

# 기계 구조물의 안정성 평가를 위한 레이저 초음파법 적용

김재열\*, 송경석+, 김창현\*, 고명수\*\*

## A Mechanic Structure Safety Evaluation Using Laser-Based Ultrasonics Application

jae-yeol Kim\*, kyung-seok Song+, chang-hyun Kim\*\*, myung-soo Ko\*\*

### Abstract

Non-destructive test on the size and depth of cracks has been required for the safety evaluation of structures. Ultrasonic method based on laser techniques is one of the most popular non-destructive methods which overwhelm PZT based tests. In the present paper, ultrasonic was generated by high powered Q switching Nd:YAG pulse laser. Experiments were carried out using Fabry-Perot interferometer which was intensively discussed in the present study.

**Key Words :** Non-destructive test(NDT), Ultrasonic, Laser, Fabry-Perot interferometer

### 1. 서론

구조물 또는 기계의 특성이나 수명을 예측하기 위해서는 재료의 특성을 정확히 파악하고 내부의 결함 유무를 검출하는 것이 필요하다. 재료 내에 결함이나 불균질한 물질이 들어있는 경우는 기계 구조물의 성능과 수명을 현저하게 저하시킬 수 있기 때문에 결함, 불균질한 물질의 유무나 형태 및 위치 파악이 중요하다.

균열과 결함에 대한 검사방법으로는 초음파를 이용한 방법으로서 트랜스듀서를 재료에 부착시켜서 재료 내부에 송신 음파를 발생시키고 결함에 반사되어 돌아온 신호나 재료를 투과한 신호를 수신 트랜스듀서로 검출하고 분석하여

결함의 유무와 위치 및 크기를 알아내는 방법이다.

이 방법은 방사선 법에 비해 간편할 뿐만 아니라 안전하고 신뢰성 있는 평가방법으로 폭넓게 이용되고 있으며, 또한 초음파를 이용한 비파괴 평가방법은 재료의 결함탐상 뿐만 아닌 물성치 측정 등에도 많이 이용되고 있다.

그러나 초음파를 이용하는 방법은 트랜스듀서와 시험편 사이의 접촉문제, 작은 재료, 복잡한 형상, 움직이는 물체의 경우, 재료가 고온의 경우에는 적용하기 어려운 단점을 가지고 있다. 또한 검사자의 숙련도에 많이 의존하는 어려움이 있으므로 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 최근에는 레이저를 이용하여 열팽창에 의한 탄성파를 발생시키는 방법들이 제안되었다.

\* 주저자, 조선대학교 기전공학과 (jykim@mail.chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

+ 조선대 대학원 광응용공학과

++ 조선대 대학원 정밀기계공학과

레이저를 이용한 초음파의 비접촉식 감지는 국외에서 지난 십 여 년에 걸쳐 비파괴 검사 및 평가분야에서 매우 활발하게 연구가 진행되어 왔으나 국내에서는 상대적으로 연구가 미비한 실정이다.

레이저를 이용한 초음파 발생 및 감지 기술의 장점은 이 기술이 비접촉식 초음파 송수신 기술이라는 것과, 재료의 상변화를 야기하지 않고 재료의 국부 가열만을 유도하여, 열탄성 효과에 의한 탄성파를 재료 내에 전파시켜 비파괴 검사가 가능하다는 것이다.

레이저에 의한 원격 초음파 생성과 더불어, 초음파 전파에 의해 발생된 재료 표면 수직 변위를 레이저 간섭계를 이용하여 비접촉 방식으로 측정하는 방법이 레이저 응용 초음파 기술에서 매우 중요하다. 이와 같이 레이저 응용 초음파 검사 기술의 정립을 위하여 본 연구에서는 실험실용 레이저 초음파 검사 시스템을 구축하였고 이를 이용하여 결합시험편의 결함 검사를 행하였다.

또한 초음파 검지용 레이저 간섭계(Fabry-Perot Interferometer)의 안정화(stabilization)를 통하여 초음파의 비접촉식 검지를 실현하였으며 이와 같이 안정화된 레이저 간섭계를 이용하여 기존의 방식인 트랜스듀서를 이용한 접촉식 검사방법의 단점들을 극복하고자 하였다.

