

적응적 에러 보정과 다이내믹 안정기를 이용한 레이저 유도 초음파 검사 시스템 개발

Development of a Laser-Generated Ultrasonic Inspection System by Using Adaptive Error Correction and Dynamic Stabilizer

박승규*[†], 백성훈*, 박문철*, 임창환*, 나성웅**

Seung-Kyu Park*[†], Sung-Hoon Baik*, Moon-Cheol Park*, Chang-Hwan Lim* and Sung-Woong Ra**

초 록 레이저 유도 초음파 시스템은 높은 공간분해능으로 스캐닝 하면서 광대역 범위에서 검사를 할 수 있는 비접촉식 검사 장치이다. 유도되는 초음파 신호의 크기는 펄스레이저의 출력에 의해서도 변화하지만, 연속발전 레이저빔이 위치하는 표면 상태에 따라라도 측정되는 초음파 세기는 크게 변화한다. 본 논문에서는 안정된 레이저 유도 초음파 시스템을 구성하기 위하여 펄스 레이저 빔의 출력을 측정하여 초음파 발생 오차를 보정하였으며, 대상체 표면의 상태에 따라 크게 변화하는 측정용 레이저 간섭계의 측정 이득 변화를 매순간 측정하여 측정 오차를 보정하였다. 본 논문에서는 대상체 표면을 스캐닝 할 수 있도록 다이내믹 안정기가 부착된 레이저 유도 초음파 시스템을 개발하였다. 개발한 레이저 초음파 시스템은 스캐닝 과정에서 간섭계의 이득이 최대가 되는 순간을 적응적으로 포착하여 초음파를 발생시키고, 유도된 초음파 신호를 고속으로 샘플링한 후에 실시간으로 신호처리를 한다. 본 논문에서는 안정적인 레이저 유도 초음파 시스템을 구성하기 위한 전체 시스템의 하드웨어 구성 방법과 제어 알고리즘에 대하여 기술한다. 또한 본 논문에서 제안한 발생오차 보정방법과 측정오차 보정 방법이 시스템의 성능 향상에 유효함을 실험을 통하여 확인하였다.

주요용어: 레이저 유도 초음파, 스캐닝, 펄스레이저, 연속발전레이저, 다이내믹 안정기, 이득 최대 순간

Abstract Laser-generated ultrasonic inspection system is a non-contact scanning inspection device with high spatial resolution and wide bandwidth. The amplitude of laser-generated ultrasound is varied according to the energy of pulse laser and the surface conditions of an object where the CW measuring laser beam is pointing. In this paper, we correct the generating errors by measuring the energy of pulse laser beam and correct the measuring errors by extracting the gain information of laser interferometer at each time. A dynamic stabilizer is developed to stably scan on the surface of an object for an laser-generated ultrasonic inspection system. The developed system generates ultrasound after adaptively finding the maximum gain time of an laser interferometer and processes the signal in real time after digitization with high speed. In this paper, we describe hardware configuration and control algorithm to build a stable laser-generated ultrasonic inspection system. Also, we confirmed through experiments that the proposed correction method for the generating errors and measuring errors is effective to improve the performance of a system.

Keywords: laser-generated ultrasonic, scanning, pulse laser, CW measuring laser, dynamic stabilizer, maximum gain time

1. 서 론

레이저 유도 초음파(laser-generated ultrasonics)는 펄스레이저 빔을 측정대상체의 표면에 조사하여 초음파를 발생시키고 레이저 간섭계를 이용하여 비접촉식으로 초음파 신호를 검출하는 비파괴 검사 장치이다[1,2]. 일반적으로 널리 사용되는 압전 트랜스듀서에 의한 초음파 검사 기술은 높은 신호대 잡음 비율과 효율성 및 간편성 면에서 우수하나 고온 재료에는 적용이 불가능하고 원자력발전소와 같이 접근이 용이하지 않은 지역에 적용하기 어려운 단점이 있다[2,3]. 비접촉식으로 초음파를 유도하고 비접촉식으로 초음파를 검출하는 레이저 유도 초음파 검사 기술은 기존의 트랜스듀서에 의한 초음파 기술에 비하여 스캐닝 방법이 용이하면서도 높은 공간분해능으로 고속 검사를 할 수 있다. 또한 주파수 대역을 수십 MHz까지의 광대역 신호와 협대역의 신호를 필요에 따라 발생시킬 수 있어서 응용범위가 넓으며 곡면부나 거친 표면에 대해서도 검사가 가능한 장점을 지니고 있다. 또한 레이저 간섭계는 표면 변위에 대한 절대 값을 얻을 수 있는 장점이 있다. 임충수 등[4]은 고온의 강판에 레이저 유도 초음파 검사기술을 적용하여 품질 결정에 주요한 요소인 결정 입경(grain size)을 측정하였고, 최상우 등[3]은 배관부 결함평가에, Kenderian 등[5]은 철로의 내부 결함 검사에, 장경영 등[6]과 Silva 등[7]은 항공기 부품의 결함검사에 레이저 유도 초음파 검사 기술을 적용하였다. 그러나 레이저 유도 초음파 시스템은 상대적으로 고가이며 신호대 잡음 비율이 낮은 단점이 있다. 현재 레이저 간섭계의 검출 효율을 높이기 위한 다양한 연구가 활발히 수행 중에 있다[8-10]. 특히, Dewhurst 와 Shan 등[8]은 공초점 Fabry-Perot 레이저 간섭계(CFPI : Confocal Fabry-Perot Interferometer)에서 초음파 검출을 위한 투과 모드와 반사모드에서의 이론적인 모델링을 연구하였으며 투과광과 반사광을 결합하여 초음파를 측정함으로써 측정 이득을 크게 향상시켰다.

