

재료의 미세결함 검출을 위한 레이저 공명 초음파 분광(Laser-RUS)시스템 개발

Development of Laser-Based Resonant Ultrasound Spectroscopy(Laser-RUS) System for the Detection of Micro Crack in Materials

강영준^{1,✉}, 김진수², 박승규², 백성훈², 최낙정¹
Young June Kang^{1,✉}, Jin Soo Kim², Seung Kyu Park², Sung Hoon Baik² and Nag Jung Choi¹

1 전북대학교 기계설계공학부 (Department of Mechanical Design, Chonbuk Univ.)

2 한국원자력연구원 양자광학연구부 (Division of Quantum Optics, KAERI.)

✉ Corresponding author: yjkang@chonbuk.ac.kr, Tel: 063-270-2453

Manuscript received: 2009.7.16 / Accepted: 2009.9.14

Non-contacting, laser-based resonant ultrasound spectroscopy (L-RUS) was applied to characterize the microstructure of a material. L-RUS is widely used by virtue of its many features. Firstly, L-RUS can be used to measure mechanical damping which related to the microstructural variations (grain boundary, grain size, precipitation, defects, dislocations etc). Secondly, L-RUS technology can be applied to various areas, such as the noncontact and nondestructive quality test for precision components as well as noncontact and nondestructive materials characterization. In addition, L-RUS technology can measure the whole field resonant frequency at once. In this paper, we evaluated material characteristics such as resonant frequency, nonlinear propagation characteristic through the development of Laser-Based Resonant Ultrasound spectroscopy (Laser-RUS) System for the detection of Micro Crack in Materials.

Key Words: Laser-based Resonant Ultrasound Spectroscopy (레이저 공명 초음파 분광법), Micro Crack (미세결함), Resonant (공명), Ultrasound (초음파), Spectroscopy (분광학), Non-contact (비접촉), Non-destructive (비파괴)

1. 서론

초음파를 이용하여 재료의 탄성 특성을 측정하는 공명 초음파 분광법(RUS: Resonant Ultrasound Spectroscopy)은 발생된 초음파의 공명 주파수를 측정하고, 여러 파라미터에 따른 공명 조건을 분석함으로써 재료의 미세구조 변화를 비파괴적 방법으로 측정하는 유용한 기술이다.

재료의 열화와 손상으로 발생하는 미세결함은 재료의 공명 스펙트럼에 영향을 미치게 되고, 이는 공명 초음파 분광법(RUS)을 이용함으로써 분석되는데, 손상은 비선형의 응력-변형률 관계와 가진

된 진폭의 증가로 인해 측정될 수 있는 비선형성을 생성하게 된다. 이때 더 큰 손상은 더 큰 비선형성을 나타내게 되고, 이러한 비선형성은 미세결함의 검출에 사용될 수 있다.

손상이 없는 건전한 재료들은 본질적으로 공명 응답에서 선형 거동을 보인다. 그러나 같은 재료라 할지라도 공명주파수의 이동과 정규화된 공명 패턴에 종속되는 진폭에 있어 명확한 손상을 입었을 때는 비선형이 된다.

최근의 비선형 공명 초음파 분광법(NRUS: Non-linear Resonant Ultrasound Spectroscopy)은 명확하게 공명주파수의 진폭 의존성을 분석할 수 있고,

이러한 정보는 비선형성의 정도와 미세결합을 진단하고 정량화하는데 사용되며, 변화되는 전압의 작용 또는 변형률에 의한 공명주파수의 이동은 미세결합 또는 손상과 관련된 비선형 변수로서 선택된다.

초음파 공명 기법은 재료의 공명 주파수를 발생시키기 위하여 접촉식 PZT 트랜스듀서를 사용한다. 이 기술은 현재까지 수많은 연구가 진행되어 재료의 탄성상수를 결정하는 기술이 잘 정립되어 있다. 그러나 이러한 접촉식 공명 초음파 분광 기술은 현장에 응용하기에는 적합하지 않은 단점이 있다.

펄스 레이저 빔을 원거리에서 재료에 조사하여 초음파를 발생시키고 측정용 레이저 빔을 원거리에서 재료에 조사하여 초음파 신호를 원격으로 측정하는 비접촉식 레이저 공명 초음파 분광법(LRUS: Laser-based Resonant Ultrasound Spectroscopy)은 재료의 탄성 특성이나 재료 내부의 미세구조를 비접촉식으로 측정하는데 유용한 도구이다. 완전한 비접촉식 검사 장치인 레이저 초음파 공명 분광법은 현장 응용이 가능한 장점이 있다.

