

## Ti-6Al-4V재의 UNSM처리에 의한 축인장압축피로특성변화

서창민\* · 조성암\*\* · 편영식\*\*\* · 서민수\*\*\*\*

\*경북대학교 공과대학 기계공학부,

\*\*경북대학교 치의학전문대학원,

\*\*\*선문대학교 공과대학 기계공학부,

\*\*\*\*국민대학교 신소재공학부

## Variation of Axial Tension-Compression Fatigue Characteristics by UNSM on Ti-6Al-4V

Chang-Min Suh\*, Sung-Am Cho\*\*, Young-Sik Pyoun\*\*\* and Min-Soo Suh\*\*\*\*

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

\*\*Department of Prosthodontic, College of Dentistry, 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:** Axial loading tension-compression fatigue test 축하중 인장압축피로시험, S-N curve S-N 곡선, UNSM (Ultrasonic nanocrystal surface modification) technology 초음파나노표면처리기술, Fish eye crack 어안균열, Facet 파셋터, Compressive residual stress 압축잔류응력

**ABSTRACT:** The present study makes three original contributions to nanoskinned Ti-6Al-4V materials. The nanoskins were fabricated on Ti-6Al-4V material using various surface treatments: deep rolling (DR), laser shot peening (LSP), and ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM). These surface treatments are newly developed techniques and are becoming more popular in industrial fields. A fatigue strength comparison at up to  $10^6$  cycles was conducted on these nanoskinned Ti-6Al-4V materials. Fatigue tests were carried out using MTS under axial loading tension-compression fatigue ( $R = -1, RT, 5 \text{ Hz, sinusoidal wave}$ ). The analysis of the crack initiation patterns in the nanoskinned Ti-6Al-4V materials found an interior originating crack pattern and surface originating crack type. Microscopic observation was mainly used to investigate the fatigue fractured sites. These surface modification techniques have been widely adopted, primarily because of the robust grade of their mechanical properties. These are mainly the result of the formation of a large-scale, deep, and useful compressive residual stress, the formation of nanocrystals by the severe plastic deformation (SPD) at the subsurface layer, and the increase in surface hardness.

### 1. 서 론

최근 Ti의 여러 좋은 특성들이 부각되면서 항공기, 로켓재료 뿐만 아니라, 외과수술용 체내 삽입용, 치과 임플란트용, 스포츠용 등의 다양한 분야에도 Ti재는 널리 사용되고 있다. 또 Ti는 크리프강도가 크므로 항공기의 고속화, 경량화와 더불어 미래의 항공기 및 우주산업에 이용도가 높아지는 경향이 있다.

또한 내구성 향상에 주요한 큰 압축잔류응력(Compressive residual stress)과 표면층의 Severe plastic deformation (SPD)에 의한 미세화조직(Nanocrystal)이라는 사실이 확인되면서 이를 구현하기 위한 많은 표면처리기술들이 개발되고 있다. 독일의 Deep rolling (DP), 미국의 Laser shot peening (LSP)과 Low plasticity burnishing (LPB), 프랑스의 Ultrasonic shot peening

(USP), 일본의 Micro shot peening (MSP), 한국의 Ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) 등이 이러한 목적으로 개발된 기술이다. 현재도 미국 국방분야, 특히 항공기술분야에서 이러한 기술을 응용, 확대하는 것이 핵심기술개발의 화두이다 (Altenberger, 2005; Prevey and Jayaraman, et al., 2005, Watanabe, et al., 2003, Thomas, 2002).

본 연구에서는 신기술로 처리된 Ti-6Al-4V재를 사용하여 축하중 인장압축피로시험을 실시하여 구한 S-N curves에서 피로강도를 비교/평가하고, 균열발생 메커니즘에 관하여 내부피로 균열발생(Interior originating fatigue crack)형 혹은 표면피로균열발생(Surface originating fatigue crack)형 등의 균열발생에 관하여 다른 연구결과와 비교하려고 한다(Chai, 2006; Petit et al., 2007; Ochi, et al., 2011; Zuo, et al., 2007; Sarrazin-Baudoux, et al., 2011).

## 2. 실험방법과 시험편

### 2.1 초음파나노표면개질(UNSM)기술과 처리조건

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/mm<sup>2</sup> 정도)을 금속표면에 가하여, 표면을 미세화조직으로 되게 한다. 이로 인해 표면층의 미시조직을 나노결정 조직으로 개질됨과 동시에 아주 크고 깊은 압축잔류응력 등을 부가하는 국내개발 특허기술이다(Suh, et al., 2007; 편영식 등, 2009).

