

용사 공정에 의한 비정질 코팅

이상용·이창희

Amorphous Coating by Thermal Spray Process

Sangyong Lee and Changhee Lee

1. 서 론

비정질 합금은 원자가 규칙적인 배열을 가지는 일반적인 금속재료와 달리 불규칙한 액상의 구조를 가지는 금속재료이다. 이러한 구조적 특성을 가지는 비정질 합금은 자기적, 기계적, 전기적 특성, 그리고 내부식 및 내마모성에서 우수한 성질을 보임으로서 새로운 기능성 재료로서 관심이 증대되고 있다¹⁻²⁾.

액상으로부터 비정질 합금을 제조함에 있어, 용융점 (T_m)과 유리전이 온도(T_g)사이에서 핵생성 및 핵성장을 억제하기 위해서 충분한 냉각속도($10^5 \sim 10^6 K/s$ 이상)가 요구된다²⁾. 이러한 냉각속도를 만족하기 위해서는 비정질 합금의 두께에 제한이 따르므로, atomization에 의한 분말 제조, melt-spinning에 의한 리본 제조, 그리고 박판 제조가 주를 이루었다³⁾.

최근 비정질 합금 형성에 있어 높은 열적 안정성을 갖고 $10^{-2} K/s$ 의 서냉에서도 비정질을 형성할 수 있는 벌크 비정질 합금에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 벌크 비정질 합금은 copper mold casting, high pressure die casting, unidirectional melting 그리고 water quenching 등의 방법으로 생산되고 있다⁴⁾.

비정질 형성에 대한 새로운 접근 방법으로 용사에 의한 비정질 코팅이 연구 되었고, 1984년 산업적 적용 이래 많은 연구 및 적용사례가 발표되고 있다. 보호막 코팅에 있어 비정질 합금은 우수한 기계적 성질뿐만 아

니라 내부식 및 내마모 특성에 있어 좋은 특성을 보임으로서 산업 전반에 걸쳐 관심이 증대되고 있다. 다양한 기술로 비정질 코팅을 형성하고 있으며, Table 1에서 보여주고 있다. 위 기술 중에서 용사 코팅 공정은 $10^6 \sim 10^8 K/s$ 의 냉각속도를 가지고 있어 다양한 조성의 비정질 분말을 사용하여 비정질 코팅 층을 형성할 수 있다. 또한 다른 제조 공정과 비교해 양산화가 쉬우며, 공정이 간단하고 비정질상의 형성과 동시에 벌크 비정질 코팅 피막을 0.05-2mm까지 형성 시킬 수 있는 가장 경제적인 방법이다⁵⁾.

비정질 용사 코팅에 있어, 적층된 입자 두께 및 응고 초기 온도(냉각속도), 분말 및 코팅층의 산화정도 그리고 모재 및 모재 온도, 코팅층의 두께, 분말의 초기 조직(비정질상, 결정상), 기타 인자 등이 주요 인자로 작용하는 실험결과가 보고 되고 있다⁵⁻⁶⁾.

본 보에서는 비정질 용사 코팅에 있어 공정 변수에 대한 영향 및 비정질 코팅의 내부식, 내마모 특성, 그리고 비정질 코팅의 결정화에 대해 소개하였다.

2. 벌크 비정질 합금

일반 비정질 합금은 우수한 기계적, 물리적 성질에도 불구하고 $10^5 \sim 10^6 K/s$ 이상의 냉각속도에서만 비정질상이 형성된다. 그래서 형성된 비정질 합금 두께(50 μm)에 제한이 따르므로 분말, 리본, 박판으로만 제조되었

Table 1 Possible production routes for amorphous metallic coatings⁵⁾

Atomic Deposition	Liquid Phase Quenching	High-energy Displacement
Chemical Vapor	Thermal Spraying	Mechanical Deformation
Physical Vapor Deposition	Laser Surface Remelting	Ion Bombardment
Cathode Sputtering	Friction Glazing	Metamorphic Transformation
Electro Deposition	Plannar Flow Casting	

다. 따라서 산업 전반에 응용하기 위해서 비정질 합금의 벌크화가 필수적이었다. 1990년대 일본과 미국 등지에서 벌크 비정질 합금에 대한 새로운 합금계가 개발되었으며, 주조에 의해 10-10²K/s의 서냉에서도 1-100mm까지 다양한 두께를 가지는 벌크 비정질 합금이 개발되었다. 지금까지 개발된 벌크 비정질 합금계는 Table 2에 나타나 있다.

