

Fused Silica와 Al2024-T4의 비선형 파라미터 측정

Measurement of Ultrasonic Nonlinearity Parameter of Fused Silica and Al2024-T4

강토*, 이택규*, 송성진*[†], 김학준*

To Kang*, Taekgyu Lee*, Sung-Jin Song*[†] and Hak-Joon Kim*

초 록 금속 재료의 비선형 파라미터는 고유한 물성치로서 기본주파수의 음압의 크기(A_1)과 2차고조파의 음압의 크기(A_2)을 측정하면 산정할 수 있다. 하지만, 실험적으로 A_1 과 A_2 를 측정하는 것은 매우 복잡한 변환 과정이 필요하기 때문에 현재 많은 연구자들이 비선형 파라미터의 절대값을 측정하지 않고, 전압 변화를 관찰하는 비선형 파라미터의 상대값을 측정하고 있다. 하지만, 비선형 파라미터 상대값으로는 재료의 물성치를 대변할 수가 없기 때문에, 열화도에 따른 시편 측정에만 사용할 수 있는 제약이 있다. 따라서 본 연구에서는 정전용량 측정기법(capacitive detector)보다는 비용이 적게 소모되고 현장 적용이 가능한 압전형 수신기법(piezoelectric detection)을 이용하여 비선형 파라미터의 절대값을 측정하기 위한 시스템을 구축하였다. A_1^2 vs A_2 그래프로 시스템의 선형성을 검증하고 시험편인 fused silica와 Al2024-T4에 대한 비선형 파라미터를 측정하였다.

주요용어: 비선형 파라미터, 압전형 수신, 정전용량 측정기법

Abstract Nonlinearity parameter is an inherent property of materials measuring fundamental acoustic amplitude(A_1) and second harmonic amplitude(A_2). However, measurement of A_1 and A_2 has complex calibration procedure, many researchers prefer to measure relative nonlinearity parameter rather than absolute nonlinearity parameter. But, relative nonlinearity parameter is only detect materials degradation with various degradation sampels, it is limited application in determining third order elastic constants of materials. Therefore, in this study, the piezoelectric detection method is adopted to measure absolute nonlinearity parameter due to experimetal simplicity compare to capacitive detector. Linearity of measurement system is verified by A_1^2 vs A_2 plot, and we measured ultrasonic nonlinearity parameters of fused silica and Al2024-T4.

Keywords: Nonlinearity Parameter, Piezoelectric Detection, Capacitive Detector

1. 서 론

비선형 초음파 기법은 1963년 Breazeale과 Thompson [1]이 유한진폭파가 알루미늄에서 선형 혹은 법칙을 따르지 않고, 전파함에 따라 왜곡되는 현상의 발견을 시작으로 연구가 시작되었다. 그 후, Breazeale과 Ford [2]는 비선형초음파를 이용하여 어닐링된 구리가 신체의 구리보다 2차 고조파성분이 증가함을 실험적으로 증명하였다. 비

선형초음파 이론값인 비선형 파라미터는 식(1)로 나타낸다.

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

식(1)에서 k 는 파수, a 는 샘플 길이, A_1 은 기본주파수의 변위, A_2 는 2차 고조파의 변위로 실제 β 단위의 측정값이다. 비선형 파라미터를 측

정할 때, 가장 중요한 측정치는 A_1 와 A_2 이며 \AA 단위의 변위이다. 이 A_1 와 A_2 를 측정하기 위해서, Breazeale과 Gauster [3]는 정전용량 측정기법을 이용하여 음파 변위를 측정하는 Fig. 1과 같은 장비를 개발하였다. 이 방법은 10^{-4}\AA 의 정밀도를 갖는 장비로서, 현재까지도 음파의 변위를 측정하는 기법의 표준으로 사용되고 있다.

