

비선형 초음파공명 특성을 이용한 미세균열 탐지

Detection of Micro-Crack Using a Nonlinear Ultrasonic Resonance Parameters

정용무*[†], 이덕현*

Yong-Moo Cheong*[†] and Deok-Hyun Lee*

초 록 기존 비파괴평가 기술의 결함 탐지 한계를 극복하기 위하여 비선형 초음파공명 특성을 이용한 미세 균열 진단 기술을 개발하였다. 가진 전압에 따른 초음파공명 주파수의 천이현상과 정규화 공명 진폭 감소 현상을 비선형 초음파공명 특성 파라미터로 제안하였으며 이를 실험적으로 확인하였다. CT 시편에 피로시험을 통하여 미세한 자연 균열을 생성하였으며 피로 사이클 단계마다 초음파공명주파수와 정규화 공명진폭의 변화를 측정하였다. 무결함 또는 10 μm 정도의 매우 미세한 균열이 존재하는 시편에서는 초음파공명 주파수 천이현상이나 정규화 공명 진폭의 변화가 나타나지 않는 반면에 30 μm 급 이상의 미세 균열 시편에서는 균열 크기가 증가함에 따라 초음파공명주파수의 천이 현상이나 정규화 공명 진폭의 감소량이 증가함을 확인하였다.

주요용어: 비선형초음파공명분광, 미세균열 탐지, 조기진단, 비선형 초음파

Abstract In order to overcome the detection limit by the current nondestructive evaluation technology, a nonlinear resonant ultrasound spectroscopy(NRUS) technique was applied for detection of micro-scale cracks in a material. A down-shift of the resonance frequency and a variation of normalized amplitude of the resonance pattern were suggested as the nonlinear parameter for detection of micro-scale cracks in a materials. A natural-like crack were produced in a standard compact tension(CT) specimen by a low cycle fatigue test and the resonance patterns were acquired in each fatigue step. As the exciting voltage increases, a down-shift of resonance frequency were increases as well as the normalized amplitude decrease. This nonlinear effects were significant and even greater in the cracked specimen, but not observed in a intact specimen.

Keywords: Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy(NRUS), Detection of Micro-Crack, Earlier Detection, Nonlinear Ultrasonics

1. 서 론

구조물의 수명 연장과 신뢰도 향상을 위해 미세 균열을 비파괴적으로 조기에 탐지하는 것은 매우 중요하다. 그러나 현존하는 비파괴평가기술인 초음파탐상기술, 방사선투과검사기술, 또는 와전류탐상기술로 탐지할 수 있는 최소 결함 크기는 대체

로 0.1 ~ 1 mm 정도로 이러한 탐지 한계로 인하여 대부분의 구조물은 그 수명이 절반 이상 지난 후에 발견되는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위한 방법의 하나로 재료 내에 초음파 비선형 특성을 이용하여 미세균열 또는 결함을 탐지/진단하는 비파괴검사 기술이 개발되고 있다[1-6]. 종래의 비파괴검사에서의 결함 탐지 한

계보다 작은 결함을 탐지하는 조기진단 기술이 가능하다면 구조물의 안전성 향상은 물론 수명 연장에도 도움을 줄 것이다.

전통적인 초음파검사법에서는 단일 주파수 초음파를 가진하여 결함에서 산란, 반사 및 굴절되는 신호의 진폭과 위상의 변화를 이용하여 결함을 탐지한다. 이러한 방식은 초음파의 선형 특성에 기초한 결함 탐지 방법으로써 고전적 관점에서 결함의 크기가 $\lambda/2$ (λ = 초음파 파장) 이상이라야 탐지 가능하다는 한계를 가질 수밖에 없다.

