

초음파원자현미경을 이용한 나노스케일 박막 코팅층에 대한 탄성특성 평가

곽동열^a, 조승범^b, 박익근^{b*}Evaluation of Elastic Properties for Nanoscale Coating Layers Using
Ultrasonic Atomic Force MicroscopyDong Ryul Kwak^a, Seung Bum Cho^b, Ik Keun Park^{c*}^a The Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea^b Dept. of Mechanical Engineering, The Graduate School, Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea^c Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 September 2015
Revised 6 October 2015
Accepted 7 October 2015

Keywords:

Ultrasonic atomic force microscopy
Nanoscale thin coatings
Elastic properties
Contact resonance frequency
Micro cantilever
Contact stiffness

ABSTRACT

Ultrasonic atomic force microscopy (Ultrasonic-AFM) has been used to investigate the elastic property of the ultra-thin coating layer in a thin-film system. The modified Hertzian theory was applied to predict the contact resonance frequency through accurate theoretical analysis of the dynamic characteristics of the cantilever. We coat 200 nm thick Aluminum and Titanium thin films on the substrate using the DC Magnetron sputtering method. The amplitude and phase of the contact resonance frequency of a vibrating cantilever varies in response to the local stiffness constant. Ultrasonic-AFM images were obtained using the variations in the elastic property of the materials. The morphology of the surface was clearly observed in the Ultrasonic-AFM images, but was barely visible in the topography. This research demonstrates that Ultrasonic-AFM is a promising technique for visualizing the distribution of local stiffness in the nano-scale thin coatings.

1. 서론

최근 박막 코팅은 기계부품의 기능성, 내마모성, 내식성, 내산화성 향상을 목적으로 소재를 보호하거나 표면 특성 개질을 위해 주로 사용되고 있으며 특히 정밀 기계, 산업기계 등에서도 다양한 박막 코팅 방법을 적용하여 널리 사용되고 있다. 박막 코팅층의 접합 특성을 향상시키기 위해서 모재와 코팅층 사이에 내식성이 우수한

Al, Ti, Ni, Cr 등과 같은 금속 중간층을 나노스케일의 두께로 형성시키게 되는데 내식성이 우수한 금속을 중간층으로 사용하더라도 박막 코팅층에 존재하는 핀홀이나 미세 결함들은 박막의 기계적 특성을 저하시킬 수 있으므로 나노스케일 박막에 대한 정밀한 기계적 물성 평가가 요구되고 있다. 박막 구조물에서 나타나는 응력 변형 특성, 층간 박리, 잔류응력 등과 같은 물리적인 결함들은 박막의 기계적인 특성에 주된 영향을 미치는 요인들이며 이들은 모두 탄성

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6332

Fax: +82-2-977-4507

E-mail address: ikpark@seoultech.ac.kr (Ik Keun Park).

계수와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 코팅층의 탄성계수는 박막의 기계적 특성 평가에 있어서 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 박막 구조물의 탄성특성을 평가하기 위한 기법으로는 나노인덴테이션 시험(nano indentation test)^[4-6], 굽힘 시험(bending test)^[7,8], 진동 시험(vibration)^[9], 표면파법(surface wave emission)^[10], 음향 방출법(acoustic emission)^[11] 등이 있다. 이 가운데 나노인덴테이션 시험은 가장 일반적으로 사용되는 기법으로 다이아몬드 압입자를 이용하여 재료에 하중을 가한 뒤 얻어지는 압입 면적 및 하중-깊이 곡선을 분석하여 재료의 탄성계수 및 경도를 구할 수 있다. Chudoba 등^[12]은 박막 코팅의 탄성 범위 내에서 구형 압입자를 사용하여 탄성계수를 결정할 수 있는 가능성을 제시하였고 Liu 등^[13]은 하중-깊이 곡선을 이용하여 탄성계수와 포아송의 비를 결정할 수 있는 방법과 절차에 관하여 연구하였다. 하지만 나노인덴테이션 시험에서는 데이터의 신뢰성 확보를 위해 최대 압입 깊이를 재료 두께의 1/10 정도로 제한하기도 하는데 두께가 얇은 코팅층의 경우는 압입깊이가 수 nm에 이르기 때문에 정밀한 데이터를 얻기가 쉽지 않고 데이터의 신뢰도가 떨어져 결과 해석이 매우 어렵다.