본 논문에서는 스캐닝 장치와 데이터 수집보드가 장착된 제어 컴퓨터와 펄스레이저 및 공초점 Fabry-Perot 간섭계를 이용하여 안정된 레이저 유도 초음파 시스템을 구성하였다. 본 논문에서 구성한 다이내믹 안정 제어장치는 실시간으로 레이저 간섭계의 투과-반사광의 상태를 관측하면서 이득이 최대가 되는 순간을 포착하여 레이저 유도 초음파를

발생시킨다. 유도된 초음파 신호는 고속 데이터 수집보드에 의하여 최대 1 GHz의 속도로 샘플링되며 실시간으로 신호처리 된다. 컴퓨터는 초음파가 유도되는 순간에 동기를 시켜 간섭계의 투과-반사광의 기울기 정보를 추출하며 또한 펄스 레이저의 출력을 안정적으로 측정한다. 측정된 데이터는 초음파의 신호처리 과정에서 발생하는 오차에 대한 보정 정보로 활용된다. 본 논문에서 구성한 다이내믹 안정기는 미세한 파장 변화와 열적변화로 야기되는 간섭계의 투과-반사광의 위치 이동을 바이어스 제어 방식으로 고정시켜 안정적으로 장시간 측정이 가능하게 시스템을 구성하였다. 본 논문에서는 실험을 통하여 시스템의 안정적인 운영을 확인하였으며 SLS(scanning laser source)기법 등을 사용하여 표면 결함에 대한 비파괴검사를 수행하였다.

2. 레이저 유도 초음파 시스템의 구성

본 논문에서 구성한 레이저 유도 초음파 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다. 펄스레이저 시스템은 반치폭이 10 ns인 펄스 레이저 빔을 측정대상체의 표면에 조사한다. 이때 펄스레이저 빔의 조사 위치는 컴퓨터에 의해 제어되는 1차원 이송장치(1D Translator)에 의해 이동될 수 있다. 펄스 레이저 빔이 측정대상체의 표면에 조사되면 순간적인 열에너지에 의하여 초음파가 유도되며 유도된 초음파는 측정시편의 표면을 변이시킨다. 이때 연속발진 레이저(CW laser) 빔을 측정대상체 표면상에 조사시켜 CFPI로 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 $[\mu\text{sec}]$ 동안 발생되므로 정확한 시간에 동기를 맞춰서 고속으로 데이터를 수집하여야 한다. 본 논문에서는 광센서 D3를 사용하여 펄스레이저 빔의 조사 시간에 동기를 일치시켰다. 레이저 초음파 신호는 펄스 레이저 빔의 출력 강도에 따라 유도되는 초음파 양이 다르므로 본 논문에서는 광센서 D4를 이용하여 레이저 빔의 출력을 측정하여 발생과정에서의 에러를 보정하였다. 구성된 시스템은 컴퓨터에 의하여 제어되는 2차원 이송장치(2D Translator)를 이용하여 샘플 시편을 정밀하게 이동시킬 수 있다.

