

**研究論文**

## 분말송급장치의 개조에 의한 미세( $5\ \mu\text{m}$ ) $\text{Al}_2\text{O}_3$ 분말의 송급특성개선 및 플라즈마 용사조건에 따른 코팅층의 특성분석

설동욱\* · 김병희\*\* · 정민석\* · 임영우\* · 서동수\*\*\*

### Improvement of Powder Feeding Characteristics of Fine( $5\ \mu\text{m}$ ) $\text{Al}_2\text{O}_3$ Powder by Modification of the Powder Feeding Systems and Characterization of the Coating Layer depending on Plasma Spraying Conditions

D. W. Sul\*, B. H. Kim\*\*, M. S. Jung\*, Y. W. Rheem\* and D. S. Suhr\*\*\*

**Key Words** ; powder feeding system, plasma spray,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating, fine ( $5\ \mu\text{m}$ )  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder, hardness, wear loss

#### Abstract

A scope of this study is to establish the optimum plasma spray conditions for fine ( $5\ \mu\text{m}$ )  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder. However, the flowability of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder is not so good because of irregular particle shape and fine particle size. Therefore, powder feeding system was modified by 1) change of powder feeding line material from polymer to copper 2) shorten the powder feeding tube length 3) heating the powder feeding system to  $80^\circ\text{C}$  4) vibrating the powder feeding line continuously, in order to feed the fine powder homogeneously. The homogeneous powder feeding conditions were obtained with the modified powder feeding system by controlling the powder carrier gas flow and the powder flow rate indicator.

The best plasma spraying conditions for the fine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder were found out as 40kw gun power, 80 g/min. powder feed rate and 50 mm working distance after characterizing the microstructure, hardness and wear loss of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating layer.

\* 비회원, 충남대학교 재료공학과

\*\* 학생회원, 충남대학교 재료공학과

\*\*\* 정회원, 충남대학교 재료공학과

## 1. 서 론

$\text{Al}_2\text{O}_3$  세라믹재료는 우수한 화학적 안정성, 산화 저항성, 전기절연성, 내마모성의 특성을 가짐으로써 다양한 소결제품이 공업적으로 광범위하게 응용되고 있으나<sup>1-3)</sup> 기존의 소결방법으로는 대형제품이나 형상이 복잡한 제품을 제조하기가 어렵다. 따라서 이와같은 제품의 표면특성을 개선하기 위하여 열용사법(thermal spray method)에 의한 표면 코팅방법이 개발되어 이용되고 있다<sup>4)</sup>.

플라즈마 용사(plasma spray)에 사용되는 용사분말의 입형, 입자크기, 입도분포, 화학조성 등의 분말특성은 균일한 미세구조를 갖는 코팅층을 제조하기 위하여 매우 중요한 인자들이다<sup>5)</sup>. 특히 용사분말을 플라즈마 화염중에 균일하게 혼입하기 위하여서는 분말의 유동성(flowability)이 양호하여야 한다. 일반적으로 분말의 유동성은 입형 및 입자크기에 따라 지배되며, 구형의 입형과 큰 입자크기를 가질 때 유동성은 양호하여 진다<sup>6)</sup>. 그러나 용사용  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말은 분쇄방법으로 제조되기<sup>7)</sup> 때문에 각형의 입형을 갖음으로써 유동성이 좋지 않다.

용사분말의 입자크기는 유동성에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 용사분말이 플라즈마 화염중을 비행하는 동안에 필요한 용융에너지가 달라지게 되어 분말의 용융상태가 달라지게 된다. 용융상태는 개괄적으로 미용융(unmelting), 부분용융(partial melting), 완전용융(complete melting)으로 분류할 수 있으며<sup>8,9)</sup>, 이러한 용융상태에 따라 용액의 점도가 달라지기 때문에 splat의 퍼짐현상이 달라지기 때문에 코팅층의 미세구조에 큰 영향을 미친다. splat이란 한 개의 용사분말이 고온, 고속의 화염에 의하여 용융, 가속된 후, 모재에 충돌하여 넓게 퍼지면서 판상의 형태로 응고된 것이다<sup>8-10)</sup>. 용사분말이 미용융되거나 부분용융될 경우에는 splat 형성이 불완전하여 용사층내에 기공이 생성되고 splat과 splat 사이의 접합강도(cohesive strength)가 낮아져 용사층의 미세구조가 불균일하여 지고 기계적성질이 떨어지는 원인이 된다<sup>11-13)</sup>. 또한 용사분말의 입자크기에 따라 splat 형상(두께 및 넓이)이 달라지게 됨으로써 용사층의 texture가 달라지며, 입자크기가 커질수록 texture는 거칠어 지고 용사층내에 형성되는 기공의 크기가 커지게 됨으로

써 불균일한 미세구조의 용사층이 형성된다.

