

초음파 피로시험시 시험편의 유한요소 동적 해석

명노준* · 최낙삼**† · 권현화**

* 한양대학교 기계공학과, ** 메디소스플러스(주)

Dynamic Analysis of Specimen Under Ultrasonic Fatigue Using Finite Element Method

No-Jun Myeong*, Nak-Sam Choi**† and Hena Kwon**

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

** MedisourcePlus.

(Received February 10, 2014 ; Revised May 23, 2014 ; Accepted May 26, 2014)

Key Words: Ultrasonic fatigue test(초음파 피로시험), Resonance(공진), Very high cycle fatigue(초고주기 피로)

초록: 본 논문에서는 초고주기피로영역의 가속시험 방법인 초음파 피로시험에 대해 20 kHz 근처에서 시험편 게이지부의 동적거동을 유한요소해석으로 검토하였다. 실제 실험에서 시험편에 작용하는 응력은 시험편의 형상과 변위를 통해 식으로 계산되는데 여기서 가정하는 시험편의 형상과 실제 시험편의 형상에 차이가 발생한다. 실험으로 구해진 응력과 유한요소 동적 해석의 결과를 비교하고 형상차이에 따른 응력분포를 확인하였다. 또한, 이론적으로 생각하는 초음파 피로시험기의 동적 거동을 가시적으로 확인하여 초음파 피로시험의 정확성을 확보하였다.

Abstract: An accelerated ultrasonic fatigue test (UFT) was used for analyzing very high cycle fatigue (VHCF, $N_f > 10^7$) behaviors of a specimen with a test resonance of 20 kHz. Using the finite element method (FEM), the dynamic behaviors of the specimen was studied by calculating the stresses along its gauge portion, with displacement. The shape of gauge portion profile was assumed to be a hyperbolic according to the stress equation of the UFT. However, as the specimen used in the test had a circular arc profile, the FEM was used for studying the local stresses for two cases of the gauge profile. The results were compared with those obtain from the stress equation of the UFT. The dynamic behavior of the gauge portion could be understood for further comparison with the actual results.

1. 서론

기계구조에서 사용되는 재료는 반복적인 하중을 받는다. 이러한 반복하중에 의한 파손은 인장강도보다 훨씬 낮은 하중수준에서 발생한다. 산업이 발전함에 따라 기계의 수명이 길어지고, 항공기, 자동차와 같은 고속기계들이 등장하면서 기존의 피로한도 ($N_f = 10^7$ cycles) 이상의 사이클 영역의 피로파괴 연구가 필요하게 되었다. 이에 따라 최근에 연구자들은 10^7 cycles 이상의 높은 영역에서 피로파손 거동을 연구하면서 기존의 피로한도에서

의 피로파손 거동과 다르다는 것을 발견하였다. 그래서 피로주기 영역과 파손거동에 따라서 저주기피로(LCF, Low Cycle Fatigue, $N_f = 10^4 \sim 10^5$), 고주기피로(HCF, High Cycle Fatigue, $N_f = 10^5 \sim 10^7$), 초고주기피로(VHCF, Very High Cycle Fatigue, $N_f > 10^7$)로 구분하여 해석하고 있다.

초고주기피로의 관심이 증가하면서 10^7 cycles 이상의 피로시험 연구결과가 필요하게 되었다. 하지만 기존의 피로시험기로는 초고주기 피로영역의 피로 시험을 수행하기에는 매우 긴 시간이 소요되기 때문에 보다 빠른 새로운 방식의 가속피로시험기에 대한 연구를 시작하였다. 그 결과로 Table 1 과 같은 다양한 방식의 피로 시험기들이 개발되면서 초고주기 피로영역까지 빠른 시험이 가능하게 되었다.⁽¹⁾

† Corresponding Author, nschoi@hanyang.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

최근 초고주기영역의 피로시험 방법으로 초음파 피로시험을 사용한 사례가 증가하고 있다. ASM-Handbook-Vol18⁽²⁾에서는 재료의 시험 평가방법으로 초음파 피로시험을 소개하고 기본적인 이론을 정리하였다. Green 등⁽³⁾은 모래시계형상의 초음파 피로 시험편에 대한 응력식을 소개하였으며, Bajons 등⁽⁴⁾은 초음파 피로시험편 게이지부의 응력집중에 대한 이론적 계산식을 검증하였다.

