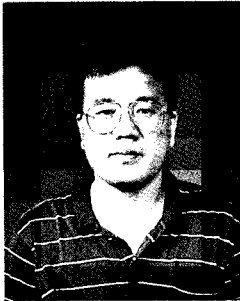


플라즈마 용사기술의 새로운 이해



김 성 완

(열처리 공학실장)

- '74 연세대학교 금속공학과(학사)
- '76 한국과학원 재료공학(석사)
- '82 (프) ENSMA(박사)
- '76-'78 KIST 연구원
- '85-'86 (미) Lehigh 대학 Visiting scholar
- '82-현 한국기계연구원 책임연구원



김 창 근

(주) 뉴테크 전무

- '74 연세대학교 금속공학과(학사)
- '77-'88 한국중공업
- '88-'91 삼성라디에이터 부장
- '92-현 뉴테크 전무, 기계연구원과 공동연구 추진중

1. 서 론

용사법이란 Bar, Wire, Powder등을 용융 또는 반용융시켜서 고속으로 분사시켜 피용사면에 피막을 만들어 내마모, 내부식, 육성등의 용도로 오래전부터 이용되어온 방법이다. 1960년대에 이르러 W음극과 Cu양극 노즐사이에 아아크(Arc)를 발생시켜 이온화시킨 플라즈마를 열원으로 사용하는 플라즈마용사법(그림 1)이 등장함으로써 종래에는 불가능하였던 Ceramic Powder의 용융이 가능하게 되었으며 높은 충격에너지를 얻을수 있어 Ceramic코팅의 시대가 개막되었다. 플라즈마 용사는 기존용사법에 비하여 Arc에 의해 불활성 기체를 가열함으로써 높은 에너지 밀도를 얻을수 있어 내화소재 용융이 가능하고, Plasma Jet에 의해 용융분말에 운동에너지를 크게하여 매우 큰 속도를 부여 할 수 있으므로 내마모, 내부식, 열차폐등에 세라믹코팅이 응용가능해졌다. 최근 30년간의 여러가지 실험결과에 힘입어 코팅층의 형성기구, 제어변수, 조직과 물성에 대한 이해가 증대됨에 따라 산업화가 널리 보급되기 시작하였다.

용사시 Generator에서 얻어지는 온도는 4000°T ($<15000\text{K}$ (그림 2) 가스속도는 200°V ($<1800\text{m/sec}$ 로써 일반적인 재료공학실험 범위를 넘어서므로 용사분말의 정확한 온도 측정 및 속도측정은 매우 어려우나 최근 몇년사이에 복잡한 실험방법의 고안에 따라 온도 및 속도 추정이 가능해짐에 따라 플라즈마 용사기술이 가일층 진보되고 있다.

플라즈마의 불균일성, 입도의 산포, 플라즈마 점성유체이동 및 분말공급의 어려움 등을 고려하면 코팅층재질의 열적, 역학적 변화는 Powder

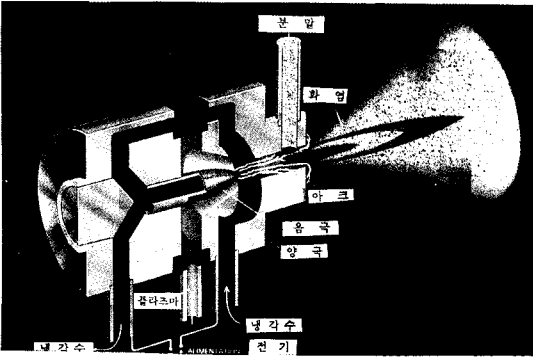


그림 1) 플라즈마 용사의 원리

충분치 못하다.

코팅층의 물성이란 용사조건에 따라 차이가 있고, 원하는 품질을 사용용도에 따라 크게 다르다.

예를들면 내마모 부품의 경우 95-98% 밀도를 가져야 하고 열차폐 부품의 경우 50%의 기공을 가져야 한다. 따라서 본고에서는 코팅층의 특성에 미치는 여러인자에 대하여 지금까지 밝혀진 지식을 종합함으로써 용사기술의 전반적인 이해와 향후 개발방향을 찾고자 하였다.

2. 코팅물성에 미치는 인자

2.1. 용사조직

플라즈마염을 통과하여 용융, 비산, 충격, 응고 및 냉각의 과정을 거친 용사조직의 단면은 그림 3,4,5와 같다.

동일조건하에서 용사가 이루어져도 나중에 용사되는 입자는 먼저 결정화 및 냉각이 이루어진 코팅층계면에 부착되어 코팅층을 형성하게 된다.

