

초음파 원자 현미경을 이용한 재료 표면의 탄성 이미지화

Elastic Imaging of Material Surface by Ultrasonic Atomic Force Microscopy

김정석*†, 박태성*, 박익근*, 이승석**, 이창준***

C. S. Kim*†, Tae-Sung Park*, Ik-Keun Park*, Seung Seok Lee** and C. J. Lee***

초 록 본 연구에서는 나노 표면층의 특성 평가를 위해 원자현미경에 초음파 특성을 결합하여 초음파 원자 현미경을 개발하였다. 초음파 원자 현미경은 기존의 나노 표면층에 대한 토포그래프 이미지뿐만 아니라 국부적인 이종부분으로 이루어진 표면에서의 물리적 특성차이에 의한 표면의 탄성 특성 이미지를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 프로토타입의 UAFM 장치를 구성하고 이를 몇몇 응용분야에 적용하였다. 구축한 프로토타입의 UAFM 시스템을 이용하여 증착 실리콘 박막층과 냉간 압조용 강의 구상화 그리고 탄소 섬유 강화 복합 재료의 표면에 대한 탄성 이미지를 성공적으로 얻을 수 있었다.

주요용어: 나노 표면, 특성 평가, 원자 현미경, 초음파 원자 현미경, 토포그래피

Abstract The ultrasonic atomic force microscope(UAFM) has been developed in order to enhance the characterization technology for nano-scale surface combining ultrasonic property to atomic force microscope. This UAFM technique enables elasticity imaging due to the physical properties on the heterogeneous surface in addition to the novel topography of surface height in the nano-surface layer. In this study, the prototype UAFM system was constructed and applied to several materials, silicon deposited wafer, spherodized cold heading steel, and carbon fiber reinforced plastic specimen. Clear elastic contrast was successfully obtained using this developed prototype UAFM.

Keywords: Nano-Surface, Characterization, Atomic Force Microscopy, Ultrasonic Atomic Force Microscopy, Topography

1. 서 론

기계, 정보통신, 바이오, 에너지, 항공우주 등의 첨단산업 분야에서 마이크로, 나노, 박막기술은 이들 산업의 중추적인 역할을 하는 가장 중요한 핵심 요소가 되었고 이들의 발전 속도는 그 어느 때 보다 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 수 많은 현미경 분석 기술이 개발되어왔고 현재 이들 또한 지속적인 발전을 위해 부단한 노력을 기울이고 있는 실정이다. 대표적인 소재의 표면을 분석 할 수 있는 현미경 분석으로는 잘 알려진 것이 전자현미경분석법(즉, SEM, TEM, AES, SIMS, 등)이다. 하지만 이들은 시험편을 준비하고 관찰하는데 많은 시간과 경비가 소요되는 물론이고 공간과 환경적인

제약이 크다고 하겠다. 이와 같이 비록 수 나노 크기 분해능의 정밀성 있는 분석을 할 수는 있지만 상당히 국부적인 관찰범위(나노 혹은 마이크로 크기)로 소재의 미시적인 특성평가에 제한적으로 응용될 뿐이다. 특히 이들은 초고진공상태 ($10^6 \sim 10^9$ torr)에서만 조작이 가능하므로 실제적으로 그 응용범위를 넓히기 위해선 제품수준의 광범위한 영역과 공기 혹은 수중에서의 분석기술이 절실하다고 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결한 것으로 1980년대 혁신적인 기술이 개발되었다. 기존의 전자현미경법과는 많은 차이는 있지만 공기 중에서 나노 수준의 분해능을 갖고 표면을 관찰할 수 있는 주사탐침현미경(SPM, scanning probe microscopy)이 개발되었다[1-8]. 이후 많은 분야에 적용되어 현재는 나노 및 박막기술에 큰 기여를 하고 있는 실정이다. 하지만 이들 또한 보다 정밀한 분석이 요구되고 있으며 이미지 분석뿐만 아니라 표면에서의 기계적 물성까지도 요구되고 있다. 현재 나노와 박막소재의 경우 X-선, 혹은 중성자회절을 이용하여 표면의 기계적 물성 측정이 가능하지만 시료, 환경, 측정법 등 많은 분석 조건의 어려움으로 신뢰성과 나노 크기 분해능의 정밀성을 향상시키는 데는 상당한 어려움을 안고 있다. 따라서 표면분석을 위한 표면 이미지 관찰외에 표면에서의 나노 크기 분해능의 정밀도 높은 기계적 물성 평가기술이 요구되고 있다. 이들의 모든 문제점을 해결할 수 있는 방법이 초음파원자현미경이라 할 수 있다[9-12]. 이는 기본적으로 원자현미경(AFM, atomic force microscopy)에 초음파특성을 접목한 것으로 소재의 표면이미지뿐만 아니라 표면의 탄성특성을 측정할 수 있는 획기적인 분석기술이라 할 수 있다. 이들은 기본적인 원자현미경에 고주파수로 캔틸레버 혹은 시료를 여기시켜 팁과 시료의 상호작용을 통해 시료의 탄성률을 정밀도 높게 측정하고 이를 이미지화 하는 분석기술이다. 현재 그리고 앞으로의 과학기술뿐만 아니라 산업발전은 나노 및 박막기술의 뒷받침 없이는 불가능한 실정이 되었다. 이들 기술은 에너지, 반도체와 자기기록장치 산업의 핵심요소기술이기 때문이다. 따라서 이들 기술을 한 차원 높일 수 있는 신뢰성과 정밀도 높은 분석 및 조작 기술이 가능한 원자현미경의 개발이 절실함은 자명한 일이라 하겠다.

