

고성능 다축 지오킴포지트

백성기, 변성원¹, 김민선¹, 유응렬², 이준석³, 조성민⁴

동일산자 주식회사, ¹한국생산기술연구원 섬유소재본부, ²서울대학교 재료공학부, ³영남대학교 섬유패션학부, ⁴한국도로공사

1. 서 론

geosynthetics는 다양한 섬유 형상의 결합 및 압출성형, 피복 등에 의해 제조되며 크게 직포 및 부직포 지오텍스타일, 지옴브레인, 지오그리드, 지오네트, 지오웹, 지오매트, 지오셀, 지오파이프, 지오킴포지트, 콘크리트 강화용 섬유복합재료 등으로 구분된다. 이중 지오킴포지트는 두 종류 이상의 geosynthetics를 결합시켜 기능을 복합적으로 향상시킨 것으로서, 사용되는 용도에 따라 지오텍스타일 보강 복합재료와 지옴브레인 보강 복합재료 및 플라스틱 드레인 보드 등의 다양한 구조로 제조된다[1].

지오텍스타일 보강 복합재료의 경우 주로 중량이 큰 부직포와 매트 형태의 직포를 사용하여 접착제를 사용하거나 열융착법으로 제조되며, 이때 형태는 Figure 1에서와 같이 부직포/그리드, 부직포/네트, 부직포/멤브레인 등의 형태가 가능하다.

지난 20여 년간 Figure 2에서와 같이 전통적인 직물 구조 외에도 부직포 및 편물을 포함하는 다양한 구조의 섬유들이 지오텍스타일로 사용되어왔으며, 그중 3차원 구조를 갖는 섬유의 경우 첨단복합재료 용도와 많은 산업분야에서의 적용을 위한 개발이 가장 활발히 진행되어왔다[2].

geosynthetics로서 다양한 구조의 섬유들의 적용이 가능하지만 용도에 적합한 구조를 선택하기 위해서는 먼저 섬유 구조와 토양 및 지반 환경과의 관계를 규명하는 것이 선행되어야 한다[3]. geosynthetics로의 적용을 위

한 섬유의 구조 및 성능에 미치는 인자들을 정리해보면 다음과 같다.

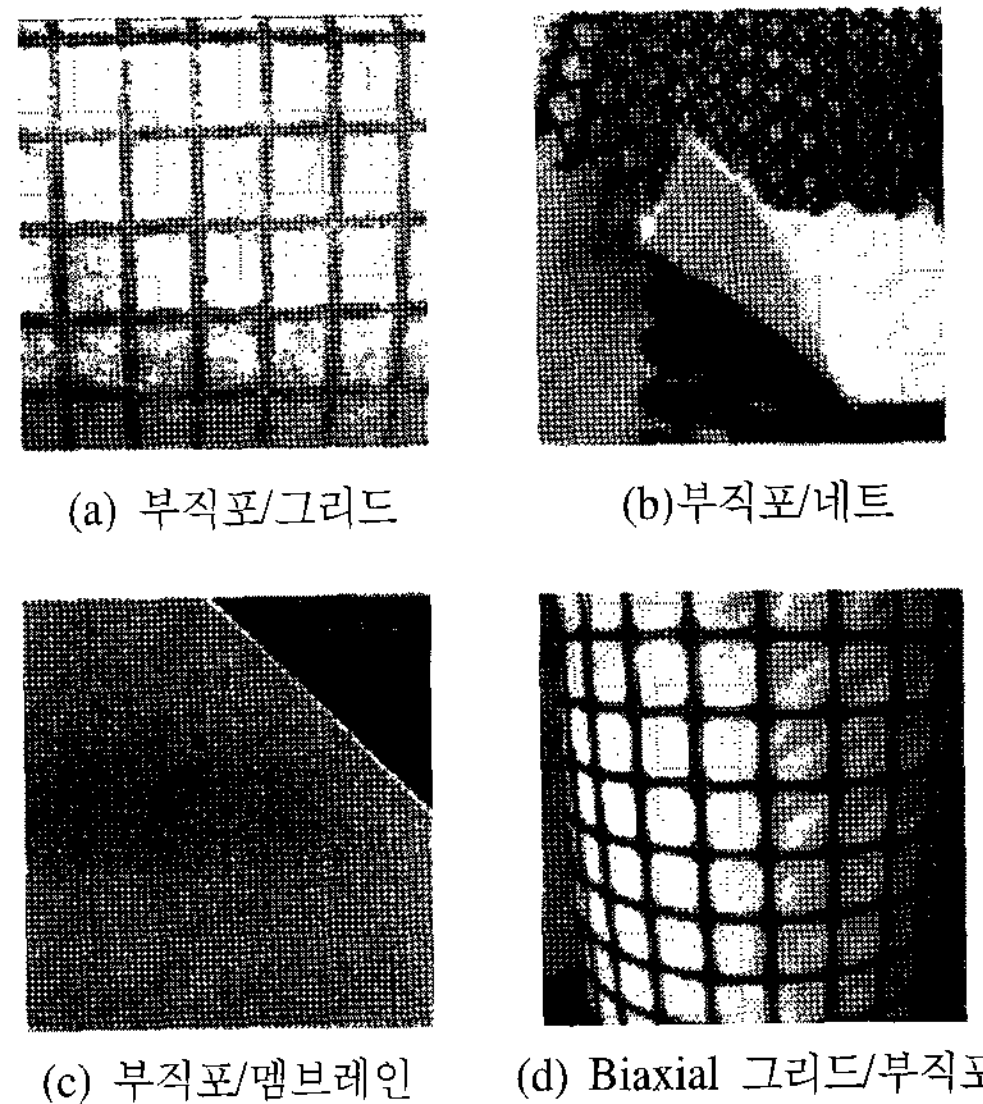


Figure 1. 지오킴포지트의 종류.

