

기준 외팔보를 이용한 액체 환경에서 Colloidal Probe의 수평방향 힘 교정

제영완 · 정구현[†]

울산대학교 기계공학부

Lateral Force Calibration of Colloidal Probe in Liquid Environment Using Reference Cantilever

Youngwan Je and Koo-Hyun Chung[†]

School of Mechanical Engineering, University of Ulsan

(Received March 11, 2013 ; Revised April 2, 2013 ; Accepted April 9, 2013)

Abstracts – There is an indispensable need for force calibration for quantitative nanoscale force measurement using atomic force microscopy. Calibrating the normal force is relatively straightforward, whereas doing so for the lateral force is often complicated because of the difficulty in determining the optical lever sensitivity. In particular, the lateral force calibration of a colloidal probe in a liquid environment often has a larger uncertainty as a result of the effects of the epoxy, the location of the colloidal particle on the cantilever, and a decrease in the quality factor. In this work, the lateral force of a colloidal probe using a reference cantilever with a known spring constant was calibrated in a liquid environment. By obtaining the spring constant and the lateral sensitivity at the equator of a spherical colloidal particle, the damage to the bottom surface of the colloidal particle could be eliminated. Further, it was shown that the effect of the contact stiffness on the determination of the lateral spring constant of the cantilever could be minimized. It was concluded that this method can be effectively used for the lateral force calibration of a colloidal probe in a liquid environment.

Keywords – contact stiffness (접촉 강성), friction loop (마찰곡선), in-plane bending stiffness (면내 굽힘 강성), lateral deflection sensitivity (수평 처짐 민감도)

1. 서 론

미세 탐침(tip)과 상대재료의 상호작용에 기반한 Atomic force microscopy (AFM)[1]는 나노 기술 분야에서 매우 다양하게 활용되고 있다. AFM에서는 탐침과 상대재료와의 상호작용으로 유발되는 외팔보(cantilever)의 거동으로부터 표면 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 힘-변위 곡선(force-displacement curve)나 마찰 곡선(friction loop) 등을 정량적으로 분석함으로써, 탐침과 상대 재료사이에 작용하는 표면력, 마찰력, 기

계적 물성 등을 나노 스케일에서 효과적으로 측정할 수 있다[2-4]. AFM을 이용하여 정량적으로 힘을 측정하기 위해서는 반드시 힘 교정(calibration)이 이루어져야 하며, 이를 위하여 열잡음 방법(thermal noise method)[5], 기준 외팔보(reference cantilever)를 이용하는 방법[6,7], 또는 hydrodynamic function[8,9]을 이용하는 방법 등과 같은 다양한 방법이 제시되고 있다. AFM을 이용하여 측정하는 힘은 대부분 외팔보의 수직, 또는 수평 처짐 및 강성값으로 결정되는데, 수직 힘 교정 방법들은 비교적 높은 정확도 및 정밀도를 얻을 수 있으나, 수평 힘 교정 방법들은 상대적으로 높은 불확도(uncertainty)를 나타내는 경우가 많다.

[†]Corresponding Author : khchung@ulsan.ac.kr

일반적으로 AFM 탐침은 원추형, 피라미드형 등의 형상을 가지고 있으며, 끝단 반경은 대개 10~100 nm의 값을 가진다. 미세한 탐침의 끝단은 산화 방법(oxidation sharpening) 등을 통하여 많이 형성하며[10,11], 그 형상 및 반경 등은 제조과정에서 조금씩 다르게 나타난다. 이러한 끝단의 반경 및 형상 차이는 AFM을 이용한 표면력 및 마찰력, 기계적 물성 분석 등에서 불확도를 유발하게 되는데, 이러한 문제를 해결하기 위하여 제시된 것 중 하나가 colloidal probe[12] 이며, 이는 일반적으로 AFM 외팔보에 특정한 입자 (colloidal particle)를 부착한 것을 말한다. Colloidal probe의 입자는 다양한 형상을 가질 수 있으나, 명확한 접촉기하(contact geometry)를 구현하기 위하여 구형상의 입자를 사용하는 경우가 많으며, 원하는 끝단 반경을 얻을 수 있는 동시에, 다양한 재료의 적용 및 화학적 표면 처리가 상대적으로 용이하다는 장점을 가진다. 이에 따라 colloidal probe는 접촉 역학 해석을 통한 기계적 물성의 측정, 표면력의 측정, 마찰 특성의 이해 등을 위하여 다양하게 활용되고 있다.

