

저마찰을 위한 Micro-Scale Surface Texturing의 실험적 연구

채 영 훈[†]

경북대학교 트라이볼로지연구소

Experimental Study on Micro-Scale Surface Texturing for Friction Reduction

Younghun Chae[†]

Engineering Tribology Research Institute in Kyungpook National University

Abstract – The aim of this paper is to investigate the effect of surface texturing on reduction friction and to understand the potential of friction reduction through micro-scale dimple to fabricate by photolithography on pin-on-disk test using flat-on-flat contact geometry. It was verified that the friction property with respect to the same pitch has been influenced on the size of dimple under lubricated sliding contact. Also, we can recognize from Stribeck curve that the friction property has a connection with the size of dimple. It can explain a relationship between the friction coefficient and a dimensionless parameter for lubrication condition. The friction property has been an effect on the size of surface texture on reduction friction, not only because the density of dimple, but also because the ratio of diameter/pitch. This ratio of approximately 0.5 is recommended under the tested friction condition. It is suggested that the ratio of d/p is an important parameter for surface texture design.

Key words – friction, surface texture, reducing friction, micro dimple, photolithography, density effect.

1. 서 론

자동차 엔진손실중 약 40% 정도는 마찰손실에서 발생된다는 것은 잘 알려져 있다[1]. 연료절감 및 효율향상을 위하여 정밀표면가공으로 마찰저감기술을 연구하였다[2-4].

상대표면접촉으로 기능을 하는 tribosystem에서 마찰손실감소를 위하여 공학표면기술중 surface texture 기술을 연구하고 있다[2-5]. Surface texture 기술은 접촉하고 있는 표면에서 발생하는 마찰저감기술에 적용하고 있다. 마찰저감을 위한 surface texture 기술은 hydrodynamic과 혼합윤활상태에 적용하고 있다.

많은 연구자들은 마찰제어기술과 “마찰저감을 위하여 surface texture를 어떻게 설계할 것인가?”에 대하여 다양한 각도로서 접근하고 있다. Etsion[7]은 mechanical

seal에 대하여 마찰성능을 지배하는 주요인자(critical parameter)를 pore크기와 비(ratio)의 관점에서 연구하였다. Wang[8]은 surface texture설계를 위하여 임계하중비(critical load ratio), 깊이/크기의 비, pit의 면적비가 마찰성능에 영향을 주고 있음을 확인하였다. 또한 Ronen[9]은 surface texture에 대한 최적의 깊이/크기 비를 가지고 있음을 보고하였다. 이러한 Surface texture의 연구는 마찰성능에 미치는 설계인자를 도출하기 위하여 연구진행되고 있다. 이러한 연구결과에도 불구하고 아직 surface texture에 대한 메커니즘은 완전히 이해되지 않고 있다.

본 논문은 저마찰을 위한 surface texturing의 micro-dimple에 대한 실험적인 연구를 크기효과와 관계성을 도출하고자 한다. 특히 micro-dimple간의 동일한 간격(pitch)과 딴플크기에 대한 마찰특성과 surface texture간의 관계되는 설계인자를 도출하고자 한다.

[†]주저자 · 책임저자 : yhunchae@knu.ac.kr

Table 1. Experiment condition for test

Parameters	Condition
Contact type	Pin-on-Disk
Disk material	Bearing steel
Pin material	Bearing steel
Size of dimple for pin [μm]	50
Depth of dimple for pin [μm]	4-5
Surface roughness	
- Pin before fabrication [μm]	0.008Ra, 0.016Rmax
- Disk [μm]	0.039Ra, 0.052Rmax
Diameter of small disk [mm]	5
Diameter of sliding track [mm]	40
Normal load range [N]	5-40
Pressure range [MPa]	0.25-2.05
Speed range [m/s]	0.04-0.32
Lubricant	Paraffin oil (Saybolt number 125/135)
Temperature	Room temperature

