

가속도센서를 이용한 광음향현미경의 제작과 응용

김달현, 권오양

한국표준과학연구원 소재특성평가센터

요 약 아르곤 이온 레이저를 광원으로 시편을 주기적으로 가열하여 광음향신호를 발생시키고 가속도 센서로 측정하는 2차원 광음향 현미경을 제작하였다. 다양한 결함을 가진 알루미늄 시편을 검사하고 광음향현미경의 특성을 조사하였으며 변조주파수, 레이저광의 단면적 등 실험 조건에 대한 의존성을 조사하여 적절한 실험조건을 확립하였다.

1. 서 론

광음향효과는 빛을 물질에 입사시킬 때에 음파가 발생하는 현상으로 1881년경 A. G. Bell 등에 의해 처음 발견되었다.¹⁾ 그리고 A. Rosencwaig와 A. Gersho가 이론을 체계화한 후에²⁾ 광음향분광학, 광음향현미경 등 여러분야에 걸친 연구가 활성화되었다.³⁾

광음향효과는 에너지 공급 방법에 따라서 펄스레이저 등의 짧은 펄스 형태의 에너지를 시료에 공급하는 방법과 일정 주파수로 에너지의 세기를 변조하여 공급하는 방법의 두가지로 크게 분류할 수 있다. 그리고 광음향효과의 신호는 마이크로폰으로 기체의 압력변화를 측정하거나, 압전소자나 레이저간섭계로 미소변위를 측정하는 등 여러 방법이 있는데 많이 사용되는 센서는 마이크로폰과 압전소자이다.

국내에서도 광음향효과를 이용하여 태양전지의 에너지 변환효율과 양자효율 측정⁴⁾, $Al_2O_3 : Cr$ 결정의 비복사전이과정⁵⁾, 기체농도 측정⁶⁾, 전자상자성 공명 검출⁷⁾, 염록소의 색소분포 측정⁸⁾, 저온 상온 고온에서의 상전이^{9~11)} 등의 연구가 수행되었고 광음향현미경에 대한 연구도 일부 이루어졌다.^{12), 13)} 이중에 압전소자를 이용한 상전이 연구를 제외한 대부분의 연구가 마이크로폰을 센서로 사용한 연구였다. 그리고 광

음향현미경에 대한 연구에서도 마이크로폰을 사용하여 코팅을 정성적으로 검사하였다.

본 실험에서는 가속도센서를 이용한 광음향현미경을 제작하여 알루미늄 내부에 가공된 표면 노치, 감추어진 노치, 수평 방향 드릴 구멍, 수직 방향 드릴 구멍 등의 여러가지 형태의 구조를 검사함으로써 광음향현미경의 특성을 조사하였다. 사용된 가속도센서는 압전소자를 이용하여 만든 진동 측정 센서로서 독일 IzfP의 W. Arnold에 의해 처음 사용된 방법이다. 실제로 많이 사용되는 변조주파수 범위(수백 kHz이내)에서 초음파 또는 음파의 파장이 시편보다 훨씬 크기 때문에 신호의 진동 성격이 큰 점을 이용한 방법이다. 압전소자에 비해 커플란트를 사용하지 않아서 부착이 용이하고 고체시편의 검사에 적합한 특징을 갖고 있다.

2. 원 리

세기 변조된 에너지가 고체 시편에 입사하면 이 에너지는 시편에 흡수되어 비복사전이를 통해 열에너지로 전환되어 온도가 주기적으로 증감한다. 이러한 온도의 증감으로 시편에 strain이 발생하거나 주위 공기의 압력변화가 나타나는 현상이 광음향 효과가

다. 이 주기적인 열에너지 또는 온도 증감은 시편 내부와 시편 주위 공기로 확산 전달되며, 파동성을 갖는 이 주기적인 열에너지의 확산을 열파(thermal wave)라고 정의한다. 이 열파는 매우 감쇄성이 커서 열확산거리($(2\alpha/\omega)^{1/2}$)마다 e^{-1} 로 감쇄하며 파장은 열확산거리의 2π 배이다.

압전소자를 이용한 고체 시료에서의 광음향 신호는 W. Jackson과 N. M. Amer의 이론을 이용하여 분석할 수 있다.¹⁵⁾ 두께가 ℓ 인 충분히 큰 시편의 한 면에 세기 변조된 광이 입사하고 그 반대쪽 면에 압전소자를 부착하여 광음향 신호를 측정하는 경우, 광학적으로 불투명하고 열적으로도 불투명한 시편일 때 광음향신호 V 는 식(1)과 같이 나타난다. 열적으로 불투명하다는 것은 열확산거리가 시편의 두께보다 훨씬 작아서 입사광에 의한 열에너지의 영향이 시편 표면 부근에 국한되고 반대쪽 면에 미치지 못하는 것을 의미한다.

$$V \approx -\frac{2}{i\ell} M_{at} \frac{1}{(\rho C)_{\text{sample}}} \frac{P}{\omega} \dots\dots\dots (1)$$

여기서

α : 열확산도

P : 입사광의 세기(W)

ω : 변조주파수

ρ : 밀도

C : 비열

P/ω : cycle당 입사된 에너지

$1/\rho C$: 에너지를 온도로 변환시키는 값

a_t : 열팽창계수, 온도를 strain으로 변환시키는 비

M : 주어진 strain을 전압으로 변환시키는 비이다.

