

## 저온분사 공정에서 알루미늄 분말의 산화가 임계 적층 속도에 미치는 영향

강기철\* · 윤상훈\* · 지을권\* · 이창희\*

\*한양대학교 신소재공학과

### Oxidation Effects on the Critical Velocity of Pure Al Feedstock Deposition in the Kinetic Spraying Process

Kicheol Kang\*, Sanghoon Yoon\*, Youlgwun Ji\* and Changhee Lee\*

\*Kinetic Spray Coating Laboratory (NRL), Division of Materials Science & Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-ku, Seoul, 133-791, Korea

#### Abstract

In kinetic spraying process, the critical velocity is an important criterion which determines the deposition of a feedstock particle onto the substrate. In other studies, it was experimentally and numerically proven that the critical velocity is determined by the physical and mechanical properties and the state of materials such as initial temperature, size and the extent of oxidation. Compared to un-oxidized feedstock, oxidized feedstock required a greater kinetic energy of in-flight particle to break away oxide film during impact. The oxide film formed on the surface of particle and substrate is of a relatively higher brittleness and hardness than those of general metals. Because of its physical characteristics, the oxide significantly affected the deposition behavior and critical velocity. In this study, in order to investigate the effects of oxidation on the deposition behavior and critical velocity of feedstock, oxygen contents of Al feedstock were artificially controlled, individual particle impact tests were carried out and the velocities of in-flight Al feedstock was measured for a wide range of process gas conditions. As a result, as the oxygen contents of Al feedstock increased, the critical velocity increased.

\*Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received February 9, 2007)

Key Words : Oxidation, Critical velocity, Adiabatic shear instability, Kinetic spraying process

#### 1. 서 론

저온 분사 (kinetic spraying) 공정은 상대적으로 저온인 300℃에서 500℃ 온도 범위의 가스를 초음속으로 가속시키고, 이러한 초음속의 가스 유동장 내에 50  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 분말을 장입하여 초음속 (400 m/s~1200 m/s)으로 가속한 후 모재와 충돌시켜 입자를 극심하게 소성 변형시킴으로써 모재-입자 및 입자-입자 간 각 계면에서 물리적으로 접합하여 고상 상태에서 코팅층을 형성하는 기술이다. 기존의 열 용사

(thermal spraying)와는 달리, 저온 분사는 입자의 용융 없이 코팅층을 형성하며, 코팅층 형성에 있어 충돌 입자의 비행 속도 즉, 입자 충돌 시의 운동 에너지가 가장 중요한 요소로 작용한다. 입자의 운동 에너지는 충돌 시 소성 변형을 유도하게 되는데, 실제 소성 변형은 입자의 계면에 국부적으로 집중되며, 실제 계면에서의 변형 속도 (strain rate)는 일반적으로  $0.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 까지 상승한다<sup>1)</sup>. 이와 같은 높은 변형 속도에서의 소성 변형 시에는 소성 변형을 통해 발생하는 열이 외부로 전달되는 시간이 충분하지 않기 때문에 등은 상태를 유지하지 못하며, 금속 내부에 열에너지 축적에

의한 단열적 온도 상승을 유발한다. 온도 상승의 정도는 변형 속도에 크게 영향을 받으며, 저온 분사 공정에서는 변형률 (strain)과 변형 속도가 높은 입자와 모재의 계면부를 중심으로 단열 가열 (adiabatic heating) 현상이 두드러지게 나타나며, 이는 충돌 입자의 열적 연화 (thermal softening)를 발생시킨다. 열적 연화에 의해 변형 금속의 변형률은 증가하여 단열 전단 불안정 (adiabatic shear instability)을 유도한다. 단열 전단 불안정은 모재-입자 및 입자-입자 간 각 계면에서 접합 영역을 증가시켜 치밀한 접합을 형성시키는 데에 중요한 역할을 한다. 현재까지 저온 분사에 대한 접합 기구는 명확하게 밝혀지지 않았으나, 이러한 계면에서 단열 전단 불안정을 통한 소성 변형 기구로서 저온 분사 공정에서의 접합을 현상학적으로 설명하고 있다<sup>1,2)</sup>.