## 2. 초음파의 검지를 위한 Fabry-Perot Interferometer의 원리

Laser-ultrasonics는 발생과 검지를 모두 비접촉식으로 수행할 때 큰 장점을 발휘할 수 있다. Fabry-Perot 간섭계(F-P 간섭계)는 기본적으로 빛의 파장을 매우 정밀하게 분석하는 장치이다. 이러한 F-P 간섭계에 빛이 입사하면 간섭계를 통과한 빛의 세기(투과율)는 입사된 빛의 파장에 의해 결정된다. 따라서 간섭계의 조건을 일정하게 유지하면 빛의 파장 변화를 정밀하게 모니터링 할 수 있다.

검지용 레이저빔이 시편의 표면에서 반사되어 간섭계에 입사할 때 시편 표면에 초음파가 도달하면 Doppler 효과에 의해 반사되는 레이저빔의 파장이 변한다. 따라서 F-P 간섭계에 입사하는 레이저빔의 파장이 변하면 투과율이 변하므로 투과되는 빛의 세기를 광검출기로 측정하면 초음파를 측정할 수 있게 된다. 이러한 초음파에 의한 레이저빔의 파장변화의 크기는 일정한 간섭계 조건 하에서 표면 변위의 속도에 비례한다. 따라서 초음파의 세기(진폭)가 크면 표면 변위의 변화량이 크고 이 변화가 일정한 시간동안 이루어지

므로 변위 속도가 크다. 따라서 F-P 간섭계의 출력신호는 초음파의 세기와 비례한다.

본 연구에서는 공초점(confocal) Fabry-Perot 간섭계를 이용하여 초음파를 측정하고자 하였다.

공초점 F-P 간섭계는 콘네스(Connes)가 처음으로 제안하였고 허셔(Hercher)와 존슨(Johnson)이 이론적으로 분석하였다. 이 간섭계는 prism이나 grating 분광기보다 분해능이 높을 뿐 아니라 사용이 간편하여 레이저의 결 모양 간격과 발진 선 폭을 측정하거나 투과 밴드폭(bandwidth)을 변화시킬 수 있는 필터로 사용되기도 하며, 레이저의 주파수 동조나 주파수 안정화를 위한 기준 공진기로 사용된다.

공초점 F-P 간섭계는 같은 곡률 반경을 가지는 두 거울이 초점을 공유하도록 정렬한 것이다. 공초점 F-P 간섭계와 평면 F-P 간섭계의 차이점은 공초점 F-P 간섭계가 평면 F-P 간섭계보다 줄 맞추기(align)가 쉽고, 구면 거울의 한 쪽이 약간 기울어져도 광학 길이는 거의 변화가 없기 때문에 주파수 안정화의 기준 공진기로 사용될 때 평면 평행 간섭계보다 높은 안정도를 유지할 수 있다는 점이다. 또한 거울 가공시 구면거울은 평면거울보다 매끄럽게 할 수 있으므로 공진기의 Finesse를 크게 할 수 있다.

Fig. 1은 공초점 F-P 공진기에서 빛살이 진행하는 경로를 표시한 그림이다. 입사되는 빛살의 전기장이  $E_i$ 이고 두 거울의 반사계수와 투과 계수가 각각  $r$ ,  $t$ 일 때, A로 입사된 빛살은 두 반사면 사이에서 다중 반사 후 B와 D로 나오게 된다. 이 때, 구면 거울의 곡률 반경이  $R_0$  이고 두 거울 사이의 간격이  $L = R_0$ 이면, 그림과 같이 F에서 공유 초점을 이루게 된다.

