

원자스케일 마찰의 하중 및 강성 의존성

성인하*

한남대학교 기계공학과

Load and Stiffness Dependence of Atomistic Sliding Friction

In-Ha Sung[†]

Dept. of Mechanical Engineering, Hannam University

Abstract – Despite numerous researches on atomic-scale friction have been carried out for understanding the origin of friction, lots of questions about sliding friction still remain. It is known that friction at atomic-scale always shows unique phenomena called ‘stick-slips’ which reflect atomic lattice of a scanned surface. In this work, experimental study on the effects of system stiffnesses and load on the atomic-scale stick-slip friction of graphite was performed by using an Atomic Force Microscope and various cantilevers/tips. The objective of this research is to figure out the dependency of atomic-scale friction on the nanomechanical properties in sliding contact such as load, stiffness and contact materials systematically. From this work, the experimental observation of transitions in atomic-scale friction from smooth sliding to multiple stick-slips in air was first made, according to the lateral cantilever stiffness and applied normal load. The superlubricity of graphite could be verified from friction vs. load experiments. Based on the results, the relationship between the stick-slip behaviors and contact stiffness was carefully discussed in this work. The results of this work indicate that the atomic-scale stick-slip behaviors can be controlled by adjusting the system stiffnesses and contact materials.

Key words – atomic-scale stick-slip friction, atomic force microscope, contact stiffness, lateral stiffness.

1. 서 론

마찰의 근원을 이해하기 위한 노력으로서 원자 스케일에서의 마찰현상에 대하여 다양한 연구가 이루어져 왔다. 이러한 원자스케일에서의 마찰현상의 가장 독특한 특징은 표면의 원자구조 및 원자배열에 따라 고착(stick)과 빠른 미끄러짐(rapid slip)을 반복함으로 인하여 마찰력의 변화가 원자간 간격(interatomic distance)을 반영하는 반복적인 톱니형태로 나타나는 소위 스틱슬립(stick-slip) 마찰거동으로서, 그간의 이론적, 실험적 연구들을 통하여 표면의 격자구조에 대한 스캔방향의 영향[1-3], 접촉재료[4-6], 작용하중과 스캔속도[7-9] 및 스틱슬립의 해석 모델[10-13] 등 다양한 변수들의 영향이 밝혀져 왔다.

그러나, 원자간힘 현미경(atomic force microscope,

AFM)을 이용한 스틱슬립 실험에서 보더라도 탐침과 표면의 여러 원자가 서로 접촉하는 상황에서 어떻게 표면상의 개개의 원자구조가 관찰가능한지, 또 어떠한 시스템과 조건에서 이러한 스틱슬립이 발생하는 것인지 등 그 발생원인과 진행메커니즘에 대하여 여전히 많은 의문점이 남아있다.

본 연구의 선행연구에서는 스틱슬립의 천이(transition), 즉, 스틱슬립이 나타나지 않는 부드러운 미끄럼(smooth sliding), 표면의 원자구조에 따라 스틱슬립의 주기가 원자간 간격과 잘 일치하는 단일슬립(single slip) 및 원자간 간격의 2-3배에 이르는 다중슬립(multiple slips) 등의 여러 모드간 천이를 대기하에서 최초로 AFM을 이용하여 실험적으로 측정하였고, 또한 이러한 천이의 발생은 작용하중과 AFM 캔틸레버의 횡방향강성(lateral stiffness)으로 정성적으로 예측가능함을 실험과 분자정역학적 해석(molecular static analysis)에 의한 검증으로 밝힌 바 있다[14,15].

*주저자 · 책임저자 : isung@hannam.ac.kr

이러한 선행연구결과를 바탕으로, 본 연구에서는 하중, 강성뿐만 아니라 접촉재료, 접촉강성(contact stiffness) 등 나노스케일 물성 변화에 따른 스틱슬립 현상을 AFM을 이용하여 실험적으로 고찰하고 나노역학적 해석을 수행하고자 한다. 접촉재료의 변화는 접촉강성의 변화를 가져오는데, 접촉강성은 접촉면에 대해 수직방향 및 횡방향에 대하여 정의할 수 있으며, 각각 수직압력 및 마찰저항에 영향을 미치게 된다. 따라서, 결국 접촉재료에 따라 스틱슬립 마찰거동의 천이 발생 및 그 경계 변화를 측정가능한 접촉강성으로 표시할 수 있게 된다.

