

Fundamental study on the effect of friction reduction based micro-scale surface texturing

채영훈¹(경북대학교 트라이볼로지연구소), 김석삼²(경북대학교 기계공학부)

Micro-scale surface texturing 을 기반으로 한 저마찰효과에 대한 기초연구

¹Younghun Chae* (Tribology Research Institute, Kyungpook National Univ.) *yhunchae@knu.ac.kr*,
²SeockSam Kim (Mech. Eng. Dept., Kyunpook National Univ.) *sskim@knu.ac.kr*.

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 using photolithography 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.

Keywords : friction(마찰), surface texture(표면요철), reducing friction(마찰 감소), micro dimple(마이크로 덤플), photolithography(포토리소그래피), density effect(밀도 효과)

1. 서론

자동차엔진의 손실 중 마찰로 인한 손실은 40%인 것으로 잘 알려져 있다.⁽¹⁾

마찰감소는 연료손실을 줄이기 위하여 필수 불가결하다. 이러한 표면의 마찰손실을 줄이기 위하여 랩핑 또는 슈퍼피니싱으로 접촉면을 가공하는 방법을 사용하고 있다.⁽²⁾

최근 Surface texturing 은 또 하나의 마찰을 감소시킬수 있는 방법으로 접근하고 있다.⁽³⁾ Surface texturing 은 접촉표면에 덤플(dimple) 또는 다양한 모양을 기계 또는 화학적인 방법으로 가공하여 기능과 성능을

향상시키는 기술이다. 이 기술은 공학표면(engineered surface)으로 1940 년도 부터 연구 되고 있다.⁽⁴⁾ 최근 반도체공정 및 나노공정이 발달함에 따라 기능성 있는 패턴(pattern)을 접촉표면에 가공하여 마찰특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁵⁾

실리콘 웨이퍼위에 나노패턴을 만들어 미끄럼 접촉운동시 stiction 을 감소시키는데 사용하고 있다.⁽⁶⁾ SiC 세라믹에 레이저를 이용하여 마이크로 덤플을 패터닝해서 미끄럼접촉시 마찰계수저감과 seizure 를 감소시키는 기술로 발표되고 있다.⁽⁷⁾ Surface

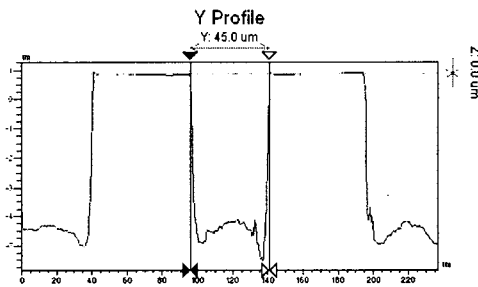
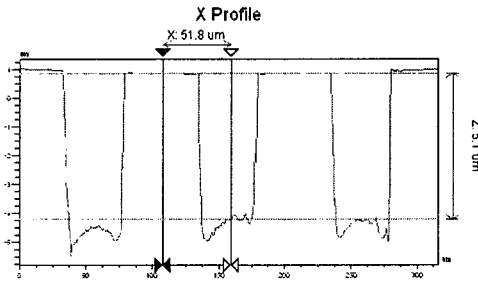
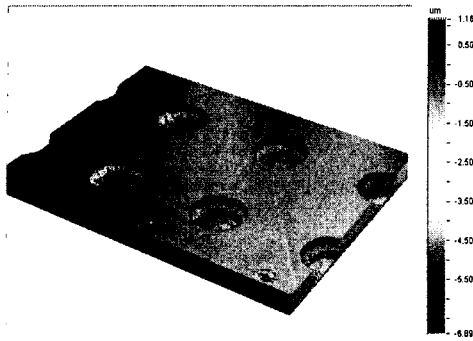


Fig. 1 The surface topography and profile for 50 μm dimple

texture 의 기구는 wear particle trapping, lubricant reservoir, hydrodynamic 등으로 나눌 수 있다. 그러나 각각의 이론은 타당성을 가지고 있으나 이러한 기구는 패턴의 밀도, 깊이, 크기에 의존하고 있다.⁽⁸⁾ 따라서 아직 Surface texturing 에 대한 완전한 이해가 없으며, 많은 실험적 데이터가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구는 포토리소그래피 (photolithography)를 이용하여 마이크로 덤플패턴 밀도에 따른 마찰특성을 조사하고, Stribeck curve 를 이용하여 가장 우수한 크기와 밀도를 구하고 또한 마찰지도 (Friction map)을 이용해서 밀도에 따른 마찰계수변화와 유용성을 고찰하고자 한다.