본 논문에서 개발한 레이저 기반의 공명 초음파 분광기술(LRUS: Laser-based Resonant Ultrasound Spectroscopy)은 비접촉식 검사 방법으로 in-situ 응용이 가능하며, 신호대 잡음 비율이 커서 더욱 정밀한 검사가 가능한 장점을 갖고 있다. 본 기술은 펄스(Pulse) 레이저로 재료에 공명 초음파를 발생시키고, 연속 발진(CW) 레이저로 초음파의 전파신호를 측정함으로써 주파수 스펙트럼 없이도 전 주파수의 동시 측정이 가능하며, 방사선 발생 시편과 고온재료와 같이 비접촉식 검사방법이 요구되는 재료의 물성변화 연구 분야에서의 활용도 유용할 것으로 기대된다.

또한, 경제·산업적인 측면에서 산업부품 또는 재료의 물성 계측 및 평가기술로서 구조물의 건전성 확보에 따른 안정성 확보, 수명연장과 생산성 향상 등의 효과가 있고, 고온 철강재 및 원자력 분야의 핵연료 물성평가 등 다양한 응용분야가 가능하며, 특히 재료의 물성평가는 물론 정밀부품의 비파괴 검사 등에 적용이 가능하다.

기존의 PZT(Piezoelectric Transducer)를 이용한 전통적인 비파괴 검사 기술은 많은 연구가 수행되어 기술정립이 잘 되어 있다고 판단할 수 있으며, 이제는 보다 정밀하고 민감한 비접촉, 비파괴 특성 평가기술을 개발할 필요성이 있다. 따라서 본

연구에서는 레이저 기반의 공명 초음파 분광장치를 개발하여 재료의 물성을 정밀하게 측정하는 시스템을 개발하였다.

2. 원리

2.1 공명초음파(RUS) 원리

고체에 초음파가 가해질 경우 고체의 원자는 가해진 주파수에 따라 진동하면서 초음파가 진행하게 되는 데 특정한 주파수에서 위상이 일치할 경우 공명이 발생하고 그밖의 다른 주파수에서는 서로 상쇄되어 잡음으로 나타난다.

기본적으로 공명주파수는 고체의 제원, 밀도 및 탄성계수에 의해서 결정되므로 고체의 제원 및 밀도가 정해질 경우 공명주파수를 측정하면 탄성계수를 계산할 수 있고, 반대로 탄성계수를 알고 있으면 공명주파수를 계산할 수 있다. 초음파 공명 분광법(RUS, Resonant Ultrasound Spectroscopy)은 이와 같은 원리에 바탕을 두고 고체의 탄성계수를 정확히 측정하는 방법으로 개발되었다.

초음파 공명 신호에는 이러한 탄성계수 계산에 필요한 정보 이외에 재료의 미시적 변화에 따른 효과를 나타내는 정보가 포함되어 있다. 초음파가 고체 내부를 진행하면서 재료 내부에 존재하는 다양한 불균일성(grain boundary, defect, dislocation, precipitation, etc)에 의한 산란으로 에너지의 손실이 발생하는데 이러한 기계적 감쇠 현상을 측정함으로써 재료 내부의 미시적인 변화를 연관지을 수 있다.

이를 측정하기 위한 수단으로 종래의 전통적인 펄스에코 방식에 의한 초음파 감쇠 측정법과 공명 현상 측정에 의한 방법이 있다. 종래의 초음파 감쇠법은 주어진 주파수에 대해서 음파가 고체 내부를 진행하면서 발생하는 에너지의 손실을 스칼라적으로 측정하여 이를 재료의 미시적인 현상과 연관짓는 방식으로써 정의에 입각한 기계적 감쇠와는 약간 다르다.

반면에 초음파 공명 분광법에서는 공명주파수의 벡터적인 요소를 계산할 수도 있다. 이와 같이 초음파 공명 분광법을 적용하여 탄성계수를 측정함은 물론, 열화과 같이 극 미세한 재료 내부의 변화를 감지하기 위한 수단으로 사용될 수도 있다.

초음파 공명 분광법의 장점은 mm 크기의 시편에서 모든 탄성 계수를 한번에 측정할 수 있다는 점이다. 탄성 계수를 알아내기 위해서는 잘 정의

된 기하학적 배열 하에서 시편이 자유롭게 공진하도록 하여야 한다.

2.2 레이저 공명초음파(L-RUS) 원리

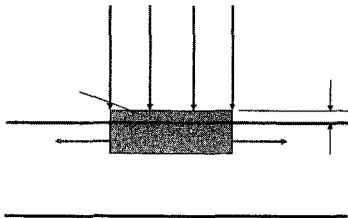


Fig. 1 Generation of a ultrasound by the thermo-elastic effect

고체 표면에 레이저를 조사하면 여러 가지 물리적 반응들이 일어나는데, 레이저에 의한 초음파 발생의 기본 원리는 Fig. 1 과 같다.

