

플라즈마 용사에 의한 Al-SiC_p 복합재료 코팅층의 제조

민준원[†] · 유승을* · 김영정** · 김정석 · 서동수

충남대학교 재료공학과

*자동차부품연구원 기능소재실

**선문대학교 재료공학과

(2003년 2월 24일 접수; 2003년 4월 4일 승인)

Preparation of Al-SiC_p Composite Coating by Plasma Thermal Spray

Joon Won Min,[†] Seung Eul Yoo,* Young Jung Kim,** Jeong Suk Kim, and Dong Soo Suhr

Department of Mat'ls Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

*Functional Mat'ls Lab., Korea Automotive Technology Institute, Chonan 330-912, Korea

**Department of Mat'ls Engineering, Sunmoon University, Asan 337-840, Korea

(Received February 24, 2003; Accepted April 4, 2003)

초 록

기계적 합금화법에 의해 준비된 복합분말을 이용하여 용사공정에 의해 알루미늄 모재에 Al-SiC_p 복합재료 코팅층을 형성하였다. 24 h milling 후 복합화된 분말을 제조할 수 있었으며, 이 분말을 용사하여 복합재료 코팅층을 형성할 수 있었다. 코팅층의 두께 및 기공율과 공정변수와 관계를 분석하였으며, 경도의 증가를 확인하였다. 또한 TEM 분석에 의해 Al-Si-C-O 화합물의 존재를 확인하였다.

ABSTRACT

Al-SiC_p composite layer was prepared by plasma thermal spray on aluminum substrate using composite powder prepared by mechanical alloying. Mechanically alloyed powder was achieved after 24 h milling, which was used for thermal spray coating. The correlations between process conditions and thickness/porosity were analyzed, and increase of hardness was confirmed. The presence of Al-Si-C-O compound was detected by TEM analysis.

Key words : Composite, Thermal spray, Ceramic particle

1. 서 론

알루미늄과 같은 경량 연질 금속에 Al₂O₃, SiC와 같은 경질 세라믹 입자를 분산시키면, 재료의 강성과 마모저항에서 현저한 향상을 나타낸다는 것은 잘 알려져 있다. 또한 이 복합재료는 모재금속에 비해 크립속도와 열팽창을 감소시키며, 열전도도는 받아들일만한 수준으로 유지된다.¹⁻³⁾

자동차산업에서는 금속-세라믹 복합재료의 이러한 장점을 이용하여 부품의 경량화, 내마모성 향상 등을 목적으로 실린더 라이너, 피스톤, 브레이크 로터 등에 응용이 시도되고 있으며, 주로 경량 알루미늄합금-세라믹 입자계 복합재료가 고비중의 주철을 대체하여 사용되고 있다.⁴⁻⁶⁾

입자강화 복합재료 (PRC, Particle Reinforced Composite)의 제조법으로는 분말야금법(powder metallurgy), 용탕교

반법(vortex addition technique), 기계적 합금화(mechanical alloying) 등과 같이 소재 전체를 복합화시키는 방법과 용사(thermal spray), PTA(Plasma Transferred Arc surface treatment) 등과 같이 모재의 표면만을 복합재료화 하는 방법으로 분류할 수 있다.⁶⁻⁹⁾

내마모성 등을 요구하는 기계적 부품의 적용은 표면특성에 의지하는 경우가 많으며, 고가의 bulk 복합소재를 대체하고, 후가공 작업 등 공정비용의 절감을 위해 표면개질에 의해 원하는 소재의 특성을 발현시키고자하는 시도가 많다. 복합재료화에 의한 표면개질의 수단은 앞서 언급한 용사나 PTA법 등이 있는데, 이러한 공정을 활용하기 위해서는 유동성이 좋을 뿐만 아니라 균일하게 혼합된 분말을 확보하여야 한다. 일반적인 용사에 사용하기 위한 복합분말의 제조법은 용융 또는 소결 후 분쇄, 분무 건조, gas atomization 등이 있으나, 고가의 설비를 요구하는 단점이 있다. 기계적 합금화법을 활용한 예는 Ghosh 등¹⁰⁾이 high energy ball mill을 이용한 기계적 복합화로 Al-SiC_p계 복합분말 및 용사코팅층을 제조하였으나, high

[†]Corresponding author : Joon Won Min

E-mail : jwmin@katech.re.kr

Tel : +82-41-559-3157 Fax : +82-41-559-3158

energy ball mill은 양산성에 어려움이 있고, 양 등¹¹⁾은 개조된 일반 볼밀을 이용하여 AlSiMg/TiC계 복합분말 및 용사코팅층을 제조하여 그 특성을 조사하였으나 공정변수의 영향에 대해서는 언급하지 않았다. 본 연구에서는 개조된 일반 볼밀에 의한 기계적 합금화법에 의해 알루미늄 matrix에 SiC_p(Silicon Carbide Particle)이 분산된 Al-SiC_p 복합 용사분말을 제조하고, 플라즈마 용사 공정을 이용하여 알루미늄 기판 위에 Al-SiC_p 복합재료 코팅층을 형성시켰으며, 공정변수에 따른 복합재료 코팅층의 특성을 조사하였다.

