

광음향 신호처리를 이용한 표면결합의 영상 기술

Image Technique of Surface Defects by Using Photoacoustic Signal Processing

이 종 호[✉], 전 계 석*

(Chong Ho Yi[✉], Kye Suk Jun*)

요 약

본 논문에서는 출력이 2W이고 파장이 10.6 μm 인 CW CO₂ 레이저와 PZT 5A 음향변화 소자를 사용하여 광음향 영상처리 시스템을 구성하였으며 샘플로서 5mm 두께의 스테인레스강을 사용하여 그 표면에 폭과 깊이가 50 μm , 선간격이 각각 200 μm , 300 μm 가 되도록 3선의 선형결합을 방전가공하고 2.2mm×2mm의 스캔범위를 취하여 표면결합을 영상화한 결과 레이저 변조주파수가 100 Hz 일때 50 μm 의 해상력을 갖는 양질의 영상을 보였다.

ABSTRACT

In this paper, photoacoustic image processing system was constructed by using 2W CW CO₂ laser of 10.6 μm wavelength and PZT 5A acoustic transducer. Stainless steel of 5mm thickness was used as a sample in experiment. Three line cracks of 50 μm in each width and depth were made by using plasma on the surface of the sample. Also, each gap among their lines was 200 μm and 300 μm in width. In the scan range of 2.2mm×2mm including surface defects, a good image of 50 μm resolution had been shown when modulation frequency of CW laser was 100Hz.

I. 서 론

광음향 영상기술은 반도체, 재료 및 정밀기계 산업 분야에서 사용되는 재료의 미시적인 구조나 물질특성을 정밀분석하는 기술로서 최근에 많은 연구가 수행되어지고 있다[1][2][3]. 기존의 광학현미경은 수십 μm 이하의 고분해능을 갖고 물질의 미시계에 관한 정보를 검출할 수 있지만 물질의 광학적 특성만을 검출하여 고체내부의 구조나 특성에 관한 정보를 얻

을 수 없고[1] 초음파 현미경은 물질표면 및 내부의 특성을 잘 검출하는 성능을 보이지만 물질의 탄성특성만을 검출하는데 국한된다[1]. 광음향현미경은 물질에 조사된 광에너지가 열에너지로 변환되며 입자의 열팽창에 의해 음향 에너지로 변환되는 일련의 광음향 변환 매카니즘을 이용하므로 물질의 광학적, 열적, 탄성적인 특성을 모두 검출하여 많은 정보를 얻을 수 있다. 1978년 Wickramasinghe는 열탄성모우드를 이용한 광음향현미경 시스템을 개발하였고[3] 1979년 Rosencwaig는 열음향 모우드를 이용한 광음향 영상기술을 실리콘 웨이퍼에 적용하였으며 현재 국외에서는 이러한 기술을 이용하여 반도체 및 재료

✉ 인하공업전문대학 전자계산기과

* 경희대학교 전자공학과

접수일자: 1994년 7월 16일

산업에서 물질특성분석에 관한 응용기술이 널리 진행중이다[3][7][8]. 광음향 영상시스템에서 광에너지가 고체에 조사되었을때 대부분의 광에너지는 고체표면에서 반사되며 변환된 열에너지는 한과장 이후에 급격히 소산되므로 고체내에서 광음향신호의 변환효율은 매우 낮다. 따라서 고체샘플의 두께가 한과장 이상이라는 경우에는 광음향신호를 직접 검출하기가 매우 어려우므로 본 연구에서는 수 nA 정도의 매우 미약한 광음향신호를 검출할 수 있는 광음향신호 검출기를 설계, 제작하고 2W 출력의 CW CO₂ 레이저, 광학회로 및 신호처리 장치등을 이용하여 광음향 영상시스템을 구성하였으며 샘플로는 5mm 두께의 스텐레스강을 선택하고 그 표면에 폭과 깊이가 50 μm, 선간격이 200 μm, 300μm가 되도록 3선 선형 결함을 방전가공하여 샘플에서 변환되는 광음향신호를 검출하고 표면결함을 영상처리하고자 한다.

