

工學碩士 學位論文

PTA 공법에 의한 Nimonic 80A 초합금재
Overlay층의 마찰 마모 특성에 관한 연구

A Study on the Friction and Wear Properties of
the Nimonic 80A Superalloys Overlay layers by
PTA Processing

指導教授 金 永 植

2004年 8月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

李 光 烈

本 論 文 을 李 光 烈 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

主 審 工 學 博 士 王 之 錫 ㉠

副 審 工 學 博 士 金 永 埴 ㉠

副 審 工 學 博 士 崔 榮 國 ㉠

2004 年 8 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

材 料 工 學 科

李 光 烈

목 차

Page

ABSTRACT

1. 서 론	01
2. Nimonic 80A의 특성	04
2. 1 Nimonic 80A의 금속학적 특성.....	04
2. 2 Nimonic 80A의 기계적 성질.....	06
2. 3 Nimonic 80A의 관련 상태도.....	08
2. 3. 1 Ni-Cr 상태도.....	08
2. 3. 2 Ni-Cr-Ti 상태도.....	09
2. 3. 3 Ni-Al 상태도.....	10
2. 3. 4 Ni-Cr-Al 상태도.....	11
2. 3. 5 Ni-Al-Ti-Cr 상태도.....	12
2. 4 강화기구	13
2. 4. 1 고용강화.....	13
2. 4. 2 석출경화.....	15
2. 4. 3 입계강화.....	16
3. 실험 방법	
3. 1 MIG용접과 PTA공정의 오버레이층의 분석.....	17
3. 2 PTA공정을 이용한 용가재별 오버레이층의 특성	19
3. 2. 1 PTA공정의 적용.....	19
3. 2. 2 오버레이층의 조직검사	24

3. 2. 3	경도측정	24
3. 2. 4	오버레이층의 내마모 시험	25
3. 2. 5	오버레이층의 내에로전성 시험	29
4.	결과 및 고찰	
4. 1	MIG용접과 PTA공정을 적용한 각 오버레이층의 특성	32
4. 2	PTA공정을 적용한 각 용가재별 오버레이층의 조직 및 경도 특성	37
4. 3	PTA공정을 적용한 오버레이층의 마찰마모특성	42
4. 4	PTA공정을 적용한 오버레이층의 내에로전 특성	47
5.	결 론	49
	참 고 문 헌	51

**A Study on the Friction and Wear Properties of the
Nimonic 80A Superalloys Overlay layers by PTA
Processing**

ABSTRACT

Wear and corrosion are regarded as both mechanical and chemical damage. Besides that point, these are fatal factor in the operational condition of products .

With the proceeding of the wear and corrosion, the performance of parts is getting lower, and the possibility of the accident increases. Therefore, either repairing the parts or exchanging the damaged parts with the new ones is required.

Regarding repair, surface modification methods as metal spray and overlay welding are generally used. Overlay welding is the way to coats the material on the surface for the purpose of anti-wear, anti-corrosion and heat resisting properties. The various coating way are used to repair the wear parts.

MIG and TIG welding method are commonly used for the purpose of the overlay welding and PTA processing is adopted recently. The PTA processing has high performance compared with other welding ways and its usage is getting expanded due to the development of new machine and controlling technique.

In this study, the MIG welding and PTA processing on Nimonic 80A superalloys are adopted. The purpose of this study is to clarify the microstructure, wear, and erosion properties of the each weld metal.

Following results were obtained from this study :

1. In the MIG welding and PTA processing on Nimonic 80A superalloys, the quality of the overlay layer was different with the overlay coating method. In case of MIG welding, liquation crack takes place in the base metal, whereas, the liquation crack does not take place by PTA processing.
2. The wear properties of the Stellite 6 overlay materials show the best performance, whereas Inconel 718 material shows the worst wear properties.
3. In case of the cavitation erosion properties Inconel 625 overlay layers show the best performance, whereas Stellite 6 shows the worst erosion properties.

1. 서 론

오버레이 용접기술은 내마모성, 내식성 또는 내열성을 갖는 재료를 모재표면에 용착시킴으로서 모재의 표면특성 향상을 위한 목적으로 시행되는 표면개질의 한 방법이다.

표면개질법에는 PVD(Physical Vapor Deposition), CVD (Chemical Vapor Deposition), 이온주입법, 도금법등 박막형성에 의한 방법과, 용사법, 오버레이법등 후막형성에 의한 방법이 있다. 이중에서 박막형성방법들은 가혹한 사용 분위기 하에서 장시간 사용되어야 하는 설비부품에 적용하기에는 어려움이 있다. 또한 후막법 중 용사법의 경우에는 코팅층의 두께가 수십 μm ~약1mm 정도로 얇고 표면층의 밀착강도 또한 낮은 단점이 있다. 이에 비해 오버레이 용접의 경우는 약1mm~수십mm정도로 매우 두꺼운 표면개질층을 얻을 수 있으며 표면층의 피막강도가 매우 높기 때문에, 용사법의 적용이 어려운 곳에서 오버레이 공정이 적용 가능하며 공정 시간을 줄여 시행할 수 있는 경제적인 방법이다.

오버레이 용접은 1920년대 초 석유 시추용 드릴 선단부의 내마모성을 향상시키기 위하여 처음 적용되었으며 세계대전 전후 급속한 산업화의 진행과 더불어 발전하여, 현재에는 장시간 운전을 요하는 장치산업을 중심으로 발전해 오고 있다.¹⁾

오버레이 용접의 특징은 다음과 같다.²⁾

- 모재와 완전한 용합을 이루기 때문에 모재와의 접합강도가 높다.
- 용착속도가 높기 때문에 작업능률이 양호하며 오버레이층의 두께 제어가 쉽다.
- 오버레이 용접금속은 슬래그 내의 불활성가스 분위기에서 야금 반응을 하므로 품질이 우수하다.
- 오버레이 하고자 하는 제품의 크기에 제한이 없다.

현재의 오버레이 용접은 MIG (Metal Inert Gas)와 TIG (Tungsten Inert Gas) 용접이 주로 적용되고 있으며, MIG용접의 경우 TIG용접 보다 상대적으로 큰 부피를 오버레이 하는데 효과적이므로 많이 이용되고 있다. 최근에는 용접기기 및 제어 기술의 발달로 인하여 PTA(Plasma Transferred Arc 이하 PTA)공정 등이 이용되기 시작하고 있다.

PTA공정은 개발된 후 제어변수가 너무 많아서 폭넓게 적용되지 못하였으나, 새로운 장치의 개발과 더불어 제어기술의 적용을 통하여 신뢰성 있고 다른 오버레이 방법에 비해 우수한 공정으로 자리 잡고 있다.³⁾

본 연구에서는 MIG용접과 PTA공정을 선박의 주기관 배기밸브와 같은 고온, 고압 분위기에 사용되는 Ni基 초합금인 Nimonic 80A에 적용하였다.

Nimonic 80A는 일반적으로 저용점 성분 등으로 인해 용접성이

까다로워서 오버레이 용접이 어려운 것으로 알려져 있으며, 실제 현장에서 Nimonic 80A재 부품은 사용중 마모나 부식에 의하여 사용한도를 초과하면 재생수리를 실시하지 않고 폐기 처분하는 실정이다. 하지만 Nimonic 80A는 원재료를 전량수입하며, 가격 또한 매우 높으므로 원가절감의 차원에서 오버레이에 의한 재생수리가 요구되고 있다. 그러나, 현재의 재생수리법은 오버레이층의 신뢰성이 떨어지므로 신뢰성 있는 공정의 확립이 필요하다.

본 연구에서는 Nimonic 80A의 오버레이 방법의 확립과 오버레이층의 신뢰성을 얻기 위한 방법으로 다음과 같은 순서로 시험을 하였다.

기존에 사용되는 MIG용접과 최근 적용되고 있는 PTA공정의 오버레이 품질을 확인하기 위해서 두 가지 방법으로 오버레이를 실시한 후 그 야금학적 특성을 비교 평가 하였다. 또한 PTA 공정을 사용하여 Nimonic 80A에 오버레이 재료로 사용되는 Nimonic 80A, Inconel 625, Inconel 718, Stellite 6를 오버레이 한 후 그 야금학적 특성 및 내마모 특성, 내에로전 특성 등을 검토하였다.

본 연구의 목적은 Nimonic 80A재에 오버레이를 실시하였을때 건전하고 신뢰성 있는 오버레이층을 얻을 수 있는 방법과 용가재를 알아보는데 있다.

2. Nimonic 80A의 특성

2.1 Nimonic 80A의 금속학적 특성

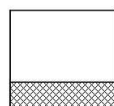
Nimonic 80A (UNS NO7080, ASTM B637 equivalent)는 2차 세계대전 당시 급격히 발달된 제트항공기 엔진의 터빈 블레이드용으로 개발된 Ni기 초합금으로서, Ni 과 Cr이 주요 성분이며, 고용강화 원소인 Fe와 Co, 석출강화 원소인 Al, Ti 그리고 입계강화 원소인 C, B 등의 원소로 조성 되어있다.^{4)~6)}

Nimonic 80A의 모상은 Fig 1.2에서와 같이 FCC(Face Centered Cubic : 면심입방)인 오스테나이트 구조인 γ 상이며, 모상에 고용강화 원소는 원자반경의 차이가 적은 Cr, Fe, Co 가 되며 고온강도를 위한 γ' 상 원소는 3,4족인 Al, Ti가 된다. 입계강화 원소는 C, B등이며 Cr은 C와 탄화물을 형성하여 입계강화에 기여한다. 내산화성을 위하여 Cr과 Al이 첨가되며, Cr과 Al은 산소와 결합하여 Cr_2O_3 , Al_2O_3 와 같은 치밀한 산화물 피막을 표면에 형성하게 된다.

Nimonic 80A는 현재에 가스터빈용 블레이드와 디스크, 원자력 발전설비 부품, 그리고 대형기관의 배기밸브 등에 적용되고 있으며 점차 사용되는 부품의 고기능화, 고출력화로 인하여 일반 내열강이 사용되는 부분품으로 확대 적용 되고 있다.

III A	IV B								
-21	-27								
B	C								
+6		IV A	V A	VI A					
Al									
		+9	+5	+3		+3	+1	0	
		Ti	V	Cr		Fe	Co	Ni	

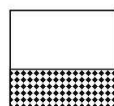
% difference in atomic diameter from Ni
 ← VIII A →



Element partions to grain boundary



Element partions to γ'



Element partions to γ

Fig. 2.1 Important elements in Nimonic 80A⁷⁾

2.2 Nimonic 80A의 기계적 성질

Fig 2.2는 온도에 따른 인장강도, 단면적 감소율, 연신율 등을 나타내었으며, Fig 2.3에서는 온도에 따른 크리프 강도를 나타내었다. 인장강도는 온도가 상승함에 따라 강도가 떨어지지만 600°C까지는 약1000MPa 정도의 높은 강도를 나타낸다. 고온에서 사용되는 재료에서 중요한 성질인 크리프 강도는 Nimonic 80A제 부품이 사용되는 작동온도가 400°C~500°C임을 감안할 때 만족할 만큼 우수한 특성을 나타낸다.

