

## 열처리된 알루미늄 합금의 초음파 비선형 특성 평가

### Evaluation of Ultrasonic Nonlinear Characteristics in Heat-Treated Aluminum Alloy

김종범\*, 전청\*, 장경영\*\*†, 김정석\*\*\*

JongBeom Kim\*, Chung Cheon\*, Kyung-Young Jhang\*\*† and Chung-Seok Kim\*\*\*

**초 록** 본 연구에서는 열처리된 알루미늄 합금의 초음파 비선형 특성을 평가하였다. 초음파의 비선형성은 재료를 전파한 초음파의 2차고조파와 기본주파수 성분의 진폭비에 의존하는 비선형 파라미터  $\beta$ 로 측정하였다. 비선형 파라미터  $\beta$ 의 측정은 접촉식 탐촉자를 이용하여 동일 평면상에서 시편저면에서 반사된 신호로부터 구하였다. 열처리(시효)는 300°C에서 1시간부터 50시간까지 다양한 유지시간동안 수행하였다. 인장시험으로부터 인장강도와 연신율을 구하고 비선형 파라미터와 비교하였다. 비선형 파라미터  $\beta$ 는 시효시간 5시간에서 피크를 나타내고 이후는 감소하였다. 이는 인장강도와 연신율의 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 또한 비선형 파라미터가 피크를 나타낸 열처리 시간과 인장곡선에서 최대변화가 나타난 열처리 시간이 일치하였다. 이 같은 결과는 알루미늄합금의 시효처리로 인한 강도 변화를 모니터링 하는데 초음파의 비선형성이 유용할 수 있음을 보여준다.

**주요용어:** 초음파, 음향비선형 파라미터, 알루미늄 합금, 열처리, 에이징

**Abstract** In this study, ultrasonic nonlinear characteristics in the heat-treated aluminum alloy have been evaluated. The nonlinearity of ultrasonic wave has been measured as the acoustic nonlinear parameter  $\beta$ , depending upon the amplitude ratio of the second-order harmonic and the fundamental frequency component of ultrasonic wave propagating through the materials. The parameter  $\beta$  measurement has been carried out with the reflected signals from the back-wall of specimens at the same plane using the contact-type transducers. The heat-treatment, aging, has been achieved at 300°C for various durations in the range of 1 to 50 hours. The tensile strength and elongation are obtained by the tensile test and then compared with the parameter  $\beta$ . There is a peak of the acoustic nonlinear parameter  $\beta$  on 5 hours aging and the  $\beta$  decreases thereafter, exhibiting closed relations with tensile strength and elongation. Also, the heat-treatment time showing peak in the parameter  $\beta$  was identical to that showing severe change in the  $\sigma$ - $\epsilon$  curve. These results suggest that the acoustic nonlinear parameter  $\beta$  can be used for monitoring the strength variations with aging of aluminum alloys.

**Keywords:** Ultrasound, Acoustic Nonlinear Parameter, Aluminum Alloy, Heat Treatment, Aging

#### 1. 서 론

재료 내부의 미세결함이나 열화 정도를 진단하기 위해서는 일반적으로 인장시험, 충격시험, 피로시험, 굽힘시험 등 파괴시험을 이용하고 있으나 파괴시험은 시료를 가동 중이거나 사용 중인

기계구조물로부터 채취하여야 하므로 경제적, 시간적인 어려움 외에도 사실상 불가능하다. 게다가 파괴시험 진행 후 재사용 할 수 없다는 문제점이 있다. 이에 대한 대안으로 재료의 외관상태를 변화시키지 않고 외부에서 정밀상태진단 할 수 있는 신개념의 첨단 비파괴검사 기술이 필요

[접수일: 2013. 4. 1, 수정일: 2013. 4. 17, 게재확정일: 2013. 4. 19] \*한양대학교 기계공학과, \*\*한양대학교 기계공학부, \*\*\*조선대학교 금속재료공학과, †Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea (E-mail: kyjhang@hanyang.ac.kr)

하게 되었다.

재료특성평가가 가능한 기존의 비파괴검사 방법에는 초음파[1], 전기비저항[2], 마크하우젠 노이즈[3]등이 있으나 전기비저항과 마크하우젠 노이즈 기술은 재료의 극표면에서의 국부적인 측정법으로 기계구조물의 상태를 진단하고 모니터링하는 데는 한계가 있다. 이에 반해서 대상재료의 전체 체적평가가 가능한 초음파기술은 재료의 탄성적 성질에 매우 밀접한 관련성으로 인해서 지금까지 결함 검사 및 상태 분석에 매우 다양한 초음파기술들이 개발되어 널리 사용되어왔다.