식(1)을 보면, 광음향신호는 싸이클당 입사된 에너지(P/ω)에 비례하여 변조주파수에 반비례하고 열팽창계수에 비례하며, 시편의 두께와 열용량에 반비례한다.

압전소자 대신 가속도센서(accelerometer)를 사용하는 이유는 서론에서 언급한 바와 같이 실제로 많이 사용되는 변조주파수 범위(수백 kHz이내)에서 초음파 또는 음파의 파장이 시편보다 훨씬 크기 때문에 신호가 진동 성격을 더 많이 나타내기 때문이다.

가속도센서로 측정된 신호는 식(2)와 같이 쓸 수 있다.¹⁴⁾

$$V \propto y \frac{\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 y 는 진동의 크기, ω 는 변조주파수 또는 진동주파수, ω_0 는 가속도센서의 공진주파수이다.

식(1)과 식(2)를 조합하여 식(3)과 같이 가속도센서로 측정되는 광음향신호를 나타낼 수 있다.

$$V \propto \frac{\alpha_t P}{\ell(\rho C)_{\text{sample}}} \frac{\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \dots\dots\dots (3)$$

가속도센서로 측정된 광음향신호는 레이저 세기와 열팽창률에 비례하고 시편 두께와 열용량에 반비례하며, 저주파 주파수 영역($\omega < \omega_0$)에서는 변조주파수에 비례한다.

그런데 시편 표면 또는 내부에 이물질이 있거나, 노치와 같은 결함이 있으면 열파를 굴절, 반사 또는 산란시켜 결국 온도 변화를 다르게 하여 음파 발생양상이 변하거나 발생된 음파를 산란시켜 신호가 달라진다. 이것은 식(3)의 α_t, ρ, C, ℓ 등 여러 변수들의 값이 바뀌는 것으로도 이해할 수 있다. 이렇게 시편의 표면 위로 입사 에너지원의 입사점을 주사하며 신호를 측정하면 국부적인 시편의 열특성 변화, 광학적 특성 변화, 역학적 특성 변화를 알 수 있는데 이를 광음향현미경이라고 부른다.

3. 실험방법

주기적으로 세기 변조한 레이저를 시편에 입사하여 발생하는 신호를 가속도센서로 측정하고, 2개의 거울을 수평 수직 방향으로 이동시켜 레이저광 입사점이 2차원 주사되도록 함으로써 국부적인 결함, 구조를 검사하는 광음향현미경을 제작하였으며, 장치도는 Fig. 1과 같다.

레이저는 Coherent회사의 INNOVA 90-6 Argon 이온 레이저(최대세기 6W)를 사용하였고, IntraAction회사의 AOM-40 acousto-optic 모듈레이터를 같은 회사의 ME-40 모듈레이터 컨트롤러(modulator controller)로 조절하여 레이저광을 세기 변조하였다. Aero-tech 회사의 두 이동스테이지(ATS 100-100)에 부착된 두 거울을 각각 수평 수직으로 이동시켜 레이저광을 2차원 주사하였으며 두 이동스테이지는 동일 회

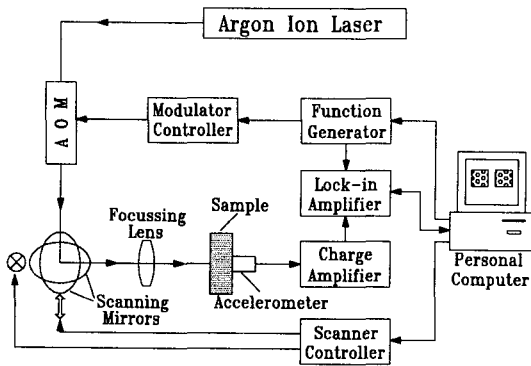


Fig. 1. Experimental setup of photoacoustic microscope.

사의 Unidex14 4축 컨트롤러로 조절하였다. 그리고 대물렌즈($\times 5$)로 시편에 입사되는 레이저광의 단면적을 조절하였다.

ME-40 모듈레이터 컨트롤러에 공급되어 중심주파수를 변조시키는 신호와 록인앰프를 동기시키는 신호는 Hewlett Packard 회사의 HP8116A 신호발생기(최대주파수 : 50MHz)로 공급하였다. 가속도센서는 Brüel & Kjær(B & K) 회사의 모델 4371센서를 사용하였고, 가속도센서의 출력은 동일 회사의 모델 2635 차이지앰프로 증폭하고 two-phase 록인앰프(EG & G Parc 회사의 모델 5210)로 변조주파수 동기 신호를 증폭 측정하였다. 그리고 록인앰프의 출력(신호 크기, 위상)을 Data Translation 회사의 DT2821 보드를 통해 컴퓨터에 저장하였다. 그리고 IBM PC(386)에서 GPIB를 통해 신호발생기의 주파수를 바꾸며 데이터를 수집하여 주파수스캔 특성을 조사하고, 이동스테이지 컨트롤러를 원격 제어하여 1차원 또는 2차원 주사를 하며 데이터를 수집 저장하여 1차원 선주사 그래프와 2차원 이미지를 얻었다.