음파의 변위를 측정하는 두 번째 방법으로 1992년 Dace [4] 등은 Fig. 2와 같은 압전형 수신기법을 제안하였는데, 전기에너지를 기계에너지로 환산하여 음파의 변위를 계산하는 기법을 개발하였다. $P_{A,inc}(\omega_1)$ 가 재료내부를 전파하면 재료

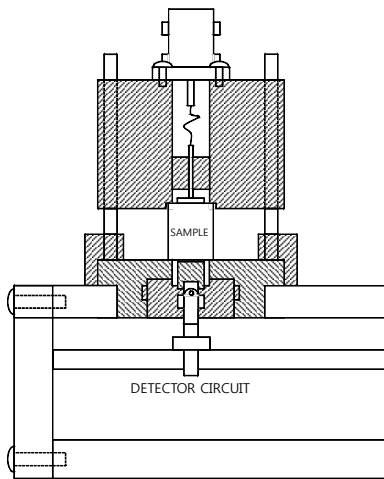


Fig. 1 Schematic diagram of capacitive detection

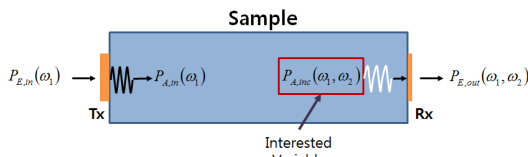


Fig. 2 Schematic diagram of piezoelectric detection

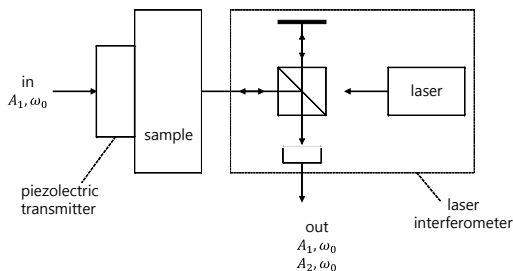


Fig. 3 Schematic diagram of nonlinear ultrasonic experiment using laser interferometry

의 비선형성으로 인하여 $P_{A,inc}(\omega_1, \omega_2)$ 에 2차고조파 성분을 포함하게 되고 $P_{A,inc}(\omega_1, \omega_2)$ 를 측정하면 음파의 변위를 산정할 수 있다.

압전형 수신기법은 capacitor를 사용하지 않기 때문에 샘플을 준비할 때, 1~2 um로 표면을 연마하지 않더라도 단선이 일어나지 않으며, LiNBO₃만으로 측정할 수 있는 장점이 있다.

음파의 변위를 측정하는 세 번째 방법으로 레이저 간섭계를 이용한 방법이 Hurely와 Fortunko [5]에 의해 Fig. 3과 같이 제안되었다.

레이저를 이용하기 때문에, 비접촉식인 장점과 표면의 준비를 정전용량 측정기법만큼 정밀하게 준비하지 않아도 되는 이점이 있다.

정확성 측면에서는 정전용량 측정기법이나 레이저 간섭계를 이용하는 것이 좋지만, 현장 적용성, 경제성과 실험용이성을 고려하면 압전형 수신기법이 우수하다.

본 논문에서는 현장 적용성, 경제성, 실험용이성이 우수한 압전형 수신기법을 이용하여 대비시험편인 fused silica와 Al2024-T4의 비선형 파라미터를 측정하였다.

2. 비선형초음파 이론

1973년 Green [6]은 운동방정식 (equation of motion)을 선형과 비선형항의 합으로 식(2)와 같이 나타내었다.

$$\rho_0 \ddot{u} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial a^2} + \delta \frac{\partial u}{\partial a} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial a^2} \right) \quad (2)$$

식(2)에서 α 와 δ 는 각각 탄성계수를 나타내며, \ddot{u} 은 u 의 시간에 대한 2차미분항이고, a 는 시스템의 좌표계를 나타낸다. 식(2)를 풀기 위하여 섭동법을 적용하여 변위 u 를 식(3)으로 가정한다.

$$u = u^0 + u' \quad (3)$$

식(3)은 $u' \ll u^0$ 조건을 만족하며, u^0 은 $\delta=0$ 인 경우에 선형해, u' 을 비선형해로 식(4)과 같이 정할 수 있다.

$$\begin{aligned} u^0 &= A \sin(ka - \omega t) \\ u' &= B \sin[2(ka - \omega t)] + C \cos[2(ka - \omega t)] \end{aligned} \quad (4)$$

식(3)을 식(2)에 대입하면 식(5)을 얻을 수 있다.

