

전자기 음향 트랜스듀서를 이용한 초음파 공진 분광법 기반 알루미늄 박판 미세결함 탐상

Detection of Microcrack on Thin Plates Using EMAT-Based Resonant Ultrasonic Spectroscopy

조승완*,**, 지봉규*,***, 조승현****,*****†

Seung Wan Cho*,**, Bonggyu Ji*,*** and Seung Hyun Cho****,*****†

초 록 현재 다양한 산업에서 구조재로서 박판 형태의 소재가 많이 사용되고 있다. 이러한 박판 구조물에 결함이 발생하면 구조물의 파괴를 불러와 인적 물적 피해가 발생하게 된다. 이러한 결함을 파악하기 위해 다양한 비파괴검사 기법 중 초음파 검사 기법을 주로 사용하고 있다. 하지만 5 mm 이하의 두께를 가지는 얇은 박판 소재에서의 미세결함을 탐상하는데 있어 결함의 판별 및 신호 해석에 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 전자기 음향 트랜스듀서 기반 공진 초음파 분광법을 적용하여 미세결함을 탐상하고자 하였다. 유한요소해석을 통해 결함 유무에 따른 공진 주파수 및 출력 전압의 변화를 파악하였고 실제 알루미늄 박판에 미세 결함을 인가한 시험편을 제작하였다. 본 연구 기법을 적용하여 미세결함을 탐상한 결과 공진 주파수의 변화 및 출력 전압의 변화를 통해 미세결함의 유무를 판별 및 스캔 이미지를 파악할 수 있었다.

주요용어: 공진 초음파 분광법, 박판, 미세결함, 전자기 음향 트랜스듀서

Abstract Currently, thin plate-type materials are widely used as structural materials in various industries. Defects in such a thin plate cause destruction of the structure, resulting in human and material damage. The ultrasonic inspection technique is the most widely used non-destructive inspection method to detect such defects. However, it is difficult to detect micro defects in a thin plate with thickness ≤ 5 mm and analyze their signals. In this study, electromagnetic acoustic transducer-based resonant ultrasonic spectroscopy was applied to detect micro defects. Through finite element analysis, the change of the resonance frequency and output voltage depending on the presence or absence of defects was determined, and a test specimen was fabricated by incorporating fine defects to an actual aluminum plate. Our results indicate that it is possible to identify the presence of micro defects using this technique and to recognize the scanned image by changing the resonance frequency and output voltage.

Keywords: Resonant Ultrasound Spectroscopy, Thin Plate, Micro-Crack, Electromagnetic Acoustic Transducer

1. 서 론

현재 많은 산업 구조물 및 배관, 자동차, 비행기 등의 대형 구조물 등 다양한 산업 영역에서

박판 소재의 구조물이 널리 이용되고 있다. 이러한 박판 구조물의 경우 결함의 크기가 아주 미세한 크기에서 구조물의 파괴에 이르기까지 짧은 시간에 진행되기 때문에 미세한 결함 크기 영역

[Received: September 21, 2018, Revised: January 11, 2019, Accepted: February 7, 2019] *한국표준과학연구원 안전측정센터 연구학생(Research Associate, Center for Safety Measurement, Korean Research Institute of Standards and Science), **성균관대학교 기계공학부 박사과정(Ph. D. Course, Major of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University), ***과학기술연합대학원대학교 측정과학전공 박사과정(Ph. D. Course, Major of Science of Measurement, Univ. of Science & Technology), ****과학기술연합대학원대학교 측정과학전공 교수(Professor, Major of Science of Measurement, Univ. of Science & Technology), *****한국표준과학연구원 안전측정센터 책임연구원(Principal Researcher, Center for Safety Measurement, Korean Research Institute of Standards and Science)

† Corresponding Author: seungcho@kriss.re.kr

© 2019, Korean Society for Nondestructive Testing

에서부터 결함을 파악하는 기법이 필요하다. 다양한 비파괴검사 기법 중에서도 초음파 펄스에코법, 피치캐치법 등의 초음파 탐상 기법이 널리 사용되고 있는데, 이 기법들은, 일정 두께 이상의 시편에서는 결함 탐상능이 아주 우수하지만, 일정 두께 이하의 박판 구조물에서는 초음파의 이동 거리가 상대적으로 짧아 결함 신호와 경계면에서의 반사 신호를 명확히 구분하기 어려워 신호를 분석하고 결함을 파악하는데 어려움이 있다.

