

마이켈슨 간섭계를 이용한 레이저 여기 초음파의 검출

Detection of Laser Generated Ultrasonic Wave Using Michelson Interferometer

김경조*, 山脇 壽*, 장경영**

Kyung-Cho Kim*, Hisashi Yamawaki* and Kyung-Young Jhang**

초 록 본 논문에서는 고풍력 펄스 Nd:YAG 레이저를 이용해서 원반형 시편의 한쪽 면에서 초음파를 발생시키고 반대 면에서 피드백 제어에 의해서 안정화된 마이켈슨 간섭계를 이용하여 열탄성 영역에서의 초음파를 검출하였다. 이론식에 의해서 계산된 열탄성 영역에서의 초음파 변위 파형이 실험에서 얻어진 파형과 유사한 것을 확인하였고, 특히 종파와 횡파의 음속이 접촉식 트랜스듀서를 이용하여 펄스-에코법으로 측정한 음속과 거의 일치하는 것을 확인하였다. 레이저 초음파를 이용한 응용예의 하나로 원반형 시편을 노 안에 넣고 음속을 계측한 결과 온도의 증가에 따라 음속이 감소하는 것을 확인하였다.

주요어 : 레이저 초음파법, 레이저 간섭계, 마이켈슨 간섭계, 열탄성 영역

Abstract In this paper, ultrasonic wave in the thermoelastic regime was generated in a steel disk by illuminating a pulse laser (Q-switched Nd:YAG) on the surface of the sample and was detected on the other side by Michelson interferometer which was stabilized by feed back control. The experimentally detected displacement waveform of the ultrasonic wave showed good agreement with the theoretically expected one. Also it was shown that sound speeds of longitudinal and shear wave were similar to ones measured by pulse-echo method using a contact transducer. As an application of the noncontact ultrasonic measurement by using laser based ultrasonics, the sound speed in the sample was monitored while the sample was heated in a furnace, and the result showed that it decreased according to the increase of sample temperature.

Keywords: thermoelastic condition, ablation condition, michelson interferometer

1. 서 론

비파괴 평가 분야에 있어서 초음파는 적용 매질의 다양성, 안전성, 지향성 등 본질적인 특징 때문에 널리 사용되어지고 있다. 그러나, 기존의 초음파 기술에는 접촉성의 문제가 있다. 즉, 초음파 송수신 트랜스듀서를 재료에 부착시켜야 하는데 접촉 상태에 따라 전기-음향 변환 효율이 달라지게 되며 재료가 매우 고온의 경우에는 실제로 PZT 트랜스듀서를 부착시킬 수가 없기 때문

에 음파의 발생 조차도 불가능해지게 된다. 또한 작은 재료, 복잡한 형상, 움직이는 물체의 경우에도 부착의 문제가 발생하게 된다. 레이저 초음파법은 이런 문제를 극복하고자 제안된 것으로 펄스 레이저광 등의 레이저를 시편에 조사해서 초음파를 발생시키고, 수신에서는 레이저 간섭계의 광학적 기술을 이용해서 초음파의 진동을 검출하는 비접촉 초음파 송수신 기술이다[1-4]. 레이저광에 의해서 시료에 조사된 레이저는 초음파를 발생시키는데, 이 때 조사된 레이저광이 어떤 문턱 값

을 넘어서 주사면을 손상시키는가 아닌가에 따라서 열탄성 영역과 아브레이션 영역으로 나눌 수 있다. 이 방법은 기존의 PZT 트랜스듀서에서와는 달리 레이저 펄스의 조사 시간과 형태에 따라서 주파수와 지향성을 변화시킬 수 있는 특징이 있으며, 결합해석 뿐만 아니라 재료의 열적, 광학적, 탄성적인 특성에 대한 정보를 획득할 수 있어 다양한 활용이 기대되고 있다(3-4).