따라서 상업적으로 판매되고 있는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  용사분말은 분말의 유동성, 용융현상, 용사층의 texture 등을 감안하여 제조회사에 따라 여러가지 입도분포를 갖는 분말이 제조되고 있으나, 일반적으로 20~60  $\mu\text{m}$ 의 입도분포를 갖는다<sup>13,14)</sup>.

본 연구에서는 치밀하고 균일한 미세구조를 갖는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  세라믹 용사층을 형성시키기 위하여 평균 입경 5  $\mu\text{m}$ 의  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말을 용사분말로 사용하였다. 그러나  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말은 미세한 입자크기와 각형의 입형을 갖음으로써 유동성이 매우 나빠 분말송급이 불가능하였다. 따라서 균일한 분말송급을 위하여 분말송급장치(powder feeding system)를 개조하였으며, 이에 적합한 용사분말의 송급조건을 규명하였다. 또한 플라즈마 용사조건들이  $\text{Al}_2\text{O}_3$  코팅층의 미세구조 및 기계적특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 금속모재의 전처리

금속모재로 SM45C 탄소강을 사용하였으며 아세톤으로 탈지처리한 후, 240 mesh  $\text{Al}_2\text{O}_3$  shot를 사용하여 blasting 하였다. 분사압력 6  $\text{kgf/cm}^2$ , 분사거리 10 cm의 조건으로 blasting한 시편의 평균 표면조도는 0.58  $\mu\text{m}$  이었다.



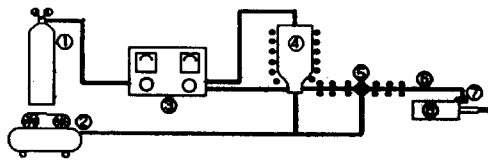
Fig. 1 SEM micrograph of the fine(5  $\mu\text{m}$ )  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder.

### 2.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 원료분말

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 원료분말의 입형은 그림 1과 같이 불규칙한 각형을 이루고 있으며, 결정상은 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 이었다. laser 입도분석기(FRITSCH, Particle Size Analysette)로 분석한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 원료분말의 입도분포는 0.5 μm 이하에서 부터 40 μm 크기까지 넓은 분포를 나타내었으며, 평균입경은 5 μm 이었다. 분말의 유동도는 ASTM B 212에 규정된 hall flow meter를 이용하여 측정하였으나, 본 연구에서 사용된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 원료분말은 유동성이 전혀 없어 유동도 측정이 불가능하였다.

### 2.3 분말송급장치(powder feeding system) 개조

균일한 미세구조를 갖는 용사층을 제조하기 위하여서는 용사분말의 균일한 송급이 우선되어야 한다. 그러나, 본 연구에서 사용된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 원료분말은 각형의 입형을 갖으며 입자크기가 미세하여 유동성이 좋지 않아 METCO사의 3MP 분말송급장치로는 분말의 균일한 송급이 불가능하여 분말송급장치의 개조가 필요하였다. 또한 이송개스유량(carrier gas flow)과 분말송급속도지시기(powder feed rate indicator)의 지수를 변화시켜 개조된 분말송급장치에 적합한 송급조건과 송급량을 규명하였다. 그림 2는 분말송급장치의 개략도이다.



- ① Powder carrier gas
- ② Air compressor
- ③ Powder feeding controller
- ④ Powder port
- ⑤ Air vibrator
- ⑥ Powder feeding line
- ⑦ Powder injector
- ⑧ Plasma gun

Fig. 2 Schematic diagram of the powder feeding system.

### 2.3. 플라즈마 용사

최대출력 40kW인 플라즈마 용사장치를 사용하여 코팅층의 특성에 큰 영향을 미치는 용사변수인 gun power, working distance, powder feed rate를 표 1과 같이 조합하여 실험하였으며, gun traverse rate와 rotation speed는 각각 12 cm/sec와 320 m/min로 일정하게 하였다.

Table 1. Plasma spray conditions.

Specimen Number	Plasma Spray Parameters		
	Gun Power (kW)	Working Distance (cm)	Powder Feed Rate (g/min)
1	40	5	65
2	40	5	80
3	35	5	80
4	37.5	5	80
5	40	7	80
6	40	9	80

주) Traverse Rate ; 12 cm/sec  
Surface Speed ; 320 m/min

### 2.4. 코팅층의 특성분석

용사조건에 따른 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 코팅층의 미세구조, 미세경도, 내마모성에 미치는 영향을 고찰하였다. 미세구조는 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 미세경도는 용사시편의 표면을 0.05 μm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 미세연마한 후, 하중 200g의 조건으로 5회 측정하여 평균값을 구하였다. 마모시험은 ball-on-disc type의 마모시험기를 이용하였으며 3 kg 하중으로 300회 미끄럼운동을 실시한 후, 무게변화를 측정하였다. 이때 사용된 ball은 직경 10 mm의 ZrO<sub>2</sub> ball 이었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 분말송급장치의 개조

플라즈마 용사에 이용되고 있는 세라믹분말은 균일한 분말송급을 위하여 일반적으로 44~80μm의 입도분포와 구형의 입형을 갖도록 제조된다. 그러

나 본 연구에서 사용한  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말은 그림 1에 보이는 바와같이 각형의 입형을 갖으며, 평균입경  $5\mu\text{m}$ 의 미세한 분말이기 때문에 유동성이 나빠서 기존의 분말송급장치로는 균일한 분말송급이 불가능하였다. 따라서 그림 2에 나타낸 분말송급장치를 다음과 같이 개조하여 분말송급특성을 개선하였다.

