

초음파 가속피로시험 적용 사례 및 연구 동향[§]

조인식^{*†} · 신충식^{**} · 김종엽^{**} · 전용호^{***}

* (주)엠브로지아텍, ** 삼성테크윈 소재개발그룹, *** 아주대학교 기계공학부

Accelerated Ultrasonic Fatigue Testing Applications and Research Trends

In Sik Cho^{*†}, Choong shig Shin^{**}, Jong Yup Kim^{**} and Yong ho Jeon^{***}

* R&D Group, Mbrosiatec Co., Ltd.,

** Terbo Machinery Center, SamSung Techwin

*** Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

(Received December 21, 2011 ; Revised April 9, 2012 ; Accepted April 11, 2012)

Key Words: Ultrasonic Fatigue Test(초음파피로시험), Giga Cycle Fatigue(기가사이클 피로), Accelerated Testing(가속시험), Durability(내구성)

초록: 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금에 대한 초고주기 피로시험 연구를 통하여 사이클에 따른 파단면 관찰결과 2가지 타입으로 명확히 구분되는 것을 확인할 수 있었다. 첫번째로 10⁶사이클 범위에서 확인할 수 있는 것은 표면부에서 피로크랙 사이트가 시작된 전형적인 피로 파단면이다. 두번째는 10⁷~10⁹사이클에서는 확연히 다른 피로파단 양상으로, 표면으로부터 500 μ m 내부에서 피로크랙 사이트가 시작되어 크게 박리되어 나간 형상으로, 크랙 사이트 주변을 관찰한 결과 미세한 마이크로 크랙들이 입계파괴 양상으로 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이에 내부 크랙 사이트 피로거동에 대한 연구결과와 본 시험에서 사용된 초음파피로시험기술의 이론 및 적용사례를 소개하고 현재 활발히 진행중인 연구동향을 밝히고자 한다.

Abstract: Very high cycle fatigue (VHCF) behavior of aerospace components has emerged much attention due to their long service life. In this study, a piezoelectric ultrasonic fatigue testing (UFT) system has been developed by Mbrosiatec Co., Ltd. to study the high cycle fatigue (HCF) strength of Ti-6Al-4V alloy. Hourglass-shaped specimens have been investigated in the range from 10⁶ to 10⁹ cycles at room temperature under completely reversed R = -1 loading conditions. Scanning electron microscopy (SEM) analysis revealed that failures occurred in the entire range up to the gigacycle regime, and the fractures have been found to be initiated from the surface, unlike in steels. However, it was found from the SEM micrographs that microcracks transformed into intergranular fractures. Thus, it can be concluded from according to the results that this test method can be applicable to commercialized automotive and railroad parts that require high cycle fatigue strength.

1. 서론

산업이 발달함에 따라 기계 핵심 부품에 대한 설계 해석과 더불어 내구성이나 신뢰성에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있으며, 그 한도 또한 매우 장시간을 요구하고 있다. 일례로 자동차 내연기관 부품이나 고속철 차륜 그리고 발전 및 항공기용 블레이드 등은 Fig. 1과 같이 10⁸ 사이클

이상의 피로수명예측을 요구하고 있는 현실이다.⁽¹⁻⁴⁾ 이에 초가속수명시험법(Highly Accelerated Life Testing)이란 내용으로 부품/시스템의 내구신뢰성 확보가 긴요한 관계로 발전분야, 우주분야, 핵분야, 항공분야 등 사용 조건 자체가 열악한 경우의 다양한 연구가 필요하다. 이에 맞추어 선진 학계에서는 ASTM이나 TMS 산하 전문 학회(Very High Cycle Fatigue)를 통해 활발하게 많은 응용 연구를 진행하고 있을 뿐 아니라 기가사이클 이상의 시험법을 표준으로 제안하고 있다.^(5,6) 하지만 현재 실용화 되고 있는 고주기 내구성 피로 시험기로는 Rotary bending 방식과

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회 (2011. 11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, truefamily@empas.com