저온 분사에서 임계 속도는 일반적으로 접합을 형성시키고 단열 전단 불안정을 발생시키는 최소의 입자 속도로 정의된다. 상당수의 연구가 임계 속도는 초기 분말과 모재 재료의 물리적 특성과 연관되어 있음을 밝히고 있다<sup>1,3,4)</sup>. 하지만, 실제 Cu 분말의 임계 속도에 대한 여러 연구에서 실제 실험을 통해 산출된 Cu 분말의 임계 속도는 500 m/s에서 640 m/s의 범위의 상이한 결과로 보고되고 있다<sup>5-7)</sup>. 현재 이러한 임계 속도의 차이가 발생하는 현상에 대해서는 명확하게 이해되지 않고 있으며, 분말의 형상이나 공정 가스의 상태 등이 상이함으로 인해 임계 속도가 달라질 수 있다고 보고되었다<sup>8)</sup>. 그러나, F. Gärtner<sup>9)</sup>와 Chang-Jiu Li<sup>10)</sup>는 이러한 동종 분말의 임계 속도 차이는 분말의 산화 (Oxidation)에 기인하는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서도 동일 분말의 산소 함량을 제어함으로써 표면 산화량에 따라 임계 속도가 상이해짐을 발견하였다. 이것은 입자 표면의 산화막이 입자와 모재와의 충돌 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 해석될 수 있다. 본 연구에서는, 산소 함량이 상이한 Al 분말로 저온 분사 공정의 개별 입자 충돌 실험을 실시하여, 산화에 따른 입자의 적층 거동을 분석하여 분말의 산화가 저온 분사에서 적층의 척도인 임계 속도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 분말 산화

본 실험에는 네 가지 상이한 산소 함량을 가진 Al 분말이 사용되었다. 초기 Al 분말은 순도 99.0% 이상으로, Fig. 1은 초기 상태의 Al 분말을 보여주고 있다.

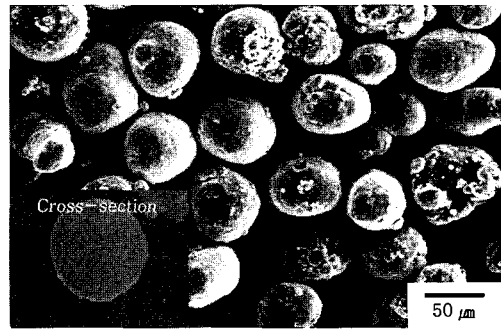


Fig. 1 SEM micrograph: pure Al powder morphology

Al 분말은 구형이며, 평균 입자 크기는 65  $\mu\text{m}$ 이고 밀도는 2.70  $\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. 인공적인 산화와 화학적 에칭을 통해 다른 산소 함량을 가진 세 가지 Al 분말이 제작되었는데, 두 가지 방법으로 산화를 하여 두 종류의 산화 Al을 제작하였다. 하나는 전기로 내에서 초기 분말을 150 $^{\circ}\text{C}$ 로 15분 동안 가열시켜 산화하였고, 다른 하나는 초기 분말을 상온의 대기 상태에 168시간 동안 노출시켜 산화시켰다. 화학적 에칭은 초기 Al 분말을 10% 불산 용액을 이용하여 실시하였으며, 이를 이용하여 Al 분말 표면에 존재하는 산화물을 제거하여 산소 함량을 감소시켰다.

### 2.2 저온 분사 공정

본 연구에서는 현재 산업적으로 사용 가능하고 수렴-발산 (converge-diverge) 타입의 텅스텐카바이드 노즐 (nozzle)이 장착된 CGT (cold gas technology)사의 저온 분사 장비가 사용되었다. 사용된 저온 분사 장비와 자세한 코팅 공정은 다음 참고 문헌에 설명되어 있다<sup>1,11-12)</sup>. 헬륨과 질소 가스가 각각 공정 가스와 분말 송급 가스로 사용되었다. 분사 공정 중 분말의 산화를 최소화하기 위해 공정 가스의 온도는 가장 낮은 온도인 300 $^{\circ}\text{C}$ 로 고정시켰다. 가스의 압력은 1.2, 1.6, 2.0 그리고 2.4 MPa 이렇게 네 가지 공정 조건이 사용되었다. 분말 송급 가스의 유동량은 공정 가스 유동량의 10%로 설정하였으며, 코팅 거리 (노즐 출구에서 모재까지의 거리)는 30 mm로 설정하였다. 본 실험에서 사용한 모재는 Al 1050 합금이며, 3mm 두께의 판재로서 저온 분사 실험 이전에 연마하여 표면 조도를 최소화하였다. 개별 입자의 충돌 거동을 관찰하고 임계 속도의 산출을 위해 개별 입자 충돌 실험이 실시되었다. 개별 입자 실험을 위해 분말 송급율을 1.0 g/min로 낮추고, 노즐 이동 속도를 300 mm/s로 높게 설정하였다.

