

금속에서의 광음향 신호 분석

An Analysis of The Photoacoustic Signal in Metals

이 종 호**, 전 계 석*
(Yi Chong Ho**, Jun Kye Suk*)

요 약

본 논문에서는 금속에서의 광음향신호를 분석하기 위해 CW CO₂ 레이저를 사용하여 광음향 신호검출 시스템을 구성하였으며 알루미늄, 탄소강 및 황동을 샘플로 선택하고 레이저 변조주파수, 록인앰프의 시정수를 변화시키면서 샘플의 종류 및 두께에 따른 수 nA 정도의 광음향 신호를 검출하여 신호처리 기법에 의해 금속에서의 광음향 신호의 특성을 분석하였다. 실험결과 시정수를 조정하여 광음향 신호를 안정화시킬 수 있었고 광음향 신호는 금속고유의 열팽창계수에 대한 열용량에 비례하여 증가하고 샘플두께 및 변조주파수에 대하여 지수함수적으로 감소함을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, the system for detection of photoacoustic signal has been constructed by using CW CO₂ laser for an analysis of the photoacoustic signal in metals and aluminum, carbon steel, brass have been used as sample. The photoacoustic signals of several nano amperes have been detected in each sample with varying modulation frequency of laser, time constant of lock-in amplifier, thickness of sample. The characteristics of photoacoustic signal has been analysed in term of phase angle by using signal processing technique. Results indicate that the photoacoustic signal can be stabilized by adjustment of time constant of lock-in amplifier, that the signal amplitude is proportional to the ratio of thermal expansion coefficient to thermal capacity of metal, and that the signal amplitude decreases exponentially with sample thickness as well as with modulation frequency.

I. 서 론

물질에 광 에너지가 조사되었을때 물질 입자의 열 팽창과 복원력이 발생되어 탄성 에너지로 변환되는 일련의 과정인 광음향효과(photoacoustic effect)는 1880년 A.G.Bell이 최초로 발견하였으며[1] 이러한

광음향효과를 이용한 기술은 물질의 광학 특성, 열 특성 및 탄성적 특성을 모두 검출할 수 있는 장점이 있어서 물질에 관련된 많은 정보를 얻을 수 있다. 일반적으로 고체에서의 광음향 변환은 두 종류의 모우드(mode)로 구분되며 첫번째 모우드인 열탄성 모우드(thermoelastic mode)에서는 변조된 광 에너지가 고체표면에 조사되면 조사지점에서 물질고유의 광흡수율에 따라 일부의 광 에너지가 흡수되며 이러한 외부 에너지로 인해 물질내의 전자들이 여기되고 다시

**인하공업전문대학 전자계산기과

*경희대학교 전자공학과

접수일자: 1994년 4월 14일

비 방사성 천이(nonradiative transition)과정을 통해 천이될때 열이 발생되어 입자의 열팽창이 발생되고 물질의 복원력으로 인하여 복원되는 매카니즘이 일어나므로 레이저 조사지점이 진동(vibration)의 근원(source)이 된다. 열탄성 모우드에서는 광음향 변환된 음향에너지가 보통의 음향과와 동일한 매카니즘으로 전파된다[2]. 이 모우드를 이용하여 1967년 Brienza등은 펄스 레이저를 금속필름 표면에 조사시켜 음향 에너지를 검출하였고[2] 1977년 Von Gutfeld 등은 펄스 레이저를 이용하여 고체의 미세부분을 영상화하는 기술에 응용하였다[2]. 두번째 모우드인 열음향 모우드(thermoacoustic mode)에서는 고체에 조사된 광 에너지가 열음향 모우드와 동일한 방식으로 열 에너지로 변환되며 변환된 열 에너지가 전도(conduction) 및 확산(diffusion)될때 열파의 전파위치에 존재하는 매질 입자의 열팽창 및 복원으로 인해 진동하는 모우드이다[3]. 1979년 Rosencwaig는 CW 레이저를 사용하여 열음향 모우드를 이용한 고체에서의 광음향 신호를 검출하여 매질의 특성을 분석하였다[3]. 열음향 모우드에서 발생하는 음향 에너지의 파장은 열탄성 모우드에서 발생하는 파의 파장과 비교할때 매우 짧으므로 미세영역에서 재료의 특성을 탐상할 수 있고 레이저의 변조 주파수를 조정하여 분해능을 변화시킬 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 금속에서 열음향 모우드로 변환되는 광음향신호를 검출하기 위해 광음향 신호검출 시스템을 CW CO₂ 레이저와 광학장치 그리고 소신호 검출 및 처리 장치를 이용하여 구성하고 알루미늄, 탄소강 및 황동에서 형성되는 열음향 모우드를 해석하며 레이저의 변조 주파수, 루인앰프의 시정수를 변화시키면서 금속샘플의 종류와 두께에 따른 광음향 신호를 분석하는 것을 목적으로 한다.

