Multiple Pivot loading 방법을 이용한 액체 환경에서의 수평방향 힘 교정

김류운[†] · 정구현^{*}

울산대학교 기계공학부

Lateral Force Calibration in Liquid Environment using Multiple Pivot Loading

Lyu-Woon Kim[†] and Koo-Hyun Chung^{*}

School of Mechanical Engineering, University of Ulsan

(Received January 4, 2013 ; Revised February 15, 2013 ; Accepted February 16, 2013)

Abstract – Quantifying the nanoscale force between the atomic force microscopy (AFM) probe of a force-sensing cantilever and the sample is one of the challenges faced by AFM researchers. The normal force calibration is straightforward; however, the lateral force is complicated due to the twisting motion of the cantilever. Force measurement in a liquid environment is often needed for biological applications; however, calibrating the force of the AFM probes for those applications is more difficult owing to the limitations of conventional calibration methods. In this work, an accurate nondestructive lateral force calibration method using multiple pivot loading was proposed for liquid environment. The torque sensitivity at the location of the integrated probe was extrapolated based on accurately measured torque sensitivities across the cantilever width along a few cantilever lengths. The uncertainty of the torque sensitivity at the location of the integrated tip was about 13%, which is significantly smaller than those for other calibration methods in a liquid environment.

Keywords – atomic force microscopy (원자력 현미경), rectangular cantilever (직사각형 외팔보), torque sensitivity (비틀림 민감도)

1. 서 론

Atomic force microscopy (AFM)[1]은 매우 작은 끝단 반경을 가지는 탐침을 이용하여 나노 스케일에서 상대재료의 표면을 관찰하거나, 다양한 물성을 분석하는데 효과적으로 이용되고 있다[2-4]. AFM 탐침은 일반적으로 micro-electromechanical-systems(MEMS) 공정을 통하여 외팔보 (cantilever) 위에 형성시키며, 상대재료와의 상호작용을 통하여 발생하는 다양한 종류의 힘은 외팔보의 처짐 (굽힘 또는 비틀림)을 유발하게 되

고, 이러한 처짐은 광감지기(position sensitive detector, PSD)를 통하여 측정된다. 일반적으로 접촉 (contact) AFM에서는 외팔보의 굽힘을 통하여 미리 설정된 수직 하중을 가하게 되며, 탐침은 표면 형상을 따라 움직이며 표면 이미지를 얻게 된다. 동적 (dynamic, tapping, AC, 또는 intermediate-contact) AFM에서는 상대재료와의 상호작용에 의하여 발생하는 외팔보 공진주파수의 변화와 그에 따른 진폭 변화를 이용하여 표면 이미지를 얻는다.

AFM은 표면 형상 관찰 외에, 탐침과 상대재료 사이에 작용하는 힘을 정량적으로 분석하는데 많이 이용되기도 하는데, 이를 위해서는 힘 교정(calibration)이 필수적으로 요구된다. 힘 교정 방법은 탐침에 작용하는

[†]주저자 : lyuwoon.kim@gmail.com

^{*}책임저자 : khchung@ulsan.ac.kr

힘에 대한 광감지기의 민감도 (force sensitivity, V/N)를 직접 측정하는 방법과 외팔보의 강성(spring constant 또는 stiffness, N/m) 및 외팔보 처짐에 따른 광감지기의 민감도(optical lever sensitivity, 또는 deflection sensitivity, V/m)를 각각 얻는 방법으로 나눌 수 있다. AFM을 이용하여 측정할 수 있는 힘의 방향은 크게 수직 (normal)과 수평 (lateral) 방향으로 나눌 수 있으며, 대부분의 AFM 외팔보는 수직하중 압힘에 민감하도록 설계 되어 있다. 현재까지 수직 방향 힘 교정을 위한 다양한 방법들이 제시되어 오고 있으며, 비교적 높은 정확도로 교정이 가능하다. 현재 가장 많이 사용되는 수직방향 교정 방법들은 열잡음 방법(thermal noise method)[5], 기준 외팔보(reference cantilever)를 이용하는 방법[6,7], 또는 hydrodynamic function[8]을 이용하는 방법 등이며, 이를 통하여 비교적 쉽게 교정값을 얻을 수 있다.

