

## 레이저 초음파의 표면파를 이용한 표면결함 측정

### Detection of a Surface-Breaking Crack Using the Surface Wave of a Laser Ultrasound

박승규\*<sup>†</sup>, 정현규\*, 백성훈\*, 임창환\*, 주영상\*, 강영준\*\*

Seung-Kyu Park\*<sup>†</sup>, Hyun-Kyu Jung\*, Sung-Hoon Baik\*, Chang-Hwan Lim\*,  
 Young-Sang Joo\* and Young-June Kang\*\*

**초 록** 레이저 초음파 검사 장치는 레이저 빔을 이용하여 초음파 신호를 발생시키고 측정하는 비접촉식 결함 검사 장치이다. 이 장치는 펄스 레이저 빔을 이용하여 광대역 주파수 범위를 갖는 초음파 신호를 발생시키고 작은 점으로 집속된 측정용 레이저 빔을 이용하여 초음파 신호를 측정하므로 우수한 측정 분해능을 제공한다. 본 논문에서는 레이저 초음파의 표면파를 이용하여 표면 결함의 깊이를 측정하는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 표면 결함은 깊이가 깊어질수록 차단 주파수 값이 작아지는 저주파 통과 필터 역할을 한다. 그리고 결함을 통과한 초음파 신호의 중심 주파수 값은 결함의 깊이에 따라 반비례적으로 작아진다. 본 논문에서는 표면 결함의 정규화된 전달함수를 구한 다음 주파수 감쇠 성분을 이용하여 표면 결함의 깊이 정보를 추출하였고 표면 결함을 통과한 레이저 초음파 신호의 중심 주파수 값을 이용하여 결함의 깊이 정보를 추출하였다. 제안된 표면 결함 깊이 측정 방법은 초음파의 진폭 변화에 의한 결함 깊이 측정법보다 더욱 정밀한 정보를 제공하였다.

**주요용어:** 레이저 초음파, 표면파, 비접촉식 검사, 표면 결함, 전달 함수, 주파수 감쇠, 중심 주파수

**Abstract** A laser ultrasonic inspection system is a non-contact inspection device which generates and measures ultrasounds by using laser beams. A laser ultrasonic inspection system provides a high measurement resolution because the ultrasonic signal generated by a pulse laser beam has a wide-band spectrum and the ultrasonic signal is measured from a small focused spot of a measuring laser beam. In this paper, we have investigated the detection techniques of a surface-breaking crack by using the laser ultrasonic surface waves. A crack acts as a low pass filter whose cut-off frequency is lowered in proportion to the depth of a crack. And, the center frequency value of a spectrum is decreased in proportion to the depth of a crack. In this paper, we extracted the crack information by using the frequency attenuation from the normalized transfer function spectrum of a surface-breaking crack. Also, we effectively measured the crack depth by using the decreasing value of the center frequency from a crack passed ultrasonic signal. The proposed measuring techniques of crack depths provided more precise information than the amplitude measuring technique.

**Keywords:** Laser Ultrasonic, Surface Wave, Non-Contacting Inspection, Surface-Breaking Crack, Transfer Function, Frequency Attenuation, Center Frequency

#### 1. 서 론

레이저 초음파 장치는 펄스 레이저 빔을 이용하

여 초음파 신호를 발생시키고 레이저 간섭계를 이용하여 발생된 초음파 신호를 측정하는 비접촉식 결함 검사 장치이다[1,2]. 펄스 레이저 빔의 표면