또한 벌크 비정질은 합금은 초소성 특성을 보이는 넓은 과냉각액체영역($\Delta T_x = T_x - T_g$)이 나타남으로서 높은 가공성을 지니고 있다^{7,8)}.

이와 같이 벌크화가 가능한 합금계의 개발로 인해 우수한 물성을 갖는 비정질 합금의 구조 및 기능성 재료로의 다양한 응용이 가능하게 되었고, 따라서 골프 클럽 헤드, 자동차, 항공기의 부품, 낚시대, 자전거 등 고부가가치 제품의 소재로 이미 이용되거나 개발되고 있는 상황이다⁹⁾.

3. 비정질 형성에 관한 공정 변수

3.1 입자 속도

Table 3는 입자속도에 대한 적층된 입자 두께 및 비정질 분율에 대한 실험결과이다⁶⁾. 적층된 입자의 두께가 4-25 μ m를 가지는 코팅보다 1-8 μ m의 두께를 가지는 plasma supersonic 코팅 층 내의 비정질 분율은 80-90%로 현저히 높은 결과를 나타내고 있다.

용사 공정에서 입자 속도는 적층되는 입자의 변형에 큰 영향을 일컫는다. 이 실험에서 사용된 supersonic plasma spray는 subsonic plasma spray 비해 4-5배의 빠른 입자속도를 가진다. 이는 적층되는 입자의 운동에너지를 증가시켜 얇으면서 넓은 면적이 모재와 접촉이 이루어진다. 적층된 입자의 응고과정에서 열 방출이 용이하게 되면서 코팅 층 내의 비정질 분율을 높인 원인으로 작용하였다.

3.2 모재 온도

Table 4은 모재 온도를 변화 시키면서 코팅 층 내의 비정질 분율에 대한 연구 결과이다⁵⁾. 용사 공정시 150 $^{\circ}$ C로 예열 처리후, 모재 최고 온도를 Hot (T_{max}

Table 2 Bulk amorphous alloys systems and calendar years⁷⁾

	Years
I. Nonferrous metal base	
Mg-Ln-M(Ln=Lanthanide metal, M=Ni, Cu or Zn)	1988
Ln-Al-TM(TM=VI~VIII group transition metal)	1989
Ln-Ga-TM	1989
Zr-Al-TM	1990
Zr-Ti-Al-TM	1990
Ti-Zr-TM	1993
Zr-Ti-TM-Be	1993
Zr-(Nb,Pd)-Al-TM	1995
Pd-Cu-Ni-P	1996
Pd-Ni-Fe-P	1996
Pd-Cu-B-Si	1997
Ti-Ni-Cu-Sn	1998
II. Ferrous metal base	
Fe-(Al,Ga)-(P,C,B,Si,Ge)	1995
Fe-(Nb,Mo,)-(Al,Ga)-(P,B,Si)	1995
Co-(Al,Ga)-(P,B,Si)	1996
Fe-(Zr,Hf,Nb)-B	1996
Co-Fe-(Zr,Hf,Nb)-B	1996
Ni-(Zr,Hf,Nb)-(Cr,Mo)-B	1996
Fe-Co-Ln-B	1998
Fe-(Nb,Cr,Mo)-(P,C,B)	1999
Ni-(Nb,Cr,Mo)-(P,B)	1999

190 $^{\circ}$ C), Standard(\ll 80 $^{\circ}$ C, air cooling), Cold (\ll 0 $^{\circ}$ C, liquid nitrogen cooling)로 유지하고 다른 용사 공정은 동일하게 하여 실험하였다.

