V 형상을 가지는 원자현미경 Cantilever의 정량적 마찰력 교정

이희준[†] · 김광희 · 김현태 · 강보람 · 정구현^{*}

울산대학교 기계공학부

Quantitative Lateral Force Calibration of V-shaped AFM Cantilever

Huijun Lee[†], Kwanghee Kim, Hyuntae Kim, Boram Kang and Koo-Hyun Chung^{*}

School of Mechanical Engineering, University of Ulsan

(Received June 21, 2012; Revised August 14, 2012; Accepted August 16, 2012)

Abstract – Atomic force microscopy (AFM) has been used as a tool, not only for imaging surfaces, but also for measuring surface forces and mechanical properties at the nano-scale. Force calibration is crucial for quantitatively measuring the forces that act between the AFM probe of a force sensing cantilever and a sample. In this work, the lateral force calibrations of a V-shaped cantilever were performed using the finite element method, multiple pivot loading, and thermal noise methods. As a result, it was shown that the multiple pivot loading method was appropriate for the lateral force calibration of a V-shaped cantilever. Further, through crosschecking of the abovementioned methods, it was concluded that the thermal noise method could be used for determining the lateral spring constants as long as the lateral deflection sensitivity was accurately determined. To obtain the lateral deflection sensitivity from the sticking portion of the friction loop, the contact stiffness should be taken into account.

Keywords – contact stiffness (접촉강성), friction loop (마찰 곡선), pivot loading method (피벗로딩 방법), thermal noise method (열잡음 방법)

1. 서 론

Atomic Force Microscopy(AFM) [1] 은 매우 작은 반경을 가지는 탐침(tip)을 이용하여 나노 스케일에서 상대 재료의 표면을 관찰하거나, 표면에서 발생하는 다양한 현상을 이해하는데 많이 활용되고 있다. 특히, AFM은 탐침과 상대재료의 상호작용을 분석함으로써, 상대재료의 기계적 물성[2] 뿐만 아니라, 표면에서 발생하는 다양한 물리/화학적 힘을 정량적으로 이해하는데 효과적으로 이용되고 있다. 또한, 최근에는 이러한 상호작용을 기반으로 나노 가공 기술, 조작 기술[3,4], 그리고 정보저장 기술[5] 등과 같이 다양한 분야에서 응용기술이 제시되고 있다.

AFM을 이용한 측정 및 응용기술에서는 많은 경우 정량적인 분석이 요구되며, 이를 위해서는 AFM cantilever의 교정(calibration)이 필수적으로 선행되어야 한다. 특히, AFM 탐침과 상대재료 사이에 작용하는 수직방향의 힘은 cantilever의 수직방향 처짐(normal deflection)으로부터, 상대운동시 발생하는 마찰력은 cantilever의 비틀림에 의한 수평방향 처짐(lateral deflection)으로부터 각각 얻게 되며, 대부분의 AFM에서는 이러한 cantilever의 거동을 photo-detector를 이용하여 측정하고 있다. 그러므로, AFM을 이용한 정량적 분석을 위해서는 cantilever의 수직 및 비틀림 운동과 photo-detector의 응답 특성을 이해해야 한다.

AFM cantilever의 교정방법은 cantilever의 sensitivity를 측정하는 과정과 강성을 결정하는 과정으로 나누어질 수 있다. 예를 들어, force-distance curve 등을 이

