

탄소섬유 프리프레그 산업의 최근 동향

정훈희, 김익수

SK케미칼(주)

1. 서론

탄소섬유는 가벼우면서 기계적 물성이 우수하여 다양한 산업 분야에서 용도가 확대되는 추세에 있다. 특히 최근 스포츠 레저, 항공, 풍력발전, 토목, 건축, 군수 산업 분야에서 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 이에 따라 탄소섬유의 물성과 용도 및 탄소섬유 프리프레그 산업에 대한 국내외 동향에 대해 소개하고자 한다.

2. 탄소섬유의 개요

2.1. 탄소섬유의 종류와 특성

탄소섬유(CF)는 1879년 에디슨이 대나무 섬유를 탄화시켜 백열전구의 필라멘트로 사용한 것이 시초라고 알려져 있다. 1950년 이후 항공/우주 분야에서 경량/고강성 재료의 필요성이 높아지자 레이온계 CF, 폴리아크리로나이트릴(PAN)계 CF, pitch계 CF가 개발되었다.

PAN계 CF는 레이온이나 pitch계 CF보다 비강도(강도/밀도)와 비탄성률(탄성률/밀도)이 높아 주로 에폭시 수지를 매트릭스로 한 복합재료인 CF강화 플라스틱으로 활발히 이용되고 있다(Figure 1). 대부분의 CF는 PAN계 CF이며 높은 강성이 필요한 구조물에는 pitch계 CF가 적용되고 있다.

CF의 제조는 PAN과 pitch 섬유를 산화, 탄화, 흑연화시키는 공정들로 이루어져 있으며 각 공정별

온도에 따라 다양한 물성의 CF가 제조된다(Figure 2). CF mono filament의 직경은 5~7 μm로(Figure 3) 매우 가늘며 1,000개의 filament 들로 구성된 CF 토우(tow)를 '1K tow'라고 부른다. CF tow(Figure 4)는 1K, 3K, 6K, 12K, 15K, 24K, 48K, 96K 등으로 지관에 감아 공급되고 있다. 이 가운데 12K, 15K CF는 범용 일방향 프리프레그 제조에 많이 사용된

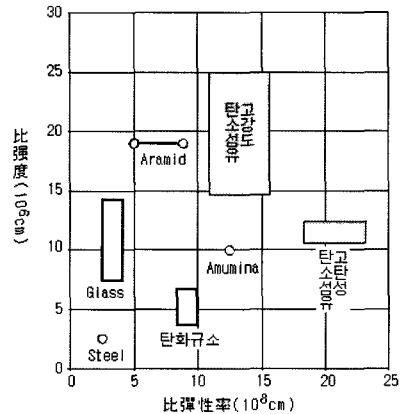


Figure 1. 탄소섬유 비강도, 비탄성률.

Table 1. PAN계 탄소섬유 물성(Mitsubishi Rayon사)

grade	Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Density (g/cm ³)
TR50S	240	4,900	2.0	1.82
MR 40	295	4,410	1.5	1.76
MS 40	345	4,610	1.3	1.77
HR 40	390	4,610	1.2	1.82
HS 40	450	4,410	1.0	1.85
SR 40	490	4,210	0.9	1.88

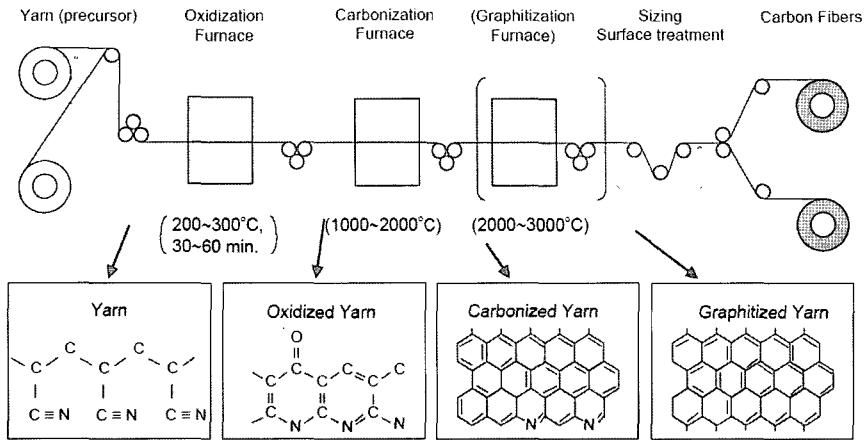


Figure 2. 탄소섬유 제조 flow.

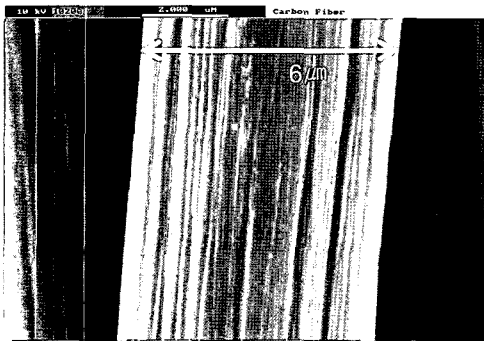


Figure 3. 탄소섬유 모노 필라멘트.

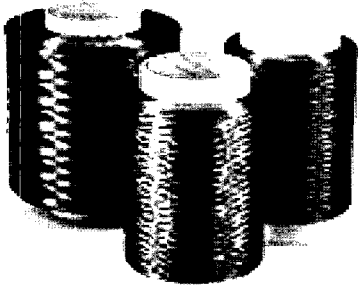


Figure 4. 탄소섬유 제품.

다. 24K 이상의 large tow는 주로 필라멘트 와인딩 공법과 인발(pultrusion) 공법을 적용하여 산업용 복

Table 2. pitch계 탄소섬유 물성(Mitsubishi Rayon사)

grade	Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Density (g/cm ³)
K633	440	2,600	0.6	2.06
K637	640	2,600	0.4	2.12
K13A	790	2,600	0.3	2.15
K63B	860	2,600	0.3	2.17

합재료 구조물 제작에 활용되고 있다.

PAN계와 pitch계 CF의 기계적 물성을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. pitch계 CF는 일반적으로 인장탄성률이 높은 반면에 인장강도가 현저히 낮고 밀도가 상대적으로 높다. pitch계 CF는 PAN계 CF에 비해 쉽게 흑연화되기 때문에 결정성장이 우수하여 고탄성률의 CF를 용이하게 얻을 수 있다. 이로 인해 고강성을 필요로 하는 기능성 구조물에 pitch계 CF의 적용이 증가하는 추세에 있다. 반면에 인장 및 압축 강도가 PAN계 CF의 50~60% 정도로 낮기 때문에 구조재료 분야에 적용하기 어려운 한계가 있다.

