

고강도 내열성 섬유

김 성 훈

1. 서 론

고강도 내열성 섬유는 복합재료의 강화섬유로 자동차, 항공 우주산업 등 강도를 요구하면서도 기동성 및 연료 절약 등으로 인하여 저중량이 절대적으로 필요되어지는 분야에 첨단소재로 쓰이고 있으며, 고강도 뿐만아니라 충격흡수성도 요구되는 방탄재료, 골프채, 테니스채 등의 스포츠용품에도 쓰이고 있다. 또한, 내화학성과 내열성을 요구하는 고성능 여과재료로 이용되고 있다.

2. 열방성 액정고분자 섬유

열방성 액정고분자는 용매를 사용하여 방사 해야하는 유방성 액정고분자와는 달리 경제적이고 저공해성인 용융가공이 가능하다. 또한, 열방성 액정고분자는 유변학적으로 nematic mesophase에서 고분자 사슬이 전단방향으로 배열되며 피브릴을 형성하고 용융점도가 낮아지는 특성이 있어 용융방사 및 연신이 용이할 뿐만아니라, 이러한 성질로 부터 열가소성 고분자와의 블렌드시 분산된 액정고분자 domain들이 피브릴을 형성하여 *in situ*로 강화제 역할을 하게 된다.

열가소성 고분자/액정 고분자 블렌드물의 기계적 성질, 유변학 및 형태학에 대하여 많은 연구가 진행되고 있으며,¹⁻³ 열방성 액정 고분자들이 매트릭스내에서 *in situ*로 피브릴을 형성하는 것은 적절한 조성비, 계면장력, 두 시료들의 용융 점도비 및 가공중 유동영역 등의 인자들에 영향을 받는다.

이 열방성 액정고분자에 대한 특허출원은 1980년대 중반 활발히 진행되었으며 특히, 미국의 Hoechst Celanese, Eastman Kodak, Dupont사 등에 의해 많은 연구

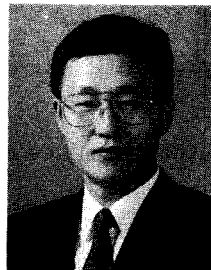
가 이루어지고 있다. 현재 활발히 연구 및 응용되고 있는 액정고분자들은 방향족환을 주쇄에 갖고있어 고강도 고탄성의 전방향족 액정고분자와 폴리에스테르계 지방족 액정고분자로 대별할 수 있다.

2.1 전방향족 액정고분자 섬유

전방향족 열방성 액정고분자는 강직한 고분자사슬이 용융체의 흐름방향으로 자체배열되어 기계적 강도, 내화학성, 내열성 및 내후성이 우수하고 특히, 충격흡수성 및 음향특성이 대단히 좋은 것으로 평가되고 있다.

최근 공업화되어 있는 전방향족 열방성 액정고분자로 미국 Hoechst Celanese사에서 수지로 개발한 Vectra와 이를 용융방사한 섬유로 Vectran이 있다. Vectran액정 섬유는 표 1에 보이는 바와 같이 고탄성 고강도이며 비중이 탄소섬유나 유리섬유보다 낮아, 우수한 비강도 및 비탄성율을 갖는다.

이러한 특성으로 Vectran섬유는 방탄 복합재료의 강화섬유 및 스피커 떨림판으로 응용이 가능하다.⁴ 초고분자량 폴리에틸렌 섬유강화 방탄복합재료는 폴리에틸렌의 용점이 낮아 방탄복 및 방탄헬멧 등의 고내열성을 필요로 하지않는 용도에 국한되나, 전방향족 액정고분자 섬유강화 방탄복합재료는 충격흡수가 더 우수하고 280℃ 정도



김성훈

1978~ 한양대학교 섬유공학과(학사)
1984
1985~ UMass Lowell 플라스틱공학
1987 (석사)
1988~ UMass Lowell 고분자과학
1992 (박사)
1993~ 한양대학교 공과대학
현재 섬유공학과 조교수