한편, 수평방향 힘의 측정을 위해서는 외팔보의 비틀림 처짐이 이용하는데, 특히 탐침이 상대재료와 접촉하여 운동할 때 발생하는 마찰력 측정에 많이 이용되며, 이를 이용한 것이 lateral force microscopy (LFM)이다. LFM 데이터는 접촉 AFM 이미징 과정에서 표면 이미지와 함께 얻을 수 있으므로, 특별한 추가 구성 요소가 필요 없다는 장점을 가진다. 그러나, 수평방향으로 발생하는 힘을 정량적으로 분석하기 위해서 요구되는 교정과정은 수평방향 힘에 비하여 더욱 복잡하며, 높은 불확도 (uncertainty)를 가진다. 예를 들어, 탐침과 상대재료간의 접촉 강성 (contact stiffness) 및 외팔보의 면내 굽힘 강성 (in-plane bending stiffness) 등은 마찰 곡선 (friction loop)을 통한 수평방향 처짐 민감도(lateral deflection sensitivity, V/m) 측정시 불확도를 증가시키는 요인으로 제시되고 있다[9,10]. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 직접적인 힘 교정 방법이 많이 제시되고 있으며, 대표적으로 wedge 방법[11,12], magnetic levitation을 이용하는 방법[13], pivot loading을 이용하는 방법[14] 등이 있다. 특히, 가장 많이 사용되는 방법 중 하나인 wedge 방법의 경우, 교정 과정에서 탐침과 상대재료의 접촉이 유발되므로, 이를 보정하기 위한 방법도 함께 제시되고 있다[15]. 또한 수직 방향 교정법과 마찬가지로, hydrodynamic function을 이용하여 수평방향 강성을 먼저 얻고, 이로부터 비틀림 민감도 (torsional sensitivity)를 역으로 계산하는 방법도 적용 가능하다[16].

최근에는 바이오 재료에 대한 나노 스케일 분석이

대두됨에 따라, 액체 환경에서의 AFM 분석이 많이 이루어지고 있다. 액체 환경에서의 정량적 힘 분석을 위해서는 상대 재료와 AFM 외팔보를 모두 액체내에 담가야 하므로, 대기중에서 이미 교정을 수행했다 하더라도 외팔보의 탐침의 반대면에 위치시킨 레이저를 다시 조정해야 하며, 이에 따라 대기중에서 얻은 교정 정보(예: 외팔보 강성, 광감지기 민감도 등)를 모두 활용할 수는 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 액체 환경내에서 직접적으로 교정을 수행하는 다양한 방법이 제시되고 있다[17]. 또한, 대기중에서 얻은 교정 정보를 일부 이용할 수도 있는데, 강성값은 환경에 따라 변하지 않는 점에 기인하여, 대기중에서 측정한 강성값을 이용하여 액체 환경에서의 광감지기 민감도를 추정할 수 있다. 예를 들어, 대기에서 열잡음 방법이나 hydrodynamic function을 이용하여 외팔보의 굽힘 또는 비틀림 강성을 먼저 얻은 후, 이를 이용하여 액체 환경내에서 얻은 thermal graph로부터 광감지기의 민감도를 역으로 계산하거나 [16,18], 마찰 곡선 등을 통하여 얻는 방법이 그것이다. 그러나, 일반적으로 액체 환경내에서는 외팔보의 공진 주파수, quality factor 등이 크게 감소하므로 대기 환경에 비하여 정확한 교정은 상대적으로 어려우며, 특히 수평방향 힘 교정에 있어서 액체환경에서의 교정값은 큰 불확도를 가지는 경우가 많다.