초음파를 이용한 비파괴검사 기술에는 초음파의 수신 크기, 속도, 감쇠비, 산란 등을 이용한 선형 초음파기법을 통해 재료의 변화를 평가하는 방법이 있으나 이 기법은 이미 어느 정도 성장된 균열의 검출은 가능하지만 초기 균열이나 단힌 균열, 재료의 열화평가에는 민감도가 낮아 적합하지 못한 것으로 알려져 있다[4-5]. 이에 반해 기존의 초음파기법에서 진단할 수 없었던 재료 파손의 초기 상태, 즉 열화, 변질, 단힌균열의 발생 등을 고감도로 진단할 수 있는 비선형 초음파 기술이 주목 받고 있다[6,7].

비선형 초음파기술은 매질에 초음파가 전파할 때 전파매질의 비선형적 탄성 특성에 의해 파형이 왜곡되고 고조파가 발생하는 비선형 음향효과를 이용하는 것으로 입사된 주파수의 정수배에 해당하는 고조파 성분의 크기로부터 비선형 파라미터를 측정하여 매질의 물성변화를 평가하는 방법이다[6,8].

비선형 파라미터는 재료의 석출거동과 미세조직의 변화를 평가할 수 있으므로 인장시험을 대체할 수 있는 방법으로 활용가능하리라 예상된다. 본 연구는 이를 확인하고자 열처리된 알루미늄 합금에 대해 인장시험과 비선형 초음파 실험의 결과를 비교 분석하였다.

이를 위해 열처리온도 300℃에서 1시간부터 50시간까지 6가지의 열처리 시간 (1H, 2H, 5H, 10H, 20H, 50H) 으로 열처리한 디스크 형상의 알루미늄 합금 시편을 준비하였다. 그리고 각 시편에서의 비선형 파라미터를 측정하기 위하여 5 MHz 톤버스트 종파를 이용하였다. 수신신호는 시편의 저면에서 반사된 신호이고, FFT를 이용하여 5 MHz와 10 MHz 성분의 크기를 구하고 이로부터 비선형 파라미터 값을 구하였다.

초음파 실험진행 후 디스크 시편에서 인장시험편을 채취하여 인장시험을 진행하였으며 인장시험 결과와 초음파 실험과의 상관성을 분석하였다.

## 2. 음향 비선형 파라미터

비선형 초음파 특성을 평가하기 위해 단일주파수를 가지는 초음파를 재료에 입사시키고 입사된 초음파는 재료를 투과하여 저면에 반사된 후 수신된다. 이 과정에서 단일 주파수를 가지는 초음파는 재료의 비선형적 탄성특성에 의해 왜곡되고 2차고조파 성분이 발생된다. 그 결과 수신되는 신호는 기본주파수 성분뿐만 아니라 2차고조파 성분도 수신되게 된다[9]. 재료의 미세 구조적인 특성에 의한 고조파 성분의 발생을 측정하기 위해 초음파 비선형 파라미터  $\beta$ 의 값을 구하는데, 이 비선형 파라미터  $\beta$ 는 다음과 같이 정의 된다.

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

위 수식에서  $A_1$ 은 기본주파수 성분의 크기이며  $A_2$ 는 2차고조파 성분의 크기,  $k$ 는 파수이며  $x$ 는 전파거리다. 실험에서 파수  $k$ 와 전파거리  $x$ 는 일정하며 따라서 다음과 같은 상대적인 비선형 파라미터  $\beta$ 를 이용할 수 있다[10].

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

## 3. 실험

### 3.1. 시편

시편은 직경 100 mm 두께 20 mm를 가지는 디스크 형상의 열처리된 알루미늄 합금을 사용하였다. 또한 시편은 300℃에서 6종류의 다양한 시효 시간(1H, 2H, 5H, 10H, 20H, 50H)으로 전기로에서 열처리하였으며 공기 중에서 공랭을 하였다.

디스크 형상의 시편으로 초음파 실험 후 디스크 시편에서 ASTM E8M 규격에 따라 80 mm × 10 mm, 두께 3 mm의 인장시편을 채취하여 인장시험을 진행하였고, 인장시험은 만능시험기(MTS793)를 이용하여 상온에서 5 mm/min의 변형속도로 진행하였다.