### 2.3 비행 입자 속도 계측 및 적층 입자 분석

Fig. 2에서 보여지는 SprayWatch system (Oseir Ltd, 필란드)을 사용하여 비행 입자의 속도가 측정되었다. SprayWatch system은 비행 입자를 조광하는 고전압 펄스 레이저 다이오드 (high power pulsed laser diode, Hiwatch)와 조광되는 비행 입자를 관측하는 고속 카메라 (high speed camera)로 구성된다. 본 장비를 통한 속도 분석 영역은 20 mm × 20 mm × 1 mm이고, 분석 영역의 중심은 노즐 출구로부터 축 방향으로 30 mm가 되는 지점으로 실제 저온 분사 공정 시 입자와 모재의 충돌 지점이 된다. 입자의 속도는 카메라에 의해 촬영되는 tracking image에 나타나는 레이저 방출 간격과 입자의 비행 거리를 통해 계산된다. SEM (scanning electron microscopy)을 통해 개별 입자의 적층 코팅의 표면과 단면이 관찰되었다. 그리고 LSM (laser scan microscope)을 통해 적층 입자의 변형도 (flattening ratio)가 측정되었다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 개별 입자 적층 거동

Table 1은 본 연구에 사용된 네 가지 Al 분말의 산소 함량을 나타내고 있다. Table 1에서 보이는 바와 같이, 화학적 에칭을 한 Al 분말은 산화막 (oxide film)이 제거되어 산소 함량이 극도로 낮다. 반면 168 시간 동안 상온의 대기에 노출 시킨 분말은 가장 높은 산소 함량을 나타냈다.

변형도 (flattening ratio)는 적층 이전의 입자의 지름과 충돌 후 적층하여 변형된 입자의 지름의 비로 정의되며, 적층된 입자의 소성 변형의 정도를 측정하는데 사용된다<sup>13)</sup>. 개별 입자 충돌 실험 시 분사 방향을

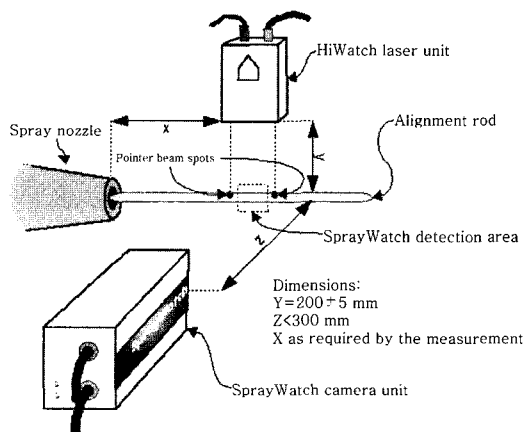


Fig. 2 Schematic of the SprayWatch system

Table 1 Oxygen contents measurement result

States	Oxygen content (wt %)
Etched	0.001
As-received	0.012
Furnace oxidation (150°C, 15min)	0.023
Atmospheric oxidation (25°C, for 168 hours)	0.045

따라 8mm의 분사 폭 (spray bead)이 형성되는데, 본 연구에서는 분사 방향을 따라 분사 폭의 가장 중앙의 입자 10-15 개의 변형도를 측정하였다. Fig. 3은 동일한 공정 조건 하에서 적층된 입자의 변형도가 입자의 산소 함량에 따라 다르게 나타나고 있음을 보여준다. 분말의 산소 함량이 증가할수록 변형도가 미세하게 감소하고 있음을 Fig. 3을 통해 알 수 있다. Fig. 4는 동일한 공정 조건 하에서 산소 함량에 따른 적층 입자의 변형도 차이를 나타내고 있다.

