

 POSRI 보고서

기지개 켜 탄소섬유 시장, 그 가능성은?

박형근 수석연구원, 미래창조연구실 (hyungkeun.park@posri.re.kr)

[목 차]

1. BMW i3와 보잉 787, 본격 탄소섬유 복합소재 시대 열다
2. 무엇이 탄소섬유 복합소재를 특별하게 하는가?
3. 치열해지는 탄소섬유 시장 경쟁환경
4. 탄소섬유 복합소재에 관한 3가지 Key Questions

Executive Summary

- BMW i3는 차체 기본골조 전체, 보잉 787은 동체의 50%에 탄소섬유 복합소재를 적용해 탄소섬유 대중화 가능성에 대한 기대감을 높임
 - BMW는 탄소섬유분야 선도기업인 독일의 SGL과 합작하여 차체 제작을 위한 원사 및 설비공장에 투자함으로써 전기차 i-시리즈 생산에 투입할 예정
 - 보잉787, A350 등 최신예 항공기는 탄소섬유 복합소재를 동체에 50% 이상 적용해 경량화를 이루어 연료 효율을 높이고 쾌적한 실내환경 조성
 - SGL의 경우 최초로 연간 3천 톤의 자동차 차체 전용 생산 기지를 구축하고 대량생산에 대한 검증은 마쳐 탄소섬유 대중화에 대한 기대감을 심어줌
- 탄소섬유란 견고한 육각 탄소고리가 끝없이 연결된 실이며, 철보다 10배 강하지만 무게는 4분의 1에 불과해 고강도 초경량 미래소재로 주목 받음
 - PAN, 레이온 등 화학섬유를 수차례 높은 온도로 가열해 흑연화 과정을 거친 후, 에폭시 수지 등 플라스틱을 첨가해 견고한 구조 완성
 - 프로필렌으로부터 추출한 PAN계가 시장의 90%를 장악하고 있으며, 포스코도 구상중인 피치계 탄소섬유는 아직 상업화가 활발히 이루어지지 않음
- 글로벌 시장은 선두업체 도레이 등에 의해 과점화되어 있으며, 올해를 기점으로 효성·삼성 등 국내 기업도 앞다투어 진출해 경쟁 치열
 - 자동차, 풍력발전 블레이드 등 산업재 분야가 연 10%대의 빠른 성장을 견인하고 있으며, 이에 발맞추어 글로벌 업체들도 증설과 인수합병에 박차
 - 이러한 성장속도를 반영하듯, 글로벌 시장은 2011년 기준 35,000톤에서 2020년에는 두 배로 늘어나 70,000톤이 될 것으로 전망
 - 약 2,000톤 규모의 국내 시장에서는 전량 수입에 의존하던 원사를 올해부터 태광, 효성, 도레이 첨단과학이 경쟁적으로 생산에 돌입해 가격 하락 예상
- 단시일 내 철강업을 위협하진 않겠지만, 가장 강력한 대체재 가운데 하나이며, 철강사는 제철과정 부산물을 활용한 피치계 사업 기회에 주목할 필요
 - ① 알루미늄의 약 4배, 철강의 약 9배나 되는 가격으로 인해 항공우주, 전기차, 슈퍼카 분야에서 제한적 확산이 이루어질 전망
 - ② 자원 순환이 어렵고, 느린 화학반응과 많은 에너지를 소비하는 현재의 생산 기술을 단기간에 혁신하기는 어려울 것으로 보여 철강 대체재로는 한계
 - ③ 제철소 부산물인 콜타르 피치를 활용해 기존 제품군과 차별화되는 초고탄성 탄소섬유 생산기술을 연구해 항공우주 등 특수분야 사업 타진 가능

1. BMW i3와 보잉 787, 본격 탄소섬유 복합소재 시대 열다

□ 항공우주, 자동차 분야에서 주목 받고 있는 탄소섬유 복합소재

○ BMW는 최근 출시한 전기차 i3에서 Body-In-Black¹의 대량생산체제를 실현함으로써, 탄소섬유 복합소재(CFRP²)의 대중화 가능성을 보여줌

