

## 인공시효된 Al6061-T6의 초음파 비선형 특성 평가

### Evaluation of Ultrasonic Nonlinear Characteristics in Artificially Aged Al6061-T6

김종범\*, 이경준\*, 장경영\*\*†, 김정석\*\*\*

Jongbeom Kim\*, KyoungJun Lee\*, Kyung-Young Jhang\*\*† and ChungSeok Kim\*\*\*

**초 록** 초음파 비선형 특성은 일반적으로 재료 내부를 전파한 초음파의 기본주파수 및 2차 고조파 성분 크기에 의해 결정되는 비선형 파라미터  $\beta$ 로 측정되며, 재료의 미세한 변질을 평가하는데 효과적인 인자로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 인공시효된 Al6061-T6의 열처리 시간에 따른 초음파 비선형 특성을 평가하였다. 초음파가 시편을 투과하여 수신되는 신호를 분석하여 비선형 파라미터  $\beta$ 를 구하였고, 비선형 파라미터 측정 후 마이크로 비커스 경도를 측정하였다. 비선형 파라미터 측정 결과로부터 열처리 시간에 따른 재료 내 미세 구조적인 변화를 추정하였으며, 경도 측정 결과로부터 이러한 추정이 합당함을 증명하였다. 측정 결과 비선형 파라미터는 석출거동 메커니즘에 의한 재료 미세조직 변화와 매우 밀접한 상관관계를 나타냈다. 이로부터 초음파 비선형 파라미터를 이용하여 인공시효에 의한 재료 내 미세구조 및 상태 변화를 초음파 비선형 파라미터로 평가할 수 있음을 확인하였다.

**주요용어:** 초음파, 비선형 파라미터, 경도, Al6061-T6, 인공시효

**Abstract** Generally, the nonlinearity of ultrasonic waves is measured using a nonlinear parameter  $\beta$ , which is defined as the ratio of the second harmonic's magnitude to the power of the fundamental frequency component after the ultrasonic wave propagates through a material. Nonlinear parameter  $\beta$  is recognized as an effective parameter for evaluating material degradation. In this paper, we evaluated the nonlinear parameter of Al6061-T6 which had been subjected to an artificial aging heat treatment. The measurement was using the transmitted signal obtained from contact-type transducers. After the ultrasonic test, a micro Vickers hardness test was conducted. From the result of the ultrasonic nonlinear parameter, the microstructural changes resulting from the heat treatment were estimated and the hardness test proved that these estimates were reasonable. Experimental results showed a correlation between the ultrasonic nonlinear parameter and microstructural changes produced by precipitation behavior in the material. These results suggest that the evaluation of mechanical properties using ultrasonic nonlinear parameter  $\beta$  can be used to monitor variations in the mechanical hardness of aluminum alloys in response to an artificial aging heat-treatment.

**Keywords:** Ultrasound, Nonlinear Parameter, Hardness, Al6061-T6, Artificial Aging

#### 1. 서 론

재료의 열화를 평가하기 위해 인장시험, 피로 시험 등과 같은 파괴적인 평가 방법이 사용되고 있다. 그러나, 이러한 파괴적인 검사 방법은 작동

중인 검사체의 작동을 중단하여 검사체에서 시편을 채취하고 가공하는 과정이 필요하고, 파괴적인 평가를 진행한 후에는 검사 대상을 재사용하지 못하기 때문에 시간적, 비용적인 측면에서 효율적이지 못하다는 단점이 있다[1]. 이러한 단점

[접수일: 2014. 3. 28, 수정일: 2014. 5. 29, 게재확정일: 2014. 6. 13] \*한양대학교 융합기계공학과, \*\*한양대학교 기계공학부, \*\*\*조선대학교 금속재료공학과 † Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea (E-mail: kyjhang@hanyang.ac.kr)

을 보완하고자 재료의 탄성 성질과 미세구조에 밀접한 관련을 갖는 초음파의 전파 특성을 이용한 초음파 비파괴검사 방법이 제안되었다.