[†]주저자 : hjlee0099@gmail.com

^{*}책임저자 : khchung@ulsan.ac.kr

용하여 cantilever의 수직방향 처짐에 따른 photo-detector의 응답 특성(normal deflection sensitivity, V/m)을 구하고, cantilever의 수직방향 강성(normal stiffness, N/m)을 이론적이나 실험적으로 얻는 방법들이 이에 해당한다. 또한, 보다 정밀하고 정확한 교정을 위하여, 알고 있는 힘이나 비틀림을 가할 때 발생하는 photo-detector의 출력을 직접적으로 얻는 방법들도 함께 제시되고 있다. 현재까지 많이 사용되는 수직방향 교정 방법은 thermal noise를 이용하는 방법[6], 추가 질량을 이용하는 방법[7], hydrodynamic function을 이용하는 방법[8], reference cantilever를 이용하는 방법[9] 등이 있으며, electrostatic force를 이용한 직접적인 교정 방법[10]도 함께 제시되고 있다. 마찰력 측정을 위한 교정방법으로 위에 제시된 방법들이 함께 활용될 수 있으며, 직접적인 교정 방법으로 wedge calibration 방법[11-13], magnetic levitation을 이용하는 방법[14], pivot loading을 이용하는 방법 등도 제시되고 있다[15,16]. 그러나, 비틀림에 의한 cantilever의 거동은 수직방향 굽힘에 비하여 복잡하고, 수평방향으로 마찰력이 작용할 때 발생하는 cantilever의 면내 수평방향 굽힘(in-plane bending), 탐침 자체의 굽힘(tip bending), 접촉강성(contact stiffness)에 의한 영향 등에 의하여 상대적으로 큰 불확실도를 가진다. 탐침의 끝단에 수평방향으로 힘(예: 마찰력)이 작용하여 cantilever의 비틀림이 유발될 때, 작용하는 스프링은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{k_{total}} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{k_{in-plane}} + \frac{1}{k_{tip bending}} + \frac{1}{k_{con}}$$

여기서, k_L 은 수수 비틀림에 의한 수평방향 강성(lateral stiffness), $k_{in-plane}$ 은 면내 수평방향 굽힘 강성(in-plane bending stiffness), $k_{tip bending}$ 은 탐침의 굽힘 강성(tip bending stiffness), k_{con} 은 접촉 강성을 의미한다. 이와 같이 수직 방향의 힘을 교정하는 방법은 상대적으로 명확하게 제시되고 있는 반면, 마찰력 측정을 위한 교정방법은 상대적으로 미흡한 실정으로 보다 효과적인 교정 방법에 관한 연구가 요구된다.

현재 사용되고 있는 AFM cantilever는 직사각형, 또는 V 형상을 가지고 있는데, 직사각형 형상을 가지는 cantilever의 경우, beam theory를 통하여 각 방향의 강성을 이론적으로 계산하기도 쉬울 뿐만 아니라, 기존 연구를 통하여 제시된 thermal noise 방법, hydrodynamic function 등을 통하여 실험적으로도 비

교적 정확한 값을 쉽게 얻을 수 있다. 그러나, V 형상을 가지는 cantilever의 경우에는 그 형상으로 인하여, 이론값이나 실험값의 오차가 상대적으로 클 뿐만 아니라, 기존에 제시된 몇몇 방법들은 활용하기 힘들다. 반면, V 형상을 가지는 cantilever는 큰 면내 수평 굽힘 강성을 가지므로, 이에 따른 오차를 무시할 수 있는 장점을 가진다. 따라서, V 형상 cantilever를 위한 효과적인 교정 방법을 도출함으로써, 보다 정확한 마찰력 측정에 기여할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 V 형상을 가지는 AFM cantilever의 수평방향 힘 교정을 위한 연구로써, 기존 연구를 통하여 제시된 수식과 유한 요소법(Finite Element Method, FEM)을 통하여 cantilever의 수평방향 강성을 이론적으로 구하고, 그 결과를 thermal noise 방법과 pivot loading 방법을 이용하여 얻은 값들과 함께 비교 분석하였다. 특히, cantilever 위 여러 지점에서 pivot loading 방법을 수행함으로써 비틀림 민감도(torque sensitivity, V/Nm)를 직접 얻는 방법은 높은 정확성을 가지고 있는 것으로 제시되고 있을 뿐만 아니라, 탐침의 위치를 정확히 파악하기 힘든 경우 효과적으로 활용될 수 있으므로, 본 연구에서는 이러한 방법을 V 형상을 가지는 cantilever에 적용하기 위하여, cantilever 위 여러 지점에서 pivot loading을 이용한 교정을 수행하고 FEM 결과와 함께 체계적으로 비교 분석하였다. 또한, friction loop와 thermal noise 방법을 통한 수평방향 교정 방법의 타당성을 확인하고, 이 때 접촉 강성에 의한 영향을 함께 고찰함으로써, 효과적이고 정확한 교정 방법을 확립하는데 기여하고자 하였다.