#### 1) 분말송급관의 재질 변경

세라믹 분말과 같은 비전도성 물질이 서로 충돌하면 정전기가 발생되고, 이로 인하여 분말이 응집되어 유동성이 나빠지게 되므로 용사분말의 균일한 송급이 어렵게 된다. 기존의 분말송급장치에는 polymer 재질의 분말송급관(내경: 5 mm, 길이: 2 m)이 장착되어 있어 발생한 정전기가 제거되지 않아 유동성이 나쁜 미세한  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말이 응집되어 송급관을 막음으로써 균일한 분말공급이 불가능하였다. 따라서 본 연구에서는 발생하는 정전기를 효과적으로 제거하기 위하여 분말송급관(그림 2-⑥)을 전도성이 좋은 copper tube(내경: 6 mm)로 대체하여 사용하였으며, 이를 접지시켰다.

#### 2) 분말송급관의 길이 조정

유동성이 나쁜 분말은 분말송급관의 길이가 길어질수록 분말사이의 충돌회수가 많아져 정전기가 많이 발생하고 송급관내부 벽면과의 접촉면적이 증가됨에 따라 분말의 유동성이 더욱 나빠진다. 따라서 powder port(그림 2-④)를 gun traverse system에 한 몸체로 부착시켜 동시에 움직이게 함으로써 powder port와 powder injector(그림 2-⑦)사이의 송급관길이를 되도록 짧게 하였으며, 이때의 송급관길이는 60 cm 이었다.

#### 3) 가열장치 부착

용사분말은 일반적으로  $70\sim 80^\circ\text{C}$ 로 건조하여 분말의 표면에 흡착되어 있는 수분을 제거한 다음, 용사작업 직전에 powder port에 장입하여 사용한다. 그러나 본 연구에서 사용된  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말과 같이 미세한 분말은 비표면적이 크므로 수분의 재흡착이 용이하다. 따라서 용사과정중에 공기중의 수분과 분말이송가스(powder carrier gas, 그림 2-①)로 사용되는  $\text{N}_2$  또는  $\text{Ar}$  개스에 함유되어 있는 수분이 재흡착됨으로써 미세한 분말이 응집되어 유동성이 나빠진다. 또한 분말의 온도강하에 의한 수분의

응결현상에 의하여 분말의 유동성이 나빠진다. 따라서 powder port 및 분말송급관에 가열장치를 부착하여 전체 분말송급장치를  $80^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

#### 4) 진동장치 부착

상기한 1), 2), 3) 항의 개조에도 불구하고 균일한 분말의 송급이 이루어지지 않았으며, 이와 같은 원인은 분말송급관의 내경(6 mm)이 작아서 작업시간이 길어질수록 미세한 분말이 송급관 내벽에 부착되어 막힘현상이 발생하기 때문인 것으로 판단되었다. 따라서 분말송급관에 air vibrator(그림 2-⑤)를 부착하여 송급관을 지속적으로 진동시켜 분말의 부착을 방지함으로써 균일한 분말의 송급이 가능하게 되었다.

### 3.2 분말송급조건 규명

플라즈마 용사공정에서 균일한 용사분말의 송급은 균일한 미세구조를 갖는 코팅층을 얻기 위하여 매우 중요하다. 또한 분말송급속도는 용사분말이 플라즈마 화염을 비행하는 동안에 일어나는 용사분말의 용융현상(미용융, 부분용융, 완전용융)을 지배한다. 이러한 용융현상은 분말특성(화학조성, 비열, 용해열, 융점, 입자크기 및 입도분포 등)과 플라즈마 화염의 특성(열용량 및 화염속도)에 따라 달라지게 되며, 코팅층의 미세구조에 큰 영향을 미친다. 그러므로 용사분말 제조업체와 용사장비 제조업체에서는 많은 실험을 통하여 용사분말 및 용사장비에 적합한 분말송급조건을 참고적으로 제시하고 있다. 그러나 본 연구에서 사용한  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말과 같이 유동성이 나쁜 분말은 용사용 분말로 이용되지 못하고 있으며, 이에 적합한 분말송급조건이 제시되어 있지 않아  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말에 대한 균일한 송급조건을 실험적으로 규명하였다.