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

Electroforce 방식으로 약 50~200Hz의 속도가 최고 속도이므로 수십억 cycle 시험을 하기에는 너무 장시간이 소요되고 있는 실정이다. 이에 가속피로시험평가(Accelerated Fatigue Testing)기술로써, 새로운 공정, 새로운 재질의 응용 주기를 획기적으로 줄일 수 있는 수십 kHz의 초음파 피로시험기술(Time Saving Method)이 그 대안으로 각광받고 있다. 따라서 본 논문에서는 초음파 피로시험법의 이론 및 적용사례를 소개하고, 초음파피로시험분야의 응용 고유기술을 확보하고 있는 (주)엠브로지아텍에서 개발한 초음파 피로시험기를 이용하여, 고특성이 요구되는 특수 부품 소재로 많이 활용되고 있는 Ti-6Al-4V합금의 20kHz 초음파 피로시험을 통하여 초고주기 사이클 피로 거동을 분석하고자 하였다.⁽⁷⁾

2. 초음파 피로시험 방법

초음파 피로시험의 원리는 압전세라믹(PZT) 탄성진동파에 의한 공진시험방법으로 Fig. 2와 같이 시험편 끝단에 최대 변위(Displacement)에 의한 시험편의 게이지 중앙부에 최대 응력진폭을 얻을 수 있다.

최대 응력진폭(S)은 시험편끝단부위 변위센서를 통해서 변위 진폭값을 측정하고 계산식 (1)에 의

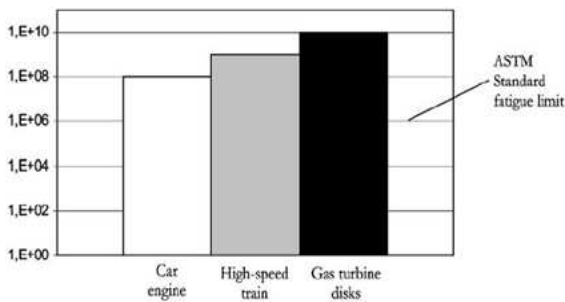


Fig. 1 Fatigue life of some components in modern machinery⁽²⁾

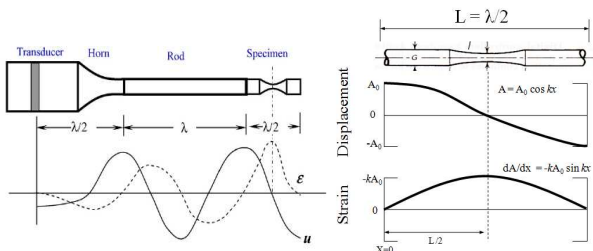


Fig. 2 Ultrasonic Fatigue Test : ASM Volume 8⁽³⁾

해서 결정된다. 여기에서 E는 정적탄성계수(static Young's modulus)이며, c는 길이방향 음속과 관련된 함수로써, $(c = (E/\rho)^{1/2}$ where E : dynamic Young's modulus, ρ : density), ω ($= 2\pi f$ where f is resonance frequency)이며, l, b 그리고 β 는(2), (3), (4) 관계식에 의해서 나타낼 수 있다. Fig. 4를 참조하면 여기에서 R (=6mm)은 시험편의 최대 반경이고, H (=2mm)는 시험편 게이지 부의 최소 반경, g (=10mm)는 게이지 길이의 반값으로 나타낼 수 있다.^(8,9)

$$S = a \cdot E \cdot \beta \cdot \cos\left(\frac{\omega \cdot l}{c}\right) \cdot \cosh bg \cdot \left(\frac{1}{\cosh \beta g}\right) \quad (1)$$

$$l = \frac{c}{\omega} \tan^{-1} \left[\frac{c}{\omega} (\beta \coth \beta g - b \tanh bg) \right] \quad (2)$$

$$b = \frac{1}{g} \cosh^{-1} \left(\frac{R}{H} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{b^2 - \left(\frac{\omega}{c}\right)^2} \quad (4)$$

