

# 금속기지 복합재료의 개발동향



조 경 목

(부산대학교 금속공학과)

- '74-'79 서울대학교 금속공학과(학사)
- '80-'82 서울대학교 금속공학과(석사)
- '82-'87 Brown University(박사)
- '87-'88 Brown University(Postdoctoral)
- '88-'89 Max-Planck-Institut(Guest Scientist)
- '89-'90 산업과학기술연구소 연구원
- '90-현재 부산대학교 금속공학과 부교수



이 성 학

(포항공과대학교  
재료금속공학과)

- '74-'78 서울대학교 금속공학과(학사)
- '79-'81 서울대학교 금속공학과(석사)
- '81-'85 Brown University(박사)
- '85-'86 Brown University(Postdoctoral)
- '86-현재 포항공과대학교 재료금속공학과 부교수

## 1. 서 론

금속기지 복합재료는 1960년대 미국에서 NASA가 주축이 되어 우주항공계획에 적용할 신소재로서 개발 연구가 본격적으로 착수되어 상당한 관심을 불러 일으킨 바가 있다. 이 시기에 복합재료에 관련된 연구는 보론(B), 탄소(C),  $Al_2O_3$ , SiC 등의 장섬유 개발에 주력되었고, 이후 장섬유 강화 금속기지 복합재료의 역학적 설계, 제조방법 개발 등에 대한 연구가 계속되어 우주항공분야에 제한적으로 적용이 시도되었으나 전면적인 실용화 단계에는 이르지 못하였다. 1980년대에 접어들면서 장섬유 뿐만 아니라 단섬유, 휘스커, 입자 등 다양한 종류와 형상의 강화재가 개발되어 금속기지 복합재료는 우주항공분야 뿐만 아니라 자동차, 기계, 전자, 레저산업 분야까지 적용이 고려되면서 새롭게 관심을 불러 일으켰다[1-4]. 이 시기에 미국에서는 NASP, Title III 등 우주항공 및 국방 사업에 지속적인 주안점을 두고 금속기지 복합재료의 연구가 계속되었으나[5], 일본에서는 자동차 부품에의 적용을 중심으로 금속기지 복합재료의 실용화에 노력을 경주하였다[6]. 유럽 각국도 국방 및 우주항공용에서 상업화로 금속기지 복합재료의 연구전환을 시도하게 되었다[7]. 금속기지 복합재료의 적용범위가 확대되고 상업화되기 위해서는 값싸게 제조될 수 있어야 한다. 따라서 고가의 장섬유 강화 금속기지 복합재료에서 탈피하여 저가의 단섬유, 휘스커, 입자를 강화한 금속기지 복합재료의 개발을 위한 연구가 활발히 이루어지기 시작하였고, 제조공정도 생산 단가가 높은 분말야금법 보다 경제적인 주조법, 분사성형법을 이용하려는 추세가 두드러지게 되

었다[8-13].

금속기 복합재료는 사용용도에 맞게 기지금속과 강화재를 조화시켜 기계적, 물리적특성을 설계하여 제조할 수 있는 장점이 있다. 금속기지 복합재료의 기지로는 경량금속인 Al 합금, Mg 합금, Ti 합금을 비롯하여 금속간화합물, Superalloy가 있으며 Cu, Pb등 금속기지도 일부 연구의 대상이 되고 있으나 [3, 4], 이 중에서 현재까지는 Al 합금이 주종을 이루고 있다[1, 2]. 금속기 복합재료의 물성적 특징은 경량이면서 비강도와 비강성이 매우 높을 뿐만 아니라 내마멸성과 고온물성이 우수하며, 열팽창계수가 낮아 다양한 구조재로서 적용이 기대되고 있다. 경량, 고강도, 내마멸성의 Al, Mg 합금기지 복합재료는 자동차 부품용 소재에의 적용이, 고온물성이 우수한 Ti합금 및 금속간화합물 기지의 복합재료는 우주항공 및 발전설비용 구조물에의 적용이 기대되고 있다[1-4, 14-16].

한편 금속기지 복합재료의 실용화 및 상업화를 위하여 선행되어야 할 과제는 신뢰성 있는 기계적 특성의 확보이다. 금속기 복합재료의 기계적 특성을 결정하는 주요 인자는 기지금속의 조성 및 미세조직, 강화재의 분포 및 부피분율로서 이들의 제어가 실용 복합재료 개발을 위한 연구의 주안점 중의 하나이다[1-2, 8]. 특히 금속기지 복합재료는 대부분 연성기지를 사용하고 있으나, 파괴인성이 매우 낮아 구조물에의 적용에 가장 심각한 저해 요인이 되고 있다. 이외에도 금속기 복합재료의 실용화에 선행되어야 해결되어야 할 과제들로는 특성평가의 표준화, 가공공정의 개발, 재활용기술의 확립 등이 있다. 본 고에서는 현재까지 연구가 되어온 제조공정별 금속기지 복합재료의 종류 및 적용예와 더불어 기계적 특성에 영향을 미치는 미세조직적 인자를 중심으로 금속기지 복합재료의 개발동향을 간략하게 정리하여 보고자 한다.

## 2. 장섬유 강화 금속기지 복합재료

금속기지 복합재료 개발의 초기부터 검토된 장섬유 강화 금속기지 복합재료는 우주왕복선(그림 1. : Al/B strut) 및 위성(그림 2. : Al/C boom/waveguide)등의 구조용 재료로서 적용이 된 바가

