

마이크로/나노 비파괴평가 기술(II): 음향특성계측

Review of Micro/Nano Nondestructive Evaluation Technique (II): Measurement of Acoustic Properties

김정석*, 박익근**†

Chung Seok Kim* and Ik-Keun Park**†

초 록 본 논문은 재료의 표면검사와 음향특성 측정이 가능한 마이크로/나노 비파괴평가 기술을 소개한다. 이들 기술로 초음파원자현미경과 초음파현미경의 원리와 특징 그리고 응용분야에 대해서 기술하였다. 특히, 이들 기술은 표면과 표면적하의 이미지 관찰 외에도 음향특성을 측정하여 마이크로/나노 구조물 혹은 표면에서의 기계적인 물성평가가 가능한 기술이다. 따라서 기존 비파괴분야와 함께 첨단 산업분야에 있어 마이크로/나노 비파괴평가의 적용과 기술 개발이 향후 폭넓게 가능할 것으로 판단된다.

주요용어: 나노와 마이크로, 비파괴평가, 음향특성, 표면, 기계적 물성

Abstract The present paper reviews the micro and nano nondestructive evaluation(NDE) technique that is possible to investigate the surface and measure the acoustic properties. The technical theory, features and applications of the ultrasonic atomic force microscopy(UAFM) and scanning acoustic microscopy(SAM) are illustrated. Especially, these technologies are possible to evaluate the mechanical properties in micro/nano structure and surface through the measurement of acoustic properties in addition to the observation of surface and subsurface. Consequently, it is thought that technique developments and applications of these micro/nano NDE in advanced industrial parts together with present nondestructive industry are widely possible hereafter.

Keywords: Micro and Nano, Nondestructive Evaluation, Acoustic Properties, Surface, Mechanical Property

1. 서 론

비파괴검사 기술은 원자력 발전설비, 석유화학 플랜트 등 거대설비기기들에서부터 반도체 등의 소형 제품에 이르기까지 검사 적용대상도 다양해져 이들 제품의 안전성 및 품질보증과 신뢰성 확보를 위한 핵심 요소기술로서의 중심적인 역할을 분담하게 되면서 이들 비파괴검사의 적용한계를 극복하기 위한 다양한 도전에 직면해 있다. 그 중에서도 시급히 요구되어지고 있는 과제 중의 하나가 이러한 나노 기술 (nano technology; NT)과 융합

된 마이크로/나노 스케일 (micro/nano scale) 영역의 NDE 기술의 확립과 응용이다.

원자와 분자수준에서 물리적, 화학적, 생물학적인 물질의 내부 상태 및 표면 상태와 에너지를 연구하고 이를 측정, 평가하는 마이크로/나노 과학은 세계적인 연구 분위기가 조성되어 지난 30여 년간 급속한 발전을 거듭하고 있으며 나노기술과 새로운 산업에 대한 기대는 날로 확산 증가되고 있는 실정이다[1,2]. 이런 마이크로/나노 과학에 대한 세계적인 연구방향은 일시적인 현상이 아니라 앞으로 기술과 산업의 새로운 돌파구 역할을 할 수

있는 불로오염분야로 기대되고 있다. 현재 마이크로/나노 과학은 거시적인 기존의 이론들을 극복해야 할 많은 이론적 문제점들이 산재해 있지만 급변하고 있는 산업사회의 요구에 따라서 마이크로/나노 구조물의 조작과 측정만으로도 현재의 한계점을 극복하는데 큰 역할을 하고 있다[3,4]. 나노수준이라고 하면 원자의 크기가 원자마다 차이는 있지만 그 크기들이 10^{-10} m 이하라고 하면 몇 개 정도의 원자가 모여 있을 정도의 크기라고 할 수 있다. 이들 크기 수준을 비교하여 Fig. 1에 나타내었다. 원자와 분자 수준의 조작과 제어로부터 개개의 결정상(crystalline phase)과 생체셀(bio cell)을 조작하게 되고 또한 이들을 조작하여 개개 결정립(grain)과 조직(tissue)을 조작함으로써 물질의 특성과 생명체의 특징을 제어하게 된다. 이러한 물질과 생명체의 특징을 결정짓는 최소의 단위를 조작하고 그 특징을 측정하고 다루는 마이크로/나노 과학은 과히 현대의 모든 산업분야의 관심분야가 아닐 수 없다.

Fig. 2는 현재 첨단산업분야인 정보(IT), 나노(NT), 생체(BT) 그리고 하이브리드기술과 연계되어 이 기술들에 이용되고 있는 대표적인 표면분석기술들을 개략적으로 나타내었다. 전자현미경을 통한 표면이미지 분석기술(TEM; transmission electron microscopy, SEM; scanning electron microscopy), 화학적 상태 분석기술(EDS; energy dispersive spectroscopy, WDS: wavelength dispersive spectroscopy), 결정학적 구조분석기술(XRD; X-ray diffraction, SANS; small angle neutron spectroscopy) 그리고 표면특성 분석기술(STM; scanning tunneling microscopy, AFM; atomic force microscopy) 평가기술들이 이용되고 있고 이들은 각각 특정한 장점과 단점들도 포함하고 있다[5-10]. 특히, 기존의 방법들은 고정밀성이라는 특징을 나타내고 있지만 시편 및 측정공간의 제약을 많이 받게 된다. 또한, 소재를 구성하는 단위가 나노스케일로 작아지면서 이미지뿐만 아니라 표면에서의 기계적물성이 소재 특성에 지대한 역할을 하게 되므로 보다 정밀한 그리고 비파괴적인 평가법이 더욱 절실하게 되었다.

따라서 원자단위 이미지의 높은 분해능 향상과 표면물성평가라는 큰 원인으로 인해 원자현미경과 음향특성을 접목한 초음파원자현미경(ultrasonic atomic force microscopy: UAFM) 그리고 음향특성을 이용한 초고주파수의 초음파현미경(scanning

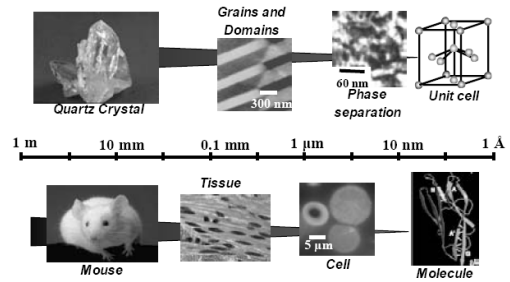


Fig. 1 The comparison the size of materials and biological objects

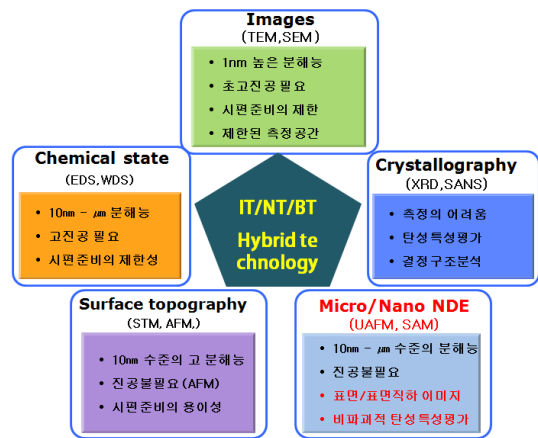


Fig. 2 Typical technologies for surface analysis used to IT/NT/BT and Hybrid technology

acoustic microscopy: SAM) 기술이 첨단산업분야에 있어 그 필요성이 절실하다고 하겠다[11-18].

