

## 초음파 나노 표면개질 기술의 정하중 레벨이 SKD61 강의 피로특성에 미치는 영향

서창민\* · 김성환\*  
\*경북대학교 기계공학부

### Effect of Static Load Level of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology on Fatigue Characteristics of SKD61

CHANG-MIN SUH\* AND SUNG-HWAN KIM\*

\*Department of Mechanical Engineering Graduate School, Kyungpook National University, 702-701 Daegu, Korea

**KEY WORDS:** Ultrasonic nanocrystal surface modification(UNSM) 초음파 나노 표면개질, Fatigue 피로, Fish eye crack 어안균열, Compressive residual stress 압축 잔류응력

**ABSTRACT:** Ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) is a method to induce severe plastic deformation to a material surface, so that the structure of the material surface becomes a nanocrystal structure from the surface to a certain depth. It improves the mechanical properties, namely hardness, compressive residual stress, and fatigue characteristics. Specimens of SKD61 were tested to verify the effects of the variation of UNSM static load level on fatigue characteristics. The results were as follows: the grain size of SKD61 treated with UNSM became very fine from the material surface to a 100 $\mu$ m depth. The surface hardness of SKD61 was increased up to 37% after UNSM. And fatigue strength at  $10^7$  cycles was increased by 8.3, 11.2, and 17.9% respectively, when the static load levels of UNSM were 4, 6, 8 kgf.

#### 1. 서 론

최근 기계재료들은 고속, 고하중하에서 사용되는 경우가 증가되고 있다. 이에 따라 금속재료들은 계속적인 반복하중으로 인해 균열이 발생하고, 급격한 파괴에 이르게 된다. 따라서 금속재료는 피로강도와 피로수명의 향상 및 그 신뢰성, 무한 수명으로의 요구가 증대되고 있다. 이에 따라 고강도의 재료와 재료의 표면성질을 향상시켜 필요한 특성을 얻을 수 있는 표면처리법이 매우 중요시되고 있다(Suh et al., 1998; 우창기와 김희송 1989; Kwak and Gil, 1985; Kim et al., 2003).

따라서 소재 표면에 여러 가지 방법을 이용하여 소성변형을 유발시킴으로 소재 표면으로부터 일정 깊이까지 조직을 미세화시켜 기계적인 성질을 향상시키고자 하는 연구들이 진행되고 있다(Pyoun and Son, 2005; Park, 2005; Cho et al., 2005). 이러한 연구들 중에서 최근에는 초음파 진동에너지(Ultrasonic vibratory energy)를 이용하여 소재 표면에 소성변형을 유발시키는 연구가 시도되고 있다(Pyoun and Son, 2005; Park, 2005; Cho et al., 2005).

본 연구에서 사용된 초음파 진동 에너지를 이용한 초음파 나노 표면개질 (Ultrasonic nanocrystal surface modification,

UNSM) 기술은 가공 소요 에너지가 작고 대상체의 크기에 제한을 받지 않으며 가공 후, 후처리가 필요 없다. 또한 이 기술은 소재 표면으로부터 일정 깊이까지의 물성을 개선시키는 방법으로 초정밀 수준의 표면 거칠기와 부품의 표면경화를 동시에 얻을 수 있으며, 가공 칩을 발생시키지 않는 친환경적인 기술이다(Pyoun and Son, 2005; Park, 2005; Cho et al., 2005).

본 연구에서는 SKD61강을 대상으로 피로강도, 마모강도 등에 기여되는 UNSM공정 중 하중크기의 효과를 극대화하기 위한 최적 공정조건에 관한 정량적인 자료 확보를 목표로 연구 실험하였다.

#### 2. 초음파 나노 표면개질기술

UNSM 기술은 초음파 진동 에너지를 이용하는 것이다.

일정한 초기 압력을 가한 상태에서 가공 대상재의 일정 면적을 수  $\mu$ m의 진폭으로 초당 수 만번 강타하여 가공 대상재의 표면에 심한 소성변형(Plastic deformation)을 유발시킨다. 이렇게 하면 표면으로부터 일정 깊이까지(약 100 $\mu$ m)조직을 미세화시킬 수 있다. 이와 같은 조직 미세화는 재질의 경도, 압축잔류응력, 마모 및 피로특성 등을 향상시켜 내마모성 및 내충격성을 향상시키게 된다(Pyoun and Son, 2005; Park, 2005; Cho et al., 2005).

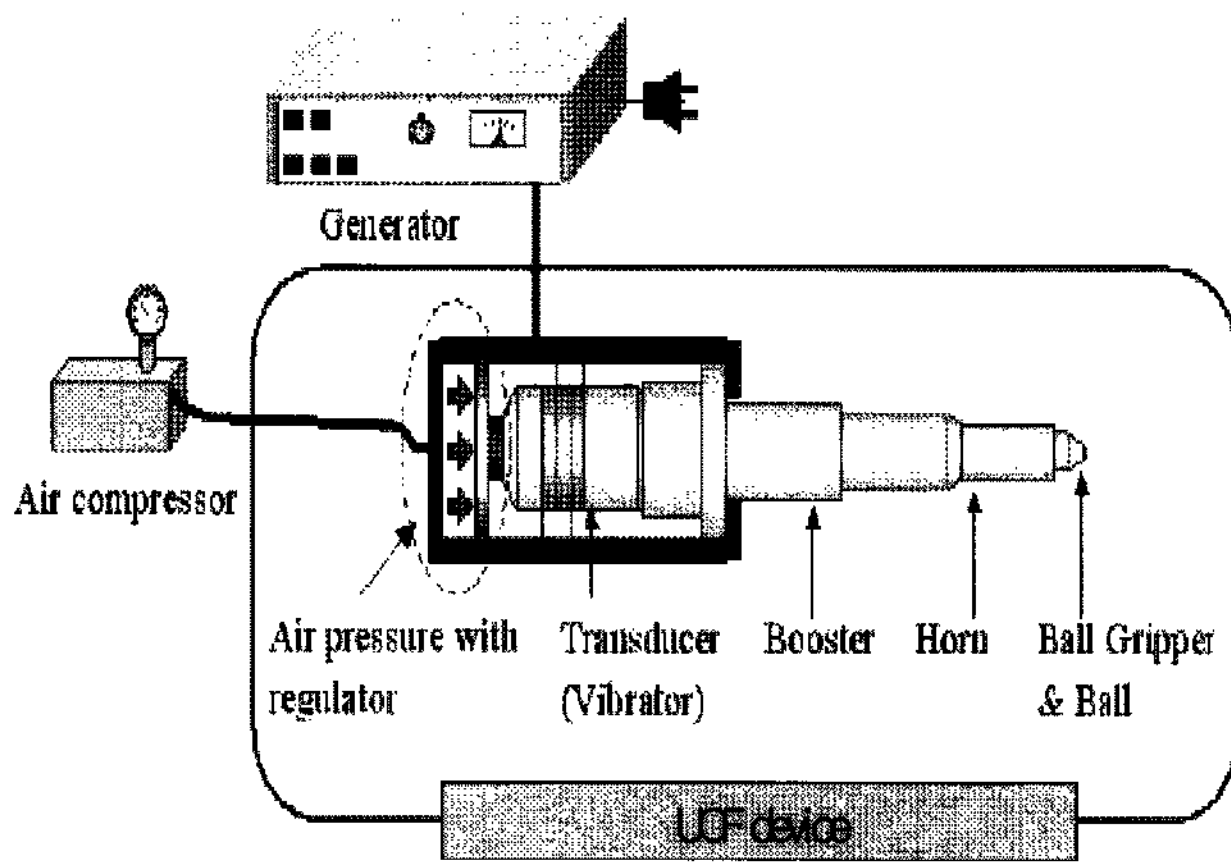


Fig. 1 Schematic diagram of the UNSM device

Fig. 1은 UNSM 장치에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 이것은 전기적인 초음파 주파수를 발생시키는 초음파 발전기(Generator), 정적하중을 인가하는 공기 압축기(Air compressor), 기계적인 초음파를 발생시키는 압전소자( $Pb(Zr,Ti)O_3$ ), 발생된 초음파를 증폭시키는 부스터(Booster), 증폭된 초음파를 손실없이 전달해주는 혼(Horn) 및 초음파 진동에너지를 최종적으로 가공 대상재에 전달하는 팁 볼 등으로 구성되어 있다.

