

방재기능 강화용 고성능 저신도 하이브리드사 섬유 소재

심동석, 조대환, 한규찬, 육지호¹, 김승현¹ · 효성생산기술연구소, ¹인하대학교 나노시스템공학부

1. 서론

고성능 지반 구조물의 보강용 섬유제품은 방재용 토목, 건축 고분자 재료의 인장강도 등 고성능 물성에 의해 지반 구조물의 역학적 안정성을 증가시키는 기능을 하는 제품이다. 토목 보강용 섬유제품은 강도 및 장기 성능이 제품 자체의 구조와 특성, 그리고 제품을 구성하고 있는 소재의 물성이 중요한 영향을 갖게 된다[1]. Figure 1과 같이 대표적인 토목합성 보강재인 지오그리드 제품의 경우 안정된 크리프 한계 변형율이 10% 이내임을 고려해 볼 때 보강소재로 사용되는 원사의 변형율이 지오그리드 제품의 크리프 변형율을 좌우하는 중요한 인자가 된다. 토목 섬유제품의 보강용 섬유 원사는 다양하며 고강도 PET 사가 폭 넓게 사용되고 있다. PET 사는 산업용 중간 소재로 가격이 저렴하고 기능 향상, 강력 보강 등 최종 제품의 여러 성능을 향상시킬 수 있어 사용 범위가 매우 넓다. 고강도 PET 섬유 소재 및 이를 이용한 최종 제품은 중국, 대만, 남아프리카 등에서 생산한 중저가용이 있으며 유럽, 일본 등의 선진국가에서 생산하는 고부가가치의 고가 시장 제품군으로 나누어져 있다. 국내 산업용 고강도 PET 시장의 경우는 중국 등의 품질 수준이 좋지 않은 값싼 제품의 수입이 꾸준히 증가하여 2007년 현재 국내 시장 점유율이 약 20% 이상으로 급성장하고 있다. 국내산의 고강도 PET 섬유는 해외의 중저가 시장에서는 중국 제품에 의해 외면당하고 고품질을 요구하는 고성능 제품의 시장에서는 성능 수준이 유럽, 일본 등의 선진 제품에 밀려 시장을 일부 잃는 부분도 있으나 국내 대기업의 꾸준한 연구 활동을 통한 기술 개발로 타이어코드지용 원사, 시트벨트용 원사, 그리고 토목용 원사 등 산업용 고성능 소재 부분에서 많은 시장 점유율을 가져가고 있다.

토목·건축 분야에도 super 섬유인 신소재가 앞으로 많이 이용될 것으로 예상된다. 현재까지 토목·건축 분야에서 단 섬유의 용도는 석면대체가 주목적이었다. 이를 위해 기존의 탄소섬유, 아라미드 섬유, 유리섬유와 함께 고강도 PVA 섬

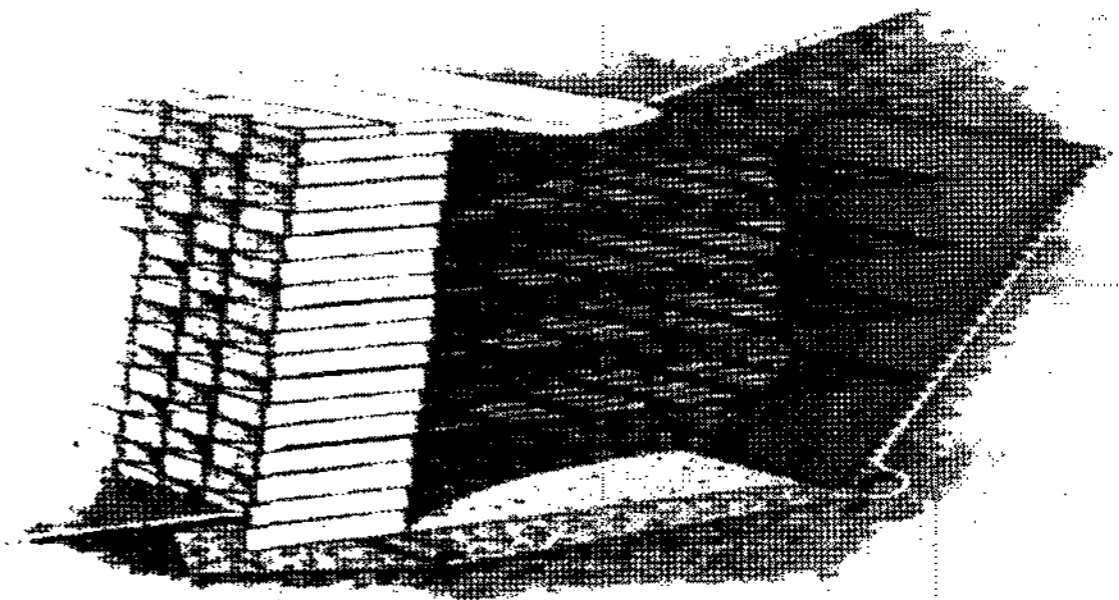


Figure 1. Geogrid를 이용한 사면 보강.

유, PAN 섬유가 일본 및 유럽에서 개발되어 사용되고 있다. 한편, 탄소섬유나 아라미드 섬유 등의 장섬유를 이용한 보강재는 토목·건축용 콘크리트 분야의 신소재로 불리고 있으며 기존의 강철 재료에는 없는 많은 이점을 가지고 있기 때문에 가격이 높다는 점에도 불구하고 그 사용이 증가하고 있다.

super 섬유의 우수한 성능을 유지하고 동시에 저렴한 비용인 소재를 개발하기 위해 연구가 진행되어 super 섬유와 다양한 저가의 소재 등을 이용한 합연 등의 복합화로 성능과 기능향상을 꾀하며 시장에서도 가격 경쟁력이 있도록 제품이 개발되고 있다. 국내 대기업에서 생산되는 다양한 소재를 이용하여 하이브리드사를 최종 제품의 용도에 맞게 설계, 제조하기 위한 기초 연구가 이미 국내 대기업을 통해 이루어지고 있으며 이를 활용한 다양한 산업용 중간재 제품에 적용하려는 시도가 활발히 연구되고 있다[2]. 토목, 건축 공사의 특성상 부품간의 결합된 지오 복합재료의 사용량이 급증하는 추세이며 고성능 소재의 하이브리드형 보강 섬유제품의 연구 개발로 기존 제품의 대체로 활용되고 있다. 이에 본 고에서는 토목, 건축용의 보강재로서 원사가 필요로 하는 특징과 사용되는 원사의 종류, 그리고 보강재용 원사 소재의 기술 및 개발 동향에 대하여 기술하고자 한다.