초음파를 이용한 비파괴검사 기술에는 재료를 투과하여 수신되는 초음파의 수신 크기, 속도, 감쇠 비, 산란 등을 이용한 선형 초음파기법이 존재하나[2,3], 선형 초음파 기법은 수  $\mu\text{m}$  크기의 미세 균열이나 단힌 균열, 재료의 미세 열화평가에는 민감도가 낮아 적합 하지 못한 것으로 알려져 있다[5]. 따라서, 재료의 미세열화를 더 효과적으로 평가하기 위한 비선형 초음파기법이 제안되었다[6].

비선형 초음파기법은 초음파가 매질을 전파할 때 전파매질의 비선형적 탄성 특성에 의해 전파되는 초음파의 파형이 왜곡되고 고조파가 발생하는 비선형 탄성 거동을 이용하는 것으로 입사된 기본주파수 및 2차 고조파 성분의 크기로부터 초음파 비선형 파라미터  $\beta$ 를 측정하여 매질의 물성변화를 평가하는 방법이다[7]. 이러한 비선형 파라미터  $\beta$ 는 재료의 격자구조와 밀접한 관련성을 가지므로, 석출물에 의한 격자구조의 붕괴, 전위에 의한 결정격자 내 원자 배열의 붕괴, 전위 쌍극자, 보이드 등의 격자 결함을 분석하는데 활용될 수 있다[8].

초음파 비선형 파라미터의 측정을 통한 재료의 미세손상 진단 기술은 많은 선형 연구자들에 의해 발전해왔다. 재료의 크리프(creep)[9], 피로에 의해 발생하는 전위(dislocation)[10], 고온의 사용 환경 등에 의해 생성되는 석출물 (precipitates)[11] 등이 비선형 파라미터와 밀접한 연관성이 있음을 보여주고 있다. 또한 비선형 파라미터와 경도 측정으로부터 재료 내 미세구조를 파악하는 연구가 진행되었다[12].

본 논문에서는 Al6061 합금의 열처리에 따른 석출물의 생성으로 발생하는 기지와 석출물간의 규칙적인 격자구조의 변형과 같은 재료 내 미세 변화를 초음파의 비선형 파라미터와 마이크로 비커스 경도 측정을 통해 분석하고자 하였다. 이를 위해 Al6061 시편을 540℃에서 용체화 처리 후, 열처리 온도 220℃에서 20 min, 40 min, 60 min, 120 min, 600 min으로 열처리한 5종류의 열처리 시편과 열처리 하지 않은 상온의 Al6061-T6 시편을 준비하였다. 그리고 각 시편에서의 비선형 파라미터를 측정하기 위하여 5 MHz 톤버스트 중

파를 이용하였다. 시편을 투과하여 수신된 신호는 FFT를 이용하여 5 MHz와 10 MHz 성분의 크기를 구하였다. 이로부터 비선형 파라미터 값을 구하였고, 이후 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 경도를 측정하였다. 열처리 시간에 따른 비선형 파라미터 측정 결과로 부터 열처리에 따른 재료 내 미세 구조적인 변화를 추정하였으며, 경도 측정 결과로부터 이러한 추정이 합당함을 증명하였다.

## 2. 음향 비선형 파라미터

비선형 초음파 특성을 평가하기 위해 단일 주파수를 가지는 초음파를 재료에 입사시키고 입사된 초음파는 재료를 투과한 후 수신된다. 이 과정에서 단일 주파수를 가지는 초음파는 재료의 비선형적 탄성 특성에 의해 왜곡되고 2차고조파 성분이 발생된다. 그 결과 수신되는 신호는 기본 주파수 성분뿐만 아니라 2차고조파 성분도 수신되게 된다. 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  $\beta'$ 을 이용할 수 있다[13].

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

## 3. 실험 방법

### 3.1. 시 편

시편은 40 × 200 × 20 mm 사이즈의 Al6061 합금을 사용하였다. 시편은 540℃에서 용체화 처리(solution treatment)를 진행하여 과포화 고용체를 형성한 후, 상온의 물에서 60분간 급냉(water

