

特輯 : 재료의 표면 개질 기술

플라즈마 용사의 특성 및 응용

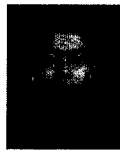
안희석 · 김학관 · 이창희

The Characteristics and Applications of the Plasma Spray Coating

Hee seek An, Hak kwan Kim and Chang hee Lee



안희석/한양대학교/
1969년생/thermal
spray coating
technology를 이용한
표면개질 연구



김학관/한양대학교/
1973년생/thermal
spray coating
technology를 이용한
표면개질 연구



이창희/한양대학교/
1956년생/레이저 및 용
사를 이용한 표면개질,
computer simulation을 이
용한 용접 열영향부의
재질 예측 모델링 연구

1. 서 론

자원의 고갈, 제조원가 및 에너지 원가 상승, 그리고 고품질의 재료에 대한 요구에 부응하여 재료 공정은 급속한 발전을 이루어 왔으며, 특히, 구조 재료와 높은 내부식성, 내마모성, 내열성 등 특별한 특성을 갖고 있는 재료에 대한 요구는 계속적으로 증가하고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해 사용하는 여러 가지 개선법중 특히 표면개질 분야에 대한 연구가 활발히 진행되어가고 있다. 현재 산업계에서 주로 사용되고 있는 표면개질법은 표면층의 조직변화에 의한 개질법과 표면피복에 의한 개질법으로 나눌수 있다. 조직변화에 의한 개질법으로는 침탄, 질화, 이온주입 및 금속확산등이 있고, 표면피복에 의한 개질법으로는 도장, 도금, 육성용접, 용사법, 증착법등이 있는데 이 중에서 경제성과 응용성에서 매우 유리한 저가의 모재에 사용분위기에 적합한 재료를 용사 코팅(Thermal Spray Coating)하는 기술인 용사법이 가장 각광을 받고 있다.

용사 코팅이란 wire, rod 혹은 분말형태의 용사

재(coating material)를 고온의 열원으로 용융 혹은 반용융시킨 후 이것을 압축된 공기나 Gas stream으로 고속분사 하여 모재(substrate)에 코팅하는 방법으로 Metallizing으로도 알려져있으며, 두꺼운 코팅을 신속하게 할 수 있고, 다양한 모재에 적용 가능한 장점을 가지고 있다.^{1,2)}

약 100여년 남짓한 역사를 가지고 있는 용사 기술은 1910년 스위스의 Max Uirich Schoop에 의해 처음 발명되어 사용되기 시작하였는데, 초기에는 안정된 열원확보의 어려움, 용사재 송급속도의 불균일 등 여러 가지 원인 때문에 비효율적이어서 제품의 보수 혹은 재생에만 한정되어 이용되었다. 그러나, 60년대가 지나서부터 용사방법, 공정 및 재료에 있어서 획기적인 발전을 하게 되었고, 80년대 중반 이후 90년대에 들어서면서부터 전기, 전자 혹은 기계적 측면에서 기기자체의 발달과, 공정의 개선, 재료의 다양화로 그 적용대상은 더욱 새롭고 광범위해지고 있는 실정이다.^{9,10)}

용사법에는 열원 종류에 따라 화염 용사(oxy-fuel gas flame spray), 전기 아크 용사(electric arc spray), 플라즈마 용사(plasma spray), 폭발 용사(detonation flame spray) 등이 있으며, 각 용사 방

Table 1. Comparison of various thermal spray processes

Process of Thermal Spray		Variety of Materials	Coating Properties		Productivity		Cost	
			Bond Strength	Porosity	Control	Build Up Velocity	Initial	Running
Oxy-Fuel	Wire	△	△	△	△	○	◎	○
	Rod	×	△	△	△	△	○	○
	Powder	○	△	△	△	○	◎	○
	HVOF	○	◎	◎	△	△	×	△
	Detonation	○	◎	◎	△	△	×	△
Electric Arc		△	△	△	○	◎	◎	◎
Plasma	APS	◎	○	○	○	○	△	△
	Water Stabilized	△	△	△	△	◎	△	○
	VPS	◎	◎	◎	△	○	×	△
Wire Explosion		△	◎	◎	×	×	△	○
Laser		○	△	△	×	△	△	△

◎ exllent, ○ good, △ average, × poor

법들을 표 1에서 비교하였다.