High Strength Heat Resistance fibers

한양대학교 섬유공학과 (Seong Hun Kim, Department of Textile Engineering, College of Engineering, Hanyang University, Sungdong-gu, Seoul 133-791 Korea)

의 고음에서도 사용할 수 있어 차량의 엔진부분 보호용 장갑재로도 사용할 있다. 스피커 떨림판의 경우 전자산업의 발달로 고출력의 고음 및 저음신호를 오디오의 증폭기가 정확한 파수로 발생시켜 주지만, 현재 사용하고 있는 무기물합유 셀룰로즈계의 떨림판으로는 고출력의 신호 재생시 순간적으로 떨림판이 찌그러져 소리의 변형을 피할 수가 없다. 고출력의 신호를 떨림판의 찌그러짐없이 정확히 재생하려면 떨림판재료의 비탄성율과 음파전달속도(음속)가 높아야 한다.

고분자 물질의 음속은 비탄성율과 다음과 같은 관계가 있다.

$$\text{Sound velocity} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{\text{Bulk modulus}}{\text{Density}}}$$

표 1. Typical Properties of Vectran HS Multifilament

Yarn size	200	Denier [®]
Filament size	5.0	Denier
	23	micron
Density	1.41	g/cm ³
Tensile strength at break*	20-25	g/denier
	360-450	Kpsi
Initial tensile modulus*	680-840	g/denier
	12.2-15.0	Mpsi
Elongation at break	2.2-2.5	%
Melting point	327-331	°C
	621-628	°F

[®]: g/9000m.

*: ASTM D885 using 50% strain rate, 20 inch gage length.

비탄성율을 측정하기 위해 인장강도 시험기를 사용하여 탄성율을 측정하고 시험편의 밀도를 따로 측정하는 번거로움없이 음속으로 쉽게 측정할 수 있다. 현재, 이방법은 제지공정에서 방향에 따른 셀룰로즈 섬유 배열정도 및 탄성율 측정을 위해 사용하고 있으나, 섬유고분자의 비탄성율 측정에 매우 간편하게 적용할 수 있는 시험 방법이다. 폴리에스터계 전방향족 열방성 액정고분자는 표 2와 같이 음속이 종방향으로 4,500 m/sec이며 횡방향으로 3,500 m/sec로 비탄성율이 크고 충격흡수성이 커서 용융체의 흐름방향으로 자체배열하는 액정고분자의 특성에 따른 기계적 성질의 이방성을 해결한다면 방탄소재, 항공우주산업, 자동차 및 스포츠 용품으로 응용할 수 있다.

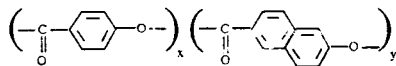
2.2 지방족 열방성 액정고분자

지방족 segment를 방향족 주쇄에 도입하였을 경우 유

표 2. Speed-of-sound Measurement of Various Polymeric Materials

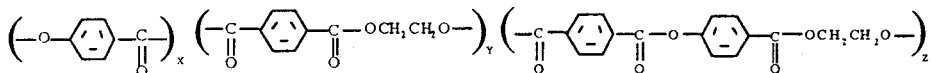
No	Material	Speed of Sound (m/sec)
1	Vectra [®] A 950 film Longitudinal to orientation	4,500
2	Vectra A 950 film Transverse to orientation	3,500
3	Paper for loud-speaker diaphragm	1,600
4	BTDA/MDA based Polyimide Film Imidized 3 hours at 275 °C	1,760
5	Ube Chemical Upilex Polyimide Film (Commercial polyimide film)	1,712

Vectra A950, 미국 Hoechst Celanese Co.



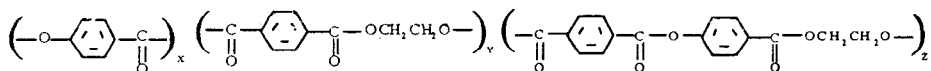
p-hydroxybenzoic acid(73 mol%) + 6-hydroxy-2-naphthoic acid(27 mol%)

RODRUN 3000, 일본 Unitika Ltd.



