

Al6061 합금의 소성변형에 따른 음향비선형 특성의 완전 비접촉식 평가

Fully Non-Contact Assessment of Acoustic Nonlinearity According to Plastic Deformation in Al6061 Alloy

이 현*, 전 청*, 김정석*, 장경영**†

Hyeon Lee*, Cheon Chung*, Chung-Seok Kim* and Kyung-Young Jhang**†

초 록 본 연구에서는 표면파의 음향비선형 특성 측정을 위해 선 배열 레이저 빔을 이용하여 협대역의 표면파를 발생시키고 레이저 TWM(Two-Wave Mixing) 방식으로 수신하는 완전 비접촉 측정 방법이 도입되었다. 이 기술은 알루미늄 합금의 소성변형과 음향비선형 특성과의 상관성을 조사하는데 적용되었다. 그 결과, 재료의 소성변형에 따라 음향 비선형성이 비례적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 접촉식 PZT 탐촉자 수신 방법으로 측정된 결과와 동일한 경향이다.

주요용어: 음향비선형성, 레이저 여기 표면파, 레이저 초음파 수신 TWM

Abstract This study proposes a fully non-contact measurement method to assess acoustic nonlinearity of narrowband surface waves generated by a line-arrayed laser beam by using a laser-ultrasonic detector in the way of two-wave mixing (TWM) method. This method was applied to figure out a relationship between plastic deformation and nonlinearity characteristics of a plastically deformed aluminum specimens. The experimental results showed that the acoustic nonlinearity of the laser-generated surface wave increased proportionally to the level of tensile deformation. This tendency is in good agreement with the result of measurement by contact method with PZT-transducer.

Keywords: Acoustic Nonlinearity, Laser-generated Surface Wave, Laser Ultrasound Detector, Two-wave Mixing

1. 서 론

초음파의 음향 비선형성 계측을 통한 재료의 미세손상 진단 기술은 많은 연구자들에 의해 발전해 왔으며, 최근의 이론적, 실험적 연구 결과들은 재료의 미세 구조적 변화와 초음파의 비선형 파라미터 간에 직접적으로 연관이 있음을 보여주었다[1]. Cantrell은 수직 투과 종파를 이용하여 재료 내부의 전위와 초음파 비선형 파라미터와의 관계를 연구하였다[2]. Blackshire는 피로에 의한 재료의 손상

을 표면파를 이용한 음향 비선형 특성으로부터 평가하였다[3]. 하지만 이러한 기법들은 접촉식 PZT 탐촉자를 이용한 전통적인 방법으로써 피검사체와의 접촉매질의 영향과 피검사체의 형상에 영향을 받는다는 측면에서 한계가 있다. 이러한 문제들을 극복하기 위한 방법으로 비접촉식 초음파 가진 기술인 레이저 초음파에 대해서 연구되었다[4]. 특히, Jhang은 마스크 슬릿을 이용한 선 배열 형태의 레이저 빔을 이용하여 협대역의 표면파를 발생시키는 방법을 제안하였으며, 이는 표면파의 음향 비

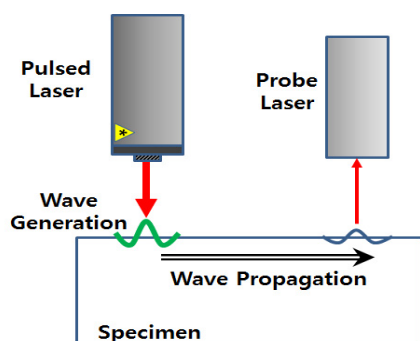


Fig. 1 A conceptual diagram of the fully non-contact measurement of acoustic nonlinearity in surface waves

선형 특성의 측정에 유용한 기술로 보고되었다[5]. 하지만 발생된 레이저 표면파의 수신은 접촉식 방법을 통해 이루어졌기 때문에, 완전한 비접촉식은 아니다.

