

## 항공기용 복합재료의 이해와 응용



최 홍 섭\*

### 1. 서 론

화학적으로 상이하게 구분되는 계면을 갖는 2개 이상의 별개 재료로 (주로 하중을 주로 지지 전달하는 섬유상과 섬유를 보호하고 지지하는 기지상으로) 구성되어 있고 각 재료의 구조적 물성 값보다 우수한 물성값을 나타내며 인공적으로 제조된 재료로 정의될 수 있는 복합재료는 미래의 신소재로서 항공, 우주, 선박, 철도, 자동차 전자, 건설 및 스포츠 등의 여러 응용분야에서 사용이 점차 확대되고 있다. 그림 1에서 보듯이 현재 복합재료의 대부분은 수송, 건설, 선박용으로 사용되고 있고 항공기용으로는 1% 미만의 미미한 시장점유율을 갖고 있는데 전자의 경우에 사용되는 복합재료들은 값이 매우 저렴한 저급품이고 후자의 경우에는 고가 이나 높은 비강도 및 비강성값을 갖는 고성능 구조용 복합재료를 의미하므로 본 고에서는 고성능 첨단 항공기용 복합재료를 중심으로 복합재료의 종류 및 기본 특성, 국내외 복합재료 사용 현황 및 향후 전망을 간략히 살펴보고 복합재료에

관련된 연구 수행에 도움이 되는 참고문서자료 및 관련시험 목록 등과 같은 기본자료를 제공하는 자리를 마련하고자 한다. 본고가 실리는 학술지의 특성상 복합재료의 수치해석 기법에 대해서 논의되어야 할 필요가 있으나 유한요소기법 이나 경계요소법등의 특정 수치해석 기법을 논의하기에 앞서 복합재료를 이용한 항공기용 구조물의 제작에

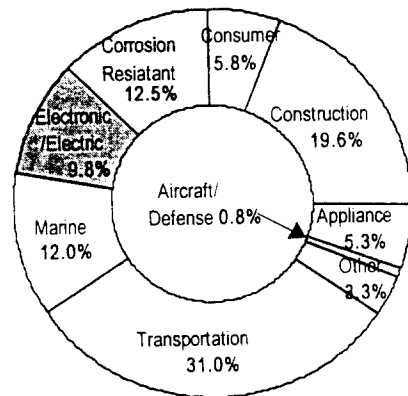


그림 1 1995 US Composite-Market Share

\* 정희원 · (주)대한항공, 한국항공기술연구원, 복합재료그룹

필요한 전반적이고 포괄적인 이해가 선행되어야 하기 때문에 본 고에서는 항공기용 복합재료의 이용과 전망에 대해 포괄적으로 서술하고자 한다.

2. 항공기용 복합재료의 종류

항공기용 복합재료 구조물은 크게 상하 혹은 좌우 외피(skin or facing), 외피 사이의 공간을 채워주는 코아(core), 외피와 코아를 접속하는 접착제(adhesive)로 구성되어 있다. 우리가 광범위하게 복합재료라고 사용하는 용어는 주로 구조물의 외피를 지칭한다. 외피는 섬유와 고분자 수지로 이루어져 있으며 샌드위치 구조물에서 굽힘하중을 지탱할 수 있어야 한다. 반면에 코아는 전단하중을 지탱하고 또한 외피에 전달할 수 있어야 하며 buckling 과 crushing 에 대한 저항을 갖고 있어야 한다.

항공기용으로 사용되는 섬유는 탄소, 유리, 아라미드(Aramid), 보론(Boron) 등이며 이들 섬유는 단방향 이나 직조형태로 구성된다. 탄소섬유는 수지와의 결합력이 우수하고 단위 무게가 갖는 강도 및 탄성계수, 즉 비강도 및 비탄성계수가 크고 인장, 압축 및 전단강도가 우수하므로 고하중을

지탱하는 구조물에 널리 사용되고 있으나 유리섬유나 아라미드 섬유보다 충격저항이 약간 작고 고가인 단점이 있다. 아라미드 섬유는 비강도가 크고 충격 및 abrasion저항이 우수한 반면 절단 부위가 깨끗하지 않고 비탄성계수, 전단 및 압축강도가 아주 작으며 수분흡수 및 열과 같은 환경조건에 취약한 단점을 갖고있어 구조용으로는 제한적

표 2 각종 복합재료의 물성 비교

Composite Properties	Desirable	Gl	Ke	C	Br	Desirable Resin Modulus
	Fiber Volume					
Tension	M-H	2	2	1	2	M
Compression	LM-M	2	3	1	1	HP
Shear	M	2	3	1	1	H
Modulus	HP	3	2	1	1	No matter
Elongation (Strain to Failure)	M	1	2	3	4	L
Fracture Toughness	M	1	1	2	2	L
Bearing	M-H	2	3	1	1	M-H
Flexure	M-H	2	3	1	2	M
Impact	M-H	1	1	2	2	L-M
Fatigue	M	3	2	1	2	M
Creep	H	3	2	1	1	H
Pressure Vessel Strength	H	3	2	1	3	L-M
Moisture Resistance	M-H	1	2	1	1	M-H
High Temp. Resistance	M-H	1	2	1	1	H
Cryogenic Temp. Resistance	M-H	1	1	2	1	M
Thermal Dimensional Stability	M-H	3	2	1	3	M-H
Thermal Conductivity	M-H	2	3	1	4	H
Bonding	M-H	1	2	1	1	M-H
Vibration Damping	M-H	2	1	3	3	M
Wear Resistance	M-H	3	1	2	2	M-H
Electrical Conduction, EMI (Lightening, ESD Protection)	M-H	2	2	1	1	M
Processing	M-H	1	2	1	3	M
Density	L-M	3	1	2	3	M
Machining	M-H	1	2	1	2	M
Source Availability		2	2	1	2	
Cost		1	2	3	4	

Low Medium High Highest  
 Fiber Volume (%) 15 ~ 35 35 ~ 50 50 ~ 65 65 ~ 80  
 Matrix Modulus(Ksi) 150 ~ 350 350 ~ 500 500 ~ 650 650 ~ 900  
 HP : Highest Possible. Gl : Glass, Ke : Kevlar, C : Carbon, Br : Boron

