

고장력 강판의 초음파 피로시험

염현호^a, 정용찬^a, 김차영^a, 강기영^b, 이문구^a, 홍민성^a, 전용호^{a*}

Ultrasonic Fatigue Test for a High Strength Steel Plate

Hyunho Yeom^a, Yongchan Jung^a, Chayeong Kim^a, Ki-Young Kang^b, Moon Gu Lee^a,
Min-Sung Hong^a, Yongho Jeon^{a*}^a Department of Mechanical, Engineering, Ajou University, 206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea^b Department of Precision Mechanical Engineering, Daeduk College, 68, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34111, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 September 2015
Revised 2 December 2015
Accepted 4 December 2015

Keywords:

Ultrasonic fatigue test
Hydraulic fatigue test
High strength steel
Plate specimen
Dynamic elastic modulus
S/N curve

ABSTRACT

The demand of high cycle fatigue behavior on plate material is increasing because of its various applications. However, the high-cycle fatigue life data of the plate material is very rare compared to the rod material. Thus, in this study, a plate specimen is designed for the ultrasonic fatigue test because it is time efficient as compared to the conventional fatigue test. To apply the ultrasonic fatigue test, the specimen design is required to resonate at 20 kHz. Therefore, the dynamic elastic modulus was determined by measuring the resonance frequency with a piezoelectric element and laser doppler vibrometer (LDV). As a result, the plate specimen is designed and demonstrated using the ultrasonic fatigue testing machine. The ultrasonic fatigue test results were compared with the hydraulic fatigue test results.

1. 서론

기계 부품이나 요소의 수명은 사용된 재료의 항복강도보다 낮은 수준의 하중이 탄성영역에서 반복적으로 작용했을 때 일어나는 피로파손과 관련이 있다. 금속 재료는 무한한 피로수명을 갖지 않아 무한히 사용할 수 없음에도 산업이 발달함에 따라 기계 재료, 제품 등의 요구 수명은 날로 길어지고 있으며 최근까지 무한수명으로 판단되었던 10^7 cycle급의 피로한도 기준이 10^9 cycle 이상으로 상향되고 있는 바 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 특히 항공, 우주, 고속철, 자동차, biomedical device 등 사용 환경이 가혹하고 교체가 매우 어렵거나 불가능한 분야에서는 초고주기 수명에 대한 정보가 필수적이며 이에 따라 초고주기 영역의 피로시험

에 대한 연구결과가 다수 발표되고 있는 상황이다. 많은 연구를 거듭하면서 연구자들은 기존의 피로영역과 고주기 피로영역의 피로 파괴 거동이 다르다는 것을 발견하게 되었으며, 피로거동을 피로주기 영역에 따라 저주기피로(LCF: low cycle fatigue, $N_f=10^4\sim10^5$), 고주기피로(HCF: high cycle fatigue, $N_f=10^5\sim10^7$), 초고주기피로(VHCF: very high cycle fatigue, $N_f>10^7$)로 구분하여 연구를 진행하고 있다. 피로시험에 있어서 얼마나 빨리 마무리 할 수 있는 지는 중요한 문제이다. 일반적으로 유압식 피로시험기의 경우에는 2~15 Hz, rotary bending 방식과 electroforce 방식의 경우는 약 50~300 Hz의 속도로 운용되고 있다. 이에 반해 본 연구에서 사용되는 초음파 피로시험기는 20 kHz의 시험 주파수를 이용하여 피로시험 소요시간을 현저히 줄여줄 수 있다는 장점을 가지

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-3652

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: princaps@ajou.ac.kr (Yongho Jeon).

고 있다. 예를 들어 종래의 피로시험기를 이용하여 300 Hz의 시험 주파수로 시험을 진행할 경우 초고주기 영역인 기가사이클에 도달하는데 약 38일이 소요되지만, 20 kHz의 시험주파수로 연속하여 시험할 경우 14시간이 소요된다.