특히, 최근에는 액체 환경에서 바이오재료의 효과적인 분석을 위한 외팔보가 많이 사용되고 있는데, 이들은 상대적으로 낮은 굽힘 강성과 높은 공진 주파수를 가지도록 설계 된 것으로써, 낮은 기계적 물성(예: 탄성계수, 경도 등)을 가지는 바이오 재료의 파손을 최소화하며 액체 환경내에서 표면 추종성을 향상시키기 위한 것이다. 이러한 외팔보는 비교적 작은 길이와 두께를 가지는 경우가 많으므로, 수평 방향 힘 교정은 더욱 어려워진다. 예를 들어, 외팔보의 길이/폭의 비가 작아짐에 따라, 비틀림 강성을 비교적 쉽게 얻을 수 있는 hydrodynamic function을 적용하기 어려우며[19], 외팔보의 강성이나 비틀림 민감도와 같은 정보를 얻기 위하여, 외팔보의 기하학적 형상을 측정하여 강성값을 계산하거나 마찰곡선으로부터 비틀림 민감도를 측정하는 방법 등을 적용해야 한다. 그러나, 강성 계산을 위해서는 주사전자현미경 (scanning electron microscopy) 등을 이용하여 외팔보의 두께를 측정해야 할 뿐만 아니라, 외팔보 소재의 기계적 물성 (특히, silicon nitride 외팔보)에 의한 불확도가 증가하게 된다. 마찰 곡선을 이용할 경우에는 접촉 강성의 영향 및 면내 굽

힘 강성 등으로 인하여 높은 불확도를 가지게 된다. 다른 직접적인 수평방향 힘 교정 방법으로써 wedge 방법을 활용할 수 있으나, 탐침의 높이 및 형상에 따라 표준 grating을 이용한 방법이 불가능한 경우가 많이 나타나고 있다.

이러한 연구 배경에 따라, 본 연구에서는 바이오 재료의 분석을 위하여 제시되고 있는 AFM 외팔보에 대한 수평 방향 힘 교정을 수행하였다. 이를 위하여 외팔보의 비틀림 민감도로부터 수평방향 힘 민감도를 얻는 직접적인 방법인 multiple pivot loading 방법을 이용하였다. Multiple pivot loading 방법은 최종적으로 탐침 위치에서의 수평방향 힘 민감도를 추정하기 위하여, 다양한 외팔보 위치에서 비틀림 민감도를 얻음으로써, 높은 정확도를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 교정 과정에서 발생할 수 있는 탐침의 파손을 없앨 수 있는 비접촉식 방법 중 하나이다. 수평 방향 교정은 액체 환경 내에서 수행되었으며, 교정 결과에 대한 불확도 분석을 통하여 정량적 정밀도를 얻음으로써, 바이오 재료의 정량적 힘 분석에 효과적으로 활용될 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2-1. AFM cantilever

본 연구는 상용 AFM (MFP-3D, Asylum Research, Santa Barbara, CA)을 이용하여 수행되었으며, 교정에 사용된 AFM 외팔보는 한쪽끝단이 테이퍼진 직사각형 형상이었으며, 소재는 silicon nitride 이었다. 공칭 수직 방향 강성은 0.03 N/m 이며, 외팔보의 공칭 길이와 폭은 각각 $60 \mu\text{m}$ 와 $30 \mu\text{m}$ 로써, 다른 AFM 외팔보에 비하여 상대적으로 작은 길이/폭 비를 가지고 있음을 알 수 있다. 외팔보의 공칭 두께는 180 nm 이며, Au 코팅이 적용되어 있었다. 외팔보 한쪽면에 위치하게 되는 탐침의 공칭 높이는 $7 \mu\text{m}$ 이었다. 실험에 사용된 외팔보는 액체환경에서 바이오 재료를 분석하기 위한 설계가 적용된 것으로써, 소재가 silicon nitride이므로 기계적 물성치를 정확하게 얻기는 힘들며, 작은 길이/폭 비를 가지고 있으므로 hydrodynamic function을 이용하여 외팔보의 비틀림 강성을 예측 (torsional Sader's 방법)할 경우 높은 불확도를 가질 것으로 예상되었다. 또한, 상대적으로 작은 탐침 길이를 가지므로 wedge 방법을 적용하기도 어려움을 알 수 있다. 실제 실험에 사용된 외팔보의 기하학적 형상은 confocal

