한국정밀공학회지 제 22 권 제 2 호 (2005 년 2 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 2, February 2005.

혼합 및 유체윤활하에서 Micro-Scale Dimple Pattern 의 마찰특성

채영훈#, 김석삼*

Friction Characteristics of Micro-scale Dimple Pattern under Mixed and Hydrodynamic Lubrication Condition

Young-Hun Chae#, Seock-Sam Kim*

ABSTRACT

Surface texturing of tribological application is another attractive technology of friction reducing. Also, reduction of friction is therefore considered to be a necessary requirement for improved efficiency of machine. In this paper attempts to investigate the effect of density for micro-scale dimple pattern on bearing steel flat mated with pin-on-disk. We demonstrated the lubrication mechanism for a Stribeck curve, which has a relationship between the friction coefficient and a dimensionless parameter for lubrication condition. It is found that friction coefficient is depended on the density of surface pattern. It was thus verified that micro-scale dimple could affect the friction reduction considerably under mixed and hydrodynamic lubrication conditions from based on friction map. Lubrication condition regime has an influence on the friction coefficient induced the density of micro dimple.

Key Words : Friction(마찰), Micro dimple(마이크로 딤플), Surface texturing(표면 텍스쳐링), Boundary lubrication(경계윤활), Mixed lubrication(혼합윤활), Stribeck curve(스트라이벡 곡선), Friction map(마찰지도)

1. 서론

자동차엔진의 손실 중 마찰손실로 인한 손실은 40%인 것을 잘 알려져 있다.[1] 마찰감소는 연료손실을 줄이기 위하여 필수 불가결하다. 표면의 마찰손실을 줄이기 위하여 랩핑 또는 슈퍼피니싱으로 접촉면을 가공하는 방법이 있다.[2]

Surface texturing 은 또 하나의 마찰을 감소시킬 수 있는 방법으로 접근하고 있다.[3] Surface texturing 은 접촉표면에 딤플(dimple) 또는 다양한 모양을 기계 또는 화학적인 방법으로 가공하여 기능과 성능을 향상시키는 기술이다. 이 기술은 공학표면(engineered surface)으로 1940 년도부터 연구되고있다.[4] 최근 반도체공정이 발달함에 따라 기능성 있는 패턴(pattern)을 접촉표면에 가공하여 마찰특성을 연구하고 있다.

·· 접수일: 2004 년 6 월 10 일; 게재승인일: 2004 년 11 월 19 일
교신저자: 경북대학교 트라이볼로지연구소
E-mail yhunchae@knu.ac.kr Tel. (053) 950-7341
* 경북대학교 기계공학부

최근 실리콘 웨이퍼위에 나노패턴을 만들어 미끄럼 접촉운동시 stiction 을 감소시키는데 사용하고 있다.[5] SiC 세라믹에 레이저를 이용하여 마이크로 딤플을 패턴닝해서 미끄럼접촉시 마찰계수저감과 seizure 를 감소시키는 기술로 발표되고 있다.[6]

Surface texture 의 기구는 wear particle trapping, lubricant reservoir, hydrodynamic 등으로 나눌 수 있다. 그러나 각각의 이론은 타당성을 가지고 있어나 이러한 기구는 패턴의 밀도, 깊이, 크기에 의존하고 있다.[7] 따라서 아직 Surface texturing 에 대한 완전한 이해가 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 혼합윤활, 유체윤활영역에서의 마이크로 딤플패턴의 밀도에 따른 마찰변화를 조사하고, Stribeck curve 를 이용하여 윤활상태를 확인하고 마이크로 딤플 밀도에 따른 마찰특성거동을 해석하고자 한다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 시험편 및 시험방법

본 실험에 사용된 핀 시험편은 베어링강으로 지름 5mm 와 두께 3mm 의 크기와 원통모양의 형상을 가지고 있다. 핀의 접촉표면은 초정밀 고평탄화 평면가공으로 상대표면과 접촉이 잘 될 수 있도록 준비하였다. 표면의 딤플을 만드는 방법은 포토리소그라피(Photolithography)를 이용하여 습식에칭으로 준비하였다. 이때 준비된 필름 포토마스크의 딤플 지름은 40μm 로 설계하였다. 또한 습식에칭방법은 NaCl 전해액을 이용하여, 에칭깊이를 에칭시간으로 조절하여 마이크로 딤플을 가공하였다. 습식에칭 후 광학 측정한 결과 약 50μm 의 지름을 가졌다. 이때 깊이는 약 4-6μm 로 준비하였다. Fig. 1 은 준비된 시험편으로 표면형상과 크기

