

## 자동차용 금속복합재료의 개발동향

### Developments in Metal Matrix Composites for Automotive Parts

박 익 민, 김 낙 준  
I. M. Park, N. J. Kim



박 익 민  
• 1954년 6월생  
• 금속재료/주조  
부산대학교 금속공학과



김 낙 준  
• 1953년 5월생  
• 금속재료/강도  
포항공대 재료금속공학과

#### 1. 서 론

최근의 자동차산업의 과제로는 연비향상, 배기가스정화, 리사이클링등이 지적되고 있다. 이들 과제와 재료기술은 밀접한 관계를 가지고 있어, 이 과제들을 해결하기 위해서는, 재료의 개발이 필수적이라 하겠다. 자동차에 사용되는 재료로는 철강, 알루미늄, 플라스틱 등이 있지만, 경량화 및 부품기능의 향상등을 위해서는 금속기복합재료의 개발적용이 절실히 요구되고 있다.<sup>1-3)</sup>

금속기복합재료는 금속과 세라믹 강화재를 복합화하여 비강도, 비강성, 감쇠특성, 내마멸성, 내열성등을 향상시키려는 Tailored Materials로, 세라믹 강화재에는 연속섬유, Whisker 혹은 입

자의 불연속섬유를 들 수 있다.<sup>4)</sup> 금속기복합재료에 관한 연구개발은 1960년대의 우주항공용 재료개발에서 시작되어 고가격의 연속섬유강화재와 값비싼 공정의 분말야금방법 혹은 확산접합 방법등의 제조방법이 적용되어 왔다. 1980년대 이후부터는 저가격의 단섬유강화재의 개발과 Near-Net-Shape로 대량생산에 용할 수 있는 값싼 주조제조방법의 개발에 중점이 두어지게 되었고, 또한 보다 가격경쟁력이 있는 입자분산강화 주조금속복합재료의 개발에 박차를 가하게 되었다. Fig.1에는 각종 복합재료의 재료특성과 생산가격과의 관련을 나타낸다. 이러한 동향에 따라 금속기복합재료는 우주항공용재료에 국한되지 않는 자동차부품용등에 대량생산의 공업재료로서 개발이 진행되고 있다.<sup>5-10)</sup> 본 자료에서는 자동차용 금속기복합재료의 특성, 제조기술 및 개발 현황등을 소개한다.

#### 2. 금속복합재료의 강화재료

자동차의 경량화를 위해서는 저밀도의 Al합금의 적용이 바람직하나, 비강성, 내마멸성면에서 비복합화 Al합금으로는 설계부품특성을 충족시켜주지 못하는 경우가 많다. 그래서 강화재로 복합화하는데, 세라믹강화재 첨가에 따른 비중 변화는 거의 없다. 금속복합재료의 강화재로는

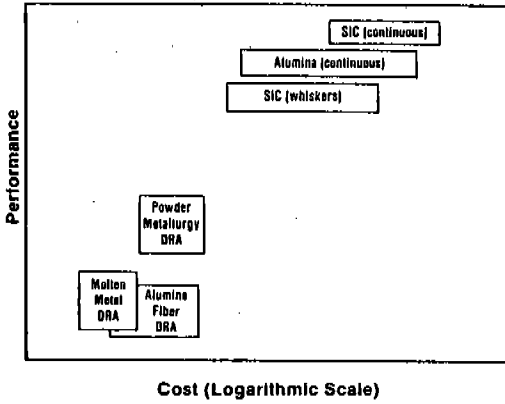


Fig.1 The material cost vs. performance of various composites.

연속섬유, Whisker, 입자등이 있으나, 자동차용으로는 저가격의 입자강화재 혹은 단섬유가 주요 적용대상이 된다.

강화재의 선택기준은 그 강화재의 적용시의 비강도, 비강성의 향상이 우선 고려되고 있다. 단섬유로는 고가의 SiC Whisker 보다는 가격이 저렴하고 계면반응성이 적은  $Al_2O_3$  혹은  $Al_2O_3-SiO_2$  단섬유가 채용되고 있고, 최근에는 가격이 1/10 수준으로 현저하게 저렴하면서 특성이 우수한 티탄산카리( $K_2O \cdot TiO_2$ ), 알루미늄보레이트( $9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$ ) Whisker 등이 적극적으로 개발, 채택되고 있다.<sup>19)</sup> 입자의 경우 Mica, 알루미늄, SiC, Clay, Zircon, Graphite 등이 검토되었으나, 자동차용으로는 가격이나 특성면에서 SiC Grinding Media인 SiC 입자와, Bauxite 정제과정의 부산물인 알루미늄 입자로 압축되고 있다. 입자의 경우 그 형상이 Angular의 경우 응력집중현상등으로 연성이 저하되는 경향이 있어, 구형입자를 개발, 채택하는 사례도 보고되고 있다. 이외에도 강화입자 선택시 강도에도 영향을 주는 열팽창계수가 고려되어야 하고, 열전도도도 적용부품에 따라 고려되고 있다. 복합재료의 특성향상예를 Table 1에 나타낸다.