이러한 전통적인 초음파검사의 탐지 한계를 극복하기 위한 방법으로 초음파 비선형 특성을 이용한 방법을 고려할 수 있다. 전통적인 비선형초음파 방법은 검사체 재료의 비선형성에 기인한 탄성파의 찌그러짐과 연관지어 기준주파수에 대한 고조파 스펙트럼 신호를 수집하여 비선형 계수를 추출하는데 이러한 고전적인 비선형초음파 이론에 따라 측정이 가능한 금속 재료의 비선형성은 다른 재료보다 상대적으로 낮으므로 강력장 초음파가 진이 필요하며 몇 개의 고조파만을 관찰할 수 있어서 실제로는 2차 고조파 초음파 방식이라고 할 수 있다. 이러한 방법을 사용하여 지난 수십 여년간 비선형초음파 특성 실험 방법으로 사용되어 왔으나 실제로 수 MHz 대역에서 수백~1000 V 급의 강력장 초음파를 가진하기 위한 특수 증폭기가 필요하며 수신되는 고조파 신호가 미약하기 때문에 특별한 증폭기 및 필터 회로가 필요하다. 또한 이러한 실험 과정에서 압전 탐촉자 특성, 실험체와의 접촉 특성, 증폭기, 필터, A/D converter 등의 전자회로 특성 등에 의한 다양한 측정 오차가 발생할 가능성이 있어서 아직까지도 보편화하기 어려운 점이 있다.

지난 10 여년간 개발된 비선형초음파 이론은 결함에 의한 비선형적인 반응, 특히 가진 에너지와 가진 주파수로 측정되는 비선형성으로써 공명주파수의 변화와 연관지을 수 있는데 이러한 공명 스펙트럼의 변화는 비교적 작은 결함으로부터 상대적으로 높은 비선형성이 나타난다[7]. 여기서 건전한 시편은 대체로 선형적 특성을 나타내기 때문에 결함을 수동적 산란체로 간주하는데 반해 비선형 초음파 방법에서는 결함을 능동적인 파형 발생 원인으로 간주하여 결함에 민감한 장치가 가능하며 비선형 특성을 측정하여 미세결함 여부를 탐지할 수 있다[8]. 본 논문에서는 균열에 의해 유발되는

비선형 특성을 공명 주파수 패턴 분석을 통해 미세균열에 민감한 비선형 파라미터를 추출하고 이를 통한 결함 탐지 한계를 측정하고자 하였다. 1/2 CT(compact tension) 시편을 준비하여 인장시험기에서 피로균열을 생성하였으며 피로균열의 크기와 비선형 특성 파라미터를 연관지음으로써 전통적인 초음파탐상검사법보다 우수한 결함 탐지 능력을 확인할 수 있었다.

2. 이론적 배경

2.1. 음향 비선형성

비교적 강한 초음파에 의해 국부적으로 균열 계면이 열리거나 닫히거나 함에 따라 박수 효과(clapping effect) 또는 키스(kiss) 기구에 의해 비선형성이 나타난다. 여기서 접촉에 의한 비선형성이 나타나는 면의 끝 즉 균열 선단에서 기계적인 응력 집중 현상이 나타나는데 재료 내에 음향 진행 과정에서 강한 음향파가 균열의 양 면에서 박수치는 효과를 이용하여 선형 탄성파 영역에서 감지하지 못하는 결함이나 균열을 탐지할 수 있다[9].

