

Ni계 및 Co계 합금 PTA 오버레이용접층의 마모거동에 관한 연구

윤병현* · 이창희** · 김형준*

*포항산업과학연구원 설비/용접연구팀

**한양대학교 재료공학부

Wear Behavior of Plasma Transferred Arc Deposited Layers for Ni - and Co - base Alloy

Yoon Byoung Hyun *, Lee Chang Hee ** and Kim Hyung Jun *

* Welding & Structural Integrity Research Team, Research Institute of Industrial Science and Technology , Pohang 790-330, Korea

**Dept. of Material Science & Engineering, Hnyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract

This study has evaluated the wear behavior of PTA (Plasma Transferred Arc) Inconel 625 and Stellite 6 overlays on Nimonic 80A substrate. Nimonic 80A alloy was also included for comparison. In order to evaluate the wear performance, three-body abrasive wear test and pin-on-disk dry sliding wear test were performed. Microstructural development during the solidification of deposits is also discussed. Wear test results show that the wear rate of Stellite 6 deposit is lower than that of Inconel 625 deposit and Nimonic 80A. The sliding wear resistance of overlay deposits follows a similar trend to the abrasive wear resistance, but for Nimonic 80A. The main wear mechanisms were abrasive wear for Inconel 625 deposit, adhesive wear and delamination for Stellite 6 deposit in pin-on-disk dry sliding wear test and ploughing in three-body abrasive wear test. Cross sectional examinations of the worn surface of pin specimens after pin-on-disk dry sliding wear test implies that the plastic deformation near worn surface has occurred during the wear testing.

(Received July 21, 2001)

Key Words : PTAW, Abrasive wear, Adhesive wear, Sliding wear, Delamination, Ni-base alloy, Co-base alloy

1. 서 론

플라즈마 분체 오버레이용접법(PTAW)은 개발된 이후 필요한 변수가 너무 많아 오랫동안 폭 넓게 적용되지 못하고 있었다. 그러나 최근에 들어서 제어기술의 적용이 적은 비용으로도 가능해지면서 새로운 장치가 개발되었고, 많은 연구에 의하여 코팅의 특성에 미치는 영향을 파악하게 됨으로써 PTA 오버레이용접이 신뢰성이 있으며 다른 오버레이방법에 비해 우수한 공정으로 평가되고 있다. 이러한 PTA 오버레이용접법은 엔진설비, 제철설비, 핵시설물 및 화학설비와 같은 곳에 사용이 되고 있다^{1,2)}. PTA 오버레이용접은 낮은 희석율, 좁은 열영향부 그리고 상대적으로 높은 적층

율의 특성이 있어 큰 부피를 코팅하거나 중요한 부품에 적용하기에 적합하다. PTA 장치가 반자동 또는 완전 자동화되면서 상대적으로 운용이 쉬워져 이러한 적용성은 더욱 확대되고 있다^{3,6)}.

Nimonic 80A의 니켈합금으로 만들어진 선박용 대형 밸브 스피들(valve spindle)은 고온 및 고압의 엔진 분위기에서의 수명을 향상시키기 위하여 열악한 분위기와 접촉하는 head 및 seat 표면에 코발트계인 Stellite 6를 사용한 PTAW(Plasma Transferred Arc Welding)을 많이 사용하여 왔다. Stellite 6는 고온에서의 마모특성 및 내부식성이 우수하나 가격이 비싸 제작 및 주기적인 보수에 따른 비용이 상당히 크다. 따라서 현재에는 전세계적으로 Stellite 6와 동등한 내마모성 및 내부식성을 보유하고 상대적으로 저렴

한 Inconel 625 합금 또는 Inconel 718 합금으로 대체하고 있는 실정이다^{7,8)}.

밸브 스피들에서 마모가 되는 부위는 시트(valve seat)로서 이 시트부위에서의 마모는 금속과 금속의 미끄럼(sliding)에 의한 응착마모(adhesive wear)와 불순물 입자에 의한 연삭마모(abrasive wear)가 단독 또는 복합적으로 작용하는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 한편, 재료의 마모특성은 미세조직과 깊은 연관성을 갖고 있는데, 경도가 높지 않은 연성재료의 마식(erosion) 거동에서 마모시 발생하는 소성변형에 의한 가공경화특성에 영향을 받는다¹⁰⁻¹³⁾.

