

## 비행입자의 열 에너지에 따른 NiTiZrSiSn 벌크 비정질 분말의 적층 거동

윤상훈\* · 김수기\* · 이창희\*

\*한양대학교 신소재공학부 저온 분사 코팅 연구실

### Effect of Thermal Energy of In-Flight Particles on Impacting Behavior for NiTiZrSiSn Bulk Metallic Glass during Kinetic Spraying

Sanghoon Yoon\*, Sooki Kim\* and Changhee Lee\*

\*Kinetic spray coating laboratory, Division of Materials Science & Engineering, College of Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

#### Abstract

Mechanical and thermomechanical properties of the bulk metallic glass (BMG) are so unique that the deformation behavior is largely dependent on the temperature and the strain rate. Impacting behavior of NiTiZrSiSn bulk metallic glass powder during kinetic spraying was investigated in this study. Considering the impact behavior of the BMG, the kinetic spraying system was modified and attached the powder preheating system to make the transition from the inhomogeneous deformation to the homogeneous deformation of impacting BMG particle easy. BMG splat formation is considered from the viewpoint of the adiabatic shear instability. It is suggested that the impact behavior of bulk metallic glass particle is determined by the competition between fracture and deformation. The bonding of the impacting NiTiZrSiSn bulk amorphous particle was primarily caused by the temperature-dependent deformation and fracture (local liquid formation) behavior.

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

(Received March 14, 2007)

Key Words : NiTiZrSiSn bulk amorphous powder, Kinetic spraying, Impact behavior, Adiabatic shear instability

### 1. 서 론

비정질 소재는 원자 구조적 측면에서 원자배열이 장주기 규칙 (long range ordering)을 가지지 못하고 단범위 규칙 (short range ordering)을 가진다. 이러한 원자 구조적 특성으로 인하여 독특한 물리, 화학, 기계적 특성을 나타내게 되어 공학적, 산업적 유용성이 높다<sup>1,2)</sup>. 벌크 비정질 소재의 독특한 열적 특성은 재가열중의 유리전이 현상과 결정화 거동이며, 특이한 열기계적 거동은 Fig. 1에 제시된 바와 같이 온도에 따른 변형거동이다. 벌크 비정질 소재의 변형거동은 온도와

변형속도 (strain rate)의 영향을 받으며 실험조건에 따라서 불균질 변형 (inhomogeneous deformation)과 균질 변형 (homogeneous deformation)이 관찰된다<sup>3-6)</sup>. 유리전이온도 [T<sub>g</sub>] 이하의 온도에서 외부응력이 주어지는 경우 응력이 국부지역에 집중되는 (strain localization) 현상이 발생하여 전단띠가 형성된다. 변형이 집중된 shear band는 열적인 연화현상이 동반되므로 또 다시 변형을 가속시키게 된다. 이러한 변형기에 의해서 저온에서의 벌크 비정질은 파괴에 앞서 외관상 무시할 만큼의 소성변형을 일으킨다. 그러나, 온도가 유리전이온도 이상에서 결정화 온도 이하의 과냉액상 영역 (supercooled liquid region)에 도달되는

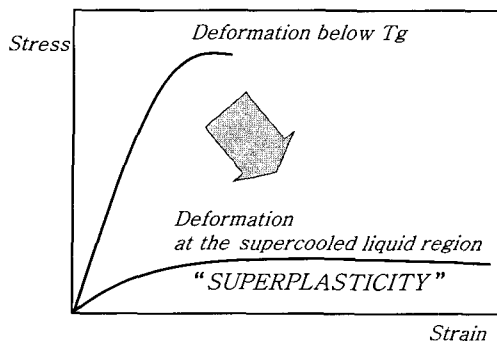


Fig. 1 Temperature dependent deformation behavior of the bulk metallic glass

경우 저온 불균질 변형거동과는 전혀 다른 초소성의 거동을 나타낸다. 이는 단범위 규칙성을 가지는 비정질 기지내 원자의 이동도가 높아 외부 응력을 완화시키는 방향으로 원자의 이동이 자유로워지기 때문이다. 그러나, 결정화가 이루어지면 다시 소재는 취성을 보이게 된다. 변형거동에 미치는 변형속도의 영향의 경우에는 일반적으로 변형속도의 증가는 온도의 감소와 유사한 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 초소성 영역에서도 변형속도가 증가함에 따라 유동응력 (flow stress)이 증가하고 파단에 이르는 변형량이 감소하게 된다. 실제로, 벌크 비정질의 산업화 가능성이 높은 이유가 바로 온도에 의존한 초소성 현상으로 과냉 액상에서의 낮은 유동응력을 이용하여 상의 변화없이 성형을 이룰 수 있기 때문이다.

