

초음파 나노표면개질을 적용한 궤도차량용 토션바 제조 및 재제조용 표면 개질기술에 관한 연구

서창민* · 편영식** · 조인호*** · 백운봉****

*경북대학교 기계공학부

**선문대학교 기계공학부

***(주)디자인메카 DM기술연구소

****한국표준과학연구원 에너지인프라연구단

UNSM Surface Technology for Manufacturing and Remanufacturing Torsion Bars for Crawler Vehicles

Chang-Min Suh*, Young-Sik Pyoun**, In-Ho Cho*** and Un-Bong, Baek****

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

**School of Mechanical Engineering, SunMoon University, Asan, Chungnam, Korea

***Design Mecha Co., Ltd., Asan, Chungnam, Korea

****Korea Research Institute of Standards & Science, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Torsion bar 토션 바, Remanufacturing 재제조, Ultrasonic nanocrystal surface modification UNSM, Presetting 프리셋팅, Shot peening SP 쇼트피닝, Stress relaxation 응력이완

ABSTRACT: The Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM) technology improves the fatigue life of a torsion bar by inducing compressive residual stress on the surface layer. The UNSM is applied to replace the presetting method and shot peening technology. The torsion bar must be changed periodically because of a lack of durability and a phenomenon related to the stress relaxation. The torsion fatigue test specimens were made of DIN17221 material, and the results showed that the fatigue life was 5 times more than under durability test conditions. A comparison test between the commercial vehicles' presetting method and shot peened torsion bar and the UNSM torsion bar showed that the UNSM could replace the presetting method and shot peening. The results for the stress relaxation and service life renewal study of used torsion bars also give a brief introduction to the UNSM technology.

1. 서 론

궤도차량용 토션바(Torsion bar)의 수명을 결정하는 핵심공정 기술은 Shot peening 처리로 부족한 압축잔류응력을 Bauschinger 효과를 이용하여 부여하는 Fig. 1과 같은 Preset 기술이다. 즉 Fig. 1a와 같이 외력을 가하면 상당량의 소성변형이 생긴다. 그러나 이 외력을 제거시키면 Fig. 1b를 거쳐, Fig. 1c와 같이 잔류응력(Residual stress)이 생기게 된다. 이러한 잔류응력은 토션바의 비틀림 피로특성을 개선하는 기존기술이다. 그러나 이 방식은 사용시간에 따른 응력이완(Stress relaxation)현상이 심하여 토션바의 성능을 저하시키므로 정기적으로 부품을 교체해야한다(Altenberger, 2005).

그러나 이 기술로 제작된 토션바는 Preset을 부여한 방향으로만 피로수명 향상 효과가 있다. 그러므로 대부분의 궤도차량에서 양방향 변위를 대응하기 위해 항상 반대방향으로 Preset한 토션바와 함께 짝으로 구성해야만 하는 복잡성과 경량화의 한

계요인이 되고 있다. 또한 응력이완현상에 의해 부여한 압축잔류응력이 이완하므로 주기적인 교체를 할 경우에도 항상 Preset가 부여된 같은 방향의 토션바만을 교체해야 하므로 보수용품 재고에도 추가적인 부담이 될 뿐 아니라 보수작업관리에도 추가적인 신경을 써야만 한다(Suh et al., 2007; Suh et al., 2010; Suh et al., 2010; 편영식 등, 2009; Suh et al., 2006; 서창민과 편영식, 2011; Suh and Pyun et al., 2011) K1 및 K1A1용과 같은 대용량의 토션바의 국산화 개발은 Preset 장비가격과 내구시험기 가격이 걸림돌이 되어왔다. 본 연구에서는 국내에서 특허기술로 개발된 초음파나노표면개질(UNSM: Ultrasonic nanocrystal surface modification)기술을 적용하여 Shot peening 과 Preset 기술을 대체하여 토션바를 제조할 수 있는 가능성을 검증하기 위한 실험결과를 정리하였다.