플라즈마 용사법(plasma spray)은 고온의 열원(열원 중심 온도는 약 30,000℃까지 올라감)으로 고용점 세라믹을 용사체로 사용할 수 있는 반면 모재는 150℃로 낮게 유지할 수 있어 모재의 변형없이 여러 산업 분야의 부품에 많이 적용될 수 있다. 플라즈마 용사의 장점을 정리하면 다음과 같다.⁴⁾

1. 용사 가능한 대부분의 재료(금속 재료 및 고용점의 세라믹재료)를 용사할 수 있다.
2. 코팅 재료조성을 임의로 조정할 수 있다.
3. 열에너지를 집중시킬 수 있고 아크의 안정성이 양호하여 코팅층의 형성 속도가 크다.
4. 모재를 비교적 저온으로 유지하는 것이 가능하므로 모재의 크기나 형상에 제약이 없다.
5. 피복 두께 제어가 용이하고 작업이 신속하며 분위기 제한이 비교적 적다.

최근의 화염 용사법의 하나인 HVOF (High-Velocity Oxygen-Fuel)가 오히려 플라즈마 용사법보다 다소 우수한 코팅층을 형성시킬 수 있기 때문에 항공 산업 등에서 주목을 받고 있으나, 고용점 세라믹 코팅 분야에서는 여전히 플라즈마 용사법이 가장 우수하고 효율적인 방법이며, 특히 근래

에 들어서는 재현성 있는 코팅 조직을 형성시키기 위해 전원 공급 장치, 분말 공급 장치, 가스 공급 장치 및 용사 장치가 개발되어, HEP(High Energy Plasma), VPS(Vacuum Plasma Spray), LPPS(Low Pressure Plasma Spray)와 같은 새로운 플라즈마 용사 기술이 나타났으며, 이 기술들은 입사 속도(particle velocity)를 증가시킬 수 있고 모재를 예열시킬 수 있기 때문에 더 우수한 코팅층을 형성시킬 수 있다.

B. Dulin, A. R. Nicoll과 T. P. Slavin, J. Nerz의 연구에 의하면,^{11,12)} WC-Co 용사 코팅의 경우, HVOF가 플라즈마 용사보다 WC(높은 경도를 가짐)분해가 덜되어 다소 우수한 내마모성을 나타내나 그 차이는 무시할 만하고 대체적으로 두 방법은 코팅 성질, 미세구조, 내마모성에 있어서 비슷한 결과를 나타냈으며, 최적의 공정변수(용사거리, 용사각도, 개스 유속, 코팅층 온도와 두께 조절)를 사용했을 때 플라즈마 용사 WC-12%Co 코팅은 D-gun, Jet-kote 등 HVOF코팅과 비교할 때 높은 접합강도(bond strength - 약 1000psi)와 미소경도(microhardness - 약 1100Hv)를 나타내었다.

본 논문에서는 앞에서 서술한 장점을 가진 플라

즈마 용사 코팅 기술에 대해 알아보기 위해서 고온의 열원인 플라즈마의 특성, 플라즈마 용사방법, 코팅 특성 및 응용에 대해 검토하고, 향후 연구방향에 대해 서술한다.

2. 플라즈마의 특성

플라즈마란 전자, 양이온, 음이온, 원자, 분자들이 외력(external force)의 영향 아래 자유롭게 움직일 수 있는 물질의 상태를 말하며, 이것은 플라즈마 상태에서는 충분한 에너지가 전자에 부과되어 전자가 이온-전자쌍의 포텐셜 우물(potential well)을 탈출할 수 있을 만큼 높은 에너지 준위(energy level)로 올라감을 의미한다. 이때 이온화(ionization)를 일으키는 에너지는 전자기에너지(electromagnetic energy), 열에너지(thermal energy), 방사에너지(radiative energy) 등이 될 수 있으며, 플라즈마는 개스에 이러한 에너지들을 가함으로써 나타나고 고전 물리학이나 열역학법칙을 따르지 않으므로 제4상(a fourth state of matter)이라고 불리워진다.^{6,7)}

플라즈마는 Maxwell-Boltzmann 분포 공식을 따르는 속도분포를 가지는데^{6,7)} 이 식은 각각의 입자 온도(particle temperature)의 값으로 표시되며, 이때 플라즈마의 전자의 속도분포(전자의 온도)가 이온의 속도 분포(이온의 온도)보다 크면 비평형 플라즈마(non-equilibrium plasma)라고 부르고, 전자와 이온의 속도분포가 같으면 평형 혹은 열 플라즈마(equilibrium or thermal plasma)라고 부른다. 비평형 플라즈마는 낮은 압력(<1Pa), 낮은 전류, 낮은 gas 온도일 때 생성되고, 일반적으로 스퍼터 에칭(sputter etching), 이온 주입(ion implantation), 화학 반응기(chemical reactor) 등에 사용된다. 평형 혹은 열 플라즈마는 높은 압력(10^4 - 10^6 Pa), 높은 전류, 높은 개스 온도일 때 생성되고, 전형적인 예는 전기 아아크(electric arc)이다. 전기 아아크는 음극과 양극사이에 직류 혹은 교류 전원을 걸어 주었을 때 전기장(electric field)에 의해 생성되고 유지되는 플라즈마로 통상 "electric discharge", "glow discharge"라고 부른다.

