

첨단 복합재료 산업의 구조



김 병 선

(복합재료실 선임연구원)

- '77. 5 미국 Grinnell College 물리학(학사)
- '78. 5 미국 Washington 대학교 기계공학(학사)
- '80. 5 미국 Washington 대학교 기계공학(석사)
- '90. 12 미국 Missouri-Rolla 대학교 기계공학(박사)
- '91. 2-현재 한국기계연구원 선임연구원



김 현 수

(복합재료실 연구원)

- '86. 2 인하대학교 공과대학 금속공학과(학사)
- '88. 2 인하대학교 대학원 금속공학과(석사)
- '88. 3 포항제철(주)
- '91. 1-현재 한국기계연구원 연구원

1. 서 론

첨단 복합재료의 역사는 세계 제2차 대전 중 미국, 영국, 일본을 비롯한 선진 각국에서 재료 과학의 발달 결과에서 시작되었다. 그 후 1960년대 우주경쟁, 상업용 항공산업의 성장, 여가 시간의 활용증가 등에 따라 고성능 첨단 복합재료 제품의 필요성이 대두되어, 첨단 복합재료에 대한 연구 개발이 선진국을 중심으로 활발하게 이루어져 왔다.

1991년 전세계 첨단 복합재료부품의 시장은 약 15,000톤, 액수로 환산하면 약 15억불에 달했다. 1980년대 복합재료 생산량은 7년마다, 액수로는 5년마다 2배로 증가하여, 최종제품기준으로 매년 50억불에 달했다. 1980년대 말에 일부 특정의 보강섬유, 수지, 최종제품 등의 년평균 신장율은 15~18%에 달하기도 하였다. 방위 산업분야에서는 매년 10% 정도 수요가 감소해도, 첨단 복합재료 산업은 역동적이고 발전적인 구조를 갖고 있다. 방위산업 분야에서 수요가 감소하더라도 첨단 복합재료산업은 생산능력의 증가에 따른 재료비의 하락, 성형공법 개선에 따른 최종제품가격의 감소로 인하여 비방위산업 분야의 제품응용이 증가하는 등 활성화되고 있다. 그러나, 첨단 복합재료가 전산업분야에서 응용되기 위해서는 아직도 해결해야 할 문제들이 많이 있다. 본 내용은 첨단 복합재료산업의 구조와 향후전망에 대하여 기술한 것으로서 최근 입수된 "ADVANCED COMPOSITES"에 게재된 "The structure of the advanced composites industry"를 요약 발췌한 것이다.

표 1) 전세계 고성능 복합재료 생산량 추이

	년 도	생산량(kg)	증가율(%)	액수(US\$)	증가율(%)
보강섬유	1985	5,278,695		312,970,000	
	1986	5,949,489	12.7	355,630,000	13.6
	1987	6,830,359	14.8	397,790,000	11.8
	1988	8,113,806	18.8	423,950,000	6.6
	1989	8,940,858	10.1	397,490,000	-6.2
	1990	10,131,240	13.3	453,260,000	14.0
프리프레그 (Prepreg)	1985	6,993,164		301,790,000	
	1986	8,219,274	17.5	385,670,000	27.7
	1987	8,888,224	8.1	452,420,000	17.3
	1988	10,278,340	15.6	498,600,000	10.2
	1989	12,029,233	17.0	586,210,000	17.5
	1990	12,890,038	7.1	653,360,000	11.4

2. 첨단 복합재료의 원재료

2.1. 강화재료

첨단 복합재료용 강화재료로 가장 많이 사용되고 있는 것은 탄소섬유이다. 그 중에서 PAN계 탄소섬유는 Filament, Tape, Tow 형태 등으로 공급되고 있으며, 첨단 복합재료용 강화재료의 대부분을 차지하고 있다. 최근에는 고탄성율 Pitch계 섬유도 수요가 증가하고 있다. 탄소섬유의 가격은 일반 산업용이 파운드당 7불에서 1,000불까지 광범위 하며, 항공용은 파운드당 20불 미만이다.