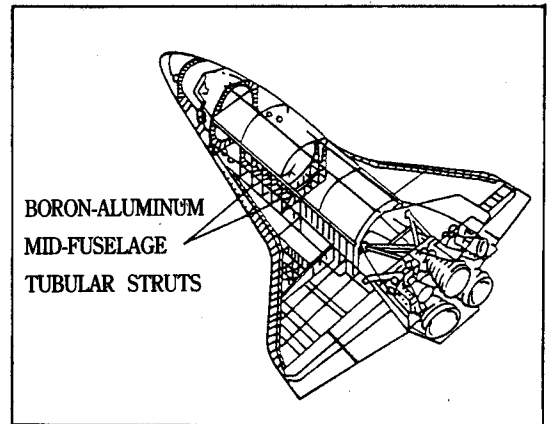


그림 1. 우주케도선의 Al-B fiber 복합재료 struts

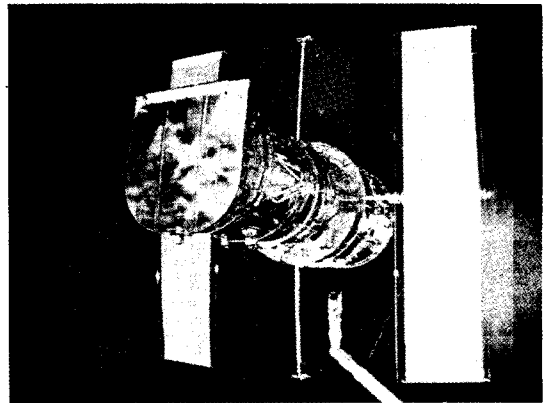


그림 2. 위성의 Al-Carbon fiber 복합재료 boom/waveguide

있다. 장섬유 강화 금속기지 복합재료는 장섬유의 가격, 제조공정의 복잡성, 제조규모의 제한성 때문에 아직까지 상업화에는 어려움이 있으나 상온 및 고온에서 비강도 및 비강성 등의 기계적 특성이 매우 우수할 뿐만 아니라 구조물의 경량화에도 부합하여 우주항공 및 발전설비용 재료로서 적용하기 위한 연구가 계속되고 있다. 장섬유 강화 복합재료의 기지재료는 Al, Mg 및 Ti 합금을 비롯하여 금속간화합물, 비정질금속 등이 사용되고 있다. 복합재료의 강화재로 사용될 장섬유는 열적으로 안정성이 있어야 하며 금속기지에 보강시 기지/강화재 계면에서의 열팽창계수 차이 및 화학반응성에 대한 안정성도 요구되고 있다. 표 1 에는 장섬유 강화 금속기지 복합재료의 종류와 적용 가능성을 정리하였다[1, 13, 17].

표 1. 장섬유 강화 금속기지 복합재료의 종류와 적용 가능성

Matrix	Fiber	Potential applications
Al	Graphite	Satellite, missile and helicopter structure
Mg		Space and Satellite structure
Al	Boron	Compressor blades and structure support
Mg		Antenna structure
Ti		Jet engine fan blade
IM		High temperature structure
Al	B <sub>4</sub> C	Jet engine fan blade
Ti		High temperature structure and fan blades
IM		High temperature structure
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Superconductor restraints in fusion power reactor
Mg		Helicopter transmission structure
IM		High temperature engine components
Al	SiC	High temperature structure
Ti		High temperature structure
IM		High temperature engine components
SA(Co-base)		High temperature engine components

IM : Intermetallic, SA : Superalloy

장섬유 강화 금속기지 복합재료의 제조방법은 액상제조법과 고상제조법으로 대별된다. 액상 제조법으로는 Al 및 Mg 합금 등 저융점 기지금속 용탕을 장섬유 다발 혹은 multifilament 직물형 예비성형체에 가압(squeeze casting) 혹은 비가압(Lanxide)으로 침투시켜 복합재료를 제조하는 방법이 있다[13, 18]. 액상제조법은 값싸게 near-net-shape 부품을 대량생산 할 수 있는 장점은 있으나, 강화재/금속용탕 젖음성 및 반응성이 문제시되고 공공(porosity) 등 구조결함이 발생하고 장섬유의 배열이 불균일하여 섬유간 접촉으로 인하여 기계적 특성이 열화되는 단점이 있다.

Ti 합금을 비롯한 대부분의 장섬유 강화 금속기지 복합재료는 고상공정법[1]을 이용하여 제조되고 있다. 고상공정법은 Foil-fiber layup, powder cloth process, Plasma 분무, consolidation of matrix coated fibers (MCF법) 등 여러가지 방법이 개발되어 있다. Foil-fiber layup법은 장섬유 매트와 기지합금 foil (75-120 $\mu$ m)를 적층시켜 탈가스 시킨 후 hot press하여 복합재료를 제조한다. 이와 유사한 방법으로 powder cloth process가 있는데, 이는

기지합금 foil 대신에 기지합금 분말을 binder와 혼합한 후 압연하여 장섬유 매트와 적층시키는 방법으로 Ti등의 금속간화합물기지 복합재료의 제조에 사용되고 있다[14]. 이와 같이 제조된 Ti 합금 및 Ti aluminide 금속간화합물 기지 복합재료는 gas turbine compressor disk, spacer assembly, air frames, space vehicles, power plants등에 적용을 기대하고 있다. 그러나 상기의 방법으로 제조된 복합재료는 장섬유의 분포상태가 나빠서 섬유간 접촉이 생기는 문제점이 있다.

Plasma 분무법은 plasma 아크 혹은 저압 plasma로 반액상의 금속을 드럼에 감긴 단층의 장섬유에 입히는 방법이다. 주로 Ti 합금 혹은 Ti aluminide를 기지로 하는 복합재료의 제조에 사용되는 방법이다. Plasma 분무법은 foil-fiber layup 법에 비하여 장섬유의 분포상태는 양호하나 분무에 의한 장섬유나 장섬유 보호 coating 층이 손상을 입는 단점이 있다.

장섬유 강화 금속복합재료의 제조법 중에서 electron beam evaporation and vapour deposition (EBED)의 PVD법 혹은 sputter법을 이용하여 기



그림 3. MCF 법으로 Ti 기지합금을 입힌 SiC fiber

지금속을 장섬유에 일정 두께로 입힌 후 성형시키는 consolidation of matrix coated fibers (MCF) 법이 있다. 그림 3은 MCF 법으로 Ti-6Al-4V 기지를 입힌 SiC 섬유이다. MCF 법의 금속기지는 grain이 매우 미세하여 초소성의 효과도 기대할 수 있다. MCF 법으로 제조할 수 있는 복합재료의 기지금속은 선택의 폭이 넓어 Al 합금(Al-4.3Cr-0.3Fe), Ti 합금(Ti-15Mg, Ti-6Al-4V, Ti-15Mo 등), 금속간화합물(TiAl, Ti<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>Al, NiAl, MoSi<sub>2</sub>), 비정질금속(Al-Y-Ni-M, Mg-Cu-Y, Mg-Ni-Y, Ti-B)등 매우 다양하다[1].

