Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 38, No. 10, pp. 1133~1137, 2014

<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.10.1133 ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

비접촉식 초음파 수신기를 이용한 초음파 비선형성 측정§

김 종 범 *· 장 경 영 **†
* 한양대학교 융합기계공학과, ** 한양대학교 기계공학부

Measurement of Ultrasonic Nonlinear Parameter by Using Non-Contact Ultrasonic Receiver

Jongbeom Kim * and Kyoung-Young Jhang **†
* Dept. of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang Univ.
** School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received February 25, 2014 ; Revised July 24, 2014 ; Accepted August 1, 2014)

Key Words: Ultrasound(초음파), Nonlinear Parameter(비선형 파라미터), Non-Contact(비접촉), Aluminum Alloy (알루미늄 합금), Aging(고온열화)

초록: 초음파 비선형 파라미터 β 는 재료의 미세한 변질을 평가하는데 효과적인 인자로 알려져있다. 그런데 지금까지 대부분의 연구는 접촉식 방법을 이용하여 측정하는 연구가 수행되어왔다. 그러나, 접촉식 방법은 탐촉자와 시편사이의 접촉상태가 측정결과에 큰 영향을 미치기 때문에 측정의 재현성을 보장하기 위해 탐촉자의 접촉상태를 일정하게 유지시키기 위한 부수적인 장치가 필요하다. 이러한 불편함을 해소할 목적으로 본 연구에서는 비접촉식 기법을 도입하였다. 다만 초음파의 송신은 접촉식으로 하고 수신만 비접촉식을 적용함으로써 동일한 조건에서 접촉식으로 수신한 경우와 비접촉식으로 수신한 경우를 비교하고자 하였다. 시편은 시효 처리된 알루미늄 합금을 사용하였고, 두 방식의 측정결과 비선형 파라미터 β 의 변화는 유사하게 나타났다. 이로부터 초음파 비선형 특성의 변화를 비접촉식 수신방법으로 용이하게 평가할 수 있음을 확인하였다.

Abstract: The ultrasonic nonlinear parameter β is generally known as an effective parameter for evaluating material degradation. Thus far, most research has been conducted using a contact method. However, since measurement by this contact method is affected by the contact conditions between the transducer and the specimen, additional devices are required to maintain the contact conditions stable during the measurement. To avoid this inconvenience, this paper proposes a noncontact method. In this study, only the receiver was replaced with a noncontact receiver, and then, the ultrasonic nonlinear parameters measured by the newly developed noncontact receiver were compared with those measured by the contact receiver. Results obtained using both these receivers for heat-treated aluminum alloy specimens showed good agreement. From this result, we can confirm that the ultrasonic nonlinear parameter β can be measured using the proposed noncontact ultrasonic method.

1. 서 론

재료의 물성평가 방법으로는 인장시험, 피로시험 등이 있으나, 이러한 파괴적인 평가 방법은 검사대상에서 시편을 채취하고 가공하는 과정이 필요하므로 시간적, 비용적인 측면에서 효율적이지 못하다는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하고자 재료의 탄성성질과 미세구조에 밀접한 관련을 갖는 초음파의 전파 특성을 이용한 초음파 비파괴 검사방법이 제안되었다.(1)

초음파 비파괴 검사방법 중 비선형 초음파 기법은 비선형 탄성 거동을 보이는 매질에 단일 주파수를 갖는 초음파가 전파될 때, 입사된 단

§ 이 논문은 2014 년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2014. 2. 26.-28., 제주대) 발표논문임
† Corresponding Author, kyjhang@hanyang.ac.kr
Ⓒ 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

일 주파수 성분 외에 2차 고조파 성분이 발생하는 현상을 이용한 방법으로, 기본주파수 및 2차 고조파 성분의 크기로부터 초음파 비선형 파라미터 β를 측정한다.[2]

비선형 파라미터 β는 재료의 미세한 변화를 평가하는데 효과적인 인자로 알려져 있다. 초음파 비선형 파라미터의 측정을 통한 재료의 미세 손상 진단 기술은 많은 선행 연구자들에 의해 발전해왔으며, 재료의 크리프(creep),[3] 피로에 의해 발생되는 전위(dislocation),[4] 고온의 사용 환경 등에 의해 생성되는 석출물(precipitates)[5] 등과 밀접한 연관성을 보여주고 있다.