이러한 음향 비선형성을 초래하는 원인으로는 1) 시편 내부에 존재하는 불균일성, 즉 균열, 박리 등의 결함, 2) 입계 접촉의 불완전성, 3) 결정 격자 구조의 불균일성 또는 원자포텐셜의 비대칭성, 4) 원자 단위에서의 불균일성, 즉 전위, 석출물 등에 의한 미세 응력 분포의 불균일성 등이 있다. 재료의 열화나 손상에 의해 가장 먼저 나타나는 미세균열은 시편의 초음파공명 스펙트럼에 영향을 주기는 하나 그 크기가 매우 작아서 기본 스펙트럼 속에 묻혀버리기 때문에 표준화된 선형 초음파 공명분광법으로는 구분하기 어렵다. 그러나 미세손상 또는 미세균열로 인하여 응력-변위 관계의 비선형성이 발생하며 이러한 비선형성은 시편에 가해지는 동적변위를 변화시킬 경우, 즉 초음파공명분광 가진 진폭을 변화시킴으로써 비선형적 관계를 도출해 낼 수 있다. 비선형초음파공명분광법을 인체 뼈를 진단하는 데 적용한 바 있다[7,8]. 여기서 미세손상 정도 또는 균열 크기가 클수록 비선형성이 커지므로 이러한 현상을 미세균열 진단에 활용할 수 있다[10]. 반면에 미세손상이나 미세균열이 없는 건전한 재료에 대해서는 이러한 비선형성이 나타나지 않고 오직 선형적인 관계가 나타

나므로 이러한 특성을 이용하면 미세 손상 또는 균열의 존재 여부를 판단할 수 있을 것이다.

2.2. 초음파공명주파수 천이와 비선형탄성 특성

탄성계수의 비선형성은

$$E(\epsilon) = E_0(1 + \beta\epsilon + \delta\epsilon^2 + \dots) \quad (1)$$

으로 표현할 수 있다. 여기서 $E(\epsilon)$ =비선형 탄성계수, ϵ = 변위, E_0 = 선형 탄성계수, β = 비선형 계수이다. 여기서 재료가 비선형 탄성특성을 나타낸다는 의미는 β, δ 가 0이 아니라는 의미이다. 이를 공명주파수와 연관짓기 위해 먼저 탄성계수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E = \rho c^2 \quad (2)$$

여기서 ρ = 밀도, c = 음속이며 계산을 단순화하기 위해 1차원 고체를 가정하여 식(2)에 탄성계수를 이를 공명주파수와 연결하면

$$E_0 = \rho_0 c_E^2 = \rho \frac{L_0^2 \omega_0^2}{\pi^2}, \quad E(\epsilon) = \rho \frac{L^2 \omega^2}{\pi^2} \quad (3a)$$

으로 표현할 수 있으며 여기서 L = 길이, ω = 각주파수이며 아래첨자는 선형성을 가정할 경우를 의미한다.

$$E_0 \propto \omega_0^2 = f_0^2 \quad (3b)$$

윗 식에서 탄성계수는 공명주파수의 제곱에 비례하며 $\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$ 에서 $L(\epsilon) = L_0(1+\epsilon)$ 이므로

$$E(\epsilon) = \rho \frac{(L_0(1+\epsilon))^2 \omega^2}{\pi^2} \quad (3c)$$

으로 쓸 수 있으며 식(3a), (3c)에서

$$\begin{aligned} \frac{E(\epsilon) - E_0}{E_0} &\approx \frac{L(\epsilon)^2 \omega(\epsilon)^2 - L_0^2 \omega_0^2}{L_0^2 \omega_0^2} \approx \frac{L(\epsilon)f(\epsilon) - L_0 f_0}{L_0 f_0} \\ &= \frac{(1+\epsilon)f(\epsilon) - f_0}{f_0} \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 여기서 strain $\epsilon \approx 0$ 을 가정하면

$$\frac{E(\epsilon) - E_0}{E_0} = \frac{f(\epsilon) - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (5)$$

으로 표현되며 초음파공명에서 가진 전압을 변화시킨다는 것, 즉 가진 변위(strain)을 변화에 따른 공명주파수의 천이는 식(4), (5)에서,

$$\frac{\Delta f}{f_0} \propto (\beta\epsilon + \delta\epsilon^2 + \dots) \quad (6)$$

으로 볼 수 있다. 식(6)에서 비선형계수 β 만을 고려할 경우

$$\frac{\Delta f}{f_0} \propto \beta\epsilon \propto \beta V \quad (7)$$

즉 변위와 가진 전압이 비례하므로 $\Delta f/f_0$ vs 가진 전압을 도시하면 그 기울기는 비선형탄성계수 β 와 비례한다고 볼 수 있다.