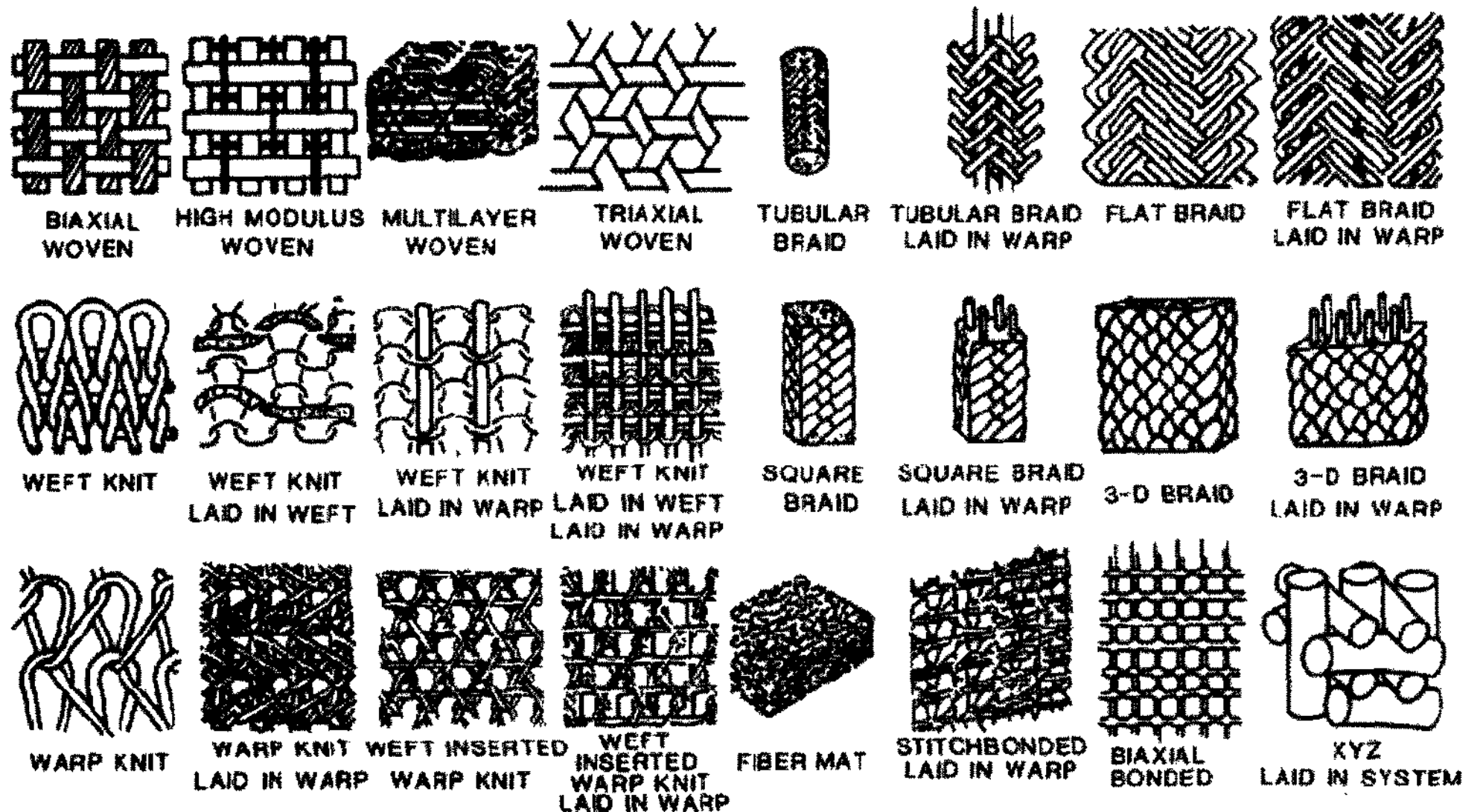


Figure 2. 지오텍스타일로 사용되는 섬유 구조.

· 구조적 인자

- 1) 공극률(porosity)
- 2) 표면 형태(surface texture)
- 3) 용량(voluminosity)
- 4) 두께(thickness)

· 성능 인자

- 1) 투과성능(permeability)
- 2) 압축성능(compressibility)
- 3) 신장성(extensibility)
- 4) 인성(toughness)

이러한 섬유 조직 구조에 따른 구조적 인자 및 성능인자 측면에서의 일반적인 위치를 Figure 3과 Figure 4에 나타내었다.

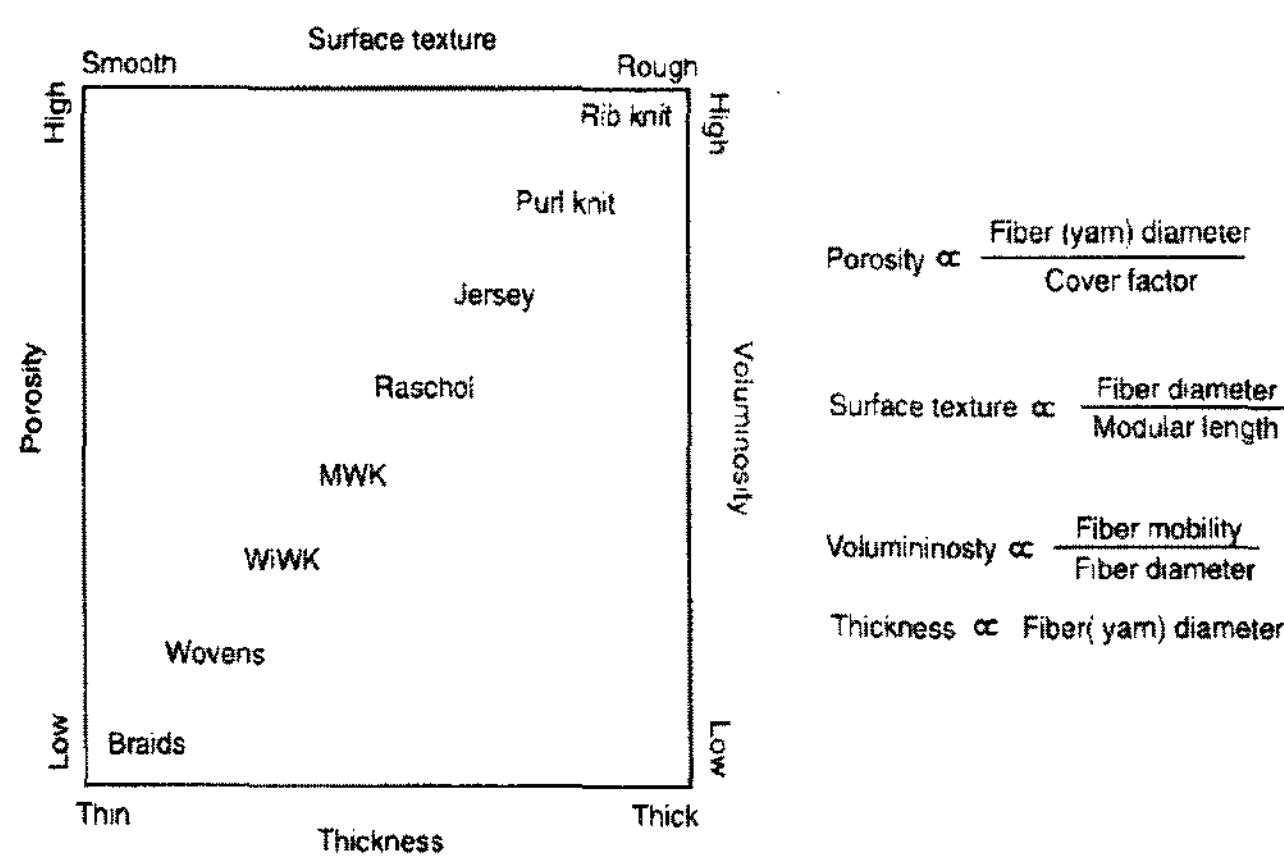


Figure 3. 섬유 조직 구조에 따른 구조적 인자.