2. 실험방법

복합 용사분말 제조에 사용된 원료분말 중 알루미늄은 일본 고순도화학 제품으로 99.9% 순도와 177-420 μm(-40+80 mesh)사이의 입도를 가지는 분말을 사용하였으며, 경질 세라믹 입자로는 연삭제로 사용되는 600 mesh(평균입경 약 29 μm) SiC 분말을 사용하였다. 플라즈마 용사공정을 적용하여 복합재료 코팅층을 제조하기 위해서는 50-150 μm 정도의 입도 분포를 가지는 유동성이 양호한 분말을 제조하여야 하며, 또한 강화제가 균일하게 분포된 복합층을 형성시키기 위해서는 원료분말부터 잘 혼합된 복합재료이어야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 목적을 위해 ball milling을 이용한 기계적 합금화법을 이용하였다.^{11,12)} Table 1에 분말제조 조건을 나타내고 있으며, 사용된 ball은 직경 9.525 mm인 SUS304 ball을 사용하였고, 분말들의 과도한 압접을 막아주기 위해 공정제어제(process control agent)로 메탄올을 4 wt% 첨가하였다. 또한, 금속 분말의 산화를 억제하기 위해 milling 용기에 밸브를 설치하여 분말 장입 후 rotary pump로 저압 분위기를 형성한 후 milling을 실시하였다. ball milling을 실시한 분말은 자동체질기에 의해 30 min 이상 체질하여 -100+325 mesh (45~150 μm)로 분급하여 용사분말을 제조하였다. 준비된 용사분말은 XRD(X-Ray Diffractometer, Rigaku Rint-1400)에 의해 스캔 속도 4 deg/min, 100 mA, 40 kV의 조건으로 결정상을 분석하고 마운팅 및 경면연마 후 광학현미경(optical microscope, Olympus, BH)에 의해 미세구조를 분석하였다.

복합재료 코팅층을 제조하기 위한 용사공정은 Sulzer-

Table 1. Powder Preparation Condition

| Parameter | Unit | Condition |
|-------------------|--------------|-------------|
| Composition | Al | wt% 60 |
| | SiC | wt% 40 |
| Process condition | Batch weight | g 443 |
| | Ball weight | g 4,431 |
| | Milling time | h 6, 18, 24 |

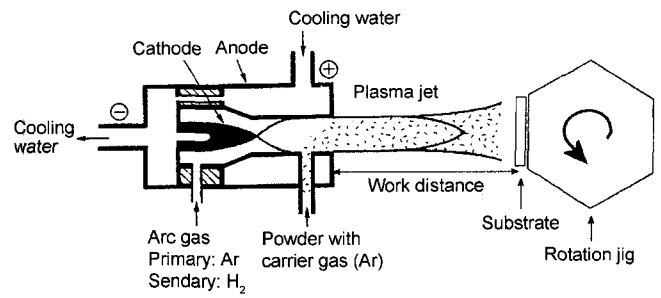


Fig. 1. Schematic diagram of plasma thermal spray system.

Table 2. Plasma Thermal Spray Condition

| Parameter | Level | | |
|--|-------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 |
| A Primary arc gas (Ar) flow rate (m ³ /h) | 2.78 | 4.17 | - |
| B Specimen rotation (rpm) | 100 | 150 | 200 |
| C Powder feed (arbitrary scale) | 50 | 60 | 70 |
| D Work distance (cm) | 8 | 10 | 12 |
| F No. of pass (pass) | 20 | 30 | 40 |
| G Arc voltage ¹⁾ (volt) | 65 | 70 | 75 |
| H Powder carrier gas flow rate (m ³ /h) | 0.83 | 0.97 | 1.11 |

* common condition

- Arc current : 500 A
- Spray angle : vertical
- Gun traverse speed : 4 cm/s

note: 1) Arc voltage was controlled by secondary arc gas(H₂) flow rate

Metco사의 플라즈마 용사 시스템을 사용하였으며 용사 건(gun)은 3MB-II이었다. 모재시편은 72×36×3 mm 크기의 알루미늄 판재를 사용하였으며, 용사작업 실시 전에 이물질의 제거를 위해 알콜로 세척하고, 모재와 용사층의 접합력을 증가시키기 위해 80 mesh fused alumina 분말로 sand blasting 처리하였다. 플라즈마 용사 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 용사공정에서는 많은 변수에 의해 코팅층의 형성이 영향을 받는다. 주요 공정변수(control parameter)로는 모재의 전처리방법(청정, 블라스팅, 중간코팅), 아크 가스의 종류 및 공급량, 아크 파워(전류/전압), 용사분말의 종류/입도분포, 건(gun)과 모재의 거리, 용사 각도, 건/모재의 이송속도, 모재의 온도, 냉각 등 용사공정조건이 있다.^{6,13)} 본 연구에서는 Table 2와 같이 공정변수와 수준을 정하고 L₁₈(2¹×3⁷)직교배열법¹⁴⁾에 의해 용사코팅을 실시하였다.

용사코팅층은 단면을 diamond slurry 1 μm까지 연마한 후에 광학현미경 및 image analyzer (Media Cybernetics, image pro plus)를 사용하여 미세조직, 두께, 기공율을 분석하였으며, load 200 g, 시간 15초, 5번 측정의 평균치로 마이크로 비커스 경도(Mitsutoyo, MVK-HVL)를 분석하였다. 또한 XRD 분석에 의해 용사공정에 의한 결정상의 변