국산화 개발된 토션바 소재로 제작된 토션피로시험편에 UNSM 기술을 적용하고 변형률에 따른 피로수명을 수행하였다. 이러한 UNSM기술을 그대로 상용차용 소형 토션바에 적용하고 Shot

peening 과 Preset 기술로 제작된 제품을 변형률에 따른 피로시험을 수행하였다. 응력이완에 대한 잔류응력의 변화에 관한 실험도 수행하였으며 이 과정을 통해 파괴되지 않은 사용을 끝낸 토션바의 재제조에 의한 재활용 가능성을 확인하기 위한 별도의 실험도 수행하였다. 실제 K1 및 K1A1용 전차용 토션바에 적용하여 제작한 후 실험한 내용과 UNSM을 함께 설명하였다.

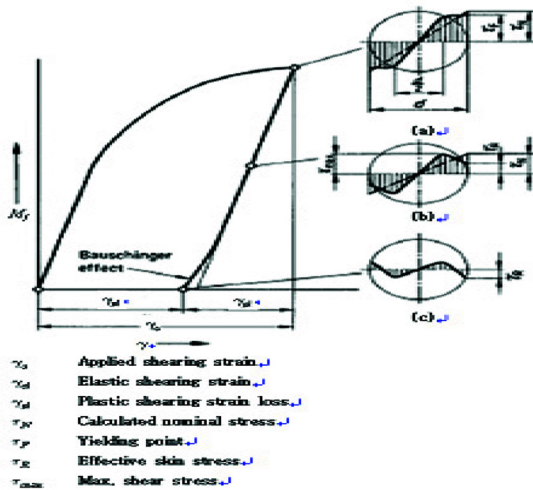


Fig. 1 Stress-strain curve and diagrammatic shear stress pattern of pre-setting torsion bar

2. 초음파나노표면개질(UNSM)기술

피로강도 향상에 주효한 것이 보다 큰 압축잔류응력(Compressive residual stress)과 표면층의 Severe plastic deformation (SPD)에 의한 미세화조직(Nanocrystal) 라는 것이 확인되면서 이를 구현하기 위한 많은 기술들이 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) 등이 이러한 목적으로 개발된 표면처리기술이다. 현재도 미국 국방분야, 특히 항공기술 분야에서 이러한 기술을 응용, 확대하는 것이 핵심기술개발의 단골 메뉴이기도하다(Altenberger, 2005; Prevey and Jayaraman, et al., 2005, Watanabe, et al., 2003, Thomas, 2002).

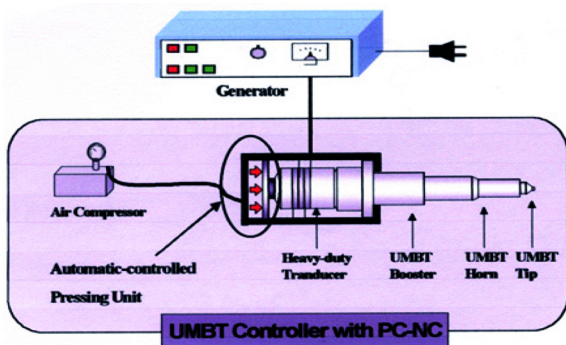


Fig. 2 Schematic diagram of UNSM device

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 나노결정 조직으로 개질함과 동시에 아주 크고 깊은 압축잔류응력 등을 부가하는 국내개발 특허기술이다(서창민 등, 2011; 편영식 등, 2009).

이 UNSM의 기본적인 가공시스템은 Fig. 2와 같이 초음파 주파수를 발생시키는 Generator, 정적하중을 가하는 Air compressor, 기계적인 초음파를 발생시키는 Transducer, 발생된 초음파를 증폭시키는 Booster, 증폭된 초음파를 손실없이 전달하는 Horn, 초음파 진동 에너지를 최종적으로 가공물에 전달하는 Ball tip 등으로 구성되어 있고, 이 UNSM 장치를 Fig. 3와 같이 공작기계(선반, 머시닝센터 등)에 부착하여 환형물, 평면형상 및 자유곡면 형상물 등을 가공처리할 수 있다.