따라서 본 논문에서는 밸브 소재인 Nimonic 80A 합금을 모재로 하여 Inconel 625 합금 분말과 Stellite 6 합금 분말을 플라즈마 분체 오버레이용접을 이용하여 오버레이용접한 후 응착마모 및 연삭마모 시험을 실시하여 마모거동을 분석하고 주요 마모기구를 고찰하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

모재인 대형 선박용 엔진의 valve spindle로 이용되는 Ni계 합금인 Nimonic 80A 와 오버레이용 분말인 Inconel 625 및 Stellite 6 합금의 화학조성은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 오버레이층의 희석율을 10% 내외로 한 PTA 오버레이시편을 만들었다. 희석율은 PTA 용접부를 수직으로 절단하여 Fig. 1에서와 같이 단면적을 image analyzer 를 이용하여 측정 후 다음 식에서와 같이 계산하였다.

$$D(\%) = \frac{A_s}{A_s + A_m} \times 100$$

여기서 A_s , A_m 은 각각 용융된 모재의 면적과 오버레이부의 면적을 나타낸다. PTA 장비는 Eutectic사의 Eutronic 375system 을 사용하였으며, 두께가

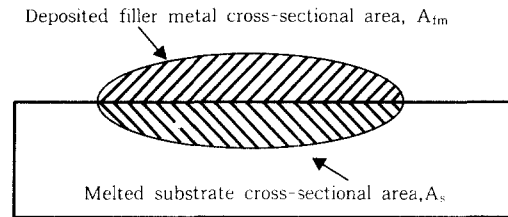


Fig. 1 Schematic illustration of dilution in single pass weld

15mm 이고 직경이 90mm인 Nimonic 80A 합금을 모재로 사용하였다. 마모시편을 제작하기 위하여 가공한 후의 오버레이층의 두께는 약 3 mm 이었다.

2.2 연삭마모시험

연삭마모(three-body abrasive wear) 특성은 DSRW (dry sand rubber wheel) 시험장비를 사용하여 평가하였으며¹⁴⁾, 시편은 시험전에 #800 emery paper를 사용하여 연마하였다. 연삭마모시험에는 모래가 사용되는데 표준 모래인 Ottawa 모래 대신에 해변에서 채취한 모래를 사용하였으며 이때 해변모래를 0.2 ~ 0.3mm의 크기로 분리하였다. 마모시 중량감소는 0.1 mg까지 측정하였으며, 3개의 시편을 이용하여 시험을 실시한 후 평균값을 취하였다. 시험절차는 ASTM 규격 G65-85 procedure B에 규정된 바에 위하여 실시하였으며 시편의 크기는 25(W)×55(L)×6(t) mm 이었다.

2.3 미끄럼 마모시험

응착마모(adhesive wear)는 pin-on disk 형태의 미끄럼 마모시험기(sliding wear tester)를 사용하여 윤활이 없는 건조식 마모저항성을 상온에서 실시하였다¹⁵⁾. 오버레이층을 방전가공으로 직경이 8mm 이고 길이가 15mm인 pin을 제작하여 Nimonic 80A 합금으로 제작된 회전하는 disk에 마찰 시키면서 마모시험을 실시하였다. 안정된 마모상태에 도달하는 시간을

Table 1 Chemical compositions and density of the powders used in this study

Materials	Chemical compositions (wt. %)*										Density (mg/mm ³)
	Ni	Co	Cr	Fe	W	Ti	Nb	Mo	C	Si	
Nimonic 80A	Bal.	-	17.57	1.43	-	2.50	-	-	0.070	0.016	8.19
Inconel 625	Bal.	-	19.76	2.74	-	0.10	3.56	8.50	0.058	0.480	8.44
Stellite 6**	3	Bal.	28	3	4.5	-	-	-	1.1	-	8.46

*Measured by ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometer)

**Given by the supplier.

줄이기 위하여 SiC paper(#800)로 pin 과 disk를 연마하였다. 마모시험속도는 0.42m/s이었으며, 마모하중은 1.49MPa이었다. 총 마모거리는 3708m 이었으며, pin의 중량감소는 최소 3개의 pin에 대한 평균값을 취하였으며, 이때 중량은 0.1mg까지 측정하였다.

2.4 오버레이층 특성 분석

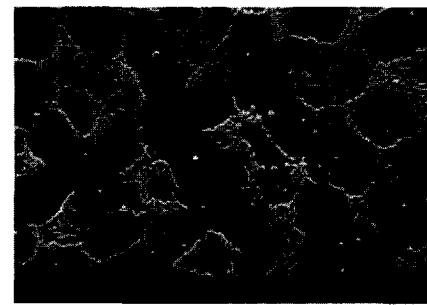
오버레이층을 오버레이면에 수직한 방향으로 절단하여 마운팅후 연마하여 100ml 증류수+10g CrO₃ 용액에서 전해에칭을 실시하였다. SEM 을 이용하여 미세조직을 관찰하였으며 image analyzer 를 이용하여 제 2상들의 분율을 측정하였다.