이때 B, D로 투과된 빛살의 전기장  $E_B$ ,  $E_D$ 는 다음과 같다.

$$E_B = \frac{E_i t^2}{1 - r^4 \exp(i\delta)} \quad (1)$$

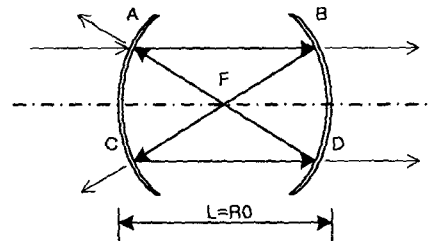


Fig. 1. The confocal Fabry-Perot Interferometer

$$E_D = \frac{E_i T^2 r^2}{1 - r^4 \exp(i\delta)} \quad (2)$$

여기서 위상차는  $\delta = 4\pi L/\lambda$ 이고, 투과빛살의 세기  $I_B$ ,  $I_D$ 는

$$I_B = \frac{I_i T^2}{(1 - R^2)^2 + 4R^2 \sin^2(\delta/2)} \quad (3)$$

$$I_D = \frac{I_i T^2 R^2}{(1 - R^2)^2 + 4R^2 \sin^2(\delta/2)} = R^2 I_B$$

입사 빛살에 대한 투과빛살의 비는 식(2)으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{I_B}{I_i} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad (5)$$

이고, 여기서  $F$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$F = \frac{4R^2}{(1 - R^2)^2} \quad (6)$$

$\delta = 2m\pi \pm \epsilon/2$ 에서 투과곡선의 최대 값의 반이 된다면

$$\frac{1}{1 + F \sin^2(\epsilon/4)} = \frac{1}{2} \quad (7)$$

로 쓸 수 있다. 여기서,  $F$ 는 충분히 크고,  $\epsilon$ 이 충분히 작다면,  $\sin(\epsilon/4) = \epsilon/4$ 로 잡을 수 있다.

따라서,  $\epsilon = 4F^{-1/2}$ 이고, FSR(Free Spectral Range)은 인접한 무늬 차수들 사이의 간격으로 정의한다. Finesse는 FSR을 FWHM(Full Width at Half Maximum)으로 나눈 값으로 나타내고 다음과 같다.

$$F = \frac{2\pi}{\epsilon} = \frac{\pi F^{1/2}}{2} = \frac{\pi R}{1 - R^2} \quad (8)$$

그리고 밴드폭(FWHM,  $\Delta\nu$ )은  $\text{FSR} \times F$  이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\nu = \frac{c}{4L} \times F = \frac{c}{4L} \left( \frac{1 - R^2}{\pi R} \right) \quad (9)$$

본 연구에 실제로 사용된 F-P 간섭계의 구조는 Fig. 2와 같다.

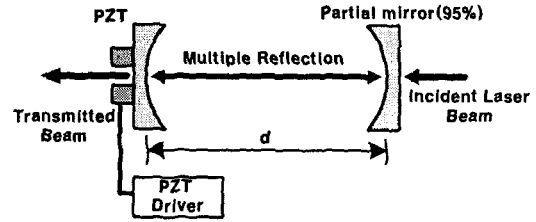


Fig. 2. The schematics of confocal Fabry-Perot Interferometer made in this research

### 3. 레이저 응용 결함검사 장치

본 연구에 사용된 시험편은 대형 구조물에 많이 사용되고 있는 기계 구조용 중탄소 강재인 SM45C를 사용하였고 실제 구조물에서 사용되고 있는 두께를 고려하여 크기는 가로 × 세로 × 두께가 50 × 150 × 60mm이다. 실제 비파괴 평가의 목적인 내부 결함의 검출을 위해서 시험편의 한쪽 측면에 미세한 균열 가공을 하기 위하여 wire cutting 가공으로 폭 0.25mm의 slit 홈을 축 방향으로 0, 5, 10, 15, 20, 30mm 길이로 각각 가공을 하였다.