본 논문에서는 이러한 레이저 초음파법의 기초 연구 단계로서 Nd:YAG 펄스 레이저를 이용하여 초음파를 발생시키고 이를 피드 백 제어에 의해서 안정화 시킨 호모다인 마이켈슨형 간섭계를 이용하여 검출하여 이론적인 해석에 의해 예상된 파형과 비교함으로써 레이저에 의한 초음파의 발생 및 검출 가능성을 검증하였다. 또한, 응용 예로 재료의 온도 변화에 따른 음속의 변화를 측정하였다. 이는 레이저 초음파의 비접촉성을 적극적으로 이용한 예로, 노 내에 설치된 시편의 물성 변화를 가열 중에 평가할 수 있음을 보여준다.

2. 마이켈슨 간섭계를 이용한 초음파 검출의 원리

본 연구에서는 레이저에 의해서 발생된 초음파를 수신하기 위하여 레이저 초음파 검출의 대표적인 방법인 호모다인 간섭법을 이용한 마이켈슨 간섭계가 이용되었다. 이 방법은 레이저 광을 프로브광과 참조광으로 나누고 재료표면에서 반사된 프로브광을 참조광과 겹쳐 간섭시켜 그 간섭광의 강도변화에서 초음파의 파형을 얻는 방법이다. 원리는 극히 간단하나 안정적으로 초음파의 파형을 얻기 위해서는 프로브광과 참조광의 광로차의 변화에 의해서 주기적으로 변화하는 간섭광의 명암이 거의 중간에 오도록 참조광용 미러의 위치를 조절할 필요가 있다. 단, 안정적으로 초음파의 파형을 얻기

위해서는 프로브광과 참조광의 광로차의 변화에 의해서 나타나는 간섭광의 강도변화가 최대가 되도록 참조광용 미러의 위치를 조절할 필요가 있다(5-7).

또한, 주위의 기계적 진동이나 잡음 전원 노이즈 등의 영향도 고려해야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 마이켈슨 간섭계를 제어부와 신호검출부의 두 부분으로 나누어 구성하였다. 신호검출부는 전형적인 마이켈슨 간섭계로서 초음파 파형을 검출하는 부분이며, 제어부는 저주파의 기계진동이나 잡음이 유입될 경우 이 성분만을 검출하여 참조 거울이 부착된 압전 구동기가 이를 상쇄시키는 방향으로 자동으로 움직이도록 하는 역할을 한다. 이렇게 함으로써, 신호 검출부에서는 저주파 진동이나 잡음에 의한 영향 없이 안정적으로 초음파 신호를 검출할 수 있다(3, 5). Photo 1은 본 연구에서 자체 개발한 제어기의 외관을 보여준다. 또한 Fig. 1에서 λ/2 플레이트는 직선편광을 90도 축이 다른 직선편광으로 바꾸어 준다. 따라서 λ/2 플레이트를 지난 빛은 직선편광 되어 있고 PBS(Polarized Beam Splitter)에서 이 성분만 투과시킨다. 시편으로 입사된 빛은 λ/4 플레이트를 왕복하면서 다시 90도 축이 다른 직선편광이 되고 PBS에서는 이 성분만 반사시키는 역할을 한다.

한편, 프로브광과 참조광은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$E_1 = a_1 \exp(j2\pi f \left(t - \frac{X_1}{c} \right)),$$

