

## Nano-Tribophysics 해석 기술

최덕현(포항공대 대학원 기계공학과), 황운봉(포항공대 기계공학과)

### Analysis of Nano-Tribophysics

D. H. Choi(Mechanical Eng. Dept., POSTECH), W. Hwang(Mechanical Eng. Dept., POSTECH)

#### ABSTRACT

Nano-scale experiments for adhesion force and friction force were performed with AFM/FFM. In macro-scale, the friction coefficient is constant without relating to the change of contact area. However, many papers have indicated that in nano-scale, the friction coefficient is related to the contact area. Contact area would increase with the normal force. Therefore, in this study, we analyzed the trend of the friction coefficient of Si(100) and Mica according to the normal force and then, the contact area was calculated by JKR-theory. Results showed the friction coefficient was constant under  $180 \text{ nm}^2$  contact area and over  $180 \text{ nm}^2$  contact area, it was degraded. Moreover, the friction coefficient was constant according to the adhesion force.

**Key Words** : Adhesion Force(접착응력), Friction Force(마찰력), Friction Coefficient(마찰계수), TMR, Contact Area(접촉면적), Normal Force(수직항력)

#### 1. 서론

최근 나노 기술을 산업 기술의 혁신 및 미래 기술에 대한 다양한 기대와 가능성의 기초로 인식하는 사람들이 늘고 있다. 그러나 아직 나노 기술은 기본 이론에 대한 적립조차 이루어 지지 않았고 이런 상황에서 나노 기술의 적용은 많은 문제점을 유발할 수 있게 된다.

나노 기술이 산업에 적용되어 제품화되었을 때 가장 중요한 요소는 제품의 신뢰성 및 내구성이다. 즉, 제품의 수명이 길지 못하고 지나치게 이상적인 조건에서만 사용 가능하다면 그것은 다양한 기술이 집약되어 탄생한 나노 기술의 성공이라 할 수 없다.

수 많은 나노 기술의 적용 제품들의 신뢰성 및 내구성을 고려하기 위해서는 나노 크기에서의 제품의 기계적 특성들을 분석 및 예측해야 한다. 특히, 접촉하여 구동하고 있는 요소의 경우에 시스템 전체의 특성의 신뢰성 및 내구성을 접촉부의 요소가 지배한다고 볼 수 있기 때문에 이런 요소에 대한 정확한 신뢰성 분석 및 내구성 예측이 필요하다.

접촉하여 구동하는 부분에 대한 기계적 특성을 tribology 라 하고, 여기서는 일반적으로 마찰, 마멸, 그리고 윤활 특성을 분석한다. 나노 크기에서 접촉

하고 있는 부분에 대한 tribology 특성을 분석하고 예측하는 것은 이전에는 상당히 어려운 일이었다. 그러나 최근 AFM(atomic force microscope)이 등장하면서 나노 크기에서의 기계적 특성 분석이 조금씩 진행되고 있다.

마이크로 크기에서는 마찰 계수는 상대 재료에 대해 접촉 면적에 상관없이 일정하다. 또한, 수직항력이 0 이면 마찰력도 0 이 되어 마찰력 그래프가 원점에서 시작하므로 마찰 계수는 마찰력을 수직항력으로 나눈 값이 된다. 그러나 나노 크기가 되면 마찰 계수는 접촉면적에 영향을 받게 된다. 접촉 면적은 수직항력을 증가하였을 때와 상대 시편의 접촉 반경이 증가하였을 때 증가하게 된다[1-3].

본 논문에서는 나노 크기에서의 마찰 계수는 접촉 면적에 따라 어떤 방향으로 변화하게 되는지에 관한 연구를 하였다. 이전 문헌에서, Bhushan 은 AFM 팁에  $\text{SiO}_2$  입자를 붙여서 상대 시편의 접촉 반경을 증가하면서 마찰 계수의 경향을 분석하였다. Si(100)시편과  $\text{Si}_3\text{N}_4$  팁을 이용하여 100nm 에서 14.5um 사이에서 접촉 면적이 증가함에 따라 마찰 계수가 증가는 결과를 얻었다[4].

