

Atomic Force Microscope Tip 의 마멸특성에 관한 연구

정구현*, 김대은#

Wear Characteristics of Atomic Force Microscope Tip

Koo-Hyun Chung* and Dae-Eun Kim#

ABSTRACT

Atomic Force Microscope (AFM) has been widely used in micro/nano-scale studies and applications for the last few decade. In this work, wear characteristics of silicon-based AFM tip was investigated. AFM tip shape was observed using a high resolution SEM and the wear coefficient was approximately calculated based on Archard's wear equation. It was shown that the wear coefficient of silicon and silicon nitride were in the range of $10^{-1} \sim 10^{-3}$ and $10^{-3} \sim 10^{-4}$, respectively. Also, the effect of relative humidity and sliding distance on adhesion-induced tip wear was discussed. It was found that the tip wear has more severe for harder test materials. Finally, the probable wear mechanism was analyzed from the adhesive and abrasive interaction point of view.

Key Words : Adhesion(응착력), AFM(원자 현미경), Si tip(실리콘 탐침), Si_3N_4 tip(실리콘 나이트라이드 탐침), Nano-wear (나노 마멸)

1. 서론

마이크로/나노 스케일에서 발생하는 각종 물리 현상에 대한 많은 연구는 AFM의 개발 이후 더욱 급진적으로 이루어져 왔다¹. 특히, AFM은 분자단위의 표면형상을 관찰하는 동시에 마찰력 측정이 가능하다는 장점을 가짐에 따라 나노 스케일에서의 표면분석뿐만 아니라 각종 tribological 특성연구에 매우 유용하게 활용되고 있다^{2,4}. 또한, 탐침(tip)과 상대표면 사이에서 발생하는 각종 물리화학적 현상을 이용하여 나노 수준의 패턴을 형성하는 다양한 Scanning Probe Lithography(SPL) 기술이 개발되었으며⁵⁻⁷, 미세한 끝단 반경을 가지는 탐침

으로 표면에 비트를 형성하여 정보를 저장하는 probe recording 기술이 제안되어, 획기적인 수준의 저장밀도를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다⁸.

AFM 탐침은 반도체 공정으로 제조되는데, 높은 표면경도를 가지는 Si, 또는 Si_3N_4 가 주로 이용되며, 스크래치 실험을 위하여 다이아몬드 코팅을 하기도 한다. 또한, 금속 코팅을 하여 전기전도성을 부여하거나 자화시키는 등, 각종 응용성을 부여한다⁹. 탐침의 끝단 반경은 lateral 분해능에 직접적인 영향을 미치므로 극소화하는 것이 요구되는데, 현재 상용화되고 있는 AFM 탐침의 경우 일반적으로 10 nm 정도의 반경을 가진다. 탐침의 끝단 반경이 작을 경우, 적은 하중에서도 높은 접촉

✉ 2002년 11월 1일 접수
* 연세대학원 기계공학과
교신저자, 연세대학교 기계공학과
Email kimde@yonsei.ac.kr Tel. (02) 2123-2822

압력을 유발하여 연삭(abrasive) 현상에 의한 파손이 발생하기 쉽다. 탐침의 파손은 AFM의 측정 결과를 왜곡시킬 뿐만 아니라, 각종 AFM 관련 응용기술의 실현을 제한하고 있는데, probe recording 기술에서 탐침의 파손에 대한 문제가 나타나고 있으며¹⁰, 이를 극복하기 위한 연구가 수행되고 있다¹¹. 그러나 현재까지 몇몇 연구결과에서 탐침의 파손을 관찰하는데 그치고 있으며¹², 파손 특성에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 Si 및 Si₃N₄로 제작된 AFM 탐침과 상대재료의 상대운동으로 인한 마멸 및 표면 파손을 관찰하고 특성을 분석하였다. Field Emission Scanning Electron Microscope(FESEM)을 이용하여 Si 및 Si₃N₄ 탐침의 마멸정도를 정량적으로 비교하였으며, 파손에 기여하는 응착력(adhesion force) 및 상대 재료의 영향에 대하여 논하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 시편

본 연구에서는 상용화된 Si 및 Si₃N₄ 탐침 및 bare Si(100), Cu 와 DLC (Diamond Like Carbon) 박막을 실험에 이용하였으며, 세부적인 사항을 다음에 제시하였다.