이 UNSM의 기본적인 가공시스템은 초음파 주파수를 발생시키는 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** The effects of UNSM technology

Effects on mechanical characteristics	Improvement on mechanical performance
Deep compressive residual stress (about 1,000 MPa into depth of more than 500 $\mu$ m)	1) HCF 2) rolling contact fatigue 3) service life on SCC
Surface micro dimples (Area:1~10 $\mu$ m, Depth: sub micron, Pattern pitch: few $\mu$ m)	1) Decrease friction loss 2) wear 3) surface quality
Increase hardness (into depths of more than 500 $\mu$ m)	1) wear 2) HCF
Nanocrystalline structure (Grain Size 50~ 200 nm into depths of 100 $\mu$ m)	1) LCF and HCF 2) wear

이 UNSM 기술을 적용하여 얻어진 기계적 물성치 향상과 기대효과를 정리하면 Table 1과 같다. 즉 깊고 큰 압축잔류응력의 형성, 표면의 미소 틱플형성, 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; Suh et al., 2010a; Suh et al., 2010b).

**Table 2** Condition of UNSM treatment

Equipment	UNSM
Tip material	WC
Tip diameter(mm)	2.8
Amplitude( $\mu$ m)	30
Load (N)	30
Number of strikes(mm <sup>2</sup> )	53,000

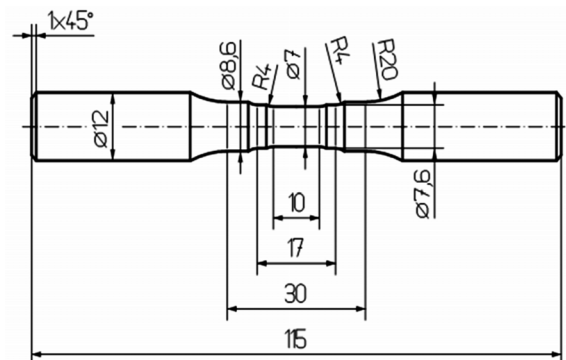
본 연구에서는 Ti-6Al-4V재를 사용하여 Table 2와 같은 조건으로 UNSM처리하여 피로시험편을 제작하였다. 그러면 Table 3과 같이 표면경도가 상승하였고, 표면조도가 감소하는 좋은 기계적인 특성을 얻을 수 있었다. 이렇게 제작된 시험편으로 인장시험과 피로시험을 실시하였다. 이 때 미처리 Ti재는 사포 200번부터 100번씩 증가시키면서 2000번까지 연마한 후 버핑하여 선반가공에 의한 영향을 최대한 없애도록 노력하였다. 그러나 UNSM 처리재는 선반으로 기계가공한 후 가공공정을 줄이기 위하여 표면연마나 버핑을 하지 않고 피로시험에 사용하였다.

**Table 3** Variation of roughness before and after UNSM

	Before	After
Hardness (Hv, 300g)	312	393
Roughness (Ra)	0.71	0.22

### 2.2 시험편의 형상

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. 1와 같이 직경 7mm인 축하중 인장압축피로시험 (R= -1)용이다. 시험편상에 가공한 단 (Step)은 축하중 인장압축피로시험을 조정하기 위하여 고안된 것이다. 인장시험편은 KS규격에 맞추어서 직경 6mm와 직경 5mm인 것을 제작하여 사용하였다. 피로시험은 MTS 유압피로시험기를 사용하여 5Hz로 실온에서 Sinusoidal wave로 축방향 인장압축피로시험을 실시하였다.



**Fig. 1** Configuration for tension-compression fatigue test specimen (unit; mm)

## 3. 실험결과와 고찰

### 3.1 인장시험

Fig. 2(a)는 직경 6mm인 미처리 Ti 시험편과 직경 5mm인 UNSM 처리재의 인장시험결과를 나타내었다. 이 그림에서 직경의 차이가 있으므로 두 종류 시험편의  $P-\delta$ 선도에서는 크게 차이가 생겼다.

Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)와 같은 2개의 시험편의 자료를 응력과 변형률로 다시 정리하여 비교한 것이다. Fig. 2(a)과 달리 2개의

직경이 다른 시험편의 최대인장응력과 비슷한 990MPa 정도이다. 학계 DB에서 구한 고급 Ti재인 Ti-6Al-4V의 최대인장응력은 910MPa로 그 값이 서로 유사하다. 여기서 UNSM의 효과는 단순인장시험에서 잘 나타나지 않음을 알 수 있다.

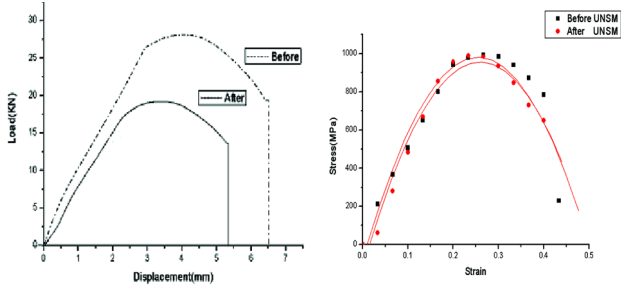


Fig. 2 (a) Comparison of P-δ (load-deformation) curve between untreated 6 mm with UNSM-treated 5 mm tensile specimen

인장시험편은 UNSM처리와 미처리재 모두 중앙부에서 인장 파단되었으며 보통 연성이 큰 연강(Mild steel)재와 유사하게 necking부가 뚜렷하게 나타났고, 부분적인 Cup and cone의 형상을 잘 나타내었다. 미처리 Ti재( $d=6\text{mm}$ )의 연신율은 22%( $\delta=3.3\text{mm}$ ,  $L=15\text{mm}$ ), UNSM 처리된 Ti 시험편(5mm)의 연신율은 16.7%( $\delta=2.5\text{mm}$ ,  $L=15\text{mm}$ ) 정도로 학계 DB에서 구한 연신율 10%보다는 약간 큰 편이었다.

3.2 경도시험

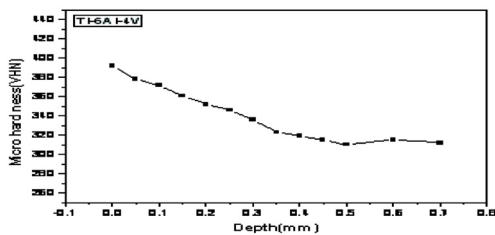


Fig. 3 Variation of Micro-Vickers hardness from surface to depth

Fig. 3은 UNSM처리를 실시한 시험편을 300g 하중으로 표면 상(Hv 393)에서 깊이방향에 따라 측정된 비커스 경도치의 변화를 나타내었다. UNSM처리를 하면 미처리재(Hv 312)보다 표면에서는 약 26% 정도 경도치가 증가하였다가 점차 깊이방향으로 경도치가 감소하는 경향을 나타내었으며 0.5mm 근처에서 미처리재와 비슷한 경도치 Hv 312에 달하였는데, 이 경향은 다른 재료의 연구결과와도 유사하였다(Suh et al., 2010a; Suh et al., 2010b).

3.3 축하중 인장압축피로시험(Axial loading, R=-1, 5 Hz)

3.3.1 S-N 곡선

Fig. 4은 Fig. 1와 같은 피로시험편을 사용하여 축방향 인장압

축피로시험을 실시하여 얻은 응력과 피로수명곡선인 S-N 곡선이다. 여기에는 UNSM처리 효과를 다른 표면처리기술과 비교하기 위하여 미처리재, LSP (Laser shot peening) 및 DR (Deep rolling)과의 피로시험결과를 동시에 나타내었다. 이 그림에서 피로강도면으로는 UNSM처리 효과가 가장 우수하였고, 그 다음으로 DR의 처리 효과도 좋았으며 LSP의 처리효과가 좀 떨어졌다.