II. 광음향 영상 신호처리 시스템의 구성 및 실험

스텐레스강 표면에 출력이 2W이고 파장이 10.6 μm 인 진폭변조된 CW CO₂ 레이저가 조사되면 그 파장대역에서 스텐레스강의 10% 미만인 광 흡수율로 인한 일부의 광 에너지가 흡수되고 입사지점에서의 주기적인 온도변화가 발생된다. 이때 열에너지는 전도 및 확산 현상으로 물질내부로 전파되며 동시에 물질입자의 열음향 변환 현상으로 인한 수 nA 정도의 매우 적은 음향 에너지가 발생된다. 등방성 물질에서 열음향 파동방정식은 Duhamel-Neumann 관계식[4] 으로부터 식(2.1), (2.2)와 같이 나타낸다.

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

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

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.

위의 열음향 파동방정식과 경계치조건을 이용하여 광음향 변환된 음향파의 변위는 아래와 같이 유도될 수 있다[4][5][6].

$$u_z = \frac{\alpha'}{k_l^2 + k_t^2} \theta_0 (jk_l e^{-jk_l z} - k_l e^{-k_l z}) \quad (2.3)$$

여기서 k_t : 열 전파상수(thermal propagation constant), θ_0 : 표면온도(surface temperature) k_l : 종파의 파수(wave number of longitudinal wave)

식 2.3에서 주어진 음향파는 실제 실험에서 수 nA 정도의 작은 신호이며 그림 1.은 이를 검출하여 신호처리 할 수 있는 광음향 영상 신호처리 시스템의 블럭선도를 보여준다.

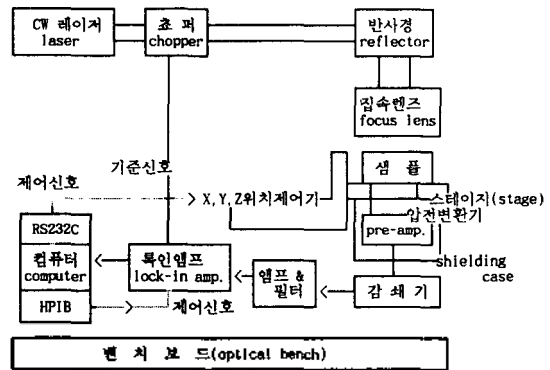


그림 1. 광음향 영상 신호처리 시스템의 블럭선도
Fig 1. Block Diagram of Photoacoustic Image Signal Processing System

그림 1.에서 나타낸 바와 같이 출력이 2W인 CW CO₂ 레이저를 발진시키고 기계적으로 동작하는 초퍼(EG&G사 197)를 이용하여 100Hz로 진폭변조시켰으며 이 주파수에서 광음향파장이 약 100 μm로써 약 50 μm인 반파장크기 결함에서 가장 잘 반응을 보인다. 이때 레이저 전원은 17 mA로 놓았고 레이저 튜브 내의 기압은 17 mbar로 놓으므로써 출력이 약 2 Watts 정도이다. 진폭변조된 레이저 에너지는 직경이 25mm 이고 두께가 6mm인 NI 반사경(VS사)에 의해 경로가 샘플방향으로 90° 바뀌며 직경이 38mm이고 초점 거리가 63.5mm인 ZnSe 접속렌즈에 의해 샘플표면으로 집중된다. 이때 조사면적은 약 0.8~1mm정도이다. 샘플에 조사된 레이저 에너지는 열음향 모우드에

의한 광음향효과에 의해 수 nA의 미소한 음향 에너지로 변환되고 이 신호를 검출하기 위해 광음향신호 검출기를 그림 2와 같이 설계, 제작하였다.

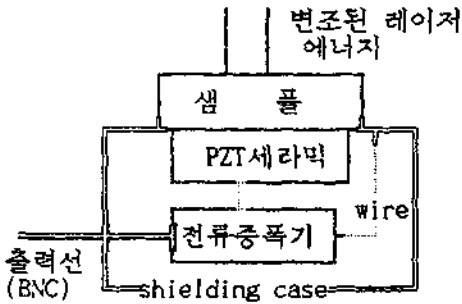
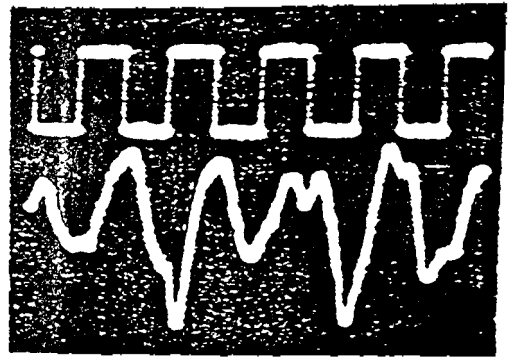