그러나, Carpick 은 Mica 시편과  $\text{Si}_3\text{N}_4$  팁을 이용하여 수직항력을 -200nN 에서 150nN 까지 증가시키

면서 접촉 면적의 증가함에 따라 마찰계수가 작아지는 결과를 얻었다[5-6]. 수직항력이 증가하면 JKR 이론에 따라 접촉면적은 증가하게 된다.

따라서 본 논문에서도 Mica 와 Si(100) 시편에 대해 Carpick 의 경우처럼 수직항력의 증가를 접촉면적의 증가로 고려했을 경우 마찰 계수의 경향을 분석해 보고자 한다. 또한 마찰 계수에 점착응력이 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 표면(Topology) 측정

AFM 을 이용하여 표면을 측정하는 방법은 Fig.1 에서 cantilever 의 휘어지는 정도를 laser 와 detector 를 이용해 측정하게 된다. cantilever 팁이 시편에 가까이 다가가면 Van der Waals 힘에 의해 cantilever 가 휘게되고 이때 휘어지는 정도를 detector 에서 (A+B)-(C+D)의 전하량의 변화를 통해 측정하게 된다. 표면 측정 결과, 표면의 거칠기, 스캔 표면의 최대-최소 높이차 및 RMS(root mean square)등의 자료를 얻을 수 있다.

### 2.2 점착 응력(Adhesion Force) 측정

Fig.1 에서 PZT 에 놓여있는 시편이 PZT 가 z 방향으로 상승하면서 cantilever 팁이 접촉하기 전에 Van der Waals 힘에 의해 cantilever 가 아래쪽으로 휘면서 팁과 시편이 붙게 되고(Fig.2 ①~②) PZT 가 계속 상승하면서 cantilever 가 위로 휘다가(Fig.2 ②~③) PZT 가 하강하면서 초기 위치보다 더 아래쪽으로 내려가도(Fig.2 ③~④) 팁이 시편과 떨어지지 않다가 어느 순간에(Fig.2 ⑤) 떨어지게 된다. 이때, 초기 위치보다 더 아래쪽으로 내려가도 팁이

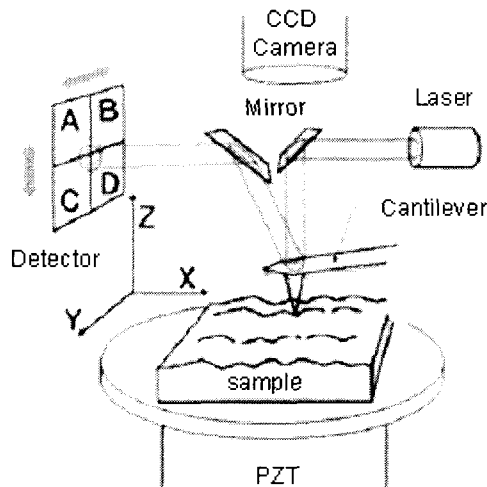


Fig. 1 Schematic diagram for AFM

시편과 떨어지지 않게 되는 힘을 pull-off force 또는 점착 응력(adhesion force)이라고 한다. Fig. 2 에서 초기 위치에서 팁과 시편이 떨어지는 변위,  $Z_{max}$  (⑤-④)에 cantilever 의 z 방향 강성(stiffness)을 곱해주면 점착 응력을 계산할 수 있다.

### 2.3 마찰력(Friction Force) 측정

AFM 으로 마찰력을 측정하는 방법은 표면을 측정하는 방법과 유사하다. Fig.1 에서 표면을 측정할 때는 시편이 cantilever 와 같은 방향인 x 으로 움직이지만 y 방향으로 시편이 움직이면서 스캔을 할 경우 표면 측정뿐만 아니라 마찰력도 측정이 가능하다. 시편이 y 방향으로 움직이면 cantilever 는 z 방향으로 휨 뿐만 아니라 비틀림도 발생하게 되고 이 비틀림 정도를 detector 의 (A+C)-(B+D)의 전하량

