

구조물의 비접촉 비파괴 검사를 위한 레이저 초음파법 적용

김재열*, 송경석⁺, 양동조⁺⁺
(논문접수일 2005. 4. 15, 심사완료일 2005. 6. 3)

Laser-Ultrasonics Application for Non-Contact and Non-destructive Evaluation of Structure

Jae-Yeal Kim*, Kyung-Seok Song⁺, Dong-Jo Yang⁺⁺

Abstract

Measuring defects on the inside and on the surface of a steel structure is very important technology in order to predict the life span of the structure. In particular, a place with a high probability that it may contain defects is a welded part and it is very important to check defects in the part, absence/presence of non-uniform substances, its shape, and the location. Many non-destructive tests can be applied, but the ultrasonic flow detection test is widely used with some advantages. The ultrasonic flow detection test, however, cannot be applied when there is a problem by a contact medium between PZT and a specimen, in case of a small and complicated shape or a moving object or when the specimen is hot. In this study, to solve the problems of the contact ultrasonic flow detection test, the non-contact ultrasonic flow detection test for sending/receiving ultrasonic waves using lasers was described. I intended to develop a non-destructive detection system applying the laser application ultrasonic test to a steel structure by detecting the defects inside of and on the surface of the specimen.

Key Words : Non-destructive, Laser generated ultrasonic, Fabry-Perot interferometer, Non-contact

1. 서 론

강구조물의 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 저하시킬 수 있기 때문에 결함과 불균질한 물질의 유무, 형태 위치 파악이

* 조선대학교 기전공학과 (jykim@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

+ 조선대학교 광응용공학과

++ 조선대학교 정밀기계공학과

중요하다. 특히 강구조물에서의 결합은 용접시에 발생할 가능성이 많으므로 용접부의 평가가 매우 중요하다고 할 수 있다.

용접부에 대한 비파괴검사방법으로는 방사선투과시험법, 자분탐상법, 초음파탐상법, 액체침투탐상법⁽¹⁾ 등 여러 가지가 있지만, 초음파탐상법이 초음파 신호의 시간과 진폭정보에 대한 분석으로 결합의 크기와 형상을 알기 쉬운 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 다른 비파괴검사법에 비해 폭넓게 이용되고 있으며, 물성치 측정 등에도 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⁽³⁻⁵⁾.

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⁽⁷⁾.

본 연구에서는 펄스레이저를 이용한 초음파의 발생과 Fabry-Perot Interferometer를 이용한 초음파 수신 기법을 이용하여 비접촉 비파괴의 검사의 적용가능성을 검토하고자 하였다. 이를 위해 레이저를 사용한 비접촉식 방법과 PZT를 이용한 접촉식 검사방법과의 비교평가와 강구조물에서 결합이 가장 많이 발생하는 용접부위의 결합 검출을 목적으로 한 인공 결합 시험편 내부의 결합검출과 시험편 표면의 결합 검출을 통하여 접촉식 초음파 탐상법의 단점들을 극복할 수 있는 방법을 연구하였다. 최종적으로 강구조물에 레이저 응용 초음파법을 적용한 비파괴검사 시스템을 개발하고자 하였다.

2. 비접촉 초음파 송수신

2.1 레이저를 이용한 초음파의 발생

레이저를 이용한 초음파 발생의 기본원리⁽⁶⁾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 체적 팽창이 발생하여 고주파의 열탄성파가 고체 내부로 전달되는 것이다.

레이저의 입사파워가 재료의 영구변형을 가져오는 한도(Limits)값을 미치지 못할 정도로 조정되었을 경우는 재료의 표면에 어떠한 흔적도 없이 탄성파를 발생시킬 수 있다.

이를 열탄성영역이라 한다⁽⁶⁾.

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

레이저에 의해 발생된 초음파는 시험편 내부에서 Fig. 2와 같이 탄성표면파와 벌크탄성파로 전파하며 Bulk탄성파에는 전파하는 각도에 따라 종파와 횡파로 나누어진다⁽¹⁾. 본 연구에서는 Ablation 영역에서 초음파를 발생하였으며, 시험편 내부의 결합은 Bulk탄성파로 표면 결합은 탄성표면파로 검출하였다.

