

## Ti-6Al-4V 재의 UNSM 처리에 의한 피로특성변화<sup>§</sup> - 회전굽힘 피로시험과 축하중 인장압축 피로시험 비교 -

서민수\* · 편영식\*\* · 서창민\*\*\*†

\* 국민대학교 신소재공학부, \*\* 선문대학교 기계공학부, \*\*\* 경북대학교 기계공학부

### Variation of Fatigue Properties in Nanoskinned Ti-6Al-4V - Rotating Bending and Axial Loading Tension-Compression Cycle -

Min-Soo Suh<sup>\*</sup>, Young-Shik Pyoun<sup>\*\*</sup> and Chang-Min Suh<sup>\*\*\*†</sup>

\* School of Advanced Materials Engineering, Kookmin Univ., \*\* School of Mechanical Engineering, SunMoon Univ.,  
\*\*\* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received December 15, 2011; Revised January 16, 2012; Accepted January 30, 2012)

**Key Words:** Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification(초음파나노표면개질), Fish Eye Crack(어안균열), Facet(파셋터), Compressive Residual Stress(압축잔류응력)

**초록:** Ti-6Al-4V 재에 다양한 표면처리방법을 통하여 나노스킨화된 피로시험편을 제작하고 회전굽힘피로 시험과 축하중 인장압축피로시험을 수행하였다. 특히 S-N 곡선에서 초음파나노표면개질(UNSM)법은 국내특허기술로 다른 처리법들보다 우수한 결과를 보였고, UNSM 처리된 직경 5 mm 재는 6 mm 티타늄재를 대체 가능할 성능을 얻었다. UNSM 처리된 10<sup>6</sup> 사이클 이상의 장수명영역에서 피로강도가 크게 향상되는 시험결과를 얻었다. 균열발생 패턴의 분석을 통하여 Ti-6Al-4V 재는 응력의 작용형태에 따라 표면균열발생형(surface originating crack type)과 내부균열발생형(interior originating crack type)인 어안균열(fish eye crack)이 발생하는 메커니즘을 분석하였다.

**Abstract:** Nanoskins were fabricated on a Ti-6Al-4V material by carrying out various surface treatments, i.e., deep rolling, laser shot peening, and ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM). These surface treatments are newly developed techniques and are becoming more popular for industrial applications. Fatigue tests were carried out using material test system (MTS); these tests included the axial loading tension-compression fatigue test (R = -1, RT, 5 Hz, sinusoidal wave) and rotating bending fatigue test (R = -1, RT, 3200 rpm). The analysis of the crack initiation pattern in the UNSM-treated material indicated that the crack was interior originating in the axial loading tension-compression cycle, and was surface originating in the bending fatigue test. UNSM treatment significantly improved the fatigue strength for the regime of above 10<sup>6</sup> cycles that S-N curve of rotating bending stress clearly show the performance of a 5 mm titanium specimen after UNSM treatment is similar to that of an untreated 6 mm titanium specimen.

### 1. 서 론

최근 Ti(티타늄)의 여러 좋은 특성 때문에 항공기, 로켓재료뿐만 아니라, 외과수술용 체내 삽입용, 치과용, 스포츠용 등에도 널리 사용되고 있다.

내구성 향상에 주요한 것이 큰 압축잔류응력

(compressive residual stress)과 표면층의 심한 소성 변형(severe plastic deformation, SPD)에 의한 나노스킨(Nanoskin)이라는 것이 확인되면서 이를 구현하기 위한 많은 표면처리기술들이 개발되고 있다.<sup>(1-5)</sup>

본 연구에서는 여러 신기술로 처리된 Ti-6Al-4V 재를 사용하여 축하중 인장압축피로시험과 회전굽힘피로시험을 실시하여 구한 S-N 곡선에서 피로 강도를 비교, 평가하고, 균열발생 메커니즘에 관하여 내부피로균열발생(interior originating fatigue crack)형 혹은 표면피로균열발생(surface originating fatigue crack)형의 균열발생에 관하여 다른 연구결과와 비교하려고 한다.<sup>(1-9)</sup>

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011.

