

탄소섬유의 최신 응용 동향

2011. 9



본 분석물은 **교육과학기술부 과학기술진흥기금**을 지원받아 작성되었습니다.

머 리 말

21세기는 지식과 정보가 그 국가의 경쟁력을 좌우하는 지식기반 산업사회로 나아가고 있으며, 최고가 아니면 살아남을 수 없는 무한 경쟁시대가 되어가고 있습니다. 이를 위해서는 새로운 기술 창조와 함께 꾸준한 기술 개발의 노력이 절실히 요구되는 때입니다. 이러한 시대적 요구 속에서 한국과학기술정보연구원에서는 우리나라가 산업사회를 선도해 나갈 수 있도록 새로운 신기술은 물론 개발 기술에 대한 기술정보동향 분석보고서를 제공하고 있으며, 이를 통해 국가 과학기술을 확산시키고 궁극적으로 국제경쟁력을 향상시키기 위해 노력하고 있습니다.

탄소섬유는 21세기를 살아가는 우리에게 가장 현실적으로 필요한 소재라 하겠습니다. 바람직한 소재가 가져야 할 기계적 특성 즉, 가벼우면서도 고강도, 고탄성과 내식성의 성질을 갖고 있어 이상적이라 하겠습니다.

탄소섬유는 탄소섬유-에폭시 수지 및 탄소 섬유를 강화재로 하는 탄소섬유 강화 플라스틱 등의 복합재료로 응용이 다양합니다. 따라서 탄소 섬유의 적용과 사용은 자연스럽게 탄소 섬유 복합재료로서의 용도를 의미하게 됩니다. 이에 탄소섬유 복합 재 기술 개발의 세계 추세를 조사하여 우리 산업 현장에서 활용할 수 있기를 바랍니다. 출간되는 본보고서는 전술한 내용을 감안하여 탄소

섬유에 대한 선진국의 기술개발 동향, 연구수준, 기술의 파급효과 및 전망 등을 이용자들이 알기 쉽게 분석하는 한편 학술정보도 심도있게 분석하여 제공하였습니다. 아울러 본 연구의 결과를 관련 과학기술정보로 국내에 확산시키고, 관련 산업의 국제경쟁력 증대에 작으나마 도움이 되었으면 합니다.

끝으로 본보고서는 교육과학기술부의 과학기술진흥기금 출연사업으로 한국과학기술정보연구원이 수행하고 있는 「ReSEAT 프로그램사업」에 참여하고 계시는 이태호 전문연구위원께서 집필한 것으로서 노고에 감사드리며, 수록된 내용은 한국과학기술정보연구원의 공식 의견이 아님을 밝혀두고자 합니다.

2011년 9월

한국과학기술정보연구원
원 장 박 영 서

목 차

제1장 서 론	1
1. 연구의 필요성과 목적	1
2. 탄소섬유	3
제2장 기술의 개요	6
제3장 기술 개발 동향	12
1. 구조 재료용 탄소섬유	12
가. 자동차 분야에 적용	14
나. 항공 우주 기술에 적용	19
다. 선박에 적용	27
라. 시설 및 기타 분야	32
마. 화재 모델링	34
2. 내열 용삭용 탄소섬유	37

3. 향후 전망	41
제4장 국내외 학술 정보 분석	46
제5장 결론	53
참고문헌	56

표 목차

<표 4-1> 탄소섬유에 관한 중요 연구 기관	51
---------------------------------	----

그림 목차

<그림 1-1> 탄소섬유 제조 과정	3
<그림 1-2> 유사소재의 대표적 물성치 비교	4
<그림 2-1> 기계적 성능과 탄소섬유의 구분	7
<그림 2-2> 탄소섬유 복합재료 분류	9
<그림 2-3> 프리프레그	10
<그림 2-4> 필라멘트 와인딩	11
<그림 3-1> PAN 탄소섬유의 적용	13
<그림 3-2> Viper 2003에 적용한 탄소섬유와 유리섬유	15
<그림 3-3> Quantum composite AMC 8595 특성	16

<그림 3-4>	CFRP의 일체형 철도 차량 사용	18
<그림 3-5>	A350의 전체 날개에 CFRP 사용	21
<그림 3-6>	H-IIA 로켓의 CFRP 사용	23
<그림 3-7>	CFRP 모터 케이스	24
<그림 3-8>	모터케이스 사용 압력 비교	25
<그림 3-9>	탄소섬유의 우주 카메라 Frame	26
<그림 3-10>	Skjold Patrol Boat	28
<그림 3-11>	Computer Drawing of Cosby	29
<그림 3-12>	탄소섬유 사용 시의 장점	30
<그림 3-13>	미 해군의 Stiletto	31
<그림 3-14>	풍력 발전 블레이드	33
<그림 3-15>	탄소섬유의 노즐에서의 적용	37
<그림 3-16>	탄소섬유의 로켓 노즐	38
<그림 3-17>	로제트 패턴	39
<그림 3-18>	탄소/탄소 브레이크 디스크	40
<그림 3-19>	탄소섬유의 수요와 공급가격	43
<그림 3-20>	탄소섬유의 사용 개략 분포	44
<그림 3-21>	탄소섬유의 기계적 특성과 용도 전망	45
<그림 4-1>	분야 별 논문 발표 수	47
<그림 4-2>	논문 발표 10대 국가	48
<그림 4-3>	논문 발표 형식	49
<그림 4-4>	논문 발표 언어	50
<그림 4-5>	연도 별 논문 발표	52

제 1 장

서 론

1. 연구의 필요성과 목적

- 현재 우리가 살고 있는 21세기는 다양한 분야의 첨단 기술이 활성화되고 있어 하루하루가 새로워지는 나날을 지내고 있다. 그 중에 인간의 생활에 사용하는 소재는, 무겁고 약하고 쉬 부서지는 것보다는 가벼우면서도 질기고 강한 쪽으로 눈부시게 발전되고 있다.
- 자동차, 선박, 철도, 항공 우주 등 다양한 분야의 운송 시스템에는 오래 동안 철강, 알루미늄 등의 금속 소재가 주를 이루어 왔다. 이러한 운반 수단은 여기에 사용하는 소재에 크게 영향을 받는다.
- 운송용 소재는 가볍고 강도가 높아야 하는 필요성이 제기된다. 즉 경량화, 강성(stiffness), 동시에 내구성을 가질 필요가 있다. 이러한 요구에 맞는 소재가 바로 탄소섬유이고 이러한 탄소섬

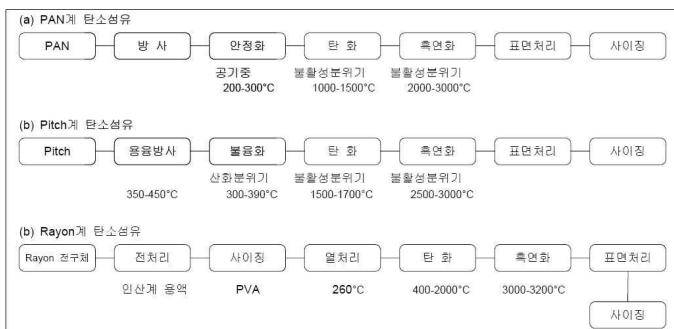
유는 언급한 상기 분야 외에도 강도와 탄성에서 특출한 우수성을 나타내어 모든 분야로 사용 범위가 확대되고 있다.

- 청동기, 철기 시대부터 발달되어 온 금속재료는 기술 개발이 성숙기를 넘은 것으로 인식되고 있는 반면에, 탄소 섬유를 포함한 복합재료의 발전은 이제 한창 전개 중으로 판단되고 있다.
- 탄소섬유는 고온 고속의 유체 흐름으로 인한 표면 삭마 방지도 매우 효능이 좋아 용삭 재료로도 사용되고 있다. 즉 고온을 흡수하여 탄소섬유 자체적으로 화학반응에 열을 사용하고, 전달하는 열을 차단하여 내열재 역할을 하며 동시에 표면 일부는 깎이어 나간다.
- 이와 같이 탄소섬유 소재를 사용하여 각 부문에 적용하고 있다. 최근의 세계의 새로운 개발과 발전 추세 및 동향을 파악하여 사업 현장에서 활용하는 계기를 마련하는데 본 조사의 필요성과 목적이 있다.

2. 탄소섬유

- 탄소 섬유는 탄성과 강도가 크기 때문에 철보다 강하고 알루미늄보다 가볍다. 강철 대비 1/5로 가볍고, 강도는 10배 정도이다. 원료에 따라 폴리아크릴로니트릴(PAN)계, 피치계, 레이온계로 분류한다.^{(23),(35)}
- PAN계 탄소섬유는 PAN을 비활성 기체 하에서 1,000~2,000℃ 이상의 온도에서 구워 만든다. 피치계 탄소섬유는 석탄이나 석유에서 나오는 피치를 섬유화한 뒤 PAN계와 거의 같은 공정으로 만든다. 일반적으로 PAN계의 탄소섬유가 고가이고 구조체로서의 특성이 좋다.^{(23),(32)} <그림 1-1>은 일반적인 탄소섬유 제조 과정이다.

<그림 1-1> 탄소섬유 제조 과정⁽²³⁾



○ 레이온 계 탄소섬유는 기본적으로 레이온 섬유를 전구체로 사용하여 만든다. 그러나 PAN과 같이 전구체의 물성을 쉽게 조절할 수 없고, 수율도 매우 낮아 널리 상용화 되지 못하고, 이용이 쇠퇴하여 탄소섬유는 주로 PAN계와 피치계이다. <그림 1-2>에 탄소섬유와 비교되는 소재의 대표적인 물성치의 값들을 비교 표시하였는데,⁽³²⁾ 이는 참고 자료로 회사마다 제품의 특성 값은 고유하다.

<그림 1-2> 유사 소재 대표적 물성 치 비교⁽³²⁾

물성	단위	Carbon Fiber: TR5DS	Duralumin : 2024-T7	G l a s s Fiber: E glass	A r a m i d Fiber: Kevlar 49	Stainless: SUS 304
density	g/cm^3	1.82	2.77	2.55	1.45	8.03
Tensile strength	GPa	4.9	0.4	3.4	3.6	0.5
Tensile Modulus	GPa	230	74	74	131	197
Specific strength	$10^6 cm$	27.5	1.6	13.7	25.5	0.7
Specific Moduls	$10^8 cm$	13.5	2.6	2.9	9.2	2.5

○ 이와 같이 탄소섬유는 뛰어난 물성을 갖고 있다. 그러나 최근에는 초기의 탄소 섬유보다 물성이 더 좋은 탄소 섬유들이 개발되어 나오고 있으며, 기존의 T300(저급) 이외에도 T700(중

급), T800(고급) 및 T1000도 나오고 있다. T800급 이상의 고급 탄소섬유, 또는 후술하는(<그림 2-1>) 고탄성(HM) 이상, 또는 고강도 이상의 탄소 섬유를 일반적으로 첨단급으로 보기도 한다.