모재 온도를 80 $^{\circ}$ C와 40 $^{\circ}$ C이하로 유지한 실험은 두 실험은 비슷한 비정질 분율을 보인 반면, 190 $^{\circ}$ C이하로 유지한 실험은 낮은 비정질 분율을 나타내고 있다. 이는 적층된 입자의 냉각속도와 관련이 있다. 화염에서 비행하는 동안 완전 용융된 입자가 모재에 적층할 때 비정질상을 형성하기 위해서는 충분한 냉각속도가 필요하다. 이러한 냉각속도는 적층된 입자에서 모재로의 열 방출이 용이함으로서 얻어진 것이다. 동시에 코팅 층의 두께를 증가시키기 위해서는 미리 형성된 비정질상이 결정화 온도(T_x) 이상으로 재 가열이 이루어지지 않고, 다음 입자의 적층이 이루어져야한다. 그러기 위해서는 적절한 냉각시스템을 장치하여 모재 온도를 일정 온도 이하로 유지시켜 줘야한다.

Table 3 Characteristics of plasma coatings of alloy FeMoCrNiB⁶⁾

Type of Coating	Porosity vol. %	Pores size μ m	Deformed particles thickness μ m	Amorphous phase content %
Plasma Subsonic	2-3	10-40	4-25	65
Plasma Supersonic	1.5-2	2-10	1-8	80-90

Table 4 Influence of the maximum substrate temperature and powder microstructure on the amorphous content of the NiMoFeB coatings⁵⁾

Powder	Method	Amorphous Wt%		
		"Cold" T _{max} <40°C	"Standard" T _{max} <80°C	"Hot" T _{max} <190°C
Amorphous	Comminuted Ribbon	65	67	37
Crystalline	Water-atomized Powder	69	60	32
Crystalline	Heat Treated Ribbon	-	60	-

3.3 분말 조건

초기 분말 변수로 조직은 비정질, 결정, 결정화된 분말로 나누었고, 분말 사이즈는 <14, 14-32, 32-36, 36-80 그리고 80-125 μ m 로 구분하여 실험을 실시한 결과는 Table 4과 Fig. 1에 나타내었다.⁵⁾

Table 4에서 나타난 결과를 보면 코팅층의 비정질 분율에 있어 약간의 차이를 보일 뿐 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 분말의 초기 조직에 관계없이 분말이 화염에 비행하는 동안 완전히 녹은 상태에서 모재에 적층이 이루어지므로 초기 조직에 큰 영향을 받지 않는다. 그러나 일부 반응용된 입자가 적층되는 HVOF(High Velocity Oxygen Fuel) 용사 공정에서는 초기 분말 조직이 완전 비정질상을 사용하는 경우 코팅 층 내에 비정질 분율이 증가 될 수 있다는 의견도 있다. 또한 입자가 용융되지 않는 고상 상태에서 속도만으로 코팅 층을 형성시키는 Kinetic spray 공정에서는 초기 분말 조직이 완전 비정질 상을 형성하고 있어야 한다.