2. Geosynthetics의 동향

2. 국내외 현황

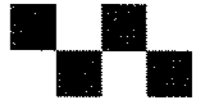


Table 1. 국내외 geosynthetics의 주요 생산 업체

항목	업체명	주생산품목과 특징
국내	a. 효성, 삼양사, 새한, 코오롱 b. 삼양사, 대한산자공업, 삼원실업 c. 코오롱, CDP PLAS Co., 제코산업, 세원지오신테크, 지해산업개발 d. CETCO Korea, 한국벤토나이트, 지오콘 e. 세원산업, 새날 f. 골든포우 g. 건양테크 h. 대운지오텍 i. 새한	a. 원사 관련 업체 b. 지반구조물 보강기능용 섬유제품 c. 연약지반개량용 섬유제품 - 지오텍스타일 d. 보조차수기능용 섬유제품(GCL) e. 자외선안정성 geo composite f. 난연성 geocomposite g. 유리섬유 지오그리드 h. 지오매트 i. 지오 차수재
국외	Naue GmbH & Co. KG 사(독일) Tenax Corp. 사(이태리) Tensar International 사(미국)	· 교통용 부지 지반 강화용 - 지오텍스타일, 지오멤브레인, 지오그리드 · 지반 보강/강화용 - 지오그리드, 지오텍스타일, 지오셀, 지오폴, 지오백, 방조제 매트리스, 콘크리트 보강용 단섬유
	Huesker Inc. 사(독일) Strata Systems Inc. 사(미국) Presto Products Co. 사(캐나다)	· 침식/퇴적부지 보강/강화용 - 지오텍스타일, 지오웹, 지오투브, 지오백, 지오센터이너

모래, 흙, 자갈 등의 환경에 사용되는 섬유, 고분자 제품은 토목공사의 시공기술과 밀접한 관계가 있다. 섬유 재료를 각종 보강공사에 이용하기 위한 시도는 아주 오랜 옛날부터 이루어져 벚짚, 보리짚, 버들가지, 갈대 등의 천연 재료를 보강재 및 필터재 등으로 사용한 기록이 있으나 이러한 천연섬유 재료들은 강도, 내구성, 재료구입 및 품질관리 등의 문제점으로 인해 토목 재료로서 광범위하게 사용되지 못하였다. 경제적이고 효과적인 재료를 얻고자 하는 많은 연구 결과로 천연 섬유재료의 문제점을 해결한 우수한 시공성, 적용성 및 경제성 등을 갖춘 각종 토목구조물에 보강, 필터, 배수, 분리, 봉쇄 및 침식 방지재 등의 제품과 그에 맞는 소재들이 폭 넓게 개발되어 사용되고 있다. 그리고 현장조건을 고려한 용도별 이론적인 해석과 설계 및 합리적인 시공을 할 수 있는 단계까지 기술이 개발되었다.

초기는 geosynthetics에 면을 적용한 지오텍스타일과 지오멤브레인 형태의 직물 또는 코팅 직물이 주종이었다. 합성 섬유의 두각과 함께 소재로는 polypropylene, polyester, polyethylene, polyacrylonitril, nylon 등의 합성섬유를 사용하여 제작된 지오텍스타일이 콘크리트 옹벽하단부에 설치되어 사용되었다. 이들 강화섬유의 첨가로 인해 균열에 의한 저항력의 증가, 균열된 부분의 공유, 열 변화 및 열 수축에 대한 저항력 증가, 내구성의 향상 등의 개선을 위한 제품 시공이 활발하게 진행되고 있다. 최근 강화 섬유 중 탄소섬유

가 토목, 건축 분야에서 폭발적으로 신장한 계기는 많은 대지진 이후 기존 구조물의 보수보강 적용이 주목되었고 이 분야에서의 시공 실적이 비약적으로 증대되고 있다. 탄소 섬유 자체는 비싸지만 작업비가 저렴하므로 결과적으로 이 공법이 교각이나 건물의 보수 보강용에 그 수요가 폭발적으로 증대되고 있으며, 또한, 건축분야에서도 철관을 보강하면 무거워지므로 구조물에 대한 하중이 커지게 되어 이런 이유 때문에 토목, 건축 분야에 대한 탄소섬유의 수요가 증가하고 있다.

국내는 현재 토목, 건설 경기가 점차 회복되어 사회 간접자본 투자의 확대와 함께 약 10% 정도의 고성장세를 회복할 것으로 예상된다. 단섬유

부직포, 복합포, 그리고 장섬유 부직포의 국내 생산에 따라 사용량이 급증하여 1995년에는 연간 약 20,000,000 m² 정도의 섬유제품이 각종 토목 구조물에 다양하게 사용되어 2005년 현재는 약 1,910억 원 정도의 시장이 형성되어 있는 것으로 추정된다[3].

향후 극한 환경 적용, 재해방지, 개보수, 그리고 복구용 등의 토목용 방재기능 보강섬유 제품분야의 기술 및 시장 분석을 통해 지반 구조물의 안정성을 증대시키는 장기성능 향상 기능의 고성능 토목용 강화섬유 소재 및 제품 개발이 이루어질 전망이다. FTA 이후 국내 건설시장 개방에 대비하기 위해 설계, 시공, 그리고 특성 시험법 등 관련기술의 체계적 정립과 함께 신제품과 새로운 관련공법 개발, 그리고 광의의 토목용 섬유 적용방안 연구 등이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

지금까지 사용된 토목건설용 섬유제품은 주로 지오텍스타일이 압도적으로 우세하지만 지오멤브레인과 지오그리드의 사용량도 급증하고 있으며 토목, 건설공사의 특성상 고성능 하이브리드형 섬유제품과 장기 성능이 향상된 지오컴포지트의 사용이 꾸준히 증가하고 있다. 이들 제품의 용도확장과 기존제품의 물성개선에 연구개발의 관심이 집중되고 있으며 미국의 경우 많은 관련기업들이 컨소시엄을 구성하여 토목 건설용 섬유제품의 연구개발에 참여하고 있다. Table 1은 국내외 geosynthetics의 주요 생산업체를 나열하였다.

2.2. Geosynthetics 물성 평가

2.2.1. 장기설계 인장강도

Geosynthetics는 토사가 갖지 못한 인장강도를 보완하기 위해 적용되는 제품이다. 모든 적용분야에서 우선 고려되어야 하는 것이 토사 내에서 유발 또는 부가되는 하중과 Geosynthetics의 인장강도에 대한 안정성의 평가이다. 이때 설계에 이용되는 geosynthetics의 인장강도는 실내 시험을 통해 얻어진 최대 인장강도의 값이 그대로 적용되는 것이 아니라 적용분야에서 고려되는 인장강도의 감소요인을 고려한 보정계수를 적용하거나 생산, 운송 및 저장단계에서 발생할 수 있는 보강재의 인장강도 값에 대한 오차 등을 고려한 보정계수를 고려하여 산출된다. 현재 geosynthetics를 이용한 모든 공법의 설계에서 감소계수를 적용하는 방법이 적용되고 있다[4].

지오그리드를 예를 들어 고장모드를 설명하면, 실내 시험을 통해 구한 인장강도와 흙 속에서 지오그리드가 발휘하는 인장력에는 차이가 있다. 흙 속에서 지오그리드가 발휘하는 인장강도와 장기간 동안 지오그리드가 사용될 때 나타나는 강도 감소 경향을 정확히 파악하기 어렵다. 이러한 이유로 지오그리드가 흙 속에서 인장강도를 발휘할 때 영향을 미치는 인자와 장기간 나타나는 강도 감소에 영향을 미치는 인자들의 영향을 설계단계에서 고려하여 최악의 조건에서 지오그리드가 발휘하는 인장강도를 예측한다. 이를 장기허용강도라고 전술한 여러 인자들은 감소계수라 한다. 설계 허용 인장강도는 아래와 같은 산출식이 적용된다.

$$T_{allow} = T_{ult} \left[\frac{1}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_{CD} \times RF_{BD} \dots} \right]$$

T_{ult} = 광폭 인장시험에서 최대인장강도
 T_{allow} = 설계 허용 인장강도
 RF_{ID} = 설치시 손상에 의한 감소계수
 RF_{CR} = 크리프에 대한 감소계수
 RF_{CD} = 화학적 분해에 대한 감소계수
 RF_{BD} = 생물학적 분해에 대한 감소계수

위 식에서 고려된 감소계수의 항 이외에 적용분야와 공법 등에 따라 다수의 감소계수가 Table 2와 같이 고려되어야 한다. 수명을 예측할 수 있는 장기 내구성 시험은 지오그리드가 사면 및 옹벽에 보강용으로 설치되어 구조물의 형태에 변형이 일어나면 고장(failure)으로 간주함으로써 이의 해석을 위해 일정 하중을 적용하여 시간변화에 따른 변형률을 해석하는 방법인 크리프 시험이 적용된다. 크리프 시험방법은 RS K 0022 및 RS K 0023에 규정되어 있는 시험방법과 조건을 적

Table 2. 외부고장 유발 요인과 고장 형태에 따른 중요도 상관관계

항목	인장 강도	인장 신도	응력 완화	크리프성	기계적 손상	광분해	화학적 손상	미생물 침해
구조물 내부장력	◎	◎	○	◎	△	-	○	△
지반내 온도변화	△	△	△	△	-	-	△	○
강우 및 지하수	△	△	-	-	-	-	◎	△
지반내 토양성분	○	○	○	○	◎	-	◎	△
지반내 미생물	○	○	-	-	○	-	-	◎
소재	△	△	△	-	-	◎	◎	-
시공 및 포설	-	-	-	-	○	○	-	-

비고: ◎ 매우중요, ○ 중요, △ 보통, - 관련 없음.