따라서 아주 얇은 두께의 박판에서의 비파괴검사를 위한 첨단 비파괴검사 기법의 필요성이 증대하고 있다[1-3]. 박판 구조물에서의 미세결함의 경우 크기가 매우 작고 불균일한 방향으로 형성되기 때문에 아주 작은 구조재의 변형에도 민감하게 반응하고 결함 신호를 명확히 파악할 수 있는 검사 기법이 필요하다. 또한 검사자가 결함 신호와 경계면 신호를 파악하는데 용이함이 확보되어야 한다. 박판에서의 미세결함 탐상을 위해 저조파 기법[4], 주파수 믹싱 기법[5], 공진 초음파 분광법[6] 비선형 초음파 기법[7] 등 전통적 초음파 기법의 단점을 극복하기 위한 최신 기법이 연구되고 있다.

본 연구에서는 소재에 발생하는 아주 미세한 변화에도 민감하게 반응하고 작은 입력 값에도 고출력의 신호를 발생시킬 수 있는 초음파 공진 분광법을 이용하여 미세결함을 탐상 가능성을 파악하고자 하였다. 또한 얇은 박판 소재에서의 검사시 소재 경계면에서의 센서의 영향을 줄이고 비접촉 탐상이 가능한 전자기 음향 트랜스듀서(EMAT)를 사용하여 실험을 진행하였다. 얇은 알루미늄 소재의 박판에 3점 굽힘 피로시험을 실시하여 미세결함 생성시킨 알루미늄 박판을 제조하였다. 박판에서의 미세결함에 의한 공진 주파수의 변화를 파악하기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 실제 알루미늄 박판과 동일한 크기로 모델링한 후 미세결함에서의 공진주파수 변화를 파악하기 위한 해석을 실시하였다. 해석을 실시한 이후, 실제 시험편에서 전자기 음향 트랜스듀서 기반 공진초음파 분광법을 적용하여 미세결함 신호를 파악하기 위한 실험을 실시하였다.

2. 미세결함에 따른 공진 현상 파악을 위한 유한요소 해석

얇은 알루미늄 박판에서 두께 방향 공진이 발

생하고 발생한 공진 주파수가 미세결함에 의해 어떤 변화양상을 보이는지 파악하기 위한 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석을 위해 상용 해석 프로그램인 Comsol multiphysics 5.2를 사용하여 Fig. 1과 같은 순서로 해석을 실시하였다. 로렌츠 힘이 횡방향으로만 발생하기 때문에 간략히 2d 모델을 적용하였다. 로렌츠 힘이 표면에 작용하는 것을 정확히 묘사하기 위해 해석 프로그램 상에서의 2가지의 물리모델을 적용하였다. 자석에 의해 발생하는 자기장의 자속 밀도를 파악하기 위한 자기장 해석과 코일에 의해 발생하