표 1 복합재료의 구성 재료에 따른 부분

Type	Fiber	Matrix
Polymer-Matrix Composites	E-Glass, S-Glass	Thermoset:
	Graphite	Epoxy,
	Aramid (Kevlar)	-Polyimide,
	Boron	-Polyester, Thermoplastics: -PEEK, -Poly-Sulfone,.
Metal-Matrix Composites	Boron, Borsic	Aluminum
	Graphite	Magnesium
	Silicon Carbide	Titanium
	Alumina	
Ceramic-Matrix Composites	Silicon Carbide	Silicon Carbide
	Alumina	Alumina
	Silicon Nitride	Glass-Ceramic
Carbon-Matrix Composites	Carbon	Carbon

표 3 복합재료와 기존 금속재료와의 특성비교  
(+ : 장점, - 단점)

Aspects	Composite	Conventional
	(+) High strength & stiffness fibers (+) High fracture toughness due to fiber surface energy & matrix ductility (+) Interfacial load transfer (-) High scatter in fiber strengths (-) Low interfacial bonds (→ low transverse strength) (-) High localized stresses (→ low transverse strength)	Local irregularities affect brittle or ductile behavior
	(+) Anisotropy & Heterogeneity enable tailoring of Material (+) Ability to control and predict mechanical performance (-) Difficult to analyze (-) Computer programming needed	Simple to analyze
	(+) Possibility for analytical prediction of "macro" properties of constituents (-) Comprehensive test program (up to 10 basic properties : E, E <sub>2</sub> , G <sub>12</sub> , ν <sub>12</sub> , F <sub>1T</sub> , F <sub>1C</sub> , F <sub>1C</sub> , V <sub>1</sub> )	Two elastic parameters ( $\sigma_f, \sigma_{f1}$ )  Two strength parameters ( $\sigma_{fc}, \sigma_{ft}$ )
	(+) Ability to design material & structure in one continuous process (+) Many degrees of freedom → optimization (-) Many options make complex analysis (-) Shortage of analytical tools	Few geometrical parameters, therefore, optimization is limited.
	(+) Possible fabrication of entire parts (+) Simple tooling (+) Few joints (-) Hand labor (-) Limited standardization & automation (-) Extensive quality control	Separation between material & structure fabrication  Many joints
	(+) Long time performance in hostile environment (+) Long fatigue life (+) Easy maintenance and repair (-) Sensitivity to hygrothermal effects (-) Difficult to detect internal damage (-) Require protective coatings	Sensitive to corrosion  Discrete defects → catastrophic failure  Repair is complex.
	(+) Weight reduction (+) Less tooling (+) Fewer parts (+) Less assembly (-) High cost of materials (-) High cost of auxiliary materials	Low cost of raw material  High tooling cost  High machining and assembly

Micro mechanics Macro mechanics Mechanical characterization  
Structural Design & Optimization Fabrication technology  
Maintanability, Serviceability Cost effectiveness

으로 사용되고 있다. 반면에 유리섬유는 금속보다 가벼우나 다른 섬유보다 무겁고, 금속보다 탄성계수가 낮은 반면, 우수한 수지와와의 결합성, radar 전파를 잘 통과시키며 변형률이 크고 생산공정이 비교적 간단하여 가격이 싸므로 fairing, fillet 과 같은 비구조용으로 널리 사용하고 있다. 보론 섬유는 섬유 직경이 굵고 무기워 입체형상의 성형이 어렵고, 절단 가공 등이 힘들며, 가격이 워낙 비싸다는 단점이 있으나 압축 및 인장강도 모두 상당히 우수하여 항공기 날개와 같이 평평한 부분의 수명 연장과 같은 특수한 용도에 사용이 제한되어 있다. 한편 참고로, 복합재료의 섬유 및 기지등의 구성재료에 따른 복합재료의 종류 분류와 그 중 항공기용으로 대표적으로 사용되는 고분자 복합재료의 섬유의 종류에 따른 물성비교 및 기존 금속재료에 비교한 복합재료의 장단점을 표. 1, 2 및 3에 나타내었다.

구조용으로 사용되는 고분자 수지로는 현재까지 어느 정도 만족스러운 기계적 특성 및 충분한 데이터베이스를 갖고 있으며 가격도 비교적 저렴한 열경화성 수지인 에폭시가 대중을 이루고 있다. 반면에 전투기와 같은 초음속 비행기나 엔진 부위 등과 같이 고온에서의 내열성을 요구하는 경우에는 BMI(Bismaleimide)나 PI(Polyimide)가 사용되고 있으며, 내장용으로는 화재 시 유독가스의 발생이 적은 phenolic 수지가 널리 사용되고 있다. PEEK(Poly-ether-ether-ketone), PEKK(Poly-ether-ketone-ketone), PEI(Poly-ether-imide) 등과 같은 고온에서 녹아 재성형이 가능한 열가소성수지는 우수한 기계적 물성에도 불구하고 현재까지 완전한 공정방법이 정립되지 않아 일부 부품에만 제한적으로 사용되고 있다.

한편 연속섬유, fabric, chopped, strand 등의 강화재료를 수지에 함침시켜 작업성을 향상시키고 공정 자동화를 가능하도록 만든 프리프레그 (prepreg)는 복합재료의 중간 제품으로 복합재료 구조물 생산업자들은 이를 구매하여 원하는 모양으로 재단하고 적층하여 구조물 형태로 만든 후 autoclave내에서 적당한 압력과 열을 가하여 최종적인 복합재료 구조물을 성형/제작하게 된다. 표

4에서는 중간 제품인 프리프레그 내의 섬유배열 방법에 따른 장단점을 비교 설명하였다.

