

複合材料 및 그의 軍事的 應用

鄭 渤

I. 序 論

複合材料라 함은 2個 이상의 素材로 集積·組合하여 개개의 素材가 가지는 것보다 總合적으로 뛰어난 特性을 가지도록 자연적으로 生成되거나 人爲적으로 가공한 材料를 의미한다.

모든 環境條件에 맞는 만능적인 天然材料가 없기때문에 特性이 다른 個個의 材料들을 적절하게 配合·加工하여 요구되는 조건에 맞는 材料로 만들어지는 것은 대개 人爲적인 複合材料들이다.

人爲적인 複合材料의 역사는 매우 오래전에 人間이 住居生活의 수단으로 흙벽돌을 썼을때 그 속에 짚을 섞어서 흙벽돌의 強度를 증가시켜 주었던 것에서 시작된 것으로 볼수 있다.

그러나 本格的인 複合材料의 개발과 이용은 20世紀에 들어와서야 이루어졌으며, 특히 2次世界大戰을 전후하여 材料에 대한 研究가 깊고 폭넓게 이루어지면서 複合材料의 필요성을 느끼게 되었으며 Missile, Rocket 및 宇宙往復船 開發에 절대적인 必須材料로 인정을 받고있다.

현재의 人爲적인 複合材料는 FRP(纖維強化 플라스틱)와 FRM(纖維強化金屬)으로 大別되며 플라스틱이나 金屬인 母材(Matrix 또는 Binder)와 纖維狀의 補強材(Reinforcement)로 구성되어 있다.

本文에서는 複合材料중에서 가볍고도 強度가 좋으며 斷熱性이 우수하고 電波透過性이 좋아서 여러方面에서 많이 應用되고 있는 FRP를 소개하고자 한다.

FRP는 原來 'Fiber Reinforced Plastics'의 略字로서 纖維로 보강된 플라스틱을 意味하는 것이지만 補強材중에서도 유리纖維가 가장 많이 사용되고 있어서 Fiberglass Reinforced Plastics의 의미로 混用되고 있다.

FRP에 사용되는 플라스틱은 거의가 合成樹脂(Synthetic Resin)로 熱可塑性인 것과 熱硬化性인 것이 있으며, 補強材로는 유리纖維 외에도 炭素纖維(Carbon Fiber), 黑鉛纖維(Graphite Fiber), 珪素纖維(Silica Fiber), 石棉纖維(Asbestos Fiber), 硼素纖維(Boron Fiber)등의 無機質纖維와 有機質의 合成纖維인 Kevlar 및 Nylon이 있다.

FRP는 補強材의 強度特性和 母材인 플라스틱의 斷熱性和 電波透過性, 耐蝕性을 그대로 유지하며 比重이 작아서 重量이 문제가 되는 분야에 효과적으로 이용되며 製作工程이 비교적 간단하여 生産費가 저렴하고 維持費가 적게드는 利點들을 가지고 있다.

II. FRP의 特性

1. 樹脂의 特性

FRP에서 樹脂(Resin)는 補強材에 형태를 부여하고 補強材가 받는 荷重을 전달 및 分배하는 役割을 한다.

樹脂에는 熱可塑性인 것과 熱硬化性인 것이 있는데 熱可塑性(Thermoplastic Resins)인 것은 녹는 온도(Melting Point) 以上에서는 溶融되어 얼마든지 形狀을 바꿀 수 있는 것으로 우리의 日常生活에서 많이 接觸할 수 있는 폴리에틸렌,

폴리프로필렌, 나일론, PVC, 폴리스티렌, ABS, Polycarbonate 樹脂 등으로 이런 樹脂로도 FRP로 제작하여 自動車, 電氣, 産業, 事務用品에 응용되고 있으나 強度가 약하며 耐熱성이 부족하다.

熱硬化性 樹脂(Thermosetting Resins)는 Melting Point가 없으며 한번 硬化되면 다시 形狀을 바꿀 수 없다. 여기에는 에폭시樹脂(Epoxy Resin), 不飽和폴리에스터樹脂(Unsaturated Polyester Resin), 페놀樹脂(Phenolic Resin), 실리콘樹脂(Silicone Resin), 폴리이미드樹脂(Polyimide Resin) 등이 있으며 構造用 FRP(Structural FRP) 제작에 사용된다.

熱硬化性樹脂는 A, B, C의 세가지 段階(Stage)를 거치면서 硬化된다. A-Stage는 樹脂와 硬化劑가 硬化反應을 일으키기전의 상태로 溶劑와 熱에 의해 熔融되며, B-Stage는 硬化反應이 약간 진행되어 溶劑에는 거의 녹지않지만 熱을 가하면 녹으며, C-Stage는 硬化反應이 완전히 끝나서 熱을 받아도 녹지 않으며 높은 熱을 받아서 酸化分解 또는 熱分解된다.

그러므로 FRP 業界에서는 B-Stage를 이용한 Prepreg이라는 中間物質을 많이 사용하고 있는데 Prepreg는 補強材에 樹脂를 浸漬시켜 B-Stage로 만든 것으로 취급하기가 간단하여 化學을 모르는 사람이라도 加工하기 쉬우며 樹脂와 補強材의 含量을 調節할 수 있어서 製品의 再現性(Reproducibility)이 좋고 形狀에 맞게 裁斷하기 편리하며 材料의 낭비가 적다.

다음은 熱硬化性樹脂 각각의 특성을 소개한다.

◇ Epoxy Resin

에폭시樹脂는 접착력이 강한 것으로 有名하며 비교적 늦게 개발된 樹脂이지만 우수한 性質들을 인정받아서 工業적으로나 軍事的인 FRP製品의 高級樹脂로 사용되고 있다.

에폭시樹脂의 長點으로는 樹脂의 형태가 다양하여 선택의 여지가 많고 硬化條件이 까다롭지 않으며 他樹脂보다 硬化後의 收縮率이 적어서 킷수가 安定되고 접착력이 강하여 거의 모든 材質을 쉽게 접착할 수 있으며 酸이나 Alkali에 대한 耐蝕性도 우수하고 電氣絶緣性과 電波透過性이 뛰어나고 耐熱성이 좋고 水分浸透率이 적

은 점들이다.

越南戰에서 美空軍의 經驗에 의하면 에폭시樹脂로 만든 FRP 製品만이 高溫多濕한 氣候에도 腐蝕(Corrosion)이 문제가 되지않는 유일한 材料라는 것을 알게되었다.

軍事的인 Missile 및 Rocket의 Motor Case와 對戰車 Rocket 發射管을 FRP로 製作하는 데는 거의 에폭시樹脂를 사용한다.

◇ Polyester Resin

FRP 業界에서 사용하는 폴리에스터樹脂는 不飽和 폴리에스터樹脂로서 가장 일반적이고 경제적인 樹脂로서 FRP 전체에서 가장 많이 사용된다

電氣特性和 化學物質에 대한 抵抗性 및 耐蝕性이 강하나 에폭시樹脂에 비하여 강도가 떨어지며 더 Brittle하고 硬化後의 收縮率이 큰 단점을 가지고 있다.

에폭시樹脂가 導入되기 전에 軍事的인 용도로 많이 사용되었으나 에폭시樹脂를 軍事的인 용도로 사용하는 별로 쓰이지 않으며 주로 商業的인 용도로 많이 사용하고 있다.

◇ Phenolic Resin

'베크라이트'로 알려졌던 가장 오래된 熱硬化性樹脂로서 1950年代 초기까지는 Structural FRP로는 유일한 樹脂로 사용되었다. 페놀樹脂는 價格이 싸며 機械的인 강도가 좋고 耐熱성이 우수하여 주로 耐熱 및 強度가 요구되는 Rocket Motor의 Blast Tube, Nozzle 部分, Ablative Material로 사용하고 絶緣 및 耐熱성이 필요한 電氣製品에 응용되고 있다.

페놀樹脂를 硬化할 때는 硬化反應을 촉진하고 揮發性的인 反應副産物을 제거하기 위하여 高溫과 高壓을 요구한다.

◇ Silicone Resin

실리콘樹脂는 일반수지와는 달리 無機高分子物質이다. 실리콘은 半導體로서 人類에게 유용하게 쓰이고 있으며 실리콘樹脂로 만들기 위해서는 여러가지의 難關도 많고 收縮率도 적어서 價格이 일반수지보다는 훨씬 비싸다.

