

원자 현미경에서 마찰력 측정을 위한 새로운 실험 기법

최덕현[†] · 황운봉* · 윤의성** · 김준원* · 김동식*

A New Experimental Technique for Calibration of Frictional Force in Atomic Force Microscopy

Dukhyun Choi, Woonbong Hwang, Euisung Yoon, Joonwon Kim and Dongsik Kim

Key Words : Angle conversion factor(각변환계수), Force conversion factor(힘변환계수), Moment balance equation(모멘트평형식)

Abstract

A new method has been proposed for the calibration of frictional forces in atomic force microscopy. Angle conversion factor is defined using the relationship between torsional angle and frictional signal. Once the factor is obtained from a cantilever, it can be applied to other cantilevers without additional experiments. Moment balance equations on the flat surface and top edge of a commercial step grating are used to obtain angle conversion factor. Proposed method is verified through another step grating test and frictional behavior of Mica.

기호설명

η	: 각 변환 계수, rad/V
κ	: 힘 변환 계수, nN/V
θ	: 외팔보의 비틀림 각, rad
μ	: 마찰 계수
α	: 팁의 절반 각도, degree
β	: 팁과 요철면 사이의 각도, degree
H	: 외팔보의 비틀림 중심 높이, μm
V	: 마찰 신호, voltage
k_t	: 비틀림 강성, Nm/rad
k_b	: 굽힘 강성, N/m
N_s	: 수직 항력, Newton
F_f	: 마찰력, Newton

1. 서론

원자 현미경은⁽¹⁻²⁾ 1981년에 비니히(Binnig)와 로러(Rohler)에 의해 개발된 이래로 나노 스케일에서 표면 형상을 측정하는 일 이외에 마찰 특성, 자성 특성과 같은 다양한 연구를 위해 활발히 사용되고 있다. 원자 현미경을 이용하여 수행된 실험 결과는 대부분 상대적으로 비교, 분석되어 왔다. 그러나, 최근에는 원자 현미경을 이용하여 나노 스케일에서의 역학 실험이⁽³⁻⁵⁾ 수행되고, 이 결과를 마이크로 스케일에서의 실험 결과와 비교하여 응용하려는 연구가 진행되고 있다. 따라서, 원자 현미경을 이용하여 측정된 자료를 정량적으로 계산하기 위한 보정 방법에 대한 연구의 필요성이 부각되고 있다.

원자 현미경에서의 마찰력에 대한 정량적 측정을 위한 보정 방법은 몇몇 연구자들에⁽⁶⁻⁸⁾ 의해 수행되었다. 그러나, 이들의 보정 방법은 실험 방법이 매우 복잡하여 수행하기 어려우며, 측정하려는 외팔보의 치수와 굽힘 강성이 바뀌면 같은 실험을 반복해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 원자 현미경에서의 마찰력을 정량적으로 계산하기 위해 각

[†] 포항공대 기계공학과 대학원
E-mail : bred@postech.ac.kr
TEL : (054)279-22835 FAX : (054)279-5899

* 포항공대 기계공학과

** 한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

변환 계수를 이용하는 새로운 보정 방법을 제안하고자 한다. 각 변환 계수란 원자 현미경 검파기의 고유한 특성치로 외팔보의 비틀림에 대한 검파기에서 산출되는 마찰 신호의 비이다. 각 변환 계수를 이용하면 외팔보의 종류마다 같은 실험을 반복할 필요가 없으며, 이를 계산하기 위한 실험 또한 단순하다. 각 변환 계수를 계산하기 위한 이론식은 요철이 없는 평평한 면과 요철면 끝부분에서의 모멘트 평형 관계식을 이용하여 구한다. 또한, 이 식에 사용되는 변수값을 측정하기 위해 원자 현미경을 이용해 요철면이 있는 시편에 대한 마찰 실험을 수행한다. 마지막으로, 새로운 보정 방법의 검증은 위해 두 종류의 높이가 다른 요철면과 두 종류의 외팔보를 이용하여 실험을 수행한다.

