

PTA 육성용접

Plasma Transferred Arc(PTA) Surfacing Process

김 영 섭

Y. S. Kim



김영섭/산업과학기술
연구소/1953년생/아크
용접 및 표면개질 분야
에 관심

1. 서 언

일반적으로 부식과 마모는 재료의 표면에서 발생하는 화학적, 기계적인 손상으로 기계부품의 수명과 작동상태를 결정하는 중요한 요소로서 산업설비 전반에 걸쳐서 발생하여 많은 예산이 소모되는 원인이 되고 있다. 특히 마모는 하중의 형태와 방법, 속도, 온도, 재질, 윤활제의 존재여부, 윤활제가 있다면 그 종류와 양, 그리고 분위기등을 고려하여야 하므로 매우 다양한 형태로 나타난다. 이와같은 마모를 줄이기 위하여 재료의 표면경화방법의 개발, 내마모(또는 내식)재료의 개발등 많은 노력을 기울여 왔다¹⁾.

이중 플라즈마에 의한 표면경화법(이하 PTA 육성용접이라고 함)은 개발된 이후 필요한 변수가 너무 많아 오랫동안 폭넓게 적용이 되지 못하고 있었다. 따라서 아주 우수한 코팅 품질을 필요로 하거나 재료측면에서 다른 방법을 사용할 수 없는 경우에만 적용이 되어왔다. 그리고 경제성보다는 안정성이 우선적으로 보장 되어야 하는 경우, 예를 들면, 핵시설물, 화학설비 또한 엔진설비와 같은 곳에 사용이 되었다. 그러나 최근에 들어서 특별

히 microprocessor와 제어기술의 적용이 적은 비용으로도 가능해지면서 새로운 장치가 개발되었고, 많은 연구에 의하여 코팅의 특성에 미치는 영향을 파악하게 되므로써 PTA 육성용접이 신뢰성이 있으며 다른 육성방법에 비해서 우수한 공정으로 자리를 잡게 되었다²⁾.

한편 PTA 육성용접은 낮은 dilution, 좁은 열영향부 그리고 상대적으로 높은 적층율의 특성이 있어 큰 부피를 코팅하거나 중요한 부품에 적용하기에 적합하다. PTA 장치가 반자동 또는 완전 자동화되면서 상대적으로 운용이 쉬워져 이러한 적용성은 더욱 확대되고 있다.

PTA 육성용접은 Table 1에서 보는 바와 같이 다른 표면 경화법에 비하여 투자비용은 많이 들더라도 그 특성에 있어서는 우수하다고 할 수 있다.

2. PTA 육성용접

2.1 PTA 장치

PTA 육성용접은 두개의 독립된 arc를 사용한다. 이들은 서로 다른 DC 공급원으로 부터 일정한 전

Table 1. Comparison of several hardfacing processes

Process	Capital cost	Material restrictions	Bond	Versatility	Heat input	Deposition rate, kg/h	
Laser (automated)	High ↓ Low	None	Fusion	Good	Very low and local	0.2~7	
PTA (automated)		Some preheat required	Fusion	Good	Hight but local	2.5~6.5	
Detonation (D-Gun, Jetkote, Flare)		---	Forge	Poor	Very low, zero	2~8	
Plasma spraying		---	Liq/sol	Good	Very low	0.5~7	
SAW (automated)		---	Fusion	Poor	Low	5~25	
TIG		---	Fair	Excellent	Medium	0.5~3.5	
MIG		---	Fair	Moderate	Medium	2.3~11	
Flame spray/fusion		---	Only low T_m alloys	Fusion	Moderate	High but uniform	0.5~7
Oxyacetylene		---	Needs substantial preheat	Liq/sol	Excellent	High	0.2~2.5
Shielded metal arc (manual)		---	---	---	Excellent	Low	0.5~2.5

류에 의하여 발생된다. Figure 1에서와 같이 음극인 W전극과 양극인 수냉식의 Cu노즐 사이에서는 고주파발진장치에 의하여 pilot arc (non-transferred arc)가 발생한다. 이 때 음극과 양극사이에 Ar plasma gas가 통과 하면서 이온화되어 음극(W)과 모재사이에 전도성의 분위기를 만든다. 따라서 이 pilot arc는 W전극과 양극인 모재사이의 2차전류에 의하여 main arc(transferred arc)를 발생시키게 된다. 경화용 분말은 torch의 내부로 이송되어 모재 상부의 지점에서 plasma arc와 만나게 된다. 한편 PTA 육성용접은 이 2차 전류에 의하여 모재표면을 가열하여 용융시키므로 모재표면의 용융깊이를 전류에 따라 조절할 수 있다³⁾.