2. 연구방법

본 연구는 상용화 되어 있는 AFM(MFP-3D, Asylum Research, Santa Barbara, CA)을 이용하여 수행되었으며, FEM 해석을 위해서는 ABAQUS를 이용하였다. 0.6 N/m의 공칭(nominal) 수직방향 강성을 가지는 V 형상의 silicon nitride cantilever를 이용하였다. 본 장에서는 먼저 cantilever의 형상 측정 결과와 FEM 해석 방법을 제시한 후, pivot loading, thermal noise 측정 방법을 설명하고자 한다.

2-1. Cantilever 형상 및 FEM 모델

Cantilever의 기하학적 형상을 결정하기 위하여 scanning electron microscope(SEM)을 이용하였다.

Fig. 1. SEM micrographs of AFM cantilever from (a), (b) top view and (c) front view.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 cantilever의 SEM micrograph 들이다. Fig. 1 (a)는 cantilever의 전체적인 형상을 나타내며, 탐침이 위치한 cantilever 끝단은 높은 배율로 관찰하여 Fig. 1 (b)에 함께 제시하였다. 관찰된 바와

Fig. 2. FEM simulation model of V-shaped cantilever.

같이, 탐침은 피라미드 형상을 가지고 있으며 cantilever의 끝에서 $4.1 \mu\text{m}$ 떨어져 있고, cantilever 중심축으로부터도 약 $1 \mu\text{m}$ 정도의 거리를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, cantilever의 수직 및 수평방향 강성을 이론적으로 계산하기 위해서는 cantilever의 두께 및 탐침의 높이가 요구되므로, cantilever를 정면에서 관찰하였다. Fig. 1 (c)에 나타난 바와 같이, cantilever의 두께(t)는 $0.6 \mu\text{m}$, 탐침의 높이(h)는 $3.4 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. 이와 같은 탐침 관찰 결과로부터, 본 연구에 사용된 탐침은 피라미드 형상을 가질 뿐만 아니라, 다른 일반적인 cantilever에 비하여 작은 높이를 가지므로, 비틀림이 가해질 때 함께 유발되는 탐침 자체의 굽힘은 상대적으로 작을 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 2는 SEM 이미지로부터 결정된 치수를 바탕으로 구성된 FEM 해석 모델을 나타낸다. 탐침이 있는 반대쪽 베이스면은 고정시키고, cantilever 중심축으로부터 거리(H)를 띄우고 일정 하중(100 nN)을 가하여 수직방향 처짐과 함께 비틀림을 유발시켰다. 하중이 작용하기 전 후 각 지점들의 위치를 비교함으로써, 비틀림 모멘트에 따라 발생한 비틀림 각(ϕ)을 분석할 수 있으며, cantilever의 비틀림 강성, k_{ϕ}^{FEM} (torsional stiffness, Nm/rad)을 얻을 수 있다. 또한, Fig. 2에 나타난 것처럼 cantilever상에 위치한 탐침의 위치(L)를 cantilever 길이 방향(y 방향)으로 변화시키며 수직하중을 가하였는

데, 최초 수직하중을 가하는 지점은 탐침이 cantilever의 끝단으로부터 $4.1\ \mu\text{m}$ 떨어져 있음을 고려하여 결정하였으며, $10\ \mu\text{m}$ 간격으로 총 4 지점에서 비틀림 강성을 얻고, 기존 연구 통하여 제시된 수식[17]으로 계산한 결과와 비교하였다. 이와 같은 결과는 pivot loading 고정 방법 및 thermal noise 방법을 통하여 얻은 실험값과 비교하였다.