2. 각 변환 계수

마찰 신호를 정량적인 마찰력으로 환산해 주는 보정 계수는 힘 변환 계수(Force Conversion Factor)라 하며, 실험을 통해 직접 힘 변환 계수를 계산하는 보정 방법의 경우 외팔보의 기하학적인 형상 및 팁의 길이 등에 따라 힘 변환 계수는 각각 따로 계산하여야 한다.

본 연구에서는 원자 현미경에서의 마찰 신호를 각 변환 계수를 이용해 마찰력으로 정량화하는 방법을 고려하였다. 식 (1)은 외팔보의 비틀림 각도에 대한 마찰 신호의 비로 이 값이 각 변환 계수이다. 각 변환 계수는 사용하는 원자 현미경에 대한 검파기의 특성을 나타내는 값으로, 원자 현미경마다 고유한 값으로 정해진다. 원자 현미경에서 마찰력은 외팔보의 비틀림 각도를 만들고, 이 비틀림 각도에 의해 검파기에 반사된 레이저가 기준 위치로부터 변위를 만들게 된다. 이 변위가 마찰력에 대한 마찰 신호로 산출된다. 검파기에서 발생하는 변위에 따라 피드백(Feedback)되는 마찰 신호는 장비의 고유한 특성 값이므로 외팔보의 종류와 관계 없이 검파기에서 나오는 마찰 신호는 기준 위치로부터 같은 변위에 대해 항상 일정한 마찰 신호를 나타나게 된다. 기준 위치로부터의 변위는 외팔보의 비틀림 각도로부터 유도되므로 비틀림 각도에 대한 마찰 신호의 비, 즉 각 변환 계수는 실험을 수행하는 원자 현미경 시스템에 대해 항상 일정한 값을 갖게 된다.

식 (2)는 각 변환 계수(η)와 힘 변환 계수(κ)의 관계를 나타낸다. 이 식에서 k_t 는 외팔보의 비틀림 강성이고 H 는 팁의 높이이다. 외팔보의 비틀림 강성과 팁의 높이는 구할 수 있기 때문에, 각 변환 계수를 측정하여 원자 현미경에서 사용되는

여러 종류의 외팔보에 대한 힘 변환 계수를 식 (2)를 통해 반복적인 실험을 하지 않고 계산할 수 있다.

$$\eta = \frac{\theta_0}{V_0} \text{ [rad/V]} \quad (1)$$

$$\kappa = \eta \frac{k_t}{H} \text{ [nN/V]} \quad (2)$$

3. 마찰력 보정식

3.1 요철면에서의 현상과 가정

원자 현미경에서 요철면이 있는 시편에 대한 마찰 실험 시 발생하는 마찰 신호와 표면 형상 높이가 그림 1에 나타나 있다. 시편의 평평한 면에서의 마찰 신호는 팁과 시편 사이의 마찰력에 의한 비틀림으로부터 발생한다. (그림 1(b)의 I 과 III 단계) 시편의 요철면 정상에서 발생하는 마찰 신호(이 신호를 최대 마찰 신호로 한다)는 요철면 정상에 팁의 끝부분이 위치할 때 받는 모멘트에 의한 비틀림으로부터 발생한다. (그림 1(b)의 II 단계) 그러나, 실제로 최대 마찰 신호는 팁의 끝부분에서 발생하지는 않는다. (그림 1(a) 오른쪽 그림) 최대 마찰 신호의 위치와 요철의 최대 높이 위치는 약 40에서 70 nm 정도의 차이를 보인다. 두 위치의 차이는 팁 끝부분의 형상과 곡률의 영향으로 고려된다.

각 변환 계수를 이용하는 새로운 보정 방법은 모멘트 평형식을 이용해 계산한다. 원자 현미경에서 사용되는 대부분 팁의 높이는 약 3 μm 정도이다. 앞서 언급한 최대 마찰 신호와 요철면의 최대 높이의 위치 차이(약 40~70 nm)는 팁 높이에 비해 매우 작으므로 O 점에서 모멘트 평형식에 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 고려된다. 또한, 마찰력에 의한 외팔보의 비틀림 각도는 매우 작은 범위에서 변하므로, 다음 세 가지 조건을 가정한다.