PAN계 CF에서 240 GPa 대의 인장탄성률을 가진 제품을 '일반탄성(standard modulus)', 300 GPa 대의 인장탄성률 제품을 '중탄성(intermediate modulus)', 그리고 400 GPa대의 인장탄성률 제품을 '고탄성(high modulus)' 제품으로 호칭하고 있다.

Table 3. CF와 다른 재료와의 물성비교

구분	CF (TR50S)	스테인레스 (SUS304)	알루미늄 (A2024)	유리섬유 (E-glass)
밀도 (g/cm ³)	1.82	8.03	2.77	2.55
인장강도 (MPa)	4,900	520	420	3,400
인장탄성률 (GPa)	240	200	70	70
비강도	25.0	0.7	1.6	13.7
비탄성 (10 ⁶ cm)	13.3	2.5	2.6	2.9

PAN계 CF중에서 일본 미쓰비시 레이온의 TR50S와 금속 등 다른 재료들의 물성을 비교해 보면(Table 3) PAN계 CF의 물성이 구조물 제작용 재료로서 매력적인 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 특히 인장강도와 인장탄성률 수치를 밀도로 나눈 비강도와 비탄성 수치가 스테인레스와 알루미늄에 비해 월등히 높아서 가벼우면서도 높은 기계적 물성이 요구되는 항공, 토목, 기계, 석유산업 분야 등에서 필요로 하는 고기능성 구조물 용도에 적합하다.

이러한 특성 외에도 CF는 진동 감쇄성이 금속대비 우수하여 골프 샤프트, 로봇 부품, 고속운동기계 부품 등에 효과적인 기능을 발휘하며, 전기 및 열전도성이 있고, 전기 인가 시에 원적외선 발열특성이 있어서 이들을 응용한 의류, 난방기기, 전자파 차폐 및 정전기방지 외장재 등의 제품들이 시판되고 있다.

또한 X선 감쇄율이 알루미늄의 1/7 수준으로 의료 분야에서 인체에 부담이 적도록 X선 강도를 낮추는 목적으로 CF가 적용된 제품이 사용되고 있다.

CF는 높은 치수 안정성, 내피로성, 내부식성 등으로 인해 정밀계측기기의 부품과 함께 밸브, 기어, 베어링, 기계부품 등에 활용되고 있다.

2.2. 프리프레그

CF 장섬유는 제직, 인발, 필라멘트 와인딩(filament winding), 시트몰딩(sheet molding) 등의 가공법으로



Figure 5. 탄소섬유 프리프레그.

대부분 수지를 사용하여 성형한다. 또한 일정 길이로 잘게 자른 chopped 또는 milled CF는 수지와 혼합하여 복합재료의 filler로 쓰인다. 이외에 furan이나 페놀수지에 CF 또는 CF의 전구체인 POF(partially oxidized PAN fiber)를 침지한 후 열분해 시켜 카본/카본 복합재료를 성형하기도 하며 최근에는 금속 매트릭스나 세라믹 매트릭스에 CF를 넣어 MMCs(metal matrix composites)나 CMCs(ceramic matrix composites)를 성형하기도 한다.

프리프레그(prepreg)는 대부분 열경화성 수지(35~40%)에 단일 방향으로 정렬시키거나 제직한 CF(60~65%)를 함침시켜 가공한 것을 말한다. 프리프레그는 복합재료 부품을 만들기 위한 중간 재료이며 폭 1미터의 테이프 형태로 지관에 권취되어 거래된다(Figure 5).

CF 복합재료의 수지로 125 °C 경화형 에폭시가 범용적으로 쓰이고 있으며 프리프레그의 용도별로 80 °C, 170 °C, 250 °C 경화형 에폭시 수지가 채용되고 있다. 성형된 복합재료 부품이 만족스러운 기능을 발현하는데 필요한 수지배합 노하우와 공정기술은 프리프레그 제조업체의 핵심기술이다.

프리프레그를 복합재료 부품으로 성형하기 위한 공법으로는 sheet winding, auto clave, vacuum bag, bag mold, mold press, match mold 등의 방법들이 있으며 각 부품의 특성에 따라 성형방법을 선택하여 적용한다.

CF 골프 샤프트는 steel에 비해 40% 정도 가벼워 상대적으로 골프 클럽 헤드의 무게를 증가시킬 수 있다. 또한 샤프트의 굴곡강성을 높이기 위해 샤프트의 길이 방향으로 CF가 배향되도록 프리프레그를

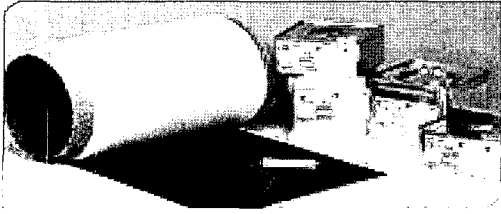


Figure 6. 탄소섬유 시트.

배열하고 샤프트의 비틀림 저항을 높이기 위해 $\pm 45^\circ$ 로 CF가 배향되도록 프리프레그를 배열한다.

토목건축 분야의 콘크리트 구조물에 채용되는 CF 시트는 수지를 소량 사용하여 프리프레그 제조공법으로 만든 후 시공 현장에서 상온 경화형 에폭시 수지에 함침하여 콘크리트 구조물에 접착시킨다 (Figure 6).

2.3. 탄소섬유의 시장 성장

1970년대 도입기에서 CF는 높은 가격으로 인해 항공기의 2차 구조용 재료, 고급 낚시대 및 골프 샤프트와 같은 매우 한정된 품목에서만 적용되었다 (Figure 7). 이후 본격적으로 CF 양산이 시작된 1980년대 중반부터 1990년대 초반까지 CF의 가격 인하

추세로 인해 CF가 다양한 분야에서 본격적으로 적용되는 성장기에 돌입하게 되었다. 항공기의 1차 구조물 소재로 적용되기 시작하였고, 골프 샤프트, 낚시대와 더불어 테니스 라켓 등의 스포츠 레저 용품에까지 폭넓게 용도가 확대되었다 (Figure 7). 심지어 가격이 수 만달러에 달하는 복합재료 자전거에 이르기까지 용도 개발이 추진되었고, 이와 함께 CF 복합재료의 성형공법 개발도 활발하게 진행되었다. 그러나 급속한 CF 가격인하 추세에서 사업을 포기하는 CF기업도 발생하게 되었다.

1990년대 중반부터 2000년대 초반까지는 항공업계 외의 불황에도 불구하고 CF에 대한 다양한 용도개발과 성형공법 개발로 인해 CF는 본격적인 시장 성장기에 돌입하게 되었다. CF 제조사들은 시장 수요에 대응하여 설비 증설을 추진하였고, 그에 따라 규모의 효율성이 확보되어 CF의 지속적인 가격인하가 가능하게 되었으며, 이로 인해 가격적으로 경쟁하기 어려웠던 기존 금속재료와 유리섬유 복합재료 분야까지 다양한 분야에 고기능성 CF의 적용이 확대되기 시작하였다.

