

원자력현미경의 위상차영상을 이용한 나노표면의 미소기계적 특성 평가

안효석*

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 8. 16)

Estimation of Nanomechanical Properties of Nanosurfaces Using Phase Contrast Imaging in Atomic Force Microscopy

Hyo-Sok Ahn*

Abstract

Phase contrast imaging in atomic force microscopy showed a promise as an effective tool for better understanding of micromechanical properties of surfaces at nano scale. A qualitative estimation model for phase contrast images obtained with a tapping mode AFM was developed. This investigation demonstrated the high efficiency of combined analysis of topography and phase contrast images for characterizing nanosurfaces. Phase contrast images allowed estimation of relative stiffness(elastic modulus) of the sample surface. The phase contrast images revealed a significant inhomogeneity of the nano scale worn surfaces. Phase contrast images are also capable of revealing the formation of tribofilms.

Key Words : Phase contrast(위상차), AFM(원자력현미경), Tapping mode(탭핑모드), Transfer film(전이막), Diamond-like carbon coating(다이아몬드상 탄소 코팅)

1. 서론

미소 크기의 탐침(probe)을 이용한 주사탐침현미경 기술(Scanning Probe Microscopy)의 개발은 체계적으로 나노 스케일에서의 구조 조절과 고분해능의 접촉표면 해석을 가능케 하고 있다. 원자력현미경(AFM)을 동적 모드에서 작동

시킴으로써 흡착된 물분자층에 의한 모세관력과 탐침-재료 접촉에 의한 응착(adhesion)효과의 영향을 거의 받지 않으며 재료 표면의 매우 작은 힘을(분자단위까지) 측정할 수 있다. 이러한 동적 작동모드를 탭핑모드 또는 “intermittent contact mode”라 부른다⁽¹⁾. 일반적으로 탭핑모드에서는 매우 큰 강성을 가진 캔틸레버(10-100N/m)를 사용하나 탐침의

* 서울산업대학교 나노아이티공학과 (hsahn@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

진동수가 100kHz 이상이고 스캔속도가 1μm/s일 경우 탐침과 재료의 접촉시간이 1μs정도로 매우 작아 재료의 소성변형은 무시할 수 있다⁽²⁾. 그러나 이와 같이 짧은 접촉시간 중에도 탐침의 진동과 관련된 중요한 변수들인 진폭, 진동수, 위상각의 변화가 일어난다. 위상차영상(phase contrast image)은 스캔 중에 측정되는 위상차(phase shift) 정보를 이용하여 구성한다. 위상차 값은 탐침-재료간에 작용하는 힘에 매우 민감하게 영향을 받기 때문에 위상차영상은 재료의 미소기계적 성질(탄성계수, 점탄성율(뒨핑값))에 대한 정보와 탐침과 재료 간에 작용하는 응력과 관련된 성질에 대한 정보(표면 에너지, 모세관력)를 제공한다⁽³⁻⁵⁾. 본 연구에서는 위상차영상의 정성적 해석모델을 수립하고 이를 이용하여 표면에 존재하는 나노 수준의 박막의 미소기계적 특성을 분석하여 위상차영상의 응용 효율적 활용 방안을 제시하였다.

2. 위상차영상의 해석

AFM을 이용해 위상차영상을 구하는 일반적인 경로를 생각해 보기로 한다. Fig. 1에 나타난 바와 같이, 먼저 초기단계로서 스프링상수가 k_0 인 캔틸레버가 바이모ρφ 드라이버(bimorph driver, BM)에 의해 자유공명진동수 ω_0 로 진동한다.

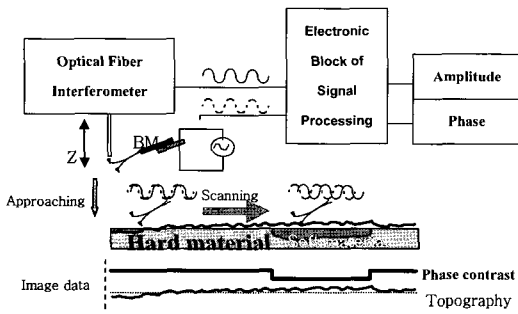


Fig. 1 General scheme for collecting phase information. (a) scanning of a non-uniform sample; and (b) scheme of probe contact in the intermittent mode

다. 초기 위상값 Φ_0 는 진동에 의한 위상값 중에 어느 값이나 선택하여 기준치로 지정할 수 있다. AFM 측정은 초기 위상과 관계가 없기 때문에 캔틸레버의 진동에 대한 해석을 용이하게 하기 위해 Φ_0 를 $\pi/2$ 로 지정할 수 있다.

