

## 압전형 수신 기법을 이용한 초음파 절대변위진폭 측정

# Measurement of Absolute Displacement-Amplitude of Ultrasonic Wave Using Piezo-Electric Detection Method

박성현\*, 김종범\*, 장경영\*\*†

Seong-Hyun Park\*, Jongbeom Kim\* and Kyung-Young Jhang\*\*†

**초 록** 음향 비선형 파라미터는 입사시킨 기본주파수 성분의 변위 진폭 크기와 재료의 비선형성에 의하여 발생된 2차 고조파 성분의 변위 진폭 크기의 비로 정의된다. 본 연구에서는, 압전소자 방식을 이용한 초음파 절대변위진폭 측정의 타당성을 확인하고자, 이 기법을 통해 초음파가 입사된 SUS316 시편의 절대변위진폭을 측정하였다. 또한 비교를 위해, 레이저를 통한 패브리페롯 방식의 간섭계를 이용하여 동일 시편에 대한 절대 변위진폭을 측정하였다. 두 가지 기법을 통한 실험 결과는 서로 잘 일치하는 경향을 보였으며, 특히 압전형 수신 기법의 경우 기존의 레이저 변위측정기법에 비하여 반복 측정의 안정성이 우수한 것으로 나타났다. 이 결과로부터 압전형 수신 기법은 기존 레이저 측정 기법에 비하여 과정이 복잡하지만, 미세변위를 더 안정적으로 측정할 수 있어 음향 비선형 파라미터의 측정에 유리할 것으로 기대된다.

**주요용어:** 초음파 절대변위, 압전형 수신 기법, 레이저 변위 측정 기법, SUS316

**Abstract** A nonlinear ultrasonic parameter is defined by the ratio of displacement amplitude of the fundamental frequency component to that of the second-order harmonic frequency component. In this study, the ultrasonic displacement amplitude of an SUS316 specimen was measured via a piezo-electric-based method to identify the validity of piezo-electric detection method. For comparison, the ultrasonic displacement was also determined via a laser-based Fabry-Pérot interferometer. The experimental results for both measurements were in good agreement. Additionally, the stability of the repeated test results from the piezo-electric method exceeded that of the laser-interferometric method. This result indicated that the piezo-electric detection method can be utilized to measure a nonlinear ultrasonic parameter due to its excellent stability although it involves a complicated process.

**Keywords:** Ultrasonic Displacement, Piezo-Electric Detection Method, Laser-Interferometric Detection Method, SUS316

### 1. 서 론

비선형 초음파기법은 재료의 미세결함이나 열화, 피로와 같은 미세손상을 효과적으로 검사하기 위한 방법으로 최근 연구되고 있는 유망한 기법이다 [1-4]. 이 기법은 초음파가 매질을 전파할 때 매질의 비선형적 탄성 특성에 의하여 초음파의 파형이 왜곡되고, 이에 따라 입사시킨 초음파의 기본주파수 성분 이외에 고조파가 발생하는 것을 이용한다.

따라서 이 기법을 이용하여 재료의 비선형성을 측정하기 위해서는 입사되는 기본주파수 성분 이외에 발생하는 고조파 성분을 측정해야 한다. 그러나 3차 이상의 고조파 성분들은 그 크기가 매우 작아 측정하기 어렵기 때문에 많은 연구들은 2차 고조파 성분만을 측정하여 재료의 비선형성을 평가하고 있는데, 이 경우, 기본주파수 성분과 2차 고조파 성분의 변위 진폭 크기로 정의되는 2차 비선형 파라미터  $\beta$ 를 이용한다[5].