앞서 언급하였듯이, 입자와 모재의 충돌 중에 발생하는 소성 변형은 비행 입자의 운동 에너지가 전환되면서 발생한다. 충돌 중 발생하는 단일 전단 불안정에 의한 소성 변형은 가장 자리에 jet을 형성하면서 입자와 모재의 표면에 존재하는 산화막을 밀어내어 제거하면서 접합을 형성하게 한다<sup>14)</sup>. 따라서 충돌 입자의 운동 에너지의 일부는 충돌 중 산화막을 제거하는데 소모된다. 그리고 산화막의 두께와 강도가 증가할수록 더 많은 입자의 운동 에너지가 소모됨에 따라 소성 변형 에너지로 전환되는 분율이 저하되어 계면의 소성 변형이 감소한다.

본 연구에서, 산화 또는 화학적 에칭에 의해 입자의

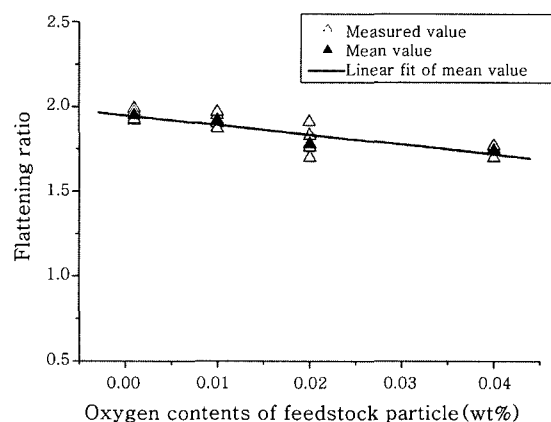
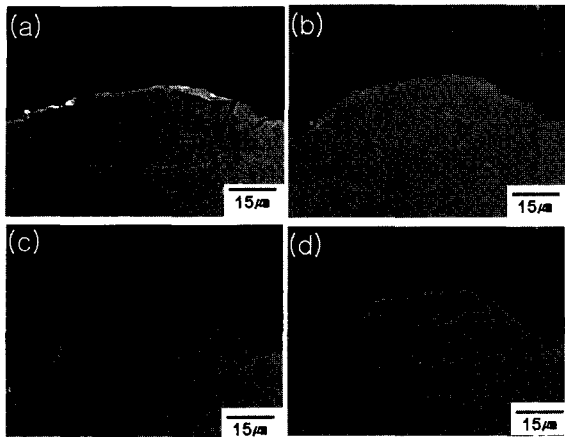


Fig. 3 Flattening ratio of deposited Al feedstock particles which has different oxygen contents under the same process parameter (process gas was helium, gas temperature was 300°C, pressure was 2.0 MPa.)

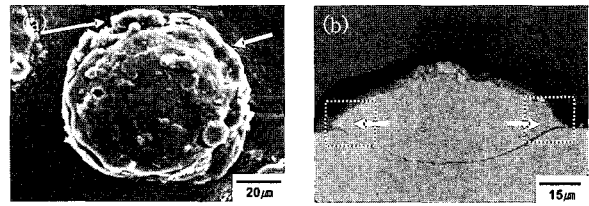


**Fig. 4** SEM micrographs: cross-sectional images of deposited particles. (a) etched particle (b) as-received particle (c) oxidized particle in furnace (d) oxidized particle in atmosphere. Process gas was helium, gas temperature was 300°C, pressure was 2.0 MPa

무게와 형상에 있어 감지할 수 있는 변화가 발생하지 않기 때문에, 동일한 공정 조건에서 각 네 가지 Al 분말 유동장 내에서 획득하는 운동에너지는 산소 함량과는 무관하게 동일하다고 할 수 있다. 그러나, 산소 함량에 비례하여 입자 표면의 산화막 두께가 증가하므로, 입자와 모재 간의 접합을 형성하기 위해 제거되어야 하는 산화막의 두께는 더 증가하게 된다. 따라서, 입자의 운동 에너지 ( $E_k$ ) 중 산화막을 제거하기 위해 모재와 충돌 중 소모되는 에너지 ( $E_o$ )는 입자의 산소 함량이 증가할수록 증가한다. 이러한 에너지 관계는 입자의 운동 에너지 중 충돌 중 입자의 소성 변형 에너지 ( $E_p$ )를 감소시켜 결과적으로 적층 입자의 변형도를 감소시키는 결과를 초래한다. 이러한 관계는  $E_p$ , (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_p = E_k - E_o \tag{1}$$