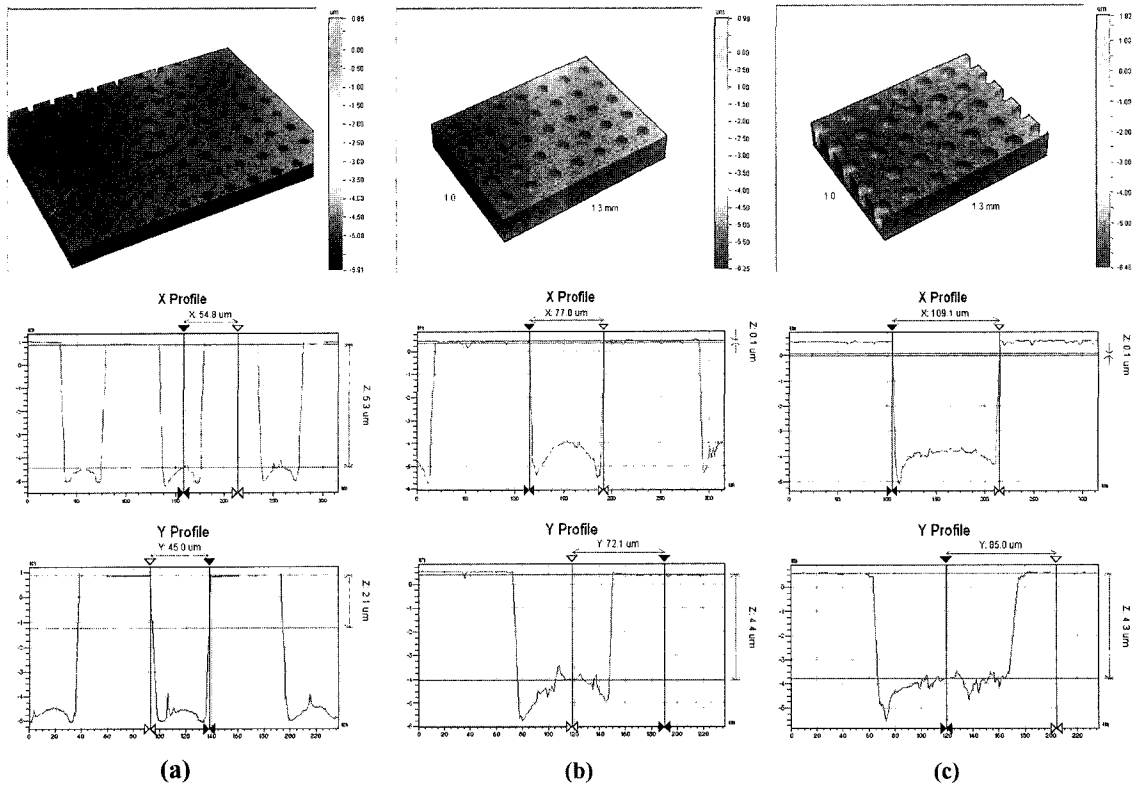


Fig. 1. Surface topography for (a) 50 μm , (b) 80 μm and (c) 110 μm of diameter.

2. 실험

2-1. Microfabrication

Table 1은 본 연구에 사용될 시험편의 크기와 형상을 나타내었으며, 접촉표면에 대한 주요치수를 나타내었다.

시험편 접촉표면에 surface texture를 가공하기 위하여 포토리소그래피를 수행하였다. 패턴설계 후 마스크를 필름마스크로 제작하였다. 시험편 접촉표면의 마지막 표면가공은 평탄화가공기술[10]과 연마기술을 사용하여 완전한 면접촉이 가능하도록 하였다. Fig. 1은 시험편의 micro-dimple크기와 패턴을 optical profile (Wyko, NT3300)로 측정된 것이다. 측정된 크기는 $50\pm 5\ \mu\text{m}$, $80\pm 4\ \mu\text{m}$ 및 $110\pm 2\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 정방향 배열로 패턴을 구성된 것을 알 수 있다.

2-2. 시험방법 및 조건

Surface texture의 마찰성능 평가를 위하여 flat-on-flat 접촉형태인 pin-on-disk 시험을 Fig. 2와 같이 수행하

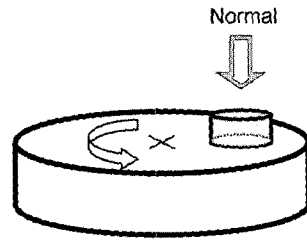


Fig. 2. Schematic of pin-on-disk type.

