

레이저 유도 초음파를 이용한 재료평가 및 비파괴 검사 시스템 개발에 관한 연구

김재열⁺, 송경석^{*}, 김창현⁺⁺, 김유홍⁺⁺

The Study on the Material Evaluation and Development of Nondestructive Inspection System Using Laser Guided Ultrasonics

Jeal-Yel Kim, Kyung-Seok, Song, Chang-Hyun Kim, Yoo-Hong Kim

Abstract

In the present study, a Nd:YAG Laser (pulse type) was used to emit ultrasonic signals to a test material. In addition, a total ultrasonic investigation system was designed by adopting a Fabry-Perot interferometer, which receives ultrasonic signals without any contact. For non-destructive test SM45C, which contains some flaws was used as a test material. Because it is easy to align light beam in receiver, and the length of the light beam does not change much even if convex mirror leans towards one side, confocal Fabry-Perot interferometer, which has stable frequency, and PI control are used to correct interfered and unstable signals from temperature, fluctuation and time shift of laser frequency. Stable signals are always obtained by the feedback of PI circuit signals in the confocal Fabry-Perot interferometer. The type, size and position of flaws inside the test material were examined by achieving the stabilization of an interferometer. This study presented a useful method, which could quantitatively investigate the fault of objects by using a Fabry-Perot interferometer.

Key Words : Laser Ultrasonic, Fabry-Perot interferometer, NDT, UT test

1. 서론

용접구조물이나 수명을 예측하기 위해서는 재료의 특성을 정확히 파악하고 내부의 결함 유무를 검출하는 것과, 재료의 미시적 구조나 물질 고유의 특성을 평가 분석하는 기술도 필요하게 된다. 재료 내에 결함이나 불균질한 물질이 존재하는 경우는 강구조물의 성능과 수명을 현저하게 저

하시킬 수 있기 때문에 결함과 불균질한 물질의 유무, 형태, 위치 파악이 중요하다. 특히 강구조물에서의 결함은 용접시에 발생할 가능성이 많으므로 용접부의 평가가 매우 중요하다고 할 수 있다.

용접부에 대한 비파괴검사방법으로는 방사선투과시험법, 자분탐상법, 초음파탐상법, 액체침투탐상법¹⁾등 여러

* 발표자, 조선대학교 광응용공학과 (witman75@hanmail.net)

주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375

+ 조선대 기계공학과

++ 조선대 대학원 정밀기계공학과

가지가 있지만, 초음파탐상법이 초음파 신호의 시간과 진폭정보에 대한 분석으로 결함의 크기와 형상을 알기 쉬운 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 다른 비파괴검사법에 비해 폭넓게 이용되고 있으며, 물성치 측정등에도 많이 사용되고 있다.

그러나 초음파탐상법은 초음파를 송수신하는 PZT와 시험편사이의 접촉매질에 의한 문제, 작고 복잡한 형상, 움직이는 대상, 시험편이 고온인 경우에는 적용이 곤란한 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하고자 최근 레이저를 이용하여 열팽창에 의한 탄성파를 발생시키는 방법들이 제안되었다.²³⁴⁾

레이저를 이용한 초음파법의 장점은 비접촉식 초음파 송수신 기술이라는 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 기술이다.

본 연구에서는 레이저를 사용한 비접촉식 방법과 PZT를 이용한 접촉식 검사방법과의 비교평가와 시험편 내부의 결함검출과 시험편 표면의 결함 검출을 통하여 접촉식 초음파탐상법의 단점들을 극복할 수 있는 방법을 연구하였다. 최종적으로 강구조물에 레이저 응용 초음파법을 적용한 비파괴검사 시스템을 개발하고자 하였다.

2. 레이저를 이용한 초음파의 발생

레이저를 이용한 초음파 발생의 기본원리⁶⁾는 고출력 펄스 레이저를 고체 표면에 조사시키면, 매우 얇은 흡수층에서 에너지의 흡수 및 반사가 발생하게 되고, 흡수된 에너지에 의해 고체 표면의 온도가 매우 짧은 시간 동안 상승 하강하는 구배가 나타난다. 극히 짧은 시간에 이루어지는 온도 구배의 열탄성효과에 의해 재료 내부에 순간적인 체적팽창이 발생하여 고주파의 열탄성파가 고체 내부로 전달되는 것이다.