탐침의 자유진동 현상은 quality factor Q_0 와 진폭 A_0 로 설명할 수 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 측정을 위해 탐침의 팁은 샘플에 접근해 가며 궁극적으로는 캔틸레버가 탐침-재료 사이에 작용하는 인력에 의해 재료쪽으로 휘면서 재료표면을 아주 짧은 시간 동안 접촉을 하게 된다. 이 때 팁-재료 시스템의 유효변수(effective parameters)들은 다음과 같이 정의된다^(6,9,10):

$$\begin{aligned} \omega_0 &\rightarrow \omega_{eff} = \omega_0 + \Delta\omega \\ k_0 &\rightarrow k_{eff} = k_0 + \Delta k \\ Q_0 &\rightarrow Q_{eff} \\ A_0 &\rightarrow A_{eff} \\ \Phi_0 &\rightarrow \Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi \end{aligned} \quad (1)$$

탐침은 캔틸레버의 진폭이 미리 지정된 진폭 set-point 값인 A_{sp} 가 될 때까지 재료 표면을 향해 접근한다. A_{sp} 는 탐침의 운동을 피드백 제어하기 위해 사용된다. 즉, 전기적인 피드백 제어에 의해 측정(면적 스캐닝)이 진행되는 동안 진동하는 캔틸레버의 진폭은 일정한 크기를 유지하게 된다. 이 때 캔틸레버의, 재료 표면에 수직인 방향으로의 위치 변화 값을 이용해 스캔면적내의 재료의 표면조도 영상(topography image)을 구한다. 또한 동일한 면적에 대해 위상차영상은 캔틸레버의 위상차 값 $\Delta\Phi$ 를 이용해 동시에 구할 수 있다.

탐침의 뒨핑운동은 진폭의 set-point ratio인 r_{sp} 에 의해 영향을 받는다.

$$r_{sp} = A_{sp}/A_0 < 1 - \epsilon, \quad (2)$$

여기에서 측정중의 캔틸레버의 진폭인 A_{sp} 는 탐침에 관한 변수인 k_0 와 R (탐침 선단부 곡률반경)과 재료의 미세기계적 성질을 고려하여 사용자가 선택한다. 측정중의 재료와 탐침 간에 작용하는 접촉의 특성에 따라 위상의 변화 값은 변화하는데 탐침에 작용하는 비접촉 표면력(noncontact surface force)에 의해서도 약간의 변화가 발생할 수 있다. 위상각의 변화는 인력(접촉 응착력)의 증가나 재료의 탄성 반응에 의해 발생하는 척력의 증가에 의해서도 초래될 수 있다. 표면에 매우 근접한 위치이거나, 팁에 의해 변형되는 재료의 표면층에서 발생하는 Van der Waals 힘, 정전기력, 모세관력과 같은 force fields의 복잡성은 캔틸레버의 진동의 불균일

현상을 더욱 복잡하게 만든다. 탭핑모드에서의 탭-재료 진동에 대한 이론적 모델은 이러한 사항들을 고려하여야만 한다⁽¹¹⁻¹³⁾. 그 외에도 캔틸레버 진동, 특히 탐침의 위상변화에, 영향을 주는 다른 요인들이 있는데 이들을 열거하면; 진폭 set-point⁽¹⁴⁾, 탐침의 동적 변수들^(11,15), 팁의 기하학적 형상⁽¹⁶⁾, 재료의 강성과 댐핑 특성⁽¹⁷⁾, 탐침의 충격 효과⁽¹⁸⁾, 에너지 발산⁽¹⁹⁾ 등이 있다. 지금까지의 고찰을 통해 탭핑모드를 이용한 측정 중에 발생하는 위상의 변화에 대해 다음과 같은 평가가 가능하다.