아라미드 섬유는 방향성 Polyamide섬유의 일반적인 명칭으로 수요자들에게는 Du Pont사의 Kevlar라는 상품명으로 잘 알려져 있으며, 역시 여러 등급이 유럽과 일본에서 생산되고 있다. 이 섬유는 첨단 복합재료의 강화재료보다는 석면, 고무벨트, 케이블, 방탄복등과 같은 분야에서 더 많이 이용되고 있다. 미국의 Allied-singal사는 초고분자량 Polyethylene 섬유를 개발하여 이들 시장에 섬유를 공급하고 있으며, 네덜란드와 일본의 회사들도 현재 생산하고 있다. 아라미드 섬유의 가격은 브레이크용이 파운드당 8불, 고성능 아라미드섬유는

파운드당 12불에서 15불 수준이며, Allied사의 Spectra섬유는 이보다 약간 낮은 수준이다.

구조적 유리섬유는 Owens Corning Fiberglas사가 개발한 고탄성, 고성능 섬유로서 보통 S-2 유리섬유라 하며, 우수한 인성으로 인하여 미국에서 헬리콥터의 Rotor blade에 사용되고 있다. 이 섬유는 기타 항공기 부품에서도 다른 고탄성 섬유와 Hybrid화 하여 사용하고 있다. 최근에는 경량을 요하는 용기, 방산용등으로 페들수지와 복합하여 사용함으로써 응용이 확대되고 있다. 이들 응용 분야에서 사용하는 섬유는 파운드당 6불 수준이다.

Boron섬유, 세라믹 섬유, 그리고 금속 Whisker 등은 일부 방위산업용으로 중요하다. 탄소/탄소 복합재료는 항공기의 브레이크와 열차폐 응용부품에 사용되고 있으며, 금속과 세라믹-금속복합재료의 응용 부품들도 활발하게 개발되고 있으나, 아직 상업용으로는 고려되고 있지 않다.

Suppliers of Advanced Composite Materials Association(SACMA)에 따르면, 1990년도 고탄성계 섬유의 전세계 출하량은 10,000톤에 이른다고 한다. 그러나, 전문가들은 이러한 수요의 양적 증가에도 불구하고 설비능력과 경쟁이 과열되어 있어서 당분간 이익을 내는 업체는 드물 것으로 보고 있다.

2.2. 기지재료

첨단 복합재료는 강화섬유와 기지재료로 이루어지며, 기지재료로는 수지, 금속, 세라믹 등이 있으나 가장 많이 사용되고 있는 것은 수지이다.

복합재료산업에서 기능적으로 보면 복합재료용 수지의 공급 업체들은 강화재료 생산업체와 유사하다. 즉, 수지의 공급업체들은 보강섬유의 구입을 위해 보강섬유업체의 고객이면서, 프리프레그 제조와 복합재료 성형을 겸하고 있다.

일반적으로 복합재료에 사용되는 수지는 크게 열경화성수지와 열가소성수지로 나눌 수 있다. 열경화성수지 중에서 에폭시 수지는 현재의 요구조건들을 만족시키는 우수한 성능으로 인하여 첨단 복합재료 산업에서 가장 많이 사용되는 수지이다. 에폭시수지의 특징은 우수한 강화재료와의 결합력, 화학적 저항성, 경화제와의 적응성, 치수 안정성, 전기절연성 등을 들 수 있다.

Polyetheretherketon(PEEK) 수지라는 열가소성 수지는 1982년에 처음 소개되었으며, 낮은 온도와 압력으로 성형 할 수 있는 장점 때문에 급속하게 주목을 받고 있다. 더구나, 열경화성수지와 같이 냉동에 의한 프리프레그의 저장이 필요없으며, 자동화된 생산기술에 의해 경화와 생산 시간이 짧은 것이 특징이다. 1990년대에 들어서, 인성과 보수성(Repairability)은 복합재료에서 고온 열가소성수지를 인정하고 적용시키기 위한 추진력이 되고 있다. 현재 사용중인 열가소성 수지는 사용량이 작긴 하지만, Polyphenylene sulfide(PPS), Thermoplastic polyimide, Polyarylate, Poly etherimide(PEI), Liquid crystal polymer(LCP) 등이다. LCP는 분자사슬이 선상으로 결합되면서 수지자체가 자기강화(Self-reinforcing) 되는 것으로서 LCP의 상업화는 복합재료에 있어서 중요한 진전이 될 것으로 기대된다. LCP는 전자산업에 응용되며, 대형 구조물에 응용되기 전에 우선 사출성형 Chip carrier에 대량으로 응용될 것이다.