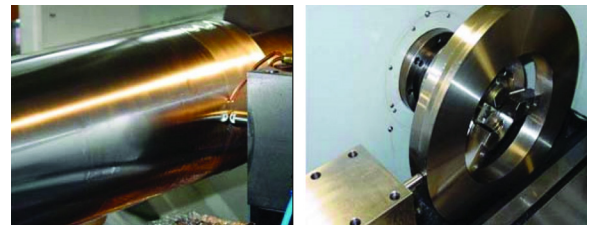


Fig. 3 UNSM device and equipment for industry use

Table 1 The effects of UNSM technology

| Effects on mechanical characteristics | Improvement on mechanical performance |
|---|--|
| Deep compressive residual stress (about 1000MPa into depth of more than 2000μm) | 1) HCF 2) rolling contact fatigue 3) service life on SCC |
| Surface micro dimples (Area:1-10 μ ² , Depth: sub micron, Pattern pitch: few μm) | 1) Decrease friction loss 2) wear 3) surface quality |
| Increase hardness (into depths of more than 1500μm) | 1) wear 2) HCF |
| Nanocrystalline structure (Grain Size 50~200nm into depths of 100μm) | 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 딤플형성, 표면경도 증가, 결정의 나노화 등의 특성으로 고사이클피로(High cycle fatigue, HCF)와 기가사이클 피로(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; Suh et al., 2010; Suh et al., 2010).

3. UNSM기술 적용 타당성 검증

3.1 비틀림 피로시험

Table 2와 같은 국내에서 개발된 DIN 17221 (50CrV4)소재로

Table 3과 같은 UNSM처리조건으로 Fig. 4와 같은 비틀림 피로시험편을 제작하였다 그 결과 Table 4와 같은 UNSM처리조건에 따른 기계적인 특성이 향상되었다. 즉 미처리재에 대하여 정압 70N인 경우, HRC는 4.5% 정도 적게 증가하였지만, 표면조도는 약 66% 크게 감소하였고, 압축잔류응력은 약 53%로 크게 증가하였다.

Table 2 Chemical composition of DIN17221 (50CrV4)

| C | Si | Mn | Cr | V |
|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 0.47 ~ 0.55 | Max 0.40 | Max 1.10 | 0.90 1.20 | 0.10 0.20 |

Table 3 Parameters of UNSM treatment process

| Feed rate, mm/rev | Amplitude, μm | Speed, rpm | Load, N | Ball dia. & material |
|-------------------|--------------------------|------------|-------------|----------------------|
| 0.07 | 30 | 50 | 40, 70, 100 | 2.38mm (WC) |

Table 4 Comparison of surface hardness, roughness and residual stress before and after the UNSM

| | Before UNSM | UNSM 40N | UNSM 70N | UNSM 100N |
|---|-------------|----------|----------|-----------|
| Surface hardness, HRC | 46.5 | 48.2 | 48.6 | 49.2 |
| Surface roughness, μm | 0.93 | 0.25 | 0.32 | 0.42 |
| Compressive residual stress at surface, MPa | 365.5 | 534.3 | 559.4 | 577.5 |

Fig. 5는 UNSM 70N처리 후의 깊이에 따른 압축잔류응력의 변화를 나타내고 있다. 이 잔류응력은 표면에서 XRD (X-ray diffraktometer, xstress 3000)를 이용하여 시편절단 후 $2\theta - \sin^2\psi$ 법으로 $5\ \mu\text{m}$ 씩 전해연마 실시 후 측정하였다. 즉 약 -900MPa로 크게 형성된 압축잔류응력은 깊이에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 나타내며 이러한 경향은 다른 재료의 측정결과와 잘 일치하였다(서창민 등, 2011, Suh et al., 2007, Suh and Pyun et al., 2011).

