

Aluminum Engine Cylinder Bore 적용 AlSiMg/SiC 복합 용사피막의 내마모 특성

양병모* · 변응선** · 박경채*

* 경북대학교 공과대학 금속공학과

** 한국기계연구원 표면기술연구부

Wear Resistance Characteristics of Thermal Sprayed AlSiMg/SiC Composite Coatings on Aluminum Engine Cylinder Bores

B. M. Yang*, E. S. Byon** and K. C. Park*

* Dept. of Metallurgical Engineering, Kyungpook National University, Taegu 700-702, Korea

** Dept. of Surface Engineering, Korea Institute of Machinery and Metals, Changwon 641-010, Korea

Abstract

The advantages of thermal sprayed coatings as a replacement for cast iron liners are reduced weight, better heat transfer and reduced cost. One of the most important performance attributes of a cylinder bore coating is its wear resistance, since it must survive the abrasive sliding of both the piston rings and the piston skirt.

In this study, composite powders were prepared by ball milling of Al-13Si-3Mg(wt%) alloy with SiC particles. The concentrations of SiC were 40 and 60wt%. The composite powders were sprayed using Metco-9MB plasma torch. Plasma sprayed coatings were heat-treated at 500°C for 3 hours. The wear resistances of the plasma sprayed coatings were found to improve with heat treatment and superior to the commercially available G.C.I.(gray cast iron). AlSiMg-40SiC heat-treated coatings showed the best wear resistance in this study.

(Received June 24, 1999)

Key Words : Plasma spray, Composit coatings, Aluminum engine block, SiC, Wear

1. 서 론

최근, 지구환경 보호의 관점에서 자동차에 대해서 저공해화와 연료절감의 요구로 인해 연비향상을 위한 경량화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재, 가장 효과적인 경량화 방안으로 실용화되고 있는 것으로 자동차의 부품소재를 철강재료에서 알루미늄합금으로 대체하는 것이다. 특히, 자동차부품중에서 무거운 중량을 차지하는 엔진의 실린더 블록(cylinder block) 소재를 편상흑연주철에서 비중이 2.7인 가벼운 알루미늄합금으로 교체함으로써 자동차의 경량화가 가능

하게 되어, 알루미늄합금을 소재로 한 실린더 블록의 제조가 증가하고 있다¹⁻⁴⁾.

엔진 실린더는 피스톤 링과 실린더가 접하는 부위인 라이너(liner)를 피스톤 링이 실린더와 접하여 상하(上下)운동을 하게 됨에 따른 피스톤(piston)이나 피스톤 링(piston ring)에 의해 마모되는 것을 피해야 한다. 이러한 라이너는 피스톤 링의 상하운동과 연소·폭발 시에 기밀성을 가지는 가스 시일(gas seal)이 중요하기 때문에 실린더는 다른 부분에 비해 한층 높은 내마모성과 내식성이 요구된다⁵⁾.

내마모성이 떨어지는 알루미늄 엔진의 내마모성 향상을 위한 방안으로 (1)엔진 소재를 내마모성이 우수

한 고Si-Al합금이나 복합재료로 제작하는 일체형과 (2)알루미늄 엔진 본체와 별도로 특수주철제 라이너를 제조한 후 본체에 압입하여 사용하는 분리형이 있다. 그러나 일체형인 고Si-Al합금의 경우 가공이 어려운 문제가 있고, 분리형의 경우는 또 다른 생산공정을 요구하기 때문에 생산비가 많이 들고 라이너와 실린더 블록간의 열전달이 떨어지게 된다^{5,6)}.

이러한 문제를 해결하기 위해 알루미늄합금 실린더의 표면개질에 대한 필요성이 대두되고 있다. 그러나 알루미늄합금은 석출경화 열처리에 의한 개질 처리가 있으나, 주철 및 강에서의 변태나 석출을 이용한 열처리, 질화나 침탄 등의 확산처리, 도금 등의 광범위한 개질처리에 비해 그 종류가 적은 상태이다. 따라서 알루미늄합금의 표면개질법으로 용융소입법, 용융합금화법 및 용사법에 대한 연구가 다양하게 행해지고 있다. 이들 방법중 저 생산비를 위한 알루미늄합금 실린더 블록의 표면개질을 위한 가장 유력한 방법이 용사법으로, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다⁶⁻⁹⁾. 특히, 세라믹(SiC, TiC)을 다량(30~70Vol.%) 첨가한 Al합금의 용사에 대하여 연구되고 있다^{10,11)}.

본 연구에서는 플라즈마 용사기를 이용하여 표면에 내마모성이 우수한 것으로 알려져 있는 AlSiMg/SiC 복합피막층을 형성시켜, 피막층의 경도, 내마모성 조사 및 미세조직 관찰을 통하여 피막특성을 분석하였다. 또한 마모시험을 통해 마모거동도 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 용사분말 제조

용사분말은 표 1과 같은 조성으로 원통형 볼밀법(ball milling)으로 제조하였다.

분말은 그림 1과 같은 원통형 ball mill 장치를 사용하여 제조하였으며, $\leq 100\mu\text{m}$ 의 Al과 $\leq 1\mu\text{m}$ 의 SiC 분말을 사용하였다. 용기에 대한 ball의 충전량은 용기내 체적의 50%로 하였고 분말량은 ball 총 중량의 1/60으로 하였다. 일반적으로 ball과 용기내벽에 원료분말의 고착을 방지하기 위해 사용하는 실리콘 조제는 사용하지 않았다. 그리고 분말의 산화방지를 위해 용기내는 저압 분위기로 하였다.