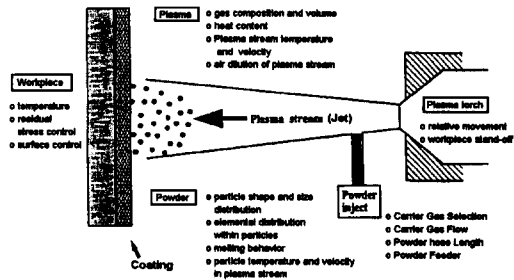
전기 아아크는 많은 연구자들에 의해 연구되었는데^{6,7)} 크게 cathode sheath, positive column, anode sheath 의 세 영역으로 나뉜다. 이중

positive column 영역이 진정한 평형 플라즈마 상태이며, 개스의 온도를 높이는데 중요한 역할을 한다. 한편 cathode sheath와 anode sheath영역은 음 또는 양으로 대전된 영역으로 높은 전위장(voltage field)을 가지며 positive column이 위치와 아아크의 안정성을 조절한다.

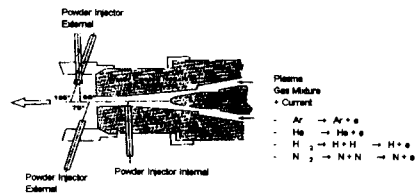
평형 혹은 열 플라즈마는 아아크 램프, 개스 히터, 용접기, 플라즈마를 이용한 파우더 조밀화(plasma densification of powder), 플라즈마 합성(plasma synthesis), PACVD(plasma assisted chemical vapor deposition) 등에 사용되며, 플라즈마 용사도 이 플라즈마를 사용한다.^{6,8)}

3. 플라즈마 용사

"Non-transferred arc"를 이용한 플라즈마 용사는 1950년대 중반 R.M. Gage, O.H. Nestor, D.M. Yenni에 의해 고안되었으며,⁴⁾ 그림 1에 플라즈마



(a) Schematic diagram of plasma spray



(b) Plasma generation gun

Fig 1. Schematic diagram of (a) plasma spray and (b) plasma generation gun

그림 2, 3에서 알 수 있듯이 플라즈마에서 입자로의 열전달은 복사(radiation)이나 대류(convection)도 있지만 대부분의 열전달은 분말 입자 표면에서 이온과 전자, 원자와 원자의 재결합(recombination)에 의한 열전도에 의해서 이루어진다고 볼때, 아아크 경계층(arc boundary)으로 부터 이온 재결합 영역(ion recombination zone)으로 갈수록 온도가 급상승하게 되고, 노즐 출구로부터의 거리에 따라서 온도가 감소하게 된다. 또한 주위 분위기와 반응에 의해서 플라즈마 stream의 중심으로부터의 가로 방향(radial 방향)과 세로 방향(노즐 출구로부터의 거리)에 따라 속도도 감소하게 된다. 따라서, 분말은 크기, 모양, 송급 속도에 따라 다른 가열(heating), 용융(melting), 응고(solidification) 현상을 보임을 예측할 수 있다. 분말 송급기의 위치와 각도도 고려해야 하는데 저용점 재료는 노즐 출구나 플라즈마 down-stream의 위치에, 고용점 재료는 노즐 안쪽에 주입하여 과열이나 불완전한 용융없이 최적의 용융이 이루어지도록 한다.

3.4 모재의 표면 처리

모재와 코팅의 결합력(adherent bond strength)에 영향을 주는 인자로는 모재의 청정도(cleaning), 표면 조도(surface roughness), 용융급속과 모재표면간의 화학적 친화력(chemical affinity), 잔류 응력(residual stress) 등이 있다. 이러한 인자들을 고려하여 모재와 코팅의 결합력을 높이기 위해 모재 표면에 전처리를 행하게 되는데 전처리 방법에는 모재표면의 이물질들을 제거하기 위해 cleaning 하거나, 표면 조도를 증가시켜 결합력을 높이기위해 그릿 블라스팅(grit blasting)하는 방법이 있으며, 열팽창 차이로 인한 잔류 응력을 줄이기위해 모재를 예열하는 방법과 그릿 블라스팅할 수 없는 경우 중간 코팅(bond coating)을 하는 방법이 있다.