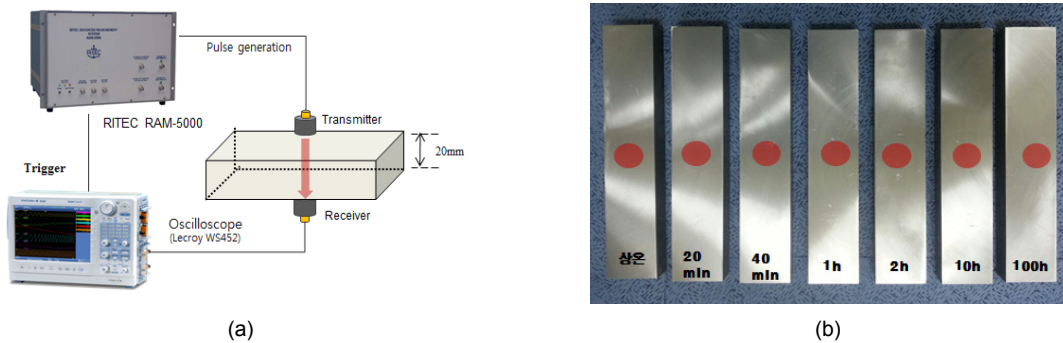


Fig. 1 (a) Measurement point of aluminum alloy specimens, and (b) experimental system to measure the nonlinear parameter by using contact method

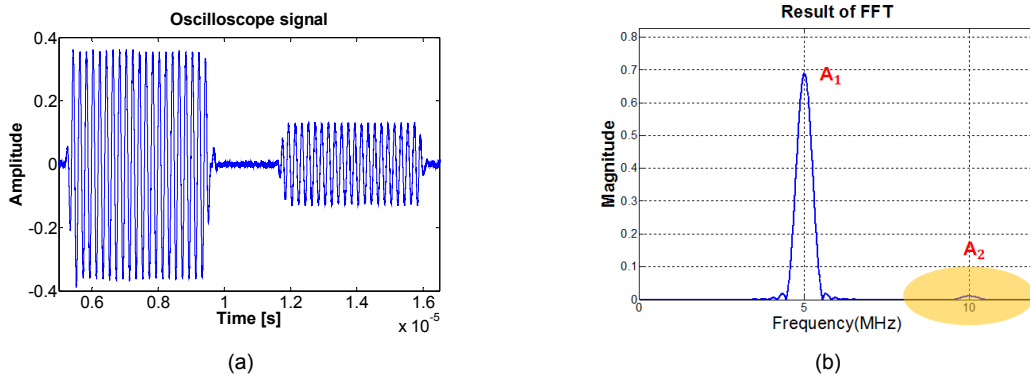


Fig. 2 (a) Received signal by oscilloscope and (b) FFT result of received signal by oscilloscope

quenching)하여 과포화 고용체 상태를 유지시켰다. 이후 220℃의 일정한 온도에서 20 min, 40 min, 60 min, 120 min, 600 min 5종류의 시효 경화 열처리를 진행하였으며, 열처리하지 않은 초기 시편과 열처리한 5종류의 시효 경화 열처리 시편으로부터 Al6061 합금의 시효 열처리에 따른 미세 석출물의 생성에 의한 재료의 변화를 초음파 비선형 파라미터와 마이크로 비커스 경도로부터 분석하였다.

### 3.2. 접촉식 비선형 파라미터 측정

초음파 비선형 특성을 접촉식 초음파 기법을 이용하여 평가하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 접촉식 탐촉자를 이용하여 실험 장치를 구성하였으며, Fig. 1(b)에 표시된 시편의 중앙부에서 시편 당 5 회씩 측정하였다. 주파수 분석을 통해 효과적으로 고조파 성분을 분리 측정하기 위해서 21사이

클의 사인파형 톤 버스트(tone burst) 형태의 협대역 신호를 고전압 펄서(RAM 5000, RITEC, USA)를 사용하여 송신 하였고, 송신 탐촉자는 중심주파수가 5 MHz인 협대역 탐촉자를 사용하였다. 송신된 초음파 신호는 시편을 투과하여 수신되고 수신되는 초음파 신호의 2차고조파 성분을 민감하게 수신하기 위해 수신 탐촉자는 10 MHz의 중심주파수를 가지는 협대역 탐촉자를 사용하였다. 이때 송수신되는 접촉식 탐촉자의 접촉상태를 일정하게 유지하기 위하여 공압기를 사용하여 접촉압력을 0.65 MPa로 일정하게 유지하였다. 수신된 신호는 디지털 오실로스코프(Lecroy WS452)에서 A/D 변환하였고 컴퓨터에서 주파수 분석(FFT)을 통해 신호처리 하였다.