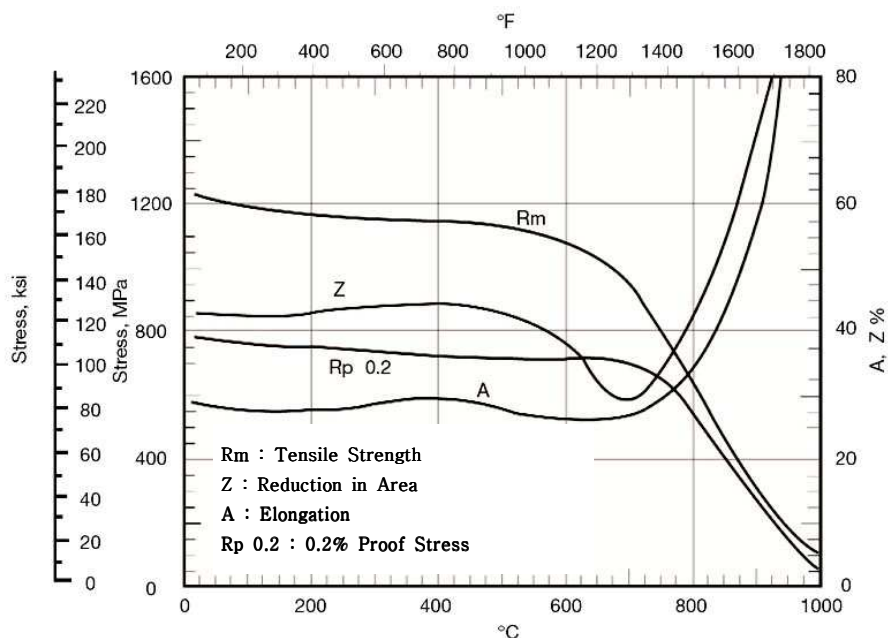


Fig. 2.2 Tensile properties of extruded bar, subsequently cold rolled. Heat treated 8 hours/1080°C / air cooled+16hours /70 0°C/air cooled.

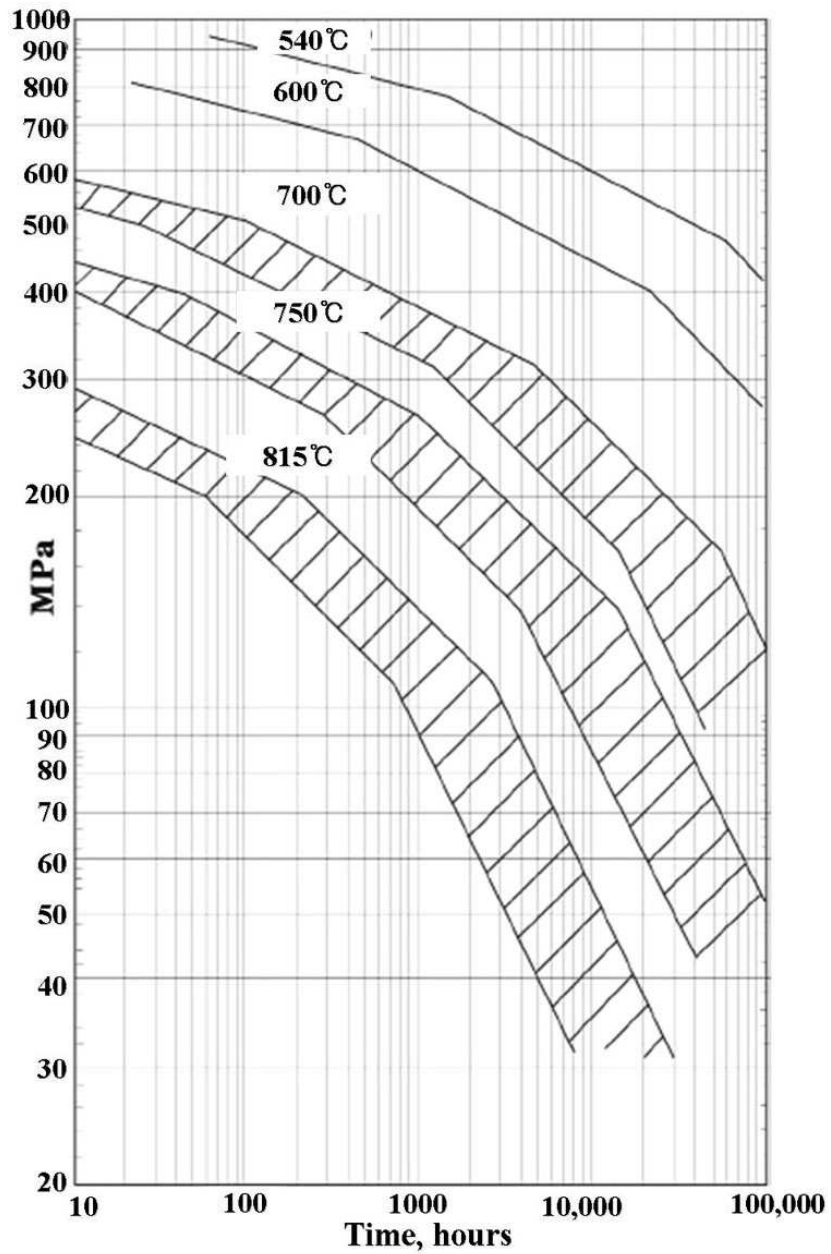


Fig. 2.3 Creep properties of Nimonic 80A extruded bar in constant strain, subsequently forged. Heat treatment 8 hours/1080°C / air cooled + 16 hours/700°C air cooled

2.3 Nimonic 80A의 관련 상태도

2.3.1 Ni-Cr 상태도

Ni-Cr 2원계 상태도는 단순공정을 가지며, Ni rich 단상영역 (γ -Ni)은 37at.%Cr (33wt.%)까지 유지하며 대부분의 Ni기 초합금은 이와 같은 조성을 가진다. Cr 함량이 많아지면 Cr rich α 상을 형성하며 64~74at.%Cr의 1250°C~1400°C 영역에서는 δ 상을 형성한다.

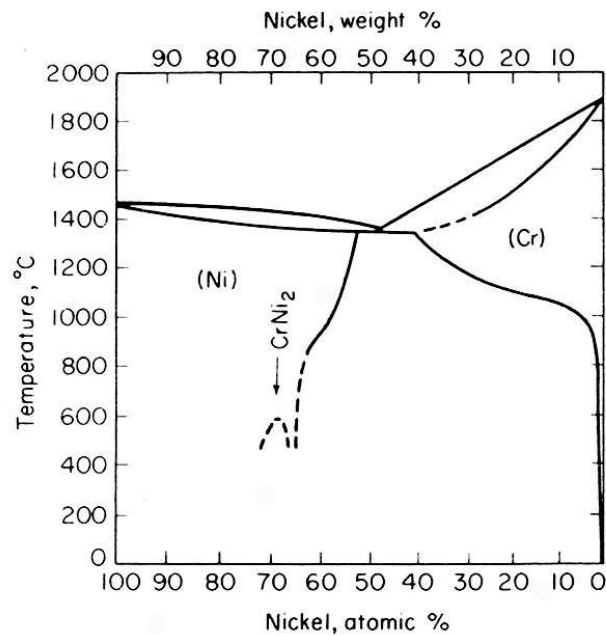


Fig. 2.4 The nickel-chromium phase diagram (Shunk⁸⁾)

2.3.2 Ni-Cr-Ti 상태도

750°C 및 1150°C에서의 Ni-Cr-Ti의 3원계 상태도는 Fig 2.5와 같다. Ti의 γ -Ni의 고용한계는 750°C에서 Cr함량이 0일 때는 9.4at.% 이고 25at.%로 증가하면 2.7at.%로 낮아지게 되며 1150°C에서는 Cr함량이 0일 때는 13at.%에서 25at.%로 증가하면 7.0%로 낮아지게 되고 고용한계를 넘은 잔류량은 η 상(Ni_3Ti)으로 석출 된다.

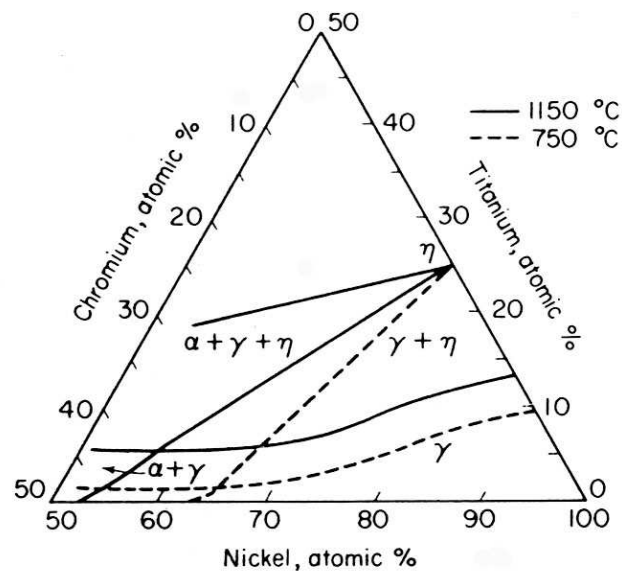


Fig. 2.5 The nickel-chromium-titanium phase diagram. Isothermal sections for 750 and 1150°C (Taylor and Floyd⁹⁾)

2.3.3 Ni-Al 상태도

Ni-Al 2원계 상태도는 Fig2.6과 같으며 Ni_3Al 은 γ' 상으로 FCC 구조이며, 고온강화기구에 중요 역할을 하며 Ni에 Al의 고용한계는 1150°C 에서 약 18at.%이며 750°C 에서는 12at.%로 떨어진다.

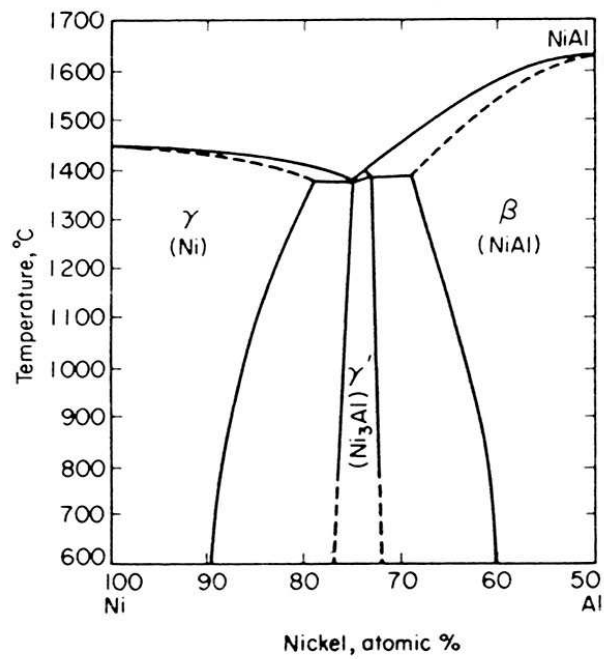


Fig. 2.6 The nickel-aluminium phase diagram. (Hansen¹⁰⁾)

2.3.4 Ni-Cr-Al 상태도

Ni-Cr-Al 3원계 상태도는 Fig 2.7에 나타내었으며, 고온강화기구에 중요한 역할을 하는 γ' 상은 온도가 상승함으로서 형성영역이 감소하게 되므로 온도가 상승 할수록 모상에 고용되는 것을 알 수 있다.

