

## 초음파 피로시험편 결정법의 연구동향

명노준\* · 한승욱\* · 박정훈\* · 최낙삼\*\*

\* 한양대학교 기계공학과

### Technical Review of Specimens under Ultrasonic Fatigue Test

No-Jun Myeong\*, Seung-Wook Han\*, Jung-Hoon Park\* and Nak-Sam Choi\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received January 22, 2013 ; Revised March 21, 2013 ; Accepted March 25, 2013)

**Key Words:** Ultrasonic Fatigue Test(초음파 피로시험), Dynamic Young's Modulus(동탄성계수), Very High Cycle Fatigue(초고주기 피로)

**초록:** 본 논문에서는 초고주기피로영역(VHCF)에 대한 가속시험 방법인 초음파 피로시험을 소개하고 이와 관련된 이론을 검토하였다. 초음파피로시험은 20 kHz 영역에서 시험편의 공진을 이용하므로 동탄성계수와 파장을 고려하여 시험편의 길이와 형상을 설계하여야 한다. 공진시험을 통하여 20 kHz 에 맞는 파장을 구하고 시험편의 길이와 동탄성계수를 계산한다. 이렇게 계산된 시험편의 형상과 시험시 형성되는 변위값을 측정하여 응력을 구한다. 초음파 피로시험결과는 기존의 피로시험법에 따른 결과와 비교되어 주파수 및 시험편 형상의 효과가 검증되어야 한다.

**Abstract:** An accelerated ultrasonic fatigue test(UFT) has been used for analyzing very high cycle fatigue( VHCF,  $N_f > 10^7$ ). This study reviews how the test specimen is to be determined. We focus on UFT using a resonance of 20 kHz. The specimen geometry is determined by selecting test materials by using a dynamic Young's modulus and wavelength of 20 kHz. The dynamic Young's modulus is calculated at the resonant frequency. Through a resonant vibration test at 20 kHz, the length of the specimen is calculated. By determining the shape of the specimen, the stress during the UFT is calculated. The UFT results should be comparable at the test frequency and the specimen geometry obtained by the conventional fatigue tests.

### 1. 서 론

산업현장에서 사용되는 모든 재료는 반복적인 하중을 받는다. 이러한 반복적인 하중에 의한 피로파손은 인장강도보다 훨씬 낮은 하중수준에서 발생한다. 산업이 발전함에 따라 기계의 수명이 길어지고 항공기, 자동차 엔진 같은 고속기계들이 등장하면서 Fig. 1 과 같이 부품의 기대수명이 기존의 피로한도 ( $N_f = 10^7$  Cycle) 이상의 영역으로 요구되었다.<sup>(1,2)</sup>

Bathias<sup>(3)</sup>는 금속재료에 무한한 수명 피로한도는 존재하지 않는다고 하였다. Sonsino<sup>(4)</sup>는 부품의 형상, 안전성과 관련해 높은 사이클수에서 피로강도의 감소 거동을 해명했다. 이와 같이 연구자들은  $10^7$  이상의

높은 사이클 수에서 피로파손 거동을 연구 하면서 기존의 피로영역과 고사이클 영역의 피로파괴 거동이 다르다는 것을 발견하게 되었다. 이에 따라 최근 연구에서는 파손거동과 피로주기 영역에 따라서 피로거동을 저주기피로(LCF, Low Cycle Fatigue,  $N_f = 10^4 \sim 10^5$ ), 고주기피로(HCF, High Cycle Fatigue,  $10^5 \sim 10^7$ ), 초고주기피로(VFCH, Very High Cycle Fatigue,  $N_f > 10^7$ )로 구분하여 해석하고 있다.<sup>(2)</sup>

초고주기피로의 관심이 증가하면서  $10^7$  이상의 사이클수의 피로시험 연구결과가 필요하게 되었다. 하지만 기존의 피로시험방법으로는 초고주기 피로 영역의 피로 거동을 연구하기에는 너무 많은 시간이 소요되기 때문에 기존 시험기들보다 빠른 새로운 방식의 가속피로시험기들을 연구하기 시작하였다. 그 결과로 Table 1 과 같은 다양한 방식의 피로

† Corresponding Author, nschoi@hanyang.ac.kr

시험기들이 개발되면서 초고주기피로 영역까지 빠른 시험이 가능하게 되었다.<sup>(2,5)</sup>

최근 초고주기피로에 관한 선행연구에서 초음파 피로시험(ultrasonic fatigue test)을 사용한 사례가 증가하고 있다.<sup>(1~13,15,16)</sup>

ASM-Handbook-Vol8<sup>(6)</sup>에서는 기계적인 재료의 시험과 평가방법으로 초음파 피로시험에 대한 소개와 기본적인 이론들을 정리하였다.