2.1.1 AFM 탐침

실험에 사용된 Si 및 실리콘 Si₃N₄ 탐침은 각각 원추형과 피라미드형상을 가지며, 끝단 반경은 10 nm 와 20 nm 의 공칭값을 가진다. 칸틸레버의 스프링 상수는 각각 0.26, 0.4 N/m 였다. 상대 재료 표면과 일정 하중에서 접촉상태를 유지하며 미끄럼운동을 시킨 후 탐침과 표면의 파손을 관찰하였다.

2.1.2 상대재료

먼저 Si 및 Si₃N₄ 탐침의 마멸을 비교하기 위하여 Si(100) 표면을 이용하였으며, 상대재료에 따른 Si 탐침의 파손 정도를 비교하기 위하여 연성 재료인 Cu 박막과 경한 DLC 박막에 대한 실험을 수행하였다. Si(100)는 실험 전에 SC1 세척을 하였으므로 표면에 약 10~20 Å 정도의 화학적 산화물이 형성되어 있을 것으로 예상되며, Cu 박막과 DLC 박막은 각각 e-beam evaporation 및 DC sputtering 으로 제작되었다. 실험에 사용된 상대 재

료의 전체 크기는 10 × 10 mm 이며, 박막두께 및 표면거칠기와 경도를 Table 1 에 제시하였다. 표면 거칠기는 5 × 5 μ m 영역에서 AFM 으로 측정하였으며 경도는 나노인덴터로 측정하였다. 경도 측정 시 기관의 영향을 최소화하기 위해서 압흔(indentation) 깊이를 가능한 감소시켜야 했는데, 측정시 안정적인 load-displacement curve 를 나타내는 압흔 깊이가 약 40 nm 였으므로 이 때의 값을 이용하였다. 측정결과, 알려진 값보다 조금씩 큰 경향을 나타냈다.

Table 1 Specification of AFM tip and sample surface

Material	Preparation	Thickness	Ra	Hardness
Si(100)	SC1 cleaning	~1 nm (chemical oxide)	0.13 nm	13.78 GPa
Cu	E-beam evaporation	180 nm	0.8 nm	3.14 GPa
DLC	DC sputter	300 nm	0.9 nm	12.4 GPa

2.2 실험 방법

상용화된 AFM 을 이용하여 실험하였으며, 탐침의 파손을 관찰하기 위하여, 실험전 탐침의 형상을 SEM 으로 관찰하였는데, 대체적으로 Si 의 경우 10 nm, Si₃N₄ 의 경우 20 nm 정도의 끝단 반경을 가지는 것으로 나타났다. 탐침이 붙어있는 칸틸레버의 굽힘을 이용하여 일정하중을 가하고, 5 × 5 μ m 영역에서 미끄럼을 진행하여 파손을 유발하였으며, 하중을 20%로 감소시키고 영역을 10 × 10 μ m 으로 증가시켜 표면의 파손을 관찰하였다. Si 및 Si₃N₄ 의 마멸정도를 비교하기 위해서는 100 회 스캔을 하였으며, 그 외의 경우에는 10 회 스캔하였다. 1 회 스캔은 256 줄로 구성되어 있으므로 탐침이 경험하는 1 회당 미끄럼거리는 5 × 5 μ m 영역스캔의 경우, 5 × 2 × 256 = 2.56 mm 이다. Si 의 경우 마멸실험 하중은 10 nN 이었으며, 실험후 2 nN 의 하중에서 상대표면의 파손을 관찰하였다. Si₃N₄ 탐침의 끝단 반경은 Si 보다 크므로 접촉압력을 비슷하게 하기 위하여 20 nN 의 하중에서 실험하였으며, 실험 후 4 nN 에서 측정하였다. Si(100) 상대 표면에 대하여 Hertz 의 해를 이용하여 접촉압력을 계산한 결과, 표면에서의 최대접촉압력은 Si 탐침의 경우 약 3.9 GPa, Si₃N₄ 탐침의 경우 약 4.1 GPa 로 나타났다. 실험 전후의 탐침을

SEM 이미지로 비교 관찰하여 끝단 형상의 변화로부터 탐침의 마멸량을 계산하였으며, Archard's wear law 를 이용하여 마멸계수를 계산하였다.