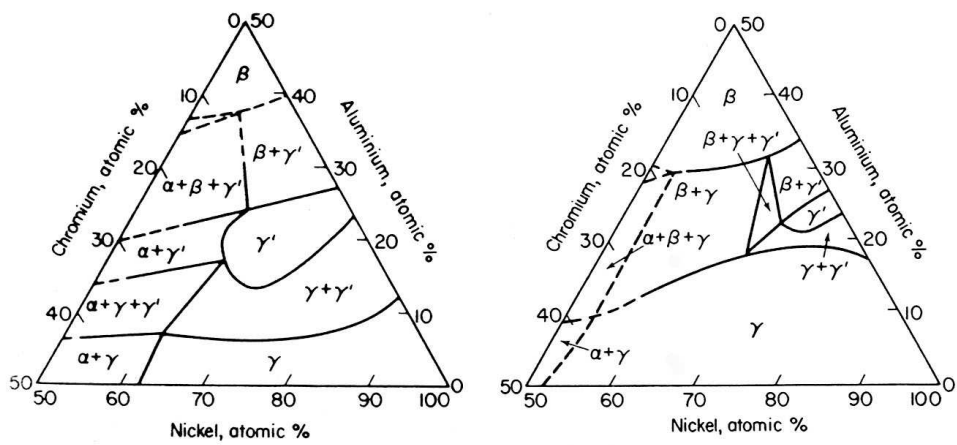


Fig. 2.7 The nickel-chromium-aluminium phase diagram. (a) isothermal section for 750°C. (b) isothermal section for 1150°C. (Taylor and Floyd¹¹⁾)

2.3.5 Ni-Al-Ti-Cr 상태도

Ni-Al-Ti-Cr의 750°C에서 4원계 상태도를 Fig 2.8에 나타내었다. 이들의 화합물을 기준으로 하여 Ni_3Al , Ni_3Cr , Ni_3Ti 로 표시하면 상태를 쉽게 알 수 있다.

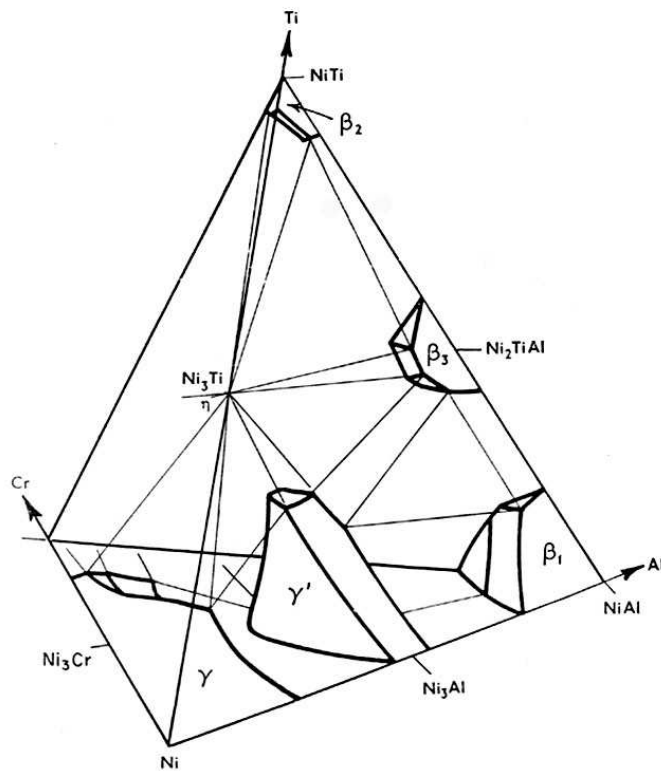


Fig. 2.8 The nickel-chromium aluminium-titanium phase diagram at 750°C (From Taylor¹²⁾)

2.4 강화기구

Nimonic 80A의 강화기구(strength mechanism)는 크게 고용강화, 석출경화, 입계강화로 구분 할 수 있다.

2.4.1 고용강화 (solid solution strengthening)

고용에 의한 강도 상승은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\tau}{dc} \propto \left(\frac{1}{a} \cdot \frac{dc}{da} \right)^n$$

τ : shear stress
 a : lattice parameter of solution
 c : solute concentration

고용되는 양이 많아질수록 shear stress는 증가하게 되고 초합금에서의 고용은 Hume Rothery의 법칙과 고온안정성이 요구되므로 넓은 범위에서 고용되어야 하며 모상과 원자반경의 차이가 작아야 하며, 높은 용점을 가져야 한다. Ni에 대한 고용강화 원소는 Co, Fe, Cr, Al, Ti, C 등이며 이 원소들의 강화 효과는 Fig 2.9에 나타내었다.

Cr은 산화피막을 형성하여 내산화성에 중요한 원소로 작용하며, Fig 2.10에 그 효과를 나타내었다. 즉 고온에서의 내산화성을 위해서는 Cr 함량이 최소 15% 이상이 되어야 하며, Cr함량이 과도하게 되면 Fig 2.4에서와 같이 취성이 큰 α 상이 형성되므로 15~30%가 적합하다.

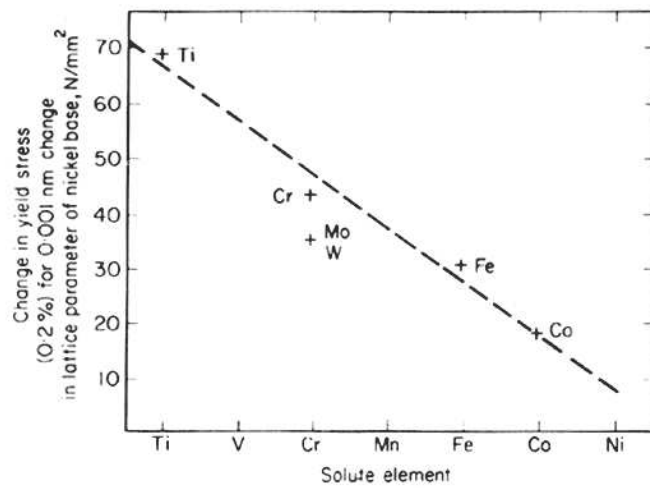


Fig. 2.9 Change in room-temperature yield strength as a function of unit change in lattice parameter caused by various solid-solution strengthening additions. (After Pelloux and Grant)¹³⁾

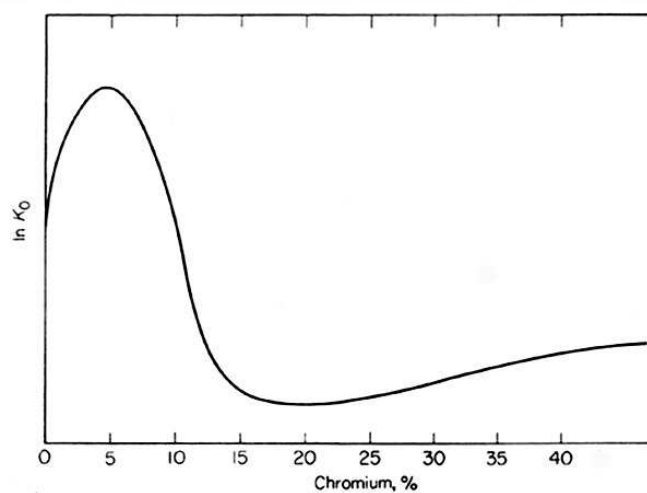


Fig. 2.10 The effect of chromium on the oxidation rate constant of nickel-chromium alloys.¹⁴⁾

2.4.2 석출경화 (Precipitation hardening)

Nimonic 80A의 내고온성은 γ' 상의 석출이 주된 인자이며 γ' 상의 양에 좌우된다. γ' 상의 석출을 최대로 하기 위해서는 Ni-Cr-Ti-Al 등의 함유량과 열처리에 의해 가능하며, 석출에 의한 강화기구이론은 다음과 같다.

$$\tau = \kappa \cdot \epsilon^{\frac{3}{2}} \cdot f^{\frac{1}{2}} \cdot (r_0/b)^{\frac{1}{2}}$$

τ : shear stress

κ : constant

ϵ : mismatch between precipitate and matrix

f : volume fraction of precipitate

r_0 : radius of precipitate

b : burger's vector of dislocation

γ' 의 생성량은 주로 Al과 Ti의 양에 따르며, Fig 1.9는 Al과 Ti의 양에 따른 γ' 의 체적 분율을 나타내었다.

하지만 Ti의 양이 많아지면 Fig 2.5에 보인 것과 같이 취성이 큰 $\eta(\text{Ni}_3\text{Ti})$ 상을 형성하기 쉬우므로 Al과 Ti의 양을 4% 이내로 제한하며, Ti/Al의 비도 3 이하로 제한 한다.

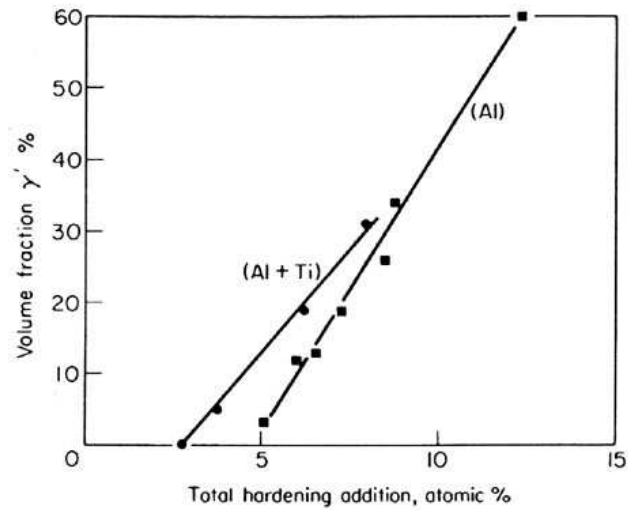


Fig. 2.11 Volume fraction of γ' precipitate as a function of total hardening addition in a nickel-20% chromium base.¹⁵⁾

2.4.3 입계강화

Nimonic 80A는 B 과 C를 첨가하여 입계강화에 기여하게 되는데, C은 결정립과 결정립계에서 metallic carbide를 형성하며, 형성된 carbide는 모재보다 경도가 높고 취성이 크므로 입계에 분산시 고온강도, 연성, creep 강도에 영향을 미친다.

일반적으로 형성되는 carbide는 MC, M_7C_3 , $M_{34}C_6$ 등이 있으며 MC는 주로 TiC로 안정한 편이며, 응고 직전에 형성 된다.

3. 실험 방법

3.1 MIG용접과 PTA공정의 오버레이층의 분석

Nimonic 80A와 같은 Ni기 초합금은 특히 용접시 용접입열에 의해 열영향부에서 조성적 액화(compositional liquation)에 의한 균열이 발생하기 쉬우므로 용접방법에 제약이 있으며, 용접조건이 까다로운 것으로 알려져 있다.¹⁶⁾ 특히 오버레이를 실시 할 경우에는 일반적인 용접을 행하는 경우보다 용착량이 많은 다층용접을 실시함으로, 모재가 오버레이시 용접열에 의한 영향을 상대적으로 많이 받게 된다. 그러므로, 건전한 오버레이층의 확인을 위하여 모재의 잔류응력의 영향과 균열발생 유무, 그리고 다층 용접시 층간의 수지상정에 저용점상인 γ /Laves와 같은 균열존재 유무의 파악이 필요하다.