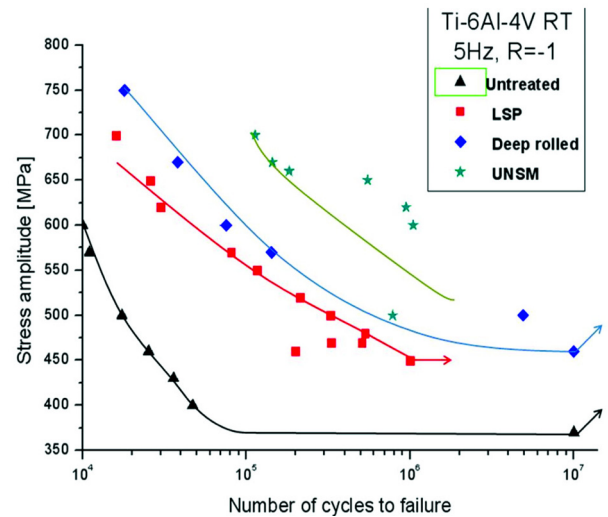


Fig. 4 S-N curves with axial loading tension-compression cycle

Fig. 4의 그림 상에는 “Solid 별표”로 나타낸 Data는 UNSM 처리를 한 Ti피로시험편의 S-N곡선으로  $10^6$  사이클에서 피로강도가 미처리재보다 48.6%, LSP처리재보다 22.2%, DR처리재보다 14.6% 상승하였다. “Solid 마름모”로 나타낸 DR처리재는  $10^6$  사이클에서 미처리재보다 29.7%, LSP처리재보다 6.7% 상승하였다. 또 “Solid 사각형”인 LSP처리재는 미처리재에 비하면 21.6% 상승하였다. 여기에서 UNSM, DR, LSP처리재는 미처리재에 비하여 각각 48.6%, 29.7%, 21.6%씩이나 피로강도가 크게 상승하였다. 특히 이러한 표면개질처리효과는  $10^6$  이상의 장수명 영역에서 매우 좋은 결과를 나타내고 있으며 이러한 효과는 다른 재료에서도 확인되고 있다 (Suh and Pyun et al., 2011).

3.3.2 피로파단상의 특징 (Fish eye crack type)

Fig. 5은 응력조건 (700MPa),  $N_f=1.13 \times 10^5$ 로 피로파단된 경우로 Fish eye crack이 2개 생긴 경우를 나타내고 있다. 즉 Fig. 5(a)는 시험편의 측면도이고, Fig. 5(b)는 근접촬영된 정면도이며, Fig. 5(c)는 Fig. 5(b)를 SEM으로 확대하여 Fish eye crack 2개 (S, L)를 합성시켜 나타낸 것이다. Fig. 5(d)는 원으로 S-crack을 확대 표시한 것이며, Fig. 5(e)는 S-crack의 발생한 곳이 Facet형태임을 확대하여 표시한 것이다. 이 S-crack은 폭, 0.82 mm, 높이; 0.67mm의 크기이며, 표면으로부터 0.57mm인 곳인 압축잔류응력의 영향이 적은 곳에서 발생하여 성장한 경우이다. 통상 Fish eye crack은 계재물에서 발생하지만 Ti-6Al-4V에는 Facet에서만 생겼으며 다른 보고서와 유사하다(Chai, 2006; Petit et al., 2007; Ochi, et al., 2011; Zuo, et al., 2007; Sarrazin-Baudoux, et al., 2011).

Fig. 6(a)는 Fig. 5(c)의 L-fish eye crack을 확대 표시한 것이며, 폭; 1.81mm, 높이; 1.24mm의 크기로, 표면으로부터 0.52 mm 곳인 압축잔류응력의 영향이 적은 곳에서 발생하여 성장한 경우이다. 이러한 균열의 발생지는 S-crack과 매우 비슷하였다. Fig. 6(b)는 L-crack이 S-crack의 발생지와 같은 형태인 Facet 형태임을 확대하여 표시한 것이다.