응착력에 따른 파손을 비교하기 위해서는 습도를 20, 40, 60 %로 변화시켰으며, 상대재료에 따른 영향을 파악하기 위하여 bare Si(100), Cu 와 DLC 표면에 대하여 $5 \times 5 \mu\text{m}$ 영역을 10 회 동안 스캔한 후 탐침의 끝단을 비교하였다. 또한 실험 중간에 force-distance curve(F-D curve)를 이용하여 응착력의 변화를 측정하였다. 습도실험을 제외한 모든 실험은 상대습도 20 %에서 행하였으며, 실험 속도는 $5 \mu\text{m/s}$ 였다.

3. 실험 결과

3.1 AFM 탐침의 마멸

Si 및 Si_3N_4 탐침에 대하여 마멸계수를 구하고, 상대습도 변화 및 상대 재료에 따른 Si 탐침의 파손에 대한 실험을 통하여 탐침에서 발생할 수 있는 마멸현상에 대하여 고찰하였다.

3.1.1 탐침의 마멸계수

Fig. 1 은 실험전 Si 와 Si_3N_4 탐침을 FESEM 으로 관찰한 결과이다. 끝단반경이 대체적으로 공칭 값과 비슷한 것을 알 수 있다. Fig. 2 는 Si(100) 표면에서 $5 \times 5 \mu\text{m}$ 영역을 100 회 동안 스캔한 결과를 나타내는데, 이 때 탐침이 이동한 미끄럼거리는 256 mm 였다. 탐침의 끝단이 상대운동으로 인하여 평평해진 것을 알 수 있으며, Si 탐침의 파손이 더 심하게 나타났다. 이들의 마멸량을 계산하고 Archard's wear law 를 이용하여 마멸계수를 구한 결과, Si 탐침은 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 정도로 나타났으며, Si_3N_4 탐침은 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 정도의 값을 나타냈다. 즉, 비슷한 정도의 접촉압력에서 Si_3N_4 의 마멸특성이 Si 보다 우수한 것으로 나타났다. 이는 매크로 스케일에서의 마멸계수와 비교해 보면 매우 큰 값으로써 중마멸(severe wear)에 해당한다.

Fig. 3 은 Fig. 2 (a)에 제시된 탐침을 위에서 관찰한 FESEM 이미지다. 대체적으로 Si 탐침의 경우 평평해진 탐침의 주변에 마멸입자들이 관찰되는 경우가 많았으며, Si_3N_4 탐침의 경우에도 입자들이 주변에서 관찰되는 경우도 있었으나, 그 정도는 상대적으로 적게 나타났다. 이는 Si 와 Si_3N_4 의 표면에너지 차이에 의한 것으로서, 발생하는 입

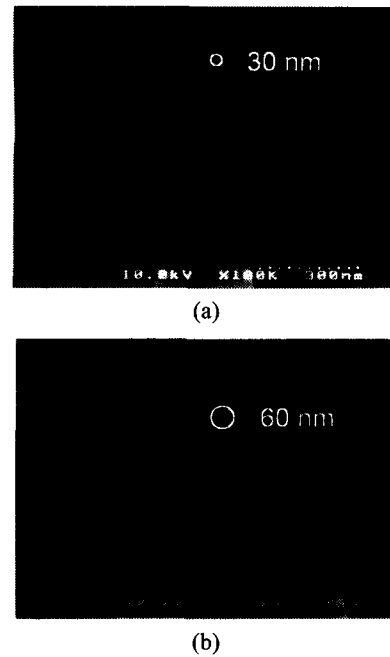


Fig. 1 SEM images of (a) silicon and (b) silicon nitride AFM tip before experiment (side view)

