

# 항공기 構造에 있어서 複合材料의 適用

三星航空 提供  
航空宇宙研究所

항공기의 개발 역사를 살펴보면 速度의 向上, 航續效率의 개선, 運動性의 向上, 安全性, 騒音의 감소, 機體價格의 인하 등 시대와 사회의 要求에 의해 그 내용들이 조금씩 변하고 있지만 구체적 수단으로서 機體의 輕量化에 대한 연구가 계속되어 왔다.

따라서 60年代 이후부터 알루미늄 合金에 비해 比強度, 比剛性이 뛰어난 複合材料의 機體構造에의 適用研究가 활발히 進行되어 왔으며, 現在 輕航空機 및 글라이더 중에는 全複合材 構造의 機體가 제작되고 있다.

複合材料는 이러한 長點 외에도 溫度變化에 따른 熱的 安定性이 우수하여 人工衛星과 宇宙飛行體에도 그 사용이 확대되고 있으며 헬리콥터의 機體 및 블레이드도 複合재료로 만들어지고 있다.

이러한 매력에도 불구하고 複合材料가 갖는 異方性 特性에 의한 安定性 및 信賴性의 보증에 어려움이 있어 航空機에의 適用速度가 느리지만 점차 使用比率이 확대될 전망이며, 기체구조중 量의 50% 정도까지 늘어나리라 예상된다.

여기서는 固定翼 航空機 分野에 국한하여 概괄적으로 複合材料의 適用에 대해 살펴보기로 한다.

## 1. 航空機用 複合材料

複合材料란 다른 性質을 지닌 2가지 種類 이상의 材料를 혼합하여 각각의 結점을 보완하고 長點을 부각시키는 材料를 말한다. 옛날 흙벽을 쌓을 때 짚을 섞어넣는 것도 複合材料의 한 중

류이며 시멘트에 자갈 및 철근을 넣은 콘크리트도 일종의 複合材料이다.

여기서 말하는 複合材料는 母材(matrix 혹은 plastics)를 高强度纖維로 보강한 材料란 意味로서 FRP(Fiber Reinforced Plastic) 혹은 複合材料(Composite Material)로 불리고 있다.

現在 航空機用으로 주로 사용되고 있는 複合材料의 高强度纖維는 탄소섬유, 보론(BORON) 섬유, 케블라(KEVLAR) 섬유(혹은 ARAMID 섬유), 유리섬유 등이 있으며, 母材로는 에폭시(EPOXY), 폴리에스터(POLYESTER), 페놀(PHENOL), 폴리이미드(POLYIMIDE) 등이 있다.

이들 중에서 유리纖維와 폴리에스터 또는 에폭시 樹脂의 조합은 오래전부터 사용되어온 複合材料의 주역이었다.

그러나 현재는 機械의 強度가 우수한 탄소섬유, 보론섬유, 케블라섬유로 代替되고 있으며 유리섬유와 구별하는 의미에서 最新複合材料(Advanced Composite Materials, ACM)로 부르고 있다.

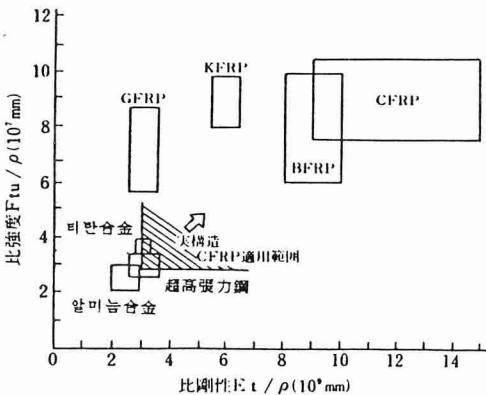
이 ACM 중에서 보론纖維強化複合材料(BFRP)는 壓縮性能이 우수하지만 高價이므로 F-14, F-15, Mirage 2000에 使用이 한정되고 있으며, 케블라纖維強化複合材料(KFRP)는 剪斷, 壓縮特性이 뒤떨어지기 때문에 2次 構造材에 사용한다.

性能과 價格의 均衡面에서 본다면 에폭시樹脂를 母材로 한 炭素纖維強化複合材料(CFRP)가 이 분야에서 가장 중요한 材料가 되고 있다.