고출력 펄스레이저를 고체 표면에 조사하면 에너지의 흡수 및 반사가 매우 얇은 흡수층에서 이루어지고, 이때 흡수되는 에너지에 의해 매우 짧은 시간 동안 고체 표면의 온도가 상승 및 하강하는 구배를 형성하며, 극히 짧은 시간 동안에 이루어지는 온도구배는 재료 내의 순간적인 팽창을 야기하는 열탄성 효과로 나타나 이로 인한 고주파의 열탄성 응력 및 변형률이 고체 내부로 전달되어지는 메커니즘이다.

레이저를 사용하여 비파괴 시험 및 평가에 적당한 수 nm 수준의 변위 진폭을 얻기 위해서는 수십 mJ 이상의 레이저 펄스 에너지가 필요하다. 이러한 고출력 레이저를 발생시키기 위하여 일반적으로 Q-스위칭된(Q-switched) 펄스레이저를 사용한다.

Q-스위칭이란, 레이저 광 펄스 출력 빔을 만드는 기법 중 하나로 레이저 공진기의 Q 값이 떨어진 상태에서 여기서 레이저 매질에 충분한 에너지를 축적한 후, 갑자기 Q 값을 올리면 발진이 시작되어 축적되었던 에너지를 빠르고 예리한 광 펄스로 방출하게 되어 높은 출력과 폭이 좁은 광 펄스를 얻을 수 있는 방법이다.

적당한 진폭 및 주파수 범위(100kHz~10MHz)의 초음파 발생을 위하여 일반적으로 펄스 길이가 20 ns 이하인 Q-스위칭된 펄스레이저를 사용한다. 펄스레이저가 고체 표면에 입사되면 다양한 물리적 현상이 발생할 수 있다. 크게 입사 레이저 세기에 따라, 저출력 레이저의 입사에 의해 열탄성

응력 및 변형률이 발생하는 열탄성 영역(thermoelastic regime)과 고출력 레이저의 입사에 의해 용발이 발생하는 용발 영역(ablation regime)으로 분류할 수 있다.

출력 밀도가 10MW/cm² 이하인 저출력 펄스 레이저가 입사하는 경우에는 순간적인 가열에 의한 열과 및 탄성파가 발생한다. 특히 반도체와 같은 재료에서는 전류의 흐름이 발생하기도 한다. 열탄성 영역에서의 레이저 초음파의 전파는 전자기적 복사의 흡수에 따른 재료 내의 온도 분포 변화와 그리고 이에 뒤따르는 열탄성 응력의 발생에 의해 이루어진다.

고출력 펄스레이저를 입사하는 경우에는 이러한 현상과 더불어 재료의 표면에서 물질이 용해되어 증발하는 용발 현상이 발생한다. 고체 재료로부터 이온과 전자가 방사되어 가시광선 영역의 푸른 불꽃을 내는 플라즈마(plasma)를 형성하며, 재료 내에서는 용융(melting)과 소성변형뿐만 아니라 심지어는 균열까지 발생될 수도 있다.

이로 인해 손상을 야기하지 않는 저출력 레이저의 입사와는 대조적으로 고출력 레이저의 입사에서는 재료 표면의 손상을 수반한다. 그러므로 손상이 허용되지 않는 비파괴 시험 및 평가의 목적으로는 열탄성 영역에서의 레이저 초음파 발생을 필요로 한다.

재료에서 발생되는 초음파는 재료의 기하학적 모양에 따라 여러 가지 모드가 생성된다. 가장 기본적인 모드로 재료 내부에서 전파하는 종파(P wave), 횡파(S wave)가 있고, 경계면을 따라 전파되는 Rayleigh wave, Stonely wave, Lamb wave 와 같은 유도 초음파(Guided wave)가 있다.

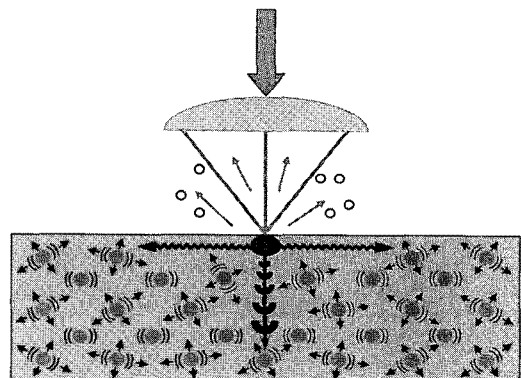


Fig. 2 Schematic diagram to show generation of resonant ultrasound using pulsed beam

Fig. 2 에서와 같이 Q-스위칭된(Q-switched) 펄스 레이저가 재료에 조사하면 초음파가 발생되는데, 고체에 초음파가 가해질 경우 고체의 원자는 가해진 주파수에 따라 진동하면서 진행하게 된다. 이때 특정한 주파수에서 위상이 일치할 경우 공명이 발생하고 그밖에 다른 주파수에서는 서로 상쇄되어 잡음으로 나타난다.