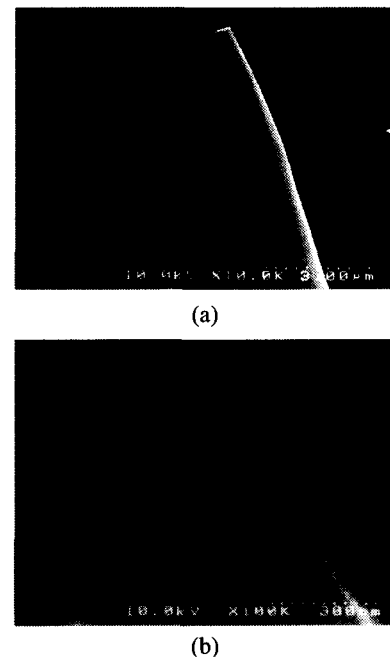


Fig. 2 SEM images of (a) silicon (under 10 nN) and (b) silicon nitride (under 20 nN) AFM tip after 256 mm sliding (side view) at 20% RH

자는 Si와 좀 더 높은 응착 특성을 나타내는 것으로 예상된다. 이와 같은 입자의 거동은 일반적인 매크로 스케일에서의 실험에도 많이 나타나는 현상인데, 스케일이 작아짐에 따라 생성되는 입자들의 크기가 작아지므로 서로 응착되기 쉬우며, 이와 같은 현상은 탐침의 마멸 현상에 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있다.

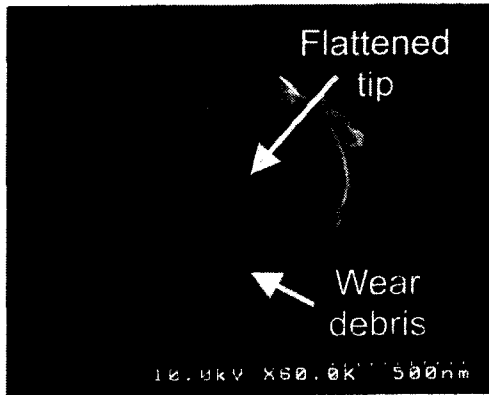


Fig. 3 SEM image of worn silicon tip under 10 nN after 256 mm sliding (top view) at 20 RH

3.1.2 습도변화에 따른 탐침의 마멸

상대 습도에 따른 응착력의 변화를 F-D curve를 이용하여 측정하였으며, 습도 변화에 따른 탐침의 마멸량을 계산하여 Fig. 4에 제시하였다. 이때 상대재료는 Si(100)을 이용하였으며, 미끄럼 거리는 25.6 mm였다. 예상했던 바와 같이 습도가 증가함에 따라 응착력 및 탐침의 마멸이 증가하는 것으로 나타났다. 습도가 증가함에 따라 표면에 습기가 응축될 확률이 증가하고, 탐침과 표면 사이에 습기가 쉽게 달라붙게 되므로 응착력이 증가할 것으로 기대되는데, 상대습도 40% 이상에서의 응착력은 약 15 nN으로써, 칸틸레버 굽힘에 의한 수직하중(10 nN) 보다 큰 것으로 나타났다. 특히, 60%에서는 습기의 국부적인 응축이 일어날 가능성이 증가함에 따라 응착력의 편차도 크게 나타났다. 상대습도 40%, 60% 경우에 응착을 고려한 접촉모델인 DMT, JKR model을 이용하여 표면에서의 최대접촉압력을 구한 결과 5.5 GPa 정도로 약 40% 정도 증가하였다. 즉, AFM 탐침과 상대표면과의 응착력은 습도 증가에 따라 2-3 배까지 커질 수 있으며, 이와 같은 관점에서 볼 때, 습도가 증가할

수록 탐침의 마멸도 증가하는 것으로 생각된다.