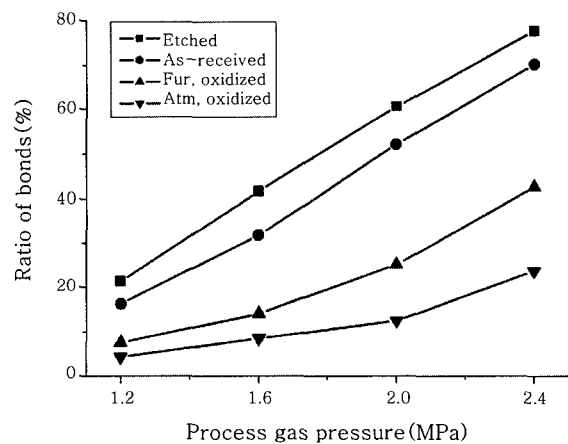
현재까지 여러 연구를 통해 제시된 실험 및 수치적 데이터들을 통해 본다면, 입자-모재 간 또는 입자-입자 간 접합을 형성하기 위해서는 계면을 따르는 국소적인 소성 변형과 단열 전단 불안정이 충분히 발생해야 한다. Fig. 5의 적층 입자 상에 화살표로 표시된 out-flow jet의 발생은 단열 전단 불안정에 의해 소성 변형이 순간적으로 급격해짐에 따라 발생하는 것으로, 이것은 적층 입자 표면의 존재하는 산화물을 계면의 중심부에서 외각 또는 외부로 밀어내고 적층 입자와 모재 간의 접합 영역을 증가시켜 접합 형성에 있어 중요한 역



**Fig. 5** Deposited particle oxidized in the atmosphere of 25°C for seven days when the process gas was helium, gas temperature was 300°C, pressure was 2.0MPa. (a) SEM micrograph of deposited particle (30° tilting view) (b) Back Scattering image of impacted particle cross-section

할을 한다<sup>2,14)</sup>. 결론적으로, 입자의 산소 함량 즉, 산화막의 양은 충돌 중 입자의 변형 거동에 영향을 주어 적층률 (ratio of bonds)에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 적층률은 모재에 충돌한 전체 입자의 수 (crater + 적층 입자)에 대한 적층 입자의 수의 비율로 정의되며, 한 회의 공정에서 적층 효율을 측정하기 위해 이용되었다<sup>4)</sup>. Fig. 6에서 보면, 공정 가스 압력의 증가에 따라 비행 입자의 속도가 증가하면서 적층률이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 같은 공정 가스 압력 조건 하에서 분말의 산소 함량이 감소함에 따라 적층률이 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7에서 같은 공정 조건에서 사용된 Al 분말의 산화도가 증가할수록 적층된 입자의 수는 줄어들고, crater의 수는 증가하여 적층률이 감소하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이를 통해 사용 분말의 산소 함량이 입자의 적층 시 접합에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



**Fig. 6** Ratio of bonds for Al feedstock which have different oxygen contents when helium is used as the process gas. The process pressure ranges from 1.2 to 2.4MPa

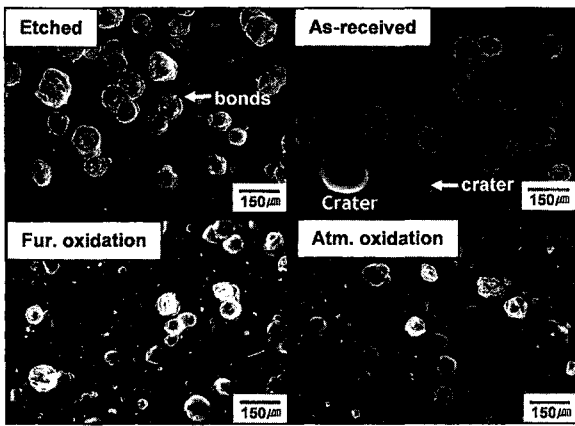


Fig. 7 SEM micrographs of contact surfaces (Top view). When helium is used as the process gas at pressure of 2.4MPa