실리콘樹脂의 강도는 작으나 高溫에서도 強度維持를 하며 無機物이기 때문에 耐蝕성이 아주 우수하며 電氣 및 熱絶緣性도 뛰어나 有人宇宙

船의 防熱材나 Ablator로 사용되고 있다.

價格이 아주 비싸고 強度가 작으며 접착력이 작아서 特殊한 경우에만 사용되며 FRP로 제작하기 위해 高溫과 高壓(2000 psi까지)을 요구하며 後硬化(Post Cure)를 해주는 것이 좋다.

◇ Polyimide Resin

폴리이미드樹脂는 高溫에서 사용하기 위하여 최근에 개발한 樹脂로 接着力이 뛰어나고 500°F까지는 계속적으로(10,000시간) 사용할 수 있으며 600~700°F에서는 現在의 어떤 樹脂보다도 安定되어 있고 10분이내라던 1000°F 이상에서도 強度를 유지할 수 있는 高溫用樹脂로 硬化時 高溫·高壓을 필요로 하고 접착력이 너무 강하여 工程上의 문제를 제기하는 短點들을 해결한다면 가장 장래성이 있는 樹脂로 보고 있다.

以上的 樹脂들이 長·短點을 가지고 있어서 短點을 보완하고 생산비를 줄이기 위해 添加劑(Additives)를 樹脂에 넣는다.

添加劑에는 비용을 줄이고 物性を 증진시키는 充填劑와 강도를 높여 주는 補强材, 색깔을 내는 染料, 工程中的 취급을 편하게하고 제품의 柔軟性を 주는 可塑劑, 酸化防止劑등 수없이 많으며 그 선택과 配合量에 따라 製品의 物性が 현저히 달라진다.

表 1은 以上에서 소개한 樹脂自體의 物性値를 보여준다.

끝으로 FRP에 사용하기 위한 樹脂들은 다음과 같은 條件들을 어느정도 만족시켜야 한다.

- 補强材에 浸透이 容易할 것.
- 硬化溫度가 가능한한 낮고 硬化時間을 조절할 수 있을 것.
- 硬化後 收縮率이 작을 것.
- 補强材와의 接着이 좋을 것.
- 硬化物의 物性が 좋을 것.

2. 補强材의 特性

纖維狀의 無機, 有機 및 金屬材料가 FRP에서 強度支持役割을 하는 補强材의 材質로 널리 사용되고 있다.

타이어의 補强材로 쓰이는 高力鋼纖維나 티타늄纖維들이 金屬纖維들이며 나일론과 Kevlar는 有機合成纖維이며 유리, 硅素, 炭素, 黑鉛, 硼素纖維들은 無機纖維들이다.

無機纖維는 특유의 高強度, 高彈性 및 耐熱性 때문에 FRP의 補强材로 각광을 받고 있다. 이 纖維들은 材質自體의 강도는 他材料에 비해 월등히 우수하나 脆性破斷이 일어나므로 미세한 内部缺陷에 의해 현저한 強度低下를 초래하는

〈표 1〉 主要熱硬化性 樹脂의 物性

物 性 \ 樹 脂	Polyester	Epoxy	Phenolic	Silicone	Polyimide
比 重	1.1~1.46	1.1~1.4	1.25~1.3	1.7~1.9	1.43
硬化後 收縮率, in/in		0.001~0.01	0.01~0.012	0.04~0.08	
水分 吸收率, 24時間, %	0.15~0.60	0.08~0.15	0.1~0.2		0.24
伸 張 率, %	<2		1.0~1.5		7.5
Rockwell 硬度	M70~115		M124~128	-M45	E50
引 張 強 度, psi	6,000~13,000	4,000~13,000	7,000~8,000	3,000~7,000	12,500
引張彈性率, 10 ⁶ psi	3.0~6.4	3.5	7.5~10		
壓 縮 強 度, psi	13,000~30,000	15,000~25,000	10,000~30,000	9,000~18,000	40,000
屈 曲 強 度, psi	8,500~23,000	13,300~21,000	12,000~15,000	9,800	19,000
熱傳導度, 10 ⁻⁴ cal/cm·s·°C	4.0	4~5	3~6		8.3
比 熱, cal/g·°C		0.25	0.38~0.42		
熱變形溫度, °C (264 psi)	140~400	115~550	240~260		680
誘 電 常 數, 60Hz	3.0~4.36	3.5~5.0	5.0~9.5	4.0~5.0	3.6
Power Factor, 60Hz	0.003~0.028	0.002~0.01	0.06~0.10	0.006	0.0018
Arc Resistance, sec	100~125	45~120			

<표 2>

유리纖維 補强材의 形態

形 態	形 狀	所 要 工 程	積層品에서 유리 含量 %	適 用 處
Roving	連續된 Strand	Filament Winding, Spray-Up, Pultrusion	25~80	Pipe, 車體, Rod, Rocket Motor Case
Chopped Strands	0.3~5cm 길이로 잘려진 Strand	Premix Molding, Preforming	15~40	電氣 및 장식용 외피
Reinforcing Mats	連續적이거나 잘려진 Strand의 Mat	Matched Die Molding, Hand Lay-Up	20~45	반투명한 관넬
Surfacing Mats	非强度用 Mat	Matched Die Molding, Hand Lay-Up, Filament Winding	5~15	부드러운 표면을 위한 외피
Yarn	꼬인 Strand	Weaving, Filament Winding	60~80	비행기, 선박, 전기용의 격중품
Woven Fabric	Yarn으로부터 직조된 천	Hand Lay-Up, Vacuum Bag, High Pressure Molding	45~65	비행기 구조물, 선박, 전기용품
Woven Roving	Roving으로부터 직조된 천	Hand Lay-Up	40~70	선박, 대형 콘테이너
Nonwoven Fabric	Sheet 형태의 1방향성 Roving	Hand Lay-Up Filament Winding	60~80	비행기 구조물

약점을 가지고 있다.

그러나 纖維狀의 補强材로 제작되면 内部缺陷이 상당히 감소되어 高强度와 高屈曲性を 보여 주며 高融點과 낮은 熱傳導度를 가진 材質이므로 일반적으로 高温强度가 우수하고 耐熱性과 熱遮斷效果가 他材質에 비해 월등히 우수하다.

各材質의 纖維들은 독특한 工法으로 제작하게 되는데 대부분의 纖維들이 表面處理工程을 거치게 된다. 表面處理를 하는 이유는 表面缺陷에 의한 강도저하를 없애고, 纖維間의 마찰을 방지하며 纖維와 樹脂의 接觸력을 증진시키기 위해서이다.

纖維와 樹脂의 接觸력이 불량하면 補强材가 아무리 우수해도 FRP의 강도는 크게 低下되므로 표면처리는 纖維補强材製作에서 중요한 工程이 되고 있으며 거의 Know-How로 보호되어 있다.

表 2에는 纖維補强材의 형태와 工程 및 應用이 소개되어 있다. 여기서 Strand는 200~1,000여개의 單纖維들을 모은 다발을 말하는 것으로 눈으로 보기에 한가닥으로 보인다.

다음은 各纖維補强材의 製法 및 特性에 대해 소개한다.

◇ Glass Fiber(琉璃纖維)

유리는 그 成分에 따라 區分되며 각각의 특성

에 따라 용도가 다르며 FRP에서는 E(Electrical)-Glass와 S(Strength)-Glass가 가장 잘 사용되고 있다. E-Glass Fiber는 Alkali-酸化物의 含量이 작아서 電氣的 特性이 우수하며, S-Glass Fiber는 强度와 彈性率에 E-Glass Fiber 보다 20~30% 더 높고 酸性溶液에 대해 우수한 耐蝕性을 가지고 있으나 價格은 E-Glass Fiber 보다 約 10배나 비싸다.

유리纖維의 引張强度는 일반적으로 460,000~600,000 psi 이지만 時間이 지남에 따라 强度가 저하된다. 유리纖維는 다른 纖維에 비해 引張强度는 좋으나 彈性率에 작아서 荷重을 받을때 變形이 쉽게 일어나는 短點을 안고있다.

유리纖維는 120°C 정도의 熔湯속에서 熔解된 유리를 가늘고 짧은 管을 통해 秒當 約 50m의 속도로 引發하여 제조된다. 이때 熔湯속에서 들어있는 유리熔液의 粘度와 引發速度가 유리纖維의 지름을 決定하게 된다. 유리纖維의 지름은 대개 2.54~18 7μ으로 그 이상의 것은 纖維로서의 特性이 부족하다.