3. 초음파 피로시험 평가

3.1 적용소재 : Ti-6Al-4V

3.1.1 시험편제작

본 실험에 사용된 Ti-6Al-4V시험편의 기계적 특성 값을 분석하기 위하여 변위제어 0.01mm/sec로 인장 시험 결과 Table 1에서와 같이 최대인장강도 값은 1056.16MPa이었으며, 연신율은 6.8%로 확인되었다. 미세조직은 2ml HF + 2ml HNO₃ + 96ml 증류수를 사용 식각하여 분석한 결과 basketweave 타입으로 확인되었다. 전체적인 성분(Oxford EDS) 분석결과는 Al 5.79%, V 4.11% 확인되었으며, 상에 따른 TEM 분석결과 Fig. 3과 같이 일반적인 Bimodal 타입의 조직보다 β 양이 많으면서 크기도 작게 분포되어 있음을 알 수 있었다. Fig. 4는 20kHz 공진을 위하

Table 1 Mechanical properties of Ti-6Al-4V

Yield Strength (MPa)	Ultimate tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Young's Modulus (GPa)	Micro hardness (Hv)
1009.88	1056.16	6.8	103.39	315.3

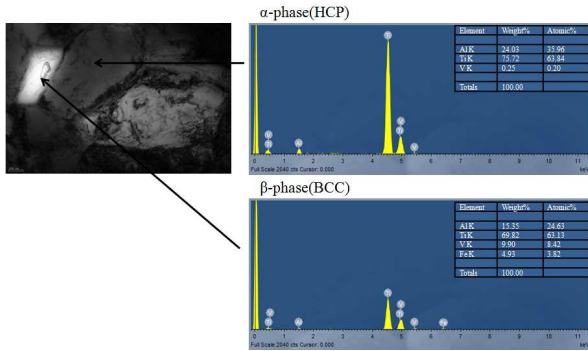


Fig. 3 A cross-sectional EDS observations of Ti-6Al-4V

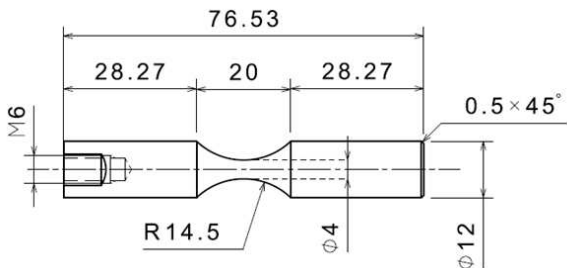


Fig. 4 Geometry and dimensions of ultrasonic fatigue test specimen

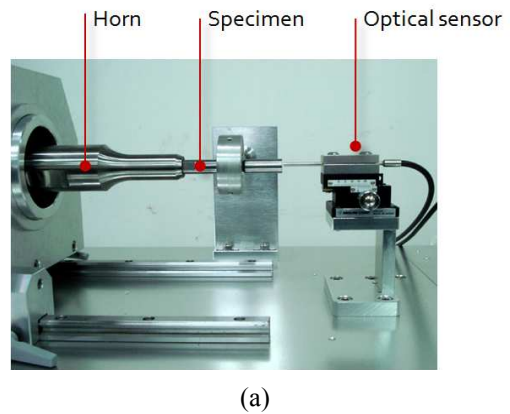
여 설계 제작한 시험편 규격으로 게이지부의 길이 20mm, R14.5mm이며, $\phi 4$ 로 이 시험의 규격은 소재 자체의 영률, 밀도와 관련하여 최대 응력진폭(S) 계산식과 연관된다.