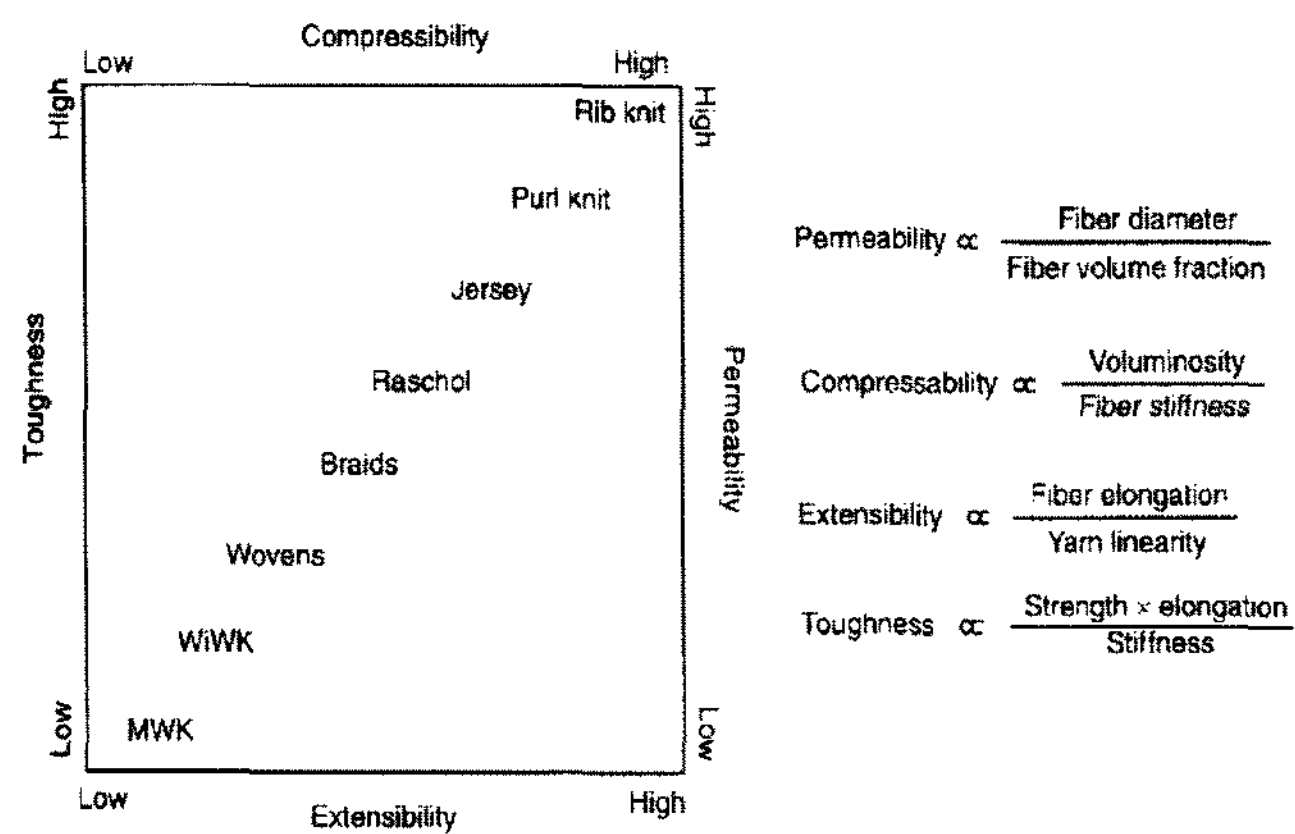


Figure 4. 섬유 조직 구조에 따른 성능 인자.

두께 방향으로 높은 구조 일체를 주는 다축 경편성물(MWK, multiaxial warp knit)은 0°, 90° 및 ±θ의 각도를 가지는 섬유들이 두께 방향의 섬유로 일체화된 구조를 갖는다. 섬유의 배열 각도 순서, 부가되는 부직포와 같은 재료의 종류, 섬유 종류 등에 따라 매우 다양한 구조를 얻을 수 있다. 이와 같은 다축 및 여러 가지의 구성 요소에 의한 특징 외에도 다축 경편성물은 3 m 폭으로 분당 1 m 이상의 제조가 가능한 높은 생산성의 장점도 가지고 있으며, 기본 단위층의 두께가 직포의 최소 2배 이상이기 때문에 대형 구조물 적층시 제조 시간을 절약할 수 있고 절단 시 절단 부위에서 섬유의 이탈이 발생하지 않기 때문에 작업이 쉽다는 장점이 있어 항공, 선박과 같은 대형 구조물 제조에 널리 사용되어 왔다[4].

또한, 다축 경편성물은 구성 섬유의 굴곡이 없는 구조로 인한 높은 인장 강도와 바이어스 방향의 보강 및 스티칭사에 의한 구조 일체화가 가능한 점 등의 우수한 기계적 성능뿐만 아니라 센서와의 결합이 용이하여 복합기능의 지오펜성물로서 새로운 설계도 가능한 섬유이다. 따라서 본 고에서는 복합기능 및 고성능의 다축 지오펜성물 개발을 위하여 필수적인 소재인 다축 경편성물의 제조 공정 및 특성에 대하여 소개하고자 한다.

2. 다축 경편성물의 제조방법

다축 경편성물 제조방법에 앞서 현재 사용되고 있는 섬유 집합체를 분류하면 Figure 5와 같다. 섬유 집합체는 단섬유 혹은 장섬유를 배열에 따라 일차원의 실, 이차원의 부직포, 직물, 그리고 평면뿐만 아니라 두께 방향의 섬유 배열을 갖는 삼차원 집합체로 구분할 수 있다. 삼차원 섬유구조물은 다축에서의 힘이 주어졌을 때 힘의 지지가 우수하므로 주로 산업용 제품, 특히 복합재료에 응용되고 있다. 삼차원 섬유구조물의 형태로는 삼차원 브레이드, 삼차원 직물, 다축 경편성물로 크게 나눌 수 있다.

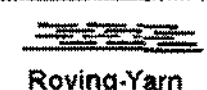





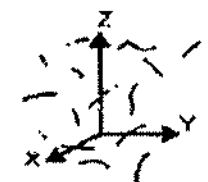



	0 Non-Axial	1 Mono-Axial	2 Biaxial	3 Triaxial	4 Multi-Axial
1D		 Roving-Yarn			
2D	 Chopped Strand Mat	 Prepreg Sheet	 Plane Weave	 Triaxial Weave	 Multi-Axial Weave, Knit
3D	 3-D Braid	 Multi-Ply Weave	 Triaxial 3-D Weave	 Multi-axial 3-D Weave	

Figure 5. 섬유 집합체 구조 분류.