조사에 의하여 발생하는 초음파 신호는 일반적인 압전 트랜스듀서에 의하여 발생하는 초음파 신호에 비하여 광대역 스펙트럼을 갖는 초음파가 발생되며, 작은 점으로 집중된 측정 레이저 빔을 이용하여 초음파를 측정하므로 측정 분해능이 우수한 장점을 가지고 있다[1]. 또한 비접촉식 측정이므로 고온 재료에 대한 품질 검사가 가능하며 원자력발전소와 같이 접근이 용이하지 않은 지역에 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한 곡면부나 거친 표면에 대해서도 검사가 가능한 장점을 지니고 있다. 그러나 레이저 초음파 장치는 고가의 레이저 장치를 이용하여야 하며 상대적으로 낮은 신호대 잡음 비율을 갖는 단점이 있다. 최근에는 수백 kW급의 펄스 레이저 빔을 측정용 레이저 빔으로 사용하여 레이저 간섭계의 신호대 잡음 비율을 크게 향상시키고 있으며, 이와 같은 레이저 초음파 검사 장치는 사람의 접근이 용이하지 않은 원자력 발전소에서 결함 검사용으로 사용되고 있다[3]. 국내에서는 고온의 강판에서 품질 결정에 주요한 요소인 결정입경(grain size) 측정과 배관부 결함 평가 및 항공기 부품의 결함 검사 등에 레이저 초음파 검사 기술을 적용하였다[4-6]. 국외에서는 원자력발전소 결함 부품 검사와 철로 결함검사, 항공기 부품의 결함 검사 등에서 다양한 연구가 활발하게 수행되고 있다[7-9].

표면 결함의 깊이 정보는 재료의 열화 평가에 있어서 중요한 요소이다. 초음파를 이용한 결함의 깊이 측정은 결함에 의한 음영 효과나 진폭 감소, 주파수 감소 및 결함 끝단에서의 회절 신호를 이용하는 방법 등이 있다[10]. 이러한 측정법은 특정 조건의 결함 측정에 대해 효과적이거나 실제 환경에서 존재하는 다양한 결함을 측정하기에는 한계가 있다.

본 논문에서는 광대역 스펙트럼 특성을 갖는 레이저 표면파의 주파수 감쇠 특성을 이용하여 결함의 깊이를 측정하였다. 본 논문에서는 펄스 레이저와 공초점 페브리-페롯(Fabry-Perot) 레이저 간섭계를 사용하여 레이저 초음파 검사 장치를 구성하였으며, 레이저 표면파를 이용하여 표면 결함 검출 실험을 수행하였다. 표면파는 시편의 표면에서 수직 방향으로 1파장 길이 이내에 대부분의 에너지가 집중되어서 전파하므로 표면 결함은 표면파에 대해 저주파 통과 필터 역할을 한다[11]. 그러므로 본 논문에서는 결함에 대한 정규화된 필터 형상을 구한 다음 구해진 필터의 특정 주파수 값의 감쇠 성분과

광대역 범위를 갖는 레이저 표면파 스펙트럼의 중심 주파수 값을 이용하여 결함의 깊이 정보를 추출하였다.

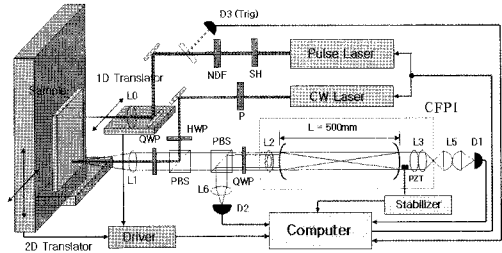


Fig. 1 Configuration of the laser ultrasonic inspection system

## 2. 레이저 초음파 검사 장치의 구성

표면 결함 검출 실험을 위하여 본 논문에서 구성한 레이저 초음파 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같고 구성된 장치의 사진은 Fig. 2와 같다. 펄스 레이저 시스템은 반치폭이 10ns인 펄스 레이저 빔을 측정 대상체의 표면에 조사한다. 이때 펄스레이저 빔의 조사 위치는 컴퓨터에 의해 제어되는 1차원 이송장치(1D Translator)에 의해 이동될 수 있다. 펄스 레이저 빔이 측정 대상체의 표면에 조사되면 순간적인 열에너지 유입에 의하여 초음파가 발생되며 발생한 초음파는 측정 시편의 표면을 변이시킨다. 이때 연속 발진 레이저 빔을 측정 대상체 표면에 작은 점으로 집중시켜 공초점 페브리-페롯 레이저 간섭계로 초음파 신호를 검출한다. 간섭계에 획득되는 초음파 신호는 두 개의 광센서(D1, D2)에 의하여 전기적인 신호로 변환되며 고주파 통과 필터를 지난 후에 고속 A/D 변환기에 의하여 디지털 데이터로 변환된다. 레이저에 의해 유도되는 초음파 신호는 수  $\mu$ s 동안 발생되므로 정확한 시간에 동기를 맞춰서 고속으로 데이터를 수집하여야 한다. 본 논문에서는 광센서 D3을 사용하여 펄스 레이저 빔의 조사 시간에 동기를 일치시켰다. 구성된 시스템은 컴퓨터에 의하여 제어되는 2차원 이송장치(2D Translator)를 이용하여 샘플 시편을 정밀하게 이동시킬 수 있다.

