

Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 Plasma 침탄 처리의 영향

朴用勸[†] · 金宅垂* · 池泰求** · 魏明鏞

충북대학교 재료공학과
*보텍스세마이컨덕터(주)
**홍익대학교 재료공학과

Improvement of Microstructural and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy by Plasma Carburization

Yong-Gwon Park[†], Taek-Soo Kim, Tae-Gu Jhee* and Myeong-Yong Wey

Department of Materials Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763

*Hanwha R/D Center, Sinsungdong, Yuseong, Taejeon, 305-345

**School of Materials Science & Engineering Hong-Ik University, Chochiwon 339-701

(2002년 3월 9일 받음, 2002년 4월 19일 최종수정본 받음)

Abstract In order to improve the low wear resistance of Ti-6Al-4V alloy, plasma carburization treatment was newly carried out without consumption of its good specific strength and fatigue life over the temperature. Effect of the plasma carburization was analyzed and compared with the non-treated alloy by microstructural observation, structure characterization and mechanical property test. The plasma treated alloy formed a carburized layer of about 150 μ m in depth from the surface, where a fine and hard particles of TiC and V₄C₃ were homogeneously dispersed through the layer. It was also found that an increase of the wear resistance, fatigue life and hardness, due to the hard and fine dispersoids.

Key words: Ti-6Al-4V alloy, Plasma-carburizing, carburized layer, hardness, wear

1. 서 론

티타늄합금은 철강 및 알루미늄 합금 등을 비롯한 많은 구조재료에 비해 우선 가볍고 또 비강도, 내식성이 우수할 뿐만 아니라, 400~500 $^{\circ}$ C의 고온에서도 기계적 특성이 우수하여, 경량화가 필수적인 군사 및 항공우주산업분야에 주로 적용되어 왔으며 점차 일반산업용으로 응용분야가 확대되고 있다.

그러나 Ti합금은 위와 같이 우수한 특성이 있음에도 불구하고, 경도 및 내마모성이 저하된다는 결점을 가지고 있어 이를 개선하기 위한 표면개질 처리에 대한 연구가 주목받고 있다.¹⁾ 경도 및 내마모성을 개선하기 위한 일반적인 표면경화법으로는 질화법^{2~5)}, 침탄법^{6,7)}, 용사법⁸⁾ 등을 들 수 있다. 그러나 Ti합금에 대한 이러한 표면경화법으로는 지금까지 질화법을 이용한 연구결과는 보고되고 있으나, 침탄법에 대한 연구는 거의 없는 것이 현실이다. 그 이유는 Ti합금은 일반적으로 난침탄재로 알려져 왔기 때문으로 생각된다. 왜냐하면, Ti합금을 침탄하기 위해 침탄전 표면연마의 여하한 방법에도 불구하고, Ti의 산소에 대한 친화력이 강하여 침탄재 표면에 얇은 산화막이 형성되어, 이 산화막

이 침탄처리시 탄소의 침입을 저지하는 작용을 하기 때문에 좀처럼 침탄이 이루어지지 않는 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 침탄법중 플라즈마이온 침탄법을 이용하여 표면경화의 목적을 이루고, 나아가서 Ti합금의 큰 결점인 경도와 내마모성은 물론 내피로성등의 기계적 특성을 개선함을 목적으로 수행하였다. 플라즈마 침탄법을 이용하고자한 이유는, Ti합금에 대한 침탄처리 전에 진공분위기 중에서 먼저 이온에칭으로 이미 형성되어 있는 시료 표면의 얇은 산화막을 제거한 다음, 순수한 모재의 표면에 침탄 처리가 가능하기 때문이다.

2. 실험 방법

2.1 시편준비

본 실험에 이용한 모재는 구조용 및 고온용으로 널리 이용되고 있는 Ti-6Al-4V합금으로서 화학성분은 Table. 1과 같다.

시편으로는 두께 1.7 mm의 Ti-6Al-4V합금의 판재를 사용했다. 이 판재를 기계가공한 후 기계적특성과 피로시험을 위한 시편을 제작하였다. 플라즈마 침탄처리전에 암연조직 제거와 균질화를 목적으로 약 1100 $^{\circ}$ C에서 30분 용체화처

[†] E-mail: pyg1224@lycos.co.kr

Table 1. Chemical composition of Ti-6Al-4V specimen

										(wt.%)
Al	V	Fe	Cu	Sn	O	N	C	H	Y	Ti
6.22	4.01	0.15	0.003	0.002	0.14	0.004	0.004	0.0072	0.001	bal.