Acousto-optic 모듈레이터의 band-width는 투과하는 레이저광의 지름이 1mm일 때 2.9MHz이고, 모듈레이터 컨트롤러의 최대 변조주파수는 10MHz이므로 이 현미경의 변조주파수 영역은 수 MHz 이내로 매우 넓다. 두 이동스테이지의 이동거리는 100mm, 최소 단일 스텝 거리는 1 μ m이고 마이크로스텝모터가 사용되었다. 집속렌즈는 가이드레일 위에 설치하여 연속적으로 이동할 수 있게 하여 시편에 입사되는 레이저광의 단면적을 임의로 조절할 수 있게 하였다. 그

리고 가속도센서 B & K 4371의 광진주파수(mounted resonance frequency)는 48kHz, charge sensitivity는 1.001pC/ms⁻²이고 부게는 11그램이었으며 모양은 원통형으로 지름 14mm, 높이 19mm였다. 그리고 차이지앰프의 단위출력은 1m/s², 단위출력당 전압은 100mV, 저주파 한계는 2Hz로 고주파 한계는 100kHz 이상으로 설정하였다.

그리고 광음향현미경의 일반적인 실험 순서는 다음과 같다.

- 1) 시편을 마운팅블록(두께 10mm, 가로 100mm 세로 70mm의 알루미늄 블록) 위 적절한 위치에 놓고 볼트로 단단하게 고정한다. 그리고 마운팅블록과 이를 지지하는 마운팅포스트를 움직여 입사광이 시편표면에 수직하게 입사하도록 조절하고 마운팅포스트를 단단하게 광학테이블 위에 고정하는데, 가속도 센서는 미리 마운팅블록의 시편 반대쪽 중앙에 볼트로 단단하게 고정한다.
- 2) 집속렌즈를 움직여 시편에 입사하는 레이저광의 단면적을 적절하게 조절한다. 일반적으로 사용된 입사 레이저광의 크기는 지름 1~200 μ m 정도였다.
- 3) 변조주파수를 변화시키며 데이터를 수집하여 주파수스캔 특성 그래프를 그리고 적절한 변조주파수를 찾는다. 적절한 변조주파수는 검사 영역 안에서 균일한 신호 크기와 위상을 가지면서 신호 크기가 다른 변조주파수에 비해 크게 즉 피크의 형태로 나타나는 주파수이다.
- 4) 1차원 또는 2차원 주사를 하여 광음향현미경의 이미지를 만든다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 실험 결과

알루미늄 블록에 표면 노치, 감추어진 노치, 수평방향 드릴 구멍, 수직 방향 드릴 구멍 등의 여러가지 형태의 구조를 만들어서 광음향현미경으로 검사하고 광음향현미경의 특성도 조사하였다.

가로 45mm, 세로 20mm, 두께 2.5mm 알루미늄(Al 1100) 블록에 폭 0.4mm, 길이 10mm의 홈을 2.4, 2.3,

2.2, 2.1, 1.9, 1.7mm 깊이로 6개를 만들어 반대쪽면에서 홈 윗면까지의 깊이가 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8mm되게 하여 감추어진 노치 시편으로 사용하였다. 홈 반대쪽 표면을 연마하고 마운팅블록의 중앙에 단단하게 고정하였다. 그리고 홈 반대쪽면에 레이저를 입사하고 집속렌즈를 조절하여 입사광의 크기를 스펙클 패턴을 보며 지름이 약 150 μ m되도록 적절하게 조절했다.

검사 영역의 여러 위치(시편 중앙, 시편 중앙에서 10mm 좌측지점, 15mm 좌측지점)에서 주파수 스캔 그래프를 각각 구해서 비교해 봄으로써 주파수 의존성과 위치 변화를 조사하고 앞의 실험 순서에서 언급한 적절한 변조주파수를 찾았다. 이 경우에는 5.69 kHz였는데 세 지점에서의 신호 피크의 크기가 1-1.3 정도로 균일한 저주파수 영역의 피크를 나타낸 변조주파수였다. 이 그래프중에서 시편 중앙에서 구한 주파수 스캔 그래프를 Fig. 2에 나타냈다. 이때 레이

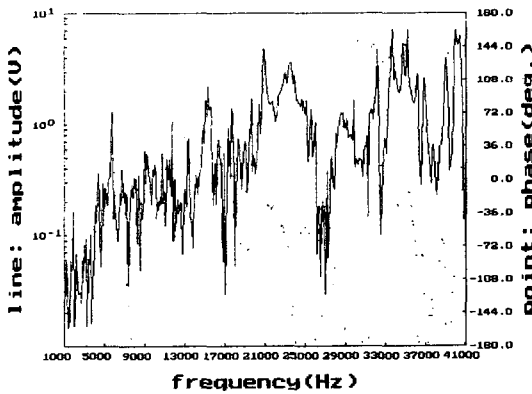


Fig. 2. Frequency scan graph of aluminum block with 6 hidden notches.

