

나노스케일에서의 표면형상 및 재료변화에 대한 마찰거동 고찰

성인하, 김대은*

연세대학교 대학원 기계공학과

*연세대학교 기계전자공학부

Investigation of the Frictional Behavior with respect to Surface Geometry and Surface Material at Nanoscale

In-Ha Sung, Dae-Eun Kim*

Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Yonsei University

*School of Electrical and Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract - In this work, the changes in the friction force(lateral force) with respect to nanoscale geometric variation were investigated using an Atomic Force Microscope and a Lateral Force Microscope. It could be concluded that the changes in the friction force correspond well to the slope change rather than the surface slope itself, and that the influence of slope change on the frictional behavior is dependent on the magnitude of the slope and the torsional stiffness of the cantilever. Also, the nominal friction force is found to be more significantly affected by the material and the physical-chemical state of the surface rather than by nanoscale geometric steps. However, the change in nanoscale geometric details of the surface cause instantaneous change and slight variation in the friction signal.

Key Words : Atomic Force Microscope, Lateral Force Microscope, Force Modulation Microscope, Surface geometry, Surface material

1. 서론

표면의 다양한 기하학적 형상과 마찰, 마멸에 관한 그간의 연구들에 의해, 일반적으로 표면의 기하학적 형상은 마찰에 영향을 주는 것으로 알려져 있다[1-7]. 널리 알려진 기존의 이론으로서, adhesion 등에 의한 friction mechanism이 변하지 않는 표면에서는 local friction force 는 local surface slope를 따른다는 surface roughness 관점에서 접근한 ratchet theory[1-3]가 있다. 이러한 ratchet mechanism에 대해, slope가 큰 topography 형상의 scan direction 에 따른

lateral force 크기의 차이를 제시하여 이 이론이 잘 맞지 않으며, 형상을 upward 할 때는 속도에 의한 collision effect가 lateral force에 나타난다고 제시되기도 하였다[3]. 또, step 에서의 lateral force가 normal load 와 scan direction 에 따라 달라지는 것을 topography의 효과 및 step에서의 electronic effect 또는 electrochemical potential에 기인하여 증가된 dissipative force에 의한 것으로 보고되기도 하였다[4,5].

표면의 기하학적인 변화에 대한 마찰거동에는 마찰에 영향을 주는 표면상태, 기하학적 변화에 의한 표면력 및 접촉면적의 변화

등 다른 인자들이 복합적으로 같이 나타나므로, 아직 표면의 기하학적 형상변화에 대한 frictional behavior 및 friction force 변화의 정량적인 크기를 정확하게 예측하지는 못하고 있다. 이러한 기하학적인 형상 및 재료변화에 대한 마찰거동의 깊이있는 이해는 마이크로 부품의 표면에서의 stiction 등의 문제해결에 있어 크게 도움이 된다.

이러한 배경으로부터, 본 연구에서는 AFM (Atomic Force Microscope), LFM (Lateral Force Microscope) 및 FMM (Force Modulation Microscope)를 이용하여, nanometer-scale의 다양한 기하학적인 미세 형상변화 및 표면재료의 영향에 대한 마찰 거동의 변화양상을 고찰하고자 하였다. 본 연구의 궁극적인 목표라 할 수 있는 표면의 기하학적인 형상변화 및 재료와 마찰거동의 정량적인 관계가 밝혀진다면, 저마찰 표면설계 및 마찰제어 실현에 한층 더 다가설 수 있을 것이다.

2. 실험방법 및 시편

본 연구에서는 beam-deflection type의 commercial AFM/LFM을 이용하였으며 (Park Scientific Instrument 사의 Autoprobe model), cantilever로는 V-shape으로서 Thermomicroscope사의 normal stiffness (typ.)~0.26, 0.4 N/m, radius of curvature ~10nm, length~180 μ m, thickness~1 μ m 인 Si lever 및 normal stiffness(typ.)~0.05 N/m, radius of curvature~20nm, length~180 μ m, thickness~0.6 μ m 인 Si₃N₄ lever를 사용하였다. 모든 실험은 18-22°C의 상온, 25-35%의 저습조건에서 class 100의 clean hood 내에서 이루어졌다.