- 빈스켈리 탄소섬유 기술(Vince Kelly Carbon Fiber Technology) 회사에서 사용한 첨단급(Advanced Grade)(<그림 3-1>) 탄소섬유 개념도 위에서 언급한 내용과 유사한 탄성률을 갖고 있으며, 인장강도는 조금 높게 잡고 있으나 초고강도 보다는 훨씬 낮은 범주에 속하고 있다.⁽¹⁹⁾
- T800보다 상위의 질인 T1000도 1986년 일부 개발되었다고 도레이 회사에서 발표되고 있으나, 이의 용처는 자체 홍보 자료에도 언급되지 않고 있어, 대외비로 분류된 비밀 보안적인 분야에 적용되는 것으로 추정할 수 있다.⁽⁴³⁾

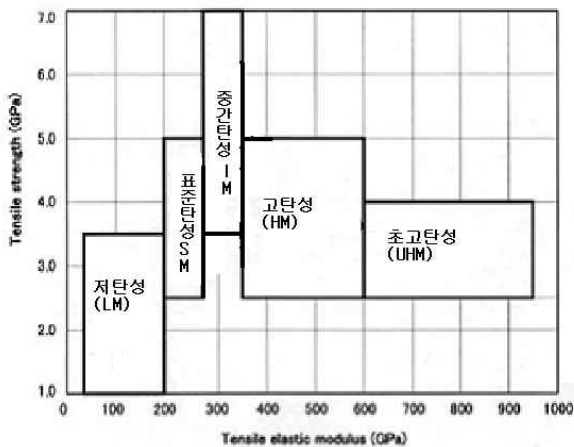
제 2 장

기술의 개요

- 1958년 Roger Bacon이 미국의 Union Carbide사에서 레이온(Rayon)으로부터 탄소섬유를 만들어 낸 것이 탄소섬유의 시작이라고 할 수 있다. 60년대에 들어서는 영국에서 탄소섬유 연구 개발이 매우 활발하였으며⁽³⁵⁾. 60년대 초 일본에서 폴리아크릴로니트릴(PAN: Polyacrylonitrile)로 부터 탄소섬유를 개발을 시작으로 일본 도레이(Toray)에서 고탄성, 고강도 탄소섬유를 개발하였다.⁽¹⁷⁾
- 1970년 대 초 T300 탄소 섬유는 양산 체제가 시작되어 님스대, 골프채에 사용을 시작으로, 1976년에는 기름 값의 급등에 맞추어 B727, B737, DC9, DC10 등 비행기에 T300이 사용되기 시작하였다. 1982년 B757, B767, Airbus A310에도 적용하였고, 우주왕복선 Columbia호에도 T300을 사용하기 시작하였다. 또 1990년대 들어서는 새로 개발된 탄소섬유인 T800을 B777에 적용하기 시작하였다.⁽⁴³⁾

- 탄소섬유가 가지고 있는 가장 매력적인 특성은 고강도 섬유라는 것은 이미 언급된 것이다. 탄소섬유의 실 가닥은 수천 개의 정교한(5-7 마이크론) 직경의 필라멘트로 구성되어 있다. 따라서 탄소섬유가 부하를 받게 되면, 파손은 필라멘트 주위의 국부적인 부위에서 시작되고 있다. 때문에 탄소섬유의 자체의 인장강도를 이야기 하는 것은 실제적인 의미가 떨어진다. 대부분의 탄소섬유는 강화 탄소섬유 복합재료로 사용되기 때문이다.⁽¹⁶⁾

<그림 2-1> 기계적 성능과 탄소섬유의 구분⁽¹⁸⁾



- 탄소섬유는 원료에 따르는 구분도 있으나 실제 응용 면에서는 탄소섬유가 가지고 있는 특성이 중요하고 이러한 성능을 기준으로 대별하며, 또 적용하고 있다. 이러한 구분을 <그림 2-1>에

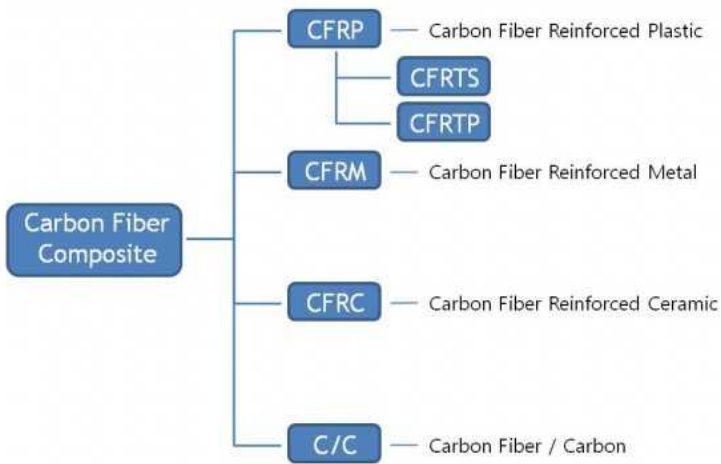
도표로서 표시하였는데 일본 탄소협회의 자료를 인용한 것이다.

(18)

- 일반 범용 탄소섬유는 저 탄성률 탄소섬유를 말하며 탄성률 200 GPa 이하에 인장 강도 3,500MPa 이하의 특성을 가지고 있으며 상대적으로 저렴한 가격이다.
 - 고성능 탄소섬유는 고강도(HT: High Tensile), 중 탄성률 (IM: Intermediate Modulus), 고탄성률(HM: High Modulus) 형 탄소 섬유를 통틀어 말하며, 특히 인장 탄성율이 600GPa 이상인 것을 초고탄성률 섬유라 부른다.
 - 탄성률 기준에 대하여 인장 강도 기준으로 구분한 것으로, 보통 인장강도 3,000MPa 이상에 인장 탄성률은 220-260GPa 이상을 고강도 탄소섬유라 말한다. 또 인장강도가 6000MPa 이상인 것을 초고강도(UHT: Ultra High Tensile) 탄소섬유 라고 부르기도 한다¹⁸.
- 탄소섬유는 탄소섬유-에폭시 수지 및 탄소 섬유를 강화재로 하는 탄소섬유 강화 플라스틱 등의 복합재료로서 응용이 다양하다. 따라서 탄소 섬유의 적용과 사용은 자연스럽게 탄소 섬유 복합재료로서의 용도를 의미하게 된다. 탄소 섬유 복합재료 분

류를 <그림 2-2>에 표시하였다⁽²³⁾.

<그림 2-2> 탄소섬유 복합재료 분류⁽²³⁾



- 탄소섬유 강화 폴리머는 그라파이트(graphite) 강화 폴리머라고도 부른다. 이들은 폴리머를 매트릭스(matrix)로 하고 있다. 이와 대조적으로 폴리머 대신에 탄소섬유 자체를 매트릭스로 하는 탄소-탄소 복합재료도 있다. 이것은 특히 고온에 적용하고 있다.⁽³⁵⁾
- 탄소섬유 폴리머는 대부분 에폭시를 말하지만, 폴리에스터나 비닐에스터, 때로는 나일론도 사용되기도 한다. 또 경우에 따라서는

복합재료에 탄소섬유와 케블라(Kevlar), 유리섬유 등 다른 소재를 포함하기도 하는데, 케블라가 성능을 증진하는 역할을 한다.⁽³⁵⁾

<그림 2-3> 프리 프레그⁽²³⁾



- 탄소섬유를 제작한 후에 에폭시, 페놀, 불포화 폴리에스터 등의 수지에 함침시켜 반 경화 상태, 흔히 B stage 경화 상태라 하는 천의 형태를 프리 프레그(prepreg)라고 한다. <그림 2-3> 이와 같이 반 제작된 상태의 프리 프레그는 부품제작에 있어서 형상에 따라 작업 효율을 증대시킬 수 있다.⁽²³⁾
- 프리 프레그를 사용하여 제작하는 방법에 따라, 테이프 래핑, 평면 레이업 또는 로제트 레이업이 등의 방법으로 제품을 만든

다. 이 방법은 다양한 제품에 따라 편한 방법을 택하고 있으며, 로제트 레이업은 추진기관 노즐 부품에 특히 적용하고 있다.

(24), (25)

<그림 2-4> 필라멘트 와인딩⁽³⁴⁾



- 탄소섬유를 사용하여 제작할 때 전술한 프리 프레그 대신 필라멘트 상태에서 필라멘트 와인딩 기계에서 직접 제작하는 방법도 있다. 이때 필라멘트가 수지에 함침되는 시기에 따라서 습식과 건식으로 구분하기도 한다.⁽³⁴⁾ <그림 2-4>는 필라멘트 와인딩 작업 장면이다.

제 3 장

기술 개발 동향

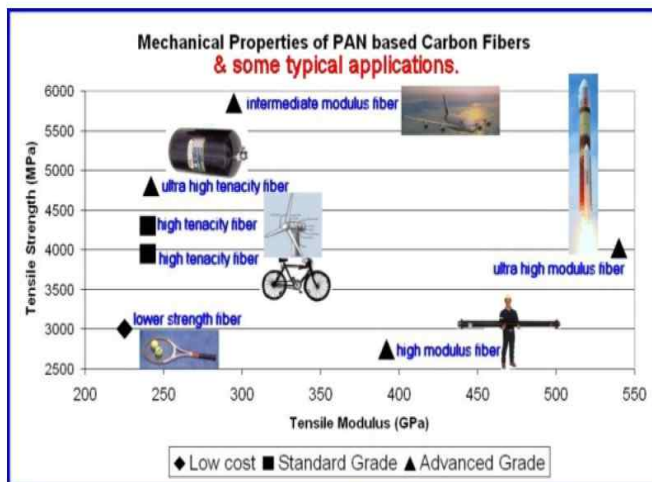
1. 구조 재료용 탄소섬유

- 탄소섬유는 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforcement Plastics)이라고 부르는 형태로 사용되는 것이 대부분이다. 이미 언급한 바대로 CFRP는 매우 강하고 가볍다. PAN 계로 만들어진 CFRP는 비교적 고가이다.
- 따라서 이러한 고가의 탄소섬유 복합재료는 우주 항공용, 자동차 특히 고급 자동차에 많이 사용되고 있다. 무게 대비 강도가 큰 것이 요구되는 모터사이클이나 자전거, 보트용으로도 각광을 받고 있다.⁽⁴⁰⁾
- 탄소섬유 복합재료의 또 다른 용도는 시설 보강재로서의 역할이다. 지난 20여 년 동안 건설 공사 적용에 눈부시게 증가되어 왔으며 콘크리트 구조물, 목재 건축 분야에 활용하고 있다. 기존 구조물의 강도 증가를 위한 리트로피트(retrofit)나, 철강 구