저 파워는 1.2W, 록인앰프의 sensitivity는 10mV, time constant는 30ms였다. 그래프에 나타난 신호 크기와 위상의 변화가 복잡하고 공진주파수 피크가 매우 많다. 그리고 저주파 영역에서 신호크기가 전체적으로 주파수에 비례하는데 이것은 식(3)의 ω 의존성과 일치한다. 이중 5.69kHz 제외한 대부분의 주파수 피크에서는 세 지점에서 신호 크기가 크게 차이가 나거나 일부 지점에서는 피크가 나타나지 않기도 했다. 그것은 공진 주파수에서는 신호가 특정한 형태의 공

진 모드를 나타내서 위치에 따라 뚜렷하게 변하기 때문인데 공진모드의 노드에 해당하는 경우 신호가 매우 작아지고 배에 해당하는 경우는 매우 커진다.

이 변조주파수 5.69kHz에서 1차원주사를 하여 6개의 감추어진 노치가 뚜렷하게 나타나는 결과(Fig. 3)

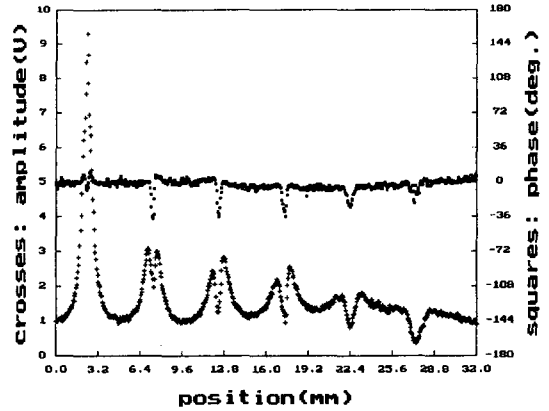


Fig. 3. Line scan graph of aluminum block with 6 hidden notches.

를 구했다. 이 경우 레이저 파워는 1.3W, 록인앰프의 sensitivity는 10mV, time constant는 30ms였고, 전체 주사 거리는 32mm, 총 스텝수는 640으로 단위 스텝 거리는 50 μ m였다. Al(1100)의 열확산도가 0.872cm²/s이기에 이 주파수에서 열파의 열확산거리는 70 μ m이고 음파의 종파 속도가 6.32km/s, 횡파 속도 3.13km/s이므로 종파의 파장은 1.11m, 횡파의 파장은 0.55m이다. 각 노치에서의 위상 변화의 반치폭은 노치의 폭과 거의 비슷하지만 신호 크기 변화의 반치폭은 노치의 폭보다 1.5~2배 정도 크다. 그리고 첫번째 노치에서 다섯번째 노치까지 깊이에 비례하여 신호 크기 변화의 반치폭이 증가하는 것을 볼 수 있다. 첫번째 노치와 나머지 5개의 노치와는 신호 변화 형태가 뚜렷한 차이점을 보이는데, 첫번째 노치는 열파의 산란 효과가 나타난데 반해 다른 노치는 음파의 산란에 의한 신호 변화가 크기 때문이다. 이것은 두번째 노치부터는 깊이가 열확산거리의 3배 이상 되기 때문에 노치에서 산란된 열파가 충분히 감쇄되어 다시 표면의 온도 변화에 영향을 줄 수 없기 때문이다. 첫번째 이외의 노치의 경우 신호 크기는 입사점이 노치에 접

근할 때 증가하다가 노치 바로 위에 있을 때는 다시 감소하고 위상은 입사점이 노치위에 있을 때만 감소한다. 이러한 결과를 분석하여 보자. 입사점이 노치 바로 위에 있는 경우 노치 윗면에서 180도 반대쪽으로 산란되는 음파는 산란되지 않은 다른 음파와 비교할 때, 방향도 다르고 시편 두께에 상응하는 시간지연을 보이기 때문에 진동신호크기도 크게 감소하고 위상도 비교적 크게 변한다. 반면 입사점이 노치와 노치 사이에 있을 경우에는 위상변화가 미미한데 이것은 노치 측면에서 산란되는 음파는 다른 부분의 음파와 방향도 비슷하고 시간 지연도 작을 뿐만 아니라 음파의 파장이 매우 크기 때문이다. 결과적으로 노치의 깊이가 열확산거리의 1~2배 이내인 경우는 열파의 영향을 받아 신호 크기의 변화가 매우 크고, 그 이상 깊어지면 신호 크기 및 위상 변화가 점차 작아지고 주로 음파의 산란에 의존하며, 적어도 열확산거리의 약 11배 깊이(6번째 노치) 또는 종파 파장의 7/10000 깊이까지는 검사가 가능하였다.

그리고 6개의 노치가 모두 검사될 수 있도록 스텝 간격 100 μ m, 주사면적 30 \times 13mm²으로 2차원 주사한 이미지를 Fig. 4에 나타냈다. 좌측에 나타낸 이미지는 신호 크기를 우측의 이미지는 신호 위상을 각각 나타낸 것이다. 이 경우의 실험조건은 변조주파수 5.69 kHz, 레이저 파워는 1.2W, 록인앰프의 sensitivity는 10mV, time constant는 30ms, S/N비는 약 45, 검사시간은 3315초였다. 신호 크기와 위상이 전체적으로 균일하고 6개의 노치가 뚜렷하게 나타났다. 여기서도 첫번째와 나머지 노치의 신호가 뚜렷한 차이를 보였다. 그리고 6번째 노치의 신호 크기 및 위상 변화가 희미해서 검사 한계깊이에 가깝다.