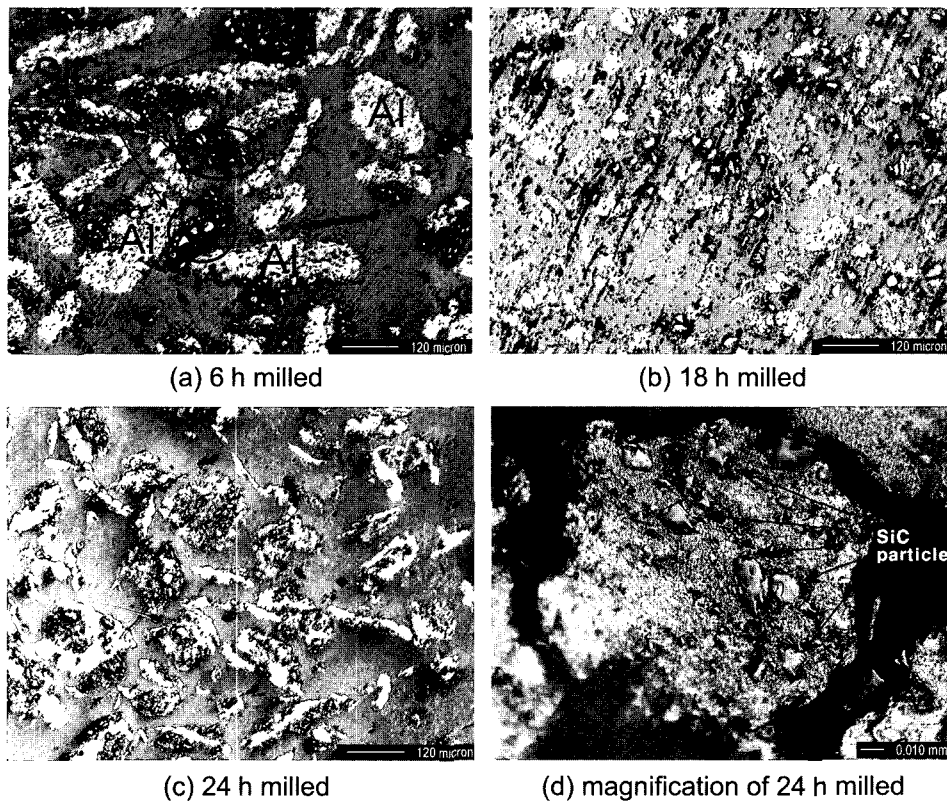


Fig. 2. Optical microscopy of Al-SiC_p composite powder.

화를 확인하였으며, TEM (Transmission Electron Microscope, Philips, CM-20)과 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)에 의해 계면반응 생성물을 조사하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 복합분말의 특성

알루미늄과 SiC 분말의 기계적 합금화를 위한 ball milling은 각각 6, 18, 24 h 동안 실시하였으며, 현미경 분석결과를 Fig. 2에 나타내었다. 6 h milling 후의 분말을 살펴보면 사진에 표시한 바와 같이 알루미늄과 SiC는 일부 분쇄만 되었을 뿐 거의 대부분 분리되어 있는 모습을 나타내고 있다. 18 h milling에서도 복합화가 부족하고 단순한 혼합상태를 나타내는 부분이 많았다. 그러나 24 h milling에서는 복합화 진행된 상태를 나타내었다. Fig. 2 (d)에 24 h 동안 ball milling에 의해 제조된 용사용 복합분말의 확대된 단면미세구조를 나타내고 있는데, 알루미늄 매트릭스 안에 SiC 입자가 복합되어 있는 모습을 보여주고 있으며, SiC 입자는 투입시 평균입경이 20 μm 이상의 입자였으나, 복합화과정에서 약 10 μm 전후의 크기로 분쇄된 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 최소한의 시간에 복합화가 가능한 24 h 동안 milling을 실시하여 용사용 복합분말을 제조하였다.

기계적 합금화법^{7,12)}은 두 가지 이상의 소재가 분쇄, 압접의 과정을 반복하며 일어나는 현상이며, 금속재료의 경우에는 원자수준의 합금화가 일어날 수 있다. 본 연구에서는 연질 금속인 알루미늄과 경질 세라믹 소재인 탄화규소의 혼합으로 알루미늄이 탄화규소입자와 함께 분쇄, 압접을 반복하며 미세한 탄화규소 입자를 포함하는 복합재료 분말을 제조할 수 있었다.

한편, 24 h milling 후 분말의 결정상 분석의 결과를 Fig. 3

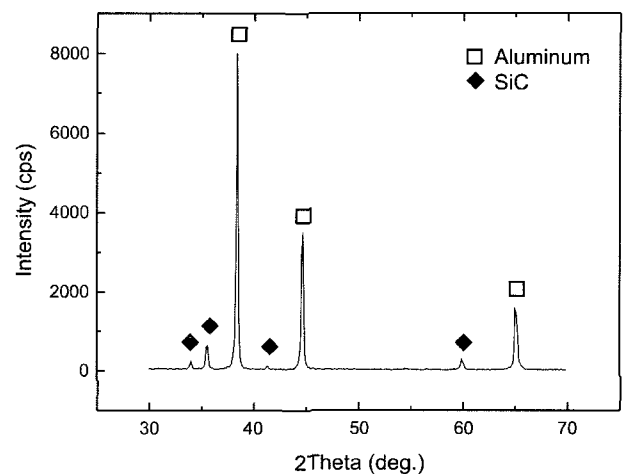


Fig. 3. XRD pattern of Al-SiC_p composite powder.

에 나타내고 있다. 출발원료인 알루미늄과 SiC의 결정상이 검출되었으며, 심한 산화나 다른 반응에 의한 제3의 상의 형성은 확인되지 않았다.

3.2. 코팅층 특성

Fig. 4는 용사 코팅층 단면의 미세조직을 나타내고 있다. 알루미늄 매트릭스에 SiC 입자가 분포된 모습을 관찰할 수 있으며, 일부 기공들이 관찰되고 있다. 각 코팅층의 공정조건과 두께, 기공율, 비커스경도의 결과치를 Table 3에 나타내었다.