본 연구에서는 먼저 기존에 오버레이 용접에 사용되는 MIG (Metal Inert Gas) 용접과 최근에 적용되고 있는 PTA 공정을 적용하였을 경우의 차이점을 파악하기 위하여, 오버레이 후 야금학적 특성을 고찰 하였다. 사용된 모재는 Nimonic 80A 재질의 선박 주기관 배기밸브(45/115H 형)를 사용하였으며, 용착금속으로는 Nimonic 80A에 오버레이를 실시 할 때 실제 현장에서 널리 사용되는 Inconel 625(UNS NO6625)를 선택 하였다. 배기밸브의 폭발면(combustion face)에 MIG용접과 PTA공정을 오버레이 한 후 시험편을 채취 하였으며, 시편을 연마하여 광학현미경으로 균열등 결함유무의 존재를 관찰 하였다. 본 실험에 적용된 배기밸브와 채취부분을 Fig 3.1에 나타내었다.

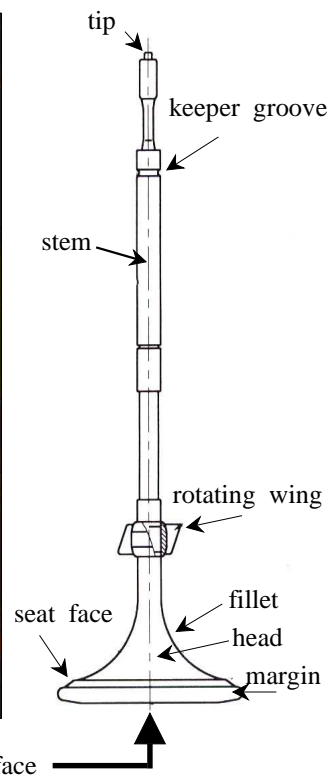
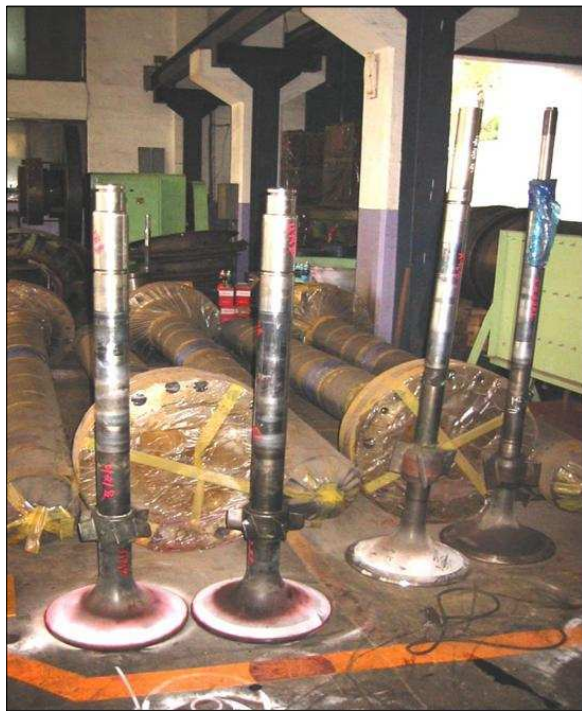


Fig. 3.1 Exhaust valve of marine diesel engine

3.2 PTA공정을 적용한 용가재별 오버레이층의 특성

3.2.1 PTA 공정의 적용

PTA공정은 에너지 밀도가 높은 플라즈마 열원을 사용하며, 플라즈마 아크 열원을 국부적으로 가할 수 있으므로 고밀도의 코팅과 높은 적층률 및 균일한 코팅 두께를 얻기 위한 조절이 가능하다.¹⁷⁾ 또한 야금학적으로 비교하면 다른 오버레이법에 비하여 낮은 희석(dilution)과 좁은 열영향부를 가진다. 사용하는 용가재는 분말재료를 사용하므로 로드(rod)나 와이어(wire)로 제작할 수 없는 용가재의 사용이 가능하다. 또한 입도의 범위가 매우 넓은 분말이나 입도가 매우 큰 분말을 사용할 때, 발생할 수 있는 문제점이 PTA공정에서는 큰 문제가 되지 않는다. 그리고, 플럭스가 필요 없으므로 슬래그 혼입 등의 불순물 개재 가능성을 없앨 수 있다. PTA공정은 오버레이 방법이 자동이므로 수동 오버레이 용접에 비해 용접시공자의 숙련도에 상관없이 입열량을 균일하게 조절이 가능하며, 작업속도를 향상 할 수 있다.

하지만 모재를 가열하기 때문에 미세조직이 변할 수 있어서 그 적용대상이 제한적일 수 있고, 모재가 반드시 도전성이어야 하며 뒤틀림에 대한 내성이 있어야 적용시 문제점이 발생하지 않는다.

PTA 공정은 두개의 독립된 아크를 사용하며, 이것은 서로 다른 직류전류 공급원으로부터 일정한 전류에 의해 발생된다. 음극인 텅스텐 전극과 양극인 수냉식 구리 노즐 사이에서 고주파발전장치에 의하여 1차 아크(pilot arc ; non-transferred arc)가 발생한다. 이 때 음극과 양극사이에 아르곤 플라즈마 가스(Ar plasma gas)

가 통과 하면서 이온화되어 음극(W)과 모재 사이에 전도성의 분위기를 만들며, 1차 아크는 텅스텐 전극과 양극인 모재사이의 2차 전류에 의하여 2차 아크(main arc ;transferred arc)를 발생 시키게 된다. 오버레이용 분말은 토치의 내부로 이송되어 모재 상부의 지점에서 플라즈마 아크와 만나게 되며 분말은 한번에 용융지에 녹아 적층된다.¹⁸⁾

전극의 마모와 용융지를 대기로부터 차단시키기 위하여 가스를 사용하며 플라즈마 가스로는 아르곤(Ar)이 주로 사용되며 아르곤과 헬륨(Ar/H₂) 혼합 가스는 집적력과 환원성이 좋으므로 차폐가스 또는 분말공급 가스로 이용된다. Fig 3.2에 PTA 공정의 대략적인 모식도를 나타내었다.

본 연구에서는 PTA(ISOTEC社의 모델명 : PTGV41BA)공정을 사용하여, Nimonic 80A제 선박용 배기 밸브를 모재로 하고, Ni 초합금인 Nimonic 80A(UNS NO7080), Inconel 625(UNS NO6625), Inconel 718(UNS NO7718) 그리고 배기밸브 시트(exhaust valve seat) 재료로 사용되는 코발트계 내열합금인 Deloro Stellite社의 Stellite 6 등 4가지의 용가재를 각각 오버레이를 실시하였다. 그리고 오버레이층의 야금학적 분석 및 내마모 시험, 내에로전성 시험을 통하여, 그 특성을 평가 하였다.

먼저 예비시험을 통하여 PTA의 적정조건을 구하여 본 시험에 적용하였다. Table 1에는 본 시험에 적용된 PTA 조건을 나타내었으며, Table 2에는 사용된 용가재의 화학적 성분을 나타내었다.

Fig 3.3에는 본 시험에 사용한 PTA(ISOTEC社의 모델명 : PTGV41BA)기기를 나타내었다.

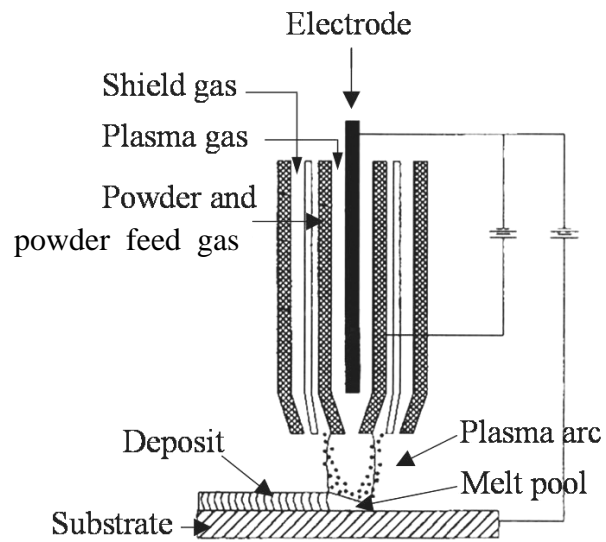


Fig. 3.2 Schematic diagram of PTA process



Fig. 3.3 PTA equipment and control panel of PTA

Table 1 PTA processing condition

speed	0.555 r.p.m
current(A)	115A
pilot gas	2.5ℓ/min
powder feed gas	10ℓ/min
shield gas	22.5ℓ/min
powder feed rate	45g/min

Table 2 Chemical compositions of Nimonic 80A, Inconel 625, Inconel 718, Stellite 6

Composition (wt.%)	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C	bal.
Nimonic 80A	19.5	73.0	1.0	-	-	-	2.25	1.4	1.5	0.05	0.1
Inconel 625	21.5	61.0	-	9.0	-	3.6	0.2	0.2	2.5	0.05	
Inconel 718	19.0	52.5	-	3.0	-	5.1	0.9	0.5	18.5	0.08	0.15
Stellite 6	30.0	1.0	61.5	-	4.5	-	-	-	1.0	1.0	-

3.2.2 오버레이층의 조직검사

미세조직 검사는 각각의 시편을 채취하여 마운팅 하였으며, 연마천(3 μ m) 까지 연마 한 후 , 에칭(eachant : CuSO₄+ HCl +ethyl alcohol : 약10초)하였다. 제작된 시험편 전체 단면에 걸쳐 광학현미경으로 관찰 하여 결함유무를 확인하였으며 디지털 카메라로 촬영 하였다.

3.2.3 경도측정

오버레이층의 경도측정은 마이크로비커스 경도기를 사용하였으며 하중은 200g 으로 하여 모재에서부터 열영향부, 계면, 용착금속 순으로 각10회 측정 하여 그 평균값을 계산하여 구하였다.

3.2.4 오버레이층의 내마모(anti-wear)시험

마모(wear)는 재료의 표면에서 발생하는 기계적인 손상으로서 기계부품의 작동상태를 결정하는 중요한 요소이다. 마모는 하중의 형태와 온도, 재질, 윤활재의 존재 여부 등 많은 변수를 가지고 있으므로 다양하게 나타난다. 마모는 응착마모, 연삭마모, 부식마모 등의 기구로 나타나며, 같은 재료라도 상대마모재 및 마모변수 따라 변할 수 있다.^{19)~21)}

본 연구에서는 PTA공정을 적용한 각각의 오버레이층 마모특성을 평가하기 위해서 R&B社의 PD-102 마찰마모 시험기를 사용하여 시험 하였다. 본 시험기의 시험방식은 Fig3.4에 나타낸 것처럼 상대마모재인 핀(pin)이 디스크(disk) 표면위에서 접촉한 상태에서 하중을 가한 상태에서, 회전하는 방식인 핀 온 디스크(pin on disk) 방식을 사용 하였다. 시험에 사용한 디스크는 Nimonic 80A 제 배기 밸브의 스템(stem) 부분을 가공하여 모재로 사용하였고, PTA공정으로 각각의 용가재를 오버레이 하여 제작 하였다. 상대 마모재는 내연기관의 밸브시트(valve seat) 재질로 사용되는 Stellite 6를 사용하였다.