21. 다축 경편성물의 도입 배경

다축 경편성물은 섬유강화복합재료에 사용되는 텍스타일, 즉 직물(woven), 부직포(nonwoven), 브레이드(braid)의 단점을 보완하기 위해 1990년대부터 고성능 복합재료에 활발히 사용되고 있다. 위사와 경사가 파형으로 얽혀 있는 직포의 경우 파형의 원사가 응력을 받을 때 원사가 퍼지면서 이 원사를 외부의 손상으로부터 보호하고 결합시켜주는 수지층과 원사간에 균열이 먼저 발생하며 이로 인하여 복합재료 전체의 강도가 떨어진다. 또한, 일방향 플라이의 경우에는 각각의 층을 적층하는데 많은 시간과 노력이 필요하고 생산 단가가 높아진다. 이에 비해 다축 경편성물은 각 층별로 일정한 방향으로 배열된 다층 섬유집합체를 두께 방향의 스티치사를 이용하여 고정시켜주는 구조이다. 다축 경편물의 구조적 특징을 살펴보기 전에 먼저 많이 사용되고 있는 직물 구조물의 특성, 특히 복합재료 강화재로 사용될 때의 특성에 대해 알아보려고 한다.

직물은 경위사의 교차 및 제직 공정에 의해 크림프(crimp)가 있는 실로 구성된다(Figure 6). 복합재료 내에 있는 직물은 힘을 지탱하는 주요소로 크림프가 있는 경우 효과적으로 힘을 지탱할 수 없다. 또한, 경위사 밀도가 높을수록 크림프의 곡률이 커지므로 평면적인 힘의 지탱에 불리한 요소로 작용한다.

직물은 경위사가 0°와 90° 방향에서 배열되어 있어 외력이 이 두 방향에서 가해지면 그 힘을 효과적으로 지탱하나 다축 방향에서 힘이 가해지면, 섬유가 배열되지 않은 방향에서는 변형이 쉽게 일어난다(Figure 7). 그러므로 직물을 사용하는 복합재료는 직물을 다축에서 적층한 라미네이트의 형태로 사용된다. 그러나 라미네이트 복합재료는 층간의 미보강으로 박리(delamination)현상이 쉽게 일어나므로 그 성능 및 용도가 제한받는다는 단점이 있다. 이러한 직물 강화재의 단점을 보완하는 하기 위해서는 다축에서의 섬유 배열 및 이들 섬유를 효과적으로 구속할 수 있는 방법이 필요하다. 이에 기존의 경편방식을 원용한 다축 경편성물이 개발되어 복합재료용 강화재로 사용되기 시작하였다.

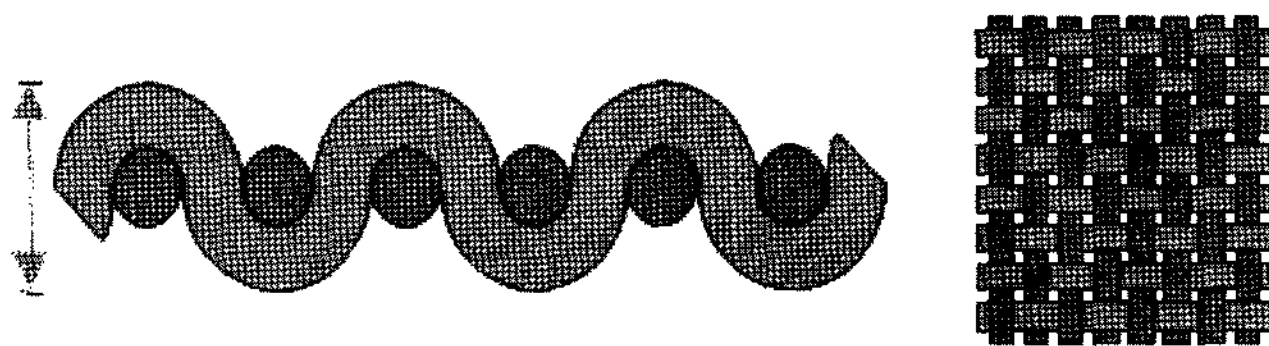


Figure 6. 직포 내의 경위사 교차점에서의 crimp.

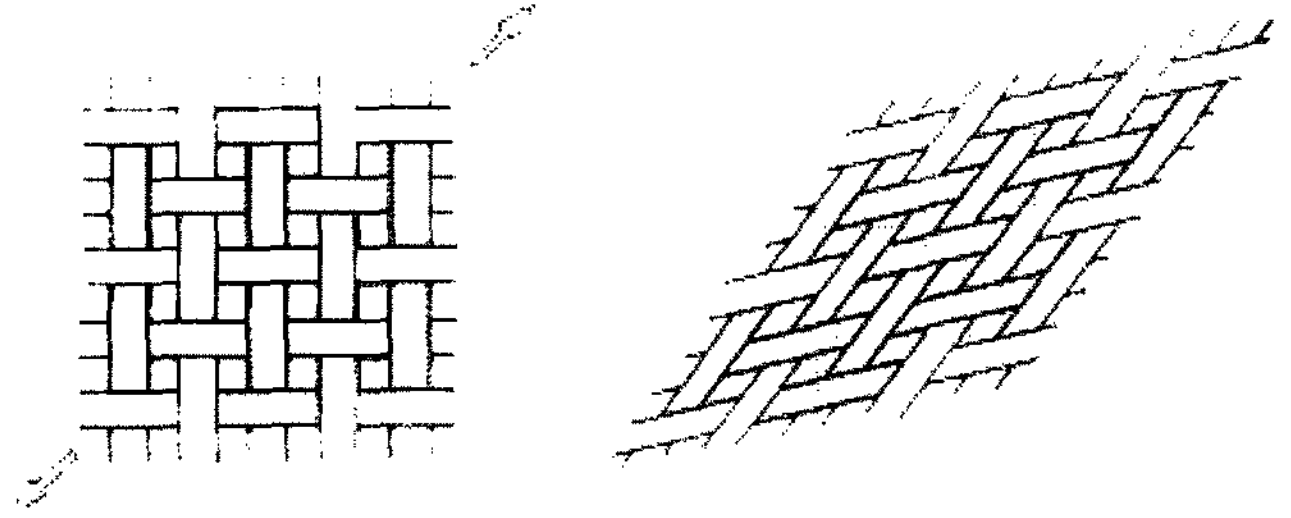


Figure 7. Off-axis load에 대한 직물의 변형.

22. 다축 경편성물의 제조 및 구조

다축 경편성물은 실을 다양한 방향에서 배열하는 단계와 이를 두께방향에서 스티칭하여 구조안정성을 주는 단계로 구성되어 있다. 다축 경편성물 제조방법에 대한 개략도(Figure 8)에서 볼 수 있듯이 다축 경편성물은 멀티레이어의 구조로 제조된다. 원하는 방향에서의 실의 배열이 끝나면 그 위에 또 다른 방향에서의 실이 배열되고 이를 반복하여 원하는 만큼 반복하게 된다. 장섬유 외에도 다축 섬유구조물에 구조안정성을 주기 위해 부직포 형태의 mat가 사용되기도 한다. 최종적으로 섬유 배열이 끝나면 take-up 전에 이들 섬유층을 스티칭하여 다축 섬유구조물의 안정성을 제공한다. 또한, 스티칭은 복합재료 보강재로 사용 시의 두께방향의 보강효과를 가져오기도 한다.