Colloidal probe의 수직 힘 교정을 위해서는 현재까지 사용되고 있는 열잡음 방법, 기준 외팔보를 이용한 방법, 압전저항식 (piezo-resistive) 외팔보를 이용한 방법들이 활용될 수 있다[13]. 그러나, colloidal probe의 힘 교정시 발생하는 불확도는 일반 AFM 탐침에 비하여 큰 경향을 가진다. 예를 들어, 외팔보에 부착되는 입자의 위치, 입자를 부착할 때 사용되는 에폭시 등은 강성값에 영향을 미친다. 또한 입자 질량으로 인한 공진주파수의 감소는 열잡음 방법을 이용한 교정시 어려움을 유발하기도 한다. 또한, colloidal probe의 교정시 주의할 점 중 하나는, 상대 표면과 큰 접촉 면적으로 인한 높은 응착력(adhesion force)의 영향이다. 이는 힘-변위 곡선으로부터 수직 처짐 민감도 (normal deflection sensitivity, V/m)를 결정하는데 큰 불확도를 유발하기 쉬우므로, 특히 낮은 수직 강성(normal stiffness, N/m)을 가지는 colloidal probe를 기준 외팔보를 이용하여 교정할 경우 주의해야 한다[14]. 또한, 비전기전도성을 가지는 상대재료의 분석을 수행할 경우 발생하기 쉬운 정전기력도 수직 처짐 민감도의 불확도를 유발할 수 있다.

한편, colloidal probe의 수평 힘 교정은 일반 AFM 탐침에 비하여 장점을 가지기도 한다. 예를 들어 입자의 크기가 상대적으로 큰 경우 (예: 일반 AFM 탐침의 높이보다 큰 직경을 가지는 경우에는 면내 수평 굽힘

강성(in-plane lateral bending stiffness, N/m)에 비하여 비틀림에 의한 수평 강성(lateral stiffness, N/m)이 작아지기 때문에 면내 수평 굽힘 강성에 의한 불확도[15]를 감소시킬 수 있는 장점을 가진다. 또한, colloidal probe는 상대적으로 큰 접촉 반경을 가짐에 따라, 큰 접촉 강성(contact stiffness)을 가지는 경우가 많으므로, 그 영향 또한 감소시킬 수 있다. 따라서, colloidal probe의 경우 마찰 곡선으로부터 수평 처짐 민감도 (lateral deflection sensitivity, V/m)를 결정하기가 상대적으로 용이하다. 그 밖에 보다 정확한 힘 교정 방법으로써, 정전기력을 이용하는 방법도 적용 가능하다[13].

이러한 colloidal probe의 수평 힘 교정에 효과적으로 사용될 수 있는 방법 중 하나는 교정된 기준 외팔보[6]를 이용하는 방법이다. 특히, 최근 바이오 재료에 대한 나노 스케일 힘 분석이 많이 요구됨에 따라 액체 환경에서의 정량적 힘 교정방법이 요구되고 있다. 이를 위하여 다양한 방법들이 제시되고는 있으나[16,17], 액체 환경 내에서는 외팔보의 공진 주파수, quality factor 등이 크게 감소하므로 대기 환경에 비하여 정확한 교정은 상대적으로 어려운 편이다. 이에 따라 본 연구에서는 액체 환경에서 비교적 쉽게 수평 힘을 교정하기 위한 방법으로 기준 외팔보를 이용하는 방법을 적용하고자 한다. 이를 통하여 colloidal probe를 이용한 정량적 힘 측정에 기여하고자 한다.

