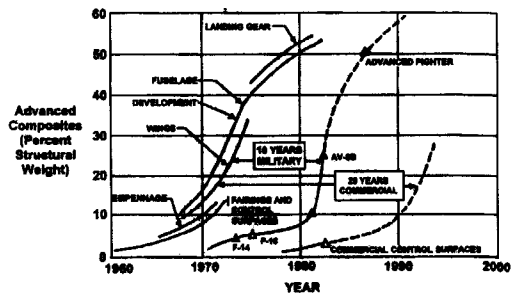


Figure 1. Implementation of advanced composites on aircraft.

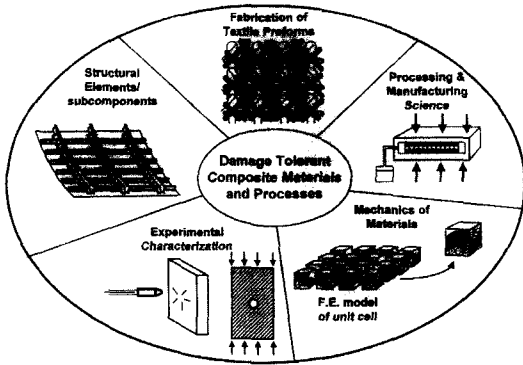


Figure 2. Scope of the research effort currently underway.

Figure 3은 이러한 연구분야를 보이고 있다.

Textile composite을 1차 구조용 소재로서 이용하기 위해서는 어느 정도의 두께를 가지는 복합재료를 경제적으로 제작할 수 있는 방법이 있어야 한다. 기존의 적층 복합재료로 두꺼운 판을 만드는 경우 층간 분리의 문제와 성형 후 잔류응력 문제가 발생하게 된다. 두꺼운 textile preform을 만들 수 있다면 적은 수의 ply로도 일정한 두께의 적층판을 만들수 있으며, 그에 따라 층간 분리 등의 문제나 잔류응력의 영향이 감소하게 된다. 3-D weaving과 3-D braiding은 최소의 가공으로 일체형 구조(near net-shape)를 만들어 줄 수 있어 최소의 가공으로 복잡한 형태의 구조물을 제작할 수 있다. 또한 multiaxial warp knit(MWK)는 기존의 적층 복합재료를 대체할 수 있는 가장 경제적인 textile preform 구조이며 특히 편직 구조물은 구조 자체의 변형률이 크며 복원성이 좋기 때문에 원하는 모양으로 preform을 제작하는데 가장 효과적이다. 또한 스티칭을 이용할 경우, 층간 성질과 구조 보지성 등의 향상된 구조물을 제작할 수 있다[2,3]. 다음 Figure 4는 항공기 구조용 부품으로 쓰인 textile composite의 예를 보이고 있다. 이 그림은 MD-12 제트기의 동체 부품으로 쓰이는 복합재료의 예를 보이고 있는데, skin과 window belt는 3-D woven을 주로 이용하며, frame은 3-D braid를 주로 이용한다. 다음은 구조에 따른 생산 방법과 특징 등을 살펴보기로 한다.

2.1. Woven Preform

기존의 제직 기술을 이용한 textile preform은 평면 구조로는 3축 직물(triaxial woven fabric)이 있으며, 3차원 구조로는 3-D orthogonal weaving, 다축 3차원 제직, interweaving 등이 있다. 제직을 이용한 구조의 장점은 생산이 비교적 간단하며, 직물의 면밀도를 높이는 것이 가능하기 때문에 최종적인 복합재료의 섬유 파괴분율을 높여 주는 것이 가능하다. 다음 Figure 5에 제직을 이용한 직물의 내부 구조를 보이고 있다.

2차원 preform의 경우, 대표적인 예는 3축 직물이다. 기존의 직물이 0도와 90도 방향 섬유 두가닥이 90도로 교차하면서 직물 구조를 이루는데 비하여 60도 간격으로 기울어진 두개의 경사가 하나의 위사와 교차하면서 3방향으로 섬유가 보강된 직물 구조를 이루는 것이다. 일반직물에 비교하여 전단 성질이 뛰어나며 다른 방법으로 만드는 textile preform에 비하여 생산 방법이 간단하고 저렴한 장점이 있다.

3축 이상의 다축 보강 preform의 제작법 중 3-D orthogonal weave는 기본적으로 multiwarp weaving법을 이용하여 만들어진다. 이 방법은 가방 등에 쓰이는 두겹, 혹은 세겹의 두꺼운 직물을 생산하기 위하여 쓰이던 방법으로서, 다수의 warp beam을 설치하여 직물을 만들어 주는 방법이다. 많게는 17층에 이르는 두꺼운 직물의 경우에도 제직이 가능하다. 평면 방향으로 경사와 위사가 교차되며, 두 섬유에 수직하게 두께 방향으로 보강 섬유가 삽입되는 구조를 보이고 있다. 3차원 제직 구조의 경우, 위사와 경사방향으로 배열되어 있는 섬유는 0~90도 사이의 배향을 가지게 되는데 비하여, 두께 방향으로 보강되는 섬유는 45도(angle interlock)에서 90도(orthogonal weave) 사이의 각도를 가지게 된다.

