

마이크로 Crosshatch 그루우브 표면패턴의 각도에 따른 미끄럼 마찰특성

채영훈[#]

Friction Property for Angles of Micro-crosshatch Grooved Surface Pattern under Lubricated Sliding Contact

Young Hun Chae [#]

ABSTRACT

Some surface pattern of tribological application is an attractive technology of engineered surface. Therefore, friction reduction is considered to be necessary for improved efficiency of machine. This study investigated the effect of friction property for angles of micro-crosshatch groove surface pattern on bearing steel using pin-on-disk test. We obtain sample which can be fabricated by photolithography process. We discuss the friction property depend on an angle of crosshatch groove surface pattern. We can verify the lubrication mechanism as Stribeck curve, which has a relationship between the friction coefficient and a dimensionless parameter under the lubrication condition. It was found that the friction coefficient was related to angle of crosshatch groove pattern on contact surface.

Key Words : Grooved surface pattern (홈표면패턴), Crosshatch (빗살), Friction (마찰), Stribeck curve (스트라벡 곡선), Tribology (트라이볼로지)

1. 서론

최근 나노기술과 정밀가공생산기술의 발달로 Nano/Micro -surface patterning 가공기술은 눈부신 발전을 하였다. 수 nm 에서 수십 nm 에 대한 초정밀 가공이 발전되고 있다. 이러한 가공기술은 전통기계부품에 접목하여 기계부품의 성능향상관점과 고부가가치화 부여 등의 발전으로 연결시키는 연구는 전세계적인 key issues 이다.¹

많은 연구자들은 마찰제어기술과 “마찰저감을 위하여 surface pattern 를 어떻게 설계할 것인가?”에

대하여 다양한 각도로써 접근하고 있다. Etsion²⁻⁵ 은 LST(Laser Surface Texturing)으로 mechanical seal 에 대하여 마찰성능을 지배하는 주요인자(critical parameter)를 pore 크기와 비(ratio)의 관점에서 연구하였다. Wang^{3,7} 은 micro pits-surface pattern 설계를 위하여 임계하중비(critical load ratio), 깊이/크기의 비, pit 의 면적비가 마찰성능에 영향을 주고 있음을 확인하였다. 또한 Ronen⁸ surface texture 에 대한 최적의 깊이/크기 비를 가지고 있음을 보고하였다. 이러한 surface pattern 의 연구는 마찰성능에 미치는 설계인자를 도출하기 위하여 연구 진행되고 있

☞ 접수일: 2006년 6월 5일; 게재승인일: 2006년 11월 14일

경북대학교 트라이볼로지연구소

E-mail yhunchae@knu.ac.kr Tel. (053) 950-7341

다.⁹

마이크로 그루우브에 대한 연구는 산업현장에서 호닝공정으로 얻을 수 있다. 이러한 호닝패턴에 대한 형상과 크기 및 각도에 대한 마찰특성연구는 아직 정립되지 않았다. 특히, 호닝패턴에 의한 crosshatch 그루우브 패턴의 사잇각이 매우 중요한 기술의 파라메타로 연구되고 있다.¹⁰ 따라서 이러한 crosshatch 그루우브 패턴에 대한 정량적인 실험을 위하여 Photolithography 공정을 이용하여 시험편을 제작하였다.

본 논문은 crosshatch 그루우브에 대한 마찰특성을 연구하기 위하여 미끄럼사잇각을 90 도에서 150 도까지 각각 10 도씩 증가되도록 하여 핀-온-디스크 타입으로 접촉압력 0.6MPa 에서 3.5MPa 까지 실험하여 그 특성을 조사하였다.

2. 장 실험

2.1 시편제작 및 Photolithography

Table1 은 본 연구에서 사용하는 시험편의 크기와 형상에 하여 나타내었다. 밀도의 기준은 단위면적기준으로 그루우브 패턴의 면적으로 나눈 값이다. 또한 디스크와 핀의 표면거칠기는 시험전에 측정된 값으로 그루우브를 제외한 접촉되는 표면에 대한 값이다.

Photolithography 공정과 Electrochemical etching 공정을 거쳐 시험편을 Fig. 1 과 같이 얻을 수 있었다. 패턴디자인과 주문제작한 마스크필름을 사용하였으며, 이때 그루브의 밀도는 10%인 필름을 겹쳐서 사용하였다.