2. 교정 방법

본 연구는 상용 AFM (MFP-3D, Asylum Research, Santa Barbara, CA)을 이용하여 수행하였으며, 직사각형 형상을 가지는 silicon nitride 외팔보의 끝단에 약 25 μm 의 직경을 가지는 Au 입자를 부착시켜 사용하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 colloidal probe를 나타내는 confocal microscopy 이미지이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이, Au 입자는 비교적 우수한 진원도를 가지고 있었으며, 반경은 약 12.5 μm 였다. 외팔보의 길이, 폭, 두께는 각각 198.9 μm , 19.8 μm , 0.6 μm 로 측정되었다. Fig. 1에 삽입된 이미지로부터 수평 및 수직 방향 길이가 다른 것을 알 수 있는데, 이는 에폭시의 영향으로 생각되며, 외팔보의 두께가 0.6 μm 임으로 고려하여 에폭시의 두께는 1.4 μm 임을 알 수 있었다. 액체 환경에 삽입하기 전 대기중에서 열잡음방법으로 얻은 colloidal probe의 수직 강성은 0.036 ± 0.002 N/m으로 나타났는데, 이는 공칭 강성 (0.02 N/m)에 비하여

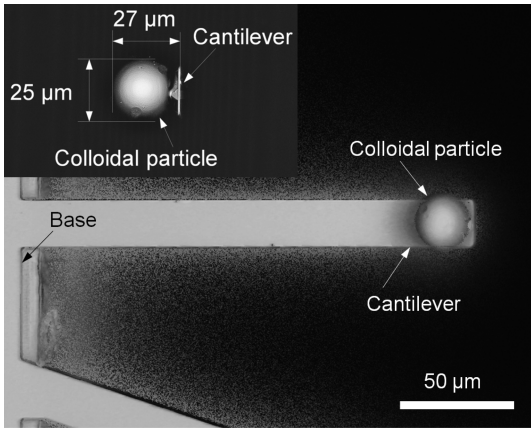


Fig. 1. Top view confocal microscopy image of colloidal probe: Front view image is inserted.

큰 값으로써, 제조과정에서 발생할 수 있는 외팔보의 기하학적 형상 차이와 더불어, 입자를 부착함으로써 외팔보의 유효거리 (베이스로부터 입자가 부착된 위치까지의 거리)가 감소하였기 때문으로 생각된다. 또한, 보 이론 (beam theory) 로부터 예측한 면내 수평 굽힘 강성은 약 37 N/m로 나타났다.

교정된 외팔보를 이용하여 교정시, 교정하고자 하는 외팔보의 수평 강성, k_{lat} 은 아래의 식으로부터 결정할 수 있는데[6],

$$k_{lat} = k_{ref} \left(\frac{S_{lat}}{S_{ref}} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서 k_{ref} 는 기준 외팔보의 강성, S_{lat} 와 S_{ref} 는 각각 강체면과 교정된 외팔보에서 얻은 수평 처짐 민감도를 나타낸다. 교정된 외팔보의 강성은 교정하고자 하는 외팔보의 강성과 일치하도록 하는 것이 유리하므로, 본 연구에서는 2 N/m의 공칭 수평강성을 가지는 기준 외팔보를 선정하였으며, 열잡음 방법으로 얻은 기준 외팔보의 실제 강성, k_{ref} 은 1.84 ± 0.09 N/m으로 나타났다. Fig. 2는 교정과정을 나타내는 개요도로써, 기준 외팔보는 교정 후 수직으로 고정하여 colloidal probe의 수평 교정에 이용할 수 있도록 하였다.

한편, 외팔보에 수평방향으로 힘이 작용할 경우에는 비틀림에 의한 수평 강성(k_{lat}), 면내 수평 굽힘, 그리고 접촉에 의한 변형이 함께 나타난다.

$$k_{total} = \frac{1}{k_{lat}} + \frac{1}{k_{in-plane}} + \frac{1}{k_{con}} \quad (2)$$

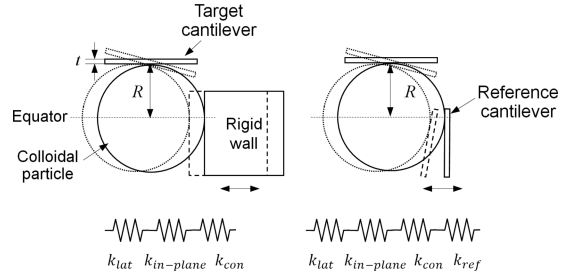


Fig. 2. Schematic of lateral force calibration method using reference cantilever.