(a)

(b)

Fig. 1. Confocal microscopy images of the cantilever: (a) tip-sided and (b) front view.

microscope를 이용하여 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 외팔보의 길이 (L) 및 폭 (W)은 각각 $57 \mu\text{m}$, $29 \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 탐침이 외팔보의 가장 끝에 위치하고 있었으므로, 외팔보의 전체 길이와 베이스로부터 탐침이 위치한 곳까지의 거리가 거의 같음을 알 수 있다. 또한, 탐침의 길이(H)는 $7 \mu\text{m}$ 로써 공칭값과 잘 일치함을 알 수 있었다. 그러나, confocal microscope를 이용하여 외팔보의 두께를 정확하게 측정하기는 힘들었다. 액체 환경 실험에 앞서 대기중에서 열잡음방법을 이용하여 수직방향 강성을 측정한 결과, $0.0432 \pm 0.0009 \text{ N/m}$ 로 나타났다. 여기서 제시된 불확도는 10회 측정에 따른 표준 편차이다.

2-2. Multiple pivot loading 방법

Multiple pivot loading을 수행하기 위하여 먼저 높

은 강성 (약 2 N/m) 과 높은 탐침 길이를 가지는 다른 AFM 외팔보를 실리콘 웨이퍼 조각의 한쪽 끝에 위치시키고 에폭시를 이용하여 고정하여 사용하였다. 이 때, 웨이퍼 바깥쪽으로 나온 외팔보의 길이를 가능한 작게 함으로써, 마운팅시킨 외팔보의 강성을 최대한 크게 하였다. 또한, 본 연구에 사용된 AFM을 이용하여 마운팅된 외팔보와 교정하고자 하는 외팔보의 상대 위치를 변화시킬 수 있었으며, 이를 통하여 수직하중이 가해지는 지점과 베이스로부터의 거리 (l) 및 교정하고자 하는 외팔보의 중심축과의 거리 (h) 를 결정할 수 있었다 (Fig. 1 (b) 참조).

AFM 외팔보에 비틀림이 작용할 때 나타나는 광감지기의 비틀림 민감도, S_T (torque sensitivity, V/Nm) 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_T = \frac{\Delta V_L}{T} \quad (1)$$

여기서, ΔV_L 은 비틀림에 따른 광감지기의 전압 변화, T 는 수평방향 힘 (예: 마찰력)과 탐침의 높이 (H)에 의하여 발생하는 비틀림을 의미한다. 그러므로, 작용하는 수평방향 힘을 F_L 이라 할 때 발생하는 비틀림 모멘트는

$$T = F_L H \quad (2)$$

이며, 수평방향 힘 민감도, S_L 은 비틀림 민감도, S_T 와 다음의 관계를 가진다.

$$S_L = \frac{\Delta V_L}{F_L} = \frac{\Delta V_L H}{T} = S_T H \quad (3)$$

Multiple pivot loading 방법을 이용하여 가하는 비틀림은 수직하중 (F_N)과 외팔보의 중심으로부터의 거리 (h)에 의하여 결정된다. 외팔보에 작용하는 수직하중은 수직강성 (k_N , N/m)과 수직방향 처짐 민감도 (S_N , V/m), 그리고 광감지기의 전압 출력값 (ΔV_N)을 이용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_N = k_N \Delta z = k_N \frac{\Delta V_N}{S_N} \quad (4)$$

