

# 첨단 복합재료에 대한 최근의 기술동향과 응용

鄭 錫 柱

서울 産業大學 機械設計學科 教授



● 1936년생  
● 固體力學에서 應力解析 및 材料學動 特性을 專攻하였으며, 특히 梵鍾應力解析 및 音響과 構造物의 動的學動에 많은 關心을 가지고 있다.

## 1. 머리말

석유화학공업은 언제나 시대의 변천과 함께 그 시대가 요구하는 새로운 재료와 기능을 공급해 왔다. 이 재료 및 공급을 통해 산업구조의 고도화에 주도적 역할을 해왔으며, 앞으로는 이러한 역할의 중요성은 변하지 않고 더욱 강조될 것으로 보인다. 즉, 초기에는 자연재료의 대체에서 시작하여 현재에는 고성능의 신소재 및 새로운 기능재료를 제공하는 역할을 하고 있다. 근래에 들어, 에너지절약, 기간산업의 고도화는 국가적인 과제가 되었고 이에 따라 각 분야의 첨단기술 개발은 더욱 중요시되고 있다. 이 요구에 대응하기 위해서 석유화학공업, 재료공업에서 공통적으로 진행되어온 것이 새로운 재료의 기술개발 복합화이다. 첨단기술의 발달에 따라 기존재료에는 기능성에 한계가 있으므로 보다 고도의 기능을 지닌 신소재의 개발을 위해서는 재료의 기능과 특성에 대한 충분한 이해와 연구를 바탕으로 이들 재료 및 기술의 복합화에 의해 고성능, 고기능의 신소재의 창출을 가능하게 하였고 이러한 신소재의 출현은 다음세대의 산업구조를 결정짓는 중요한 역할을 한다. 이러한 시대적 요청에 부응하기 위한 노력중 최대의 결실이 첨단 복합재료라 불리는 신소재의 개발과 공업분야에

의 이용이다. 복합재료는 구조물의 중량경감과 동시에 강도 및 강성이 구조재료로서의 특성을 충분히 만족시켜 그 유용성을 항공우주공학에서 실증하고 있다. 그뿐 아니라 여러가지 산업분야에서 응용 가능한 다양한 기능과 광범위한 물성범위 즉, 고강도, 비강성, 내피로 특성, 고내열성, 내마멸성, 전도성 또는 절연성, 방열성, 내식성, 방사선투과성, 방사선흡수성, 재료의 특성을 열거할 수 없을 만큼 광범위한 기능소재이다. 또한 복합재료에 있어서는 요구되는 특성에 따라 물성의 설계가 가능하며 종래의 재료로써는 달성하지 못했던 특성 발현 및 응용이 가능하여 그 응용범위가 무한하다고 볼 수 있다. 이러한 특성을 공업분야에 응용하기 위해서는 재료 자체에 대한 제조평가 기술 및 응용을 위한 관련산업의 기술혁신이 요구되어, 새로운 산업구조 고도화의 기초적인 역할을 하게 됨으로, 따라서 향후의 재료혁명의 열쇠는 복합재료라고 할 수 있다. 즉, 신소재의 개발이 신기술분야의 개발의 원동력이고 신기술의 발전이 신소재 개발을 촉진하는 기술혁명의 동향에 따라 복합화를 통한 신소재의 개발에 대한 필요성은 계속 증대되고 있다. 21세기를 지향하는 항공우주개발, 해양관련산업, 마이크로엘렉트로닉스, 기존산업의 고도화, 제반산업분야의 발전의 견인차로써의 역할은 신소재 분야에서 복합재료가 그 주역임을 믿어 의심치 않

는다.

본 글에서는, 앞으로 복합재료 분야에서 점차 그 역할이 크게 증대될 것으로 예상되는 첨단복합재료의 개발 및 최근 동향과 앞으로의 잠재성에 대하여 좀더 자세히 살펴 보기로 한다.

(1) 첨단복합재료의 범위

첨단복합재료 (ACM : advanced composite material) 라는 용어는 1960년대 미공군 및 NASA에서 사용하기 시작하였다.

복합재료를 이루는 재료의 범주를 크게 나누면, 첫째로 연속상의 고성능 섬유와 이를 지지하는 수지재료가 있다. 둘째로, 샌드위치 구조 재료로서 이것은 벌집 모양의 매우 가벼운 하니콤 중간 부위가 두개의 섬유강화시트 사이에 결합된 것이다. 셋째로, 섬유강화 금속을 들 수 있는데, 이것은 군용용도에 없어서는 안될 재료이지만 상업용로서는 용도가 제한되어 있다.

ACM은 종래의 유리섬유 강화수지 (GFRP : glass fiber reinforced plastic) 보다 탁월한 기계적 물성을 보유하고 있고, 또한 특별한 기능을 가지고 있다. ACM과 FRP를 분명하게 구

별하기는 곤란하나, 굳이 ACM을 정의하자면 “특별한 용도에 적용할 수 있는 매우 높은 수준의 물성을 보유한 복합재료”라고 할 수 있고, ACM은 모든면에서 FRP 보다 탁월하다고 구별할 수 있다. 즉

$$\begin{aligned} \text{비교강도} &> 4 \times 10^6 \text{cm} \\ \text{비교탄성률} &> 4 \times 10^8 \text{cm} \end{aligned}$$

이어야 하는데, 이러한 수치는 경험적인 수치이긴 하나, 대부분의 ACM에 적용되었다. 그림 1에 여러 산업용 재료의 비교강도와 비교탄성률을 표시하였으며, ACM의 경우 빗금으로 나타내었다. 섬유강화 복합재료의 경우에 있어서 기계적 물성은 섬유 라미네이트 조건, 응력이 걸리는 방향 및 섬유의 부피률(VF : volume fraction)에 따라 변하게 된다. 그림에서는 라미네이트가 0/90, 그리고 VF는 60%의 경우를 보였다.

