

복합재료 보강용 고성능 섬유재료

박 종 래

1. 섬유강화 고분자 복합재료

1.1 복합재료란 ?

복합재료는 중량대비 역학적 성능의 비율이 매우 높은 재료로서 우주항공분야, 자동차분야 및 스포츠·레저분야에서 생체공학분야에 이르기까지 아주 넓은 범위에서 사용되고 있는 재료이다. 또한, 환경문제가 지배적인 패러다임이 될 21세기에는, 복합재료가 화석연료의 사용량을 절감할 수 있는 거의 유일한 대안 재료가 될 것으로 인식되고 있기도 하다.¹

복합재료는 분류기준에 따라 여러 가지로 정의될 수 있지만, 가장 보편적으로는 광학 혹은 전자현미경으로 쉽게 구별될 뿐만 아니라 역학적으로도 뚜렷이 다른 두 가지 이상의 소재를 조합함으로써 단독으로 있을 때보다 월등히 뛰어난 성능을 발휘하도록 설계된 재료라고 정의할 수 있다. 복합재료는 그 성능을 최적화하기 위해서 한 성분소재를 다른 한 성분소재 속으로 적절히 분산시켜 제조하는 것이 일반적인데, 이때 전자를 보강재(분산상)라 하고 후자를 매트릭스(연속상; 고분자의 경우는 수지상이라고도 함)라고 부르고 있다. 금속, 세라믹, 고분자 등 우리가 생각할 수 있는 보편적인 재료들은 전부 매트릭스 및 보강재가 될 수 있으나 보강재의 경우는, 복합재료의 사용용도에 따라, 섬유상(장섬유 및 단섬유 포함), 입자상(구형, 판상, 중공상 등)과 같이 여러 가지의 특별한 형태를 가지게 된다.² 여러 가지 보강재 중에서도 섬유형태의 것은 아주 오래 전부터 사용되어 온 가장 보편적인 재료라 할 수 있으며, 나무, 뼈, 대나무, 인체의 근육 등과 같은 자연 복합체

에서도 섬유형태의 보강재를 쉽게 발견할 수 있다.

1.2 고성능 섬유재료란 ?

섬유재료는 직경에 비해 길이가 긴, 쉽게 말해 가늘고 긴 형태의 소재를 통칭하는 용어이며, 역학적인 관점에서 보면 섬유의 축 방향으로 역학적 성능이 극대화된 소재라고 할 수 있다. 따라서 섬유의 배열상태 혹은 집합상태를 1차원, 2차원, 혹은 다차원으로 적절히 제어함으로써 고차원의 역학적 성능까지도 최적화하는 것이 가능하며, 바로 이점이 섬유강화 복합재료를 우주왕복선에서 인공뼈에 이르기까지 광범위하게 사용할 수 있게 하는 밑바탕이 되고 있다.

섬유강화 고분자 복합재료의 성능은 당연히 분산상인 섬유와 연속상인 고분자 매트릭스의 역학적 성질의 상보적인 작용에 의해 좌우된다. 그러나, 굳이 구분한다면, 매트릭스보다는 보강재인 섬유의 역학적 성질이 복합재료의 성능을 지배적으로 좌우하는 요인이라고 말할 수 있을 것이다. 그러므로 복합재료의 성능을 극대화하기 위해서는 보강재인 섬유의



박종래

1981 서울대학교(학사)
 1983 서울대학교 대학원(석사)
 1987 한국과학기술연구원 연구원
 1990 Leeds Univ.(U.K.)(박사)
 1992 Leeds Univ.(Post Doc.)
 1992~ 성균관대학교 섬유공학과
 1997 조교수 및 부교수
 1997~ 서울대학교 섬유고분자공학과
 현재 조교수

High Performance Fiber Reinforcements for Advanced Composites

서울대학교 섬유고분자공학과(Chong Rae Park, Department of Fiber and Polymer Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

역학적 성질을 극대화하는 것이 우선적으로 요구되는 사항이며, 최근들어 많은 관심의 대상이 되고 있는 소위 '고성능 섬유재료'는 이러한 요구를 충족시키기 위한 노력의 결실이라 할 수 있다.

고성능 섬유재료는 고강도(예를 들어 약 30 GPa 이상)와 고탄성률(약 2 GPa 이상)을 가지는 섬유와 극한조건에서도 견디는 섬유를 모두 포함하는 것이지만³ 복합재료의 관점에서는 전자의 부류에 속하는 섬유가 주된 관심의 대상이다. 고강도, 고탄성률의 고성능 섬유는 그것을 구성하는 원자 혹은 분자의 고차구조를 정밀 제어함으로써 얻어지며, 고분자를 출발물질로 하여 제조할 때는 보통 다음과 같은 세 가지의 접근 방법을 채택하고 있다. 즉, 첫째, 폴리에틸렌과 같이 유연한 사슬구조를 가지는 고분자는 용융방사 혹은 겔방사 후 초연신을 함으로써 곧게 펴진 사슬의 집합체가 섬유축 방향으로 고도로 배향되도록 한다. 이와 같은 방법을 통해 개발된 것이 초고분자량 폴리에틸렌 섬유이다. 둘째, 폴리아크릴로니트릴과 같이 분해온도가 용융온도보다 낮은 고분자는 장력하에서 산화 및 탄화시킴으로써 섬유축 방향으로 잘 배향된 탄소층이 형성되도록 하여 고성능 탄소섬유를 제조한다. 셋째, 네마틱 액정상을 형성할 수 있는 고분자는 액정방사를 통하여 액정상태에서의 고배향 분자 도메인이 그대로 섬유구조 속으로 수용되도록 함으로써 고성능 섬유를 제조하며, 듀폰이 상업화에 성공한 케블라섬유가 이 부류에 속한다.