장섬유 강화 금속기지 복합재료는 상온에서 뿐만 아니라 고온에서도 비강성, 비강도가 유지되는 경량재료이며 열팽창계수가 낮아서 우주, 지상의 구조물 및 수송기기에 적용이 매우 적합한 소재이다. 장섬유 강화 금속기지 복합재료는 특히 섬유 강화방향으로 강성 및 강도가 매우 우수하며 Al 및 Mg 합금기지의 경우 약 300°C 까지, Ti 합금기지는 약 600°C 그리고 Ti aluminide 기지는 700-800°C까지 강성과 강도의 유지가 가능하다. 그러나 기계적 특성이 일정하지 못하여 신뢰성이 떨어지는 단점은 복합재료의 실용화를 저해하는 주 요인이다. 장섬유 강화 금속기지 복합재료의 기지조직내 공공 및 결함, 장섬유의 불규칙분포, 열잔류응력 균열 등이 기계적 특성을 저하시키고 신뢰성을 떨어지게하는 원인으로 알려져 있다. 장섬유 강화 금속기지 복합재료는 제조시 섬유

손상과 강화재/기지 계면반응을 최소화하고, 강화재의 배열과 부피분율을 효과적으로 제어해야만 우수한 물성을 확보할 수 있다. 특히 복합재료에서 강화재의 불균일한 배열은 강화재 간의 접촉이 일어날 경우 국부적으로 응력이 집중되어 전단 변형이 일어나고 접촉부에서 균열이 발생할 소지가 있어 복합재료의 기계적 특성을 심각하게 저하시킨다. 따라서 장섬유 강화재를 균일하게 분포시키면서 값싸게 복합재료를 제조할 수 있는 제조공정기술의 개발이 무엇 보다도 중요하다. 장섬유 강화 금속기지 복합재료의 파괴인성은 기지금속에 비하여 상당히 낮으며, 기지금속 특성 및 기지/강화재 계면 특성과 밀접한 관련이 있다. 장섬유 강화 금속기지 복합재료가 파괴인성을 유지하기 위해서는 파괴의 진행과정에서 기지/강화재 계면을 통하여 충분한 하중전달이 일어날 수 있는 높은 계면강도가 요구된다. 미세조직적으로는 작은 지름의 장섬유가 하중전달효과를 높일 수 있고 미세한 grain의 기지조직이 microcrack branching을 유도하여 파괴인성을 향상시킬 수 있다. 한편 장섬유 강화 금속기지 복합재료의 기계적 특성은 제조공정에 따라서도 상당한 차이를 나타낼 수 있다.

### 3. 불연속 강화재(단섬유, 휘스커, 입자) 금속기지 복합재료

최근 10여년간 금속기지 복합재료에 대한 연구의 추세는 상업화의 가능성이 높은 불연속 강화재 금속기지 복합재료의 개발에 집중되고 있다[2, 8]. 불연속 강화재(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 SiC 단섬유, 휘스커, 입자, TiC 및 TB<sub>2</sub> 입자)는 장섬유에 비하여 가격이 저렴하여 분말야금법이나 기존의 주조법을 이용하여 경제적으로 경량 금속기지(Al, Mg, Ti)에 복합화 할 수 있기 때문이다. 특히 휘스커의 경우 아직까지는 가격이 다소 비싸기는 하나 1979년 Exxon사에서 쌀겨(rice hull)로 제조한 SiC 휘스커를 대량생산함에 따라 휘스커 강화 금속기지 복합재료의 상품화 가능성을 맞는 계기가 되었다. 불연속 강화재 금속기지 복합재료는 합금설계, 기계적특성, 제조공정에 대한 지난 수년간 연구

결과의 축적으로 높은 비강도, 비강성, 내마모성, 낮은 열팽창 계수의 복합재료를 제조할 수 있는 가능성을 보이고 있어 자동차, 항공기, 철도차량, 선박에 이르는 수송기기를 비롯하여 기계부품,

전자제품, 레저상품에 광범위한 적용이 기대되고 있다[8-13]. 그림 4는 불연속 강화재 금속기지 복합재료로 제조된 우주항공용 부품의 예이다. 표 2에는 불연속 강화재 금속기지 복합재료를 적용

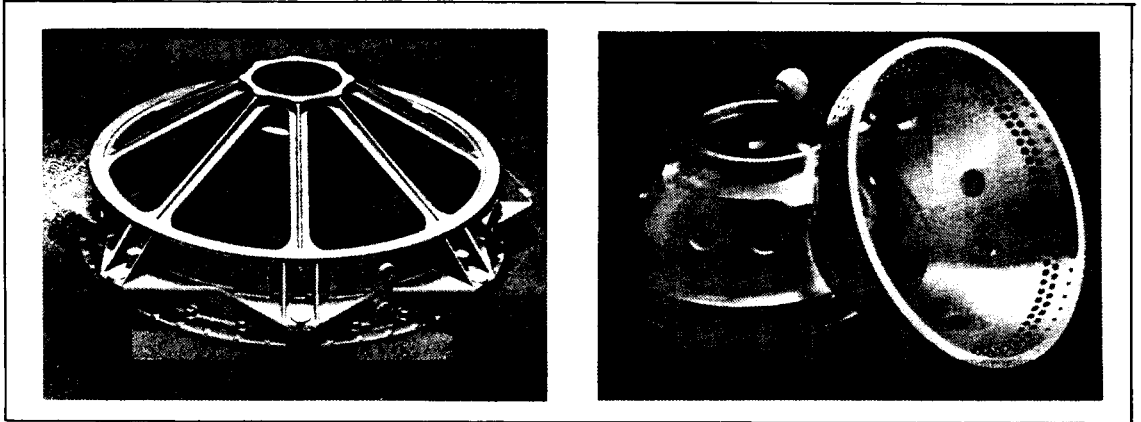


그림 4. (a) 정밀주조법으로 제조된 A356 Al/SiC 복합재료 aircraft-camera gimbal  
 (b) 분말야금법으로 제조후 단조와 기계가공을 거친 2009 Al/SiCp 복합재료 rocket motor 부품