본 연구에서 이용한 분말송급제어기(powder feeding controller, 그림 2-③)는 이송개스유량(carrier gas flow)과 분말송급속도지시기(powder feed rate indicator, 이하 지시기)의 지수를 조절하여 분말송급속도를 변화시킬수 있도록 설계되어 있으며, 두가지 변수의 조합조건에 따라 균일한 분말송급과 분말송급속도(powder feed rate)가 달라진다. 지시기의 지수는 powder port 내의 압력을 나타낸다.

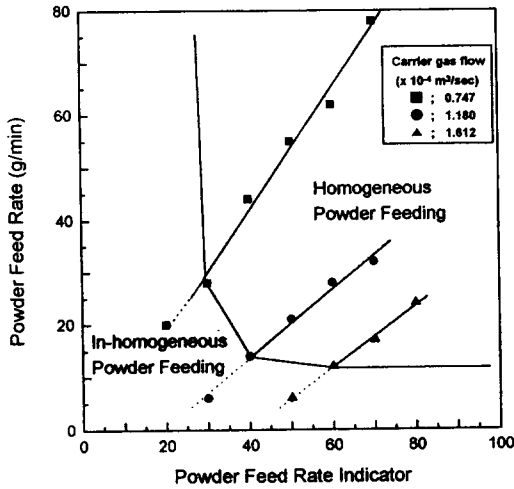


Fig. 3 Homogeneous powder feeding conditions for the fine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder.

그림 3은 이송가스유량(carrier gas flow)과 분말송급속도지시기(powder feed rate indicator)의 지수 변화에 따른 용사분말의 균일분사조건과 분말송급속도를 실험적으로 규명한 결과이다. 이송개스유량을  $0.747 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ .로 일정하게 유지한 경우에 지시기의 지수가 30 미만에서는 분말송급이 전혀 이루어지지 않았고, 지수가 30 이상이 되어야 균일한 분말송급이 가능하였다. 분말송급속도는 지시기의 지수가 커질수록 증가하여 28 g/min. (지수 30)에서 78 g/min. (지수 70)으로 변화하였다. 한편 이송개스유량을  $1.180 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ .으로 일정하게 유지할 경우에는 지시기의 지수 30에서 분말송급이 가능하였으나 불균일하였고, 지수 40 이상에서 균일한 분말송급이 가능하였으며 지수가 커질수록 분말송급속도가 증가하였다. 이송개스유량을 더욱 증가시켜  $1.612 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ .으로 유지할 경우에는 지시기의 지수가 60 이상에서 균일한 분말송급이 가능하였다.

상기와 같은 실험을 통하여 평균입경  $5\mu\text{m}$ 의 미세한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 균일분사구역을 설정할 수 있었다. 동일한 이송개스유량일 때에는 지시기의 지수가 커질수록 분말송급량이 직선적으로 증가하였으며, 지시기의 지수가 일정할 때에는 이송개스유량이 적어질수록 분말의 송급속도가 증가함을 알 수 있었다.

### 3.3 플라즈마 용사조건에 따른 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 코팅층의 미세구조

플라즈마 용사된 코팅층의 미세구조에 큰 영향을 미치는 용사변수는 gun power, working distance, powder feed rate 등이며, 이들 변수들의 조합조건에 따라 미세구조와 코팅층의 특성이 달라지게 된다. 표 1의 플라즈마 용사조건으로 용사된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 코팅층의 단면 미세구조는 그림 4(a) - (f)와 같이 용사조건에 따라 상이한 미세구조를 나타내었으며, 용사변수가 용사층의 미세구조에 미치는 영향은 다음과 같다.

#### 1) gun power의 영향

gun power는 플라즈마 화염온도 및 화염속도를 지배하는 용사변수로서 용사분말의 용융현상과 용융입자의 속도가 gun power에 따라 달라지게 되므로 코팅층의 미세구조와 특성에 가장 큰 영향을 미친다. 그림 4b(시편번호 2), e(시편번호 5), f(시편번호 6)은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 코팅층의 미세구조에 미치는 gun power의 영향을 알아보기 위하여 working distance (5 cm), powder feed rate (80 g/min)를 일정하게 하고, gun power를 35 kW, 37.5 kW, 40 kW로 변화시켰을 때의 미세구조이다.

gun power가 35 kW의 경우에는 그림 4c(시편번호 5)에 보이는 바와같이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 코팅층내에 많은 기공이 형성되고 불완전 용융상태의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말이 존재하고 있으며, 금속모재와 코팅층의 계면에서 균열이 발생하였다. 이와같이 불균일한 미세구조를 나타내는 원인은 gun power가 낮음으로써 플라즈마 화염의 온도가 낮아져 용점이 높은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 완전한 용융이 이루어지지 않음으로써 용융된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 점도가 높아 splat 형성이 불충분하였기 때문인 것으로 판단된다. 한편 계면에서의 균열발생은 gun power가 낮아 용융입자가 플라즈마 화염내에서 충분히 가속되지 못함으로써 운동에너지가 낮아 금속모재와 splat 사이의 접착강도(adhesive strength)가 낮아졌기 때문인 것으로 생각된다.