하지만 지금까지의 연구들은 대부분 접촉식 탐촉자를 이용한 전통적인 방법으로 연구가 진행되었다. 그런데 이러한 접촉식 측정 방법은 탐촉자와 시편과의 접촉상태가 측정결과에 큰 영향을 미치는 문제가 있어서 측정의 재현성을 보장하기 위해서는 탐촉자의 접촉상태를 일관되게 유지시키기 위한 부가적인 장치를 필요로 하는 불편함이 있다.

이에 본 연구에서는 초음파 비선형성 측정에 비접촉식 기법을 도입하였다. 다만 초음파의 송신은 접촉식으로 하고 수신만 비접촉식을 적용함으로써 동일한 조건에서 접촉식으로 수신한 경우와 비접촉식으로 수신한 경우를 비교하였다. 이로써 탐촉자와 시편과의 접촉상태에 영향을 덜 받는 비접촉식 초음파 비선형 파라미터 측정의 가능성을 확인해보고자 하였다.

이를 위해 열처리하지 않은 상온 시편과 온도 300 ℃에서 1 시간부터 100시간까지 7가지의 열처리 시간(lh, 2h, 5h, 10h, 20h, 50h, 100h)으로 열처리한 7종류의 열처리 시편을 준비하여 총 8종류의 시편으로 실험을 진행하였다. 시편을 투과한 신호는 접촉식 탐촉자와 비접촉식 초음파 수신기를 이용하여 각각 수신하였다. 접촉식 수신에는 압전 트랜스듀서를 사용하였고, 비접촉식 수신에는 레이저를 이용한 TWM(Two-Wave Mixing) 장치를 사용하였다. 수신한 신호는 주파수 분석하여, 5 MHz와 10 MHz 성분의 크기를 구하였고 이로부터 비선형 파라미터 값을 구하여, 접촉식 수신 결과와 비접촉식 수신결과를 비교하였다.

2. 배경 이론

2.1 음향 비선형 파라미터

초음파의 비선형 특성을 평가하기 위해 단일주파수를 가지는 초음파를 재료에 입사시키고 입사된 초음파는 재료를 투과한 후 수신된다. 이 과정에서 단일 주파수를 가지는 초음파는 재료의 비선형적 탄성특성에 의해 왜곡되고 2차고조파 성분이 발생하게 된다. 그 결과 수신되는 신호는 기본주파수 성분뿐만 아니라 2차고조파 성분도 수신되고[6] 이러한 2차고조파 성분은 재료의 미세 구조적인 변화와 상관성을 갖는다. 재료의 미세 구조적인 특성에 의한 고조파 성분의 발생을 측정하기 위해 초음파 비선형 파라미터 β의 값을 구하는데, 이 비선형 파라미터 β는 다음과 같이 정의 된다.

$$\beta = \frac{8A_2}{{A_1}^2 k^2 x} \tag{1}$$

위 수식 식 (1)에서 A_1 은 기본주파수 성분의 크기이며 A_2 는 2차고조파 성분의 크기, k는 파수이고 x는 전파거리다. 실험에서 파수 k와 전파거리 x는 일정하며 따라서 식 (2)와 같은 상대적인 비선형 파라미터 β′을 이용할 수 있다.[7]

$$\beta \propto \beta' = \frac{A_2}{{A_1}^2} \tag{2}$$

2.2 비접촉식 초음파 수신 방법

재료를 투과한 초음파 신호를 비접촉으로 수신하기 위해 레이저를 이용하는 TWM(Two-Wave Mixing) 장치를 사용하였다. Fig. 1은 TWM 방식의 비접촉식 초음파 신호 수신원리를 나타낸다. 레이저 소스가 빔 스플리터를 거쳐 펌프빔(Pump beam)과 산란빔(Scattered beam)으로 나뉜 후, 펌프빔은 광굴절 크리스탈로 입사되고 산란빔은 시편에 반사되어 광굴절 크리스털로 입사되는데, 이때 두 빔의 위상차가 광굴절 크