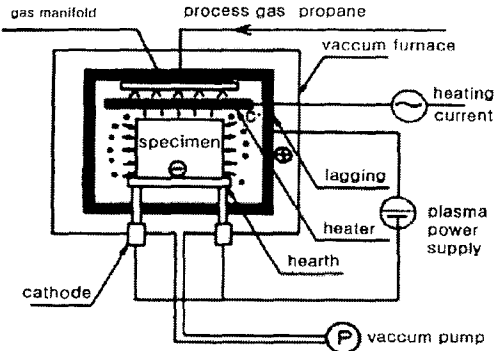


Fig. 1. Schematic diagram for plasma carburizing system.

리를 한 후 수냉 하였으며, 강도와 연신율의 극대화를 유도하기 위하여 955℃에서 30분 유지한 후 노냉하여, 등축정과 층상의 혼합조직을 형성시켰다. 이들 시편의 표면을 에머리 페퍼 #1200까지 연마한 다음 0.3μm 알루미나 분말 연마제로 연마한 후, 아세톤으로 초음파 세척하여 플라즈마 침탄처리를 하였다.

2.2 플라즈마 침탄처리

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 플라즈마 침탄장치의 개략도로써, 시료를 시료대에 설치하고 로내를 6 Pa로 감압시킨 다음, 1100℃까지 승온 시킨 후, H₂가스(유량 4.17×10⁻⁶m³/s)와 Ar(유량 4.17×10⁻⁶m³/s)의 혼합가스를 사용해서 40분간 스퍼터링하여 시료의 표면을 크리닝했다. 그후에 침탄가스를 로내에 유입하여 로내압력을 약 250 Pa, 글로우 방전전류밀도 0.05 A/cm²으로 유지하면서 플라즈마 침탄처리를 하였다. 침탄가스로서는 메탄농도 1.7 vol%의 CH₄-Ar-H₂ 혼합가스를 사용했다. 혼합가스의 유량은 8.94×10⁻⁶m³/s이고, 처리온도 900℃, 처리시간 21.6 ks로 하였다. 처리온도는 로내에 부착시킨 열전대로 제어하였다.

2.3 기계적 특성조사

침탄효과의 검토를 위하여 미세조직, 경도, 마모 및 피로 특성을 조사하였다. 이때 미세 조직의 관찰을 위하여 시편을 기계적인 연마를 한 후 Kroll 용액으로 부식시키고 광학현미경을 사용하여 침탄전후의 합금조직을 관찰하였다. 결정구조해석을 위하여 무침탄 시편은 XRD로, 침탄시편은 GXRD(Scin. Tag. DMS-200)를 이용하여 분석하였다. 이때 2θ 범위는 20°~70°, 전압 및 전류는 50 kV, 150 mA로 고정하고, 주사속도를 5°/min로 하여 회절분석 하였다. 경도측정에는 마이크로 비커스 경도계(AKASHI社, HM-122)를 이용하였는데, 가해진 하중은 25 gf로 20초간 하중을 유지하면서 침탄 표면에서부터 시편의 중심부 쪽으로 20 μm의 일정간격으로 측정하였다. 마모특성을 조사하기

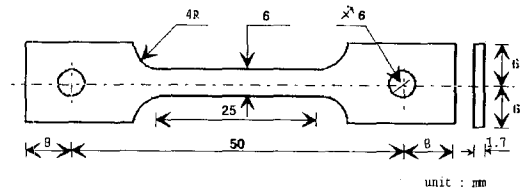


Fig. 2. Dimension of fatigue specimens.

위해 핀온디스크형 마모시험기(CSEM, CH-2007)를 이용하여 실시하였으며, 직경 6.0 mm의 SiC 구를 이용하여 ball의 회전속도는 5.0 cm/s, 하중은 5 N의 조건에서 마모 시험을 하였다.