중간 코팅(bond coating)이란 자기 확산(self diffusion) 특성을 나타내는 self-fluxing alloy를 사용하여 코팅하기 전에 먼저 중간 코팅을 행하는 것으로서 코팅층과 모재의 결합력을 높이고 열팽창 차이를 좁혀 잔류 응력을 줄이는 효과를 가져온다.

3.5 그 밖의 공정 변수

위에서 서술한 플라즈마 용사시 고려해야할 점들 이외의 공정변수로는 용사거리, 용사각도, 침적 표면 속도(traverse speed)가 있다.

용사거리는 용사입자가 모재에 용착(depositon)되는 순간의 속도와 온도, 모재의 온도에 영향을 미치므로 매우 중요하며, 그 거리는 장비, 전원입력, 용사재료등에 따라 결정된다. 용사거리가 길 경우에는 용사입자가 과냉되어 입자가 모재에 용착될 때 변형이 적어지므로 접착강도와 용착효율이 저하되고 기공이 발생하게 된다. 용사거리가 짧은 경우에는 모재가 과열되어 모재의 표면을 산화시키거나 모재가 너무 팽창하여 용착급속(splat)이 모재로부터 탈락하게 된다.

일반적으로 최적의 용사각도는 90도이나, 부품의 형상이나 플라즈마 gun 크기의 제한 때문에 90도보다 작은 각도에서 용사해야 될 때가있는데, 이 때에는 입자 속도가 떨어지기 때문에 코팅 특성이 저하하게 된다.

침적 표면 속도는 건 노즐이 모재 표면을 지나는 속도를 말하는 것으로 한 패스(pass)당 코팅두께와 패스의 겹침(overlap) 등을 고려해야한다.

3.6 분위기에 따른 플라즈마용사의 종류

대기 분위기 하에서의 플라즈마 용사(air plasma spray)의 가장 큰 단점으로는 입자와 주위와의 반응에 의한 산화물, 질화물등의 생성과 플라즈마 stream의 온도저하가 있으며, 이것은 코팅 특성, 특히 밀도 및 모재와 코팅층의 결합력에 나쁜 영향을 미친다. 이에 새로운 플라즈마 용사 방법인 LPPS(Low Pressure Plasma Spray)와 VPS(Vacuum Plasma Spray)이 개발되었는데 이 방법의 특성은 주위와의 반응이 적어 산화물, 질화물등의 생성과 플라즈마 stream의 온도저하가 줄어들고, 상당히 큰 압력차에 의해 용사되는 면적과 플라즈마 개스와 분말 입자의 속도가 매우 크다는 점이다. 또한 진공 분위기하에서 transfered arc를 이용하여 모재를 예열, cleaning 할 수 있는 특징을 갖고 있다.^{14,15)}

또한, 최근에는 소음과 먼지, 유해 물질 방사를 막을 수 있는 UPS(Under water Plasma Spray)가

Table 2. Properties of various plasma spray technology with environments

APS	LPPS or VPS	UPS
Variable particle velocity	Variable particle velocity	Relatively low particle velocity
High particle temperature	High particle temperature	High particle temperature
Low substrate temperature	High substrate temperature	Very low substrate temperature
	Expansion of coated area	Noise, radiation and dust reduction
	Reduced gas/metal reaction	Toxic material coating
	Reactive material coating	Dense and thicker coating

발명되었는데 이 방법의 특징은 물이 아아크를 제한하므로 분말입자의 속도가 느리고, 아아크 길이(arc length)가 작고 안정성이 있으며 모재의 온도가 매우 낮다. 따라서 에너지 밀도(energy density)가 높으며 용사거리가 가까워 치밀하고 두꺼운 코팅을 하기가 용이하다.^{4,17)} 각 플라즈마 용사방법의 특성을 표 2에서 비교하였다.