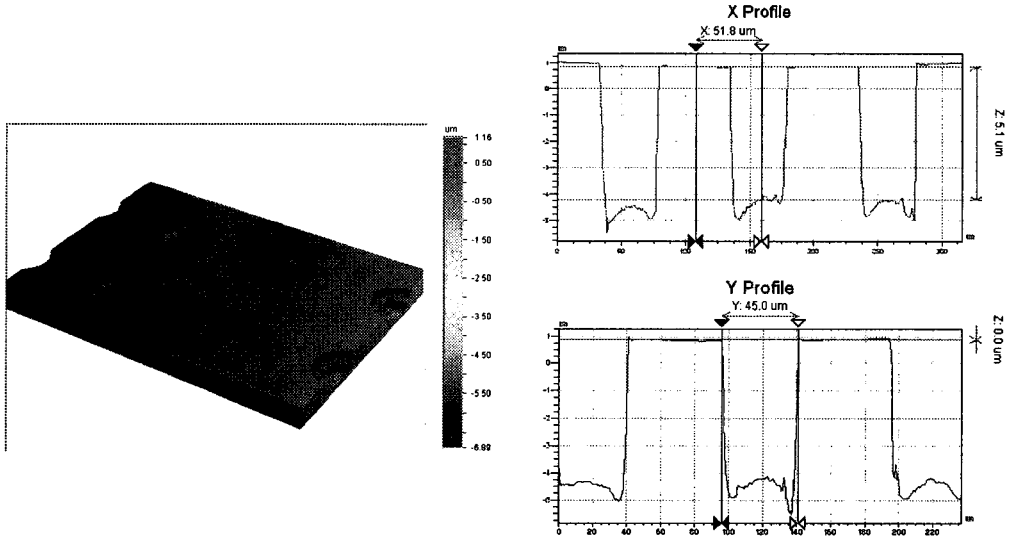


Fig. 1 Surface topography for micro-scale dimple

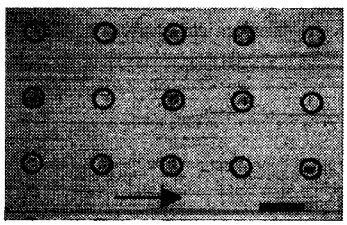


Fig. 2 Microscopy for micro-dimple pattern (The arrow is sliding direction)

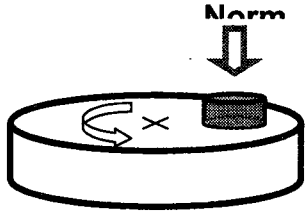


Fig. 3 Schematic illustration for pin on disk

Table 1 Experimental condition for friction test

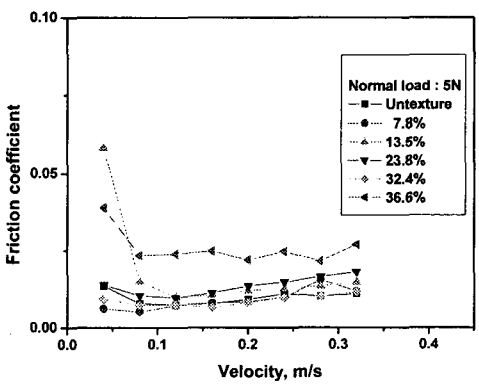
Parameters	Condition
Contact type	Pin-on-Disk
Disk material	Bearing steel
Pin material	Bearing steel
Size of dimple for pin [μm]	50
Density of dimple for pin [%]	7.8-36.6
Depth of dimple for pin [μm]	4-6
Surface roughness	
- Pin [μm]	0.008Ra, 0.016Rq
- Disk [μm]	0.039Ra, 0.052Rq
Diameter of small disk	5 mm
Diameter of sliding track	40mm
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

를 보여주고 있다. 마이크로 딤플의 정렬을 확인하기 위하여 Fig. 2 와 같이 광학현미경 사진을 보여주고 있다. 디스크의 재료는 베어링강으로 상대재료와 동일하게 준비 제작하였다. 지름 60mm 와 두께 5mm 로 가공하였다. 디스크의 표면조도는 폴리싱후 0.039μmRa 를 가지고 있다. Table 1 에서 보는 것과 같이 마이크로 딤플의 밀도는 7.8%에서 36.6%까 지 5 가지 밀도로 준비하였다. 마찰특성을 평가하기 위하여 핀-온-디스크실험방법으로 상온, 상압 윤활상태에서 마찰 시험 하였다. 이때 사용한 시험기는 스위사 CSEM Tribometer 를 사용하였다. 모든 데이터는 A/D convertor 를 사용하여 컴퓨터에 저장될 수 있도록 하였다. 실험은 수직하중별 5 분간의 run-in 을 수행한 후 본 실험데이터로 추출하였다.