3. 실험 방법

3.1. 피로시험에 의한 균열 생성

미세균열에 대한 비선형초음파 파라미터를 추출하기 위해 자연균열에 가까운 시편을 제작하였다. 실제 원자로 재료로 사용되는 SA 508 - Gr. 3 재료를 사용하여 표준 1/2T-1T CT(compact tension) 표준시험편(63.5 mm × 61 mm × 12.72 mm)을 Fig. 1과 같이 제작하였다. 사용된 재료의 화학 조성은 Table 1과 같다.

자연적인 닫힌 균열을 생성시키기 위해서 인스트론 만능시험기에서 저주파 피로시험을 수행하였으며 피로 사이클은 각각 10 Hz 주기로 N = 20,000, 40,000, 60,000 및 120,000번 실시하여 각 단계마다 초음파 공명분광스펙트럼을 측정하였다. 피로 시험 파라미터는 Table 2에 보인 바와 같다.

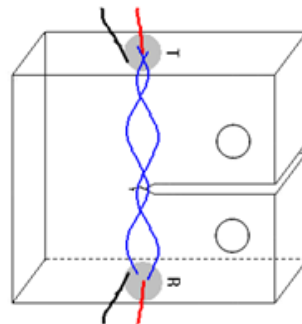


Fig. 1 1/2 compact tension specimen

Table 1 Chemical compositions of SA508-Gr.3 reactor pressure vessel (wt%)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
0.21	1.36	0.007	0.002	0.24	0.92	0.21	0.49	0.005	0.03	0.022
Y5 (MPa)		VTS (MPa)		Uniform elongation (%)			Elongation (%)			
446.2		607.0		50.4			14.7			

Table 2 Fatigue test parameters

Set point	Max	Min	ΔK	Frequency
450 kg	750 (25 MPa√m)	150 (5 MPa√m)	20 MPa√m	10 Hz

3.2. 비선형초음파공명 실험

요구되는 초음파를 가진하기 위한 파워앰프와 주파수 주사 기능을 갖춘 디지털화 초음파공명분광시스템을 사용하여 다양한 가진진폭에 따른 공명스펙트럼을 수집, 분석하였다(Figs. 2~3 참조). 가진 전압을 2 V 부터 140 V까지 변화시키면서 공명 스펙트럼을 수집하였으며 전압 변화에 따른 변화를 비교하기 위해 수집된 스펙트럼은 가진 전압 1V를 기준으로 정한 정규화 신호 패턴을 작성하여 한 화면에 표시하였다.

또한 실험 도중에 영향을 주는 외부 진동, 온도 변화, 심지어 실험자의 호흡에 따른 공기 흐름도 차단하기 위해 시편을 이중 챔버 안에 설치하고

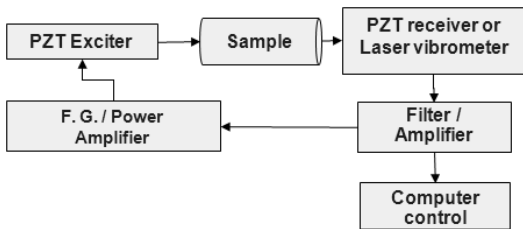


Fig. 2 Block diagram of nonlinear resonant ultrasound spectroscopy

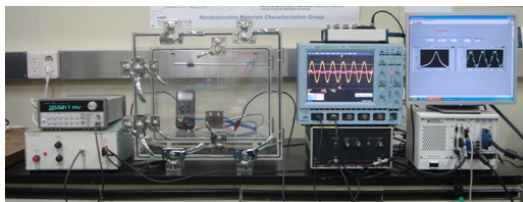


Fig. 3 Photo of experimental setup and a chamber to maintain constant temperature and free of vibration