Green 등<sup>(7)</sup>은 모래시계형상 시험편에 대한 응력 이론식을 소개하였으며, Bajons 등<sup>(8)</sup>은 일반적인 초음파 시험편의 게이지부의 응력집중에 대한 이론적 계산식을 검증하였다.

초고주기 피로영역에 대한 연구는 피로파손에 대한 새로운 영역으로 정의하고 그에 따라서 가속 피로시험인 초음파 피로시험을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 국내에서는 초고주기피로영역과 초음파 피로시험기에 대한 연구가 부족한 것이 사실이다.

초음파 피로시험은 20 kHz 영역에서 시험편의 공진을 사용하는 시험조건으로 피로시험 속도가 매우 빠르지만 그에 따라 고려할 사항도 많다. 시험편의 공진을 발생시켜야 하는 조건 때문에 형상이 제한된다. 그러므로 산업현장에서 직접 사용되는 부품시험은 불가능하고, 재료의 탄성 특성에 따라 크기와 형상을 결정하여 실험해야 한다.

본 논문에서는 초고주기피로 연구에서 사용되는 초음파 피로시험의 원리를 소개하고, 시험편 형상 결정에 대한 선행 이론을 검토하였다. 또한 초음파 피로시험의 시험편 형상의 계산 과정과 결정에 미치는 주요인자들을 분석하였다.

## 2. 초음파 피로시험의 이론

### 2.1 초음파 피로시험기의 원리

초음파 피로시험은 15~25 kHz 영역에서 재료의

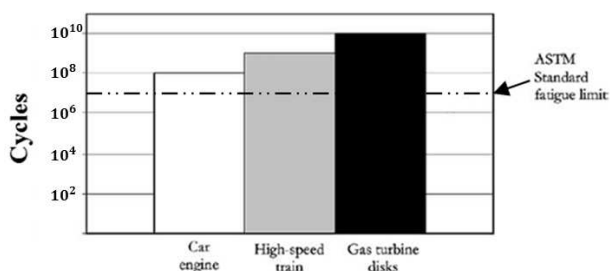


Fig. 1 Fatigue life of some components in modern machinery<sup>(1)</sup>

공진주파수를 이용하여 주기적인 응력을 가하는 가속피로시험방법이다.<sup>(6)</sup> 압전소자를 이용하여 시험편의 공진주파수와 일치하는 진동파를 발생시켜 시험편에 주기적인 응력을 발생시키는 원리이다. Fig. 2 와 같이 진동파를 전달 및 증폭시키는 혼(horn)의 길이를 공진파장의 반( $\lambda/2$ )으로 설정한다.

Table 1 Overview of testing facilities, frequency and time<sup>(2)</sup>

Testing facilities	Frequency	Time for N = 10 <sup>9</sup>
Rotating bending machine	50Hz	231 days
Resonant frequency machine	150Hz	77 days
Servohydraulic testing machine	400 Hz (1000 Hz)	29 days (12 days)
Ultrasonic test system	20,000 Hz	0.6-6 days depending on pauses

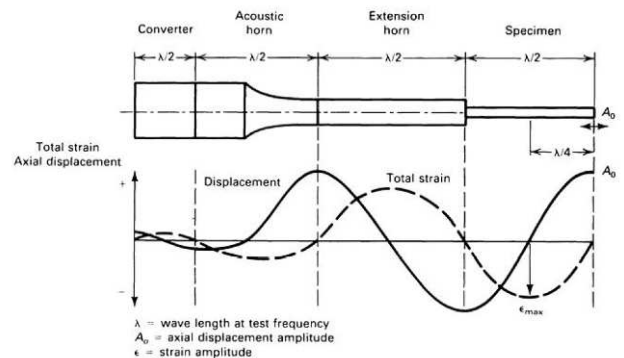


Fig. 2 Variation of the displacement and strain amplitudes along acoustic wave train<sup>(6)</sup>

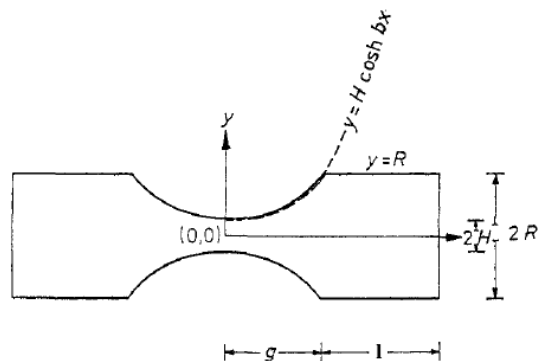


Fig. 3 Specimen with circular profile gauge flanked by two cylindrical shoulders<sup>(7)</sup>