Fig. 2은 평면가공 및 나이프와 같은 원주면 가공시 UNSM 방법을 개략적으로 나타낸 그림이다. 이 그림에서  $P_{st}$ 는 정적하중(Static load),  $P$ 는 동적하중의 진폭(Amplitude of dynamic load),  $S$ 는 초음파 진동장치 주축의 이송량(Feed),  $S_s$ 는 전, 후 타점 간 볼의 이동거리,  $S_o$ 는 원주면 가공시 전, 후 타점 간 볼의 이동거리,  $A$ 는 초음파 진동의 진폭,  $V$ 는 회전 공작물의 선속도,  $V_I$ 는 볼의 진동속도,  $r$ 은 볼의 반경,  $D$ 는 공작물의 직경을 각각 나타낸다.

UNSM 가공시 초음파 진동장치로부터 가공 대상재에 가해지는 총에너지는 초음파 진동장치를 일정한 압력으로 밀어주는 정적 에너지와 초음파 진동에 의한 타격으로 작용하는 동적에너지의 합으로 식 (1)과 같다.

UNSM 가공시 주요인자로는 정적하중, 초음파진동의 진폭, 가공 대상재의 회전속도, 초음파 진동장치의 이송속도, 팁 볼의 크기 및 가공 대상재의 직경 등으로 가공 대상재에 따라 이들 상호인자간의 최적 조건을 도출하여 적용할 필요가 있다.

$$P_t = P_{st} + P \sin 2\pi ft \quad (1)$$

### 3. 시험편 및 실험 방법

#### 3.1 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 열간 금형 공구강의 대표적인 재료인 SKD61강으로써 열간 압출 및 다이캐스팅 금형, 열간

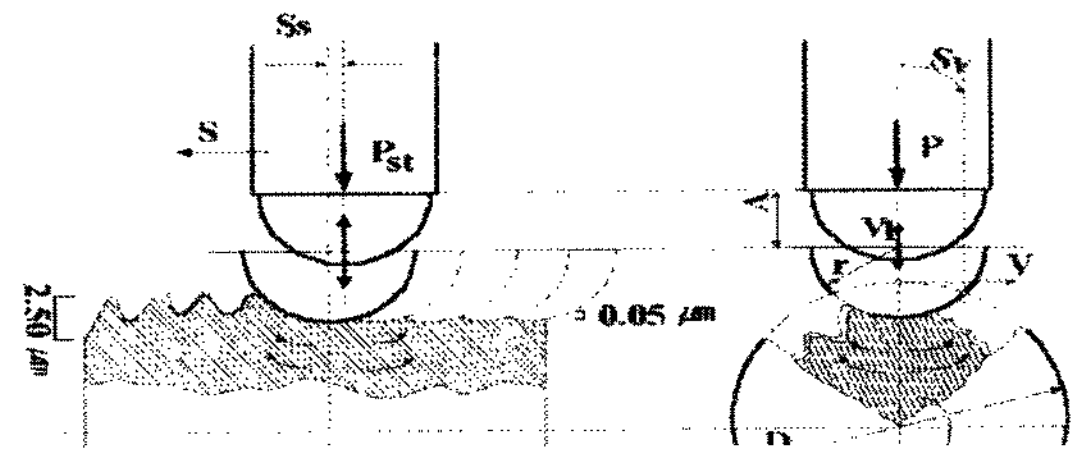


Fig. 2 Model of UNSM

단조 용도로 사용된다. 여기서 SKD61은 JIS규격이며, KS규격으로는 STD61(열간 금형 공구강)이다. 이 SKD61강은 주요 성분으로 Cr 4.5%~5.5%, Mo 1.0%~1.5%를 가진 Cr-Mo 열간 금형강이다. Table 1은 시험편의 UNSM 처리전과 처리 후 SKD61강의 기계적 성질을 각각 나타내고 있으며 기계적 성질이 약간 변화였다.

시험편인 SKD61강을 기계가공한 후 30분간 가열한 후 650°C, 850°C 그리고 1030°C에서 각각 1시간씩 항온유지시켜 3차례 열처리하였다. 또한 오스테나이트의 상태로 가열하고 급랭하여 펄라이트로의 변화를 저지하고 매우 단단한 마르텐사이트(Martensite)조직으로 만들기 위하여 80°C까지 유냉시킨 후 Sub-zero처리를 실시하였다. 오일 담금질(Oil quenching)한 재료에 인성을 부여하고 내부응력을 제거하기 위하여 550°C, 570°C에서 각각 3시간동안 유지한 후 공냉하여 뜨임(Tempering)하였다.

본 연구에서는 JIS Z 2274에 의거하여 평활부 길이 8mm, 평활부 직경 8mm인 피로시험편을 제작 사용하였다. 이 피로 시험편은 길이방향(Longitudinal direction)으로 가공하였다. 이것은 균열이 회전축에 직각방향으로 진전하도록 하기 위함이다. 시험편은 평활부를 연마지(Emery paper)를 이용하여 #2000까지 연마한 후, 산화 크롬(Cr2O3)과 산화 알루미늄(Al2O3)으로 버핑하여 경면가공(Polishing) 한 다음 초음파 세척기를 사용하여 표면에 존재하는 이물질 제거하였다. 이 상태에서 피로시험을 수행하였다.

본 실험에서 사용된 피로시험기는 Ono-type 회전굽힘 피로 시험기로 용량은 최대 굽힘모멘트 10kgf·m, 회전수 3450rpm이다.

#### 3.2 실험 방법

본 연구에서는 초음파 나노 표면개질 전의 시험편(무처리 피로시험편)을 Before UNSM재, UNSM 처리 후의 시험편을 After UNSM재로 명명한다. 그리고 UNSM처리시 가해지는 정적하중을 4, 6, 8kgf의 세 가지 종류로 달리하여 시험편 표면에 나노 표면개질을 하였다. 본 실험에서는 SKD61강의 기계적인 특성을 파악하기 위해서 표면 거칠기 시험, 조직관찰, 경도 시험, 피로시험 등을 행하였다. 또한 피로파단된 시험편은 SEM(Scanning electron microscope, Hitachi, S4700)으로 피로파단면을 관찰하였다.

표면 거칠기 시험은 나노 표면개질된 SKD61강의 표면 특성

을 관찰하기 위하여 실시하였다. 이 시험은 접촉식 표면 거칠기 시험기(Surfest-500, Mitutoyo)를 이용하여 표점거리를 1.6mm로 해서 중심선 평균 거칠기( $R_a$ ), 최대 높이 거칠기( $R_{max}$ )를 각각 10회 측정하여 그 평균값을 Table 3에 나타내었다.

경도시험은 마운팅 시킨 시편에 Before UNSM재와 after UNSM재에 대한 표면 특성을 파악하기 위하여 시험편의 표면에서 중심으로  $20\mu m$ 의 일정한 간격으로 실시하였다. 경도시험은 Micro Vickers hardness tester(FM 700e, Future-Tech)를 이용하였으며 각각의 깊이에 대해서 5번의 시험 결과를 평균하여 경도치를 정하였다. 시험기의 압입하중은 200g으로 하중이 부하되는 시간은 30sec이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 표면의 특성

Table 2는 UNSM 전, 후의 마모량과 마찰계수를 정리하여 나타낸 것으로 마찰계수는 UNSM 처리재의 경우가 미처리재 대비 약 절반 정도로 감소하였다. 또한 UNSM 처리재의 경우 미처리재에 비해 시간의 경과에 따른 급격한 마찰계수 감소 경향을 나타내지 않고 완만하게 감소하며 마모량은 약 30배정도 감소하였다.

표면 거칠기는 Table 3와 같이 UNSM 처리재의 경우가 미처리재 대비  $R_a$ 는 UNSM처리가 4kgf일 때는 약 4배, 6kgf일 때는 11배, 8kgf일 때는 30배 정도로 증가하였다. 그리고  $R_{max}$ 는 미처리재 대비 4kgf일 때는 약 2배, 6kgf일 때는 4배, 8kgf일 때는 5배 정도로 증가하였다. 이는 UNSM 처리 시 불탑이 시험편과 부딪히면서 생성된 표면층에서의 소성변형의 결과라고 판단된다. 이러한 표면조도는 피로시험중 저하중/장수명 영역에서의 피로수명에 상당한 영향을 줄 것으로 보고되고 있다(Stephens et al., 2001; Barsom and Rolfe, 1999; Banantine et al., 1990).