Ethylene terephthalate(40 mol%) + *p*-hydroxybenzoic acid(60 mol%)

RODRUN 5000, 일본 Unitika Ltd.



Ethylene terephthalate(20 mol%) + *p*-hydroxybenzoic acid(80 mol%)

그림 1. Chemical structure of aromatic and aliphatic thermotropic copolyesters.

연한 지방족 부분이 액정고분자의 용융점을 떨어뜨려 가공성을 향상시킨다. **그림 1**과 같은 유연한 지방족 결합을 포함한 형태의 액정고분자는 Eastman사에서 XG-7이란 상품명으로 PET/PHB로 이뤄진 copolyester를 개발하였으며, 1987년 Unitika사가 Eastman Kodak으로부터 제조권을 얻어 RODRUN이란 상품명으로 생산하고 있다.^{5,6}

표 3에는 사출성형으로 제조된 Unitika사의 RODRUN PET/PHB copolyester들의 특성을 PET와 비교하여 나타내었다. **그림 1**과 같이 지방족 격자를 포함하는 액정고분자는 다른 액정고분자에 비하여 비교적 낮은 가격으로 제조할 수 있다는 장점이 있지만, 지방족 단량체들과 방향족 단량체들과의 반응성이 다르기 때문에 copolyester로 중합할때 segment들의 분포를 조절하는데 어려움이 있다.⁷ 폴리에틸렌 테레프탈레이트를 주쇄에 도입하면 액정고분자와 폴리에스테르수지와의 블렌드시 가공조건에 상용성을 증대시킬 수 있으며, 블렌드시 폴리에스테르계 액정고분자가 열가소성 고분자상으로 파괴되어 블렌드물내 두 물질 사이에서 혼화성을 부여하며 열처리 시간에 따라 두 물질간에 에스테르교환 반응이 일어난다.⁸ 또한, PET/액정고분자 블렌드에서 액정고분자는 PET 결정화 속도를 가속화시키는 기핵제 역할을 부여할 수 있으며, 블렌드물내에서 PET의 결정구조에 영향을 줄 수 있다.⁹ 방향족 고분자와 삼상계 블렌드를 할 경우 유연한 분자쇄를 갖는 액정고분자가 더욱 강력한 액정고분자와 PET 사이에서 coupling agent 역할도 한다.

3. 유방성 액정고분자 섬유

유방성 액정고분자 섬유는 경량이며 강한 특성을 가지고 있어 고강도가 요구되는 산업자재에서 항공우주용 고분자재료에 응용되고 있다. 방향족 폴리아미드(아라미드) 섬유는 고탄성을 저신도의 기계적 특성과 아울러 강철보다 5배 높은 인장강도, 비중이 강철의 1/5, 유리섬유의 3/5정도이며, -160℃ ~ +200℃까지 섬유의 특성이 유지되며 고온에서도 응용되지 않는다. 자기소화성, 높은 내전단응력성, 치수안정성, 내약품성 및 내열 내한성을 갖고 있어 응용범위가 넓다.

그림 2의 메타형 방향족 폴리아미드의 대표적인 예는 poly(m-phenylene isophthalamide)로서 미국 Du Pont사가 1960년대에 개발하여 내열성 및 난연성 섬유로 Nomex 아라미드 섬유를 처음으로 시판하였으며, 그 후 일본 Teijin사가 Comex란 상품명으로 동일 구조의 아라미드 섬유를 개발하여 시판하고 있다.