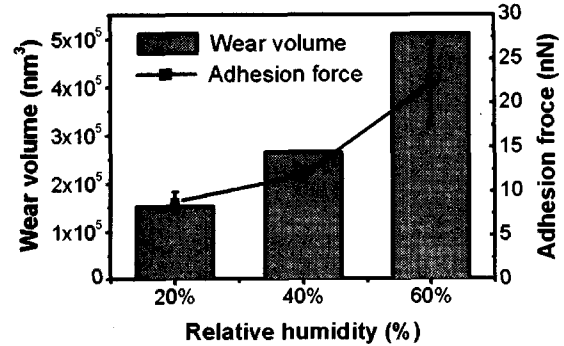


Fig. 4 Wear volume and adhesion force of Si tip w.r.t. relative humidity

3.1.3 상대 재료에 따른 탐침의 마멸

상대재료에 따른 Si 탐침의 마멸 정도를 비교하기 위하여 서로 다른 정도와 응착 특성을 나타내는 Si(100), Cu, DLC에 대하여 10회의 5×5 μm 영역 스캔 후 SEM으로 탐침 끝단의 변화를 관찰하여 Fig. 5에 제시하였다. Si(100)와 DLC에 대한 실험결과 Cu에 비하여 비교적 큰 마멸이 발생하였다. Cu의 경우에는 탐침의 파손이 비교적 적었음에도 불구하고 입자에 의하여 오염되는 현상을 나타냈다. 이상과 같은 실험 결과에서 상대 재료에 따라 탐침의 파손이 다르게 나타남을 알 수 있으며, 특히 Table 1에 제시된 실험에 사용된 재료의 경도를 고려하면, 경한 재료에 대한 탐침의 마멸이 더 크게 나타났음을 알 수 있다.

3.2 상대 표면의 파손

상대 표면에서 발생한 파손현상을 파악하기 위해서, 실험 후 10×10 μm 영역을 스캔하여 표면의 파손을 관찰한 결과, AFM 이미지에서 파손된 흔적을 관찰하기는 힘들었으나 LFM (Lateral Force Microscopy) 이미지에서는 파손의 흔적을 관찰할 수 있었다.

Fig. 6은 Si 탐침과 Si(100) 표면을 이용한 실험 결과로써, 중앙에 5×5 μm 영역의 흔적이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 100회 스캔 영역과 바깥 영역에서의 lateral force가 미세하게나마 다르게 나타난 것을 의미한다. 그러나 topography에서는 흔적을 찾기가 어려웠는데, 이는 표면에서의 파손량 자체가 표면거칠기 수준으로 적게 나타났기 때문

이기도 하며, 마멸된 탐침으로 측정된 이미지에서는 정밀하게 측정되지 어렵기 때문이다. 특히, Cu와 DLC의 표면거칠기는 Si에 비하여 더 컸으므로 AFM의 topography 측정결과에서 차이를 파악하기는 어려웠다. 이와 같은 표면에서의 파손을 정량적으로 비교하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

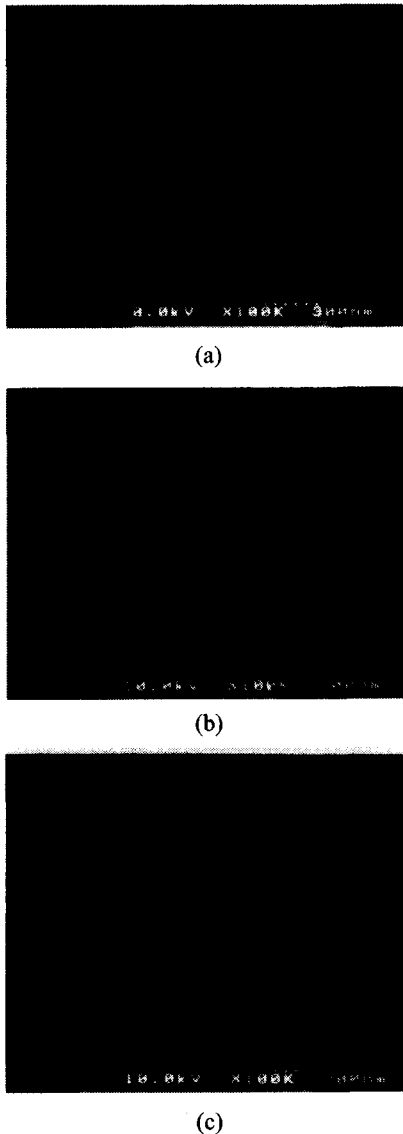


Fig. 5 SEM images of AFM tip after 25.6mm sliding on (a) bare Si(100), (b) Cu, and (c) DLC surface at 20% RH