치과용 실로 매달아서 초음파공명 스펙트럼을 수집하였다. 챔버 내에 일정한 온도를 유지하기 위해 온도는 dummy 시편에 부착된 thermo-couple로 측정하여 온도 변화가 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내를 유지하도록 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

각 피로시험 단계마다 생성된 균열 크기를 측정하기 위해 heat tinting 방법을 적용하여 파면 색깔을 변화시켰으며 최종적으로 피로 사이클 120,000 번 가한 후 파면을 관찰하기 위해 파괴하였다. 파면의 주사현미경 사진을 Fig. 4에 보였는데 각 피로 사이클 단계마다 heat tinting에 의한 색깔 차이를 실측하여 피로 사이클과 균열 크기의 관계를 수립하였다 Fig. 5에 보인 바와 같이 균열 길이와 피로 사이클과의 관계는 전형적인 Paris law를 따름을 알 수 있다.

각각의 피로 사이클 또는 균열 단계에서 가진 전압의 변화에 따른 초음파공명 신호 사례를 Fig. 6에 보였다. 먼저 피로 사이클 $N=1,000$, 균열 길

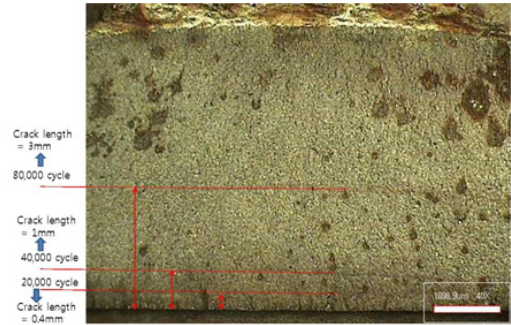


Fig. 4 SEM image of a fractured surface after fatigue test with heat tinting

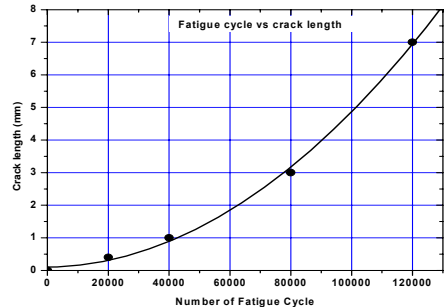
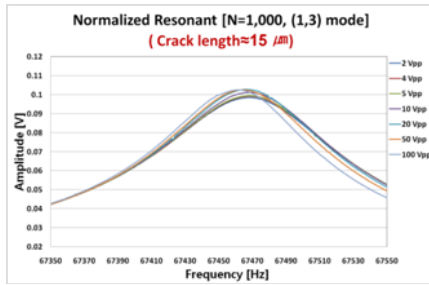


Fig. 5 Estimation of fatigue crack length

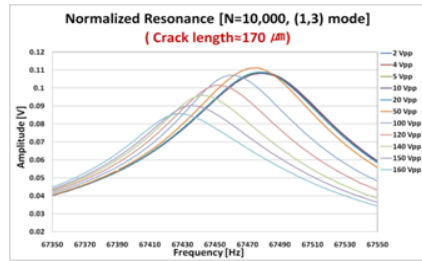
이 약 15 μm 의 경우 가진 전압을 2 V에서 140 V 까지 변화시키더라도 정규화 공명패턴의 변화는 미미하였다.(Fig. 6(a) 참조) 이것은 균열이 존재하지 않는 건전한 시편이나 아주 작은 미세 균열 시편에서는 거의 비선형 특성이 나타나지 않음을 알 수 있다. 즉 이런 시편에서는 단지 선형적 특성만이 관찰되고 비선형 특성에 의한 변화를 탐지하기

어려우므로 본 실험 방법에 의한 균열 탐지 한계를 벗어난다고 볼 수 있다.