2. 실험방법 및 시편

시편으로는 원자구조가 잘 알려져 있고 취급하기 쉬운 highly oriented pyrolytic graphite(HOPG)이 사용되었다. 모든 AFM 실험은 대기하에서 상온(20~25°C), 상대습도 35~50% RH에서 행하였다. 시편은 (0001)면 상에서 [1120] 방향으로 0.6 $\mu\text{m/s}$ 의 속도로 스캔하였다.

AFM 캔틸레버 및 팁으로는, Table 1에 제시된 것과 같이 Si 및 Si_3N_4 의 두 종류의 재료의 팁을 갖는 캔틸레버가 사용되었다. 각 캔틸레버는 길이, 폭 및 팁의 길이 등 치수가 상이하므로 서로 다른 수직강성(normal stiffness) 및 횡방향 강성을 갖는다. Fig. 1에 사용된 팁의 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM) 사진을 제시하였다. 실험에 사용된 캔틸레버의 수직방향과 횡방향 강성의 측정 및 마찰력의 교정

Table 1. AFM cantilevers and tips used in this work

Cantilever (material/shape)	Tip (material/radius of curvature)
Si/beam	Si (with native oxide)~10 nm
Si/beam	Si_3N_4 -coated Si~30 nm

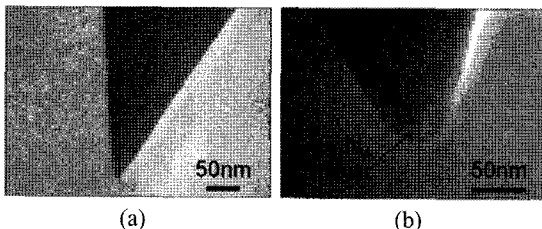


Fig. 1. TEM micrographs of (a) a Si cantilever, and (b) a Si_3N_4 -coated Si cantilever.

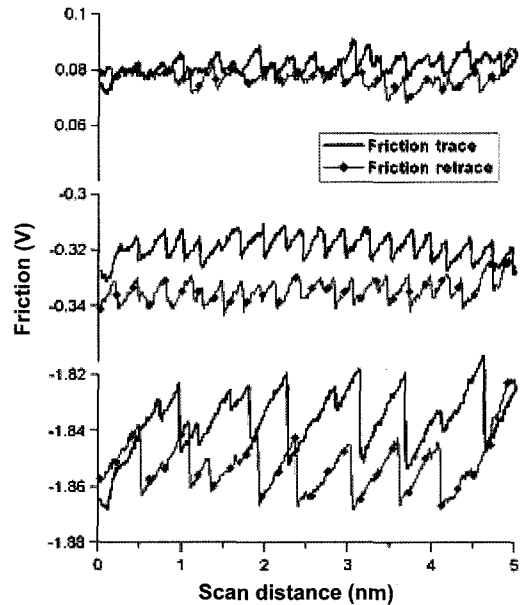


Fig. 2. Friction traces that show the transitions in the stick-slip behavior with respect to the applied load : top-smooth sliding (12.4 nN), middle-single slip (45.5 nN), bottom-multiple slips (236.0 nN).

(calibration)은 기존의 방법들을 이용하여 수행되었다 [16-18].

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 Si 캔틸레버를 이용하여 하중의 변화에 따라 얻은 스틱슬립 데이터를 보여준다. 하중의 변화에 따라 스틱슬립이 나타나지 않는 부드럽고 원활한 미끄럼(smooth sliding)으로부터, 팁의 고착과 뒤이은 슬립에 의한 점프로 HOPG의 격자간격의 2-3배에 해당하는 슬립간격을 갖는 다중슬립(multiple slips)까지 여러 양상으로 원자스케일 마찰의 천이가 나타남을 알 수 있다.