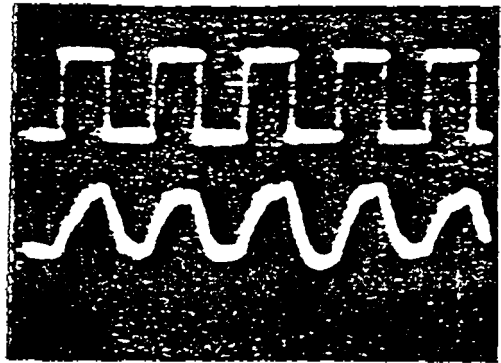
그림 2. 제작된 광음향신호 검출기의 설계도
Fig 2. Design of Manufactured Photoacoustic Signal Detector

본 논문에서 검출한 광음향신호는 확산되는 열에너지에 의한 매질입자의 열팽창을 검출하므로 열음향모우드로 전파되고 신호이며 고체에서 열음향모우드에 의해 변환된 광음향파는 한 파장 이후에서 급속히 소산(dissipative)되어 미소하고 외부의 공간전자파 잡음(60Hz), 진동잡음 및 내부의 열잡음등이 포함되어 직접 광음향신호를 검출하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 광음향신호를 10pA/V의 증폭도로 증폭시키고 외부 전자파 및 진동잡음을 차폐시키는 광음향 신호검출기를 설계, 제작하여 광음향 파장이 110 μm일때 5mm 두께의 스텐레스 강에서 변환된 수 nA의 신호를 직접적으로 검출할 수 있었다. 그림 3.은 압전소자로 검출된 미소한 광음향신호를 BNC 케이블을 통하여 EG&G 131 전류증폭기로 증폭시킨 신호와 설계, 제작된 광음향신호 검출기를 이용하여 검출한 신호를 비교한 것이다.

위의 압전소자는 치수가 25mm×12.5mm×6mm이고 공진주파수는 800KHz이며 광음향신호 검출기에서 제작된 전류증폭기는 바이어스 전류(bias current)가 매우 낮은 75fA(famto Amperes)의 특성을 갖는 AD515AL OP amp. (Analog Device 사)를 이용하여 설계하였다. 또한 내부 산란현상으로 인한 잡음은 백색잡음으로 간주하여 록인앰프의 시정수를 조정함으로써 해결하였다. 광음향 신호검출기에서 검출된 신호는 감쇄기(HP사, 355D)를 이용하여 다이내믹 레



(a) BNC케이블, EG&G131로 검출한 신호



(b) 광음향신호검출기로 검출된 신호

그림 3. 검출된 광음향신호
Fig 3. Detected Photoacoustic Signal

인지(dynamic range)를 조정하고 필터를 이용하여 잡음을 제거한 후 전압증폭기를 사용하여 록인앰프의 적절한 입력전압으로 조정한다. 록인앰프의 기준 신호로는 초퍼의 동기신호가 입력되며 록인앰프의 위상, 시정수, 감도등은 486 PC에서 HPIB(HP사의 Interface Board)를 이용하여 제어된다. 광음향 신호는 초퍼의 100Hz 동기신호에 대해 위상이 지연되어 발생되므로 광음향신호에 대한 기준신호의 최대 전압 위상값을 검출한 후 록인앰프의 위상을 그 위상값으로 놓아야한다. 또한 록인앰프의 출력값은 HPIB 제어에 의해 하나의 디지털 값으로 PC에 획득, 저장된다. 레이저 에너지가 샘플에 조사될때 조사면적은 약 0.8~1mm 정도이며 한 지점에서 하나의 데이터 값을 획득하므로 분해능이 10 μm인 정밀 위치제어기(Aerotech사, Unidex IIIa)를 이용하여 2차원적으로 스텝당 20 μm씩 스캐닝하면서 데이터를 획득하여

저장한다. 이때 위치제어기는 RS232C를 이용하여 제어하였는데 RS232C와 HPIB는 Quick Basic의 하나의 프로그램 안에서 순차적으로 수행될 수 있도록 동시에 제어하였으며 스캐너의 소음으로 인해 1스텝에서 3초동안 휴지한 후 1개의 데이터를 획득하므로 15000개의 데이터를 얻는데 약 13시간 정도가 소요된다. 그림 4.에서는 두께가 5mm인 스텐레스강 표면에 폭과 깊이가 약 50 μm 이고 선간격이 200 μm , 300 μm 인 3선의 선형 결함(line defect)을 가공한 샘플과 2차원 스캐닝 영역을 나타낸 것이고 그림 5.와 그림 6.은 이 샘플의 2.2 \times 2mm²인 면을 스캐닝하여 영상처리 한 메쉬영상(mesh image)과 칼라영상(color image)이다.