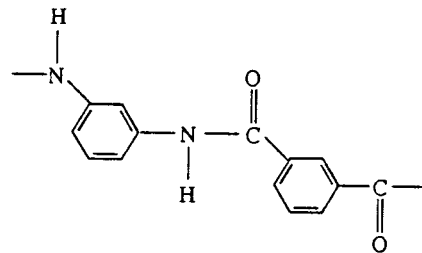
파라형 방향족 폴리아미드는 Poly-p-phenyleneterephthal amide로 구성된 고강도 아라미드섬유이며 내열

표 3. Properties of Injection Molded PET and PET/PHB Copolyesters

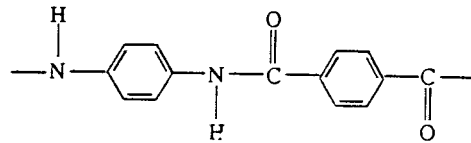
	PHB content, mol%			
	0	3	60	80
Cylinder temperature, °C	275	250	260	340
Inherent viscosity ^a				
Before molding	0.76	0.59	0.67	Insoluble
After molding	0.62	0.54	0.62	Insoluble ^a
Tensile strength, 10 ³ psi	8.0	17.0	33.7	34.8
Elongation to break, %	24	12	20	24
Flexural modulus, 10 ⁵ psi	3.3	5.8	18.1	14.0
Izod impact strength				
Notched, ft-lb/in	0.3	1.0	7.8	2.2
Unnotched, ft-lb/in	9.5	18.0	27.7	14.1
Rockwell hardness, L	73	82	42	65
Heat-deflection temp.(264psi), °C	66	73	64	154
Mold shrinkage, %	0.6	0.1	0	0
Oxygen index	21 ^b	—	30	39

^a Melt flow 28 g/10 min, at 325 °C (0.04-in. capillary).

^b Bar reinforced with 20 wt% glass fibers to avoid abnormally high value because of dripping.



meta-linked aromatic polyamide



para-linked aromatic polyamide

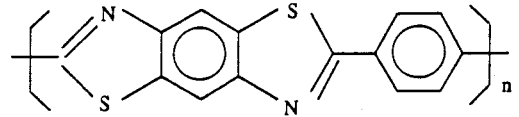
그림 2. Chemical structure of aromatic polyamide fibers.

성 및 난연성 뿐만아니라 메타형에서는 찾아볼 수 없는 고강도 섬유로 제조될 수 있다. 1970년대에 Du Pont사에 의해 개발되어 아라미드 섬유가 고강도 섬유로 알려지게 되었다.

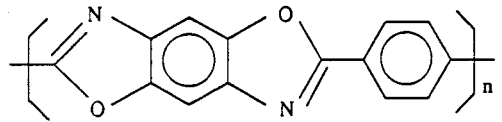
4. 복소환계 섬유

고강도 고탄성 섬유를 얻기 위해 poly(p-phenylene

terephthal amide)보다 분자쇄가 더 강직한 poly(p-phenylene bis benzobisthiazol)(PBT) 및 poly(p-phenylenebenzobisoxazole) (PBO)섬유가 1980년대에 미국 공군연구소에서 개발되었다. PBT는 완전 신장상태에서의 분자길이의 희박용액중에서의 분자길이의 비는 거의 1인데, 이 값이 PPTA에서는 1/4인것과 비교하면, PBT가 얼마나 강직성이 높은가를 알 수 있다.¹⁰ 방향족 4가 화합물을 단량체로 사용하여 제조가격이 높고 고분자량의 고분자를 합성할 수 있는 기술이 미국 Dow Chemical사에 의해 이룩되었다. 복소환계 섬유는 진한황산에서 저농도로 성형할 수 있으며, 비강도가 탄소섬유보다도 우수하나 압축강도는 다소 약하다(그림 3 참조).



PBT



PBO

그림 3. Chemical structure of poly(p-phenylene bis benzobisthiazol) (PBT) and poly(p-phenylenebenzobisoxazole) (PBO) fibers.