이와 같이 초고주기 피로영역에 대한 연구는 피로파손에 대한 새로운 영역으로 정의하고 연구가 계속되면서 초음파 피로시험에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 하지만 아직 국내에서는 초고주기 피로시험과 초음파 피로시험기에 관한 연구가 부족하다.

초음파 피로시험은 20 kHz 내외의 정해진 주파수 영역에서 시험편의 공진으로 주기적인 응력을 시험편에 가하는 피로시험 방법이다. 피로시험 속도가 매우 빠르지만 그에 따라 고려할 사항도 많아진다. 공진을 이용하는 방법이므로 시험편의 형상이 제한적이고, 20 kHz 근방의 공진 주파수에 맞추어 시험편의 형상을 설계하여야 한다. 그러므로 시험 재료의 기계적 물성을 이용하여 시험편 크기와 형상을 결정하고, 설계하여 시험해야 한다.

시험편 형상 결정시 게이지부 길이와 두께 변화에 따라 중앙부에 작용하는 최대응력이 민감하게 변화한다. 그래서 시험편의 형상은 시험 응력에 맞추어 설계되어야 한다.⁽⁵⁾ 또한, 20 kHz의 속도로 빠른 시험이 진행되고, 시험편 끝단의 변위도 마이크로 미터 단위로 측정된다. 그래서 게이지 부위의 직접적인 응력측정이 어렵기 때문에 응력을 시험편 끝단의 변위와 시험편 형상에 따른 식으로 계산한다. 시험편의 실제 동적 거동을 관찰하기도 어렵다.

본 논문에서는 초음파 피로시험의 원리를 이용하여 미리 설계된 알루미늄합금 (Al6061) 시험편에 대한 유한요소 동적변형 해석을 수행하였다. 초음파 피로 시험의 경우 높은 주파수로 인하여 시험편 중앙에 높은 열을 발생하게 된다.⁽⁶⁾ 철 금속의 경우 이러한 온도에 변화가 Al 금속에 비해 민감하다. 비교적 상온 근처의 온도로 시험가능한 Al6061 을 사용하여 실험하고 FEM 해석하였다. 실제 관찰하기 어려운 동적거동과 응력분포를 이론적인 개념과 비교하여 확인하고, 실제 초음파 시험기인 (주)메디소스플러스社의 UFT-20X 에서 시험한 알루미늄 시험편의 응력값과 유한요소 해석으로 구한 응력값을 비교검토하였다. 또한, 응력식에

서 게이지부를 가정하는 hyperbolic cosine 과 실제 가공되는 원호형상 시험편의 응력분포 차이를 유한요소 해석을 통해 확인하였다.

2. 초음파 피로시험 이론

2.1 초음파 피로시험기의 원리

본 연구에서 사용한 초음파 피로시험기에서는

Table 1 Overview of testing facilities, frequency and time⁽¹⁾

Testing facilities	Frequency	Time for N = 10 ⁹
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

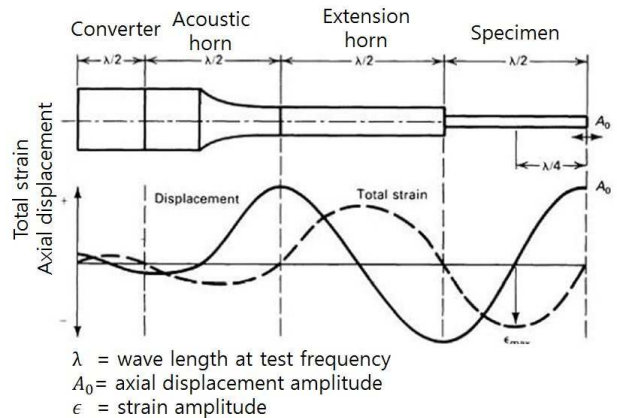


Fig. 1 Variation of the displacement and strain amplitudes along acoustic wave train⁽²⁾