2.4 피로특성조사

피로특성검토를 위하여, Fig. 2와 같이 두께 1.7 mm, 표점거리 50 mm의 ASTM 규격의 축소형인 판상시편으로 제작하였다.

피로시험은 고온특성 측정이 가능한 10톤 용량의 Electro-hydraulic Material Testing machine (Shirnadzu 사)을 이용하여 상온 및 500℃에서 하였으며, 이때 피로시험조건은 응력범위 70~250 MPa, 응력비가 0.1, 주파수 20 Hz이었다. 피로시편의 파단양상과 피로특성은 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 이때 비교적 얇은 시편을 사용할 경우 나타날 수도 있는 buckling현상은 전혀 발생하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Fig. 3은 Ti-6Al-4V 합금의 광학현미경에 의한 미세조직 사진이다. 그림(a)는 침탄전 시편(미침탄시편)의 조직 사진이며, 그림(b)는 침탄처리한 시편의 조직사진이다. 조직사진을 보아 알 수 있듯이 미침탄 시편인 그림(a)의 조직은 조직 대부분을 차지하고 있는 흰부분의 α-Ti상과 일부 β-Ti상이 혼재된 전형적인 Ti-6Al-4V 합금의 조직을 나타내고 있는데, 이때의 결정립 크기는 약 600μm였다. 한편 침탄처리된 시편의 그림(b)는 표면으로부터 약 150μm 정도의 침탄층을 이루고 있음을 알 수 있다.

이러한 조직을 확인하기 위하여, (a)와 (b) 두 시편을 GXRD로 각 시편의 표면조직을 분석하였는데, Fig. 4는 그 분석결과다. 미침탄체인(a)를 보면 조직의 대부분을 차지했던 α-Ti상에 의한 피크가 거의 전부를 나타내고 있는 것에 비해, 침탄체인(b)의 분석결과를 보면, TiC 및 V₂C₃의 탄화물피크가 크게 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 난 침탄재로 알려진 Ti합금도 본 실험에서 시도한 플라즈마 침탄 방법으로 쉽게 침탄이 이루어져, 모재의 Ti