이상에서 언급한 고성능 복합재료와 고성능 보강 섬유와의 상호 관계적 입장에서 볼 때, 이 글에서는 복합재료 보강용으로 사용되고 있는 여러 가지 섬유재료 중, 위에서 언급한 고분자계 고성능 섬유재료를 위주로 기술하는 것이 매우 적절할 것으로 생각된다. 또한, 오래 전부터 보강재로 널리 사용되어 온 유리섬유를 비롯하여 최근에 선보이기 시작한 몇가지 세라믹계 및 금속계 고성능 섬유재료 중 대표적인 것에 대해서도 간단한 물성과 특성을 아울러 고찰해 보는 것이 비교 목적상 필요하다고 생각되므로 이에 대해서도 간략히 서술하고자 한다.

2. 유기 고분자계 고성능 섬유재료

2.1 고성능 탄소섬유

고성능 탄소섬유는 외력을 직접적으로 받게 되는 구조용 복합재료에 있어 절대적으로 필요한 보강섬

유이며 탄소/탄소 복합체의 경우는 고온 구조용 재료로도 사용된다.

2.1.1 고성능 탄소섬유의 제조

탄소섬유는 흔히 폴리아크릴로니트릴(PAN), 셀룰로오스, 메조페이즈피치(MP) 등을 전구체로 하여 제조되며, 열적 안정화, 탄화, 흑연화 과정을 거쳐 제조된다. 전구체에 따라 약간씩 다르긴 하지만, 열적 안정화는 보통 200~300 °C의 산화성 기체분위기에서 장력을 가한 상태로 소정시간 동안 열처리하는 것으로서, 이 과정에서 전구체는 열적으로 안정한 분자구조를 가지게 되며, 분자들은 섬유축 방향으로 배향하게 된다. 탄화는 안정화단계에서 도입된 고리형태의 분자구조를 육각형의 흑연형 탄소구조로 변환시키는 과정으로서 보통 1000 °C 이하에서 행하는 1차 탄화와 2000 °C 이하에서 행하는 2차 탄화로 구분하여 행한다. 이 과정부터는 별도의 장력을 가하지 않아도 되는 것으로 일반적으로 알려져 있으나 요구되는 성능에 따라 또는 제조회사에 따라 그 내용은 달라질 수가 있다. 2000 °C 이상에서 행하는 흑연화는 탄소섬유의 구조를 더욱더 치밀하게 하고 배향도 및 결정화도를 증진시키는 과정으로서 고탄성률의 탄소섬유 제조시에는 반드시 거쳐야 하는 과정으로 알려져 있다. 현재 상업적으로 의미가 있는 것은 PAN계와 MP계이며, 앞의 것이 높은 강력과 비교적 낮은 탄성률을 나타내는 반면, 뒤의 것은 높은 탄성률과 비교적 낮은 강력을 나타내는 특성상의 차이를 보인다. **그림 1**은 이와 같은 특성차이를 유발하는 PAN계와 MP계 탄소섬유의 제조 공정상의 차이를 개략적으로 나타낸 것이며,⁴ **그림 2**는 탄화시의 온도조건에 따른 MP계 탄소섬유의 내부구조변화에 대한 개념도를⁵ 나타낸 것이다.

2.1.2 고성능 탄소섬유의 구조와 성질

탄소섬유의 성질은 거시적으로는 섬유단면의 형상 및 직경, 미시적으로는 섬유내부의 탄소층이 집합된 구조 및 배향 정도에 따라 크게 좌우된다. 현재 시판중인 고성능 탄소섬유는 약 7~8 μm 정도의 직경을 가지는 원형섬유가 대부분이지만 리본형 및 중공형 탄소섬유도 시도되고 있다. 미시적으로는, 고강도 탄소섬유의 경우, **그림 3(a)**에서 보는 바와 같이 탄소층의 발달 정도가 아주 미약하며 결정크기를 정의하기 힘들 정도의 탄소층 집합구조를 보이고 있으나, 고탄성률 탄소섬유의 경우는, **그림 3(b)**에서와 같이 탄소층이 길고 두껍게 잘 발달해 있을 뿐만 아니라 섬유축 방향으로 아주 잘 배향된 탄소층의 집

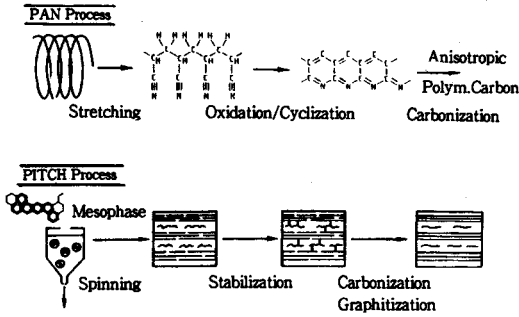


그림 1. The difference in processes between PAN- and MP-based carbon fibers.