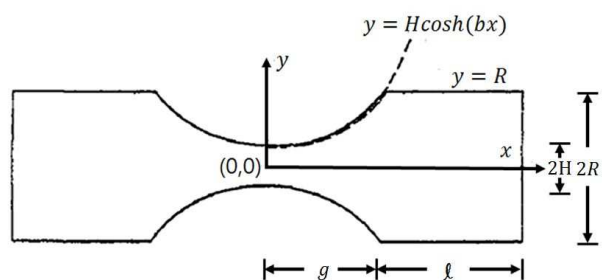


Fig. 2 Specimen with circular profile gauge flanked by two cylindrical shoulders⁽³⁾

상단부에 결합된 압전소자를 이용하여 미리 설계된 시험편의 공진주파수와 일치하는 진동파를 발생시킨다. ASM handbook⁽²⁾에 따르면 초음파 피로시험은 15 ~ 25 kHz 영역의 종파형 진동파를 전달 및 확장시키는 혼(acoustic horn)을 통해 시험편에 전달하여 주기적인 응력을 가한다. 이때 시험편이 길이 방향으로 공진을 하면서 Fig. 1과 같이 자유단 끝단에 최대변위가 형성되고, 게이지 중앙부에는 변위가 0 인 노드점(node)이 형성된다. 그로인해 게이지부의 노드점에서 변형률이 최대가 되면서 최대응력이 발생하게 되는 것이다. 변형률과 시험주파수에 맞는 동탄성계수의 곱으로 시험편에 가하는 주기적인 최대응력을 계산하고, 이를 이용하여 가속피로시험을 하는 원리이다.

2.2 초음파 피로시험편의 응력 계산

사용되는 초음파 피로시험편의 형상은 Fig. 2 와 같은 단면이 원통인 모래시계형상의 시험편이다. 중앙 노치부분의 형상을 hyperbolic-cosine 으로 가정하여 시험편의 응력을 계산한다. 이러한 과정으로, 응력(σ)의 계산식은 식 (1) 이다.⁽³⁾

$$\sigma = \delta \cdot E_d \cdot \beta \cdot \cos \frac{\omega l}{v_c} \cdot \cosh(\beta g) \cdot \operatorname{csch}(\beta g) \quad (1)$$

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

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

여기서 δ : 변위, E_d : 동탄성계수, $\omega=2\pi f$, v_c : 음파속도, g : 게이지 부분 길이, l : 원통 끝 부분 길이, b, β : 시험편 형상 계수이다. 이와 같이 초음파 피로시험은 시험편에 작용하는 응력을 시험기에서 측정된 변위값과 시험편의 형상 계수를 통하여 식 (1)으로 계산한다.

3. 실험

3.1 시험편 및 시험 조건

시험편은 Fig. 3과 같은 모래시계 형상의 Al6061 재질이다. 시험편의 형상은 공진파장을 고려하여 게이지부 중앙에 노드점이 형성되도록 설계하였다.

Fig. 4와 같은 초음파 피로시험기를 사용하여 시험편에 작용하는 응력을 측정하였다. 시험기 구조물의 구성은 상단부에 압전소자가 결합되어 있고 이를 좌우로 구성하면 Fig. 1과 같으며, 시험편은 오른쪽에 장착되었다. 시험기에 시험편의 형상 파

라미터를 입력하고, 시험시에는 변위, 시험주파수, 응력을 측정하였다.

