

# 원자 현미경을 이용한 접촉 면적에 따른 마찰 및 마멸 특성 분석

최덕현\*, 황운봉#

## Effect of Contact Area on Friction and Wear Behavior in Atomic Force Microscope

Dukhyun Choi\*, Woonbong Hwang#

### ABSTRACT

Recently, it has been reported that frictional behavior at nanometer scale can be different from that at macro scale. In this article, friction and wear tests were conducted using an AFM to investigate the effect of real contact area on the coefficient of friction and wear property. SiO<sub>2</sub>, Mica, and SiGe were used in friction test and the AFM tip was Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. The real contact area between an AFM tip and flat surface was calculated by the Johnson-Kendall-Roberts (JKR) theory. Wear specimen was Mica, and the diamond tip was used. We found that the coefficient of friction is constant below a critical area, but it is degraded over the area. Moreover, it is found that wear depth increased rapidly from a certain load and was degraded as a function of the number of the scanning cycles. Also, the range of scanning velocity used in this study had little effect on the wear depth.

**Key Words** : Coefficient of friction (마찰계수), Real contact area (실접촉면적), Wear depth (마멸깊이), Normal force (수직하중), Number of scanning cycle (마멸횟수)

### 1. 서론

접촉하고 있는 구조물에서 상대적인 운동에 의해 표면에서 발생하는 점착력, 마찰력 및 마멸 특성에 대한 연구를 트라이볼로지<sup>1</sup>라 하며, 이 분야에 대한 연구는 오랜 기간에 걸쳐 정립되어 왔다. 특히, 마찰력은 수직하중에만 비례하고 접촉 면적에는 영향을 받지 않는다는 가설은 1950 년대에 Bowden 과 Tabor<sup>2</sup>에 의해 제시되어, 대부분 현재의 마찰 이론<sup>3-5</sup>을 정립하는데 초석이 되었다. 한편, 최근 원자 현미경(AFM)<sup>6-8</sup>, 표면 분석기(SFA)<sup>9-11</sup>

및 나노 인덴터 등과 같은 나노 스케일 실험 장비의 개발과 함께 원자 및 분자 수준에서의 트라이볼로지 실험이 가능해 졌다. 또한, K. S. Kim<sup>12</sup>, B. Bhushan<sup>13</sup>과 R. W. Carpick<sup>14-15</sup> 등은 나노 및 마이크로 스케일에서 마찰력은 접촉 면적에 영향을 받는 실험 결과를 보고하였다<sup>16-18</sup>. 따라서, 구조물의 수명을 예측하거나 구동 조건 및 구조물 전체의 안전성 및 신뢰성을 결정하는데 중요한 영향을 끼치는 트라이볼로지 특성에 대한 연구가 마크로 스케일에서부터 나노 스케일까지에 걸쳐 크게 부각되고 있다.

접수일: 2004 년 4 월 14 일; 게재승인일: 2004 년 9 월 9 일

\* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

# 교신저자: 포항공과대학교 기계공학과

E-mail whwang@postech.ac.kr Tel. (054) 279-2174

이전까지 나노 스케일에서의 대부분 실험은 여러 가지 오염에 의한 문제점을 줄이기 위해 초고 진공에서 수행되었고 마찰 거동을 예측하기 위해 시편의 상대적인 크기에 따른 경향성만을 분석하였다. 그러나, 마찰이 발생하는 대부분의 나노 구조물은 공기 중에서 구동될 것이고, 구동부의 접촉 면적은 시편의 상대적인 크기뿐만 아니라, 접착력, 재료의 탄성 계수 및 수직 항력 등에도 영향을 받기 때문에, 이들 모두를 고려한 분석이 이루어져야 한다. 따라서, 본 연구에서는 나노 스케일에서 마찰 거동을 이해하기 위해, 상온에서 접촉 면적에 따른 마찰 계수의 경향성을 분석하고자 하였다. 이때, 실 접촉 면적은 여러 인자들의 영향력을 모두 고려한 JKR 이론<sup>19</sup>으로 계산하였고, 이들 인자들 중 실 접촉 면적에 지배적인 인자를 찾아내고자 하였다. 마찰 특성과 함께 나노 구조물의 마멸 특성<sup>3,15</sup>은 구조물의 내구성 평가 및 수명 예측에 중요한 인자이다. 따라서 본 연구에서는 나노 스케일에서 수직하중, 마멸 횟수 및 마멸 속도에 따른 마멸 경향성을 분석하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