였다. 표면의 청정을 위하여 아세톤으로 5분간의 초음파세척 후 DI water와 질소가스로 건조시켰다.

시험방법으로 고정 하중으로 단계별 속도를 변화하였다. 수직하중 5, 10, 15, 20, 30, 40 N순으로 추 (deadweight)를 사용하여 가압하였다. 미끄럼속도는 하중에 따라 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.20, 0.24, 0.28, 0.32 m/s로 단계별 속도를 증가시켰다. 모든 윤활유는 하중단계별 새로운 윤활유를 사용하였다. 새로운 시험편 마다 15분간의 run-in후 측정 데이터로 사용하였다.

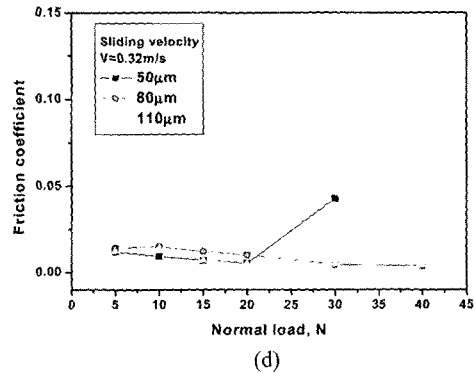
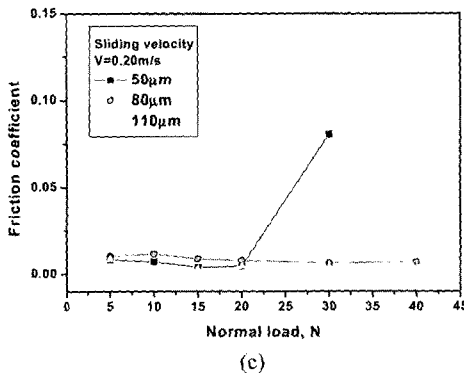
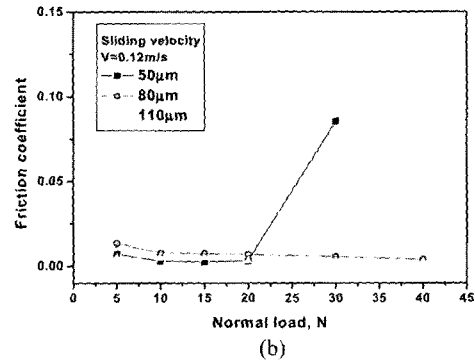
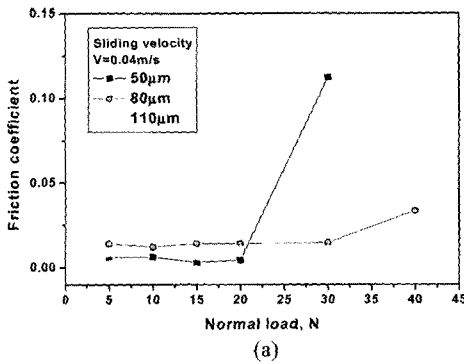


Fig. 3. Friction coefficient as a function of normal load for $160\ \mu\text{m}$ of pitch under (a) 0.04 m/s, (b) 0.12 m/s, (c) 0.20 m/s and (d) 0.32 m/s.

3. 결과 및 고찰

3-1. 동일피치에서 micro-dimple 크기 효과

Fig. 3은 미끄럼속도별 수직하중 증가에 따라 micro-dimple 크기에 따른 마찰계수변화를 보여주고 있다. 시험편은 micro-dimple간의 피치는 160 μm 이다. 미끄럼속도 0.04 m/s에서 50 μm 시험편의 마찰계수는 수직하중 20 N 이상에서 급격히 증가하였다. 반면에 110 μm 시험편은 미끄럼속도와 수직하중 증가에 따라 마찰계수는 감소하였다. 80 μm 시험편은 수직하중 30 N에서 마찰계수는 증가되고 있었다. 또한 Fig. 4는 수직하중별 미끄럼속도 증가에 따라 micro-dimple 크기에 따른 마찰계수변화를 보여주고 있다. 동일한 하중에서 미끄럼속도에 따라 마찰계수는 매우 조금 증가되는 것으로 알 수 있다. 수직하중 30 N에서 50 μm 시험편은 상대적으로 80 μm 과 110 μm 의 마찰계수보다 높게 나타났다.