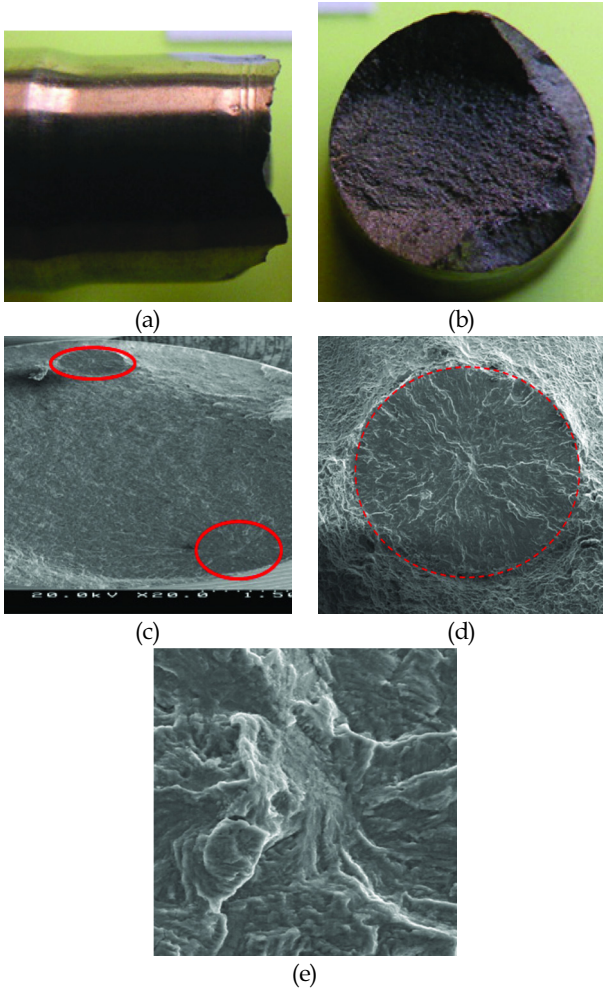


Fig. 5 (a); Closeup view of fractured UNSM-treated specimen, (b); front view of Fig. 5 (a), (c); SEM photo of Fig. 5 (b) showing two fish eye cracks (S, L), (d); magnified view of S-crack, (e); initiation site of S-crack: facet type

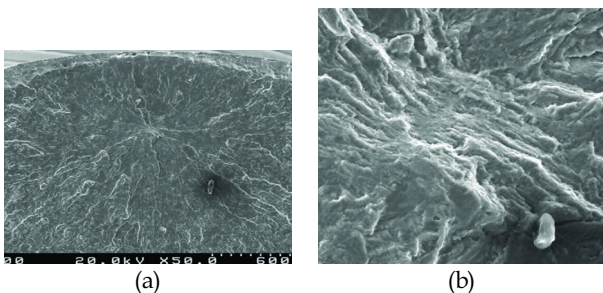


Fig. 6 (a); Magnified view of L-crack, (b); initiation site of L-crack: facet type

Fig. 7(a)은 응력조건 (620MPa),  $N_f=9.5 \times 10^5$ 로 피로파단된 경우로 Fish eye crack가 생긴 경우를 나타내고 있다. 즉 Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 원을 확대하여 나타낸 것이며, Fig. 7(c)는 Fig. 7(b)의 사각형 부분인 Fish eye crack의 중심부를 확대한 사진으로 이 Crack의 발생지는 Facet형태임을 알 수 있다. 이 Fish eye crack는 폭; 1.27 mm, 높이; 1 mm, Crack 깊이는 약 0.45 mm 이므로 압축잔류응력의 영향이 적은 곳에서 발생하여 성장한 경우이다. 이 깊이는 Fig. 5와 Fig. 6의 S-crack과 L-crack과도 비슷한 경우이다. Fig. 7(d)는 Fig. 7(c)사진의 사각형을 확대한 사진으로 Fatigue crack 성장으로 생긴 규칙적인 연성줄무늬를 나타내고 있다.

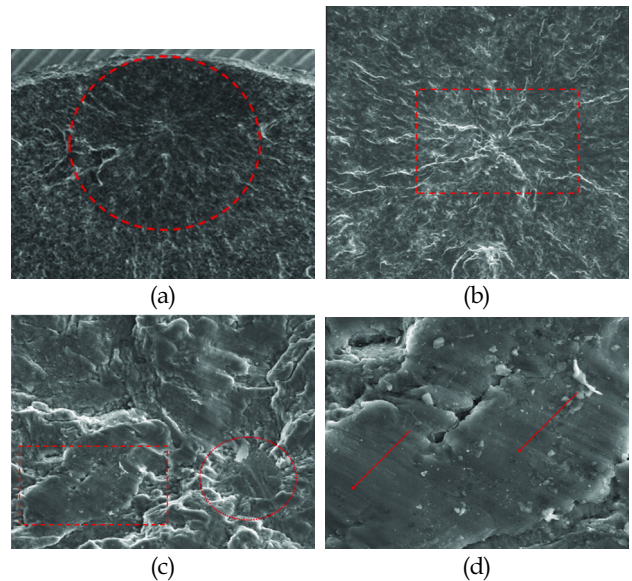


Fig. 7 (a); Magnified view of a fish eye crack at UNSM-treated specimen, (G), (b); magnified view of Fig. 7 (a), (c); crack initiation site of Fig. 7 (a): facet type, (d); ductile striation observed beside of crack initiation site of Fig. 7 (c). Arrows indicate growth direction of G-crack