조 대신에 사용하는 보강 재료로의 대체 사용이다.⁽⁴⁰⁾

- <그림 3-1>은 Vince Kelly Carbon Fiber Technology에서 보여주는 탄소섬유 복합재료의 인장강도와 인장 모듈 값에 따른 대표적인 응용 분야를 그림으로 나타낸 것이다.⁽¹⁹⁾

<그림 3-1> PAN 탄소섬유의 적용⁽¹⁹⁾

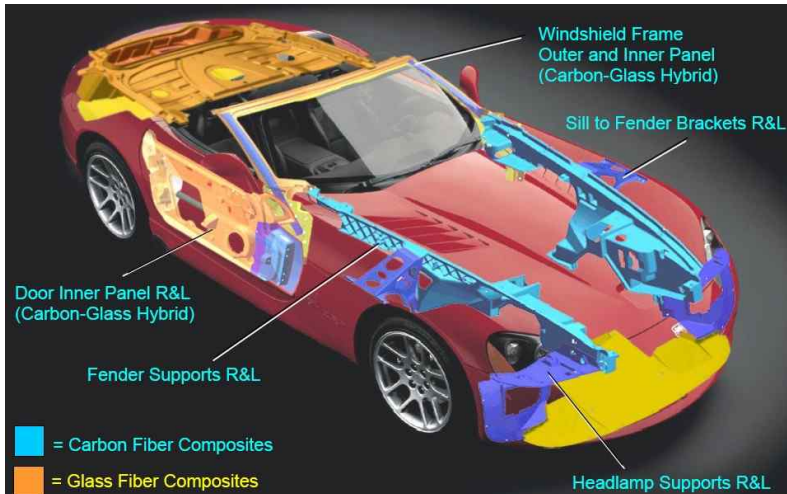


- 이들 탄소섬유 복합재료의 응용 분야에 대하여 자동차, 항공우주, 선박 등의 분야로 나누어 살펴보기로 한다.

가. 자동차 분야에 적용

- 탄소 섬유 복합재료가 자동차에 적용되기 전에 유리섬유 복합재료가 먼저 자동차에 적용되어 왔다. 그러나 이것은 유리섬유의 특성이 갖는 장점이라기보다는 상대적으로 저가이었기 때문이다. 탄소섬유가 더 가볍고 개발 기술의 발달로 가격도 경쟁할 만하여 탄소 섬유의 사용이 확대되고 있다.
- 탄소 섬유 복합 재는 자동차 분야에는 아직까지는 스포츠카 등 고급 차종에 일부 사용되어왔다. 그리고 부품으로 프로펠러 샤프트에 사용되어 왔으나, 자동차 수요의 증가와 함께 점차로 가장 수요가 증가할 분야로 보인다.
- 2003년 처음 Dodge Viper Convertible에 탄소섬유 SMC(CFSMC: Carbon Fiber Sheet Molded Composite)가 사용된 것을 <그림 3-2>에 표시하였다. 탄소섬유 SMC의 기본적인 장점은 유리섬유 보다 높은 탄성률과 낮은 비중이다.

<그림 3-2> Viper 2003에 적용한 탄소섬유와 유리섬유⁽¹³⁾



- 사용한 상용 탄소섬유는 탄성률이 대략 230 GPa로 E-유리섬유보다 3배 정도 높고 탄소섬유 비중은 1.8로 유리섬유의 약 70% 정도이었다. 그래서 복합재료 구조물은 얇고 가볍게 되었다. 여기에 사용한 탄소섬유 복합 재는 Quantum Composites 회사의 AM C8590과 8595인데, 그 특성을 <그림 3-3>에 표시하였다.

(13)

< 그림 3-3> Quantum composite AMC-8595 특성⁽¹³⁾

Property	Method	Specimens Cut From Panel, Machine/ Fiber Direction
Fiber Content (% by weight)	Solvent Wash	55
Specific Gravity	ISO 1183	1.49
Tensile Strength (MPa)	ASTM D 3039	1200
Tensile Modulus (GPa)	ASTM D 3039	120
CTLE (mm/mm°C)	ASTM D 696	9.47×10^{-7}
Heat Deflection Temp. @ 1.80 MPa Stress (°C)	ISO 75	>260

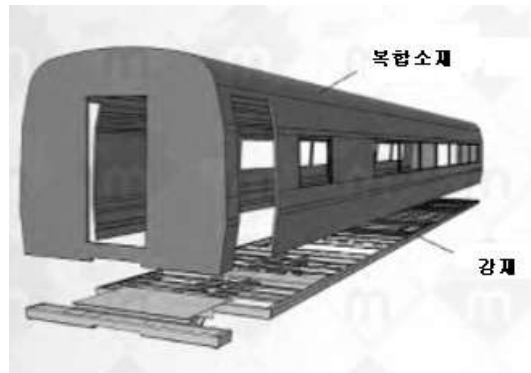
- 그러나 최근 시도되는 자동차에의 적용은 에너지 절감을 목적으로 하는 경량화 등으로 고급 탄소섬유를 사용할 것으로 예측된다. 일본 도요타 자동차 회사는 2010년 12월 고성능 스포츠카에 처음으로 탄소섬유 강화 수지(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics)를 사용한 자동차를 생산 판매하였다. 차체 구조의 65%를 차지하고 있어 종래 알루미늄 차체와 비교하면 100kg이 가벼워진 것이다.⁽³⁸⁾
- 2011년 판매하기 시작한 후지 중공업 스포츠카는 도레이와 공동 개발한 CFRP 루프를 채택하였다. 중량은 20% 정도 감소되었고, 루프가 가벼워짐에 따라 차체 중심이 낮아져 운전성이 향상되었다.⁽⁴⁰⁾
- 독일의 다임러 자동차 회사에서도 2010년 4월 도레이 회사와

CFRP 자동차 부품 공동 개발 계약을 체결하여 2013년에는 메르세데스 벤츠 승용차에 탑재하기로 하였다. 탄소섬유 강화 공법으로 RTM(Resin Transfer Moulding)공법을 사용하여 전체 공정 주기를 단축하려고 노력하고 있다.⁽³⁷⁾

- 독일의 BMW도 2015년 판매를 목표로 개발 중인 전기 자동차의 부품에 탄소섬유를 원료로 하는 아크릴 섬유를 일본의 미쓰비시 레이온과 합병한 독일 CFRP 제조회사 SGL에서 공급하기로 하였다.⁽³⁹⁾
- 메가시티(Megacity)라 불리는 BMW 자동차는 배터리를 사용하는 전기자동차인데, 이로 인하여 중량에 부담이 간다. 때문에 경량화가 더욱 요구되고, 여기에 탄소섬유 복합재료가 효과적일 뿐만 아니라 진동도 줄여 주어 안락함을 더해줄 것이다.⁽²²⁾
- 이상 최근 여러 나라에서 개발 적용 예정인 탄소 섬유에 대한 그레이드는 별도로 언급되지는 않고 있으나 시도하는 목적과 차종의 고급스러움을 감안하면 최고 양질의 탄소섬유 즉 고급 탄소섬유 들이 사용될 것으로 예상할 수 있다.
- 2011년 2월 16일자로 일본 경제신문에 보도된 일본 탄소섬유 협회의 발표에 의하면 평균적인 보통 승용차에 사용 가능한 기술을 적용하면 차체 중량의 17%를 CFRP로 대체가 가능하고, 중량은 30% 줄일 수 있다고 발표하였다.⁽¹⁸⁾

- 탄소 섬유로 만든 연료 탱크도 자동차 경량화에 일조를 하고 있다.⁽⁴⁰⁾ 천연가스 차의 CNG 탱크에도 점차 확대되고 있으며, 고속 철도 프레임에도 사용이 늘어가고 있다. <그림 3-4>는 철도기술연구원에서 발표한 CFRP 차량 형상이다.⁽³³⁾ 일본에서는 고급 탄소섬유의 차체로 고성능 철도에 이용하고 있다.⁽¹⁸⁾

<그림 3-4> CFRP의 일체형 철도 차량 사용⁽³³⁾



- 세계적으로 자동차의 연비 규제가 엄격해지고 있기 때문에 자동차 경량화의 필요성이 더욱 증가하고 있다. 일본에서 생산하는 자동차에는 일부 차종에서 이미 CFRP 프로펠러 샤프트가 사용되고 있다. 프로펠러 샤프트에는 고 탄성의 탄소섬유가 사용되고 있다.⁽¹⁹⁾

- 살펴본 바와 같이 미국, 일본과 독일 등의 여러 나라에서 탄소 섬유 복합재료를 자동차에 활용하기 시작하고 있다. 아직은 초기 단계이나, 고급 탄소섬유의 적용과 함께 신기술로서 이에 대한 발전 전망은 밝아 보이고 선진국에서는 전술한 것처럼 깊은 관심을 갖고 개발 적용중이다.

나. 항공 우주 기술에 적용

- 탄소섬유 복합재료가 많이 소요되는 분야 중에 하나가 항공기 분야이다. 항공기는 하늘을 날아야 하는 원초적인 성능을 위하여 가벼우면서 강한 재료가 필요하고, 이에 합당한 재료가 탄소섬유가 될 것이다.
- 일본 탄소섬유 협회의 발표에 의하면 비행기 기체 구조 중량에 50%의 탄소섬유를 적용하면 20% 경량화가 가능하며, 이렇게 하면 일본 내 전 여객기의 탄산가스 배출량을 연간 120만 톤 줄일 수 있다고 한다. 이것은 곧 연료 사용의 감소이고 동시에 곧 친환경적인 효과를 얻을 수 있게 된다.
(18)
- 항공기용 탄소섬유는 일반적으로 프리 프레그를 사용하여 부품을 성형한다. 프리 프레그를 여러 장 쌓아 압력과 열을 가해 매트릭스 수지를 경화시켜 성형한다. 따라서 이 CFRP

는 적층 판상 구조로 되고 층간에는 탄소섬유가 지나가지 않는다.

