

TiN 코팅 공정 개선에 의한 1Cr-1Mo-0.25V 강재의 피로강도 특성

서 창 민* · 김 경 렬**
(97년 9월 6일 접수)

Fatigue Strength Characteristics of 1Cr-1Mo-0.25V Steel by Improved TiN Coated Processes

Chang-Min Suh* · Kyung-Ryul Kim**

Key Words : Arc Ion Plating(아크 이온 플레이팅), Droplet (드롭렛), TiN Coated Steel(TiN 코팅강), Fatigue Strength(피로강도)

Abstract

This paper deals with the effect of coating layer on the fatigue strength of TiN coated 1Cr-1Mo-0.25V steel prepared by using the arc ion plating (AIP) process, in which it was characterized by the presence of extractor grid (ion filter). The rotary bending fatigue tests were carried out under room air conditions, and the fatigue crack initiation and growth behavior were observed by using plastic replica method. As experimental results, it was found that the obvious improvement of fatigue life at lower stress region was confirmed in TiN coated specimen processed with ion filter. It was also explained that the increase of fatigue life in the case of an improved AIP process with ion filter was attributed to the retardation of crack initiation of the substrate surface due to hard coating layer, more densely formed with the reduced size and density of droplets.

1. 서 론

세라믹 코팅(ceramic coating)은 내열성, 내마모성, 내산화성, 내식성 및 고경도 등의 물리, 화학적 안전성과 우수한 기계적 성질을 가지고 있는 세라믹 재료를 금속 등에 코팅함으로써 표면 개선을 통

하여 재료의 성능을 향상시키는 신기술의 일종으로, 현재까지는 이러한 세라믹 코팅 기술이 절삭공구 및 금형, 기계 부품 및 자동차 산업, 우주 및 항공 산업을 중심으로 한 내열성 및 내마모성, 내식성이 요구되는 산업 분야에서 주로 응용되고 있다^{1)~4)}. 금속 재료에 세라믹을 10 μm 이하의 두께로 코팅

* 경북대학교 기계공학부

** 포항공과대학교 가속기연구소

하는 방법으로써 물리증착(PVD)법 및 화학증착(CVD)법 등이 주로 이용되고 있으며, PVD 방법의 일종인 아크 이온 플레이팅(AIP, arc ion plating)은 박막의 밀착성이 높고, 가스와의 반응성이 좋으며, 비교적 저온(약 500°C 이하)에서 코팅을 할 수 있는 특징을 가지고 있다.

특히, 모재에 증착되는 박막의 세라믹재로서, TiN, TiC, TiCN, TiAlN 및 Al₂O₃ 등과 같은 코팅재를 다양하게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다^{(2), (4)~(8)}. 그러나, 아크 이온 플레이팅은 높은 이온화율과 이온 에너지를 가지므로 모재 표면에 매크로 입자(macroparticle, droplet) 등이 생성되어 코팅층 표면의 조대화 및 밀착력의 저하 등을 일으켜 코팅층의 기계적 성질을 악화시키는 요인으로 작용하고 있음이 보고되고 있다^{(5), (6), (8)}. 따라서 최근에는 이러한 매크로 입자를 억제하여 코팅재의 물리, 화학적 안전성과 기계적 성질을 향상시키기 위한 코팅 공정의 개선에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{(6), (8)~(9)}.

특히, 최근에는 세라믹 코팅재를 구조용 부재 등으로 사용하기 위해 기계적 성질 및 코팅층의 특성, 즉 코팅층의 두께, 코팅층과 모재 사이의 밀착력, 코팅층의 표면 상태 등이 피로강도 특성에 미치는 영향에 대한 연구가 주목을 받고 있다^{(10)~(16)}. 그러나, 세라믹 코팅재의 피로강도 문제에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 특히 코팅공정의 개선을 통하여 세라믹 코팅된 코팅재의 강도 설계에 반영하기 위한 목적의 피로강도, 균열의 발생 및 성장 특성에 관한 연구는 충분치 않은 상태이다^{(17)~(19)}.

본 연구에서는 코팅공정의 개선을 통한 TiN의 세라믹 박막이 피로강도 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 터빈 로터강으로 널리 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강의 모재에 PVD 방법 중 아크 이온 플레이팅을 사용하여, 코팅온도, 코팅시간, 바이어스 전압, 타겟전류 및 반응가스 분압 등의 코팅 공정 변수의 최적 조건을 구한 후, 박막의 증착시 고에너지 이온의 모재와의 충돌을 조절하

기 위한 이온 필터(ion filter)의 유무를 공정변수로 채택하여 TiN을 코팅하였다. 이때, 세라믹 코팅 두께는 각각 2.5 μm, 3.5 μm 및 5 μm인 세가지 종류로 실시하였으며, 코팅층의 분석과 아울러 실온 대기중에서 인장 시험 및 회전굽힘 피로시험을 실시하여 코팅층의 표면 특성이 모재의 정적, 기계적 성질 및 피로강도의 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 및 코팅공정

시험용 모재는 화력발전소의 증기 터빈 로터용 소재로서 광범위하게 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강재로서, 재료의 화학적 조성 및 상온에서의 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다. 피로시험에 사용한 시험편은 단조 제작된 원판형 소재로부터 균열 성장이 가장 용이한 단조 방향과 직각으로 절단하여 채취하였다. 또한, 코팅재의 기계적 성질을 파악하기 위한 인장시험편은 ASTM E8 규정에 따라 평행부 직경 8 mm의 표준 시험편으로 가공하였으며, 경도 및 코팅층의 분석을 위한 시험편은 직경 8 mm, 두께 4 mm의 원형 디스크 형상으로 제작하였다. 기계 가공한 시험편 표면은 에머리지를 사용하여 1500번까지 연마한 후, 산화 크롬 버핑과 동시에 초음파 세척기를 사용하여 표면에 존재하는 이물질 제거하였다.