기계, 정보통신, 바이오, 에너지, 항공우주 등의 첨단산업 분야에서 마이크로/나노와 박막기술은 이들 산업의 중추적인 역할을 하는 가장 중요한 핵심요소가 되었고 이들의 발전 속도는 그 어느 때보다도 빠른 속도로 성장해 가고 있는 실정이다. 이러한 핵심요소 기술의 눈부신 발전을 지속적으로 진행시키기 위해서 이들을 조작하고 분석하는 조작 및 분석기술이 필수불가결한 과제가 되고 있다.

물론 오랫동안 소재산업의 경우 분석을 위한 파괴적인 수많은 현미경 분석 기술이 개발되어 왔고 현재 이들 또 한 지속적인 발전을 위해 부단한 노력을 기울이고 있는 실정이다. 대표적인 소재의 표면을 분석할 수 있는 현미경 분석으로는 잘 알려진 것이 전자현미경분석법이다. 하지만 이들은 시험편을 준비하고 관찰하는 데는 많은 시간과 경

비가 소요됨은 물론이고 공간과 환경적인 제약이 크다고 하겠다. 이와 같이 비록 정밀성 있는 분석을 할 수는 있지만 상당히 제한적인 관찰범위로 소재의 미시적인 특성평가에 제한적으로 응용될 뿐이다. 특히 이들은 초고진공상태에서만 조작이 가능하므로 실제적으로 그 응용 범위를 넓히기 위해선 제품 수준의 광범위한 영역과 대기 혹은 수중에서의 분석기술이 절실하다고 할 수 있다. 따라서 최근에는 기능이나 신뢰성을 극한까지 높이기 위한 첨단 비파괴검사 기술들이 새롭게 연구가 진행되고 있으며, 향후 폭넓은 응용이 예상되고 있다.

본 해설 논문에서는 마이크로/나노 분해능을 가지며 표면관찰이 용이하고 기존의 파괴적인 이미지 분석법으로 불가능한 표면적하의 결함을 관찰하는 것이 가능한 음향특성을 이용한 마이크로/나노 비파괴평가기술에 대해 소개하고자 한다. 이들 기술로 초음파원자현미경과 초음파현미경의 원리와 특징 그리고 응용분야 등을 회원들에게 소개하고자 한다. 특히, 표면과 표면적하의 이미지 관찰 외에도 이들은 음향특성을 측정하여 마이크로/나노 구조물 혹은 표면에서의 기계적인 물성평가가 가능한 기술이다. 따라서 기존의 비파괴분야와 함께 새로운 산업분야의 응용과 향후 비파괴분야에 적용 가능한 기술의 자체 개발에 활용하고자 하였다.

2. 마이크로 나노 NDE 기술

2.1. 초음파원자현미경

현재 마이크로/나노 구조물 및 박막소재의 경우 X선, 혹은 중성자 회절을 이용하여 표면의 기계적 물성 측정이 가능하지만 시료, 환경, 측정법 등 많은 분석조건으로 어려움으로 신뢰성과 정밀성을 향상시키는 데는 상당한 어려움을 안고 있다[19-21]. 초음파원자현미경(UAFM)은 기본적으로 원자현미경에 초음파 특성을 접목한 한 것으로 소재의 표면이미지, 표면적하 이미지뿐만 아니라 표면의 탄성특성을 측정할 수 있는 분석기술이라 할 수 있다. 이는 기본적인 원자현미경에 고주파수로 캔틸레버 혹은 시료를 여기서 팁과 시료의 상호작용을 통해 시료의 탄성계수를 정밀도 높게 측정하고 이를 이미지화 하는 분석기술이다. 시험편은 압전 소자에 부착되고 종파 초음파를 시험편에 방출하게

된다. 따라서 시험편의 표면에서는 면의 변위의 진동을 일으키게 된다. 이러한 진동은 캔틸레버를 통해서 센서의 팁에 전달된다. 캔틸레버의 진동들은 광소자에 의해서 측정되고 락-인 증폭기에 의해서 평가된다. 이 장치로부터 캔틸레버의 진동스펙트럼을 얻고 또 음향이미지를 얻는데 사용된다. 공명진동수 근방에서 여기주파수의 캔틸레버 진폭을 통해서 이미지를 만들게 되며 이러한 진폭은 시험편 표면에서의 탄성값의 차를 나타내게 된다. 또한 접촉식으로 표면 토포그래프(topography) 이미지를 음향이미지와 동시에 얻게 된다.

2.1.1. UAFM 이미지 원리

캔틸레버가 시험편의 표면을 주사하는 동안 캔틸레버 팁은 반데르발스력, 모세관력, 그리고 압입력 등의 다양한 팁-시험편간의 상호작용력의 영향을 받게 된다. 따라서 이러한 팁-시험편간의 상호작용력은 캔틸레버의 유효강성계수($k_{eff} = k + \sigma$)를 변화시키게 된다. 여기서 σ 는 캔틸레버에 작용하는 파생된 모든 힘들의 합이고, k 는 캔틸레버의 스프링상수이다. 즉, 팁-시험편간의 상호작용은 캔틸레버의 공진주파수를 새로운 공진주파수 ω_{eff} 로 변화시킨다. 상호작용하는 캔틸레버의 진폭 $A_f(\omega)$ 는 $\sigma > 0$ 인 경우에 자유캔틸레버의 진폭 $A_f(\omega)$ 의 피크를 보다 높은 주파수 ($\omega_{eff} > 0$)로 이동시키게 된다. 그리고, $\sigma < 0$ 인 경우에 보다 낮은 주파수 ($\omega_{eff} < 0$)로 이동한다. 그러므로, ω_0 에서 측정할 경우, 진폭의 변화는 $\Delta A(\omega_0) = A_f(\omega_0) - A_f(\omega_0)$ 이고 다음 식(1)과 같다[22].

$$\Delta A(\omega_0) = A_0 \frac{(Q\sigma/k)^2}{1 + (Q\sigma/k)^2} \approx A_0 (Q\sigma/k)^2 \quad (1)$$

여기서 A_0 는 구동진폭, Q 는 양질계수(quality factor), ω_0 는 공진주파수이다. 이상의 근사관계는 만일 Q_0 값이 k 보다 더 작으면 유지된다. 그러므로 진폭변화 $A(\omega_0)$ 는 k_{eff} 와 k 간의 차이, 즉 $\sigma = k - k_{eff}$ 가 증가함에 따라서 증가하게 된다. 피드백 기구는 높은 진폭의 진동이 있는 표면영역이 표면 토포그래프 이미지 상에서 더 높게 기록되어지는 방식처럼 작용하게 된다. 그래서 더 밝은 이미지를 나타낸다. 국부적으로 서로 다른 표면특성을 갖는 표면의 경우, 서로 다른 표면영역에서 상대적인 진동의 진폭은 팁-시험편간의 상호작용력에 의해 나

타나는 현상이다. 자유캔틸레버의 위상각 $\phi(\omega)$ 은 ω_0 에서 변곡점을 갖는 점진적으로 증가하는 ω 함수이다. 상호작용하는 캔틸레버의 위상각 $\phi(\omega)$ 은 변곡점이 ω_{eff} 인 것을 제외하고는 $\phi(\omega)$ 로 동일하다. 그러므로, ω_0 에서 측정했을 때 위상이동 $\Delta\phi(\omega_0)=\phi_f(\omega_0)-\phi_i(\omega_0)$ 은 $\sigma < 0$ 에서 음이 되고 $\sigma > 0$ 일 때 양이 된다. σ 가 k 값과 비교하여 매우 작을 경우, 위상이동 $\Delta\phi(\omega_0)$ 은 다음과 같다[23].

$$\Delta\phi(\omega_0) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{k}{Q\sigma}\right) \approx \frac{Q\sigma}{k} \quad (2a)$$

$$\propto \sqrt{\langle A \rangle E^*} \quad (2b)$$

여기서 수식 2b는 $\sigma > 0$ 일 때 유효하다. E^* 는 팁-시편 시스템 상의 유효탄성계수이다. 그리고 $\langle A \rangle$ 는 한 사이클 진동에 의한 접촉면적이다.