2.2 초음파 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. 검

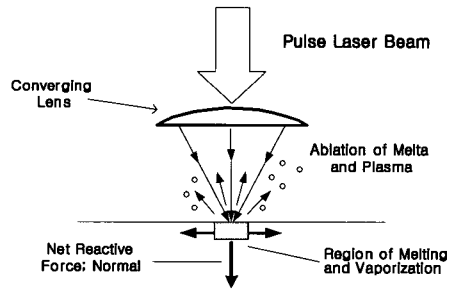


Fig. 1 Schematic Diagram to Show Ablation of Surface Material and Net Reactive Force on Sample

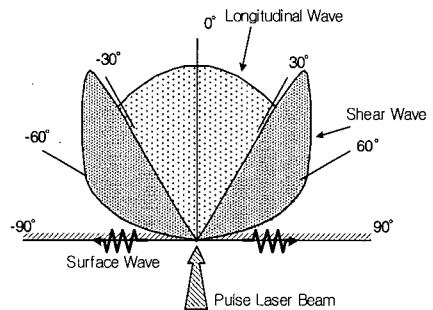


Fig. 2 Propagation Direction of the Wavelength in the Ablation Induced by the Pulse Laser

지용 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. 3은 Confocal Fabry-Perot Interferometer의 구조를 나타낸 그림이다. PZT를 이용하여 Mirror를 미세하게 조종함으로써 빛의 파장을 정밀하게 분석한다. Fig. 4는 공초점 F-P 공진기에서 빛살이 진행되는 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.

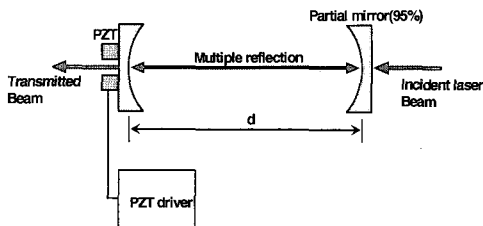


Fig. 3 Schematics of Confocal Fabry-Perot Interferometer

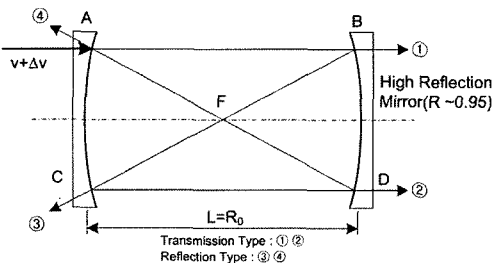


Fig. 4 Beam Orbit of Confocal Fabry-Perot interferometer

이때 B, D로 투과된 빛살의 전기장 E_B, E_D 는 다음과 같다⁽⁶⁾.

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

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

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

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

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

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

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

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 최대값의 반이 된다면,

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

로 쓸 수 있다. 여기서, F 는 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.

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

그리고 밴드폭(FWHM, Δv)은 $\text{FSR} \times \mathcal{F}$ 이므로 다음과 같이 쓸 수 있다. 여기서 \mathcal{F} 는 Finesse of Fabry-Perot Interferometer이다.

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

3. 결함검사 장치 및 방법

3.1 결함 시편 및 장치

본 연구에 사용한 시험편은 SM45C의 재질을 사용하고 크기는 300×50×60mm이다. 비파괴 평가의 목적인 내부 결함의 검출을 위하여 시험편 내부에 원형의 인공결함을 ϕ 4mm 크기로 제작하였고, 시험편의 한쪽 측면은 미세균열을 만들기 위하여 0.25mm의 Slit홈을 축 방향으로 5, 10, 15, 20, 30mm 깊이로 가공하였다.

표면결함의 검출을 위해서는 균열결함의 반대쪽 표면에 0.25mm slit홈을 15mm 깊이 방향으로 가공하였다. Fig. 5는 본 연구에 사용된 시험편이다.

