

저가 탄소섬유 개발 동향

양갑승**, 김보혜**

*전남대학교 응용화학공학부, **전남대학교 Alan G. MacDiarmid 에너지연구소(AMERI)
{ksyang, bohye}@chonnam.ac.kr

개요

기존의 탄소섬유는 가격이 비싸기 때문에 용도가 제한되어 일반화되지 못했다. 최근에는 이 문제를 해결하기 위해서 낮은 가격(\$5~7/Lb 이하)의 탄소를 개발하여 기존에 사용하고 있던 탄소섬유를 대체하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이를 해결하기 위해 탄소섬유의 주 원료이면서 탄소 섬유 제조경비의 43%를 차지하는 polyacrylonitrile(PAN)을 lignin이나 의류용 아크릴 섬유로 대체하는 것과 기존의 열처리 방법을 microwave를 이용한 plasma열처리 방법으로 대체하는 것으로 미국의 국가 연구소를 주축으로 개발이 진행되고 있다. 현재의 연구 개발 수준은 전 공정에서 파일럿 규모가 성공적이며 양산을 위한 연구개발 투자가 이루어지고 있다.

서론

탄소섬유란 탄소원소의 질량 함유율이 90%이상으로 이루어진 섬유상의 탄소재료를 일컫는다. 탄소 섬유는 일반적으로 강철보다 1/5 가볍고 강도는 10배 강할 뿐만 아니라 전도성, 내열성, 치수안정성 및 내화학약품성 등 우수한 특성을 가지고 있는 고강도/고탄성 첨단 소재로서 항공우주, 방산 및 반도체 등 고부가 복합재료의 핵심 소재로 사용되고 있다[표 1]. 더불어 탄소섬유는 금속(고강도/전

도성), 비철금속(고강도/경량), 세라믹(내열성/내화학성), 플라스틱(경량)의 장점들을 모두 가지고 있고 다른 소재와의 융복합화가 우수하여 전 산업에 다양하게 사용되고 있다. 또한 탄소섬유는 환경, 에너지 및 나노분야에서 각광을 받고 있으며 2005년 미국에서 선정한 10가지 향후 기술에 탄소나노튜브 및 인조다이아몬드와 함께 탄소섬유강화 복합재료가 선정될 만큼 차세대 핵심소재로 판단된다.

탄소섬유는 경량화를 선도하는 재료이다. 따라서 10%의 중량이 감소되면 6~7%의 연료 절감효과가 있다. 일반적으로 소재의 중량을 감소시키면 그 용도는 더욱 확장된다. 그러나 이와 같은 탄소섬유의 용도를 확장하기 위해서는 많은 걸림돌들이 있는데 이는, 많은 양을 사용할 경우에 너무 비싸고, 공급이 부족하고, 제조공정이 충분히 개발되지 못했다는 점이다. 따라서 저가(\$5~7/Lb 이하)의 탄소섬유 제조 공정을 개발하는 것이 시급한 과제이며 이에 대한 최근의 동향을 소개하고자 한다.

표 1. Properties of carbon fibers

특 징		용 도(적용 분야)
고강도/고탄성	철의 10배/3배	우주 항공, 스포츠 레저, 구조재
초경량성	철의 20%	
열적 치수안정성	철, 알루미늄대비 우수	우주기기, 전파환경, 성형
내열성	고온 강도유지 우수	항공기 브레이크, 단열재
내약품성	석면, GF 대비 우수	패킹, 필터
열전도도	극저온에서 낮음	저온 저장탱크 (액체 헬륨, LNG 등)
전기전도성	전기전도도 우수	전극재료, 전자파 차단재
생체적합성	인체의 무해성	인공 골재, 인대

시장동향

탄소섬유는 2005년을 기점으로 2005년 전에는 과잉공급 상태였고 그 후는 공급 부족상태를 보였다. 수요의 증가 속도도 2005년 전에는 0.8백만Lb/년이었던 것이 Boeing 787과 Airbus A380, A350 등의 상용비행기에 탄소섬유 복합재를 주로 사용함에 따라 수요가 9.0백만Lb/년으로 급속한 증가를 보이고 있다. 그리고 2012년 후에는 공급 부족이 될 것으로 예측되고 2013년에는 그 수요가 130백만b/년에 이를 것으로 추측된다.