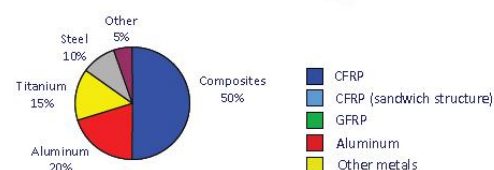
- i3를 5만 달러 대 대중적 도시차량으로 출시하면서 기본 골조 전체를 탄소복합소재로 제작, 대량생산 가능성 입증
- BMW는 SGL³사와의 조인트벤처에 9천만 유로를 투자해(총 2.3억 유로 투자 계획) 초기 단계 연산 3천 톤 규모의 탄소섬유 생산체제 구축
- 미국의 Moses Lake 공장에서 섬유 원사를 공급하고 독일의 Wackersdorf에서 복합소재(직물화)를 생산해 Leipzig에서 완성차를 조립하는 형태

○ 보잉 787, 에어버스 A350 등 최신 기종에서 50% 가까이 CFRP를 적용해 항공우주분야에서도 기술적 도약이 일어나고 있음

- 보잉사는 777기에서는 동체의 약 12% 가량만 탄소복합체를 사용한 반면, 2011년 출시한 후속기종 787에서는 탄소복합체를 50% 적용
- 알루미늄 프레임에 탄소섬유를 테이프 휘감듯 감는 공법으로 제작해 5만 개 가량의 볼트 사용을 줄이고 경량화를 이룸으로써 연료 효율을 20% 정도 높임
- 강도 및 내습성이 뛰어나 지상과 유사한 기압과 습도를 유지할 수 있어 탑승객에게 안락한 환경을 제공하며, 내구성도 우수해 기존 6~7년 단위의 동체 점검주기도 10년 이상으로 늘어나 경제성 측면에서도 매력적

○ 골프채 샤프트 등 스포츠 기구, 조선·건축 보강재 분야도 적용 확대

- 스포츠, 건축 외에도 풍력터빈 블레이드, 고속철도 차체에 적용되고 있으며, X선 투과성이 있어 X선 진단장비 등 의료분야에서도 활용
- 항공분야가 물량비중으로는 3%에 불과하지만 금액 비중으로는 17%를 차지해 가장 높은 부가가치를 지니며, 자동차 25% (금액 23%), 건축 30%(금액 21%)의 물량 비중으로 고객층이 분포



<BMW i3의 탄소복합차체, 자료:SGL>

<보잉 787의 동체 적용소재 분포, 자료: 도레이>

¹ 기존 차량의 철재 골조 구조를 일컫는 Body-In-White 용어를 차용, '검은색 차체'라는 의미로 BIB라 지칭

² CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic

³ 독일 탄소소재전문 제조기업 (전극봉, 탄소섬유)

2. 무엇이 탄소섬유 복합소재를 특별하게 하는가?

□ 꿈의 소재로 불리는 탄소섬유 복합소재, 알루미늄보다 가볍고 철보다 강한 특성으로 인해 고강도 초경량 소재로서 각광

○ 탄소섬유는 육각고리 형태의 탄소원자가 끝없이 연결된 실

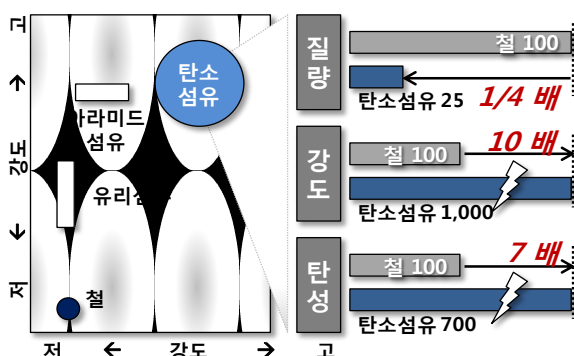
- 탄소섬유는 100%에 가까운 탄소원자로 구성된 무기섬유이며, 탄소원자들이 육각고리결정 형태로 구성되어 밀도가 낮으면서도 높은 강도 유지
- 1958년 美 Union Carbide가 레이온 섬유 기반 탄소섬유를 개발한 이래 1986년 日 도레이가 항공용 PAN계 탄소섬유 개발하며 관심 폭발
- 단면적 1mm²으로 700kg 이상을 들어올릴 수 있는 강도로 철보다 10배 강한 반면, 무게는 4분의 1 수준에 불과해 꿈의 소재로 불림