용도 다양화의 예로는 천연가스 자동차의 고압

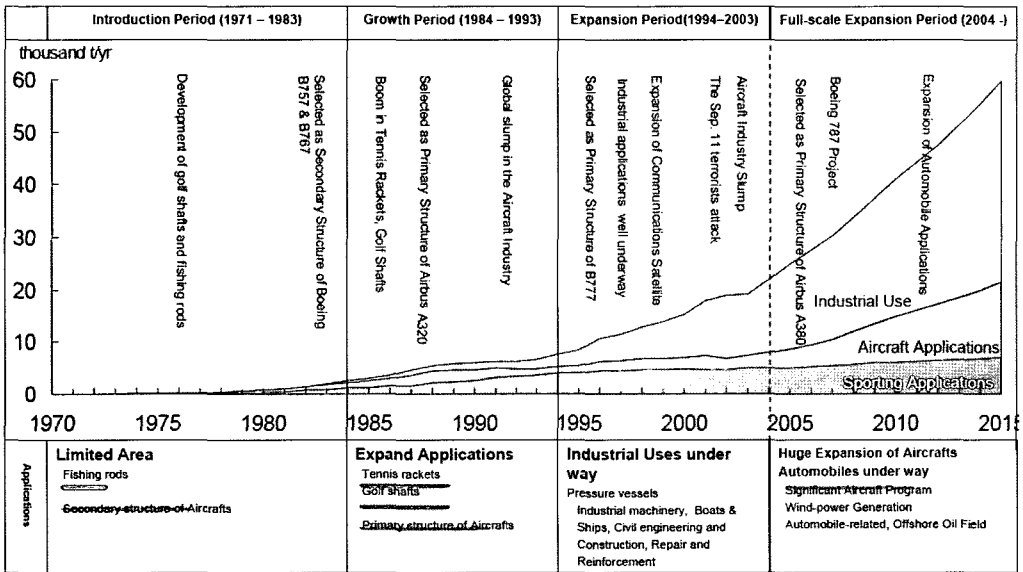


Figure 7. 탄소섬유 시장의 세계 추이.

연료탱크, 중이와 필름 생산설비의 롤(roll), 선박/해양 분야의 대형 구조물 부품, 그리고 토목건축 분야에서는 콘크리트 구조물의 보수보강 재료 등을 들 수 있다. CF 용도확대가 가능하게 된 것은 기존에 사용하고 있던 금속재료와 비교하여 시공비나 운전비용 측면에서 볼 때 CF의 비강도와 비탄성율이 우수하였기 때문이다(Figure 7).

2000년부터는 Boeing 및 Airbus가 항공기 구조물 제작에 적극적으로 CF를 적용하였고 아울러 산업용으로 CF의 수요가 증가하여 CF 공급량이 수요량을 만족시키지 못하게 되었다(Figure 7). 이로 인해 CF의 가격이 상승세로 반전되었고 CF 제조사들은 증설 투자를 집행하고 있지만 수요추세에 비해 미흡하여 CF 공급부족 상황은 수 년간 지속될 것으로 예측된다.

일본 Toray사는 2004년부터 CF 사용량이 크게 증가할 것으로 전망하고 있는데(Figure 7), 이는 항공기 구조물, 대형 풍력발전기의 날개, 자동차 부품 등의 산업용에서 활발하게 수요가 창출될 것으로 기대하고 있기 때문이다. 2005년 PAN계 CF 수요는 27,000톤 정도로 산출되지만 실제의 공급은 약 80% 수준으로 추정되며 전체 공급량 가운데 70~80%를 일본의 3개 회사(도레이, 미쓰비시 레이온, 도호 테낙스)가 생산하고 있다. 일본 3개사가 해외에 수출하는 CF 물량도 2000년부터 다시 증가하는 모습으로 회복하였고, 2002년 이후부터는 10% 이상씩 지속적으로 증가하는 추세에 있다. 일본업체의 수출 물량은 1995년 6,500톤에서 2005년 현

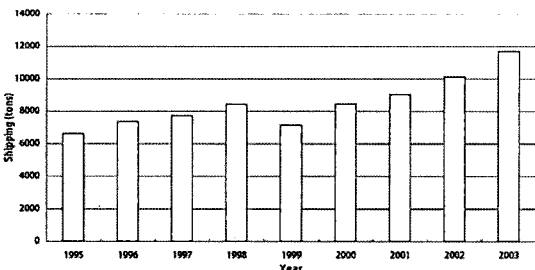


Figure 8. Annual Quantity of Shipping Carbon Fiber from Japan (tons/year).

Table 4. PAN계 CF 생산능력(단위: 톤)

제조사	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년
Toray	7,300	7,300	9,100	10,900	10,900
Mitsubishi Rayon	4,700	4,700	4,700	5,700	7,700
Toho Tenax	5,600	5,600	6,300	6,300	7,800
Hexcel	2,000	2,000	2,000	2,000	2,800
Cytec	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800
Formosa	1,800	1,800	1,800	1,800	2,900
기타	1,900	1,800	1,900	1,900	1,900
합계	25,100	26,900	27,600	31,900	35,800

재 약 13,000톤 정도로 추산된다(Figure 8).

상기 일본 회사들은 일본 내의 공장뿐만 아니라 미국, 프랑스 등 해외 주요 시장에서도 현지 공장을 가동하여 공급하고 있지만, 현재 전세계적으로 CF의 공급량이 부족한 상황으로 각 CF 제조사들은 증설 계획을 잇달아 발표하면서 공급불량 확대에 주력하는 모습을 보이고 있다(Table 4).

3. 세계 현황

3.1. 국외 현황

3.1.1. 스포츠 레저 분야

CF/에폭시 프리프레그는 시트 와인딩(sheet winding) 공법의 낚싯대 및 골프 샤프트 등과 금속 몰드와 압력 튜브를 이용하여 가공한 테니스 라켓이나 자전거 프레임 등에 채용되고 있다.

2000년대 이후 이 분야에서의 CF 수요량은 정체되어 있으며 고부가가치를 제외한 일반제품의 생산기지가 선진국에서 중국으로 급속히 이전되고 있다. 중국은 저가의 유리섬유계 복합재료 제품을 만들면서 취득한 생산기술을 토대로 CF 프리프레그를 적용하여 제품을 생산하고 있다.