피로시험시 시험편의 아래 끝 단의 변위는 비접촉식 적외선센서로 측정하며 시험기 패널에 시험편의 길이, 단면 반지름, 게이지부분의 최소단면 반지름을 입력하여 식 (1)에 의거 응력을 계산하였다.

시험조건으로는 인장-압축 ($R=-1$), 온도조건은 상온에서 공랭하면서 시험하였다.

3.2 시험 결과

Table 2 는 Al6061 시험편의 초음파 피로시험 결과이다. 변위는 42.72 μm 수준으로 조절하며 시험하였다. 이 변위값은 식 (1)에 의해 시험편 게이지부의 응력 121 MPa 으로 환산되었다.

Table 2 Test result of the Al6061 specimen in UFT-20X

Stress ratio (R)	Displacement (μm)	Frequency (kHz)	Stress (MPa)
-1	42.72	19.6	121



Fig. 3 Al6061 specimen for UFT at 20 kHz



Fig. 4 Ultrasonic fatigue tester(UFT-20X, MediSource-Plus corp.)

4. 유한요소 해석

4.1 자유공진 모드에서의 해석

초음파 피로시험시 시험기와 시험편의 동적 거동을 확인하기 위해 시험편(Fig. 3)과 시험편 장착구조물(Fig. 4)의 형상을 바탕으로 유한요소 모델을 Fig. 5와 같이 구성하였다. 확장기와 혼부분은 티타늄 합금(Ti alloy) 물성으로 설정하고, 시험편 부분은 Al6061의 물성을 적용하였다. 또한, 시험기(UFT-20X)에 체결되는 부위를 유한요소 모델에도 동일하게 적용하였다.

Table 3은 초음파 피로시험의 특성으로 찾고자 하는 자유공진 주파수의 범위를 15 ~ 25 kHz으로 설정하고 해석한 결과이다. 여기서 해석된 자유공진 모드들은 Fig. 6(a)와 같은 길이방향의 자유공진과 Fig. 6(b) 같은 횡방향 자유공진모드도 포함된 것이다. 횡방향 공진은 초음파 피로시험의 방향과 맞지 않으므로 시험하는 주파수 영역인 20 kHz 근방에서 길이방향이 아닌 공진을 피해야 한다. 15 ~ 25 kHz 사이에서 6차 공진모드인 20.193 kHz 이 시험에 적절한 길이방향 공진임을 확인하였다. 또한, 5차, 7차 고유진동수와의 차이가 약 2 kHz, 1 kHz 만큼 비교적 멀리 떨어져 있어서 초음파 피로시험을 위한 본 시험편은 20 kHz 근방에서 길이방향 공진이 발생하여 적절히 설계되었다.

4.2 강제 진동 모드에서의 해석

실제 초음파 피로시험은 완전 자유공진 시험이 아니며 일정한 에너지를 갖는 탄성파를 일정한 공진 주파수로 가진하는 강제진동에 의한 시험방법이다.⁽⁷⁾

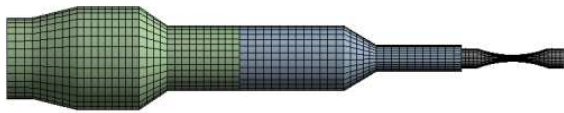
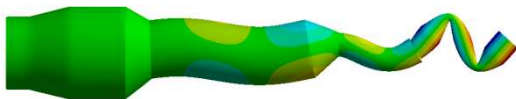


Fig. 5 Finite element simulated model



(a) 6th mode shape (20,193 Hz)



(b) 3th mode shape(16,070 Hz)

Fig. 6 Mode shapes of the specimen

자유진동 해석에서 사용한 모델을 이용하여 강제진동으로 설정하고, 시험기 압전소자 위치를 적용하여 강제진동 모드에서 일정한 하중으로 가진하였다. 또한, 실제 시험기의 결과와 비교하기 위해 시험편 끝단에서 제어된 실제 변위를 본 수치해석에 적용하였다.