가로 45mm, 세로 20mm, 두께 5mm 알루미늄 블록(Al1100)에 폭 0.4mm, 길이 10mm인 홈을 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8mm 깊이로 6개를 만들어 표면 노치 시편으로 사용하였다. 홈이 있는 면에 레이저를 입사하고 집속렌즈를 조절하여 입사광의 크기를 적절하게 조절했다.

주파수 스캔 그래프를 구해서 상호주파수 의존성을 조사하고 적절한 변조주파수를 찾아 1차원 주사를 하여 6개의 표면 노치가 잘 나타나는 1차원 주사 그래프(Fig. 5)를 구했다. 이 경우 변조주파수는 5.7 kHz, 레이저파워는 1.3W, 록인앰프의 sensitivity는 3

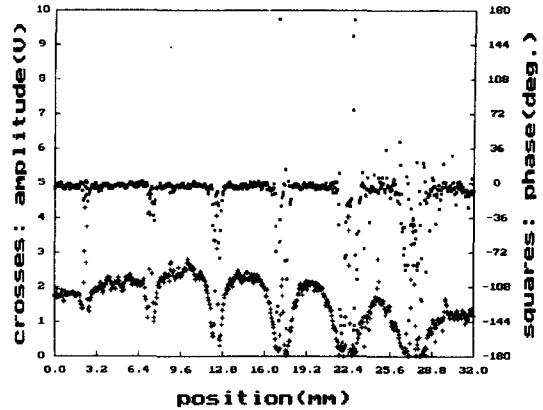


Fig. 5. Line scan graph of aluminum block with 6 surface notches.

mV, 평균 시간은 30ms였고, 전체 주사 거리는 32 mm, 총스텝수는 640으로 스텝 간격은 50 μ m였고 열확산거리는 70 μ m, 종파의 파장은 1.11m, 횡파의 파장은 0.55m이다. 깊이 50 μ m인 노치도 뚜렷하게 나타나고 깊이에 비례하여 신호의 크기와 위상 변화가 증가했다. 그리고 신호 크기 변화의 반치폭이 노치 깊이의 두배에 노치 폭을 더한 값으로 근사할 수 있는데 이것은 W. Arnold의 실험 결과와 일치하며 음파의 near-field효과 때문이다.¹⁴⁾ 입사점이 노치에 접근하면 신호 크기 및 위상은 감소하다가 입사점이 바로 노치 위에 있으면 신호 크기와 위상 모두 증가하는데 노치에서의 신호 변화 형태가 감추어진 노치와 다르다. 그리고 변조주파수 18.5kHz, 레이저파워 1.2W, 록인앰프의 sensitivity는 3mV, 평균 시간은 30ms일 때 스텝 간격 100 μ m, 주사면적 30mm \times 13mm, 검사시간 3315초로 2차원 주사한 이미지(Fig. 6)에도 6개의 노치가 뚜렷하게 나타났다. 이 경우 열확산거리는 39 μ m이고 종파 파장은 0.34m, 횡파 파장은 0.17m이다. 연마할 때 생긴 트랙과 다른 표면의 굴곡이 신호 크기 이미지(좌측)에 뚜렷하게 나타나지만 위상 이미지(우측)에는 전혀 나타나지 않는다. 따라서 위상 이미지 또는 위상은 표면의 성질을 배제하고 시편 내부만을 검사하는데 적합하다.

가로 45mm, 세로 20mm, 두께 5mm 알루미늄(Al 1100)블록에 지름 0.7mm의 드릴 구멍 6개를 구멍 윗부분까지의 거리가 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8mm 되게 표면과 수평으로 만들어서 검사하였다. 1차원

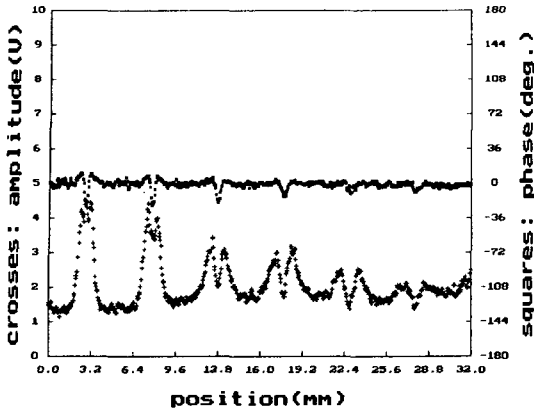


Fig. 7. Line scan graph of aluminum block with 6 holes drilled parallel to surface.