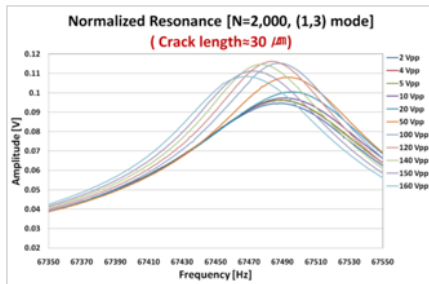
Fig. 6(b)에서 피로 사이클 $N=2,000$ 즉 균열 길이가 30 μm 인 경우를 보면 가진 전압을 증가시키에 따라 초음파 공명 패턴이 변화하기 시작함을 알 수 있으며 피로 사이클 $N=5,000$ 즉 균열 길이가 80 μm 정도인 경우 가진 전압을 증가시키에 따라



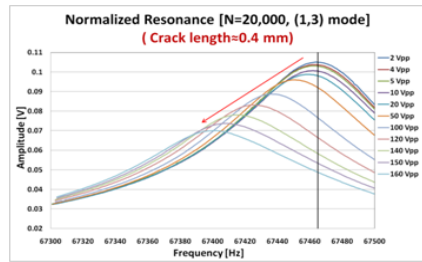
a) Crack length $\approx 15 \mu\text{m}$



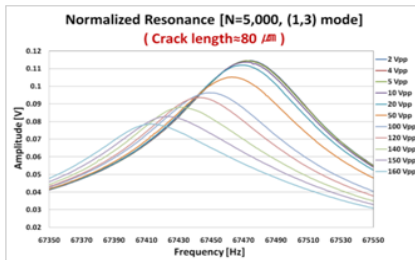
d) Crack length $\approx 170 \mu\text{m}$



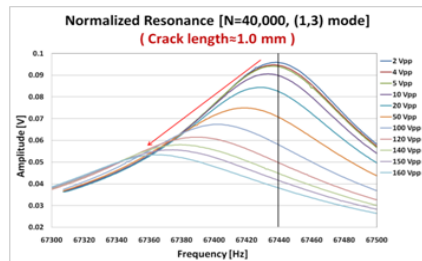
b) Crack length $\approx 30 \mu\text{m}$



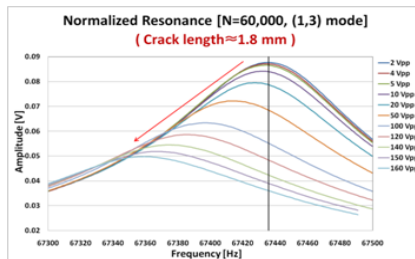
e) Crack length $\approx 0.4 \text{ mm}$



c) Crack length $\approx 80 \mu\text{m}$



f) Crack length $\approx 1.0 \text{ mm}$



g) Crack length $\approx 1.4 \text{ mm}$

Fig. 6 Normalized resonance pattern of cracked specimen

확연한 초음파 공명주파수의 천이 현상이 나타나기 시작하였다. 이후 균열 길이가 증가하여 100 μm ~ 1 mm급으로 성장함에 따라 초음파공명 패턴은 확연한 초음파공명 주파수 천이 현상과 정규화 초음파공명 진폭의 감소 현상을 뚜렷이 확인할 수 있었다(Fig. 6(c)~(f) 참조).

본 실험 결과에 따라 결함을 함유한 시편에서 초음파공명 패턴은 가진 전압을 증가시킴에 따라 공명주파수가 낮아지고 정규화 공명신호 진폭이 감소하는 현상을 확인하였으며 이를 미세결함 탐지를 위한 비선형 특성 파라미터로 제안하고자 한다.

또한 본 실험 결과에서 보듯이 비선형초음파공명 특성을 이용하면 수십 μm 급의 미세 균열 탐지가 가능함을 확인하였으며 이는 일반적인 초음파 검사법에 의한 균열 탐지 한계 0.1 ~ 1.0 mm를 능가하는 미세 균열 탐지 방법으로 볼 수 있다.

