

초음파탄성진동에너지를 이용한 표면개질처리 및 가속피로수명평가 기술의 적용사례 및 응용기술

조인식*† · 조인호** · 오주연*** · 이창순*** · 편영식**** · 박인규***

* (주)엠브로시아, ** (주)디자인메카, *** 선문대학교 하이브리드공학과, **** 선문대학교 기계공학과

Applied Cases and Application Technologies of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification and Accelerated Fatigue Life Evaluation Using Ultrasonic Elastic Vibrational Energy

In-Sik Jo *† , In-Ho Jo ** , Joo-Yeon Oh *** , Chang-Soon Lee *** , Young-Sik Pyoun **** and In-Gyu Park ***

* Mbrosia Co., Ltd., ** DesignMecha Co., Ltd.,
*** Dept. of Hybrid Engineering, Sun Moon Univ.
****Dept. of Mechanical Engineering, Sun Moon Univ.

(Received May 13, 2013 ; Revised June 30, 2013 ; Accepted June 30, 2013)

Key Words: Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification(초음파나노표면개질), Ultrasonic Fatigue Test(초음파피로시험), Accelerated Testing(가속시험)

초록: 최근 플랜트산업분야에서는 발전설비와 해양 플랜트 및 선박, 교량 건설등 핵심 구조물들에 대한 내구성 향상 및 평가를 위한 기술이 크게 확장 적용될 것으로 본다. 이에 본 연구에서는 초음파 탄성진동에너지를 이용한 초음파 나노표면개질(Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification) 기술과 초음파 피로시험(Ultrasonic Fatigue Test)기술을 통해서 현재까지 국내산업분야에서 활발하게 진행중인 적용사례를 분석하고자 하였으며, 플랜트분야 특히 발전설비와 해양선박 플랜트 및 교량 건설구조물들의 핵심 용접부에 대한 내구성 향상을 위해 크게 확장 적용될 수 있는 새로운 응용기술 연구방향에 대한 방법들을 제시하고자 한다.

Abstract: It is greatly expected that the technologies of durability enhancement and evaluation for the core structures of plant facilities, marine plant and bridge constructs will be greatly expanded in the plant industry fields. In this study, the actively ongoing applied cases were tried to be analyzed in the present domestic industry fields through the Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification (UNSM) and Ultrasonic Fatigue Test (UFT) technologies using ultrasonic elastic vibrational energy, and the new application technology to improve the durability of plant industry field, especially plant facilities, marine plant and core weld components of bridge constructs will be presented.

1. 서론

고온고압의 열악한 환경 하에서 가동되는 발전설비와 해양 플랜트 및 불규칙 진동이 가해지는 선박, 교량 건설구조물들은 다양하고 중요한 핵심구조물들 중에서 가장 취약하고 중요한 것이 플랜트 용접부의 내구성이다. 용접기술과 더불어 내구수명 향상을 위하여 용접부의 표면나노구조화와 압축잔류응력 부가를 위한 새로운 기술들이 중점적으로 개발 적용되고 있다. 이 중 초음파나 레이저 등의 에너지원을 이용한 표면처리기술을 응용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이는 항공우주산업분야 엔진 및 추진시스템에 사용되는 핵심부품들의 내구수명 향상과 안전성 향상을 위한 기술로도 적용되고 있다.⁽¹⁻³⁾