표 4 프리프레그의 형태에 따른 장단점 비교

Type of prepreg	Advantage	Disadvantage	Remarks
Tape	<ul style="list-style-type: none"> <li>Can be tailored more easily to match loads</li> <li>Lower raw material cost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No splice overlaps allowed parallel to fibers</li> <li>Complex contours more difficult than fabric</li> </ul>	
Woven fabric	<ul style="list-style-type: none"> <li>Less material handling damage</li> <li>Easier forming on contours &amp; corners</li> <li>More resistant to surface breakout and delamination which aids in machining and hole drilling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Less tailorable than tape</li> <li>Edge selvage requires large overlap and width trimming</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recommended for use on sandwich structure and always next to H/C core.</li> <li>Preferred for outer ply</li> </ul>

한편 복합재료 구조물의 공간을 채우는 역할을 하는 코어는 하니콤(honeycomb)과 foam으로 구분되며 일반적으로 구조용으로는 하니콤, 비구조용으로는 foam이 사용되고 있다. 하니콤은 알루미늄과 같은 금속, 유리나 같은 세라믹, 아라미드(Nomex®)와 같은 고분자 소재로 제작할 수 있으나 무게측면에서 Nomex®가 가장 널리 쓰이고 있다.

그림 2는 판 구조물의 강성도(stiffness), 강도(strength) 및 그 무게(weight)를 양쪽 스킨을 하니콤 또는 foam으로 보강하였을 때의 값과 비교한 것으로 적층판 2개를 겹쳐놓은 판의 굽힘강성 및 강도값에 비해 단지 3%의 작은 무게 증가만을 주는 두께 t 인 Nomex 하니콤을 심재로 보강하게 되면 강성값과 강도값은 각각 7배 및 3.5배 증가함을 볼 수 있어 복합재료 사용의 장점을 단적으로 잘 보여주고 있다. 한편 우주용 소재들의 특정 용도에는 하니콤 측면에 미세 구멍을 뚫어놓은 알루미늄





	
Relative Stiffness = 100 Relative Strength = 100 Relative Weight = 100	700 350 103
	
3700 925 106	476 91 113

그림 2 하니콤 및 Foam을 심재로 사용한 구조물의 물성 비교

미늄이 또한 radome과 같이 radar 전파의 투과성이 좋아야 하는 구조물에는 유리섬유가 널리 하니콤의 기본 소재로 많이 사용되고 있다. foam은 PU(Polyurethane) 등이 주종을 이루어 왔으나 최근에는 PEI(Poly-ether-imide), PES(Poly-ether-sulfone), PMI(Poly-methacryl-imide)와 같이 특수한 용도의 소재도 개발되어 있다.

접착제는 외피와의 compatibility를 위하여 외피의 수지와 동일한 종류를 사용하는 것이 일반적이므로 주로 에폭시 수지를 사용하고 있다. 피접착면의 종류나 물성에 따라 접착 성능이 크게 좌우되므로 접착시에는 접착 부위의 기계/화학적 표면처리가 선행되어야 원하는 강도의 접착 성능을 얻을 수 있음을 유의하여야 한다. 접착제는 강성과 함께 어느 정도의 인성을 갖고 있어야 하므로 고무나 열가소성수지 등과 같은 많은 첨가제가 포함되어 있으며 구조용으로 사용하는 경우에는 부직포를 포함하는 film 형태가 일반적이다.

### 3. 복합재료의 장점

항공기 제작에 있어서 복합재료를 사용하는 가장 주된 목적은 항공기의 운용과 직접적인 관련이 있는 무게 감소에 있다고 볼 수 있다. 일반적으로 기존의 항공기 소재인 알루미늄 합금을 복합재료로 대체하는 경우 강도(strength) 측면에서는 약 20%-25% 정도의 무게 감소 효과가 있으며, 탄성계수(stiffness) 및 피로(fatigue) 측면에서는 약 40% 정도의 무게 감소 효과가 있는 것으로 알려

져 있다. 이와 같은 무게 감소 효과는 복합재료를 적용한 항공기에 대해서는 기동성 및 무장 능력 향상 등의 성능향상과 직접 연관될 수 있으며 또한 무게 감소에 따른 경제적인 이익을 항공기 수명기간 동안의 연료비 절약 및 추가 적재량에 따른 이익과 비교하여 환산하면 복합재료 부품 제작에 있어서의 높은 제작 경비가 충분히 보상될 수 있을 것이란 항공기 제작사의 주장이 어느 정도 설득력을 갖게 된다. 또한 고분자 복합재료는 금속과 비교하여 거의 영구적으로 부식 및 피로에 대한 저항력을 갖고 있다. 이와 같이 복합재료의 적용으로 얻어지는 구조물의 피로 수명 증가로 항공기 운용 수명이 연장되고 특히 군용기 등에서 중요시 되는 중력기동성의 향상에 따른 항공기의 내구성 증대 등의 요구 조건을 만족시킬 수 있다. 또한 대형구조물을 일체로 성형할 수 있으므로 정비 및 유지 보수에 유리하다는 장점을 갖고 있다. 이외에도 복합재료가 갖고 있는 열적 안정성과 이방성을 잘 활용하면 원하는 방향으로 우수한 기계적 물성과 치수 안정성을 갖는 부품을 제작할 수 있다는 장점과 함께 공기역학적 형상설계가 유리하여 금속재료로는 만들기 어려운 복잡하고 매끄러운 형상표면을 제작할 수 있어 항공기의 공기저항을 최소화하여 궁극적으로 연료 소비를 줄일 수 있다는 장점을 갖고 있다(그림 3 참조).

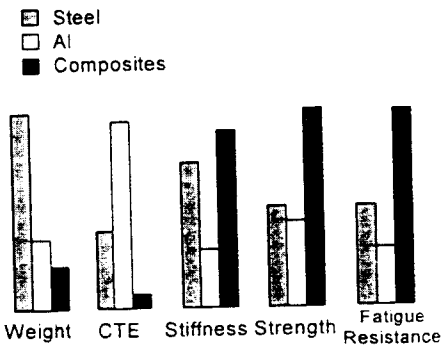


그림 3 Comparisons of parametric material properties

그림 4는 항공기용 소재로 많이 사용되는 기존의 알루미늄 및 티타늄과 항공기 구조물로의 적용이 확대되고 있는 첨단 고성능 신소재인 graph-

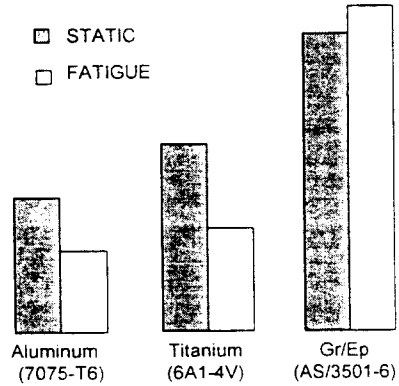


그림 4 Relative structural efficiency of aircraft materials

ite /epoxy(AS /3501-6)의 정하중 및 피로하중에 대한 성능을 비교한 것으로 정하중 및 피로하중 성능 모두에서 복합재료가 상대적으로 우수함을 볼 수 있다.