열 발생원으로 Q 스위칭된 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 내부결함과 표면결함을 검출하기 위하여 광학계를 구성하였고 F-P 간섭계로 얻은 신호들은 오실로스코프(Lecroy 9345)를 통해 디스플레이 및 데이터 저장을 하였다. 실험장치의 구성은 Fig. 6와 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. 6의 장치에서 산란 광의 포집효율을 증대하기 위하여 산란 광 포집용 측정

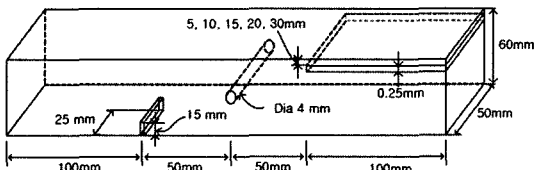


Fig. 5 Dimensions and Defect of specimen

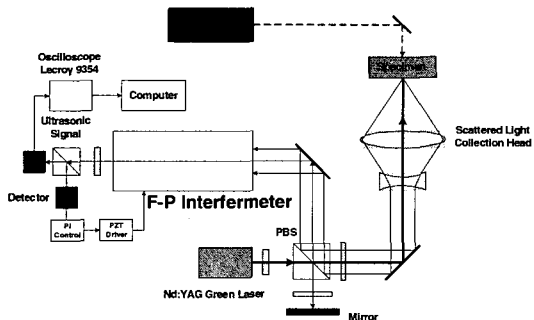


Fig. 6 Schematic Diagram of Experimental Equipment

헤드를 Fig. 7과 같이 설계하였다. Fig. 7의 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.

3.2 결함 검사 방법

Ablation 영역에서의 초음파 발생은 시험편의 표면에 손상이 동반되어 비파괴검사라 볼 수 없다. 그러나 이때 발생하는 표면손상량은 극히 미세함으로 구조물의 안정성 측면에서 영향이 없다. 또한 초음파의 비접촉 검지 효율을 높이기 위하여 Ablation 영역에서 Fig. 8과 같이 초음파 송수신 Laser를 일직선으로 정렬하고 시험편을 이동하여 결함을 측정하였다. 내부결함의 측정은 레이저가 시험편에 입사되면 모든 초음파가 발생되나 표면의 물질이 증발됨과 동시에 매질표면에 미치는 반발력이 수직방향으로 가장 크게 작용하므로 종파를 이용한 투과법이 가장 효율적이다.

표면결함의 측정은 Ablation 영역에서 발생하는 표면파를 이용하여 Time of Flight 기법을 적용하여 측정하였다. 초음파 송수신 Laser Source의 간격을 표면 균열을 중심으로 각 20mm의 간격을 두고 측정하였다.

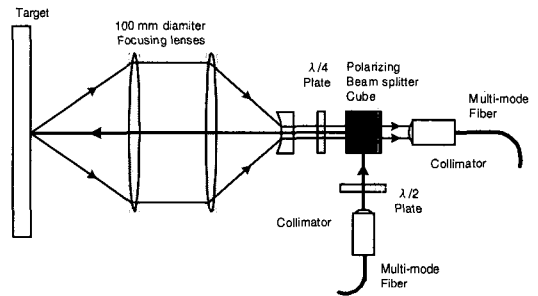


Fig. 7 Collection Head of Scattered Light

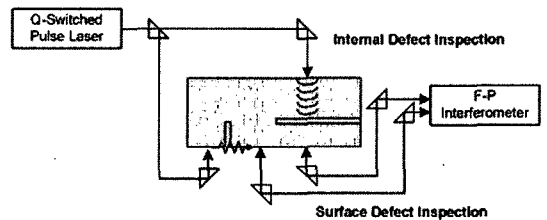


Fig. 8 Non-contact Ultrasonic Wave Detection Method Depending on the Defect

초음파 신호의 비접촉 검지를 위하여 F-P 간섭계의 안정화는 온도나 공기중의 섭동, 그리고 레이저 주파수 자체의 시간에 따른 변화에 의한 검출신호의 불안정성을 보정하기 위하여 PI Control을 이용 PZT에 진류신호를 Feed-Back해 줌으로서 공초점 F-P 공진기에서 항상 안정적인 신호가 검출되도록 하였다.