Table 1 Chemical compositions of thermal spray powders (wt%)

1	40SiC/60(Al-3Mg-13Si)
2	60SiC/40(Al-3Mg-13Si)

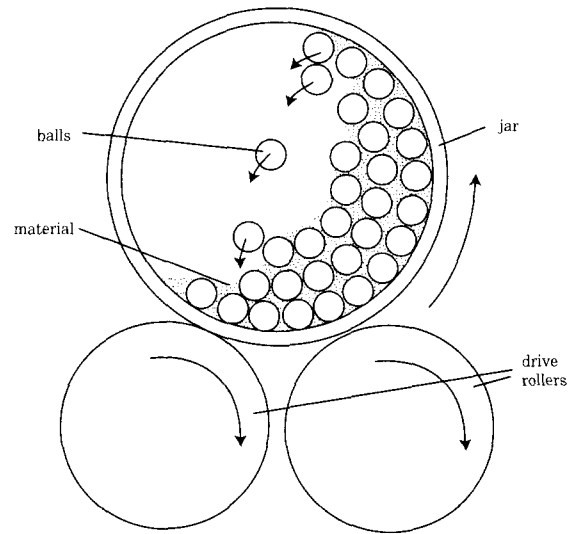


Fig. 1 Schematic diagram of ball milling

2.2 용사 및 기공율 측정

용사는 Metco社의 9MB Plasma gun을 사용하여 표2의 조건으로 대기 중에서 용사피막을 제조하였다. 모재금속은 현재 알루미늄엔진의 실린더 블록 제작에 사용되고 있는 AC4B를 주조한 후, 사각형(12×12×12mm)으로 가공하여 사용하였다. 용사전 전처리로 피막의 접합면 증대와 모재표면의 산화피막 제거를 위하여 Alumina로 블라스팅(blasting)하였다.

용사 후에는 피막과 모재의 접합력 강화를 위하여 Ar 분위기에서 500℃로 3시간 열처리하였다.

기공율 측정은 열처리 전, 후 피막의 표면을 Polishing 한 후 Image Analyzer (Media-cybernetics: Materials Proanalyzer-V3.0)를 이용하여 측정하였다.

Table 2 Condition of plasma spray coatings.

Spray gun	Metco - 9MB	
	AlSiMg-40SiC	AlSiMg-60SiC
Chemical composition (wt%)	AlSiMg-40SiC	AlSiMg-60SiC
Gas pressure(Ar/H ₂) (psi)	96/20	116/23.5
Spray distance (mm)	150	150
Transverse speed (mm/min)	600	600
Spray angle (°)	90	90
Arc voltage (V)	70	79
Arc current (A)	500	500
Feed rate indicator(g/min)	76	64
Carrier gas flow(SCFH)	13.5	13.5

2.3 경도 및 마모시험

용사피막층 단면의 경도는 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 측정하였다. 이때 시험 하중은 100g, 부하시간은 10초로 하였다. 피막층의 경도 값은 10회 측정하여 평균치로 하였다.

용사피막층의 내마모성을 측정하기 위하여 마모시험을 하였다. 마모시험은 마찰마모시험기(TE53, PLINT Co, UK)를 이용하여 JIS K7218규정 block on disk식으로 대기중 무윤활 및 윤활상태에서 실시하였다. 비마모값은 마모흔적 길이를 측정하여 다음식(1)에 의해 구하였다.

$$W_s = Bb_0^3/8rL_0P_0 \quad (1)$$

W_s : 비마모량(mm^3/Nm) r : 회전원판의 반경(mm)

B : 회전원판의 두께(mm) b_0 : 마모흔의 길이(mm)

L_0 : 마모거리(m) P_0 : 하중(N)

그림 2는 마모시험기의 모식도를 보여 주고 있다. 상대재는 초경(WC-6wt%Co) 회전원판(Hv 1500, 직경 60mm, 두께 10mm)을 사용하였다. 윤활유는 자동차용 엔진오일(10W/50 API-SH)을 사용하였다. 무윤활상태에서는 마찰 하중 42N과 마찰거리 5000m로 하였고, 윤활상태에서는 마찰하중 140N과 마찰거

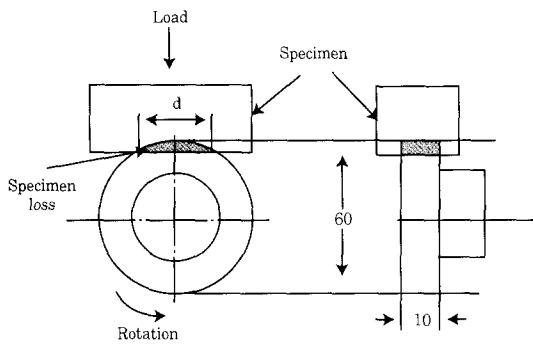


Fig. 2 Schematic diagram of wear testing machine and dimensions of rotor.

리 10,000m로 하였다. 마찰속도는 무윤활상태와 윤활상태 모두 1m/s로 일정하게 하였다. 윤활상태의 마모시험은 300°C의 윤활유에 1시간 침지한 후 윤활막의 유지성을 시험하기 위해 마모시험 할 면을 수직으로 세워 12시간 지난 후 무급유 상태로 실시하였다.