디스크의 표면은 표면조도를 동일하게 하기 위하여 선반가공 후 연마지 #1000번 까지 연마 하였으며, 상대 마모재인 핀은 Stellite 6 용접봉을 선반가공 하여 사용하였다. Fig 3.5는 제작한 시험편의 도면을 나타내었다.

마모시험은 상온에서 실시하였으며 회전수는 50rpm, 적용하중은 200N 으로 하여 총 마모거리가 8300m 가 되게 하였다.

마모량은 시험전과 시험후 디스크와 핀을 초음파 세척한 다음 무게를 측정하여 계산하였으며, 마찰계수는 로드셀을 이용한 PD-102 마모시험기의 자체 시스템을 이용 하여 구하였다.



Fig. 3.4 Friction and wear tester (R&B PD-102)

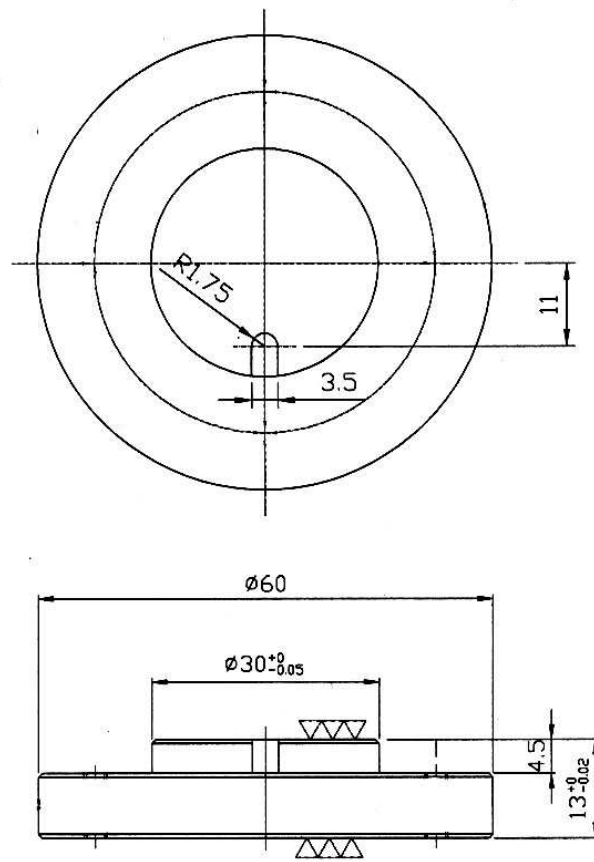


Fig. 3.5 The dimension of wear test specimen

3.2.5 오버레이층의 에로전(erosion) 시험

오버레이를 실시하는 가장 주된 요인은 모재 표면에 새로운 기능성 부여와 마모 또는 침식, 부식 등이 복합적으로 작용하여 손상된 표면의 원래 상태로의 보수재생이며 복합적인 목적으로 시행되기도 한다.

재료를 손상 시키는 주요 인자 중 하나인 에로전은 반복되는 입자 충돌에 의해 발생하는 재료의 이탈과 관계되는 표면현상으로 요약 할 수 있다.

에로전 특성에 미치는 인자는 침식입자의 속도, 입자의 모양과 크기, 입자의 내재적 특성, 충돌각도, 유체의 성질, 재료의 성질 등에 따라 에로전 특성이 달라진다. 재료의 성질로는 표면 응력상태, 표면조도, 경도, 밀도, 파괴인성 등이며, 또한 부가적인 요소로는 사용분위기와 사용온도 등의 복합적인 요소들에 의해 에로전 특성은 좌우된다.²²⁾

본 연구에서는 오버레이층의 에로전 특성을 시험하기 위하여 캐비테이션(cavitation) 장치를 이용하여 시험 하였다.

캐비테이션 에로전 현상은 유체의 속도가 증가하면서 유체 중의 물체표면에 기포가 발생, 이때 발생된 기포에는 물방울의 충격현상에 의해 압력이 생기며, 이때의 순간적인 물분자의 충격압력에 의해 기계적인 침식과 화학적인 부식을 동반하게 되는 현상을 말한다. 시험법은 ASTM-G32를 개량한 시험법을 사용 하였다.²³⁾

시험법은 진동자의 선단에 볼트형의 SUS316재의 보상시험편을

삽입하고 시험시 마다 교체하도록 하였다. 시험편은 디스크로부터 0.5mm 떨어진 위치에 고정하여 자연해수를 채워 시험편이 해수면 아래 10mm 지점에 잠기도록 배치하였으며, 진동자의 진동수는 20 kHz, 진폭은 50 μ m로 하였으며 각 시험편에 대해 48시간씩 시험하여 그 무게감량을 조사 하였다.

Fig 3.6에 캐비테이션 에로전 시험법을 개략적으로 도시하였다.

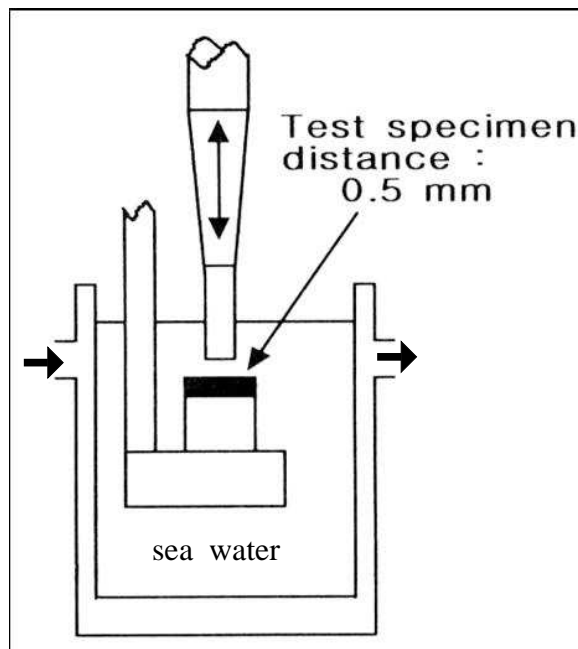


Fig. 3.6 Schematic diagram of cavitation-erosion test

4. 결과 및 고찰

4.1 MIG용접과 PTA공정을 적용한 각 오버레이층의 특성

MIG용접과 PTA공정을 사용하여 Nimonic 80A제 선박 주기관 배기밸브에 Inconel 625를 용가재로 사용하여 오버레이를 하였다. MIG 용접으로 오버레이를 실시하고 용접부를 관찰한 결과 열영향부와 다층용접의 층간에서 Fig 4.1에 나타낸 것과 같은 다수의 균열을 발견 하였다. 이와 같은 균열은 고온균열의 일종으로 액화균열 (liquation crack)이다. 액화균열이란 용접 고온균열의 일종으로 크게는 편석균열에 포함되며, 주로 용접 열영향부에서 발생된다. 용접시 열영향부는 먼저 용접금속의 열팽창에 의해 압축응력을 받지만, 아크가 통과한 후에는 온도의 저하와 함께 인장응력을 받게 된다. 이 때 결정립계에 저용점의 성분 또는 화합물이 용융하여 필름상으로 존재하면 액화균열이 발생하기 쉽다.²⁴⁾

Nimonic 80A와 Inconel과 같은 Ni基 초합금의 액화균열은 결정립계에 편석된 특정원소들 (Nb, Mo, Ti, Al등)에 의한 저용점상 (γ/NbC , γ/Laves) 형성이 주된 원인으로 알려져 있다.^{25)~27)} Fig 4.2에 Ni基 초합금에서의 액화균열의 기구를 나타내었다.

PTA공정을 적용한 경우에는 MIG용접을 적용한 경우와는 다르게 전체시편의 단면에 걸쳐 관찰한 결과, 결함 및 균열 등을 발견할 수 없었으며, MIG용접을 적용한 미세조직 보다 열영향부와 용착금속의 결정립의 크기가 더 미세함을 알 수 있다. 이는 PTA공정 자체의 특징으로서 PTA공정은 입열량이 높지만 국부적이어서

상대적으로 모재에 가하는 입열량이 작으므로, 저용접 석출상이 형성되지 않았거나, 형성된 양이 작아서 모재의 조직상의 변화에 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다. 또한, 용착금속은 상대적으로 빨리 응고되어 수지상정이 MIG 용접의 경우보다 미세한 조직을 가지는 것으로 사료된다.

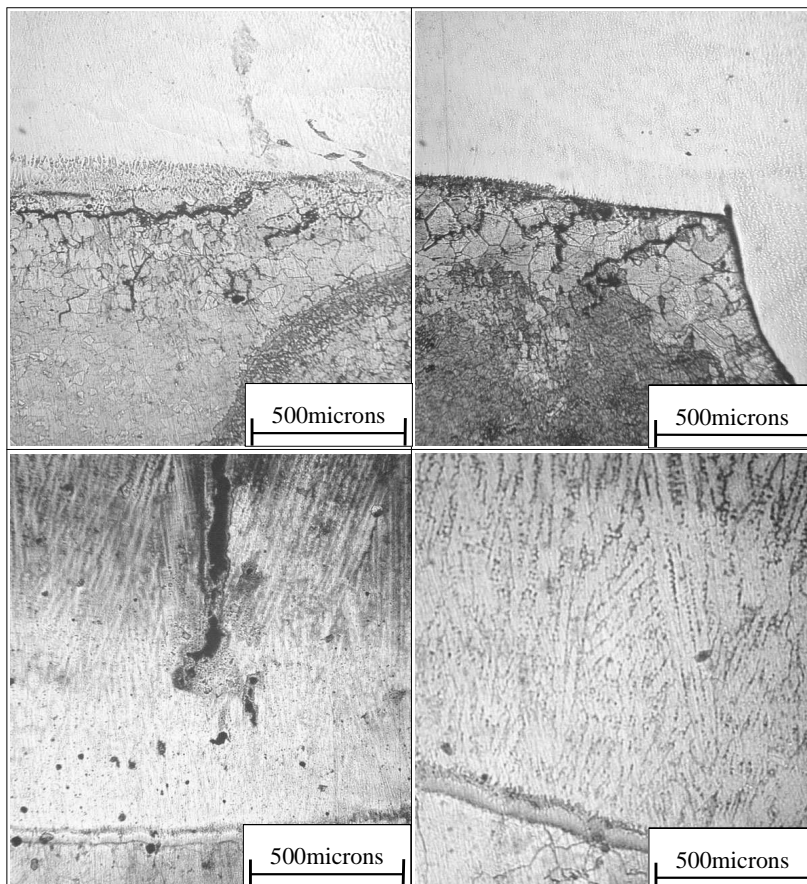
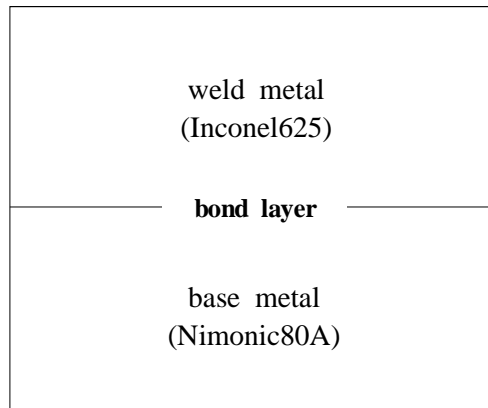