3. 실험결과

3.1 마이크로 딤플의 하중의 영향

Fig. 4 는 수직하중별 미끄럼 속도증가에 따른 마이크로 딤플 밀도에 관하여 마찰계수변화곡선이다. Untexture 된 시험편은 속도에 따라 마이크로 딤플을 가진 시험편과 거의 비슷하게 마찰변화를 보이고 있다. 그러나 수직하중 20N 과 30N 에서는 마이크로 딤플을 가진 시험편은 마찰저감효과가 나타나고 있다. 특히 수직하중 30N 에서 마찰계수 저감 효과는 23.8%, 32.4% 및 36.6%의 밀도를 가지는 시험편이 우수하게 나타났다. 마이크로 딤플의 밀도 7.8%와 13.5%의 시험편은 수직하중 20N 까지는 마찰계수 저감 효과를 가지고있었다. 그러나 수직하중 30N 에서 마찰저감기능을 상실하는 것을 알 수 있다. 마이크로 딤플은 마찰계수 저감효과를 가지고 있었으며, 딤플의 밀도에 따라 마찰계수는 관계성을 가지고 있다. 또한 딤플의 최적 밀도가 존재하고 있었다.



(a) 5N

Fig. 4 Friction coefficient as a function of velocity for various density of micro dimple (continuous)

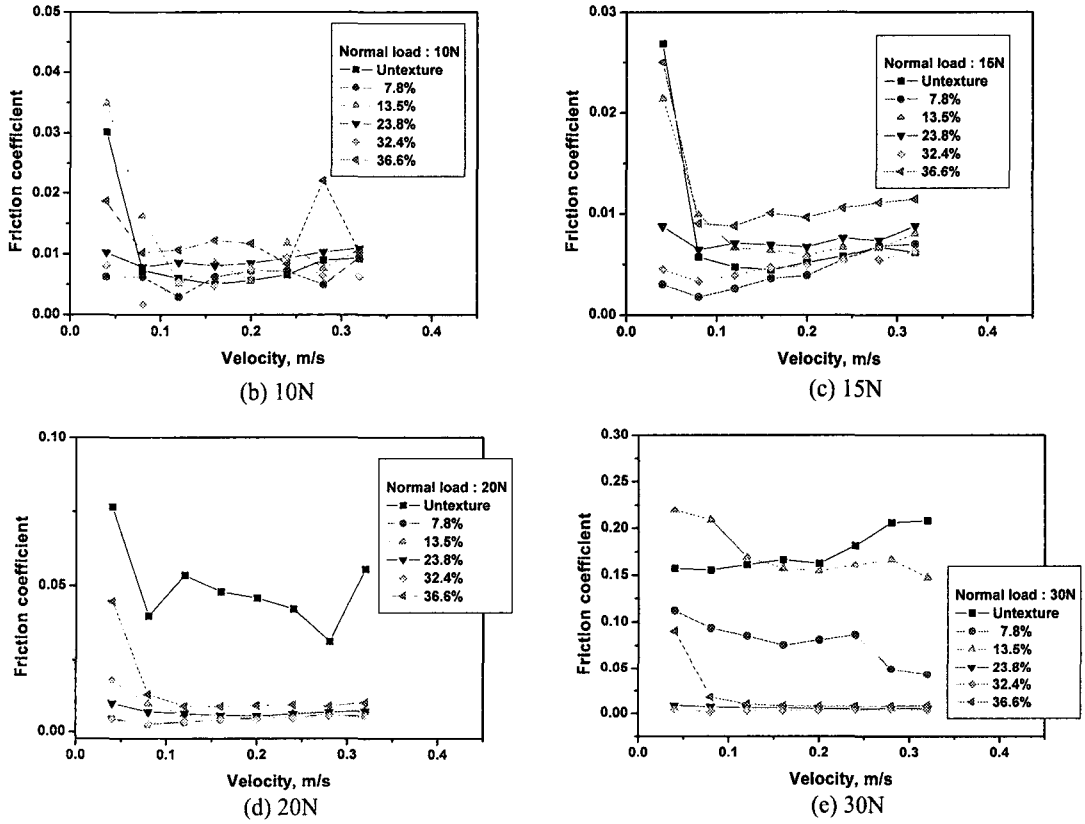


Fig. 4 Friction coefficient as a function of velocity for various density of micro dimple