4. 플라즈마 용사코팅층의 특성

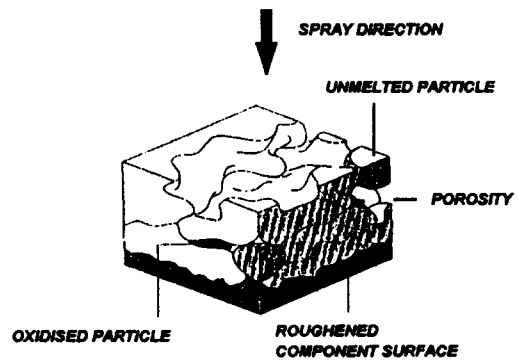
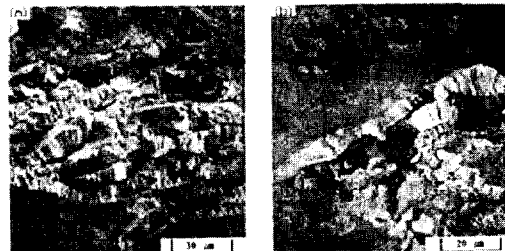
용사코팅층의 특성은 입자와 플라즈마 stream간의 반응, 용착금속과 모재와의 반응, 그리고 수많은 공정변수에 의해 영향을 받으므로 모재와는 매우 상이하다. 대표적인 코팅 특성으로 코팅층 미세구조, 결합력, 잔류응력, 경도 등을 들 수 있다.

4.1 코팅층의 미세구조(Microstructure)

이상적인 조건이라면 용융된 입자는 모재 표면 위에 평평하게 퍼진 후 급속 응고된다. 평평도(flattening)의 정도는 용융(melting) 정도, 액상의 점성, 표면 젖음(surface wetting)에 달려 있으며, 그 위에 다음 용융된 입자가 같은 방식으로 침적되므로 코팅층은 층상(lamellar) 구조를 갖게 된다. 코팅 구조의 3차원적 개략도를 그림 4에 나타냈으며, 실제 대기 분위기 하에서 플라즈마 용사된 텅스텐 코팅층의 파면(fracture surface)을 그림 5에 나타냈다.

그림 4에서 알 수 있듯이 일반적으로 코팅층은 개스의 생성으로 인한 공극(voids), 미용융 입자(unmelted particle), 미용융 입자위에 용착이 일어

남으로써 생긴 기공(porosity), 주위 공기와의 반응에 의한 산화물, 충돌 및 응고시 수축에 의한 지형지세 효과(topographical effect) 등을 가지고 있다. 플라즈마 용사시 냉각 속도(cooling rate)는 약 $10^6\text{-}10^8\text{Ks}^{-1}$ 이므로⁴⁾ 코팅층은 비정질이거나 매우

**Fig 4.** Schematic view of coating structure**Fig 5.** Fracture surface of an air plasma sprayed tungsten coating showing
(a) intersplat fracture
(b) columnar structure within splats

미세한 결정구조를 가지며, 이때 용고가 모재 방향 혹은 반대 방향으로 진행되므로 그림 5에서 보듯이 층상 용착금속(lamellar splat) 안에 2층구조의 주상정 구조(columnar structure)를 나타낸다. 또한 코팅층은 결정미세화효과 이외에도 완전한 비정질상에서부터 다양한 비평형상까지의 준안정상(metastable phase)과 용사시 산화 또는 개스와의 반응에 의한 화학적 변화를 나타내기도 한다. 예를 들어 α -알루미늄 코팅층에서 분말 크기가 감소하고, 조업 에너지가 증가할수록 γ phase가 생성된다는가, WC 코팅층에서의 탈탄 반응 등이 실험적으로 보여졌다.¹⁸

4.2 코팅층의 결합력(Bond strength)

코팅층의 모재에 대한 결합 메카니즘(bond mechanism)은 주로 코팅층과 모재 표면의 돌출부 사이의 맞물림(interlocking)에 의한 기계적 결합(mechanical bonding)이고, 약간의 국부적 확산(local diffusion)과 합금화(alloying)에 의한 야금학적 결합(metallurgical bonding)과 화학적 결합(chemical bonding)이 있다.^{1,3,9}

코팅층의 결합력 측정 방법은 사용 환경에 따라 각각 다른 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 주로 pull-off test, indentation and scratch test, shear test, double-tortion test, four point bend test 등이 쓰이고 있다.¹⁹

4.3 잔류 응력(Residual stress)

두꺼운 코팅층에서는 잔류 응력이 결합에 큰 영향을 미친다. 이 잔류 응력은 급속응고시 코팅층과 모재간의 열팽창 차이에 의해 나타나는 것으로 일반적으로 인장 응력(tensile stress)으로 알려져 있으며^{4,14} 이 응력이 결합력보다 크면 균열(crack)이 발생하고 코팅층이 떨어져나가게 된다. 그러나 입자속도가 매우 큰 경우에는 압축 응력(compressive stress)이 코팅층에 생길 수 있으며 이것은 피로(fatigue)에 이로운 영향을 미친다.