gun power가 37.5 kW로 높아짐에 따라 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹 코팅층의 미세구조는 그림 4d(시편번호 6)와 같이 gun power 35 kW의 경우에 비하여 기공이 적

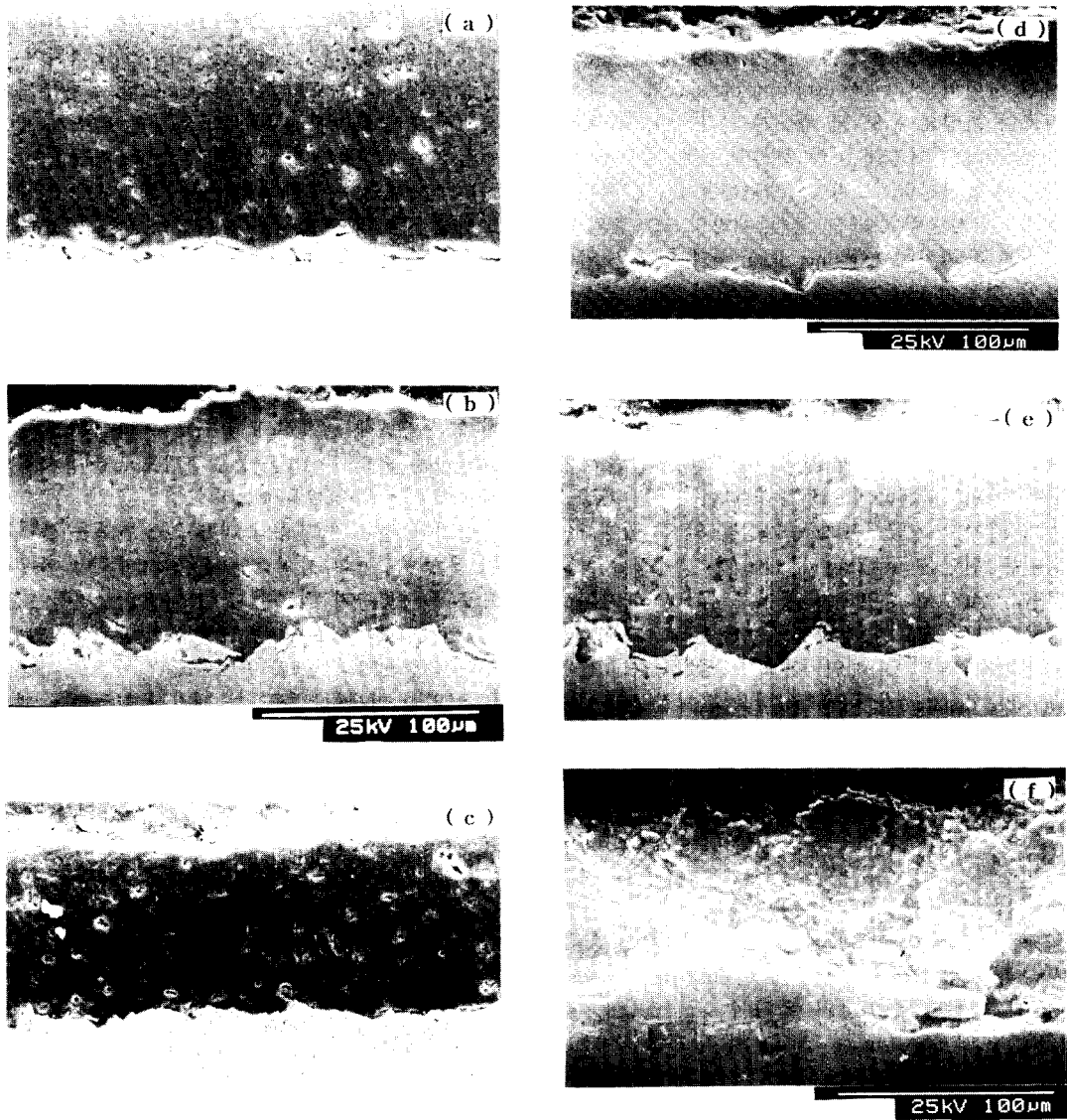


Fig. 4 SEM micrographs of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic coating layers depending on plasma spray conditions.

고 치밀한 미세구조를 나타내고 있으나, 계면에는 균열이 발생하였다.

gun power를 40 kW로 증대시킬 경우에는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  세라믹분말의 완전한 용융 및 과열(over heating)로 용융  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 점도가 충분히 낮아져 splat이 잘 발달함으로써 그림 3b(시편번호 2)와 같이 기공크

기 및 분포가 적어졌으며 splat과 splat 사이의 접착(cohesion)상태가 양호하여짐을 알 수 있다. 또한 플라즈마 화염속도가 증대되어 금속모재와  $\text{Al}_2\text{O}_3$  세라믹 코팅층 사이의 접착강도가 증대됨으로써 계면에서의 균열이 발생치 않았다.