- 최근에는 VaRTM(Vacuum assisted RTM) 공법이 사용되기도 하는데, 이 방법은 탄소섬유 기지에 수지를 함침하지 않은 상태로 적층하고 진공 상태로 만들어 액상 수지를 주입하여 오븐에서 가열하여 경화시키는 공법이다.⁽¹⁸⁾
- 이 방법은 탄소섬유를 건조한 상태에서 작업을 함으로 일반 직물과 같이 취급은 쉬우나, CFRP의 역학적 성질은 약한 편이다. VaRTM 공법을 사용한 탄소섬유를 개발하여 일본 국내 소형 비행기의 뒷날개에 사용을 추진하고 있다.⁽¹⁸⁾
- 1976년에 보잉 항공회사에서 비행기에 T300을 사용하기 시작하였고, 1982년 B757, B767, Airbus A310에도 적용하였다.⁽⁴³⁾ Airbus 회사의 초대형 비행기 A380은 2007년 10월 Singapore Airline에서 상용 운행을 개시하였다. A380에는 중심 날개, 동체 등의 부분에 CFRP 35 톤을 사용하였다. 유리섬유 등을 포함하여, 탄소섬유 등 복합재료를 22% 사용하였다.^{(42),(43)}
- 근년에 B777이 개발되었는데 1994년 첫 비행을 하였으며, 여기에 사용한 탄소 섬유를 보면 T800을 사용하고 있다.^{(40),(43)} 고급 탄소섬유를 T800급 이상으로 간주하면 이후의 새로운 비행기에는 고급 탄소섬유를 사용한다고 보아도 큰 무리는 없

을 것으로 보인다. 비행기 마루 빔(floor beam)과 수직, 수평 미익(stabilizer)에 사용하였다. 그 외에도 엔진 낙셀(engine nacelle), 랜딩기어 도어, Aileron 등의 2차 구조물에도 사용하고 있다.

- 새로운 중형기로 A350, <그림 3-5>를 개발 중인데, 2011년 최종 설계 확정을 하고 2013년 납품 계획으로 되어 있다. 동체, 날개 등에 CFRP를 사용하며, 구조 부품에서 CFRP의 비율은 53%로 될 것으로 예상하고 있으며, 전체 날개 구조를 탄소섬유 강화재로 사용할 것이다.^{(18), (19)}

<그림 3-5> A350의 전체 날개에 CFRP 사용⁽¹⁸⁾



- 보잉 회사에서는 주 날개, 동체, 중앙 날개 등에 프리 프레그

탄소섬유 복합재료를 사용하여 구조 부품의 50%를 사용한 Dream Liner B787을 2007년 8월 공개하였고, 2009년 최초비행을 성공리에 마쳤다. 상용 1호기의 납품은 2011년 이루어질 것이다. B777에는 총 무게의 12%가 탄소섬유를 포함한 복합재료이다.^{(18),(19)}

- 이러한 탄소섬유 복합재료를 사용하는 비행기는 그 외에도 러시아, 중국, 브라질, 캐나다 등에서 2013, 2014년을 목표로 참여 개발 중이다. 캐나다의 Bombardier Learjet 85는 구조부품을 모두 복합재료를 사용할 계획인데, 미루어 보아 고급 탄소섬유를 사용할 것으로 추정되며, 2013년 납품을 개시할 예정이다.⁽⁴¹⁾
- 항공기 외에 우주용으로도 탄소섬유는 매우 훌륭한 특성을 나타내고 있다. 고압에 견디어야 하며 무게는 가벼워야 하는 발사체 로켓에 탄소섬유는 이상적인 재료이다. 때문에 금속재료에서 탄소섬유 복합재료로 바뀌는 추세이다.⁽²⁴⁾
- 항공 우주 발사체에 사용한 탄소섬유를 살펴보면, <그림 3-6>의 H-IIA 로켓의 맨 위 상단은 CFRP가 사용되었으며, 몸체 중간 위쪽의 검은 부분은 샌드위치 CFRP로 그리고 하부의 로켓 부스터의 모터 케이스는 모두 CFRP로 만들었다. <그림 3-7>에는 CFRP로 만들어진 모터 케이스를 보여주고 있다.⁽¹⁸⁾ 여기에 사용한 탄소섬유들에 대한 특별한 언급은 없으나, 특성상, 최상의 탄성률과 강도를 갖

는 탄소섬유일 것이다.⁽¹⁹⁾

<그림 3-6> H-IIA 로켓의 CFRP 사용⁽¹⁸⁾



- 제작 관점에서 보면 필라멘트 와인딩(Filament winding)공법이 사용되며, 직경이나 길이에도 특별한 제한이 없이 제작이 가능하다. 또한 제작한 제품의 품질을 검사하는 NDT(Non Destructive Test) 기법도 성숙 단계에 있다.⁽²⁴⁾

<그림 3-7> CFRP 모터 케이스⁽²⁴⁾



- 우주 발사체 추진기관의 최근 로드맵 상에 나타난 첨단 고체 추진기관의 기술의 하나로 필라멘트 와인딩 모터 케이스가 포함되어 있음을 볼 때 탄소섬유를 이용한 추진기관은 점차로 증가할 것이다. 금속재 케이스에 비하여 압력과 내부 부피의 곱으로 표시되는 값이 5배에 달하여, 자연적으로 고강도의 탄소 복합재료로 이동할 것이라 밝히고 있다.⁽²⁴⁾
- 탄소섬유 복합재료의 큰 비강도(specific strength)는 금속 재료에 비하여 상대적인 최적 운용 압력을 증가시켜 주고 있다. 특히 분리 조각형(segment)보다는 단일 형으로 제작한 것이 효과적이다.

이러한 특성은 적당한 크기의 단일형까지는 탄소 섬유 복합재료의 장점이다.⁽²⁴⁾ <그림 3-8>에 복합재료 케이스를 사용한 모터의 압력을 비교하여 보이고 있다.

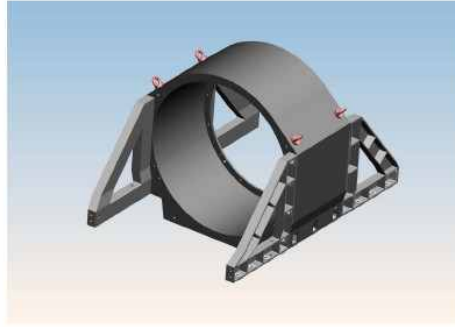
< 그림 3-8> 모터 케이스 사용 압력 비교⁽²⁴⁾

Optimum pressure vs Case design parameter

Case design	Range of pressure (MPa)	International SRM examples
Metallic	6-7	RSRM, MPS
Segment composite	8-9	SRMU
Monolithic composite	0-11	Castor 120, M 25, SRB-A, P80

- 그러나 한편으로 여러 단편으로 만들어야만 하는 경우에는 이 단편들의 조합기술이 필요하다. 금속 부분과 복합재료의 연결 부분이 문제이지만 이러한 연결 부위의 결합도 최근의 제작 기술로는 큰 무리 없이 해결되고 있다.⁽²⁴⁾
- 탄소섬유 복합재료 연소관을 사용한 대표적인 대형 발사체를 보면, DELTA 2, TITAN, H-II, 그리고 상업용에는 EELV ATLAS 5, DELTA 4 발사체 등이 있고 유럽의 Ares 5가 있다.⁽²⁴⁾ 이미 기술한대로 연소관에는 최상급 탄소섬유가 사용되고 있다.

< 그림 3-9> 탄소섬유 우주 카메라 Frame⁽¹⁾



- 우주용으로 사용하는 강화 탄소섬유는 탑재물에도 사용되고 있다. 특히 우주용 카메라는 당연히 가볍고 견고해야 하며 안정성이 필요하며, 이러한 측면에서 카메라 틀에 새로이 적용되기 시작하였다.⁽¹⁾ 원격 측정 장치에도 계속적으로 사용 용도가 늘어 날 것이다. <그림 3-9>는 탄소섬유를 사용한 우주 카메라의 프레임이다.
- 이상 간단히 살펴본 우주용에 적용되는 탄소섬유는 구체적으로 표시되고 있지 않으나, 특성상 최상급 탄소섬유를 사용하고 있다. T800은 물론이려니와 개발되고 있는 최고급, 최상의 탄성률과 인장강도 등을 갖고 있는 탄소섬유를 필요로 하는 분야이다.

다. 선박에 적용

- 선박에는 2차 세계 이후부터 단단하고, 강하며 내구성이 있고 수리가 쉬워 군용 보트에 복합재료를 적용하기 시작하였다. 1960년대 베트남 전쟁 때까지 약 3,000대의 소형 군용 보트 등에 이를 적용하였는데, 유리섬유 복합재료가 많이 사용되었다.

(3)

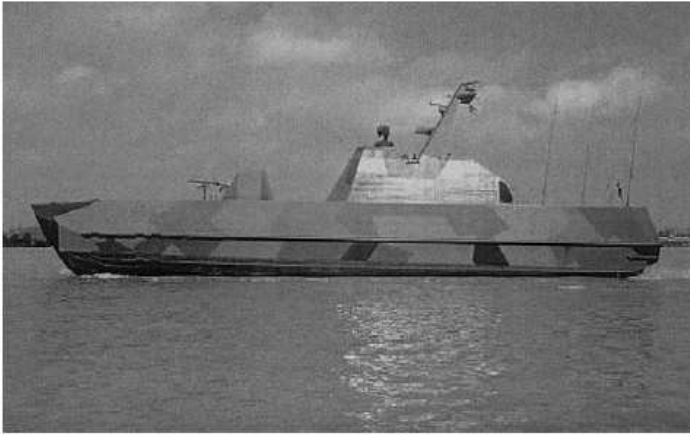
- 미 해군은 소형 선박의 갑판, 돛대, 구축함의 파이프라인, 잠수함의 수로(fairwaters)와 케이스 등에도 복합재료를 사용하였다. 그 외에도 프랑스 해군, 노르웨이, 스웨덴, 네덜란드 해군 등에서 복합 재를 사용하였는데, 이 재료는 특히 녹 등 부식에 좋은 특성을 갖고 있는 것도 큰 장점이다.

- 초계정(Patrol boat)에 탄소섬유를 사용하기 시작하였고, Royal Norwegian 해군에서는 처음으로 대형 해군 초계정에 전부 복합재료로 만든 Skjold를 구축하였다. 전체를 유리섬유와 탄소섬유 샌드위치 복합재료로 만들었고 <그림 3-10>에 나타나 있으며, 1999년 임무를 시작하였다.⁽³⁾미루어 짐작컨대 이미 첨단급 탄소섬유가 개발된 시기이므로 군의 목적상 최고급 탄소섬유가 사용되었을 것이다.