이러한 UNSM조건으로 처리된 비틀림 피로시험편은 Fig. 6과 같은 Axial-torsional material test system (MTS 646 JUS)에서 10Hz로 토션 피로시험을 수행하여 그 결과를 Fig. 7와 같은 $\Delta\theta-N_f$ 곡선으로 정리하였다. 이 결과 비틀림각 $\Delta\theta = 1.4\sim 18.8^\circ$ (17.4°)으로 피로시험을 실시한 UNSM 처리재는 피로파괴 기준인 4.5×10^4 을 넘어 10^5 에도 파괴되지 않았다. 또 여러 비틀림 각의 레벨에서 비틀림 피로시험을 실시하였고 그 결과를 Fig. 7에 정리하였다.

즉 UNSM 처리한 시편은 전부 10^5 보다 수명이 길어 처리전보다 5배 이상 수명이 연장되었고, 가속조건인 $\Delta\theta = 1.4\sim 20.9^\circ$ 와 $\Delta\theta = 1.4\sim 23^\circ$ 에서도 UNSM처리 시편은 4.5×10^4 보다 수명이 길고 처리전 소재보다 약 5배 정도 수명이 연장되었다. 특히 이 비틀림 피로시험에서 5×10^6 이상에서는 20~40배 이상 수명이 증가함을 알 수 있다. 따라서 UNSM처리는 고사이클피로(HCF)와 VHCF피로에서 매우 유효 할 것으로 예상된다.

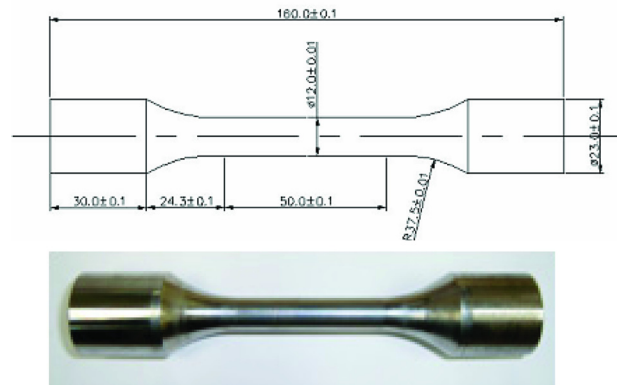


Fig. 4 Configuration of torsion fatigue test specimen

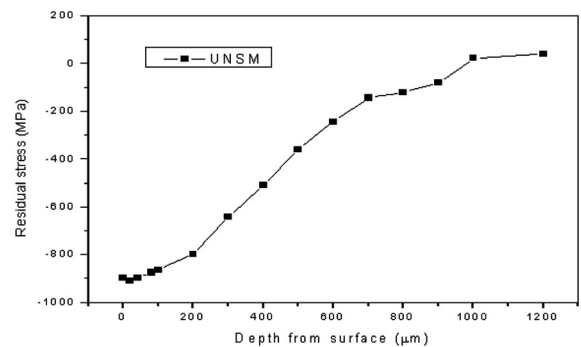


Fig. 5 Variation of compressive residual stress after UNSM treatment for DIN17221

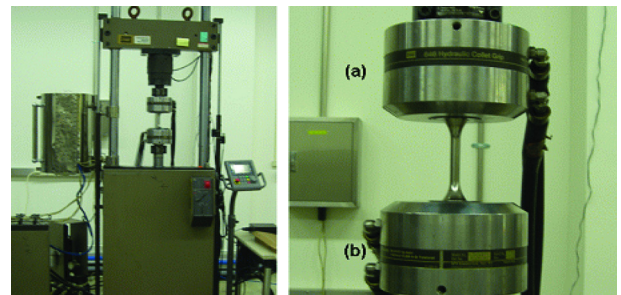


Fig. 6 Axial-torsion test machine (MTS 646 JUS)