11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, cmsuh@knu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 2. 시험편과 연구방법

### 2.1 초음파나노표면개질(UNSM)기술과 처리조건

국내에서 개발된 UNSM 기술은 초음파 진동에너지를 응용하여 아주 큰 정적하중 및 동적하중이 부가된 볼(ball)로 1 초에 20,000 번 이상의 타격(1,000~10,000 회/mm<sup>2</sup> 정도)을 금속표면에 가하여, 표면을 SPD 로 되게 한다. 이로 인해 표면층의 미시조직을 나노결정 조직(nano-crystallized structure)으로 개질 됨과 동시에 아주 크고 깊은 압축잔류응력 등을 형성시키는 특허기술이다.<sup>(3,4)</sup>

이 UNSM 기술을 적용하여 얻어진 기계적 물성치 향상과 기대효과는 깊고 큰 압축잔류응력의 형성, 표면의 미소 틱플형성, 표면경도 증가, 결정의 나노화 등의 특성으로 고사이클피로(HCF)와 기가사이클피로(Very High cycle fatigue, VHCF), SCC(stress corrosion cracking) 등의 분야에서 피로강도의 증가가 매우 크고, 마찰계수 감소로 마모특성 향상 및 내마모성이 매우 좋아졌다.<sup>(3,4,6,7)</sup>

본 연구에서는 Table 1 와 같은 조건으로 Ti-6Al-4V 재에 UNSM 을 처리하여 피로시험편을 제작하였다. 이를 통하여 표면경도의 상승과 함께, 표면조도 R<sub>a</sub> 가 0.71 에서 0.22 로 크게 감소하는 등의 좋은 기계적인 특성을 얻을 수 있었다. 이렇게 제작된 시험편으로 인장시험과 피로시험을 실시하였다. 이 때 미처리 Ti 재는 사포 200 번부터 100 번씩 증가시키면서 2000 번까지 연마한 후 버핑하여 선반가공에 의한 영향을 최대한 없애도록 노력하였다. 그러나 UNSM 처리재는 기계가공한 후 가공공정의 영향을 검토키 위하여 표면연마나 버핑을 하지 않고 UNSM 처리후 피로시험에 사용하였다.

### 2.2 시험편의 형상

본 연구에 사용된 Ti 재는 고급 Ti 재료로서 (Ti-6Al-4V), Al 5.5~6.5%, V 4%를 함유하고 있다.

시험편의 형상은 두 가지로 회전굽힘(R=-1)의 경우 Fig. 1(a)와 같이 중앙평활부의 직경이 각각 6 mm 와 5 mm 였으며, 축하중 인장압축피로시험(R=-1)의 경우 Fig. 1(b)와 같은 형상으로 직경은 7 mm 이었다.

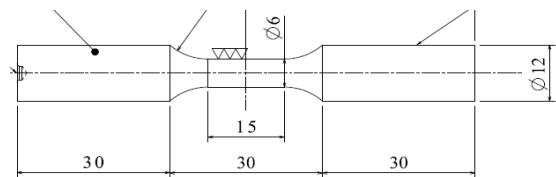
## 3. 실험결과 및 토론

### 3.1 인장시험

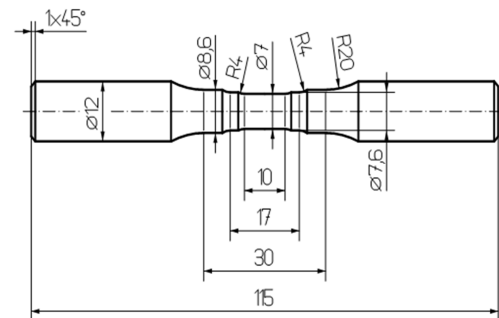
직경 6 mm 인 미처리 Ti 시험편과 직경 5 mm 인 UNSM 처리재에 인장시험을 실시한 경우, 직경의 차이가 있으므로 두 종류의 시험편 모두 선도에서

**Table 1** Condition of UNSM treatments

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



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



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

는 크게 차이가 생겼지만, 2 개의 시험편의 자료를 응력과 변형률로 다시 정리하면 2 개의 직경이 다른 시험편의 최대인장응력은 비슷한 990 MPa 정도로 나타났다. 여기서 UNSM 의 효과는 단순인장 시험에서 잘 나타나지 않음을 알 수 있었다.

인장시험편은 중앙부에서 인장 파단 되었으며 보통 연성이 큰 연강재와 유사하게 수축부(necking)가 뚜렷하게 나타났고, 부분적인 컵과 콘(cup and cone)의 형상을 잘 나타내었다. 미처리 6 mm 재의 연신율은 22%( $\delta=3.3$  mm, L=15 mm)이었고, UNSM 처리된 5 mm 재의 연신율은 16.7%( $\delta=2.5$  mm, L=15 mm)정도로 web 상에서 구한 연신율 10% 보다는 약간 큰 편이었다.

