

# 플라즈마 용사에 의한 $AlSi-Al_2O_3$ 복합재료 코팅층의 미세조직 및 마찰·마모특성

민준원\* · 유승을\*\* · 김영정\*\*\* · 서동수\*

\*충남대학교 재료공학과

\*\*자동차부품연구원 환경소재연구센터

\*\*\*선문대학교 재료공학과

## Microstructure and Tribological Characteristics of $AlSi-Al_2O_3$ Composite Coating Prepared by Plasma Spray

Joon-Won Min\*, Seung-Eul Yoo\*\*, Young-Jung Kim\*\*\* and Dong-Soo Suh\*

\*Dept. of Materials Eng., Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

\*\*Environmental Materials Research Center, Korea Automotive Technology Institute, Chonan 330-912, Korea

\*\*\*Dept. of Materials Eng., Sunmoon University, Asan 336-708, Korea

### Abstract

$AlSi-Al_2O_3$  composite layer was prepared by plasma spray on steel substrate. The composite powder for plasma spray was prepared by simple mechanical blending. The wear resistance of the composite layers and matrix aluminum alloy were performed in terms of size distribution of ceramic particles. Friction coefficients of  $AlSi$  were decreased with incorporation of  $Al_2O_3$ . The tribological properties of coated layers were affected by the size of incorporated  $Al_2O_3$  particle. The reinforcement of  $Al_2O_3$  particle into aluminum alloy matrix decreased the friction coefficient as well as wear loss.

\* Corresponding author : jwmin@katech.re.kr

(Received July 26, 2004)

Key Words : Plasma spray, Aluminum alloy, Ceramic particle, Composite, Friction coefficient, Wear

### 1. 서 론

알루미늄합금과 같은 경량 연질 금속에  $Al_2O_3$ ,  $SiC$ 와 같은 경질 세라믹 입자를 분산시키면, 재료의 강성과 마모저항에서 현저한 향상을 나타낸다는 것은 잘 알려져 있다. 또한 이 복합재료는 모재금속에 비해 크립 속도와 열팽창을 감소시키며, 열전도도는 받아들일만한 수준으로 유지된다<sup>1-3)</sup>.

자동차산업에서는 금속-세라믹 복합재료의 이러한 장점을 이용하여 부품의 경량화, 내구성능 향상 등을 목적으로 실린더 보어, 피스톤, 브레이크 디스크 로터 등에 응용이 시도되고 있으며, 주로 경량 알루미늄 합금-세라

믹 입자계 복합재료가 고비중의 주철을 대체하여 사용되고 있다<sup>4-6)</sup>.

한편, 이러한 복합재료의 제조는 주조 (Casting)나 분말야금법 (Powder metallurgy) 등 벌크소재 제조기술이 활용되나 실제 기능이 요구되는 부분은 대부분 표면에 국한되므로 표면개질에 의한 복합재료화 기술의 개발이 요구되고 있다. 표면개질에 의한 복합재료의 개발은 기술적 이점으로 새로운 재료의 창조가 용이하다는 점을 들 수 있으며, 경제적으로는 비싼 벌크재료 (Bulk material)를 대체할 수 있다는 장점을 가지고 있다<sup>7)</sup>. 표면개질법 중에서도 용사기술 (Thermal spray)은 적층속도가 빠른 후막형성기술로서 자동차부품에의 응용에 주목받고 있다<sup>7,8)</sup>. 또한 자동차 부품은 실제 사용 환경에서 온도,

부하, 속도의 급격한 변화 등 가혹한 마찰/마모 환경을 겪게 된다. 따라서 복합재료 용사기술 및 마찰/마모 특성 등 성능평가에 대한 연구가 매우 필요한 상황이다<sup>1,9-13</sup>.