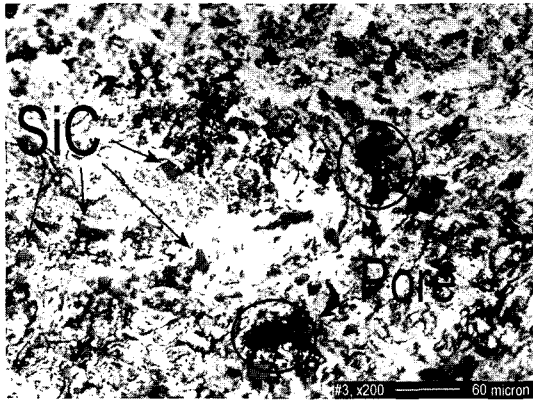


Fig. 4. Optical microscopy of thermal sprayed Al-SiC_p composite coating layer.

용사 코팅층 두께는 공정조건에 따라 57-800 μm 정도의 범위를 나타냈다. 공정조건에 의한 두께값을 분산분석한 결과를 Table 4에 그리고 각 수준에 따른 두께의 모평균(동일수준에서 실시한 실험결과들의 평균)값을 Fig. 5에 나타내었다. 코팅층 두께는 모재를 고정된 지그의 회전속도, 분말공급장치의 feed 설정치, 용사건 반복이동 횟수, 아크전압의 증가에 따라 증가하였으며, 1차 아크 가스인

Table 4. Analysis of Variance(ANOVA) Table of Thickness Results

| | φ | S | V | F ₀ |
|---------------------------------|---|---------|---------|----------------|
| A. Primary arc gas flow rate | 1 | 25,006 | 25,006 | 5.14 |
| B. Specimen rotation | 2 | 16,922 | 8,461 | 1.74 |
| C. Powder feed | 2 | 225,510 | 112,755 | 23.19** |
| D. Work distance | 2 | 10,391 | 5,196 | 1.07 |
| F. No. of pass | 2 | 117,772 | 58,886 | 12.11* |
| G. Arc voltage | 2 | 7,063 | 3,532 | 0.73 |
| H. Powder carrier gas flow rate | 2 | 230,888 | 115,444 | 23.74** |
| Error | 4 | 10,523 | 5,251 | |

φ : Degree of freedom * : significant in significant level = 0.05
 S : Sum of square ** : significant in significant level = 0.01
 V : Variance (=S/φ)

Table 3. Plasma Thermal Spray Condition and Results

| No. of experiment | Process condition | | | | | | | Results | | |
|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|------------------------|----------------|--------------|---------------|
| | Primary arc gas flow rate | Specimen rotation | Powder feed | Work distance | No. of pass | Arc voltage | Carrirer gas flow rate | Thickness (μm) | Porosity (%) | Hardness (Hv) |
| 1 | 2.78 | 100 | 50 | 8 | 20 | 65 | 30 | 112 | 13.6 | 58 |
| 2 | 2.78 | 100 | 60 | 10 | 30 | 70 | 35 | 368 | 4.1 | 109 |
| 3 | 2.78 | 100 | 70 | 12 | 40 | 75 | 40 | 303 | 1.0 | 93 |
| 4 | 2.78 | 150 | 50 | 8 | 30 | 70 | 40 | 72 | 7.9 | 52 |
| 5 | 2.78 | 150 | 60 | 10 | 40 | 75 | 30 | 599 | 7.8 | 101 |
| 6 | 2.78 | 150 | 70 | 12 | 20 | 65 | 35 | 329 | 18.1 | 87 |
| 7 | 2.78 | 200 | 50 | 10 | 20 | 75 | 35 | 158 | 2.8 | 104 |
| 8 | 2.78 | 200 | 60 | 12 | 30 | 65 | 40 | 197 | 5.9 | 55 |
| 9 | 2.78 | 200 | 70 | 8 | 40 | 70 | 30 | 800 | 5.8 | 68 |
| 10 | 4.17 | 100 | 50 | 12 | 40 | 70 | 35 | 158 | 13.2 | 80 |
| 11 | 4.17 | 100 | 60 | 8 | 20 | 75 | 40 | 99 | 6.6 | 51 |
| 12 | 4.17 | 100 | 70 | 10 | 30 | 65 | 30 | 491 | 10.2 | 61 |
| 13 | 4.17 | 150 | 50 | 10 | 40 | 65 | 40 | 57 | 7.5 | 31 |
| 14 | 4.17 | 150 | 60 | 12 | 20 | 70 | 30 | 261 | 12.5 | 86 |
| 15 | 4.17 | 150 | 70 | 8 | 30 | 75 | 35 | 382 | 7.9 | 37 |
| 16 | 4.17 | 200 | 50 | 12 | 30 | 75 | 30 | 284 | 13.0 | 93 |
| 17 | 4.17 | 200 | 60 | 8 | 40 | 65 | 35 | 382 | 9.6 | 56 |
| 18 | 4.17 | 200 | 70 | 10 | 20 | 70 | 40 | 155 | 8.2 | 47 |
| Average | | | | | | | | 289 | 8.7 | 71 |

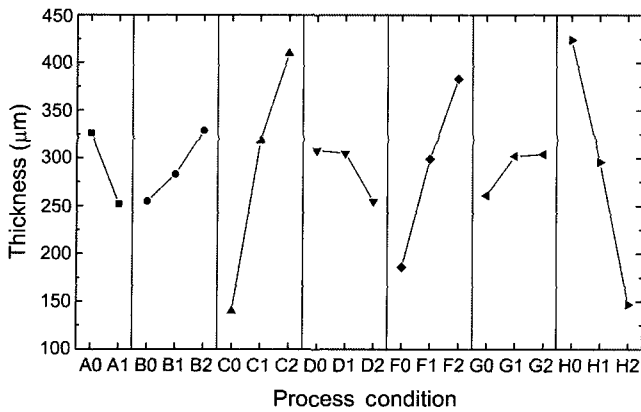


Fig. 5. Thickness variation.