##### 4.2 시험편 표면 관찰

Fig. 3은 UNSM처리된 SKD61강 시험편 표면을 정적하중(Pst)에 따른 표면형상을 광학현미경으로 관찰한 예를 나타내었다. Fig. 3(a)는 UNSM를 처리할 때 가하는 하중이 4kgf, Fig. 3(b)는 6kgf, 3(c)는 8kgf를 각각 나타내며 Pst를 점점 증가시킬수록 시험편 표면의 조도( $R_a$ ,  $R_{max}$ )가 증가하였다.

##### 4.3 조직 관찰

Fig. 4는 시험편의 UNSM 처리 전, 후의 표면으로부터 깊이 방향쪽의 조직 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 4(b)에서 표면에서 깊이방향으로 약  $80\sim 100\mu m$ 정도까지 UNSM에 의한 소성변형에 의해 미세화된 조직이다. 이렇게 초음파 에너지에 의한 소성변형의 영향을 받아 미세화된 조직은 소성변형된 영역 범위에서의 경도, 압축 잔류응력, 마모 및 피로특성의 상승효과를 유발시키는 것으로 판단된다(Cho et al., 2005).1

Table 1 Mechanical properties of SKD61 steel

Specimen	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)
Before UNSM	1196	1397	9.36	8.19
After UNSM	1196	1375	11.53	9.70

Table 2 Comparison of wear amount and friction coefficient before and after UNSM

	Wear amount (mg)	Friction coefficient
Before UNSM	1.179	0.42
after UNSM	0.039	0.21~0.24

Table 3 Comparison of surface roughness before and after UNSM according to static pressure

	before UNSM	after UNSM		
		4 Kgf	6 Kgf	8 Kgf
$R_a$	0.46	2.0	5.1	14.4
$R_{max}$	2.30	5.3	8.2	15.8

##### 4.4 경도 특성

UNSM 전후의 표면경도는 약 40%정도 증가하였다. 또 깊이 방향으로도 일정깊이(약  $60\mu m$ )까지 경도가 향상됨을 알 수 있으며 그 이후는 UNSM 전, 후의 경도값이 비슷함을 알 수 있다.

##### 4.5 S-N곡선 특성

Fig. 6은 Before UNSM 재의 S-N곡선을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 7은 재료 표면에 인가되어지는 정적하중을 4, 6, 8kgf의 세가지로 변화시켜 After UNSM재의 피로시험을 실시하여 얻어낸 그림에 Fig. 6을 동시에 나타낸 것이다. Before UNSM의 시험편의 피로파단의 특징은 시험편 표면상에서 미소표면균열(Micro surface crack)이 발생하여 성장, 합체과정을 거쳐 시험편이 파단되었다.

After UNSM재의 경우는 시험편 표면에 존재하는 압축잔류응력의 영향으로 표면에서 발생된 균열이 아닌 Fisheye crack이 주로 발생하였다. 이것은 시험편 내의 개재물(Inclusion)에서 크랙(Crack)이 발생, 성장하는 형태이다.

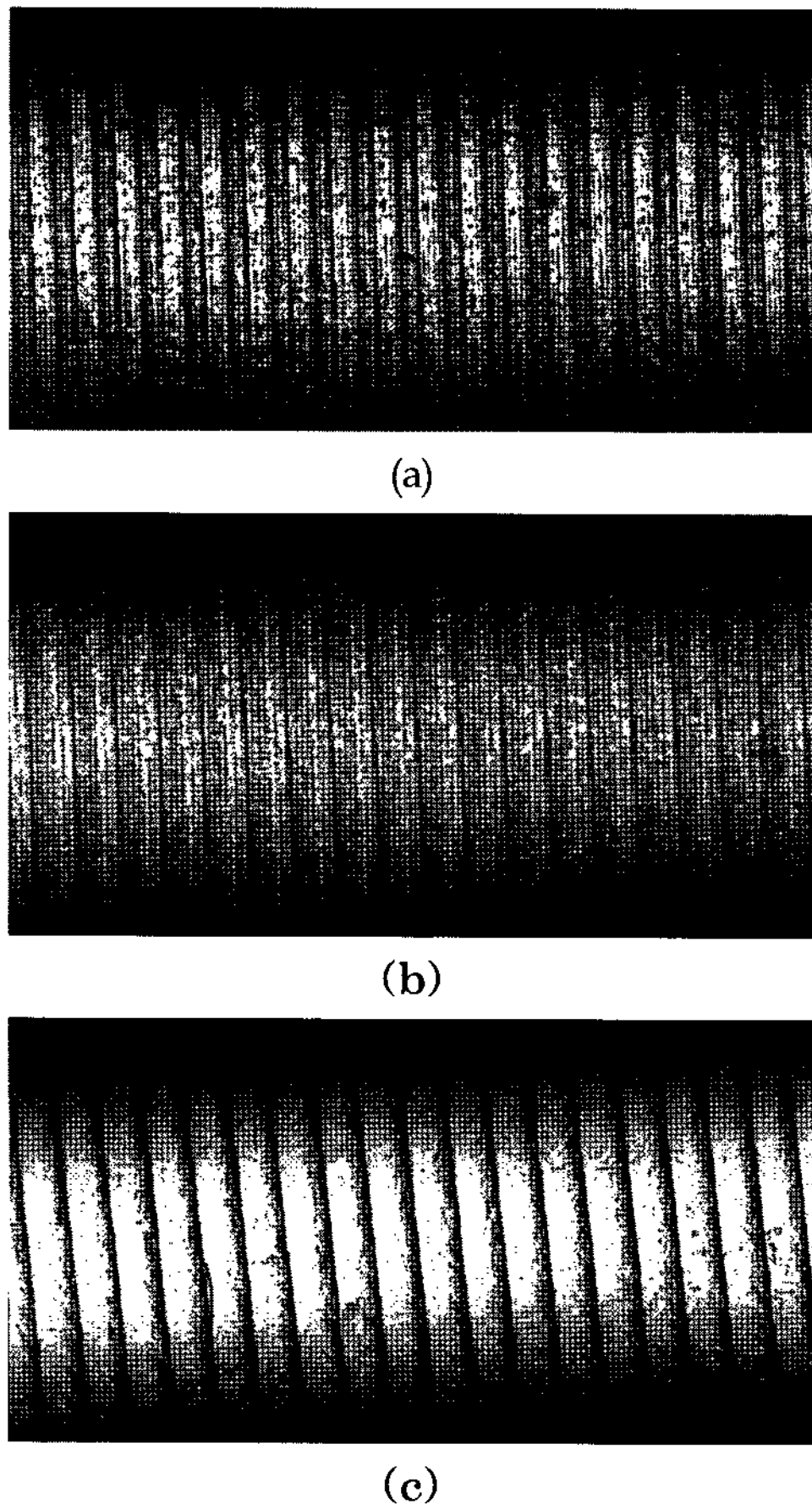


Fig. 3 Surface of smooth specimen after UNSM at static load level (a) 4kgf, (b) 6kgf and (c) 8kgf