그러므로 본 연구에서는 나노수준의 초고 정밀도의 분해능을 갖고, 현장적용이 가능한 표면이미

지 분석기술을 향상시키고 표면부 기계적 물성을 비파괴적으로 평가할 수 있는 초음파원자현미경에 관한 기본 기술과 프로토타입(prototype)으로 구축한 시스템을 소개하며 그 응용에 대해서 소개하고자 한다.

2. UAFM 이미지 원리

캔틸레버가 시편의 표면을 주사하는 동안 캔틸레버 팁은 반데르발스력, 인력적인 모세관력, 그리고 척력의 압입력 등의 다양한 팁-시편간의 상호작용력의 영향을 받게 된다. 따라서 이러한 팁-시편간의 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-시편간의 상호작용은 캔틸레버의 공진주파수를 새로운 공진주파수 ω_{eff} 로 변화시킨다. 상호작용하는 캔틸레버의 진폭 $A_i(\omega)$ 는 $\sigma > 0$ 인 경우에 자유캔틸레버의 진폭 $A_f(\omega)$ 의 피크를 보다 높은 주파수 ($\omega_{eff} > 0$)로 이동시켜 얻게 된다. 그리고, $\sigma < 0$ 인 경우에 보다 낮은 주파수($\omega_{eff} < 0$)로 이동시켜 얻는다. 그러므로, ω_0 에서 측정할 경우, 진폭의 변화는 $\Delta A(\omega_0) = A_i(\omega_0) - A_f(\omega_0)$ 이고 다음 식과 같다[13].

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

여기서 A_0 는 구동진폭, Q 는 양질계수(quality factor), ω_0 는 공진주파수이다. 이상의 근사관계는 만일 $Q\sigma$ 값이 k 보다 더 작으면 유지된다. 그러므로 진폭변화 $\Delta A(\omega_0)$ 는 k_{eff} 와 k 간의 차이, 즉 $\sigma = k - k_{eff}$ 가 증가함에 따라서 증가하게 된다. 피드백 기구는 높은 진폭의 진동이 있는 표면영역이 표면높이 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-시편간의 상호작용력에 의해 나타나는 현상이다. 자유캔틸레버의 위상각 $\phi_f(\omega)$ 은 ω_0 에서 변곡점을 갖는 점진적으로 증가하는 ω 함수이다. 상호작용하는 캔틸레버의 위상각 $\phi_i(\omega)$ 은 변곡점이 ω_{eff} 인 것을 제외하고는 $\phi_f(\omega)$ 로 동일하다. 그러므로, ω_0 에서 측정했을 때 위상이동 $\Delta\phi(\omega_0) = \phi_i(\omega_0) - \phi_f(\omega_0)$ 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[14].

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

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

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. 1(a)와 (b)는 UAFM의 작동모드로 각각 힘변조 모드와 위상검출 모드를 설명하고 있다. 다음은 두 모드에 대한 이미지원리를 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 편향신호를 팁과 시편간에 일정한 힘을 유지하는데 사용한다. 게다가, 시편 혹은 캔틸레버의 진동으로 팁과 시편과의 접촉시 상호작용력에 따라서 캔틸레버의 변조진폭의 변화가 생기며 이 신호를 얻게 된다. 일반적으로 진동 주파수는 수백 킬로헤르츠 정도이고, 이는 Z 피드백 루프보다도 훨씬 빠르다. 그러므로, 국부적인 진동으로 야기되는 신호는 미비하고 결국 표면 높낮이 정보는 이들과 구별되게 된다. 그리고 위상검출현미경의 경우, 시편 혹은 캔틸

레버에 구동된 신호간에 위상지연을 모니터링 하는 것이다. 위상지연의 변화는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 시편의 표면에서 국부적인 기계적물성의 차이로 인해서 나타나는 것이다[15,16].