여러 방향에서의 섬유 배열이 필요하므로 다축경편기는 Figure 8에서 볼 수 있듯이 섬유 배열 시의 장력 조절이 가능한 많은 creel의 구비가 필수적이다. Figure 9에 Liba에서 상업화된 다축경편기를 나타내었다. '다축경편'이란 용어는

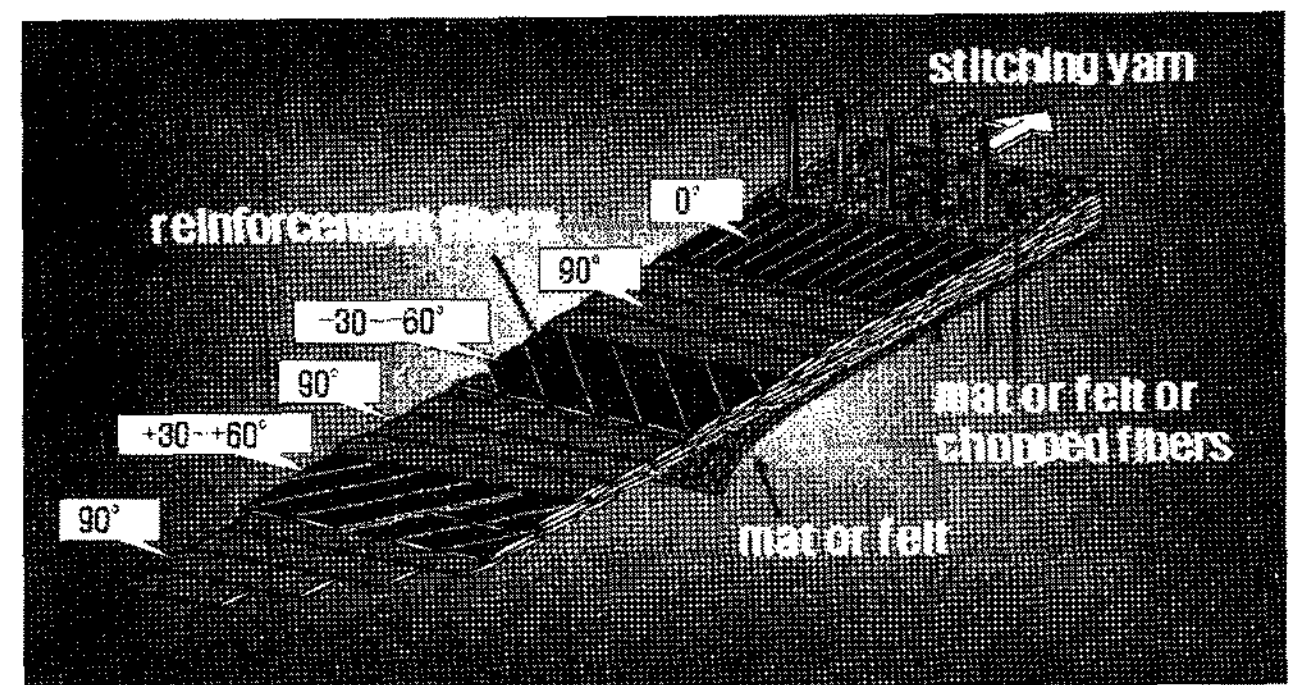


Figure 8. 다축 경편성물 제조공정 개략도.

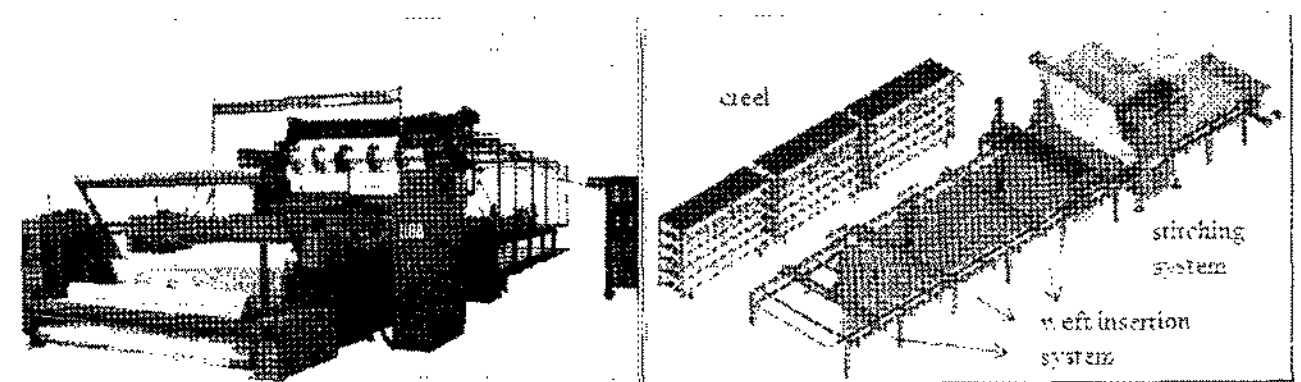


Figure 9. 다축경편기의 외관 및 개략도.

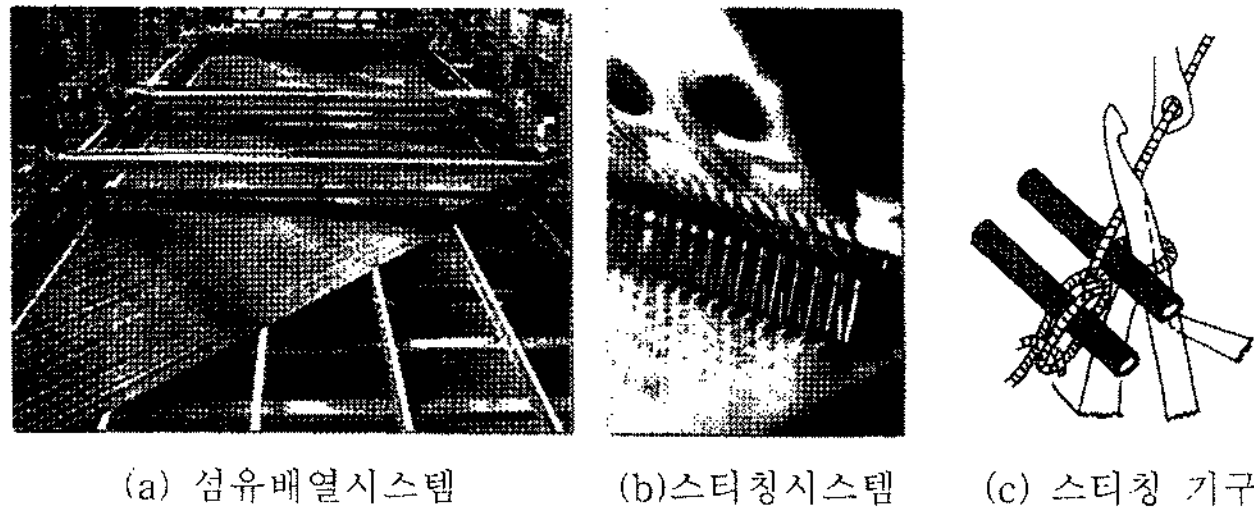
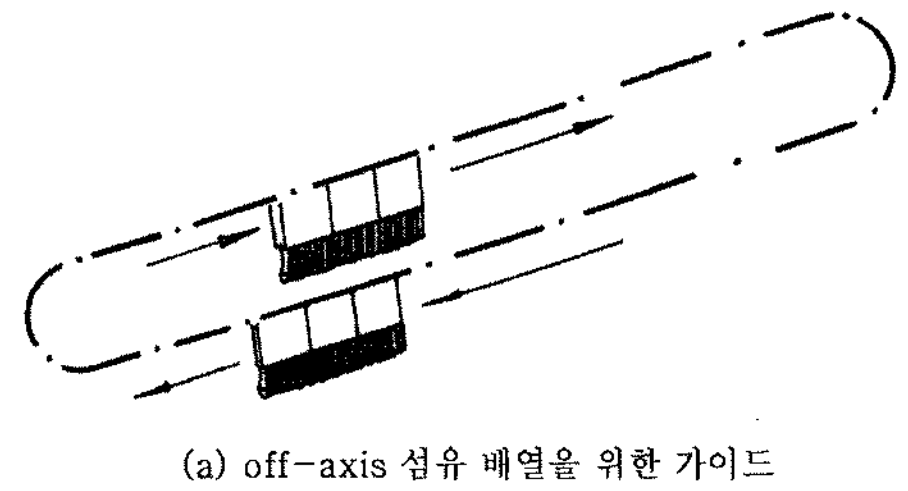


