

아라미드 섬유 특성 및 응용

한인식, 이창배

(주)코오롱 중앙기술원 Heracron 연구소

1. 서론

아라미드(aramid)란 지방족 폴리아미드(aliphatic polyamide)의 대표적인 nylon과 대별되는 용어로서, 1971년 방향족 폴리아미드 섬유를 최초로 개발한 미국 Dupont 사에 의해 제안된 후, 1974년 미국 연방통상위원회로부터 받아들여진 방향족 폴리아미드(aromatic polyamide)의 일반적인 표현이다. 미국 연방통상위원회는 아라미드를 “85%이상의 아미드기(CO-NH)가 두 개의 방향족 고리에 직접 연결된 합성 폴리아미드로부터 제조된 섬유”로 규정하고 있다. 아라미드 섬유는 크게 메타계와 파라계로 대별되며, 메타계는 내열성이 필요한 소재에, 파라계는 강도가 필요한 소재에 사용되고 있다. 특히 파라계 아라미드 섬유는 인장강도 20 g/d 이상, 인장탄성률 500~1100 g/d 정도의 고강력을 갖고 있을 뿐 아니라, 분해온도 400 °C 이상의 고내열성과 -160 °C에서도 섬유의 특성을 유지하는 우수한 내한성 및 우수한 절연성과 내약품성을 나타내는 첨단소재이다. 본 섬유는 nylon의 개발이후 고분자계에서 가장 획기적인 발명으로 받아들여지고 있다. 아라미드 섬유는 일반적인 유기 섬유와는 다른 우수한 성질을 가지고 있고 특히 가격대비 성능비가 우수하기 때문에 최초의 상업화 이후, 원사 및 직물을 비롯하여 부직포, UD laminating, staple 등의 형태로 크게 섬유보강 고무복합재료 등의 각종 복합재료, 로프, 케이블, 방탄방호용과 같은 산업소재의 용도로 자

동차, 우주항공, 정보통신, 국방 등 다양한 관련 산업분야에서 사용이 확대되고 있는 고부가 소재이다.

본 고에서는 주로 파라계 아라미드 섬유소재의 특성과 용도 분야에 관하여 살펴보고자 한다.

2. 아라미드 섬유 소재의 특성

2.1. 아라미드 섬유의 물리·화학적 특성

아라미드 섬유는 앞서 언급한 바와 같이 고강도, 고탄성을 나타내고, 고내열성, 치수 안정성, 내약품성, 전기 절연성 등이 뛰어나다. 기본적인 섬유 물성 및 타소재와의 물성 비교를 각각 Table 1, 2에 나타내었다. PPTA의 유리전이 온도는 375 °C, 저분자량의 용융온도는 530 °C로 알려져 있으며, Kevlar 29는 TGA 분석에 의하면 350 °C 이하에서 감량이 1% 이하이다. 아라미드 섬유의 색상은 밝은 노란색이며, 열처리한 Kevlar 149는 짙은 황금색이다. 이러한 색상을 가지는 원인은 파라 사슬구조에서 아미드 결합을 통해서 전자구름의 conjugation에 기인한 것으로 알려져 있다. 또한 일반적인 아라미드의 밀도는 1.43-1.44 g/cm³이며, 열처리한 제

Table 1. 아라미드 섬유의 주요 물성표

| Type | 단위 | Kevlar 29 | Kevlar 49 | Kevlar 129 | Kevlar 149 | Twaron | Technora | Nomex |
|------|-------------------|-----------|-----------|------------|------------|--------|----------|-------|
| 밀도 | g/cm ³ | 1.44 | 1.45 | 1.45 | 1.47 | 1.44 | 1.39 | 1.38 |
| 강도 | g/d | 23 | 23 | 26 | 18 | 23 | 27 | 5 |
| 탄성률 | g/d | 550 | 950 | 780 | 1100 | 600 | 570 | 140 |
| 신도 | % | 3.6 | 2.8 | 3.3 | 1.5 | 3.6 | 4.3 | 22 |

Table 2. 아라미드의 타 소재와의 물성비교

| Type | 단위 | Aramid | Nylon 66 | Steel | E glass |
|------|-------------------|-------------|----------|-------|---------|
| 밀도 | g/cm ³ | 1.43 - 1.47 | 1.14 | 7.8 | 2.55 |
| 강도 | g/d | 23 - 26 | 9 | 11 | 11.6 |
| 탄성율 | g/d | 500 - 1000 | 50 | 220 | 320 |
| 신도 | % | 2.8 - 4.5 | 19 | 4.8 | 3 |
| 사용온도 | °C | 250 | 150 | 500 | 350 |

품인 Kevlar 49는 1.44-1.45 g/cm³, Kevlar 149는 1.47 g/cm³ 정도로 밀도가 일반 grade 대비 약간 높다. 한편 아라미드의 평균 수분함량은 20 °C, 55% 상대습도에서 Kevlar 29는 7%, Kevlar 49는 4.0%, Kevlar 149는 1%이며 수분율은 불순물의 함량 및 섬유 미세구조에 따라 변화한다.

아라미드 필라멘트 하나의 강도는 섬유종류에 따라 다르며 대략 26-30 g/d이며, 아라미드 yarn의 강도는 TM 1.1, 10인치 게이지 length에서 1인치 필라멘트 강도의 80-85% 정도이다. 또한, loop 형태로 만들어진 yarn의 파단강도인 loop 강도는 인장강도의 50%수준인 10-12 g/d 정도이다.

Figure 1은 Kevlar 섬유의 인장강도에 대한 100-250 °C 온도범위에서의 열적인 aging 효과를 나타내준다. 100시간 aging 시 200 °C에서는 20%, 250 °C에서는 40%의 강도저하를 보여준다. Figure 1에

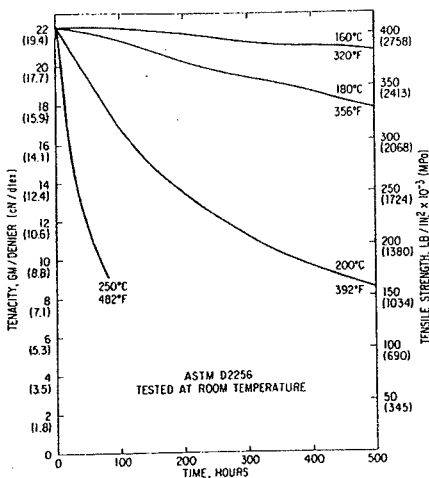


Figure 1. Kevlar 29 아라미드 섬유의 산화안정성.