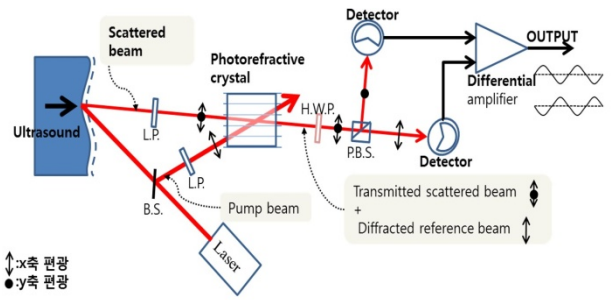


Fig. 1 Principle of detection by two-wave mixing using photorefractive crystal

리스탈에서 홀로그래픽 효과에 의해 기억되고 변위측정의 기준이 된다.

재료에서 초음파가 발생하면 초음파의 변위에 따라 재료에서 반사된 산란빔의 위상이 변하게 되고, 광굴절 크리스털에 기억된 위상과의 차이가 간섭효과로 측정된다.[8,9]

이러한 레이저 TWM 방식의 비접촉식 초음파 수신 장치는 수 MHz의 고주파수 초음파 신호를 수신할 수 있으며 접촉식 측정에서 발생하는 탐촉자와 접촉매질에 의한 비선형성이 발생하지 않아 재료만의 비선형성의 변화를 두드러지게 관찰할 수 있는 장점이 있다.

3. 실험 방법

3.1 시 편

시편은 Al-Mg-Mn-Si로 구성된 150 X 150 X 15 mm 크기의 알루미늄 합금을 사용하였고, 열처리하지 않은 상온 시편과 온도 300 ℃ 에서 1 시간부터 100시간까지 7가지의 열처리 시간(1 hour, 2 hour, 5 hour, 10 hour, 20 hour, 50 hour, 100 hour)으로 열처리한 7종류의 열처리 시편을 준비하여 총 8종류의 시편으로 실험을 진행하였다. 열처리는 300 ℃에서 7종류의 다양한 시효시간((1 hour, 2 hour, 5 hour, 10 hour, 20 hour, 50 hour, 100 hour)으로 전기로에서 시효 열처리 진행 후 공랭하였다.

3.2 접촉식 비선형 파라미터 측정

초음파 비선형 특성을 접촉식 초음파 기법을 이용하여 평가하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 접촉식 탐촉자를 이용하여 실험장치를 구성하였다. 주파수 분석을 통해 효과적으로 고조파 성분을 분리 측정하기 위해서 21사이클의 사인파형 톤 버스트(tone burst)형태의 협대역 신호를 고전압펄서(RAM 5000, RITEC, USA)를 사용하여 송신하였고, 송신 탐촉자는 중심주파수가 5 MHz인 0.375 in 협대역 PZT 탐촉자를 사용하였다. 송신된 초음파 신호는 시편을 투과하여 수신되고 수신되는 초음파 신호의 2차고조파 성분을 민감하게 수신하기 위해 수신 탐촉자는 10MHz의 중심주파수를 가지는 0.375 in 협대역 PZT 탐촉자를 사용하였다. 수신된 신호는 디지털 오실로스코프(Lecroy WS452)에서 A/D 변환하였고 컴퓨터에서 주파수분석(FFT)을 통해 신호처리 하였다.

3.3 비접촉식 수신 비선형 파라미터 측정

초음파 비선형 특성을 비접촉식으로 수신하여 비선형 파라미터 측정을 위해 Fig. 2(b)과 같이 접 촉식 탐촉자를 이용하여 초음파 신호를 송신하고 TWM을 이용하여 비접촉식으로 초음파 수신하는 실험장치를 구성하였다. 송신신호는 접촉식 측정과 동일하게 고전압펄서(RAM 5000, RITEC,USA)를 사용하여 21사이클의 톤 버스트 형태의 협대역 신호를 중심주파수가 5 MHz인 협대역 탐촉자를 이용하여 송신하였다. 발생된 초음파를 비접촉으로 수신하기 위하여 TWM 수신기(TECNAR, TWM)를 사용하였다. 수신된 신호는 접촉식 측정과 동일하게 디지털 오실로스코프(Lecroy, WS452)에서 A/D 변환하여 컴퓨터에서 주파수분석(FFT)을 통해 신호처리 하였다.