잔류 응력 측정은 four point bend test를 하여 영률(Young's modulus)과 엑스선 탄성계수(X-rays elastic constants)를 결정함으로써 알 수 있다.¹⁹

4.4 경도(Hardness)

경도는 코팅 특성중 가장 많이 인용되는 특성으로 코팅 밀도와 코팅층간 혹은 용착금속(splat)간 결합력이 불수록 크게 나타난다. 그러나 일반적으로 인용되고 있는 경도의 마모특성과의 비례관계는 잘못된 것으로 내마모성이 크기 위해서는 경도도 높아야 하지만 인성도 좋아야한다.⁴

경도 측정으로는 일반적인 Knoop Hardness와 Vickers Hardness 측정방법이 사용되고 있다.

5. 용사 코팅의 응용

플라즈마 용사 코팅은 다양한 재료를 용사할 수 있다는 점과 비교적 경제적이면서도 고품질의 코팅을 생산할 수 있다는 장점이 크게 부각되어 그 응용 분야는 실로 엄청나게 광범위해졌다. 플라즈마 용사코팅의 주된 적용 분야는 내식성, 내마모성, 내열성 코팅 이지만 이밖에도 특수한 사용 환경에 따라 여러 분야에 응용되고 있다.

5.1 내열성 코팅(Thermal Barrier Coating)

내열성, 내산화성, 단열성이 우수한 세라믹 재료를 사용하여 제조한 용사피막을 내열성 코팅이라고 하며, 주로 항공기 combustor cans, nozzle and walls, gas path transition pieces, turbine blade flatform 등에 적용되고 있다. 단열 피막에 사용되는 재료로는 CaO, MgO, Y₂O₃, C₂O₂등으로 안정화시킨 지르코니아(ZrO₂)를 사용하는데 안정화제를 첨가하는 이유는 고온에서 지르코니아의 tetragonal에서 monoclinic으로의 상변화를 막아 지르코니아의 열충격 저항성(thermal shock resistance)과 내식성(corrosion resistance)을 증가시키기 때문이다. 그리고 코팅층과 모재 금속과의 결합력 강화와 열팽창계수에 의한 응력을 완화시키기 위해 중간 코팅(bond coating)을 이용한 이중 코팅을 하는데 여기에는 NiCrAlY계 합금이 주로 사용되고 있다. 최근에 와서 모재로부터 제일 바깥 코팅층(top coating)까지 지르코니아 양을 연속

적으로 변화시켜 코팅하는 경사 코팅 기술 (graded metal-oxide coating technology) 이 개발되었는데 이는 이중코팅 보다 더 좋은 열충격 저항성을 나타내는 것으로 밝혀졌다.¹³⁾

5.2 내마모 코팅(Wear resistance Coating)

내마모성 향상을 목적으로 사용되는 용사피막 재료로는 높은 경도, 낮은 마찰계수, 강한 모재-코팅층간 결합력(adhesive strength)을 나타내는 Cr₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, Al₂O₃-TiO₂, WC-Co, Cr₂O₃-NiCr 등이 사용되고 있다. 코팅층의 마모 특성은 bulk 재료와 다른 특성을 나타내는데 이는 층상 구조(lamella structure)라는 코팅 특성에 기인한다. 즉 코팅층간

균열의 방향 및 형태가 마모 특성에 중요한 요소로 작용한다. 플라즈마 용사코팅은 산업 현장에서 마멸(abrasive), 미동마찰(fretting), 공동화 현상(cavitation), 마손(erosion)을 방지하기위해 사용되며, 특히 sealing rings, guide rolls, pumpsleeves, comprellor cylinder 등에 사용되고 있다.

5.3 내부식 코팅 (Corrosion resistance coating)

내식성 용사피막에 사용되는 용사 재료로는 내식성이 우수한 Al, Zn, Ni-Cr, Ni-Al, 스테인레스강 등의 금속재료가 주로 사용되고 있는데 용사 피막내에 존재하는 기공이 중요한 문제가 되므로 현재는 후 처리 공정 과정으로서 소둔(annealing),

Table 3. Plasma spray applications

		Aerospace	Medical	Paper Printing	Textile	Auto-motive	Electrical Electronic	Energy 1. Fuel Cell 2. Nuclear Fusion 3. Industrial Gasturbine	Iron+Steel Boilers Pumps
Metals	Si Cu Ti Al Mo	o	o				o		o
Alloys	MCrAlY NiCr T-800 Stellite CuAl CoCr	o		o	o	o		o	o
Carbides	WC-Co WC-Co-Cr Cr3C2-NiCr WC-Ni	o			o	o		o	o
Ceramics	HA Al2O3-MgO Al2O3 Al2O3-TiO2 TiO2 Cr2O3 ZrO2-MgO/Y2O3	o	o		o	o	o	o(2)	o
Comp. Blends	AlSi-Polyester Ni-Graphite Mo+NiCrSiB NiAl NiCrAl	o		o		o			