용사피막층의 단면 미세조직과 마모면의 관찰은 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다. 또한 생성 상은 XRD에 의해서 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용사분말

그림 3은 milling time을 24시간 한 후의 분말사진이다. 분말의 형상은 상당히 구상화된 것을 알 수 있다. 그러나 분말의 입도는 균일하지 못했다. 이러한 입도의 불균일성은 송사시 분말 송급성을 나쁘게 만들기 때문에, 송급성 향상을 위해 분말의 입도를 36~106 μm 로 분급하여 용사분말로 사용하였다.

그림 4는 제조된 분말의 혼합성을 알아보기 위해서 EDX 면분석 한 사진이다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 SiC 입자가 기지 내에 고르게 혼합되어 있음을 알 수 있다.

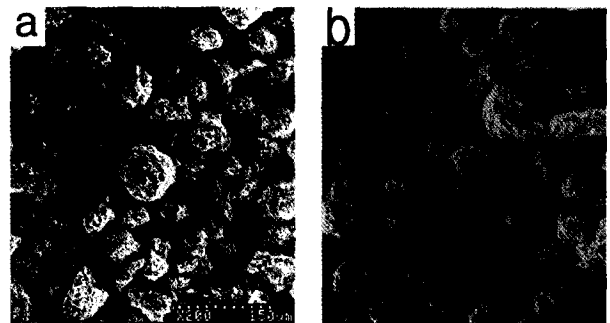


Fig. 3 SEM micrographs of ball milling powders. AlSiMg-40SiC(a), AlSiMg-60SiC(b)

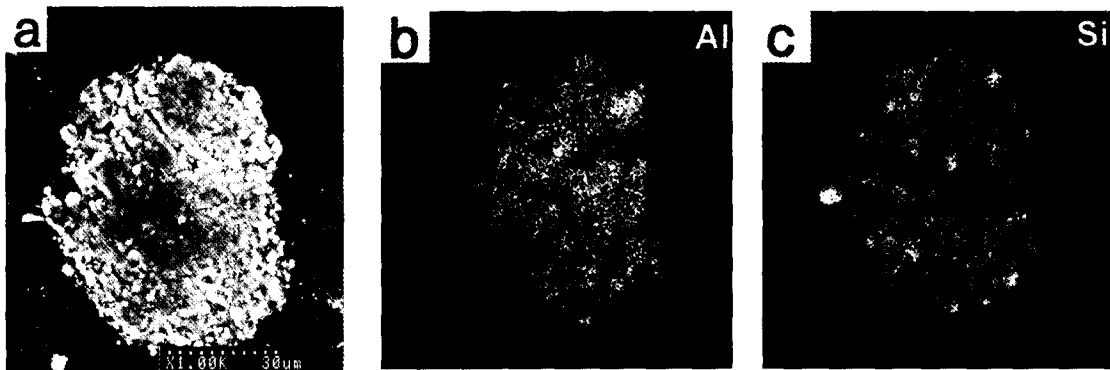


Fig. 4 SEM micrographs of cross section of AlSiMg-40SiC(a) ball milling powders and Al(b), Si(c) mapping

3.2 용사

그림 5는 용사피막의 단면조직을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 일반 금속의 용사에서 용융된 입자가 모재에 충돌되면서 나타나는 splat층이 나타나지 않고 있다. 이것은 저융점의 AlSiMg 내에 고용점인 SiC가 미세하게 혼합됨에 따라 용사시 용융입자의 유동성이 저하되어 충돌시 splat층이 발달하지 못한 것으로 판단된다. 이러한 유동성 저하는 피막내 기공생성으로 나타났고, 유동성이 떨어지는 AlSiMg-60SiC가 상대적으로 기공이 많은 것을 알 수 있다. 이것은 표3의 기공을 측정 결과에서 확인할 수 있었다.

Table 3 Porosity of plasma-sprayed coatings.

	H.T. (500℃, 3Hr)	Porosity(%)
AlSiMg-40wt%SiC	Before	3.2
	After	1.3
AlSiMg-60wt%SiC	Before	14.1
	After	13.4

그림 6은 열처리 후의 용사피막의 단면조직을 보여주고 있다. 열처리 전에 비해서 기공이 감소하고 피막과 모재의 접합상태도 향상된 것을 관찰할 수 있다.

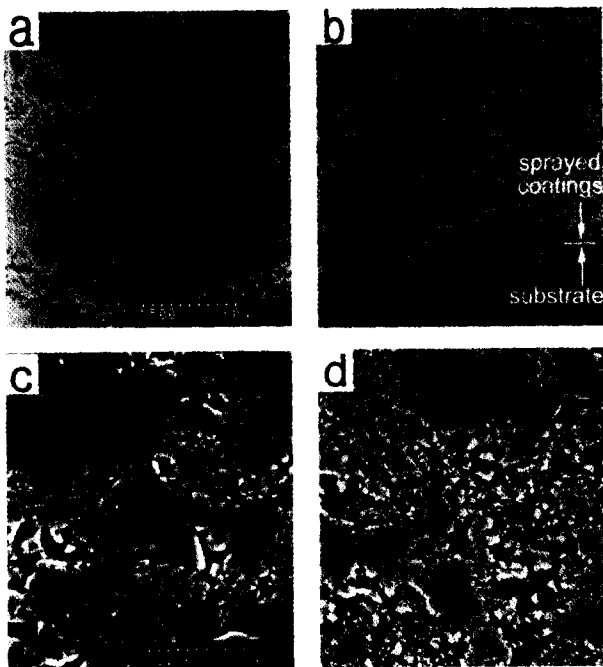


Fig. 5 SEM micrographs of cross section of plasma-sprayed AlSiMg-40SiC(a), (c) and AlSiMg-60SiC(b), (d) coatings