강화재료의 선택시 제조방법이 고려되어야 한다. 복합재료의 제조공정에는 여러가지 방법이 있으나, 전세계적으로 주조기술에 의한 입자강화 복합재료의 개발에 주력하고 있다. 주조제조공

Table 1 Specific Properties of Selected Materials

Material	Specific Modulus ( $10^7/mm$ )	Specific Fatigue Strength ( $10^6/mm$ )
2080Al/SiC/15p	3.5	7.6
6061Al/ $Al_2O_3$ /20p	3.5	3.8
6061Al	2.6	4.0
1040 Steel	2.6	3.0
Ti-6Al-4V	2.5	7.0
Ductile Cast Iron	2.2	3.0

정의 경우 우선 강화재와 기지용탕과의 계면반응성여부가 고려되어야 한다. SiC는 Al과 반응하여  $Al_4C_3$ 를, 알루미늄은 Mg을 함유하는 Al용탕과 반응하여  $Al_2MgO$ 의 반응층을 형성하고 과도한 반응층 형성은 기계적 성질을 저하시킨다.<sup>13-14)</sup> 또한 입자의 크기도 중요하여 일반적으로 조대한 것이 주조제조에 유리하지만, 조대입자는 용탕처리중 침강하기 쉽고, 너무 미세하면 용탕의 점성이 증가되어 제조가 어려워지므로 통상 10~20 $\mu m$ 의 범위가 이용된다. 분말야금제조공정의 경우, 혼합공정에 따라 적절한 입자의 크기 비율이 요구된다. 예로 SiC/Al 복합재의 경우 입자의 크기비율이 0.7 : 1인 경우가 0.3 : 1인 경우보다 균일분포되는 결과를 나타낸다. 또한 입자의 Aspect Ratio에 따라 입자 파괴의 가능성이 있으므로 유의해야하고, 전형적인 분말 Al입자는 20~40 $\mu m$ , 강화입자는 Aspect Ratio가 5 이하인 3~20 $\mu m$ 이다.<sup>5)</sup>

### 3. 금속복합재료의 제조기술

#### 3.1 분말야금방법

분말야금제조방법은 기본적으로 <분말혼합>-<냉간압축성형>-<탈가스>-<열간프레스>-<압출>의 공정으로 이루어지는데, 사용되는 분말입자의 크기는 통상 20~40 $\mu m$ 이고, 급속응고하여 고온성질이 우수한 분말, 리본 등도 사용된다.<sup>15)</sup> 제조공정에서 입자에 부착된 수산화물은 탈가

스작업으로 제거되고, 열간프레스후에는 이론 밀도의 95%의 밀도를 갖게 되지만, 통상 20:1 이상의 높은 압출비의 추가공이 요구된다. 급속 용고분말의 경우 고온액상소결이 일어나면 강화 입자와 기지와의 반응으로 급속간화합물을 형성 하던지 혹은 급속용고 조직의 열화가 일어나므로 액상소결이 아닌 고상선이하에서의 소결이 요구 된다.

분말야금방법의 잇점으로는, 1) 기지 및 강화 입자의 선택이 폭이 넓은점, 2) 고상상태의 반응으로 입자계면의 반응이 최소화 되는 점, 3) 높은 강화입자의 제척율이 가능한점 4) 급속용 고분말의 사용이 가능한점, 5) 주조법에 비해 성질이 양호한점 등을 들 수 있다. 단점으로는 입자 취급시의 반응, 폭발성, 주조법에 비해 공정이 복잡하고 고가인 점(US \$100/kg)을 들 수 있다. 자동차산업에서 요구되는 저가격, 고생산성의 요인을 고려하면 특수기능부품외에는 고려 대상에서 대부분이 제외되고 있는 실정이다.

### 3.2 주조제조기술

급속기복합재료의 용고제조기술으로는 교반주조방법(Stir-Casting), 가압침투방법(Pressure Infiltration), 무가압침투방법(Pressureless Spontaneous Infiltration), XD Process, 분무적층성형방법(Spray Codeposition), Mixalloy Process 등 여러 가지 방법이 제안개발되고 있으나, 대량생산에 용할 수 있는 Near-Net-Shape의 주조기술으로는 교반주조후 다이캐스팅하는 방법과 세라믹강화재의 Preform상에 급속용탕을 가압침투용고 시키는 용탕단조(Squeeze Casting)방법이 기대되고 있다. 주조방법에 의한 복합재료의 제조시에는 기본적으로 급속용탕과 강화재와의 젖음성(Wettability)부족 및 계면반응에 의한 강화재의 열화, 강화재의 불균일 편석, 주조가스결함존재 등의 어려운 문제가 지적되고 있다.