Ar의 유량, 건과 모재 사이의 거리, 용사분말 공급용 carrier gas 유량의 증가에 따라 감소하였다. 이들 공정변수 중 시험조건 내에서 두께 결과값에 대해 유의성이 큰 공정변수는 feed 설정치, 용사건 반복이동 횟수, carrier gas 유량이었다. Feed 설정치 및 반복이동 횟수 증가는 시편표면으로의 용사분말의 공급량을 늘려주어 두께 증가에 기여한 것으로 판단된다. 한편, Mash 등¹⁵⁾에 의하면 deposition efficiency에 대한 carrier gas flow 영향은 최적점(Optimum point)을 가지며 너무 과소하거나 과다한 경우에는 효율이 떨어진다고 보고한 바 있는데, 본 실험에서는 carrier gas flow의 과다로 flow rate 증가에 의해 용사분말의 집중적인 공급을 방해하여 두께가 감소한 것으로 사료된다.

기공율 분산분석결과와 공정변수에 따른 모평균값을 Table 5와 Fig. 6에 나타내었다. 기공율은 시편에 따라 1.0~18.1%의 범위를 나타냈는데, 1차 아크 가스 유량의 증가에 따라 증가하였으며, 용사건 반복이동 횟수, 아크 전압, carrier gas 유량 증가에 따라 감소하였다. 특히 아크 전압과 carrier gas 유량의 증가에 따라 크게 감소하는 경향을 나타내었다.

아크 가스 중 1차 가스인 Ar은 주로 용사 분말의 kinetic energy에 기여하며, 2차 가스인 H₂는 용사 분말의 thermal energy에 기여한다고 알려져 있다.¹⁶⁾ 1차 아크 가스 유량이 증가하면 분말의 속도가 빨라지며, 그에 따라 플라즈마 제트 중에 체류되는 시간이 감소되어 분말의 용융이 불충분해 질 수 있고, 모재에 충돌할 때 상대적으로 큰 기공을 형성시킬 수 있다. 따라서 기공율의 감소를 위해서는 용사 분말의 비행 중 충분한 용융이 일어날 수 있는 조건이 필요하다.

용사건의 반복이동 횟수가 증가할수록 모재 시편에 축적되는 열량이 증가한다. 따라서 용융입자가 모재에 충돌할 때, 용사건의 반복이동 횟수가 큰 경우에는 좀 더 예열된 모재와 충돌하게 되며 분말의 용융이 불충분하더라도 모재로부터의 열량에 의해 용사 입자간 결합이 촉진된 것으로 판단된다.

Table 5. Analysis of Variance(ANOVA) Table of Porosity Results

| | ϕ | S | V | F ₀ |
|---------------------------------|--------|------|------|----------------|
| A. Primary arc gas flow rate | 1 | 26.2 | 26.2 | 1.72 |
| B. Specimen rotation | 2 | 25.0 | 12.5 | 0.82 |
| C. Powder feed | 2 | 11.1 | 5.6 | 0.37 |
| D. Work distance | 2 | 44.5 | 22.3 | 1.46 |
| F. No. of pass | 2 | 25.9 | 13.0 | 0.85 |
| G. Arc voltage | 2 | 55.5 | 27.7 | 1.82 |
| H. Powder carrier gas flow rate | 2 | 59.1 | 29.5 | 1.94 |
| Error | 4 | 61.0 | 15.2 | |

ϕ : Degree of freedom * : significant in significant level = 0.05
 S : Sum of square ** : significant in significant level = 0.01
 V : Variance (=S/ ϕ)

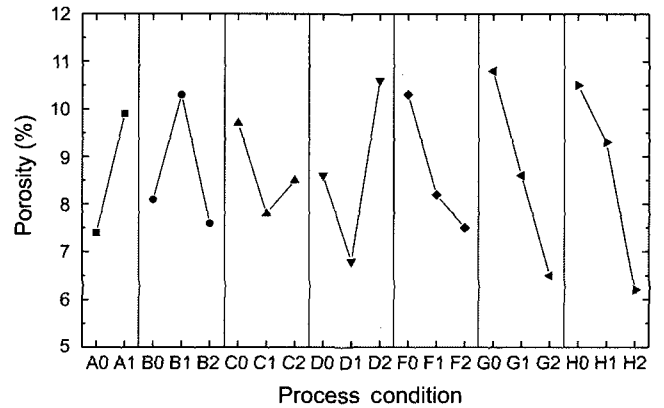


Fig. 6. Porosity variation.