또 다른 3차원 제직의 예는 angle interlock이다. Orthogonal weave의 경우 두께 방향의 섬유가 수직으로 교차하는 데 비하여 수직 방향의 보강 섬유가 45도까지 기울어진 각도로 두께 방향으로 배열된다는 점이 다르다.

이러한 3축 직물들의 장점은 두께 방향으로의 물성이 다른 2차원적인 구조물에 비하여 월등히

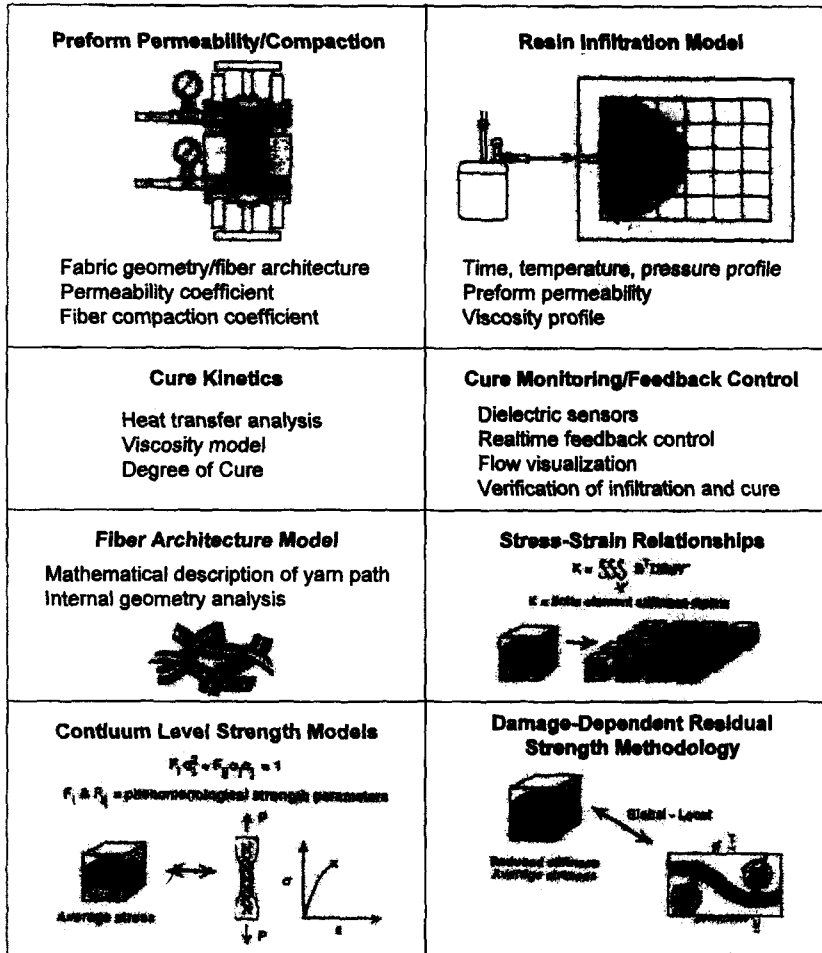


Figure 3. Processing science and mechanics of material models for textile composites.

우수하며, 재료 전체를 하나의 구조물로 만들 수 있다는 점이다. 또한 최종 생산품의 모양에 맞추어 적절한 모양으로 만들 수 있다는 장점이 있으며, 한 부분에서 파괴가 일어나도 구조의 집적성을 유지하는 것이 가능하다. 또한 T-bar와 같이 가지가 달린 모양의 경우에도 이음매나 접착 부분이 없이 하나의 구조로 만들어 줄 수 있다. 다음 Figure 6에 3-D 직물을 이용한 탄소/탄소 제트 엔진 일부를 예로 보이고 있다.

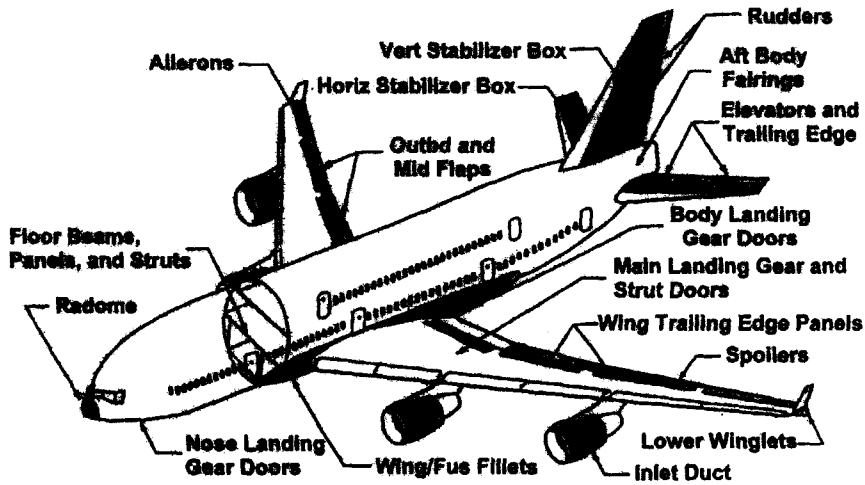
복합재료의 구조보지성은 preform을 이루고 있는 fiber의 interlacing에 영향을 받게 되는데, 모든 조건이 동일한 경우, 3차원 제직 구조물이 damage tolerance가 가장 좋은 것으로 알려져

있다. 따라서 충격 하에서도 손상을 입게 되는 영역을 최소화 할 수 있으며, 손상 영역의 최소화에 따라 충격 후 잔여 강도면에서도 기존이 복합재료보다 월등히 우수함을 보인다.