기하학적 형상과 마찰거동과의 관계를 보기위해서, 기하학적 형상에 의해서만 friction 변화가 유발되도록 동질재료 (homogeneous material)를 이용하여 재료영

향을 배제시켰다. 시편으로는 HOPG(highly oriented pyrolytic graphite), calibration 용 Si standard grid sample(160nm height) 및 bare-si(100)에 약 35, 160, 260nm의 다양한 높이의 step 을 갖는 microgrooved surface 를 제작하여 사용하였다.

또한, 미세한 형상변화와 표면재료의 영향을 함께 보기 위하여, Si surface위에 Au, Cu를 각각 30, 90nm 두께로 thermal deposition 시켜 Au, Cu 부분이 높게 step 이 형성된 시편을 제작하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기하학적 형상변화와 마찰거동의 관계

Fig. 1은 각 시편의 step 을 upward 및 downward scan 하여 얻은 topography 와 lateral force, 그리고 측정된 topography 로부터 계산한 slope 및 slope 변화량을 함께 plot 한 것이다. Topography plot으로부터 보여지는 것과 같이 (a)-(c)는 각 step을 upward scan 한 경우이고, (d)-(f)는 downward scan 한 경우이다.

우선, 데이터로부터 step 부근에서의 topography 변화와 lateral force(friction force)의 변화를 전체적으로 살펴보면, lateral force 의 변화양상이 slope 보다는 slope change 의 거동에 잘 일치함을 알 수 있다. 즉 friction force 의 변화시점은 slope 가 변화하는 지점인 변곡점에서 나타나며, slope 는 friction 변화시점과 잘 일치하지 않음을 알 수 있다.

또한, (a), (d) 의 경우는 대체적인 lateral force 의 변화추이가 slope에 일치하는 것으로 보이는 반면, (b), (e)의 경우는 slope change에 잘 일치하는 것으로 나타난다. (c), (f)의 경우는 slope 와 slope change의 영향이 복합적으로 나타나는 것으로 보인다.