본 연구에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 기존의 레이저 표면파 발생기술에 비접촉식 레이저 초음파 수신기법을 더하여 완전한 비접촉식 방법을 통해 재료의 음향 비선형 특성을 측정하고자 한다. 이렇게 함으로써 기존의 접촉식 수신에서 음향비선형성 측정에 미칠 수 있는 커플런트나 탐촉자와 시편사이의 접촉상태의 영향을 배제 할 수 있어 재료의 변질에 따른 음향 비선형 특성의 변화를 보다 민감하게 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

제안 기법의 유용성을 검증하기 위하여 Al6061 합금의 소성변형에 따른 음향비선형 특성의 변화를 평가 하였으며, 동일한 시험편에 대해 접촉식 탐촉자를 이용하여 평가한 선행연구의 결과[6]와 비교하였다. 시험편은 스트로크 제어에 의한 인장 시험을 통하여 단계별로 손상 정도를 달리하도록 제작되었다.

2. 측정원리

2.1. 레이저에 의한 표면파의 발생

본 연구에서는 펄스 레이저를 이용하여 협대역의 표면파를 발생시키기 위하여 Fig. 2 와 같이 선 배열 슬릿 마스크를 이용한다.

선 배열 슬릿 마스크는 선 배열 레이저 빔을 만들어 협대역의 주파수 특성을 갖는 표면파를 발생시킨다. 그림에서 d 는 각 슬릿의 간격, w 는 슬릿

의 열림 폭, λ 는 레이저 여기 표면파의 파장으로 d 와 동일하다.

이렇게 하여 발생되는 표면파의 주파수 스펙트럼은 $f = mf_0$ 에서 피크를 갖는다. m 은 양의 정수, $f_0(=c/d)$ 는 기본파의 주파수, c 는 표면파의 속도이다. 이는 본질적으로 하모닉 성분을 갖는 표면파가 발생된다는 것을 의미한다. 단 하모닉 성분의 크기는 슬릿 열림비율, 즉 duty ratio ($=w/d$)에 따라 달라진다는 사실이 선행연구 결과 알려져 있다[7].

2.2. 레이저에 의한 표면파의 수신

본 연구에서 표면파를 수신하기 위해 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 TWM(Two-Wave Mixing)방식의 레이저 초음파 수신기가 사용되었다[8].

수신기의 레이저 소스가 빔 스플리터를 거쳐 반사빔과 투과빔으로 나뉜 후, 반사빔은 광굴절 크리스탈(Photorefractive crystal)로 입사되고, 투과빔은 시편에 반사되어 광굴절 크리스탈로 입사된다.

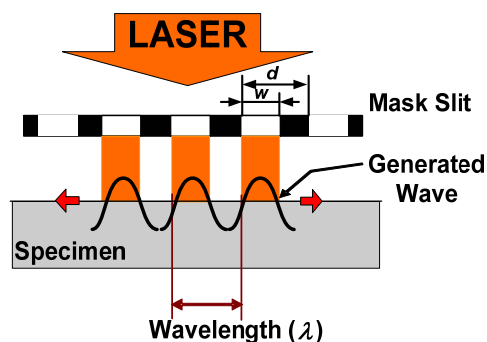


Fig. 2 Schematic diagram of surface wave generation by arrayed line laser beam with slit mask

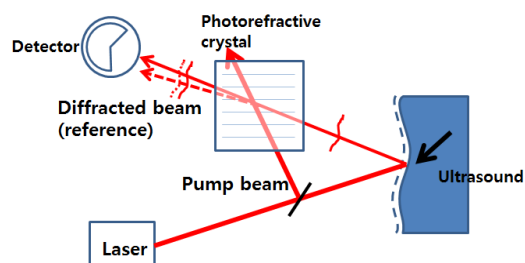


Fig. 3 Basic experimental setup for optical detection of ultrasound by two-wave mixing using photorefractive crystal

두 빔의 위상차가 광굴절 크리스탈에서 홀로그래픽 효과에 의해 기억되고 이는 변위측정의 기준이 된다. 시편에 표면파가 발생하면 표면파의 변위에 따라 시편에서 반사된 빔의 위상이 변하게 되고, 광굴절 크리스탈에 기억된 위상과의 차이가 간섭 효과로 측정되며 이로부터 시편에서 발생하는 변위에 비례하는 상대적인 크기의 신호를 얻을 수 있다. 이 방법을 TWM기법이라 하는데 기존의 마이켈슨 간섭계나 패브리 페럿 간섭계에 비하여 시편의 표면 상태에 덜 민감하고 동적응답특성이 매우 높은 장점이 있다.