II. 열음향(Thermoacoustic) 변환 현상

그림 1에서 나타낸 바와 같이 고체표면에 진폭 변조된 레이저가 조사되면 레이저 파장에 대한 샘플 고유의 광 흡수율에 의해 주기적으로 표면온도의 변화가 발생되고 굴절율과 같은 온도에 민감한 물질특성의 변화가 나타나며 이 상황에서 열 에너지의 전도 및 확산과 함께 발생하는 물질입자의 열팽창 및 복원된 음향에너지를 발생시킨다.

등방성 물질에서 열음향 파동방정식은 식(2.1), (2.2)

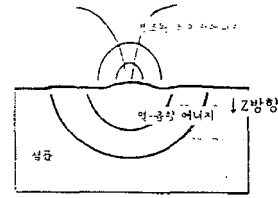


그림 1. 고체에서 열음향 현상의 개략도
Fig 1. Figure of Thermoacoustic Phenomena in Solids

와 같이 나타낸다[4].

$$\kappa \nabla^2 \theta - C \frac{\partial \theta}{\partial t} - T_0 \alpha (3\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot u = h \quad (2.1)$$

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \alpha (3\lambda + 2\mu) \nabla \theta = M \quad (2.2)$$

여기서 θ : 온도(temperature), u : 변위(displacement), κ : 열 전도도(thermal conductivity), ρ : 밀도(density),

C : 단위체적 당 열용량(heat capacity), T_0 : 주변온도(ambient temperature),

α : 열 팽창계수(thermal expansion coefficient),

λ, μ : 라메상수(Lame constants),

h, M : 열, 모멘트 선속(heat, momentum flux)이다.

식(2.1), (2.2)에서 열 팽창계수에 관련된 항은 열과 탄성에너지가 상호 변환되는 관계식으로 Duhamel-Neumann 관계식[4]으로부터 유도되었고 나머지 항은 각각 열확산 방정식과 음향 파동방정식으로 이루어진다. 만일 등방성 고체표면에 변조된 레이저가 조사됐을때 조사지점의 면적이 열 파장(thermal wavelength)보다 크다고 가정하면 일차원적으로 모델링할 수 있다. 대부분의 금속고체에서는 식(2.1)에서의 열팽창항의 영향은 5% 미만으로써 무시될 수 있으므로[5] 열원(thermal source)을 정현파로 놓고 그림 1에서 z 방향성분만 고려하면 식(2.1)은 식(2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - j \frac{\omega C}{\kappa} \theta = 0 \quad (2.3)$$

따라서 열 전파상수(thermal propagation constant), k_t 는 식(2.4)와 같다.

$$k_t = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega C}{2\kappa}} = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega}{2D}} \quad (2.4)$$

여기서 D는 열 확산도(thermal diffusivity)이고 일반적으로 열 파장은 $\sqrt{\frac{2D}{\omega}}$ 으로 나타내며 식(2.3)은 식(2.5)와 같이 주어진다.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - k_t^2 z = 0 \quad (2.5)$$

따라서 위의 열 파동방정식의 해는 식(2.6)과 같다.

$$\theta = \theta_0 e^{\pm k_t z} \quad (2.6)$$

또한 광 흡수깊이(absorption depth)는 열 확산거리나 음향파장에 비해 매우 작다고 가정하는 경계조건을 이용하여 표면온도 θ_0 에 관해 풀면 식(2.7)과 같다.

$$\theta_0 = \frac{I_0}{\kappa k_t} = \frac{I_0}{\sqrt{\omega C \kappa}} e^{-jn/4} \quad (2.7)$$

만일 재료의 표면에 외부적인 스트레스가 없을 경우에 식(2.8)과 같은 경계조건이 성립하고[4] 식(2.2)를 이용하여 변위에 관한 해를 풀면 식(2.9)와 같다.