[Received: October 27, 2016, Revised: December 1, 2016 / January 31, 2017, Accepted: February 10, 2017] \*한양대학교 융합기계공학과, \*\*한양대학교 기계공학부, †Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea (E-mail: kyjhang@hanyang.ac.kr)

하지만 2차 고조파 성분의 변위 진폭 크기도 수 옴스트롬( $\text{\AA}$ ) 이내로 작기 때문에 이를 정밀하게 측정하는 것도 쉬운 일은 아니다[6]. 따라서 대부분의 연구들은 수신 신호의 변위 진폭 크기로 정의되는 절대 비선형 파라미터  $\beta$ 가 아닌, 수신 신호의 전압 진폭 크기로 정의되는 상대 비선형 파라미터  $\beta'$ 를 측정하여 이용하고 있다[6-7]. 그러나 상대 비선형 파라미터를 통한 재료의 미세손상 평가는 상대비교를 통한 정성적인 진단만 가능하다는 한계가 있다. 따라서 재료 미세손상에 대한 정량적인 진단을 위하여 절대 비선형 파라미터의 측정이 필수적이다[8].

일반적으로 절대 비선형 파라미터의 측정을 위한 방법으로는 레이저 변위 측정 방식 그리고 압전형 측정 방식이 알려져 있다[9]. 이 중, 레이저 변위 측정은 레이저를 이용하여 측정하고자 하는 대상의 움직임을 변위 정보로 수신할 수 있는 직접 방식이다. 이는 비접촉식으로 측정이 가능하며, 수신점으로써 사용된 레이저의 직경에 해당하는 너비만을 필요로 하기 때문에 측정하고자 하는 대상의 외관에 크게 제약을 받지 않는 장점이 있다[10]. 압전소자 방식의 측정 기법은 접촉식 압전소자를 이용하여 측정된 전기신호를 캘리브레이션을 통한 변위 정보로 변환하여 초음파의 절대변위진폭의 크기를 측정하는 간접 방식이다. 이는 기존의 상용화 되어 있는 초음파 비파괴검사 장비를 그대로 적용할 수 있고 타 기법들에 비하여 측정하고자 하는 대상 시편의 표면 상태와 측정 환경의 영향을 상대적으로 덜 받기 때문에 수신 신호의 감도가 뛰어나다는 장점을 가지고 있다[11]. 그러나 이 기법을 이용한 기존의 연구사례는 측정한 음향 비선형 파라미터가 알려진 참조값과 유사함을 보이는데 그쳤고, 측정한 절대변위가 실제 변위와 같은지에 대해서는 평가된 바 없다[12]. 또한 이 기법에서는 2차 고조파 성분을 효과적으로 수신하기 위하여 송신 주파수의 2배에 해당하는 중심주파수를 갖는 탐촉자를 사용하게 되는데, 송신 주파수와 수신 탐촉자의 중심주파수가 일치하지 않는 상황에서도 송신 주파수 성분의 변위 진폭이 올바르게 측정되는지에 대한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 압전형 수신 기법을 이용한 초음파 절대변위진폭 측정의 타당성을 확인하고자,

이 기법을 통해 초음파가 입사된 SUS316 시편의 절대변위진폭을 측정하였으며, 비교를 위하여 레이저를 이용한 패브리페르 방식의 간섭기법을 통한 절대변위측정 또한 수행되었다. 단, 비교는 송신 주파수 성분에 대해 이루어졌는데, 이는 압전소자 방식에서 송신 주파수와 다른 주파수의 수신 탐촉자를 사용하더라도 송신 주파수 성분의 변위 진폭이 잘 측정되는지를 일차적으로 검증하기 위한 것이다.