기본적으로 공명주파수는 고체의 제원, 밀도 및 탄성계수에 의해서 결정되므로 고체의 제원 및 밀도가 정해질 경우 공명주파수를 측정하면 탄성계수를 계산할 수 있고, 반대로 탄성계수를 알고 있으면 공명주파수를 계산할 수 있다. 초음파가 고체 내부를 진행하면서 재료 내부에 존재하는 다양한 불균일성(grain boundary, defect, dislocation, precipitation, etc) 에 의한 산란으로 에너지의 손실이 발생하는데 이러한 기계적 감쇄 현상을 측정함으로써 재료 내부의 미시적인 변화를 연관지을 수 있다.

Fig. 3 에서와 같이 재료의 탄성 특성을 비접촉식으로 측정하는 레이저 공명 초음파 분광 기술은 원거리에서 비접촉식으로 펄스 레이저 빔을 재료에 조사하여 초음파를 발생시킨 다음에, 측정용 연속발진 레이저 빔을 원거리에서 비접촉식으로 재료표면에 조사하여 초음파 신호를 측정하는 완전한 원거리 비접촉식 기술이다. 이 기술은 재료의 탄성 특성을 포함하여 결정의 방향이나 그레인 경계부 위치 정보 등의 제공에도 효과적으로 활용될 수 있다.

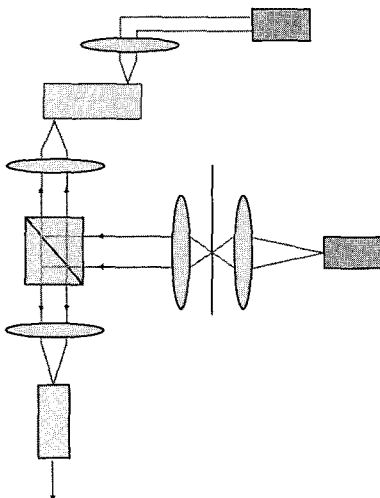


Fig. 3 Optical geometry of Laser-RUS system

3. 실험장치 구성 및 실험

3.1 시스템구성

Fig. 4 는 전체적인 시스템의 구성도 이고, Fig. 5 는 L-RUS 시스템의 실제 사진이다. 그림에서와 같이 공명 초음파를 발생시키는 펄스레이저는 빔 분할기를 지나 두 개의 빔으로 분할되어 한쪽은 측정 대상체에 조사되어 순간적인 열에너지 유입에 의하여 초음파를 발생시키면서 시편을 가진시키고, 다른 한쪽은 컴퓨터의 트리거 신호로 이용된다.

레이저에 의하여 생성된 초음파는 펄스레이저 발진에서 데이터 수집까지 수 μs 이내에서 진행되므로 정확한 시간에 동기를 맞추어 고속으로 데이터를 수집해야 하기 때문에 펄스레이저 발진에 동기를 일치시키기 위하여 트리거를 사용하였다.

다음으로 레이저 공명 초음파 신호를 검출하는 단일 주파수의 연속발진 레이저는 1/2 파장판을 통하여 선형 편광되고, 편광 빔분할기 통과 후 한쪽은 1/4 파장판을 통하여 원형 편광되어 측정 대상체로 향하게 된다.

측정 대상체로 향한 연속발진 레이저는 측정 대상체에서 되돌아와 다시 1/4 파장판을 통하여 선 편광되어 공초점 페브리-페롯 간섭계(CFPI:Confocal Fabry-Perot Interferometer)로 입사하게 되는데, CFPI에서 나온 연속발진 레이저는 광검출기를 통하여 전기적인 신호로 변환되고, 저주파 통과 필터를 통과한 신호만이 오실로스코프와 다이내믹 안정기를 통하여 컴퓨터로 전송되어 진동신호로 나타내게 된다.

이렇게 컴퓨터로 전송된 신호는 자체 소프트웨어 프로그램을 통해 메인화면에 시간-진폭 그래프와 주파수 스펙트럼 그래프로 보여진다.