Fig. 3(a)와 (b)는 UAFM의 작동모드로 각각 힘 변조 모드와 위상검출 모드를 설명하고 있다. 다음은 두 모드에 대한 이미지 원리를 설명한 것이다. 먼저 힘변조현미경의 경우, 압전재료는 시편 혹은 캔틸레버를 진동시키기 위해서 시편의 후면에 접촉되거나 캔틸레버의 배면에 접촉되어 연속적인 초음파를 발생시키게 된다.

캔틸레버에 부착된 팁은 시편의 표면을 접촉상태로 주사를 하게 된다. 표면 높낮이 이미지를 얻기 위해서 Z 피드백 루프는 DC-캔틸레버의 편향 신호를 팁과 시편간에 일정한 힘을 유지하는데 사용한다. 게다가, 시편 혹은 캔틸레버의 진동으로 팁과 시편과의 접촉시 상호작용력에 따라서 캔틸

레버의 변조진폭의 변화가 생기며 이 신호를 얻게 된다. 일반적으로 진동 주파수는 수백 키로헤르츠 정도이고, 이는 Z 피드백 루프보다도 훨씬 빠르다. 그러므로, 국부적인 진동으로 야기되는 신호는 미미하고 결국 표면 높낮이 정보는 이들과 구별되게 된다. 그리고 위상검출의 경우, 시편 혹은 캔틸레버에 구동된 신호 간에 위상지연을 모니터링 하는 것이다. 위상지연의 변화는 Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 시편의 표면에서 국부적인 기계적물성의 차이로 인해서 나타나는 것이다[24,25].

2.1.2. UAFM 표면 역학특성

Fig. 4에서 보이는 바처럼 캔틸레버의 휨 진동은 탄성계수 측정에 이용된다. 캔틸레버의 휨 진동 운동방정식은 다음 식(3)과 같다[26].

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{ET^2}{12\rho} \frac{d^4y}{dx^4} = 0 \quad (3)$$

여기서, E 는 탄성계수, ρ 는 밀도, T 는 캔틸레버의 두께이다. $x=0$ 에서의 경계조건은 $y(0)=0$ 이고 $dy/dx=0$ 이다. 반면에 $x=L$ 에서 (L 는 캔틸레버의 길이)는 다음과 같다.

$$\frac{EWT^3}{12} \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = k^* y \quad (4)$$

여기서, W 는 캔틸레버의 폭, k^* 는 접촉강성, 혹은 접촉모드에서 힘의 그래디언트이다. 식(4)의 왼쪽은 캔틸레버의 전단력이고 오른쪽은 시편으로부터

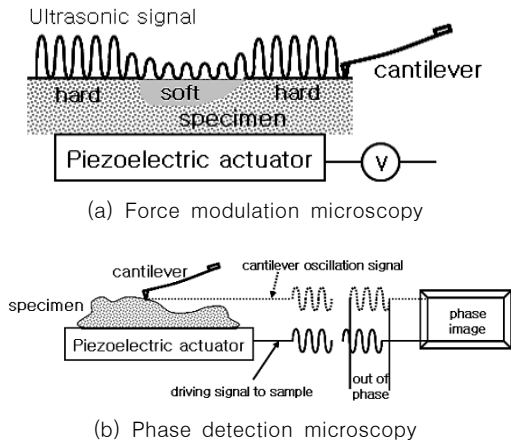


Fig. 3 Image principles of UAFM; (a) force modulation and (b) phase detection

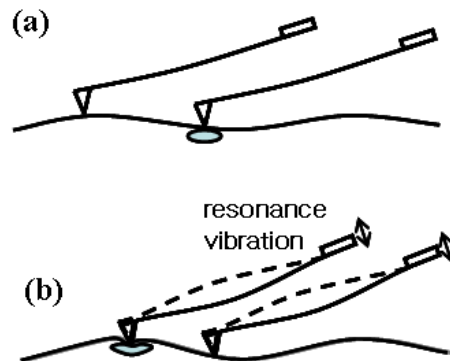


Fig. 4 Deflection of a cantilever in contact mode; (a) in the static condition it does not deform the sample and (b) at the resonance it can deform stiff materials

터의 복귀력이다. 식(4)을 이용하여 식(3)을 풀면 다음의 주파수 수식을 얻게 된다.

$$k^* = \left(\frac{k_c}{3} \right) \frac{\alpha^3 (1 + \cos\alpha \cosh\alpha)}{\cos\alpha \sin\alpha - \sin\alpha \cosh\alpha} \quad (5)$$

여기서 $\alpha = (48\pi^2 \rho L^4 / ET^2)^{1/4} f^{1/2}$ (주파수상수) 이고 $k_c = EWT^3 / 4L^3$ (캔틸레버강성)이다.

탄성의 측정은 다음과 같은 과정으로 얻게 된다. 먼저, 공명주파수 f 가 측정되어지고 주파수상수가 결정된다. 이후 접촉강성 k^* 는 식(6)으로부터 얻게 된다.

다음으로, 유효탄성계수가 다음의 수식을 이용하여 계산된다.

$$E^* = (2/3)^{3/2} \frac{[1 + \sqrt{F_c / (F_1 + F_c)}]^{3/2}}{\sqrt{R[F_1 + 2F_c + 2(F_c F_1 + F_c^2)^{1/2}]}} k^{*3/2} \quad (6)$$

여기서 R 은 팁의 곡률반경, F 는 인가된 수직 힘 그리고 $F_c = (3/2)\gamma\pi R$ 는 표면에너지(γ)에 따른 점착력. 유효탄성계수 E^* 는 시편의 영률과 프와송비와 관련 있다[27].

$$E^* = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - \nu_{Tip}^2}{E_{Tip}} + \frac{1 - \nu_{Sample}^2}{E_{Sample}} \right)^{-1} \quad (7)$$

일반적으로 캔틸레버의 프와송비와 영률 (예를 들어, Si의 경우 $E_{tip}=166$ GPa, $\nu_{tip}=0.217$)을 알고 있기 때문에 시편의 프와송비를 알고 E^* 가 수식(6)에 의해 얻어지면 다음으로 시편의 영률 E_{Sample} 은 수식(7)로부터 결정된다.