## 2. 압전형 수신 기법

초음파 절대변위의 측정을 위하여 두께 17 mm의 SUS316 시편에 대하여 Fig. 1과 같이 압전형 수신 기법을 적용하였다. 이 기법은 Fig. 1(a)와 같은 캘리브레이션과 Fig. 1(b)와 같은 하모닉 측정으로 구성되어 있다. 사용된 탐촉자는  $LiNbO_3$  탐촉자이며, 면외 수직 방향의 커플링 상수값은  $6 \times 10^{-12} C/N$ 으로 알려져 있다[13]. 먼저 캘리브레이션은 펄스-에코법을 이용하였다. 이를 위해 광대역의 펄서/리시버(PR5072, Panametric, 일본)를 통해 펄스 신호를 송신하였고, 송신된 신호는 하모닉 측정에서 수신기로 사용되는 5 MHz의 중심주파수를 갖는  $LiNbO_3$  탐촉자를 통해 음향신호로 재료에 전달된다. 이때 재료의 저면에서 반사된 신호는 다시 동일한 탐촉자와 펄서/리시버를 통해 수신하였다. 송수신되는 구동 전류  $I_{in}'(\omega)$ 과 구동 전압  $V_{in}'(\omega)$ , 수신 전류  $I_{out}'(\omega)$  그리고 수신 전압  $V_{out}'(\omega)$ 은 각각 전류 프로브(CP030, Lecroy, 미국)와 전압프로브(Tektronix, P220, 미국)을 이용하여 측정하였다. 사용된 전류프로브는 최대 30 A와 50 MHz를 측정 가능하며, 전압프로브는 최대 300 V와 200 MHz까지 측정 가능하다. 수신 신호는 디지털 오실로스코프(Wavesurfer452, Lecroy, 미국)를 통해 취득하였고, 취득된 신호는 사이드-로브의 영향을 줄이기 위하여 Tukey window를 적용한 후, 고속 푸리에 변환(FFT)을 통하여 분석되었다. 이 때, 창 함수에 의해 발생하는 신호의 에너지 손실을 보상하기 위하여 Tukey window에 대한 보정계수를 적용하여 FFT 결과값을 보상하였고 이를 통해 측정되는 전류 신호를 다음과 같이 변위 신호로 변환하여 주는 변환계수  $H(\omega)$ 를 구하

였다[11,14].

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{|I_{in}'(\omega)(\frac{V_{out}'(\omega)}{I_{out}'(\omega)} + V_{in}'(\omega))|}{2\omega^2\rho va|I_{out}'(\omega)|}} \quad (1)$$

여기서  $\omega$ 는 각주파수이며,  $\rho$ 는 밀도,  $v$ 는 초음파의 종파 속도, 그리고  $a$ 는 탐촉자의 면적이다.

Fig. 1(b)와 같은 하모닉 측정을 통하여 수신 전류 신호를 측정 한 후 앞서 구한 변환계수  $H(\omega)$ 를 이용하여 다음과 같이 초음파 변위 진폭  $A_{inc}(\omega)$ 를 구하였다. 이때 수신기는 가진된 초음파의 진행방향과 동일한 축 상에 위치시켰고, 면외 수직방향에 대한 절대변위를 측정하였다.

$$A_{inc}(\omega) = |H(\omega)||I_{out}(\omega)| \quad (2)$$

이를 위해 2.25 MHz의 사인파형 톤버스트 형태 역 신호를 고전압 펄서(RAM-5000, SNAP, 영국)를 사용하여 송신하였고, 송신 탐촉자로는 2.25 MHz의 중심주파수를 갖는  $LiNbO_3$  탐촉자를 사용하였다. 송신된 초음파 신호는 재료를 투과하여 반대편에서 수신되고 이를 측정하기 위한 수신 탐촉자로는 5 MHz  $LiNbO_3$  탐촉자를 사용하였다. 취득된 신호는 사이드-로브의 영향을 줄이기 위하여 Hanning window를 적용한 후, 고속 푸리에 변환(FFT)을 통하여 분석되었고, Hanning window를 사용함에 따라 발생하는 원 신호의 크기 손실을 보상하기 위해 보정계수를 적용하였다. 측정의 재현성을 높이기 위하여 고전압 펄서의 인가전압을 증가시켜가며 실험을 반복 진행하였고, 수신되는 전류  $I_{out}(\omega)$ 은 캘리브레이션에서 사용된 것과 동일한 전류프로브를 사용하여 측정하였다.