서 보듯이 아라미드 섬유의 장기사용 내열온도는 약 150 °C 정도이다.

Figure 2는 Kevlar 29, Kevlar 49의 최대강도의 50%에서의 creep 특성을 나타내는 그래프이다. 여기서 Kevlar 29가 Kevlar 49보다 더 큰 creep 특성을 보여주고, creep 속도는 일정하게 유지가 되고, creep strain은 시간의 log 값에 선형비례한다. 전체적으로 볼 때 아라미드 사슬의 강직한 물리적 특성 때문에 아라미드의 creep strain 값은 10,000 시간이 지나도 1%내외로 그 특성은 상당히 우수함을 알 수 있다. 한편 아라미드 섬유의 축 방향 압축강도는 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.

Table 3은 Kevlar-49의 내화학성을 정리해 놓은 것이다. 대부분의 유기용매에 대하여 강한 내화학성을 보여주지만 고농도의 강산이나 강염기에서는 가수분해되어 강도저하가 많이 발생된다. 아라미드는 다른 폴리머와 같이 자외선에 민감하여 강도의 저하 및 색상변화가 쉽다. 아라미드는 독특한 이방성이 있어서 섬유축방향으로의 열팽창계수는 Kevlar 29인 경우 $4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 음의 값을 가진다. 또한 아라미드는 LOI(한계산소지수)값이 29로 상당히 높아 난연성이 우수한 특징이 있다.

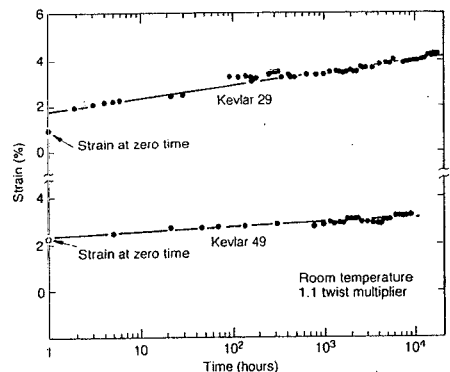


Figure 2. Kevlar 29와 Kevlar 49의 Creep 특성 (최고강도 50%, 상온).

Table 3. Kevlar 49 아라미드 섬유의 화학적 내구성^a

| Chemical | Retained tensile strength(%) | Retained tensile modulus(%) |
|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Acetic acid(99.7% aqueous) | 100 | 99 |
| Formic acid | 88 | 98 |
| Hydrochloric acid(37% aqueous) | 100 | 97 |
| Nitric acid(70% aqueous) | 40 | 95 |
| Sulfuric acid(96% aqueous) | 0 | |
| (too weak to test) | | |
| Ammonium hydroxide (28.5% aqueous) | 100 | 98 |
| Potassium hydroxide (50% aqueous) | 74 | 97 |
| Sodium hydroxide(50% aqueous) | 90 | 95 |
| Acetone | 100 | 99 |
| Benzene | 100 | 99 |
| Carbon tetrachloride | 100 | 100 |
| Dimethylformamide | 100 | 98 |
| Methylene chloride | 100 | 100 |
| Methyle ethyl ketone (MEK) | 100 | 98 |
| Trichloroethylen('Triclene') | 98 | 99 |
| Chlorothene (1,1,1-trichloroethane) | 100 | 100 |
| Toluene | 100 | 100 |
| Benzyl alcohol | 100 | 99 |
| Ethyl alcohol | 100 | 98 |
| Methyl alcohol | 99 | 98 |
| Formalin | 99 | 97 |
| Gasoline (regular) | 100 | 100 |
| Jet fuel (Texaco 'Abjet' K-40) | 96 | 99 |
| Lubricating oil ('Skydrol') | 100 | 99 |
| Salt water (5% solution) | 100 | 92 |
| Tap water | 100 | 100 |

^aYarns were tested using air-actuated 4-C cord and yarn clamps on an Instron test machine, at 10 in gage length with 3 turns per inch twist added, 10% per minute elongation, and at 55% RH and 72°F.

2.2. 아라미드 섬유의 구조적 특성[3,5]

아라미드 섬유는 amide 기와 aromatic ring으로 구성되는 강직한 형태와 직연쇄배좌(extended chain conformation)의 화학구조식을 가지고 있으며, 선형 사슬을 따라 주기적으로 존재하는 amide 기는 분자 간의 수소결합을 형성하여 결정화도를 증가시킨다. 따라서 아라미드는 결정화도가 60 이상인 고결정성을 갖고 배향도가 80% 이상(방사조건에 따라 90% 이상)의 고배향성을 갖기 때문에 인장에 대한 기계

적 성질이 우수하다.

x-ray를 통한 아라미드 섬유의 구조에 관한 연구와 결정과 분자구조의 모델은 Northolt가 최초로 제시했는데, 아라미드 섬유는 단사정계(monoclinic)로서 $a=7.87 \text{ \AA}$, $b=5.18 \text{ \AA}$, $c=12.9 \text{ \AA}$ 이고, 배향각은 PPD가 c 축으로부터 6도, TPC가 14도로 각 segment 별로 다르고, 두 분자사슬이 단위격자(unit cell)를 통과하는데 하나는 중심으로 하나는 4개의 모서리 부분을 1/4도씩 통과한다(Figure 3). 또한, (100)면에서 고분자사슬이 수소결합으로 연결되어 매우 면 밀하게 짜여진 층을 형성하게 되며, 이 수소결합에 기인한 고분자사슬 간의 강한 상호작용에 의해 PPTA 섬유가 고강도, 고탄성률을 가질 수 있는 것으로 알려져 있다.

아라미드 섬유는 매우 규칙적인 fibrillar 구조로 되어있다. 피브릴들은 섬유축을 따라 약 600 nm의 폭과 수 cm의 길이로 배향되어 있고, 35 nm의 간격마다 defect layer가 형성되어 있다. 배향된 fibril들은 tie fibril에 의하여 서로 연결되어 있다. Figure 4는 fibrillar 구조의 개략적 모델이다.