표 2. 불연속 강화재 금속기지 복합재료의 적용예와 제조법 및 특성

Product	MMC system	Method of manufacture	Characteristics of applied MMC	Year (maker)
Vane, pressure side Plate of oil pressure vane pump	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · SiO <sub>2</sub> / SC4C	Squeeze casting(S.C.)	Wear resistance, noise damping	1987 (Hiroshima Aluminum)
Ring groove reinforced piston	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Al-alloy	"	Light weight, wear resistance at high temperature	1983 (Toyota)
Golf goods Face of screwdriver	SiCpcs/ Al-alloy	"	Light weight, abrasion resistance	1984 (Nippon Carbon)
Connecting rod of gasoline engine	SUS fiber/ Al-alloy	"	Specific strength	1985 (Honda)
M6~8 bolt	SiCw/6061	S.C. Extrusion Tread rolling	Neutron absorption High temperature strength, little degasing	1986 (Toshiba)
Joint of aerospace structure	SiCw/7075	S.C. Rolling	Specific strength, low thermal expansion	1988 (Mitubishi)
Rotary compressor vane	SiCw/Al-17% Si -4% Cu alloy	S.C.	Specific strength, wear resistance, low thermal expansion	1989 (Sanyo)
Shock absorber cylinder	SiCp/ Al-alloy	Compo-casting S.C. Extrusion	Light weight, wear resistance, thermal diffusivity	1989 (Mitubishi Aluminum)
Bicycle frame	SiCw/6061	Powder metallurgy HIP, Extrusion	Light weight, high specific rigidity	1989 (Kobe steel)
Diesel engine Piston	SiCw/ Al-alloy	S.C.	Light weight, wear resistance	1989 (Niigata)
Cylinder liner	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CF/ Al-alloy	Low pressure S.C.	Wear resistance, light weight	1991 (Honda)

예와 제조법 및 특성을 나타내었다[17].

불연속 강화재 금속기지 복합재료의 제조방법도 장섬유 강화 금속기지 복합재료와 마찬가지로 액상공정법과 고상공정법으로 대별되고 있다. 개발 초기단계에서 불연속 강화재 금속기지 복합재료는 주로 분말야금법으로 제조되었다. 이는 금속용탕과 세라믹 강화재의 젖음성(wettability)이 양호하지 못하고 비중차이에 의하여 강화재가 편석이 일어나 주조법 등 액상공정법의 사용이 용이하지 못하였기 때문이었다. 그러나 현재는 불연속 강화재 금속기지 복합재료를 경제적으로 제조할 수 있는 다양한 액상공정법이 개발되어 있다[2, 19].

분말야금법으로 제조되는 불연속 강화재 금속기지 복합재료에서는 Al, Mg 및 Ti 합금 등 금속기지는 분무법(atomization)으로 합금화한 20-40 $\mu$ m 분말입자나, 급냉용고법으로 제조된 과포화 준안정 합금 리본 혹은 flake 형상이 사용된다. 강화재는 주로 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 입자, 휘스커 및 단섬유 형태로 사용되고 있다. 입자강화재의 크기는 1 $\mu$ m 이하에서 부터 50 $\mu$ m 까지이며, SiC 휘스커는 직경 0.1-0.5 $\mu$ m 지름 5-200 $\mu$ m로 상당히 미세하다. 분말야금법의 첫공정인 혼합공정은 균일한 복합재료 제조를 위하여 매우 중요하다. 혼합이 완료되면 cold isostatic pressing (CIP)으로 성형한 후 탈가스(degassing)하고 hot pressing하여 약 95% 밀도의 소결체가 제조된다[8]. 소결공정에서는 고상소결을 행하여야만 계면반응을 방지하고, 특히 급냉용고 합금의 경우 기지금속 분말에 과포화된 합금원소의 미세조직적 잇점을 살릴 수 있다[20]. 최종 공정인 압출은 압출비가 20:1 이상으로 행하여 금속기지 분말입자의 표면 산화물을 분쇄시켜 금속분말 입자간의 접촉을 강화시키고, 금속기지와 강화재 계면결합력을 증대시킬 수 있다. 아울러 압출은 금속기지를 소성변형 시킴으로서 강화재를 더욱 균일하게 분산시킬 수 있는 잇점이 있다. 그러나 압출비와 압출온도는 강화재가 균열이 생기지 않도록 그리고 급냉용고 합금은 금속기지의 미세조직을 해치지 않는 범위에서 신중히 제어되어야 한다. 분말야금법은 주조법 등 액상공정법에 비하여 제조공정이 복잡하여 비싸기는 하나 계면반응이 최소화되어

기지금속과 강화재의 선택폭이 넓고, 강화재를 비교적 균일분산시킬 수 있으며 강화재의 부피분율을 높일 수 있어 고강도, 고강성, 저열팽창계수의 기계적 특성이 우수한 복합재료를 제조할 수 있다. 그림 5는 분말야금법으로 제조된 Al/SiCw (휘스커)와 Al/SiCp(입자) 복합재료 부품의 예이다.

액상공정법에 의한 금속기지 복합재료의 제조법은 Stir casting, Squeeze casting, Lanxide Process, XD™ Process, Spray Codeposition을 들 수 있다.[2, 19] 액상공정법에 의한 불연속 강화재 금속기지 복합재료의 제조는 강화재와 금속기지 사이의

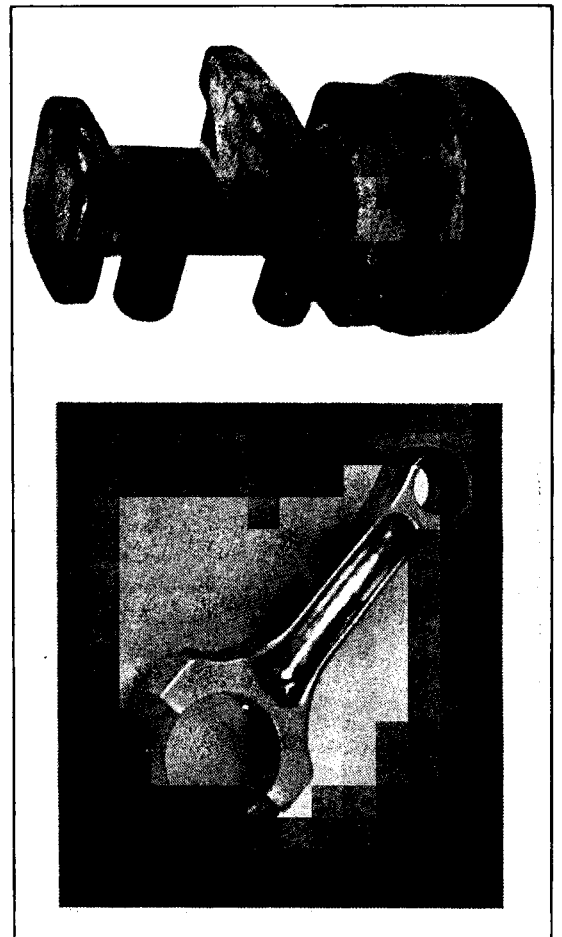


그림 5. (a) 분말야금법으로 제조후 단조한 2009 Al/SiCw hydraulic manifold  
(b) 분말야금법으로 제조후 단조한 2080 Al/SiCp connecting rod