초음파 검지용 레이저 Spot 크기의 확대를 통한 초음파 탐상 면적의 증대와 레이저 간섭계의 효율 증대를 실현하여 시험편 결합의 측정정도를 향상시켰다. 레이저를 시편에 조사한 순서는 Fig. 9와 같다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 10은 시험편에서 결합이 없는 부위에 레이저를 조사하여 반대편에서 F-P간섭계를 이용하여 비접촉으로 얻은 초음파 신호이다. 본 연구에서 레이저 빔을 시험편에 3회 조사하였고 그 결과 측정된 파형을 동기화 평균하여 나타내었다. 파형에서 시간축의 L은 초음파의 발생지점으로부터 반대면으로 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.

레이저 초음파법에서는 발생음파가 모든 방향을 따라 전파하는 점을 고려해야 한다. 또한 모든 종류의 파가 발생하

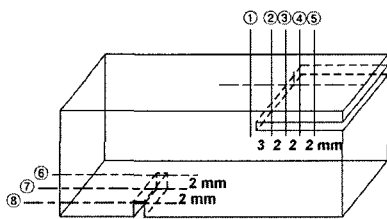


Fig. 9 Inspection Sequence of Defect in Specimen

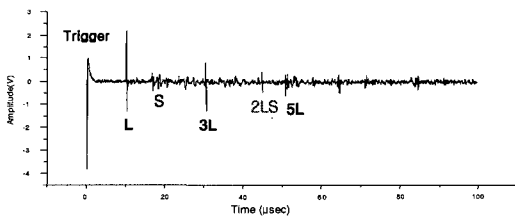


Fig. 10 Multiple Reflection of Laser Generated Longitudinal pulses

Table 1 Sound velocity in SM45C

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

게 되어 검출되어진 파를 해석하는데 어려움을 가지게 된다.

Fig. 11에서 보면 결합의 유무는 무결합 파형과 결합 파형의 비교시에 확인할 수 있다. 시험편을 직접적으로 전파한 종파(L)와 횡파(S)의 진폭값이 감소되고 있으며 시험편을 한번 왕복한 종파인 3L 신호의 진폭값이 현저하게 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

균열의 경우 Fig. 12에서 보면 균열이 없는 부위에서 수신된 신호와 균열의 깊이가 0, 5, 10, 15, 20, 30 mm으로 증가

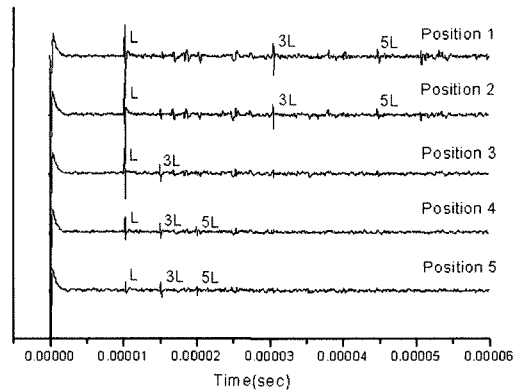


Fig. 11 Result of Signals to the Variation of Measuring Position(Crack Depth 15mm)

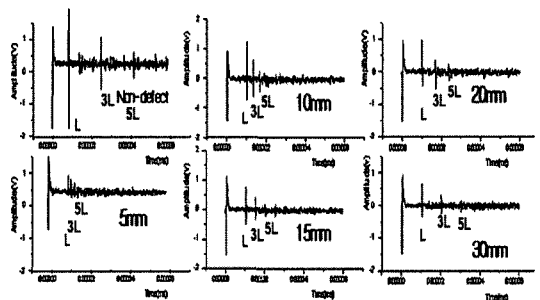


Fig. 12 Comparison of Signal with to the Variation of Silt Depth(Position 4)

할수록 진폭값이 급격하게 감소함을 관찰할 수 있다. 이것은 레이저의 펄스에너지 성분이 균열의 깊이가 깊어질수록 입사된 펄스에너지가 균열 선단과 표면에서 입사 초음파와 수직인 균열면에 의해 거의 소실된다. 특히 3번 지점부터는 균열에 의해서 L과 3L 신호 사이에 결함에 의한 반사파가 나타남을 확인 할 수 있다. 이것으로 결함의 유무를 확인할 수 있었고 결함의 크기 또한 추정이 가능하였다