### 3. 레이저 변위 측정 기법

비교를 위하여 패브리페렛 방식의 레이저 변위 측정기(FPS3010, Attocube, 독일)를 통한 초음파 절대변위 측정 실험을 진행하였다. 이를 위하여 시편의 한쪽 면과 간섭계를 구성하는 광섬유의 한면을 Fig. 2와 같이 공진기로 구성하여 측정하였고, 압전형 수신 기법과 동일한 실험 구성을 위하여 하모닉 측정의 실험구성에서 수신부를 레

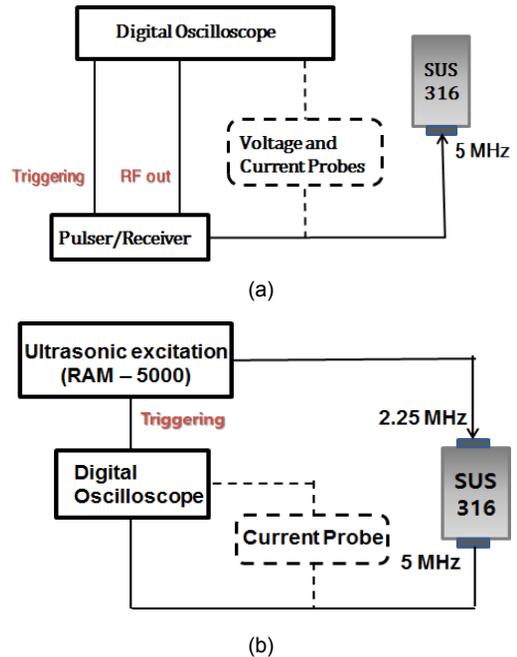


Fig. 1 Ultrasonic experimental setup for (a) calibration and (b) harmonic measurement

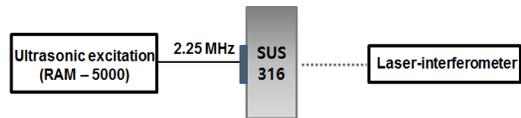


Fig. 2 Experimental setup for laser-interferometric detection method

이저 변위 측정기로 대체한 후, 앞선 방법과 마찬가지로 송신 탐촉자의 중심축과 레이저 수신기의 중심축을 일치시켜 면외 수직 방향의 초음파 절대변위를 측정하였다[15].

### 4. 실험 결과

압전형 수신 기법을 이용한 초음파 절대변위 측정 결과를 Fig. 3에 나타낸다. Fig. 3(a)는 주파수에 따른 전기 임피던스 값이며, 이는 실제 측정에 사용된 계측장비와 마찬가지로 50 옴을 유지하여 측정이 정상적으로 이루어졌음을 보여준다. Fig. 3(b)는 캘리브레이션을 통한 변환계수  $H(\omega)$ 를 나타내며, Fig. 3(c)는 하모닉 측정을 통해 측정되어 오실로스코프 상으로 나타나는 수신 전류 신호  $I_{out}(t)$ 이다. 이때 톤-버스트 개수는 총 13개

인데 양 끝을 제외한 9개를 이용하였고, 신호 대 잡음비를 높이기 위하여 100회 평균 처리하였다. 수신 신호에서 가진 주파수에 해당하는 전류 신호만을 취득하기 위하여 FFT를 통해 Fig. 3(d)와 같은 결과를 얻었으며 주파수 축 상에서 가진 주파수에 해당하는 2.25 MHz 성분의 진폭 크기를 추출한 뒤, 앞서 구한 변환계수  $H(\omega)$ 와 식 (2)를 통해 초음파 절대변위로 변환되었다.