$$\rho_0 \ddot{u}^0 + \rho_0 \ddot{u}' - \alpha \frac{\partial^2 u^0}{\partial a^2} - \alpha \frac{\partial^2 u'}{\partial a^2} = \delta \frac{\partial(u^0 + u')}{\partial a} \frac{\partial^2(u^0 + u')}{\partial a^2} \quad (5)$$

선형 운동방정식에서 $\rho_0 \ddot{u}^0 - \alpha \frac{\partial^2 u^0}{\partial a^2} = 0$ 이 되므로, 식(5)은 식(6)로 나타낼 수 있다.

$$\rho_0 \ddot{u}' - \alpha \frac{\partial^2 u'}{\partial a^2} = \delta \left[\frac{\partial u^0}{\partial a} \frac{\partial^2 u^0}{\partial a^2} + \frac{\partial u'}{\partial a} \frac{\partial^2 u^0}{\partial a^2} + \frac{\partial u^0}{\partial a} \frac{\partial^2 u'}{\partial a^2} + \frac{\partial u'}{\partial a} \frac{\partial^2 u'}{\partial a^2} \right] \quad (6)$$

식(6)에서 $\frac{\partial u'}{\partial a} \frac{\partial^2 u^0}{\partial a^2}$, $\frac{\partial u^0}{\partial a} \frac{\partial^2 u'}{\partial a^2}$, $\frac{\partial u^0}{\partial a} \frac{\partial^2 u^0}{\partial a^2}$ 이 세 항들은 $u' \ll u^0$ 이기 때문에 첫 번째항에 비하여 무시할 만큼 작다. 따라서, 식(6)은 식(7)처럼 간소화된다.

$$\rho_0 \ddot{u}' - \alpha \frac{\partial^2 u'}{\partial a^2} = \delta \left(\frac{\partial u^0}{\partial a} \frac{\partial^2 u^0}{\partial a^2} \right) \quad (7)$$

u 는 식(4)로부터 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$u(a, t) = A \sin(ka - \omega t) - \frac{a \delta k^2 A^2}{8 \rho_0 c_0^2} \cos[2(ka - \omega t)] \quad (8)$$

$\beta = -\frac{\delta}{\alpha}$ 라고 하면, 진폭 A 는 기본주파수 변위

A_1 이며, $\frac{a \beta (kA)^2}{8}$ 은 2차 고조파 변위 A_2 이다.

따라서, 비선형 파라미터는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

3. 실험

3.1. 압전형 수신기법

GE Dace [4] 등은 정전용량 측정기법의 단점을 보완하기 위하여 f , $2f$ 탐측자를 이용하여 비선형 파라미터를 측정하였다. 입·출력의 전기에너지와 기계에너지는 Fig. 2와 같은 관계가 있다. 전기에너지와 기계에너지는 주파수에 따라 효율이 존재하며, 이는 실험할 때마다 탐측자 부착 조건에 따라 달라지며 이 효율을 $K_R(\omega_1, \omega_2)$ 라고 가정한다.

$K_R(\omega_1, \omega_2)$ 는 식(9)와 같이, 전기에너지를 기계에너지와의 관계로 나타나게 되며, 측정된 기계에너지로부터 음과 변위를 산정할 수가 있다.

$$|P_{A,inc}(\omega_1, \omega_2)| = \frac{|P_{E,out}(\omega_1, \omega_2)|}{K_R(\omega_1, \omega_2)} \quad (9)$$

초음파실험에서 측정하는 것은 전압이며, $P_{A,inc}(\omega_1, \omega_2)$ 와 $P_{E,out}(\omega_1, \omega_2)$ 의 관계를 정립하면 $P_{A,inc}(\omega_1, \omega_2)$ 로부터 식(10)과 같이 $A_{inc}(\omega_1, \omega_2)$ 를 측정할 수 있다.

$$\frac{1}{2} |\omega A_{inc}(\omega_1, \omega_2)|^2 \rho v a = \frac{\frac{1}{2} |\omega I_{out}(\omega_1, \omega_2)|^2 \text{Re}(Z_s)}{K_R(\omega_1, \omega_2)} \quad (10)$$