미세경도는 비커스 경도기를 이용하여 마모시험전 오버레이층의 단면은 10kg으로, 마모시험후 마모 하부면(worn sub-surface)에서는 2g의 하중으로 경도를 측정하였다. 마모시험전 오버레이층의 경도는 오버레이면의 중간부위에서 측정하였고, 마모 하부면(worn sub-surface)의 경도는 마모면에서 약 0.1 mm떨어진 위치에서 1mm 간격으로 10회 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직적 특성

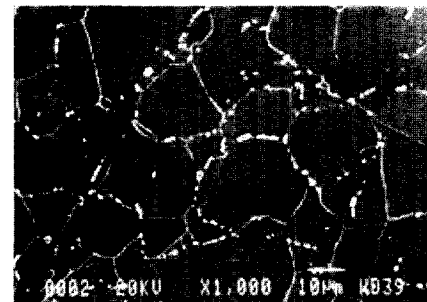
Fig. 2는 PTA 오버레이용접후 Inconel 625 오버레이층 및 Stellite 6 오버레이층과 모재인 Nimonic 80A 합금의 미세조직을 나타낸 사진이다. Inconel 625 와 Stellite 6 오버레이층은 기본적으로 주상정(dendrite) 조직을 나타내고 있으며, 주상정과 주상정사이의 영역에 제2상 입자들이 분포되어 있음을 알 수 있다. Inconel 625 합금의 경우는 Nb, Mo 및 Ti 과 같은 원소들이 주상정사이의 영역에 편석되어 NbC 및 Laves 상으로 이루어져 있으며^{16,17)}, Stellite 6 합금의 경우는 망(network)구조를 하고 있는 Cr₇C₃의 탄화물로 구성되어 있다¹⁸⁾. 한편, Nimonic 80A 합금은 단조된(rotary forged)상태로 약간의 탄화



(a)Stellite 6



b) Inconel 625



(c) Nimonic 80A

Fig. 2 Typical cross sectional SEM images of PTA deposits and substrate

물 및 쌍정들을 가지는 오스테나이트 조직을 하고 있다.

Table 2 는 PTA 오버레이용접층의 기본 특성을 나타낸 표로서 Stellite 6 오버레이층의 경도가 가장 높은 것을 알 수 있다. 즉, Stellite 6 오버레이층의 경도는 335 HV 정도로 Inconel 625 오버레이층의 경도 210 HV 보다 약 125 HV 정도 높으며, 비교재인

Table 2 The characteristics of the coating produced by PTA process

Specimen	Dilution(%)	Bulk hardness	Second phase hardness	Matrix hardness	Second phase area fraction(%)
Inconel 625	10	210	-	-	3.3
Stellite 6	10	335	520	281	26.3
Nimonic 80A*	-	320	-	-	-

*Substrate material

Table 3 Chemical compositions of Inconel 625 and stellite 6 coating layer after PTA weld surfacing
(unit:wt. %)

Specimen	Ni	Co	W	Cr	Fe	Ti	Nb	Mo	C	Si
Inconel 625	64.60	-	-	19.91	2.70	0.13	3.59	8.53	NA	0.475
Stellite 6	Matrix	19.53	51.43	5.37	22.12	1.55	-	-	-	--
	Second phase	7.82	24.63	9.96	55.94	1.65	-	-	-	-

*NA:Not Analyzed

Nimonic 80A 합금보다는 약 15 HV 정도 높게 나타났다. Inconel 625 오버레이층의 제2상 입자의 분율은 약 3% 정도이고, Stellite 6 오버레이층의 경우는 약 26% 를 나타내어 상당히 많은 양의 제2상을 포함하고 있음을 알 수 있다.

Table 3 은 PTA 오버레이용접후 화학조성을 나타낸 표로서 모재와의 희석에 의하여 모든 오버레이층에서 Ni 함량이 증가된 것을 알 수 있으며, 특히 Stellite 6 오버레이층에서는 오버레이전 분말보다 많은 양의 Ni 이 함유되어 있음을 알 수 있다.

3.2 연삭마모 특성

Fig. 3은 연삭마모시험결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 제2상의 석출물을 많이 포함하고 있으면서 경도가 가장 높은 Stellite 6 오버레이층이 가장 우수한 연삭마모특성을 나타내었으며 Inconel 625 오버레이층이 가장 낮은 연삭마모특성을 나타내었다.