지금까지 언급한 것처럼 탄소섬유의 물성이 우수하고 수요가 매우 크고 다양한데 비해 제한적으로 밖에는 사용되지 못하는 그 첫째 이유는 높은 가격이다. 탄소섬유가 다른 재료와 경쟁력을 갖기 위해서 가장 먼저 선결해야할 문제는 낮은 가격으로 양

산하는 것으로 판단된다.

[표 2]에서는 차량의 연료 효율을 높이는 것을 목표로 어떠한 재료 개발의 접근 방법이 가장 효율적인지를 제시하고 있다. 우수한 물성을 유지하면서 생산 단가가 낮은 재료를 생산하기 위해서 엔지니어링 재료나 제조 방법, 광택가공, 금속매트릭스 복합재, 티타늄, 고성능 고강도 철강, 마그네슘, 알루미늄, 탄소섬유 복합재료 등 사이의 상대적인 경쟁력을 비교하고 있으며, 이 중에서도 저가의 탄소섬유를 생산하는 것이 우수한 물성과 낮은 생산가의 목표를 동시에 실현하는데 가장 파급효과가 큰 것으로 보고 있다(자료: Robert McCune-Ford Motor Company).

차량용으로 수요가 증가하는 이유는 [그림 1]에서 보는 바와 같이 탄소섬유 복합재료는 충격강도가 다

표 2. Material options in increasing impact missions for energy saving

↔ Increasing Severity of Challenge

		Critical Challenges				
↑ Increasing Impact Mission	Carbon-fiber Composites	Low-cost fibers	High-volume Mfg.	Recycling	Joining	Predictive Modeling
	Aluminum	Feedstock Cost	Manufacturing	Improved Alloys	Recycling	
	Magnesium	Feedstock Cost	Improved Alloys	Corrosion Protection	Manufacturing	Recycling
	Advanced High-strength Steels	Manufacturability	Wt.red. Concepts	Alloy Development		
	Titanium	Low-cost Extraction	Low-cost Production	Forming & Machining	Low-cost PM	Alloy Development
	Metal-matrix Composites	Feedstock Cost	Compositing Methods	Power Handling	Compaction	Machining & Forming
	Glazings	Low-cost Lightweight Materials	Noise, T ⁰ struc, models simulations	Noise reduction techniques	UV and IR blockers	
	Emerging Materials and Manufacturing	Material Cost	Mfg-ability	Design Concepts	Performance Models	

Chart is provided courtesy of McCune-Ford Motor Company

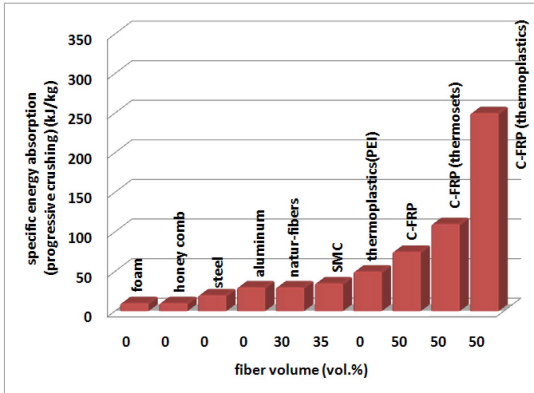


그림 1. Advanced composites' remarkable crash energy adsorption(Book by Herman, Mohrdeck & Bjekovic, 2007, p 17).

른 소재에 비해서 월등하게 우수하여 차량용으로 응용하는데 적합하다. 충격 에너지 흡수정도를 비교해보면 강철(Steel³⁰⁰)이 20kJ/kg인 것에 비해서 열경화성 탄소섬유 복합체는 120kJ/kg, 열가소성 탄소섬유 복합체는 250kJ/kg로 우수하다. 파괴(crush) 특성을 보완하기 위하여 탄소섬유를 다른 종류의 섬유와 혼합하여 사용할 수 있으며 요구되는 특성에 따라 혼합비율을 적절하게 조절하여 사용할 수도 있다.

미국 국방성의 발표 자료에 의하면 (PAN Carbon Fibers Industrial Capability Assessment OUSD (AT&L) Industrial Policy, October 2005) 북아메리카의 차량산량은 16백만대 이상이고 1대당 12Lb의 탄소섬유가 사용된다하면 그 사용량은 192백만Lb/년이 되며 그 수요만으로도 2010년 세계 생산 용량의 2배가 된다. 탄소섬유가 차량용으로 사용되기 위하여 경쟁력이 있는 가격은 \$5.0~7.0/lb로 보고 있다.