CF 낚시대는 굴곡강성과 강도를 높이면서도 가벼운 특성을 이용하여 다양한 제품들이 개발되고 있으며 동일한 프리프레그를 사용하여도 제품의 설계를 어떻게 하는가에 따라 낚싯대의 물성이 크게 다르게 나타난다. 또한 인장탄성률이 높은 CF 프리프레그를 사용하여 낚싯대를 생산하는 기술은 제품

의 설계뿐만 아니라 세밀한 공정관리를 필요로 하기 때문에 일본 등의 선진국은 기술 유출을 피하기 위해 주로 자국내 공장에서 생산하고 있다.

CF 골프 샤프트는 일반적으로 80 g 대가 많으나 최근에는 더욱 가벼운 50 g 미만의 제품들이 생산되고 있다. 2004년 일본에서는 드라이버의 99%, 아이언의 59%가 CF 샤프트로 판매되었으며 전세계 샤프트 판매량 56백만개 중에서 38백만개가 CF 샤프트이었다.

2002년 미국에서 스포츠 레저 분야의 CF 소비량은 1,678톤이었으며 CF 연평균 증가율은 1997~2002년에 -6.1%이고 2002~2007년에 3.1%로 예측하고 있다. 서유럽은 2002년 동 분야의 CF 소비량이 690톤에 연평균 수요증가율은 1997~2002년 8.9%이고 2002~2007년 3.0%로 예상된다. 일본은 2002년 CF 소비량이 504톤이었으며 1997~2002년간 연평균 수요증가율은 -15.1%이고 2002~2007년간 증가율은 -2.2%로 예측된다(Table 5).

3.1.2. 산업용 분야

CNG(compressed natural gas)를 비롯한 가스물질을 저장하기 위한 압력용기에 필라멘트 와인딩 공법으로 만든 CF 복합재료가 사용되고 있다(Figure 9). 버스, 항공기, 선박 및 충전 시설 등의 CNG 탱크는 알루미늄 라이너에 CF를 감아 만든 것으로 일

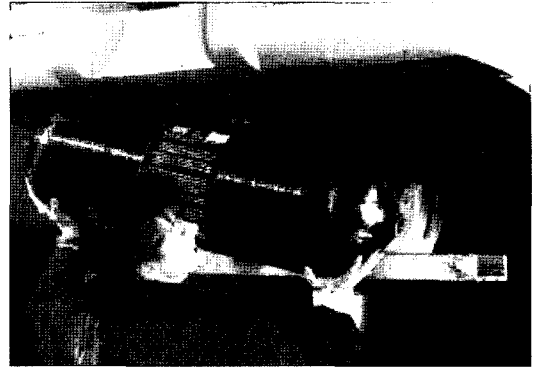


Figure 9. 탄소섬유 CNG Tank.

반 금속 압력용기에 비해 가벼우면서도 고압에서 가스를 충전할 수 있는 장점이 있다. CF 복합재료는 소방수의 고압 산소탱크에도 적용되고 있으며 향후 수소 연료전지의 용기로도 적용될 가능성이 매우 높다.

또한 풍력자원을 에너지화하는 풍력발전기의 대형 날개 제조에 CF가 적용되고 있는데 프리프레그를 적용한 중소형과 함께 RIM(resin infusion molding)공법을 적용한 대형 날개가 있다. 에너지 생산의 효율을 높이기 위해 풍력발전기 날개가 대형화 되는 추세로 최근 덴마크의 LM사는 5 MW급 풍력발전기에 길이 61.5 m 무게 17.7톤의 대형 날개를 개발하여 적용하였다(Figure 10).

토목건축 분야에서는 일본의 코베 대지진 이후부

Table 5. 주요 지역의 CF 용도별 소비 추이(단위: 톤)

구 분		1993	1997	2002	2007	연평균 성장률 (%)	
						1992-2002	2002-2007
미국	산업	458	1,126	1,724	3,175	8.9	13.0
	스포츠/레저	1,309	2,304	1,678	1,950	-6.1	3.1
	항공/우주	1,879	2,831	2,268	2,826	-4.3	4.5
소 계		3,646	6,261	5,670	7,951	-2.0	7.0
유럽	산업	250	950	2,800	5,630	24.1	15.0
	스포츠/레저	320	450	690	800	8.9	3.0
	항공/우주	650	860	1,710	2,230	14.7	5.5
소 계		1,220	2,260	5,200	8,660	18.1	10.7
일본	산업	850	1,330	2,264	2,900	11.2	5.1
	스포츠/레저	1,071	1,145	504	450	-15.1	-2.2
	항공/우주	53	107	94	150	-2.6	9.8
소 계		1,974	2,582	2,862	3,500	2.1	4.1

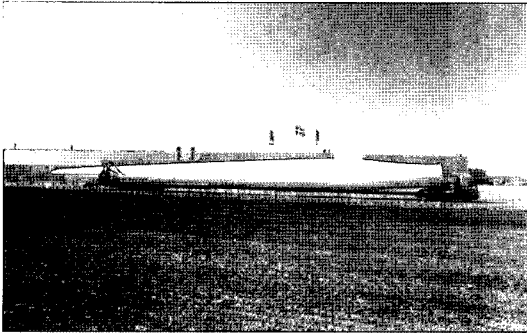


Figure 10. 5 Mw급 풍력발전기의 대형 날개(61.5 m).

터 콘크리트 구조물의 보수보강에 CF가 본격적으로 적용되기 시작하였다. 내진도와 내하중을 높이기 위해 교량의 교각과 상판, 건축물의 슬라브와 보 등에 CF 시트와 CF strip을 시공하여 콘크리트 구조물을 보강하고 있다(Figure 11). CF 보강공법은 기존의 steel jacket공법에 비해 시공이 간편하고 공기가 단축되며 시공 후에 구조물의 무게 증가가 거의 없는 장점이 부각되어 최근 광범위하게 적용되고 있다.

미국은 9.11사태 이후 도로, 항만, 교량 등 사회간접자본을 점검한 결과 노후화에 따른 보수/교체에 대한 필요성이 지적되었다. 미국의 교량 가운데 40%에 달하는 약 125,000개의 교량을 보수보강하기 위한 연방예산이 수립되었고 이에 따라 CF 복합재료의 수요가 증가하고 있다.

제조업 분야에 있어서는 필름 제조사와 제지업체에서 사용하는 무거운 금속 롤러(roller)를 대신하여 CF 프리프레그를 사용한 경량의 롤러가 적용되어 생산성 향상과 취급성 및 안정성 개선 효과를 보고 있다. 또한 LCD 제조현장에서 고탄성 CF 프리프레그를 사용한 복합재료 부품이 적용되고 있다. 고탄성 CF 프리프레그는 LCD기판의 정밀이송 robot arm에 요구되는 높은 굴곡강성과 진동 문제를 해결하였으며, 아울러 경량 고강성 대형 롤러를 제공하여 대형 LCD의 생산성을 향상시켰다.