피치 160 μm 에서 micro-dimple 크기만을 변화시켜 마찰계수를 변화를 조사한 결과 micro-dimple 크기는

마찰성능에 영향을 주고 있었으며, micro-dimple은 성능에 주요 요인으로 작용하고 있었다. 그러나 달리 생각하면 동일한 피치에서 micro-dimple 크기를 변화시키면 밀도가 변화된다. 따라서 동일한 밀도에서 크기를 달리하여 micro-dimple 크기에 따른 마찰성능관계를 조사하였다.

3-2. 동일밀도에서 micro-dimple 크기 효과

동일한 피치에서 정방형정렬의 패턴에서 마이크로뎀플 크기를 변화시키면 밀도가 변화된다. 그러면 이러한 결과는 밀도변화에 따라 나타나는 현상일 수 있다. 따라서 동일 밀도에서 마이크로뎀플 크기 변화에 따라 마찰성능을 조사하여 크기효과를 심도있게 조사하기 위하여 윤활상태를 조사하면서 마찰성능을 조사하였다.

윤활상태를 조사하기 위하여 Stribeck curve를 사용하였다. 이것은 마찰계수와 무차원계수와의 관계에서 윤활상태를 확인할 수 있다.

Fig. 5는 무차원계수에 따른 마찰계수변화를 나타내

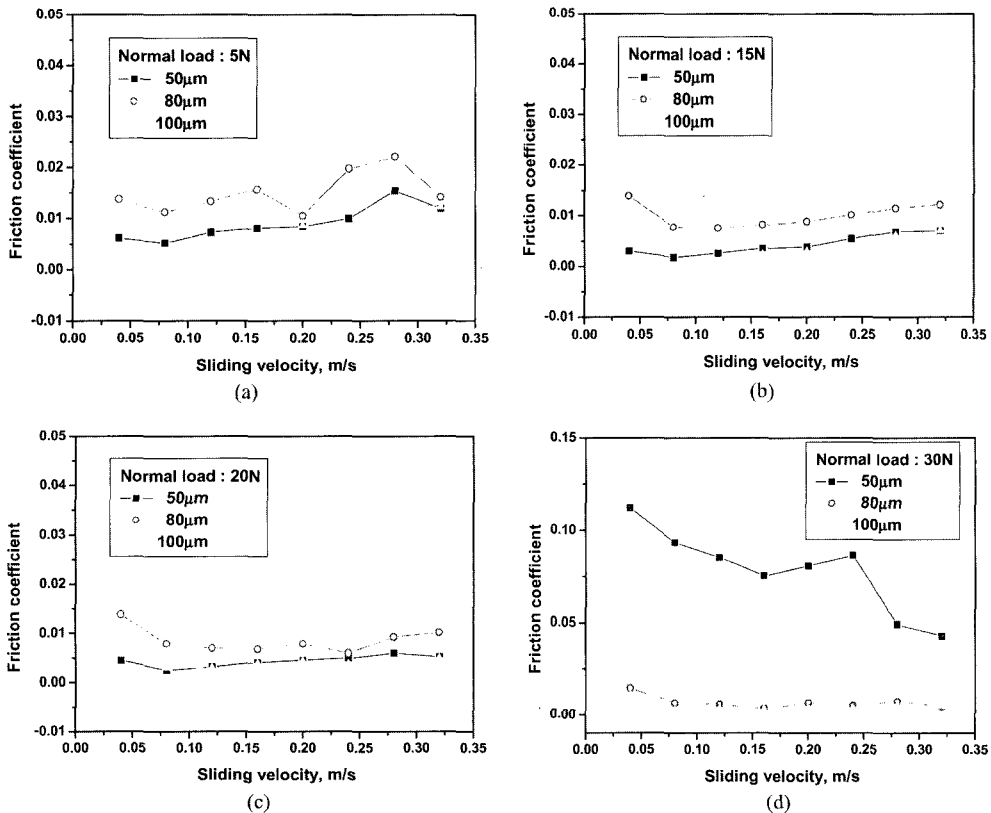


Fig. 4. Friction coefficient as a function of normal load for 160 μm of pitch under (a) 5 N, (b) 15 N, (c) 20 N and (d) 30 N.