본 연구에서는 Al-12Si계 알루미늄 합금분말을 모재로 하여 플라즈마 용사공정에 의해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹입자가 복합화된 표면개질층을 형성시키고, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입도에 따른 복합재료 코팅층의 미세조직 및 마찰/마모 특성을 분석하고자 하였다. 또한, 플라즈마 용사공정에 사용되는 복합용 상용분말의 제조에는 용융분무 (Atomizing), 기계적 합금화 (Mechanical alloying)<sup>14-16</sup> 등이 활용되나, 본 연구에서는 공정의 단순화를 위하여 기계적 단순 혼합에 의해 준비되었으며, 복합재료 코팅층은 강구 (Steel ball)를 상대재로 하여 왕복구동 방식의 상온건식 마모 시험을 실시하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 복합코팅층의 제조

사용된 원료 중 알루미늄 합금은 Al-12Si 합금 분말 (-90+45 μm, Spheroidal, Gas atomized)을 사용하였으며, 경질 세라믹 입자로는 연삭재로 사용되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말 (Mesh 번호: #600, #400, #220, 평균입경은 각각 30, 47, 62 μm, Fig. 1 참조)을 사용하였다. 두 분말

은 무게비 60:40 (부피비 69:31)로 혼합용기에 담아 10분간 교반 혼합하였다. 복합재료 코팅층을 제조하기 위한 용사공정은 대기 플라즈마 용사 시스템을 사용하였으며 용사 건 (Gun)은 Sulzer-Metco사의 9MB type 이었다. 기판은 51 × 35 × 2 mm 크기의 일반구조용 압연강 (KS 규격명, SS 41)을 사용하였으며, 용사작업 실시 전에 이물질의 제거를 위해 알콜로 세척하고, 모재와 용사층의 접합력을 증가시키기 위해 80 mesh fused alumina 분말로 sand blasting 처리하였다. Table 1에 적용된 주요 용사공정 조건을 나타내고 있다. 복합재료 코팅층은 광학현미경 (Optical microscope), 주사전자현미경 (Scanning electronic microscope), EDS (Energy dispersive spectroscopy) 등을 이용하여 미

Table 1 Plasma spray conditions

Parameters	Unit	Applied conditions	
		AlSi-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AlSi
Arc current	A	500	500
Arc voltage	V	50	68
Gas flow (Ar)	ft <sup>3</sup> /hr	50	96
Gas flow (H <sub>2</sub> )	ft <sup>3</sup> /hr	2	20
Spray distance	cm	6	12.7
Powder feeding rate	g/min	40	76
No. of pass	pass	2	2