아라미드 섬유의 구조는 skin-core 구조로도 표시되는데, Figure 5 panner는 섬유의 skin에서는 피브릴들이 섬유의 축방향과 균일하게 배향되어 있고, core에서는 피브릴들이 250 nm의 정수배에 해당하는 계단식으로 불안정하게 쌓여 배향되어 있음을 제시하였다. 섬유의 물리적인 성질은 주로 skin 층에 의해 결정되며, 제조공정에서 가해지는 각 공정별 조건에 의해 skin 층

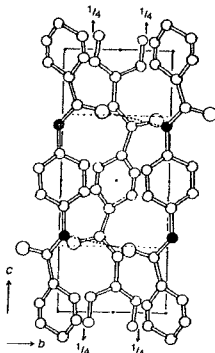
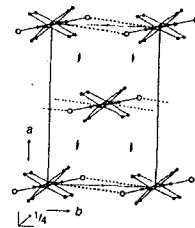


Figure 3. 아라미드 단위격정의 구조.

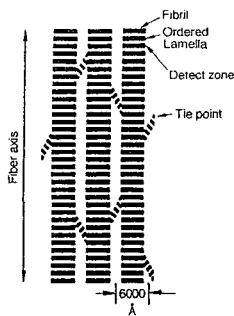


Figure 4. 아라미드 섬유의 fibrillar 구조 모델.

core 부분의 비율이 높아져 섬유의 강도를 저하시킨다. PPTA 섬유의 기계적 성질, 특히 탄성률은 장력 하에서 열처리하면 현저히 향상된다.

또 하나의 구조적 특징은 radial pleated sheet 구조로 되어 있다는 것인데(Figure 6), Dobb등은 아라미드 섬유의 미결정의 크기 및 분포, 분자의 배향 및 결정구조의 연구에서, 아라미드 섬유는 170도의 각도로 주름(pleat)간격이 500 nm이고, 폭이 600 nm인 배향액정영역 집합체가 섬유축 방향으로 피브릴을 구성하고 있으며, 주름 잡힌 시트형의 피브릴은 섬유의 직경방향으로 놓여 있다고 한다. 그러나 이러한 주름구조는 장력 하에서 강열처리하면 없어진다. 실제 초고탄성률을 갖는 Kevlar-149(이 섬유는 이전의 Kevlar 섬유와는 달리 열처리 공정처리 단계가 있음)는 거의 직선상의 시트구조를 하고 있다.

아라미드의 이러한 구조적 특성은 섬유의 물성과 깊은 관계가 있는데, 아라미드 섬유의 강직성이나 직연쇄배좌, 분자

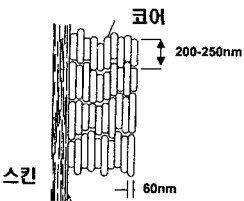


Figure 5. 아라미드 섬유의 결정구조 모델.

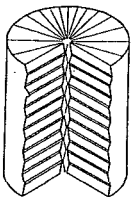


Figure 6. 아라미드 섬유의 주름잡힌 시트 모델.

과 core 층의 형상이 달라지게 되며, 이로 인해 섬유의 물리적 성질의 차이가 발생한다. 이 skin-core 구조는 방사 시도 우프(dope)의 외부가 받는 전단력이 내부보다 크서 외부의 분자쇄들이 내부보다 더 잘 배향하기 때문에 생기는데 필라멘트의 굵기가 굵을수록

간 수소결합, 높은 결정화도 및 배향도 등은 우수한 물성에 영향을 주는 인자들이지만, skin-core 구조 및 radial pleated sheet 구조는 우수한 물성에 역효과를 주는 인자들이다.

3. 아라미드 섬유 소재의 용도

파라계 아라미드 섬유는 일반적인 유기섬유와는 다른 우수한 성질을 바탕으로 최초의 상업화 이후 원사 및 직물을 비롯하여 부직포, prepreg, staple 및 펄프 등의 형태로 고무 보강재, 로프, 광케이블용 보강재 및 방탄 복합소재 등 산업소재의 용도와 자동차, 우주항공, 정보통신, 국방 등 다양한 관련 산업분야에서 사용이 확대되고 있는 고부가 가치 소재이다.

파라계 아라미드 섬유의 고강도, 고탄성, 경량 및 치수안정성 등의 특징을 이용하여 용도개발 초기부터 개발에 주력한 타이어 코드와 같은 섬유보강 고무복합재료의 적용은 현재 완전히 실용화되어, 스포츠용 자동차나 특수용도의 타이어에 사용되고 있다. 우주 항공분야에서는 우주왕복선의 연료탱크를 비롯하여 압축강도가 요구되는 부분을 제외한 항공기의 화물 보관함, duct, 바닥재 등과 같은 내장재에 resin system의 형태로 사용되고 있다. 특수 분야에서도 파라계 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, 낚싯대 등과 같은 스포츠용품에도 유리섬유와 같이 사용되고 있다.

Figure 7에 아라미드 섬유의 용도에 따른 수요량, Table 4에 용도별 응용 예를 나타내었다.

3.1. 용도별 시장규모

3.1.1. 방탄복합소재

Table 5에 방탄복합소재의 시장규모를 나타내었다. 방탄소재와 복합소재가 아라미드 전체에서 차

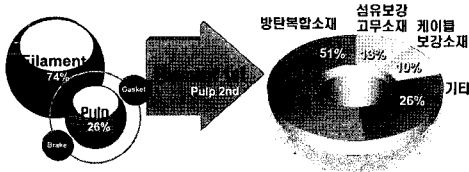


Figure 7. 아라미드 섬유의 용도에 따른 수요량.

Table 4. 아라미드 섬유의 응용 예

| 분 야 | 응용 | 응용 예 |
|-------|-------|--|
| 자동차 | 타이어 | 승용차, 트럭, 비포장차, 설상차 |
| | 석면대체 | 브레이크라이닝, 클러치 페이싱 |
| | 복합재료 | 모터사이클 기동벨트, 경주용차체 |
| 구조복합체 | 해양 | 선체, 해저밧줄, 카누, 카약, 수중 음파 탐지기 케이블, 해저계류선 |
| | 스포츠용품 | 스키, 골프 클럽, 테니스 라켓, 설상차 차체, 낚싯대 |
| | 직물 | 방수포, 오일방재, 방탄복, 안전 장갑, 낙하산 부품, 내열내화 작업복, 광섬유 케이블, 군모 |
| 항공기 | 외장재 | 프로펠러, 헬리콥터 날개, 레이돔 |
| | 내장재 | 마루, 격벽 |
| | 항공기부품 | 화물수송기 패널, 엔진 캐스팅, 압축용기 |