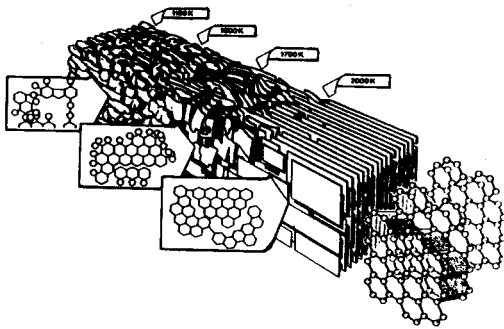


그림 2. Structural model for carbonization between 1100 and 2000 K.

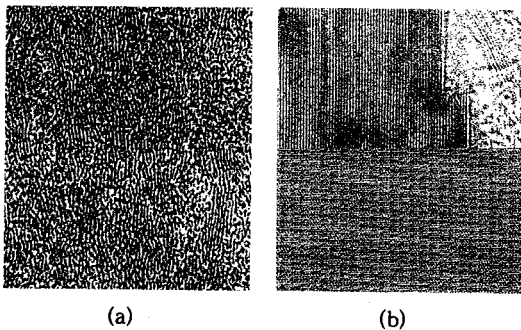


그림 3. TEM high resolution lattice fringe image of (a) high strength and (b) high modulus type carbon fibers.

합상태를 보이고 있다.⁶ 이와 같은 미세구조상의 차이로 인하여 인장 및 압축력에 대한 섬유들의 변형과 파괴기구가 현저하게 달라지게 되며,⁷ 앞서 언급한 제조과정에서의 여러 조건을 조절하여 미세구조를 제어함으로써 탄소섬유의 성능을 최적화할 수 있게 된다. 표 1은 현재 시판되고 있는 여러 가지 탄소섬유의 인장성질을 요약 정리한 것이고,⁸ 그림 4는 섬유내부의 탄소층의 배향과 탄성률과의 상관관계를 나타낸 것인데, 배향도가 증가할수록 탄성률이 급격

히 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다.⁹

한편, 표 2는 지금까지 언급한 고성능 탄소섬유 중에서 고강도급과 고탄성률급의 대표적인 탄소섬유의 성질이 복합재료의 보강재로 사용되었을 때 얼마나 발휘되는가를 나타낸 결과로서, 복합체인 경우 섬유 자체로 있을 때보다 약 50%미만 정도의 성능 발휘 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 복합재료의 성능발현에 있어 보강재인 탄소섬유 자체의 벌크성질도 중요하지만 보강재와 매트릭스의 계면 접착력 또한 매우 중요한 역할을 하고 있다는 것을 암시하고 있다. 따라서, 보강섬유의 표면 구조 및 특성에 대한 보다 상세한 고찰이 요구되지만, 이것은 이 특집의 다른 글을 참고하기 바란다.

2.2 아라미드섬유

아라미드란 두 개의 방향족 고리 사이에 직접 연결된 아미드결합이 85% 이상인 합성고분자를 의미하며 이러한 고분자를 액정방사하여 얻어지는 섬유를 아라미드섬유라 한다.

2.2.1 아라미드섬유의 제조

듀폰이 상업화한 케블라섬유의 경우는 poly(*p*-phenylene terephthalamide) (PPTA)로부터 제조되며, 이때 적어도 다음과 같은 조건을 만족해야만 성공적으로 섬유가 형성된다고 알려져 있다. 즉, 첫째, 고분자의 분자량은 적어도 30,000 이상이어야 하고, 둘째, 방사원액 속의 고분자 농도는 6이상의 고유점도 값을 나타낼 정도가 되어야 한다. 셋째, 용매의 용해력이 매우 높아야 하며(보통 99.8%의 황산을 사용함), 넷째, 방사원액의 온도는 보통 90 °C 이하로 유지되어야 한다. 이와 같은 조건을 만족하는 방사원액은 기적방사법(dry-jet wet spinning)으로 방사되면서 섬유형태를 가지게 되며 이것이 약 5 °C 정도로 유지되는 응고욕을 거치면서 고화되어 최종 섬유가 얻어진다. 이때, 방사구를 빠져나가는 속도와 응고욕을 빠져나가는 속도비에 의해서 연신 정도가 달라지고 이에 따라 섬유의 구조와 성질 또한 달라지게 된다. 고탄성률의 아라미드섬유를 얻기 위해서는 방사된 섬유에 장력을 가한 상태로 450~550 °C의 온도조건에서 0.5~수초 동안 열처리하면 된다.

2.2.2 아라미드섬유의 구조와 성질

케블라타입의 아라미드섬유는 그림 5에서와 같이 PPTA 사슬의 집합체가 원의 반지름 방향으로 배향된 주름잡힌 판상구조를 가진다고 알려져 있다.¹⁰ 주름의 폭은 약 250 nm이고 주름과 주름의 접경에는 약 30 nm 정도 폭의 띠가 주기적으로 형성되어

표 1. Tensile Properties of Various Carbon Fibers (Manufacturer's Data)