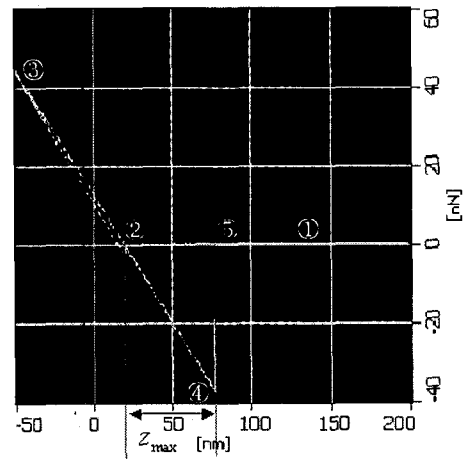


Fig. 2 Adhesion force diagram of AFM

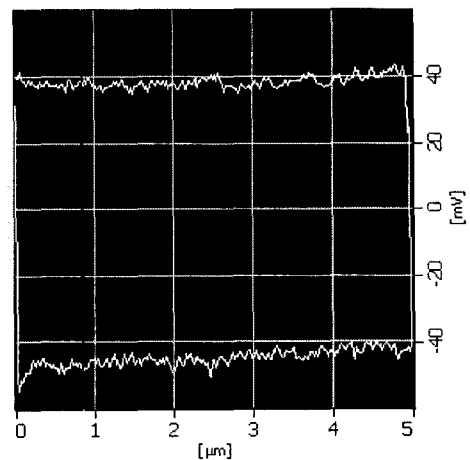


Fig. 3 Friction force diagram of AFM

변화를 통해 측정하게 된다. 이때, 비틀림이 발생하기 전에 detector의 기준점을 알 수 없기 때문에 마찰력은 Fig. 3의 TMR(trace minus retrace)값으로 분석하게 된다. Trace를 y 방향으로 시편이 움직일 때의 마찰력으로 하면 retrace는 -y 방향으로 시편이 움직일 때의 마찰력의 값이 된다. 이때 trace의 경우나 retrace의 경우에 대해 마찰력은 같아야 하므로 TMR을 2로 나눈 값이 마찰력에 해당한다.

### 2.4 JKR-Theory

JKR 이론은 접촉하고 있는 표면사이에 인력의 영향을 고려하여, 수직항력과 접촉 면적과의 관계식을 제공하는 모델이다. JKR 이론은 초기에 접촉하고 있는 두 구형 모델에 대한 식을 제공하나, AFM의 팁과 시편사이에서 팁의 반경을 R로 고려하고 시편의 반경을 ∞로 고려하여 식(1)처럼 변형하는 것이 가능하다. 여기에서 A는 접촉 면적, L은 수직 항력, K는 reduced 강성, 그리고 γ는 표면 에너지가 된다.

$$A^{\frac{3}{2}} = \frac{\pi^{\frac{3}{2}} R}{K} \left[ L + 3\pi R\gamma + \sqrt{6\pi R\gamma L + (3\pi R\gamma)^2} \right] \quad (1)$$

$$\text{where } K = \frac{4}{3} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$$

## 3. 실험

### 3.1 실험 장비 및 조건

AFM을 이용한 표면 및 마찰력 측정은 Seiko사의 SPA400을 이용하였다. 100μm 스캐너를 사용하였으며, 5μm의 스캔 크기에, 1Hz의 속도로 시편이 cantilever에 대해 90° 방향으로 움직이면서 표면과 마찰력을 같이 스캔하였다. 팁은 k<sub>z</sub>가 0.76N/m인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>에 Au/Cr이 도금된 것을 사용하였는데, 팁 분석기를 통해, 팁 반경이 50nm인 팁과 팁 반경이 30nm인 팁을 사용하였다. 시편은 Si(100)과 Mica를 사용하여 수직항력을 0.726nN에서부터 160nN까지 증가시켜 가면서 마찰력을 측정하였다. 마찰력은 온도 및 습도에 민감하기 때문에 측정시의 온도 및 습도를 측정하여 나타내었다.