레이저의 입사파워가 재료의 영구변형을 가져오는 문턱값을 미치지 못할 정도로 조정되었을 경우는 재료의 표면에 어떠한 흔적도 없이 탄성파를 발생시킬 수 있다. 이를 열탄성영역이라 한다.⁷⁾

이와는 반대로 Fig. 1과 같이 레이저와 시험편 사이에 볼록렌즈등을 사용하여 레이저의 입사 밀도를 높이면 표면이 플라즈마와 함께 재료의 일부가 증발하여 날아가게 된다. 이를 ablation 영역이라고 한다.

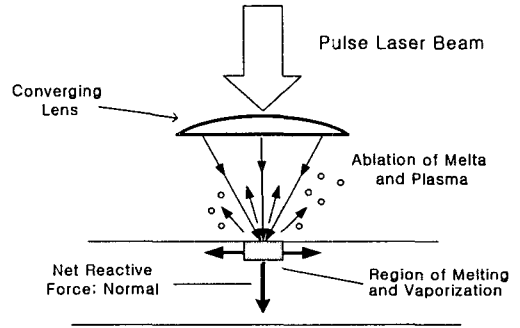


Fig. 1 Schematic diagram to show ablation of surface material and net reactive force on sample

레이저에 의해 발생된 초음파는 시편 내부에서 탄성표면파와 벌크탄성파로 전파하며 벌크탄성파에는 전파하는 각도에 따라 종파와 횡파로 나누어진다. 본 연구에서는 ablation 영역에서 초음파를 발생하였으며, 시편 내부의 결함은 bulk탄성파로 검출하였다.

3. 초음파의 검지를 위한 Fabry-Perot Interferometer

레이저 초음파는 발생과 검지를 모두 비접촉식으로 수행할 때 큰 장점을 발휘할 수 있다. Fabry-Perot(F-P) Interferometer는 기본적으로 빛의 파장을 매우 정밀하게 분석하는 장치이다. 이러한 F-P 간섭계에 빛이 입사하면 간섭계를 통과한 빛의 세기는 입사된 빛의 파장에 의해 결정된다. 검지용 레이저 빔이 시편의 표면에서 반사되어 간섭계에 입사할 때 시편 표면에 초음파가 도달하면 Doppler 효과에 의해 반사되는 레이저 빔의 파장이 변한다. 따라서 F-P 간섭계로 입사하는 레이저 빔의 파장이 변하면 투과율이 변하므로 투과되는 빛의 세기를 광검출기로 측정하면 초음파를 측정할 수 있게 된다. 따라서 F-P 간섭계의 출력신호는 초음파의 세기와 비례한다.

본 연구에서는 평면 F-P 간섭계보다 줄 맞추기가 쉽고, 구면 거울의 한 쪽이 약간 기울어져도 광학 길이는 거의 변화가 없기 때문에 주파수 안정화의 기준 공진기로 사용될 때 평면 간섭계보다 높은 안정도를 유지할 수 있다는 점에서 공초점 F-P 간섭계를 사용하였다. 또한 거울 가공시 구면거울은 평면거울보다 매끄럽게 할 수 있으므로 공진기의 선예도를 크게 할 수 있다.

Fig. 2는 공초점 파브리-페롯 공진기에서 빛살이 진행하

는 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 반사후 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 EB, ED는 다음과 같다.

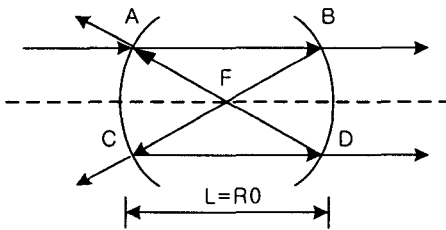


Fig. 2 The confocal Fabry-Perot Interferometer

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

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

여기서 위상차는 $\delta = 4\pi L/\lambda$ 이고, 투과빛살의 세기 IB, ID는

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

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

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

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

이고, 여기서 F는 다음과 같이 정의한다.

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

$\delta = 2m\pi \pm \epsilon/2$ 에서 투과곡선의 최대값의 반이 된다면,

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

로 쓸 수 있다. 여기서, F는 충분히 크고, ϵ 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 FSR×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. 3과 같다.