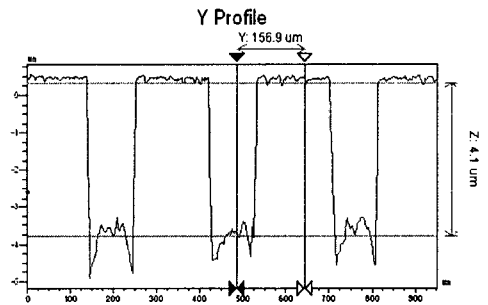
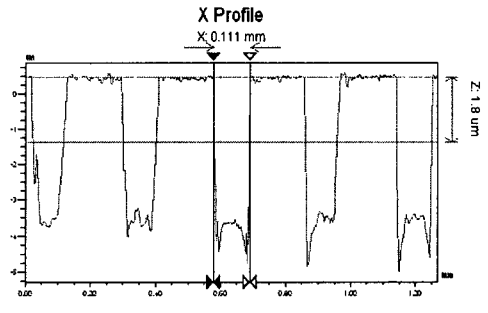
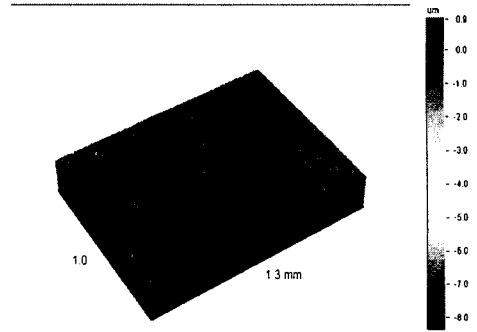


Fig. 2 The surface topography and profile for 110 μm dimple

2. 실험

2.1 시험편

본 실험에 사용된 핀 시험편은 베어링강으로 지름 5 mm, 두께 3 mm 의 크기로 원통모양의 형상을 가지고 있다. 핀의 접촉 표면은 초정밀 고평탄화 평면가공으로 상대 표면과 접촉이 잘 될 수 있도록 준비하였다. 표면의 덤플을 만들기 위하여 포토리소그래피공정을 거쳐 습식에칭으로 준비하였다. 이때 준비된 필름 포토마스크의 덤플 지름

Table 1 Experimental condition for friction test

Parameters	Condition
Contact type	Pin-on-Disk
Disk material	Bearing steel
Diameter of disk [mm]	60
Surface roughness of disk[μm]	0.039Ra, 0.052Rq
Pin material	Bearing steel
Diameter of pin[mm]	5
Surface roughness of pin[μm]	0.008Ra, 0.016Rq
Size of dimple for pin[μm]	50 and 110
Density of dimple for pin[%]	7.8-36.6
Depth of dimple for pin[μm]	4 - 6
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

은 40 μm 와 100 μm 이며, 이들의 배치는 사각형 정렬로 설계하였다. 또한 습식에칭 방법은 NaCl 전해액을 이용하여 습식에칭 후 광학 측정된 결과 약 50 μm 과 110 μm 의 지름을 가졌다. 이때 깊이는 약 4-6 μm 로 준비하였다. 시험편으로 표면형상과 크기를 보여주고 있다. 110 μm 크기의 마이크로 뎀플의 시험편은 Fig. 2 에 나타내었다. 또한 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 패턴의 정렬과 마이크로 뎀플의 크기를 Fig. 3 에서 볼 수 있다. 마이크로 뎀플의 밀도는 단위 면적당 뎀플이 차지하는 면적을 백분율로 표현하였다

디스크의 재료는 베어링강으로 상대재료와 동일하게 준비 제작하였다. 지름 60 mm 와

두께 5 mm 로 가공하였다. 디스크의 표면조도는 폴리싱후 0.039 μm Ra 를 가지고 있다. 시험편에 관한 조건은 Table 1 에서 보는 것과 같다

2.2 시험방법

마찰특성을 평가하기 위하여 핀-온-디스크(pin-on-disk)실험을 Fig. 4 에 나타내었으며, 상온, 상압 윤회상태에서 마찰 시험을 수행하였다. 시험조건은 Table 1 에 나타내었다. 이때 마찰시험을 위하여 시험기는 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.