시험편 게이지부의 중앙부위 근방에서의 응력을 비교하기 위해 Fig. 7과 같이 시험편 중앙부에서 메쉬 간격을 0.2 mm로 설정하여 국부적으로 세부 모델링을 하였다.

Fig. 8는 시험편 게이지부 정중앙 부위와 자유단 방향으로 + 0.2 mm과 - 0.2 mm에서의 변위를 주파수에 따라 해석한 결과이다. 여기서, 시험편 게이지부 중앙에 노드점이 형성되는 주파수는 20,046 Hz였음을 확인하였다. 이 주파수에서 + 0.2 mm, - 0.2 mm 위치단면의 길이방향 변위도 일치하여 변형이 거의 정확한 좌우대칭으로 거동하는 것을 확인하였다. 하지만, 시험편 중앙의 노드점에서 시험기 방향으로 0.2 mm 떨어진 단면부분은 주파수에 따라 일정한 거동을 보였고, 자유단 방향으로 + 0.2 mm 단면부분은 주파수가 증가함에 따라 변위가 급격히 증가하는 거동을 보여 노드점에서 벗어난 위치에서는 주파수 특성이 좌우 위치에 따라 크게 달랐음을 확인하였다.

Fig. 9은 20,046 Hz을 기준으로 20 kHz와 20,092 Hz에서 노드점 좌우 위치에 따른 변위를 해석한 그래프이다. 시험편의 중앙에 노드점이 형성되는 20,046 Hz의 경우 정확한 좌우 대칭의 거동이 나타났다. 20 kHz의 경우는 상대적으로 변위가 작은 경향이 나타나지만 좌우 대칭의 경향을 보였다. 20,092 Hz의 경우 상대적으로 큰 변위가 나타났으며 다른 주파수에 비해 좌우 대칭성이 더욱 나빠졌다. 따라서, 시험편 게이지부 중앙에 노드점이 정확히 형성되는 20,046 Hz에서 응력을 해석하였다. 시험편의 끝단의 변위는 실제 시험기에서 측정된 42.72 μm을 적용하였다. Fig. 10은 응력해석 결과를 나타낸 것이다. 초음파 피로시험의 원리에

Table 3 Resonance mode of UFT model in 15 ~ 25 kHz

Mode	Frequency (Hz)	Mode shape
1	15,569	torsion
2	16,068	Y axis
3	16,070	Z axis
4	16,379	torsion
5	18,145	asymmetric
6	20,193	X axis
7	21,463	Y axis

따라 시험편 중앙부에 가장 큰 변형이 생겨 Table 4와 같이 137 MPa의 최대응력이 발생했으며, 시험편 끝단에는 변형이 거의 일어나지 않았다.

Fig. 11는 유한요소 강제진동해석을 이용하여 시험기 전체의 길이방향 응력을 Fig. 1과 같은 이론적인 변위 그래프와 비교하여 나타낸 것이다. 본 연구에서의 해석결과와 이론에서 계산되는 응력분포가 일치하는 것을 확인하였다.

이를 통하여 초음파 피로시험시 시험구조물과 게이지부의 응력 분포, 중앙에서의 노드점, 시험편의 동적 거동을 확인하였다.