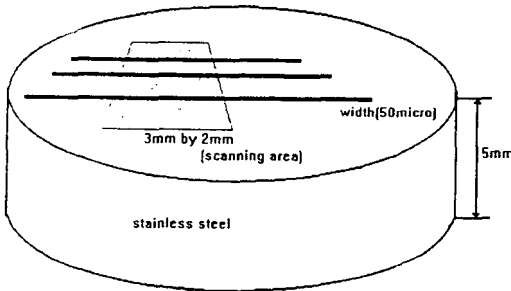


그림 4. 가공된 샘플(스텐레스강)과 스캐닝 영역
Fig 4. Manufactured Sample(stainless steel) and Scanning Area

그림 5.에서 보여진 메쉬영상은 샘플표면의 2.2mm \times 2mm 스캐닝 영역에서 2차원적인 각 지점에서의 광음향 신호 진폭값을 3차원적으로 나타낸 것인데 알루미늄 표면과 선형결함의 경계면에서 진폭값의 급격한 변화가 잘 나타난 것을 알 수 있으며 이것은 50 μm 의 해상도를 갖고 표면의 결함을 잘 분해한다는 것을 나타낸다. 메쉬영상에서 Y 축상의 40~50스텝, 60~70스텝, 80~90스텝의 결함부분에서 진폭값이 일정하지 않은 것은 결함을 가공할때 깊이가 일정하지 않고 바닥면도 고르게 가공되지 못하여 이 부분에서 광음향신호가 일정하게 변환되지 못한 것으로서 분석되지만 목표결함의 검출에는 지장이 없는 것으로 나타났다. 결함 이외의 부분에서도 진폭값이 일정하지 못하고 약간의 요동이 나타난 것은 파장이 약 100 μm 인 광음향파가 매끄럽지 못한 표면에서 다르게 반응하여 나타난 것으로 해석된다. 그림 6.은 이

데이터의 진폭값을 그레이 레벨(gray level)로 나누어 칼라영상화한 결과를 나타낸 것으로서 폭 50 μm 의 선형결함 3선의 좋은 영상을 얻을 수 있었고 선폭이 실제보다 3배 정도 크게 나타났는데 이러한 퍼짐 현상은 레이저의 조사면적이 0.8~1mm 정도로 결함의 폭보다 매우 크고 이 면적에서 변환된 광음향신호가 압전소자에서 평균값이 취해지며 광음향 신호가 샘플내에서 전파될때 회절되었기 때문에 나타난 것으로 분석된다. 또한 칼라영상에서 선형결함 윗 부분의 색이 파란색으로 아래부분의 빨간색과 다르게 나타난 것은 샘플 후면의 PZT가 광음향 신호를 검출할 때 PZT 면적에서 검출되는 모든 신호의 평균 값을 취했기때문인 것으로써 PZT가 선형결함 중심에 정확히 부착되지 않고 결함 조금 윗 부분에 부착되어 나타난 현상을 볼 수 있다. 그림 7.은 이 현상을 비교

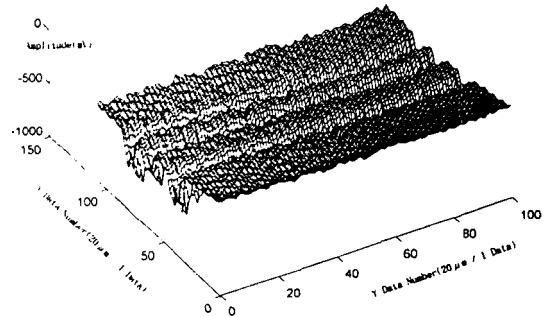
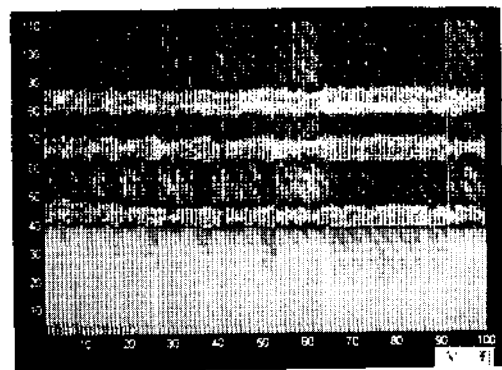