또한, 경도가 낮은 Inconel 625 오버레이층 보다 경도가 높은 Nimonic 80A 합금이 더 우수한 마모특성을 나타내었다.

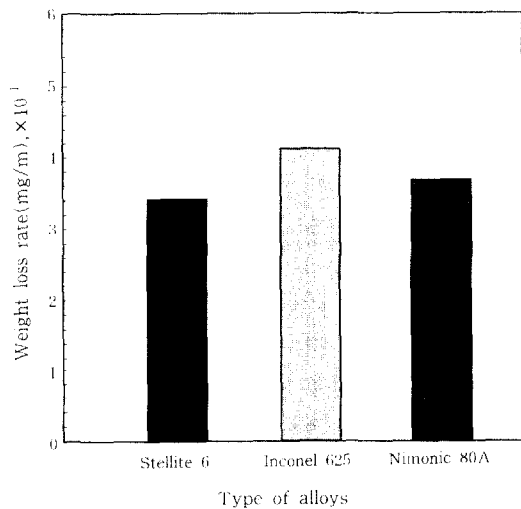
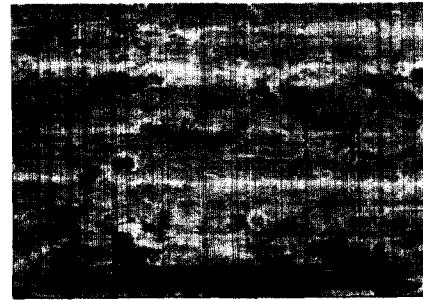
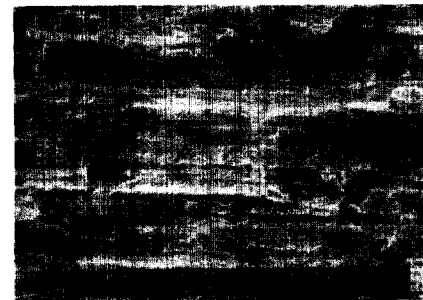


Fig. 3 The results of DSRW abrasive wear test

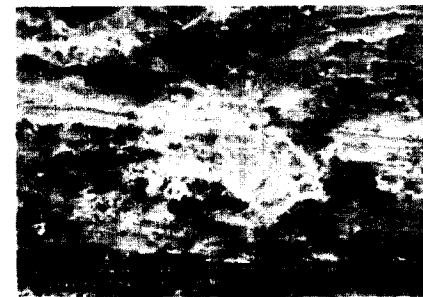
Fig. 4는 마모면의 형상을 나타낸 것으로 전형적인 연삭마모특성을 보이고 있는데, ploughing 에 의한 마모손상은 Stellite 6 오버레이층에서 보다 Inconel 625 오버레이층과 Nimonic 80A 합금에서 더 심하게 나타났으며, Inconel 625 오버레이층과 Nimonic 80A 합금의 마모면의 형상으로는 마모저항성을 구별하기가 곤란하였다.



(a) Stellite 6



(b) Inconel 625



(c) Nimonic 80A

Fig. 4 Worn surface morphologies of the coatings tested by DSRW abrasive wear

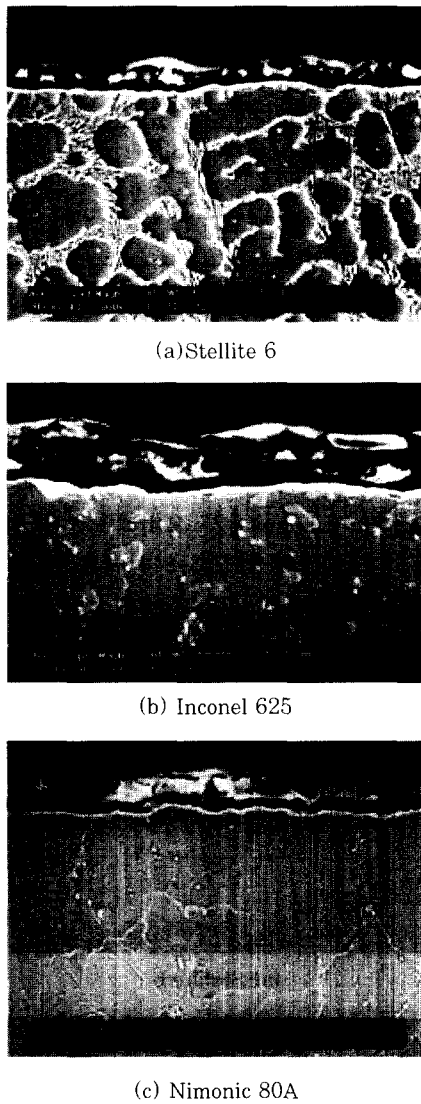


Fig. 5 Worn sub-surface microstructures of the specimens after DSRW abrasive wear test