Fig. 1은 크기에 따른 분말의 비정질 분율 및 초기

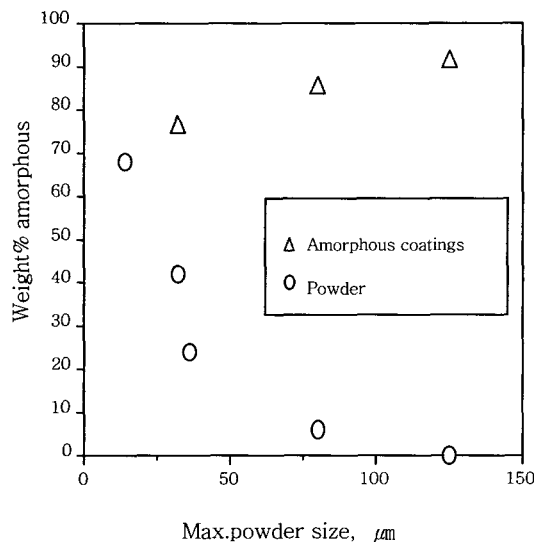


Fig. 1 Comparison of the influence of powder size⁵⁾

분말 크기 별로 비정질 코팅 형성시 비정질 분율에 대한 결과이다. 분말의 비정질 분율은 예상한 바와 같이 크기가 증가 할수록 비정질 분율은 감소하고, 125 μ m에서 완전 결정상을 가진다. 그러나 초기 분말 조직에 상관없이 분말 크기가 증가할수록 코팅 층의 비정질 분율은 증가하는 결과를 보인다. 이는 위에서 언급한 적층된 입자의 두께에 관한 이야기와 상반된 결과를 보이고 있다. 하지만 이 실험에서는 입자가 완전 용융된 상태에서 적층이 이루어졌으며, 적층된 입자가 비정질 상이 형성될 수 있는 충분한 냉각속도가 이루어 졌으며, 미리 형성된 비정질 상도 재결정이 이루어지지 않도록 모재 온도를 일정 온도 이하로 유지시켜 준 결과 이와 같은 실험결과를 얻었다고 사료된다.

3.4 화염 온도 및 용사거리

Fig. 2와 Fig. 3은 Zr-base 비정질 분말 소재를 이용하여 용사거리와 연료 유량의 공정 변수에 대한 HVOF 코팅 실험 결과를 보여주고 있다. 실험변수로 용사거리를 고려하였을 때는 연료유량을 고정 시켰고, 연료 유량을 실험변수로 고려시 용사거리를 고정시킨 실험에 대한 결과이다¹⁰⁾.

300mm 거리에서 코팅층 내의 비정질 분율이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 300mm 거리 이상에서는 비정질 분율이 감소하는 결과를 보인다. 이는 용사 거리 증가에 따른 화염의 온도 감소로 용융된 입자의 표면에서 응고가 발생한다. 표면이 응고된 상태로 모재에 적층이 이루어지므로 코팅층 내부에 결정 분율이 증가 되는 원인으로 작용되는 것이다. 200mm 용사거리에서 비정질 분율이 가장 낮은 이유는 산화물이 다량 형성되었기 때문이다. 이는 HVOF 화염이 모재에 직접 닿아 모재 온도가 증가했을 뿐만 아니라 용사거리가 짧을 수록 대기중에 포함된 산소가 화염 내부로 들어와 모재에 보내어 지는 산소량이 증가하게 된다¹¹⁾. 모재의 온도가 증가됨으로서 적층된 입자들이 다량의 산소와 결합하여

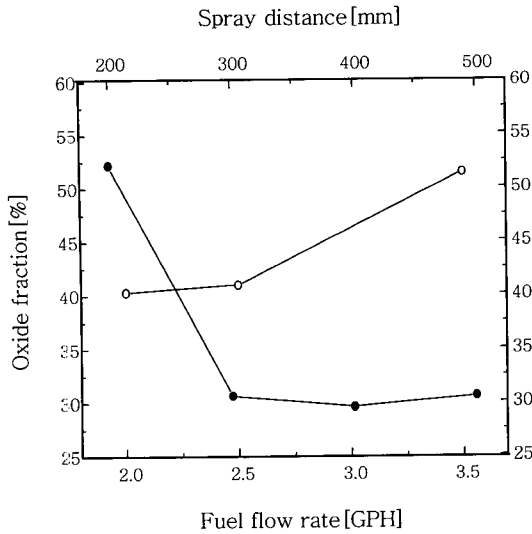


Fig. 2 Variations of the oxide fraction(%area) in spray coatings with different fuel rates and spray distances¹⁰⁾

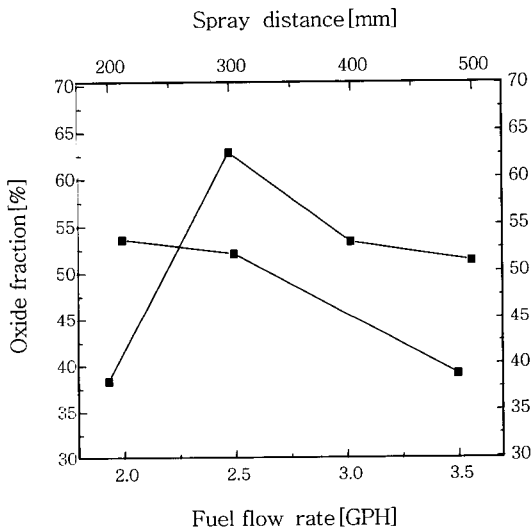


Fig. 3 The variations of the amorphous phase fraction (%area) in spray coatings with different flow rates and spray distances¹⁰⁾

산화물 형성이 쉽게 된다. 그 결과 다량의 산화물 형성이 코팅층 내부의 비정질 분율을 감소시키는 원인으로 작용하였다.