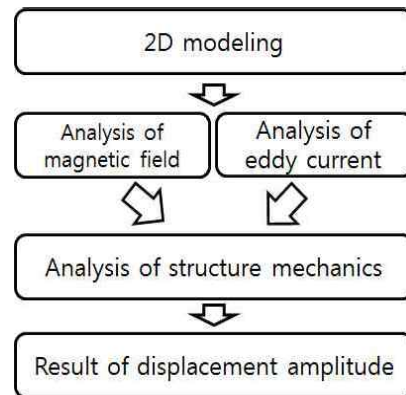


Fig. 1 A schematic of FEM for EMAT RUS

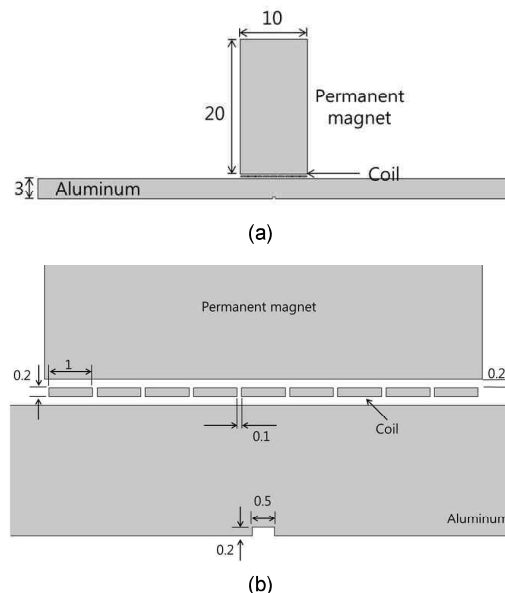
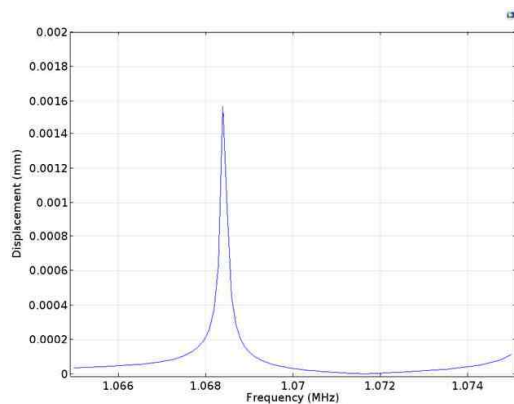
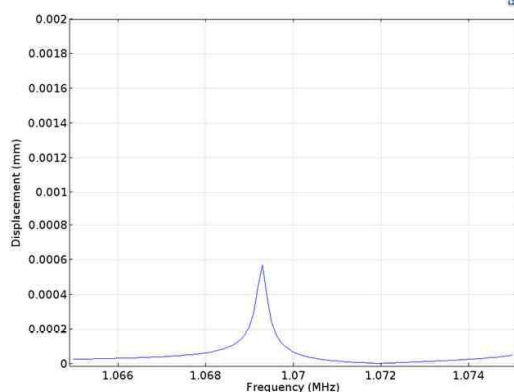


Fig. 2 Analytical model similar to actual test specimen, sensor(a) and coil & crack size (size: 0.5 × 0.2 mm)

는 와전류 값을 파악하기 위한 와전류 해석 물리 모델을 통해 두 값의 상호작용으로 발생하는 로렌츠 힘을 적용하여 구조 해석을 실시하여 변위 값의 변화를 파악하였다. Fig. 2와 같이 실제 시험편의 크기와 동일한 모델을 적용하였고 또한 센서 구성하는 자석 및 코일의 사이즈도 실제 센서 구성대로 모델링하여 해석을 실시하였다. 자석의 크기는 10×20 mm이고 코일은 1×0.2 mm의 사이즈로 9턴의 권선수를 인가하여 모델링하였다. 각 소재의 재료 물성치는 해석 프로그램 상에 존재하는 물성치를 대입하여 해석을 실시하였다. 메시의 크기는 파장의 1/10의 크기인 0.1 mm의 크기로 60000여개의 요소로 구성되었다. 결함이 없을 때와 폭 0.5 mm, 깊이 0.2 mm인 결함을 인가하고 해석을 실시한 결과는 Fig. 3과 같다.



(a) without defect



(b) with defect

Fig. 3 Resonant frequency and displacement change without defect (a) and with defect (b)

미세 결함으로 인해 공진 주파수가 커지고 변위 값이 크게 감소하는 경향을 파악하였다. 유한 요소해석의 결과를 토대로 공진 주파수의 변화 및 출력 전압의 변화를 통해 미세결함을 탐상할 수 있음을 파악하였다.