- 1) 최대 마찰 신호는 팁의 끝부분에서 발생한다.
- 2) 팁의 옆면은 직선이다.
- 3) 마찰 신호(V)와 비틀림 각도(θ)는 식 (3)과 같이 비례 관계에 있다.

$$V_0 : V_1 = \theta_0 : \theta_1 \quad (3)$$

3.2 요철면에서의 모멘트 평형식

그림 2는 시편의 평평한 면과 요철면의 정상에서의 팁의 비틀림을 보여준다. 평평한 면에서 마찰이 발생할 때, O 점에서의 모멘트 평형식은 다음 식 (4)~(6)에 의해 계산된다.

$$\sum \mathbf{F}: \mathbf{F} = \mathbf{F}_f + \mathbf{N}_s = -\mu N_s \mathbf{i} + N_s \mathbf{j} \quad (4)$$

$$\mathbf{R} = -H \sin \theta_0 \mathbf{i} - H \cos \theta_0 \mathbf{j} = -H \theta_0 \mathbf{i} - H \mathbf{j} \quad (5)$$

(θ_0 is very small)

$$\mathbf{M}_o = \mathbf{R} \times \mathbf{F} = -\mu H N_s \mathbf{k} - H \theta_0 N_s \mathbf{k} = k_t \theta_0 \mathbf{k} \quad (6)$$

식 (4)에서 N_s 는 수직 항력이고 F_f 는 마찰력, μ 는 마찰 계수이다. 식 (5)에서 H 는 외팔보의 비틀림 중심 높이이고 θ_0 는 평평한 면에서의 비틀림 각이다. 식 (6)에서 k_t 는 외팔보의 비틀림 강성으로, 이 관계식에서 수직항력과 비틀림 강성의 값은 약 10^{-9} 정도 이고 팁의 높이는 약 10^{-6} 정도이므로 비틀림 각도는 약 10^{-6} rad 정도로 작은 값이 된다.

요철면의 정상에서는 O'점에서의 모멘트 평형식을 다음 (7)~(9)식으로 계산된다.

$$\sum \mathbf{F}: \mathbf{F} = \mathbf{N}_r + \mathbf{F}_r$$

$$= -(N_r \sin \beta + \mu N_r \cos \beta) \mathbf{i} \quad (7)$$

$$+ (N_r \cos \beta - \mu N_r \sin \beta) \mathbf{j}$$

where $F_y = N_r (\cos \beta - \mu \sin \beta) = N_s$

$$\mathbf{R} = -H \sin(\alpha + \beta) \mathbf{i} - H \sin(\alpha + \beta) \mathbf{j} \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_o = \mathbf{R} \times \mathbf{F}$$

$$= -H N_s \left[\sin \theta_1 + \cos \theta_1 \left(\frac{\sin \beta + \mu \cos \beta}{\cos \beta - \mu \sin \beta} \right) \right] \quad (9)$$

$$= k_t \theta_1$$

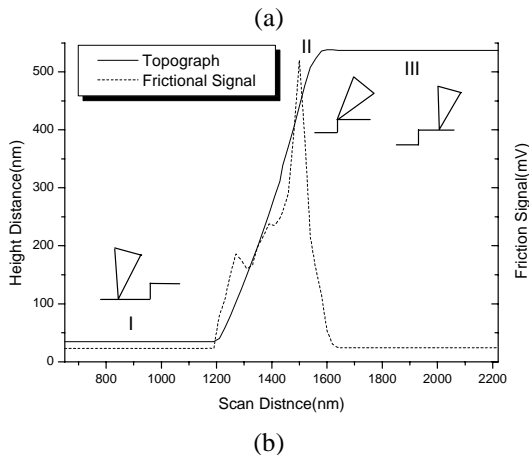
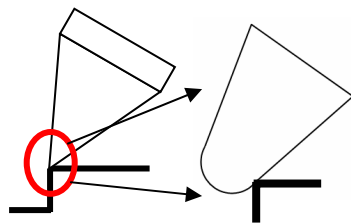


Fig. 1 (a) The location on the tip which the maximum signal happens. (b) The frictional signal and the topography at each location.