그로 인해 압전소자에서 발생하는 진동파를 시험편의 시작부위에 전달하여 시험편 끝단에 최대변위가 형성되고, 시험편 중앙부에는 변위가 0인 노드 포인트가 형성된다. 노드 포인트에서 변형률이 최대가 되면서 최대응력이 발생하게 된다. 일반적인 변위와 변형률의 관계, 변형률과 응력의 관계를 이용하여 시험편에 가하는 주기적인 하중을 계산하고, 이를 이용하여 가속피로시험을 하는 원리이다.

2.2 초음파 피로시험편의 응력

초음파 피로시험의 가장 기본적인 시험편은 Fig. 3 과같은 원통의 단면을 가지는 모래시계형상이다. 이러한 시험편을 대상으로, 응력 계산을 위한 기본적인 지배방정식은 두께방향 단면(A)과 길이방향 변위(u)에 관한 식 (1)인 Webster equation(Webster 1919)이다.<sup>(7)</sup>

$$\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \frac{du}{dx} + \frac{\omega^2}{v_c^2} u = 0 \tag{1}$$

시험편의 단면은  $A(x) = \pi y^2$  이고  $y$  는 Fig. 3, 4 와 같이 길이방향으로 곡선형상을 갖는다. 즉, 게이지부분의 형상을  $y=y(x)$ 로 두면 식 (1)은 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{2}{y} \frac{dy}{dx} \frac{du}{dx} + \frac{\omega^2}{v_c^2} u = 0 \tag{2}$$

곡선부분의 형상을 hyperbolic cosine 으로 가정하여 시험편의 응력을 계산한다.<sup>(7,8)</sup> 따라서 시험편 곡선형상은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = H \cosh(bx) \tag{3}$$

식 (3)에서  $x=0$  일 때  $y=H$  이고  $x=g$  일때  $y=R$  이므로 시험편 형상계수  $b$  는 식 (4)로 나타난다.

$$b = \frac{1}{g} \cosh^{-1} \frac{R}{H} \tag{4}$$

윗 식들을 이용하여 다음 계수  $\beta$  를 구한다.

$$\beta = \sqrt{b^2 - \left(\frac{\omega}{v_c}\right)^2} \tag{5}$$

위 식들을 통해서 구한  $b, \beta$  와 시험기에서 측정

되는 변위(a), 시험편의 공진주파수(f), 동탄성계수 ( $E_d$ ), 시험편의 형상( $g, \ell$ )으로 시험편에 걸리는 응력(S)을 다음 식 (6)으로 구할 수 있다.<sup>(7-10)</sup>

$$S = a \cdot E_d \cdot \beta \cdot \cos \frac{\omega \ell}{v_c} \cdot \cosh(bg) \cdot \operatorname{csch}(\beta g) \tag{6}$$

여기서,  $a$ : 변위,  $E_d$ : 동탄성계수,  $\omega=2\pi f$ ,  $v_c$ : 음파속도,  $g$ : 게이지 부분 길이,  $\ell, b, \beta$ : 시험편 형상계수이다. 이와 같이 초음파 피로시험은 시험편에 작용하는 응력을 변위값을 통하여 식 (6)으로 계산된다.

2.3 초음파 피로시험편 형상의 종류 고찰

초음파 피로시험 선행연구에서 시험편 형상은 Fig. 3 과 같이 게이지가 반원 형상인 시험편과 Fig. 5 와 같은 게이지가 곡선과 편평한 부분이 있는 두 가지 종류의 시험편이 사용된다.<sup>(11-13)</sup> 두 시험편 모두 시

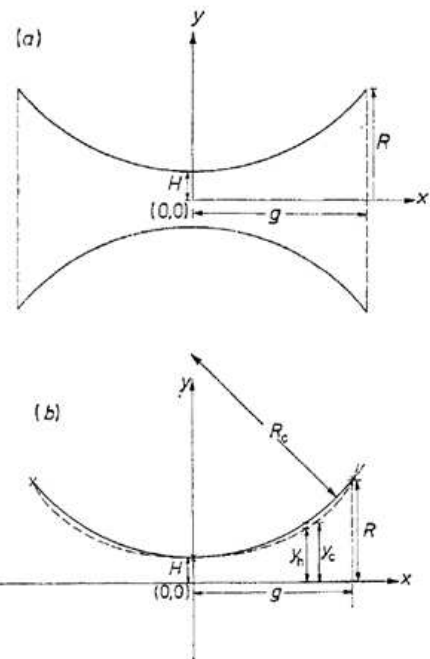


Fig. 4 (a) Volume of revolution with circular profile. (b) Fitting a hyperbolic cosine function (exaggerated) to an arc of circle<sup>(7)</sup>