주사를 하여 6개의 드릴 구멍이 모두 잘 나타나는 1차원 주사 그래프(Fig. 7)를 구했다. 이 경우 변조주파수는 4.72kHz, 레이저 파워는 1.2W, 록인앰프의 sensitivity는 10mV, 평균 시간은 30ms였고, 전체 주사 거리는 32mm, 총 스텝수는 640으로 스텝 간격은 50 μ m였고 열확산거리는 77 μ m, 종파 파장은 1.34m, 횡파 파장은 0.66m이다. 구멍 주위에서의 신호 크기 및 위상의 변화 양상이 감추어진 노치의 경우와 비슷하여 신호 크기는 입사점이 구멍에 접근할 때 증가하다가 구멍 바로 위에 있을 때는 다시 감소하고 위상은 입사점이 구멍 위에 있을 때만 감소한다. 깊이에 반비례하여 신호 크기와 위상 변화가 점차 작아지나 두번째와 세번째 구멍 사이에서는 신호크기 감소가 가파른 것은 두번째 구멍의 경우까지는 열파의 영향을 받기 때문인데, 감추어진 노치보다 더 깊은 구멍까지 열파의 영향이 의미있는 것은 열확산거리가 더 크고 구멍의 지름이 노치의 폭보다 크기 때문이다. 그리고 깊이에 비례하여 신호 크기 변화의 반치폭이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 변조주파수 4.72 kHz, 레이저파워 1.2W, 록인앰프의 sensitivity는 10 mV, 평균 시간은 30ms일 때 스텝간격 100 μ m, 주사 면적 30mm \times 3mm로 2차원 주사한 이미지를 Fig. 8에 나타냈다. 이때의 S/N비는 약 30이다. 6개의 드릴 구멍이 잘 나타나 있는데 깊이 0.8mm의 구멍은 희미하게 보여 열확산거리의 약 10배이고 종파 파장의 6/10000인 이 깊이가 한계 검사 깊이에 가깝다고 볼 수 있다.

그리고 가로 45mm, 세로 18mm, 두께 4mm 알루미늄(AI 1100) 블록에 지름 3mm의 드릴 구멍 3개를 구멍 윗부분까지의 거리가 각각 0.15, 0.45, 0.75mm되게 표면과 수직하게 만들어서 검사하였다.

1차원 주사를 하여 3개의 드릴 구멍이 잘 나타나는 1차원 주사 그래프(Fig. 9)를 구했다. 이 경우 변조주

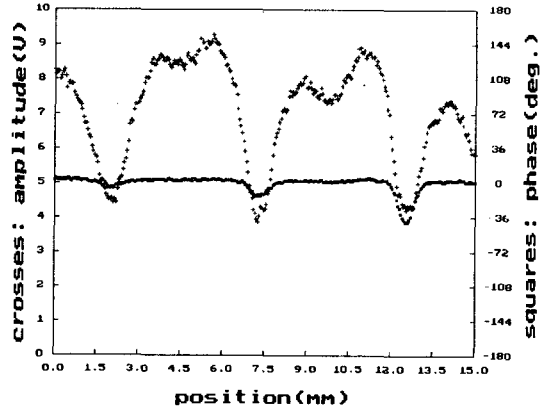


Fig. 9. Line scan graph of aluminum block with 3 holes drilled vertically.

파수는 4.8kHz, 레이저 파워는 1.2W, 록인앰프의 sensitivity는 3mV, 평균 시간은 30ms였고, 전체 주사 거리는 15mm, 총 스텝수는 300으로 스텝 간격은 50 μ m였다. 열확산거리는 76 μ m이고 종파 파장은 1.32m, 횡파 파장은 0.65m이다. 위상 변화는 깊이에 반비례하여 감소하고 깊이가 0.75mm일 때는 구별하기 어려울 정도로 작지만 신호 크기 변화는 세 구멍에서 거의 같고 반치폭은 깊이에 비례하여 증가한다. 이것은 깊이에 비해 결함이 충분히 커서 신호 크기가 거의 균일하게 크게 감소했지만 결함 형태가 3차원이고 복잡해서 음파의 산란이 산만하기에 신호의 위상에 주는 효과가 상쇄되었기 때문이다. 따라서 복잡한 형태의 깊은 결함의 경우는 신호 크기 이미지가 검사에 더 유용하다. 그리고 변조주파수 4.8kHz, 레이저파워 1.2W, 록인앰프의 sensitivity는 3mV, 평균 시간은 30ms일 때 스텝 간격 150 μ m, 주사면적 15mm \times 4.5mm로 2차원 주사한 이미지를 Fig. 10에 나타냈다. 이때의 S/N비는 약 115이다. 신호 크기는 구멍중심부에서는 감소하지만 구멍 중심으로부터 지름 약 1.5mm에서 약 5mm의 도우넛 구간에서는 음파의 보강간섭

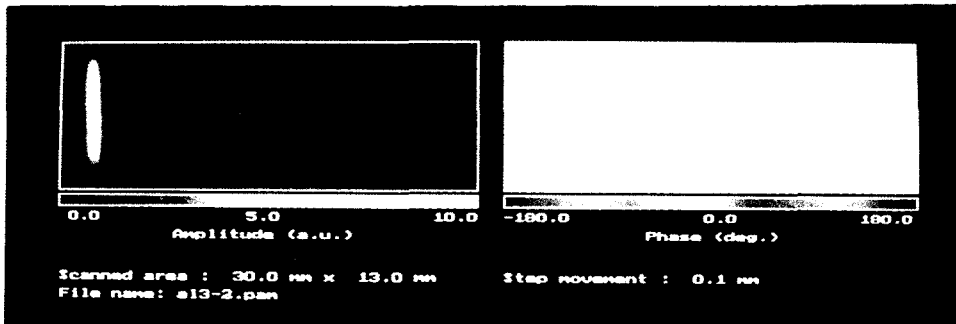


Fig. 4. Two dimensional image of aluminum block with 6 hidden notches.