Manufacturer	Fibre	E/GPa	TS/GPa	e(%)
(PAN-based High Modulus, low strain to failure)				
Celanese	Celion GY-70	517	1.85	0.4
Hercules	HM-S Magnanite	345	2.21	0.6
Hysol Grafil	Grafil HM	370	2.75	0.7
Toray	M50	500	2.50	0.5
Toray	M55J	540	3.63	0.7
(PAN-based Intermediate Modulus, Intermediate strain to failure)				
Celanese	Celion 1000	234	3.24	1.4
Hercules	IM-6	276	4.40	1.4
Hysol Grafil	Apollo IM 43-600	300	4.00	1.3
Toho Beslon	Sta-grade Besfight	240	3.73	1.6
Union Carbide	Thornel 300	230	3.10	1.3
Toray	M 30	294	3.92	1.3
(PAN-based HS, high strain to failure)				
Celanese	Celion ST	235	4.34	1.8
Hercules	AS-6	241	4.14	1.7
Hysol Grafil	Appollo HS 38-750	260	5.00	1.9
Toray	T 800	300	5.70	1.9
Toray	T 1000	294	7.06	2.4
(Mesophase-pitch-based)				
Union Carbide	Thornel P-25	140	1.40	1.0
	P-55	380	2.10	0.5
	P-75	500	2.00	0.4
	P-100	690	2.20	0.3
	P-120	820	2.20	0.2
Osaka Gas	Donacarbo F-140	140	1.80	1.3
	F-600	600	3.00	0.5
(Isotropic-pitch-based)				
Kureha	T101F	33	0.80	2.4
Ashland	Carboflex	38	0.52	1.4

E-Young's Modulus, TS-Tensile strength, e-Strain to failure.

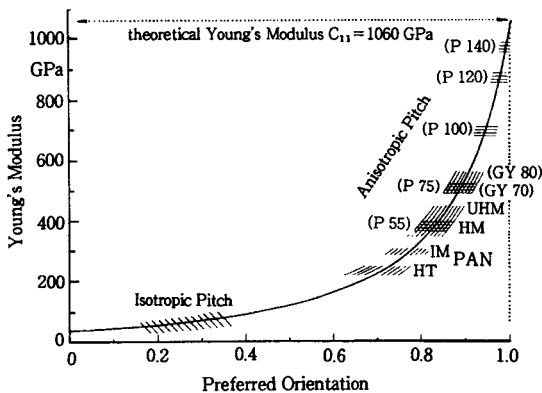


그림 4. Relationship between preferred orientation of carbon layers and Young's modulus of carbon fibers.

있으며, 주름과 주름의 각도는 약 170° 정도이다. 이 각도는 특히 탄성률에 지대한 영향을 미치며, 실

제로 고탄성률급의 아라미드섬유인 케블라149는 거의 180°에 가까운 각도를 가진다는 것이 확인된 바 있다.¹¹ 또한, 아라미드섬유는 습식 용고육에서 고화되므로 스킨/코어의 구조를 가지는 것이 일반적이며, 스킨에는 5~10 nm의 폭과 약 25 nm 정도의 길이를 가지는 바늘 모양의 기공이 존재한다.¹² 고강도급 섬유인 케블라981의 경우는 스킨이 전체 섬유체적의 60% 이상을 차지할 정도로 두껍게 발달한 반면, 고탄성률급인 케블라149는 거의 무시해도 좋을 정도의 스킨구조를 가지고 있는 것으로 알려져 있다.

아라미드 섬유는, 탄소섬유와 달리, 인장성능에 대한 압축성능의 비율이 약 10% 정도에 불과할 정도로 매우 낮은 편이다. 즉, 인장강도는 2.6~3.5 GPa 정도이지만 압축강도는 0.25~0.40 GPa 수준이다.

표 2. Comparison of Properties of Fibers and Composites (Comp.), Manufacturer's Data

Property	T300		T100		M40		M50J	
	Fiber	Comp.	Fiber	Comp.	Fiber	Comp.	Fiber	Comp.
Tensile Strength	3.5	1.9	7.1	3.5	2.7	1.3	4.0	2.2
Compressive Strength	4.4	1.7	-	1.7	2.8	1.2	4.0	1.1
Tensile Modulus	230	135	294	160	390	220	490	280
Strain to failure(%)	1.5	1.3	2.4	2.0	0.7	0.6	0.8	0.8

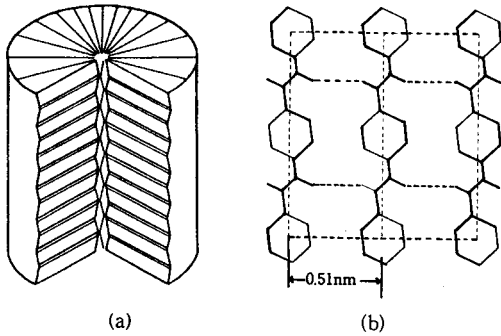


그림 5. Schematic representations of (a) the supramolecular structure of Kevlar49 depicting the radially arranged pleated sheets system and (b) planar array of poly(*p*-phenylene terephthalamide) molecules showing interchain hydrogen bonding within a sheet.

이는 앞서 언급한 바 있는 주름잡힌 판상구조에서, 판과 판사이에는 약한 2차 결합력만이 존재하기 때문에 전단변형이 쉽게 일어난 결과로 해석되고 있다. 그러나, 이러한 인장성능과 압축성능간의 불균형에도 불구하고 아라미드섬유가 복합재료의 보강재 혹은 섬유단독 제품으로 용도가 다양하게 전개될 수 있는 이유는 전통적인 제작기술을 사용하여 2차원 혹은 3차원의 제품형태를 만들 수 있기 때문이며, 또한 이 과정에서 압축력에 의한 항복이 일어나긴 하지만 최종 파괴에는 도달하지 않는 장점을 갖추고 있기 때문이다.