### 3.2 경도시험

Fig. 2(a)는 UNSM 처리를 실시한 시험편을 300 g 하중으로 표면(H<sub>v</sub>=393)에서 깊이 방향에 따라 측

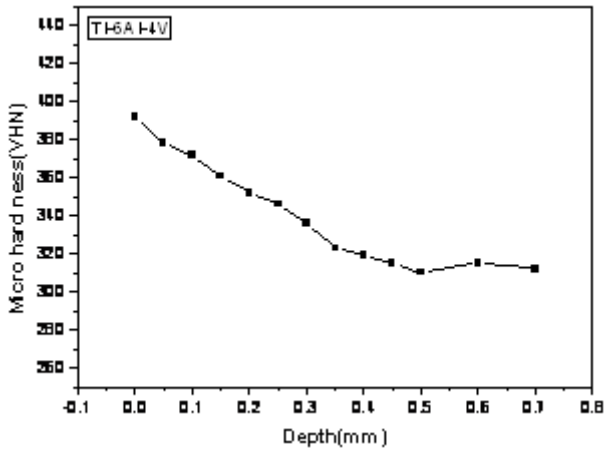


Fig. 2(a) Variation of Micro-Vickers hardness from surface to depth

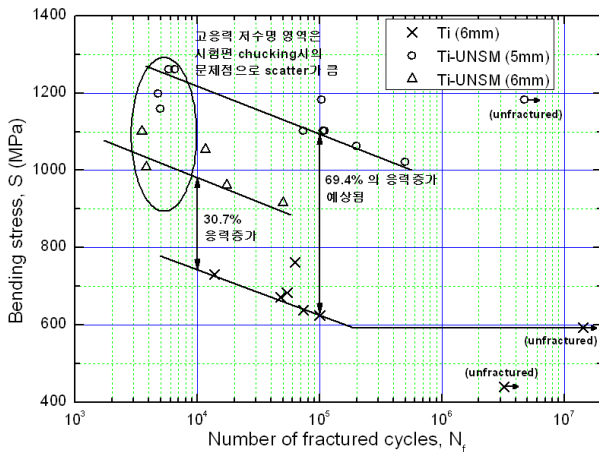


Fig. 2(b) S-N curves under rotating bending stress

정된 비커스 경도치의 변화를 나타내었다. UNSM 처리하면 미처리재( $H_V=312$ )보다 표면에서는 약 26% 정도 경도치가 증가하였다가 점차 깊이 방향으로 경도치가 감소하는 경향을 나타내었으며 0.5 mm 근처에서 미처리재와 비슷한 경도치인  $H_V=312$ 에 도달하였는데, 이 경향은 다른 재료의 연구결과와도 유사하였다.<sup>(3,4)</sup>

### 3.3 회전굽힘피로시험 ( $R=-1, 3150 \text{ rpm}$ )

#### 3.3.1 S-N 곡선

Fig. 2(b)는 회전굽힘 피로시험에서 얻는 응력과 피로수명곡선인 S-N 곡선을 나타낸다. 여기에 “X”로 나타낸 직경 6 mm 미처리 Ti 시험편은 직선상에 잘 수렴되었으며 피로한도는 약 592 MPa 이다.

직경 6 mm 시험편에 UNSM 처리를 실시하여 피로시험을 수행하면 “Δ”로 나타낸 것과 같은 실험 결과가 얻어졌다. 다소 분산도가 크게 나타났지만

미처리재보다 피로수명  $10^4$  회에서 피로강도가 약 31% 증가하였다. 이와 같이 Ti-6Al-4V에 UNSM 처리를 하여 표면에 압축잔류응력을 형성시키면 피로강도가 30% 이상 증가하는 것은 매우 우수한 표면개질(surface modification)이 된 것으로 평가된다. 이 UNSM에 의한 피로강도의 증가경향은 다른 재료에서도 얻어졌다.<sup>(3-7)</sup>

또 그림 상에는 “O”로 나타낸 자료는 직경 5 mm 인 Ti 피로시험편에 UNSM 처리를 한 경우의 S-N 곡선이다. 이 “O”로 나타낸 자료도 분산도가 “X”로 나타낸 자료보다 크지만 이 S-N 곡선에서  $10^5$  피로수명에서 약 69%의 증가효과가 생겼다. 그러나 높은 굽힘응력으로 시험편을 물리는 (chucking) 작업이 쉽지 않으므로 피로시험의 수행이 까다로웠다.

이러한 일련의 피로시험과정에서 특히 직경 5 mm 인 경우는 UNSM 효과가 매우 뛰어나 큰 하중에서도 우수한 결과를 보였다. 즉 UNSM 처리된 직경 5 mm 인 경우는 미처리재 6 mm 인 시편과 같은 하중에서 비슷한 피로수명을 가지고 장수명 영역에서는 그 이상의 피로수명을 나타내므로 UNSM 효과에 의하여 부품의 소형화가 가능함을 입증하였다.