그림에서 나타난 ACM 범위를 기준으로 강화용 섬유의 물성을 역산 하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{비교강도} &> 4 \times 10^6 \text{cm} / 0.6 = 6.7 \times 10^6 \text{cm} \\ \text{비교탄성률} &> 4 \times 10^8 \text{cm} / 0.6 = 6.7 \times 10^8 \text{cm} \end{aligned}$$

이와같은 요구특성을 가지는 ACM용 강화섬유를 그림 2에 보였다.

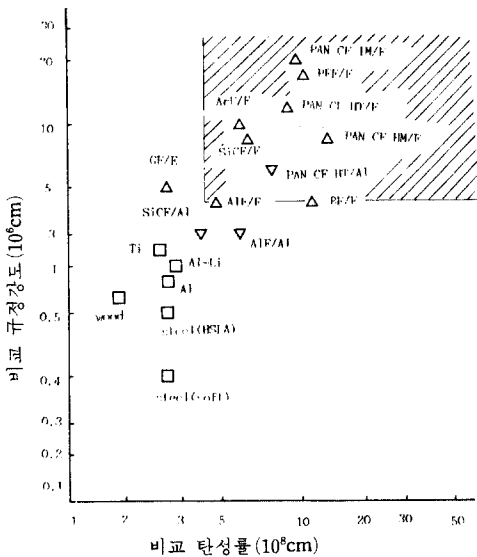


그림 1 공업적 재료(성분과 ACM영역)

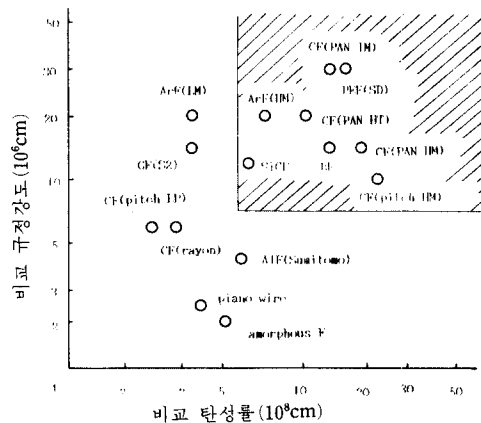


그림 2 ACM 강화섬유

표 1 첨단복합재료의 변천

년	제 1 세대 (GFRP) → ← 제 2 세대 (BFRP, CFRP) → ← 제 3 세대 (FRM)					
	1940	1950	1960	1970	1980	1990
FRP	GFRP	→				
	BFRP	→				
	CFRP	→				
	DFRP	→				
	SFRP	→				
	AFRP	→				
FRM	BFRM	→				
	SFRM	→				
	AFRM	→				
섬유		A : Alumina, S : Silicon Carbide,		B : Boron, K : Kevlar		C : Carbon, G : Glass, K : Kevlar
Matrix	플라스틱	에폭시, 폴리에스터, 페놀, 폴리이미드, 폴리설폰				
	금속	알루미늄, 마그네슘, 구리, 티탄				

첨단복합재료의 제조에 있어서는 네가지 중요한 공정이 있다.

- (가) 원료의 제조 : 강화섬유, 수지
  - (나) 일축으로 정렬된 프리프레그 및 제작된 프리프레그
  - (다) 부품의 설계 및 생산
  - (라) 최종제품의 조립, 등이다.
- 복합재료에 사용되는 섬유로서는 과거에 사용되던 유리섬유에서 탈피하여 PAN계 탄소섬유, 피치계 고탄성 탄소섬유, 고탄성 아라미드 섬유가 주류를 이루고 있으며, 고온에서도 인장강도와 강성이 확보될 수 있는 SiC, 보론등의 세라믹 섬유와 위스커가 있다<sup>(8,10)</sup>.
- 매트릭스로서는 열경화성수지, 열가소성 수지, 금속, 세라믹/시멘트를 들 수 있으며, 본 총설에서는 고분자 복합재료에 대해서 논하기로 한다.

## (2) 극한재료로서의 ACM

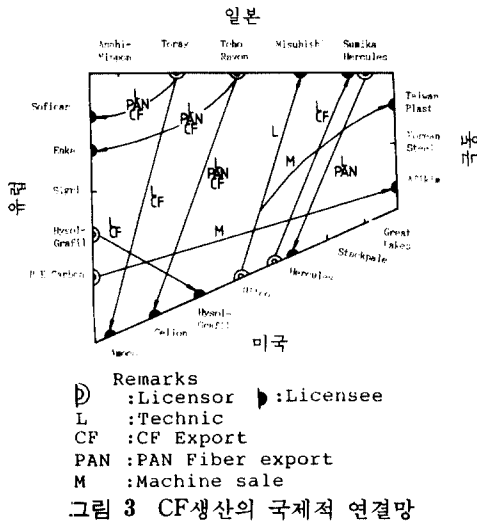
공업재료에 요구되는 성능으로서 제일 중요한 것은 내구성이다. 경제성, 성형가공성, 기계가공성도 중요하긴 하지만 내구성이 항상 선결되어야 한다.

하중, 환경, 시간등 극한 조건에서 섬유강화 플라스틱이 가져야 하는 필요성능으로서;

- (가) 일방향 강화재의 상온에서의 인장강도가 2400 MPa 이상(신뢰도 90% 이상)
- (나) 250°C의 온도에서 인장강도가 상온의 90% 이상이어야 한다. 이와같은 목표 물성을 달성하기 위한 기술은 VF=80% 정도의 높은 탄소섬유 함량(현재 65%)을 실용적으로 가능하게 하는 성형기술에 있다<sup>(9)</sup>. 최근에는 4500 MPa의 탄소섬유가 시험 판매되고 있으므로 일방향 탄소섬유 ACM에서 3600 MPa의 인장강도가 기대된다. 표 1에 첨단복합재료에 사용하는 강화섬유와 매트릭스 개발 변천을 요약 정리하였다.

## 2. 첨단복합재료의 수요

강화섬유중에서 대표적인 것으로는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드 섬유가 있다. ACM에 사용되는 수요는 각각 3000~4000 Ton정도이나, 실제로 이들 강화섬유의 생산량은 크게 다르다.



