

금속 재료의 잠닉손상 평가를 위한 비선형 전자기음향공진 기법에 관한 연구

Study on the Nonlinear Electromagnetic Acoustic Resonance Method for the Evaluation of Hidden Damage in a Metallic Material

조승원***, 조승현*†, 박춘수*, 서대철*, 장경영***

Seung-Wan Cho***, Seung-Hyun Cho*†, Choon-Su Park*, Dae-Cheol Seo* and Kyung-Young Jhang***

초 록 최근 전통적 초음파기법이 탐상할 수 없는 잠닉손상을 평가할 수 있는 잠재적 기술로서 비선형 초음파기법들에 대한 많은 관심이 있다. 비선형 초음파기법중 하나인 공진주파수 변화를 이용하는 기법은 재료의 탄성영역에서의 이력에 근거한 기술이다. 공진주파수의 변화량이 아주 작기 때문에 정교한 공진주파수 측정장치가 필요하다. 본 연구에서는 비선형 전자기음향공진기법을 적용하였다. 비선형 전자기음향공진기법은 비접촉 EMAT 센서를 사용하기 때문에 재료의 주파수 응답에 영향을 최소화할 수 있다. 3점 굽힘 피로시험을 한 알루미늄판 시편에 횡파 EMAT으로 실험을 실시하였다. 전압을 여러 레벨로 인가하며 공진을 발생시켜 잠닉손상측정에 중요한 요인중 하나인 이력 비선형 파라미터 α 를 공진주파수 변화로부터 산출하였다. 비손상시편과 손상시편에서의 측정된 이력 비선형 인자의 값이 서로 차이가 남을 확인하였다.

주요용어: 잠닉손상, 비선형 전자기음향공진, 이력 비선형 인자, 공진주파수 변화

Abstract Recently, much attention has been paid to nonlinear ultrasonic technology as a potential tool to assess hidden damages that cannot be detected by conventional ultrasonic testing. One nonlinear ultrasonic technique is measurement of the resonance frequency shift, which is based on the hysteresis of the material elasticity. Sophisticated measurement of resonance frequency is required, because the change in resonance frequency is usually quite small. In this investigation, the nonlinear electromagnetic acoustic resonance (NEMAR) method was employed. The NEMAR method uses noncontact electromagnetic acoustic transducers (EMATs) in order to minimize the effect of the transducer on the frequency response of the object. Aluminum plate specimens that underwent three point bending fatigue were tested with a shear wave EMAT. The hysteretic nonlinear parameter α , a key indicator of damage, was calculated from the resonance frequency shift at several levels of input voltage. The hysteretic nonlinear parameter of a damaged sample was compared to that of an intact one, showing a difference in the values.

Keywords: Hidden Damage, Nonlinear Electromagnetic Acoustic Resonance, Hysteretic Nonlinear Parameter, Resonance Frequency Shift

1. 서 론

원전 및 대형 기간시설과 같이 사고시에 많은 인적 물적 피해가 예상되는 구조물은 사전 유지보수가 매우 중요하다. 하지만, 기존의 전통적 초

음파탐상기법은 결함 탐상능의 한계로 인해 조기 단계의 건전성 평가가 쉽지 않아서 구조물의 장주기 유지 관리 적용에 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해서는 현재의 탐상기술로 진단이 어려운 손상을 탐지할 수 있는 첨단 비파괴검사 기술

[접수일: 2014. 4. 4, 수정일: 2014. 7. 21, 게재확정일: 2014. 7. 21] *한국표준과학연구원, **성균관대학교 기계공학부 ***한양대학교 기계공학부 †Corresponding Author: Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea (E-mail: seungcho@kriss.re.kr)

이 요구된다.