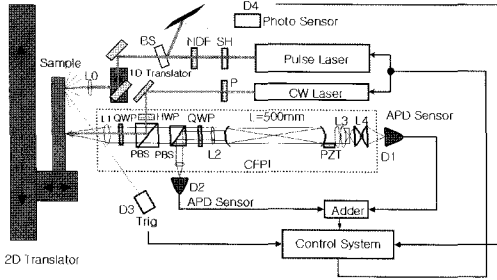


Fig. 1 Configuration of the designed laser-induced ultrasonic system

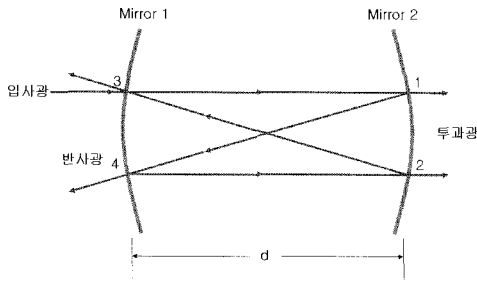


Fig. 2 Schematic diagram of a Confocal Fabry-Perot Interferometer

레이저 간섭계인 CFPI는 동일한 특성을 갖는 두 개의 구형 미러가 서로 마주보게 배치되어 있는 구조로 되어있다. Fig. 2는 CFPI의 내부를 세부적으로 도시한 예로서, 보이는 바와 같이 위치 3으로 입사된 레이저 광은 공동(cavity)안에서 위치 1, 4, 2, 3를 거치고 나서 원래의 위치로 되돌아간다. 이 과정은 계속 반복되면서 위치 1에서 출력되는 동시 투과광의 수를 무한히 증대시킨다. 부가적인 투과광은 위치 2, 3, 4에서 발생되며 높은 성능을 갖는 초음파 측정을 위해서는 투과광인 위치 1, 2에서의 출력광과 반사광인 위치 3, 4에서의 출력광을 동시에 이용한다. 초음파 신호 검출을 위한 CFPI의 한 쪽 거울에는 정밀하게 위치를 이동시킬 수 있는 PZT구동축이 설치되어 있다. 간섭계 내부의 흡수를 무시한다면, 투과광의 강도는 다음 식 (1)과 같고 반사 계수는 식 (2)와 같다.

$$K_t = \frac{(1+R^2)(1-R^2)}{1-2R^2 \cos \phi + R^4} \quad (1)$$

$$K_r = \frac{1-2R \cos \phi + R^2}{1-2R^2 \cos \phi + R^4} + \frac{R(1-R^2)}{1-2R^2 \cos \phi + R^4} \quad (2)$$

여기서 R은 거울의 반사율이고 ϕ 는 간섭계의 공동 내에서 두 연속 반사 사이에서의 위상지연이며 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\phi = 8\pi \frac{d}{\lambda} = 8\pi \frac{dv}{c} \quad (3)$$

여기서 d는 미러 사이의 거리이며 λ 는 광학파장이며 v는 광학주파수이고 c는 광속도이다.

Fig. 1에 보이는 바와 같이 본 논문에서는 투과광과 반사광 신호를 동시에 이용하여 초음파 신호를 획득하였다. 이때 강도계수는 다음 식 (4)와 같다.

$$K_c = K_r - K_t = \frac{1-2R \cos \phi + R^2}{1-2R^2 \cos \phi + R^4} - \frac{(1-R+R^2)(1-R^2)}{1-2R^2 \cos \phi + R^4} \quad (4)$$

이와 같이 투과광과 반사광의 신호를 동시에 이용하면 초음파의 측정 감도를 두 배 정도 향상시킬 수 있다[8].

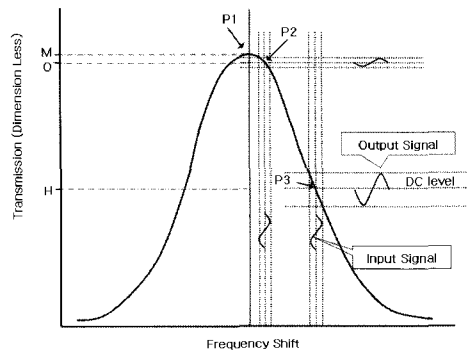


Fig. 3 Variation of the transmission-reflection coefficient of intensity for a Confocal Fabry-Perot Interferometer

Fig. 3은 투과광과 반사광(투과-반사광)을 합친 신호를 확대한 그림이다. Fig. 3에 보이는 바와 같이 높은 신호 대 잡음 비율을 갖는 초음파를 검출하기 위해서는 투과-반사광의 기울기가 가장 큰 위치인 진폭 H의 P3 위치에서 초음파를 검출하여야 한다.

동일한 양의 미소 표면 변이에 대하여 투과-반사광의 기울기 값이 큰 위치 P3에서 측정되는 초음파 신호는 기울기 값이 적은 진폭 O인 위치 P2에서 측정되는 초음파 신호보다 진폭이 크울 알 수 있다. 본 논문에서도 초음파 신호의 측정 이득을 최대로 유지하기 위하여 간섭계의 투과광과 반사광을 결합하는 방식으로 초음파 신호를 검출하였다.

3. 안정적 스캐닝을 위한 다이내믹 안정 제어 장치의 구성

레이저 유도 초음파 시스템은 정밀하게 스캐닝을 하면서 고속으로 검사를 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 스캐닝 과정에서 측정대상체의 표면 상태가 변화하고 이에 따라 간섭계의 투과-반사 이득 특성이 크게 변화하므로 초음파의 측정 과정에서 오차가 발생된다. 또한 CFPI의 투과-반사광은 내부의 열적 변화로 인하여 투과-반사의 위치가 미소하게 이동되므로 장시간 측정이 어렵다.

본 논문에서는 이와 같은 에러를 보정하면서 시스템을 안정적으로 제어하는 다이내믹 안정기를 구성하였다. Fig. 4는 구성된 다이내믹 안정장치의 제어 과정이고, Fig. 5는 세부적인 신호처리 순서도이며, Fig. 6은 본 논문에서 구성한 레이저 유도 초음파 시스템의 전기 연결도이다.

