

FFT해석을 이용한 기하학적 접촉조건에 따른 마찰거동에측

성 인 하, 이 형 석, 김 대 은*

연세대학교 대학원 기계공학과

*연세대학교 기계전자공학부

Prediction of Frictional behavior according to geometrical contact condition using FFT-based analysis

In-Ha Sung, Hyung-Suk Lee, Dae-Eun Kim*

Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Yonsei University

*School of Electrical and Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract - In this paper, FFT(Fast Fourier Transform) analysis of friction was suggested as a method to interpret the contact conditions. Micro-grooves with various dimensions were fabricated on the silicon surface to investigate the frictional behavior with respect to the change in geometrical contact condition. Frictional forces between micro-grooved surfaces and spheres modeled as surface asperities were measured using a micro-tribotester which was built inside a SEM(Scanning Electron Microscope). The experimental results show that the relative dimensions and distributions of contact asperities between two surfaces can be predicted by the power spectrum and the main frequency in FFT-based analysis of friction coefficient. Also, it was shown that the friction coefficient for multi-asperities was the result of the superposition of that for each asperity.

Key Words : Friction, FFT(Fast Fourier Transform), Asperity, Frequency spectrum, Power spectrum, Micro-grooved surface

1. 서 론

두 표면이 상대 운동을 하는 경우에 발생하는 마찰 현상은 기계적인 요인과 화학적인 요인 등 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하여 나타나는 것으로 알려져 있다[1,2]. 특히, 표면에 존재하는 요철들의 상호 작용 및 변형은 마찰을 일으키는 기계역학적 원인으로, 이러한 기하학적형상에 의한 마찰에 대해 접촉면적 및 형상, contact potential 등 다양한 관점에서의 연구가 이루어져 왔다 [3-6]. 이러한 연구를 통하여 거시시스템에 대해서는 undulated surface와 같은 기능성

표면을 이용하여 접촉면적을 줄이고, 마멸입자를 포집함으로써 마찰저감을 시도하기도 하였다[7,8]. 또한, 마멸이 거의 발생하지 않는 미소시스템에 대한 연구에서는 기계역학적인 요인보다는 표면상호작용에 기인한 흡착력, 정전기력 등이 마찰력에 크게 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 이 또한 표면거칠기나 기하학적인 접촉 형상에 의해 그 영향이 크게 좌우되어[9,10], MEMS 부품의 표면에는 stiction저감을 위해서 접촉면적을 줄이기위해 dimple과 같은 형상을 제작하고 있다[11]. 실제적으로 두 표면간의 마찰이 일어나는

상황을 해석하기 위해서는 표면에 존재하는 여러 개의 요철이 동시에 접촉하는 복합요철 접촉에 대한 해석이 필수적이다. 그러나 이러한 실험적 해석은 불규칙한 요철의 형상과 분포로 인하여 많은 어려움이 있어서 기존의 해석은 실험적인 연구보다는 대부분 이상적인 상황을 가정한 simulation 과 수치적 해석 방법에 의존하여 왔다[12-14].

이에 본 연구에서는 groove의 폭과 간격이 일정한 micro-grooved structure를 제작하여 이를 표면요철로 가정하여, 실제 표면간의 접촉상황과 유사하도록 여러 요철이 동시에 접촉하는 상황에서의 마찰력의 변화를 고찰하고, 이로부터 얻어진 마찰계수의 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 통하여 접촉 상태를 예측하는 방법을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제시하는 요철의 형태와 분포에 따른 마찰 계수의 변화 및 그에 따른 FFT 분석 방법은, 표면의 기하학적 형상에 따른 마찰 계수를 예측가능케 하여 마찰 특성을 향상시키기 위한 표면 설계에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험방법 및 시편

