

## 초음파원자현미경 캔틸레버의 동특성 해석과 탄성특성 평가

### Evaluation of Elastic Properties and Analysis of Contact Resonance Frequency of Cantilever for Ultrasonic AFM

박태성\*, 광동열\*, 박익근\*<sup>†</sup>, 김정석\*\*, 장경영\*\*\*

Tae Sung Park\*, Dong Ryul Kwak\*, Ik Keun Park\*<sup>†</sup>, Chung Seok Kim\*\*  
 and Kyung-Young Jhang\*\*\*

초 록 본 연구에서는 초음파원자현미경을 이용하여 비파괴적인 표면탄성이미지 분석과 나노표면에서의 기계적 물성 평가를 연구하였다. 이를 위해 접촉역학 특성에 따른 캔틸레버의 공진주파수 변화를 이론적으로 해석하고 실험적으로 측정하였다. 스프링-질량 모델과 Herzian 이론을 이용하여 계산한 이론적인 접촉공진주파수는 초음파원자현미경 캔틸레버의 실험적인 접촉 공진주파수의 변화와 매우 유사하였다. 결과적으로, 초음파원자현미경의 표면 높이 이미지와 진폭이미지를 성공적으로 얻을 수 있었고 진폭신호를 통하여 시료 표면에서의 탄성특성을 정성적으로 평가하였다.

주요용어: 초음파원자현미경, 나노표면, 접촉공진주파수

**Abstract** Nondestructive surface imaging of elastic characteristic and mechanical property has been studied on nanoscale surface with ultrasonic AFM. Resonance frequency variation of cantilever is theoretically analyzed with respect to contact mechanics as well as experimentally measured. The contact resonance frequency is calculated theoretically using the spring-mass and Herzian model in accordance with the resonance frequency of UAFM cantilever measured experimentally. Consequently, the topography and amplitude images could be obtained successfully and the elastic characteristic at the nanoscale surface was evaluated qualitatively by amplitude signals.

**Keywords:** Ultrasonic Atomic Force Microscopy, Elastic Properties, Contact Resonance Frequency

#### 1. 서 론

부품과 소재가 점점 마이크로 및 나노 크기로 소형화됨에 따라 이들 부품에 대한 신뢰성 평가 기술에 대한 관심이 급증하고 있다. 그러나 현재 이들 부품에 대한 평가는 대부분 설계 단계에서 이루어지는 현미경 분석 및 나노 인텐테이션법을 이용한 파괴적인 평가만이 이루어지고 있는 실정이다. 기존의 높은 정밀도를 갖는 인장, 굽힘, 피로 등의 거시적이고 파괴적인 평가법을 직접적으

로 소형화 되어가는 부품과 소재에 응용이 불가능하므로 이들을 조작하고 분석하는 기술이 현재 필수불가결한 과제가 되고 있다. 물론 오랫동안 소재산업의 경우 분석을 위한 수많은 현미경 분석 기술이 개발되어왔고 현재 이들 또한 지속적인 발전을 위해 부단한 노력을 기울이고 있는 실정이다. 이들의 대부분은 표면에 대한 형태학적인 이미지 분석과 금속학적인 상 분석 그리고 화학적분석 등에 국한되고 시료 준비의 어려움과 크기 및 측정환경의 제한성 등으로 부품과 소재