○ 탄소섬유는 원재료(전구체)에 따라 PAN계, 레이온계, 피치계⁴ 탄소섬유로 구분되며, 현재는 PAN계가 시장의 90% 가까이 점유

- 대표적인 PAN계 탄소섬유는 석유화학제품인 프로필렌에서 추출된 아크릴로니트릴을 중합-방사-내염화-흑연화하여 제조
- 원료인 PAN섬유 원사를 전구체(Precursor)라 하며, 탄화·직물화한 후 에폭시 수지 등을 입혀 경화시킨 중간재를 프리프레그(Prepreg)라 지칭
- 프리프레그를 형틀에 넣거나 휘감은(테이핑) 후, 압력과 열을 가해 견고한 구조물을 만들어내면 차체, 비행기 동체 등을 위한 부품이 됨

○ 낮은 생산성으로 인한 경제성 문제와 기공 발생으로 인한 결함 문제 등을 해결해야 대중화 가능

- 현재는 느린 반응속도로 인한 에너지 소비와 낮은 생산성으로 인해 철강재 대비 약 9배의 가격에 판매되고 있어 경제성 확보가 가장 큰 숙제
- 극한환경 용도로 개발된 소재인 만큼 작은 결함도 용납되지 않는 생산 안정성과, 현재 많은 부분 수작업으로 이루어지는 공정의 자동화가 필요



<탄소섬유 복합소재 특징>



<탄소섬유 부품 제조 공정>

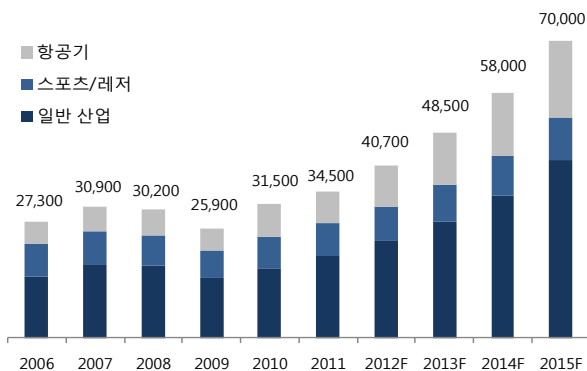
자료: 『자동차 경량소재 동향 및 완성업체 대응』, 모세준, 자동차경제 및 언론자료, POSRI 편집

⁴ PAN(Polyacrylonitrile), 레이온: 석유화학원료인 프로필렌 가공섬유, 피치: 석유·석탄 가공 부산물 화합물

3. 치열해지는 탄소섬유 시장 경쟁환경

- 출하량 기준 2011년 34,500톤에서 2015년 70,000톤으로 빠르게 확대 전망, 현재는 도레이 등 대형 8개 회사가 시장 주도
- 2008년 금융위기시 크게 후퇴하였으나, 매년 평균 10% 수준 성장 지속
 - 풍력발전용 블레이드가 일반 산업용도로는 가장 비중이 높았으며, 골프채, 요트, 자전거 등 레저용 고급 내구소비재도 성장에 큰 역할
 - 자동차 부품용 수요도 크게 늘어나 2020년 시장의 약 20%까지 차지할 전망
- 세계 탄소섬유시장 판도는 일본 3개사 등 top tier는 우주항공에 특화된 가운데 유럽·미국 등 후발주자는 토목 내지는 스포츠용에 집중
 - 일본의 도레이, 도호-테낙스, 미츠비시 레이온 3개사 생산량이 전 세계의 절반 가량을 차지하며, 선두업체 도레이는 보잉 등 항공사가 주고객
 - 독일의 SGL이 BMW, 삼성과 손잡으며 새로운 강자로 부상하였고, 중국 등 후발주자는 주로 소규모로 내수시장에 대응할 것으로 전망