이와 같이 초음파를 이용한 피로시험을 진행할 경우 빠른 시간 내에 실험을 마무리 할 수 있어 초고주기 피로 영역의 실험에 적합하다. Fig. 1은 초음파 피로시험기로서 시험편을 20 kHz의 주파수로 공진시켜 최대 응력과 변형량을 얻고 이를 이용해 피로시험을 진행한다.

초음파 피로시험은 작동 원리상 시험편이 공진되어야 하며, 이에 따라 실험을 수행하기 전 시험편의 형상에 대한 설계가 매우 중요하다. 시험편의 형상에 대해서는 환봉형 시험편뿐만 아니라 실제 자동차나 선박과 같은 산업 분야에서는 주로 사용되고 있는 판형 소재에 대한 연구가 필요하다. 이러한 필요성으로 인해 선행 연구자들은 스테인리스강, 마그네슘 합금 등 다양한 판형 소재에 대한 연구결과를 발표하였다^[2,3]. 본 논문에서는 자동차, 선박 등 각종 산업분야에서 사용되는 고장력강(590 ferrite-bainite)을 이용하여 초음파 피로시험기에 사용되는 판형시험편을 설계하였으며, 자유 공진 모드에서의 유한요소 해석을 통해 초음파 피로시험편 설계의

타당성을 검토하였다. 이를 바탕으로 제작된 초음파 피로시험편으로 초음파 피로시험을 진행하여 판형 소재의 고주기 피로수명을 분석하고자 하였다.

또한 본 연구에서는 초고주기 피로시험에 특징점을 가지는 초음파 피로시험과 더불어 종래에 많이 사용되었던 Fig. 2와 같은 유압식 피로시험기를 사용한 피로시험을 진행하여 초음파 피로시험과 기존 유압 피로시험 간의 상관관계를 평가하고자 하였다.

2. 시험편 설계

2.1 소재

본 연구에서 사용한 재료는 590 ferrite-bainite강으로 연질의 ferrite는 높은 연신율을 나타내고, bainite는 높은 신장 플랜지성을 보이고 있다. 이들이 결합된 590FB강은 구멍확장성이 우수하여 주로 진동을 직접 흡수하게 되는 완충장치, 암, 휠 디스크 등에 사용된다^[4]. 본 연구에서 설계된 시험편 형상은 방전가공을 통하여 제작하였고, 사용된 재료의 조성은 Table 1과 같다.

2.2 동탄성 계수

20 kHz의 정확한 초음파 공진 시험편을 설계하고 또한 시험에서 적용되는 응력값을 계산하기 위해서 동탄성계수 값을 측정하였다. 동탄성계수 측정시스템은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 압전소자, OFV-352 LDV(laser doppler vibrometer)와 HP-35670A DSA(digital signal analyzer)를 이용하여 아래와 같은 순서로 동탄성 계수 값을 정밀 측정하였다.

1. 바(bar) 형태의 590FB강의 원재료를 실을 이용하여 공중에 매달아 자유운동 할 수 있는 상태로 만든다.



Fig. 1 Ultrasonic fatigue tester



Fig. 2 Hydraulic fatigue tester (Instron 1350)

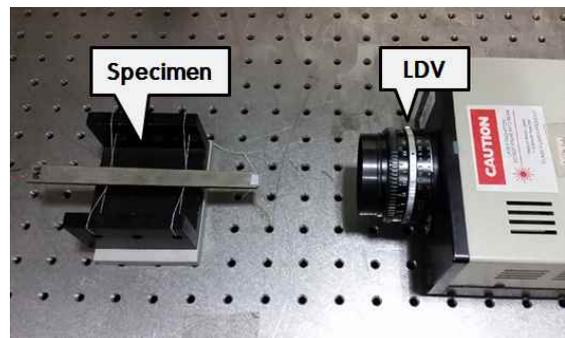


Fig. 3 Measurement of dynamic Young's modulus

Table 1 Chemical composition of 590FB (wt.%)

C	Mn	Si	P	S	Fe
Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	
0.090	1.550	0.150	0.030	0.003	balance

2. 공중에 매달린 590FB 강 of 원재료의 한쪽 끝에 왁스를 이용하여 압전소자를 부착한다.
3. 압전소자가 부착된 반대편에서 LDV를 이용하여 압전소자의 가진에 따른 변위를 측정한다.
4. DSA를 이용하여 압전소자의 가진 주파수와 LDV의 변위를 분석하여 공진 주파수를 측정한다.