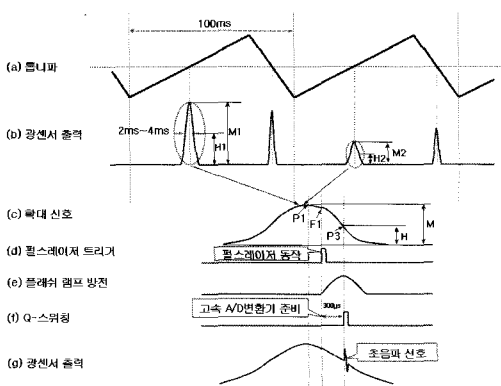


Fig. 4 Control diagram of a designed dynamic stabilizer

사용자는 초기 시작 단계에서 초음파 신호를 획득하기 위한 지연시간과 획득시간 및 세부적인 게이트(Gate)신호와 폴로우(Follow)신호에 대해 지연

시간과 신호처리 시간을 설정한다. CFPI의 한쪽 거울 면에 부착되어 있는 PZT에는 Fig. 4(a)에 보이는 바와 같이 파형 발생기에서 생성되는 톱니파가 인가된다. 톱니파의 주기는 펄스레이저의 최적화된 반복 주기와 동일한 10 [Hz]이다. 다이내믹 안정기는 초기 상태에서 D/A변환기를 사용하여 인가되는 톱니파 신호에 기본 DC 바이어스 값을 더해준다. CFPI의 투과-반사광은 Fig. 4(b)에 보이는 바와 같이 인가되는 톱니파 신호의 특정 레벨에서 출력된다. 초기에 다이내믹 안정기는 톱니파의 상승 경계 영역에서 투과-반사광의 진폭이 최대가 되는 위치의 톱니파 값을 A/D변환기로 획득하여 메모리에 기억한다. 그리고 다이내믹 안정기는 다른 A/D변환기를 사용하여 톱니파 신호의 상승 경계선 시작 지점을 포착한다. 상승경계선 시작점이 포착되면 다이내믹 안정기는 이를 유효 영역 시작점으로 설정하고 다른 채널의 A/D변환기를 사용하여 간섭계의 투과-반사광 신호를 연속적으로 획득하면서 감시한다. 이 과정에서 최대 진폭 M인 위치 P1이 포착되면 Fig. 4(c)에 보이는 바와 같이 다이내믹 안정기는 예측되는 투과-반사광의 최대 기울기 위치 P3에서 Q-스위칭 지연시간 만큼 앞선 시간 F1에서 디지털 출력 포트(digital output port)로 펄스 레이저를 동작시켜 P3시간 위치에서 초음파를 발생시킨다. 만약 투과-반사광의 최대 위치를 찾는 과정에서 반복주기가 110 [ms]이내에 투과-반사광이 나타나지 않으면 다이내믹 안정기는 무효 펄스레이저 빔을 발생시켜 펄스레이저의 출력을 안정화시킨다. 펄스레이저 빔이 측정대상체의 표면에 조사되면 고속 A/D변환기는 사용자가 설정한 시간 지연 후에 설정된 시간 동안 초음파 신호를 획득한다. 또한 펄스 레이저 빔이 조사되면 다이내믹 안정기는 20 KHz의 샘플링 속도로 초음파가 유도되는 순간의 전후 0.5 [msec] 범위에서 투과-반사광의 기울기 값을 추출하여 평균기울기 값을 구한다. 또한 펄스레이저 빔의 출력도 측정한다. 펄스레이저 빔에 의해 유도되는 비파괴 검사용 초음파 신호는 레이저 빔의 세기에 비례하며, 측정되는 초음파 신호는 투과-반사광의 기울기 값에 선형적으로 비례한다. 그러므로 본 논문에서는 다음 식 (5)를 적용하여 초음파 신호를 구하였다.

$$\bar{u} = \frac{u}{s(k+d)} \quad (5)$$

여기서 u 는 고속 A/D변환기에 의해서 획득되는 초음파 신호이며 s 는 투과-반사광의 평균 기울기 값이다. p 는 펄스레이저의 출력이며 k 는 사용자가 설정하는 상수 값이다.

레이저 유도 초음파 시스템은 사용자가 설정한 시간 영역 안에서 초음파 신호의 최대값과 시간, 최소값과 시간, 최대-최소(peak-to-peak)값 및 시간 차등에 대한 신호를 추출한다. 또한 레이저 유도 초음파 신호는 사용자가 설정한 시간 범위 안에서 사용자가 설정한 중심점 형태를 중심으로 설정된 시간 ($0.1 \mu\text{sec} \sim 4.096 \mu\text{sec}$) 범위에 대한 주파수 스펙트럼과 그때의 중심점 위치를 화면에 디스플레이 한다.