Fig. 5는 연삭마모시험후 마모면의 단면형상을 나타낸 그림으로 마모면의 직하부에서의 소성변형의 발생여부는 구별하기가 곤란하였으나 3.4절의 경도측정 결과로 미루어 볼 때 국부적인 소성변형이 발생한 것으로 사료된다. Stellite 6 오버레이층의 경우 기지조직과 석출물들이 동시에 마모된 것을 알 수 있다.

연삭마모 저항성은 제2상의 형상과 분율 및 기지조직의 경도에 지배를 받게 되며, 마모입자와 제2상의 경도비에 의해서도 영향을 받는다^{19, 20)}. 본 실험결과에서도 이와 유사한 경향을 나타내어 기지조직의 경도가 높거나 제2상의 분율이 높은 경우 우수한 연삭마모 저항성을 나타내었다. 즉, 기지조직의 경도와 제2상의 분율이 연삭마모에 영향을 미치는 주요 인자임을 확인할 수 있었다.

3.3 미끄럼 마모 특성

PTA 오버레이용접된 Inconel 625 와 Stellite 6 pin을 Nimonic 80A (HV=320) disk 를 마모상대재로 하여 마모시험을 실시하였다. Fig. 6은 pin-on-disk 마모시험결과를 나타낸 그림으로 연삭마모와는 다른 경향을 보이고 있다. 즉, Stellite 6 오버레이층이 가장 우수한 마모특성을 나타낸 것은 연삭마모에서의 경우와 동일하나, 연삭마모에서 Nimonic 80A 합금 보다 더 낮은 마모저항성을 나타내었던 Inconel 625 오버레이층이 미끄럼마모 즉, 응착마모에서는 Nimonic 80A 보다 더 우수한 마모 저항성을 나타내었다.

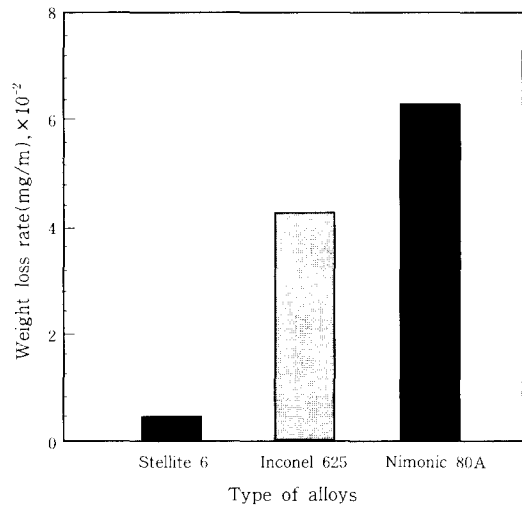


Fig. 6 The results of pin-on-disk dry sliding wear test

Fig. 7은 Inconel 625 오버레이층, Stellite 6 오버레이층 및 Nimonic 80A 합금의 마모면을 나타낸 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이, 모든 시편에서 delamination 마모, 즉 응착마모 형상이 관찰되고 있으며, 연삭마모 형상도 함께 관찰되고 있다. Fig. 7 (b) 그림에서 알 수 있듯이, Inconel 625 오버레이층에서는 scratch가 심한 것으로 보아 연삭마모가 더 주요한 마모기구로 작용한 것으로 판단된다. 한편, Stellite 6 오버레이층과 Nimonic 80A 합금의 경우에도 부분적인 scratch 흔적은 발견되나 응착(adhesion)에 의한 마모 형상이 더 지배적인 것을 알 수 있으며, 가장 낮은 마모저항성을 나타낸 Nimonic 80A 합금의 경우는 다른 시편들보다 더 심한 delamination 경향을 보이고 있다. Fig. 8은 Inconel 625 오버레이층, Stellite 6 오버레이층 및 Nimonic 80A 합금의 마모 시험후 마모단면을 나타낸 사진으로, Nimonic 80A 합

금이 더 심한 delamination 현상을 보이는 이유는 Fig. 8(c)에 보이는 바와 같이 마모시 발생된 균열에 의하여 delamination 현상이 더 심하게 나타난 것으로 사료된다. 한편, Fig. 8에 보이는 바와 같이 모든 시편에서 소성유동(마모면으로부터 약 30μm 깊이)이 관찰되는 것으로 보아 소성변형이 발생했음을 알 수 있으며, Stellite 6 오버레이층의 경우는 탄화물들의 파괴가 일부 관찰되었다. 따라서 Inconel 625 오버레이층의 경우, 주요 마모기구는 연삭마모인 것으로 사료되며, Stellite 6 오버레이층의 경우는 연삭마모와 delamination 마모가, Nimonic 80A 합금의 경우는 마모시험시 발생하는 응착마모와 delamination 마모가 주요 마모기구인 것으로 사료된다.