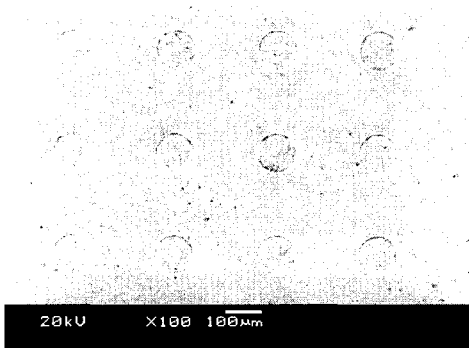


Fig. 3 SEM of pattern for micro dimple

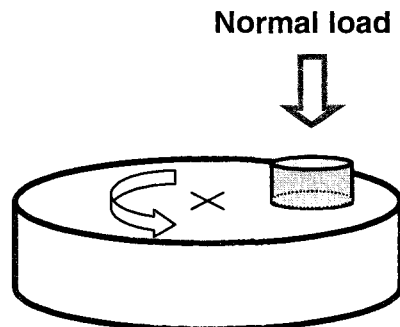
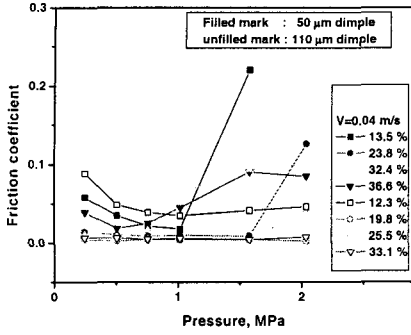
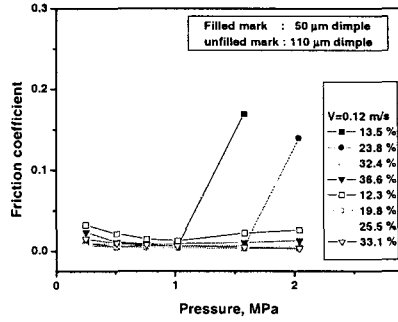


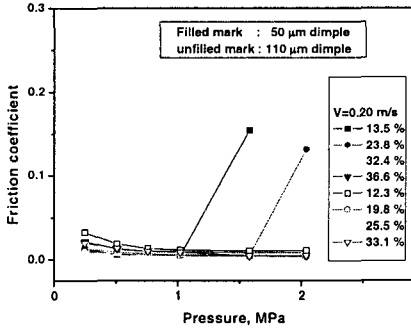
Fig. 4 Schematic illustration for pin on disk



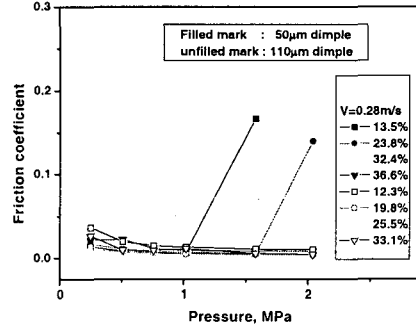
(a) 0.04 m/s



(b) 0.12 m/s



(c) 0.20 m/s



(d) 0.28 m/s

Fig. 5 Friction coefficient as a function of pressure on 50 μm and 110 μm of micro dimple

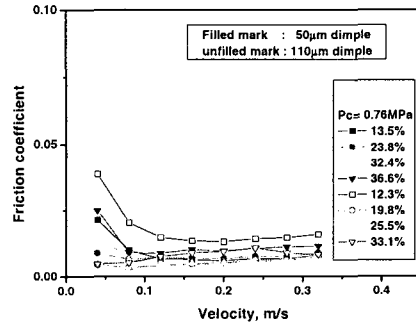
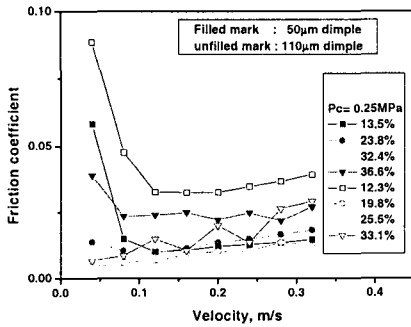
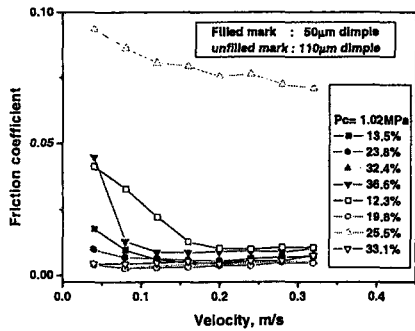
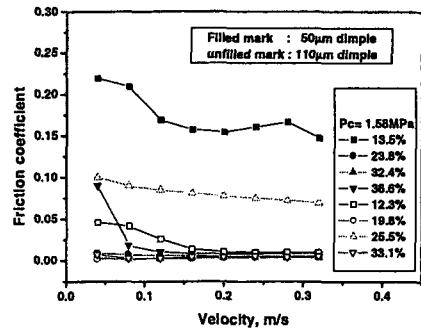