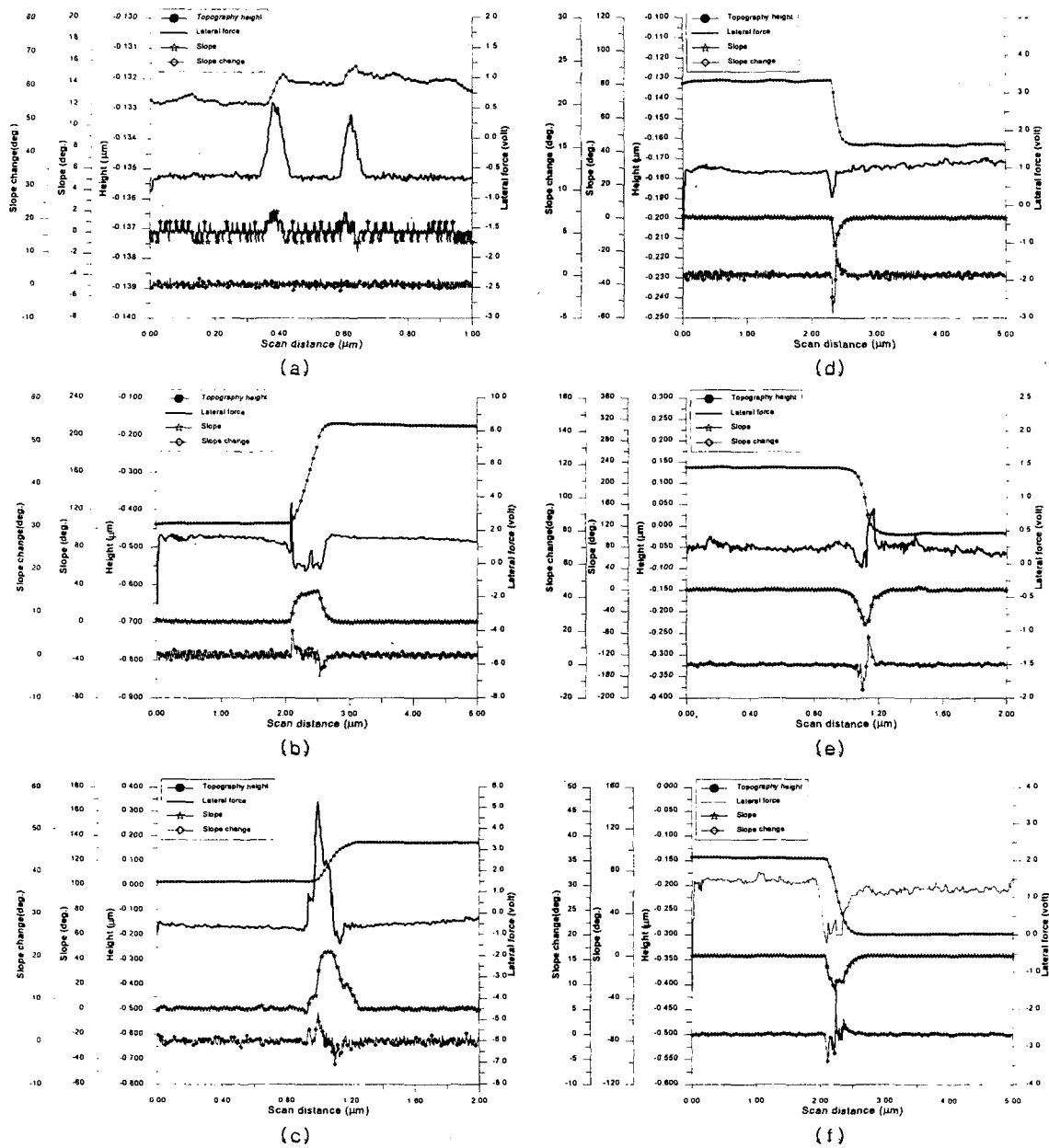


Fig. 1 Topography height, lateral force, slope, and slope change of various surface geometries
 (a)-(c) ; upward scan, (d)-(f) ; downward scan

- (a) HOPG with two atomic steps ; speed - $4\mu\text{m/s}$, load - 2nN , Si_3N_4 lever(0.05N/m)
- (b) Si sample with a 260nm height step ; speed - $20\mu\text{m/s}$, load - 8nN , Si lever(0.26N/m)
- (c) Si standard sample with a 160nm height step ; speed - $4\mu\text{m/s}$, load - 2nN , Si_3N_4 lever(0.05N/m)
- (d) Si sample with a 35nm height step ; speed - $20\mu\text{m/s}$, load - 8nN , Si lever(0.26N/m)
- (e) Si standard sample with a 160nm height step ; speed - $4\mu\text{m/s}$, load - 10nN , Si lever(0.4N/m)
- (f) Si sample with a 160nm height step ; speed - $20\mu\text{m/s}$, load - 10nN , Si lever(0.4N/m)

이러한 결과는 앞서 언급한 대로 slope에 의해 friction force 가 변화한다는 ratchet mechanism 만으로는 설명되지 않는다[1-3]. 반중의 일례로, (b),(c)와 같이 step 형상을 upward 하는 경우, step을 올라가는 부분에서 flat region 에 비해 lateral force 가 오히려 감소하는 구간이 나타나는데, 이러한 양상은 lateral force 거동이 slope 에 따른다는 기존의 결과로는 설명되지 않는다.

Fig. 1의 결과는 lateral force의 변화거동이 slope change 에 더 잘 일치함을 보여준다. 다시말하면, 기하학적 형상에 의한 lateral force(friction force)는, atomically flat 한 surface 에 대한 friction force를 $F_0 = \mu_0 W$ (μ_0 : friction coefficient, W : normal load)라 하고 $\theta_2 > \theta_1$ 이라 하면, 다음 식으로 나타내어 질 수 있다.

$$F = F_0 \pm W(\tan \theta_2 - \tan \theta_1)$$

(+ : positive slope, - : negative slope)

또한, tangent 함수는 각도가 커질수록 급격한 값의 증가를 보이므로, 낮은 각도에서와 높은 각도에서의 동일한 각도차이에 의한 값은 크게 다르게 된다. 즉, 예를 들어 위 식에서 60도의 slope 에서의 1-2도 변화는 5도의 slope 에서의 1-2도 변화에 비해 friction 변화에 기여하는 정도가 훨씬 크게 된다. 따라서, slope 가 클수록 미세한 slope change 도 friction force의 변화에 더욱 잘 반영되게 된다.