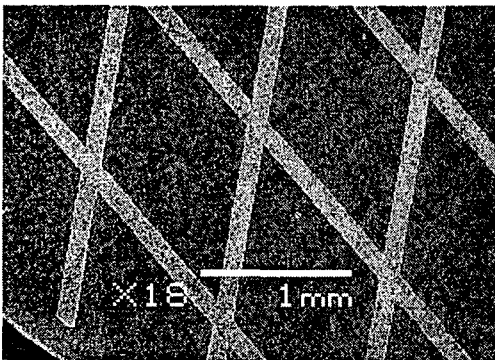


Fig.1 SEM of micro-crosshatch grooved pattern

Table 1 Condition of test parameters

Parameter	Condition
Pin material	Bearing steel
Disk material	Bearing steel
Size of pin[mm]	6 x 1(thickness)
Size of disk[mm]	40
Size of groove[μm]	100
Depth of groove[μm]	4-5
Density of pattern[%]	20
Roughness of specimens	0.001μmRa
Temperature	Room Temperature

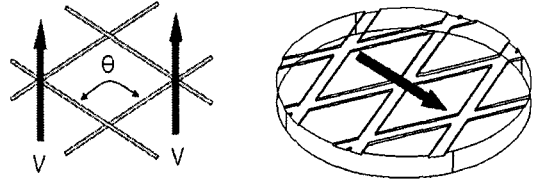


Fig. 2 Notation of angle (θ) and sliding direction(V)

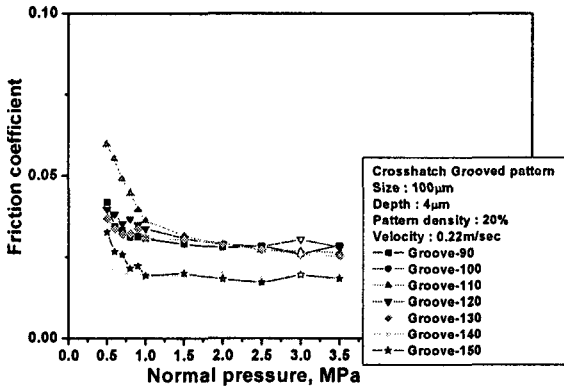
Crosshatch 각도를 90 도, 100 도, 110 도, 120 도, 130 도, 140 도 및 150 도로 제작하였다. 시험편의 기호를 Fig. 2 에서 나타내었으며, 예를 들어 Groove-100 으로 표시하면, θ 는 그루우브의 사잇각인 100 도이며, 미끄럼방향은 그림에서 나타나는 V 방향을 칭한다.

2.2 시험방법 및 조건

마찰실험을 통하여 마찰특성을 조사하기 위하여 파라핀윤활상태에서 pin-on-disk 실험하였다. 이때 사용한 파라핀윤활유는 d^{20}_4 0.86; 100-145 MPa-s(20 °C)이며, 각 압력증가에 새로운 윤활유로 교체하였다.

시험압력은 0.5 MPa, 0.6 MPa, 0.7 MPa, 0.8 MPa, 0.9 MPa, 1.0 MPa, 1.5 MPa, 2.0 MPa, 2.5 MPa, 3.0 MPa 및 3.5 MPa 로 무게추(deadweight)를 사용하였다. 미끄럼속도는 0.02 m/s 에서 0.30 m/s 까지 시험하였으며, 각 증가는 0.04 m/s 씩 증가하여 시험하였다. 시험시간은 30 초씩 시험하였으며, 새로운 시험편 교체마다 15 분씩 run-in 을 주었다. 또한 데이터의 재현성을 확인하기 위하여 각 시험편 마다 3 회 시험하여 데이터의 재현성을 확인하였으나 특이한

문제점을 확인할 수 없었다.



(a)

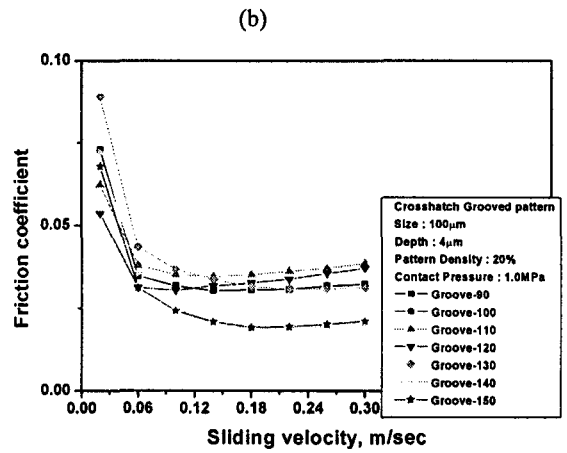


Fig. 3 Friction coefficient as a function of normal load(a) and sliding velocity(b) for crosshatch grooved pattern