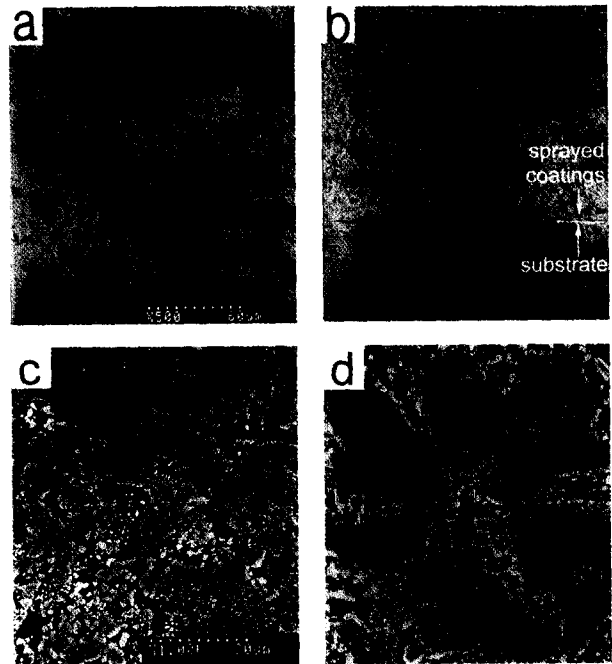


Fig. 6 SEM micrographs of cross section of plasma-sprayed AlSiMg-40SiC(a), (c) and AlSiMg-60SiC(b), (d) coatings after heat treatment at 500°C for 3 hours

3.3 XRD시험

그림 7은 용사분말과 열처리 전후 용사피막의 XRD 시험 결과를 보여주고 있다. 시험결과, 대기중 용사로 인해 Al의 산화로 Al₂O₃가 생성된 것을 알 수 있다. 이러한 산화막의 형성이외는 용사 전후와 열처리 전후 생성상의 변화는 없었다.

본 연구의 용사피막에서는 소결이나 주조에 의해 제조한 Al/SiC 복합재의 계면에서 발견되는 Al₄C₃가 발견되지 않았는데, 이것은 Al₄C₃의 형성을 억제하는 Si

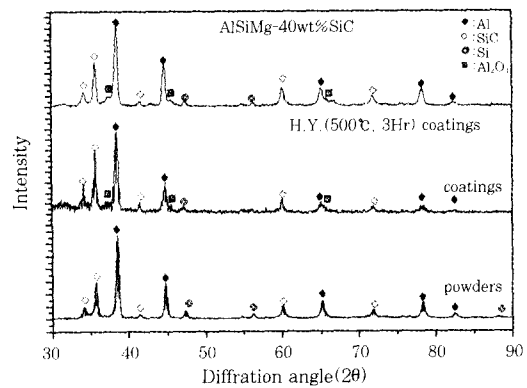


Fig. 7 XRD patterns of AlSiMg-40SiC powders, plasma-sprayed coatings and plasma sprayed coatings after heat treatment at 500°C for 3 hours

의 첨가와 소결이나 주조와 달리 용융시간(1초이하)이 대단히 짧았기 때문으로 판단된다. 또한 열처리 후에도 Al_4C_3 가 생성되지 않은 것은 Al_4C_3 생성온도보다 열처리 온도가 낮았기 때문으로 사료된다^{10~14)}.

3.4 경도시험

그림 8은 피막의 열처리 전후의 경도시험 결과를 보여주고 있다. 열처리 전 경도값은 Hv 270~370의 분포를 보이는데, SiC량이 적은 것이 높은 경도값을 보이고 있다.

이는 60wt%의 SiC첨가한 경우, 이들 SiC를 고정하는 Al량의 부족으로 SiC입자와 Al기지의 접합력 감소 때문으로 판단된다. 그리고 열처리 후에는 전체적으로 증가된 값을 보이고 있다. 이것은 열처리에 의해서 SiC입자와 Al기지의 접합력이 증가되고 기공 감소에 의한 것으로 생각된다.

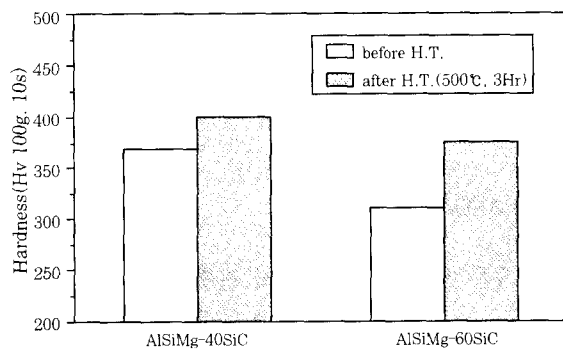


Fig. 8 Hardness of Plasma-sprayed coating, before and after heat treatment at 500°C for hours.