즉시 引發된 유리纖維의 强度는 900,000 psi 까지 되지만 수시간이 지나면 500,000~600,000 psi로 떨어지고 Strand로 만들면 400,000 psi 이하로 떨어지는데 이것은 그 精確한 原因이 규명되어 있지 않으나 보통 水分攻擊에 의한 表面缺

陷과 Strand 內에서 單纖維間의 마찰에 의한 表面缺陷인 것으로 생각되고 있다.

그러므로 이러한 表面缺陷을 방지하기 위하여 또 纖維와 樹脂間의 접착력을 증진시키기 위하여 表面處理劑(Coupling Agent)를 單纖維의 表面에 뿌려준다. 表面處理劑는 無機質과 有機質에 똑같이 접착이 잘되는 Silane과 有機크롬錯化合物이 사용되고 있다.

◇ Carbon-and Graphite Fiber(炭素 및 黑鉛纖維)

현재 高級 FRP 複合材料의 補强材로 널리 사용되는 纖維가 炭素 및 黑鉛纖維이다. 이것이 널리 사용되는 것은 纖維의 특성이 우수하다는 것과 價格 및 製作工程에 利點이 많기 때문이다.

炭素纖維는 1880년경에 높은 融點을 가진 특성 때문에 白熱燈의 필라멘트로 개발되어 처음으로 사용되었고 1959년경에는 耐磨耗性和 편리한 加工性 때문에 Ablative 材料의 補强材로 응용되어 왔다.

1965년에 高強度의 炭素纖維가 개발되자 많은 구조물의 補强材로써 각광을 받게 되었다. 유리纖維에 비하면 引張強度는 낮지만 彈性率은 높아서 견고한 구조물의 補强材로는 더 우수하다.

炭素纖維와 黑鉛纖維는 거의 같은 의미로 사용되고 있지만 구조상으로 상당한 差異를 가지고 있다. 같은 元素로 이루어진 이 두 纖維의 物理的 性質에 대한 차이점이 表 3에 잘 나타나 있다.

〈丑 3〉 炭素纖維와 黑鉛纖維의 物理的 性質

物理的 性質	炭素纖維	黑鉛纖維
纖維構造	非晶質	多結晶質
比重	1.3~1.8	1.5~2.0
熔融點	3,600°C以上	3,600°C 以上
熱傳導度 (Cal/cm/sec/°C)	0.01	0.38
電氣抵抗 (10^{-6} ohm-cm)	5,080	700

炭素纖維는 약 50\AA 의 미세한 黑鉛結晶質로 이루어져 있기 때문에 전체적으로는 非晶質狀態의 纖維이며 黑鉛纖維는 黑鉛結晶이 粗大한 상태를 이룬 多結晶質의 纖維이다. 이 두 纖維의

구조에는 차이가 있으나 機械的 性質은 加工方法에 따라 큰 차이가 없고 肉眼으로는 구별되지 않으며 電氣傳導도와 같은 物理的 性質의 측정 에 의해서만 식별할 수 있다.

炭素 및 黑鉛纖維는 다같이 약 $7\mu\text{m}$ 정도의 Rayon絲나 PAN(Polyacrylonitrile)絲를 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 정도에서 酸化시킨후 眞空이나 不活性氣體속에서 1000°C 로 가열하여 炭化시킨후 2700°C 부근에서 黑鉛化시킴으로써 제조된다. 이런 基本工程에 따라 各製造會社들은 특유의 秘法을 가미하여 纖維를 제작하고 纖維의 특성을 고려하여 工程을 변화시켜 高強度纖維나 高彈性纖維를 제작할 수도 있다.

現在로서는 美國·英國·日本등 先進 몇개국에서만 생산되고 있으며 各製造會社마다 여러 等級의 纖維로 판매하고 있으며 형태는 Fiber, Yarn, Felt, Cloths 등으로 판매된다.

◇ Boron Fiber(硼素纖維)

1959년에 化學蒸着法(Chemical Vapor Deposition)에 의해 개발된 硼素纖維는 高強度, 高彈性 때문에 비행기의 FRP로 많이 사용되어 왔다. 그 製作工法과 FRP에의 응용은 美軍事材料試驗部에서 많이 연구되어졌다.

硼素纖維의 化學蒸着法에 의한 제조방법은 反應物로 사용하는 氣體에 따라 Halide 工法과 Hydride 工法으로 구분되어진다. 高溫으로 가열된 가는 텅스텐線(지름 0.0005 inch)에 Halide인 BCl_3 氣體를 熱分解시켜 蒸着시키는 방법이 Halide 工法이며 Hydride인 B_2H_6 를 蒸着시키는 방법이 Hydride 工法이다. 현재 生産供給되는 대부분의 纖維가 Halide 工法으로 제조되고 있으며 Hydride 工法은 현재 개발되고 있는 도중이다.

Boron Fiber의 평균지름은 약 0.004 inch(100μ) 정도의 굵기를 가지며 平均引張強度는 460 ksi 정도이고 彈性率은 60×10^6 psi로 유리纖維에 비하면 수십배나 된다. 比重은 2.63이며 熱膨脹係數는 $2.7 \times 10^{-6} \text{in/in}/^{\circ}\text{F}$ 硬度는 4000kg/mm^2 이다.

硼素纖維도 초기에는 母材와의 접착을 좋게 하기 위하여 Silane으로 表面處理를 했으나 현재에는 表面處理 없이도 사용하며 대신에 耐酸化

〈표 4〉

纖維狀 補强材의 特性

補强材	物性	熔 融 點 °C	密 度 g/cc	引張强度 10 ³ psi	比 强 度 10 ⁶ in.	彈 性 率 10 ⁶ psi	纖 維 直 徑 μ
E-Glass fiber		700	2.55	500	5.4	10.5	10
S-Glass fiber		840	2.50	650	7.2	12.6	10
Silica fiber		1,660	2.19	850	10.8	10.5	35
Carbon Graphite fiber		3,650	1.50	200	3.7	30	5
Boron fiber (Tungsten 芯)		2,300	2.63	400	4.2	55	102
Tungsten fiber		3,400	19.4	580	0.8	59	13
HTS Steel fiber		1,400	7.74	600	2.1	29	13
수염섬유(Whisker)	Al ₂ O ₃	2,040	3.96	3,000	21.2	62	3~10
	SiC	2,690	3.21	3,000	26.1	70	<1~3
	Cr	1,890	7.20	1,290	5.0	35	
	Ni	1,455	8.98	560	1.7	31	

성을 높이기 위해서 SiC나 Nitride로 皮膜處理를 한다.

硼素纖維의 구조는 Halide를 熱分解하여 가열된 텅스텐線 위에 蒸着하기 때문에 20Å의 硼素結晶으로 이루어진 非晶質狀態를 보여주고 있다. 또한 纖維의 中心部位에 있는 텅스텐線은 硼素의 확산으로 WB의 化合物로 變하게 된다.

纖維의 硼素層은 Nodular 形狀을 이루고 있으며 이 形狀은 化學蒸着工程에 따라 變하게 된다. 蒸着工程에서 존재하는 불순물과 工程溫度에 따라 硼素纖維의 强度 및 形狀의 變化가 심하게 일어나므로 蒸着工程의 조건결정은 良質의 纖維製作에서 가장 중요한 문제가 된다.

에폭시樹脂에 붕소섬유로 보강시킨 Boron-Epoxy는 이미 美空軍의 戰鬥機에 應用되고 있으며 또한 알루미늄의 補强材로서 알루미늄의 高溫强度를 향상시켜 주기 때문에 Boron-Aluminum系 補合材料로 비행기의 胴體製作에도 사용되고 있으며 硼素纖維를 補强材로 한 金屬複合材料에 대한 研究도 활발히 進行되고 있다.

◇ Whisker(수염纖維)

수염纖維는 補强材로 사용 또는 纖維중에서 가장 理想的인 特性을 가진 纖維이다. 수염纖維의 기계적인 강도는 引張强度가 4000 ksi, 彈性率이 10⁶ psi 이므로 다른 纖維와는 비교가 안될 정도로 우수하다.

수염纖維의 이런 特性은 結晶粒界가 없는 單

結晶質을 이루고 있어서 纖維의 直徑이 1~20μ 정도로 미세하여 内部缺陷이 적기 때문이다. 그러나 아직도 연속적인 長纖維를 생산하지 못하여 사용상 制約이 있다.

現在 수염纖維로 이용되는 無機材料로는 Al₂O₃, SiC, SiN, AlN 등이 있으며 金屬材料의 대부분이 수염纖維로 제작될 수 있다. 현재로서는 價格이 엄청나게 비싸며 長纖維가 개발된다면 價格도 싸질 것이며 가장 장래성 있는 補强材로 손꼽을 수 있다.