레이저 초음파 검사 장치는 거친 재료 표면이나 곡률 변화가 큰 재료 표면에서도 스캐닝을 하면서 검사를 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 스캐닝 과

정에서 측정 대상체의 표면 상태가 변화하고 이에 따라 간섭계의 투과-반사 이득 특성이 크게 변화하므로 초음파의 측정 과정에서 오차가 발생할 수 있다. 구성된 레이저 초음파 검사 장치는 발생하는 오차를 줄이기 위하여 레이저 간섭계의 이득이 최대가 되는 순간에 초음파 신호를 획득 하였으며, 측정된 초음파 신호에 대해 측정 순간에서의 간섭계 투과-반사광 신호의 기울기 값으로 나누어 줌으로써 초음파 신호를 정규화 시켰다[12].

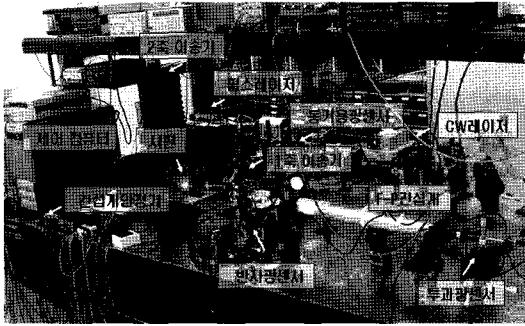


Fig. 2 Photograph of the laser ultrasonic system

3. 표면 결함 검출 실험

레이저 초음파 검사 장치는 고속 데이터 수집보드(AL81G, ALI, max. sampling speed 1GHz)와 다기능 보드(PCI9112, ADLink)가 장착된 제어 컴퓨터와 펄스 레이저(Quantel-Brilliant) 및 안정화된 CW 녹색 레이저(142H, LightWave Elec. Inc.)를 사용하는 CFPI(CFT-500, Buleigh, FSR 150MHz)로 구성되어 있다. 제어 컴퓨터는 랜 포트를 이용하여 이더넷(Ethernet) 통신 방식으로 2차원 자동이송장치(ATS212-M, Aerotech Inc)와 1차원 자동이송장치(OEM57-83, Parker)를 제어한다. 본 논문에서는 APD(C3090E, PerkingElmer)센서와 고속 고이득 증폭기를 구성하여 측정 효율이 높은 광센서를 구성하였다. 펄스 레이저 외부 트리거용으로는 상용의 광센서(ThorLabs, DET210)를 사용하였다. 펄스 레이저는 10Hz에 최적화되어 있으며, 펄스 레이저 빔의 반치전폭(FWHM : full-width at half-maximum)은 약 10ns이다. 결함 검출 실험에서는 약 30mJ의 에너지를 갖는 펄스 레이저 빔을 사용하였으며, 측정용 CW 녹색 레이저는 약 60mW범위의 출력을 사용하였다.