$$E_2 = a_2 \exp(j2\pi f \left(t - \frac{X_2}{c} \right)) \dots\dots\dots (1)$$

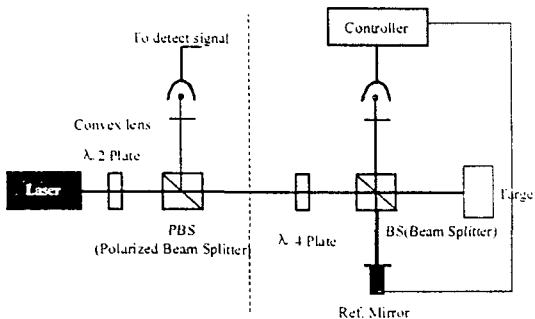


Fig. 1 The construction of Optical Michelson Interferometer

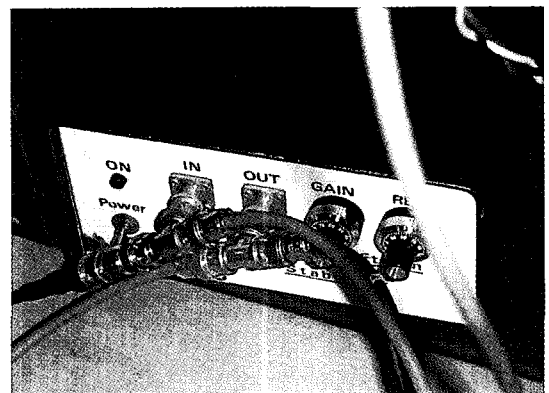


Photo 1 The controller for stabilization of receiving signal in Michelson interferometer

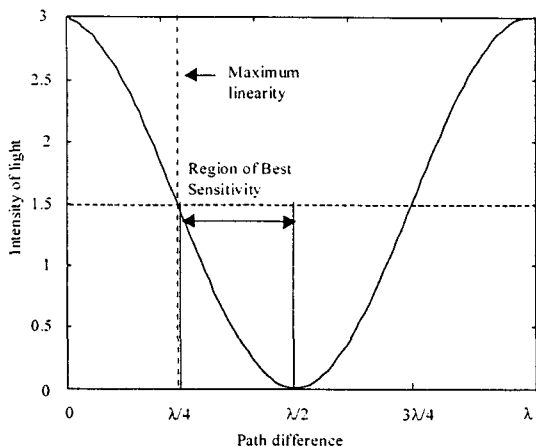


Fig. 2 The relationship between interference light and relative intensity of light

여기서, E_1 은 프로브광의 진폭, E_2 는 참조광의 진폭, a_1 과 a_2 는 진폭계수, f 는 광주파수, t 는 시간, X_1 과 X_2 는 광로 길이, c 는 광속을 나타낸다. 이 두개의 레이저 광을 겹쳐서 얻는 간섭광의 강도 I 는 다음과 같이 된다.

$$I = |E_1 + E_2|^2 \approx a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos\left(2\pi \frac{X_1 - X_2}{\lambda}\right) \quad (2)$$

여기서, λ 는 레이저 광의 파장이다. 간섭광의 강도 I 를 최고의 감도로 검출하기 위해서는 광로차 $X_1 - X_2$ 은 Fig. 2에 표시한 것처럼 파장의 정수배에 $\lambda/4$ 만큼 차이 나게 조절 해야 한다[5].

이 경우 시료 표면의 진동 변위를 $D(t)$ 라고 하면 광로차는 다음식으로 표시할 수 있다.

$$X_1 - X_2 = (n \pm 0.25)\lambda + 2D(t) \quad (3)$$

이것을 식 (2)에 대입하면, 간섭광 강도는 다음식으로 표시할 수 있다.

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \sin\left(\pm \frac{4\pi}{\lambda} D(t)\right) \quad (4)$$

여기서 식 (4) 우변의 앞 두 항은 변위와는 무관하게

일정한 크기의 배경잡음으로 존재하므로 고려 대상에서 제외하기로 한다. 그러면, 변위 $D(t)$ 가 $|D(t)| < \lambda/8$ 의 경우, 식 (4)은 근사적으로

$$I \approx 2a_1a_2 \frac{4\pi}{\lambda} D(t) \quad (5)$$

와 같이 되고, 간섭광 강도는 변위에 비례하게 된다. 변위를 인위적으로 $\lambda/4$ 이상으로 가한 경우 출력 전압의 최대값과 최소값의 차를 교정 강도 I_{cal} 이라 하면 식 (4)에서

$$I_{cal} = 4a_1a_2 \quad (6)$$

와 같다. 식 (5)와 식(6)을 이용하면,

$$D(t) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{I}{I_{cal}} \quad (7)$$

와 같이 나타내지므로, 초음파 변위를 광간섭 강도 변화로부터 검출하는 것이 가능하다. 이러한 원리에 의해서, 통상의 초음파 탐촉자에서는 불가능한 변위파형을 직접적으로 검출할 수 있고, 또 수신 주파수 범위에 관계없이 파형을 검출할 수 있다.