여러가지 열 전달 Model로 부터 계산된 결과에 의하면, 냉각은 몇 μsec 내에 이루어지고 완전히 냉각되는데 겨우 $100\mu\text{ sec}$ 정도 소요된다. 용사된 분말은 용융상태로 방울방울 날아와 충격에 의해 납작하게 되는데 이때 이로인한 열영향부는 매우 작고 열구배는 $10^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 정도 생기는 것으로 알려져 있다.

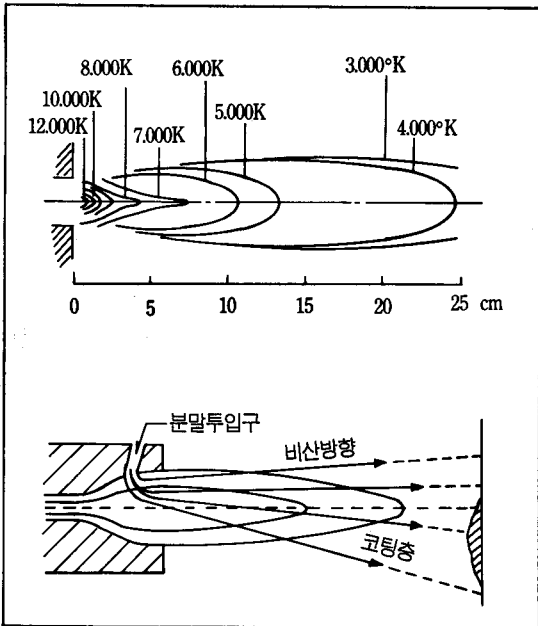


그림 2) 플라즈마 용사시 온도 및 코팅분말의 분포

용융여부 및 휘발여부에 따라 크게 차이가 있다. 일반적으로 플라즈마 용사에서 제어가능한 변수는 다음과 같이 생각할 수 있다.

- 1) 가스의 종류 및 유량
- 2) 분말의 종류, 량 및 입도분포
- 3) 전기 용량
- 4) 전극의 크기
- 5) 전극과 목표물간의 거리

그러나 코팅층의 물성을 좌우하는 충격순간의 온도 및 속도를 결정하는데는 상기 변수만으로는

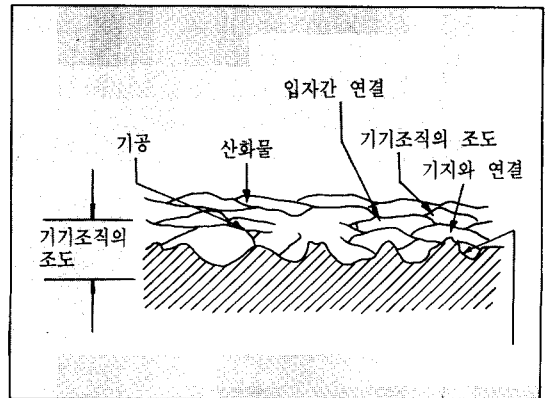


그림 3) 용사조직 단면의 모식도



그림 4) 코팅층의 SEM 관찰

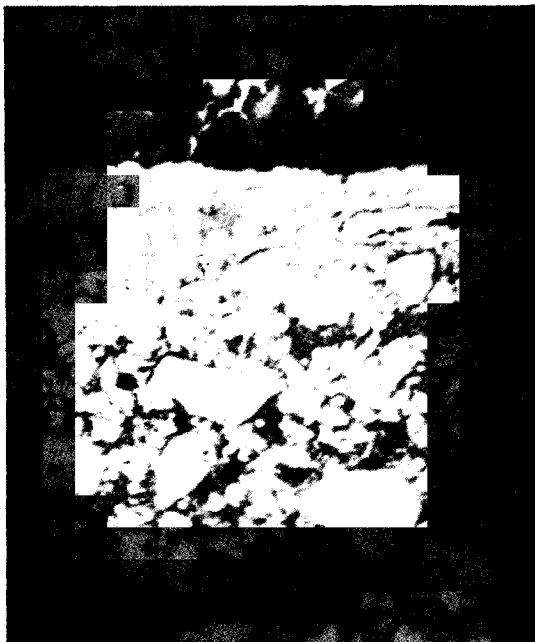


그림 5) 코팅층의 단면 현미경 조직

코팅층의 물성은 용사된 각각의 입자가 변형 및 응고 되는 동안 이러한 입자들의 접촉 및 상호작용에 의한 합으로 생각 할 수 있다. 그러므로 플라즈마 용사 코팅재라는 것은 심하게 납작한 상태로 변형되고 급냉된 입자들로 구성된 샌드위치 구조를 가진 재료의 일종으로 볼수있다.(여기에서는 용사된 분말이 모두 용융된 상태로 모재에 코팅된다고 가정하였지만 실제용융되지 않은 상태로도 부착된다.)