Table 1에 제시한 캔틸레버들을 이용한 반복실험으로부터, 같은 종류에 속하는 캔틸레버의 경우라도 팁에 작용하는 하중과 횡방향 강성에 따라 Fig. 2에 보이는 바와 같은 명백한 스틱슬립의 천이를 보여주었다. 또한, Si 캔틸레버에 대하여 하중뿐만 아니라 캔틸레버의 횡방향 강성에 따른 스틱슬립의 천이양상을 실험적으로 살펴본 결과, 각 천이영역간의 명확한 경계가 존재함을 알 수 있었다[14,15]. 이러한 결과는 대기 중에서 AFM을 이용하여 최초로 얻어진 결과라는 점

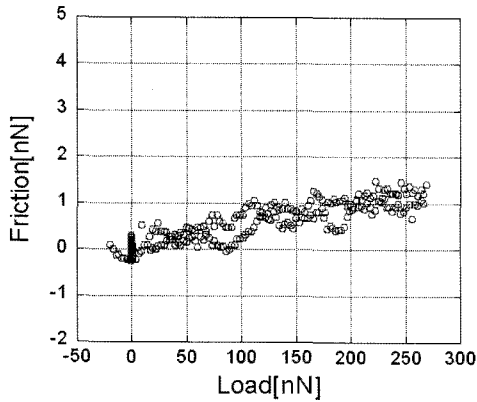


Fig. 3. Friction vs. applied load plot obtained using a Si cantilever.

에서 매우 큰 의미가 있다.

한편, Fig. 3은 Si 캔틸레버를 이용하여 얻은 하중에 따른 마찰력 데이터를 보여준다. 광범위한 하중범위에서도 HOPG와 Si 캔틸레버간에 마찰계수 0.01 이하의 극저마찰을 보이는 초윤활성(superlubricity)이 나타남을 알 수 있다.

이러한 스틱슬립 거동의 천이가 나타나는 하중은 비록 두 캔틸레버의 횡방향 강성이 비슷하다 하더라도 상대 표면과 접촉하는 팁의 재료가 다르면 매우 크게 변화함을 보여주었다.

Fig. 4는 그 예로서, 캔틸레버는 동일한 Si이지만 팁이 Si와 silicon nitride로 서로 다른 재질을 갖는 경우의 캔틸레버를 이용하여 얻어진 데이터들이다. 제시된 데이터로부터, 스틱슬립의 천이양상이 팁의 재료에 따라 크게 다르게 나타남을 알 수 있다. Silicon nitride 팁의 경우는 대기하에서는 smooth sliding 영역이 거의 파악되지 않았다. 또한, 두 데이터를 비교해보면 캔틸레버가 동일한 크기의 횡방향 강성을 갖더라도 천이 하중에서 크게 차이를 보임을 알 수 있다.

이러한 결과는, 팁의 재료가 달라짐에 의해 접촉계면에서의 접촉강성이 변화하며 이에 따라 스틱슬립의 천이양상이 크게 달라지게 되는 것으로 판단할 수 있다.

Tomlinson model을 토대로 제시되어 온 이론적 모델[19,20]을 이용하여 고찰해보면, 팁과 상대표면의 접촉에서의 포텐셜 에너지의 변화가 여러개의 국부적인 최소점(local minimum)을 가져야만 팁이 순간적으로 다음 최소점으로 점프함에 의해 다중 슬립이 가능하게 된다. 즉, Fig. 5와 같은 AFM 팁과 표면의 모델을 고려하면, 시스템의 전체에너지 E_{tot} 는 식(1)과 같이 표현

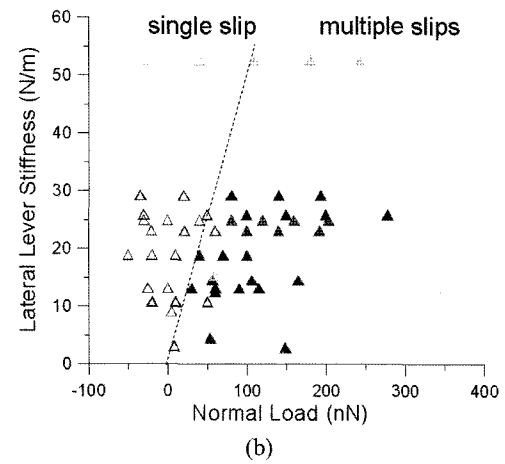
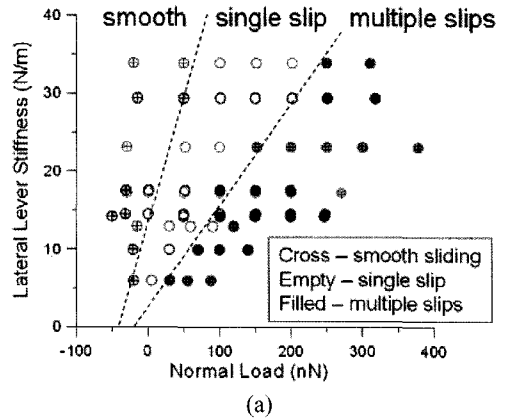


Fig. 4. Transitions in the stick-slip behaviors on graphite according to the lateral lever stiffness of cantilevers and the normal load applied to the tip. (a) Si cantilevers [15] and (b) Si₃N₄-coated Si cantilevers.