지히는 비중은 현재까지 지속적으로 증가하는 추세였으며, 향후에도 증가추세는 낮아지나 절대비중은 50%대를 지속적으로 유지할 것으로 전망된다. 이는 기존의 아라미드 섬유에 대한 두터운 시장형성과 복합소재에 대한 신규용도의 증대와 확대가 예상되기 때문이다. 그리고 최근의 군수분야 특수(이라크 전)와 테러 방지 산업의 급격한 성장 등으로 인하여 방탄복합소재 용도로서의 아라미드 섬유는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 결과적으로 세계시장의 경우에는 연평균 4~5%대의 성장은 지속할 것으로 전망된다. 세계시장과는 달리 국내의 방탄부문에 대한 아라미드의 절대수요는 적은 수준이나, 서서히 방탄 및 방호복 시장을 중심으로 활성화가 시작되고 있는 상태이므로 향후에는 현재대비 보다 증가할 것으로 예상된다. 이는 2001년 이후 기준으로 연평균 20% 이상의 높은 수요증가세를 보이고 있는 수치로 확인할 수 있다. 또한 세계시장의 경우, 아라미드 시장 중 방탄복합소재의 비율이 약 50%

Table 5. 방탄복합소재 시장규모 (단위: 물량-톤/년, 금액-억원)

| 구 분 | 현재의 시장규모 (2004년) | | 예상 시장규모 (2009년) | |
|-----|------------------|-------|-----------------|-------|
| | 물량 | 금액 | 물량 | 금액 |
| 세 계 | 23,520 | 7,626 | 28,100 | 9,150 |
| | 비중 | | 51.3 | 51.5 |
| | 비중 | | 215 | 340 |
| 한 국 | 75 | 120 | 75 | 120 |
| | 비중 | | 25.3 | 27.5 |

(비중: 전체 아라미드 사용량 중 방탄복합소재로의 사용비율)

* 산출근거

- ① 세계시장[1,2]
 - 제조회사 생산량 조사
- ② 국내시장[1,2]
 - 자체 아라미드시장 조사결과

대의 높은 수준인데 반하여, 국내의 경우 2004년 기준으로 25% 수준인 것을 감안하면, 이 수치는 보다 높아질 것으로 전망된다.

3.1.2. 섬유보강고무소재

섬유보강고무소재로서의 현재까지의 세계적인 아라미드 비중은 13% 전후로 성장과 감소를 반복하는 상태이며, 적용물량도 다른 용도와는 달리 크게 증가하지 않는 실정이다. 다만, 물량대비 금액의 증가는 고성능 자동차산업의 기술개발과 각종 산업용 원자재의 수요증가에 연동하여 시장이 형성되는 경향에 기인하는 것으로 해석된다.

국내 시장의 경우는 2000년 기준 6.8억원 규모의 초보적인 시장에서 시작하여 2002년부터 높은 성장세를 나타내고 있다. 2004년의 경우, 2000년 대비 물량 면에서는 약 540%, 금액 면에서는 635% 증가하였으며, 전체 아라미드 사용량 중 섬유보강고무소재로의 사용비율도 2.6%에서 15.9%로 급증하였다(Table 6). 그리고 섬유보강고무소재의 최대 수요처인 고성능 타이어코드 산업의 아라미드 적용 연구 및 기술개발이 진행 중에 있는 점, 고무호스 보강재를 중심으로 한 시장이 이미 형성된 점, 고압 호스 및 belt를 중심으로 수요가 증대되고 있는 상황을 감안하면, 성장 폭은 다소 낮아지겠지만, 타 용도에 비해서는 가히 폭발적인 수준의 수요증가가 전망된다. 또한 타이어코드 등의 파급효과가 큰 부

Table 6. 섬유보강고무소재의 시장규모 (단위: 물량 톤/년, 금액 억원)

| 구 분 | | 현재의 시장규모 (2004년) | 예상 시장규모 (2009년) |
|-----|----|---------------------|--------------------|
| 세 계 | 물량 | 5,880 | 7,266 |
| | 금액 | 1,880 | 233 |
| | 비중 | 12.6 | 12.1 |
| 한 국 | 물량 | 135 | 218 |
| | 금액 | 43.2 | 70 |
| | 비중 | 15.9 | 17.8 |

(비중: 전체 아라미드 사용량 중 섬유보강고무소재로의 사용비율)
* 산출근거: [1,2]

품산업의 수요증대는 향후 안정적인 성장원이 될 것으로 판단된다.

전술한 바와 같이, 세계시장의 관점에서 볼 때 섬유보강고무소재에 대한 아라미드의 적용 수요는 단기적으로 큰 폭의 상승세를 기대하기는 어려운 사항이다. 그러나 아라미드 타이어코드의 steel 코드 대체와 UHP 타이어 등의 수요증대를 감안하면 잠재적인 시장 성장률은 높다고 평가할 수 있다. 현재 전 세계적으로 고성능 섬유 소재로서 많은 극한 소재들의 개발이 진행되고 있으며, 그 전망 또한 밝다고 판단되고 있으며, 특히 섬유보강고무소재의 자동차산업 분야는 그 시장 분야의 구조 특성상 성장 규모 및 성장전망, 확률이 가장 확실한 분야로서 각국 및 각 관련업체별로 집중적인 투자와 연구개발을 활성화되고 있는 분야이다.

3.1.3. 광케이블보강소재

광케이블보강소재에 적용되는 초고성능 파라계 아라미드 섬유시장(Table 7)의 경우 광케이블 시장동

Table 7. 광케이블보강소재의 시장규모 (단위: 물량 톤/년, 금액 억원)

| 구 분 | | 현재의 시장규모 (2004년) | 예상 시장규모 (2009년) |
|-----|----|---------------------|--------------------|
| 세 계 | 물량 | 4,800 | 8,355 |
| | 금액 | 1,440 | 2,675 |
| | 비중 | 10.3 | 13.9 |
| 한 국 | 물량 | 150 | 243 |
| | 금액 | 45 | 78 |
| | 비중 | 17.6 | 19.7 |

(비중: 전체 아라미드 사용량 중 광케이블보강소재로의 사용비율)
* 산출근거: [1, 2]