2.3. 프리프레그(Prepreg)

프리프레그는 연속섬유, Chopped, Strand, Fabric

등의 강화재료를 수지에 함침시켜 만든 복합재료의 중간제품이다. 첨단 복합재료 생산업체들은 프리프레그를 최종형태로 만들고 열과 압력을 가하여 경화시켜 최종제품을 만든다. 1990년에 전세계의 프리프레그 판매량은 약 13,000톤이었으며, 금액으로는 약 7억불에 달했다. 프리프레그 제조업체는 플라스틱 산업에서 혼합업체(Compounder)와 유사하여 원재료의 공급업체와 복합재료 성형업체의 중간에 위치한다. 프리프레그 제조업체들은 다양한 원재료와 경화제의 혼합 비율, 혼합방법, 혼합시간, 기타 많은 변수들에 대하여 연구개발을 해 왔다. 프리프레그 제조업체는 저장기간, 성형공정과의 적합성, 취급의 용이성, 최종제품에 알맞는 특성등을 고려해야만 한다. 프리프레그 제조공정에서의 미묘한 차이가 복합재료 최종제품에 영향을 미치기 때문에 프리프레그 제조업체는 독립적인 속성을 갖고 있었다. 그러나, 프리프레그 제조업체는 불규칙한 사업환경과 기술의 급격한 진전을 맞이하여 복합재료 성형업체와의 긴밀한 협조체제 없이는 생존할 수 없었다. 다행히, 투자자들이 수익성 높은 장기적인 사업을 찾던 1980년대에 첨단 복합재료는 매력적인 투자대상이 되어 독립적인 프리프레그 제조업체는 현재 거의 없어졌다. 최근 개발된 열가소성수지 프리프리그는 이러한 사업 통합의 원인과 결과라고 볼수 있으며, 열가소성 수지를 개발하던 회사들은 대부분 프리프레그 제조업체나 섬유의 생산업체와 밀접한 관계에 있다.

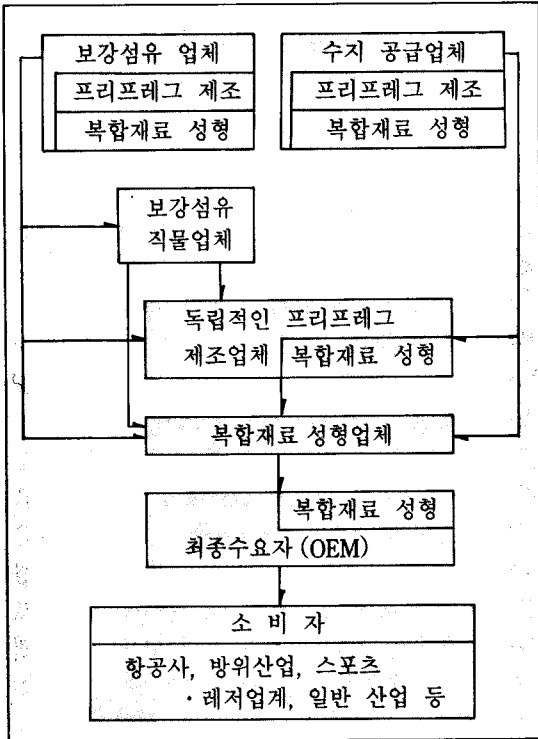
코어(Core)와 배열(Configuration)은 초기부터 첨단 복합재료의 일부였다. 2차 대전중과 우주개발이 활발하던 시기에 Balsa 코어가 사용되었으며, 현재 코어재료는 오늘날 항공기의 바닥재와 Pallet, 기타 용도로 사용되는 중요한 부품이 되고 있다. 종이로 육각형 형태로 만든 뒤 수지를 함침시켜 성형한 하니컴 코어는 약 20년간 첨단 복합재료에 사용되어 왔다. 하니컴 코어는 대부분 Aramid paper로 되어 있으나, 알루미늄, 탄소, 열가소성수지 코어는 특별한 용도에 사용되고 있다. 이밖에 열가소성 Foam core는 복합재료 구조물의 경량, 강성, 손상 저항성 등을 부여하기 위하여 개발되어 왔으며, 2차 구조재료로 사용시에는 제조비를 줄일

수 있는 잇점도 있다.