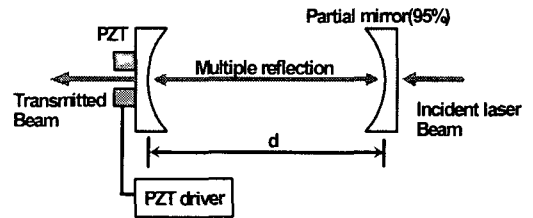


Fig. 3 The schematics of confocal Fabry-Perot Interferometer made in this research

4. 결함검사 장치 및 방법

본 연구에 사용한 시험편은 SM45C의 재질을 사용하고 크기는 300×50×60mm이다. 비파괴 평가의 목적인 내부 결함의 검출을 위하여 시험편 내부에 원형의 인공결함을 $\phi 4$ mm 크기로 제작하였고, 시험편의 한쪽 측면은 미세균열을 만들기 위하여 0.25mm의 slit홈을 축방향으로 15mm깊이로 가공하였다.

표면결합의 검출을 위해서는 균열결합의 반대쪽 표면에 0.25mm slit홈을 15mm 길이 방향으로 가공하였다. Fig. 4는 본 연구에 사용된 시험편이다.

열 발생원으로 Q 스위칭된 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 내부결합과 표면결합을 검출하기 위하여 광학계를 구성하였고 F-P 간섭계로 얻은 신호들은 오실로스코프(Lecroy 9345)를 통해 디스플레이 및 데이터 저장을 하였다. 실험장치의 구성은 Fig. 5와 같고 산란광의 전송에는 현장적용 및 다용도로 사용할 수 있는 이동형 시스템의 개발을 위하여 광섬유를 적용하였다. 이와 같은 레이저 간섭계를 이용한 초음파의 측정 효율에 영향을 미치는 요인은 시험편 표면에서 반사된 산란 광 포집효율, 간섭계출력광의 간섭 효율, 그리고 초음파 주파수에 따른 감도 등이다. Fig. 5의 장치에서 산란 광의 포집효율을 증대하기 위하여 산란 광 포집용 측정 헤드를 Fig. 6과 같이 설계하였다.

Fig. 6의 측정 헤드는 측정 대상의 표면에서 초음파에 의해 파장이 천이된 산란광을 포집한 후 광섬유를 이용하여 간섭계에 전송하는 역할을 한다. 실험에서 산란광의 포집량을 증대하기 위해 직경 100 mm의 렌즈를 사용하였다.

본 측정 헤드는 측정 시험편의 표면에서 초음파에 의해 파장이 천이된 산란광을 포집한 후 광섬유를 이용하여 간섭계에 전송하는 역할을 한다. Fig. 3는 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 전류신호를 되먹임(feedback)해 줌으로서 공초점 파브리-페롯 공진기에서 항상 안정적인 신호가 검출되도록 하였다.

5. 실험 결과 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 결합을 검사하였다. 초음파 검지용 레이저 spot 크기의 확대를 통한 초음파 탐상 면적의 증대와 레이저 간섭계의 효율 증대를 실현하여 시험편 결합의 측정정도를 향상시켰다. 우선 비접촉 검지의 효율을 높이기 위해 레이저 빔과 시험편 사이에 볼록렌즈