경화제 (DDS)가 외국에 의존하고 있다는데 대하여 우려를 표명하였다. 이 사실을 반영하듯이, 세계의 주요 산업지역에서는 PAN 중합부터 탄소섬유의 생산에 이르는 주요 공정 기술을 국제적 연계를 통하여 확보하고 있다(그림 3)<sup>(1)</sup>.

### 3. 강화섬유의 개발

첨단 복합재료에 사용되는 강화섬유는 같은 재료로써 구성된 벌크상태의 물성에 비하여 탁월하게 강하다. 벌크상태의 흑연은 인장강도가 7MPa 이하이지만, 일반적인 탄소섬유의 인장강도는 1700~2750MPa에 이른다.

복합재료에서는 이와 같이 고강도 고탄성 섬유가 외부로부터의 응력에 견디게 하는 역할을 한다. 상업적으로 생산되고 있는 복합재료용 섬유를 정성적으로 비교하면 다음과 같다.

#### 3.1 유리섬유(Glass Fiber, GF)

##### (1) GF의 개발

FRP 세대에 있어서는 F-GLASS가 대부분의 경우 사용되었으나, ACM 세대에서는 미국 OCF사가 개발한 고강도 S 및 S-2가 사용되며, 일본의 Nittobo(日東紡)가 개발한 T-Glass도 비슷한 성질을 가지고 있다. 시멘트 강화를 위해서는 ZnO<sub>2</sub>를 첨가하여 개발된 Alkali Resist인 AR-Glass가 있다.

섬유	전세계 수요량	ACM 수요
유리	1,300,000 톤	0.3%
아라미드	10,000 톤	30 %
탄소	4,000 톤	90 %

CF-ACM을 필두로 ACM이 군사 및 국가 방위 프로젝트에서 필수적인 재료로서 인식됨에 따라, 모든 국가가 ACM의 기술 및 생산을 외국에 의존하지 않으려 하고 있다. 최근에 미국의 국방성은 (1) 미국정부가 필요한 PAN 프리커서의 30%, 향후에는 50%가 미국내에서 생산되어야 하며 (2) 에폭시(TGMDA)와

섬유	장점	단점
유리(장섬유)	낮은 가격 다양한 부품으로 쉽게 성형가공 된다	강도에 제한이 있으나 내화학약품성이 낮다
탄소(PAN계) 탄소(피치계)	열팽창 계수가 낮다 고강도/고탄성율의 조화가 양호 PAN계에 비하여 가격이 낮다	내충격성이 비교적 낮다 금속을 전해시키는 수가 있다.
아라미드	내충격성이 매우 양호 (방탄 효과가 탁월함)	압축강도가 약하다 생산업체 수가 적다 절단하는 데 있어서 특별한 기술이 요구된다.

표 2 GF 성분과 기계적 물성

		E electrical	S H.strength	AR alkali res	Be inclu- sion	N inclu- sion	micro crystal
화학적 성분	SiO <sub>2</sub>	54	64	62	Si0-	Si0-	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15	25	-	A10-	A10-	
	CaO	17	-	5	Be0-	Y	
	MgO	5	10	-	ZrO	N	
	Na <sub>2</sub> O	1	-	17			
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	-	-			
	ZrO <sub>2</sub>	-	-	17			
$\rho$ /cm <sup>3</sup>		2.54	2.49	2.75			
$\sigma_t$ GPa		3.4	4.5	2.5			
$E_t$ Gpa		70	85	70	>200	190	130-150
$\epsilon$ %		4.8	5.4	3.6			
-6							
$\alpha$ 10/°C		5.0	2.8				
최대사용온도°C		600	760				

$\rho$  : 밀도

$\epsilon$  : 파단신도

$\sigma_t, E_t$  : 인장 강도, 탄성률

$\alpha$  : 열팽창계수

BeO를 첨가하면 고탄성률을 얻을 수 있으나, Be이 유독하므로 사용이 금지되어 있다. N을 함유시키면 Si-N 결합이 이루어져 유리의 네트워크를 치밀하게 만드므로 강도와 탄성률이 향상될 수 있다<sup>(12)</sup>. 통상의 비경질 유리를 미세 결정화시키면 탄성률이 향상된다(표2).

(2) GF 강화재료의 용도

GF계 복합재료의 일례로서 GF를 X자형으로 배향시킨 시트상 성형재료(sheet molding compound), 즉 XMC로서 휠(wheel) 및 소형 트럭의 리프스프링(leaf spring)을 개발하여, 현재 미국 포드사에서 시험중에 있다. XMC로써 리어서스펜션을 일체 성형하면 부품수가 대폭 감소하며, FRP 특성인 경음 감소 효과를 얻을 수 있으며, 강한 접촉에 의하여 수평방향 안정성의 증가가 기대된다.

3.2 탄소 섬유(Carbon Fiber, CF)

(1) CF의 종류

탄소섬유는 GF와 아라미드 섬유에 비하여

더욱 많은 종류가 성공적으로 개발되었는데, 그 이유는 원료인 탄소원에 융통성이 있으며, 적용가능한 공정이 많기 때문이다. 상업화된 CF는 다음의 네 종류로 구별된다.

분류	원료
저성능	Pitch and Rayon
중간성능	PAN
고강도	PAN
고 탄성률	PAN and Pitch

위와 같은 차이는 프리커서의 특성과 열처리 온도에 따라 나타나게 되며, 표 3에 그 물성의 차이를 보였다. 고강도 CF는 그림 4에 나타난 바와 같이 다시 넷 세대로 구별되며, 고 탄성률 CF는 PAN계와 Pitch계로 얻을 수 있다(표 4).