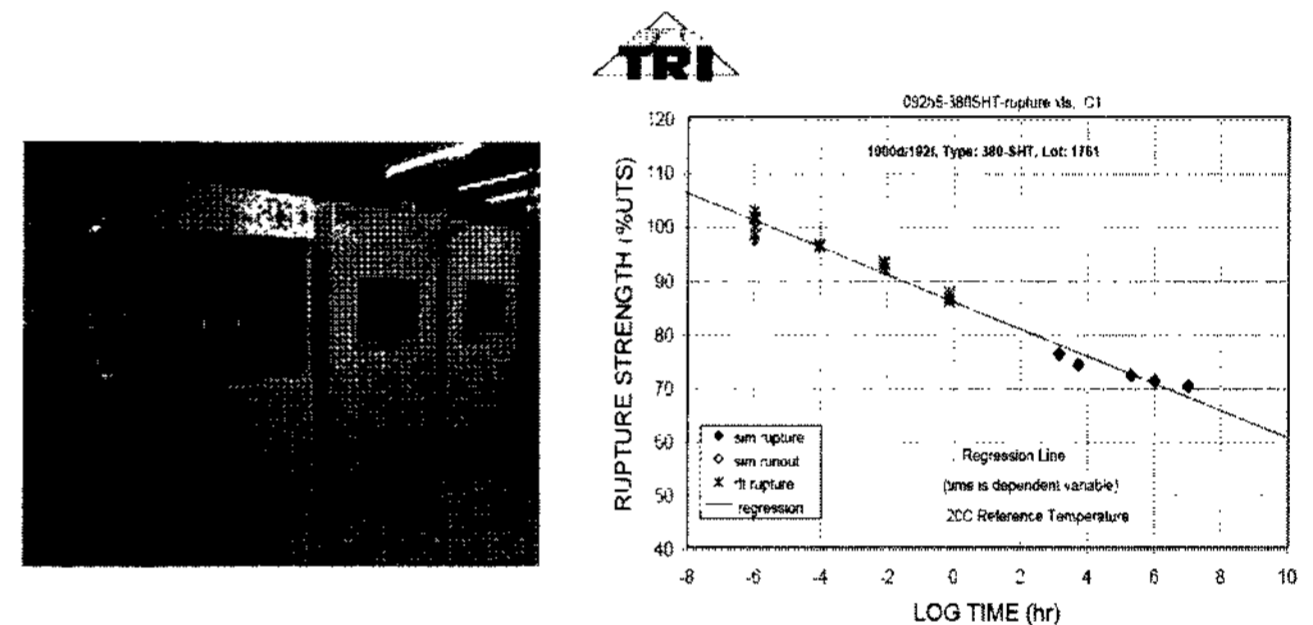


Figure 2. 가속시험장치(左) 및 원사의 SIM 테스트 결과 그래프(右).

용하여 수명예측을 위해 시간·온도 중첩원리(time temperature superposition principle), 그리고 Figure 2와 같이 시간-온도 중첩원리를 이용한 단계 등온법(steped isothermal method)이 사용된다. 예상 수명은 일반적으로 구조물의 수명과 같거나 길어야 한다고 가정하여 일반적인 토목 구조물의 내구연한인 100년이 경과하여도 크리프 변형이 10% 이내를 유지하는가의 여부로써 신뢰성 인증을 실시한다.

2.3. Geosynthetics의 원료

geosynthetics는 각각의 사용 용도에 따라 디자인 되고 그 기능에 적합한 특성을 갖기 위해 고분자 원료와 섬유 소재를 달리하며 또한 내부 충전제와 산화 방지제, 카본블랙, 유제, 가소제 등 여러 가지 첨가제를 필요에 따라 제조 공정에 적용하여 특수한 성질 및 기능의 제품을 얻는다. geosynthetics에 대한 이해를 돕기 위해 사용되는 원료별 특성을 간단히 설명하면 아래와 같다.

geosynthetics 초기 제품에는 천연고분자 원료가 사용되었



고 공업화가 가속되면서 합성고분자 수지가 용도별로 다양하게 개발되었다. geosynthetics 소재로는 steel fiber, glass fiber, asbestos fiber 등과 low modulus fiber인 polypropylene, polyamide, polyethylene, polyester 섬유 등과 특수한 용도와 기능을 부여하기 위하여 polyurethane, carbon, aramid, acrylic, PVA fiber 등이 사용되고 있다.

2.3.1. 천연 소재

geosynthetics에 사용되는 천연 고분자원료는 매우 한정적이지만 최초로 사용된 geosynthetics 제품이며 주로 fiber, yarn, knit 형태로 초기에 적용되었다. nonwoven 및 mat 형태의 제품이 개발되면서 그 수요가 증가하였다. 천연 섬유제품은 환경친화형 재료라는 장점을 가지고 있기 때문에 근래에 이르러 geosynthetics 제품으로서의 효용성이 다시 부각되기 시작하였고 제품의 원료도 cotton, jute, coir, straw, 그리고 기타 줄기형태에서 waste assembly 등에 이르기까지 매우 다양하다. 그러나 사용량이 많지 않고 합성재료에 비해 대량생산이 불가능하기 때문에 수요창출에 어려운 문제를 내포하고 있으며 일부에서는 토목용 천연 섬유제품을 사면안정화, 침식방지, 배수용 또는 녹지조성용 matrix 등으로 이용하고 있다(Figure 3)[5].

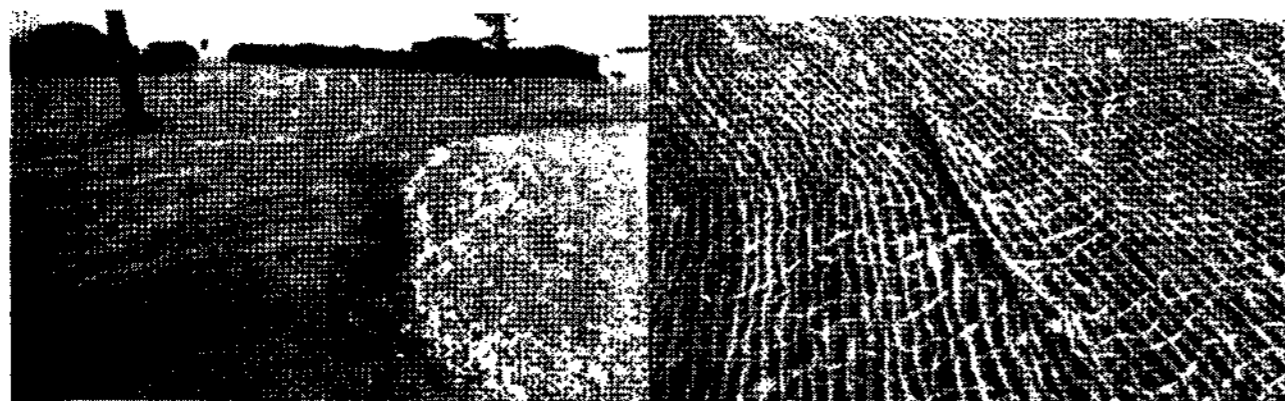


Figure 3. Geojute를 이용한 geosynthetics 제품의 시공.