#### 3.3.2 미처리재 및 처리재의 파단특징

미처리재의 경우 응력차이에 큰 영향 없이 단일 균열(single crack)로 표면에에서 피로균열이 발생하여 성장, 피로파단 되는 파면 특징을 가졌다. UNSM 처리재의 특징은 피로 파단수에 가깝게 다가갈수록 큰 열이 발생함과 동시에 시험편 중앙부 표면에 남아있는 기름이 타는 냄새가 나면서 청열(blue heat)의 푸른색이 피로파단 후에 생성되었다. 이러한 발열현상은 미처리재에서는 전혀 생성되지 않았다. 특히, 고응력 쪽에서는 더욱 심하였는데 이러한 발열, 청열의 산화막 형성은 UNSM 처리에 의한 표면조직의 소성변형과 나노화(nano crystallization)에 의한 열전달(heat transfer)과 방열(heat radiation)이 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

#### 3.3.3 광학현미경에 의한 미소표면균열의 관찰

Fig. 3(a)은 UNSM 처리재( $d=5 \text{ mm}, 1062.7 \text{ MPa}$ )의 표면상의 미세적인 피로균열의 형상과 합체거동을 관찰한 예로 광학현미경으로 저배율 연속 촬영한 영상을 모자이크(Mosaic)식으로 연결한 것이다.

횡축의 선이 UNSM 처리에 의하여 표면에 형성된 선이고, 종축의 골과 같은 선은 현미경 사진

을 촬영하여 폭 방향으로 크게 축소, 합성시켜 나타낸 것이다. 이 사진에서 발열에 의하여 생긴 균열의 푸른색을 알 수 있었다. 또 UNSM 처리선에 따라 작은 표면피로균열이 복수로 다수 발생, 성장, 합체하여 큰 피로균열로 판단되는 현상을 관찰할 수 있었다.

(1) SEM 사진에 의한 미소표면균열의 관찰

Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)의 광학현미경 사진의 형상과 크기를 정밀하게 파악하기 위하여 SEM(scanning electron microscope)을 통하여  $\times 100$  배율로 관찰한 사진으로 횡축의 균열길이를 정확하게 산출 가능하였다. 약 0.75 mm 에서 1.125 mm 의 표면균열 4 개가 합체되었다. 이 사진에서 주균열(major crack)의 상, 하에는 SEM 사진의 확대에 의하여 작은 표면균열이 다수 발생하여 합체된 것을 알 수 있었다.

(2) 파단면상의 SEM 사진

Fig. 4(a)는 직경 6 mm 의 미처리재(624.2 MPa,  $N_f=1 \times 10^5$ )의 파단면을  $\times 100$  배율로 확대 관찰한 사진이다. 이 미처리재 경우에는 사진 상에 사각형 표시의 표면상에서 한 개의 주균열이 발생, 성장, 파단 되었지만 주균열의 발생영역에 사각표시와 같이 개재물이 관찰되었다. Fig. 4(b)는 주균열의 발생위치의 사각부분내의 개재물을 EDS 로 성분을 분석한 예로, 본 시험편의 주성분인 Ti, Al, V 성분이 주로 분석되었다.

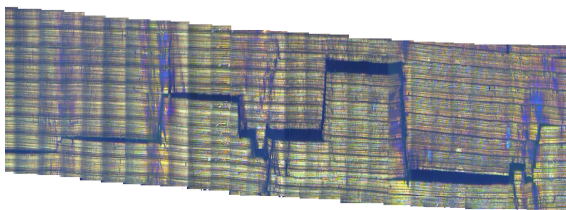


Fig. 3(a) A photo-mosaic of optical microscope; multi-fatigue cracks coalesced each other



Fig. 3(b) A magnified SEM image ( $\times 100$ ) indicates crack initiation and its coalesced form