JKR 이론은 탄성 영역 내의 접촉 문제에서, 표면 에너지의 영향을 고려한 연속 접촉 기계적 모델(continuum contact mechanical model)이다. 이 이론은 접착력을 고려하여, Hertzian 접촉 역학<sup>20</sup>을 확장한 것으로 볼 수 있다. JKR 이론은 두 개의 구 형체가 접촉하고 있는 경우에 적용되었으나, 한쪽은 구 형체로 다른 한쪽은 무한 곡률을 가지는 구 형체로 고려함으로써 구 형체와 평평한 표면 사이의 접촉 문제에 응용이 가능하다. JKR 이론의 검증은 이미 많은 SFA 실험<sup>21</sup>을 통해 증명되었고, 다양한 형태의 접촉 문제로 확장되고 있다<sup>14,22</sup>.

JKR 이론은 실 접촉 면적, 압입 깊이, 압력 분포와 같은 다양한 기계적인 접촉 문제를 해결하는데 사용된다. 특히, 수직 하중이  $L$  인 경우에 실 접촉 면적,  $A$ 는 다음의 식으로 계산된다.

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

이 식에서  $R$ 은 팁 반경이고,  $\gamma$ 는 표면 에너지, 그리고  $K$ 는 두 재료에 대한 환산 탄성 계수로 다음

의 식으로 계산된다.

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

여기에서  $E_1$ 과  $E_2$ 는 각 재료의 탄성계수이고  $\nu_1$ 과  $\nu_2$ 는 프와송 비이다.

이 이론에서는 접촉 후에 두 재료가 분리되는데 필요한 힘을 임계력이라 하며 다음의 식으로 계산한다.

$$L_c = -\frac{3}{2} \pi R \gamma \quad (3)$$

이 임계력은 AFM 실험에서 측정되는 접착력과 같은 값으로 식 (1)에서 표면 에너지를 구하기 위해 사용된다.

결국, JKR 이론은 팁 반경, 접착력, 탄성 계수 및 수직하중을 고려하여 실 접촉 면적을 계산하는데 사용된다. 또한, 접착력은 팁 반경 외에 온도와 습도 등에 영향을 받는 인자이므로, 이 이론에서는 환경적 인자와 구조적 인자가 모두 고려된다. 따라서, JKR 이론으로 계산된 실 접촉 면적에 따른 마찰 거동 분석은 여러 마찰 인자를 함께 고려한 분석으로 생각할 수 있다.

## 3. 실험

### 3.1 실험 조건 및 방법

시편은 표면 거칠기와 탄성 계수가 다른 세 종류의 Mica, SiO<sub>2</sub>, SiGe 샘플을 사용하였고 사각 피라미드형 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>을 AFM 팁(Olympus Inc.)으로 사용하였다. 팁 반경은 30과 50 nm 이고 팁이 달려 있는 외팔보(cantilever)의 굽힘 강성은 0.76 N/m 였다. 나노 스케일 마찰 실험은 상온에서 SEIKO사의 AFM (SPA 400)으로 수행되었다. 마찰 거리는 5  $\mu$ m 이고 마찰 속도는 1Hz (10  $\mu$ m/s)였다. AFM에서 마찰력을 측정하기 위해 시편은 AFM 팁이 달려 있는 외팔보에 수직으로 움직인다. 접착력은 시편과 외팔보의 팁이 붙었다가 떨어질 때 측정되는 값으로 이에 중요한 영향을 끼치는 온도와 습도는 실험 시 측정되었고, 수직항력은 0.76에서 160 nN까지 변화 시켰다. Mica와 SiGe의 탄성 계수는 나노 인텐터의 경도로부터 계산되었고 SiO<sub>2</sub>

의 탄성 계수는 참고문헌에서 구하였다<sup>23</sup>.