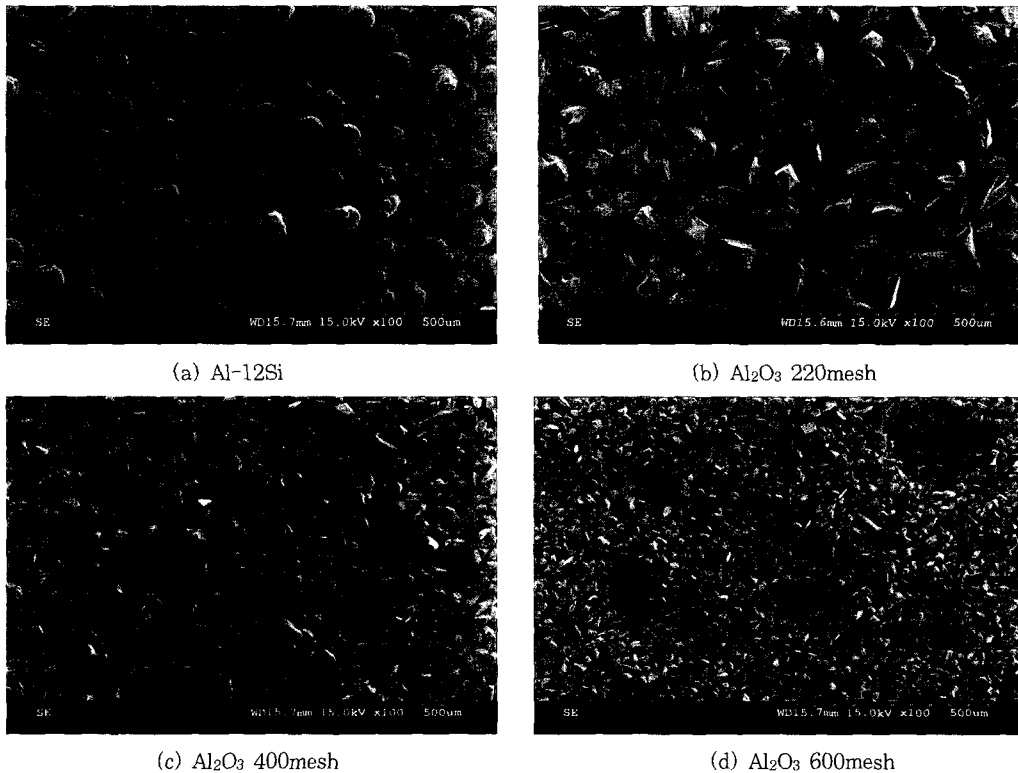


Fig. 1 SEM images of feed stock powders

제조 및 조성을 분석하였다.

### 2.2 복합코팅층의 마찰·마모시험

복합재료 코팅층의 마찰/마모특성은 왕복구동 방식의 마모시험기 (TE77AUTO, Plint & Partners)를 사용하여 분석하였다. 시험장비의 개략도를 Fig. 2에 나타내고 있다. 하부에 용사 코팅된 판상 시편을 장치하고 상부에는 상대재로 직경 9.525 mm인 강구 (SUS304 ball, Hv 227)을 설치하였다. 시험조건은 무윤활 상태에서 왕복속도 0.043 m/s (왕복거리 10.8 mm, 왕복빈도 2 Hz), 부하 20 N, 시험시간 20 분의 조건으로 실시하였으며, 시험 중에 발생하는 마모입자는 제거하지 않았다. 시험은 시험 전후에 0.1 mg의 정밀도를 가지는 저울을 사용하여 무게를 측정하고 마모감량을 분석하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 용사층의 미세조직

Fig. 3에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입도에 따른 AlSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 용사 코팅층의 단면 미세조직을 나타내었으며, 코팅층의 두께, 기공도 및 복합화율은 Table 2와 같다. 용사 코팅층은 기공도는 0.5-2.7%로 비교적 치밀한 용사조직을 나

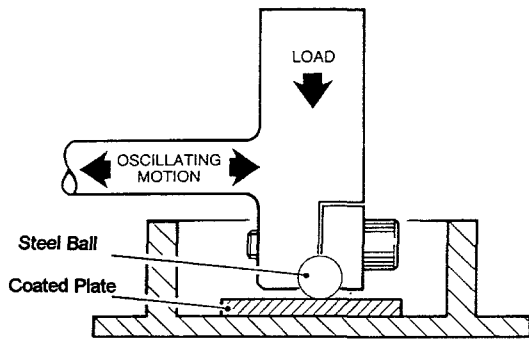


Fig. 2 Schematic diagram of wear test equipment

Table 2 Basic properties of plasma sprayed layers

Specimen	Thickness (μm)	Porosity (%)	Ceramic content (Area %)
AlSi only	1240	2.7	-
AlSi + 220 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	545	1.2	14.2
AlSi + 400 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	513	0.5	10.6
AlSi + 600 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	665	0.9	23.1