식 (8)에서 α 는 팁 끝부분 각도의 절반으로 보통 $30\sim 35^\circ$ 정도 이고, β 는 팁과 요철면사이의 이루는 각도이다. 원자 현미경에서 마찰 실험은 수직 항력을 일정하게 유지하도록 수행된다. 따라서, 식 (7)에서 y 축 방향에 대한 힘은 수직 항력과 같아야 한다. 식 (9)에서의 최대 마찰 비틀림 각 θ_1 은 α 와 β 에 비해 매우 작고, $\alpha + \beta + \theta_1$ 는 90° 이므로 식 (9)는 식 (10)으로 단순화 될 수 있다.

$$-H N_s \left[\theta_1 + \left(\frac{\cos \alpha + \mu \sin \alpha}{\sin \alpha - \mu \cos \alpha} \right) \right] = k_t \theta_1 \quad (10)$$

그러므로, 식 (3)과 식 (6) 그리고 식(10)을 이용하여 마찰력에 의한 외팔보의 비틀림 각도를 계산하는 식 (11)을 유도할 수 있다.

$$\theta_0^2 + N_s \tan \alpha \frac{(a-1)}{a(b+N_s)} \theta_0 + \frac{N_s^2}{a(b+N_s)^2} = 0$$

where $a = \frac{V_1}{V_0}$; experimental data (11)

$b = \frac{k_t}{H}$; dimensional data

N_s ; input data

식 (11)에서 a 는 마찰 실험을 통해 측정된 자료이고, b 는 외팔보의 비틀림 강성과 팁의 높이로부터 계산되는 기하학적 형상 자료이고, N_s 는 수직 항력으로 실험 시 일정하게 유지되는 조건이다. 결국, 각 변환 계수를 이용하는 새로운 보정 방법은 실험을 통해 측정된 자료와 기하학적 형상 자료를 이용하여 계산된 비틀림 각도(θ)를 마찰 신호(V)로 나누어 주어 각 변환 계수를 구하고, 이를 이용하여 원자 현미경에서 사용되는 여러 종류의 외팔보에 대해 식 (2)의 관계로 계산하고자 하는 것이다.

3.3 비틀림 상수

외팔보의 비틀림 강성은 제조업자가 제공하지 않기 때문에 고전 역학 이론을 통해 계산한다. 식 (12)는 직사각형 모양의 외팔보에 대한 비틀림 강성을 계산하는 식이다.

$$k_t = \frac{G W t^3}{3L} \quad (12)$$

식 (12)에서 G 는 전단 탄성 계수이고 W 는 외팔보의 폭, L 은 길이, 그리고 t 는 두께이다. V 모양의 외팔보의 비틀림 강성은 W. A. Neumeister 와 W. A. Ducke 에⁽⁹⁾ 의해 유도된 식으로 계산할 수 있다. 그림 3 은 4 종류의 직사각형 모양의 외팔보를 나타낸다. 표 I 은 외팔보의 형상에 따라 계산된 비틀림 강성을 나타낸다. 이 자료는 각 변형 계수와 힘 변형 계수를 계산할 때 사용된다.

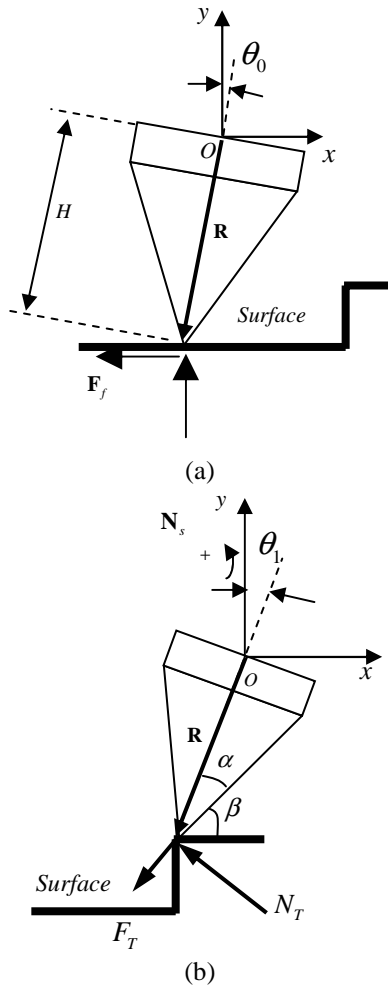


Fig. 2 The twisted shape of the tip of cantilever (a) on the flat surface and (b) on the top edge of the step grating.