거시균열(macrocrack) 발생 이전에 구조물 내부에 생성되는 잠닉손상(hidden damage)은 종류 및 특성이 다양하고 손상의 크기가 매우 작아 기존 비파괴탐상 기술로는 탐지가 어렵다. 최근, 초음파탐상, 와전류탐상 등의 전통적 비파괴검사 기법의 한계를 극복하고, 잠닉손상을 탐상할 수 있는 방법으로서 비선형 초음파기법(nonlinear ultrasonic testing)이 많은 주목을 받고 있다. 기존의 초음파탐상이 초음파 속도, 감쇠, 투과 및 반사계수 등의 선형 인자를 기준으로 결함을 평가하는데 반해 비선형 초음파기법은 재료의 탄성학적 비선형성으로 인한 초음파 신호의 변화를 측정하여 잠닉손상이나 미세결함을 탐상할 수 있는 고성능의 기법[1,15,16]이다. 매질의 비선형 탄성 응답에 의해 생성된 2차 고조파 성분(second harmonic frequency)을 기반으로 비선형 인자 β 를 파악하는 기법인 고전 비선형 초음파탐상(classical nonlinear ultrasonic testing) 기법[2] 뿐 아니라 최근에는 다양한 금속재료 내부에 공진을 발생시켜 공진주파수의 변화를 통해 이력 비선형 인자(hysteretic nonlinear parameter) α 를 이용하는 기법[3-6], 저조파 발생을 관찰하여 단립균열을 진단하는 기법[7], 서로 다른 모드 및 주파수의 초음파를 합성하는 믹싱기법[8] 등 다양한 비선형 초음파 연구가 진행 중이다.

본 연구에서는 앞에서 설명한 비선형 초음파 기법중 공진주파수 변화를 관찰하여 재료의 손상을 진단하고자 하였다. 일반적으로 재료의 비선형성으로 인한 공진주파수의 변화가 크지 않으므로 매우 민감한 공진 측정 방법이 필요하다. 이를 위해서 비선형 전자기음향공진(NEMAR) 기법을 도입하였다. 이 방법은 비접촉 탐상이 가능한 전자기음향탐촉자(EMAT)를 사용하므로 탐촉자가 시험편에 미치는 영향을 최소화할 수 있어 정밀한 공진주파수 측정이 용이하다는 장점이 있다.

현재까지 잠닉손상을 탐상하는데 있어, 비선형 전자기음향공진기법을 적용하고자 하는 연구는 매우 드물었다. 이에 따라 본 연구에서는 잠닉손상 탐상을 위한 비선형 전자기음향공진기법의 적용 타당성에 관해 고찰하고자 하였다.

2. 이력 비선형성

재료 내부에서의 피로하중, 열피로, 재료열화 등으로 인해 발생하는 손상은 매우 작은 크기로 발생하여 그 손상이 점진적으로 증가하여 재료의 파괴를 야기하게 된다. 비선형 기법은 재료의 아주 작은 물성변화에도 민감하게 반응하기 때문에 음향 비선형성을 이용하는 여러 종류의 비선형 기법이 활용되고 있다. 재료에 외력을 가하여 변형이 발생하면 응력-변형률 곡선 상의 탄성영역에서는 외력을 제거시 재료가 변형 이전의 상태로 돌아오게 되는데, 재료 내부에 피로하중, 열피로에 의한 손상이나 석출물 등의 영구변형이 존재하면 가하는 하중과 변형률 관계가 기존의 관계와는 다른 형태로 발생하게 되는데 이를 이력(Hysteresis) 현상이라고 한다. 손상이나 소성변형 하에서의 재료는 선형 탄성 후크의 법칙으로 재료의 비선형성을 묘사하기에는 적합하지 않다. 이를 해결하기 위해 여러 이론[9-14]을 통해 이력 비선형 인자를 파악하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 많은 재료내의 구조적 현상들은 응력-변형률 상태방정식에서의 이력과 strain memory에 의한 비선형 응답 특성과 관련된 다음의 식 (1)로 나타낼 수 있다[9].

$$\frac{\partial \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})}{\partial \epsilon} = g(\epsilon) - \alpha s [\sigma(\epsilon_0) - f(\epsilon_0)] e^{\alpha s (\epsilon_0 - \epsilon)} - \alpha s \int_{\epsilon_0}^{\epsilon} \left[g(\tau) - \frac{df(\tau)}{d\tau} \right] e^{\alpha s (\tau - \epsilon)} d\tau \quad (1)$$