본 연구에 사용된 cantilever의 재질은 비정질 구조를 가지는 silicon nitride이며, silicon nitride의 기계적 물성(예: 탄성계수, 전단계수)은 제조방법 및 공정에 따라 다른 것으로 제시되고 있다. 이와 같은 cantilever 물성의 불확실도는 이론적 계산 결과, 또는 FEM 분석결과와 오차를 유발하므로, 본 연구에서는 실험적으로 얻은 수직방향 강성과 이론적인 계산값[17]을 비교하여 탄성계수를 구하였다. 즉, 현재 AFM cantilever의 수직 강성을 얻는데 가장 많이 사용되는 방법 중 하나인 thermal noise 방법으로부터 수직방향 강성을 실험적으로 얻고, 이를 이론적으로 계산된 값과 비교하여 두 값이 일치하도록 탄성계수를 정한 후 FEM 해석에 이용하였다. 실험에 사용된 cantilever의 수직방향 처짐 민감도(S_N , normal deflection sensitivity, V/m)는 $41.2 \times 10^7\ \text{V/m}$ 였으며, thermal noise 방법을 통하여 얻은 수직방향 강성(k_N^r)은 $0.989\ \text{N/m}$ 로 측정되었다. 이를 이용하여 유추된 silicon nitride의 탄성계수는 $235\ \text{GPa}$ 로 나타났으며, 이는 기존의 연구를 통하여 제시된 silicon nitride의 탄성계수 범위 ($200 \sim 320\ \text{GPa}$) 내에 포함되어 있음을 알 수 있다. FEM 해석을 통하여 얻은 수직방향 강성(k_N^r)은 $1.031\ \text{N/m}$ 으로써, 이론적 계산 값에 비하여 약간 크게 나타났는데, 이는 cantilever의 형상이 Fig. 1에 제시된 바와 같이 완벽한 V 형상이 아니기 때문에 발생한 차이로 생각된다.

2.2. 실험

본 연구에서는 먼저 pivot loading 방법으로부터 비틀림 민감도를 실험적으로 측정하였으며, friction loop로부터 수평방향 처짐 민감도(lateral deflection sensitivity, V/m)를 구하였다. 또한, 수평방향 처짐 민감도를 이용하여 thermal noise 그래프로부터 수평방향 강성을 얻어 다른 결과들과 비교하였다. Pivot loading을 수행하기 위하여 다른 직사각형 형상의 silicon cantilever(AC160, Olympus, Tokyo)를 Si (100) 표면 위에 고정시켜 이용하였다. 고정하고자 하는 V 형상의 cantilever 아래에 직사각형 형상의 cantilever를 위치시

Fig. 3. Optical microscope image of pivot loading calibration method using mounted cantilever on Si wafer.

킨 후, 두 cantilever의 상대좌표를 변화시키며, force-distance curve를 얻음으로써 다양한 지점에서의 비틀림 민감도(S_r^r)를 구하였다[16]. 직사각형 형상 cantilever의 탐침 높이는 약 $15\ \mu\text{m}$ 로써, V 형상 cantilever의 탐침 높이($3.4\ \mu\text{m}$)에 비하여 매우 크므로, 두 탐침의 간섭(interference) 없이 비틀림을 가할 수 있었다. Fig. 3은 이러한 과정을 나타내는 광학 현미경 사진으로 아래쪽 직사각형 형상의 cantilever 방향에서 관찰한 결과이다.