현재 세계 시장에 선보이고 있는 아라미드섬유는 듀폰(미국)의 케블라, 약조(네덜란드)의 트와론, 데이진(일본)의 테크노라이며, 성분 고분자는 케블라와 트와론이 PPTA계인데 반해 테크노라는 공중합체의 아라미드이다. 그러나, 인장성질은 세가지 모두 약 3GPa 수준으로 거의 비슷한 성능을 보이고 있다.¹³

2.3 초고분자량 폴리에틸렌섬유¹⁴

폴리에틸렌과 같은 열가소성 범용고분자는 방사과정에서 분자사슬이 접히는 경향이 있으므로 이러한 고분자를 사용해 고성능 섬유를 얻으려면 접혀진 분

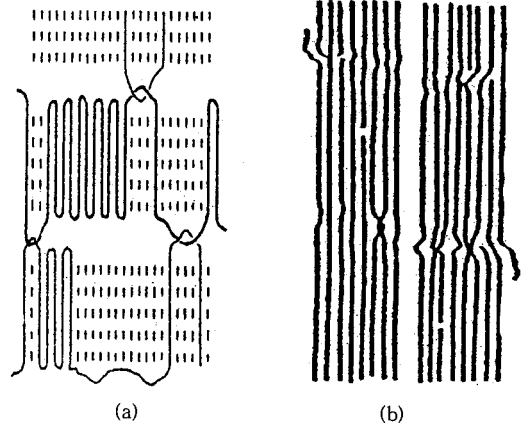


그림 6. Schematic structure of (a) the fiber of gel state and (b) the superdrawn fiber.

자사슬을 섬유축 방향으로 완전히 펼쳐야 할 필요가 있다. 현재 산업적으로 사용되고 있는 것은 겔방사 후 초연신하는 방법이다.

2.3.1 초고분자량 폴리에틸렌 섬유의 제조

700,000 이상의 중량평균분자량을 가지는 폴리에틸렌의 준희박용액 (보통 30wt% 이하의 폴리에틸렌이 데카린, 크실렌, 파라핀 등과 같은 용매에 녹아 있음)을 용매가 가능한 휘발하지 않도록 하면서 방사하면 겔이 얻어지며, 이것을 적절한 온도에서 20배이상 초연신하면 고성능 섬유가 얻어진다.

2.3.2 초고분자량 폴리에틸렌 섬유의 구조와 성질

방사 후의 겔상 섬유는 냉각할 때 만들어지는 라멜라 사이에 많은 양의 용매를 가지고 있는 일종의 물리적 겔상태이고, 그림 6(a)와 같이 라멜라는 뒤엀킨 분자에 의해 서로 연결된 구조를 가지는 것으로 생각되고 있다. 이것을 연신하면 많은 피브릴을 형성하는 성질이 있고 분자차원에서 보면 접혀진 분자사슬이 연신에 의해 용액속으로 풀어지면서 가지런히 정돈되어 그림 6(b)와 같은 피브릴 구조를 만든다고 추정되고 있다.

현재 시판되고 있는 대표적인 겔방사 고성능 폴리

표 3. Tensile Properties of Gel-Spun Polyethylene Fibers

Fiber	Producer	Modulus(GPa)	Tenacity(GPa)	Elongation(%)	Density(g·cm ⁻³)
Spectra 900	Allide	119	2.6	3.5	0.97
Spectra 1000	Allied	175	3.0	2.7	0.97
Dyneema	DMS/Toyobo	50-125	2-3.5	3-6	0.97
Tekilon	Mitsui Petrochem.	60-100	15-3.5	3-6	0.96

표 4. Mechanical Performance of Composites Reinforced with Spectra900 Fiber (Unidirectional, Epon826)

Properties	Values	V _f (%)
Axial tensile		
Strength(MPa)	1113	61.3
Modulus(GPa)	26	61.3
Strain to failure(%)	3.8	61.3
Transverse tensile		
Strength(MPa)	8.3	55.8
Modulus(GPa)	3.4	55.8
Axial compressive strength(MPa)	79.3	48.2
Shear strength(MPa)		
Iosipescu	24	55.8
Short beam	23	55.8

*Spectra is a registered trademark of Allied Corporation for its series of ultra high-strength industrial fibers.

표 5. Comparison of Composite Impact Strength (Drop-Weight Impact Test)

Reinforcement Material	Total Energy Absorbed(ft lb)	Specific Energy Absorbed (ft lb)/(1b ft ²)
Spectra 900™	33.4	58.6
E-glass	34.5	31.9
Aramid	16.1	22.4
Graphite	16.0	19.3

* Epoxy matrix, solid laminate(0°, 90°)s.

에틸렌섬유의 인장성질을 표 3에 나타내었다. 또한, 표 4는 Spectra900으로 보강된 복합재료의 역학적 성능을 요약한 것이고 표 5는 대표적인 몇가지 고성능 섬유로 보강된 복합체의 충격강도를 나타낸 결과이다. 여기서 보면, 다른 보강섬유에 비해 겔방사 폴리에틸렌섬유로 보강된 복합체는 높은 에너지 흡수능력을 나타내고, 섬유자체의 밀도가 낮아서 비강도나 비탄성률면에서 케블라 및 탄소섬유를 능가하고 있기 때문에 방탄복과 같이 높은 충격강도를 필요로 하는 곳에 절대적으로 필요한 소재가 될 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 높은 내화학적 및 내가수분

표 6. Composition of Glass Fibers (all values in wt%)

	E glass	C glass	S glass
SiO	52.4	64.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	14.4	4.1	25.0
CaO	17.2	13.4	-
MgO	4.6	3.3	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	0.8	9.6	0.3
Ba ₂ O ₃	10.6	4.7	-
BaO	-	0.9	-

Note : Data from Fibreglass Ltd.