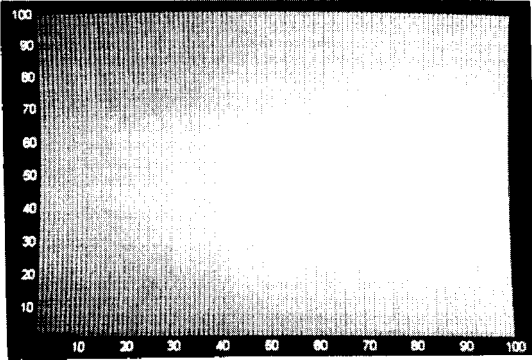
그림 5. 선형결함의 메쉬영상
Fig 5. Mesh Image of line cracks



레이저 조사면적 : 약 0.8-1mm

그림 6. 선형결함의 칼라 영상
Fig 6. Color Image of line cracks

하기위해 폭이 약 200 μm 인 3선 결함을 제작하고 중심부분에 압전소자를 정확히 부착하여 검출한 영상으로 광음향신호의 경사도를 제거할 수 있었다.



레이저 조사면적 : 약 0.8~1mm

그림 7. 검출소자 중심부분의 의사칼라 영상
Fig 7. Pseudo Color Image on Center Area of Detector

III. 결 론

본 논문에서는 출력이 2W인 CW CO₂ 레이저를 사용하여 두께 5mm의 스테인레스강 표면에 방전가공된 3선 선형결함을 탐상하기 위한 광음향 영상시스템을 구성하고 2.2mm×2mm 스캐닝영역에서 선형결함에 대한 영상처리를 수행한 결과 광 변조 주파수 100Hz에서 50 μm 의 해상력을 갖는 양질의 영상을 얻을 수 있었다. 본 시스템의 광음향 신호검출기는 110 μm 인 광음향신호 파장보다 매우 큰 5mm 두께의 샘플에서 수 nA의 광음향신호를 직접 검출할 수 있도록 설계, 제작되었다. 선형 3선결함에 대한 영상은 그림 5.의 메쉬영상에서 보여주는 바 처럼 샘플의 표면과 결함 경계면에서 광음향신호의 급격한 진폭변화를 볼 수 있으며 이를 사용하여 그림 6.과 같은 칼라영상을 만들었다. 그림 6.에서 결함의 폭이 실제보다 3배정도 크게 나타난 것은 레이저의 조사면적과 광음향신호의 회절에 기인한것으로 분석된다. 본 연구에서는 구성된 광음향 영상시스템은 반도체 및 재료분야등에서 물질의 미세구조를 영상화하고 특성을 탐상하는 기술에서 고분해능과 고감도의 성능을 갖고 많은 정보를 얻을것으로 기대되어진다.

참 고 문 헌

1. Yoh-Han Pao, "Optoacoustic Spectroscopy and Detection," Academic Press, 1977.
2. Andreas Mandelis, "Photoacoustic and Thermal Wave Phenomena in Semiconductors," North-Holland, 1987.
3. Allan Rosencwaig, "Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy," John Wiley & Sons, 1980.
4. Jeffrey T. Fanton, "Analysis and Applications of Photothermal Microscopy," Stanford University, 1990.
5. B.A.Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids," John Wiley & Sons, Vol.1, Vol.2, 1973.
6. G.S.Kino, "Acoustic Waves," Prentice-Hall, 1987.
7. J.F.Ready, "Effects of High-Power Laser Radiation," Academic Press, 1971.
8. J. Opsal, A. Rosencwaig, "Thermal-wave Depth Profiling," J.Appl.Phys.53(6), 4240, 1982.
9. R.L.Thomas, A. Rosencwaig, "Subsurface Flaw Detection in Metals by Photoacoustic microscopy," J. Appl.Phys.51(2), Feb., 1980.

▲이 종 호(Chong Ho Yi)



1988년 2월 : 경희대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사)
 1990년 2월 : 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(Kye Suk Jun)

현재 : 경희대학교 공과대학 전자공학과 교수