

표면파의 음향비선형 특성을 이용한 표면 피로열화 평가

Evaluation of Surface Fatigue Degradation Using Acoustic Nonlinearity of Surface Wave

이재익*, 이태훈*, 장경영**†

Jaek Lee*, Taehun Lee* and Kyung-Young Jhang**†

초 록 이 논문은 표면파의 비선형특성을 이용하여 재료 표면의 열화손상을 평가한 사례 연구의 결과를 보고한다. 이 연구에서는 3점 굽힘 피로시험에 의해 표면에 피로열화를 가한 알루미늄 T6 시편을 대상으로 표면파의 음향 비선형 파라미터를 측정하기 위한 실험장치를 구성하였으며 피로시험 전후에서 측정된 비선형 파라미터의 크기를 비교하였다. 특히 3점 굽힘 피로시험에 의한 표면피로손상은 시편의 중앙부 표면에 집중될 것이 예상되므로 이 주변에서의 비선형 파라미터의 변화를 세밀히 관찰하였다. 실험결과 피로손상이 거의 없는 시편의 가장자리에서는 비선형 파라미터가 피로시험 전후에서 큰 변화가 없었지만 표면 피로열화가 집중된 중앙부에서는 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다.

주요용어: 표면파, 음향 비선형성, 비선형 파라미터, 3점굽힘피로, 표면열화

Abstract This paper reports the results of a case study for the evaluation of surface damage by using acoustic nonlinearity of surface wave. In this study, the experimental system was constructed to measure the acoustic nonlinear parameter of surface wave in an Aluminum 6061 T6 specimen of which surface was damaged by the three point bending fatigue test, and magnitudes of nonlinear parameter measured before and after the fatigue test were compared. Especially, since the surface fatigue damage by the three point bending is concentrated at the central position of loading, the change in the nonlinear parameter around this position was monitored. Experimental results showed that the measured nonlinear parameter at the outside of this position after the fatigue test was almost same as the initial value before the fatigue test, since the fatigue damage at this position was little. However, clear increase in the nonlinear parameter was noticed after the fatigue test at the central position of specimen where the surface fatigue damage is expected to be concentrated.

Keywords: Surface wave, Acoustic Nonlinearity, Nonlinear Parameter, Three Point Bending Fatigue, Surface Damage

1. 서 론

탄성파의 비선형 특성은 재료의 열화에 따른 미시구조적 변화와 미세결함의 정밀한 평가를 위한 수단으로서 주목받고 있다[1]. 기존의 탄성파의 비

선형 특성은 초음파 중에서도 벌크파(bulk wave)를 이용한 기법에서 주로 사용되어져 왔다. 그러나 구조재의 열화가 대부분 재질 표면에서부터 발생한다는 점을 감안하였을 때, 표면파의 비선형 특성과 재료 표면의 열화 정도의 상관관계에 대해 규명하

고 현장 적용을 위한 평가기법을 개발하는 연구가 필수적이라 할 수 있다.

본 연구진은 선행연구에서 표면파의 음향비선형성 발생 메커니즘과 그 특성에 대해 규명한 바 있으며, 전파거리에 따른 감쇠의 영향을 극복하기 위한 방법을 제시하고 타당성을 검증한 바 있다[2]. 이 논문에서는 표면파 비선형 특성을 재료 표면 열화에 대한 비파괴평가의 수단으로 활용하기 위해 선행연구로부터 도출된 비선형 파라미터를 정량적 평가 수단으로 도입하였으며, 이를 측정하기 위한 측정 시스템을 접촉식 탐촉자를 이용하여 구축하였다.

시편으로는 알루미늄 6061 T6 합금 블록을 사용하였으며, 3점 굽힘 피로시험을 이용하여 표면에 집중적인 피로손상을 가하였다. 실험에 앞서 수치 해석을 통해 피로시험으로 인해 발생한 표면 피로손상분포를 예측하였으며, 측정된 비선형 파라미터의 분포와 비교하였다. 또한, 초기 상태와의 비교를 위해 동일한 재료와 크기의 피로를 가하지 않은 시편에 대해서도 비선형 파라미터의 분포를 측정하여 비교하였다.