3.2 마이크로 딤플의 속도의 영향

Fig. 5 는 미끄럼속도별 수직하중 증가에 따른 마이크로 딤플 밀도에 관하여 마찰계수 변화곡선이다. 마찰계수 변화곡선은 모든 하중에서 거의 비슷한 거동을 보여주고 있다. 특히 미끄럼속도 0.04m/s, 0.08m/s, 0.12m/s 에서 마이크로 딤플 밀도 36.6% 시험편의 마찰계수 거동이 수직하중 및 미끄럼속도 증가에 따라 마찰계수 감소효과를 보이고 있다. 수직하중 15N 이하에서는 Untexture 시험편과 마이크로 딤플을 가진 시험편은 거의 비슷한 마찰계수를 나타내었다. 그러나 수직하중 15N 이상에서는 각각의 마이크로 딤플의 특성이 나타났다. 특히 마이크로 딤플 밀도 32.4%와 36.6%를 가지는 시험편이 우수한 마찰계수 감소 효과를 나타내었다. 따라서 마이크로 딤플의 밀도에 따라 속도에 의존은 조금 작았다. 수직하중에 따라 마찰계수는 달리 나타나고 있었다. 또한 마이크로 딤플 밀도에 따라 속도의 영향 보다 하중의 영향을 많이 받고 있었다.

4. 고찰

4.1 마이크로 딤플의 Stribeck curve

본 실험의 결과에서 마이크로 딤플의 밀도가 32.4%와 36.6%를 가지는 시험편이 마찰계수 저감효과를 가지고 있었다. 이러한 결과를 보다 자세히 분석하기 위하여 윤활상태에 따른 메커니즘을 규명하기 위하여 Stribeck curve[8] 를 사용하였다. Stribeck curve 는 마찰계수와 무차원수를 사용해서 윤활상태를 구별하고 있다. 관계식을 표현하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