3.1.2 시험 장치 및 조건

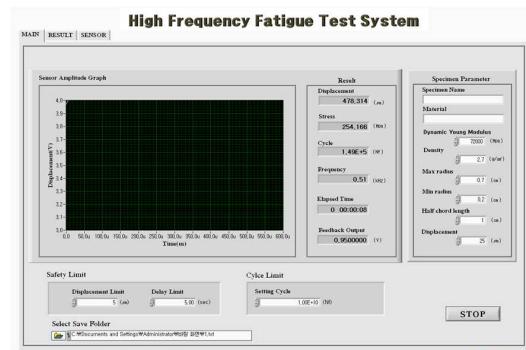
초음파피로시험장치 주 구성부는 자동 튜닝 발진부(generator)로 1,500W이며, 전기적인 에너지를 기계적 탄성진동에너지로 변환하는 20kHz 압전세라믹(piezoelectric) 진동부와 Fig. 5의 (a)와 같이 탄성진동 전달 및 증폭시키는 혼(horn)과 열변형량 특성 최적화를 위한 냉각시스템 그리고 최대 Strain 해석을 통해 제작된 전용 시험부로 구성되어 있으며, 변위 및 공진 주파수 측정을 위한 센싱 & 모니터링 시스템 제어부가 Fig. 5의 (b)와 같이 자동화 제어 프로그램으로 구축되어 있다. Table 2는 Ti-6Al-4V 초음파피로시험을 위한 조건으로 응력비는 R=-1로 인장 및 압축이며, 변위조절은 33.2~43.0 μ m로 0.5 μ m씩 제어 하여 상온에서 냉각을 하면서 시험 하였으며, 시험편이 크랙이 날 경우 공진 주파수 리미트 (20kHz \pm 500Hz)를 설정하여 자동 피로수명이 계산될 수 있도록 하였다. 그리고 본 시험에서 사용된 총 시험편수는

Table 2 Conditions of ultrasonic fatigue test

Loading frequency (kHz)	Stress ratio	Displacement (μ m)	Test atmosphere
20	R=-1	33.2~43	Room Temp.



(a)



(b)

Fig. 5 System for ultrasonic fatigue test equipment (a) and control program (b)

21개로 인장시험 및 조직관찰 그리고 초기 피로 시험 규격을 설정하는데 사용되고 나머지 13개로 피로시험 데이터를 최종 확보하였다.

3.2 피로강도 (S-N curve)

3.2.1 초음파 피로 특성

Fig. 6은 초음파피로시험결과로서 최대응력 진폭(S) 대 $10^6 \sim 10^9$ 피로과피 사이클로써 530MPa 응력 대에서 기가사이클 피로한도가 확인되었으며, 사이클에 따른 파단면 관찰결과 2가지 타입으로 명확히 구분되는 것을 확인할 수 있었다.

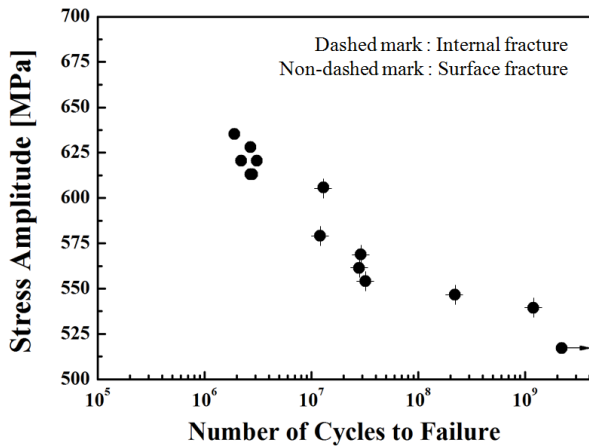


Fig. 6 S-N curve of Ti-6Al-4V (20kHz, R=-1)

3.2.2 피로파손 크랙 사이트

일반적으로 피로파손의 크랙 시작 사이트는 주로 표면부의 계재물(inclusion)이나 공공등 결함(defect)부위에서 시작하여 전파되는 것으로 알려져 있다. 하지만 본 연구에서 사용된 Ti-6Al-4V 합금의 피로 파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과 사이클에 따른 피로파손의 2가지 다른 양상을 확인할 수 있었다. 첫번째는 Fig. 7과 같이 10⁶ 사이클 범위으로써 6개의 시험편에서 공통적으로 확인할 수 있는 것은 표면부 한 부위에서 크랙이 시작되어 beachmark 타입으로 전형적인 피로파단면이 일어난 것으로 확인할 수 있었다. 이는 응력범위대가 큰 625MPa 범위 에서는 표면의 결함부위의 응력집중으로 일어난 것으로 확인할 수 있다. 두번째는 10⁷ ~ 10⁹ 사이클에서 확연히 다른 피로파단 양상을 확인하였다. Fig. 8에서 보이는 것과 같이 500 μ m ~ 1,000 μ m 내부에서 크게 뭉치로 떨어져 나간 형상으로 Fig. 9처럼 파단면의 내부를 잘 관찰해보면 미세한 마이크로 크랙들이 내부에 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Ti-6Al-4V 합금의 특성상 Fig. 10의 선행 연구 자료를 보면 낮은 응력 범위대에서 HCP결정구조인 α 상 결정립 사이가 내부 크랙 시작의 노치 역할을 하는 것으로 크랙이 시작되어 Fig. 9와 같이 입계를 따라 진전되다가 파단된 것으로 확인할 수 있다.