타내고 있으며, 220 및 400 mesh Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 혼합하여 형성된 용사층 내의 세라믹 입자는 대부분 용융되지 않고 원료입자의 형상이 유지된 채로 코팅층 내에 분산되어 있는 것을 알 수 있었다. 그러나, 가장 미세한 입자인 600 mesh Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 혼합한 경우에는, 반복용사된 경계층에서, 220 mesh나 400 mesh Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합 코팅층에서는 그다지 보이지 않던 조직 (Fig. 3 (c) 표시부분 참조)을 나타내었다. EDS분석 결과에 의하면 주성분이 알루미늄과 산소로 확인되었으며, 이는 상대적으로 미세한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 용사 중 완전용융 및 응고되어 형성된 조직으로 판단된다. 한편, 세라믹 입자의 함유량은 투입원료에 비해 상대적으로 적은 양이 관찰되고 있다. 원료 혼합분말에는 AlSi:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 투입비가 무게비로 60:40 (부피비로 69:31)이었으나, 용사조직에서 영상분석기(Image Analysing)에 의한 면적비 분석결과는 10-23% 수준을 나타내고 있었다. 용사 코팅층 내의 세라믹 입자 함유 부족은 용사피막 형성시 AlSi 합금 용융체와의 젖음성 불량, 세라믹 입자의 미용융에 의한 모재표면의 부착능 부족 등이 원인으로 사료된다. 따라서 용사 중에 세라믹 입자가 작고 비교적 용융이 잘되었던 600 mesh Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 용사층은 비교적 높은 복합화율을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 용사 코팅층 내에 세라믹 입자의 복합화율을 상승시키려는 실험은 별도로 진행 중에 있다.

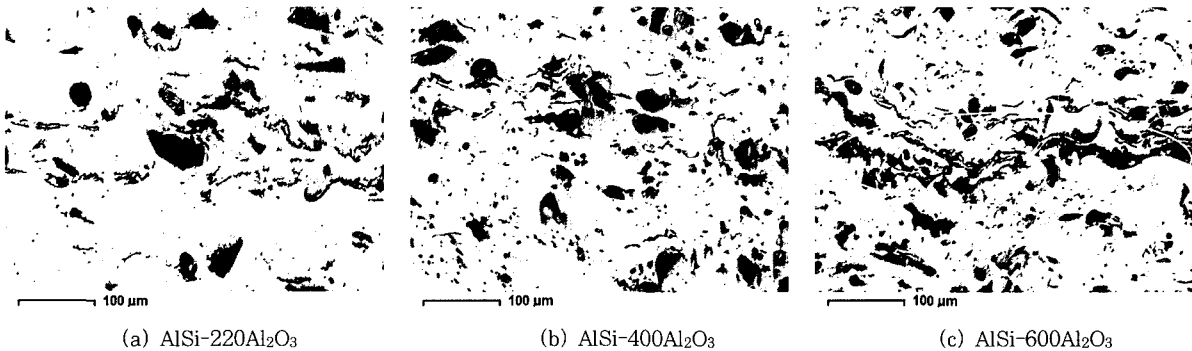


Fig. 3 Optical micrographs of cross section of plasma sprayed layer

### 3.2 마찰/마모특성

플라즈마 용사공정에 의해 준비된 AlSi 코팅층과 AlSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 코팅층에서, 첨가된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 입도에 따른 마모감량의 변화를 Fig. 4에 나타내고 있다. 일정 조건의 마모시험 실시 전후에 측정된 코팅층의 마모감량 (마모감량=시험 전 시편무게 - 시험 후 시편무게)은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 입자 첨가에 의해 약 1/3 이하로 감소되는 결과를 나타내고 있으며 특히, 220 mesh Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자를 첨가한 경우 가장 적은 마모량을 나타내고 있다. 한편, 상대재인 강구 (Steel ball)의 마모감량은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자의 크기가 커지면서 (즉, mesh 번호가 작아지면서), 증가하는 경향을 보이고 있으며, 세라믹 입자를 첨가하지 않은 AlSi 코팅층의 경우에는 마모시험 후 오히려 강구의 무게가 증가하는 양상을 나타내고 있다.

Fig. 5는 각 용사 코팅층의 시험시간동안 평균 마찰계수의 차이를 보여주고 있다. 마찰계수 또한 코팅층의 마모감량과 마찬가지로 세라믹 입자 첨가에 의해 감소되었

으며, 특히, 세라믹 입자의 입도가 가장 큰 220 mesh 첨가의 경우 평균 마찰계수의 감소량이 더욱 커짐을 알 수 있었다. 세라믹 입자 첨가에 의한 평균 마찰계수의 변화는 코팅층의 마모감량의 변화와 매우 유사한 양상을 보여주고 있다. 특히 세라믹 입자의 평균입경이 제일 큰 220 mesh 입자가 첨가된 경우 코팅층의 마모감량 및 마찰계수가 더욱 향상되는 결과를 나타내었다.

