

# 마찰제어를 위한 Surface texturing 의 Micro-scale dimple 밀도영향

채영훈<sup>†</sup> · 김석삼<sup>\*</sup>

Influence on a density of micro-scale dimple for surface texturing on friction control

Young-hun Chae<sup>†</sup> and Seock-sam Kim

**Key Words :** Friction control(마찰제어), Micro dimple(마이크로 디플), Surface texturing(표면 텍스처 어링), lubrication condition(윤활상태), Stribeck curve(스트라벡 곡선)

## 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. Lubrication condition regime has an influence on the friction coefficient induced the density of micro dimple.

## 1. 서 론

자동차의 엔진에서 발생하는 마찰손실은 약 40%이라는 것은 잘 알려져 있다. <sup>1</sup> 동력기계부품의 에너지절감을 위하여 저마찰에 대한 연구는 윤활유의 개발 및 접촉표면의 연마 또는 코팅 등으로 연구되어지고 있다. 최근 미국과 일본 등의 선진국에서 또 다른 에너지 절감 및 마찰손실 개선을 위하여 surface texturing 에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. <sup>2</sup>

Surface texturing 은 또 하나의 마찰을 감소시킬수 있는 방법으로 접근하고 있다. <sup>3</sup> Surface texturing 은 접촉표면에 디플(dimple) 또는 다양한 모양을 기계 또는 화학적인 방법으로 가공하여 기능과 성능을 향상시키는 기술이다. 이 기술은 공학표면(engineered surface)으로 1940 년도부터 연구되고있다. <sup>4</sup> 최근 반도

체공정이 발달함에 따라 기능성 있는 패턴(pattern)을 접촉표면에 가공하여 마찰특성을 연구하고 있다. 일본에서 가솔린엔진의 크랭크샤프트 베어링에 마이크로 그루우브를 적용하여 이미 상용화하였다[8]. 향후 5 년 후 또 다른 소모연료절감 및 기계효율향상기술을 위하여 surface texturing 기술은 자동차 및 기계부품산업의 원자재절감 및 내구성 증대 기술로 응용될 전망이다.

Surface 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. <sup>7</sup> 따라서 아직 Surface texturing 에 대한 완전한 이해가 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 혼합윤활, Hydrodynamic 영역에서의 마이크로 디플패턴의 밀도에 따른 마찰변화를 조사하고, Stribeck curve 를 이용하여 밀도에 따른 마찰거동을 해석하고자 한다.

<sup>†</sup> 경북대학교 트라이볼로지연구소

E-mail : yhunchae@knu.ac.kr

TEL : (053)950-7341 FAX : (053)950-6588

<sup>\*</sup> 경북대학교 기계공학부

## 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 딥플을 만드는 방법은 포토리소그래피(Photolithography)를 이용하여 습식에칭으로 준비하였다. 이때 준비된 필름 포토마스크의 딥플 지름은 40 $\mu\text{m}$  로 설계하였다. 또한 습식에칭방법은 NaCl 전해액을 이용하여, 에칭깊이를 에칭시간으로 조절하여 마이크로 딥

플을 가공하였다. 습식에칭 후 광학 측정된 결과 약 50 $\mu\text{m}$  의 지름을 가졌다. 이때 깊이는 약 4-6 $\mu\text{m}$  로 준비하였다. Fig. 1 은 준비된 시험편으로 표면형상과 크기를 보여주고 있다. 마이크로 딥플의 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 0.039 $\mu\text{mRa}$  를 가지고 있다. Table 1 에서 보는 것과 같이 마이크로 딥플의 밀도는 7.8%에서 36.6%까 지 5 가지 밀도로 준비하였다. 마찰특성을 평가하기 위하여 핀-온-디스크실험방법으로 상온,상압 윤회상태에서 마찰 시험 하였다. 이때 사용한 시험기는 스위사