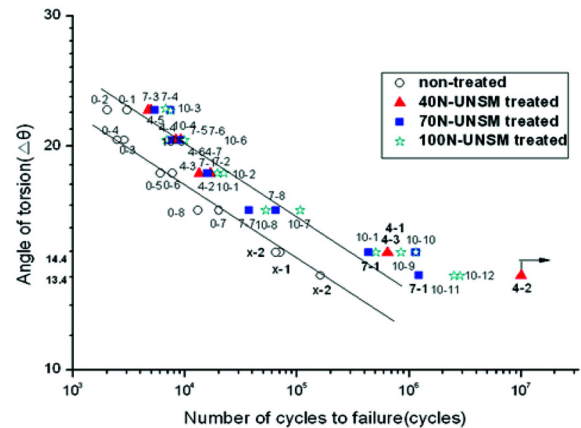


Fig. 7 Torsion fatigue test results

3.2. 상용차량용 토션바 시험

3.1절의 비틀림 피로시험에서 실시하여 얻은 연구결과를 응용, 확대시키기 위하여 다음과 같은 승합차와 소형 트럭용의 토션바에 UNSM 처리시킴 피로시험을 실시하였다. 이 비틀림피로 시험에 사용된 시편의 형상은 Fig. 8과 같다. 이 형상의 시험편을 제작하여 두 종류(UNSM 처리재와 Shot peening + preset 처리재)를 준비하여 Fig. 9와 같은 중형비틀림피로시험기에서 0.4Hz로 5°~90°로 비교시험을 수행하였다. 비틀림 시험각 5.6°~71.4°에서 UNSM처리재의 수명이 Shot peening + preset 처리재보다 약 20% 정도 길었다. 실험에 사용된 차량용 토션바는 실제제품 대비 Gage부위의 직경이 23.6/60.96(mm), 전체길이 1,080/2176.3 (mm) 이므로 실제 제품에서도 UNSM처리를 실시하면 충분한 수명연장 효과가 있을 것으로 추론 가능하다. 이러한 유사한 연구결과는 다른 재료에서 연구결과가 발표되어있다(Suh and Pyun et al., 2011).

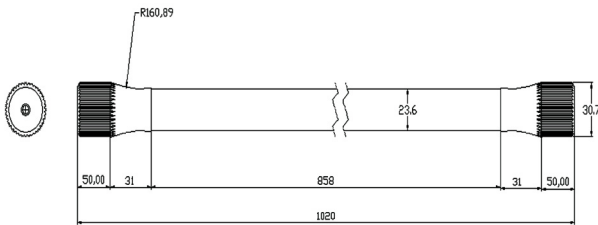


Fig. 8 Torsion bar of commercial vehicles



Fig. 9 Torsion bar test rig ($\pm 4\text{KNm} \times 2500\text{mm}$)

3.3. 수명재생 및 응력이완 시험

수명재생시험은 토션피로시험기 보다 더 빠른 인장/압축 사이클 변환이 가능한 회전식굽힘피로(Rotary bending fatigue tester) 시험기에서 실시하였다. 피로시험편과 피로시험기는 Fig. 10과 Fig. 11과 같고 그 결과는 Fig 12과 같다. 특히 Fig. 11의 피로시험기는 2축 피로시험기로 4개의 시험편을 동시에 피로시험 가능하므로 실험시간을 크게 단축시킬수 있는 장점이 있다.