### 3.3.3 피로파단상의 특징(Surface originating crack type)

Fig. 8은 응력조건 (630MPa),  $N_f=6.69 \times 10^4$ 로 피로파단된 경우로 표면상에서 작은 표면피로균열이 복수로 생겨 성장, 합체된 경우를 나타내고 있다. 즉 Fig. 8(a)는 시험편의 측면도이고, Fig. 8(b)는 근접촬영된 정면도이며, Fig. 8(c)는 Fig. 8(b)를 SEM으로 확대하여 표면상에서 숫자로 나타난 5개의 표면균열을 확대하여 나타낸 것이다.

Fig. 8(d)는 숫자로 나타난 3개의 표면균열을 확대 표시한 것이며, Fig. 8(e)는 균열이 발생한 3번을 확대하여 표시한 것이다. 이러한 표면상의 균열발생한 경우는 다른 Ti재에서도 보고되고 있다(Chai, 2006; Petit et al., 2007; Ochi, et al., 2011; Zuo, et al., 2007; Sarrazin-Baudoux, et al., 2011).

이와 같이 Ti-6Al-4V의 축하중 인장압축피로시험에서는 Interior originating fatigue crack이 대부분을 차지하였고 드물게 표면상에서 피로균열이 발생하였다. 특히 UNSM처리재 중에 Fig. 1의 단(Step)부분에서 피로균열이 발생하면 표면균열발생(Surface originating fatigue crack)형 이었다.

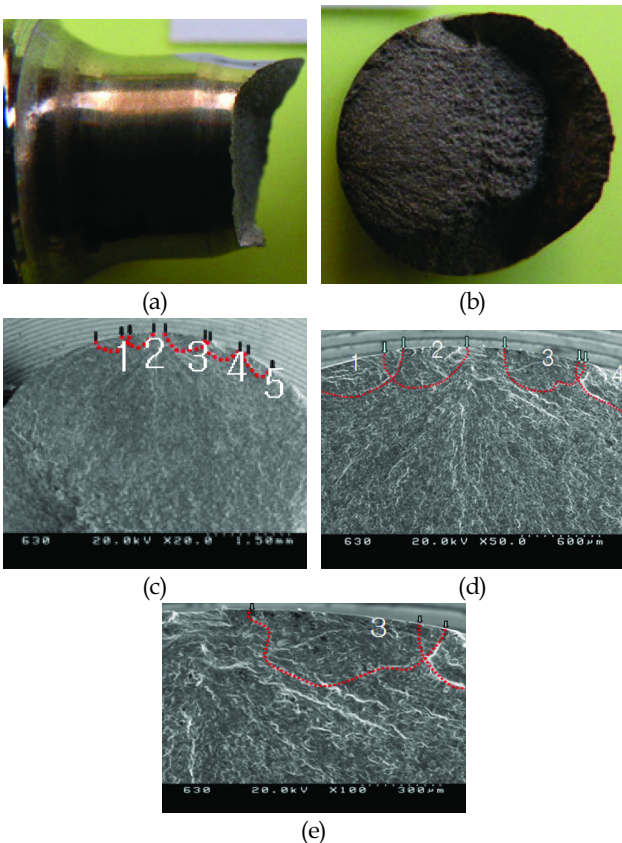


Fig. 8 (a); Closeup view of fractured UNSM-treated specimen, (b); front view of Fig. 8 (a), (c); SEM photo of Fig. 8 (b) showing surface cracks, (d); magnified view of surface crack, (e); initiation site of surface crack

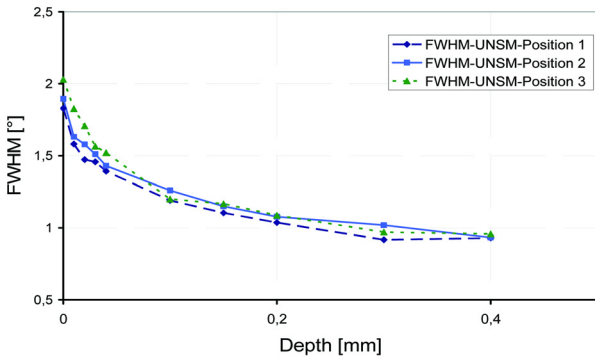


Fig. 9 Variation of FWHM depth profiles of UNSM-treated specimen at different surface positions