#### 4. 국내외의 복합재료 사용 현황

현재 전세계적으로 군용기나 소형 민항기의 경우에는 미익, 주익 및 동체 등 주요 구조물을 복합재료를 사용하여 제작하는 것이 일반화되어 있으며, Beech starship과 같이 전체 기체 구조물을 복합재료로 제작한 all-composite airplane도 이미 오래 전에 선보인 바 있다. 따라서 소형 항공기 부품의 경우에는 복합재료 관련 설계 제작 기술이 이미 확보되어 있는 상태이며 현재는 경제성을 고려한 최적화 기술개발이 활발하게 진행되고 있다. 반면에 대형항공기의 경우에는 최근까지 그림. 5에서 보는 바와 같이 fairing, fillet, engine cowl, radome, door, interior 등의 비구조용 부품, 미익의 vertical과 horizontal stabilizer, 주익의 spoiler, aileron, flap 등과 같은 2차 구조물에 제한적으로 복합재료가 사용되어 왔으며, floor panel beam이나 torque fin box와 같은 1차 구조물에 복합재료가 사용되기 시작한 것은 아주 최근의 일이다. 따라서 현재까지도 대형항공기의 경우 복합재료의 사용은 전체 구조물의 약 10-20%에 머물고 있는 실정이다. 이와 같은 추세로 볼 때 향후

예상되는 개발분야는 주익전체, unpressurized & pressurized fuselage이며 이것이 현실화 되면 전체 구조물의 약 절반 정도를 복합재료가 차지하게 될 것으로 예상된다. 표 5는 Boeing 및 Airbus사에서 제작한 항공기에 적용된 복합재료의 총량 및 이에 따른 무게 절감량을 표시한 것으로 새로운 모델이 나올수록 복합재료의 사용량 및 적용 범위가 점차 확대되는 경향을 보이고 있으며 유럽의 Airbus사가 미국의 Boeing사에 비해 복합재료의 적용에 보다 적극적인 것을 유추할 수 있다.

표 5 민간항공기의 복합재료사용량과 무게절감량

Model	Total Advanced Composite (Kg)	Weight Savings (Kg)
B737-300	681	272
B757	1516	676
B767	1535	636
A320	-	1050
A340	-	2600

한편 국내의 항공기용 복합재료 사용 현황은 외국과 비교하여 아주 미미한 실정이다. 특히 민항기의 경우에는 현재까지 국내 수요는 극히 제한적이며 국내 항공 3사(대한항공, 삼성항공, 대우중공업)를 중심으로 외국의 항공기 제작사에서 수주를 받아 일부 부품을 제작 수출하고 있다. 국내 수요로는 대한항공에서 자체 설계 제작한 국내 최초의 다목적 소형항공기인 창공-91의 경우 engine, cowl, wheel pants, door, wing tip, tail cone, rudder, stabilizer등을 복합재료로 시험 제작한 경험을 갖고 있다. 복합재료 부품의 해외 수주 사업은 1970년대 중반부터 대한항공을 중심으로 시작하여 그동안 상당한 기술축적을 이루었으며(표 6 참조), 이를 바탕으로 1992년에는 미국 McDonnell Douglas 사의 대형항공기인 MD-11의 주요조종면의 하나인 spoiler를 국내 기술로 설계 제작하고 국내 최초로 미국 FAA의 인증을 획득하여 기술력을 인정받은 경험을 갖고 있다. 또한 항공기용 복합재료 소재의 국내 현황은 선경 인더스트리에서 하니콤, 한국화이버에서 프리프레그를 개발하여 외국 항공기 제작사의 인증을 획득하였으나

국내 항공기용 복합재료 수요가 제한되어 있어 많은 어려움을 겪어 왔다.

표 6 대한항공의 항공기용 복합재료부품의 제작 현황

Items	Prep.	H / C	Adhesive	Cure T. °(F)
B747 Flap Tracking Fairing	GF/Ep	Nomex	Epoxy	250
B747 Wing Tip Extention	GF/Ep, GF/Pe	Nomex	Epoxy	250
MD-11 Fillet	AF/Ep	Nomex	Epoxy	250
Mid Fan Cowl	CF/Ep	Aluminum	Epoxy	350
MD-11 Spoiler	CF/Ep	Nomex	Epoxy	250 & 350
B777 Flap Support Fairing	GF/Ep, CF/Ep	Nomex	Epoxy	250
B777 Wing Tip Assembly	GF/Ep	Nomex	Epoxy	250
Blocker Door	CF/Ep	Glass	Epoxy	350
무궁화 위성 Solar Panel	CF/Ep, AF/Ep	Aluminum	Epoxy	250 & 350

CF : 탄소섬유, GF : 유리섬유, AF : 아라미드섬유, Ep : 에폭시수지, Pe : 폴리에스터수지

### 5. 향후예상 및 맺음말

향후 개발이 예상되는 대형 항공기는 크게 고성능(high performance), 초대형(high capacity), 초음속(high speed) 항공기로 구분할 수 있다. 이 중 고성능 항공기는 이미 미국 Boeing사의 B777(그림 5 참조)과 같이 두개의 엔진으로 태평양을 횡단할 수 있는 항공기가 개발되었고, 초대형 항공기는 현재까지는 외국의 대형항공기 제작사들의 시장성에 관한 이해관계에 의하여 계획이 확정되어 있지는 않지만 전세계적으로 개발이 요구되는 항공기이다. 이와 같은 항공기의 개발에 있어서 복합재료는 필수적이며 현재의 상황으로 판단할 때 기존에 사용되어 오던 탄소섬유/에폭시수지 복합재료가 주종을 이루어 많은 금속재 부품을 대체할 것으로 예상된다. 한편 초음속 항공기는 이미 Boeing사에서 2005년경 출시를 목표로 진행중인 HSCT(High Speed Civil Transport)를 예로 들 수 있다. HSCT는 평균항해속도가 기존의 항공기의 약 3배인 Mach 2.4로서 기체 표면의