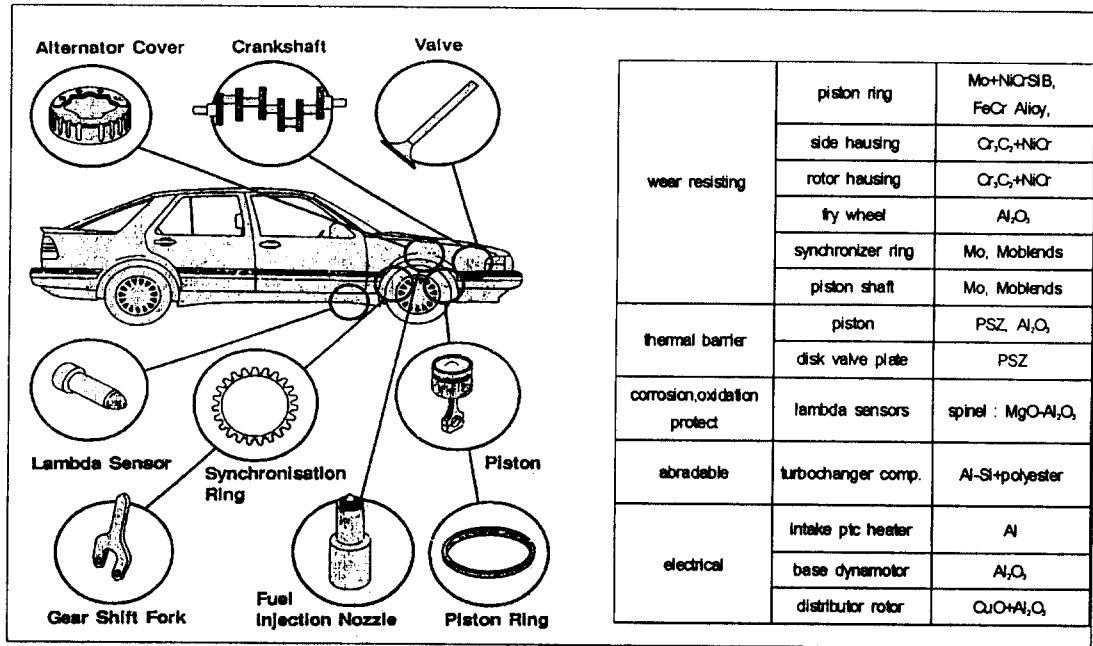


Fig 6. Plasma thermal spray application in automotive industry

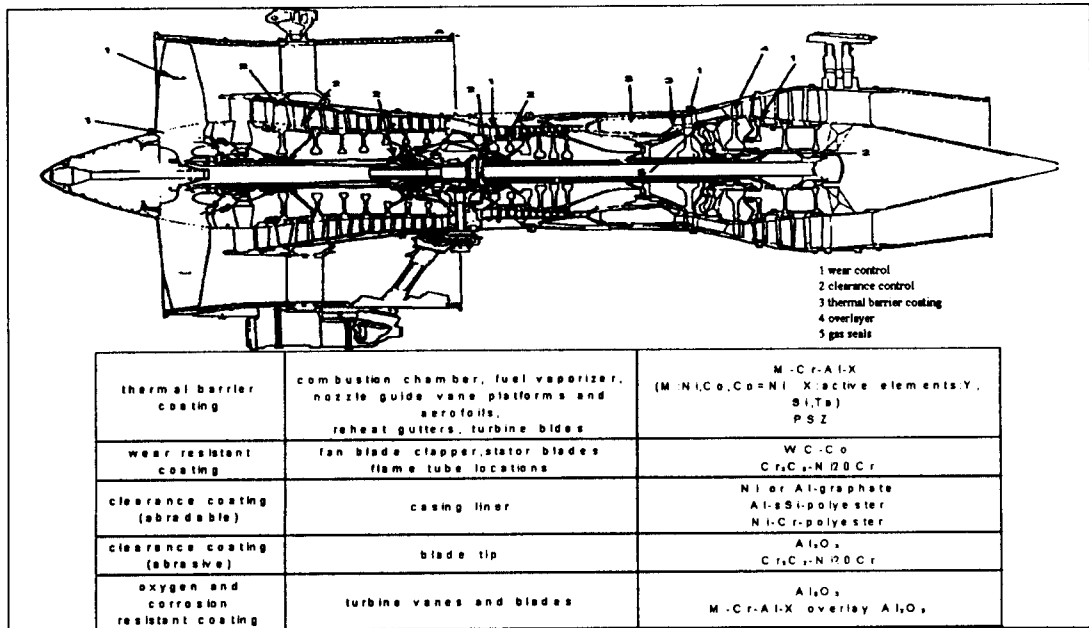


Fig 7. Plasma spray applications in aero industry

가압 열처리(HIP : Hot Isostatic Pressing) 등의 방법을 써서 붕공처리를 하고 있다.

표 3은 각 응용 분야에 사용되는 재료와 구체적으로 적용되는 산업 분야를 나타내고 있으며,^{13,14)} 그림 6과 7에는 특히 자동차 공업과 항공기 산업에서 응용되고 있는 코팅 재료와 부품에 대해 나타내었다.

6. 향후 연구 방향

이상과 같이 용사 기술은 각 산업계에 다양하게 적용됨에 따라 그 중요성이 증대되고 있으며, 앞으로의 용사기술은 더욱더 발전할 것으로 기대된다. 그러나 용사기술은 어느 한가지만 발달해서는 안되고 분말, 모재, 장비등 수많은 공정변수에 따른 기술이 함께 발달해야 하는 종합적인 기술이다. 국내에서는 이들의 중요성에 대하여 일부 연구소에서 연구를 수행하고 있으나, 대부분의 연구는 코팅 공정 변수 혹은 코팅 방법의 변화에 따른 코팅 재료 특성 비교에 국한되고 있다. 따라서 앞으로 코팅 특성에 큰 영향을 미치는 분말 제조 방법, 미세 조직 분석을 통한 각 사용분위기하에서의 품질특성 저하기구(degradation mechanism) 규명 등 종합적인 연구를 통하여 코팅 선택에 대한 기준을 확립하고 나아가 현장기술로 확대가 되어야겠다.

Reference

1. Metals Handbook, 5 (361-375)
2. Welding Handbook. 2 (864-889)
3. James H. Clare, Daryl E. Crawmer : "Metal Handbook", 10th Edition, pp. 365
4. Yves Pauleau : Materials and Processes for Surface and Interface Engineering, (1995) 245-284
5. R. Suryanarayanan : Plasma Spraying (1993) 163-200
6. Stephen M. Rosznagel et. al : Handbook of Plasma Processing Technology, (1989) 14-58
7. D. Apelian, M. Paliwal, et. al : Melting and Solidification in Plasma Spray deposition, International Metals Reviews, 28 (1983) 5