3. 시편과 계측계의 구성

Fig. 3은 사용된 계측계의 구성도를 나타내고,

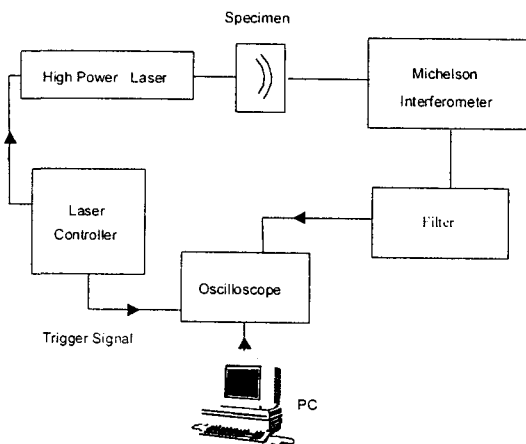


Fig. 3 The construction of measurement setup

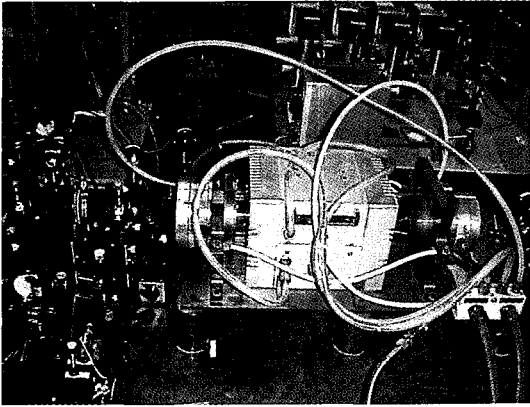


Photo 2 The photo of measurement system

Photo. 2는 전체 계측계의 사진을 나타낸다.

열 발생원으로는 Q 스위칭된 Nd:YAG 레이저 (New Wave Research사의 Mililase-III/10Hz)를 사용하였다. 이 레이저의 에너지는 70mJ이고, 감쇠기에 의해서 강도가 조절된다. 펄스 레이저의 시간 폭은 100ns로 하였고, 파장은 1064nm의 2차 조화 성분인 532nm를 사용 하였다. 이 레이저의 펄스 반복율은 10Hz이다. 마이켈슨 간섭계에서 사용한 CW레이저도 532nm(Lightwave사의 A142모델, 5mW He-Ne laser)를 사용하였다. 수신된 파형은 잡음을 제거하기 위한 광대역 필터(0-100MHz)를 거치고 디지털 오실로 스코프(Tektronix 사의 DSA 601모델)에서 A/D변환 한 후, 컴퓨터로 옮겨서 신호처리를 행하였다. 시편은 지름 50mm, 높이 6.35mm의 steel disk

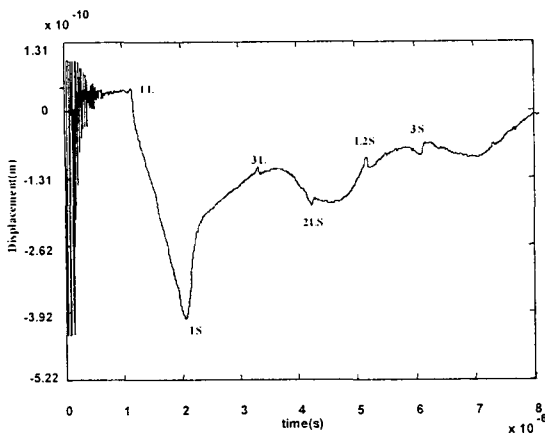


Fig. 4 Wave form received by Michelson interferometer

(SKS3)를 대상으로 하였다.