에 대한 정확한 신뢰도를 평가하는데 매우 제한적이라 할 수 있다. 하지만 공기 중에서 나노 수준의 분해능을 갖고 표면을 관찰할 수 있는 주사 탐침현미경(SPM, scanning probe microscopy)은 많은 분야에 적용되어 현재는 나노 및 박막기술에 큰 기여를 하고 있는 실정이다[1-4]. 하지만 이들 또한 보다 정밀한 분석이 요구되고 있으며 이미 분석뿐만 아니라 표면에서의 기계적 물성까지도 요구되고 있다. 현재 나노와 박막소재의 경우 X-선, 혹은 중성자 회절을 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 표면 분석을 위한 표면 이미지 관찰외에 표면에서의 나노단위 분해능의 정밀도 높은 기계적 물성 평가기술이 요구되고 있다. 이들의 문제점을 해결할 수 있는 방법이 초음파원자현미경(UAFM; ultrasonic AFM)이라 할 수 있다[5-7]. 이는 기본적으로 원자현미경(AFM, atomic force microscopy)에 초음파특성을 접목한 것으로 소재의 표면이미지 뿐만 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. 그러므로 본 연구에서는 나노 수준의 초고정밀도의 분해능을 갖고 표면의 탄성특성 분석이 가능한 원자현미경과 초음파특성을 결합한 초음파원자현미경을 이용한 나노 표면에서의 음향특성에 대해 연구하고자 한다. 캔틸레버의 진동 특성을 접촉역학 특성을 고려하여 이론적으로 해석하고 실험적으로 분석하였으며 또한 구상화 열처리한 시편을 이용하여 구상화 흑연과 기지간의 탄성이미지를 평가하고자 하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1. 캔틸레버 진동 특성 해석

캔틸레버 진동에 관한 동력학적인 연구는 초음

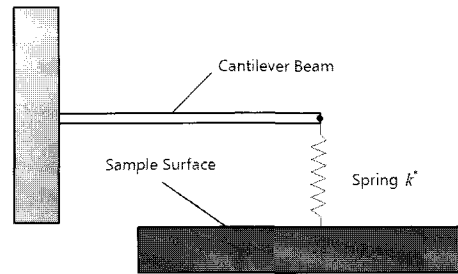


Fig. 1 Schematic diagram of a rectangular cantilever in contact with a sample simulating clamped spring-coupled cantilever

파원자현미경의 이미지 콘트라스트를 이해하는데 매우 중요하다. 캔틸레버는 일반적으로 팁-시편 사이에 작용하는 상호 작용력의 정도에 따라서 상당히 민감한 공진 반응을 나타낸다. 그러므로 일반적으로 1차모드 자유공진은 원자현미경의 이미지화 모드로 이용된다. 고차 모드는 보다 향상되거나 동시 다중신호 측정 즉, 토포그래피(topography) 뿐만 아니라 자기적 혹은 전자기적 이미지화를 동시에 제공하기도 한다. Fig. 1에 기계적인 접촉 진동 모델을 나타내었다. 균일한 단면적을 갖는 빔의 경우, 초기 변형에 대한 응답 변위는  $y(x,t)$ 로 주어지고 횡방향의 진동방정식은 다음과 같은 미분방정식이 된다[8,9].

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서  $E$ 는 캔틸레버의 탄성계수,  $\rho$ 는 밀도,  $A$ 는 단면적, 그리고  $I$ 는 캔틸레버 빔의 관성 모멘트이다.  $y(x)$ 는 길이  $x$ 에서 평균 위치로부터의 빔의 횡방향 변위,  $\partial y / \partial x$ 는 기울기,  $EI \partial^2 y / \partial x^2$ 는 굽힘 모멘트이고  $EI \partial^3 y / \partial x^3$ 는  $x$ 에서의 전단력이다. 캔틸레버가 시험편 표면에 접근할 때 팁-시험편 간에 상호 작용력이 발생한다. 이 때 팁의 거동은 스프링 모델로 표현할 수 있다. 끝단의 스프링은  $x=l$ 에서 스프링이 연결된 자유단의 모멘트가 없고 또한  $y$ 방향으로  $-k^*y$ 의 힘이 발생되고 전단력  $EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$ 가 고려되어야 한다. 스프링 결합된 시스템의 경계조건은 식(2)와 같다.

$$y=0, \frac{\partial y}{\partial x}=0 \quad (x=0)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}=0, \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}=\frac{3k^*}{kl^3}y(x=l) \quad (2)$$