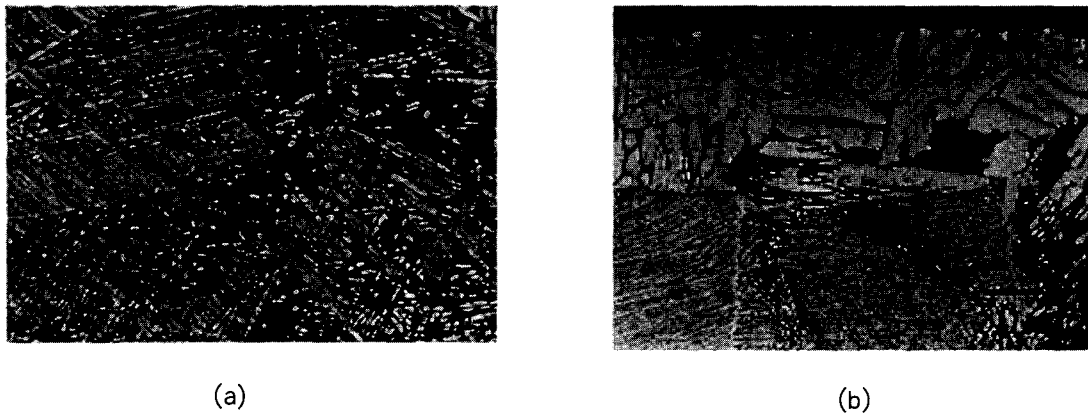


Fig. 3. Microstructure of Ti-6Al-4V alloy (a)non-carburized and (b)carburized

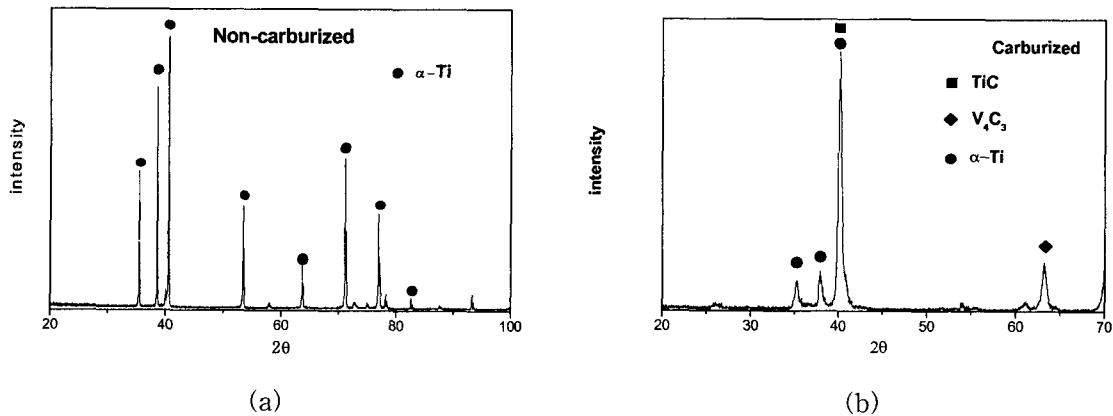


Fig. 4. XRD patterns of carburized Ti-6Al-4V alloy (a)non-carburized and (b)carburized

와 V 원소가 탄소(C)와의 친화력으로 인하여 TiC 및 V_4C_3 탄화물을 형성하였다고 사료된다.

3.2 기계적성질

3.2.1 경도 분포

Table. 2는 플라즈마 침탄전·후 시편의 표면경도를 측정한 결과다. 침탄전의 표면경도값은 460 Hv이고 침탄후의 표면경도는 약 1600 Hv로 측정되었다.

Fig. 5는 침탄된 시료의 단면 경도를 나타낸 것이다. 이 그림은 침탄처리된 시료의 표면에서부터 시편의 중심부 쪽으로 약 20 μm 의 일정간격으로 측정된 결과로, 깊이의 증가에 따라 경도가 점차로 감소하다가 표면으로부터 약 150 μm 이후에는 일정한 값으로 수렴되었다. 이와 같은 사실은 본 실험에서 수행한 플라즈마 침탄에 의해 표면으로부터 약 150 μm 까지 침탄 되었음을 의미하며, 이것은 앞의 Fig. 3 (b)의 조직사진의 결과와 일치함을 알 수 있다.

3.2.2 마모특성

Fig. 6은 침탄전·후의 시편을 마모시험기를 이용하여

Table 2. Surface Hardness of Ti-6Al-4V alloy

classification	Surface Hardness(Hv)
non-carburized	460
carburized	1600

시험한 결과다. 미처리 시편의 경우 왕복운동 회수의 증가에 따라 거의 직선적으로 마모량이 증가하는 반면, 플라즈마 침탄처리한 시편의 경우는 미처리재 시편보다 아주 적게 마모되는 것을 알 수 있다. 즉, 왕복운동회수가 약 700사이클까지는 미침탄재의 경우에 비해, 내마모성이 크게 향상되었음을 의미한다. 이와 같은 사실은 플라즈마 침탄시 형성된 고경도 탄화물의 내마모 효과에 기인하여 내마모성이 향상된 것을 알 수 있다.

3.3 피로특성

Fig. 7은 침탄처리 전후의 시편을 상온과 500 $^{\circ}\text{C}$ 에서 피로시험한 결과를 응력과 사이클 수와의 관계로 정리한 결과인데, 전형적인 S-N곡선을 나타내었음을 알 수 있다. 상온 시험의 경우, 침탄처리에 의한 피로수명의 대폭적인 증가를 확인할 수 있다. 예를 들어 200 MPa의 응력에서 상온시험의 경우 미처리시편은 20,678 사이클, 침탄처리한 시편은 46,789 사이클로 침탄을 통하여 약 2.5배의 피로수명 향상을 나타내고 있으며, 고온시험의 경우도 미처리시 42,275 사이클, 침탄후 87,043사이클로 침탄처리시 약 2.0배의 피로수명 향상을 나타냈다. 침탄시편의 피로강도가 높은 이유는 이온질화처리의 경우와 유사하게¹⁰⁾ 침탄층에 형성된 균일하고 미세한 탄화물이 고주기 피로시험시 균열생성을 지연시켜 피로수명향상에 기여하였기 때문이라 사료된다. 한