θ 가 작을 경우, 즉 step height 가 작거나 또는 step height가 커도 기울기가 완만한 경우에는, scan 방향의 sampling rate 에 따른 unit distance에 대한 수직방향 형상높이 변화의 비 dz/dx , 즉 slope 가 매우 작아서 slope 변화는 거의 없게 되며, 따라서 이러한 경우 friction force 변화는 매우 작게 되므로 upward 및 downward 시에 friction peak 는 나타나지 않게 되어, friction force 가 slope 에 일치하는 양상으로 나타난다.

이러한 경향을 보이는 (a), (d) 의 경우를 살펴보면, slope 는 10도, slope change는 5도 내외로 매우 작다는 것을 알 수 있다.

반면, (b), (c), (e), (f)와 같이, 형상의 급격한 변화가 존재하면, slope 및 slope change 가 크게 되어, slope 의 변화지점에서 cantilever의 비틀림이 크게 변화하게 된다. (e)의 경우 최대 60도의 slope에서 최대 20도의 큰 slope 변화를 보이므로, 이러한 경우 friction force 거동은 slope change의 거동과 잘 일치하게 된다. lateral force의 변화양상이 slope change에 잘 따르는 것은, flat surface로부터 step을 올라갈 때 보다 내려갈 때 더 잘 나타나는 것처럼 보이는데, 이때 slope와 slope change의 양상이 확연히 달라지기 때문이다.

특히, (c), (f)의 경우는 step 부근의 slope 는 비교적 크나, slope change 가 작아서 국부적으로 slope change의 영향이 반영되는 정도가 다르게 나타난다. 즉, slope 가 상대적으로 큰 곳에서는, slope change가 작아도 slope change의 변화양상에 따라 lateral force가 변화하나, slope가 작은 곳에서는 slope change의 양상에 lateral force 거동이 거의 영향을 받지 못함을 알 수 있다.

또한, cantilever 의 torsional 또는 lateral stiffness에 따라 slope change에 따른 lateral force의 변화량이 달라짐을 알 수 있다. 즉, 사용된 typical normal stiffness 가 각각 0.4, 0.26, 0.05 (N/m)인 V-shape의 Si 및 Si_3N_4 lever의 torsional stiffness를 cantilever의 기하형상으로부터 계산해보면, 각각 11.3, 14.8, 1.9 (nNm/rad)이 되는데[8], 각 lever로부터 얻어진 (a)(c), (b)(d), (e)(f)를 비교해보면, torsional stiffness 가 작을수록 작은 slope 및 slope change에서도 friction force 변화가 크게 일어남을 알 수 있다.

3.2 Surface material의 영향

Nanometer-scale의 형상변화 및 표면의 재료변화가 friction에 미치는 영향을 함께 고찰하기 위하여, 앞서 언급한대로 AFM, LFM, FMM 을 이용하여 Au, Cu가 각각 30, 90nm 두께로 코팅된 Au/Si(100), Cu/Si(100) 시편에 대해 실험하였다. 재료에 따른 표면에서의 local elasticity, hardness차이와 lateral force를 비교하기 위해 FMM(Force modulation microscopy)을 이용하여 local hardness를 알아보았다.

각 시편에 대해 AFM/FMM 으로 동시에 얻은 topography 및 local hardness image는 Fig. 2 와 같다. Si 가 Au, Cu보다 FMM image에서 더 밝게 나타나므로, 예상대로 Si surface에서의 local hardness 가 더 큼을 알 수 있다.

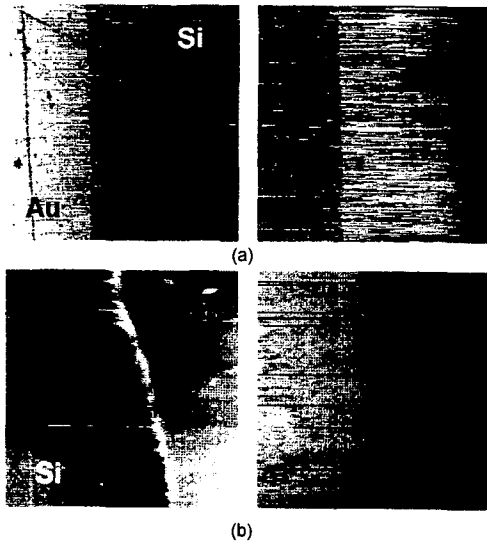


Fig. 2 Topography and local hardness images of metal coated specimens with (a) 30nm thick Au (b) 90nm thick Cu (left-topography, right-local hardness)

또한, Fig. 3의 lateral force image는 nanometer-scale의 soft ductile 재료의 step이 더 높게 존재하더라도, 보다 hard 한 Si

영역의 높은 friction에 의해 기하학적 형상의 영향이 감소되는 것을 보여준다.