잔류응력은 XRD (X-ray diffraktometer, XStress 3000)장치로 표면에서  $2\theta - \sin^2\psi$ 법으로 5  $\mu\text{m}$ 씩 전해연마 실시 후 측정하였다. Fig. 9는 이 측정된 FWHM (Full width at half maximum) 깊이 분포도의 변화를 나타내었는데 시험편 표면에서 최고치를 나타내었고 깊이방향으로 약 0.4 mm까지 서서히 감소함을 알 수 있다. 이때 FWHM 깊이 분포도는 시험편 중앙에서  $\pm 5\text{mm}$ 인 3곳에서 측정하여 결정하였다.

Fig. 10(a)는 압축잔류응력이 깊이방향에 따라 최고 1,100

MPa에서 서서히 감소함을 나타내고 있으며, 이렇게 표면에서 크게 형성된 압축잔류응력이 깊이방향으로 서서히 감소하는 경향은 공구강과 축재(Suh and Phun, et al. 2011)와 유사한 결과이다. Fig. 10(b)는 Fig. 10(a)와 같이 형성된 높은 압축잔류응력은 시험편에 작용하는 응력조건에 따라 과단수명의 절반까지 지나면 초기잔류응력보다 약 40%까지 감소하는 응력이완(Stress relaxation)현상을 나타내고 있다.

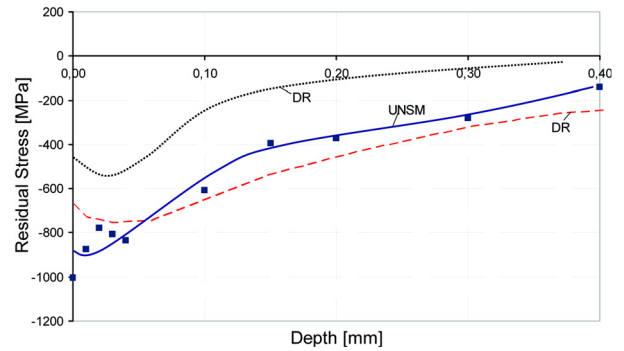


Fig. 10 (a) Variation of compressive residual stress to depth of UNSM-treated specimen of Ti-6Al-4V

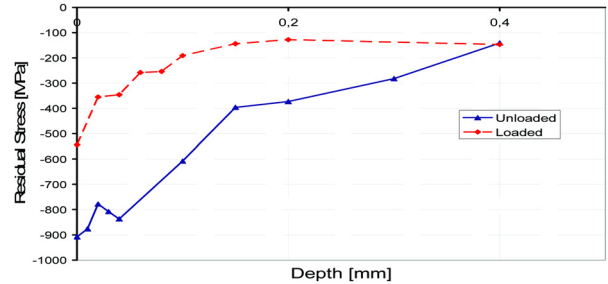


Fig. 10 (b) Variation of compressive residual stress to depth of UNSM-treated specimen unloaded and fatigued

### 3.4 균열발생 메커니즘

따라서 피로균열의 발생메커니즘에서 중요한 잔류응력은 Fig. 11과 같이 최고 잔류응력값에서 줄여서 계략적으로 분석할 수 있다. 즉 Fig. 11a는 인장시의 축방향 인장응력상태와 응력이완상태의 압축잔류응력 상태를 나타내고 있다. 인장작용하중보다 표면에서는 압축잔류응력이 크게 작용하므로 Fig. 11b와 같은 깊이방향의 응력의 차감에 따라 압축잔류응력이 소멸되는 450 ~ 580  $\mu\text{m}$  깊이 근방에서 “-”하중이 “+”하중으로 변하게 된다. 이렇게 “-”하중이 “+”하중으로 변하는 깊이에서 일반적으로 Interior originating type인 Fish eye crack이 발생하는 메커니즘이 형성됨을 그림에서 도시하고 있다.

특히 본 연구에 사용된 Ti-6Al-4V재는 재재물을 관찰하기 어렵기 때문에 공구강(Suh and Pyun et al., 2011)의 경우와 달리 Facet에 Fisheye 피로균열이 생기므로 축방향 인장압축피로시험시에는 응력이 집중되는 Fig. 8과 같은 단(Step)이 있는 곳을 제외하고는 대부분 Interior originating type만이 발생하였다. 특히 Ti-6Al-4V재는 이 단부분의 표면처리를 잘 하게 되면 모두 내부균열 발생형으로 될 가능성이 큰 재질이다.