온도가 거의 400°F에 이르므로 기존의 에폭시 수지는 사용이 불가능하며 따라서 현재 고온특성이 보다 우수한 PI(Polyimide)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

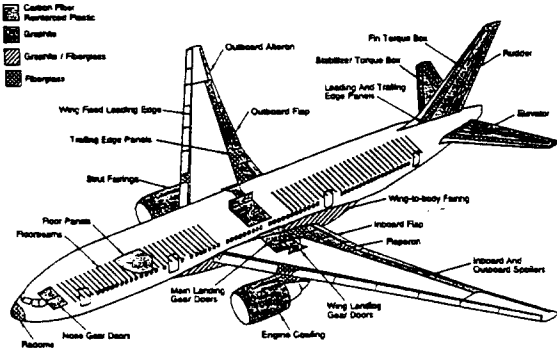


그림 5 B777항공기(1995)의 복합재료 사용 예

항공기용 복합재료의 적용이 보다 활성화되기 위하여서는 우선 소재 및 공정 가격이 낮추어져야 한다. 이를 위하여 기존의 항공기 부품 제작에 사용되어 온 고가의 3K 혹은 6K의 탄소섬유 Tow를 상대적으로 저가인 12K 혹은 24K Tow로 대체하는 것이 시급한데 이 경우 소재 가격은 50% 이상 감소할 것으로 예상되며 이와 더불어 새로운 소재, 특히 값싼 탄소섬유의 개발이 요구된다. 생산 공정 측면에 있어서는 RTM(Resin Transfer Molding)과 같은 경제성 있는 공정의 도입 및 개발이 필요하며, 설계단계에서 공정을 고려하여 부품의 개수를 줄이거나 형상을 간단하게 할 수 있는 concurring design 개념을 도입하여야 한다. 기술적으로는 현재 사용 중인 복합재료의 최대 약점인 damage tolerance 혹은 impact resistance를 보강하기 위한 고인성/고탄성 수지 및 fibrous preform 개발이 시급하며, 초음속 항공기에 적용할 수 있는 고온용 수지, 접착제, 하니콤파 개발이 필요하다. 또한 탄소/아라미드/유리 등의 섬유가 혼합되어 synergetic effect를 극대화할 수 있는 hybrid 복합재료에 대한 연구도 요구된다. 이와 함께 복합재료 구조물의 결함을 탐지할 수 있는 비파괴 검사(NDI) 및 수리 방법(repair)의 개

발도 중요한 연구 분야이다. 특히 저온에서 경화하여 고온 특성을 갖는 저온 경화용 수지(low-temperature cure resin), 저온이나 고온에서 경화하여도 동일한 물성값을 갖는 dual cure-temperature 수지의 개발은 구조물 제작뿐만 아니라 생산비 절감 및 maintenance 용이성 등 경제적인 측면에서도 상당히 필요한 신소재 기술이다.

결론적으로 항공기용 복합재료는 여전히 많은 응용의 여지를 갖고 있으나 또한 시급히 해결하여야 할 많은 기술적인 문제점을 갖고 있다. 즉 복합재료 항공기용 구조물은 반드시 인증 절차를 밟아야 실제 항공기에 장착/판매될 수 있는데 수치해석 기법에 의한 구조 해석을 기친 기본/상세 설계 과정과 성형 제작된 실물 구조물에 대해 가혹환경 조건하(95% 상대습도, 70°C 온도에서 30일간 방치)에서 설계에서 제시한 최대 하중의 150%를 견디어야 하는 까다로운 full-scale testing 및 각종 복합재료관련 coupon test(표 7 참조)들을 수행하여야 한다. 이와 같은 기술적인 문제점들은 향후 연구 결과에 따라 충분히 극복할 수 있으나 이와 더불어 현재 각각의 항공기 제작사가 보유하고 있는 material specification, design manual, process standard 등의 규격이 전세계적으로 통일될 수 있는 제도적인 보완이 뒷받침된다면 복합재료의 응용도 훨씬 앞당겨질 수 있을 것으로 예상된다.

### 참고할 사항

본 절에서는 특정 복합재료 구조물을 제작하는 것을 최종 목적으로 하는 과제 수행자나 연구자가 과제 수행시 참고하면 도움이 될 항목이나 관련 연구등을 간단한 표로 압축하여 나타내었다. 복합재료 소재에 대한 기본실험 절차에 관련된 요구사항 지침서는 표 7에 해당하는 SPEC 번호로 정리하였고 복합재료에 관련된 연구 주제별 STP Book 목록은 표 8에 분류하여 정리하였고 각 연구분야의 주제 및 해외 논문집 이름을 표 9에 모아 정리하였다.