(2) CF를 이용한 ACM의 제조 및 물성

CF 강화 수지는 CF와 매트릭스 수지의 결

표 3 CF 물성

Grade		Example	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_t$ (GPa)	$E_t$ (GPa)	$\epsilon$ (%)
base	type					
PAN	HT	Torayca T300	1.77	3.5	230	1.5
		T400H	1.80	4.4	250	1.8
		T800H	1.81	5.6	290	1.9
		T1000	1.82	7.1	290	2.4
PAN	HM	Torayca M30	1.70	3.9	290	1.3
		M40	1.81	2.7	390	0.6
		M40J	1.77	4.4	380	1.1
		M46	1.88	2.3	450	0.5
		M46J	1.84	4.3	440	0.9
		M50	1.91	2.5	490	0.5
PAM	MT	Fortafil C	1.78	3.1	227	1.4
		G	1.78	3.1	340	0.7
pitch	GP	Kureca KCF100 C	1.65	0.9	38	2.4
		KCF200 G	1.55	0.85	42	2.1
pitch	HM	Thornel P55	2.0	1.8	380	
		P120	2.18	2.3	820	
rayon	GP		1.45~1.5	0.7~1.2	34~35	

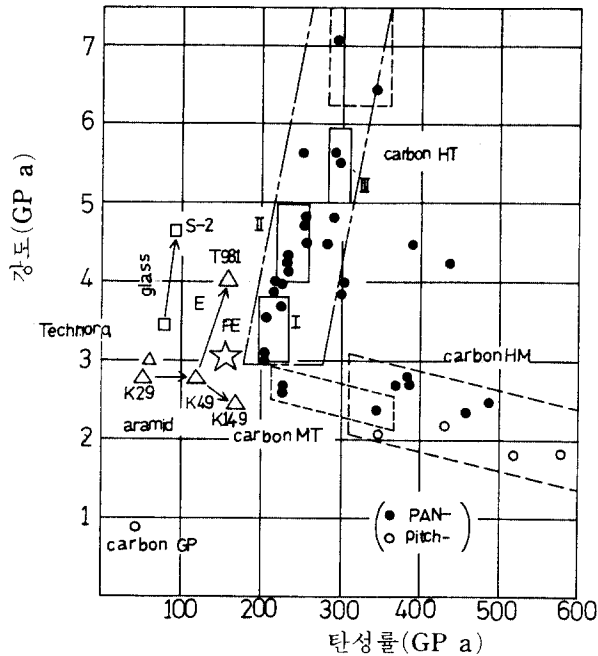


그림 4 중요섬유의 물성

표 4 탄소섬유공급

	제조업체	품명	공급량(톤/년)			비 고
			1987	1989	1990	
미국	Hercules	Magnamite	1050	1400	1800	Mesophase pitch
	Amoco Performance	Thornel	360	450	900	
	Amoco Performance	Thornel P *	230	230	230	
	Celion C.F/BASF	Celion	450	450	900	
	Akzo	Fortafil	350	450	450	
	Zoltex	Panex	115	115	115	
	Courtaulds	Grafil	300	400	400	isotropic pitch
	Ashland Chem.	Carboflex *	20	140	140	
	British Petroleum	Hitex		125	125	
일본	Toray	Torayca	1500	1500	2250	import : 900t/y('87) isotropic pitch
	Toho Rayon	Besfight	1380	1420	1920	
	Asahi-Nippon	Hi-Carbolon	300	300	450	
	Mitsubishi R.	Pyrofil	120	120	470	
	Sumika-Hercules	Magnamite				
	Kureha Chem.	Kureca *	400	900	900	
	Nippon Carbon	Carbolon *	60			
영국	Courtaulds-Grafil	Grafil	350	350	350	
	R K Textiles	R K Carbon	20			
프랑스	SOFICAR	Filker	300	300	300	
독일	Sigri Elek-tragraphit	Sigrafil	100			
	Enka (Akzo)	Tenax	350	350	350	
기타	Afikim (Israel)	ACF	115			
	Taiwan Plastics	Tairyfil	100	100	250	
	Korean Steel Chem	Kosca	150	150	150	
	Tae Kwang Ind				100	
계		PAN base	7150			
		pitch base *	710			

1990년도의 공급량은 예상량임.

합에 의하여 성형되는 것으로, CF의 형태(예를 들어, 장섬유, 단섬유, 직물, 프리프레그)와 수지의 종류에 따라 제조 방법을 달리한다<sup>(2)</sup>. 가장 널리 사용되는 방법은 프리프레그 성형법으로서 장섬유/에폭시 수지계가 주이며, CF 함유량은 50~70wt% 수준이다<sup>(11)</sup> CF 강화수지의 비강도는 강철의 6배, GF 강화수지의

2배, 비탄성률은 강철의 3배, GF 강화수지의 4배이며, 가볍고 강성이 높다. 내피로강도가 높고, 마찰 마멸성능이 우수하고, 열팽창계수가 낮다. 표 5에 각종재료의 특성을 비교하였다.

### (3) CF를 이용한 복합재료의 용도

일본에서는 스포츠·레저관련, 미국및 유럽에서는 주로 우주항공 관련 부문에 이용되고

표 5 아라미드(Aramid)섬유(ArF)의 물성

		para			neta
		PPTA		DPEPPTA	MPIA
		Kevlar	Kevlar49	Technora	Nomex
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	1.44	1.45	1.39	1.38
$\sigma_t$	GPa	2.8	2.8	3.0	0.7
$E_t$	GPa	60	130	70	8
$\epsilon$	%	3.8		9.4	38
Retention (%)					
dry hot 200°C × 100h		59		75	88
wet hot 140°C × 100h		30		95	-
alkali (10% NaOH)					
95°C × 100h		18		84	0
acid (40% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )					
95°C × 100h		20		89	2
$\sigma_t/\rho$	10 <sup>6</sup> cm	20	20	22	5
$E/\rho$	10 <sup>6</sup> cm	42	90	54	6

표 6 세계 PAN계 CF의 용도별 생산(1987년)

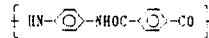
단위 : MT/년

지역 \ 용도	항공우주 MT (%)	스포츠 MT (%)	공업 기재 MT (%)
미국	1500 (65%)	320 (15%)	450 (20%)
유럽	430 (56%)	150 (19%)	190 (24%)
일본	40 (5%)	650 (76%)	160 (19%)
아시아	40 (5%)	630 (80%)	120 (15%)
합계	2020 (43%)	1750 (38%)	920 (19%)

t/년

있다(표6참조).