2.1.3. UAFM 장치구성

Fig. 5는 UAFM의 장치구성도이다. 함수발생기에서 만들어진 순차적인 신호는 압전소자에 의해 초음파로 진동하게 되고 팁과 시편에 가해지게 된다. 인가되어진 신호로부터 변조되어진 캔틸레버의 진폭은 시편 표면의 탄성특성에 따라서 변하게 된다. 이처럼 인가되어진 신호는 수백 kHz에서 수 MHz대역으로 이는 Z피드백 루프보다도 훨씬 빠르다. 따라서 표면 토폰그래프 정보는 시편 탄성표면에 대한 국부적인 변화로부터 구별되어지고 동시에 두 형태의 이미지가 얻어지게 된다. 이렇게

신호를 인가하여 변조시키는 방법으로는 두 가지의 모드가 가능해진다. 즉, 팁과 시편에 각각 신호를 인가하므로 팁변조모드와 시편변조모드로 구분하게 된다. 먼저 팁변조모드는 구동신호가 캔틸레버에 전해진다. 이러한 구동신호는 일정한 주파수로 캔틸레버를 진동시키게 된다. 캔틸레버의 진동신호에 의한 진폭의 변화는 시편의 기계적특성에 따라서 변하게 된다. 그리고 다음 시편변조모드에서 시편진동자는 시편의 척에 부착되게 된다. 시편은 시편진동자 위에 위치하게 되고 구동신호는 시편진동자에 보내져 일정 주파수로 시편을 진동시키게 된다. 시편이 진동할 때, 시편과 캔틸레버의 팁이 접촉상태이므로 캔틸레버도 역시 진동하게 된다. 팁변조모드에서처럼, 캔틸레버 진동신호의 진폭은 시편의 기계적 특성에 따라서 변하게 된다.

Fig. 5는 팁변조모드에 대한 장치구성도와 신호의 흐름을 나타내었다. 그림에서와 같이 기본구성은 우측의 원자현미경을 기반으로 초음파의 가진과 분석이 가능한 좌측부분으로 구성된다.

팁변조모드에서는 신호발생기에서 발생되어진 전기적인 신호는 캔틸레버 배면에 부착된 압전재료를 진동시켜 캔틸레버에 일정 주파수의 휨진동을 야기시키게 된다. 이렇게 변조되어진 신호는 팁이 시편상을 주사하면서 각 위치에서 실시간으로 광학변위측정계로 측정되어지는 시편에 대한 변위신호 원자현미경의 피드백장치를 통해 토폰그래프 이미지를 나타내게 된다. 또한, 시편의 국부적인 물리적 특성 변화에 의한 초음파신호의 진폭과 위상변화신호는 변위센서를 거쳐 락-인 증폭기와 오실로스코프를 통해 신호처리 후 진폭과 위상 이미지를 나타내게 된다.

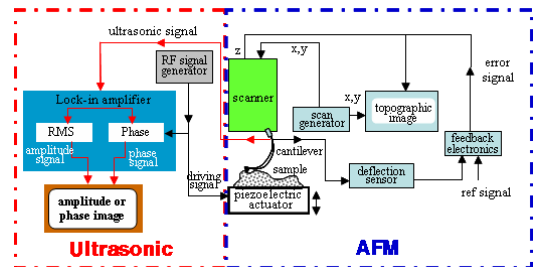


Fig. 5 Schematic diagram of UAFM; combining novel AFM (blue dotted line) and ultrasonic property (red dotted line)

2.1.4. UAFM 응용분야

Fig. 6은 Al₂O₃-TiC의 표면을 AFM과 UAFM으로 관찰한 표면구조의 모습이다[28]. 두 사진 모두 가로와 세로 5마이크론 크기로 동일 지역을 주사한 모습이다. AFM에서 관찰하지 못했던 많은 미세표면균열과 보이드 등의 결함을 UAFM사진에서는 매우 향상된 콘트라스트를 가지고 관찰하는 것이 가능하다. 이미지로 나타낸 것과 같이 그 이미지 분해능이 현저하게 증가하였음을 알 수 있다. 표면에서의 매우 향상된 콘트라스트 외에도 표면 직하에 존재하는 결함에 의한 탄성특성의 차이를 이용하여 결함평가가 가능하기도 하다.

Fig. 7은 물리증착법에 의해서 실리콘 웨이퍼에 비정질의 탄소박막을 증착하고 이 시편의 표면을 관찰한 사진이다[29]. AFM 이미지가 표면 굴곡만을 보여주는데 반해서 UAFM 이미지는 표면직하에 화살표로 표시한 A(보이드)와 B(이차상)의 관찰이 가능하다. Fig. 8은 Ti 박판 (0.1 mm 두께)을 286 kHz와 접촉압력 875 nN로 스캔한 것으로 Fig. 8(a)는 AFM 표면이미지이고 Fig. 8(b)는 UAFM 이미지로 표면 탄성이미지를 나타내었다[30]. AFM 이미지와 현저하게 다른 콘트라스트를 보이고 또한 한 결정립 내에도 콘트라스트 차이가 a, b, c와

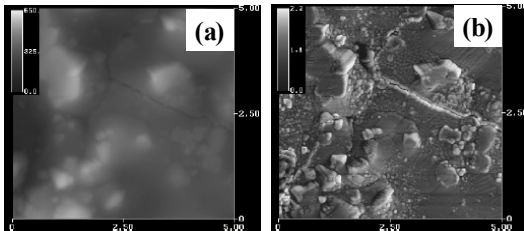


Fig. 6 Al₂O₃-TiC surface morphology images; (a) AFM image and (b) UAFM image

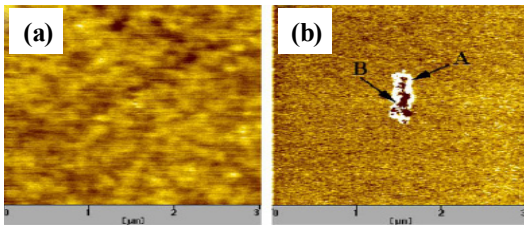


Fig. 7 The topographic image and acoustic image of amorphous carbon film; (a) AFM image and (b) UAFM image showing void (A) and secondary phase (B)

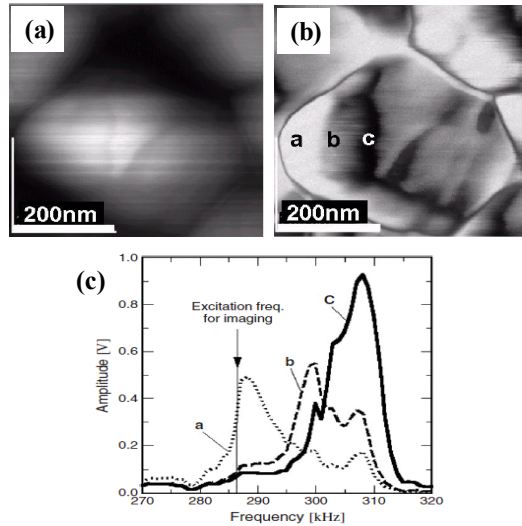


Fig. 8 Variation of contact resonance due to elastic heterogeneity, corresponding to sites a, b and c in Fig. 8(b)

같이 나타남을 관찰할 수 있다. 이들 각 위치에서 접촉공진 주파수를 Fig. 8(c)에 나타내었다.

각 위치에서도 분명하게 구분되는 접촉공진주파수를 얻을 수 있다. 이렇게 한 결정립에서도 콘트라스트 차이가 나는 것은 그 위치에서 전위의 집적 혹은 결정학적 이방성에 의해 나타난 것임을 알 수 있다.