여기서 $k_{in-plane}$ 은 colloidal probe의 면내 수평 굽힘 강성, k_{con} 은 접촉 강성을 의미한다. 면내 수평 처짐량 및 접촉으로 인한 변형량은 AFM의 압전 소자를 이용한 수평 이송량에 포함되어 있는 반면, AFM 광감지기는 비틀림에 민감하도록 설계되어 있으므로, 수평 힘-변위곡선으로부터 S_{lat} 와 S_{ref} 결정시 고려되어야 한다. 그러나, 교정된 외팔보를 이용한 교정방법은 식 (1)에서 알 수 있듯이, 이러한 영향이 상쇄되는 장점을 가지는데, 특히 면내 수평 처짐은 같은 정도로 발생할 것이므로, 접촉 강성의 영향만 효과적으로 고려함으로써 불확도를 최소화할 수 있다. 또한, 접촉 강성은 접촉 면적 증가에 따라 증가하므로, 접촉 강성의 영향은 탐침을 가지지 않는 기준 외팔보를 이용함으로써 최소화할 수 있다.

상대재료와의 상호작용이 발생하는 입자의 가장 아래쪽 접선 방향에서 직접적 교정은 실제적으로 어려웠으므로, 본 연구에서는 입자의 수평축(equator)에서 교정을 먼저 수행하였다. 수평축에서 외팔보의 수평 강성, $k_{lat,eq}$ 는 매우 작은 비틀림량에 대하여

$$k_{lat,eq} = \frac{k_{tor}}{(R+h+t/2)^2} \quad (3)$$

의 관계를 가지는데, 여기서 k_{tor} 는 colloidal probe의 비틀림 강성 (torsional stiffness), R 은 입자의 반경, h 는 예폭시의 두께, t 는 외팔보의 두께이다. 그러므로, 교정된 외팔보를 구 입자의 수평축에 정확하게 위치하는 것이 요구되는데, 본 연구에서는 이를 정확하게 수행하기 위하여 AFM의 폐회로 위치 결정 시스템을 이용하였다. 즉, 두 외팔보를 최대한 가까이 위치시킨 후, 두 외팔보의 상대 좌표를 변화시키며 힘-변위 곡선들을 얻었으며, 접촉이 발생하는 지점의 각 좌표값 및 힘-변위 곡선의 형상들을 비교함으로써, 구 입자의 가

장 최외각 지점이 기준외팔보의 끝단과 접촉할 수 있도록 기준외팔보를 위치시켰다. 위치 결정에서의 불확도는 약 500 nm 정도를 가지는 것으로 판단되었으며, 이는 구형 입자가 가지는 진원도, 표면 요철의 영향, 교정과정에서 발생하는 압전소자의 열흐름 (thermal drift) 등에 의한 영향으로 생각된다. 실제 수평 방향 힘을 측정하는데 요구되는 구 입자 아랫면에서의 강성, $k_{lat,bot}$ 은

$$k_{lat,bot} = \frac{k_{tor}}{(2R+h+t/2)^2} = k_{lat,eq} \frac{(R+h+t/2)^2}{(2R+h+t/2)^2} \quad (4)$$

의 관계를 이용하여 얻을 수 있다.