4. 결과 및 고찰

검출 파형을 Fig. 4에 보인다.

그림에서 1L과 1S로 표시한 포인트는 각각 시편을 한번 통과한 종파와 횡파의 도착을 의미하고, 3L은 시편을 3번 통과한 종파를, 2LS는 종파로 시편을 두 번 통과하고 횡파로 시편을 한번 통과한 파를, L2S는 종파로 시편을 한번 통과하고 횡파로 2번 통과한 파를 3S는 횡파로 시편을 세 번 통과한 파를 나타낸다. 종파 속도는 1L과 3L을 이용하여 계산하였고, 횡파의 속도는 1L과 2LS를 이용하여 계산하였다(8). 그 결과 종파의 속도는 5836.4m/s, 횡파의 속도는 3126.4m/s 이었다. 이것은 접촉식 트랜스듀서를 사용하여 펄스-에코법으로 계측한 steel의 음속 5841.2m/s, 3123.7m/s와 비교하여 유사한 결과라 할 수 있다.

한편, 이 계측계의 타당성을 검증하기 위해서 참고문헌(9)에서 제시했던 그림 함수를 이용한 Sinclair (1979)의 식을 기초로 레이저 초음파에 의해 발생되어지는 신호의 변위성분을 컴퓨터를 통하여 수치적으로 구하여 보았다. 시편에 조사되어진 바로 아래 축을 따라서 반대면에서 검출되어지는 신호에 대한 변위를 계산하였다. Fig. 5에 주목하고 있는 열탄성 영역에서 얻어진 시뮬레이션 파형과 실험에서 얻어진 파형을 동시에 나타내었다.

Fig. 5에서 초기에 아래쪽으로 나타나는 피크(1L)

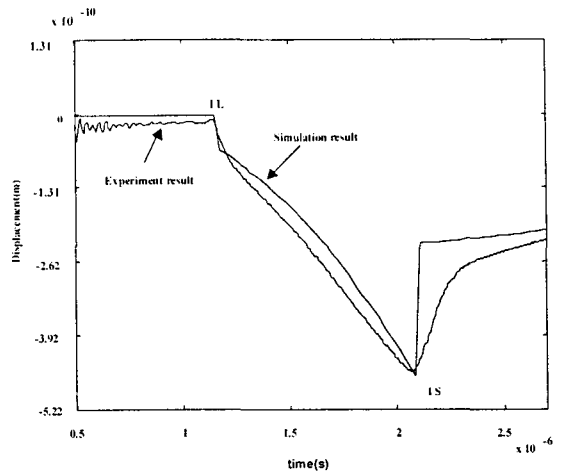


Fig. 5 Theoretical displacement with Heaviside step function in thermoelastic regime

가 종파, 중간에 위쪽으로 나타나는 피크(1S)가 횡파에 의한 변위이다. 실험에 의해서 구한 파형과 시뮬레이션에 의해서 구한 파형은 유사한 형태를 나타내며, 구성된 계측계가 적절히 구성되었음을 시뮬레이션을 통하여 검증할 수 있다.

5. 고온재료에의 적용

레이저 초음파의 특징 중 제일 큰 장점인 비접촉 계측이라는 면에서, 고온 재료로의 적용은 극히 중요한 응용 분야이다. 종래부터, 고온중의 재료의 음속 측정 등이 초음파를 이용해서 수행되고 있으나 긴 봉을 사용하는 등 적용하기에 여러 가지 번거로운 점이 있다. 또한, 자기장과 와전류와의 상호 작용을 이용한 초음파 계측 기술(EMAT)이 있는데, 이 방법에서는, 전파매질이 필요 없고 비접촉으로 초음파 송신이 가능하나 전자유도를 이용하기 때문에 센서와 재료의 사이의 거리를 크게 할 수 없고, 시료가 전도체가 아니면 안 되는 제한이 있다[10]. 반면에, 레이저 초음파 기술은 시편에서 반사 혹은 산란되는 광량을 이용하여 원 거리에서 초음파를 수신하므로 노의 안에서 시료의 적용등에 유리한 특징을 지니고 있다. 따라서, 본 연구에서는 구성된 마이켈슨 간섭계를 이용하여 고온의 재료에 대해서 레이저 초음파의 적용가능성을 검토하였다.