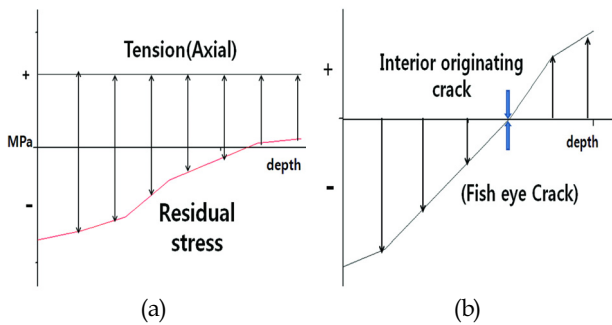


Fig. 11 Crack initiation mechanism under axial tension-compression fatigue test on Ti-6Al-4V

#### 4. 결 론

(1) 본 연구에 사용된 Ti-6Al-4V(Extra low interstitial)에 UNSM처리를 하면  $10^6$  사이클 피로강도가 미처리재보다 48.6% 증가하는 연구결과를 얻었다. 즉 UNSM처리기술이 매우 우수한 표면개질기술임이 확인되었다.

(2) UNSM처리를 한 Ti피로시험편은  $10^6$  사이클에서 피로강도가 미처리재보다 48.6%, LSP처리재보다 22.2%, DR처리재보다 14.6% 상승하였다. DR처리재는  $10^6$  사이클에서 미처리재보다 29.7%, LSP처리재보다 6.7% 상승하였다. 또 LSP처리재는 미처리재에 비하면 21.6% 상승하였다. UNSM, DR, LSP처리재는 미처리재에 비하여 각각 48.6%, 29.7%, 21.6%씩이나 피로강도가 크게 상승하였다.

(3) S-N곡선에서 피로강도면으로는 UNSM처리 효과가 가장 우수하였고, 그 다음으로 DR의 처리 효과도 좋았으며 LSP의 처리효과가 떨어졌다. 특히 표면개질처리효과는 UNSM을 포함하여  $10^6$  이상의 장수명 영역에서 매우 좋은 결과를 나타내고 있었다.

(4) 높은 압축잔류응력은 시험편에 작용하는 응력조건에 따라 피로과정중에 생기는 응력이완 현상으로 계략적으로 분석할 수 있었다. 인장작용하중보다 표면에서 압축잔류응력이 크므로 깊이방향의 응력의 차감에 따라 압축잔류응력이 소멸되는 깊이  $450\mu\text{m} \sim 580\mu\text{m}$  근방에서 “-”하중이 “+”하중으로 변하게 된다. 이렇게 “-”하중이 “+”하중으로 변하는 깊이에서 일반적으로 Interior originating type인 Fish eye crack이 발생하는 메커니즘이 형성됨을 그림에서 도시하였다.

#### 후 기

본 연구는 산학연 공동기술개발사업의 지원을 받았으며, 네 번째 저자는 과기부의 한국연구재단(NRF, 2010-0028287)의 지원을 받았서 연구비 지원에 감사드립니다. 또 전자현미경은 기초과학연구소의 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.
- Sarrazin-Baudoux, C., Stanzl-Tschegg, S.E., Mayer, H. and Petit, J. (2011). “Ultra Slow Fatigue Crack Propagation in TA6V Titanium Alloy”, 5th International conference on Very High Cycle Fatigue, pp 133-138.
- Suh, C.M. and Pyun, Y.S. (2011). “Improvement of VHCF Properties of AISI 1045, 4137, 52100 & H13 Steel by UNSM Treatment”, 2011년도 한국해양공학회 춘계학술대회.
- 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 Psetting Method for Torsion Bar”, International journal of modern physics B, Vol 24, Nos 15-16, pp 2435-2440.
- 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.

Zuo, J.H., Wang, Z.G. and Han, E.H. (2007). "Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Alloy in Very High Cycle Regime", 4th International conference on Very High Cycle Fatigue, pp 255-260.

편영식, 박정현, 조인호, 김창식, 서창민 (2009). "초음파 나노표면개질기술의 특성과 활용방안 연구", 대한기계학회논문집(A), 33-3 pp 190-195.

---

2011년 8월 22일 원고 접수  
2011년 11월 15일 심사 완료  
2011년 12월 23일 게재 확정