8. Maher Boulos, Emil Pfender : Materials Processing with Thermal Plasmas, MRS Bulletin, 1996
9. N.R. Nicoll, B. Clarke : The Thermal Spraying as a Modern Production Process, 1992
10. J. Disam, A. Sickinger, V. Wilms : The Effect of the Chamber and Spraying Parameters of the LPPS Method on the Structure of Mullite Coatings, Proceedings of the NTSC 1990.
11. B. Dulin, A.R. Nicoll : Plasma sprayed Tungsten Carbide-Cobalt Coatings, Proceedings of the NTSC 1987.
12. T. P. Slavin, J. Nerz : Material Characteristics and Performance of WC-Co Wear resistant Coatings, Proceedings of the NTSC 1990.
13. 이 주 동 : 플라즈마 용사 코팅시의 적층모델 및 ZrO₂ 코팅층의 잔류응력에 관한 연구, 서울대 금속공학과 대학원 박사학위 논문 1992.
14. D. S. Rickerby, A. Matthews : Advanced Surface Coatings - a Handbook of Surface Engineering, (1991) 217-243
15. Ing. H. -D. Steffens : Arc and Plasma Spraying Today and in the 90th, transaction of JWRI, 1988
16. Thermal spray coating manual, Shulzer-Metco. Ltd
17. E. Lugscheider and I. Rass : Under water Plasma Spraying, Proceedings of the NTSC 1991
18. A. Dauge, D. Fargeot, J. P. Laval, Phase Transformations in Solids, Metals Res. Soc. Symp. Proc. 21 (1984) 207
19. Pina J, Dias A. M : Residual Stresses in Plasma Sprayed Coatings, 2nd Plasma-Technik-Symposium 1991