향과 연동하여 변동하고 있다. 세계시장의 경우, 2001년을 기점으로 한 광케이블의 수요 감소로 인해 광케이블용 아라미드의 사용량이 급감하였으며, 2004년 현재 점진적인 회복추세를 보이고 있다. 국내의 경우도 세계시장과 마찬가지로 2000년 이후 전체적인 시장수요가 감소한 상태이며, 현재 점차 회복되고 있는 상황이다. 2002년 전 세계 광케이블 시장은 2000년에 비해 약 30% 정도 규모가 감소하였으며, 이후 Premise Market 중심으로 약 6~7%대로 완만하게 성장하고 있다. 이는 선진국의 기간통신망 구축완료와 전 세계 IT 경기 둔화 등의 불안정한 시장요인에 기인하고 있다. 그러나 2003년 말을 기점으로 전 세계 IT 수요의 증가와 개도국의 광케이블 수요의 증대, FTTH(fiber to the home)의 수요증가에 힘입어 성장세로 돌아섰으며, 2004년에 이르러서야 완만한 반등경향을 보이고 있다. 향후 3년간 수요는 점진적으로 약 6~7%수준으로 증가될 것으로 예상되며, 2006년 또는 2007년경에 이르면 2000년 또는 2001년의 수준을 회복하리라 전망된다. 이후 연평균 9~10%의 성장이 전망된다. 주된 성장 동력은 long-haul이 성장을 주도하던 과거와는 달리, FTTH, FTTC(fiber to the curb) 및 CATV가 주도할 것으로 예상된다. 광케이블 network은 공공기관 및 대형건물에 광케이블을 설치하는 FTTO(fiber to the office)에서 아파트 등 가입자 밀집지역까지 광케이블을 포설하는 FTTC를 거쳐 가입자 가정까지 포설하는 FTTH로 진행되고 있으므로, 이에 따른 파라계 아라미드의 수요증가는 필수일 것으로 판단된다. 국내 시장에서도 광케이블 보강소재는 2000년 국내 IT 산업의 성장과 같이 높은 수요를 형성하면서, LS 전선 및 회성전선, 대한전선 등의 수요업체에서 공급부족 현상이 발생하였으며, 아라미드의 가격상승에 큰 영향을 미쳤으나, 2001년 이후 수요급감에 의해 급격한 감소현상을 나타내었다. 현재는 수요가 점차 증가되는 경향을 보이고 있고, 향후에도 그 증가경향은 유지될 것으로 판단된다.

결론적으로, 2000년 이후 마이너스 성장을 기록

하고 있는 전 세계 광케이블 시장이, 2003년 이후 약 6~7% 수준의 성장률을 기록하여 회복기를 거친 후, 2006년 이후에는 약 9~10%에 이를 것으로 예상되므로, 광케이블보강섬유로서의 아라미드의 전망은 밝다 하겠다.

국가별 multimode 광케이블 포설 현황을 살펴보면, 미국시장이 34.9%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 일본, 독일, 영국 순을 보이고 있다. 향후에는 선진국의 기간통신망 구축사업은 거의 완료수준에 도달할 것이므로, 선진국에 집중하기보다는 상시 국가들을 제외한 개발도상국에 집중함이 보다 타당하다고 판단된다. 다만 상시 선진국 중 포설 현황은 낮으나, 시장 성장률이 23~24%로 매우 높은 독일과 영국은 사업화와 연계하여 지속적으로 시장 조사 및 관련정책 파악이 필요하다고 사료된다.

3.2. 용도별 상세 내용

3.2.1. 브레이크용 마찰재

자동차 브레이크용 마찰재에 사용되는 아라미드 필프는 티탄산칼륨 섬유(potassium titanate whisker)와 더불어 강화섬유로서 예비 성형체의 강도(preform strength) 증가 및 마찰계수의 안정성(friction stability)과 내마모성을 향상시키기 위해 사용된다. 일반적으로 마찰재의 강화섬유로는 파라계 아라미드 섬유, 금속섬유(metallic fiber), 탄소섬유(carbon fiber), 세라믹섬유(ceramic fiber), 유리섬유(glass fiber) 등이 사용되고 있으며, 이들 원료 중 2~3종의 강화섬유를 혼합하여 마찰재를 제조하고 있다.

3.2.2. Tire cord 보강재

타이어는 섬유/강철/고무의 복합체이다. 즉, 강철과 섬유 코드는 고무를 보강하는 역할을 하고 타이어 내에서 기본 골격 구조를 형성한다. 사람 인체와 비교하면 뼈와 같은 역할이다. 타이어 보강재로서 요구되는 성능은 내피로성, 전단강도, 내구성과 반발탄성 등이다. 타이어에 요구되는 성능에 따라 적절한 소재의 코드를 사용하게 된다. 현재 일반적

으로 사용되는 소재는 레이온, 나일론, 폴리에스터, 스틸과 아라미드이다. 후자 두 개는 주로 타이어 벨트부에 사용된다.

타이어 산업의 초창기에는 타이어 보강재로서 면이 일반적으로 사용되었으나 1920년대에는 합성 셀룰로스 섬유인 레이온이 대신 사용되기 시작하였고, 2차 세계대전 이후로는 완전히 레이온으로 대체되었다. 그 후 스틸소재를 타이어 벨트부에 적용하였고, 1940년대 후반에 나일론 소재개발로 타이어 코드 소재로 적용되었다. 현재 레이온 생산 시 발생하는 환경문제로 인해 레이온을 대체하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며 이를 위해 레이온과 유사한 구조안정성을 갖는 많은 PET 코드들이 개발되어 일부 적용되고 있으며, 일부 고속주행용 타이어는 아직도 레이온이 적용되고 있다. 이후 고탄성 소재인 glass fiber와 아라미드 소재가 고성능을 발휘하는 타이어 코드로 적용되고 있다.

특히, 아라미드는 나일론처럼 아마이드기인 (-CO-NH-)를 포함하고 있지만, 테레프탈산과 파라페닐렌디아민의 합성으로 만들어지는 방향성 폴리 아마이드 섬유이다. 아라미드 섬유는 다른 섬유들과 비교 시 고강도, 고탄성 및 형태안정성이 매우 우수한 물성을 나타냄으로 래디알 타이어 뿐만 아니라 고압호스, 컨베이어 벨트 등과 같은 고성능이 요구되는 제품의 보강재로 사용할 수 있도록 발전되어 왔으며, 이 섬유의 고무와의 접착 메커니즘에 관하여 많은 연구가 되어졌다.

최근 승용차의 고급화에 따라 고속주행을 하면서 타이어도 고속주행안정성 및 고 내구성능이 매우 중요하게 대두되고 있으며, 아라미드 코드는 기존의 경주용, 농업용 타이어 벨트 부분 뿐 아니라 light-truck의 캡플라이 부분에도 일부 적용되어 상용화되어 있다.