3. UAFM 장비구성

다음의 Fig. 2는 본 연구에서 구축한 프로토타입의 UAFM 시스템의 모식도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 기본구성은 원자현미경(모식도의 우측부분, 파란색 점선부분)을 기반으로 초음파의 가진과 신호처리부(모식도의 좌측부분, 빨간색 점선부분)로 구성된다. 상용 AFM은 시편의 표면 높낮이를 이미지화하고 정적 캔틸레버력을 조절하기 위해 사용하였다. 기본적으로 AFM은 헤드와 스캐너, 컨트롤러 제어부로 구성된다. 헤드부에는 캔틸레버에 맞은 레이저가 광학 빔-변위 센서에 정렬되도록 되어있고 광학센서에 들어온 신호가 캔틸레버의 휨정도를 나타내게 된다. 이로부터 시편 표면의 높낮이 이미지를 얻게 된다. 외부의 주파수 발생기를 이용하여 시편 저면에 부착된 압전재료를 진동시키거나 캔틸레버의 배면에 부착한 압전재료를 진동시키도록 함수발생기(HP 33120A)를 사용하였다. 부착된 압전재료는 종파 초음파를 발생시켜 캔틸레버 혹은 시편 표면에 면외 진동을 야기시키게 된다.

이러한 표면진동은 센서팁을 통하여 캔틸레버로 전달된다. 캔틸레버 진동의 진폭변화는 AFM의 광학 빔-변위 센서로부터 락-인 증폭기를 통하여 측정된다. 락-인 증폭기는 진폭 변조된 일정 주파수에서 초음파진동으로 유도된 캔틸레버의 변위정도를 측정하는 것이 가능하다. 캔틸레버로는 피라미드형태의 스프링상수 0.06 Nm^{-1} 의 질화 실리콘 팁(높이: $10 \mu\text{m}$, 반경: 10 nm)을 사용하였다. 이렇게

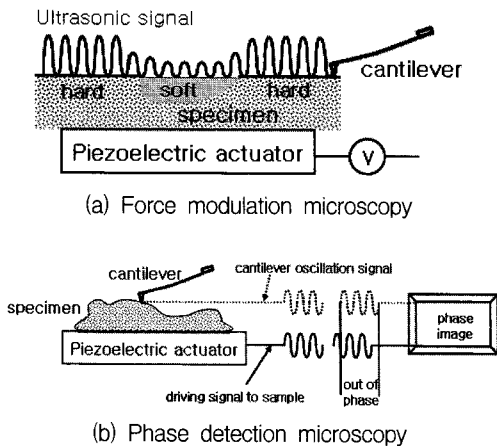


Fig. 1 Image principles of UAFM: force modulation microscopy and phase detection microscopy

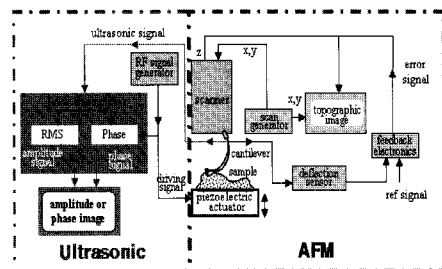


Fig. 2 Schematic diagram of prototype UAFM; combining novel AFM(blue dotted line) and ultrasonic property(red dotted line)

하여 고주파수의 구동이 가능해지고 구동주파수는 대략 0.1^{10} MHz가 된다. 가진주파수가 캔틸레버의 공명주파수에 근접할 때, 캔틸레버 진동의 검출 진폭이 증가하고 접촉공명주파수를 결정할 수 있다. 이렇게 결정되어진 접촉공명주파수를 가진하여 시편의 표면을 주사하여 변조된 신호를 수신하게 된다.