따라서 코팅층의 물성을 결정하는 가장 중요한 변수는 용융된 분말입자가 모재에 부딪히는 속도(모멘텀)와 그 순간의 온도임을 쉽게 유추 할수 있다. 이렇게 냉 모재(Cold Substrate)에 용융입자가 충돌할때의 열전달 현상이나 결정 성장을 고려한 입자들의 거동 및 응고에 대한 해석은 매우 어려우며 특히 이러한 현상은 매우 짧은 시간에 일어남으로 측정하기란 거의 불가능하다. 그럼에도 불구하고 용사시의 입자에 일어나는 열전달에 대한 최근 연구 결과에 따르면,

- ①냉각속도는 모재의 성질과 거의 무관하며 오히려 모재와 입자의 접촉면에 의해 결정된다(단 접촉면이 몇 μm 두께인 경우에)
- ②입자와 모재(먼저 용사되어 냉각된 코팅층도 포함하는 의미임) 계면에는 심한 열구배가 존재하여 실제 모재의 온도는 매우 낮은 온도일수있다. 이러한 사실때문에 압축공기로 모재의 표면을 냉각하면 플라즈마가스에 의한 모재의 가열을 막을 수 있어 나일론 같은 소재에도 코팅이 가능하다.

앞의 사실들을 종합하여 보면, 결국 코팅층의 물성은 용사시 용융된 입자들의 모재에 충돌시의 속도, 온도 및 입자 크기의 함수임을 알 수 있다.

2.2. 결합력

모재조직과 결합력은 매우 중요하지만 어떤 인자가 영향을 미치는지 아직까지 명확히 규명되지 않았으며 그 결합기구에 대해서도 많은 논란이 있다.

일반적으로 용융입자가 이미 응고된 입자 또는 미세한 요철부위가 있는 모재와의 상호작용에

의한 기계적, 물리적결합이라는 이론과 용융입자와 모재사이에 상호확산이나 부분용해에 의한 화학적 결합이라는 이론이 있다.

모재의 표면 상태는 코팅층의 물성에 크게 영향을 주므로 용사전에 탈지처리 한후 기계적 결합이 쉽게 일어날 수 있도록 깨끗하게 세척하여야 한다. Blasting작업은 일반적으로 용사하기 수 분전에 Sand혹은 Grit Blasting 처리를 한다. 결합력을 증대하기 위하여 Electroerosion 처리를 하는 경우도 있다. 이외에도 결합력에는 퍼짐성(Wettability)도 매우 큰 영향을 주는데 Cu의 경우 접착이 잘 안되는 모재의 하나이다.

코팅층의 결합력에 대한 측정 및 해석은 어렵지만 일반적으로 500kg/cm^2 정도이고 최대 4000kg/cm^2 까지 얻을 수 있다. 표 1은 각종의 플라즈마 용사 피막에 대한 결합력을 측정한 결과의 일례이다.

표 1) 각종 용사재료의 밀착력의 측정결과의 일례

용사재료	플라즈마가스	용사두께 mm	밀착력 kg/cm^2
88WC-12Co	Ar-He	0.2	538
88WC-12Co	N ₂ -H ₂	0.2	440
75CrC-25 (80Ni-20Cr)	Ar-He	0.2	567
Mo	N ₂ -H ₂	0.2	536
80Ni-20Al	Ar-He	0.2	635
80Ni-20Al	N ₂ -H ₂	0.2	437
95Ni-5Al	N ₂ -H ₂	0.2	487
Al ₂ O ₃ -13TiO ₃	N ₂ -H ₂	0.2	420

2.3. 내부응력

코팅층에 생기는 잔류응력은 각 입자내의 미시적인 응력과 전체에 걸친 거시적인 응력으로 구분 할 수 있다.

미시적인 응력(Micro Stress)은 용사된 입자사에서 냉각시 발생하는 수축에 기인된다. 거시적

응력(Macro Stress)은 용사재료와 모재의 열팽창 계수 차이에 의하여 용사 후 냉각되었을때에 생기는 것으로 용사시 적층될때의 온도 구배와도 관계가 있다. 인장잔류 응력이 아주크게 되면 경도가 낮은 표면의 코팅층의 탈락 및 균열이 생기기도 한다. 압축 잔류 응력은 파단강도를 향상시키므로 오히려 바람직스럽다. 잔류응력을 적게 하기 위하여 가능한한 온도구배를 줄일 필요가 있다. 그러나 열전도도가 낮거나 코팅층이 두꺼운 경우 잔류응력을 줄이기란 쉽지 않다. 피 용사면의 형상에 따라서 코팅층의 두께의 사용한계도 달라진다. 일반적으로 내경면 <평면 <외경면의 순으로 두껍게 코팅 가능하다.