### 2) working distance의 영향

working distance는 plasma gun nozzle 끝부분과 시편 사이의 거리로써 working distance에 따라 플라즈마 화염의 온도 및 속도가 달라지며, working distance가 길어짐에 따라 화염의 온도 및 속도는 급작히 떨어진다. 그림 4b(시편번호 2), e(시편번호 5), f(시편번호 6)은  $Al_2O_3$  세라믹 코팅층의 미세구조에 미치는 working distance의 영향을 알아보기 위하여 gun power (40 kW)와 powder feed rate (80 g/min)를 일정하게 하고, working distance를 5 cm, 7 cm, 9 cm로 변화시켰을 때의 미세구조이다.

working distance가 5 cm에서 7 cm로 멀어짐에 따라 그림 4b(시편번호 2) 및 그림 4e(시편번호 5)와 같이  $Al_2O_3$  세라믹 코팅층내에 존재하는 기공크기가 커지고 기공분포가 증가함을 알 수 있다. 이와같은 원인은 working distance가 길어짐에 따라 용융된  $Al_2O_3$ 의 과열도가 떨어져 점도가 증가되고 용융입자의 속도가 감소됨으로써 splat 형성이 불완전하게 되기 때문인 것으로 생각된다. 한편 working distance가 9 cm로 더욱 길어질 경우에는 그림 4f(시편번호 6)과 같이 splat 형성이 더욱 불완전하여 지고 splat과 splat 사이의 접착(cohesion) 상태도 나빠져  $Al_2O_3$  세라믹 코팅층내에서 박리가 일어남을 알 수 있다.

### 3) powder feed rate의 영향

그림 4a(시편번호 1)와 b(시편번호 2)는  $Al_2O_3$  세라믹 코팅층의 미세구조에 미치는 powder feed rate의 영향을 알아보기 위하여 gun power (40 kW), working distance (5 cm)를 일정하게 하고, powder feed rate를 65 g/min와 80 g/min로 변화시켰을 때의 미세구조이다.

분말송급량이 65 g/min일 경우에는 그림 4a(시편번호 1)에 보이는 바와같이 모재와 세라믹 코팅층의 계면에서 균열이 발생하였으며, 코팅층내의 기공도는 분말송급량을 80 g/min으로 하였을 때와 비교하여 약간 증가하였다. 분말송급량은 단위 시간당 플라즈마 화염중에 혼입되는 용사분말의 양으로써 gun power에 따라 분말송급량이 적절히 조절되어야 균일한 미세구조를 갖는 코팅층을 제조할 수 있다. 일정한 gun power에서 분말송급량이 부족할 경우에는 용사분말이 필요 이상으로 과

열되어 용사분말의 분해 또는 휘발이 일어나고, 이때 발생하는 개스가 코팅층 내부에 포획되어 기공을 형성시키는 원인이 된다. 또한 용융입자의 과열도가 증가함에 따라 용융입자의 점도가 필요 이상으로 낮아지면 잘 발달된 splat을 형성하지 못하며, 모재의 온도를 과도하게 상승시켜 모재와 코팅층 사이의 열팽창계수 차이에 의하여 발생하는 응력으로 인하여 모재와 코팅층의 계면에서 균열이 발생된다. 한편 분말송급량이 과다할 경우에는 용사분말의 불완전한 용융을 초래하여 splat이 잘 발달되지 않으며, 미용융입자(unmelted particle)와 부분용융입자(partially melted particle)가 코팅층내에 존재하게 됨으로써 미세구조가 불균일하게 되고 큰 기공이 형성됨으로써 용사층의 물성에 해로운 영향을 미친다.

상기와 같은 코팅층의 미세구조 변화는 플라즈마 용사변수들의 복합적인 작용에 의하여 좌우되므로 용사변수가 적절히 조합되어야 균일한 미세구조와 접합강도가 높은 코팅층을 얻을 수 있다. 따라서 평균입경  $5\mu m$ 의 미세한  $Al_2O_3$  분말을 사용하여 균일한 미세구조를 갖는 세라믹 코팅층을 제조하기 위한 최적용사조건은 본 연구의 연구범위내에서 다음과 같은 조건으로 판단되었다.

gun power ; 40 kW  
working distance ; 5 cm  
powder feed rate ; 80 g/min

## 3.4 플라즈마 용사조건에 따른 $Al_2O_3$ 세라믹 코팅층의 기계적특성

### 1) 미세경도

표 1의 용사조건으로 플라즈마 용사된  $Al_2O_3$  세라믹 코팅층의 미세경도는 그림 5에 보이는 바와같이 용사조건에 따라 상이한 평균 경도값을 나타내었으며, 이러한 미세경도변화는 3.2.에서 고찰한 용사변수에 따른 미세구조분석 결과와 잘 일치하고 있다. 즉  $Al_2O_3$  세라믹 코팅층 내부에 기공이 적고 splat이 잘 형성되어 치밀하고 균일한 미세구조를 갖으면 높은 경도값을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 경도값은 큰 산란을 보이고 있으며, 이와같은 현상을 코팅층내에 존재하는 기공의 영향으로 생각된다.