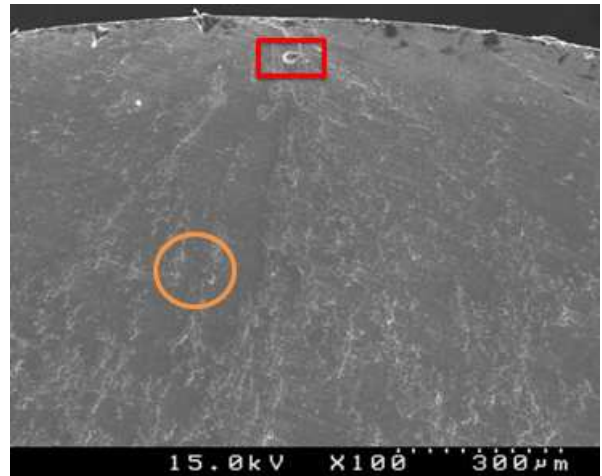


Fig. 4(a) A magnified SEM image of crack initiation site

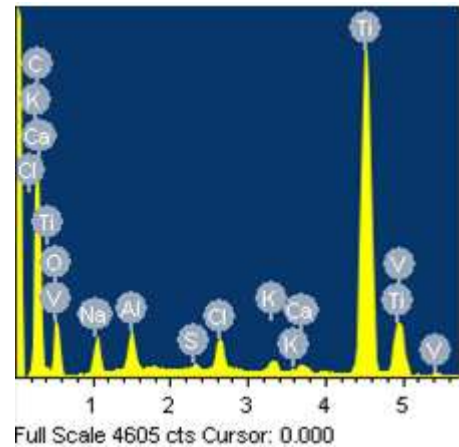


Fig. 4(b) An EDS analysis where small inclusion marked in square at Fig.4(a)

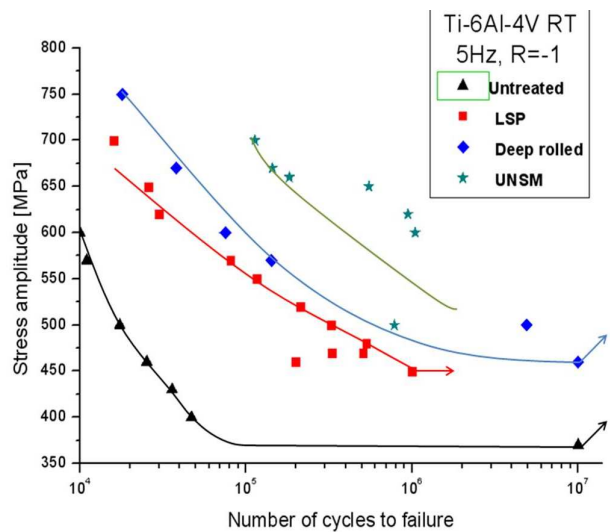


Fig. 5 S-N curves under axial loading tension-compression cycle

### 3.4 축하중 인장압축피로시험(R=-1, 5Hz)

#### 3.4.1 S-N 곡선

Fig. 5 는 Fig. 1(b)와 같은 피로시험편을 사용하여 축방향 인장압축피로시험(R=-1, 5Hz, RT, sinusoidal wave)을 실시하여 얻은 응력과 피로수명 곡선인 S-N 곡선이다. 여기에는 UNSM 처리 효과를 다른 표면처리기술과 비교하기 위하여 미처리재, LSP(Laser Shot Peening) 및 DR(Dep Rolling) 처리재의 피로시험결과를 동시에 나타내었다.

이 그림에서 피로강도 면으로는 UNSM 처리 효과가 가장 우수하였고, 그 다음으로 DR 의 처리 효과도 좋았으며 LSP 의 처리효과가 좀 떨어졌다. 그러나 미처리재에 비하면 LSP 도 좋은 효과를 얻었다. 따라서 이러한 표면개질기술의 개발과 응용에 관하여 많은 관심과 연구가 수행되고 있다.<sup>(1-4)</sup>

Fig. 5 의 그림 상에는 “solid ★”로 나타낸 자료는 UNSM 처리를 한 Ti 피로시험편의 S-N 곡선으로  $10^6$  사이클에서 피로강도가 미처리재보다 48.6%, LSP 처리재보다 22.2%, DR 처리재보다 14.6% 상승하였다. “solid ◆”로 나타낸 DR 처리재는  $10^6$  사이클에서 미처리재보다 29.7%, LSP 처리재보다 6.7% 상승하였다. 또 “solid ■”인 LSP 처리재는 미처리재에 비하면 21.6% 상승하였다.

여기에서 연구된 3 가지의 표면개질기술인 UNSM, DR, LSP 처리재는 미처리재에 비하여 각각 48.6%, 29.7%, 21.6%씩이나 피로강도가 크게 상승하였다. 특히 이러한 표면개질처리효과는  $10^6$  사이클 이상의 장수명 영역에서 매우 좋은 결과를 나타내고 있으며 이러한 효과는 다른 재료에서도 확인되고 있다.<sup>(3,4,6,7)</sup>

#### 3.4.2 피로파단상의 특징

Fig. 6 은 응력조건(700 MPa,  $N_f=1.13 \times 10^5$ )하의 피로파단 된 경우로 어안균열(fish eye crack)이 2 개 생긴 경우를 나타내고 있다. 즉 Fig. 6(a)는 SEM 으로 확대하여 이 균열 2 개(S, L)를 합성시켜 나타낸 것이다. Fig. 6(b)는 원으로 S-균열을 확대 표시한 것이며, Fig. 6(c)는 S-균열의 발생한 곳이 파셋터(facet)형태임을 확대하여 표시한 것이다. 이 S-균열은 폭; 0.82 mm, 높이; 0.67 mm 의 크기이며, 표면으로부터 0.57 mm 인 곳인 압축잔류응력의 영향이 적은 곳에서 발생하여 성장한 경우이다. 이러한 발생위치는 다른 Ti 재에서도 보고되고 있으며 통상 어안균열은 개재물(inclusion)에서 발생하지만 Ti-6Al-4V 재에는 파셋터에서만 생겼으며 다른 보고서와 유사하다.<sup>(4,5)</sup>