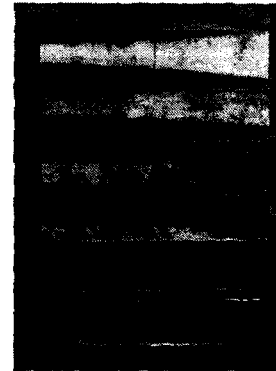
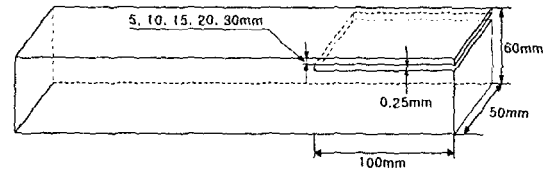


Fig. 3 Dimension of specimen

열 발생원으로 Q 스위칭된 Nd:YAG 레이저를 사용한다. 펄스 레이저의 시간 폭은 10 ns이고 파장은 532 nm를 사용하였다. 내부결함을 검출하기 위하여 광학계를 구성하였고 F-P 간섭계로 얻은 신호를 오실로스코프(Lecory 9345)를 통하여 디스플레이 및 데이터 저장을 하였다. 그리고 컴퓨터를 사용하여 파형의 특성 및 차이를 해석하였다. 실험장치 구성도는 Fig. 4와 같다.

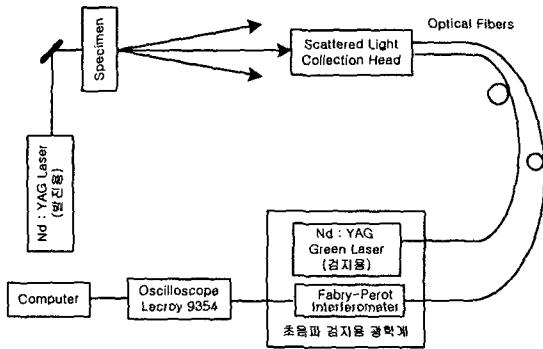


Fig. 4 Schematic diagram of experiment

Fig. 4의 장치에서 산란 광의 포집효율을 증대하기 위하여 산란 광 포집용 측정 헤드를 Fig. 5와 같이 설계하였다.

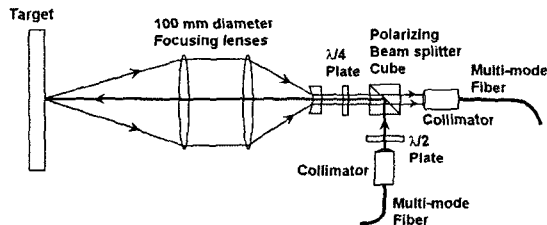


Fig. 5 Scattered lights collection head

본 측정 헤드는 측정 시험편의 표면에서 초음파에 의해 파장이 천이된 산란 광을 포집한 후 광섬유를 이용하여 간섭계에 전송하는 역할을 한다. Fig. 2는 F-P 간섭계로서 공진기 길이의 안정화를 위하여 열팽창계수가 매우 작은 invar를 거울 지지대로서 사용하였다. 또한 온도나 공기중의 섭동(fluctuation), 그리고 레이저 주파수 자체의 시간에 따른 변화에 의한 검출신호의 불안정성을 보정하기 위하여 PI control을 이용하였다. PI circuit을 통하여 PZT에 전류

신호를 feedback해 줌으로써 공초점 F-P 공진기에서 항상 안정적인 신호가 검출되도록 하였다.

#### 4. 실험 및 고찰

SM45C 시험편의 두께 방향으로 전파하는 종파를 측정하기 위해 Nd:YAG 레이저를 시험편에 입사시키고, 초음파 검지용 레이저 간섭계(Fabry-Perot interferometer)의 안정화를 통해 초음파의 비접촉식 검지를 실현하였으며 이와 같이 안정화된 레이저를 이용하여 시험편의 결함을 검사하였다. 초음파 검지용 레이저 spot 크기의 확대를 통한 초음파 탐상 면적의 증대와 레이저 간섭계의 효율 증대를 실현하여 시험편 결함의 측정정도를 향상시켰다. 우선 비접촉 검지의 효율을 높이기 위해 레이저빔과 시험편 사이에 볼록렌즈를 사용하여 빔을 모아줌으로써 레이저 입사 밀도를 높이는 ablation 영역에서 투과법으로 실험을 행하였다. 레이저빔이 시험편에 입사하면 모든 초음파가 발생되나, 표면의 물질이 플라즈마 불꽃을 내면서 매질로부터 증발됨과 동시에 매질 표면에 미치는 반발력의 합이 표면에 수직방향으로 가장 크게 되므로 종파의 발생에 가장 효과적인 방법이다. 레이저를 시험편에 조사한 순서는 Fig. 6과 같다.