벌크 비정질 소재는 자체를 구조소재로 적용하는 방법과 코팅으로 적용하는 방법이 있다. 열용사코팅기술 (thermal spraying)은 이미 구조소재 코팅분야에서 매우 잘 알려진 후막형성 기술로 고융점 세라믹 소재에서 저융점 고분자 소재까지 다양한 소재군을 적층시킬 수 있는 유용한 공정기술이다. 그러나, 열용사 코팅기술은 기본적으로 코팅소재를 완전 혹은 반응용상태로 용융시키는 과정이 동반되므로 고온의 열원 내를 비행하는 과정에 열적 활성화 반응이 필연적으로 발생한다. 따라서, 나노소재나 비정질 소재와 같은 비평형 코팅소재 및 산화에 대한 저항성이 낮은 금속소재의 경우 공정과정에서의 상변화에 따른 소재열화를 억제시킬 수 없다. 기존의 열 용사코팅 기술의 장점을 유지하면서 단점을 효과적으로 보완할 수 있는 새로운 공정기술로 저온 분사 코팅기술 (kinetic spraying)이 제시되고 있다. 저온 분사 코팅기술은 열원이 열적 활성화 반응을 일으킬 정도로 높지 않으며, 매우 빠른 입자 비행으로 인해 열원과 입자의 반응시간이 제한되기 때문에 비정질 소재와 같이 열적 활성화 반응에 민감한 소재를

이용한 후막형성 공정에 적용될 수 있다<sup>7-11</sup>).

현재까지 저온 분사공정에서의 정확한 입자 적층에 대한 이론적인 규명이 완료된 것은 아니나, 일반적으로 높은 운동 에너지를 가진 입자가 모재나 혹은 먼저 적층된 층에 충돌하는 과정에 극심한 변형 및 계면에서의 국부적인 용융을 유발하고 이 과정에 충돌계면이 분당을 이루는 것으로 알려져 있다<sup>12-14</sup>. 결과적으로, 코팅 가능한 소재는 소성변형이 가능한 소재 조합에 제한되며, 입자 결합을 유발할 수 있을 정도로 충분한 변형이 이루어지기 위해서는 충분한 운동 에너지를 가져야 한다. 저온 분사 공정에서의 미세 입자 충돌현상은 매우 복합적인 현상들이 수십나노 초의 극히 짧은 시간에 완료되어<sup>12,15</sup> 실험적인 접근이 매우 어려워 현상론적인 접근이 주를 이루고 있다.

벌크 비정질 소재는 저온과 빠른 변형속도에서 불균일 변형거동을 보이며 연성을 나타내지 않기 때문에 외관상 저온 분사에 적합하지 않는 소재이다. 그러나, 온도의 상승에 따라 소위 과냉액상 영역에서 초소성 (superplasticity) 현상을 보이므로<sup>1,2</sup> 본 연구에서는 이를 이용할 수 있는 실험적 접근방법을 시도하였다. 따라서, 본 연구에서는 벌크 비정질 소재의 변형 거동을 고려할 때, 충돌한 벌크 비정질 입자가 쉽게 불균일 변형에서 균일변형으로 전이될 수 있도록 새로운 분말 예열 시스템을 고안하였으며, 벌크 비정질 분말의 예열 온도에 따른 비행입자 열 에너지를 제어하고 개별입자 충돌 실험을 통해 비행입자의 열 에너지에 따른 벌크 비정질 소재의 충돌 거동을 관찰하였다.

## 2. 실험 방법

분말소재는 불활성분위기 가스분무 (inert gas atomization) 법으로 제조된 구형의 분말을 사용하였다. 열 물리적 특성은 열분석기 (differential scanning calorimetry) 방법을 적용하여 측정하였다. Fig. 2는 새로 고안된 저온 분사 공정 시스템을 보여준다. 노즐 출구모양이 원

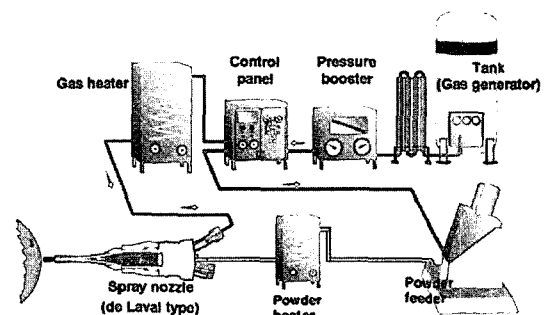


Fig. 2 Layout of modified kinetic spraying system

형인 de Laval 타입 노즐을 사용했다. 본 연구에서는 벌크 비정질 분말의 적층효율과 코팅층의 밀도를 증가시키기 위해, 그리고 초기분말 온도가 적층거동 및 코팅 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위해 부가적으로 분말예열장치를 고안해 Fig. 2와 같이 분말 송급 장치와 건 (gun) 사이에 설치하여 초기분말 온도를 변화시켰다. 분말예열은 상온에서 최대 600℃까지 조절 가능하다. 모재는 연강 (mild steel) 을 이용하였고, 분사 코팅의 전처리 공정으로 모재 표면의 불순물 제거를 위해 연마를 실시한 후 2분간 알코올과 아세톤으로 초음파 세척을 실시하였다.