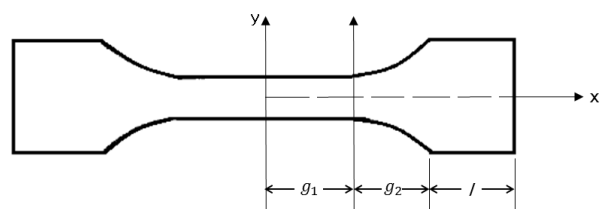


Fig. 5 Specimen with flat and circular profile gauge

험 주파수 영역에 맞추어 길이를  $\lambda/2$  로 결정하여 게이지 중앙에 최대 응력이 발생하게 한다. 이때 사용되는 식 (6)은 게이지 부분의 곡선형상(Fig. 3의 시험편)에 대한 식으로, 게이지의 최소단면 부분에서의 응력을 구하게 된다. 한편, Fig. 5 형상의 시험편은 g1 과 g2 경계 부분에서의 노치효과를 시험편 중앙부에 적용하여 응력을 계산하게 된다.

### 3. 시험편 형상의 결정 절차 고찰

#### 3.1 시험편의 길이 선택

초음파 피로 시험편은 시험 주파수영역 안에서 공진파장의 길이, 재료의 밀도, 동탄성계수를 고려하여 설계해야 한다.

혼으로부터 시험편까지 각각의 길이를 Fig. 2 와 Fig. 6 과 같이 공진파장의 반으로 설정하여 시험편 중앙에 최대 응력을 발생시켜야 한다.

재료에 따른 시험편의 길이를 설정하기 위해서는 Fig. 7 과 같이 20kHz 영역에서 공진실험을 실시한다. 기본적으로 노치가 없는 일정한 단면을 가진 바(bar)형태의 시험편을 사용하고, 시험편의 한 쪽

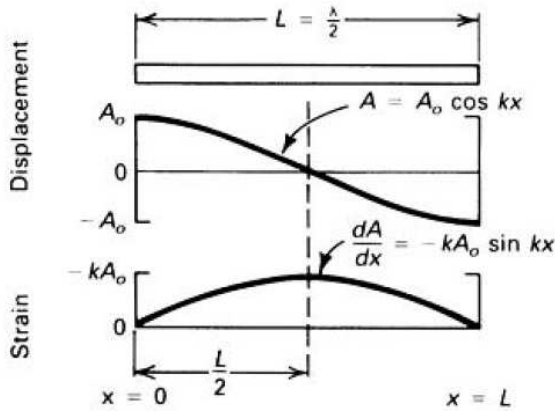


Fig. 6 Distribution of oscillatory displacement amplitude and strain amplitude over the length of a resonant bar of uniform cross section<sup>(6)</sup>

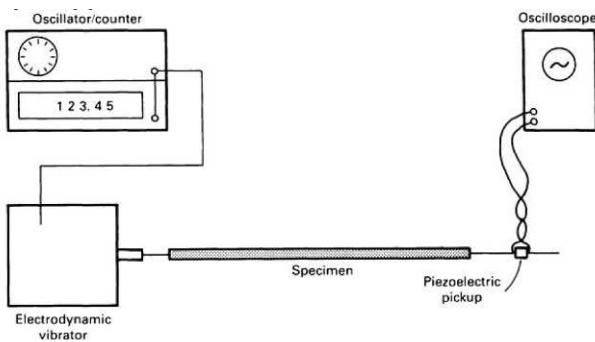


Fig. 7 Experimental measurement of the longitudinal resonance frequency of specimens<sup>(6)</sup>

끝단을 시험 주파수 영역(20kHz)으로 가진한다. 그와 동시에 반대쪽 시험편 끝단부의 변위센서를 통하여 주파수 변화에 따른 진폭값을 측정한다. 최대 진폭값에서의 주파수가 시험편의 공진주파수가 되고, 최대 진폭값에서의 길이가 시험편의 공진길이가 된다. 이때 초음파 피로 시험편의 길이는 100 ~ 150mm, 단면의 지름은 4 ~ 10mm의 범위 안에서 결정하는 것이 일반적이다.<sup>(6)</sup>