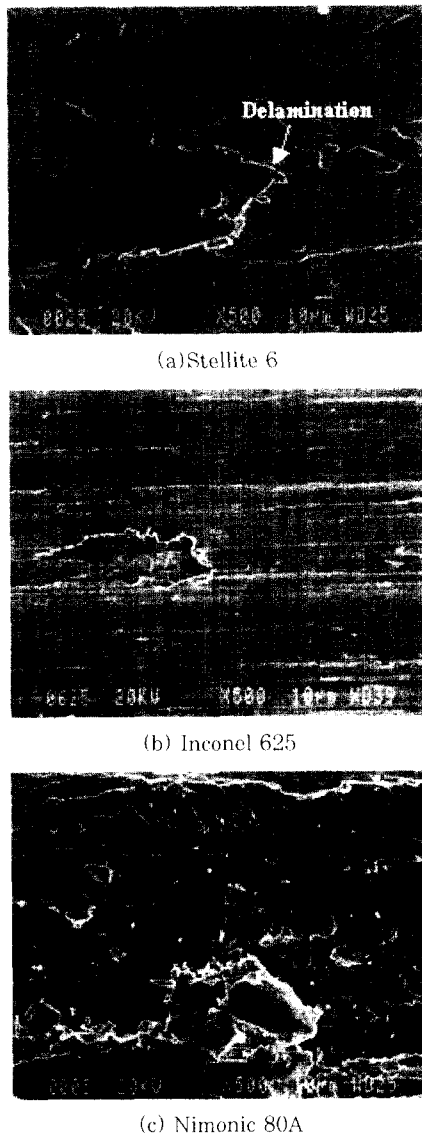


Fig. 7 Worn surface morphologies of the pin specimens after pin-on-disk dry sliding wear test

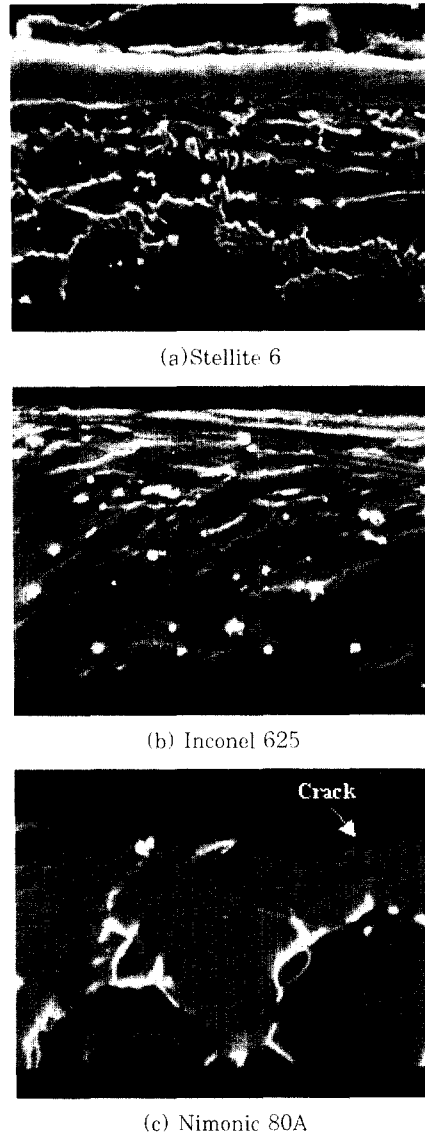
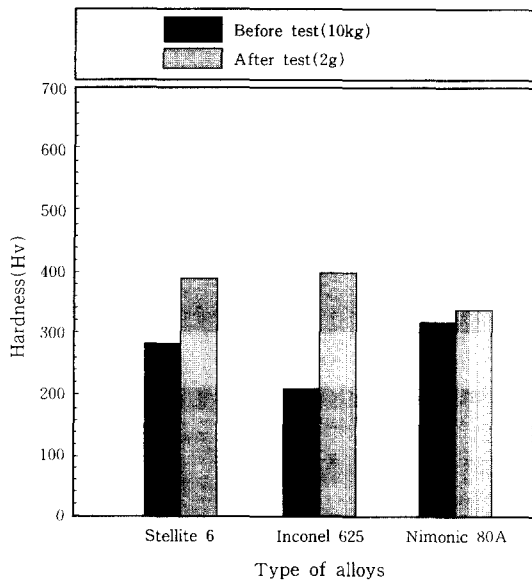