그런 다음 다이내믹 안정기는 간섭계의 최대 투과-반사광 위치를 톱니파의 특정 위치에 고정시키기 위하여 바이어스 전압을 제어한다. 레이저 간섭계용 CW 레이저는 내부의 미소한 열적변화와 주파수의 변화에 의해서 투과-반사광의 위치가 변화하므로 장시간 측정이 어려운 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 연속적으로 바이어스 전압을 제어하여 톱니파 파형의 중앙부에 최대 투과지점이 위치되게 유지함으로써 장시간 안정적인 측정이 가능하게 다이내믹 안정기를 구성하였다.

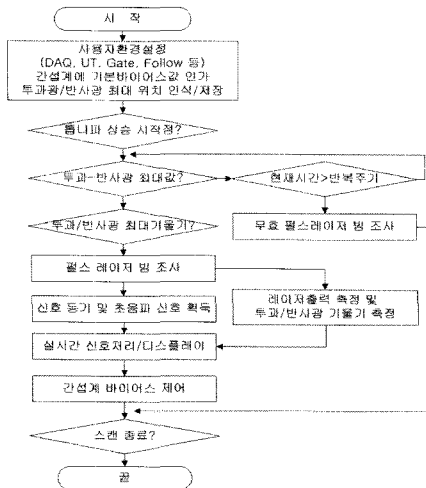


Fig. 5 Signal follow chart of a designed laser-induced ultrasonic system with a dynamic stabilizer

레이저 간섭계를 이용하여 초음파 신호를 안정적으로 검출하기 위해서는 간섭계의 투과-반사광의

기울기 값이 커야한다. Fig. 4에 보이는바와 같이 간섭계의 투과-반사광의 최대값(진폭 M1, M2)은 스캐닝 과정에서 측정대상체의 표면 조건에 따라 크게 변화하므로 기울기 값도 크게 변화한다. 그러므로 매 순간 초음파가 발생하는 순간(진폭 H1, H2)에서 투과-반사광의 기울기 값을 추출하여 측정 에러를 보정하여야 한다. 본 논문에서는 투과-반사광 신호에 차단 주파수가 약 20 KHz인 저주파 통과필터를 적용시킨 다음, 초음파 측정 순간을 중심으로 전후 위치에서 20 KHz의 샘플링 속도로 5개의 기울기 정보를 추출하여 평균값을 취하였다.

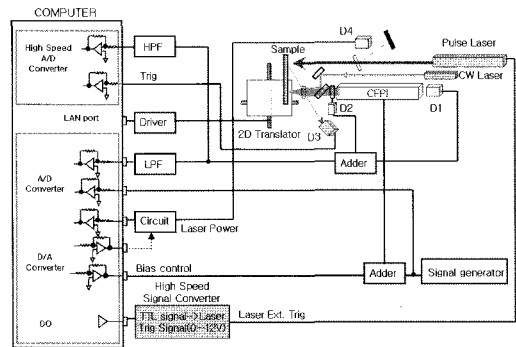


Fig. 6 Electrical configuration of a designed laser-induced ultrasonic system with a dynamic stabilizer

Fig. 7은 초음파가 발생하는 순간에 투과-반사광을 확대시켜 획득한 파형이다. Fig. 7(a)는 투과-반사광 파형이며 Fig. 7(b)는 저주파 통과 필터를 적용한 후에 얻은 투과-반사광 파형이다. Fig. 7(a)에서 앞쪽의 큰 점선 원 안에 있는 큰 펄스는 측정대상체의 표면에 조사된 펄스레이저 빔이 반사되어 CFPI를 직접 통과하여 광센서에 잡히는 신호이고, 뒤쪽의 작은 원 안에 있는 펄스는 초음파인 표면파 신호이다. 이와같은 신호는 투과-반사광의 기울기 정보 추출 과정에서 왜곡을 발생시킬 수 있다. Fig. 7(b)에 보이는 바와 같이 저주파 통과필터는 CFPI를 통과하는 펄스레이저 빔과 초음파 신호를 효과적으로 제거함으로써 정밀한 기울기 정보의 추출을 가능하게 한다.

펄스레이저에 의하여 유도되는 초음파의 세기는 펄스레이저 빔의 출력에도 관계하므로 레이저 빔의 출력에 따른 초음파 신호의 세기도 보정하여야

한다. 펄스레이저 빔의 폭은 약 10 [ns]로 아주 짧은 신호이므로 본 논문에서는 이와같은 신호의 에너지를 획득하기 위해서 전력증폭이 가능한 적분기를 사용하여 신호를 획득하였다. 그리고 비록 펄스레이저 빔에 동기를 시켜서 초음파 신호를 획득하기는 하지만 신호 획득 후에 수행되는 여러 종류의 신호처리 과정의 한 부분에서 펄스 레이저빔의 출력을 측정하므로 동기 시간을 기준으로 매순간 수 μs 의 시간차가 발생할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 Fig. 8과 같이 전력증폭과 적분된 에너지를 가뒀을 수 있는 펄스 레이저 측정 회로를 구성하였다. 구성된 회로는 리셋 신호가 동작하면 준비 상태가 되며 한번 측정된 에너지는 장시간 보존이 가능하다.