$$T_{zz} = (\lambda + 2\mu) S_{zz} - \alpha(3\lambda + 2\mu)\theta_0 = 0 \quad (2.8)$$

여기서 T_{zz} : 재료표면과 수직방향(z방향)에서의 종 스트레스

(longitudinal stress in z direction)

S_{zz} : 재료표면과 수직방향에서의 종 스트레인

(longitudinal strain in z direction)이다.

$$u_z = \frac{\alpha'}{k_t^2 + k_t^2} \theta_0 (jk_t e^{-jk_t z} - k_t e^{-k_t z}) \quad (2.9)$$

여기서 U_z : 재료표면과 수직방향의 변위성분(일차원적인 경우)

식(2.9)는 매질내에서 광음향 변환된 변위파형을 나타내며 두개의 파로 구성된다. 일반적인 금속에서 식(2.9)에서 유도된 두파의 전파상수를 비교하면 아래와 같다.

$$\left| \frac{k_t}{k_l} \right| = \frac{\sqrt{\omega C / \kappa}}{\omega / V_l} \cong 10^5 \sim 10^6 / \sqrt{f} \quad (2.1)$$

여기서 k_l : 종파의 파수이다.

따라서 등방성 고체에서 CW 레이저를 이용한 광음향 신호는 GHz 이하의 주파수 대역에서는 주로 열음향 모우드로 전달되어 매질입자들의 열팽창에 의해 이루어진다. GHz 대역 이하에서 $k_t \gg k_l$ 이므로 표현 아래와 같이 근사적으로 표현될 수 있다.

$$u_z(0) = -\alpha' \frac{\theta_0}{k_t} = \frac{\alpha' I_0}{\omega C} e^{+jn/4} \quad (2.11)$$

식(2.11)에서 나타난 바와 같이 고체표면에서의 변위는 레이저의 변조 주파수와 고체의 열음향에 반비례하고 열 팽창계수와 흡수된 열 에너지량에 비례함을 알 수 있다.

III. 광음향 신호검출 시스템의 구성

본 연구에서는 알루미늄, 탄소강, 황동표면에 CO₂ 레이저를 조사시키고 위의 금속매질 내에서 광음향 변환되는 신호를 검출하기 위하여 그림 2와 같은 광음향 신호검출 시스템을 구성하였다.

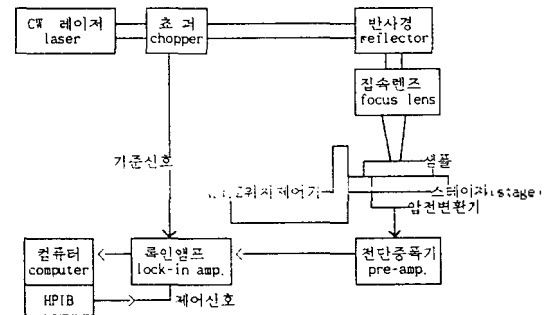


그림 2 광음향 신호검출 시스템의 블록선도
Fig 2. Block Diagram of Photoacoustic Signal Detection System

그림 2에 나타난 바와 같이 파장이 10.6 μ m인 CW CO₂ 레이저 에너지를 수 W 정도의 출력으로 발진시키고 이 에너지를 기계적으로 동작하는 초퍼(chopper)를 이용하여 주파수를 갖는 에너지로 진폭 변조시킨다. 변조된 레이저 에너지를 반사경(reflector)을 이용하여 경로를 샘플 방향으로 변화시키고 집속렌즈(focus lens)에 의해 샘플표면으로 집속시킨다. 이때 집속렌즈의 집속거리는 63.5mm이다. 샘플은 알루미늄, 탄소강, 황동을 이용하여 지름이 70mm, 두께

는 각각의 샘플에 대해 2mm, 5mm, 10mm인 원판형으로 제작하였고 표면에서 레이저 에너지의 산란을 줄이기 위해 샘플의 양 표면을 정밀하게 폴리싱(polishing) 처리하였다. 또한 샘플표면에 조사되는 레이저의 조사지점과 초점거리를 조정하기 위해 Aerotech사(미국)의 X, Y, Z축 정밀 위치 제어기를 이용하여 조사위치와 초점거리를 μm 단위로 조절하였다. 또한 샘플을 위치 제어기에 고정시키기 위해 샘플 스테이지를 설계, 제작하였고 샘플에 조사된 레이저가 매질에서 광음향 현상에 의해 탄성 에너지로 변환되고 변환된 탄성파를 검출하기 위해 PZT 세라믹을 이용하여 변환기를 설계, 제작하였다. 그림 3은 제작된 샘플 스테이지와 압전 변환기의 설계도이다.