해성, 낮은 함유수분을, 레이저투과성, 낮은 유전상수 등의 장점도 아울러 가지고 있기 때문에 이러한 성질을 요구하는 용도에 다양하게 응용될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

3. 세라믹섬유재료

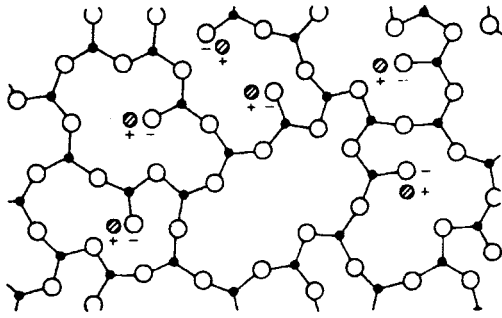
3.1 유리섬유¹⁵

3.1.1 유리섬유의 종류와 제조

유리는 성분 및 특성에 따라 E, S, 및 C계 유리로 나뉘며, 이들 유리를 용융방사함으로써 유리섬유가 얻어진다. 99%이상의 장섬유는 E계 유리섬유이며 강도와 탄성률, 전기적 성질 및 내환경성 등이 좋아서 가장 보편적으로 사용된다. C계 유리섬유는 E계 섬유에 비해 내화학적 성질이 뛰어나고 값이 비싸지만 강력은 오히려 낮다. 한편, S계 섬유는 가장 높은 탄성률과 내열성이 뛰어나기 때문에 고가에도 불구하고 항공산업 분야에 널리 사용되고 있다. 표 6은 이들 E, S, 및 C계 유리섬유 각각의 성분을 요약한 것이다.

3.1.2 유리섬유의 구조와 성질

유리섬유의 강도와 탄성률은 유리의 구성성분인 세라믹산화물에 의해 크게 좌우된다. 유리속에 존재하는 실리콘과 산소는 공유결합을 하고 나트륨 이온과 같은 것은 강한 이온결합을 형성함으로써 3차원의 고차구조를 형성할 수 있다. 그림 7은 유리섬유의 2차원적인 분자구조를 나타낸 것이며, 표 7은 몇



- Silicon atom
- Oxygen atom
- ⊕ Sodium ion

그림 7. 2D representation of the polyhedron network structure of sodium silicate glass.

가지 상업화된 유리섬유의 여러 가지 성질을 요약한 것이다.

3.2 탄화규소섬유¹⁶

3.2.1 탄화규소섬유의 제조

폴리카보실란섬유를 전구체로 하여 제조하며, 제조과정은 PAN계 탄소섬유의 제조과정과 아주 비슷하다. 그러나, 폴리카보실란의 분자량은 대략 1,500 정도에 불과해서 밀가루 반죽과 같은 상태의 고분자로부터 섬유를 뽑아야 하기 때문에 균일한 섬유를 얻는 것이 굉장히 어렵다. 고분자로부터 얻어진 전구체 섬유를 약 200 °C 정도의 공기 분위기에서 열처리하면 분자간 가교결합이 형성되어 후속 열처리에도 안정한 상태가 된다. 이 과정에서 산소가 고분자의 주쇄에 도입되어 섬유를 불용불용의 상태로 만든다.

표 7. Properties of Commercial Glass Fibers

Properties	A	C	D	E	M	S
1. Specific gravity : Fiber Thermally compacted	2.50	2.49	2.16	2.54-2.55	2.89	2.48-2.49
		2.54		2.58-2.62		2.51-2.52
2. Index of refraction at 589.3 mm : Fiber Thermally compacted	1.512	1.541	1.47	1.547	1.635	1.523
3. Dielectric constant(at 21 °C, 10 ⁶ Hz)	6.90	6.24-6.30	3.56-3.62	5.86-6.6		1.529
4. Thermal conductivity(cal cm ⁻¹ °C ⁻¹ s ⁻¹)					2.3 × 10 ⁻³	4.53-4.60
5. Specific heat(cal g ⁻¹ °C ⁻¹)		0.19-0.21	0.175	0.192		0.176
6. Linear expansion coefficient(× 10 ⁻⁷ °F ⁻¹)	48	40	17	27-33	31.6	16-19
	90	70-72	31	49-60	57	29-50
7. Liquidus temperature(°C)				1065-1120		1500
8. Fiberizing temperature(°C)	1280			1270-1300		1565
9. Strain point(°F)		1025	890	1140		1400
		552	475	616		760
10. Annealing point(°F)		1090	970	1215		1490
		588	520	657		810
11. Softening point(°F)	1285-1330	1380-1385	1420	1555		1775-1778
	695- 720	750	770	845		968
12. Hardness(Vickers, 10 ⁶ psi) (Moh Scale)				0.76		0.82
				6.5		
13. Young's modulus(10 ⁶ psi) (fiber) (GPa)	10.5	10	7.5	10.5	15.9	12.4-12.5
	72.5	70	51.7	72.4-76	110	84-88
14. Young's modulus(10 ⁶ psi) (Thermal compacted) (GPa)				12.3-12.4	16.7	13.5
				86	115.2	95
15. Poisson's ratio				0.20-0.22		
16. Virgin fiber tensile strength(10 ³ psi) at room temperature(MPa)	350	400- 450	350	500	500	665
	2414	2758-3103	2414	3500	3500	4600
17. Virgin fiber tensile strength(10 ³ psi) at liquid nitrogen temperature(MPa)				850		1200
				5900		8300
18. Fracture toughness(MPa · m ^{1/2})				0.90		1.2
19. Stress corrosion susceptibility exponent				28-31		40
20. Percent weight loss of 14 mm diameter fiber after						
1 h boil in : H ₂ O	11.1	0.13		1.7		
1N H ₂ SO ₄	6.2	0.10		48.2		
0.1N NaOH	12-15.0	2.28		9.7		