#### 3.2 동탄성계수 측정

시험편에 걸리는 응력을 식 (6)과 같이 계산하기 위해서는 시험 주파수에서의 동탄성계수( $E_d$ ) 값을 알아야 한다. 이와 관련해서 ASTM E1876 와 KS F 2437 에 동탄성계수의 측정 시험방법이 보고되어 있지만, Fig. 7의 시험을 통해서도 지정된 공진주파수에서의 동탄성계수 측정이 가능하다. 동탄성계수는 밀도( $\rho$ )와 음파속도( $V_c$ )에 관한 식 (7) 나타낸다.

$$E_d = \rho V_c^2 \tag{7}$$

식 (7)에서 음파속도는 공진주파수( $f_n$ )와 파장( $\lambda_n$ )의 측정값을 통하여 다음 식으로 계산한다.<sup>(14)</sup>

$$V_c = f_n \lambda_n \tag{8}$$

여기서,  $V_c$ : 길이방향 음속,  $f_n$ : 공진주파수,  $\lambda_n$ : 파장,  $\rho$ : 밀도,  $E_d$ : 동탄성계수이다.

윗 두 식으로 시험조건에서의 재료의 동탄성계수를 계산할 수 있다.

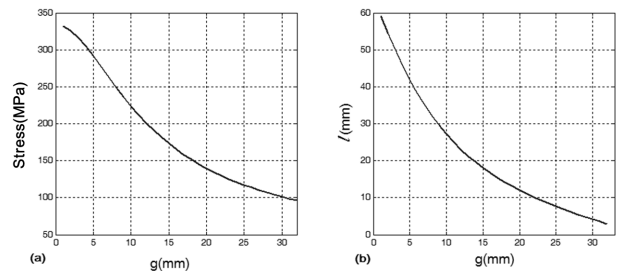


Fig. 8 Calculated stress(S), length( $l$ ) - gage length (g) diagram for specimen with circular profile gauge

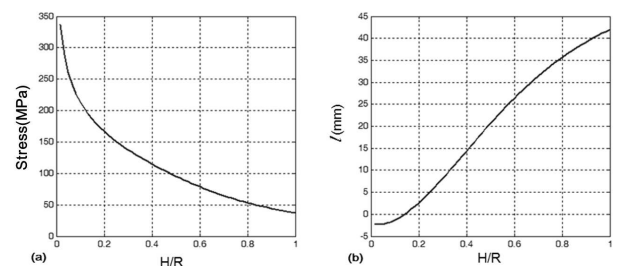


Fig. 9 Calculated stress(S), length( $l$ ) - radius ratio (H/R) diagram for specimen with circular profile gauge

3.3 시험편 형상의 결정과 고찰

기초시험과 식 (4,5,8)로부터 얻어진 각계수값과 Fig. 5 에서 시험편의 게이지 곡선부분의 길이(g), 그립부의 단면 반지름(R), 게이지 중앙부의 최소 단면 반지름(H)의 조건으로 시험편의 형상이 계산 된다. 또한 Fig. 3 의 시험편에서 그립부의 길이(l) 는 식 (9)와 같이 구해진다.<sup>(6)</sup>

$$l = \frac{v_c}{\omega} \tan^{-1} \left[ \frac{v_c}{\omega} (\beta \coth \beta g - b \tanh b g) \right] \quad (9)$$

Fig. 8 와 Fig. 9 는 알루미늄 합금(AI6061)을 소재로한 시험편 형상을 바탕으로 게이지 길이(g)와 단면 반지름비(H/R)의 변화에 따른 응력과 그립부의 길이(l) 변화를 계산하여 나타낸 그래프이다.

게이지의 길이가 증가함에 따라 시험편 중앙에서의 응력집중현상이 작아지기 때문에 Fig. 8(a)와 같이 응력이 작아졌다. Fig. 8(b)는 게이지 길이의 증가에 따른 그립부의 길이 변화를 나타낸 것으로 게이지의 길이 증가에 따라 그립부의 길이 역시 감소하는 경향을 나타낸다. 시험편의 전체 길이는 g 와 l 의 합이며 공진주파수에 맞추어 λ/2 로 설정하였다. 그러므로 실제 공진주파수에 맞는 시험편 길이와 계산식으로 나타나는 시험편 길이를 비교하여 서로 맞추어야 한다.