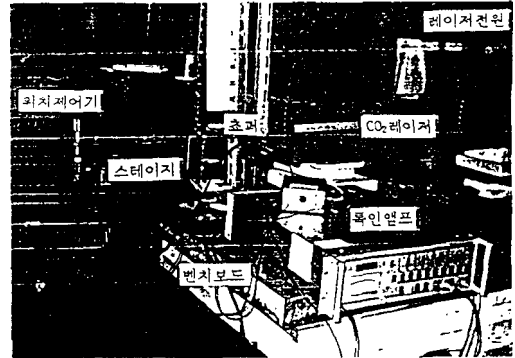


사진 1. 광음향 신호검출 시스템

Photo 1. Photoacoustic Signal Detection System

IV. 광음향 신호검출 및 분석

본 실험에서는 지름이 70mm인 알루미늄, 탄소강, 황동 봉을 각각 2mm, 5mm, 10mm로 절단하였고 양면을 정밀하게 폴리싱하여 샘플로 이용하였다. 또한 샘플의 두께, 종류, 레이저의 변조 주파수 및 복인앰프의 시정수를 변화시키면서 각각의 실험환경에서의 광음향신호의 변화를 관찰하고 이론과 비교, 분석하면서 실험을 수행하였다. 초퍼에 의해 진폭 변조된 레이저 에너지가 샘플표면으로 조사되고 매질 내에서 열음향 효과에 의해 열파가 조사지점에서 방사방향으로 발전되며 이때 입자들의 열탄성으로 인한 음향 에너지가 전달된다. 이 음향신호를 샘플 후면에 부착된 압전 변환기로 검출하는데 금속 내에서 광음향 변환되는 신호는 매우 미약하고 이 신호는 외부로부터의 많은 진동잡음 성분들을 포함하게 된다. 따라

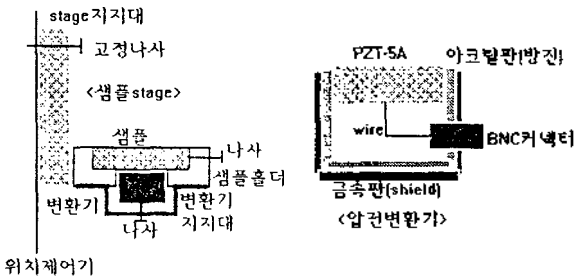


그림 3. 샘플 스테이지와 압전 변환기의 제작도

Fig 3. Design of Sample Stage and Piezoelectric Transducer

압전 변환기는 레이저 조사지점의 반대후면에 진공 그리스(vacuum grease)를 이용하여 부착시키고 샘플 스테이지의 변환기 고정나사로 변환기를 고정시킨다. 본 연구에서 변환기로부터 검출된 광음향 신호의 전류는 수 nA 정도로 매우 미약하므로 전단 증폭기(pre-amplifier)를 이용하여 증폭시키고 EC&G사의 52.7 복인앰프(lock-in amplifier)를 이용하여 잡음이 섞인 광음향 신호 중에 초퍼의 주파수 성분을 검출시킨다. 복인앰프는 PC로 HP-IB를 이용하여 위상, 시정수 등 여러기능이 제어되고 검출된 광음향 신호를 컴퓨터에 디지털 형식으로 저장시킨다. 사진 1은 본 논문에서 구성된 광음향 신호검출 시스템이다.