3.2. 실험장치

알루미늄 합금의 열처리에 따른 초음파 비선형 특성을 평가하기 위하여 Fig. 1(a)와 같이 접촉식 탐촉자를 이용하여 실험장치를 구성하였다. 신호 송신을 위해서 고전압펄서(RAM 5000, RITEC, USA)를 사용하였고, 송신 탐촉자로 중심주파수가 5 MHz인 협대역 탐촉자를 사용하였다. 송신된 초음파 신호는 시편 저면에서 반사된 후 수신되고 반사되는 초음파 신호의 2차고조파 성분을 민감하게 수신하기 위해 수신 탐촉자로는 10 MHz의 중심주파수를 가지는 협대역 탐촉자를 사용하였다.

초음파 신호로는 주파수 분석을 통해 효과적으로 고조파 성분을 분리 측정하기 위해서 Fig. 1(b)와 같이 20사이클의 사인파형 톤버스트 형태의 협대역 신호를 사용하였다. 수신된 신호는 디지털 오실로스코프(Lecroy WS452)에서 A/D 변환하고 컴퓨터에서 처리된다.

비선형 파라미터  $\beta$ 을 구하기 위한 기본주파수 성분과 2차고조파 성분의 크기는 Fig. 2(a)와 같

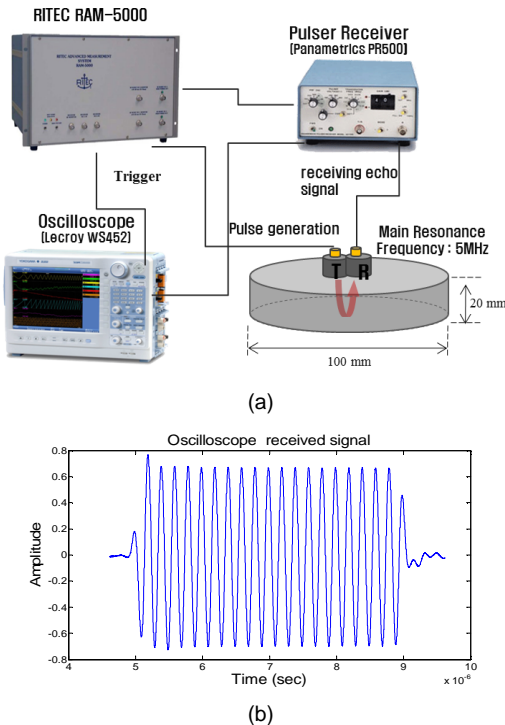


Fig. 1 (a) Experimental system to measure the nonlinear parameter and (b) example of the received signal in time domain

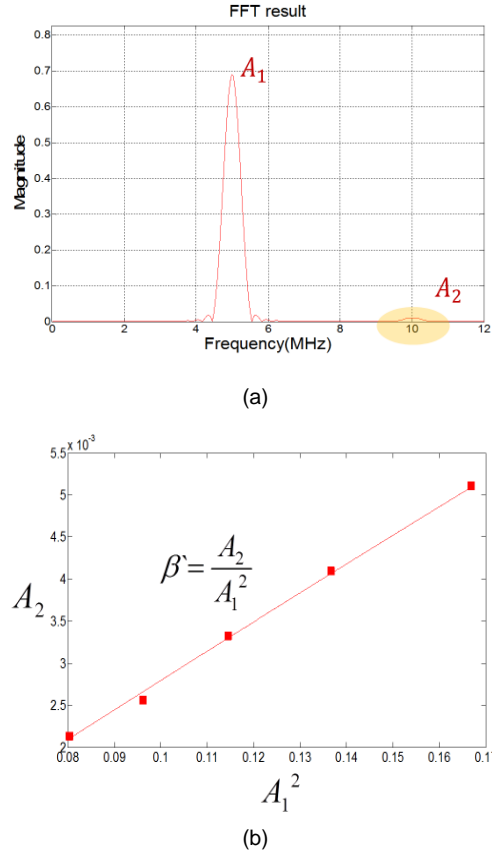


Fig. 2 (a) FFT result of the received signal and (b) experimental result to show the dependency of the second harmonic amplitude on the fundamental frequency amplitude:  $A_1^2$  vs  $A_2$

이 수신신호를 FFT함으로써 얻어진다. Fig. 2(b)는 1시간 열처리된 시편에 송신 전압을 증가시키며 얻은  $A_1^2$ 과  $A_2$ 의 관계를 보여주고 있으며  $A_1^2$ 과  $A_2$ 의 관계가 Eq. (2)에서와 같이 선형적인 관계를 만족함을 확인할 수 있고, 비선형 파라미터  $\beta$ 은  $A_1^2$ 과  $A_2$ 관계의 선형기울기로 결정하였다. 모든 열처리 시편에 대하여 이와 같은 방법으로 비선형 파라미터를 구하였다.