§ 이 논문은 대한기계학회 플랜트부문 2013년도 춘계학술강연회(2013. 6. 4.-5., 한국수자원공사 교육원) 발표논문임

† Corresponding Author, true8297@nate.com

기존 산업분야에서 가장 일반적으로 사용되어 왔던 Shot Peening을 통한 압축잔류응력 부가기술이 용접부의 피로, 마모, 응력부식 특성 향상에 좋은 효과를 발휘한 것은 주지의 사실이지만, 발전 설비나 플랜트 설비의 잔류수명 향상이나 보수 목적으로 적용하기 위해서는 현장 휴대용으로 개발되어야 한다는 가장 큰 기술적인 어려움을 극복하기 위하여 많은 연구가 선진국을 중심으로 진행되고 있는 실정이다. 특히 선진국에서는 New Trade 기술로 응용되기 때문에 기술이전이나 정보를 획득하기가 대단히 어렵고, 일반적인 타 분야 응용기술이 확보되었다 하더라도 발전설비 및 플랜트 분야 등 사용자의 사용 환경과 특성에 따른 응용 기술은 새롭게 개발 시험/평가의 과정을 거쳐야만 비로소 활용이 가능한 기술이다. 이와 더불어 신뢰성 평가방법 중 압축잔류응력 분석과 용접피로수명 평가는 대부분 실험실 수준의 해석뿐 신뢰성 규격화에 한계가 있는 것으로 판단된다. 특히 판상용 용접피로성능 평가를 위해서는 시험장비 자체의 설계 및 셋팅이 어려울 뿐 아니라 장시간이 소요되는 문제가 있다. 이에 새로운 성능평가방법으로 초음파를 이용한 동탄성계수 관련 잔류응력 측정기술과 탄성공진을 이용한 가속피로시험법이 선진국을 통해 중요한 연구자료들이 발표되고 있는 실정이다. 이러한 기반 위에 본 논문에서 소개하고자 하는 핵심적인 기술은 초음파나노표면개질(UNSM : Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification) 기술과 초음파가속피로(UFT : Ultrasonic Fatigue Test) 시험법이 있다. UNSM 기술은 초음파 진동에너지 최대 변위를 이용한 불 팁에 의한 극소성변형 표면처리기술이고, UFT 기술은 피로시험편의 탄성공진 시험법으로 20kHz의 주파수로 인장압축이 시험편 중앙에 부가되게 하는 기술로서 동탄성계수 측정과 시험편 설계를 통해 평가하는 방법이다.^(4,5) 지금까지 이 두 기술은 국내에서는 대기업을 중심으로 응용연구가 진행되고 있을 뿐만 아니라 학계에서도 그에 맞추어 많은 관심을 가지고 신진 연구진들의 활발한 연구 협력을 통해 진행되고 있는 상황이다. 따라서 본 논문의 목적은 Cu 60wt% + Zn 40wt%의 황동합금에 대한 UNSM 처리를 통해 압축잔류응력 부가와 피로강도를 향상시키고, 그 평가방법으로 UFT 시험결과로 피로거동을 평가하고자 하였으며, 표면처리 후 표면 극소성변형 특성에 대한 결과를 조직학적 이론으로 설명하고자 하였다. 추가로 발전설비 플랜트 부분에 응용될 수 있는 휴대용 초음파 표면개질 기술과 시험/평가를 위한 초음파피로시험과 잔류응력측정 기술에 대한 연구개발 방향을 소개하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 준비 및 미세조직 분석

본 연구에 사용된 60/40 황동의 화학조성은 Table 1과 같이 Cu-Zn 합금이며, X선 회절 패턴의 결정구조 분석 결과, 기지조직은 FCC 결정구조를 가지며, 격자상수는 3.72Å인 α 상으로 확인되었고, 추가로 β 상이 존재하며, 이는 격자상수 2.95Å의 BCC 구조로 분석되었다.

Table 1 Chemical composition (wt.%) of the specimen.

Element	Cu	Pb	Fe	Sn	Al	Si	Zn
SIMS	65.122	4.307	0.058	6.531	0.004	0.049	Balance

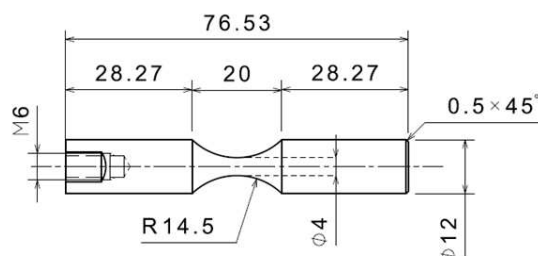


Fig. 1 Geometry and dimensions of ultrasonic fatigue test specimen

Fig. 1과 같은 초음파 피로시험(UFT)을 위한 20kHz 공진 전용시험편을 제작하여 gage length부에 초음파 나노표면 개질처리(UNSM)를 수행하였다. UNSM 처리에 의한 소성변형 층의 두께 및 조직분석을 위해서 단면부의 전자후방산란회절(Electron Back Scatter Diffraction, EBSD, TESCAN Mira II) 분석과 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy; TEM, JEM-2100F)을 사용하여 미세조직을 분석하였다. EBSD 시편은 0.5 μm 다이아몬드 paste로 연마한 뒤 콜로이달 실리카(0.05 μm)로 연마천과 비접촉 연마를 통해 마무리하였으며, TEM 시편은 twin jet polishing 법으로 10% HNO₃+90%메타놀 용액을 사용하여 -20°C, 15V에서 전해연마(Tenupol 5)하였다. 또한 UNSM 처리 정도에 따른 미소경도의 변화관찰을 위해 비커스(Vickers)경도기를 사용하여 50g의 하중 하에서 UNSM 처리한 표면으로부터 약 550μm 내부까지 미세경도의 변화를 측정하였다.