동탄성 계수(E_d)는 식 (1)과 같이 밀도(ρ), 음파속도(V_c)로 나타내며 음파속도(V_c)는 공진주파수(f_n)와 파장의 길이(λ)로 표현된다. 밀도는 시편의 질량 측정을 통해 확보하였고, 식 (1)을 이용하여 계산된 결과는 Table 2에 정리하였다.

$$E_d = \rho V_c^2, V_c = f_n \lambda_n \quad (1)$$

2.3 판형시험편 설계

초음파 피로시험에서 시험편에 진동파를 가하면 변형과 응력이 발생한다. 1차원으로 가정한 시험편에 파동방정식을 적용하여 변형과 응력을 얻는다. 얇은 막대에 중력을 무시하면 1차 파동방정식은 다음과 같다.

$$E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2)$$

경계조건으로 시험편의 양 끝단에서 변위가 최대가 됨을 적용한다. 파동방정식을 통하여 1차 모드 공진 파장(length of resonance)은 다음과 같다.

$$l = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (3)$$

Fig. 4에서 보는 바와 같이 초음파 피로시험편에 응력집중을 발생시키기 위해서 중앙부의 단면적을 감소시킨다. 단면적 $S(x)$ 를 고

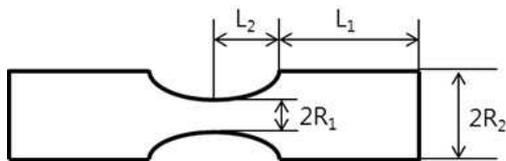


Fig. 4 Schematic of ultrasonic fatigue test specimen

Table 2 Physical properties of 590FB steel

Density	Dynamic Young's modulus
8170 kg/m ³	221.28 GPa

려한 파동방정식은 다음과 같다.

$$\rho S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial f}{\partial x}, f = E_d S(x) \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

파동방정식에 표기된 E_d 는 앞서 실험으로 구한 동탄성 계수를 사용한다. 판형 시험편의 단면적은 두 부분으로 나뉜다. 평행부인 L_1 부와 단면적이 변하는 L_2 부분이며 L_2 의 형상은 exponential profile로 하였다.

$$y(x) = R_2, L_2 < |x| \leq L$$

$$y(x) = R_1 \exp(2\alpha x), |x| \leq L_2$$

$$\alpha = \frac{1}{2L_2} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (5)$$

판형 시험편의 길이는 중앙에서 최대 응력이 작용하도록 공진 파장과 같다. L_1 의 길이는 판형 시험편 중심에서 L_2 만큼 떨어진 시험편 상에서 변위가 연속이고 미분 가능하다는 경계조건을 적용하여 구하면 다음과 같다.

$$L_1 = \frac{1}{k} \arctan \frac{1}{k} [\beta \coth(\beta L_2) - \alpha], \beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2} \quad (6)$$

시험편의 총 길이를 공진 파장에 맞추므로써 중앙에서 변위는 없고 응력은 최대가 된다. 또한 단면적의 감소로 중앙에서 응력이 집중된다. L_1 값을 결정한 후 최종 590FB강의 초음파 피로시험편은 Fig. 5와 같이 설계되었다.

서론에 밝힌 바와 같이 본 연구에서는 초음파 피로시험과 더불어 유압식 피로시험기를 통한 시험이 같이 진행되었다. 유압식 피로시험기에 사용된 소재는 초음파 피로시험에 사용된 재료와 같은 590FB강으로 동일한 두께로 제작하였으며 KS B 0825규격에 부합하도록 Fig. 6과 같이 제작되었다.