2.4. 기공성

용사재료를 특별한 분위기를 이용하지 않고 용사하면, 비행중의 입자는 공기에 노출되어 그 표면이 산화막으로 덮여 있으므로 이러한 입자가 적층된 피막에는 미세한 기공이 개재한다. 기공율은 용사방법, 용사재료에 따라서 변화하지만 통상 5-20%정도이다.

예로서,

- TiO₂, Al₂O₃-50%, TiO₂, Cr₂O₃, NiO : 4%이하
- Al₂O₃, ZrO₂ : 4-8%
- 회토류, 산화물, Zr SiO₄ : 8-15%

일반적으로 열차폐 코팅에서는 기공율이 높을 필요가 있고, 반면 내산화, 내부식성 코팅의 경우 기공은 가능한 한 작아야 한다. 특히 이때 개구기공(open pore)는 바람직스럽지 못하다.

코팅층과 모재의 계면에 기공이 많다면 결합강도는 떨어진다. 재료에 따른 기공율의 차이는 표면장력, 접촉각등에 기인한 퍼짐성(Wettability)의 차이로 생각되며 일반적으로 퍼짐성이 좋은 재료는 기공율이 작고 결합력이 우수하다. 동일 재료의 경우 기공은 분말의 입도분포 및 충돌시의 온도, 속도등에 따라 차이가 생긴다.

충돌에너지가 큰 용융입자 일수록 기공율이 작아진다. 분말의 입도 산포가 크게되면 Plasma Jet로부터 각 분말입자가 얻게 되는 에너지 및 비행궤도의 차이로 인해 모재에 충돌하는 순간

표 2) 플라즈마 용사에 의한 용사재료의 변질

용 사 재 료	용사재료의 조성	(X선 회절에 의한 분석) 용사피막의 조성
Oxide ceramic		
White alumina	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ $\gamma\text{-AlOOH}$	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + (d\text{-Al}_2\text{O}_3)$ 〃
Gray alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{TiO}_2$)	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 + (\text{Al}_2\text{TiO}_5 + \text{TiO}_2 \text{ (R)})$	〃
Alumina Titania ($\text{Al}_2\text{O}_3 * 40\text{TiO}_2$)	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{TiO}_5$ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 \text{ (R)}$	$\text{Al}_2\text{TiO}_5 + (\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3)$ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + (\text{TiO}_2 \text{ (R)} + \text{Al}_2\text{TiO}_5)$
Titania	$\text{TiO}_2 \text{ (R)} + (\text{Ti}_{10} \text{O}_{19})$	$\text{TiO}_2 \text{ (R)} + \text{TiO}_2 \text{ (A)}$
Alumina Chromia ($\text{Al}_2\text{O}_3 * 50\text{Cr}_2\text{O}_3$)	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \text{ (S.S)}$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \text{ (S.S)} + (\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3)$
Chromia	Cr_2O_3	Cr_2O_3
Zirconia (+12 Y_2O_3) (+7 CaO) (+20 MgO)	$\text{ZrO}_2 \text{ (C)}$ $\text{ZrO}_2 \text{ (C)}$ $\text{ZrO}_2 \text{ (C)} + \text{MgO} + (\text{ZrO}_2 \text{ (n)})$	$\text{ZrO}_2 \text{ (t)} + \text{ZrO}_2 \text{ (m)}$ 〃 $\text{ZrO}_2 \text{ (t)} + \text{ZrO}_2 \text{ (C)} + \text{MaO}$
Spinel($\text{Al}_2\text{O}_3 * \text{MgO}$)	MaAl_2O_4	MaAl_2O_4
Zircon($\text{ZrO}_2 * 33 \text{SiO}_2$)	AiSiO_4	$\text{ZiSiO}_4 + \text{ZiO}_2 \text{ (t)} + \text{ZiO}_2 \text{ (m)}$ + Glass
Metal		
Ni-20 Cr	Ni (S.S)	Ni(S.S) + (NiO + NiCr ₂ O ₄)
Ni-5 Al	Ni+Al	Ni(S.S) + (NiO)
Ni-20 Al	Ni+Al	Ni(S.S) + NiAl + (NiO)
Cu	Cu	Cu + (Cu ₂ O)
Ti	Ti	Ti + TiN, Ti[LPPS]
W	W	W + (WO ₃), W[LPPS]
Mo	Mo	Mo + (MoO ₃ , Mo[LPPS])
SUS 420	$\alpha\text{-Fe}$	$\alpha\text{-Fe} + \gamma\text{-Fe} + (\text{Cr}_2\text{O}_3)$
Ni-Cr-Si-B (Self-flux-alloy)	Ni(S.S)	Ni(S.S) + CrB + Ni ₃ B + Cr ₃ C ₂ [Fusing]
Cermet		
WC-12Co, -17Co	WC+Co WC+Co $\text{WC} + d\text{-W}_2\text{C} + \text{W} = \text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$	WC + amorphous phase WC + ($\alpha\text{-W}_2\text{C} + \text{W}$) WC + $\alpha\text{-W}_2\text{C} + \text{W} + \text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$
Cr ₃ C ₂ -20NiCr	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Ni(S.S)}$	$\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{amorphous phase}$
TiC-50 Co	TiC+Co	TiC + Co + Co ₂ Ti
SiC-50 Co	SiC+Co	〃
SiC-50 Ni	SiC+Ni	SiC + Ni + NiSSi ₂ + NiSi + (NiO)