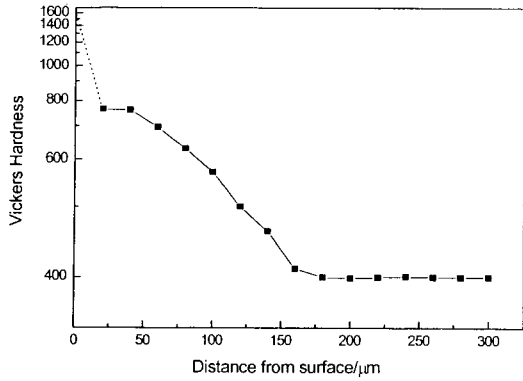


Fig. 5. Hardness variation of carburized Ti-6Al-4V specimen.

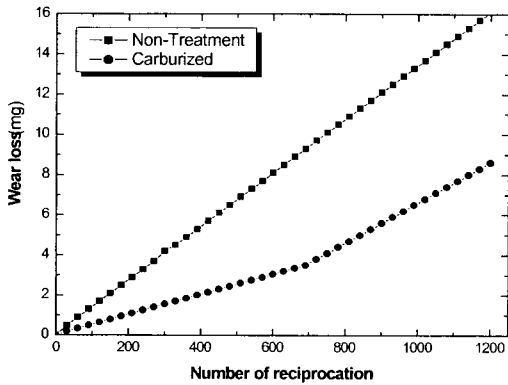
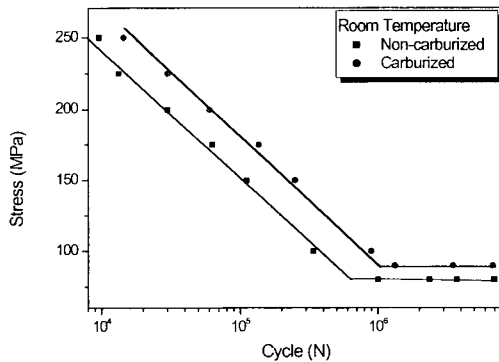


Fig. 6. Effect of plasma carburizing on the wear loss by pin on disc wear test

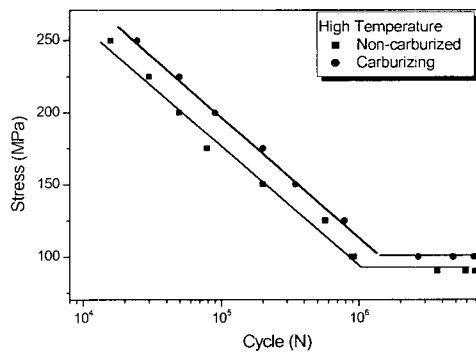
편, 상온과 비교하여 고온에서 낮은 피로강도향상은 동일한 응력조건에서 증가된 고온 연화현상에 기인한다. 또한 침탄재의 경우 고온피로강도가 상온피로강도보다 비슷하거나 약간 높았는데, 이는 고온에서 비교적 안정한 TiC 및 V_4C_3 화합물의 강화효과와 고온피로시험중 야기되는 전위회복의 복합현상에 기인된다고 사료된다.

한편 Basquin식은 응력-수명(S-N) data가 log-log scale에서 직선적인 관계를 갖는다고 하였는데, 응력진폭(σ_a)과 피로수명(N_f)의 관계는 다음식으로 표현된다.

$$\Delta \epsilon_p / 2 = \sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b \quad \# 2N_f = 1 \quad (1)$$



(a) Room Temp.



(b) 500°C

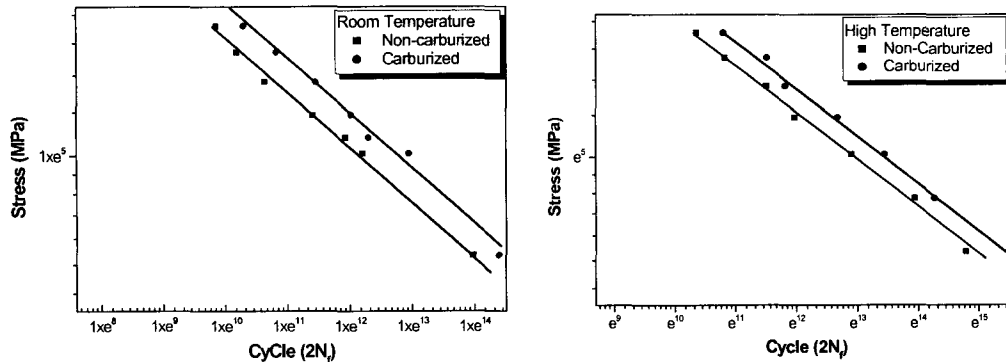
Fig. 7. Relationship between failure cycle vs. stress.