4. 실험 방법 및 결과

4.1 실험 방법

요철면이 있는 시편은 MicroMasch 에서 제조한 요철면 높이가 500 nm 인 시편을 사용한다. 외팔보는 Olympus 에서 만든 굽힘 강성이 0.76 N/m 이고 비틀림 강성이 3.53 nNm/rad 인 사각형 모양을 사용한다. 요철면은 산화를 막기 위해 Si₃N₄ 로 코팅되어 있고, 팁 곡률은 약 30 nm 이다. 팁 높이는 2.9 μm 이고 외팔보의 두께가 0.8 μm 이므로 외팔보의 비틀림 중심 높이 H는 3.3 μm 이다. 원자 현미경은 Seiko 사의 SPM 400 을 사용한다. 마찰 실험에서 수직 항력은 0.74 에서 150 nN 까지 변화시켜가면서 수행한다. 마찰 거리는 5 μm 이고 마찰 속도는 1 Hz (10 μm/s)이다. 온도와 습도는 실험 시 측정된다.

4.2 실험 결과

그림 4 는 평평한 면에서의 수직 항력에 따른

마찰 신호를 나타낸다. 일반적으로, 나노 스케일에서는 점착력으로 인해 수직 항력이 작용하지 않더라도 마찰력이 존재한다. AFM 팁의 경우 일반적으로 수직항력이 50 nN 이상에서 점착력의 영향은 마찰력에 비해 아주 작게 된다⁽¹³⁾. 나노 스케일에서의 마찰력은 온도와 습도에 따라 점착력의 차이로 인해 다른 값을 갖게 된다. 점착력의 차이로 마찰력의 크기는 변하지만, 재료에 따른 마찰 계수는 변하지 않는다. 또한, 본 연구에서는 평평한 면에서의 마찰 신호와 요철면에서의 최대 마찰 신호의 비를 이용하기 때문에 점착력의 차이로 인한 마찰력의 차이는 큰 영향을 주지 않는다고 가정하였다. 그림 5 는 요철면 정상에서의 최대 마찰 신호를 나타낸다. 각 수직 항력에서의 마찰 신호는 각 변환 계수를 계산하기 위한 비틀림 각도를 계산하기 위해 사용된다.

그림 6 은 식 (11)로 계산된 평평한 면에서의 비틀림 각도와 실험에서 측정된 마찰 신호를 수직 항력에 따라 함께 나타낸 그래프이다. 식 (11)에서는 마찰력에 대한 점착력의 영향은 고려하지 않는다. 그러나, 실험에서 측정된 마찰 신호는 점착력의 영향이 고려된 결과이므로 그림 6 에서 마찰 신호는 원점에서 시작하지 않으나, 비틀림 각도는 원점에서 시작하게 된다. 그러므로, 비틀림 각도를 마찰 신호로 나누어준 각 변환 계수는 수직 항력에 따라 그림 7 과 같이 수렴을 하게 되고 이 수렴 값이 우리가 찾고자 하는 각 변환 계수가 된다. 식 (11)에서는 점착력을 고려하지 않았기 때문에 본 연구에서 제시하는 식으로 각 변환 계수를 계산하기 위해서는 점착력의 영향이 적은 50 nN 이상의 수직 항력에서 측정된 자료를 이용하여 계산하여야 한다. 본 연구에서 사용한 원자 현미경에 대한 각 변환 계수는 그림 7 의 수렴값으로 145 μrad/V 가 된다. 이 각 변환 계수를 식 (2)에 대입하여 표 I 에 제시한 외팔보의 힘 변환 계수를 계산하면 표 II 와 같다. 표 II 에서 외팔보의 종류에 따라 힘 변환 계수는 크게 다른 것을 확인할 수 있다.