입자강화 알루미늄기 복합재료의 마찰계수에 대한 연구는 주로 주조법 등에 의해 제조된 벌크 복합재료에 대해 행해져 왔으며, 그 결과들을 Table 3에 나타내었다. 상온에서의 마찰계수를 살펴보면, Sato 등이<sup>14)</sup> 복합재료에서 모재보다 마찰계수가 증가함을 관찰한 바도 있으나, 다른 연구자들은<sup>2,15)</sup> 복합재료에서 마찰계수가 모재에 대비하여 동등<sup>5)</sup> 또는 20-30% 감소하는<sup>6)</sup> 양상을 관찰하고 있다. 본 실험에서 준비된 플라즈마 용사에 의한 복합재료 코팅층에서는 모재인 알루미늄합금의 평균 마찰계수가 약 0.95인 것에 대비하여 0.76-0.83 수준으로 감소된 마찰계수를 나타내고 있다. 이러한 마찰계수의 차이

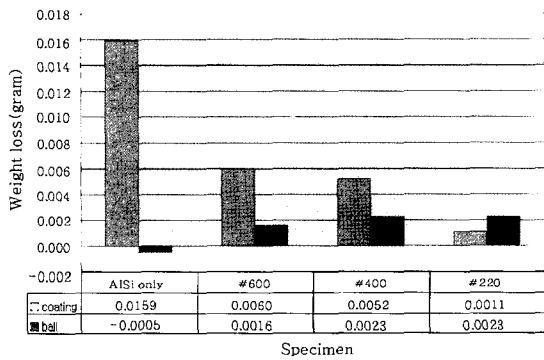


Fig. 4 Weight loss of coating layer and ball after wear test

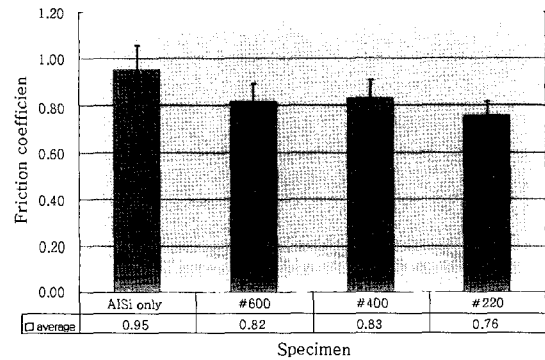


Fig. 5 Average friction coefficients of coating layers

Table 3 Friction coefficients of various aluminum metal matrix composites

Matrix	Reinforcing Mat'l				FC <sup>1)</sup>		Comment	ref.
	Mat'l	Process	Contents	Size(μm)	Matrix	Comp. <sup>2)</sup>		
Al-4Cu-0.75Mg	SiC	Casting	10-15 wt%	5-46	0.36-0.42	0.43-0.56	greater FC than matrix at RT <sup>3)</sup>	17
Al-4Cu-0.75Mg	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Casting	15 wt%	3	0.36-0.45	0.39-0.51	greater FC than matrix at RT	17
Al-1.5Mg	SiC	Casting	12.5-15 wt%	50-100	0.63	0.24-0.47	lower FC than matrix at RT	18
Al	SiC	PM	10-20 vol%	3.5-7	0.53-0.66	0.36-0.49	lower FC than matrix at RT	2
Al-1Mg-0.6Si (6061)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Casting Duralcan process	20 vol%	15	0.3-0.6 (RT-220°C)	0.4-0.5 (RT-250°C)	6061: abrupt increase at 300°C Comp.: abrupt increase at 300°C	10
Al-2.3Cu-1.6Mg-1.1Fe-1.0Ni (2618)	SiC	Spray forming	15 vol%	7.5 (3-22)	0.8-0.9 (RT-100°C)	0.55-0.90 (RT-150°C)	2618: greater than 1 over 150°C Comp.: abrupt increase at 200°C	11

1) FC : Friction coefficient  
2) Comp. : Composite  
3) RT : Room temperature

를 마모면의 미세조직 및 마모입자의 형상과 성분, 그리고 그에 따른 마모기구의 변화에 대해 검토해 보았다.