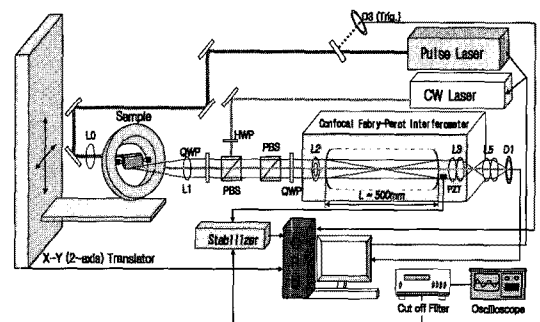


Fig. 4 Configuration of Laser-RUS system

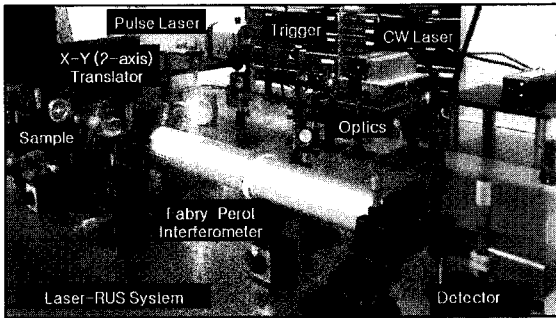


Fig. 5 Photograph of Laser-RUS system

3.2 시편 및 실험방법

본 연구에서는 일반 기계부품 및 구조용 재료로 주변에서 많이 이용되는 중탄소강(Medium Carbon Steel)을 시편으로 사용하였다.

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 실제 피로시험을 통해(스트레인 범위 0.2%/sec, 한주기가 20sec 인 인장-압축 삼각파 주기 0.05 Hz로 500 cycles 동안 시험 후 파단됨) 피로파괴된 관형 피로시험편(Fatigue Test Specimen)의 단면을 추출하여 실험을 실시하였고, 시험편의 크기와 물성치는 Table 1에 나타낸 것과 같으며, 양면은 CFPI의 이득을 높일 목적으로 시험편에서의 반사율을 높이기 위해 시험편 표면을 연마하였다.

본 논문에서는 Fig. 7에 보이는 바와 같이 시험편을 홀딩하는 나사의 중간을 스프링으로 만들어 가능한 한 시험편을 자유롭게 진동하도록 하는 홀딩장치를 사용하였다. 실험에 앞서 시험 외적인 변수를 통제하고, 신뢰도를 높이기 위한 목적으로 시험편을 홀딩하는 위치가 공명 주파수에 미치는 영향과 홀딩하는 힘이 공명주파수에 미치는 영향을 다음과 같은 실험을 통해 확인하였다.

Table 1 Material properties of a specimen

Dimensions of the specimen		Material properties of The specimen	
Length	0.0072m	Mass density	$7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
Width	0.0039m	Young's modulus	203 GPa
Thickness	0.0012m	Poisson's ratio	$\nu = 0.29$

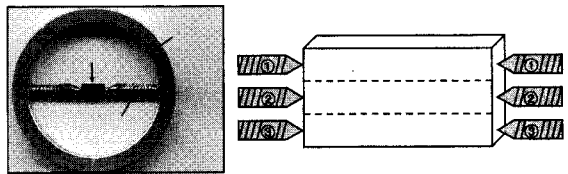
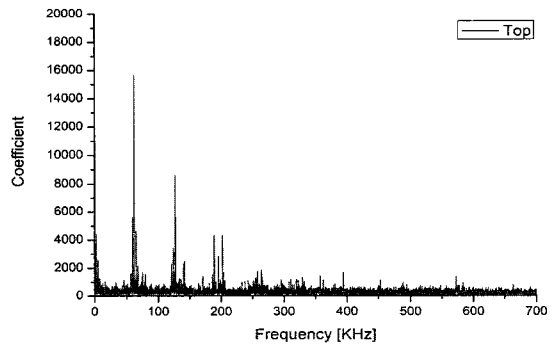
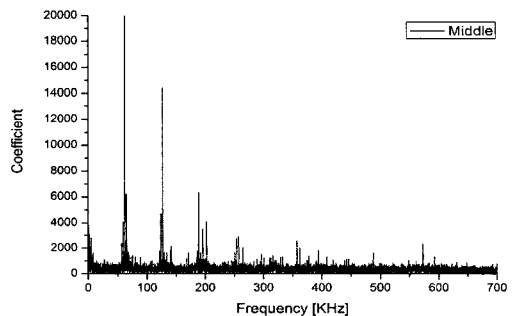


Fig. 7 Holding device & method

Fig. 8은 시험편을 홀딩하는 위치에 따른 각각의 공진 주파수 스펙트럼을 비교한 그래프로 2번 위치 즉, 측면의 중간지점을 홀딩하였을 때 가장 크고 뚜렷한 주파수 신호가 수신됨을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