구 입자의 아랫면에서의 수평 처짐 민감도, $S_{lat,bot}$ 은 수평축에서 얻은 수평처짐 민감도, $S_{lat,eq}$ 로부터 아래의 관계를 이용하여 얻을 수 있다.

$$S_{lat,bot} = S_{lat,eq} \frac{2R+h+t/2}{R+h+t/2} \quad (5)$$

수평 강성 교정 과정과는 달리, 구 입자의 수평축에서 수평 처짐 민감도를 결정하는 과정에는 면내 굽힘 강성 및 접촉 강성의 영향이 포함된다. 앞서 언급한 바와 같이 구 입자를 이용할 경우, 상대적으로 높은 접촉 강성이 발생할 것이므로, 그 영향은 무시할 수도 있으나, 면내 굽힘 강성의 영향은 고려하는 것이 유리하다. 또한, 이러한 영향은 마찰곡선을 이용하여 수평 처짐 민감도를 결정함으로써 최소화 할 수 있는데, 그 이유는 비틀림에 의한 수평 강성이 면내 수평 강성에 비하여 훨씬 작아지기 때문이다.

외팔보의 강성은 주변 환경의 영향을 받지 않으므로, 모든 교정 과정을 액체 환경에서 수행하는 것이 더 간단하고 더 높은 정확도를 가질 것으로 예상되었으나, 본 연구에서는 보다 일반적인 교정 과정을 위하여, 수평 강성은 대기 중에서 결정하고, colloidal probe를 액체 환경에 삽입한 후 수평 처짐 민감도를 다시 얻었다. 이 때 수평 처짐 민감도는 colloidal probe의 수평축에서 강체면을 이용하여 얻은 값과 마찰곡선으로부터 얻은 값을 함께 비교하였다. 본 연구에서 제시된 불확도는 10회 측정에 따른 표준 편차 (1σ)를 의미하며, 최종값의 불확도는 root-sum-squares (RSS) 방법 [18]을 이용하여 결정하였다.

3. 교정 결과

Fig. 3은 대기중에서 강체면과 교정된 외팔보를 이

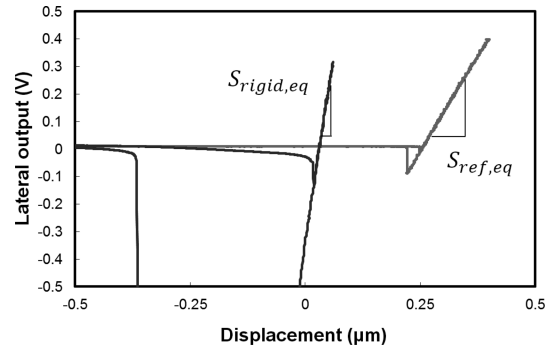


Fig. 3. An example of lateral force calibration result using the reference cantilever at the equator of the colloidal particle.

용하여 얻은 수평 처짐 민감도를 나타내는 예이다. 두 곡선의 기울기가 명확하게 다른 것을 알 수 있으며, 특히 강체면 위에서는 큰 응착력이 나타난 반면, 교정된 외팔보 위에서는 상대적으로 작은 응착력이 나타났다. 이와 같은 결과에서, 강체면에 비하여 교정된 외팔보와의 접촉 면적이 상대적으로 작을 것으로 예상되며, 이는 접촉 강성의 차이가 존재함을 의미할 수 있다. 보다 정확하게 접촉 강성의 영향을 상쇄하기 위해서는 표면 상태가 고른 교정된 외팔보를 사용하는 것이 유리할 것으로 생각된다. 강체면에서 얻은 수평 처짐 민감도 $S_{lat,eq}$ 의 값은 10회 측정 결과 $(1.11 \pm 0.04) \times 10^2 \text{ V/nm}$ 로 나타났다, 교정된 외팔보로부터 얻은 수평 처짐 민감도 $S_{ref,eq}$ 는 $(2.79 \pm 0.03) \times 10^3 \text{ V/nm}$ 로 나타났다. 이로부터 얻은 colloidal probe의 수평축에서의 수평 강성, $k_{lat,eq}$ 는 $5.5 \pm 0.3 \text{ N/m}$ 로 결정되었다. 외팔보의 두께, t , 에폭시의 두께, h , 구 입자의 반경, R 을 고려한 식 (4)를 이용하여 결정된 아랫면에서의 강성, $k_{lat,bot}$ 은 $1.6 \pm 0.1 \text{ N/m}$ 로 계산되었다. 또한, 보 이론을 통하여 예측한 외팔보의 수평 강성은 비틀림 강성은 $8.9 \times 10^{-1} \text{ nNm/rad}$ 이었으며, 식(4)를 이용하여 얻은 colloidal probe의 수평 강성은 1.2 N/m 로 나타났는데, 교정결과와의 차이는 외팔보 재료의 물성, 기하학적 형상의 측정 오차 등에서 기인하는 것을 여겨진다.