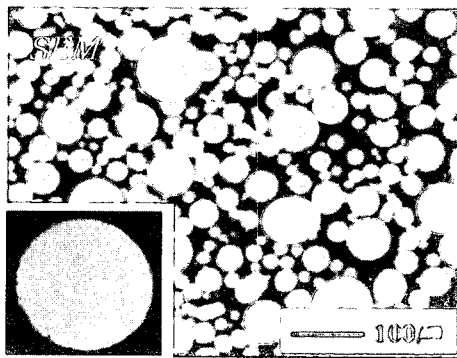
개별입자의 적층과 충돌 거동을 확인하기 위해, 매우 낮은 분말 송급량 (<4.5 g/min)과 빠른 건 이동속도 (300 mm/sec)를 사용하여 개별입자 충돌시험을 수행

했다. 자세한 공정조건은 Table 1에 나타내었다. 분말 예열 온도에 따른 비정질 분말의 충돌거동을 관찰하기 위해 공정가스의 압력과 온도는 일정한 상태에서 공정가스로 헬륨을 사용했으며, 분말예열 온도는 상온에서 550℃까지 변화를 주어 실험하였다. 한번 분사 후, 모재에 충돌하여 적층된 하나하나의 입자들을 얻을 수 있었다.

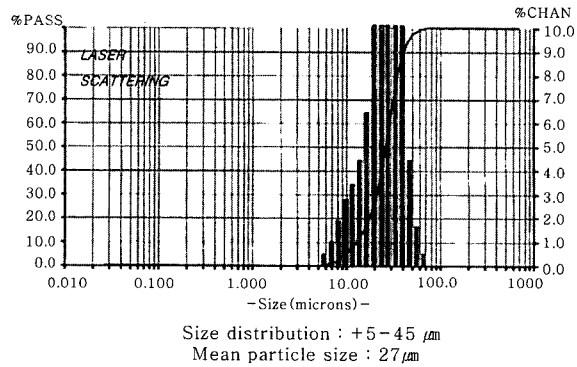
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 초기 분말 특성 평가

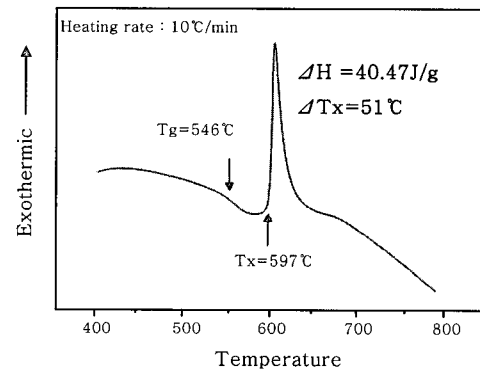
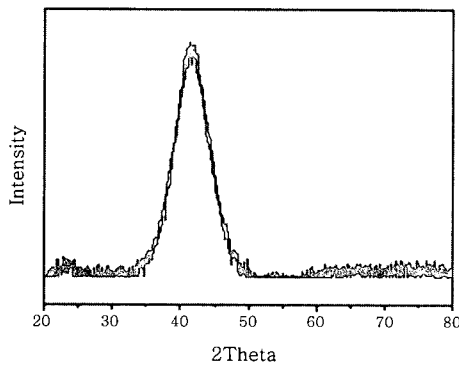
코팅분말은 높은 비정질 형성능 (glass formability) 을 갖는 화학조성인 Ni<sub>57</sub>Ti<sub>18</sub>Zr<sub>20</sub>Si<sub>2</sub>Sn<sub>3</sub> (at.%) 으로 가스 분무법에 의해 제조되었다. Fig. 3(a)에 보이는



(a) Morphology and cross sectional of powder



(b) Size distribution



(c) Phase composition and thermal properties

**Fig. 3** Characteristics of a bulk amorphous feedstock

Table 1 The parameters of kinetic spraying experiments

| Gas type | Process gas pressure | Process gas temp. | Powder preheating temp. | Fixed variables   |
|----------|----------------------|-------------------|-------------------------|---|
| Helium   | 29 bar               | 550℃              | RT (under Tg)           | - Feeding rate : 4.5 g/min<br>- Spraying distance : 30 mm<br>- Gun speed : 300 mm/sec |
|          |                      |                   | 450℃ (under Tg)         |   |
|          |                      |                   | 550℃ (Tg~Tx)            |   |