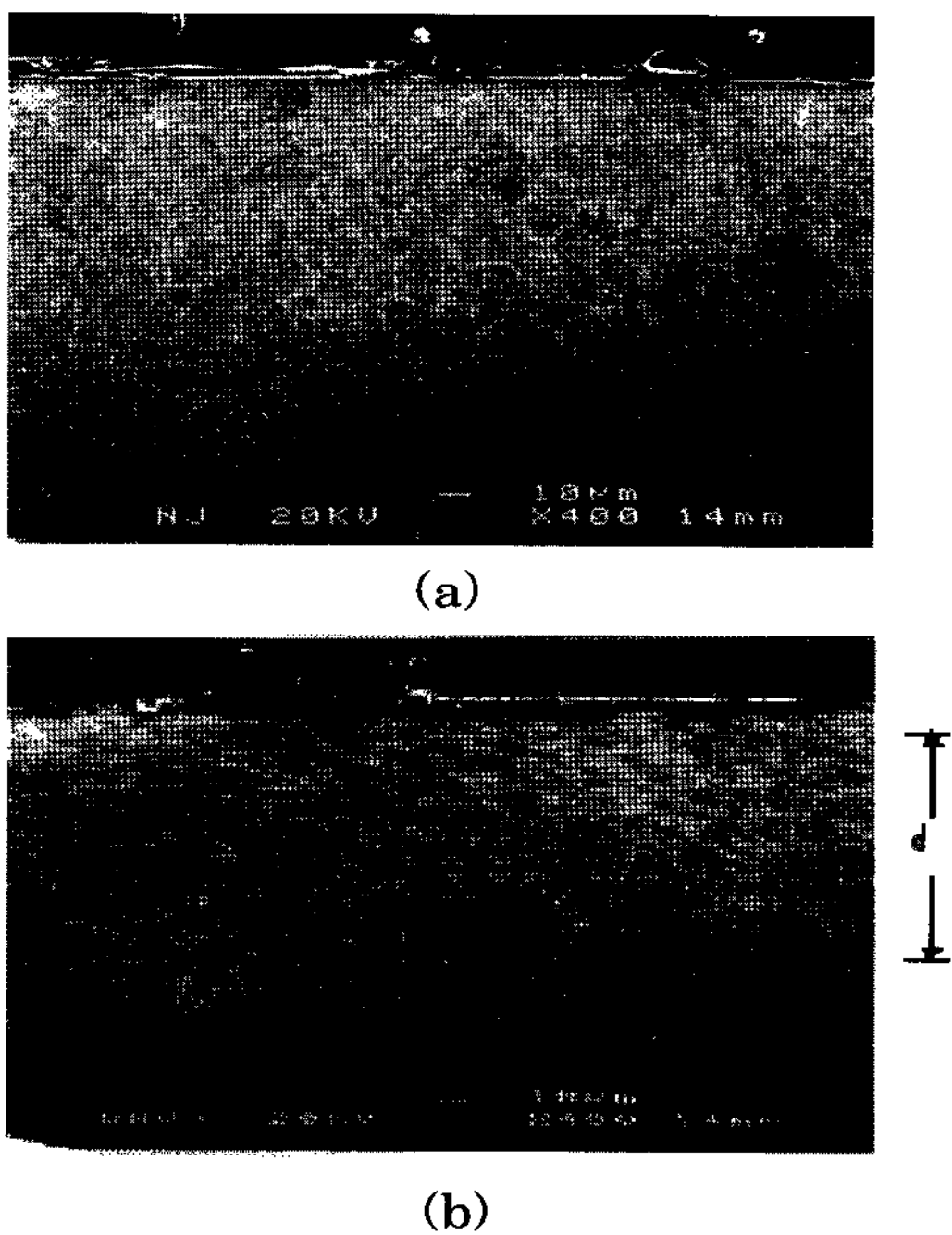


Fig. 4 Variation of the microstructure of SKD61 (a) before and (b) after UNSM

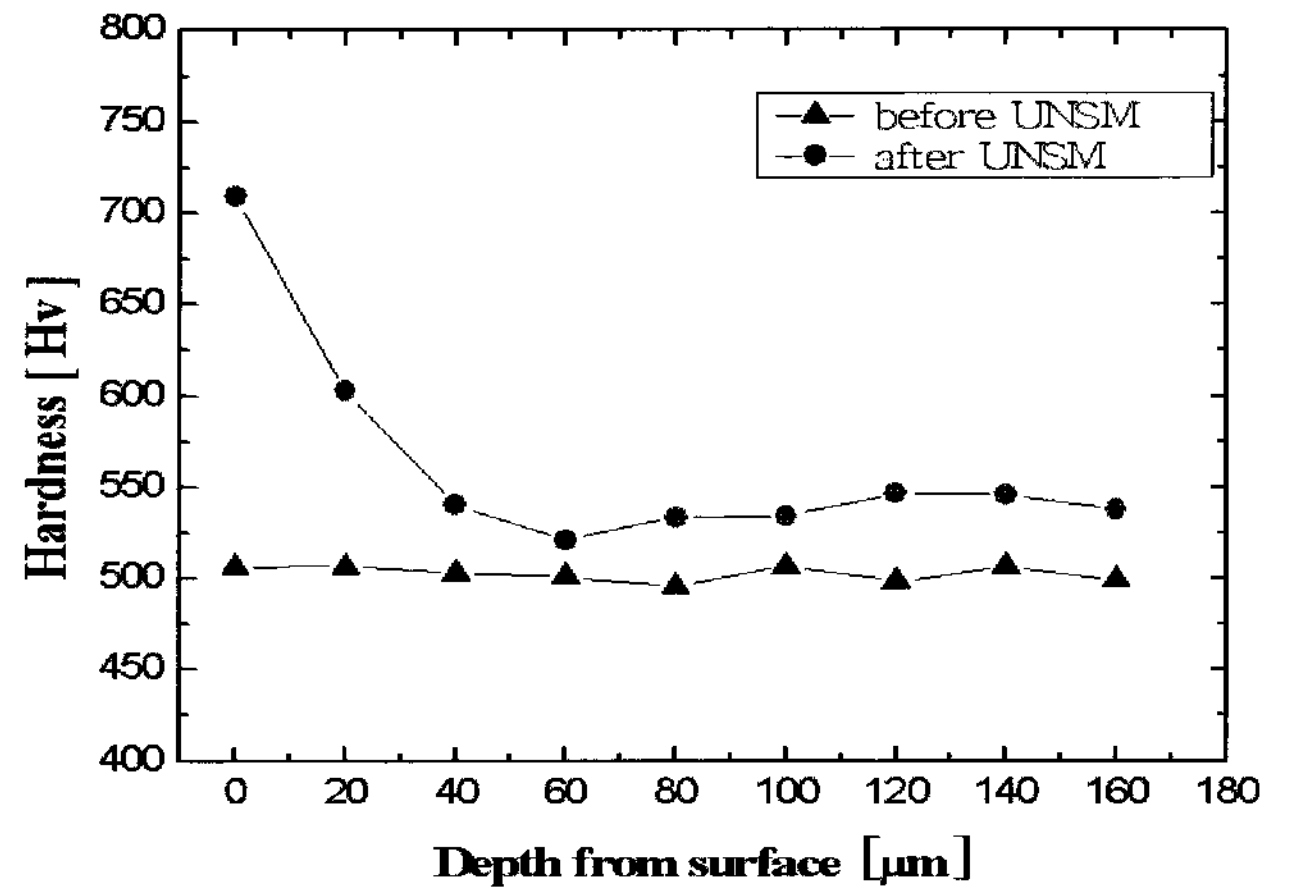


Fig. 5 Distribution of micro Vickers hardness from surface to depth before and after UNSM