4. 실험결과

Fig. 3는 열처리 시간에 따른 비선형 파라미터 측정 결과로 비선형 파라미터는 1시간 열처리 시편에서 얻은 비선형 파라미터 값을 기준으로 정규화 하였다. 비선형 파라미터 측정 결과 초기에

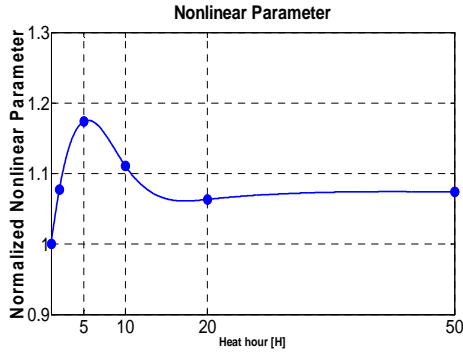


Fig. 3 Relationship between the normalized nonlinear parameter and heat-treatment time

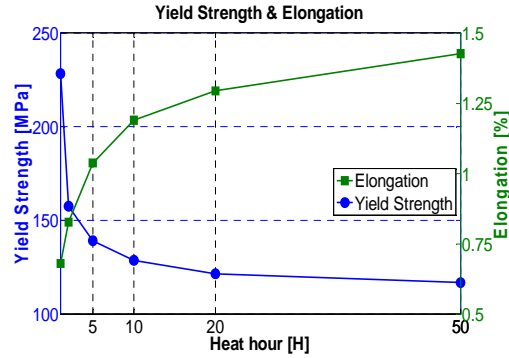


Fig. 5 Yield stress and elongation obtained from stress-strain curve shown in Fig.5

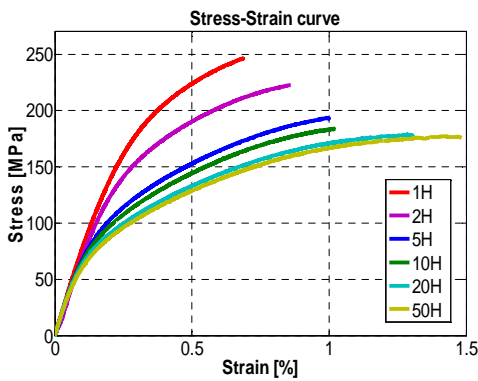


Fig. 4 Stress-strain curve obtained from tensile test for specimens with different heat-treatment time

는 열처리 시간의 증가에 따라 비선형 파라미터가 증가하였고 5시간 열처리에서 피크가 발생했으며 이후 비선형 파라미터는 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 4는 인장시험 결과 얻은 응력 변형률 곡선으로 비선형 파라미터가 피크를 가지는 5시간 열처리에서부터 응력 변형률 곡선의 급격한 곡률 변화가 나타났으며 이는 1시간에서 5시간으로 열처리가 진행되면서 재료의 급격한 강도 저하와 연신율 증가가 나타났다는 것을 보여준다. 물리적으로 비선형 파라미터는 2차탄성계수와 3차탄성계수의 비로 정의되어진다. 그리고 합금의 탄성계수는 합금화 원소들의 조성적인 변화에 매우 민감하다. 본 연구의 대상재료는 주조합금이며 300℃에서 고온 시효처리한 것으로 주조 시 형성된 석출물들이 시효과정을 거치면서 변화하므로 이로 인해 기계적 물성과 비선형 파라미터의 변

화에 영향을 미치게 될 것으로 판단된다. 주조 중 존재하던 기지내 과포화 고용된 합금원소로 인해 응고과정 중 생성된 공정 석출상들은 시효처리 과정동안 기지로 재고용이 일어나게 되어 기지격자의 원자의 조성적 차이가 일어난다. 이로 인해서 원자간 재배열이 일어나고 미소역학적 탄성계수가 크게 변하게 되어 5시간 시효까지 비선형 파라미터는 증가한 것으로 판단된다. 이후에는 미소한 공정 실리콘상이 조대화되고 구상화 되면서 2차 탄성계수는 증가하게 되고 이로 인해 비선형 파라미터는 감소한 것으로 판단된다[11]. 이에 대한 미세조직적인 원인 규명은 대상재료를 가지고 다양한 정량분석과 석출물 거동에 대한 체계적인 연구가 추가적으로 진행되어야 한다.