Table 1 Chemical compositions of 1Cr-1Mo-0.25V steel (wt. %)

Element	C	Si	Mn	Cu	P	S	Ni
Composition	0.29	0.24	0.76	0.03	0.0033	0.0006	0.46

Element	Al	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb
Composition	0.0018	1.10	1.19	0.24	0.002	0.003	0.0006

Table 2 Mechanical properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel

Temp. (°C)	0.2% yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Young's modulus (GPa)
24	626.9	776.9	16.9	56.7	313.45

Table 3 TiN and TiCN coating conditions of arc ion plating process

Temp (°C)	Bias voltage (V)	Target current (A)	Vacuum (Torr)	Target-specimen distance (mm)	Gas pressure (Pa)		Coating time (min)		
					TiN	TiCN	2.5 (µm)	3.5 (µm)	5.0 (µm)
450	-200	50~100	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁶	250	N ₂ =1.0	N ₂ =0.25 CH ₄ =0.5	50	70	100

시험편의 코팅은 아크 이온 플레이팅 방법으로 TiN의 세라믹을 표면에 코팅하였다. 코팅작업은 챔버내에 시험편을 장입한 후, 예비 가열원을 사용하여 일정한 온도까지 가열하면서 진공펌프를 이용하여 10⁻⁴~10⁻⁶ 범위로 배기를 수행한 후, 이온 세척(ion sputtering), Ti 중간층 코팅 및 N₂ 가스 주입을 통한 세라믹 코팅 공정의 순서로 실시하였다. 이때, Table 3에 나타낸 바와 같이, 코팅 온도, 바이어스 전압, 타겟 전류 및 반응 가스의 분압 등의 제반 코팅 최적 조건을 미리 구한 후, Ti 중간층 코팅시 이온 필터의 사용 유무를 코팅 공정 변수로 하여 코팅 시간을 변화시켜 가면서 코팅층의 두께를 각각 2.5 µm, 3.5 µm 및 5 µm로 제작하였다.

2.2 코팅층의 분석 및 시험

코팅층의 표면 특성을 파악하기 위하여 주사형 전자 현미경(scanning electron microscopy) 및 에너지 분산형 X-선 분광법(energy dispersion spectroscopy), X-선 회절기(X-ray diffractometer)를 사용하여 코팅층의 표면 상태 및 구조, 그 화학적 조성을 정량적으로 관찰하고, 피로시험 후 파단면의 분석을 통하여, 코팅층의 두께 및 피로균열의 발생 기점의 특성을 조사하였다. 또한, 코팅재의 표면특성이 피로강도에 미치는 영향을 분석하기 위한 코팅층의 경도시험은 마이크로 비커스 경도계(HMV-2000, Shimadzu)를 사용하여 실온 대기중에서 실시하였으며, 이때 코팅 두께에 따른 모재의 영향을 최소화하기 위하여 압입 하중을 각각 15g과 20g으로 부가하여 코팅층의 경도를 면

Fig. 1은 TiN으로 코팅된 인장 시험편 및 회전 굽힘 피로시험편의 형상을 도시하고 있다.

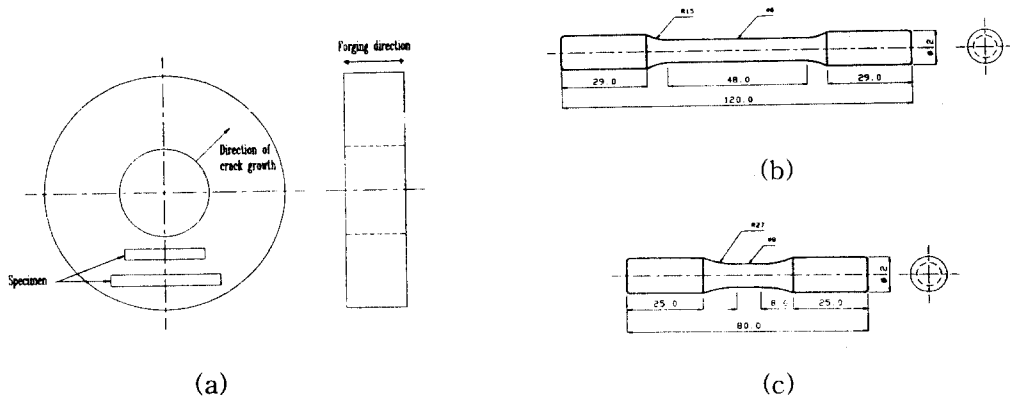


Fig. 1 Configuration of cylindrical bulk material and specimens

- (a) forged bulk material
- (b) monotonic tensile specimen
- (c) rotary bending fatigue specimen

밀하게 분석하였다. 코팅층의 표면 상태, 즉 드롭렛의 크기 및 분포의 영향에 따른 표면거칠기를 파악하기 위한 일환으로 코팅 처리 후, 측정 길이 2.4 mm를 기준으로 접촉식 표면 조도 시험기 (Surftest-500, Mitutoyo)를 사용하여 각각의 시험편에 대하여 표면 거칠기시험을 실시하였다.

세라믹 코팅층이 모재의 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하기 위한 인장시험은 최대 하중 25 ton, 최대 하중속도 500 mm/min의 만능재료시험기(Model 1127, Instron)를 사용하여 ASTM E8 규정에 따라 실온 대기중에서 실시하였으며, 이때 하중 속도를 2 mm/min을 일정하게 제어하여 코팅층의 정적 기계적 성질을 조사하였다. 또한, 코팅층

이 코팅재의 피로강도 특성에 미치는 영향을 면밀하게 관찰하기 위하여 실온 대기중에서 회전굽힘 피로시험을 실시하였다. 피로시험기는 회전수 3450 rpm의 오노(Ono)식 피로 시험기(H5, 98 N·m, Shimadzu)를 사용하였다.