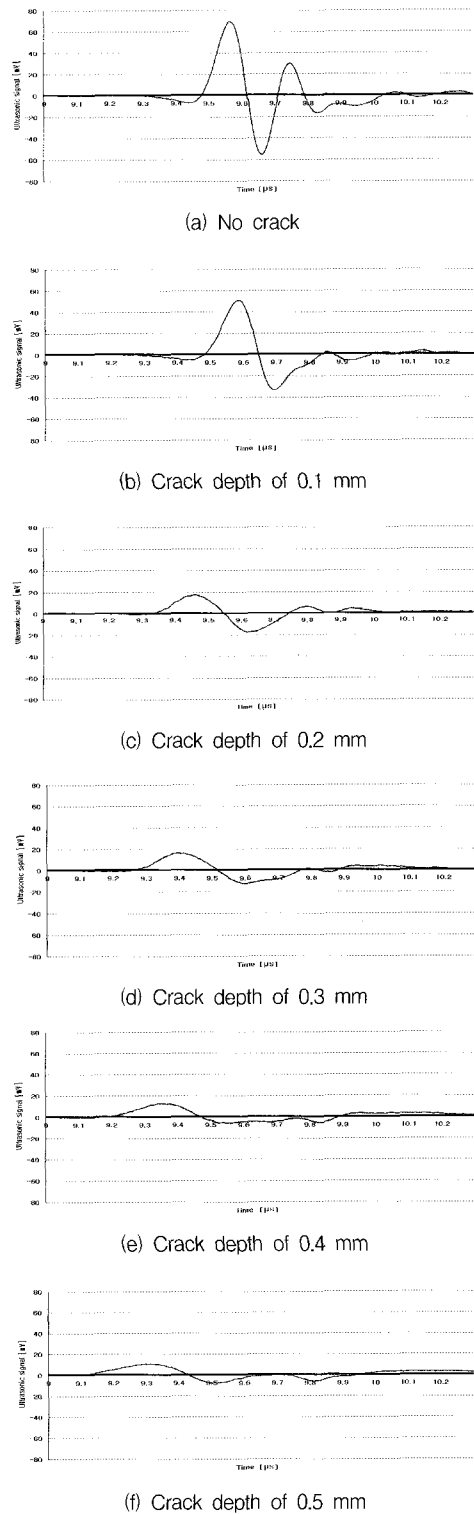


Fig. 3 Measured laser ultrasonic surface waves according to the depths of surface-breaking cracks

본 연구에서는 실험을 위하여 SUS 316 재질의 시편에 깊이가 100 $\mu$ m에서 500 $\mu$ m 사이인 표면 결함을 제작하였다. 사포 1000으로 표면 연마된 시편의 크기는 240x100x10(WxHxD) mm이고, 시편에 제작된 표면 결함의 폭은 모두 300 $\mu$ m이고 길이는 10cm이다. 길이 7mm의 선형 필스 레이저 빔과 연속 발전 레이저 빔은 약 30mm 정도 떨어져 있고, 그 중간에 표면 결함이 위치되어 있다. 그러므로 컴퓨터는 결함 중앙부를 통과한 레이저 초음파의 표면파 신호를 측정한다.

깊이 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m, 300 $\mu$ m, 400 $\mu$ m, 500 $\mu$ m 표면 결함에서 각 시편마다 40번씩의 레이저 초음파를 발생시켜 측정한 다음 평균화한 후에 표면파 부분을 확대된 신호는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 표면파 신호에서 볼 수 있듯이 초음파 신호는 표면 결함의 깊이가 깊어질수록 진폭이 작아지고 주기가 길어져 고주파 성분이 많이 감소됨을 시각적으로 관찰할 수 있다. 깊이가 다른 각각의 샘플에서 40번씩 초음파를 발생시켜 최대-최소값을 구한 후에 평균값을 구한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 결과에서 볼 수 있듯이 표면 결함의 깊이가 깊어질수록 표면파 신호의 진폭은 반비례적으로 작아지기는 하나, 일반적인 트랜스듀스 방식의 초음파 신호와 마찬가지로 레이저 초음파에서도 각 샘플마다 발생하는 초음파 진폭 크기의 변화가 심하여 선형적 반비례 관계는 아니었다.

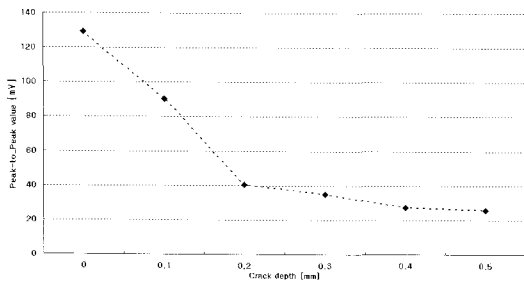


Fig. 4 Averaged peak-to-valley values according to the depths of surface-breaking cracks

본 논문에서는 표면 결함 측정을 위하여 시간 영역에서의 신호 처리와 동시에 주파수 영역에서의 신호 처리를 수행하였다. 주파수 영역에서 구한 표면 결함의 깊이별 표면파 신호의 스펙트럼은 Fig. 5와 같다.