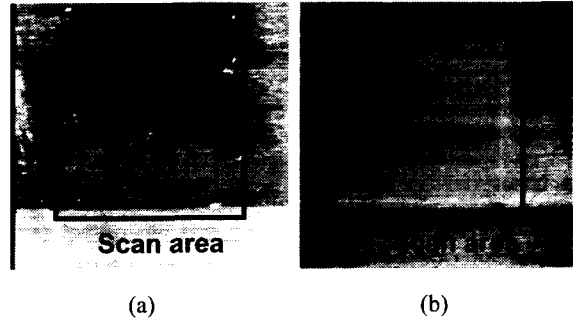


Fig. 6 (a) Left to right and (b) right to left LFM images of Si(100) surface after 256 mm contact sliding with Si tip under 10 nN at RH 20%

4. 고찰

AFM 탐침과 표면과의 상호작용에서 발생할 것으로 기대되는 마멸기구는 응착마멸, 연삭마멸, 피로마멸 등으로 제시되고 있으며¹³, 이 중 응착과 연삭 작용에 대하여 다음과 같이 살펴보았다.

4.1 응착 특성의 영향

탐침의 마멸에 기여하는 응착마멸에 대하여 고찰하기 위하여 응착력을 비교하였다. 먼저 Si와 Si₃N₄ 탐침의 실험 결과에 대하여 고찰하면, F-D curve의 pull-off force로부터 구한 응착력은 Si 탐침과 Si(100) 표면의 경우, 약 8.8±1.5 nN으로 나타났다. Si₃N₄ 탐침은 12±1.8 nN으로 나타났다. Si₃N₄ 탐침의 경우 끝단 반경이 2배 정도 크기 때문에 응착력이 더 크게 나타날 것으로 예상되는데, 그 정도는 약 1.3배로 나타났다. 이는 실험에 사용된 Si₃N₄와 Si 탐침의 표면에너지차이에 기인하는 것으로서 Si₃N₄의 표면에너지가 더 적은 것으로 예측할 수 있다. 이는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 평평해진 Si 탐침의 주변에 마멸입자가 달라붙는 현상이 Si₃N₄에 비하여 자주 나타났다는 것으로부터도 추정할 수 있다.

Fig. 7은 Si 탐침과 Si 표면의 10회의 스캔 중간에 F-D curve를 측정하여 미끄럼 거리 변화에 따른 응착력의 변화를 나타낸 결과이다. 미끄럼이 진행됨에 따라 응착력은 약 2배까지 증가하였는데, 이는 미끄럼이 진행됨에 따라 탐침의 마멸이 커지므로 미세 asperity 간 상호작용이 발생할 확률이 증가하기 때문으로 해석된다. 이러한 응착력의

증가는 다시 탐침의 파손에 기여할 것으로 기대되는데, 마멸이 진행되어 탐침이 무더질수록 탐침이 경험하는 평균적인 접촉압력은 감소할 수 있으나 상대표면, 또는 발생하는 입자들과의 응착의 영향은 증가할 것을 예측할 수 있다.

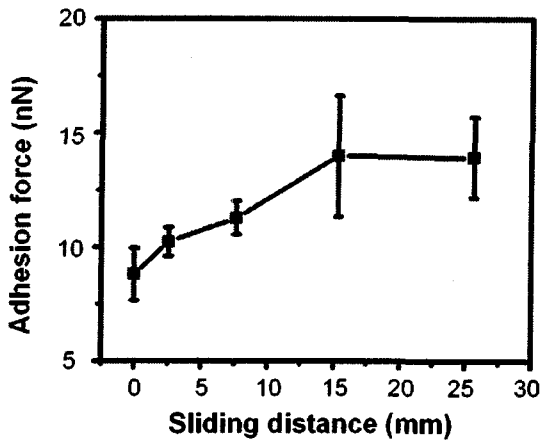


Fig. 7 Adhesion force change between Si tip and Si(100) surface w.r.t sliding distance