본 연구에 사용된 마찰 시험기는 pin-on-disk type의 micro-tribotester로서, 10^{-5} torr의 진공도를 갖는 진공챔버 내부에 설치하여 일정하게 유지되는 환경조건하에서 실험이 가능하도록 하였다. 핀 끝단의 볼은 요철로 모델링하여, 단일요철 실험에서는 하나의 볼이 부착되게 되고, 복합 요철 실험에서는 3개의 볼을 부착하였다. 3개의 볼이 디스크위에 놓이는 시편과 최대한 모두 접촉할 수 있도록 핀 끝단에 고무패드를 붙이고 그 위에 볼을 부착시켰다. 사용된 볼은 500 μ m 지름의 STB-2 베어링 볼로서, 경도는 HV 700이며 평균조도는 10nm 이다.

디스크위에 놓이는 시편은 silicon 표면위에 groove를 깊이 약 1 μ m, 폭 및 간격은 5, 10

μ m로 photo-lithography 방법으로 일정하게 제작한 micro-grooved surface를 이용하였으며, groove의 폭 w, 간격 s, 깊이 d의 정의는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 하나의 groove를 단일요철로 가정하면, 이러한 micro-grooved surface는 핀 끝단에 부착된 볼에 비해 상대적으로 작은 크기의 미세요철들을 갖는 표면으로 모델링된다.

핀에 가해지는 하중은 dead weight 방식으로 20mN의 저 하중을 유지할 수 있도록 하여 핀에 부착된 볼과 micro-grooved surface 간의 접촉으로 발생할 수 있는 마멸 현상을 최소화하였다. 디스크의 회전 속도는 약 1.5 μ m/s의 선속도를 구현하여 요철간의 접촉상태의 변화가 마찰 신호에 보다 잘 반영될 수 있도록 하였다.

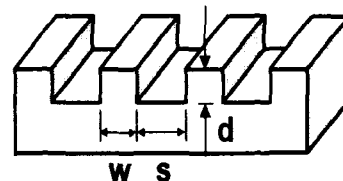


Fig.1 Schematic of micro-grooved surface

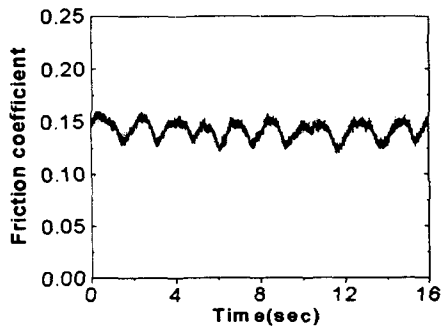
3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일요철과 micro-grooved surface 간 접촉

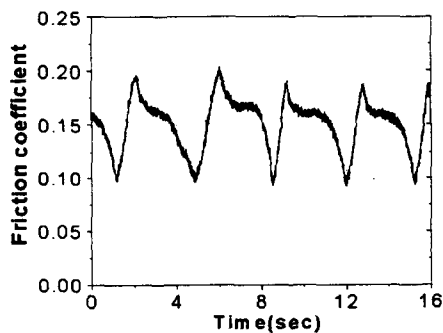
우선 micro-grooved surface의 요철의 형상 및 분포에 따른 마찰특성을 관찰하기 위하여, 핀 끝단에 1개의 볼을 부착한 단일요철과 micro-grooved surface간의 실험을 실시하였다.

Fig. 2는 동일한 속도와 하중조건에서 얻은 micro-groove의 폭에 따른 마찰 계수의 변화이다. Fig. 2에서 상대적으로 groove의 폭이 좁은 경우에는 groove에서의 마찰 계수가 groove가 존재하지 않는 평탄면에서의 마찰 계수와 비교하여 감소하는 경향을 나타내는데 비해, groove의 폭이 넓은 경우에

는 요철간의 맞물림에 의한 stick-slip 현상이 관찰되며 마찰 계수가 급격하게 커지는 구간이 발생하는 것을 볼 수 있다.