압전형 수신기법은 시편 양쪽에 f 와 $2f$ 의 주파수를 가지는 탐측자를 부착하여 실험을 수행하는 harmonic 실험과 $2f$ 탐측자만을 붙여서 실험을 수행하는 calibration 실험으로 나뉘게 되고, 식(11)과 같이 calibration 실험으로부터 측정된 $H(\omega_1, \omega_2)$ 와 harmonic 실험으로부터 측정된 $I_{out}(\omega_1, \omega_2)$ 로 기본주파수 변위와 2차 고조파 변위를 측정하게 된다.

$$|A_{inc}(\omega_1, \omega_2)| = |H(\omega_1, \omega_2)| |I_{out}(\omega_1, \omega_2)| \quad (11)$$

측정된 $A_{inc}(\omega_1, \omega_2)$ 으로부터 푸리에 역변환(inverse Fourier transform)을 수행하여, A_1 과 A_2 를 산정할 수 있다.

3.2. 실험장비

본 연구에서는 세 가지의 비선형 파라미터 측정 방법 중 압전형 수신기법을 선정하여 시스템을 Fig. 4와 같이 구축하였다. 버스트 sine을 발생시키기 위한 함수발생기(AFG-3002), 함수발생기에서 5 MHz, 10사이클의 입력신호를 200~300 V의 고전압신호로 증폭시켜주기 위해 power amplifier (AR-150A100B)를 사용하였다. power amplifier에서 증폭된 신호는 고조파 일그러짐이 발생하므로 이를 억제하기 위해 5 MHz low pass filter (Franklin Innovation Inc.)를 적용하였다. 전압측정은 10:1 프로브(PP006)를 이용하여 측정하였으며 최소 측정 전압은 1 mV이며, 1:1 전류 프로브(CT-2)를 이용하여 1 mA 최소단위의 전류

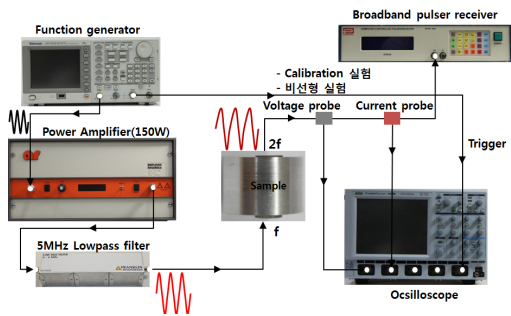


Fig. 4 Experimental nonlinear ultrasonic system for piezoelectric detection

를 측정하였다. Calibration 실험시 사용하는 펄서 리시버는 넓은 주파수 범위의 교정을 위한 광대역 펄서리시버 (PR5800)을 사용하였다. 비선형 파라미터를 측정하기 위해 PZT를 사용할 경우 PZT 자체의 비선형성이 존재하여 시스템의 비선형성과 혼재될 우려가 있으므로 비선형성이 없는 단결정인 LiNbO₃ (지름 6.4 mm의 5, 10 MHz)를 사용하였다 [8].

3.3. 시편 준비

압전형 수신 시스템의 성능 검증을 위해서는 대비시험편에 대한 비선형 파라미터를 측정하여 그 값을 기존의 연구에서 측정된 값과 비교해 보는 과정이 반드시 필요하다. 이 과정없이 열화된 시편의 비선형 파라미터를 측정하는 것은 무의미하며, 대비시험편에 대한 충분한 반복실험을 통하여 갖추어진 시스템의 측정 견고성을 확고히 할 필요가 있다. 그리고, 대비시험편은 반드시 윗면과 아랫면이 평평하고, 1~2 μm (지름 25.4 mm 기준)로 평행한 시편을 준비해야 한다. 비선형 파라미터는 표면상태와 시편의 윗면과 아랫면의 기울기에 영향을 받으므로 [9], 측정시 발생하는 오차의 원인을 제대로 분석할 수 없어 정확한 측정에 어려움을 겪게 된다.