4. 응용

본 연구에서 구성한 프로토타입의 UAFM 시스템을 이용하여 다음과 같은 다양한 조건의 시험을 수행하였다. 먼저, Fig. 3은 증착된 실리콘 웨이퍼의 표면이미지를 나타내었다. 각각의 표면높이, 진폭과 위상이미지와 그림내에 선형스캔 데이터를 동시에 나타내었다. 이미지 상에서 $2\ \mu\text{m}$ 간격으로 $1 \times 1\ \mu\text{m}$ 크기의 표면 굴곡을 세 이미지에서 정확하게 관찰할 수 있다. 그리고 진폭 이미지에선 굴곡진 부분의 경계부를 명확하게 관찰할 수 있도록 3차원적인 구분이 가능하게 되어 보다 정확한 이미지를 얻을 수 있었다. 표면 높이 이미지에서 이미 구분이 가능하지만 진폭이미지에서 관찰되는 것처럼 $11\ \mu\text{m}$ 크기의 표면 굴곡은 움푹 들어간 형상임을 이미지상에서 관찰이 가능하였다.

냉간압조용 강(cold heading steel)은 자동차 및 산업기계용 볼트, 너트로 널리 사용되는 소재로써 가공성을 높이기 위해 가공전 구상화 열처리를 실시한다.

구상화 열처리의 목적은 라멜라 세멘타이트를 구형화시키며, 또한 구형의 세멘타이트 입자를 균질하게 분포시킴으로써 냉간 가공성 및 절삭성을 향상시키기 위한 것이다. 또한 구상화 열처리를 통해 재료의 경도를 낮추어 줌으로써 냉간 가공시 장비의 수명을 연장시키는 두 가지 목적을 지니고 있다. 본 연구에서는 실제 구상화 열처리 공정에서 사용되고 있는 SWRCH45F를 선택하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 항온 장시간 열처리한 구상화열처리시편을 주사전자현미경과 AFM 및 266 kHz의 1차 공명주파수를 이용하여 UAFM으로 관찰한 결과이다.

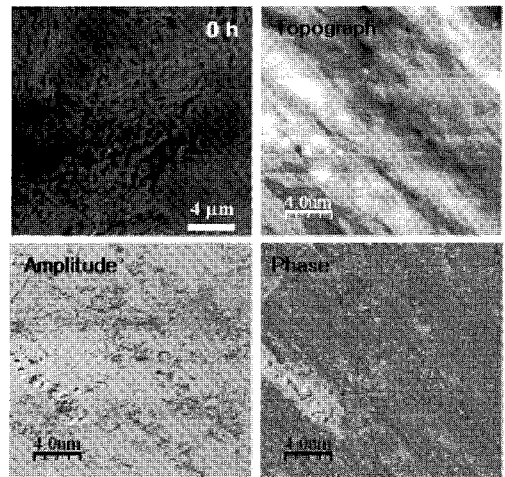


Fig. 4 SEM, AFM and UAFM images of 0 h spheroidized SWRCH45F steel. The 1st resonance frequency is 266 kHz

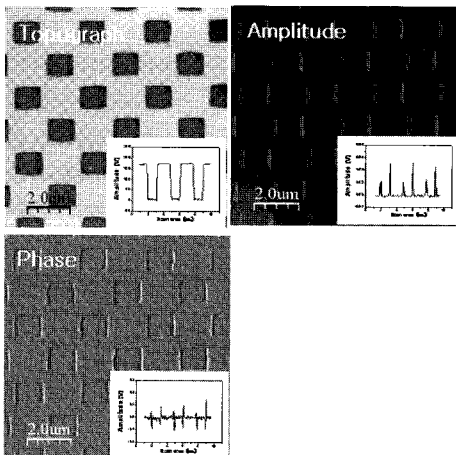


Fig. 3 Topograph, amplitude, phase images of silicon wafer observed by AFM and UAFM. The 1st resonance frequency is 119 kHz

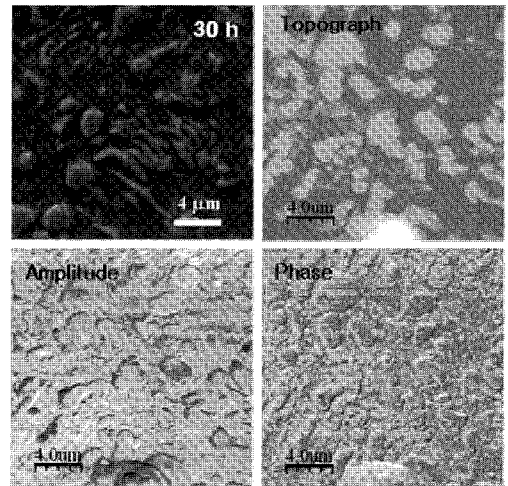


Fig. 5 SEM, AFM and UAFM images of 30 h spheroidized SWRCH45F steel. The 1st resonance frequency is 266 kHz