#### 3.2.1 교반주조방법(Stir-Casting)

Stir-Casting 방법은 강화입자 혹은 담섬유를 급속용탕 혹은 반응용상태의 급속에 첨가하여 교반하고 그 Slurry를 주형에 주입주조하는 방법으로, 사형주조, 금형주조, 원심주조 및 다이

캐스팅등이 가능하다. 대부분의 강화재가 급속 용탕과의 젖음성이 좋지못하기 때문에 기지용탕에의 표면활성원소의 첨가, 강화입자의 표면처리 혹은 외부 가압이 요구된다.

사형주조의 경우 냉각속도가 느리기 때문에 강화입자가 부력에 의해 편석되기 쉽다. 그러나 이를 적극적으로 이용하여 표면에 가벼운 고경도강화입자층등을 형성시켜 내마멸성 혹은 내온활성을 향상시키는 예도 있다. 금형주조의 경우, 빠른 냉각속도로 사형보다는 강화 입자의 균일 분산을 피할 수 있다. 원심주조의 경우는 원심력에 의한 강화입자의 편석현상이 생기기 쉬운데, 예를들어 알루미늄용탕의 경우 가벼운 Graphite 입자는 내측에, SiC 입자와 같이 무거운 경우는 외측에 Particle-Rich 영역을 형성한다.

부력에 의한 입자의 부유침강을 방지하기 위하여 반응용상태의 Slurry 상태에서 강제 교반하여 주는 방법이 Compcasting(Semi-Solid) 방법이다. 이 방법은 반응고상상태에서의 용탕을 강제고속교반함으로써 수지상정조직을 비수지상조직으로 변화시킬 수 있고, 이에 따른 기계적성질의 향상을 피할 수 있는데, Dow-Chemical사에서는 Mg 복합재료의 제조에 적용하고 있다.<sup>17)</sup> 반응용상태에서의 교반후 다이캐스팅을 행하던 Near-Net-Shape로 대량생산을 행할 수 있을 뿐 아니라, Die Filling이 조절가능하여 액상상태의 Turbulent Filling 보다 용탕난류를 줄이고 가스결함을 감소시킬 수 있다.

입자강화복합재료의 Stir-Casting의 경우 상술과 같은 낮은 젖음성, 강화입자의 편석문제외에도 교반시의 가스혼입등에 의한 기공발생, 용해시의 용탕과 강화입자의 반응등과 같은 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고 성공적으로 Al/SiC, 복합재료를 생산하고 있는 Duralcan사의 제조공정을 소개하면 다음과 같다. Al Ingot를 200°C에서 예열하여 수분등의 오염을 제거하고, 과열로 인한 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>의 생성을 방지하면서 적정의 온도에서 용해하고, 교반은 용탕표면이 파괴되어 Dross등이 혼입되지 않고 Turbulence를 최소화하기 위해 천천히 행한다. Rotating Impeller 장치를 이용하여 교반 및 Fluxing, Degassing 작업을

행하는데 이때 Ar과 SF<sub>6</sub> 혼합가스를 이용하고 있다.<sup>15)</sup> 교반주조의 개발초기단계에서, 강화입자의 표면처리, 용탕에의 Mg등의 활성원소 첨가 등으로 젖음성을 향상시킨 경우에는 입자의 크기가 50μm 이상의 초대입자로, 입자체적율이 최대 10% 정도로 제한을 받았지만, 이 Duralcan 제조공정에서는 이를 극복하고, 미표면처리한 10μm 크기의 입자사용과 체적율 25%까지의 복합화가 가능하게 되었다. 현재 6800kg/batch 작업을 행하는 사형 및 금형주조한 A356/SiC 잉곳등을 생산판매하고 있다. 이외에 Comalco사에서는 구형의 알루미늄-실리카입자 강화 6061Al 합금복합재료의 개발적용을 서두르고 있다.<sup>16)</sup> Duralcan사와 Comalco사의 입자강화복합재료의 조직을 Fig.2에 나타낸다.

3.2.2 가압침투방법(Pressure Infiltration)

세라믹강화재의 Preform상에 금속용탕을 가압 침투용고시키는 Squeeze Casting 방법이다. Squeeze Casting시에는 기초현상으로 (1) 단열압축에 의한 용탕온도상승, (2) 용고점온도의 상승, (3) 과냉의 증가 혹은 압력충격에 의한 핵생성의 촉진 현상이 일어나고, (4) 조직미세화로 인한 기계적 성질의 향상, (5) 가스고용량의 증가에 의한 용고중의 가스결함감소, (6) 급속한 열전달로 인한 급냉효과, (7) 가압력으로 인해 수축공, 미세기공의 제거, (8) 섬유와 기지간의 젖음성

향상, (9) 성형성과 표면상태의 향상 등을 이룰 수가 있다.<sup>17)</sup>

사용되는 Preform은 용탕주입시 그 형태가 유지될 수 있도록 충분한 강도를 가져야 하고 보강섬유가 균일분산되어야 한다. Preform의 제조방법은 Press 및 Suction Forming으로 대별되는데, 양호한 Preform을 제조하기 위해서는 제조공정 인자와 바인더, 분산제등의 첨가제에 대한 많은 연구가 필요하다.