3.5 마모시험

그림 9는 열처리 전, 후의 용사피막에 대한 대기중 마모시험 결과인 비마모량을 보여주고 있다. AISiMg-40SiC보다 AISiMg-60SiC가 더 우수한 내마모 특성을 보였다. 열처리 후에 내마모성이 향상되었고, 그 향상 폭은 AISiMg-40SiC가 더 크게 나타났다. 이것은 용사시 짧은 용융 시간으로 인해 충분히 Al과 SiC가 접합되지 못했던 것이 열처리 의해 Al과 SiC의 접합력이 향상되었기 때문으로 사료되고, 이러한 효과가 Al의 양이 많은 AISiMg-40SiC이 AISiMg-60SiC보다 컸기 때문으로 판단된다. AISiMg-40, 60SiC 용사피막의 내마모성은 현재, 자동차엔진에 사용되고 있는 회주철보다 더 나은 내마모성을 보였다.

그림 10은 마모 시험한 용사피막의 마모면을 관찰한 사진이다. 마모면 사진의 화살표에서 알 수 있는 것과 같이 둥근 형태로 박리 되고 있음을 알 수 있다. 이와

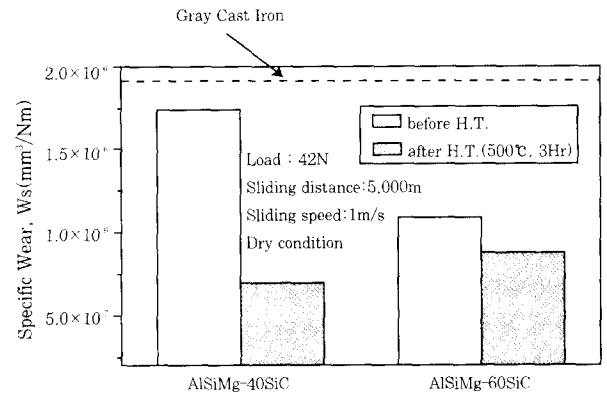


Fig. 9 Specific wear of plasma-sprayed coating, before and after heat treatment for 3 hours at 500°C

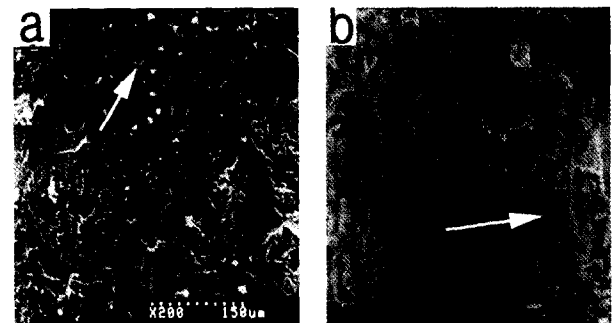


Fig. 10 SEM micrographs of worn surface of plasma sprayed AISiMg-40SiC(a) and AISiMg-60SiC(b) coatings

같은 마모형태는 AISiMg-40SiC와 AISiMg-60SiC 모두 관찰되었다. 그리고 그 박리 정도는 AISiMg-40SiC가 더 심한 것을 알 수 있다.

그림 11은 마모형태를 알기 위해 마모면을 수직 절단하여 관찰한 마모단면의 조직 사진이다. 사진에서처럼 마모면 내부에서 균열이 발생된 것이 관찰된다. 균열은 마모시 마모면에서 내부로 일정깊이의 소성변형에 의해 화살표와 같이 Al/SiC계면에서 발생후 성장

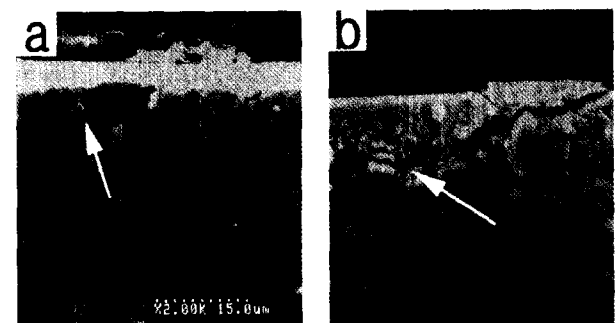


Fig. 11 SEM micrographs of longitudinal cross-section of worn surface on plasma sprayed AISiMg-40SiC(a) and AISiMg-60SiC(b) coatings

하여 박리 되는 것을 알 수 있다. 이러한 마모거동은 그림 12와 같다. 그리고 AlSiMg-60SiC가 AlSiMg-40SiC에 비해 낮은 비마모값을 나타낸 것은 소성변형층의 깊이가 AlSiMg-40SiC에 비해서 적었기 때문으로 판단된다. 이것은 기존의 구조에 의해 제조한 Al/SiC 복합재료의 마모에 대한 연구¹⁶⁻¹⁹⁾에 의해 밝혀진 것과 같은 결과를 보이고 있다.