“재료의 강성이 낮은 부분에서 높은 부분으로 탐침이 이동해 갈 때 위상차는 증가한다. 반대로 재료의 강성이 높은 부분에서 낮은 부분으로 탐침이 이동해 갈 때에는 위상차는 감소한다.”

측정된 위상각 값 Φ 가 자유진동시의 위상각 Φ_0 보다 작을 경우엔 탐침이 심한 인력 영역 즉 접촉응착 현상에 의해 추가적으로 매우 큰 인력이 작용하는 영역에서 움직이고 있음을 의미한다. 위상차영상은 지금까지 설명한 바와 같이 매우 중요한 정보를 제공한다.

본 연구에서는 위에 열거한 어려움을 극복하고 위상차영상의 의미를 정확히 평가하기 위해 제한된 경우에 대해 생각해 보기로 한다. 먼저 측정하는 대상이 되는 재료는 강성이 높은 재료로 한정한다. 이 경우, 강성이 큰 탐침에 의한 재료 표면의 소성변형은 무시할 수 있으며 힘센서 역할을 하는 캔틸레버가 재료 표면에 존재하는 여러 가지 force fields에 의해 거의 영향을 받지 않는다. 또한 표면에 존재하는 응축된 물분자층의 영향도 매우 작게 된다. 따라서 진동하는 캔틸레버에 관한 여러 가지 변수들은 주로 재료의 탄성의 비균질성(micro-heterogeneity)에 의해 야기된 탐침-재료 접촉현상의 변화에 의해 영향을 받게 된다. 강성이 큰 재료의 경우에는 매우 명암차가 큰 위상차영상을 얻을 수 있어 입자경계나 함유된 외부불순물의 존재를 영상 내에서 쉽게 구별할 수가 있다. 강성이 작은 재료를 측정할 경우에는 재료의 탄성 변형에 의해 탐침-재료 사이의 근거리힘이 증가하여 위상차가 감소하여 매우 선명한 위상차영상을 얻기가 힘들어진다.

해석의 편의를 위해, 캔틸레버가 진동하여 탐침과 재료가 접촉을 할 때 팁과 재료간의 직접적인 기계적 접촉만을 캔틸레버 진동모델에 고려하기로 한다. 이 경우, 공진진동수 ω_0 는 캔틸레버의 스프링 상수 k_0 와 질량 m 에 의해 $k_0=m\omega_0^2$ 으로 표시할 수 있다. 자유 진동하는 캔틸레버의 위상각을 진동수 ω 의 함수로 표시하면⁽²⁰⁾:

$$\Phi(\omega) = \tan^{-1} \frac{m\omega\omega_0}{Q(k_0 - m\omega^2)} \quad (3)$$

식 (1)로부터, 캔틸레버의 자유 진동시의 위상각(편의를 위해 $\Phi_0=\pi/2$ 로 지정)과 탭핑 진동시의 위상각의 차 $\Delta\Phi_0$ 는⁽²⁰⁾:

$$\Delta\Phi_0 \approx Q_{eff} \frac{S}{k_0} \quad (4)$$

여기에서 S는 재료 표면의 강성으로서 $S = \partial F / \partial \delta$ 이며; F는 작용하중, δ 는 압입 깊이(indentation depth)이다.

탐침에 의해서 재료 표면에 가해지는 힘은, Fig. 1 (b)에 보인 바와 같이, 캔틸레버의 굽혀지는 정도에 비례하므로 자유진동 진폭 A_0 와 탭핑 진동 시의 진폭 A_{sp} 의 차이인 ΔA 에 비례한다.

$$\Delta A = A_0 - A_{sp} \quad (5)$$

따라서 재료 표면에 작용하는 하중 F는

$$F = k_{eff} A_0 (1-r_{sp}) \quad (6)$$

탐침-재료 접촉이 선단부의 반경이 R인 팁과 평면사이의 접촉으로 가정하면 Hertz 접촉이론에 의하여 접촉하중 F는:

$$F = E^* R^{1/2} \delta^{3/2} \quad (7)$$

이 때 E^* 는 유효탄성을 값으로서,

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_{tip}^2)}{E_{tip}} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (8)$$

ν_{tip} , E_{tip} 와 ν_i , E_i 는 각각 측정 지점 i에서의 탐침과 재료의 포와송 상수와 탄성을 값이다.