세계 탄소섬유 수요전망 (단위: 톤, 일본 탄소협회 2011년 자료)



PAN계 주요업체 공급능력 현황 (단위: 톤/년, 2013년 기준)

기업	위치	생산능력 (톤/년)
Toray	HQ(일), CFA(미), Soica(프)	21,100
Toho-Tenax	HQ(일), TTA(미), TTE(독)	13,900
Mitsubishi Rayon	HQ(일), Grafil(미)	10,100
Hexcel	HQ(미)	7,200
Cytec	HQ(미)	3,400
Formosa Plastics	HQ(대)	8,800
Zoltec*	HQ(미), (형), (맥)	10,500
SGL	(독), (미)	9,000
AKSA	HQ(터)	1,500
기타	중국업체	12,200

*2013년 연내 도레이에 흡수합병 예정

- 국내시장도 2013년 태광에 이어 효성이 상업생산을 시작하고 삼성과 GS칼텍스가 참여 의사를 밝히면서 경쟁 가열
- 2012년 기준 2,400톤 전량 수입하던 국내 시장에서는 올해 태광 1,500톤, 도레이 첨단소재 2,200톤, 효성 2,000톤으로 총 5,700톤 설비 가동
 - 도레이는 프랑스, 미국에 이어 한국에도 자회사 도레이 첨단소재를 통해 본격 진출함으로써 일본을 포함한 4개국에서 생산·판매 체제를 갖추
 - 섬유분야에서 역량을 갖추고 있는 효성이 상업생산을 시작하였으며, 정유공정 잔사유(남은 기름)를 활용해 피치계 탄소섬유 생산을 추진하는 GS칼텍스도 2015년 상업화를 목표
 - 중국 석유화학 업체의 시장잠식으로 PTA⁵시장 등을 빼앗긴 SK케미칼과 삼성석유화학도 각각 미츠비시 레이온, SGL과 합작하여 다각화 모색

⁵ PTA(purified terephthalic acid): 폴리에스테르계 합성 섬유, 필름의 원료가 되는 석유화학 제품

국내 탄소섬유 생산설비 현황

기업	위치	생산능력 (톤/년)	가동시기
도레이첨단소재	구미 #1, #2	2,200	2013년 1월
		2,500	2014년 3월
태광산업	울산	1,500	2012년 9월
효성	전주	2,000	2013년 3월
		12,000	2020년 12월

기타 기업 계획 중 사업 (언론자료 종합)

삼성석유화학	독일 SGL사와 합작 SGL사의 탄소섬유 복합소재 참여와 국내 마케팅 및 판매
SK케미칼	미츠비시 레이온과 협력, 미츠비시 레이온의 탄소 섬유 원사를 들여와 프리프레그로 가공, 판매
GS칼텍스	정유공정 잔사유 활용해 2015년 국내 상업생산 목표로 피치계 탄소섬유 개발 中

4. 탄소섬유 복합소재에 관한 3가지 Key Questions

① 철강분야를 위협하는 새로운 대체제인가?