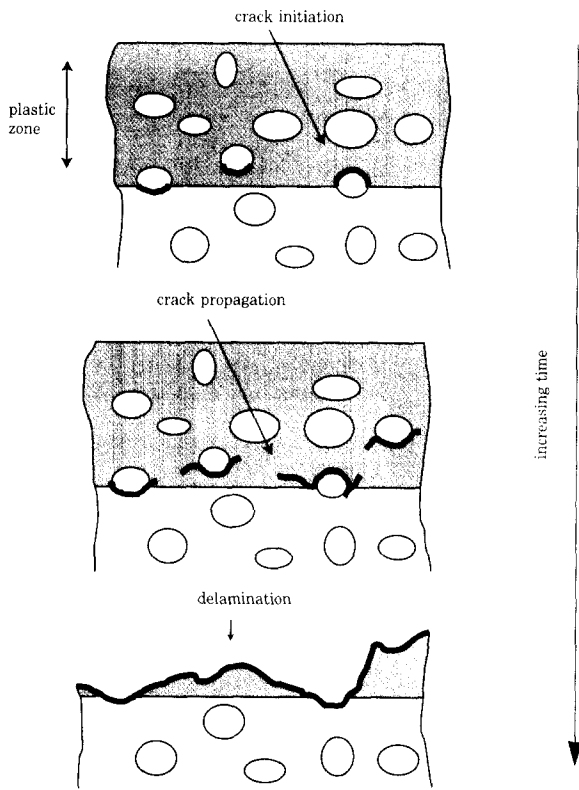


Fig. 12 Schematic of subsurface cracking wear mechanism

그림 13은 열처리한 용사피막의 마모면 사진이다. 열처리 전 둥근 형태의 박리 흔적을 발견할 수 없고, 표면상태가 고른 형상을 보여주고 있다. 또한, 그림 14는 마모단면 조직사진에서 처럼 열처리한 AlSiMg-40SiC 용사피막의 경우는 균열을 관찰할 수 없으며, AlSiMg-60SiC의 경우도 열처리 전에 비해서 균열이 생성된 깊이가 얇아진 것을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 열처리에 의해 Al기지와 SiC입자간의 접합력이 강화되었기 때문인 것으로 판단되며, Al의 양이 많은 AlSiMg-40SiC가 AlSiMg-60SiC보다 열처리에 의해 더욱 강화되었기 때문으로 사료된다.

그림 15는 균열이 발생되지 않은 AlSiMg-40SiC 열처리 용사피막의 마모단면을 EDX 면분석한 사진이다. 상대재와 접촉된 마모면에 텅스텐이 발견되고 있다. 이것은 상대재로 사용된 초경(WC-Co)에서 유입

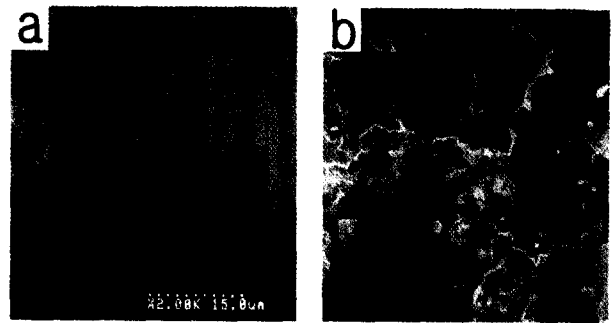


Fig. 13 SEM micrographs of worn surfaces of plasma sprayed AlSiMg-40SiC (a) and AlSiMg-60SiC(b) coatings after heat treatment at 500°C for 3 hours.

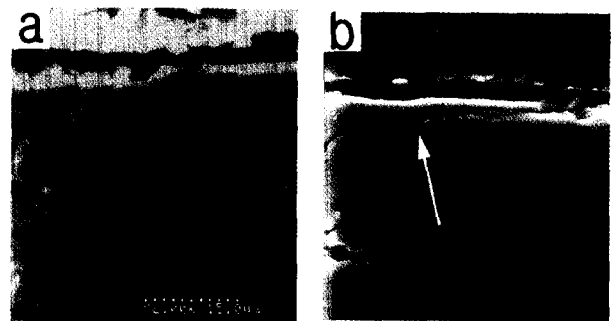


Fig. 14 SEM micrographs of longitudinal cross-section of worn surfaces on plasma sprayed AlSiMg-40SiC (a) and AlSiMg-60SiC(b) coatings after heat treatment at 500°C for 3 hours

된 것으로 고경도 입자인 SiC입자에 의해 마모된 초경 입자와 초경과 마찰되면서 마모된 미세한 SiC입자가 마찰면에서 마찰하중에 의해 기계적 혼합층 (MML, mechanically mixed layer)을 형성한 것을 알 수 있다. 이러한 MML은 기지층과 상이한 성질로 마찰충격에 의해서 떨어져 마모되는 것으로 알려져 있다¹⁶⁻¹⁹⁾. 이러한 마모거동의 변화는 기지와 경질입자의 접합력이 열처리에 의해 강화됨에 따라 변화한 것으로, 이것은 내마모성의 향상으로 나타나게 되었다.