여기서, ϵ_0 는 최초 변형이고, $s = \text{sign}(\dot{\epsilon})$, α 는 이력 비선형 파라미터, 그리고 $f(\epsilon)$ 와 $g(\epsilon)$ 는 주어진 재료를 실험적으로 측정된 값들을 나타낸다. 최초에 응력과 변형이 없으면 식(1)은 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})}{\partial \epsilon} = g(\epsilon) + \alpha s f(0) e^{-\alpha s \epsilon} - \alpha s \int_{\epsilon_0}^{\epsilon} \left[g(\tau) - \frac{df(\tau)}{d\tau} \right] e^{\alpha s (\tau - \epsilon)} d\tau \quad (2)$$

여기서, $\alpha = 0$ 일 때, 전통적인 비선형 탄성 구성방정식인 식(3)을 대입하면, 식(4)를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})}{\partial \epsilon} = E(1 - \gamma \epsilon - \delta \epsilon^2 \dots) \quad (3)$$

$$g(\epsilon) = E(1 - \gamma\epsilon - \delta\epsilon^2 - \dots) \quad (4)$$

식(3),(4)를 식(1)에 대입하여 풀면,

$$\frac{df(\epsilon)}{d\epsilon} = g(\epsilon) - E(1 + \alpha\Delta\epsilon), \quad f(0) = -\frac{E\Delta\epsilon}{s} \quad (5)$$

이고, 이것을 식(3)에 대입하면 다음의 식(6)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})}{\partial\epsilon} = g(\epsilon) - E(1 + \alpha\Delta\epsilon) + Ee^{-\alpha s\epsilon} \quad (6)$$

α 가 아주 작다면 $e^{\pm\alpha s\epsilon} \approx 1 \pm \alpha s\epsilon$ 이 되고 이 값과 식(6)을 식(3)에 대입하면

$$\frac{\partial\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})}{\partial\epsilon} = E[1 - \gamma\epsilon - \delta\epsilon^2 - \alpha(\Delta\epsilon + s\epsilon)] \quad (7)$$

이 되고 이것이 응력-변형률 관계식을 이용하여 이력 비선형 파라미터를 구하는 구성방정식을 나타낸다. 앞서의 식을 통해, 이력 비선형 파라미터 α 는 비선형 거동의 가장 중요한 특성이 됨을 알 수 있고, 이러한 비선형 거동은 재료가 계속해서 손상이 되어 좀 더 탄성 비선형성을 띄게 되는 것과 직접적으로 관련이 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 가진전압레벨이 증가하였을 때 재료의 손상이 더 축적되는 것으로 생각할 수 있고, 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_1 - f}{f_0} \approx \alpha\Delta\epsilon \quad (8)$$

여기서, f 는 현재 인가된 가진레벨에서의 공진 주파수, f_0 는 가장 낮은 가진레벨의 공진주파수를 나타낸다. 식(8)을 통해 이력 비선형 파라미터 α 를 구할 수 있다.

3. 비선형 전자기음향공진

3.1. 원리

앞서 설명한 이론을 바탕으로 본 연구에서는 판 재료 내부에 두께 방향으로 횡파를 발생시켜 재료 내부에 공진을 유발하는 방법을 적용하여 실험을 실시하였다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 자석에 의해 발생하는 자기장과 코일에서 발생하는