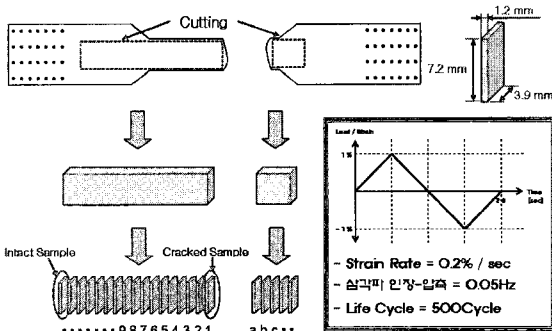


Fig. 6 The dimensions of the specimen

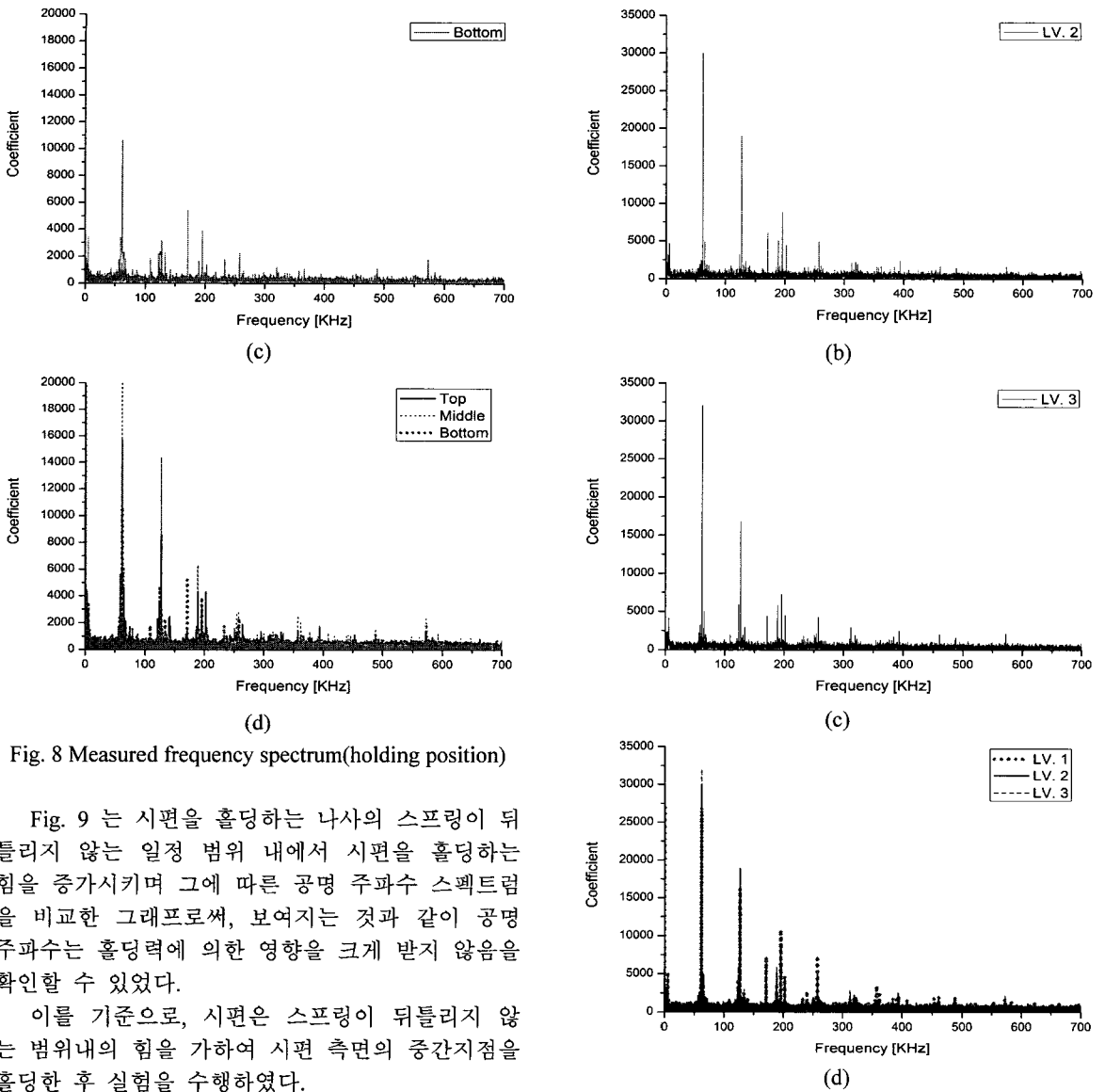
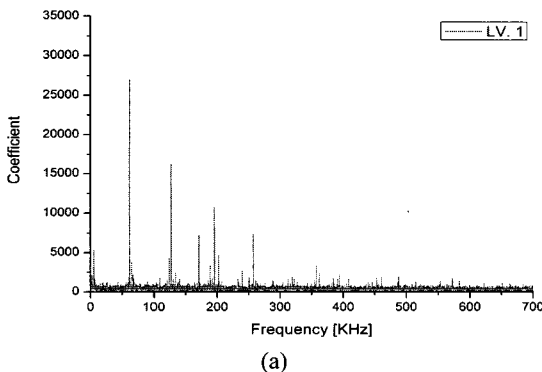


Fig. 8 Measured frequency spectrum(holding position)

Fig. 9 는 시편을 홀딩하는 나사의 스프링이 뒤틀리지 않는 일정 범위 내에서 시편을 홀딩하는 힘을 증가시키며 그에 따른 공명 주파수 스펙트럼을 비교한 그래프로써, 보여지는 것과 같이 공명 주파수는 홀딩력에 의한 영향을 크게 받지 않음을 확인할 수 있었다.