대비시험편은 fused silica와 Al2024-T4를 준비하였다. Fused silica는 두께 19.09 mm, 지름이 76.2 mm이며, Al2024-T4은 두께 12.871 mm, 지름 20 mm인 것으로 준비하였다. Fused silica는 윗면과 아랫면이 광학적으로 거의 평평하고 평행한 샘플로 준비하였다. Al2024-T4은 기계 가공하여 연마하였고, 연마된 시편을 9 μm, 6 μm, 3 μm의

diamond paste로 랩핑을 하여 평평하고, 윗면과 아랫면이 1~2 μm의 평행도를 갖는 시편으로 준비하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 세 가지 비선형 파라미터 측정 방법 중 압전형 수신기법을 사용하여 측정하였다. 측정 시험편은 비결정질인 fused silica와 다결정 금속인 Al2024-T4를 사용하였다. Function generator의 입력전압을 120 mV 부터 40 mV 간격으로 600 mV까지 조정하였다. 측정시스템의 선형성을 측정하기 위하여, Fig. 5(a) 그래프를 도시하였으며 A_1^2 가 증가함에 따라 A_2 가 선형적으로 증가됨을 확인하였다. 측정된 비선형 파라미터를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 실험은 5회 반복하여 측정하였으며, 측정별 평균값이 8.86~10.63으로 참고문헌의 평균값과 매우 유사하였다 [10-12]. ‘disbond’는 탐촉자의 접촉불량으로 $A_1^2 VS A_2$ 그래프가 기울기가 1~5회의 측정값과 매우 다르게 나타나며, 비선형 파라미터의 값이 30이상 큰 값을 갖게되어 Fig. 5(b)에 나타나지 않았다.

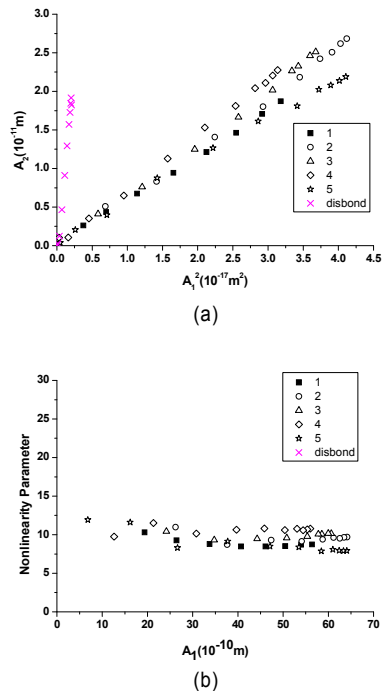


Fig. 5 (a) $A_1^2 VS A_2$ and (b) nonlinearity parameter of fused silica sample

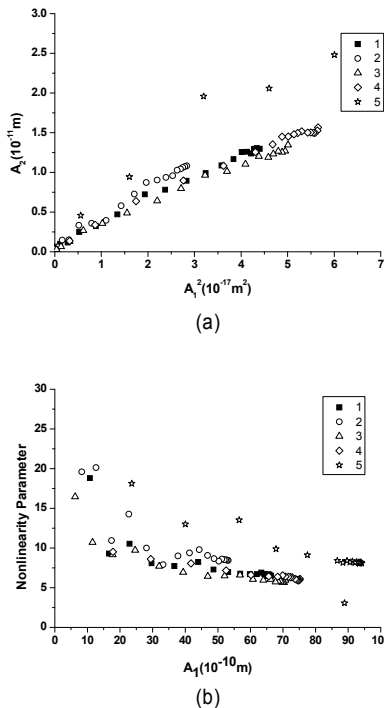


Fig. 6 (a) A_1^2 VS A_2 and (b) nonlinearity parameter of Al2024-T4 sample

Al2024-T4 시험편도 fused silica와 동일하게 수행하였으며, 5번째의 실험은 시험편과 transducer의 접촉상태가 불량한 것으로 판단된다. 5번째 실험을 제외하고, Fig. 6(a)는 선형적임을 알 수 있으며, 측정값은 A_1 이 30Å보다 클 때, 5.85~8.7로 참고문헌의 값과 거의 일치하게 측정됨을 알 수가 있다[13].