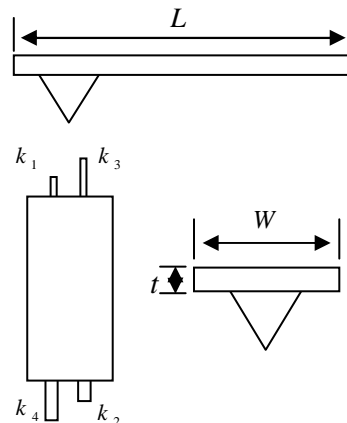


Fig. 3 Four kinds of cantilever and dimensions

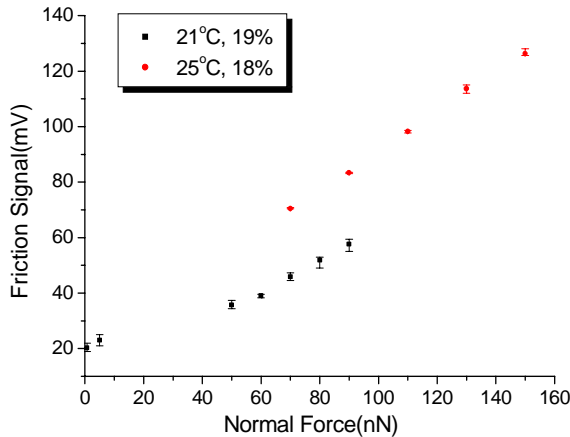


Fig. 4 The frictional signals at each normal force.

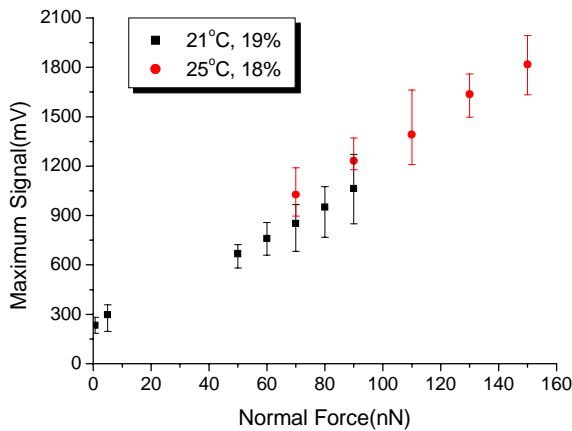


Fig. 5 The maximum signals at each normal force on the top edge of step grating.

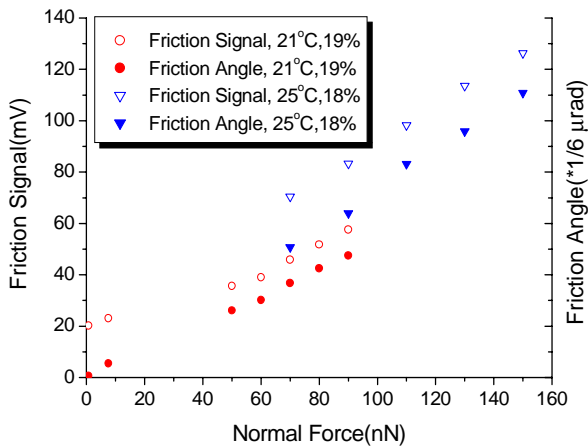


Fig. 6 The torsion angles calculated by Eq. (11) and the friction signals at each normal force.