미국의 산업용 CF 수요 가운데 37%는 chopped 또는 milled CF로 EMI 나 RFI(resonance frequency

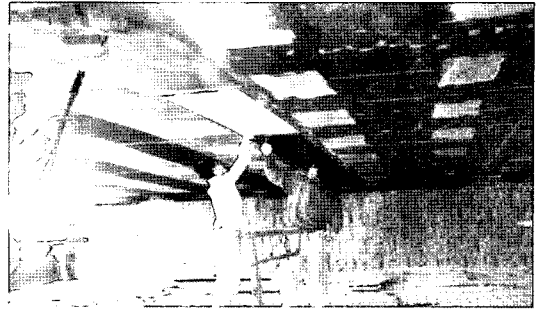


Figure 11. 탄소섬유 시트를 이용한 교량 상판 보강.

interference) 차폐 및 정전기방지 기능을 활용한 전자제품의 외장재 및 운반기구 등에 chopped CF가 쓰이고 있다.

미국에서 2002년 약 1,724톤의 CF가 산업용 분야에 사용되었으며 CF의 연평균 증가율은 1997~2002년 8.9%이고 2002~2007년 13.0%로 예측하고 있다. 서유럽은 2002년 산업용 분야의 CF 소비량은 2,800톤에 달했으며 연평균 수요증가율은 1997~2002년 24.1%이고 2002~2007년 15.0%로 예상된다. 일본은 2002년 CF 소비량이 2,264톤이었으며 1997~2002년간 연평균 수요증가율은 11.2%이고 2002~2007년간 증가율은 5.1%로 예측된다(Table 5).

3.1.3. 항공우주 및 군수 분야

세계 최대 항공기 제조사인 미국의 Boeing사와 유럽의 Airbus사는 CF 복합재료 채용을 대폭 확대하고 있다.

2006년 취항할 예정인 Airbus A380기종에 동체, 주 날개, 꼬리 날개 등의 구조물 부품으로 CF 복합재료가 채용되었다(Figure 12). CF는 Toray계열인 프랑스 SOFICAR사의 T380S, Mitsubishi Rayon사의 Pyrofil MR50, Toho Tenax사의 Bestfight IM600이 채택되었다. Airbus사는 주로 알루미늄 부품재료를 CF 복합재료로 대체하였는데, A380 기종의 총 중량 약 277톤 가운데 14.4%인 40톤을 CF로 적용하여 대형 여객기를 경량화 시켰다. 이렇게 경량

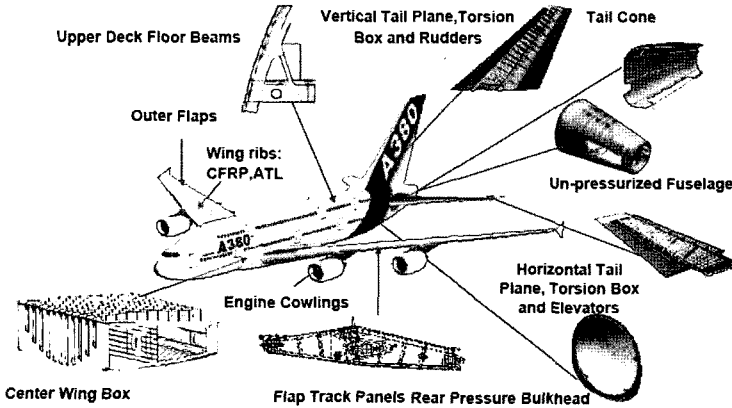


Figure 12. A380 기종의 복합재료 적용 부위.

화된 비행기는 비거리가 향상되어 보다 경제적인 운항이 가능하게 된다.

Boeing사의 항공기 기종에 따른 해당 CF 복합재료 추정 사용량을 Table 6에 요약하였다. 초기 기종들에 비해 최신 기종인 B777에서 CF 복합재료의 사용량이 비약적으로 높아졌으며, 이러한 경향은 개발과정에 있는 초대형 여객기 B7E7 기종에서 더욱 두드러질 전망이다.

일반적으로 신규 항공기의 양산이 확정되면 연간 100대 정도 제작하게 되므로 여기에 소요되는 CF도 막대한 양이 된다. 따라서 항공기 제조사는 안정적인 CF 복합재료를 확보하기 위해 CF 제조사와 장기 공급계약을 체결한다. 2004년 Boeing사와 Toray사는 B7E7 생산을 위해 17년간 29억불의 CF 공급계약을 맺은 바 있으며, 이에 대응하여 Airbus사는 미쓰비시 레이온사를 A380 프로그램의 CF 복합재료 공급업체의 하나로 발표할 정도로 원료확보에 주안을 두고 있는 실정이다. Table 5에 미국, 서유럽, 일본의 항공우주분야의 CF 사용량과 평균군 증가율을 나타내었다.

Table 6. Boeing사 항공기의 CF 복합재료 추정 사용량

기종	CF복합재료 중량(kg/대)
B717	450
B737, B747	570
B757, B767	1,130
B777	8,380

미국의 항공우주산업 분야에 있어서 사용된 CF 복합재료는 군용기와 대형여객기 용도에 2/3 정도가 적용되었을 것으로 보여지며 나머지는 근거리 소형여객기, 헬리콥터, 항공기 엔진 부품 및 디스크 브레이크 장치, 부품 제작용 치구, 미사일, 위성, 우주선 부품에 적용되었다. 군용 항공기를 중심으로 미국의 주요 군수산업에 적용된 CF 현황을 살펴보면 다음과 같다.

군용 항공기: 최신 군용기의 구성 재료로 CF, 아라미드, 유리섬유 및 그들의 혼섬 강화 복합재료들은 항공기 구조물 총 중량의 25% 전체 면적의 50% 정도를 차지한다. 복합재료로 만들어진 항공기는 금속재료에 비해 더욱 가볍고 빠르게 기동성이 우수하고 레이더 회피기능이 우수하기 때문에 동체와 날개 등과 같이 하중을 지지하는 구조물과 외장부품 등에 복합재료의 사용이 확대되었다. 아울러 복합재료를 채용함으로써 유지관리가 간편하고 손상이 작으며 항속거리가 길어지는 장점이 있다.

1980년대 F-14, F-15, F-16 Falcon, F-18 Hornet, 그리고 F-117A 스텔스 등의 신규 항공기와 기존 항공기의 개량/개조에 CF 복합재료가 본격적으로 적용되기 시작하였다. 해군의 AV-8B 해리어 스텔스 전투기는 날개 전체가 복합재료로 제작된 최초의 군용기이며 외장 부품과 1차 구조물을 포함하여 전체 구조물 무게의 26%인 1,450~1,500 lb의 복합재료가 사용되어 500 lb를 경량화 시켰다.

