

# 金屬複合材料의 開發動向



吉 相 哲  
(産業技術情報院 責任研究員)

## 목 차

- I. 머리말
- II. FRM의 제조방법
- III. FRM의 특성
- IV. FRM의 用途
- V. 맺는말

<이번호에 전제>

## I. 머리말

金屬複合材料(MMC : metal matrix composites)는 構造 特性에 따라 纖維強化型과 分散強化型으로 크게 나눌 수 있는데, 전자는 재료에 작용하는 힘을 주로 強化纖維가 담당하고, 후자는 매트릭스가 담당한다. 그러나, 통상적으로 金屬複合材料라 하면 전자인 纖維強化金屬(FRM : fiber reinforced metals)을 말한다.

FRM의 연구는 1959년 미국 항공우주국에서 발표한 텅스텐 纖維強化 구리가 최초이며, 그후 미국을 중심으로 유럽, 일본, 구소련 등의 각국에서 연구 개발이 추진되었으며, 우리나라도 KIST, KIMM 등의 국가출연 연구기관과 대학이 중심이 되어 연구 개발이 진행되고 있다.

強化纖維는 보론(B)에 이어 탄소(C), 炭化硅素(SiC), 알루미늄나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 등의 連續纖維와 炭化硅素, 氮化硅素(SiN)의 위스키 등이 개발되어 이를 사용한 FRM 제조 연구가 진행되고 있지만, 매트릭스는 알루미늄을 중심으로한 輕金屬이 대부분이다.

따라서 本稿에서는 알루미늄基 FRM을 중심으로 FRM의 제조, 종류 및 특성, 용도 등에 대한 최근 개발동향을 살펴보기로 한다.

## II. FRM의 제조방법

### 1. 強化纖維

FRM은 強化纖維의 종류에 따라 連續纖維強化와 不連續纖維強化로 구분할 수 있으며, 후자 중에서 특히 纖維가 單結晶인 것을 위스키強化 金屬複合材料라 한다. FRM의 물성치는 複合化하는 素材의 물성치로부터 「複合 理論」에 의해 쉽게 추측할 수 있다.

連續纖維強化 複合材料의 引張強調  $\sigma_c$ 와 彈性率  $E_c$ 는 각각 (1)식과 (2)식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m(1 - V_f) \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $\sigma_f$  : 纖維의 破斷應力,  $\sigma_m$  : 매트릭스

의 破斷應力,  $V_f$ : 纖維의 容積率이다.

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m(1 - V_f) \dots\dots\dots (2)$$

여기서: 纖維의 彈性率, 매트릭스의 強性率이다. 또 不連續纖維強化 複合材料의 引張強度  $\sigma_{cu}$ 는 (3)식과 같다.

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \cdot V_f \cdot F(l_c/l) + \sigma_m(1 - V_f) \quad (3)$$

$$l_c/d_f = \sigma_{fu} / 2\tau \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $\sigma_{fu}$ : 纖維의 引張強度,  $l_c$ : 界纖維 길이,  $l$ : 纖維의 平均길이,  $F(l_c/l) = 1 - 1/2l_c(1 > l_c$ 의 경우),  $\tau$ : 纖維와 매트릭스의 界面剪斷應力이다.  $l_c/d_f$ 는 Aspect Ratio이며, 이 값이 어느 정도 이상이어야만 複合效果가 충분히 발휘된다. (1)~(3)식에서 알 수 있는 바와 같이 複合材料의 特性은 強化纖維에 의해 크게 달라진다. 지금까지 많은 FRM용 強化纖維가 개발되었으며, <表1>은 대표적인 強化纖維이다.

連續纖維는 직경에 따라 100~200 $\mu$ m의 太經纖維와 20 $\mu$ m 이하의 細經纖維로 구분할 수 있다. 전자는 炭素纖維나 텅스텐纖維 表面에 CVD法 등으로 보론이나 炭化硅素를 피복시킨 것이며 모노필라멘트로서 사용된다. 후자는 細經이므로 통상 여러개를 묶어 멀티필라멘트로서 사용된다. 太經纖維는 細經纖維보다 알루미늄합금 蝕浸이 간단하므로 界面에서 化學反應이 일어나도 強度의 저하가 적은 이점이 있다. 반면 코스트가 높고, 織物 등의 纖維의 2차 가공이 어려운 결점이 있다.