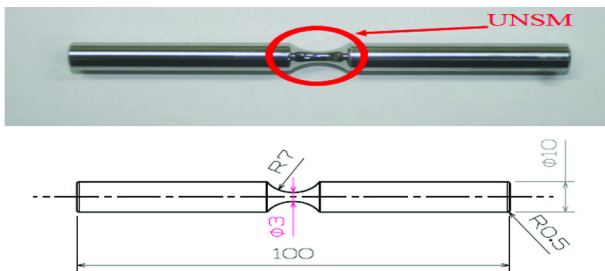


Fig. 10 Configuration of fatigue specimens(unit: mm)



Fig. 11 Cantilever type fatigue testing machine, (a) motor, (b) specimen, (c) stopper, (d) bearing, (e) hanger, (f) weight, (g) counter

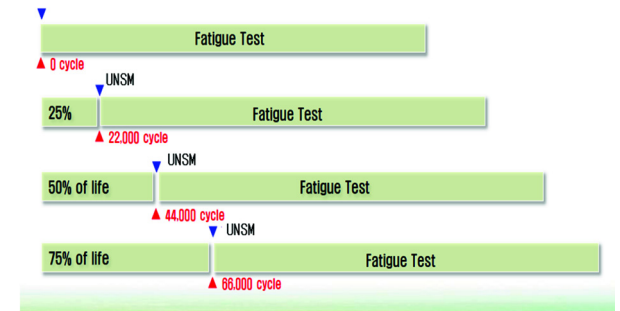


Fig. 12 Fatigue test of UNSM treated specimens after 25%, 50% and 75% duty cycles specimens

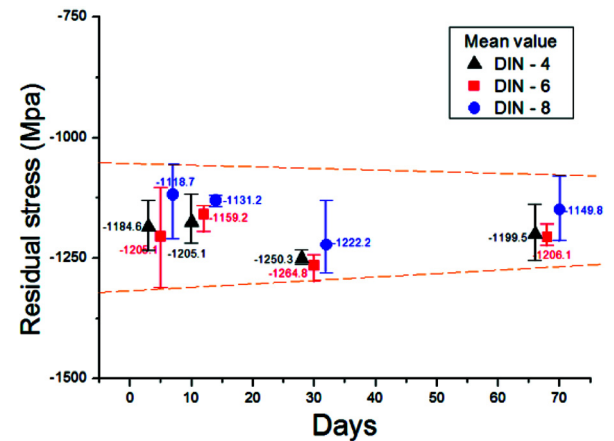


Fig. 13 Stress relaxation test results of UNSM treated specimens

Fig. 12는 88,000 사이클에서 파괴가 발생한 시편 그룹 중에 3개의 샘플을 골라 각각 25%(22,000 사이클), 50%(44,000 사이클), 75% (66,000 사이클)의 피로시험을 실시한 후 UNSM 처리를 한 후 같은 조건으로 피로시험을 실시한 결과 전부다 초기의 피로 수명에서도 파괴가 발생하지 않았다.

Fig. 13에서 UNSM 처리시 정하중을 3조건(40, 60, 80N)으로 각각 처리한 UNSM 시편의 압축잔류응력을 일차별로 측정하여

분석한 결과, 각 시편마다 압축잔류응력의 분산도는 다소 있지만 응력이완현상은 70일이 경과하여도 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

3.4. K1, K1A1 용 토션바 시험

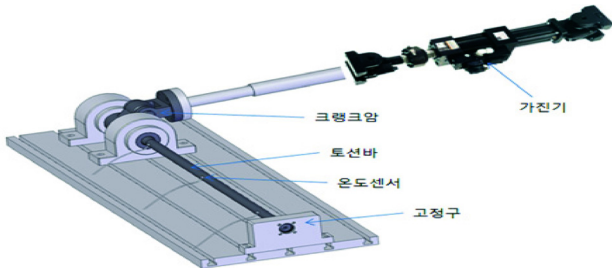


Fig. 14 An example of crankshaft type torsion fatigue bar test system

±50KNm의 Rotary actuator와 2.2m 이상의 Torsion 피로시험을 할 수 있는 장비가 국내에는 없어 50ton 규모의 직선 Actuator의 직선운동을 회전운동으로 전환하는 크랭크축 시스템을 이용하여 Fig. 14와 같은 피로시험기를 개발하여 실험을 시도하였다. 그러나 직선운동을 회전운동으로 전환하는 크랭크 축운동시 발생하는 Radial 방향 변위가 제품 시험시 고정부(토션바의 스프라인부)에 반력을 발생시키는 것을 방지할 방안이 없어 성공적인 시험을 수행 할 수 없었다. 따라서 상기의 50ton 규모의 대형시험을 실시 가능한 새로운 형태의 내구성 시험기를 개발 중에 있다.