식 (7)로부터

$$S = (3/2) (E^* R^{1/2} \delta^{3/2}) \quad (9)$$

식 (6), (7)과 (9)를 이용해 압입깊이 δ 를 하중 F로 치환하면 결과적으로 아래 식을 얻는다:

$$S = \frac{3}{2} E^{*2/3} k_{eff}^{1/3} R^{1/3} A_0^{1/3} (1-r_{sp})^{1/3} \quad (10)$$

이제 식 (4)의 위상차 $\Delta\Phi_0$ 는 아래 식으로 표현된다.

$$\Delta\Phi_0 = \frac{Q_{eff} k_{eff}^{1/3} E^{*2/3} R^{1/3} A_0^{1/3} (1-r_{sp})^{1/3}}{k_0} \quad (11)$$

식 (11)은 사용된 각각의 기본 변수들이 위상각의 변화에

미치는 영향을 정성적으로 설명하고 있다. 위상차는 재료의 강성, 팁의 반경과 작동 중의 진폭이 증가함에 따라 증가하며 r_{sp} set-point와 스프링 상수에는 반비례 함을 알 수 있다. 식 (11)을 측정 위치 i 에서 탄성율에 대해서 표현하면,

$$E_i^* = \frac{k_o^{3/2} \Delta\Phi_{oi}^{3/2}}{Q_{eff}^{3/2} k_{eff}^{1/2} R^{1/2} A_o^{1/2} (1-r_{sp})^{1/2}} \quad (12)$$

Q_{eff} 와 k_{eff} 는 측정 중에 임의로 제어 할 수 있는 변수가 아니므로 상수 K 를 도입해 표현하면

$$E_i^* \approx K \frac{k_o^{3/2} \Delta\Phi_{oi}^{3/2}}{R^{1/2} A_o^{1/2} (1-r_{sp})^{1/2}} \quad (13)$$

식 (13)은 팁에서 재료에 가해지는 충격에 의한 하중 증가분이 고려되지 있지는 않았지만, 상수 K 가 그 영향도 포함할 수 있으므로 식 (13)의 신뢰성에는 하자가 없는 것으로 판단된다.

3. DLC 박막에 대한 위상차영상 분석

DLC(Diamond-like-carbon) 박막 코팅은 산, 알칼리와 반응하지 않는 내화학성과 낮은 마찰계수, 마모에 대한 좋은 특성을 가지고 있어 기어, 베어링, 정보저장 장치의 보호막 등 여러 분야에 적용되고 있다. 미끄럼 접촉 시 DLC 코팅의 표면에는 얇은 트리보필름(tribofilm)이 형성되며 이 트리보필름은 탄성계수와 경도가 낮고 마찰, 마모에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. DLC 코팅의 마모 현상과 트리보필름의 특성은 원자력 현미경을 이용하여 얻은 위상차영상과 마이크로 라만(micro-Raman) 스펙트럼 분석을 통하여 보다 쉽게 이해할 수 있다. Pulsed vacuum arc 증착 방법으로 제조된 DLC 코팅과 강구와의 미끄럼 접촉에 의해 만들어진 마모면을 원자력 현미경의 탭핑모드로 측정하여 얻은 위상 변화 정보를 통해 미소기계적 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구에서는 ball-on-plate 실험 장치를 사용하여 실험실 환경에서 건식 마찰 실험을 하였다. TiN 코팅 위에 DLC 코팅을 각각 0.53 μ m, 1.2 μ m로 증착한 직경 6mm의 강구와 DLC 코팅을 0.4 μ m 증착한 글라스세라믹 플레이트(glassceramic plate) 시편을 사용하였고, 코팅 두께는 Linnik interferometer로 측정하였다. DLC 코팅이 증착된 고정된 플레이트 시편에 대한 강구 시편의 미끄럼 속도는 0.01m/s이었으며 이때 가해지는 하중은 2.5N이었다. 탐침의 변화를 광섬유 센서로 감지하

도록 자체 제작한 원자력 현미경으로 표면영상과 위상차영상을 측정하였다. 탐침은 직경 100 μ m 텅스텐 선을 전기화학적으로 에칭하여 만들었다. 단단한 시편을 측정하기 위해 강성이 큰 외팔보 탐침을 사용하여 탭핑모드로 작동하였다. 이 탭핑모드는 응착의 영향이 거의 없고 시편 표면의 강성도에 민감하기 때문에 본 실험으로 얻은 위상차영상을 통해 주사 영역의 강성도의 상대적인 변화를 알 수가 있다. 또 마모 실험 전후 표면의 미소조직 변화를 알아보기 위해 라만 스펙트럼 분석을 실시하였다.