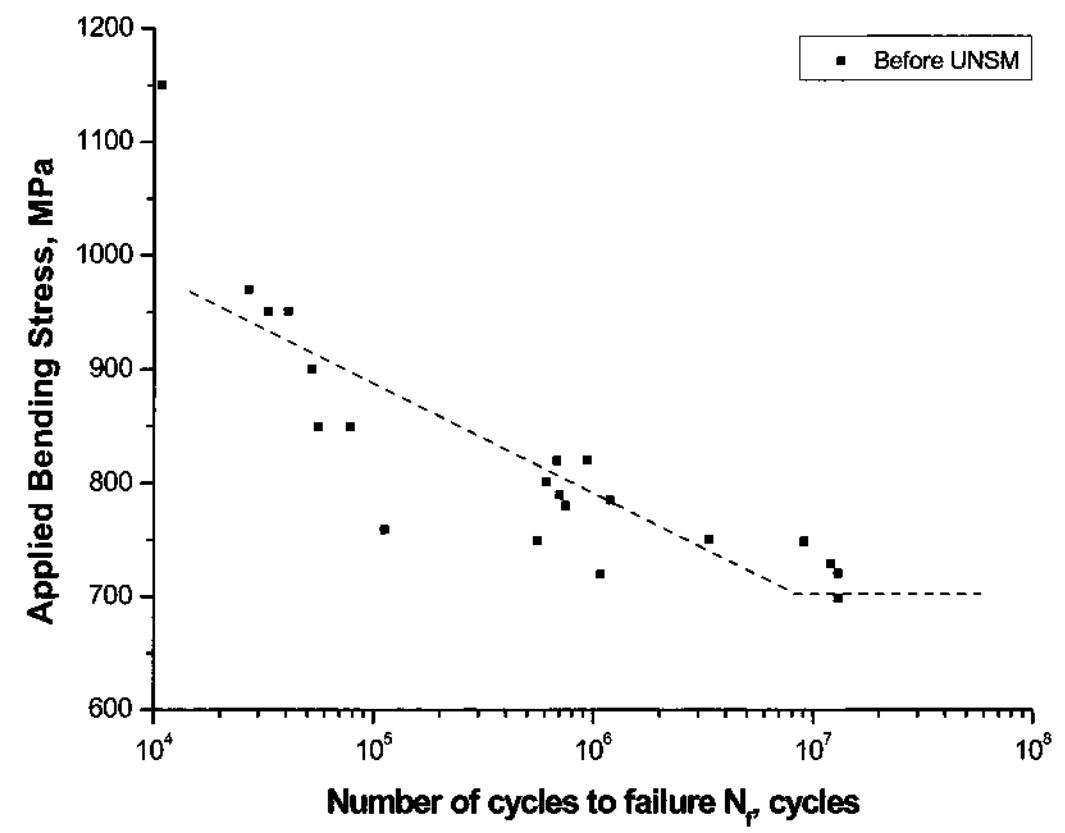


Fig. 6 S-N curves for the before UNSM of SKD61

After UNSM재의  $10^7$ 사이클 피로한도는 처리하중이 4kgf일 때는 779MPa, 6kgf일 때는 810MPa, 8kgf일 때는 848MPa인 반면, 미처리재의 경우는 719MPa이다. 따라서 After UNSM재가 미처리재의 경우에 비해 처리하중이 4kgf, 6kgf, 8kgf 인 경우, 각각 8.3%, 11.2%, 17.9% 정도 피로한도가 증가하였다. 피로수명 또한 고응력 저수명영역에서는 UNSM효과가 적으나, 저응력 장수명영역에서는 UNSM처리 효과가 크게 됨을 알 수 있다.

4.6 피로파단면의 관찰 및 분석

피로균열은 최대응력이 걸리는 재료의 표면 및 형상이 변하는 부분에서 반복하중에 의하여 슬립(Slip)이 형성되기 쉽다. 이러한 슬립발생 부분 중에서 함몰부(Intrusion)가 응력집중원이 되어 미소 노치(Micro-notch)의 역할을 하여 피로균열의 발생원이 된다(Barsom and Rolfe 1999; Banantine et al., 1990; Suh et al., 2005). 이외에도 입계(Boundary), 쌍정(Twin boundary), 개재물(Inclusion) 및 조직의 불균일 등과 같은 미소결함(Flaw)이 피로균열의 발생원인이 된다. 따라서 반복응력이



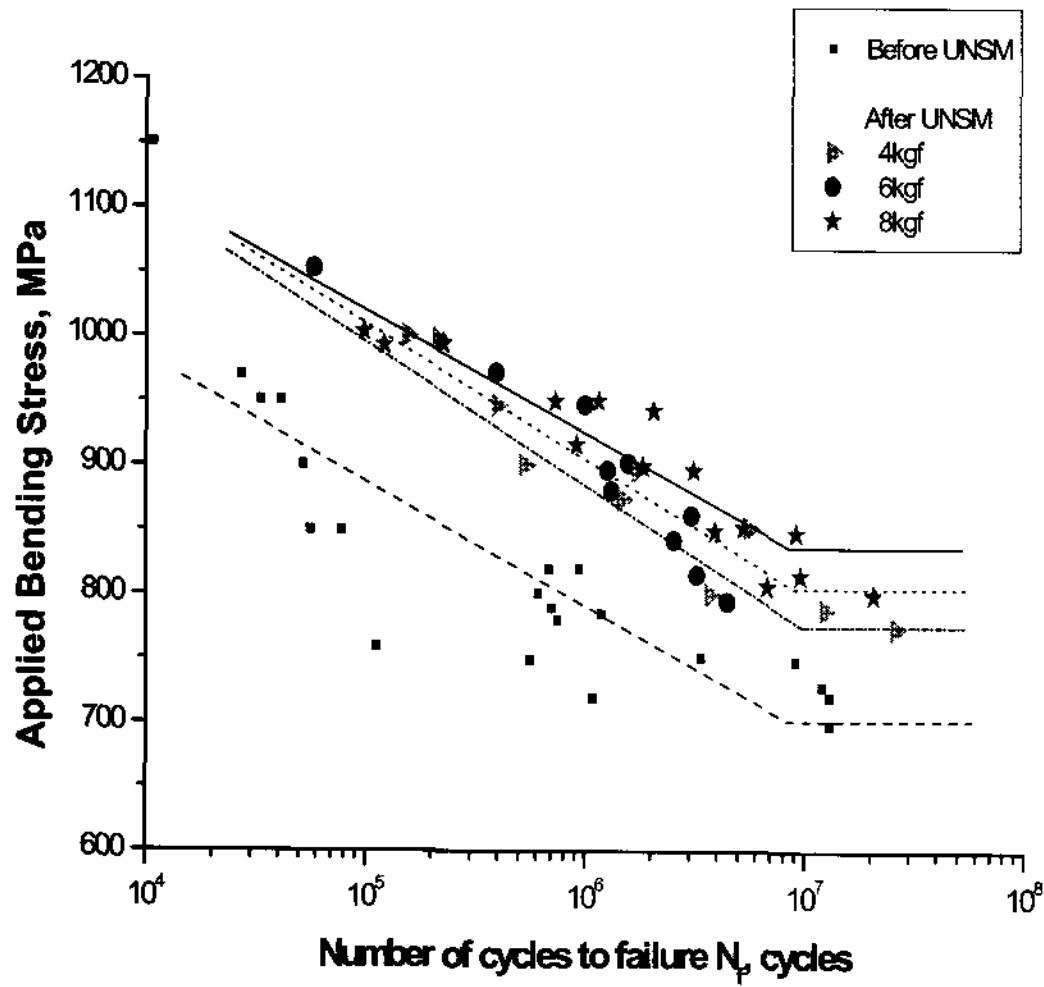


Fig. 7 Comparison of S-N curves for the before and after UNSM of SKD61

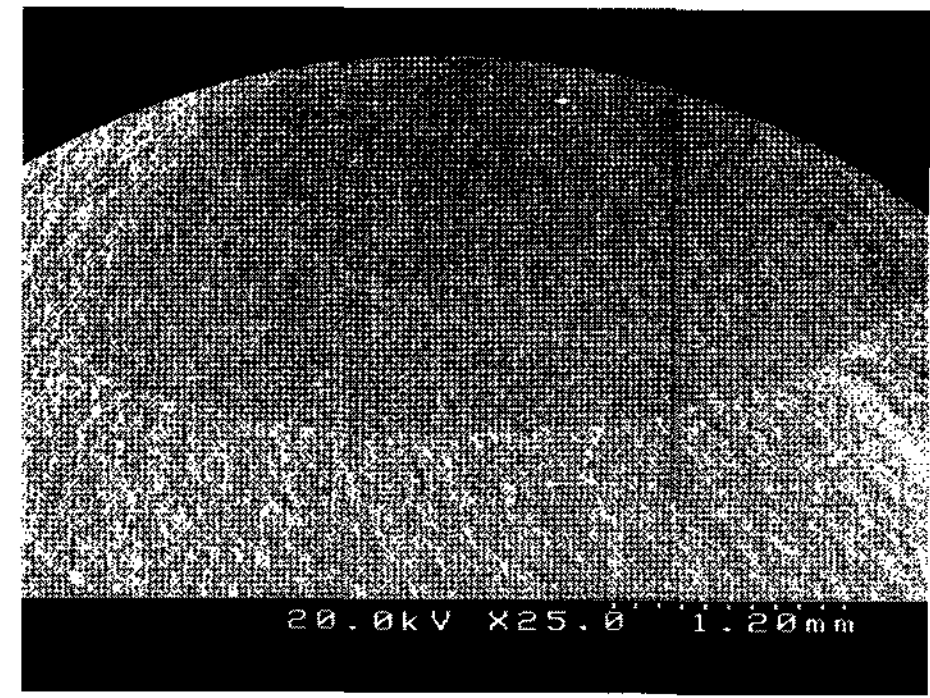
수반되는 재료의 표면에 균열선단의 소성변형을 제어하는 경질의 표면처리를 실시하면 재료표면에서 전위(Dislocation)의 발생을 억제시켜 피로균열 발생을 지연시킬 수 있다(Suh et al., 1998; Kim et al., 2003; Suh et al. 2005).