Fig. 6 Friction coefficient as a function of velocity on 50 μm and 110 μm of micro dimple (to be continuous)



(c) 1.02 MPa



(d) 1.58 MPa

Fig. 6 Continued

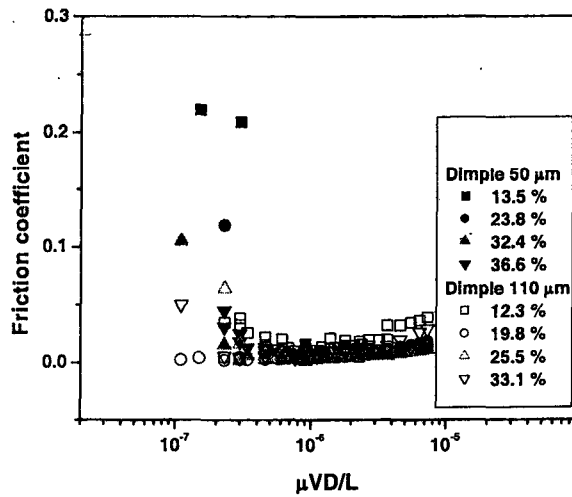


Fig. 7 Friction coefficient as a function of velocity on 50 µm and 110 µm of micro dimple

3. 실험결과

3.1 패턴 밀도에 따른 접촉압력 의존성

Fig. 5는 50 µm와 110 µm 크기의 마이크로 덤플에 관한 수직압력증가에 따른 마찰계수변화를 마이크로 덤플 밀도에 따라 나타내었다. 50 µm, 36.6%와 110 µm, 25.5%의 시험편은 0.76 MPa 이상의 접촉압력에서 마찰계수가 높게 나타났다. 그러나 0.12 m/s 속도에서 50 µm 크기의 36.6% 밀도

를 가지는 시험편은 마찰계수가 낮아지는 것을 알 수 있다. 110 µm 크기의 밀도 25.5% 시험편을 제외한 시험편들은 마찰계수가 낮아지는 것을 알 수 있다. 전체적으로 동일속도에서 접촉압력증가에 따라 마찰계수 감소 현상이 나타났다. 마이크로 덤플 밀도와 크기에 따라 마찰계수는 하중에 의존하고 있으며, 50 µm 크기의 덤플에서는 13.5%와 23.8%를 제외한 시험편에서는 110 µm 크기의 밀도 25.5% 시험편보다 우

수하게 나타났다. 이것은 접촉표면에서 덩플 크기에 따른 최적의 밀도가 존재함을 보여주고 있다. 밀도는 덩플간 피치와의 밀접한 관계를 가지고 있으며, surface texture 효과를 가지기 위한 메카니즘을 4.2절에서 고찰하고자 한다.

3.2 패턴 밀도에 따른 속도의 의존성

Fig. 6은 50 μm 와 110 μm 크기의 마이크로 덩플에 관한 속도증가에 따른 마찰계수 변화를 마이크로 덩플 밀도에 따라 나타내었다. (a)에서 보는 것과 같이 접촉압력(Pc) 0.25 MPa에서 속도 증가에 따라 마찰계수가 감소되고 속도 0.1 m/s 이상에서 다소 증가하는 현상이 나타났다. 그러나 (b)-(d)에서는 속도증가에 따라 마찰계수는 감소되었다. (c)에서 보는 것과 같이 110 μm 크기의 시험편이 상대적으로 높은 마찰계수를 가졌으나 속도증가에 따라 감소되는 경향이 뚜렷하게 나타났다. (d)에서 접촉압력 1.58 MPa에서 50 μm 의 크기, 밀도 13.5%의 시험편이 높은 마찰계수를 가졌다. 마이크로 덩플의 밀도, 크기에 따라 속도증가에 따라 마찰계수 감소효과를 가지고 있었다.