표 7 복합재료 관련 표준 시험 목록 분류표

Types of Tests		ASTM	Test (Others)			
1	ABRASION WEAR : Loss in Weight	ASTM-D1044	FTMS-406-1091	19	2-RAIL SHEAR	D-4255 -
2	ACCELERATED SERVICE TESTS : Temperature and Humidity	D-756	FTMS-406-6011	20	RESIN-FLOW	D-3531 -
3	BEARING STRENGTH	D-953	FTMS-406-1051	21	RESIN CONTENT : Acid Digestion Burn Off	D-3171 - D-2584 FTMS-406-7061
4	BLOCK SHEAR	-	-	22	SALT-SPRAY TEST	B-117 FTMS-406-6071
5	COMPRESSION : Compression after impact Compression shear	D-695 NASA-1092	FTMS-406-1021 BSS 7260	23	SANDWICH CONSTRUCTION: Compression Shear Tension Flex Peel	C-364 - - C-297 - C-393 - D-1781 - MIL-STD-401 5. 2. 1 MIL-STD-401 5. 2. 2 MIL-STD-401 5. 2. 3 MIL-STD-401 5. 2. 4 MIL-STD-401 5. 2. 6
6	CORE MATERIALS : Compression Shear Tension	C-365 C-273 -	MIL-STD-401 5. 1. 4 MIL-STD-401 5. 1. 5 MIL-STD-401 5. 1. 6	24	SHEAR : Double(Lap) Interlaminar(Short Beam) Interlaminar(Lap) In plane Johnson	D-3528 - D-2344 - D-1002 - D-3846 - D-732 - FTMS-406-1041 FTMS-406-1041 FTMS-406-1042 FTMS-406-1041
7	DEFLECTION TEMPERATURE UNDER LOAD	D-648	FTMS-406-2011	25	SPECIFIC GRAVITY : Displacement Physical Measurement	D-792 - FTMS-406-5011 FTMS-406-5012
8	DEFORMATION UNDER LOAD	D-621	FTMS-406-1101	26	TACK	D-3121 -
9	FLAMMABILITY OF PLASTICS OVER 0.050 IN THICKNESS	D-635	FTMS-406-2021	27	TEAR RESISTANCE	D-1004 - FTMS-406-1121
10	FLEXURAL	D-790	FTMS-406-1031	28	TENSION : Flatwise Micro N. O. L. Hoop Shear 1450 Unidirectional Woven	C-297 - D-1708 - D-2290 - D-3518 - D-3039 - D-638 - MIL-STD-401 5. 2. 3 - - - - FTMS-406-1101
11	GEL TIME	D-3532	-	29	VISCOSITY : Brookfield Ford Cup Zahn Cup	D-1824 - D-1200 - D-1084 - ISO 2555 - -
12	HARDNESS : Barcol Rockwell(Plastics) Shore A & D	D-2583 D-785 D-2240	FTMS-406-1081 FTMS-406-1082/83	30	VOLATILE CONTENT : Residual	D-3530 -
13	IMPACT : Izod	D-256	FTMS-406-1071			
14	LINEAR THERMAL EXPANSION : Fused Quartz Tube Method(Linear) Cubical	D-696 D-864	FTMS-406-2031			
15	MELTING POINT: Fisher Johns	-	-			
16	MOISTURE ABSORPTION	D-3229 D-570	-			
17	OPEN HOLE COMPRESSION	NASA-1092	BSS 7260			
18	PEEL : Climbing Drum Floating Roller(Bell Peel) T-Peel(1800)	D-1781 D-3167 D-1876	- - -			

표 8 복합재료 관련 주제별 STP Book 목록 분류

Area	STP Number	Title	Year	Area	STP Number	Title	Year
	STP521	Analysis of the Test Methods for High Modulus Fibers and Composites	1973		STP873	High Modulus Fiber Composites in Ground Transportation and High Volume Applications	1985
	STP546	Composite Materials: Testing and Design(Third Conference)	1974		STP883	Composite Materials: Testing and Design (Seventh Conference)	1986
	STP617	Composite Materials: Testing and Design(Fourth Conference)	1977		STP460	Composite Materials: Testing and Design	1970
	STP864	Recent Advances in Composites in the United States and Japan	1985		STP497	Composite Materials: Testing and Design(Second Conference)	1972
	STP876	Delamination and Debonding of Materials	1985		STP521	Analysis of the Test Methods for High Modulus Fibers and Composites	1973
	STP883	Composite Materials: Testing and Design (Seventh Conference)	1986		STP546	Composite Materials: Testing and Design(Third Conference)	1974
	STP460	Composite Materials: Testing and Design	1970		STP568	Foreign Object Impact Damage to Composites	1975
	STP497	Composite Materials: Testing and Design(Second Conference)	1972		STP569	Fatigue of Composite Materials	1975
	STP521	Applications of Composite Materials	1973		STP580	Composite Reliability	1975
	STP546	Composite Materials: Testing and Design(Third Conference)	1974		STP583	Fracture Mechanics of Composites	1976
	STP580	Composite Reliability	1975		STP617	Composite Materials: Testing and Design(Fourth Conference)	1977
	STP671	Composite Materials: Testing and Design(Fifth Conference)	1979		STP636	Fatigue of Filamentary Composite Materials	1977
	STP794	Through Thickness Tension Testing of Steel			STP671	Composite Materials: Testing and Design(Fifth Conference)	1979
	STP787	Composite Materials: Testing and Design(Sixth Conference)	1982		STP696	Nondestructive Evaluation and Flaw Criticality for Composite Materials	1979
	STP797	Composite Materials: Quality Assurance and Processing	1983		STP723	Fatigue of Fibrous Composite Materials	1981
	STP808	Compression Testing of Homogeneous Materials and Composites	1983				



Area	STP Number	Title	Year
	STP775	Damage in Composite Materials: Basic Mechanisms, Accumulation, Tolerance, and Characterization	1982
	STP787	Composite Materials: Testing and Design(Sixth Conference)	1982
	STP813	Long Term Behavior of Composites	1983
	STP836	Effects of Defects in Composite Materials	1984
	STP864	Recent Advances in Composites in the United States and Japan	1985
	STP876	Delamination and Debonding of Materials	1985
	STP893	Composite Materials: Testing and Design (Seventh Conference)	1986
	STP907	Composite Materials: Fatigue and Fracture	1984
	STP927	Fatigue in Mechanically Fastened Composite and Metallic Joints	1986
	STP948	Fractography of Modern Engineering Materials: Composites and Metals	1988
	STP546	Composite Materials: Testing and Design(Third Conference)	1974
	STP580	Composite Reliability	1975
	STP602	Environmental Effects on Advanced Composite Materials	1976
	STP617	Composite Materials: Testing and Design (Fourth Conference)	1977
	STP658	Advanced Composite Materials Environmental Effects	1978
	STP674	Composite Materials: Testing and Design(Fifth Conference)	1979
	STP768	Composites for Extreme Environments	1982
	STP864	Recent Advances in Composites in the United States and Japan	1985
	STP427	Fiber Strengthened Metallic Composites	1967
	STP438	Metal Matrix Composites	1968
	STP497	Composite Materials: Testing and Design(Second Conference)	1972
	STP546	Composite Materials: Testing and Design(Third Conference)	1974
	STP964	Testing Technology of Metal Matrix Composites	1988
	STP521	Analysis of the Test Methods for High Modulus Fibers and Composites	1973
	STP569	Fatigue of Composite Materials	1975
	STP580	Composite Reliability	1975
	STP617	Composite Materials: Testing and Design(Fourth Conference)	1977
	STP797	Composite Materials: Quality Assurance and Processing	1983
	STP813	Long Term Behavior of Composites	1983

