

방탄 섬유소재

오영세, 한인식, 김영근*

(주)코오롱 중앙기술원, *오리엔탈코

1. 서 론

오늘날 방탄의 역사는 고대 중국 병사들이 화살 및 칼날을 방호하기 위해 실크 패딩을 사용한 예에서 유래되었고, 그리스 로마 군대에서 헬멧 및 가슴 방호판을 사용 한 이후 2차대전까지는 특별한 방탄외투가 개발되지 않았다. 2차대전 이후 월남전에 nylon을 소재로 한 방탄복이 시험으로 출현한 바 있다.

NIJ(National Institute of Justice) 에 따르면, 방탄복은 여러 가지 방법과 재료들로 만들어 질 수 있지만 일반적인 방탄복의 목적은 개인들을 총알로부터 보호할 외피를 만드는 것이다. 방탄복은 발사체를 맞았을 때 그 물체가 아주 단단한 섬유로 구성된 web에서 잡혀지도록 디자인 되었다. 이 섬유들은 탄환을 변형시킴으로써 발사체로부터 방탄복에 보내진 충격을 흡수하고 분산시킨다. 대부분의 방

탄복은 탄환이 멈춰질 때까지의 추가적인 에너지를 흡수하기 위하여 이 섬유들의 연속적인 층으로 이루어져 있다. 방탄조끼에서 섬유들은 서로 다른 여러 층으로 구성되어 서로 함께 작용하기 때문에 조끼의 큰 범위가 총알의 관통으로부터 보호받을 수 있게 된다. 또한 이점은 타박상과 내출혈같은 비관통상을 일으킬 수 있는 힘을 흩어지게 한다.

방탄의 개념은 발사된 총알, 대포, 지뢰로부터 인명을 보호하는 것으로 여러 가지 까다로운 규격이 있으나 거의 대부분 국가적인 기밀사항이거나 국가 전략적인 사항으로 일반인이 정보를 취득하기가 매우 어렵다. 최근 9.11테러 이후 방호에 대한 시민의식이 고조되면서 군인뿐만 아니라 일반 시민에 까지 방탄/방호제품이 확대되어야한다는 인식의 전환이 일어나고 있고 이에 따른 방탄/방호산업 또한 활발히 전개될 것으로 예상되고 있다.

본 장에서는 방탄제품에 대한 여러 가지 지식(제

Table 1. 주요 방탄 섬유소재의 물성 비교

Fiber	Density (g/cm ³)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Thermal Expansion (%)
Glass	2.450	71	3,500	5
Kevlar 49	1.470	154	2,800	-4
Kevlar 29	1.470	61	2,800	-4
PE-spectra	0.970	66-124	2,300-3,250	-12
PE-dyneema	0.975	115	3,500	-12
PBO-Zylon AS	1.540	180	5,800	-6
PBO-Zylon HM	1.560	270	5,800	-6

Notes : PE = gel spun ultra high-molecular-weight polyethylene (Spectra, Dyneema); PBO = poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole).
Source : Morris Brown College; BCC, Inc.

Table 2. 방탄 섬유소재의 시장 점유율(2004년)

Material	Percent(%) Market Share
Aramid	39
Ceramic	21
Ultra high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE)	33
PBO	1
Others	6
Total	100

Source: BCC, Inc.

조방법, 방탄 등급, 표준가이드) 중에 방탄용으로 사용되는 섬유에 국한하여 기술과 산업적 측면에서 서술한다.

2. 본 론

Business Opportunity Report[1]에 따르면 현재 방탄용으로 사용되고 있는 대표적인 섬유는 glass fiber, aramid fiber, UHMWPE fiber, 그리고 PBO fiber 들이다. 아래 Table 1은 이들 섬유의 중요한 물리적 특징을 비교해 놓은 것이다.

다음 Table 2는 이들 섬유소재에 따른 방탄복의 2004년도 시장점유율을 요약한 것이고, Table 3은 방탄소재에 대해서 세계 회사별 market share 분포를 나타낸 것이다.

Table 2,3에서 보듯이 현재 방탄 소재로 가장 각광을 받고 있는 소재는 para-아라미드 와 UHMWPE 섬유이다. UHMWPE 섬유의 상업화가 1990년대에 이루어졌다고 보면 향후 수년 내에 아라미드계 섬유를 추월할 것으로 예상된다.

다음 Table 4는 미국에서 방탄 산업의 향후 전망

Table 4. 미국 방호산업의 전망

Sector	2001	2004	2005	2010	(단위: 백만불) AAGR% 2005-2010
Armor	135	279	356	628	12.0
Fire protection	331	406	429	606	7.2
Chemical/Biological	250	315	340	500	8.0
Ancillary	905	1,112	1,172	1,618	6.7
Total	1,621	2,112	2,297	3,352	7.9

Table 3. 세계 각사별 방탄 섬유소재의 시장 점유율(2004년)

Company	Market Share (%)
Dupont	45
Honeywell	37
Teijin	11
Toyobo	5
Others	2
Total	100

Source: BCC, Inc.

을 나타낸 것으로 전체 방호산업 중에 방탄 부분의 성장속도가 매우 큰 것으로 예측되고 있다.

이는 9.11 테러 외에 사회 안전 분야에 종사하는 안전요원의 수가 증가할 것으로 보이고, 따라서 안전요원의 의복 및 보호장비 산업이 활발히 전개될 것으로 예측되기 때문이다.

다음은 각 방탄 섬유소재별로 기술과 산업에 대해서 서술하고자 한다. 다만 방탄분야가 국가 특수 산업으로 인해 일반인이 정보를 얻기가 매우 어렵다. 따라서, 각소재에 대해서 기초지식과 방탄분야의 소개 정도로 서술하고자 한다.

2.1. 유리섬유(glass fiber)

2.1.1. 개발과 기술동향

방탄 재료(bullet proof materials)로 사용할 수 있는 섬유 중 제일 오래 전부터 사용되어 온 섬유가 유리섬유이며 이들 유리섬유 방탄재료는 2차대전 이후에 본격적으로 항공기(헬기), 선박, 장갑차 또는 개인 방탄장비에까지 광범위하게 사용되어져 왔다. 타 재료에 비해 유리섬유는 직물로써 여러 가지 형태로 제작될 수 있어 각종 laminate 형태로 성형할 수 있는 특징이 있으며 이로 인해서 방탄재료로서의 요구사항인 “침투에 대한 저항”을 극대화시

킬 수 있고 충격에 대한 저항 및 파쇄에 대한 저항이 매우 커 에너지 흡수를 용이하게 하는 재료이기 때문에 널리 사용되어 왔다[2-4].

다음 장에서 화학섬유로서 아라미드 섬유, PE 섬유의 방탄재료로서의 특징을 서술하겠지만, 80년대 대량 생산에 의한 가격 하락과 경량이란 특징을 갖는 아라미드 섬유와 90년대의 PE 섬유 개발로 인해 유리섬유는 방탄소재로서 이들(아라미드 섬유, PE 섬유)로 점차 대체되고 있는 실정이었다. 그러나 최근 세계 사회정세의 불안함으로 인해 이들 아라미드, UHMWPE(ultra high-molecular-weight polyethylene, 초고강도·고탄성 PE)섬유의 가격 상승과 수급 불안정으로 유리섬유가 재조명 받고 있다.

방탄재료는 이러한 방호물성 이외에도 흡습성, UV 내구성, 내열성 등을 고려 할 경우가 있으며 특히 전자장비의 방호 시 EMI효과를 고려해야 한다는 점에서 유리섬유와 metal wire 의 복합직물이 이 점을 해결 할 수 있어 경우에 따라서는 이러한 2차적인 재료특성이 방호물성 못지않게 중요시 된다. 이런 성질 때문에 현재까지 지상무기 방호체계에서는 유리섬유가 많이 이용되고 있는 중이다. 그리고 아라미드 섬유는 흡습 시 40% 방호능력이 저하되며, UHMWPE섬유는 높은 습도에서 섬유 표면에 부착수가 형성되어 성형할 때 void가 발생하기 때문에 방탄 효율이 저하된다. 따라서 설계할 때 갖추어야 할 외부요인을 고려해야 하기 때문에 방호효율보다 오히려 환경대응에 비중을 크게 두는 경우가 종종 발생하기도 해서 유리섬유가 비중(2.5)이 타 섬유보다 크더라도 기체 방호에 대량 사용 중이다. 이들 3 가지 방탄 섬유 중 유리섬유 가격이 가장 저렴하다.