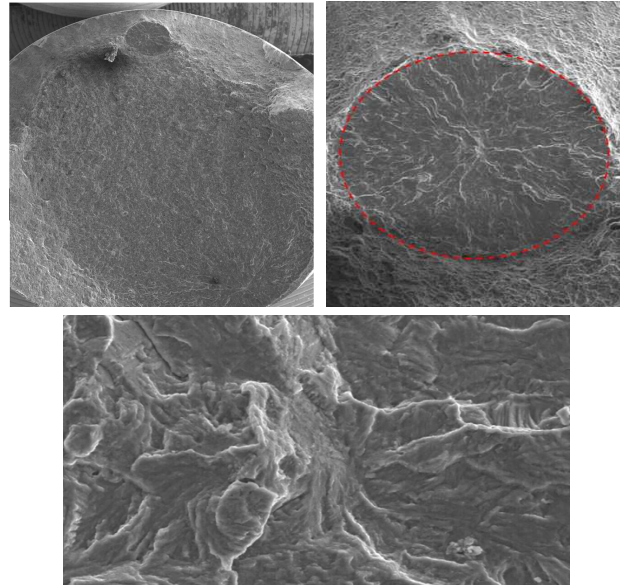


Fig. 6 a) SEM photo showing two fish eye cracks(S, L), b) Magnified view of S-crack, and c) Initiation site of S-crack facet type

또 L-균열은 폭; 1.81 mm, 높이; 1.24 mm 의 크기이며, 표면으로부터 0.52 mm 곳인 압축잔류응력의 영향이 적은 곳에서 발생하여 성장한 경우이었다. 이 균열의 발생지는 S-균열과 매우 비슷하였으며 파셋터 형태이었다.

응력조건(620 MPa,  $N_f=9.5 \times 10^5$ )하의 피로파단 된 경우에도 어안균열이 생겼으며, 응력조건(630 MPa,  $N_f=6.69 \times 10^4$ )하의 피로파단 된 경우에는 표면상에서 작은 표면피로균열이 5 개 생겨 성장, 합체된 경우도 있었다. 이러한 표면상의 발생한 경우는 다른 Ti 재에서도 보고되고 있다.<sup>(5)</sup> 이와 같이 Ti-6Al-4V 의 축 하중 인장압축피로시험에서는 내부균열발생(interior originating fatigue crack)형이 대부분을 차지하였고 드물게 표면상에서 피로균열이 발생하였다. 특히 UNSM 처리재 중에 단(step)부분에서 피로균열이 발생하면 표면균열발생(surface originating fatigue crack)형 이었다.

### 3.5 균열발생 메커니즘

Fig. 7(a)는 압축잔류응력이 깊이 방향에 따라 최고 1,100 MPa 에서 서서히 감소함을 나타내고 있으며, 이렇게 표면에서 크게 형성된 압축잔류응력이 깊이 방향으로 서서히 감소하는 경향은 공구강과 축재<sup>(3,4)</sup>에서와 유사한 결과이었다. 이 압축잔류응력은 XRD(X-Ray Diffractometer, XStress 3000)장치로 표면에서 5  $\mu$ m 씩 전해연마 실시 후 측정하였다.

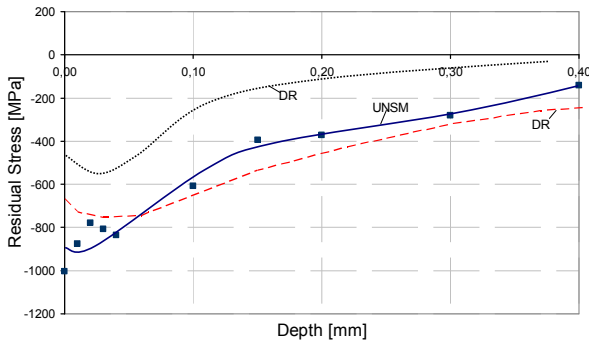


Fig. 7(a) Variation of compressive residual stress to depth of UNSM-treated specimen of Ti6Al-4V