젖음성이 낮고, 비중 차이에 의한 강화재의 편석이 심하며, 높은 금속용탕 온도에 의한 계면반응성 때문에 금속기지 복합재료 개발의 초기에는 제약이 있었다. 그러나 최근에 Duralcan 사에서 이러한 문제점을 어느정도 해결하고 휘스커 혹은 입자를 금속용탕이나 반응용상태의 금속에 첨가하여 교반하면서 그 slurry를 주형에 주입하여 주조하는 stir casting 법으로 저가의 SiC 강화 Al 복합재료를 대량생산하여 불연속 강화재 금속기지 복합재료의 상업화에 새로운 지평을 열었다. 한편 Hydro Aluminum AS, Comalco 사에서도 주조공정을 이용하여 적게는 10 $\mu$ m 크기까지의 입자 강화 금속기지 복합재료의 제조가 가능한 것으로 보고하고 있다[2]. Stir casting법은 기지/강화재 젖음성이 낮고 계면반응의 문제점이 있으며, 강화재의 편석이 발생하며, 공공등 주조결함에 의하여 기계적 특성이 양호하지 못한 단점이 있어 기계적 특성을 향상시키기 위하여 압출, 재주조 등의 2차공정을 거치기도 한다. Dural 사의 stir cast Al-SiCp는 강도와 내마모성이 우수하여 자동차의 브레이크 부품과 피스톤, 실린더, drive shaft 등에의 적용이 시도되고 있다.(그림 6)

Squeeze casting 법은 near-net-shape의 복합재료 부품을 대량생산할 수 있는 가능성이 가장 높아 액상공정법 중에서도 관심이 집중되는 금속기지 복합재료의 제조법이다. 특히 일본에서는 주로 자동차 부품을 중심으로 우주항공용 구조재, 레저용품 등에 적용하기 위한 연구가 활발하다(표 2 참조) [6, 18]. Squeeze casting법은 휘스커 및 단섬유 등의 강화재 예비성형체에 금속용탕을 가압침투시켜 복합재료를 제조하는 방법이다. 가압에 의하여 기지/강화재 계면 젖음성을 향상시키고 기지조직을 미세화 시키며 주조결함을 제거하여 복합재료의 양호한 기계적 특성을 획득할 수 있는 장점이 있다. 그림 7은 Al-SiC 복합재료를 디젤엔진 피스톤의 일부에 squeeze casting 법으로 강화한 예이다.

Lanxide Process는 Lanxide Corp. Primex 사에서 개발한 복합재료 제조법으로 N<sub>2</sub> 분위기에서 SiC 혹은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 강화재에 Al-Mg 합금 용탕을 자발적으로 침투하게 하는 방법이다. 이 방법은

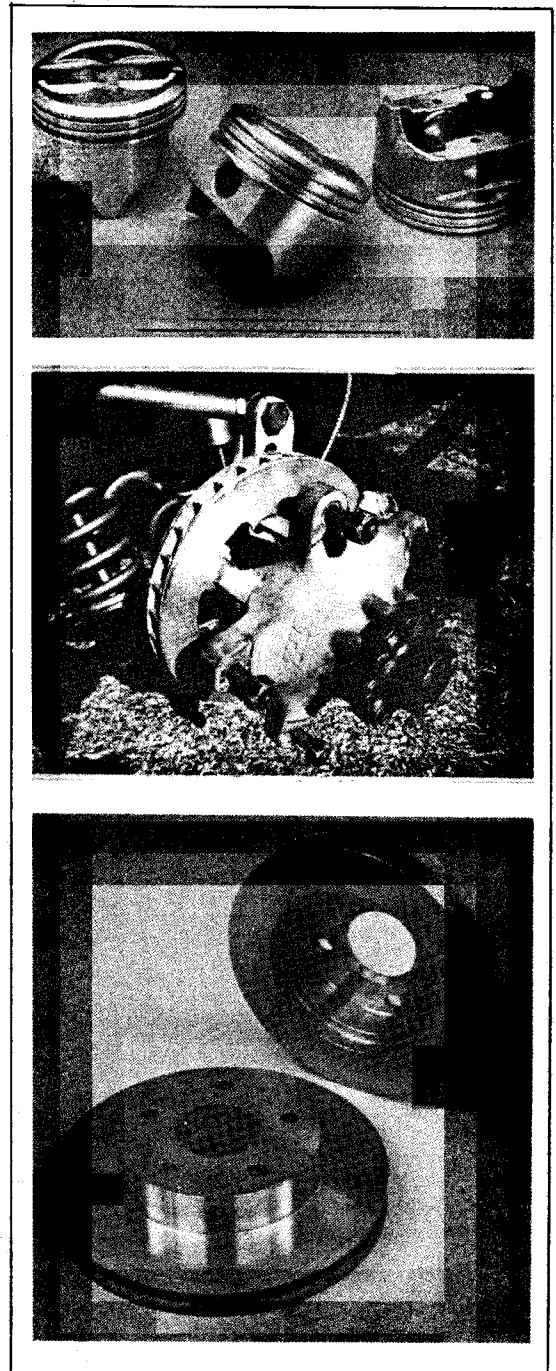


그림 6 (a) Permanent mold cast Al-Si/SiCp piston  
(b) Sand cast A356 Al/SiCp disk break rotor  
(c) A359 Al/SiCp break rotor

강화재 부피분율을 70%까지 높일 수 있어 낮은 열팽창 계수와 양호한 열전도도의 복합재료를 제조할 수 있어 electronic packaging 및 supporting용 재료 (그림 8)에의 적용을 위한 연구가 이루어지고 있다[21].