(S.S) : 고용체 Solid solution

TiO₂ (R) : Rutile

〃 (A) : Anatase

ZrO₂(C) : 입방정 Cubic

〃 (t) : 정방정 tetragonal

〃 (m) : 단사정 monoclinic

[LPPS] : 감압용사 Low pressure plasma spraying

표 3) 플라즈마 용사기술의 산업분야 응용

기능	적용 분야	용사 재료
기계	1) 내마모성 피복 경질 고밀도, 저마찰계수 2) 고온, 경질피복(열간 Roller) 3) 미끄럼 방지용 배면피복 (제지, 섬유, 고무용 Roller) 4) 본드코팅 (Hot Plate용 teflon하지) 5) 충격흡수(Propane용기)	Cr_2O_3 , WC-Co TiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 $Cr_3C_2/NiCr$ Al_2O_3 , TiO_2 Al_2O_3 , TiO_2 Zn
내열, 열차폐	1) 열차폐피복(Thermal Barrier Coating) 2) 점변피복(Continuously Grate Coating) (Turbine Blade, Rocket Combustion Chamber)	$ZrO_2/MCrAlY/Sub.$ $ZrO_2/ZrO_2 + MCrAlY/$
내식	1) 대기중 내식피복 2) 특수환경 내식피복	Al, Zn Amorphous, Self-flux-alloy, Ceramics

온도 및 속도는 다양하게 되어 기공이 많아질 것이다. 따라서 코팅층의 품질을 향상시키기 위해서는 용사분말의 입도의 산포를 엄격히 제어하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

모재계면에 충돌시 모든 분말입자를 용융시키고 속도를 크게하기 위해서는 고속의 Plasma Jet를 이용하는 것이 바람직하나 속도가 빨라지는 만큼 분말과의 상호작용 시간이 짧아지므로 더 큰 용량의 장치가 필요해진다.

또 실제에 있어서는 세라믹의 경우 열전도도가 낮아 표면의 상단부분이 증발될 우려가 있으므로 한계가 생긴다. 따라서 분말의 입도제어를 통한 기공제어는 가장 효과적인 방법이 될 수 있다.

2.5. 용사재료의 변질

플라즈마 용사중 분말은 고온에서 용융, 응고, 냉각 과정중 플라즈마 가스와 반응하여 새로운 조성의 코팅층으로 형성된다. 이것은 용사과정중 가스상이 입자내로의 확산, 입자에서의 가스상으로의 확산(시간이 짧아 무시할수 있을 정도임)에

의해 새로운 안정상이 얻어진다. 표2에 플라즈마 용사시 재료가 어떻게 변질되는가 예를 보여주고 있다.

3. 코팅의 실제

3.1. 코팅의 적용분야

플라즈마 용사기술은 여러 산업분야에 다양하게 응용되고 있다. 표 3에는 현재 이용되고 있는 예를 보이고 있다. 지금까지는 항공산업을 중심으로한 열차폐 및 내마모 내식분야에 주로 응용되어 왔다. 항공부품이나 가스터빈의 열차폐 피복에서는 MCrAlY가 주로 적용되어 왔다. 최근의 추세는 진공중의 용사기술인 감압용사(100Torr)에 의해 큰 Plasma 속도와 산화나 질화를 줄여서 활성금속인 Ti, W의 용사도 확대되고 있다.

프레싱-소결이라는 공정을 거치는 파인세라믹스 분야에서 소결과정을 생략가능한 장점을 살려 기능성 소자분야에도 다양한 응용연구가 진행되고

있다.(표4 참조)