본 연구에서 제안하는 초음파원자현미경은 비파괴적인 기법으로써 캔틸레버의 팁을 재료 표면에 접촉시켜 발생하는 접촉공진주파수를 분석하여 재료의 탄성특성을 평가할 수 있고 탄성특성을 이미지화함으로써 표면이미지뿐만 아니라 탄성이미지를 동시에 얻을 수가 있다. 나노스케일 박막 코팅층에 대한 캔틸레버의 동특성을 정확하게 분석하기 위해 변형된 Hertzian 이론을 적용하였고 200 nm 두께의 알루미늄과 티타늄으로 증착된 박막 코팅층에 대하여 접촉공진주파수 분석 및 탄성이미지를 통해 나노스케일 박막 코팅층의 탄성특성을 평가하였다.

2. 이론적 접촉 모델

2.1 나노 스케일 코팅층에 대한 등가 탄성계수

두 개의 탄성체 사이의 접촉 문제를 해석하기 위해서는 Hertzian 모델이 대표적으로 적용되어왔다. 하지만 기판 위에 코팅층이 증착되어 있는 경우, 나노스케일 박막 구조물에 대한 해석은 기존에 적용하였던 Hertzian 접촉 이론과는 다른 변형된 Hertzian 이론을 적용할 필요가 있다. Fig. 1은 강체로 가정된 기판 위에 있는 코팅층(탄성체 1)과 초음파원자현미경의 캔틸레버 팁(탄성체 2)과의 접촉을 도식적으로 나타낸 것이다. 기판 위의 코팅층은 기판과 코팅의 재료 특성을 모두 포함하고 있기 때문에 기존의 Hertzian 모델에 기판과 코팅층 두 가지 재료의 특성을 고려한 등가 탄성계수(E^*)가 적용되어야 하고 수식적으로는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[14].

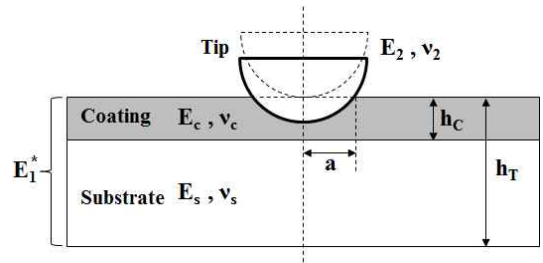


Fig. 1 Schematic diagram of contact model between a cantilever tip and a coated sample

$$E_1^* = \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \frac{1 - (\lambda + \kappa + 4\kappa\omega^2 h_c^2) e^{-2\omega h_c} + \lambda\kappa e^{-4\omega h_c}}{1 + 4\omega h_c \kappa e^{-2\omega h_c} - \lambda\kappa e^{-4\omega h_c}} \quad (1)$$

$$\lambda = 1 - \frac{4(1-\nu_c)}{1 + (\mu_c/\mu_s)(3-4\nu_s)} \quad (2)$$

$$\kappa = 1 - \frac{(\mu_c/\mu_s) - 1}{(\mu_c/\mu_s) + (3-4\nu_c)} \quad (3)$$

첨자 ‘c’와 ‘s’는 코팅층과 기판의 재료 특성을 나타내고, μ 는 전단 계수, ν 는 포아송의 비, E 는 탄성계수, ω 는 각주파수, h_c 는 코팅층의 두께를 나타낸다. 기판과 코팅층의 등가 탄성계수는 E_1^* , 팁의 탄성계수는 E_2 이며 전체 등가 탄성계수는 식 (4)와 같다.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_1^*} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (4)$$

2.2 캔틸레버의 접촉 진동 해석

초음파현미경의 캔틸레버는 초음파에 의해 가진되어 다양한 모드의 고유주파수로 진동하면서 재료 표면에 접촉한다. 이 때 캔틸레버 팁과 코팅층의 접촉은 스프링 모델로 가정된다. 캔틸레버의 진폭은 매우 작고 높은 주파수의 진동에 의해 캔틸레버의 강성은 높아져서 재료의 탄성영역 내에서 재료의 변형을 주지 않는다. 캔틸레버에 작용하는 수직 하중은 접착력에 비해 매우 크기 때문에 캔틸레버 팁과 코팅층 표면과의 접착력은 무시한다. Fig. 2에 캔틸레버 팁이 코팅층 표면에 접촉하였을 때의 수학적 접촉공진 해석을 위한 스프링 접촉 모델을 나타내었다. 캔틸레버는 사각형의 탄성빔으로 가정되고 k^* 는 수직 접촉강성, L 은 캔틸레버의 길이를 나타낸다. 균일한 단면을 갖는 탄성빔에 대한 진동해석은 다음과 같은 오일러-베르누이 방정식으로부터 유도된다.