2.3.2. 고성능 소재

2.3.2.1. 초고강력 PET 섬유 소재

초고강력 PET 섬유는 고강도, 고탄성율, 내화학성 등의 장점이 있어 토목건축 보강재, 해양 방재용 제품, 타포린, 각종 고무 보강재, 소폭 벨트지 등의 산업전반에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있다. 산업용 중간 소재로 가격이 저렴하고 기능 향상, 강력 보강 등 최종 제품의 여러 성능을 향상시킬 수 있어 사용 범위가 점차 확대되고 있다(Table 3).

세계시장에서 가격 경쟁력을 유지하고 고품질의 시장을 계속해서 확보하기 위해서는 물성 측면과 사용 제품의 수명 성능이 뛰어난 초고강력 PET 섬유의 제조기술 개발이 필수적이다. 초고강력 PET사는 기존의 산업용 PET사보다 강도가 약 10~20% 높고 절신이 10% 이하로 크리프 특성이 매우 뛰어나다. 그리고 고탄성율, 내화학성 등의 장점이 있어 다양한

Table 3. 원사의 세계 시장규모(단위 : 억원)

항 목	세계 잠재 시장규모(2009년)
초고강력 PET 사	619
고성능 하이브리드사	370

출처: 2006년 12월 “산업용 원사부분” 분석자료(국내 대기업)

산업용 중간재 용도로, 특히 토목건축 보강재, 해양 방재용 제품에 매우 적합하다.

2.3.2.2. Super 섬유 소재

항공, 우주, 통신, 스포츠, 레저용으로 광범위한 산업분야에서 복합재료의 섬유보강재로 이용되고 있는 탄소섬유, 아라미드 섬유, 유리섬유, PVA 섬유 등은 매우 높은 인장강도와 탄성률을 가지고 있어 이들 섬유를 이용한 보강재는 토목, 건축, 그리고 콘크리트 분야의 신소재로 불리고 있다(Figure 4). 기존의 강철 재료에는 없는 많은 이점을 가지고 있기 때문에 가격이 높다는 점에도 불구하고 그 사용이 증가하고 있다(Table 4,5). 다가오는 정보화 사회에서 비자성체의 비철구조물이 필요한 용도가 증가할 것으로 예상되어 장섬유 보강재의 전망은 밝은 편이다. 그러나 이를 더욱 보급 발전시키기 위해서는 이것을 이용한 보강 구조물의 설계 및 시공 방법, 그리고 보강재 자체의 품질규격과 시험방법의 확립이 요구된다. 특

Table 4. Aramid 섬유의 시장규모(단위 : 물량T/Y, 금액-억원, 2004)

구 분		방탄복합	섬유보강	광케이블
		소재용	고무소재용	보강소재용
세계시장	물량	23,520	5,880	4,800
	금액	7,626	1,880	1,440
국내시장	물량	215	135	150
	금액	75	43	45

Table 5. 탄소 섬유 세계 수요예측(단위 : 물량T/Y)

분 야	'02	'03	'04	'05
토목·산업	6,580	7,190	7,860	9,600
스포츠·레저	4,020	4,025	4,030	4,560
항공·우주	4,400	4,440	4,530	5,840
합계	15,000	15,655	16,420	20,000



Figure 4. PVA 섬유를 이용한 시공 및 보강 현장.

히 장섬유 보강재를 이용한 구조물의 역학적 거동은 기존의 구조물과는 현저하게 다른 경우가 있어 설계·시공에 관한 통일된 기준이 필요한 실정이다.

2.3.2.3. 하이브리드 소재

하이브리드 소재의 개발은 Figure 5와 같이 최근의 다양한 신소재들 간 또는 기존 소재와의 복합화를 통해, 기존 소재 또는 신소재 단독으로는 달성하기 어려운 성능을 발현하도록 하는 것이 기술의 핵심이라고 할 수 있다. 서로 다른 물리적·화학적 특성을 지닌 두 가지 이상의 소재로서 각각의 소재 단독으로는 달성하기 어려운 각 소재의 장점만을 살린다는 것은 결코 쉬운 일이 아니므로 다양한 연사·합사 방법을 적용하여 최적화하는 기술이 필요하며 이러한 기술들 중 어떤 것들은 기존 설비로는 불가능하며 각 회사가 독창적으로 개발한 설비를 사용해야 하는 것들도 있다. 따라서 이러한 독창적인 기술들은 각 회사가 갖는 노하우 또는 특허로 선점되어 기존 업체와의 기술격차는 더욱 벌어질 것으로 기대되며 기존 제품에서 성능을 발휘하지 못했던 특성을 얻을 수 있으며 최종 제품에 적용할 수 있는 범위가 매우 넓다.

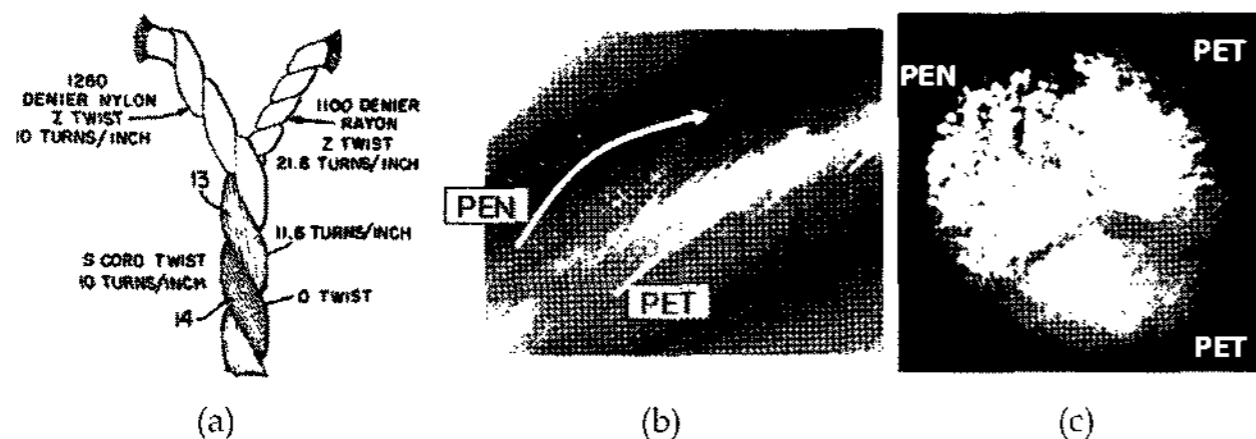


Figure 5. Hybrid 사; (a) 모식도, (b) 표면사진(x 5), (c) 사 단면(1000d/3ply).

3. 고성능 소재의 기술 개발 현황

3.1. 초고강력(Super High Tenacity, 이하 SHT) PET사 현황

산업용 PET 섬유는 고강도, 고탄성율, 내화학성 등의 장점이 있어 건축토목 보강재, 해양방재용 제품, 타포린, 각종 고무 보강재, 소폭 벨트지 등의 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있다. 산업용 중간 소재로 가격이 저렴하고 기능 향상, 강력 보강 등 최종 제품의 여러 성능을 향상시킬 수 있어 사용 범위가 매우 다양하다. 특히 산업 재료용 섬유의 SHT화는 어느 일정 하중을 얻기 위한 섬유 사용량 저감을 통하여 환경부하를 낮추는 데에도 공헌할 수 있다는데 큰 의미가 있다.