전극의 마모와 용융 pool을 대기로부터 차단시키기 위하여 gas를 사용하는데 plasma gas로는 Ar이 주로 사용되며 Ar/H₂ 혼합gas는 집적력과 환원성이 좋으므로 차폐gas 또는 분말공급gas로 이용되고 있다. 분말은 한번에 용융 pool에 녹아 적층되고 넓은 층을 형성하기 위하여 torch를 왕복시켜 진행 한다. 집적된 에너지 때문에 적층율이 높지만 모재가 전기적으로 연결되어 있으므로 dilution이

높게 나타난다. 적층율을 높이기 위하여 plasma arc의 에너지를 증가시키면 변수를 적절하게 조절하지 못할 경우 모재의 dilution은 더욱 가중된다²⁾.

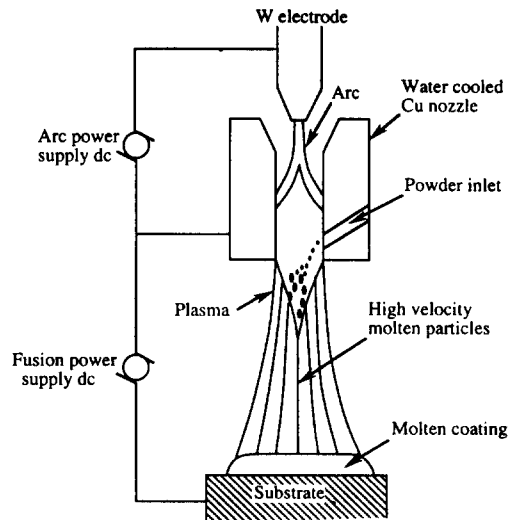


Fig. 1 Schematic illustration of PTA surfacing.

2.2 PTA 공정

PTA 육성용접의 장점이라면 금속적인 결합, 고 밀도의 코팅, 높은 적층율, pass당 높은 두께등이 있다. 일반적으로 최대 7kg/h의 분말공급속도로 pass당 0.5~6.35mm의 두께와 최대 32mm의 코팅 폭을 얻을 수 있다. 한편 PTA에 의한 육성은 전력 손실이 적은 특징이 있다. 예를 들어, 88%WC-12%Co를 0.3mm두께와 9.5mm폭으로 plasma 용사할 때 최고의 용사층 특성을 얻기 위해서는 40~60kW 로 24pass를 하여야 한다. 그러나 같은 재료를 PTA로 코팅할 경우에는 pass당 2.5kW의 전력 만이 필요하다³⁾.

입도의 범위가 매우 넓은 분말이나 입도가 매우 큰 분말을 사용하는데에서 발생할 수 있는 많은 문제점은 PTA 육성용접에서는 큰 문제가 되지 않는다. 한편 모재를 가열하기 때문에 미세조직이 변할 수 있어서 그 적용대상이 제한적일 수가 있다. 또한 반드시 도전성이어야 하고 뒤틀림에 대한 내성이 있는 모재를 선정하여야 한다.

수동의 PTA 육성용접을 다른 arc에 의한 육성용접과 그 특성을 비교하여 보면 Table 2와 같다. 산소-아세틸렌용접(OAW)으로 CoCrW 합금을 코팅 하였을 때 PTA 육성용접에 비해서는 dilution이 낮으나 미세조직상으로 조대한 dendrite 구조를 보여 주며 원래의 높은 입열량으로 열영향부에서도 결정립 조대화 현상이 발견되고 있다. 그에 반해서 PTA 육성용접에 의한 코팅층은 미세한 dendrite구조 이며 열영향부에서도 상대적으로 미세한 결정립이 관찰되고 있다⁴⁾.