Fig. 9(a)는 게이지 부분과 그립부의 단면 반지름비(H/R) 변화에 따른 응력 변화를 나타낸 그래프이다. 시험편의 단면 차이가 작아질수록 응력이 감소하는 경향이 나타난다. 이 또한 시험편의 단면차이의 감소로 Fig. 9(a)와 같이 응력집중효과가 작아짐으로서 시험편에 걸리는 응력이 작아짐을 보이고, 시험편의 그립부와 게이지 중앙부 반지름의 차이가 증가함에 따라 응력의 변화량이 급격이 증가함을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 시험편의 단면 반지름의 비율 변화에 따른 그립부의 길이 변화량이다. 그립부와 게이지 중앙부 반지름의 비율이 증가함에 따라 그립부의 길이도 증가해야 함을 알 수 있다.

이와 같이 초음파 피로시험편은 게이지부의 단면반지름이나 길이를 변화시키면 전체 길이와 크기를 계산을 통해 조정해야 함을 알수있다.

4. 시험 주파수 및 형상에 따른 효과

4.1 주파수에 따른 시험 결과

Fig. 10(a,c,d)는 초음파 피로시험에 사용된 AISI-4140 의 시험편을 보여주고 있다. Fig. 10(a)는 Fig.

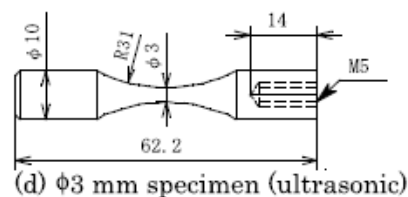
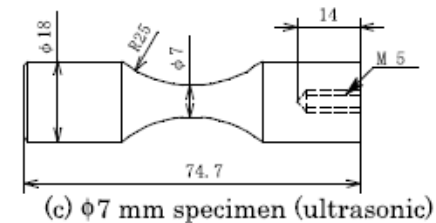
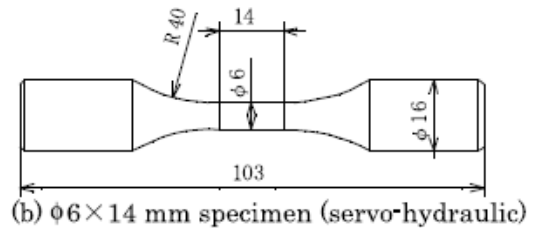
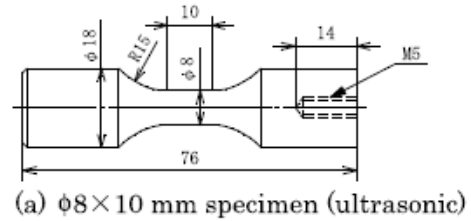


Fig. 10 Profiles of fatigue test specimens<sup>(13)</sup>

5 와 같은 게이지부가 일정한 부분이 있는 시험편이고, Fig. 10(c), (d)는 Fig. 3 과 같이 게이지가 반원형상을 갖는 시험편이다. 또한 각각의 시험편 전체 길이와 단면적의 크기가 다르다.

Fig. 11 은 서로 다른 시험주파수에 따른 JIS SNCM439 시험편의 인장-압축(R=-1) 피로시험 결과이다.<sup>(15)</sup>

3 가지 타입의 시험기로 각각 100Hz (electromagnetic), 600Hz(high-speed servohydraulic), 20kHz (ultrasonic fatigue test) 의 조건으로 시험을 하였다. 각각의 시험 최대 반복값을 10<sup>8</sup>(100 Hz), 10<sup>9</sup>(600 Hz), 10<sup>10</sup>(20 kHz)으로 설정하였다. 초음파 피로시험은 높은 응력의 시험에서 시험편의 온도가 급속도로 증가하여 고온피로파괴모드로 바뀔 수 있기 때문에 890Mpa 이하에서만 진행하였다.<sup>(15)</sup> 3 가지의 서로 다른 주파수에서의 시험 결과에서 동일선상의 S-N 선도를 나타낸다.

Fig. 12 는 AISI-4140 시험편(Fig. 10(a),(b))을 각각 20kHz(ultrasonic)와 20Hz (servo-hydraulic)의 피로시험 결과를 나타낸 것이다.<sup>(13)</sup> 두 가지의 피로시험

결과가 거의 동일한 S-N 선 상에 있다고 볼 수 있다. 이로서 초음파 피로시험기의 주파수 효과는 무시 가능하다고 볼 수 있다.