국내 산업용 섬유의 연구 개발 현황이 선진국과 다른 점은 국내시장의 협소함과 기술력의 저조이다. 선진국의 경우에는 관련 산업 분야가 발달되어 있기 때문에 산업용 섬유의 수요

가 국내와 비교할 수 없을 정도로 크며, 용도 개발에도 제한이 없을 정도이지만 국내의 경우에는 산업용 섬유소재를 적용하는 시장과의 정보교류나 분석 등이 어렵고 시장이 작기 때문에 기술 개발 등의 투자비용을 감당하기가 어려운 수준이다. 기술력이 있는 일부 대기업의 경우에는 규모의 경제를 실현할 수 있는 범용 섬유소재 개발에 국한된 연구 개발을 진행하고 있으며, 중소기업의 경우에는 투자에 대한 위험 감당과 연구 개발 인력을 확충하는 것이 어렵다는 점이 문제이다.

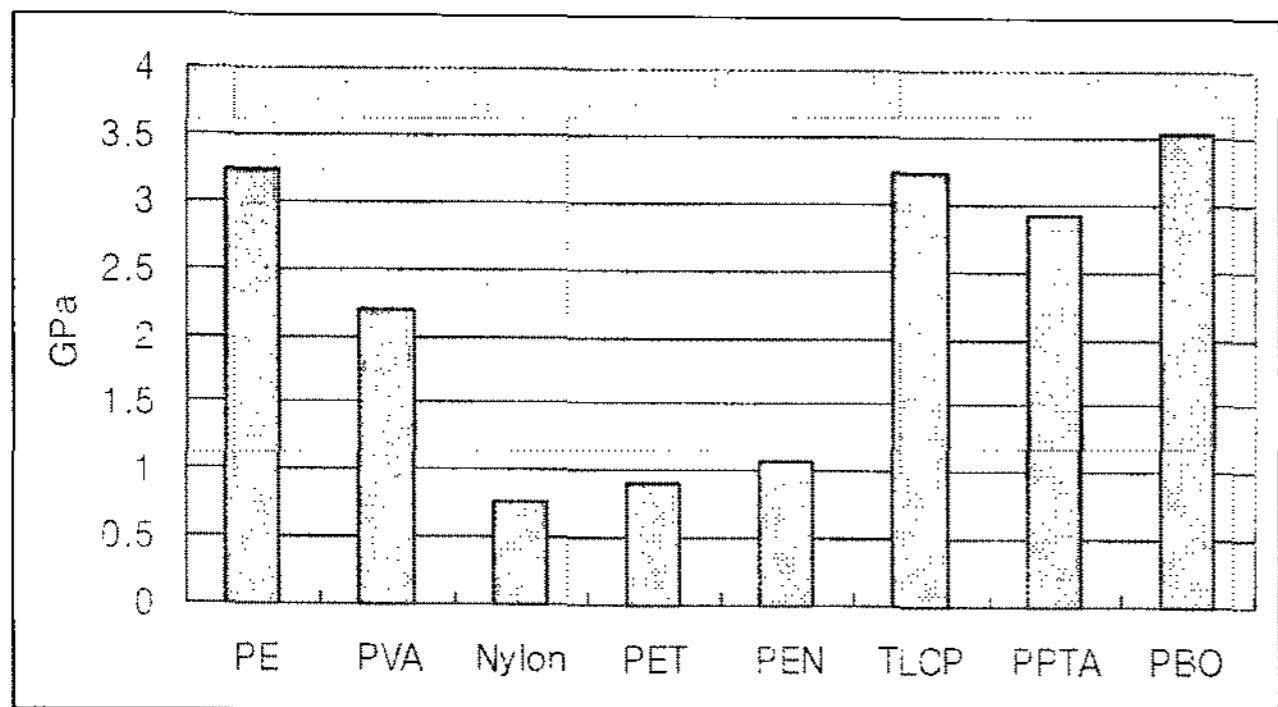
시장에서의 차별화 소재와 제품에서의 성능 향상에 대한 요구가 계속되기 때문에 대기업을 중심으로 일부 연구 개발이 진행되고 있다. 기존 범용의 산업용 PET 사에서 강도를 10~20% 높임으로써 기존의 PET 섬유로는 가질 수 없었던 초고강도 특성을 확보할 수 있고 크리프 특성이 뛰어나 토목 보강용 섬유재료로 성능이 향상된 제품을 제조할 수 있다. 또한, seat belt, 로프, 섬유강화 복합재료, 광통신용 섬유 재료 등 거의 무한한 분야에 적용되고 있는 기존 원사를 본 SHT 기술의 응용, 접목하여 각 용도에 맞는 PET 사를 개발 할 수 있다. 물성 측면과 사용 제품의 수명 성능이 뛰어난 초고강도 PET 사를 개발함으로써 세계시장에서 가격 경쟁력을 유지 및 고품질의 시장을 계속해서 확보할 수 있을 것으로 기대되어 선진사 및 국내 대기업을 중심으로 연구 개발이 진행되고 있다.

3.1.1. SHT PET 사 개발

PET 사의 이론 강도는 230 g/d 정도이고 고강도화 될 가능성을 충분히 가지고 있다. 하지만 상업적으로 사용되고 있는 강도 수준은 Figure 6와 같이 5% 정도인 9~10 g/d에 머물러 있다. 이렇게 PET 사의 고강도화를 어렵게 하는 요인으로는, PET 사가 축합계 고분자로 고분자량화가 어렵고 용융 시에 고중합물의 분자량 저하가 현저하고 분자간 반복단위 길이가 길기 때문에 연신이나 결정화에 불리하다는 단점이 있다.

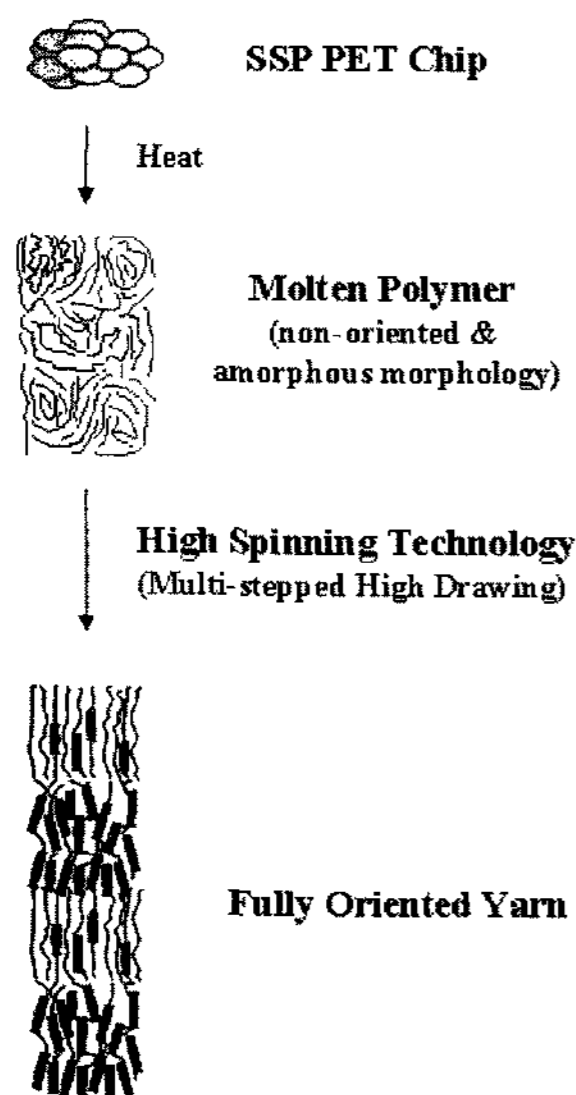
섬유의 분자량을 높이면 구조 결함을 일으키는 분자쇄 말단의 수가 감소하는 동시에 고온에서 유효한 연신을 실행하는데 충분한 분자쇄 간의 교락이 확보될 수 있기 때문에 섬유의 강도가 커지는 것이다. 이와 같이 고분자량의 섬유를 제조하기 위해서는, 고중합물을 섬유화하기 위한 고점도물의 압출기술·분자량 저하 억제기술·용융점도 저하 억제기술·분자량 분포 제어기술 등을 통하여 이루어진다.