3.4 신호 처리

Fig. 3(a)는 접촉식 및 비접촉식 측정방법을 통해 얻은 1 시간 열처리된 시편의 수신신호이다. 비접촉식 수신신호의 크기가 접촉식 수신신호의 크기에 비해 낮은 것은 비접촉식 초음파 수신기

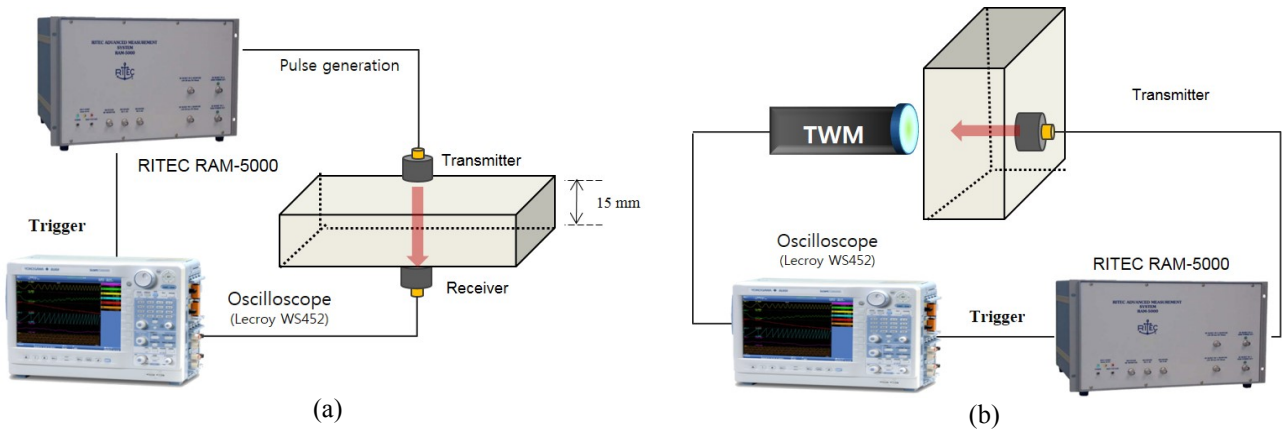
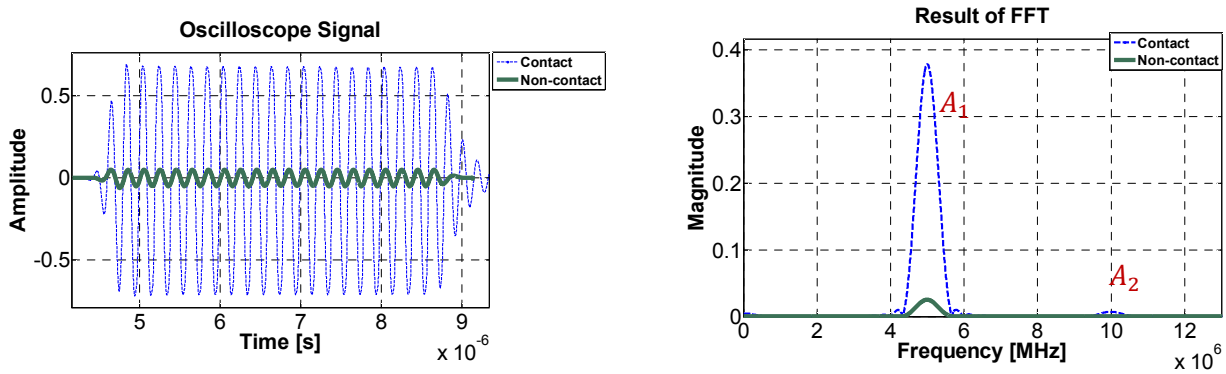


Fig. 2 Experimental system to measure the nonlinear parameter. (a) by using contact method, and (b) by using non-contact receiving method