또한 비교를 위하여 레이저 변위 측정 기법을 통해 초음파 절대변위를 측정 후 FFT한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

한편 분석의 신뢰도를 높이기 위하여 두 기법을 통한 실험 모두 3회 반복 측정을 하였으며, 먼저 인가전압을 증가시키면서 하모닉 측정으로 얻은 수신 전류신호를 Fig. 5에 나타낸 뒤, 캘리브레이션으로 얻은 변환계수를 통하여 최종적으로 얻은 변위와 레이저 변위 측정 기법으로 측정

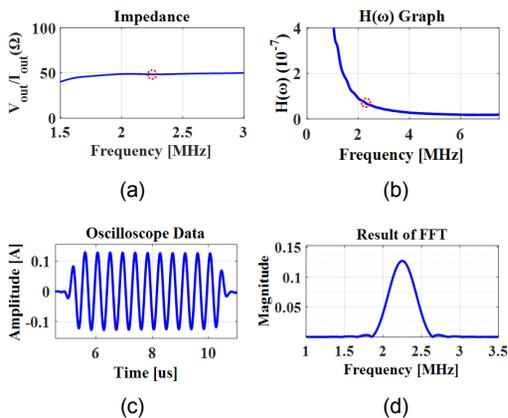


Fig. 3 Experimental results about (a) electric impedance according to the frequency, (b) calibration, (c) received current signal by oscilloscope and (d) the FFT results of piezo-electric detection method

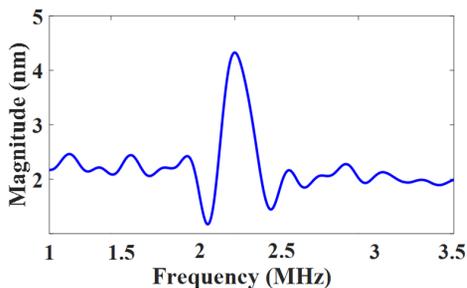


Fig. 4 Experimental results about the FFT results of laser-interferometric detection method

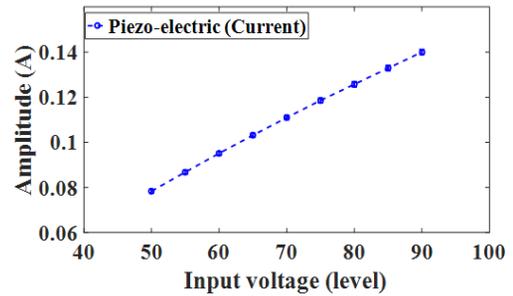


Fig. 5 Current signal amplitudes depending on increasing the input power via the piezo-electric detection method

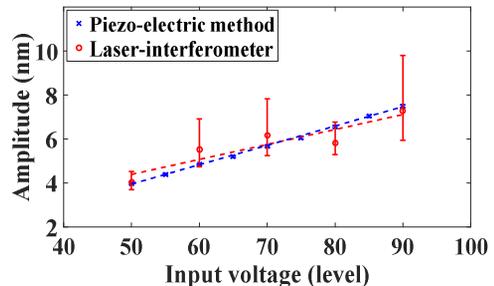


Fig. 6 Ultrasonic displacement amplitudes obtained from both measurements

한 변위를 Fig. 6에 함께 나타내었다. 두 기법을 이용한 실험 결과를 비교하였을 때, 두 결과 모두 인가전압을 증가시키에 따라 초음파 절대변위가 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 평균적으로 두 측정결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다. 특히 압전형 수신 기법을 통한 실험 결과는 편차율 1% 이내로, 레이저 측정에 비해 반복측정의 안정성이 높게 나타났는데, 이는 압전 방식이 시편의 표면 상태나 측정 환경에 덜 민감하기 때문으로 사료된다. 이에 반해, 레이저 측정의 경우 반복 측정 시 앞서 측정한 지점과 동일한 수신점을 사용하기 어렵고, 이에 따른 시편의 표면 상태와 측정 환경의 변화로 인하여 반복측정의 산포가 상대적으로 크게 나타난 것으로 사료된다.