대기 중에서 수평 강성을 결정한 후, colloidal probe를 액체 환경에 삽입하였으며, 레이저의 위치를 재조정하고, 강체면을 이용하여 colloidal probe의 수평축에서 수평 처짐 민감도를 다시 얻었다. Fig. 4는 이러한 결과를 나타내는 예로써, 액체 환경에 삽입됨에 따라 응착력이 거의 나타나지 않은 것을 알 수 있다. 앞서

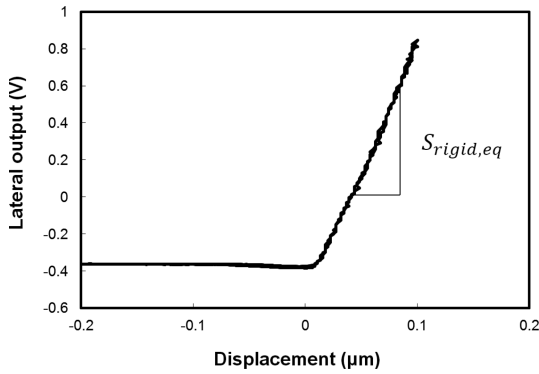


Fig. 4. An example of lateral deflection sensitivity measurement result at the equator of the colloidal particle in liquid environment.

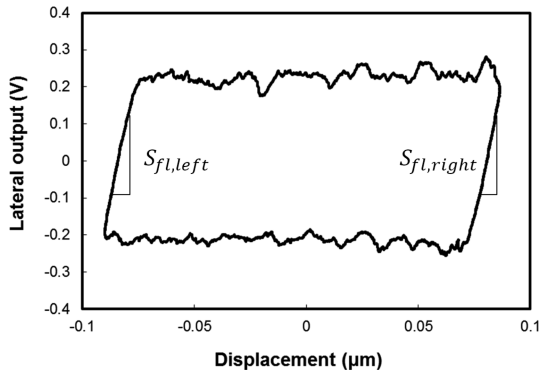


Fig. 5. An example of friction loop in liquid environment.

언급한 바와 같이 이와 같은 수평 처짐 민감도 결정시에는 면내 수평 처짐 및 접촉으로 인한 변형 등의 요인이 반영될 것으로 예상되는데, 10회 측정 결과 수평축에서의 수평 처짐 민감도, $S_{lat,eq}$ 는 $(1.44 \pm 0.06) \times 10^{-2}$ V/nm으로 나타났으며, 식 (5)를 이용하여 얻은 아래면에서의 수평 처짐 민감도, $S_{lat,bot}$ 은 $(2.73 \pm 0.06) \times 10^{-2}$

V/nm으로 계산되었다. Hertzian 접촉 모델을 이용하여 얻은 강체면과 구입자의 접촉 강성[19]은 약 5,000 N/m로 계산되었으며, 이는 수평축에서의 수평 강성 (5.5 N/m)에 비하여 매우 큰 값이므로 무시할 수 있다. 또한, 보 이론을 통하여 예측한 colloidal probe의 면내 수평 굽힘 강성은 약 37 N/m이었으므로, 수평축에서 얻은 수평 처짐 민감도에는 면내 수평 굽힘 처짐에 의하여 약 13%의 불확도가 발생 할 것으로 예측할 수 있다.