나노 및 마이크로 스케일에서의 마멸 실험은 삼면 피라미드 형태의 다이아몬드 팁으로 수행되었다. 다이아몬드 팁의 반경은 100 nm 이고 팁이 달려 있는 외팔보는 스테인리스 스틸로 굽힘 강성이 41 N/m 였다. 시편은 표면 거칠기가 우수한 Mica 를 이용하였다. 수직 하중에 따른 마멸 깊이의 경향성을 분석하기 위해 하중은 1 에서 4  $\mu\text{N}$  까지 가하였고, 마멸 횟수는 1 회에서 5 회까지 같은 마멸 면에서 수행 되었다. 마멸 깊이에 대한 마멸 속도의 영향을 알아보기 위해 5 회씩 2 (0.5 Hz)에서 12  $\mu\text{m/s}$  (3 Hz)까지 속도를 변화시켰다. 마멸 면적은  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  으로 이 면적은 64 등분(64 라인)되어 마멸 실험이 수행되었다. 따라서 1 회의 마멸 실험에서 1 라인을 AFM 팁이 움직일 때, 31.25nm 씩 마멸이 진행되었다. 마멸 속도의 경향성을 분석하기 위한 실험에서는 5  $\mu\text{N}$  하중에서 3  $\mu\text{m}$  의 마멸 거리를 움직이면서 실험이 수행되었다.

Table 1 Adhesion force for SiO<sub>2</sub>, Mica, and SiGe

	Mica		SiO <sub>2</sub>		SiGe
Temperature (°)	24°	22°	23°	25°	22°
Humidity (%)	39%	35%	45%	48%	69%
radius (nm)	r=50	r=30	r=50	r=30	r=30
Adhesive Force (nN)	60	40	60	15	38
Elastic Constant (GPa)	65		70		224
Average Surface Roughness (nm)	0.17		0.08		5.02

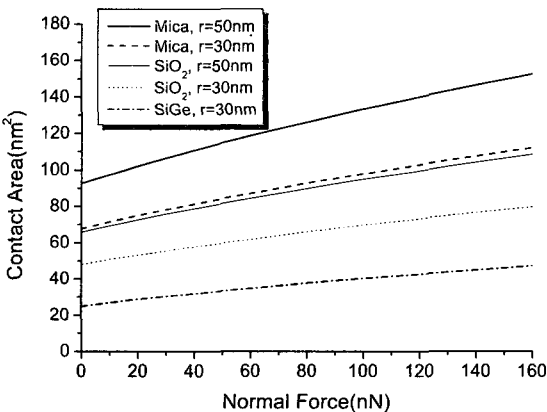


Fig. 1 The real contact area calculated by JKR theory

### 3.2 실험 결과 및 토론

표 1 에 각 시편에 대한 점착력과 탄성 계수, 평균 표면 거칠기 및 측정된 온도와 습도를 정리 하였다. 이 자료로부터 JKR 이론을 이용하여 각 시편의 하중에 따른 실 접촉 면적을 계산하면 fig 1 과 같다. fig 1 에서 실 접촉 면적은 팁 반경이 같을 때는 탄성 계수에 따라 큰 영향을 받았고, 같은 재료에 대해서는 접촉 반경에 큰 영향을 받았다. 즉, 같은 크기의 접촉 문제에서는 재료에 따라 실 접촉 면적이 크게 변하게 되므로 나노 스케일 마찰 및 마멸 거동 예측을 위해 재료에 따른 영향력을 분석해야 하고, 정해진 재료에 대한 접촉 문제에서는 접촉 반경의 영향을 고려해야 한다.