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

여기서, E 는 캔틸레버의 탄성계수, ρ 는 밀도, A 는 캔틸레버의 단면적을 나타내고 이 때 캔틸레버 단면적의 폭은 ω , 두께는 b 이므로 관성모멘트는 $I = \omega b^3/12$ 이다. $y(x)$ 는 길이 x 에서 평균 위치로부터

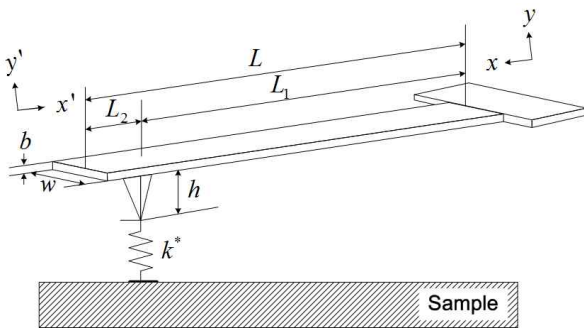


Fig. 2 Schematic diagram of a rectangular cantilever in contact with a sample surface

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.

$$y(x, t) = (A_1 \sin kx + A_2 \sinh kx + A_3 \cos kx + A_4 \cosh kx) e^{i\omega t} \quad (6)$$

캔틸레버 빔은 팁의 위치를 기준으로 두 개의 빔으로 구분할 수 있으며 x' 과 y' 은 길이 L_1 에 대한 빔의 축을 나타내며 x'' 과 y'' 은 길이 L_2 에 대한 빔의 축을 나타낸다. 스프링 결합된 시스템의 경계 조건은 각각의 지점에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = 0 \text{에서 } y(0, t) = 0 \quad (7)$$

$$x = 0 \text{에서 } \frac{\partial y(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$x' = L \text{에서 } \frac{\partial y(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$x' = L \text{에서 } \frac{\partial^3 y'(L, t)}{\partial x'^3} = 0 \quad (10)$$

$$x = L_1, x' = L_2 \text{에서 } y(L_1, t) = y'(L_2, t) \quad (11)$$

$$x = L_1, x' = L_2 \text{에서 } \frac{\partial y(L_1, t)}{\partial x} = - \frac{\partial y'(L_2, t)}{\partial x'} \quad (12)$$

접촉 거동 해석을 위해 위와 같은 경계조건을 적용하면 식 (13)과 같은 특성방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{2k_c (k_n L_1)^3}{3k^*} (1 + \cos(k_n L) \cosh(k_n L)) \\ & = \sin(k_n L_2) \cosh(k_n L_2) - \sinh(k_n L_2) \cos(k_n L_2) \\ & \quad \cdot (1 - \cos k_n L_1 \cosh k_n L_1) - \sin(k_n L_1) \cosh(k_n L_1) \\ & \quad - \sinh(k_n L_1) \cos(k_n L_1) \cdot (1 + \cos k_n L_2 \cosh k_n L_2) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $k_n L$ 는 캔틸레버 n 차 모드에서의 파수이고 k_c 는 캔틸레버의 스프링상수이며 특성방정식은 캔틸레버의 진폭, 캔틸레버의 팁 접촉, 경계조건에 관한 식으로 표현된다. 특성방정식의 해를 구하기 위해서는 접촉강성 k^* 값을 결정해야하고 이 때 앞서 언급한 2.1절의 전체 등가 탄성계수 값이 적용된다.