3. 실험결과

3.1 마찰실험 결과

압력증가에 따른 마찰계수를 각각의 그루우브 시험편에 대한 마찰특성을 Fig. 3(a)에서 나타내었다. 모든시험편은 압력 1 MPa 까지 마찰계수가 감소하고 있으며, 1 MPa 이상에서는 마찰계수는 다소 일정하게 나타났다. 일정한 압력에서는 마찰계수는 일정하게 나타났다. 여기서 시험편 Groove-140 과 150 은 다른 시험편들보다 낮은 마찰계수가 나타났다. 특정한 그루우브각도에서 마찰특성이 향상됨을 알 수 있다.

미끄럼속도증가에 따른 마찰계수를 각각의 그루우브 시험편에 대한 마찰특성을 Fig. 3(b)에서 나타내었다. 미끄럼속도 0.6 m/s 에서 0.12 m/s 까지 마찰계수는 감소하였으며, 미끄럼속도 0.3 m/s 까지 증가될수록 마찰계수는 증가됨을 알 수 있다. 미끄럼속도에 증가됨에 따라 특정 속도 이상일 때 마찰계수가 증가 됨을 알 수 있었다. 여기서도 Groove-140 과 150 일 때 마찰계수가 낮게 나타났다.

3.2 Stribeck curve

본 실험의 결과에서 crosshatch 그루우브 시험편은 특정한 각도에서 마찰특성이 향상되는 것을 실험결과에서 알 수 있었다. 이러한 결과를 보다 자세히 분석하기 위하여 윤활상태에 따른 메커니즘

을 규명하기 위하여 Stribeck curve⁸를 적용하였다. Stribeck curve 는 마찰계수와 무차원수를 사용해서 윤활상태를 구별하고 있다. 관계식을 표현하면 다음과 같다.

$$S = \frac{\mu VD}{P} \tag{1}$$

여기서 S 는 무차원수, μ 는 동점성계수[Pa·s], V 는 미끄럼속도[m/s], D 는 접촉지름[m], P 는 수직하중[N]이다.

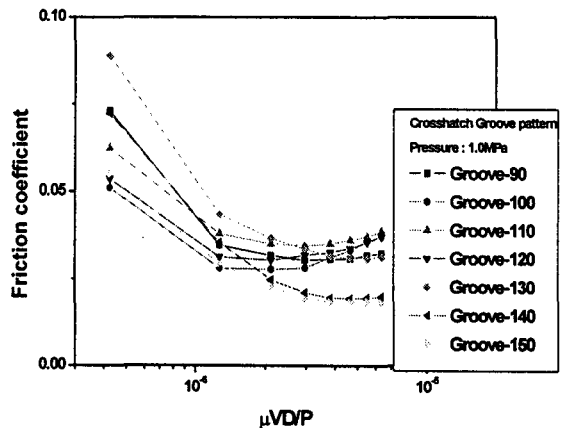


Fig. 4 Stribeck curve of crosshatch groove pattern

본 실험 데이터를 Stribeck curve 로 Fig. 4 에서 나타내었다. 본 실험의 윤활영역은 혼합윤활과 유체윤활상태에서 실험한 것을 알 수 있었다. 하중이 증가되면서 혼합윤활로 변화되고, 속도가 증가될수록 유체윤활상태로 천이하는 것을 알 수 있다. 여기에서도 Groove-150 과 140 에서 낮은 마찰계수를

가지고 있었으며, 특히 혼합유체윤활영역이 확대 되는 것을 알 수 있다.