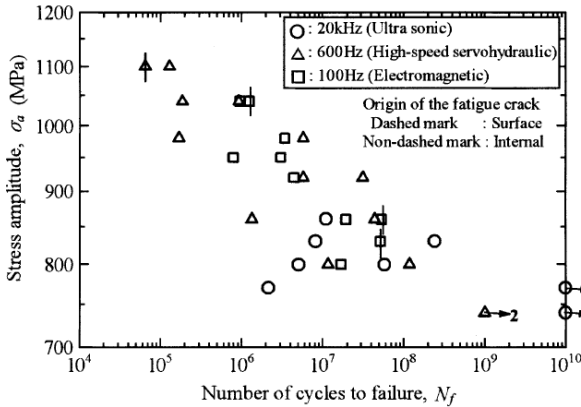


Fig. 11 S-N diagram for low-temperature-tempered JIS SNCM439 steel. Arrow-marked plot show unbroken results. Origins of fish-eye fractures were  $Al_2O_3$  or  $Al_2O_3 \cdot Ca$  inclusions of various size<sup>(15)</sup>

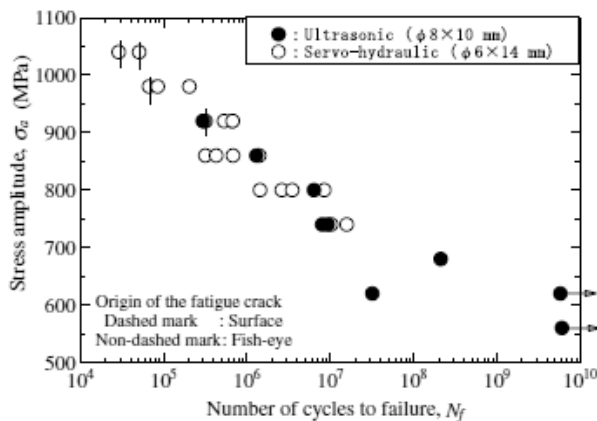


Fig. 12 fatigue test results for specimens with a straight section<sup>(16)</sup>

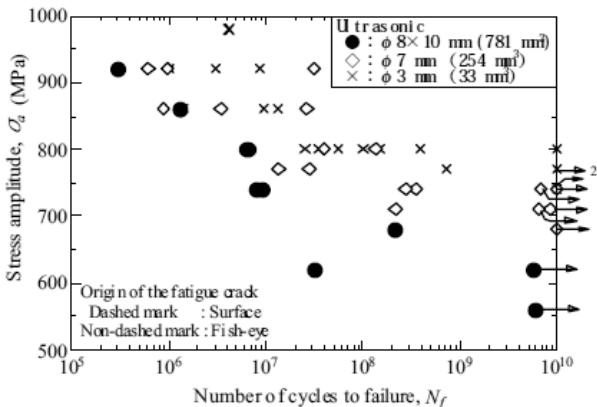


Fig. 13 Ultrasonic fatigue test results for specimens of various sizes<sup>(16)</sup>

4.2 시험편 형상에 따른 시험 결과

Fig. 13 은 서로 형상이 다른 세 가지 AISI-4140 시험편(Fig. 10(a),(c),(d))에 따른 20kHz 에서의 초음파 피로시험 결과이다.<sup>(16)</sup>

전반적으로 시험편(a)가 다른 두 가지 시험편에 비해 피로강도가 낮음을 보였다. Fig. 5 와 같이 게이지부가 일정한 길이부분이 있는 시험편(a)은 다른 시험편(b),(c)에 비해 최대응력을 받는 부분의 크기가 증가하면서 보다 낮은 피로강도가 나타났다.

시험편(c), (d)를 비교하면 Fig. 3 과 같은 반원형상의 시험편이라도 크기에 따라 피로강도의 차이가 나타났다. 시험편의 지름 증가로 인해 게이지부 크기가 증가하면서 최대응력을 받는 부분의 크기가 증가하면서 피로강도가 감소했다.<sup>(16)</sup>

이를 통해 기존의 피로시험보다 빠른 20kHz 의 가속시험으로 인한 피로강도의 변화는 무시할 수 있지만, 시험편 게이지부 크기와 형상에 따라서는 피로강도가 크게 변했음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 초고주기 피로영역에 대한 가속 시험 방법인 초음파 피로시험을 선행연구를 통해 검토하고 시험편형상 결정절차를 연구하였다.

20kHz 영역의 공진을 이용한 초음파 피로시험은 일반적인 피로시험과 달리 시험편의 물성에 따라 시험편의 형상도 달라져야 한다. 또한 기존의 유압식 및 전자기식 피로시험과 비교 될 수 있는 형상조건으로 설정해야 한다. 이러한 조건으로 인해 재료에 따른 초음파 피로시험편의 형상 결정과정을 선행연구들을 통하여 정리하였다.