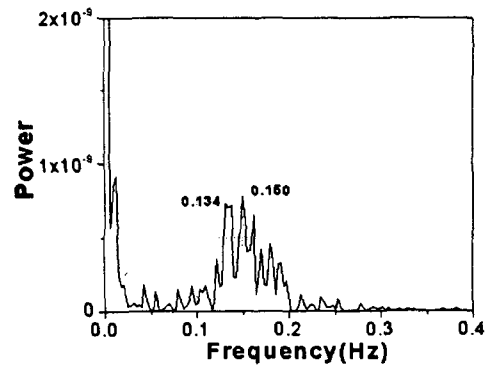
(a)



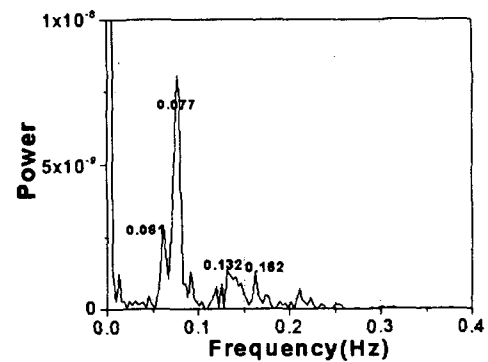
(b)

Fig. 2 Friction coefficient between a single ball(single asperity) and (a) $5\mu\text{m}$, (b) $10\mu\text{m}$ micro-grooved surface

이와 같이 groove의 폭에 따라 마찰 계수의 변화 양상이 다르게 나타나는 것은 요철로 가정된 볼과 groove가 접촉하여 상대운동하면서 발생하는 볼의 수직변위의 변화에 따르는 요철간의 기하학적 형상비에 의한 접촉 각도의 크기에 기인한 것으로, groove의 폭이 넓어짐에 따라 최대 접촉 각도의 증가 및 접촉 각도의 순간적인 변화가 크게 일어나게 되기 때문이다. Fig. 3은 Fig. 2에 나타난 마찰 계수의 FFT 스펙트럼이다.



(a)



(b)

Fig. 3 FFT spectrum of the friction coefficient between a single ball(single asperity) and (a) $5\mu\text{m}$, (b) $10\mu\text{m}$ micro-grooved surface

Fig. 2의 마찰계수 변화와 Fig. 3의 FFT 스펙트럼을 비교해 보면, 5, $10\mu\text{m}$ grooved surface 각각에 대하여 최대파워가 나타나는 주요주파수가 0.150, 0.077Hz에서 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 분석해보면, $5\mu\text{m}$ micro-grooved surface에서는 볼과 시편간의 상대 미끄럼 속도 $1.5\mu\text{m/s}$ 인 실험 조건으로부터, 반복되는 groove에 의해 마찰신호에 나타나는 주파수는 $0.15\text{ Hz} (=1.5/10)$ 가 되는데, FFT 스펙트럼에서도 이와 동일한 값이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 10

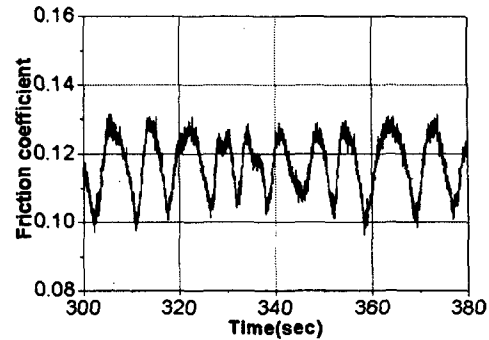
μm grooved surface에 대한 주요주파수 역시, groove의 폭이 $5\mu\text{m}$ groove의 폭에 비하여 2배 크므로 마찰 계수의 주기는 2배로 늘어나고, 주파수는 이에 반비례하여 줄어들 것으로 예측할 수 있는데, Fig. 3에 나타난 바와 같이 0.077Hz 은 이러한 예측값에 매우 근사한 값이다. 따라서, 마찰 계수는 표면에 존재하는 요철의 분포를 반영하며, 마찰 계수의 주파수 분석을 통하여 요철의 분포를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