그러므로, 이 때 발생하는 비틀림은

$$T = F_N h = k_N \frac{\Delta V_N}{S_N} h \quad (5)$$

로 나타나게 된다. 비틀림 민감도와 이들의 관계는

식 (1)로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$S_T = \frac{\Delta V_L}{T} = \left(\frac{S_N}{h k_N} \right) \left(\frac{\Delta V_L}{\Delta V_N} \right) \quad (6)$$

즉, 외팔보의 수직방향 강성, 광감지기의 수직방향 처짐 민감도와 같은 수직 방향 힘과 관련된 측정 값과, 외팔보 중심과 하중이 가해지는 지점과의 거리, 그리고 비틀림에 의하여 발생하는 광감지기의 수직방향 및 수평방향 출력의 비를 이용하여 주어진 외팔보의 길이에 대한 비틀림 민감도를 결정할 수 있다. 또한, 비틀림 민감도는 주어진 외팔보의 길이와 선형적인 관계를 가지므로, 외팔보 길이를 따라 여러지점에서 비틀림 민감도를 구한후, 탐침이 위치한 곳에서의 비틀림 민감도를 추정할 수 있게 된다. 특히, 이러한 방법은 실제 AFM 외팔보에서 탐침이 위치한 곳에서 비틀림 민감도를 직접 측정하는 것이 매우 어렵거나 불가능한 경우에 효과적으로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 먼저 외팔보에 형상을 고려하여, Fig. 1에 제시된 'A' 부분에서부터, 외팔보의 수평방향을 따라 h 를 변화시키며, 일정한 수직하중을 가했을 때 발생하는 광감지기의 신호를 얻음으로써, 주어진 하나의 외팔보 길이에 대한 비틀림 민감도를 구하였다. 이 때 비틀림 민감도는 측정값들로부터 얻어진 $\Delta V_L / \Delta V_N$ 과 $h k_N / S_N$ 데이터의 선형 fitting 으로부터 결정하였다. 또한 외팔보의 길이를 변화시키며 비틀림 민감도를 결정하고, extrapolation을 통하여 탐침이 위치한 곳에서의 비틀림 민감도를 구하였다. 이러한 과정에서는 외팔보의 모서리 부분, 즉 'A' 부분을 정확하게 결정하는 것이 필요한데, 이를 위해서 본 연구에서는 마운팅된 외팔보 탐침과 교정하고자 하는 외팔보의 아래면 사이 접촉이 발생할 때의 AFM 시스템의 좌표와 얻어지는 force curve를 비교하였다. 즉, 모서리에서 마운트된 외팔보의 탐침이 미끄러지는 경우, 일반적인 형태와 다른 force curve가 발생하게 되므로, force curve를 관찰하면서, 미끄러움이 발생하지 않도록 마운팅된 외팔보 탐침을 최대한 바깥쪽으로 위치시킨 후, 접촉이 발생할 때의 AFM 시스템 좌표와 외팔보가 기울어져 있는 각도 등을 고려하여 'A' 지점을 결정할 수 있었다. 본 연구에서 관찰한 결과, 좌표값의 불확도는 약 500 nm로 추정되었으며, 그 외 측정값의 불확도는 5~10회 반복 측정을 통하여 얻은 표준편차(1σ)로 결정하였다. 이들을 이용하여 계산한 식 (6)를 통하여 얻은 최종값의 불확도는 Root-Sum-Squares (RSS) 방

Fig. 2. Optical microscopy image of multiple pivot loading calibration procedure (bottom view).