이를 기준으로, 시편은 스프링이 뒤틀리지 않는 범위내의 힘을 가하여 시편 측면의 중간지점을 홀딩한 후 실험을 수행하였다.

Fig. 9 Measured frequency spectrum(holding over)



4. 실험결과

펄스레이저 Q-스위칭의 Delay Time 을 330 μ s ~360 μ s까지 단계별로 변화 시키면서 펄스에너지를 조절하였고, Delay Time 에 따른 펄스에너지를 변화는 Fig. 10 과 같다.

발진된 펄스레이저의 빔이 시편면에 조사되어 시편편을 가진하고, 그에 따라 발생하는 공명주파수(Resonant Frequency)의 응답을 연속발진 레이저를 통해 수신하여, 오실로스코프를 통해 화면상에

나타내었으며, 건전시편과 피로시편 각각에 대한 두 개의 주파수 구간에서 공명주파수 데이터를 비교하였다.

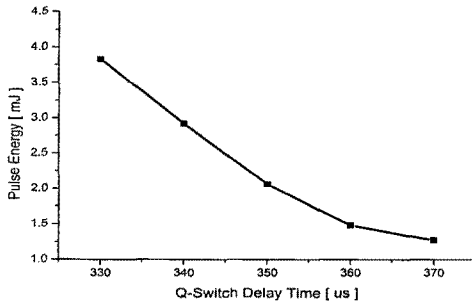


Fig. 10 Power of a pulse laser beam by the delay time

이는 재료의 미세결함을 검출하기 위한 레이저 공명 초음파 분광 시스템(L-RUS)을 통해 주파수의 변화를 알아보고자 한 것으로, Fig. 11 은 측정된 초음파 신호에 대한 주파수 스펙트럼의 공명 주파수를 구하기 위한 실험결과로서 시간영역에서의 진동신호를 나타내고 있고, Fig. 12 는 Fourier 변환 후 건전한 시편과 미세결합이 발생한 시편에 대한 각각의 주파수 영역에서의 진동신호를 나타내고 있다.

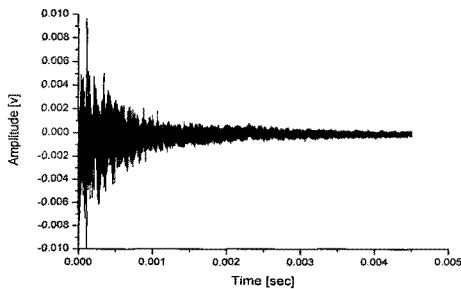
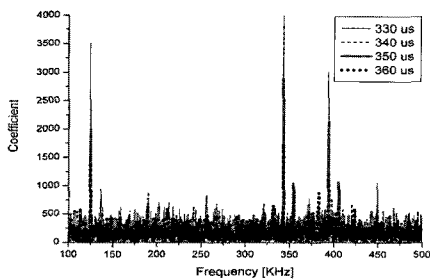
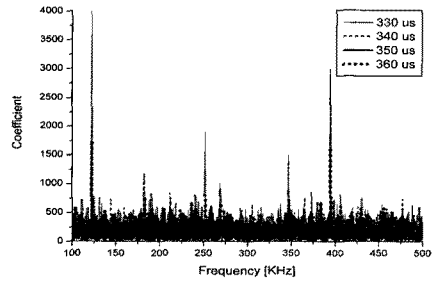


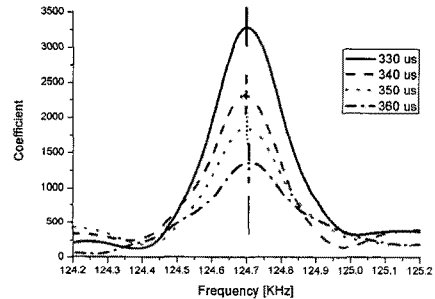
Fig. 11 Time domain signal



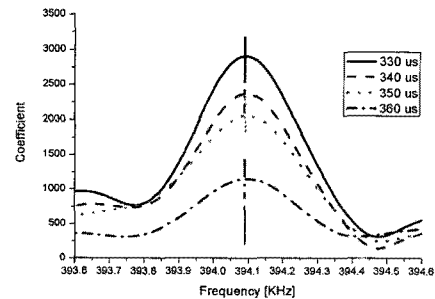
(a) Intact sample



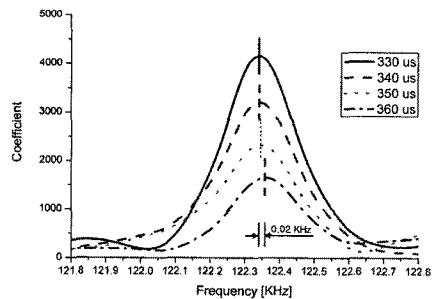
(b) Micro-crack sample
Fig. 12 Frequency domain signal