fig 2-4 는 각 시편에 대한 마찰 실험 결과 그래프이다. 그래프에서 마찰력의 시작점은 점착력의 차이로 조금씩 달라졌지만 경향성은 변하지 않았다. 30 nm 의 팁을 사용한 경우에 모든 시편의 마찰력은 수직항력에 선형적으로 비례하여 마찰 계수가 일정한 값을 가지는 결과가 나왔다. 50 nm 의 팁을 사용한 경우에, SiO<sub>2</sub> 와 SiGe 시편은 마찰력이 수직항력에 비례하여 마찰 계수가 일정하게 나왔으나, Mica 시편은 수직항력에 따라 마찰력이 감소되는 경향을 보여 마찰 계수가 작아지는 결과가 나왔다. fig 2 에서 30nm 의 팁을 사용한 결과와 50 nm 의 팁을 사용한 결과를 비교해 볼 때, 50 nm 의 팁을 사용한 경우에는 40 nN 부터 마찰 계수가 바뀌는 것으로 볼 수 있었다. 또한, fig 1 에서 50 nm 의 팁 반경에서 40 nN 의 수직하중을 가할 때 Mica 의 실 접촉 면적은 110 nm<sup>2</sup> 로 이 값을 임계 면적으로 고려 할 수 있었다. 따라서, 나노 스케일에서 마찰 계수는 임계 면적 이하에서는 일정하다가 실 접촉 면적이 임계값보다 커지면서 마찰 계수가 변하는 것을 알 수 있었다. 마찰 계수는 구동하는 구조물의 구동 조건에 필수적인 자료인데, 마크로 스케일에서는 마찰 계수가 실 접촉 면적에 영향을 받지 않으나, 나노 스케일에서는 실 접촉 면적에 영향을 받게 되므로, 구동하는 나노 구조물의 구동 조건을 정하기 위해 실 접촉 면적에 영향을 주는 여러 인자들을 반드시 고려해야 할 것이다.

fig 5 는  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  의 마멸된 면으로, 나노 스케일에서의 마멸 실험이 성공적으로 수행됐음을 알 수 있었다. fig 6 은 수직 하중에 따른 마멸 면의 단면으로 마멸 입자가 쌓여서 마멸 형상에 기울기

