

마이크로 크기를 가지는 빗살무늬 그루우브 패턴의 빗살각도변화에 대한 실험적 마찰특성

김석삼[#], 채영훈^{*}

Sliding Friction Property of Angle Effect for Crosshatch Micro-grooved Pattern under Lubricated

Seock-Sam Kim[#], Youn-Ghun Chae^{*}

(Received 8 April 2011; received in revised form 22 June 2011; accepted 24 June 2011)

ABSTRACT

Micro-scale surface pattern has an benefit of tribological application under lubricated sliding contact. Therefore, a special pattern, that has to reduce the coulomb friction under contact, is considered to be necessary for improved efficiency of machines. The current study investigated the friction property of angle effect for micro-scale grooved crosshatch pattern on bearing steel surface using pin-on-disk type. The samples fabricated by photolithography process and then these are carry out the electrochemical etching process. We discuss the friction property due to the influence of hatched-angle on contact surface. We could be explained the lubrication mechanism for a Stribeck curve. It was found that the friction coefficient depend on an angle of the crosshatch on contact surface. It was thus verified that micro-scale crosshatch grooved pattern could affect the friction reduction.

Key Words : Friction(마찰), Crosshatch Pattern(빗살무늬), Stribeck Curve(스트라벡곡선), Photolithography(식각), Angle Effect(각도효과)

1. 서 론

최근 자동차산업은 유로환경규제로 인하여 저연비
고효율에 대한 부품설계를 하고 있다. 또한 자동차 엔
진 손실중 약 40%정도는 마찰손실에서 발생된다는 것
은 잘 알려져 있다^[1].

상대운동하는 부품에서 마찰저감을 위하여 점성

이 좋은 윤활유 적용과 표면거칠기를 제어하여 원
활한 윤활막 두께형성에 도움을 주어 마찰저감효
과를 연구하고 있다^[2-4].

표면거칠기를 인위적으로 표면가공 및 설계하여
상대접촉운동조건에 따른 마찰특성에 대한 연구가
진행되고 있다. 특히 자동차 엔진부의 실린더 라이
너/피스톤링 표면에 마이크로 크기의 딥플을 가공
하여 미끄럼마찰특성을 개선시키고 있다^[5].

많은 연구자들은 “마찰제어를 위하여 surface
pattern에는 어떤 설계인자가 있는가?”에 대하여 다
양한 각도로서 접근하고 있다. Etsion^[6]은

* 경북대학교 기계공학부

교신저자 : 경북대학교 기계공학부

E-mail : sskim@knu.ac.kr

mechanical seal에 대하여 마찰성능을 지배하는 주요인자(critical parameter)를 pore크기와 비(ratio)의 관점에서 연구하였다. Wang^[7]은 Micro-pits설계를 위하여 임계하중비(critical load ratio), 깊이/크기의 비, pit의 면적비가 마찰성능에 영향을 주고 있음을 확인하였다. 또한 이러한 Surface pattern의 연구는 패턴의 모양, 즉 딴플, 그루우브 등, 형상에 따른 마찰성능에 미치는 설계인자를 도출하기 위하여 많은 연구가 발표되고 있다^[8-12]. 이러한 연구결과에도 불구하고 아직 surface pattern에 대한 형상메커니즘은 완전히 이해되지 않고 있다. 본 논문은 마이크로 스케일 빗살무늬 각도변화에 따른 미끄럼 마찰특성변화를 연구하고자 한다.

Table 1 Experiment condition for friction test

Parameters	Condition
Contact type	Pin-on-disk
Disk material	Bearing steel
Pin material	Bearing steel
Width of groove for pin[μm]	100
Depth of groove for pin[μm]	4-5
Density of groove pattern area[%]	20
Surface roughness	
- Pin before fabrication[μm]	0.008Ra, 0.016Rmax
- Disk[μm]	0.039Ra, 0.052Rmax
Diameter of pin[mm]	6
Diameter of sliding track[mm]	40
Normal load range[N]	5-40
Pressure range[MPa]	0.6-3.5
Speed range[m/s]	0.04-0.32
Lubricant	Paraffin oil(Saybolt number 125/135)
Temperature	Room temperature

2.2 시험방법 및 조건

그루우브에 대한 마찰특성 평가를 위하여 flat-on-flat 접촉형태인 pin-on-disk 시험을 Fig. 2와 같이 수행하였다. 수직하중은 무게추를 이용하였으며, 미끄럼속도는 모터제어장치를 이용하여 설정된 회전수에 따라 미끄럼 속도를 제어하였다.