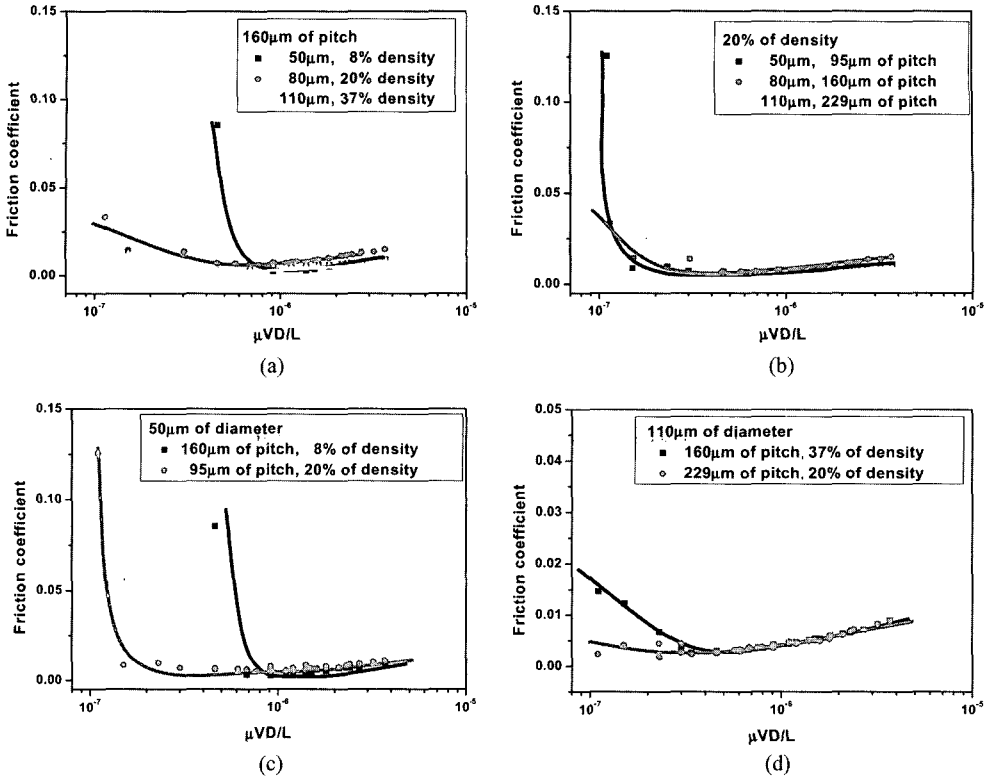


Fig. 5. Stribeck curve for (a) 160 μm of pitch, (b) 20% of density, (c) 50 μm of diameter and (d) 110 μm of diameter.

고 있다. 그래프에서 보는 바와 같이 윤활상태는 hydrodynamic과 혼합윤활상태임을 알 수 있다[11]. Fig. 5 (a)는 160 μm의 피치에서 50 μm, 80 μm 및 110 μm의 크기에 대한 마찰계수 변화를 보이고 있다. 110 μm의 시험편이 우수한 것이 나타났다. Fig. 5(b)는 20%의 동일한 밀도에서 마이크로딴플크기에 따른 마찰 성능을 보여주고 있다. 110 μm의 시험편이 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 Fig. 5(c)는 50 μm의 시험편에 대한 비교를 하였다. 밀도 8% 보다 20%의 시험편이 마찰성능이 우수하였다. Fig. 5(d)는 110 μm의 시험편에서 37%보다 20%의 시험편이 마찰성능이 우수하였다.