CSEM Tribometer 를 사용하였다. 모든 데이터는 A/D

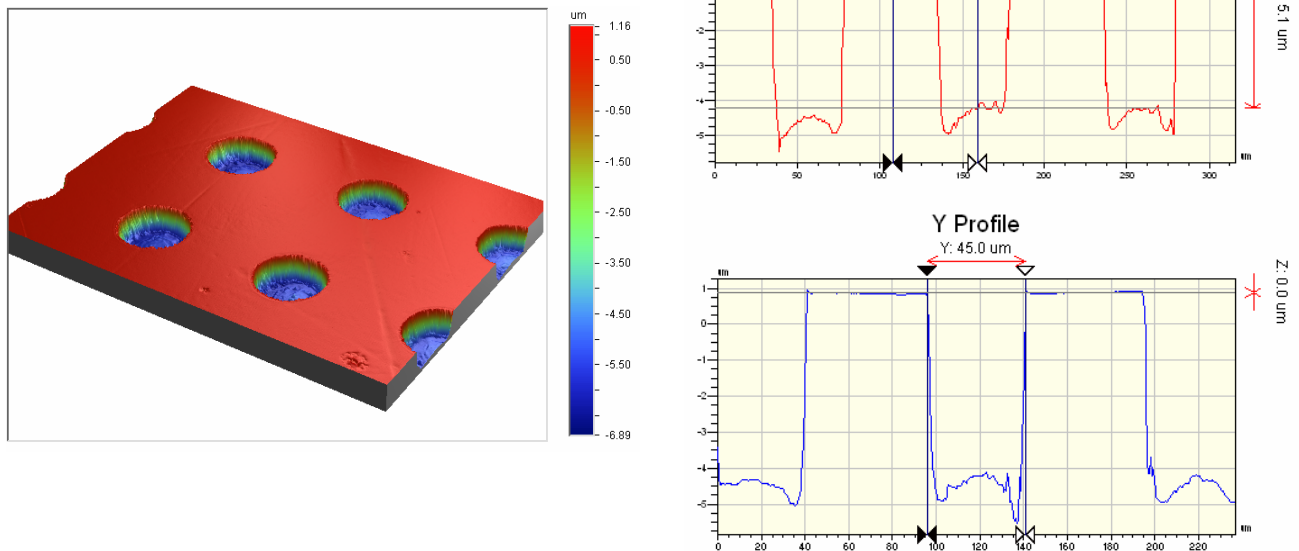


Fig. 1 Surface topography for micro-scale dimple

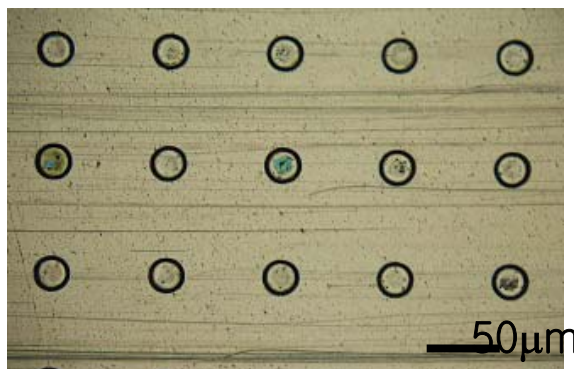


Fig. 2 SEM of surface pattern

**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[ $\mu\text{m}$ ]	50
Density of dimple for pin[%]	7.8-36.6
Depth of dimple for pin[ $\mu\text{m}$ ]	4-6
Surface roughness	
- Pin before fabrication[ $\mu\text{m}$ ]	0.008 $R_{\text{as}}$ , 0.016 $R_{\text{max}}$
- Disk [ $\mu\text{m}$ ]	0.039 $R_{\text{as}}$ , 0.052 $R_{\text{max}}$
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

converter 를 사용하여 컴퓨터에 저장될 수 있도록 하였다. 실험은 수직하중별 5 분간의 run-in 을 수행한 후 본 실험데이터로 추출하였다.