또한, 주요주파수에서의 파워값을 비교해 보면, groove의 폭이 $5\mu\text{m}$ 일때보다 $10\mu\text{m}$ 일때 약 10배 정도 증가한 것을 알 수 있는데, 이는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 마찰 계수의 변화폭이 $5\mu\text{m}$ micro-grooved surface에서보다 $10\mu\text{m}$ grooved surface에서 더 커지기 때문에 이와 같은 마찰계수의 변동폭이 파워 스펙트럼에 반영된 것이다. 앞서 언급한대로, 각 시편에 대해서 다르게 나타나는 마찰 계수의 편차는 두 요철간의 형상비에 의한 최대 접촉각도에 따른 것이기 때문에, 결과적으로 마찰 계수의 파워 스펙트럼은 요철의 형상에 의한 두 요철간의 최대 접촉 각도를 반영하고 있다고 할 수 있다.

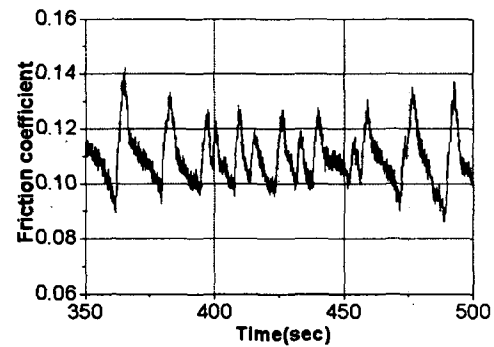
3.2 복합요철과 micro-grooved surface 간 접촉

앞서 언급한대로, 복합 요철에 대한 실험은 3개의 볼을 부착하여 보다 실제적인 마찰 상황인 여러 개의 요철이 동시에 접촉하는 경우를 모델링한 것이다.

Fig. 4는 단일 요철 실험과 동일한 하중과 속도조건에서 복합요철과 $5, 10\mu\text{m}$ grooved surface간의 마찰계수 변화를 나타낸 것이다. 이로부터 복합요철의 경우에는 마찰계수의 변화폭에 있어서 국부적인 최대값과 최소값들의 크기가 일정하지 않고 변화하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 각각의 multi-ball이 경험하는 마찰신호가 서로 중첩되면서 상호 간섭 현상을 일으키기 때문으로 생각할 수 있다.



(a)

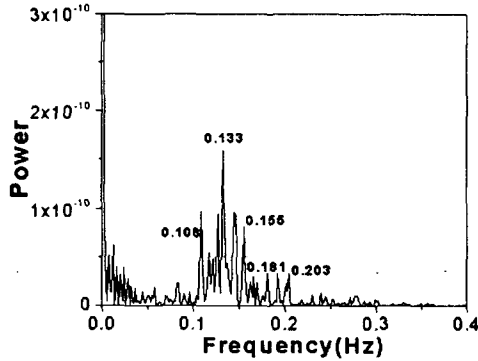


(b)

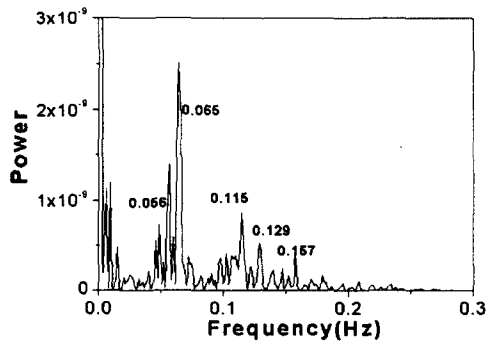
Fig. 4 Friction coefficient between multi-balls (multi-asperities) and (a) $5\mu\text{m}$, (b) $10\mu\text{m}$ micro-grooved surface