다시 결과를 정리하면 160 μm의 동일피치에서 마찰 성능은 110 μm의 마이크로딴플의 크기의 37% 밀도 시험편이 우수하였다. 또한 20%의 동일 밀도에서 110 μm의 20% 밀도를 가지는 시험편이 가장 우수하였다. Surface texture의 마찰저감효과를 가지고 있었다. Surface texture의 메커니즘을 마이크로딴플크기와 피치간의 관계에서 도출하였다. Fig. 6은 마이크로딴플

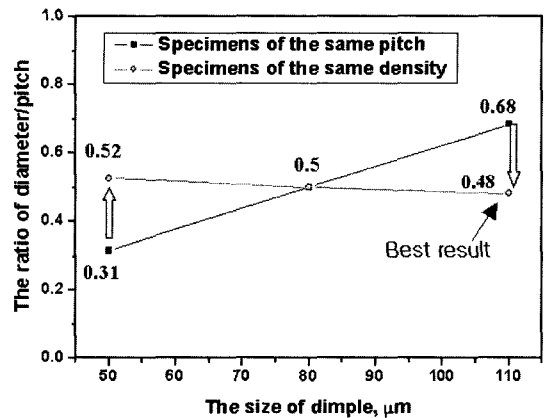


Fig. 6. The ratio of diameter/pitch as a function of the size of dimple.

크기에 대한 크기/피치의 비(d/p ratio)를 나타내었다. 그래프에서 보는 바와 같이 각 마이크로 딴플 크기에 0.5값에 가까울수록 성능이 향상됨을 확인하였다. 이것은 surface texture설계에서 주요한 인자로 사료된다.

4. 결 론

본 논문은 저마찰을 위한 surface texturing의 micro-dimple에 대한 실험적인 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 160 μm 의 동일한 피치에서 마이크로딴플의 크기는 110 μm 가 우수하였으며,
2. 20%의 동일 밀도에서도 110 μm 에서 가장 우수하게 나타났다.
3. Surface texture의 마찰성능의 향상에 지배되는 주요인자를 d/p 값이 각 크기별 0.5일 때 향상됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Nakada, N., "Trends in Engine Technology and Tribology," *Tribology International*, Vol. 27, No. 1, pp. 3-8, 1994.
2. Gryk, Y.K. and Etsion, I., "Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components," *Tribology Transactions*, Vol. 45, No. 4, pp. 444-449, 2002.
3. Etsion, I., Kligerman, Y. and Halperin, G., "Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces," *Tribology Transactions*, Vol. 42, No. 3, pp. 511-516, 1999.
4. Tian, H., Saka, N. and Suh, N.P., "Boundary Lubrication Studies on Undulated Titanium Surfaces," *Tribology Transactions*, Vol. 32, No. 3, pp. 289-296, 1989.
5. Etsion, I. and Burstein, L., "A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure," *Tribology Transactions*, Vol. 39, No. 3, pp. 677-683, 1996.
6. Wang, X., Kato, K., Adachi, K. and Aizawa, K., "The Effect of Laser Texturing of SiC Surface on the Critical Load for the Transition of Water Lubrication Mode from Hydrodynamic to Mixed," *Tribology International*, Vol. 34, pp. 703-711, 2001.
7. Etsion, I. and Halperin, G., "A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal," *Tribology Transaction*, Vol. 45, pp. 430-434, 2002.
8. Wang, X., Kato, K. and Adachi, K., "The Lubrication Effect of Micro-Pits on Parallel Sliding Faces of SiC in Water," *Lubrication Engineering*, Aug., pp. 27-34, 2002.
9. Ronen, A., Etsion, I. and Kligerman, I., "Friction-reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components," *Tribology Transaction*, Vol. 44, No. 3, pp. 359-366, 2001.
10. 채영훈, "가공면 고평탄화 방법 및 장치," 특허출원 번호 10-2004-43066, 2004.
11. Wakuda, M., Yamauchi, Y., Kanzaki, S. and Yasuda, Y., "Effect of Surface Texturing on Friction Reduction between Ceramic and Steel Materials under Lubricated Sliding Contact," *Wear*, Vol. 254, pp. 356-363, 2003.