본 시험방법으로 수직하중에 따른 설정된 속도를 변화시키면서 마찰력을 컴퓨터로 저장할 수 있도록 하였다. 이때 사용된 무게추는 5, 10, 15, 20, 30, 40 N을 사용하였으며, 낮은 수직하중에서 높은 수직하중으로 시험하였다. 미끄럼속도는 수직하중에 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-in 후 측정 데이터로 사용하였다.

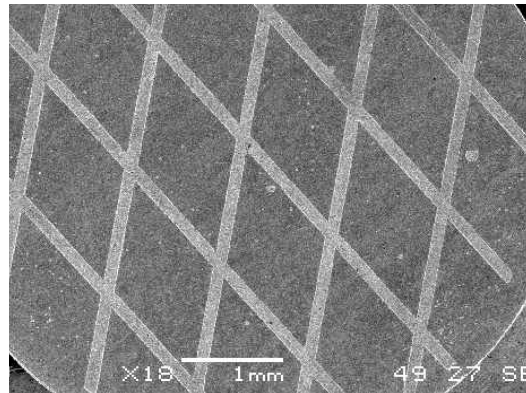


Fig. 1 Photography of SEM for sample

2. 실험

2.1 Microfabrication

Table 1은 본 연구에 사용될 시험편의 크기와 형상을 나타내었으며, 접촉표면에 대한 주요치수를 나타내었다. 핀 시험편에 마이크로 빗살무늬 그루우브를 가공하기 위하여 설계된 패턴을 이용하여 포토리소그래피를 수행하였다. 부식깊이를 제어하기 위하여 화학부식가공을 수행하였다. Fig. 1은 시험편 표면을 SEM(JOEL, JSM-5200)의 사진이다.

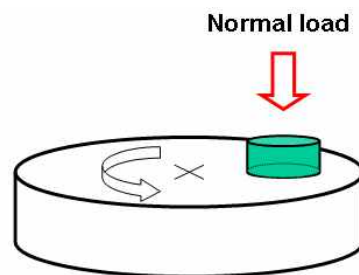


Fig. 2 Schematic of pin-on-disk type

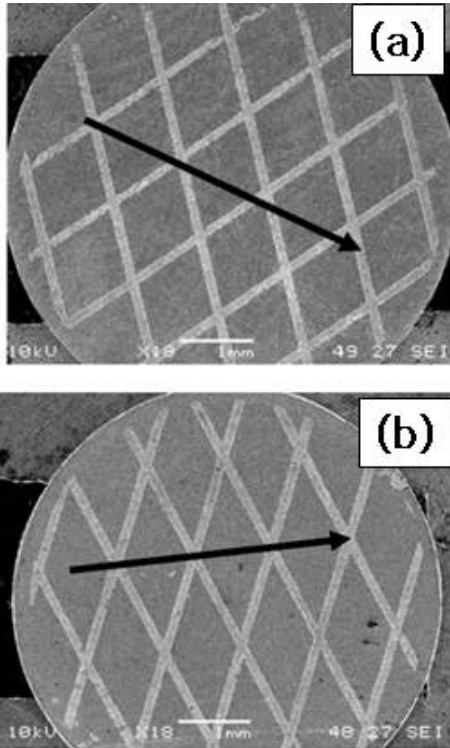
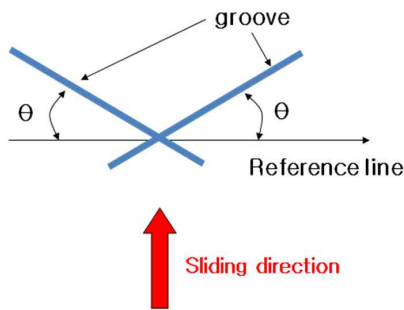


Fig. 3 Sliding direction on surface in friction test (Arrow is sliding direction)



θ : Notation of Angle for graph

Fig. 4 Notation of angle and sliding direction for sample

2.3 시험편

마이크로그루우브의 빗살무늬각도에 따른 미끄럼 마찰특성을 조사하기 위하여 Fig. 3과 같이 화살표 방향으로 미끄럼마찰을 시험하였다. 서로 대칭적인 마이크로그루우브 빗살무늬의 미끄럼특성이 잘 나타날

수 있도록 화살표와 같이 시험하였다. 시험편의 표현 방법을 Fig. 4와 같이 수평기준선과 마이크로그루우브의 사잇각을 기준각도로 정의하였다. 또한 미끄럼 운동방향선을 기준으로 대칭적으로 패턴을 유지하면서 시험하였다. 시험편의 기호는 기준각도 q 가 30도이면 G30으로 표현하였다. 본 시험편은 G15, G20, G25, G30, G35, G40, G45로 7종을 준비하였다.