Fig. 4.1 Microstructures of MIG welding (X50)

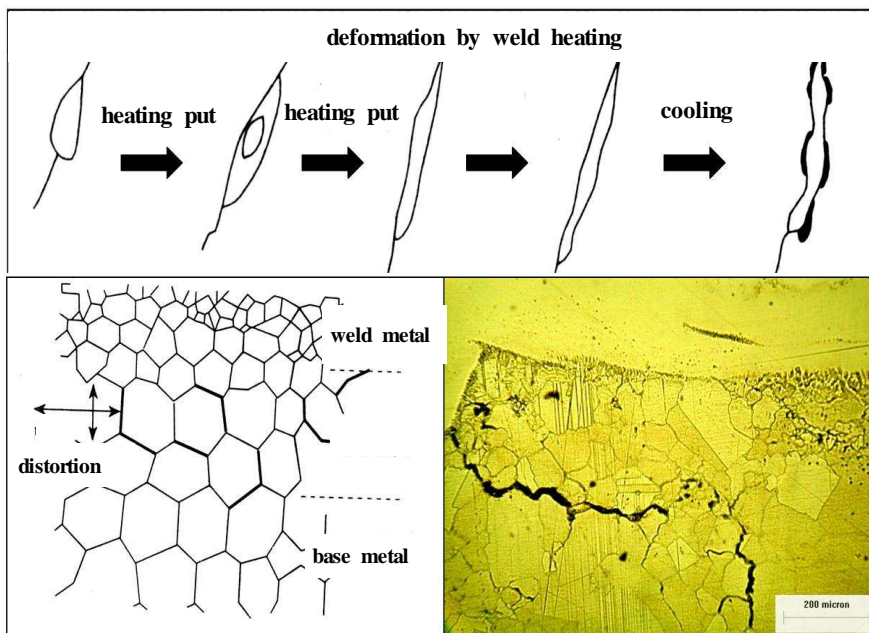


Fig. 4.2 Mechanism of liquation crack²⁸⁾

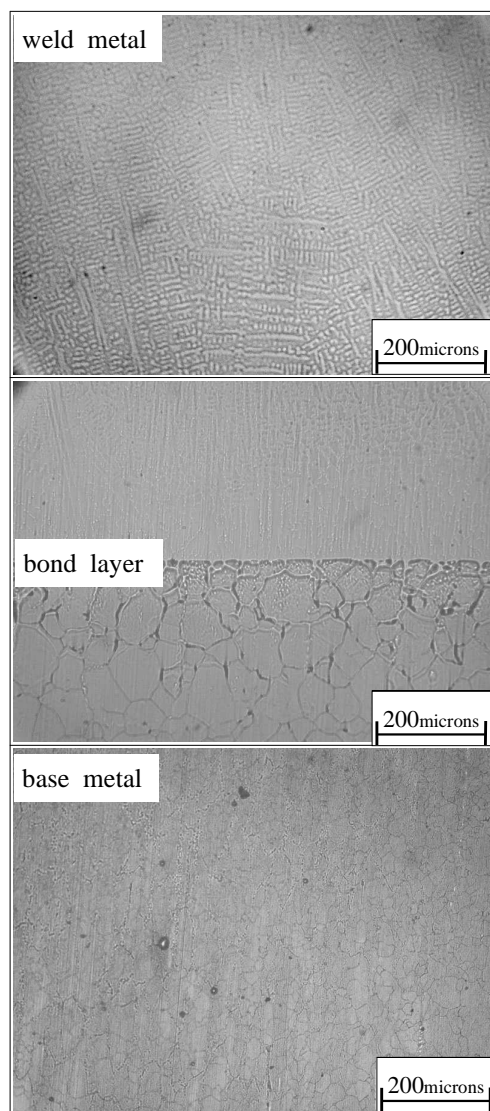


Fig. 4.3 Microstructures of PTA process (X100)

4.2 PTA공정을 적용한 각 용가재별 오버레이층의 조직 및 경도 특성

Fig 4.4~4.6에 촬영한 조직사진을 나타내었다. 조직사진은 광학 현미경을 사용하여 100배 200배 500배 사진을 촬영 하였다. 전 시편에 걸쳐 미세조직을 관찰한 결과 MIG 용접시 관찰된 액화 균열은 찾을 수 없었으며, 결함이 없는 건전한 모습을 보였다. Inconel의 경우에는 다층 용접시 층간에 그리고 수지상정에 편석이 일어나서 결함이 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있지만, PTA공정을 적용한 시험편에서는 발견 할 수 없었다.

MIG용접부에 비하여 접합계면이 우수하며, 열영향부가 용가재에 상관없이 MIG용접에 비교하여 작고, 용착금속은 미세한 수지상정의 구조를 나타내었다. 이는 PTA 공정시 모재가 열응력을 MIG용접시 보다 상대적으로 작게 받아서 모재의 잔류응력이 경감하였으며, 용접후 용착금속이 빠르게 응고된 것으로 사료된다.

경도시험 결과는 Fig 4.7에 나타내었다. 열영향부에서 경도값의 감소가 나타나고 있으며, Stellite 6를 제외한 전체 시편에서 제작사가 제시한 경도값 보다 조금 낮게 나오고 있으며 특히 열처리에 의해 경도값의 상승이 다른 재료보다 큰 Inconel 718의 경우가 경도값의 차이가 큰 것을 알 수 있다.

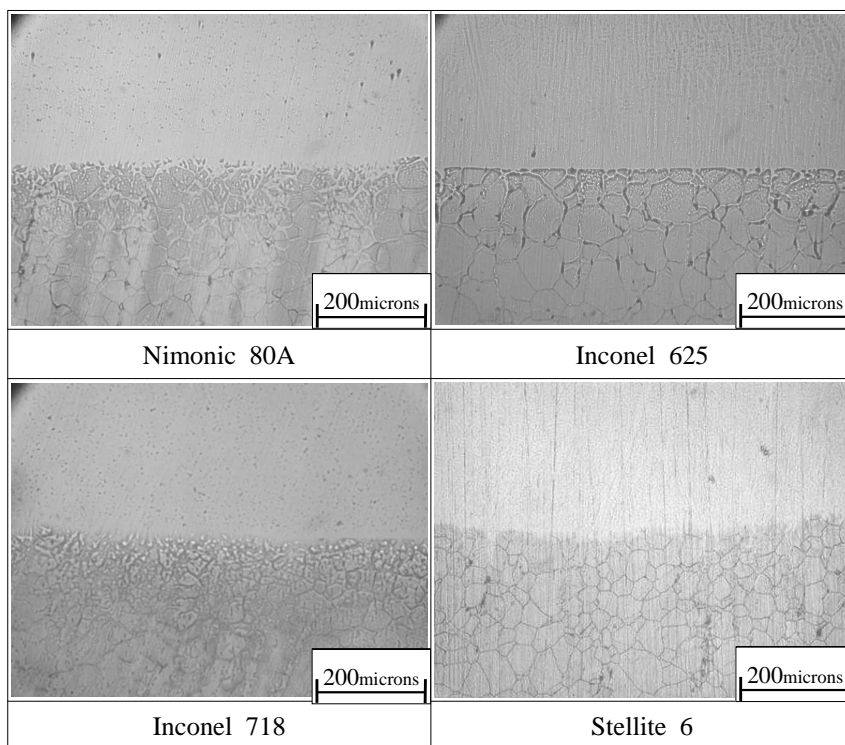
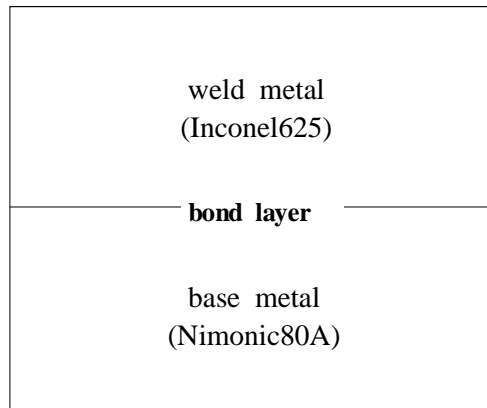


Fig. 4.4 Microstructures of PTA process (X100)

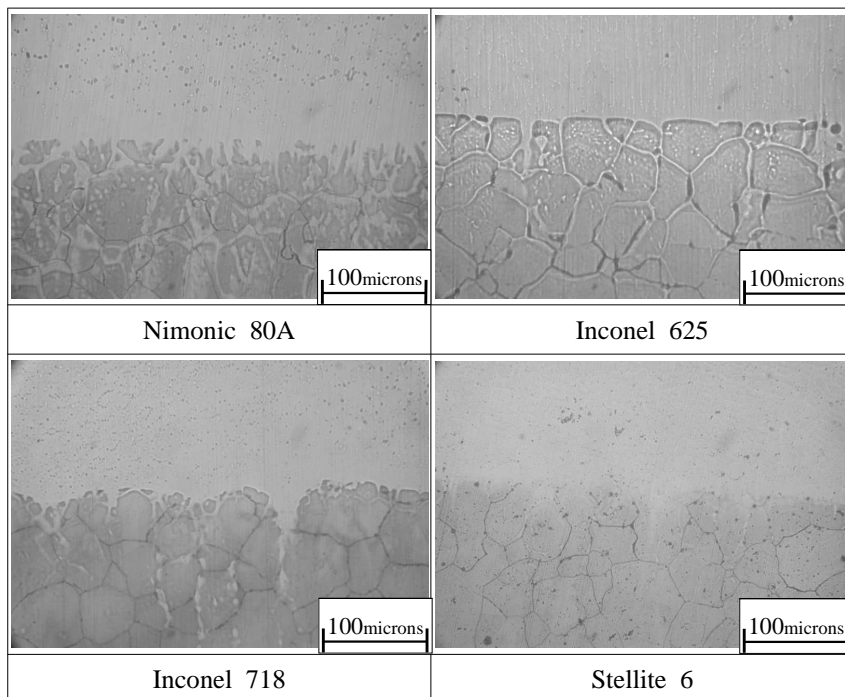
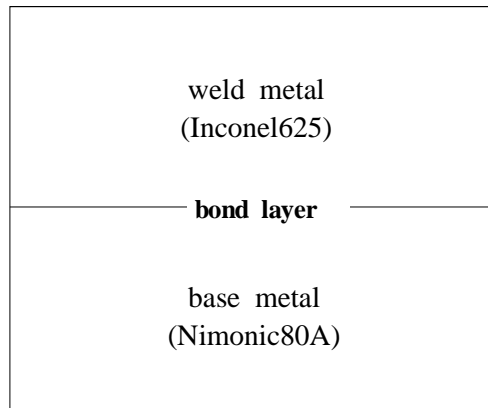