일반적으로 PTA 육성용접의 기본적인 변수로는 1차 전류(pilot arc current), 2차 전류(main arc current), plasma gas 속도, 분말공급속도, 용접속도, 전극간격등이 있으며 모재의 dilution은 이들에 따라 크게 영향을 받는다. 전극과 모재사이의 간격이 15mm일 때와 20mm일 때 dilution 정도가 큰 차이를 보여주고 있으며, 또한 이는 2차 전류에 따라 변화하고 있음을 알 수 있다(Figure 2)⁵⁾.

한편 이러한 dilution 정도는 분말의 공급속도와 plasma gas 속도에도 큰 영향을 받는 것으로 나타나 있다(Figure 3)⁵⁾. 이 그림에서 알 수 있듯이 12kg/h의 높은 적층율로도 5%이하의 dilution이 가

Table 2. Comparison of surfacing process⁴⁾

	Manual OAW	Manual GTAW	Manual PTA
Dilution	1~3%	7~10%	5~7%
HAZ	Wide	Wide	Narrow
Deposition rate	0.9kg/h	1.8kg/h	2.5kg/h
Consumable	Wire	Wire	Powder or Wire
Operator skill	High	Moderate	Low to moderate

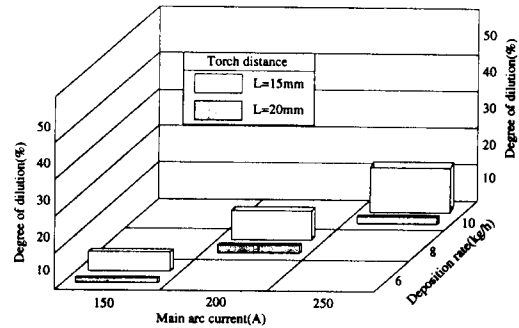


Fig. 2 Degree of dilution as functions of main arc current and deposition rate for different torch distance

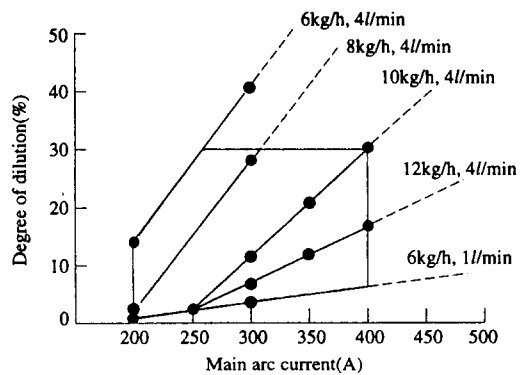


Fig. 3 Dilution as a function of main arc current at different deposition rate and plasma gas flow rate

능하다.

3. PTA 용성용접재료

PTA와 같은 고밀도의 에너지를 이용한 용성용접은 합금분말을 사용하는 용성용접으로써 최근에 내식, 내마모특성의 개선이 필요한 산업설비에 적용되기 시작하였다. 내식, 내마모에 대한 연구는 상당한 기간동안 이어져 왔으며 그 결과에 따라 표면개질을 위한 합금이 많이 개발되었다. 이러한 재료의 개발에서는 코팅층이 가져야 할 특성을 검토하여 그에 필요한 요인을 고려하여야 한다. 그러한 요인으로는 다음과 같은 것들이 있다⁴⁾:

- 코팅층의 사용 분위가-마모형태, 연삭 마모입자, 운동속도, 입자의 충돌각도, 부식성 물질의 존재여부, 온도.

- 부품의 성질-코팅될 부위의 크기와 모양, 소재의 종류(이 경우 필요하다면, 코팅층 재료의 특성, 예열의 여부, pass간 온도 등을 함께 고려하여야 한다.).

- 수명-얼마나 오랫동안 수명을 유지하여야 하는가?

- 표면상태-용접된 상태 그대로 사용할 것인지 아니면 마감처리를 하여야 하는 것인지 ; 균열의 허용한도.

- 경제성-코팅에 필요한 전체 비용은 얼마나 되는지 그리고 경제성이 있는 것인지?

한편 PTA 용성용접재료는 복잡한 마모응력상태 때문에 고경도의 합금을 가장 많이 사용한다. 여기에서 고경도의 합금이라 하면 상대적으로 ductile한 조직내에 hard phase가 분산되어 있는 것을 뜻한다. 한가지 또는 그 이상의 합금분말과 다양한 형태와 크기의 탄화물의 혼합비율을 조절함으로써 코팅층내의 hard phase의 분포와 체적비를 조절할 수가 있다. 따라서 용성용접재료의 합금설계는 매우 다양하며 광범위하다.