2. 표면파의 비선형특성과 표면열화 평가의 원리

표면파의 비선형 특성은 선행 연구들로부터 그 발생 메커니즘이 정립되어 있으며[2-4], 정량적 평가를 위해 측정된 기본 주파수 성분의 진폭인 A_1 과 2차 고조파 성분의 진폭인 A_2 로부터 정의되는 상대적 비선형 파라미터 β' 을 사용한다. 이때의 β' 는 식 (1)로 정의된다.

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (1)$$

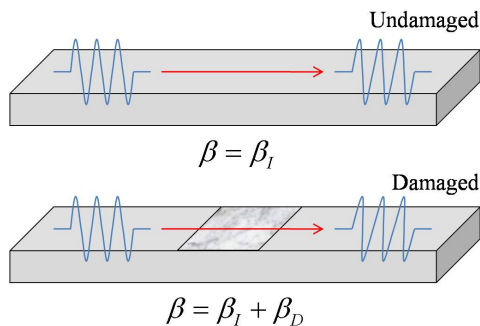


Fig. 1 The acoustic nonlinear parameter of surface wave before and after the surface damage

한편 반복 하중 혹은 열에 의해 표면이 열화된 재료의 비선형 특성은 Fig. 1에서와 같이 표면파의 진행에 의해 발생하는 비선형성(β_I)과 재료의 열화 상태에 의해 발생하는 비선형성(β_D)의 합으로 나타내어질 수 있다. 단, 식 (1)의 상대적 비선형 파라미터 β' 은 표면파의 전파거리에 비례하여 증가하기 때문에 재료의 열화만을 비선형 파라미터에 반영시키기 위해서는 송신부와 수신부의 거리를 고정할 필요가 있다. 이 때 모든 측정 조건을 동일하게 유지한다면 검출된 비선형 파라미터의 변화로부터 재료의 열화 상태에 의해 발생하는 비선형성만을 비교할 수 있다. 일반적으로 열화가 큰 부위에서 초음파의 음향 비선형 파라미터는 커지며[5], 표면파에서도 동일한 경향을 나타내는 것으로 보고된 바 있다[6].

3. 실험 방법

3.1. 계측 시스템의 구성

표면파의 음향 비선형 파라미터를 측정하기 위한 계측 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 신호발생기로부터 발생된 신호를 게이트 증폭기(gate amplifier-Ritec GA2500)를 이용하여 증폭시켜 발신 탐촉자로 송신한다. 수신신호는 펄서/리시버(pulsar/receiver-Panametrics 500PR)를 이용해 증폭시킨 후 디지털 오실로스코프 (Lecroy WS452)에서 A/D 변환되고 컴퓨터에서 주파수 분석되었다.

주파수 분석에서는 푸리에 변환(FFT)을 이용하여 기본파 성분의 진폭과 2차 고조파 성분의 진폭을 측정하여 비선형 파라미터 β' 을 계산하였다.

탐촉자는 웨지결합형 원형 탐촉자를 사용하였으며, 발신에 1.5 MHz, 수신에 3.5 MHz의 탐촉자를 사용하였다. 탐촉자와 웨지의 결합 및 입사 임계각을 Fig. 3에 나타내었다. 송신 파형은 핸닝 윈도우(hanning window)로 변조한 1.5 MHz 톤버스트 신호를 이용하였고, 버스트의 길이는 10주기로 하였다.

한편, 앞 절에서 언급하였듯이 표면파의 전파 거리를 고정하기 위해 발신 탐촉자와 수신 탐촉자를 결합한 지그를 Fig. 4와 같이 제작하였다. 송, 수신 탐촉자 간격은 50 mm, 또는 20 mm로 고정하였다.