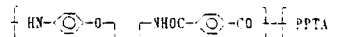
분야	용도	이용특성
스포츠, 레저	골프 샤프트, 낚시용구, 테니스라켓, 스키, 요트, 모터사이클 부품	비강도 비탄성률
우주항공	항공기 : 전투기, 민항기, 헬리콥터 우주 : 로켓트 부품, 우주왕복선	비탄성률 경량화
오디오 부품	스피커 콘	진동 감쇠성



PPTA : poly (p-phenylene terephthalamide)

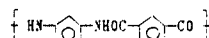
Kevlar from DuPont

Twaron from Akzo



DPEPPTA (DDE=3,3'-diamino diphenylene ether)

Technora from Teijin



MPIA : poly (m-phenylene isophthalamide)

Nomex from DuPont

Conex from Teijin

CF의 세계 생산량은 1980년에 800톤, 1988년



에 5500톤으로서 최근 8년간 7배의 성장을 보였다. 1988의 경우 미국이 전체의 50%, 유럽과 일본, 기타 지역의 각각 17%씩을 생산하였다<sup>(3)</sup>.

### 3.3 아라미드 섬유(Aramid Fiber, ArF)

아라미드 섬유는 완전한 방향족 폴리아마이드로서 유기 섬유중에서 탁월하게 높은 탄성률을 나타낸다. 상업적으로 가치가 있는 아라미

표 7 각종재료와의 특성비교

項目	種類	CFRP <sup>(a)</sup>	GFRP <sup>(a)</sup>	KFRP <sup>(a)</sup>	BFRP <sup>(a)</sup>	강	알루미늄 합금	치탄 합금	AFRP <sup>(a)</sup>	SFRP <sup>(a)</sup>
密度 (g/cm <sup>3</sup> )		1.6	2.0	1.4	2.1	7.8	2.8	4.5	2.4	2.3
引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )		180	120	150	160	140	48	98	170	110
比強度 (10 <sup>6</sup> cm)		11.2	6.0	11.5	7.5	1.8	1.7	2.1	7.1	10
引張 彈性率 (10 <sup>3</sup> kg/mm <sup>3</sup> )		12.8	4.2	8	22	2.1	7.7	11	13	10
比彈性率 (10 <sup>3</sup> cm)		8.0	2.1	5.7	10.4	2.7	2.7	2.5	5.4	4.3
熱傳導率 (kcal/m <sup>2</sup> h <sup>2</sup> rC)		43	5	—	4	6.5	162	5.3	2	—
線膨脹率 (10 <sup>6</sup> /C)		-0.7	8	—	—	12	23	—	4	—
比抵抗 (Ω · cm)		10 <sup>-3</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>16</sup>	—	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>4</sup>

(a) 에폭시계복합지트, 섬유함유율 60Vol%의 한방향 적층판의 섬유층 방향특성  
 GF=유리섬유, KF=Kevlar(49), BF=보론섬유, AF=알루미늄섬유 SF=탄화규소섬유 CF는 HT형을 사용

표 8 아라미드(Aramid) 섬유공급

국가	공급처	품명	공급량(톤/년)			
			(M)m-m. (P)p-p	1986말	1987~8	1989
미국	Dupont	Nomex (M)		11,000		15,000
		Devlar (P)		21,000		21,000
일본	DuPont-Japan	Nomex (M)		수입		*
	Toray-DuPont	Kevlar (P)		수입	2,000 ('88)	5,000 ('90)
	Teijin	Conex (M)		1,200		1,200
		Technora (P)		0	500 ('87)	1,000
	Unitica Nihon Aramid	Apiere (M)		100		200
	Twaron (P)		수입		2,000	
네덜란드	Akzo	Twaron (P)		5,000	15,000 ('88)	15,000
영국	DuPont	Kevlar (P)		0	7,000 ('87)	7,000
한국	Kolon	Heracon (P)				500 ('90)

Dupont는 Nomex 페이퍼를 일본에서 생산할 것으로 발표함.

드는 미국 DuPont의 PPTA와 MPIA이며, 일본의 Teijin(帝人)은 PPTA와 DDE의 공중합물을 상품화 하였다.

표 7은 아라미드 섬유 의 물성을 보여준다. 아라미드는 CF 보다 비중이 낮은 것이 장점이다. 아라미드 중에서도 테크노라는 케블라 보다 비중이 더 낮으므로 더욱 높은 비교강도와 비교탄성률을 나타내며, 내화학약품성과 내가수분해성이 더욱 양호하다고 알려져 있다(표 8).

#### 4. 복합재료 매트릭스의 개발

첨단 복합재료에서 수지 매트릭스는 외부로부터의 응력을 섬유에 전달하는 역할을 하며 섬유의 배향 방향으로 그 응력을 분산시킨다. 또한 습기, 마멸 및 환경적인 열화의 원인으로 부터 섬유를 보호한다.

매트릭스수지는 열가소성 수지와 열경화성 수지로서 크게 두 범주로 나뉘어진다. 이 두 종류의 차이는 부품 제조에 있어서 그 가공기술

이 다른데 있다. 열경화 성수지는 촉매를 첨가하여 열과 압력을 가하면 비가역화학 반응을 일으키는데, 이것을 큐어링(curing)이라고 한다. 큐어링 전의 수지는 액체 형태이거나 열과 압력에 의해서 원하는 형태로 수지가 흐를 수 있도록 되어 있어야 한다. 큐어링 후의 열경화성 수지는 열과 압력을 더 가하여도 형태를 변경시킬 수 없다. 복합 재료에 사용되는 대표적인 열경화성 수지로서는 에폭시, 페놀, 불포화 폴리에스터 및 폴리이미드 수지를 들 수 있다. 열가소성 수지는 상온에서 고체이며, 가열을 하면 연화되거나 용융되어, 금형 내부에서 가압과 냉각을 거친 후 원하는 형태로 성형된다. 최종 제품(예를 들면, 시트상)을 다시 연화시켜 재성형(예를 들면, 컵)하기도 한다. 그러나 이와 같은 가공 공정이 여러번 반복되면 열에 의한 수지의 성화가 발생하므로 첨단 복합재료에서는 재생된 수지의 사용을 절제하고 있다. 열가소성 수지는 제품의 제조공정에서 선택의 폭이 다양하고, 또한 성형 사이클이 열경화성 수지에 비하여 짧다는 장점이 있다.