5. 1. 계측계의 구성

고온에서 레이저 초음파를 송 수신하기 위해서 Fig. 6과 같은 장치를 구성하였다.

노 안에는 긴 원통형의 관이 들어가 있고 이 관 안에 시편을 고정하였다. 원통형 관은 열에 견딜 수 있게 수정으로 만들어졌고, 양 벽은 광학 창(optical window)으로 구성되었다. 노 안의 온도는 열전대를 통하

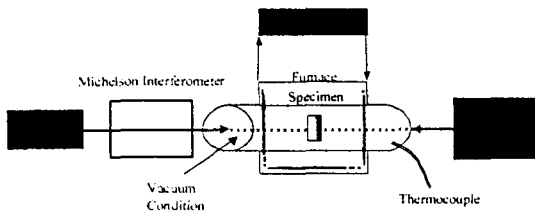


Fig. 6 The measurement system to measure laser based ultrasonic wave in high temperature

여 계측 되고, 노 안은 진공상태로 만들어서 산화를 방지 하였다. 시편의 한쪽 면에 고출력 레이저를 조사시켜 초음파를 발생시키고 반대편으로 전파된 파를 마이켈슨 간섭계로 검출하도록 하였다.

5. 2. 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 노 안의 온도가 20℃일 때와 200℃일 때의 수신파형을 비교하여 나타낸다.

그림에서 볼 수 있는 것처럼 온도가 올라감에 따라서, 전파 시간차가 커지는 것을 볼 수 있다. 즉, 20℃에서 보다 200℃에서의 전파속도가 더 느린 것을 알 수 있다. 실제로 1L과 3L을 이용해서 전파속도를 구하여 보면 20℃에서 종파속도가 5945.7m/s, 200℃에서 5609.5m/s이었다. 한편 20℃에서의 음속을 접촉식 초음파 펄스-에코법으로 계측한 결과는 5937.6m/s 이었다. 앞의 실험에서와 다른 값을 갖는 것은 여기서 사용된 시편이 앞에서 사용된 시편과 별개의 시편(재료는 동일)이기 때문인 것으로 생각된다. 또한 두 측정값의 차이가 앞의 실험에서보다 약간 더 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 노의 주위에 냉각수를 돌리기 위한 모터의 진동때문에 생기는 오차로 사료된다. 물론, 제어부에서 진동을 소거시키기는 하나 냉각수의 흐름에 의한 진동이 너무 크므로 완전히 제거하지는 못하고 그 레벨을 크게 줄이는 효과를 보였다. 실제 실험에서 제어부를 작동시키지 않은 경우는 수신 신호가 너무 큰 변동을 가져서 계측이 거의 불가능 하였다.