### 3.2 임계 속도

임계 속도는 충돌 입자의 적층률과 측정된 입자 속도 분포를 이용하여 산출되었다<sup>15)</sup>. SprayWatch system을 이용하여 본 실험에서 사용된 공정 조건 하에서 입자의 속도와 입자의 속도 분포가 측정되었다. 앞서 언급되었듯이, 가스 유동장 내에서 비행 입자가 획득하는 운동 에너지는 입자의 산소 함량과는 무관하다고 가정하였다. 따라서, 이번 연구에서는 네 종류의 다른 산소 함량을 가진 Al 분말은 같은 공정 조건 하에서는 가스 유동장 내에서 같은 운동 에너지를 획득하므로 모두 같은 속도 분포를 가진다고 가정되었다. Fig. 8은 공정 가스 압력이 2.0 MPa이고 온도가 300°C일 때 측정된 입자 속도 분포 데이터이다. 같은 수직 위치 (vertical position)에서 입자의 속도 차이가 발생하는 것은 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 모든 입자의 크기가 동일하지

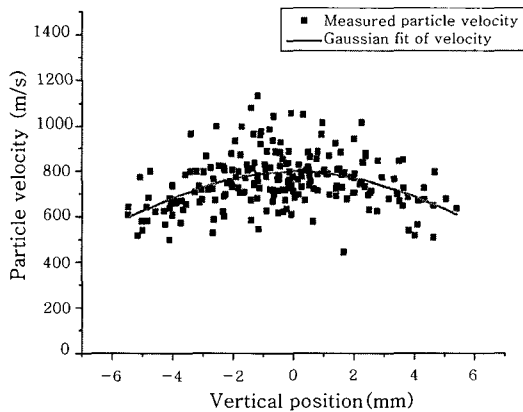


Fig. 8 Measured particle velocity when the process gas pressure was 2.0 MPa and temperature was 300°C

않고 크기 분포를 가지기 때문이다. 일반적으로, 입자 속도 분포는 수직 위치의 중심에서 가장 높은 속도를 가지는 가우시안 분포 (Gaussian distribution)를 보인다. Fig. 8에서 보면 직경 10 mm의 영역 내에 대부분의 입자들이 집중되어 비행하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 평균 입자 속도는 이 영역 내에 포함되어 있는 입자의 측정 데이터를 이용하여 산출하였다. Table 2는 실험에서 사용한 각 공정 조건 하에서의 평균 입자 속도를 나타내며, 평균 입자 속도 범위는 630 m/s에서 800 m/s로 나타나고 있다. 공정 가스의 온도가 300°C에서 고정되고 압력이 증가함에 따라 입자의 속도는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 공정 조건과 입자의 평균 비행 속도 간의 선형적 관계는 Alkhimov가 제시한 속도 방정식으로 설명될 수 있다<sup>16)</sup>. 입자 속도 방정식은 다음 Eq. (2)와 같다.

$$v_p = \frac{v_g}{1 + 0.85 \sqrt{\frac{D}{x}} \sqrt{\frac{\rho_p v_g^2}{P_0}}} \tag{2}$$

여기서  $v_p$ 는 입자 속도,  $v_g$ 는 질소 가스 속도,  $P_0$ 는 질소 가스 압력,  $\rho_p$ 는 입자의 밀도,  $D$ 는 입자의 직경 그리고  $x$ 는 분사 방향에 평행한 축 상의 위치를 각각 나타낸다.