가압침투방법에 의해 양질의 금속복합재료를 얻기 위해서는 가압력, 용탕온도와 보강섬유의 예열온도, 함침속도등과 같은 제조공정인자들의 정확한 제어가 필요하다. 가압력은 주조시의 응고수축공을 보충하고 기지재료와 보강섬유의 젖음성을 향상시키는 가장 중요한 인자이다. Squeeze Casting시에 발생하는 가압력 손실은 표면장력으로 인한 압력감소와 금형과의 마찰저항의 합으로 나타낼 수 있다. 표면장력으로 인한 압력감소는 식 (1)과 같이 Kelvin식으로 부터 구할 수 있고 마찰저항은 식 (2)와 같이 Blake-Kozeny 식으로 부터 구할 수 있다.<sup>24)</sup>

$$\Delta P = 2\gamma \sum 1/r_i \tag{1}$$

$\gamma$ : 계면 에너지  $r_i$ : 곡률반경

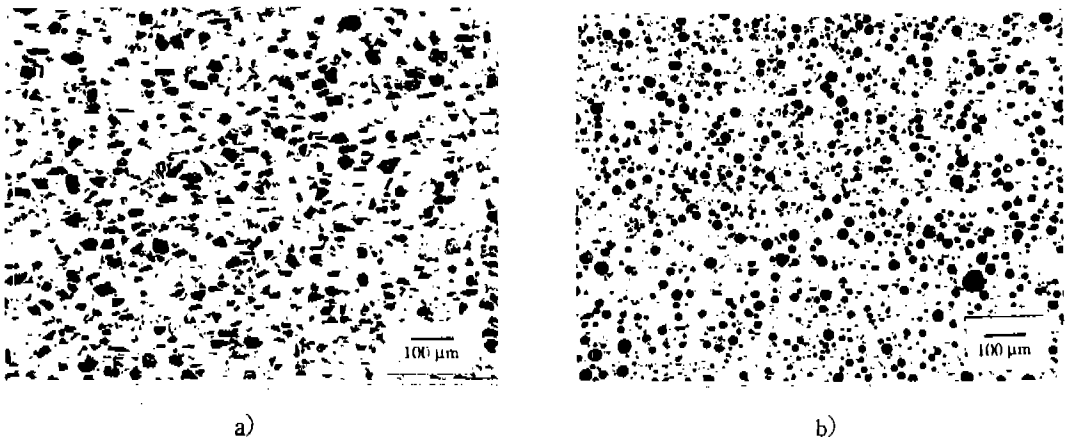


Fig.2 a) Microstructure of Duralcan 6061Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/20p composite after extrusion. b) Microstructure of Comalco 6061Al/spherical oxide/20p composite after extrusion

$$dp/dz = 16.8[V/R(1-V)] \eta \quad (2)$$

$\eta$ : 용탕의 *dynamic viscosity*

따라서, 이론적인 최소가압력은 (1), (2)식의 함으로부터 구할 수 있다. 높은 가압력은 보강섬유와 기지재료간의 젖음성을 향상시켜 복합재료의 인장강도를 증진시키나 적정이상의 가압력은 보강섬유의 표면을 손상시켜 기계적 성질의 저하를 초래한다.

복합재료의 최대인장강도를 얻기 위한 용탕온도와 보강섬유예열의 온도의 적정영역이 존재한다. 만약 보강섬유 온도( $T_f$ )와 용탕온도( $T_s$ )가 너무 높으면 보강섬유의 열화에 의해 높은 강도의 복합재료를 얻을 수 없고,  $T_s$ 와  $T_f$ 가 너무 낮다면 용탕은 보강섬유 주위를 흐를 수 없게 되어 비합침영역이 형성된다. 그러므로,  $T_s$ 와  $T_f$ 는 최소임계값보다는 높아야 하고, 이 온도영역은 응고층이 형성되더라도 용탕이 보강섬유 사이를 흐를 수 있는 최소 통로를 확보해 준다.<sup>25)</sup>

Squeeze Casting시의 합침속도와 Plunger의 속도는 매우 밀접한 관계가 있다. 용탕선단부의 합침속도는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$U = A \cdot V/S(1-V) \quad (3)$$