Fig. 9는 Si(001) 단결정, 소다석회유리, 그리고 탄소섬유강화플라스틱에 대한 접촉 공진주파수의 변화를 나타내었고 이 공진주파수를 이용하여 계산한 표면에서의 기계적물성을 Table 1에 나타내었다[31]. 그림에서처럼 탄소섬유의 중심부와 가장자리부 그리고 실리콘과 에폭시수지와 유리 모두 분명한 공진주파수를 나타내었다. 탄성계수를 계산함에 있어 캔틸레버 팁의 크기를 정확히 알 수 없기 때문에 인장시험으로 얻은 값과는 차이가 있지만 대체적으로 유사한 결과를 나타내었다.

이상과 같이 현재 초음파원자현미경기술은 원자현미경의 이미지 콘트라스트의 향상 연구는 물론이고 표면직하의 결함특성분석과 함께 표면부의 탄성특성평가 기술 그리고 부품소자 수준에서 구조물에 직접 부착하여 구조물의 표면특성분석에 적용 가능한 휴대용 장비로 발전하고 있다.

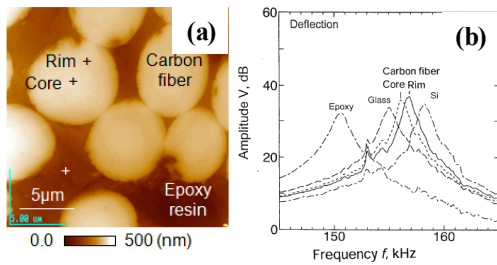


Fig. 9 UAFM image and resonance spectra of the cantilever deflection vibration on Si(001), soda lime glass, and different regions of the CFRP sample

Table 1 Reported and measured values of parameters

	<i>reported</i> <i>E</i> (GPa)	<i>reported</i> <i>v</i> (GPa)	<i>measured</i> <i>E</i> (GPa)
Silicon(001)	166	0.217	168
C fiber rim	230	0.3	90.2
C fiber core	230	0.3	63.6
Soda lime glass	62	0.24	42.8
Epoxy resin	3.4	0.4	17.6

2.2. 초음파현미경

초음파현미경(SAM)은 디스크형태의 압전소자로부터 발생하는 평면초음파를 구면 및 원통형의 집속형 음향렌즈를 통해 재료 내부의 특징지점에 초음파를 집속시켜 발생하는 초음파의 반사와 굴절 및 투과 특성에 따라서 재료 표면과 내부의 고분해능 이미지를 얻게 된다. 또한, 표면의 미소영역에서 발생한 표면파와 직접 반사된 종파 신호간의 상호간섭으로 얻어진 음향신호를 분석하므로써 누설표면파의 속도를 측정하고 기계적 물성을 비접촉, 비파괴적 방법으로 정밀하게 측정할 수 있는 첨단기술이다.

2.2.1. SAM 이미지 원리

탐촉자의 렌즈를 구형으로 만들어 초음파빔을 집속시켜 시험편에 조사하면 시험편의 표면과 내부의 재료특성에 따라서 반사파와 투과파가 발생한다. 이 초음파들의 미세한 변화를 계측하여 화상으로 나타내는 것이 초음파현미경이다. Fig. 8은 압전소자의 구성요소와 초음파의 간섭을 보여주는 개략도이다. 탐촉자의 구성요소는 압전현상이 일어나는 압전소자(ZnO)와 초음파빔을 집속시켜줄

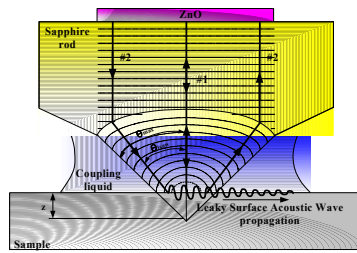


Fig. 10 Details of acoustic lens and interference of acoustic waves

수 있는 렌즈와 압전소자에서 생성된 초음파가 렌즈까지 도달하여 재료에 집속될 때 렌즈와의 구면수차를 작게 만들기 위해 적용된 사파이어 매질로 구성되어 있다. 탐촉자에서 초음파가 집속되는 것을 초점이라고 부르고, 이 초점을 시험편 표면과 일치시키는 방법을 포커스모드라고 하며, 이 동작은 시험편의 표면이미지를 얻을 때 사용한다. 또한 시험편 내부의 이미지를 검출하고자 할 때 탐촉자를 시험편에 접근시켜 초점이 시험편의 내부에 형성되도록 한다. 이러한 동작을 디포커스모드라 한다.

2.2.2. SAM 표면역학 특성

음향렌즈는 구형의 표면을 가지므로 음향렌즈 초점을 갖는다(Fig. 10 참조). 렌즈는 접촉매질 즉, 증류수를 통해서 시험편의 표면에 초음파가 전달되게 된다. 만일 음향렌즈의 조리개 각이 표면에서 표면파의 발생을 만족하는 임계각을 포함한다면 탐촉자에 수신된 신호는 시험편의 표면에서 직접 반사한 신호(#1)와 시험편의 표면에서 발생되어진 표면파(#2)에 의한 두 신호간의 상호간섭의 결과로 수신된다. 이러한 두 개 빔의 경로는 시험편으로부터 탐촉자 간 분리거리 z 에 의존하게 되며 이들의 상호간섭은 수신 신호의 감쇠와 함께 연속적으로 일어난다. 각각의 빔의 위상이 z 가 변할 때 서로 다른 속도에 상쇄와 보강이 일어나게 된다. 이러한 조건하에서 수신신호는 분리거리 z 에 따라 간격 Δz 의 진동을 나타내고 이를 음향재료신호 즉, $V(z)$ 곡선이라 한다. 개개의 전파속도에 의해 특성지어지는 서로 다른 모드들은 $V(z)$ 곡선을 고속 푸리에 변환을 함으로써 추출할 수 있다. 이론적인 $V(z)$ 모델은 음장의 전파를 기본으로 하고 있다. 수신신호의 진폭 V 는 다음과 같이 표현된다[32,33].

$$V_z = \int_0^{\theta_{\max}} P^2(\theta) R(\theta) \exp(2jk_0 z \cos\theta) \times \sin\theta \cos\theta d\theta \quad (8)$$

여기서 $P^2(\theta)$ 는 렌즈의 퍼필함수(pupil function), $j = \sqrt{-1}$, θ_{\max} 는 렌즈의 조리개 각, $R(\theta)$ 는 반사함수, 그리고 접촉매질 내에서의 파수 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 이다.

이러한 $V(z)$ 곡선은 종파나 횡파보다도 느린 위상 속도를 갖는 표면파의 영향을 크게 받게 된다. 이러한 표면파의 속도는 접촉매질에서의 음속 V_0 과 진폭의 패임 간격(dip interval, Δz), 그리고 측정 주파수 f 에 의존하여 다음의 식으로 표현된다[34-36].

$$V_R = V_0 \sqrt{1 - (1 - \frac{V_0}{2f\Delta z})^2} \quad (9)$$

음탄성파들이 미소음향학적 관점에서 고려될 때 탄성파들은 대상재료 내에서 가역적이며 아주 미소한 기계적인 변위를 만들게 된다. 이러한 이유로 대상재료의 기계적인 거동은 고전적 선형탄성 이론에 의해 정의된다. 따라서 벌크등방체의 경우에 있어 밀도와 초음파의 속도는 탄성계수 혹은 프와송비와 밀접한 관련성을 갖게 된다. 재료의 동적탄성계수는 서로 다른 모드의 초음파 (종파와 횡파) 속도와 밀도를 이용하여 측정할 수 있다. 또한, 표면파의 음속으로부터 프와송의 비를 다음과 같이 가정하여 재료의 탄성계수를 식(10)과 같이 나타낼 수 있다[37].

$$E = k\rho V_R^2, k = \frac{2(1+\nu^3)}{(0.87+1.12\nu)^2} \quad (10)$$

여기서, ρ 는 시편의 밀도, ν 는 프와송의 비이다.