그림 16은 열처리 전, 후 용사피막에 대해 대기 중 마모시험에서 마모거리에 따른 마찰계수를 보여주고 있다. 용사피막의 경우, 마찰거리가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 기지가 마모됨에 따라 경한 SiC입자가 상대와 접촉함에 따라 마찰계수가 감소한 것으로 판단된다. 그리고 열처리 후에는 마찰계수가 전체적으로 감소한 값을 보이는 데, 이것은 앞서 설명한 마모거동이 마모면의 박리에서 기계적 혼합층 형성에 따른 마모형태로 변화함에 따라 감소한 것으로 판단된다. SiC량에 따른 차이는 SiC량이 많은 AlSiMg-60SiC가 낮은 마찰계수를 보

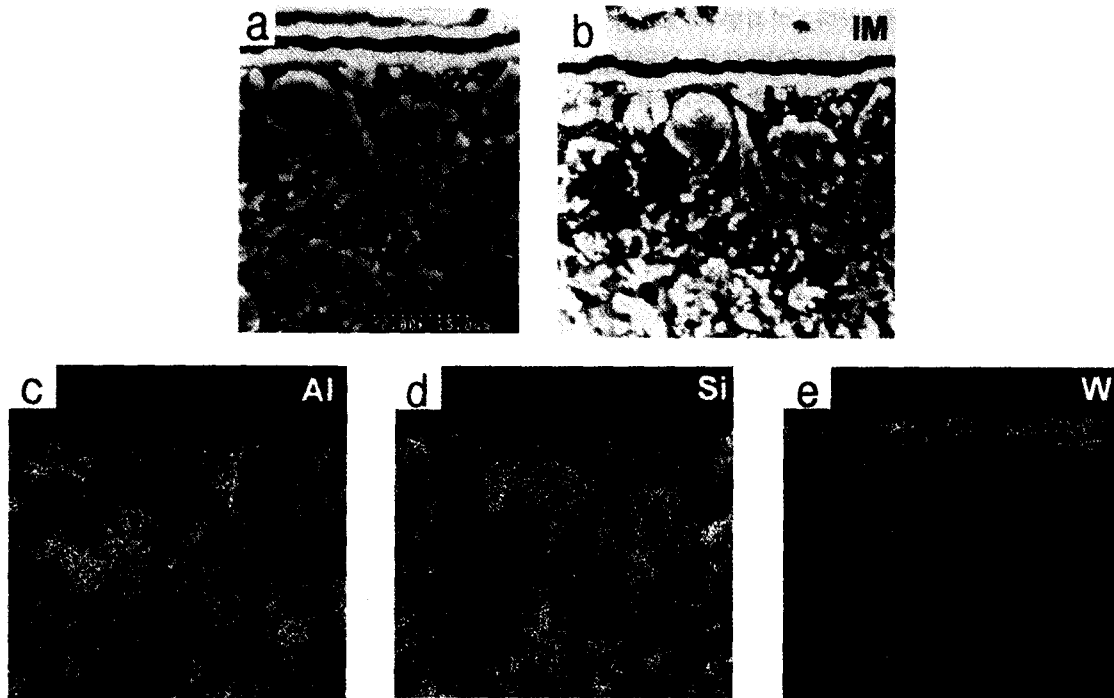


Fig. 15 SEM micrographs of longitudinal cross-section of worn surface on plasma sprayed AlSiMg-40SiC(a) and image(b), EDX mapping Al(c), Si(d) and W(e)

여주고 있다. 전체적으로 현재, 자동차 엔진 재료로 사용되고 있는 회주철에 비해 낮은 마찰계수를 보여 주고 있다. 이는 엔진 효율의 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

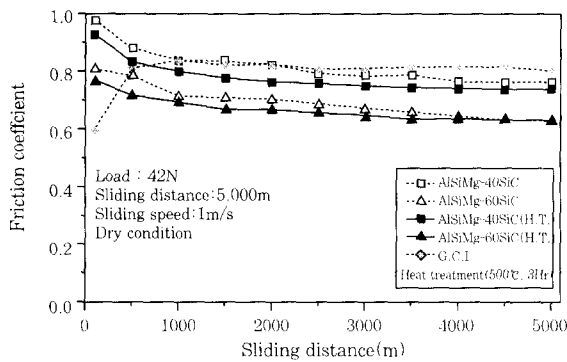


Fig. 16 Relation of friction coefficient vs. sliding distance in dry condition for gray cast iron and plasma-sprayed coatings

그림 17은 열처리한 용사피막과 회주철을 윤활유에 침지한 후, 무급유 상태에서 마모거리에 따른 마찰계수의 변화를 보여주고 있다. 용사피막의 경우는 마모거리 10,000m까지 소폭의 증가하였지만, 회주철의 경우는 마모거리 3,500m를 지나면서 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 이때 유막이 파괴되었음을 알 수 있다. 이와 달리 용사피막의 경우는 유막을

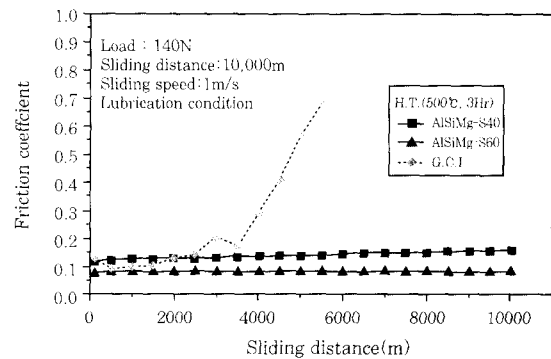


Fig. 17 Relation of friction coefficient vs. sliding distance in dry condition for oil dipping gray cast iron and heat treated plasma-spray coatings

지속하고 있음을 알 수 있는데, 이것은 용사피막에 존재하는 기공이 윤활유를 함유함에 따라 유막을 지속적으로 유지할 수 있었기 때문임을 알 수 있다. 이러한 유막의 유지는 자동차 엔진의 마모가 실린더 내 유막이 불량한 엔진시동 초기에 급격히 이루어지기 때문에 자동차엔진에 유막 유지능이 우수한 용사피막의 적용이 적합한 것으로 판단된다.