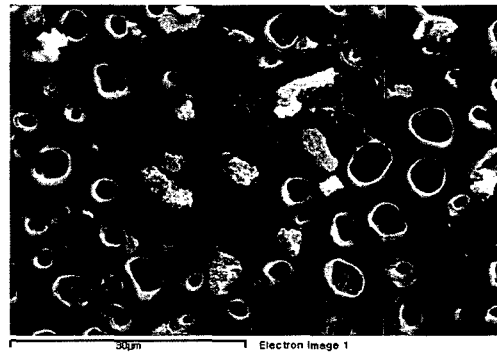
건조미끄럼 마모에서 나타나는 마모기구는 응착마모 (Adhesive wear), 연삭마모 (Abrasive wear), 피로마모 (Fatigue wear), 부식마모 (Erosive wear)로 통상 분류할 수 있다<sup>7,8)</sup>. 이 중 피로마모는 주로 구름마찰 시에 관찰되는 것이고, 부식마모는 특수한 분위기하에서 한정되고 있는 것으로 통상의 건조미끄럼 마모기구는 응착마모와 연삭마모가 주요한 것이다. 응착마모는 2개의 마찰표면에 미소 요철부끼리의 응착부분이 마찰에 의해 전단되어 발생하며, 연삭마모는 미끄럼하는 2개의 고체 표면 간에서, 딱딱한 쪽의 고체표면이 상대의 부드러운 표면을 깎아 내어 일어난다. 또 2개의 고체 표면 간에 딱딱한 이물입자가 개재되면, 이 입자가 연마제의 작용을 하여 일어난는 경우도 있다.

Fig. 6은 마모시험 후 AlSi 코팅층 및 AlSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 코팅층에서 마모트랙 (Wear track) 표면의 전형적인 외관을 나타내고 있다. 세라믹 입자가 복합화되지 않은 AlSi 코팅층의 경우에는 200-400 μm 크기의 표면층이 떨어져 나간 조직을 보여주고 있으나 (Fig. 6 (a) 표시부분 참조), AlSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 코팅층의 경우에는 상대적으로 좁고 일정한 간격의 마모트랙이 나타나고 있다. Fig. 7은 마모시험 후 생성된 마모입자를 나타내고 있다. 세라믹 입자가 복합되지 않은 AlSi 합금 코팅층

에서 형성된 마모입자는 AlSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 코팅층에서 형성된 마모입자에 비해 큰 크기를 가지고 있었다. 한

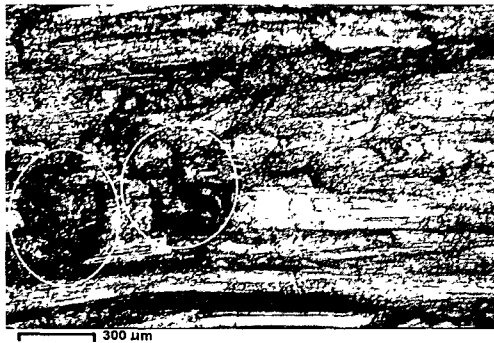


(a) wear debris of AlSi coating

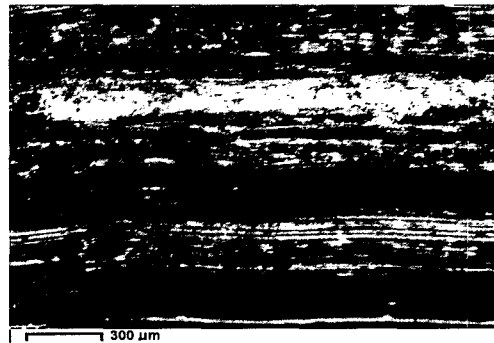


(b) wear debris of AlSi-#600Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating

Fig. 7 Morphologies of wear debris



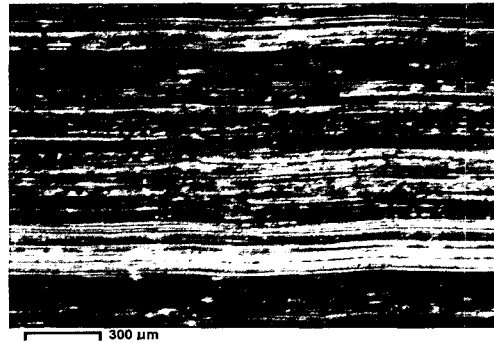
(a) AlSi coating



(b) AlSi-600Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating



(c) AlSi-400Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating



(d) AlSi-220Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating

Fig. 6 Morphologies of worn surfaces

편, AlSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 코팅층의 마찰에서는 마모입자가 상대적으로 미세한 분말로 구성되어 있었으며, 전자현미경 분석결과 10 μm 이하의 입자가 다수 포함되어 있는 것을 알 수 있었다(Fig. 7 (b) 참조). 이 입자들을 EDS 분석한 결과 AlSi와 AlSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 코팅층의 마모입자는 대부분 AlSi 합금입자인 것으로 확인되었다.

마모 전후의 무게변화에서 AlSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 코팅층의 상대재인 강구는 마모에 의한 무게 감소를 나타내고 있으나, AlSi 코팅층의 상대재에는 오히려 시험 후 강구의 무게증가를 보여주고 있으며, 광학현미경 관찰 결과 코팅층 물질의 강구로의 이착 (Material transfer)을 확인할 수 있었다. 따라서, AlSi 알루미늄합금 코팅층과 강구의 마찰시에는 응착 (Adhesion) 및 전단파괴 (Shear fracture)에 의한 응착마모의 양상을 보이고 있다고 판단된다.

한편 복합재료 코팅층의 마모면은 알루미늄 합금의 마모면에 비하여 균일하고 연속되며 미세한 마모흔을 보이며, 경질의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자 개재에 의한 연삭마모의 경향을 나타내고 있다고 판단된다. 복합재료 코팅층의 경우에는, 경질 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 첨가에 따라 경도가 높아지고 모재의 소성변형양이 제한되며<sup>2)</sup>, 또한, Alpas 등에<sup>16)</sup> 의하면, 상대재인 강의 표면에서 떨어져 나온 철의 산화에 의해 생성된 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 고체윤활제의 역할을 한다고 알려져 있다. 따라서, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가에 의한 경도의 상승 및 소성변형의 억제, 또한 강구에서 마모되어 마모입자 중에 포함된 Fe의 존재가 내마모성의 증대와 마찰계수의 상승억제에 기여한 것으로 추정된다. 특히 첨가된 세라믹입자의 크기가 가장 큰 220 mesh 복합재료 코팅층의 경우 마찰계수의 감소가 크고 마모량이 최소화되는 상승효과를 나타내고 있음을 관찰할 수 있었다.

#### 4. 결 론

AlSi 합금분말과 입도분포가 다른 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 혼합분말을 사용하여 대기 플라즈마 용사법에 의해 AlSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료 용사 코팅층을 제조하였다. 복합재료 및 모재 알루미늄합금 코팅층에 대해 상대재로 강구를 사용하여 상온에서 건식으로 왕복구동 마찰시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 복합화시키는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 큰 경우에는 원료상태의 입자형상이 유지되며 복합 코팅층이 형성되었고, 상대적으로 미세한 입도분포를 가지는 600 mesh Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 경우에는 일부 세라믹 입자의 완전용융이 관찰되었다.

2) 알루미늄 합금 코팅층의 마찰계수는 0.95였으며, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 입자가 혼합된 복합재료 코팅층의 마찰계

수는 0.76-0.83으로, 세라믹입자 복합화에 의해 마찰계수가 감소하였다. 마찰계수의 감소는 마모흔 및 마모입자 분석 결과 마모기구의 차이에 기인한다고 사료된다.