3.3 Friction map

본 시험에서 얻어진 시험조건별로 마찰계수의 영역을 조사하기 위하여 마찰지도(Friction Map)를

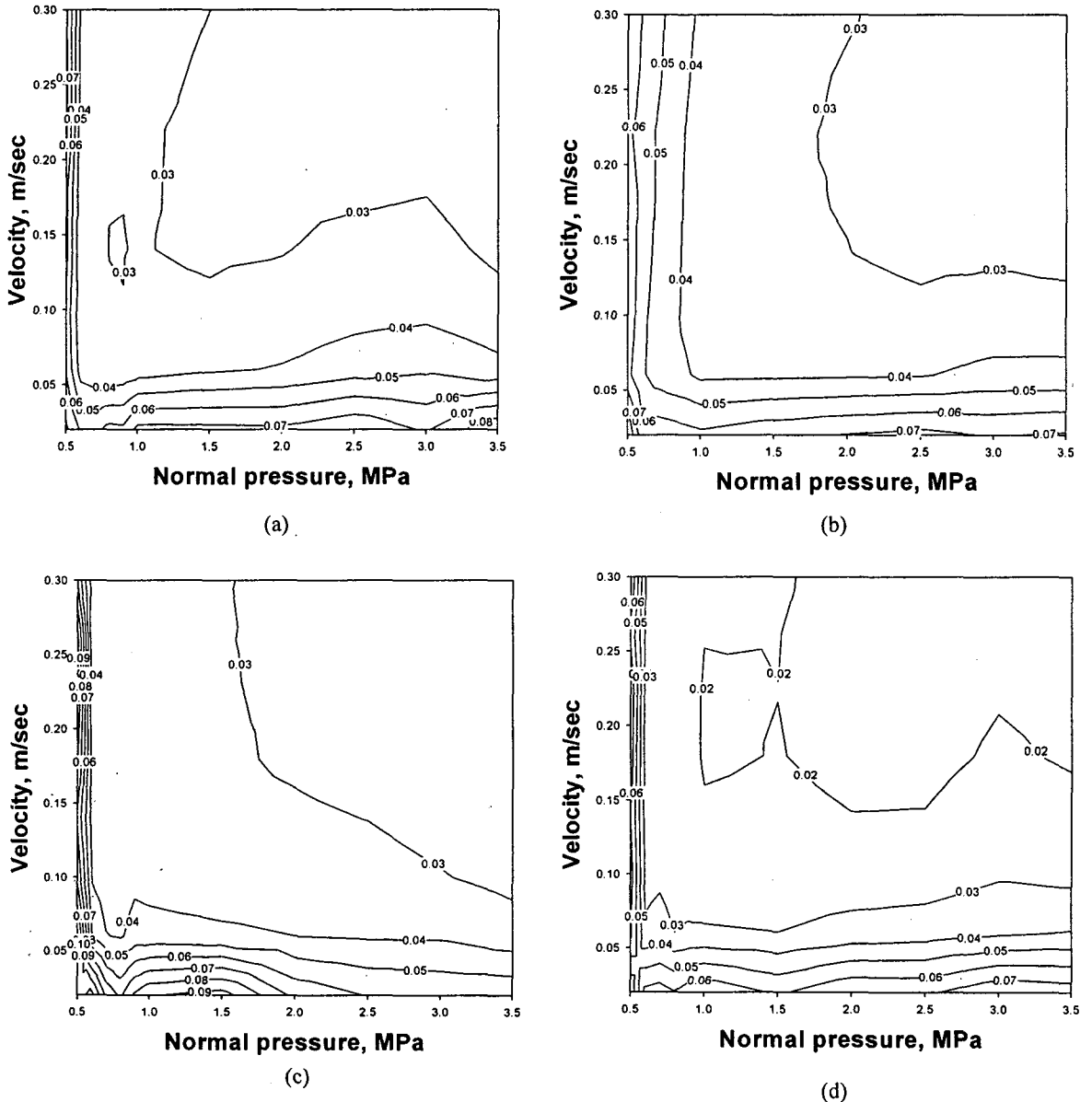


Fig. 5 Friction map of crosshatch groove pattern for degree of 90(a), 110(b), 130(c) and 150(d)

작성하였다. 마찰지도는 시험영역에서 동일 마찰계수값을 나타내어 마찰특성을 쉽게 알 수 있다. 저속고압일 때 혼합윤활과 경계윤활로 구분되며 이때 마찰계수는 증가된다. 또한 이러한 영역에서 Groove pattern 의 마찰계수 값을 평가할 수 있다. 시험편 Groove-150 을 제외한 시험편은 마찰계수 0.03 영역이 고압중속에서 나타나고 있으나, Groove-150 에서는 마찰계수 0.02 로 낮은 마찰계수가 분포되고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 마찰지도에서 시험에 대한 분포를 쉽게 평가할 수 있다.

4. 고찰

본 실험에서 얻어진 결과는 Groove-140 과 150 의 시험편이 가장 우수한 결과가 나타났다. 이들보다 더 좋은 결과를 확인하기 위하여 Groove-135 와 145 를 다시 제작하여 실험하였다.