피로균열의 발생 및 성장 거동을 분석하기 위하여 예상 파단 수명의 일정 반복수, 즉 전체 예상 수명의 10~15% 마다 피로 시험기를 정지시켜 시험편의 표면에서 레프리카를 채취하였다. 또한, 실험 종료 후, 광학 현미경을 사용하여 다수의 표면 피로 균열 중에서 시험편의 파단 수명을 좌우하는 한 개의 가장 큰 피로균열을 주균열(major crack)로 정하여 피로 수명의 말기에서 초기로 역추적하

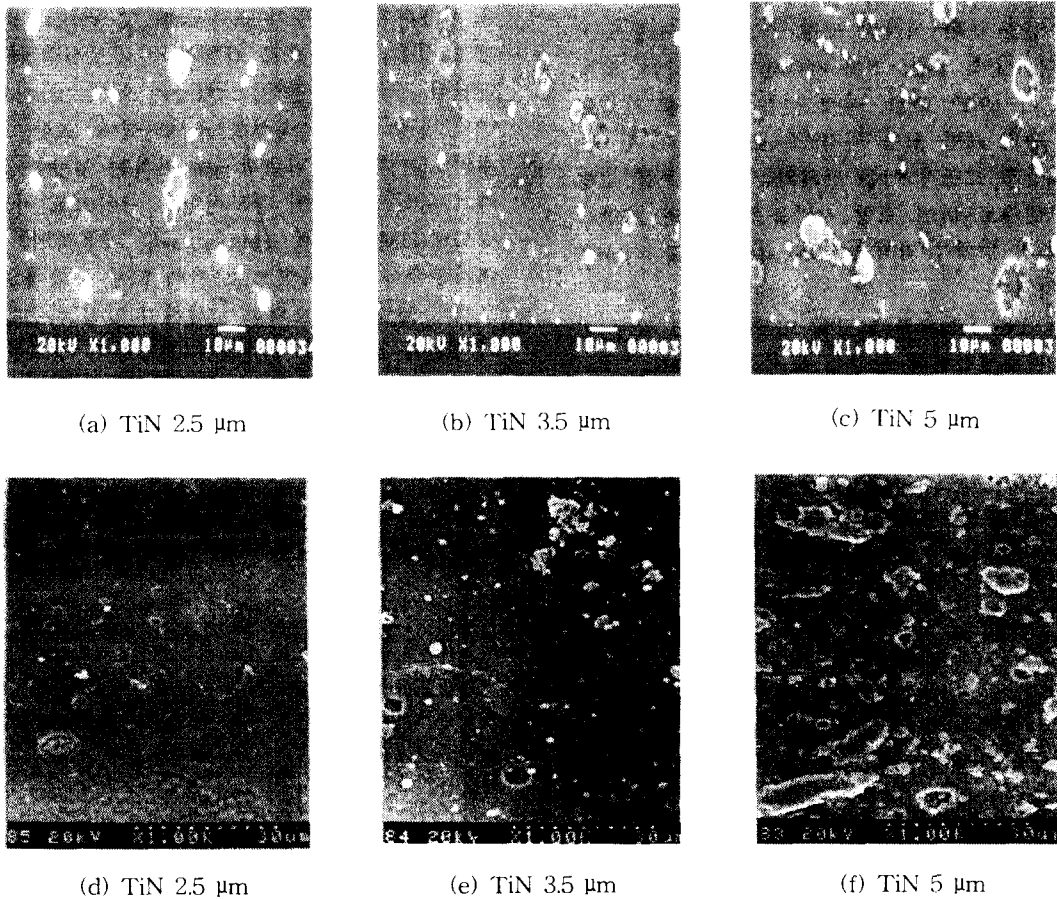


Fig. 2 Comparison of SEM images showing droplets of coating layer with and without ion filter; (a)(b)(c) with ion filter, (d)(e)(f) without ion filter

여 코팅재의 피로 균열의 발생, 성장 및 합체 거동을 정량적으로 분석하여 이를 파괴역학적으로 고찰하였다.

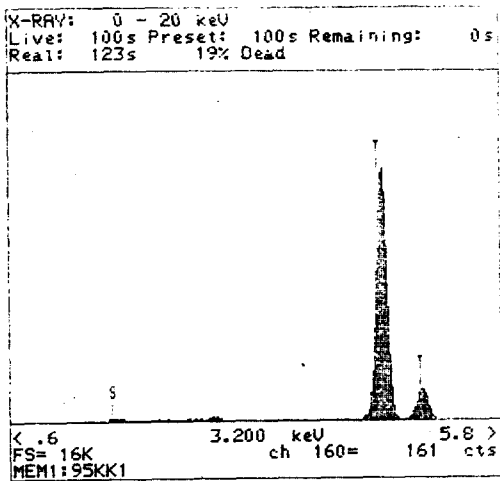
3. 실험결과 및 고찰

3.1 코팅층의 특성

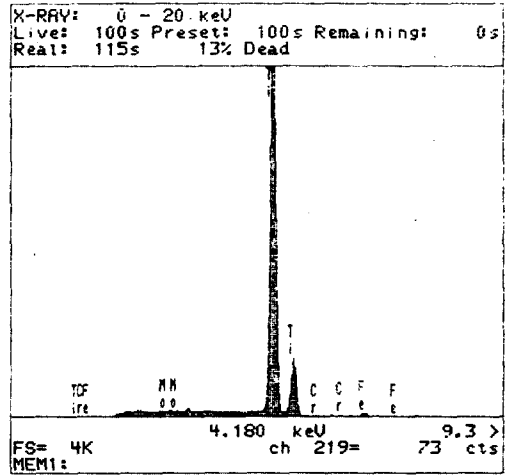
AIP 공정은 진공 아크에 의하여 생성된 증기 플럭스(vapor flux) 내에서 높은 이온에너지로 인하여

타겟 금속 이온이 용융된 상태에서 모재의 표면에 균일하게 증착하지 못하고, 모재 온도, 타겟 전류, 가스 분압 등의 영향을 받아 매크로 입자 또는 드롭렛(macroparticle or droplet)⁵⁾이라 불리우고 있는 미소 입자들이 모재의 표면에 응고되어, 코팅층의 표면 특성 및 기계적 성질 등에 악영향을 미치는 것으로 보고 되고 있다.