표 4) 플라즈마 용사를 이용한 신소재 개발 및 응용

적용 분야	용사 재료
1) 전자파 shield	Zn
2) 태양열 흡수	Cr ₂ O ₃ , YB ₆ , TiB ₂
3) 적외선 방사(조리기, 건조로)	ZrO ₂ , NiO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂
4) 흑체(Roentgen target)
5) 방열(Brake)	13 Cr-Al
6) 광전극(물의 전기분해)	TiO ₂
7) 연료전지(Natrium 농염전지) ◇ (고온고체 전해질전지)	βAl ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ /NiO/ZrO ₂ /Ni-Al/Al ₂ O ₃ /Fe/LaCoO ₃
8) 산소센서(자동차용 배기가스 산소센서) 산소센서(용강용 산소센서)	LaNiO ₃ /Alumina Sub. ZrO ₂ /Cr · Cr ₂ O ₃ /Mo Sub
9) 전기절연(고주파 소입 Coil)	Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , MgO
10) 전열(복사기, 용설기와)	Ni-Cr
11) 자성(전자조리기용 용기)	Fe, Ni
12) 음향(Speaker의 음색)	Al ₂ O ₃ /Al, Ti Sub
13) 광학(형광, 발광)	ZnS, CaWO ₄
14) 가역착색(Electro Chromic, X-ray Chromic)	WO ₃ , CaF ₂ , LiF
15) 초전도(자기 shield)	Y ₁ Ba ₂ , Cu ₃ O _Y (Y=7-α)
16) Diamond 합성	CH ₄ (methane)
17) 생체부품(Bioceram)	[Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂](hydroapatite)

예를 들면 기존의 Baking 방법에 의해 제조된

형광체를 온·습도 변화에 약한점 및 기계적 강도가 떨어지는 점을 응용 용고 과정을 거치는 플라즈마 용사에 의한 형광피막은 이러한 단점의 보완에다 휘도(Brightness) 높은 피막은 얻을 수 있는 특징도 있다.

이러한 용사분야의 확장은 플라즈마의 안정적인 제어를 위해 로봇 또는 자동화기술과 더불어 소요성질의 향상을 위한 laser 또는 분위기 처리 기술과 병행 발달되어 오고 있다.

3.2. 공정 및 품질관리

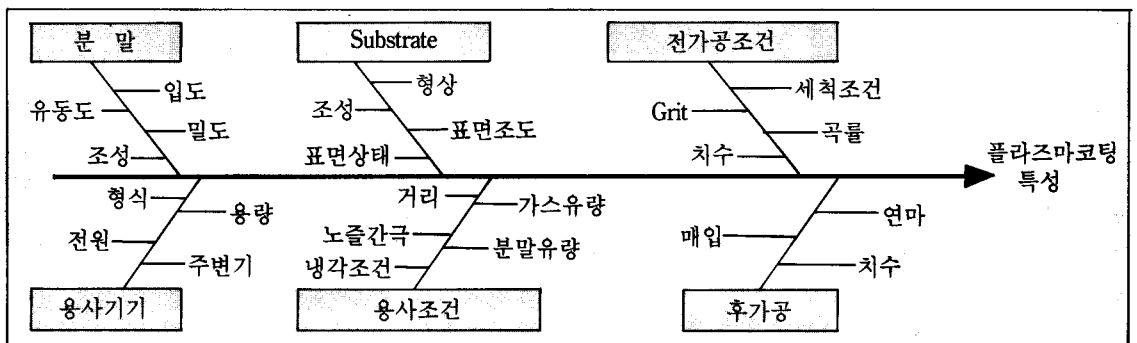
코팅층의 물성 즉 사용중의 제품의 성능은 제조과정의 품질관리 수준에 따라 달라진다. 일반적으로 플라즈마용사는 전처리로서 표면준비, 용사작업 후가공으로 구성되어 있는바, 세분하여 보면 다음과 같다.

- ①용사변수의 정의
- ②표면요구물성
- ③표면 세척 및 청정화
- ④예열
- ⑤Bond layer coating
- ⑥코팅층 형성
- ⑦냉각
- ⑧가공

양질의 코팅층을 얻고자하면 모든 과정에서 관리가 되어야 된다.

이를 요약하여 보면 다음 표5의 특성요인도와 같다.

표 5) 플라즈마 용사코팅의 특성요인도



3.3. Hexa Plasma 기술

마찰은 미끄럼이 일어나는 것을 억제하는 용착현상으로 설명할 수 있다. 두개의 물체가 접촉하여 상대운동이 일어나면 용기된 진접촉면은 매우 제한되며 이때, 국부적으로 고온하중하에 놓이게 된 상태에서 소성변형을 일으키게 된다. 이렇게 되면, 확산, 합금생성 과정을 거쳐 용융된 용기부분이 급냉되는 현상을 일으켜, 모재와 다른 새로운 계면층이 생긴다. 만일 계면층의 기계적 강도가 약하게 되면 쉬 파손이 일어날 것이다. 즉, 용착부분이 전단(shear)으로 일어나면 마찰계

수가 작아져 쉽게 마찰이 일어난다고 생각 할 수 있다.

반면 계면층의 강도가 모재보다 높으면 용접(Welding)에 의한 소착이 일어나서 마찰 계수가 크게될 것이다. 마찰은 응력을 발생시켜 가공경화를 통한 표면의 시효 및 주변 분위기와 작용하여 표면의 화학적 특성을 변화시킨다. 이와 같이 결정에서의 마찰은 이방성을 가지는 현상으로 결정면과 방향에 따라서도 차이가 있다.