2.3. 음향비선형 파라미터의 측정

표면파의 음향비선형 파라미터는 종파의 그것과 동일한 형태로 식(1)과 같이 나타내어진다라는 것이 알려져 있다[9].

$$\beta = \frac{8A_2}{A_1^2 k^2 x} \quad (1)$$

여기서, A_1 은 기본 주파수 성분의 크기이며 A_2 는 2차 고조파 성분의 크기, k 는 표면파의 파수이며 x 는 전파거리이다.

또한 음향 비선형특성의 분석은 파라미터 β 를 통해 이루어지지만, k , x 가 동일할 경우 편의상 다음과 같은 상대적인 파라미터 β' 를 이용할 수 있다.

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} = \frac{1}{8} \beta k^2 x \quad (2)$$

본 연구에서는 2.1절에서와 같이 발생시킨 표면파를 2.2절의 방법으로 수신하고, 수신한 파형에 대한 기본주파수 성분의 크기와 2차 고조파 성분의 크기를 구하여 파라미터 β' 을 구한다. 이때 2.1절에서 발생시킨 표면파에는 초기 A_2 성분이 존재하며 재료의 손상에 따른 β' 값의 변화가 둔감하게 관측될 수 있으므로 본 연구에서는 duty ratio의 조절을 통해서 초기 A_2 성분을 최소화 하도록 하였다[6].

3. 실험

3.1. 실험 장치

선 배열 레이저 소스를 이용하여 협대역의 주파

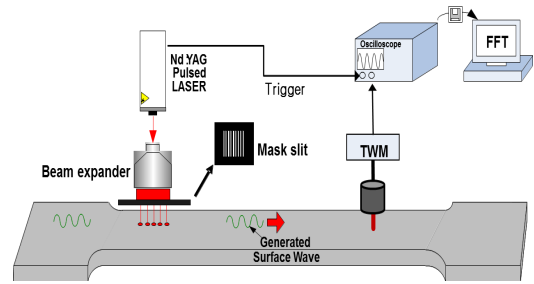


Fig. 4 Schematic diagram of acoustic nonlinearity measurement system consisted of Nd:YAG laser

수를 가지는 레이저 여기 표면파를 발생시키기 위하여 Fig. 4와 같이 Nd:YAG 펄스 레이저 (파장 1064 nm, 펄스 폭 5 ns), 빔 익스텐더, 슬릿 마스크를 이용하였다. 1 MHz의 기본 주파수를 선정하였고, 이를 위해 슬릿 마스크의 슬릿 간격 d 는 2.920 mm로, 열림 폭 w 는 1.460 mm로 하였다. 1 MHz의 주파수를 선택한 것은 레이저 초음파 수신기의 레이저빔 폭이 2 mm 이므로 효과적인 측정을 위해서는 표면파의 파장이 이보다 커야하기 때문에 이를 만족하는 파장의 주파수를 선택해야 했기 때문이다. 슬릿 마스크는 시편에 부착시켜 회절 효과를 억제하였다. 또한, 발생시킨 표면파를 비접촉으로 수신하기 위하여 TWM(Two-Wave Mixing)방식을 사용하며 파장 1064 nm, 밴드폭 0.5 MHz ~ 15 MHz을 가지는 레이저 초음파 수신기 (TECNAR, TWM)를 이용하였다. 수신 신호는 디지털 오실로스코프 (Lecroy, WS452)에서 A/D 변환하여 컴퓨터에서 주파수 분석을 수행하였다.

주파수 분석에서는 고속 푸리에 변환(FFT)을 이용하였으며, 기본주파수 성분의 크기와 2차 고조파 성분의 크기로부터 식(2)과 같은 상대적인 비선형 파라미터를 계산하였다.

3.2. 시편

제안하는 기법을 알루미늄합금의 소성변형 평가에 적용하기 위하여 인장 변형율을 달리한 서로 다른 손상의 정도를 가지는 시험편을 Fig. 5와 같이 제작하였다.