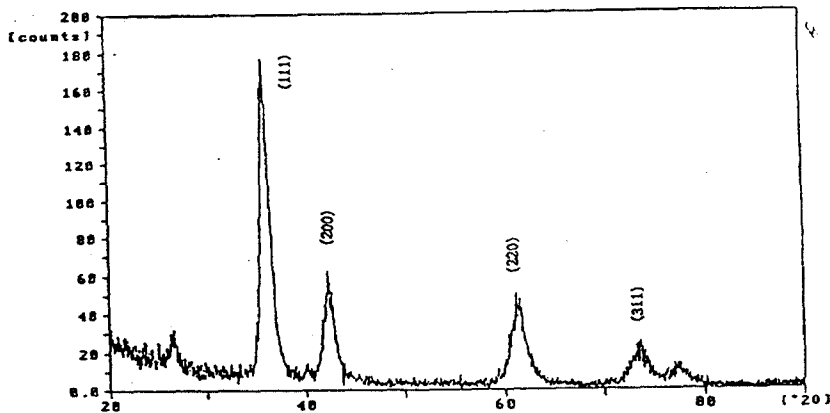
Fig. 2는 AIP 공정에서 이온 필터의 사용 유무에 따른 각 코팅층의 증착 시간의 변화, 즉, 코팅층



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 EDS analysis and X-ray diffraction pattern of TiN coating layers; (a) with ion filter, (b) without ion filter, (c) typical X-ray diffraction pattern of TiN films with ion filter

의 두께에 따른 드롭렛의 분포 양상을 나타내고 있다. 이온 필터를 사용하지 않은 경우에 있어서, TiN 코팅층의 드롭렛의 크기 및 분포는 코팅층의 두께의 증가에 따라 점차적으로 증가하는 양상을 나타내고 있다. 반면 이온 필터를 사용한 경우에 있어서는 Ti 중간층 증착시 이미 형성된 드롭렛만이 존재하고 코팅시간의 증가에 따라 보다 큰 크기의 드롭렛은 표면에 증착되지 않고 있음을 알 수 있다. 즉, 이온 필터를 사용한 경우에는 드롭렛의 크기가 약 10 μm 이내로써 이는 구형 또는 불규칙한 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 드롭렛은 모재의 표면상태, 즉 청정도, 표면거칠기 등에 따라 그 생성 과정이 복잡하게 나타나고, 박막의 성장시 코팅층의 내부에 기공 등을 형성함으로써, 코팅층의 밀착력 및 코팅재의 기계적 성질을 악화시키는 요인으로 파악되고 있다⁵⁾.

Fig. 3은 코팅층의 EDS 분석 및 X-선 회절 시험 결과를 도시하고 있다. TiN 코팅층은 이온 필터를 채택한 경우가 보다 치밀한 박막이 형성되어 Ti만이 모재 표면에 나타나고 있음을 알 수 있으며, 또한, TiN의 코팅층의 우선 방위(preferred orientation)⁶⁾는 박막의 표면과 평행한 (111) 방향이 주로 나타나고 있음을 알 수 있다.

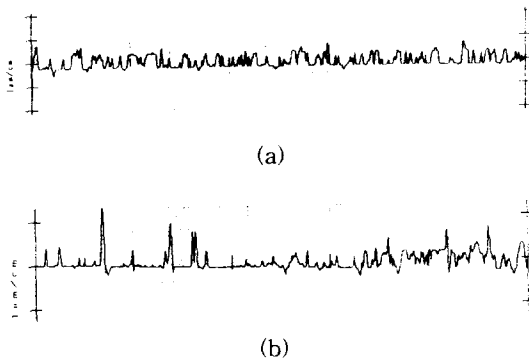


Fig. 4 An example of profile of surface roughness along the surface of 2.5 μm TiN coating layers;

(a) with ion filter, (b) without ion filter

Fig. 4는 2.5 μm 두께를 가진 TiN 코팅재의 표면거칠기 형상을 도시하고 있다. 이온 필터를 사용

한 경우, 일반적인 AIP 공정에 의한 코팅보다도 코팅층의 표면이 균일한 거칠기를 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히, 코팅층의 경도가 높은 박막이 표면의 소성변형을 구속하여 피로균열의 발생을 지연시키는 효과가 있는 경우에도, 조대한 표면 상태는 오히려 노치 효과로 작용하여 피로 강도의 저하 및 피로 수명의 감소를 일으킬 수 있는 요인으로 작용할 수 있음이 보고 되고 있다^{13),16)}.

Fig. 5는 Fig. 4의 예시와 같은 자료를 이용하여 코팅층의 두께에 따른 코팅 시험편의 표면 거칠기 측정 결과를 최대 높이 거칠기(R_{max})로 나타내고 있다. 이온 필터를 채택한 경우에는 코팅 두께의 증가에 따라 코팅층의 표면 상태가 균일함을 알 수 있으며, 이는 앞서 언급한 드롭렛의 분포 및 크기에 대한 변화 양상과 동일한 특징을 나타내고 있음을 알 수 있다.