Fig. 4.5 Microstructures of PTA process (X200)

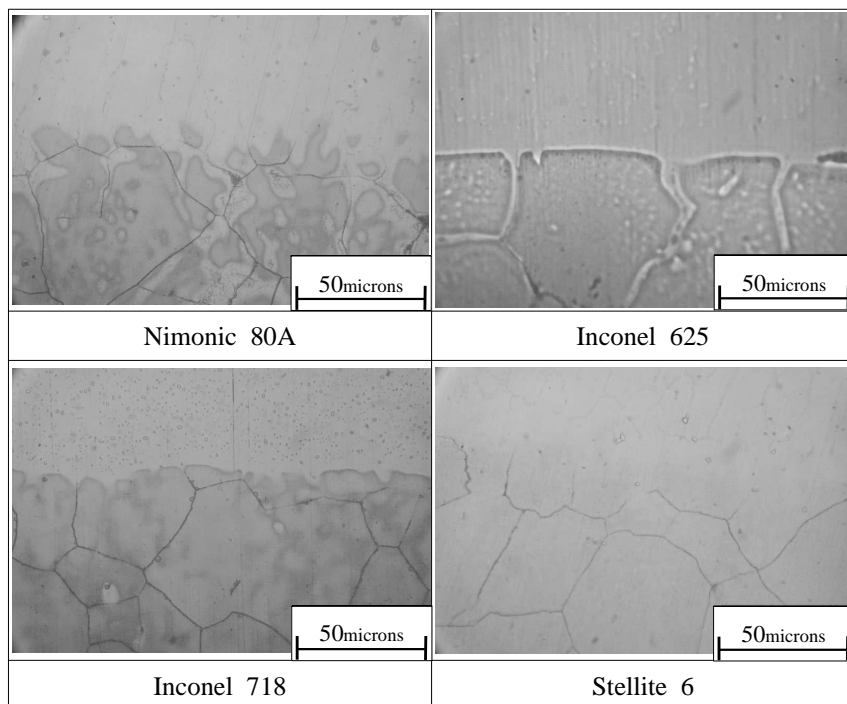
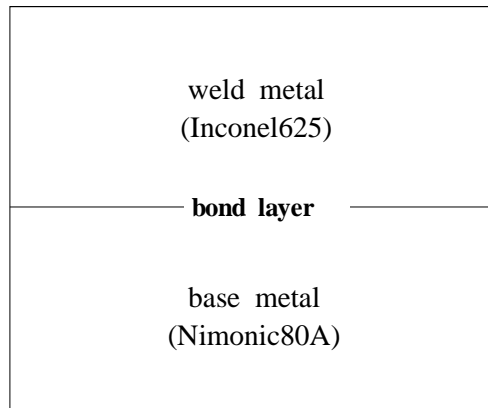


Fig. 4.6 Microstructures of PTA process (X500)

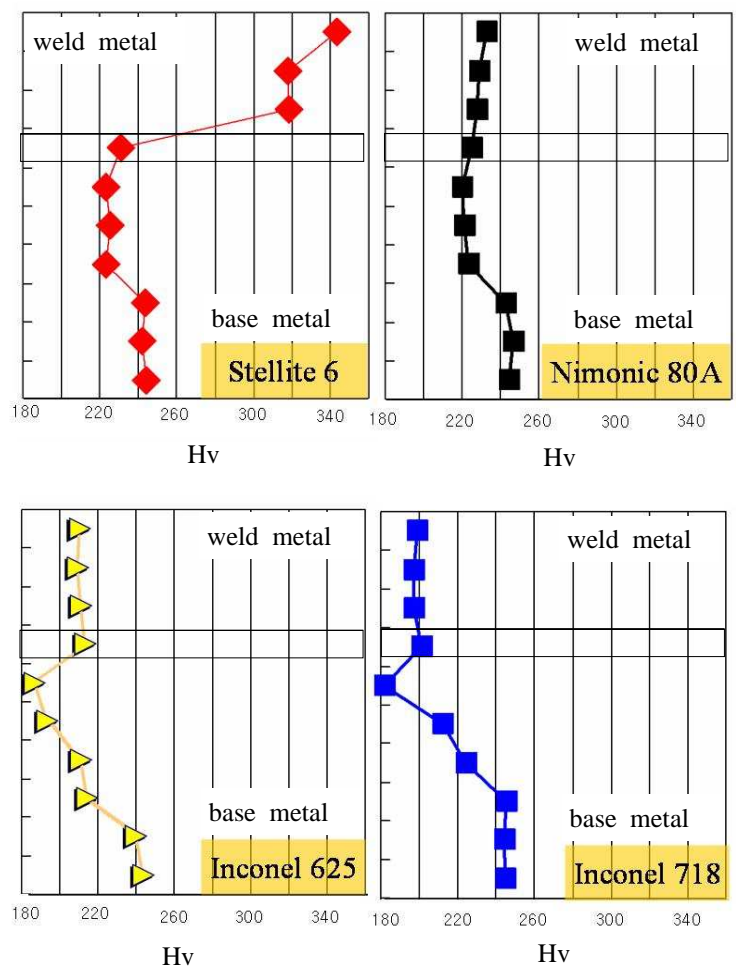


Fig. 4.7 Results of hardness tests

4.3 PTA공정을 적용한 각 용가재별 오버레이층의 마찰마모 특성

본 실험에서는 pin on disk 방식으로 시험을 하였으며, Fig 4.8에 시험 후 각 시편별의 무게 감량을 나타내었으며, Fig 4.9에는 각 시편별 마찰계수를 나타내었다.

Fig 4.9에서 보이는 것과 같이 Stellite 6의 경우에는 초기 피크 값이 거의 나타나지 않고, 일정한 마찰계수 거동을 보이고 있다. Nimonic 80A와 Inconel 625, Inconel 718의 경우에는 일반적인 마찰계수 피크와 마찬가지로 초기 피크가 나타났으며, 주기적으로 심한 피크가 보였다. 이 피크들은 오버레이부를 형성하는 입자와 입자간의 결합력이 높아서 응착마모를 일으키는 것으로 사료된다. Stellite 6의 경우에는 초기 응착이 일어나지 않거나 일어난다고 하여도 입자사이에서 쉽게 탈락되어 마찰 저항이 작아지기 때문인 것으로 사료된다.

마모 시험 후 마모궤도를 실체현미경으로 250배와 2000배에 걸쳐 촬영하여 분석하였으며 Fig 4.10과 4.11에 나타내었다.

Fig 4.10과 4.11에 보인 것처럼 Nimonic 80A와 Inconel 625, Inconel 718의 경우에는 응착이 발생하여 시편에 응착된 것을 쉽게 볼 수 있었으며 Stellite 6의 경우에는 응착이 일어난 곳을 발견할 수 없었다.

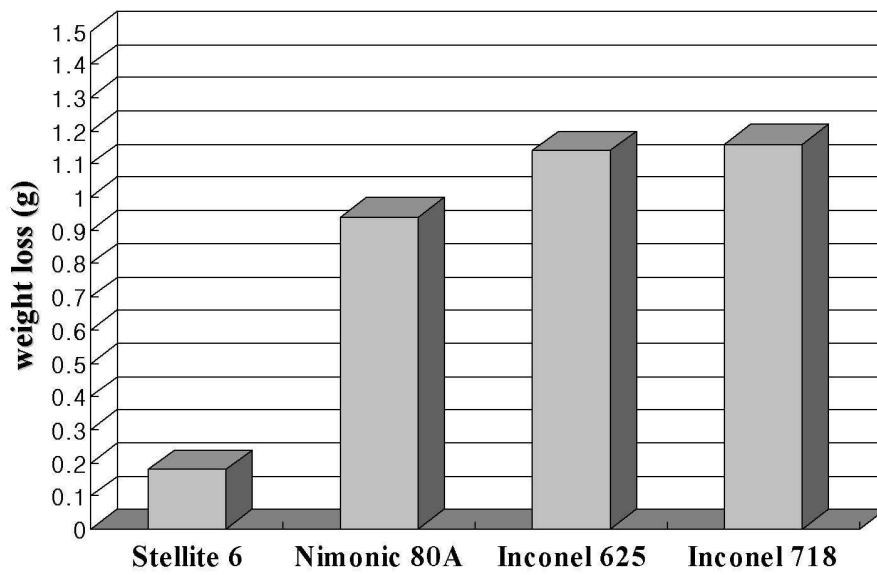


Fig. 4.8 The comparison of wear weight loss

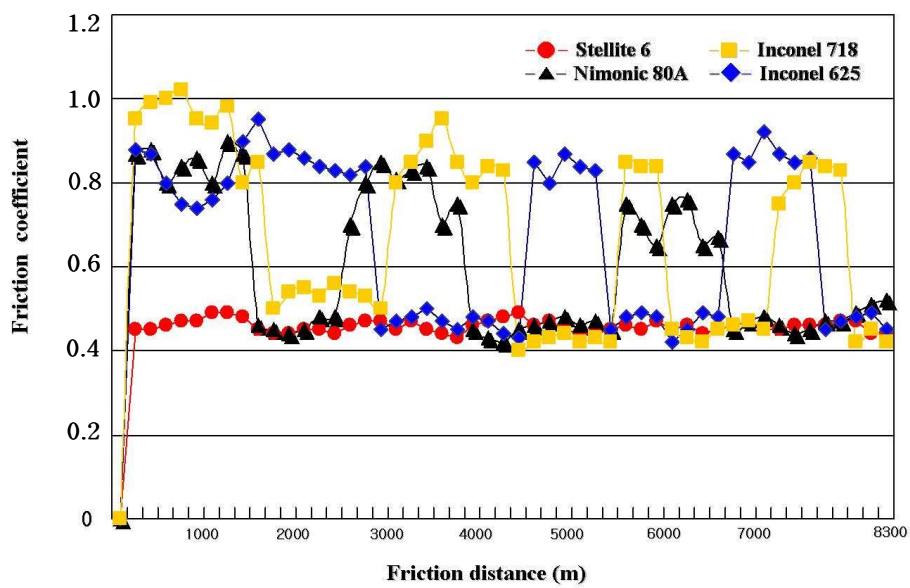


Fig. 4.9 Relation between friction distance and friction coefficient on overlay layer