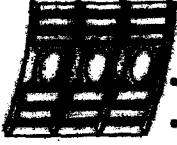


2.2. Knitted Preform

Knitting을 이용한 구조는 loop의 생성 방향에 따라 위편을 이용한 경우와 경편을 이용한 경우로 나눌 수 있다. 위편은 하나의 섬유가 연속적인 loop를 만들면서 구조를 이루는 것으로서, 모든 방향으로의 신장도가 뛰어나며 탄성회복률이 우수한 구조를 만들 수 있다.

Knitting 구조물 역시 2차원 knitting 구조와



(a) Textile Composite Parts applied to MD-12X

<p>Stringer/Fused Fuselage Panels</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Damage tolerance • Buckling/postbuckling • Pressure pilfering • Combined cyclic loads 	<p>Fuselage Window Belt</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Out-of-plane/interlaminar stresses • Stability under combined loads • Damage tolerance/pressure containment
<p>Circumferential Fuselage Frames</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Combined loads • High interlaminar stresses • Durability of frame/stringer/skin attachments • Frame splices 	<p>Keel Beam/Frame Intersections</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Impact damage tolerance • Through penetration/damage containment • Durability of beam/frame splices

(b) Fuselage Subcomponents

Figure 4. Textile composite parts of MD-12X airplane and fuselage subcomponents. (a) textile composite parts applied to MD-12X, (b) fuselage subcomponents.

3차원 knitting 구조의 preform으로 나눌 수 있으며, knitting에 사용되는 기계의 종류에 따라서도 분류할 수 있다. 위편이나 경편 두 가지 모두 평면 구조를 만들기 위해서는 single needle machine을 이용하며, 3차원 구조를 만들기 위하여서는 double needle machine을 이용하여야 한다. 위편을 이용한 경우는 주로 2차원 구조로 많이 쓰이게 되는데 다음 Figure 7에 위편을 이

용한 항공기용 brake disk의 적용 예를 보이고 있다.

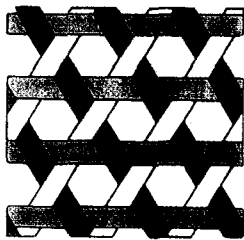
위편물을 이용할 경우, 편성물 자체로만 복합 재료를 만들어 주는 것이 아니라 경사나 위사 방향으로 섬유를 삽입하여 주는 것이 일반적이다. 위편물의 경우, 전체적으로 하나의 구조를 만들어 줄 수 있으며, 하중에 대한 변형이 크기 때문에 flexible한 복합재료에 주로 쓰이게 되며,

RTM과 같은 molding 공정 등에 적용할 경우, 큰 변형으로 인하여 각진 부분이나 복잡한 모양의 제작시 일반적인 직물 형태를 보강구조로 이용한 경우보다 최종 제품의 물성이 더 우수하다. 섬유가 3차원적으로 loop를 형성하기 때문에, 섬유의 파괴분율을 높일 수 없다는 것과 loop의 신장이 일어난 후 섬유가 변형되기 때문에 하중에 의한 초기 인장 탄성 계수가 낮은 것이 단점이다.

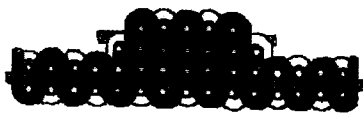
경편을 이용할 경우, 가장 대표적인 3차원 구조는 multiaxial warp knit(MWK) 구조이다. 아래 Figure 8에 multiaxial warp knit의 개략적인 구조를 보이고 있다.

다축경편성 textile preform은 평면 상에 몇개의 층을 이루면서 섬유가 직선으로 배열되며, 각각의 섬유 사이로 stitch사가 두께 방향으로 loop를 이루면서 섬유를 고정시키게 된다. 구성 구조물의 종류에 따라 두께의 조절이 가능하며, 최대 12층까지 적층이 가능하다. 섬유가 crimp

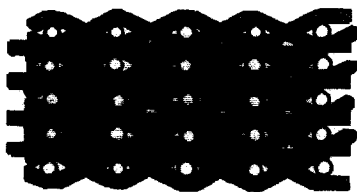
없이 보강되기 때문에, 섬유가 지닌 최대의 물성을 발휘할 수 있고, 인장시 초기 탄성계수가 직선을 유지하게 된다. 또한 두께 방향으로 보강되는 stitch사의 종류에 따라서는 3축 방향으로의 물성 보강이 가능하다. MWK구조는 기존의 적층구조물의 경제성을 보완하기 위한 방법의 하나로 제안된 것이지만, 스티치사를 고강도 섬유로 바꾸어 3축 보강효과를 얻게 하여 줌으로써 두께 방향의 물성이 뛰어난 복합재료 제조가 가능하기 때문에 근래에 들어 많이 연구되고 있다. 다축경편성물(MWK)은 스티칭 등의 기존 방법과는 달리 3축 보강시 수평 방향의 섬유에 손상을 입히지 않음으로 더욱 나은 물성을 기대할 수



(a) 2-D Triaxial Woven



(b) 3-D Integrally Woven



(c) Angle Interlock

Figure 5. Woven textile preform. (a) 2-D triaxial woven, (B) 3-D integrally woven, (c) angle interlock.