용융 구조 제어를 이용한 SHT PET 사의 섬유 제조 기술은 Figure 7과 같이 용융 상태에서 극도로 저 배향된 미연신사를 제조하는 달성할 수 있다. SHT PET 사의 제조 공정의 핵심은 고속 방사시에 부여되는 방사 선상에서의 속도구배가



(유연체) (반강직체) (강직체)

Figure 6. 분자쇄의 강직성과 섬유의 강도.



SHT PET

Figure 7. SHT PET 사의 형성.

저 배향된 미연신 필라멘트 고분자의 더 큰 분자쇄 신장을 가져와 이에 의해 분자배향이 되며, 결국 이 배향에 의해 유도된 결정화가 섬유 구조 내에 고정됨으로써 SHT PET 섬유의 미세구조를 결정하게 된다. 이때 형성된 고강도 섬유의 미세구조는 Figure 8에서와 같이 결정화도와 비결정형 단위의 배향이 월등히 발달된 것으로 확인되었다.

이렇게 제조된 SHT PET 섬유는 Reg. 대비하여 Figure 9과 같이 강도는 10% 이상 우수하며 파단 신도도 상대적으로 낮아 토목합성 보강재로 주로 사

용된다. 특히 대표적인 토목합성 보강재인 지오그리드 제품의 경우 안정된 크리프 한계 변형률이 10% 이내임을 고려해 볼 때 원사의 변형률은 지오그리드 제품의 크리프 변형률을 좌우하는 중요한자가 된다. 따라서 geosynthetics 제품뿐만 아니라 PET 원사 자체의 장기크리프 특성 및 크리프 감소계수의 평가가 필요하다. 장기 크리프특성을 평가하기 위한 방법으로는 conventional method, TTS (time-temperature superposition), 그리고 SIM(steped isothermal method) 방법이 있으며 시험의 신속한 진행과 편리함으로 SIM이 많이 사용되고 있는 추세이다. Figure 10과 Table 6은 SIM 방법에 의한 SHT PET 사와 Reg. PET 사와의 크리프 특성을 비교한 자료로써 파단 신도가 낮은 SHT PET 사가 크리프 특성

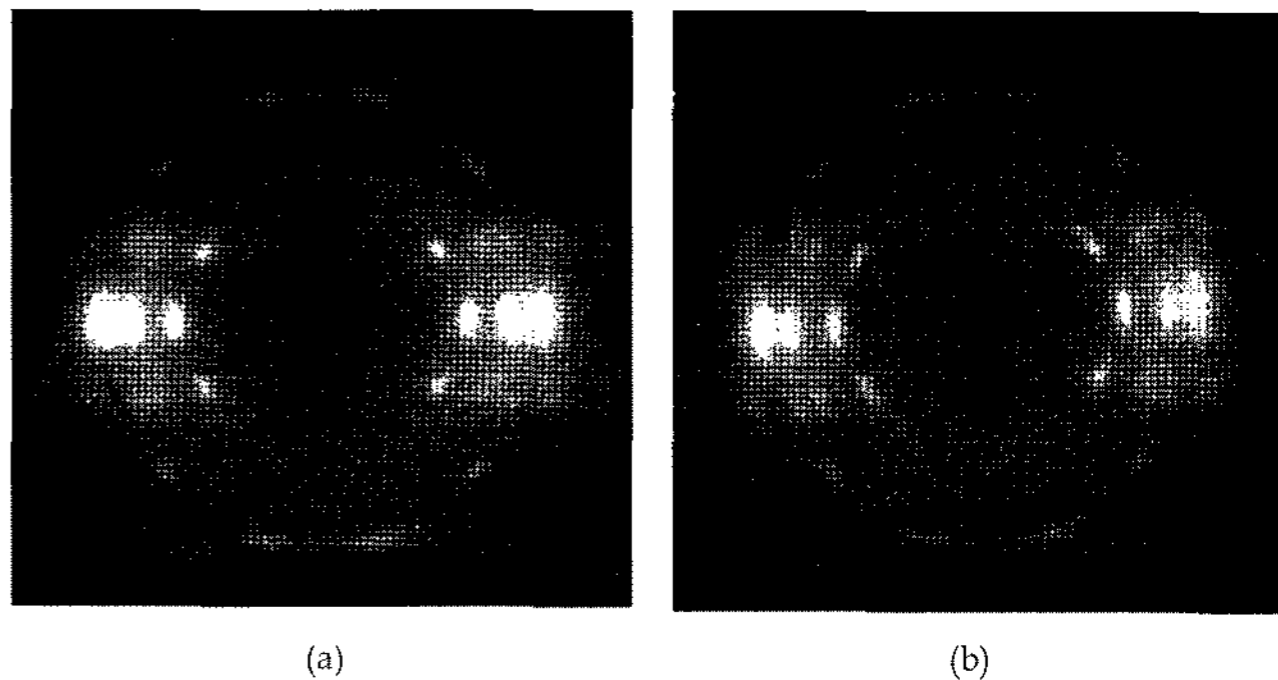


Figure 8. SHT PET 사(a)와 Reg. PET 사(b)의 WAXD Pattern.

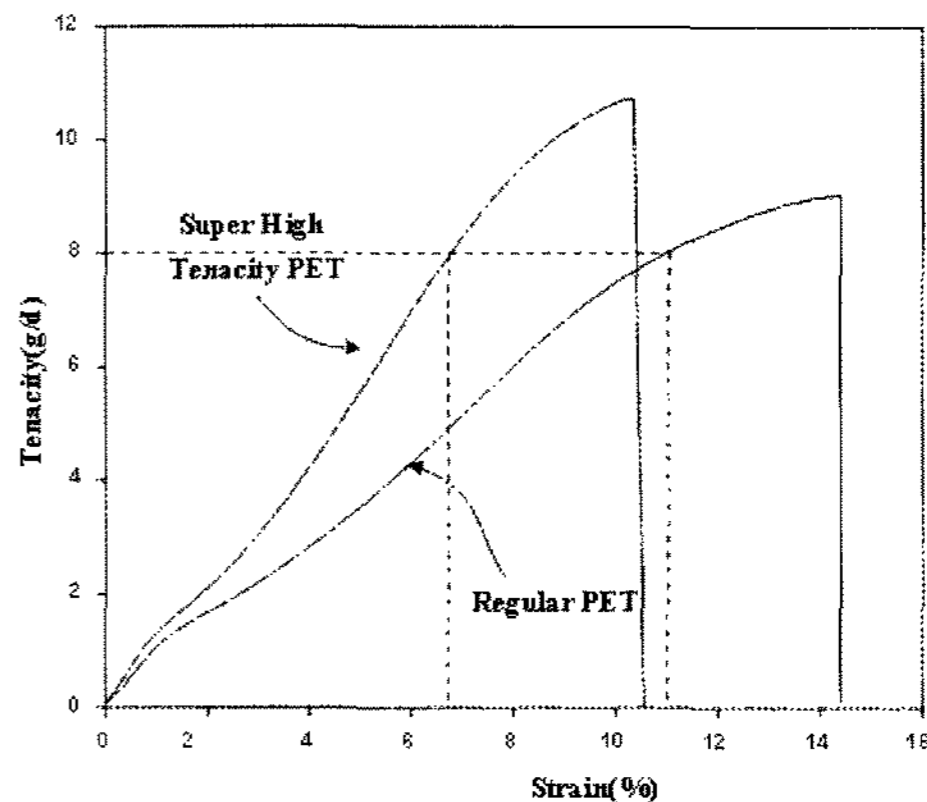


Figure 9. SHT PET 사와 Reg. PET 사의 강신도 그래프.