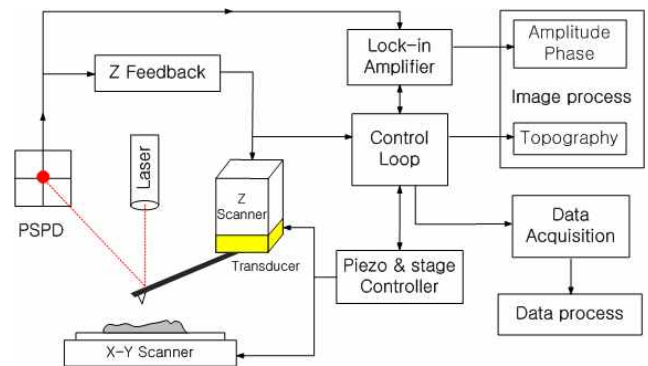


Fig. 3 Schematic diagram of the ultrasonic atomic force microscopy (Ultrasonic-AFM) system

$$k^* = \sqrt[3]{6E^*RF_0} \quad (14)$$

자유공진하고 있는 캔틸레버 빔의 공진주파수는 파수에 의해 결정된다. 접촉공진주파수와 파수와의 관계는 다음의 식 (15), (16)에 의해 결정된다.

$$c_c = L \sqrt{2\pi} \sqrt[3]{\frac{\rho A}{EI}} \quad (15)$$

$$f_n = \left(\frac{k_n L}{c_c} \right)^2 \quad (16)$$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 초음파원자현미경

Fig. 3은 초음파원자현미경 시스템의 모식도를 나타낸 것이다. 초음파원자현미경은 신호처리를 위한 제어부, 컴퓨터, 현미경으로 구성되어 있고 현미경에 있는 헤드부에는 캔틸레버와 레이저 다이오드(LD: laser diode), 위치 감지 광 다이오드(PSPD: position sensitive photo diode)로 구성된다. 헤드부에서는 캔틸레버 배면에서 반사된 레이저가 PSPD에 정렬되도록 하고 캔틸레버 홀더부에 있는 압전재료는 초음파를 발생시켜 캔틸레버의 면의 진동을 야기시킨다. 캔틸레버 팁은 재료 표면과 접촉하여 주사하며 캔틸레버의 휨 정도에 따라 변화되는 수신 신호를 이용하여 표면의 높낮이를 이미지화한다. 또한 고유진동수로 진동하는 캔틸레버 팁과 시편이 접촉시 접촉공진주파수가 발생이 되고 팁과 시편 사이의 상호작용력에 따라 캔틸레버의 변조 진폭의 변화와 위상 지연의 변화가 발생된다. 캔틸레버 진동의 진폭 및 위상 변화에 대한 신호는 광학 빔-변위 센서로부터 락-인 증폭기(lock-in amplifier)를 통하여 측정된다^[15]. 락-인 증폭기는 진폭 변조된 일정 주파수에서 초음파진동으로 유도된 캔틸레버의 변위정도를 측정하는 것이 가능하며 구동주파수는 대략 0.1-10 MHz가 된다. 일반적으로 진동 주파

Table 1 Silicon nitride cantilever parameters

Length	Width	Thickness	Spring constant	Resonance frequency
222 μm	26 μm	3.3 μm	3.6 N/m	89 kHz

수는 수백 kHz 정도이고, 이는 Z 피드백 루프보다도 훨씬 빠르다. 그러므로 국부적인 진동으로 야기되는 신호는 미비하고 결국 표면 높낮이 정보는 이들과 구별되게 된다. 접촉공진주파수의 변조된 신호 변화를 수신함으로써 시편 표면에서 국부적인 탄성특성의 차이를 구별할 수가 있다. 접촉공진주파수를 얻기 위해 사용된 캔틸레버 재료는 실리콘 나이트라이드(Silicon nitride, Si_3N_4)이고 재료 특성 및 크기를 Table 1에 나타내었다. 캔틸레버의 세부 정보는 제조사(Nanosensors, NanoWorld AG, Neuchatel, Switzerland)에서 제공된 데이터이며 캔틸레버의 배면부에서 반사되는 레이저의 효율을 높이기 위해 30 nm 두께의 알루미늄 코팅이 되어 있다. 캔틸레버 팁 끝단의 반경은 7 nm 이다. 초음파원자현미경에서 캔틸레버는 팁과 시편의 접촉 시에 경계 조건에 따른 국부적인 접촉 강성의 변화를 감지하며 팁과 표면 사이의 상호작용을 검출하는 센서로 사용된다.