## 2. 複合材料의 特性

이들 複合材料의 가장 큰 특징은 앞에서 이미 언급했듯이, 가벼우면서도 強度가 높다는 것이다. 예를 들면 CFRP는 比重이 알루미늄의 60% 鋼鐵의 20%밖에 되지 않지만 強度는 알루미늄의 3배이며 鋼鐵과는 비슷한 수준이다. 그러므로 CFRP는 같은 強度의 部品을 알루미늄이나 鋼鐵에 비해 20%밖에 안되는 重量으로도 만들 수 있다. <그림 1>은 複合材料로서 다른 航空機用材料보다 가벼운 重量으로 원하는 強度의 部品을 만들 수 있음을 보여주고 있다.

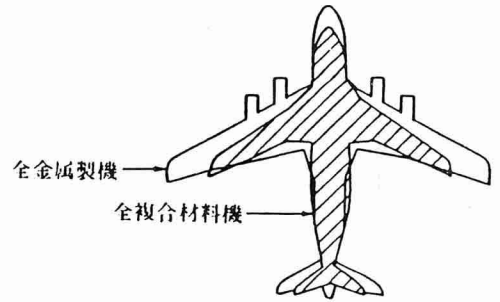
그러나 실제에서는 複合材料의 異方性 및 實用上의 補強, 金屬部材와의 병용 등으로 重量이 증가하여 약 25%~30%의 重量減少가 타당한 것으로 생각된다.



<그림 1> 複合材料和 代表的 航空機用 材料의 比強度, 比剛性

複合材料의 가장 큰 특징의 하나는 重量輕減이며 이는 航空機에 있어 여러 면에서 중요하다.

예를 들면 Boeing 767에서 1kg의 重量감소로 인하여 매년 약 55弗(85年 기준)의 연료비를 절약할 수 있다고 하며, Lockheed社의 연구에 의하면 重量 150ton, 항속거리 6,200km인 旅客機에 複合材料를 60%(重量比) 사용함으로써 重量을 20%, 運航費를 17% 감소할 수 있다고 한다. <그림 2>는 複合材料를 使用함으로써 機體



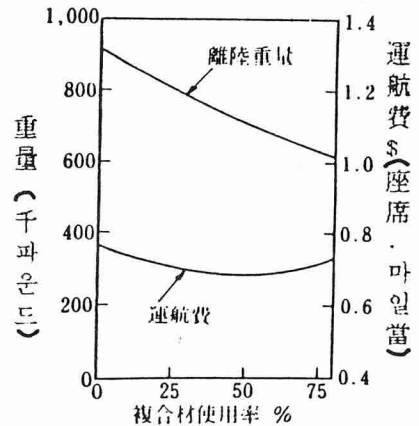
<그림 2> 複合材料에 依한 輕量化와 小型化

의 輕量化에 의한 小型化를 보여주고 있다.

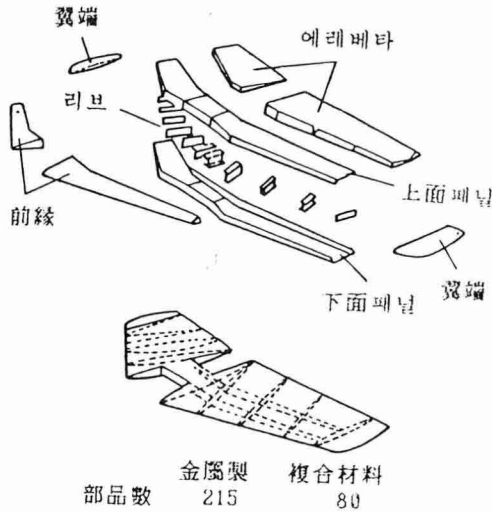
현재 旅客機에서는 보다 저렴한 運航費가 요구되고 있으며 에너지 節約型 航空機는 他航空機와의 경쟁에서 優位를 차지하고 있다. 따라서 航空機 製作社에서는 重量을 줄이기 위해 많은 노력을 경주하고 있다.

複合材料는 알루미늄합금에 비해서 아직 생산단가가 높고(약 10배) 使用量을 높이면 機體價格도 따라서 상승하므로 重量輕減에 의한 運航費減少效果를 상쇄시킨다. 따라서 複合材料의 使用量에는 어떤 범위에서의 最適値가 존재한다. <그림 3>은 複合材料의 使用效果를 보여주고 있으며 여기서는 最適値가 50% 정도이지만 이것은 10여년 전에 예상한 것으로, 현재에는 複合材料의 가격이 많이 낮아져서(80年の 알루미늄에 비해 30배이던 것이 현재는 약 10배) 最適使用量은 증가하고 있다.