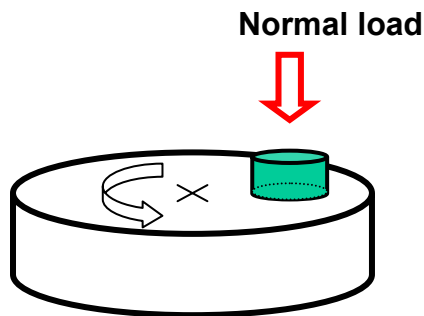
### 3. 실험결과

#### 3.1 절 마이크로 덤플의 하중과 속도의 영향

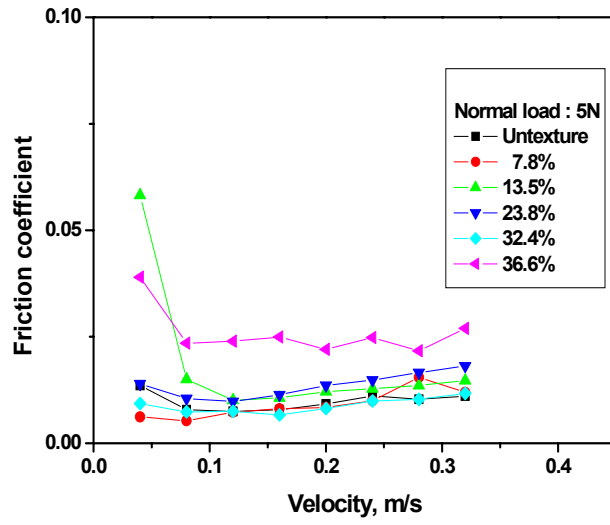
Fig. 4 는 수직하중별 미끄럼 속도증가에 따른 마이크로덤플 밀도에 관하여 마찰계수변화곡선이다. Untexture 된 시험편은 하중에 하중과 속도에 따라 마이크로 덤플을 가진 시험편과 거의 비슷하게 마찰변화를 보이고 있다. 그러나 수직하중 20N 과 30N 에서는 마이크로 덤플을 가진 시험편은 마찰저감효과가 나타나고 있다. 특히 수직하중 30N 에서 마찰계수 저감 효과는 23.8%, 32.4% 및 36.6%의 밀도를 가지는 시험편이 우수

하게 나타났다. 마이크로 덤플의 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 덤플은 마찰계수 저감효과를 가지고 있었으며, 덤플의 밀도에 따라 마찰계수는 관계성을 가지고 있다. 또한 덤플의 최적 밀도가 존재하고 있었다.

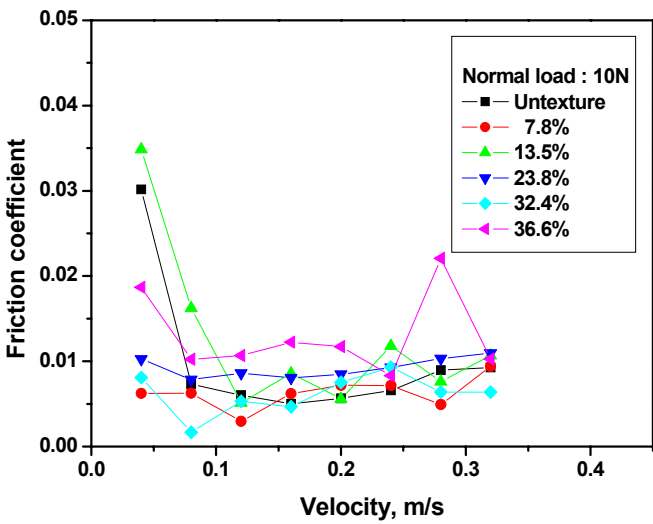
미끄럼속도 0.04m/s, 0.08m/s, 0.12m/s 에서 마이크로 덤플 밀도 36.6% 시험편의 마찰계수 거동이 수직하중 및 미끄럼속도 증가에 따라 마찰계수 감소효과를 보이고 있다. 수직하중 15N 이하에서는 Untexture 시험편과 마이크로 덤플을 가진 시험편은 거의 비슷한 마찰계수를 나타내었다. 그러나 수직하중 15N 이상에서는 각각의 마이크로 덤플의 특성이 나타났다. 특히 마이크로 덤플 밀도 32.4%와 36.6%를 가지는 시험편이 우수한 마찰계수 감소 효과를 나타내었다. 따라서 마이크로 덤플의 밀도에 따라 속도에 의존은 조금 작았다. 수직하중에 따라 마찰계수는 달리 나타나고 있었다. 또한 마이크로 덤플 밀도에 따라 속도의 영향 보다 하중의 영향을 많이 받고 있었다.