첨단 복합재료가 최신에 전투기에 성공적으로 적용되었으나 1990년대 초반까지 냉전 종식과 더불어 군비축소로 인하여 신규 군용기 수요가 현격히 감소한 가운데 A-6 해군 전투기 등의 개량사업은 계속되면서 신규 날개에 복합재료가 계속 적용되었다. 복합재료를 광범위하게 적용한 B-2 폭격기는 초기 B-1B 폭격기보다 레이더 탐지 강도가 1/10 정

Table 7. 탄소섬유를 사용한 미국 군용기의 최근 프로그램

기종	기간(년)	매출 예상 수량(대)	CF 복합재료 사용량(kg/대)
C-17A Transport	1994-2006	124	453
V-22 Osprey Tilt Rotor	1997-2014	458	6,163
F/A-18 E/F Hornet	1996-2006	248	362
F-22 Raptor ATF	2000-2013	295-339	5,746
F-35 Joint Strike Fighter	2005-2020	2,850-4,850	3,171
Unmanned Combat Air Vehicle	2008-2028	1,800-2,200	?

도로 작아져 스텔스 기능이 대폭 강화되었다. 제조 비용이 대당 3억불이 넘는 C-17 수송기는 C-17A 프로그램으로 대체하여 평균 2억불 미만으로 제조비용을 경감하였는데 날개, 동체, 출입구 등에 총 중량의 6%인 1000 lb 정도의 복합재료를 적용하였다.

최근의 군용기 프로그램을 살펴보면(Table 7) V-22 Osprey Tilt- Rotor 항공기는 CF/에폭시 복합재료가 총 중량의 41%를 차지하도록 제작되었다. F/A-18E/F Hornet에는 대당 약 800 파운드의 CF 복합재료가 사용되었는데 날개 외장부품과 구조물, 꼬리 날개 부품 등에 적용되었다. F-22 Raptor는 복합재료가 총 중량의 40%에 달하는데 CF 복합재료가 주 구조물, 날개 외장부품, 칸막이 부품과 덕트, 그리고 동체 외장부품에 사용되었다. F-35 Joint Strike Fighter에는 1차 구조물의 41%를 차지하는 약 7,000 lb의 CF 복합재료가 적용되었는데 날개 외장부품, spar, rib, frame, inlet ducts, landing gear door, weapons bay doors 등에 사용되었다.

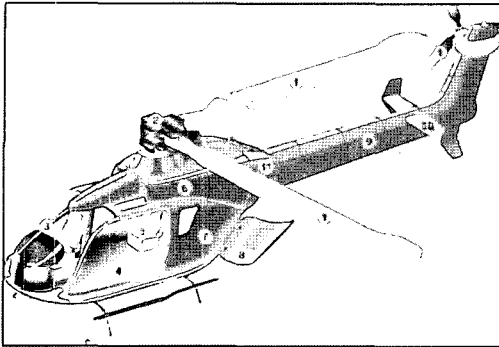
헬리콥터: 고기능 복합재료의 도입으로 헬리콥터 설계와 제조기술은 지난 10년간 비약적으로 발전하였다. 높은 내응력성이 요구되는 로터뿐만 아니라 기체 구조물, 하중 지지 구조물, 동력 시스템 등에 CF 또는 CF/유리섬유 복합재료가 적용되고 있다(Figure 13). 복합재료 구조물은 무게 감축, 연비 향상, 소음 저감, 신뢰도 향상, 내부식성, 유지관리 용이성 및 금속재료로는 쉽지 않은 공기역학적으로 최적화된 형상의 구조물 등을 구현할 수 있어서 헬리콥터의 속력, 기동성, 탑재량, 내피로성 등이 개선되었다. 또한 복합재료의 높은 레이더 회피 기능은 전투 상황에서 생존율을 높이는 장점이 있다.

개량 또는 재 제작 프로그램이 진행 중인 블랙호크와 아파치 헬리콥터는 복합재료를 채용하여 양력 용량 증대 및 성능 향상과 아울러 구조물 보강을 실현하여 수명을 25년에서 30년으로 연장시켰다. AH-66 코만치는 2006년에 양산될 계획인데 1차 구조물 중량의 75%를 CF로 사용하여 경량화를 실현하였다. 대형 헬리콥터인 CH-47 Chinook와 CH-53E Super Stallion은 기체의 대부분과 로터 시스템에 복합재료를 사용하고 있다.

미사일과 우주선: 최근 10년간 미사일에 CF 복합재료 사용량이 현격히 증가하였다. 로켓 모터 케이스는 내압성이 크게 요구되어 고강도CF/에폭시 복합재료가 사용되어 왔다. 또한 CF 또는 유리섬유 강화 복합재료는 로켓의 nose, body section, fin, wing에 채용되었고 소형 미사일의 외부 피복재료로 복합재료를 적용하여 레이더 회피 기능과 항속거리를 향상시켰다. 복합재료의 경량화 효과를 이용할 수 있는 것으로서 대전차 포탄을 생각할 수 있는데 경량화로 인한 유효 사거리 및 포탄 속도의 증가에 따라 관통 파괴력이 증대하는 효과를 얻을 수 있다.

우주선 추진체는 1파운드를 탑재하기 위해 20파운드 이상의 연료가 필요하기 때문에 경량화가 필수적이다. NASA의 스페이스 셔틀에 약 30,000 lb의 CF 복합재료가 사용되었는데 가장 큰 용도는 두 개의 화물 칸 문으로 각각 3,200 lb에 달하며 알루미늄에 비해 900 lb를 경량화 하였다. 이외에 날개의 하중 지지 부품과 출입구에도 CF 복합재료가 적용되었다.

인공위성에는 안테나 지지대, 반사경과 반사경 부품, 태양 전지판 및 기타 구조물에 CF/에폭시 복합



- 1 Rotor Blades: Prepregs/carbon/glass honeycombs Machined Nomex?cores Redux adhesives
- 2 Rotor Hub: Carbon epoxy Prepregs
- 3 Glazing Bars: Epoxy carbon/glass Prepregs
- 4 Flooring: Fibrelam panels
- 5 Seats and Interior Fittings: Glass Prepregs/fabricated panel material
- 6 Engine/body Fairings and Access Panels: Epoxy/EMI glass/carbon/aramid Prepregs
- 7 Fuselage: Carbon and glass Prepregs Honeycomb
- 8 Main and Cargo Doors: Epoxy carbon/glass Prepreg, honeycomb and Redux adhesive
- 9 Boom and Tail Section: Epoxy carbon/glass Prepreg, honeycomb and Redux adhesive
- 10 Horizontal Stabilisers: Epoxy glass/carbon/aramid Prepregs
- 11 Fuselage Panels: Epoxy carbon/glass Prepreg, Nomex?honeycomb and Redux adhesives

Figure 13. 헬리콥터에 적용되는 복합재료.