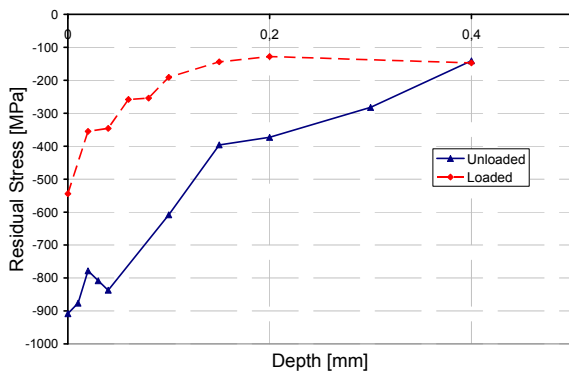


Fig. 7(b) Variation of compressive residual stress to depth of UNSM-treated specimen unloaded and fatigued

이렇게 형성된 높은 압축잔류응력(compressive residual stress)은 파단수명의 절반에서 피로시험후의 잔류응력곡선은 초기의 잔류응력보다 약 40%까지 감소하는 Fig. 7(b)와 같은 현상이 발생하였다.

따라서 피로균열(fatigue crack)의 발생 메커니즘에서 중요한 잔류응력은 Fig. 7(b)과 같이 최고 잔류응력 값에서 감소하게 되므로 Fig. 8 과 Fig. 9 와 같이 계략적으로 분석할 수 있다.

Fig. 8(a)은 굽힘피로를 받는 경우의 응력상태를 개략적으로 나타내고 있다. 즉 굽힘하중(bending load)이므로 표면에서는 최대응력이 발생하고 중립축에는 응력이 없으므로 그림과 같이 선형적으로 감소할 것이다. 또, 압축잔류응력은 Fig. 7(b)의 감소현상에 따라 Fig. 8(a)와 같이 깊이에 따라 감소할 것이다. 따라서 Fig. 8(a)의 인장응력과 압축잔류응력의 차감에 의하여 Fig. 8(b)와 같은 응력상태가 형성되기 때문에 굽힘 피로상태에서는 모두 표면에서 피로균열이 발생될 것이고 실험결과 또한 이를 뒷받침해주고 있다.

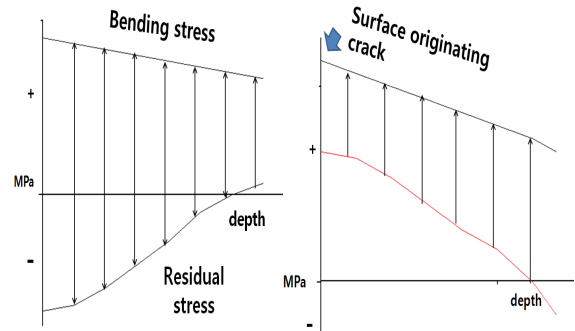


Fig. 8 Crack initiation mechanism under the rotating bending fatigue test on Ti-6Al-4V

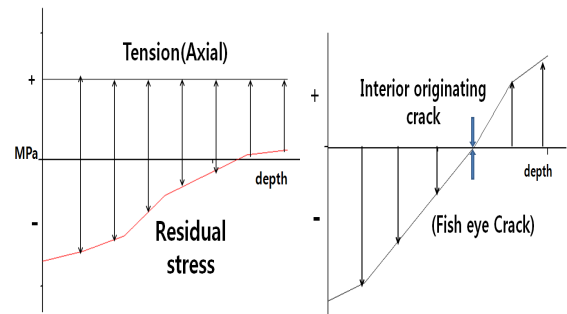


Fig. 9 Crack initiation mechanism under axial tension-compression fatigue test on Ti-6Al-4V

인장시의 축방향 인장응력상태와 압축잔류응력은 Fig. 7(b)의 감소현상에 따라 Fig. 9(a)와 같이 계략적으로 나타낼 수 있다. 여기서는 굽힘피로와 달리 표면에서는 인장작용 하중보다 압축잔류응력이 크게 작용하므로 Fig. 9(b)와 같은 깊이방향의 응력의 차감에 따라 압축잔류응력이 소멸되는 깊이 450  $\mu\text{m}$  ~ 580  $\mu\text{m}$  근방에서 “-” 하중이 “+” 하중으로 변하게 된다. 이렇게 “-” 하중이 “+” 하중으로 변하는 깊이에서 일반적으로 내부균열발생형인 어안균열(fish eye crack)이 발생하는 메커니즘이 형성됨을 그림에서 도시할 수 있다.

