

Ti-6Al-4V재의 UNSM처리에 의한 회전굽힘피로특성변화

서창민* · 편영식** · 서민수***

*경북대학교 공과대학 기계공학부,

**선문대학교 공과대학 기계공학부,

***국민대학교 공과대학 신소재공학부

Variation of Rotating Bending Fatigue Characteristics by UNSM on Ti-6Al-4V

Chang-Min Suh*, Young-Sik Pyoun** and Min-Soo Suh***

*School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea,

**School of Mechanical Engineering, Sun Moon University, Asan, Chungnam, Korea,

*** School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea,

KEY WORDS: Rotating bending fatigue test 회전굽힘피로시험, S-N curve S-N 곡선, Ultrasonic nanocrystal surface modification technology 초음파나노표면처리기술, Compressive residual stress, 압축잔류응력

ABSTRACT: In order to analyze feasibility of replacing a conventional 6-mm Ti bar with a 5-mm bar, a series of rotating bending fatigue tests were carried out on Ti-6Al-4V bars by strengthening the fatigue performance using a special technique called UNSM (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification). The results of S-N curves clearly showed that the performance of the 5-mm titanium specimen was similar to that of the 6-mm specimen when the UNSM treatment was applied. The 5-mm treated specimen converged with small scattering band into the linear line of the non-treated 6-mm one. Below the fatigue life of 10^5 cycles, the UNSM treatment did not show any significant superiority in the bending stress and fatigue life. However, over the fatigue life of 10^5 cycles, the effect of UNSM was superior for each fatigue life, and the bending stress became longer and higher than that of the untreated one. In the case of 6-mm Ti-bar with UNSM, the fatigue limit was about 592 MPa, and there was fatigue strength increase of about 30.7% at the fatigue life of 10^4 cycles compared to the untreated 6-mm bar. Therefore, the compressive residual stress made by the UNSM in Ti-6Al-4V increased the fatigue strength by more than 30%.

1. 서 론

Ti는 비중에 비하여 강도가 크므로 항공기, 로켓재료로 높게 평가되고 있다. 또 Ti는 내식성이 18-8 스테인리스강보다 우수하다. 크리프강도가 큰 Ti는 항공기의 고속화, 경량화 더불어 미래의 항공기 및 우주산업에 이용도가 높아지는 경향이 있다. 또 외과수술용 체내 삽입용, 치과용 임플란트, 스포츠용 등에도 널리 사용되고, 특히 균열발생의 특징에 관하여 많은 연구대상이 되고 있다 (Chai, 2006; Petit et al., 2007; Ochi et al., 2011). 본 연구에서는 최근 개발된 표면처리기술 UNSM에 의한 Ti-6Al-4V재의 회전굽힘피로시험 결과의 축적과 임프란트의 소형화에 따른 직경 6mm와 5mm의 Ti-6Al-4V재의 UNSM에 의한 효과를 연구하였다.

2. 실험방법과 시험편

2.1 초음파나노표면개질(UNSM)기술

피로강도 향상에 주효한 것이 큰 압축잔류응력(Compressive

residual stress)과 표면층의 Severe plastic deformation(SPD)에 의한 미세화조직(Nanocrystal)이라는 것이 확인되면서 이를 구현하기 위한 많은 기술들이 개발되고 있다. 독일의 Deep rolling (DP), 미국의 Laser shot peening(LSP)과 Low plasticity burnishing(LPBI), 프랑스의 Ultrasonic shot peening(USP), 일본의 Micro shot peening (MSP) 등이 이러한 목적으로 개발된 표면처리기술이다. 현재도 미국 국방분야, 특히 항공기분야에서 이러한 기술을 응용, 확대하는 것이 핵심기술개발이다(Altenberger, 2005; Prevey and Jayaraman, 2005; Watanabe et al., 2003, Thomas, 2002).

국내에서 개발된 UNSM 기술은 초음파 진동에너지를 응용하여 아주 큰 정적 및 동적하중이 부가된 볼(Ball)로 1초에 20,000번 이상의 타격 (1,000~10,000회/mm² 정도)을 금속표면에 가하여, 표면을 SPD로 되게 한다. 이로 인해 표면층의 미세조직을 나노 결정 조직으로 개질함과 동시에 아주 크고 깊은 압축잔류응력 등을 부가하는 국내개발 특허기술이다(Suh et al., 2007; 편영식 등, 2009).

이 UNSM의 기본적인 가공시스템은 초음파 주파수를 발생시

키는 Generator, 정적하중을 가하는 Air compressor, 기계적인 초음파를 발생시키는 Transducer, 발생된 초음파를 증폭시키는 Booster, 증폭된 초음파를 손실없이 전달하는 Horn, 초음파 진동에너지를 최종적으로 가공물에 전달하는 Ball tip 등으로 구성되어 있고, 이 UNSM 장치를 공작기계(선반, 머시닝센터 등)에 부착하여 환형물, 평면형상 및 자유곡면 형상물 등을 가공처리할 수 있다.