Fig. 8 은 미끄럼 운동을 하기 전 각 표면에 대하여 응착력을 측정된 결과를 나타내는데, Cu 의 경우 10 nN 정도로 가장 크게 나타났다. 그러나 Cu 에 비하여 Si, DLC 에 대한 탐침의 마멸이 더욱 크게 나타났는데, 이는 각 표면의 응착력의 차이보다는 상대적인 경도의 차이가 훨씬 크기 때문으로 볼 수 있다. 즉, 본 실험에 사용된 시편의 경우 응착특성은 최대 2 배정도의 차이를 나타내는데 비하여 경도차이는 4.5 배였으므로, 경도의 차이가 보다 현저하게 탐침의 마멸에 크게 기여하는 것으로 생각된다.

이상과 같은 결과에서, liquid 에 의한 응착현상이 크게 작용하는 상대 습도 변화 실험에서만 응착력 증가에 따라 파손이 크게 나타났으며, 그 외의 경우에는 탐침 자체의 경도, 또는 상대 표면의 경도가 탐침의 마멸에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 응착력의 증가와 응착마멸이 같은 물리적 현상에 기초하는 것으로 보았을 때, 응착마멸은 탐침의 마멸을 유발하는 한 요인이 될 수 있다. 그러나 그 정도는 재료에 따라 다르게 작용할 것으로 예상된다.

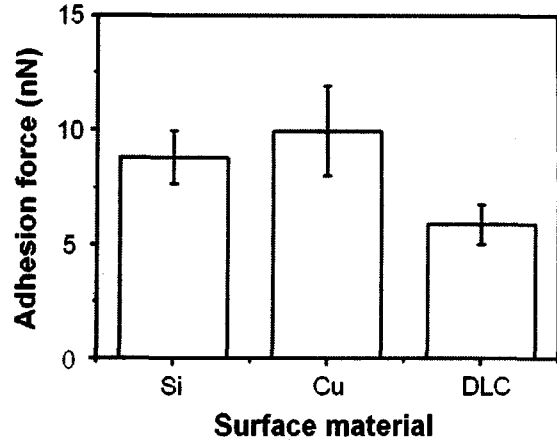


Fig. 8 Adhesion force between Si tip and Si(100)/Cu/DLC surface at RH 20%

4.2 연삭 특성의 영향

다음으로 연삭 현상에 대하여 고찰해 보면, Si_3N_4 의 경도는 Si 보다 2 배 정도 크므로 연삭 특성 관점에서 마멸은 덜 발생할 것으로 예상되며, 실제로 Si_3N_4 탐침의 마멸계수는 Si 탐침보다 1/100~1/10 배로 적은 것으로 나타났다. 이러한 관점에서 연삭마멸은 탐침의 파손기구로 예측할 수 있다. 그런데, 연삭마멸은 경도차이로 인한 소성변형에 기인하므로, 탐침과 표면과의 접촉조건으로부터 탄소성 거동을 예측할 필요가 있다. Hertz contact 으로 계산된 접촉압력이 4 GPa 정도였으며, Si 및 Si_3N_4 표면의 경도가 각각 10 GPa, 20 GPa 이고¹⁴, 대략적으로 최대접촉압력이 경도의 0.6 배 정도일 때 소성거동이 시작될 수 있다는 결과¹⁵를 고려할 때, 탐침과 상대표면은 탄성접촉을 할 것으로 예상할 수 있다. 그러나 탐침의 파손은 심하게 나타났는데, 이는 탄성접촉으로 예상되는 경우에도 표면의 미세 asperity 에서 국부적으로 높은 압력이 걸릴 수 있다는 것과, 표면에 존재하는 오염물, 흡착물 등에 의한 영향으로 생각할 수 있다.