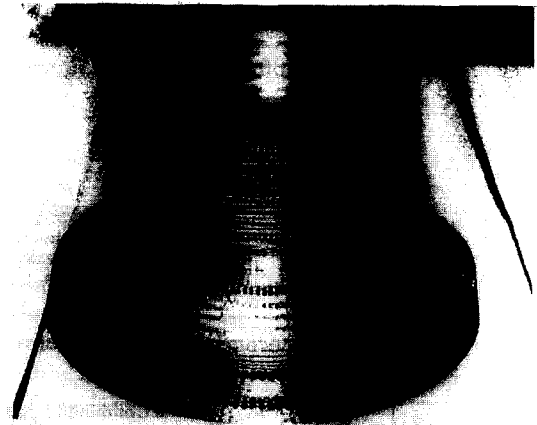


Figure 6. 3-D Woven carbon/carbon ITE (integral throat exit) for nuclear missile.



Figure 7. A weft knitted carbon/carbon composite brake disk.

있다. 특히 두께가 별로 두껍지 않은 구조를 제작하는 경우 유용하게 사용할 수 있으며 또한 수평 방향으로 배열되는 섬유 층의 장수와 배열 각도를 조절하여 줌으로 기존의 보강용 직물 구조가 가지고 있던 이방성을 거의 없애는 것이 가능하게 된다. 그 외에도 기존 복합재료 생산 방법으로는 시간과 노동력이 많이 필요한 큰 구조물도 단시간에 저렴한 비용으로 생산이 가능하다. 100인치 폭의 다축 경편물의 생산성이 분당 수 미터까지도 가능하며 이를 이용할 경우, 장치산업이나 건축분야에서 경량 대형 구조물을 만드는데 유용하게 적용될 수 있다. Figure 9에는 MWK fabric을 적용한 제품의 예를 보이고 있다. 주로 경량화와 함께 크기가 큰 구조물을 만드는데 유용하게 응용됨을 알 수 있다[4,5].

2.3. Braids

브레이딩은 전통적으로 밧줄이나 벨트 등을

만드는데 이용된 매우 오랜 기술이었는데 현재에 와서 다양하고 복잡한 복합재료 textile preform을 일체형(net shape)으로 제조하는데 효율적으로 이용되고 있다. 브레이딩 구조는 2차원 브레이드 구조와 3차원 브레이드 구조로 분류할 수 있으며, 2차원 구조의 경우 flat, circular의 두 가지 방법에 의하여 제작된다.

전통적인 3차원 브레이드는 horn gear 방식으로 제조되는데 이는 carrier의 수에 한계가 있고 복잡한 형태의 구조물을 만드는데 어려움이 있어 현재는 여러 형태의 새로운 브레이드 제조방법이 개발되어 응용되고 있다. 3차원 브레이딩은 plate의 모양에 따라 rectangular와 circular로 나눌 수 있으며 이것은 다시 2-step, 4-step, multi-step으로 나뉘어진다.

일반적인 2-step 브레이드의 preform 구조는 길이 방향으로 평행하게 배열되어 고정되어 있는 다수의 axial yarn과 그 사이를 움직이는 소수의 braiding yarn으로 구성되는데, axial yarn의

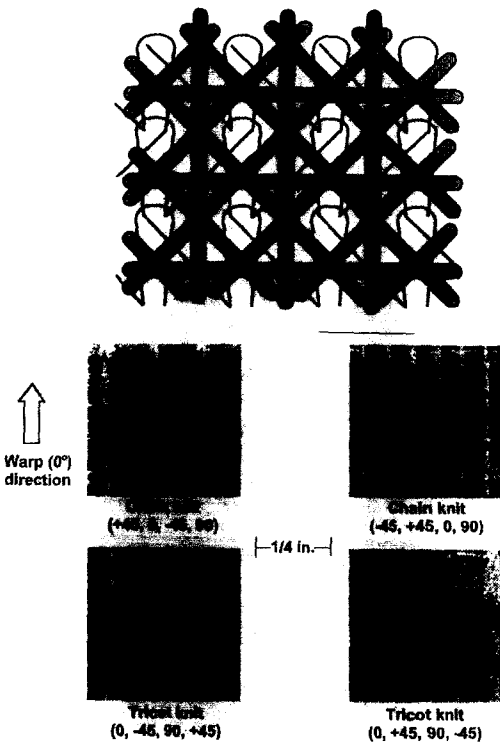
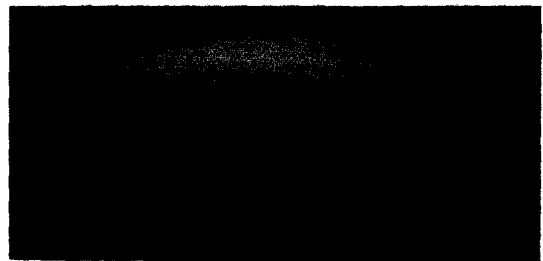
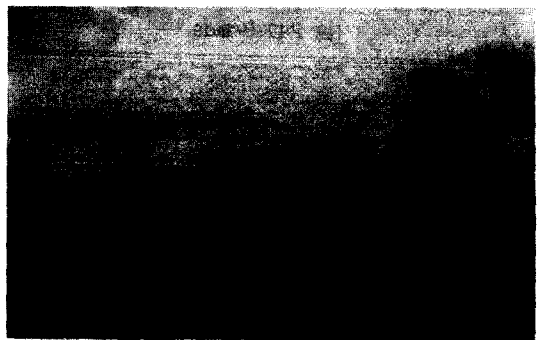


Figure 8. Schematic geometry of multiaxial warp knitted structure.