아크 전압에 따른 기공율의 감소도 분말의 용융과 관련지을 수 있다. 플라즈마 용사에서 플라즈마 제트의 온도는 공급되는 전기에너지의 양에 의존하여 증가한다.¹³⁾ 아크 전압은 수소공급량에 연동하며, 수소공급량이 증가하면 아크 전압이 증가한다. 아크 전압의 증가에 따라 용사분말에 공급되는 열량이 증가하고 분말의 용융이 충분해지며 용융 분말간의 밀착성이 향상되어 기공율을 감소시킨 것으로 판단된다. 이와 유사한 예는 Choi 등이 실시한 알루미늄-티타니아 세라믹 용사코팅에서도 관찰되고 있다.¹⁶⁾

그러나 두께값에 대한 공정변수의 분산분석에서는 유의 수준 5%에서 유의한 인자가 3개나 있었으나, 기공율에 대한 공정변수의 분산분석에서는 유의 수준 5%에서 유의한 인자가 하나도 없었고, 실시된 시험수준에서는 두께에서의 영향만큼 큰 영향을 주지는 않는 것으로 판단된다.

마이크로 비커스 경도분석에 의한 알루미늄 모재의 평균 경도는 44이며, 복합재료의 평균 경도는 71이었다. 전반적으로 경질 세라믹 입자의 혼합에 의해 경도의 상승

Table 6. Analysis of Variance(ANOVA) Table of Hardness Results

| | ϕ | S | V | F ₀ |
|---------------------------------|--------|-------|-------|----------------|
| A. Primary arc gas flow rate | 1 | 1,901 | 1,901 | 9.72* |
| B. Specimen rotation | 2 | 280 | 140 | 0.72 |
| C. Powder feed | 2 | 358 | 179 | 0.92 |
| D. Work distance | 2 | 2,690 | 1,345 | 6.88 |
| F. No. of pass | 2 | 65 | 33 | 0.17 |
| G. Arc voltage | 2 | 1520 | 760 | 3.89 |
| H. Powder carrier gas flow rate | 2 | 2,212 | 1,106 | 5.65 |
| Error | 4 | 782 | 196 | |

ϕ : Degree of freedom * : significant in significant level = 0.05
 S : Sum of square ** : significant in significant level = 0.01
 V : Variance (=S/ ϕ)

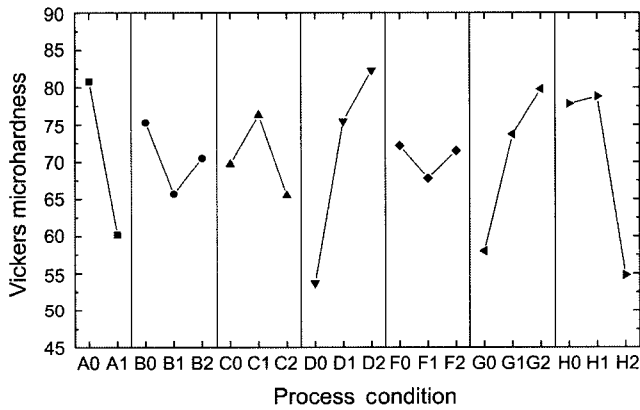
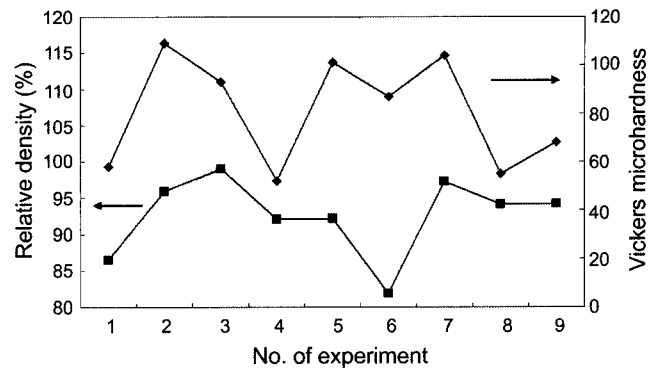


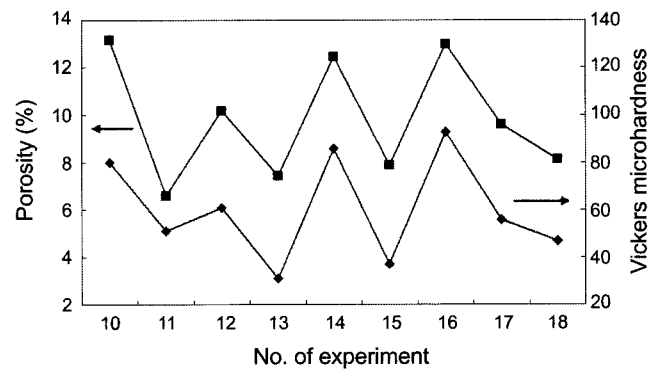
Fig. 7. Hardness variation.

을 나타내고 있으며, 내마모성의 향상이 기대된다. 그러나, 경도는 공정조건에 따라 31-109의 큰 편차를 보이고 있다. 경도에 대한 공정변수의 분산분석 결과 및 각 변수의 수준에 따른 모평균값을 Table 6 및 Fig. 7에 나타내었다. 경도는 1차 아크 가스 유량에 증가에 따라 경도가 감소하였으며, 건과 모재 사이의 거리, 아크 전압 증가에 따라 경도가 증가하였다. 유의 수준 5%에서 유의한 인자는 1차 아크 가스 유량 한 가지였으며, 이것은 기공율의 변화 경향과 대칭되는 것으로서 1차 아크 가스 유량의 증가에 따라 기공율은 증가하고 경도는 감소하는 것을 나타냈다.