두 번째 실험으로 연료 유량이 증가하면서 코팅층 내의 비정질 분율이 감소하는 결과를 보인다. 연료 유량의 증가는 화염 온도를 증가시킨다. 이는 코팅층 내의 산화물 형성을 촉진시키는 결과 비정질 분율이 감소된 원인이다.

또한 용사거리 짧을수록 모재의 온도가 증가함으로써 코팅층내에 산화물이 증가뿐만 아니라 냉각속도에 영향을 준 결과로 사료된다.

3.5 코팅 프로세스

이전 연구에서 Fe-10at.%CR-13at.%P-7at.%C 비정질 분말을 LPPS(low-pressure plasma spraying), HPS(high-energy-plasma spraying), 그리고 HVOF의 공정을 이용하여 비정질 코팅 실험을 실시하였다¹²⁾. LPPS 공정에서만 100% 비정질 코팅이 형성되었다. 이 실험에 대한 결과는 Fig. 4에서 보여주고 있다. 그러나 코팅 공정을 결정함에 있어 산업 적용에 제한이 없는지를 고려해 봐야 한다. LPPS 공정인 경우 low-pressure vessel 안에서 코팅을 실시하기 때문에 모든 산업에 적용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 그러므로 대기에서 코팅 공정이 이루어지는 다른 용사 공정을 이용 비정질 코팅을 형성시키는 연구가 이루어지고 있다. 최근에는 화염의 열원이 높지 않고 화염 속도가 빠른 HVOF 공정을 이용하여 비정질 코팅 형성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Otsubo는 HVOF 공정을 이용하여 100% 비정질 코팅에 성공하였다¹³⁾. 이는 비정질 형성이 잘 되는 초기 분말을 이용했을 뿐만 아니라 다양한 공정 변수를 통한 연구결과이다.

비정질 코팅에 있어 용사 공정과 달리 분말을 용융시키지 않고 압축가스(He, N₂, 공기 혹은 혼합 가스)의 초음속 제트로 가속시키면, 분말의 소성변형과 모재와 결합할 수 있는 충분한 속도(임계속도)에 이르게 되어 코팅이 형성되는 Kinetic spray 기술이 새로운 대안으로 제시되고 있다¹⁴⁾.

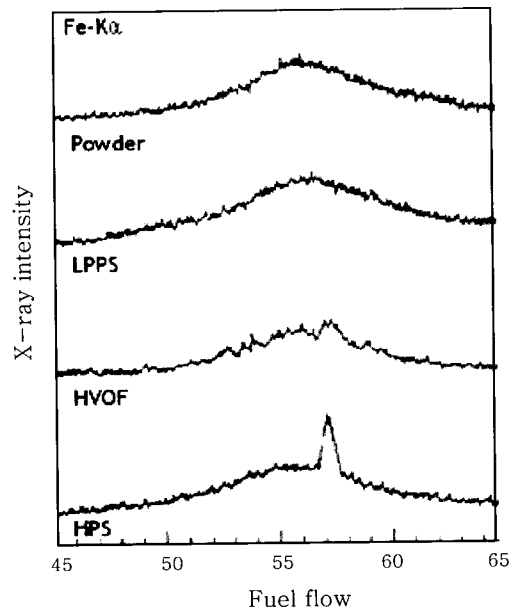


Fig. 4 XRD patterns of powder and as sprayed coatings¹²⁾

4. 비정질 코팅 특성

비정질 합금에 대한 부식 특성뿐 아니라 비정질 코팅 특성에 있어 부식에 대한 연구 결과가 다수를 이룬다(12-13,15-18). 이 중 Fig. 4는 Fe-10Cr-13P-7C 비정질 분말을 이용, LPPS, HVOF, HPS 공정을 사용하여 코팅 실험한 결과의 XRD 결과이다. LPPS 비정질 코팅 피막은 완전 비정질 상을 보인 반면 HVOF 와 HPS 는 부분적으로 결정화가 이루어졌음을 보인다. Fig. 5 는 0.05N HCl 용액이 포함된 6% FeCl₃-6H₂O 용액에 SUS316L 코팅 층은 10시간 동안, HPS, LPPS 코팅 층은 100시간동안 부식 실험 후 광학 현미경으로 찍은 사진이다. 그림에서 알 수 있듯이 LPPS 비정질 코팅 층은 부식이 거의 발생되지 않았다. HPS 비정질 코팅 층은 결정상이 존재하는 부분에서 부식이 발생했으며 SUS316L 코팅 층은 짧은 시간 동안 많은 부식이 발생함을 알 수 있다.