2.1.2. 특성과 응용

방탄유리섬유에 대해서 더욱 자세히 설명하자면 유리섬유는 1930년대 Owens-coming(미국)사에서 처음 상용화하였는데 이때까지만 하더라도 방탄용보다는 FRP(fiber reinforced plastic)소재의 강화재로서 대량 소모되었다. 특히 인쇄회로기판용으로 라

디오, TV등 절연재 제품으로 소위 E - Glass 라는 별칭을 가지고 사용되어 졌다. 현재까지 유리섬유 물성의 차이로 혹은 이용도로 구분되어지는 유리섬유는 S-2 Glass 섬유를 포함 7~8가지이지만 (Table 5참조) E- Glass 섬유가 가장 많이 생산되고 있으며(전체 90% 이상) 비교적 타 유리섬유보다 인장강도가 높아 제작하여 사용하는 것이 현재 보편적인 laminate용 직물이며, matrix로 불포화 폴리에스터나 epoxy 수지와 함침하여 press 공법이나 autoclave를 이용, 세라믹, 강판 등을 부착하여 후면체로 사용되어지고 있다. 사용 부위에 따라서는 내열성을 강조 할 경우 phenolic resin을 사용하는 경우가 있으며 matrix의 선정이 신물에 영향을 주어 방탄 효과를 극대화시킬 수 있으므로 설계할 때 탄도의 종류, 속도 등을 고려해야만 한다. 그런데 80년대부터는 E- Glass에 비해 30~40% 정도 인장강도가 향상된 S-2 Glass가 출현하였는데 이 역시 미국 Owens-Coming 제품으로서 tensile strength가 super 라는 뜻에서 S-2 Glass라는 별칭을 가지게 되었으며 이 유리섬유는 거의 전적으로 방위산업 즉 방탄소재로서 쓰이고 있는 중이다. 따라서 종전에 쓰이던 E- Glass 대신 S-2 Glass를 사용하므로 무게감소를 가져올 수 있을 뿐만 아니라 방탄재료에서 중요한 두께 감소가 이루어져 지금까지 이런 용도로 국내에서 년 간 100 ton 씩 수입 되어지고 있으며 지상무기 장갑에 대해선 수십 겹씩 laminate화시켜 장착하여 사용 된다고 한다. 그리고 S-2 Glass는 일반적인 E - Glass 섬유에 비해 몇 가지 구분되는 특징이 있는데, a) 내열성, Tg가 높고 (Figure 1), b) 화학적 내구성이 좋다(Figure 2), 그리고 c) 유전상수가 낮다(Figure 3).

S-2 Glass 섬유가 방탄재료로서 탁월한 성능을 발휘한다는 것은 인장강도가 E- Glass 섬유보다 높다는 점을 이해할 수 있어 E - Glass 대체 소재로서 safe factor가 크다는 것 외에 유전상수가 (δ :3.5) 낮아 레이돔에 사용할 수 있다는 특징이 있다. 그래서 비행체의 레이돔이나 지상 전파국의 레이돔에

Table 5. 각종 유리섬유의 물성 비교

PHYSICAL PROPERTIES								
	A-GLASS	C-GLASS	D-GLASS	E-GLASS	ECR-GLASS	AR-GLASS	R-GLASS	S-2 GLASS
Density, gm/cc	2.44	2.52	2.11	2.58	2.72	2.70	2.54	2.46
Refractive Index	1.538	1.533	1.465	1.558	1.579	1.562	1.546	1.521
Softening Point, °C(°F)	705 (1,300)	750 (1,382)	771 (1,420)	846 (1,555)	882 (1,619)	773 (1,424)	952 (1,745)	1056 (1,932)
Annealing Point, °C(°F)		588 (1,090)	521 (970)	657 (1,215)				816 (1,500)
Strain Point, °C(°F)		522 (1,025)	477 (890)	615 (1,140)				766 (1,410)
Tensile Strength, MPa								
-196 °C		5,380		5,310	5,310			8,275
23 °C	3,310	3,310	2,415	3,445	3,445	3,241	4,135	4,890
371 °C				2,620	2,165		2,930	4,445
538 °C				1,725	1,725		2,140	2,415
Young's MD, GPa								
23 °C	68.9	68.9	51.7	72.3	72.3	73.1	85.5	86.9
538 °C				81.3	81.3			88.9
Elongation %	4.8	4.8	4.6	4.8	4.8	4.4	4.8	5.7

Table 6. 고강력 유리섬유의 물성 비교

	AGY S-2 Glass	DBW high-modulus glass fibre roving
Tensile Strength, 23 °C	4,890 MPa	4,500 MPa2
Tensile Modulus, 23 °C	86.9 GPa	95 GPa2
Resin Compatibility	Epoxy	Epoxy
Fibre Diameter	8~12 µm	6~12 µm
Transformation Temperature	845 °C	793 °C
Softening Point	1,056 °C	969 °C
Density g/cm ³	2.46	2.47
available as	twisted yarns rovings fabrics...	twisted yarns rovings fabrics...

두 가지 효과를 볼 수 있으며(방탄효과와 FRP 보강재 효과) 마지막으로 방사선 특성에 우수한 성질을 가지고 있다. 특히 PE 섬유나 아라미드 섬유와 달리 α, β선에는 절대 안전하며 γ선이나 중성자선에 5~10%의 인장강도 감소와 1%이내의 중량감소를 보일 뿐 타 섬유보다 안정하다.

S-2 Glass는 Owens-Corning사의 상품명인데 5년 전 AGY라는 회사로 명칭이 변경되었으며 독일, 러시아, 프랑스는 S-2 Glass(특허제품)에 필적 할 수 있는 자체 상품을 가지고 있는데 일명 Y-Glass, S-

Glass, DBW -Glass라는 이름으로 비슷비슷한 물성을 가지고 있다. 따라서 Table 6에서 참고로 S-2 Glass와 DBW-Glass를 비교해 보았다.

2.2. Para-아라미드 섬유(Para-Phenylene terephthalamide, PPTA)

2.2.1. 개발과 기술 동향

Para-아라미드계의 대표 섬유는 Kevlar이다. Kevlar는 DuPont의 Stephanie Kwolek와 Hervert Blades에 의해 1965년에 최초 합성되었다[6-7]. 1970년 Herb

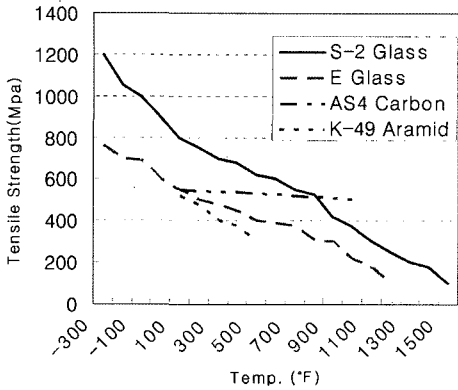


Figure 1. 각종 섬유의 온도에 따른 강도 변화.

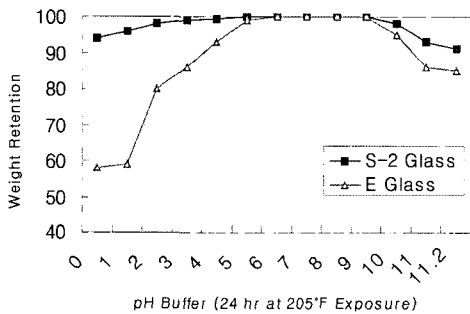


Figure 2. 205°F buffer 용액에 24시간 노출 시 무게유지율(%).

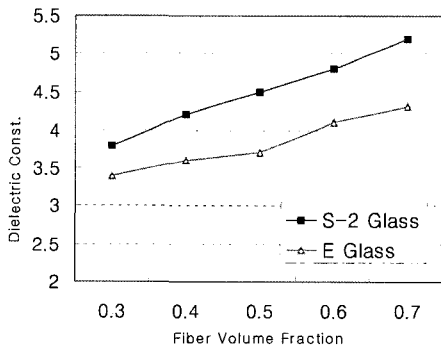


Figure 3. 유리섬유의 부피비에 따른 유전상수 변화.