Table 1 Condition of UNSM treatment

Equipment	UNSM
Tip material	WC
Tip diameter(mm)	2.8
Amplitude(μ m)	30
Load (N)	30
Number of strikes(mm ²)	53,000

Table 2 Variation of roughness before and after UNSM

	Before	After
Hardness (H_v , 300g)	312	393
Roughness (R_a)	0.71	0.22

이 UNSM 기술을 적용하면 깊고 큰 압축잔류응력의 형성, 표면의 미소 텀플형성, 표면경도 증가, 결정의 나노화 등의 특성으로 고사이클피로(High cycle fatigue, HCF)와 기가사이클피로(Very high cycle fatigue, VHCF, Giga cycle fatigue), SCC (Stress corrosion cracking) 등의 분야에서 피로강도의 증가가 매우 크고, 마찰계수 감소로 마모특성 향상 및 내마모성이 매우 좋아졌다(Suh, et al., 2007; 편영식 등, 2009). 본 연구에서는 Table 1과 같은 조건으로 UNSM처리하여 Ti시험편을 제작, 사용하였다. 그러면 Table 2와 같은 표면경도가 상승하였고, 표면조도가 감소하는 좋은 기계적인 특성을 얻을 수 있었다. 이렇게 제작된 시험편으로 인장시험과 피로시험을 실시하였다. 이 때 미처리 Ti재는 사포 200번부터 100번씩 증가시키면서 2000번까지 연마한 후 버핑하여 선반가공에 의한 영향을 최대한 없애도록 노력하였다. 그러나 UNSM처리재는 선반가공후 처리하여 가공공정을 줄이는 시도도 병행하였다

2.2 시험편의 형상 및 처리조건

본 연구에 사용된 Ti는 고급 Ti재(Ti-6Al-4V, Extra low interstitial; Al 5.5~6.5%, V 4%)를 함유하였다. 본 연구에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 $d=6mm$ (혹은 $d=5mm$)인 회전굽힘용 피로시험편($R=1$)을 나타내었다.

3. 실험결과와 고찰

3.1 인장시험

Fig. 2a는 $d=6mm$ 인 미처리 Ti 시험편과 $d=5mm$ 인 UNSM 처리재의 인장시험결과를 나타내었다. 이 그림에서 직경의 차이가 있으므로 두 종류 시험편의 $P-\delta$ 선도에서는 크게 차이가 생겼다.

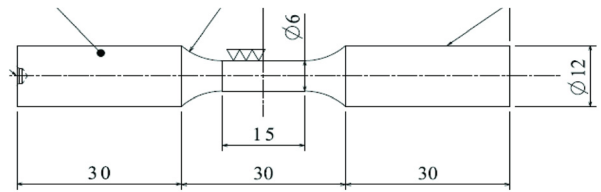


Fig. 1 Configuration for rotary bending fatigue test specimen (unit; mm)

Fig. 2b는 Fig. 2a와 같은 2개의 시험편의 자료를 응력과 변형률로 다시 정리하여 비교한 것이다. Fig. 2a과 달리 2개의 직경이 다른 시험편의 최대인장응력은 비슷한 990MPa 정도이다. 여기서 UNSM의 효과는 인장시험에서 잘 나타나지 않았다.

인장시험편의 중앙부에서 인장 파단되었으며 보통 연성이 큰 연강(Mild steel)재와 유사하게 Necking부가 뚜렷하게 나타났고, 부분적인 Cup and cone의 형상을 잘 나타내었다. 미처리 Ti재($d=6mm$)의 연신율은 22%($\delta=3.3mm$, $L=15mm$), UNSM 처리된 Ti재(5mm)의 연신율은 16.7%($\delta=2.5mm$, $L=15mm$) 정도이다.

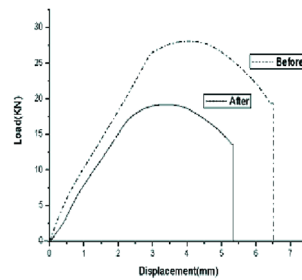


Fig. 2a Comparison of $P-\delta$ (load-deformation) curve between untreated 6mm and UNSM treated 5 mm tensile specimen