2.4. 공급의 경로

일반적으로 첨단 복합재료용 보강섬유 생산업체들은 그들의 제품을 보강섬유직물업자(weavers and knitters)와 프리프레그 제조업체, 복합재료 성형업체 등에 공급한다. 그러나, 보강섬유 생산업체의 가장 중요한 고객은 프리프레그 제조업체들이다. 표 2에서 보는 바와 같이 주요 프리프레그 제조업체들은 섬유생산업체의 자회사이거나 수지의 생산업체들이며, 일부 복합재료 성형업체들은 프리프레그 생산도 겸하고 있다.

표 2) 첨단 복합재료산업의 구조



첨단 복합재료 부품의 생산시 Filament Winding, Pultrusion 등의 성형공법과 같이 프리프레그가 필요하지 않을 때, 복합재료 성형업체들은 보강섬유와 수지를 직접 공급 받을 수 있다. 그러나

프리프레그 제조업자와 복합재료 생산업자간의 구매/주문의 관계에도 불구하고 보강섬유 생산업체들의 가장 중요한 고객은 OEM, 방산업계, 우주항공업체 등이다.

3. 첨단 복합재료의 성형

첨단 복합재료의 성형공장은 국가 보안상의 문제로 일부 통제되어 있으며, 일부는 최첨단 생산기술을 보호하기 위하여 통제되고 있다. 따라서, 일반에 공개되는 성형공법은 단순한 공법들이다.

성형공법은 재료의 특성과 시장성에 따라 개발되어 왔으며, 소량의 주문과 철저한 품질관리가 필요하기 때문에 대부분 수작업일 수밖에 없었다. Northrop사의 B-2 Stealth 폭격기 및 Beech Starship 항공기와 같은 80년대의 대표적인 대형과제에서도 상당 부분이 Hand layup으로 이루어 졌다. 고속 자동화 생산이 업체의 최종 목표이지만 Hand layup 방법은 앞으로도 당분간 이용될 전망이다.

Compression molding 및 RTM(Resin Transfer Molding) 공법은 성형시간이 매우 단축되어 불과 분단위로 성형이 완료되며, 작업장에서 작업시간과 작업동작이 더 일정하게 되는 특징이 있다. 첨단 복합재료에서는 프리프레그의 취급, Tool에서의 재료취급, 성형된 부품이형등에 로봇을 사용하면 생산성이 높아지는 것은 이미 잘 알려진 일이다. 따라서 많은 업체에서는 고속생산을 위하여 프리프레그의 자동적층 또는 섬유 배열장비를 도입하고 있다.

Filament winding 공법으로는 진공병같은 소형 부품에서 항공기 동체와 같은 대형 부품까지 제작한다. 종래 원통형에 제한되어 있던 이 공법은 컴퓨터를 이용하여 다축으로 섬유를 강화시킬 수 있게 되었다. Pultrusion 성형공법도 역시 컴퓨터의 이용으로 많은 발전이 있었다. 다양한 단면형상의 제품을 대량생산 할수 있는 이공법에 RTM 및 Braiding 공법을 추가시키면 복잡한 형상의 제품도 생산이 가능해진다.

열가소성수지 복합재료는 새로운 차원의 성형공법으로 성형되며, 부품은 고온 및 고압에서 사용할 수 있으므로 뛰어난 프로세스 제어를 요한다.

현재는 수작업 방법이 주로 사용되고 있지만 자동화공법이 연구되고 있다. 압력성형(Pressure forming)이 대형 부품성형에 가장 적합한 공법이어서 많은 업체에서는 지난 2년간 대형 Forming 장비를 도입하고 있다.