시편으로는 330 mm×30 mm×20 mm의 알루미늄 6061 T6 블록을 사용하였다.

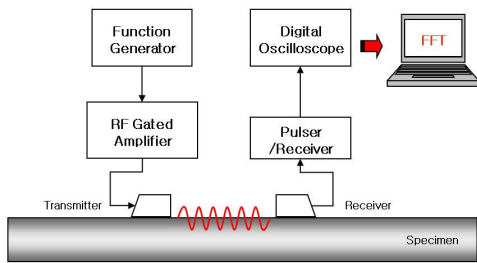


Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

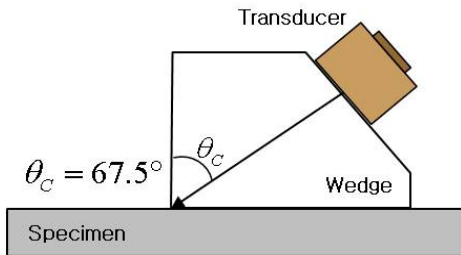


Fig. 3 Wedge-transducer assembly

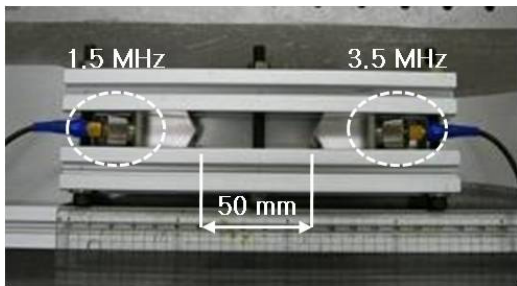


Fig. 4 Experimental jig to hold transducers

3.2. 3점 굽힘 피로시험

표면의 열화를 인공적으로 발생시키기 위해 Fig. 5와 같은 3점 굽힘 피로시험을 시행하였다. 피로시험에서는 두 개의 롤러로 지지된 시편의 반대쪽에서 반복적으로 하중을 가하여 표면 중앙부에 집중적인 피로를 발생시켰으며, 13 kN의 하중을 응력비 0.1로 1000만회 반복 인가하였다. 여기서 1000만회의 피로는 동일한 조건의 다른 시편에 대한 시험결과 시편에 외형적 변형이 시작되기 직전에 해당하는 것으로 나타났다.

한편 하중을 가하는 면은 롤러와의 접촉으로 인해 표면이 손상되어 비선형 파라미터 검출 실험에 사용할 수 없었고, 따라서 인장력이 발생하는 아랫면에 대해서만 비선형 파라미터 측정 실험을 실시하였다.

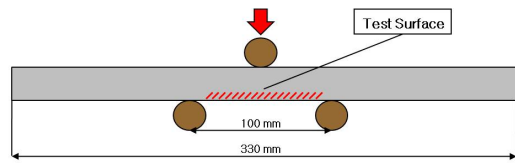


Fig. 5 3-Point bending fatigue test

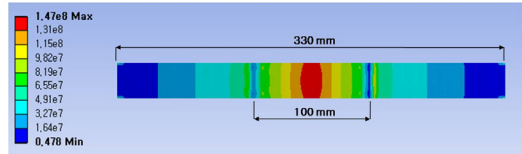


Fig. 6 Results of numerical analysis for the equivalent alternating stress on the test surface of specimen under the 3-point bending fatigue condition

Fig. 6은 3점 굽힘 시험에 의한 시편의 아랫면 표면에서의 표면응력 분포를 수치해석적으로 분석하여 나타난 결과이다. 중앙부에 응력이 집중되며 가장자리로 갈수록 작용하는 응력이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 중앙부에 작용하는 최대응력은 147 MPa이었다. 즉, 응력이 집중되는 중앙부에서 피로손상이 집중적으로 발생한다는 것을 예상할 수 있으며, 응력이 최대 응력의 절반으로 감소하는 범위는 중앙으로부터 좌우 약 20 mm이다. 단, 중앙으로부터 좌, 우측 50 mm 위치에 나타나는 가선 형태의 응력집중은 굽힘 시험에서의 지지점에 의한 영향이다.