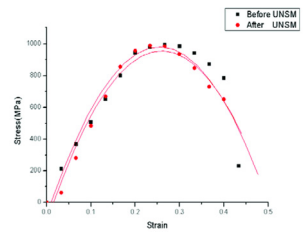


Fig. 2b Comparison of stress-strain curve

3.2 경도시험

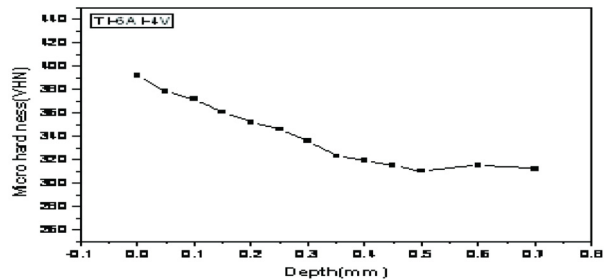


Fig. 3 Variation of Micro-Vickers hardness from surface to depth

Fig. 3은 UNSM처리를 실시한 시험편을 300g 하중으로 표면상(H_v 393)에서 깊이방향에 따라 측정된 비커스 경도치의 변화를 나타내었다. 이 경도치는 UNSM처리한 시편의 단면을 에머리지 2000번까지 연마한 후 일정한 간격으로 측정하였다. 이 결과 UNSM처리를 하면 미처리재(H_v 312)보다 표면에서는 약 26% 정도 경도치가 증가하였다가 점차 깊이방향으로 경도치가 감소

하는 경향을 나타내었는데 이 경향은 다른 재료의 연구결과와도 유사하였다(Suh et al., 2010a; Suh et al., 2010b; Suh et al., 2011).

3.3 회전굽힘피로시험(Bending load, R=-1, 3150rpm)

3.3.1 하중-피로수명 곡선

Fig. 4a는 미처리재(직경 6mm)와 UNSM 처리재(직경 5mm와 6mm)와의 하중-피로파단수명곡선(W-N curves)을 나타내었고, Fig. 4b는 응력-피로파단수명곡선(S-N curves)을 나타내었다.

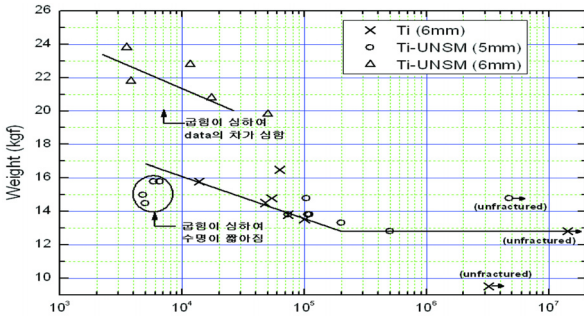


Fig. 4a Weight vs. fracture life (W-N) curves

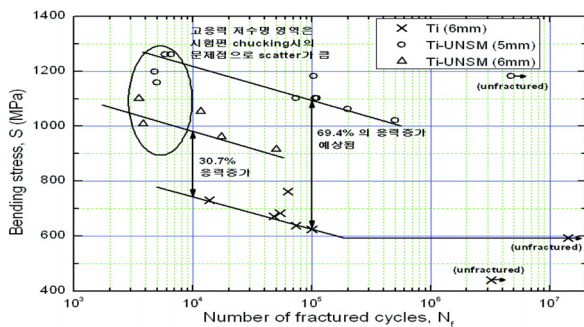


Fig. 4b S-N curves with the bending stress

Fig. 4a에서 “X”로 나타난 6mm 미처리재의 피로한도는 약 12.8kgf이며 1.43x10⁷에서도 파단되지 않았다. 그것 외에 6개의 미처리재의 파단곡선은 직선상에 잘 수렴하였다.

그런데 “O”로 나타난 d=5mm인 UNSM 처리 Ti체는 6mm 미처리재의 직선상에 Scatter가 다소 생기면서 수렴되었다. 특히 고응력 저수명 영역에서는 피로시험편의 굽힘이 심하며 “X”의 Data보다 수명이 다소 짧아지는 경향이 생겼지만 10⁵이상의 수명영역에서는 UNSM효과가 잘 나타나서 피로수명이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 d=5mm인 경우는 직경에 비하여 하중이 크므로 시험편의 처짐현상이 매우 심하여 피로시험의 Chucking이 어려웠다.

Fig. 4a의 그림 중에 “Δ”로 나타난 것은 d=6mm 인 Ti 시험편을 UNSM처리하여 하중-피로수명곡선에서 UNSM효과가 얼마나 크게 나타나는지를 비교한 것이다. “Δ”로 나타난 UNSM 처리시험편은 d=6mm 이지만 UNSM효과가 생겨 10⁴ 피로수명에서 피로강도가 약 31% 증가하는 경향을 나타내었다. 이 “Δ” Data도 고응력 저수명 영역에서는 굽힘이 심하므로 Scatter가 큼을 알 수 있다. 5개로 제한된 시험편이므로 장수명 영역의 자

료를 얻지 못하였다.

3.3.2 S-N 곡선

Fig. 4b는 피로시험에서 얻는 전통적인 응력과 피로수명곡선인 S-N curves이다. 여기에 “X표”로 나타난 6mm 미처리 Ti시험편은 Scatter가 적어지며 직선상에 잘 수렴되었으며 피로한도는 약 592MPa이다. 이 6mm 직경의 피로시험편에 UNSM처리를 실시하여 피로시험하면 “Δ표”로 나타난 data와 함께 실험결과가 얻어졌다. 다소 Scatter Band가 크게 나타났지만 미처리재보다 피로수명 10⁴회에서 피로강도가 약 30.7% 증가하였다.