2.2 초음파나노표면개질(UNSM) 처리방법

Ultrasonic Nano-crystalline Surface Modification (UNSM) 기술은 압전소자(PZT)와 고주파형인 20kHz급의 볼트조임 랑즈뱅형 진동자(BLT)로써 전기적 에너지를 기계적 진동에너지로 변환하는 과정을 거쳐서 진동 Horn을 통한 탄성진동과 전달 및 증폭시킨 초음파 진동에너지로 최종 Ball Tip을 통해 금속표면에 단위 면적당 1,000~4,000/mm² 정도 타격을 가하여 SPD(Severe Plastic Deformation)의 발생으로 표층부의 조직을 나노결정 조직으로 개질함과 동시에 아주 크고 깊은 압축 잔류응력을 부가하는 기술이다.^(2,3) 이 UNSM 장치는 Fig. 2의 (a)와 같이 초음파 진동에너지의 최대 변위를 이용한 볼 팁에 의한 표면처리기술이며, Table 2는 초음파 나노표면 개질처리 공정 조건으로 Cu-Zn 합금에 대한 최적화된 공정을 선정하여 처리하였다.

2.3 초음파 피로시험 (Ultrasonic Fatigue Testing : UFT)

초음파 피로시험의 원리는 Fig. 2의 (b)와 같이 압전세라믹(PZT) 탄성진동과에 의한 공진시험방법으로 시험편 끝단에 최대 변위(Displacement)에 의한 시편의 게이지 중앙부에 최대 응력진폭(Maximum Amplitude Stresses)을 얻을 수 있다. 초음파 피로시험장치의 주 구성부는 자동 튜닝 발진부(generator)로 2,500W이며, 전기적인 에너지를 기계적 탄성진동에너지로 변환하는 20kHz 압전세라믹(piezoelectric) 진동부와 탄성진동 전달 및 증폭시키는 혼(horn)과 열변형량 특성 최적화를 위한 냉각시스템, 그리고 최대 Strain 해석을 통해 제작된 전용 시험편부로 구성되어 있으며, 변위 및 공진 주파수 측정을 위한 센싱 &

Table 2 Principal parameters of UNSM technology

Feed (mm/rev)	Speed (m/min)	Frequency (kHz)	Static Load (N)	Amplitude (μm)	Ball diameter (mm)
0.07	30	20	20	20	3

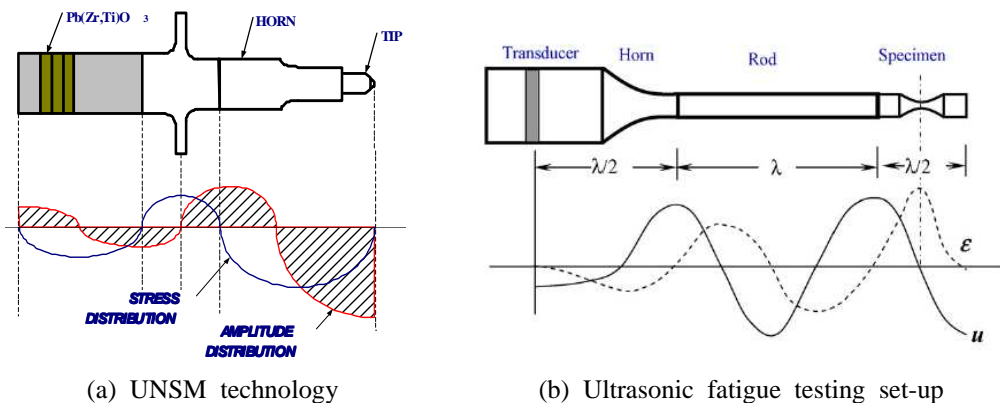


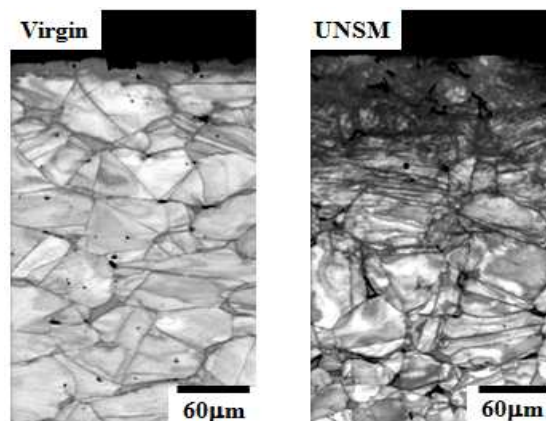
Fig. 2 Variation of the stress and amplitude along the acoustic wave (a) along with resonant specimen (b)