바와 같이 분말은 표면이 매끈한 구형의 형태를 보임으로 분사 공정시 유동성을 확보할 수 있으며, 단면 관찰 결과 기공이 존재하지 않은 치밀한 조직을 나타낸다. Fig. 3(b)에 나타난 입도 분석결과 평균 입자 크기는 27 $\mu\text{m}$ 였으며, 15 $\mu\text{m}$  이하의 미세한 입자는 20%, 30 $\mu\text{m}$  이상의 조대한 입자는 20%의 입도 분포를 가지고 있다. Fig. 3(c)에 나타난 XRD 분석결과 결정상 피크가 거의 없는 브로드한 피크를 나타내고 있어, 코팅 분말은 대부분 비정질 단상으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 열분석기를 통한 열분석 결과를 Fig. 3(c)에 보여주고 있으며, 유리전이 온도는 546 $^{\circ}\text{C}$  부근에서 나타났으며, 결정화 온도는 597 $^{\circ}\text{C}$ 에서 시작되었다. 그리고 코팅 분말의 비정질형성능 ( $T_x - T_g = \Delta T_x$ )은 51 $^{\circ}\text{C}$ 이다. 초기분말의 산소함량은 원소분석기 (N/O analyzer 900)을 이용하여 측정하였으며, 고온 분해시 발생하는 산소 가스를 적외선 검출기와 열 전도도를 감지하여 초기분말의 산소원소를 정량화하는 방법을 통해서 측정한 결과 산소함유량은 0.30 wt.%였다.

저온 분사공정에 의해 형성되는 코팅은 열 용사공정을 통한 코팅형성과 마찬가지로 독립적으로 상이한 궤적 (trajectory)을 통해 비행하는 입자의 독립적인 적층거동의 집합체 (build-ups)로 간주된다. 결론적으로, 매우 상이한 에너지 상태의 비행입자가 동시에 적층이 이루어지므로, 가스 유동장내 비행입자의 거동과 함께 개별입자의 적층거동을 연구함으로써 코팅 형성 과정에 대해 이해할 수 있다. 충돌입자의 적층거동은 매우 짧은 시간을 통해 발생하는 복합적인 충돌과정을 거치고 비행단계에서의 입자 에너지가 변형을 통해 전환되는 과정이다. 따라서, 초기 충돌입자의 에너지 상태 뿐만 아니라 코팅 분말입자의 특성 및 충돌면 소재의 특성 [모재 혹은 먼저 적층된 코팅]에 따라서 상이한 적층거동을 보인다. 본 연구에서는 분말 예열온도가 적층거동에 어떠한 영향을 주는지 관찰하기에 전에 온도에 따른 벌크 비정질 분말의 열적-기계적 특성을 알아보기 위해, Fig. 4와 같이 온도를 올리면서 코팅층의 경도값을 측정하였다. Fig. 4의 결과에서 알 수 있듯이, 300 $^{\circ}\text{C}$  이하에서는 높은 경도값을 유지한다. 하지만, 온도가 올라갈수록 경도값이 선형적으로 감소하다가 소위 과냉액상영역 ( $\Delta T$ ) 구간인 550 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 급격히 떨어지는 초소성 현상을 보임을 알 수 있다. 따라서, 비행입자의 열 에너지에 따라 벌크 비정질 입자의 적층거동은 크게 달라질 것으로 예상된다.

### 3.2 분말예열 온도에 따른 개별입자 적층거동

Fig. 5와 같이 충돌입자의 단면 조직사진을 통해 분

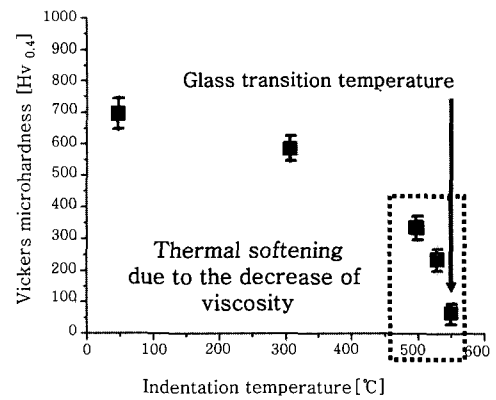


Fig. 4 Vickers microhardness of feedstock powder according to indentation temperature