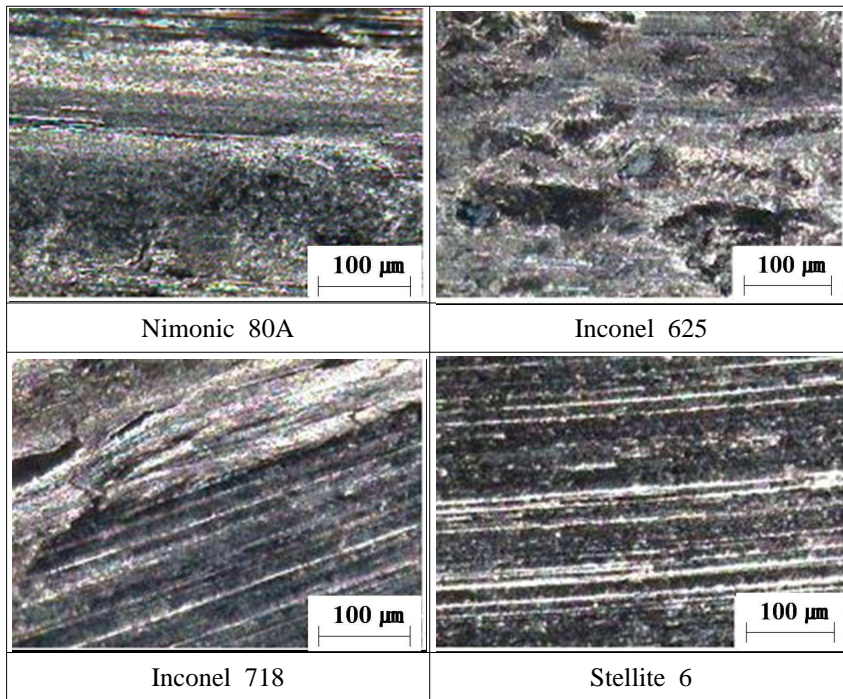


Fig. 4.10 Photograph of worn surface by friction (X250)

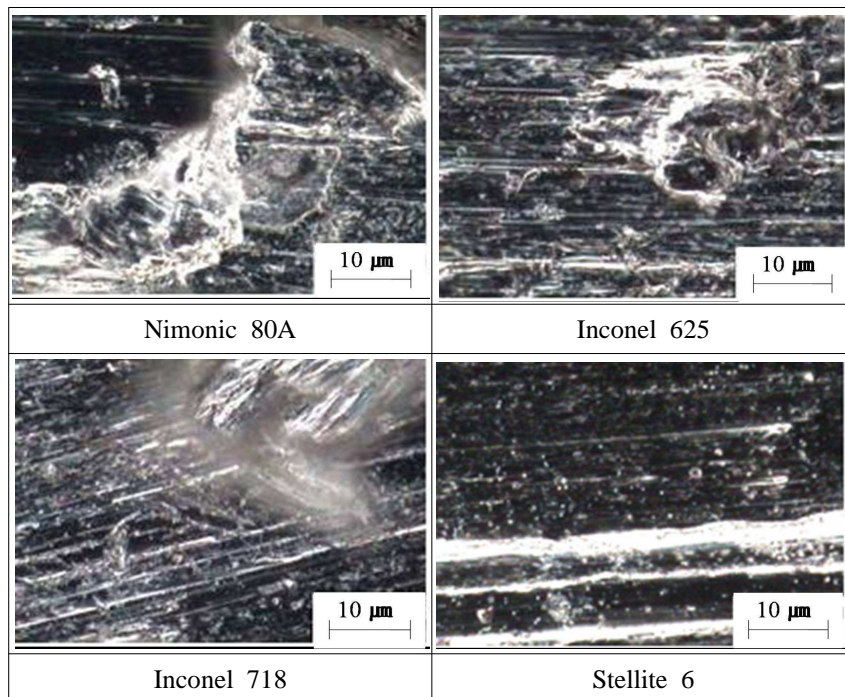


Fig. 4. 11 Photograph of worn surface by friction (X2000)

4.4 PTA공정을 적용한 각 용가재별 오버레이층의 에로전 특성

Fig 4.12는 캐비테이션 에로전 시험 결과를 나타낸 것이다. 시편별 에로전 특성은 Co基 합금인 Stellite 6의 경우에 Ni基 초합금인 Inconel 625,718과 Nimonic 80A보다 큰 에로전을 보이는 것을 알 수 있었으며, Ni基 초합금의 경우에는 에로전 현상이 거의 동일하였다. 캐비테이션 에로전 현상은 피로균열의 발생과 입계면에 따르는 전파거동에 의해 발생하는 현상으로 보고 되고 있다.²⁹⁾ 그러므로 오버레이층의 표면에 피로균열의 발생 장소인 미세한 응력집중부가 많을수록 캐비테이션 에로전이 많이 발생한다고 생각할 수 있다.

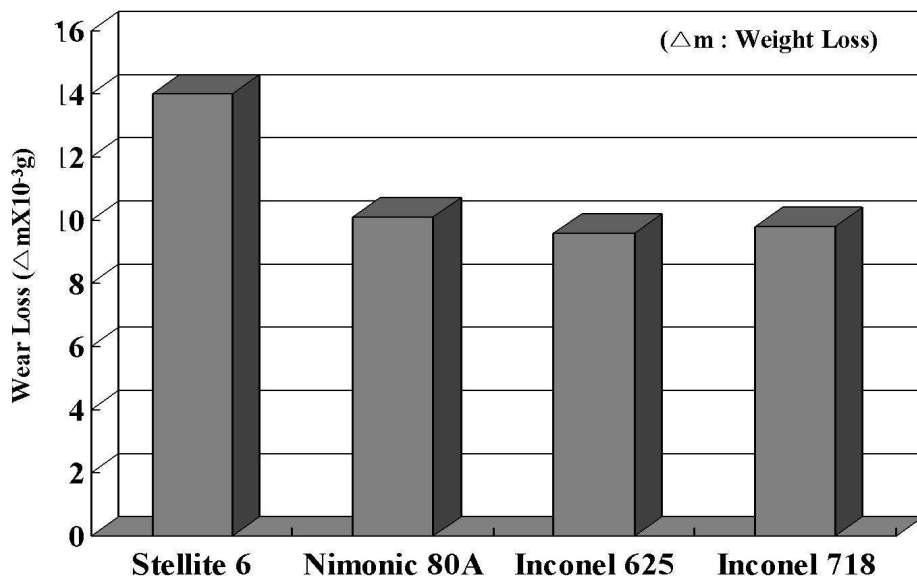


Fig. 4.12 Results of cavitation erosion tests

5. 결 론

본 연구에서는 Ni基 초합금인 Nimonic 80A를 모재로 사용하여 기존의 오버레이 용접법으로 사용되는 MIG용접과 새롭게 적용되고 있는 PTA공정을 적용하여 그 미세조직특성을 비교분석하였으며, PTA공정을 Nimonic 80A, Inconel625, Inconel 718, Stellite 6 용가재를 이용하여 오버레이 후 미세조직특성과 마모시험, 에로전 시험을 통하여 그 특성을 검토하였다.

본 연구를 통하여 얻은 주요 결과들은 다음과 같다.

1) 용접부의 단면을 전체적으로 현미경으로 검사한 결과 일반적으로 Overlay 용접에 사용되는 MIG용접을 실시한 경우 보다 결정립이 작은 건전한 용접부를 얻을 수가 있었고 저용점 석출물에 의한 균열등은 발견 할 수 없었다.

2) 용접부에 밸브시트 재질인 Stellite 6를 상대 마모재로 하여 마찰마모시험을 시험한 결과는 Ni基 초합금인 Nimonic 80A와 Inconel 625·718의 경우엔 반복적으로 응착마모가 발생하여 응착마모가 발생 하지 않은 Stellite 6 보다 상대적으로 마모량이 많았다.

3) 캐비테이션 에로전 시험의 결과는 Stellite 6의 경우가 가장 큰 에로전을 보였고 Nimonic 80A, Inconel 718, Inconel 625 순으로 점차 낮은 에로전 특성을 보였다.

본 연구에서 시험한 PTA공정에 의한 오버레이층은 기존에 널리

사용되는 MIG용접보다 우수한 오버레이층을 얻을 수 있었다. 각 용가재로 용접한 시험편의 마모시험과 에로전 시험에서는 서로 상반되는 결과를 얻을 수 있었다. 마모시험에서는 Stellite 6의 경우 가장 우수하였으며 에로전 시험에서는 Inconel 625가 가장 우수하였으며 모재와 동종의 재질인 Nimonic 80A는 중간정도의 특성을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 황순영외 : 국내용사/오버레이 용접기술의 현황과 전망, 대한용접학회지, Vol. 20, No. 4 (2002) p. 72~73
2. 대한용접학회 : 용접접합편람 (1998) p. 717
3. 김영섭 : Plasma Transferred Arc(PTA) surfacing process, 대한용접학회지, Vol. 14, No. 2 (1996) p.28
4. W. betteridge et al., : The Nimonic alloys 2nd edition, N.Y. : Edward Arnold Co., (1974) p.52
5. G.W. Meetham, : The Development of Gas Turbine Materials, London : Applied Science Publishers, (1981) p.296
6. W. betteridge et al., : The Nimonic alloys and other Nickel-base high temperature alloys : Edward Arnold Co., (1974) p.73
7. 藤田利夫外 : Ni基 超合金における 合金元素の 役割 日本金屬學會誌, 第16卷, 第4號, (1977), p.231~239
8. Shunk F. A et al., Constitution of Binary Alloys, (N.Y. : Mc-Graw Hills, 1969). p.247
9. Taylor A. et al ., J. Inst. Metals, (1980), p.577.
10. Hansen M. et al ., Constitution of Binary alloys, 2nd Edition, (McGraw Hill, 1958)
11. Taylor A. et al ., J. Inst. Metals, (1952), p.451.
12. Taylor A. Trans AIME, 206, (1956), p.1356
13. Pelloux R. M. N. et al ., Trans AIME, 218, (1960), p.232

14. Douglass D. L., "Fundamentals of the Reactions Between Metals and Their Environment at high Temperature ", SAMPE, 16th National Symposium, Anaheim, California, (1971)
15. Gibbons T.B. and Hopkins BE., Met. Sci. Jnl. 5, (1971), p.233
16. W. betteridge et al., : The Nimonic alloys 2nd edition, N.Y. : Edward Arnold Co., (1974) p.383
17. 대한용접학회 : 용접접합용어사전 (2001) p. 314
18. 김영섭 : Plasma Transferred Arc(PTA) surfacing process, 대한용접학회지, Vol. 14, No. 2 (1996) p.28~30
19. K. Holmberg and A, Mettews : Coating Tribology, Elsevier Pulication (1994)
20. Ernest Rabinowicz : Friction and Wear of Materials, A Wiley Interscience Publication(1995)
21. Peter J. : Friction and Wear Transition of Materials, Noyes Publication(1989).
22. 김현근 : 폭발용사 의한 내에로전성 서멧 피막 코팅에 관한 연구 (2000) p.26
23. Keiji Sonoya and Chang Jiu li : HVOF 溶射皮膜の 皮膜性狀 と性能, 日本溶接學會全國大會講演概要, 第60集(1997), p 142
24. 대한용접학회 : 용접접합편람 (1998) p. 207
25. W. betteridge et al., : The Nimonic alloys and other Nickel-base high temperature alloys : Edward Arnold Co., (1974) p.387

26. Baohui Tian et al., : Local microstructure and its influence on precipitation behavior in hot deformed Nimonic 80A, Acta Materialia 51 (2003) p.4150
27. 김희봉, 이창희 : Ni계 초내열합금의 응고균열, 대한용접학회 21, No. 17, Vol.5 (1999) p.20~28
28. 대한용접학회 : 용접접합편람 (1998) p.218
29. Kreye H., Schwetzke R., Buschinell A., Boccanera L. : Cavitation Erosion Resistant Coating Produced By Thermal Spraying and by Weld Cladding. Proc. of the 15th International Thermal Spray Conf. (1998) Nice France, p 269