ALI, max. sampling speed 1 GHz)와 다기능보드(PCI9112, ADLink)가 장착된 제어 컴퓨터와 펄스레이저(Quantel-Brilliant) 및 안정화된 CW 녹색 레이저(142H, LightWave Elec. Inc.)를 사용하는 CFPI(CFT-500, Buleigh, FSR 150MHz)를 이용하여 레이저 유도 초음파 시스템을 구성하였다. 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 개발하였다. 개발된 광센서를 이용하여 간섭계의 투과광과 반사광을 측정하였다. 그리고 펄스레이저 외부트리거용과 펄스레이저 출력 측정용으로는 상용의 광센서(ThorLabs, DET210, DET100)를 사용하였다.

펄스 레이저는 10 Hz에 최적화 되어 있으며, 펄스레이저 빔의 반치전폭(FWHM: full-width at half-maximum)은 약 10 [nsec]이다. 본 논문에서는 실험을 위하여 약 40 [mJ]의 에너지를 갖는 펄스레이저 빔을 사용하였으며, 측정용 CW 녹색 레이저는 약 50 mW범위의 출력을 사용하였다.

본 논문에서는 진폭이 큰 초음파 신호를 유도하기 위하여 선형의 펄스레이저 빔을 생성하여 조사하였다. 또한 초음파 신호의 검출 효율을 높이기 위하여 간섭계의 투과광과 반사광을 동시에 이용하였으며, 투과-간섭광의 최대 기울기 위치를 정확히 포착하기 위하여 투과-간섭광의 피크값을 구한다음 이로부터 일정한 비율의 위치에 해당하는 최대 기울기 값을 갖는 하강 에지 영역에서 초음파를 유도하였다.

본 논문에서는 우선 선형레이저 빔에 의해 유도되는 초음파 신호의 크기와 방향성을 조사하였다. Fig. 9는 측정용 레이저 빔의 위치는 고정시켜놓고 선형의 펄스레이저 빔을 1° 단위로 회전시켜 가면서 유도되는 초음파 신호의 최대-최소값을 측정한 결과이다. 사용된 선형의 레이저 빔 길이는 17 mm이며 펄스레이저 빔과 측정용 CW레이저 빔과의 거리는 40 [mm]였다. 그러므로 CW 레이저 빔의 위치와 회전하지 않은 상태인 90° 위치로 있는 선형 펄스 레이저 빔의 끝점과의 각도는 12.14°이다. Fig. 9의 결과에서 볼 수 있듯이 선형레이저 빔에 의해 유도되는 초음파 신호는 점(point)형의 펄스레이저 빔에 비하여 진폭이 크고 방향성에 민감함을 알 수 있다.

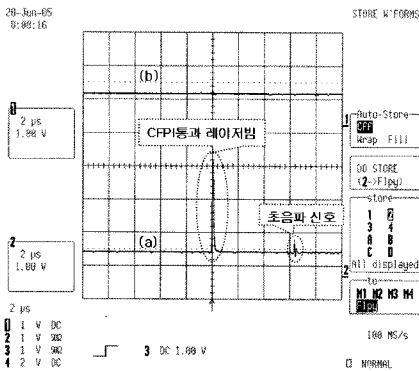


Fig. 7 Comparisons between transmission signal and low pass filtered transmission signal to acquire slope information

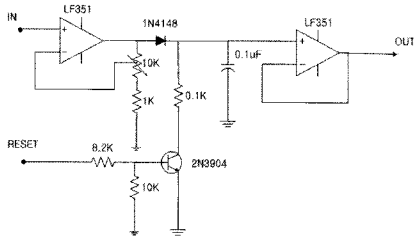


Fig. 8 Schematic circuit to measure the energy of the short pulse laser

4. 실험

본 논문에서는 고속 데이터 수집보드(AL81G,

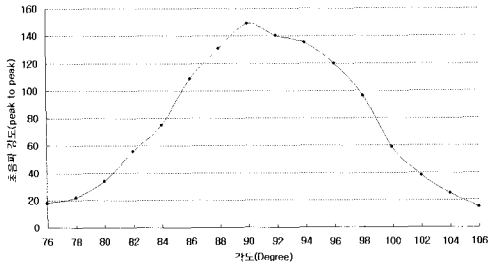


Fig. 9 Ultrasonic intensity according to the angle of the line-shaped pulse laser