Table 3 Conditions of ultrasonic fatigue test

Loading frequency (kHz)	Stress ratio	Stress Amplitude (MPa)	Test atmosphere
20	R=-1	130~210	Room Temp.

Table 4 Twin density and distance between twins

Specimens	Virgin	UNSM
Twin distance (μm)	62.43	2.06
Twin density ($\times 10^6 \text{cm}^{-2}$)	0.001	0.237

**Fig. 3** EBSD micrographs of the specimens before and after the UNSM.

모니터링 시스템 제어부가 자동화 제어 프로그램으로 구축되어 있다.^(5,6) Table 3은 Cu-Zn 초음파 피로시험을 위한 조건으로 응력비는 R=-1로 인장 및 압축이며, 인가된 응력진폭 범위는 130~210MPa 안에서 제어하여 상온에서 냉각을 하면서 시험하였으며, 시험편에 크랙이 날 경우 공진 주파수 리미트 (20kHz \pm 500Hz)를 설정하여 자동 피로수명이 계산될 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 분석

Fig. 3은 UNSM 전후의 단면 EBSD 조직사진으로 UNSM 처리 전에는 표면층의 변형이 거의 없는 상태로 결정립의 크기가 20~70 μm 로 결정립계 부분에 제 2상이 존재하는 것으로 보인다. UNSM 처리된 시편의 경우, twin의 형성과 조직의 변형으로 인한 결정립계의 소멸 등, 표면층의 강소성 가공변형이 진행된 것으로 확인되었으며, Table 4는 UNSM처리 전후 소성변형에 의해 형성된 쌍정 밀도와 거리를 정량적으로 측정된 결과로 UNSM 처리 후에 현저하게 쌍정 밀도가 높고 거리는 작은 것으로 확인되었다.

Fig. 4는 UNSM 처리 전후 시편 표면층의 TEM 조직사진과 제한시야회절상(Selected Area Diffraction Pattern, SADP)이다. 조직사진에서 보듯이 UNSM 전에 이미 상당수준의 전위밀도를 가지고 있으나 twin은 거의 관찰되지 않았으며, UNSM 처리 후에 전위밀도는 많아지고, 고밀도의 twin이 모든 시편에서 관찰되었다. UNSM 처리 후에 결정립계가 불분명해지며, 회절상이 원형도형에 가까워지는 사실로부터 결정립의 미세화로 인한 강소성변형이 진행된 것을 알 수 있다.

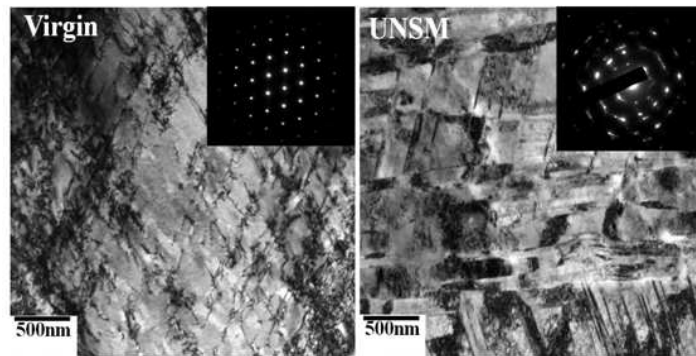


Fig. 4 Typical TEM micrographs and SADP of before and after the UNSM.