특히 본 연구에 사용된 Ti-6Al-4V 재는 계재물을 관찰하기 어렵기 때문에 특수강<sup>(3,4)</sup>의 경우와 달리 파셋트에서 어안피로균열이 생겼다. 이와같이 축방향 인장압축피로시험에는 응력이 집중되는 단(step)이 있는 곳을 제외하고는 대부분이 내부균열발생형인 어안균열이 주균열이었다. 따라서 Ti-6Al-4V 재는 이 단부분의 표면처리를 잘 하게 되면 모두 내부균열발생형으로 될 가능성이 큰 재질이다. 그러나 계재물에서 피로균열이 발생하지 않는 Ti-6Al-4V 재는 회전굽힘피로 시험에는 Fig. 8 와 같이 표면균열만이 발생하였다. 이러한 Ti 재의 피로균열발생의 차이는 응력구배(stress gradient)에 의한 특징으로 판단된다.

#### 4. 결 론

(1) 회전굽힘피로시험의 경우: 미처리재(직경 6 mm)와 UNSM 처리재(5 mm)와의 하중-피로파단 수명곡선은 비슷하였으며, 피로파단곡선은 직선상에 잘 수렴하였다.  $d=5$  mm 인 UNSM 처리 Ti 재는 6 mm 미처리재의 직선상에 분산대가 다소 생기면서 수렴되었다. 특히 고응력 저수명 영역에서는 UNSM 효과가 적고 피로시험편의 굽힘이 심하며 수명이 다소 짧아지는 경향이 생겼지만 장수명 영역에서는 UNSM 효과가 잘 나타나서 피로수명이 증가하는 경향을 나타내었다.

(2) 직경 5 mm 인 Ti 피로시험편에 UNSM 처리를 한 경우 분산대가 크지만 피로수명에서 약 69%의 피로강도의 증가 효과가 생겼다.

(3) 미처리 Ti 재와 UNSM 처리재( $d=5$  mm)의 거시적인 피로파단특징은 응력레벨의 차이에 큰 영향 없이 표면상에서 피로균열이 발생(surface originating fatigue crack)하여 성장하여 피로파단(fatigue fracture) 되는 파면특징을 가졌다.

(4) 축방향 인장압축피로시험: UNSM 처리를 한 티타늄 피로시험편은  $10^6$  사이클에서 피로강도가 미처리재보다 48.6%, LSP 처리재보다 22.2%, DR 처리재보다 14.6% 상승하였다. DR 처리재는  $10^6$  사이클에서 미처리재보다 29.7%, LSP 처리재보다 6.7% 상승하였다. 또 LSP 처리재는 미처리재에 비하면 21.6% 상승하였다. UNSM, DR, LSP 처리재는 미처리재에 비하여 각각 48.6%, 29.7%, 21.6%씩이나 피로강도가 크게 상승하였다. 특히 표면개질처리효과는 UNSM 을 포함하여  $10^6$  이상의 장수명영역에서 좋은 결과를 나타내었다.

(5) 높은 압축잔류응력은 피로수명에 따라 피로과정 중에 응력이완 현상이 생김을 확인할 수 있었다. 인장하중보다 표면에서 압축잔류응력이 큰 축방향피로시험에는 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 내부균열발생형(interior originating type)인 어안균열(fish eye crack)이 발생하는 메커니즘이 형성됨을 그림으로 도시하였다.

#### 후 기

본 연구는 2011년도 기초연구사업(201105610000)으로 교육과학기술부와 한국연구재단의 지원을 받

아 수행된 연구결과임. 또한, 주저자는 NRF(2010-0028287)의 지원에 감사 드리며 전자현미경은 한국기초과학지원연구원의 장비(SEM, Hitachi S-4200, KBSI, Daegu)를 사용하였음.

#### 참고문헌

- (1) Altenberger, I., 2005, "Deep Rolling - The Past, The Present and The Future," *Proc. 9th Int. Conf. on Shot Peening*, pp.144~155.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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," *Proc. of Joint Conference with Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, pp. 1574~1579.
- (5) 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.
- (6) Cho, I.H., Song, G.H., Suh, C.M., Pyoun, Y.S., et al., 2005 "Nano Structured Surface Modification of Tool Steel and Its Beneficial Effects in Mechanical Properties," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19-11, pp.2151~2156.
- (7) Pyoun, Y.S., Park, J.H., Cho, I.H., Kim, C.S. and Suh, C.M., 2009, "A Study on the Ultrasonic Nano Crystal Surface Modification (UNSM) Technology and It's Application," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 33 No.3, pp.190~195.
- (8) Suh, C.M., Suh, M.S. and Hwang, N.S., 2011, "Growth Behaviours of Small Surface Fatigue Crack in AISI 304 Steel," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 35, Issue 1, pp. 22~29.
- (9) Suh, C.M., Suh, M.S. and Kim, S.K., 2011, "Fracture Mechanics of Surface Fatigue Crack Growth by Ductile Striation Space Measurement in Notched Waspaloy," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 35, Issue 1, pp. 30~36.