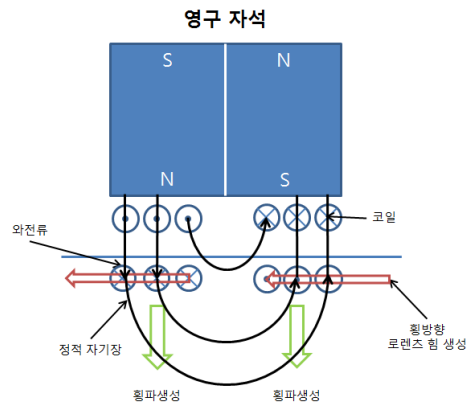


Fig. 1 Principle of shear wave generation by EMAT

유도전류에 의해 생성되는 로렌츠 힘이 상호작용하여 재료 표면에 횡방향 진동현상을 유발시킨다. 여기서 유발된 진동으로 재료의 두께 방향으로 횡파가 발생, 전파되어 재료 내부에 공진을 발생시킨다. 재료 내부에 발생된 공진은 재료의 두께와 횡파 속도에 의해 일정한 주기로 공진 모드가 형성되는데 형성된 공진 모드 중에서 에너지가 가장 집중된 횡파 모드를 선택하여 가진 및 수신할 수 있도록 실험장치를 구성하여 실험하였다.

3.2. 시편 및 실험장치

본 연구에서는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 피로시편을 제작하였다. 길이 300 mm, 폭 100 mm 이고 두께가 3 mm인 알루미늄 시편을 260 MPa의 인장하중으로 689,000번의 피로 실험을 실시하여 길이 68 mm, 깊이 3 mm인 closed-crack을 가진 피로시편을 제작하였다. 제작된 시편은 실험테이블 위에 일정부분 자유공진을 유지하였다.



Fig. 2 The plate specimen through 3 point bending fatigue test

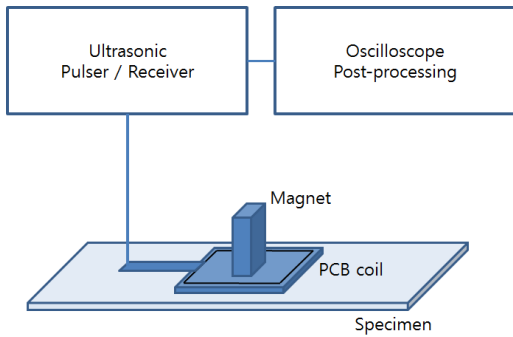


Fig. 3 The schematic diagram of the experimental setup for NEMAR test



Fig. 4 The EMAT used in experiment

Fig. 3은 본 연구를 위해 제작된 실험장치의 구성도를 나타낸다. 초음파 가진을 위한 펄서/리시버는 광대역 주파수 스위치 가능한 RAM-10000 (RITEC. Inc.) 장비를 사용하였다.

Fig. 4와 같이 횡파를 발생할 수 있는 racetrack 코일 형상의 EMAT 센서를 사용하였다. 연구에서 사용된 횡파 EMAT 센서는 시편과 접촉되어 있지만 재료와 센서 사이에 커플런트를 첨가하지 않은 상태로 탐상하였다. 3지점 굽힘 피로시험을 통해 균열이 발생하기 시작한 시점까지 잠닉손상을 발생시킨 시험편에 가진전압레벨을 변경하여 피로 부위와 비피로 부위에서 각각 측정을 실시하였다. 기본 신호를 파악하고 RAM-10000 장비에서 측정 구간을 기본 신호의 피크 부분으로 설정한 후 각각의 가진전압레벨별로 신호를 파악하여 분석하였다.