비정질 합금은 열역학적으로 불안정상이다. 그러나 그들은 결정 합금이 가지고 있는 grain boundaries, dislocations, stacking faults와 같은 결점들이 존재하지 않는 이상적인 화학적 균질 합금으로서 부식에 대한 저항성이 높은 것이다¹⁹⁾.

비정질 합금은 높은 경도와 강도를 보임으로서 부식 특성과 같이 내마모성에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다^{20,21)}. 비정질 코팅에 있어서도 내마모 특성에 대한 연구 사례가 있다. Borosiv는 FeMoCrNiB을 이용하여 플라즈마 용사 코팅을 실시하였다²²⁾. 그 결과 비정질 상을 많이 포함한 코팅 층이 높은 경도 값을 보인다. 그리고 높은 경도 값을 보인 코팅 층에서 내마모 특성이 우수한 결과를 나타내고 있다. 그러나 용사 코팅에서 비정질 상 형성만으로 코팅 층의 내마모성을 우수하다고 말할 수는 없다. 용사 코팅 층만이 가지고 있는 라멜라 구조 및 기공의 형성 등이 내마모 특성에 더 많은 영향을 미칠 수 있다²³⁾. 거기에 대한 실험 결과로 Fig. 6에 나타나 있다. 비정질 코팅 층이 높은 경도를 보이거나 급냉에 의한 다량의 기공 형성으로 내마모성은

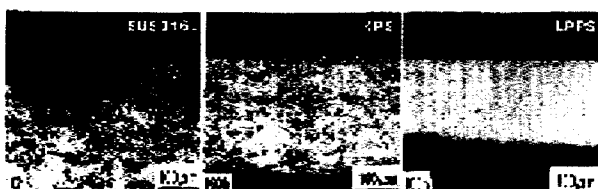


Fig. 5 Optical micrographs of coatings after immersion in 6% FeCl₃-6H₂O solution containing 0.05N HCl¹²⁾

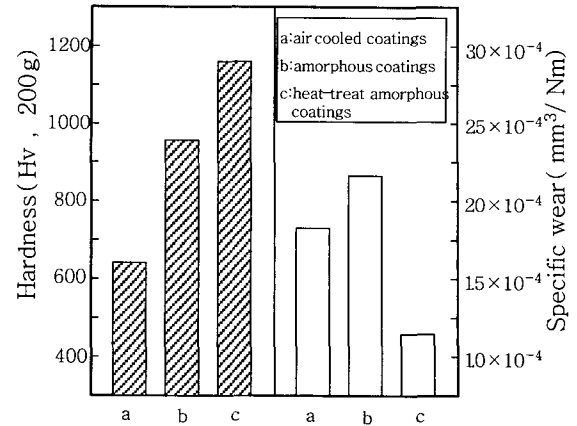


Fig. 6 Specific wear and hardness of amorphous coatings and heat-treated amorphous coatings²⁴⁾

저하했으며, 열처리한 코팅 층은 미세조직의 석출 및 기공 감소로 인하여 높은 경도와 우수한 내마모성을 나타내고 있다²⁴⁾.

5. 비정질 코팅의 결정화

비정질 합금은 우수한 기계적, 자기적 특성을 보이는 나노상을 형성하는 precursor로서 관심이 증가 되고 있다. 비정질 합금은 열처리를 통한 나노상을 형성하는 반면 비정질 코팅에 있어 후처리 없이 비정질 / 나노 복합상을 형성 높은 경도, 내부식성, 열적안정성을 보이고 있다. 또한 열처리 한 비정질 코팅 역시 나노 상을 형성하여 우수한 성질을 나타내고 있는 연구 결과가 다수 있다²⁵⁻²⁷⁾.