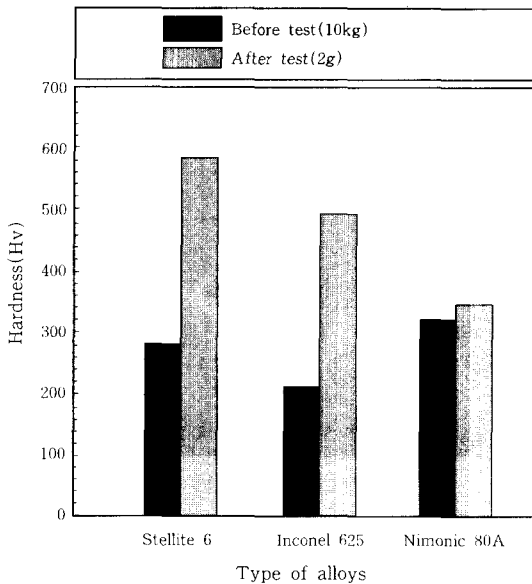
Fig. 8 Worn sub-surface microstructures of the pin specimens after pin-on-disk dry sliding wear test

3.4 가공경화의 영향

Fig. 9는 마모시험전과 마모시험후의 마모단면에서의 경도변화를 나타낸 그림으로 Stellite 6 시편의 경우는 기조직(주상정)의 경도변화를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 연삭마모 시험전과 후의 경도변화를 나타낸 그림으로 Stellite 6 오버레이층과 Inconel 625 오버레이층 및 Nimonic 80A 합금에서 약간의 가공경화가 일어났음을 알 수 있다. 그러나 연삭마모시험 결과 (Fig. 3)와 비교해 보면 알 수 있듯이 가공경화가 많이 발생한 Inconel 625 오버레이층이 Nimonic 80A 합금보다 더 심하게 마모가 되었다. 따라서 본 실험결과에서는 이러한 가공경화에 의한 경도



(a) Abrasive wear test



(b) Sliding wear test

Fig. 9 The hardness variation of the PTA deposits worn sub-surface

증가가 연삭마모특성에 영향을 주었는지에 대해 명확한 규명을 하기가 곤란하였다. 이는 본 연구에서 연삭마모시험법으로 사용된 DSRW 마모시험이 가혹한 조건에서 수행되어 마모량이 많았기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 9(b)는 미끄럼 마모시험전과 후의 경도변화를 나타낸 것으로 Nimonic 80A의 경우는 연삭마모에서의 경우와 마찬가지로 가공경화현상은 미미하였으나, Stellite 6 오버레이층과 Inconel 625 오버레이층의 경우는 마모시험전과 후의 경도차이가 약 300 HV 정도로 상당히 많은 가공경화가 일어났음을

알 수 있다. 따라서, Stellite 6 와 Inconel 625 오버레이층의 경우는 소성변형에 의한 가공경화가 마모저항성에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다(Fig. 6).

4. 결 론

Ni- 및 Co-계 합금 PTA 오버레이용접층의 연삭마모 및 미끄럼 마모특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연삭마모 및 미끄럼 마모시험결과 Stellite 6 오버레이층이 우수한 마모저항성을 나타내었다. 또한, 연삭마모에서는 Nimonic 80A 합금이 Inconel 625 오버레이층 보다 더 우수한 마모특성을 나타내었으나, 미끄럼마모시험에서는 Inconel 625 오버레이층이 Nimonic 80A 합금 보다 더 우수한 마모특성을 나타내었다.

2) 연삭마모에서는 ploughing 이 주요한 마모기구로 작용하였으며, 미끄럼마모에서는 Inconel 625 오버레이층의 경우 연삭마모가, Stellite 6 오버레이층의 경우는 연삭마모와 delamination 마모가, Nimonic 80A 합금의 경우는 응착마모와 delamination 마모가 주요 마모기구로 작용하였다.

3) Inconel 625 오버레이층, Stellite 6 오버레이층 및 Nimonic 80A 합금의 미끄럼마모시험결과, 가공경화현상이 마모 저항성에 영향을 미치는 주요 변수중의 하나임을 알 수 있었다.