3. 전자기 음향 트랜스듀서를 이용한 초음파 공진 분광법

본 연구에서는 알루미늄 박판에서의 미세결함 탐상을 위해 전자기 음향 트랜스듀서를 이용한 초음파 공진 분광법을 적용하였다. 이는 전자기 음향 트랜스듀서를 이용하여 공진을 발생시키고, 알루미늄 박판에서 발생하는 공진 특성을 측정하여 대상을 평가하는 방법이다. 전자기 음향 트랜스듀서는 전자기적 원리(로렌츠힘(Lorentz force))를 이용하여 초음파를 변환하므로 원칙적으로 비접촉 탐상이 가능한 특성을 가진다. 이러한 특성은 측정 대상과 접촉에서 오는 영향을 최소화하여 대상의 특성 변화에 대한 민감도를 향상시키는데 있어 유리한 점이 있고, 넓은 영역을 고속으로 탐상할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 시험편에 초음파 및 공진을 발생시키기 위해서 압전(piezoelectricity) 원리를 이용한 트랜스듀서를 많이 이용한다. 하지만 본 연구에서 다루는 초음파 공진 분광시험은 접촉에서 오는 영향을 최소화하여 미세결함에 반응하는 공진 특성을 평가하는 시험법으로 접촉 매질에 의해 진폭 변화가 큰 압전 트랜스듀서의 적용이 어렵다. 실험에서 사용한 초음파 공진 분광법은 전자기 음향 트랜스듀서를 이용하여 두께 방향으로 진행하는 횡파 모드로 공진을 발생시키고, 이를 측정하였다. 횡파 모드 가진 방법은 레이스트랙 코일(racetrack coil)에 전류를 인가하였을 때, 측정 대상 내부에 코일에 흐르는 전류 반대 방향으로 생성되는 유도 전류와 영구자석의 정자기장의 상호 작용으로 인해 횡방향으로 진동하는 로렌츠 힘(Lorentz force)이 발생하게 되고 이러한 힘의 작용으로 인해 박판 내부의 두께 방향으로 진행하는 횡파를 생성시킬 수 있다. 이로 인한 공진 발생이 가능하다. 초음파 분광법에 사용한 횡파 모드 가진용 전자기 음향 트랜스듀서의 구성은 Fig. 4와 같다.

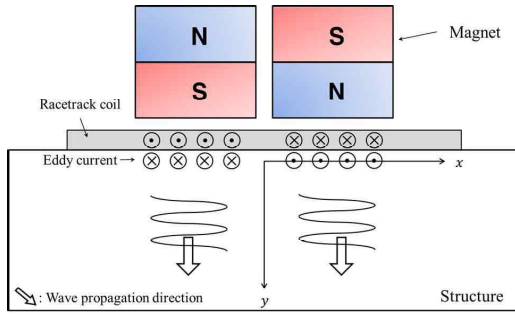


Fig. 4 Schematics of the EMAT for shear ultrasonic wave transduction

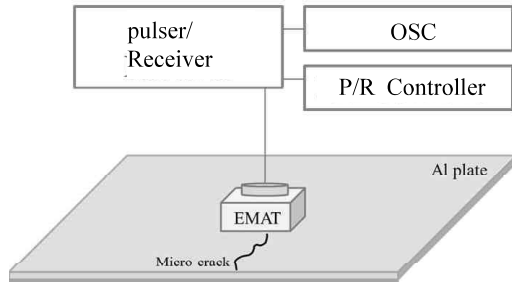


Fig. 5 Experimental setup

4. 미세 결함 알루미늄 시험편에서의 초음파 공진 분광탐상을 위한 시험 장치 및 셋업

Fig. 5는 본 연구에 사용된 실험 장치를 간략히 나타내는 구성도이다. 센서에 고전압의 출력을 인가하기 위한 펄서/리시버는 RAM-5000 (Ritec Inc.)를 사용하였다. 이 장치는 고출력이고 주파수 스위프 기능이 내장되어 있어 본 연구에 적합하다.

본 연구에서 사용된 전자기음향 센서의 구조는 횡파를 발생시키는데 있어 자석과의 배치가 용이한 racetrack 형상의 코일과 $10 \times 30 \times 20$ mm의 사이즈를 가지는 자석, 코일과 자석을 견고히 유지하고 측정을 좀 더 용이하게 하기 위한 센서 케이스로 구성되어 있다.