(a) Stadium Roof



(b) Cabin of rail transport

Figure 9. Applications of multiaxial warp knit composites.

배열에 따라 I beam, box beam, circular tube 등의 preform 모양이 결정되며 braiding yarn에 의하여 preform이 고정되게 된다. 이러한 2-step의 장점은 braider의 움직임이 단순하다는 것과 복잡한 형태의 구조를 쉽게 디자인 할 수 있다는 데 있으며 섬유 packing factor를 높일 수 있다는 장점도 있다. 4-step 브레이딩 공정은 1주기 동안 4번의 직교 운동을 하게 되며 먼저 단면의 치수를 결정하여 column과 row의 수를 결정한 다음 브레이딩이 진행된다. 이때 한칸씩 움직이는 경우를 1×1 pattern 이라고 하며 목적에 맞게 2×1, 3×1 등의 pattern도 가능하다. Multi-step 브레이딩은 2, 4-step과 유사한 형태이나 제작하고자 하는 구조물의 모양에 따라 step을 확장해야만 하는 경우에 사용되는 방법이다.

브레이딩은 그 적용 분야가 매우 넓은 특징이 있는데, 원통 모양의 단면을 포함한 여러형태의 구조물 제작에 많이 쓰이며, 두께가 두껍고 폭이 좁은 경우에 주로 적용된다. x, y, z축 3방향에 대하여 각각의 섬유가 10~80도 사이의 각도를 가지도록 섬유의 배향각을 조절할 수 있으며, 길

이 방향으로 강도를 높일 필요가 있는 경우, axial yarn을 보강하여 주기도 한다[3,6].

브레이드 구조물의 섬유 파괴분율은 약 70% 까지 가능하며, 원통형 구조물의 경우 완전한 일체형 구조물로 만드는 것이 가능하며, 특히 보통의 복합재료 원통형 구조물은 연결을 위한 joining 부분이 취약하게 되나, 브레이드 구조물의 경우 joining part를 미리 만들어 놓을 수 있는 장점이 있다. 브레이드 구조물을 응용한 탄소/탄소 복합재료의 경우, 로켓 노즐 등의 구조에 효율적으로 쓰이고 있다. 다음 Figure 11은 그 한 예로서 braid를 이용한 rocket nozzle을 보이고 있다.

2.4. Nonwoven and Stitching

고성능 복합재료의 preform에 쓰이는 부직포의 경우 fiber mat, stitch bond, XYZ, adhesive bond 등으로 나눌 수 있다. Fiber mat의 경우는 섬유를 mat의 형태로 entanglement를 주는 것이며, XYZ는 각각의 섬유를 x, y, z의 세 방향으로 배열하는 구조로서 가장 널리 알려진 방법으로는 ON(orthogonal nonwoven)이 있다. 다음 Figure 12에 orthogonal nonwoven의 개략적인 그림을 보이고 있다. 각각의 방향으로 배열된 섬유들이 직교하고 있으며 3-D 제직과는 달리 서로 interlacing 이 없다는 점이 차이가 있다. ON

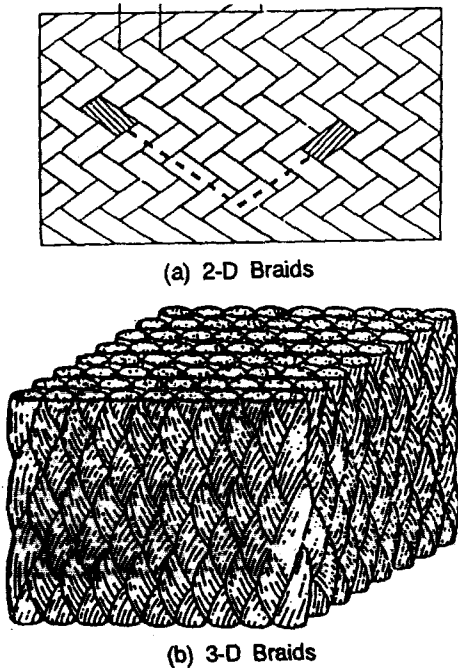


Figure 10. 2-D and 3-D braided structures.



Figure 11. Braided carbon/carbon rocket nozzle.

은 20세기에 들어와서 우주항공 분야에 적용하기 위해 GE와 AVCO에 의해 개발된 구조인데 고정되어 있는 섬유나 rod의 주위로 다른 섬유들을 삽입하여 3차원 구조를 가지도록 만들어 주는 방법으로서, 치환법과 직접법의 두가지 종류가 있다. ON 구조로 만들어진 preform의 가장 큰 장점은 open lattice 구조를 만드는 것이 가능하다는 점이다.