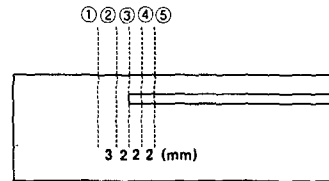


Fig. 6 Inspection order of specimen

Fig. 7은 시간 영역에서의 레이저 조사에 의한 균열이 없는 시험편에서의 측정결과이다. 맨 처음에 나타나는 신호는 Q-스위치 트리거에 의한 노이즈 성분이며 1번째 신호는 L1파의 신호이고 2번째 신호는 L2 신호이다.

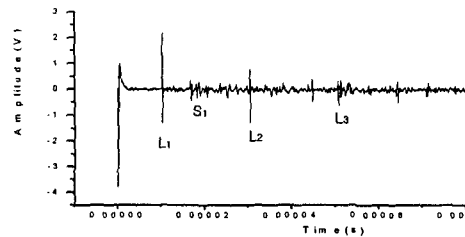


Fig. 7 Typical experimental waveform

Fig. 8은 균열 깊이가 40mm인 시험편을 Fig. 6의 순서에 따라 레이저 조사에 의해 발생된 초음파를 측정된 결과이다.

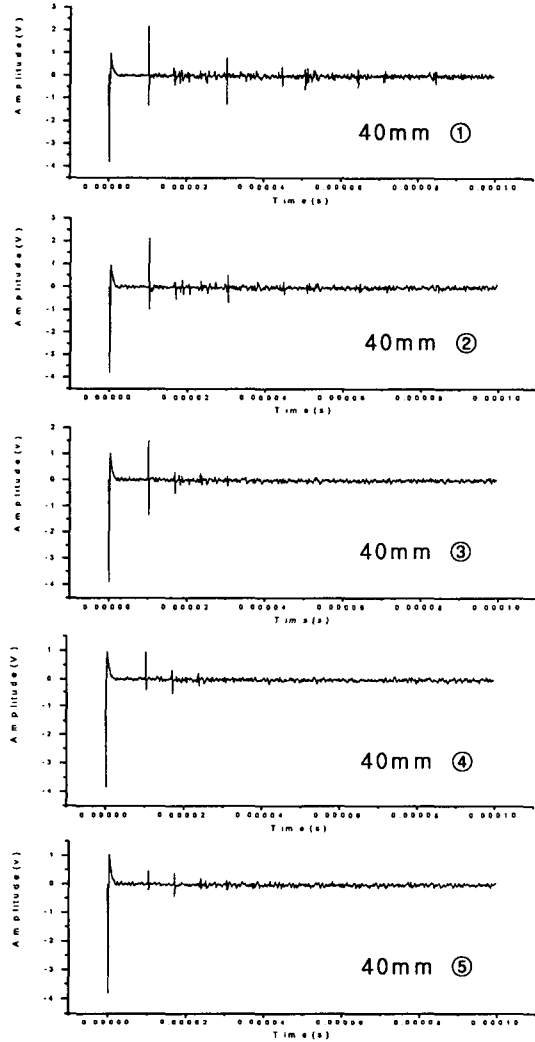


Fig. 8 The comparison of signals with to the variation of slit position

Fig. 8에서 균열이 없는 부분의 신호와 결함부를 통과할 때의 신호를 비교해 보면 결함부의 진폭 값이 감소함과 동시에 B1, B2 에코가 사라지고 결함부에 의해 반사된 F1, F2 에코가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 9는 균열의 깊이가 변함에 따라서 첫 번째 피크 신호는 초음파 발생지점으

로부터 반대면으로 전파하는 초음파를 감지한 것이고, 두 번째 피크신호부터서는 결함부에 반사되어 나온 신호이다.