본 연구에서 사용한 시험편은 길이 300 mm, 폭 70 mm, 두께 3 mm의 알루미늄 시편을 3점 굽힘 피로 실험을 실시하여 미세결함을 인가하였다. 3점 굽힘 피로 실험은 260 MPa의 하중으로 150000 cycle로 실시하였다. 3점 굽힘 피로 실험을 통해 생성된 미세결함은 길이 30 mm, 깊이 0.5 mm의 사이즈로 생성되었다.

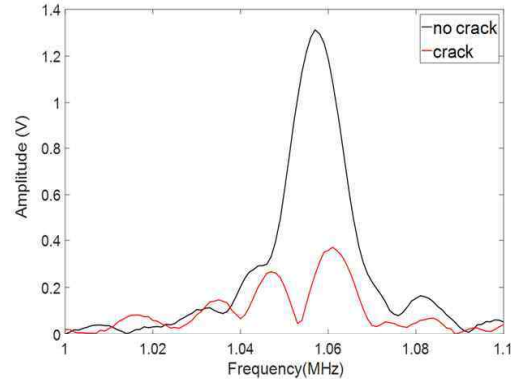


Fig. 6 Change of resonance frequency and output amplitude according to presence or absence of defect

5. 공진 초음파 분광법을 통한 미세결함 탐상 및 결함 C-SCAN

알루미늄 박판에 형성된 미세결함을 파악하기 위해 결함이 발생하지 않은 지점과 결함 발생 지점을 전자기 음향 트랜스듀서를 이용하여 공진 초음파 분광법으로 각각 실험을 실시하였다. 앞서의 해석 결과를 바탕으로 실험을 통한 결과의 양상을 상호 비교하여 공진 주파수의 변화 및 출력 전압의 변화를 파악하고 분석하였다.

실험을 위한 설정으로 인가 전압은 펄서/리시버상에서의 전압 출력값을 고정하고 20 cycle의 toneburst 신호를 입력하여 실험을 실시하였다. 실험 결과 피로 결함이 없는 영역에서는 공진주파수가 1.058 MHz에서 발생하였고, 피로 결함이 존재하는 영역에서는 공진주파수가 1.06 MHz로 증가함을 파악하였다. 또한 피로 결함이 존재하는 영역에서는 피로 결함 존재하는 부분에서의 출력 전압이 피로 결함이 없는 영역일 때의 출력 전압에 비해 현저히 감소함을 파악하였다. Fig. 6는 공진 초음파 분광법을 통한 시험 결과이다.

미세결함 분포 영역을 관찰하기 위해서 결함 영역을 C-Scan 이미지로 나타내었다. 피로 결함이 존재하지 않은 영역에서의 공진 주파수를 기준으로 각 지점에서 출력 전압의 변화를 이용하여 Fig. 7에서 확인할 수 있는 미세 피로결함이 존재하는 영역과 존재하지 않는 영역을 C-Scan하였다. 총 스캔 영역은 10×20 mm이고 x축으로 1 mm씩, y축으로 2 mm씩 이동하며 총 100개의 지점을 전

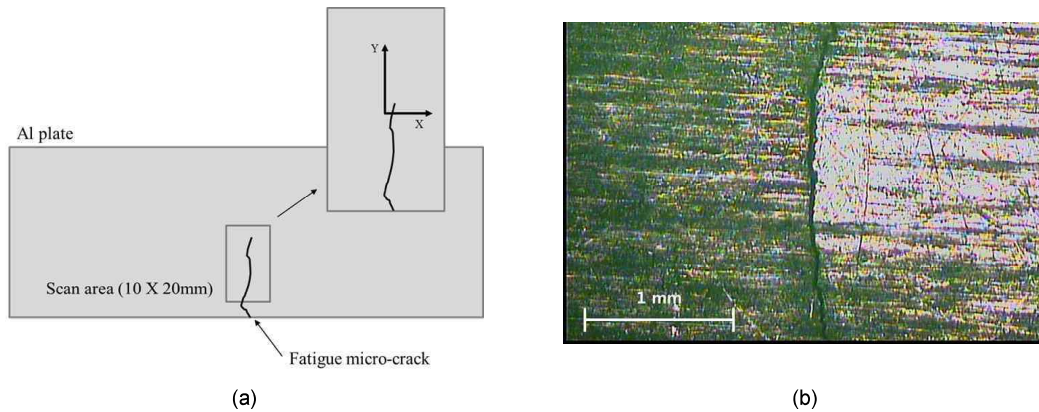


Fig. 7 C-Scan area (a) in fatigue micro defect specimen and zoom image (b) of fatigue crack