앞으로 보다 다양한 결함 시편에 대한 정량적인 연구를 통하여 공명주파수 천이현상과 미세균열 크기를 정량화할 필요가 있으며 주파수 천이 크기와 정규화 공명 신호 진폭을 연계하여 미세균열 탐지 한계를 대폭 낮추고 이를 통한 열화손상의 조기진단 기술 개발에 기여하고자 한다.

5. 결론

비선형초음파공명분광법을 적용하여 미세균열을 진단코자 하였다. 특정한 비선형 파라미터, 즉 가진 진폭이 변화함에 따른 초음파공명주파수의 천이와 정규화 공명 패턴의 변화가 미세균열 탐지에 민감함을 발견하여 이를 통한 미세균열의 탐지계를 확인코자 자연균열을 함유한 CT 시편에 대한 실험을 수행하였다.

15 μm 정도의 미세 균열이 존재하는 CT 시편의 경우 초음파공명주파수의 천이현상이 거의 나타나지 않았고, 즉 선형 특성만이 나타났으나 30 μm 이상의 미세균열 상태에서도 초음파공명주파수의 천이 현상이 나타나기 시작하여 균열 길이가 증가할수록 이러한 현상은 증가하였다.

가진 전압을 증가시킴에 따라 초음파공명주파수가 변화하는 공명주파수 천이현상과 정규화 초음파 진폭이 감소하는 현상을 새로운 비선형 초음파 파라미터로 제안하였으며 앞으로 추가 연구를 통하여 이러한 비선형 초음파 파라미터와 균열 크기와의 관계를 정량화하여 현재 비파괴검사 기술의

결함 탐지 한계를 극복하고 닫힌 균열을 탐지하는 비파괴특성평가기술로 개발할 예정이다.

후 기

본 연구과제는 교육과학기술부의 원자력기술개발사업 중 재료 열화손상 조기진단 신기술 개발 과제에서 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] P. A. Johnson, "The new wave in acoustic testing," *Materials World, The J. Inst. Materials*, Vol. 7, pp. 544-546 (1999)
- [2] K. E.-A. Van Den Abeele, P. A. Johnson and A. Sutin, "Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage. part I: nonlinear wave modulation spectroscopy(NWMS)," *Research Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, pp. 17-30 (2000)
- [3] K. E.-A. Van den Abeele, J. Carmeliet, J. A. Tencate and P. A. Johnson, "Nonlinear elastic wave spectroscopy(NEWS) techniques to discern material damage, part II: single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy," *Research Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, pp. 31-42 (2000)
- [4] L. Ostrovsky and P. A. Johnson, "Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials," *Rivista del Nuovo Cimento*, Vol. 24, pp. 1-46 (2001)
- [5] P. A. Johnson and A. Sutin, "Slow dynamics and anomalous nonlinear fast dynamics in diverse solids," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 117, pp.124-130 (2005)
- [6] I. Solodov, "Nonlinear ultrasonic NDT for early detection recognition and images," *European Conf. Nondestructive Testing (ECNDT 2010)*, Moscow, (2010)
- [7] M. Muller, J. A. Ten Cate, T. W. Darling, A. Sutin, R. A. Guyer, M. Talmant, P. Laugier and P. A. Johnson, "Bone micro-damage assessment using non-linear resonant ultrasound spectroscopy(NRUS) techniques: A feasibility study," *Ultrasonics*, Vol. 44, p. 245 (2006)

-
- [8] M. Muller, D. Mitton, M. Talmant, P. Johnson and P. Laugier, "Nonlinear ultrasound can detect accumulated damage in human bone," *J. Biomechanics*, Vol. 41, pp. 1062-1068 (2008)
- [9] I. solodov, "Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection and NDE-applications," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 383-390 (1998)
- [10] Yong-Moo Cheong and M. K. Alam, "Feasibility of nonlinear resonant ultrasound spectroscopy(NRUS) for diagnosis of micro-cracks," *Trans. Korean Nuclear Soc. Spring Meeting*, Jeju Korea (2009)