PTA 용성용접에서는 일반적으로 AWS분류 : NiCr-B와 같은 Ni계 합금과 AWS분류 : CoCr-A, CoCr-B와 같은 Co계 합금분말이 많이 이용되고 있다(Table 3)⁶⁾. 그리고 Fe계 합금으로는 FeNiCr, FeCrW, FeCoCr등이 있다. 고온에서의 부식을 방지하기 위하여 초합금과 금속간 화합물의 사용도

Table 3. Nominal chemical composition of conventional alloys for PTA surfacing⁶⁾

Alloy	Elements								
	C	Cr	B	Si	W	Mo	Fe	Ni	Co
NiCr-B	0.5	12.0	2.2	3.7	-	-	-	Bal	-
CoCr-A	1.1	28.0	-	1.1	4.5	-	-	-	Bal
CoCr-B	1.4	29.0	-	1.4	8.2	-	-	-	Bal

증가하고 있다. 최근 산업설비의 고효율, 고도화에 따라 그 사용환경이 가혹해지면서 기존의 합금으로는 내식성, 내마모성이 부족하게 되었다. 그에 따라 Cr이 50%이상인 CrNi계 합금을 개발한 경우도 있는데 Mo, B, Si이 미량 첨가된 것으로 기존의 합금분말에 비해서 그 특성이 우수하게 나타나고 있다⁶⁾. 이 합금의 미세조직은 Cr상과 공정상으로 되어 있으며 공정상은 Cr, Ni의 고용체와 미세한 CrB로 이루어져 기존 합금(NiCr-B, CoCr-A, B)의 경도와 같은 수준이었다. 용접성에 있어서도 CoCr-A, B와 같았으며 NiCr-B에 비해서는 훨씬 우수한 특성을 보여주었고 충격인성과 내식성에 있어서도 좋은 결과를 보여주었다. 한편 내마모특성은 기존의 합금보다 우수한 결과를 나타내었다(Figure 4).

탄화물은 WC-W₂C, Cr₃C₂, TiC, VC등이 많이 이용되고 있으며 이때 분말의 크기는 분말공급장치를 고려하면 통상적으로 250 μ m이하가 되어야 한

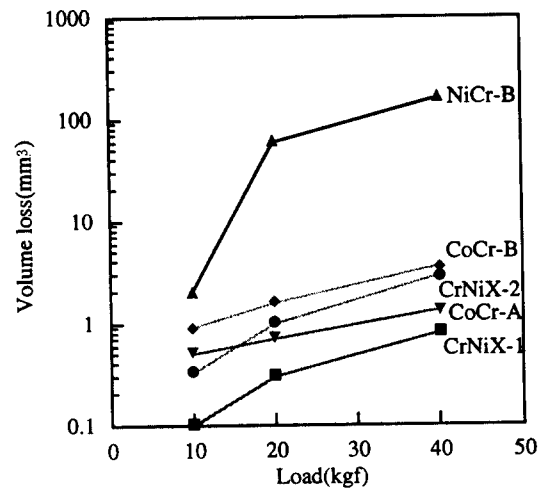


Fig. 4 Wear test results

다⁴. 따라서 금속기지 합금분말의 입도는 $-250\mu\text{m} + 40\mu\text{m}$ 가 되어야 하고 탄화물의 종류와 입도는 코팅층 사용환경에 따라서 선택할 수 있다. 실험 결과에 따르면 합금분말과 탄화물이 1:1(50%)로 혼합되면 내마모성이 5~6배까지 증가한다고 한다⁴. 이때 PTA 용성용접층은 탄화물이 높은 밀도로 균일하게 분포되어 있다. 탄화물들은 일부 용해되는 것도 있으며 일부는 기지조직에 그대로 분포되어 있다. 이와같은 현상이 일반 arc에 의한 용성용접과 상반되는 것으로 arc용접에서는 탄화물이 용융 pool에서 용해되어 버린다.