이상에서 설명하고 식(5)에서 나타낸 바와 같이 수신신호의 진폭 $V(z)$ 는 두 성분 즉, 첫 번째 성분은 시편으로부터 직접 반사되는 z축에 근접한 음파이고 다른 두 번째 성분은 접촉매질인 증류수와 시편의 표면 경계에 존재하는 누설표면파로서 시편으로부터 재 발산되는 음파성분으로서 이들 두 성분 간의 조합으로 다음의 수식과 같이 개념적으로 간략하게 나타낼 수 있다.

여기서 $V_r(z)$ 는 선이론(ray theory)에서 유도되어지며 두 성분 간의 간섭에 의존하는 진폭 그리고 $V_L(z)$ 은 렌즈의 응답으로 음향렌즈의 치수와 작동

주파수 즉, 음장분포에 크게 의존하게 된다[38].

따라서 음향재료신호, $V(z)$ 곡선으로부터 정밀한 표면파 속도를 측정하기 위해서는 이들 신호에 대한 분해과정이 매우 중요하다. 초기 $V(z)$ 곡선으로부터 $V_L(z)$ 에 근사한 Pb에서의 $V(z)$ 데이터 (참조신호), 즉 $V_L'(z)$ 신호를 빼줌으로써 Δz 에 대한 $V_L(z)$ 만의 신호를 얻게 된다. 그리고 FFT 분석을 통해서 주파수 분포를 얻어 패임간격(dip interval, Δz)에 해당되는 최대 스펙트럼을 갖는 중심주파수를 얻게 된다. 마지막으로 식(9)으로부터 표면파의 속도를 정밀하게 측정하게 된다.

2.2.3. SAM 장치구성

Fig. 11는 주사음향현미경의 구성도이다. 발진기(oscillator)에서의 전기적인 정현파신호가 압전소자(ZnO)를 자극하여 기계적인 진동(초음파)을 얻어 내 초음파가 접촉매질을 지나 시험편을 향해 집중되고 집중된 초음파가 일부는 투과하고 일부는 반사하여 반사된 초음파는 다시 압전소자를 기계적인 진동으로 자극해 수신기를 지나 검출기에 수집되고 이것은 데이터 처리장치인 컴퓨터에서 신호의 위상정보와 진폭의 크기를 처리하여 모니터에 화상의 정보로 표현된다. 이상의 기본 구성으로 초음파의 발생과 송수신이 가능하였다. 또한 제어장치를 통하여 X, Y, Z 3축의 이동과 전반적인 구동부의 제어가 가능하도록 구성하였다.

특수한 음향렌즈를 사용하여 디포커스모드를 이용하여 표면파를 발생시키는 것이 가능하고 음향렌즈를 통해 수신이 가능해진다. 음향렌즈의 형상으로 압전효과를 이용한 ZnO변환기는 결정로드(crystal rod)의 한쪽 끝에 스퍼터링으로 증착하고 이는 고주파음향파를 발생하여 시편으로 전파된

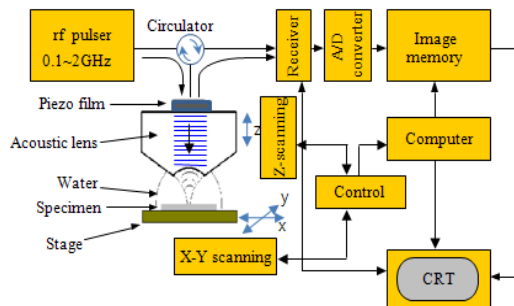


Fig. 11 Scanning acoustic microscopy

다. 결정로드는 ZnO변환기에서 발생한 초음파를 전달하는 역할을 하며 사파이어와 같이 음향전달 특성이 양호하고 음향속도가 빠른 단결정체가 선택된다. 사파이어 로드 후면에 구형으로 연마된 오목한 면은 입사되는 초음파를 접촉매질을 통한 곳으로 집중시키는 역할을 한다. 또한, 시편과 렌즈 사이에는 음향경로를 형성시키기 위해 사용한 접촉매질과 사파이어의 큰 음향 속도 차이로 초점에서 회절 제한된 초음파 빔을 얻을 수 있어 광학렌즈에서 발생하는 구면수차를 최소화 할 수 있다.

2.2.4. SAM 응용분야

Fig. 12는 400 MHz의 음향렌즈를 이용하여 용체화 처리한 알루미늄 5052 합금의 표면 탄성이미지를 나타내었다[39]. 그림에서와 같이 Fig. 12(a)와 12(b)는 음향렌즈의 비축점거리 $z=0 \mu\text{m}$ 와 $z=-25 \mu\text{m}$ 일 때 각각 관찰한 결과이다. 비축점거리 $z=0 \mu\text{m}$ 일 경우 시편의 표면에서 직접 반사되는 신호만이 존재하고 표면파가 발생되지 않으므로 어떠한 콘트라스트 차이도 구분되지 않는다. 이와 달리 비축점거리 $z=-25 \mu\text{m}$ 일 경우 음향렌즈의 일정부부분에서 표면파 발생의 임계각을 만족하게 되고 시편의 표면에는 누설표면파가 발생하게 된다. 따라서 결정의 불연속부인 결정립계는 결정립 내부와 콘트라스트 차이를 갖게 되고 결정립 구조를 명확하게 관찰할 수 있다.

Fig. 13은 강의 기지위에 2-3 μm 의 Cr-DLC (diamond-like coating; DLC) 막을 형성 후 표면을 SAM으로 관찰한 결과를 나타내었다[40]. Fig. 13(b)에 표시한 부분처럼 많은 부분이 표면이미지에 관찰하지 못했던 보이드들이 관찰되었다.

Fig. 14는 생체재료에 대해 초음파현미경을 이용하여 관찰한 것이다[41,42]. Fig. 14(a)는 자궁경 암종에서 채취되어 계속 배양되고 있는 헬라 세포를 관찰한 것으로 시간에 따른 세포의 분할과 이동연구에 응용된다. Fig. 14(b)는 미발달 닭의 심장 근육세포를 광학현미경과 함께 초음파현미경으로 관찰한 것이다. 광학현미경으로 관찰이 불가능한 세포질과 핵을 관찰할 수 있다. 이렇듯 초음파현미경은 금속, 반도체, 고분자는 물론 생체재료까지도 관찰이 가능하므로 그 응용분야가 매우 다양하게 된다.