이와 같이 고급 Ti재인 Ti-6Al-4V에 UNSM처리를 하여 표면에 압축잔류응력을 형성시키면 피로강도가 30% 이상 증가하는 것은 매우 우수한 표면개질이 된 것으로 평가된다. 이러한 UNSM에 의한 피로강도의 증가경향은 다른 재료의 연구에서도 얻어졌다(Suh et al., 2010a; Suh et al., 2010b; Suh et al., 2011).

Fig. 4b의 그림 상에는 “O표”로 나타난 Data는 d=5mm인 Ti 피로시험편에 UNSM처리를 한 경우의 S-N곡선이다. 이 “O표”로 나타난 Data도 Scatter band가 “X표”로 나타난 Data보다 크지만 이 S-N 곡선에서 10⁵ 피로수명에서 약 69.4%의 피로강도 증가 효과가 생겼다. 그러나 높은 굽힘응력으로 Chucking시의 어려움으로 피로시험이 쉽지 않았다.

Fig. 4a에서 굽힘하중으로 나타내며 “X표와 O표”가 서로 중첩 혹은 비슷한 자료로 수렴되었지만 Fig. 4b의 S-N곡선으로 나타내면 같은 수명에서 피로강도가 69.4%증가함을 알 수 있다.

이러한 일련의 피로시험에서 특히 d=5mm인 경우는 UNSM 효과가 매우 좋아 큰 하중에도 잘 지탱하였다. 즉 d=6mm인 시험편과 같은 하중에서 비슷한 피로수명을 갖던지 장수명 영역에서는 그 이상의 피로수명을 나타내어 UNSM 효과가 매우 큼을 입증하였다. 그러나 피로시험 중 직경이 적고 하중이 큰 UNSM 처리재(d=5mm, d=6mm)의 Chucking과 피로시험에는 처짐(Deflection)이 매우 심하였지만 잘 지탱하였다.

3.3.3 미처리재의 거시적인 파단 특징

미처리 Ti체는 사포 200번부터 100번씩 증가시키면서 2000번까지 연마한 후 버핑하여 선반가공에 의한 영향을 최대한 없애도록 노력하였다. 응력 차이에 큰 영향 없이 Single crack으로 표면상에서 피로균열이 발생(Surface originating fatigue crack)하여 성장, 피로파단되는 파면의 특징을 가졌다.

3.3.4 UNSM처리재(d=5mm)의 거시적인 파단특징

UNSM 처리재(d=5mm) 피로시험편의 특징은 Fig. 5와 같이 피로파단수에 가깝게 되면 큰 열이 발생하면서 시험편 중앙부 표면상에 남아있는 기름이 타는 냄새가 생기면서 청열의 Blue 색이 피로파단 후에 생겼다. 이러한 발열현상은 미처리재에서는 전혀 생기지 않았다. 청열현상이 뚜렷한 시험편은 8개이며 그 중에 가장 심하게 나타난 것은 4개이며 고응력 쪽에서 심하였다.

이러한 발열, 청열의 Blue색상 산화막 형성은 UNSM처리에 의한 표면조직의 소성변형과 Nano하에 의한 열전달과 방열이 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 이 현상은 본 실험과 같이 회전굽힘되는 탄소강에서는 생기지 않지만 스테인레스강에는 Ni,

Cr을 많이 함유하므로 발생하는 현상과 같았다.

3.3.5 UNSM처리재($d=6mm$)의 거시적인 파단특징

미처리 Ti재 즉 "Before UNSM"는 사포 2000번까지 연마하여 선반가공에 의한 영향을 최대한 없애도록 노력하였지만 UNSM 처리재는 선반가공 후 표면연마공정을 생략한 채 연마지를 사용하지않고 피로시험하였다. "After UNSM"는 UNSM처리를 하였기에 Fig. 5와 같이 발열, 청열, 산화현상이 모든 시험편에서 심하게 나타났다.

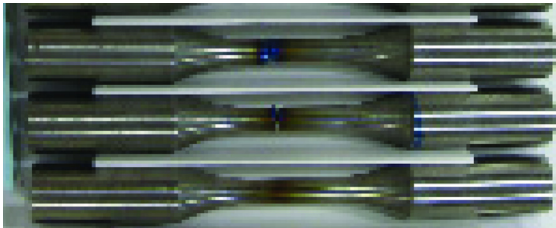


Fig. 5 Macroscopic surface characteristics of UNSM treated fatigue specimen ($d=5mm$)

3.4 표면균열의 미시적 관찰

3.4.1 광학현미경에 의한 미소표면균열의 관찰

Fig. 6a는 UNSM처리재($d=5mm$, 1062.7MPa)의 표면상의 미시적인 피로균열의 형상과 합체거동을 관찰한 예이다. 이 사진에서 발열에 의하여 생긴 청열 Blue색상을 알 수 있다. 또 UNSM처리선에 따라 작은 표면피로균열이 복수로 발생, 성장, 합체하여 큰 피로균열로 파단되는 현상을 알 수 있다. 이 사진은 현미경으로 저배율로 연속 촬영한 영상을 모자이크(Mosaic)식으로 연결한 것이다. 횡축의 선이 UNSM처리에 의하여 표면에 형성된 선이고, 종축의 골과 같은 선은 현미경 사진을 촬영하여 폭 방향으로 크게 축소, 합성시켜 나타낸 것이다.