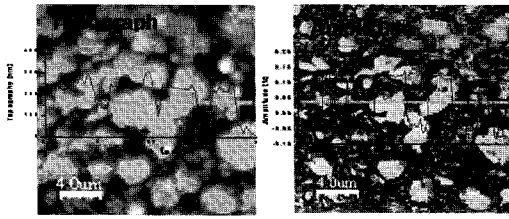


Fig. 6 Line scan of 30H spheroidized SWRCH45F steel using AFM and UAFM

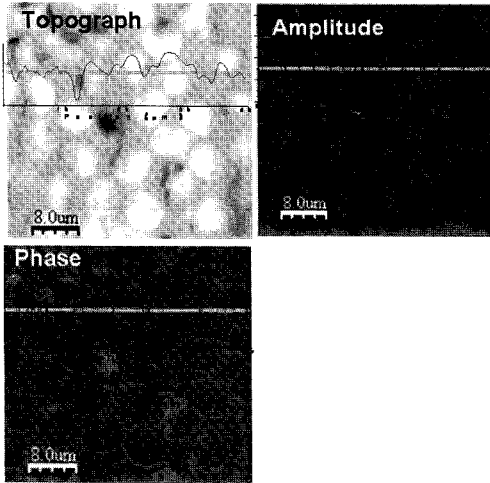


Fig. 7 AFM and UAFM images of carbon fiber reinforced plastic. The 1st resonance frequency is 267 kHz

30시간의 열처리후 초기 시멘타이트의 분절과 성장에 의한 조대화된 수 마이크로미터 크기의 구형 시멘타이트를 관찰할 수 있다. 초기 구상화 열처리를 하기전과 30시간의 구상화 열처리후의 결과는 이상의 주사전자현미경 관찰 결과와 유사하게 구상화 흑연을 명확하게 관찰할 수 있다. 열처리전에는 층상 라멜라 구조로 직선적으로 배열된 미세한 시멘타이트상이 층상으로 균일하게 배열된 것을 관찰할 수 있다.

30시간의 구상화 열처리후 이러한 층상을 형성하던 시멘타이트는 분절과 성장을 하여 수 마이크로 크기로 조대화되고 구형화된 모습을 볼 수 있고 평면적인 AFM의 표면 높이 이미지와는 다르게 UAFM의 진폭과 위상 이미지에서는 그 경계가 명확한 높은 콘트라스트 이미지를 얻을 수 있었다. Fig. 6은 구상화 시편에 대한 UAFM 이미지와 라인스캔한 결과를 나타내었다. 표면높이 이미지의 밝은 색은 구상화 흑연을 나타내고 보다 어두운 부분은 기지부임을 관찰하였다. 라인스캔의 표면높이 결과에서 표면 높낮이의 차이는 시편을 준비하는 자동

진동연마 과정중 생성된 표면높이 차이로 생각된다. 즉, 구상화 흑연부는 기지부보다도 높은 강성을 갖는 강한 부분으로 동일한 조건으로 연마를 할지라도 연마되는 정도가 다르기 때문에 구상화 흑연부보다 더 용이하게 연마되는 기지부는 더 깊게 연마가 되어 표면 굴곡이 나타나는 것으로 판단된다. 하지만 UAFM 진폭이미지와 라인스캔에서는 이러한 표면 높낮이 결과와는 다르게 구상화 흑연 부분과 기지부의 진폭차이가 명확한 것을 볼 수 있다. 이는 이미지 원리에서 설명한 바와 같이 팁-시편간의 상호작용력으로 인한 캔틸레버의 유효강성계수의 변화에 기인하는 것이다. 본 시편은 등은 구상화 열처리를 수행하여 구상화 흑연을 생성시키고 조대화시킨 냉간 압조용강으로 시편을 준비하는 표면 연마 과정에서 기지부보다도 더욱 경한 구상화된 흑연부분이 연마가 덜 되고 돌출하므로써 표면높이 데이터 상에서 구상화 흑연부가 기지부보다도 더 높게 나타난 것이다. 표면 높이 이미지와는 크게 향상된 이미지를 UAFM의 진폭이미지에서 관찰하였다. 이상의 구상화 흑연부분과 기지부가 명확하게 구분되는 높은 콘트라스트를 나타내었고 특히, 라인스캔한 진폭 데이터 상에서 구상화 흑연부의 진폭이 기지부보다도 높게 나타난 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRP) 복합재료의 강화재와 기지부 관찰 결과를 나타내었다. 탄소 섬유 강화재의 크기는 직경 7 μm이고 탄성계수는 230 GPa, 그리고 기지부인 에폭시 합성수지의 탄성계수는 3 GPa이다. 따라서 이렇게 큰 탄성특성의 차이로 인해서 표면높이 이미지보다 높은 콘트라스트의 차이를 갖는 이미지를 얻게 되었으며 이는 국부적인 탄성특성의 차이에 기인하는 것으로 구상화 흑연 관찰 결과와 같이 본 연구가 목표로 하는 향상된 표면 이미지분석법과 재료표면의 비파괴적인 물리적 특성 평가법에 상응하는 결과라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 나노수준의 초고 정밀도의 분해능을 갖고, 현장적용이 가능한 비파괴적인 표면이미지 분석기술을 향상시키고 표면부 기계적 물성을 평가할 수 있는 첨단 초음파원자현미경을 개발하고자 하였다. 이를 위해 기본적으로 상용 원자현미경에 초음파 특성을 결합하고자 하였으며 캔틸레버와 시