## 5. 결론

비선형 파라미터를 구하기 위해서는 초음파의 절대변위진폭을 측정하여야 한다. 이를 위하여,

최근 압전형 수신 기법을 통한 간접측정기법이 많이 연구되고 있다. 본 연구에서는 압전형 수신 기법을 이용한 초음파 절대변위진폭 측정의 타당성을 확인하고자, 이 기법을 통해 초음파가 입사된 SUS316 시편에 대한 절대변위진폭을 측정하였으며, 또한 비교를 위하여 패브리페렛 방식의 레이저 변위 측정 기법을 통해 동일 시편에 대한 절대변위진폭을 측정하였다. 그 결과, 두 가지 기법을 사용하여 측정된 초음파 변위 진폭이 서로 잘 일치하였으며, 특히, 압전소자 방식의 경우 상대적으로 측정 환경에 덜 영향을 받아, 레이저 변위 측정 방식에 비하여 반복 측정의 안정성이 우수하였다.

이 결과로부터 압전소자 방식의 수신 기법은 초음파 절대변위 측정에 있어서 유효한 기법임을 확인하였으며, 특히 이 기법은 간접 측정이긴 하지만, 초음파의 미세 변위 진폭을 측정하는데 효과적이라고 할 수 있으며, 따라서 비선형 초음파 파라미터 측정에 활용하는 것도 타당하다고 할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NRF-2013M2A2A9043241).

## References

- [1] P. B. Nagy, "Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization," *Ultrasonics*, Vol. 36, No. 1-5, pp. 375-381 (1998)
- [2] T. H. Lee, I. H. Choi and K. Y. Jhang, "The nonlinearity of guided wave in an elastic plate," *Modern Physics Letters*, Vol. 22, No. 11, pp. 1135-1140 (2008)
- [3] B. Christian, J. Y. Kim, J. Qu and L. J. Jacobs, "Experimental characterization of material nonlinearity using Lamb waves," *Applied physics letters*, Vol. 90, No. 2, pp. 1266-1273 (2007)
- [4] K. Y. Jhang, "Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation," *IEEE Transactions on Ultrasonics*, Vol. 47, No. 3, pp. 540-548 (2000)
- [5] 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)
- [6] D. G. Song, J. H. Jun, S. H. Park and K. Y. Jhang, "Stability of acoustic nonlinear parameter measurement with respect to input voltage," *Ultrasonics*, Vol. 56, pp. 539-544 (2015)
- [7] C. Mondal, A. Mukhopadhyay and R. Sarkar, "A study on precipitation characteristics induced strength variation by nonlinear ultrasonic parameter," *Journal of Applied Physics*, Vol. 108, No. 12, 124910 (2010)
- [8] J. Frouin, S. Sathish, T. E. Matikas and J. K. Na, "Ultrasonic linear and nonlinear behavior of fatigued Ti-6Al-4V," *Journal of Materials Research*, Vol. 14, No. 4, pp. 1295-1298 (1999)
- [9] K. H. Matlack, J. Y. Kim, L. J. Jacobs and J. Qu, "Review of second harmonic generation measurement techniques for material state determination in metals," *Journal of Non-destructive Evaluation*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-23 (2015)
- [10] S. H. Choi, H. G. Seo and K. Y. Jhang, "Noncontact evaluation of acoustic nonlinearity of a laser-generated surface wave in a plastically deformed aluminum alloy," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 26, No. 1, pp. 13-22 (2015)
- [11] G. E. Dace, R. B. Thompson and O. Buck, "Measurement of the acoustic harmonic generation for materials characterization using contact transducers," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Vol. 11, pp. 2069-2076 (1992)
- [12] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Acoustic harmonic generation and dislocation dynamics of fatigued aluminum alloys," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Springer US, pp. 2059-2066 (1993)

- [13] R. S. Weis and T. K. Gaylord, "Lithium niobate: summary of physical properties and crystal structure," *Applied Physics A*, Vol. 37, No. 4, pp. 191-203 (1985)
- [14] G. E. Dace, R. B. Thompson, L. J. Brasche, D. K. Rehbein and O. Buck, "Nonlinear acoustics, a technique to determine microstructural changes in materials," *In Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Springer US, pp. 1685-1692 (1991)
- [15] K. Thurmer, P. F. Braun and K. Karrai, "Fabry-Pérot interferometry for long range displacement sensing," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 84, No. 9, 09005 (2013)