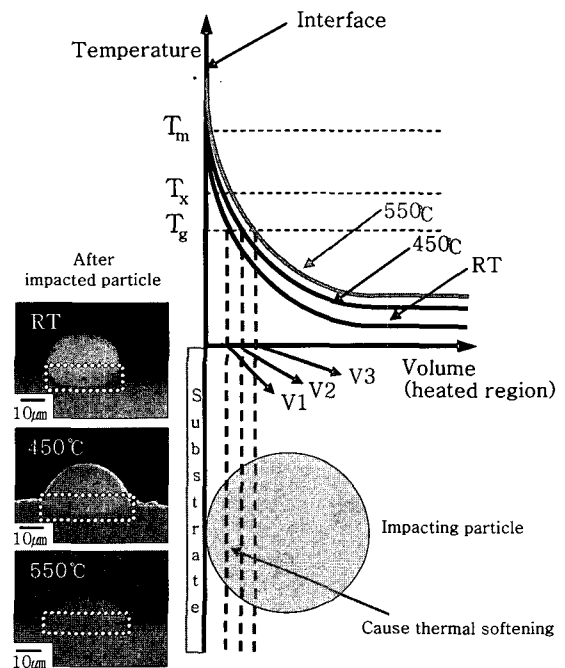


Fig. 5 Impact behaviors according to the powder preheating temperature

말예열 온도에 따른 충돌입자의 변형거동을 관찰하였으며 Fig. 6과 같이 충돌입자의 변형정도 (flattening ratio)를 계산하여 분말예열 온도가 충돌입자의 변형에 미치는 영향을 알아보았다. 초기 분말예열에 의해 입자는 더 연화되고 충돌시 열이 발생할 수 있는 가열영역이 증가하게됨을 알 수 있다. 따라서, 단열 과정에 의한 벌크 비정질 분말의 소성변형 영역이 증가하게 되고 더 많은 열적연화가 발생하여 Fig. 5와 같이 초기분말 예열온도가 증가할수록 충돌 입자에 더 많은 변형이 발생함을 알 수 있다. Fig. 6의 충돌입자 변형정도를 계산을 통한 결과에서도 같은 결과를 얻었다.

벌크 비정질 소재의 변형거동은 일반적으로 알 수 있

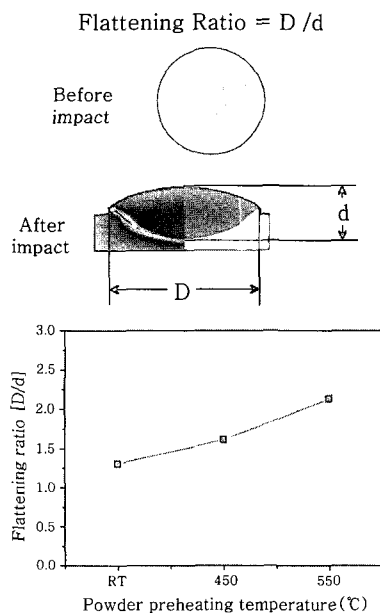


Fig. 6 Flattening ratios according to the powder preheating temperature

듯이 온도와 변형속도에 영향을 받으며 실험조건에 따라서 불균질 변형과 균질 변형이 관찰된다<sup>16)</sup>. 유리전이 온도 이하의 온도에서 외부응력이 주어지는 경우 응력이 국부지역에 집중되는 (strain localization) 현상이 발생하여 전단띠가 형성된다. 변형이 집중된 전단띠는

열적인 연화현상이 동반되므로 또 다시 변형을 가속시키게 된다. 이러한 변형기구에 의해서 저온에서의 벌크 비정질은 파괴에 앞서 외관상 무시할 만큼의 소성변형을 일으킨다. 그러나, 온도가 유리전이온도 이상에서 결정화 온도 이하의 과냉액상 영역에 도달되는 경우 저온 불균질 변형거동과는 전혀 다른 초소성의 거동을 나타낸다. 이는 단범위 규칙성을 가지는 비정질 기지내 원자의 이동도가 높아 외부 응력을 완화시키는 방향으로 원자의 이동이 자유로워 지기 때문이다. 그러나, 결정화가 이루어지면 다시 소성은 취성을 보이게 된다<sup>17)</sup>. 초기분말의 예열온도에 따른 충돌입자의 불균질 변형과 균질 변형 적층거동을 관찰하기 위해 Fig. 7과 같이 분말예열 온도에 따른 개별입자 적층 시험 후, 유리전이 온도 (Tg) 이하의 온도와 과냉액상영역 (Tg~Tx) 온도로 구분하여 관찰하였다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 유리전이온도 이하의 조건에서는 충돌된 입자의 표면에 현저한 전단 띠를 가진 심한 파단현상이 나타났다. 이 경우, 충돌시 충돌응력이 형성되고 열적 연화가 일어나기 전에 비정질 분말의 최대 파단강도를 넘었을 때 충돌 입자에 파단이 발생하게 된 경우이다. 하지만 초기분말의 예열을 통해 분말에 추가적인 열을 줌으로서 Fig. 7 (b)처럼 충돌된 입자 표면에 극심한 파단현상없이 심한 소성변형이 일어남을 알 수 있다. 이 경우