탄소섬유가 필수적으로 사용되어야 할 다른 분야는 풍력발전기의 날개이다. 바람으로부터 에너지를 보다 많이 얻기 위해서는 날개의 길이가 길어질수록 효과적이며 날개의 인장 탄성율이 크고 가벼워야 한다. 이 수요를 충족하기 위해서도 탄소섬유의 저가 대량 생산이 이루어져야 하며 이를 위해서 연구개발이 빠

른 속도로 이루어져야 할 것으로 예측하고 있다.

다른 또 하나의 용도는 전력수송 전선이다. 탄소섬유는 비슷한 강도와 packing factor를 가지고 있는 강철 보강재를 대체하는 것이다. 이 용도로 사용하기 위한 탄소섬유의 장점은 높은 인장상태에서 견디기에 충분한 인장강도와 600K 이하에서 약간의 음의 값의 열팽창계수(coefficient of thermal expansion, CTE)를 갖기 때문에 저온에서 길이의 수축 없이 저온에 대비하여 전선을 늘어뜨려야 하는 정도가 작고 전선의 무게도 줄일 수 있다(기존의 334Lbs에서 94Lbs로). 따라서 양산 및 공정기술과 가격경쟁력이 확보된다면 강선을 탄소섬유로 대체 할 수 있을 것으로 본다.

그 밖의 탄소섬유의 용도는 수소나 천연가스저장 탱크 보강용, 토목 기반시설을 보수용, 해저 탐사용 관이나 천공기 제조용, 방위사업용으로도 탄소섬유가 이용된다.

탄소섬유의 저가 양산

최근 들어 에너지 환경문제를 해결하는 것과 항공 우주기술을 개발하는 것에 그 중요성이 더해지고 있다. 이러한 시기에 탄소섬유의 저가 양산이라는 과제는 시급하게 성취되어야 하고, 국내 기술이 핵심 역량을 가져야 국내에서 관련 산업의 장래가 밝을 것으로 기대된다. 탄소섬유 제조 공정의 원가 분석 결과 기존의 PAN 프리커서를 저렴한 가격의 프리커서로 하는 것과 안정화 및 탄화 공정에서의 기존의 열처리 방법을 microwave를 이용한 plasma 열처리 방법으로 대체하는 것으로 연구개발이 진행되고 있어 이를 소개한다.

전통적인 탄소섬유 프리커서의 대체

전통적인 섬유보강 복합재료로 사용되는 탄소섬유 제조공정은 PAN 섬유를 제조하고, 연신시켜서 산화 안정화 공정을 거치며 이 과정에서 열고정되고

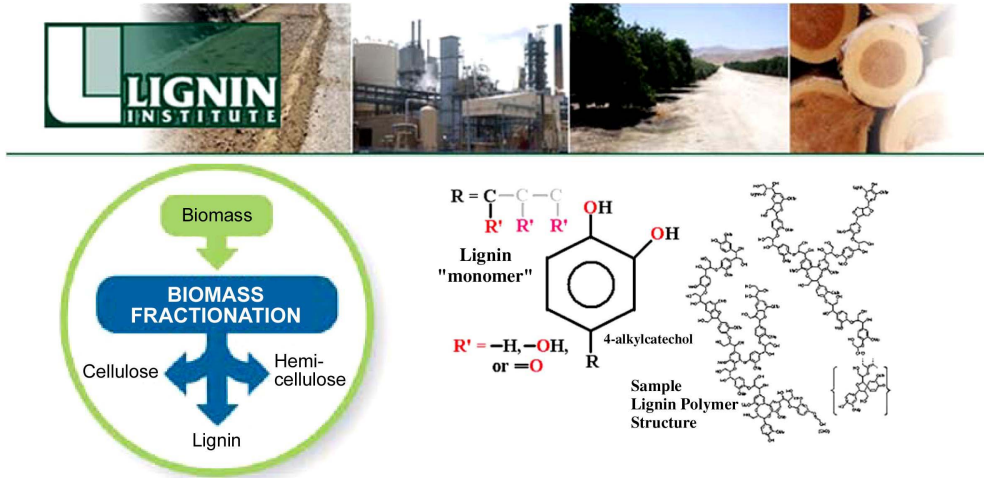


그림 2. Lignin from bio-mass.

탄화 흑연화 과정을 거쳐 탄소섬유의 모폴러지가 결정되며 표면처리와 가호 과정을 거쳐서 보빈에 감는다. 여기에 소요되는 경비중 PAN 섬유 프리커서가 전체 탄소섬유 경비 중 43%, 산화 안정화 18%, 탄화과정 13%, 흑연화 15%, 기타 공정에서 11%이다.