(a) (b)

Fig. 3 (a) Example of the received signal in time domain of 1hour heat treatment specimen measured by contact receiver and non-contact receiver, (b) FFT result after that 15 cycles of the received signal applied to the hanning window measured by contact receiver and non-contact receiver

의 감도가 접촉식 탐촉자의 감도에 비해 낮기 때문이다. 그러나 접촉식 수신신호는 초음파의 음향파워에 비례하는 신호이고, 비접촉식 수신신호는 초음파의 변위에 비례하는 신호로 감도의 직접적인 비교는 무의미하다. 한편, 신호분석을 위해 수신신호의 안정한 구간에 해당하는 15cycle의 신호를 획득하여 해닝윈도우(Hanning window)적용 후 FFT처리 하였다. 그 결과 Fig. 3(b)와 같이 기본주파수성분과 2차고조파 성분의 크기를 구하였고, 이를 식 (2)를 이용하여 상대 비선형 파라미터 β′을 구하였다.

모든 열처리 시편에 대하여 이와 같은 방법으로 비선형 파라미터를 구하였으며, 안정된 비선형 파라미터 값을 획득하기 위해 고전압펄서(RAM 5000)로부터 시편에 송신되는 전압과 오실로스코프(Lecroy WS452)에 수신되는 전압의 크기는 일정하도록 하였다.

4. 실험 결과

Fig. 4는 열처리 시간에 따른 접촉식 비선형 파라미터 측정결과와 비접촉식 수신으로 측정한 비선형 파라미터 결과이다. Fig. 4 비선형 파라미터 측정 결과는 상온 시편에서 얻은 비선형 파라미터 값을 기준으로 정규화(Normalizing)하였다. 비접촉식에서 이용하는 TWM은 광학 장치의 특성상 접촉식 탐촉자를 이용한 측정에 비해서 주변의 영향이나 측정 재료의 표면 거칠기에 영향을 받으며 측정 안정성(stability)이 낮아 접촉식 측정결과보다 편차가 높게 측정됐다.

비선형 파라미터 측정 결과 초기 열화가 시작되면서 1시간 열처리에서 비선형 파라미터가 감소하였다. 이후 열처리 시간의 증가에 따라 석

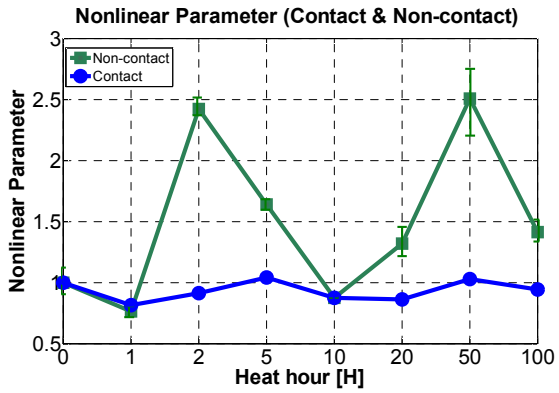


Fig. 4 Relationship between the normalized nonlinear parameter and heat-treatment time measured by contact receiver and non-contact receiver

출물이 생성되는데 이러한 석출물의 생성이 알루미늄기지와 석출물간의 격자변형을 일으키고 이러한 격자의 변형이 초음파의 전파를 왜곡시켜 비선형 파라미터를 증가시킨다. 따라서 열처리 시간의 증가에 따라 비선형 파라미터 증가하고 2~5시간 열처리에서 비선형 피크가 발생하게 된다. 이후 열처리가 지속되면서, 정합관계를 나타내면서 알루미늄기지와 석출물간의 격자의 뒤틀림에 의한 격자변형을 야기시키던 석출물들은 안정한 석출물로 상변태하고 격자와 부정합의 관계를 나타내게 된다. 따라서 전파되는 초음파를 효과적으로 왜곡시키지 못하게되고 결과적으로 비선형파라미터는 감소하게 된다. 이후, 열처리가 더 지속되면서 석출물의 수는 감소하고 크기만 성장하게 된다. 조대화 된 석출물은 전위의 증가와 이동에 기여를 하게 되면서 다시 비선형성을 증가시켜 50시간 열처리에서 다시 2번째 피크가 발생한다.[10,11]