여기서 σ_f' : 피로강도계수 (fatigue strength coefficient)
위 식의 양변에 로그를 취해보면, 다음의 (2) 식과 같은 일차함수의 형태가 얻어진다.

$$Y = \log \sigma = \log \sigma_f' + \text{blog} (2N_f) \quad (2)$$

따라서 피로시험 결과를 (2) 식에 대입하여 최소자승법으로 얻은 결과를 Fig. 8에 나타내었으며 그림에서와 같이 응력-수명과의 관계를 log-log scale한 결과 직선의 그래프를 얻을 수 있었다. 피로수명이 표면 강도에 관련된다면 시편 전체의 조직과 관련되는 인장강도 보다는 표면의 강도를 나타내는 경도값과 비교할 수 있을 것이다. 따라서 침탄처리와 같은 표면처리재의 경우는 인장강도 보다는 표면에서의 경도값이 Basquin equation의 σ_f' 값을 더욱 잘 나타낼 수 있다고 사료된다.

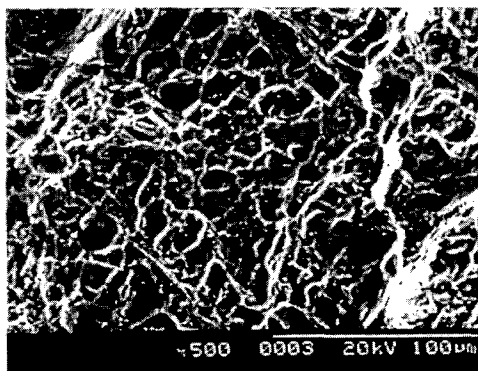
Fig. 9는 각각 피로시편의 내부의 파면사진이다. 피로시편 내부의 파면조직을 관찰하여 파면특성을 검토한 결과, 미침탄재의 상온과 500°C의 시편 (a)와 (c)에서는 전반적으로 약간의 덩플과 공공이 수반되는 전형적인 연성파괴현상이 주류인 반면, 플라즈마 침탄처리된 시편 (b)와 (d)의 파면면에서는 표면 침탄처리부의 높은 경도 때문에 내부의 연한 상과 lamellar계면에 응력이 집중되어 공동이 생성, 전파되어 파괴된 것이라 생각된다. 일반적으로 피로파면에 나타나는 파면형상은 물결무늬 형상의 striation형, striation형과 유사하지만 불규칙적인 striation like pattern형, 매우 불규칙한 형태로 tire track형의 세가지 형태로 분류된다.¹¹⁾ striation형은 최대인장응력과 수직으로 전진하는 균열 끝이 존재하였던 위치를 연속적으로 나타내며 연성과 취에서 쉽게 볼 수 있다. 경우에 따라서는 striation이 없는 피로파괴도 있는데 이것은 striation 간격이 관찰할 수 없을 정도로 작거나 균열선단에서의 연성이 부족하여 큰 무늬가 생길 수 없기 때문이다. 본 연구에서는 striation형과 유사하면서도 불규칙적으로 나타난 것으로 보아 striation like pattern형으로 볼 수 있으며, 이러한 것들이 부분적으로 발생한 것은 취성파괴와 동시에 연성파괴가 진행된 것이라 판단된다.



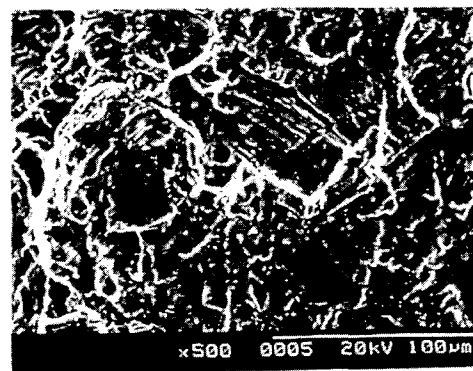
(a) Room Temp.