표 9 매트릭스 재료

수지	특 성	향 후 문 제
에폭시	ACM에 가장 많이 이용되고 있음. 용도가 다양함.	생산성 및 성질.
BMI	210°C 까지 사용가능. 양호한 내건습도, 가공용이.	인성, 섬유와의 접착력.
PI	240°C 까지 사용가능. 수요가 많지 않음.	모ULD기술, 취약성, 가격.
ENPLA	주입모ULD를 하는 경우. 단속 섬유로서 Nylon-66, PC, Pac, ABS, PBT 사용.	다이캐스팅 금속과의 반응, 섬유배열.
Super ENPLA	기계적 성질이 큼.	결정구조, 적층기술.
탄소	항공기의 브레이크 면 및 열판.	생산성 및 인성.
금속	미국에서는 항공기의 재료도 사용하는 경우 제한을 받음.	수요, 섬유보호도금, 결합기술.
세멘트	빌딩재료.	섬유혼합기술, 사용기간, 가격.

역사적으로, ACM의 매트릭스로 사용된 중요한 수지로서는 에폭시, 폴리이미드 및 열가소성 수지를 들 수 있다. 폴리이미드의 경우에는 그 용도가 제한되어 있어 대부분의 경우 열경화성 에폭시 수지가 사용되고 있다. 최근에 ACM의 용도가 다양하게 됨에 따라 매트릭스도 새롭게 개발되고 있다(표 9).

**4.1 에폭시 수지의 내충격성 향상**

에폭시 수지의 내충격성 향상을 위해서는 탄성체 입자를 혼합하는 방법, 비정질 열가소성 수지와 IPN을 만드는 방법, Interply toughening 등을 들 수 있다.

**4.2 비스말레이미드 (BMI) 수지**

BMI는 중간정도의 온도에 견디는 수지이다. 최초에는 에어로다이내믹 열에 의하여 고속항공기 날개의 표면온도가 상승되는 부위에 사용되었다. BMI는 에폭시 수지의 Hot-wet 물성을 개량시킨 수지로 인식되어지고 있다. 이 경우 유리전이 온도가 상승하고 흡습률이 적은 것이 특징이다.

**4.3 슈퍼엔지니어링 플라스틱(Super Engineering Plastics ; Super-ENPLA)**

(1) 종류

범용 수지의 내열온도가 50~80℃로서 낮고

	1985		1995	
	1000 MT	Million \$	1000 MT	Million \$
ENPLA	1,300(98)	5,100(89)	2,860(95)	112,000(72)
수퍼-ENPLA	23(2)	630(11)	160(5)	42,000(28)

( )안의 수치는 백분률(%)을 나타낸 것임

	수지종류	개발년도	내열온도(℃) (UL 지수)	가격(1988, 12) (\$/kg)
범용 플라스틱	PVC	1928	60	1.0
	PS	1938	50	1.3
	HDPE	1953	50	1.3
	PP	1954	85	1.1
	ABS	1948	80	1.9
범용 ENPLA	PA	1939	90~105	3.8
	POM	1956	100	3.4
	PC	1958	110	4.5
	NORYL	1966	100	3.6
	PBT	1970	120	3.5
수퍼 ENPLA	PI	1964	300	150<
	PSF	1965	150	8.4
	PPS	1967	200~240	7.0(GF 40%)
	LCP	1971	240~260	26.4
	PAI	1971	230	33.0
	PES	1972	180	9.4
	PAR	1973	150	5.3
	PEEX	1979	240	50.7
	PEI	1982	170	9.8

그 가격도 0.85~2.4\$/kg 수준인데 비하여 범용엔지니어링 플라스틱 (ENPLA)은 내열온도가 100~150°C로서 비교적 높으며 가격도 높다. 슈퍼 엔지니어링 플라스틱(슈퍼-ENPLA)의 내열온도는 150°C 이상이다.

범용 ENPLA의 상업화와 슈퍼-ENPLA의 도입역사는 내열성 향상 연구의 역사와 같으며 ENPLA의 내열성과 가격은 서로 비례관계에 있다.

전체 ENPLA중 슈퍼-ENPLA의 1995년도 사용비율은 사용량 기준으로 볼 때 5% 정도로 추정되며, 금액기준으로는 28%에 이를 것으로 예상된다.

열가소성 구지는 그 가격과 사용온도에 따라 크게 세 범주로 구별한다<sup>(4-5)</sup>.

단섬유로 강화된 열가소성 수지는 대부분 사출

제품에 이용된다. 그러나 엄밀한 의미에서는 이들의 기계적 물성이 높지 않으므로 ACM의 범주에 넣기는 어렵다. 연속섬유로 강화된 열가소성 수지는 아직도 개발단계에 있으나, 향후 전망이 매우 양호하다. 연속섬유 강화 슈퍼 엔지니어링 열가소성 수지는 종래의 열경화성 ACM을 대체할 소재로서 주의를 끌고 있는데, 그 이유로서는 가공성과 강인성이 종래의 ACM보다 양호하기 때문이다.

열가소성 ACM은 비교적 신기술에 속하므로 몇가지 기본적인 핵심기술이 개발되어야 한다.