이상의 경계조건을 이용하여 식(3)과 같은 특성 방정식을 얻을 수 있다. 주파수를 구하기 위해  $\frac{k^*}{k}$ 를 계산하고 특성방정식에 대입하여 진동주파수를 구하게 된다. 여기서  $k$ 는 캔틸레버의 강성계수이며  $k^*$ 는 접촉강성이다.  $n$ 차 모드에 대한 특성방정식은 다음의 식(4)와 식(5)의 Herzian 이론을 사용하여 접촉강성과 접촉탄성 계수  $E^*$ 를 구할 수 있다 여기서  $k_n$ 은 캔틸레버 특성방정식의  $n$ 차 모드에 대한 해를 나타내고 있다[10].

$$\begin{aligned} & \sinh k_n l \cos k_n l - \sin k_n l \cosh k_n l \\ &= \frac{(k_n l)^3 k}{3k^*} (1 + \cos k_n l \cosh k_n l) \end{aligned} \quad (3)$$

$$k^* = \sqrt[3]{6E^* RF_0} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_t^2}{E_t} \quad (5)$$

여기서  $R$ 은 팁 반경,  $F_0$ 는 접촉력,  $E_s$ 는 시험편의 탄성계수,  $E_t$ 는 팁의 탄성계수,  $\nu_s$ 는 시험편의 프아송 비,  $\nu_t$ 는 팁의 프아송 비를 나타낸다.

2.2. 초음파원자현미경의 이미지 원리

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

$$\Delta A(\omega_0) = A_0 \frac{(Q\sigma/k)^2}{1 + (Q\sigma/k)^2} \approx A_0 (Q\sigma/k)^2 \quad (6)$$

여기서  $A_0$ 는 구동진폭,  $Q$ 는 양질계수(quality factor),  $\omega_0$ 는 공진주파수이다. 진폭변화  $A(\omega_0)$ 는  $k_{eff}$ 와  $k$ 간의 차이, 즉  $\sigma = k - k_{eff}$ 가 증가함에 따라서 증가하게 된다. 자유캔틸레버의 위상각  $\phi(\omega)$ 은  $\omega_0$ 에서 변곡점을 갖는 점진적으로 증가하는  $\omega$  함수이다. 상호작용하는 캔틸레버의 위상이동  $\Delta\phi(\omega_0)$ 은 다음과 같다[11].

$$\Delta\phi(\omega_0) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{k}{Q\sigma}\right) \approx \frac{Q\sigma}{k} \quad (7)$$

캔틸레버-시편간의 공진주파수로 가진되어진 초음파신호는 팁-시편간의 탄성적인 상호작용력의 영향으로 인해 진폭과 위상의 변화가 나타나고 이는 식(6)과 식(7)에서 나타난 바와 같이  $\sigma$ 에 크게 의존하게 된다. 그리고  $\sigma \propto E^*$ 이므로 진폭의 변화와 위상의 변화는 모두 접촉으로 인한 팁-시편간이 접촉탄성계수에 의존하게 된다.

Fig. 2는 초음파원자현미경의 작동모드로 각각 힘변조 모드와 위상검출 모드를 설명하고 있다. 다음은 두 모드에 대한 이미지 원리를 설명한 것이다. 먼저 힘변조현미경의 경우, 압전재료는 시편을 진동시키기 위해서 시편의 후면에 부착되어 연속적인 초음파를 발생시키게 된다. 시편의 진동으로 팁과 시편과의 접촉시 상호작용력에 따라서 캔틸레버의 변조 진폭의 변화가 생기며 이 신