$A$ : Plunger 직경  $V$ : Plunger 속도

$S$ : Preform내의 용탕선단면의 면적

$V_f$ : 섬유체적율

침투 속도는 침투압력과 관련되므로 동시에 두 인자를 조절할수는 없다. 섬유사이의 용탕흐름은 많은 경우 Reynold 수가 100이하인 Laminar Flow로 용탕과 섬유사이의 정수압 상호작용은 적다. 예로, Plunger 속도만을 변화시킨 SiC/Al( $V_f$  38%)의 경우 합침속도가 1-5cm/sec일 경우에는 기계적성질에 크게 영향을 미치지 않는 것이 보고되고 있다. 그러나, Preform의 압축강도부족시나 Preform의 섬유체적율이 작은 경우에는 Preform 변형방지를 위한 임계합침 속도는 존재함을 유의해야 한다.

이와 같은 가압침투방법은 자동차용 피스톤부품의 부분적인 복합화에 적용되어 좋은 성과를 거두고 있다.

### 3.2.3 무가압침투방법(Pressureless Spontaneous Infiltration)

Lanxide사에서 개발한 제법으로  $Al_2O_3$  혹은 SiC 입자 Bed상에 Mg함유 Al합금을 설치하고, 질소분위기에서 800-1000°C로 가열하여 용탕이 자발적으로 입자 Bed로 침투하게 하는 방법이다.<sup>26)</sup> Mg 함량 및 분위기의 조절이 중요하고 Stir-Casting 방법보다는 훨씬 높은(45-70 Vol.%) 입자체적율의 복합재를 제조할 수 있다. 공정도중 Aluminum Nitride가 형성되어 복합재의 특성에 영향을 미치기도 한다. 이 제법은 원래 전자 패키지재료용 고체적율의 SiC/Al 복합재료의 제조방법으로 개발되었다. Near-Net-Shape의 제품생산이 가능하지만, 통상은 고체적율의 복합재료 모합금(Master Composite Hardener)을 제조하는데 이용되고, 이 모복합재료는 비복합화 용탕으로 희석하여 Submerged Mixing으로 재분산시켜 사용한다.

### 3.2.4 XD Process

Martin Marietta사가 개발한 제법으로 Al용탕에 Ti과 Carbon을 각각 첨가하여 In-Situ로 TiC 강화입자를 형성시키는 방법이다.<sup>27)</sup> 형성되는 TiC의 직경이 0.1-10 $\mu$ m로 모합금상태에서 20-75 Vol. %의 것이 제조되고, Al용탕으로 희석시켜 25 Vol. %의 복합재가 제조되고 있다. 이 합금은 Brake Calipers, Connecting Rods, Piston용으로 시험되고 있다.

### 3.2.5 분무적층성형방법(Spray Codepositon)

용탕과 강화입자를 동시에 분무시켜서 반응용 상태의 액적으로 적층복합화 시키는 제법이다.<sup>28)</sup>

<sup>29)</sup> Osprey 혹은 Hybrid Rapid Solidification Process로도 불린다. 적층속도는 6-10kg/min 정도 이고, 입자와 용탕간의 접촉시간이 짧아 계면반응의 가능성이 적다. 처음 빌렛은 95-98%의 밀도로 2차가공이 요구된다. 급속응고법에 의해 고온기계적성질등이 향상된 2014Al 혹은 8090Al/15% SiCp가 제조되고 있다.

3.2.6 Mixalloy process

이 제법은 liquid metal mixing process로도 불리우며, 서로 다른 조성의 용탕을 단열이송하여 설계된 mixing chamber에서 적정의 유속으로 turbulent eddy를 형성시키면서 혼합하고 급냉시키는 방법이다. 강화입자상은 in-situ의 발열 화학 반응으로 형성되는데, 대표적인 예로 Cu중에 50 nm의 nanoscale TiB<sub>2</sub> 강화입자를 형성시킨 복합 재료를 들 수 있다.

4. 자동차용 금속복합재료의 개발동향

자동차용 금속기복합재료의 특성 및 응용현황을 Table 2에 나타낸다. 1983년 Toyota사에서 자동차용 디젤엔진의 piston top groove부분에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AC8A Al복합재료를 실용화한 이래 현재 월간 30만개 이상을 squeeze casting방법으로 생산하고

있다.<sup>11)</sup> 또한 Toyota사에서는 crankshaft damper pulley 부품에도 같은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AC8A Al복합재를 적용하여 pulley전체의 20% 경량화를 달성시키고 1991년 8월 부터 양산하고 있다. Duralcan 사에서는 stir-casting해서 SiC입자를 균일 분산시킨 SiCp/Al의 생산에 성공해서 값싼 상용재료로서의 대량 생산의 길을 열면서, 현재 연간 11kton을 생산하고 있다.<sup>13)</sup> 이 SiCp/Al 복합재는 aircraft-camera gimbal 용도로 생산되고 있고, 자동차용으로는 piston, driveshaft 등에 사용될 전망인데, 1988년 가격이 25\$/kg이었으나 1990년 중반이후부터는 9\$/kg으로 판매되었고, 현재는 6\$/kg로 저하되었다. 이외에도 1985년에는 Honda사에서 connecting rod에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al FRM을, Sanyo사에서는 rotary compressor에 SiC<sub>w</sub>/Al을, Yamaha사에서는 상용 오토바이에 SiC<sub>w</sub>/Al을 적용 시판하고 있다.<sup>28-30)</sup> 주요부품별 개발현황은 다음과 같다.