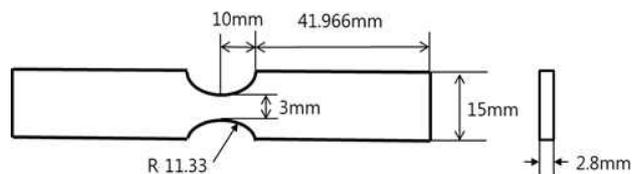


Fig. 5 Dimension of ultrasonic fatigue test specimen

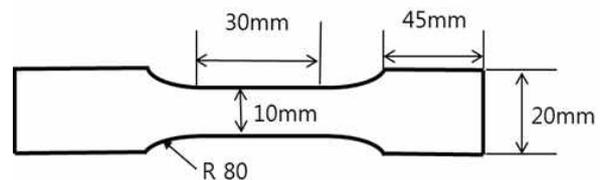


Fig. 6 Dimension of hydraulic fatigue test specimen

3. 결과

3.1 유한요소 해석

앞서 언급한 바와 같이 초음파 피로시험편은 20 kHz의 특정 공진주파수에서 공진을 일으키게 설계되며 가장 큰 변위와 응력을 발생시켜 초음파 피로시험을 가능하게 한다. 이에 따라 시험편 설계가 제대로 이루어졌는지 분석하기 위한 유한요소 해석을 실시하였다. 유한요소 해석은 Table 3과 같이 ANSYS가 사용되었으며, 구속이 이루어지지 않은 자유진동 상태에서 모달 해석을 실시하였다. 유한요소 해석에 사용된 모델은 Fig. 7과 같이 트랜스듀서로부터 초음파 가진을 전달하는 booster, 초음파 진동을 증폭 및 전달하는 horn, 시험편으로 이루어져 있다. booster와 horn은 titanium alloy의 물성치를 적용하였고 시험편은 일반 강재에 측정된 590FB강의 물성치를 적용시켰다. 15 kHz에서 25 kHz 사이에서 모달 해석을 수행하였으며 Fig. 8과 같이 19.927 kHz에서 축방향으로 변위를 가지는 모드가 발생함을 알 수 있었다. 설계 목표인 20 kHz와 80 Hz 차이를 가지므로 유한요소 해석상 유효한 설계가 되었다고 판단하였다.

3.2 초음파 피로시험

초음파 공진 설계된 590FB강의 초음파 피로시험편의 피로시험 조건은 Table 4와 같으며 응력비는 인장-압축인 R = -1, 시험 주파수는 19.914 kHz이다. 시험온도는 상온에서 시험이 진행되었으며 590FB 강종의 소재 특성상 초음파 진동 시 응력집중과 더불어 자체 잡열이 크기 때문에 시험편 중앙부에서 어느 정도 열이 발생한다. 이러한 열 발생으로 인한 시험 값의 오차나 공진을 벗어나는 현상을 방지하기 위해 압축공기로 외부에서 냉각함과 더불어 일정