3.2 시험편

초음파원자현미경의 접촉공진주파수의 변화에 의한 나노스케일 박막 코팅층의 탄성특성을 평가하기 위해 서로 다른 재료로 증착된 두 가지의 코팅층을 제작하였다. 4인치 (100) 방향의 웨이퍼 기판을 2.5 cm×2.5 cm의 크기로 절단하였고 기판 위의 이물질을 제거하기 위해 초음파 세척기를 이용하여 아세톤에 5분간 담그고 탈염수로 씻어낸 뒤 다시 메탄올에 5분간 세척하였다. 이후 5분간 탈염수로 세척한 후 표면의 습기를 제거하기 위해 질소 가스로 건조하였다. 고품질의 코팅층을 증착하기 위해 고진공 챔버에서 순도 99.995%의 알루미늄과 티타늄 타겟을 사용하여 알루미늄과 티타늄을 각각 200 nm의 두께로 DC 마그네트론 스퍼터링을 통해 증착하였다. 두 가지의 코팅층을 제작하기 위해 챔버 내의 압력은 4.2×10^{-6} Torr 로 동일하게 하였고 타겟과 기판 거리는 7 cm, 직류 전압은 108 W, 아르곤 압력은 5 mTorr로 하였다. 서로 다른 재료를 동일한 두께로 증착시키기 위해 증착률을 다르게 적용하였고 알루미늄의 경우는 1.09 nm/s, 티타늄의 경우는 0.64 nm/s로 증착하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 실리콘 기판 위에 200 nm의 두께로 증착된 알루미늄과 티타늄 코팅층의 단면에 대한 SEM 이미지를 나타내고 있다.

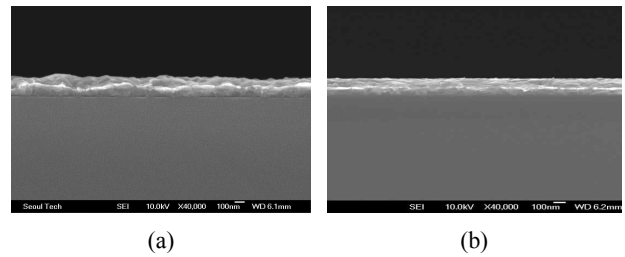


Fig. 4 SEM images showing cross-section of the fabricated specimens: (a) aluminum coating, (b) titanium coating with 200 nm thickness

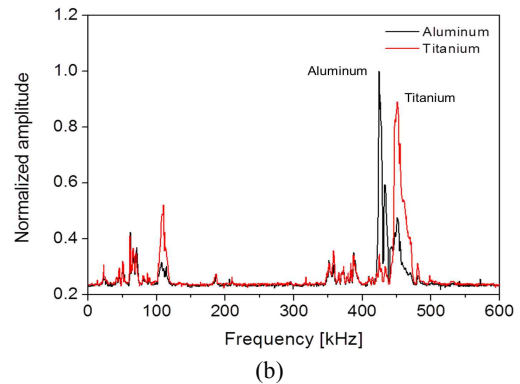
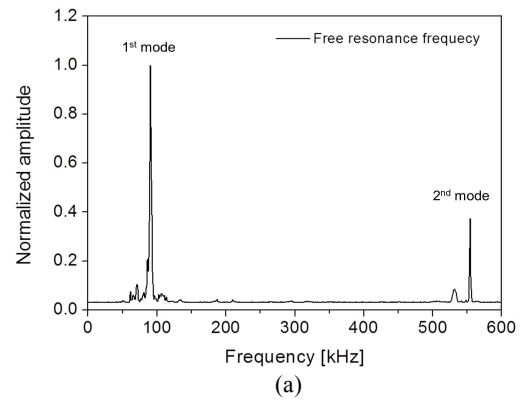


Fig. 5 Frequency spectrums: (a) resonance frequency of cantilever in free space, (b) contact resonance frequency for each specimen

각각의 재료에 따른 증착률을 고려하여 200 nm의 두께를 갖는 박막 코팅층을 제작하였지만 실제 제작된 박막 코팅층의 두께를 측정된 결과 알루미늄은 5%, 티타늄은 7%의 오차 범위 내에서 증착되었다.