참고적으로 아라미드 타이어 코드는 tire big 3사에서 대부분 소비하고 있으며, 현재 시장현황 3,000~4,000 Ton/년으로 형성되어 있으며, yarn 가격은 24 \$/kg, 타이어 코드 가격은 36 \$/kg 수준이

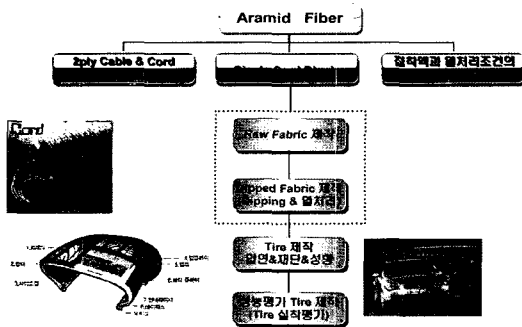


Figure 8. Tire cord 제조 process.

다. 아래 Figure 8에 타이어 코드 제조 process에 대하여 간략하게 표현하였다.

3.2.3. 방탄복합소재[4]

방탄복은 1차 대전 때부터 다시 개발되고 구시대의 유물인 갑옷이 다시 등장한 것은 총알을 막자는 것보다는 일반화된 각종 포탄들의 치명적인 파편으로부터 몸을 보호하자는 데서 출발하였으나 너무 무거웠다. 그러나 2차 대전 때는 새로 개발된 나일론계의 섬유류와 유리 섬유등이 대두되었고 2차 대전 이후 부상당한 병사의 상당수가 파편에 의해 사상을 입었다는 것 때문에 미군은 월남전부터는 일반병에게 방탄복을 지급하기 시작하였다.

현대의 방탄복은 크게 2가지로 구분된다. hard body armor와 soft body armor로 나누어진다.

소프트한 바디 아머(armor)는 말 그대로 유연한 방탄판이 들어가고 방탄섬유를 사용해 만든 것이다. 가볍고 부드러워 착용감도 나쁘지는 않지만 상대적으로 저속 저위력탄, 산탄, 파편 등을 막기에나 적당하고 원래 소재가 섬유이기 때문에 예리한 무기에는 약하며 의외로 들릴지는 모르지만 칼이나 화살 등 날카로운 무기에는 약하고 하드 바디 아머는 소프트와 같이 방탄섬유로 된 방탄판을 사용하지만 이것 외에 세라믹이나 특수한 금속의 판이나 사슬 등을 더 추가한 것이다.

만약 군용으로 방탄복을 만든다고 생각하면 강력한 군용총기들과 여러 가지 파편으로 몸을 지키기

위해 튼튼하게 만든다고 하드를 썼을 경우 다 좋지만 병사는 각종 병기와 그에 해당하는 물건들을 착용해야 한다는 조건을 생각해야 한다.

현재 가장 잘 알려진 방탄복의 재질로는 나일론과 같은 폴리 아라미드계 섬유인 케블러(kevlar 흔히 K로 약칭. 미군의 프리츠 헬멧 PASGT helmet도 미군들에게 K-pot이라 불림)와 스펙트라(spectra)가 있다.

kevlar의 경우는 강철로 같은 굵기의 섬유로 만들었을 때 5배에 달하는 강도를 갖고 있지만 물에 젖으면 능력이 현저히 떨어져 따로 방수처리가 필요하지만 이에 비해 스펙트라는 더욱 가벼울 뿐만 아니라 강도도 10배로 증가되었고 물에 젖어도 능력이 별로 떨어지지 않으나 가격이 비싼 단점이 있다.

현재 사용 중인 방탄복 재료로는 폴리아라미드 계열의 kevlar, twaron, goldflex 등과 폴리에틸렌 계열의 spectra, dyneema 등이 있다.

이상은 소프트 바디 아머의 개념으로의 방탄재료이다. 앞서 밝혔다시피 여기에다가 하드 바디 아머의 개념으로 더 방탄력을 높이기 위해 세라믹이나 아리스톤((주)코오롱))으로 만든 판넬을 추가하게 된다. 아리스톤은 폴리에틸렌을 몇 겹, 몇 십겹 겹쳐서 판넬화한 것이다. 이들 외에 유리섬유(fiber glass)나 탄소섬유 등도 된다.

방탄헬멧의 경우 prepreg라는 공정을 거치게 되는데 특수 수지를 사용하게 되며 이러한 공정을 거친 후 몇 겹으로 헬멧을 제조하게 된다. 성형에 있어 prepreg를 이용하는 방법이 수지 함량 조절 및 제작상의 품질 관리를 위하여 대단히 편리하다. prepreg란 미경화 상태의 수지를 도포 건조한 상태의 성형재료를 말하는 것으로 직물에 미리 적합한 함량의 수지를 도포, 건조하여 재료와 절단 및 적층이 용이하도록 되어 있다. prepreg는 아직 입체화되지 않은 평면구조의 저분자체 수지가 도포되어 있는 상태이며 이것은 가열에 의한 반응이 진행됨으로서 경화가 이루어지며 가열 가압공정을 거쳐 성형품이 완성이 된다.

방탄복의 경우는 요구 수준의 방탄 성능을 발휘하게 하기 위해 적정 형태의 섬도 및 제직 spec.이 존재하게 된다.

한편, 방탄 시험에도 등급과 규격이 있다. 방탄 시험은 정부로부터 공식적으로 허가 받은 곳에서 규격에 맞는 설비를 갖추고 있어야 하는데, 이 시험을 운영하고 있는 곳은 국내에 육군사관학교, ADD, 그리고 국내 모업체의 방탄시험장 등이 있다. 모든 방호제품에 대해서 각종 shooting range를 시험할 수 있어야 하며 V50 값을 추산해 낼 수 있는 전문가가 있어야 한다. V50이란 발사체가 목표물에 50% 관통할 수 있는 속도를 말하는 것으로써 NATO 표준에 따르며 발사된 탄두가 방탄물체와 같은 물체에 V50 값으로 추정된 속도를 계산해 내고 있다. 일반적으로 파편 방호는 MIL STD 662F 및 NATO STANG 2920에 따라 시험을 실시한다.

미국의 경우 그리고 대부분의 나라에서 상용하고 있는 등급은 NIJ(national institute of justice) 방탄복등급을 사용하고 있다. NIJ는 미 법무성 산하 국립사법연구소라 할 수 있고 그 밖에 러시아, 독일, 유럽의 방탄복 등급이 존재한다.