4. 실험 결과

4.1. 비선형 파라미터의 검출

Fig. 7은 시편 아랫면 중앙부에 대한 비선형 파라미터 측정 실험에서 수신된 파형의 FFT 결과이다. 이 때 탐촉자의 간격은 50 mm로 고정되었다. 기본 주파수 성분인 1.5 MHz와 2차 고조파 성분인 3 MHz가 잘 검출되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 시편의 중앙에서 좌, 우 20 mm 간격으로 60 mm의 거리에 걸쳐 측정된 A₁, A₂ 및 계산된 비선형 파라미터 β'의 변화를 나타낸다. 실험은 2회 반복되었다.

먼저 A₁의 변화를 살펴보면 응력 집중이 발생한 중심부에서 기본 주파수 성분의 진폭이 약간 감소했음을 볼 수 있다. 이는 표면 열화로 감쇠가 약간

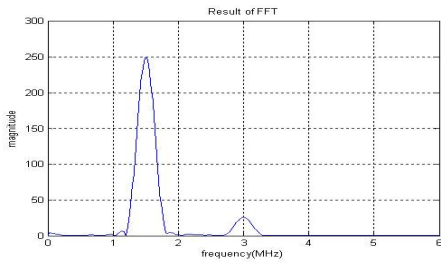


Fig. 7 FFT result of received waveform

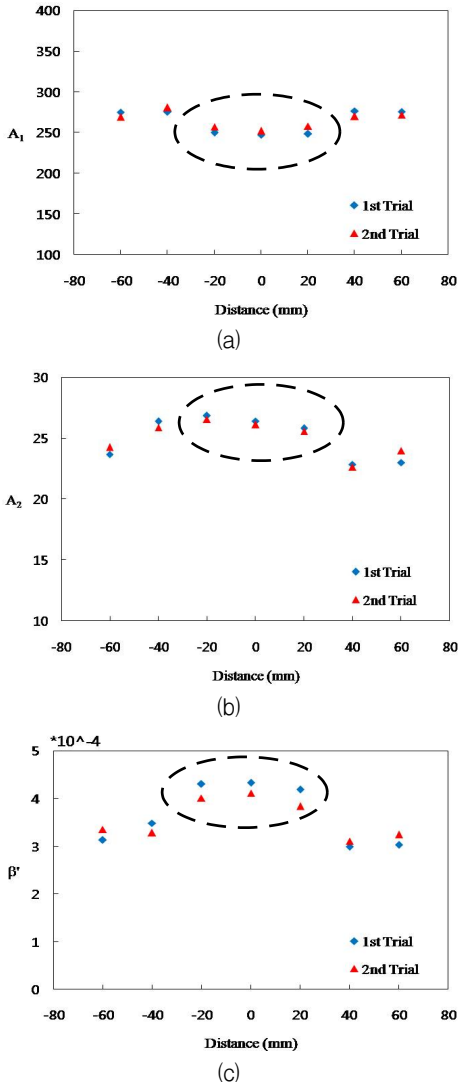


Fig. 8 Results of measurement in the fatigued specimen; (a) magnitude of primary frequency component in the received wave signal (A_1), (b) magnitude of secondary harmonic frequency component in the received wave signal (A_2), and (c) nonlinear parameter (β')

증가한 때문으로 보인다. A_2 는 응력 집중이 발생한 부위에서 증가 추세를 보이는데 이 위치에서 A_1 이 감소했음에도 불구하고 고조파 성분의 크기가 증가하는 것은 열화손상에 따른 음향비선형 효과가 크게 증가했기 때문이다. 이 같은 현상은 비선형 파라미터 β' 에서 쉽게 확인할 수 있다. 비선형 파라미터의 크기는 손상이 크게 발생하지 않은 가장자리에서보다 중심부에서 뚜렷한 증가를 보이고 있으며, 증가율은 약 30%이다. 그리고 전체적인 분포형태는 앞선 수치해석에서 얻은 응력 분포와 잘 일치한다.