5. 폴리이미드 섬유

폴리이미드 섬유는 우수한 기계적 성질, 고온 열안정성, 내화화성을 가지고 있어 항공 우주 산업 및 레이저 스포츠 산업용의 고강도 내열소재 및 내열성 방호복, 분리막 등에 쓰이는 고성능 고분자재료이다. 또한, 낮은 흡수성과 열팽창계수 및 낮은 유전상수를 지니고 있어 유기절연체, 반도체칩 절연막, 접착 및 코팅 재료 등에 응용되고 있다.¹¹ 1960년대에 미국 Du Pont사가 PMDA/ODA를 단량체로 하는 KAPTON필름을 개발한 이래로, 섬유, 코팅, 성형품 및 발포체로도 사용되고 있다.

폴리이미드 섬유는 미국 Upjohn사가 습식 및 건식방사한 폴리이미드 2080 필라멘트 섬유를 개발하여 우주항공산업에 쓰여왔다. 1980년대에 미국 Dow chemical사가 Upjohn사의 폴리이미드 필라멘트 섬유 방사공정 특허를 인수하여 공업화하였다. 1987년부터는 오스트리아의 Lenzing AG사가 미국 Dow chemical사로부터 방사용액을 수입하여 고강도, 고내열, 불용, 불용성 필라멘트 섬유 및 스테플 섬유를 생산하고 있다.

5.1 폴리이미드 섬유의 방사

폴리이미드 섬유는 폴리아미산을 건식 방사한 후, 폴리아미산 섬유를 절사되지 않는 한도에서 최대한의 응력을 가한 상태에서 열적 이미드화하여 얻어진다. 섬유의 인장강도는 분자쇄의 일축배향도가 좌우하나, 폴리이미드는 그림 4에 나타나 있는 것과 같이 주쇄의 이미드환 및 벤젠고리에 의해 평판배향하는 특성이 있으므로 유연구조의 폴리아미산을 분자설계해야 응력하에서의 이미드화가 가능하며 연신이 가능하다. 또한, 최적의 이미드화 분위기와 온도에서 전구체인 폴리아미산이 일축배향되며 최대인 이미드환을 형성하여 고강도를 발휘할 수 있도록 해야 한다.

고강도 폴리이미드 섬유제조의 단계는 1. 섬유형성 폴리아미산 분자구조의 설계, 2. 방사후 최적 이미드화 설

정, 3. 폴리이미드 섬유의 분자 일축 배향 및 연신기술로 대별할 수 있다. 현재, 세계적으로 발표된 고강도 폴리이미드 섬유의 연구개발 사례를 정리해 보면 다음과 같다.¹²

1. 디안하이드라이드로 PPD를 디아민으로 3,4'-ODA를 선택한 폴리아미산을 DMAc/pyridine 용매에서 방사한 후, 500℃까지 승온하며 열적이미드화와 동시에 연신하여 인장강도 15.5 g/d, 신도 3.3, 탄성을 600 g/d의 섬유를 얻었다. 이 섬유는 열적이미드화를 단계별 승온하여 연신비 6~10으로 연신하였다.

2. OTOL을 공중합한 OTOL-BPDA/PMDA(70/30)과 3,4'-ODA/PPD-BPDA 폴리이미드 섬유는 인장강도 25 g/d, 신도 2.6, 탄성을 1000 g/d이며, 300℃의 고온에서도 Kevlar 49섬유보다 우수한 기계적 강도를 유지한다. 이 폴리이미드 섬유는 내약품성이 우수하여, 85℃의 진한황산에서도 Kevlar 49보다 우수한 내산성을 가지고 있다.

3. 폴리아미산과 부분적으로 이미드화된 폴리아미산 혼합체를 NMP용매하에서 방사할 수 있다. 이 방법으로는 다양하고 범용적인 PMDA, ODP, BTDA 등의 디안하이드라이드와 ODA, benzidine 류 및 diaminoterphenyl 등의 디아민을 선택한 폴리아미산으로 방사하여, 인장강도 19.7 g/d, 신도 1.5, 탄성을 1,000~1,300 g/d의 폴리이미드 섬유를 연신비 3~6으로 400~600℃에서 연신하여 얻었다.