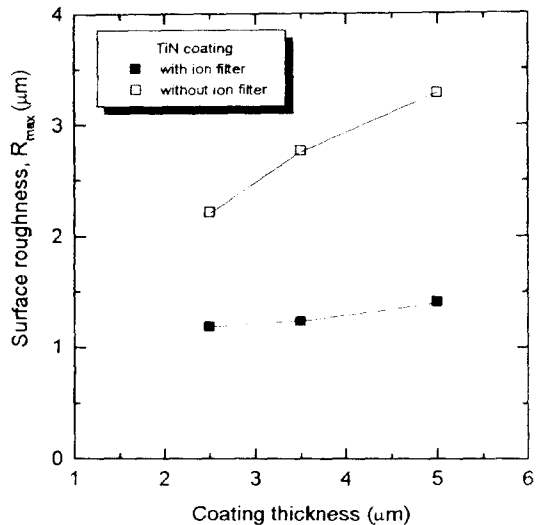


Fig. 5 Relation between the surface roughness, R_{max} and the coating layer thickness

3.2 코팅재의 기계적 성질 및 경도

TiN으로 코팅된 인장 시험편에 대하여 단순 인장시험을 실시한 결과, 코팅재의 항복 강도 627.2 MPa, 인장 강도 778.1 MPa 및 연신율 18.3% 로써, Table 2에 도시한 바와 같이 모재의 기계적 성질과 거의 유사한 값을 나타내었다. AIP 공정의 챔버 내의 온도 조건, 즉 450 $^{\circ}\text{C}$ 범위에서 코팅 처리를

실시한 경우에 있어서, 온도 변화에 의한 모재의 정적 기계적 성질은 그다지 영향을 받고 있지 않음을 알 수 있다. 특히, 코팅층의 두께가 얇고, 인장 하중 부가시 내력을 모재부가 받음으로써 AIP 코팅 처리를 통한 코팅재에 있어서 코팅층의 영향이 거의 나타나지 않은 것으로 추정된다.

Fig. 6은 AIP 공정시 이온 필터의 사용 유무 및 코팅 두께에 따른 코팅층의 경도값을 나타내고 있다. 코팅층의 경도 측정에 있어서, 모재의 영향을 최소화하기 위하여 압입 하중을 각각 15 g 및 25 g으로 하고, 세 종류의 각 코팅 두께별로 동일 시험편에 대하여 6회 이상 경도값을 측정하여 그 평균값을 구하였다. 코팅층의 두께가 증가함에 따라 경도값은 높게 나타나고 있으며, 또한 이온 필터를 사용한 경우가 다소 높은 경도값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

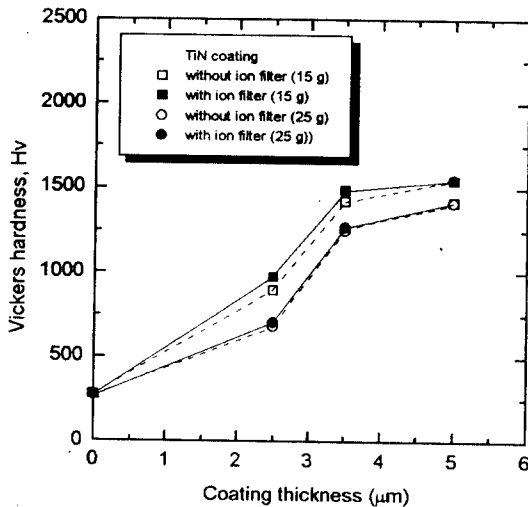


Fig. 6 Relation between the Vickers hardness, Hv and the coating layer thickness

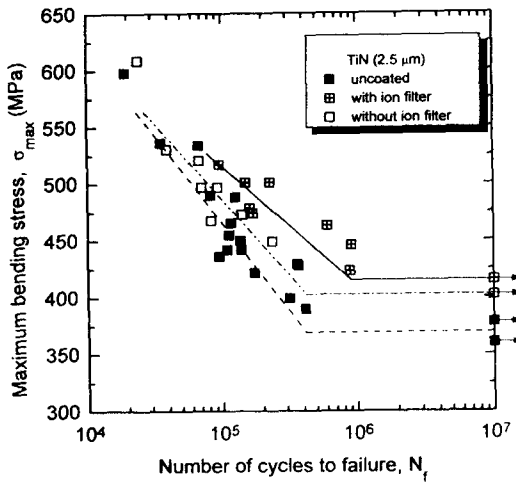
이 이온 필터의 사용 및 코팅층의 두께가 두꺼울수록 표면상에 TiN 코팅층이 조밀하게 성장되고, 드롭렛의 영향을 적게 받아 표면 거칠기가 적은 상태에서 표면 특성에 민감한 경도값이 다소 크게 나타나는 것으로 판단된다. 특히, 압입하중이 15 g인 경우, 코팅층의 두께가 3.5 μm 이상에서는 이온 필터의 사용 유무에 관계없이 일정한 경도값

을 나타내고 있으며, 이때 TiN 코팅재의 경도값은 약 1530 정도로써 이는 모재와 비교하여 약 5.6 배임을 알 수 있다. 코팅층의 두께가 2.5 μm의 경우, 본 실험에 적용한 압입하중에 대하여 코팅층이 모재의 영향을 받아 압입 자국의 소성변형이 보다 크게 나타나 경도 값이 적게 나타난 것으로 추정된다⁷⁾. 또한, 이때 경도 값은 900 정도이며, 이는 모재의 경도보다도 약 3.6 배 높음으로써, 모재의 표면에 세라믹 코팅이 잘 이루어져 있음을 알 수 있다.