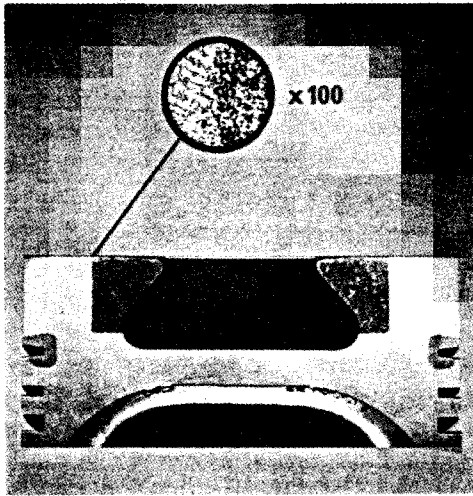


그림 7. Squeeze cast 법으로 부분적으로 Al-SiCw로 강화된 piston

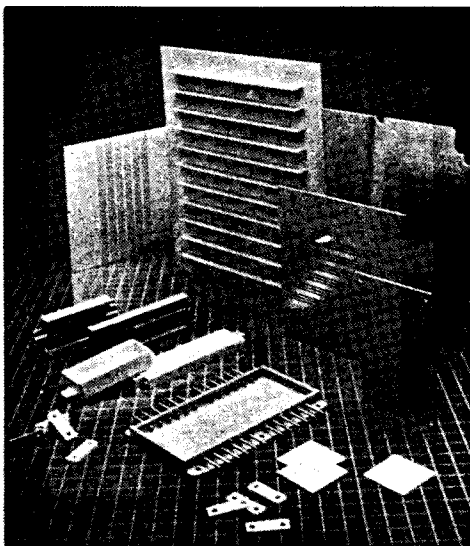


그림 8. Lanxide process로 제조된 electronic packaging 및 supporting용 Al-SiCp 복합재료

XD™ Process는 Martin Marietta Corp. 사가 개발한 복합재료 제조법으로 금속용탕내에 화합물을 첨가하여 in-situ 발열반응에 의하여 강화재를 생성시키는 방법이다. 가장 관심의 대상이 되고 있는 복합재료계는 Al-Ti 및 Ti 합금 용탕에 B 혹은 C을 투입하여 TiC 혹은 TiB<sub>2</sub> 강화입자를 생성시키는 방법이다. 이 방법으로는 1 $\mu$ m 정도의 단결정 강화재를 포함하는 복합재료를 제조할 수 있고, 기지/강화재 계면이 청결하여 계면강도가 높아서 기계적 특성이 우수한 복합재료를 제조할 수 있다.

Spray Codeposition 법은 금속용탕을 분사시키면서 강화재를 동시에 공급하여 substrate에 deposition시켜 복합재료를 제조하는 방법이다. Spray deposition법은 기지금속의 급냉응고에 의하여 기지/강화재 접촉시간이 짧아 기지와 강화재의 선택 폭이 넓고, 계면반응을 최소화시키므로 계면특성이 양호한 복합재료를 제조할 수 있다. 그림 9는 spray casting하여 제조한 Al-SiCp 복합재료 부품들이다. 현재 금속기지 복합재료 제조용 spray forming 장치는 Osprey Metals 및 Alcan사에서 상업화를 위한 개발연구가 진행 중으로 알려져 있다.

불연속 강화재 금속기지 복합재료에서 복합화에 동반되는 복잡한 미세조직의 변화는 복합재료의 물성에 상당한 영향을 미친다[2, 8]. 불연속 강화재 금속기지 복합재료의 기계적 특성에 미치는 주요한 미세조직 인자로서는 기지/강화재 계면특성과 더불어 강화재의 분포, 기지의 grain size, 기지조직의 시효열처리 효과 등이 있다. 금속기지 복합재료의 기지금속과 강화재 및 제조공정의

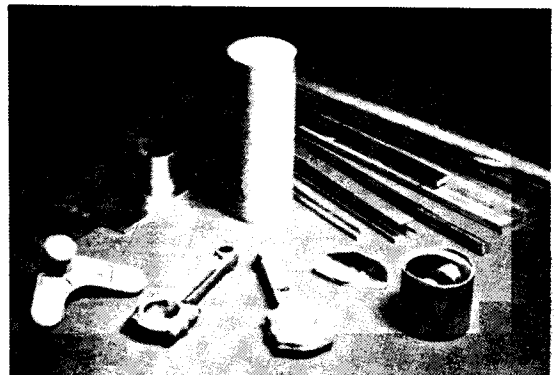


그림 9. Spray deposition 법으로 제조된 Al-SiC 복합재료 부품



선택시 기지/강화재 계면반응성은 매우 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 금속기지 복합재료의 제조시 기지/강화재 반응층의 생성은 계면강도에 심대한 영향을 미치게 되고 복합재료의 변형 및 파괴등 기계적 특성을 결정할 뿐만 아니라 기지 조성의 변화를 유발시켜 기지금속의 용융온도와 물성의 변화 등을 일으킨다. 따라서 복합재료의 개발을 위한 기지금속과 강화재의 조합을 선택할 때 이들의 반응관계를 면밀히 검토하여야 한다. 일반적으로 SiC 강화재는 Si가 합금화되지 않은 Al 용탕에서는 불안정하여  $Al_4C_3$ 를 생성시켜 기지내 Si 함량이 증가하고 기지금속의 용점을 저하시킨다. 따라서 액상공정법으로 제조되는 Al 합금기지 복합재료에서는 Si함량이 높은 Al 합금을 기지금속으로 사용하고 있다. 그러나 SiC는 Al 합금의 용점이하에서는 안정하여 분말야금법과 spray deposition 법에서는 Al 합금기지의 선택이 용이하다.  $Al_2O_3$  강화재는 Al-Mg 합금에서는  $MgAl_2O_4$  spinel을 생성시켜 불안정하나 그외 Al 합금에서는 안정하다. 한편 Mg carbide는 안정상이 없어 순수 Mg에서는 대부분의 ceramic carbide가 안정하나  $Al_2O_3$ 의 경우는 Mg과 반응하여  $MgO$ 가 생성된다. 또한 대부분의 Mg 합금은 Al을 포함하고 있어 고상 및 액상반응에서 공히  $MgAl_2O_4$ 을 생성시킨다.

강화재의 분포는 복합재료의 제조법과 상당한 연관성이 있다. 분말야금법으로 제조된 복합재료는 혼합법, 성형법, 기지 및 강화재의 입도비와 압출 등의 후속공정이 강화재의 분포를 결정짓는 요인들이다. 한편 주조법으로 제조된 복합재료에서는 강화재 혼합법, 응고과정에서 응고속도, 수지상간 (interdendritic region)으로 particle pushing에 의한 강화재의 재분포 및 편석 그리고 압출 및 압연 등의 후속공정이 강화재 분포에 영향을 미쳐서 더욱 복잡한 양상을 나타낸다. 복합재료에서는 강화재가 핵생성 장소를 제공함에 따라 grain의 미세화에 기여하게 되고, 응고속도의 증가와 squeeze casting의 경우 가압력이 기지의 grain 미세화에 효과적인 영향을 미치게 된다. 시효열처리에 의한 복합재료의 미세조직변화는 강화재에 의한 기지의 재결정 핵생성량을 증가시키고, 용

체화처리후 quenching시 열팽창 계수의 차이로 인한 기지/강화재 계면의 높은 전위밀도는 시효 석출을 촉진시켜 가속시효 효과를 유발시킨다. 또한 기지/강화재 계면으로의 활성금속의 편석과 계면반응은 기지금속의 조성을 변화시켜 충분한 시효강화를 저해하는 원인이 되기도 하여 복합화 이전에 기지금속의 합금원소를 조절해야 할 필요가 있는 경우도 있다[8]. 복합재료의 시효열처리에 대한 kinetics는 아직 정보가 많지 않으나 Al 및 Mg 기지 복합재료의 경우 대체로 비복합화 합금에 준하는 시효열처리를 행할 수 있는 것으로 알려져 있다.