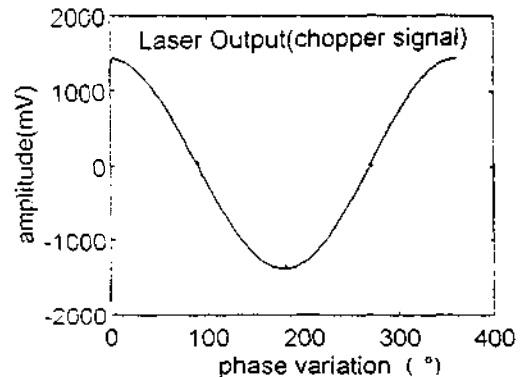


그림 4. 샘플표면에 입사되는 레이저 에너지

Fig 4. Input Laser Energy on Sample Surface

서 전단 증폭기로 증폭시킨 후에 록인 앰프에서 초핑 주파수(chopping frequency) 성분만을 검출하게 된다. 이때 PC로 HPIB를 이용하여 록인앰프를 제어하는데 록인앰프의 기준신호(reference signal)인 초퍼신호의 위상을 0에서 360도까지 순차적으로 변화시키면서 각각의 위상에서의 광음향 신호를 디지털 형식으로 컴퓨터에 저장한다. CW 레이저가 초퍼를 통해 변조되므로 초퍼에서 출력되는 동기신호를 샘플에 조사되는 변조된 레이저 에너지의 형태로 분수 있고 그림 4는 초퍼의 동기신호를 록인앰프의 입력신호와 기준신호로 동시에 연결하여 한 주기동안 록인앰프의 위상을 변화시키면서 나타낸 것이다.

그림 5는 샘플에 조사되는 레이저 출력이 2W, 변조주파수가 1KHz, 증폭도가 $10^{-9}A/V$ 일때 직경이 70mm, 두께가 10mm인 원판형 탄소강에서 검출된 광음향 신호이며 록인앰프의 시정수를 3mS, 10mS, 100mS, 1S로 변화시키면서 광음향신호를 검출한 것이다.

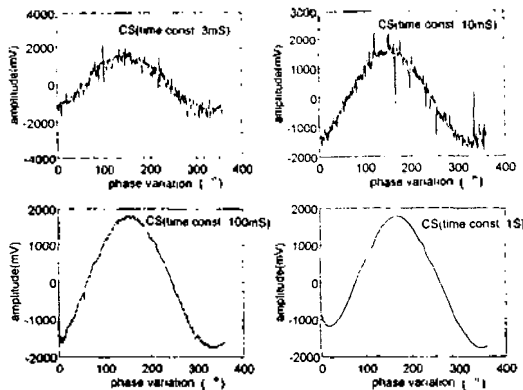


그림 5. 시정수 변화에 따른 탄소강에서의 광음향 신호
Fig 5. Photoacoustic Signal in CS with Time Constant Variation

그림 5에서 나타난 바와 같이 록인앰프의 시정수를 증가시키면 광음향 신호가 좀 더 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 샘플내부에서 변환되는 광음향 신호가 수 nA 정도의 미소신호이므로 급속내부에서의 산란 및 진동잡음, 전자과 잡음 등에 의해 요동되는 신호를 시간영역에서 평균값을 취한 효과 때문에 나타난 것으로써 시정수를 증가시켜서 광음향 신호를 안정화시킬 수 있었다. 그림 6은 레이저

출력이 2W, 변조주파수가 1KHz, 증폭도는 $10^{-9}A/V$ 이고 록인앰프의 시정수가 3S일때 직경이 70mm인 원판형 알루미늄 샘플의 두께변화에 따른 광음향신호의 변화를 보인 것이다.

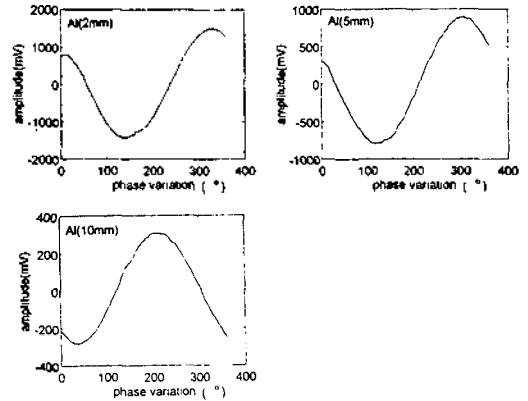


그림 6. 알루미늄의 두께변화에 따른 광음향신호
Fig 6. Photoacoustic Signal in Aluminium with Thickness Variation