이 밖에도 여러가지 보강구조를 이용하여 textile preform을 제작할 수 있으며, 실제로 탄소/탄소 복합재료의 제작시 많이 사용되고 있는 구조가 4-D, 5-D 직물 보강재이다. 섬유가 배열되어 있는 방향의 개수에 따라 4, 5 등의 문자가 붙게 된다. 4-D의 경우, 평면 방향으로는 triaxial weave와 유사하게 3 방향으로 섬유가 배열되지만, 섬유 서로간의 entanglement가 없으며, 두께 방향으로 섬유를 다시 보강하여 전체적으로 4-D 구조를 만들게 된다. 이러한 구조물은 항공 우주산업용 내열재 등의 구조를 만들 때 주로 사용된다. 최근에는 11-D 구조까지 만들어 지고 있는 실정이며 이러한 다방향 보강 구조물은 주로 탄소/탄소 복합재료의 preform을 만드는 데 많이 쓰이고 있다. Figure 13은 이러한 구조를 이용하여 만든 고온용 탄소/탄소 fastner를 보이고 있다.

또 다른 부직포 preform을 만드는 방법 중의 하나는 stitching을 이용하는 것이다. 스티칭을 이용하는 방법은 두께 방향의 보강에 의한 복합재료의 제조 방법 중 가장 쉽고 경제적으로 수행

이 가능한 제조 방법이라 할 수 있다. 스티칭을 이용한 3차원 섬유강화 복합재료는 생산성이 높고 보강 섬유의 배열이 우수한 장점을 지니고 있으며 적층 복합재료와 비교할 때 충격강도가 우수하고 층간 파괴인성이 월등하여 고기능성 복합재료로 많이 사용된다. 스티칭에 의한 preform 제조 방법은 짧은 시간에 다수의 편직 바늘을 사용하여 동시에 loop를 형성시켜 줌으로써 제조 단가가 적고 스티치 타입이나 패턴을 다양하게 변화시켜 줄 수 있는 특징을 지니고 있다. 스티칭 방법으로는 기존의 sewing machine을 사용하여 lock stitch나 chain stitch를 형성시켜 주는 방법과 multi-needle machine을 사용하여 광폭의, 적층 복합재료를 고속으로 스티칭 시켜주는 방법(Figure 14) 등이 개발되어 사용되고 있다[7].

스티칭은 구조재의 종류에 따라 net-shape의 preform을 제작하는데 유용하게 사용된다. 다음 Figure 15는 T-flange의 제작을 위한 스티칭 개념을 보여주는 것으로서 single-needle sewing machine을 사용하여 적층 부위에 적당한 밀도의 간격을 갖도록 스티칭 하여 주는 것을 보여주고 있다.

구조재의 목적에 따라 스티칭 밀도를 달리하여 줌으로써 내충격성, 구조 보지성, 손상 보위성 등의 향상을 꾀할 수 있다. 외부 하중에 의한 충격이 가해졌을 때 스티칭에 의한 3축 방향의 보강 섬유는 하중을 구조물 전체에 고르게 분산시키는 역할을 함으로써 적층판의 층간 분리가

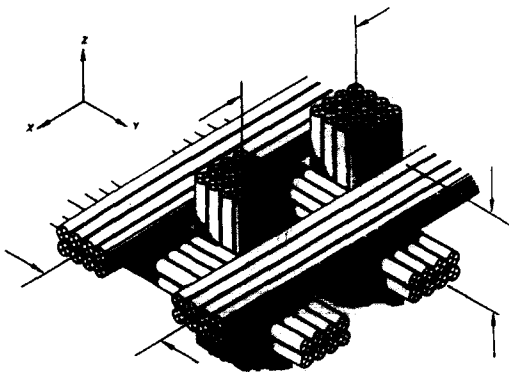


Figure 12. Orthogonal nonwoven 3-D fabrics.



Figure 13. High temperature carbon/carbon fasteners.

억제되고 손상 영역이 현저히 감소함을 보이게 된다.

위에서 설명한 두가지 방법 이외의 3차원적인 구조를 갖는 부직포 preform을 생산하는 방법 중 가장 제작이 용이하고 경제성이 있는 방법이 needle punching을 이용한 방법이다. Needle punching을 이용한 3축 방향 보강 복합재료는 층간 분리에 의한 파괴를 막아주어 우수한 구조 보지성을 보여 주며 제작이 용이하고 다른 3차원 구조물에 비해 크기에 제한이 거의 없다는 장점을 지니고 있어서 군사, 우주 항공, 산업등 분야에 널리 이용되고 있다. 니들펀칭 부직포는 다음 Figure 16에서와 같이 card web을 두판 사이로 지나게 하면서 측면에 barb가 있는 바늘을 통과시켜 섬유가 3축 방향으로 배향됨과 동시에 entanglement를 가지도록 한 것으로서 이때 제작된 부직포의 물성은 사용된 실의 종류, web 형태, 실의 두께, 실의 길이, 구성사의 배향, 펀칭 밀도 등에 따라 다르게 나타나게 된다.