Figure 10. 다축경편기의 구성 요소.

섬유가 멀티레이어 상으로 '다축'으로 배열되어 있고 이렇게 배열된 섬유집합체를 일반 '경편'기에서와 같은 스티칭 방법으로 구속한다는 의미에서 사용되었다.

다축경편기의 핵심요소는 Figure 10에 나타내었듯이 연속적으로 멀티레이어의 섬유를 다축해서 배열할 수 있는 섬유배열 시스템, 이들 섬유집합체를 스티칭할 수 있는 스티칭 시스템(경편시스템), 스티칭 기구 등이 있다. 다른 섬유집합체 공정과 같이 다축경편도 연속공정이므로 섬유의 절단은 생산성을 줄이므로 섬유배열 시 creel로부터의 장력 조절은 중요한 요소가 된다. 다축공정의 생산성은 섬유 배열이외에 스티칭 시스템에 의해 결정되므로 효과적인 스티칭 시스템의 도입이 중요하다. 현재 다축경편기를 상업화한 업체는 Liba와 Karl Mayer 등이 있는데, 이들 업체는 기존 경편기 메이커로서 스티칭 시스템에 대한 노하우를 갖고 있는 업체로서 다축경편기에서의 스티칭 시스템의 중요성을 나타낸다 하겠다.

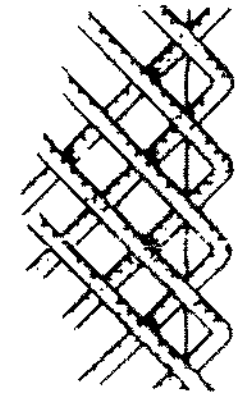
다축경편기는 0°와 90°에서의 섬유 배열뿐만 아니라 임의의 방향에서 섬유가 배열되게 된다. 이는 2가지 실이 걸린 guide bar가 각 편성 사이클에서 한 니들 스페이스를 움직임과 동시에 계속적으로 mislapping 하면서 이루어진다. 같은 방향으로 움직이는 각 guide bar가 편성물 폭에 대하여 대각선 방향으로 실을 위치하게 한다. 다축 경편기 설계에 의해 만들어진 연속적인 체인은 가이드의 반을 오른쪽에서 왼쪽으로 움직이게 하고 다른 반은 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이게 한다(Figure 11(a)). 니들 바의 끝에 도달한 각 가이드바는 다시 돌아 반대편으로 운동을 한다. 대각선 방향으로 실이 움직이는 동안 실이 꼬이는 것을 방지하기 위하여 회전하는 플랫폼에 위치시키며 가이드 체인과 반대 방향으로 천천히 회전한다. 지사(ground yarn) 비임과 경사 비임 뿐만 아니라 위사 메겨진 모두 회전한다. 다축경편기에서 가만히 있는 요소는 대각선 실을 제공하는 콘뿐이다. 대각선 사이 움직이는 경로는 Figure 11(b)에 잘 나타내고 있다. 이 다축 경편물에 사용되는 변부는 대각선 사이 변부에서 돌아감으로써 이루어진다(Figure 11(c)).



(a) off-axis 섬유 배열을 위한 가이드



(b) off-axis 섬유배열 예



(c) 변부

Figure 11. 다축경편기의 off-axis 섬유배열 기구 및 변부.

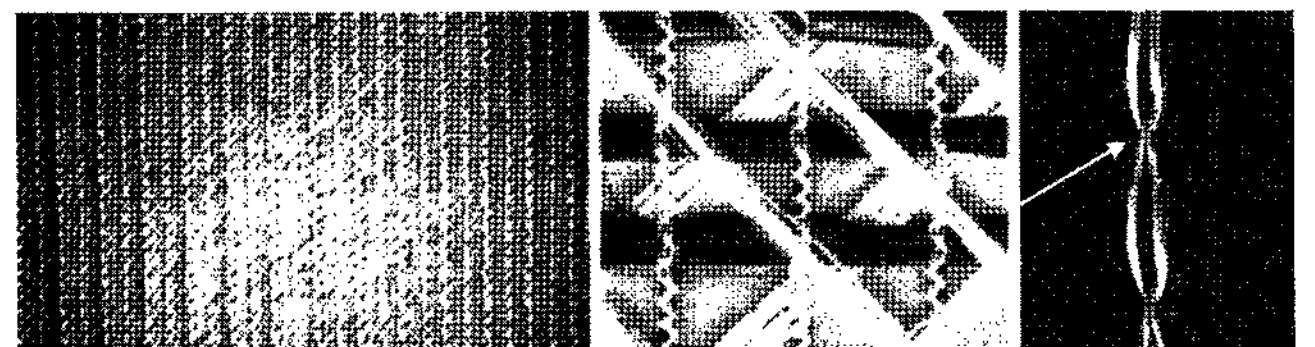
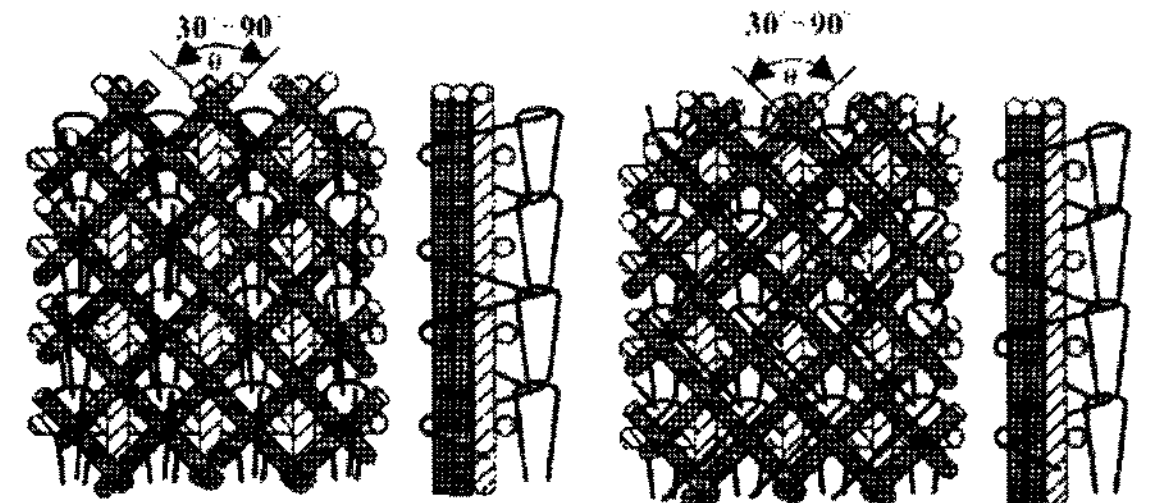