Table 8. 국내 prepreg용 CF 수요(단위: 톤)

분 야	2002	2005	2008
산업용	30	250	400
스포츠 레저	500	450	380
토목건축	60	70	80
기타	10	30	60
합 계	600	800	920

재료가 사용된다. CF 복합재료는 알루미늄에 비해 30~35% 정도의 무게를 줄일 수 있고 극심한 온도 변화 조건에서도 치수 안정성이 우수한 장점이 있다. 인공위성에서의 CF 수요는 매년 10~15%의 성장이 기대되어 2002년 20,000~30,000 lb에서 2007년 40,000~50,000 lb의 수요가 예상된다.

3.2. 국내 현황

프리프레그의 국내 수요는 산업용 분야를 중심으로 지속적인 증가가 예상되고 있지만 세계적인 CF 수급 불안 상황으로 관련 업체들은 CF 조달에 큰 어려움을 겪고 있다(Table 8). CF 제조사들은 항공용과 산업용 신규수요 등 판매단가가 높은 분야에 CF 물량을 먼저 배정하고 가격에 민감한 스포츠 레저 분야에는 공급을 제한하고 있다.

3.2.1. 스포츠 레저 용도

과거 국내에서 프리프레그의 가장 큰 시장이었던 스포츠 레저 분야는 1997년 이후 계속 축소 되는 추세이다. CF 낚시대와 골프 샤프트 등 스포츠 레

저 품목들이 중국에서 생산되기 시작하면서 국내 업체는 점차 가격 경쟁력을 상실하게 되었고 이후 다수의 국내업체는 중국으로 생산공장을 이전하여 스포츠 레저 분야의 국내 생산 규모는 지금은 전성기의 25% 수준으로 축소되었다. 현재 화살대 및 양궁(Figure 14)과 모터사이클 헬멧 등과 같이 독자적인 품질과 브랜드를 구축한 소수 업체만이 남아 있는 실정이다.

스포츠 레저 부분의 어려운 환경에 비하여 2005년 CF 수요량이 크게 줄지 않은 것은 생산기지를 중국으로 이전한 국내업체에 프리프레그가 공급되었기 때문이며 장기적으로는 점차 이 분야의 프리프레그 판매량이 감소될 것으로 필자들은 전망하고 있다.

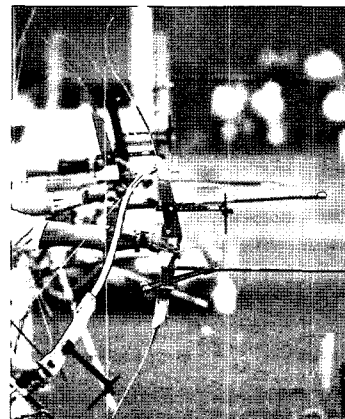


Figure 14. CF 프리프레그 양궁 활과 화살.

3.2.2. 산업용 분야

국내 에너지 관련 분야에 있어서 앞서 기술한 천연가스 원료 자동차의 압력용기 개발이 국내에서 진행되어 천연가스 버스가 운행되고 있다. 그러나 여기에 장착된 압력용기는 스틸 라이너에 유리섬유를 와인딩한 제품이어서 경량화 목표에는 만족스럽지 못한 실정이다. 그러나 CF 복합재료를 이용하여 수소 연료전지 자동차 분야의 수소 저장용기와 소방수용 산소 압력용기 개발이 활발하게 진행되고 있어서 향후에는 선진국과 같은 복합재료 압력용기가 개발될 전망이다.

정부는 대체 에너지 보급계획을 수립하여 2011년에 전체 에너지소비의 5%를 대체에너지로 보급할 계획인데 이 수준은 OECD 평균치와 비슷하다. 대체에너지 가운데 풍력 에너지가 약 10%를 차지하고 있다(Table 9). 국내 풍력발전 산업에 대한 개발계획을 보면 풍력발전의 대형화를 통해 발전단가를 낮추는 것으로 되어 있어 CF 복합재료의 수요가 기대된다. 이미 국내 풍력자원 지도가 완성되어 어느 지역이 풍력발전에 적합한지 밝혀졌으며 발전설비의 국산화 개발을 추진 중에 있다. 2005년까지 750 kW급의 풍력발전기 시스템을 국산화 하는 연구가 진행되었으며 2006년부터는 1,500 kW급 대형 풍력발전기 개발 및 상용화를 목적으로 2단계가 진행 중이며 3단계로 해양풍력단지 보급을 활성화하는 로드맵이 설정되어 있다. Figure 15는 750 kW급 국

산 날개를 대관령 단지에 설치하는 장면인데 길이가 30미터의 유리섬유 복합재료를 사용한 날개이지만 1,500 kW급 이상의 대형 날개를 제작하기 위해서는 해외에서와 같이 CF 복합재료가 소요될 것으로 기대하고 있다. 국내 풍력발전 단지의 조성은 지방자치단체를 중심으로 실행계획이 수립되어 있는데 이미 제주도에서는 풍력발전에 대한 상업화 가능성이 확인되어 보급을 넓히는 중이며 강원도와 경상도 지역에서도 이미 풍력발전기가 설치되어 운영 중에 있다. 이와 같이 각 지방자치단체에서 많은 풍력발전 단지를 계획하고 있고 규모도 커서 향후 풍력발전 산업에서 프리프레그 수요가 확대될 것으로 예상된다.

토목건축 분야에 있어서는 1996년 콘크리트 구조물 신규 보강공법으로 CF 복합재료가 처음 적용된 이래로 전술한 복합재료의 여러 가지 장점으로 인해 CF 복합재료 보강공법은 steel jacket 보강공법을 대체하는 공법으로 정착되었다. 일본에서 복합재료와 공법이 도입되어 활발하게 콘크리트 구조물 보강공법이 시행되었고 이어서 복합재료를 국산화하여 시공경비도 상당히 절감 하였다. 그러나 기대와는 달리 시장이 성장하지 못하고 정체되어 있다.

이러한 실정에서 시공방법이 더욱 간편한 CF strip이 2004년 SK케미칼(주)에서 개발되어 국내외에 판매되고 있다(Figure 16). 기존 CF strip은 폴리에

Table 9. 대체 에너지 보급 계획(단위: 천toe*)

보급 목표	2006년(3%)	2011년(5%)
폐기물	5,050	7,540
소수력	111	446
풍력	126	1,311
바이오	495	1,050
태양광	21.9	341
태양열	101.5	318
연료전지	0.4	147
지열	12.8	968
수력	1,082	1,213
합 계	7,001	13,335

*toe: ton of oil equivalent, 1 toe=107 kcal



Figure 15. 대관령에 설치된 750 Kw급 풍력발전기.



Figure 16. CF strip 및 이를 이용한 시공 모습.