또한 니들펀칭 부직포의 경우, 모든 방향의 섬유가 랜덤하게 배열되어 있기 때문에 단일 성능

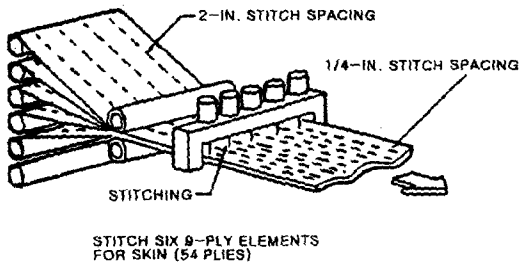


Figure 14. Multi-needle stitching of six 9-ply stitched panel.

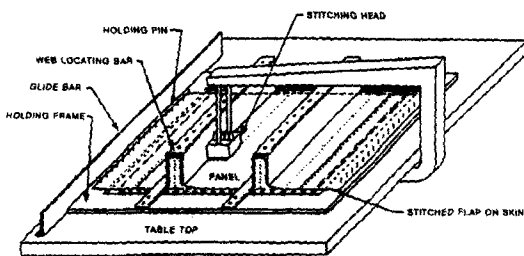


Figure 15. Single-needle sewing machine for the stitching of "T" flange to skin.

이 우수한 특성을 지닌다. 이러한 특성으로 인하여 원자로 등의 내열 차폐재로 많이 이용되기도 한다.

2.5. Properties of Textile Composites

앞에서 살펴본 바와 같이 3차원 textile composite의 가장 큰 특징은 기존의 2차원 섬유강화 복합재료와 비교할 때, 층간 분리의 문제가 현저히 줄어든다는 점이다. 두께 방향으로 보강을 하여줌으로써 3축 방향의 물성이 현저히 향상되는 특징을 보인다. Table 2는 ON/폐놀릭 복합재료의 물성을 적층 복합재료와 비교한 결과를 보이고 있다. ON 복합재료의 경우, 평면 방향의 물성은 차이를 논할 수 없었지만 두께 방향의 물성이 현저히 향상되는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 다른 구조의 textile composite에서도 마찬가지로 나타난다.

두께 방향으로의 섬유보강 정도가 커짐에 따라 평면 방향으로의 섬유부피분율은 줄어드는 경향을 보이게 된다. 평면 방향과 두께 방향 각각의 섬유 부피분율은 보강구조 제조 방법에 따라 다르게 된다. 또한 섬유의 bundle size와 construction에 따라 부피 분율이 달라지게 된다. 예를 들어 ON의 경우, weft-warp plane으로 다양한 배향을 가지도록 섬유를 배열하는 것이 가능하다. 두께 방향으로 거의 수직하게 stitching yarn이 보강되어 있는 multiaxial warp knit

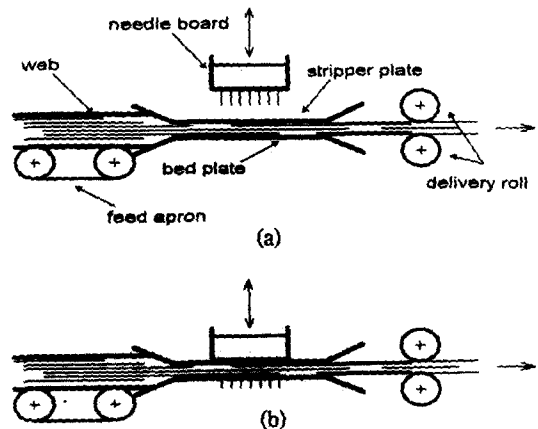


Figure 16. Principles of needle punching.

경우에는 bias yarn의 배향을 아주 다양하게 변화시킬 수 있다. 3차원 브레이딩의 경우에는 이러한 섬유 배향의 조절이 더욱 용이하며 3개의 축 방향으로 모두 10~80도 범위내에서 각도의 조절이 가능하다.

ON 구조의 최대 섬유부피분율은 60% 정도 까지이며, 3차원 브레이딩의 경우 70%까지, 제직물이나 multiaxial warp knit의 경우 그 중간값을 가지게 된다.

Preform의 구조보지성은 섬유의 interlacing에 의해 영향을 받게 된다. 모든 조건이 동일하다면, 3-D woven이나 3-D braid가 ON이나 MWK구조에 비하여 구조보지성이 더 크다. Table 3에 3-D 브레이드 복합재료의 충격 성능을 보인다. 일방향 복합재료에 비하여 섬유 부피분율은 반이면서도 충격 성능 거의 모든 면에서 월등함을 알 수 있다.

3-D woven이나 MWK의 경우 60인치가 넘는 광폭 preform의 제조가 가능하지만, machine gauge에 따라 두께가 제한된다. ON이나 3-D braid를 이용하는 경우, 좀 더 폭은 좁지만 두께가 두꺼운 구조물의 생산이 가능해진다. ON이나 3-D woven이 두께 방향의 보강을 하는데 가장 직접적인 방법이며, 또한 보강 정도도 다른 방법에 비하여 훨씬 높은 수치를 나타내지만 3차원 복합재료에 있어서 두께 방향의 보강은 전체 섬유 부피분율의 10%면 충분한 값을 보인다. Conformability나 net-shape를 만드는 측면에서 생각해 보면, 3-D braid의 경우가 가장 적당한 preform 제작 방법이 될 수 있다. 3-D knit 구조 또한 conformability가 매우 높으며 특히 몰딩공정에 적용하기 적합하다.