表 4에 이상에서 소개된 纖維補强材들의 特性이 나와있다.

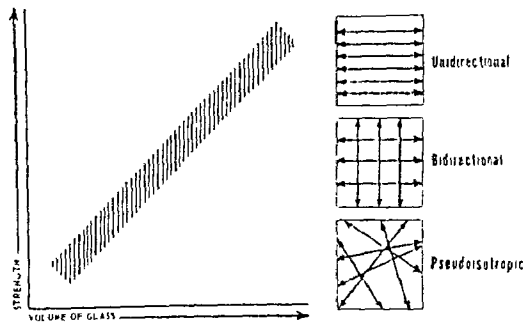
3 FRP의 特性

FRP는 複合材料의 일종으로 母材와 補强材로 이루어져 있으며 母材는 형태를 만들고 補强材는 荷重을 견딘다.

補强材가 纖維로 되어 있기 때문에 FRP 自體는 섬유의 방향에 따라 物性이나 强度가 달라지는 Anisotropic Material 이라는 特性을 가지며 이것은 長點인 동시에 弱점이 되고 있다.

補强材와 樹脂의 종류에 따라 FRP의 物性이 결정되지만 補强材의 함량에 따라 物性이 변하며 補强材의 含量이 많아질수록 FRP의 機械的 强度는 증가한다.

補强材의 함량은 方向性과도 관계가 있어서 그림 1에서 보는바와 같이 補强材가 한방향으로

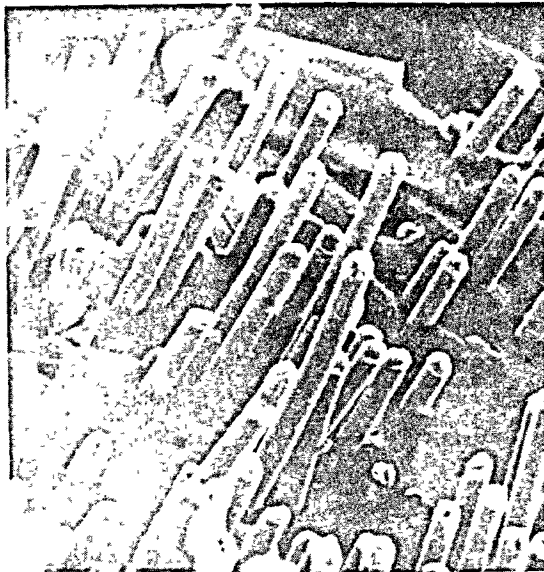


〈그림 1〉 補强材의 함량과 强度 및 方向性的 관계

配列되었을때 含量이 가장 크며 섬유배열 方向으로의 强度는 가장 크다. 補强材가 두方向으로 配列되면 함량과 强度는 조금 떨어지며, 方向이 없이 제멋대로 配列되었을때 含量도 가장 적고 强度도 가장 떨어진다.

FRP에서 强度에 영향을 미치는 또다른 요소들은 樹脂와 補强材間의 接착상태와 FRP 製作중에 생기는 空間(Void)의 含量으로 樹脂와 補强材가 잘 결합되지 않았을때는 樹脂가 荷重을 제대로 전달해 주지 못하며 荷重分布도 고르지 않아서 强度가 크게 저하된다(그림 2).

그러므로 FRP 製品製作時에는 補强材의 표면 처리規格과 Void Content의 許用基準値를 명시



〈그림 2-1〉 表面處理되지않은 炭素섬유 FRP의 파단면



〈그림 2-2〉 表面處理된 炭素纖維의 파단면

하고 있다. 軍事規格에는 FRP Molding 積層品의 경우 Void Content가 2% 以下, Filament Winding 製品일 경우 5% 以下가 될것을 規定하고 있다.

表 5에는 E-Glass를 補强材로한 FRP 積層品(Laminate)의 특성이 소개되어 있다.

앞에서도 말한 바와같이 FRP의 長點으로는, 첫째, 무게에 대한 强度 즉, 比强度가 커서 輕量化에 도움이 되며

둘째, 熱傳導率이 작고 比熱이 커서 熱遮斷 및 耐熱材로도 우수하며

셋째, 誘電率이 작고 電波透過性이 뛰어나며

네째, 化工藥品이나 기타의 腐蝕에 강하여 유지하기 편하며

다섯째, 生産工程이 간단하고 부피가 큰 製品도 한번에 생산할 수 있어서 生産費가 저렴하다는 점들이다.

이런 長點들 중에서도 比强度와 斷熱性 때문에 Missile이나 Rocket에 많이 응용하고 있으며 그 適用處로는 Motor Case, Radome, Nose Cone, Thrust Chamber, Nozzle 部位, Launcher Tube 등이며 航空機에는 Radome, Aileron, Fuselage, Duct, Antenna Housing, Helicopter Blade, Engine Blade 등에 응용하고 있으며 商

<표 5>

E-Glass-Resin FRP Laminate의 物性

Laminate 性 質	Polyester	Epoxy	Epoxy Filament Winding	Phenolic	Silicone	Polyimide	Asbestos Phenolic
比 重	1.85	1.85	1.9~2.2	1.73~1.95	1.7~1.9	1.9	1.72~ 1.8
Rockwell 硬度(M)	110	105~120	115~120	100	100	60	90~110
水分吸收(24 hre %)	0.60	0.2~0.3	0.4~1.0	0.5	0.1	0.5	2~5
引張強度 psi	46,000	60,000~ 75,000	100,000~ 200,000	55,000	30,000~ 40,000	55,000	32,000
引張彈性率 10 ⁶ psi	3.1	3.4	4.5~7.5	3.4~4.5	2.7	3.5	4.0
屈曲強度 psi	65,000	75,000~ 95,000	90,000~ 200,000	64,000~ 85,000	33,000	55,000	32,000
壓縮強度 psi	37,000	50,000~ 60,000	45,000~ 80,000	45,000	29,000	45,000	25,000
熱傳導率 Btu/th·hr·°F	0.09~0.1	0.1~0.2	0.16	0.07~0.12	0.08~0.1		0.1
比 熱 Btu/lb·°F	0.28	0.25~0.28	0.25	0.23	0.25		0.29

業으로는 전부 플라스틱인 飛行機(All-Plastics-Airplane)도 생산하고 있다.

FRP의 問題點으로는,

첫째, 현재까지의 FRP는 理論적으로 설계하여 제작하기 보다는 經驗과 試行錯誤에 의해 製作되고 있기 때문에 때때로 예기치 않았던 失敗(Failure)를 초래할 수 있으며

둘째, 工程中에 FRP 제품의 性質에 영향을 미치는 要素들이 많으며 그것들이 正確하게 규명되지 않았으며 製作者에 따라 製品이 다르고 成形品の 性質差異를 精確하게 測定할 수 없으며

셋째, Test 試片이 製品과는 별도로 만들어지기 때문에 결과가 다르게 나올 수 있으며

네째, 品質管理가 어렵고

다섯째, 經時特性(Aging Characteristics) 즉, 耐久性과 耐候性은 주로 樹脂의 특성과 밀접한 관계가 있으나 그에 대한 資料가 부족하여 使用可能期間에 대한 保證이 확실치가 않다는 점이다.

III. FRP의 製作

1. 設計

FRP는 人爲的인 複合材料중의 하나로 자체적으로 Anisotropic 한 性質을 갖고 있어서 力學的으로 완전히 設計하기가 어려우며 Test 方法도

標準化되어 있지않고 試行錯誤를 계속하고 있다.

FRP의 설계는 機械的인 면과 化學的인 면으로 나눌 수 있으며 그 두가지 면을 잘 만족시키지 않으면 원하는 特性을 가진 製品을 얻을 수 없으며 經驗的인 기술과 우수한 裝備도 필요로 한다.

◇ 機械的인 면

複合材料는 가볍고 높은 強度와 높은 剛性을 가진 材料로서 塑性變形이 거의 일어나지 않으며 衝擊과 疲勞에 강하고 腐蝕에 강하므로 높은 荷重을 받는 구조물에 사용되고 있다.