4) Inconel 625 오버레이층, Stellite 6 오버레이층 및 Nimonic 80A 합금의 DSRW 연삭마모시험결과에서는 가공경화현상이 마모 저항성에 영향을 미치는 주요 변수인지 판단하기가 곤란하였다.

후 기

본 연구는 1998년도 산업기반기술개발사업(A00-982-1104-03-2-2)을 통하여 지원을 받았으며, 이에 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. E. Lugscheider, U. Morkramer and A. Ait Mekideche: Advances in PTA Surfacing. Thermal Spray Coatings: Properties, Processes and Applications, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, (1991), 529-5352
2. H. Hallen, A. Ait-Mekideche, F. Hettiger, H. Mathesius, U. Morkramer and E. Lugscheider: New Applications for High Power PTA Surfacing in the

- Steel Industry, Thermal Spray: International Advances in Coatings Technology, Orlando, FL, USA, (1992), 899-902
3. 강원석, 이영호, 田福久, 中田一博: 플라즈마분체 오버레이법에 의한 알루미늄합금표면의 경화특성에 관한 연구(I), 대한용접학회지, 12-4(1994), 85-101
 4. 강원석, 이영호, 田福久, 中田一博: 플라즈마분체 오버레이법에 의한 알루미늄합금표면의 경화특성에 관한 연구(II), 대한용접학회지, 12-4(1994), 102-109
 5. 임병수, 김봉수, 오세훈, 황선효, 서창제: PTAW법에 의한 Al합금표면의 후막 경화층 형성에 관한 연구, 대한용접학회지, 15-5(1997), 92-103
 6. 박성두, 이영호, 田福久, 中田一博: PTAW법에 의한 Al합금표면의 Si 합금층의 형성과 내마모성 개선, 대한용접학회지, 15-5(1997), 508-517
 7. T. Moriyama, Y. Izaki, K. Umeda, R. Oka, Y. Nishioka and T. Tanaka: Nimonic Compound Exhaust Valve Spindles for Diesel Engines via Hot Isostatic Pressing, Materials Science and Technology, 10-11(1994), 993-1001
 8. J.R. Nicholls: Coatings and Hardfacing Alloys for Corrosion and Wear Resistance in Diesel Engines, Materials Science and Technology, 10-11(1994), 1002-1012
 9. Y.S. Wang, S. Narasimhan, J.M. Larson, J.E. Larson and G.C. Barber: The Effect of Operating Conditions on Heavy Duty Engine Valve Seat Wear, Wear, 201(1996), 15-25
 10. 김준기, 안삼열, 김용덕, 오한근, 이덕현, 김선진: Co계 Stellite 합금 대체용 Fe계, Ni계 경면재료의 Cavitation Erosion 거동, 대한금속학회지, 36-9(1998), 1391-1395
 11. 김용석, 송진화: Fe-25 at.% Al 금속간화합물의 마식거동, 대한금속학회지, 34-12(1996), 1596-160012.
 12. 김용석, 송진화, 장영원: 연성재질의 마식거동에 미치는 기계적 성질의 영향(I), 대한금속학회지, 31-10(1993), 1299-130713.
 13. 김용석, 송진화, 장영원: 연성재질의 마식거동에 미치는 기계적 성질의 영향(II), 대한금속학회지, 31-10(1993), 1308-1314
 14. ASTM Standard G65-85, Standard Practice for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test.
 15. ASTM Standard G99-95a, Test Method for Wear Testing with a Pin-on-disk Apparatus.16.
 16. J.N. Dupont, C.V. Robino, J.R. Michael, M.R. Notis, and A.R. Marder: Solidification of Nb-bearing Superalloys: Part I. Reaction Sequences, Metall. Mater. Trans. A, 29A-11(1998), 2785-2796
 17. J.N. Dupont, C.V. Robino and A.R. Marder: Modeling Solute Redistribution and Microstructural Development in Fusion Welds of Nb-bearing Superalloys, Acta Mater., 46-13(1998), 4781-4790
 18. H. Berns, A. Fisher and W. Theisen: Development of New Co-base Hardfacing Alloys, Wear Mater., 2(1989), 601-610
 19. M. Izciler and H. Celik: Two- and Three-body Abrasive Wear Behavior of Different Heat Treated Boron Alloyed High Chromium Cast Iron Grinding Balls, J. of Materials Processing Technology, 105(2000), 237-245
 20. N. Axen and S. Jacobson: A Model for the Abrasive Wear Resistance of Multiphase Materials, Wear, 174-(1-2)(1994), 187-199