한편 실험결과에서 나타낸 측정점은 송수신 탐촉자 간 중심에 해당한다. 이 실험에서 탐촉자 간격은 50 mm로 고정되었으므로 한 측정점에서의 측정결과는 탐촉자 간 중심으로부터 좌우 25 mm 범위에 걸쳐서 평균화된 결과라고 할 수 있다.

그리고 지지점에 의한 손상은 측정에 큰 영향을 미치지 않았다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 측정결과들이 표면과 전파경로상의 특성을 평균한 것이라 할 수 있는데 지지점에서의 손상은 매우 국부적이어서 이런 공간평균 과정에서 크게 희석된 때문으로 사료된다.

만일 매우 국부적인 열화손상을 평가하고자 한다면 표면과의 전파거리를 짧게 해야 된다. 다만, 표면과의 비선형성에 의해 발생하는 고조파의 크기는 전파거리에 비례하므로 전파거리가 너무 짧아질 경우 발생하는 고조파의 크기가 작아지게 되고, 따라서 이를 정밀하게 검출하기 위한 고감도 측정기법이 요구될 것이다.

4.2. 초기 시편과의 비교

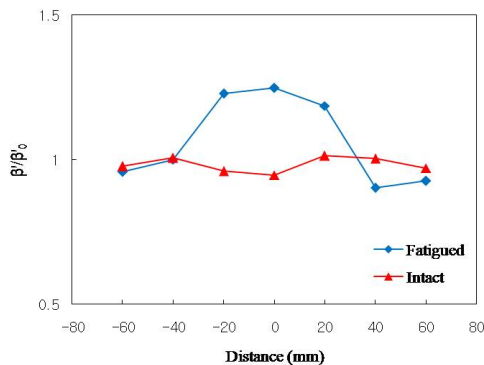
다음으로 앞 절에서 확인한 비선형 파라미터의 변화 추세와 표면 열화도의 상관 관계를 재확인하기 위해 동일 재질과 크기의 피로를 가하지 않은 시편에 대해서도 같은 실험을 진행하였다. 실험은 2회 반복하였으며, 그 평균값을 구하여 두 시편에서의 결과를 비교하였다. 그 결과를 Fig. 9에 상대적인 비율 β'/β'_0 로 나타내었다. 여기서 β'_0 은 피로를 가하지 않은 시편에서 얻어진 비선형 파라미터의 평균값이다.

한편 탐촉자 간격을 작게 하면 앞 절에서 언급한 바와 같이 건전부위와 열화손상 부위가 과도하게 중첩 평균화되는 것을 억제할 수 있어 보다 세밀한

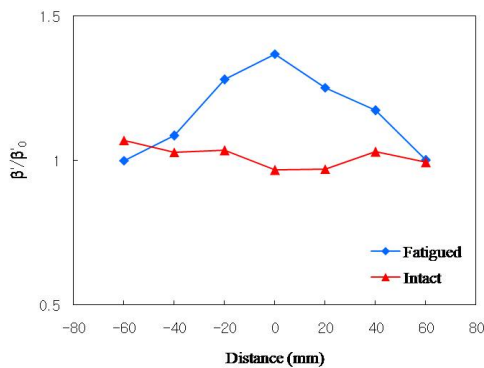
비선형 파라미터의 변화를 관측할 수 있을 것으로 기대된다. 여기서는 이를 검증하기 위하여 탐촉자간 간격을 50 mm와 20 mm의 두 경우로 한 실험을 실시하여 그 결과를 함께 비교하였다. Fig. 9(a)는 탐촉자간 간격을 50 mm로 한 경우이며, Fig. 9(b)는 20 mm로 한 경우이다.