4. 결 론

일련의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) K1, K1A1소재로 개발된 DIN 17221 (50CrV4) 소재로 만든 토션피로시편에 UNSM처리를 실시하여 비틀림각 ($\Delta\theta$)=1.4~18.8° 시험에서는 기준인 4.5×10^4 을 넘어 10^5 에도 파괴되지 않았다. 22%를 추가한 가혹조건인 $\Delta\theta=1.4\sim 23^\circ$ 에서도 4.5×10^4 사이클을 견디고, 약 5배 수명이 연장되어 UNSM처리기술이 기존의 Shot peening + preset 기술의 대체가 가능한 것을 확인하였다.
- (2) 승합차와 소형 트럭용에 사용되는 $\Phi 23.6\text{mm} \times 1080\text{mm}$ 토션바에 UNSM 처리 후 피로수명이 기존의 Shot peening + preset 제품보다 연장되어 $\Phi 60.96\text{mm} \times 2176.3\text{mm}$ 의 실제 제품에서도 충분한 수명연장 효과가 있을 것으로 판단되었다.
- (3) 응력이완시험결과도 기존의 Shot peening + preset에 의

한 압축잔류응력 부가기술보다도 우수한 특성을 갖고 있음이 확인되었다.

(4) 88,000 사이클에서 파괴가 발생하는 3개의 피로시편을 25%(22,000 사이클), 50%(44,000 사이클), 75%(66,000 사이클)의 피로시험을 각각 실시한 후 UNSM 처리를 한 후 같은 조건에서 피로수명시험을 실시한 결과 전보다 88,000 사이클에서도 파괴가 발생하지 않았다. 이는 파괴되지 않은 사용된 토션바에 UNSM 처리를 하게 되면 다시 원래의 수명으로 회복 가능함을 알 수 있었다. 따라서 토션바의 Remanufacturing(재제조) 기술로 UNSM 기술의 사용이 가능함을 확인할 수 있었다.

(5) 실제 제품의 피로수명시험은 ± 50KNm 의 Rotary actuator로 구성된 전용 토션 피로시험기로 수행이 되어야 한다.

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.

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., Kim, M.H., Baek, U.B., Pyun, Y.S., Kim, C.S. and Chi, C.H. (2010). "A Study on The Alternative Technology Using UNSM Instead of The Presetting 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. (2010). "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., Pyun, Y.S. (2011). "Improvement of VHCF Properties of AISI 1045, 4137, 52100 & H13 Steel by UNSM Treatment", 2011년도 한국해양공학회 춘계학술대회.

Suh, C.M., Song, G.H., Park, H.D. and Pyoun, Y.S. (2006). "A Study on the Mechanical Characteristic of Ultrasonic Cold Forged SKD61", Inter. Journal of Modern Physics B, Vol 20 Nos 25-27, pp 4541-4546.

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.

서창민, 편영식 (2011). "VHCF(>Mega cycle fatigue)와 표면처리 기술의 연구", 2011년도 한국해양공학회 춘계학술대회.
편영식, 박정현, 조인호, 김창식, 서창민 (2009). "초음파 나노표면개질기술의 특성과 활용방안 연구", 대한기계학회논문집 (A), 33-3 pp 190-195.

2011년 8월 11일 원고 접수

2011년 11월 7일 심사 완료

2011년 12월 23일 게재 확정