細經纖維에는 炭素纖維, 알루미늄纖維, 炭化硅素纖維 등이 있으며, 炭素纖維는 熔融 알루미늄과 반응하여  $Al_2C_3$ 가 형성되기 쉬워 기계적 성질 저하의 원인이 되지만, 高彈性系와 피치系 炭素纖維에서는 반응이 거의 일어나지 않는다. 알루미늄纖維는 化學組成과 結晶構造에 따라 구분되는데, 結晶構造가 안정한  $\alpha-Al_2O_3$ 와 SiC를 15% 함유한  $\gamma-Al_2O_3$  등이 있다.

細經 炭化硅素纖維는 폴리머를 熔融紡絲法으로 纖維狀으로 만든 다음, 不熔融化處理, 燒成하여 제조하며, 알루미늄과의 蝕浸성이 양호하므로 피복없이 사용할 수 있는 이점이 있다.

한편 不連續纖維는 상당히 종류가 많으며, 직경에 따라 2 $\mu$ m 이상의 多結晶 不連續纖維와 1 $\mu$ m 이하의 각종 위스커로 나눌 수 있다. 알루미늄 不連續纖維는 다른 纖維에 비해 強度와 彈性率이 작고 가격이 저렴하므로 일반 공업재료로서 널리 사용되고 있다. 纖維의 特性은 連續纖維와 같이 화학조성에 따라 다르다. 또 위스커는 일반적으로 強度와 彈性率이 높다. 그 중에서도 SiC와  $Si_3N_4$  위스커가 우수한데, 위스커 자체가 고가이므로 용도는 고부가가치재료에 한정되고 있다. 그러나 티탄酸칼륨 위스커와 보론酸알루미늄 위스커는 비교적 가격이 저렴하며, 특히 보론酸알루미늄 위스커는 強度와 彈性率이 우수하여 향후 일반 공업재료로서의 실용화가 기대된다.

<表1> 대표적인 FRM용 強化纖維

纖維 種類	길이 ( $\mu$ m)	直徑 ( $\mu$ m)	密度 (g/cc)	영率 (GPa)	引張強度 (GPa)
SiC위스커	10-100	0.1-1.0	3.2	400-700	14
$Si_3N_4$ 위스커	5-200	0.1-1.6	3.2	380	1.4
$K_2Ti_6O_{12}$ 위스커	10-100	0.5-3.0	3.3	280	3-5
$Al_2B_4O_{10}$ 위스커	10-30	0.5-1.0	2.9	400	8
$Al_2O_3$ 불연속섬유	500	3	2.9-3.3	300	2
SiC	연속 섬유	10	2.6	200	3
CVD-SiC		140	3.0	420	4
$Si_3N_4$		10	2.5	300	2.5
CVD-B		100, 140	2.6	410	3.5
C		7-20	1.8-2.2	200-700	3-6
$Al_2O_3$		10, 15	3.1-3.6	170-320	1.8

## 2. 제조방법

〈表2〉는 FRM의 제조방법이다. FRM의 제조방법은 連續纖維와 不連續纖維가 약간의 차이는 있지만, 固相法, 鑄造法, 熔射法의 3종류가 있다. 그러나 熔射法은 氣泡를 완전히 제거하기가 어렵고 收率도 나쁘므로 매트릭스를 固相狀態 그대로 열간프레스나 HIP로 燒結하는 固相法과 液體狀態를 거치는 鑄造法의 2종류가 주류를 이루고 있다. 티타늄基 FRM은 固相法, 마그네슘基 FRM은 鑄造法이 적용되고 있으며, 알루미늄基 FRM은 固相法과 鑄造法 모두 적용이 가능하다.

固相法에는 金屬 포일 위에 連續纖維를 配列한 것을 積層시켜 熱間프레스하는 방법, 金屬粉末과 混合하여 열간프레스하는 방법, 진공용기에 對入하여 HIP처리하는 방법 등이 있다. 위스커는 固相法이 鑄造法보다도 強度가 높고, 燒結時에 알루미늄 분말 표면의 산화막이 분쇄되어 미세하게 분산되므로 固相法이 많이 적용되고 있다. 한편 固相法으로 제조한 FRM은 強度가 높은 장점이 있지만 배치방식이므로 量産이 곤란하여 제조 코스트가 높은 단점이 있다.