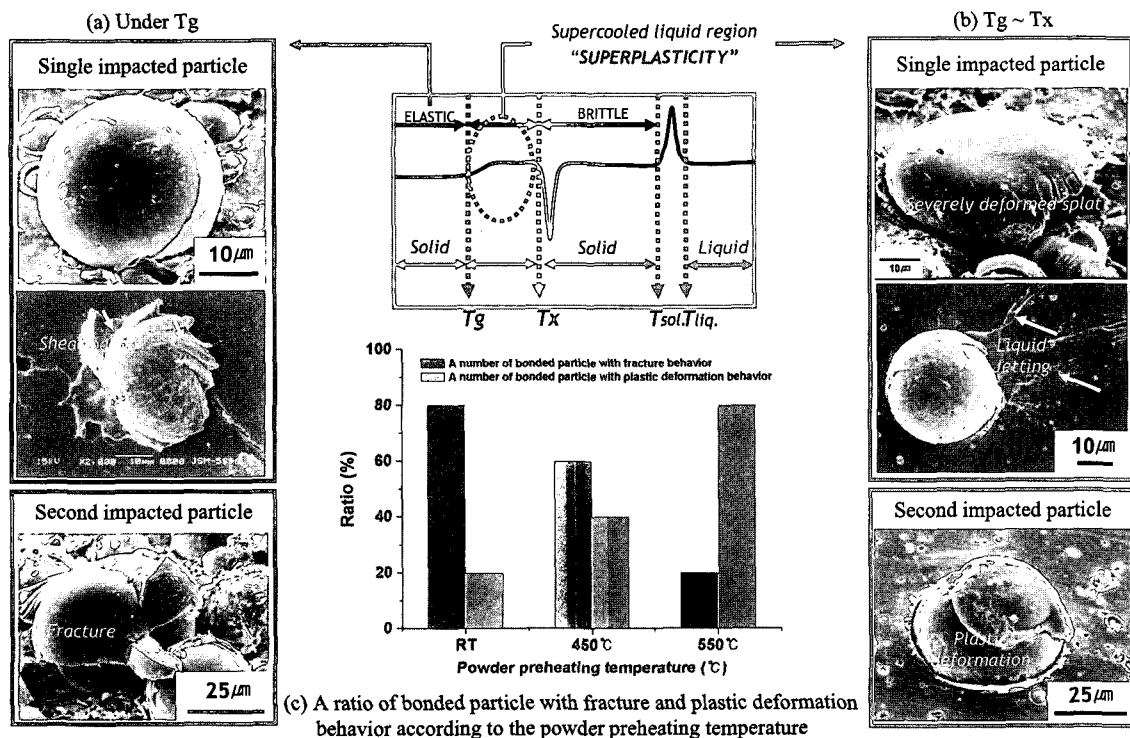
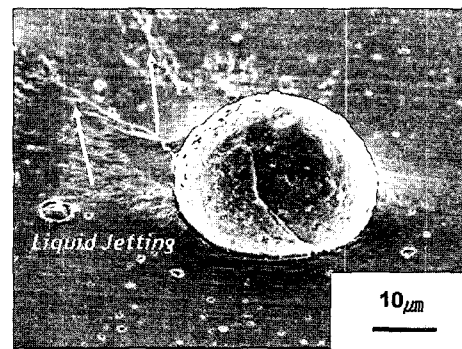


Fig. 7 Characteristic plane-view morphology of impacted particle according to the powder preheating temperature

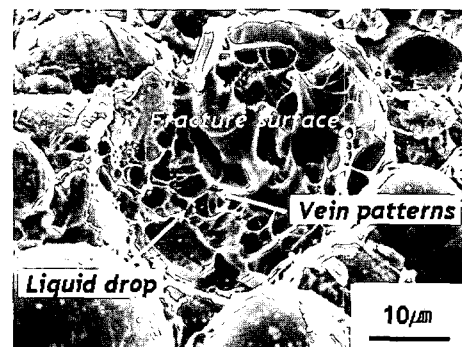
는 단열과정에서 열의 생성과 가열된 충돌입자의 연화에 의해 충격에너지 (응력)이 소성변형을 일으킴으로서 파단되지 않고 적층되어 있는 것을 보여준다. 분말에열을 함으로서 같은 비행입자의 운동에너지를 가지고도 좀 더 많은 영역이 쉽게 비정질 분말의 초소성구간에 도달할 수 있었기 때문이다. 열은 입자가 충돌하는 순간 에너지 변환과정을 통해 생성되고 충돌계면에서의 열의 축적속도는 열 생성속도와 소실속도에 의해 좌우된다. 열적 연화 속도가 응력 축적속도보다 빠를 때, 변형거동이 비균일한 변형에서 균일한 변형으로 갑자기 전이된다. 따라서, 입자와 입자의 충돌에서의 소성변형은 밀착 접촉 (intimate contact)의 결과이다. 반대로 응력 축적속도가 열적 연화보다 더 빠를 때, 충분한 변형 전에 파단이 발생한다. 충돌입자의 운동에너지, 스프레트에 존재하고 있던 결함, 그리고 충돌 입자의 온도 등과 같은 열적 연화 속도와 응력 축적속도 둘 다에 영향을 주는 많은 인자들이 있을 것이다. Fig. 7(c)의 결과에서 알 수 있듯이, 분말에열 온도에 따라 관찰되는 적층 거동은 파단에서 열적 연화에 의한 소성변형 거동의 비율 증가로 나타남을 알 수 있었다. 즉, 벌크 비정질 입자의 충돌시에는 경화요인이 아닌 동적파괴 (dynamic fracturing)와 열적 연화 (thermal softening)과의 경쟁적인 관점에서 적층거동을 접근할 수 있다. 또한, 벌크 비정질 소재의 변형 거동은 온도 외에 변형속도에도 영향을 받는다. 변형속도의 영향의 경우에는 일반적으로 변형속도의 증가는 온도의 감소와 유사한 영향을 주는 것으로 알려져 있는데 초소성 영역에서도 변형속도가 증가함에 따라 유동응력 (flow stress)이 증가하고, 파단에 이르는 변형량이 감소하게 된다. 저온 분사 코팅 공정인 경우, 음속으로 가속된 입자가 모재에 충돌하는 과정이고 모재와 비행 입자가 매우 짧은 충돌시간을 가지며, 변형 속도가 매우 빠르기 때문에 열이 유동할 시간이 없어 거의 단열상태에 가까운 조건이 된다. 즉, 매우 빠른 변형속도를 가진 조건에서는 벌크 비정질 소재의 변형을 수반하는 전단파의 생성속도가 적용된 변형속도를 수용하기에 충분하지 않기 때문에 과냉액상 영역에서도 쉽게 파단이 일어나게 된다<sup>17)</sup>. 또한, 일반적으로 벌크 비정질 소재는 매우 낮은 열전도율을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 충돌시 모재와 입자의 충돌계면에는 높은 응력이 집중된다. 그로인해, 계면에서는 소성변형에 의해 발생한 열이 집중되어 재료는 열적연화에 의해 유동응력이 감소하는 점성유동 (viscous flow)과정을 겪게 된다. 또한 하나의 쟁점이 되고 있는 계면의 불균질한 부분에 의해 변형이 집중되