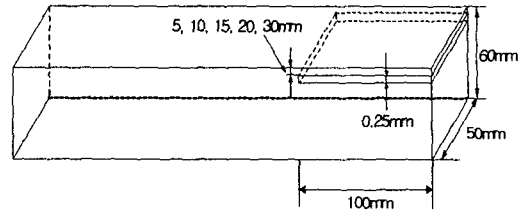


Fig. 4 Dimension of specimen

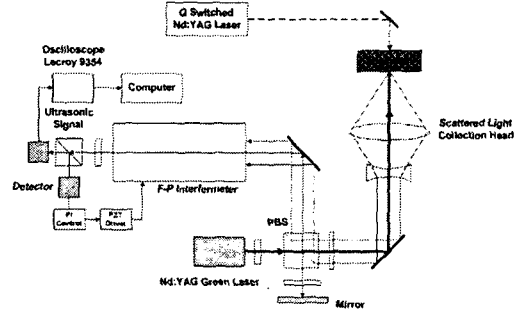


Fig. 5 Schematic diagram of experiment

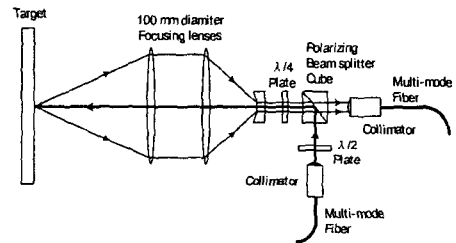


Fig. 6 Scattered lights collection head

를 사용하여 빔을 모아줌으로써 레이저 입사 밀도를 높이는 ablation 영역에서 투과법으로 실험을 행하였다. 레이저 빔이 시험편에 입사하면 모든 초음파가 발생되나, 표면의 물질이 플라즈마 불꽃을 내면서 내질로부터 증발됨과 동시에 매질 표면에 미치는 반발력의 합이 표면에 수직방향으로 가장 크게 되므로 종파의 발생에 가장 효과적인 방법이다. 레이저를 시험편에 조사한 순서는 Fig. 7과 같다.

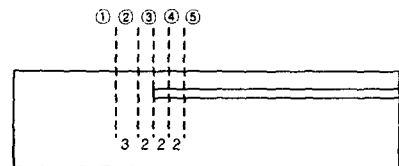


Fig. 7 Inspection order of specimen

Fig. 8은 시험편에서 결함이 없는 부위에 레이저를 조사하여 반대편에서 F-P간섭계를 이용하여 비접촉으로 얻은 초음파 신호이다. 본 연구에서 레이저 빔을 시험편에 30회 조사하였고 그 결과 측정된 파형을 동기화 평균하여 나타내었다.

파형에서 시간축의 L은 초음파의 발생지점으로부터 반대편으로 전파하는 초음파를 감지한 것이고, 3L은 시험편을 한번 왕복한 후의 얻어진 종파이고, 5L은 두번 왕복한 종파 신호를 나타낸 것이다. 실험에서 얻은 파형의 해석을 통하여 각 피크에서의 음속값을 계산하면 Table 1과 같다

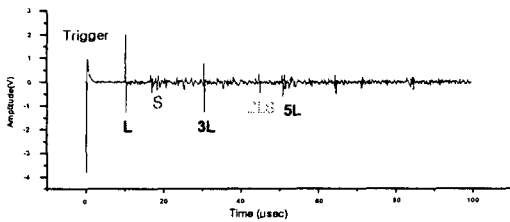


Fig. 8 Typical experimental waveform

Table 1 Sound velocity in SM45C

Component	Propagating time	Propagating distance	Sound velocity	Error
L	1.018×10^{-5}	60 mm	5893.90 m/s	0.78 %
3L	3.042×10^{-5}	180 mm	5917.15 m/s	0.39 %
5L	5.062×10^{-5}	300 mm	5926.50 m/s	0.23 %
S	1.862×10^{-5}	60 mm	3222.34 m/s	0.65 %

Fig. 9는 균열 깊이가 40mm인 시험편을 Fig. 7의 순서에 따라 레이저 조사에 의해 발생된 초음파를 측정된 결과이다.

Fig. 9에서 균열이 없는 부분의 신호와 결함부를 통과할 때의 신호를 비교해 보면 결함부의 진폭값이 감소함과 동시에 B1, B2 에코가 사라지고 결함부에 의해 반사된 F1, F2 에코가 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10는 균열의 깊이가 변화에 따라서 첫 번째 피크 신호는 초음파 발생지점으로부터 반대편으로 전파하는 초음파를 감지한 것이고, 두 번째 피크신호 부터서는 결함부를 맞고 나온 신호이다. 결함부에서 다중 반사가 일