Figure 12. 다축 경편성물의 예.



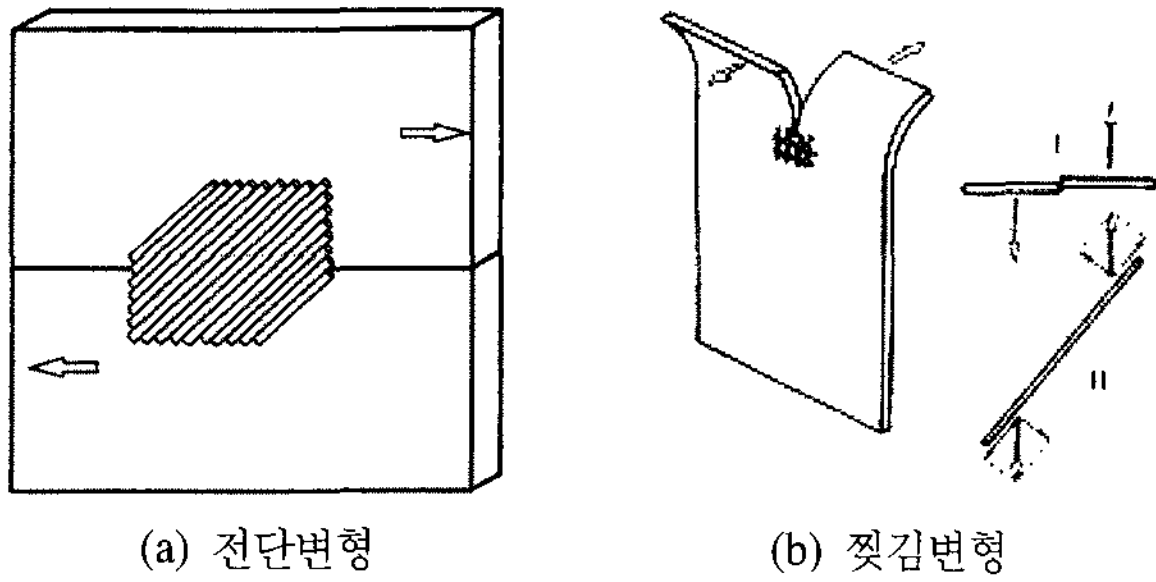
(a) 체인 스티치

(b) 트리콧 스티치

Figure 13. 스티칭에 따른 다축경편 구조 예.

이상에서 설명한 다축경편기구에 의해 수많은 조합의 경편물을 제조할 수 있다. 실의 굵기 및 종류, 실의 배열각도, 실 배열 레이어 수, 실 밀도 및 스티칭 방법 및 밀도 등을 변화시키면 무한대의 다축경편조직을 연속적으로 생산할 수 있다. Figure 12에 다축경편기에 의해 제조된 다축 경편성물의 예를 나타내고 있다. 이 경편물은 체인 스티칭에 의해 제조된 경편물로서 산업용 제품에 응용되고 있는 구조이다.

배열된 섬유집합체에 도입되는 스티칭 방법은 크게 Figure 13에서 볼 수 있듯이 체인 스티치와 트리콧 스티치로 나뉘어진다. 체인 스티치가 일방향에서의 스티치인데 비해, 트리콧



(a) 전단변형 (b) 찢김변형

Figure 14. 다층 경편성물의 변형 거동.

은 zig-zag 형태의 스티치로 이 구조로 인해 다층 경편성물의 전단거동이 특히 영향을 받게 된다.

이러한 다층 경편성물의 장점을 Figure 14에 나타내었다. 다층 경편성물이 대각선 방향의 실을 포함하여 강화되었을 때 구조물에 전단응력을 가하게 되면 이 방향 실들이 이 전단응력에 대응하게 된다. 다른 방향의 전단응력은 다른 방향의 대각선 실이 이 응력에 대응하게 한다(Figure 14(a)). Figure 14(b) 직물을 찢을 때 섬유에 작용하는 전단응력을 보이고 있다. (I)의 경우 각 실은 개별적으로 파단이 발생하지만 (II)의 경우에서 변형의 일부분이 실 방향으로 바뀌게 되어 섬유의 높은 인장강도를 발휘하게 된다.

3. 다층 경편성물의 물성 및 응용

다층 경편성물은 위사와 경사가 파형으로 얽혀 있는 직물 구조에 비해 원사의 배열이 곧고 편평하여 일방향 원단에 가장 근접한 형상을 띠고 있으며 물성 또한 근접한 것으로 알려지고 있다[5]. 또한, 제편 시 적층각을 조절할 수 있어 제조공정에서의 적층과정을 생략할 수 있으며 표면층 등에는 매트를 넣어서 제편할 수도 있다. 하지만, 제편기의 성능에 따라 적층가능한 단층의 수가 제한을 받는다. 현재로서는 일곱 겹까지의 원사 제편이 가능한 것으로 알려지고 있으며 매트를 함께 넣어 사용할 때에는 최고 아홉겹까지를 한번에 제편할 수 있다.

보통 일방향 플라이는 각각의 층을 적층하는데 많은 시간과 노력이 필요하고 생산 단가가 높아진다. 이와 같은 단점을 극복하고자 개발된 것이 다층 경편성물로 각 층별도 일정한 방향으로 배열된 다층섬유집합체를 두께 방향의 스티치사를 이용하여 고정시켜주는 구조이다. 층별로 배열된 섬유들을 니트로 묶어 줌으로써 직물형태로 만들어 주면 배열이 쉽게 변형되지 않으므로 작업이 빨라지고 더욱 균일한 물성의 제품을 제조할 수 있게 된다. 이와 같은 다층 경편성물은 고강도, 고탄성률을 지내며 내충격성에 뛰어난 장점을 가지고 있다[6].



Figure 15. Construction profiles.



Figure 16. A moulded shape of multi-axial fabric.