전단 응력보다 큰 응력이 결정에 가해지면 결정은 최밀충진면에서 최밀충진 방향으로 미끄럼 변형(slip)을 일으킨다. f.c.c 결정구조를 가진 소

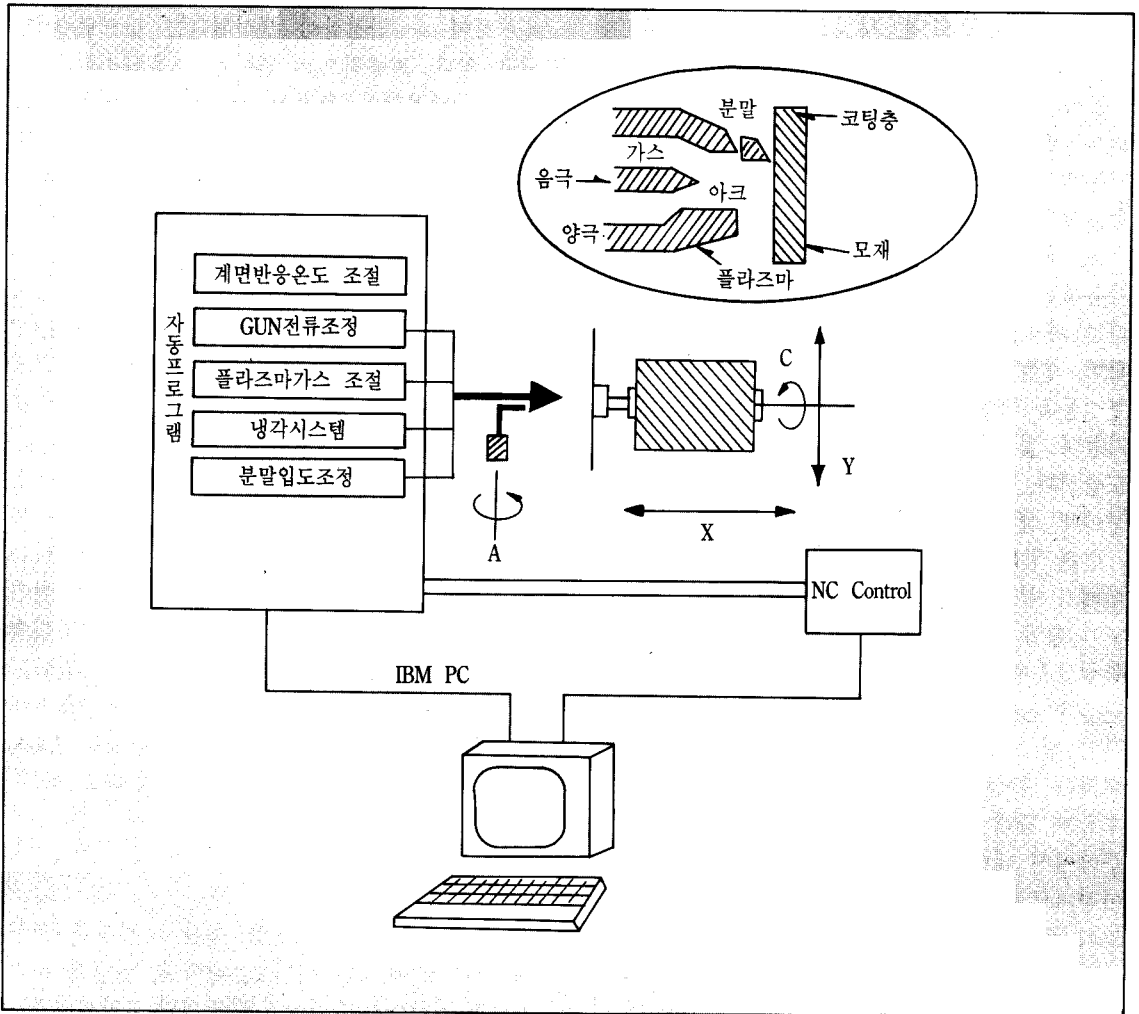


그림 6) 용사장치의 자동화 개요

재는 HCP보다 인성과 가공경화성이 크고 마찰 계수가 크다. 이 분야의 연구 결과에 따르면

- 가장 낮은 마찰계수는 최밀충진면에서 최밀 충진방향으로 나타난다.
- HCP 결정구조의 경우 마찰계수는 c/a 의 함수로 $c/a=1.633$ 일때 가장 낮다.

CoMo, W₂C, Co₃W, Cr₂O₃의 플라즈마 용사시 분말의 용사조건에 따라 최대로 80%까지 C축이 피복재의 면에 수직되게 얻을 수 있다. HCP 결정이 C축에 수직되게 성장하는 것은 급냉현상과 관련이 있는 것으로 보인다.