어 국부적인 용융현상 (localization)이 발생하며 유동응력은 거의 '0'에 가까운 값을 가지게 된다.

Fig. 8은 벌크 비정질 분말을 이용한 저온 분사 코팅 공정에서 관찰되었던 용융현상이다. 첫 번째 경우는 충돌시 단열상태에서 국부적인 영역에 열이 집중되어 쉽게 용융온도까지 도달할 수 있으므로 Fig. 8(a) 경우와 같이 충돌시 계면에 용융에 의한 제트현상이 발생할 수 있다. Fig. 8(b)의 용융현상은 충돌시 계면에 높은 압력이 형성되고 연화가 일어나기전에 충돌압력에 의해 비정질 분말의 최대 파단강도를 넘었을 때 충돌한 비정질 입자에 파단이 발생하게 된다. 파단이 발생하는 순간 국부적인 영역에서 열이 집중되기 때문에 Fig. 8(b)와 같이 파단면에 vein 패턴이라든지 용융현상이 발생하게 된다. 두 번째 경우는 일반적으로 벌크 비정질의 압축 실험에서도 관찰되는 고유한 특성중 하나이다<sup>18,19)</sup>. 본 연구에서 분말을 과냉액상영역 (Tg~Tx) 온도까지 예열한 경우 초소성이 충돌입자 전체에 일어나야 하는데 저온 분사 코팅 공정에서는 충돌계면의 국부적인 영역에서만 일어났다. 예상할 수 있는 이유 중 하나는 초기분말이 Tg 온도까지 가열된 가스내부로 비행하는 동안 열이 충분히 모재에 전달되지 못했을 경우도 있고, 분말의 표면온도가 Tg 온도까지 올라가더라도 일반적으로 비정질 소재는 열전도도가 매우 낮기 때문



(a) Interfacial melting



(b) Local melting

Fig. 8 Melting phenomena in the bulk metallic glass

에<sup>20)</sup> 가열된 분말의 표면에서 내부까지 온도 구배가 생기기 때문이다. 다른 하나는 저온 분사 코팅 공정처럼 변형 속도가 매우 빠른 조건에서는 유동응력 (flow stress)이 증가하고 유동변형 (flow strain)이 감소하여 변형이 더 어려워진다<sup>17)</sup>.

이상의 벌크 비정질 분말의 적층과 관련해서는 일반적으로 저온 분사에서 연구된 연성소재에서의 충돌거동과는 상이한 거동을 보였다. 대표적인 충돌거동으로 국부 전단파 형성, 파괴, 용융입자 및 변형입자가 관찰되었다. 이는 벌크 비정질 소재의 특이한 기계적, 열-기계적 특성에 기인하는 현상으로 사료된다. 벌크 비정질의 변형거동은 온도와 변형속도에 따라 크게 달라진다. 특히, 온도가 증가하면 불균일변형에서 균일변형의 전이 가 발생하는 것으로 알려져 있다. 불균일변형은 저온과 빠른 변형속도에서 소재의 국부영역에서의 변형 집중이 발생하고 이는 전단파를 형성하게 된다. 반면, 구조적인 완화가 발생하는 과냉액상 영역에서는 점성의 급격한 감소가 발생하고 외부응력에 대한 저항이 급격히 감소하면서 균일한 변형이 발생하는 초소성이 관찰된다. 결론적으로, 벌크 비정질의 적층거동을 연성입자의 충돌거동 (연성입자의 충돌시에는 변형을 통한 경화적인 요인과 변형을 통해 발생하는 열에 의한 연화적인 요인의 상호경쟁적인 관점에서 제시된 단열적층 거동이 유효한 적층기구로 알려져 있다)과 비교할 때, 벌크 비정질 입자의 충돌 시에는 경화요인이 아닌 동적파괴와 열적 연화와의 경쟁적인 관점에서 적층거동을 설명할 수 있었다. 다시 말해서, 충돌시 국부영역에서의 응력 집중과 국부 변형을 통해 발생한 열에 의한 온도상승의 경쟁적인 관점에서 충돌입자의 극심한 파괴에서부터 비이상적인 변형이 유발할 수 있다는 것을 실험적으로 확인하였다. 실제로, 계면에서 용융액상 응고조직이 관찰되었고, 분말입자의 온도를 가열하는 실험을 통해 유사한 충돌속도에서도 매우 극심한 변형이 유발되는 것을 통해 충돌시 연성소재의 충돌현상에서 관찰되는 단열적층 거동이 유효하다는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