鑄造法에는 低壓鑄造法과 加壓鑄造法이 있다. 低壓鑄造法은 金屬 熔湯을 교반하면서 급형에 주입하는 방법이며, 대형 장치가 필요하지 않아 가장 저렴한 FRM 제조방법이다. 그러나 대부분의 強化纖維가 세라믹이므로 알루미늄 熔湯 내에서 잘 분산되지 않아 분산 가능한 容積率에 낮은 결점이 있다. 또 분산에 시간이 많이 걸려 반응이 격렬하게 일어나는 強

化纖維는 사용이 어려운데, 이 결점은 熔湯을 半熔融狀態로 하면 개선된다.

加壓鑄造法은 強化纖維의 容積率과 反應制御 등이 우수한 방법이다. 먼저 強化纖維를 豫備成形하여 프리폼으로 만드는데, 이 단계에서 FRM으로서의 形狀과 強化纖維의 容積率이 결정된다. 이 방법은 매트릭스 金屬이 아주 짧은 시간에 凝固되므로 매트릭스와 반응성이 강한 強化纖維도 양호하게 복합화시킬 수 있다. 특성과 제조 코스트 모두 우수하므로 실용화되어 있는 FRM의 대부분이 이 방법으로 제조되고 있다. 다만 프리폼제조시에 이용되는 바인더의 SiO<sub>2</sub>가 合金 熔湯과 쉽게 반응하여 Si나 合金元素 Mg 등을 析出시키는 문제가 있다. 따라서 Si나 Mg와의 반응성이 낮은 바인더의 개발이 요구된다.

## III. FRM의 特性

### 1. 위스커強化 金屬複合材料

각종 위스커가 強化纖維로서 개발되었지만, 현재 SiC 위스커가 가장 많이 사용되고 있다. 위스커의 精製, 熔湯·造法과 押出成形法의 조합으로 SiC 위스커 / Al의 引張強度를 800 - 950MPa 까지 얻을 수 있게 되었다. 그러나 최근 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 위스커強化 알루미늄의 우수한 특성이 발견되어 활발한 연구가 진행되고 있다. 熔湯鍛造法으로 제조한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 위스커 / 6061合金은 容積率 25%에서 韌性強度 900-1000MPa가 얻어졌으며, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 위스커 / 7075合金에서는 容積率 30%에서 1300MPa가 얻어졌다. 앞으로 저

〈表2〉 FRM의 제조방법

분류	방법	복합재료 강도	제조 코스트	비고
고상법	열간프레스	고	고	金屬粉末을 이용할 시의 粒徑은 20μm 정도의 微分을 이용함. 母相의 半熔融加工이 바람직함.
	HIP	고	극고	
	열간압출	고	고	
주조법	저압주조	저	저	容積率에 낮음.
	가압주조	중고	중	가장 유력한 기술.
용사법	가스용사	저	저	기공이 생김.
	감압플라스마용사	저	고	수율이 나쁨.

코스트 제조기술 개발이 기대된다.

## 2. 連續纖維強化 複合材料

連續纖維強化 金屬複合材料는 위스커強化 金屬複合材料와는 달리 성질에 異方性이 있으며, 이 특성을 최대한 이용한 Tailor-made 재료가 가능하다. 그러나 위스커強化 複合材料와는 달리 壓延, 押出 등의 2차 加工이 어려우며, Near-Net-Shape의 FRM 제조기술의 개발이 필요하다.

連續纖維強化의 큰 특징은 纖維方向에서 強度가 높은 점이다. <表3>은 長纖維方向 알루미늄基 FRM의 纖維配列方向(0°)과 垂直方向(90°)의 引張強度와 영率이다.

炭素纖維에서는 1GPa를 넘는 高強度재료가 얻어졌다. CVD法으로 제조된 SiC纖維나 B纖維는 太經이므로 취급이 쉬워 이상적인 纖維配列이 가능하다. 이러한 纖維를 사용한 FRM의 強度는 1GPa이상으로 상당히 높다. 현재 최고의 強度와 彈性率을 가진 FRM은 CVD SiC纖維強化 티타늄합금계이며, 각각 2GPa, 210GPa에 이르고 있다. 또 細經 SiC纖維도 위스커와 하이브리드화로 配列을 制御하여 양호한 強度를 얻고 있다.

## IV. FRM의 用途

FRM의 실용화는 미국이 가장 앞서가고 있다. 미국은 국방성, NASA 등의 강력한 지원 아래 輕量 高強度 高剛性 材料를 航空 宇宙分野에 사용할 목적으로 強化纖維, 복합화 기술의 개발, 纖維와 매트릭스와의 界面 舉動, 適合性, 實機 部品の 시험제작 및 평가 등 많은 연구를 실시하여 FRM에 대한 기초가 거의 확립되어 있다.