4. 결 론

Ball mill법에 의해 복합합금 용사분말을 제조하고, 이렇게 제조한 용사분말을 플라즈마용사한 용사피막

의 특성에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 24시간 ball milling한 결과, SiC와 AlSiMg가 균일하게 혼합된 구상의 복합분말을 제조할 수 있었다.
2. 500℃에서 3시간 열처리한 결과, 경도가 향상되었고, 기공도 감소하였다.
3. 용사피막의 경도는 AlSiMg-40SiC가 AlSiMg-60SiC가 더 우수하였다. 이것은 Al량이 많은 AlSiMg-40SiC 용사피막에서 Al과 SiC가 고르게 결합하기 때문으로 판단된다.
4. 용사피막의 마모시험 결과, AlSiMg-40, 60wt% SiC 용사피막은 현재, 자동차엔진 재료로 사용되고 있는 회주철보다 우수한 내마모성을 보였다. 열처리 후 AlSiMg-40SiC 용사피막이 가장 우수한 내마모성을 보였다. 이것은 열처리에 의해 기지인 Al과 SiC의 결합력이 향상되었기 때문으로 판단된다.
5. 마찰계수는 AlSiMg-40, 60wt%SiC 용사피막이 회주철보다 낮은 값을 보였으며, 윤활 유막의 지속성은 용사피막이 회주철에 비해 월등히 우수하였다.

후 기

본 연구는 교육부 학술연구조성비(신소재분야)에 의하여 연구되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 寺前哲夫 : Advanced materials in mechanical industries, 日本機械學會誌, Vol.96, No.893(1993), pp1
2. 금동화, 김혜성, 박상인 : 마그네슘 자동차 부품의 활용현황과 전망, 자동차공학회지, Vol.18, No.5(1996), pp53
3. 박우진, 박익민, 김낙준 : 자동차용 경량금속재료의 개발동향, 자동차공학회지, Vol.16, No.4(1994), pp23
4. 최현규 : 自動車の 알루미늄 利用現況, 신기술, Vol.4, No.6(1990), pp1
5. 신동명 : 자동차재료, 형설출판사(1994), pp363
6. L. Bymes, M. Kramer : Method and Apparatus for the Application of Thermal Spray Coatings onto Aluminum Engine Cylinder Bores(1994) International Thermal Spray Conference Proceedings, pp39
7. 김경수 : 알루미늄 합금의 表面厚膜 경화기술, 신기술, Vol.7, No.5(1993), pp1
8. R. C. McCune, M. J. Zaluzec, L. V. Reatherford, E. L. Cartwright : Thermal Sprayed Self-Lubricating Composites from Cored Wires, 1994 International Thermal Spray Conference Proceedings(1994), pp25
9. M. R. Kim, R. W. Smith : High-Deposition Rate Coating of Aluminum Cylinder Bores, 1994 International Thermal Spray Conference Proceedings(1994), pp43
10. K. Ghosh, T. Troczynski, and A. C. D. Chaklader : Aluminum-Silicon Carbide Coatings by Plasma Spraying, J. Thermal Spray Tec. Vol. 7(1998), pp78
11. P. Vitiaz, A. Verstak, T. Azarova, T. Talako : Titanium Carbide in Wear Resistant Coatings, 1996 International Thermal Spray Conference Proceedings(1996), pp169
12. 이재철, 변지영, 석현광, 오창석, 이인호 : Sicp/2024Al 복합재료 제조시 계면반응에 미치는 제조온도의 영향, 대한금속학회지, Vol.35, No.6(1997), pp748
13. 이재철, 변지영, 박성배, 이인호 : SiC/Al복합재료에서 Al₄C₃ 생성방지를 위한 평형 Si의 분석, 대한금속학회지, Vol.35, No.6(1997), pp767
14. J. C. Viala, P. Fortier, J. Bouix : Stable and Metastable Phase Equilibria in the Chemical Interaction between Aluminum and Silicon Carbide, J. of Materials Science, Vol.25(1990), pp1842
15. J. C. Lee, Jung-ill Lee, Ho-In Lee : Observation of Three-Dimensional Interfacial Morphologies in SiCp/Al Composites and its Characterization, J. of Materials Science Letters, Vol.15(1996), pp1539
16. A. T. Alpas, J. D. Embury : Sliding and Abrasive Wear Behaviour of an (2014)-SiC Particle Reinforced Composite, Scripta Materialia, Vol.24(1990), pp931
17. A. Wang and H. J. Rack : Transition wear behaviour of SiC-particulate-and SiC-whisker-reinforced 7091 Al metal matrix composites, Materials Science and Engineering A, Vol.147(1991), pp211
18. A. T. Alpas and J. Zhang : Wear rate transitions in cast aluminum-silicon alloys reinforced with SiC particles, Scripta Materialia, Vol.26(1992), pp505
19. B. Venkataraman and G. Sundararajan : The Sliding Wear Behaviour of Al-SiC Particulate Composites- II (The Characterization of Subsurface Deformation and Correlation with Wear Behaviour), Acta mater. Vol.44, No.2(1996), pp461