Fig. 10의 점선 (a)는 무결함 시편에서 측정용 레이저 빔과 선형의 펄스 레이저 빔을 동시에 이동시키는 스캐닝 방식을 취했을 때 유도되는 초음파 신호의 최대-최소값을 보여준다. 실선 (b)는 매 측정 순간에서 구한 간섭계의 투과광 기울기 값으로 보정한 결과이다. 기울기 값으로 보정하기 전의 초음파 최대 값은 2이며 보정후의 초음파 최대 값은 0.34이다. 그리고 보정전의 표준편차는 0.47이며 보정후의 표준 편차는 0.11이었다. Fig. 10의 결과에서 볼 수 있듯이 초음파 신호는 투과-반사광의 기울기 값으로 보정함에 따라 측정오차를 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

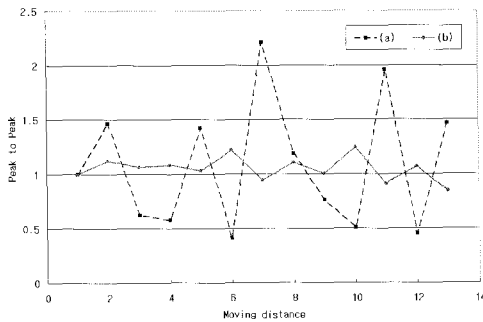


Fig. 10 Comparisons of peak-to-peak values between measured ultrasonics and normalized ultrasonics by using the slope of transmission-reflection signal

Fig. 11은 폭이 0.3 mm이고 깊이가 0.4 mm인 표면 결함에 대하여 SLS(scanning laser source)방법으로 결함 검사를 수행한 구성도이다. 측정용 레이저 빔은 한 위치에 고정되어 있으며 길이 7 mm의 선형 레이저 빔은 6 mm의 거리를 60 μm씩 이동시키면서 100번 측정하였다. 각 위치에서는 펄스레이저

빔을 30번 반복하여 조사하여 30번째의 초음파 신호를 선택하였다. Fig. 12(a)는 투과-반사광의 기울기 값이고 Fig. 12(b)는 각 위치에서 펄스레이저 빔의 출력 값이다. Fig. 13(a)는 보정전의 최대-최소값 신호이며 Fig. 13(b)는 기울기 값으로 보정한 결과이며 Fig. 13(c)는 Fig. 13(b)에 대해 레이저 출력 값으로 보정한 결과이다. Fig. 14(a)는 보정된 최종 결과이며 Fig. 14(b)는 매순간 30개의 펄스 레이저 빔을 조사하여 21번째 펄스부터 30번째 펄스까지 10개의 신호에 대해 최대-최소값을 평균화 값을 디스플레이한 결과이다. Fig. 14의 실험 결과에서 볼 수 있듯이 초음파 신호는 펄스 레이저 빔이 결함 직전에 위치할 때 최대 값이 되고 결함을 통과한 후에는 크게 감소한다. 펄스레이저 빔이 결함 직전에 위치할 때 초음파 신호가 급격히 증가하는 이유는 이 위치에서 유도되는 초음파 신호는 결함 부에서 반사되는 신호와 중첩된 신호가 관측되기 때문이다.

Fig. 13과 Fig. 14의 SLS 실험 결과에서 볼 수 있듯이 측정용 레이저 빔은 고정되어 있으므로 투과-반사광의 기울기 값에 의한 효과 보다는 레이저 빔의 출력 변화에 따른 오차보정 효과가 큼을 알 수 있다.

평균화된 초음파 신호를 얻기 위하여 한 위치에서 연속 발생하는 초음파 신호를 누적시킨 다음 평균값을 구해본 결과 연속 수에 따라 초음파 신호의 최대-최소값이 크게 변화함을 관찰하였다. 이는 한 위치에 여러 번 누적 조사되는 펄스 레이저 빔에 의해 측정대상체의 표면 흡수율 조건이 초기에는 크게 변화되기 때문인 것으로 판단된다. 이에 따라 본 논문에서는 효과적인 결함검출을 위하여 연속 펄스의 각 최대-최소값의 평균값을 사용하였으며 Fig. 14(b)의 결과에서 볼 수 있듯이 이 방법은 더욱 효과적임을 알 수 있다.