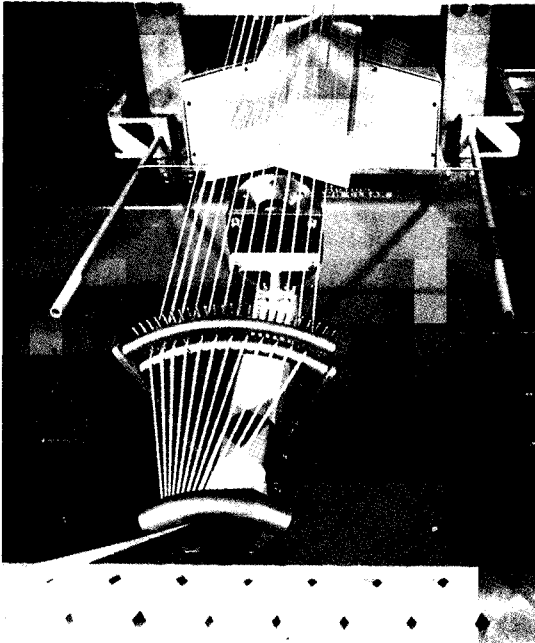


그림 1) Filament winding

독립적인 복합재료 성형업체는 프리프레그 제조업체와 마찬가지로 성형공법을 독자적으로 연구하며 성형해 왔었다. 이들 업체들은 비행기 화물칸의 바닥 혹은 Pallet과 같이 대량생산 품목을 선호하고 있으며, 고가의 기술 경쟁 때문에 다른 분야의 제품을 생산하기에는 어려움이 많다. 이러한 상황에서 성형업체는 간단한 성형공법으로부터 발전하여 생산성이 높은 다른 성형공법의 연구도 하고 있는 것이다. 그러나, 복합재료 성형업체 중에는 일반적인 유형과 다른 업체들도 있다. 가장 대표적인 예는 원재료회사가 원재료의 공급업을 포기 하였지만 성형업체로는 계속 남아 있는 경우이다. 다른 예는 신중한 업체로 몇년전부터 알루미늄 또는 철강 사업과 복합재료 성형 사업을 같이한 업체들이다. 또다른 예는 단조 등

중공업분야로 전환하려는 복합재료 성형업체로부터 첨단 복합재료 생산설비를 인수한 업체들이다.

4. 첨단복합재료의 응용분야

초기의 첨단 복합재료의 주요 개발품은 군사용으로 주로 미국 국방성 및 NASA에 의해 모두 개발 되었으며, 80년대 중반부터 일반 산업용으로도 개발되기 시작하였다. 즉, 복합재료에 대한 지식을 대학원 과정 혹은 경험으로 부터 얻은 전문가들이 군용 뿐만 아니라 일반산업분야에도 응용하기 위하여 연구개발하기 시작하였다. 첨단 복합재료 제품을 일반산업분야에 응용하기 위해서는 제품의 성능 뿐만 아니라 제품의 가격과 생산성도 매우 중요하다. NASA는 수송 및 항공 산업분야에서 복합재료의 응용을 강조하면서 여객기의 복합재료 주요 구조물 개발에 9,900만불의 개발비를 15개 업체에 투자하였다. 최근에는 복합재료에 경험이 있는 전문가들이 개인업체에서 첨단 복합재료 사업을 시작하는 경우가 증가하고 있다. 첨단 복합재료는 가격 문제가 아직도 걸림이 되고 있지만 새로운 구조물에 쓰일 대상으로는 항상 고려되고 있거나 선택되고 있다.

스포츠·레저용품 분야는 첨단 복합재료 응용 분야에서 두번째의 위치를 지켜 왔지만 다른 분야의 성장으로 그 비율이 줄어들고 있다. 주요 소비자인 장대높이뛰기 선수와 코치, 프로 테니스 선수, 세계적인 자전거 선수 등 최종 수요자들은 첨단 복합재료를 발전시키는 원동력이 되었고, 이들을 통하여 스포츠·레저용품의 생산업체들은 사업상 크게 도움이 될수 있는 새로운 재료를 신속히 알게 되었다. 그러나, 이 분야에는 정부로부터의 연구비 지원이 전혀 없기 때문에 노동집약적인 부품개발은 극동아시아에서 주로 이루어지며 일부는 미국에서도 생산하고 있다. 스키 및 대량생산 품목 등은 시장성이 있어 선진국에서도 생산되고 있으며, 경주용 보트 등에 사용되는 첨단 복합재료 발판은 조선산업에도 많이 쓰이지만 미국에서는 생산되지 않고 있다.