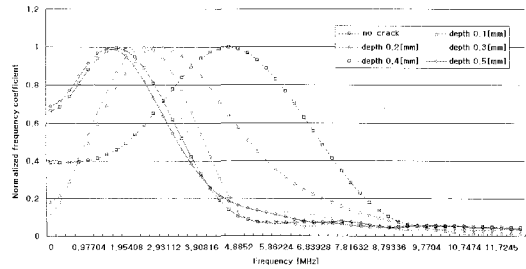


Fig. 5 Spectrum distributions of laser ultrasonic surface waves according to the depths of surface-breaking cracks

Fig. 5의 주파수 스펙트럼에서 시각적으로 관찰할 수 있듯이 레이저 초음파 스펙트럼은 표면 결함의 깊이가 증가할수록 일부 고주파 성분은 서로 섞이는 부분이 있더라도 중심 주파수 위치는 반비례적으로 감소함을 뚜렷하게 알 수 있다.

각각의 표면 결함에 대해 40번씩의 초음파를 발생시켜 구한 표면파 스펙트럼의 중심 주파수 값을 평균화한 그래프는 Fig. 6과 같다.

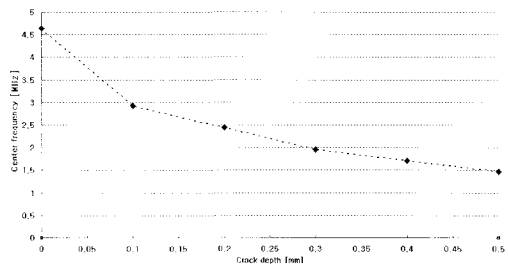


Fig. 6 Averaged center frequency values according to the crack depths of surface-breaking cracks

Fig. 6의 실험 결과에서 관찰할 수 있듯이 표면 결함의 깊이가 증가할수록 중심 주파수 값은 반비례적으로 감소함을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 6의 실험 결과를 비교해 보면 주파수 영역에서의 중심 주파수 추출법이 시간 영역에서의 최대-최소값 관찰법 보다 더욱 정밀한 정보를 제공함을 알 수 있다.

표면 결함을 통과한 표면파 신호는 측정용 레이저 빔의 작은 집속점에서 측정된다. 본 논문에서는 신호 처리 장치를 이용하여 표면 결함에 대한 전달 함수를 구한 다음에 주파수 감쇠 성분을 이용하여 표면 결함의 깊이 정보를 추출하였다.

결함에 대한 전달 함수는 다음 식 (1)과 같다.

$$p(t) = \sum_{m=1}^{1024} g(m)i(t-m) \quad (1)$$

여기서 함수  $i$ 는 결함을 통과하기 전의 초음파 신호를 의미하고 함수  $p$ 는 결함을 통과한 후의 레이저 초음파 신호를 의미한다. 그리고 함수  $g$ 는 표면 결함의 깊이에 대응하는 표면파의 투과 특성을 나타내는 표면 결함에 대한 전달 함수이다.

표면 결함에 대한 전달함수를 식 (1)과 같은 시간 영역에서 구하기 위해서는 계산 절차가 복잡하므로 본 논문에서는 식 (2)를 이용하여 주파수 영역에서 전달 함수를 구하였다.

$$G(s) = \frac{P(s)}{I(s)} \quad (2)$$

여기서 함수  $I$ 와 함수  $P$  및 함수  $G$ 는 각각 입력 신호  $i$ 와 결함 통과 신호  $p$  및 결함 전달 함수  $g$ 를 주파수 변환한 함수이다.