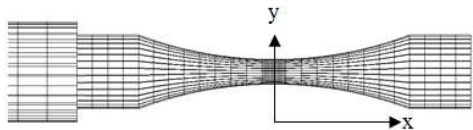


Fig. 7 Mesh of the Al6061 specimen

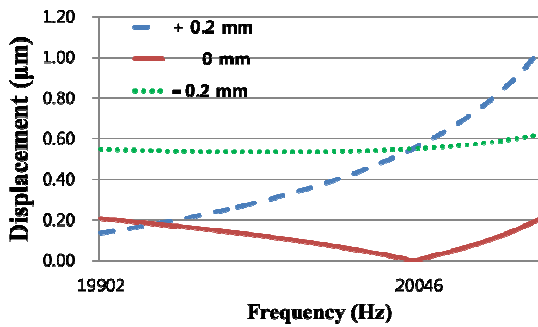


Fig. 8 Variation of displacement of the gage portion with frequency

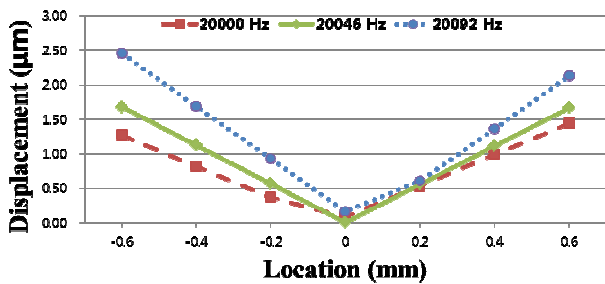


Fig. 9 Variation of displacement along the gage portion with its location

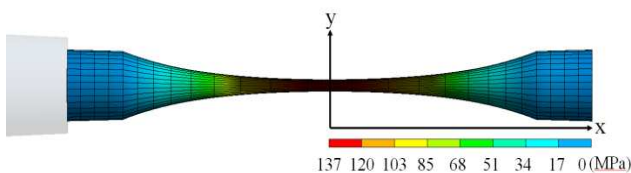


Fig. 10 Displacement of normal stresses along the x-axis in force vibration

4.3 시험 및 해석 결과 비교

초음파 피로시험에서의 응력은 121 MPa으로 유한요소 해석결과보다 16 MPa 만큼 작은 응력값을 나타냈다. 응력식 (1)은 시험편의 게이지 부분의 형상을 Fig. 2와 같이 hyperbolic cosine 으로 가정하고 정리한 것이다. 하지만 실제 Al6061 시험편은 동일한 중심점을 갖는 원호(circular arc)로 제작된다. 이러한 차이에 대해서 Batias 등⁽⁸⁾은 저서를 통해 두 가지 게이지 형상에 대한 차이를 확인하였다.

Fig. 12는 본 논문에서 사용된 A1 시험편 게이지부를 hyperbolic cosine과 원호로 가정했을 때의 형상차이를 그래프로 나타낸 것이다.⁽⁸⁾ 실제 시험편의 형상은 점선인 원호이며 응력식(1)에서 가정하는 시험편은 실선인 cosh 형상이다. 원호의 경우는 경사면의 증가량이 게이지부 전체적으로 일정한 반면 cosh 형상의 경우는 게이지 중앙부에서 원호에 비해 경사면의 증가량이 작아 비교적 평평한 형상을 나타낸다. 이러한 차이는 게이지부 중앙에서의 응력집중 효과와 변형량에 영향을 줄 수 있는데, 보다 평평한 cosh의 경우가 원호보다 응력집중 효과와 변형량이 작을 것이다. 이로 인해서 cosh으로 가정한 실제 실험값은 원호로 해석한 유한요소 결과값보다 작아졌다고 생각된다.

그래서 두 가지 형상에 대한 응력분포 차이를 확인하기 위해 Fig. 12 에서 나타낸 두 가지의 형상을 Fig. 13 처럼 모델링 하였다. 두 가지 형상에 대해 끝단의 변위를 21 μm으로 설정하고 물성은

Table 4 Result of finite element forced vibration analysis

Stress ratio (R)	Displacement (μm)	Frequency (kHz)	Stress (MPa)
-1	42.72	20.046	137