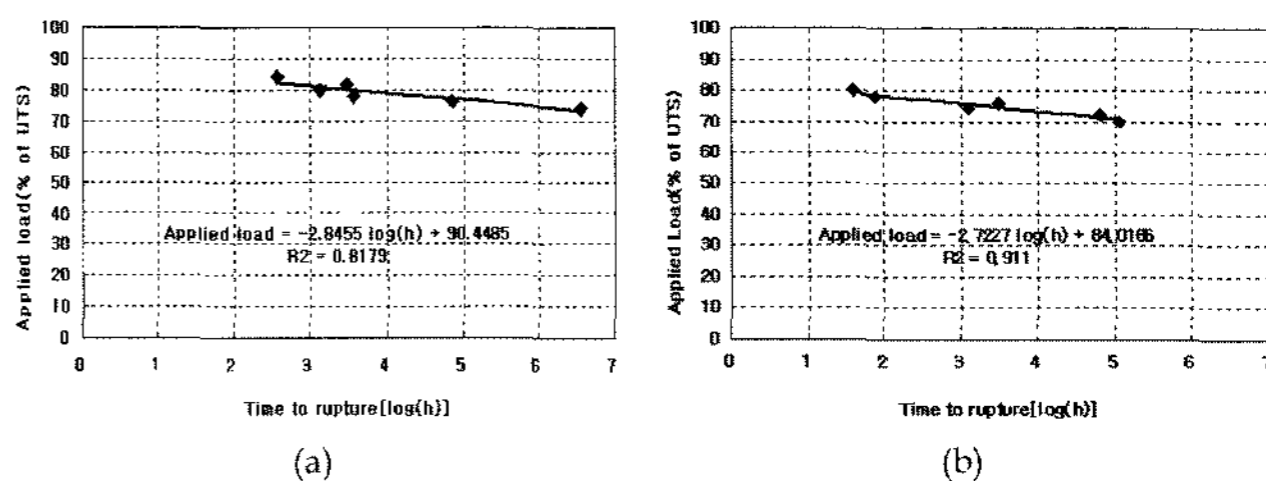


Figure 10. SHT PET 사(a)와 Reg. PET 사(b)의 SIM 테스트 중 원사 파단강력과 시간과의 관계.

이 우수한 것을 알 수 있다.

3.2. 하이브리드사 현황

최근 고강력 이면서도 한 차원 우수한 형태 안정성을 갖으며 여기에 환경과 가격을 만족하는 새로운 형태의 산업용 원사가 개발 되거나 개발이 진행 중이다. 폴리에틸렌나프탈레이트(이하 PEN)는 폴리머의 고유특성인 나프탈렌환의 강직성으로 저수축, 고탄성율화 특성이 있는 고강도 섬유를 만들 수 있다. 또 최근 국내 대기업에서 개발 상업화된 라이오셀(lyocell)의 경우 레이온과 유사한 물성을 갖으면서도 레이온

Table 6. SHT PET 사와 Reg. PET 사의 creep reduction factor 비교

Life Time (years)	Reg. PET 사		SHT PET 사	
	% of UTS	RF _{CR}	% of UTS	RF _{CR}
50	68.66	1.46	74.40	1.34
100	67.84	1.47	74.17	1.35
114	67.68	1.48	74.08	1.35

측정: FITI 시험연구원

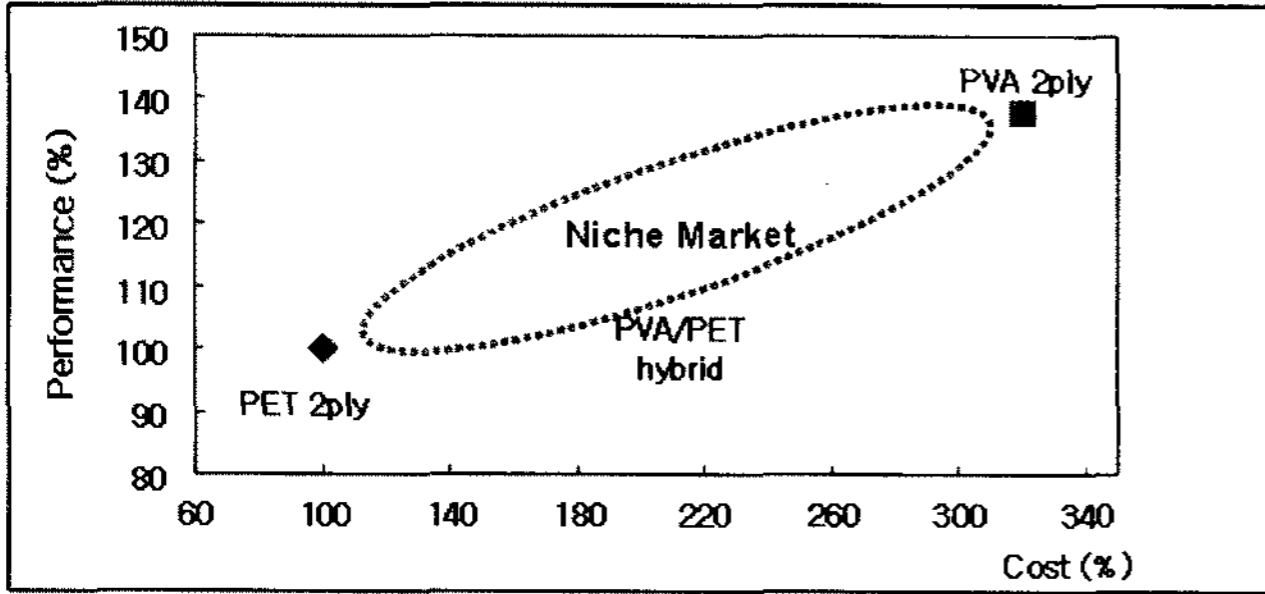


Figure 11. 고성능 원사의 performance/cost 비교.

과 달리 친환경적인 생산기법으로 인해 향후 셀룰로스 장섬유시장에 무궁무진한 성장가능성을 가지고 있다. 그리고 폴리비닐알코올(이하 PVA)은 고강도, 고탄성율, 내화학성, 우수한 접착성을 가져 자동차부품, 해양, 그리고 토목건축용 등의 산업전반에 걸쳐 광범위하게 사용되는 소재이다.

그러나 이러한 다양한 산업용 원사들은 Table 7과 같이 그 기본적으로 중요한 몇 가지 특성, 즉 강력, 구조안정성, 접착성 등에서 각기 장단점을 가지고 있는데, PEN의 경우는 고강도이면서 형태안정성이 우수하나, 낮은 접착력이 문제이고, lyocell의 경우는 형태안정성과 접착력이 우수하나 내피로가 약하며, 대량생산의 문제가 있다. 또 PVA는 고강도이나 내열성이 약하며 대량생산에 한계가 있다. 또한, 세 가지 소재가 모두 제조비용이 폴리에스터에 비해 두세 배 이상으로 향후 비용의 혁신적인 절감 없이는 수요의 급속한 증가는 불가능한 실정이다.

아무리 좋은 원사라 하더라도 기본적인 중요 물성이 하락하면 용도에 맞는 제품으로 적용하기 어렵거나 용도가 제한되게 된다. 따라서 이와 같은 단일 재료로서 요구하는 수준의

물성을 실현할 수 없을 경우 특성화된 재료들을 적절히 조합함으로써 단일재료로는 발현키 어려운 새로운 개념의 물성을 가지는 하이브리드 원사를 개발할 수 있다. 이렇게 개발된 하이브리드 원사를 사용하면 제품의 원사 사용량을 적게 하여 제품의 중량을 줄일 수 있을 뿐 아니라 초저수축의 제품을 비교적 적은 비용으로 만들 수 있는 등(Figure 11) 고기능성 산업용 제품 개발을 용이하게 할 수 있는 장점이 있다[6].