스터 수지를 사용하여 CF와 수지 사이의 계면접착력이 낮아 인장강도가 미흡하였으나 SK케미칼(주)에서 신규 개발한 CF strip은 에폭시 레진을 적용하여 인장강도를 개선하였다.

2004년부터 LCD제조장비 부품에 CF 복합재료가 본격적으로 적용되었다. MG(mother glass)를 자동 이송하는 로봇 핸드 부품은 알루미늄 소재이었으나 대형 MG의 등장에 따라 Pitch계 CF 복합재료로 변경되었다. 로봇 핸드 부품은 CF 복합재료를 채용함에 따라 MG 이송 시에 휨이 최소화 되었고 복합재료의 진동 감쇄효과에 따라 정확한 이송이 가능하게 되었으며 경량화에 따라 로봇 본체에 미치는 관성력도 감소되었다(Figure 17). 5세대 이후의 LCD는 MG가 1100×1250 mm이상으로 커져 몇몇 공정의 제조장비에 부착된 금속 롤은 자중에 의한 휨이 문제가 되어 CF 복합재료로 교체되었다.

3.2.3. 항공산업 분야

Airbus A350과 Boeing B7E7 여객기의 구조물 부품을 제작하는 사업과 국산 헬기를 개발하기 위한 KHP사업이 CF 복합재료가 적용되는 대표적 사업이다. A350사업은 총 10억 달러 규모로 주익과 동체 구조물을 제작하여 Airbus사에 납품하는 것으로

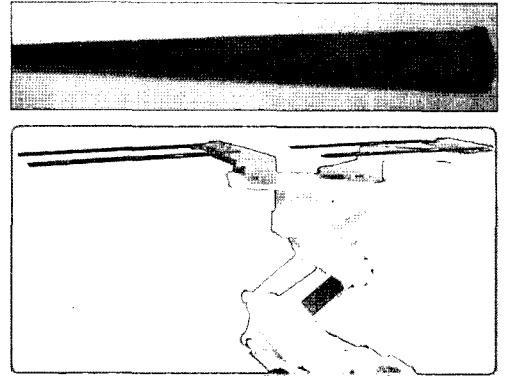


Figure 17. 로봇 핸드 부품 및 mother glass 이송 로봇. 현재 MOU 단계에 있다. KAI는 A350사업과 함께 Airbus사에 8천만 달러 규모의 A321 동체구조물 공급을 추진하고 있다.

한국형 헬리콥터 개발사업인 KHP사업은 현재 운용 중인 UH-1, 500MD 등 노후화된 헬기를 2011년부터 국산헬기로 대체하기 위한 사업이다. KHP사업은 개발과 생산을 포함하여 총 5조원 가량의 사업비가 소요될 것으로 예상되며, 2005년 12월부터 시작하여 2008년 즈음 시제기를 제작하고 2011년 9월부터 시험평가와 비행을 진행한 뒤 2012년부터 양산에 들어갈 예정인데 총 245대(육군 231, 해군 12, 공군 12)의 기동형 헬기가 양산될 예정이다.

국산 프리프레그가 항공용 시장에 진입 하기에는 많은 어려움이 있는 실정이다. 그 중에서도 항공사의 엄격한 품질인증을 통과하기 위한 설비 투자비와 생산시스템 구축비용이 적지 않으며 품질인증을 받더라도 제품 판매를 보장 받을 수 없기 때문이다. 따라서 대부분의 항공용 복합재료는 수입하여 사용하는 실정이다.

4. 맺음말

전세계적으로 CF 복합재료의 수요가 지속적으로 증가할 것으로 예측되고 있는데 반해 CF의 공급은 당분간 부족할 것으로 예상된다. 일본 기업들을 중심으로 CF 증설이 완료되어도 수급 균형을 갖추기

는 어려울 것으로 보인다. 한편 CF 제조사는 그동안 영업손실을 감수하고 장기간 지속적으로 다양한 용도개발 노력을 통해 얻어낸 결실을 지속적으로 유지하고자 시장을 통제하려는 의도를 감추지 않고 있어 국내 CF 수요업체들은 어려움이 가중되고 있다.

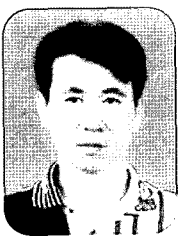
1990년 한국제철화학, 2001년 태광산업이 CF 생산을 포기한 이래로 2002년 CF 수입량은 약 850톤 규모이고 2005년은 약 1,200톤 정도로 추산하고 있다.

CF 복합재료는 우수한 물성으로 다양한 용도에 적용되고 있고 수요량이 확대되는 추세에 있는데 반해 원료인 CF를 국내에서 생산/공급하지 못하여 안타까운 실정이다. 대략 연산 2,000톤 규모로 양산하기 위한 제조설비 투자비가 약 2,000억원이고 CF 제조기술 기반이 유실되어 국내기업이 투자결정을 하기는 쉽지 않은 실정이다. CF 원료를 확보하지 않고는 산업용 및 군수용 복합재료 산업의 발전은 기대하기 어려우므로 관련 각계의 관심이 요구된다.

참고문헌

1. Robert M. Jones, Mechanics of Composite Materials, 1975.
2. George Lubin, Handbook of Composites, 1982.
3. ASM International, Engineered Materials Handbook of Composites, 1987.
4. Nicholas P. Cheremisinoff, Composites and Specialty Applications, 1989.
5. Stuart M. Lee, Reference Book for Composites Technology (2), 1989.
6. F. C. Campbell, Manufacturing Process for Advanced Composites, 2004.
7. Fred Hajduk, Thomas Kälin, Kazuteru Yokose, CEH Marketing Research Report: Carbon Fibers, 2004.
8. 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱 공저, 최신 복합재료, 1995.
9. 이대길, 정광섭, 최진호 공저, 복합재료 역학 및 제조기술, 1998.
10. 炭素材料學會, 炭素纖維の展開と平價 方法, 1988.
11. (財)鐵道總合技術研究所, 炭素纖維シートによる地下鐵RC柱の耐震 補強, 1997.
12. 平松 徹, PAN계 炭素纖維[TORACA], 化纖月報, 2000.5.
13. Toray, Toray Carbon Fiber Composite Materials Business, 2005.

저자 프로필



정 훈 희

1989. 인하대학교 항공우주공학과 졸업
1991. KAIST 항공우주공학과(석사)
1991-현재. SK케미칼(주) 연구소
수석연구원



김 익 수

1985. 서울대학교 섬유공학과 졸업
1987. 서울대학교 섬유공학과(석사)
1997. 오사카부립대학 응용화학과(박사)
1987-현재. SK케미칼(주) 연구소
수석연구원
(440-300)경기 수원시 장안구 정자1동 600
전화: 031-240-8410
e-mail: iskim@skchemicals.com