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 시험번호에 따른 상대밀도 또는 기공율과 경도와의 관계를 살펴보면 흥미로운 경향을 발견할 수 있었다. 1차 아크 가스의 유량이 2.78 m³/h 인 1-9번의 시험에서는 상대밀도(Relative density(%)=100-Porosity(%))와 경도가 유사한 경향의 상관관계를 나타내며, 1차 아크 가스의 유량이 50% 증가하여 4.17 m³/h로 설정된 10-18번의 시험에서는 반대로 기공율과 경도가



(a) Relationship of relative and Vicker's hardness in experiments 1-9



(b) Relationship of porosity and Vicker's hardness in experiments 10-18.

Fig. 8. Variation of porosity and hardness.

동일한 경향의 상관관계를 나타내고 있다. 상대밀도가 높을수록 경도가 높아지는 것은 기공 감소에 의한 경도의 증가라고 생각할 수 있다. 그러나, 10-18번의 시험과 같이 기공율이 커짐에도 불구하고 경도가 증가하는 것은 특이한 현상이다. 두 그룹간의 기공율 및 경도의 평균치를 살펴보면 1-9번 시험의 경우 각각 7.4%, 81이며, 10-18번의 경우는 9.8%, 60이었다. 즉 10-18번 그룹의 경우 1-9번 그룹에 비교하여 평균 기공율이 클뿐 아니라 평균 경도가 20 이상 작은 분포를 보였다. 상대적으로 큰 기공율 및 낮은 경도의 상태인 10-18번의 경우는 경도에 미치는 기공율의 음(-)의 영향을 초과하여 양(+)의 영향을 주는 다른 인자가 존재하는 것으로 판단된다. 용사코팅층에서 경도의 측정은 여러 인자의 영향을 받을 수 있다. 예를 들면, 잔류응력, grain size, grain orientation, 기공율 등이며, 경도는 공정조건에 무관한 intrinsic quantity가 아니다.¹³⁾ 경도의 상승을 야기할 수 있는 인자는 알루미늄 모재자체의 강화기구나 세라믹 강화분말인 SiC 입자의 함량 또는 제3의 반응물 생성 등을 고려할 수 있다. 1차 아크 가스 유량이 4.17 m³/h인 경우 이와 같은 이유 등에 의해 기공율에 의한 경도감소를 역전시킬 수 있는 강화기구가 존재하는 것으로 생각되지만 구체적인 강화기구에

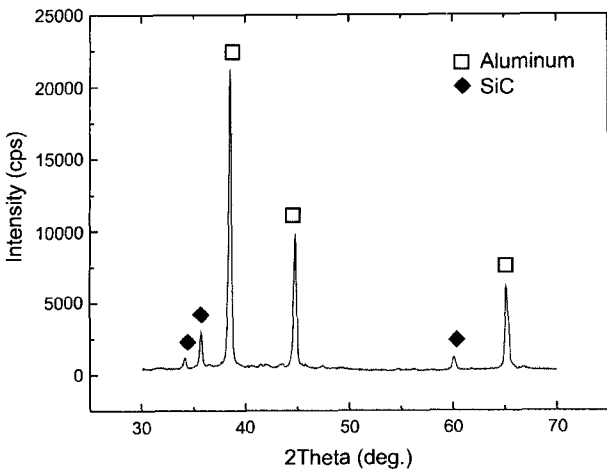
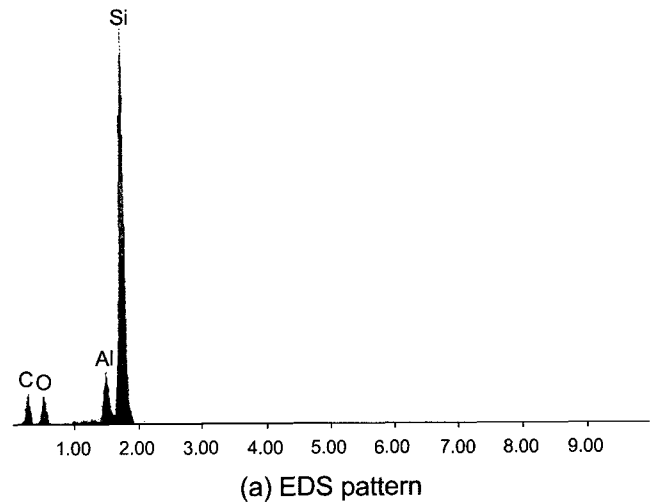


Fig. 9. XRD pattern of Al-SiC_p composite coating layer.



| Element | Al | Si | C | O |
|------------|------|------|------|-----|
| Atomic (%) | 12.1 | 70.8 | 10.4 | 6.7 |

(b) Element analysis

Fig. 11. EDS result of Al-Si-C-O compound.

금속이 산화된 알루미늄 산화물 액상에서 생성된 것으로 판단되며, 정확한 조성비 및 결정상에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

Al-SiC_p 복합용사분말을 ball milling을 이용한 기계적 합금화법에 의해 제조하였으며, 이 복합분말을 사용하여 플라즈마 용사에 의해 알루미늄 모재 위에 Al-SiC_p 복합코팅층을 형성시켰다.

코팅층의 두께는 시편을 고정된 지그의 회전수, 분말공급장치의 feed 설정치, 용사건 반복이동 횟수 및 아크 전압 증가와 함께 증가하였으며, 1차 아크 가스(Ar)의 유량, 건과 모재 사이의 거리, 분말공급용 carrier gas 유량의 증가에 따라 감소하였다.

코팅층의 기공율은 1차 아크 가스 유량의 증가에 따라 증가하였으며 용사건 반복이동 횟수, 아크 전압, carrier gas 유량 증가에 따라 감소하였다.