편부에 초음파를 진동시키고 캔틸레버의 변조신호를 수신할 수 있는 프로토타입의 UAFM 시스템을 성공적으로 구축하였다. 구축된 시스템의 응용성을 위해서 몇몇 조건의 시편을 이용하여 원자현미경의 표면 높이 이미지의 차이를 살펴보고 각각의 시료 표면에 대한 탄성 이미지를 성공적으로 얻을 수 있었다. 따라서 이를 이용한 표면에서의 탄성특성 이미지외에 나노 박막층의 물리적 특성에 대한 비파괴적인 측정도 가능할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2008-03516).

참고문헌

- [1] G. Binnig, C. F. Quate and Ch. Gerber, "Atomic force microscope," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 56, pp. 930-933, (1986)
- [2] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel, "Tunneling through a controllable vacuum gap," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 40, pp. 178-180, (1982)
- [3] F. Ohnesorge and G. Binnig, "True atomic resolution by atomic force microscopy through repulsive and attractive forces," *Science*, Vol. 260, pp. 1451-1456, (1993)
- [4] I. L. Singer, "Friction and energy dissipation at the atomic scale: A review," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 12, pp. 2605-2616 (1994)
- [5] A. A. Tseng, A. Notargiacomo, and T. P. Chen, "Nanofabrication by scanning probe microscope lithography: A review," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 23, pp. 877-894, (2005)
- [6] S. H. Wang, G. Xu and S. L. Tan, "Development of a metrological atomic force microscope for nano-scale standards calibration," *Proc. of SPIE* Vol. 7155, pp. 71550I-1- 71550I-8, (2008)
- [7] H.-J. Butt, B. Cappella and M. Kappl, "Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications," *Surf. Sci. Rep.*, Vol. 59, pp. 1-152, (2005)
- [8] J. H. Kim and K.-B. Song, "Recent progress of nano-technology with NSOM," *Micron*, Vol. 38, pp. 409-426, (2007)
- [9] E. Chilla, T. Hesjedahl and H-J Frohlich, "Nanoscale determination of phase velocity by scanning acoustic force microscopy," *Phys. Rev. B*, Vol. 55, pp. 15852-15855, (1997)
- [10] U. Rabe and W. Arnold, "Acoustic microscopy by atomic force microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, pp. 1493-1495, (1994)
- [11] K. Yamanaka and S. Nakano, "Ultrasonic atomic force microscope with overtone excitation of cantilever," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 3787-3792, (1996)
- [12] W. Rohrbeck and E. Chilla, "Detection of surface acoustic waves by scanning force microscopy," *Phys. Stat. Sol. (a)*, Vol. 131, pp. 69-71, (1992)
- [13] 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)
- [14] S. N. Magonov, V. Elings and M. -H, Whangbo, "Phase imaging and stiffness in tapping-mode atomic force microscopy," *Surf. Sci. Lett.*, Vol. 375, pp. L385-L391, (1997)
- [15] C. Miyasaka, B. R. Tittmann, T. Adachi and A. Yamaji, "Theoretical approach to contrast mechanism for UAFM," *PVP-2002, ASME conf.*, Vol. 450, pp. 63-67, (2002)
- [16] Y. Martin, C. C. Williams, and H. K. Wickramasinghe, "Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale," *J. Appl. Phys.*, Vol. 61, pp. 4723-4729, (1987)