이와 같이 Ti-6Al-4V 합금은 특성상 계재물등 결함이 없는 소재로서 낮은 응력진폭 즉 수명주기가 오래가는 사이클에서는 표면의 응력 집중보다는 주기적인 소성변형으로 전위들의 이동과 관련

가) type I

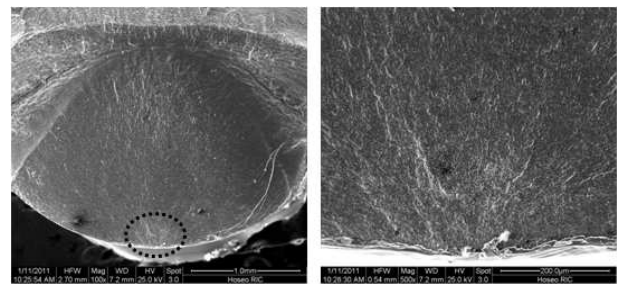


Fig. 7 SEM micrographs showing the overall view of the fatigue fracture surface of Ti-6Al-4V and high magnification : 613.1 MPa, 2.7×10⁶ cycles

나) type II

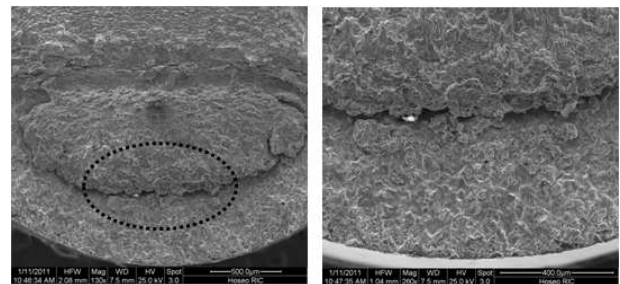


Fig. 8 SEM micrographs showing the overall view of the fatigue fracture surface of Ti-6Al-4V and high magnification : 539.3 MPa, 1.2×10⁹ cycles

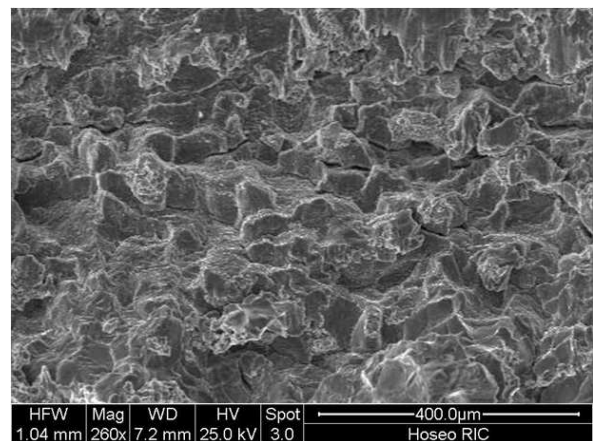


Fig. 9 SEM micrographs showing the overall view of the fatigue fracture surface of Ti-6Al-4V : 554 MPa, 3.2×10⁷ cycles

된 슬립계(Slip system)를 통한 결정립 부위에서의 내부 크랙 시작점의 요인으로 판단되며 이러한 내부 마이크로크랙들이 입계를 따라 여러 군데에서 진전된 후 최종 파단된 것으로 사료된다.