3. 실험결과

3.1 미끄럼 속도와 수직하중간의 마찰계수 변화

마이크로그루우브의 빗살무늬 각도별 미끄럼속도 변화에 따른 마찰계수의 변화곡선은 각도별의 마찰특성이 추이를 쉽게 알 수 있으며 미끄럼속도증가에 따라 윤활조건이 변화되는 것을 추정할 수 있다. Fig. 5는 접촉압력 1MPa일 때 각 시험편의 미끄럼속도에 따른 마찰계수 특성을 보여주고 있다. 특히 G15와 G20이 상대적으로 미끄럼속도 0.15m/s이상에서 0.02이하로 마찰계수 저감효과를 가지고 있는 것이 나타났다.

빗살무늬 각도별, 접촉압력변화에 따른 마찰계수의 변화곡선은 접촉압력의 증가에 따른 마이크로 그루우브의 윤활막형성의 한계를 알 수 있다. Fig. 6은 미끄럼속도가 0.22m/sec일 때 각 시험편의 접촉압력에 따른 마찰계수 특성을 보여주고 있다. 특히 G15와 G20이 상대적으로 0.02이하로 마찰계수 저감효과를 가지고 있는 것이 뚜렷하게 나타났다.

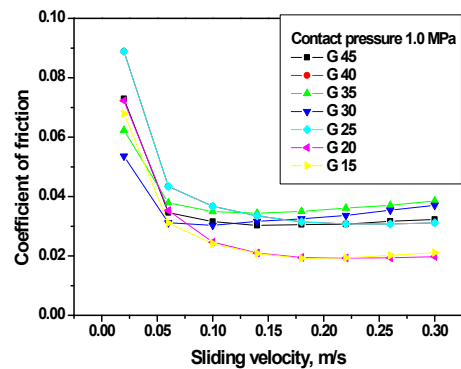


Fig. 5 Friction coefficient as a function of sliding velocity under 1.0MPa of contact pressure

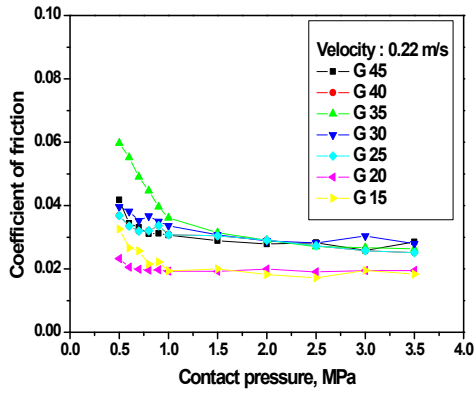


Fig. 6 Friction coefficient as a function of contact pressure under 0.22m/s of sliding velocity

3.2 기준각도 변화에 따른 마찰계수

마이크로그루우브의 빗살무늬 각도변화에 대한 마찰특성을 분석하기 위하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7 (a)는 미끄럼속도 0.18m/s일 때 마이크로그루우브의 기준각도증가에 따른 마찰계수변화를 접촉압력별로 나타내었다. 접촉압력증가에 따라 마찰계수변화의 경향은 유사하게 거동하였다. 그러나 마찰계수는 시험편의 기준각도 증가됨에 따라 마찰계수는 증가되는 경향을 보여주고 있다.