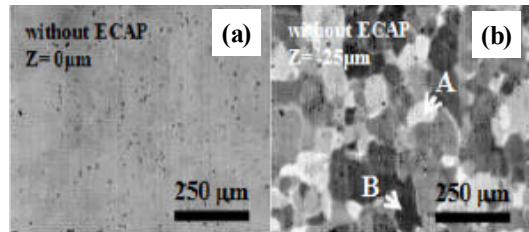


Fig. 12 SAM images of Al5052 alloy at each defocusing distance; (a) $0 \mu\text{m}$ and (b) $25 \mu\text{m}$ (400 MHz)

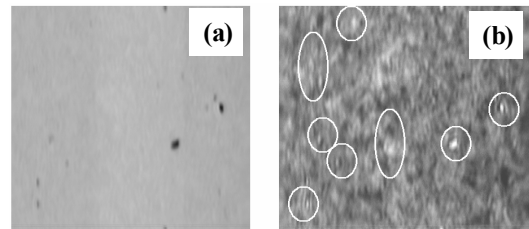


Fig. 13 Acoustic image of specimen Cr-DLC at 1.3 GHz where the horizontal image size was $100 \mu\text{m}$ with (a) defocus $z = 0 \mu\text{m}$ and (b) defocus $z = -4 \mu\text{m}$

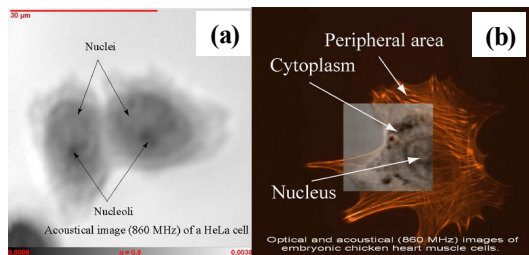


Fig. 14 Acoustic image: (a) HeLa cell and (b) optical and acoustical images of embryonic chicken heart muscle cells with a center frequency of 860 MHz

Fig. 15는 M2강과 유리에서 얻은 $V(z)$ 곡선과 주파수분석결과를 나타내었다[43]. 식(9)를 이용하여 유리는 3214 m/s M2강은 3006 m/s의 누설표면파의 속도를 계산하였다. Table 2는 각 재료에서 측정된 탄성계수는 나노인덴테이션과 SAM에서 유사하지만 나노인덴테이션의 오차율이 수백 배 정도가 큰 것으로 나타났다. 이러한 오차는 재료 자체의 국부적인 불균일성과 상용 장비나 측정자로부터 나타나게 되며, 더욱이 주사음향현미경은 프와송비 측정이 가능하므로 벌크 상태의 프와송비를 이용하는 나노인덴테이션보다도 크게 향상된 측정 정밀도를 꾀할 수 있다.

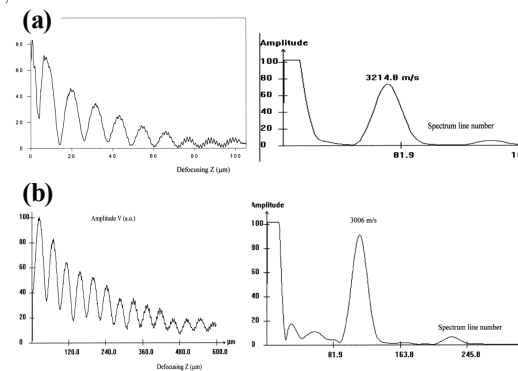


Fig. 15 V(z) curve at 600 MHz on (a) glass and (b) M2 steel sample and its spectrum calculated from FFT analysis

Table 2 Measured values of parameters by indentation and SAM

Specimen	Measurement technique		
	Indentation	SAM	
		E (GPa)	E (GPa)
Fused silica	70.4±1.5	72.1±1	0.167
M2 steel	no data	218±2	0.288
TiN coating	440±130/446±85	432±8	0.190
Cr-C coating	329±22	320±9	0.350

이상과 같이 현재 주사초음파현미경기술은 접촉 매질에 따른 제한된 시험 환경과 장치상의 어려움으로 몇몇 분야에서 개발연구가 진행되었지만 현재 생체분야에서는 생체조직의 탄성특성을 연구하는데 활발하게 활용되고 있으며 재료특성평가분야에서는 부품소자 수준에서 표면부의 탄성특성평가 기술로 발전하고 있다. 이미지 분해능 향상을 위해 종파 외에 횡파를 이용하는 기술과 정밀한 표면파의 속도 측정을 위해서 톤버스트파가 아닌 단펄스를 이용하는 기술이 개발되므로 더욱 신속하고 정밀도가 향상된 표면특성평가가 가능하게 되고 있다.

3. 결론

본 해설 논문은 마이크로/나노 분해능을 가지며 표면관찰이 용이하고 기존의 파괴적인 이미지 분석법으로 불가능한 표면적하의 결함을 관찰하는 것이 가능한 음향특성을 이용한 마이크로/나노 비파괴평가 기술에 대해 소개하였다. 이러한 기술로써 초음파원자현미경과 초음파현미경의 원리와 특

징 그리고 응용분야에 대해서 소개하였다. 이들 기술은 표면과 표면적하의 이미지 관찰 외에도 이들은 음향특성을 측정하여 마이크로/나노 구조물 혹은 표면에서의 기계적인 물성평가가 가능한 기술이므로 기계, 정보통신, 바이오, 에너지, 항공우주 등의 첨단산업 분야에서 마이크로/나노와 박막 기술에 적극 응용되는 것이 가능할 것이며 이들을 조작하고 분석하는 마이크로/나노 기술로의 개발이 기대된다. 또한, 향후 비파괴분야에 적용 가능한 기술의 자체 개발과 그 활용이 가능할 것으로 기대된다.

Acknowledgment

This study was financially supported by Seoul National University of Science & Technology.

참고문헌

- [1] V. Natarajan, "Micro and nano science and technology: naval perspective," Science Spectrum 2009, Defence Research & Development Organization, Ministry of Defence, India, pp. 237-244 (2009)
- [2] A. Bonaccorsi and Grid Thoma, "Institutional complementarity and inventive performance in nano science and technology," *Research Policy*, Vol. 36, pp. 813-831 (2007)
- [3] M. Kautt, S. T. Walsh and K. Bittner, "Global distribution of micro-nano technology and fabrication centers: A portfolio analysis approach," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 74, No. 9, pp. 1697-1717 (2007)
- [4] B. Wunderle and B. Michel, "Progress in reliability research in the micro and nano region," *Microelectronics Reliability*, Vol. 46, pp. 1685-1694 (2006)
- [5] R. J. Cherry, "New Techniques of Optical Microscopy and Microspectroscopy," CRC Press, Florida, USA (1991)
- [6] P. H. Hart, "Hydrogen cracking - its causes, costs and future occurrence," *Proceeding of 1st International Conference on Weld Metal*