탄화물의 용해정도는 금속기지합금의 조성에 따라 달라진다. 그것은 근본적으로 기지합금의 용해온도가 조성에 따라 변하고 그 온도에서 탄화물의 용해도가 다르기 때문이며 또한 탄화물의 크기도에 영향을 미친다.

CoCrMo 합금에 VC를 혼합하여 얻은 PTA 용성용접층을 분석한 결과에 따르면 VC의 크기에 따라 다른 양상을 보여주고 있다⁷. 조대한 VC의 경우 많은 탄화물이 용해되지 못하고 일부만이 용해, 재결정된 것을 보여준 반면 미세한 VC의 경우에는 대부분 용해되어 재결정된 것을 보여주었다. 이들의 내마모특성(Figure 5)도 미세한 VC의 경우가 우수하였는데 이것은 용해되지 못한 조대한 탄화물이 마모에 의하여 쉽게 파단되기 때문이며 또한 미세한 탄화물이 조대한 탄화물에 비해서 기지조직에 더욱 조밀하게 분포되어 있으므로 내마모특성이 우수하다고 할 수 있다⁷.

4. 적용사례

4.1 Ball valve

Ball valve²⁾는 고온, 고압 뿐만 아니라 유체중에 연삭물질이 있기 때문에 PTFE와 같은 sealing은 좋지 않으며 이 경우 순수한 금속이 좋은 것 같지만 심각한 마모를 유발하므로 그들의 수명연장은 응력상태에 견딜 수 있는 재료만이 가능하다. 이러한 재료는 연삭 및 접촉에 대한 내마모, 내식, 내열 특성을 가지고 있어야 한다. 일반적으로 탄화물을 혼합하여 hard phase를 얻을 수가 있다. 그러나 경우에 따라서 높은 내마모성을 필요로 할 때에

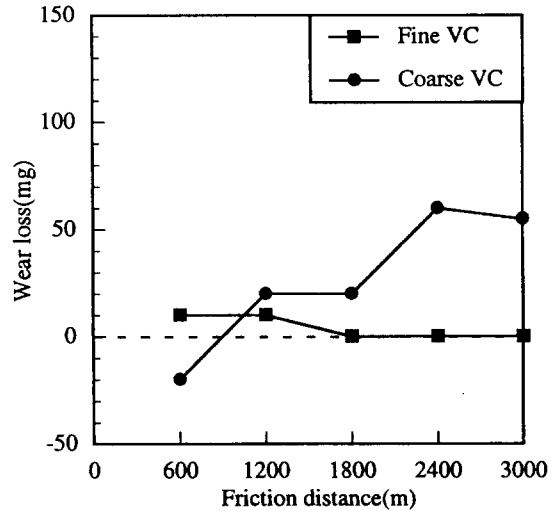


Fig. 5 Result of wear resistance test for different size of carbide.

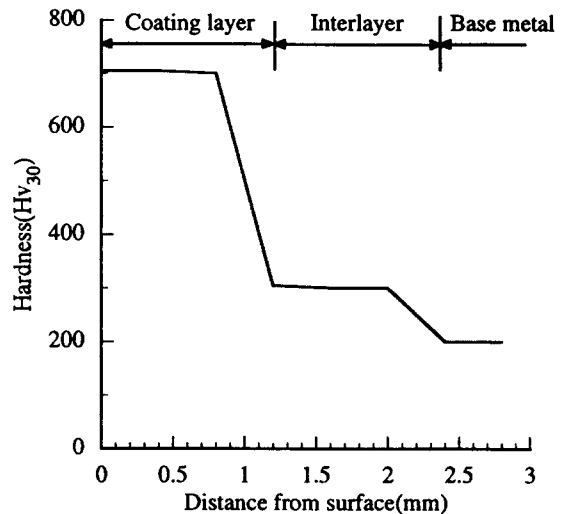


Fig. 6 Hardness profile of a coated ball valve.