- 탄소섬유 적층의 견고함이 요구되는 빔의 골격, 돛대, 화포 지

지대 등과 같은 구조물에 필요로 하였다. 특히 탄소섬유는 전기 자장 차폐 효과를 주어 상부 구조물에 효과적으로 사용하였다.⁽³⁾

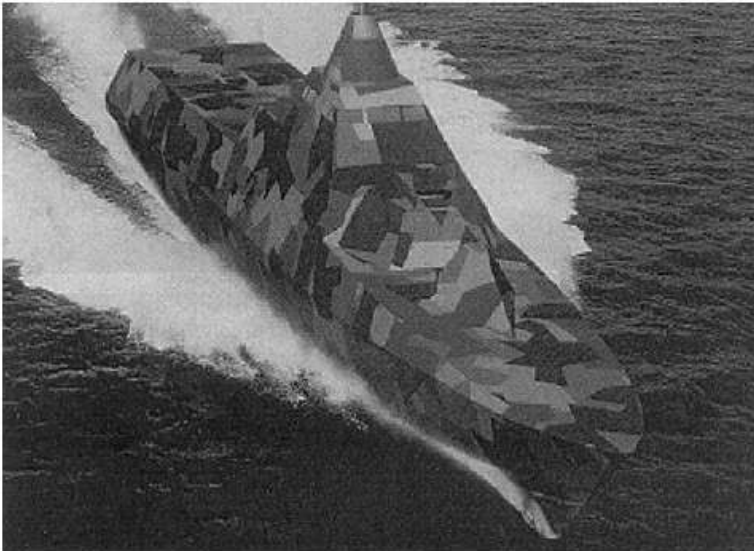
<그림 3-10> Skjold patrol boat⁽³⁾



- 스웨덴의 Royal Swedish Navy에서도 1980년대 후반에 30m 길이의 대형 초계정을 구축하였다. Smyge MPC 2000이라고 부르는 이 배는 탄소, 유리, 케블라(Kevlar) 등의 복합재료를 사용하였다.⁽³⁾ 시기와 군사용 목적이 고급 탄소섬유의 사용을 짐작하게 한다.
- 초고속 호위함으로 알려진 Corvette 중에 Royal Swedish Navy에서 개발한 Visby Corvette는 길이 72m 급이다. 탄소섬유와

유리섬유 혼합으로 구축되었지만, Visby가 선체에 탄소섬유를 많이 사용한 최초의 해군 배로 2000년에 진수되었다. <그림 3-11>은 컴퓨터로 형상화 한 모형이다.⁽³⁾

<그림-3-11> Computer drawing of Cosby⁽³⁾



- 선박에 사용하는 부품에도 탄소섬유 복합재료를 사용하는 곳이 점차 확대되고 있다, 프로펠러 블레이드, 샤프트 등 프로펠러 시스템과, 선박의 격벽, 문 등 구조물 전체가 용처가 될 수 있다. 이들 부품에는 기계적 특성을 고려하면 고급 탄소섬유가 필요한

분야이다.⁽¹⁹⁾ 그림 <3-12>에 복합재료를 사용하는 경우의 장점을 요약한 것이다.

<그림 3-12> 탄소 섬유 사용 시의 장점⁽³⁾

Reduced fabrication cost (but only if a large number of blades are manufactured)
 Reduced through-life maintenance costs
 Reduced wear on gearbox/shaft
 Weight savings
 Improved vibration damping properties
 Improved fatigue performance
 Reduced corrosion
 Increased cavitation inception speeds by using thick and flexible blades
 Lower electrical/magnetic signatures
 Lower noise signatures

- 미 해군의 Navy Newsstand 2007년 2월 7일자로 공표된 자료에 의하면 미 국방성의 OFT(Office of Force Transformation)가 설계하고 조립한 Stiletto가 강변과 얕은 물에서 운용하도록 한 미국 내 최초의 대형 탄소섬유 배라고 한다. 그림 <3-13>에 나타나 있듯이 m자 형태를 갖고 있으며 캘리포니아 연안의 합동군사 훈련에 투입되었다.⁽²⁹⁾

<그림 3-13> 미 해군의 Stiletto⁽²⁹⁾



- 지금까지 선박은 주로 군용에서 탄소섬유를 사용하는 경우를 살펴보았다. 탄소섬유의 급에 대해서도 언급되지는 않고 있지만 군의 목적상 최상의 탄소섬유를 필요로 하는 부위에는 사용하였을 것임을 짐작할 수 있다.
- 이외에 최근에는 레저 산업용 보트나 선박에도 탄소섬유의 사용은 가볍고 좋은 탄성과 함께 좋은 비 강도로 인하여 많이 적용되고 있다. 즉 카누(canoe)에서 요트, 범선에 이르기까지 모든 보트 종류에 적용될 것이다. 특히 고급화 되면서 고급 탄소섬유의 사용은 증가될 것이다.

라. 시설 및 기타 분야

- 오래된 건설물의 부하 증대를 포함하는 구형의 리트로피트에 탄소섬유 강화 플라스틱이 사용되고 있다. 특히 오늘의 부하를 예상하지 않고 설계되었던 교량 등이 해당한다. 손상된 구조물이나 지진에 손상을 입은 것들도 보강하는데 쓰인다.⁽⁴⁰⁾
- CFRP는 전단력 강도를 증가시키는 방안으로 사용되고 있다. 단면을 쌓아서 연성(ductility)이 증대되고 지진으로 부터 오는 붕괴에 견디는 힘을 크게 증가시키고 있다. 고탄성의 탄소섬유의 필요한 분야라고 판단된다. ‘지진 리트로피트(seismic retrofit)’가 지진 발생 빈도가 높은 지역에는 주요 적용 방안이다.
- 미국에서는 물을 수송하는 관의 주종으로 PCCP(Prestressed Concrete Cylinder Pipe)를 사용하는데, 큰 직경의 관이어서 PCCP의 파손은 큰 손실을 일으킨다. 대형 직경이므로 수압과 관련하여 고강도 탄소섬유가 고려될 수 있는 분야로 보인다.
- 최근 용도가 증가되는 분야 중에 하나는 풍력 발전용 블레이드이다. 블레이드가 대형화되고 회전이 클수록 CFRP의 사용이 바람직하기 때문이다. 철제 블레이드에서 탄소섬유 블레이드로 대체되고 있다. <그림 3-14>에 탄소섬유를 사용한 풍력 발전

용 블레이드를 보여 주고 있다.^{(18), (19)}

<그림-3-14> 풍력 발전 블레이드⁽¹⁸⁾



- 이와 함께 해양 석유 시추 작업에도 적용하고 있어 에너지 산업 분야에 활용이 증대되고 있다. 즉 심해 해저의 고 압력에 견디는 유전 송유관, 로드, 로프 등으로 기존의 철제 제품에서

고강도 고 탄성의 탄소섬유가 그 특성으로 인하여 대체되어 사용되고 있다.⁽⁴⁰⁾

- 그 밖에 운동기구와 음악에 사용하는 악기에도 탄소섬유가 응용되고 있다. 아이스 하키의 스틱, 테니스 라켓, 낚싯대, 골프 클럽 등은 고급 제품일수록 탄소섬유의 특징을 살려 활로가 늘어나고 있다.⁽⁴⁰⁾
- 이와 함께 크게 사용도가 늘고 있는 것이 자전거이다. T800급 이상의 탄소섬유로 만들어지는 자전거 프레임에서부터 디스크 휠도 만들어 사용되고 있다. 도레이 회사에서 전망하는 탄소섬유 전망을 보면 크게 스포츠 분야와 항공우주 그리고 산업 분야로 대별하고 있는데 산업 분야에는 자동차, 선박을 포함하고 있어 그 범위가 광대하지만 전체적으로 산업분야의 용도가 훨씬 빨리 진행되는 것으로 전망하고 있다.⁽³⁰⁾

마. 화재 모델링

- 탄소 섬유는 구조용에서 살펴본 대로 선박, 항공기, 자동차, 철도 차량 등 우리 일상생활과 밀접한 위치에서 접하고 있다. 따라서 언제든지 화재의 위험에 노출될 수 있다. 그러나 탄소 섬유 구조재료는 일반적으로 carbon-epoxy나 carbon-plastics로

되어 있어 열에 노출되면 분해 현상 등의 화학 반응을 수반하게 된다.

- 특히 선박은 장기간을 해상에서 활동해야하는 특성이 있어 탄소섬유의 화재에 대하여 많은 관심을 가져왔다. 분해 시 발생하는 가스 문제는 별도로 하고, 구조재로서의 기계적 강도나 파손이 일어나는지 등이 중요하다.
- 불에 노출된 복합재료의 온도 분포를 계산하는 데 가장 많이 쓰이는 열적 모델링은 Henderson 등의 모델로 열전도, 폴리머 매트릭스의 열분해와 분해가스의 확산 과정을 해석하는 것이다. 좀 더 자세한 것으로 Florio 등이 열전도, 가스 유동, 매트릭스 분해와 함께 열팽창과 휘발성 가스의 형성에 의한 압력 상승을 해석하는 모델을 개발하였다.⁽¹²⁾
- 화재 시의 손상 모델로는 Mouritz와 그의 동료들이 불에 노출된 적층에서 숯의 형성과 성장을 해석하는데도 Arrhenius 역학 율 식을 사용하였다. 가시적인 숯 형성은 분해와 증발로 인하여 질량이 약 20% 감소했을 때부터 하였다. 이를 기준으로 적층에서 추가 숯의 성장은 질량 손실을 근거로 산출한다.⁽¹⁰⁾
- 적층재에 기계적 해석을 하는 방법으로 평균 강도, Euler

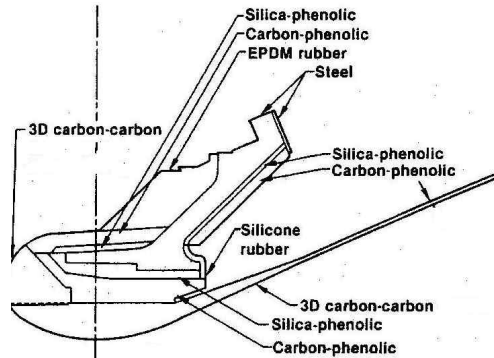
buckling, 점-탄성 연화 등이 있고, 샌드위치 재료에는 표면 파손, 좌굴, skin-wrinkling 등의 모델이 있다. 또 모델이 사용한 크기에서도 개개 섬유나 폴리머 매트릭스의 단위 셀에서부터 bulk에 이르기 까지 다양하며, 풀이 방법도 해석적인 것과 유한 요소법 등이 사용되고 있다.⁽¹¹⁾

- 화재 후의 잔류 기계적 특성과 안전성을 조사하는 것도 매우 중요하다. 2층(two-layer) 모델이 가장 확립된 모델로서 화재로 손상된 적층재를 충분히 분해된 층과 처녀 층으로 대별한다. 화재 후의 특성 값을 계산하는 핵심은 섬유-숯 영역의 두께를 파악하는 것이다. 섬유-숯 두께는 열 모델을 사용하여 온도 분포를 계산하고, 이 값을 가지고 분해 모델을 이용하여 숯의 형성 범위를 알아낸다. 숯의 형성은 폴리머 매트릭스의 질량이 20% 감소하면 일어난다고 가정한다.⁽¹²⁾

2. 내열 용삭(Ablation)용 탄소섬유

- 탄소섬유 복합재료가 주로 구조적 보강 기능을 가지고 활용되는 것이 일반적이지만 내열 재료로도 그 활용성이 다양하다. 특히 로켓 모터의 노즐에는 탄소섬유를 이용하여 열을 차단하고 있다.