구 입자 아래면에서의 수평 처짐 민감도, $S_{lat,bot}$ 는 마찰 곡선을 이용하여 결정된 수평 처짐 민감도, S_{β} 과 함께 비교하였다. Fig. 5는 이를 마찰 곡선을 나타내는 예로써, 10 nN의 수직하중에서 얻은 결과이다. 왼쪽과 오른쪽에서의 기울기, $S_{fl,left}$ 와 $S_{fl,right}$ 의 평균값으로써 수평 처짐 민감도를 결정하였으며, 그 값은 $(3.1 \pm 0.2) \times 10^{-2}$ V/nm로 나타났다. 이때의 접촉 강성은 기존 연구 [20]를 통하여 1,600 N/m로 예측할 수 있었으며, 이는 구 입자의 아래면에서 예측한 수평 강성 (1.6 N/m)에 비해 매우 큰 값이므로 무시할 수 있을 것이다. 또한, colloidal probe의 면내 수평 굽힘 강성에 의한 영향은 약 4% 정도 나타나는 것으로 나타났다. 즉 구 입자의 크기가 충분히 큰 경우, 마찰 곡선을 이용한 수평 처짐 민감도의 결정이 좀 더 용이함을 확인할 수 있었다. 두 방법으로 측정된 수평 처짐 민감도, $S_{lat,bot}$ 과 S_{β} 은 1σ의 오차 범위 내에서는 일치하지 않음을 알 수 있으나, 10% 정도의 차이를 유발하는 면내 굽힘 강성의 차이를 고려할 경우, 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 교정 결과는 Table 1에 제시하였다.

4. 결 론

본 연구는 AFM을 이용하여 수평방향 힘을 정량적으로 측정하기 위한 것으로써, 보다 잘 정립된 접촉 기하를 구현하기 위하여 많이 사용되는 colloidal probe의 교정에 관한 것이다. 특히, 액체 환경에서의

Table 1. Calibration results of colloidal probe

Method	Spring constant (N/m)	Lateral deflection sensitivity in liquid	
		Determined value (V/nm)	Uncertainty by in-plane lateral bending of cantilever
Calibration by reference cantilever	at equator	$k_{lat,eq} = 5.5 \pm 0.3$	$S_{lat,eq} = (1.44 \pm 0.06) \times 10^{-2}$ ~13%
	at bottom	$k_{lat,bot} = 1.6 \pm 0.1$	
Friction loop	-	$S_{\beta} = (3.1 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	~4%

쉽고 정확한 수평 방향 힘의 교정을 위하여 기준 외팔보를 이용하는 교정 방법을 수행하였다. 교정과정에서 발생할 수 있는 외팔보의 면내 굽힘 처짐 및 접촉 변형에 대한 영향을 정량적으로 고찰하였으며, 특히, 효과적으로 수평 처짐 민감도를 결정하는 방법에 대하여 논하였다. 결론적으로, 기준 외팔보를 이용하여 colloidal probe를 교정할 경우, 수평 강성을 비교적 정확하게 얻을 수 있었으며, 최종적으로 수평 방향 힘을 측정할 경우의 불확도는 수평 처짐 민감도에 의하여 더 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. Colloidal probe가 상대적으로 큰 접촉 면적을 가짐에 따라 접촉 강성의 영향은 거의 무시할 수 있었으므로, 수평 처짐 민감도의 불확도는 주로 외팔보의 면내 굽힘 강성의 영향임을 확인할 수 있었다. 만일 교정 과정에서 colloidal probe가 상대 표면과 접촉하는 것이 허락된다면, 입자의 수평축에서의 처짐 민감도를 얻는 것 보다는 마찰 곡선을 이용함으로써 수평 처짐 민감도 결정시 발생할 수 있는 불확도를 좀 더 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 교정 방법은 주변 환경의 영향을 받지 않으므로, 특히 액체 환경에서 colloidal probe의 정확한 수평 힘 교정 방법으로써 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