5.2 폴리이미드 섬유의 응용

폴리이미드는 현재 항공기의 얼음 및 조류와의 충돌에 의한 부분적 수리용으로 쓰이고 있으나, 마하 1의 여객 및 수송기, 고도 24 Km이상의 초고도 비행기의 1주일이상 비행, 고도 20 Km에서 마하 3.5로 비행하는 전투기, 고도 7.2 Km에서 마하 2.7이상으로 비행하는 승객 300

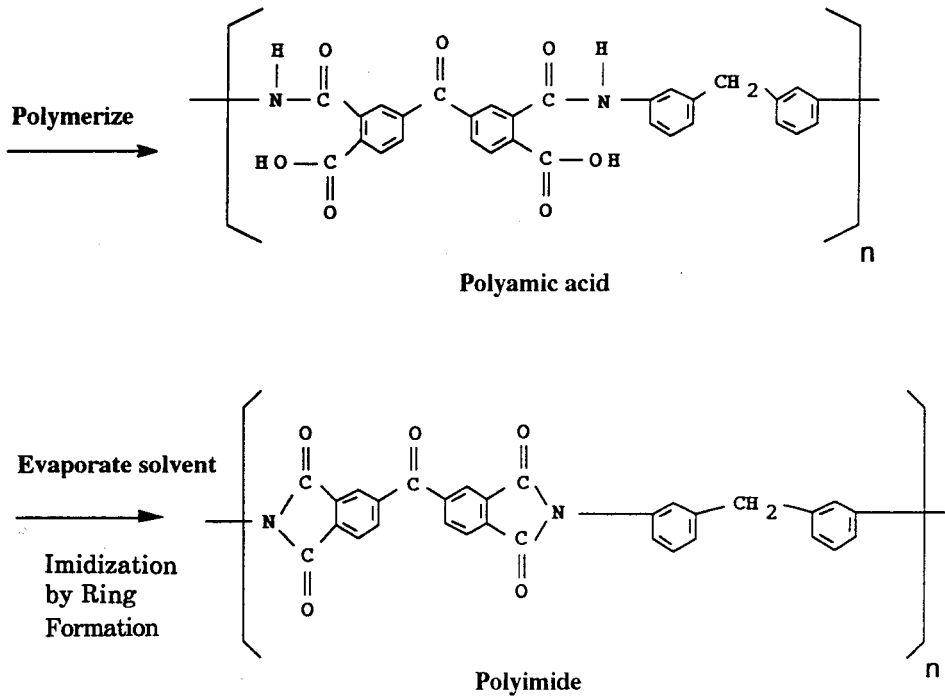


그림 4. Imidization reaction of (benzophenone tetracarboxylic dianhydride and 3,3'-methylene dianiline) based polyamic acid to polyimide.

명이상의 초음속 여객기, 마하 8~12로 비행하는 미사일 등의 극한 환경에서도 고강도를 요구하는 비행체에 쓰일 수 있다.

또한, 폴리이미드는 고강도 내열성 섬유로의 응용 뿐만 아니라 기체선택투과 특성이 있어 디안하이드라이드와 디아민의 선택에 따라, 질소로부터 헬륨의 분리, 질소로부터 탄산가스의 분리, 메탄으로 부터 수소의 분리에도 응용할 수 있다.

고분자복합재료용 폴리이미드의 개발로는 고인성 semi-crystalline 폴리이미드, 디아민으로 MDA를 사용하지 않는 폴리이미드, 경제적인 Resin Transfer Molding이 용이한 저점도 폴리이미드, Avimid M과 PMR-15와 같은 열경화성/열가소성 Inter Penetrate Network 폴리이미드의 개발 등이다.