PAN을 대체하여 값이 싼 원료를 사용하여 탄소섬유를 제조하는 것이 탄소섬유 저가 생산의 기반이 된다. [그림 2]에서는 가격의 비중이 큰 PAN을 lignin으로 대체하여 탄소섬유를 제조하는 기술을 보여주고 있다.

미국의 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)에서는 탄소섬유의 저가 생산을 위해서 다음의 방법을 제안하고 있다. 현재 프리커서 PAN의 가격을 \$3.53/lb로 계산하면 의류용 PAN의 경우 \$2.33/lb, hard wood Kraft Lignin은 \$2.07/lb, soft wood Kraft Lignin은 \$1.73/lb로 프리커서의 가격을 낮출 수 있는 것으로 보고하고 있다. 그리고 공정상의 경비는 전통적인 산화 안정화 공정에서 \$1.34/lb, 탄화 \$1.00, 흑연화 \$1.19, 후처리 \$0.82이다. 이에 비해서 새롭게 개발된 공정(advanced stabilization, AS)인 플라즈마 산화법(plasma oxidation)이나 마이크로파 플라즈마(microwave-

assisted plasma, MAP)를 이용하여 산화 안정화하고 MAP 법으로 탄화와 흑연화를 하면 산화 안정화 공정에서 \$0.6/lb, 탄화와 흑연화 공정을 합해서 \$1.34/lb, 후 처리 공정에 \$0.82/lb가 소모되어 기존의 공정 \$7.88/lb에 비해서 \$5.00~4.49/lb로 64%에 해당하는 생산비를 줄일 수 있다. 특히 차량용으로 탄소섬유를 사용할 때, 경제적인 생산량 4,500톤/년 이상을 가정함으로써 다른 재료와 비교해 가격 경쟁력이 매우 크다고 볼 수 있다.

또한 용융 점도를 조절하기 위하여 soft wood lignin의 가소제로써 hard wood lignin을 사용할 수 있다. 이렇게 해서 제조된 탄소섬유의 가격은 전통적인 방법인 PAN 프리커서를 사용할 때 생산단가가 \$7.85/lb인 것에 비해서 lignin 프리커서를 사용, 새로운 열처리 방법을 도입하면 \$5.14/lb로써 65%의 비용절감으로 생산이 가능하다고 보고하고 있다(Cline & Company, 07년 1월 보고).

Biomass를 이용해서 탄소섬유를 제조하는 공정은 biomass를 화학적으로 가공해서 공정상에서 안정된 물질을 제조한 후 중합하여 섬유 프리커서를 제조하고 방사, 안정화 탄화를 거쳐 탄소 섬유를 제조한다 [그림 3].

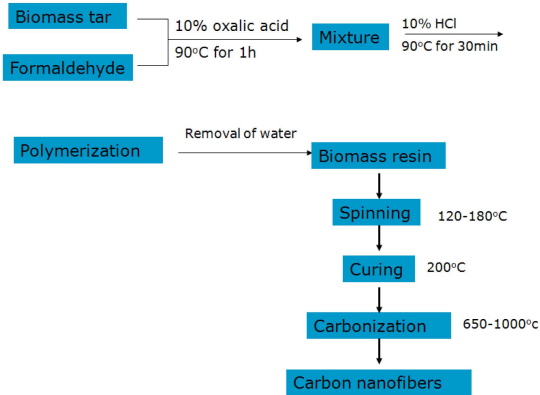


그림 3. Preparations of biomass based carbon fibers (W.M. Qiao, Y. Song, M. Huda, X. Zhang, S.H. Yoon, I. Mochida, O. Katou, H. Hayashi, K. Kawamoto ; Development of carbon precursor from bamboo tar ; Carbon, 43 (2005) 3002-3039).

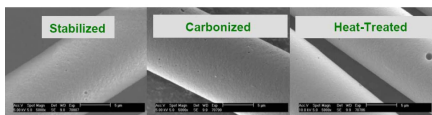


그림 4. Lignin based carbon fibers (by Flex L. Paulauskas, Carbon Fiber 2008, October 1~2, 2008, Hamburg, Germany).

Lignin 프리커서를 이용해서 제조된 탄소섬유는 다음의 사진과 같이 비교적 우수한 물성을 갖는 것으로 보고되었다[그림 4].