본 연구에서는 또한, thermal noise 방법을 이용하여 비틀림 강성을 결정하는 방법의 타당성을 고찰하였다. Photo-detector에서 발생하는 수평방향 응답을 이용하여 thermal noise 그래프를 얻었으며, 이로부터 cantilever의 비틀림 공진주파수, Q factor 등을 얻어 수평방향 강성(k_L^r)을 구하였다[18,19]. 이때 요구되는 수평방향 처짐 민감도는 friction loop로부터 결정하였다[20]. Friction loop는 silicon (100) 표면 위에 탐침을 접촉시킨 후 좌우로 이동시키면서 얻을 수 있는데, 운동방향이 바뀔 때 탐침이 상대표면에 고정(stick)되면서 cantilever의 비틀림이 유발되며, 이 때 발생하는 기울기로부터 수평변형 처짐 민감도(S_L^{rL})를 얻을 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, friction loop로부터 얻은 기울기는 특히 접촉 강성에 의하여 순수 비틀림에 의한 기울기에 비하여 적게 측정되는 경향을 가지므로, 이러한 영향을 감소시키기 위하여 본 연구에서는 수직하중을 허용범위 내에서 가능한 크게 가하였으며, 해당 하중에서의 접촉 강성을 보정하여 그 영향을 명확하게 고찰하고자 하였다.

Fig. 4. FEM simulation results: (a) topview and (b) front view.

3. 연구결과 및 고찰

Fig. 4 (a)는 시뮬레이션의 결과를 나타내는 대표적인 예로써, cantilever의 중심축에서 $1.206\ \mu\text{m}$ 떨어진 위치에 $100\ \text{nN}$ 의 하중을 수직방향으로 가하였을 때의 해석 결과를 나타낸다. Fig. 4 (b)는 비틀림을 가한 경우와 그렇지 않은 경우의 cantilever를 함께 표시한 것으로써, $120.6 \times 10^{-6}\ \text{nNm}$ 의 비틀림 모멘트가 가해짐에 따라, 수직방향 처짐과 비틀림이 발생하였음을 알 수 있다. Fig 5 (a)는 탐침의 실제 위치($L=67.7\ \mu\text{m}$)에서 비틀림 강성을 얻은 결과로써, 비틀림 모멘트(T)와 비틀림각(ϕ)의 관계를 나타낸다. Curve fitting 결과, 탐침이 위치한 곳에서의 비틀림 강성(k_{ϕ}^{FEM})은 $2.43\ \text{nNm/rad}$ 로 나타났으며, 예상된 바와 같이, 동일한 cantilever 길이(L)에서 중심축과의 거리(H)를 변화시키며 얻은 비틀림 강성은 선형성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. Cantilever의 비틀림 강성과 비틀림에 의한 수평방향 처짐 강성은 매우 작은 비틀림에 대하여 다음의 관계를 가지므로,

$$k_L = \frac{k_{\phi}}{(h+t/2)^2}$$

이를 이용하여 계산한 결과, 수평방향 강성(k_L^{FEM})은

Fig. 5. (a) Torsional spring constant of the V-shaped cantilever at the actual tip location ($L=67.7\ \mu\text{m}$) by FEM simulation and (b) comparison of lateral stiffness with respect to distance between tip and the cantilever base by FEM and theoretical calculation.

$177.6\ \text{N/m}$ 로 나타났다. Fig. 5 (b)는 FEM 분석과 수식으로 계산된 수평방향 강성 결과를 탐침의 길이방향 위치(L)에 따라 비교한 결과이다. L 이 짧아질수록 두 결과의 차이가 커짐을 알 수 있는데, 그 이유는 기존 연구를 통하여 제시된 모델은 탐침이 cantilever 끝단 가까이에 위치한 이상적인 V 형상을 기반으로 하고 있으므로 탐침의 위치가 베이스쪽으로 가까워 질수록 모델이 성립하지 않기 때문이다. 그러나, 탐침이 위치한 곳($L=67.7\ \mu\text{m}$)에서의 수평방향 강성은 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6은 탐침이 위치한 곳에서 수행된 pivot loading 실험 결과를 나타낸다. FEM 해석과 마찬가지로, 중심축으로부터의 거리(H)를 변화시키며 force-

Fig. 6. Calibration result of pivot loading method: (a) determination of torque sensitivity at tip location and (b) variation of torque sensitivity with respect to distance between tip and the cantilever base.