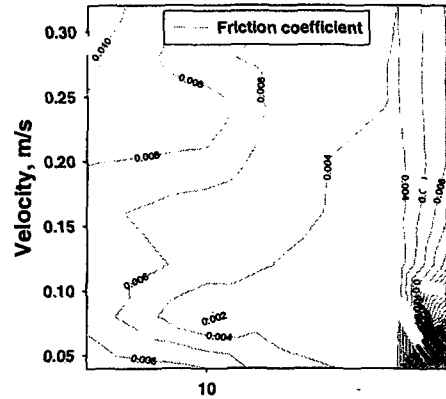
3.3 패턴 밀도에 따른 마찰계수 감소효과

50 μm 및 110 μm 크기의 마이크로 덩플의 밀도관점에서 저밀도와 고밀도의 관점에서 보면, 덩플 50 μm 크기의 시험편에서 13.5% 밀도에서 접촉압력 증가되면서 마찰계수가 높게 나타나고 있으나, 36.6%의 밀도에서는 압력이 증가되어도 마찰계수는 안정적으로 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 110 μm 크기의 시험편은 50 μm 의 시험편보다 안정된 마찰계수를 가지고 있었다. 마찰 감소효과는 마이크로 덩플은 밀도보다 크기에 의존하는 것을 알 수 있었다.

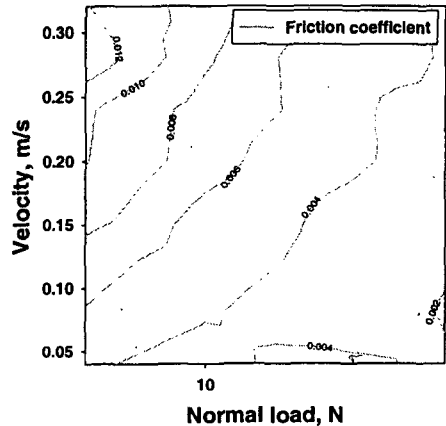
4. 고찰

4.1 마이크로 덩플의 크기와 밀도에 따른 마찰

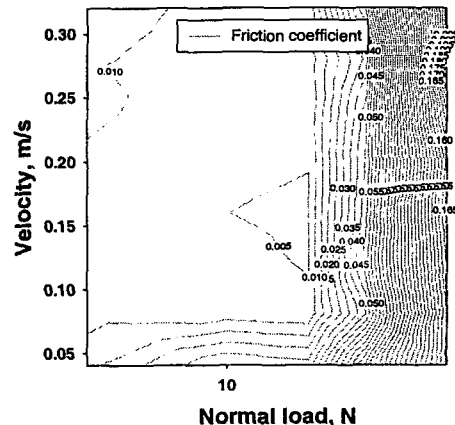
3장에서 언급한 바와 같이 마이크로 덩플의 크기와 밀도에 따라 마찰계수가 변화되었으며, 각 크기 별로 특정한 밀도에서 우수한 마찰감소 효과가 있음을 보았다.



(a) Untexture



(b) Dimple of 50 μm , density of 32.4 %



(c) Dimple of 110 μm density of 19.8 %

Fig. 8 Friction map for specimens

이러한 마찰계수 변화를 크기와 밀도에 따라 윤활상태를 조사하기 위하여 Fig. 7에서 보는 바와 같이 Stribeck curve⁽⁹⁾에서 접촉상태를 고찰하였다. 마찰계수와 무차원 S를 표현하였다.

$$S = \frac{\mu VD}{L} \quad (1)$$

여기서 S : Dimensionless parameter

μ : Viscosity[MPa·s]

V : Velocity[m/s]

L : Pressure[MPa]

D : Contact diameter[m]

무차원 파라메타는 식(1)에 나타내었으며, 경계윤활과 Hydrodynamic 영역이 Fig. 7에 뚜렷이 나타나고 있다.

경계윤활에서 마찰계수의 감소는 110 μm 에서 19.8 %의 밀도를 가진 시험편이 가장 우수한 마찰저감효과를 가지고 있었다. 또한 50 μm 의 크기에서는 32.4 %의 밀도를 가진 시험편이 마찰계수 감소가 우수하였다.