5. 결 론

위에 언급한 바와 같이 비정질 용사 코팅에 있어 용사 공정 변수는 다양할 뿐 아니라 변수들이 독립적으로 작용하기보다 상호 복합적으로 작용을 한다. 이 중 비정질 용사 코팅에 있어 가장 중요한 사항은 비행하는

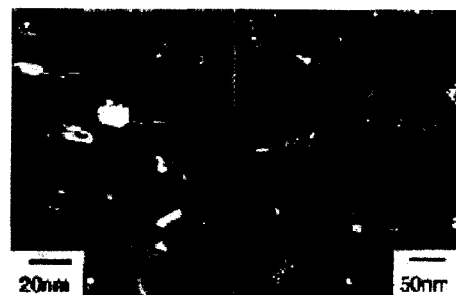


Fig. 7 (a) and (b) are dark field images of a second-phase precipitate in amorphous and nanocrystalline matrix regions²⁵⁾

동안 입자는 완전 용융이 일어나야 하며, 적층되는 입자는 충분한 냉각속도를 가져야 한다는 것이다. 또한 산화물이 형성되지 않은 것 또한 중요한 사항을 알 수 있다.

보호막 코팅으로서 비정질 용사 코팅은 우수한 기계적 성질뿐만 아니라 내부식 및 내마모 특성에 있어 좋은 특성을 보임으로서 선진국에서는 현재 많은 관심을 갖고 있는 연구 분야이다. 따라서 비정질 용사 코팅 기술은 1984년 이래 Fe-base, Ni-base, Zr-base 비정질 분말 재료에 대한 우수한 논문 결과가 발표되고 있다. 그러나 아직 대기에서 이루어지는 용사 공정에서 완전 비정질 코팅 층을 형성한 연구결과는 드물다. 하지만 GFA(Glass Forming ability)가 높은 벌크 비정질 합금이 지속적으로 연구 개발 되고 있으며, 비정질 용사 코팅에 있어 새로운 공정이 연구되고 있으므로, 대기 중에서 완전 비정질 코팅에 관한 많은 연구결과가 나올 것으로 기대되고 있다.