Fig. 2(a)는 열처리하지 않은 초기 시편의 수신 신호이다. 신호 분석을 위해 수신신호의 안정한 구간에 해당하는 15cycle의 신호를 획득하여海宁윈도우(Hanning window) 적용 후 FFT 처리하

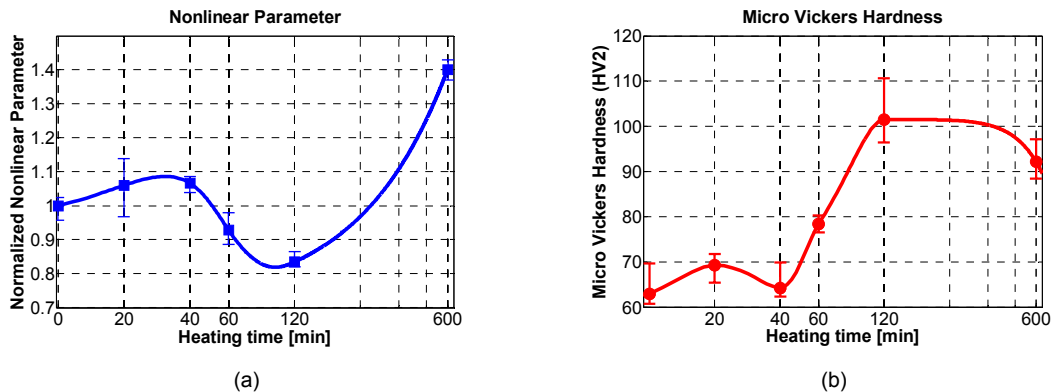


Fig. 3 Experimental results: (a) ultrasonic nonlinear parameter and (b) micro Vickers hardness

였다. FFT 결과로부터 Fig. 2(b)와 같이 기본주파수 성분과 2차고조파 성분의 크기를 구하였고, 이로부터 상대 비선형 파라미터  $\beta$ 를 구하였다.

### 3.3. 경도 측정

시편에 대해 초음파 비선형 파라미터를 측정 한 후 초음파 비선형 파라미터를 측정 한 시편의 중앙부(Fig. 1(a)에 표시)에서 마이크로 비커스 경도계(micro Vickers hardness tester)를 이용하여 미세 경도를 시편당 10회씩 측정하였다. 마이크로 비커스 경도(micro Vickers hardness)는 2 kg의 하중으로 10초간 하중을 유지하여 측정하였다.

### 4. 실험 결과

Fig. 3(a)는 열처리 시간에 따른 비선형 파라미터 측정 결과이다. 측정 결과는 상온 시편에서 얻은 비선형 파라미터 값을 기준으로 정규화(normalizing)하였으며, 측정 편차는 2.92%이었다. Fig. 3(b)는 열처리 시간에 따른 마이크로 비커스 경도 측정 결과이며, 측정 편차가 3.90%로 측정되었다.

열처리에 따른 비선형 파라미터와 경도의 변화는 다음과 같은 미세구조의 변화 때문으로 사료된다. 즉, 열처리가 시작되면 GP zone(Guiner - Preston zone) 석출상( $Mg_2Si$ )이 초기에 생성되는데 이러한 정합(coherence) 석출상의 생성은 알루미늄 기지와 석출물 간의 규칙적인 격자 구조의 변형을 일으키고 이러한 격자 구조의 변형이

시편 내 전파되는 초음파를 왜곡시켜 비선형 파라미터를 증가시킨다. 따라서 열처리 시간의 증가에 따라 비선형 파라미터는 증가하고 열처리 시간 40분에서 비선형 파라미터의 피크가 발생하게 된다.

이후 열처리가 지속되면, 정합관계를 나타내면서 알루미늄 기지와 석출물 간의 격자의 뒤틀림에 의한 격자 변형을 일으키던 GP zone (Guiner - Preston zone) 석출상은 안정한 석출물로 상 변태하고 격자와 부정합의 관계를 나타내게 된다. 따라서 전파되는 초음파를 효과적으로 왜곡시키지 못하게 되고 결과적으로 비선형 파라미터는 열처리 시간 120분까지 감소하게 된다. 한편 석출물의 성장은 재료 내 전위의 발생을 지연시키고 결과적으로 재료의 경도(hardness)는 열처리 시간 40분부터 120분까지 증가한다[14].