Fig. 2 (a)와 (b)는 실험 전 플레이트 시편의 DLC 코팅 표면에 대한 표면영상과(topography image) 위상차영상을 나타낸 것이고, (c)와 (d)는 높은 마찰계수를 보인 100 사이클 실험 후 그리고 (e)와 (f)는 안정된 상태의 마찰계수를 보

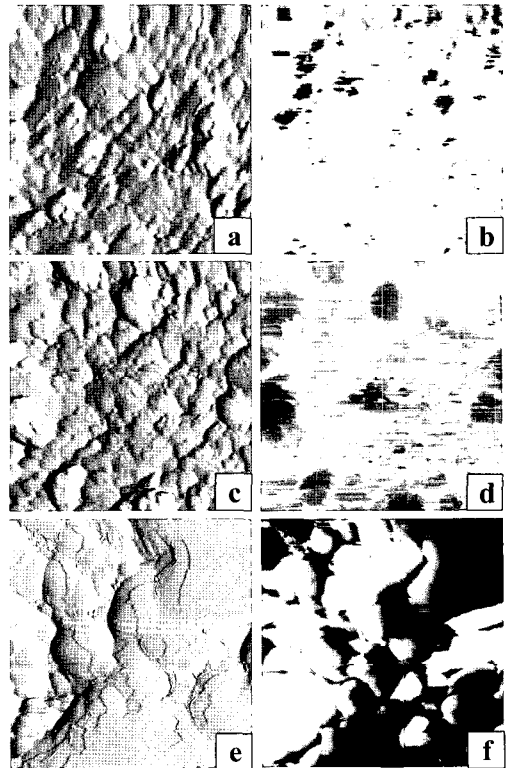


Fig. 2 (a) topography image and (b) phase contrast image of the unworn DLC coating surface; and (c) topography image and (d) phase contrast image of the worn DLC coating surface after 100 cycles; and (e) topography image and (f) phase contrast image of the worn DLC coating surface after 12000 cycles

인 12000 사이클 실험 후 플레이트 시편의 DLC 코팅 마모 표면에 대한 표면영상과 위상차영상을 각각 나타낸 것이다.

높은 마찰계수를 보인 100 사이클 실험 후의 표면영상 (c) 는 실험 전 표면영상(a)에 비해 크게 달라진 것을 볼 수 없는 것에 반하여, 안정된 마찰계수를 보인 12000 사이클 실험 후의 표면영상 (e)을 살펴보면 실험 전 보다 표면이 상당히 평평해진 것을 알 수 있다. 그 값의 수치적 변화로는 실험 전의 표면 거칠기가 36.9nm Rq(Rq:root mean square)이었던 것이 12000 사이클 실험 후 8.4nm로 작아졌고, 돌기의 평균 기울기 각도(mean local tilt angle, mid)도 5.6도에서 3.2도로 작아졌다. 이것은 돌기의 반경이 커지면서 표면이 평평해진 것을 의미한다. 실험 전과 100 사이클 후의 위상차 영상(b와 d)과 12000 사이클 실험 후의 위상차영상(e)을 비교해 보면 확연히 달라진 것을 볼 수 있는데, 12000 사이클 실험 후의 위상차영상에 검은 부분이 차지하는 영역이 넓어졌다. 이 검은 부분은 탐침이 상대적으로 낮은 강성도를 가진 표면을 주사 시에 나타나는 것으로 12000 사이클 실험 후에 낮은 강성도를 가지는 트리보필름이 마모 표면 위에 형성되었음을 의미한다.