열처리 방법의 개선

산화 안정화 처리는 일반적으로 200~250°C에서 시행하고, 안정화단계와 산화단계로 구분할 수 있는

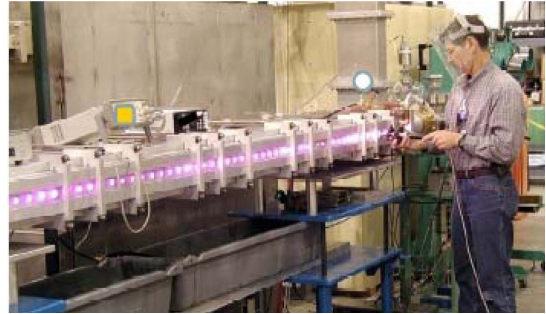


그림 5. Process of microwave assisted plasma carbonization (by Flex L. Paulauskas, Carbon Fiber 2008, October 1~2, 2008, Hamburg, Germany).

데, 안정화상태는 황색에서 적갈색, 더 산화가 진행 되면 검정색으로 변화된다. 안정화 정도를 4개의 단계로 나눌 수 있으며 안정화가 진행됨에 따라 밀도는 1.2에서 1.4로 증가되면서 선상 고분자가 환상의 구조로 변화되고 온도가 보다 높은 상태에서도 열적으로 안정한 상태로 변한다. 이 산화안정화 과정이 공정 내에서 전체 섬유 체류 시간의 75~80%를 차지하기 때문에 공정비의 18~20%가 소비되는 가장 소모가 큰 공정이며 산소의 확산에 의해서 안정화가 완결되기 때문에 스킨-코어 구조가 형성되기 쉽다.

이러한 산화안정화 공정의 체류시간과 에너지를 절감하기 위해서 상압에서 열처리 공정 대신에 프라즈마 처리하는 것이 효과적이다. 이 프라즈마 처리 공정을 도입하면 기존의 산화 안정화 공정과 비교해서 비용이 1/2로 절감되고 체류시간이 1/3으로 감소된다고 보고하고 있다. 현재로는 항공기용 3K 토우를 제조하고 있으며, 좀 더 대용량의 토우를 제조하기 위한 공정 개발을 하고 있다.

전통적인 산화안정화 과정을 프라즈마 안정화로 대체하기 위해서는 프라즈마 안정화 공정 후에 충분한 가교가 이루어져야 하고 단축된 시간 내에 절감된 가격으로 산화안정화 가능해야 된다. 전통적인 산화안정화 방법을 대체 할 수 있는 방법으로 E-beam, ultraviolet(UV), 화학열처리 방법이 제안되

고 있고 이러한 방법으로 안정화 하면 기존의 방법에 비해서 시간은 1/2에서 1/4로 감축하는 것이 가능하다. 한 예를 들어서 microwave와 low-pressure plasma 공정을 통해서 체류 시간과 에너지 소모를 줄일 수 있는 것으로 예측되고 탄화경비도 반으로 줄일 수 있을 것으로 예측하고 있다[그림 5]. 현재의 기술 수준으로는 체류 시간을 기존의 공정의 1/3, single large tow의 선속도 15feet/min, 3 large tow의 경우 3feet/min이며 다음 단계로는 5 large tow의 공정 개발 중이다.

결론

탄소 섬유의 저가 양산이 필요한 이유와 그 방법에 대해서 정리하였다. 특별히 저가 양산 기술에 대해서는 보다 구체적인 연구가 선행되어야 될 것으로 보이고 이러한 기술은 생산 기술과 연계되어야 하기 때문에 산학이 협력해야 소정의 목표에 도달 가능할 것으로 보인다. 또한 이 분야는 여러 분야의 기초 연구가 융합하여서 시너지효과가 날 수 있는 기술이기 때문에 그룹연구가 필요한 분야이고 그 연구 투자가 시급하게 이루어져야 할 것으로 판단된다.

저자약력



양 갑 승

1978 한양대 섬유공학과 졸업
 1980 한양대 섬유공학과 석사
 1988 North Carolina State Univ. 박사
 2007~2008 한국탄소학회 회장
 1989~현재 전남대 응용화학부 교수



김 보 혜

1997 전남대 화학교육과 졸업
 2000 전남대 화학과 석사
 2003 전남대 화학과 박사
 2004~2007 동신대 한약재산업학과 전임강사
 2007~현재 전남대 Alan G. MacDiarmid
 에너지연구소 연구교수