Table I Dimensions and torsional stiffnesses of each cantilever

k_b (N/m)	L (μm)	W (μm)	t (μm)	k_t (nNm/rad)
$k_1 = 0.39$	100	20	0.8	1.77
$k_2 = 0.76$	100	40	0.8	3.53
$k_3 = 0.05$	200	20	0.8	0.87
$k_4 = 0.1$	200	40	0.8	1.74

Table II Force conversion factors of each cantilever

k_b (N/m)	k_t (nNm/rad)	Force Conversion Factor (nN/V)
$k_1 = 0.39$	1.77	77
$k_2 = 0.76$	3.53	155
$k_3 = 0.05$	0.87	38
$k_4 = 0.1$	1.74	75

5. 새로운 보정 방법의 검증

본 연구에서 제시한 각 변환 계수를 이용하는 방법에 대한 검증을 위해 두 종류의 실험이 수행된다. 우선, 요철의 높이가 100 nm 인 시편으로 계산된 각 변화 계수가 500 nm 의 요철 높이로 계산된 결과와 같은 값으로 계산되는 지를 확인한다. 다음으로 Mica 시편에 대해 두 종류의 외팔보로 마찰 신호를 측정하고 측정된 마찰 신호를 표 II 에서 계산된 각각의 힘 변환 계수로 정량화하여 마찰 계수를 비교한다.

5.1 높이가 다른 요철 시편을 통한 검증

요철의 높이가 100 nm 인 시편으로 각 변환 계수를 구하는 실험과 계산을 반복한다. 수직 항력은 점착력의 영향이 다소 적은 50, 70, 90 nN 을 가한다. 표 III 에서 실험 및 계산 결과를 확인 할 수 있고 각 변환 계수를 152 $\mu\text{rad/V}$ 으로 고려할 수 있다. 이 결과는 500 nm 의 요철면에서 계산된 각 변환 계수와 약 5%의 오차를 보이는 것으로 본 연구에서 제시하는 보정 방법은 약 5%내에서 마찰력을 정량적으로 측정하는 것은 가능하다고 판단된다.

5.2 Mica 시편에서의 마찰 거동 비교

표 II 에 나온 외팔보의 굽힘 강성과 비틀림 강성이 크게 차이가 나는 k_2 와 k_4 두 종류의 외팔보를 가지고 Mica 시편에 대해 마찰 실험을 수행하여 마찰 계수를 비교한다. 그림 8 은 두 외팔보에 대해 측정된 마찰 신호를 표 II 의 힘 변환 계수로 정량화한 마찰력을 수직항력에 대해 나타낸 그래프이다. 그림 8 에서 기울기는 마찰 계수로 동일한 시편에 대한 같은 종류의 팁으로 계산된 마찰 계수는 같아야 한다. 그림 8 에서 k_2 으로 계산된 마찰 계수는 0.086 이고 k_4 으로 계산된 마찰 계수는 0.081 로 약 5% 정도의 오차를 보이나 이는 같은 값으로 고려된다. 두 그래프에서 마찰력의 차이는 초기 점착력의 차이로 발생하나 앞서 설명한 것처럼 마찰 계수는 같은 값이 나오는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 앞서 검증한 실험 결과와 마찰 가치로 본 연구에서 제시하는 마찰력의 정량화 방법은 점착력 및 실험 횟수에 따른 오차로 인해 원자 현미경에서 측정된 마찰력을 5% 오차 내에서 정량화할 수 있음을 알 수 있다.

Table III Angle conversion factor calculated with step grating of 100 nm height

Normal Force (nN)	Angle Conversion Factor ($\mu\text{rad/V}$)
50	142.5
70	146.3
90	151.4

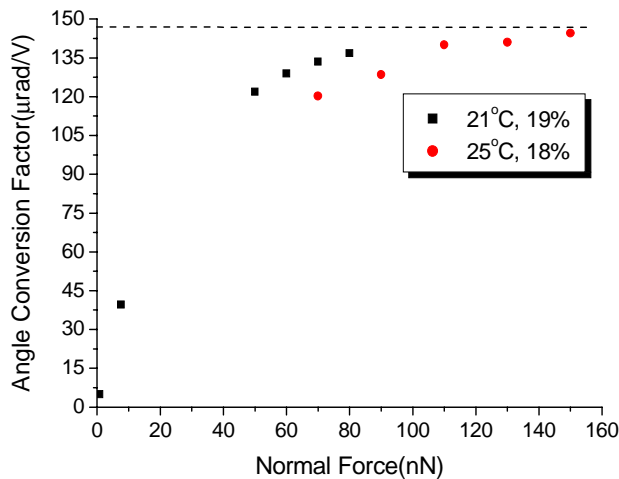


Fig. 7 The angle conversion factor at each normal force.