특히 기준각도 15도, 20도, 30도까지 완만하게 마찰계수는 증가되었으나, 30도 이후에는 유지하는 경향으로 나타났다. 그러나 접촉압력 3.5MPa에서는 다소 마찰계수는 30도 이후에는 감소하는 경향

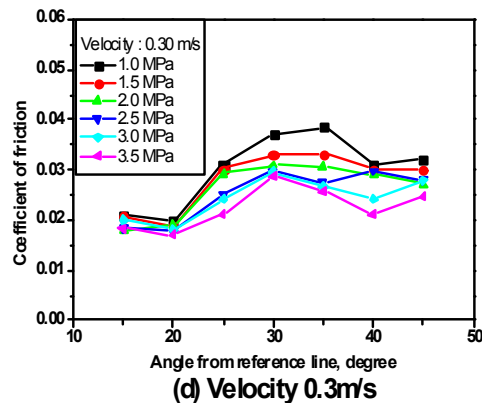
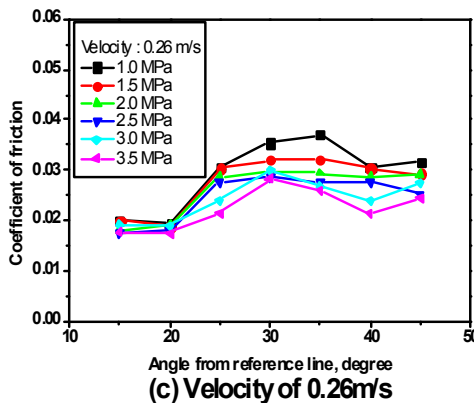
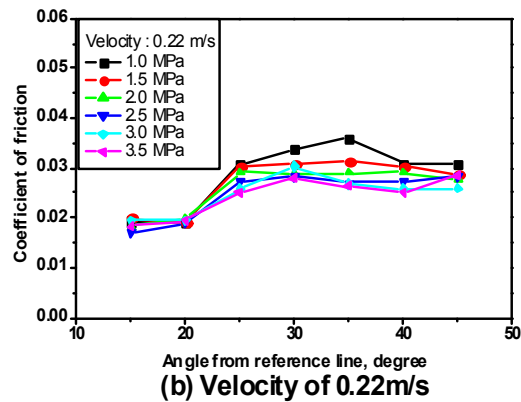
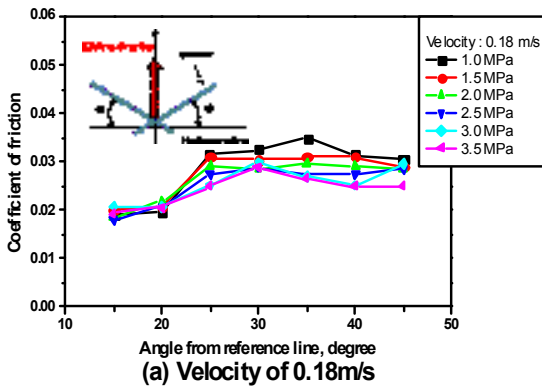


Fig. 7 Coefficient of friction as a function of angle from reference line

이 나타났다. 미끄럼 속도가 증가됨에 따라 마찰계수는 접촉압력의 크기에 변화가 두드러지게 나타남이 Fig. 7(d)에서 알 수 있다.

3.3 스트라벡곡선(Stribeck curve)에서의 유효조건

본 실험에서 수행된 마찰시험이 유효조건에서 어느 영역인지를 알기 위해서는 스트라벡곡선⁹⁾을 아래와 같이 식 (1)으로 계산할 수 있다.

$$Lubrication\ parameter = \frac{\mu VD}{P} \quad (1)$$

여기서 lubrication parameter는 무차원수, μ 는 동점성계수[Pa-s], V는 미끄럼속도[m/s], D는 접촉지름[m], P는 수직하중[N]이다.

스트라벡 곡선은 미끄럼 상대접촉운동하에서 접촉면간의 유효상태인 유체유효, 혼합유효 및 경계유효인지 구분되어진다. Fig. 8에서 10^{-6} 의 lubrication parameter를 기준으로 0.00에서 10^{-6} 까지 혼합유효영역과 10^{-6} 이후의 유체유효영역을 볼 수 있다. 특히, G15 및 G20시편이 혼합유효영역에 마찰저감효과를 가지고 있음이 잘 나타나고 있다.

4. 고찰

앞의 3장에서 마이크로그루우브의 패턴에 대한 실험결과를 보았다. 결과적으로 G15와 G20에 대한 시험편이 본 시험조건에서 가장 낮은 마찰계수를 가지고 있었다. 마이크로그루우브의 사잇각은 마찰 특성개선에 고려해야 할 설계변수임을 확인할 수 있었다.