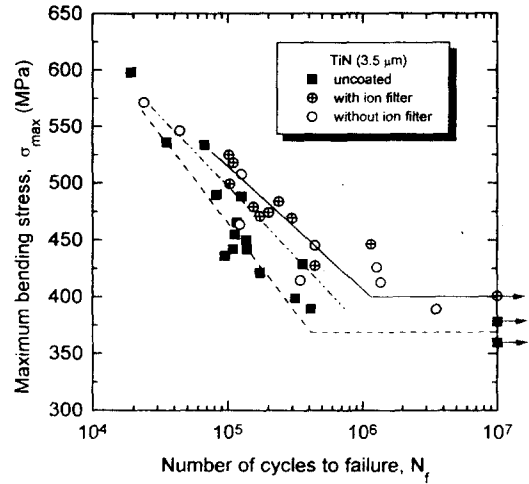
3.3 S-N 특성에 미치는 코팅공정의 영향

Fig. 7은 TiN 코팅 두께 2.5 μm, 3.5 μm 및 5 μm에 대하여 이온 필터의 사용 유무에 따른 코팅 공정을 변수로 하여 비코팅재의 피로강도와 더불어 코팅재의 피로강도 특성을 S-N 곡선으로 나타내고 있다. Fig. 7(a)에서 2.5 μm 두께의 코팅재에 대하여, 이온 필터의 사용이 피로 수명에 미치는 영향을 일정 응력, $\sigma_{max}=450$ MPa에 대하여 고찰하여보자. 즉 $\sigma_{max}=450$ MPa에서 이온 필터를 사용한 경우, 모재의 평균 피로 수명과 비교하여 약 330% 증가를 나타내고 있으며, 이온 필터를 사용하지 않은 공정에 대하여는 약 60%의 증가를 나타내고 있다. 또한, 10^7 반복수에서의 피로강도, 즉 피로한도는 이온 필터의 사용의 경우, 415 MPa, 이온 필터를 사용하지 않은 경우에는 401.7 MPa로써, 모재의 평균 피로 한도 368.9 MPa과 비교하여 각각 14.5% 및 10.3% 증가를 나타내었다.

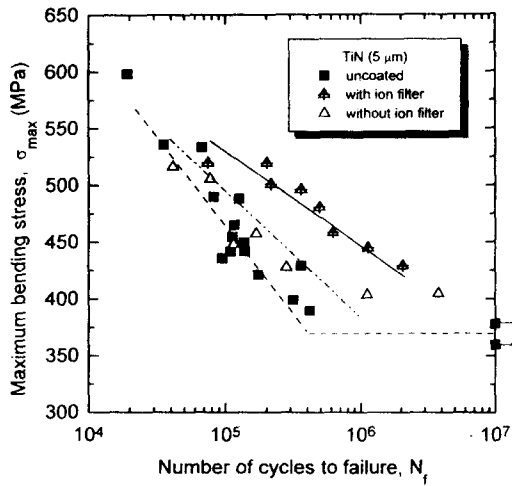
따라서, 이온 필터를 사용한 공정의 경우, 피로 수명이 고응력 단수명 범위에서보다 저응력 장수명 범위에서 크게 향상되는 경향을 보이고 있으며, 이와 같은 현상은 피로과정시 표면 상태가 양호한 고경도의 코팅층이 표면 및 모재부에서 발생하는 피로균열의 발생을 지연시킴으로써 코팅재의 피로 수명을 향상시킨 것으로 판단된다^{17)~19)}. 그리고 Fig. 7(b) 및 Fig. 7(c)에 도시한 바와 같이, 코팅층의 두께가 각각 3.5 μm 및 5 μm의 경우에 있어서도 2.5 μm의 경우와 같이 이온 필터를 사용하여 코팅된 시험편의 피로 강도가 모재 및 일반 AIP 공정으로 처리된 시험편의 피로 강도에 비해 장수명 영역으로 갈수록 현저하게 향상되어 나타나고 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Effect of coating process by ion filter on S-N curves of TiN coated specimens with different coating thickness;

(a) 2.5 μm , (b) 3.5 μm , (c) 5 μm

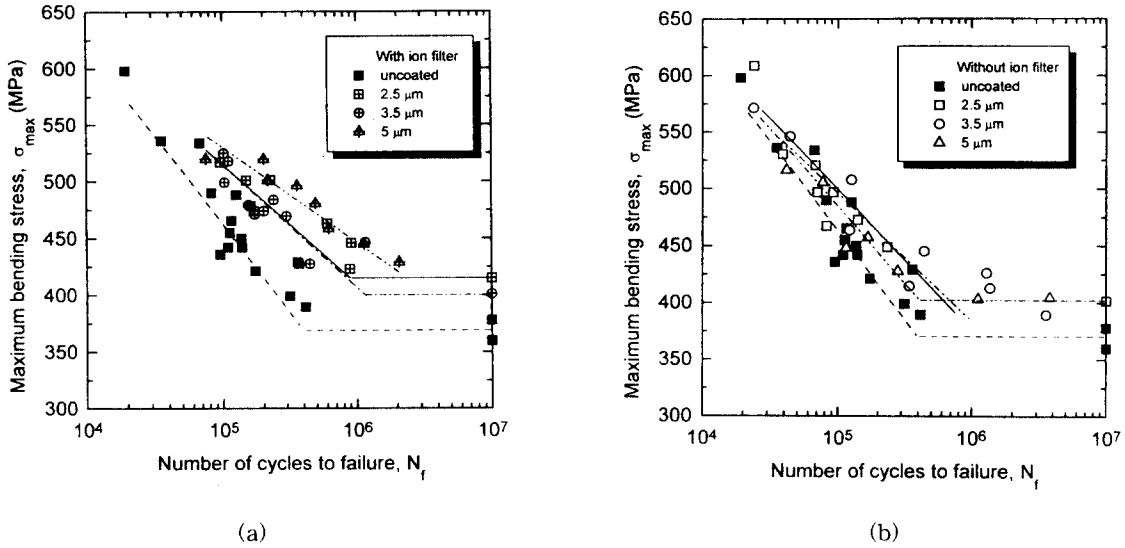


Fig. 8 Effect of coating layer thickness on S-N curves of TiN coated specimens; (a) with ion filter, (b) without ion filter

Fig. 8(a), (b)는 코팅층의 두께에 따른 S-N 선도를 나타내고 있다. Fig. 8(b)의 이온 필터를 사용하지 않은 코팅재의 피로강도는 이온 필터를 채택한 경우와 Fig. 8(a)의 경우와 비교하여 코팅재의 두께가 증가하는 경우(3.5 μm 이상)에도 거의 유사한 피로강도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8(a)의 이온필터를 사용한 경우에는 저응력 레벨에서 피로수명이 크게 증가하고 있다. 이것은 코팅층의 표면 상태, 즉 드롭렛수의 감소 및 표면 거칠기의 감소로 인하여 보다 매끈하게 증착된 고경도의 코팅층이 표면요철을 감소 시키므로써 피로 균열의 발생에 있어서 높은 지연 효과를 나타냄을 시사하고 있다.