3.4. 코팅공정의 자동화

플라즈마 용사에 의한 코팅층은 앞서에서 살펴본 것과 같이 용사기기의 특성, 분말, 용사조건 등에 따라 외견상 동일조건이라도 계면에서 충돌시 모멘텀과 온도에 의해 크게 차이가 있다.

또 용사기술에서는 고가의 분말과 에너지를 사용하면서도 원가절감 및 생산성이 높아야 한다는 과제를 안고 있다. 따라서 코팅층두께의 정확한 재현, 분말 손실의 감소, 생산성 향상, 재현성등을 구현하기 위해서는 절대적으로 설비의 자동화 및 로봇화가 필요하다는 것으로 결론이 도출된다. 이러한 생각에서 선진국에서는 최근 이 분야에 상당한 노력이 경주되고 있다.

반면 국내에서는 아직도 플라즈마 용사 기술의 이해가 부족하고 시장이 성숙치 못하여 응용연구가 활발치 못한 실정이나, 폴리에스터 나이론 등 합성섬유제조 및 가공공정에 장섬유(filament) 및 단섬유(staple fiber) 사용이 증대되고 있는 섬유 산업 및 고강도 공업용강화 플라스틱 제조가 증대되는 합성수지 공업분야에서 내마모 기술의 수요가 증대 될 것으로 증대되는 합성수지 공업 분야에서 내마모 기술의 수요가 증대 될 것으로 예상되므로 플라즈마 용사기술도 크게 향상이 될 것이 요구된다.

또한 기능성 파인세라믹의 제조도 향후 크게 발전이 되기 위해서는 무엇보다 먼저 용사코팅층의 물성 조절이 가능한 용사기기의 자동화가

요구된다.

용사기기의 자동화는 용도에 따라 다양한 형태로 출현하고 있다. 그림 6은 용사코팅의 자동화의 일례로 개념도를 보이고 있다.

3.5. 결정구조

플라즈마 용사에서는 용융된 액상이 극히 빠른 속도로 냉각되어 고상이 되므로 비정질 또는 준안정상이 얻어지는 특성이 있다. 이것은 용융상태로부터 초급냉하면 자유에너지(Free Energy)가 가장 낮은 Spinel구조를 가진 조직의 핵생성이 가장 용이하여 준안정상이 생성된다는 것으로 설명되고 있다. 최종적으로 얻어지는 용사조직은 이러한 준안정상의 조직이 타상 또는 α 상으로의 변태속도와 고상에서 냉각속도에 의해 결정된다. 용사조건, 분말의 입도 형태, 모재의 온도에 따라 각기 다른 준안정상이 얻어지는 것은 위와 같은 설명으로 이해 할 수 있다.

용사의 또 하나의 특징은 코팅층이 표면에 대해 선택방향을 가진다는 것이다. Cr₂O₃의 경우 HCP 결정구조 중 약 80%의 C축이 모재와 수직되게 배열된다. 이것은 용고 과정과 관련이 있는 것으로 보인다.

HCP 결정구조는 마찰계수가 최소가 되는 경향이 있으므로 Cr₂O₃의 산화물 코팅시 C축을 특정하게 배열하게 되면 마찰계수를 낮출수 있다는 의미가 된다. 실제 프랑스의 한 기업에서는 여러 가지 세라믹에 이러한 원리를 사용하여 세라믹의 마찰계수를 낮추어 마찰부위에 적용하고 있다고 하는데, 그로써 철강압연기의 베어링과 클러치에 적용한 경우 수명이 종전의 1000시간에서 18000시간으로 18배까지 향상 시킬수 있었다고 한다.

4. 결 론

앞서 살펴본 용사기술은 용사시 정확한 조건 제어가 가능하다면 내마모, 내마찰, 실링제 뿐만 아니라 지금까지 소결공정을 거치던 파인세라믹을 용사방법에 의해 제조가 가능함을 알 수 있다.

즉 용착계면에서 온도, 충돌시 온도, 모멘텀이 제어되고 용사과정중 재료의 변질을 이해하면 기능성 소재제조 기술로 확장될수 있음을 알수 있다.

현재 마모 및 내열성 코팅의 초보적인 상태에 있는 국내의 플라즈마 용사기술의 향상을 위해 선진기술의 조기이식 및 장비와 연계된 코팅층에

대한 기초연구 및 내마모 부품 및 기능성 세라믹의 응용연구를 통한 시장확대가 요구된다.

따라서 무엇보다 먼저 이러한 재료공학적인 지식의 종합과 용사장비의 자동화가 필수적이며, 이러한 바탕위에 산학연 협동이 이루어지면 플라즈마 응용의 신시대를 개척할 수 있을것으로 사료된다.