시험편은 AI6061-T6의 소재로 350 × 25 × 10 mm의 크기의 열처리된 판상규격의 인장 시험편을 이용하였다. 열처리 조건으로는 530 °C에서 120분

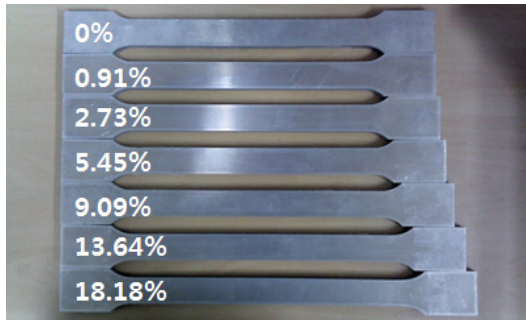


Fig. 5 Picture of specimens

유지 후 상온의 물에 급냉 처리 하였다. 인장시험의 조건으로는 스트로크 제어를 통하여 표점거리 220 mm의 시험편을 2 mm/min의 속도로 인장하여 각각 0%, 0.91%, 2.73%, 5.45%, 9.09%, 13.64%, 18.18%의 변형율을 가지는 시험편으로 제작 하였다. 이때 과단 연신율은 22%인 것으로 나타났다.

일반적으로 금속은 소성변형되면 전위의 증가와 슬립이 발달하게 되는데, 앞에서 제작한 시험편에서 인장 변형율이 증가함에 따라 전위가 증가한다는 것이 선행연구에서 EBSD(electron backscatter diffraction) 관찰을 통해 확인되었다[6].

4. 실험 결과 및 분석

4.1. 실험 결과

Fig. 6은 0%인장시험편에서 수신한 파형 및 이의 주파수 분석 예를 보여준다. 외부 기계적인 노이즈로 인하여 1 MHz보다 낮은 저주파수 성분이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 이런 노이즈를 제거하기 위하여 1 MHz Highpass 필터를 통해 수신한 파형 및 이의 주파수 분석 결과를 보여준다. 선 배열 레이저 빔에 의하여 발생된 표면파는 톤버스트 형태를 나타내었으며 협대역의 1 MHz 기본주파수 성분과, 2 MHz의 2차 고조파 성분이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

소성 변형율에 따른 상대적 비선형 파라미터를 구한 결과는 Fig. 8과 같다. 비선형 파라미터의 값은 인장 변형되지 않은 시편에서의 값을 기준으로 정규화 하였으며, 시편 당 5회 측정하였다. 인장 변형율이 커짐에 따라 비선형 파라미터가 증가하였으며, 18.18%의 변형율 시편은 인장되지 않은 초기 시편에 비해 비선형 파라미터가 약 80% 증가하였다.

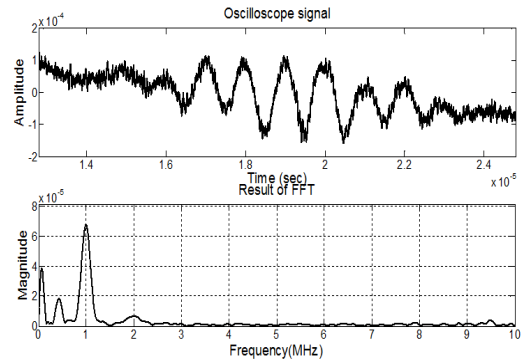


Fig. 6 Received signal of surface wave and frequency spectrum

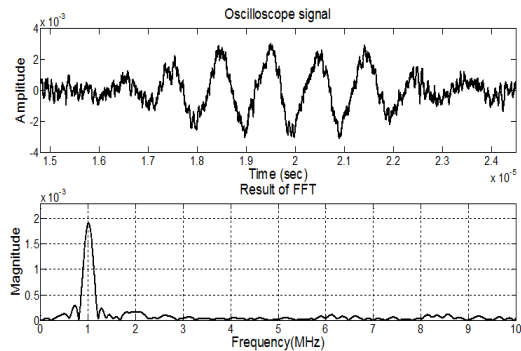


Fig. 7 Received signal of surface wave and frequency spectrum through a highpass filter

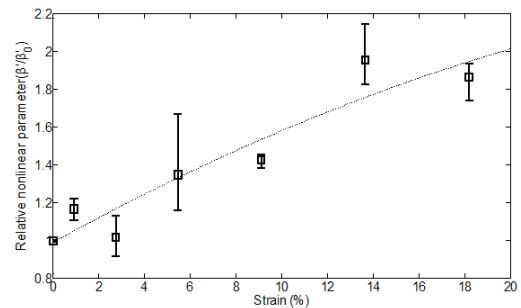


Fig. 8 Variation in relative nonlinear parameter as a result of tensile strain using TWM