불연속 강화재 금속기지 복합재료는 장섬유 강화 금속기지 복합재료에 비하여 기계적 특성은 떨어지나 조직 및 물성의 방향성이 없고 기지금속에 비해서는 상온 및 고온에서 비강성과 비강도가 크게 증가된다. 그러나 휘스커 강화 금속기지 복합재료의 경우는 압출 등의 후속공정에 의하여 다소의 방향성이 나타나기도 한다. 불연속 강화재 금속기지 복합재료는 탄성계수와 강도의 증가는 부피분율에 가장 크게 의존한다. 그러나 열잔류 응력 및 강화재의 불균일분포는 복합재료의 탄성계수를 이론치에 크게 못미치는 원인이 되고 있다. 불연속 강화재 금속기지 복합재료의 강도는 부피분율 이외에도 강화재의 형상, 기지/계면특성 및 기지의 미세조직에 영향을 받는다. 불연속 강화재 금속기지 복합재료의 강화기구에는 매우 복잡하다. 금속기지의 grain과 substructure에 의한 강화, 기지/강화재 열팽창계수에 의한 금속기지내 전위밀도 증가에 의한 강화, 탄성변형 강화재와 소성변형 기지 사이의 strain misfit에 의한 back stress 강화 등이 주요 강화기구로 보고되고 있다[2, 8]. 이와같은 강화기구에 근거한 복합재료는 초기변형에서 가공경화가 매우 높은 것이 특징이어서 일반적으로 0.2% offset 항복강도가 비복합화 기지합금에 비하여 상당히 높은 반면 인장강도 (복합재료의 경우 대부분 파괴강도)가 항복강도에 비하여 증가량이 높지 못하다. 기지/강화재 계면에 생성된 전위는 금속기지에 압축응력을 유발시켜 복합재료의 항복강도를 높이거나 강화재의 불균일 분포는 강화재 간의 거리가 넓은 영역에서 전위

밀도가 낮아서 이 영역에서의 먼저 항복이 일어나 복합재료의 강도를 감소시키는 원인이 된다. Back stress에 의한 복합재료의 강화효과를 극대화하기 위해서는 높은 계면강도가 필요하다. 한편 고온에서 복합재료는 강화재의 복합화에 의하여 높은 탄성계수를 유지하나, 위에서 언급한 강화기구가 완화되면서 강화효과가 낮아진다. 그의 복합재료의 기계적 특성으로 복합재료는 비복합화 기지합금에 비하여 내마멸성은 상당히 우수하고 피로특성은 피로한계와 threshold가 다소 높아서 피로 특성도 대체로 우수하며 creep 저항성도 증가하는 것으로 보고되고 있다[2].

불연속 강화재 금속기지 복합재료가 연신율과 파괴인성이 매우 열악한 단점은 복합재료의 실용화에 가장 중대한 걸림돌이 되고 있다. 복합재료에서 연신율과 파괴특성을 저하시키는 요인은 조대한 강화재의 균열, 강화재 불균일 분포와 cluster에 의한 국부응력집중, 기지와 강화재의 열팽창계수의 차이에 의한 잔류응력, 기지/강화재 계면의 불량성 등을 들 수 있다. 따라서 연신율과 파괴인성의 개선을 위하여 미세하고 균일한 크기의 강화재 보강 및 강화재 shape의 제어, 강화재의 균일분산, 계면강도의 향상, 연성이 좋은 기지금속 선택이 필요하다. 불연속 강화재 금속기지 복합재료의 제조공정 인자와 기계적 특성에 관하여 보고되고 있는 정보는 대체로 실험실적 규모의 연구결과가 대부분이다. 그러나 선진국에서 확보하고 있는 대규모 생산공정에서의 제조공정-미세조직-기계적 특성에 관한 정보는 기밀에 해당하는 사안으로 노출이 되지않고 있으나 상당한 기술축적이 되어 있는 것으로 알려져 있다[8].

#### 4. 기타 금속기지 복합재료

최근에는 장섬유 강화재 및 불연속 강화재를 보강한 기존의 금속기지 복합재료 외에도 매우 다양한 금속기지 복합재료가 연구되고 있어 이들 모두를 열거하기는 어려우나 몇가지 예를 살펴보기로 한다. 하이브리드 복합재료는 두 종류 이상의 강화재를 동시에 첨가하여 물성을 향상시킨 것으로 관심의 대상이 되고 있다. 하이브리드 복

합재료는 장섬유와 입자 혹은 휘스커를 동시에 금속기지에 보강시킨 복합재료로서 장섬유 접촉을 방지하거나 강화재 균일분산을 노려 기계적 특성을 향상시킨 경우이다. 하이브리드 복합재료는 장섬유 혹은 단섬유와 입자 강화재를 혼합한 예비성형체를 제조한 후 액상침투법으로 제조하는 경우와 휘스커, 단섬유 등의 강화재 예비성형체에 액상을 침투시키면서 in-situ 방식에 의하여 금속간화합물 입자를 생성시키는 방법(그림 10)등이 시도되고 있다[17]. 한편 강화재와 기지금속의 열팽창계수 차이에서 생기는 문제점을 개선하기 위하여 강화재의 첨가량을 부위에 따라 점차적으로 변화시키는 경사기능 복합재료는 열차폐재료, 내마멸재료, 전자재료에의 응용을 위하여 개발이 시도되고 있으며, 제조방법은 분말야금법, plasma spray법, PVD 법을 비롯하여 다양한 방법이 고려되고 있다[20]. 그림 11과 같은 조직을 갖는 microinfiltrated macrolaminated composite(MIMLC)(W-Ni-Fe/Ni, W-Co/Co, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ni<sub>3</sub>Al-B, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ni 등)는 내마멸성과 파괴인성을 동시에 개선할 수 있고