기호 설명

h :	에폭시의 두께 (m)
t :	외팔보의 두께 (m)
R :	입자의 반경 (m)
k_{con} :	접촉 강성 (N/m)
$k_{in-plane}$:	외팔보의 면내 수평 굽힘 강성 (N/m)
k_{lat} :	외팔보의 수평 강성 (N/m)
$k_{lat,bot}$:	입자 아랫면에서의 수평 강성 (N/m)
$k_{lat,eq}$:	입자 중심에서의 수평 강성 (N/m)
k_{ref} :	기준 외팔보의 강성 (N/m)
k_{tor} :	외팔보의 비틀림 강성 (Nm/rad)
k_{total} :	체 유효 강성 (N/m)
S_{lat} :	외팔보의 수평 처짐 민감도 (V/m)
$S_{lat,bot}$:	입자 아랫면에서의 수평 처짐 민감도 (V/m)
$S_{lat,eq}$:	입자 중심에서의 수평 처짐 민감도 (V/m)
S_{ref} :	기준외팔보에서 얻은 수평 처짐 민감도 (V/m)
$S_{ref,eq}$:	기준외팔보에서 얻은 입자 중심에서의 수평 처짐 민감도 (V/m)
S_{fl} :	마찰 곡선을 이용하여 결정된 수평 처짐

민감도 (V/m)

$S_{fl,left}$: 마찰 곡선의 왼쪽 기울기로부터 얻은 수평 처짐 민감도 (V/m)

$S_{fl,right}$: 마찰 곡선의 오른쪽 기울기로부터 얻은 수평 처짐 민감도 (V/m)

감사의 글

본 연구는 2012년 울산대학교 기계공학부 일류화 사업단의 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- Binnig, G., Quate, C. F., and Gerber, C., "Atomic Force Microscope", *Phys Rev Lett*, Vol. 56, pp. 930-933, 1986.
- 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.
- 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.
- Stan, G., Ciobanu, C. V., Parthangal, P. M., and Cook, R. F., "Diameter-Dependent Radial and Tangential Elastic Moduli of ZnO Nanowires", *Nano Lett.*, Vol. 7, pp. 3691-3697, 2007.
- Hutter, J. L. and Bechhoefer, J., "Calibration of Atomic-Force Microscope Tips", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 64, pp. 1868-1873, 1993.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Ravi, T. S., Marcus, R. B., and Liu, D., "Oxidation Sharpening of Silicon Tips", *J. Vac. Sci. Technol. B*,

- Vol. 9, pp. 2733-2737, 1991.
11. Folch, A., Wrighton, M. S., and Schmidt, M. A., "Microfabrication of Oxidation-Sharpended Silicon Tips on Silicon Nitride Cantilevers for Atomic Force Microscopy", *Microelectromechanical Systems, Journal Of*, Vol. 6, pp. 303-306, 1997.
 12. Ducker, W. A., Senden, T. J., and Pashley, R. M., "Direct Measurement of Colloidal Forces using an Atomic Force Microscope", *Nature*, Vol. 353, pp. 239-241, 1991.
 13. Chung, K. H., Pratt, J. R., and Reitsma, M. G., "Lateral Force Calibration: Accurate Procedures for Colloidal Probe Friction Measurements in Atomic Force Microscopy", *Langmuir*, Vol. 26, pp. 1386-1394, 2010.
 14. 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.
 15. 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.
 16. Craig, V. S. J. and Neto, C., "In Situ Calibration of Colloid Probe Cantilevers in Force Microscopy: Hydrodynamic Drag on a Sphere Approaching a Wall", *Langmuir*, Vol. 17, pp. 6018-6022, 2001.
 17. Ryu, S. and Franck, C., "In Situ Hydrodynamic Lateral Force Calibration of AFM Colloidal Probes", *Langmuir*, Vol. 27, pp. 13390-13399, 2011.
 18. John R. Taylor. *An Introduction Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. Sausalito, California: University Science Books, 1996.
 19. Johnson KL. *Contact Mechanics*. : Cambridge University Press, 1985.
 20. Carpick, R. W., Ogletree, D. F., and Salmeron, M., "Lateral Stiffness: A New Nanomechanical Measurement for the Determination of Shear Strengths with Friction Force Microscopy", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, pp. 1548-1550, 1997.