이 NIJ 레벨은 아주 중요한데 모든 방탄복의 등급을 가장 공신력 있는 기관이 분류해 놓은 기준이기 때문이다.

여기에 방탄에 사용되는 용어에 대해 간단히 설명하면 다음과 같다.

FMJ: full metal jacket 납탄두를 얇은 구리관으로 완전히 덮은 탄두

JSP: jacket soft point FMJ의 맨 끝 쪽의 재킷이 살짝 벗겨져서 납이 약간 드러난 것임 이것은 피탄시 펴하고 벌어지면서 FMJ나 납탄보다 큰 상처를 낼 수 있게 고안된 것임

HV-LLB: high-velocity, long-length barrel 고속도나 긴 총신으로 쏜 경우를 의미

RN: round nose 리볼버용탄에 많은 탄자 끝부분이 둥글게 만들어진 것

SWC: semi wad cutter wad cutter(탄두 앞이 평

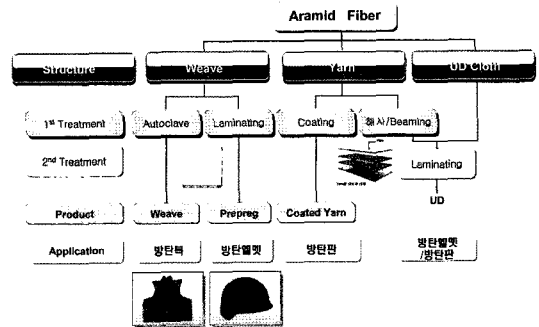


Figure 9. 방탄복합소재 제조 process.

면에 가까움)보다 조금 앞이 튀어 나온 것으로 WC 보다 파괴력을 높이기 위해 제작된 것임

AP: armor piercing 철갑탄 탄심에 텅스텐이나 열처리 강철을 사용함

Lead: 납이나 납합금으로 이루어진 탄자임

22LR: 22 long rifle 사격 경기용으로 많이 사용되는 소구경탄이며 동일 구경대의 권총용 탄약에 비해 상당히 강하며 빠른 속도를 가짐

38SPL: 38 special 리볼버용 탄약으로 경찰용 리볼버용 탄약임

357Mag: 357(remington)magnum 38SPL의 강화형 리볼버용 탄약이며 미국에서 경찰용과 민간용으로 많이 사용됨

44Mag: 44 매그넘탄 대구경 리볼버 탄약이고 가장 강력한 권총탄 중의 일종

Table 8에 방탄용에 사용되는 섬유 직물의 style 물성을 Teijin의 Twaron 제품을 기준으로 나타내었고 방탄 복합소재에 대한 제조 process에 대하여도 Figure 9에 요약하였다.

3.2.4. 광케이블

일반적으로 광케이블은 optical을 이용하여 화상 신호를 원거리 전송이 가능하게 하고 실시간 양방향 통화가 가능하고, 광신호 전송에 의하여 EMI가 발생하지 않아 데이터의 왜곡이 없으며 제품의 크기 및 무게가 크게 감소하여 소형의 제품 생산이 가능하여 휴대, 설치 및 이동이 용이하며 대용량의 테

Table 8. Teijin Twaron 제직 spec.

| Style | Linear Density (dtex) | Twaron type | | Weave | Sett (per 10cm) | | Areal Density (g/m ²) | Thickness (mm) | Breaking Strength (N/5cm) | |
|-------|-----------------------|-------------|-------|-------------|-----------------|------|-----------------------------------|----------------|---------------------------|--------|
| | | Warp | Weft | | Warp | Weft | | | Warp | Weft |
| CT704 | 840 f 1000 | 2.040 | 2.000 | Plain | 107 | 107 | 180 | 0.30 | 8,000 | 8,400 |
| CT706 | 840 f 1000 | 2.040 | 2.000 | Plain | 126 | 126 | 215 | 0.31 | 9,000 | 9,500 |
| CT709 | 930 f 1000 | 2.040 | 2.000 | Plain | 105 | 105 | 200 | 0.30 | 7,800 | 7,800 |
| CT710 | 930 f 1000 | 2.040 | 2.000 | Plain | 117 | 117 | 220 | 0.35 | 8,400 | 8,600 |
| CT714 | 1100 f 1000 | 2.040 | 2.000 | Plain | 85 | 85 | 190 | 0.30 | 7,400 | 7,400 |
| CT716 | 1100 f 1000 | 2.040 | 2.000 | Plain | 122 | 122 | 280 | 0.40 | 9,500 | 11,000 |
| CT732 | 1680 f 1000 | 2.040 | 2.000 | Plain | 68 | 68 | 220 | 0.34 | 8,500 | 8,500 |
| CT733 | 1680 f 1000 | 2.040 | 2.000 | Plain | 79 | 79 | 260 | 0.40 | 9,600 | 9,600 |
| CT736 | 1680 f 1000 | 2.000 | 2.000 | Basket 2×2 | 127 | 127 | 410 | 0.65 | 14,000 | 14,000 |
| CT737 | 1680 f 1000 | 2.000 | 2.000 | Twill 2×2 Z | 127 | 127 | 410 | 0.60 | 14,000 | 14,000 |
| CT738 | 1680 f 1000 | 2.000 | 2.000 | Basket 2×2 | 142 | 142 | 460 | 0.65 | 15,700 | 15,700 |
| T713 | 1100 f 1000 | 1.040 | 1.000 | Plain | 122 | 122 | 260 | 0.40 | 7,500 | 7,500 |
| T730 | 1680 f 1000 | 1.040 | 1.000 | Plain | 78 | 78 | 260 | 0.40 | 9,300 | 9,300 |
| T735 | 1680 f 1000 | 1.040 | 1.000 | Basket 2×2 | 135 | 138 | 475 | 0.68 | 16,000 | 16,000 |
| T750 | 3360 f 2000 | 1.000 | 1.000 | Plain | 67 | 67 | 460 | 0.65 | 13,500 | 13,500 |
| T751 | 3360 f 2000 | 1.000 | 1.000 | Plain | 45 | 45 | 300 | 0.53 | 9,500 | 9,500 |
| T755 | 3360 f 2000 | 1.000 | 1.000 | Twill 4×4 | 88 | 93 | 605 | 1.00 | 19,500 | 19,500 |
| T760 | 3360 f 2000 | 1.000 | 1.000 | Twill 4×4 | 92 | 92 | 635 | 1.05 | 19,500 | 19,500 |

Due to different performance requirements, each of the mentioned styles may be used as woven "scoured", scoured and water-repellent-treated[WRT-soft] or scoured and hard-water-repellent-treated[WRT-hard]

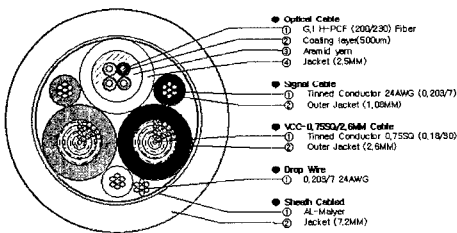


Figure 10. DVI 광복합 케이블의 단면.