<그림-3-15> 탄소섬유의 노즐에서의 적용⁽²⁵⁾



○ 로켓 모터의 노즐에는 고온 고압 고속의 가스가 흐르고 있어, 그 접촉면이 고온이 되면서 마손되어 나가고 있다. 이때 소량의 표면 물질을 소모해 가면서 유입되는 많은 열에너지를 소산시키는 역할이 필요하며 여기에 탄소 섬유 복합재료가 많이 사용되고 있다. <그림 3-15>는 노즐 부위에 탄소섬유를 사용한 설계를 보여주고 있다.

○ 또 여기에는 내 삭마라는 기계적 특성이 요구되어 이 또한 새로운 특성의 탄소섬유이다. 우리나라의 일부 업체에서는 이 분야에 적용할 소재로 레이온계의 탄소섬유를 개발하려는 시도도 있다. 상대적 침체 상태에 있는 계열이어서 기술협력은 용이할

지도 모른다. <그림 3-16>은 탄소 섬유를 사용한 실제 로켓 노즐의 모양이다.

<그림-3-16> 탄소섬유의 로켓 노즐⁽²⁵⁾

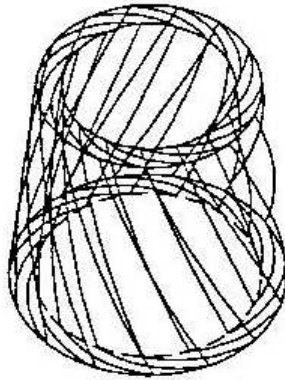


○ 특히 유동 면적이 가장 좁은 노즐 목은 분출가스의 질량이 통제되어 추진기관의 성능과 직결되는 곳이어서 초기 형상 유지가 중요한 곳이다. 즉 삭마 현상도 적게 일어나야 할 필요가 있는 곳이어서 이 부분의 부품은 탄소/탄소 제품으로 사용하고 있다.⁽²⁵⁾

○ 또 탄소섬유를 이용한 노즐 부위의 제작은 주로 프리 프레그에

의한 테이프를 사용한다. 테이프를 감는 형상은 여러 가지가 있으나 가장 성능이 좋게 나타나는 방법은 로제트 패턴, <그림 3-17>로 하는 것이다. 이것은 패턴의 형상이 복잡하여 방향성을 없애는 효과가 있다.⁽²⁵⁾

<그림-3-17> 로제트 패턴⁽²⁵⁾



- 탄소섬유를 이용한 열 차폐용은 우주 비행체 등의 대기권 재진입에도 반드시 필요하고, 특히 탄소/탄소섬유로 된 복합재료는 항공기, 우주선의 브레이크 디스크로 개발하여 사용하고 있다.^{(24), (25)} 또 산업용으로 진공로(vacuum furnace)나 화학 반응기의 내화벽에 사용한다.⁽²⁶⁾
- 현재의 항공기는 비행속도가 시속 100마일에서 음속 가까이까지 비행하고 있어 이러한 속도에 보조익(flap)이 적응하여야 하

며, 이러한 플랩의 구동 장치에 마찰 디스크를 사용한다. 이 마찰 디스크에 탄소/탄소섬유 복합재를 사용하고 있으며 미국의 Newmet Composite 회사에서 비행기 플랩 잼(Flap Jam)) 시스템에 사용할 탄소/탄소 디스크를 생산하고 있다.⁽²⁾

- 이러한 항공기 브레이크 디스크에 사용하는 탄소섬유는 미사일 기술통제 체제(MTCR: Missile Technology Control Regime) 협약에 의하여 수출입이 통제되는 탄소섬유이다. 근래에는 강화 탄소섬유에 SiC 세라믹 매트릭스로 된 우수한 성질을 갖는 브레이크 디스크를 개발하여 마찰용 브레이크 패드에도 적용하고 있다. <그림 3-18>은 탄소/탄소브레이크 디스크 모양이다.

<그림-3-18> 탄소/탄소 브레이크 디스크⁽²⁾



- 강화 탄소섬유 중에 탄소/탄소 계열의 재료는 주로 브레이크 디스크나 마찰과 관계된 디스크의 패드 라이닝 등 내마모성 용도로 쓰인다. 로켓 노즐에서도 삭마가 가장 심한 노즐 목 부위는 탄소/탄소 계열이다.^{(24),(25)}
- 이와 같이 내 용삭, 내 삭마용으로 쓰이는 탄소 섬유는 유도 무기의 추진기관과 비행체 침투 부 등을 포함하는 방위산업 기술과 직결되는 기술이며, 비행기 브레이크 디스크에도 사용되어 기술 보호 차원에서 협력과 이전이 매우 어려운 분야이다. 또 최상의 탄소섬유가 적용되고 있다. 따라서 이 분야의 기술 연구개발은 시장 규모가 크지 않지만 관심과 지원이 필요한 부분이다.

3. 향후 전망

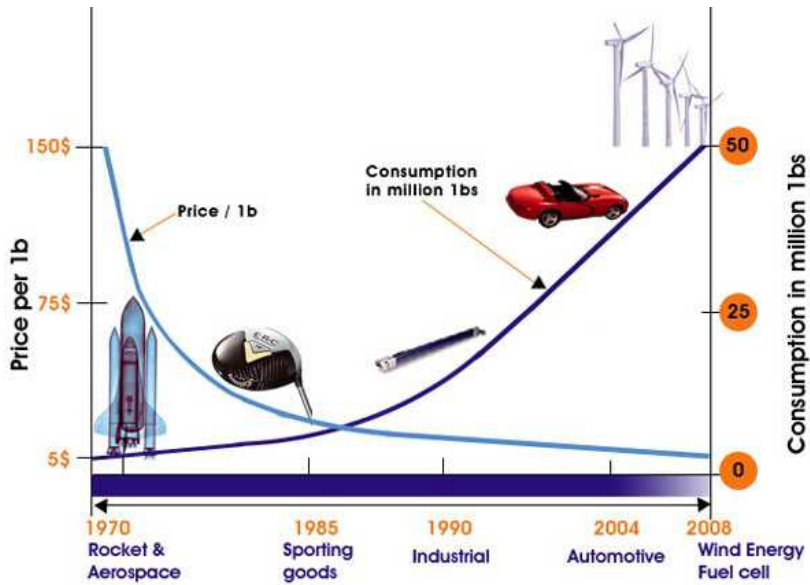
- 탄소섬유의 사용에 대한 향후의 전망은 이미 전술한 바와 같이 산업 전반에 걸쳐 다양하게 응용될 것이다. 경제 분석 전문회사인 루신텔에서 발표한 자료를 보면 탄소섬유는 제작 기술의 발달로 생산 가격이 낮아지게 되고 따라서 좋은 기계적 특성에도 불구하고 가격으로 인하여 적용하지 못하던 많은 분야에 사용 증가로 수요가 기하급수적으로 증가될 것으로 예상하고 있다. <그림 3-19>는 루신텔의 시장 분석 자료

를 인용한 것이다.

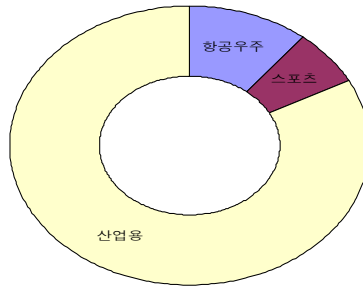
- 특히 고가임에도 고성능이 필요로 하였던 항공우주의 사용에서
이제는 가격 경쟁이 가능한 자동차 분야로의 확대가 주목할 만
하다. 즉 탄소섬유는 기존의 항공우주 분야는 물론 자동차 분
야와 풍력 발전 블레이드 등의 에너지용으로, 자전거 및 보트
등 고급 스포츠 용품으로 확대되고 있음을 보여 주고 있다.
기존의 비교적 저 등급의 소재로 사용하던 스포츠용이나 산업
용도 그 용도가 줄어들지는 않을 것이다.

- 일본의 도레이 회사가 발표한 현재의 시장 분석을 보면, <그림
3-20>에 자료를 원용하여 개략적으로 표시하였는데, 루신텔과
마찬가지로 일반 산업분야의 적용이 상대적으로 큰 것을 알 수
있다. 일반 산업에는 자동차, 선박 등이 포함되고 있음을 비추
어 보면, 그 전망은 동일하다.⁽¹⁸⁾

<그림 3-19> 탄소섬유의 수요와 공급가격⁽³¹⁾



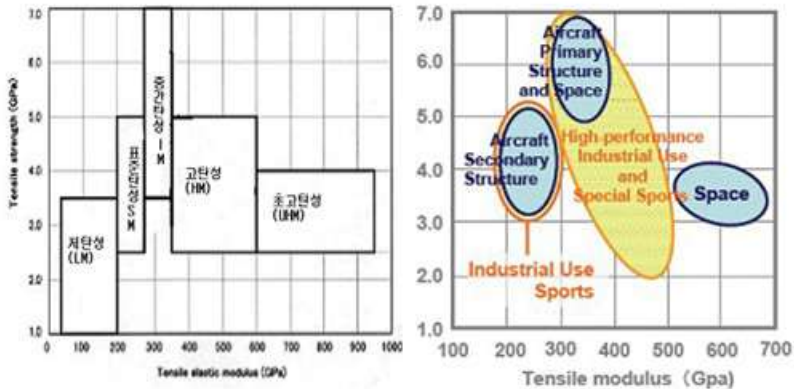
<그림 3-20> 탄소섬유의 사용 개략 분포⁽¹⁸⁾



- 탄소 섬유는 전술한 바와 같이 그 기계적 특성에 따라 몇 가지로 대별하였었다. 그리고 적용분야에 따라 그 등급도 다른 것이 적용되고 있어 수요와 성능 관계도 매우 중요한 인자이다. 일반적으로 범용 탄소 섬유가 아직은 큰 비중을 차지하고 있다. 그러나 가격 경쟁이 가능해진다면 고급 그레이드의 수요가 자동차나 선박 등에도 적극적으로 검토되리라 예측된다.
- <그림 3-21>은 기계적 물성에 따라 즉 인장강도를 포함한 탄성률을 기준으로 탄소섬유 구분과 이에 대비한 용도 전망을 같이 표시한 것이다. 우측 그림에서 탄성률을 기준으로 하면 우측으로 반(인장강도 3 GPa 이상), 인장강도를 기준으로 하면 위쪽의 반(탄성 모듈러스 300GPa 이상)이 첨단급 탄소섬유 영

역으로 볼 수 있다. 이것을 기준으로 보면 우주 항공에 사용하는 것은 전부 고급 탄소섬유이고 고성능 산업용과 스포츠용품은, 즉 자동차, 자전거, 로봇, 요트를 포함하는 선박 등의 산업과, 고급 골프 클럽, 낚시대, 테니스 라켓 등도 고급 탄소섬유가 활용될 것으로 나타나 있다.