Fig. 8과 같은 각 공정 조건에서 측정된 속도 분포 데이터에서 30 m/s 단위로 입자의 속도를 분류하고 각 속도 단위에 포함되는 입자의 수를 측정하여 Fig. 9과 같은 입자 속도 정규 분포를 나타내었다. 입자의 속도가 가스 유동장 내에서 이러한 분포를 가지게 되는 것은 일차적으로 유동장 내부 위치에 따른 유동 가스의 분포가 존재하고, 앞서 언급하였듯이 사용 분말의 크기가 동일하지 않고 크기 분포를 가지기 때문이다. 입자의 위치가 가스 유동의 중심으로부터 벗어날수록, 입자의 크기가 커질수록 입자의 속도는 감소한다. 실제 입자 속도 분포 상에 임계 속도 이상의 속도를 가지는 입자만이 적층이 가능하다. 따라서 임계 속도는 각 공정

Table 2 Mean particle velocity at each process parameter

Process gas Temperature (°C)	Process Gas Pressure (MPa)	Particle velocity (m/s)
300	1.2	639
	1.6	706
	2.0	759
	2.4	804

에서의 입자의 적층률 (Fig. 6)과 입자 속도 분포 데이터 (Fig. 9)를 이용하여 Fig. 10와 같이 산출될 수 있다.

다른 산소 함량을 가지는 분말의 임계 속도가 Fig. 11에서 보여진다. 산소 함량이 0.01 (wt%)인 초기 분말의 임계 속도는 742 m/s로 나타났다. 이 결과값은 M. Grujicic의 결과<sup>17)</sup>와 비교하였을 때 조금 낮은 값을 가진다. 동일 분말의 경우 입자의 크기가 커질수록 임계 속도는 감소하는데<sup>3-4)</sup>, 이러한 결과 값의 차이는 사용 분말의 크기 차이에 의한 효과로 사료된다. Al 분말의 산소 함량이 증가할수록 임계 속도는 더 높아지는 경향을 보인다. 그러나 산소 함량의 증가에 따르는 임계 속도의 증가율은 감소하고 있음을 Fig. 11을 통해 확인할 있다.

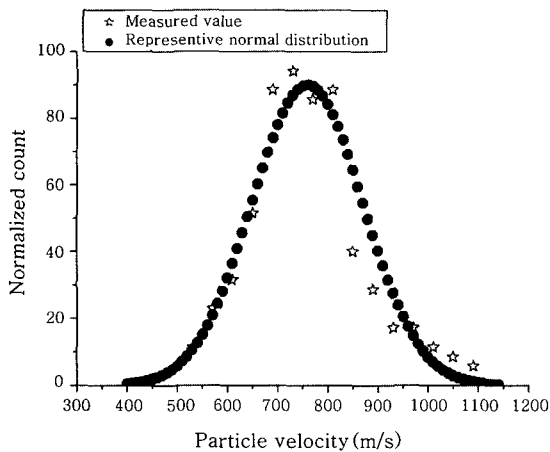


Fig. 9 Particle distribution curve when the process gas temperature was 300°C and pressure is 2.0 MPa

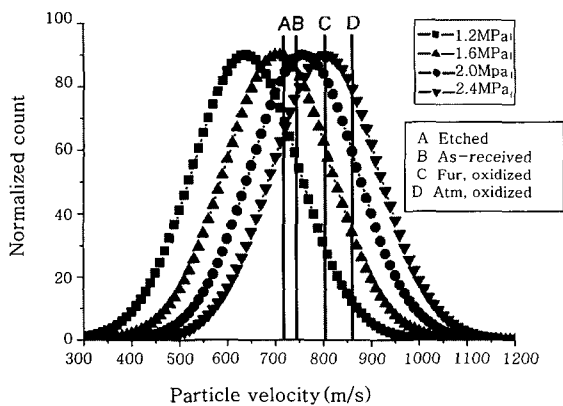


Fig. 10 Particle velocity distributions at the process gas pressure of 1.2, 1.6, 2.0 and 2.4MPa. The velocity distribution curve shifts right with the increase of the gas pressure

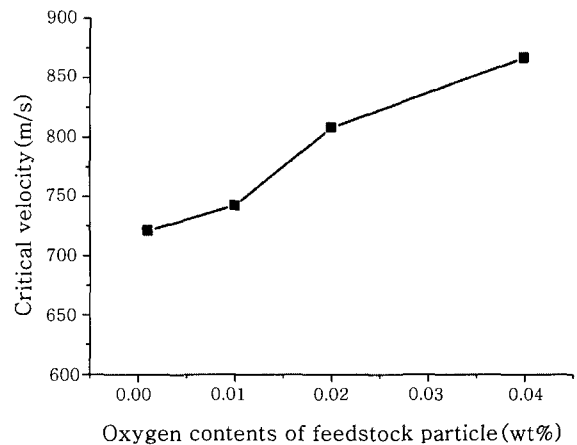


Fig. 11 Critical velocity of four kinds of Al feedstock which have the different oxygen contents