3.2.1. 하이브리드사의 국내외 기술

현재까지 하이브리드 원사에 대한 국내에서의 특허출원은 거의 없는 상태이다. 국외의 몇몇 선진 섬유업체에 의하여 특허출원이 주도되고 있다. 1968년 Goodyear에 의해 하이브리드에 관한 최초의 특허가 출원된 것을 시작으로 1990년대에 이르러 Goodyear, Sumitomo, Bridgestone 3개사에 의해 특허출원이 주도되었다. 이 상위 3개사가 전체 특허중 75%를 출원하였으며 특히 일본의 Sumitomo는 전체 특허중 35%를 출원하여 하이브리드 원사에 대한 기술을 선점하고 있다. 원사업체로는 Honeywell과 Teijin이 2003년 1건씩 출원하였다. 또한 연사 및 합사 방법에 따른 다양한 기술들이 나타났는데 고탄성 필라멘트와 저탄성 필라멘트간의 연사 및 합사를 통하여 각 소재들의 단점을 보완하고 장점을 살리는 기술들이 주종 이었다. 심지어는 steel 소재와 유기섬유와의 연사 및 합사를 통한 여러 가지 효과를 다루고 있다. 이러한 효과들을 나열하여 보면, 비용절감, 내피로성 향상, 굴곡성능, 안정성, 내구성, 중량감소 등 산업용 제품의 고기능화에 필요한 다양한 요구 조건들을 만족하고 있는 것으로 파악된다. 하이브리드의 주목적은 기존의 소재로써 불가능했던 고기능성 제품에 다양한 소재의 복합화로 고기능성을 부여하는 것이다.

3.2.2. 하이브리드사의 개발 필요성

빠르게 성장하는 산업용 소재 시장에서 업체간 치열하게 이루어지는 경쟁목표는 바로 경량화와 비용절감이다. 산업화의 다양한 요구에 맞추기 위하여 산업용 제품 및 소재에 요

Table 7. 산업용 섬유 소재의 특징과 용도 비교

항목	Nylon 66	레이온	PET	PEN	Lyocell	PVA	Aramid
장점	고강력 내피로성 저발열 접착력	내열성 접착력 초저수축	경제성 고강도	고강력 고탄성률 초저수축	내열성 접착력 초저수축 친환경성	고강력 내피로성 접착력 고탄성률	고강력 고탄성률 형태안정성
단점	저형태 안정성 Flat spot	저강도 수분민감 경제성	내열강력 저내수성	경제성	저강도 수분민감	저온탄성률 열안정성 경제성	접착력 내피로 경제성



구되는 특성은 다음과 같다.

- 고강도: 경량화/안정성/내구성
- 내열성: 고속화/안정성/내구성
- 고탄성율: 고속화/내구성
- 내열접착력: 안정성/내구성
- 저발열: 안정성/내구성

이러한 특성을 단일 소재의 섬유가 모두 가지고 있기는 불가능하다. 예를 들어 나일론류는 탄성율이 낮으며, 폴리에스터의 경우에는 내열성과 내열접착력 면에서 약점이 있으며, 레이온은 강도와 생산 공정의 문제 등에서 약점이 있고, PEN의 경우는 가격이 높은 등의 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해 중합, 가공, 방사 기술과 연사, 합연 기술의 활용을 통한 고부가가치의 차별화된 하이브리드사의 개발이 절실하다. 하이브리드사는 기존 원사의 기계적 강도, 치수 안정성, 내약품성 등을 획기적으로 향상시킬 수 있으므로 이를 통해 기존의 단일 소재 자체로는 적용이 어려웠던 고기능, 고성능 산업용 섬유 및 토목, 건축용 보강재료 등에 널리 적용될 수 있다.

4. 결 론

지금까지 토목, 건축용 보강재료 사용되는 재료의 종류, 특징, 그리고 향후 개발 방향에 대하여 간략하게 살펴보았다. 방재용 토목, 건축의 섬유제품의 보강재료 사용되는 고강도 섬유 소재는 산업용 시장에서 매우 큰 부피를 차지하고 있으며 앞으로도 발전 가능성이 상당히 큰 시장이라고 할 수 있다. 특히 지구 온난화로 인한 더 강력해진 열대성 저기압으로 태풍, 폭우 등에 의해 피해 사례가 해마다 증가하고 있고 그 피해 규모도 해마다 급속하게 증가 추세에 있다. 그러므로 기존에 수동적인 방재 개념에서 자연 재해로부터 적극적인 방재 개념, 즉 예방 분야에 많은 연구, 개발 및 투자가 이루어지고 있다. 기존의 단순한 보강 기능에서 성능이 월등하게 향상된 지오 복합체에 대한 관심이 매우 많으며 이에 따라 보강재료 사용되는 소재에 대하여도 연구, 개발이 활발히 이루어지고 있다. 아울러 장기 성능과 고성능화된 보강용 섬유제품의 시장은 해마다 크게 증가할 것으로 예상되고 있다.

이와 같은 자연환경과 더불어 갈수록 경쟁이 치열해지고 있는 섬유 산업의 현 상태를 볼 때, 상대적으로 성능과 기능

이 우수한 제품 개발을 통한 고부가가치화 등 섬유 관련 학계/산업계 전반의 지속적인 연구 개발의 노력이 요구된다.

참고문헌

1. Shukla, Yin, "Fundamentals of Geosynthetic Engineering", Taylor&Francis, 2005.
2. 전한용, 홍상진, 고분자과학과 기술, 15(1), p.20, 2004.
3. T. R. Bowne, "Industry Study 2153 GEOSYNTHETICS", Freedonia Group, 2007.
4. 전한용외 3인, "토목합성보강재", 전남대학교 출판부, 2001.
5. 전한용외 5인, "지오신세틱스", 보성각, 2005.
6. "UHP Tire용 Hybrid Tire Cord 기술개발에 관한연구", 산업자원부, 2006.

• 심 동 석

1988. 서울대학교 섬유공학과 졸업
 1990. 서울대학교 섬유공학과(석사)
 1990-현재. 효성기술원 생산기술연구소 Tech. Yarn 연구팀 팀장

• 조 대 환

1993. 충남대학교 섬유공학과 졸업
 1996. 서울대학교 섬유고분자공학과(석사)
 2001. 서울대학교 재료공학부(박사)
 2001-현재. 효성기술원 생산기술연구소 Tech. Yarn 연구팀 수석연구원 (431-428) 경기도 안양시 동안구 호계동 183
 전화 : 031-428-1416
 e-mail : dhwgod@hyosung.com

• 한 규 찬

2002. 인하대학교 섬유공학과 졸업
 2004. 인하대학교 섬유공학과(석사)
 2004-현재. 효성기술원 생산기술연구소 Tech. Yarn 연구팀 선임연구원

• 육 지 호

1989. 서울대학교 섬유공학과 졸업
 1996. 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)
 1997-2000. 미국 University of Massachusetts, Post-doc.
 2001-2003. 한국전자통신연구원 선임연구원
 2003-현재. 인하대학교 나노시스템공학부 섬유신소재전공 부교수

• 김 승 현

1992. 서울대학교 섬유고분자공학과 졸업
 1994. 서울대학교 섬유고분자공학과(석사)
 1998. 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)
 1999. Pennsylvania State University 재료공학과 Post-doc.
 2000-2002. 서울대학교 신소재공동연구소 특별연구원
 2002-2005. University of Massachusetts at Amherst 고분자공학과 Post-doc.
 2005-현재. 인하대학교 나노시스템공학부 섬유신소재전공 조교수