이후, 열처리가 더 지속되면서 석출물의 수는 감소하고 크기만 성장하게 된다. 조대화된 석출물은 전위(dislocation)의 증가와 이동에 기여하게 되면서 다시 비선형성을 증가시킨다 [8,13]. 이러한 전위 농도의 증가는 재료의 강도 저하의 원인이 되고 열처리 시간 120분 이후에 재료의 경도 저하가 나타난다. 비선형 파라미터의 변화가 나타나는 열처리 시간 40분과 120분에서 경도가 급변하였고 이러한 결과로부터 비선형 파라미터로 추정 한 재료 내 미세구조의 변화를 경도 측정 결과로부터 합당함을 증명할 수 있다.

열처리가 진행되면서 석출물의 생성과 소멸에 따라 알루미늄 합금의 격자 구조 붕괴로 비선형 파라미터는 증감을 반복하게 된다. 이러한 비선

형 파라미터의 증감 때문에 비선형 파라미터와 재료의 미세구조 사이에 1:1 매칭을 통한 재료의 미세구조 분석 및 상태 진단에는 어려움이 있다. 따라서 비선형 파라미터를 이용한 미세 구조 분석 및 상태 진단을 위한 추가적인 연구가 요구된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 A6061-T6의 인공시효 열처리에 따른 초음파 비선형 파라미터의 특성 변화를 분석하기 위해 열처리 온도 220°C에서 20 min, 40 min, 60 min, 120 min, 600 min으로 열처리한 5종류의 열처리 시편과 열처리 하지 않은 상온의 시편을 제작하여 실험을 진행하였고, 초음파 실험 후 경도를 측정하여 초음파 비선형 파라미터 측정 결과로부터 열처리에 따른 재료 내 미세 구조적인 변화를 추정하였으며, 경도 측정 결과로부터 이러한 추정이 합당함을 증명하였다.

그 결과 초음파 비선형 파라미터는 재료 경도의 단순한 증감이 아닌, 석출 거동 메커니즘에 의한 재료 미세조직의 변화에 매우 민감한 결과를 보였다. 이와 같은 결과로 볼 때, 초음파 비선형 파라미터가 재료의 미세구조 분석 및 상태 진단에 매우 유용할 것으로 기대되며, A6061-T6의 열처리에 따른 미세 구조적 변화 평가를 위한 파괴적 재료 분석 방법을 대체할 수 있는 방법으로서의 발전 가능성을 확인할 수 있다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] H. I. Kim, C. S. Seok and J. P. Kim, "A study on the nondestructive evaluation of material properties," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 130-136 (2005)
- [2] M. Kikuchi, M. Takahashi and O. Okuno, "Elastic moduli of cast Ti-Au, Ti-Ag, and Ti-Cu alloys," *Dental Materials*, Vol. 22, pp. 641-646 (2006)
- [3] A. B. Boudaa, S. Lebailib and A. Benchaala, "Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation," *NDT&E International*, Vol. 36, pp. 1-5 (2003)
- [4] 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)
- [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] 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)
- [8] C. S. Kim and I. K. Park, "Ultrasonic non-linearity parameter due to precipitate and dislocation," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp. 131-138 (2008)
- [9] C. S. Kim, K. Y. Jhang and C. Y. Hyun, "Creep characterization of superalloy IN-738 using ultrasonic nonlinearity measurement," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 25, No. 10, pp. 1385-1392 (2010)
- [10] J. Y. Kim, L. Jacobs, J. Qu and J. Littles, "Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base super alloy using non linear ultrasonic waves," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 120, No. 3, pp. 1266-1273 (2006)
- [11] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Determina-

- tion of precipitate nucleation and growth rates from ultrasonic harmonic generation," *Applied Physics Letters*, Vol. 77, No. 13, pp. 1952-1954 (2000)
- [12] D. C. Hurley, P. T. Purtscher, D. Balzar, K. W. Hollman, and C. M. Fortunko, "Nonlinear ultrasonic properties of as-quenched steels," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 17 (1998)
- [13] 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)
- [14] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Effect of precipitate coherency strains on acoustic harmonic generation" *Journal of Applied Physics*, Vol. 81, No. 7, pp. 2957-2962 (1997)