Fig. 7은 식 (2)를 사용하여 무결함 시편과 깊이가 100 $\mu$ m에서부터 500 $\mu$ m사이인 표면 결함에 대한 전달 함수를 주파수 영역에서 구한 다음 이를 정규화시킨 결과이다. Fig. 7에 보이는 바와 같이 무결함에서는 모든 주파수 대역에서 주파수 감쇠가 없으며 표면 결함의 깊이가 증가할수록 고주파 성분은 더욱 많이 손실됨을 알 수 있다. 표면파는 시편의 표면에서 수직 방향으로 1과장 깊이 이내에 대부분의 에너지가 집중되어서 전파하므로 표면 결함은 표면파에 대해 저주파 통과 필터 역할을 한다[11]. 그러므로 표면 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 차단 주파수 값은 작아지는 특징을 가지고 있다. 예를 들어 1MHz의 표면파 신호는 5MHz의 표면파 보다 파장이 5배 길어서 5MHz 신호가 통과할 수 있는 결함 깊이보다 5배 깊은 표면결함을 통과할 수 있다.

본 논문에서는 표면 결함의 깊이 정보를 추출하기 위하여 깊이에 따른 주파수 감쇠 정도를 조사하였다. Fig. 8은 결함의 깊이에 따른 2.92MHz 주파수 성분의 감쇠를 조사한 결과이다. Fig. 8의 주파수 감쇠에서 확인할 수 있듯이 특정 주파수 성분의 감쇠는 결함 깊이에 따라 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

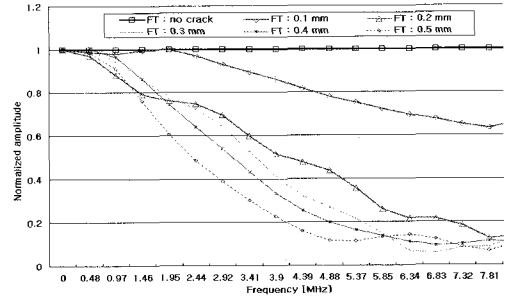


Fig. 7 Fourier transformed transfer functions according to crack depths of surface-breaking cracks

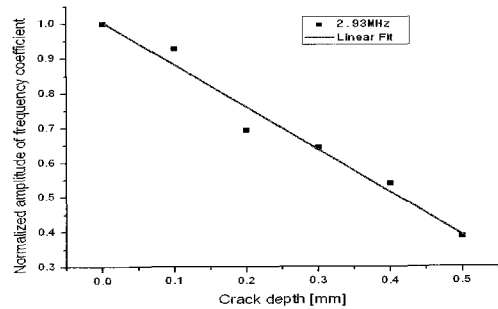


Fig. 8 Normalized amplitude of frequency coefficient of 2.92 MHz according to crack depths

Fig. 9는 결함 깊이에 따라 1.95MHz에서부터 5.37MHz 사이 주파수 계수의 평균값을 도시한 결과이다. Fig. 8과 Fig. 9에서의 실선은 선형 피팅(fitting)한 결과이다.

표면파를 이용하여 다양한 깊이의 표면 결함을 검출한 본 실험의 결과에서 알 수 있듯이, 결함 깊이의 증가에 따라 레이저 초음파 신호의 진폭 감소와 고주파 성분의 감소가 비례적으로 뚜렷하게 관찰되었다. 같은 깊이의 표면 결함에 대하여 초음파의 더 큰 고주파 성분일수록 더 크게 감소함을 알 수 있다.

또한 표면 결함의 깊이가 증가할수록 결함 전달 함수의 고주파 성분 감쇠는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 표면 결함을 통과한 레이저 표면파 신호의 최대-최소값과 주파수 스펙트럼의 중심 주파수 값도 반비례적으로 감소함을 확인하였다. 그러나 본 실험의 결과에서 관찰할 수 있듯이 레이저 초음파 신호는 강도 변화가 심한 특징으로 인하

여 표면 결함 해석시에 시간 영역에서의 진폭 해석 보다는 주파수 영역에서의 중심 주파수 해석이 더욱 정확한 깊이 정보를 제공할 수 있었다.