그런데 접촉식 비선형 파라미터 측정결과는

상온시편의 비선형 파라미터 값을 기준으로 첫 번째 피크인 5시간 열처리에서 4.0 %, 두 번째 피크인 50시간 열처리에서는 2.6 %의 비선형 파라미터 값의 증가를 보인 반면, 비접촉식 수신 비선형 파라미터 측정결과는 상온시편의 비선형 파라미터 값을 기준으로 첫 번째 피크인 2시간 열처리에서 240 %, 두 번째 피크인 50시간 열처리에서는 250 %의 비선형 파라미터 값의 증가를 보였다. 이는 접촉식 측정에 비해 비접촉식 측정이 재료의 비선형 특성 변화에 훨씬 민감하다는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 열처리된 알루미늄 합금의 초음파 비선형 파라미터의 측정에 비접촉식 기법을 도입하였다. 그리고 동일한 조건의 초음파를 송신하였을때 접촉식으로 수신한 경우와 비접촉식으로 수신한 경우를 비교하였다.

TWM을 이용한 비접촉식 측정결과가 접촉식 측정결과보다 수신신호의 크기가 작고, 측정 편차가 더 크게 나타났다. 그러나 알루미늄 합금의 열처리에 따른 비선형 파라미터 β의 변화는 접촉식 측정결과와 유사하게 나타났으며, 그 변화의 폭은 비접촉식 수신의 경우에 통해 훨씬 크게 나타났다.

이로부터 초음파 비선형성 측정에 있어서 비접촉식 수신기법의 유효성을 확인할 수 있으며, 이 방법은 탐촉자의 접촉상태를 안정하게 유지하기 위해 부수적인 장치를 필요로 하는 접촉식 기법의 불편함을 해소할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

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

참고문헌
(References)

(1) Kim, H. I., Seok, C. S. and Kim, J. P., 2005, “A Study on the Nondestructive Evaluation of Material Properties,” *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 130~136

(2) Jhang, K. Y., 2009, “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

(3) Kim, C. S., Jhang, K. Y. and Hyun, C. Y., 2010, “Creep Characterization of Superalloy IN-738 Using Ultrasonic Nonlinearity Measurement,” *International Journal of Modern Physics B,* Vol. 25, No. 10, pp. 1385~1392,

(4) Kim, J. Y., 1, Jacobs, L. J., Qu, J. and Littles, J. W., 2006, “Experimental Characterization of Fatigue Damage in a Nickel-Base Superalloy Using Nonlinear Ultrasonic Waves,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 120, No. 3, pp.1266~1273

(5) Cantrell, J. H. and Yost, W. T., 2000, “Determination of Precipitate Nucleation and Growth Rates from Ultrasonic Harmonic Generation," *Applied Physics Letters*, Vol. 77, No. 13, pp. 1952~1954,

(6) Li, W., Cho, Y., Lee, J. and Achenbach, J. D., 2013, "Assessment of Heat treated Inconel X-750 alloy by nonlinear ultrasonics," *Experimental Mechanics*, Vol. 53, No. 5, pp. 775~781

(7) Choi, I. H., Lee, T. H. and Jhang, K. Y., 2010, "Evaluation of fatigue degradation using nonlinear ultrasonics," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vo1. 29, pp. 1433~1438

(8) Monchanlin, J. -P., 2004, “Non contact generation and detection of ultrasound with laser,” *WCNDT proceedings*.

(9) Lee, H., Chung. C., Kim, C. S. and Jhang, K. Y., 2012, “Fully Non-Contact Assessment of Acoustic Nonlinearity According to Plastic Deformation in Al6061 Alloy,” *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 4, pp. 388~392,

(10) Cantrell, J. H. and Yost. W. T., 1997, "Effect of precipitate coherency strains on acoustic harmonic generation", *Journal of Applied Physics*, Vol. 81, No. 7, pp. 2957~2962,

(11) Kim, C. S. and Park, I. K., 2008, “Ultrasonic Nonlinearity Parameter Due to Precipitate and Dislocation,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp.131~138.