Fig. 6 은 시험편 Groove-130, 135, 140, 145 및 150 으로 다시 Stribeck curve 로 마찰특성을 나타내었다. 여기서 흥미로운 결과를 얻을 수 있었다. Groove-135 의 시험편이 가장 우수한 결과를 나타냈다. Crosshatch groove pattern 이 각도에 따라 마찰특성이 다르게 나타나는 현상은 Hydrodynamic 압력발생 메커니즘과 관계되는 것으로 판단된다.

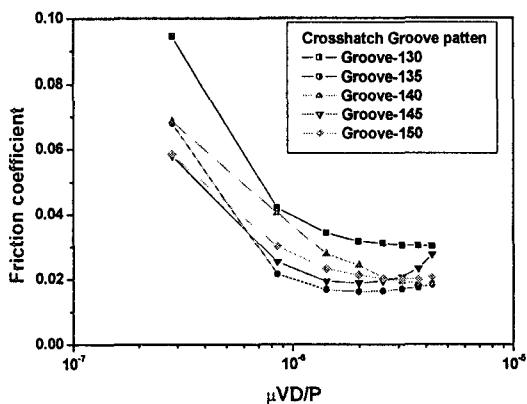


Fig. 6 Stribeck curve of Groove-130 to 150

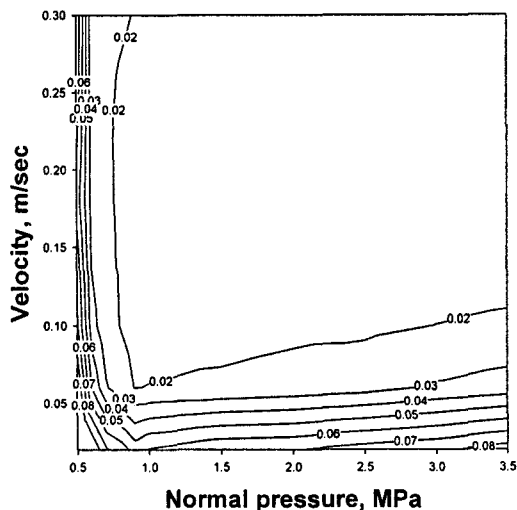


Fig. 7 Friction map of Groove-135

Fig. 7 은 Groove-135 에 대한 마찰지도로 낮은 마찰계수와 저속저압뿐만 아니라 고압저속일때도 마찰계수의 값은 다른 시험편보다 낮게 나타났다.

Crosshatch groove pattern 은 사잇각에 따라 혼합윤활영역을 유체윤활영역으로 변화시키는 것을 실험결과로 알 수 있었다. 그러나 이러한 원인과 메커니즘에 대한 연구는 pattern 의 밀도, groove 의 크기 및 깊이에 따른 마찰특성을 파악되어야 한다.

5. 결론

마이크로 crosshatch 그루우브 표면패턴은 사잇각도에 따라 마찰특성이 다르게 나타났으며, 본 실험조건하에서는 혼합윤활과 유체윤활영역으로 Stribeck curve 에서 나타났으며, Groove-135 의 시험편이 Stribeck curve 과 마찰지도에서 가장 마찰특성이 우수하게 나타났다.

후 기

본 연구는 경북대학교 기계공학부 MSYNE Lab 의 김규만교수님과 안창용 석사과정생에게 시험편 제작에 도움을 주셔서 진심으로 감사합니다.

This work was supported by Korea Research Foundation Grant (KRF-2002-050-D00002).

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. Etsion, I. and Burstein, L., "A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure," *Tribology Transactions*, Vol. 39, No. 3, pp. 677-683, 1996.
5. Etsion, I. and Halperin, G., "A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal," *Tribology transaction*, Vol. 45, No.3, pp. 430-434, 2002.
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. 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. Ronen, A., Etsion, I. and Kligerman, Y., "Friction-Reducing Surface-texturing in Reciprocating Automotive Components," *Tribology Transaction*, Vol. 44, No. 3, pp. 359-366, 2001.
9. Chae, Y. H. and Kim, S. S., "Friction Characteristics of Micro-scale Dimple Pattern under Mixed and Hydrodynamic Lubrication Condition," *J. of the KSPE*, Vol. 22, No. 2, pp. 188-193, 2005.
10. Chae, Y. H. and Hsu, S. M. "Effect of Micro-scale Groove Surface Pattern on Friction Reduction under Sliding Contact," *Extended abstracts of iCAT2004*, B-81, 2004.