Fig. 8은 Before UNSM재의 피로파단면( $\sigma_a=789\text{MPa}$ ,  $N_f=7.03\times 10^5$ )을 (a) $\times 25$ 배, (b) $\times 500$ 배로 SEM 관찰한 사진이다. 그림에서 UNSM전에는 표면상에서 미소피로균열이 발생, 성장하여 파단하는 전형적인 피로거동을 보이고 있다. 이는 경면 가공후 남아있는 미세 스크래치(Micro scratch) 혹은 표면에 노출된 개재물이 피로 발생원이 된 것으로 판단된다.

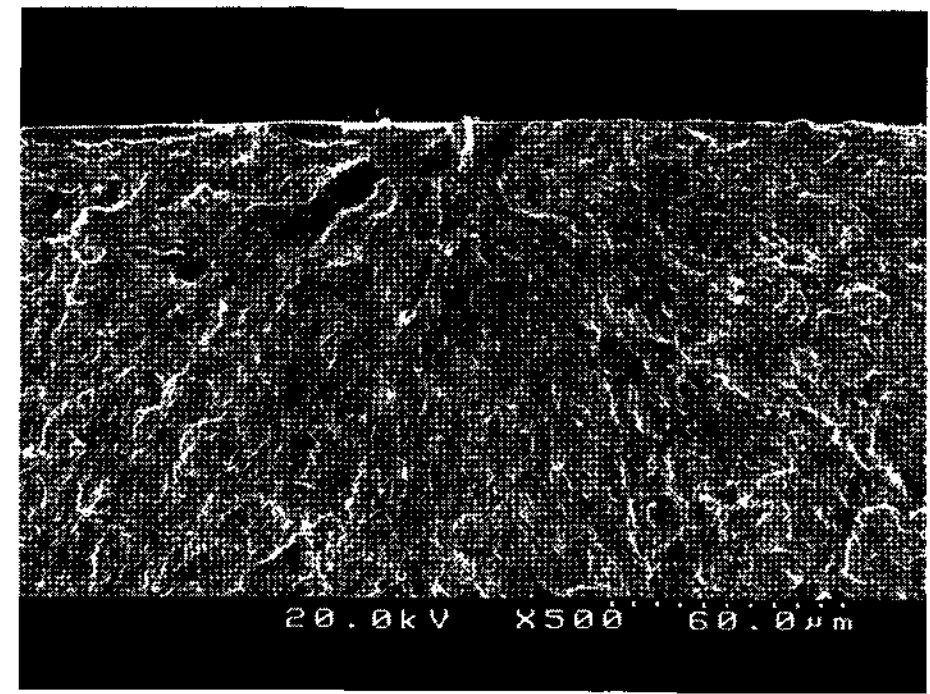
Fig. 9는 4kgf로 처리된 After UNSM재의 피로파단면( $\sigma_a=896\text{MPa}$ ,  $N_f=1.7\times 10^6$ )을 (a) $\times 50$ 배, (b) $\times 1000$ 배로 SEM 관찰한 Fisheye crack의 사진이다. 그림과 같이 After UNSM재에 대해 회전굽힘 피로시험을 행할 경우 UNSM 과정에서 형성된 압축잔류응력이 시험편 표면에 작용되어 실제응력을 낮추는 효과가 매우 크다. 따라서 피로균열의 발생 및 진전이 지연되는 효과로 전위의 이동을 방해하는 작용을 하므로 피로수명이 상승하고, 피로균열의 발생은 표면에서 형성되지 못하고 내부의 개재물에서 형성되어 느린 속도로 진전하면서 Fisheye crack을 만든다. 이렇게 형성된 균열은 단면적의 감소로 인해 더 높은 수준의 응력이 작용하게 되고 그 값이 임계값 이상이 될 때, Fisheye crack의 성장이 표면상으로 성장되는 균열의 양상을 하게 된다(Cho et al., 2005).

이런 과정이 계속되다가 균열이 안정적인 속도로 진전할 수 있는 응력수준 이상이 되면 피로균열은 급격하게 성장하면서 최종적으로 취성파괴를 일으키면서 파단된다. 이 때 시험편에는 취성파괴의 흔적인 최종파단부(Final fracture part)가 남게 되는데 그 형상은 원형이나 타원형의 형상이 된다.

Fig. 9에서 화살표로 나타난 개재물의 성분은 EDS분석에서 Fe 94.54, Cr 5.46 wt%로 나타났다.

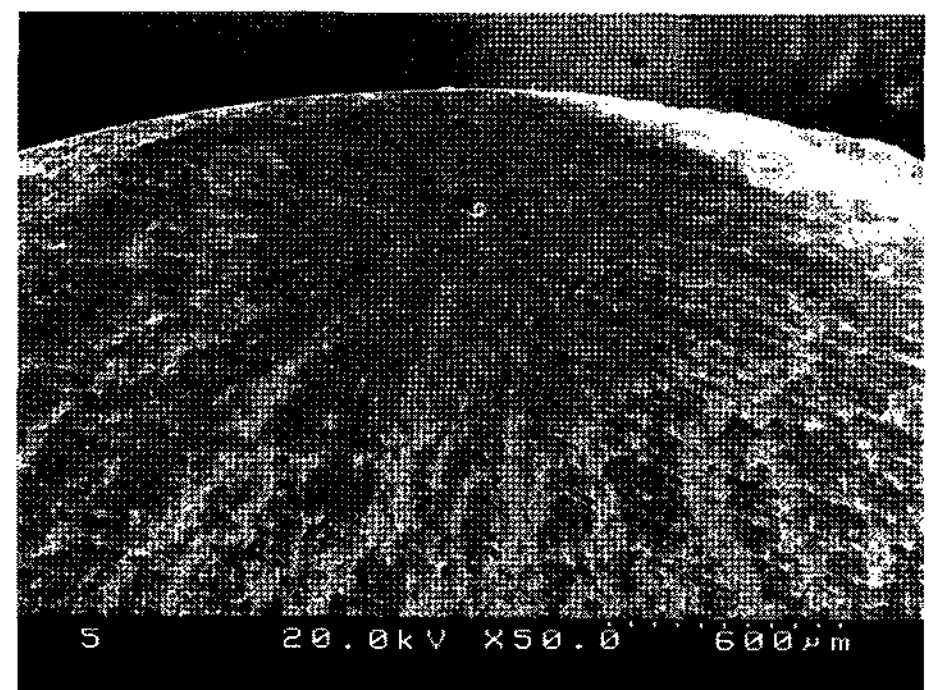


(a)

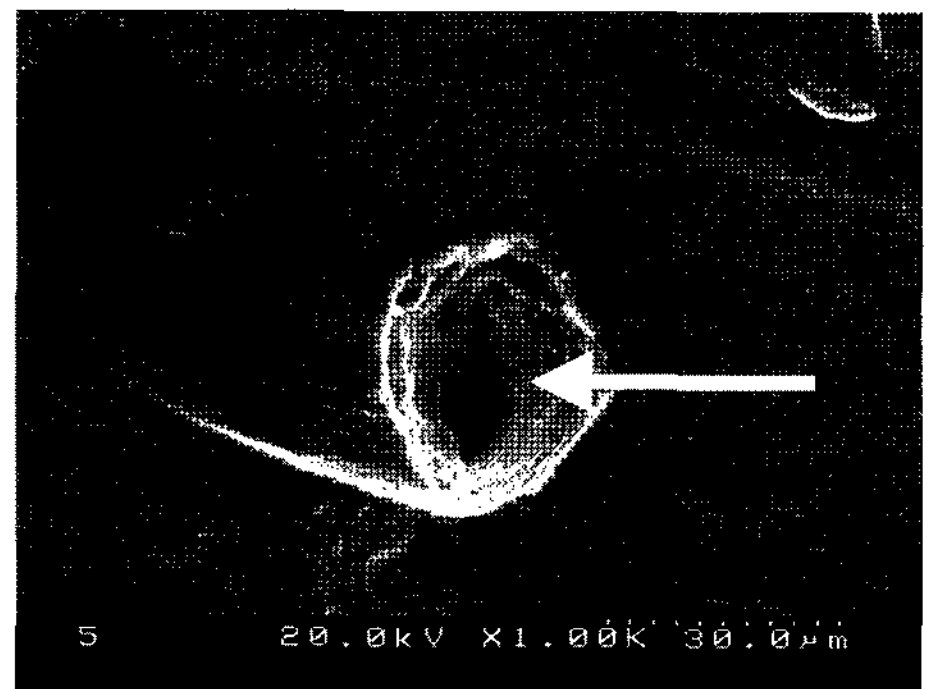


(b)