복합재료층의 마이크로 비커스 경도는 평균 71로 알루미늄 모재 44에 비해 2배 가까이 증가하였으며, 1차 아크 가스 유량이 2.78 m³/h인 경우 기공율과 경도의 변화경향은 대칭된 양상을 나타내었고, 1차 아크 가스 유량이 4.17 m³/h인 경우에는 평균적인 경도값은 낮았지만 기공율과 경도가 유사한 경향으로 변화되는 특성을 나타내었다.

한편, TEM 분석에 의해 용사코팅 과정 중에 생성된 것으로 판단되는 Al-Si-C-O 화합물의 존재를 확인하였다.

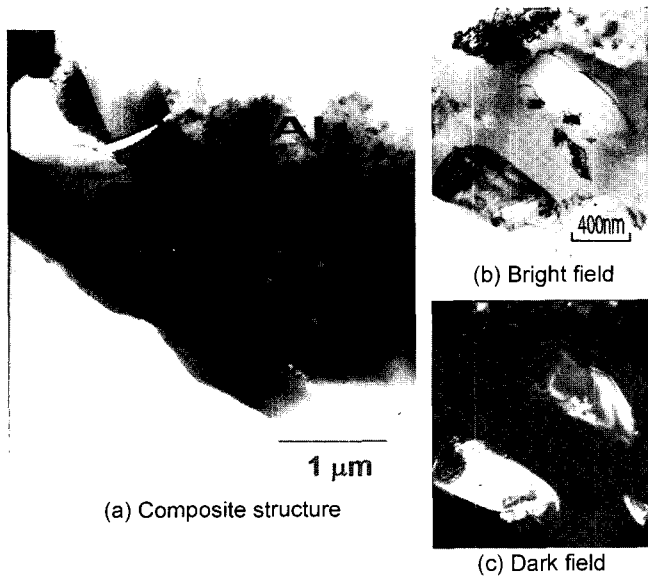


Fig. 10. TEM microstructure of composite coating layer and enlarged image of Al-Si-C-O compound.

대해서는 더욱 연구가 필요할 것으로 생각된다.

한편, 복합재료층의 XRD에 의한 결정상 분석결과를 Fig. 9에 나타내고 있다. 출발 원료 분말의 결정상 이외에 산화물이나 제3의 상은 확인할 수 없었다.

3.3. 복합재료코팅층의 TEM/EDS 분석

용사 코팅층 내의 미세조직 변화를 좀 더 자세히 확인하기 위해 투과전자현미경 분석을 실시하였다. Figs. 10 및 11에 TEM 및 EDS 분석결과를 나타내고 있다. 출발 원료인 알루미늄 금속 모재와 SiC 입자 이외에 일부 부위에서 비정질인 알루미늄 산화물 조직을 발견할 수 있었으며, 그 내부에는 Al-Si-C-O계 화합물이 생성된 것을 확인할 수 있었다. 이 화합물은 용사과정 중에 알루미늄

REFERENCES

1. J. Rodriguez, A. Martin, and J. Llorca, "Modeling the Effect of Temperature on the Wear Resistance of Metal Reinforced with Ceramic Particles," *Acta Mater.*, **48** 993-1003 (2000).
2. F. M. Hosking, F. F. Portillo, R. Wunderlin, and R. Mehrabian, "Composites of Aluminium Alloys: Fabrication and Wear Behavior," *J. Mater. Sci.*, **17** 477-98 (1982).
3. A. Sato and R. Mehrabian, "Aluminum Matrix Composites: Fabrication and Properties," *Metal. Trans.*, **7B** 443-51 (1976).
4. M. V. Kevorkijan, "MMCs for Automotive Applications," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **77** [12] 53-9 (1998).
5. X. Y. Li and K. N. Tandon, "Effect of Ion Implantation on the Dry Sliding Wear Behavior of SiC Reinforced Al-Si Composite," *Surface and Coating Technol.*, **90** 136-42 (1997).
6. L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coating*, John Wiley & Sons, New York, 1995.
7. Y. Nishida, *Introduction to Metal Matrix Composites(in Jpn.)*, Coronasha, Tokyo, 2001.
8. R. N. Sanders and A. R. Valdo, "Aluminum-silicon Composite," US patent 3,961,945 (1976).
9. J. W. Min and 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] 138-45 (1999).
10. K. Ghosh, T. Troczynski, and A. C. D. Chaklader, "Aluminum-silicon Carbide Coatings by Plasma Spraying," *J. of Thermal Spray Technol.*, **7** [1] 78-86 (1998).
11. B. M. Yang, E. S. Byon, and K. C. Park, "Thermal Sprayed AlSiMg/TiC Composite Coatings-fabrication of Powder and Characteristics of Coatings (I)," *J. Kor. Weld. Soc.*, **18** [5] 638-44 (2000).
12. P. S. Gilman and J. S. Benjamin, "Mechanical Alloying," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **13** 279-300 (1983).
13. R. B. Heimann, *Plasma-spray Coating*, VCH Publishers, New York, 1996.
14. S. H. Park, *Applied Experimental Design*, Youngchi Publishing Co., Seoul, 1990.
15. D. R. Mash, N. E. Weare, and D. L. Walker, "Process Variables in Plasma-jet Spraying," *J. Met.*, **13** 473-78 (1961).
16. H. S. Choi, C. M. Han, C. H. Lee, and H. J. Kim, "Effects of the Process Parameters on the Coating Properties of the APS Alumina-titania Coatings," *Proceedings of the 16th Thermal Spray Technol. Workshop(Seoul)*, 3-14 (2002).