distance curve를 얻었으며, photo-detector로부터 나오는 수직방향 신호(V_N) 및 수평방향 신호(V_L)를 분석하여 비틀림 모멘트 민감도를 결정하였다[16]. 이를 위해서 cantilever의 수직방향 처짐 민감도(S_N)와 thermal noise 방법을 통하여 얻은 수직방향 강성(k_N^T)을 이용하였으며, Fig. 6 (a)에 제시한 바와 같이, 탐침이 위치한 곳($L=67.7 \mu\text{m}$)에서의 비틀림 민감도(S_T^P)는 $4.15 \times 10^{11} \text{ V/(Nm)}$ 로 나타났다. FEM 분석결과와 마찬가지로, H 변화에 따라 높은 선형성을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 6 (b)는 pivot loading 방법을 이용하여 L 에 따른 비틀림 민감도를 측정된 결과이다. AFM 좌표를 이용하여 다양한 탐침의 길이방향 위치(L)에 대하여 비틀림 민감도를 측정하는 방법은, 측정값의 정확도 및 정밀도를 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 실제 탐침 위치에서 비틀림 민감도를 직접 측정하기 어려운 경우 효과적으로 활용될 수 있다. L 이 감소할

Fig. 7. Lateral deflection sensitivity determined at the sticking portion of friction loop.

수록 비틀림 민감도가 선형적으로 감소함을 알 수 있으며, 이와 같은 여러 번의 실험 결과에서, pivot loading을 이용하여 측정된 비틀림 민감도는 V 형상을 가지는 cantilever에 대해서도 높은 정확도를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

Pivot loading 방법은 비틀림 민감도를 직접적으로 측정하기 때문에 수평방향 강성을 따로 구할 필요가 없는 장점을 가지나, 본 연구에서는 다른 분석 결과와의 비교를 위하여 수평방향 강성을 얻는데 함께 활용되었다. 즉, FEM을 통하여 얻은 비틀림 강성과 pivot loading 방법으로 얻은 비틀림 민감도로부터, cantilever의 비틀림 처짐 민감도(torsional sensitivity, V/rad), S_ϕ 를 아래식을 이용하여 예측할 수 있으며,

$$S_\phi = k_\phi S_T$$

수평 방향 처짐 민감도, S_L 는 비틀림양이 매우 작은 경우, 아래와 같은 관계에서

$$S_L = \frac{S_\phi}{(h+t/2)}$$

구할 수 있다. FEM을 통하여 얻은 비틀림 강성과 pivot loading을 통하여 얻은 비틀림 민감도로부터 구한 비틀림 처짐 민감도($S_\phi^{\text{FEM, pivot}}$)는 $1.01 \times 10^3 \text{ V/rad}$ 으로, 수평방향 처짐 민감도($S_L^{\text{FEM, pivot}}$)는 $2.78 \times 10^8 \text{ V/m}$ 로 나타났다. 이와 같이, FEM 및 pivot loading 방법을 이용하여 얻은 결과는 friction loop를 이용하여 실험적으로 얻은 수평방향 처짐 민감도와, thermal noise 방법을 통한 수평방향 강성 결과 등과 함께 비교하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 측정된 friction loop의 대표

Table 1. Results of FEM simulation, pivot loading and thermal noise calibration methods

Lateral sensitivity determination			Lateral stiffness determination		
Method	Lateral sensitivity		Method	Measured property	Lateral stiffness
	before k_{con} correction	after k_{con} correction			
Friction loop	$S_L^{FL} = 1.62 \times 10^8$ V/m	$S_L^{FL,cor} = 2.70 \times 10^8$ V/m	FEM simulation	Torsional stiffness, $k_\phi = 2.43 \times 10^{-9}$ Nm/rad	$k_L^{FEM} = 177.6$ N/m
			Pivot loading method	Torque sensitivity, $S_T = 4.15 \times 10^{11}$ V/(Nm)	before k_{con} correction $k_L^P = 105.2$ N/m
					after k_{con} correction $k_L^{P,cor} = 167.9$ N/m
			Thermal noise method	Lateral stiffness	before k_{con} correction $k_L^T = 65.6$ N/m
					after k_{con} correction $k_L^{T,cor} = 167.2$ N/m