가 생기는 것을 알 수 있고 이를 통해 하중에 따른 최대 마멸 깊이를 측정할 수 있다. 이는

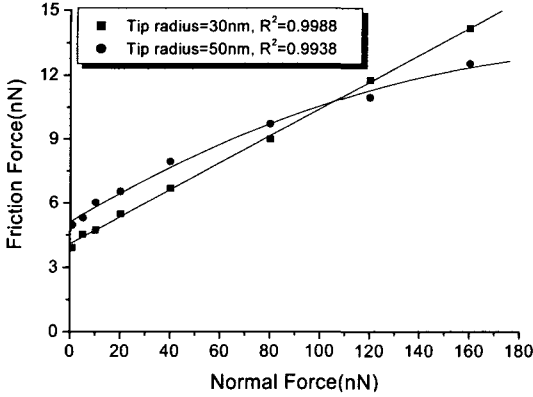


Fig. 2 Friction force vs. normal force of Mica

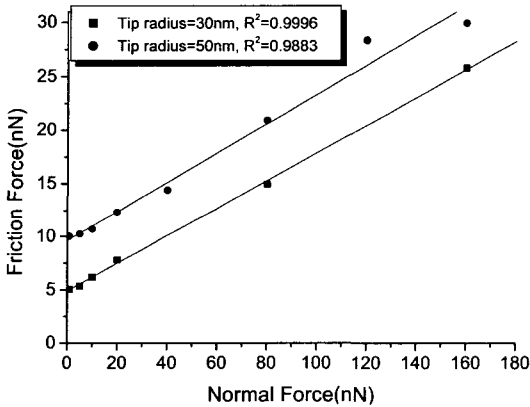


Fig. 3 Friction force vs. normal force of SiO<sub>2</sub>

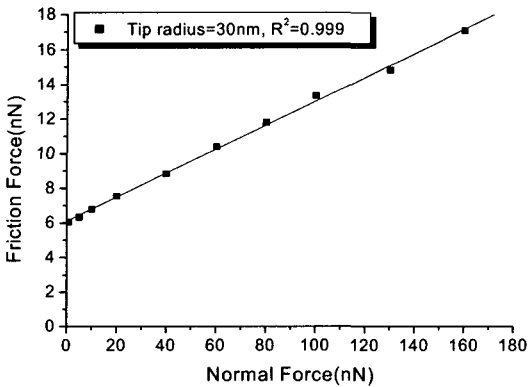


Fig. 4 Friction force vs. normal force of SiGe

fig 7 의 그래프에서 기울기가 하중에 따라 점점 커지는 경향을 보이므로, 마멸 깊이는 수직 하중에 따라 급하게 증가함을 알 수 있었다. 따라서, 나노 스케일에서 접촉부의 하중은 구조물의 안정성 및 내구성에 가장 중요한 인자로 고려된다. fig 8 은 같은 마멸면을 1 회, 3 회, 5 회 마멸 시켰을 때의 마멸면 형상이다. fig 에서, 같은 마멸면을 마멸 시켰으나, 스캐너 피에조(piezo)의 이력 현상으로 인해 다소 같은 면을 벗어나서 마멸 된 것을 알 수 있었다. 그러나, 마멸 횟수에 따른 최대 마멸 깊이를 분석하는 데에는 문제점이 없었다. 따라서, fig 9 에서 보듯이, 마멸 횟수에 따른 마멸 깊이는 마멸 횟수가 증가함에 따라 마멸 깊이는 증가하나 그 증가량이 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이는 마멸 횟수가 증가함에 따라, 다이아몬드 팁에 Mica 의 마멸 입자가 달라 붙어 마찰 특성을 향상시키고, 그 결과 마멸 특성 향상에 기여 한 것으로 판단된다. fig 10 은 마멸 실험 전, 후의 다이아몬드 팁 끝의 형상이다. fig 에서 보듯이 마멸 실험 후 팁 끝부분에 Mica 입자가 붙어있는 것을 확인할 수 있었다. fig 11~12 는 마멸 속도에 따른 마멸 깊이를 나타낸 것이다. fig 에서 보듯이, 마멸 속도가 증가함에 따라 마멸 깊이는 변하지 않았다. 따라서, 본 연구에서 수행한 마멸 속도의 범위에서는 마멸 깊이는 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 결국, 마멸 깊이는 하중에 따라 급하게 변하고, 마멸 횟수에 따라서는 그 증가량이 감소하며, 마멸 속도에는 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 마멸 특성은 구조물의 내구성 및 수명 예측에 중요한 인자로, 특히 나노 구조물의 경우, 접촉부의 하중을 조절하여 고속으로 구동하는 안정성이 높은 나노 구조물을 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