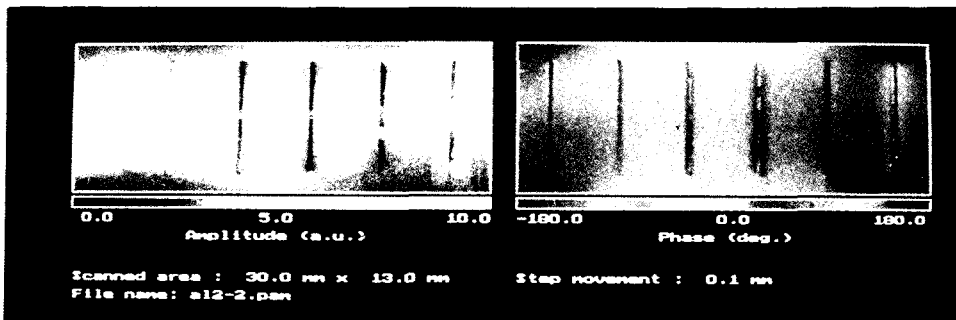


Fig. 6. Two dimensional image of aluminum block with 6 surface notches.

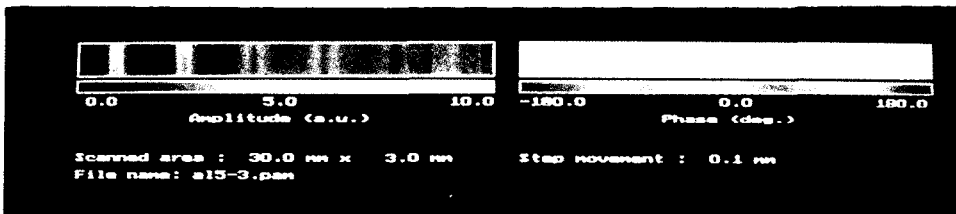


Fig. 8. Two dimensional image of aluminum block with 6 drilled holes parallel to surface.

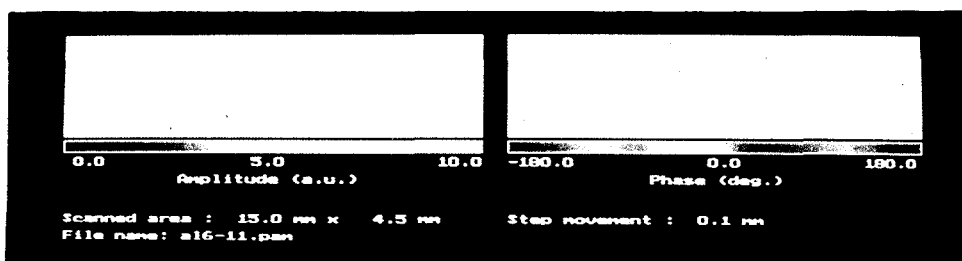


Fig. 10. Two dimensional image of aluminum block with 3 drilled holes vertical to surface.

으로 커지는 것을 볼 수 있다.

4.2. 의 존 성

광음향현미경의 신호는 변조주파수, 입사광의 세기와 시편 표면에서의 단면적, 마운팅블록의 재질과 형태 등 여러 실험 조건에 따라 변하기 때문에 적절한 검사 조건을 확립하기 위해서 각 실험 조건에 대한 의존성을 조사하였다.

광음향 신호는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 식(2)와는 달리 가속도센서 공진주파수(48kHz) 이외의 구간에서도 변조주파수의 변화에 아주 민감하여 신호 크기의 피크가 매우 많고 날카로우며 위상이 급격하게 변한다. 그리고 입사점의 위치에 따라 동일 변조주파수에서의 신호 크기와 위상이 다르다. 이것은 마운팅블록과 시편이 식(1)의 가정과는 달리 유한한 크기를 갖기 때문이며, 무한히 많은 질량과 스프링으로 구성된 진동계라고 볼 수 있고 각각의 신호 피크 주파수는 공진 주파수이다.¹⁶⁾ 이 공진 주파수는 시편의 재질과 형태, 마운팅블록의 재질과 형태, 시편을 마운팅블록에 부착하는 방법, 마운팅블록을 광학테이블에 고정하는 방법 등에 따라 변한다. 그리고 넓은 영역을 검사할 경우에는, 주파수가 커지면 공진 모드가 복잡해져서 위치에 따른 변화가 심하기 때문에 신호의 왜곡이 클 수 있으므로 주파수 선정에 유의해야 하며 위치에 따른 변화가 완만한 저주파 공진주파수에서 검사하는 것이 좋다. 그러나 신호 크기가 큰 고주파 영역의 변조주파수의 경우는 S/N비가 크고 파장이 작으므로 미세 구조의 검사나 delamination 등의 검사에 유리하다.¹⁷⁾

그리고 입사광의 단면적이 작아지면 신호가 표면의 성질에 민감하여 이미지의 배경에 나타나는 신호의 크기와 위상의 요동이 커져서 잡음이 증가하는 효과를 나타내고, 커지면 6개의 수평 드릴 구멍 중에 6번째 구멍이 보이지 않게 되는 등 분해능이 떨어져서 입사광의 크기가 100-200 μm 정도가 적당하였다.