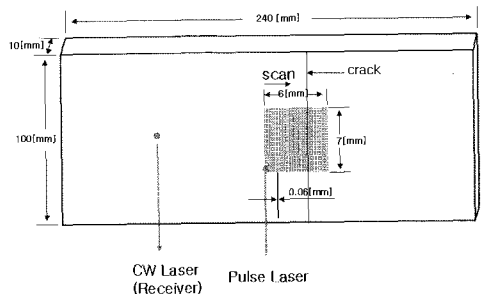


Fig. 11 Schematic to detect surface crack according to SLS position

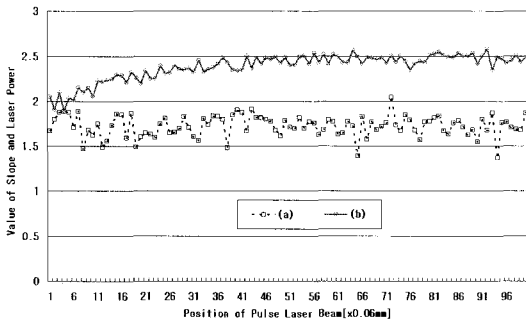


Fig. 12 Measured slope and laser power according to SLS position

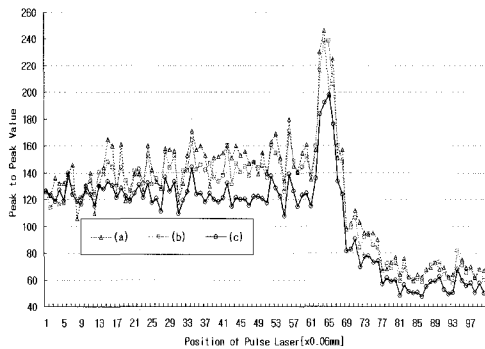


Fig. 13 Comparisons between raw peak-to-peak value and normalized value according SLS position

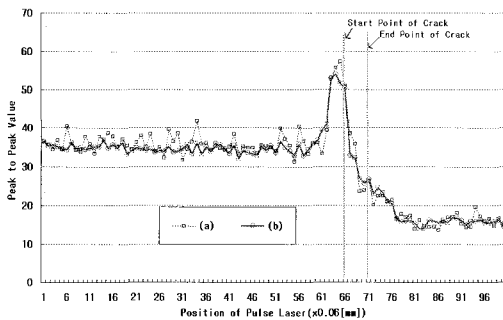


Fig. 14 Normalized peak-to-peak value according SLS position

5. 결 론

본 논문에서는 펄스레이저와 CFPI 레이저 간섭계를 이용하여 레이저 유도 초음파 검사 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 다이내믹 안정 제어 방식을 채택함으로써 스캐닝 방식으로 비파괴 검

사가 가능하다. 또한 신호 대 잡음 비율이 높은 초음파 신호를 검출하기 위하여 레이저 간섭계의 투과광과 반사광을 함께 사용하였으며 투과-반사광의 최대 값을 추출한 후에 이에 대해 일정 비율의 위치에 해당하는 최고 기울기 값의 위치에서 초음파를 발생시킴으로써 진폭이 큰 초음파를 유도시킬 수 있었다. 본 논문에서는 펄스 레이저 빔의 출력과 레이저 간섭계의 투과-반사광의 기울기 값을 측정하여 초음파가 검출되는 과정에서 발생하는 에러를 보정하였다. 또한 측정 시간의 미소한 편차에도 상관없이 안정적으로 레이저 출력을 측정할 수 있는 측정회로를 구성하였으며 다중 샘플링에 의한 평균값을 투과-반사광의 기울기 값으로 취함으로써 주변 노이즈에 강하게 에러를 보정하였다. 본 논문에서 적용한 투과-반사광의 기울기 값과 레이저 출력에 의한 측정 에러 보정 방법은 SLS 방식의 표면 결함 검사 실험을 통하여 그 효과를 확인하였다. 또한 본 논문에서 구성한 레이저 유도 초음파 시스템은 표면 결함을 검사함에 있어서 안정적으로 동작됨을 실험으로 확인하였다.

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] 최상우, 이준현, 조운호, "배관부 부식 및 결함 평가를 위한 레이저 유도 초음파 적용기술", 비파괴검사학회 춘계학술대회, pp. 46-54, (2004)
- [4] 임충수, 박형국, 전형하, 김달우, "레이저 응용 초음파를 이용한 금속 시편의 결정 입경 측정 연구", 비파괴검사학회 춘계학술대회, pp. 59-63, (2002)
- [5] S. Kenderian, B. B. Djordjevic and R. E. Green, "Point and line source laser generation of ultrasound for inspection of internal and surface flaws in rail and structural materials," Res. Nondestr. Eval., Vol. 13, pp. 189-200, (2001)
- [6] 장경영, 김홍준, D. Ceringglia and B. Djordjevic, "레이저 여기 램파를 이용한 항공기

- 판재 접합부의 비접촉식 초음파 검사", 비파괴 검사학회지, Vol. 21, No. 2, pp. 163-168, (2001)
- [7] M. Z. Silva, R. Gouyon and F. Lepoutre, "Hidden corrosion detection in aircraft aluminum structures using laser ultrasonics and wavelet transform signal analysis," Ultrasonics, Vol. 41, pp. 301-305, (2003)
- [8] Q. Shan, C. M. Chen and R. J. Dewhurst, "A conjugate optical confocal Fabry-Perot interferometer for enhanced ultrasound detection," Meas. Sci. Technol., Vol. 6, pp. 921-928, (1995)
- [9] T. Tanaka and Y. Izawa, "Nondestructive detection of small internal defects in Carbon steel by laser ultrasonics," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, pp. 1477-1481, (2001)
- [10] Y. H. Sohn and S. Krishnaswamy, "Mass spring lattice modeling of the scanning laser source technique," Ultrasonics, Vol. 39, pp. 543-551, (2002)