6. 탄소섬유

탄소섬유는 전구체를 가열소성시켜 탄소원자들만을 남기고, 이들이 섬유상을 이룬 섬유를 말한다. 탄소섬유의 기계적 물성 및 표면은 전구체의 선택, 탄소화 공정에 따라 달라진다. 탄소섬유는 전구체를 섬유로 방사하여 불활성 기체 분위기에서 적절한 인장응력을 가한 긴장상태에서 가열소성하여 만들어진다.

탄소섬유를 다른 고강도 내열성 섬유와 비교할때 비탄성율은 다소 낮아질 수도 있으나 절대탄성율과 내열성이 월등히 우수하다. 또한, 신도면에서 볼때 아라미드섬유의 신도는 4~5%, 전방향족 열방성 액정고분자는 2.5%인데 비하여 탄소섬유의 신도는 1%이다.¹³ 탄소섬유는 항공 우주용 구조재료 및 스포츠용품 복합재료의 강화섬유로 쓰이고 있다. 탄소섬유는 복합재료의 기계적 특성을 높여 주는 구조재료인 동시에 복합재료에 많은 특성을 줄 수 있는 기능재료로도 이용된다. 낮은 열팽창계수로 온도의 변화에 따라 신축하지 않는 복합재료를 만들 수 있다. 또한, 높은 열전도성, 질산과 크롬산을 제외한 각종 강산이나 강알칼리에 안정한 우수한 내약품성과 전기전도성 및 윤활특성을 갖고 있다.

탄소섬유는 사용된 전구체의 종류에 따라 PAN계 탄소섬유, 피치계 탄소섬유(등방성, 이방성) 및 레이온계 탄소섬유로 분류할 수 있다.

6.1 PAN계 탄소섬유

PAN섬유는 T_g 가 90~120 °C로 높고 가열하여도 쉽게 용해되지 않으므로 탄소섬유의 전구체로서 적당하다. 탄소섬유용 PAN은 의류용과는 공중합체의 조성이 달라 아세트산비닐, 아크릴아미드, 메타크릴산, 아크릴산 에틸 에스테르, 아크릴산 메틸에스테르, 2-히드록시 에틸아크릴로니트릴, 2-히드록시 부틸아크릴로니트릴 등이 공중합체로 쓰인다. PAN섬유의 방사에는 건식방사와 습식방

사가 가능하나, 탄소섬유의 원료로는 습식방사된 PAN 섬유를 주로 쓴다.

탄소섬유 제조공정은 첫번째로 산화공정 또는 안정화공정이 있는데, 200~300 °C의 온도에서 PAN섬유를 서서히 공기중에서 산화시켜 지방족 탄소의 산화에 의하여 가교반응이 시작되고 축합방향족고리를 거쳐서 환상 직선 고분자물이 생성된다. 두번째 공정은 전 탄화공정 또는 방염화 공정이라고 하는데, 산화공정을 거친 섬유를 불활성기체중에서 300~700 °C의 온도로 가열하면 섬유 내에 축합고리의 고리수의 증가가 일어나 부분적으로 탄화가 일어나며 불꽃에 타지않게 된다.

세번째로 탄화공정은, 전 탄화공정을 거친 섬유를 질소 하에서 연신하며 700~1,500 °C로 가열하면 900 °C 부근에서 연신효과가 크며 섬유내의 축합고리가 늘어나고 불완전한 흑연 결정방면의 난층구조가 생성되어 탄화됨으로 고강도 탄소섬유가 얻어진다. 네번째로 흑연화 공정은 탄화공정을 마친 탄소섬유를 1,500~2,500 °C에서 열처리를 계속하면 흑연화가 진행되어 1,750 °C 부근에서 흑연질로 변하기 시작하며, 고탄성의 흑연질 섬유가 얻어진다.

6.2 피치계 탄소섬유

석유계 피치를 원료로한 탄소섬유는 공업화되어 있으나, 석탄계 피치를 원료로한 탄소섬유는 아직 연구가 진행되고 있다. 피치계 탄소섬유는 등방성 피치계와 이방성 피치계 탄소섬유 두 종류가 있다. 피치는 여러가지 화합물들이 혼합된 분자량 300~500 정도의 혼합물로 용점은 50~100 °C 정도로 낮다.