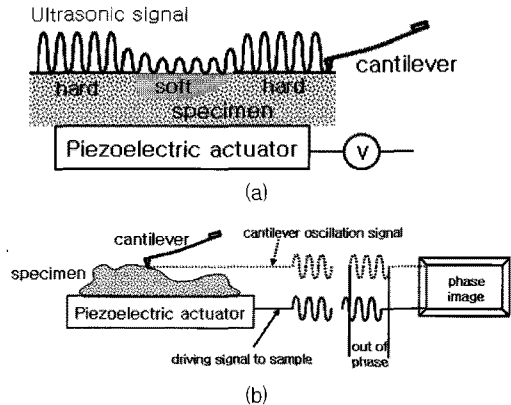


Fig. 2 Image principles of UAFM, (a) Force modulation microscopy, (b) Phase detection microscopy

호를 얻게 된다. 일반적으로 진동 주파수는 수백 kHz 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 캔틸레버에 구동된 신호간에 위상 지연을 모니터링 하는 것이다. 위상지연의 변화는 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 시편의 표면에서 국부적인 기계적물성의 차이로 인해서 나타나는 것이다.

### 3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 구축한 프로토타입의 초음파원자현미경 시스템의 모식도를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 기본 구성은 원자현미경을 기반으로 초음파의 가진과 신호처리부로 구성된다. 상용 원자현미경은 시편의 표면 높낮이를 이미지화하고 정적 캔틸레버력을 조절하기 위해 사용하였다. 기본적으로 원자현미경은 헤드와 스캐너, 컨트롤러 제어부로 구성된다. 헤드부에는 캔틸레버에 맞은 레이저가 광학 빔-변위 센서에 정렬되도록 되어 있고 광학센서에 들어온 신호가 캔틸레버의 휨 정도를 나타내게 된다. 이로부터 시편 표면의 높낮이 이미지를 얻게 된다. 외부의 주파수 발생기를 이용하여 시편 저면에 부착된 압전 재료를 진동시키거나 캔틸레버의 배면에 부착한 압전재료를 진동시키도록 함수발생기를 사용하였다. 부착된 압전재료는 중파 초음파를 발생시켜 캔틸레버 혹은 시편 표면에 면의 진동을 야기시키게 된다. 이러한 표면 진동은 센서팁을 통하여 캔틸레버로 전달된다. 캔틸레버 진동의 진폭변화는 원자현미경의 광학 빔-변위 센서로부터 락-인

증폭기(lock-in Amp.)를 통하여 측정된다. 락-인 증폭기는 진폭 변조된 일정 주파수에서 초음파진동으로 유도된 캔틸레버의 변위정도를 측정하는 것이 가능하다. 구동주파수는 대략 0.1-10 MHz가 된다. 가진 주파수가 캔틸레버의 공진주파수에 근접할 때, 캔틸레버 진동의 검출 진폭이 증가하고 접촉공진주파수를 결정할 수 있다. 이렇게 결정되어진 접촉공진주파수를 가진하여 시편의 표면을 주사하여 변조된 신호를 수신하게 된다[12].

Table 1은 본 연구에 사용된 캔틸레버의 정보를 나타내고 있다. 여기서 T는 두께, W는 폭, L은 길이, k는 스프링 상수를 나타낸다. 모든 캔틸레버는 <100> 방향의 단결정 실리콘 캔틸레버를 사용하였다. 캔틸레버의 공진주파수를 측정하기 위해 캔틸레버를 시험편과 접촉시키지 않은 상태에서 캔틸레버를 가진시켜 캔틸레버의 공진주파수를 측정하였으며 또한 접촉 공진주파수를 측정하기 위해 구리 및 스테인레스 강 시험편에 캔틸레버를 접촉시켜 탄성특성이 다른 재료에 대한 각각의 접촉 공진주파수를 측정하였다.