Fig. 5는 캔틸레버의 공진주파수를 나타낸 것으로 Fig. 5(a)는 캔틸레버가 재료 표면에 접촉하지 않고 진동하는 경우의 공진주파수를 나타낸 것이다. 주파수 0~600 kHz까지의 범위 내에서 측정 가능한 모드는 2차 모드까지이며 1차 고유공진주파수는 90.23 kHz이고 2차 고유공진주파수는 554.30 kHz였다. 이 값들은 캔틸레버 제조사에서 제공한 값과 매우 일치한다. Fig. 5(b)는 두 개의 코팅층에 대하여 캔틸레버 팁이 접촉했을 때 발생된 각각의 접촉공

진주파수를 나타낸다. 캔틸레버가 코팅층 표면에 접촉하면 접촉한 재료의 탄성특성에 따라 서로 다른 접촉공진주파수가 발생된다. 캔틸레버가 알루미늄 코팅층에 접촉하였을 때 측정된 1차 모드의 접촉공진주파수는 424.22 kHz이고 티타늄 코팅층에 접촉하였을 때 측정된 1차 모드 접촉공진주파수는 451.17 kHz였다. 이러한 접촉공진주파수는 각각의 재료에서 기준 값으로 사용되며 재료 표면의 미세한 탄성 특성에 따라 달라지는 팁과 코팅층 사이의 접촉강성의 차이로 인해 접촉공진주파수가 변화하게 된다. 반무한 코팅층에 대해 이론적으로 계산한 접촉 반경과 접촉 강성은 알루미늄 코팅층의 경우 4.21 nm, 467.08 N/m였고 티타늄 코팅층의 경우 3.79 nm, 574.34 N/m였다. 이 때 사용된 캔틸레버 팁의 반경은 10 nm, 팁에 가해지는 하중은 550 nN이다. 캔틸레버 팁이 재료 표면을 스캔할 때 강성이 높은 영역으로 이동하면 캔틸레버의 진폭이 높아지기 때문에 팁과 표면의 접촉강성(k^*)이 높아지며 이에 따라 접촉공진주파수의 진폭과 위상 값은 높아진다. 이와 반대로 캔틸레버 팁이 상대적으로 강성이 낮은 영역으로 이동하면 캔틸레버의 진폭은 낮아지게 되고 그에 따른 팁과 표면의 접촉강성(k^*)이 낮아짐에 따라 접촉공진주파수의 진폭과 위상 값은 낮아진다^[16]. 이와 같은 접촉강성(k^*)에 따른 접촉공진주파수의 진폭 및 위상 차이로부터 나타나는 콘트라스트 변화로 초음파원자현미경의 진폭 및 위상 이미지를 얻을 수 있고 재료의 표면 이미지뿐만 아니라 재료의 탄성특성을 내포하고 있는 탄성이미지를 한 번의 스캔으로 동시에 획득할 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 알루미늄 박막 코팅층과 티타늄 박막 코팅층에 대한 표면 SEM 이미지, 초음파원자현미경의 높낮이 이미지(topography), 진폭(amplitude) 및 위상(phase image) 이미지를 나타낸 것이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 SEM 이미지와 높낮이 이미지는 코팅층의 표면 특성을 나타내고 있으며 진폭 및 위상 이미지는 재료의 탄성 특성에 의해 나타난 것이다. 캔틸레버 팁이 표면을 스캔하면 각각의 접촉공진주파수의 값을 기준으로 캔틸레버의 진폭 및 위상이 높아진 영역은 상대적으로 밝게 나타나며 이와 반대로 진폭 및 위상이 낮아지는 영역에서는 어둡게 나타나게 된다. 상대적으로 어둡게 나타나는 영역은 주변의 다른 영역보다 더 단단하다는 것을 의미한다^[17]. 이와 같이 캔틸레버와 시편사이의 접촉공진주파수를 이용함으로써 국부적인 재료 표층부의 강성 변화에 의한 탄성 특성의 분포를 탄성이미지로 쉽게 나타낼 수 있다. 초음파원자현미경의 진폭 및 위상 이미지는 표면의 높낮이 이미지에 비해 보다 높은 콘트라스트를 나타내고 있으며 높낮이 이미지에서 명확하게 구별하지 못하는 부분을 보다 세밀하게 나타내고 있고 이러한 진폭 및 위상 이미지를 통해 재료의 격자 구조 또는 입자 구조를 명확하게 구분해 낼 수 있다. 또한 탄성이미지는 표면 이미지(topography)에 비해 높은 콘트라스트를 나타내고 있으며 SEM 표면이미지와 비교해보았을 때 표면의 형상(morphology)을