宇宙機器의 FRM화는 航空機보다 실용화가 빨리 진행되고 있다. FRM 實機 構造 應用 1호는 宇宙輸送體 Orbiter의 中胴 構造에 B/Al FRM을 사용한 것이며, Orbiter 1機當 243개의 管狀 truss가 장착된다. FRM의 사용으로 기존의 高張力 알루미늄합금 押出材에 비해 44% 정도의 重量 輕減效果를 얻었다. <表4>는 1970년대 초기까지 B/Al FRM으로 시험제작한 航空 宇宙機器의 構造物 例이다. 또 <表5>는 航空 宇宙分野에서 유망한 FRM 용도이다.

자동차에 FRM 응용은 일본이 앞서가고 있다. 1982년에 도요다자동차가 승용차 디젤엔진의 피스톤 헤드와 링홈부의 耐磨耗環境에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 不連續纖維 / 알루미늄 FRM 사용하였다.

<表3> 長纖維 一方向強化 Al 複合材料의 引張強度와 영率

섬유 종류	제 회 사		매트릭스	纖 維 容 積 率(%)	제조방법	引張強度(MPa)		영率(MPa)	
						0°	90°	0°	90°
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DuPont		純 Al	45-50	-	1300	-	-	-
	住友化學		純 Al	50	주조법	860	98	150	110
C	東邦레이온		5056합금	35	IP+고상법	6-900	-	160	-
	도레이	高彈性	Al-11.5%Si	50	액상 열간프레스	1025	8.2	-	-
		高彈性	Al-11.5%Si	40		376	54	-	-
SiC	日本카본		純 Al	35	고상법	800	72	95	62
	宇部興産		純 Al	50	주조법	1100*	-	-	-
	AVCO		純 Al	47	고상법	1500	86	204	118
B	AVCO		純 Al	48	주조법	1500	140	215	140

주: ① IP는 이온플레이팅

② \* SiC 위스커를 혼합하여 섬유 분산성과 횡방향 강도를 개선하였음.

〈表4〉 B / Al을 이용한 構造物의 試驗製作 例

品 目	製作 年度	FRM	치수(m)	重量 (Kg)	중량 輕減(%)	試 驗 結 果
Atlas Missile Adapter	1968	B / Al	1.50徑× 1.05	32.7	45	終局荷重의 133%(制限荷重의 200%)에 서 破斷
F-111 Bulkhead	1969	Borsic / Al	0.94×1.2		26	制限荷重의 130%에서 破斷
F-106 Access Door	1969	B / Al	0.31×0.28		20	69.1 時間飛行: 破斷되지 않았음.
Gimbal Ring Stiffeners	1971	Borsic / Al	0.24×0.04	1.6		試驗片數 2個: 破斷되지 않았음.
OVI Spacer	1971	B / Al	2.1徑×0.4	38.4	20	終局荷重의 160%에서 試驗: 破斷되지 않았음.
OVI Truss	1971	B / Al	2.1×0.75 ×0.75	22.7	51	Al / Al 接着部에서 破斷
Compression Panel	1972	B / Al-Ti	1.2×0.6	5.0	32	316℃에서 試驗: 制限荷重에서 破斷
S-3A Wing Box	1973	B / Al	0.75×1.3 ×0.17	26.5	25	制限重量의 150%에서 靜的強度試驗: 破斷되지 않았음. 靜的強度 試驗後 5배 의 life cycle까지 試驗: 破斷되지 않았 음.
Space Shuttle Shear Beam	1973	B / Al	1.0×0.96	35.4		終局荷重의 106%에서 破斷
Space Shuttle Compr. Panel	1973	B / Al	2.0×0.7	20.2		316℃에서 使用을 目的으로 함.

註: B / Al: 보론 纖維強化 알루미늄 FRM.  
Borsic / Al: Borsic 纖維強化 알루미늄 FRM.

이 FRM은 熔湯·造法으로 제조하며, 1986년 2월 기준으로 23개 車種, 月刊 10萬개의 FRM 피스톤 부품을 제조하고 있다. 또 韓大技研工業도 1985년에 스테인리스鋼/알루미늄 FRM으로 만든 콘로드를 사용하기 시작하였다. 이 밖에도 많은 실용화가 검토되고 있지만, 아직 FRM을 자동차 부품에 사용하는 데에는 코스트에 문제가 있다. 지금까지 실용화된 FRM의 대부분이 가격이 저렴한 알루미늄나 不連續纖維나 티탄酸칼륨 위스커를 사용하고 있으며, 제조방법도 코스트가 적게 들면 量産性이 우수한

熔湯鍛造法을 이용하고 있다.