경도가 높으므로 균열을 피할 수가 없지만 복합분말을 사용하면 hard phase의 비율이 높아져 특성이 개선된다. Ni계 합금에 50%의 WC-W₂C가 혼합되었을 때 용접성, 경도, 균열 생성정도 등의 특성이 가장 우수하게 나타났²⁾. Figure 6의 경도분포에 의하면 적정 조건하에서 모재의 dilution도 극히 낮은 것으로 나타났다. 초경합금에 있어서는 모재와

의 열팽창 거동이 큰 차이를 나타내므로 균열 발생률이 매우 높다. 이러한 열응력은 적절한 중간 삽입층의 소성변형에 의하여 감소시킬 수가 있다. Ball valve의 경우 오스테나이트계 삽입층을 사용하여 600℃로 예열한 뒤 용접하는 동안 그 온도를 유지시켜 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

4.2 Ball bearing

일반적으로 고온설비에서 spindle 또는 manipulator와 같은 bearing²⁾들은 고온이 작용하여 작은 움직임에도 열팽창을 보상해주어야 하는 문제가 있다. 이러한 곳에는 대체로 윤활액을 사용하지 않으며 건식의 윤활제를 사용하거나 전혀 사용하지 않는다. 이와같은 곳에 사용되는 소재는 그 분위기가 600℃의 마모조건이므로 상온에서의 경도는 600Hv, 600℃에서는 400Hv이 되어야 하며, 내식성이 좋아야 하고 균일한 미세결정구조를 가져야 하며, 또한 사용온도에서 변태가 없어야 한다. 이러한 조건에 따라 상온에서 경도가 600Hv이상되는 합금을 대상으로 고온경도, 미세구조, 용접성 등을 검토한 결과 우선 사용 가능한 합금은 Table 4에서 보는 바와 같은 조성을 가지며 그 중에서 CoCrMoSi합금의 미세구조는 탄화물, 붕화물 또는 규소화합물에 의한 강화형이 아니고 금속간화합물에 의한 분산강화형 합금이다. 이 합금은 laves상에 의하여 온도가 상승하여도 조직이 안정되어 있으며 540℃까지는 열팽창에 따른 부피의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이 합금은 고온에서 산화피막의 밀착성이 우수하므로 마모및 마찰을 최소화하는데 효과적이며 400℃이상에서는 경도가 거의 일정하게 400Hv를 유지하였다.

4.3 Turbine blade

2차 저압 증기 turbine⁸⁾은 90℃정도의 증기가 있는 곳으로 물방울이 충돌하여 erosion이 심하게 나타난다. 이러한 마모는 blade의 모서리를 따라서 국부적으로 발생하여 손상된 blade를 Co계 내마모재료(40HRC)로 코팅을 한다. 일반적으로 보수 코팅은 brazing 또는 화염용사법을 이용하는데 이 방법은 고도의 숙련이 필요하며 경제적인 이유 때문에 blade가 rotor에 붙어있는 상태에서 보수를 한다. 따라서 고온에 의하여 모재인 410 스테인레스강이 과도하게 결정성장을 일으킬 수 있다. 결국 피로강도의 저하를 초래하게 된다. 그러므로 PTA에 의한 코팅층의 수명은 수배이상 연장될 것으로 나타났다. 한편 PTA 육성용접은 자동화가 잘 되어 있으므로 높은 숙련도가 필요없으며 모재에 영향을 미치지 않고 고품위의 코팅층을 형성할 수가 있다. PTA 육성용접은 blade를 우선 산소-아세틸렌 torch로 200~230℃에서 예열하며, 용접한 후에는 530℃에서 10분간 가열하여 응력을 제거한다.

4.4 Fan blade

발전소, 제지공장, 시멘트공장의 배출구에 있는 fan blade⁸⁾는 분진에 의한 erosion이 심하게 발생한다. 그 손상 정도가 균일하지 못하고 위치에 따라 차이가 있다. 이와같이 손상된 blade는 일반적으로 고속 plasma용사에 의하여 WC 코팅으로 보수를 한다. 그러나 통상적인 코팅 방법으로는 위치에 따라 불균일한 마모로 코팅의 두께를 다르게 하여 전체적으로 균일한 코팅을 하기가 매우 어렵다. PTA를 이용할 경우 손상정도에 따라 재료의 혼합비율을 달리하며 코팅의 두께도 다르게 하므로써 전체적으로 균일한 코팅층을 얻을 수가 있다. Ni-B 합금에 WC-W₂C를 혼합하여 PTA 육성용접하였을 때 수명이 plasma 용사하였을 때에 비

Table 4. Chemical composition of alloys for surfacing of bearing(2)

Alloy	Elements									
	C	Cr	B	Si	W	Mo	Fe	Ni	Co	Others
NiCrBSi	0.75	13.5	3	4.25	-	-	4.75	Bal	-	-
CoCrWC	2.6	30.0	-	1.20	13.0	-	1.00	-	Bal	-
CoCrMoSi	0.08	17.5	-	3.40	-	20.5	-	3	Bal	-
FeNiCrC	1.3~1.9	15.32	-	-	2~4	3~4	21.55	15.30	-	7

해서 2배이상 증가하는 것으로 나타났다.