3.4 코팅재의 피로균열의 발생 및 성장

터빈 로터 강재의 평활 시험편의 피로균열의 발생은 고사이클 피로의 경우, 표면에서의 국부적인 소성변형에 의한 슬립 생성으로 인하여 피로 균열이 발생하는 경우가 보고되고 있다¹⁰⁾. 또한 이와 같이 반복 변형이 수반되는 재료의 표면에 소성 변

형을 억제시킬 수 있는 세라믹 코팅 등의 표면처리를 실시함으로써 피로균열의 발생을 지연시킬 수 있음이 보고 되고 있다^{13)~19)}. 그러나, 코팅층의 특성, 즉 밀착 상태 및 표면 특성에 따라 피로 균열의 발생이 모재부의 개재물 또는 계면에서 발생하는 경우와 코팅층의 박리 및 찢김등에 의하여 코팅층에서 발생하는 경우 등이 있으며, 코팅층에서 피로균열이 발생되어 모재부로 성장하는 경우에는 오히려 고경도의 코팅층의 인성이 낮으므로 피로수명이 감소하는 경우가 있다¹⁶⁾. 따라서, 이온 필터의 사용과 같은 코팅 공정의 개선을 통한 코팅층의 표면 특성을 향상시킴으로써 코팅재의 피로수명을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다. 본 실험에서는 TiN 코팅재의 피로균열의 발생 거동을 파악하기 위하여 실험 도중에 주기적으로 표면 레프리카를 채취하고 피로시험 종료 후, 주균열(major crack)을 중심으로 역추적하여 피로균열의 발생 및 성장 거동을 관찰하였다.

피로균열의 발생의 경우 모재부에 존재하고 있는 개재물 등이 발생기점이 되어 반복수가 증가함

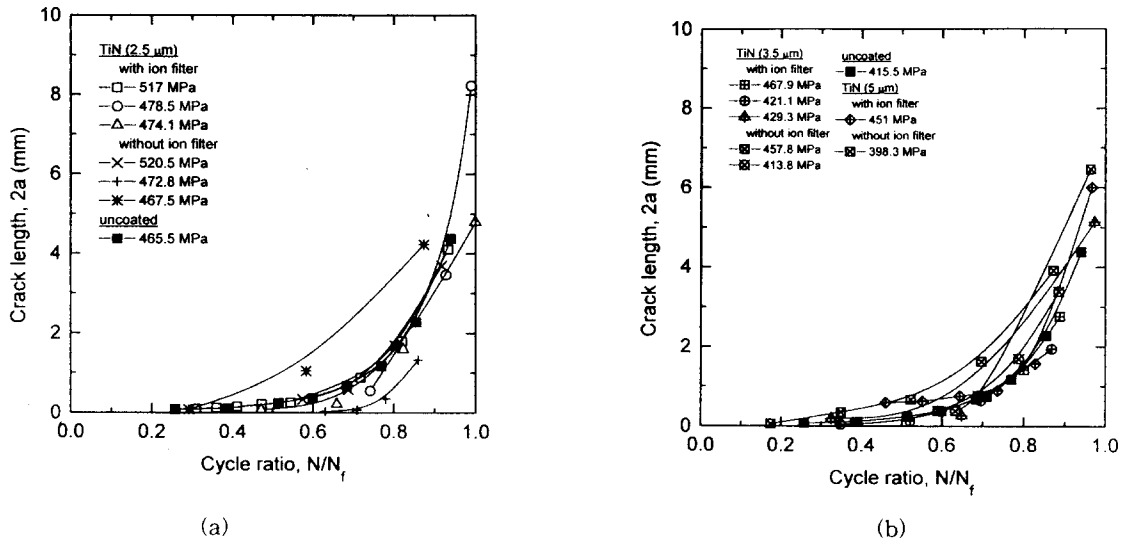


Fig. 9 Relation between major crack length, 2a and cycle ratio, N/N_f

(a) TiN 2.5 μm (b) TiN 3.5 and 5 μm

에 따라 균열이 성장하여 코팅층으로 진전하는 경우가 많다. 이와 같이 고경도의 코팅층의 존재는 코팅시 생성되는 압축 잔류응력^{2),17)}으로 인하여 상대적으로 굽힘 응력하에서 표면에는 작은 응력이 작용하게 되고, 오히려 모재부의 개재물 또는 기공 등의 결함을 기점으로 응력이 집중되어 피로균열이 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 모재부의 피로 파단면 양상은 회전굽힘하의 전형적인 입내 파면 특성을 나타내었으며, 코팅층은 찢김과 같은 취성 재료의 파면 양상을 나타냄을 알 수 있었다.

Fig. 9 (a), (b)는 주균열의 성장과 파단반복수비의 관계를 도시하고 있다. 이온 필터를 사용한 경우의 균열 성장은 비교적 일정 반복수비에서 분산폭이 적게 나타나고 있으나, 이온 필터를 채택하지 않은 경우에는 균열이 불균일하게 성장함으로써 일정 반복수비에서 그 분산폭이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 더욱이, 코팅 공정 개선을 통하여 코팅된 시험편의 경우가 보다 피로 균열이 길게 성장된 후, 파단하는 것을 알 수 있으며, 이는 코팅층의 표면 특성에 따라 재료의 피로수명이 좌우될 수 있음을 암시하는 것으로, 이온 필터의 사용과

같은 코팅 공정의 개선이 각종 산업 분야에서 강도 부재로서의 코팅재의 사용 및 경제성 재고에 필수적 요소임을 알 수 있다.