이러한 G15와 G20에 대한 결과를 확인하기 위하여 보다 세분된 기준각도를 가진 시험편을 준비하였다. 즉, G17.5, G22.5를 가지고 다시 마찰시험을 하여 기준각도사이의 마찰특성과 재현성 시험에 대한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 G22.5의 마찰계수가 낮게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 스트라벡곡선을 이용하여 G17.5

와 G22.5를 재플로팅하여 비교한 것이 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 혼합유효와 유체유효의 경계에서 G22.5의 시험편이 우수한 결과를 도출하였다.

마이크로그루우브의 빗살무늬에 대한 각도에 대한 연구는 이제 시작단계이면서 아직까지 마이크로그루우브의 기하적인 변수인 즉, 크기, 깊이, 밀도에 대한 미끄럼마찰의 메커니즘 연구가 전세계적으로 진행하고 있다.

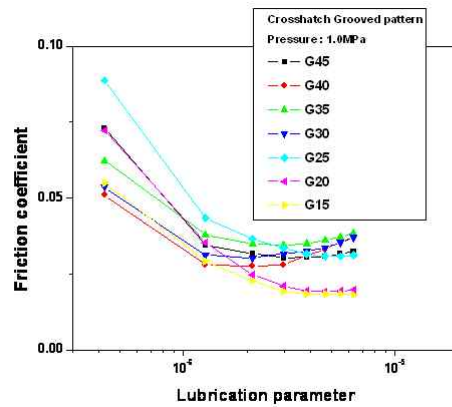


Fig. 8 Stribeck curve of micro-grooved crosshatch pattern samples

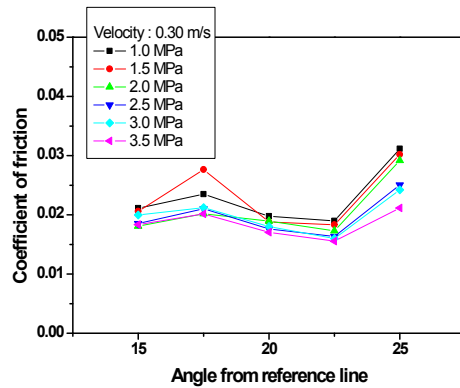


Fig. 9 Coefficient of friction as a function of angle from reference line for additional samples

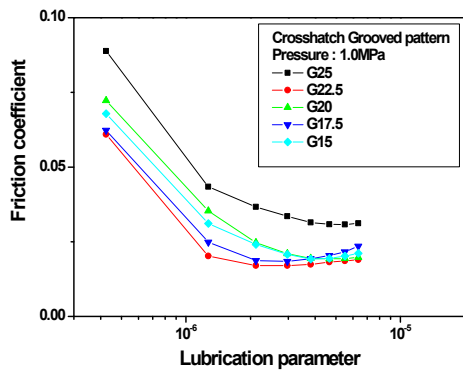


Fig. 10 Stribeck curve of micro-grooved crosshatch pattern for additional samples

5. 결 론

본 논문은 마이크로 스케일 빗살무늬 그루우브 패턴의 기준각도변화에 따른 미끄럼 마찰특성변화를 연구하였다. 실험결과로부터 기준각도에 따라 마찰특성이 변화되는 것을 확인하였으며, 기준각도는 마찰제어를 위한 설계변수가 됨을 알았다. 또한 G15, G17.5, G20, G22.5 및 G25 중 G22.5의 시험편이, 즉 기준각도가 22.5°일 때가 최적 마찰특성을 가지는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문 또는 저서는 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-521-D00053)

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0009826)

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. Etsion, I. and Halperin, G., "A laser surface textured hydrostatic mechanical seal", Tribology transaction, Vol. 45, pp. 430-434, 2002.
7. 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.
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. Tae-Wan Kim, Sang-Don Lee, Yong-Joo Cho, "The effect of surface characterization parameters on Sliding Friction", journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol 3 No 2, pp 18-24, 2004.
11. E. Gualtieri, A. Borghi, L. Calabri, N. Pugno, S. Valeri, "Increasing nanohardness and reducing friction if nitride steel by laser surface texturing Original Research Article", Tribology International, Vol. 42, Issue 5, pp. 699-705, 2009.
12. A.de Keaker, R.A.J. van Ostayen, D.J. Rixen., "Development of a texture averaged Reynolds equation Original Research Article", Tribology International, Vol. 43, Issue 11, pp. 2100-2109, 2010.