상대재료에 따른 탐침의 마멸을 비교한 결과, Si 에 비하여 경도가 1/4~1/5 정도인 Cu 의 경우 응착력이 가장 크게 나타났음에도 불구하고 파손이 적게 나타난 것으로부터, 연삭 상호작용은 AFM 의 탐침과 표면에서 발생 가능한 마멸기구로 여겨진다. 그러나 좀 더 명확한 마멸기구를 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 nN 하중에서 AFM 탐침과 상대 표면의 상호작용에 의하여 발생하는 탐침의 마멸을 정량적으로 비교하고 발생할 수 있는 마멸현상에 대하여 논하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Si 와 Si₃N₄ 탐침의 마멸계수는 각각, 10⁻¹~10⁻³, 10⁻³~10⁻⁴ 정도의 값을 나타냈다.
- 2) AFM 탐침과 상대표면과의 상호작용에서 상대 습도가 60%로 증가함에 따라 응착력은 3 배까지 커지며, AFM 탐침의 파손이 증가한다.
- 3) 높은 응착력을 나타내는 재료에 비하여 상대적으로 경한 재료에 대하여 탐침의 마멸이 크게 나타났으며, 이로부터 상대재료의 경도가 탐침의 마멸에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2001 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2001-041-E00056).

참고문헌

1. Binnig, G., Quate, C. F. and Gerber, C., "Atomic Force Microscope," *Physical Review Letters*, Vol. 56, No. 9, pp. 930-933, 1986.
2. Mate, C. M., McClelland, G. M., Erlandsson, R. and Chiang, S., "Atomic-Scale Friction of a Tungsten Tip on a Graphite Surface," *Physical Review Letters*, Vol. 59, No. 17, pp. 1942-1945, 1987.
3. Wiens, A., Persch-Schuy, G., Vogelgesang, M. and Hartmann, U., "Scratching Resistance of Diamond-Like Carbon Coatings in the Subnanometer Regime," *Applied Physics Letters*, Vol. 75, No. 8, pp. 1077-1079, 1999.
4. Lee, S. C., Chung, K. H., Kim, D. E., "A Study on the Surface Damage between Head/Disk Interfaces by Using AFM," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 167-174, 1998.
5. Dagata, J. A., "The Role of Space charge in Scanned Probe Oxidation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, No. 12, pp. 6891-6900, 1998.
6. Cheung, C. L., Hafner, J. H., Odom, T. W., Kim, K. and Lieber, C. M., "Growth and Fabrication with Single-Walled Carbon nanotube Probe Microscopy Tips," *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 21, pp. 3136-3138, 2000.
7. Marrian, C. R. K., Perkins, F. K., Brandow, S. L., Koloski, T. S., Dobisz, E. A. and Calvert, J. M., "Low Voltage Electron Beam Lithography in Self-Assembled Ultrathin Films with the Scanning Tunneling Microscope," *Applied Physics Letters*, Vol. 64, No. 3, pp. 390-392, 1994.
8. Mamin, H. J. and Rugar, D., "Thermomechanical Writing with an Atomic Force Microscope Tip," *Applied Physics Letter*, Vol. 61, No. 8, pp. 1003-1005, 1992.
9. O'Shea, S. J., Atta, R. M. and Welland, M. E., "Characterization of Tips for Conducting Atomic Force microscopy," *Review of Scientific Instrument*, Vol. 66, No. 3, pp. 2508-1512, 1995.
10. Chui, B. W., *Microcantilevers for Atomic Force Microscope Data Storage*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
11. Terris, B. D., Rishton, S. A., Mamin, H. J., Ried, R. P. and Rugar, D., "Atomic Force Microscope-based data storage: Track Servo and Wear Study," *Applied Physics A*, Vol. 66, pp. S809-813, 1998.
12. Khurshudov, A. G., Kato, K. and Koide, H., "Wear of the AFM Diamond Tip Sliding against Silicon," *Wear*, Vol. 203-204, pp. 22-27, 1997.
13. Khurshudov, A. and Kato, K., "Wear of the Atomic Force Microscope Tip under Light Load, Studied by Atomic Force Microscopy," *Ultramicroscopy Letter*, Vol. 60, pp. 11-16, 1995.
14. Bhushan, B., *Handbook of Micro/Nano Tribology*, CRC Press, 1999.
15. Bhushan, B., *Principles and Applications of Tribology*, John Wiley and Sons, Inc., 1999.