Fig. 3은 마모 표면의 미소 부위에 대한 분석결과를 나타낸 것이다. Fig. 3 (c)는 마모 표면의 표면영상(a)과 위상차 영상(b) 위에 표시된 선을 따라서 표면의 높이 변화와 위상각(phase angle)의 변화를 나타낸 것이다. 위상차 영상에 나타난 검은 부분의 위상각(Φ) 값이 밝은 부분에 비하여 상당히 낮은 값을 가지는데 이것은 검은 부분의 강성도가 밝은 부분에 비하여 낮다는 것을 의미한다. 이 검은 부분에 해당하는 부분을 표면영상에서 살펴 보면 트리보필름이 형성되어 있음을 볼 수 있으며 그 두께는 2~3nm이었다. 이 트리보필름은 상대적으로 높은 표면에 형성이 되었다. 즉 낮은 부분보다 접촉압력과 마찰열에 의한 온도가 상대적으로 높은 표면에서 마찰화학반응이 집중적으로 일어나 새로운 트리보필름이 형성된 것으로 보인다. 위상차 영상의 히스토그램을 살펴본 결과 실험 전 DLC 코팅과 실험 후 형성된 얇은 트리보필름 사이의 기계적 성질 차이로 진동하는 탐침의 위상 차이가 70도 발생하였다.

Fig. 4는 마모 실험 전후 DLC 코팅의 마이크로 라만 스펙트럼이다. 실험 전 DLC 코팅의 경우 1550 cm^{-1} 에서 피크값을 보였는데 이것은 sp^3 비율이 높은 (>80%) 비정질 카본(amorphous carbon)의 경우와 같은 값으로 실험 전 DLC 코팅의 구조가 sp^3 비율이 높은 비정질 카본임을 알 수 있다. 마모면에 붙어 있는 마모입자에 대한 스펙트럼에서는 1350 cm^{-1} 과 1580 cm^{-1} 에서 피크값을 나타내었는데 이것은 흑연 결정체의

D-band(disorder-band)와 G-band(graphitic -band) 값과 일치하는 것으로 마모입자가 흑연 조성이 다량 포함되어 있음을 알 수 있다. 이와 아울러 662 cm^{-1} 에서 산화철($\alpha-Fe_2O_3$)를

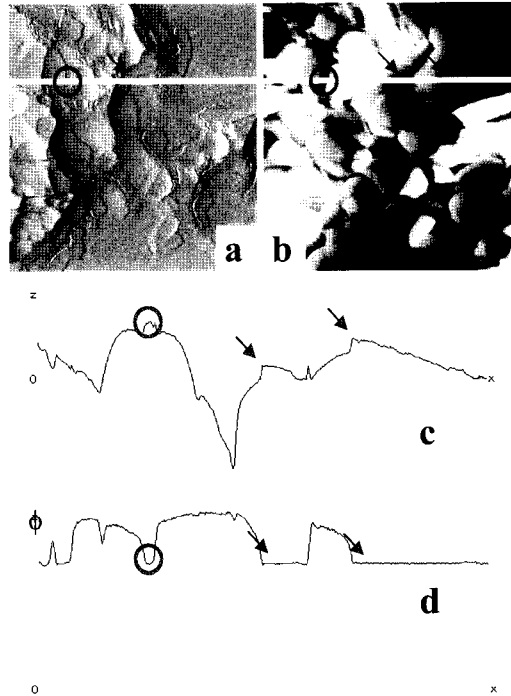


Fig. 3 (a) topography image and (b) phase contrast image of worn DLC coating on plate and (c) variation of height and phase angle along the line marked in (a) and (b), respectively

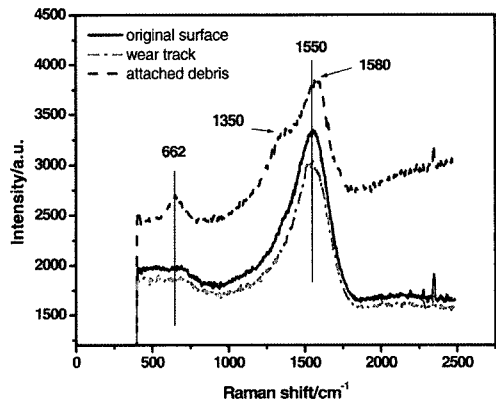


Fig. 4 Micro-laser Raman spectra of the DLC coating prior to and after the wear test