두께 방향으로 스티칭된 복합재료의 다양한 형태의 적층방법과 스티칭 섬유의 밀도 등은 복합재료의 물성에 영향을 주는 중요한 요소가 된다. 이에 따라 스티칭의 효과에 의한 물성의 영향 분석에 관련된 연구들이 보고된 바 있다. A. P. Mouritx et al.은 섬유강화 복합재료의 스티칭에 의한 면내 물성의 영향에 대하여 연구하였고, S. V. Lomov et al.은 스티칭된 프리폼의 기하학적 형상에 관한 연구를 하였으며, Y. J. Wang은 스티칭된 다층 경편 섬유 복합재료의 기계적 물성에 관한 연구를 진행하였다. 또한, S. S. Suh et al.은 직물형 복합재료에 적용한 스티칭의 영향에 대한 연구를 하였다[7-10]. 이 밖에도 복합재의 구성물질의 물성을 이용하여 단위구조체적을 설정한 된 물성예측 모델에 적용하여 3차원 보강을 위해 스티칭이 복합재료의 물성에 미친 영향에 관한 연구도 진행되었다[11].

고탄성사로 이루어진 다층 경편물은 산업용 섬유제품을 생산하는 사람에게 매우 큰 관심을 끌고 있다. 이 다층 경편물은 복합재료 강화재로도 적합하고 토목 산업뿐만 아니라 항공, 해양, 자동차, 스포츠장비산업의 시장을 예측할 수 있다. 군사용 용도에 대부분은 그 자료가 제한적이지만 개인용과 방탄장갑차와 같은 구조물에서 무수히 많은 방탄 실험을 수행하였다[12].

다층 경편성물이 사용되는 다른 예로서 경량 구조물의 예를 Figure 15에 나타내었다.

또한, net shape의 다층 경편물이 사용되고 있다(Figure 16). 다층 방향으로의 섬유 배열은 돔 구조물에서 이상적인 구조 강화를 해 줄 수 있다.

4. 결 론

본 고를 통하여 고성능 지오펜지트로의 적용을 위한 다



축 경편성물의 특성과 제조 공정에 대하여 살펴보았다. 상기 기술한 바와 같이 지오킴포지트로서 적용 가능한 다양한 구조의 섬유들이 있지만, 다축 경편성 구조는 0°, 90° 및 ±θ 각도 방향의 섬유로 보강되고, 섬유에 손상이 없이 스티칭사에 의해 두께 방향으로 구조 일체화되어 우수한 기계적 특성을 발현할 수 있으므로 고성능 지오킴포지트의 제조를 가능하게 할 수 있다. 또한, 센서와의 혼입이 용이한 구조이므로 지오킴포지트의 장기 성능 모니터링과 같은 복합기능을 부여할 수 있다. 이외에도 고성능 지오킴포지트의 제조를 위해서 3-D 브레이딩 직물 적용, 나노웹과의 복합화, PVA 부직포 적용 등에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

자연재난으로부터 지반구조물의 보호, 안정화시키기 위한 geosynthetics에 대한 요구가 증대되고 있는 상황에서 향후 지오킴포지트 제품은 고성능 및 다기능에 대한 요구가 더욱 증대될 전망이다. 따라서 다축 경편성물을 적용한 고성능 다축 지오킴포지트 제조를 위한 개발과 연구가 심도있게 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 전한용 외 2인, *고분자과학과 기술*, 15(1), pp.20-30, (2004).
2. Chou T.W. and Ko, F. K., *Textile Structural Composites*, Elsevier, 1989.
3. Frank, K., *From Textile to Geotextile*, Seminar in Honor of Professor Rober Koerner, 2004.
4. 변준형 외 2인, *섬유기술과 산업*, 10(4), pp.364-376, 2006.
5. 최형연 외 4인, *대학기계학회 춘계학술대회논문집*, pp.565-570, 1995.
6. 김태균 외 2인, *한국섬유공학회지*, 37(6), pp.346-351, (2000).
7. A. P. Mouritx, K. H. Leong, I. Herszberg, A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fiber-reinforced polymer composites, *Composites : Part A*, 28A, pp.979-991, 1997.
8. S. V. Lomov, E. B. Belov, T. Bishoff, S. B. Ghosh, T. Truong Chi, I. Verpoest, Carbon composites based, on multiaxial, multipoly stitched preforms. part I : Geometry of the preform, *Composites Part A*, 33, pp.1171-1183, 2002.
9. H. J. Wang, Mechanical properties of stitched multiaxial fabric reinforced composites from manual layup process, *Applied composite Materials*, 9, pp.81-97, 2002.
10. S. S. Suh, J. H. Park, H. Thomas Hahn, Stitching effect on textile composites, *Proceedings of 2nd Asian-Australians Conference on Composite Materials*, 2, pp.1199-1201, 2000.
11. 김형우 외 3인, *한국복합재료학회 춘계학술발표대회논문집*, pp.125-129, (2005).
12. Warp Knitting Production, Dr. S. Raz, Melliland, pp.447-456.

• 백성기

1991. 서울대학교 섬유고분자공학과 졸업
 1993. 서울대학교 섬유고분자공학과(석사)
 1998. 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)
 1999-현재. 동일산자 주식회사
 (135-280) 서울시 강남구 대치동 944-1
 전화 : 02-565-3878
 e-mail : skback@dong-il.com

• 변성원

1987. 한양대학교 섬유공학과 졸업
 1989. 한양대학교 섬유공학과(석사)
 1995. 한양대학교 섬유공학과(박사)
 1995-현재. 한국생산기술연구원 본부장

• 김민선

1993. 서울대학교 섬유공학과 졸업
 1995. 서울대학교 섬유고분자공학과(석사)
 2000. 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)
 2001-2003. Univ. of Connecticut, Institute of Materials Science (Post-Doc.)
 2003-현재. 한국생산기술연구원 산업용섬유팀 선임연구원

• 유웅렬

1991. 서울대학교 섬유고분자공학과 졸업
 1998. 서울대학교 섬유고분자공학(박사)
 1998-2000. 한국생산기술연구원 섬유기술연구팀
 2001-2004. Michigan State University and The University of Nottingham Research Fellow
 2004-현재. 서울대학교 재료공학부 조교수

• 이준석

1994. 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)
 1995. North Carolina State University 연구원
 2000-현재. 지역협력 연구센터(RRC) 부장
 2002-현재. 섬유기계연구센터 연구본부장
 2003-현재. 섬유·의류 연구정보센터(RICTA) 부소장
 1996. 영남대학교 섬유패션학부 부교수

• 조성민

1992. 서울대학교 토목공학과 졸업
 1994. 서울대학교 토목공학과(석사)
 1998. 서울대학교 토목공학과(박사)
 대한토목학회, 한국지반공학회 회원 및 각 위원회 위원/간사
 ASCE(미국토목학회), ISSMGE(국제지반공학회) 회원
 한국수자원공사, 환경관리공단, 부산도시개발공사 설계자문(심의)위원
 소방방재청 재해복구사전심의위원회 심의위원