결함부에서 다중 반사가 일어나는 데 걸리는 시간은 일정하다. Fig. 9의 신호로서 F-P 간섭계가 기계 구조물의 균열을 정량적으로 평가하는데 유용하게 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

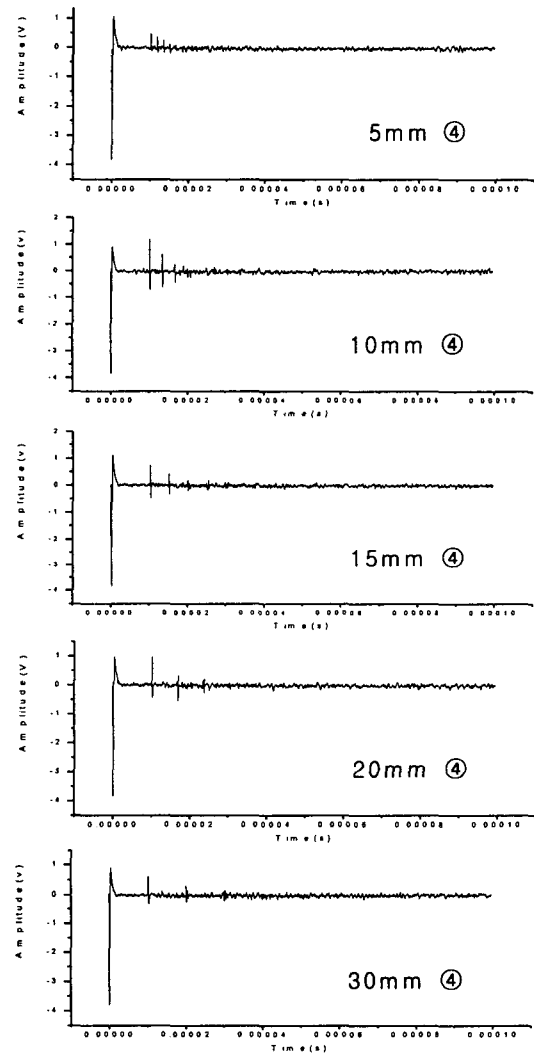


Fig. 9 The comparison of signals with to the variation of slit depth

## 5. 결 론

본 연구는 레이저를 이용하여 비접촉 초음파를 발생시켰으며 Fabry-Perot 간섭계를 이용하여 초음파의 비접촉식 감지를 행하였다.

1. Fabry-Perot 간섭계를 이용하여 비접촉식으로 결함부의 검사가 가능하였고 레이저빔이 결함부로 접근해 감에 따라 결함에 의해 초음파가 감쇄되고, 제2, 제3의 저면 에코가 사라짐으로 인하여 결함의 위치 추정이 가능하였다.

2. 결함의 깊이를 달리한 결과 결함부의 다중반사신호가 깊이 변화에 대하여 일관성 있는 변화를 나타내어 결함의 깊이 추정도 가능하였다.

3. 레이저를 이용한 구조물의 내부결함을 검사하는데 Fabry-Perot 간섭계가 적합하다는 것과 결함의 크기 및 위치를 검사하는데 유용함을 확인 할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단지정 지역협력연구

센터인 레이저응용 신기술개발 연구센터의 2002년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

## 참 고 문 헌

[1]A.C.Tam, "Pulsed Laser Generation of Ultrashort Acoustic Pulses: Application for Thin-Film Ultrasonic measurement", *Applied Physics Letters*, Vol. 45, 510-512 (1984)

[2]C.B. Scruby and L.E. Drain *Laser ultrasonics-techniques and applications*, Adam Hilger, New York, (1990)

[3]이준현, 최상우, 하상봉, "레이저 유도 초음파 및 자기보상 기법을 이용한 재료의 표면균열 및 깊이 비파괴 평가", *대한기계학회논문집 A 권*, 제26권 제4호, pp.745~753, 2002

[4]임충수, 박형국, 전형하, 김달우, 오기장, "레이저 응용 초음파를 이용한 금속 시편의 결정 입경 측정연구", *한국비파괴검사학회 2002 춘계학술발표회 논문집*, pp 59~63, (2002)