Blades가 air-gap 방사방법을 발견하고 para-아라미드계 섬유의 생산기술을 확립하였다[8]. 1972년 Dupont사가 Kevlar라는 상표명으로 상업적으로 출시하여 종래에 없는 꿈의 섬유로 각광을 받았다. Kevlar는 결합구조에 의한 고유한 배향성으로 낮은 무게에서의 높은 장력, 구조적 강직함, 그리고 낮은

전기전도율을 가지며, 이런 특징들은 높은 화학적 저항, 높은 cut 저항, 높은 flame 저항성을 나타내어 방탄용 구조재료로서 적합하다.

Para-아라미드 섬유의 제법에 대해서는 많은 서적[9,10]에서 잘 알려져 있어 여기에서는 기술동향에 대해서 조사하기로 하였다.

아라미드와 관련된 미국 출원 및 등록 특허 동향 파악을 통해 기술의 개발 과정을 살펴보고자 한다. 우선 아라미드 관련 특허의 전체 및 소재, 용도 관련 특허의 연도별 특허 출원 현황 (Figure 4)을 살펴보면 아라미드 관련 특허는 70년대부터 80년대까지는 점진적으로 증가하다가 90년대 중반과 2000년대 초에 급격히 증가하여 오늘에 이르고 있다. 이를 다시 아라미드 소재 특허와 용도 특허로 나누어서 살펴보면, 용도 특허가 전체의 약 83%로서 아라미드 관련 특허의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 또, 전체 특허 출원의 그래프 모양을 용도 특허의 그래프가 결정하고 있는 것으로도 알 수 있다. 특허 주목 할 것은 아라미드 소재 특허가 90년대 말부터는 상당히 감소하여 1년에 한 두건 정도로 출원되고 있는 반면에 용도 특허는 급격히 증가하여 아라미드 개발 이래 최고의 출원 건수를 기록하고 있는 것을 볼 때, 아라미드의 수요는 엄청나게 증가되고 있다는 것을 알 수 있다.

아라미드 소재에 대한 특허는 Dupont이 약 47%로서 압도적인 우위를 차지하고 있으며 Akzo를 인수한 Teijin이 약 19%로 그 뒤를 따르고 있다. 즉, 소재 관련 특허 출원 중 약 66%가 양사에 편중되

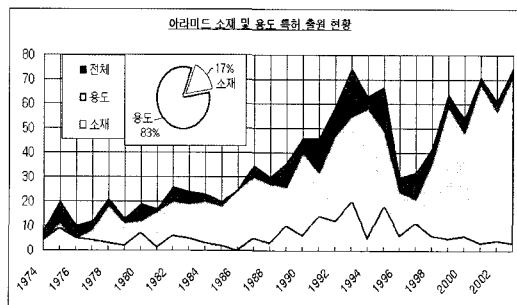


Figure 4. 아라미드 소재 및 용도 특허 출원 현황.

어 있는 가운데 나머지 약 34% 정도가 후발 개발업체가 차지하고 있다. 특히 국내 기업으로서는 유일하게 (주)코오롱이 전체의 약 4%를 출원하고 있다.

국내에서는 1980년대 초 KAIST에서 고강도, 고탄성의 아라미드 펄프 제조법을 세계 최초로 개발하여 특허권을 획득하였다. 이 방법은 기존의 섬유에서 펄프를 제조하는 방법과는 달리 중합 단계에서 펄프를 제조하는 획기적인 방법이었다. (주)코오롱은 KIST와 공동으로 이의 생산을 위한 연구를 진행하였으나 상용화에 이르지지는 못하였다. (주)코오롱은 현재 파라계 아라미드 섬유의 생산설비를 구축 중이며 2005년 말 Heracron의 상표명으로 생산할 예정이다.

2.2.2. 특성과 응용

아라미드 섬유는 앞서 언급한 바와 같이 고강도, 고탄성을 나타내고, 고내열성, 치수 안정성, 내약품성, 전기 절연성 등이 뛰어나다. 기본적인 섬유 물성 및 타 소재와의 물성 비교를 각각 Table 7과 Figure 5에 나타내었다. PPTA의 유리전이 온도는 375 °C, 저 분자량의 용융온도는 530 °C로 알려져 있으며, Kevlar 29는 TGA분석에 의하면 350 °C 이하에서 감량이 1%이하이다. 아라미드의 평균 수분함량은 20 °C, 55% 상대습도에서 Kevlar 29는 7%, Kevlar 149는 1%이며 수분율은 불순물의 함량 및 섬유의 미세구조에 따라 변화한다.

파라계 아라미드 섬유는 축 방향 압축강도가 Kevlar 49의 경우 인장강도의 5분의 1 수준으로 낮은 압축강도의 특성을 갖는다. 또한 섬유의 이방성 특성에 의해 전단 및 마모에 의해 쉽게 피브릴이 발생하는

특성이 있다. 다른 폴리머와 같이 자외선에 민감하여 강도가 저하되며 섬유가 어두운 색상으로 변한다. 대부분의 용매 및 염에 대한 내화학성은 뛰어나며 고온이나 고농도의 산, 염기에 의해 침해된다.

섬유 구조를 살펴 보면 노르솔트(Northolt)에 의하면[11] PPTA 단위격자는 단사결정으로 (100)면에서 고분자사슬이 수소결합으로 연결되어 매우 면밀하게 짜여진 층을 형성하게 되며, 이 수소결합에 기인한 고분자사슬 간의 강한 상호작용에 의해 아라미드섬유가 고강도, 고탄성률을 가질 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 결정화도가 50%이상인 고결정성(Kevlar의 경우 결정화도 60%이상)과 배향도 80%이상(방사조건에 따라 90%이상)의 고배향성을 갖기 때문에 인장에 대한 기계적 성질이 우수하다. 그러나 탄소섬유보다도 낮은 압축강도를 가지는데 이는 펼쳐진 사슬구조에 기인하는 것으로 사슬들 사이의 수소결합과 낮은 반데르발스(van der waals)력 이외에는 강한 면결합을 형성하는 힘이 없기 때문이다. 따라서 축방향의 압축이나 굽힘에 의해서 구조적 파괴가 일어나기 쉽다.

도브(Dobb)[12] 또는 모건(Morgan)에 의하면[13] PPTA섬유는 주름 잡힌 시트(pleated sheet) 또는 스킨-코어(skin-core)구조를 갖는다. 약 170 °의 각도로 주름(pleat)간격이 500 nm이고 폭이 600 nm인 배향액정영역 집합체가 섬유축 방향으로 피브릴을 구성하고 있으며, 주름 잡힌 시트형의 피브릴은 섬유의 직경방향으로 놓여 있다. 그러나 이러한 주름 구조는 장력 하에서 강열처리하면 없어진다. 실제 초고탄성률을 갖는 Kevlar-149(이 섬유는 이전의 Kevlar 섬유와는 달리 열처리 공정 단계가 있음)는 거의 직

Table 7. 아라미드 섬유 등급에 따른 일반 물성

Grade	Density (g/cm ³)	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (GPa)	Tensile Elongation Percent (%)
Kevlar 29	1.44	83	3.6	4.0
Kevlar 49	1.44	131	3.6 - 4.1	2.8
Kevlar 149	1.47	186	3.4	2.0
Kevlar Ht (T129)	1.44	59-124	N/A	N/A

Source: E.I. DuPont de Nemours; BCC, Inc

선상의 시트구조를 하고 있다. 아라미드섬유의 구조는 스킨-코어구조로도 표현되는데, 스킨에서는 고분자 사슬의 말단이 섬유축 방향으로 무질서하게 배열되어 있고, 코어에서는 고분자 사슬 말단이 집중된 피브릴들이 200~250 nm의 정수 배에 해당되는 계단식으로 쌓여 배향되어 있다. 섬유의 물리적 성질은 주로 스킨 층에 의해 결정되며, 제조공정에서 가해지는 각 공정별 조건에 의해 스킨 층과 코어 층의 형상이 달라지며, 이로 인해 섬유의 물리적 성질의 차가 발생한다. 이 스킨-코어구조는 방사 시 섬유의 외부가 받는 전단응력이 내부보다도 커서 외부의 분자사슬들이 내부보다 더 잘 배향하기 때문에 생기는데 필라멘트의 굵기가 증가할수록 코어부분의 비율이 높아져서 섬유의 강도를 저하시키게 된다. PPTA섬유의 기계적 성질, 특히 탄성률은 장력 하에서 열처리하면 현저히 향상된다.