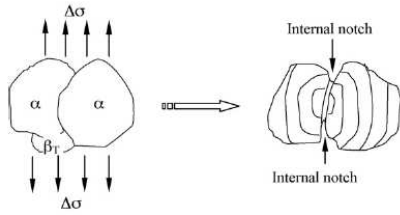


Fig. 10 A schematic of primary grain boundary as a potential interior crack initiation site⁽¹⁰⁾

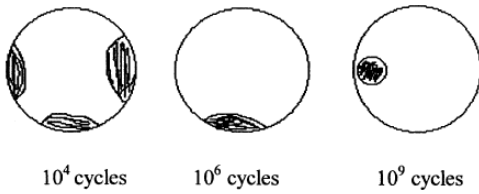


Fig. 11 Mechanism of fatigue initiation

3.2.3 피로크랙 생성의 매커니즘

일반적으로 피로 크랙생성의 중요한 인자는 계 재료와 공공등 결함으로부터의 시작된다. 하지만 많은 연구보고서를 근거로 경향을 분석한 결과 Fig. 11과 같이 크랙 시작점의 경향이 사이클에 따라 3가지 타입으로 나타나며, 주로 낮은 사이클(10^4)의 경우는 표면부의 여러 부위에서 시작될 수 있으며, 메가사이클(10^6)에서는 오직 한 부위에서 크랙 생성이 진행되는 것을 보여주고 있다. 하지만 초고주기 사이클(10^9)영역에서는 크랙생성의 사이트가 내부에서 진행되는 경향으로 나타나고 있다. 따라서 고주기 피로에 있어서 가장 확률적으로 적절한 해석은 벌크 소재내부의 응력 집중도가 높아진다는 것으로 설명할 수 있다.⁽¹¹⁾

4. 초음파 피로시험 적용 사례

4.1 비철소재 Al6061-T6 합금

피로수명을 향상시키기 위한 표면 강소성 기술중 초음파나노표면처리(UNSM)는 구조재료의 표면에 일정한 압축잔류응력을 부가함과 동시에 조직을 나노결정화하는 기술로서 Fig. 12는 Al6061-T6 합금에 대한 UNSM 처리전후의 초음파 피로시험을 수행한 결과로써 전형적인 비철재료에서 확인할 수 있는 피로한도는 고주기에서도 나타나지 않음을 확인할 수 있다.⁽¹²⁾

4.2 베어링 소재 SUJ2 합금

Fig. 13은 베어링강에 대한 초음파나노표면처리

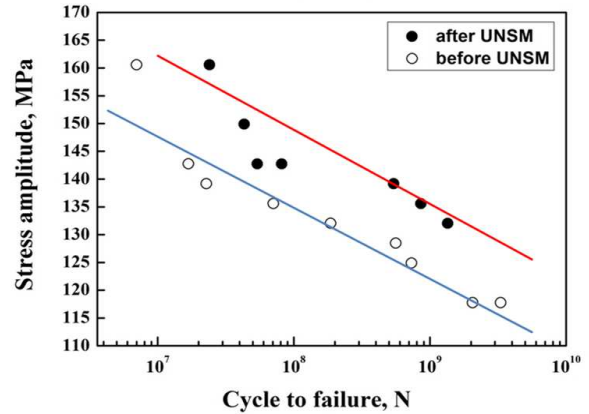


Fig. 12 S-N curve of Al6061-T6 alloy (20kHz, R=-1)

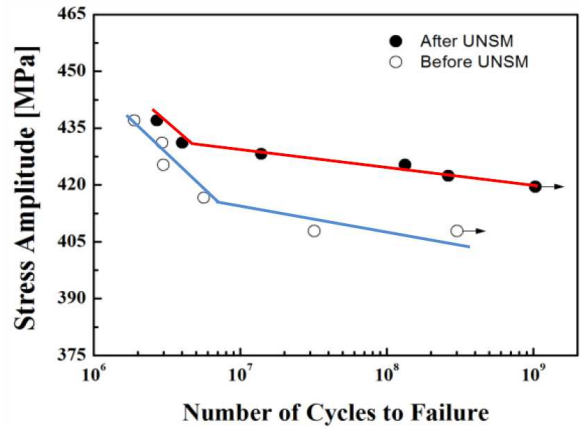


Fig. 13 S-N curve of SUJ2 Bearing steel (20kHz, R=-1)



Fig. 14 System for ultrasonic fatigue test at high temperature

(UNSM) 기술을 적용한 초음파피로수명 평가 결과로써 고주기 피로 한도의 차가 현저히 향상됨을 확인할 수 있었다.⁽¹³⁾

4.3 초음파 고온피로시험

고주기 피로시험이 요구되는 내구성능평가중

엔진내연기관이나 터빈부품들은 고온분위기 시험이 추가적으로 요구되는 상황에서 Fig. 14는 고온 분위기에서 초음파 가속피로시험이 가능하도록 제작한 시스템으로 초음파의 연속파에 의한 소재 자체의 열 발생을 억제하기 위한 방안으로 펄스(Puls) 제어기술을 개발하였으며, 고주파 유도도와 비침착식 Pyrometer를 이용하여 일정온도 제어를 통한 고온 분위기 시험이 가능하도록 구축한 상태이다.