두 경우 모두 피로를 가하지 않은 시편에서는 위치에 따라 큰 변화없이 일정한 분포를 보임을 알 수 있다. 앞의 β'/β_0 은 이 분포 데이터의 평균값이다. 이 시편은 열화손상이 없기 때문에 측정되는 비선형특성은 재료고유의 비선형성이며, 위치에 무관하게 균일해야 한다. 측정결과는 이와 잘 일치하였다.

반면 피로를 가한 시편과 가하지 않은 시편에서의 결과를 비교하면, 피로손상이 집중된 중앙부에서 비선형 파라미터의 뚜렷한 차이를 볼 수 있으며, 이로써 측정된 비선형 파라미터가 표면열화 손상과 강한 상관성이 있음을 재확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 9 Comparison of nonlinear parameter measured before and after the fatigue test, when the transducer interval is (a) 50 mm and (b) 20 mm

한편, Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)의 피로를 가한 시편에 대한 결과를 비교하면 송, 수신 간격을 좁게 하여 측정 구간을 세분화한 경우에 있어 열화 부위와 건전 부위에 대해 보다 확연한 차이를 관찰할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 탐촉자 간격을 20 mm로 한 경우 손상이 집중된 중앙부에서 비선형 파라미터의 크기가 더 크게 나타났으며, 시편의 중앙부에 가까워질수록 비선형 파라미터가 점진적으로 증가하는 경향도 뚜렷하다.

5. 결론

이 연구에서는 표면파의 비선형특성을 이용하여 3점 굽힘 피로시험에 의해 표면에 피로열화를 가한 알루미늄 T6 시편의 표면 열화를 평가하는 연구를 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

수치해석을 통해 3점 굽힘 피로시험이 시편 표면 중앙부에 응력 집중 및 피로손상의 집중을 발생시킬 것을 예상하였으며, 이 부근의 비선형 파라미터의 변화를 측정한 결과 중앙부에서 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또 피로를 가하기 전의 시편에서는 위치에 무관하게 균일한 값의 비선형 파라미터가 측정되었으나 피로를 가한 시편에서는 손상이 집중된 중앙부에 가까워질수록 비선형 파라미터가 증가하였으며 이는 수치해석에서 예상한 손상의 분포경향과 일치하였다.

이상의 결과로부터 표면파의 음향비선형 특성을 이용한 재료 표면의 피로열화평가의 가능성을 검증할 수 있었다.

후 기

이 연구는 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었음. (KRF-2007-313-D00010)

참고문헌

- [1] K. Y. Jhang, "Application of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation," IEEE Transaction on Ultrasonics, Frequencies, and Frequency Control, Vol. 47, No. 3, pp. 540-548 (2000)

- [2] J. I. Lee, G. D. Kwon and K. Y. Jhang, "Acoustic nonlinearity of surface wave and experimental verification of characteristics," *Journal of KSNT*, Vol. 29, No. 4, pp. 344-350 (2009)
- [3] J. Herrmann, J. Y. Kim, L. J. Jacobs, J. Qu, J. W. Little and M. F. Savage, "Assessment of material damage in a nickel-base superalloy using nonlinear Rayleigh surface waves," *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, Issue 12, pp. 99-106 (2006)
- [4] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, pp. 44-49 and 90-92, Cambridge University Press, USA (1999)
- [5] S. P. Sagar, A. Metya, N. Parida and R. N. Ghosh, "Nonlinear ultrasonic to assess localized plastic deformation during high cycle fatigue," *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 27, pp. 1260-1266 (2008)
- [6] D. J. Barnard, L. J. H. Brasche, D. Raulerson, and A. D. Detyar, "Monitoring fatigue damage accumulation with rayleigh wave harmonic generation measurements," *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 22, pp. 1393-1400 (2003)