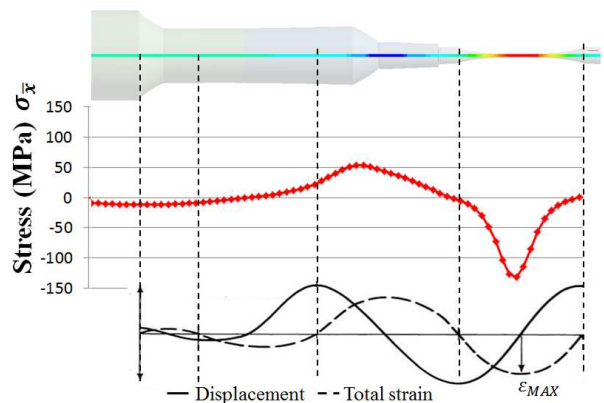


Fig. 11 Nominal stress distribution along the x-axis

Al6061 으로 인장해석을 하였다. 메쉬의 크기는 원호와 cosh 모델링의 경계부분에 온전한 메쉬가 형성 되도록 설정하였다.

Fig. 13은 두 가지 형상에서 x 축 방향으로의 응력 분포를 비교하여 나타낸 것이다. 게이지 중앙 부위에서의 cosh의 응력분포가 같은 수준에서의 원호보다 좁게 형성하는 것을 확인하였다.

Fig. 14는 Fig. 13에서 게이지 중앙부위에서의 두께 방향인 화살표 방향으로 형성되는 응력을 나타낸 것이다. 응력 분포의 형상은 동일하지만 cosh의 경우가 원호보다 상대적으로 작은 값을 가진다. 시험편 중앙에서 표면방향으로 응력이 증가한다. 이는 시험편 표면에서 게이지부 형상에 따른 응력집중효과를 직접적으로 받기 때문이다.

이러한 시험편에 작용하는 응력의 차이는 Fig. 12에서 나타낸 두 가지의 형상에 따라 발생한다고

사료된다. 게이지 중앙부에서 비교적 평평한 cosh의 경우가 응력집중효과가 낮아 상대적으로 낮은 응력분포를 보이고, 시험편 중앙에서 낮은 응력값을 보인다.

5. 결론

본 논문에서는 초고주기피로영역에 대한 가속시험 방법인 초음파 피로시험에 대해 시험편의 동적 변형과 응력을 유한요소 해석으로 검토하였다. 초음파 피로시험은 20 kHz의 공진을 이용하므로 빠른 시험조건으로 인해 시험편 게이지부위에서의 직접적인 응력 측정이 어렵고, 시험중 시험편의 동적 거동을 관찰하기 어렵다. 이러한 이유로 시험시 형성되는 변위를 측정하여 응력식을 통해 계산한다. 즉, 다른 피로시험기들과 달리 초음파 피로시험은 시험편 끝단의 변위로 게이지부 중앙의 응력을 구하게 되는 것이다. 따라서 유한요소 해석을 통해 시험편의 동적 변형 상태를 확인하고 응력값 거동을 검토하였다.

시험구조물과 Al6061 시험편을 모델링하고 이를 자유공진과 강제진동 해석을 하였다. 자유공진 해석결과 20 kHz 영역의 공진은 20,193 Hz로 나타났다. 실제 시험에서의 공진 주파수는 19.6 kHz로 약 500 Hz의 차이가 나타났지만, 근처의 고유진동수와의 차이가 1 ~ 2 kHz 만큼 떨어져 있어 주위의 공진 모드의 영향을 적게 받도록 설계되었음을 확인하였다. 또한, 실험과 동일한 길이방향 공진모드를 확인하여 적용하였다. 자유공진 해석을 통해 시험편의 적절성을 판단하였다. 하지만, 실제 시험기는 자유공진 모드가 아닌 일정한 탄성파를 시험편에 가지는 강제진동이기 때문에 강제진동 해석을 수행하였다. 시험편 게이지 중앙에 정확한 노드점을 형성하는 주파수는 20,046 Hz로 실제 시험 주파수와 약 400 Hz의 차이가 발생했다. 하지만 이러한 차이는 초음파 피로시험 주파수 범위에 포함되어있음을 고려하면 초음파 피로시험을 위한 본 Al6061 시험편이 적절하게 설계되었음을 확인하였다.