4.5 제철설비

많은 제철설비들이 다양한 부식과 마모 분위기에서 사용되고 있다. 따라서 코팅재료로서 필요한 특성이 매우 많으며 일부는 서로 반대의 특성이 필요한 경우도 있다. 이들 필요조건으로는 높은 연성, 열충격저항성, 접촉 및 연삭에 대한 내마모성, 내식성등이 있다. 일반적으로 제철설비에 적용되는 내식, 내마모 코팅재료는 내열강, CrNiSiB 합금, Mn강, Ni계 합금, Co계 합금, 산화물들이다.

압연공장의 guide roller는 내식성 뿐만아니라 고온에서 높은 압축강도가 필요하다. 이러한 조건에 적합한 PTA 육성용접재료는 FeCr합금이 있다. 한편 연주설비의 roller는 300℃~800℃에서 여러 복합적인 열응력이 마모성 분위기와 함께 작용한다. 이 경우에도 guide roller와 같은 재료를 사용하여 수명을 연장시킬 수가 있다. 연삭마모가 심각하며 광석이 부딪힐 때 충격응력을 함께 받는 coal dredger는 NiCrBSi합금과 60%WC를 혼합하여 코팅하였다. 이와같은 PTA 육성용접은 낮은 dilution으로 코팅층의 부피를 줄이면 필요한 코팅재료의 부피를 절감하여 비용이 적게 든다⁹⁾.

일반적으로 집진설비에서는 분진에 의한 erosion이 많이 발생하므로 관련설비의 수명연장을 위한 노력이 계속되고 있다. 특히 제철소의 소결공장에서는 이러한 impeller의 마모가 심하여 liner를 덧붙이는 경우가 많은데 내마모재료를 바로 사용하거나 코팅을 하여 사용한다. 이 경우 PTA 육성용접에 의한 NiCr-Cr₃C₂분말을 코팅한 검토 결과도 있다¹⁰⁾.

PTA 육성용접층에 대한 미세조직은 계면 근처에서 Fe-Cr-Ni 고용체의 일반 dendrite 응고 조직을 보여주고 있다. Dendrite의 주변은 미세한 lamellar 조직으로 이루어져 있는데 M₇C₃와 γ-Fe의 혼합조직으로 나타났다. 탄화물 형태는 대부분 M₂₃C₆로 일부 불완전 용융으로 비평형 Cr₃C₂가 존재하고 있다. Dilution은 5%이하로 최소화 할 수 있었으며 그만큼 탄화물의 부피분율이 높으므로 경도 또한 최고 1273Hv까지 측정되었다(Figure 7).

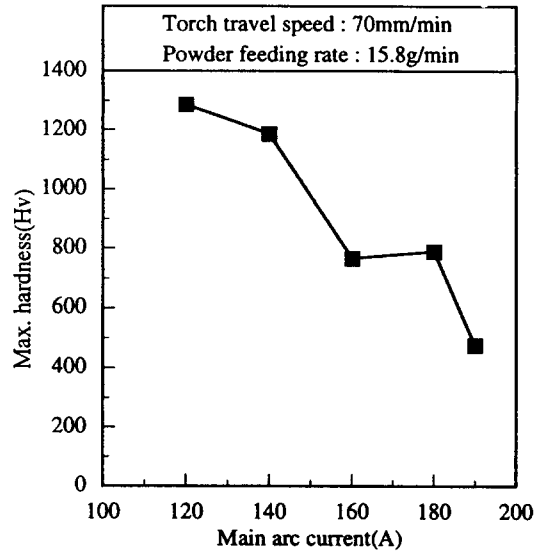


Fig. 7 Variation of maximum bardnessas a function of main arc current.