4.2. 접촉식 수신 방법과의 비교

여기서는 앞에서와 동일한 방식으로 발생시킨 레이저 여기 표면파를 접촉식 PZT 탐촉자를 이용하여 수신한 경우와 비교하였다. 그 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 레이저 수신 실험결과와 동일하게 비선형 파라미터의 값은 인장 변형되지 않은 시편

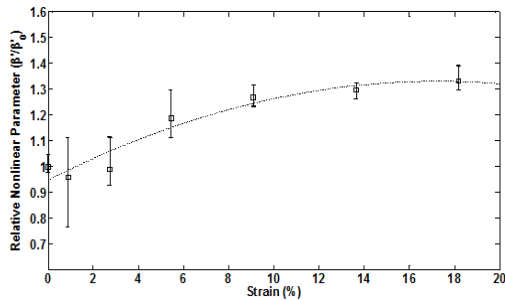


Fig. 9 Variation in nonlinear parameter as a result of tensile strain using PZT

에서의 값을 기준으로 정규화 하였으며, 18.18%의 변형률 시편은 초기 시편에 비해 비선형 파라미터가 약 34% 증가하였고, 결과적으로 레이저 수신방법과 PZT 탐촉자 수신방법 모두 소성 변형율에 따른 상대적 비선형 파라미터가 증가하는 경향을 유사하게 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 표면파의 음향비선형특성 측정을 위해 선 배열 레이저 빔을 이용한 협대역 표면파 발생기법과 레이저 TWM(Two-Wave Mixing)에 의한 초음파 수신기법을 결합한 완전 비접촉 측정방법을 제안하였다. 그리고 제안된 방법을 이용하여 인장 소성 변형 정도를 달리한 알루미늄 합금 시험편의 음향비선형 파라미터를 측정하고 변형정도와의 상관성을 분석하였다. 그 결과 변형의 증가에 따라 음향비선형 파라미터가 비례적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 동일한 시험편에 대해 동일한 레이저 방식에 의해 발생시킨 표면파를 접촉식 PZT 탐촉자 수신방법으로 측정하여 수행한 선행연구의 결과와 동일한 경향이다. 이로써 제안하는 완전 비접촉식 기법의 유효성을 검증할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 원전기술혁신사업 분야의 연구지원으로 이루어 졌습니다. (20101620100080)

참고문헌

- [1] K. Y. Jhang, "Nonlinear Ultrasonic Techniques for Nondestructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 123-135 (2009)
- [2] J. H. Cantrell, "Dependence of microelastic-plastic nonlinearity of martensitic stainless steel in fatigue damage accumulation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, pp. 063508 (2006)
- [3] J. L. Blackshire, S. Sathish, J. Na and J. Frouin, "Nonlinear Laser Ultrasonic Measurement of Localized Fatigue Damage," *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 22, pp. 1479-1488 (2003)
- [4] C. B. Scruby and L. E. Drain, "Laser Ultrasonics: Techniques and Applications," Adan Hilger, Bristol (1990)
- [5] T. H. Nam, S. H. Choi, T. H. Lee and K. Y. Jhang, C. S. Kim, "Acoustic Nonlinearity of Narrowband Laser-generated Surface waves in the Bending Fatigue of Al6061 Alloy," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 97, pp. 1212-1217 (2010)
- [6] C. S. Kim, T. Y. Nam, S. H. Choi and K. Y. Jhang, "Assessment of Plastic Deformation in Al6061 Alloy Using Acoustic Nonlinearity of Laser-Generated Surface Wave," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 32, No. 1, pp. 20-26 (2012)
- [7] S. H. Choi, T. H. Nam, K. Y. Jhang and C. S. Kim, "Frequency Response of Narrowband Surface Waves Generated by Laser Beams Spatially Modulated with a Line-arrayed Slit Mask," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 60, No. 1, pp. 26-30 (2012)
- [8] A. Blouin, J. P. Monchalin, "Detection of Ultrasonic Motion of a Scattering Surface by Two-wave Mixing in A Photorefractive GaAs Crystal", *Applied Physics Letter*, Vol. 65, No. 8, pp. 932-934 (1994)
- [9] G. Shui, J. Y. Kim, J. Qu, Y. S. Wang and L. J. Jacobs, "Anew technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using Rayleigh waves," *NDT & E International*, Vol. 41, pp. 326-329 (2008)