Fig. 13는 시험편에서의 각측정(⑥ ~ ⑧) 위치에서의 표면파 신호를 보여주고 있다. 파형에서 시간축의 L은 초음파의 발생지점으로부터 시험편의 표면 바로 밑을 지나는 종파이며, R은 표면파이다. 표면파는 초음파중 가장 늦은 속도를 가지므로 가장 나중에 검출된다. 표면결함이 없는 곳에서 표면 결함쪽으로 측정 위치가 이동함에 따라 표면파는 사라지고 종파만이 남는 것을 확인할 수 있다.

균열의 깊이가 변함에 따라서 첫 번째 피크 신호는 초음파 발생지점으로부터 반대면으로 직접 전파하는 초음파 신호를 감지한 것이고, 두 번째 피크 신호부터는 결함부를 맞고 나온 신호들이다. 결함부에서 다중반사가 일어나는데 소요된 시간은 크랙의 깊이에 비례해서 일정하게 변함을 확인할 수 있었다. 따라서 결함부를 통과한 다중반사 신호의 도착시간을 확인하면 크랙의 위치를 정확히 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서 레이저와 F-P간섭계를 이용하여 비접촉으로 초음파 신호를 송수신하였다. 초음파 신호의 특성을 분석함으로써 내부결함과 표면결함의 존재 유무와 내부결함의 크기, 위치까지도 분석이 가능하였다.

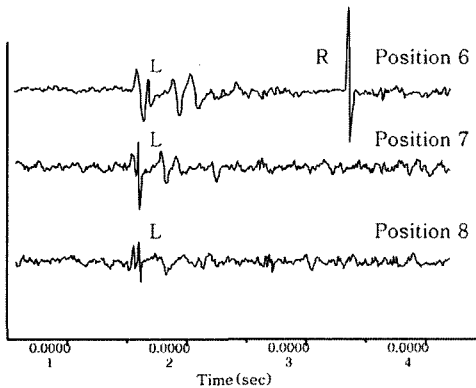


Fig. 13 Result of Signals to the Variation of Measuring Position (Surface Defect, ⑥ ~ ⑧)

- (1) F-P간섭계를 활용하여 비접촉 초음파 신호를 측정함으로써 기존의 접촉식 방법의 단점을 해소하였다.
- (2) 다중모드 광섬유를 이용하여 초음파 수신부를 모듈화함으로써 결함의 종류에 따른 초음파 측정 위치 변경이 용이하게 하여 현장 적용성을 증대시켰다.
- (3) 결함 신호로부터 결함의 유무, 크기, 위치, 깊이 등을 평가하는데 있어 유용한 측정 기법임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2005년도 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음

참 고 문 헌

- (1) Tam, A. C., 1984, "Pulsed Laser Generation of Ultrashort Acoustic Pulses: Application for Ultrasonic measurement," *Applied Physics Letters*, Vol. 45, pp. 510~512.
- (2) White, R. M., 1963, "Generation of Elastic Waves by Transient Surface Heating," *J. Appl. Phys.*, Vol. 34(12), pp. 3559~3567.
- (3) Monchalin, J. P., 1986, "Optical Detection of Ultrasound," *UFFC* Vol. 33(5) pp. 485~499.
- (4) Scruby, C. B. and Drain, L. E., 1990, *Laser Ultrasonic-Technique and Applications*, Adam Hilger, New York.
- (5) Hutchins, D. A., Dewhurst, R. J., and plamer, S. B., 1981, *Ultrasonic 19*, p. 103.
- (6) Connes, F. A. and white, H. E., 1976, *Fundamentals of Optics, 4th Edition*, McGraw-Hill, New York, pp. 271~301.
- (7) Nagata, Y., 2000, "Material Evaluation Using Laser-Based Ultrasonics," *JSNDI*, Vol. 49, No. 6, pp. 369~375.