나타내는 피크값이 검출되었는데, 이것은 DLC 코팅된 강구의 철(Fe)성분이 tribochemical reaction에 의해 마모입자에 포함 된 것으로 사료된다. 마모면과 실험 전 DLC 코팅의 라만 스펙트럼을 비교해 보면 강도(intensity)에서 차이를 보일 뿐 크게 다른 점을 발견할 수 없었다. 이것은 트리보필름의 두께가 수 나노미터에 그치고 있어 라만 장비에 쓰인 Arion 레이저의 투과 깊이보다 얇아 트리보필름 밑의 DLC 코팅의 라만 스펙트럼이 주로 검출된 것으로 보이며, 강도의 차이를 나타낸 것은 마모로 인해 코팅의 두께가 얇아졌기 때문에 마모면의 강도가 작게 나온 것이다.

원자력 현미경과 마이크로 라만 스펙트럼의 결과들로 종합해 볼 때 마모 표면에 형성된 얇은 트리보필름은 흑연 혹은 흑연 특성을 갖는 탄소로 구성되어 있다는 결론을 얻을 수 있다. 트리보필름은 실제 접촉이 일어나는 돌기 표면에 형성이 되고 그 두께는 수 나노미터 수준이지만 DLC 코팅 표면을 보호하며 마찰계수를 감소시키는 역할을 한다. 접촉 압력과 마찰열에 의한 온도가 가장 높을 가능성이 있는 돌기에 가장 두꺼운 막이 형성되고 그 조직은 다이아몬드 상 구조에서 흑연 구조로의 전이가 발생하는 것으로 보이며 흑연 구조는 다이아몬드 상 구조 보다 낮은 탄성계수를 가진다. 그러므로 탐침이 새로 형성된 얇은 트리보필름을 주사할 때 위상이 급격하게 감소하게 된다.

4. 결론

강성이 매우 큰 텅스텐 캔틸레버를 사용하여 강성이 비균질한 재료의 미소 표면을 탭핑모드 원자력 현미경으로 측정할 경우에 대해 측정된 위상차 값과 탄성을, 탐침의 선단부 곡률반경, 캔틸레버의 스프링 상수 등 여러 가지 중요한 변수들 간의 상관 관계를 구하였다. 위상차는 재료의 강성, 탐침의 선단부의 반경과 탭핑진동 중의 진폭이 증가함에 따라 증가하며 r_{sp} set-point와 스프링 상수에는 반비례함을 알 수 있다. 위상차영상의 효율성을 확인하기 위하여 마모된 DLC 코팅 표면에 대한 위상차영상을 조사하였다. 측정된 위상차영상은 마모표면에 형성된, 균질하지 않은 탄성을 분포를 가진 마모면의 탄성을 분포를 파악하는 데에 매우 효과적이라는 것을 보여 주었다.

위상차영상을 이용한 마모 표면 분석을 통해 표면 위에 기계적 성질이 다른 나노 차원의 얇은 트리보필름이 형성되었음을 알 수 있었다. 이 얇은 트리보필름은 실제로 접촉이 일어나는 미소돌기 표면에 형성이 되고 그 두께는 접촉 압력과 마찰시 발생하는 온도가 증가함에 따라 두꺼워지게 된다.

또 실험 전 DLC 코팅보다 낮은 강성을 가지며 그 구조는 다이아몬드 상 구조에서 흑연 구조로의 전이가 되는 것으로 보인다.

원자력 현미경으로 측정된 위상차영상은 표면에 존재하는 나노 차원의 초박막의 기계적 특성을 측정하여 균질성 여부를 파악하는 데에 매우 효과적인 수단으로 활용할 수 있다.