- 기존의 열경화성 ACM 공정에서의 적용기술
- 적층기술
- 내 용제성
- 결정구조의 제어기술

슈퍼엔지니어링 플라스틱의 종류를 표 10에 나

표 10 슈퍼엔지니어링 플라스틱

재료	품명 (회사)	crys tal.	Tg (Tm) °C	화학적 성분
PSu	"Udel" (UCC)	amor	190	
PES	"Victrex" (ICI)	amor	225	
PEEK	"Victrex" (ICI)	crys	144 (335)	
PPS	"Ryton" (Phillips)	crys	88 (280)	
PAE	"Econol" (Sumitomo)	crys	325-360	
	"Xydar" (Dartco)	crys	372 (421)	
PAI	"Tolon" (Amoco)	amor	260	
PEI	"Ultem" (GE)	amor	217	
	"Avimid" N (du Pont)	amor		not opened

표 11 니트레진(Neat Resin)물성

수지 품명(또는 등급)	PSu P-1700	PES 200-P	PPS R-4	PEEK 45-P	PAI TorlonC	PEI ULtem	PAE Xydar	epoxy DX210
$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	1.24	1.37		1.3	1.4	1.27		1.21
$\sigma_t$ kg/cm <sup>2</sup>	720	860	800	930	1660	1070	1160	530
$E_t$ 1000kg/cm <sup>2</sup>		25				31	95	
$\epsilon$ %	50-100	50	21	150	9.7	60		3
$\sigma_t$ kg/cm <sup>2</sup>	1100	2000	1500		(post cured)	1480	1310	940
$E_t$ 1000kg/cm <sup>2</sup>	28	26	34	40		34	110	28
Izod notch kgcm/cm	7.1	8.7	1.6	45		5		
UL-Temp Index °C	150	180	220	240			06,916	64
Flammability UL-94 OI	V-0-2	V-0	V-0		V-0 47	V-0 42		
Moisture %	0.3	0.3	0.03	0.14		1.25		1~3

표 12 슈퍼엔지니어링 TP/CF 물성.

	PEEK (APC-2)	PPS	PES	PAI Torlon-C	Epoxy EP828
CF	AS-4	Celion6K	XA-S	?	T-300
VF %	62	56	60	53~55	65
$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	1.6	1.6	—	—	—
$\sigma_t$ GPa	2.3	1.2	1.2	1.4	1.6
$E_t$ GPa	130	120	150	140	140
$\epsilon$ %	1.45	0.8	—	—	1.1
$\sigma_f$ GPa	—	1.4	1.5	2.0	1.7
$E_f$ GPa	—	70	130	130	130
ILSS GPa	—	0.07	0.11	0.11	0.09

타내었으며, 수지의 물성을 표 11에 나타내었다. 이 플라스틱을 응용한 ACM 기술자료의 축적이 많지는 않으며, 탄소섬유와의 ACM 예를 표 12에 보였다.

#### (2) 국내의 개발전략

국내에서 열가소성 ACM이 개발되기 위해서는 매트릭스 수지로서 슈퍼엔지니어링 플라스틱의 국내 개발이 이루어져야 한다. 몇몇 주요 수지의 개발전략으로서는;

· 폴리페닐렌설파이드(PPS) ; 1989년 현재, 국내 수요가 가장 크며, 가격이 점차 하락할

것이므로 급격한 수요 증가가 예상된다. 일본의 제조업체들은 현실비를 100% 가동하고 있지 않으므로 한국과의 기술협력에 긍정적이지 않을 것임. 구미지역과 연계하여 우선 기본수지를 수입하여 강화수지를 개발한 후, 기본수지의 합성에 착수

· 액정고분자(LCP) : 전체 슈퍼엔지니어링 플라스틱의 금액 중 20%, 수요량의 5% 점유하고 있으며, 년 성장률이 24%로서 높음. 신물질 창조로서 물질특허의 획득을 목표로 하는 한편, 액정고분자-폴리아릴레이트-폴리카보

네이트에 이르는 유사 화학구조의 고분자에 대한 합성연구 병행.

· 폴리이미드(PI) : 전체 슈퍼엔지니어링 플라스틱의 금액중 31%를 점유하고 있는 중요 수지이며, 세계적으로 상업화된 생산설비의 규모가 연산 100톤 이하로서 비교적 공업화 투자가 적은 편임. 소규모투자 및 고부가가치형의 수지임. 다운스트림 전개를 중심으로 한 개발연구가 선결문제.

(3) 용도

40% CF 강화의 폴리에테르설폰, 폴리에테르케톤 등으로 디젤엔진 터보차저용모터를 개발중에 있다.

5. ACM 체계의 주요 과제

(1) 강도향상

일반적으로 구조재료는 외부응력을 받아 견디어 주어야 하는 1차 구조(primary structure)와 외부응력을 받지 않는 2차 구조(secondary structure)로 나뉘어 진다. 우주항공분야에 ACM이 적용된 역사를 돌이켜 보면, 처음에는 2차 구조 재료로 사용되다가 점차 1차 구조재료로 폭넓게 응용되어 온 것을 알 수 있다. 따라서 설계 응력과 신도가 증가될 필요가 생겼다.

(2) Hot-wet 특성

섬유에서 복합재료로의 물성 전달 특성과 강인성의 향상을 위해서는 기존의 우주항공용 소재인 에폭시(TGMDA/DDS) 보다 더 취성적인 수지가 바람직하다. 그러나, 취성재료는 흡습상태에서나 고온분위기에서 (즉, hot-wet condition에서) 물성의 저하를 가져온다. 따라서 강인성과 Hot-wet 특성의 균형을 극대화시키는 노력을 해야한다.

(3) 압축강도

일반적으로 재료의 기계적 강도와 탄성율은 인장특성 측면에서 검토되어진다. 그러나 그림 5에서 보는 바와 같이 첨단섬유 중 일부는 복합재료의 설계에 요구되는 물성보다는 낮은 압

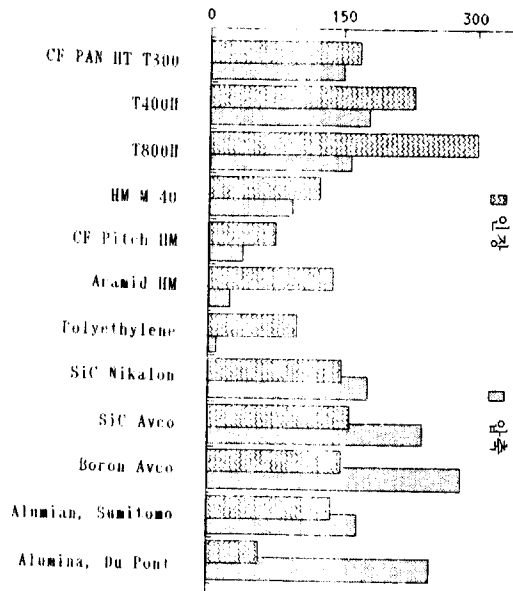


그림 5 섬유의 인장/압축강도

축 정도를 보유하고 있다.