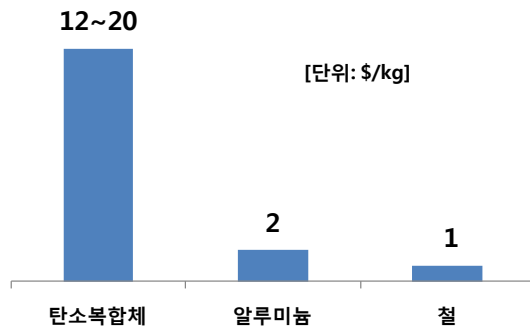
- ✓ 탄소섬유의 압도적인 물리적 특성으로 인해 기존 철강 및 알루미늄 시장을 잠식할 것이라는 우려가 있으나 단기적으로는 어려울 전망
- ✓ 현재 탄소섬유 프리프레그 가격은 kg당 12~20달러에 형성되어 있어 자동차용 강판 약 1달러, 알루미늄 약 2달러와는 큰 차이를 보임
- ✓ 철강재로 구성된 구조물을 동일하게 탄소복합체로 대체할 경우 20~40% 가량 중량을 줄일 수 있지만 가격은 여전히 약 9배에 달함
- ✓ 따라서, 연료효율이 결정적인 항공우주산업이나 무거운 배터리 무게를 보상해야 하는 전기차, 스포츠카 등 일부 시장에서 확산 예상

② 대중화를 위한 기술적 한계는 무엇인가?

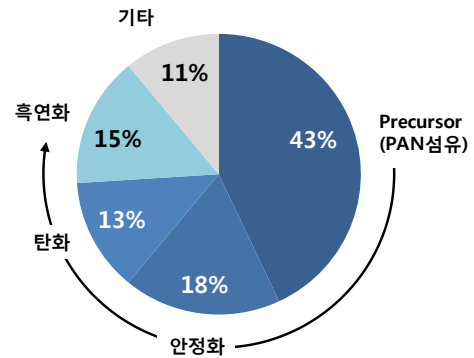
- ✓ 대중화를 위한 가장 큰 걸림돌은 가격이며, 이는 1,000°C 이상의 가열 에너지, 화학적 반응시간이 소요되는 특수한 생산공정이 원인
- ✓ 많은 부분 수동작업인 성형공정 등은 자동화를 통한 개선 여지가 있으나, 탄소섬유 제조공정 본래의 고에너지/저속 특성을 극복하기 위한 혁신이 필요
- ✓ 급격한 충격에 의한 파괴가 상대적으로 잘 일어나며, 스크래치나 파손 시 금속소재 대비 복원이 용이하지 않아 기술 개발이 필요
- ✓ Lifecycle 이후 재활용이 용이한 금속소재와 달리 많은 에너지가 소요되는 리사이클링 기술 개선을 위한 연구 진행

③ 철강사 대응 방향은?

- ✓ 철강사업의 위협요소로 보기에 아직 이르지만 기술·공정 혁신을 통해 가격을 떨어뜨릴 경우 가장 강력한 대체재이므로 예의 주시
- ✓ 제철공정 가운데 코크스 제조과정 부산물인 콜타르 피치를 활용한 탄소 사업 포트폴리오의 하나로 피치계 탄소섬유 사업 고려 가능



<소재간 가격 비교>



<탄소섬유의 가격구조>

자료: 일본탄소섬유협회, POSRI 정리

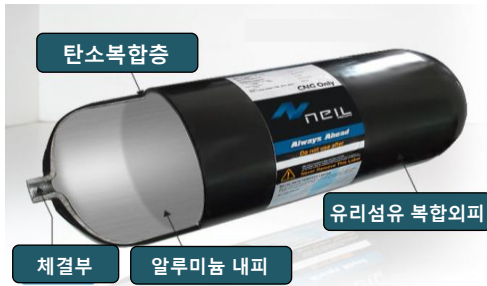
- ✓ 피치계 탄소섬유는 탄성, 열전도성이 상대적으로 뛰어난 초고탄성 재료로 가공해 항공우주, 전기전자 등 특수 고부가 제품군 적용가능
- ✓ 이방성 피치를 원료로 하는 탄소섬유는 결정성이 높고 흑연화가 용이해 원가경쟁력 면에서 PAN계에 앞서는 장점이 있음
- ✓ PAN계 대비 연구가 많이 이루어지지 않았고, 현재 뚜렷한 리더도 없어 기술개발을 통한 고부가 시장 선점을 노려볼 만 함
- ✓ 단, 태광산업의 경우 지난해 3월 설비 완공 후 가동 8일만에 화재로 생산 중단, 4개월 만에 재가동하는 수난을 겪었고, 웅진케미칼은 2011년 기획한지 1년 만에 탄소섬유 사업에서 철수하는 등 시장 노하우와 기술력이 필요한 분야로 사전에 충분한 역량을 쌓은 후 진출하는 것이 바람직