일반 산업용 복합재료 시장은 가장 매력있는

분야면서 가장 경쟁이 심한 분야이다. 만일 첨단 복합재료 제품의 가격이 적당하고, 성능 시험에 통과되고, 생산성이 높은 성형공법이 개발되면 현재의 수송기계분야에서 수만개의 부품을 복합재료화 할 수 있을 것이다. 따라서, 첨단 복합재료산업은 로봇트를 이용한 고속생산을 통해 가격을 낮추는 것이 가장 중요하다. 그러나, 복합재료 성형업체들은 주문을 받기전에 새로운 성형공법 및 Tool에 투자하는 것은 바람직하지 못하며, 소비자도 모든 조건이 만족될 때만 주문을 할 것이다. 이 문제에 대한 해답은 시제품 제작과정에서의 기술축적 및 현재 철강재료가 복합재료로 거의 대체되는 향후 10년 정도 단계적으로 꾸준히 연구개발하는 데 있다. General motor사는 1986년에 Pultrusion 공법으로 제작된 drive shaft를 Two-wheel drive 트럭에 처음 채용하였으며, 다음해에는 180,000대에 채용하였다. 이것은 자동차 시장에서의 복합재료 응용을 지난 5년 동안 45% 증가시켰다. 이밖에 다른 분야도 첨단 복합재료의 장래를 밝게 해주고 있다. 토목공사분야에서는 건축 구조물을 교체하기 위해 복합재료의 비강도 등의 장점을 검토하기 시작했으며, 석유, 전기 등의 에너지 산업도 복합재료가 응용되고 있다. 그리고, SACMA (Suppliers of Advanced Composite Materials Association)의 시장다변화추진반은 고속 경량 수송시스템의 개발을 계획하고 있다.

5. 향후전망

지금까지 복합재료에 대하여 일반적으로 서술해 왔다. 기술적 돌파구 및 회사의 재구성 등이 없이는 새로운 분야의 개척은 불가능 하다. 첨단 복합재료는 미래시장의 요구사항을 예측하고 모두 수용하기에는 범위가 너무 넓다. 일부 특수분야의 가격 인상 및 고급화 추세에 소비자 요구조건 등도 어려운 문제점중 하나이다. 현재 미국 및 캐나다의 복합재료 관련회사는 약 450개이며, 이 중에서 15%정도가 외국회사이다. 그러나, 이들 외국회사들은 매우 중요한 위치에 있으며 이들의 존재는 매우 중요하다. 이 외국회사들은 원재료생산업체, 프리프레그 생산업체 및 성형업체 들로서 자국에도 업체가 있으며 외국과 무역을 할수 있는 허가증도 가지고 있다. 반대로 미국의 복합재료 선두회사들은 유럽, 극동아시아 등 다른 나라에 관련 업체를 가지고 있다. 최근 복합재료분야에서는 거의 매주 특허권 상호교환, 합작사업 등이 행하여 지고 있다. 1990년부터 미국기업들이 갖고 있던 복합재료기술이 외국에 이전되기 시작했으며, 상호협조간의 시장조사, 국제적 업무 등은 일반화되어 가고 있다.

1991년도에는 복합재료 관련의 주요 계약들이 있었다. 복합재료 역사상 가장 큰 규모의 미공군 첨단 복합재료 F-22 전투기 계약이 이루어졌으며, 상업적인 면에서 Boeing사는 777 여객기의 복합재료 Wing spar 및 Empanage 구조물 채용을 발표하였다. 또한 성형업체들의 합작사업도 활발하여 천연가스 차량의 연료탱크, 연해의 원유/가스 플랫폼 튜브, 제지기계의 부품 등을 생산하고 있다. 또한, 1991년은 복합재료업체들의 통폐합 초기단계이기도 하였다. Cyanamid사, Conrtanlds사, Ferro사, Phillips사 등 유수한 업체들이 복합재료 업계를 떠났고, 많은 업체들도 투자를 줄이고 있다. 이들 업체들은 궁극적으로 복합재료의 미래는 밝고 장래성이 있다는 것도 알고는 있으나, 단기간 투자로는 전망이 없다고 느끼고 있다.