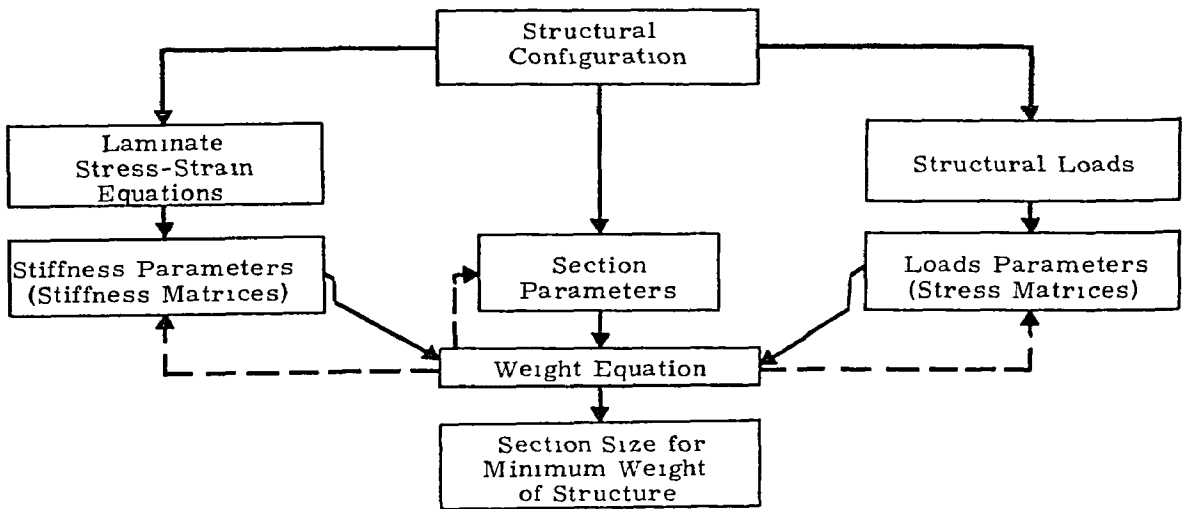
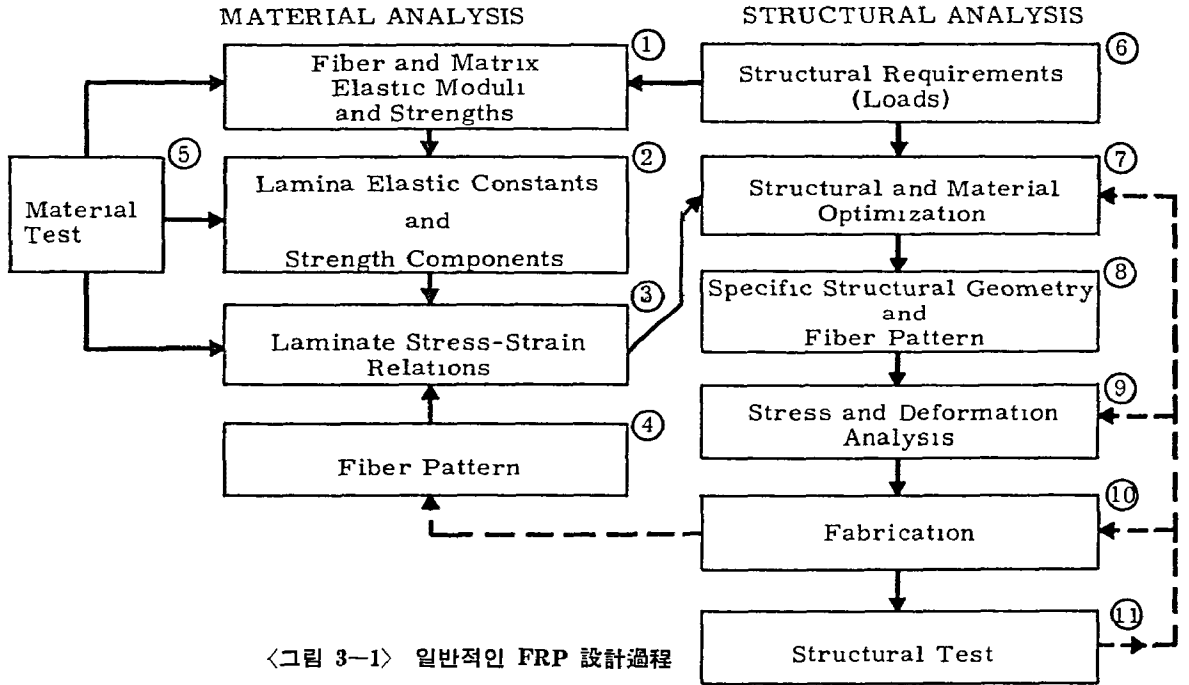
纖維補強材와 母材로 구성된 複合材料는 구조물의 主應力方向으로 配列하므로서 높은 應力에 견딜 수 있게 設計할 수 있다.

複合材料 構造物은 그림 3과 같이 構造的인 分析과 材料分析을 동시에 해야한다. 이 그림의 材料分析過程은 Lamina의 機械的인 性質과 Laminate의 機械的인 性質을 결정하는 과정이다.

Lamina의 機械的인 特性을 알기 위해서는 纖維의 방향과 그에 垂直한 방향의 彈性係數와 強度를 알아야 한다.

Laminate(積層品)의 彈性係數는 각 Lamina의 彈性係數와 積層順序 및 Lamina間的 각도에 의존하므로 이 要素들의 組合으로 계산하여 求하며—실제로 이 計算은 굉장히 복잡하며 어렵다—.

Laminate의 彈性係數를 알면 Laminate의 應



〈그림 3-2〉 FRP의 構造 및 材料 最適設計

力과 變形率 사이의 關係式을 求할 수 있다. 이 린 材料分析이 끝나면 構造分析을 한다.

構造分析은 먼저 구조물의 形狀과 그 形狀이 받는 荷重 및 周圍環境을 고려하여야 한다. 이러한 媒介變數는 Laminate의 彈性係數와 더불어 구조물의 最適設計의 入力資料가 된다.

最適設計 과정에서 最小重量의 구조물을 만들기 위해 纖維의 방향, 두께 및 積層順序를 결정해야하며 다음으로 構造物에 어떤 部位의 應力이 구조물의 強度를 증가하는지 결정하기 위해 應力分析을 하고, 만일 強度缺陷이 생기면 두께 角度, 積層順序 등 形狀을 변경시켜야 한다. 이

런 과정이 끝나면 제작하고 構造實驗을 한다.

◇ 化學的인 面

化學的인 面은 주로 母材인 플라스틱樹脂의 문제로서 補强材와 樹脂間의 結合을 증진시키는 것과 Void의 含量을 최소로 하는 것, 樹脂가 補强材에 잘 젖어들게 하는 것, 成形後의 收縮率이 작아지는 것, 耐久性이나 耐候性이 강한 樹脂가 되도록 樹脂의 Formulation(樹脂에 대한 처방)을 調節하고 제작공정에서의 문제가 되는 樹脂의 粘度, 硬化時間, 硬化溫度, 作業許用時間등을 고려해야 한다.

2 製作工程

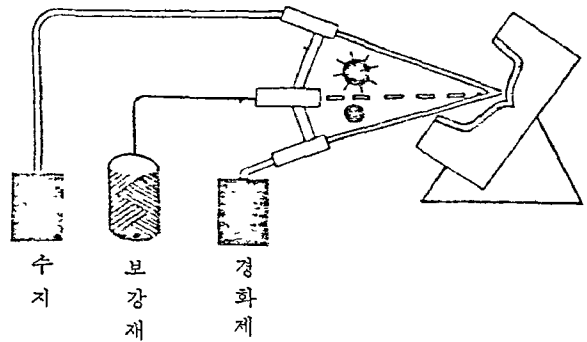
FRP 製作공정은 製品의 용도와 經濟性에 크게 支配를 받는다. FRP의 製作工程은 크게 Lay-Up, Molding, Pultrusion, Filament Winding, Sandwich Construction으로 나눌 수 있으며 이런 工程을 개량한 工程들이 많이 개발되어 있다. FRP 製品은 다른 材料에서 보다는 經驗的인 要素가 많이 작용하며 製作技術에 따라 품질이 크게 달라진다.

◇ Lay-Up Process

이 Process는 가장 간단하게 FRP를 제작하는 工程으로 한쪽 面만 있는 金型(Mold)에 단순히 補强材를 쌓고 樹脂를 발라주며 대개 常溫에서 成形한다. Mold의 材料는 나무, 흙, 석고, 플라스틱, 鐵등 값싼 材料를 사용하며 補强材의 형태는 Mat, Fabric, Chopped Strand이고 樹脂는 Polyester나 Epoxy를 사용하며 硬化時에 압



〈그림 4〉 Hand Lay-Up Process



〈그림 5〉 Spray-Up Process

력이나 溫度를 요하지 않기 때문에 生産費는 저렴하나 強度가 떨어지므로 構造物로는 잘 사용하지 않는다.