### 3.2 실험 결과

아래의 fig.4~7은 Mica와 Si(100) 시편의 마찰력 측정 결과이다. Fig. 4와 5는 접촉면적에 영향을 받지 않고 수직항력에 마찰력이 비례한다고 가정하여 마찰계수를 각 자료의 직선의 기울기로 계산하여 나타낸 경우이고, fig. 6과 7은 접촉면적과 수직항력과의 관계를 고려하여 마찰력의 경향을 나타낸

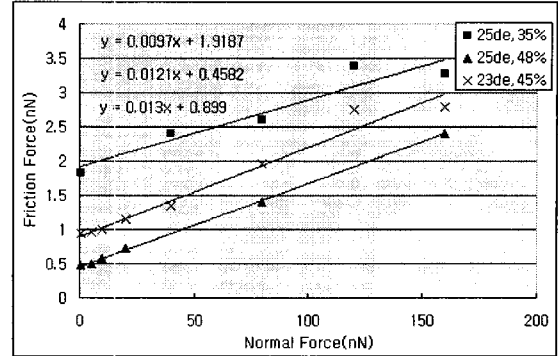


Fig. 4 Linear friction force diagram for Si(100)

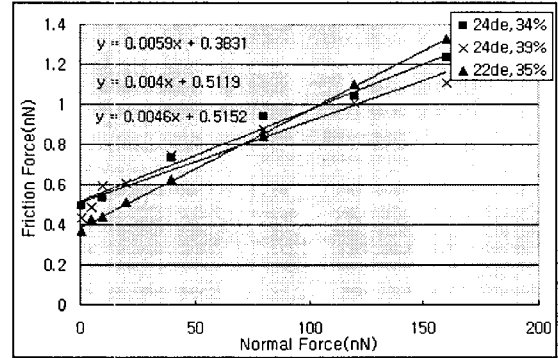


Fig. 5 Linear friction force diagram for Mica

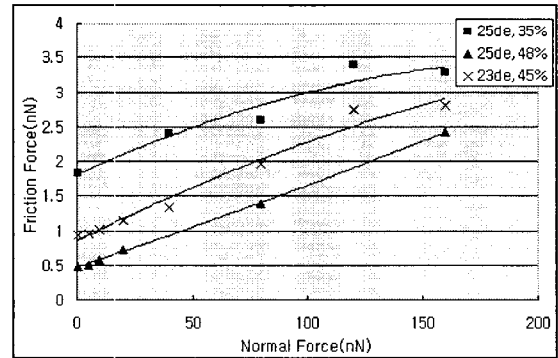


Fig. 6 Nonlinear friction force diagram for Si(100)

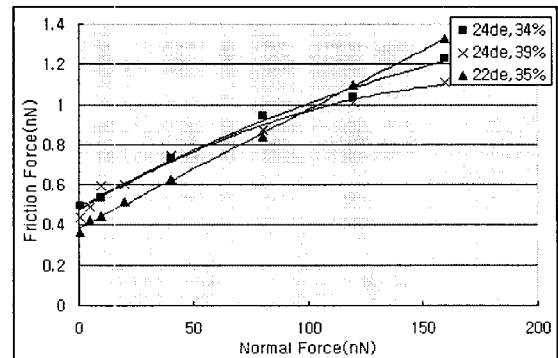


Fig. 7 Nonlinear friction force diagram for Mica

경우이다. 4 종류의 그래프에서 마찰력은 상대 마찰력을 나타낸다.

그림에서 보듯이 수직 항력이 증가함에 따라 50nm 팁의 경우 마찰력이 감소하는 경향(■, x)을 나타내고 30nm 팁의 경우 마찰력이 일정하게 증가하는 경향(▲)을 볼 수 있다. 실험 결과 마찰 계수는 Si(100)이 Mica 보다 두 배정도 큰 값을 갖음을 알 수 있었다.