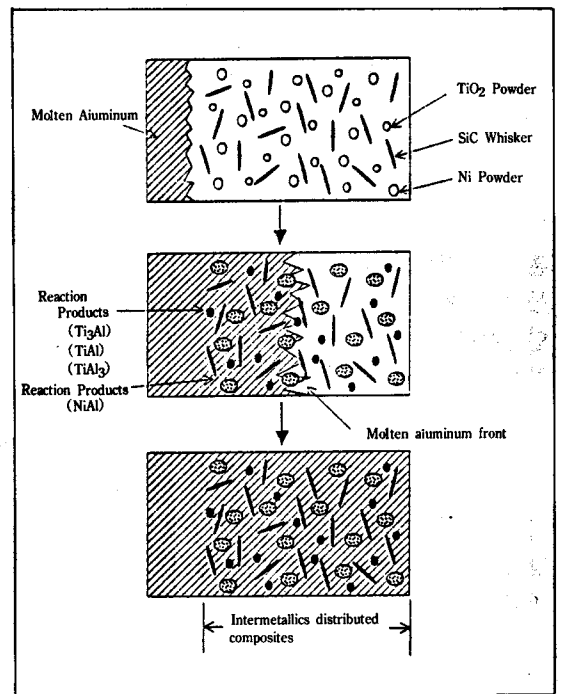


그림 10. Squeeze casting에 의한 하이브리드 복합재료의 제조법

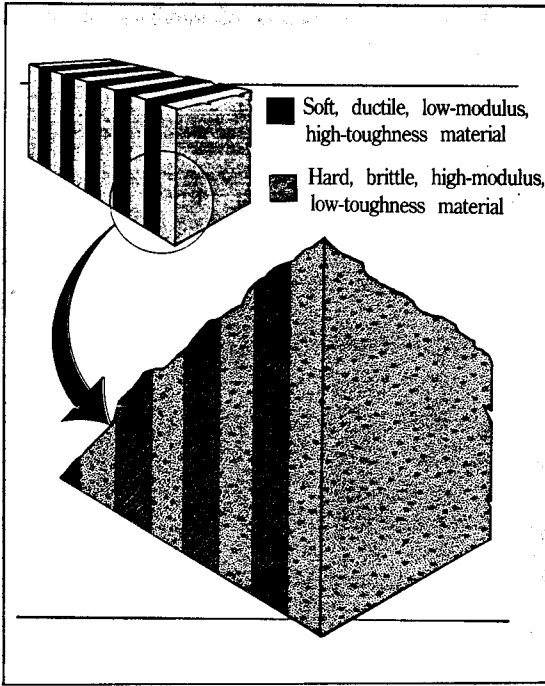


그림 11. MIMLC 복합재료의 대표적인 조직

내열·내산화성 재료로서 무기, 절삭공구, 항공우주소재로의 적용을 위하여 연구되고 있다[21]. 금속기지 복합재료가 구조재로서 대부분 개발이 되고 있으나 일부 기능성 금속기 복합재료도 연구가 되고 있다. 예를들면 shape memory, piezoelectric, fiber optic 재료와 금속기지를 복합화하는 intelligent (or smart) material은 외부의 자극에 의하여 자발적으로 반응하는 기능성 재료이다[24].

### 참 고 문 헌

1. Patridge, P.G. and Ward-Close, C.M., "Processing of advanced continuous fiber composites: Current practice and potential developments", Int. Mat. Rev. 38(1) 1, 1993.
2. Lloyd, D.J., Particle reinforced Al and Mg matrix composites", Int. Mat. Rev. 39(1) 1, 1994.
3. Composite Materials Handbook 2nd ed., ed. by M.M. Schwartz, McGraw-Hill, 1992.
4. Clyne, T.W. and Withers, P.J., An introduction to metal matrix composites, Cambridge Univ.

- Press, 1993.
5. Mortensen, A. and Koczak, M.J., "The status of metal matrix composite research and development in Japan", JOM, 45(3) 10, 1993.
6. Froes, F.H., "Space-age metals technology", JOM, 40(11) 12, 1988.
7. Feest, E.A., "The exploitation of metal matrix composites in manufacturing industries, 한영 심포지움 : 경량합금, KIST, 1992.
8. Geiger, A.L. and Walker, J.A., "The processing and properties of discontinuously reinforced Al composites", JOM 43(8) 8, 1991.
9. Allison, J.E. and Cole, G.S., "Metal matrix composites in the automotive industries: Opportunities and challenges", JOM 45(1) 19, 1993.
10. Rohatgi, P., "Cast Al matrix composites for automotive applications", JOM 43(4) 10, 1991.
11. Kennedy, D.O., "SiC particulates beef up investment cast Al", Adv. Mat. Proc. 139(6), 42, 1991.
12. Lampman S.R., "Tuning up the metals in auto engines", Adv. Mat. Proc. 139(5), 17, 1991.
13. Rohatgi, P., "Advances in cast MMCs", Adv. Mat. Proc. 137(2), 39, 1991.
14. Bowman, R. and Noebe R., "Up-and-coming IMCs", Adv. Mat. Proc. 136(2), 35, 1989.
15. 조경목, 박익민, "항공기용 재료의 개발동향", 구조, 11(1) 15, 1991.
16. 이성학, "금속복합재료의 개발", 수송기계 경량화 workshop, CAAM, 1991.
17. 김진, 이상관, 전의진, "금속복합재료", 대한금속학회회보, 3(2) 130, 1990.
18. Fukunaga, H., "Exploration of new application of MMCs manufactured by squeeze casting process", Proc. of ICCM/9, 1, 355, 1993.
19. 조경목, 박익민, "자동차용 금속복합재료의 주조기술", 제1회 자동차 경량화 심포지움, 포항, p.239, 1992.
20. 김낙준, 이두영, 이성학, 안상호, "신분말야금 기술과 우주항공재료 개발", 대한금속학회회보, 3(1) 35, 1990.
21. Urquhart, A.W., "Molten metals sire MMCs,

- CMCs" Adv. Mat. Proc. 140(1), 25, 1991.
22. 이용태, 이수영, "경사기능재료" 기계와 재료, 4(2) 78, 1992.
23. Bose, A. and Lankford J., "MIMLCs: New composite architecture", Adv. Mat. Proc. 140(1), 18, 1991.
24. Takagi, T., "A concept of intelligent materials and the current activities of intelligent materials in Japan", Proc. of the 1st European Conf. on smart structures and materials, Glasgow, 13, 1992.

환경보전 캠페인

환경마크 상품을 사시다!



한 국 기 계 연 구 원