$Al_2O_3$  세라믹 코팅층의 미세경도에 미치는 분말

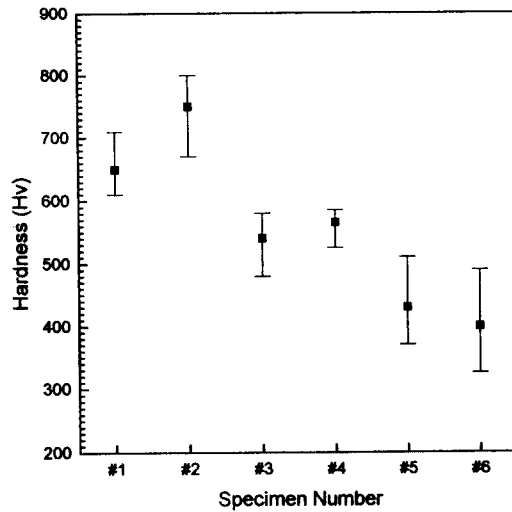


Fig. 5 Micro-Vickers hardness of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating layer depending on plasma spray conditions.

공급량의 영향을 고찰하기 위하여 gun power (40 kW)와 working distance (5 cm)를 일정하게 하고 powder feed rate를 65 g/min(시편번호 1)과 80 g/min(시편번호 2)으로 변화시켰을 때의 미세경도값은 각각 570과 750 이었으며, 시편번호 2가 가장 높은 미세경도값을 나타내었다. 경도값에 가장 큰 영향을 미치는 용사변수는 working distance로서 working distance가 5 cm(시편번호 1, 2, 3, 4)에서 7 cm(시편번호 5)와 9 cm(시편번호 6)로 길어짐에 따라 평균경도값은 급격히 감소하였으며, 경도값의 산란폭은 더욱 커졌다. 이와 같은 원인은 용사조건에 따른 미세구조변화에서 고찰한 바와 같이 working distance가 길어질수록 플라즈마 화염속도 및 화염온도가 급작히 감소함으로써 용융입자의 과열도가 떨어지고, 이에 따라 용융입자의 점도가 증가되어 코팅층내의 기공율이 증대되고 splat 형성이 불완전하여지며, splat과 splat 사이의 접합강도가 낮아져 불균일한 미세구조를 갖는 코팅층이 형성되기 때문으로 생각된다.

또한 gun power도 플라즈마 화염속도 및 화염온도를 지배하여, gun power가 35 kW(시편번호 3)에서 37.5 kW(시편번호 4)로 증가됨에 따라 미세경도값은 540에서 565로 약간 높아졌다. 그러나 gun power가 40 kW(시편번호 1)로 증가시켰을 경

우에는 미세경도값이 750으로 크게 높아졌다. 따라서  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말을 완전히 용융시키고 적당한 과열도를 갖게하기 위하여서는 40 kW 이상의 gun power가 필요하다고 생각된다.

## 2) 마모특성

그림 6(a)에  $\text{Al}_2\text{O}_3$  세라믹 코팅층의 wear loss에 미치는 gun power의 영향을 나타내었으며, gun power가 35 kW(시편번호 3), 37.5 kW(시편번호 4), 40 kW(시편번호 2)로 증가됨에 따라 wear loss량은 각각  $7.4 \times 10^4$  g,  $4.5 \times 10^4$  g,  $2.7 \times 10^4$  g로 감소하였다. 또한 working distance에 따른 wear loss량은 그림 6(b)에 보이는 바와 같이 working distance가 5 cm(시편번호 2), 7 cm(시편번호 5), 9 cm(시편번호 6)로 멀어짐에 따라 wear loss량은 각각  $2.7 \times 10^4$  g,  $12.2 \times 10^4$  g, 41.