(b) 500°C

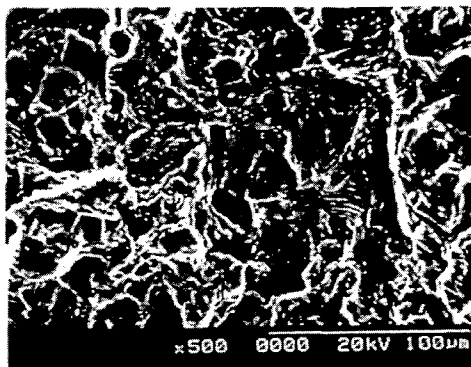
Fig. 8. Relationship between stress and failure cycle number($N_f \times 2$).



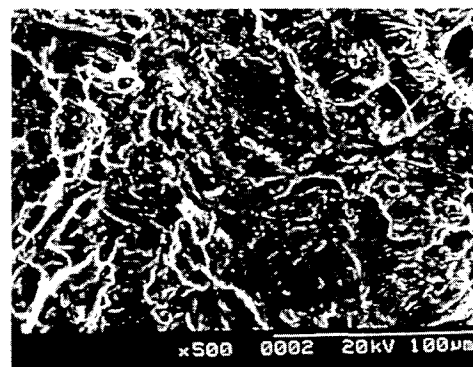
(a) Non-carburized(Room Temp.)



(b) carburized(Room Temp.)



(c) Non-carburized(500°C)



(d) carburized(500°C)

Fig. 9. Fractography of carburized Ti-6Al-4V alloy.

4. 결 론

플라즈마 침탄처리한 Ti-6Al-4V 합금의 미세 조직 및 기계적 특성의 변화를 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 900°C, 250 MPa의 가스압에서 약 21.6 ks동안 플라즈마 침탄처리 결과, 약 150 µm 깊이의 침탄층을 얻었다.
- 2) 침탄층의 최외 표면의 경도값은 Hv 1600이었는데, 이와 같은 높은 경도값은 침탄으로 인한 TiC 및 V₄C₃의 탄

화물형성에 기인된 것으로 사료된다.

- 3) 침탄층에 형성된 탄화물은 마모특성의 향상에 크게 기여하였다.

4) 침탄시편의 피로강도는 미침탄재의 경우에 비해 상온에서 약 2.5배, 고온에서 약 2.0배 이상 향상되었다. 이것은 침탄 표면의 높은 경도가 고주기 피로시험시 균열생성과 전파를 어느 정도 지연시킨 때문이라 생각된다.

- 5) 피로시험 결과를 Basquin equation에 적용하여 분석해 본 결과, 침탄재와 같은 표면경화 처리재는 표면경도와

피로수명과는 밀접한 상관관계가 있음을 암시한다고 사료된다.

6) 침탄재는 striation like pattern 형태의 전형적인 피로파단양상을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 中山武典, 和田恭典, 井戸秀和 : 神戸製鋼技報, **43**, 71 (1993).
2. B. Berghaus : U.S. Patent 3181029, (1965)
3. Edward Rolinski : Mater. Sci. & Eng., **A108**, 37 (1989).
4. T.M. Muraleedharan, E.I. Meletis : Thin Solid Films, **221**, 104 (1992).
5. A. Raveh, R. Avni : Thin Solid Films, **186**, 241 (1990).
6. 岡本善四郎, 星加洋, 藥師寺正雄 : 熱處理, **40**, 25 (2001).
7. 岡本善四郎, 星加洋, 藥師寺正雄 : 熱處理, **40**, 88 (2001).
8. E.W. Turns, J.W. Browning and R.L. Jones : Plating and Surface Finishing, **62**, 443 (1975).
9. J.F. Moulder, W.F. Stickle, P.E. Sobol, K.D. Bomben : "Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy", Published by Physical Electronics, Inc., 1995.
10. 喜多, 松田 : 金屬材料 **15**, 26 (1975).
11. 黒木剛司郎, 大森宮次郎 : 金屬の強度と破壊 **41** (1997).