법을 이용하였다. 이러한 교정은 phosphate buffered saline (PBS) 환경에서 진행되었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 액체 환경 내의 교정 과정을 관찰한 광학 현미경 이미지이다. AFM 시스템을 이용하여 두 외팔보의 상대위치를 조절함으로써, 접촉으로 인한 외팔보 탐침 파손을 피하는 동시에 다양한 위치에서 외팔보의 비틀림을 유발하고, 이 때 발생하는 수직 및 수평방향 광감지기 응답을 얻을 수 있다. Fig. 3는 비틀림을 가할 때 발생하는 광감지기의 수직 및 수평방향 신호를 나타내는 예로써, 베이스로부터의 거리, $l = 43 \mu\text{m}$, 외팔보의 축중심으로부터 거리, $h = 8.5 \mu\text{m}$ 인 지점에서 얻은 측정 결과이다. 접촉이 일어남에 따라, 외팔보의 굽힘 및 비틀림이 동시에 발생함을 알 수 있으며, Fig. 3(a)는 해당지점에서 압전 액추에이터 이송량에 따른 광감지기의 수직방향 출력값으로써, 해당지점에서의 수직방향 처짐 민감도 (S_N)를 구할 수 있다. Fig. 3(a)에 제시된 바와 같이 압전 액추에이터 확장 및 축소에 따라 기울기의 차이가 약간 발생하는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서는 두 기울기의 평균값을 이용하였다[20]. 베이스로부터의 거리가 $43 \mu\text{m}$, 외팔보의 축중심으로부터 거리가 $8.5 \mu\text{m}$ 인 지점에서의 수직방향 처짐 민감도는 $29.0 \pm 0.7 \text{ V}/\mu\text{m}$ 로 나타났다. Fig. 4는 광감지기의 수직방향 신호에 대한 수평방향 신호를 나타내는 그래프으로써, 선형 curve fitting을 통하여 식 (6)에서의 $\Delta V_L/\Delta V_N$ 를 결정하였다. 두 출력값의 비는 매우 높은 선형성을 가지고 있음을 알 수 있

(a)

(b)

Fig. 3. An example of (a) normal and (b) lateral outputs from position sensitive detector at the pivot loading point with $l=43 \mu\text{m}$ and $h=8.5 \mu\text{m}$.

Fig. 4. An example of $\Delta V_L/\Delta V_N$ determination (reproduced from the data in Fig. 3).

다. 이와 같은 방법으로 주어진 l 에 대하여 h 를 변화시키며 각각의 $\Delta V_L/\Delta V_N$ 를 결정하였다.

Fig. 5는 베이스로부터의 거리가 $43 \mu\text{m}$ 인 지점에서

Fig. 5. The torque sensitivity measurement results taken across the cantilever width at a distance, $l=43 \mu\text{m}$

Fig. 6. Plot of torque sensitivity, S_T as a function of measurement position, l , along the length of the cantilever. The curve fit is extrapolated to the integrated tip (red circle).

의 비틀림 민감도를 나타내는 결과이다. 이 때, 측정지점에서의 수직 방향 강성 (k_N)은 탐침이 위치한 곳에서 열잡음방법으로 구한 수직방향 강성 ($0.0432 \pm 0.0009 \text{ N/m}$) 및 외팔보 전체의 길이 ($L=57 \mu\text{m}$)와 측정위치까지의 길이 ($l=43 \mu\text{m}$)를 이용하여 얻을 수 있었다. Fig. 5에 제시된 바와 같이, $\Delta V_L/\Delta V_N$ 과 hk_N/S_N 은 높은 선형성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 과정을 통하여 최종적으로 얻은 베이스로부터의 거리, $l=43 \mu\text{m}$ 인 지점의 비틀림 민감도는 $9.6 \pm 0.3 \text{ V/pNm}$ 로 나타났다.