Area	STP Number	Title	Year
	STP864	Recent Advances in Composites in the United States and Japan	1985
	STP452	Interfaces in Composites	1969
	STP749	Joining of Composite Materials	1981
	STP772	Short Fiber Reinforced Composite Materials	1982
	STP864	Recent Advances in Composites in the United States and Japan	1985
	STP873	High Modulus Fiber Composites in Ground Transportation and High Volume Applications	1985
	STP937	Toughened Composites	1986
	STP521	Analysis of the Test Methods for High Modulus Fibers and Composites	1973
	STP546	Composite Materials: Testing and Design(Third Conference)	1974
	STP617	Composite Materials: Testing and Design(Fourth Conference)	1977
	STP636	Fatigue of Filamentary Composite Materials	1977
	STP674	Composite Materials: Testing and Design(Fifth Conference)	1979
	STP734	Test Methods and Design Allowables for Fibrous Composite	1981
	STP787	Composite Materials: Testing and Design(Sixth Conference)	1982
	STP797	Composite Materials: Quality Assurance and Processing	1983
	STP808	Compression Testing of Homogeneous Materials and Composites	1983
	STP864	Recent Advances in Composites in the United States and Japan	1985
	STP906	Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials	1987
	STP964	Testing Technology of Metal Matrix Composites	1988
	STP480	Composite Materials: Testing and Design	1970
	STP497	Composite Materials: Testing and Design(Second Conference)	1972
	STP546	Composite Materials: Testing and Design(Third Conference)	1974
	STP617	Composite Materials: Testing and Design(Fourth Conference)	1977
	STP674	Composite Materials: Testing and Design(Fifth Conference)	1979
	STP696	Nondestructive Evaluation and Flaw Criticality for Composite Materials	1979
	STP787	Composite Materials: Testing and Design(Sixth Conference)	1982
	STP864	Recent Advances in Composites in the United States and Japan	1985
	STP893	Composite Materials: Testing and Design (Seventh Conference)	1986

복합재료 관련서적 (연도순)

1. Applied Anisotropic Elasticity, R. F. S. Hearman, Oxford University Press, 1961.
2. The Analysis of Laminated Composite Structures, Lee R. Calcote, Van Nostrand Reinhold, New York, 1969.
3. Polymer Matrix Composites Vol. I : Guidelines, Military Handbook, Dept. of Defense, USA, 1971.
4. Applications of Composite Materials, M. J. Salkind and G. S. Holister eds., ASTM Spec-

ial Technical Publication, 1973.

5. Composite Materials and Their Use in Structures, J. R. Vinson and Tsu-Wei Chou, Wiley NewYork, 1975.
6. Mechanics of Composite Materials, R. M. Jones, McGraw-Hill, New York, 1975.
7. Mechanics of Composite Materials, R. M. Christensen, John Wiley & Sons, 1979.
8. Analysis of Performance of Fiber Composites, B. D. Agarwal and L. J. Broutman, Wiley, NewYork, 1980.
9. Introduction to Composite Materials, S. W.

표 9 복합재료 관련 연구분야 및 해외 논문집

Research Topics

1. Micromechanical analysis of composites
2. Thermal properties of composites
3. Residual (thermal) stresses in composites
4. Failure theories for unidirectional lamina
5. Mechanical characterization of unidirectional composites
6. Properties of hybrid composites
7. Impact on Composites
8. Adhesive joints in composites
9. Bolted joints in composites
10. Fatigue of Glass /Epoxy composites
11. Fatigue of Graphite /Epoxy composites
12. Fatigue of Kevlar /Epoxy composites
13. Properties of Kevlar /Epoxy composites
14. Strength theories of composite laminates
15. Delamination fracture in composites
16. Stress concentrations in composites (holes, cracks)
17. Environmental effects (Temperature, Moisture)
18. Nondestructive testing
19. Behavior of damaged composite laminates
20. Biaxial testing
21. Dynamic (high-rate) testing
22. Composite sandwich beam construction
23. Smart structures in composites
24. Thermal analysis of composite materials
25. Cure analysis of polymeric composites
26. Repair of Composite Structures
27. Dimensional mismatch in tooling composites

Foreign Journals

1. Journal of Composite Materials
2. Journal of Composites Technology and Research
3. Journal of Reinforced Plastics and Composites
4. Composites Science and Technology
5. Polymer Composites
6. Composite Structures
7. Composites
8. Proceedings of the ASCE
9. Experimental Mechanics
10. Journal of Applied Mechanics
11. AIAA Journal
12. Mechanics of Materials
13. SAMPE Journal
14. SAMPE Quarterly
15. Experimental Techniques

- Tsai, Technomic Pub. Co., 1980.
10. Load Bearing Fiber Composites, M. R. Piggott, Pergamon Press, Oxford, 1980.
  11. An Introduction to Composite Materials, Derek Hull, Cambridge University Press, New York, 1981.
  12. Fibre Composite Hybrid Materials, N. L. Hancox ed., Applied Science Publishers Ltd., 1981.
  13. Handbook of Composites, G. Lubin ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 1982.
  14. Structures Vol. 12- Bonded Joints, ESDU International Ltd., 1983.
  15. Structures Vol. 13- Buckling of Laminated Composite Plates, ESDU International Ltd., 1983.
  16. Structures Vol. 14-Laminated Composites, ESDU International Ltd., 1983.
  17. Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials, J. M. Whitney, I. M. Daniel and R. B. Pipes, Soc. for Experimental Mechanics, Bethel, CT, 1982 : second edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1984.
  18. Primer on Composite Materials : Analysis, J. E. Ashton, J. C. Halpin, and P. M. Petit, Technomic, Lanchester, 1969 : revised edition by J. C. Halpin, Technomic, Lanchester, 1984.
  19. Adhesive Technology Handbook, A. H. Landrock, Noyes Publications, 1985.
  20. The Behavior of Structures Composed of Composite Materials, J. R. Vinson and R. L. Sierakowski, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986.
  21. Composite Design 1986, S. W. Tsai, Think Composites, 1986.
  22. Composite Materials for Aircraft Structures, B. C. Hoskin & A. A. Baker, eds., AIAA Education Series, 1986.
  23. Pocket Reference Guide for Composite Materials Used in Production, Manufacturing Research & Development A-2020, Boeing D6-46632, 1986.
  24. Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, L. A. Carlsson and R. B. Pipes, Prentice-Hall, 1987.