4. 결 론

이온 필터의 사용 유무에 따라 AIP 방법으로 TiN 코팅된 터빈 로터 강재의 코팅 특성의 분석 및 회전굽힘 피로시험을 실시하여, 코팅 공정의 개선에 따른 코팅층이 피로강도에 미치는 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이온 필터를 사용한 AIP 공정으로 코팅된 TiN 코팅재의 표면은 이온 필터를 사용하지 않은 코팅재와 비교하여 Ti이온으로부터 형성된 드롭렛의 크기 및 밀도가 현저하게 감소하였으며, 또한 표면 거칠기도 코팅 두께의 증가에 따라 커다란 변화없이 일정한 값을 나타내었다.

(2) 코팅 공정 개선에 의한 TiN 코팅재의 비커스 경도는 코팅층의 두께가 약 3.5 μm 에서 안정된 값을 나타냈으며, 이때 경도는 약 1530 정도로서 모재와 비교하여 약 5.6 배 높게 나타났다.

(3) TiN 코팅재의 피로강도는 이온 필터를 사용하여 코팅된 시험편의 경우가 보통의 AIP로 코팅된 시험편 보다도 높게 나타났으며, 특히 저응력 범위에서 피로 수명의 향상이 뚜렷하였다. 또한, $\sigma_{max}=450$ MPa에서 이온 필터를 사용한 경우, 모재의 평균 피로 수명과 비교하여 약 330% 증가를 나타내고 있으며, 이온 필터를 사용하지 않은 공정에 대하여는 약 60%의 증가를 나타내었다.

(4) 코팅재의 피로 균열은 고경도의 TiN 박막 하부의 모재부에 존재하는 개재물에서 발생되어 성장하는 것으로 나타났다. 코팅 공정의 개선에 따라 균일한 코팅층이 존재함으로써, 코팅층의 고경도로 인하여 소성 변형이 구속됨으로써 표면 균열의 발생이 지연되고, 특히 코팅층이 저응력 범위에서 균열의 발생 및 성장을 억제하는 효과가 뚜렷함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 猿木勝司, "界面・表面の材料力學の動向," 日本機械學會誌, Vol. 99, No. 933, pp.23-25, 1996
- 2) 上田重明, "PVD・CVD皮膜の基礎と應用," 表面技術協會, 1994
- 3) Bunshah, R. F. and Deshpandev, C. V., "Hard coatings," Vacuum, Vol. 39, No. 10, pp. 955-965, 1989
- 4) 武井厚, "氣相蒸着(PVD, CVD)による薄膜の製作法," 材料科學, Vol. 30, No. 2, pp. 53-60, 1993
- 5) Tai, C. N. and Koh, E. S., "Macroparticles on TiN Films Prepared by the Arc Ion Plating Process," Surface and Coatings Technology, 43/44, pp.324-335, 1990
- 6) Bendavid, A., Martin, P. J., Netterfield, R. P. and Knder, T. J., "The Properties of TiN films Deposited by Filtered Arc Evaporation," Surface and Coatings Technology, 70, pp. 97-106, 1994
- 7) Wittling, M., Bendavid, A., Martin, P. J. and Swain, M. V., "Influence of Thickness and Substrate on the Hardness and Deformation of TiN Films," Thin Solid Films, 270, pp. 79-85, 1993
- 8) Nishibori, M., "How to Solve Problems of Films Coated by ARC Methods," Surface and Coatings Technology, 52, pp. 229-233, 1992
- 9) Ljungcrantz, H., Hultman, L. and Sundgren, J.-E., "Microstructural Investigation of Droplets in Arc-Evaporated TiN Films," Surface and Coatings Technology, 63, pp. 123-128, 1994
- 10) 서창민, 김경렬, 권현욱, "세라믹 코팅된 1Cr-1Mo-0.25V강재의 피로 균열의 발생 성장기동," 대한기계학회춘계학술대회 초록집, pp. 185-190, 1995
- 11) 김홍우, 김문일, "TiN박막을 코팅한 드릴의 수명향상에 관한 연구," 대한기계 학회논문집, 16-12, pp. 2340-2348, 1992
- 12) Ashley, S., "High-tech Coatings for Turbine Blades," Mechanical Engineering, pp. 66-69, 1992
- 13) Shiozawa, K., and Ohshima, S., "Effect of TiN Coating on Fatigue Strength of Carbon Steel," J. of the Society of Materials Science, Japan, 39-442, pp. 927-932, 1990
- 14) 鹽澤和章, 韓玲, "PVD法によるTiN被覆炭素鋼の低サイクル疲勞強度," 日本機械 學會論文集(A編), 59卷, 559號, pp. 733-740, 1993
- 15) 鹽澤和章, 西野精一, 韓玲, "皮膜の強度評價とTiN被覆鋼の低サイクル疲勞強度," 日本機械學會論文集(A編), 60卷, 569號, pp. 9-16, 1994
- 16) 鹽澤和章, 友叛敏信, 韓玲, 本林功, "窒化チタン被覆炭素鋼の疲勞強度特性に及ぼす被覆割れの影響," 日本機械學會論文集(A編), 60卷, 571號, pp. 626-633, 1994
- 17) Saruki K., Hotta S., and Arai T., "Investigation of Surface Cracks near Fracture Point in VC Coated Steel under Rotating Bending Fatigue," J. of the Society of Materials Science, Japan, 38-429, pp. 651-657, 1989

- 18) Murakami, R., Morikawa, Y., Morimoto, Y., Yoneda, M., and Katsumura, M., "Fatigue Properties and Fatigue Crack Behaviour of Steel with TiNx Films Laminated by Dynamic Mixing Method," J. Soc. Mat. Sci, Japan, Vol. 43-490, pp. 847-852, 1994
- 19) Motita, T., Takahashi, H., Shimizu, M. and Kawasaki, K., "Factors Controlling the Fatigue Strength of Nitrided Titanium," Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol. 20, No. 1, pp. 85-92, 1997