아라미드 섬유소재는 Figure 5에서와 같이 물성이 가장 우수한 섬유소재는 아니지만 고유의 특성 및 가격대 성능비가 우수하여 다양한 용도에서 시장 점유율이 높은 섬유소재이다. 고강도, 고탄성, 경량 및 치수안정성 등의 특징을 이용하여 용도개발 초기부터 개발에 주력한 타이어 코드와 같은 섬유 보강고무복합재료의 적용은 현재 완전히 실용화되어, 스포츠용 자동차나 특수용도의 타이어에 사용되고 있다.

우주 항공분야에서는 우주왕복선의 연료탱크를 비

롯하여 압축강도가 요구되는 부분을 제외한 항공기의 화물 보관함, duct, 바닥재 등과 같은 내장재에 resin system의 형태로 사용되고 있다. 특수 분야에서도 아라미드 섬유는 탁월한 절단저항력을 인정받아 직물 또는 felt의 형태로 항공기 및 방탄조끼, 방탄헬멧 등에 널리 사용되고 있고, 고탄성, 경량화가 요구되는 보트, 요트 등을 비롯하여 골프채, 테니스라켓, 낚시대 등과 같은 스포츠용품에도 유리섬유와 같이 사용되고 있다.

한편, Kevlar(para-아라미드)는 방탄의복 재료로서 잘 알려져 있고 같은 weight에서 강철보다 5배나 더 강함에도 불구하고 잘 구부러진다는 특성으로 처음으로 유기섬유가 방탄복에 적용된 case이다.

이미 언급한 바와 같이 인장 특성은 Table 7에서 참조하기로 하고 내열 특성을 살펴보면 Kevlar는 PBO 섬유보다는 못하지만 다른 섬유에 비해 열분해 개시온도, 열수축 개시온도, 및 연소성은 매우 뛰어나다. 그리고 온도변화에 따른 물성의 안정성이 매우 높다. 특히 고온에서 섬유의 수축이 거의 없고 160 °C에서 장기간 사용이 가능하다. 온도 상승에 따른 인장강도 변화를 Figure 6, 일정한 온도에서 노출 시간에 따른 물성변화를 Figure 7에 각각 나타내었고 저온인장특성은 Table 8에 나타내었다. 저온시의 인장 탄성율은 상승하고 파단신율은 약간 감소하는데 이는 분자의 강직성이 약간 증가하기 때문인 것으로 해석된다.

그리고 치수안정성에 대해서 특히 열풍과 열수에 장시간 노출시켰을 때 다른 섬유들은 비가역성 수축이 일어나는데 비해 Kevlar는 수축이 거의 일어나지 않으며 직경방향으로 마이너스 열팽창계수를 가지고 그 수치 또한 매우 미약한 수준이다. 또 Kevlar는 내화염성을 가지고 있으며 착화는 가능하지만 (한계산소지수,LOI:29)연소는 대개 불씨를 제거하면 정지하는 성질이 있다. 이러한 특성으로 Kevlar는 방탄소재로 적합성을 인정받아 일찍이 방탄복에 적용된 바 있으며, Kevlar의 등급에 따라 방탄복에 통용되고 있다;Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar 149,

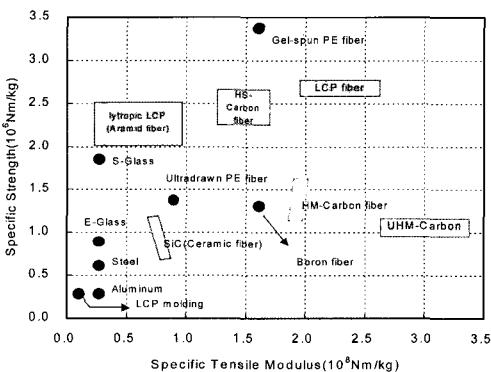


Figure 5. 여러 고성능 섬유의 물성 비교.

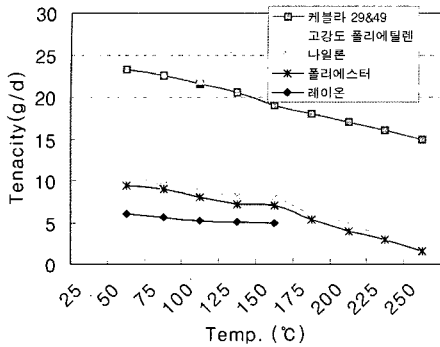


Figure 6. 각종 섬유에 따른 온도에 따른 인장강도.

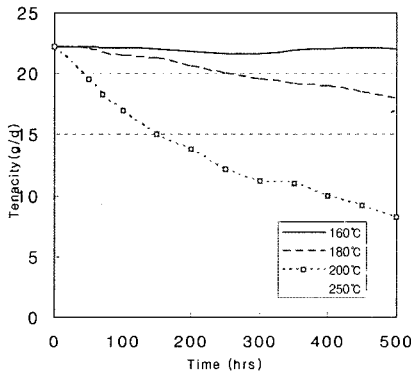


Figure 7. Kevlar yarn(연계수: 1.1)의 고온 노출시간에 따른 인장강도 변화.

Table 8. 저온에서 Kevlar -29 yarn(연계수: 6.5)의 인장 특성

		상 온(24°C)	저 온(°C)
강도	g/d	19.1	19.8
	Kg/mm ²	247	256
	Mpa	2,475	2,514
과탄신율(%)	4.1	3.9	
인장탄성율	g/d	425	521
	Kg/mm ²	5,498	6,742
	Mpa	53.9	66.1

Kevlar 129, Kevlar Correctional, 그리고 Kevlar Protera 가 통용된다.

Kevlar 29 는 DuPont에 의해 개발된 방탄복섬유의 제1세대이며, 제품을 유연하게 해주는 것과 실전에서 방탄복을 숨길 수 있게 했다. 두 번째 세대의 Kevlar는 1988년에 Kevlar 129로 데뷔했다. 1995년 에는 puncture-resistant 기술(방검성)이 가미된

Correctional Kevlar가 도입된 바 있다. Correctional Kevlar는 초극세 fiber를 사용해서 매우 단단하게 짜여진 부직포인데 얼음조각, 송곳 및 죄수가 만든 칼 등으로부터 공격받았을 때 충격의 에너지를 흡수할 뿐 아니라 분산시키는 역할을 한다. 그리고 Kevlar Protera는 고성능 Kevlar 직물인데 종래의 방탄복에 비해서 더욱 가볍고 더욱 유연하며, 방탄성능이 더욱 우수한 직물이다. 이 직물의 Kevlar는 새로운 방사기법 개발로 인해 인장강도와 충격흡수능에서 한층 up-grade된 섬유이다. 즉, 인접 사슬의 phenyl 기가 서로 한 방향으로 쌓여 있는 배열로 섬유를 방사하기 때문에 결정성이 통상의 Kevlar 보다 높고 더 강하다.

2.3. UHMWPE(ultra high-molecular-weight polyethylene) 섬유

2.3.1. 개발 및 기술 동향

UHMWPE섬유는 초고분자량 폴리에틸렌(ultra high molecular weight PE/UHMWPE)섬유로 부르기도 한다. 종래의 범용 폴리에틸렌을 섬유로 만들면 겨우 10 GPa 정도의 탄성률밖에 얻지 못한다. 그러나 1975~1979년에 아라미드의 강도 및 탄성율을 능가하는 초고강도·고탄성을 폴리에틸렌 섬유가 섬유상 결정성장법[14], gel 방사/gel-cast & 초연신법[15]에 의해 실현되었다. 섬유상 결정성장법은 필터형 결정화용기를 이용하여 초고분자량 폴리에틸렌/파라크실렌 준희박용액 (0.4~0.6 wt%, 100~125°C) 중에 rotor를 회전시킴으로써 rotor표면에 형성된 Gel 피막에 종결정(seed)을 접촉시켜 유동방향으로 성장하는 섬유상결정을 연속적으로 인취하는 방법으로 110 °C이상의 고온에서 얻어진 섬유상 물질은 연신 없이도 고강도 및 고탄성율을 나타내며, 110 °C이하의 저온에서 얻어진 섬유상물질은 연신에 의해 초고강도·고탄성율 섬유를 얻을 수 있다.

gel 방사/gel-cast & 초연신법은 섬유상 결정성장법의 rotor표면에 형성된 gel 상 물질을 용액방사(또는 용액cast)에 의해 형성시킨 후 초연신을 하는 방

법으로 용액으로는 초고분자량 폴리에틸렌 준희박 용액을 이용하여 용매를 가급적 휘산없이 방사(또는 cast)하여 얻은 gel 상 섬유(또는 cast)를 초연신한다. 얻어진 gel 상 섬유는 냉각 시에 생성되는 lamella 간에 다량의 용매를 함유하는 일종의 물리적 gel 상태이며, lamella간의 결합분자에 의해 연결된 구조를 형성하며 이에 대한 구조 model을 Figure 8에 도식하였다. 점선 부분이 용매를 나타내고 실선이 polymer chain을 묘사한 것으로 분자 간 결합밀도는 종래의 용융방사, 용액방사에 의한 방출사와 비교하여 상당히 낮아 최대 연신배율이 100~300배에 달하며 folded chain의 연신에 의해 초고강도·고탄성을 폴리에틸렌섬유를 얻을 수 있다.