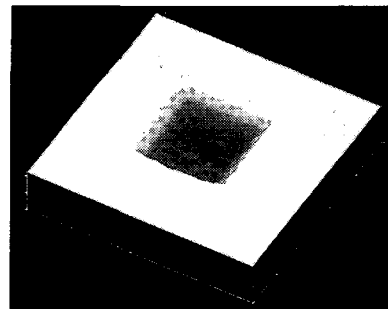


Fig. 5 Worn surface of Mica in 2 × 2 μm<sup>2</sup>

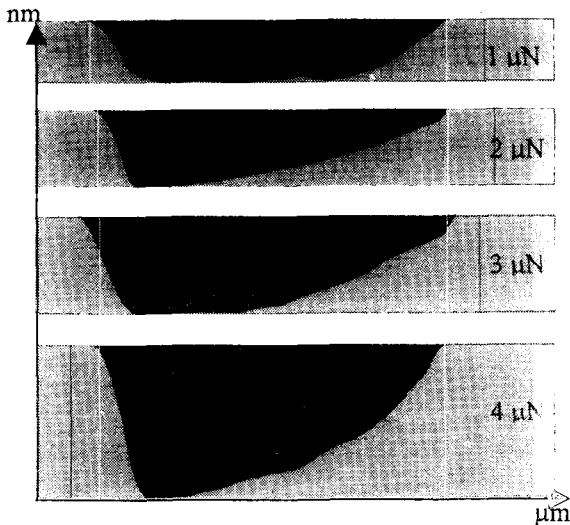


Fig. 6 Cross section of worn sample for normal forces

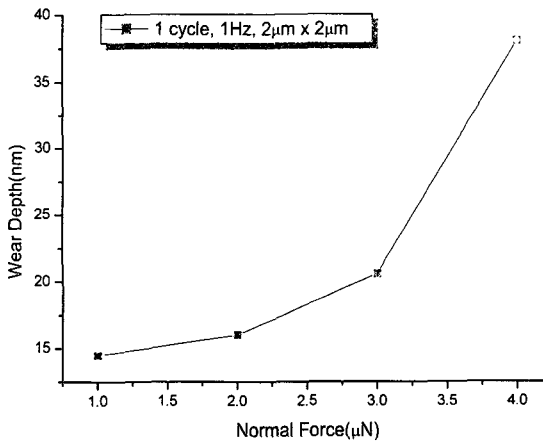
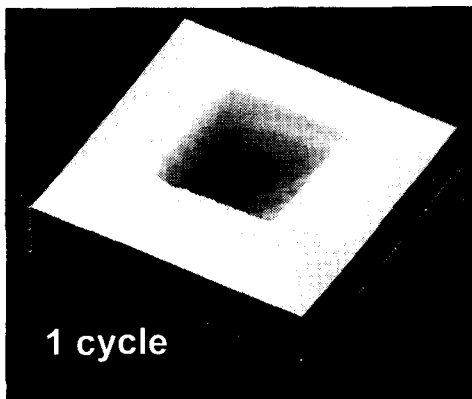
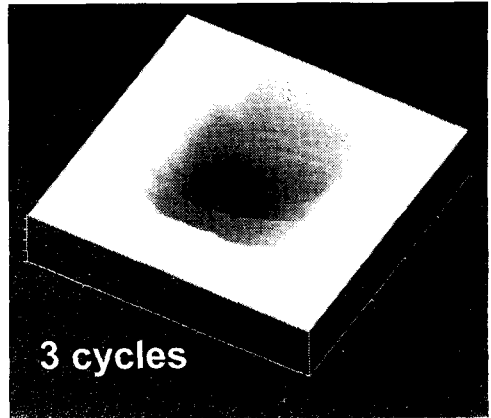


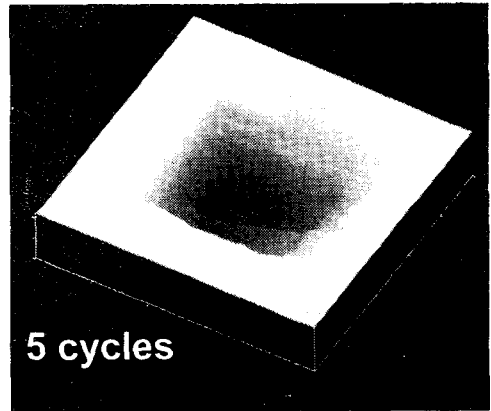
Fig. 7 Plot of wear depth vs. normal force



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Worn surface for scanning cycle (a) 1 (b) 3 (c) 5 cycles