이더 전송이 가능하여 응답속도가 빠르고, 고화질의 전송이 가능하게 하는 기능이 있기 때문에 광가입자 망에 사용되며, 초고속인터넷, 통합방송시스템, 홈네트워킹 서비스 등의 안정적인 통신서비스 구축의 기능이 있으며 향후 이 시스템을 이용하여 항공기 및 의료기기 분야까지도 응용이 가능하게 할 수 있다.

Figure 10은 광케이블의 일종인 DVI 광 복합 케이블의 단면을 나타내었으며, Figure 11은 광케이블 제조 process를 나타내었다. 이러한 광케이블의 지지체 및 강력을 유지하게 하기 위해 아라미드가 사용된다. 특히 여기에 사용되는 아라미드는 탄소

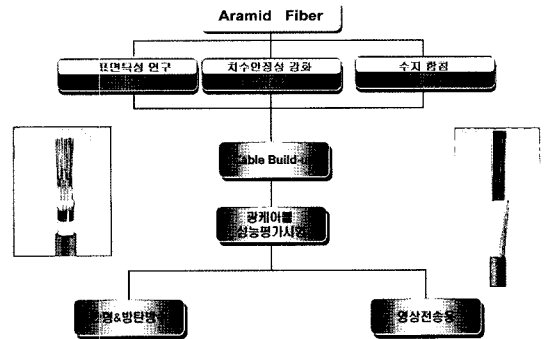


Figure 11. 광케이블 제조 process.

율이 900 g/d 이상인 고탄성 아라미드가 사용된다. Figure 4에 광케이블의 일반적인 요구특성에 대해 나타내었다.

3.2.5. 로프

고성능 아라미드 합섬 로프는 강철훈로프와 동일한 강도이면서 중량이 1/5로 가볍고, 유연하며 내구성이 우수하다. 그리고 로프의 수명 또한 강철훈로프와

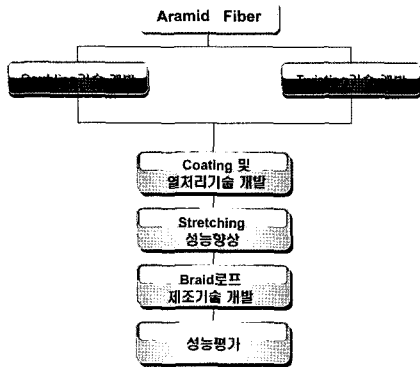


Figure 12. 로프 제조 process.

비교하여 2배 이상 긴 장점을 가지고 있다. 국내 섬유로프 제조기술은 폴리프로필렌, 나일론 및 폴리에스터 섬유 등을 이용한 일반로프 제조기술이며, 현재 고부가가치의 슈퍼섬유를 이용한 로프제조기술은 낮은 단계에 있다.

국의 기술개발동향으로는 미국, 유럽 등 선진국의 경우 석유화학사업 특히 해저 유전 개발 사업등과 군수산업에서 앞서있으며, 이에 따라 필요한 로프부분에서도 다양한 실용화 시험을 통해 각종 로프제조 기술을 확보하고 있다. 현재 UHMPE 섬유를 이용한 로프가 OCIMF의 선박 guideline 규정에 포함됨으로서 앞으로 선박부분 등에서 적용범위가 확대될 것으로 보인다. 또한 군수산업부분에서도 전투력을 높이고자 UHMPE 섬유를 이용한 로프가 적용될 예정이며, 레저 부분 특히 요트용 자일부분에서 사용이 확대될 것으로 기대된다. Figure 12는 로

프제조 process를 간략하게 나타내었다.

4. 결론

지금까지 아라미드 섬유소재의 물리화학적 및 구조적 특성을 간략하게 소개하였고, 이러한 특성을 바탕으로 방탄복합소재, 섬유보강고무소재, 케이블 보강소재, 브레이크용 마찰재 등의 용도로 아라미드가 사용이 되고 있음을 설명하였다. 이와 같이 현재 아라미드 섬유는 꾸준한 수요가 증가하고 있는 실정이나 비싼 가격, 가공성의 부족 및 제한된 용도 등으로 그 수요가 급격히 증가하고 있지 못하다. 이러한 문제를 해결하고 상용화를 위한 새로운 용도개발이 향후 아라미드 섬유가 더욱 더 발전할 수 있는 길일 것이다. 따라서 향후 보다 향상된 강도와 탄성률을 갖는 섬유의 제조, 저가의 단량체 제조, 공정의 단순화, 저가의 펄프 제조, 폴리머 개질에 의한 직법 방법, 방사 속도 증대에 의한 생산성 향상, 다양한 용도에 부합하는 섬유생산을 위한 폴리머 개질 등이 이루어 질 전망이다.

참고문헌

1. 극한성능 차세대 산업용섬유 개발, 산업자원부, 2001.
2. 분자제어기법을 이용한 산업용 하이테크섬유 기술개발에 관한 산업분석, 산업자원부, 2002.
3. H. H. Yang, *Kevlar Aramid Fiber*, John Wiley & Sons(1993).
4. Karel F. Mulder, "A battle of giants", *Technology In Society*, p.37, (1999).
5. 한국섬유공학회, "최신합성섬유", 형설출판사, 2001.

저자 프로필



한 인 식

1985. 서울대학교 화학공학과 졸업
 1994. 포항공과대학교 화학공학과(석사)
 1985-현재. (주)코오롱 중앙기술원 Heracron 연구소 소장



이 창 배

1997. 영남대학교 섬유공학과 졸업
 1999. 한양대학교 섬유공학과(석사)
 2003. 방사기술사
 1999-현재. (주)코오롱 중앙기술원 Heracron 연구소 선임연구원
 전화: 054-469-3835, Fax: 054-461-6113
 e-mail: seondol@kolon.com