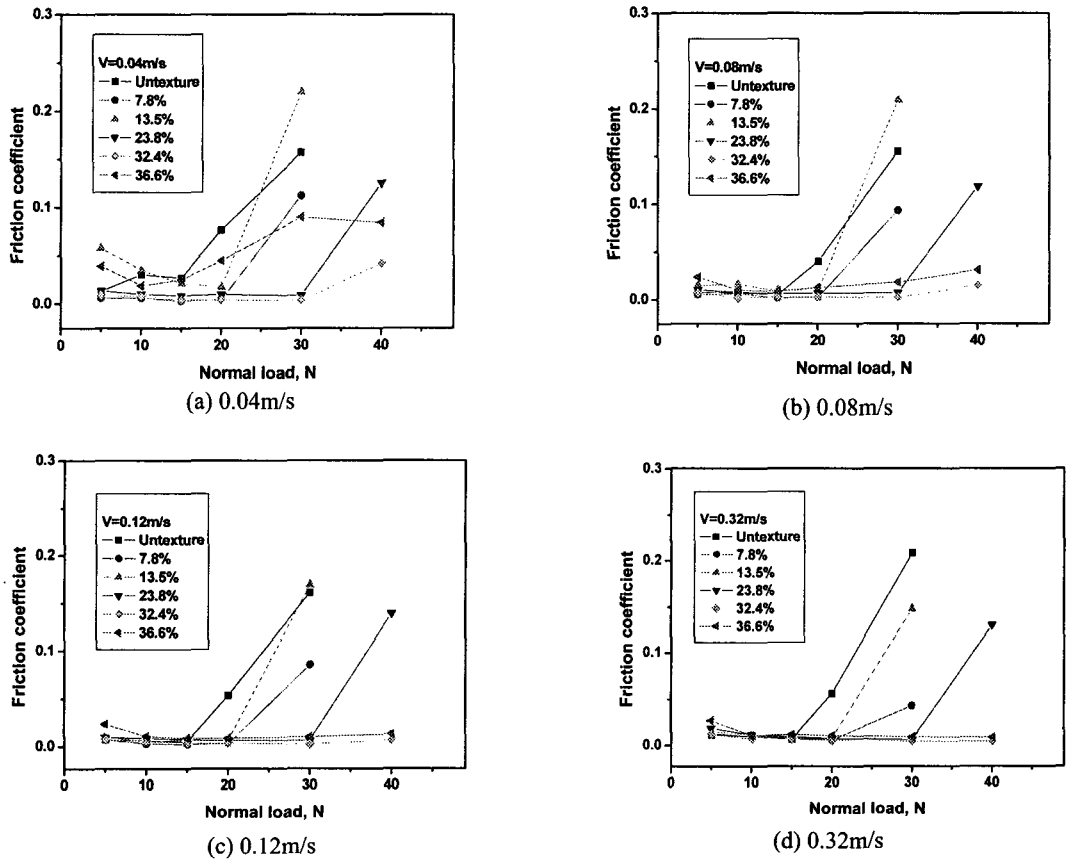


Fig. 5 Friction coefficient as a function of normal load for various density of micro dimple

$$S = \frac{\mu N}{p} \tag{1}$$

여기서 S 는 무차원수, μ는 동점성계수[Pa-s], N 는 분당회전수[rpm], p 는 접촉압력[Pa]이다. 일반적으로 Stribeck curve 는 접촉상태에서 형상과 재료, 미끄럼상태, 윤활막 두께에 의존한다.

본 실험의 데이터를 계산하여 Fig. 6 과 같이 Stribeck curve 를 표현하였다. 그림에서 혼합윤활상태와 유체윤활상태의 천이가 뚜렷하게 나타나고 있다. Untexture 의 마찰계수는 마이크로 딤플보다 먼저 혼합윤활영역으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 앞에서 언급한 실험결과에서는 32.4%,

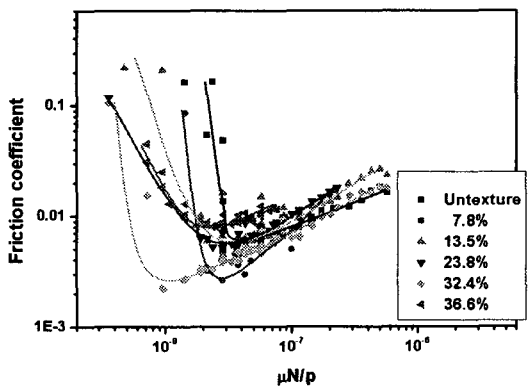


Fig. 6 Stribeck curve for various densities of micro dimple pattern

36.6%의 밀도를 가지는 시험편이 우수하였다. 그러나 Stribeck curve 상에서는 보다 확실하게 윤활상태를 알 수 있다. 가장 우수한 마찰저하 효과를 나타내고 있는 시험편은 32.4%의 밀도를 가지는 시험편으로 나타났다. 따라서 Surface texture 의 마이크로 딤플 밀도는 마찰저감효과에 의존하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 혼합윤활, 유체윤활영역에서의 마이크로 딤플 패턴의 밀도에 따른 마찰변화를 조사하고, Stribeck curve 를 이용하여 마찰거동을 해석하였다.

Surface texturing 된 시험편은 없는 시험편보다 마찰저감효과를 가지고 있었다. 마이크로 딤플의 밀도는 하중범위에 따라 최적의 밀도가 존재하고 있었으며, 수직하중 5N-30N 범위에서는 32.4%의 밀도를 가진 시험편이 우수하게 나타났다.

후기

본 연구는 산업자원부 2004 년 에너지기술 학술진흥사업으로 수행되었습니다. 연구를 위해 지원해 주신 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Nakada, M., "Trends in engine technology and tribology," Tribology International, Vol. 27, No. 1, pp.3-8, 1994.
2. Kato, A., Yasuda, Y., "An analysis of friction reduction techniques for the direct-acting valve train system of a new-generation lightweight 2-Liter V6 Nissan engine," SAE Paper No. 940992, 1994.
3. Ronen, A., Etsion, I. and Kligerman, Y.," Friction-reducing surface textureing in reciprocating automotive components," Tribology Transaction, Vol.44, No.3, pp.359-366, 2001.
4. Hamilton, D.B., Walowit, J.A. and Allen, C.M., "A theory of lubrication by micro-irregularities," J. of Basic Engineering, March, pp.177-185, 1966.
5. Kim, D.H., Kim, J.K. and Hwang, P., "Anisotropic tribological properties of the coating on a magnetic recording disk," Thin Solid Films, Vol.360, pp.187-194, 2000.
6. Etsion, I. and Kligerman, Y. and Ghalperin, "Analytical and Experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces," Tribology Transactions, Vol. 42, No.3, pp.511-516, 1999.
7. 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.
8. Bhushan, B. and Gupta, B.K., Handbook of Tribology, McGraw Hill, 1991.