<PAN계 대비 Pitch계 탄소섬유의 장단점>

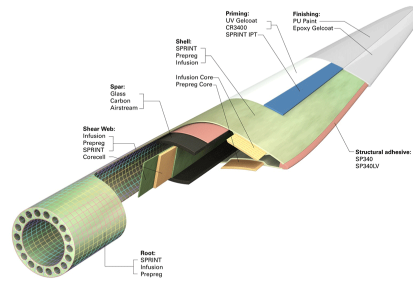
• 에너지 경제성	피치 구조 자체가 탄소섬유 구조인 흑연과 유사, PAN계 대비 생산시 적은 에너지 소비
• 높은 수율	피치 전구체 섬유는 불순물인 N ₂ , H ₂ 및 기타 탄소물질 비율이 PAN 섬유에 비해 낮아 수율이 높음 (75% : 50~60%)
• 높은 탄성	이방성 피치(mesophase A)는 900 GPa 이상의 고탄성 ※ PAN계는 500 GPa 수준, 등방성 피치는 100 GPa
• 전기적/열적 특성	PAN 섬유 대비 전기 및 열 특성 우수하나, 인장강도는 PAN 탄소섬유 비해 낮음

자료: 탄소연속섬유 복합체 제조기술, 오창섭, 김영철, 한국과학기술정보연구원 2011.11

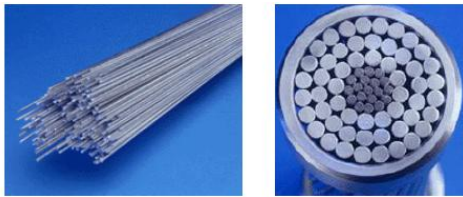
[별첨 1] 기타 탄소섬유 적용사례



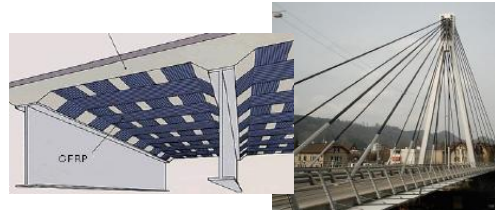
고압천연가스(CNG)/연료전지용 수소탱크 외피



풍력 발전용 터빈 블레이드 구조재료



높은 전도성 이용한 전기전자 재료



토목/건설용 보강재

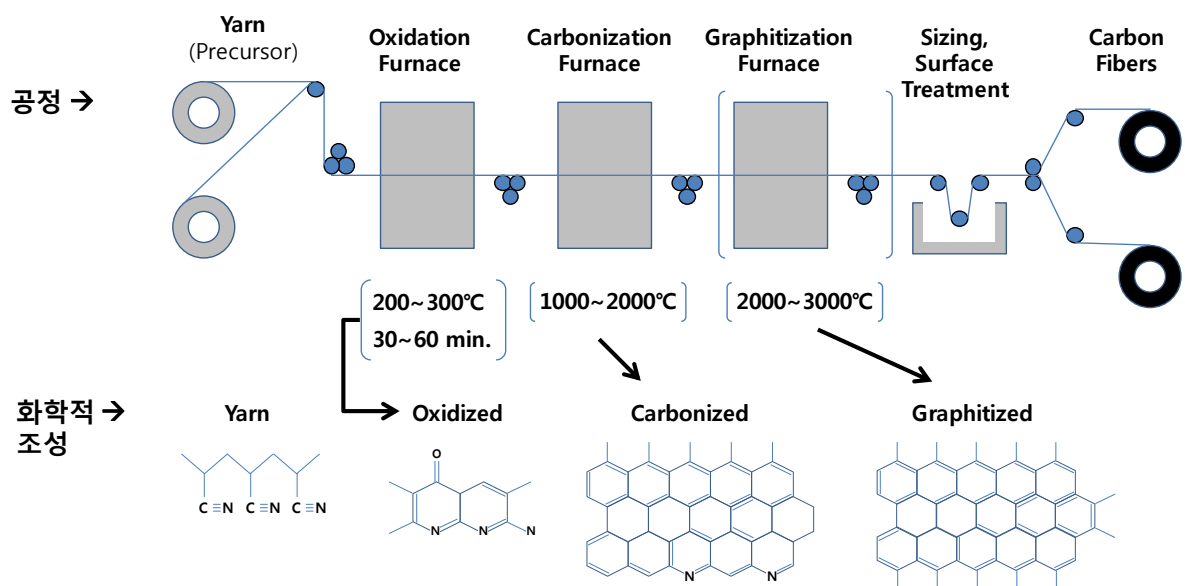


스포츠용품

낚싯대, 골프채
헬멧, 자전거, 활 등

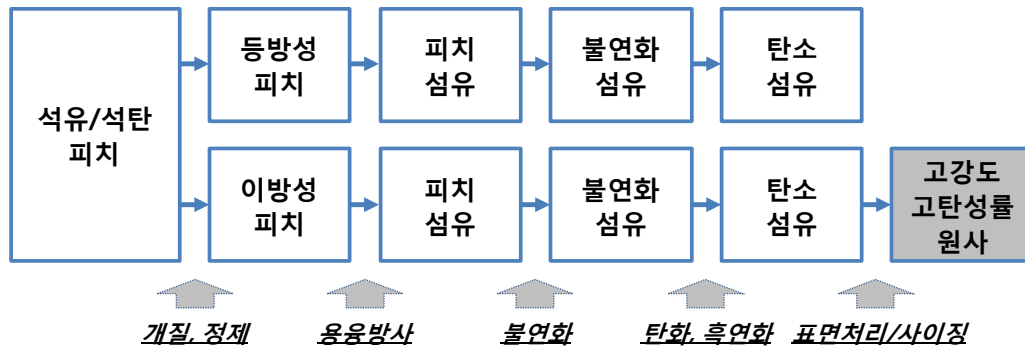
자료: 최신 탄소섬유 동향 2011, 효성기술원 방윤혁 외 온라인 자료 종합