4. 실험 결과

본 연구에서 제작한 피로시험편에 횡파 EMAT 센서를 통해 두께 방향으로 로컬 진동 모드를 발

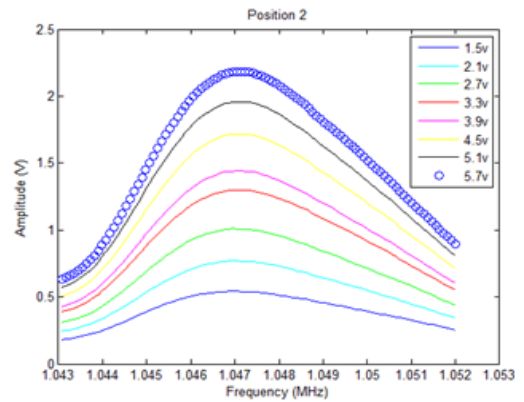


Fig. 5 Frequency response measured in an intact region

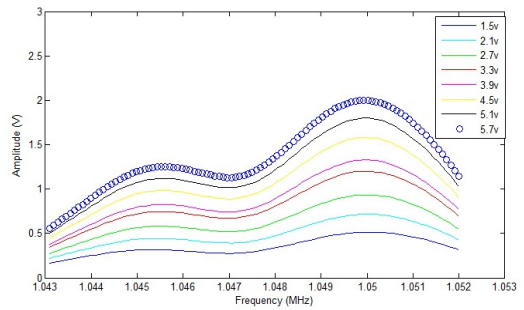


Fig. 6 Frequency response measured in a damaged region

생시켜 비결함부와 결함부에서 각각 실험을 실시하였다. 본 연구에서 측정된 이력 비선형 파라미터 α' 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\alpha' = \frac{f_{v=1.5V} - f_{v=5.7V}}{f_{v=1.5V}} \quad (9)$$

센서에 인가하는 전압을 1.5 ~ 5.7 V까지 0.6V씩 증가시켜 측정된 실험 결과는 다음의 Fig. 5, 6과 같다. 여기서, $f_{v=5.7V}$ 는 센서에 인가한 전압이 5.7V일 때 측정된 공진주파수이고 $f_{v=1.5V}$ 는 센서에 인가한 전압이 1.5V일 때 측정된 공진주파수를 나타낸다. 실험을 통해 획득한 신호는 육안으로 공진주파수의 변화를 구별하기 어려워 입력 신호 크기에 따른 공진주파수를 matlab을 통해 파악하고 각 인가전압별로 얻은 공진주파수 값을 curve fitting한 결과는 다음의 Fig. 7, 8과 같다. 각 전압별 입력신호에 따른 공진주파수를 파악한 결과 비결함부에서의 α' 의 값은 85.93×10^{-6} , 결함

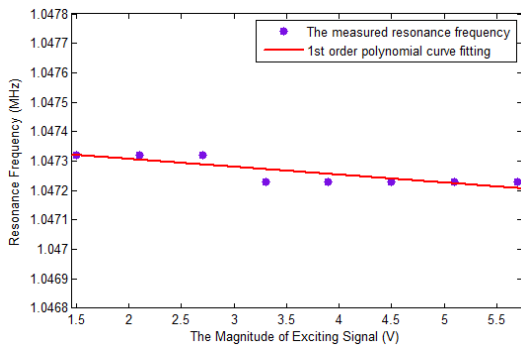


Fig. 7 Result of resonance frequency from input signal level on impact part

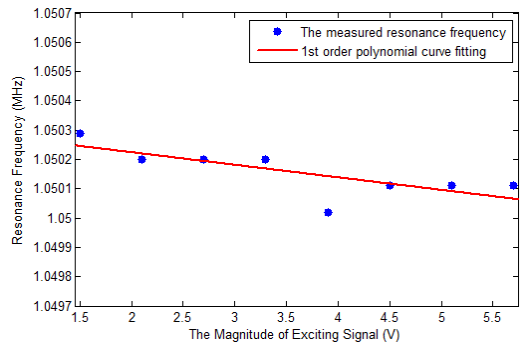


Fig. 8 Result of resonance frequency from input signal level on damaged part

부에서의 α '의 값은 170.96×10^{-6} 의 결과를 나타내었다. 이 결과값을 통해 비결함부에 비해 결함부에서의 공진주파수 변화현상이 좀 더 명확히 발생하였음을 파악할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 재료 내부에 존재하는 잠닉손상을 비선형 전자기공진기법을 통해 잠닉손상 유무 및 정도를 파악하기 위한 연구이다. 비선형 전자기음향공진기법은 기존의 전통적 비파괴검사 기법에 비해 손상에 좀 더 민감히 반응하기 때문에 잠닉손상 파악에 용이하다. 기존의 전통적 비선형 기법에서의 파라미터와는 전혀 특성이 다른 재료 내부의 이력 비선형 파라미터인 α 와 연관이 있는 공진주파수의 변화 현상을 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 그 결과 비결함부에 비해 결함부에서 공진주파수 변화 현상이 발생됨을 알 수 있었다. 하지만, 본 실험에서 사용된 피로시편