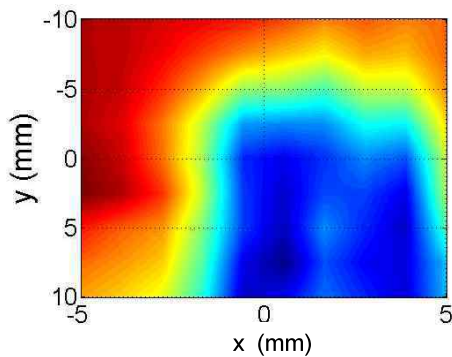


Fig. 8 The scanning image (area: 10 × 20 mm) measured by moving the defective part and the missing part by 1 mm on the x axis by 2 mm on the y axis

자기 음향 트랜스듀서를 이동하여 측정하였다. 실험결과 실제 피로 결함이 존재하는 영역에서 출력 전압의 변화를 확인할 수 있었다. Fig. 8는 C-Scan을 실시하여 획득한 시험 결과이다. C-Scan 결과와 실 피로 결함 영역에서의 오차는 센서 크기가 실제 결함 영역에 비해 현저히 크기 때문에 민감도가 떨어져서 발생한 결과로 파악된다.

6. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 박판 구조물에 발생하는 미세결함을 전자기 음향 트랜스듀서 기반 공진 초음파 분광법을 적용하여 탐상을 실시하고 결함 이미지를 파악하였다. 본 기법을 적용하여 실제 피로결함 시편에서 실험을 실시하기 전에, 미세결함으로 인한 공진 주파수 및 여러 측정 인

자의 변화를 유한요소해석을 실시하여 파악하였다. 해석을 실시한 결과, 미세결함이 발생하면 측정 공진 주파수가 변화함을 파악하였고 또한 결함에 의해 출력 전압이 변화함을 파악하였다. 해석 결과를 토대로 3점 굽힘 피로 실험을 통해 미세한 피로결함이 인가된 시험편을 제작하였고 제작된 시험편의 결함부와 비결함부를 각각 측정하여 공진 주파수와 출력 전압의 변화를 파악하였다. 실험을 통해, 미세결함 유무에 따라 공진 주파수의 변화를 명확히 구분할 수 있었고 또한 미세 결함영역에서 출력 전압이 큰 폭으로 감소하는 것을 파악하였다. 또한 출력 전압의 차를 이용하여 미세결함의 스캔 이미지를 파악하였다. 본 연구에서의 결과를 통해 얇은 박판으로 구성된 구조물에 발생하는 미세결함을 탐상하는데 있어 본 연구 기법인 EMAT 기반 공진 초음파 분광법이 유용하다는 것을 파악하였다. 향후 결함의 정량화를 위해서 좀 더 정밀한 사이즈의 결함 시편을 제작한 후 본 기법을 적용하여 연구를 진행하는 것이 필요하다.

References

- [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] 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 Non-destructive Testing*, Vol. 22, No. 2, pp. 170-176 (2002)
- [3] 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)
- [4] I. Solodov, J. Wackerl, K. Pfeiderer and G. Busse, "Nonlinear Self-Modulation and Sub-harmonic Acoustic Spectroscopy for Damage Detection And Location," *Applied Physics Letters*, Vol. 84, No. 26, pp. 5386-5388 (2004)
- [5] 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)
- [6] A. Migliori, and J. D. Maynard, "Implementation of a modern resonant ultrasound spectroscopy system for the measurement of the elastic moduli of small solid specimens" *Review of Scientific Instruments*, Vol. 76, 121301 (2005)
- [7] 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)