적인 예를 나타낸다. Fig. 7에 제시된 결과는, 본 연구에 사용된 cantilever와 AFM을 이용하여 가할 수 있는 가장 큰 하중인 93.4 nN의 수직하중에서 측정된 결과이며, 10회 측정된 결과, 수평방향 처짐 민감도 (S_L^{FL})는 1.62×10^8 V/m로 나타났다. 이는 앞서 예측한 값($S_L^{FEM,pivot} = 2.78 \times 10^8$ V/m)에 비하여 40% 정도 작음을 알 수 있다. 또한, friction loop에서 측정된 수평방향 처짐 민감도와 thermal noise 그래프를 이용하여 얻은 cantilever의 수평방향 강성(k_L^T)은 65.6 N/m로 나타났으며, FEM 분석으로부터 얻은 177.6 N/m에 비하여 매우 작은 값을 알 수 있다. 이와 같이 thermal noise 그래프로부터 결정된 수평방향 강성이 더 작은 이유는 friction loop를 이용하여 측정된 수평방향 처짐 민감도의 오차에 기인한다. 즉, friction loop를 통하여 수평방향 처짐 민감도를 얻는 경우, cantilever와 상대재료 사이에는 순수 비틀림에 의한 수평방향 강성 외에, cantilever의 면내 수평방향 굽힘 강성, 접촉 강성이 포함되므로, 측정값은 작게 나타난다. 특히, V 형상을 가지는 cantilever의 경우 면내 수평방향 굽힘 강성이 매우 크므로 무시할 수 있으나, 접촉 강성은 비틀림에 의한 수평강성과 비슷한 값을 가지는 경우가 많으므로, 그 영향을 반드시 고려해야 한다. 본 실험에서 가한 93.4 nN의 수직하중에 의한 접촉 강성(k_{con})을 계산한 결과[13], 약 298 N/m로 나타났다. FEM 해석을 통하여 예측한 순수 비틀림에 의한 수평방향 강성이 177.6 N/m 임을 고려할 때, 그 영향이 클 것임을 확인할 수 있다. FEM 해석으로부터

얻은 cantilever의 수평방향 강성과 접촉 강성을 이용하여 수평방향 처짐 민감도를 보정할 수 있는데, 177.6 N/m 및 298 N/m의 강성을 가지는 두 스프링에 직렬 연결되어 있으므로, friction loop로부터 얻은 수평방향 처짐 민감도를 보정하면($S_L^{FL,cor}$) 2.70×10^8 V/m의 값을 얻을 수 있었다. 또한, 이를 이용하여 thermal noise 그래프로부터 결정된 cantilever의 수평방향 강성($k_L^{T,cor}$)은 167.2 N/m로 나타났다. 이와 같이 보정된 수평방향 처짐 민감도는 앞서 FEM과 pivot loading 방법으로 결정된 민감도($S_L^{FEM,pivot} = 2.78 \times 10^8$ V/m)과 약 3%의 차이를 보였으며, 수평방향 강성은 FEM 결과로부터 예측한 값($k_L^{FEM} = 177.6$ N/m)에 비하여 약 6% 작은 값을 나타냈다. 이와 같은 차이가 나타나는 이유는 접촉 강성 외에 탐침 자체의 변형 및 면내 수평방향 굽힘에 의한 영향으로 생각된다. 이와 같은 결과에서, 본 연구에 사용된 V 형상을 가지는 cantilever의 경우, 면내 수평방향 강성 및 탐침의 굽힘강성에 의한 영향은 상대적으로 매우 작음을 확인할 수 있다. 또한 아래의 관계를 이용하여, 보정된 수평방향 처짐 민감도($S_L^{FL,cor}$)와 pivot loading을 통하여 측정된 비틀림 민감도(S_T^P)로부터 수평방향 강성을 결정할 수 있다.