본 실험에서 가장 우수한 마찰저감 효과를 가지는 크기 50 μm , 32.4 %의 밀도를 가지는 시험편과 크기 110 μm , 19.8 %의 밀도를 가지는 시험편의 마찰지도(friction map)를 Fig. 8에 나타내었다. 마찰지도는 수직하중과 속도에 따른 일정한 마찰계수 영역을 도시하므로 요약과 예측에 유용한 방법이다. (a)는 Untexture의 시험편으로 일정하중 이상에서 마찰계수가 급격하게 변동되

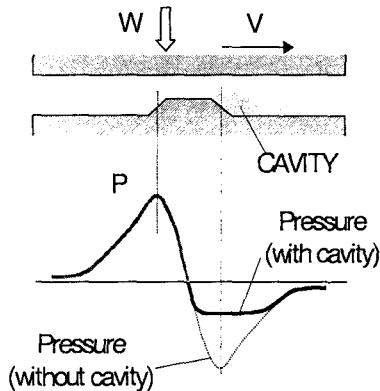


Fig. 9 Hydrodynamic mechanism for surface texture

며 속도증가에 따라 변화없이 일정하게 유지되고 있다. (b)는 고하중에서 속도증가에도 불구하고 마찰계수가 일정한 특성을 보이고 있고 이것은 경계윤활에서 나타나는 것과 동일하게 나타났다.

(c)는 고하중에서 낮은 마찰계수로 경계윤활조건에서 hydrodynamic 윤활조건으로 이동되어(Fig.7) 마찰계수 변화가 둔화되어 뚜렷이 나타났다. 따라서 마찰지도는 마이크로 덤플의 특성을 파악하고 예측하는데 중요한 방법으로 사료된다.

4.2 마이크로 덤플의 마찰감소 메카니즘 고찰

가장 마찰계수 감소효과를 가진 밀도와 크기에 대하여 관계성에 대하여 고찰하였다. Surface texturing의 마찰감소는 hydrodynamics 기구로 해석할 수 있다.^(4,5,7) Fig. 9와 같이 상대 운동하는 접촉 표면간의 돌기에 의해서 압력변화를 발생시킨다. 특정한 조건에서 캐비테이션 현상이 발생되면 돌기전후에서 압력의 불균형이 발생되며 이것은 유체의 hydrodynamic 현상이 발생되어 상대접촉하는 표면을 분리시킬 수 있는 것으로 사료된다.

Fig. 10은 마이크로 덤플의 밀도별 지름(d)과 덤플간의 피치(p)의 d/p 비로 나타내었다. 압력의 변화를 일으키기 위한 최소한의 비는 0.5 ~ 0.6 정도로 해석할 수 있다. d/p의 값이 크거나 작게 되면 Hydrodynamic 기구를 유발하기 어려운 조건으로 마찰저감 효과를 기대할 수 없게 됨을 알 수가 있다. 그러나 이러한 결과는

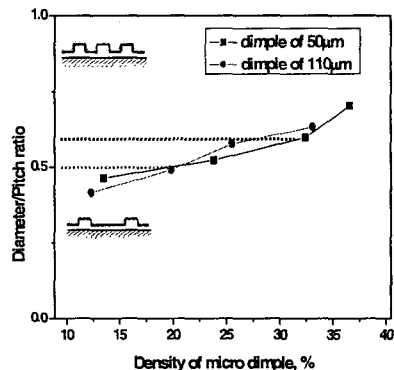


Fig. 10 Diameter/Pitch ratio as function of density of dimple for 50 μm and 110 μm

많은 데이터를 요구하고 있어 보다 많은 연구가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 마찰저감을 위한 마이크로 딥플패턴의 밀도에 의해 마찰계수가 변화되는 것을 알 수 있었다. 특히, 마이크로 딥플 크기 50 μm , 32.4 %와 크기 110 μm , 19.8 %에서 각각이 크기에서 가장 우수함을 Stribeck curve 에서 확인하였다. 또한 마찰지도를 이용하여 하중과 속도에 따른 마찰계수의 변화를 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Nakada, M., "Trends in engine technology and tribology," *Tribology International*, Vol. 27, No. 1, pp.3-8, 1994.
- (2) Kato, A. and 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) Chae, Y.H and Kim, S.S., "Friction characteristics for micro groove pattern at an area contact" *Conference of KSTLE*, Spring, pp.44-50, 2004.
- (6) 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.
- (7) Etsion, I., Kligerman, Y. and Ghalperin, "Analytical and Experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces," *Tribology Transactions*, Vol. 42, No.3, pp.511-516, 1999.
- (8) Wang, X., Kato, K. and Adachi, K., 2002, "The lubrication effect of micro-pits on parallel sliding faces of SiC in water," *Lubrication Engineering*, Aug., pp.27-34, 2002.
- (9) Bhushan, B. and Gupta, B.K., *Handbook of Tribology*, McGraw Hill, 1991.