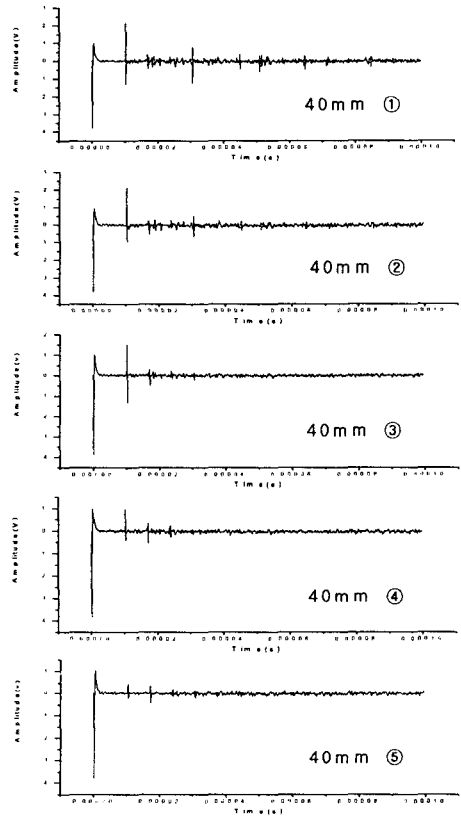
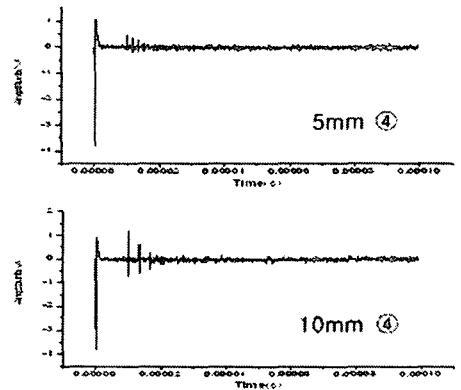


Fig. 9 The comparison of signals with to the variation of slit position

어나는 데 걸리는 시간은 일정하다. Fig. 10의 신호로서 파브리-페롯 간섭계가 구조물의 균열을 정량적으로 평가하는데 유용하게 적용될 수 있음을 보여주고 있다.



참고 문헌

- [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] White R. M., 1963, "Generation of Elastic Waves by Transient Surface Heating" J. Appl. Phys., Vol. 34(12), pp 3559~3567.
- [4] J. P. Monchalin, 1986, "Optical Detection of Ultrasound", UFFC Vol. 33(5) pp. 485-499.
- [5] C. B. Scruby and L. E. Drain, Laser Ultrasonic-Technique and Applications, Adam Hilger, New york, 1990.
- [6] Hutchins, D. A., Dewhurst, R. J. and plamer, S. B., 1981a, Ultrasonic 19,103.

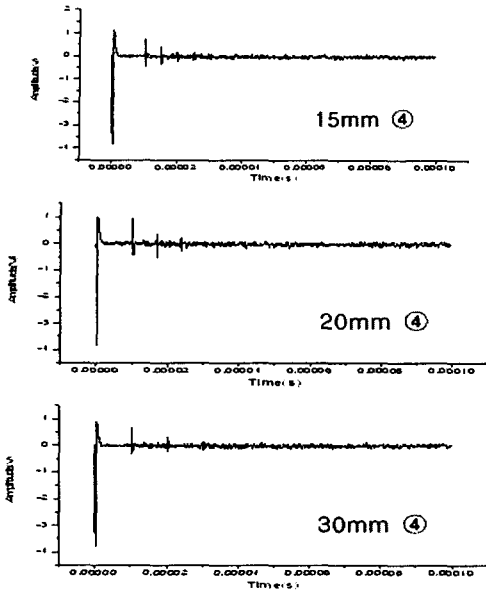


Fig. 9 The comparison of signals with to the variation of slit depth

6. 결 론

본 연구는 레이저를 이용하여 비접촉 초음파를 발생시켰으며 파브리-페롯 간섭계를 이용하여 초음파의 비접촉식 감지를 행하였다. 파브리-페롯 간섭계를 이용하여 비접촉식으로 결함부의 검사가 가능하였고 레이저 빔이 결함부로 접근해 감에 따라 결함에 의해 초음파가 감쇄되고, 제2, 제3의 저면에코가 사라짐으로 인하여 결함의 위치 추정이 가능하였다. 그리고 결함의 깊이를 달리한 결과 결함부의 다중반사신호가 깊이 변화에 대하여 일관성 있는 변화를 나타내어 결함의 깊이 추정도 가능하였다. 레이저를 이용한 구조물의 내부결함을 검사하는데 파브리-페롯 간섭계가 적합하다는 것과 결함의 크기 및 위치를 검사하는데 유용함을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.