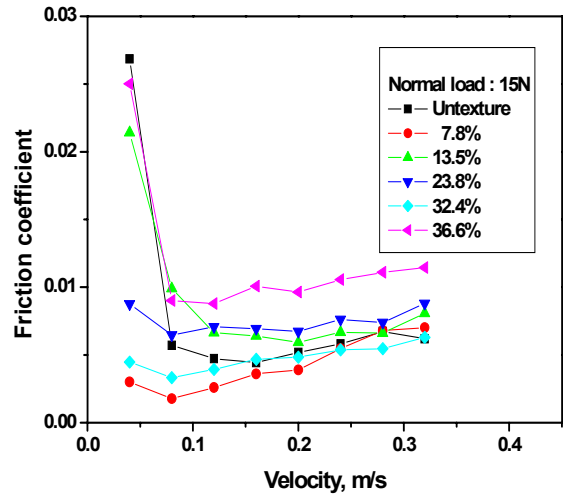
**Fig. 3.** Schematic for pin on disk



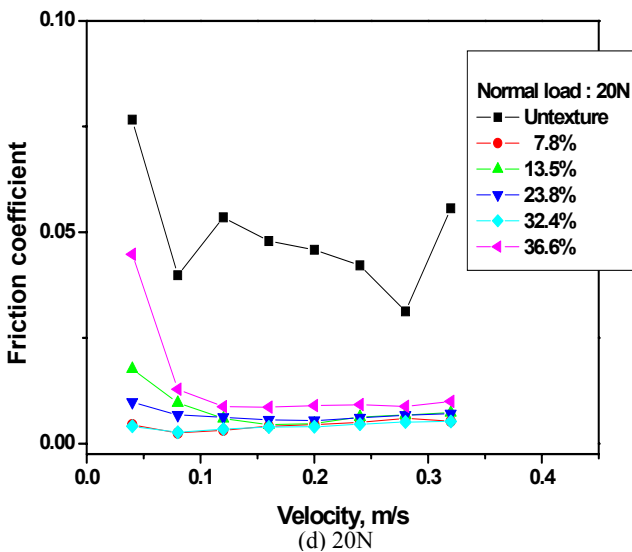
(a) 5N



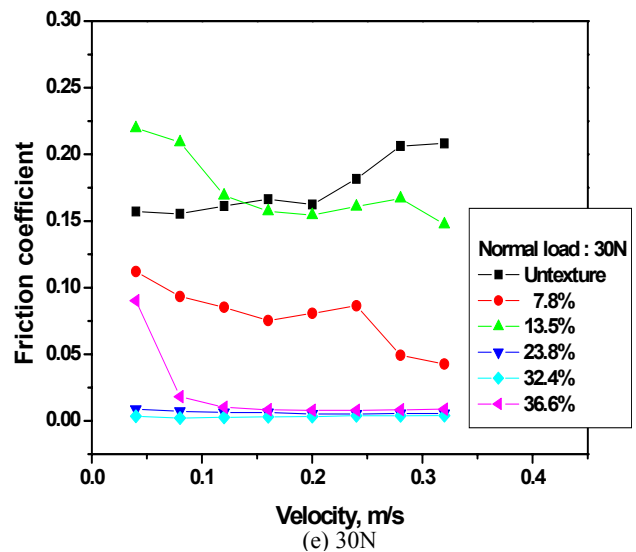
(b) 10N



(c) 15N



(d) 20N



(e) 30N

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

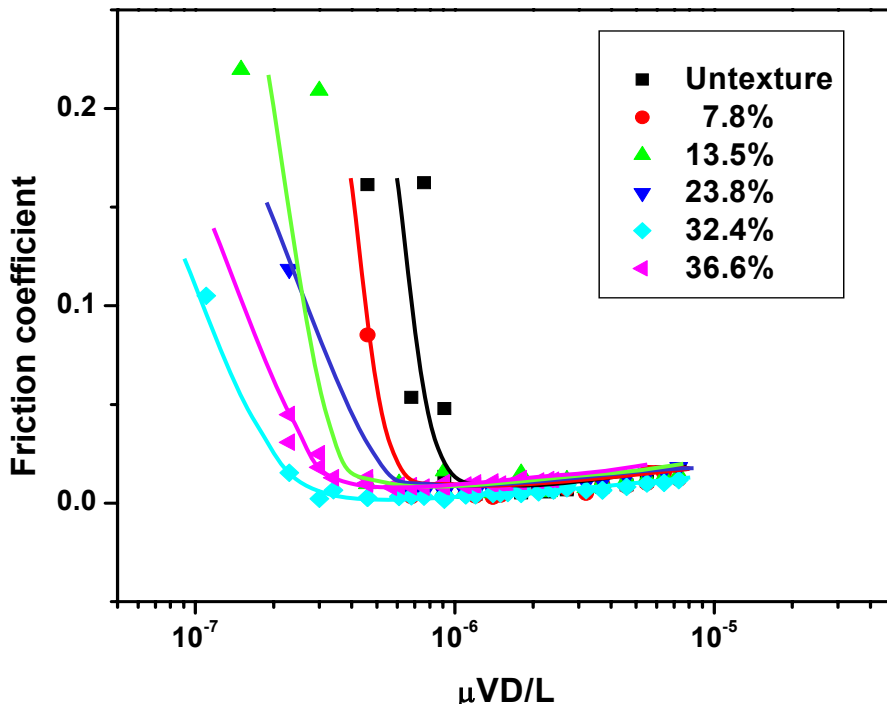


Fig. 5 Stribeck curve for various densities of micro dimple pattern

#### 4. 고찰

##### 4.1 마이크로 댄플의 윤활상태

본 실험의 결과에서 마이크로 댄플의 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<sup>8</sup>를 사용하기로 하자 Stribeck curve는 마찰계수와 무차원수를 사용해서 윤활상태를 구별하고 있다. 관계식을 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 S는 무차원수, μ는 동점성계수[Pa·s], V는 미끄럼속도[m/s], D는 접촉지름[m], L은 수직하중[N]이다. 일반적으로 Stribeck curve는 접촉상태에서 형상과 재료, 미끄럼상태, 윤활막 두께에 의존한다.