그림 6에서 샘플의 두께가 커질수록 광음향신호가 급격히 감소됨이 나타났다. 또한 두께 변화에 따라 신호의 위상도 변화됨을 알 수 있었다. 식 2.9에서 유도된 것과 전과거리가 증가할수록 광음향 신호가 지수함수적으로 감쇄된다는 것이 확인되었다. 그림 7에서는 레이저 출력이 2W, 변조주파수가 1KHz, 증폭도가 $10^{-9}A/V$ 이고 록인앰프의 시정수가 3S일때 두께가 10mm인 알루미늄, 탄소강 및 황동에서의 광음향신호이다. 위의 각 샘플의 열팽창계수에 대한 열용량의 비를 계산해보면 알루미늄은 0.000106, 탄소강은 0.000208이고 황동은 0.000202가 된다. 또한 본 레이저의 파장대역에서 알루미늄, 탄소강 및 황동의 반사율은 모두 90% 이상이다. 식 2.11에서 유도된 바와 같이 열 팽창계수에 대한 열용량의 비가 높으면 광음향 신호가 커짐을 알 수 있고 그림 7의 실험값으로 그 결과가 입증되었다.

그림 8은 레이저 출력이 4W, 증폭도가 $10^{-9}A/V$, 록인앰프의 시정수가 3S 일때 레이저의 변조 주파수(chopping freq.)를 700Hz, 1KHz, 3KHz로 변화시키면서 지름이 70mm, 두께가 5mm인 알루미늄 샘플에서 발견된 광음향신호이다.

그림 8의 실험 결과에서 나타난 바와 같이 광음향

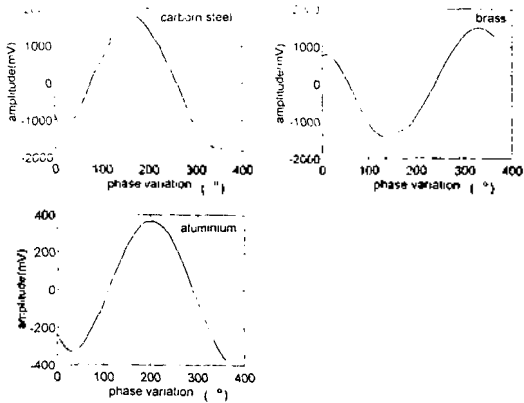


그림 7. 알루미늄, 탄소강, 황동에서의 광 음향신호 비교
Fig 7. Comparison of Photoacoustic Signals in Al, CS, Br

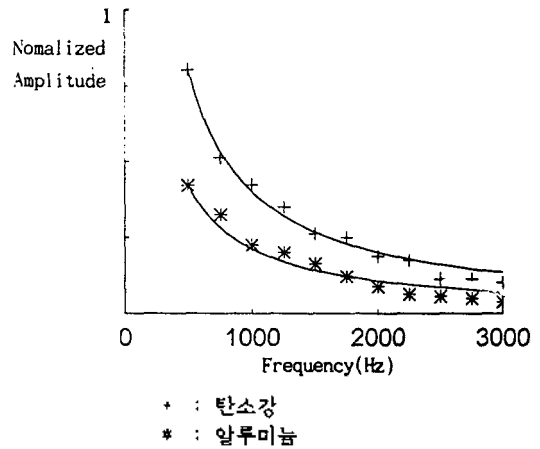


그림 9. 변조주파수 변화에 대한 Al, CS에서의 광음향신호
Fig 9. Photoacoustic signal in Al, CS with Frequency Variation

V. 결 론

본 연구에서는 레이저 에너지가 등방성 고체 매질 내에서 광음향 변환 메커니즘을 통해 음향 에너지로 변환된 신호를 분석하기 위해 광음향 신호검출 시스템을 구성하였고 알루미늄, 탄소강 및 황동에서 변환된 수 nA 정도의 미소한 광음향 신호를 진단 증폭기와 록인앰프를 이용하여 검출하였으며 HPIB를 사용하여 록인앰프를 제어하면서 광음향신호를 데이터 형식으로 컴퓨터에 저장하였다. 또한 레이저의 변조 주파수, 록인앰프의 시정수를 변화시키면서 금속의 종류 및 두께에 따른 광음향신호를 검출하였다. 록인앰프의 시정수 변화에 따른 광음향신호는 미소한 광음향신호가 잡음으로 인해 심하게 요동되는 현상이 나타나며 시정수를 100ms, 1S로 놓아 시간영역에서 평균값을 위해 강음향신호를 안정화시킬 수 있었다. 두께변화에 대한 광음향신호는 금속의 두께가 증가될때 감소하며 본 시스템에서는 성능시험을 통해 광에너지의 반사율이 90% 이상인 금속매질을 깊이 10mm 까지 효율적으로 탐상할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 재료종류에 따른 광음향신호는 탄소강과 황동에서 열팽창계수에 대한 열용량의 비가 각각 0.000208, 0.000202이므로 입력 레이저 에너지가 2W일때 두 샘플 모두 약 2V 정도의 출력이 발생되었고 열팽창계수에 대한 열용량의 비율이 0.000106인 알루미늄에서는 0.4V가 출력되었다. 이 결과로서 광음향신호는 물질의 열팽창계수에 비례하고 열용량에 반비례한다는