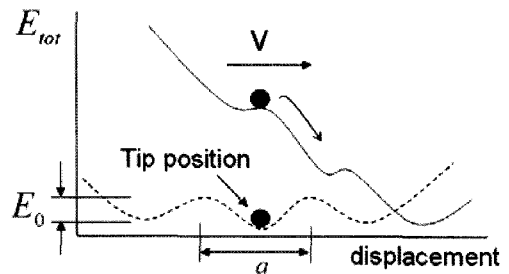


Fig. 5. Potential energy profile experienced by an AFM tip moving with the constant speed of v .

될 수 있다.

$$E_{tot} = E_{TS} + E_{lever} = -\frac{E_0}{2} \cos \frac{2\pi x}{a} + \frac{1}{2} k(vt - x)^2 \quad (1)$$

여기서, E_{TS} 는 접촉재료, 팁끝단의 원자배열 등에 의해 변화하는 tip-surface interaction의 포텐셜에너지를 나타내고, E_{lever} 는 캔틸레버 스프링의 탄성에너지, E_0 는 포텐셜 에너지 프로파일의 크기(potential corrugation amplitude), k 및 ν 는 각각 캔틸레버의 횡방향강성(lateral stiffness), 팁의 미끄럼속도를 지시한다.

그러므로, 이와 같은 포텐셜 함수로부터 팁의 슬립을 유발시키는 횡방향 힘은 슬립이 발생하는 순간의 팁의 위치($\partial^2 E_{tot}/\partial x^2=0$)로부터 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$F = k(\nu t - x) = \frac{ka}{2\pi} \sqrt{\gamma^2 - 1}, \quad \gamma = \frac{2\pi^2 E_0}{ka^2} \quad (2)$$

따라서, 스틱슬립은 $\gamma > 1$ 인 경우, 환언하면 시스템의 횡방향강성이 크지 않고, tip-surface interaction이 충분히 클때 즉 시스템에서 접촉강성이 증가함에 따라 스틱슬립 거동은 단일 슬립에서 다중 슬립으로 천이한다. 앞서 제시한 데이터들에서 보이듯이 본 연구에서 다중 슬립은 캔틸레버가 상대적으로 낮은 횡방향 강성을 가질 경우와 상대적으로 큰 하중에서 나타났는데, 접촉강성이 하중과 비례하므로 실험결과는 이론적 모델과 잘 일치함을 알수 있다.

그러나, 실제 시스템의 감쇠(damping)에 대한 고찰이 추가로 이루어질 필요가 있다. 시스템의 감쇠가 충분하여 인접한 최소포텐셜에서 팁이 고착(stick)될 수 있다면 천이시점 및 영역에 있어서 상당히 다른 양상이 나타날 수 있을 것이다. 즉, 슬립이 얼마나 많이 일어나는가를 결정짓는 요소가 시스템의 동특성 및 감쇠특성이므로, 비록 캔틸레버의 강성 등을 이용하여 동특성을 변화시킬수 있다 하더라도 시스템이 고감쇠 영역(high damping region)에 있을 경우에는 바로 이웃한 국부적인 최소에너지 상태로의 천이, 즉, 단일슬립으로 스틱슬립을 제한시켜서 다중슬립의 실험적 관찰은 불가능할 것이다. 이러한 분석으로부터 본 실험조건은 고감쇠영역에 있지 않음을 판단할 수 있으나, 다중슬립이 발생하지 않을 시스템의 임계감쇠 범위에 대하여 향후 추가로 깊이있는 고찰이 필요하다.