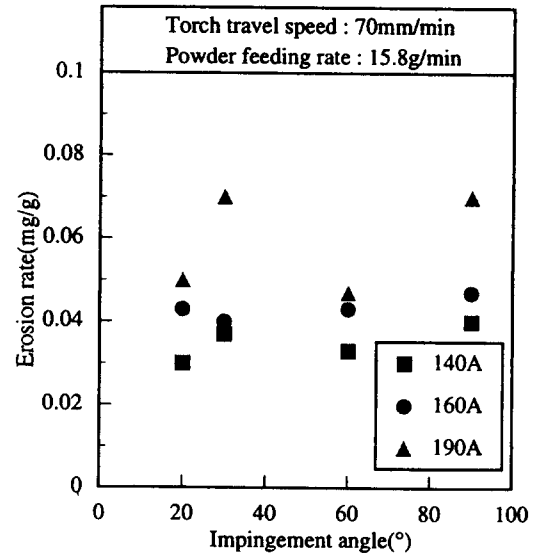


Fig. 8 Variation of erosion rate as a function of impingement angle for different main arc current.

일반적으로 ductile한 재료는 erosion 입자의 충돌각도가 높아질수록 erosion 속도가 15~30° 정도에서 최대가 되었다가 점점 감소하는 특성이 있으

며^{12,13)}, brittle한 재료는 충돌각도가 높아지면 erosion속도가 증가하는 특성이 있다^{14,15)}. 그러나 PTA육성층의 erosion 속도는 입자의 충돌각도에 따라 ductile 또는 brittle 한 재료의 erosion 특성이 복합형태로 나타나고 있는 것으로 나타났다. 이것은 dilution 정도에 따라서 탄화물의 분포가 다르기 때문에 그에 따라서 erosion 특성도 달라진다고 할 수가 있겠다(Figure 8).

5. 결 언

PTA 육성용접은 분말을 사용하므로 용접용 wire에 비하여 재료의 선택 범위가 훨씬 넓으며 dilution이 낮은 특성을 가지고 있다. PTA 육성용접은 특히 자동화가 되어 있어서 코팅층의 품질 신뢰성이 높으며, 적층율에 있어서는 일반적으로는 7kg/h로 제한이 되어 있어서 사용에 한계가 있었다. 그러나 최근에 적층속도를 12~15kg/h로 하는 고풍력의 PTA(HPTA) 육성용접이 가능하므로써 대형설비의 적용도 가능하게 되어 앞으로 그 사용이 확대될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. A. R. Lansdown and A. L. Price : *Metals to Wear*, Pergamon Press, Oxford, UK (1986).
2. E. Lugscheider, U. Morkraner, and A. Ait-Mekideche : in Proc. of 4th NTSC, Pittsburg, PA, USA (1991), P. 529.
3. *Metals Handbook* : 9th ed., V. 5, ASM (1982).
4. P. A. Kammer, M. Weinstein, and R. J. DuMola : in Proc. of 4th NTSC, Pittsburg, PA, USA (1991), P. 513.
5. H. Hall n, E. Lugscheider, and A. Ait-Mekideche : *ibid*, P. 537.
6. K. Hidaka and K. Tanaka : in Proc. of 1993 NTSC, Anaheim, CA, USA (1993), P. 391.
7. K. Sasaki, M. Shimada, Y. Kato, and T. Shinoda : *ibid*, P. 385.
8. R. J. DuMolar and P. A. Kammer : *Thermal Spray ; Advances in Coating Technology*, ASM (1988), P. 131.
9. H. Hall n, H. Mathesius, A. Ait-Mekideche, F. Hettiger, U. Morkraner, and E. Lugscheider : in Proc. of ITSC, Orlando, FL, USA (1992), P. 899.
10. 김영섭 : 산업과학기술연구소 연구보고서 (93A097) (1993).
11. *Alloy Phase Diagrams* : ASM Handbook, V. 3, ASM (1992), P. 324.
12. J. G. A. Bitter : *Wear*, V. 6 (1963), P. 5.
13. Z. Finnie : *Wear*, V. 19 (1972), P. 81.
14. R. Bellman, Jr. and A. L. Levy : *Wear* 70 (1981), P. 1.
15. G. Sudararajan and P. G. Shewmon : *Wear* 84 (1984), P. 237.