1983년에는 gel 상 구정 press-die연신법[16](일명, gel press-초연신법)이 고안되었으며, 이것은 준희박 용액에서 만들어진 용매를 다량 함유한 구정의 집속볼을 press하여 얻어진 sheet상 물질을 die연신시키는 방법으로 구정 간에 이어짐이 없는 독립적인 gel 상 입자를 이용하는 점에서 gel 방사/gel-cast법과 다르다. 1987년에는 virgin polymer초연신법[17]이 개발되었는데 virgin polymer는 저온중합에 의해 분자간의 결합을 극히 억제한 단결정상의 폴리머이며 이것을 용매에 녹여 초연신하는 점이 타 제법과 다르다.

폴리에틸렌 고분자를 이용한 초고강도·고탄성을 섬유의 제법에 있어서 공통적인 원리는 크게 다음과 같이 3가지로 요약할 수 있다.

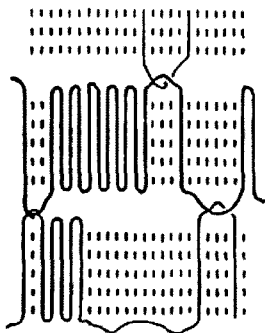


Figure 8. gel 상 섬유 구조 model.

- ① 분자 chain길이 1 μm 를 넘는 고분자량 고분자를 이용함
 - 고분자량화에 의해 최대연신배율이 증가하며, 연신물의 도달강도는 분자량에 의존하며, 분자말단의 구조결합이 파단의 요인이 되기에 이를 억제하기 위해서 고분자량화가 유리하기 때문이다.
- ② 분자간 결합밀도가 가능한 적은 미연신물을 제조함.
 - 폴리에틸렌 100~300배, PVA 40배 수준까지 연신이 가능해지게 된다.
- ③ 결정분산온도(또는 연화점 근방의 온도)이상에서 다단 연신을 행함.

초연신을 행하여 물성을 실현하는데 있어 최대연신 배율을 높이기 위해서는 미연신물의 제조가 가장 중요하다.

앞서 언급된 초고강도·고탄성을 갖는 폴리에틸렌 섬유를 제조하는 방법으로는 여러 가지가 고안되었으나, 그 중에서 상업적으로 가장 성공적인 연구는 1980년대에 고안된 gel 방사 및 초연신(ultra-drawing)에 의한 방법[18]이다. 이는 초고분자량 polyethylene을 decaline 등의 유기 용매에 용해시킴으로서 준희박 용액을 얻고, 이것을 용액 중에 방사해서 gel 상 섬유로 만든 후 초연신하는 방법이다. 이때 사용되는 초고분자량 폴리에틸렌은 ① 분자쇄의 직선성이 양호하다. ② 분자의 단면적이 작다. ③ 한계신장 분자쇄 상태가 될 때 자유 변형량이 작기 때문에 이론적으로 초고강도·고탄성화되기 쉽다. gel 방사 장치와 개념도를 Figure 9에 나타내었는데, 일반적으로 ① 저농도 폴리에틸렌 고분자 용액을 gel화하는 공정 ② gel 섬유 형성을 위한 용액 압출공정 ③ 연신 공정으로 구성된다.

이와 같은 초고분자량 polyethylene을 이용한 초고강도·고탄성을 섬유의 제조에 있어서 섬유의 결합을 최소화하기 위해서는 다음과 같은 제조상의 필요조건들이 충족되어야 한다.

- ① 분자량이 100만을 넘는 초고분자량의 고분자를 이용한다(분자쇄 말단 결합을 최소화).

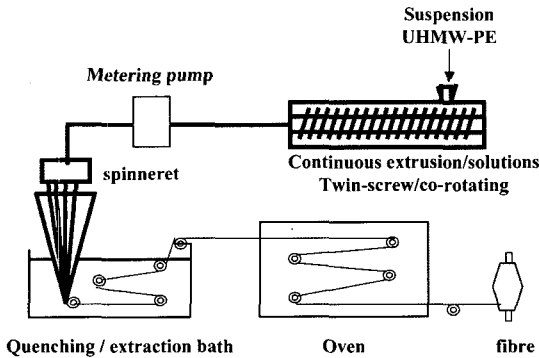


Figure 9. UHMWPE gel 방사 장치 및 개념도.

- ② 분자쇄가 서로 얽히는 준희박용액 농도에서 균일하게 용해한후, 방사구금으로 압출하여 냉각, 결정화 한다(얽히는 결합을 최소화).
- ③ 얻어진 gel 상의 미연신사에서 용제를 제거하면서, 초연신공정으로 고배율 연신을 한다(얽히는 결합, 비결정부, 접히는 사슬 등의 결합을 최소화). 상기의 조건들이 충족되면 접힌 사슬, 얽힘, 비결정쇄 등의 결합이 거의 없는 이른바 최대신장 분자쇄 결정구조에 의해 초고강도·고탄성률의 폴리에틸렌 섬유를 얻을 수 있다. gel 방사 및 초연신법에 의한 폴리에틸렌 고분자에 있어서 고강도 및 고탄성률 특성을 발현할 수 있는 이유를 이론적으로 살펴보면 Figure 10과 같다.

Gel 방사에 있어서 희박용액으로부터 얻어진 라멜라(lamella) 단결정은 판상이며, 분자쇄는 라멜라의 두께방향으로 정렬되어 있고 라멜라의 표면에서 규칙적으로 접혀있다. 층상으로 배열된 결정은 공간적으로 임의의 방향으로 배열하여 구정(spherulite)

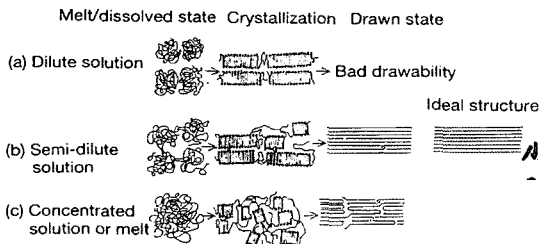


Figure 10. Gel 방사 및 초연신법의 기본 개념.

을 형성한다. 이러한 결정성 고분자에 힘을 가하면 구정이 파괴된다. 연신응력이 탄성영역의 한계를 초과하면 구정과는 완전히 다른 피브릴 형태의 섬유 구조로 바뀌게 된다. Figure 10과 같이 라멜라내의 접혀진 사슬이 연속적 (혹은 블록) 형태로 불연속적으로 풀려 나와 마이크로 피브릴로 되며, 각 블록은 연신시 넥킹부에서 분자쇄 펼쳐짐에 의해 형성된 피브릴내 tie 분자에 의해 연결된 반면, 마이크로피브릴 사이는 피브릴간 tie 분자에 의해 연결되어 있다. 초고강도·고탄성률의 polyethylene 섬유를 얻기 위해서는 방사조건을 최적화하여 결정구조를 형성하는 분자쇄를 섬유의 연신방향으로 최대한 배향시키고, 배향된 분자가 펼쳐진 사슬구조를 갖도록 유도해야 하며, 피브릴내 tie 분자 및 피브릴간 tie 분자수를 증가시키고 동시에 길이분포를 균일하게 해야 한다.

현재 상업화된 기술은 gel 방사와 초연신법이 혼합된 기술로서 네덜란드의 DSM 중앙연구소에서 1980년대 초부터 개발에 착수하여 gel 방사법을 적용하여 일차로 실용화하고, 그 후 일본의 Toyobo사와 기술 제휴하여 gel 방사 기술을 완성했다.