Table 2. 자동차용 주요금속복합재료의 특성 및 개발현황

복합 재료	적용 부품	특성 및 효과	제조회사
Al/SiCp	Piston	마멸, 고온강도 경량화	Martin Marietta Lanxide Duralcan
Al/SiCp	Brake Rotor Caliper, Liner	마멸, 경량화	Duralcan, Lanxide
Al/SiCp	Drive Shaft	비강성, 부품감소, 경량화	Duralcan, GKN
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3(a)</sub>	Piston Ring Groove	마멸, 고온운전	Toyota
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3(a)</sub>	Piston Crown (combustion bowl)	피로	T&N, JPL, Mahle
Al/SiCw	Connecting Rod	비강성, 비강도 열팽창	Nissan
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3(i)</sub>	Connecting Rod	마멸, 팽창 수명, 소형화	Dupont Chrysler
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -C	Cylinder Liner	마멸, 피로, 경량화	Honda
Al/TiCp	Piston, Connecting Rod	마멸, 피로, 경량화, 수명	Martin Marietta
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Valve Spring Retainer Cam Lifter Body	마멸, 피로, 경량화, 수명	Lanxide

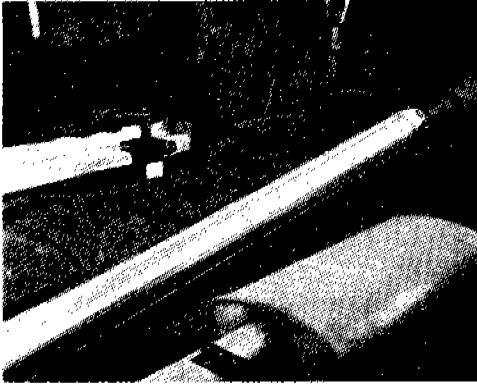


Fig.3 A particle-reinforced aluminum drive shaft installed on a vehicle. The material is 6061Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/20p

#### 4.1 드라이브샤프트

현재 대부분의 드라이브샤프트에는 철강재료가 적용되고 있지만 최근 몇 년간에는 알루미늄이 시험적용되고 있다. 트럭이나 대형수송버스의 드라이브샤프트에는 입자강화알루미늄복합재료의 적용이 바람직하다. 드라이브샤프트에는 샤프트가 동적으로 불안정하게 되어 사용이 곤란하게 되는 임계속도가 존재하는데, 이 임계속도는 재료의 비탄성율( $E/p$ )에 비례하고, 샤프트의 길이, 직경이 변수가 된다. 장래의 드라이브샤프트가 직경은 그다지 변화하지않고, 길이가 증가된다고 생각하면, 비탄성율이 철강재료나 비복합화 Al합금보다 훨씬 높은 입자강화알루미늄복합재료의 적용은 크게 효과가 있음을 알 수 있다. Fig.3에는 6061 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 드라이브샤프트의 예를 나타내는데, 1990년도 후반에는 6000계의 알루미늄기지의 입자강화재가 본격적으로 적용되리라 기대된다.<sup>30)</sup>

#### 4.2 브레이크로터

현재 사용되고 있는 주철제의 로터는 중량이 5.4kg으로, 이를 입자강화알루미늄복합재료로 대체하면 중량이 2.5kg으로 줄어 50-60%의 중량감소효과를 거둘 수 있다. 또한 inertial force의 감소로 연비향상 효과도 기대된다. 경량입자강화알루미늄복합재료를 brake dynamometer test 및 50,