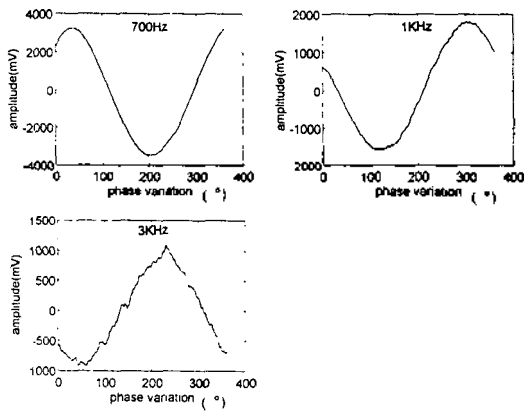


그림 8. 알루미늄 샘플에서 주파수 변화에 따른 광 음향신호
Fig 8. Photoacoustic Signal in Al with Frequency Variation

신호는 변조 주파수에 반비례하므로 변조 주파수가 증가될수록 광음향 신호의 강도가 급격히 감소함을 알 수 있고 이 광음향신호의 파장, 주 열과장은 식 2.4에서 유도된 바와 같이 변조주파수의 함수이므로 위상도 변화됨이 확인하였다. 3KHz에서 광음향신호의 요동이 심한 것은 이때의 열과장이 0.093mm로 매우 작으므로 매질의 그레인(grain)과 같은 입자와의 산란이 심해져서 발생된 것으로 분석된다. 그림 9는 알루미늄, 탄소강에서 변조주파수를 500Hz에서 3KHz까지 변화시키면서 광음향신호를 검출했을때 시뮬레이션과 실험값을 비교한 것이다.

것을 알 수 있었다. 또한 레이저의 변조주파수를 500Hz에서 3KHz까지 변화시켰을 때 광음향신호는 주파수에 반비례하여 감소하였다. 고체 매질 내에서 열음향 모우드로 전달되는 음향신호의 파장은 수십 μm 이고 본 실험에서 사용된 CO_2 레이저의 파장도 10.6 μm 이므로 본 연구에서 구성된 광음향 신호검출 시스템은 미세한 물질의 제반특성을 검출하는 분야, 광음향 스펙트럼 기술분야, 반도체 재료 특성분석 기술분야 및 미세구조를 영상화하여 관찰하는 현미경 및 비파괴 검사 분야등에 유용한 장비로서 이용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. A. Rosencwaig, "Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy," John Wiley & Sons, 1980.
2. C.B.Scruby, L.E.Drain, "Laser Ultrasonics," Adam Hilger, 1990.
3. D.S.Kliger, "Ultrasensitive Laser Spectroscopy," Academic Press, 1983.
4. Witold Nowacki, "Thermoelasticity," Pergamon Press, 1986.
5. Ivan Tolstoy, "Wave Propagation," McGraw-Hill, 1973.
6. B.A.Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids," John Wiley & Sons, Vol.1, Vol.2, 1973.
7. G.S.Kino, "Acoustic Waves," Prentice-Hall, 1987.
8. J.F.Ready, "Effects of High-Power Laser Radiation," Academic Press, 1971.
9. J. Opsal, A. Rosencwaig, "Thermal-wave Depth Profiling," J.Appl.Phys. 53(6), 4240, 1982.
10. R.L.Thomas, A. Rosencwaig, "Subsurface Flaw Detection in Metals by Photoacoustic microscopy," J.Appl.Phys.51(2), Feb., 1980.

▲이 중 호

- 1988년 2월 : 경희대학교 공과대학 전자공학과 졸업 (공학사)
 1990년 3월 : 경희대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1990년 3월~1991년 3월 : 한국전자통신연구소 연구원
 1995년 2월 : 경희대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1994년 9월~현재 : 인하공업전문대학 전자계산기과 전임강사

▲전 계 석

경희대학교 공과대학 전자공학과 교수