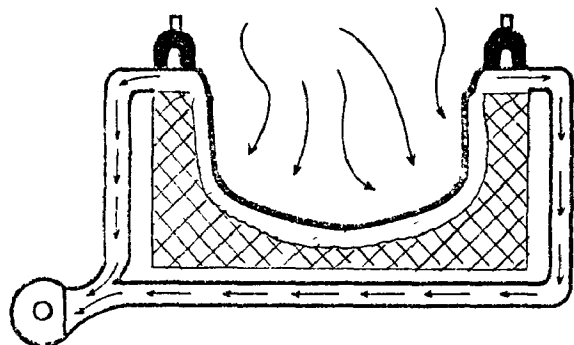
사람의 손으로 直接 만드는 Hand Lay-Up Process(그림 4)와 그것을 改良한 Spray-Up Process(그림 5)가 보편화 되어있다.

◇ Molding Process

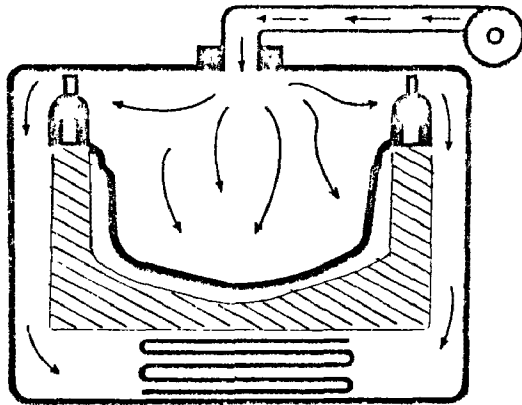
FRP 産業에서 대표적인 工程으로 가장 일반적으로 이용되고 있다. 압수 두개의 Mold를 사용하여 壓力과 溫度를 높여줄 수 있어서 Polyester, Phenolic, Silicone, Polyimide 등의 樹脂는 대개 Molding Process로 成形한다.

FRP 原料는 보통 BMC(Bulk Molding Compound), SMC(Sheet Molding Compound), Preform이라는 Prepreg을 사용한다. Molding 壓力은 樹脂에 따라 2000psi까지, 溫度는 100~300°C 溫度維持時間은 수분~수시간이 소요된다.

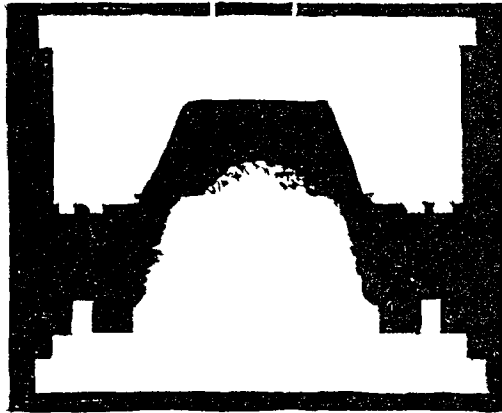
Molding Process에는 Vacuum Bag Molding(그림 6), Autoclave Molding(그림 7), Matched Die Molding(그림 8) 등의 方法이 있으며 Bag Molding은 50 psi 이하의 壓力에서 成形하고,



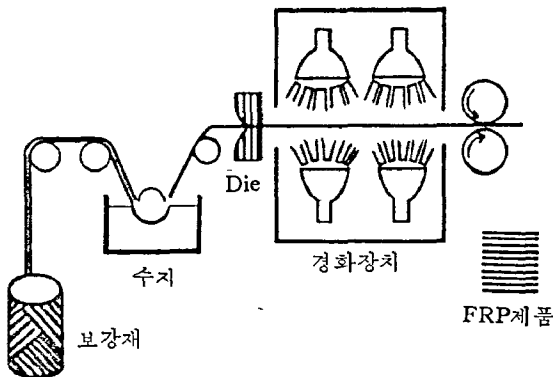
〈그림 6〉 Vacuum Bag Molding



〈그림 7〉 Autoclave Molding



〈그림 8〉 Matched Die Molding



〈그림 9〉 Pultrusion

Autoclave Molding에서는 50~300psi, Matched Die Molding에서는 500~2000psi 정도의 압력에

서 成形하여 FRP 製品을 만들어낸다.

◇ Pultrusion

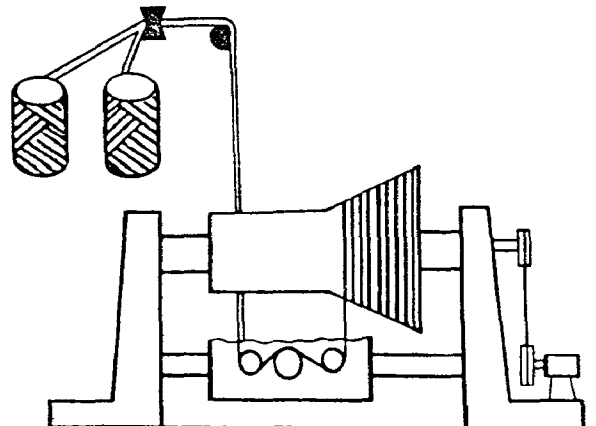
Molding Process의 특수한 應用工程으로 Molding Process는 製品이 한개씩 생산되는데 비해 Pultrusion에서는 연속적으로 생산되어 自動大量生産이 가능하다. 주로 斷面이 일정한 Bar, Rod, Beam, Cylinder, Tube 등을 생산하는데 이용되며 高周波 및 紫外線을 이용한 樹脂硬化法이 개발되어 Molding Process에서처럼 오랫동안 硬化하지 않고 수분내에 硬化할 수 있어서 工程이 연속적으로 진행된다.

Polyester와 Epoxy樹脂가 사용되며 補強材는 주로 Roving을 쓴다. 수 십개의 Roving에서 한 가닥씩의 Strand를 뽑아 樹脂를 含浸시키고 Mold 役割을 하는 Die를 통과하면서 硬化된다.

◇ Filament Winding

壓力容器를 제작하는 Process로서 Pipe나 Tube, Cylinder, 化學物質들의 輸送 및 貯藏 Tank 製作에 이용된다. 軍事的으로는 Motor Case, 小型 Missile의 發射管, Radome 등의 제작에 이용되고 있다. 이 工程은 纖維補強材에 樹脂를 含浸시켜서 Mold 役割을 하는 Mandrel에 감아서 硬化하고 Mandrel을 빼내고 加工하는 工程으로 용도에 따라 감는 角度가 다르게 設計되며 容器의 지름과 길이에 따라서 Polar Winding과 Helical Winding을 구별해서 감는데 길이가 짧고 지름이 클 경우에는 Polar Winding으로 감은 후 Hoop Winding으로 보강해 준다.

商業的으로는 設計와 品質管理가 엄격하지 않



〈그림 10〉 Filament Winding

고 재료도 E-Glass와 Polyester 樹脂를 사용하지만 軍事 및 宇宙用으로는 最適設計과 엄격한 品質管理를 요하며 S-Glass와 Epoxy樹脂를 사용한다.

製品の 性能은 여러가지 Winding Void 因子의 지배를 받는다. 그러므로 Sandwich 設計와 製作過程에서 다음과 같은 事項에 留意해야 한다.

- 첫째, 補强材와 樹脂의 選定
 - 둘째, 補强材와 樹脂間의 완전한 接着
 - 셋째, 纖維補强材가 製作過程에서 均일하게 당겨질 것과 정확한 角度를 維持할 것
 - 넷째, 樹脂와 補强材의 含量이 일정할 것
 - 다섯째, Construction를 최소한으로 줄일 것
- 구조는 Sandwich 1-Beam의 原理를 응용한 것으로 무게가 가벼운 반면에 壓縮強度와 굽힘強度가 뛰어나서 航空機部品 및 Radome으로 많이 사용되고 있다. Sandwich 구조는 무겁고 얇으며 強度가 큰 두장의 平板 Skin과 가볍고 두꺼우며 強度가 작은 Core(Foam 또는 Honeycomb)으로 이루어져 있어서 Core는 外部荷重으로부터 剪斷應力을 견디고 Skin이 주그러지는 것을 보호하며 Skin 間의 거리를 유지하여 貫性能率을 크게하는 役割을 하며 Skin은 굽힘荷重을 견디고 荷重을 均일하게 分配하므로써 전체적으로 가벼우면서 效率적인 구조물이 된다.