$$k_L = \frac{S_L}{S_T(h+t/2)}$$

이로부터 결정된 수평 방향 강성(k_L^P)은 167.9 N/m로써, thermal noise 방법을 이용한 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Table 1에 요약하

였으며, 결론적으로, 접촉 강성에 의한 영향을 보정하여 수평방향 처짐 민감도를 결정할 경우, 서로 다른 두 방법(pivot loading과 thermal noise방법)을 통하여 결정된 수평방향 강성은 잘 일치함을 알 수 있다. 즉, 접촉 강성에 의한 영향을 고려하여 friction loop에서 얻은 수평방향 처짐 민감도를 보정함으로써, 수직방향과 마찬가지로, thermal noise 방법을 이용하여 cantilever의 수평방향 강성을 효과적으로 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 cantilever의 형상을 정밀하게 측정하여 FEM 해석을 수행하였으며, pivot loading, thermal noise 방법을 이용하여 V 형상을 가지는 AFM cantilever의 힘 교정에 관하여 고찰하였다. 이 때 요구되는 cantilever의 수평방향 처짐 민감도는 friction loop를 통하여 얻었으며, 각 방법으로부터 얻은 수평방향 강성을 비교하였다. 다양한 위치에서 pivot loading을 수행함으로써, V 형상을 가지는 cantilever의 비틀림 민감도를 실험적으로 정확하게 얻을 수 있었다. 또한, friction loop로부터 수평 방향 처짐 민감도를 결정하기 위해서는 접촉강성의 영향을 반드시 고려되어야 하는 것으로 나타났으며, 특히 V 형상을 가지는 cantilever의 경우, 면내 굽힘강성의 영향은 상대적으로 미비한 것으로 나타났다. 이와 같이 접촉 강성에 의한 영향을 효과적으로 보정하고, thermal noise 방법을 적용함으로써, V 형상을 가지는 cantilever의 수평방향 강성을 정확하게 얻을 수 있었다. 본 연구는 V 형상의 cantilever를 이용하여 나노스케일의 힘을 정량적으로 명확하게 분석하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호: 2011-0014367).

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. Giesbers, A. J. M., Zeitler, U., Neubeck, S., Freitag, F., Novoselov, K. S., and Maan, J. C., "Nanolithography and Manipulation of Graphene using an Atomic Force Microscope," *Solid State Commun*, Vol. 147, pp. 366-369, 2008.
4. Bordag, M., Ribayrol, A., Conache, G., Fröberg, L., Gray, S., Samuelson, L., Montelius, L., and Pettersson, H., "Shear Stress Measurements on InAs Nanowires by AFM Manipulation," *Small*, Vol. 3, pp. 1398-1401, 2007.
5. Bharat Bhushan and Kwang Joo Kwak and, Manuel Palacio, "Nanotribology and Nanomechanics of AFM Probe-Based Data Recording Technology," *J Phys: Condens Matter*, Vol. 20, pp. 365207, 2008.
6. Hutter, J. L. and Bechhoefer, J., "Calibration of Atomic-Force Microscope Tips," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 64, pp. 1868-1873, 1993.
7. Cleveland, J. P., Manne, S., Bocek, D., and Hansma, P. K., "A Nondestructive Method for Determining the Spring Constant of Cantilevers for Scanning Force Microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 64, pp. 403-405, 1993.
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. 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.
10. 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.
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. 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.
14. 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.
15. Bogdanovic, G., Meurk, A., and Rutland, M. W., "Tip Friction — Torsional Spring Constant Determination," *Colloid Surf B-Biointerfaces*, Vol. 19, pp. 397-405, 2000.
16. 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.
17. Neumeister, J. M. and Ducker, W. A., "Lateral, Normal, and Longitudinal Spring Constants of Atomic Force Microscopy Cantilevers," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 65, pp. 2527-2531, 1994.
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. 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.
20. 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.