네덜란드의 DSM사는 1979년 세계 최초로 고강력 폴리에틸렌 섬유의 특허를 등록한 후 상당 기간의 실용화 연구를 계속하여 gel 방사법을 개발하였고, 개발된 제품의 상품명을 Dyneema로 하여 시험 생산 단계를 거친 후, 1990년에 약 500 ton/year 규모의 상업 생산에 들어갔다. Dyneema라는 이름은 라틴어로 ‘강한 실’을 의미한다. DSM의 생산능력은 그 후 꾸준히 늘어나 1997년에는 1500 ton/year, 2001년에는 2,600 ton/year로 증가되었으며, 2003년에는 생산능력을 3,200 ton/year로 증설할 계획을 발표했다.

한편, 일본의 Toyobo사는 DSM사의 특허를 기반으로 하는 기술제휴 협약을 체결하여 공동 개발에 참여한 결과 DSM사 보다 빠른 1988년에 500 ton/year의 생산능력을 확보하여 같은 상품명인 Dyneema로 출시했으며, 2003년에 생산설비의 2배

증설 계획을 발표했다.

미국의 Allied-Signal사(1999년 Honeywell Performance Fibers에 합병)도 DSM으로 부터 특허 라이선스를 받아 비슷한 시기에 Spectra라는 상품명으로 출시했다.

따라서, 현재 초고강도·고탄성을 폴리에틸렌 섬유 메이커는 원조 개발자인 네덜란드의 DSM사(Dyneema), DSM 특허를 상용화한 일본의 Toyobo사(Dyneema) 및 미국의 Honeywell Performance Fibers사(Spectra) 등 3개 회사이다.

2.3.2. 특성과 응용

초고강도·고탄성울의 폴리에틸렌은 다음과 같은 5가지 특징을 가지며 시판되고 있는 제품의 특성별 용도를 Table 9에 나타내었다.

- ① 밀도가 1.0 g/cm³ 이하이므로 매우 가볍고, 특히 물을 흡수하지 않고 물에 뜰 수 있다는 특징을 가지며, 음파 등 파동의 전달성이 우수하고, 수중에서 길이가 변하지 않는 특성이 있다. 선박 예인용 로프(ropes), 해안 계류용 로프, 요트의 돛, 낚시줄(최근에는 어군 탐지기를 사용하는 하이테크 낚시 어로 작업에도 사용)
- ② 고강도와 신도의 균형이 양호하여 내충격성이 우수하다.
광섬유 케이블 보강소재, 항공우주용 복합재료, 차량용 방탄재료, 방탄조끼, 방검복, 방호장갑, 헬멧, 전기코드 등에 사용
- ③ 폭넓은 내약품성 및 자외선에 대한 내광성이 우수하고, 수중이나 야외 사용에도 물성의 열화가 일어나지 않고, 내마모성이 강하다. 골프장 넷트, 기중기용 밧줄, 공사장 방호넷트, 등산 배낭, 선수용 운동복, 송풍용 파이프관 등에 사용
- ④ 범용 폴리에틸렌 대비, 내열성이나 치수안정성이 훨씬 높으나, 타 극한성능 소재에 비해서 용점이 낮은 것이 약점이나, 온도가 올라가면 오히려 수축하는 매우 특이한 성질을 가지고 있다. 온도가 올라가면 팽창하는 정상적 물성의 재료

와 혼성된 복합재료를 만들면, 복합재료의 온도 특성을 원하는 대로 조정할 수 있게 되며, 이는 재료설계에 매우 유리한 수단을 제공함. (초전도 coil용의 보빈 제조에 사용)

- ⑤ 유전상수(dielectric constant)가 낮아 레이더에 잡히지 않는 복합재료 제조에 적합하여 군사 목적의 스텔스용 복합재료에 사용된다.

Table 9에 언급된 제품중 Dyneema의 경우, 결합이 적은 신축성 결정구조에 가까운 미세구조를 갖고 있다고 고찰되나, 현실적으로는 다른 유기섬유와 같이 마이크로피브릴-메크로피브릴의 미세구조 집합체인 계층적 구조이므로 결정입자계, 마이크로 및 메크로 피브릴사이의 결핍 등 아직 많은 결핍이 존재하고 있다. 따라서 개선의 여지가 있다고 시사되고 있다. 실제 최근 일본 Toyobo(주)에서는 원료에서 각 공정에서의 혁신화를 달성하는 것에 따라 종래품마다 약 30% 강도를 향상시킨 고강도 폴리에틸렌(강도 40 g/d 이상)의 개발에 성공하였다. 이와 같이 일반 물성의 우수성 외에 내광성, 내약품성에서 우수한 성능을 나타낸다. 카본 아크(carbonarc)광을 1,500시간 조사한 후의 강도 유지율은 80% 이상이다. 같은 조건에서 aramid의 유지율은 30% 정도에 지나지 않는다. 내약품성 측면에서 내산(耐酸), 내알칼리성은 넓은 pH 범위에서 우수한 안정성으로 최근 대표적인 응용분야로는 수산자재, 일반 자재, 방탄/방호재(防護材), 특수의료(特殊衣料), FRC, FRP 등이 있으나 방탄 부분에서 기존 사용되고 있는 유리섬유 및 Kevlar 섬유의 대체소재로서 활발히 전개되고 있다. 이는 경량이면서 면적당 강도가 월등히 뛰어난 특성을 가지고 있기 때문이다. 군용의 두꺼운 장갑으로부터 방탄 조끼, 방탄모자, 방탄 마스크 등 향후 응용분야는 점점 확대될 것으로 예측된다. 특히 헬멧의 경우 높은 완충성(緩衝性)과 내관통성(puncture resistance, 耐貫通性)이 요구되기 때문에, 이 두 가지 성질에 있어 모두 고강도 폴리에틸렌 섬유가 우수한 성능을 발휘하고 있다. 나아가 유리 섬유 일부를 치환하는 형

Table 9. 초고강도·고탄성율 polyethylene 섬유 물성

제품명	강도		탄성률		신도	밀도	비고
	g/d	GPa	g/d	GPa	%	g/cc	
SK25-750dTex ¹⁾	26	2.2	621	53	4.4	0.975	일반용
SK60-440dTex ¹⁾	33	2.9	1028	88	3.6		일반용
SK65-110dTex ¹⁾	38	3.3	1158	100	3.6		일반용
SK75-440dTex ¹⁾	44	3.8	1377	118	3.6		고강도용
SK76-1760dTex ¹⁾	41	3.5	1337	115	3.6		방탄용
SK60 ²⁾	29.5~36.3	2.6~3.2	658~1396	88~123	3~5	0.97	일반용
SK71 ²⁾	>40	3.5~4.0	>1396	>123	3~5		고강도용
Spectra 900 ³⁾	25.5~30.5	2.2~2.6	720~920	62~66	3.6~4.4		일반용
Spectra 1000 ³⁾	34.5~38	2.95~3.25	1150~1320	101~113	2.9~3.4		고강도용
Spectra 2000 ³⁾	34~41	2.91~3.34	925~1350	79~124	2.9~3.1		우주항공용

¹⁾제품/Maker: ¹⁾Dyneema/DSM, ²⁾Dyneema/Toyobo, ³⁾Spectra/Honeywell.

태로 사용되기 때문에 경량화도 달성하고 있다. 요구 성능이 같은 작업용 헬멧으로도 사용을 넓혀가고 있다.

2.4. PBO(polyphenylene-2,6-benzobisoxazole) 섬유

2.4.1. 개발과 기술동향

내열 초극한 성능을 가진 PBO 섬유의 역사는 1970년대 후반 미공군 연구소(Air Force Ordered Polymer Research Program)에서 시작되었고[19-22], 1970년대 말 Stanford Research Institute(SRI)에서 PBO에 대한 특허가 출원되었다. 그 이후 미국의 Dow Chemicals사에서 SRI의 특허를 획득하여 공업화를 시작하였으며, 1991년 Dow Chemicals사와 일본의 Toyobo사가 공동으로 PBO 섬유인 ZYLON을 세계 최초로 개발하였다. 1998년 Dow Chemicals사는 본 사업에서 철수하고, Toyobo사에서 독자적으로 敦賀市 소재 공장에서 200 톤/년 규모로 생산을 개시하였다. 한편, PBO 섬유는 Kevlar 및 Twaron에 비해서 경량이므로 방탄 조끼에 매우 적합한 것으로 알려져 있으나 높은 온도 및 습도에 장시간 노출시 물성저하가 예상된다고 알려져 있어 극소부분에만 사용되고 있다.