Table 1 Data of the cantilever made of crystalline silicon used in the experiments

Probe No.	T (um)	W (um)	L (um)	k (N/m)
#1	2.8	23	224	2.0

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4은 캔틸레버의 자유 진동과 시험편에 스프링 결합된 상태일 때의 이론적으로 시뮬레이션한 각 모드의 형상을 나타내고 있다. Fig 4(a)는 캔틸레버가 시험편에 접촉하지 않았을 때 캔틸레버의 모드 형상을 나타내고 Fig 4(b)는 캔틸레버가 구리 시편의 표면에 접촉하였을 때 스프링 모델과 Herzian 접촉역학 이론을 적용한 캔틸레버의 모드 형상을 이론적으로 구하여 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 장비의 주파수 스위프(sweep)의 최대 범위는 600 kHz로 모든 캔틸레버에 대해 600 kHz까지 주파수 스위프를 하여 공진주파수를 측정하였다. Table 2는 수치적으로 계산된 각 캔틸레버의 공진주파수와 실험을 통해 측정된 공진주파수를 비교하여 나타내었다. 결과에서와 같이 캔틸레버의 이론적 값과 실험에 의한

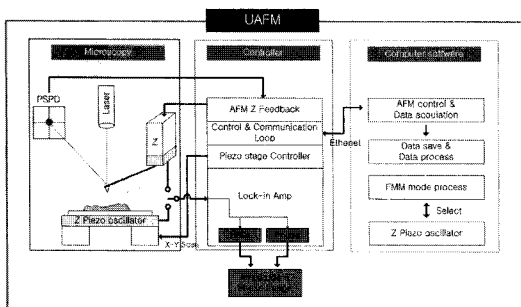


Fig. 3 Schematic diagram of prototype UAFM

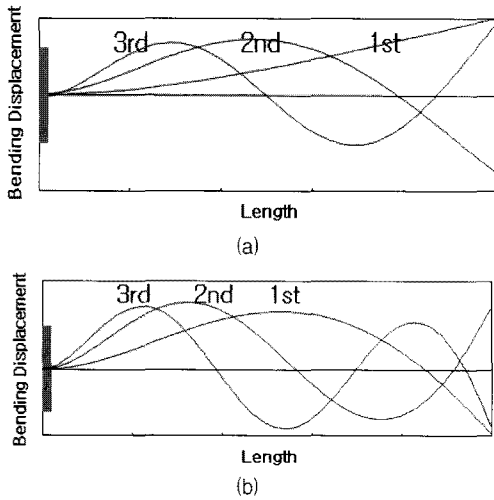


Fig. 4 Theoretically simulated modes of cantilever vibration of mode  $n=1,2,3$  (a) Bending modes of a cantilever in free, (b) Bending modes of a cantilever in contact with a surface

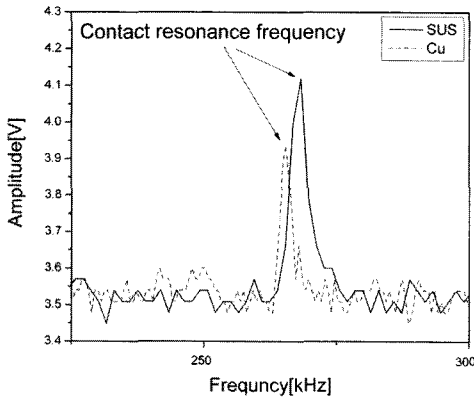


Fig. 5 Contact resonance frequency of Cu and stainless steel

측정값이 매우 유사하게 나타났다. 대상재료의 탄성특성에 따른 공진주파수의 변화를 확인하기 위하여 #1 캔틸레버의 1차 모드를 이용하여 재료에 따른 공진주파수를 이론적으로 계산하고 실험적으로 측정하였다. 이론적 접촉 공진주파수를 계산하기 위해 접촉 반경은 100 nm 그리고 접촉력은 실제 실험에 사용한 350 nN을 사용하였다. 또한 사용된 시험편의 탄성계수와 푸아송비를 Table 3에 나타내었다. 캔틸레버가 시험편에 접촉할 때는 캔틸레버의 지지부에서 발생하는 신호들이 증폭되어 신호들이 복잡해진다. 따라서 본 연구에서는 이론적으로 계산한 값을 이용하여 각각의 공진주파수를 이론값 근처에서 스윕하여 접촉