5. 결 론

현재 국내에서 초음파 피로 시험법의 적용사례 및 연구동향에 대해서 소개하였으며, 또한 고특성 부품 소재로 많이 활용되고 있는 Ti-6Al-4V합금의 초음파 피로 거동을 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 초음파 가속피로시험기를 가지고 Ti-6Al-4V합금의 $10^6 \sim 10^9$ 피로파괴 시험결과 539.3MPa 응력 대에서 기가 사이클 피로수명을 확인할 수 있었으며, 피로 파단면을 관찰한 결과 최대응력 진폭(S)대 사이클에 따라 2가지 다른 피로 파괴 거동을 확인할 수 있었다.

(2) Ti-6Al-4V합금의 $10^7 \sim 10^9$ 사이클 범위에서는 소재 내부에서 피로 파손 현상이 일어난 것으로 확인하였으며, 이는 내부에 미세한 마이크로 크랙들이 입계를 따라 진전된 것으로 확인할 수 있었다.

(3) 적용분야 : 이와 같이 초음파 가속피로 시험방법의 국내 적용 분야로는 현재 자동차내연기관 및 베어링 소재개발에 활용되고 있으며, 각종 분위기에 맞는 시스템 구축을 통한 추가 연구가 진행되고 있는 상황이다.

후 기

본 연구는 삼성테크윈 소재개발그룹의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Cho, I. S., Lee, C. S., Pyoun, Y. S., Park, I. G.,

2010, "Ultrasonic Fatigue Testing of Al 6061-T6 Alloy on Gigacycle Fatigue" *KSAE 2010 Annual conference*, Vol. 486, pp. 2739~2746.

(2) Marines, I., Bin, X. and Bathias, C., 2003 "An Understanding of very High Cycle Fatigue of Metals" *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp 1101~1107.

(3) "Ultrasonic Fatigue Testing" *ASM*, Vol. 8, pp.718~723.

(4) Pyoun, Y. S. and Cho, I. S., 2007, "Application of Ultrasonic Nano Crystal Surface Modification Technology for Increasing the Fatigue Strength, Weight Reduction and Decreasing the Friction Loss" *Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 929~938.

(5) www.astm.org/A01symp1111.htm

(6) www.vhcf5.de

(7) www.mbrosiatec.com

(8) Hiroshi, H. and Yukio, M., 2006 *NTN Technical Review*, Vol. 74, pp. 54~61.

(9) Bathias, C., 2006, "Piezoelectric Fatigue Testing Machines and Devices" *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp. 1438~1445.

(10) Zuo, J. H., Wang, Z. G. and Hana, E. H., 2008, "Effect of Microstructure on Ultra-High Cycle Fatigue" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 473, pp. 147~152.

(11) Bathias, C., Drouillac, L., Le Francois, P., 2001 "How and why the Fatigue S-N Curve does not Approach a Horizontal Asymptote" *International Journal of Fatigue*, Vol.23, pp. 143~151.

(12) Amanov, A., Cho, I. S., Lee, J. Y., Lee, C. S., Pyoun, Y. S. and Park, I. G., 2011, "Effect of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification on Very High Numbers of Cycles Fatigue of Al6061-T6 Alloy" *Fifth International Conference on Very High cycle fatigue*, pp. 405~410.

(13) Cho, I. S., Amanov, A., Kim, K. H., Lee, C. S., Pyoun, Y. S. and Park, I. G., 2011, "The Role of Spheroidal Cementite Particle on SAE 52100 Bearing Steel for Gigacycle Fatigue" *Fifth International Conference on Very High cycle fatigue*, pp. 195~200.