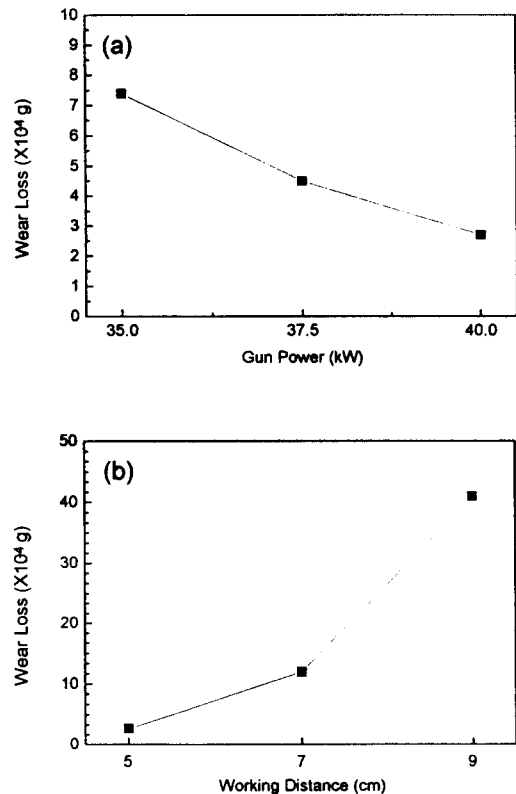


Fig. 6 Wear loss of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating layer depending on plasma spray conditions.



$5 \times 10^4$  g으로 급격히 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 3.2. 및 3.3에서 고찰한 용사조건이 미세구조변화 및 미세경도변화에 미치는 영향과 잘 일치하고 있으며, wear loss에는 gun power 보다 working distance의 영향이 큰 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

분말송급장치의 개조에 의한 미세한  $Al_2O_3$  분말의 송급특성과 플라즈마 용사조건에 따른 용사층의 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분말송급장치 (powder feeding system)를 개조하고 분말송급제어조건 (powder feeding control parameters)을 적절하게 조절함으로써 유동성이 나쁜 평균입자 크기  $5 \mu m$ 의 미세한  $Al_2O_3$  세라믹분말의 균일한 분말송급이 가능하였다.

(2) 치밀하고 균일한 미세구조를 갖는  $Al_2O_3$  세라믹 코팅층을 제조할수 있는 최적 플라즈마 용사 조건은 본 연구의 실험범위내에서 다음과 같았다.

gun power : 40 kW

powder feed rate : 80 g/min

working distance : 5 cm

(3) 용사층의 미세구조, 경도, 마모특성에 가장 큰 영향을 주는 플라즈마 용사변수는 working distance 였다. 이는 working distance가 길어짐에 따라 플라즈마 화염속도 및 화염온도가 급속히 떨어짐으로써 용융입자의 운동에너지가 저하되고 과열도가 감소됨으로써 점도가 높아져, splat 형성이 불완전하여 기공이 많아지며 splat과 splat 사이의 접합강도가 낮아지기 때문이다.

#### 참 고 문 헌

1. Zatorski, R. A and Herman. H, High Performance Ceramic Films and Coating, Elsevier, 1991, pp. 591~601
2. M. N. Rahaman, Ceramic Processing and Sintering, Marcel Dekker Inc. 1995
3. L. D. Hart, Alumina Chemicals : Science and Technology Handbook, Am. Ceram. Soc. 1990
4. 蓮井 淳 : "セラミック·サーメット 溶射 と 溶射法 の 基礎知識", Thermal Spray Technique, Vol 9, No 4, 1990, pp. 36~42
5. P. Fauchais, A. Vardelle and M. Vardelle, "Modelling of Plasma Spraying Ceramic Coatings at Atmospheric Pressure", High Performance Ceramic Films and Coating, Elsevier, 1991, pp. 3~25
6. G. Schwier and J. Beczowiak, "Advanced Ceramic Powders for Thermal Spray Coatings and Monolithic Ceramics", High Performance Ceramic Films and Coating, Elsevier, 1991, pp. 37~46
7. M. Vardelle, A. Vardelle and P. Fauchais, "Spray Parameters and Particle Behavior Relationships during Plasma Spraying", J. Therm. Spray Tech., Vol 2, No. 1, 1993, pp. 79~91
8. G. Montavon and S. Sampath, "Effect of Vacuum Plasma Spray Processing Parameter on Splat Morphology", J. Therm. Spray Tech., 1995, pp. 67~74
9. H. L. Filmer, J. Hochstrasser and A. R. Nicoll, "Plasma Spray Deposition of Alumina-Based Ceramic Coatings", High Performance Ceramic Films and Coating, Elsevier, 1991, pp. 47~56
10. R. McPherson, "A Model for the Thermal Conductivity of Plasma-Sprayed Ceramic Coating", Thin Solid Films, 112, 1994, pp. 89~95
11. R. McPherson: "A Review of Microstructure and Properties of Plasma - Sprayed Ceramic Coating", Surface Coating Technology, Vol 39/40, 1989, pp. 173~181
12. 岩本信也 : "セラミック·サーメット 溶射 と 溶射法 の 基礎知識", Thermal Spray Technique, Vol 9, No 4, 1990, pp. 43~49
13. 上野和夫 : "セラミック·サーメット 溶射 と 溶射法 の 基礎知識", Thermal Spray Technique, Vol 9, No 4, 1990, pp. 50~56
14. Metco Technical Bulletin : Metco 105 SF-NS Powder.