複合材料의 또 하나의 장점은 成型性이 우수



<그림 3> 複合材料 使用效果



Alpha jet의 水平꼬리날개  
 〈그림 4〉 複合材料에 의한 部品減少

하여 복잡한 형태의 部品을 금속재료보다 쉽게 만들 수 있다는 것이다. 금속재료에서는 프레스에 의해 휘거나, 기계로 加工하여 리벳 등으로 조립하여 성형을 하지만 複合材料에서는 薄板形態의 프리프레그(prepreg)(纖維에 에폭시樹脂를 묻힌 半硬化狀態의 薄板)를 型위에 積層하여 이것을 硬化槽(autoclave) 속에 넣고서 壓力과 溫度를 가하여 硬化시키면 된다. 複合材料는 아주 복잡한 조립품에서도 一體成型이 가능하다. Mc-Donnell Douglas 社의 AV-8B의 날개에 들어가는 正弦波形 웹(web)을 갖는 스파(spar)가 그 좋은 예이다.

一體成型의 長點은 部品數의 감소, 리벳類의 감소, 組立費用의 감소, 強度의 증대를 가져온다. 또 금속에서 절삭가공에 의해 一體成型을 하면 재료의 80% 이상까지 깎아내야 되지만 複合材料에서는 프리프레그를 재단하여 사용함으로써 버리는 것이 얼마되지 않는다. 〈그림 4〉는 一體成型의 예이다.

### 3. 複合材料의 航空機에의 適用

ACM의 航空機 構造에의 適用은 美國의 경우 軍用機는 공군, 해군, 육군이, 民間機는 NASA와 FAA(美國聯邦航空局)가 담당하여 상호간에

밀접한 협력을 갖고 있다. 금속構造의 航空機에서 확립된 設計 및 製作技術의 전통을 계승하면서 構造重量의 경감, 損傷許容 및 耐久性의 증가, 生産費와 LCC(life cycle cost)의 低減 등을 複合材料를 사용하여 달성하려는 複合材料 技術開發計劃을 적극적으로 추진하고 있다.

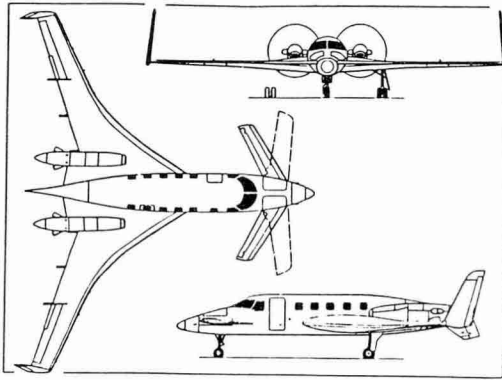
보잉 727에서는 主翼-胴體, 垂直尾翼-水平尾翼의 接合部 페어링에 유리纖維를 사용한 정도이고, 보잉 747에서는 대다수의 2次 構造部材(強度를 직접 담당하지 않는 部材)에 유리섬유강화 複合材料를 사용하고 있지만 사용량은 1%(構造重量比)밖에 되지 않는다. 보잉 757에서는 制御面, 페어링 등 1次 構造物이 아닌 部位에 유리섬유, 탄소섬유, 케블라섬유 複合材料를 3%(構造重量比) 정도 사용하였으며, 日本, 이탈리아와 共同開發한 보잉 767에서는 全表面積의 30%, 構造重量의 3%가 複合材料化 하였고, 대부분의 2次 構造物 및 內裝材를 複合材料로 만들고 있다.

따라서 2次 構造物에 대한 複合材料의 적용은 대체로 확립되었다고 할 수 있지만, 複合材料 사용비율을 構造重量의 30% 이상으로 올리기 위해서는 1次 構造物에 複合材料를 사용하지 않으면 안된다. 1次 構造物에 複合材料를 사용하기 위해서는 지금 이상으로 複合材料에 대한 解析法의 확립 및 信賴性의 향상, 成型法의 연구가 중요하며, 현재 각국의 航空機 製作社에서는 연구에 몰두하고 있다.

향후 개발될 보잉의 7J7에서는 1次 構造物에도 複合材料를 적용할 전망이다. 高壓縮強度를 갖는 탄소섬유를 사용하여 垂直, 水平尾翼, 後方胴體, 마루보, 날개, 飛行制御面을 제작할 예정이다.

民間 小型商用機에서는 보다 적극적으로 複合材料를 적용하고 있는데, Learfan 2100에서는 構造重量의 70%를 탄소섬유강화 複合材料로 제작하였으며, 機體重量을 30% 감소시켰다. 그리고 新型 Starship 1, Avtek 400 등의 全複合材製機體가 개발되어 88年 中반에 가서는 실용화될 전망이다(그림 6).