Fig. 8 SEM photographs of fracture surface before UNSM under  $\sigma_a = 789\text{MPa}$ ,  $N_f = 7.03\times 10^5$  cycles at the magnification of (a)  $\times 25$ , (b)  $\times 500$



(a)



(b)

Fig. 9 SEM photograph of fisheye crack which initiated at fracture surface after UNSM (static load = 4 kgf) under  $\sigma_a = 896\text{MPa}$ ,  $N_f = 1.7\times 10^6$  cycles at the magnification of (a)  $\times 50$ , (b)  $\times 1000$

4.7 Fisheye crack의 특징

일반적으로 UNSM 표면처리재에는 고강도강의 장수명영역에서 관찰되는  $10^9$ 사이클(Giga cycles)의 전형적인 피로파괴특성인 Fisheye crack이 발생되며, 그 깊이와 면적은 시험편의 표면에서 계산된 최대굽힘응력과 밀접한 관계를 가질 것이다. 따라서 본 연구에서는 저배율 금속현미경에 부착된 마이크로미터를 사용하여 Fig. 10과 같이 Fisheye의 가로길이  $2a$ , 세로길이  $2b$ , 면적을 각각 피로수명과 비교하여 Fig. 11(a), (b)에 나타내었다. 또한, Fisheye 면적과 굽힘응력에 대한 비교를 Fig. 12에 나타내었다. 그리고 각 그래프에서 얻어진 선도는 OriginPro 프로그램을 이용하여 수식으로 나타내었다.

Fig. 11(a)에는 피로수명이 증가할수록 가로길이  $2a$ 에 대한 세로길이  $2b$ 의 비  $b/a$ (Aspect ratio)가 감소되었다. 즉 피로수명이 증가될수록 Fisheye는 원형에서 점차 타원형으로 되어가는 경향을 나타내며 이것은 식 (2)로 표시된다.

$$b/a = 1.47 - 0.11 \log(N_f) \tag{2}$$

Fig. 11(b)에는 피로수명이 증가할수록 Fisheye의 면적(A)이 증가하며 이것은 식 (3)으로 표시된다. 이렇게 면적이 증가함은 높은 응력이 작용하는 표면보다 낮은 응력이 작용되어 Fisheye crack의 성장이 지연되어 수명이 증가하게 된다. 그러나 UNSM 부하하중과 Fisheye crack의 길이나 면적과는 상관이 적은 것으로 보인다.

$$A = -7.25 \times 10^5 + 1.93 \times 10^5 \log(N_f) \tag{3}$$

Fig. 12는 굽힘응력이 증가할수록 Fisheye의 면적 (A)이 감소함을 나타내고 있으며 식 (4)로 표시된다.

$$A = 2.18 \times 10^6 - 1942\sigma \tag{4}$$

5. 결 론

본 논문에서는 SKD61(열간 금형 공구강)을 사용하여 초음파 나노 표면개질 처리(UNSM) 전, 후의 표면특성을 비교하고, UNSM 처리시 하중을 달리하였을 경우 피로수명의 변화를 알아보고 기계적인 특성을 실험 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)  $10^7$  사이클 피로한도는 UNSM 전의 경우는 719MPa이다. 정적하중을 4, 6, 8kgf로 변화시킨 After UNSM 재는 각각 779, 810, 848MPa로 각각 8.3, 11.2, 17.9% 정도 피로한도가 증가하였다.

(2) 피로수명이 증가할수록 Fisheye는 원형에서 점차 타원형으로 되어가고, 굽힘응력이 증가할수록 Fisheye의 면적은 감소한다는 것을 알 수 있었다. 또 UNSM처리하중이 Fisheye의 면적에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

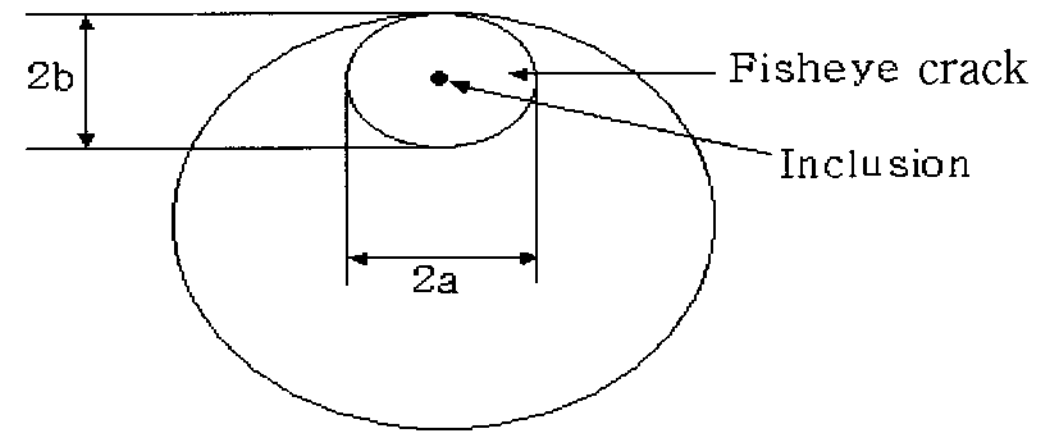
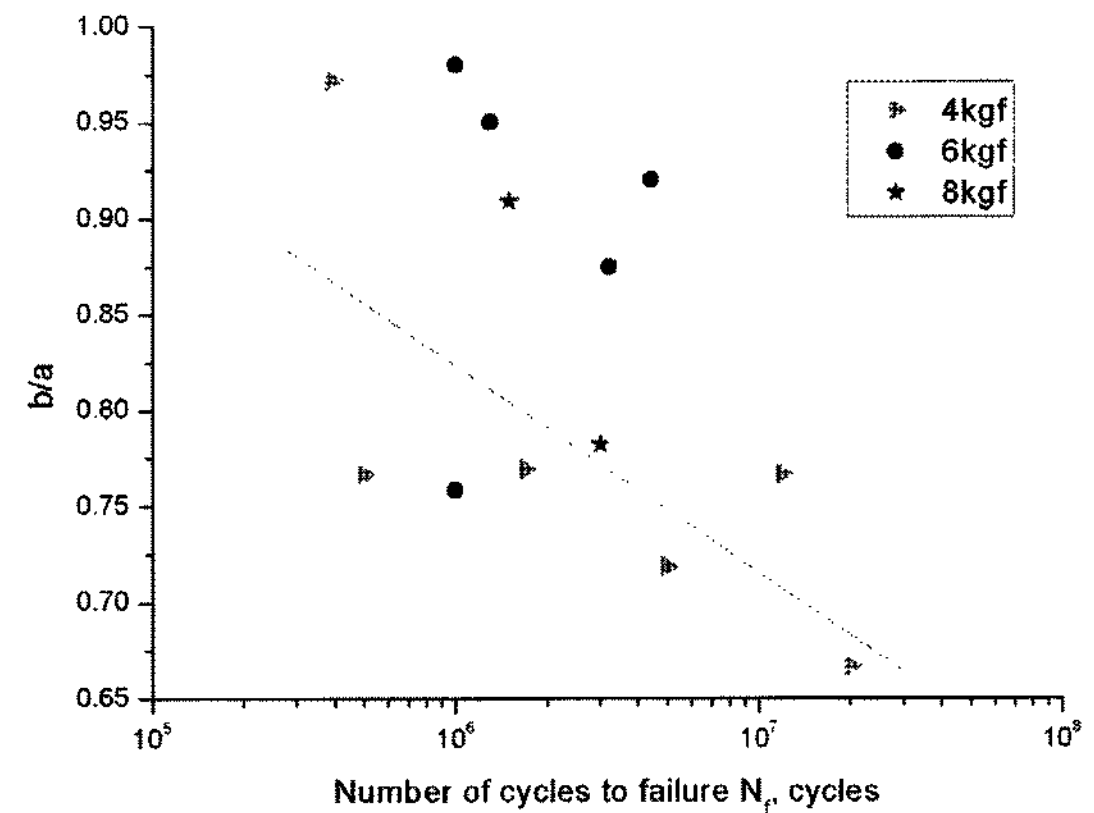
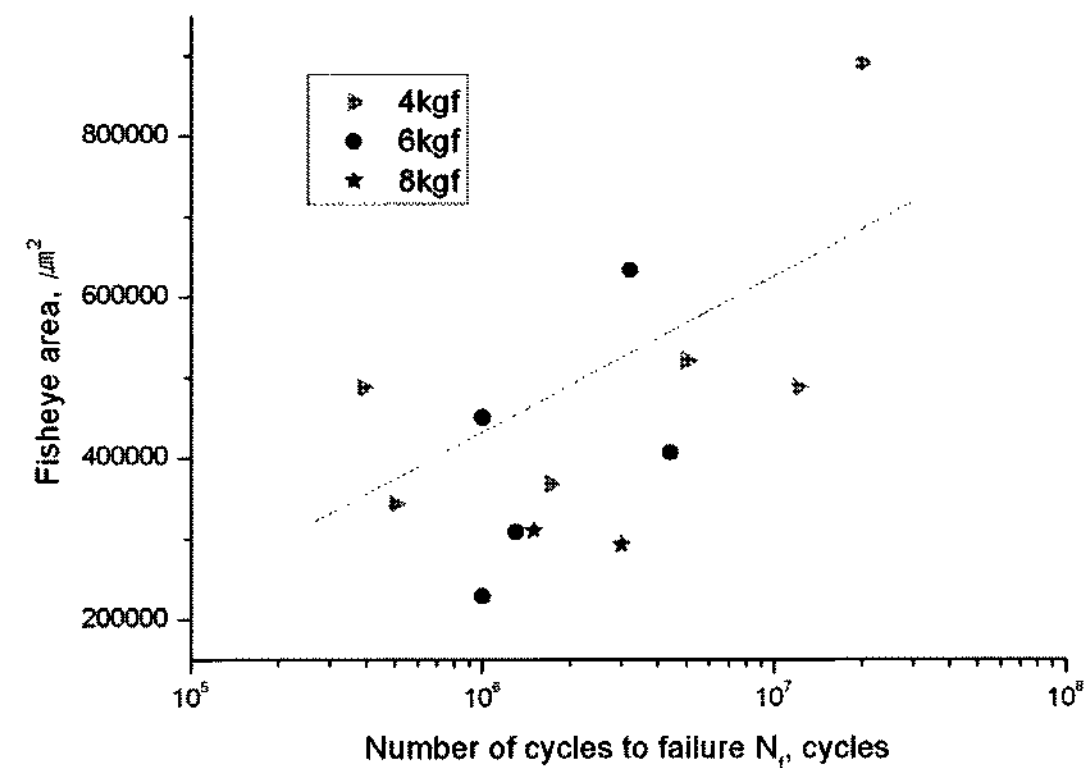