Fig. 6은 앞서 제시한 과정을 통하여 각 위치별로 결정된 베이스로부터의 거리 (l)에 따른 각 지점에서의 비틀림 민감도를 나타낸다. 본 실험에 사용된 외팔보는

탐침이 외팔보의 끝단에 위치하고 있으므로, 탐침이 위치한 곳에서의 비틀림 민감도를 직접 구하는 것은 어려웠으므로, 측정위치가 각각, $38 \mu\text{m}$, $43 \mu\text{m}$, $48 \mu\text{m}$, $53 \mu\text{m}$ 인 지점에서 비틀림 민감도를 얻음으로써 탐침이 위치한 곳에서의 비틀림 민감도는 extrapolation하여 얻었다. Fig. 6(b)에 제시한 바와 같이 외팔보의 길이 증가에 따라 비틀림민감도는 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었으며, 본 실험에 사용된 외팔보의 경우 탐침이 위치한 곳에서의 비틀림 민감도는 13.3 V/pNm 로 계산되었다. Fig. 6에 제시된 각 측정지점에서의 오차 막대들은 모든 측정값의 표준편차를 RSS 방법으로 합산한 결과(1σ)이며, 최종적으로 extrapolation을 통하여 얻은 탐침 위치에서의 불확도는, 선형 fitting에서 발생하는 기울기 불확도를 함께 고려하였다[21]. 탐침 위치에서 비틀림 민감도의 불확도는 1.7 V/pNm 이었으며, 이는 측정값의 약 13%에 해당함을 알 수 있었다. 본 교정방법에서 불확도에 영향을 미치는 가장 큰 인자는 측정위치와 베이스와의 거리 (l) 및 외팔보중심축간의 거리 (h)와 같은 길이 측정에서 발생된 것으로 추정된다. 그러나, 최종측정값의 불확도는 일반적으로 액체환경에서 얻은 다른 교정 결과에 비하여 높을 뿐만 아니라, 다양한 외팔보 위치들에서 교정을 수행함으로써, 최종 결정값의 정확도는 매우 높은 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 AFM을 이용하여 액체 환경에서 정확한 수평방향 힘을 측정하기 위하여, 바이오재료 측정을 위한 기하학적 특성을 가지는 AFM 외팔보에 대하여 힘 교정을 수행하고 불확도를 분석하였다. 액체 환경에서 바이오재료를 분석하기 위하여 제시되고 있는 AFM 외팔보는 현재 수평방향 힘 교정방법으로 많이 사용되고 있는 hydrodynamic function이나 wedge 방법 등을 쉽게 적용하기 어려울 뿐만 아니라, 높은 불확도를 가지는 경우가 많다. 본 연구에서는 보다 정확한 교정을 위하여 multiple pivot loading 방법을 적용하였으며, 정확한 수평 방향 힘 민감도를 얻을 수 있었다. 각 측정값들의 불확도로부터 RSS 방법을 이용하여 합산한 최종 수평방향 힘 민감도의 불확도는 약 13%로 나타났으며, 다른 수평방향 힘 교정방법들에 비하여 비교적 높은 정밀도를 가지고 있음을 알 수 있었다. 본 방법은 수평방향 힘 민감도를 직접적으로