Table 3 Information of analysis results

Software	ANSYS
Number of nodes	10,638

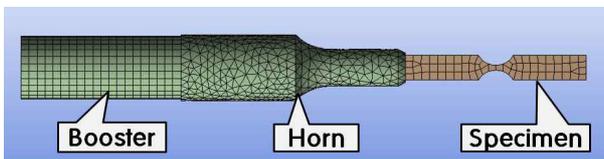


Fig. 7 Finite element model of ultrasonic fatigue tester

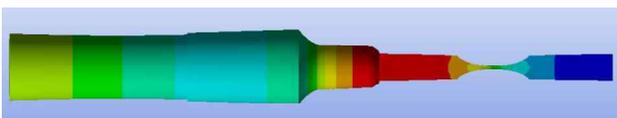


Fig. 8 Mode shape at the 19.927 kHz

시간 초 단위로 응력 부가 후 휴지기를 갖는 시험 방식으로 실험을 진행하였다. Fig. 9(a)는 시험 전의 판형 초음파 피로시험편이며 시험결과인 Fig. 9(b)는 예측한 대로 시험편의 중앙에서 파단된 시험편을 보여주고 있다. 피로시험 결과는 Fig. 10과 같으며 가장 짧은 피로수명은 540 MPa에서 7.34×10^4 이며, 가장 긴 피로수명의 경우는 460 MPa에서 1.41×10^9 이었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 S-N 선도가 경향을 가지며 판형 초음파 피로시험편 설계와 피로시험이 제대로 이루어졌다고 볼 수 있다. 또한 460 MPa의 응력 부가 시 기가사이클에 도달함을 알 수 있었는데 같은 460 MPa의 응력을 부가한 다른 시편의 경우 8.37×10^7 의 피로수명을 가져 S-N 선도 상에서 평행을 이루었다. 이에 따라 460 MPa보다 낮은 응력에서는 무한 수명을 갖는다고 판단하였다.

3.3 유압식 피로시험

유압식 피로시험은 INSTRON 사의 1350 모델로 시험하였으며

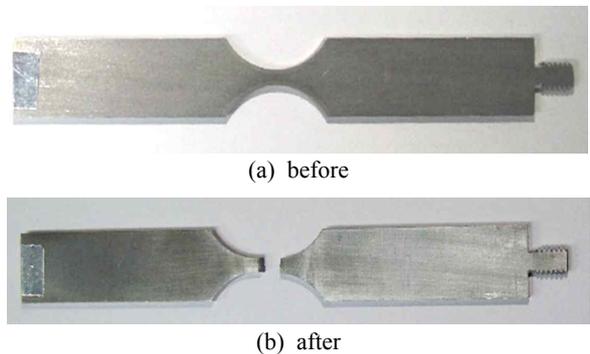


Fig. 9 Ultrasonic fatigue test specimen

Table 4 Ultrasonic fatigue test setting

Stress ratio [R]	-1
Frequency [kHz]	19.914
Temperature [°C]	25
On / Off time [s]	5 / 2

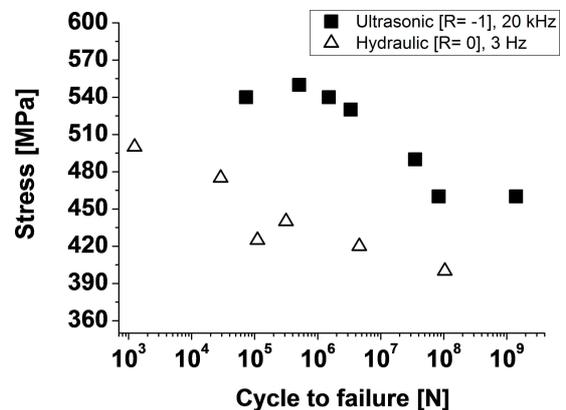


Fig. 10 S-N curves of 590FB

Table 5 Hydraulic fatigue test setting

Stress ratio [R]	0
Frequency [Hz]	3
Temperature [°C]	25

시험조건은 Table 5와 같이 시험주파수 3 Hz로 상온에서 시험되었으며 응력비는 '0'이다. 응력비가 초음파 피로시험기와 같은 '-1'이 아닌 이유는 판상시험편에 대하여 인장-압축인 '-1'의 응력비로 시험 할 경우 압축 하중 부가 시 좌굴이 발생하여 실험을 진행할 수 없기 때문이다.