표 8. PChemical Composition of Two Types of Nicalon Fibers

	SiC	C	SiO ₂
NLP 101(mol.%)	65	20	15
NLM 102(mol.%)	49	40	11
NLP 101(mol.%)	69	7	24
NLM 102(mol.%)	63	15	22

는 데 기여하기도 하지만 탄화 후에도 남아서 섬유
의 물성을 저하시키는 단점으로 작용하기도 한다.
어쨌든 산화된 섬유를 불활성 기체분위기에서 1300
℃까지 아주 천천히 가열하면 결국 탄화규소섬유가
얻어진다. 이런 과정을 거쳐 제조되는 시판섬유는
Nicalon(Nippon Carbon)이 대표적이며, 표 8은 이
섬유의 화학조성을 나타낸 것이다.

3.2.2 탄화규소섬유의 구조와 성질

지금까지 알려진 바에 의하면, Nicalon 섬유는 약
15 μm 정도의 평균직경을 가지지만 균일한 섬유를 얻
기 어렵기 때문에 8~22 μm의 넓은 직경분포를 보인
다. 미세구조면에서, Nicalon101은 거의 무정형에 가
까운 구조를 가지며, Nicalon102는 평균크기가 1.7
nm인 작은 결정체를 포함하고 있다. 또한, 탄소만의 도
메인이 존재하여, 앞의 섬유는 평균크기가 약 2.1 nm
의 단일상을 가지지만, 뒤의 섬유는 약 2.1 nm와 1.5
nm의 두 개의 상을 가진다. 이와 같은 구조상의 차이
가 표 9와 같은 인장성질의 차이를 유발하게 된다.

4. 금속섬유 재료

이 부류에 속하는 섬유는 금속 자체, 즉, 스테인레
스 스틸을 섬유화한 것과 탄소섬유, 아라미드섬유,
유리섬유와 같은 기존의 섬유에 금속을 코팅한 것을
포함한다. 여기서는 앞의 것만 간단히 언급하기로

표 9. Tensile Properties of Various Types of Nicalon Fibers

Fibre Type	Gauge Length (mm)	σ_r (GPa)	Standard Deviations (GPa)	Weibull Shape Parameter m	Young's Modulus (GPa)	Standard Deviations(GPa)
NLP 101	220	1.29	0.51	3.1	147	36
	80	1.58	0.47	3.0	113	23
	25	1.84	0.39	2.3	134	23
	15	2.04	0.54	2.2	185	50
NLM 102	25	1.49	0.64	2.7	144	57
	220	1.16	0.42	3.6	130	62
NLM 202	220	1.50	0.5	3.3	193	34

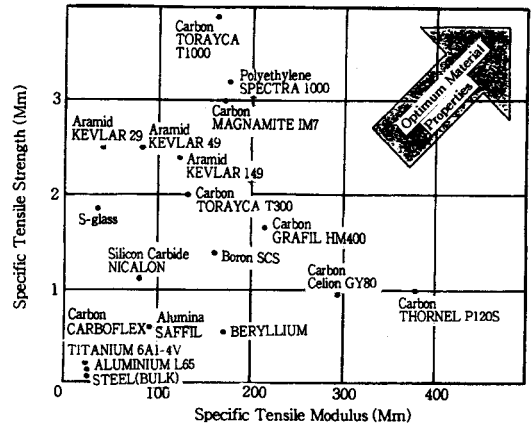


그림 8. Future development direction for property-op-
timization of high performance fiber-reinforcements.

한다.

섬유제조에 사용되는 스테인레스스틸은 302,
304, 316, 316L, 326, 347, Inconel, Hastelloy X,
Fecralloy 등이며, 제품의 형태는 장섬유, 단섬유,
슬라이버, 토우, 테이프, 웹, 직물 등으로 아주 다양
하다. 섬유의 경우, 직경은 용도에 따라 2~22 μm
의 크기를 가지며, 여러가닥(예를 들면, 90가닥,
275가닥, 1000가닥)을 한점으로 해서 4겹까지 겹
쳐 만든 상품도 있다. Bekinox(NV Bekaert SA)
와 Brunsmet(Brunswick Technologies Inc)가 대
표적인 상품명이며 거의 전세계 시장을 점유하고 있
다. 스테인레스 스틸 304의 경우, 강도 1.45 GPa,
신도 1.2~1.5%, 항복응력 1.24 GPa, 저항계수 75
μΩ/cm, 밀도 7.9 g/cc의 물성을 나타낸다.