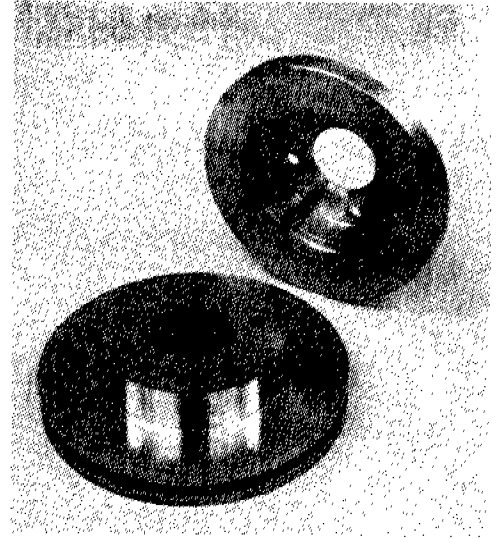


Fig.4 Brake rotors manufactured from 359Al/SiC/20p

000km 주행시험을 행한 결과, 가속 및 감속의 제어거리증가, 소음감소, 균일마모 및 마모량감소효과를 인정하고 있다. 입자강화알루미늄복합재는 또한 주철보다 열확산이 7배나 빨라 마찰면에서의 로터를 통한 열전달을 향상시킬 수 있다. 통상 로터는 300°C이하의 온도에서 사용되지만 450°C의 고온 노출 가능성도 있으므로 열시효, 응력완화, 열유도초소성 현상등에 의한 scuffing(움착마멸)현상이 발생하지 않도록 하기 위해서는 충분한 입자 체적율의 확보와 입자의 균일분포조직이 요구된다. 입자의 체적율을 30-35%까지 증가 시키면 로터의 작동온도를 20°C정도 증가시킬 수 있다. Fig.4에는 359Al/SiC 브레이크로터의 예를 나타낸다. 다이아몬드 가공이 요구되나, 카바이드 가공도 만족스러운 결과를 얻고 있다.

#### 4.3 엔진볼력, 실린더라이너

엔진볼력은 주철제에서 319 혹은 356 알루미늄합금으로 대체되면서 15-35kg의 중량감소효과를 거두고 있다. 그러나 이들 알루미늄합금은 마멸특성이 부족하여 입자강화알루미늄복합재료에의 전환이 요구되고 있다. 입자강화알루미늄복

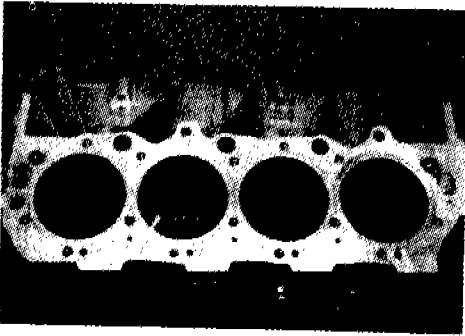


Fig.5 An aluminum engine block with particle-reinforced aluminum cylinder liners

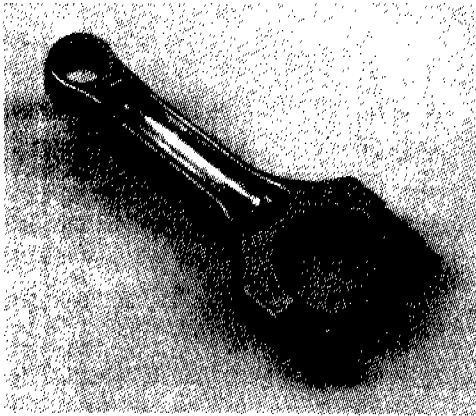


Fig.6 A hot-forged 2080Al/SiC/15p connecting rod

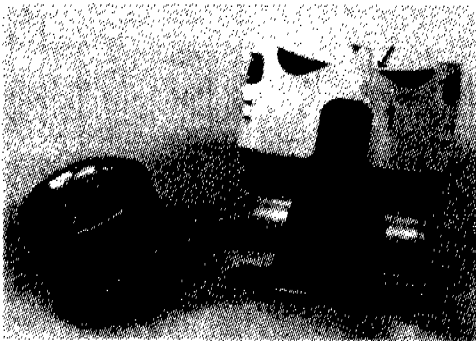


Fig.7 Cast aluminum pistons. At right, a selectively reinforced(note arrows) piston for heavy-duty diesel engines. At left, a fully reinforced piston for a low-emission passenger car engine.

합재료로 대체하면 3~4.5kg의 추가중량감소 효과 및 열전도증가와 마멸량 감소에 따른 작동효율의 향상이 기대된다. 실제 적용검토되는 기술로는 1) Honda사에서 알루미나와 탄소섬유의 하이브리드 프리폼에 알루미늄용탕을 스퀴즈캐스팅방법으로 가압침투시켜 부분복합화 시키는 방법, 2) 입자강화알루미늄복합재를 주조, 압출하여 실린더 라이너를 분리제조하고, 블럭주조하는 방법, 3) 실린더 bore coating하는 방법 등이 있다. 2)방법에 의해 제조된 예를 Fig.5에 나타낸다.

#### 4.4 커넥팅로드

커넥팅로드재료로는 급냉응고 알루미늄, 분말 야금방법으로 제조된 티타늄, 단조된 티타늄, 금속복합재료가 경합을 이루고 있다. 커넥팅로드 재료는 특히 150~180°C의 고주기 피로 특성이 요구되는데, 이는 2080Al/15% SiC의 복합재료에서 성질이 만족되고 있다.<sup>31)</sup> 열간단조한 이복합재의 커넥팅로드의 예를 Fig.6에 나타낸다. 이밖에도 열팽창계수, 탄성계수, 마모특성이 요구되는데, 복합재료의 적극적인 적용이 검토되고 있다.