- Hydrogen Cracking in Pipeline Girth Welds*, Wollongong, Australia (1999)
- [7] C. Sheppard, "Confocal Laser Scanning Microscopy," 1st Ed. Springer, New York, UAS (1997)
- [8] S. R. Kothapalli and L. V. Wang, "Ultrasound-modulated optical microscopy," *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 13, 054046 (2008)
- [9] S. Sakadzic and L. V. Wang, "High-resolution ultrasound-modulated optical tomography in biological tissues," *Optics Letters*, Vol. 29, pp. 2770-2772 (2004)
- [10] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, P. Echlin, D. C. Joy, C. E. Lyman, E. Lifshin, L. Sawyer and J. R. Michael, "Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis," 3rd Ed. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, USA (2003)
- [11] D. C. Joy, "Scanning electron microscopy for materials characterization," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 2, pp. 465-468 (1997)
- [12] A. J. Schwartz, M. Kumar, B. L. Adams and D. P. Field, "Electron Backscatter Diffraction in Materials Science," 2nd Ed. Springer, New York, USA (2009)
- [13] D. B. Williams and C. B. Carter, "Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science," 1st Ed. Springer, New York, USA (2004)
- [14] D. Bonnell, "Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications," 2nd Ed. Wiley-VCH, New York, USA (2000)
- [15] B. T. Khuri-Yakub, "Scanning acoustic microscopy," *Ultrasonics*, Vol. 31, No. 5, pp. 361-372 (1993)
- [16] A. Kamanyi, W. Ngwa, T. Betz, R. Wannemacher and W. Grill, "Combined phase-sensitive acoustic microscopy and confocal laser scanning microscopy," *Ultrasonics*, Vol. 44, pp. 1295-1300 (2006)
- [17] U. Rabe, S. Amelio, E. Kester, V. Scherer, S. Hirsekorn and W. Arnold, "Quantitative determination of contact stiffness using atomic force acoustic microscopy," *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 430-437 (2000)
- [18] S. Amelio, A. V. Goldade, U. Rabe, V. Scherer, B. Bhushan and W. Arnold, "Measurements of elastic properties of ultra-thin diamond-like carbon coatings using atomic force acoustic microscopy," *Thin Solid Films*, Vol. 392, No. 1, pp. 75-84 (2001)
- [19] P. Goudeau, P. O. Renault, P. Villain, C. Coupeau, V. Pelosin, B. Boubeker, K. F. Badawi, D. Thiaudière and M. Gailhanou, "Characterization of thin film elastic properties using X-ray diffraction and mechanical methods: application to polycrystalline stainless steel," *Thin Solid Films*, Vol. 398-399, pp. 496-500 (2001)
- [20] H. Y. Chen, J. H. Chen and F. H. Lu, "Evaluation of Poisson's ratio and Young's modulus of nitride films by combining grazing incidence X-ray diffraction and laser curvature techniques," *Thin Solid Films*, Vol. 516, pp. 345-348 (2007)
- [21] V. V. Sumin, I. V. Papushkin, R. N. Vasin, A. M. Venter and A. M. Balagurov, "Determination of the residual stress tensor in textured zirconium alloy by neutron diffraction," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 421, pp. 64-72 (2012)
- [22] M. Salmeron, G. Nuebauer, A. Folch, M. Tomitori, D. F. Ogletree and P. Sautet, "Viscoelastic and electrical properties of self-assembled monolayers on gold (111) films," *Langmuir*, Vol. 9, pp. 3600-3611 (1993)
- [23] S. N. Magonov, V. Elings and M. H. Whangbo, "Phase imaging and stiffness in tapping-mode atomic force microscopy," *Surface Science Letters*, Vol. 375, pp. L385-L391, (1997)
- [24] C. Miyasaka, B. R. Tittmann, T. Adachi and A. Yamaji, "Theoretical approach to contrast mechanism for UAFM," PVP-2002, ASME

- conference, Vol. 450, pp. 63-67 (2002)
- [25] Y. Martin, C. C. Williams, and H. K. Wickramasinghe, "Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale," *Journal of Applied Physics*, Vol. 61, pp. 4723-4729 (1987)
- [26] K. Yamanaka and S. Nakano, "Ultrasonic atomic force microscope with overtone excitation of cantilever," *Japanese Journal of Physics*, Vol. 35, pp. 3787-3792 (1996)
- [27] K. Yamanaka and S. Nakano, "Quantitative elasticity evaluation by contact resonance in an atomic force microscope," *Applied Physics A*, Vol. 66, 313-317 (1998)
- [28] C. J. Druffner and S. Sathish, "Atomic force and ultrasonic force microscopic investigation of laser-treated ceramic head sliders," *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 86, pp. 2122-2128 (2003)
- [29] J. T. Zeng, K. Y. Zhao, H. R. Zeng, H. Z. Song, L. Y. Zheng, G. R. Li and Q. R. Yin, "Subsurface defect of amorphous carbon film imaged by near field acoustic microscopy," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 91, No. 2, pp. 261-265 (2008)
- [30] M. Muraoka, "Sensitivity-enhanced atomic force acoustic microscopy with concentrated-mass cantilevers," *Nanotechnology*, Vol. 16, pp. 542-550 (2005)
- [31] K. Yamanaka and S. Nakano, "Quantitative elasticity evaluation by contact resonance in an atomic force microscope," *Applied Physics A*, Vol. 66, pp. 313-317 (1998)
- [32] Y. Gaillard, E. Jiménez-Piqué, F. Soldera, F. Mucklich and M. Anglada, "Quantification of hydrothermal degradation in zirconia by nanoindentation," *Acta Materialia*, Vol. 56, pp. 4206-4216 (2008)
- [33] S. Parthasarathi, B. R. Tittmann and R. J. Ianno, "Quantitative acoustic microscopy for characterization of the interface strength of diamond-like carbon thin films," *Thin Solid Films*, Vol. 300, pp. 42-50 (1997)
- [34] J. M. R. Weaver, M. G. Somekh, A. D. Briggs, S. D. Peck and C. Ilett, "Applications of the scanning reflection acoustic microscope to the study of materials science," *IEEE Transactions on Sonics Ultrasonics*, Vol. SU-32, No. 2, pp. 302-312 (1985)
- [35] H. S. Ju and B. R. Tittmann, "Recent advances in scanning acoustic microscopy for adhesion evaluation on thin films," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 6, pp. 534-549 (2009)
- [36] C. S. Kim, Y. K. Kim, I. K. Park and S. I. Kwun, "Characterization of residual stress in shot peened Al 7075 alloy using surface acoustic wave," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 26, No. 5, pp. 291-296 (2006)
- [37] C. S. Kim, D. S. Cho and I. K. Park, "Ultrasonic characterization of residual stress in shot peened Al 7075 alloy using acoustic signature," *Key Engineering Materials*, Vol. 321-323, pp. 1475-1478 (2006)
- [38] J. Kushibiki and N. Chubachi, "Material characterization by line-focus-beam acoustic microscope," *IEEE Transactions and Ultrasonics*, Vol. 32, No. 2, pp. 189-212 (1985)
- [39] C. S. Kim, I. K. Park, K. Y. Jhang and C. Miyasaka, "Determination of elastic modulus of equal-channel-angular-pressed aluminum 5052 alloy by acoustic material signature," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 2, pp. 146-154 (2010)
- [40] P. V. Zainin, M. H. Manghnani, S. Berezina, B. Koehler, D. Fei and D. A. Rebinsky, "The FIB/SEM technique, atomic force microscopy and acoustic microscopy for detection of subsurface defects in thin DLC coatings," *Microscopy and Microanalysis*, Vol. 11, pp. 668-669 (2005)
- [41] E. C. Weiss, P. Anastasiadis, G. Pilarczyk, R. M. Lenor and P. V. Zinin, "Mechanical properties of single cells by high-frequency time-resolved acoustic microscopy," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics,*

- and Frequency Control*, Vol. 54, pp. 2257-2271 (2007)
- [42] E. C. Weiss, R. M. Lemor, G. Pilarczyk, P. Anastasiadis and P. V. Zinin, "Imaging of focal contacts of chicken heart muscle cells by high-frequency acoustic microscopy," *Ultrasound in Medicine & Biology*, Vol. 33, pp. 1320-1326 (2007)
- [43] L. Robert, N. Brunet, T. Flaherty, T. Randles, E. Matthaei-Schulz, H. Vettters, D. Rats and V. V. Stebut, "Characterisation of TiN and carbon-doped chromium thin film coatings by acoustic microscopy," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 116-119, pp. 327-334 (1999)