이제 복합재료 업계는 성숙기에 접어들고 있다. 그러나, 복합재료업계가 해결 해야할 문제는 산적해 있으며, 그 문제들을 종합해 보면 다음과 같다.

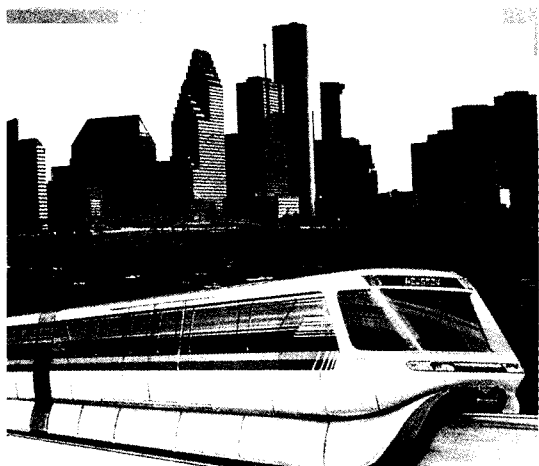


그림 2) 복합재료 경량 고속 전철

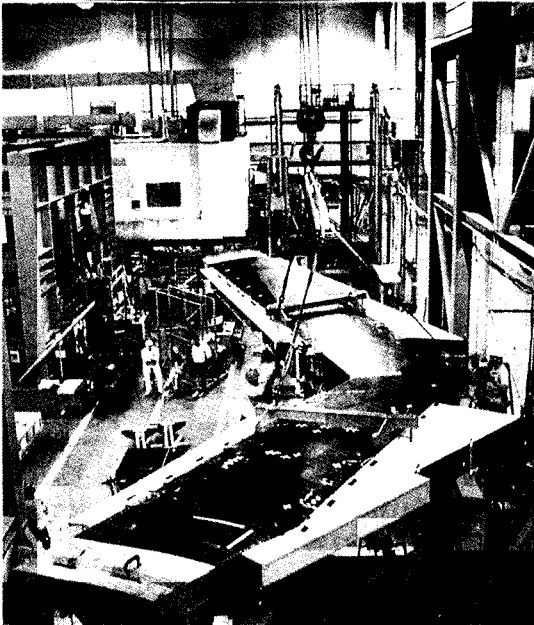


그림 3) Boeing사 777여객기의 Wing spar

첫째로, 기술적인 면에서 충격저항 및 인성, 층간분리, 환경영향, 피로특성의 평가, 이와같은

특성치의 평가 및 신뢰할 수 있는 비파괴 시험법의 개발, 기계화된 성형공법, 접합 및 조립방법등의 발전, 그리고 유지, 보수, 내화염, 재생 또는 폐기방법 등이 개발되어야 한다.

둘째로, 영업적인 면에서는 소비자 요구사항에 대한 더 자세한 조사가 필요하며, 비용효과성이 반드시 있어야 하며, 소비자에게 이점을 주어야 한다. 그리고, 군사용에 사용되던 기술의 일반 산업용 상품에 응용하는 노력이 필요하다.

셋째로, 경영적인 면에서는 Data base 축적 및 품질관리가 필요하며, 산업위생 및 환경 치료법에 대한 대응, 그리고 복합재료 업계간의 상호 기술 교류가 절실히 필요하다.

첨단 복합재료 산업은 이러한 문제들을 조속한 시일내에 해결한다면 복합재료의 단가가 낮아지고 생산업자들의 투자가 증가할 것이다. 지난날을 돌이켜 볼때 새로운 기술 개발에 R&D 투자후 생산까지 많은 시간이 소요되었다. 즉, 증기기관, 전기, 컴퓨터 등도 개발에서 완전 실용화까지는 많은 시일이 걸렸으며, 첨단 복합재료도 이들의 예와 같이 완전한 실용화가 이루어지기까지는 아직도 시일이 필요하다고 사료된다.