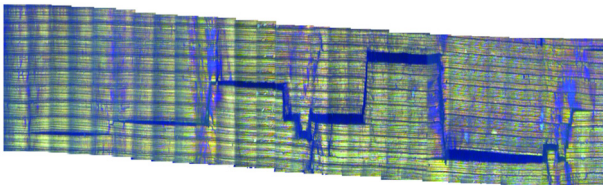


Fig. 6a A mosaic photo of optical microscope indicates fracture surface of many small multi-fatigue cracks ($\sigma_a = 1062.7MPa$, $N_f=4.95 \times 10^5$, $d=5mm$) and coalesced each other

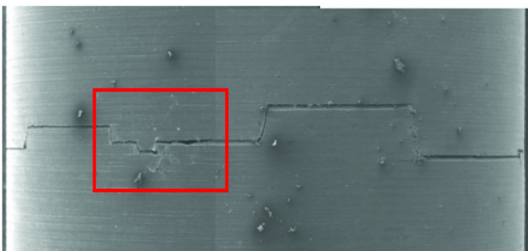


Fig. 6b A mosaic SEM photo ($\times 40$) arranged to clear the configuration and size of many small multi-fatigue cracks of Fig. 6a

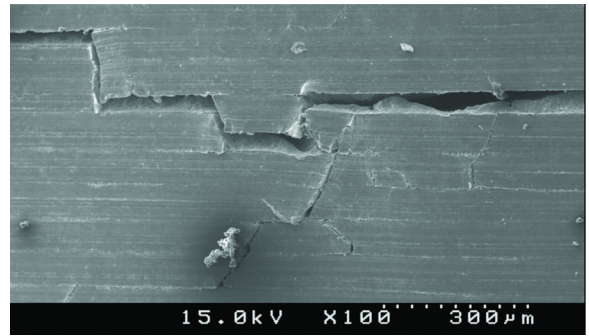


Fig. 6c A magnified SEM photo($\times 100$) marked in square at Fig. 6b indicates crack initiation and its coalesced form

3.4.2 SEM 사진에 의한 미소표면균열의 관찰

Fig. 6b는 Fig. 6a의 광학현미경 사진의 형상과 크기를 정밀하게 파악키 위하여 SEM으로 $\times 40$ 배로 관찰하여 모자이크 식으로 연결한 사진으로 횡축의 균열길이를 정확하게 산출가능하다. 약 0.75mm에서 1.125mm의 표면균열 4개가 합체되었다. Fig. 6c는 Fig. 6b의 SEM 사진 중에 사각형 표시 부분을 $\times 100$ 배로 확대 관찰한 사진이다. 이 사진에서 주균열(Major crack)의 상, 하에는 SEM사진의 확대에 의하여 작은 표면균열이 다수 발생하여 합체된 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 다른 재료의 연구에서도 비슷한 경향을 보였다(Suh and Kitagawa, 1985; Suh and Kitagawa, 1987).

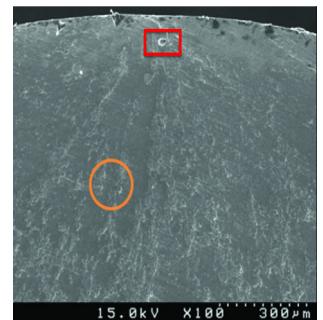
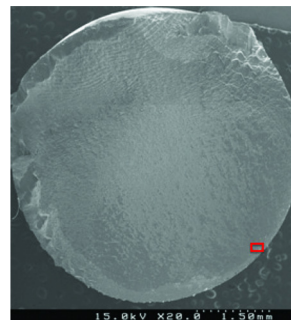


Fig. 7a SEM image of fracture of untreated specimen at 624.2 MPa, $N_f=1 \times 10^5$, $\times 20$ Fig. 7b A magnified SEM photo ($\times 100$) marked in square at Fig. 7a indicates crack initiation site