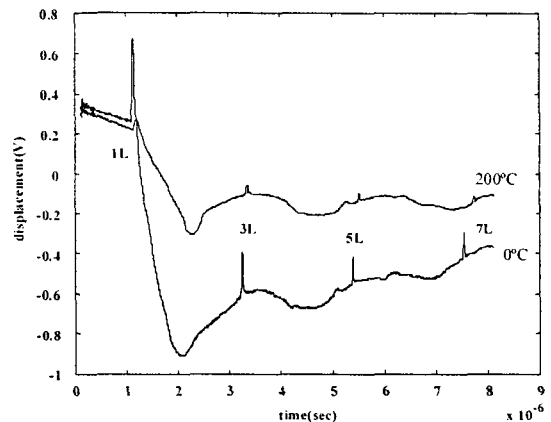


Fig. 7 Receiving signal according to the change of temperature

6. 결 론

고출력 펄스 Nd:YAG 레이저와 안정화된 마이켈슨 간섭계를 이용하여 비접촉으로 초음파를 송수신할 수 있는 계측계를 구성하였다. 구성된 시스템으로 지름 50mm, 높이 6.35mm의 steel disk(SKS3)시편에 발생시킨 초음파를 관측한 결과 이론적으로 예측된 파형과 유사한 파형을 얻을 수 있었으며 구성된 시스템의 유효성을 검증할 수 있었다. 또한, 음속을 계측한 결과 종파는 5836.4m/s 횡파는 3162.4m/s이었으며 이는 펄스-에코법으로 계측한 음속과 비슷한 값이다. 한편, 시편의 온도를 200℃까지 증가시켜 실험한 결과, 20℃에서와 유사한 파형이 관측되었으며 200℃에서는 전파 속도가 6%정도 감소되는 것을 알아낼 수 있었다. 이로써 레이저 초음파의 특징 중 하나인 고온재료의 적용성을 확인할 수 있었다.

한편, 본 논문에서 레이저 초음파의 시뮬레이션에 이용한 Sinclair의 식은 다중 반사, 모드변환 등에 대한 해석에 한계가 있으므로 유한차분법과 같은 수치해석적 기법의 적용에 대한 연구가 향후 레이저 초음파의 전파 거동을 보다 명확하게 규명하기 위하여 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 과학재단(KOSEF)의 1999년 전반기 해외 Post-Doc.연수 지원에 의해서 수행되었음.

참고문헌

- [1] White R M. "Generation of elastic waves by transient surface heating", *J. Appl. Phys.* Vol. 34, No. 12, pp. 3559-3567, (1963)
- [2] C. B. Scruby, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins, and S. B. Palmer, "Quantitative studies of thermally generated elastic waves in laser-irradiated metals", *J. Appl. Phys.* Vol. 51, No. 12, pp. 6210-6216, (1980)
- [3] C. B. Scruby and L. E. Drain "Laser ultrasonics: techniques and applications", Adam Hilger, pp. 105, (1990)
- [4] J. D. Aussel, A. Le Brun and J. C. Baboux, "Generating acoustic waves by laser : theoretical and experimental study of emission source", *Ultrasonics*, Vol. 26 pp. 245-255, (1988)
- [5] 김영환, 소철호, 권오양, 광로차 보상회로가 부착된 마이켈슨 간섭계에 의한 탄성파 신호검출, 비파괴검사학회지, Vol. 13, No. 4, (1993)
- [6] Wagner J. W., "Physical acoustics", Vol. 19, ed W. P. Mason and R. N. Thurston (New Yorker: Academic)
- [7] Jean P. M., "Optical detection of ultrasound", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control*, Vol. UFFC-33, No. 5, pp. 485-498, (1986)
- [8] J.-D. Aussel and J. -P. Monchalim, "Precision laser-ultrasonic velocity measurement and elastic constant determination", *Ultrasonics*, Vol. 27, pp. 165-177, (1989)
- [9] 장경영, 김경조, 박종록, "PZT트랜스 듀서에 의한 레이저 여기 초음파의 특성 분석", 대한기계학회 논문집 A권, Vol.23, No.9, 1590-1597, (1999)
- [10] D. A. Hutchins, J. Hu, and K. Landgren, "A comparison of laser and EMAT technique for noncontact ultrasonics", *Materials Eval.*, Vol. 44, pp. 1244-1253, (1986)
- [11] JE Sinclair, "Epicentre solutions for point multipole sources in an elastic half-space", *J. Phys. D* Vol. 12, pp. 1309-1315, (1979)
- [12] J. A. Cooper, R. J. Dewhurst, S. Moody, S. B. Palmer, "High-voltage spark discharge source as an ultrasonic generator", *IEE Proceedings*, Vol. 131, Pt. A, No. 4, pp. 275-281, (1984)
- [13] S. S. Lee and B. Y. Ahn, EMAT application at high temperature, *Non-destructive Test & Evaluation*, Vol. 7, pp. 253-261, (1991)