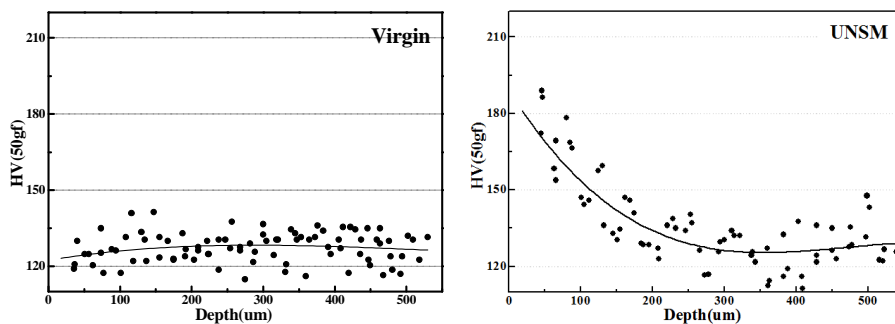


Fig. 5 Vicker's hardness of the specimens

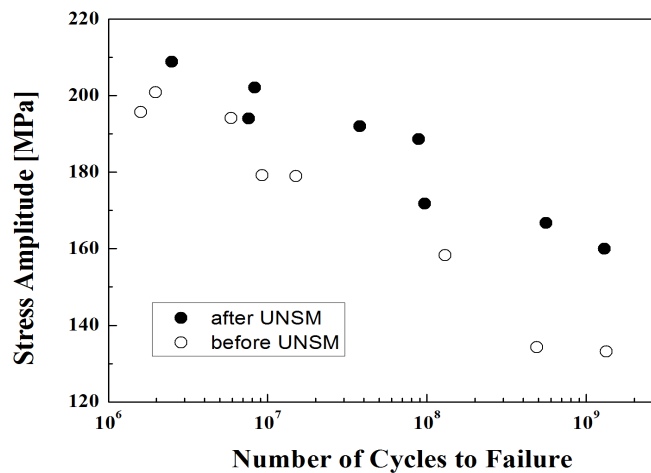


Fig. 6 S-N behavior of Cu-Zn alloy before and after UNSM (20kHz, R=-1).

3.2 표면경도 및 초음파 피로 시험 결과

Fig. 5는 UNSM 처리 전후 시편의 Vicker's 경도시험 결과를 나타낸 것으로 표면경화 깊이는 약 250 μ m 정도이며, 최대 Hv130에서 Hv180으로 향상됨을 알 수 있었다.

Fig. 6은 초음파 피로시험법을 이용한 피로수명평가 결과로서 Cu-Zn 합금의 기가사이클 기준으로 UNSM 처리를 하지 않은 경우 피로한은 130MPa인 반면, UNSM 처리를 한 경우 피로한은 160MPa로 UNSM 처리에 의하여 피로한이 30MPa가 증가한 것을 알 수 있었다. 이는 표면나노구조화와 압축잔류응력의 영향이 낮은 응력진폭범위에서 더욱 피로수명 향상의 인자로 작용하는 것으로 알 수 있었다.

4. UNSM 및 UFT 적용 분야

현재 가장 활발히 활용되고 있는 UNSM 기술 적용분야는 철강산업, 제지산업 및 목재산업에 사용되는 산업용 나이프와 베어링 분야이다. 특히 철강 분야의 소재가 고장력강 생산이 확대되면서 더 큰 효과를 내고 있으며 평균적으로 100% 이상 수명이 향상되고 있다. Fig. 7에는 철강산업에 사용되고 있는 UNSM 처리된 공업용 나이프와 압연롤이 제시되었다. 최근에는 베어링의 내외륜에 UNSM 처리를 하여 rolling contact fatigue와 마찰계수를 저감함으로써 베어링의 dynamic load rating을 10% 이상 향상시키는 기술을 개발하고, 이를 발전설비와 관련된 Angular Contact Bearing과 터빈로터베어링에 적용하고 있다.

Fig. 8은 발전설비에 사용되고 있는 대형밸브의 개폐역할을 하는 Stem(AISI304)과 소형 밸브의 Stem(Ti-6Al-4V)이며, 반도체 장비에서 사용되는 Remer Pin과 Guide Roll(Ti(G2))로서 상대재와의 내마모 문제가 가장 심각하며, 이들 모두 가공 난삭재 소재로서 최종 finishing의 어려움을 가지고 있는 부품들이다. UNSM 기술은 표면강화뿐 아니라 표면거칠기 또한 거의 polishing급의 수준을 구현하면서 표면형상을 미세 dimple 구조로 형상화하여 마찰계수 저감을 동시에 구현시킬 수 있다. 이와 관련해서 고온 구조재료의 핵심 교환부품의 전체적인 내구수명을 향상시키기 위한 기술개발이 진행 중에 있다.