이러한 예측은 Fig. 5의 FFT 분석결과에서 잘 입증된다. 복합요철에서는 단일요철에서와는 달리 peak의 폭이 좁아지면서 여러주파수가 나타남을 알 수 있다. 또한, 동일한 micro-grooved surface에 대하여 주요주파수에서의 파워값을 서로 비교해 보면, 복합요철의 마찰 실험 결과 나타나는 파워의 값은 모두 10^{-10} order로서 단일요철에서의 값에 비하여 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 일정한 주파수에서의 파워의 값은 복합요철가운데 하나의 요철이 나타내는 마찰계수의 변화폭을 나타내는데, 두개 이상의 볼(요철)이 동시에 접촉하면서 각각의

불에 의한 마찰신호가 상호간섭을 일으켜 하나의 요철이 나타내는 파워 스펙트럼의 값이 감소하기 때문이다.



(a)



(b)

Fig. 5 FFT analysis of friction coefficient for multi-balls(multi-asperities) with (a) 5 μ m, (b) 10 μ m micro-grooved surface

4. 결 론

본 연구에서는 단일 요철과 복합 요철 실험을 통하여 마찰을 일으키는 주요한 원인 가운데 하나인 요철간의 mechanical interlocking 현상에 있어서, 요철의 형태와 분포에 따른 마찰 계수의 변화를 살펴 보고 이러한 요철간의 접촉 상태를 해석하는데 있어서 FFT 방법을 제시하였다. 이로부터,

FFT 분석을 통하여 복합요철에서 나타나는 마찰 계수의 변화는 각각의 단일요철이 경험하는 마찰계수의 중첩에 의해 결정되며, 단일요철의 크기와 분포에 따라서 요철들의 상호 간섭효과는 다르게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 마찰 계수의 FFT 분석결과로서 얻어지는 파워 스펙트럼과 주파수 스펙트럼은 접촉상태에 따라 다르게 나타나는데, 파워 스펙트럼의 값은 두 표면에 존재하는 요철의 기하학적 형상비와 접촉하는 요철의 개수를 반영하고 있으며 주파수 스펙트럼은 표면에 존재하는 요철의 상대적인 위치분포를 반영한다. 따라서, 표면에 존재하는 요철간 접촉상태를 예측하는데 마찰계수의 FFT 분석 방법은 효과적으로 이용될 수 있다.

후 기

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

참고문헌

1. N. P. Suh, Wear, 69, 91-114, 1981.
2. The Friction and Lubrication of Solids, F. P. Bowden and D. Tabor (Clarendon press, 1986).
3. T. Muller, M.Lohrmann, T.Kasser, O.Marti, J. Mlynek, and G. Krausch, Phys. Rev. Lett., 79, 5066, (1997).
4. E. Weilandt, A.Menck, and O.Marti, Surf. Int. Anal. 23, 428, (1995).
5. S. Sundararajan and B. Bhushan, J. Appl. Phys., 88, 4825-4831, (2000).
6. R. W. Carpick, D. F. Ogletree, and M. Salmeron, J. Colloid and Interface Science 211, 395-400, 1999.

7. N. P. Suh, M. Mosleh, P. S. Howard, *Wear*, 175, 151-158, 1994.
8. D. E. Kim and N. P. Suh, SAE Paper, No.911231, pp.99-106, 1992.
9. M. Saint Jean, S. Hudlet, C. Guthmann, and J. Berger, *Eur. Phys. J. B.*, 2, 5-10, 1998.
10. Y. Ando and J. Ino, *Wear*, Vol. 216, pp. 115-122, 1998.
11. C. H. Mastrangelo, *Tribology letters*, 3:223-238, 1997.
12. O. M. Braun, T. Dauxois, and M. Peyrard, *Phys. Rev. B*, 56, 4987-4995, 1997.
13. N. Sasaki, K. Kobayashi, and M. Tsukada, *Surface Science*, 357-358, pp. 92-95, 1996.
14. R. S. Sayles, *Tribology International*, 29(8), 639-650, 1996.