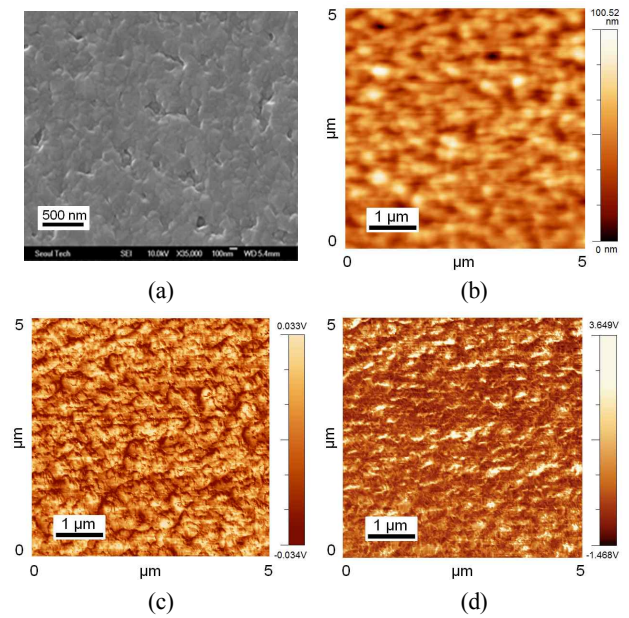


Fig. 6 SEM and Ultrasonic-AFM images of Aluminum thin coating. (a) SEM image, (b) topography, (c) amplitude image and (d) phase image of Ultrasonic-AFM

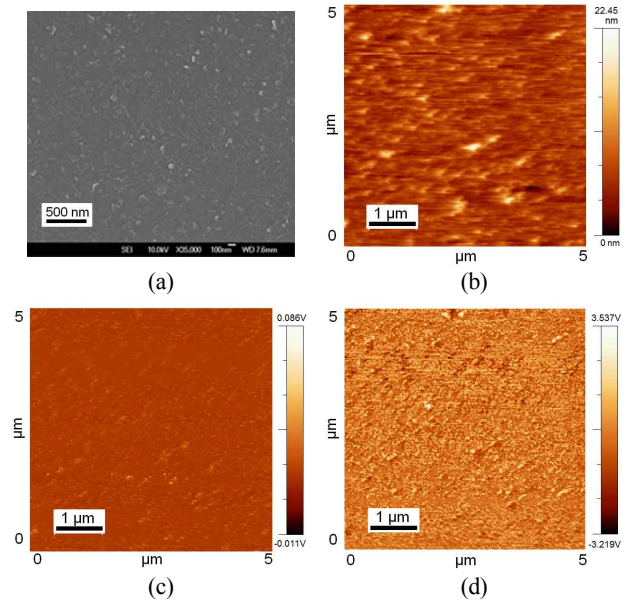


Fig. 7 SEM and Ultrasonic-AFM images of Titanium thin coating: (a) SEM image, (b) topography, (c) amplitude image and (d) phase image of Ultrasonic-AFM

보다 뚜렷하게 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 나노스케일 박막 시스템에서 사용되는 박막 코팅층에 대한 탄성 특성 평가를 위해 초음파원자현미경 기법을 적용하