한편, 유럽에서는 美國보다 적극적으로 複合材料를 民間機에 적용하고 있으며 유럽의 機體



〈그림 6〉 全複合材構造의 商用機

製作社들인 Aérospatiale, MBB, BAe, Fokker, CASA 등이 참가하여 만든 Airbus Industrie 社는 A300, A310, A320, TA 시리즈의 다양한機種을 시장에 내보내거나 개발하고 있는데, 이 중에서 最新複合材料는 A310, A300-600에 사용하고 A320에서는 보다 사용량을 증가하고 있다. A310에서는 機體重量의 5%를 복합재료로製作하였으며, 2000年代 이후에는 機體重量의 40%까지 複合材料化할 수 있을 것이라고 Airbus Industrie 社는 전망하고 있다.

현재 미국의 NASA 에서는 6千萬弗을 들여서 B-737, DC-10, L-1011의 複合材料 꼬리날개의 개발을 행하고 있으며, 유럽에서는 독일의 MBB 에서 A310에 들어가는 垂直꼬리날개 安定板을 複合材料로 製作하여 실용화하고 있다.

지금까지는 民間機에 대해서 複合材料의 適用을 살펴보았는데, 民間機에서는 安全性 및 信賴性 문제때문에 複合材料의 사용이 大型機로 갈수록 미미하였다.

하지만 보다 다양한 성능을 요구하는 軍用機에서는 이들 요구를 충족시키기 위하여 機體輕量化를 적극적으로 추진하므로 複合材料의 사용량은 民間機에 비해서 훨씬 많은 비율을 차지하고 있다.

美國에서는 60年代 후반에 McDonnell 항공기회사가 F-4 팬텀에 보론섬유強化複合材料로 만든 방향기를 장착하여 초기비행에 성공한 이래로 다수의 部品이 飛行試驗에 제공되었다.

軍用機에 사용된 複合材料의 비율을 보면, F-15는 약 1%의 BFRP, F-16은 약 3%, F/A-18은 약 10%, Hi-MAT는 약 25%, AV-8B는 약 30% 정도 그 사용량이 급격히 늘고 있다.

유럽에서는 프랑스의 Dassault-Breguet 社가 Mirage III의 방향기를 CFRP로 제작하여 적용하였으며 Mirage 2000에서는 複合材料 사용비율을 12%까지 확대하고 있다. 또 독일 Donier 社와 프랑스 Dassault-Breguet 社가 共同開發한 훈련機인 Alpha Jet 機의 수평꼬리날개도 CFRP로 제작되고 있으며, 英國의 BAe 社와 獨逸의 MBB 社, 伊太利의 Aeritalia 社가 공동개발한 Tornado 機의 水平꼬리날개 역시 CFRP로 제작되고 있다.

그리고 다음 世代의 구라파 통일형 전투기는 1990年代를 목표로 개발이 추진되고 있으며 英國, 獨逸, 伊太利 공동의 EFA 프랑스의 RAFALE 계획에서 構造重量의 40%를 CFRP化하는 것을 언급하고 있다.

#### 4. 複合材料 利用의 問題點

복합재료에 대한 강도특성 데이터가 부족하여 신뢰성이 낮다는 점이다. 파괴 메카니즘이 아직 완전히 해명되어 있지 않으며, 그런 까닭에 材料許容值에 대한 기준도 機體製作會社마다 각기 다른 실정이다.

複合材料는 材料의 선택, 섬유 함유량, 섬유 방향 등을 設計者가 자유로이 결정하는 利點이 있지만 한편으로는 그것이 設計를 복잡하고 어렵게 만드는 요인이 되기도 한다.

또 複合材料를 구성하는 纖維와 樹脂는 強度가 약 40倍 정도 차이가 있으므로 FRP에서 纖維方向과 纖維直角方向은 強度가 20倍 이상 차이가 생긴다.

실제 機體에서는 힘이 作用하는 방향은 한 方向이 아니므로 필요한 強度를 얻기 위해서는 FRP의 各層(lamina)의 각도를 바꾸어서 적층한다. 따라서 直角으로 적층하면 強度가 약 半으로 감소하며, 그 위에  $\pm 45^\circ$ 로 바꾸어 적층한  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$ (s: 上下對稱意味)의 FRP에서는, 強度는 각 方向으로 대체로 균일하게

되지만(擬似等方性, quasiisotropic) 크기는 1/3로 감소하고 만다.