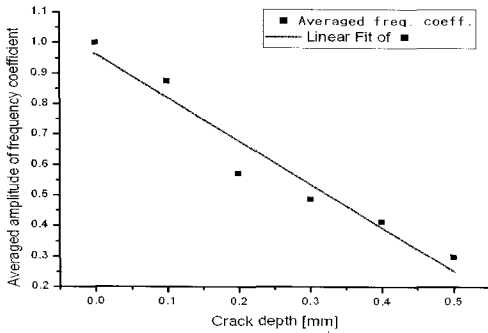


Fig. 9 Averaged amplitude of frequency coefficient from 1.95 MHz to 5.37 MHz according to crack depths

#### 4. 결 론

본 논문에서는 레이저 초음파의 표면파를 이용하여 표면 결함 검출 실험을 수행하였다. 실험을 위하여 펄스 레이저와 공초점 페브리-패롯 레이저 간섭계를 이용하여 레이저 초음파 검사 장치를 구성하였다. 본 논문에서는 광대역 스펙트럼을 갖는 레이저 표면파의 중심주파수 감소와 결함 전달 함수의 주파수 감쇠 성분을 관찰함으로써 결함 깊이 정보를 추출하였다. 표면 결함을 검출함에 있어서, 시간 영역에서 표면파 신호의 강도 변화를 관찰하는 방법은 전체적인 경향 관찰은 가능하나 정확도가 떨어짐을 확인하였다. 그러나 레이저 초음파의 주파수 영역에서 스펙트럼의 중심 주파수 값을 관찰하는 방법은 좀 더 신뢰성 높은 표면 결함의 깊이 정보를 제공하였다. 그리고 결함 전달 함수에서 고주파 성분의 감쇠 관찰법 또한 신뢰성 높은 결함 깊이 정보 추출이 가능함을 확인하였다.

향후 연구 과제로 주파수 영역에서의 신호 처리는 노이즈 성분에 민감한 특징이 있으므로 효율적인 신호 처리에 대한 세부적인 연구가 필요하리라 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] C. B. Scruby and L. E. Drain, "Laser ultrasonics: techniques and applications", Adam-Hilger, New York, (1990)
- [2] 이승석, 장태성, "레이저 유도 초음파에 대한 이해", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 1, pp. 74-87, (2002)
- [3] Toshiba Review, "Laser based maintenance technology for PWR power plants," p. 20, (2005)
- [4] 임충수, 박형국, 전형하, 김달우, "레이저 응용 초음파를 이용한 금속 시편의 결장 입경 측정 연구", 비파괴검사학회 춘계학술대회, pp. 59-63, (2002)
- [5] 최상우, 이준현, 조윤호, "배관부 부식 및 결함 평가를 위한 레이저 유도 초음파 적용 기술", 비파괴검사학회 춘계학술대회, pp. 46-54, (2004)
- [6] 장경영, 김홍준, D. Ceringgla, B. Djordjevic, "레이저 여기 램파를 이용한 항공기 판재 접합부의 비접촉식 초음파 검사", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 2, pp. 163-168, (2001)
- [7] T. Miura, H. Kuroda, M. Ochiai and K. Naruse "Applications of laser-ultrasonic technique for nuclear power plants," J. of JSNDI, Vol. 51, No. 4, pp. 194-199, (2002)
- [8] S. B. Palmer and S. Dixon, "Industrially viable non-contact ultrasound," Insight, Vol. 45. No. 3, pp. 211-217, (2003)
- [9] S. Kenderian, T. P. Berndt and R. E. Green, "Ultrasonic monitoring of dislocations during fatigue of pearlitic rail steel," Materials Science and Engineering, A348, pp. 90-99, (2003)
- [10] M. G. Silk, "Research Techniques in non-destructive testing," Vol. 3, Academic Press, New York, (1977)
- [11] I. S. Viktorov, "Rayleigh and lamb waves," Plenum Press, New York (1967)
- [12] 박승규, 백성훈, 박문철, 임창환, 나성웅, "적응적 에러 보정과 다이내믹 안정기를 이용한 레이저 유도 초음파 검사 시스템 개발", 비파괴검사학회지, Vol. 25, No. 5, pp. 391-399, (2005)