공진을 이용한 시험으로 공진주파수, 파장을 측정하고 이를 이용하여 기본적인 시험편의 길이를 설정한다. 시험편의 응력 계산식 식 (6)에 20kHz 에서의 재료의 동탄성계수가 필요하다. 식 (7)으로 공진 주파수와 파장을 이용하여 동탄성계수를 구한다. 시험편 그림부의 지름, 게이지부의 지름과 길이를 시험응력범위에 따라 계산한 뒤 시험편의 구체적인 형상을 결정한다. 시험편 설계변수에 따라 반복 실험을 하여 시험편형상을 정밀하게 구한다.

초음파 피로시험에 의한 S-N 데이터는 기존의 피로시험 데이터와 비교하여 20kHz 근처의 시험에서 피로강도의 거동에 영향을 주는 주파수 효과는 특별히 보이지 않았다. 하지만 시험편의 크기에 따른 피로강도의 변화가 발생하기에 초음파 피로

시험편의 형상을 결정할 때 이를 고려해야 한다. 또한 게이지부의 길이에 대비하여 시험편 그림부의 지름의 상대적인 크기에 따라 시험편에 작용하는 최대응력이 민감하게 변화하기 때문에 이를 고려하여 시험편을 결정해야 한다.

## 후 기

이 논문은 2012 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2012R1A1A2A0311)

## 참고문헌

- (1) Marines, I., Bin, X. and Bathis, C., 2003, "An Understanding of Very High Cycle Fatigue Metals," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 1101~1107.
- (2) Pyttel, B., Schwerdt, D. and Berger, C., 2011, "Very High Cycle Fatigue - Is There a Fatigue Limit?," *International Journal of Fatigue*, Vol. 33, pp. 49~58.
- (3) Bathias, C., 1999, "There is No Infinite Fatigue Life in Metallic Materials," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 22, Issue 7, pp. 559~565.
- (4) Sonsino, C.M., 2007, "Course of SN-Curves Especially in the High-Cycle Fatigue Regime with Regard to Component Design and Safety," *International Journal of Fatigue*, Vol 29, Issue 12, pp.2246~2258.
- (5) Bathis, C., 2006, "Piezoelectric Fatigue Testing Machines and Devices," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, pp. 1438~1445.
- (6) "Ultrasonic Fatigue Testing," *ASM handbook Mechanical Testing and Evaluation*, Vol. 8.
- (7) Green, C.H. and Guiu, F., 1976, "The Ultrasonic Stress Distribution in a Specimen with a Circular Gauge Profile," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 9, No 6, pp. 1063~1069.
- (8) Bajons, P. and Kromp, W., 1978, "Determination of Magnification and Resonance Length of Samples used in Ultrasonic Fatigue Test," *Ultrasonics*, Vol. 16, Issue 5, pp. 213~217.
- (9) 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.
- (10) Dlapka, M., Danninger, H., Gierl, C., Weiss, B., Khatibi G. and Betzwar-Kotas, A., 2011, "Critical Defects in Different Sinter Hardening Grade Steels Tested under Gigacycle Fatigue Loading," *Powder Metallurgy Progress*, Vol 11, No. 1-2, pp.69~77.
- (11) Freitas, M., Reis, L., Anes, V., Montalvao, D., Ribeiro A.M. and Fonte M., 2011, "Design and Assembly of an Ultrasonic Fatigue Testing Machine," *Anales de mecanica de la Fractura*, Vol. 1, pp.335~340.
- (12) Takahashi, K. and Ogawa, T., 2008, "Evaluation of Giga-cycle Fatigue Properties of Austenitic Stainless Steels Using Ultrasonic Fatigue Test," *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 366~372.
- (13) Furuya, Y., 2008, "Specimen Size Effects on Gigacycle Fatigue Properties of High-strength Steel under Ultrasonic Fatigue Testing," *Scripta Materialia*, Vol. 58, Issue 11, pp. 1014~1017.
- (14) Jin, M.Y., 1999, "Measurements of Elastic Moduli of Rock Cores Using Free-Free Resonance Tests," *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 4, No. 4, pp. 95~100.
- (15) Furuya, Y., Matsuoka, S. and Yamaguchi, K., 2002, "Gigacycle Fatigue Properties for High-strength Low-alloy Steel at 100 Hz, 600 Hz, and 20 kHz," *Scripta Materialia*, Vol. 46, pp.157~162.
- (16) Furuya, Y., 2010, "Size Effects in Gigacycle Fatigue of High-strength Steel under Ultrasonic Fatigue Testing," *Procedia Engineering*, Vol. 2, Issue 1, pp.485~490.