Table 2 Experimentally determined free resonance frequency and calculated frequency

Mode No.	$f_n$ (kHz)	$f_{exp}$ (kHz)
1	67.33	67.25

Table 3 Elastic modulus and Poisson's ratio

	Cu	SUS
Elastic modulus	$1.1 \times 10^{11}$	$2.0 \times 10^{11}$
Poisson's ratio	0.34	0.27

Table 4 Experimentally determined frequency  $f_{exp}$  and calculated frequency  $f_n$  in contact with the sample

Silicon-Copper		
Mode No.	$f_n$ (kHz)	$f_{exp}$ (kHz)
1	292.224	265.441

Silicon-SUS		
Mode No.	$f_n$ (kHz)	$f_{exp}$ (kHz)
1	292.658	268.088

공진주파수를 측정하였다. Fig. 5는 실리콘 캔틸레버가 구리 및 스테인레스 강과 접촉하였을 때의 공진주파수를 측정된 결과이다. 구리에서의 접촉공진주파수는 265.441 kHz이며 스테인레스 강에서의 공진주파수는 268.088 kHz이다. 구리와 스테인레스 강의 접촉공진주파수 차이는 약 3 kHz정도이며 이는 탄성특성의 차이에 의해 발생된 주파수의 변화로 생각된다.

Table 4는 캔틸레버가 구리와 스테인레스 강에 접촉하였을 때의 접촉공진주파수를 이론적으로 계산한 값과 실험값을 비교하여 나타내었다.

이상의 기초 실험 및 이론적 접근을 통하여 본 연구에서 제작된 프로토타입의 초음파원자현미경의 성능을 검증하고 실제 자동차 및 산업기계용 볼트, 너트로 널리 사용되는 소재인 냉간압조용강(cold heading steel)에 적용하였다. 냉간압조용강(cold heading steel)은 가공성을 높이기 위해 일반적으로 가공전 구상화 열처리를 실시한다. 구상화 열처리를 통해 라멜라 시멘타이트를 구형화시키며, 또한 구형의 시멘타이트 입자를 균질하게 분포시킴으로써 냉간 가공성 및 절삭성을 향상시키게 된다. Fig. 6은 구상화 열처리한 SWRCH45F 시편을 초음파원자현미경을 이용하여

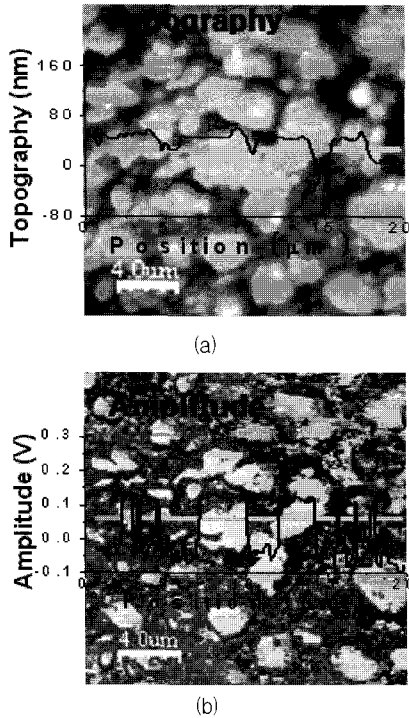


Fig. 6 UAFM images of 30h spheroidized SWRCH45F steel. The 1st resonance frequency is 267 kHz. Line scan shows the topography and amplitude variation on nanoscale surface, (a) Topography image and line data, (b) Amplitude image and line data