Fused silica의 비선형 파라미터와 다른점은 A_1 의 크기가 30Å보다 감소할 때, 비선형 파라미터가 증가하는 것을 알 수가 있다. 이러한 원인은 전위에 의한 영향으로 추정되어 왔으며[14], 이러한 현상을 연구하기 위해 Cantrell은 dislocation dynamics 이론을 제시하였다[15]. 이러한 현상은 전위가 존재하지 않는 fused silica와 같은 비결정질 재료에서는 나타나지 않으며, 전위가 존재하는 모든 재료에서 존재하게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 fused silica와 Al2024-T4의 비선형 파라미터를 측정하기 위해서 압전형 수신 시

스템을 구축하고, 반복측정을 통하여 측정의 정밀도를 검증하였다. Fused silica와 Al2024-T4의 비선형 파라미터는 참고문헌에서 측정된 값과 거의 일치하였다. 따라서, 압전형 수신기법이 비선형 파라미터를 측정하는 방법으로 사용이 가능한 것으로 검증하였다. 향후 현장 적용을 위하여 접촉식 방법과, 시편의 기울기에 따른 비선형 파라미터 측정에 대해서도 연구를 진행할 것이다 [16,17].

후기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지기술개발사업 연구 과제입니다 (No. 20111020400020).

참고문헌

- [1] M. A. Breazeale and D. O. Thompson, "Finite-amplitude ultrasonic waves in aluminum," *Applied Physics Letters*, Vol. 3, No. 5, pp. 77-78 (1963)
- [2] M. A. Breazeale and J. Ford, "Ultrasonic studies of the nonlinear behavior of solids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 36, No. 11, pp. 3486-3490 (1965)
- [3] W. B. Gauster and M. A. Breazeale, "Detector for measurement of ultrasonic strain amplitudes in solids," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 37, No. 11, pp. 1544-1548 (1966)
- [4] G. E. Dace, R. B. Thompson and O. Buck, "Measurement of the acoustic harmonic generation for materials characterization using contact transducers," *Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 11, pp. 2069-2076 (1992)
- [5] D. C. Hurely and C. M. Fortunko, "Ultrasonic parameter β using a Michelson interferometer," *Measurement Science and Technology*, Vol. 8, pp. 634-642 (1997)
- [6] R. E. Green, "Treatise on Materials Science and Technology," Chapter III, Academic, New York and London, Vol. 3 (1974)

- [7] K. Brugger, "Third-order elastic constants and the velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media," *Physical Review*, Vol. 134, pp. A981-997 (1964)
- [8] J. K. Na and M. A. Breazeale, "Ultrasonic nonlinear properties of lead zirconate-titanate ceramics," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 95 No. 6, pp. 3213-3221 (1994)
- [9] R. Truell, C. Elbaum and B. B. Chick, "Ultrasonic methods in solid state physics," Academic Press, New York and London (1969)
- [10] W. T. Yost and M. A. Breazeale, "Adiabatic third-order elastic constants of fused silica," *Journal of Applied Physics*, Vol. 44, No. 4, pp. 1909-1910 (1973)
- [11] R. A. Graham, "Determination of third-and fourth-order longitudinal elastic constants by shock compression techniques-Application to Sapphire and Fused Quartz," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 51, No. 5, pp. 1576-1581 (1972)
- [12] E. H. Bohardus, "Third order elastic constants of Ge, MgO, and Fused SiO₂," *Journal of Applied Physics*, Vol. 36, No. 8, pp. 2504-2513 (1965)
- [13] P. Li, W. T. Yost, J. H. Cantrell and K. Salama, "Dependence of acoustic nonlinearity parameter on second phase precipitates of aluminum alloys," *Ultrasonic Symposium*, pp. 1113-1115 (1985)
- [14] D. J. Barnard, "Variation of nonlinearity parameter at low fundamental amplitudes," *Applied Physics Letters*, Vol. 74, No. 17, pp. 2447-2449 (1999)
- [15] J. H. Cantrell, "Nonlinear dislocation dynamics at ultrasonic frequencies," *Journal of Applied Physics*, Vol. 105, No. 4, pp. 043520-1~7 (2009)
- [16] J. K. Na, W. T. Yost, J. H. Cantrell and G. L. Kessel, "Effects of surface roughness and nonparallelism on the measurement of the acoustic nonlinearity parameter in steam turbine blades," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol 19, pp. 1417-1424 (1999)
- [17] Y. L. Hinton, J. K. Na, W. T. Yost and G. L. Kessel, "Field measurement of the acoustic nonlinearity parameter in turbine blades," *NASA Center for Aerospace Information*, pp. 1-7 (2000)