한편 스포츠 레저부품은 경제성보다는 기능성을 중요시하는 분야이므로 FRM의 대량 사용이 가능하다. 〈表6〉은 스포츠 레저분야에서 FRM 이용 가능한 품목이다.

그밖에도 현재 軍用 航空機에 應用이 주류를 이루고 있는 防衛産業分野, 一般産業機械 및 精密器械分野 등에도 이용이 확대될 것으로 예측된다.

## V. 맺는말

〈表5〉 FRM의 有望한 用度

應 用	要 求 特 性	有 望 한 材 料 系
宇宙 宇宙構造 Antenna Truss(Space Shuttle)	輕量, 剛性, 熱的 寸수 安定性 輕量, 剛性, 強度	B / Al, B / Mg, C / Mg B / Al(實用)
航空機 Pylons Struts	輕量, 剛性, 耐熱性 輕量, 剛性, 強度	B / Al, SiC / Al, SiC / Ti B / Al, SiC / Al
Fairings Access Door Wing Box	輕量, 剛性 輕量, 剛性, 強度 輕量, 剛性, 強度	B / Al, SiC / Al, C / Al B / Al, SiC / Al B / Al, SiC / Al
Frames Floor Beams Stiffeners	輕量, 剛性, 強度 輕量, 剛性, 強度 輕量, 剛性, 強度	B / Al, SiC / Al, C / Al B / Al, SiC / Al, C / Al B / Al, SiC / Al, C / Al
Fan, Compressor Blades Turbine Blades	輕量, 剛性, 耐熱性, 耐衝擊性 強度, 剛性, 耐熱性, 耐衝擊性, 耐腐蝕性	B / Al, SiC / Al, SiC / Ti 耐火金屬機纖維強化 超耐熱合金 一方向凝固共晶合金
Transmission Case(Helicopter) Truss(Helicopter)	 輕量, 剛性, 強度 輕量, 剛性, 強度	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Mg, C / Al, C / Mg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Mg B / Al, SiC / Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Al

註 : B, C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 連續纖維, SiC는 위스커 및 連續纖維.

〈表6〉 스포츠 · 레저 分野에서 FRM 利用可能 品目

分 野	品 目	特 性	FRM 種 類
스포츠 분 야	테니스라켓	輕量, 剛性, 強度	B / Al, C / Al, SiC※ / Al
	스키폴(poles)	輕量, 剛性, 強度	B / Al, C / Al, SiC※ / Al
	스키	輕量, 剛性, 強度	B / Al, C / Al, SiC※ / Al
레 저 分 野	낚싯대	輕量, 剛性, 柔軟性	B / Al, C / Al, SiC※ / Al
	골프대	輕量, 剛性, 柔軟性	B / Al, C / Al, SiC※ / Al
	자전거프레임	輕量, 剛性, 強度	B / Al, C / Al, SiC※ / Al
	오토바이프레임	輕量, 剛性, 強度	B / Al, C / Al, SiC※ / Al

註 : SiC 위스커만 使用.

FRM은 1959년 최초의 연구가 시작된 이후, 強化纖維의 개발에서 複合化技術 및 2次 가공 기술에 이르기까지 폭넓은 연구 개발이 진행되어 왔으며 그 결과 많은 발전을 가져왔지만. 아직도 強化纖維와 매트릭스와의 結合性, 界面制御技術, 特性 데이터 不足 등 해결해야 할 문제점이 있다. FRM의 실용화는 지금까지는 상당히 적지만, 앞으로 연구개발이 진행됨에 따라 점차 증가할 것으로 예상되며, 미국의 경우 FRM

의 시장 규모가 1988년 2,000萬달러(US)에서 2000년에는 2億2,900萬 달러로 10배 이상 증가할 것으로 예측하고 있다.

한편 국내에서도 정부출연 연구기관과 대학이 중심이 되어 FRM에 대한 연구 개발을 진행하고 있으며, 이미 FRM 자동차부품을 개발 실용화 단계에 이르고 있어, 향후 연구 개발 결과가 기대되고 있다. <♣>