[별첨 2] 탄소섬유 생산 공정 개념도



자료: Z. Wangxi, et al., Carbon, 41, 2003

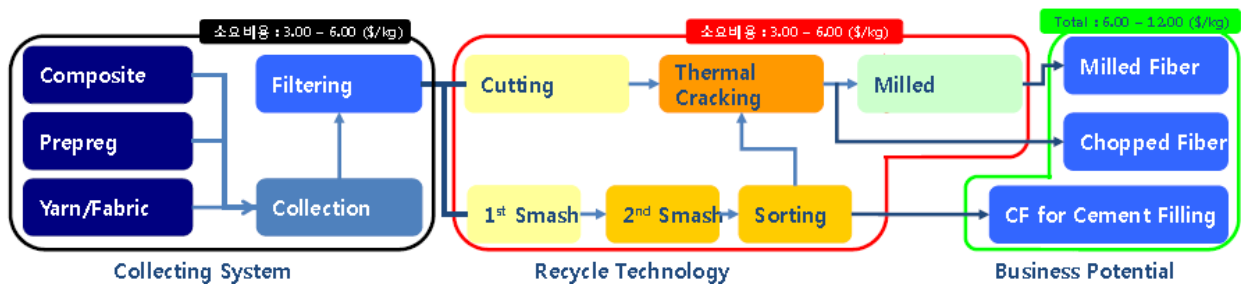
[별첨 3] 피치계 탄소섬유 제조 공정



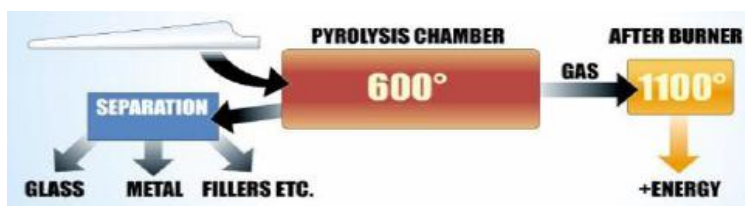
※ 방향족 탄화수소 혼합물인 피치는 일반적으로 무정형, 등방성임. 등방성 피치를 적당한 온도(350~500도)로 가열하면 메소페이스 피치 (이방성 피치 A)로 전환. 생산공정을 달리하여 범용과 고급제품을 구분하는 PAN계와 달리 피치계는 전구체에 따라 등방성 피치로부터는 범용 탄소섬유 생산이 가능하고 이방성 피치로부터는 고성능 탄소섬유 생산이 가능.

자료: 초고온 탄소복합재료, KISTI 2009

[별첨 4] 탄소섬유 리사이클링 개요 및 방식



※ 기존 약 0.3\$/kg에 매립으로 처리하던 탄소섬유를 총 6~12\$/kg의 비용으로 재활용 가능



<기존 Batch 방식의 리사이클링>

Batch 방식으로 처리할 경우, 비효율성으로 인해 비용구조가 악화돼 최근 연속처리방식 연구 중

<탄소섬유 리사이클링 방식>

기계적 분해	열분해	산화처리	화학적 분해
슈레딩, 파쇄, 분쇄 통해 섬유질 물질 분류, 건축용에 보강재 등 활용	무산소 상태에서 450~700°C 가열, 잔류 탄소섬유 회수 ※ Milled Carbon(영), CFK(독)	풍부한 산소 환경에서 폴리머 고온 연소 통해 섬유 분리, 수지는 연소에 에너지 활용	초임계유체 등 물질 활용해 에폭시 용해, 섬유 분리 ※ Nakagawa(일)

자료: 최신 탄소섬유 동향 2011, 효성기술원 방윤혁 외 온라인 자료 종합

[참고 자료]

- 『탄소로 만든 실! 탄소섬유의 숨겨진 성장성에 주목』, 안상희, 대신증권 2012.11.6
- 『탄소연속섬유 복합체 제조기술』, 오창섭, 김영철, 한국과학기술정보연구원 2011.11
- 『Toray's Business Strategy for Carbon Fiber Composite Materials』, Onishi, Toray 2012.11.21
- 『자동차 경량소재 동향 및 완성업체 대응』, 모세준 연구위원, 자동차 경제 2013.1
- 『일본의 탄소섬유 시장 분석』, 일본지식리포트, 한일재단 일본지식정보센터
- 『Introduction to SGL Group's Business』, SGL, Investor Relations Presentation 2013. 10
- 『The Future of Sustainable Mobility』, Manuel Sattig, project I, BMW Group 2013
- 『최신 탄소섬유 동향, Project E 커뮤니티 포럼』, 방윤혁, 효성기술원 2011
- 『자동차 산업 탄소섬유 적용현황 및 미래』, 최치훈, 현대기아 연구개발본부 2011.4.14
- 『Carbon Fiber in the Automotive Industry』, Jim deVries, Ford Motor Company Research
- 『탄소복합섬유 개발동향』, 채한기·이성호·구본철·박민·김준경, 고분자과학과 기술 21, 2010.4
- 『탄소섬유 제조방법 및 응용분야』, 서민강·박수진, 고분자과학과 기술 21, 2010.4
- 『몸값만큼 비싼 제조과정, 아스팔트에서 해답을 얻다』, 박상욱, GS칼텍스 블로그 2012.12
- 『탄소보강섬유 중합체의 리사이클링』, 신희덕, 한국과학기술정보연구원 2011.11
- 『복합재료 소개』, 한경섭, 포항공대 기계공학과