3) 알루미늄 합금 코팅층의 경우에는 응착마모의 발생과 함께 마찰계수가 크고 상대재로의 물질전이가 관찰되었으며, 복합재료 코팅층의 경우에는 경질 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자 개재에 의한 연삭마모 현상 및 상대재의 마모를 관찰할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. J. Rodriguez, A. Martin, J. Llorca : Modeling the Effect of Temperature on the Wear Resistance of Metal Reinforced with Ceramic Particles, *Acta Mater.*, **48** (2000), 993-1003
2. M. Roy, B. Venkataraman, V. Bhanuprasad, Y. R. Mahajan, G. Sundararajan : The Effect of Particulate Reinforcement on the Sliding Wear Behavior of Aluminum Matrix Composite, *Metall. Trans.*, **23A** (1992), 2833-47
3. Y. Nishida : Introduction to Metal Matrix Composites, Coronasha, Tokyo, 2001 (in Japanese)
4. M. V. Kevorkjian : MMCs for Automotive Applications, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **77-12**, (1998), 53-9
5. J. E. Allison and, G. S. Cole : Metal-Matrix Composite in the Automotive Industry: Opportunities and Challenges, *JOM*, **Jan.** (1993), 19-24
6. C. G. E. Mangin, J. A. Issacs, J. P. Clark : MMCs for Automotive Engine Applications, *JOM*, **Feb.** (1996), 49-51
7. R. B. Heimann : Plasma-Spray Coating, VCH Publishers, New York, 1996
8. 松田福久, アルミニウム合金の表面厚膜硬化技術, 日刊工業新聞社, 1995 (in Japanese)
9. M. A. Martinez, A. Martin, J. Llorca : Wear of Al-Si Alloys and Al-Si/SiC Composites at Ambient and Elevated Temperatures, *Scripta Met.*, **28** (1993), 207-12
10. J. Singh, A. T. Alpas : High-Temperature Wear and Deformation Processes in Metal Matrix Composite, *Met. Mat. Trans.*, **27A** (1996), 3135-48
11. A. Martin, M. A. Martinez, J. Llorca : Wear of SiC-reinforced Al-matrix composites in the temperature range 20-200°C, *Wear*, **193** (1996), 169-79
12. J. W. Min, S. E. Yoo : A Study on the Preparation and Wear Characteristics of TiC Hardfaced Layers on Aluminium Alloy by PTA Method, *Tran. Kor. Soc. Auto. Eng.*, **7-9** (1999), 138-45 (in Korean)
13. J. W. Min, S. E. Yoo, D. S. Suhr : High Temperature Friction Characteristic of Al-SiC<sub>p</sub> Composite Coating Prepared by Plasma Thermal Spray, *J. of the KSTLE*, **19-5**, (2003), 274-9 (in Korean)
14. P. S. Gilman, J. S. Benjamin : Mechanical Alloying", *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **13** (1983), 279-300
15. J. S. Benjamin, M. J. Bomford : Dispersion Strengthened

- Al Made by Mechanical Alloying, Metal. Trans., **8A** (1977) 1301-5
16. J. W. Min, S. E. Yoo, Y. J. Kim, J. S. Kim, D. S. Suhr : Preparation of Al-SiC<sub>p</sub> Composite Coating by Plasma Thermal Spray, J. of the Kor. Ceram. Soc., **40-5** (2003), 460-7 (in Korean)
17. A. Sato, R. Mehrabian : Aluminum Matrix Composites: Fabrication and Properties, Metal. Trans., **7B** (1976), 443-51
18. F. Rana, D. M. Stefanescu : Friction Properties of Al-1.5 Pct Mg/SiC Particulate Metal-Matrix Composites, Met. Trans., **20A** (1989), 1564-6
19. A. T. Alpas, J. Zhang, : Wear rate transition in cast Al-Si alloys reinforced with SiC<sub>p</sub>, Scripta Met., **26** (1992), 505-9