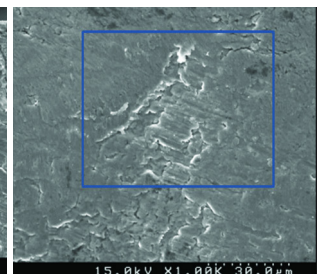
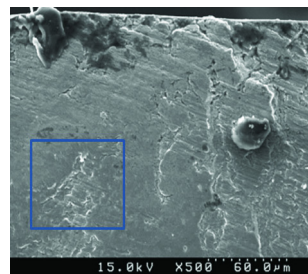
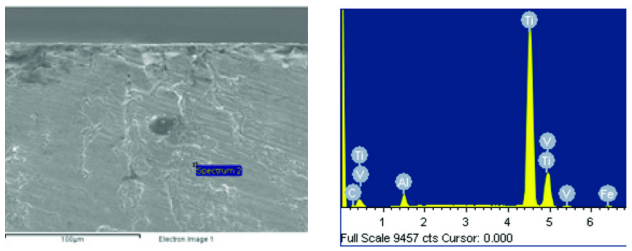
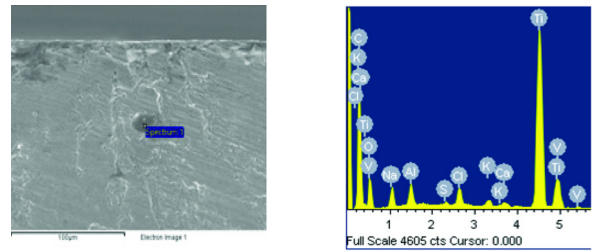


Fig. 7c A magnified SEM photo ($\times 500$) marked in square at Fig. 7b indicates crack initiation site. Fig. 7d A magnified SEM photo ($\times 1,000$) marked in square at Fig. 7c indicates ductile striation pattern.



Element	Weight%	Atomic %
C K	3.87	13.57
Al K	3.31	5.17
Ti K	87.13	76.60
V K	5.12	4.23
Fe K	0.57	0.43
Total	100	



Element	Weight%	Atomic %
C K	41.81	59.04
O K	26.68	28.29
Na K	2.43	1.79
Al K	1.34	0.84
S K	0.19	0.10
Cl K	1.17	0.56
K K	0.48	0.21
Ca K	0.33	0.14
Ti K	24.57	8.70
V K	1.01	0.34
Total	100	

Fig. 8a An example of EDS analysis where marked in square at Fig. 7b

Fig. 8b An EDS analysis where small inclusion marked in square at Fig. 7b.

3.4.3 파단면상의 SEM 사진

Fig. 7a은 미처리된($d=6\text{mm}$, 624.2MPa , $N_f=1 \times 10^5$)의 파단면을 $\times 20$ 배로 확대 관찰하여 모자이크 식으로 연결한 사진이다. 이 미처리재 경우에는 사진상에 사각형 표시의 표면상에서 주균열이 Single crack처럼 발생, 성장, 파단되었다.

Fig. 7b는 Fig. 7a의 SEM 사진 중에 사각형 표시부분을 $\times 100$ 배로 확대 관찰한 사진이다. 주균열의 발생영역에 사각표시와 같이 개재물이 관찰되었다.

Fig. 7c는 Fig. 7b의 SEM 사진 중에 주균열의 발생영역을 $\times 500$ 배로 확대 관찰한 사진이다. Fig. 7c의 사진 중에 사각형 표시부분과 같이 피로균열의 진전을 나타내는 연성 줄무늬(Ductile striation)를 관찰 가능하도록 확대한 것이 Fig. 7d이다.

3.4.4 미처리재의 EDS 분석 자료

Fig. 8a는 Fig. 7b의 파면 중에 주균열의 발생위치에 인접한

사각부분 내의 모재의 성분을 EDS로 분석한 예이며, Fig. 8b는 Fig. 7b의 파면 중에 주균열의 발생위치에 인접한 사각부분내의 개재물을 EDS로 성분을 분석한 예로, 본 시험편의 주성분인 Ti, Al, V 성분이 주로 분석되었다.

3.4.5 UNSM처리재의 SEM 사진

Fig. 9a는 UN-5재(1262.4MPa , $N_f=5.8 \times 10^3$)의 파단면을 $\times 20$ 배로 확대 관찰한 SEM 사진이며, Fig 9b는 Fig. 9a의 파면중에 타원으로 표시한 부분을 $\times 50$ 배로 확대한 SEM 사진이다. 이 사진은 초기 피로균열의 발생의 특징인 평판한 면을 잘 나타낸다.

3.5 균열발생 메카니즘

Fig. 10는 깊이방향에 따라 2회 측정된 압축잔류응력의 변화를 나타낸 그림으로 최고 $1,100\text{MPa}$ 에서 깊이에 따라 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있으며, SCM435, SKD61 (Suh et al.,

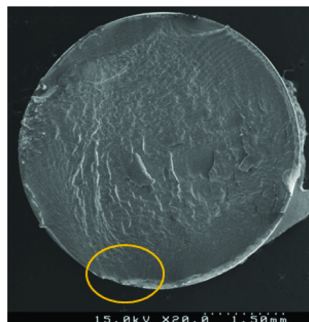


Fig. 9a SEM image of fracture of UNSM treated specimen at 1262.4MPa , $N_f=5.8 \times 10^3$, $\times 20$.