현재 PBO 섬유는 국내에서 생산되지 않을 뿐 아니라 해외에서도 일본 Toyobo사에서만 독점생산하

고 있으며, 국내수요는 방탄복 등에 5~10 톤/년 정도 소비되는 것으로 추정된다. 하지만 아라미드 섬유를 능가하는 내열성과 강도 때문에 향후 원가의 문제가 해결된다면 시장의 급격한 증가가 예상된다. PBO 중합체를 얻는 방법으로는 wolfe 법과 dow 법이 있는데 tri-chlorobenzene을 시작으로 diamino-resolthinol을 합성하고 이를 프탈산과 반응시켜 최종 PBO를 얻는 dow 법[23]은 wolfe 법에 비해 수율이 높아 합성되는데 wolfe에 의한 합성법[24] 이성체 생성으로 수율이 낮다. 중합은 폴리인산 용액 중에서 무수인산에 의한 탈수반응으로 얻어지고 용액중합으로 얻은 dope는 액정성을 나타내고 바로 방사에 사용된다. 방사 방법은 아라미드 방사법과 유사하고 대략적인 과정을 Figure 11에 나타내었다.

인류 마지막 최고의 합성섬유라는 의미로 명명된 ZYLON 섬유는 강도가 42 g/d(5.8 GPa)로 p-아라미드 섬유의 2배 수준이며, 내크리프성, 내약품성, 내광성, 난연성, 형태안정성이 극히 우수하며, 복합재료의 보강재로 유망한 첨단소재이다.

PBO 섬유를 독점 생산하는 일본 Toyobo사는 Table 10과 같은 생산계획을 세우고 있으며, 1999년 현재 약 180 톤 정도가 생산되었으며, 원사 가격은 \$100~200/kg으로 para-아라미드보다 3~4배 높은 가격에 공급되고 있다.

Toyobo사에서는 향후 PBO 섬유가 para-아라미

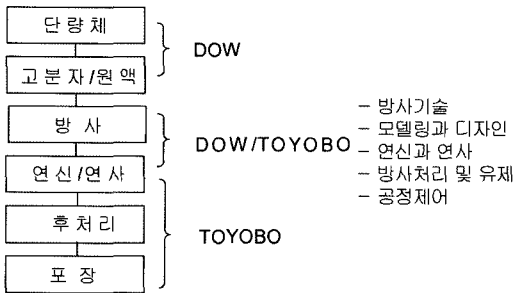


Figure 11. PBO 섬유의 제조 공정 과정.

Table 10. 일본 Toyobo사의 PBO 섬유 생산계획

연도	1998	2000	2005	2010
생산량(톤/년)	200	380	1,000	3,000

드 섬유를 상당량 대체해 나갈 것으로 전망하고 있으며, 따라서 향후 전 세계적으로 연간 약 10,000 톤 이상의 수요(1,100만 달러에 해당)가 발생하리라 전망된다.

2.4.2. 특성과 응용

Zylon 섬유는 강도 및 탄성률과 내열성 및 난연성 면에서 모두 기존의 국한성 섬유소재를 능가하는 월등한 물성을 가지고 있다. Table 12에서 보듯이 타 섬유에 비해 특히 강도 및 탄성률과 내열성 및 난연성 면이라는 두가지 극한성을 동시에 보유하는 매우 혁신적인 소재로 향후 시장전개에 따라 그 성장이 크게 기대가 되고 있다. 건열 분위기에서 장시간 노출하였을 때 강도 유지율을 Figure

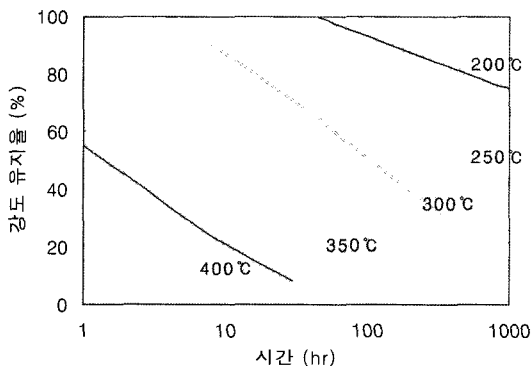


Figure 12. 열처리 시간에 따른 zylon AS의 강도유지율.

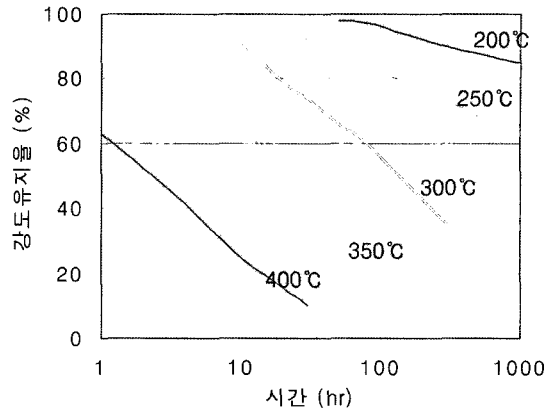


Figure 13. 열처리 시간에 따른 zylon HM의 강도유지율.

PBO Fiber Producer Products

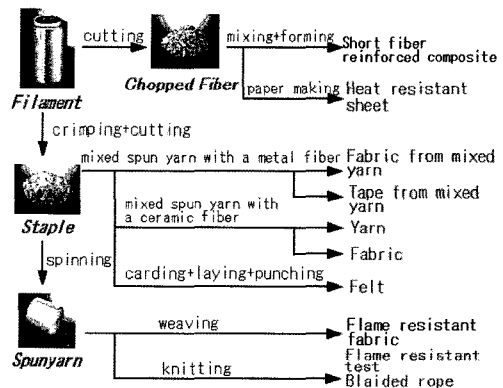


Figure 14. Toyobo사의 PBO 섬유 제품계통도.

12,13에 나타내었는데 zylon AS(단섬유) 보다 zylon HM(장섬유)이 더욱 우수함을 보이고 있다. Figure 14는 Toyobo사 zylon 섬유제품의 응용 제품 계통도를 나타낸 것이다.

3. 방탄 소재 섬유의 응용에

방탄제품의 경우 국내에서는 오리엔탈, 은성사, STEC line 등 중소기업 4-5개 회사가 방탄제품을 제조하고 있으며 시험실(방탄실험)을 갖춘 회사는 오리엔탈 뿐이다.

따라서 자이툰 부대 헬멧, 방탄복, 방탄차량에 쓰

Table 11. PBO 섬유와 기존 극한성능 섬유의 물성비교

섬유 종류	PBO (ZYLON [®])		Aramid		Carbon Fiber	고강력 PET
	ZYLON-AS	ZYLON-HM	p-Aramid	m-Aramid		
인장강도(g/d)	42	42	22	5.3	23	9
인장탄성율(g/d)	1300	2000	850	140	1480	125
파단신도(%)	3.5	2.5	2.4	22	1.5	25
밀도(g/cc)	1.54	1.56	1.45	1.38	1.76	1.38
내Creep性	◎	◎	○	○	-	△
내약품성(H ₂ SO ₄)	◎	◎	○	○	-	△
난연성(LOI)	68	68	29	29	-	21

^{*)} p-Aramid: DuPont(Kevlar), Teijin(Technora), m-Aramid: Du Pont(Nomex) 고강력 PET: KOLON,

²⁾ ◎: Excellent, ○: Good, △: Poor

³⁾ LOI: Limited Oxygen Index, LOI 숫자가 높을수록 난연성이 우수함

(의류용인 경우 미국은 LOI 26 이상, 유럽은 LOI 28 이상을 요구함)