(1) 등방성 피치계 탄소섬유

용점이 낮은 피치를 전구체로 사용하면 산화공정에서 점착현상이 일어나므로 용점 180 °C이상의 피치를 사용하여야 방사성이 좋아진다. 정제된 광학적 등방성 원료 피치를 가열처리 없이 240~280 °C에서 용융방사하여 등방성 피치 전구체를 만들며, 이를 200~300 °C의 공기중에서 공기산화 공정을 거쳐 불용안정화시킨 후 1,000~2,000 °C에서 탄화시켜 탄소섬유를 제조한다. 이 탄소섬유는 저탄성 저강도 탄소섬유로 범용 탄소섬유로 쓰여진다.

(2) 이방성 피치계 탄소섬유

이들은 광학적으로 보면 모두 등방성이나, 이것을 질소 기류에서 400 °C 정도로 20~30시간 동안 가열처리하여 저분자량의 물질을 제거하고 탈수축합 등으로 등방성상의 피치중에서 소구체가 생겨 광학적으로 이방성의 분자

량 1,000이상의 평면축합 방향고리 분자의 액정피치가 생성된다. 이방성 액정피치 40% 이상과 등방성 피치가 혼재하여 있는 것을 메소페이즈 피치라고 하며, 이를 용융방사하면 높은 배향도를 갖는 이방성 피치 전구체가 얻어진다. 이를 200~350 °C의 공기중에서 가열하면 산화되면서 가교가 되어 불용 안정화 열처리가 되고, 이를 2,000 °C 전후까지 탄화시키면 고강도 고탄성류의 이방성 피치계 탄소섬유가 얻어진다.

6.3 레이온계 탄소섬유

직물상이나 펠트상의 레이온을 약 900 °C까지 서서히 탄화하거나 2,500 °C 이상까지의 온도로 흑연화시키는 방법이다. 이 제법으로 만들어진 탄소섬유는 기계적 성질이 우수하지는 못하고 탄화수율이 25% 정도로 낮으며, 인장강도 350~700 MPa, 인장탄성률 28~50 GPa 정도이며, 직물상이나 펠트상의 탄소섬유의 생산에만 이용되고 있다.

참 고 문 헌

1. Ping Zhuang, Thein Kyu, and James L. White. *Polymer*, 34(4), 684 (1993).
2. Wan-Chung Lee and Anthony T. Dibenedetto, *Polym. Eng. Sci.*, 32(6), 400 (1992).
3. Woo Nyon Kim and Morton M. Denn, *J. Rheol.*, 36(8), 1477 (1992).
4. Seong Hun Kim and Samuel P. Sawan, *ACS, Polym. Prepr.*, 33(1), 1028 (1992).
5. *Chem. Week*, 140(23), 21 (1987).
6. *The Report on Performance Materials*, McGraw-Hill Publications, June 1, 1987, p. 3.
7. Francesco Paolo La Mantia, "Thermotropic Liquid Crystal Polymer Blends", 1993.
8. Pei Tang; Jeffrey, A. Reimer; Morton M. Denn, *Macromolecules*, 26, 4269 (1993).
9. Sharma, S. K.; Tendolkar, A.; Misra, A., *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Inc. Nonlin. Opt.*, 157, 597 (1988).
10. W. Fang, *Post Symp. Formation, Structure and Properties of High Modulus and High Tenacity Fibers*, p. 23 (1985).
11. M. I. Bossonov, M. M. Koton, and V. V. Kudryavtsev, "Polyimide: Thermally stable polymer", ed. by L. A. Laius, p. 271, Consultants Bureau, N. Y., 1987.
12. D. Wilson, H. D. Stenzenberger and P. M. Hergenrother, "Polyimides".
13. 인조섬유, 형설출판사 (1995).