NiTiZrSiSn 벌크 비정질 조성의 분말을 저온 분사 공정을 이용하여 개별입자 적층거동 실험을 통해 다양한 형상의 벌크 비정질 스프래트를 관찰하였다. 대표적인 적층 미세조직은 전단파, 균열 및 용융액상 응고조직이 있다. 저온/빠른 변형속도에서 소성거동이 없는 벌크 비정질의 적층거동을 통해 연성입자 충돌시 발생하는 단열적층 거동이 주요한 적층기구로 사료된다. 단, 경화요인과 열적연화 요인간의 상호 경쟁이 연성소재의 적

층에 있어 단열적층 거동 (adiabatic shear instability)의 기준이 되는 반면, 벌크 비정질의 경우 동적파괴와 열적연화간의 상호경쟁이 적층의 기준이 되는 것으로 판단된다. 이에 대한 대표적 배경은 계면 액상형성과 분말에 열 온도 상승에 따른 스프랫 변형정도의 향상이 있다.

#### 후 기

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2006-02289).

#### 참 고 문 헌

1. Thierry Gloriant, J. Non-Crystalline Solids, **316** (2003) 96-103
2. A. L. Greer, Materials Science and Engineering A, **304-306** (2001) 68-72
3. L.F. Liu, L.H. Dai, Y.L. Bai, B.C. Wei and G.S. Yu, Intermetallics, **13** (2005) 827-832
4. Xueshan Xiao, Shoushi Fang, Lei Xia, Weihuo Li, Qin Hua and Yuanda Dong, Journal of Non-Crystalline Solids, **330** (2003) 242-247
5. Toshiji Mukai, T. G. Nieh, Yoshihito Kawamura, Akihisa Inoue and Kenji Higashi, Intermetallics, **10** (2002) 1071-1077
6. T. G. Nieh, C. Schuh, J. Wadsworth and Yi Li, Intermetallics, **10** (2002) 1177-1182
7. Jingwei Wu, Hongyuan Fang, Sanghoon Yoon, HyungJun Kim and Changhee Lee, Scripta Materialia, **54** (2006) 665-669
8. Hanshin Choi, Sanghoon Yoon, Sangho Uhm, Changhee Lee, Surface and Coatings Technology, **192** (2005) 374-381
9. Sanghoon Yoon, Changhee Lee, Hanshin Choi, Hyoungho Jo, Materials Science & Engineering A, **415** (2006) 45-52
10. Sanghoon Yoon, Hyung Jun Kim, Changhee Lee, Surface and Coatings Technology, **200** (2006) 6022-6029
11. Hanshin Choi, Sanghoon Yoon, Gilyoung Kim, Hyoungho Jo and Changhee Lee, Scripta Materialia, **53** (2005) 125-130
12. T. Schmidt, F. Gartner, H. Kreye, Thermal Spray 2003: Advancing the science & applying the technology, ASM international, Ohio, USA, (2003) 9-18
13. M. Grujicic, C. L. Zhao, W. S. DeRosset and D. Helfritsch, Materials and Design, **25** (2004) 681-688
14. F. Gartner, C. Borchers, T. Stoltenhoff, H. Kreye, Thermal Spray 2003: Advancing the science & applying the technology, ASM international, Ohio, USA, (2003) 1-8

15. Hamid Assadi, Frank Gartner, Thorsten Stoltenhoff, Heinrich Kreye, *Acta Materialia*, **51** (2003) 4379-4394
16. J. Lu, G. Ravichandran, W.L. Johnson, *Acta Materialia*, **51** (2003) 3429-3443
17. L.F. Liu, L.H. Dai, Y.L. Bai, B.C. Wei and G.S. Yu, *Intermetallics*, **13** (2005) 827-832
18. M. Heilmaier, *Journal of Materials Processing Technology*, **117** (2001) 374-380
19. Z.F. Zhang, J. Eckert, L. Schultz, *Acta Materialia*, **51** (2003) 1167-1179
20. Michiaki Yamasaki, Shinya Kagao, Yoshihito Kawamura, *Scripta Materialia*, **53** (2005) 63-67