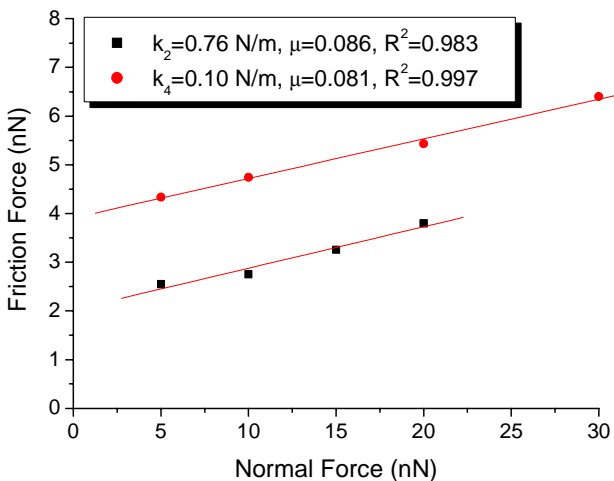


Fig. 8 The results of tests performed by cantilevers with bending stiffness of 0.76 N/m and 0.10 N/m on Mica..

6. 결론

본 연구에서는 원자 현미경에서 측정된 마찰 신호를 정량화하는 새로운 방법을 제안한다. 각 변환 계수를 이용하는 보정 방법은 측정된 실험 자료와 평평한 면과 요철면 정상에서의 모멘트 평형식을 이용하여 계산된다. 이 보정 방법은 여러 종류의 외팔보에 대해 실험을 반복할 필요가 없다는 면과 실험 방법이 단순하다는 장점이 있다. 실험과 계산을 통해 본 연구에서 사용된 원자 현미

경에 대한 각 보정 계수를 계산할 수 있었고, 두 종류의 검증 실험을 통해 마찰 신호를 정량화하는 것이 가능하다는 것이 확인 되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국책연구 개발사업의 일환인 나노핵심기반기술개발사업단의 연구비(M10214000191-02B1500-02910) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Binnig, G., Quate, C. F. and Gerber, C., 1986, "Atomic force microscope," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 56, pp. 930~933.
- (2) Virwani, K. R., Malshe, A. P., Schmidt, W. F., and Sood, D. K., 2003, "Young's modulus measurements of silicon nanostructures using a scanning probe system: a non-destructive evaluation approach," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 12, pp. 1028~1032.
- (3) Namazu, T., Isono, Y., and Tanaka, T., 2000, "Evaluation of size effect on mechanical properties of single crystal silicon by nanoscale bending test using AFM," *J. Microelectromech. S.*, Vol. 9, pp. 450~459.
- (4) Namazu, T. and Isono, Y., 2003, "Quasi-static bending test of nano-scale SiO₂ wire at intermediate temperatures using AFM-based technique," *Sensors and Actuators A*, Vol. 104, 78~85.
- (5) Ruan, J. A. and Bhushan, B., 1994, "Atomic-scale friction measurements using friction force microscopy: Part I - General principles and new measurement techniques," *ASME J. Tribol.*, Vol. 116, pp. 378~388.
- (6) Ogletree, D. F., Carpick, R.W., and Salmeron, M., 1996, "Calibration of frictional forces in atomic force microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 67, pp. 3298~3306.
- (7) Schwarz, U.D., Köster, P., and Wiesendanger, R., 1996, "Quantitative analysis of lateral force microscopy experiments," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 67, 2560~2567.
- (8) Bhushan, B., 1999, *Handbook of Micro/Nano Tribology*, CRC, pp. 22~29.
- (9) Neumeister, J. M. and Ducker, W. A., 1994, "Lateral, normal, and longitudinal spring constants of atomic force microscopy cantilever," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 65, pp. 2527~2531.