시험결과는 Fig. 10에 초음파 피로시험 결과와 같이 나타내었다. 가장 짧은 수명을 가지는 데이터는 500 MPa의 응력에서 1.24×10^3 이며, 가장 긴 수명을 가지는 값은 400 MPa의 응력에서 1.05×10^8 이다. 초음파 피로시험기로 측정된 S-N 선도와 같은 경향을 나타내었으나 값은 유압식 피로시험기로 시험한 결과가 약 100 MPa 정도 응력대가 낮게 측정되었다. 이는 유압식 피로시험기를 통해 50 Hz 미만의 주파수로 시험된 Tatsuo S.의 연구결과와 같이 응력비가 '-1'과 '0'의 경우에는 개략적으로 100~150 MPa 수준의 차이를 보인다고 보고되었으며, 본 연구에서 그 결과를 다시 확인할 수 있었다⁵⁾.

4. 결론

본 연구에서는 초음파 피로시험을 위한 판상 소재의 시험편 설계와 시험편 설계 검증 및 사용된 590FB 소재의 피로특성을 연구하였다. 특정 주파수에서의 공진을 이용하는 초음파 피로시험을 위하여 동탄성 계수 측정값과 기존의 이론식을 바탕으로 시험편을 설계하였다. 설계된 시험편은 유한요소 해석을 통해 설계 공진 주파수인 20 kHz에 근접한 19.927 kHz의 자유진동 모드를 가지는 것을 확인하였다. 이후에 방전가공을 통해 만들어진 판상 초음파 피로시험편으로 피로시험을 진행하였으며 시험주파수는 19.914 kHz로 유한요소 해석 값과 가까운 결과를 보였으며, 460 MPa의 응력을 부가하였을 때 기가사이클에서 피로파괴가 일어나는 피로특성을 확인하였다.

초음파 피로시험과 더불어 종래에 널리 사용되었던 유압식 피로시험기를 이용한 피로시험도 병행하였다. 초음파 피로시험을 통한 S-N 선도와 비슷한 개형을 보였으나 절대 값에 있어서 차이를 나

타내었다. 이는 초음파 피로시험과 다른 응력비로 피로시험이 진행된 결과로 판단된다.

상기와 같은 결론을 통해 시험편 설계와 시험이 유의미한 결과를 가진다고 판단하였다. 하지만 좌굴로 인해 판상 소재에 대해서는 유압식 피로시험기에서 응력비 '-1'의 시험이 어려운 점이 있었으며 이에 따라 시험 주파수에 따른 결과 값의 차이를 비교하지 못하였다. 본 연구를 통해 국내에서 초음파 피로시험법을 통해 그동안 산업계 등에서 널리 사용되는 판상소재에 대한 기가사이클 영역의 고주기 피로시험 데이터를 확보하는데 수월할 것으로 예상된다. 더불어 판상 용접재 등에 대한 피로시험이나 다양한 판상 소재의 고주기 피로특성을 위한 연구가 활발히 이루어질 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2014R1A2A1A1005 2344)임.

References

- [1] Batheias, C., Paris, P. C., 2005, Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice, Marcel Dekker, New York.
- [2] Müller-Bollenhagen, C., Zimmermann, M., Christ, H., 2009, Very High Cycle Fatigue Behaviour of Austenitic Stainless Steel and the Effect of Strain-induced Martensite, International Journal of Fatigue, 32:6 936-942.
- [3] Mayer, H., Papakyriacou, M., Zettl, B., Stanzl-Tschegg, S. E., 2003, Influence of Porosity on the Fatigue Limit of Die Cast Magnesium and Aluminium Alloys, International Journal of Fatigue, 25:3 245-256.
- [4] Matlock, D. K., Speer, J. G., 2009, Third Generation of AHSS: Microstructure Design Concepts, International conference on microstructure and texture in steels; Microstructure and Texture in Steels and other Materials, 185-208.
- [5] Tatsuo, S., Yosuke, S., Yoshiyuki, N., Mitsuhiro, T., Noriyasu, O., 2006, Effect of Stress Ratio on Long Life Fatigue Behavior of High Carbon Chromium Bearing Steel Under Axial Loading, International Journal of Fatigue, 28:11 1547-1554.