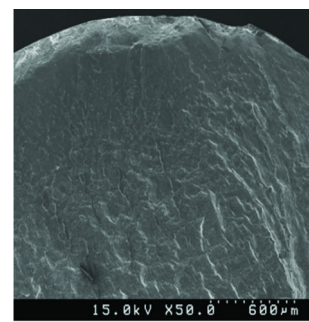


Fig 9b An SEM photo($\times 50$) elliptically marked at Fig. 7c indicates multi- crack initiation sites.

2011), 기타 재료에서와 유사한 결과를 얻었다. 이 잔류응력은 XRD(X-ray diffractometer, XStress 3000)장치로 표면에서 $2\theta - \sin^2\psi$ 법으로 5 μ m씩 전해연마 실시 후 측정하였다. 이렇게 UNSM처리에 의하여 높게 형성된 큰 압축잔류응력은 시험편에 작용하는 응력조건에 따라 Fig. 11와 같이 계략적으로 정리, 해석할 수 있다.

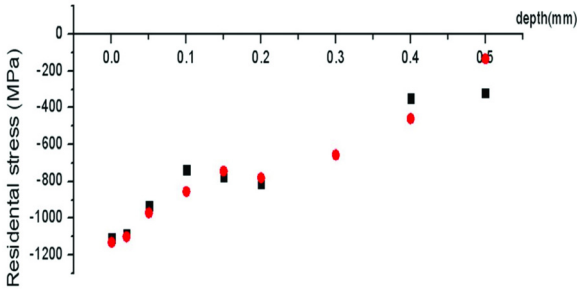


Fig. 10 Variation of compressive residual stress to depth of "after UNSM treated specimen"

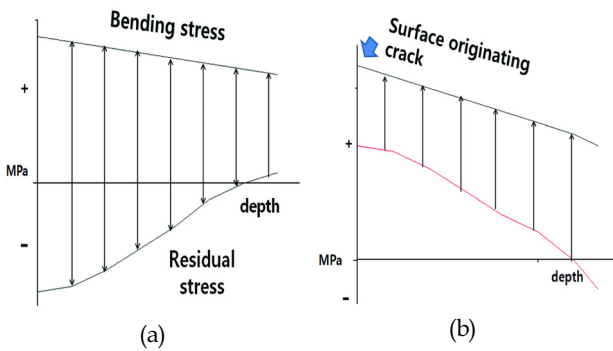


Fig. 11 Crack initiation mechanism under the rotating bending fatigue test on Ti-6Al-4V

Fig. 11은 굽힘피로를 받는 경우의 응력상태를 개략적으로 나타내고 있다. Fig. 11a는 굽힘하중이므로 표면에서의 최대응력이 중립축에는 응력이 없는 경우로 선형적으로 감소함을 나타내고 있고 압축잔류응력은 Fig. 10와 같이 깊이에 따라 감소한다. 따라서 인장응력과 압축잔류응력의 차감에 의하여 Fig. 11b와 같은 응력상태가 형성되기 때문에 굽힘상태에서는 모두 Surface originating fatigue crack이 형성되었다. 특히 본 연구에 사용된 Ti-6Al-4V제는 개재물을 관찰하기 어렵기 때문에 SKD-61, SCM435(Suh et al., 2011)의 경우와 달리 Facet에 Fisheye 피로 균열이 생기므로 축방향 인장압축피로시험시에는 대부분이 상태에 Interior originating type인 Fish eye crack이였고, 회전굽힘피로시험시에는 Surface originating fatigue crack만이 발생하였다. 이러한 Ti제의 피로균열발생에 관한 연구도 본 연구와 비슷한 경향을 보였다(Chai, 2006).

4. 결 론

(1) 미처리재(직경 6mm)와 UNSM 처리재(5mm)와의 W-N곡

선은 비슷하였다. 미처리재의 피로한도는 약 12.8kgf이며 피로 파단곡선은 직선상에 잘 수렴하였다. $d=5$ mm인 UNSM처리 Ti재는 6mm 미처리재의 직선상에 Scatter가 다소 생기면서 수렴되었다. 특히 고응력 저수명 영역에서는 UNSM효과가 적고 피로시험편의 굽힘이 심하며 수명이 다소 짧아지는 경향이 생겼지만 10^5 이상의 수명영역에서는 UNSM효과가 잘 나타나서 피로수명이 증가하는 경향을 나타내었다.

(2) $d=6$ mm 미처리 Ti시험편은 Scatter band가 적어면서 직선상에 수렴되었으며 피로한도는 약 592MPa이며, 다소 Scatter band가 크게 나타났지만 미처리재보다 피로수명 10^4 회에서 피로강도가 약 30.7% 증가하였다.