현재 국내에서 비정질 용사 코팅은 차세대 핵심 기술 개발 사업으로 선정되어 연구가 진행되고 있으며, 빠른 시일 내에 산업 전반에 걸쳐 핵심 기술로 적용 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. F.E.Luborsky : Amorphous Metallic alloys, F.E.Luborsky, ed., Butterworths, 1994, 1-7
2. A.Inoue, K.Hashimoto, Amorphous and Nanocrystalline Materials, ed, Springer
3. 임경득, 김형준, 김연욱, 박찬경 : 가스분무법으로 제조된 Zr65Al7.5Ni10Cu17.5 합금 분말의 비정질상 형성, 대한금속·재료학회지, **38-3**(2000), 403-408
4. A. Inoue : Bulk Amorphous Alloys, Materials Science Foundations, **4**(1998), 27
5. J.W.Luster, G.R.Heath, P.A.Kammer : Formation and Characterization of Corrosion-Resistant Amorphous Coatings by Thermal Spraying, Materials and Manufacturing Processes, **11-5** (1996), 855-867
6. A.Borosiva, Y.Borisov, V.Korzhyk, V.Bobrik : Effect of Spraying conditions on Amorphization and Properties of Thermal spray Coatings of FeCrMoNiB Alloy, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, (1995), 749-754
7. Akihisa Inoue : Stabilization of Metallic Supercooled Liquid and Bulk Amorphous Alloys, Acta mater. **48**(2000), 279-306
8. O.N.SenKov, D.B.Miracle : Effect of The Atomic size distribution on glass forming ability of amorphous metallic alloys, Materials Research Bulletin **36**(2001), 2183-2198
9. 이광석, 하태권, 안상호, 장영원 : 벌크 비정질 Zr-Ti-Cu-Ni-B₂ 합금의 고온 압축 변형 특성, 한국소성가공학회, **10-0**(2001)
10. H.J.Kim, K.M.Lim, C.G.Park : Amorphous phase formation of Zr-based alloy coating by HVOF spraying process, J. of Materials Science, **36**(2001) 49-54
11. Erich Lugscheider, christian Herbst, Lidong Zhao : Parameter studies on high-velocity oxy-fuel spraying of MCrAlY coatings, Surface and Technology, **108-109**(1998), 16-23
12. K.Kishitake, H.Era, F.Otsubo : Thermal-Sprayed Fe-10Cr-13P-7C Amorphous coatings Possessing Excellent corrosion Resistance, J. of Thermal spray Technology, **5-4**(1996), 476-482
13. F. Otsubo, H.Era, K.Kishitake : Formation of Amorphous Fe-Cr-Mo-8P-2C Coatings by the High Velocity Oxy-Fuel Process, J. of Thermal spray Technology, **9-4**(2000), 494-498
14. 김형준, 이창희, 권영각 : Cold spray 기술, 대한용접학회지, **20-4**(2002), 53-60
15. F. Otsubo, H.Era, K.Kishitake, H.Matsumoto : High Corrosion Resistant Iron-Based Amorphous Coatings Obtained by Thermal Spraying, Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, (1998), 659-664
16. A.Kawashima, J.Habazaki, K.Hashimoto : Highly corrosion-resistant Ni-based bulk amorphous alloys, Materials Science and Engineering, **A304-306**(2001), 753-757
17. A.H.Dent, A.J.Horlock, D.G.McCartney, S.J.Harris : The Corrosion Behavior and Microstructure of High-Velocity Oxy-Fuel sprayed Nickel-Base Amorphous/Nanocrystalline Coatings, J. of Thermal spray Technology, **8-3**(1999), 399-404
18. T.PShmyreva, L.V.Mukhina : Formation Behaviour of New Amorphous and Composite Materials in Detonation Gun and Plasma Spraying, Proceedings of the 7th national Thermal spray Conference, (1994), 201-204
19. K.Hashimoto : Amorphous Metallic alloys, F.E. Luborsky, ed., Butterworths, 1994, 471-486
20. G.Y.Liang, J.Y.Su : The microstructure and tribological characteristics of laser-clad Ni-Cr-Al coatings on aluminium alloy, Materials Science and Engineering, **A290**(2000), 207-212
21. Thierry Gloriant : Microhardness and abrasive wear resistance of metallic glasses and nanostructured composite materials, J. of Non-crystalline Solids **316**(2003), 96-103
22. Y.Borisov, V.Borisov, V.Korzhyk, V.Golnik, E.Lugscheider, P.Jokiel : Plasma Coatings of FeMoCrNiB Alloy with Amorphized Structure, Proceedings of the national Thermal spray Conference, (1993), 531-536
23. Hyung-jun Kim, Stephanic Grossi, Young-Gak Kweon : Wear performance of metamorphic alloy coatings, Wear, **232**(1999), 51-60
24. 정하윤, 김태형, 박경채 : Ni-Cr-B-Si계 비정질 용사피막의 제조 및 특성, 대한용접학회지, **17-4**(1999), 53-59

25. A.H.Dent, A.J.Horlock, D.G.McCartney, S.J.Harris : Microstructure formation in high velocity oxy-fuel thermally sprayed Ni-Cr-Mo-B alloys, *Materials Science and Engineering*, A283(2000), 242-250
26. A.L.Greer : From Metallic Glasses To nanocrystalline Solids, *Proceedings of the 22nd Riso International Symposium on Materials Science: Science of Metastable and nanocrystalline Alloys Structure*, Properties and Modelling, (2001), 461-481
27. G.Wilde, R.I.Wu, J.H.perepezko : Nanocrystal Development In Aluminum-based Metallic Glasses, *Proceedings of the 22nd Riso International Symposium on Materials Science: Science of Metastable and nanocrystalline Alloys Structure*, Properties and Modelling, (2001), 429-434



- 이창희(李昌禧)
- 1956년생
- 한양대학교 신소재공학부
- 용접야금/표면개질
- e-mail: chlee@hanyang.ac.kr



- 이상용(李尙鎔)
- 1976년생
- 한양대학교 신소재공학부
- 용사코팅
- e-mail: sangyonglee@ihanyang.ac.kr