측정할 수 있는 교정방법 중 하나로써, 교정 과정에서 탐침의 접촉이 유발되지 않으므로 탐침의 파손을 배제할 수 있을 뿐만 아니라, 접촉 강성으로 인한 불확도를 제거할 수 있는 장점을 가진다. 또한 본 방법은 탐침 위치에서 직접 교정을 수행하기 힘든 경우에도 extrapolation을 통하여 비교적 정확한 값을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이를 수행하기 위한 기술적 방법들을 함께 제시하였으며, AFM을 이용하여 마찰력과 같은 수평방향 힘을 정확히 측정하는데 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2012년 울산대학교 기계공학부의 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Binnig, G., Quate, C. F., and Gerber, C., "Atomic Force Microscope," *Phys Rev Lett*, Vol. 56, pp. 930-933, 1986.
2. Chung, K. H., Bhadriraju, K., Spurlin, T. A., Cook, R. F., and Plant, A. L., "Nanomechanical Properties of Thin Films of Type I Collagen Fibrils," *Langmuir*, Vol. 26, pp. 3629-3636, 2010.
3. Mahaffy, R. E., Shih, C. K., MacKintosh, F. C., and Käs, J., "Scanning Probe-Based Frequency-Dependent Microrheology of Polymer Gels and Biological Cells," *Phys Rev Lett*, Vol. 85, pp. 880-883, 2000.
4. Stan, G., Krylyuk, S., Davydov, A. V., Levin, I., and Cook, R. F., "Ultimate Bending Strength of Si Nanowires," *Nano Lett.*, Vol. 12, pp. 2599-2604, 2012.
5. Hutter, J. L. and Bechhoefer, J., "Calibration of Atomic-Force Microscope Tips," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 64, pp. 1868-1873, 1993.
6. Torii, A., Sasaki, M., Hane, K., and Okuma, S., "A Method for Determining the Spring Constant of Cantilevers for Atomic Force Microscopy," *Meas Sci Technol*, Vol. 7, pp. 179-184, 1996.
7. Gates, R. S. and Reitsma, M. G., "Precise Atomic Force Microscope Cantilever Spring Constant Calibration using a Reference Cantilever Array," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 78, pp. 086101, 2007.
8. Sader, J. E., Chon, J. W. M., and Mulvaney, P., "Calibration of Rectangular Atomic Force Microscope Cantilevers," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 70, pp. 3967-3969, 1999.
9. Cain, R. G., Biggs, S., and Page, N. W., "Force Calibration in Lateral Force Microscopy," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 227, pp. 55-65, 2000.
10. Sader, J. E. and Green, C. P., "In-Plane Deformation of Cantilever Plates with Applications to Lateral Force Microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 75, pp. 878-883, 2004.
11. Ogletree, D. F., Carpick, R. W., and Salmeron, M., "Calibration of Frictional Forces in Atomic Force Microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 67, pp. 3298-3306, 1996.
12. Varenberg, M., Etsion, I., and Halperin, G., "An Improved Wedge Calibration Method for Lateral Force in Atomic Force Microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 74, pp. 3362-3367, 2003.
13. Li, Q., Kim, K. -, and Rydberg, A., "Lateral Force Calibration of an Atomic Force Microscope with a Diamagnetic Levitation Spring System," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 77, pp. 065105, 2006.
14. Chung, K. H. and Reitsma, M. G., "Note: Lateral Force Microscope Calibration using Multiple Location Pivot Loading of Rectangular Cantilevers," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 81, pp. 026104, 2010.
15. Wang, F. and Zhao, X., "Effect of Contact Stiffness on Wedge Calibration of Lateral Force in Atomic Force Microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 78, pp. 043701, 2007.
16. Wagner, K., Cheng, P., and Vezenov, D., "Noncontact Method for Calibration of Lateral Forces in Scanning Force Microscopy," *Langmuir*, Vol. 27, pp. 4635-4644, 2011.
17. Ryu, S. and Franck, C., "In Situ Hydrodynamic Lateral Force Calibration of AFM Colloidal Probes," *Langmuir*, Vol. 27, pp. 13390-13399, 2011.
18. Higgins, M. J., Proksch, R., Sader, J. E., Polcik, M., Endoo, S. M., Cleveland, J. P., and Jarvis, S. P., "Noninvasive Determination of Optical Lever Sensitivity in Atomic Force Microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 77, pp. 013701, 2006.
19. Green, C. P., Lioe, H., Cleveland, J. P., Proksch, R., Mulvaney, P., and Sader, J. E., "Normal and Torsional Spring Constants of Atomic Force Microscope Cantilevers," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 75, pp. 1988-1996, 2004.
20. Chung, K. H., Shaw, G. A., and Pratt, J. R., "Accurate Noncontact Calibration of Colloidal Probe Sensitivities in Atomic Force Microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 80, pp. 065107, 2009.
21. John R. Taylor. *An Introduction Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. Sausalito, California: University Science Books, 1996.