3-D woven의 경우, 60~70% 정도의 섬유 부

피분율을 가지며, 일체형 구조를 가지도록 만들 수 있다. 또한 전체적으로 net-shape을 만드는 것이 가능하다. 항공 우주용 재료를 만드는 데 쓰이며, damage tolerance가 좋기 때문에 내충격용 재료로도 많이 쓰이고 있다. Weft knit는 신장도가 크고 conformability가 좋기 때문에 주로 molded composite의 preform을 만드는 데 쓰이며, 위사나 경사 방향으로 섬유를 삽입하여 강도를 증가시킬 수도 있다. 앞에서 보인 예와 같이 weft knit 단일 구조로 쓰이는 경우는 거의 없으며, 직물이나 다른 보강재와 함께 보강하여 주는 경우가 대부분이다. Warp knit의 경우 주로 MWK가 널리 쓰이며, 폭이 넓은 구조의 생산이 용이하고 경제성이 있기 때문에 주로 소형 선박이나 기차 객실, 버스 몸체 등의 대형 구조물에 쓰이고 있다. 또한 급수탑이나 고속도로의 안전 방호벽 등으로도 적용되고 있다.

Orthogonal nonwoven은 열린 격자 구조를 만드는 것이 용이하며, 또한 이런 open lattice structure일 경우 수지를 함침시키는 것이 용이하기 때문에 함침, 탄화 공정을 반복해야 하는 탄소/탄소 복합재료의 제조에 널리 쓰이고 있다. 보강 섬유의 방향에 따라 여러 방향으로 보강효과를 가지도록 만드는 것이 가능하며, 항공우주용 복합재료로 쓰이고 있다. 고온에서 사용되는 gear나 원자로 등의 차폐재로도 쓰이고 있다.

부직포 복합재료나 스티칭 복합재료는 제작이 용이하며 층간 분리에 의한 파괴를 막아주어 우수한 구조 보지성을 보여주고, 다른 구조에 비해 크기에 제한이 거의 없다는 장점으로 인하여 군사, 항공, 산업 등의 분야에 널리 사용되고 있다.

Table 2. Impact properties of FP alumina/Al composite

	3-D braid	UD laminate
Fiber vol. fraction	0.17	0.35
Total absorbed energy (ft-lbs)	196	93.5
Crack initiation energy	48.9	10.5
Propagation energy	145.5	83
Maximum load (1,000 lbs)	5.6	2.6

Table 3. Summary of properties of ON/phenolic composite

	In-plane	Through-the-thickness
Laminated carbon phenolic		
Tensile strength (MPa)	130	21
Tensile modulus (GPa)	13.2	11.7
Failure strain (%)	1.38	0.12
3-D ON/phenolic		
Tensile strength (MPa)	104	163
Tensile modulus (GPa)	9.9	12.3
Failure strain (%)	1.78	2.02

특히 부직포 복합재료는 충격 전후의 압축 강도와 파괴인성이 높으며, 일반 적층 복합재료에 비하여 내마모성, 굽힘 성질 등에서 우수한 물성을 지니고 있다.

3. 결 론

현대에 들어와서 급속한 산업의 고도화로 인하여 기존의 재료로는 도달할 수 없는 물성을 가지는 재료를 요구하는 경우가 많아졌다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 개발된 것이 textile composite이다. Textile composite는 특히 3차원 보강 구조물을 제작하므로 기존의 2차원적인 복합재료의 최대 단점 중의 하나인 층간 분리 문제를 해결하였으며, 적층 복합재료보다 구조 보지성, 손상 보위성 등이 뛰어나며, 고인성, 고강력 등의 물성을 지닌다. Textile composite은 여러 가지 preform 제작 방법이 있으며, 최종 용도와 크기, 생산성, 구조 등에 따라 그 제작 방법을 선택할 수 있으며, 각각의 구조에 따른 특징을 가

진다. 이러한 고성능 섬유복합재료 분야의 기술은 근래에 들어 더욱 발전되고 있으며, 그 적용 분야 또한 더욱 넓혀갈 것으로 생각된다.

참고문헌

1. F. Scardino, "Composite Material Series" (R. B. Pipes Ed.), Elsevier, 1989.
2. Y. M. Tarnopolskii, I. G. Zhigun, and V. A. Polyakov, "Spatially Reinforced Composites", Technomic Publication, Pennsylvania, 1992.
3. T. W. Chou, "Microstructural Design of Fiber Composites", pp.285-373, Cambridge University Press, NY, 1992.
4. H. Dexter and G. H. Hasko, *Composite Sci. and Tech.*, **56**, 367(1996).
5. S. Ramakrishna, *Composite Sci. and Tech.*, **57**, 1(1997).
6. A. R. Bunsell, "Composite Material Series" (R. D. Pipes Ed.), Vol. 2, pp.1-17, Elsevier, 1989.
7. T. W. Chou, "Microstructural Design of Fiber Composites", pp.374-442, Cambridge University Press, NY, 1992.