후 기

본 논문은 서울특별시가 지원하는 전략산업 혁신클러스터 육성 지원사업(3D Microsystem Packaging을 위한 접합 공정 및 장비개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- (1) Marti, O., 1993, "Nanotribology: Friction on a Nanometer Scale," *Physica Scripta*, Vol. T49, pp. 599~604.
- (2) Binggeli, M. and Mate, C. M., 1994, "Influence of Capillary Condensation of Water on Nanotribology Studied by Force Microscopy," *Applied Physics Letters*, Vol. 65, pp. 415~417.
- (3) Bhushan, B., Israelachvili, J. N. and Landman, U., 1995, "Nanotribology: Friction, Wear, and Lubrication at the Atomic Scale," *Nature*, Vol. 374, pp. 607~616.
- (4) Gibson, C. T., Watson, G. S. and Myhra, S., 1997, "Lateral Force Microscopy - A Quantitative Approach," *Wear*, Vol. 213, pp. 72~79.
- (5) Burnham, N. and Colton, R. J., 1989, "Measuring the Nanomechanical Properties and Surface Forces of Materials Using an Atomic Force Microscope," *Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol. A7, pp. 2906~2913.
- (6) Sarid, D., 1994, *Scanning Force Microscopy*, Oxford University Press, New York, pp. 120~135.
- (7) Sarid, D., 1997, *Exploring Scanning Probe Microscopy*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 136~145.
- (8) Sarid, D., Ruskell, T. G., Workman, R. K. and Chen, D., 1996, "Driven Nonlinear Atomic Force Microscopy Cantilevers: From noncontact to tapping modes of operation," *Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol. B14, pp. 864~867.

- (9) Whangbo, M. H., Bar, G. and Brandsh, R., 1998, "Description of Phase Imaging in Tapping Mode Atomic Force Microscopy by Harmonic Approximation," *Surface Science Letters*, Vol. 411, pp. L794~L801.
- (10) Bar, G., Brandsh, R. and Whangbo, M. H., 1998, "Description of the Frequency Dependence of the Amplitude and Phase Angle of a Silicon Cantilever Tapping on a Silicon Substrate by Harmonic Approximation," *Surface Science Letters*, Vol. 411, pp. L802~L809.
- (11) Barnham, N. A., Behrend, O. P., Oulevey, F., Gremaud, G., Gallo, P. J., Gourdon, D., Dupas, E., Kulik, A. J., Pollock, H. M. and Briggs, G. A. D., 1997, "How Does a Tip Tap?," *Nanotechnology*, Vol. 8, pp. 67~75.
- (12) Chen, X., Davies, M. C., Roberts, C. J., Tendler, S. J. B., Williams, P. M., Davies, J., Dawkes, A. C. and Edwards, J. C., 1998, "Interpretation of Tapping Mode Atomic Force Microscopy Data Using Amplitude-phase-distance Measurements," *Ultramicroscopy*, Vol. 75, pp. 171~181.
- (13) Cleveland, J. P., Anczykowski, B., Schmid, A. E. and Elings, V. B., 1998, "Energy Dissipation in Tapping-mode Atomic Force Microscopy," *Applied Physics Letters*, Vol. 72, pp. 2613~2615.
- (14) Wang, L., 1998, "Analytical Descriptions on the Tapping-mode Atomic Force Microscopy," *Applied Physics Letters*, Vol. 73, pp. 3781~3783.
- (15) Bar, G., Brandsh, R. and Whangbo, M. H., 1999, "Correlation Between Frequency-sweep Hysteresis and Phase Imaging Instability in Tapping Mode Atomic Force Microscopy," *Surface Science Letters*, Vol. 436, pp. L715~L723.
- (16) Bar, G., Brandsh, R. and Whangbo, M. H., 1999, "Effect of Tip Sharpness on the Relative Contributions of Attractive and Repulsive Forces in the Phase Imaging of Tapping Mode Atomic Force Microscopy," *Surface Science Letters*, Vol. 422, pp. L192~L199.
- (17) Wang, L., 1999, "The Role of Damping in Phase Imaging in Tapping Mode Atomic Force Microscopy," *Surface Science*, Vol. 429, pp. 178~185.
- (18) Huhnt, J. P. and Sarid, D., 1998, "Kinetics of Lossy Grazing Impact Oscillators," *Applied Physics Letters*, Vol. 72, pp. 2969~2671.
- (19) Anczykowski, B., Gotsman, B., Fuchs, H., Cleveland, J. P. and Elings, V. B., 1999, "How to Measure Energy Dissipation in Dynamic Mode Atomic Force Microscopy," *Applied Surface Science*, Vol. 140, pp. 376~382.
- (20) Magonov, S. N., Elings, V. and Whangbo, M. H., 1997, "Phase Imaging and Stiffness in Tapping-mode Atomic Force Microscopy," *Surface Science Letters*, Vol. 375, pp. L385~L391.