또한 신호 크기는 식(1)과 같이 입사광의 세기에 비례하여 증가하지만 위상은 무관하였다.

그리고 두께 방향 진동만을 측정하는 B & K 4371 가속도센서 이외에 3축(가로, 세로, 두께)의 진동을 측정하는 3축 가속도센서(B & K 4321)을 사용하여

가속도센서와 진동 방향에 대한 의존성을 조사하였는데, 주파수 스캔 그래프를 비교하면 전체적인 그래프 형태는 비슷하고 몇몇 피크만 상이하미 이미지 차이도 거의 없었다.

4.3. 특 성

가속도센서를 사용한 광음향현미경의 특성을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 열파와 음파가 모두 작용한다.
- 2) 표면에서 가까운 부분은 열파의 영향이 크고 음파영역보다 신호가 크며, 분해능은 열파의 파장, 스텝간격 등에 의해 결정되고 열파의 파장이 음파보다 아주 작아 보통 수십 μm 이므로 반도체, 실리콘웨이퍼 등 정밀한 검사가 가능하다.
- 3) 열파의 영향을 받지 않는 표면에서 먼 부분도 음파의 산란 등에 의한 효과가 크기 때문에 검사할 수 있고, 분해능은 주로 결함까지의 깊이에 의해 결정된다.
- 4) 시편의 열적, 역학적, 광학적 성질에 의존한다.
- 5) 시편의 설치가 용이하고 시편의 형상, 크기, 표면조건 등에 대한 제약이 없다.
- 6) 표면에 노출된 결함과 감추어진 결함을 구별할 수 있다.

5. 결 론

가속도센서를 사용한 광음향현미경의 제작 및 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 아르곤 이온 레이저를 광원으로 시편에 주기적으로 가열하여 광음향신호를 발생시키고 가속도센서로 측정하는 광음향 현미경을 제작하였다.
- 2) 제작된 광음향 현미경으로 다양한 결함을 가진 시편을 검사하고 광음향현미경의 특성을 조사하였고 실험조건에 대한 의존성을 조사하여 적절한 실험조건을 확립하였다.
- 3) 표면에서 가까운 부분은 물론 먼 부분까지도 검사할 수 있었다.
- 4) 마이크로폰이나 압전소자를 사용하는 경우와

비교하여 시편의 설치가 용이하고 시편의 크기 등에 대한 제약이 없었다.

본 논문은 정부출연연구과제의 수행 결과이다. 그리고 여러가지 도움과 조언을 주신 독일 비파괴시험 연구소(Izfp)의 W. Arnold 교수와 U. Netzelmann 박사에게 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 1) A. G. Bell, Phil. Mag. Vol. 11(1881), pp. 51
- 2) A. Rosencwaig, A. Gersho, J. Appl. Phys. Vol. 47, No. 1(1976), pp. 64-69
- 3) A. Rosencwaig, Photoacoustics & Photoacoustic spectroscopy, John Wiley & Sons, New York(1980)
- 4) 윤수인, 윤보경, 문병기, 서효진, 박홍이, J. Korean Phys. Soc. Vol. 18(1985), pp. 224-227
- 5) 문병기, 윤수인, 박홍이, 새물리, Vol. 26(1986), pp. 152-154
- 6) 박준호, 차성도, 응용물리, Vol. 2(1989), pp. 24-28
- 7) 윤수인, 김학수, 최규만, 정중현, 새물리, Vol. 24(1984), pp. 12-17
- 8) 백두현, 김학수, 응용물리, Vol. 1(1988), pp. 174-177
- 9) 금채, 허복희, 김유배, 강무관, 응용물리, Vol. 7, No. 1(1994), pp. 8-13
- 10) 금채, 허복희, 김유배, 이병주, 강무관, 응용물리, Vol. 7, No. 1(1994), pp. 1-7
- 11) 금채, 윤화중, 이병주, 김유배, 허복희, 응용물리, Vol. 5, No. 2(1992), pp. 185-192
- 12) 윤수인, 김중환, 설정식, 새물리, Vol. 21, No. 3(1981), pp. 188-192
- 13) 이호성, 송양섭, 이동두, 새물리, Vol. 28, No. 1(1988), pp. 100-106
- 14) W. Arnold, B. Hoffmann, H. Willems, Z. Phys. B, Vol. 64(1986), pp. 31-34
- 15) W. Jackson, N. M. Amer, J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 6(1980), pp. 3343-3353
- 16) 한국표준연구소, 음향표준연구실, 진동원리와 측정기술, KSRI-ET-55(1985)
- 17) D. H. Kim, U. Netzelmann, Nondestructive testing evaluation, Vol. 10(1993), pp. 343-350

Development and Application of Photoacoustic Microscope using Accelerometer

D. H. Kim and Oh-Yang Kwon

Korea Research Institute of Standards and Science, Materials Evaluation Center

Abstract A two-dimensional photoacoustic microscope utilizing photoacoustic signals generated by periodic heating of specimen surface with Argon ion laser and measured by accelerometer has been developed. Several aluminum specimens with various defects have been examined, characteristics of the microscope have been evaluated and optimal experimental conditions have been determined by examining the dependence on several experimental conditions including the modulation frequency and the beam width of laser.

(Received : June 24, 1994)