### 4. 결 론

본 연구는 Al 분말의 산소 함량을 제어하여 네 가지의 상이한 산소 함량을 가진 Al 분말을 제조하고, 이들 Al 분말로 저온 분사 공정을 통해 개별 입자 충돌 실험을 실행하였다. 산화막의 두께가 두꺼울수록 더 많은 입자의 충돌 에너지가 산화막을 제거하는데 사용되어, 입자의 소성 변형 에너지로 전환되는 비율이 감소하여 적층 입자의 변형도는 산소 함량의 증가에 따라 미소하게 감소하게 된다. 입자의 소성 변형 에너지의 양은 입자의 적층 거동에 영향을 미치게 되므로, 산소 함량의 증가에 따라, 개별 입자 충돌 실험에서의 적층률은 크게 감소하였다. 각 공정 조건의 적층률과 입자 속도 분포 측정을 통하여 임계 속도가 산출되었다. Al분말의 산소 함량이 증가함에 따라 임계 속도는 두드러지게 증가하였다.

### 후 기

이 논문은 2006년도 정부 (과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2006 - 02289).

### 참 고 문 헌

1. H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye: Acta Mater., 51, 2003, 4379-4304
2. M. Grujicica, J.R. Saylor, D.E. Beasley, W.S. DeRossetb, D. Helfritch: App. Sur. Sci., 219, 2003, 211-227
3. T. Schmidt, F. Gärtner, H. Assadi, H. Kreye: Acta Mater., 54, 2006, 729-742
4. J. Wu, H. Fang, S. Yoon, C. Lee, H. Kim: Mater.

- Trans., 47 (7), 2006, 1723-1727
5. A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, A.N. Papyrin: Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1990, 318(5), 1062- 1065
  6. T. Stoltenhoff, J. Voyer, H. Kreye: International Thermal Spray Conference, E. Lugscheider and C.C. Berndt, Ed., March 4-6, 2002 (Essen, Germany), DVS Deutscher Verband für Schweißen, 2002, 366-374
  7. P D.L. Gilmore, R.C. Dykhuizen, R.A. Neiser, T.J. Roemer, M.F. Smith: J. Therm. Spray Technol., 8(4), 1999, 576-582
  8. H. Fukanuma, N. Ohno, B. Sun, R. Huang: Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, Materials Park, OH, 2006.)
  9. F. Gärtner, T. Stoltenhoff, T. Schmidt, H. Kreye: Thermal Spray Connects: Explore Its Surface Potential, E. Lugscheider, Ed., May 2-4, 2005 (Basel, Switzerland), DVS, 158-163
  10. C.-J. Li, W.-Y. Li, H. Liao: J. Therm. Spray Technol. 15 (2), 2006, 212-222
  11. A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, A.N. Papyrin: Sov. Phys. Dokl. 35, 1990, 1047-1049
  12. F. J. Wu, H. Fang, S. Yoon, H. Kim, C. Lee: Scripta Mater., 54, 2006, 4746-4754
  13. J. Wu, H. Fang, H. Kim, C. Lee: Mater. Sci. Eng., A, 417, 2006, 114-119
  14. T. Schmidt, F. Gärtner, H. Kreye: Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology, B.R. Marple and C. Moreau, Ed., May 5-8, 2003 (Orlando, FL), ASM International, 2003
  15. J. Lee, J Kim, S. Shin, C. Lee, H, Kim: Building on 100 Years of Success: Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.C. Lau, R.S. Lima, and J. Voyer, Eds., May 15-18, 2006 (Seattle, WA, USA), ASM International, Materials Park, OH, 2006.)
  16. A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, S.V. Klinkow: J. Therm. Spray Technol. 10, 2001, 375-381
  17. M. Grujicic, C.L. Zhao, W.S. DeRosset, D. Helfritsch: Mater. Des, 25 (2004) 681-688