25. Structural Analysis of Laminated Anisotropic Plates, J. M. Whitney, Technomic, Lancaster, 1987.
26. Composite Design, S. W. Tsai, Think Composites, Dayton, 1988.
27. Fiber Reinforced Composites : Materials, Manufacturing and Design, P. K. Mallick, Marcel Dekker, Inc., 1988.
28. Composite Materials : Fatigue and Fracture, P. A. Lagace ed. , ASTM, 1989.
29. Delaware Composites Design Encyclopedia- Volume 1. Mechanical Behavior and Properties of Composite Materials, C. Zweben, H. T. Hahn & T. W. Chou, Technomic Pub. Co., 1989.
30. Delaware Composites Design Encyclopedia- Volume 2. Micromechanical Materials Modeling, J. M. Whitney & R. M. McCullough, Technomic Pub. Co., 1989.
31. Delaware Composites Design Encyclopedia- Volume 3. Processing and Fabrication Technology, M. G. Bader, W. Smith, A. B. Isham, J. A. Rolston and A. B. Metzner, Technomic Pub. Co., 1989.
32. Delaware Composites Design Encyclopedia- Volume 4. Failure Analysis of Composite Materials, P. W. R. Beaumont J. M. Schultz and K. Friedrich, Technomic Pub. Co., 1989.
33. Delaware Composites Design Encyclopedia- Volume 5. Design Studies, K. T. Kedward and J. M. Whitney, Technomic Pub. Co., 1989.
34. Delaware Composites Design Encyclopedia- Volume 6. Test Methods, R. B. Pipes and R. A. Blake etal, Technomic Pub. Co., 1989.
35. Dictionary of Composite Materials Technology, Stuart M. Lee, Technomic Pub. Co., 1989.
36. Fiber Reinforced Composites, K. H. G. Ashbee, Technomic publishing Co., Inc., Lancaster, 1989.
37. Fundamentals of Composite Manufacturing; Materials, Methods, and Applications, A. B. Strong, SME, 1989.
38. Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites, R. L. Pendleton and M. E. Tuttle eds., SEM (Society for Experimental Mechanics Inc.), Elsevier Applied Science Pub., 1989.
39. Reference Book for Composite Technology I, II, Stuart. M. Lee, Technomic Pub. Co., 1989.
40. Adhesion and Bonding in Composites, R. Yoshiomiya and K. Morimoto, Marcel Dekker, 1990.
41. Analysis and Performance of Fiber Composites, B. D. Agarwal & L. J. Broutman, John Wiley & Sons Inc., 1990.
42. Composite Materials in Aircraft Structures, D. H. Middleton, Longman Scientific & Technical, 1990.
43. Design of Marine Structures in Composite Materials, C. S. Smith, Elsevier Applied Science, 1990.
44. Engineering Plastics and Composites, J. C. Bittence ed., ASM International, 1990.
45. Polymer Matrix Composites Vol. III : Utilization of Data, Military Handbook, Dept. of Defense, USA, 1990.
46. Smart Autoclave Cure of Composites, P. R. Ciriscioli and G. S. Springer, Technomic Pub. Co., 1990.
47. Advanced Composite Materials : New Developments and Applications, Proceedings of the 7th Annual ASM /ESD Advanced Composites Conference 30 Sep.-3 Oct., 1991, Detroit, Michigan, USA, 1991.
48. Cure of Thermosetting Resins -Modelling and Experiments, J. M. Vergnaud & J. Bouzon, Springer Verlag, 1991.
49. Guidance Material for the Design, Maintenance, Inspection and Repair of Thermosetting Epoxy Matrix Composite Aircraft Structures, DOC. GEN /3043, 1st ed., International Air Transport Association, 1991.
50. Mechanics of Composite Materials-A Unified Micromechanical Approach, J. Aboudi, Elsevier, 1991.
51. Metal Matrix Composites, Proceedings of Symposium B on Metal Matrix Composites of the 1990 E-MRS Spring Conference, G. Chadwick and L. Froyen eds. , Strasbourg, France, 29 May-1 June 1990, North-Holland, 1991.

52. Modern Theory of Anisotropic Elasticity and Applications -Proceedings of the Workshop on Anisotropic Elasticity and Its Applications, J. Wu, T. C. T. Ting and D. M. Barnett eds. , 1990, North Carolina, SIAM, 1991.
53. Nondestructive Characterization of Composite Media, R. A. Kline, Technomic Pub. Co., 1992.
54. ECCM Smart Composites Workshop, Sep. 21-22, P. Gardiner, A. Kelly and A. R. Bunsell, France, Woodhead Pub. Ltd., 1993.
55. Smart Composites Workshop, EACM, P. Gardiner, A. Kelly and A. R. Bunsell eds., September 21-22, France, 1993.
56. Concise Encyclopedia of Composite Materials, Kelly, Pergamon, 1994.
57. Design and Manufacture of Composite Structures, G. Eckold, Woodhead Pub. Co., 1994.
58. Engineering with Fibre-Polymer Laminates, P. C. Powell, Chapman & Hall, 1994.
59. Advanced Composite Repair I, II Technical Training Student NoteBook, McDonnell Douglas, 1994.
60. Mechanical Properties of Polymers and Composites, L. E. Nielsen and R. F. Landel, Marcel Dekker, 1994.
61. Principles of Composite Material Mechanics, R. F. Gibson, McGraw Hill Inc., 1994.
62. Practical Analysis of Composite Laminates, J. N. Reddy and A. Miravete, CRC Press, 1995.
63. Fiber Optic Smart Structures, E. Udd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1995.
64. Numerical Analysis and Modelling of Composite Materials, J. W. Bull ed. , Blackie Academic & Professional, 1996. 