#### 4.5 피스톤

Toyota사에서 1983년 자동차용 디젤엔진의 피스톤 top groove부분에 알루미나·실리카 단섬유 Kaowool(중급) 혹은 Saffil(고급)강화 AC8A Al복합재료를 실용화한 이래, 1987년에는 Kaowool섬유의 결정화 열처리(1200~1300°C)를 통한 Mullite의 고경도 결정을 형성시켜 저가격 단섬유의 고강도화에 성공하였고, 1988년에는 Ni입자를 첨가하면서 반응 스퀴즈캐스팅(reaction squeeze casting)을 행하여 in-situ 금속간화합물 Ni<sub>3</sub>Al의 형성시킴으로서 고강도화 시켜, 저가격이고 고온 내마멸성이 우수한 피스톤 생산을 계속하고 있다.<sup>32)</sup> 주조방법으로 제조된 피스톤의 예를 Fig.7에 나타낸다. 최근에는 피스톤전체를 입자강화알루미늄 혹은 마그네슘 복합재로 제조하려는 움직임이 활발해지고 있다.<sup>5)</sup>



## 5. 결 언

자동차의 경량화 및 부품기능의 향상등을 위해서는 금속복합재료의 개발적용이 절실히 요구되고 있다. 고성능의 금속복합재료부품의 저가격, 대량생산을 위하여서는 아직 넘어야 할 재료기술의 과제가 많이 있지만, 자동차부품에의 금속복합재료의 적용범위 확대를 위한 재료부품 기술자의 연구개발노력이 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 조경목, 박익민 : 신금속(1990), 2
2. 신광선, 김낙준 : 제1회 자동차경량화심포지움논문집, 포항(1992), 15
3. 신광선 : 환경을 위한 자동차재료기술 workshop 개요집, (1993), 서울, 한국자동차공학회 재료부문위원회, 31
4. 박익민, 최정철 : 복합재료, 반도출판사, 개정1판(1994)
5. P. Rohatgi and R. Asthana : JOM, 5(1991) 35
6. J. E. Allison and G. S. Cole : JOM, (1993) 1, 19
7. P. Rohatgi : Advanced Mat. & Processes, 2 (1990) 39
8. 박익민, 신광선, 윤의박 : 한국주조공학회지, 8(1988) 412
9. A. Mortensen, J. A. Cornie and M. C. Flemings : JOM, 2(1988) 12
10. 조경목, 박익민 : 제1회 자동차경량화심포지움논문집, 포항(1992), 239
11. 박익민 : 제2회응고기술심포지움, 서울 KIM-KFS(1991) 86
12. K. Sukanuma : Proc. of Light Materials for Transportation Systems, ed. N. J. Kim, Kyungju, (1993), 747
13. R. Warren and C. H. Andersson : Composites, (1984), 15, 101
14. C. M. Gabryel and A. D. Mcleod : Metall. Trans., (1992), 23A, 1279
15. C. M. Adams and R. E. Lewis : Rapidly Solidified Crystalline Alloys, ed. S. K. Das, (1985), Warrendale, PA, 157, The Met. Soc. of AIME
16. A. Mortensen and I. Jin : International Materials Reviews, 37(1992) 3, 101
17. Dow Chemical Co. : US Patent 4432936
18. Alcan Aluminum Corp. : US Patent 4786467 (1988)
19. D. J. Lloyd : International Materials Reviews, 39(1994) 1, 1
20. T. Hikosaka, K. Miki and Y. Nishida : Imono, 61(1989) 780
21. M. N. Gungor, J. A. Cornie and M. C. Flemings-Proc. Int. Sym. on Advanced Cast MMC, Chicago, (1988) 39
22. D. M. Schuster, M. Skibo and F. Yep : JOM, 11(1987) 60
23. T. E. Wilks : Advanced Mat. & Processes, 8 (1992) 27
24. T. W. Clyne and M. G. Bader, Proc. ICCM-5th, (1985), 755
25. H. Fugunaga : Proc. Int. Sym. on Advanced Cast MMC, Chicago, (1988) 101
26. A. W. Urquhart : Mat. Sci. Eng., (1991), A144,75
27. Martin Marietta Corp. : US Patent4915908(1990)
28. A. R. E. Singer : US Patent 4515864(1985)
29. Osprey Metals : UK Patent 1472939(1977)
30. W. Hoover : Materials Engineering(1992) 4, 30
31. W. H. Hunt, C. R. Cook and R. R. Sawtel : SAE paper 910834(1991)
32. T. Sukanuma and A. Tanaka : Tetsu-to-Hagane, 75(1989) 1790