실제 실험에서 게이지부 중앙에서의 응력은 121 MPa 으로 측정되었다. 이때의 시험편 끝단의 변위를 강제진도 해석에 적용하여 계산한 응력은 137 MPa 으로 해석의 결과가 약 16 MPa 만큼 크게 계산되었다.

이 차이는 응력식에서 게이지부에서 가정하는 hyperbolic cosine 과 실제 시험편의 게이지부인 원호 형상의 차이에서 나타났다고 해석된다. 게이지 중앙부에서 비교적 평평한 형상인 cosh의 경우가

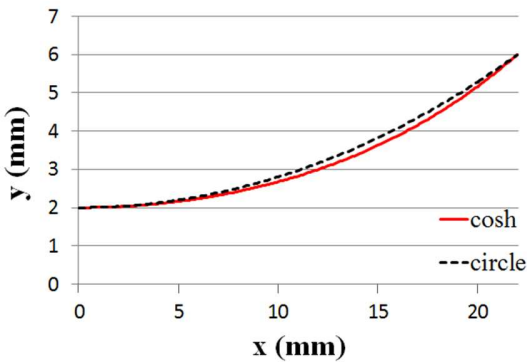


Fig. 12 Gage portion profiles of two assumed specimens

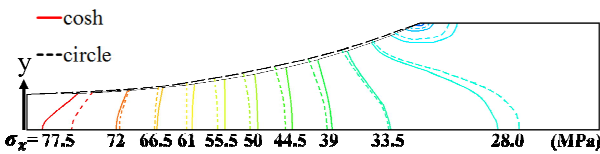


Fig. 13 Normal stress distribution of two assumed specimens

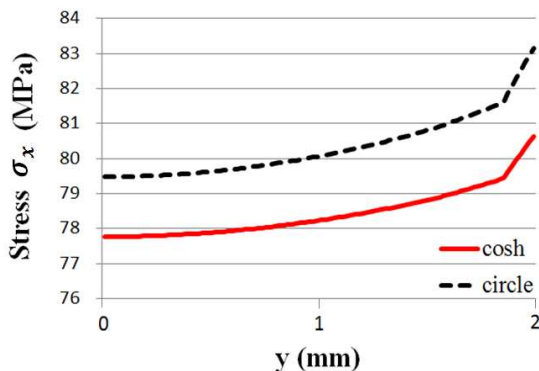


Fig. 14 Normal stress of gage section

응력집중효과가 적어 응력과 응력분포가 비교적 작게 형성됨을 유한요소해석을 통해 확인하였다. 이러한 두 가지 형상에 따른 응력의 차이는 일반적인 피로영역에서는 큰 영향을 주지 않지만 초고주기피로에서는 큰 영향을 줄 수 있기에 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

(References)

- (1) 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
- (2) "Ultrasonic Fatigue Testing," ASM handbook Mechanical Testing and Evaluation, Vol. 8
- (3) 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
- (4) 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
- (5) Myeong, N.-J., Han, S.-W., Park, J.-H. and Choi, N.-S., 2013, "Technical Review of Specimens under Ultrasonic Fatigue Test," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 8, pp. 967~973
- (6) Matikas, T. E., 2008, "A High-Cycle Fatigue Apparatus at 20 kHz for low-cycle Fatigue/High-Cycle Fatigue Interaction Testing," *Fatigue&Fracture of Engineering Materials&Structures*, Vol. 24, Issue 10, pp. 687~697
- (7) Bruchhausen, M., Hahner, P., Fischer, B. and Cornu, D., 2013, "Device for Carrying out Environmental very High Cycle Fatigue Tests with Ultrasonic Excitation in Asymmetric Push-Pull Mode," *International Journal of Fatigue*, Vol. 52, pp.11~19
- (8) Batias, C. and Paris, P. C., 2005, "Gigacycle Fatigue in MECHANICAL PRACTICE," Marcel Dekker