Table 12. 방탄제품의 성능 지표 및 수준


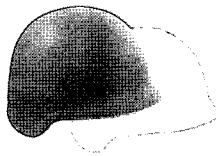

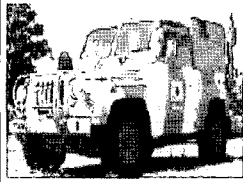
기술적 성능지표 등		단위	전체	세계 최고수준	공인시험 기관	시험규격	
			비중(%)	(보유기업/국가)			
			성능수준	성능수준			
성능 또는 물성	방탄재 면밀도	UD Cloth	g/m ²	10	300 (Dupont/미국)	화학시험 연구원	KS M ISO 10352 or ASTM D 3774-89
		UD	g/m ²	10	240 (Honywell/미국)		
		prepreg	g/m ²	10	170 (Dupont/미국)		
		yarn coating	g/m ²	10	400 (Dupont/미국)		
	방탄 성능 (방호 면밀도)	방탄복	kg/m ²	20	(III A 급) 5.2 Kg/m ² (Twaron/네덜란드)	(해외) White Lab (국내) 육군사관학교	MIL-STD-662F NIJ -0101.04 NIJ -0108.01
		방탄헬멧	g	20	(FSP1.1 g 610 m/s이상) 1,550 g (Dupont/미국)		
		방탄판	kg/m ²	20	(III 급) 25 Kg/m ² (Dupont/미국)		
내구수명 또는 고장율							
합계		합계	100%				

이는 소재 및 가공제품은 오리엔탈을 포함해서 연간 200만 달러 수준으로 수출하고 있다. 방탄 제품의 test는 최종적으로 미국 White Lab.에 규격 합격 여부를 판단하지만 국방소요일 경우 매우 엄격히 육군 사관학교 방탄 test를 품질관리소에서도 실시하고 있다. 방탄 제품에 대한 기술 수준은 단연 미국이 최고 높다. 다음 Table 13은 방탄제품의 성능 지도 따른 기술 수준을 나타낸 것이다. 여기에서 가장 중요시 되는 항목은 역시 직물의 면밀도이다. 면 밀도가 높을수록 방탄에 대한 침투방어력이 우수하

기 때문이다. Figure 15는 방탄섬유소재를 이용하여 방탄제품군별 제조하는 단계를 나타낸 것이다. 계통도에서 보듯이 unidirection 또는 unicloth (UD) 제조를 거쳐 prepreg 제조하는 단계가 중요한데 여기에는 적당한 성능을 가진 수지 또한 중요한 요인이 된다.

Table 14는 실 예로서 몇몇 방탄제품에 사용되는 소재 및 규격에 대한 것으로 참고로 삼았으면 한다.

Table 13. 몇몇 방탄 제품의 구성성분 및 성능 규격

구분	방탄복	헬멧	방탄판	차량(선박)용 방탄판
제품사진				
사용소재	P-Aramid/UHMWPE	P-Aramid/UHMWPE	P-Aramid/UHMWPE /PBO	P-Aramid or Hybride 소재 사용
사용원사	1,500 denier 이하	1,500 denier 이하	1,500 denier 이하	1,500 denier 이하
직물형태	UD Fabric/ 열가소성수지	Weaving Fabric/열경화성수지 UD Fabric/열경화성수지 UD Fabric/열가소성수지	Weaving Fabric/열경화성수지 UD Fabric/열경화성수지 UD Fabric/열가소성수지	Weaving Fabric/열경화성수지 UD Fabric/열경화성수지 UD Fabric/열가소성수지
기준 면밀도 (방호규격)	6.4 kg/m ² (NIJ-STD-0101.04) Level IIIA급	1,550 g이하 (FSP1.1 g 610 m/s 이상)	25 kg/m ² (NIJ-STD-0104.01) Level III급	42 kg/m ² (NIJ-STD-0108.01) Level IV급

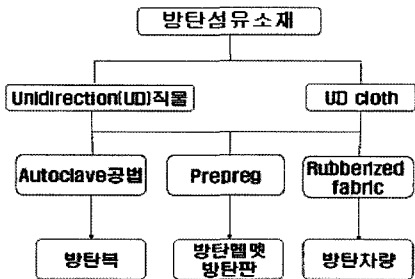


Figure 15. 방탄 제품군별 섬유소재의 적용 계통도.

4. 맺음말

오늘날 세관, 경찰, 군인, 그리고 모든 사회의 질서유지 종사자는 탄도에 대한 방어를 요구하고 있다. 역사적으로 방탄은 운동성, 유연성, 및 화염에 대한 대피성에 대한 반대급부를 지니고 있었다. 무겁고 딱딱한 재료를 사용함으로써 예전의 방탄복은 그 역할을 충분히 하였지만 사용자에게는 상당한 불편을 주고 있다고 하겠다. 따라서 현대는 활동성에서 보다 개선된 소재와 방탄복을 요구하고 있다.

2003년에 Simula, Inc.(Phoenix AZ)사 의해 출현

된 U.S. Patent 6,526,862에서 보다 가볍고 방탄성능이 우수한 유사 등방성 섬유배열집합체(quasi-isotropic orientation)이라는 기술을 발표한 바 있다. 이 직물은 다양한 탄도를 효과적으로 방어할 수 있도록 설계되었는데 PBO, Kevlar, Dyneema 섬유 모두 사용될 수 있고, hybrid 형태로도 가능함을 보여주고 있다. 이상에서 빈약한 지식으로 방탄 섬유소재에 대해서 두서없이 기술하였으나 방탄산업이 국가 기간산업으로서, 그리고 사회 security 측면에서 부각될 것으로 예측되므로 많은 섬유 산업 종사자들이 관심을 갖기를 희망한다.

참고문헌

1. A. W. Crull and R. D. Hooker, "Protective Clothing and Gear : Body/Vehile Armor, Fire, Chem/Bio", *Business Communications Co., Inc.*, Norwalk, CT 06855.
2. D. R. Hartmon, "High Strength Glass Fibers", *Technical Paper*, Owens Corning.
3. 김영근, 복합재료용 무기섬유(I-II), *한국화섬협회지*, 6, 62(1992).
4. E. Medvdovski, *Ceramic Armor and Armor Systems*, p3-18, 1999.
5. U. S. Patent 3,063,966.

6. U. S. Patent 3,600,350.
7. U. S. Patent 3,671,542.
8. U. S. Patent 3,767,756.
9. 超高强度 纖維의 競合과 市場實態, (株)大阪Chemical Market Tcch Center(1990).
10. H. H. Yang, Kevlar Aramid Fiber, John Wiley & Sons(1993).
11. M. G. Northolt, *Euro. Polym. J.*, **10**, 799, 1974.
12. M. G. Dobb, D. J. Johnson, and B. P. Saville, *Polymer*, **22**, 961(1981).
13. R. J. Morgan, C. O. Prueda, and W. J. Steels, *J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed.*, **21**, 1757(1983).
14. A. J. Pennings, et al., *Colloid & Polym. Sci.*, **253**, 452(1975).
15. 太田利彦, 岡田富士男, *Polymer preprints, Japan*, 35823(1986).
16. M. Mastsuo et al., *Seni-Kakkaishi*, **40**, 275(1984).
17. P. Smith et al., *J. Mater. Sci.*, **22**, 523(1987).
18. P. J. Lemstra, R. Kirschbaum, T. Ohta, and H. Yasuda, "Developments in Oriented Polymers-2(Ed. I.M.Ward), Elsevier, New York, p.39, 1987.
19. J. M. Wolfe, et al., *Polym. Prepr., Am. Chem. Soc., Div. Polym. Chem.*, **19**(2), 1(1978).
20. T. E. Helminiak, *Proceedings of 17th ACS Meeting, Hawaii, Am. Chem. Soc.*, Washington, DC, p.675(1979).
21. S. Kummar, International Encyclopedia of Composite, Vol. 4, S. M. Lee, Ed., VGH, New York, p.51(1991).
22. L. F. Wolfe, Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Vol. 11, 2nd Ed., John Wiley, New York p.601(1955).
23. U. S. Patent 4,766,244.
24. S. G. Wierschke, *Mater. Res. Soc. Symp.*, **134**, 313(1989).

저자 프로필



오 영 세

1984. 부산대학교 고분자공학과 졸업
 1986. 부산대학교 고분자공학과(석사)
 1996. 부산대학교 고분자공학과(박사)
 현재. (주)코오롱 중앙기술원 산자연구소
 수석연구원
 (730-030)경북 구미시 공단동 212
 전화: 054-469-3845
 e-mail: ysoh@kolon.com



한 인 식

1985. 서울대학교 화학공학과 졸업
 1994. 포항공과대학교 화학공학과(석사)
 현재. (주)코오롱 중앙기술원 헤라크론
 연구소장



김 영 근

1972. 전남대학교 무기재료공학과 졸업
 1974. 전남대학교 무기재료공학과(석사)
 1985. 독일 Berlin 복합재료(박사)
 현재. 오리엔탈코 부사장