Fig. 5는 인장시험 결과 얻은 열처리 시간에 따른 항복강도와 연신율 변화 그래프로 항복강도는 1시간 열처리에서 5시간 열처리가 될 때 228.173 MPa에서 139.091 MPa로 급격히 감소하였고 연신율은 0.679에서 1.037으로 급격히 증가함을 보였으며 이후 열처리 시간의 증가에 따른 항복강도와 연신율의 변화는 상대적으로 작게 나타났다. 알루미늄 합금은 열처리에 따라 석출물과 미세조직의 영향으로 재료의 물성이 변화하는데 열처리 시간의 증가에 따른 알루미늄 합금의 석출거동과 미세조직의 변화가 인장시험을 통해 응력-변형률 곡선의 급격한 곡률 변화와 항복강도의 급격한 감소 및 연신율의 증가로 나타났으며, 이러한 변화를 나타내는 열처리 시간이 비선형 파라미터가 피크를 나타내는 열처리 시간과 일치한다. 이로부터 인장시험과 비선형 파라미터 사이에 높은 상관성이 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

알루미늄 합금의 열처리에 따른 초음파 비선형 파라미터의 변화를 조사하기 위해 300℃에서 6종류의 시간(1H, 2H, 5H, 10H, 20H, 50H)으로 열처리한 시편을 제작하여 초음파 실험을 진행하였고 초음파 실험 완료 후 인장시험을 진행하여 초음파 실험과 인장시험과의 상관성을 분석하였다.

알루미늄 합금은 열처리에 따라 석출물과 미세조직의 영향으로 재료의 물성이 변화하는데 이러한 재료의 물성변화가 파괴적인 인장시험을 통해 항복강도의 급격한 증가와 연신율의 급격한 저하로 나타남을 확인하였으며 초음파 실험 결과에서는 비선형 파라미터의 피크로 확인할 수 있었다. 또한 인장곡선과 비선형 파라미터에서 최대 변화가 나타난 열처리 시간이 일치하였다. 이로부터 알루미늄 합금의 물성을 크게 변화시키는 열처리 시간을 평가하는데 비선형 초음파기술이 활용될 수 있음을 확인할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2008-2003505)입니다.

## 참고문헌

- [1] S. H. Baek, T. H. Lee, C. S. Kim and K. Y. Jhang, "Ultrasonic nonlinearity measurement in heat treated SA508 alloy: influences of grains and precipitates," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 5, pp. 451-457 (2010)
- [2] C. S. Kim, S. H. Nahm and C. Y. Hyun, "Evaluation of microscopic degradation of copper and copper alloy by electrical resistivity measurement," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 5, pp. 440-450 (2010)
- [3] M. H. Lee, "Degradation estimation of material by barkhausen noise analysis," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 38-46 (2005)
- [4] J. P. Kim, C. S. Seok, S. J. Song and Y. H. Kim, "A Study on the evaluation of material degradation for 1Cr-1Mo-0.25V steel using linear and nonlinear ultrasonics," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 21, No. 5, pp. 549-555 (2001)
- [5] U. S. Park, I. K. Park and C. S. Kim, "A study on the evaluation of material degradation for 2.25Cr-1Mo steel by ultrasonic measurements," *Transactions of the Korea Society of Machine Tool Engineer*, Vol. 10, No. 3, pp. 61-67 (2001)
- [6] K. Y. Jhang, "Application of nonlinear ultrasonic to the NDE of material degradation," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 47, No. 3, pp. 540-548 (2000)
- [7] G. E. Dace, P. B. Thompson and L. J. H. Brash, "Nonlinear acoustics, a technique to determine microstructural changes in material," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Plenum Press, New York, Vol. 10B, pp 1685-1692 (1991)
- [8] J. K. Na, J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Linear and nonlinear ultrasonic properties of fatigues 410Cb stainless steel," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Plenum Press, Vol. 15, pp. 1347-1351 (1996)
- [9] I. H. Choi, T. H. Lee and K. Y. Jhang, "Evaluation of fatigue degradation using nonlinear ultrasonics," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 29 pp. 1433-1438 (2010)
- [10] W. Li, Y. Cho J. Lee and J. D. Achenbach, "Assessment of heat treated Inconel X-750 alloy by nonlinear ultrasonics," *Experimental Mechanics*, Vol. 52, No. 8, pp. 1-7 (2012)
- [11] K. V. Rajkumar, A. Kumar, T. Jayakumar, B. Raj and K. K. Ray, "Characterization of aging behavior in M250 grade maraging steel using ultrasonic measurement," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38, pp. 236-243 (2012)