여 표면이미지를 관찰한 결과이다. 30시간의 열처리후 초기 시멘타이트의 분절과 성장에 의한 조대화된 수 마이크로미터 크기의 구형 시멘타이트를 관찰할 수 있다. UAFM의 탄성 이미지외에 라인 스캔한 결과, 표면이 이미지의 밝은 색은 구상화 흑연을 나타내고 어두운 부분은 기지부임을 관찰하였다. 라인스캔의 표면높이 결과에서 표면 높낮이의 차이는 시편을 준비하는 자동 진동연마 과정에서 생성된 표면 높이 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 초음파원자현미경 진폭이미지와 라인스캔에서는 이러한 표면 높낮이 결과와는 다르게 구상화 흑연 부분과 기지부의 진폭 차이가 명확한 것을 볼 수 있다. 이는 이미지 원리에

서 설명한 바와 같이 팁-시편간의 상호작용력으로 인한 캔틸레버의 유효강성계수의 변화에 기인하는 것이다. 본 시편은 등은 구상화 열처리를 수행하여 구상화 흑연을 생성시키고 조대화 시킨 냉간압조용강으로 시편을 준비하는 표면 연마 과정에서 기지부보다도 더욱 경한 구상화된 흑연부분이 연마가 덜 되고 돌출하므로써 표면 높이 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, 라인 스캔한 진폭 데이터 상에서 구상화 흑연부의 진폭이 기지부보다도 높게 나타난 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 나노 수준의 초고정밀도의 분해능을 갖고, 비파괴적인 표면 탄성이미지 분석과 나노 표면부 기계적 물성을 평가할 수 있는 초음파원자현미경을 연구하였다. 이를 위해 기본적으로 접촉역학 특성에 따른 캔틸레버의 공진주파수 변화를 이론적으로 해석하고 실험적으로 측정하였다. 스프링-질량 모델과 Herzian 이론을 이용하여 접촉 공진주파수의 변화를 이론적으로 계산하고 초음파원자현미경을 이용하여 캔틸레버의 공진주파수와 접촉 공진주파수의 변화를 비교한 결과 이론적인 값과는 다소 오차가 발생하였다. 이는 이론적인 모델에서 팁에 대한 조건과 그리고 시험편에 대한 물성치가 정확하지 않아 발생한 것으로 사료된다. 초음파원자현미경의 표면 높이 이미지와 진폭이미지를 성공적으로 얻을 수 있었고 진폭이미지를 통하여 시료 표면에서의 탄성특성을 정성적으로 평가하였다. 따라서 이를 이용한 표면에서의 탄성특성 이미지 외에 나노 박막층의 물리적 특성에 대한 비파괴적인 측정도 가능할 것으로 생각된다.

### 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원(No. 2010-0019303, No. 2010-0007349)으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 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] 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)
- [5] 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)
- [6] U. Rabe and W. Arnold, "Acoustic microscopy by atomic force microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, pp. 1493-1495 (1994)
- [7] K. Yamanaka and S. Nakano, "Ultrasonic atomic force microscope with overtone excitation of cantilever," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 3787-3792 (1996)
- [8] T. Tsuji and K. Yamanaka, "Measurement method of acoustic property on nanoscale: Improvement of precision of ultrasonic atomic force microscopy and application for measurement of material property," *Japan Society of Applied Physics*, Vol. 62, pp. 121-127 (2006)
- [9] S. Hirsekorn, U. Rabe and W. Arnold, "Ultrasonic radiation in dynamic force microscopy," *Applied Physics. A*, Vol. 72 pp. 87-92 (2001)
- [10] W. Rohrbeck and E. Chilla, "Detection of surface acoustic waves by scanning force microscopy," *Phys. Stat. Sol. (a)*, Vol. 131, pp. 69-71 (1992)
- [11] 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)
- [12] T. S. Park, D. R. Kwak, I. K. Park and C. S. Kim "Vibro-contact analysis of ultrasonic atomic force microscopy tip it's application to nano surface," *Journal of the Korean Society for Non-destructive Testing*, Vol. 30, No. 2, pp. 132-138 (2010)