Fig. 10 Schematic diagram for  $2a$  and  $2b$  of a fisheye crack



(a)



(b)

Fig. 11 Relationship between the fatigue life and (a) aspect ratio  $b/a$ , (b) fisheye crack area

후 기

이 논문은 2007년도 경북대학교 연구교수 연구비에 의하여 연구되었음.

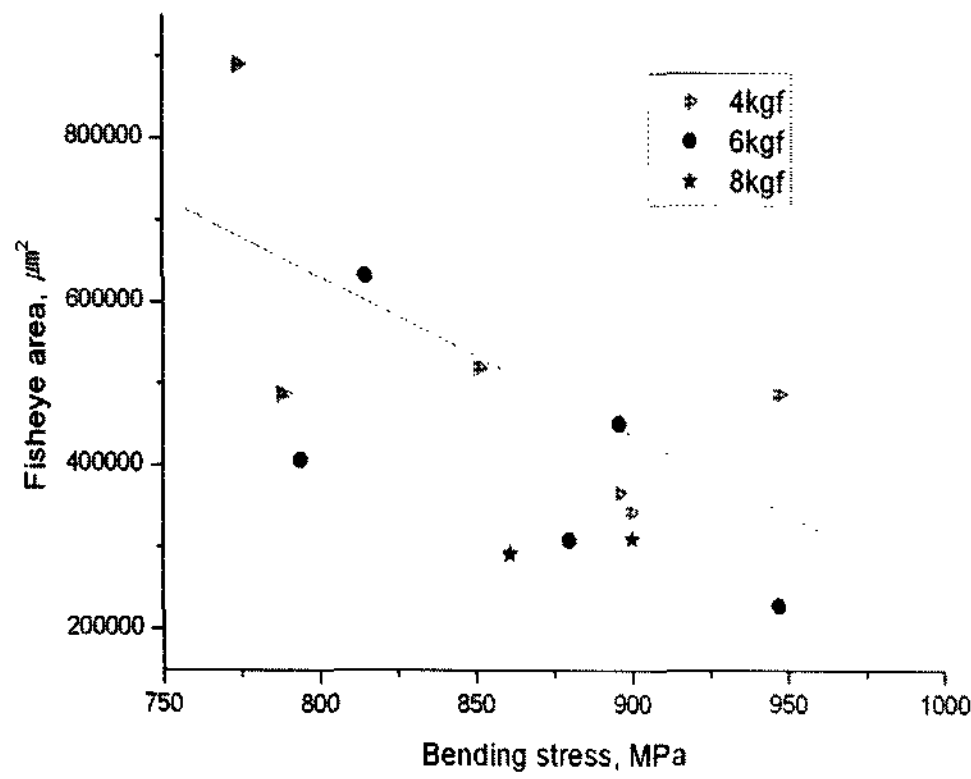


Fig. 12 Relationship between the bending stress and fisheye crack area

참고 문헌

Suh, C.M, Kim, K.R. and Lee, D.W. (1998). "Fatigue Strength of TiAlN Ceramic Coated 1Cr-1Mo-0.25V Steel at Elevated Temperatures", Inter. Journal of Ocean Eng. & Technology, Vol 1-1, pp 70-77.

우창기, 김희송 (1989). "반복인장-압축하중을 받는 이온질화 처리한 SM45C의 부식피로 파괴거동에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제13권, 제3호, pp 451-460.

Kwak, B.M and Gil, Y.J. (1985). "An Indirect Experimental Method for the Determination of Mechanical Properties of Ion-nitrided Layer and Residual Stress Distribution", Tran. of the Korean

Society of Mechanical Eng. Vol 9, No 2, pp 240-249.

Kim, K.R, Suh, C.M, Murakami, R.I. and Chung, C.W. (2003). "Effect of Intrinsic Properties of Ceramic Coatings on Fatigue Behavior of Cr-Mo-V Steels", 171, pp 15-23.

Pyoun, Y.S and Son, K.G (2005). "Development of D2 Tool Steel Trimming Knives with Nanoscale Microstructure, AIS-Tech Vol 2, pp 465-468.

Park, J., Cho, I.H and Kang, J.H (2005). "Extending Service Life by Surface Modification of Local Area on Stretch Level Roll in PL-TCM line", AIS-Tech Vol 2, pp 347-348.

Cho, I.H, Song, G.H, Kim, C.S., Suh, C.M and Park, J.H. (2005). "Nano Structured Surface Modification of Tool Steel and Its Beneficial Effects in Mechanical Properties", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol 19, pp 2151-2156.

Stephens, R.I, Fatemi, A, Stephens, R.R and Fuchs Henry O. (2001). "Metal Fatigue in Engineering", Wiley interscience, 2nd Edition, pp 59-89.

Barsom, J.M and Rolfe, S.T. (1999). "Fracture and Fatigue Control in Structure", Butterworth Heinemann, 3rd Edition, pp 163-192.

Banantine, J.A, Comer, J.J. and Handrock, J.L.(1990). "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, pp 1-15.

Suh, C.M, Hwang, J.K, Son, K.S and Jang, H.K (2005). "Fatigue Characteristics of Nitrided SACM 645 according to the Nitriding Condition and Notch", Materials Science and Engineering A 392, pp 31-37.

2008년 1월 30일 원고 접수  
 2008년 4월 1일 최종 수정본 채택