5. 결 론

2년 앞으로 다가온 새로운 천년은 정보통신, 생명

표 10. Comparison of Various Commercial High Performance Fibers

Fibre	Modulus(GPa)	Strength(GPa)	Density(g/cc)	Specific Modulus(Mm)
Carbon				
UHM(Thornel P-120S)	827	2.2	2.18	379
UHM(Celion GY-80)	572	1.86	1.96	291
UM(Microfil 55)	379	3.45	1.83	207
IM(Magnamite IM 8)	303	5.3	1.80	168
SM(Torayca T300)	230	3.53	1.75	131
LM(Kureha T 101F)	33	0.79	1.65	20
Aramid				
HM(Kevlar 149)	179	3.45	1.47	122
IM(Twaron HM)	121	3.15	1.45	83
LM(Kevlar 29)	58	3.62	1.44	40
Polymer				
PE(Spectra 1000)	172	3.09	0.97	177
PI(P-84)	5	0.54	1.41	3.5
PBI(hoechst pbi)	5.5	0.38	1.43	3.8
Glass & Quartz				
S-Glass(Owens Corning)	86	3.45	2.55	34
Quartz(Quartz & Silice)	69	3.69	2.2	31
E-Glass	69	2.4	2.54	27
Ceramic				
Silicon carbide(Nicalon)	193	2.76	2.55	76
Alumina-silicate(Saffil)	300	2.0	3.3	91
Silicon-titanium(Tyranno)	206	2.74	2.35	87
Boron(SCS)	400	3.6	2.57	156
Metal				
Stainless steel fibre	197	1.45	7.9	25
Steel, piano wire	207	2.41	7.8	26

공학, 우주항공, 신소재 등에 의해 주도되는 시대가 될 것으로 예측되고 있다. 앞서 기술한 몇가지의 복합재료 보강용 섬유재료는 21세기를 이끌어 갈 신소재로서 고성능 복합재료 창출에 있어 가장 중심되는 역할을 할 것임에 틀림없다. 그러나, 불행하게도 국내에서는 각종 산업을 뒷받침할 수 있는 이러한 첨단 섬유소재를 생산할 수 있는 기술적 기반이 거의 없는 실정이며, 이에 대한 연구 역시 미미한 상황이다. 선진국 주도로 이미 개발되어 있는 고성능 섬유재료가 기존 복합재료의 보강재로서 충분한 역할을 해 왔지만 여전히 개선할 점은 남아 있다. 즉, 소재에 따라 비탄성률과 비강도간의 불균형이 심하기 때문에 이와 같은 단점이 극복된 새로운 섬유의 개발이 기대되고 있는 것이다(그림 8참조). 또한, 보강시의 계면접착력을 향상시키기 위하여 섬유의 표면구조 및 특성이 현저히 향상된 섬유의 출현도 기대된다. 따라서, 국내에서도 이러한 관점에서 고성능 섬유재료에 대한 연구개발과 생산에 눈을 돌리고 정

성을 쏟는다면, 멀지 않은 장래에 선진국을 능가하는 기술을 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 표 10은 이 글의 결론으로서, 이상에서 언급한 여러 가지 고성능 섬유재료의 특성을 요약 비교한 것이다.

참 고 문 헌

1. a) Y. Nakamura, *Japan Chemical Fibers Monthly*, **6**, 12 (1998). b) Y. Nakamura, *Japan Chemical Fibers Monthly*, **7**, 39 (1998).
2. D. Hull, "An Introduction to Composite Materials", p. 3, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
3. J. E. McIntyre, *Textile Horizons*, **8**(10), 43 (1988).
4. E. Fitzer and M. Heine, "Fibre Reinforcements for Composite Materials", ed. by A. R. Bunsell, vol. 2, p. 91, Elsevier, Amsterdam, 1988.
5. p. 120 of Ref. 4.
6. M. G. Dobb, H. Guo, D. J. Johnson, and C. R. Park, *Carbon*, **33**(11), 1553 (1995).

7. M. G. Dobb, D. J. Johnson, and C. R. Park, *J. Mater. Sci.*, **25**, 829 (1990).
8. C. R. Park, Ph. D. Dissertation, Leeds University, Leeds (U.K.), 1990.
9. E. Fitzer, M. Heine, and G. Jacobsen, "Verstärkte Kunststoffe in der Luft-und Raumfahrttechnik", ed. by P. Eyerer, vol. 12, p. 95, W. Kohlhammer GmbH Verlag, Stuttgart, 1986.
10. M. G. Dobb, D. J. Johnson, and B. P. Saville, *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.*, **15**, 2201 (1977).
11. M. G. Dobb and R. M. Robson, *J. Mater. Sci.*, **25**, 459 (1990).
12. M. G. Dobb, D. J. Johnson, and B. P. Saville, *Polymer*, **20**, 1284 (1979).
13. Anon, "Carbon and High Performance Fibers Directory and Databook", 6th ed., p. 241, Chapman & Hall, London, 1995.
14. I. M. Ward, "Strong Fibers", eds. by W. Watt and B. V. Perov, vol. 1, p. 705, North-Holland, Amsterdam, 1985.
15. P. K. Gupta, "Fibre Reinforcements for Composite Materials", ed. by A. R. Bunsell, vol. 2, p. 19, Elsevier, Amsterdam, 1988.
16. A. R. Bunsell, G. Simon, Y. Abe, and M. Akiyama, "Fibre Reinforcements for Composite Materials", ed. by A. R. Bunsell, vol. 2, p. 427, Elsevier, Amsterdam, 1988.