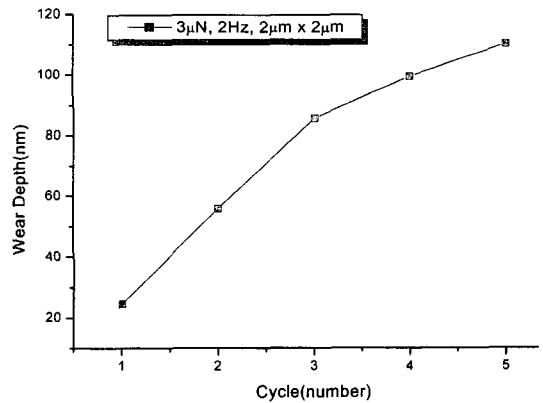


Fig. 9 Plot of wear depth vs. scanning cycle

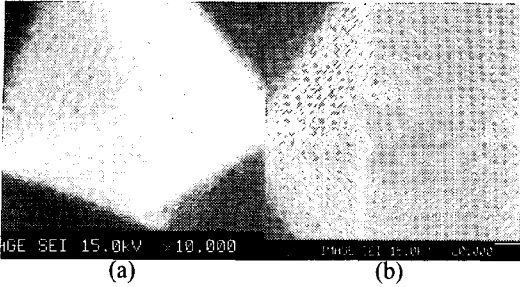


Fig. 10 SEM images of diamond tip (a)before and (b)after test

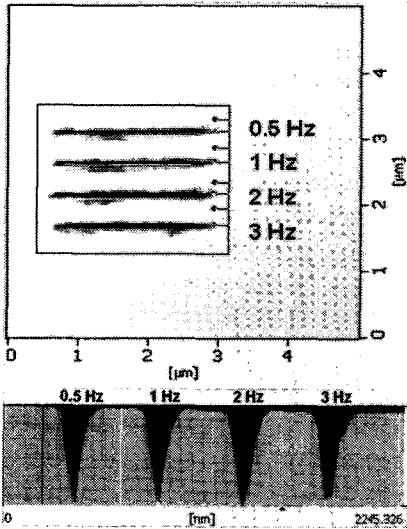


Fig. 11 Worn surface and depths as a function of a scanning speed

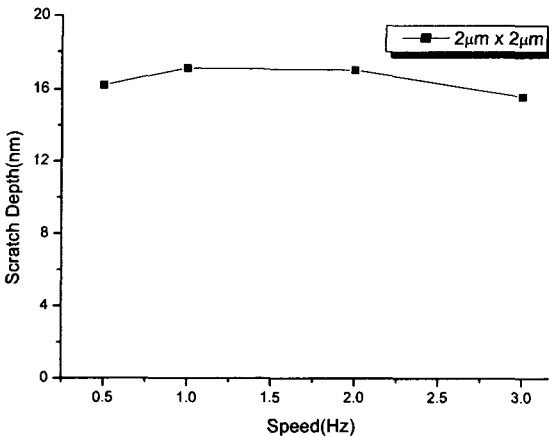


Fig. 12 Plot of scratch depth vs. scanning speed

#### 4. 결론

본 연구에서는 나노 스케일에서 접촉 면적에 따른 마찰 거동과 마멸 인자에 따른 마멸 거동을 분석하였다. 마찰 실험 결과 나노 스케일에서 마찰 계수는 임계 면적 이하에서는 일정하다가 실 접촉 면적이 임계 면적보다 커지면서 작아지는 경향을 보였다. 마멸 실험 결과에서는 마멸 깊이는 수직 하중의 증가에 따라 급하게 증가하는 경향을 보였고, 마멸 깊이는 마멸 횟수에 따라 그 증가량이 줄어들었다. 마멸 속도는 마멸 깊이에 영향을 끼치지 않았다. 나노 스케일에서는 매크로 스케일에서와는 다르게 환경 및 구조적 인자들에 따라 마찰 및 마멸 거동이 크게 바뀌는 것을 알 수 있었다. 앞으로 제작될 나노 구조물의 신뢰성 평가 및 안정성 예측을 위해 구동 조건 및 구동부의 환경에 따라 마찰 및 마멸 인자에 대한 다양한 분석이 이루어져야 함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 21 세기 프론티어 연구 개발 사업의 일환인 나노 메카트로닉스 기술 개발 사업단의 연구비 지원(M102KN0100 01-02K1401-01610)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. Holmberg, K., "Reliability aspects of tribology," Tribology, Vol. 34, pp. 801-808, 2001.
2. Bowden, F. P. and Tabor, D. F., The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon, Oxford, 1950.
3. Bhushan, B., Handbook of Micro/Nano Tribology, CRC, 1999.
4. Friedrich, K., Friction and Wear of Polymer Composites, E.S.P.C, Vol. 1, 1986.
5. Suh, N. P., Tribophysics, PRENTICE-HALL, 1986.
6. Binnig, G., Quate, C. F. and Gerber, C., "Atomic force microscope," Phys. Rev. Lett., Vol. 56, pp. 930-933, 1986.
7. Mate, C. M., MacLelland, G. M., Erlandsson, R. and Chiang, S., "Atomic-scale friction of a tungsten