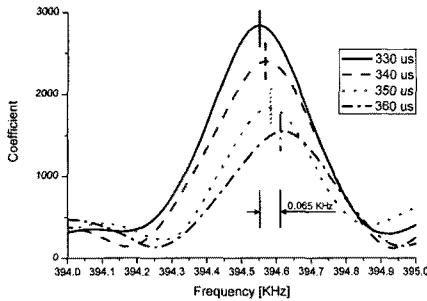
(a) Intact sample(measuring point 1)



(b) Intact sample(measuring point 2)



(c) Micro-crack sample(measuring point 1)



(d) Micro-crack sample(measuring point 2)

Fig. 13 Measured frequency spectrum(resonance curves)

공명 주파수 곡선은 Fig. 13 의 (a, b, c, d) 에서 보이는 것과 같이 나타나는데 Q-스위칭의 Delay Time 이 330 μ s ~ 360 μ s 으로 가면서 펄스에너지가 줄어드는 동안 건전한 시험편(a, b)의 경우 공명 주파수의 변화가 거의 없이 진폭만이 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

반면에 손상된 시험편(c, d)의 경우 진폭의 감소와 함께 공명주파수가 약 20 Hz 와 65 Hz 정도 이동함을 확인할 수 있었는데, 이와 같은 공명 주파수의 이동은 시험 내부에 존재하는 미세한 폐쇄 크랙에 기반한 것으로 판단되며, 레이저 초음파 공명 기법이 가능함을 보였다.

5. 결론

본 논문에서는 재료의 미세결함을 검출하기 위하여 완전한 비접촉식의 레이저 공명 초음파 분광 시스템(L-RUS)을 개발하였고, 레이저 초음파 공명 신호의 비선형 특성을 이용하여 미세결함 검출이 가능함을 실험으로 확인하였다.

선형 초음파 기법으로 검출이 어려운 마이크로 미세결함들은 초음파의 비선형 특성을 이용하여 검출이 가능하며, 본 논문에서는 정밀도는 높지만 파워가 약한 레이저 초음파의 비선형 특성을 이용하여서도 마이크로 미세결함의 검출이 가능함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Landau, L. D. and Lifshitz, E. M., "Theory of Elasticity, 3rd ed.," Pergamon Press, 1986.
2. Scruby, C. B. and Drain, L. E., "Laser ultrasonics:

- techniques and applications," Adam-Hilger, 1990.
3. Reese, S. J., Telshow, K. L., Lillo, T. M. and Hurley, D. H., "On the establishment of a method for characterization of material microstructure through laser-based resonant ultrasound spectroscopy," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 55, No. 4, pp. 770-777, 2008.
4. Ogi, H., Ledbetter, H., Kim, S. and Hirao, M., "Contactless modeselective resonance ultrasound spectroscopy: Electromagnetic acoustic resonance," Journal of Acoustic Society of America, Vol. 106, No. 2, pp. 660-665, 1999.
5. Shan, Q., Chen, C. M. and Dewhurst, R. J., "A conjugate optical confocal Fabry-Perot interferometer for enhanced ultrasound detection," Measurement Science and Technology, Vol. 6, No. 7, pp. 921-928, 1995.
6. Kenderian, S., Berndt, T. P. and Green, R. E., "Ultrasonic monitoring of dislocations during fatigue of pearlitic rail steel," Materials Science and Engineering A, Vol. 348, No. 1-2, pp. 90-99, 2003.
7. Cheong, Y.-M., Cheong, H.-K., Joo, Y.-S., Sim, C.-M., "Materials Characterization by Resonant Ultrasonic Spectroscopy," KAERI/RR-2077/2000, pp. 1-84, 2001.
8. Kim, J.-S., Park, S.-K., Baik, S.-H., Cheong, Y.-M., Kang, Y.-J., Kim, S.-K. and Cha, H.-K., "Laser-RUS System for Resonance Frequency Analysis of Materials," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 459-460, 2008.
9. Kim, J.-S., Park, S.-K., Baik, S.-H. and Kang, Y.-J., "Resonance Frequency Analysis of Materials by using the Laser-RUS System," The Optical Society Korea Summer Meeting, pp. 367-368, 2008.
10. Kim, J.-S., Park, S.-K., Kang, Y.-J., Kang, S.-J. and Kim, S.-K., "Observation of nonlinearity by using the Laser-RUS System," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 397-398, 2008.
11. Kim, S.-K., Park, S.-K., Kang, Y.-J., Kim, C.-S. and Kim, J.-S., "Frequency Analysis of Fatigue Specimens with a crack by using the LASER-RUS System," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 395-396, 2008.