(4) 표면과 계면

섬유의 물성이 극대화 됨에 따라, 이 물성을 복합재료의 물성에 전달시키는 것이 더욱 어렵게 된다.

섬유와 수지의 계면은 매우 중요한 의미를 가지며, 그 계면은 수지로부터 강화 섬유 쪽으로 필요한 응력 전달을 충분히 하여야 한다. 응력 전달이 불충분할 경우 제품의 용도 및 복합재료의 성능을 최대로 응용할 수가 없게 된다. 싸일레인(silane)과 같은 접합제가 계면상태를 향상시키기 위해 사용된다. 이와같은 "전달요인"(translation factor)에 있어서는 매트릭스 수지의 물성도 중요하지만 계면의 역할 또한 중요하다. 그림 6은 계면현상중에서 전형적인 것으로서, 계면접착력과 복합재료내 강화섬유의 강도와의 관계를 보이고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 섬유물성의 전달효율은 적정 수준이 존재한다. 탄소섬유의 상업적인 생산에 있어서는 탄소섬유 표면의 화학적 활성을 변화시킴으로써, 즉 표면처리의 정도를

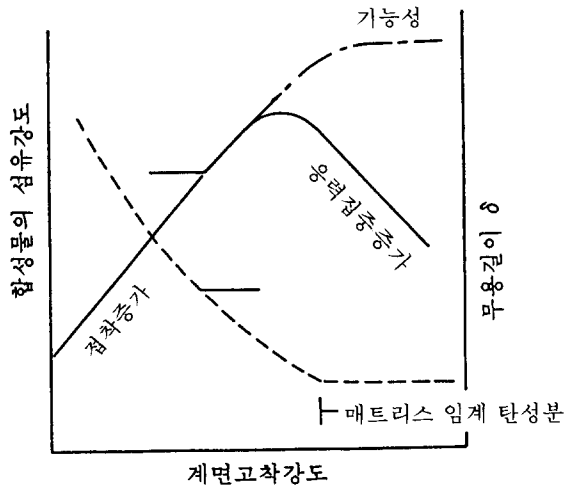


그림 6 용력변형과 계면고착강도

변화시킴으로써 위와 같은 적정 수준에 맞추고 있다.

#### (5) 안전 설계

첨단 복합재료가 실제로 공업적으로 이용되는 이유는 그 강도와 탄성률이 타재료에 앞서며 비중 또한 낮기 때문이다. 철, 알루미늄과 같은 기존 재료에 비하여 비강도와 비탄성률이 몇배에 이른다. 그러나 제품설계에 있어서 재료의 강도만이 중요한 것은 아니며, 피로강도, 용력에 의한 부식과 같이 제품의 안전성과 수명을 예측할 수 있는 물성의 연구가 병행되어야 한다. 복합재료의 경우는 비교적 새로운 재료이므로, 제품이 요구하는 안전도(safety factor) 보다 4~5배 감안하여 재료를 선정하여 설계한다. 금속과 같이 그 특성과 물성이 잘 알려진 재료의 경우는 안전도가 1.2~2.0이 되도록 설계한다<sup>(13~15)</sup>.

## 6. 맺 음 말

현재 불황산업으로 알려진 기초소재 산업의 대책으로서, 과잉설비의 처리, 원재료 및 에너지 코스트의 절감, 설비투자의 활성화, 사업의 집약화 등과 병행하여 생산 공정 자체의 혁신,

제품의 고부가가치화 및 신제품의 개발측면에서 강력한 기술개발의 추진이 요구되고 있다<sup>(6)</sup>.

소재산업 제품의 부가가치, 신제품의 개발 방법으로서 ACM이 이용되고 있다. 또한, 자원 에너지 제약을 극복하기 위해서는 에너지를 대체할 수 있는 재료의 개발과, 자원 및 에너지를 절약하는 방법 두 가지가 있다. 구체적 대책의 하나로서, 신규소재를 이용하여 경량강성화된 ACM의 출현이 강하게 요구되고 있다.

## 참고문헌

- (1) Matsuda, H.S. 1987.3.26~27, "Recent Developments of ACM," Symposium at KAIST, pp27.
- (2) 古田敏康, 1980. 7, 新しい材料の研究開発の現象と問題点, 海洋技術資料研究所
- (3) 宮入裕夫, 1989, 工業材料, 18, 37(11).
- (4) 産業技術 211號, 1984. 6
- (5) Plastic Technology 1988.12.
- (6) 小野昌考, 1985, 接着, 29, 7.
- (7) Speake, J.H. and Curtis, G.J. 1974 "Characterization of the Fracture Process in

- CFRP using Spectral Analysis of the A.E arising from the Application of Stress," International Conference on Carbon Fiber, London, The Plastic Institution, No. 29.
- (8) 苦井史博, 1975, "セラミクス", 20, No.10, 879.
- (9) 湯山茂徳, 1985, 強化プラスチック, 30, No.9,433.
- (10) 北館, 田中, 1985, "セラミクス", 20, No. 10, pp.54 — 60.
- (11) Outwater, J.D., 1956, "Mod. Plast", 38, pp. 156
- (12) Agarwat, B.D., 1977, "Fibre Sci. and Tech.", 10-4, p.281
- (13) J. Ashton, Halpin, J.C. and Petit, P. H. Primer on composite Materials : Analysis, Vol. III, Technomic Publishing Co., Inc., Stamford. Conn., 1969.
- (14) Broutman L. J and Krock, R. H. eds., Modern Composite Materials, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass., 1967.
- (15) Broutman L. J. and Krock, eds., R. H. Composite Materials, Vols, 1-6, Academic Press, New York, 1974.