Fig. 9는 현재 초음파피로시험법(UFT)이 활발하게 적용되고 있는 자동차엔진과 터빈분야로서 경량화 소재 및 고온소재 개발 등에 적극적으로 활용되고 있을 뿐 아니라 고온 분위기에서 초음파 가속피로시험이 가능하도록 시스템을 구축하여 Fig. 10과 같이 각 온도별로 고온에 따른 탄성계수값을 이용하여 초음파 고온피로시험을 수행할 수 있도록 하였다. 추가로 자동차 경량화를 위한 고장력강판(TRIP)이나 엔지니어링 플라스틱(POM)에 대한 초음파피로시험을 적용하기 위하여 판상용 평가 시스템이 현재 구축되어 추가 연구가 진행되고 있는 상황이다.



Fig. 7 Parts for the steel alloy which applied UNSM



Fig. 8 High temperature structural material parts applying UNSM

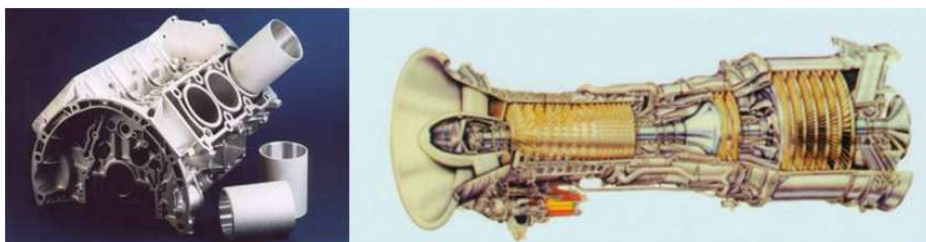


Fig. 9 Some components in modern machinery



Fig. 10 System for ultrasonic fatigue test at high temperature

5. 결 론

본 연구에서는 현재 국내에서 최초로 개발한 초음파나노표면개질(UNSM) 기술과 초음파피로시험(UFT) 기술을 통해 Cu-Zn 합금에 대한 강소성변형이 초고주기 피로거동 영향에 대한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) Cu-Zn 합금의 결정립의 크기는 20~70 μm 로 결정립계 부분에 제 2상이 존재하는 것으로 확인하였으며, UNSM 처리후 기계적 쌍정이 고밀도로 형성되고, 결정립계가 변형, 불분명해지며, 결정립의 나노구조화가 진행되었음을 확인할 수 있었다.

(2) UNSM 처리 전후의 쌍정거리(Twin distance)가 62.43 μm 에서 2.06 μm 으로 작아졌으며, 쌍정밀도(Twin density)는 $0.001 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 에서 $0.237 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 로 증가한 양을 정량적으로 확인하였으며, 표면경도는 Hv130에서 Hv180으로 향상되었고, 경화깊이는 약 250 μm 로 확인되었다.

(3) 초음파 피로시험(Ultrasonic Fatigue Test) 결과 기가사이클 기준으로 피로한은 UNSM 처리전 130MPa에서 UNSM 처리후 160MPa로 30MPa 증가한 것을 확인 할 수 있었으며, 낮은 응력진폭범위로 갈수록 피로 수명이 점점 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다.

후 기

This work (Grants No. C0100527) was supported by Business for Cooperative R&D between Industry, Academy, and Research Institute funded Korea Small and Medium Business Administration in 2013.

참고문헌

- (1) Kirkhope, K. J., Bell, R., Caron, L., Basu, R. I. and Ma, K. T., 1999, "Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques. Part 1: Review," *Marine Structures*, Vol. 12, pp. 447~474.
- (2) Lee, C. S., Cho, I. S., Pyoun, Y. S. and Park., I. G., 2011, "Study of Inner Micro Cracks on Rolling Contact Fatigue of Bearing Steels Using Ultrasonic Nano-Crystalline Surface Modification," *Key Engineering Materials*, Vols. 462-463, pp. 979~984.
- (3) Cho, I. S., Amanov, A., Ahn D. G., Shin, K. S., Lee, C. S., Pyoun, Y. S. and Park., I. G., 2011, "Wear Behavior of Cu-Zn Alloy by Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 11, pp. 6443~6447.
- (4) "Ultrasonic Fatigue Testing" *ASM*, Vol. 8, pp. 718~723.
- (5) Cho, I. S., Shin, C. S., Kim, J. Y. and Jeon, Y. H., 2012, "Accelerated Ultrasonic Fatigue Testing Applications and Research Trends," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 6, pp. 707~712.
- (6) Bathias, C., 2006, "Piezoelectric Fatigue Testing Machines and Devices," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp. 1438~1445.