였다. 실리콘웨이퍼 기판 위에 알루미늄과 티타늄으로 200 nm 두께로 증착한 코팅층을 제작하여 캔틸레버의 접촉공진주파수의 변화를 관찰하였고 각각의 코팅층의 재료에 따라 접촉공진주파수가 다르게 발생하는 것을 확인하였다. 캔틸레버 팁이 코팅층 표면에 접촉하여 스캔할 때 발생하는 접촉강성의 차이에 따라 변화하는 접촉공진주파수의 진폭과 위상 값을 이용하여 탄성특성 이미지를 획득함으로써 재료 표층부의 강성 분포를 확인하였고 이로부터 초음파원자현미경을 이용한 나노스케일 박막 코팅층의 재료 탄성 특성 평가에 대한 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Ahn, H. S., 2007, Estimation of Nanomechanical Properties of Nanosurfaces using Phase Contrast Imaging in Atomic Force Microscopy, Transactions of the KSMTE, 16:5 115-121.
- [2] Lee, J. M., Han Y. H., Kwak D. R., Park, I. K., 2014, Analysis of Contact Resonance Frequency Characteristics for Cantilever of Ultrasonic-AFM using Finite Element Method, Journal of the KSMTE, 23:5 478-484.
- [3] Ahn, H. S., Jang, D. Y., 2009, Analysis of Nano-contact between Nano-asperities using Atomic Force Microscopy, Journal of the KSMTE, 18:4 369-374.
- [4] King, R. B., 1987, Elastic Analysis of Some Punch Problems for a Layered Medium, Int. J. of Solids and Structures, 23:12 1657-1664.
- [5] Chen, X., Vlassak, J. J., 2001, Numerical Study on the Measurement of Thin Film Mechanical Properties by Means of Nanoindentation, J. of Mat. Res., 16:10 2974-2982.
- [6] Tayebi, N., Polycarpou, A. A., Conry, T. F., 2001, Effects of Substrate on Determination of Hardness of Thin Films by Nanoscratch and Nanoindentation Techniques, J. of Mat. Res., 19:6 1791-1802.
- [7] Ashrafi, B., Das, K., Faive, L. R., Hubert, P., Vengallatore, S., 2012, Measuring the elastic properties of freestanding thick films using a nanoindenter-based bending Test, Experimental Mechanics, 52(4), 371-378.
- [8] Kourtis, L. C., Carter, D. R., Beaupre, G. S., 2014, Improving the Estimate of the Effective Elastic Modulus Derived from Three-point Bending Tests of Long Bones, Annals of Biomedical Engineering, 42:8 1773-1780.
- [9] Alfano, M., Pagnotta, L., 2006, Measurement of the Dynamic Elastic Properties of a Thin Coating, Rev. of Sci. Instrum., 77:5 056107.
- [10] Schneider, D., Schwaz, T., Schultrich, B., 1992, Determination of Elastic Modulus and Thickness of Surface Layers by Ultrasonic Surface Waves, Thin Solid Films, 219:1-2 92-102.
- [11] Tsuchiya, T., Ito, K., Miyoshi, S., Enoki, M., Yamaguchi, S., 2014, In-situ Monitoring of Oxide Ion Induced Breakdown in Amorphous Tantalum Oxide Thin Film using Acoustic Emission Measurement, Mater. Trans., 55:10 1553-1556.
- [12] Chudoba, T., Schwarzer, N., Richter, F., 2000, Determination of Elastic Properties of Thin Films by Indentation Measurements with a Spherical Indenter, Surf. Coat. Technol., 127:1 9-17.
- [13] Liu, S., Wang, Q. J., 2007, Determination of Young's Modulus and Poisson's Ratio for Coatings, Surf. Coat. Technol., 201:14 6470-6477.
- [14] Liu, S., Peyronnel, A., Wang, Q. J., Keer, L. M., 2005, An Extension of the Herz Theory for 2D Coated Components, Tribol. Lett., 18:4 505-511.
- [15] Park, T. S., Kwak, D. R., Park, I. K., Kim, C. S., Jhang, K. Y., 2011, Evaluation of Elastic Properties and Analysis of Contact Resonance Frequency of Cantilever for Ultrasonic AFM, J. of KSNT, 31:2 174-180.
- [16] Cunfu, H., Gaimei, Z., Bin, W., Zaiqi, W., 2010, Subsurface Defect of the SiO_x Film Imaged by Atomic Force Acoustic Microscopy, Optics and Laser in Engineering, 48:11 1108-1112.
- [17] Banerjee, S., Gayathri, N., Dash, S., Tyagi, A. K., Raj, B., 2005, A Comparative Study of Contact Resonance Imaging using Atomic Force Microscopy, Appl. Phys. Lett., 86:21 211913.
- [18] Rabe, U., Janser, K., Arnold, W., 1996, Vibrations of Free and Surface-coupled aTomic Force Microscope Cantilevers: Theory and Experiment, Rev. of Sci. Instrum., 67:9 3281-3293.