- tip on a graphite surface," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 59, pp. 1942-1945, 1987.
8. Meyrer, G. and Amer, N. M., "Simultaneous measurement of lateral and normal forces with an optical-beam-deflection atomic force microscopy: the NaCl (011) surface," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 57, pp. 2089-2091, 1990.
  9. Tabor, D. and Winterton, R. H. S., "The Direct Measurement of Normal and Retarded van der Waals Forces," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 312, pp. 435-450, 1969.
  10. Israelachvili, J. N., McGuiggan, P. M. and Homola, A. M., "Dynamic properties of molecularly thin liquid films," *Science*, Vol. 240, pp. 189-190, 1988.
  11. Homoloa, A. M., Israelachvili, J. N., McGuiggan, P. M. and Gee, M. L., "Fundamental experimental studies in tribology: The transition from "Interfacial" friction of undamaged molecularly smooth surfaces to "Normal" friction with wear," *Wear*, Vol. 136, pp. 65-83, 1990.
  12. Hurtado, J. A. and Kim, K. S., "Scale effects in friction of single-asperity contacts. I. From concurrent slip to single-dislocation-assisted slip," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 455, pp. 3363-3384, 1999.
  13. Bhushan, B. and Sundararajan, S., "Micro/nanoscale friction and wear mechanisms of thin films using atomic force and friction force microscopy," *Acta. Mater.*, Vol. 46, pp. 3793-3804, 1998.
  14. Carpick, R. W., Agrait, N., Ogletree, D. F. and Salmeron, M., "Measurement of interfacial shear (friction) with an ultrahigh vacuum atomic force microscope," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 1289-1295, 1996.
  15. Carpick, R. W., Agrait, N., Ogletree, D. F. and Salmeron, M., "Variation of the interfacial shear strength and adhesion of a nanometer-sized contact," *Langmuir*, Vol. 12, pp. 3334-3340, 1996.
  16. Carpick, R. W., Ogletree, D. F. and Salmeron, M., "A general equation for fitting contact area and friction vs load measurements," *J. Colloid. Interf. Sci.*, Vol. 211, pp. 395-400, 1999.
  17. Lantz, M. A., O'Shea, S. J. and Welland, M. E., "Atomic-force-microscope study of contact area and friction on NbSe<sub>2</sub>," *Phys. Rev. B*, Vol. 55, pp. 10776-10785, 1997.
  18. Lutz, M. A., Feenstra, R. M. and Chu, J. O., "Atomic force microscopy studies of SiGe films and Si/SiGe heterostructures," *J. Res. Develop.*, Vol. 39, pp. 629-637, 1995.
  19. Johnson, K. L., Kendal, K. and Roberts, A. D., "Surface energy and the contact of elastic solids," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 324, pp. 301-313, 1971.
  20. Hertz, H., "Über die Berührung fester elastischer Körper," *J. Reine Angew. Math.*, Vol. 92, pp. 156-171, 1881.
  21. Israelachvili, J. N., *Fundamentals of Friction*; Singer, I. L., Pollock, H. M., Ed., Kluwer: Dordrecht, pp. 351, 1992.
  22. Maugis, D., "Extension of the Johnson-Kendall-Roberts theory of the elastic contact of spheres to large contact radii," *Langmuir*, Vol. 11, pp. 679-682, 1995.
  23. Kim, T. M., "Influence of substrates on the elastic reaction of films for the microindentation tests," *Thin Solid Films*, Vol. 283, pp. 12-16, 1996.