결론적으로, 앞서 언급한 동일재료에서의 nanometer-scale의 형상변화가 주는 영향과 비교해보면, 재료와 표면상태가 동일하면 기하학적 형상변화는 friction의 순간적인 변화 및 fluctuation을 유발시키며, overall friction value는 재료의 변화에 의해 크게 좌우되는 것으로 판단할 수 있다.

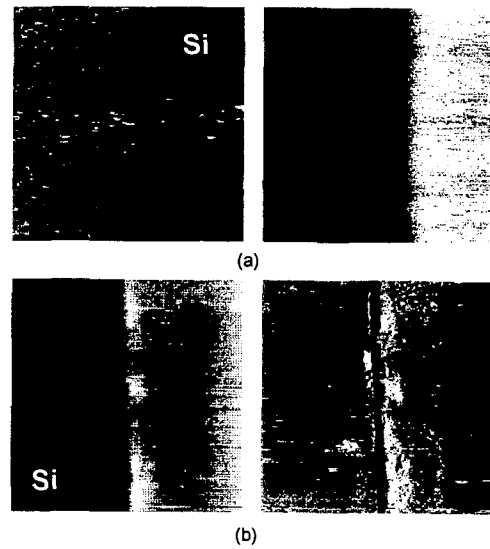


Fig. 3 Topography and lateral force images of metal coated specimens with (a) 30nm thick Au (b) 90nm thick Cu (left-topography, right-lateral force)

4. 결론

본 연구에서는 AFM/LFM을 이용하여 여러가지 높이의 step을 갖는 동일재료에 대한 기하학적 형상변화와 friction force의 거동간의 관계를 고찰하였다. 이를 통하여, 기존의 이론과는 달리 표면의 기하학적 형상변화에 대한 friction force(lateral force)의 변화거동은 slope 보다는 slope change에 더 잘 일치한다는 것을 확인하였다. 그러나, lateral force의 변화거동에 slope change에

의한 영향이 반영되는 정도는 slope 의 크기 및 cantilever의 torsional(lateral) stiffness에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 즉, 큰 slope 에서는 미세한 slope change 도 lateral force 의 변화거동에 잘 나타나며, torsional stiffness 가 작으면, 동일한 slope change라 하더라도 friction force의 거동에 미치는 영향이 더 커지게 된다.

또한, 기하학적 미세형상변화와 재료의 영향에 대한 고찰로부터 재료와 표면상태가 동일하면 미소 형상단차는 friction 의 순간적인 변화 및 fluctuation 을 유발시키지만, frictional force 의 overall value는 재료에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

후 기

본 내용은 과학기술부 21세기 프론티어 개발사업 중 “지능형마이크로시스템개발사업단”의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과이며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. F.P.Bowden, D.Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*, pp.171-175, Clarendon Press, Oxford, 1986.
2. Vilas N. Koinkar and Bharat Bhushan, *J. Appl. Phys.*, 81, 2472, (1997).
3. S.Sundararajan, B.Bhushan, *J. Appl. Phys.*, 88, 4825, (2000).
4. T. Muller, M.Lohrmann, T.Kasser, O.Marti, J.Mlynek, and G.Krausch, *Phys. Rev. Lett.*, 79, 5066, (1997).
5. E. Weilandt, A.Menck, and O.Marti, *Surf. Int. Anal.* 23, 428, (1995).
6. S.Grafstrom, M.Neitzert, T.Hagen, J.Ackermann, R.Neumann, O.Probst, and M.Wortge, *Nanotechnology*, 4, 143, (1993).

7. E.Meyer, R.Luthi, L.Howald, and H.J Guntherodt, *"Friction force microscopy" in Forces in Scanning Probe Methods* pp.285-306, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1995.

8. J.M.Neumeister, W.A.Ducker, *Rev. Sci. Instrum.* 65(8), 2527, (1994).