Skin의 材質은 Steel, Aluminum, FRP Laminate 등을, 사용하며 Core는 Honeycomb Core나 Foam Core로서 Plastic을 사용한다. Honeycomb Core는 본래 六角形이나 용도에 따라서 三角形, 四角形, 圓形등 모양이 다양하며 Foam은 스펀지와 같은 多空性의 Plastic이다.

3 FRP의 試驗檢査 및 品質管理

良質의 FRP 製品을 얻기위해서는 原料에 대한 철저한 檢査와 工程管理, 製品의 品質檢査와 品質管理가 필요하다.

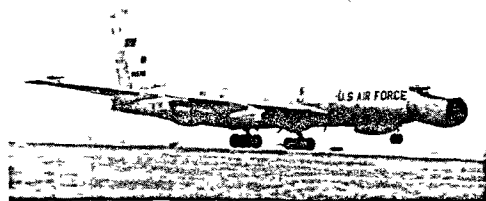
일반적인 材質은 ASTM이나 MIL-SPEC으로 規格, 基準 및 檢査方法이 확정될 수 있지만 FRP는 아직도 研究, 開發의 餘地가 많으며 Anisotropic한 性質때문에 Test 方法이 확정되지 못한것들이 많다.

일반적으로 樹脂의 粘度測定, 硬化溫度 및 壓력과 時間測定, 保存수명과 作業수명, 樹脂自體의 物性 및 補强材의 物性등이 原料檢査에서 행해지며 FRP 製品에 대해서는 比重測定, 強度測定, 熱性測定, 電氣的性質測定이 행해지며 缺陷測定에는 肉眼檢査와 X-Ray나 Ultrasonic Tester를 이용한 NDT(非破壞檢査)를 행한다.

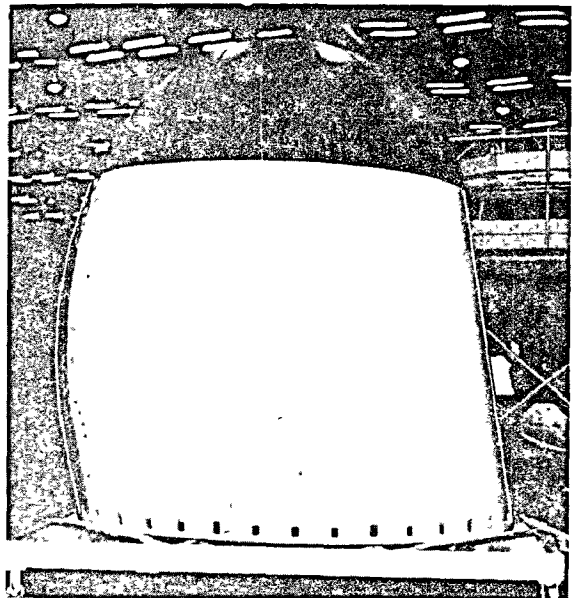
NDT 裝置를 이용하여 결함을 찾는것도 FRP 製作에 큰 技術로서 오랜 經驗과 工學的인 판단력을 필요로 한다.

VI. FRP의 軍事的 應用

FRP의 軍事的인 응용이 시작된 것은 2次世界大戰중에 軍用飛行體의 Radome의 電子的인

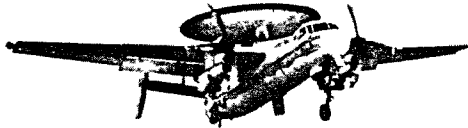


(A)

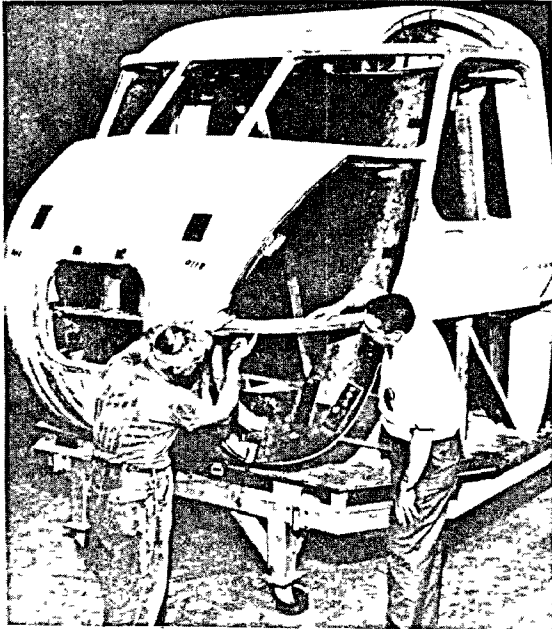


(B)

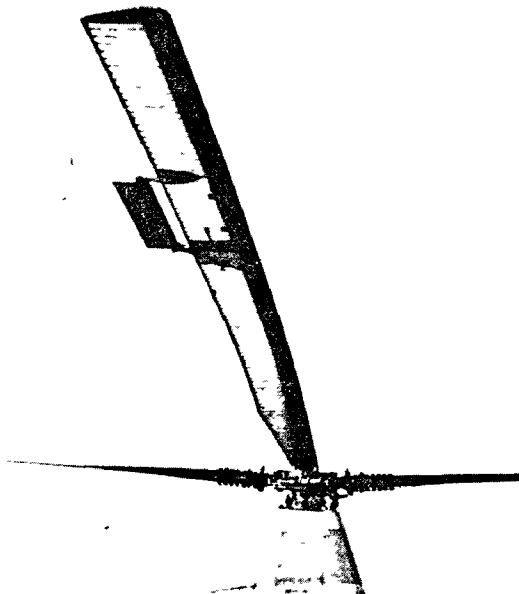
〈그림 11〉 軌道飛行中인 宇宙船으로부터 음성을 중계하는 Radome. Vacuum으로 製成된 Epoxy Honeycomb으로 길이 10 ft, 지름 7 ft.



〈그림 12〉 E-2a Hawkeye에搭載된 지름 24ft의 Radome



〈그림 13-1〉 Helicopter의 조종실을 Glass-Epoxy로 제작하고 있다.



〈그림 13-2〉 Boron Epoxy로 제작된 Helicopter Blade

요구를 만족시키기 위해 사용된 후 FRP 應用에 대한 활발한 研究가 이루어졌다. 이 당시에는 Vacuum Bag Molding이나 Autoclave Molding으로 200 psi 이하에서 成形했으나 현재는 2000 psi까지도 압력을 가하여 成形하고 있다.

FRP가 金屬보다 比強度, 斷熱性, 耐蝕性, 電波透過性에 있어서 더 우수하기 때문에, 작게는 電子回路用 기판에서 부터 크기는 Missile의 Motor Case에 이르기까지 광범위하게 이용되고 있다.

◇ 地上兵器에의 應用

地上兵器로는 小銃分野에서 개머리판과 彈倉을 Molding 된 FRP로 제작하여 輕量化 및 短形化를 기하고 對戰車 Rocket(Dragon, Viper 등)의 發射管이나 Motor Case를 Filament Winding 製品으로 제작하고 있으며 계속 개발중에 있다.

◇ 航空機에의 應用

航空機에 사용되는 FRP 製品은 Radome(그림 11, 12), Antenna Enclosure, Fairing, Elevator, Horizontal Stabilizer, Helicopter Blade(그림 13) 등이 代表的인 應用處이며 F-14의 Horizontal Stabilizer에 Boron Epoxy FRP를 導入한 이래로 Boron-Epoxy, Graphite-Epoxy系의 FRP 製品이 많이 사용되어 왔으며 F-18의 경우 全體重量의 10%를 Graphite-Epoxy FRP로 설계하고 있으며 장래의 戰鬥機에는 30%까지 FRP로 제작할 것으로 보이며 製作方法은 Molding이나 Filament Winding 또는 Sandwich Construction으로 제작하게 된다.