<그림 3-21> 탄소섬유 기계적 특성과 용도 전망^{(18),(30)}



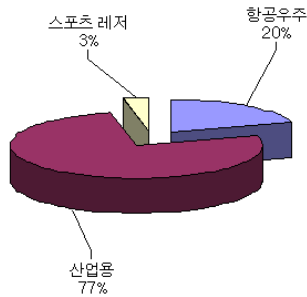
제 4 장

국내외 학술정보 분석

- ISI Web of Knowledge 플랫폼에서 Web of science를 활용하여 비교적 최근 연도인 2000년부터 현재(2011.10)까지 발표된 탄소섬유의 응용에 관한 학술 정보를 조사하였다. “carbon fiber” and “aircraft”와 같이 응용분야를 포함하는 토픽으로 검색하였다. 전체적인 학술 정보 분석은 전술한 것과 같이 탄소섬유와 응용분야를 and 로 묶은 항목을 or로 모두 열거한 검색 결과를 모 집합으로 하여 조사하였다.
- 검색 결과 비행기, 항공우주 분야에는 비교적 활발한 학술 활동이 나타나고 있으나, 자동차, 자전거를 위시하여, 배나 보트 그리고 운동용품과 관련된 낚싯대나 테니스 라켓, 골프 클럽 등의 분야에는 학술적으로는 발표가 드물게 나타나고 있다. 특이한 것은 탄소섬유와 콘크리트를 토픽으로 검색한 결과가 가장 많이 나타나고 있다.
- 일반적으로 수요를 근거로 한 3개 분야별 예측 전망에는 자동차를 포함한 산업분야가 가장 큰 수요가 되고 항공우주, 운동

용품 등으로 예측하고 있는데,⁽³⁰⁾ 학술활동도 이와 같은 경향이 있지만 자동차나 자전거 분야의 학술 활동은 검색 결과로는 크지 않았고, 산업분야 중 토목 분야인 콘크리트와 관련된 학술 활동은 활발하였다.

<그림 4-1> 분야별 논문 발표

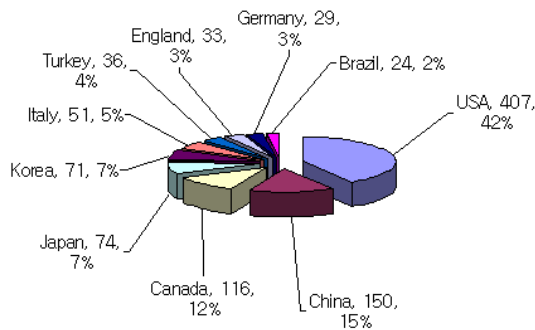


- 검색 결과 총 1,099 건이고 개별 분야별로는 비행기분야 104건, 우주 분야가 130건이었다. 나머지 분야에서는 자동차, 블레이드, 엔진 등은 20 여건을 전후로 또 자전거, 보트, 낚시대등의 운동 용품과 관련한 학술활동은 수건 정도로 나타나고 있다.
- <그림 4-1>에 학술활동을 크게 3그룹으로 나누어 표시하였다. 그룹별 검색을 위해, 비행기와 우주분야를 or로 묶은 결과 215

건이 검색되어 각각의 합 234건보다 적어 일부가 중복되는 것을 볼 수 있었으나, 대부분의 경우 중복 현상은 그리 나타나지 않았다.

- 국가별로 논문 발표가 활발했던 10대 국가를 <그림 4-2>에 표시하였다. 학술활동은 미국이 단연 우수하여 10대 국가 중에는 42%, 전 세계적으로는 37%를 차지하고 있다. 이어 중국, 캐나다, 일본이 뒤를 잇고 있다.

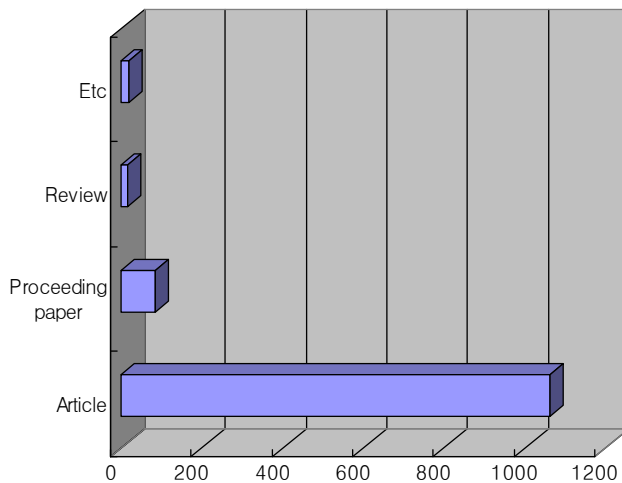
<그림4-2> 논문 발표 10대 국가



- 우리나라의 발표 현황은 10대 국가 중에 6위에 올라 있어, 현재 국내에 탄소섬유 생산 공장도 하나 제대로 갖고 있지 못한

상황을 감안하면 학술활동은 활발한 편이다. 원자재를 수입하여 활용하는 여건에서도 적용성과 관련하여 연구 개발은 나름대로 수행하고 있는 것으로 판단할 수 있고 앞으로 생산 공장의 가동과 함께 탄소섬유에 대한 응용과 학술 활동도 더욱 확대되리라 본다.

<그림 4-3> 논문 발표 형식

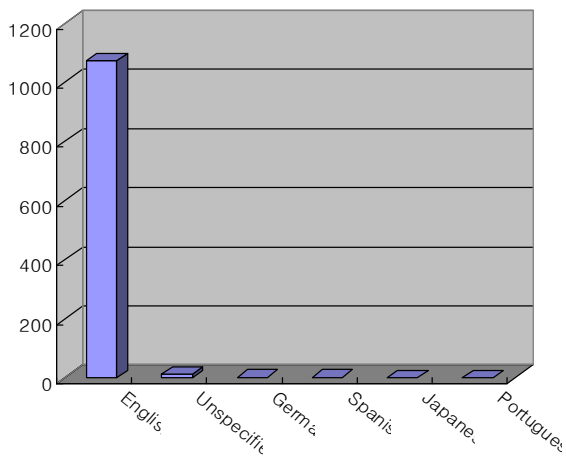


- 발표된 논문의 형식으로 보면 <그림 4-3>, Article 96%, Proceeding이 7.7%, Review 1.5% 등으로 나타나고 있다.

Article과 Proceeding의 합만으로도 100%를 초과하고 있는데, 이는 일부가 중복된 것으로, 학술회의에 발표한 후 논문 게재가 이루어지는 경우를 생각하면 당연한 결과로 보인다.

- 발표된 언어로는 역시 영어가 대부분이다. <그림 4-4>에서 보 여주듯이 독일어, 스페인어, 일어, 포르투갈 언어가 나타나고 있는데, 한국어는 별도 구분이 없다.

<그림 4-4> 논문 발표 언어



<표 4-1> 탄소섬유 응용에 관한 중요 연구기관

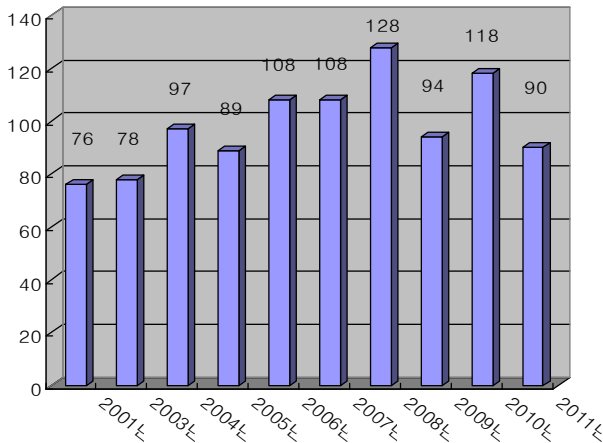
순위	연구 기관	논문 수
1	Sunny Buffalo	53
2	Univ Waterloo	25
3	Univ Missouri	23
4	Queens Univ	22
5	Wuhan Univ	21
6	Harbin Inst Technol	19
7	Lawrence Technol Univ	19
8	Hanyang Univ	16
9	Korea Advanced Inst Sci Tech	15
10	Dallan Univ Tech	13
11	N Carolina State Univ	13
12	Univ Cal San Diego	13
13	Univ Minho	13
14	N Dakota State Univ	12
15	Royal Mil Coll Canada	12
16	Univ Alabama	12
17	Univ Utah	12
18	Univ Pittsburgh	11
19	Univ Toronto	11
20	Indian Inst technol	10
21	NASA	10
22	Tonji Univ	10
23	Univ Windsor	10
24	CTAi.	9
25	Ibaraki Univ	9

○ <표 4-1>에 25대 기관을 조사했는데, 나타난 바와 같이 가장 많은

기관이 48%이고 뒤를 이어 2.3%에서 0.8%로 1%대를 보여 많은 기관이 골고루 관심을 갖고 있음을 알 수 있었다. 25대 기관 중에는 우리나라의 한양대학교와 KAIST가 포함되어 있다.

- 끝으로 2000년대의 연도 별 학술활동 추이를 조사하여 보니 한두 해(2008,2009) 다르기도 하지만, 전반적으로 근년에 가까울수록 학술활동이 늘어나고 있고 앞으로 (2011년 이후) 새로운 활용이 예상되는 자동차 분야를 포함하여 학술활동도 많아질 것으로 예측된다. 2011년은 집계가 완료되지 않은 상태이다.

<그림 4-5> 연도별(10대) 논문 발표



제5장

결 론

- 탄소섬유는 소재가 가져야 할 장점, 즉 가볍고 강하며, 내 침식성과 고 탄성 율 등을 두루 가지고 있어 그 활용 범위가 최첨단 기술을 요하는 항공우주에서 부터 자동차, 선박 철도 등 주요 운송기관을 포함한 산업 전반과 고급 스포츠용품, 자전거 등 모든 분야로 용도가 확대되고 있다.

- 따라서 이러한 탄소섬유의 시장은 탄소섬유와 생산 가격의 현실화와 함께 시장 전망은 더 커질 것이 자명하다. 세계 굴지의 탄소 섬유회사인 도레이 회사에서는 탄소섬유 세계 시장 전망을 2011년에 연 6만 톤 소요에서 10년 후인 2020년에는 두 배가 넘는 12만 톤으로 급속한 증가를 예측하고 있다.

- 특히 상질의 탄소섬유가 자동차, 자전거, 선박, 고급 스포츠용품 등으로 사용범위가 늘어날 것이며, 기술 발전과 생산가와 연계되어 시장은 크게 확대될 것으로 보인다.