### 3.3 접촉 면적 계산

2.4 절에서 JKR 이론을 이용하면 수직항력에 따른 팁과 시편사이의 접촉 면적을 식(1)에 의해 계산할 수 있다. Fig. 8 은 Mica 시편의 경우에 접촉 반경이 50nm 인 팁에 대해 수직항력에 따른 접촉 면적을 계산한 그래프이다. Fig. 8 에서 보듯이 50nm 의 팁은 수직항력이 가장 작은 경우에 160nm<sup>2</sup> 의 접촉 면적을 갖게 되는데, 30nm 의 팁의 경우 160nN 의 수직항력에서의 접촉 면적을 계산하면 126nm<sup>2</sup> 이 된다. 이는 앞의 fig. 4~7 의 그래프에서 30nm 의 팁의 경우 마찰력이 수직항력에 대해 감소하지 않게 되는 이유를 설명할 수 있게 된다. 즉, 접촉 면적이 작은 경우에는 마찰력은 수직항력에 일정하게 증가하다가 접촉 면적이 커지면 마찰력의 증가 폭이 줄어들게 되는 것이다. 따라서, 본 실험에서는 50nm 의 팁의 경우 수직항력이 50nN 보다 커지면서 마찰력의 증가 폭이 감소하므로 이때의 접촉 면적인 180nm<sup>2</sup> 을 마찰 계수가 감소하는 임계값으로 고려할 수 있다.

### 3.4 점착 응력

Fig. 4~7 에서 그래프의 기울기는 Si(100)과 Mica 의 경우 각각 일정하지만 y 절편 값이 다르다. 이는 온도 및 습도 그리고 표면 상태에 따라 변하게 되는 점착 응력 때문이다. 다음 table 1 은 수직항력이 0 nN 에서의 각 실험 환경에서의 점착 응력을 나타내었다.

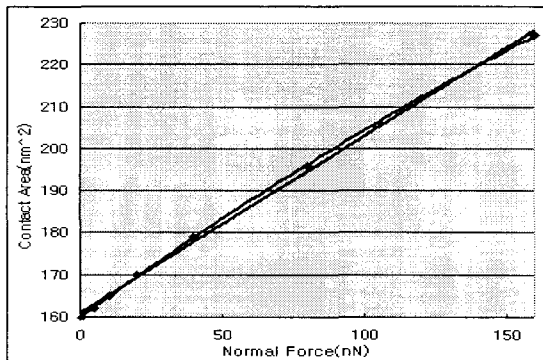


Fig. 8 Contact area according to normal force

Table 1 Adhesion force for Si(100) and Mica

Sample	25°, 35%	23°, 45%	25°, 48%
Si (100)	110nN	60nN	15nN
Sample	24°, 34%	24°, 39%	22°, 35%
Mica	65nN	60nN	40nN

## 4. 결론

수직항력의 변화를 접촉 면적으로 고려하여 Si(100)과 Mica 에 대한 마찰 계수 변화에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 50nm 팁은 접촉 면적이 180nm<sup>2</sup> 이상에서 마찰 계수의 감소가 발생하였다.
2. 30nm 팁은 160nN 에서도 접촉 면적이 180 nm<sup>2</sup> 보다 작기 때문에 마찰 계수의 감소가 나타나지 않았다.
3. 점착 응력은 마찰 계수에는 영향을 끼치지 않았고 마찰력에만 영향을 끼쳤다.
4. Si(100)의 마찰 계수는 Mica 의 마찰 계수보다 약 2 배 컸다.

## 후 기

본 연구는 나노 메카트로닉스 기술 개발 사업단 (M102KN010001-02K1401-01610)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. B. Bhushan, "Handbook of Micro/Nano Tribology," CRC, 1999.
2. K. Friedrich, "Friction and Wear of Polymer Composites," E.S.P.C, Vol. 1, 1986.
3. N.P. Suh, "Tribophysics," PRENTICE-HALL, 1986.
4. B. Bhushan, "Micro/Nanoscale Friction and Wear Mechanisms of Thin Film using AFM and FFM," Acta. Mater., Vol.46, No. 11, pp. 3793-3804, 1998
5. R.W. Carpick, "Measurement of Interfacial Shear (friction) with an Ultrahigh Vacuum Atomic Force Microscope," J. Vac. Sci. Technol., B 14(2), 1996.
6. R.W. Carpick, "Variation of the Interfacial Shear Strength and Adhesion of a Nanometer-Sized Contact," Langmuir, Vol. 12, No. 13, pp. 3334-3340, 1996.