◇ Missile 및 Rocket에의 應用

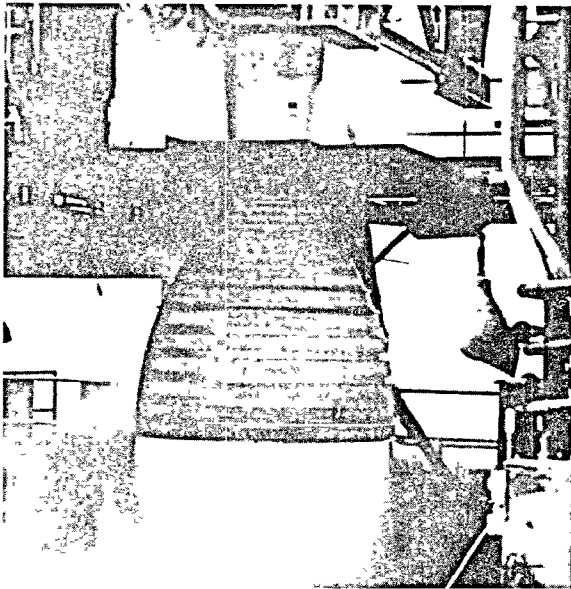
超音速이나 極超音速으로 비행하는 Missile이나 Rocket에는 空力加熱 및 推進機關에서 발생되는 熱을 차단해 주는것과 여러가지 荷重들을 이겨낼 수 있는 材料들이 필요하다. Missile과 Rocket의 Radome, Nozzle, Nose, Body, Leading Edge, Motor Case 등은 특히 斷熱性이 필요한 部位이다.

Radome은 通信裝備을 수용하고 있어서 斷熱性和 電波透過性이 좋아야하며 Nozzle 部位(그림 14)는 高溫의 腐蝕性 燃燒 Gas가 빠른 속도로 통과하기 때문에 Ablation 性能도 우수해야

한다. Nozzle 部位에는 Asbestos-Phenolic이나 Silica Phenolic Carbon-Phenolic系의 FRP가 많이 사용되고 있다.

Motor Case를 FRP Filament Winding으로 製作한 Missile이나 Rocket으로는 Polaris, Minuteman, Atlas가 있다. Polaris A2 Missile은 1 단계는 Steel이며 2段階는 FRP로 되어 있으나 A3 Missile은 두段階 모두 FRP로 제작되었고, Pershing Missile은 Aluminum Case 위에 FRP Filament Winding으로 제작하여 Case당 20,000 달러의 生産費를 절약하였다.

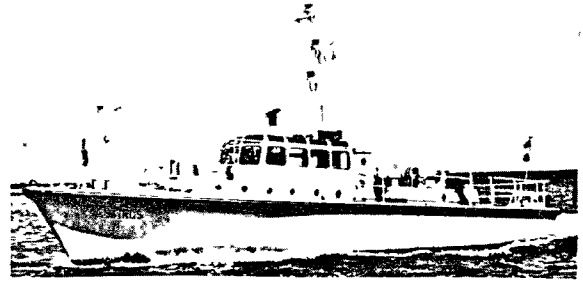
Minuteman은 제 3段階 Rocket Motor를 FRP로 제작하여 Titanium Case 生産費의 90%를 감소시켰다. Filament Winding으로 製作된 Motor Case는 보통 1,000 psi의 壓力을 오랫동안 견디며 3,000 psi 이상의 壓力도 이겨낼 수 있다.



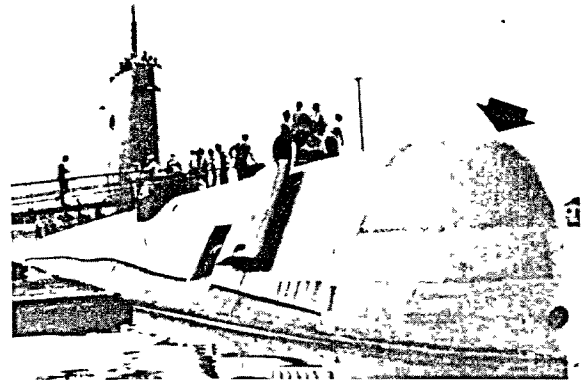
〈그림 14〉 地上에서 연소試驗中인 FRP Thrust Chamber

◇ 海上 및 水中兵器에의 應用

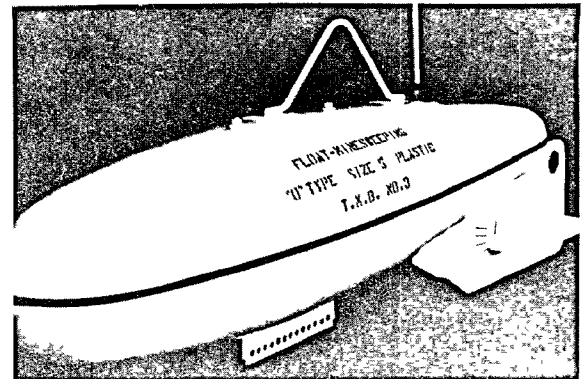
Boat나 小型船舶의 船體(그림 15)는 현재 FRP Lay-Up 또는 Molding 法으로도 생산하고 있으며 비행기의 Radome과 같이 潛水艦이나 驅逐艦 등의 Sonardome(그림 16)을 FRP로 製作하고 있으며 機雷除去를 위한 Minesweeper(그림 17)는 Non-Magnetic이라야 하므로 FRP로 만든 Boat를 사용하는 것이 좋다.



〈그림 15〉 77 ft짜리 네덜란드의 Pilot Boat



〈그림 16〉 잠수함의 Sonardome



〈그림 18〉 Minesweeper

V. 結 言

以上에서 살펴본 FRP 複合材料는 많은 長點을 가지고 있으며 또한 未解決된 문제점들도 가지고 있다. 그러나 世界的인 추세로 볼때 FRP의 사용은 漸增되어 가고 있으며 先進工業國에서는 오래전부터 未來의 材料로서 개발에 力點

을 두어왔다.

商業的으로는 自動車, 小型船舶, 輕飛行機, 貯藏容器, 化學工場, 家庭用品 및 Sports 用品에 어느정도 일반화되어 그 응용이 크게 늘어나고 있으며 軍事的으로는 兵器體系의 輕量化로 機動性を 높이고 性能을 증가시키며 生産費를 절감하여 費用對效果面에서 有利한 점을 살려서 個人火器 및 小型 Missile에의 응용이 늘어나고 있으며 戰鬪機에 있어서도 앞으로 全體重量의 30% 까지 FRP化 하려고 하고있다.

한편, 國內的으로 볼때 FRP에 대한 小規模의 散發的인 연구와 빈약한 裝備와 施設을 갖춘 中小企業에서 Boat, 貯水槽, 浴槽 및 耐酸容器등을 생산하고 있으며 FRP 材料의 重要性에 비추어 볼때 投資가 적은 편이다. 그러나 가까운 日本이나 台灣에서는 軍事的인 이용에 까지 이른 실정에 있다.

未來의 材料로 각광을 받고 있는 FRP에 대한 投資를 늘려서 專門人力의 養成과 裝備의 現代화가 시급히 요구되며 技術을 蓄積하여 民間産業發展은 물론 自主國防에 이바지 할수 있는 시기가 빨리 올것을 바란다.

參 考 文 獻

1. Robert. V. Milby, "Plastics Technology", McGraw-Hill Co., New York, 1973.
2. Brian Parkyn, "Glass Reinforced Plastics", Butterworth & Co. Ltd, London, 1970.
3. George Lubin, "Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites", Van Nostrand Reinhold Co New York, 1969.
4. "복합재료", 화학공학, 제16권, 제 2 호, 1978년 4월
5. MIL-HDBK-17, Part 1, "Reinforced Plastics", Armed Forces Supply Support Center, Washington D. C., Nov. 1959.
6. N. J. Parrat, "Fiber Reinforced Materials Technology", Van Nostrand Reinhold Co., 1972
7. C. Z. Carroll—Porczynski, "Advanced Materials", Chemical Publishing Co., 1969.
8. H. W. Rauch, Sr., W. H. Sutton, and L. R. McCreight, "Ceramic Fibers and Fibrous Composite Materials", Academic Press, 1968.
9. G. Piatti, "Advances in Composite Materials", Applied Science Publishers, Ltd., 1978.
10. D. V. Rosato and C. S. Grove, Jr., "Filament Winding", John Wiley & Sons, Inc., 1974.
11. R. M. Jones, "Mechanics of Composite Materials", McGraw Hill Book Co., 1976.
12. National Defense, Jan/Feb. 1974, Cwo T. L. Golden, "The Dragon Missile"
13. National Defense, Nov/Dec ' 1977, C. F. Bersch and L. B. Lockhart, Jr., "Navy Composite Materials Research"
14. Modern Plastics Encyclopedia, Vol. 54, No. 10A, 1977.
15. Donald F. Haskell, "Structural Design and Analysis of Fiber Reinforced Composites", SAMPE J. Vol. 12, D-1, 1967.

— (◇) —