본 실험의 데이터를 계산하여 Fig. 5와 같이 Stribeck curve를 표현하였다. 그림에서 보는 것과 같이 혼합윤활상태와 hydrodynamic 윤활상태가 잘 나타나고 있다. Untexture의 마찰계수는 마이크로 댄플을 가지는 시험편보다 S값이 작아짐에 따라 먼저 혼합윤활영역으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 앞에서 언급한 실험결과상에서는 32.4%, 36.6%의 밀도를 가지는 시험편이 우수하였다. 그러나 Stribeck

curve상에서는 보다 확실하게 윤활상태를 알 수 있다. 가장 우수한 마찰저하 효과를 나타내고 있는 시험편은 32.4%의 밀도를 가지는 시험편으로 나타났다. 따라서 Surface texturing은 윤활상태에서 마찰저감효과를 가지고 있는 것으로 나타났다.

#### 5. 결론

본 연구는 혼합윤활, Hydrodynamic 영역에서의 마이크로 댄플 패턴의 밀도에 따른 마찰변화를 조사하고, Stribeck curve를 이용하여 밀도에 따른 마찰거동을 해석하였다.

Surface texturing된 시험편은 없는 시험편보다 마찰계수 저감효과를 가지고 있었다. 마이크로 댄플의 밀도는 하중범위에 따라 최적의 밀도가 존재하고 있었으며, 수직하중 5N-30N 범위에서는 32.4%의 밀도를 가진 시험편이 우수하게 나타났다. 또한 surface texturing의 효과에 대한 윤활상태변화를 Stribeck 곡선하에서 관찰할 수 있었다.

#### 참고문헌

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