強度가 1/3로 감소하여도 아직 알루미늄 및 鋼鐵보다 比強度(強度와 重量의 比)는 크지만 문제는 섬유가 끊어지지 않는 경우에도 사이의 母材가 파괴되는 경우가 있다. 이 상태에서 다음에 壓縮荷重이 걸리면 섬유는 母材의 支持가 없으므로 座屈破壞를 일으킨다. 이것에 의한 強度減少는 약 50%에 달한다.

결국 현재의 에폭시 계열의 複合材料에서는 纖維의 強度를 충분히 살리지 못하고 있으며, 보다 강한 樹脂의 개발이 기대되고 있다.

또 다른 문제점은 複合材料가 航空기에 적용되어 실제로 운용되는 경우 여러가지 환경조건, 즉 열, 물, 기름(연료 및 작동유), 염분, 전기, 모래 등에 접하게 되는데, 현재 사용하고 있는 母材가 에폭시인 樹脂는 有機材料이기 때문에 이같은 환경조건에서 영향을 받는다. 太陽光線에 의한 分解劣化나 모래, 빗방울에 의한 侵蝕을 방지하는 데는 塗裝이 필요하며, 電害對策이 필요하다.

또한 CFRP는 충격하중을 받아 손상되더라도 알루미늄 합금과 같이 손상된 흠집이 외부로부터 발견되지 않으므로, 損傷許容성과의 관계에서 외부로부터 보이지 않는 흠집을 어떻게 발견하는가 하는 문제도 해결되어야 한다.

그 외에 品質管理 및 修理方法 등 어려운 문제가 많지만 현재 행하여지고 있는 각종의 適用化研究의 과정에서 차차히 해결되어가고 있다.

## 5. 向後的 發展方向

航空機의 主翼은 空氣力이 作用하여 위로 휘어지는 동시에 비틀림을 받고 있다. 이러한 이유로 揚力이 감소하거나 制御面效果가 나빠지거나 하며, 심한 경우에는 비틀림이 점차 증가하여 파괴되는 空彈性 現象이 발생하기도 한다.

그런데 複合材料의 異方性을 역으로 이용하여 特定方向을 보다 強化하도록 積層하면 휘면서도 비틀림이 없는 效率이 좋은, 안전한 날개를設計할 수 있다. 이것을 空力彈性學的 테일러링(tailoring)이라고 한다. 따라서 構造設計 자체도

크게 바뀌게 되고 컴퓨터를 이용한 設計(CAD)가 필요하게 된다.

成型方法도 현재는 손으로 1장, 1장 적층하여 硬化槽(autoclave) 속에 넣고서 壓力과 溫度를 가하여 硬化시키는 手工業的인 作業方法이지만, 主翼 등의 大型構造物은 그러한 方法을 사용하여 제작할 수 없다. 당연히 自動裁斷, 自動積層機 등의 도입에 의한 成型加工의 自動化가 필요하다.

또 素材 자체의 개발도 진행되고 있다. 현재까지 언급한 纖維 이외에도 탄소화규소(SiC), 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 산화지르코늄(ZrO<sub>2</sub>) 등이 있으며, 이것과 조합되는 母材도 알루미늄, 炭素, 열가소성 수지 등이 있다.

보론섬유-알루미늄 및 탄소섬유-탄소는 스페이스셔틀(SPACE SHUTTLE)에도 사용되고 있으며 내열성을 필요로 하는 부분에 이용된다. 航空機에서도 브레이크, 엔진, 엔진 배기가스에 의해 열을 받는 부분에는 아주 적합한 材料이지만 유감스럽게도 高價인 것이 결점이다.

최근에는 損傷許容性 및 環境特性 개선에 효과가 있는 열가소성 수지인 PEEK가 주목을 받고 있다.

複合材料의 추격으로 위기감을 느낀 알루미늄 제조회사에서 Al-Li 합금 등의 새로운 알루미늄 합금을 개발하고 있다. 따라서 全複合材 航空機가 최적이란 해답은 없지만 材料費의 引下에 따라서 금후에도 複合材料의 使用量은 증가하리라 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. 航空宇宙産業用 最新複合材料, 仁荷大學校 航空工學科 編, 1985.
2. 航空·宇宙, 限없는 꿈을 싣고, 山崎章 編, 1985.
3. Composite Proving Durable, Bruce Frisch ed., Aerospace America, Jan., 1987.
4. They Force a Fresh Look at the Design Process, J.F. Schier and R.J. Juergens, Astronautics and Aeronautics, Aug., 1983.
5. Composite; New Look to the Aircraft Production Line, J.F. Schier and R.J. Juergens, Astronautics and Aeronautics, Oct., 1983.