(3) $d=5$ mm인 Ti피로시험편에 UNSM처리를 한 경우 10^5 피로수명에서 약 69.4%의 피로강도의 증가 효과가 생겼다. 특히 UNSM효과가 커서 큰 하중에도 잘 지탱하였다. 즉 $d=6$ mm인 시험편과 같은 하중에서 비슷한 피로수명을 갖던지 장수명 영역에서는 그 이상의 피로수명을 나타내어 UNSM효과가 큼을 입증하였다.

(4) 미처리 Ti재와 UNSM처리재($d=5$ mm)의 거시적인 피로파단특징은 응력레벨의 차이에 큰 영향 없이 Single crack으로 피로균열이 표면상에서 피로균열이 발생(Surface originating fatigue crack)하여 성장하여 피로파단되는 파면 특징을 가졌다. UNSM처리재는 피로파단수에 가깝게 되면 큰 열이 발생하면서 청열의 Blue색상이 피로파단 후에 생겼다. 이러한 산화현상은 미처리재에서는 전연 생기지 않았지만, UNSM처리에 의한 조직 Nano화로 발달, 청열현상이 모든 시험편에서 심하게 나타났다.

후 기

본 연구는 2011년도 기초연구사업(201105610000)으로 교육과학기술부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구결과임. 세 번째 저자는 과기부의 한국연구재단(NRF, 2010-0028287)의 지원을 받아서 연구비 지원에 감사드립니다. 또 전자현미경은 한국기초과학지원연구원의 장비(SEM, Hitachi S-4200, KBSI, Daegu)를 사용하였다.

참 고 문 헌

Altenberger, I. (2005). "Deep Rolling - The Past, The Present and The Future", Proc. 9th Int. Conf. on Shot Peening, pp 144-155.

Chai, G. (2006). "The Formation of Subsurface Non-Defect Fatigue Crack Origins", International Journal of Fatigue. Vol 28-11, pp 1533-1539.

Ochi, Y., Matsumura, T., Sasaki, R., Masaki, K., Sakai, T. and Sano, Y. (2011). "Effects of Laser Peening Treatment Without Protective Coation on High Cycle Fatigue Property of Ti-6Al-4V alloy", 5th International conference on Very High Cycle Fatigue, pp 369-374.

Petit, J., Christine Sarrazin-Baudoux and Martinez, J. (2007). "Very High Cycle Fatigue Behavior of Ti6246 Alloy in

- Air and in High Vacuum", 4th International Conference on Very High Cycle Fatigue, pp 399-408.
- Prevey, P. and Jayaraman, N. (2005). "Overview of Low Plasticity Burnishing for Mitigation of Fatigue Damage Mechanisms", Proc. 9th Int. Conf. on Shot Peening, pp 267-272.
- Suh, C.M., An, Y.D., Pyun, Y.S., Cho, L.H. and Suh, M.S. (2011). "Improvement of VHCF Properties of AISI 1045, 4137, 52100 & H13 steel by UNSM treatment", 2011년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp 1574-1579.
- Suh, C.M., Kim, M.H., Baek, U.B., Pyun, Y.S., Kim, C.S. and Chi, C.H. (2010a). "A Study on The Alternative Technology Using UNSM Instead of The Persetting Method for Torsion Bar", International journal of modern physics B, Vol 24, Nos 15-16, pp 2435-2440.
- Suh, C.M. and Kitagawa, H. (1985), "Fatigue Microcracks in a Low Carbon Steel", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol 8-2, pp 193-203.
- Suh, C.M. and Kitagawa, H. (1987), "Crack Growth Behaviour of Fatigue Microcracks in Low Carbon Steels" Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct, Vol 9-6, pp 409-424.
- Suh, C.M., Lee, M.H. and Pyoun, Y.S. (2010b). " Fatigue Characteristics of SKD-61 by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology Under Static Load Variation", International journal of modern physics B, Vol 24, Nos 15-16, pp 2645-2650.
- Suh, C.M., Song, G.H. Suh, M.S. and Pyoun, Y.S. (2007). "Fatigue and Mechanical Characteristic of Nano-Structured Tool Steel by Ultrasonic Cold Forging Technology", Materials Science and Engineering A 443, pp 101-106.
- Thomas, M.B. (2002). "High Cycles Fatigue (HCF) Science and Technology Program 2001 Annual Report", AFRL-PR-WP-TR-2002-2060.
- Watanabe, Y., Hasegawa, N. and Duchazeaubeneix J.M. (2003). "Effect of Ultrasonic Shot Peening on Fatigue Strength of High Strength Steel", Proc. 8th Int. Conf. on Shot Peening, pp 306-310.
- 편영식, 박정현, 조인호, 김창식, 서창민 (2009). "초음파 나노표면개질기술의 특성과 활용방안 연구", 대한기계학회논문집 (A), 33-3, pp 190-195.

2011년 8월 18일 원고 접수

2011년 12월 13일 심사 완료

2010년 12월 23일 게재 확정