- 한편 탄소섬유는 소재의 특성상 미사일과 같은 방위 산업에 적용되고 있어 기술 이전은 물론 제품의 수입 자체도 어려워, 미국 일본 유럽 등의 선진국에서 고 품질인 경우, 즉 첨단급 탄소섬유는 수출도 규제되고 있다.
- 따라서 방위 산업을 포함하여, 항공우주, 잠수정 등의 선박, 극한 조건에 적용할 수 있는 로봇의 개발, LNG 탱크를 포함하고압 저장용 탱크, 풍력 발전 블레이드 등 21세기의 고 부가가치 산업에 적용할 수 있는 첨단급 탄소섬유의 자체 생산기반 기술이 절실하다.
- 현재 우리나라에서도 일부 회사에서 탄소섬유를 연구 개발 중이나, 기술적으로 선진국에 비하여 미흡한 상태이다. 금년 초에 일본의 도레이와 한국의 자회사인 도레이첨단소재가 경북 구미에 연산 2,200톤 탄소섬유 생산 라인을 만들어 2013년 완성한다는 목표로 시작하였다.
- 이 생산품은 산업용과 스포츠용으로 사용될 것을 목표로 하는 범용 탄소섬유가 될 것이다. 범용 탄소섬유는 항공우주 등에 사용하는 고 성능의 탄소 섬유에 비하면 상대적으로 최상의 질은 아니다. 당연히 기술을 이전하게 되는 이러한 생산 시설 투자는 나름대로의 기술 보안을 유지할 것이며, 나머지 기술 발전은 우리의 몫이다.

- 고급 탄소섬유를 이용한 제품은, 수요자의 요구에 따라 어느 정도의 수준은 국내에서도 가능한 상태에 있다. 즉 비교적 고성능이 요구되는 항공우주용 부품도 만들고 있어 상대적으로 제작 기술은 좋은 편이나, 원자재인 탄소섬유가 관건이다.
- 따라서 첨단급 탄소섬유를 포함한 탄소섬유의 역학적 기능성과 제조 성형 방법, 설계 및 평가 방법 등 전반적인 기술 향상에 노력하여야 할 것이며, 범국가적 차원에서의 지원과 관심 또한 필요하다.

참고문헌

1. Quangfeng Guo, Wei Lei et al, "Application of carbon fiber composite in space camera frame", Advanced Material Research vols. 194-196, pp.1558-1563, 2011.
2. W. Buchgraber, "Carbon/carbon Composite friction disc for aerospace", Mat-wiss. u. Werkstofftech. 34 pp.317-3321, 2003
3. A. P. Mouritz, E. Gilber et al, "Review of composite structures for naval ships and submarines", Composite Structures, 53, pp.21-41, 2001
4. Chengzhong Yang, Yanjun Wang, Yilin Chen, "The application of carbon fiber reinforcement in tunnel second lining cracks", Advanced Material Research vols. 194-196, pp.865-868, 2011.
5. Han Jiaqiang, Fu Xiuyan, Zhang Yumin, "Carbon fiber cloth in structural engineering application", Advanced Material Research vols. 1960-1962, pp.146-150, 2011.
6. A. P. Mouritz, "Review of smoke toxicity of fiber-polymer composites used in aircraft", Journal of Aircraft Vol 46. No 3. May-June, 2009
7. A. P. Mouritz, C. P. Gardiner, "Compression properties of

- fire-damaged polymer sandwich composites", *Composites: Part A*, 33, pp.609–620, 2002
8. A. P. Mouritz, Z. Mathys,. C. P. Gardiner, "Thermomechanical Modelling the fire properties of fiber-polymer composites", *Composite: Part B*, 35, pp.467–474, 2004
 9. A. Toldy, B Szolnoki, Gy. Marosi, "Flame retardancy of fiber-reinforce epoxy resin composites for aerospace application", *Polymer Degradation and Stability*, 96, pp.371–376, 2011
 10. A. P. Mouritz, Z. Mathys,. A. G. Gibson, "Heat release of polymer composites in fire", *Composite: Part A*, 37, pp.1040–1054, 2006
 11. S. Feih, Z. Mathys,. A. G. Gibson, A. P. Mouritz, "Modelling the tension and compression strengths of polymer laminates in fire ", *Composite Science and Technologies*, 67, pp.551–564, 2007
 12. A. P. Mouritz, S. Feih, E. Kandare, Z. Mathys,. A. G. Gibson, et al, "Review of structural modelling of polymer composites", *Composite: Part A*, 40, pp.1800–1814, 2009
 13. Mark Bruderick, Douglas Denton, Michael Schnelding, "Carbon fiber composit body structures for the 2003 Dodge Viper",

Daimler Chrysler Cooperation and Michael Kiesel, Quantum Composites Inc.

14. M. Rashid Khan, Andrew R. Barron, "Carbon fibers: opportunities and challenges", Advanced Materials and Processes, pp47-49, September. 2008
15. Vince Kelly, www.carbon-fiber.com, "A review of feedstock for making carbon fiber, a material cutting edge of efficient energy technologies", Carbon fiber Technology, Ireland
16. <http://www.torayca.com/techref/index.html>
17. <http://www.toraycfa.com/manufacturing.html>
18. <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/index.html> (일본 탄소 협회)
19. <http://www.carbon-fiber.com/> (Vince Kelly)
20. <http://eco.nikkeibp.co.jp/article/report/20110210/105850/?P=1>
21. 井塚 淑夫(Ijika Yoshio), "炭素纖維複合材料の用途展開から見た最近の内*外の動向", 「加工 技術(日本4)」, 45(11), 2010, pp.672-676
22. Amanda Jacob, "BMW counts on carbon fibre for its Megacity Vehicle", Reinforced Plastics 54 (5) PP38-41, 2010
23. 김 용 암, "탄소체 복합재료", 물리학과첨단기술, March, 2003
24. Jean-Francois Guery et al "Solid propulsion for space applications: An updated roadmap", Acta Astronautica, 66, 2010 pp. 201-219

25. Rob Black and Robert A. Fredrick, "AIAA SRTC 2008 Short Course Advanced Solid Rocket", July 24-25 2007
26. G. A. Kravestikii, V. V. Rodionova, S. A. Kolesnikov, A. N. Gordeev, " Increase in the refractoriness of carbon composite materials with use of heat-resistant ceramic coatings", Refractories and Industrial Ceramics, 49, pp309-313, 2008
27. ISI Web of Science :
28.
http://apps.isiknowledge.com/summary.do?qid=1&product=WOS&SID=V2pK68M6%40ibJeALDi4B&search_mode=GeneralSearch (시장)
29.
<http://www.globalsecurity.org/military/library/news/2007/02/mil-070207-nns08.htm> (stiletto)
30.
http://www.toray.com/ir/pdf/lib/lib_a136.pdf (도레이 strategy)
31.
<http://www.lucintel.com/marketcarbon.aspx> (시장분석)
- 32
<http://www.think-tank.co.kr/56>(미래의 과학기술)
- 33
<http://olv.moazine.com/rviewer/index.asp> (철도 차량)
- 34

- http://www.sacomposites.com/filament_winding_carbon_fiber.html
35. [http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_\(fiber\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_(fiber))
36. http://www.toray.com/technology/network/net_004.html (도레이 R&D Center)
37. <http://www.toray.com/news/carbon/nr100428.html> (독일 다임러 자동차)
38. <http://www.reinforcedplastics.com/view/5799/toyotas-lexus-lfa-to-use-toho-tenax-carbon-composites/> (Toyota)
39. <http://www.spiegel.de/international/business/0,1518,736296,00.html> (BMW)
40. <http://www.toraycfa.com/application.html> (사용처)
41. <http://www.compositesworld.com/articles/learjet-85-composite-pressurized-cabin-a-cost-cutter> (Bombardia)
42. <http://www.airliners.net/aircraft-data/stats.main?id=29> (A380)
43. <http://www.torayca.com/history2.html> (도레이 탄소섬유 적용 역사)

저자소개

이태호

- 미국 Washington State University 공학박사
- 미국 해군대학원 항공우주공학과 객원교수
- 국방과학연구소 책임 연구원(실장, 부장역임)
- 국가과학기술 평가 위원회 조 분 평 평가위원/위원장
- 한국 추진공학회 초대, 2대 회장 역임, 현 명예회장
- 금오공과 대학교 기계공학부 초빙교수
- 현, 한국과학기술정보연구원 전문연구위원

- 보국포장(1999), 과학기술훈장 진보장(2010) 수상

- 저서 : 램제트 추진기관의 기본 열역학(2005)
(충남대학교 출판부, 학예사 인쇄)

Metal Spinning의 기술 개발 동향
기타 연구 논문 및 보고서 다수

요 약

탄소섬유는 소재로 바람직한 특성, 즉 가볍고 질기며 강도가 높고 탄성율도 좋아 각광을 받고 있다. 특히 개발 초기의 탄소섬유보다 기계적 특성이 향상된 고강도, 고탄성 탄소섬유의 출현으로 현재 생산되는 탄소섬유 중에는 첨단급 탄소섬유도 포함되어 있고, 또 앞으로 계속 새로운 고질의 첨단 탄소섬유는 연구 개발 생산되어 질 것이다.

이러한 고급 탄소섬유는 비교적 고가의 생산비로 인하여 고성능 특성이 요구되는 항공우주 특히 우주분야에 사용되어 왔고, 범용 탄소 섬유는 스포츠용품, 즉 낚싯대, 골프채, 테니스 라켓 등에 주로 사용되어 왔다.

그러나 전반적인 탄소섬유의 제작 기술 향상으로 향후의 탄소섬유 제조가는 상대적으로 낮아지게 될 것이고, 따라서 고질의 탄소섬유가 기존의 항공우주 분야를 위시하여 자동차, 선박, 자전거, 풍력 발전, 고급 스포츠용품 등의 사용에 경쟁력을 가지게 되어 용처는 더욱 확대 될 것으로 예상하고 있다.

그동안 우리나라는 탄소 섬유를 거의 수입하여 사용하여 왔으나,

프리프레그를 포함한 필라멘트 와인딩 기법이라든지, 로제트 패턴의 설계 제작 기법 등, 탄소 섬유를 이용한 제작 기술은 중 소 기업을 중심으로 착실하게 쌓아온 편이다.

이제 시작하는 탄소섬유의 국내 생산과 함께 고성능의 제품 개발에도 관심과 지원을 통하여 점차 확대되는 첨단급 탄소섬유와 그 응용 시장에도 적극적으로 참여하여야 할 것이다. 특히 고성능의 탄소 섬유는 항공우주 등 방위 산업과 직결되는 기술 규제 품목으로 기술 협력과 이전이 제한되고 있다. 그러므로 자체적인 연구 개발이 동반되어야만 한다.