의 경우 시편의 표면 상태 및 정밀한 두께로의 제작이 되지 못하였기에 명확한 결과값을 도출하지 못한 부분이 있다. 좀 더 명확한 공진주파수 변화 현상을 파악하기 위해서는 피로시편의 제작을 좀 더 정밀히 할 필요가 있고 또한 결과값의 명확성을 위해 재료에 높은 에너지를 부여할 수 있고 양질의 신호 획득을 할 수 있도록 고출력 및 좀 더 강력한 자기장을 생성시킬 수 있는 고성능의 장비 개선이 필요하다고 생각된다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 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)
- [2] K. E-A. Van Den Abeele, "Elastic pulsed wave propagation in media with second- or higher-order nonlinearity. Part I. theoretical framework," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 99, No. 6, pp. 3334-3345 (1996)
- [3] Y. M. Cheong, M. K. Alam and C. G. Kim, "Nonlinear parameters for a diagnosis of microscale cracks using a nonlinear resonant ultrasound spectroscopy(NRUS)," *American Institute of Physics Conference Proceedings*, Vol. 29, pp. 1439-1444 (2010)
- [4] U. Polimeno and M. Meo, "Understanding the effect of boundary conditions on damage identification process when using nonlinear elastic wave spectroscopy methods," *International Journal of Nonlinear Mechanics*, Vol. 43, No. 3, pp. 187-193, (2008)
- [5] P. A. Johnson, B. Zinsner and P. N. J. Rasolofosaon, "Resonance and elastic nonlinear phenomenon in rock," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. B5, pp. 553-564 (1996)

- [6] K. E-A. Van Den Abeele, A. Sutin., J. Carmeliet and P. A. Johnson, "Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy," *NDT&E International*, Vol. 34, pp. 239-248 (2001)
- [7] I. Solodov, J. Wackerl, K. Pfeleiderer and G. Busse, "Nonlinear self-modulation and subharmonic acoustic spectroscopy for damage detection and location," *Applied Physics Letters*, Vol. 84, No. 26, pp. 5386-5388 (2004)
- [8] K. E-A. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J. A. Ten Cate and P. A. Johnson, "Nonlinear elastic wave spectroscopy(NEWS) techniques to discern material damage. Part II: Single mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy," *Res. Nondestr. Eval.*, Vol. 12, pp. 31-42 (2000)
- [9] T. Meurer, J. Qu and L. J. Jacobs, "Wave propagation in nonlinear and hysteretic media - A numerical study," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 5585-5614 (2002)
- [10] K. R. McCall and R. A. Guyer, "Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, pp. 887-897 (1994)
- [11] K. R. McCall and R. A. Guyer, "A new theoretical paradigm to describe hysteresis, discrete memory and nonlinear elastic wave propagation in rock," *Nonlinear Process in Geophysics*, Vol. 3, pp. 89-101 (1996)
- [12] I. D. Mayergoyz, "Mathematical models of hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 22, No. 5, pp. 603-608 (1986)
- [13] J. W. Macki, N. Paolo and Z. Pietro, "Mathematical models for hysteresis," *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 35, No. 1, pp. 94-123 (1993)
- [14] K. Alexander and T. Eitan, "New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection-diffusion equations," *Journal of Computational Physics*, Vol. 160, pp. 241-282 (2000)
- [15] Y. H. Choi, H. M. Kim, K. Y. Jhang and I. K. Park, "Application of non-linear acoustic effect for evaluation of degradation of 2.25Cr-1Mo steel," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 22, No. 2, pp. 170-176 (2002)
- [16] Y. M. Cheong and D. H. Lee, "Detection of micro-crack using a nonlinear ultrasonic resonance parameters," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 4, pp. 369-375 (2012)