4. 결 론

원자레벨에서의 stick-slip 현상의 시스템의 강성 및 재료 물성에 따른 변화를 고찰하기 위하여, 다양한 강성과 마이크로 또는 나노스케일 접촉반경의 팁을 갖는

AFM 캔틸레버를 이용한 HOPG 표면에서의 원자레벨에서의 실험적 고찰을 수행하였다. 캔틸레버의 미끄럼 방향의 강성과 접촉강성의 변화를 조절함에 의해서, 잘 알려진 것과 같이 HOPG의 단위격자구조와 일치하는 정상적인 단일 스틱슬립 거동뿐만 아니라 상대 미끄럼 운동시에 스틱슬립이 발생하지 않는 smooth sliding과 다중슬립으로의 마찰거동의 천이를 대기중에서 최초로 실험적으로 확인하였으며, 횡방향강성과 하중에 따른 스틱슬립의 천이양상은 이론적 모델과 잘 일치함을 입증할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006년도 한남대학교 학술연구구성비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Mate, C. M., McClelland, 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.
2. Morita, S., Fujisawa, S. and Sugawara, Y., "Spatially quantized friction with a lattice periodicity," *Surf. Sci. Rep.*, Vol. 23, pp.1-41, 1996.
3. Fujisawa, S., Kishi, E., Sugawara, Y. and Morita, S., "Two-dimensionally discrete friction on the NaF(100) surface with the lattice periodicity," *Nanotechnology*, Vol. 5, pp.8-11, 1994.
4. Germann, G. J. et al., "Atomic scale friction of a diamond tip on diamond (100) and (111) surfaces," *J. Appl. Phys.*, Vol. 73, pp.163-167, 1993.
5. Takano, H. and Fujihira, M., "Study of molecular scale friction on stearic acid crystals by friction force microscopy," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 14, pp.1272-1275, 1996.
6. Miura, K., Sasaki, N. and Kamiya, S., "Friction mechanisms of graphite from a single-atomic tip to a large-area flake tip," *Phys. Rev. B*, Vol. 69, Art. No.075420, 2004.
7. Fujisawa, S., Yokoyama, K., Sugarawa, Y. and Morita, S., "Load dependence of sticking-domain distribution in two-dimensional atomic scale friction of NaF(100) surface," *Tribol. Lett.*, Vol. 9, pp.69-72, 2000.
8. Gnecco, E. et al., "Velocity Dependence of Atomic Friction," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 84, pp.1172-1175, 2000.
9. Bennewitz, R. et al., "Atomic-scale stick-slip pro-

- cesses on Cu(111)," *Phys. Rev. B*, Vol. 60, R11301-4, 1999.
10. Zhong, W. and Tomanek, D., "First-principles theory of atomic-scale friction," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 64, pp.3054-3057, 1990.
 11. Holscher, H., Schwarz, U. D. and Wiesendanger, R., "Modeling of the scan process in lateral force microscopy," *Surf. Sci.*, Vol. 375, pp.395-402, 1997.
 12. Sasaki, N. Kobayashi, K. and Tsukada, M., "Atomic-scale image of graphite in atomic-force microscopy," *Phys. Rev. B*, Vol. 54, pp.2138-2149, 1996.
 13. Johnson, K. L. and Woodhouse, J., "Stick-slip motion in the atomic force microscope," *Tribol. Lett.*, Vol. 5, pp.155-160, 1998.
 14. Sung, I.-H., Cannara, R. J. and Carpick, R. W., "Transitions in atomic-scale stick-slip friction behavior on graphite due to system stiffness," 2005 MRS (Material Research Society) Fall meeting, Nov.28-Dec.2, 2005, pp.966, Boston, USA.
 15. Medyanik, S. N., Sung, I.-H., Liu, W. K. and Carpick, R. W., "Predictions and observations of multiple slip modes in atomic-scale friction," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 97, No. 13, Art. No.136106, 2006.
 16. Sader, J. E., Chon, J. W. M. and Mulvaney, P., "Calibration of rectangular atomic force microscope cantilevers," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 70, pp.3967-3969, 1999.
 17. Green, C. P. *et al.*, "Normal and torsional spring constants of atomic force microscope cantilevers," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 75, pp.1988-1996, 1995.
 18. Ogletree, D. F., Carpick, R. W. and Salmeron, M., "Calibration of frictional forces in atomic force microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 67, pp.3298-3306, 1996.
 19. Tomlinson, G. A., "A molecular theory of friction," *Phil. Mag.*, Vol. 7, pp.905-939, 1929.
 20. Socoliuc, A., Bennewitz, R., Gnecco, E. and Meyer, E., "Transition from stick-slip to continuous sliding in atomic friction: entering a new regime of ultralow friction," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 92, Art. No.134301, 2004.